

Anpassung der Talsperrensteuerung an Klimaänderungen: Bewertung von Leistungsfähigkeit und Robustheit

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors
der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Matthias Kufeld

aus

Wipperfürth

Berichter: Universitätsprofessor Dr. Holger Schüttrumpf
 Universitätsprofessor Dr. André Niemann

Tag der mündlichen Prüfung: 06.12.2013

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Hochschulbibliothek online verfügbar.

Abstract

Reservoirs serve to compensate naturally fluctuating water availability and socio-economically driven water demand. To achieve this, flood water is retained and stored water is released to bridge periods of low flow. The required storage capacity when planning new dams and the operating rules of existing dams are determined on the basis of the observed flows at the site of the reservoir. The flow properties depend on the hydrology of the catchment area, which in turn is influenced by the climatic boundary conditions. Changes in climate therefore directly influence the input data used in reservoir design and the subsequent reservoir performance. A significant change in climate conditions is expected in the future due to the increasing concentration of greenhouse gases in the atmosphere (IPCC, 2007a). This raises the question of the impact of climate change on the performance of reservoirs and how adaption measures can be planned and chosen.

The performance of reservoirs is evaluated probabilistically by considering the consequences and the probability of failure events. A distinction is made between failures due to floods and failures due to low flows. Probabilistic methods for evaluating the performance of flood protection provided by dams are well-established, whilst the corresponding method to evaluate the performance of dams that protect against low flows is newly developed. Combining these two methods makes it possible to determine the overall performance of a dam by means of the integrated water management risk for floods and low flows. The applied methods of stochastic generation of inflow boundary conditions allow us to quasi-continuously capture the potential impact of projected climate change and to map it using the climate impact function, which represents the relationship between climate-induced change of statistical properties of the inflow and the change in the performance of the studied reservoirs.

The climate impact function assesses the robustness of the reservoir. Robustness describes how sensitively the performance of the reservoir responds to changes in the inflow. Comparing the climate impact functions derived for different operation rules enables us to find adaption measures which preserve the performance of the reservoir for a climate-induced change in the inflow boundary conditions.

Kurzfassung

Talsperren dienen dem Ausgleich von natürlich schwankendem Wasserdargebot und sozioökonomisch bestimmter Wassernachfrage. Hierzu werden Hochwasser zurückgehalten und gespeichertes Wasser zur Überbrückung von Niedrigwasserperioden verzögert abgegeben. Die dazu notwendige Speichergöße bei der Planung neuer Anlagen sowie die Betriebsregeln bestehender Anlagen werden auf Basis der beobachteten Zuflüsse am Standort der Talsperre bestimmt. Die Eigenschaften des Zuflusses hängen von der Hydrologie des Einzugsgebietes ab, welche wiederum von den klimatischen Randbedingungen beeinflusst wird. Änderungen der klimatischen Bedingungen wirken sich so direkt auf die Eingangsdaten der Bemessung von Talsperren und ihre Leistungsfähigkeit aus. Für die Zukunft ist aufgrund der zunehmenden Konzentration klimawirksamer Gase in der Erdatmosphäre mit einer signifikanten Änderung des Klimas zu rechnen (IPCC, 2007a). Es stellt sich daher die Frage, welche Auswirkungen Klimaänderungen auf die Leistungsfähigkeit von Talsperren haben und wie Anpassungsmaßnahmen an diese Klimaänderungen geplant und ausgewählt werden können.

Die Bewertung der Leistungsfähigkeit von Talsperren erfolgt probabilistisch unter Berücksichtigung der Konsequenzen und der Eintrittswahrscheinlichkeit von Versagensereignissen. Hierbei wird zwischen Versagen aufgrund von Hochwasser und Versagen aufgrund von Niedrigwasser unterschieden. Während zur Bewertung der Leistungsfähigkeit bezüglich des Hochwasserschutzes etablierte Verfahren bestehen, wird ein gleichwertiges, probabilistisches Verfahren zur Bewertung der Leistungsfähigkeit bei Niedrigwasser neu entwickelt. Damit ist es möglich, die Leistungsfähigkeit von Talsperren anhand des wasserwirtschaftlichen Gesamtrisikos integrativ für Hochwasser und Niedrigwasser zu bestimmen. Die dabei angewendeten Methoden der stochastischen Generierung von Zuflussrandbedingungen erlauben es, die möglichen Auswirkungen der prognostizierten Klimaänderung quasi-kontinuierlich zu erfassen und in einer Klimaeinwirkungsfunktion abzubilden, welche den Zusammenhang von klimabedingter Änderung statistischer Eigenschaften des Zuflusses und der Änderung der Leistungsfähigkeit der untersuchten Talsperren darstellt.

Die Klimaeinwirkungsfunktion ermöglicht eine Bewertung der Robustheit der Talsperren, also eine Aussage dazu, wie empfindlich die Leistungsfähigkeit der Talsperren auf Änderungen des Zuflusses reagiert. So lassen sich verschiedene Betriebsregeln vergleichen und Anpassungsmaßnahmen finden, welche die Leistungsfähigkeit des Talsperrenbetriebs für eine klimabedingte Veränderung der Zuflussrandbedingungen bewahren.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	IX
Symbolverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problemstellung	1
1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise	1
2 Aufgaben von Talsperren	5
2.1 Einleitung	5
2.2 Aufgaben	6
2.2.1 Unterscheidung nach Speicherräumen	6
2.2.2 Hochwasserschutz.....	6
2.2.3 Wasserbereitstellung.....	7
2.3 Quantifizierung der Zielsetzung von Talsperren – Bemessungswerte	11
2.3.1 Wasserbereitstellung.....	11
2.3.2 Hochwasserschutz.....	14
2.4 Zusammenfassung.....	14
3 Planung und Betrieb von Talsperren	17
3.1 Einleitung	17
3.2 Bestimmung der notwendigen Speichergröße	17
3.2.1 Deterministische Verfahren.....	17
3.2.2 Statistische Verfahren	19
3.3 Betriebsregeln	22
3.3.1 Einleitung.....	22
3.3.2 Stationäre Steuerung	23
3.3.3 Echtzeitsteuerung	34
3.4 Zusammenfassung.....	37
4 Bewertung der Leistungsfähigkeit von Talsperren	39
4.1 Einleitung	39
4.2 Abflussretention und Hochwasser – Hochwasserrisiko	40
4.2.1 Konzept	40
4.2.2 Modellkette	43
4.3 Wasserbereitstellung und Niedrigwasser - Niedrigwasserrisiko.....	49

4.3.1	Konzept	49
4.3.2	Modellkette	56
4.4	Wasserwirtschaftliches Gesamtrisiko	69
4.5	Zusammenfassung	70
5	Bestimmung des Einflusses der Klimaänderung auf die Leistungsfähigkeit von Talsperren	73
5.1	Einleitung	73
5.2	Klimaszenarien	73
5.3	Einfluss der Klimaänderung auf die Leistungsfähigkeit von Talsperren	76
5.3.1	Szenarienbasierte Einwirkungsstudien	76
5.3.2	Klimaeinwirkungsfunktionen	81
5.4	Probabilistische Bestimmung der Klimaeinwirkungsfunktion mit Hilfe von stochastischem Abflussgenerator und detaillierter Betriebssimulation	85
5.5	Zusammenfassung	91
6	Anpassung des Talsperrenbetriebs an den Klimawandel	93
6.1	Einleitung	93
6.2	Ziele der Anpassung und Entscheidungsfindung: Erhalt der Leistungsfähigkeit und Robustheit	93
6.3	Anpassungsmaßnahmen und ihre Bemessung	98
6.3.1	Vorarbeiten	98
6.3.2	Maßnahmen	100
6.3.3	Bemessung von Maßnahmen	102
6.4	Maßnahmenauswahl auf Basis probabilistischer Bewertung	108
6.5	Zusammenfassung	110
7	Anwendungsbeispiel Rur	113
7.1	Das Modellgebiet	113
7.1.1	Einzugsgebiet der Rur	113
7.1.2	Talsperrenbetrieb	116
7.2	Leistungsfähigkeit für Klimaänderungen	120
7.2.1	Klimaszenarien	120
7.2.2	Multivariater Zuflussganglinien-Generator	126
7.2.3	Niedrigwasserrisiko	130
7.2.4	Hochwasserrisiko	134
7.2.5	Wasserwirtschaftliches Gesamtrisiko	138
7.3	Bewertung einer Maßnahme anhand der Robustheit bei Niedrigwasser	139
8	Zusammenfassung und Ausblick	145
8.1	Zusammenfassung	145
8.2	Wichtige Erkenntnisse	147

8.3	Zukünftiger Forschungsbedarf.....	148
Literatur		149
Glossar		165
Anhang A	Definition der Speicherinhalte einer Talsperre	169
Anhang B	Klimaeinwirkungsfunktionen für Zuverlässigkeit der Wasserversorgung	171

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1 Aufbau der Arbeit	3
Abbildung 2-1 Anteil von Talsperren an der öffentlichen Wasserversorgung je Bundesland (BDEW, 2011)	8
Abbildung 2-2 Empirische Speicherwirkungslinie (Tageszeitschritt) am Pegel Urft-Malsbenden ($MQ = 4,7 \text{ m}^3/\text{s}$)	12
Abbildung 3-1 Graphische Bestimmung der notwendigen Speichergröße am Pegel Urft-Malsbenden für konstante Abgabe ($MQ = 4,7 \text{ m}^3/\text{s}$) anhand der Summenlinie des Zuflusses	18
Abbildung 3-2 Summendifferenzlinie nach dem Folgescheitelalgorithmus am Pegel Urft-Malsbenden für konstante Abgabe ($MQ = 4,7 \text{ m}^3/\text{s}$).....	19
Abbildung 3-3 Speicherwirkungslinie am Pegel Urft-Malsbenden ($MQ = 4,7 \text{ m}^3/\text{s}$) nach Gleichung (3.5)	21
Abbildung 3-4 Lamellenplan der Rurtalsperren aus den 1960er Jahren (GERB & LANGE, 1992)	25
Abbildung 3-5 Netzplan möglicher Abgaben und resultierender Speicherstände S für gegebene Sequenz des Zuflusses Q	28
Abbildung 3-6 Straffunktionswerte für mögliche Abgabeentscheidungen.....	29
Abbildung 3-7 Berechnung von Übergangswahrscheinlichkeiten.....	30
Abbildung 3-8 Berechnungsablauf der Echtzeitsteuerung (HEUSCH, 2011)	35
Abbildung 4-1 Zusammenhang von Eintrittswahrscheinlichkeit, Hochwasserereignis, Schaden und resultierendem Hochwasserrisiko (nach: LOUCKS & E. VAN BEEK, 2005).....	42
Abbildung 4-2 Änderung des Hochwasserrisikos durch Talsperrenbetrieb.....	43
Abbildung 4-3 Hochwasserganglinien für unterschiedliche Formbeiwerte.....	45
Abbildung 4-4 Schema Hochwassermerkmal-Simulation	46
Abbildung 4-5 Berechnungsablauf ökonomische Hochwasserschäden (SCHÜTTRUMPF ET AL., 2009)	47
Abbildung 4-6 Approximation der Risikokurve	48
Abbildung 4-7 Modellkette zur Berechnung des Hochwasserrisikos.....	48
Abbildung 4-8 Diskrete Überschreitungswahrscheinlichkeit und Schaden von Niedrigwasserereignissen (logarithmischer Maßstab).....	55
Abbildung 4-9 Histogramm der wöchentlichen Zuflüsse zur Urftalsperre der 2. Maiwoche zwischen 1970 und 2000.....	62

Abbildung 4-10 Vergleich der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion nach Kern-Schätzung und Log-Normal Anpassung	62
Abbildung 4-11 Wahrscheinlichkeitsdichte (oben) und Verteilungsfunktion (unten) aus 30 gemessenen Werten und 1000 simulierten Realisationen.....	64
Abbildung 4-12 Herstellen der Korrelation zwischen Abflüssen benachbarter Stationen	65
Abbildung 4-13 Herstellen der Korrelation zwischen Abflüssen aufeinanderfolgender Wochen einer Station	66
Abbildung 4-14 Vorgehen zur Generierung von wöchentlichen Abflüssen als Randbedingung für die Niedrigwasserrisikobewertung	67
Abbildung 4-15 Modellkette zur Berechnung des Niedrigwasserrisikos	69
Abbildung 4-16 Skizzierte Risikokurven für Niedrigwasser, Hochwasser und Gesamtrisiko (logarithmischer Maßstab)	69
Abbildung 5-1 Anstieg der Unsicherheit in der Modellkette (nach: MCCARTHY, 2001; WILBY & DESSAI, 2010).....	75
Abbildung 5-2 Notwendiger Ausbaugrad nach Gleichung (3.5) am Pegel Urft-Malsbenden für Ausgleichsgrad 0,75 und 95 % Zuverlässigkeit bei 30 Jahre Zeitfenster für Mittelwert, Varianz und Autokorrelation	83
Abbildung 5-3 Einfluss des Dämpfungsfaktors auf die Rechenzeit zur Generierung perturbierter Wochenabflüsse mit verändertem Variationskoeffizienten	87
Abbildung 5-4 Vorgehen zur Generierung von wöchentlichen Abflüssen mit Abbildung von Klimaänderung	88
Abbildung 5-5 Veränderung der Dichtefunktion (<i>probability density function (pdf)</i>) der wöchentlichen Zuflüsse der 2. Maiwoche zur Urfttalsperre für Änderungen des Mittelwertes und des Variationskoeffizienten.....	89
Abbildung 5-6 Veränderung der Dichtefunktion der jährlichen Zuflusssumme für Änderungen des Mittelwertes und des Variationskoeffizienten.....	90
Abbildung 5-7 Veränderung der innerjährlichen Verteilung der Abflüsse für Änderung des Winteranteils.....	91
Abbildung 6-1 Idealisierte Risikokurve zur Beschreibung der Systemrobustheit (Verändert nach: MENS ET AL. (2011))	96
Abbildung 6-2 Bewertung der Robustheit anhand des Verlaufs der Risikoänderung mit Klimaänderungen	97
Abbildung 6-3 Ablauf der Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen	100
Abbildung 6-4 Absolute Änderung des für einzelne Aufgaben allokierten Speichervolumens	101
Abbildung 6-5 Jahreszeitabhängige Änderung der für einzelne Aufgaben allokierten Speichervolumen	102
Abbildung 7-1 Das Einzugsgebiet der Rur.....	113
Abbildung 7-2 Lage, Volumen und Jahreszuflüsse der Talsperren des Rur-Systems.....	114

Abbildung 7-3 Lamellenplan der bestehenden Steuerung.....	117
Abbildung 7-4 Dynamische Abgabe in Abhängigkeit des Zufluss.....	119
Abbildung 7-5 Modellkette zur szenarienbasierten Bewertung wasserwirtschaftlicher Risiken an der Rur.....	120
Abbildung 7-6 Dichtefunktionen der jährlichen Zuflusssumme für Klimaszenarien.....	124
Abbildung 7-7 Mittelwerte der monatlichen Talsperrenzuflüsse (Gesamtsystem) für betrachtete Klimaszenarien.....	124
Abbildung 7-8 Änderungsfaktoren der statistischen Eigenschaften des Zuflusses für die untersuchten Klimaszenarien	125
Abbildung 7-9 Jahresgang (Mittelwert) und Verteilung der wöchentlichen Abflüsse im Referenzzeitraum (1970-2000, rot) und simuliert (1000 Jahre, blau). Boxplots der Wochen zeigen Median als Kreis, 25. und 75. Perzentile als dicke Linie und Ausreißer als Punkte	127
Abbildung 7-10 Veränderung von Jahresgang und Verteilung der wöchentlichen Abflüsse für trockenes Szenario (Mittelwert 70 %, Variationskoeffizient und Winteranteil konstant)	128
Abbildung 7-11 Veränderung von Jahresgang und Verteilung der wöchentlichen Abflüsse für erhöhte Streuung (Mittelwert und Winteranteil konstant, Variationskoeffizient 150 %).....	128
Abbildung 7-12 Vergleich des mittleren Jahresganges der Wochenmittelwerte des Abflusses für das transnationale, trockene Szenario des Zeitraumes 2070-2100 und einem synthetischen Szenario mit gleichen Änderungsfaktoren für Jahresmittelwert (dm) und Winteranteil (dw)	129
Abbildung 7-13 Vergleich des mittleren Jahresganges der Wochenmittelwerte des Abflusses für das ExUS-Rur Szenario des Zeitraumes 2070-2100 und einem synthetischen Szenario mit gleichen Änderungsfaktoren für Jahresmittelwert (dm) und Winteranteil (dw).....	130
Abbildung 7-14 Veränderung der Zuverlässigkeit mit dem Variationskoeffizienten und dem Mittelwert der Zuflüsse bei konstantem Winteranteil und konstanter jährlicher Autokorrelation	131
Abbildung 7-15 Änderung des Niedrigwasserrisikos mit dem Variationskoeffizienten und dem Mittelwert der Zuflüsse bei konstantem Winteranteil und konstanter jährlicher Autokorrelation.....	132
Abbildung 7-16 Änderung des Niedrigwasserrisikos mit dem Winteranteil und dem Mittelwert der Zuflüsse bei konstantem Variationskoeffizienten und konstanter jährlicher Autokorrelation.....	133
Abbildung 7-17 Veränderung des Niedrigwasserrisikos mit dem Variationskoeffizienten und dem Winteranteil der Zuflüsse ohne Änderung des Mittelwertes.....	133
Abbildung 7-18 Änderung des Niedrigwasserrisikos mit der jährlichen Autokorrelation und dem Mittelwert der Zuflüsse bei konstantem Variationskoeffizient und konstantem Winteranteil	134
Abbildung 7-19 Extremwertstatistik der jährlichen Spitzenzuflüsse zum Obersee.....	135
Abbildung 7-20 Approximation der Hochwasserrisikokurve im Referenzklima.....	137

Abbildung 7-21 Änderung des Hochwasserrisikos für Klimaszenarien	137
Abbildung 7-22 Änderung des Hochwasserrisikos in Abhängigkeit vom Mittelwert der Zuflüsse (Referenz rot) .	138
Abbildung 7-23 Klimaeinwirkungsfunktion wasserwirtschaftlicher Risiken (Referenz grün)	139
Abbildung 7-24 Angepasster Lamellenplan	140
Abbildung 7-25 Angepasster Lamellenplan mit Darstellung der mittleren Füllstände	141
Abbildung 7-26 Dauerlinie der Abgabe aus dem Staubecken Obermaubach (Systemabschluss) im Referenzzeitraum (1970-2000) für bestehende und angepasste Steuerung	141
Abbildung 7-27 Verringerung des Niedrigwasserrisikos durch Maßnahme „Verzicht auf Dynamisierung“ (durchgezogene Linie) im Vergleich zur bestehenden Steuerung (gestrichelte Linie) für Änderung des Mittelwertes	142
Abbildung 7-28 Verringerung des Niedrigwasserrisikos durch Maßnahme „Verzicht auf Dynamisierung“ (durchgezogene Linie) im Vergleich zur bestehenden Steuerung (gestrichelte Linie) für Änderung des Mittelwertes und des Variationskoeffizienten der jährlichen Zuflüsse	142
Abbildung 7-29 Verringerung des Niedrigwasserrisikos durch Maßnahme „Verzicht auf Dynamisierung“ (durchgezogene Linie) im Vergleich zur bestehenden Steuerung (gestrichelte Linie) für Änderung des Mittelwertes und des Winteranteils der jährlichen Zuflüsse	143
Abbildung 7-30 Verringerung des Niedrigwasserrisikos durch Maßnahme „Verzicht auf Dynamisierung“ (durchgezogene Linie) im Vergleich zur bestehenden Steuerung (gestrichelte Linie) für Änderung des Winteranteils und des Variationskoeffizienten der jährlichen Zuflüsse	144
Abbildung A-1 Anpassung der Stauraumaufteilung in den sächsischen Trinkwassertalsperren seit 1992 (SCHUMANN & SIEBERT, 2004)	170
Abbildung B-1 Veränderung der Zuverlässigkeit mit dem Winteranteil und dem Mittelwert der Zuflüsse bei konstantem Variationskoeffizient und konstanter jährlicher Autokorrelation	171
Abbildung B-2 Veränderung der Zuverlässigkeit mit der jährlichen Autokorrelation und dem Mittelwert der Zuflüsse bei konstantem Variationskoeffizient und konstantem Winteranteil	172
Abbildung B-3 Veränderung der Zuverlässigkeit mit dem Variationskoeffizienten und dem Winteranteil der Zuflüsse ohne Änderung des Mittelwertes	172
Abbildung B-4 Erhöhung der Zuverlässigkeit durch Maßnahme „Verzicht auf Dynamisierung“ für Änderung des Mittelwertes und des Variationskoeffizienten der jährlichen Zuflüsse	173

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1 Wasserwirtschaftliche Kennzahlen von Talsperren	13
Tabelle 3-1 Vor- und Nachteile der Verfahren zur Herleitung von Betriebsregeln	33
Tabelle 4-1 Schema der Berechnung empirischer Wahrscheinlichkeiten	55
Tabelle 5-1 Klassifizierung der Studien zur Bestimmung des Einflusses der Klimaänderung auf Talsperren	85
Tabelle 6-1 Auswertung der Literatur zur Bestimmung von Maßnahmen zur Anpassung des Talsperrenbetriebs	107
Tabelle 7-1 Übersicht der Talsperren im Einzugsgebiet der Rur	115
Tabelle 7-2 Zielwerte der Abgaben aus dem Rurtalsperrensystem	116
Tabelle 7-3 Absolute Änderung der Temperatur [°C] für Klimaszenarien (DROGUE ET AL., 2010)	122
Tabelle 7-4 Prozentuale Änderungsfaktoren [%] des Niederschlags für Klimaszenarien (DROGUE ET AL., 2010)	123
Tabelle 7-5 Zuflusseigenschaften im Referenzzeitraum	125
Tabelle 7-6 Autokorrelation der Zuflusszeitreihen	126
Tabelle A-1 Begriffsdefinitionen nach DIN 19700 (2004)	169

Symbolverzeichnis

Lateinische Zeichen

B	=	Zustand des Versagens	[-]
C	=	Anfälligkeit für Niedrigwasser	$\left[\frac{\text{€}}{\text{m}^3 \cdot \text{Tag}} \right]$
C(q D)	=	Kosten eines alternativen Systems	[€]
C _v	=	Variationskoeffizient	[-]
Cov	=	Kovarianz	[-]
d _i	=	Dauer eines Versagensereignisses i	[Tag]
d _j	=	Entscheidungsvariablen	[-]
dm	=	Änderungsfaktor Mittelwert	[-]
dr	=	Änderungsfaktor Autokorrelation	[-]
dv	=	Änderungsfaktor Variationskoeffizient	[-]
dw	=	Änderungsfaktor Winteranteil	[-]
D	=	Schaden	[€]
F	=	Anzahl von Versagensereignissen	[-]
FS	=	Änderungsfaktor für Sommerwochen	[-]
h _F	=	Netto Fallhöhe	[m]
I _{GHR}	=	Gewöhnlicher Hochwasserrückhalteraum (siehe Anhang A)	[m ³]
K	=	Speicherkapazität	[m ³]
L	=	Verluste	[m ³]
L(q)	=	Kosten des optimalen Systems	[€]
m	=	Standarisierte Netto-Zufluss	[-]

m_R	=	Ordnungszahl	[-]
MQ	=	Mittlerer Talsperrenzufluss	[m ³ /s]
n	=	Dimension der Verteilungsfunktion	[-]
N	=	Anzahl von Jahren	[-]
O	=	Zufriedenstellender Zustand	[-]
p_M	=	Dimension des MA-Modells	[-]
p_R	=	Dimension des AR-Modells	[-]
P	=	Elektrische Leistung	[W]
P_F	=	Versagenswahrscheinlichkeit	[-]
P_H	=	Hydrologische Sicherheit	[-]
P_j	=	Relatives Gewicht	[-]
$P_{\bar{u}}$	=	Überschreitungswahrscheinlichkeit	[-]
P_v	=	Perturbationsterm	[-]
q	=	Bemessungsabgabe	[m ³ /s]
Q	=	Abfluss	[m ³ /s]
r	=	Zuverlässigkeit	[-]
R	=	Variable Abgabe	[m ³ /s]
R_χ	=	Robustheit (ökonomische)	[-]
RW	=	Winteranteil	[-]
s	=	Schweregrad eines Versagens / Fehlmenge	[m ³]
S	=	Speicherstand	[m ³]
t	=	Zeitpunkt	[-]
t_q	=	q -te Perzentile der Versagenswahrscheinlichkeit	[-]
T	=	Zeitschritte	[-]
v	=	Verwundbarkeit	[-]

Var	=	Varianz	[-]
x	=	Zufallsvariable	[-]
x_t	=	Zeitabhängige Größe	[-]
X	=	Talsperrenzufluss	[m ³ /s]

Griechische Zeichen

α	=	Ausgleichsgrad	[-]
β	=	Ausbaugrad	[-]
χ	=	Anteil	[-]
δ	=	Dämpfungsfaktor	[-]
ε	=	Unabhängige, normalverteilte Zufallsvariabel	[-]
Φ	=	Autoregressionskoeffizient	[-]
γ	=	Wichte von Wasser	[N/m ³]
η	=	Wirkungsgrad	[-]
μ	=	Mittelwert	[-]
Θ	=	Koeffizient des MA-Terms	[-]
ρ	=	Jährlicher Autokorrelationskoeffizient	[-]
σ	=	Standartabweichung	[-]
ω	=	Widerstandsfähigkeit	[Zeit]

1 Einleitung

1.1 Motivation

Talsperren ermöglichen als Wasserspeicher den Ausgleich von natürlichem Wasserangebot und dem sich durch die verschiedenen Nutzer ergebenden Wasserbedarf. Durch die Ausgleichswirkung erhöhen Talsperren die Widerstandsfähigkeit wasserwirtschaftlicher Systeme gegenüber wetter- und klimabedingten Schwankungen. Die Größe des Speichers bei der Planung von Talsperren, bzw. die Betriebsregeln für bestehende Anlagen werden dazu anhand historischer Aufzeichnungen des Wasserdargebots (Niederschlag und Abfluss im Talsperreneinzugsgebiet) ausgerichtet, um den Wasserbedarf optimal zu befriedigen. Hierbei gilt es, stets eine Abwägung von konkurrierenden und sich widersprechenden Zielen zu treffen, wie beispielsweise der Wasserbereithaltung, der Energieerzeugung und dem Hochwasserrückhalt. Dazu werden Zielgrößen, wie maximale und minimale Regelabgabe, definiert, innerhalb deren Grenzen sich die Anforderungen für die gemessenen oder extrapolierten Szenarien erfüllen lassen. Mögliche klimabedingte Änderungen des Wasserhaushaltes bedingen in diesem Zusammenhang große Unsicherheiten für den Talsperrenbetrieb, da sie sich direkt auf die Eingangsdaten der Bemessung auswirken.

1.2 Problemstellung

Viele Klimamodelle prognostizierten einen Anstieg des Niederschlags im Winter und einen Rückgang im Sommerhalbjahr (KUNDZEWICZ ET AL., 2007). Die Notwendigkeit einer Anpassung der bestehenden Betriebsregeln von Talsperren an die veränderten klimatischen Randbedingungen scheint daher erforderlich. In Untersuchungen zur Anpassung der Betriebsregeln sind die Unsicherheiten der Eingangsdaten zu berücksichtigen und aufzuzeigen. Ein Problem hierbei ist, dass die derzeit verfügbaren Klimaprognosen keine gesicherten Aussagen zum zukünftigen Wasserdargebot zulassen (KUNDZEWICZ & STAKHIV, 2010). Zwar lassen sich oftmals für bestimmte Jahreszeiten und Szenarien Trends bestimmen, bezogen auf die jährliche Wasserbilanz aber, welche für den Talsperrenbetrieb maßgebend ist, lassen sich keine eindeutigen Trends feststellen. Zudem zeigen unterschiedliche globale Klimamodelle und verschiedene Regionalisierungen divergierende Ergebnisse. Die Unsicherheit wird weiter erhöht durch das jeweils verwendete Zukunftsszenario. Auch die wasserwirtschaftliche Kenngrößenbewertung für den bereits beobachteten Klimawandel zeigt keine Eindeutigkeit bei den beobachteten Trends der Wasserverfügbarkeit (LANUV NRW, 2010b). Aufgrund der großen Unsicherheit und Uneindeutigkeit ist es problematisch, mittels der bestehenden Optimierungsmethoden eine Anpassung der Betriebsregeln basierend auf Szenarienrechnungen vorzunehmen. Erschwert wird dies, da im voraussichtlich zunehmend wichtigen Bereich der Trockenheit keine probabilistischen Verfahren existieren, welche eine mathematisch eindeutige Abwägung von Hoch- und Niedrigwasserrisiken ermöglichen.

1.3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel der Arbeit ist die Beschreibung des Zusammenhanges zwischen Klimaänderungen und Leistungsfähigkeit von Talsperren, bezogen auf Hochwasserschutz und Wasserbereitstellung. Hierzu ist es notwendig, einerseits den Zusammenhang zwischen Änderungen der statistischen Eigenschaften des Zuflusses und der Talsperren-Leistungsfähigkeit zu beschreiben, andererseits die Leistungsfähigkeit auch probabilistisch unter Berücksichtigung der Konsequenzen und der Wahrscheinlichkeit von Versagen-

sereignissen zu erfassen. Zur Bewertung der Hochwasserschutzwirkung von Talsperren existiert mit der Berechnung des Hochwasserrisikos ein solches probabilistisches Verfahren (BACHMANN, 2012), das zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit verwendet werden kann. Ein entsprechendes Verfahren für den Bereich des Niedrigwassers soll neu entwickelt werden. Aufbauend auf der dann möglichen Bewertung der Leistungsfähigkeit von Talsperren auf Basis des wasserwirtschaftlichen Gesamtrisikos soll abgeleitet werden, wie sich die Leistungsfähigkeit für veränderte klimatische Randbedingungen verhält und welche möglichen Änderungen an den Betriebsregeln sinnvoll und robust sind. Unter Robustheit wird hier die Fähigkeit der Steuerung verstanden, die Leistungsfähigkeit des Talsperrenbetriebs für eine klimabedingte Veränderung der Zuflussrandbedingungen zu bewahren.

Um diese komplexe Fragestellung zu erfassen, wird diese vom Kern aus angegangen (siehe Abbildung 1-1). In Kapitel 2 soll entsprechend zunächst dargestellt werden, welche Aufgaben eine Talsperre erfüllen kann. Darauf aufbauend werden in Kapitel 3 die Grundlagen von Planung und Betrieb von Talsperren untersucht. Erstens wird beschrieben, welche Speichergröße abhängig von den hydrologischen Randbedingungen zur Erfüllung dieser Aufgaben notwendig ist und zweitens, wie der Talsperrenbetrieb, auch mehrerer Speicher im Verbund, zu gestalten ist, um diese Aufgaben optimal erfüllen zu können. Dazu werden neben den Talsperren selbst auch ihre Einzugsgebiete betrachtet, welche die Zuflüsse zu den Talsperren bestimmen. In Kapitel 4 wird diese Betrachtung um die unterstrom der Talsperren gelegenen Nutzer erweitert, so dass die Leistungsfähigkeit der Talsperren bewertet werden kann.

Kapitel 5 beschreibt nun die Bestimmung des Einflusses von Klimaänderungen auf die Leistungsfähigkeit von Talsperren. Die bestehenden Verfahren werden dabei im Hinblick auf ihre Eignung zur Abbildung des Einflusses von Klimaänderungen auf den Talsperrenbetrieb auch für komplexe Speichersysteme untersucht. Dabei wird besonderes Augenmerk auf die Möglichkeit zur Abbildung der Unsicherheiten in den Klimaeingangsdaten gelegt.

Diese Unsicherheiten werden bei der Bewertung von Maßnahmen zur Anpassung des Talsperrenbetriebs an den Klimawandel in Kapitel 6 besonders berücksichtigt.

Basierend auf der Analyse der Methoden in den vorangegangenen Kapiteln wird in Kapitel 7 beispielhaft für das Rur-Einzugsgebiet die Auswirkung der Klimaänderung auf die Leistungsfähigkeit des vorhandenen Talsperrensystems untersucht. Hierzu wird auch eine Maßnahme zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Wasserbereitstellung unter Einfluss von Klimaänderungen analysiert und gezeigt, wie Maßnahmen bezüglich des wasserwirtschaftlichen Gesamtrisikos bei veränderlichen klimatischen Randbedingungen bewertet werden können.

Abschließend gibt Kapitel 8 eine Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse und einen Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf. Die in der Arbeit verwendeten statistischen Größen werden im Glossar erläutert, auf welches an den entsprechenden Stellen im Text hingewiesen wird.

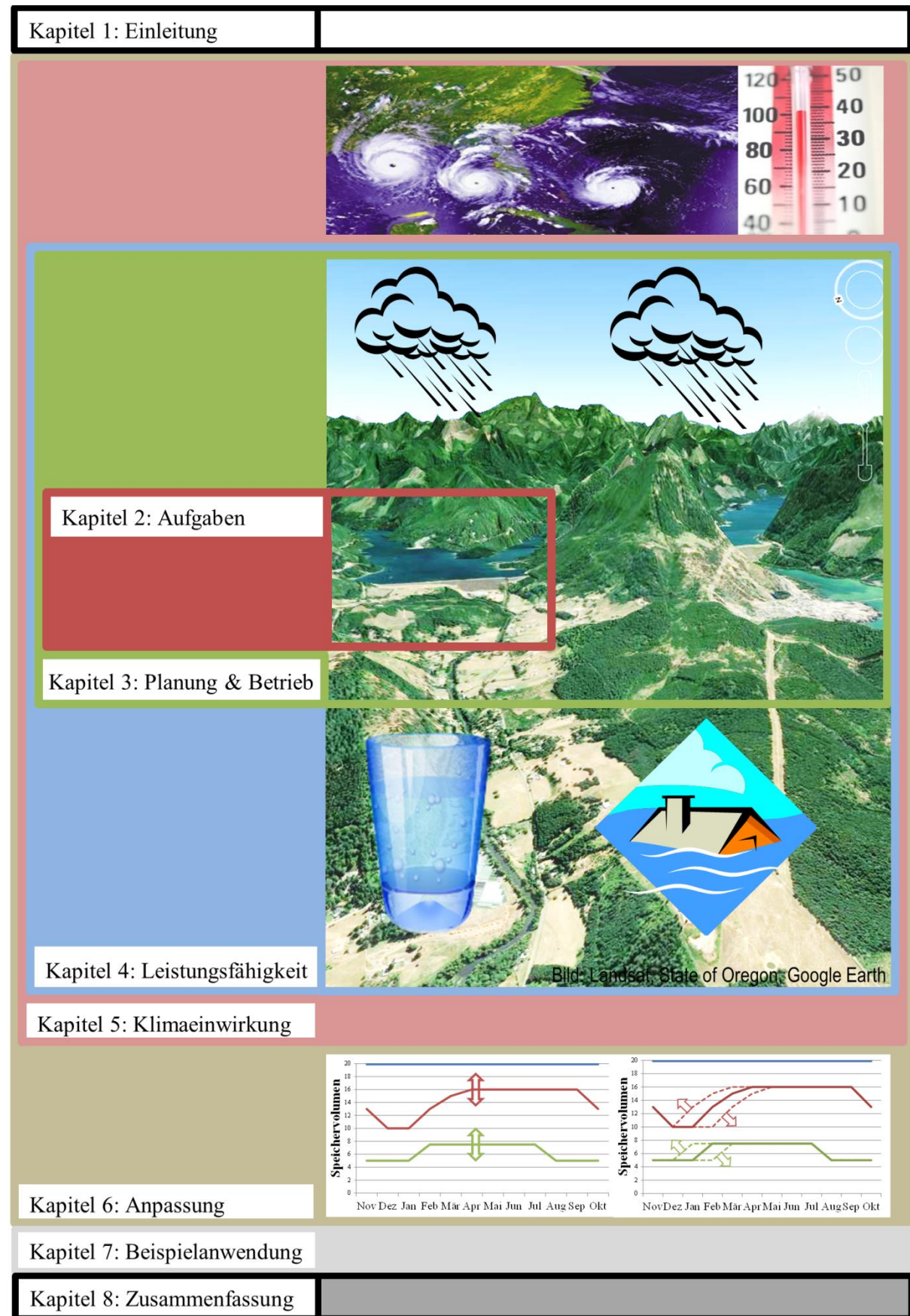


Abbildung 1-1 Aufbau der Arbeit

2 Aufgaben von Talsperren

2.1 Einleitung

Talsperren dienen als Speicher dem Ausgleich von unregelmäßig schwankendem natürlichem Wasserdargebot und dem maßgeblich durch sozio-ökonomische Gegebenheiten bestimmtem Wasserbedarf. Diese Funktionen des Speicherns und bedarfsgerechten Bereitstellens von Wasser charakterisieren Talsperren in wasserwirtschaftlicher Hinsicht.

Das Wasserrecht (im jeweiligen Landesrecht zum Beispiel LWG-NRW (1995); SÄCHSWG (2008); NWG (2010)) definiert eine Talsperre nach der Größe der baulichen Anlagen. Danach wird jede Stauanlage mit einer Höhe des Absperrbauwerks größer als 5 m über dem tiefsten Punkt der Gewässersohle im Speicher und einem Stauvolumen größer 100.000 m³ bis zur Krone als Talsperre bezeichnet.

Aus dieser Definition ergeben sich rechtliche Anforderungen bezüglich der Errichtung und des Betriebs der Anlagen. Hinsichtlich der detaillierten Auflagen an eine einzelne Anlage wird weiter nach dem hauptsächlichen Zweck und der Lage (im oder außerhalb des Gewässers) unterschieden. Nach DIN 19700 werden Stauanlagen unterteilt in Talsperren, Hochwasserrückhaltebecken, Staustufen, Pumpspeicherbecken und Sedimentationsbecken.

Eine Talsperre ist nach DIN 19700-11 (2004) definiert

- als “Stauanlage, die über den Querschnitt des gestauten Wasserlaufes hinaus den Talquerschnitt abriegel[t]”
- und die “durch Speicherung des zufließenden Wassers einen Ausgleich des natürlichen Wasserdargebotes in den gestauten Fließgewässern” bewirkt.

Die Definition einer Talsperre nach rechtlicher, technischer und wasserwirtschaftlicher Sicht unterscheidet sich geringfügig. Gemein ist ihnen, dass als Talsperre jeweils die Gesamtheit der Bauwerke einer bestimmten Stauanlage bezeichnet wird, und der Aspekt der Wasserspeicherung und des Wasserausgleichs hervorgehoben wird.

Der Speicherraum einer Talsperre kann zum Hochwasserrückhalt, zur Wasserversorgung (öffentliche, industrielle, landwirtschaftliche), zur Niedrigwasseraufhöhung, zur Gewinnung elektrischer Energie aus Wasserkraft, zur Schifffahrt, zur Erhaltung von Ökosystemen (auch Fischerei) und zu Erholungszwecken (touristisch) genutzt werden. Die Vielfältigkeit der Nutzungen bedingt, dass eine Optimierung des Betriebs der Talsperren auch eine Vielzahl von Zielsetzungen berücksichtigen und abwägen muss. Die Fragestellungen, welche im Zusammenhang mit dem Talsperrenbetrieb zu behandeln sind, beinhalten inhärente Unsicherheiten. Diese dem Talsperrenbetrieb innewohnenden Unsicherheiten entstehen zum einen durch die zufällige Verteilung der hydrologischen Eingangsvariablen, wie dem Talsperrenzufluss, und zum anderen durch die Veränderlichkeit des Wasserbedarfs der verschiedenen Nutzungen. Die Beurteilung der Zuverlässigkeit der Leistungsfähigkeit von Talsperren ist daher einer der wichtigsten Aspekte der Entscheidungsfindung bezüglich des Betriebs der Speicher (TAKEUCHI, 1998). Dieses Kapitel soll daher zunächst die grundlegenden Aufgaben einer Talsperre beschreiben. Zudem werden Bemessungswerte vorgestellt, anhand derer die Zielsetzung der Talsperre quantifiziert

werden kann, um eine Abschätzung der zur Erreichung dieser Ziele notwendigen Speichergröße zu ermöglichen.

2.2 Aufgaben

2.2.1 Unterscheidung nach Speicherräumen

Die Aufgaben einer Talsperre werden bereits in der Ausgestaltung der baulichen Anlagen und der daraus abgeleiteten Einteilung der Speicherräume berücksichtigt. Bei großen Speichern mit mehreren Nutzungen wird der Speicherraum in drei Bereiche eingeteilt:

- Hochwasserrückhalteraum
- Betriebsraum
- Totraum bzw. Reserveraum.

Der Hochwasserrückhalteraum dient der Aufnahme von Hochwasserabflüssen, um Spitzenabflüsse zu dämpfen und die Schäden unterstrom zu reduzieren. Der Betriebsraum wird genutzt, um die Abgabe ins Unterwasser zu regulieren und Wasser für die verschiedenen Nutzer bereitzustellen. Der Betriebsraum ist damit die eigentliche Wasserquelle für die öffentliche Wasserversorgung sowie für Industrie und Landwirtschaft. Wasser aus dem Betriebsraum wird des Weiteren zur Erzeugung elektrischer Energie, der Niedrigwasseraufhöhung für die Schifffahrt oder ökologische Belange und gegebenenfalls zur Freizeitnutzung verwendet. Der Totraum ist der Speicherinhalt unterhalb des tiefsten Ablasses und dient der Aufnahme von Sedimenten. Existiert zusätzlich ein höher gelegener Betriebsablass, so wird das Speichervolumen zwischen diesem und dem tieferen Grundablass als Reserveraum oder als eiserner Bestand bezeichnet.

Die Speichervolumina sind ebenfalls in DIN 19700 definiert und anhand der Stauziele abgegrenzt. Die Begriffsdefinitionen der Speicherinhalte einer Talsperre sind in Anhang A aufgeführt und erläutert.

Bezüglich der Planung, des Betriebs und der Bewertung der Leistungsfähigkeit von Talsperren kann entsprechend zwischen den zwei Aufgabenbereichen Hochwasserschutz und Wasserbereitstellung unterschieden werden.

2.2.2 Hochwasserschutz

Bei jeder Talsperre muss im Falle von Hochwasser zumindest die Sicherheit der Anlage selbst gewährleistet sein. Die DIN 19700-10 (2004) unterscheidet daher zwischen Hochwassersicherheit und Hochwasserschutz. Die Anforderungen an die Hochwassersicherheit beziehen sich auf die Standsicherheit des Absperrbauwerks unter Hochwassereinwirkung. Dagegen meint Hochwasserschutz den Rückhalt von Abflüssen zum Schutz der unterstrom der Talsperre gelegenen Gebiete vor Überschwemmungen. Die Hochwassersicherheit der Bauwerke einer Talsperre ist wegen der katastrophalen Folgen eines möglichen Versagens des Absperrbauwerks von großer Wichtigkeit, auch da 60% der beobachteten Versagensfälle auf Hochwasserereignisse zurückzuführen sind (LEMPERIERE ET AL., 1998). Die Anforderungen an die Hochwassersicherheit einer Talsperre bestimmen insbesondere die Bemessung der Hochwasserentlastungsanlage. Es werden hierbei Extremereignisse untersucht, bei welchen die Talsperre vollständig gefüllt wird und es zu einem Überlaufen kommt. Das Hochwasser muss vom Bauwerk sicher abgeführt werden können. Es wird empfohlen, hierbei die Retentionswir-

kung des Speicherraumes bei der Bewertung der Hochwassersicherheit zu berücksichtigen (DIN 19700-11, 2004). Damit ergibt sich eine Überschneidung zwischen der Bemessung der Hochwassersicherheit und der Rückhaltung von Abflüssen zum Hochwasserschutz. Die Bemessung des für den Rückhalt von Hochwasserabflüssen freizuhaltenden Stauvolumens erfolgt jedoch gemäß den Zielen des Hochwasserschutzes.

Ziel des Hochwasserschutzes ist der Rückhalt von Abflüssen im Stauraum der Talsperre zur Reduktion des nach unterstrom abgegebenen Scheitelabflusses. Es geht also vordergründig nicht um eine mengenmäßige Beeinflussung des Abflussgeschehens. Ziel ist dagegen eine Minderung des schadenverursachenden, maximalen Abflusses auf einen Wert, der vom unterstrom liegenden Gewässerabschnitt schadfrei aufgenommen und abgeführt werden kann. Die erzielte Reduktion des Scheitelabflusses hängt sowohl vom verfügbaren Stauraum, in Relation zum Zufluss, als auch von der Hochwassersteuerung bzw. Dimensionierung der Abgabeleistung der einzelnen Anlagen ab. Die Hochwassersteuerung ist von den Vorhersagemöglichkeiten der Hochwasserwelle im Zulauf der Talsperre abhängig. Ist eine Vorhersage nicht möglich, kann beispielsweise eine Vorentlastung (Leeren des Speichervolumens zur Aufnahme der Abflüsse vor Eintreffen der Hochwasserwelle) nicht durchgeführt werden. Die Abgabeleistung der Regelorgane ist bei bestehenden Anlagen von deren baulicher Gestaltung, bzw. bei neuen Anlagen von deren Bemessung abhängig. Einfluss auf die Bemessung haben das Abflussvermögen des Gewässers unterhalb der Talsperre, betriebliche Anforderungen und die gemeinsame Abflusskapazität von Regelorganen und Hochwasserentlastung.

Neben der Reduktion des Spitzenabflusses kann auch die zeitliche Verschiebung des Abflussscheitels für die Minderung von Hochwasserschäden von Bedeutung sein. So kann durch eine Verlangsamung der Hochwasserwelle ein ungünstiges Zusammentreffen der Welle eines Nebenflusses mit der Welle im Hauptfluss vermieden werden und so der Spitzenwert des Abflusses im Hauptstrom indirekt vermindert werden. Eine Berücksichtigung des Einflusses von Wellenretention und -translation auf potentielle Hochwasserschäden ist nur durch eine integrierte Abbildung des Flusses mittels instationärer hydraulischer Modelle auf Einzugsgebietsebene möglich.

Um die Aufgabe des Hochwasserschutzes im Betrieb optimal wahrnehmen zu können, ist ein möglichst niedriger Füllstand der Talsperre erstrebenswert.

2.2.3 Wasserbereitstellung

Alle wasserkonsumierenden Nutzungen einer Talsperre lassen sich unter der Aufgabe der Wasserbereitstellung zusammenfassen. Durch Speicherung des Talsperrenzuflusses kann die Abgabe aus der Talsperre gleichmäßig und an die Bedürfnisse der Nutzer angepasst werden.

Wenn die Bereitstellung von Wasser für die Trinkwassergewinnung zu den Aufgaben einer Talsperre gehört, ist die öffentliche Wasserversorgung die priorisierte Nutzung. Weitere Nutzer der Wasserbereitstellung aus Talsperren, die im Folgenden beschrieben werden, sind Brauchwasserversorgung, Niedrigwasseraufhöhung, Erzeugung elektrischer Energie und Freizeitnutzung.

Öffentliche Wasserversorgung

Unter der öffentlichen Wasserversorgung wird die Bereitstellung von Wasser für die Allgemeinheit über das öffentliche Leitungsnetz durch Wasserversorgungsunternehmen verstanden. Im Gegensatz

zur öffentlichen Wasserversorgung steht die nicht-öffentliche Selbstversorgung einzelner Betriebe oder Haushalte, welche Wasser über eigene, dezentrale Anlagen fördern. An Wasser, das zur öffentlichen Wasserversorgung verwendet wird, werden besondere Qualitätsanforderungen gestellt. Hier wird daher eine Unterscheidung zwischen öffentlicher Wasserversorgung und Brauchwasserversorgung vorgenommen. Zur öffentlichen Wasserversorgung wird das dem Wasserkreislauf entnommene Rohwasser aufbereitet, so dass es dem Verbraucher in Trinkwasserqualität bereitgestellt werden kann. Die Qualitätsanforderungen an Trinkwasser sind in Gesetzen und Normen definiert (WHO, 2008; DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION, 1998; DIN 2000, 2000). Die Qualität des Rohwassers ist entscheidend für die Kosten der Aufbereitung. Zur Trinkwassergewinnung ist in vielen Fällen eine Verwendung von Grundwasser der von Oberflächenwasser vorzuziehen, da die Rohwasserqualität von Grundwasser in der Regel besser als die von Oberflächenwasser ist. Wenn aber die Ergiebigkeit oder Qualität der Grundwasservorkommen nicht ausreicht, wird Oberflächenwasser zur Trinkwassergewinnung verwendet. Oberflächenwasser wird unterschieden in Fluss-, See- und Talsperrenwasser. Sofern es die räumliche Lage zulässt, bieten Talsperren gegenüber anderen Oberflächenwasserquellen den Vorteil, dass durch die Bewirtschaftung der Talsperre Einfluss auf die zeitliche und mengenmäßige Verfügbarkeit sowie auf die Qualität des Rohwassers genommen werden kann.

Aktuelle Zahlen zum Anteil des Talsperrenwassers an der gesamten Wasserförderung von 1.420 befragten Wasserversorgungsunternehmen zeigen die Bedeutung von Talsperren für die öffentliche Wasserversorgung in Deutschland (BDEW, 2011). Die Studie umfasst 78 % der insgesamt zur öffentlichen Wasserversorgung in Deutschland geförderten Wassermenge. Davon beträgt der Anteil des Talsperrenwassers 11,38 % für das gesamte Bundesgebiet. Wie Abbildung 2-1 zeigt, ist der Anteil regional jedoch größer und in Thüringen mit 51 % am höchsten. Hohe Anteile von Talsperrenwasser an der zur öffentlichen Wasserversorgung geförderten Wassermenge zeigen auch Sachsen (49 %), Nordrhein-Westfalen (20 %) und Niedersachsen (13 %).

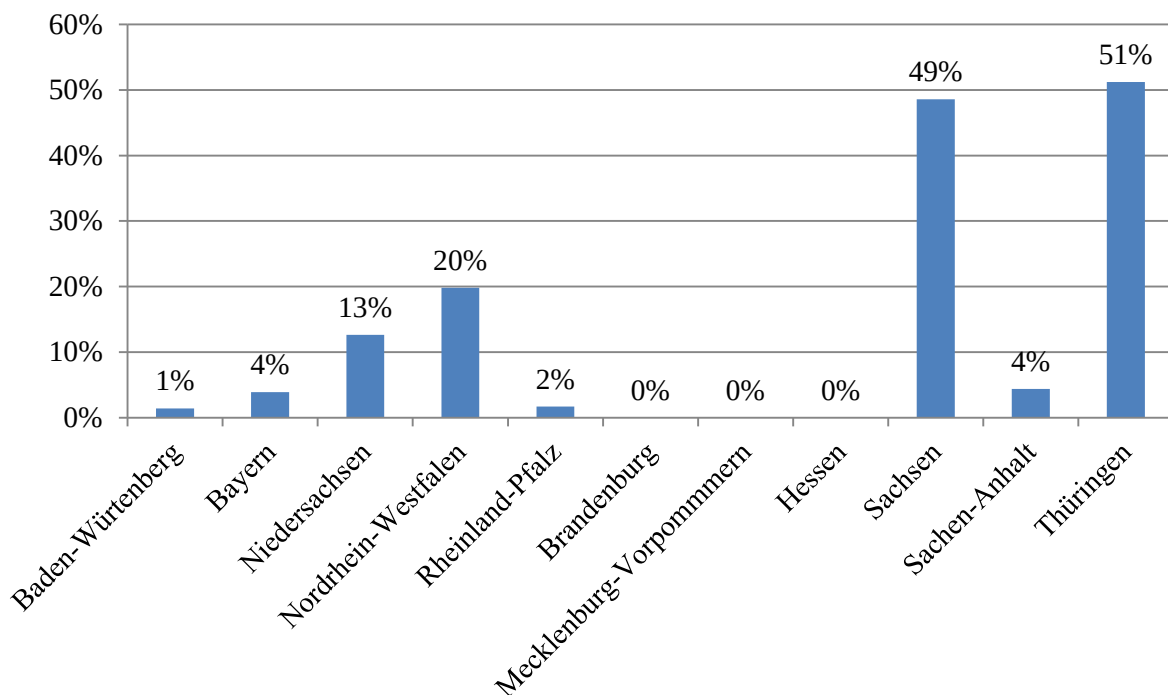


Abbildung 2-1 Anteil von Talsperren an der öffentlichen Wasserversorgung je Bundesland (BDEW, 2011)

50 % des Stauraumes der Talsperren in Nordrhein-Westfalen wird primär zur Sicherung der Trinkwasserversorgung unterhalten. Auch in Sachsen beträgt der Anteil der Trinkwassertalsperren am Gesamtspeichervolumen 48 %. In Thüringen ist der Anteil mit 17,5 % geringer, da hier anteilmäßig mehr Speichervolumen dem Hochwasserschutz dient (RIßLER, 1999). In den anderen deutschen Bundesländern ist der Anteil nicht klar abzugrenzen oder die Rolle von Talsperren bei der Trinkwasserversorgung ist gering. In vielen Regionen, in denen eine Versorgung aus Grundwasservorkommen nicht möglich ist, bilden Talsperren aber die tragende Säule der öffentlichen Wasserversorgung.

Soll eine Talsperre die Aufgabe der Bereitstellung von Rohwasser für die öffentliche Wasserversorgung erfüllen, so ergeben sich daraus besondere Anforderungen an den Betrieb und andere Nutzungsmöglichkeiten. Eine Freizeitnutzung von Trinkwasserspeichern ist in den meisten Fällen ausgeschlossen, um einen vermehrten Schadstoffeintrag in den Wasserkörper der Talsperre zu vermeiden. Der Betrieb erfolgt oftmals ausgerichtet auf eine Maximierung der möglichen Wasserentnahme, was in Konkurrenz zu den Zielen des Hochwasserschutzes steht. Des Weiteren kann durch den Betrieb auch die Schichtung des Wasserkörpers beeinflusst werden (LANGE ET AL., 2010). Wie auch in natürlichen Seen stellt sich in Talsperren eine temperaturabhängige Schichtung des Wasserkörpers ein, welche je nach klimatischer Lage der Anlage auch dem Verlauf der Jahreszeiten folgt und zur Durchmischung des Wasserkörpers führt. Eine Entnahme von Rohwasser zur Trinkwasserversorgung sollte, wenn möglich, aus der gleichmäßig kalten Tiefenschicht (Hypolimnion) erfolgen.

Brauchwasserversorgung

Die Versorgung von Industrie, Landwirtschaft und verarbeitendem Gewerbe mit Wasser wird hier unter dem Begriff der Brauchwasserversorgung zusammengefasst. Es kann unterschieden werden zwischen der Versorgung aus dem Speicherraum der Talsperre selbst oder aus der fließenden Welle des unterhalb der Talsperre gelegenen Gewässers. Erfolgt die Versorgung aus der fließenden Welle, sind die Anforderungen an die Abgabe aus der Talsperre häufig mit denen einer Niedrigwasseraufhöhung zu harmonisieren.

Bezüglich der in der Bundesrepublik Deutschland aus Talsperren entnommenen Brauchwassermengen sind die Statistiken nicht aussagekräftig, da hier Fluss-, Seen- und Talsperrenwasser zusammengefasst werden. Von den 27 Mrd. m³ Wasser, welches nicht-öffentliche Betriebe selbst gewinnen, stammten 2007 90 % aus Flüssen, Seen oder Talsperren (STATISTISCHES BUNDESAMT, 2009).

Niedrigwasseraufhöhung

Eine Niedrigwasseraufhöhung dient im Allgemeinen der Vergleichmäßigung des Abflusses im unterstrom der Talsperre gelegenen Gewässer. Damit kann in Flussgebieten, in denen der Niederschlag nur sehr unregelmäßig fällt (Tropenregionen mit Trocken- und Regenzeit) oder in denen aufgrund der geologischen Gegebenheiten eine Speicherung des Wassers im Boden nicht möglich ist, ein künstlicher Ausgleich des Wasserhaushaltes erzielt werden. Oftmals sind erst durch die Speicherung des Niederschlags in Talsperren eine wirtschaftliche Nutzung dieser Ressource und damit eine Besiedlung des Gebiets möglich. Das gleichmäßig abgegebene Wasser wird Nutzern unterstrom der Talsperre über die fließende Welle bereitgestellt. Somit ergibt sich eine Überschneidung der Niedrigwasseraufhöhung mit der Brauchwasserbereitstellung. Die Niedrigwasseraufhöhung umfasst aber noch weitere Aspekte.

Ein weiterer Aspekt der Niedrigwasseraufhöhung betrifft die Schifffahrt. Durch eine gleichmäßige Abgabe der Abflüsse ins Unterwasser der Talsperre werden dort die Mindestwasserstände, die Schiffe zum Navigieren benötigen, eingehalten. Die so beaufschlagten und schiffbar erhaltenen Gewässer sind in vielen Fällen künstliche Kanäle, welche den Zuschuss an Wasser aus Talsperren zum Ausgleich von Schleusenverlusten sowie Versickerung und Verdunstung benötigen.

An Gewässern, in die nur unzureichend geklärte Siedlungsabwässer oder stark industriell belastete Abwässer eingeleitet werden, können durch eine Niedrigwasseraufhöhung auch ökologische Zielsetzungen verfolgt werden. Durch die Sicherstellung eines Mindestabflusses im Gewässer wird die Konzentration von Schadstoffen verringert. Diesem positiven ökologischen Aspekt der Abflussvergleichmäßigung bezüglich der Wasserqualität steht der sich unter Umständen ökologisch negativ auswirkende Aspekt der verringerten Abflussdynamik entgegen. Vielfach wird daher durch den Betrieb der Talsperre eine künstliche Dynamisierung des Abflusses vorgenommen, wobei die der Talsperre zufließenden Abflüsse aufgezeichnet und mit ähnlicher Dynamik ins Unterwasser abgegeben werden.

Erzeugung elektrischer Energie

Das energetische Potential, welches das im Stauraum der Talsperre gespeicherte Wasser darstellt, kann durch Ausnutzung des Höhenunterschiedes zwischen dem Wasserspiegel im Stauraum und dem im Unterwasser mittels Wasserkraftwerken in elektrische Energie umgewandelt werden. Dabei erfolgt zunächst eine Umwandlung der potentiellen oder kinetischen Energie mittels Turbinen in Rotationsenergie, welche wiederum mit Hilfe von Generatoren in elektrische Energie umgeformt wird.

Weltweit wird etwa 16 % der elektrischen Energie aus Wasserkraft gewonnen. Dabei ist die Wasserkraft oftmals die Grundlage zur Elektrifizierung eines Landes und wird, wo das Potential vorhanden ist, zur Grundversorgung verwendet. In vielen Industrieländern übersteigt der Energiebedarf das Potential an möglicher Energieerzeugung aus Wasserkraft und in Deutschland beträgt der Anteil der Wasserkraft an der gesamten Stromerzeugung beispielsweise nur noch 3,4 % (BMU, 2011).

Der Erzeugung elektrischer Energie aus Wasserkraft kommt im Zuge des Themenkomplexes Klima- und Energiewandel eine besondere Bedeutung zu. Die Emissionen aus der Nutzung fossiler Energieträger bewirken eine Änderung des Klimas auf der Erde (IPCC, 2001). Zudem ist die Verfügbarkeit fossiler Energieträger endlich und ihre Nutzung damit nicht nachhaltig. Erneuerbare, weitgehend emissionsfreie und damit nachhaltige Energiegewinnungsverfahren bauen auf die Nutzung der Energie auf, welche als Sonnenstrahlung auf die Erde einwirkt. Sei es direkt in Form von Photovoltaik oder mittelbar durch Nutzung durch die von Sonnenstrahlung angestoßenen Masseströmungen von Wind (Windkraftanlagen) und Wasser. Die Produktion von Energie aus diesen natürlichen Energiequellen folgt dabei der schwankenden Verfügbarkeit von Sonneneinstrahlung, Wind und Abfluss. Dabei weist der Wasserkreislauf aufgrund seiner Trägheit die größte Konstanz auf. Bei der Nutzung der erneuerbaren Energien ist eine Anpassung der Energieproduktion an die Energienachfrage nicht in dem Maße wie bei fossilen Energieträgern möglich. Es bedarf daher einer Speicherung der erzeugten Energie. Auch hierzu bieten Talsperren, welche als Pumpspeicherkraftwerke genutzt werden, gute Möglichkeiten. Eine Energiewende ist notwendig, um die durch Nutzung fossiler Energieträger hervorgerufenen Klimaänderungen zu begrenzen. Der Wasserkraftnutzung an Talsperren kommt im Rahmen der Energiewende deshalb eine besondere Bedeutung zu.

Der Betrieb der Talsperre für die Wasserkraftnutzung zielt auf die Maximierung des für die Stromerzeugung verfügbaren Wassers ab sowie auf einen großen Höhenunterschied zwischen dem Wasserspiegel im Stauraum und im Unterwasser. Der Betrieb der Kraftwerke selbst erfolgt dabei abhängig vom Energiebedarf. Zum Ausgleich der Schwankungen in der Wasserführung aus dem Kraftwerksbetrieb sind oftmals weitere Zwischenspeicher notwendig, welche als Tages- oder Wochenspeicher die gleichmäßige Abgabe des zur Erzeugung elektrischer Energie genutzten Wassers in unterstrom gelegene Gewässerabschnitte erlauben.

Freizeitnutzung

Der attraktive Landschaftsraum von Talsperren wird vielfältig für Zwecke der Freizeit und Erholung genutzt. Freizeitaktivitäten an Talsperren sind Segeln, Surfen, Angeln, Baden, Tauchen und Wandern.

Da Talsperren oftmals in abgelegenen, wirtschaftsschwachen Regionen liegen, hat die touristische Nutzung dort eine verhältnismäßig hohe wirtschaftliche Bedeutung. Diese sollte beim Betrieb von Talsperren nicht vernachlässigt werden. Zielsetzungen für die touristische Nutzung der Talsperre an den Betrieb sind ein möglichst konstanter und hoher Wasserstand im Stauraum. Diese Ziele stehen im Widerspruch zu denen anderer Nutzungen, so dass Betriebsregeln, welche die Anforderungen aus Freizeitnutzung berücksichtigen, immer einen Kompromiss zwischen den verschiedenen Nutzungen finden müssen. Üblicherweise wird der Freizeitnutzung hierbei eine niedrige Priorität eingeräumt. Zum einen, da die touristische Nutzung vielfach als Zusatznutzen und nicht als vordergründige Aufgabe einer Talsperre gesehen wird, zum anderen, da die Freizeitnutzung eine relativ hohe Toleranz gegenüber nicht optimalen Bedingungen bezüglich des Wasserstandes im Stauraum aufweist (LIENHOOP & ANSMANN, 2011): So ist es für einen Schwimmer vielleicht unangenehm, über freiliegende Uferböschungen ins Wasser gehen zu müssen, es wird ihn an einem heißen Sommertag jedoch nicht davon abhalten, die Talsperre zu besuchen. Während sich bei der Energiegewinnung jeder Meter Füllstand weniger direkt auf die produzierte Energiemenge auswirkt, ist eine Wassersportnutzung über einen weiten Bereich des Wasserstandes möglich.

2.3 Quantifizierung der Zielsetzung von Talsperren – Bemessungswerte

2.3.1 Wasserbereitstellung

Zentrale Frage bei der Bemessung einer Talsperre ist, wie viel Wasser mit einer bestimmten Speichergröße unter den Zuflussrandbedingungen am Standort bereitgestellt werden kann. Diese Wassermenge wird als Ertrag, im Englischen als *yield*, bezeichnet. Der Ertrag ist die Abgabe aus dem Speicher, welche mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eingehalten werden kann.

Zur Bemessung wird die Wahrscheinlichkeit, dass die Talsperre den Ertrag zu erfüllen vermag, bzw. ihr Gegenstück, die Versagenswahrscheinlichkeit, verwendet. Zur Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit, bzw. der erforderlichen Speichergröße zur Einhaltung eines Bemessungswertes derselben, werden historische Aufzeichnungen des Zuflusses oder statistisch generierte Zuflussganglinien verwendet. Durch einfache Simulation des Talsperrenzu- und -abflusses lässt sich, auf Basis der Länge der betrachteten Zeitreihe, die Wahrscheinlichkeit bestimmen, mit der die Abgabe nicht eingehalten werden kann. Wird das Verfahren für verschiedene Abgaben wiederholt, lässt sich die Beziehung von Abgabe und Versagenswahrscheinlichkeit bestimmen. Die Berechnung kann ebenfalls für unterschiedlich große Speicher wiederholt werden, wodurch man den Zusammenhang von Speichergröße, Ertrag

und Versagenswahrscheinlichkeit erhält. Das Verfahren beruht auf Untersuchungen von HAZEN (1914). Abbildung 2-2 zeigt eine graphische Darstellung des Zusammenhanges, welche auch als Speicherwirkungslinie bezeichnet wird. Auf der horizontalen Achse ist die Zuverlässigkeit als prozentualer Anteil von Zeitschritten, in denen der Ertrag eingehalten werden kann, abgebildet. Die vertikale Achse zeigt die Speichergröße, die zur Erzielung des Ertrags erforderlich ist. Abgaben größer als der mittlere Zufluss (MQ) können von keinem noch so großen Speicher mit hoher Zuverlässigkeit eingehalten werden. Für diskrete Werte des Ertrags aus der Talsperre kann dann jeweils eine Kurve, welche die Beziehung von Zuverlässigkeit zur erforderlichen Speichergröße beschreibt, aufgestellt werden. Auf dieses und weitere Verfahren zur Bestimmung der notwendigen Speichergröße wird genauer in Kapitel 3.2 eingegangen.

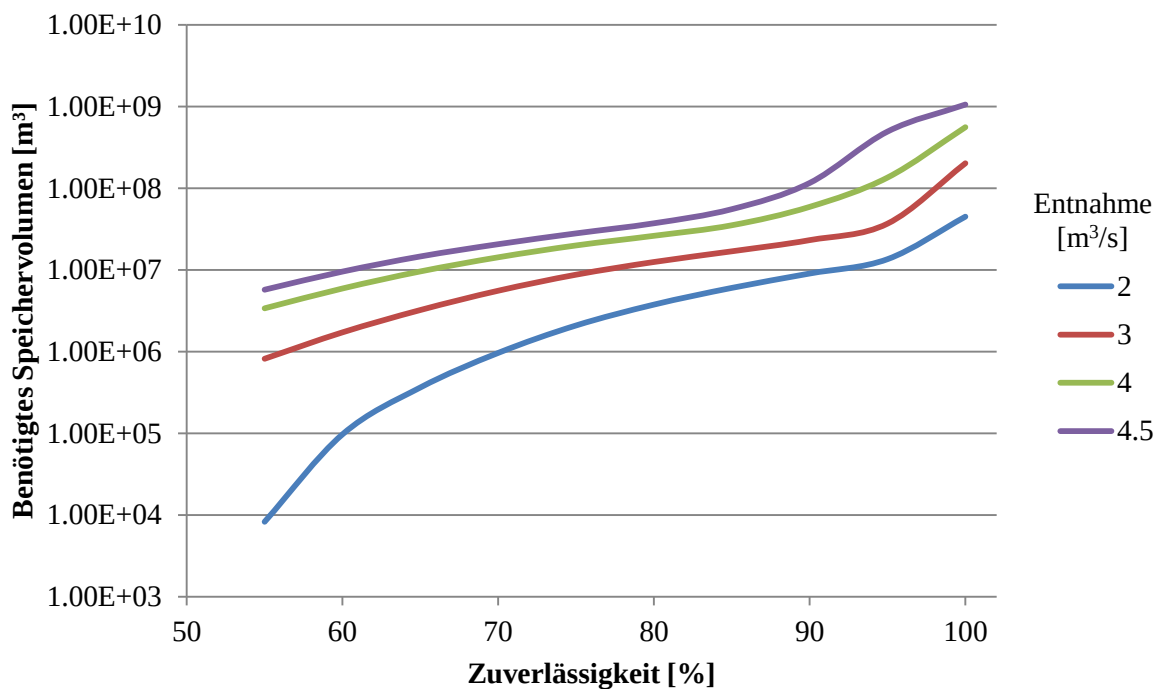


Abbildung 2-2 Empirische Speicherwirkungslinie (Tageszeitschritt) am Pegel Urft-Malsbenden ($MQ = 4,7 \text{ m}^3/\text{s}$)

Die Wahrscheinlichkeit, dass die Talsperre den Ertrag zu erzielen vermag, wird auch als hydrologische Sicherheit P_H bezeichnet (MANIAK, 2010). P_H definiert sich nach Gleichung (2.1), mit F als Anzahl der Versagensfälle und N als der Anzahl der Jahre der betrachteten Zeitreihe.

$$P_H = 100 \cdot \frac{1 - F}{N + 1} [\%] \quad (2.1)$$

MANIAK gibt beispielhaft Wertebereiche von P_H für verschiedene Wassernutzungen in Deutschland an. Die Werte reichen von 97 – 99 % für die Wasserversorgung einer Großstadt, bis 50 – 75 % für die Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen in ariden Gebieten. Diese Werte können an die klimatischen und wirtschaftlichen Bedingungen angepasst werden. So werden nach JAIN & BHUNYA (2008) Talsperren in Indien üblicherweise auf hydrologische Sicherheiten von 90 % für die öffentliche Wasserversorgung und 75 % für Bewässerungszwecke ausgelegt.

Offensichtlich hängt die zur Erzielung einer bestimmten Sicherheit und eines bestimmten Ertrags notwendige Speichergröße von den Zuflussrandbedingungen am Standort der Talsperre ab. Entsprechend

wurden zum Vergleich verschiedener Standorte und Planungen Kennzahlen definiert, welche die verschiedenen Größen wie mittleren Zufluss, Variation des Zuflusses, Ertrag und Speichergröße miteinander ins Verhältnis setzen.

Diese wasserwirtschaftlichen Kennzahlen wie Ausgleichsgrad α , Ausbaugrad β und standardisierter Netto-Zufluss m , die im Folgenden in Tabelle 2-1 definiert werden, charakterisieren die klimatischen Bedingungen am Standort der Talsperre.

Tabelle 2-1 Wasserwirtschaftliche Kennzahlen von Talsperren

Ausgleichsgrad α	Verhältnis der minimalen Regelabgabe (Ertrag) q zum mittleren jährlichen Zufluss MQ . Der Wert ist theoretisch nie größer 1. In der Praxis liegt er aufgrund von Verdunstungsverlusten unter 0,9, was der maximal erreichbaren Vergleichmäßigung des Abflusses entspricht.
$\alpha = \frac{q}{MQ}$	
Ausbaugrad β	Verhältnis des Stauvolumens K zum mittleren jährlichen Wasserzufluss $\bar{X}_a$. Bei einem Überjahresspeicher ist das Verhältnis größer 100 %. Der Ausbaugrad entspricht damit der mittleren Verweildauer eines Wasserteilchens in der Talsperre in Jahren.
$\beta = \frac{K}{\bar{X}_a}$	
Standardisierter Netto-Zufluss m	Verhältnis der Differenz von mittlerem jährlichen Zufluss MQ und Ertrag q zur Standardabweichung (siehe Glossar) des jährlichen Zuflusses σ_Q .
$m = \frac{MQ - q}{\sigma_Q}$	

Insbesondere der Ausgleichsgrad α ist eng mit der Größe des Ertrags verknüpft. Der maximale theoretische Ertrag ließe sich bei einem Ausgleichsgrad von 1 erhalten. Man spricht in diesem theoretischen Fall von einer idealen Talsperre. Der zur Erzielung eines bestimmten Ausgleichsgrades notwendige Ausbaugrad hängt insbesondere vom standardisierten Netto-Zufluss ab. Je höher die Varianz (siehe Glossar) des Zuflusses ist und je höher der zu erzielende Ertrag ist, desto größer muss ein Speicher sein.

Für Abflussdaten von 729 Flüssen weltweit berechneten MCMAHON ET AL. (2007a) den notwendigen Ausbaugrad für einen Ertrag von 75 % des mittleren jährlichen Zuflusses für gemessene Zeitreihen von mindestens 25 Jahren Dauer. Die Medianwerte (siehe Glossar) über alle Flüsse in einer Klimazone des notwendigen Ausbaugrades wurden zu 256 % für arides Klima, 122 % für gemäßigtes Klima, 55 % in tropischem Klima, 54 % in kaltem Klima und 10 % in polarem Klima bestimmt. Dies entspricht der räumlichen Verteilung des Variationskoeffizienten der jährlichen Abflüsse auf der Welt. In West-Europa mit gemäßigttem Klima ohne Trockenzeit und warmen Sommern ist im Mittel ein Ausbaugrad von 70 % notwendig. Umgekehrt lässt sich bestimmen, welche hydrologische Sicherheit bei gegebenem Ausbaugrad und Ausgleichsgrad in verschiedenen Klimazonen erzielt werden kann.

2.3.2 Hochwasserschutz

Die Bemessung des Hochwasserrückhalteraumes einer Talsperre erfolgt für ein Bemessungshochwasser mit definierter Scheitelhöhe und Volumen. Die Auswahl des Bemessungshochwassers erfolgt analog zur hydrologischen Sicherheit der Wasserversorgung anhand der Eintrittswahrscheinlichkeit des Hochwassers. Auf die Verfahren zur Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit wird in Kapitel 4.2 detailliert eingegangen.

Ziel ist die Reduzierung des Maximalabflusses, so dass dieser im unterstrom der Talsperre gelegenen Gewässer schadfrei abgeführt werden kann. Im Allgemeinen ist hierzu weniger Speichervolumen erforderlich als für die Wasserbereitstellung.

Mit dem Bemessungshochwasserabfluss $Q_{Zufluss}$ zum Zeitpunkt i und dem schadensfrei abführbaren Abfluss Q_{Abgabe} ergibt sich der gewöhnliche Hochwasserrückhalteraum I_{GHR} durch zeitliche Integration von Gleichung (2.2):

$$\int Q_{Zufluss, i} \cdot dt - \int Q_{Abgabe, i} \cdot dt \leq I_{GHR} \quad (2.2)$$

2.4 Zusammenfassung

Bei Planung, Betrieb und Bewertung von Talsperren ist immer zwischen den konkurrierenden Zielen Hochwasserschutz und Wasserbereitstellung abzuwägen. Diese Abwägung kann, wenn Hochwasser häufig zu bestimmten Zeiten im hydrologischen Jahr auftreten, jahreszeitenabhängig erfolgen. Während Zeiten hoher Zuflüsse kann dann dem Hochwasserschutz mehr Speicherraum zugeordnet werden, um danach den Füllstand anzuheben und eine gesicherte Wasserversorgung in trockenen Jahreszeiten zu ermöglichen. Die Wasserbereitstellung erfordert für die häufig anzutreffenden Randbedingungen ein größeres Volumen als der Hochwasserschutz. Die Bemessung erfolgt daher häufig vordergründig für die Aufgabe der Wasserbereitstellung.

Anhand wasserwirtschaftlicher Kennwerte lässt sich abschätzen, welche Ziele eine Talsperre an einem bestimmten Standort zu erfüllen vermag. Vordergründiges Ziel ist die Bereitstellung von Wasser. Der Bemessungswert der Menge an Wasser, die bereitgestellt werden soll, wird Ertrag genannt. Die Bemessung erfolgt dabei anhand der erforderlichen hydrologischen Sicherheit: der Wahrscheinlichkeit, dass die Talsperre den Ertrag zu erfüllen vermag, welche auch als Zuverlässigkeit bezeichnet wird.

Der Zusammenhang zwischen dem Bemessungswert der hydrologischen Sicherheit und der in Abhängigkeit der Zuflussrandbedingungen notwendigen Speichergröße zur Erfüllung eines bestimmten Ertrags kann als Speicherwirkungslinie graphisch dargestellt werden.

Das Konzept der Versagenswahrscheinlichkeit oder hydrologischen Sicherheit wird entsprechend auch auf den Hochwasserrückhalt angewendet. Hierbei entspricht das statistische Wiederkehrintervall des Bemessungshochwassers der hydrologischen Sicherheit.

Die Randbedingungen des Zuflusses hängen von den Eigenschaften des Einzugsgebietes und den klimatischen Bedingungen ab. Diese Wechselwirkung zwischen Bemessung der Talsperren und den kli-

matischen Randbedingungen soll im Folgenden untersucht werden. Zunächst wird jedoch betrachtet, wie einzelne Talsperren im Detail bemessen und betrieben werden können.

3 Planung und Betrieb von Talsperren

3.1 Einleitung

Vor der Frage nach dem optimalen Betrieb einer Talsperre steht zunächst die Fragestellung, wie viel Wasser mit einer bestimmten hydrologischen Sicherheit von einer Talsperre bereitgestellt werden kann, bzw. wie groß eine Talsperre hierfür sein muss. Die Frage nach der optimalen Größe des Speichers ist leichter zu beantworten und setzt den Rahmen, innerhalb dessen Regeln für einen optimalen Betrieb einer bestehenden Talsperre gefunden werden können. Um die Grundlagen der Talsperrenbewirtschaftung und mögliche Ansatzpunkte für eine Berücksichtigung des Einflusses veränderter klimatischer Randbedingungen zu erläutern, werden daher zunächst die Methoden zur Bestimmung der notwendigen Speichergröße erläutert. Anschließend wird auf die Herleitung von Betriebsregeln bei bekannter Speichergröße eingegangen.

Die Darstellung der Verfahren zur Herleitung von Betriebsregeln soll

1. ein Verständnis der beim Talsperrenbetrieb zu berücksichtigenden Prozesse und Aufgaben vermitteln,
2. als Grundlage für die Beurteilung möglicher Anpassungen der Betriebsregeln an veränderliche klimatische Randbedingungen dienen und
3. vordergründig zur Auswahl eines Verfahrens herangezogen werden, welches als Grundlage zur umfassenden Bewertung der Leistungsfähigkeit von Talsperren verwendet werden kann.

3.2 Bestimmung der notwendigen Speichergröße

Die Ansätze zur Bestimmung der notwendigen Speichergröße lassen sich in deterministische und statistische unterteilen: Bei ersteren basiert die Herleitung der Speichergröße auf Messwerten und festen Bemessungsgrößen. Letztere verwenden probabilistische Ansätze für die hydrologische Belastung und die Bemessungsgrößen.

3.2.1 Deterministische Verfahren

Grundlage der deterministischen Verfahren bildet die Annahme der Stationarität und Repräsentativität der gemessenen Werte für die hydrologische Belastung. Die für die Aufgaben der Wasserbereitstellung erzielbare maximale hydrologische Sicherheit hängt damit von der Länge der Messreihe ab. Ist eine Messreihe $n = 99$ Zeitschritte lang, ergibt sich die Versagenswahrscheinlichkeit, dass Abflüsse geringer als die gemessenen auftreten, unter der Annahme, dass jeder gemessene Wert ein Intervall aufspannt, dessen Eintrittswahrscheinlichkeit gleich der aller anderen Intervalle ist, zu $1/(n+1)$, also in diesem Fall 1% der Zeitschritte. Diese Einschränkung bezüglich der Aussagegenauigkeit besteht für alle deterministischen Verfahren, die auf historisch gemessenen Bemessungsgrößen angewiesen sind. Die weiter unten in Kapitel 3.2.2 beschriebenen statistischen Verfahren versuchen diese Einschränkung aufzuheben.

Die einfachste deterministische Methode zur Bestimmung der notwendigen Größe einer geplanten Talsperre zur Wasserbereitstellung ist das graphische Verfahren der Summenlinie. Hierzu sind ledig-

lich die Messreihe des Abflusses am geplanten Standort sowie die Annahme einer zeitlich konstanten Abgabe (Ertrag) der Talsperre notwendig. Wird die Summe der Abflüsse über die Zeit aufgetragen und die Abgabe als Tangente an diese gezeichnet, ergibt sich die notwendige Speicherkapazität aus dem maximalen Abstand von Summenlinie und Abgabengerade (siehe Abbildung 3-1, gezeigt ist die notwendige Speichergröße für eine vollständige Regulierung). Dem Vorgehen liegt die Annahme zugrunde, dass der Speicher zu Beginn der Betrachtung vollständig gefüllt ist.

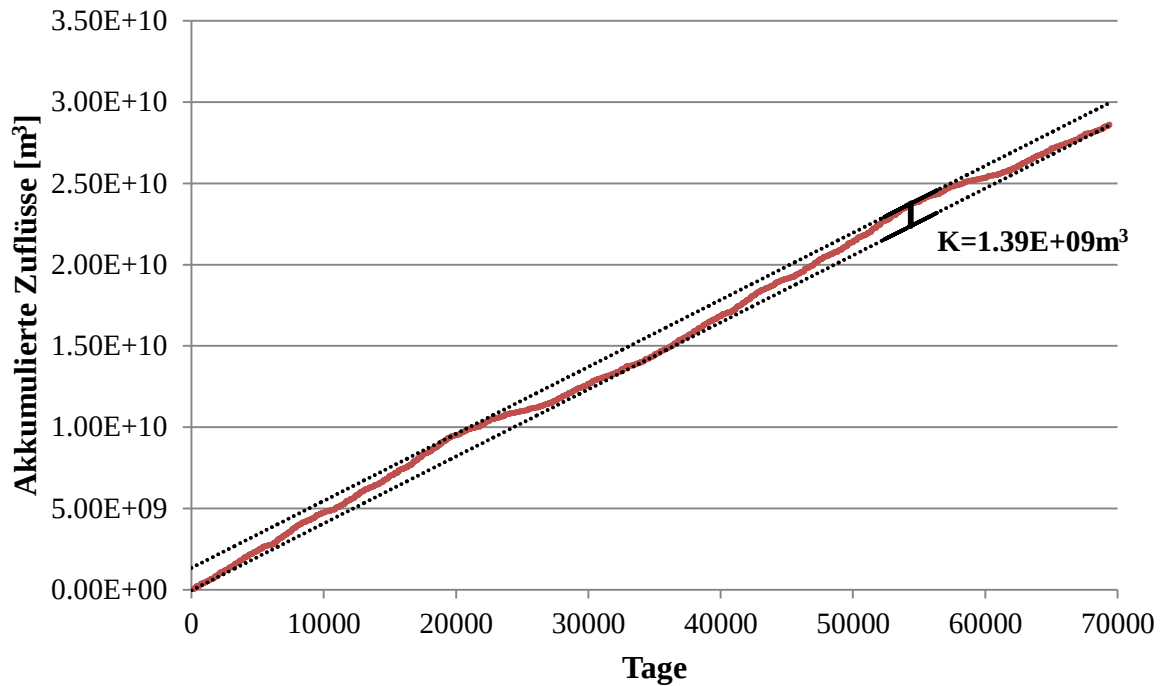


Abbildung 3-1 Graphische Bestimmung der notwendigen Speichergröße am Pegel Urft-Malsbenden für konstante Abgabe (MQ = 4,7 m³/s) anhand der Summenlinie des Zuflusses

Mit diesem einfachen Verfahren lassen sich in erster Näherung zeitlich konstante Abgaben untersuchen. Bei einer zeitlich konstanten Abgabe spricht man auch vom Standardbetrieb einer Talsperre. Wann immer physikalisch möglich, wird hierbei die Bemessungsabgabe q eingehalten. Die Betriebsregeln zur Bestimmung der Abgabe R im Standardbetrieb lassen sich mit dem Speicherstand S , der Speicherkapazität K und dem Zufluss X nach Gleichung (3.1) bestimmen (KLEMEŠ, 1981):

$$R = \begin{cases} q, \text{ für } \begin{cases} 0 < S < K \text{ und alle } X \\ S = 0 \text{ und } X \geq q \\ S = K \text{ und } X \leq q \end{cases} \\ X, \text{ für } \begin{cases} S = 0 \text{ und } X < q \\ S = K \text{ und } X > q \end{cases} \end{cases} \quad (3.1)$$

Eine Erweiterung des zuvor vorgestellten Verfahrens der Summenlinie ergibt sich, wenn nicht die Summe des Abflusses, sondern die Summe der Differenzen von benötigter Wasserabgabe und Talsperrenzufluss über die Zeit aufgetragen wird. Die benötigte Größe des aktiven Speichervolumens ergibt sich dann aus dem maximalen Wert der Summendifferenzlinie (RIPPL, 1883). Da hierbei die zeitabhängige Differenz zwischen Zufluss und Abgabe betrachtet wird, können auch zeitlich veränderliche Abgabeansforderungen berücksichtigt werden. Während eines Zeitschrittes wird die Abgabe jedoch konstant angesetzt. Die analoge numerische Lösung nach dieser Methode wird Folgescheitelal-

gorithmus (*sequent peak analysis*) genannt. Der Name ergibt sich daraus, dass eine Berechnung für eine zweimalige Wiederholung der hydrologischen Messreihe notwendig ist, um die maximale akkumulierte, positive Differenz zwischen Zufluss und Abgabe zu bestimmen. Diese maximale kumulierte, positive Differenz entspricht wiederum der benötigten Speichergröße, um die Abgabe für die untersuchte Zuflussganglinie sicherstellen zu können (siehe Abbildung 3-2).

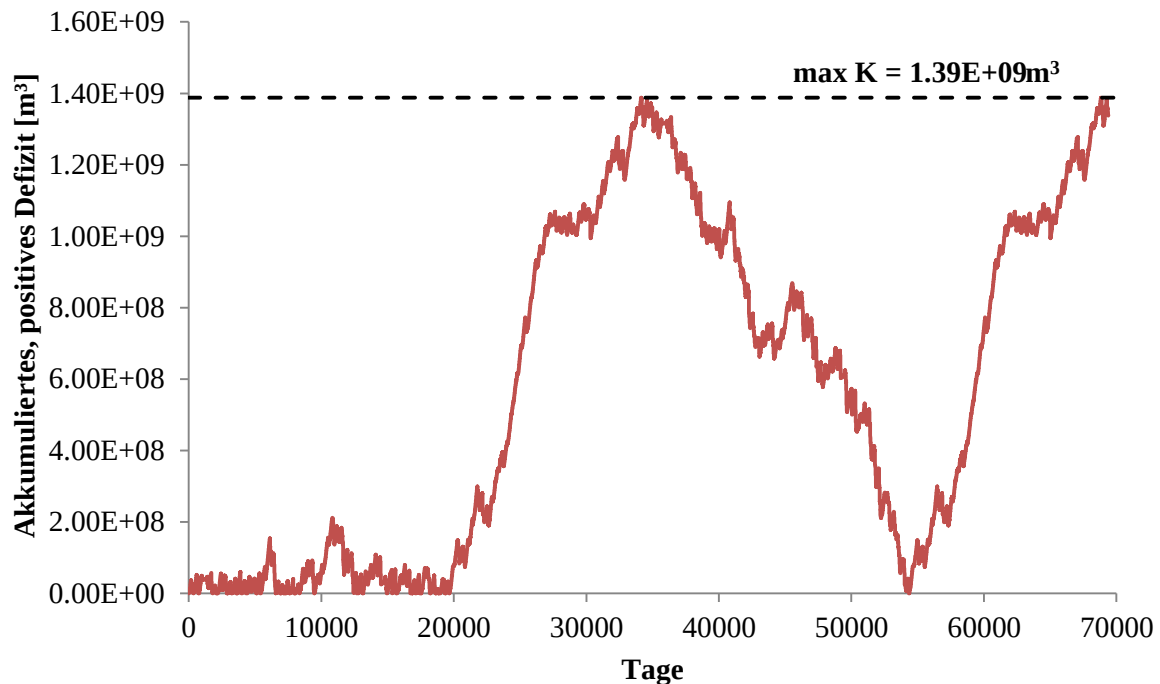


Abbildung 3-2 Summendifferenzlinie nach dem Folgescheitelalgorithmus am Pegel Urft-Malsbenden für konstante Abgabe (MQ = 4,7 m³/s)

3.2.2 Statistische Verfahren

Für Talsperren mit konstanter Abgabe lassen sich die Versagenswahrscheinlichkeiten statistisch, das heißt ohne deterministische, schrittweise Bilanzierung der Talsperrenzu- und -abflüsse, berechnen oder aus entsprechend vorbereiteten Diagrammen ablesen. Dabei werden die Zuflüsse anhand ihrer statistischen Eigenschaften charakterisiert (MANIAK, 2010).

Die hier vorgestellten expliziten statistischen Verfahren berechnen die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Speicherfüllstände oder Leistungsindizes direkt und werden aufgrund der dabei häufig angewandten Matrizenoperationen auch Matrixmethoden genannt (KLEMEŠ, 1981). Einen Überblick der im 19. Jahrhundert entwickelten statistischen Verfahren zur Beschreibung der Speicherwirkung von Talsperren wird in KLEMEŠ (1981 & 1987) gegeben.

Ziel der Matrixmethoden ist es, für eine Talsperre mit gegebener Speicherkapazität K zu bestimmen, mit welcher hydrologischen Sicherheit eine Bemessungsabgabe q erfüllt werden kann. Der Talsperrenzufluss X wird hierzu anhand seiner statistischen Eigenschaften, bezogen auf die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $F(X)$, beschrieben. Die Zuverlässigkeit ergibt sich aus der Wahrscheinlichkeit eines Versagens, wenn also die Abgabe aufgrund eines leeren Speichers nicht erfüllt werden kann. Das Vorgehen zur Bestimmung lässt sich anschaulich am iterativen Verfahren darstellen, welches auf KRITSKIY & MENKEL (1935) zurückgeht (KLEMEŠ, 1981). Betrachtet man zunächst ein einzelnes Zeit-

intervall, kann kein Versagen vorliegen, wenn der Zufluss in diesem Zeitintervall größer als die Bemessungsabgabe ist. Damit ergibt sich in erster Näherung die maximale Versagenswahrscheinlichkeit $P_{F, \max}$ als die Wahrscheinlichkeit, dass der Zufluss kleiner als die Bemessungsabgabe ist. Maximale Versagenswahrscheinlichkeit deshalb, da noch nicht betrachtet wurde, ob der Speicher aufgrund hoher Zuflüsse im vorherigen Zeitschritt gefüllt ist und die Abgabe aus dem Speichervolumen befriedigt werden konnte. Genauso kann die Bemessungsabgabe nicht erfüllt werden, wenn die Summe aus Zufluss im Zeitintervall und Speichervolumen kleiner als das erforderliche Abgabevolumen ist, selbst wenn die Talsperre vollständig gefüllt wäre. Die minimale Versagenswahrscheinlichkeit $P_{F, \min}$ ist somit gleich der Wahrscheinlichkeit, dass der Abfluss über das betrachtete Zeitintervall geringer als das benötigte Abgabevolumen minus des Speichervolumens ist. In einem ersten Schritt ergeben sich so die Grenzen, wie sie in Gleichung (3.2) dargestellt sind:

$$F(q - K) \leq P_F \leq F(q) \quad (3.2)$$

Für Abflüsse X im Bereich zwischen $q - K < X < q$ kann in Abhängigkeit des Abflusses im vorangehenden Zeitintervall entschieden werden, ob ein Versagen auftritt oder die geforderte Abgabe eingehalten werden kann. Die Abflüsse in diesem Bereich haben die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $U^I(X)$, welche gleich dem Segment von $F(X)$ zwischen $F(q - K)$ und $F(q)$ ist. KRITSKIY & MENKEL verwenden ein zufallsbasiertes Modell, bei welchem keine Korrelation des gegenwärtigen Abflusses mit dem vorherigen berücksichtigt wird und somit jeder Abfluss auf einen beliebigen Abfluss im vorherigen Zeitintervall folgen kann. Werden nun im zweiten Iterationsschritt die Volumina über zwei Zeitintervalle summiert, erhält man die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des summierten Zuflusses $H^I(X_{i-1} + X_i)$ durch Faltung von $F(X)$ mit $U^I(X)$. Nun können wiederum zwei Fälle unterschieden werden: Entweder ist der Abfluss so gering, dass in jedem Fall, auch bei einer vollen Talsperre, ein Versagen eintritt, oder der Abfluss ist hoch genug, dass es in keinem Fall zu einem Versagen kommt, auch nicht bei einer leeren Talsperre. Dieser zweite Iterationsschritt ist in Gleichung (3.3) dargestellt.

$$\begin{aligned} F(q - K) + [H^I(2q - K)][F(q) - F(q - K)] &\leq P_F \\ &\leq F(q) - H^I(2q)[F(q) - F(q - K)] \end{aligned} \quad (3.3)$$

Darin steht $[F(q) - F(q - K)]$ für die gesamte Wahrscheinlichkeit der Abflüsse, denen im ersten Schritt kein Systemzustand (Versagen / Nicht-Versagen) zugewiesen werden konnte. Die Iteration wird nun fortgesetzt bis der Wert der Versagenswahrscheinlichkeit P_F hinreichend genau bestimmt ist. Die Annahme, dass aufeinander folgende Abflüsse unabhängig sind, ist nur für Zeitintervalle von einem Jahr sinnvoll. Das gezeigte iterative Vorgehen ist anschaulich, aber rechenaufwendig. Erweiterungen des Verfahrens zur Berücksichtigung der seriellen Korrelation des jährlichen Abflusses mittels verschiedener Autokorrelationsfunktionen (Potenz, harmonische Schwingung) wurden von KRITSKIY & MENKEL (1959) und NACHÁZEL (1965) erarbeitet (VOTRUBA & BROŽA, 1989).

Eine analytische Lösung geht auf GOULD zurück (VOGEL & MCMAHON, 1996). Für normal- oder gammaverteilte, zeitlich unabhängige Zuflüsse lässt sich die q -te Perzentile der Versagenswahrscheinlichkeit t_q mit der Standardabweichung der jährlichen Zuflüsse σ nach Gleichung (3.4) berechnen:

$$t_q = \sqrt{\frac{4K(MQ - q)}{\sigma^2}} \quad (3.4)$$

Die Gleichung erweitert sich bei Berücksichtigung des jährlichen Autokorrelationskoeffizienten ρ (siehe Glossar) zu:

$$t_q = \sqrt{\frac{4K(MQ - q)}{\sigma^2} \left(\frac{1 - \rho}{1 + \rho} \right)} \quad (3.5)$$

Abbildung 3-3 zeigt das Beispiel einer nach Gleichung (3.5) berechneten Speicherwirkungslinie. Erweiterungen des Verfahrens zur Berücksichtigung von autokorrelierten und logarithmisch normalverteilten Jahresabflusssummen existieren (MCMAHON ET AL., 2007b).

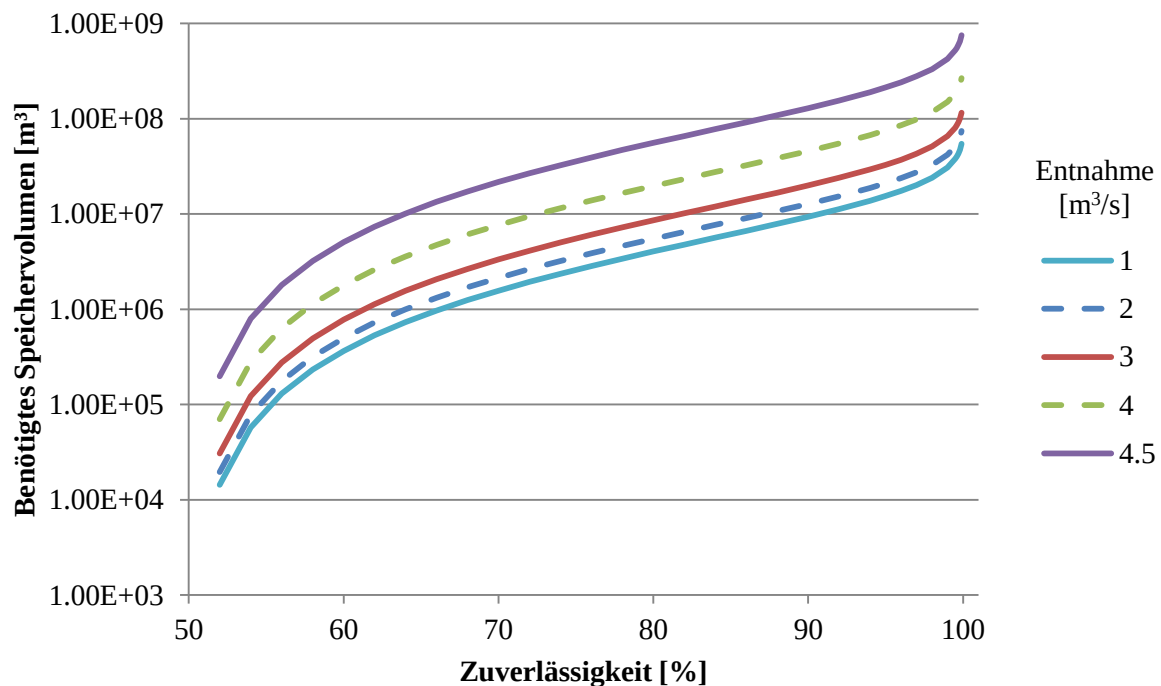


Abbildung 3-3 Speicherwirkungslinie am Pegel Urft-Malsbenden ($MQ = 4,7 \text{ m}^3/\text{s}$) nach Gleichung (3.5)

Da die bisher vorgestellten statistischen Verfahren eine Zeitschrittweite von einem Jahr verwenden, lässt sich mit ihrer Hilfe der Speicherbedarf zum Ausgleich von innerjährlichen Schwankungen nicht bestimmen. Ansätze zur Erweiterung der einfachen analytischen Lösung nach GOULD, um die notwendige Speicherkapazität zum Ausgleich von innerjährlichen Abflussschwankungen zu berücksichtigen, zeigen ADELOYE ET AL. (2003). Basierend auf einer Regressionsanalyse für 432 Fälle finden sie eine Beziehung von Variationskoeffizient C_v der jährlichen Zuflüsse, dem Ausgleichsgrad α , Ausbaugrad zum zwischenjährlichen Ausgleich β_a und benötigter Gesamtausbaugrad β_t :

$$\beta_t = -0,222 + 0,322 \cdot C_v + 0,6 \cdot \alpha + 1,025 \cdot \beta_a \quad (3.6)$$

MCMAHON ET AL. (2007b) vergleichen die mit Hilfe von Gleichung (3.6) berechnete Speichergröße mit nach dem Folgescheitelalgorithmus für monatliche Zeitschrittweite bestimmten Wert anhand von Abflussdaten von 729 Flüssen in der ganzen Welt. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung für große Speicher, während die notwendige Größe kleinerer Speicher (≤ 10 Millionen m^3) überschätzt wird.

Weitere Matrixmethoden, welche die Autokorrelation des Zuflusses und die innerjährliche Verteilung der Zuflüsse berücksichtigen, werden in KLEMEŠ (1981 & 1987) und MCMAHON & ADELOYE (2005) vorgestellt. Genereller Nachteil der Matrixmethoden ist, dass eine Anwendung auf Speichersysteme mit mehreren Talsperren, die im Verbund betrieben werden, nicht möglich ist (DYCK, 1980).

Im Hinblick auf die Planung ermöglichen die statistischen Verfahren eine Aussage darüber, welche Standardabgabe mit der geforderten Zuverlässigkeit von einem bestimmten Speichervolumen erbracht werden kann. Damit lässt sich die Beziehung zwischen den klimatischen Bedingungen, wie sie in den statistischen Eigenschaften des Talsperrenzuflusses ausgedrückt sind, und der mit einem bestimmten Speichervolumen für einen bestimmten Ertrag erzielbaren hydrologischen Sicherheit darstellen. Insofern erfüllen die statistischen Verfahren die Anforderung nach Möglichkeit zur Abbildung des Einflusses der Klimaänderung auf die Leistungsfähigkeit von Talsperren teilweise. Weder die bisher vorgestellten deterministischen Verfahren (Verfahren der Summenlinie, Folgescheitelalgorithmus) noch die statistischen Verfahren eignen sich allerdings dazu, detaillierte Betriebsregeln herzuleiten, die über die Definition einer jahreszeitabhängigen Abgabe gemäß Standardbetrieb (Gleichung (3.1)) hinausgehen. Auch vermag keines dieser Verfahren, Anpassungen an Betriebsregeln zu bewerten. Hierzu sind weitergehende Methoden notwendig, welche im Folgenden vorgestellt werden.

3.3 Betriebsregeln

3.3.1 Einleitung

Ist die Speichergröße mittels der zuvor vorgestellten Verfahren festgelegt, sind in einem zweiten Schritt Betriebsregeln für die Nutzung dieses Speichervolumens zu bestimmen. Die dabei verwendeten Verfahren beruhen auf denselben Grundsätzen, erlauben jedoch eine detailliertere Beschreibung und Auswertung des Betriebsablaufes.

Talsperrenbetreiber benötigen Informationen und Handlungsanleitungen darüber, wie viel Wasser zu welchem Zeitpunkt aus einer Talsperre abgelassen werden soll. Dabei müssen die Nutzungen einer Talsperre, wie die Deckung des Wasserbedarfs für die öffentliche Wasserversorgung, Brauchwasserbereitstellung, die Niedrigwasseraufhöhung, die Erzeugung elektrischer Energie und Freizeitnutzung sowie Hochwasserschutz berücksichtigt werden. Da die zukünftigen Talsperrenzuflüsse unbekannt sind, besteht die Schwierigkeit der Talsperrenbewirtschaftung darin, die optimale Talsperrenabgabe für eine Vielzahl möglicher zukünftiger Zuflüsse und Speicherstände zu finden. Eine einfache Möglichkeit, Abgaben zu definieren, ist die Vorgabe eines jahreszeitabhängigen Zielspeicherstandes mit Vorgabe von maximaler und minimaler Abgabe, welche gewählt werden kann, um diesen Speicherstand zu halten. Als Erweiterung dieser Vorgabe einer Minimalabgabe lassen sich weitere Abgaben bestimmen, welche in wasserreichen Jahren bei gut gefülltem Speicher möglich sind. Diese Abgaben werden oftmals anhand von Lamellenplänen definiert, in denen die Abgabe abhängig von Speicherstand und Jahreszeit abgelesen werden kann. Dieses Verfahren lässt sich nahezu beliebig erweitern, um auch Informationen zu Schneehöhen im Einzugsgebiet der Talsperre, den Verlauf der Speicherfülllinie oder Vorhersagen zu den klimatischen Bedingungen zu berücksichtigen (LOUCKS & E. VAN BEEK, 2005). Die Betriebsregeln werden typischerweise anhand von automatisierten Versuchs- und Irrtumssimulationen bestimmt. Die Betriebsregeln derart festzulegen, dass die Leistung der Talsperre maximal ist, stellt damit eine Optimierungsaufgabe dar. Automatisierte Ansätze zur einfachen Simulation des Talsperrenbetriebs für verschiedene Betriebsregeln, die dann verglichen werden, benötigen oftmals vereinfachte Ansätze zur Bewertung der Leistungsfähigkeit, bzw. eine Definition der Zielset-

zungen des Talsperrenbetriebs in Form von Ziel- und Straffunktionen, die sich zu jedem Zeitschritt eines Optimierungslaufes evaluieren lassen. Zur Bewertung der dabei versuchsweise festgelegten Betriebsregeln können auch Ziel- und Straffunktionen für einzelne Aufgabenbereiche verwendet werden. Beispielsweise kann für die Freizeitnutzung ein bestimmter Mindestwasserstand in den Sommermonaten als Zielwert vorgegeben sein, dessen Unterschreitung mit Strafwerten belegt wird. Diese Strafwerte können sich aus der Differenz von Zielwert und aufgetretenem Wasserstand berechnen und über den Untersuchungszeitraum summiert werden. Analog kann für die Unterschreitung der Mindestabgabe oder die Überschreitung der Maximalabgabe verfahren werden. Durch gewichtete Aggregation der Strafwerte verschiedener Nutzungen ergibt sich ein Wert zur Bewertung des untersuchten Parametersatzes der Betriebsregeln.

Die verschiedenen Ansätze zur Herleitung und Optimierung der Talsperrenbewirtschaftung werden im Folgenden vorgestellt. Die Darstellung soll vordergründig der Auswahl eines Verfahrens dienen, das sich als Grundlage für eine umfassende Bewertung der Leistungsfähigkeit von Talsperren (Kapitel 4) eignet, auch bei veränderlichen klimatischen Randbedingungen (Kapitel 5). Zum anderen soll aber auch ein Überblick über die Möglichkeiten gegeben werden, den Talsperrenbetrieb zu optimieren. Dadurch können bisherige Arbeiten zur Anpassung der Talsperrenbewirtschaftung an Klimaänderungen eingeordnet werden (Kapitel 6).

Die Methoden der Talsperrenbewirtschaftung lassen sich unterteilen in solche mit festen Betriebsregeln und solche, die eine Echtzeitsteuerung umsetzen. In festen Betriebsregeln wird die Speicherabgabe beispielsweise abhängig von Datum (zur Berücksichtigung der Zuflussschwankungen über das hydrologische Jahr) und Speicherfüllstand vorgegeben. Dagegen wird die Abgabe bei einer Echtzeitsteuerung aus Daten zu aktuellem oder prognostiziertem Zufluss, Wasserbedarf, Speicherfüllstand etc. zu jedem Zeitpunkt neu berechnet. In der Literatur werden diese Methoden oft in *off-line* (feste Betriebsregeln) und *on-line* (Echtzeitsteuerung) Ansätze unterteilt (CASTELLETTI ET AL., 2008).

Die Verfahren lassen sich, wie schon die Ansätze zur Bestimmung der notwendigen Speichergröße, weiter unterteilen in deterministische und statistische: Bei ersteren basiert die Herleitung der Betriebsregeln auf Messwerten und festen Bemessungsgrößen. Letztere verwenden probabilistische Ansätze für die hydrologische Belastung und die Bemessungsgrößen.

3.3.2 Stationäre Steuerung

Verwendet man den Folgescheitelalgorithmus (siehe Kapitel 3.2.1) zur Berechnung der notwendigen Speichergröße zur Erzielung eines bestimmten Ertrags mit einer gegebenen hydrologischen Sicherheit in Abhängigkeit von der Jahreszeit, lassen sich unmittelbar einfache Betriebsregeln für die untersuchte Talsperre ableiten. Das in jeder Jahreszeit benötigte Speichervolumen zur Sicherstellung der Abgabe wird hierzu als Speicherinhalt über die Zeit aufgetragen. Liegt der dem aktuellen Wasserstand entsprechende Speicherstand unter dem so errechneten Speicherinhalt, wird nur die bei der Bemessung ange setzte Mindestabgabe entnommen. Liegt er in wasserreichen Jahren darüber, kann entsprechend mehr entnommen werden. Um zu bestimmen, wie viel höher die Abgabe dann für eine bestimmte hydrologische Sicherheit sein darf, kann die Abgabe unter Auslassung der trockensten Zeiten der Messreihe mit bekanntem Speicherinhalt berechnet und die so bestimmte Speicherinhaltslinie über die zuvor berechnete gezeichnet werden. Es ergeben sich damit Lamellen des Speicherinhalts über die Jahreszeit, für die jeweils eine bestimmte Abgabe mit einer aus der verwendeten Zeitreihe berechneten hydrologischen Sicherheit eingehalten werden kann.

Um die Berechnung zu vereinfachen, wurden Verfahren entwickelt, welche in einem ersten Rechenschritt den notwendigen Speicherinhalt zunächst für eine Zeitschrittweite von einem Jahr bestimmen. Anschließend bestimmen sie in einem zweiten Rechenschritt den zum Ausgleich der jahreszeitlichen Zuflussschwankungen notwendigen Speicherinhalt (LOUCKS & E. VAN BEEK, 2005). Die Zielsetzungen anderer Aufgaben einer Talsperre als die der Wasserversorgung werden vom Verfahren der Summendifferenzlinie oder dem Folgescheitelalgorithmus nicht berücksichtigt. In die abgeleiteten Betriebsregeln kann die Aufgabe des Hochwasserschutzes integriert werden, indem ein Anteil des Speicherraums als freizuhaltender Hochwasserrückhalteraum definiert wird, welcher bei der Bestimmung der Regelabgabe nicht angesetzt wird. Die Bemessung des Hochwasserrückhalterumes orientiert sich an dem Volumen, das notwendig ist, um ein Bemessungshochwasser mit gegebener Größe oder gegebenem Wiederkehrintervall auf den im Unterlauf schadensfrei abführbaren Abfluss zu dämpfen. In Deutschland wird die Bemessung des gewöhnlichen Hochwasserrückhalterums nach DIN 19799 Teil 11 (2004) geregelt.

Die Festlegung des Hochwasserrückhalterumes kann jahreszeitabhängig erfolgen. Somit lässt sich ein Lammellenplan aufstellen, aus dem die Abgabe abhängig vom Füllstand und der Jahreszeit abgelesen werden kann. Die Abgabe bei Erreichen von Füllständen, welche in den Hochwasserrückhalteraum hineinreichen, orientiert sich dann am schadensfrei vom unterstrom der Talsperre gelegenen Gewässer abführbaren Abfluss. Ein Beispiel eines einfachen Lamellenplanes zeigt Abbildung 3-4.

Die oberste Lamelle beschreibt den Hochwasserrückhalteraum, der durch Abgabe des schadensfrei abführbaren Abflusses frei gehalten werden soll. Es werden je nach Jahreszeit unterschiedliche Abgaben und Speicherräume gewählt. Die Lamelle darunter zeigt die jahreszeitabhängige Abgabe, die bei guter Füllung des Speichers mit hoher Wahrscheinlichkeit eingehalten werden kann. Diese wird im Frühjahr (vor dem trockenen Sommer) geringer gewählt als im Herbst (vor dem feuchten Winter). Im Frühjahr wird die Abgabe zudem bereits bei höheren Speicherständen gedrosselt, um Reserven für einen trockenen Sommer sicher zu stellen. Weitere Abgabelamellen sind nicht mehr abhängig von der Jahreszeit. Als zusätzliche Sicherheit der Wasserversorgung ist ein „Eiserner Bestand“ angegeben, für den die Abgabe gesondert nach Bedarf geregelt wird. Dieses einfache Beispiel zeigt die Ergebnisse von Berechnungen mit einer Zeitschrittweite von einem Monat, wie sie ohne Computer durchgeführt werden können. Sollen lediglich die Sicherung der Wasserbereitstellung und ein einfacher Hochwasserschutz in den Betriebsregeln berücksichtigt werden, lassen sich diese heute nach dem gleichen Prinzip mit Hilfe von rechnergestützten Modellen und kürzeren Zeitschrittweiten aufstellen.

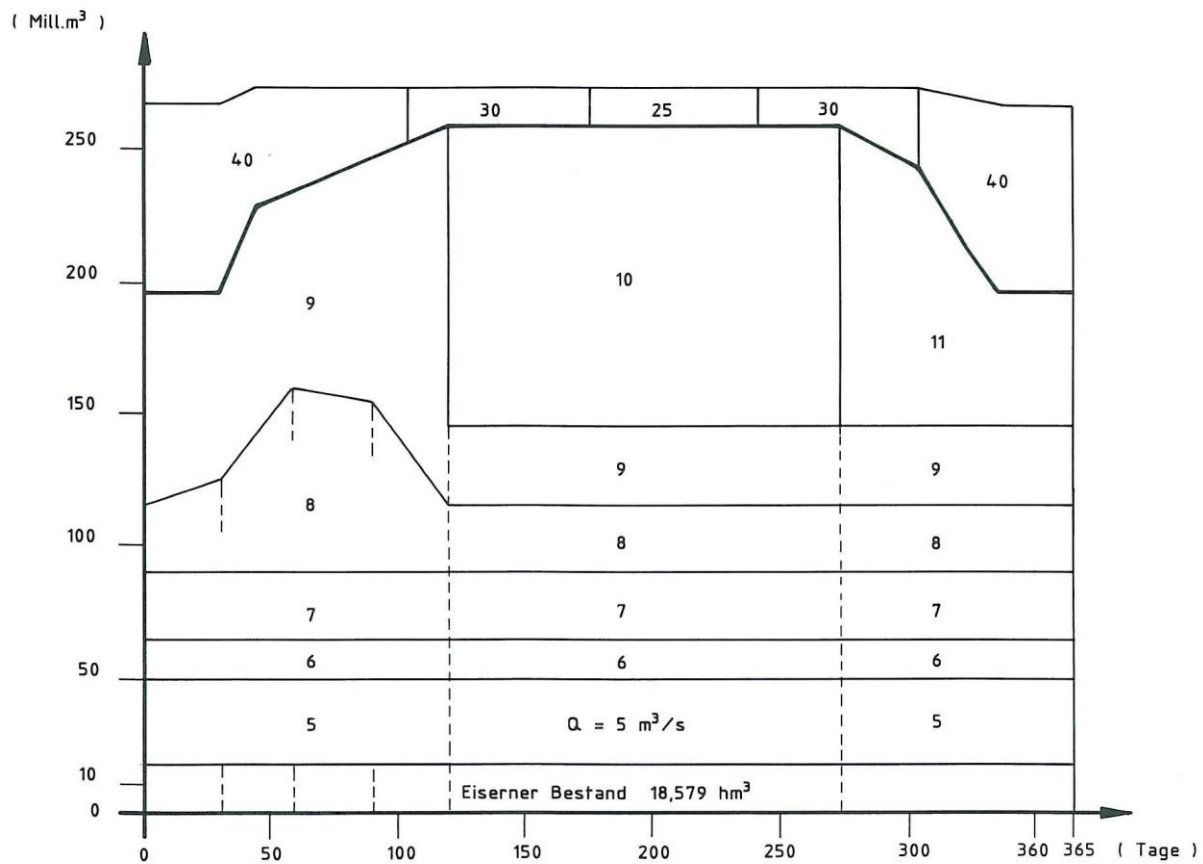


Abbildung 3-4 Lamellenplan der Rurtalsperren aus den 1960er Jahren (GERB & LANGE, 1992)

Sollen neben den Aufgaben der Wasserbereitstellung und des Hochwasserschutzes weitere Zielsetzungen für den Betrieb der Talsperre beachtet werden, sind Optimierungsmethoden notwendig, welche die Zielsetzungen unterschiedlicher Aufgaben einzeln berücksichtigen.

Ein verbreitetes, einfaches Optimierungsverfahren stellt die lineare Programmierung dar. Dieses Verfahren ist in vielen Anwendungsbereichen verbreitet (Betriebswirtschaft, Handel, Lehre, Ingenieurwesen, Finanzwirtschaft u.a.) und es existieren effiziente Software-Pakete zur flexiblen Abbildung komplexer Problemstellungen (RANI & MOREIRA, 2009). Es wird eine Zielfunktion $Z(\mathbf{D})$ für den Vektor $\mathbf{D}$ der Entscheidungsvariablen d_j formuliert. Des Weiteren werden Randbedingungen formuliert, die von möglichen Lösungen der Problemstellung eingehalten werden müssen. Diese grundlegende Struktur eines Modells der linearen Programmierung mit Randbedingungen ist in Gleichung (3.7) bis (3.9) dargestellt.

$$\text{Maximiere (oder Minimiere)} \sum_j^n P_j d_j \quad (3.7)$$

$$\text{für } \sum_j^n a_{ij} d_j \leq b_i \quad (3.8)$$

$$\text{und } d_j \geq 0 \quad (3.9)$$

Darin steht P_j für das Gewicht der Ziel- oder Straffunktion einer Entscheidungsvariablen. Randbedingungen b_i werden in Ungleichung (3.8) mit den Koeffizienten a_{ij} ausgedrückt. Die Bedingung, dass alle Entscheidungsvariablen d_j positiv sein müssen (Gleichung (3.9)), wird von vielen Software-Paketen bereits automatisch sichergestellt (LOUCKS & E. VAN BEEK, 2005). Das Verfahren ermöglicht die schnelle Berechnung eines globalen Optimums für komplexe Probleme. Voraussetzung hierfür ist jedoch die Darstellbarkeit als lineares Problem, das heißt, dass sowohl die Ziele als auch die Restriktionen des betrachteten Systems durch lineare Gleichungen beschrieben werden können. Bei Talsperren ist diese Anforderung der Linearität nicht ohne weiteres gegeben, da die Speicherfülllinie (Funktion des Speicherinhalts in Abhängigkeit des Füllstands) nicht linear verläuft. Zudem müssen auch die Zielfunktionen linear und konvex sein. Diesen Einschränkungen kann durch eine Erweiterung der Methode begegnet werden. Hierbei werden die Fragestellungen unterteilt oder Funktionen abschnittsweise linearisiert. Anwendungsbeispiele der linearen Programmierung auf den Betrieb von Talsperren sind die Optimierung des Verbundbetriebs mehrerer Talsperren zum Hochwasserschutz (NEEDHAM ET AL., 2000), die Abstimmung von Grundwasserentnahmen und dem Talsperrenbetrieb zur Bewässerung landwirtschaftlicher Flächen (VEDULA ET AL., 2005) sowie die allgemeine Bestimmung von Betriebsregeln (DANDY & CRAWLEY, 1992). Zur Bestimmung von Betriebsregeln werden zunächst Ziele definiert, die von der Talsperre eingehalten werden sollen. Dazu gehören die Minimierung der Fehlmengen zur Wasserversorgung und Niedrigwasseraufhöhung sowie die Minimierung der Inanspruchnahme des Hochwasserschutzraumes und der Talsperrenüberläufe. Die Ziele können in einer gemeinsamen Zielfunktion gewichtet zusammengefasst werden (DANDY & CRAWLEY, 1992). Die physikalischen Randbedingungen des Talsperrenbetriebs werden ebenfalls in linearen Gleichungen ausgedrückt, wie zum Beispiel, dass die Summe von Entnahme und Defizit gleich dem Bedarf sein muss oder die Masenerhaltung von Zuflüssen, Abgaben und Speicherung. Für ein bekanntes Speichervolumen und einen bekannten Zufluss zu jedem Zeitschritt ergeben sich dann Werte für die Entscheidungsvariablen Abgabe, Fehlmengen und Speicherstände. Durch eine Regressionsanalyse (siehe Glossar) lassen sich hieraus Betriebsregeln ableiten. Dabei wird die Funktion der Abgabe als unabhängige Variable in Abhängigkeit der Variablen Speicherstand und Zufluss aus der Menge an optimalen Kombinationen von Speicherstand, Zufluss und Abgabe bestimmt.

Trotz des Vorteils der einfachen Handhabung großer Systeme mit vielen Bedingungen wiegen die Nachteile schwer, die sich aus der Forderung nach Linearität der Problemstellung ergeben. Insbesondere können nicht-lineare Funktionen von Wasserkraftnutzung und Speicherverlusten durch Evaporation nicht exakt abgebildet werden. Dies wird beispielsweise deutlich, wenn man die Gleichung zur Berechnung der von einem an eine Talsperre angeschlossenen Wasserkraftwerk produzierten elektrischen Energie betrachtet. Die elektrische Leistung P lässt sich für jeden Zeitschritt Δt nach Gleichung (3.10) berechnen.

$$P_{\Delta t} = \eta \cdot \gamma \cdot h_F \cdot Q \quad (3.10)$$

Während die Eingangsgröße Wichte des Wassers γ konstant ist, müssen der Durchfluss Q und die netto Fallhöhe h_F aus der Simulation des Talsperrenbetriebs berechnet werden und sind Entscheidungsvariablen bei der Bestimmung eines Betriebsplanes. Der Wirkungsgrad η ist wiederum direkt von Durchfluss und Fallhöhe abhängig. Durch Integration über den Betrachtungszeitraum erhält man die von der Wasserkraftanlage produzierte elektrische Energie. Da sowohl der Füllstand des Speichers und damit die Nettofallhöhe h_F als auch der Durchfluss Q Entscheidungsvariablen sind und voneinander abhängen, kann keine einfache abschnittsweise Linearisierung angewendet werden. Daher muss

bei der Anwendung der linearen Optimierung einer der Terme (Q oder h_f) und der Wirkungsgrad η als konstant angenommen werden (REZNICEK & SIMONOVIC, 1989). Hierdurch ergeben sich Ungenauigkeiten, welche eine Anpassung der Methodik oder die Verwendung anderer Methoden erforderlich machen.

Ein Optimierungsverfahren, welches auch mit nicht-linearen Problemen umgehen kann, ist die dynamische Programmierung. Das Verfahren geht auf BELLMAN (1957) zurück. Das Grundprinzip des Ansatzes ist die Zerlegung des zu lösenden Problems in serielle Teilprobleme. Damit entsteht ein Netzwerk von Teilproblemen, in dem die Knoten mögliche Systemzustände und die Verbindungen mögliche Entscheidungen darstellen, welche wiederum zu neuen Systemzuständen (Knoten) führen. Die dynamische Programmierung findet den insgesamt optimalen Weg entlang des Netzwerkes aus Entscheidungen zu Teilproblemen, welcher damit zum optimalen Systemzustand führt. Die Lösung kann auf zwei verschiedenen Wegen erfolgen: rückschreitend, aber vorausschauend oder vorschreitend, aber zurückschauend. Die rückschreitende Lösung entspricht der Entscheidungsfindung, was zukünftig getan werden soll unter Berücksichtigung des gegenwärtigen Systemzustands, wohingegen die vorschreitende Lösung die Frage betrachtet, was man am besten getan hätte, um in die gegenwärtige Situation zu kommen (LOUCKS & E. VAN BEEK, 2005). Bezüglich der Talsperrensteuerung interessiert die rückschreitende Lösung, um über zukünftige Abgaben in Abhängigkeit der gegenwärtigen Füllstände und Zuflüsse entscheiden zu können. Optimalität ist dann erfüllt, wenn im letzten Systemzustand der rückschreitenden Lösung keine globale Verbesserung mehr erzielt werden kann.

Mathematisch müssen hierzu, analog zur linearen Programmierung, eine Zielfunktion sowie Randbedingungen definiert werden. Hierzu wird der Speicherraum der Talsperre in diskrete Speicherlamellen unterteilt und der Zufluss, Verluste durch Versickerung und Evaporation sowie die Abgabe über diskrete Zeitabschnitte gemittelt betrachtet. Somit werden alle Größen als Volumina dargestellt. Für jeden Zeitabschnitt kann so eine Massenerhaltungsgleichung aufgestellt werden, welche den Speicherfüllstand im nächsten Zeitabschnitt S_{t+1} in Abhängigkeit des Speicherfüllstand zum aktuellen Zeitschritt S_t , dem aktuellen Zufluss Q_t , der aktuellen Abgabe R_t sowie den aktuellen Verlusten L_t ausdrückt (Gleichung (3.11)). Die Verluste sind dabei wiederum abhängig vom Speicherfüllstand im aktuellen und nächsten Zeitschritt.

$$S_t + Q_t - R_t - L_t(S_t, S_{t+1}) = S_{t+1} \quad (3.11)$$

Die Zeitschrittweite kann beliebig gewählt werden. Für jeden möglichen diskreten Speicherfüllstand und jeden diskreten Zeitabschnitt, werden nun die physikalisch möglichen Abgaben und daraus resultierenden Speicherstände im nächsten Zeitschritt berechnet. Werden nun die diskreten Speicherfüllstände als Knoten und die möglichen Abgaben als Verbindungen zwischen Knoten verstanden, lässt sich ein Netzwerk des seriellen Entscheidungsproblems aufstellen.

Ein einfaches Beispiel eines Netzplanes der möglichen Abgabeentscheidungen (Pfeile) für einen Speicher mit drei diskreten Füllständen S und gegebenen Zuflüssen Q zeigt Abbildung 3-5. Die Sequenz des Zuflusses Q ist 2, 1, 3 und wiederholt sich.

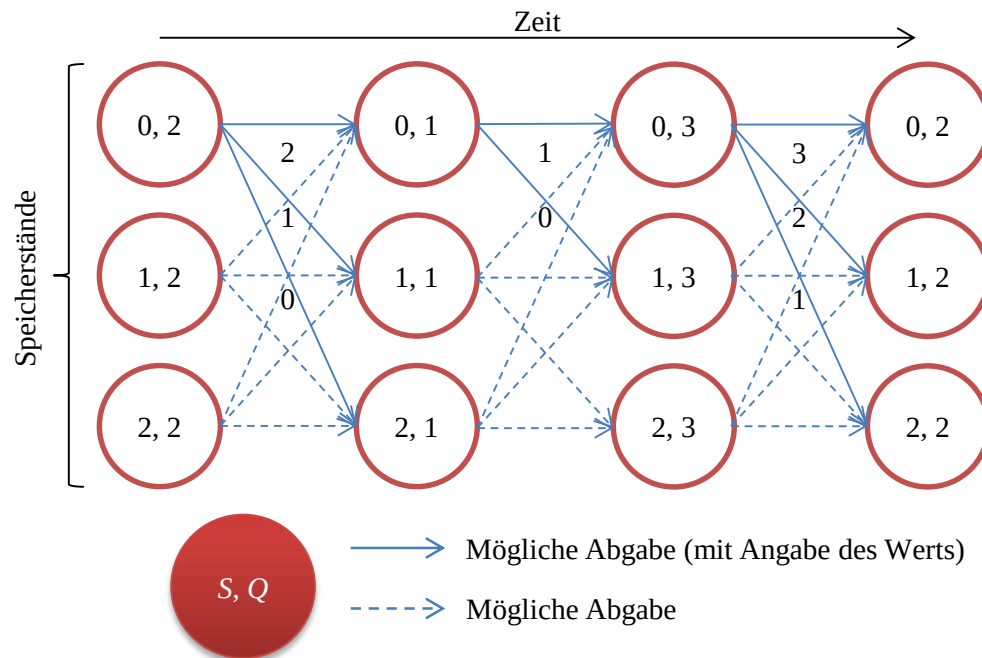


Abbildung 3-5 Netzplan möglicher Abgaben und resultierender Speicherstände S für gegebene Sequenz des Zuflusses Q

Hieraus ergibt sich, welche Abgabe zu welchem Zeitschritt bei welchem Speicherfüllstand getätigt werden kann. Um aus den so dargestellten möglichen Entscheidungen die optimale herauszufinden, ist eine Bewertung anhand von Zielfunktionen (Maximierung des Nutzens) bzw. Straffunktionen (Minimierung des Schadens) notwendig. Eine Bestimmung des Nutzens der Abgabe oder des Einhaltens eines Speicherfüllstands zur Freizeitnutzung oder als Hochwasserrückhalteraum ist nur indirekt möglich. Einfacher ist es, Zielvorgaben für die Abgabe und den Speicherfüllstand für verschiedene Aufgaben der betrachteten Talsperre zu definieren und eine Straffunktion zur Bewertung des Verfehlens dieser Ziele zu verwenden. Als Straffunktion benutzen LOUCKS & VAN BEEK (2005) die quadrierten Abweichungen vom Zielspeicherinhalt oder der Zielabgabe, welche für verschiedene Nutzungen gewichtet summiert werden. Diese Summe ist der Straffunktionswert, welcher zum Vergleich verschiedener Abgabeentscheidungen herangezogen wird.

Ziel ist nun die Identifikation des Entscheidungspfades entlang des Netzwerkes, welcher die kleinste Summe der Straffunktionswerte entlang des Pfades aufweist. Wird das Entscheidungsnetzwerk über eine hinreichend lange Zeitspanne aufgebaut, stellt sich ein konstanter Zustand des Talsperrenbetriebs ein und die getroffenen Entscheidungen wiederholen sich für jeweils verschiedene Systemzustände. Auf diese Weise kann eine Betriebsregel gefunden werden, die unter den gegebenen Randbedingungen optimal ist. Dieser stationäre Zustand stellt sich für konstante Randbedingungen unabhängig von der Anfangsbedingung der Berechnung ein. Dies wird Prinzip der Optimalität (BELLMAN, 1957) genannt und impliziert, dass in der Zukunft keine Änderung des erzielten Nutzens mehr stattfindet und die Lösung entlang des so gewählten Pfades also optimal für den untersuchten Zufluss ist. Die Berechnung dieses Entscheidungspfades erfolgt daher rückschreitend in der Annahme, dass dieser stationäre Systemzustand erreicht wurde. Für das einfache Beispiel aus Abbildung 3-5 soll angenommen

werden, das Ziel des Betriebs sei, den Speicherstand bei 1 zu halten und keine Abgabe gleich Null und größer 3 zu tätigen. Abbildung 3-6 zeigt die angesetzten Straffunktionswerte für mögliche Abgabeentscheidungen.

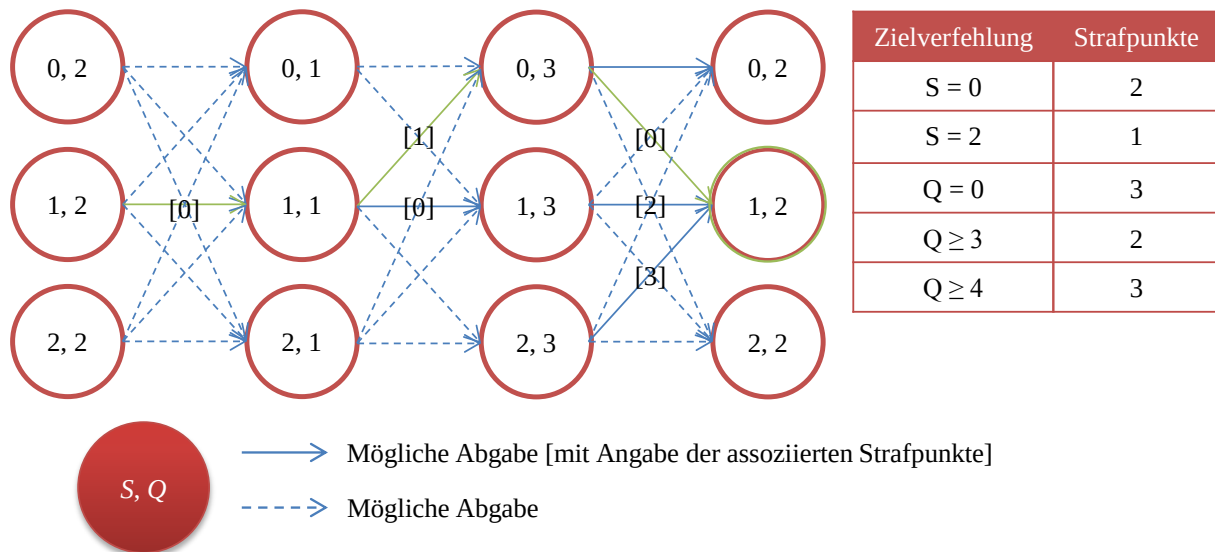


Abbildung 3-6 Straffunktionswerte für mögliche Abgabeentscheidungen

Die Straffunktionswerte können, entsprechend dem in Abbildung 3-6 gezeigten Vorgehen, für alle möglichen Abgabeentscheidungen berechnet werden. Daraus lässt sich der optimale Entscheidungspfad bestimmen. Zunächst wird ausgehend von jedem diskreten Speicherfüllstand der Pfad (die Abgabe) mit dem kleinsten Wert der Straffunktion gewählt. Im rückschreitend folgenden Knoten wird genauso verfahren, wobei die Werte der Straffunktion nun summiert werden. Diese fortschreitende Addition der Straffunktionswerte möglicher Entscheidungspfade wird mathematisch als Rekursionsgleichung umgesetzt. Beispielhaft ist in Abbildung 3-6 nur der Weg ausgehend vom Speicherstand 1 im letzten Zeitschritt dargestellt. Diese Schritte werden wiederholt bis sich die Werte der Straffunktion für verschiedene Zeitabschnitte und Speicherfüllstände nicht mehr ändern. So findet sich der Weg mit dem kleinsten summierten Wert der Straffunktionswerte und somit die für die betrachteten Zuflüsse und Speicherlamellen optimale Abgabe. Im hier skizzierten Beispiel dient die Abgabe als Kontrollvariable, von der der Speicherfüllstand (Regelgröße) abhängt und welche die entsprechenden Störgrößen (Zufluss, Evaporation (im Beispiel nicht berücksichtigt)) und Randbedingungen ausgleicht. Analog lässt sich das Problem auch für den Speicherfüllstand als Kontrollvariable formulieren.

Der Vorteil der dynamischen Programmierung ist neben der flexiblen Berücksichtigung auch nicht-linearer Phänomene, dass die damit gefundene Lösung direkt in einen Betriebsplan umgesetzt werden kann. Die Kontrollvariable (hier Abgabe) wird direkt in Abhängigkeit von Zufluss, Speicherfüllstand und Zeitabschnitt bestimmt. Hieraus lassen sich, ähnlich einem Lamellenplan, jahreszeitabhängige Speicherbereiche festlegen, für die eine bestimmte Abgabe gilt.

Ein schwerwiegender Nachteil der dynamischen Programmierung ist, dass mit jedem untersuchten diskreten Systemzustand die Dimensionalität der zu untersuchenden Zustandsvariablen erhöht wird. Damit steigt der Rechenaufwand bei der Untersuchung komplexer Systeme (mehrere Speicher, viele Zielsetzungen, Speicherzustände, Zeitabschnitte) immens an. Zur Überwindung dieses so genannten „Fluchs der Dimensionalität“ wurden verschiedene Verfahren entwickelt. Sie zielen darauf ab, das

Optimierungsproblem weiter zu unterteilen und so die in einem Rechenschritt zu behandelnde Komplexität zu reduzieren. Einen Überblick über Erweiterungen und Anwendungsbeispiele der deterministischen dynamischen Programmierung geben RANI & MOREIRA (2009) und NANDALAL & BOGÁRDI (2007).

Die dynamische Programmierung basiert (wie die lineare Programmierung) auf gegebenen Zeitreihen des Zuflusses. Hierbei wird davon ausgegangen, dass diese eine perfekte Prognose darstellen. Das Modell kennt also zu jedem Zeitpunkt die zukünftigen Zuflüsse und findet entsprechend die optimale Abgabe. Soll die Variabilität des Zuflusses berücksichtigt werden, können Methoden, welche die statistischen Eigenschaften des Zuflusses einbeziehen, verwendet werden. Die Möglichkeit, Speichersysteme bei gleichzeitiger expliziter Berücksichtigung der statistischen Eigenschaften des Zuflusses zu optimieren, bietet eine Erweiterung der dynamischen Programmierung zur stochastischen dynamischen Programmierung. Hierzu wird zusätzlich die Wahrscheinlichkeit des Zuflusses als Störgröße in der Berechnung berücksichtigt. Dies geschieht anhand der Übergangswahrscheinlichkeit, dass auf den Zufluss zum untersuchten Zeitschritt ein bestimmter Zufluss im zukünftigen Zeitschritt auftritt. Bei einer einfachen Einteilung des Zuflusses in drei Klassen (niedrig, mittel, hoch) berechnet sich die Übergangswahrscheinlichkeit als die Wahrscheinlichkeit, dass beispielsweise auf einen niedrigen Abfluss wieder ein niedriger, ein mittlerer oder ein hoher Abfluss folgt. Das Vorgehen ist in Abbildung 3-7 anhand eines Beispiels dargestellt. Treten in einer gemessenen Zeitreihe 10-mal niedrige Abflüsse auf und folgen darauf 5-mal wieder niedrige, 3-mal mittlere und 2-mal hohe, so beträgt die Übergangswahrscheinlichkeit von niedrig auf niedrig 50 %, niedrig auf mittel 30 % und niedrig auf hoch 20 %. Entsprechend wird für alle Kombinationen vorgegangen, sodass sich die Übergangswahrscheinlichkeiten in einer Matrix darstellen lassen.



Klassifizierte Zeitreihe des Zuflusses

t \ t+1				
	1	2	3	
1	5	3	2	n=10
2	2	1	3	n=6
3	3	2	0	n=5

Anzahl der Übergänge zwischen Zuflussklassen

t \ t+1				
	1	2	3	
1	0.50	0.30	0.20	$\Sigma=1$
2	0.33	0.17	0.50	$\Sigma=1$
3	0.60	0.40	0.00	$\Sigma=1$

Übergangswahrscheinlichkeit

Abbildung 3-7 Berechnung von Übergangswahrscheinlichkeiten

Die Übergangswahrscheinlichkeit fließt in die Rekursionsgleichung als Faktor des Zielfunktionswertes (oder Straffunktionswertes) ein. Entsprechend erfolgt eine Gewichtung von Entscheidungen zu Systemzuständen größerer Eintrittswahrscheinlichkeit. Die Optimierung erfolgt bezüglich des Erwartungswertes der Zielfunktion. Voraussetzungen zur Anwendung dieser Methode sind, dass die Zuflüsse autokorreliert sind, ihre Verteilung stationär ist und sich die Kriterien zur Bewertung des Betriebs mittels Straf- bzw. Zielfunktion über die Zeit nicht ändern. Die Optimierung mit Hilfe der stochastischen dynamischen Programmierung ist bei einer feinen Diskretisierung der untersuchten Speicher (große Zahl an Zustandsvariablen) und insbesondere für Mehrspeichersysteme sehr rechenaufwändig. Um den Rechenaufwand zu verringern, werden verschiedene Verfahren verwendet, welche darauf abzielen, die Dimensionalität des untersuchten Systems zu verringern. Diese ähneln den bereits bei der Beschreibung der deterministischen dynamischen Programmierung vorgestellten Verfahren. BRASS

(2006) und NANDALAL & BOGÁRDI (2007) geben einen Überblick über ihre Anwendung im Rahmen der stochastischen dynamischen Programmierung. Eine Berücksichtigung mehrerer Zielsetzungen erfolgt vielfach, indem die gewichtete Summe der einzelnen Zielfunktionswerte gebildet wird. Ergebnis der Optimierung des Talsperrenbetriebs mittels stochastisch dynamischer Programmierung ist eine Aussage zur bevorzugten Abgabe bei gegebenem Wasserstand, Zufluss und Zeitintervall (Jahreszeit, Monat, Woche je nach zeitlicher Diskretisierung). Es können also unmittelbar Betriebsregeln für das untersuchte System aufgestellt werden. Diese Betriebsregeln sollten wie bei allen Verfahren der automatischen Optimierung anhand einer Simulation des Talsperrenbetriebs überprüft werden (LOUCKS & E. VAN BEEK, 2005; BRASS, 2006).

Neben der Weiterentwicklung der Methode der dynamischen Programmierung wurden weitere Methoden zur Optimierung des Talsperrenbetriebs entwickelt, welche auf einer Simulation des Talsperrenbetriebs und einer Anpassung und Optimierung vorgegebener Betriebsregeln beruhen. Während bei der linearen Programmierung die Regeln für die Abgabe aus der Menge an optimalen Kombinationen von Speicherstand, Zufluss und Abgabe bestimmt werden müssen, und die dynamische Programmierung diese optimale Kombination berechnet, wird bei den auf Simulation basierenden Verfahren zunächst die Regelfunktion mathematisch vorgegeben. LOHR (2001) zeigt, wie gebräuchliche Betriebsregeln von Talsperren mathematisch als Funktion der Abgabe in Abhängigkeit von Speicherinhalt und Zeit beschrieben werden können, wobei diese Abgabefunktion gegebenenfalls abhängig von Systemzuständen und der Priorisierung von Aufgaben skaliert werden kann. Damit ist die detaillierte Simulation des Talsperrenbetriebs unter Berücksichtigung vielfältiger Aufgaben und Betriebszustände möglich. Hierzu existieren Simulationswerkzeuge, welche eine Abbildung auch von Systemen mit mehreren Speichern und komplexen Betriebsregeln ermöglichen (LOHR, 2001; KLIPSCH & HURST, 2007; SCHWANENBERG & BECKER, 2012). Durch die Vorgabe einer Regelfunktion wird der Lösungsraum des Optimierungsproblems eingeschränkt (CASTELLETTI ET AL., 2008). Eine exakte Bestimmung des globalen Optimums ist somit nicht möglich. Eine ähnliche Einschränkung ergibt sich aber beispielsweise bei der dynamischen Programmierung auch durch die Diskretisierung der Speicherfüllstände. Ist die Art des Betriebs und damit die mathematische Form der Abgabefunktion festgelegt, lassen sich die Parameter der Regelfunktion mittels heuristischer Optimierungsmethoden bestimmen. Hierzu werden wiederholt Simulationen des Talsperrenbetriebs für die gegebene Zeitreihe der Zuflüsse (und eventuell des Wasserbedarfs etc.) und für variierende Parameter der Regelfunktion durchgeführt und anhand von Zielfunktionswerten verglichen.

Zur zielgerichteten Variation der Regelparameter kommen vielfach evolutionäre Algorithmen zum Einsatz (OLIVEIRA & LOUCKS, 1997; LOHR, 2001; MUSCHALLA, 2006; DITTMANN ET AL., 2009). Die Bezeichnung evolutionär ergibt sich aus der Analogie zu Fortpflanzung mit Vererbung genetischer Eigenschaften und evolutionärer Auswahl. Dazu werden in einem ersten Schritt zufällig Parameter für alle zuvor definierten Regelfunktionen definiert. Hierbei ist darauf zu achten, dass nur realisierbare Lösungen generiert werden. Die gewählten Regelparameter werden als Sequenz einer genetischen Information verstanden. Aus der Simulation des Talsperrenbetriebs mit gegebenen Randbedingungen und diesem Parametersatz ergibt sich ein Wert für die damit erzielte Leistung, beispielsweise eine Kombination von abgegebenem maximalem Abfluss, Anzahl der Unterschreitungen der Mindestabgabe, erzeugte elektrische Energie, etc. Diese Evaluierung kann anhand von Zielfunktionen erfolgen. Eine Anzahl von im ersten Schritt rein zufällig erzeugten Parametersätzen wird in Analogie zur biologischen Fortpflanzung als Eltern verstanden. Nachkommen, also neue Regelparametersätze, werden nun durch Mutation (inkrementelle Änderung einzelner Parameter) und Rekombination (Übernahme

von Parametern des Elternpaares) gebildet. Die Anzahl der Nachkommen übersteigt dabei die der Eltern. Für jeden dieser Parametersätze erfolgt eine Simulation des Talsperrenbetriebs. Abhängig von der erzielten Leistung mit diesen Regelparametersätzen werden die Eltern für den nächsten Iterationsschritt ausgewählt. So findet eine evolutionäre Auswahl von Regelsätzen statt, die eine gute Performance zeigen. Die Iteration wird fortgeführt bis sich der Zielfunktionswert nur noch innerhalb vorgegebener Grenzen ändert.

Die Evaluierung des Talsperrenbetriebs anhand der Zielfunktion kann hierbei sehr detailliert erfolgen, da nach jedem Simulationslauf die vollständige Zeitreihe der Systemzustände und Abgaben bereitsteht. So kann beispielsweise die Energieerzeugung durch Wasserkraft direkt berechnet und die maximale erzeugte Energie innerhalb des Betrachtungszeitraumes für verschiedene Regelparameter verglichen werden. Ebenso lassen sich die Zielfunktionen definieren, anhand derer die Leistungsfähigkeit der Niedrigwasseraufhöhung bestimmt werden kann. Beispielsweise verwendet der Ruhrverband als Kenngröße für die Leistungsfähigkeit den „Betriebsfaktor“. Dieser bestimmt sich aus dem Quotienten von tatsächlich geleisteter Abgabe der Talsperren und der rechnerisch erforderlichen Abgabe zur Einhaltung der Grenzwerte an den unterstrom gelegenen Bezugspegeln. Der Kehrwert des „Betriebsfaktors“ wird „wasserwirtschaftlicher Wirkungsgrad“ genannt (MORGENSCHWEIS ET AL., 2006). Angestrebt wird ein wasserwirtschaftlicher Wirkungsgrad von 1, welcher einem in Bezug auf die Niedrigwasseraufhöhung optimalen Talsperrenbetrieb entspräche. Auf derartige Kennzahlen und weitergehende Methoden zur Bewertung der Leistungsfähigkeit wird im folgenden Kapitel 4 eingegangen.

Tabelle 3-1 zeigt die Vor- und Nachteile der verschiedenen Verfahren zur Herleitung von Betriebsregeln. Hierzu wurden die verschiedenen bisher genannten Kriterien verwendet. Während kein Verfahren alle Kriterien erfüllt, sind zwei Verfahren hervorzuheben: Erstens die stochastische dynamische Programmierung, die als einziges Verfahren die statistischen Eigenschaften des Zuflusses direkt berücksichtigen kann. Zweitens die heuristische Optimierung mittels Simulation, welche als einziges Verfahren eine direkte, detaillierte Evaluierung des Talsperrenbetriebs ermöglicht.

Tabelle 3-1 Vor- und Nachteile der Verfahren zur Herleitung von Betriebsregeln

Verfahren Kriterien				
	Folgescheitel- algorithmus	Lineare Programmierung	(*Stochastische) dynamische Programmierung	Heuristische Optimierung mittels Simulation
Einfach nachvollziehbar	+	o	-	+
Geringer Rechenaufwand	+	+	-	o
Bestehende Werkzeuge	+	+	o	+
Bemessung auf hydrologische Sicherheit	+	+	+	+
Betriebsregeln werden unmittelbar bestimmt	+	-	+	+
Globales Optimum wird erzielt	o	+	+	o
Abbildung komplexer Mehrspeichersysteme	-	+	o	+
Vielfältige Aufgaben	-	o	+	+
Behandlung auch nicht-linearer Probleme	-	-	+	+
Berücksichtigung der statistischen Eigenschaften des Zuflusses	-	-	+	-
Detaillierte Evaluierung des Talsperrenbetriebs	-	-	-	+

+ Kriterium wird erfüllt; o Kriterium wird zum Teil erfüllt; - Kriterium wird nicht erfüllt

Der Vorteil der detaillierten Evaluierung des Talsperrenbetriebs mittels heuristischer Verfahren ist oftmals ausschlaggebend für ihre Anwendung bei der Herleitung von Betriebsregeln für Talsperrensysteme mit mehreren Speichern und vielfältigen Nutzern. Die Verfahren der reinen Optimierung müssen mit Simulationen sinnvoll kombiniert bzw. ergänzt werden, um die Ergebnisse der Optimierung zu verifizieren. Während mit Hilfe der Optimierung Betriebsregelalternativen entwickelt werden, welche als Startpunkt für die Simulation dienen, ermöglicht die Simulation selbst, die Performance von alternativen Betriebsregeln besser zu vergleichen (LOUCKS & E. VAN BEEK, 2005). Dieses Zusammenspiel von Optimierung und Simulation ist bei den heuristischen Verfahren bereits implizit gegeben, da hier die Optimierung auf einer Simulation beruht. Diesen Vorteil stellt auch LABADIE (2004) in einer Literaturstudie zu verfügbaren Verfahren zur Optimierung des Betriebs von Mehrespeichersystemen heraus. Auch in dieser Arbeit soll die Bewertung der Leistungsfähigkeit von Talsperren auf Basis einer detaillierten Simulation des Talsperrenbetriebs erfolgen.

3.3.3 Echtzeitsteuerung

Im Unterschied zu festen Betriebsregeln, welche die Abgabe abhängig von Zeit und Systemzuständen festlegen, wird bei der Echtzeitsteuerung die Abgabe aus Daten zu aktuellem oder prognostiziertem Zufluss, Wasserbedarf, Speicherfüllstand etc. zu jedem Zeitpunkt neu berechnet. Im Fachgebiet der Kybernetik wird unterschieden zwischen Steuerung und Regelung. Während bei der Regelung eine Rückkopplung zwischen Ausgabewert und Stellgröße vorgenommen wird, erfolgt diese definitionsgemäß bei einer Steuerung nicht. In der Wasserwirtschaft wird jedoch, analog zum englischen Begriff *control*, oftmals allgemein von der Talsperrensteuerung oder den Betriebsregeln gesprochen, unabhängig davon, ob eine Rückkopplung, beispielsweise der Talsperrenabgabe mit dem Abfluss am Bezugspegel, vorgenommen wird (HEUSCH, 2011; RAUSCHENBACH & WERNSTEDT, 2006). Im Folgenden wird dieser Sprachgebrauch beibehalten. Es soll an dieser Stelle jedoch darauf hingewiesen werden, dass es sich bei dem hier als Echtzeitsteuerung bezeichneten Verfahren im Sinne der Kybernetik um eine Regelung handelt.

Voraussetzung zur Umsetzung einer Echtzeitsteuerung ist, dass die Zustandsgrößen des Speichersystems in Echtzeit für die Modellierung des Systems zur Verfügung stehen. Dann kann zu jedem Zeitpunkt, an dem eine Entscheidung über die Abgabe getroffen werden soll, eine Optimierung auf Basis der gemessenen und vorhergesagten Werte durchgeführt werden (online Optimierung). Der zeitliche Abstand der Zeitpunkte, an denen eine Entscheidung über die Abgabe getroffen wird, bildet als Steuerungszeitschritt die zeitliche Diskretisierung des Optimierungsmodells. Die Modellierung folgt dem Prinzip des rollenden Horizonts. Es werden drei Zeitfenster oder rollende Horizonte unterschieden: Prognosehorizont, Kontrollhorizont und Evaluierungshorizont. Der Berechnungsablauf nach dem Prinzip des rollenden Horizonts ist in Abbildung 3-8 dargestellt.

Der Prognosehorizont beschreibt den Zeitraum, für den eine Vorhersage des Zuflusses vorliegt oder dieser aus dem Verlauf der gemessenen Abflüsse auf Basis der statistischen Eigenschaften der gesamten beobachteten Zeitreihe extrapoliert werden kann. Zur Bestimmung der Abgabe im Hochwasserfall lassen sich oft meteorologische Vorhersagen verwenden. Diese Art der Prognose findet beispielsweise bei der Steuerung der Talsperren im Einzugsgebiet der Ruhr Anwendung (MORGENSCHWEIS, 2001). Für die Aufgabe der Wasserbereitstellung ist die Betrachtung langer Zeiträume notwendig. Hier können stochastische Prognosemodelle Zuflussrandbedingungen geben (PRIEN & THIELE, 1994; BÜTTNER, 2008). Diese stochastischen Prognosemodelle basieren auf Zeitreihenmodellen, wie sie in Kapitel 4.3.2 vorgestellt werden.

Der Kontrollhorizont ist der Zeitraum, für den eine Optimierung der Steuerung vorgenommen wird. Von den so bestimmten Steuerungsschritten wird jedoch nur die jeweils nächstliegende Entscheidung umgesetzt, bevor die Berechnung wiederholt wird. Der Evaluierungshorizont entspricht dem Zeitraum, der vom Modell zu jedem Steuerungszeitschritt simuliert wird und über den die Zielfunktion ausgewertet wird. Der Evaluierungshorizont kann länger als Kontroll- und Prognosehorizont gewählt werden, um Auswirkungen von Entscheidungen, welche über den Kontrollhorizont hinaus wirken, berücksichtigen zu können.

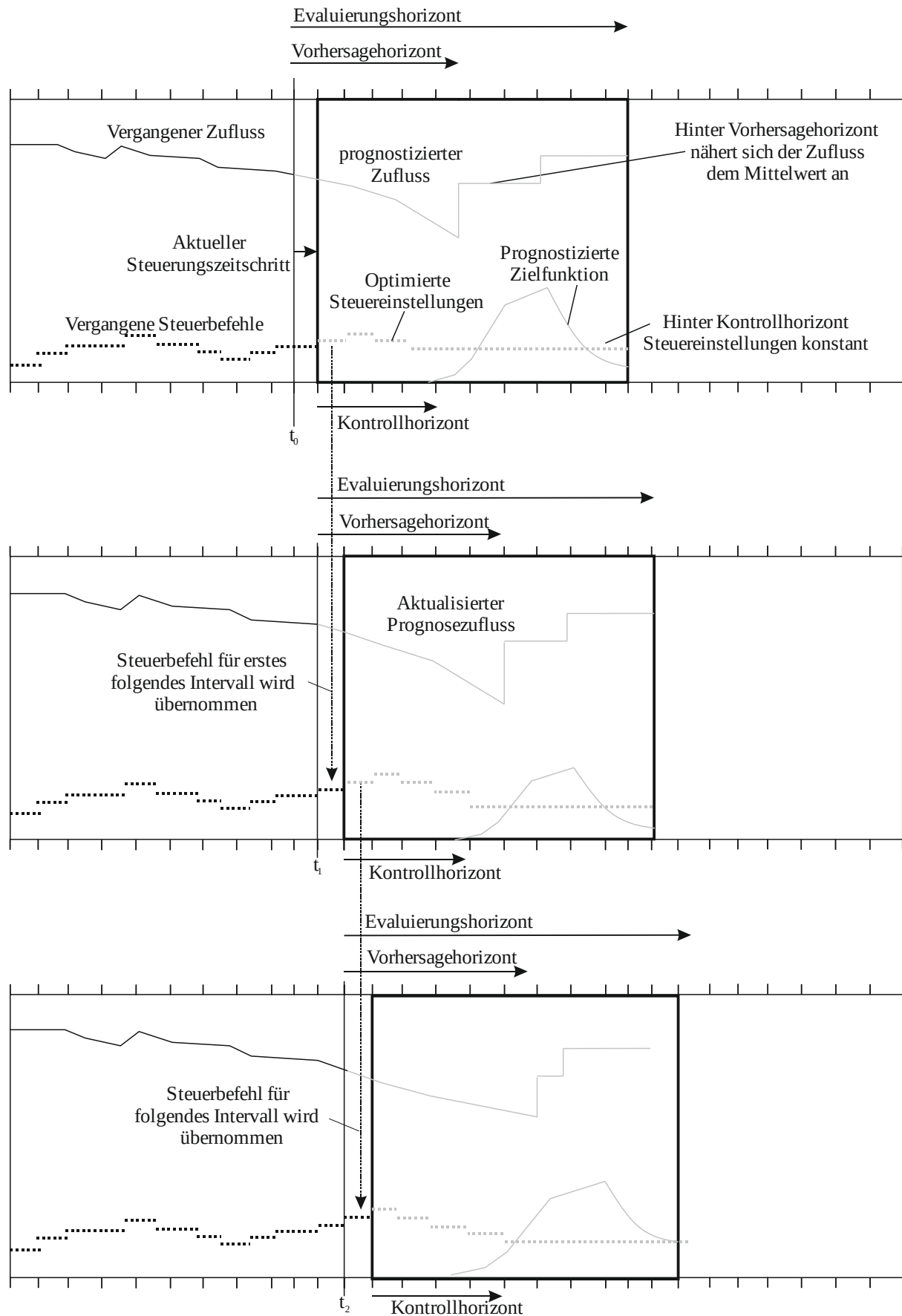


Abbildung 3-8 Berechnungsablauf der Echtzeitsteuerung (HEUSCH, 2011)

So wird zu jedem Steuerungszeitschritt eine Simulation des Verhaltens der Talsperre für den Evaluierungshorizont durchgeführt. Hierbei werden die Zuflüsse im Prognosehorizont durch die Vorhersage bestimmt und für den über den Prognosehorizont hinausgehenden Zeitraum des Evaluierungshorizontes angenommen. In dieser Simulation werden außerdem die Abgabeentscheidungen über den Kontrollhorizont verändert. Ein Optimierungsalgorithmus wertet dabei die Zielfunktion aus, beispielsweise die Einhaltung bestimmter Mindest- und Höchstwerte der Abgabe, und passt die Abgabeentscheidungen im Kontrollhorizont an. Die für den aktuellen Steuerungszeitschritt als optimal bestimmte Abgabe wird übernommen, woraufhin die Optimierung mit aktualisierten Prognosezuflüssen für den nächsten Steuerungszeitschritt wiederholt wird.

An die bei der Optimierung zur Anwendung kommenden Verfahren zur Abbildung des Zuflusses, der Simulation des Talsperrenbetriebs (Prozessmodell), bzw. der Optimierung der Steuerung, werden hohe Anforderungen an die Recheneffizienz gestellt. Die Rechenzeit darf nicht länger als der Steuerungszeitschritt sein, damit die mittels Optimierung gefundene Abgabeentscheidung auch rechtzeitig umgesetzt werden kann. Vielfach sind hierzu Vereinfachungen notwendig, um die benötigte Rechenzeit der Steuerentscheidung zu jedem Zeitschritt hinreichend kurz zu halten. Dadurch können Nachteile bezüglich des möglichen Detaillierungsgrades der modelltechnischen Beschreibung des Talsperrensystems entstehen. Der Vorteil ist dagegen die Möglichkeit, durch die Kopplung an aktuelle Messwerte und Vorhersagen des Zuflusses den wahrscheinlichen Verlauf der Zustandsgrößen durch Simulation zu bestimmen und derart eine, bezogen auf den aktuellen Systemzustand, optimale Steuerung herzuleiten.

So verwenden PRIEN & THIELE (1994) ein einfaches Modell der Echtzeitsteuerung ohne Online-Anbindung, um, basierend auf der stochastischen Prognose des Zuflusses in Abhängigkeit des aktuellen Speicherfüllstandes, die maximale Trinkwasserabgabe für eine gegebene hydrologische Sicherheit bei Einhaltung eines Mindestfüllstandes im Speicher zu bestimmen. Mit Hilfe des Modells lassen sich rechtzeitig Diskrepanzen zwischen Bedarf und voraussichtlichem Dargebot erkennen, wodurch man den Handlungsspielraum für vorausschauende Maßnahmen erweitern kann.

Ebenso können die Wassermengen bestimmt werden, die für sekundäre Ziele zur Verfügung stehen, wie die Dynamisierung der Abgabe für ökologische Belange, wenn eine hohe Zuverlässigkeit der Trinkwasserversorgung prognostiziert wird. Ein ähnlicher Ansatz kann auch zur vorsorglichen Maximierung des Hochwasserrückhalteriums verwendet werden (BÜTTNER, 2008). Hierbei wird iterativ bestimmt, wie weit der Füllstand in der Talsperre abgesenkt werden kann, ohne die geforderte Sicherheit der Wasserversorgung zu gefährden. Der Hochwasserrückhalteraum kann dann dynamisch vergrößert werden. Die genannten Beispiele verwenden eine stochastische Prognose des Zuflusses, um die langfristigen Ziele der Wasserversorgung zu berücksichtigen. Für auf kürzeren Zeitskalen ablaufende Prozesse wie Hochwasser und Erzeugung elektrischer Energie lassen sich Wettervorhersagen für die Prognose des Zuflusses einsetzen. So verwenden HERNÁNDEZ ET AL. (2011) die Vorhersage des Wetterdienstes MeteoSwiss, um den Betrieb der Wasserkraftwerke im Oberlauf der Rhone bezüglich des Hochwasserschutzes zu optimieren. Hierzu werden die vorhergesagten Regen- und Temperaturdaten als Randbedingungen eines hydrologischen Modells angesetzt, welches eine Prognose der Talsperrenzuflüsse liefert. Als Zielgröße für die Optimierung des Betriebs der an die Talsperren angeschlossenen Wasserkraftwerke werden die Hochwasserschäden im Unterlauf dieser Talsperren verwendet. Daraus ergibt sich, dass eine Echtzeitsteuerung auf Basis der Wettervorhersagen erst einsetzt, wenn mit Hochwasserschäden zu rechnen ist. Die Schäden werden dazu zwischen vorberechneten Schäden eines als maximal angenommenem Extremhochwassers und eines Bemessungshochwassers,

welches gerade noch schadensfrei abgeführt werden kann, interpoliert. Den Hochwasserschäden werden die potentiellen Verhinderungskosten gegenübergestellt, die sich aus den Einbußen der Wasserkraftgewinnung durch die angepasste Steuerung ergeben. Ein optimaler Betrieb ergibt sich für eine maximale Begrenzung der Hochwasserschäden, bei minimalen Verhinderungskosten. Die verwendeten Optimierungsalgorithmen und die Einbindung der Vorhersagen in die Modellkette sind in HERNÁNDEZ (2011) detailliert beschrieben.

Diese bezogen auf den aktuellen Zustand optimale Steuerung steht im Gegensatz zur optimalen Steuerung in Bezug auf die Gesamtheit der möglichen Zuflussbedingungen, wie sie von den zuvor vorgestellten Verfahren aufgestellt wird (offline Optimierung). Durch die Möglichkeit, eine Prädiktion der Randbedingungen zu berücksichtigen, lassen sich Versagensereignisse abmildern. Dies führt jedoch theoretisch, das heißt, wenn auch die nicht-prädiktive Optimierung die Grundgesamtheit der möglichen Randbedingungen berücksichtigt, zu einer Häufung von weniger schweren Versagensereignissen als bei festen Betriebsregeln, welche beispielsweise anhand einer stochastischen dynamischen Programmierung gewonnen wurden. Unter der Annahme, dass die Grundgesamtheit der Zuflussbedingungen bei der Herleitung fester Betriebsregeln berücksichtigt werden kann, macht eine modellprädiktive Regelung also nur dann Sinn, wenn große Versagensereignisse einen überproportional größeren Schaden verursachen als kleine Versagensereignisse (DYCK, 1980). Bei den meisten Aufgaben einer Talsperre ist diese Voraussetzung gegeben. Beispielsweise richten viele kleine Hochwasser geringeren Schaden an als ein großes Hochwasserereignis oder lassen sich kurze Engpässe der Wasserversorgung einfacher überbrücken als langanhaltende.

Auf die Verwendung der Echtzeitsteuerung zur Anpassung des Talsperrenbetriebs an veränderliche klimatische Randbedingungen wird in Kapitel 6 weiter eingegangen.

3.4 Zusammenfassung

In erster Näherung kann die zur Erfüllung wasserwirtschaftlicher Zielsetzungen notwendige Speichergröße deterministisch aus gemessenen Zuflüssen bestimmt werden. Hierzu zählen beispielsweise die Bereitstellung einer bestimmten Wassermenge unter Berücksichtigung einer definierten hydrologischen Sicherheit und der Rückhalt von Hochwasserabflüssen bestimmter Eintrittswahrscheinlichkeit. Die Aussagegenauigkeit bezüglich der hydrologischen Sicherheit der Wasserbereitstellung und der Eintrittswahrscheinlichkeit des Bemessungshochwassers ist dabei durch die Länge der für die Berechnung verwendeten Zeitreihe der gemessenen Abflüsse beschränkt. Eine höhere Aussagegenauigkeit erlauben statistische Verfahren zur Bestimmung der Speichergröße. Hierbei wird für die Wasserbereitstellung der funktionale Zusammenhang zwischen den Eigenschaften des Zuflusses und der Speichergröße sowie dem Ertrag und der hydrologischen Sicherheit hergestellt. Damit ist eine direkte Berücksichtigung der Auswirkungen veränderter klimatischer Randbedingungen, wie sie sich in den statistischen Eigenschaften des Zuflusses manifestieren, möglich. Dies ist ein großer Vorteil dieses einfachen Verfahrens zur Bewertung der Folgen des Klimawandels auf Talsperren. Die Einschränkung, dass eine Bewertung nur anhand der Zuverlässigkeit einer konstanten Regelabgabe aus einem Einzelspeicher möglich ist, erlaubt jedoch keine Anwendung auf Mehrspeichersysteme oder die Berücksichtigung komplexerer Betriebsregeln.

Eine solche detaillierte Beschreibung erlauben die vorgestellten Verfahren zur Herleitung von Betriebsregeln. Insbesondere die auf Simulation beruhenden Methoden können auch den Betrieb komplexer Systeme sehr genau abbilden. Mit den vorgestellten Optimierungsverfahren ist jedoch keine

direkte Berücksichtigung der klimatischen Bedingungen möglich. Dies ist ein Nachteil gegenüber den in Kapitel 3.2.2 vorgestellten statistischen Verfahren zur Bestimmung der notwendigen Speichergröße.

Um die Auswirkungen veränderter klimatischer Randbedingungen auf den Betrieb bestehender Anlagen bewerten zu können, muss das verwendete Verfahren die Möglichkeit sowohl zur detaillierten Abbildung auch komplexer Speichersysteme und Betriebsregeln als auch zur Berücksichtigung der klimatischen Bedingungen bieten. Die detaillierte Beschreibung des Betriebs auch komplexer Talsperrensysteme leisten, wie aufgezeigt wurde, Simulationsverfahren am besten. Eine umfassende Bewertung der Leistungsfähigkeit von Talsperren, auch für veränderliche klimatische Randbedingungen, erfordert aber die Abbildung der statistischen Eigenschaften des Zuflusses. Wie die Simulationsverfahren erweitert werden können, um auch die statistischen Eigenschaften des Zuflusses zu berücksichtigen, soll im Folgenden dargestellt werden. Zunächst wird der Fokus auf die Bewertung der Leistungsfähigkeit gelegt, wie sie mit der vorgestellten detaillierten Beschreibung des Talsperrenbetriebs möglich wird.

4 Bewertung der Leistungsfähigkeit von Talsperren

4.1 Einleitung

Als Bemessungswert für die Dimensionierung von Talsperren wird die hydrologische Sicherheit P_H verwendet. Bezogen auf die Wasserbereitstellung aus einer Talsperre oder einem Talsperrensystem gibt sie an, wie häufig damit zu rechnen ist, dass der Ertrag nicht erbracht werden kann. Bezogen auf den Hochwasserschutz zeigt der Bemessungswert analog an, wie häufig mit einem Hochwasser zu rechnen ist, welches nicht zurückgehalten werden kann. Eine solche Bemessung auf die Versagenswahrscheinlichkeit gibt, wie gezeigt wurde, den Rahmen vor, innerhalb dessen der Betrieb optimiert werden kann. Neben der grundlegenden Bewertung anhand der hydrologischen Sicherheit oder Versagenswahrscheinlichkeit, ist zur Optimierung der Betriebsregeln eine effiziente, automatische Bewertung verschiedener Regeln notwendig. Hierzu wurden Zielfunktionen definiert, welche die Abweichung von vorgegebenen Zielwerten bestrafen und verschiedene Betriebsregeln anhand ihrer akkumulierten und für verschiedene Nutzungen gewichteten Strafwerte vergleichen. Damit ist ein relativer Vergleich unterschiedlicher Betriebsweisen zum einen bezüglich der Zielerfüllung im Normalbetrieb (Nicht-Versagen) und zum anderen bezüglich der Versagenswahrscheinlichkeit möglich. Die Konsequenzen eines Versagens werden jedoch nicht betrachtet. Um die Leistungsfähigkeit von Talsperren für verschiedene und sich verändernde klimatische Randbedingungen zu bewerten, sind jedoch gerade die Konsequenzen und die Schwere eines Versagens, sowohl der Wasserbereitstellung als auch des Hochwasserschutzes, von Bedeutung. Die Bewertung der Konsequenzen eines Versagens erlauben risikobasierte Ansätze wie sie im Folgenden vorgestellt werden.

Um die Konsequenzen eines Versagens probabilistisch abbilden zu können, ist eine genaue Kenntnis der Wahrscheinlichkeit eines Versagensereignisses notwendig. Zunächst sollen daher die bisher vorgestellten Verfahren bezüglich ihrer Aussagekraft zur Bestimmung der Versagenswahrscheinlichkeit kurz diskutiert werden.

Mit Ausnahme der stochastischen Erweiterung der dynamischen Programmierung ist den vorgestellten Verfahren zur Herleitung von Betriebsregeln gemein, dass sie die Analyse des jeweiligen Talsperrensystems basierend auf historisch gemessenen Zuflussdaten durchführen. Für ein solches deterministisches Verfahren spricht, dass das zu untersuchende System durch die historischen Daten sehr detailliert abgebildet werden kann (KARAMOUZ & HOUCK, 1987). PHILBRICK & KITANIDIS (1999) zeigen jedoch auf, dass die deterministische Herleitung von Betriebsregeln vielfach zu nicht optimalen Lösungen führt, da Ereignisse sehr geringer Eintrittswahrscheinlichkeit nicht berücksichtigt werden.

Die probabilistische Bewertung von Talsperren ermöglicht die genauere Untersuchung der Performance im Grenzbereich auch für Extremereignisse, wie lang andauernde Trockenperioden oder Hochwasser mit geringer Eintrittswahrscheinlichkeit. Hierzu werden basierend auf der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zuflüsse zur Talsperre Aussagen zur Speicherwirkung getroffen. Probabilistische Bemessungsverfahren erlauben damit einen Genauigkeitsgewinn bei der Bewertung der Leistungsfähigkeit von Talsperren und machen den methodischen und wissenschaftlichen Fortschritt in diesem Bereich deutlich (VOGEL & STEDINGER, 1988). KLEMEŠ (1991) zitiert den Ingenieur, der 1915 die Talsperren zur Erzeugung elektrischer Energie am Winnipeg Fluss plante, mit der Aussage, dass die Bemessung auf Basis der zu dem Zeitpunkt verfügbaren 7-jährigen Messreihe „eine weitgehend

vollständige Regulierung“ („*fairly complete regulation*“) erziele. Eine solche Aussage ist heute wissenschaftlich nicht mehr haltbar, auch wenn die deterministisch geplanten Anlagen eine gute Leistungsfähigkeit zeigen und vielfach noch in Betrieb sind. Vielmehr hat sich als gute Praxis durchgesetzt, jede Aussage zur Leistungsfähigkeit eines Systems, dessen Randbedingungen Schwankungen unterworfen sind, mit statistischen Werten zu untermauern. Hierzu werden probabilistische Ansätze benötigt, wie sie seit Beginn des 19. Jahrhunderts entwickelt wurden und zum Teil in Kapitel 3 vorgestellt werden.

Es kann dabei unterschieden werden zwischen Verfahren, welche die statistischen Eigenschaften des Zuflusses explizit berücksichtigen (vergleiche Kapitel 3.2.2), und solchen, die die statistischen Eigenschaften implizit abbilden. Hierzu werden synthetische Zuflussganglinien mit Hilfe stochastischer Verfahren erzeugt und als Randbedingung bei der Simulation des Talsperrenbetriebs angesetzt. Solche impliziten Verfahren berücksichtigen die Eigenschaften des Systems anhand der statistischen Beschreibung der Randbedingungen und berechnen anschließend mittels deterministischer Methoden Ergebnisse der Systemperformance, die wiederum statistisch ausgewertet werden. Damit ist eine sehr detaillierte Abbildung des Betriebes auch komplexer Speichersysteme bei gleichzeitig hoher Aussagegenauigkeit bezogen auf die Wahrscheinlichkeit von Versagensereignissen möglich.

4.2 Abflussretention und Hochwasser – Hochwasserrisiko

4.2.1 Konzept

Wie in Kapitel 2.3.2 erläutert, ist ein einfacher Ansatz zur Dimensionierung des Hochwasserrückhalterumes die Verwendung eines Bemessungshochwassers. Das Volumen des Hochwasserrückhalterumes wird dabei so bestimmt, dass ein Bemessungshochwasser auf den vom unterstrom der Talsperre gelegenen Flussabschnitt schadensfrei abführbaren Abfluss gedrosselt werden kann. Mit dem Bemessungshochwasserzufluss $Q_{Zufluss, i}$ zum Zeitpunkt i und dem schadensfrei abführbaren Abfluss $Q_{Abgabe, i}$ ergibt sich der gewöhnliche Hochwasserrückhalteraum I_{GHR} durch zeitliche Integration von Gleichung (4.1).

$$\int Q_{Zufluss, i} \cdot dt - \int Q_{Abgabe, i} \cdot dt \leq I_{GHR} \quad (4.1)$$

Diese Beschränkung auf ein Bemessungsereignis stellt jedoch eine starke Vereinfachung der realen Abflusssituation dar und erfordert unter Umständen die Ausweisung eines großen Rückhaltevolumens, um mit der Bemessung auf der „sicheren Seite“ zu liegen. Um die Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit der Talsperre bei der Wasserbereitstellung nicht zu stark einzuschränken, wird häufig eine jahreszeitlich variable Festlegung des Hochwasserrückhalterumes vorgenommen. Hierzu werden für verschiedene Jahreszeiten angepasste Bemessungshochwasser verwendet. Fallen beispielsweise typische Hochwasser im Frühjahr größer als im Herbst aus, so kann der Hochwasserrückhalteraum während der Sommermonate kleiner gewählt werden. Durch dieses Vorgehen wird die Eintrittswahrscheinlichkeit von Hochwasserereignissen bezogen auf die Jahreszeit berücksichtigt.

Weitergehende probabilistische Ansätze berücksichtigen auch die gemeinsame Eintrittswahrscheinlichkeit von Hochwasserspitzenabfluss und -volumen sowie die Konsequenzen von Hochwassern, welche nicht ausreichend zurückgehalten werden können. Die Bemessung des Hochwasserrückhalterumes erfolgt dann auf ein definiertes akzeptiertes Hochwasserrisiko. Hierzu sind die Konsequenzen

verschiedener Hochwasser unterschiedlicher Eintrittswahrscheinlichkeit zu bestimmen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Hochwassers wird häufig anhand des mittleren Wiederkehrintervalls beschrieben. Dies ist der Kehrwert der Eintrittswahrscheinlichkeit. Ein Hochwasser mit einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren oder größer („Jahrhunderthochwasser“) kann danach in jedem betrachteten Jahr mit einer Wahrscheinlichkeit von $1/100$ oder $0,01$ eintreten. Betrachtet man Hochwasserereignisse als statistisch voneinander unabhängig, so bleibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Hochwasser dieses Ausmaßes im nächsten Jahr wieder auftritt, ebenfalls $0,01$. Die Konsequenzen eines Hochwassers lassen sich mit Hilfe von numerischen Modellen simulieren. Hierzu wird zunächst ein hydrodynamisches Modell verwendet, um den Hochwasserwellenablauf und die hierbei auf den Überschwemmungsflächen auftretenden Wassertiefen und Fließgeschwindigkeiten zu bestimmen. Ein Schadensmodell kann anschließend über empirische Beziehungen von aufgetretenem Wasserstand und resultierender Schädigung für unterschiedliche Bebauungen und Landnutzungen die zu erwartende Zerstörung von Vermögenswerten quantifizieren. Das Hochwasserrisiko berechnet sich dann als Produkt von Eintrittswahrscheinlichkeit des Hochwassers und dessen Konsequenzen. Das Konzept wird allgemein auf Naturgefahren angewandt. Man spricht dann vom Risiko als Produkt der auf das System wirkenden Gefährdung (*hazard*) und der Verwundbarkeit des Systems (*vulnerability*) (UNDHA, 1992). Durch Integration über alle Hochwasserereignisse unterschiedlicher Eintrittswahrscheinlichkeit lässt sich dann das Hochwasserrisiko als zu erwartender jährlicher Hochwasserschaden eines Einzugsgebietes bestimmen.

Der Berechnungsablauf ist in Abbildung 4-1 dargestellt. Aus einer extremwertstatistischen Analyse des gemessenen oder simulierten Hochwasserabflusses ist die Eintrittswahrscheinlichkeit bekannt (Graph I). Ein hydraulisches Modell des untersuchten Gebietes liefert für diskrete Hochwasserereignisse Informationen zur Schwere der Überflutung (Graph II). Mit diesen Informationen zur Schwere der Überflutung lassen sich die Hochwasserschäden modellieren (Graph III) und die Verknüpfung von Eintrittswahrscheinlichkeit eines Hochwassers und resultierendem Schaden ziehen (Graph IV). Das Hochwasserrisiko des betrachteten Gebietes entspricht in dieser Darstellung der grauen Fläche unter dem Graphen unten rechts. Dies ist das Integral über das Produkt von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schaden über alle Hochwasserereignisse. In der praktischen Analyse des Hochwasserrisikos werden die gezeigten Beziehungen für diskrete Punkte berechnet und das Integral entsprechend numerisch approximiert.

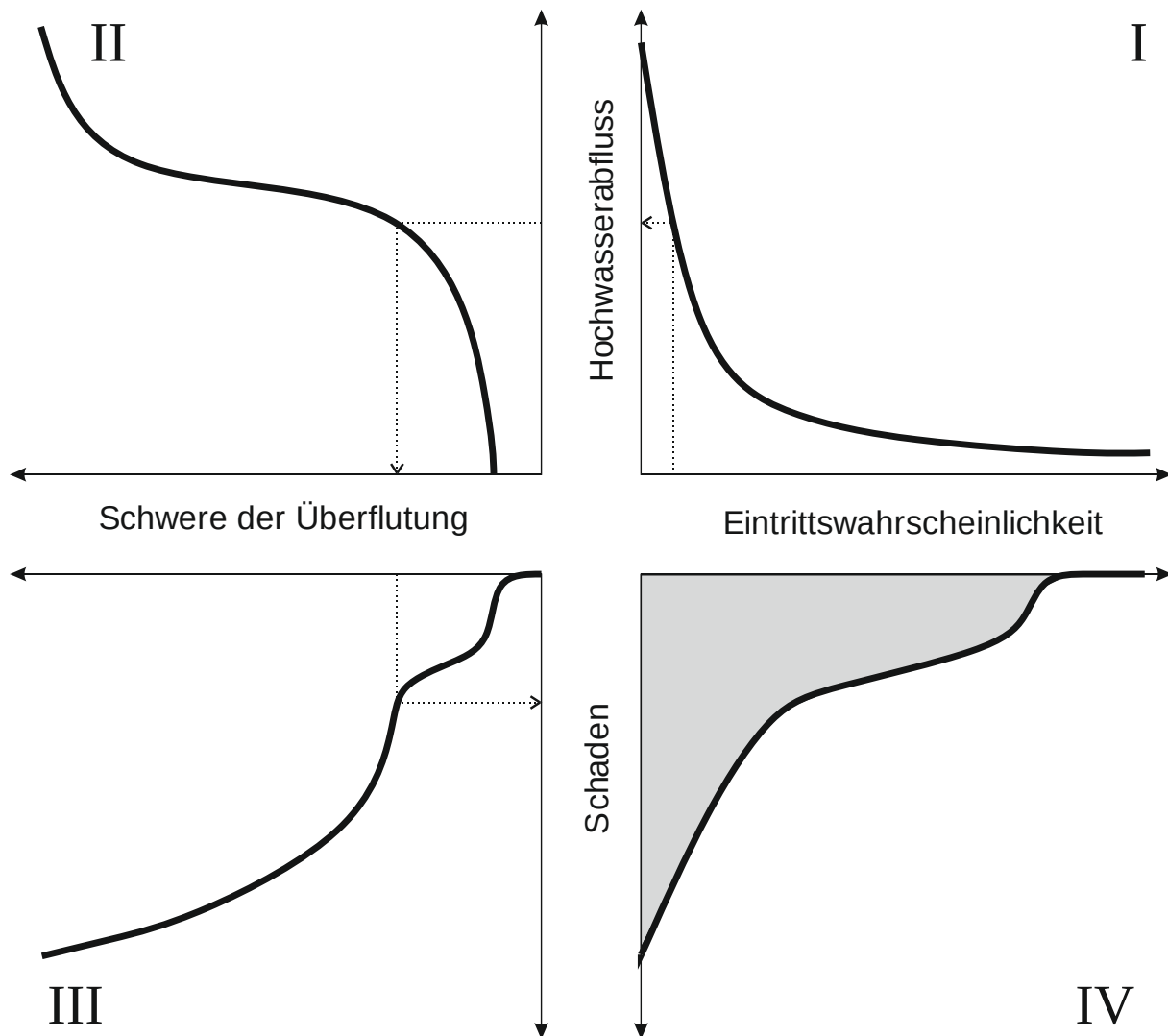


Abbildung 4-1 Zusammenhang von Eintrittswahrscheinlichkeit, Hochwasserereignis, Schaden und resultierendem Hochwasserrisiko (nach: LOUCKS & E. VAN BEEK, 2005)

Die dargestellten Kurven verdeutlichen den typischen Verlauf der Beziehung von Hochwasserhäufigkeit und Hochwasserschäden in einem von Talsperren geschützten Gebiet. Hochwasser hoher Eintrittswahrscheinlichkeit können vom Hochwasserrückhalteraum der Talsperre aufgenommen werden und verursachen somit keine Schäden. Dagegen steigen die Schwere der Überschwemmung und damit auch der zu erwartende Schaden für Hochwasser geringer Eintrittswahrscheinlichkeit, welche nicht mehr vollständig von der Talsperre zurückgehalten werden können, stark an. Durch eine Vergrößerung oder einen optimierten Betrieb des Hochwasserrückhalterumes der Talsperre verändert sich die Beziehung von Hochwasserabfluss und Eintrittswahrscheinlichkeit (siehe Abbildung 4-2). Auch größere Hochwasser werden nun zurückgehalten und entsprechend verringert sich das Hochwasserrisiko (graue Fläche im Graphen unten rechts). Die durchgezogene Linie stellt die Situation mit verbesserter Hochwasserschutzwirkung und die gestrichelte Linie die ursprüngliche Situation dar. Die Fläche zwischen den beiden Linien entspricht der Reduktion des Risikos bzw. der Verringerung der zu erwartenden mittleren jährlichen Hochwasserschäden.

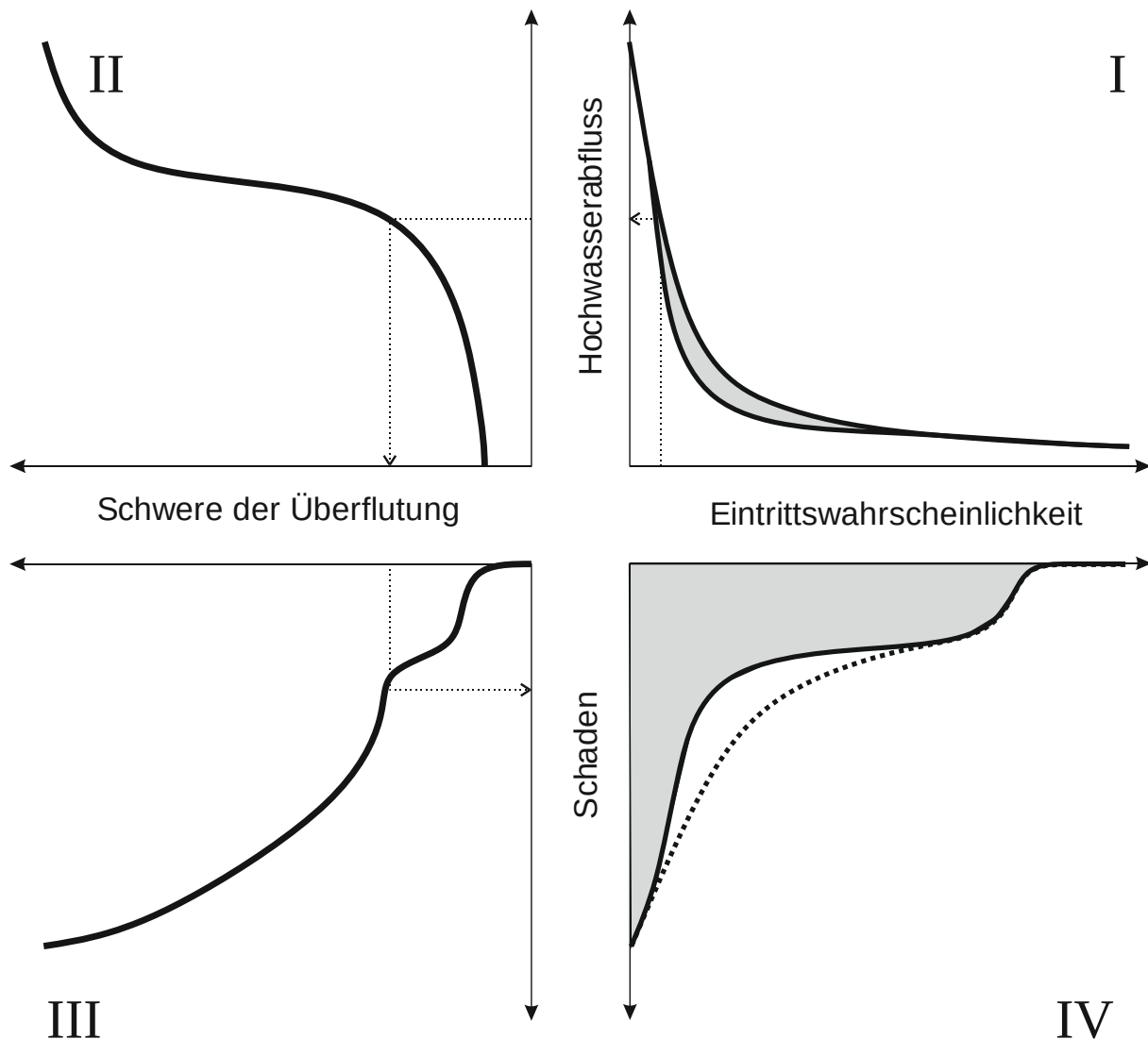


Abbildung 4-2 Änderung des Hochwasserrisikos durch Talsperrenbetrieb

Mit Hilfe des beschriebenen Verfahrens der probabilistischen Bestimmung des Hochwasserrisikos als mittlerer jährlich zu erwartender Hochwasserschaden lässt sich die Leistungsfähigkeit einer Talsperre bezüglich des Hochwasserschutzes direkt bewerten. Durch Variation der zur Bewertung angesetzten Hochwasserzuflüsse zur Talsperre lassen sich zudem unterschiedliche klimatische Randbedingungen abbilden. Die Modellkette zur Berechnung des Hochwasserrisikos wird im Folgenden beschrieben.

4.2.2 Modellkette

Randbedingungen und Eintrittswahrscheinlichkeit von Versagensereignissen

Als Randbedingungen für die Hochwasserrisiko-Berechnung sind Abflussganglinien von definierter Eintrittswahrscheinlichkeit in hoher zeitlicher Auflösung notwendig. Da Hochwasserabflüsse zeitlich stark schwanken können, benötigt man eine mindestens stündliche Auflösung. Abflussganglinien werden zum einen am Zufluss der Talsperren als auch für weitere Zuflüsse in den unterstrom der Talsperren gelegenen Gewässerabschnitten gebraucht, um den Hochwasserwellenablauf und die resultierenden Überflutungsflächen im unterstrom der Talsperre gelegenen Einzugsgebiet berechnen zu können. Es können drei Verfahren unterschieden werden, welche in der Lage sind, Zuflusszeitreihen in der

geforderten räumlichen und zeitlichen Auflösung für verschiedene Eintrittswahrscheinlichkeiten zu liefern (KLEIN, 2009):

1. Skalierung der gemessenen Ganglinien eines historischen Hochwasserereignisses, so dass der maximale Abfluss mit dem aus der Extremwertstatistik extrapolierten Wert für das gesuchte statistische Wiederkehrintervall übereinstimmt.
2. Kopplung von stochastischem Niederschlagsgenerator und deterministischem hydrologischem Modell.
3. Generierung synthetischer Abflussganglinien mittels Hochwassermerkmal-Simulation.

Während zur Skalierung von Ganglinien eine Extremwertstatistik der Abflussspitzen benötigt wird, kann diese bei Verwendung stochastischer Generierungsverfahren (2. und 3.) dem Vergleich der generierten Abflussspitzen dienen. Die Extremwertstatistik beschreibt die Randbereiche der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Abflüsse, wobei in Bezug auf Hochwasser nur die maximalen Abflüsse von Interesse sind. Es kann zwischen jährlichen und partiellen Serien als Grundlage für die Extremwertstatistik unterschieden werden (MANIAK, 2010). Für die Auswertung der Hochwasserstatistik in Deutschland gibt das DVWK-Merkblatt 251 Empfehlungen (DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU, 1999). Eine einfache Skalierung von Abflussganglinien anhand der Extremwertstatistik eignet sich nicht für die Bewertung des Hochwasserrisikos unterstrom von Talsperren, da hierbei die Variabilität des Abflussvolumens nur unzureichend erfasst werden kann. Vom Abflussvolumen eines Hochwasserereignisses hängt jedoch die Schutzwirkung einer Talsperre maßgeblich ab, da es bestimmt, ob das Hochwasser zurückgehalten werden kann oder Spitzenabflüsse unterstrom weitergegeben werden.

Die Kopplung eines stochastischen Niederschlagsgenerators mit einem deterministischen Niederschlags-Abfluss-Modell stellt eine gute Möglichkeit zur Generierung von Randbedingungen für die Hochwasserrisikoberechnung dar und konnte in Studien hierzu erfolgreich angewendet werden (SCHUMANN, 2009; KLEIN, 2009; SCHÜTTRUPF ET AL., 2009). Ihre Anwendung erfordert jedoch eine umfangreiche Modellkette, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht zur Verfügung stand und deshalb nicht weiter verfolgt wird.

Die Hochwassermerkmal-Simulation basiert auf der Beschreibung von Hochwasserwellen anhand einer Funktion mit wenigen Parametern, welche als Hochwassermerkmale bezeichnet werden. Indem die Verteilungsfunktion (siehe Glossar) der Hochwasserwellenparameter bestimmt wird und neue Parameter durch Ziehen einer Zufallszahl aus dieser Verteilung bestimmt werden, lassen sich neue Hochwasserwellen generieren. Je nach Verfahren und angesetzter Hochwasserwellenfunktion werden unterschiedliche Parameter verwendet. So nutzt DYCK (1980) eine Gamma-Verteilungsfunktion zur mathematischen Beschreibung der Hochwasserwelle mit den Parametern Scheitelabfluss, Formbeiwert, Anstiegszeit und Basisabfluss. Auf Grundlage empirischer Untersuchungen zur Form des abfallenden Astes der Hochwasserwelle in unterschiedlichen Einzugsgebieten erarbeiten LOHR & LEICHTFUß (1999) eine hyperbolische Funktion. Sie verwenden dafür die Parameter Scheitelabfluss, Anlaufzeit, Formbeiwert des ansteigenden Astes und Formbeiwert des absteigenden Astes. Diese hyperbolische Funktion kann um den zusätzlichen Parameter der Scheiteldauer erweitert werden (BENDER & JENSEN, 2012). Abbildung 4-3 zeigt den Einfluss verschiedener Formbeiwerte auf die Form der generierten Ganglinie.

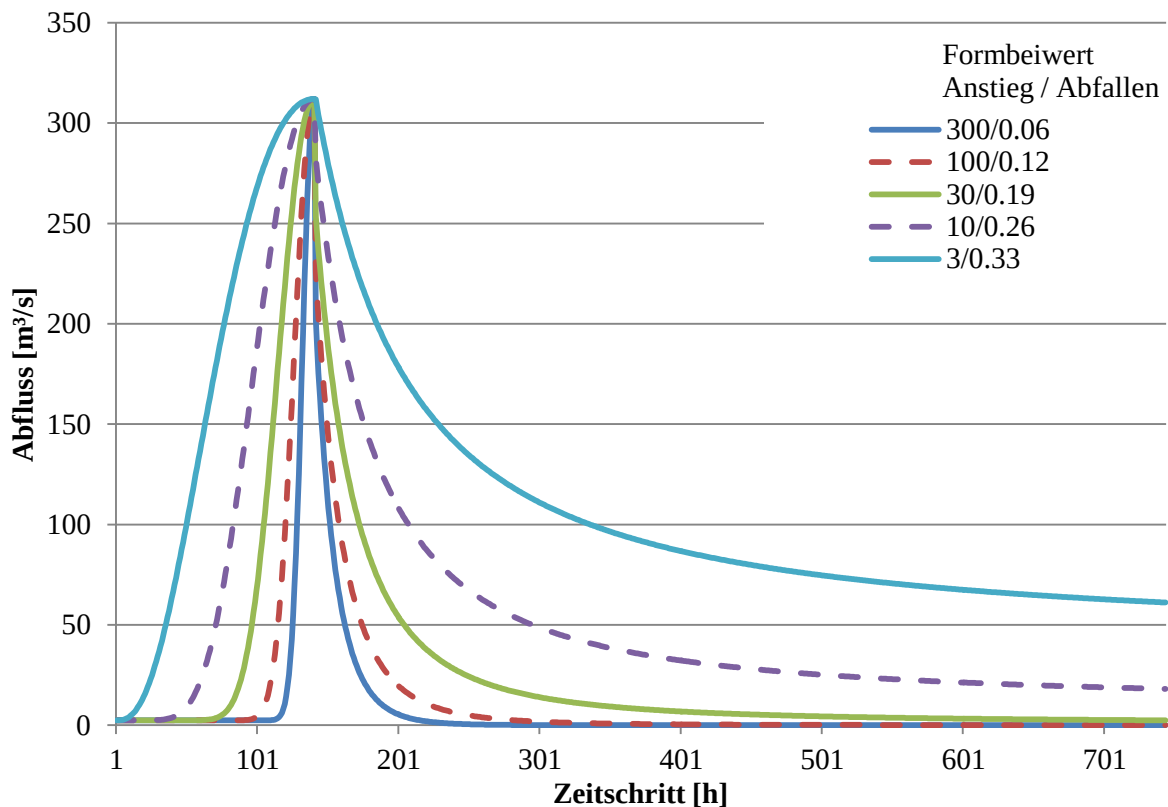


Abbildung 4-3 Hochwasserganglinien für unterschiedliche Formbeiwerte

Die Verteilungsfunktionen der Parameter werden durch Auswertung der gemessenen Hochwasserereignisse bestimmt. Hierbei kann zusätzlich nach Jahreszeiten differenziert werden, um die unterschiedliche Ausprägung von Hochwasserereignissen beispielweise im Winter oder im Sommer zu berücksichtigen. Die Hochwassermerkmal-Simulation kann erweitert werden, um Abflussganglinien an verschiedenen Stellen eines Einzugsgebietes zu erzeugen. Sind die Hochwasserereignisse an benachbarten Stellen voneinander abhängig, wird hierzu ein Bezugspegel ausgewählt und die Abhängigkeit mittels einer Verteilungsfunktion statistisch abgebildet. Diese Verteilungsfunktion beschreibt das Verhältnis der Scheitelwerte am Bezugspegel zu denen an abhängigen Pegelstellen. So kann nach Erzeugen der Hochwasserganglinie mittels Ziehen aus den Verteilungsfunktionen der Wellenparameter am Bezugspegel durch Ziehen aus den Verteilungsfunktion der Verhältnisse der Scheitelwerte die Ganglinie für die weiteren benötigten Stellen skaliert werden (LANUV NRW, 2004). Für jeden so ermittelten Parametersatz können Hochwasserganglinien an den benötigten Stellen im Einzugsgebiet aus der gewählten mathematischen Funktion der Hochwasserwelle bestimmt werden. Ein Simulationsmodell des Talsperrenbetriebs, welches auch den Wellenablauf im Unterlauf vereinfacht über Speicherelemente abbildet, liefert eine Approximation der Hochwasserwelle an Bezugspegeln im Gebiet unterstrom der Talsperren. Wird dieser Vorgang sehr oft wiederholt, kann die empirische Überschreitungswahrscheinlichkeit einzelner Hochwasserwellen berechnet und mit der Extremwertstatistik der gemessenen Abflüsse an den Bezugspegeln verglichen werden. Wurde eine gute Übereinstimmung erreicht, lassen sich einzelne Hochwasserganglinien für die Risikoermittlung auswählen. Das Vorgehen ist in Abbildung 4-4 skizziert.

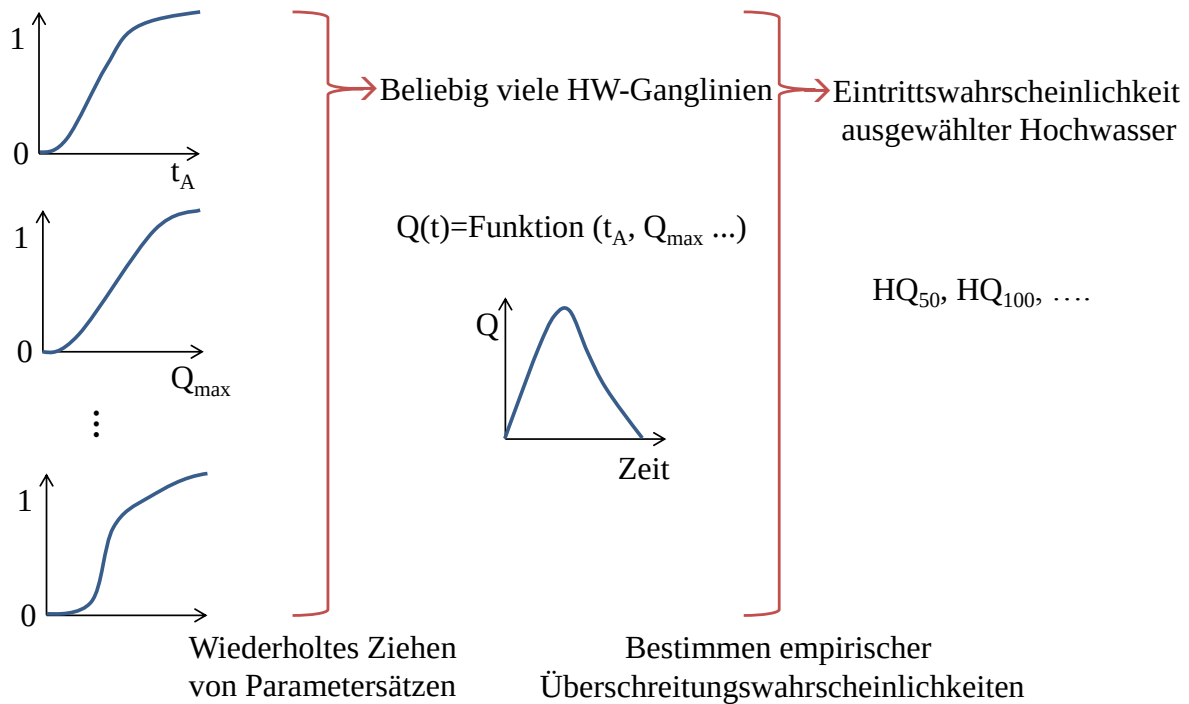


Abbildung 4-4 Schema Hochwassermerkmal-Simulation

Bestimmung der Konsequenzen von Versagensereignissen

Die Konsequenzen eines Hochwassers lassen sich mit Hilfe eines hydrodynamischen Modells in Form von resultierenden Überschwemmungsflächen und Wasserständen bestimmen. Verwendet wird hierzu das gekoppelte 1D-2D-Modell ProMaDeS (KAMRATH, 2010; BACHMANN, 2012). Ein Schadensmodell berechnet auf Basis der ermittelten Überschwemmungsflächen die monetären Konsequenzen für verschiedene Landnutzungen. Das Schadensmodell kann erweitert werden, um auch nicht-monetäre Konsequenzen, zum Beispiel ökologische oder soziale zu berücksichtigen (BACHMANN, 2012). Erster Schritt der Schadensberechnung ist die Verschneidung der Überflutungsflächen und -tiefen mit der Landnutzung der betroffenen Flächen. Zur Berechnung ökonomischer Schäden eines Hochwasserereignisses werden hierzu die Landnutzungen, welche aus digitalen Landschaftsmodellen (in Deutschland beispielsweise dem Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystem) entnommen werden können, zu Schadenskategorien aggregiert. Im hier angewandten Verfahren werden 9 Kategorien unterschieden: Wohnbebauung, Industrie, Mischnutzung, Öffentliche Gebäude, Freizeitnutzung, Verkehrsflächen, Landwirtschaft, Besondere Industrien (Energiewirtschaft) und Forstwirtschaft. Mit Hilfe von Schadensfunktionen lässt sich die relative Schädigung der betroffenen Werte in Abhängigkeit von der maximalen, während des Hochwassers aufgetretenen Fließtiefe bestimmen. Durch Multiplikation mit flächenbezogenen spezifischen Vermögenswerten berechnet sich anschließend der absolute monetäre Schaden. Der Gesamtschaden eines Hochwasserereignisses entspricht dann der Summe der Einzelschäden über alle Flächenelemente verschiedener Landnutzungen (KUTSCHERA, 2008). Das Vorgehen ist in Abbildung 4-5 dargestellt.

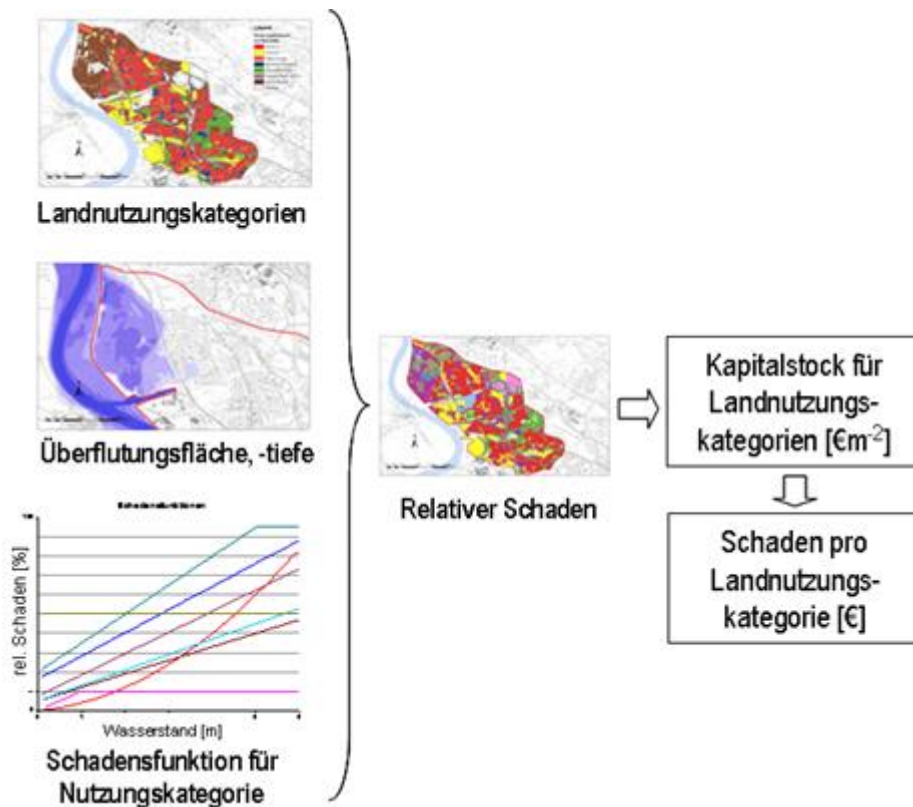


Abbildung 4-5 Berechnungsablauf ökonomische Hochwasserschäden (SCHÜTTRUMPF ET AL., 2009)

Risiko

Durch Integration über alle schadensverursachenden Ereignisse erhält man das Hochwasserrisiko des unterstrom der Talsperre gelegenen Gebiets. Zur Integration über die Eintrittswahrscheinlichkeit ist es notwendig, von diskreten Ereignissen zu einer kontinuierlichen Beschreibung des Ereignisraums überzugehen. Hierbei wird angenommen, dass jeder Punkt des berechneten Verhältnisses von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schaden ein Intervall aufspannt, die Fläche unter der Risikokurve also durch eine Treppenfunktion approximiert werden kann. Hierbei wird ferner angenommen, dass der Schaden für die kleinste untersuchte Eintrittswahrscheinlichkeit konstant bis zur Wahrscheinlichkeit null ist und der Schaden für die größte untersuchte Eintrittswahrscheinlichkeit konstant bis zum doppelten dieser Wahrscheinlichkeit verläuft und darüber null ist (BACHMANN, 2012). Die Klassengrenzen zur Berechnung des Risikos als Fläche unter der Risikokurve sind in Abbildung 4-6 dargestellt.

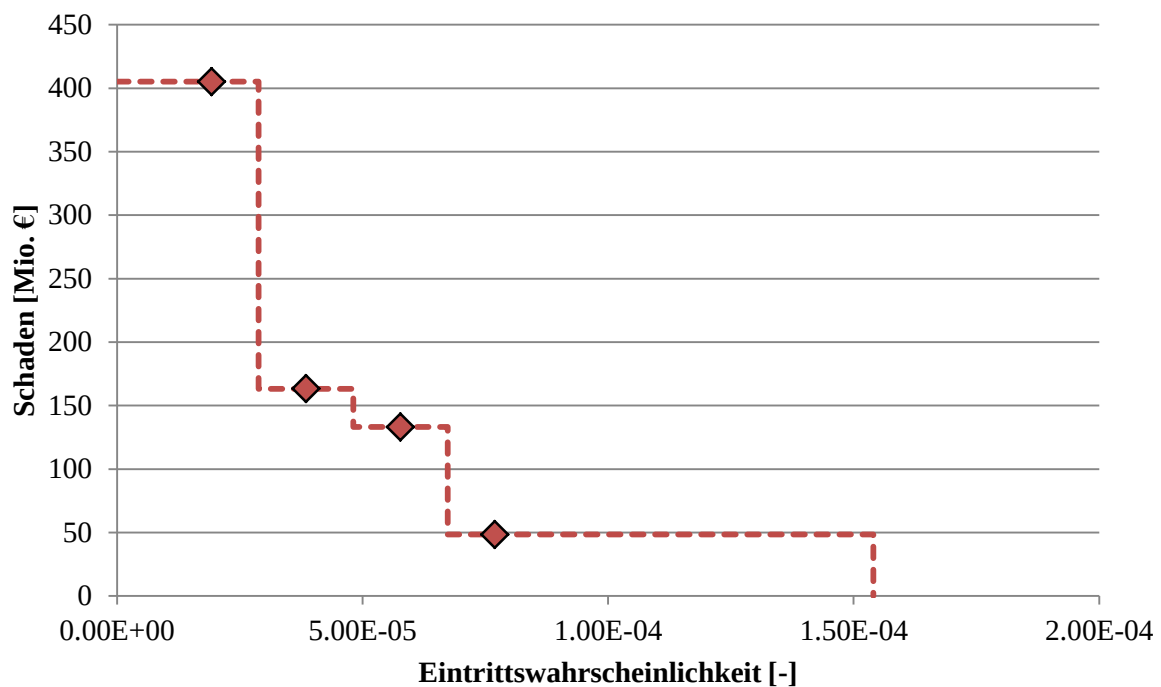


Abbildung 4-6 Approximation der Risikokurve

Mit Hilfe des beschriebenen, bestehenden Verfahrens ist es möglich, die Leistungsfähigkeit einer Talsperre oder eines Talsperrensystems bezüglich des Hochwasserschutzes unter der Berücksichtigung der Konsequenzen eines Versagens des Hochwasserrückhalts zu bestimmen. Hierbei können die Betriebsregeln des Systems detailliert abgebildet und die Leistungsfähigkeit des Hochwasserschutzes für verschiedene Betriebsregeln verglichen werden. Abbildung 4-7 zeigt die verwendete Modellkette.

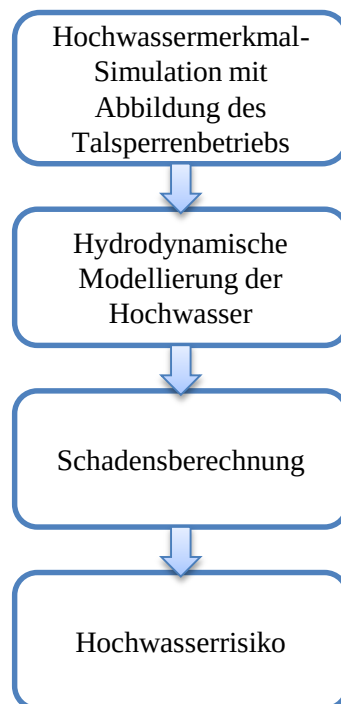


Abbildung 4-7 Modellkette zur Berechnung des Hochwasserrisikos

Durch Erweiterung des Verfahrens der Hochwassermerkmal-Simulation zur Bestimmung von Randbedingungen für die Bewertung ist es zudem möglich, den Einfluss der klimabedingten Änderung dieser Randbedingungen abzubilden. Damit erfüllt das vorgestellte Verfahren die Anforderungen zur Bestimmung des Einflusses der Klimaänderung auf die Talsperrenbewirtschaftung und erfüllt ebenso die Voraussetzungen zur Evaluierung von an die Klimaänderung angepassten Betriebsregeln. Diese Themen werden in Kapitel 5 und 6 erörtert. Zunächst soll aber ein gleichwertiges Verfahren zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Talsperren bezüglich der Wasserbereitstellung gefunden werden.

4.3 Wasserbereitstellung und Niedrigwasser - Niedrigwasserrisiko

4.3.1 Konzept

Das Konzept der hydrologischen Sicherheit erlaubt, wie in der Einleitung zu diesem Kapitel erläutert, nur eine unzureichende Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer Talsperre, da die Konsequenzen von Versagensereignissen nicht berücksichtigt werden. Es soll daher ein Verfahren entwickelt werden, welches eine risikobasierte Analyse ermöglicht. Im Gegensatz zum etablierten und in Rahmengesetze (DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION, 2007) übernommenem Verfahren der Hochwasserrisiko-Berechnung existiert zur Berechnung des Niedrigwasserrisikos noch keine etablierte Methodik. Gründe hierfür liegen zum einen in der Problematik, die Eintrittswahrscheinlichkeit von Versagensereignissen statistisch zu bestimmen, und zum anderen in der Schwierigkeit, die Konsequenzen eines Versagens der Wasserbereitstellung zu bewerten. Die Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit von Versagensereignissen ist problematisch, da der notwendige Simulationszeitraum zur Abbildung des Einflusses von Niedrigwasser auf eine Talsperre sehr viel länger als bei Hochwasserereignissen ist. Während Hochwasser Stunden bis einen Monat dauern, können Niedrigwasserperioden mehrere Jahre andauern bevor sie zu einem Versagen großer Talsperren führen. Während also bei Hochwassern die Eintrittswahrscheinlichkeit aus der jährlichen Serie der maximalen Abflüsse bestimmt werden kann und ein direkter Zusammenhang zwischen maximalem Abfluss und dem Auftreten von Hochwasserschäden angenommen werden kann, ist ein solcher Zusammenhang zwischen jährlichem Minimalabfluss und schadensverursachenden Niedrigwasserereignissen nicht gegeben. Schadensverursachend ist erst eine ungünstige Kombination aus langer Dauer und niedrigem Abflussvolumen.

Um Niedrigwasserereignisse dennoch vereinfacht, ohne komplexe stochastische Berechnungen beschreiben zu können, werden in der Hydrologie Kenngrößen des Abflusses an einer Messstelle verwendet, welche entweder einen konstanten Schwellenwert des Durchflusses oder einen konstanten Schwellenwert der Unterschreitungsdauer ansetzen. Eine häufig verwendete Größe zur Beschreibung der Abflusseigenschaften eines Flusses bezüglich Niedrigwasser ist der Abfluss, der im Mittel an sieben Tagen eines Jahres unterschritten wird. Dieser Wert ermöglicht den Vergleich verschiedener Flussgebiete, erlaubt aber keine risikobasierte Bewertung wasserwirtschaftlicher Systeme (DYCK, 1980). Die Eintrittswahrscheinlichkeit von Niedrigwasserereignissen kann jedoch mittels Langzeitsimulation bestimmt werden. Hierzu sind synthetische Zuflusszeitreihen langer Dauer notwendig, auf deren Generierung im folgenden Kapitel bei der Beschreibung der Modellkette eingegangen wird. Zunächst soll jedoch untersucht werden, wie sich die Schäden eines Versagens der Wasserbereitstellung aus Talsperren beschreiben lassen.

Im Gegensatz zum Hochwasserfall fehlt es für den Niedrigwasserfall an empirisch belegten Zusammenhängen, um Schäden zu quantifizieren. Zur Beschreibung der Schäden durch Niedrigwasser bzw.

der Leistungsfähigkeit von Talsperren, diese abzuwenden, wurden daher zunächst allgemeine Ansätze verwendet, wie sie zur Beschreibung der Performance wasserwirtschaftlicher Systeme entwickelt wurden. Eine Übersicht über verschiedene Kenngrößen zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Talsperren gibt BRASS (2006).

HASHIMOTO, STEDINGER, ET AL. (1982) zeigen ein Konzept, welches die Bewertung der Leistungsfähigkeit anhand von drei Kennzahlen erlaubt. Der erste Index, die Zuverlässigkeit (*reliability*), beschreibt die Wahrscheinlichkeit eines Systemversagens. Der zweite Index beschreibt die Widerstandsfähigkeit (*resilience*), also wie schnell das System nach einem Versagen wieder funktionstüchtig ist. Der dritte Index erfasst die Verwundbarkeit (*vulnerability*) des Systems als Maß für die Schwere der Konsequenzen eines Versagens.

Die Zuverlässigkeit kann berechnet werden als Zuverlässigkeit bezogen auf die Zeit oder auf die Abgabe einer bestimmten Menge von Wasser. In Bezug auf die Zeit, in der eine Talsperre zufriedenstellend arbeitet oder versagt, können verschiedene Zeitschrittweiten definiert werden. Es lässt sich so der Anteil an Jahren, Monaten oder Tagen bestimmen, in denen eine Talsperre innerhalb des Untersuchungszeitraums zufriedenstellend arbeitet. Allgemein berechnet sich die Zuverlässigkeit als Häufigkeit oder als die Wahrscheinlichkeit, dass ein System zufriedenstellend arbeitet. Die mathematische Beschreibung ist in Gleichung (4.2) dargestellt. Darin ist x eine Zufallsvariable zum Zeitpunkt t , aus n diskreten Zeitpunkten. Für jeden Zeitpunkt ist zu evaluieren, ob sich das System in einem zufriedenstellenden Zustand O oder einem Zustand des Versagens B befindet. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich das System zu einem beliebigen Zeitpunkt in einem zufriedenstellenden Zustand befindet, ist dann die Zuverlässigkeit r .

$$r = \text{Prob}[x_t \in O] \quad (4.2)$$

Damit entspricht die Zuverlässigkeit bezogen auf die Zeit der hydrologischen Sicherheit.

Widerstandsfähigkeit ω als Maß dafür, wie schnell ein Talsperrensystem nach einem Versagen wieder zufriedenstellend arbeitet, ist mathematisch definiert als die bedingte Wahrscheinlichkeit, dass nach Eintritt eines Versagens das System zum nächsten Zeitschritt wieder alle Ansprüche erfüllen kann (Gleichung (4.3)).

$$\omega = \frac{\text{Prob}[x_t \in B \cap x_{t+1} \in O]}{\text{Prob}[x_t \in B]} \quad (4.3)$$

Der Wert für die Widerstandsfähigkeit, gemäß der obigen Definition, kann auch berechnet werden als Kehrwert der mittleren Zeitspanne, die das System nicht zufriedenstellend arbeitet. Andere Autoren argumentieren, dass der so bestimmte Wert kurze, weniger schwerwiegende Ereignisse von Versagen überbewertet und schlagen deshalb vor, nur den Kehrwert der Dauer des längsten Versagensereignisses zu verwenden (KUNDZEWICZ & KINDLER, 1995; MOY ET AL., 1986).

Für den Fall, dass das Auftreten eines Versagens und das einer darauffolgenden zufriedenstellenden Leistung statistisch unabhängig sind, wird die Widerstandsfähigkeit reduziert auf die Wahrscheinlichkeit, dass die Talsperre zum nächsten betrachteten Zeitschritt zufriedenstellend arbeitet, $\text{Prob}[x_{t+1} \in O]$. Dies entspricht dem Maß für die Zuverlässigkeit. Für diesen Fall der Unabhängigkeit der Systemperformance zu verschiedenen Zeitschritten beinhaltet der Index der Zuverlässigkeit

also implizit bereits den der Widerstandsfähigkeit. Bei großen Speichern ist eine solche Unabhängigkeit der Systemperformance bei aufeinanderfolgenden Zeitschritten jedoch nicht gegeben.

Die Verwundbarkeit wird von HASHIMOTO ET AL. explizit als Index zur Beurteilung der Größe von Schäden durch ein Versagen wasserwirtschaftlicher Anlagen eingeführt. In diesem Fall ist mit dem Versagen der Talsperre hier nicht das Versagen des Absperrbauwerks und die dadurch bedingte Überflutung unterstrom gelegener Gebiete gemeint, sondern ein Versagen des Betriebs, also dass die Talsperre nicht genügend Wasser für die ihr zugeordneten Aufgaben bereitstellen kann. Zur Berechnung des Index der Verwundbarkeit wird jedem Versagensereignis ein numerischer Wert gegeben, der die Schwere der Konsequenzen beschreibt. Des Weiteren wird die Wahrscheinlichkeit, dass diese Konsequenzen die schwersten eines möglichen Versagens sind, bestimmt. Als Maß für die Verwundbarkeit der Talsperre kann dann die erwartete maximale Schwere der Versagensereignisse dienen. Der Fokus wird auf den Erwartungswert der maximalen Schwere gelegt, und nicht auf die mittlere Schwere, um dem Entscheider die möglichen Konsequenzen eines Versagens zu verdeutlichen. Mit s_j als Wert des Schweregrades des Versagensereignisses und e_j der Wahrscheinlichkeit, dass die mit dem Versagensereignis x_j assoziierten Konsequenzen s_j die maximalen sind, ergibt sich die Verwundbarkeit v als Summe der Produkte von s_j und e_j über alle Versagensereignisse F :

$$v = \sum_{x_j \in F} s_j \cdot e_j \quad (4.4)$$

Bezogen auf die Aufgabe der Wasserbereitstellung wird die Schwere des Versagensereignisses s_j anhand der Fehlmenge beschrieben. Mit der Annahme, dass die Eintrittswahrscheinlichkeit aller Ereignisse gleich ist, also $e_1 = \dots = e_N = 1/N$, mit N der Anzahl der Versagensereignisse kann Gleichung (4.5) vereinfacht werden zu:

$$v = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N s_j \quad (4.5)$$

Die so bestimmte Verwundbarkeit beschreibt den Mittelwert der Fehlmenge aller Versagensereignisse. Um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wird der so berechnete Index der Verwundbarkeit oftmals normiert (MCMAHON & ADELOYE, 2005). Hierzu wird die Fehlmenge durch das während der Versagensereignisse erforderliche Abgabevolumen geteilt. Somit ergeben sich die relative Fehlmenge und daraus der dimensionslose Index der Verwundbarkeit, welcher wie die Indices für Zuverlässigkeit und Widerstandsfähigkeit einen Wertebereich zwischen 0 und 1 aufweist. Analog zum Wert der Widerstandsfähigkeit empfehlen einige Autoren die Verwendung nur des größten Versagensereignisses, womit der Index der Verwundbarkeit auf die maximale während des Betrachtungszeitraumes auftretende Fehlmenge bezogen wird (KUNDZEWICZ & KINDLER, 1995). Grund hierfür ist, dass bei Verwendung des Mittelwertes von Fehlmenge und Schwere die berechneten Indices von Widerstandsfähigkeit und Verwundbarkeit kein stetiges Verhalten für verschiedene Systemzustände aufweisen und sich sporadisch, beispielsweise bessere Werte für eine höhere Systembeanspruchung zeigen. Auch KJELDSSEN (2001) bestätigt diese Ergebnisse und legt dar, dass stetige Ergebnisse bei Verwendung von maximalen Werten der Fehlmenge und Versagensdauer erzielt werden können. KJELDSSEN (2001) verwendet statt den Maximalwerten dennoch die 90. Perzentile, um bei sehr langen Simulationszeiträumen einen konvergierenden Zustand zu erreichen.

Auch für den Index der Verwundbarkeit ergeben sich Überschneidungen mit den anderen Indices. So besteht insbesondere zum Index der Widerstandsfähigkeit, bei Abhängigkeit von Schwere und Dauer der Versagensereignisse, eine starke Korrelation (KJELDEN & ROSBJERG, 2004). Aufgrund der hohen Korrelation der Werte von Verwundbarkeit und Widerstandsfähigkeit empfiehlt SCHUMANN (1997) die ausschließliche Verwendung von Zuverlässigkeit und Verwundbarkeit.

Ein weiteres Konzept zur risikobasierten Bewertung der Leistungsfähigkeit wasserwirtschaftlicher Systeme wird von DUCKSTEIN ET AL. (1987) vorgestellt und basiert auf insgesamt zehn Indices. Der erste Index beschreibt den Grad der Leistungserfüllung als relative Häufigkeit, mit der die Bewirtschaftungsziele erreicht werden. Er kann berechnet werden als Anteil des Wasserbedarfs, welcher über einen spezifischen Zeitraum (Tag, Monat, Jahr) bereitgestellt werden kann. Als Qualität der Leistung (Index 2) wird der Anteil der Zeiten beschrieben, in denen eine Leistung erfolgt, auch wenn diese geringer als gefordert ausfällt. Der dritte Index zur Reaktionsgeschwindigkeit gibt an, wie schnell eine Bedarfsanforderung befriedigt werden kann. Als vierter Index wird die Zuverlässigkeit herangezogen, definiert wiederum als Anteil der betrachteten Zeit, in der das System zufriedenstellend arbeitet. Als Versagensperiode (Index 5) wird das mittlere Wiederkehrintervall von Versagensereignissen bezeichnet. Index 6, die Einsatzzuverlässigkeit, beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der es zwischen der Anforderung eines Bedarfs und der Bereitstellung der Leistung zu einer Störung kommt. Die Verfügbarkeit (Index 7) ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Talsperre einen Bedarf bedienen kann. Index 8 entspricht der oben definierten Widerstandsfähigkeit, wird hier jedoch als *repairability* bezeichnet. Er berechnet sich wieder als mittlere Zeitdauer, in der das System nicht zufriedenstellend arbeitet, bezogen auf die betrachtete Zeitspanne. Die Verwundbarkeit dient als Index 9 und wird definiert als mittlere Versagensschwere. Der zehnte und letzte der von DUCKSTEIN ET AL. verwendeten Indices ist die Wirtschaftlichkeit und kann die erwarteten Kosten, die Verluste und Gewinne, die Rendite oder den Kassenzufluss (*cash flow*) beinhalten. DUCKSTEIN ET AL. schlagen vor, die Indices zur einfacheren Handhabung mit Hilfe von Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung weiter zusammenzufassen. Hierzu existieren verschiedene mathematische Verfahren, welche Alternativen anhand mehrerer Kriterien bzw. Attribute einer Variante bewerten (YOON & HWANG, 1995).

Eine Zusammenfassung der Kennzahlen zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit zu einem Gesamtindex verfolgen auch andere Autoren unter Verwendung der von HASHIMOTO ET AL. definierten Indices Zuverlässigkeit, Widerstandsfähigkeit und Verwundbarkeit. Zunächst zielte die Forschung zur Bewertung von Talsperren auf die Beurteilung der Nachhaltigkeit der Anlagen ab (LOUCKS, 1997; TAKEUCHI, 1998), während sie heute unter Verwendung der vorgestellten Indices die Bewertung der Auswirkungen des Klimawandels bezwecken (ANGHILERI ET AL., 2011; ROSSI ET AL., 2012).

LOUCKS (1997) definiert nachhaltige wasserwirtschaftliche Systeme als solche, welche so bemessen und bewirtschaftet werden, dass sie ihren Zielen jetzt und in Zukunft nachkommen können, während sie die Integrität der ökologischen und hydrologischen Gegebenheiten bewahren. Zur Bewertung der relativen Nachhaltigkeit einer Talsperre schlägt er das Produkt von Zuverlässigkeit, Widerstandsfähigkeit und Verwundbarkeit vor. Die Verwendung des Produkts der Einzelindices hat den Vorteil, dass eine implizite Gewichtung in der Art vorgenommen wird, dass der Index mit dem kleinsten Wert eine starke Berücksichtigung im aggregierten Nachhaltigkeits-Index findet. Eine weitere Aggregation von Zuverlässigkeit, Widerstandsfähigkeit und Verwundbarkeit zu einem Index als gewichtete Summe wird in Studien zur Analyse des Dürrierisikos der öffentlichen Wasserversorgung als Dürrierisikoindex bezeichnet (JINNO, 1995; ZONGXUE ET AL., 1998). Die Gewichte müssen dabei vom Anwender vorge-

geben werden und bewirken bzw. erlauben damit die Berücksichtigung subjektiver Präferenzen bei der Bewertung.

Das bisherige Vorgehen der Aggregationen von Zuverlässigkeit, Widerstandsfähigkeit und Verwundbarkeit zu einer Kennzahl entspricht einer verallgemeinerten risikobasierten Betrachtung der Leistungsfähigkeit von Talsperren. Die Zuverlässigkeit gibt ein Maß für die Eintrittswahrscheinlichkeit von Versagensereignissen, während Widerstandsfähigkeit und Verwundbarkeit die Konsequenzen der Versagensereignisse beschreiben. Die Dauer von Versagensereignissen wird dabei von der Widerstandsfähigkeit abgebildet, die Schwere (Fehlmenge) der Versagensereignisse von der Verwundbarkeit. Die Indices bilden jeweils einen repräsentativen Wert der Ausprägung und Eintrittswahrscheinlichkeit aller Versagensereignisse ab. Diese näherungsweise Abbildung des Niedrigwasserrisikos umgeht die beiden Schwierigkeiten der probabilistischen Bewertung der Leistungsfähigkeit von Talsperren bezüglich der Wasserbereitstellung: Die Schwierigkeit, die Eintrittswahrscheinlichkeit von Versagensereignissen statistisch zu bestimmen, und die Schwierigkeit, die Konsequenzen eines Versagens der Wasserbereitstellung zu bewerten. Die näherungsweise Bewertung des Niedrigwasserrisikos anhand eines Index erlaubt jedoch keinen direkten Vergleich mit dem Hochwasserrisiko. Die dargestellten Bemühungen von KJELDTSEN (2001) und anderen Autoren, einen stetigen Verlauf der Indices zur Abbildung der Systembelastung zu erzielen, zeigen die Defizite der Verwendung von Indices zur repräsentativen Abbildung der Leistungsfähigkeit auf.

Aufgrund der bestehenden Defizite soll hier ein neuer Ansatz zur Bestimmung des Niedrigwasserrisikos verfolgt werden. Eine Verbesserung lässt sich erzielen, wenn Versagensereignisse der Wasserbereitstellung auch diskret als Einzelereignisse betrachtet werden, wie dies auch bei der Hochwasserrisikoberechnung getan wird. Dementsprechend wird aus der Simulation des Talsperrenbetriebs nicht die Zuverlässigkeit als Maß für die mittlere Wahrscheinlichkeit eines Versagens bestimmt, sondern jedem einzelnen Versagensereignis eine Eintrittswahrscheinlichkeit zugewiesen. Hierzu sind sehr lange Simulationszeiträume notwendig, um eine empirische Wahrscheinlichkeitsverteilung anwenden zu können. Auf Zeitreihenmodelle zur Generierung der Randbedingungen für solche sehr langen Simulationszeiträume wird in Kapitel 4.3.2 eingegangen. Zunächst wird eine Möglichkeit vorgestellt, die Konsequenzen diskreter Versagensereignisse der Wasserbereitstellung zu berechnen.

Aus der Simulation des Talsperrenbetriebs folgt direkt die Ausprägung der jeweiligen Versagensereignisse in Form der Dauer und der Fehlmenge. Diese beiden Eigenschaften des Versagens der Wasserbereitstellung aus Talsperren werden auch von allen bisherigen Verfahren zur Bewertung des Niedrigwasserrisikos herangezogen. Können Versagensdauer und Fehlmenge Schadensfunktionen zugeordnet werden, lässt sich jedem Einzelereignis ein monetärer Schaden zuweisen und durch Multiplikation mit der Eintrittswahrscheinlichkeit und Integration über alle Ereignisse das Niedrigwasserrisiko für die Wassernutzer einer Talsperre bestimmen.

Der zur Aufstellung von Schadensfunktionen notwendigen monetären Betrachtungsweise steht der hohe Fixkostenanteil in der Wasserversorgung entgegen. Entsprechend ist es schwierig, Kosten für zu substituierende Fehlmengen oder Fehldauern zu bestimmen. So machen die Fixkosten in der Wasserver- und -entsorgung durchschnittlich 70 bis 85 % der Gesamtkosten aus (VKU, 2011). Die mengenabhängigen Kosten für Energie, Betriebsmittel und Wasserentnahmeentgelt machen dagegen nur einen geringen Anteil der Gesamtkosten aus und auch hierbei ist eine direkte Abhängigkeit zur Leistungsfähigkeit der Talsperre nicht gegeben. Abhängig von der Menge an bezogenem Wasser werden Wasser-

entnahmeentgelte als Verbrauchssteuer erhoben. Diese Wasserentnahmeentgelte dienen in den meisten Bundesländern der Finanzierung von Verbesserungen des Gewässerschutzes und nicht der Refinanzierung der Wasserversorgungsinfrastruktur. Die Finanzierung der Wasserversorgung erfolgt über die Veranlagung (siehe Glossar) der Bezieher von Wasser aus einer Anlage. Die Veranlagung wird jedoch immer bezogen auf eine einzelne Anlage und ihre Betriebsdauer und Finanzierungsstruktur berechnet und eignet sich damit nicht zur allgemeingültigen Bewertung der Kosten der Wasserversorgung. Grundsätzlich ist jedoch, auch auf Basis der dargestellten Analyse bisheriger Ansätze, davon auszugehen, dass mögliche Schäden für Wassernutzer zum einen von der Dauer der Unterbrechung der Wasserversorgung und zum anderen von der zu substituierenden Menge an Wasser abhängen, die in diesem Zeitraum nicht bezogen wird. In dieser Arbeit wird als Schadensfunktion daher eine lineare Abhängigkeit des Schadens sowohl von der Dauer als auch von der Fehlmenge angenommen. Der durch Nicht-Befriedigung des Wasserbedarfs eines Nutzers auftretende Schaden D kann dann nach Gleichung (4.6) berechnet werden.

$$D_i[\text{€}] = C \left[\frac{\text{€}}{\text{m}^3 \cdot \text{Tage}} \right] \cdot s_i[\text{m}^3] \cdot d_i[\text{Tage}] \quad (4.6)$$

Darin ist C eine Konstante zur Beschreibung der Anfälligkeit, s die Fehlmenge und d die Dauer eines Versagensereignisses. Die Annahme des linearen Zusammenhanges muss in empirischen Studien bestätigt werden, erlaubt jedoch den relativen Vergleich der Leistungsfähigkeit von Talsperren für verschiedene Betriebsregeln oder klimatische Randbedingungen.

Um die Vergleichbarkeit mit der Berechnung des Hochwasserrisikos zu gewährleisten, werden die Eintrittswahrscheinlichkeiten von Versagensereignissen ebenfalls auf den Zeitschritt von einem Jahr bezogen. Die Verwendung des bei Hochwasser angewandten Verfahrens, nämlich die jährlichen Maxima nach ihrem Abflusswert zu sortieren und daraus die extremwertstatistische Eintrittswahrscheinlichkeit bzw. das Wiederkehrintervall zu bestimmen, ist aufgrund der längeren Zeitskala von Niedrigwasserereignissen nicht sinnvoll. Zudem nähern sich Abflüsse großen Wiederkehrintervalls schnell Null und erlauben damit lediglich die Aussage, dass der Zufluss zur Talsperre während Niedrigwasserperioden zu vernachlässigen ist (CHANG & STENSON, 1990). Stattdessen können die Eintrittswahrscheinlichkeiten von Versagensereignissen direkt, ohne vorherige Untersuchung der korrespondierenden Abflüsse, bestimmt werden. Die Eintrittswahrscheinlichkeit jedes Versagensereignisses kann so aus der empirischen Wahrscheinlichkeitsverteilung bezogen auf die während einer Langzeitsimulation aufgetretenen Schadenshöhen berechnet werden.

Damit ergibt sich die Überschreitungswahrscheinlichkeit $P_{\bar{u}}$ des Ereignisses mit dem größten aufgetretenen Schaden während des Simulationszeitraumes von T Zeitschritten zu $1/(T+1)$ (DYCK, 1980). Entsprechend wird die Überschreitungswahrscheinlichkeit des zweitgrößten Schadensereignisses durch $2/(T+1)$ beschrieben und so weiter mit m_R der Ordnungszahl des Ereignisses, siehe Gleichung (4.7):

$$P_{\bar{u}}(D_i) = \frac{m_R(D_i)}{T + 1} \quad (4.7)$$

Der Berechnungsablauf zur Bestimmung der empirischen Überschreitungswahrscheinlichkeit von schadensverursachenden Versagensereignissen ist in Tabelle 4-1 gegeben.

Tabelle 4-1 Schema der Berechnung empirischer Wahrscheinlichkeiten

Ordnungszahl $m_R(D_i)$ [-]	D_i [€]	$P_{\ddot{u}}(D_i)$ [1/a]
1	$\text{Max}(K_i)$	$\frac{1}{T+1}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
m	K_i	$\frac{m(K_i)}{T+1}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
M	$\text{Min}(K_i)$	$\frac{M}{T+1}$

Aus der so empirisch bestimmten, diskreten Überschreitungswahrscheinlichkeit lässt sich, analog dem Vorgehen zur Hochwasserrisikoberechnung (BACHMANN, 2012), die kontinuierliche Eintrittswahrscheinlichkeit eines Versagensereignisses festlegen und das Niedrigwasserrisiko als Fläche unter der Risikokurve berechnen. Abbildung 4-8 zeigt die Risikokurve für einen Simulationszeitraum von 3000 Jahren, wobei die Konstante C zu 0,01 €/m³d) angesetzt wurde.

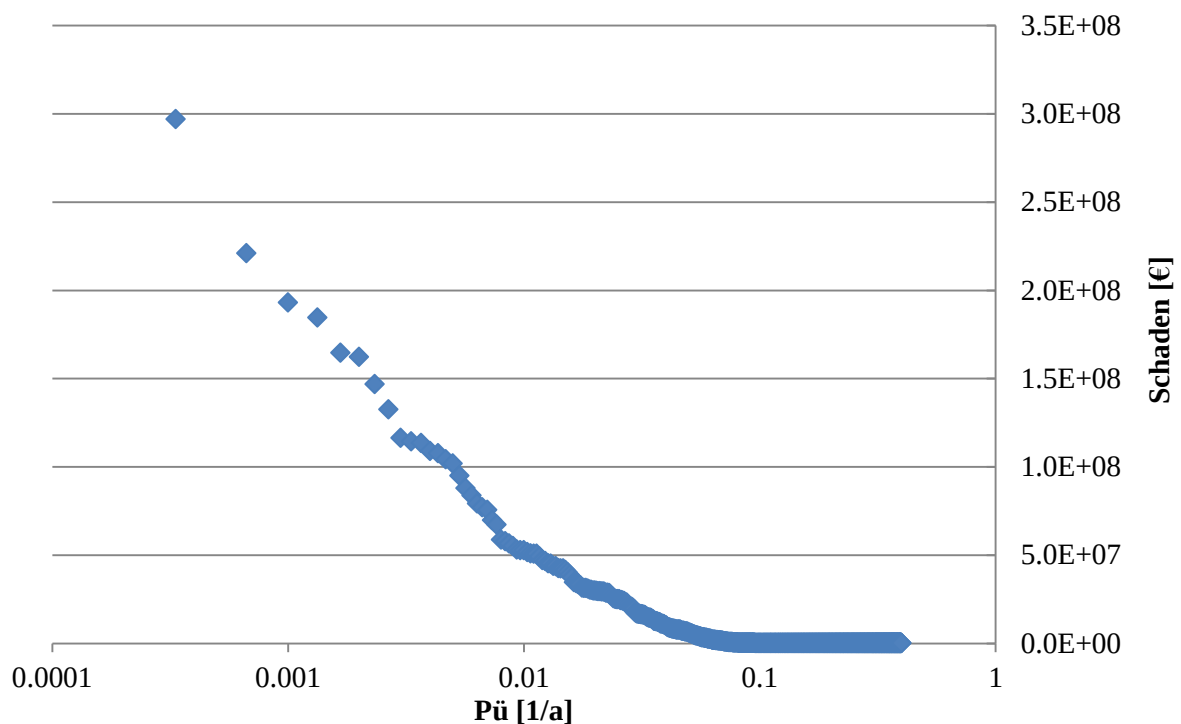


Abbildung 4-8 Diskrete Überschreitungswahrscheinlichkeit und Schaden von Niedrigwasserereignissen (logarithmischer Maßstab)

Im Vergleich zur Hochwasserrisiko-Berechnung liefert die Talsperrensimulation somit in einem Schritt Werte für Eintrittswahrscheinlichkeiten und Schäden bei Niedrigwasser. Die Talsperrensimulation zur Berechnung des Niedrigwasserrisikos entspricht damit einem hydrodynamischen Modell zur Hochwasserrisikoberechnung, welches auch die Prozesse der Abflusskonzentration abbildet. Somit würde man aus der Simulation mit diesem hydrodynamischen Modell zur Hochwasserrisikoberechnung für eine sehr lange kontinuierliche Zeitreihe des Niederschlags, sowohl die Eintrittswahrschein-

lichkeit von Hochwasser-Ereignissen, als auch die Überflutungstiefe und Überflutungsdauer und damit die Schäden erhalten. Zur Untersuchung von Hochwasser ist dies aufgrund der dazu notwendigen Modellkomplexität und Rechenkapazität nicht möglich. Zumal für diesen Fall nur die kurzen Ereignisse mit hohem Abfluss von Interesse sind. Entsprechend wurden Verfahren wie die Hochwassermerkmal-simulation entwickelt, welche die gezielte Repräsentation dieses Extremwertbereichs des Abflussspektrums ermöglichen. Zur Untersuchung von Niedrigwasser ist eine solche Fokussierung nicht möglich, da der notwendige Simulationszeitraum zur Abbildung des Einflusses von Niedrigwasserereignissen auf eine Talsperre sehr viel länger ist. Die Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit und der Ausprägung von Versagensereignissen in einem Modell ist daher notwendig und aufgrund der geringeren Komplexität auch möglich.

Das dargestellte Konzept zur Bestimmung des Niedrigwasserrisikos ermöglicht die probabilistische Bewertung der Leistungsfähigkeit von Talsperren unter Berücksichtigung der Konsequenzen möglicher Versagensereignisse. Für die praktische Anwendung sind sehr lange Zeitreihen des Talsperrenzuflusses notwendig, um die Eintrittswahrscheinlichkeit von Versagensereignissen hinreichend genau bestimmen zu können. Die Verfahren zur Generierung solcher langer Zuflusszeitreihen und die zur Berechnung des Niedrigwasserrisikos verwendete Modellkette wird im folgenden Kapitel vorgestellt.

4.3.2 Modellkette

Randbedingungen

Als Randbedingung für die Talsperrensimulation werden lange, kontinuierliche Zeitreihen des Zuflusses benötigt. Die gemessenen Zeitreihen des Zuflusses sind in den meisten Fällen zu kurz, um eine probabilistische Bewertung der Leistungsfähigkeit von Talsperren zu erlauben. Es können jedoch mit geeigneten stochastischen Verfahren Zeitreihen ausreichender Länge generiert werden, welche die gleichen statistischen Eigenschaften wie die gemessenen Zeitreihen aufweisen. Im Gegensatz zu den in Kapitel 3.2.2 vorgestellten expliziten statistischen Verfahren spricht man bei einer solchen Kombination von stochastischer Generierung der Zuflussrandbedingungen und deterministischer Talsperrensimulation von impliziten statistischen Verfahren.

Die bisher vorgestellten expliziten statistischen Verfahren eignen sich lediglich zur Abbildung einfacher Einzelspeicher mit Standardabgabe. Einzige Ausnahme stellt die stochastische dynamische Programmierung dar, die auch die Bewirtschaftung komplexerer Systeme abbilden kann. Nachteile der stochastischen dynamischen Programmierung sind jedoch ein hoher Berechnungsaufwand und dass die Leistungsfähigkeit der Talsperren lediglich anhand von Zielfunktionen bewertet wird (siehe Kapitel 3.2.2, Tabelle 3-1). Zudem werden die statistischen Eigenschaften des Zuflusses nur über die Übergangswahrscheinlichkeiten abgebildet. Dagegen erlauben implizite statistische Verfahren die Anwendung auf jede Art von Fragestellung, welche auch mit deterministischen Methoden bearbeitet werden kann. Die Berücksichtigung der statistischen Eigenschaften des Zuflusses erfolgt dabei durch Generierung von synthetischen Zeitreihen des Zuflusses. Abhängig vom verwendeten Zeitreihengenerator können so alle relevanten statistischen Eigenschaften berücksichtigt werden. Die Generierung der Zuflusszeitreihen geschieht separat vom eigentlichen Verfahren zur Bemessung oder Aufstellung von Bewirtschaftungsplänen. Hierzu muss ein mathematisches Modell gefunden werden, das die Eigenschaften der als Stichprobe verstandenen historischen Abflussreihe abbildet und reproduziert: Ein sogenanntes Zeitreihenmodell. Die erforderliche Komplexität des Modells hängt von den abzubildenden Eigenschaften und der Auflösung der Zeitreihe ab. Generell nimmt die Komplexität zu, je höher die

geforderte zeitliche Auflösung ist und je mehr statistische Parameter, wie Momente höherer Ordnung und Persistenz (siehe Glossar), Berücksichtigung finden sollen. Sollen zudem die Abhängigkeiten des Abflusses an benachbarten Stationen in einem Modell abgebildet werden, erhöht sich die Komplexität zusätzlich. Ein Modell mehrerer Stationen wird auch als multivariat bezeichnet. Grundsätzlich nehmen mit der Komplexität des Modells auch die Anzahl der zu bestimmenden Parameter und damit die Unsicherheit der Modellierung zu. Bei der Wahl des Modells sollte dies berücksichtigt werden und entsprechend möglichst das Modell mit der geringsten Komplexität gewählt werden, welches noch in der Lage ist, die gewünschten Eigenschaften des Abflusses abzubilden. Im Folgenden werden die existierenden Modelle kurz vorgestellt und auf ihre Eignung zur Generierung von Randbedingungen für die Berechnung des Niedrigwasserrisikos hin analysiert.

Die an ein solches Zeitreihenmodell zu stellenden Anforderungen sind:

1. Mindestens wöchentliche Auflösung, um den Betrieb der Talsperre oder des Talsperrensystems realitätsnah abbilden zu können.
2. Möglichkeit zur Generierung der abhängigen Abflüsse an mehreren Stationen (multivariat), um auch Talsperrensysteme betrachten zu können.
3. Fähigkeit, lange Zeitreihen auf Basis der gemessenen Daten einer Klimareferenzperiode, von in der Regel 30 Jahren (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2003), generieren zu können.
4. Möglichkeit, statistische Eigenschaften der generierten Zeitreihe vorzugeben, um Klimaänderungen quasi-kontinuierlich abbilden zu können.

Auf die beiden letzten Anforderungen wird in Kapitel 5 genauer eingegangen. Sie sollen jedoch bereits hier, bei der Auswahl eines geeigneten Zeitreihenmodells, berücksichtigt werden.

Die Entwicklung von Zeitreihenmodellen des Abflusses beginnt in den 1960er Jahren mit der Einführung von Autoregressionsmodellen (AR-Modelle) des jährlichen Abflusses (THOMAS & FIERING, 1962). AR-Modelle nehmen eine lineare Beziehung des Abflusses zum betrachteten Zeitpunkt und den Werten der zurückliegenden Zeitpunkte an. Die Regressionskoeffizienten dieser linearen Beziehung bilden die Parameter der AR-Modelle. Es kann unterschieden werden zwischen Modellen mit konstanten Parametern, zur Abbildung des jährlichen Abflusses, und solchen mit zeitlich veränderlichen Parametern. Letztere können zur Abbildung der innerjährlichen Abflussschwankungen mit einer Zeitschrittweite kleiner als einem Jahr verwendet werden. Beiden ist gemein, dass die Beschreibung der statistischen Abhängigkeit von Werten zu verschiedenen Zeiten anhand einer mehrdimensionalen Verteilungsfunktion mathematisch als Gauß-Prozess beschrieben wird. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass alle Größen normalverteilt sind. Daher ist für nicht normalverteilte Abflüsse jeweils eine Transformation der Eingangsdaten auf normalverteilte Werte und eine anschließende Rücktransformation der simulierten Werte vorzunehmen.

Zur Transformation der Eingangsdaten auf normalverteilte Werte existieren verschiedene Verfahren. Verbreitet in der Anwendung auf Abflussdaten sind zwei- und drei-Parameter Transformationen von log-Normal- auf Normalverteilung (DYCK, 1980). Generelle Anwendung, nicht nur für hydrologische Daten, findet die BOX-COX Transformation (BOX & COX, 1964), welche eine Potenzfunktion verwen-

det und in Softwarepaketen zur Zeitreihenanalyse implementiert ist (MCLEOD ET AL., 2012; CRYER & CHAN, 2008). Anhand von statistischen Tests lässt sich überprüfen, ob die Transformation zu einer Normalverteilung erfolgreich war. MCMAHON ET AL. (2006) verwenden hierzu den Shapiro-Wilk-Test. Alternativ lässt sich die statistische Verteilung der gemessenen Abflüsse vor der Transformation bestimmen und anschließend ein entsprechendes Transformationsverfahren wählen. Zur Wahl einer geeigneten Wahrscheinlichkeitsverteilung existieren verschiedene Verfahren. NAWAZ & ADELOYE (2006) verwenden den Wahrscheinlichkeits-Diagramm-Korrelations-Koeffizienten (FILLIBEN, 1975).

Weitere Voraussetzungen, die der zu modellierende Abflussprozess erfüllen muss, sind

1. die Ergodizität, d.h. dass eine über verschiedene zeitliche Realisationen vorgenommene Betrachtung eines Prozesses gleiche Ergebnisse liefert,
2. die strenge jährliche Periodizität, welche Stationarität impliziert, und
3. die im Folgenden erläuterte MARKOV-Eigenschaft.

Geht man davon aus, dass der Abfluss zum nächsten Zeitschritt theoretisch von allen vorherigen Zeitschritten abhängt, so wäre die Dimension n der Verteilungsfunktion zur vollständigen statistischen Beschreibung des Abflussprozesses für den Zeitraum eines Jahres und der Zeitschrittweite von einem Tag gleich der Anzahl der Tage des Jahres: $n = 365$. Zur Verminderung der Dimension der Verteilungsfunktion zur Beschreibung der zeitlichen Entwicklung des Abflusses wird dieser als MARKOV-Prozess, bzw. bei zeitlich diskreter Betrachtung, als MARKOV-Kette abgebildet. Hierbei wird nur eine endliche Anzahl p_R von Werten der Vergangenheit als unmittelbar relevant für die weitere Entwicklung des Prozesses angesehen. Unmittelbar meint, dass Werte, die weiter als p_R zurückliegen, nicht direkt, sondern über Zwischenwerte des kontinuierlichen Prozesses auf den betrachteten Wert einwirken. Dem entsprechend sind Werte, die weiter als p_R zurückliegen, nicht als unabhängig vom betrachteten Wert aufzufassen. Die Dimension der Verteilungsfunktion verkleinert sich dennoch durch diese Annahme auf höchstens $p_R + 1$. Die weitere Entwicklung erfolgt dann zufällig und wird im Falle des angenommenen Gauß-Prozesses durch eine normalverteilte Zufallsvariable beschrieben. Die Berücksichtigung der statistischen Eigenschaften des Zuflusses bei der stochastischen dynamischen Programmierung (siehe vorheriges Kapitel 3.3.2) entspricht einer MARKOV-Kette 1. Ordnung (BRASS, 2006). Ein Autoregressionsmodell mit konstanten Parametern der zeitabhängigen Größe x_t der Dimension p wird durch Gleichung (4.8) beschrieben (SALAS, 1980):

$$x_t = \mu + \sum_{j=1}^{p_R} \Phi_j (x_{t-j} - \mu) + \varepsilon_t \quad (4.8)$$

Darin ist μ der Mittelwert, die Koeffizienten $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_q$ werden Autoregressionskoeffizienten genannt und ε_t ist eine unabhängige, normalverteilte Zufallsvariable. Die Varianz von ε_t hängt jedoch von den anderen Größen ab, worüber die zuvor beschriebene mittelbare Abhängigkeit des aktuellen Wertes von weiter als p_R zurückliegenden Werten Berücksichtigung findet.

Physikalisch kann der Autoregressionsanteil verstanden werden als Abbildung der Speicherwirkung von Grundwasser und Bodenwasser, welche den Abflussprozess noch eine Zeit lang nach einem Niederschlagsereignis speisen. Ein solches Modell mit konstanten Parametern eignet sich beispielsweise zur Simulation des jährlichen Abflusses an einem Pegel. Soll der jahreszeitliche Verlauf der Abflüsse

mit einer Zeitschrittweite kleiner als ein Jahr beschrieben werden, müssen die Parameter des Modells als periodisch angenommen werden. Entsprechend erhalten alle Größen in Gleichung (4.8) einen Index, der die betrachtete Periode (Jahreszeit, Monat) darstellt. Ein periodisches AR-Modell wird oft auch als THOMAS-FIERING-Modell bezeichnet (THOMAS & FIERING, 1962).

Zur Simulation des Abflusses an mehreren Pegeln, wie sie zur Analyse eines Talsperrensystems benötigt wird, kann das Autoregressionsmodell zu einem multivariaten Modell mit Berücksichtigung der Kreuzkorrelation erweitert werden (MATALAS, 1967; YOUNG & PISANO, 1968). Ein Problem hierbei stellt die Vielzahl der aus den historischen Reihen zu bestimmenden Parameter dar. Dieses Problem verschärft sich, wenn Zeitreihen hoher zeitlicher Auflösung generiert werden sollen. So sind beispielsweise für ein monatliches Modell AR(2) an acht betrachteten Pegeln 2304 Parameter notwendig (12 Monate mal $2+1=3$ Korrelationsmatrizen mit je 8 mal 8 Parametern, also 12 mal 3 mal 64 gleich 2304), deren Bestimmung abhängig von der verfügbaren Datengrundlage an Messwerten mit großen Unsicherheiten verbunden ist. Vielfach muss daher die Dimension p_R der MARKOV-Kette klein gewählt werden. Hierdurch ist das Modell jedoch weniger gut in der Lage, die Persistenz des Abflussprozesses abzubilden. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von Modellen mit kurzem Gedächtnis.

Das Gedächtnis des Modells kann verlängert werden, indem das Autoregressionsmodell um einen Term des gleitenden Mittels (*moving average* MA) erweitert wird. Das resultierende Modell wird als ARMA Modell bezeichnet. Der MA-Term beschreibt, wie der Wert zum betrachteten Zeitschritt neben dem Zufallsterm des aktuellen Zeitschrittes auch von vergangenen Störgrößen abhängt. Wie weit zurück die berücksichtigten Störgrößen liegen, wird von der Dimension des MA-Terms p_M bestimmt, analog zu der Dimension des AR-Modells p_R zur Beschreibung der Abhängigkeit des Abflussprozesses von Werten vergangener Zeitschritte. Damit ist ein MA-Modell äquivalent zu einem AR-Modell unendlicher Dimension (HIPEL & MCLEOD, 1994). Während der MA-Term zur Abbildung der signifikanten Terme der Autokorrelationsfunktion des Abflussprozesses verwendet wird, lassen sich die signifikanten Terme der partiellen Autokorrelationsfunktion mit Hilfe der AR-Terme des ARMA-Modells darstellen. Ein ARMA(p_R, p_M)-Modell mit konstanten Parametern der zeitabhängigen Größe x_t der Dimension des AR-Terms p_R und des MA-Terms p_M wird durch Gleichung (4.9) beschrieben (SALAS, 1980):

$$x_t = \mu + \sum_{j=1}^{p_R} \Phi_j(x_{t-j} - \mu) + \varepsilon_t - \sum_{j=1}^{p_M} \Theta_j \varepsilon_{t-j} \quad (4.9)$$

Darin sind Θ_j die Koeffizienten des MA-Terms. Physikalisch kann der MA-Term als Beschreibung der linearen Abhängigkeit des Abflussprozesses von Regenereignissen in der Vergangenheit verstanden werden, welche auf den Prozess als unabhängige Störgrößen einwirken (SALAS, 1980). Die Flexibilität des ARMA Modells ermöglicht es, die Autokorrelationseigenschaften des Abflussprozesses anhand weniger Parameter abzubilden als für ein reines AR-Modell notwendig wären. Dennoch ist die Parameterbestimmung hoch komplex, insbesondere für ein multivariates periodisches Modell, wie es für die Untersuchung eines Talsperrensystems mit mehreren korrelierten Zuflüssen benötigt wird.

Eine Lösung des Problems, eine große Anzahl von Parametern aus einer kleinen Anzahl von Stichprobenwerten bestimmen zu müssen, wird von VALENCIA & SCHAAKE (1973) vorgestellt. Die Methode basiert auf der getrennten Abbildung der statistischen Eigenschaften bezogen auf die jährliche Zeitska-

la und der innerjährlichen Skala (Jahreszeiten, Monate, Wochen) einer Zeitreihe. Hierzu wird zunächst eine Zeitreihe der jährlichen Werte generiert und diese anschließend auf die gewünschte Zeitschrittweite disaggregiert. Der Prozess der Disaggregation, dem Brechen in kleinere Zeitschritte, kann in mehreren Schritten erfolgen, beispielsweise von Jahren auf Jahreszeiten und in einem zweiten Schritt von Jahreszeiten auf Monate. Zugrunde liegt jeweils die Annahme eines linearen Zusammenhangs der Abhängigkeit zwischen den beiden Zeitreihen unterschiedlicher Zeitschrittweite. Die lineare Beziehung ist dabei nicht eindimensional, sondern multivariat, analog zu einem multivariaten Autoregressionsmodell. Die Anzahl der Parameter zur Generierung monatlicher Abflüsse an s Pegeln nach VALENCIA & SCHAAKE (1973) ist $156 s^2$ (SRIKANTHAN & MCMAHON, 1999).

Eine weitere verbreitete Disaggregierungsmethode ist das Verfahren mit Fragmenten nach SVANIDZE (1980). Fragmente beschreiben hierbei die anteilige Verteilung des Abflusses über das Jahr. Diese wird für jedes Jahr der gemessenen Zeitreihe bestimmt. Basierend auf der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Jahresabflüsse lassen sich synthetische Jahresabflüsse generieren. Diese werden im ursprünglichen Verfahren mit zufällig ausgewählten Fragmenten kombiniert, um den disaggregierten Abfluss für die kleinere Zeitschrittweite zu erhalten. Eine Erweiterung dieses ursprünglichen Verfahrens zur Generierung multivariater Zeitreihen wählt das Fragment des gemessenen Jahres mit der geringsten Abweichung zum betrachteten simulierten Jahr aus (SRIKANTHAN & MCMAHON, 1982). Nachteile der Methode der Fragmente sind zum einen, dass die Autokorrelation zwischen dem letzten Zeitschritt eines Jahres und dem ersten Zeitschritt des Folgejahres nicht berücksichtigt wird und zum anderen, dass die innerjährliche Varianz der simulierten Reihe nicht größer als die gemessene sein kann. Dies bewirkt, dass simulierte Jahre mit größerem oder kleinerem Abfluss als dem gemessenen immer nach der Abflussverteilung im Jahr mit dem größten bzw. kleinstem gemessenen Abfluss disaggregiert werden. Dennoch wird dieses Verfahren in einer Vielzahl von Studien verwendet, da es einfach umsetzbar ist und sich gut auf Flüsse sehr hoher Varianz des Abflusses oder episodischem Abfluss anwenden lässt (KJELDSSEN, 2001; MCMAHON ET AL., 2006; GUIMARÃES & SANTOS, 2011). Die Verfahren der Disaggregation lassen sich auch auf andere Umweltvariablen als den Durchfluss anwenden. So beschreiben EUM & SIMONOVIC (2012) anhand der statistischen Generierung langer Zeitreihen von Temperatur und Niederschlag sowie ihrer Disaggregation auf stündliche Werte nach SVANIDZE den Einfluss des Klimawandels auf Extremereignisse.

Es existieren weitere Modellansätze zur statistischen Generierung von Abflusszeitreihen. Zu nennen sind *Fractional-Noise-Modelle* (WALLIS & MANDELBROT, 1968; KOUTSOYIANNIS, 2002), welche auf die Wiedergabe sehr langfristiger Zyklen des Abflussprozesses abzielen. JAIN & BHUNYA (2008) untersuchen den Einfluss des Verfahrens zur Generierung von Zuflussganglinien auf die Varianz der Leistungsindikatoren der Wasserbereitstellung (Zuverlässigkeit, Widerstandsfähigkeit und Verwundbarkeit). Anwendungsbeispiel ist die Dharoi Talsperre in Indien mit einem Ausbaugrad von 76 % und einem Ausgleichsgrad von 42 %. Sie vergleichen ein Autoregressionsmodell zur Generierung monatlicher Zuflüsse und ein Modell mit sehr langem Gedächtnis. Als Modell mit sehr langem Gedächtnis verwenden sie ein *Fractional-Noise-Modell* zur Generierung jährlicher Abflüsse mit anschließender Disaggregation nach VALENCIA & SCHAAKE auf monatliche Abflüsse. Es wird gezeigt, dass die Berücksichtigung der Persistenz des Zuflusses zu einer höheren Varianz der Leistung führt. Bei der Abbildung der als stationär angenommenen Bedingungen in Klimareferenzperioden ist der Einfluss solcher langfristiger Zyklen jedoch zu vernachlässigen. Diese Modelle sollen hier nicht weiter untersucht werden.

Gemeinsam ist allen bisher vorgestellten Modellen, dass sie, wie zu Beginn dieses Kapitels dargelegt, eine Transformation der Eingangsdaten auf die Normalverteilung mit anschließender Rücktransformation benötigen. Die Wahl einer geeigneten Wahrscheinlichkeitsverteilung ist insbesondere für kurze gemessene Referenzzeitreihen problematisch und statistische Tests zur Bestimmung der Anpassungsgüte vermögen es vielfach nicht, Unterschiede zwischen den zur Wahl stehenden Verteilungsfunktionen aufzuzeigen (SHARMA ET AL., 1997). Entsprechend ist die Unsicherheit bei kurzen gemessenen Referenzzeiträumen sehr hoch, da eine Vielzahl von Modellparametern für ein saisonales, multivariates Zeitreihenmodell aus wenigen Messwerten bestimmt werden müssen. Hinzu kommt die Problematik, dass die bisher vorgestellten Modelle zwar die abzubildenden statistischen Momente des Zuflussprozesses im Gaussraum gut wiederzugeben vermögen, die Rücktransformation auf die angenommene Wahrscheinlichkeitsverteilung des Zuflusses aber die Abbildungsgüte in der Regel negativ beeinflusst. In der praktischen Anwendung konnten sich die Verfahren daher schwer durchsetzen und es wurden vielfach einfachere Ansätze gewählt. Auch in Bezug auf die hier gestellten Anforderungen sind die bislang vorgestellten parametrischen Verfahren nicht geeignet, da die Vielzahl zu bestimmender Parameter für ein multivariates Modell wöchentlicher Auflösung auf Basis kurzer Referenzzeiträume zu große Unsicherheiten bedingt.

Die Probleme der Parameterbestimmung und die Entwicklung der Computertechnik führten zu einer weiteren Klasse von Verfahren zur Generierung synthetischer Abflusszeitreihen. Sie werden als nicht-parametrisch oder datengetrieben bezeichnet. Hohe Beachtung fand beispielsweise die Anwendung eines einfachen *resampling*-Ansatzes durch das *United States Bureau of Reclamation*, welcher, aufgrund der einfachen Anwendbarkeit und guten Performance, die bestehenden AR(1)-Verfahren der Bundesbehörde ablöste (KENDALL & DRACUP, 1991). Beim *resampling* werden die gemessenen Abflüsse wiederholt in neuer Abfolge angeordnet und so eine beliebig lange Zeitreihe generiert, die bei Beachtung von Regeln zur erneuten Anordnung ähnliche statistische Eigenschaften wie die gemessene Zeitreihe aufweist. Eine verbreitete Regel zur erneuten Anordnung ist beispielsweise die Nachbarschaft der Werte (LALL & SHARMA, 1996). Nachteil des *resampling* ist, dass keine neuen Werte erzeugt werden und somit auch keine höheren als bislang gemessen. Neben dem *resampling* wurden weitere nicht-parametrische Verfahren entwickelt.

ILICH & DESPOTOVIC (2008) zeigen ein einfaches, nicht-parametrisches Verfahren, welches Abflusszeitreihen an mehreren Pegeln für wöchentliche Auflösung in drei Schritten generiert. Dieses Verfahren soll hier vorgestellt werden.

Nicht-parametrische Modelle umgehen das Problem der Auswahl und Anpassung einer Wahrscheinlichkeitsverteilung sowie anschließender Transformation und Rücktransformation, indem ein gewichtetes gleitendes Mittel der empirischen Häufigkeitsverteilung an die Ausgangsdaten angepasst wird (SHARMA ET AL., 1997). Die so empirisch angepasste Verteilungsfunktion wird als Kern-Schätzung (*kernel estimate*) bezeichnet. Das Vorgehen hierbei ist ähnlich der Erstellung eines Histogramms, welches die Häufigkeit des Auftretens von Werten innerhalb festgelegter Intervalle darstellt (siehe Beispiel in Abbildung 4-9). Das Histogramm dient häufig der ersten Einschätzung der den Daten zugrundeliegenden Wahrscheinlichkeitsverteilung. Für tägliche, wöchentliche oder monatliche Abflüsse zeigt sich häufig eine Dichteverteilung mit mehreren Maxima, die physikalisch durch nicht-lineare und Hysterese-Effekte der Bodenfeuchte, Schneeschmelze und Evapotranspiration entstehen. Die Beschreibung dieser Effekte ist mittels parametrischer Verteilungen nicht möglich. Dies verdeutlicht Abbildung 4-10, welche die nach Kern-Schätzung bestimmte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der

Werte aus Abbildung 4-9 der Anpassung nach Log-Normal-Verteilung gegenüberstellt. Während die Kernanpassung ebenfalls zwei Maxima zeigt, können diese von der Log-Normal-Anpassung nicht abgebildet werden.

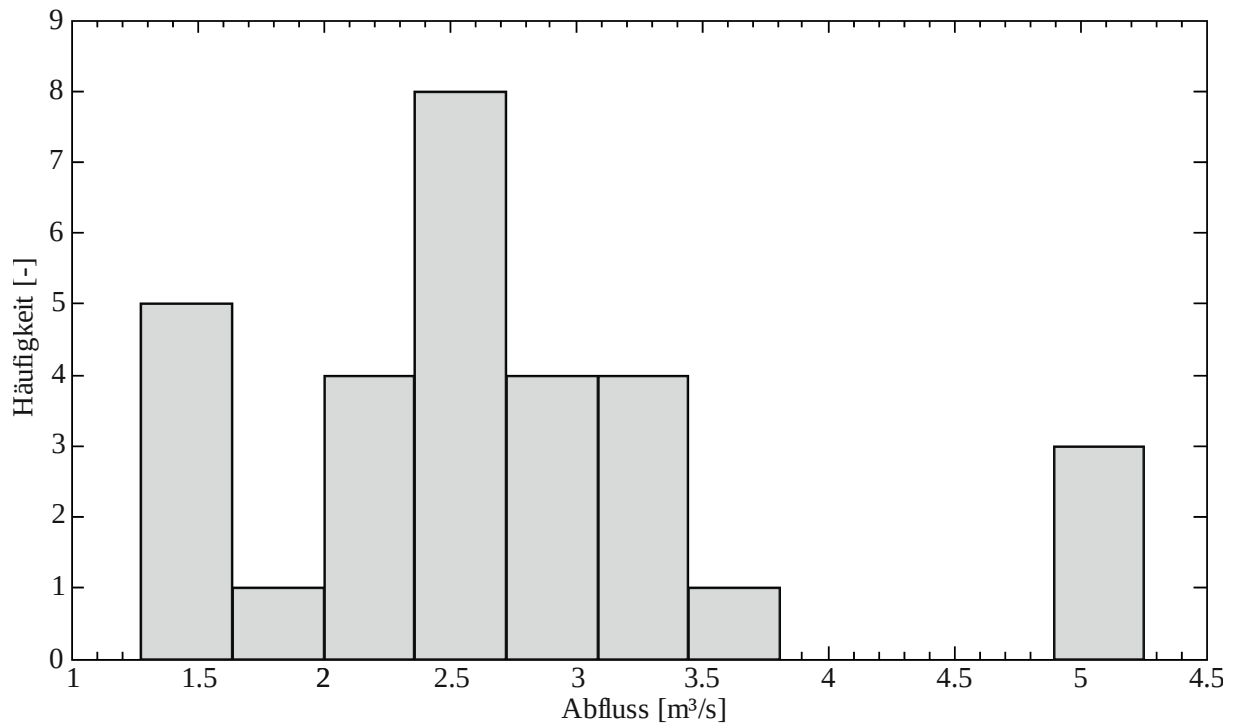


Abbildung 4-9 Histogramm der wöchentlichen Zuflüsse zur Urftalsperre der 2. Maiwoche zwischen 1970 und 2000

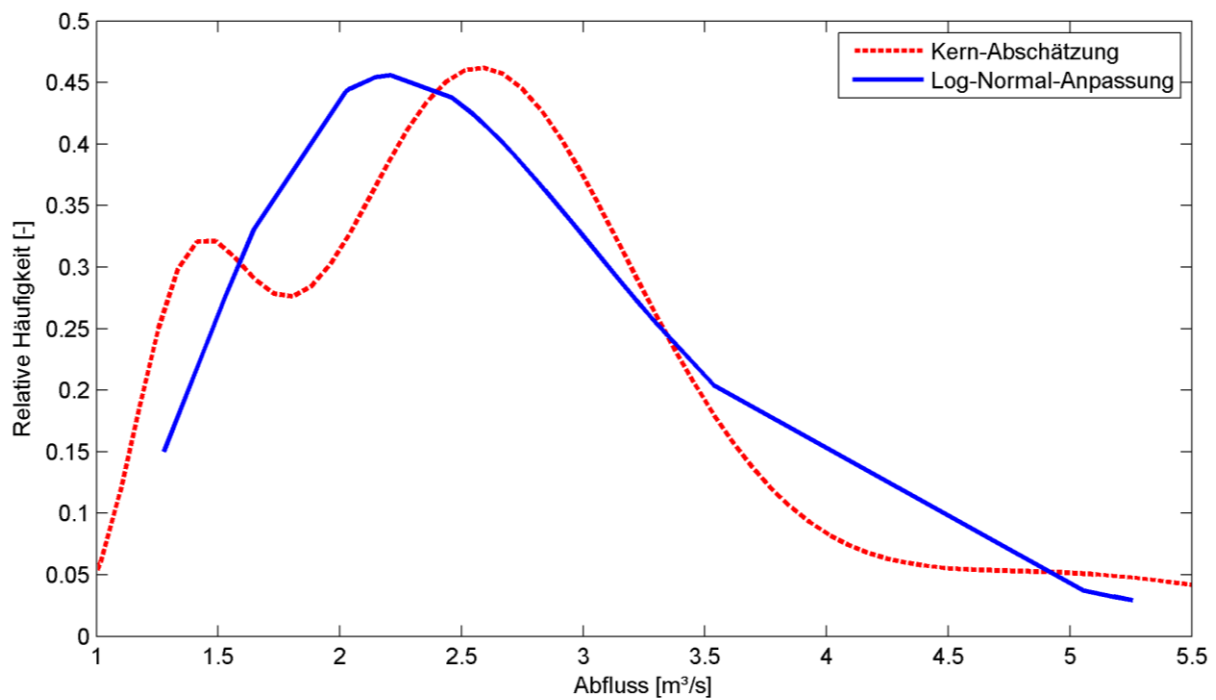


Abbildung 4-10 Vergleich der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion nach Kern-Schätzung und Log-Normal Anpassung

Die Erweiterung des Histogramms zur Kern-Schätzung wird als Glättung (*smoothing*) bezeichnet und folgt Gleichung (4.10).

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (4.10)$$

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-x^2/2) \quad (4.11)$$

K ist die Kernfunktion zentriert um jeden der n Punkte x_i und h ist die Bandbreite, welche den maximalen Abstand der Datenpunkte x zur Bestimmung des lokalen Kerns festlegt. Gleichung (4.11) zeigt die Kernfunktion nach GAUSS. Zur Anwendung der Kerndichtenfunktion auf Abflussdaten, welche nur positive Werte annehmen, werden die Datenpunkte logarithmisch transformiert, die Kern-Schätzung für die transformierten Werte durchgeführt und die so berechneten Werte anschließend zurück transformiert. Bestehende Software-Lösungen ermöglichen die einfache Anwendung des Verfahrens (BOWMAN & AZZALINI, 1997). Durch Integration lässt sich die Verteilungsfunktion mittels der Kern-Schätzung aus der bestehenden Stichprobe berechnen. Neue Stichproben lassen sich aus der so bestimmten Verteilungsfunktion ziehen (*sampling*). Hierzu wird eine gleichverteilte Pseudo-Zufallszahl zwischen Null und Eins generiert und anschließend der hierzu korrespondierende Abfluss aus der Verteilungsfunktion abgelesen. Im ersten Schritt des Verfahrens nach (ILICH & DESPOTOVIC, 2008) werden so Zeitreihen des wöchentlichen Abflusses aus der Verteilungsfunktion generiert.

Abbildung 4-11 zeigt für Zuflüsse der 2. Maiwoche zur Urfttalsperre im Zeitraum 1970 bis 2000 (Stichprobe von 30 Werten als blaue Punkte dargestellt) die Kern-Schätzung der Dichtefunktion (oben) und der Verteilungsfunktion (unten) in blau und die entsprechenden Funktionen für 1000 anhand von Stichproben-Generierung simulierten Realisationen. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Funktionen für die simulierten und gemessenen Werte.

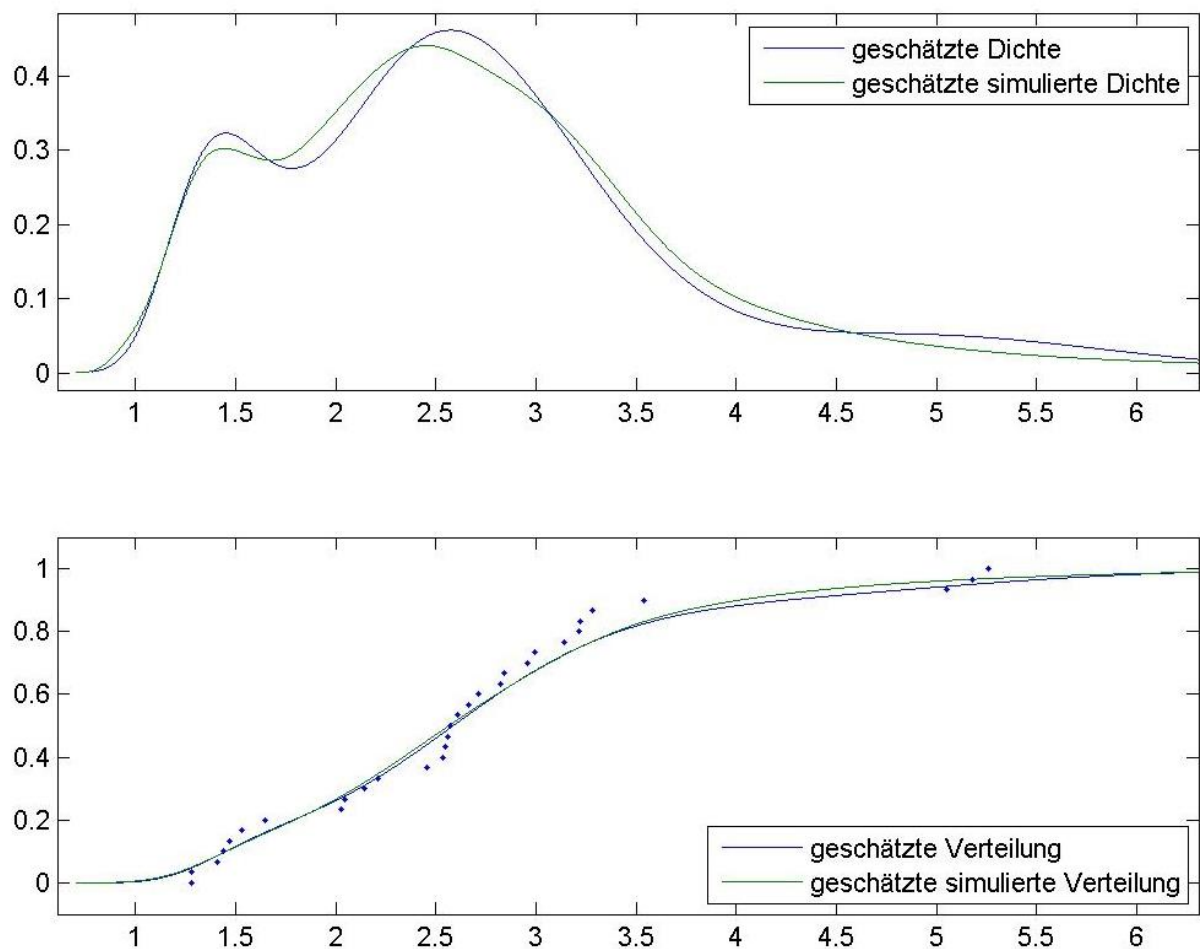


Abbildung 4-11 Wahrscheinlichkeitsdichte (oben) und Verteilungsfunktion (unten) aus 30 gemessenen Werten und 1000 simulierten Realisationen

Das Verfahren erlaubt es, beliebig lange, synthetische Realisationen von Abflüssen auf Basis auch kleiner gemessener Stichproben zu generieren. Damit erfüllt es die Anforderung, lange Zeitreihen hoher zeitlicher Auflösung auf Basis relativ kurzer Referenzzeiträume zu generieren.

Zur Verfeinerung des Verfahrens kann während der Generierung der wöchentlichen Abflüsse durch Ziehen aus der Verteilungsfunktion überprüft werden, ob die statistischen Momente der generierten Abflüsse mit denen der gemessenen Werte übereinstimmen (ILICH & DESPOTOVIC, 2008). Von Interesse sind hier die ersten beiden Momente: Mittelwert und Standardabweichung. Soll beispielsweise eine Zeitreihe von 100 Jahren generiert werden, und stimmen Mittelwert und Standardabweichung der betrachteten Wochenabflüsse nach Ziehen der ersten 100 Werte nicht mit dem gemessenen Mittelwert und der gemessenen Standardabweichung überein, so werden weitere Werte gezogen und fortschreitend der gleitende Mittelwert und die gleitende Standardabweichung der zuletzt gezogenen 100 Werte berechnet. Es werden dann solange weitere Werte generiert bis eine Sequenz von 100 Werten gefunden wurde, deren Mittelwert und Standardabweichung mit der geforderten Genauigkeit denen der gemessenen Serie entspricht.

Was von dieser Anwendung der nicht-parametrischen Statistik noch nicht abgebildet wird, ist die Abhängigkeit zwischen Abflüssen an verschiedenen Stationen im gleichen Zeitraum (räumliche Korrelation, siehe Glossar), zwischen Abflüssen zu unterschiedlichen Zeiträumen an gleicher Stelle (Autokor-

relation, siehe Glossar) sowie zwischen Abflüssen zu unterschiedlichen Zeiträumen an verschiedenen Stationen (Kreuzkorrelation). Diese Abhängigkeiten berücksichtigen die zuvor vorgestellten parametrischen Verfahren teilweise anhand der Parameter, die aus der Korrelationsmatrix abgeleitet werden. Entsprechend existieren ebensolche nicht-parametrischen Ansätze, welche die gemeinsame Verteilungsfunktion von beispielweise dem Abfluss zum betrachteten Zeitpunkt und dem vorhergehenden Zeitpunkt zur Berücksichtigung der Autokorrelation bestimmen (SHARMA ET AL., 1997). Solche multivariaten Verfahren sind jedoch aufwendig in der Anwendung und sind, genau wie die parametrischen Verfahren, beschränkt auf die Berücksichtigung weniger Abhängigkeiten, um die Dimension der Verteilungsfunktion nicht zu groß werden zu lassen. Eine Alternative zur Berücksichtigung der Abhängigkeiten zwischen den Abflüssen zu verschiedenen Zeitpunkten und an verschiedenen Orten stellen Sortieralgorithmen dar, welche die unabhängig generierten Abflüsse so anordnen, dass die Korrelationsstruktur der gemessenen Stichprobe angenähert wird (IMAN & CONOVER, 1982). Ziel ist es, die Rangkorrelation der historischen Daten durch Tauschen der Werte des Abflusses einer Woche in einem Jahr mit den Werten eines anderen Jahres für die generierten Abflüsse herzustellen. Da nur Werte der jeweils gleichen Woche getauscht werden, ändern sich die Verteilungsfunktionen der Abflüsse nicht. Das Verfahren basiert auf Matrizenoperationen und ist in der rechentechnischen Umsetzung sehr effizient. Ergebnisse dieses zweiten Schrittes der Generierung synthetischer Talsperrenzuflüsse wöchentlicher Auflösung sind in Abbildung 4-12 und Abbildung 4-13 dargestellt. Zur Beurteilung der Korrelation zwischen zwei Datensätzen eignen sich Punktwolken, welche in den gezeigten Abbildungen um Regressionsgraden ergänzt wurden. Es zeigt sich deutlich, dass sich die Korrelation der simulierten Daten nach der Sortierung der Korrelation der historischen (gemessenen) Daten angleicht, sowohl für den räumlichen Fall (Abbildung 4-12) als auch für den Fall der Autokorrelation (Abbildung 4-13).

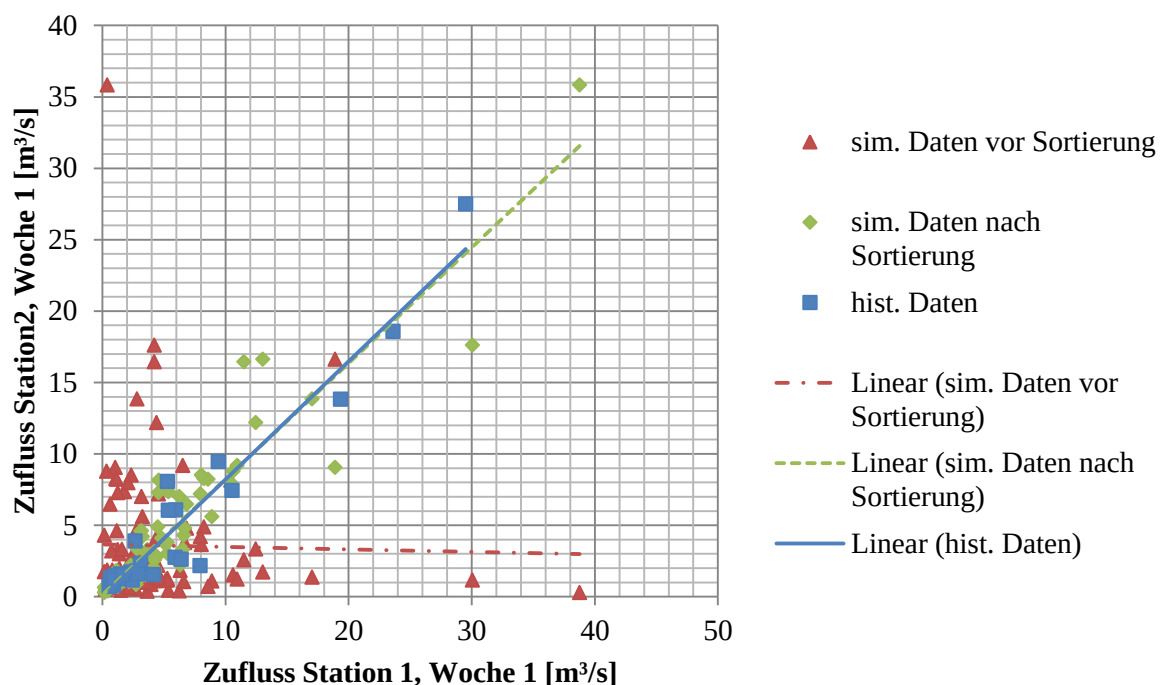


Abbildung 4-12 Herstellen der Korrelation zwischen Abflüssen benachbarter Stationen

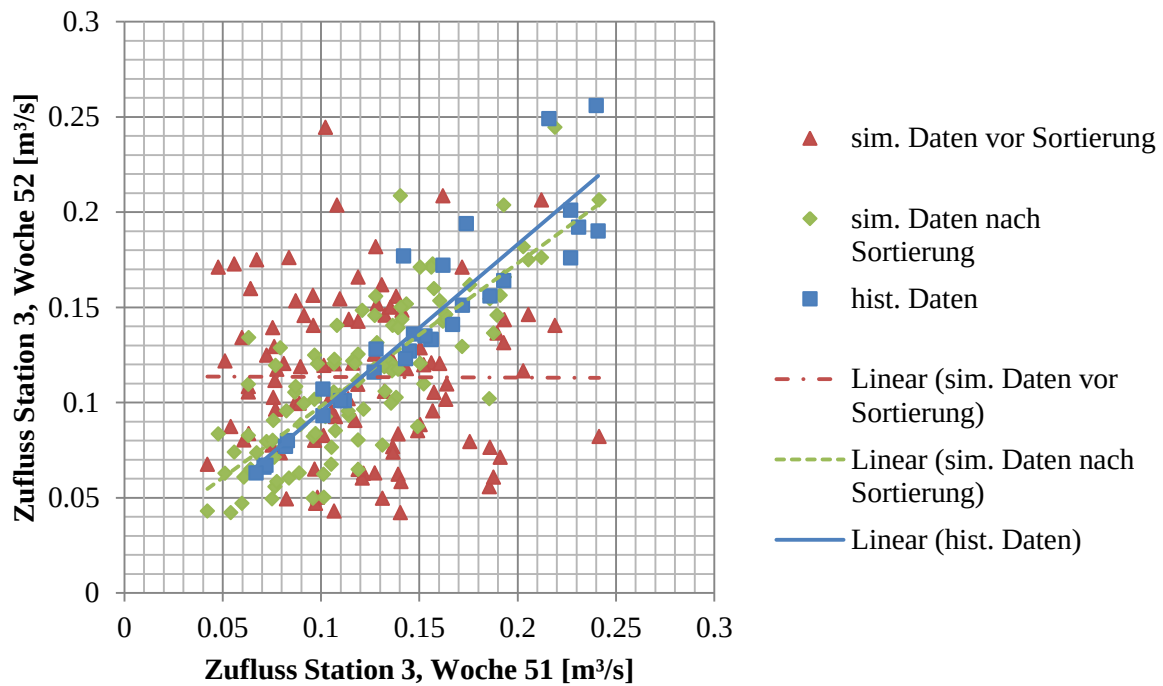


Abbildung 4-13 Herstellen der Korrelation zwischen Abflüssen aufeinanderfolgender Wochen einer Station

Zur Verwendung als Randbedingung für die Untersuchung des Niedrigwasserrisikos müssen die generierten Zuflusszeitreihen sowohl die statistischen Momente des wöchentlichen Abflusses als auch die Momente der jährlichen Zuflüsse abbilden. Es sollen, wie schon bei den wöchentlichen Abflüssen, wieder die ersten beiden statistischen Momente Mittelwert und Standardabweichung berücksichtigt werden. Während sich der Mittelwert der jährlichen Zuflusssumme einfach aus dem Mittelwert der Wochen ergibt, hängt die Standardabweichung der jährlichen Zuflusssumme nicht allein von der Standardabweichung der wöchentlichen Abflüsse, sondern auch von deren Korrelation bzw. von der Kovarianz Cov ab (siehe Gleichung (4.12), (WEISSTEIN, 2013)).

$$Var\left(\sum_{i=1}^n X_i\right) = \sum_{i=1}^n Var(X_i) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n Cov(X_i, X_j) \quad (4.12)$$

Die Varianz Var (deren Wurzel die Standardabweichung ist) der Summe der Zuflüsse X_i setzt sich zusammen aus der Summe der Varianzen der Wochenabflüsse sowie einem Term, welcher die Kovarianzen der Wochenabflüsse zueinander berücksichtigt. Um sowohl die Standardabweichung der wöchentlichen Abflüsse als auch die Standardabweichung der jährlichen Abflüsse der Referenzzeitreihen hinreichend genau in den generierten Abflüssen abzubilden, wird wiederum eine Abfrage im Generierungsprozess integriert. Diese überprüft nach erfolgreichem Ziehen aller Wochenabflüsse (Schritt 1) und Herstellen der Korrelation (Schritt 2), ob die Standardabweichung der jährlichen Abflüsse getroffen wurde. Bei Nicht-Einhaltung der geforderten Übereinstimmung von Standardabweichung der gemessenen und der generierten Abflüsse werden Schritt 1 und 2 wiederholt bis eine hinreichende Genauigkeit erreicht wird. Diese zweite Schleife stellt eine Erweiterung des von ILICH & DESPOTOVIC (2008) beschriebenen Vorgehens dar.

Mit diesen ersten beiden Schritten können die Verteilung der wöchentlichen Abflüsse, ihre räumliche Korrelation und die zeitliche Korrelation innerhalb eines Abflussjahres abgebildet werden. Bisher fanden aber die zeitliche Korrelation von aufeinanderfolgenden Wochen um den Jahreswechsel sowie die jährliche Autokorrelation noch keine Berücksichtigung. Dies geschieht in einem dritten Schritt. Analog zum Tausch von Werten des Abflusses einer Woche in verschiedenen Jahren (in Schritt 2), bewirkt auch die Veränderung der Reihenfolge der Abflussjahre keine Änderung an der Verteilung der wöchentlichen Abflüsse oder der Korrelationsstruktur selbiger. Dies kann man sich zu Nutzen machen, um die Zeilen der Matrix der generierten Abflüsse derart anzuordnen, dass die Korrelation von aufeinanderfolgenden Wochen um den Jahreswechsel sowie die jährliche Autokorrelation der generierten Zeitreihen denen der gemessenen Zeitreihe angenähert wird (ILICH & DESPOTOVIC, 2008). Die Schritte sind zusammenfassend in Abbildung 4-14 dargestellt.

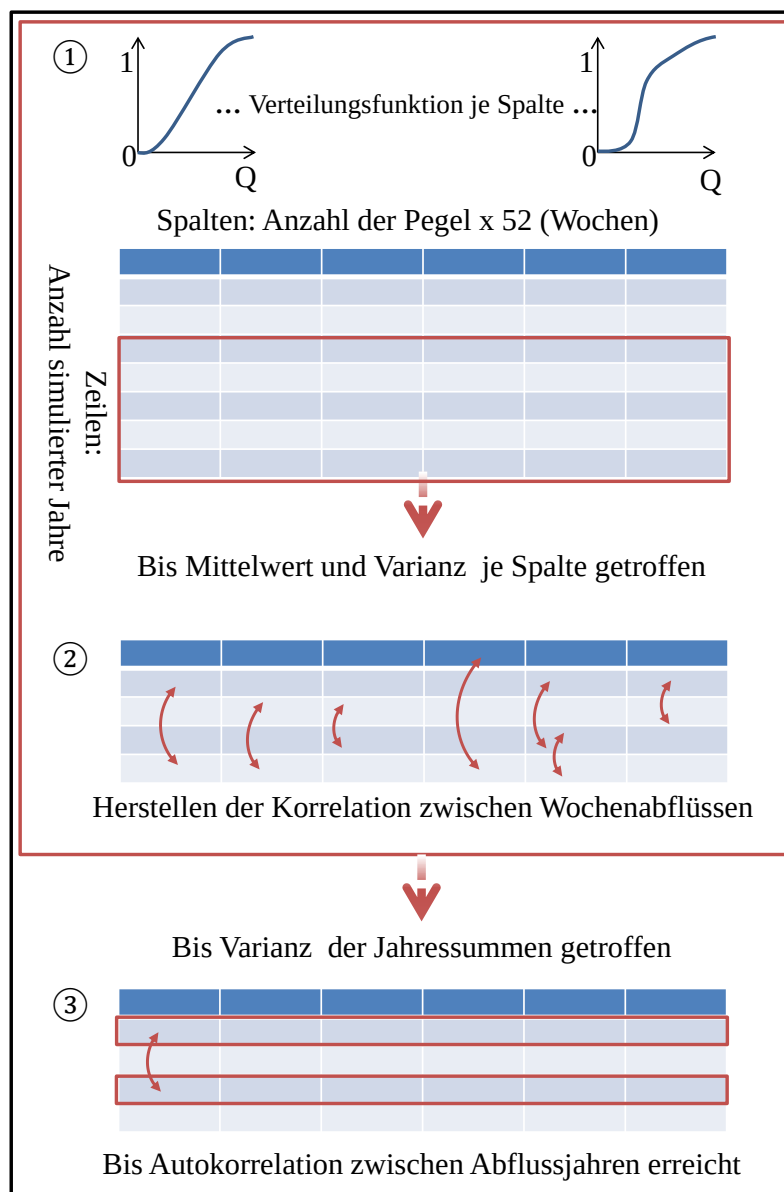


Abbildung 4-14 Vorgehen zur Generierung von wöchentlichen Abflüssen als Randbedingung für die Niedrigwasserrisikobewertung

Das vorgestellte Verfahren ist geeignet, Zuflussganglinien, welche die statistischen Eigenschaften der gemessenen Zuflüsse abbilden, in wöchentlicher Auflösung für mehrere benachbarte Speicher und in beliebiger Länge zu liefern. Es eignet sich damit zur Generierung von Randbedingungen für die Bewertung des Niedrigwasserrisikos für die Wasserbereitstellung aus Talsperren. Zudem können Änderungen der statistischen Eigenschaften des Zuflusses, wie sie sich durch den prognostizierten Klimawandel ergeben, einfach abgebildet werden. Hierbei kann sich zu Nutzen gemacht werden, dass die Abbildung der beiden statistischen Momente Mittelwert und Standardabweichung sowohl der wöchentlichen als auch der jährlichen Abflüsse sowie der jährlichen Autokorrelation programmtechnisch iterativ bis zum Erreichen des Zielwertes erfolgt. Dieser Zielwert wird zur Abbildung der Eigenschaften der gemessenen Zuflüsse aus diesen bestimmt, kann jedoch zur Abbildung veränderter klimatischer Bedingungen auch nahezu beliebig vorgegeben werden. Die Erweiterung des Verfahrens zur Abbildung von Klimaänderungen wird in Kapitel 5.4 genauer beschrieben.

Bestimmung der Konsequenzen und Eintrittswahrscheinlichkeit von Versagensereignissen

Unter Verwendung der zuvor generierten Zuflussganglinien wird der Talsperrenbetrieb unter Berücksichtigung aller Betriebsregeln und Abhängigkeiten zwischen verbundenen Speichern simuliert. Hierzu wird das Simulationsprogramm TALSIM (LOHR, 2001) verwendet. Ergebnis der Simulation ist eine Zeitreihe der Abgaben aus den untersuchten Talsperren. Diese wird mittels eines Werkzeugs zur Zeitreihenanalyse auf Abschnitte hin untersucht, in denen die geforderte Mindestabgabe nicht eingehalten werden konnte. Ergebnis dieser Zeitreihenanalyse sind Dauer und Fehlmenge einzelner Versagensereignisse. Unter Verwendung des zuvor in Kapitel 4.3.1 beschriebenen Ansatzes lassen sich hieraus für jedes Versagensereignis die resultierenden Schäden als Produkt von Versagensdauer, Fehlmenge und Anfälligkeit berechnen. Aus der empirischen Häufigkeitsverteilung der Schäden kann anschließend die Überschreitungswahrscheinlichkeit der Versagensereignisse ermittelt werden. Zur vergleichenden Analyse der Leistungsfähigkeit der Talsperre erfolgt die Abbildung aller Wassernutzer unterstrom der Talsperre als virtueller Einzelnutzer mit einer mittleren Anfälligkeit gegenüber Wasserdefiziten. Liegen detailliertere Informationen zu Wasserbedarf, Priorisierung und Anfälligkeit einzelner Nutzer vor, kann eine feinere räumliche Diskretisierung zur Schadensberechnung verwendet werden.

Risiko

Analog zum Vorgehen zur Berechnung des Hochwasserrisikos erhält man das Niedrigwasserrisiko der Nutzer der Wasserbereitstellung aus einer Talsperre, oder eines Talsperrensystems, durch Integration aller Schadensereignisse über deren Eintrittswahrscheinlichkeit. Es wird der gleiche Ansatz zur Approximation der Risikokurve durch eine Treppenfunktion verwendet.

Die Modellkette zur Bestimmung des Niedrigwasserrisikos ist in Abbildung 4-15 zusammenfassend dargestellt. Nach Generierung einer langen Zeitreihe der wöchentlichen Talsperrenzuflüsse mit Hilfe des beschriebenen nicht-parametrischen Verfahrens, lässt sich der Talsperrenbetrieb simulieren, unter Berücksichtigung aller Betriebsregeln und Nutzungsansprüche. Diese Simulation liefert eine Zeitreihe der Abgabe, welche auf schadensverursachende Niedrigwasserereignisse hin analysiert wird. Die Eintrittswahrscheinlichkeit der Schäden wird aus ihrer empirischen Häufigkeitsverteilung bezogen auf den Simulationszeitraum bestimmt. Durch Integration der Schadensereignisse über ihre Eintrittswahrscheinlichkeit lässt sich das Risiko berechnen.

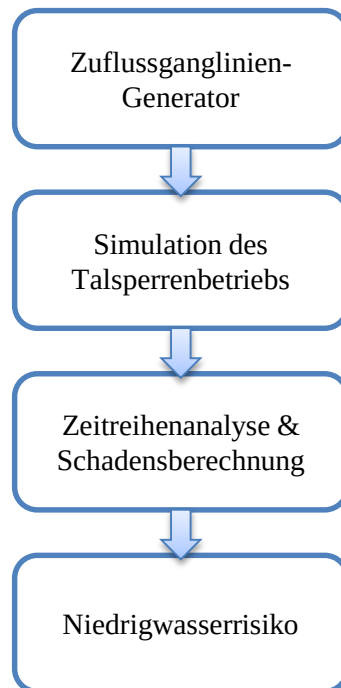


Abbildung 4-15 Modellkette zur Berechnung des Niedrigwasserrisikos

4.4 Wasserwirtschaftliches Gesamtrisiko

Um eine ganzheitliche Kennzahl zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Talsperren zu erhalten, können Niedrigwasserrisiko und Hochwasserrisiko zum wasserwirtschaftlichen Gesamtrisiko zusammengefasst werden (siehe Abbildung 4-16).

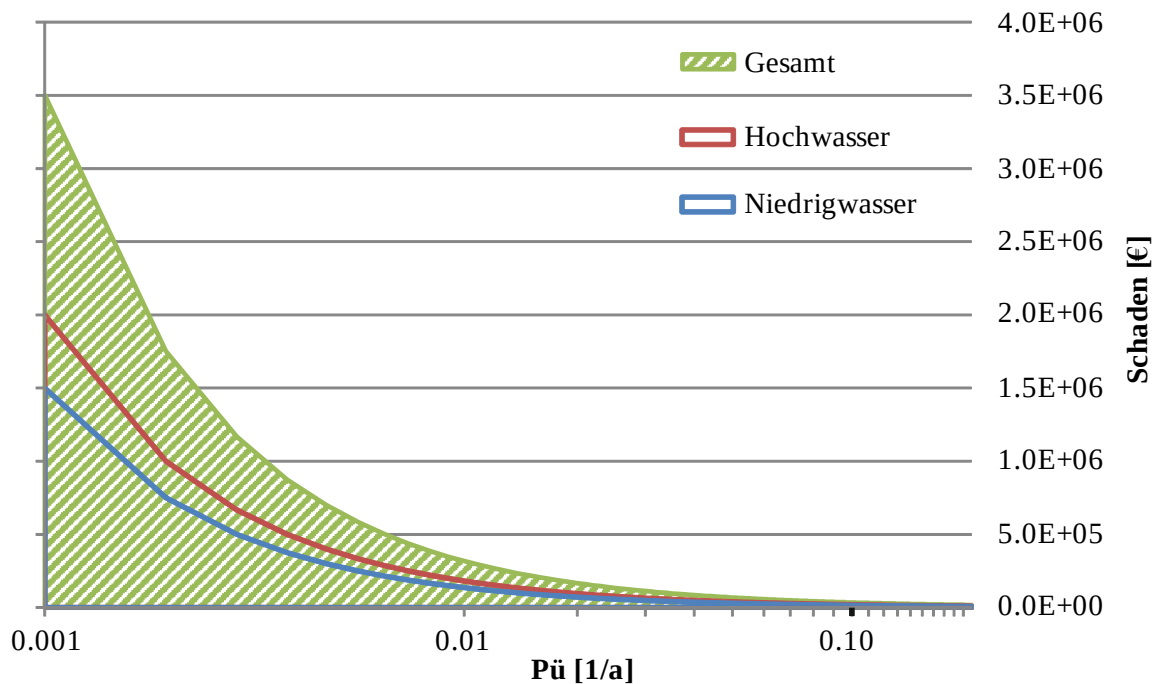


Abbildung 4-16 Skizzierte Risikokurven für Niedrigwasser, Hochwasser und Gesamtrisiko (logarithmischer Maßstab)

Hierzu sind sowohl bei der Bestimmung des Hochwasserrisikos als auch des Niedrigwasserrisikos der gleiche Bezugszeitraum zu wählen, beispielsweise 1000 Jahre. Ist diese Voraussetzung erfüllt, können die jährlichen Schadenserwartungswerte bezüglich Hochwasser und Niedrigwasser zum Gesamtrisiko, dem mittleren, jährlich zu erwartenden, wasserwirtschaftlichen Schaden addiert werden.

Je kleiner das wasserwirtschaftliche Gesamtrisiko, desto größer ist die Leistungsfähigkeit der untersuchten Talsperren.

4.5 Zusammenfassung

Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Talsperren reicht die als Bemessungswert verwendete hydrologische Sicherheit nicht aus. Vielmehr sind hierzu auch die Konsequenzen von Versagensereignissen in Verbindung mit ihrer Eintrittswahrscheinlichkeit zu betrachten. Erst damit lässt sich eine risikobasierte Bewertung der Leistungsfähigkeit vornehmen. Um die Eintrittswahrscheinlichkeit von Versagensereignissen bestimmen zu können, ist eine umfassende Erfassung und statistische Beschreibung der Zuflussrandbedingungen erforderlich. Aufgrund der unterschiedlichen Zeitskalen von Hochwasserereignissen und Niedrigwasserperioden werden zur statistischen Beschreibung dieser Phänomene unterschiedliche Modelle verwendet.

Die Beschreibung der Zuflüsse bei Hochwasser erfolgt hier mit Hilfe des bestehenden Verfahrens der Hochwassermerkmal-Simulation. Diese liefert Zeitreihen einzelner Hochwasserereignisse gegebener Eintrittswahrscheinlichkeit. Die für jedes Hochwasserereignis resultierenden Überflutungsflächen können mittels hydrodynamischer Simulation berechnet und daraus die Konsequenzen als zu erwartender Hochwasserschaden bestimmt werden. Die Integration der Hochwasserschäden über die Eintrittswahrscheinlichkeit der untersuchten Ereignisse ergibt das Hochwasserrisiko des unterstrom der Talsperren gelegenen Gebiets. Je niedriger das Hochwasserrisiko ist, desto höher ist die Leistungsfähigkeit der Talsperren bezüglich des Hochwasserschutzes.

Für die Bewertung der Leistungsfähigkeit der Wasserbereitstellung aus Talsperren existiert bislang kein vergleichbares Verfahren. In der vorliegenden Arbeit wird daher eine entsprechende Methodik zur Bestimmung des Niedrigwasserrisikos erarbeitet. Grundlage dieser Methode bildet die statistische Generierung von Zuflussganglinien langer Dauer und wöchentlicher Auflösung. Um Zeitreihen wöchentlicher Auflösung multivariat, für mehrere Zuflüsse eines Talsperrensystems generieren zu können, wurde ein nicht-parametrisches Verfahren ausgewählt und an die Erfordernisse angepasst. Für die so generierten Zuflussganglinien wird der Talsperrenbetrieb detailliert durch Simulation abgebildet. Aus den Ergebnissen dieser Talsperrensimulation können Versagensereignisse der Wasserbereitstellung identifiziert werden, ihre Ausprägung und resultierenden Schäden bestimmt und die empirische Eintrittswahrscheinlichkeit einzelner Schadensereignisse berechnet werden. Durch Integration aller Schadensereignisse über ihre Eintrittswahrscheinlichkeit kann nun, analog zum Vorgehen zur Bestimmung des Hochwasserrisikos, das Niedrigwasserrisiko bestimmt werden. Hochwasser- und Niedrigwasserrisiko lassen sich anschließend zum wasserwirtschaftlichen Gesamtrisiko zusammenfassen, womit die Leistungsfähigkeit der Talsperren ganzheitlich beschrieben wird.

Die verwendeten Verfahren zur statistischen Beschreibung der Zuflussrandbedingungen erlauben es, veränderliche klimatische Bedingungen abzubilden, so dass das beschriebene Vorgehen zur risikobasierten Bewertung der Leistungsfähigkeit von Talsperren auch zur Bestimmung des Einflusses der Klimaänderung verwendet werden kann. Wie die Klimaänderung erfasst und ihre Auswirkung auf die

Leistungsfähigkeit bestehender Talsperren bewertet werden kann, wird im folgenden Kapitel dargestellt.

5 Bestimmung des Einflusses der Klimaänderung auf die Leistungsfähigkeit von Talsperren

5.1 Einleitung

Das Klima an einem Ort ist der langfristige, mittlere Zustand der meteorologischen Größen wie Temperatur, Niederschlag und Wind. Als Bezugsperiode zur Beschreibung langfristiger mittlerer Zustände werden allgemein 30 Jahre verwendet (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 2003). Das Klima bestimmt die Rahmenbedingungen des Lebens und Wirtschaftens, beispielsweise die Wasserverfügbarkeit. Es unterliegt Schwankungen, welche durch Änderungen der Sonneneinstrahlung auf die Erde und die Zusammensetzung der Atmosphäre bedingt sind. Seit Mitte des 20. Jahrhunderts ist eine deutliche Erwärmung des Klimas in allen Weltregionen zu beobachten. Der zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) kommt auf Basis der verfügbaren wissenschaftlichen Erkenntnisse zu dem Schluss, dass diese Erwärmung sehr wahrscheinlich (90 % Übereinstimmung der verschiedenen Messungen und verschiedenen Modelle) menschengemacht ist (IPCC, 2007a). Die Konzentration klimawirksamer Gase in der Erdatmosphäre übersteigt im Jahr 2005 die natürliche, wie sie aus Eisbohrkernen für die letzten 650.000 Jahre rekonstruiert wurde, bei weitem (IPCC, 2007a). Der Anstieg ist bedingt durch Nutzung fossiler Energien und veränderter Landnutzungen und wird sich, sollte sich die globale Gesellschaft nicht weitgehend ändern, fortsetzen. Für die Zukunft ist daher mit einer signifikanten Änderung des Klimas zu rechnen, so dass die heute verwendeten Bemessungs- und Bewertungsansätze für wasserwirtschaftliche Systeme, welche auf der Annahme stationärer klimatischer Bedingungen beruhen, erweitert werden müssen (MILLY ET AL., 2008).

Im folgenden Kapitel sollen Methoden zur Bewertung des Einflusses der Klimaänderung auf die Leistungsfähigkeit vorgestellt werden. Die Methoden können unterschieden werden in solche, welche Szenarien der Klimaänderung verwenden, um den Einfluss auf Talsperren zu bestimmen und jene, die den funktionellen Zusammenhang zwischen möglichen Klimaänderungen und der Leistungsfähigkeit von Talsperren und Talsperrensystemen beschreiben.

5.2 Klimaszenarien

Heute verfügbare Klimaszenarien werden mittels globaler Zirkulationsmodelle (*general circulation models* GCMs) berechnet, um den Einfluss der Emission von klimawirksamen Gasen und Landnutzungsänderungen auf das globale Klima abzubilden. Der vierte IPCC Report (IPCC, 2007b) verwendet hierzu die Ergebnisse von 23 verschiedenen GCMs, welche wiederum verschiedene Parametersätze sowie Emissions- und Landnutzungsprognosen für die Generierung der einzelnen Klimaszenarien anwenden. Diese Modelle haben die Zielsetzung, den Einfluss der Emission klimawirksamer Gase auf das globale Klima zu bewerten. Sie werden anhand des Vergleichs der berechneten meteorologischen Größen mit den gemessenen Größen eines Kontrollzeitraumes (üblicherweise 30 Jahre) validiert. Die wichtigste Größe ist hierbei die über einen langen Zeitraum (Skala: Jahrzehnte) und ein großes Gebiet (Skala: Kontinente) gemittelte Temperatur. Weitere Modellergebnisse zeigen eine hinreichende (regionale Temperatur) bis unzureichende (Niederschlag) Übereinstimmung (ANAGNOSTOPOULOS ET AL., 2010; KUNDZEWICZ ET AL., 2008). Die räumliche und zeitliche Auflösung der GCMs ist für eine Verwendung bei der Untersuchung von wasserwirtschaftlichen Fragestellungen zu grob. Es wurden daher

sogenannte *Downscaling*-Verfahren entwickelt, welche Modellergebnisse in feinerer Auflösung liefern. Zum Ausgleich der unzureichenden Abbildung der regionalen Gegebenheiten, die sich auch in den regionalen Klimamodellen zeigt, werden statistische Korrekturverfahren angewandt (*bias correction*). Diese Korrekturverfahren entsprechen einer pragmatischen ad hoc Regressionskurve ohne physikalischen Hintergrund, erlauben jedoch die Übertragung der Klimamodellergebnisse auf für die Wasserwirtschaft relevante Skalen (KUNDZEWICZ & STAKHIV, 2010).

Zum *Downscaling* kann zwischen zwei Ansätzen unterschieden werden: Zum einen dynamische, regionale Klimamodelle: Sie verwenden die gleichen numerischen Methoden, wie auch die globalen Modelle, jedoch mit einer höheren Auflösung, wobei die Ergebnisse der globalen Modelle als Randbedingung genutzt werden. Zum anderen statistische *Downscaling*-Verfahren, die auf weitere aufwändige numerische Berechnungen verzichten: Stattdessen prognostizieren sie regionale Klimaänderungen mit Hilfe der statistischen Beziehung zwischen Großwetterlagen, welche vom globalen Modell abgebildet werden, und lokalem Klima, wie es an einzelnen Stationen gemessen wurde. Statistische Verfahren erlauben damit eine feinere Auflösung als dynamische Verfahren, sofern genügend Messdaten zur Verfügung stehen. Die statistischen *Downscaling*-Verfahren können weiter danach unterschieden werden, ob sie die statistischen Beziehungen zwischen großräumigem und lokalem Klima anhand gemessener Daten beider Skalen (*perfect prognosis*) oder zwischen globalen Modellergebnissen für den Referenzzeitraum und lokalem gemessenen Klima (*model output statistics*) bestimmen (MARAUN ET AL., 2010). Der Abgleich zwischen Modellergebnissen und gemessenen Werten soll eine Berücksichtigung der Modellfehler bewirken. Die Wahl eines *Downscaling*-Verfahrens hängt neben den verfügbaren Ressourcen, insbesondere dynamisches *Downscaling* ist sehr rechenintensiv, von den untersuchten meteorologischen Größen sowie der betrachteten Jahreszeit ab (TEUTSCHBEIN ET AL., 2011).

Ergebnisse der Klimamodellierung und des *Downscalings* sind Aussagen über die Änderung der meteorologischen Größen Niederschlag, Bodentemperatur, Windgeschwindigkeit, Sonneneinstrahlung und Luftfeuchte, welche wiederum als Eingangsdaten für die hydrologische Modellierung benötigt werden. Abhängig vom verwendeten *Downscaling*-Verfahren sind gegebenenfalls weitere Schritte erforderlich, um diese Größen in einer für die hydrologische Modellierung benötigten Auflösung zu erhalten. Ein einfaches und häufig angewendetes Verfahren hierzu ist der *Delta-Change*-Ansatz. Dabei wird die gemessene Zeitreihe einer Größe mit dem Änderungssignal der Klimaprojektion beaufschlagt und so eine Zeitreihe in gleicher zeitlicher und räumlicher Auflösung für ein Klimaszenario ermittelt. Die Beaufschlagung erfolgt für die Temperatur häufig additiv und für den Niederschlag multiplikativ. Die Klimaänderung wird so lediglich auf den Mittelwert, die Minimal- und Maximalwerte bezogen. Veränderungen der Varianz werden nicht berücksichtigt (FOWLER ET AL., 2007). Es existieren Verfahren, welche statistische Momente höherer Ordnung berücksichtigen, um beispielsweise eine adäquate Berücksichtigung von Hochwasserereignissen zu erzielen (VAN PELT ET AL., 2012). Einen Überblick über verschiedene *Delta-Change*-Verfahren gibt ANANDHI ET AL. (2011). Ein Nachteil des *Delta-Change*-Ansatzes ist, dass die Länge der Zeitreihen durch die Länge der gemessenen Zeitreihe bzw. des Referenzzeitraums begrenzt ist. Dieser Zeitraum reicht in den meisten Fällen nicht für eine probabilistische Bewertung der Leistung eines wasserwirtschaftlichen Systems aus. Alternativ können Wettergeneratoren verwendet werden, die es ermöglichen, lange synthetische Zeitreihen mit statistischen Eigenschaften zu erzeugen, die das untersuchte Klima repräsentieren. Wettergeneratoren bauen auf den bereits in Kapitel 4.2.2 und 4.3.2 vorgestellten Verfahren zur stochastischen Generierung langer Zuflusszeitreihen auf. Die Simulation stark fluktuierender Größen wie Niederschlag und die für die hydrologische Modellierung notwendige kurze Zeitschrittweite von maximal einem Tag machen

Erweiterungen der beschriebenen Verfahren zur Simulation des vergleichsweise trägen Abflusses notwendig. Ein häufig angewandtes Verfahren hierzu ist das in Kapitel 4.3.2 erwähnte Nachbarschafts-*Resampling* (LALL & SHARMA, 1996). Einen Überblick über weitere Verfahren geben SRIKANTHAN & MCMAHON (1999); FOWLER ET AL. (2007) und MARAUN ET AL. (2010).

Um Klimaszenarien als Randbedingung eines Modells des Talsperrenbetriebs verwenden zu können, ist somit eine umfangreiche Modellkette notwendig:

Am Anfang stehen Szenarien für die zukünftige Entwicklung der globalen Gesellschaft, welche in Emissionsszenarien klimawirksamer Gase überführt werden. Diese Emissionsszenarien dienen als Randbedingung globaler Klimamodelle, deren Ergebnisse durch *Downscaling* regionalisiert werden. An diesen Schritt schließen sich weitere statistische Bearbeitungen der Ergebnisse regionaler Klimamodelle an, um diese als Randbedingung für hydrologische Modelle nutzen zu können. Erst die hydrologische Modellierung liefert Szenarien des Abflusses, mit denen der Talsperrenbetrieb untersucht werden kann. Jeder Modellierungsschritt benötigt Annahmen und bewirkt Unsicherheiten der Ergebnisse, welche im Verlauf der Modellkette anwachsen. Die Modellkette und die Fortpflanzung der Unsicherheit der Ergebnisse sind in Abbildung 5-1 dargestellt. Die Fortpflanzung der Unsicherheit wird auch als Unsicherheitsexplosion bezeichnet (HENDERSON-SELLERS, 1993).

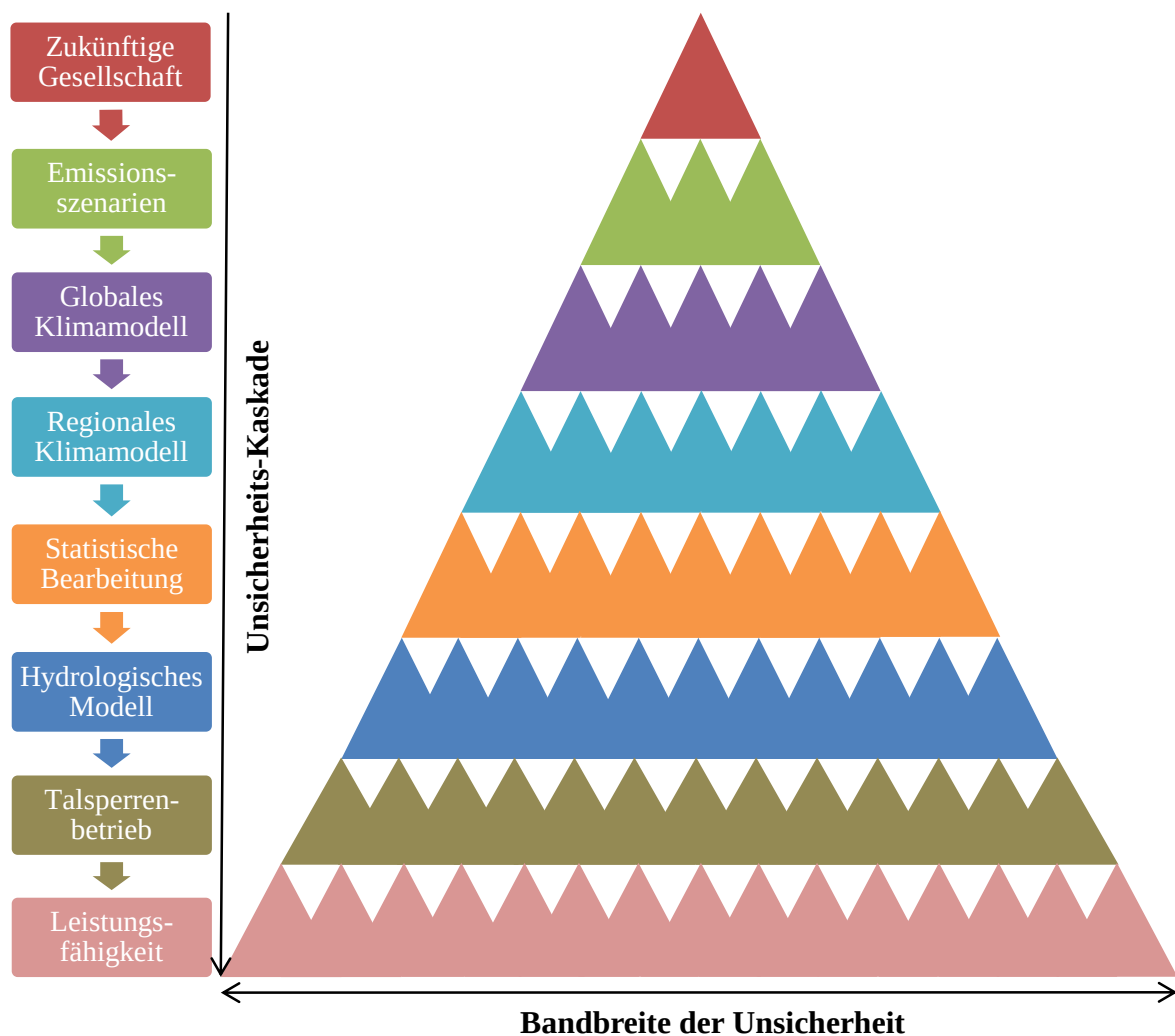


Abbildung 5-1 Anstieg der Unsicherheit in der Modellkette (nach: MCCARTHY, 2001; WILBY & DESSAI, 2010)

Die Unsicherheit, welche aus der Verwendung eines bestimmten globalen Zirkulationsmodells entsteht, kann durch Auswertung Monte-Carlo-generierter Modellläufe bestimmt werden. Mittels der Monte-Carlo-Methode lassen sich Modellunsicherheiten quantifizieren. Hierzu werden die Modelleingangsparameter entsprechend ihrer Verteilungsfunktion variiert und für jeden so zufällig bestimmten Parametersatz der Eingangsdaten das Modellergebnis berechnet. Werden sehr viele Berechnungen durchgeführt, erhält man als Resultat die Verteilungsfunktion der Modellergebnisse, anhand der sich die Modellunsicherheit bestimmen lässt (LOUCKS & E. VAN BEEK, 2005). Eine derartige Unsicherheitsanalyse wurde in verschiedenen Untersuchungen bereits erfolgreich durchgeführt: Für Hochwasserabflüsse in Nordengland und Schottland konnte so, anhand von 25.000 generierten Klimaszenarien, eine Variation um den Faktor 9 für verschiedene globale Zirkulationsmodelle festgestellt werden (CHRISTEL PRUDHOMME ET AL., 2003). Unter Verwendung von zwei globalen Klimaszenarien, zwei Emissionsszenarien und eines hydrologischen Modells untersuchen TEUTSCHBEIN ET AL. (2011) den Einfluss dreier verschiedener statistischer *Downscaling*-Verfahren auf die prognostizierten Abflussänderungen des Vättholman Flusses in Schweden. Die Bandbreite der Änderung des mittleren Abflusses reicht von -11,7 % bis +11,6 %. Ähnliche Ergebnisse erzielen MUERTH ET AL. (2012) in einer Untersuchung des Einflusses verschiedener GCMs, dynamischer *Downscaling*-Verfahren, Korrekturverfahren und hydrologischer Modelle auf die Prognoseunsicherheit des Abflusses für mittlere Einzugsgebiete in Kanada und Bayern. Es werden 40 Szenarien untersucht, welche eine Bandbreite der Änderung des mittleren Abflusses von -10 % bis +25 % für Kanada und -20 % bis +10 % für Bayern zeigen.

Die Unsicherheiten der Modellkette hängen somit vom untersuchten hydrologischen Prozess, dem untersuchten statistischen Moment und der betrachteten räumlichen Skala ab. Grundsätzlich ist die Unsicherheit größer bei Prozessen, welche vom Niederschlag, im Gegensatz zur Temperatur, bestimmt werden, sowie die Unsicherheit größer ist bei statistischen Momenten höherer Ordnung und Extremwerten, im Gegensatz zu langjährigen Mittelwerten. Zudem ist die Unsicherheit höher, je kleiner der räumliche Maßstab einer Untersuchung ist (MERZ ET AL., 2012).

KUNDZEWICZ & STAKHIV (2010) kommen zu der Schlussfolgerung, dass die derzeitige Generation von Klimamodellen bezüglich des Detaillierungsgrades und der Unsicherheiten nicht dazu geeignet ist, als Grundlage für Entscheidungen zum Betrieb von Talsperren zu dienen. Die Klimamodelle können daher nur Szenarien einer möglichen Zukunft liefern und eine Abschätzung des Ausmaßes der Veränderungen geben.

5.3 Einfluss der Klimaänderung auf die Leistungsfähigkeit von Talsperren

5.3.1 Szenarienbasierte Einwirkungsstudien

Unter Verwendung der in Kapitel 5.2 beschriebenen Modellkette können Szenarien des zukünftigen Talsperrenzuflusses bestimmt werden, welche als Randbedingungen für ein Modell des Talsperrenbetriebs dienen. Die Ergebnisse der Simulation des Talsperrenbetriebs können anschließend in Leistungsfähigkeitskennzahlen zusammengefasst werden. Dieses Vorgehen stellt das generelle Gerüst zur szenarienbasierten Bestimmung des Einflusses der Klimaänderung, wie sie von globalen Klimamodellen projiziert werden, auf die Leistungsfähigkeit von Talsperren dar (LETTENMAIER, 2003).

Während eine Vielzahl von Studien die Auswirkungen des Klimawandels auf die Hydrologie in unterschiedlichen Einzugsgebieten betrachtet, existieren vergleichsweise wenige Untersuchungen, die auch

die Einwirkung auf den Talsperrenbetrieb abbilden. Einige dieser Studien sollen im Folgenden kurz dargestellt und hinsichtlich ihrer Vorgehensweise, der Ergebnisse sowie der Behandlung von Unsicherheiten der Modellkette analysiert werden. Die Darstellung ist nicht umfassend, sondern konzentriert sich auf diejenigen Studien, die repräsentativ für eine mögliche Methodik sind oder eine Abschätzung der Unsicherheiten vornehmen.

MORGENSCHWEIS ET AL. (2007) untersucht die Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf die Leistungsfähigkeit der Wasserbereitstellung aus den Ruhrtalsperren. Das Ruhrtalsperrensystem besitzt eine Speicherkapazität von 463 Millionen m³ und dient der Trinkwasserversorgung von 5 Millionen Menschen, der Niedrigwasseraufhöhung und dem Hochwasserschutz. Die Klimaprojektion für Temperatur und Niederschlag des deterministischen, regionalen Klimamodells REMO (JACOB ET AL., 2008) und des statistischen Klimamodells WETTREG (SPEKAT ET AL., 2007) werden gemittelt über alle im Einzugsgebiet liegenden Gitterzellen bzw. Stationen betrachtet. Es werden drei Emissionsszenarien untersucht. Die Ergebnisse der beiden regionalen Klimamodelle für gleiche Emissionsszenarien unterscheiden sich stärker als die Ergebnisse eines Modells für verschiedene Emissionsszenarien. Für die Einwirkungsstudie werden daher nur die Änderungen der beiden Klimamodelle für ein Emissionsszenario betrachtet. Randbedingungen für die detaillierte Simulation des Betriebs der Talsperren im Verbund werden mittels eines Wettergenerators für diese Klimaszenarien erstellt. Hierzu wird zunächst eine synthetische Zeitreihe für das gegenwärtige Klima erzeugt (MORGENSCHWEIS ET AL., 2006) und diese mittels statistischem *Downscaling* (B. VAN DEN HURK ET AL., 2006) perturbiert, um die veränderten Klimabedingungen abzubilden. Die Bewertung der Leistungsfähigkeit der Talsperren erfolgt anhand der Zuverlässigkeit der Wasserbereitstellung, wobei von einem Versagen der Wasserbereitstellung ausgegangen wird, wenn der Speicherinhalt einer Talsperre 2 % des vorhandenen Speichervolumens unterschreitet. Die erhöhte Verdunstung durch den Temperaturanstieg für die Klimaszenarien bewirkt eine Reduzierung der Wasserbereitstellungsleistung der untersuchten Talsperren. In einer weiteren Studie wurde für ein Szenario auf Basis der generierten Randbedingungen die Wirkung der Klimaänderung auf das Hochwassergeschehen untersucht (HÖFER ET AL., 2010). Der vom betrachteten Klimaszenario projizierte Anstieg der Winterhochwasser ist für Ereignisse höherer Eintrittswahrscheinlichkeit größer als für seltene Ereignisse und wird für das HQ100 mit 8 % beziffert (HÖFER ET AL., 2010).

In Untersuchungen zur Auswirkung des globalen Wandels auf die Wasserverfügbarkeit im Einzugsgebiet der Elbe werden auch Talsperren betrachtet (KOCH ET AL., 2008a; KOCH ET AL., 2008b). Für ein Emissionsszenario und ein globales Klimamodell werden mit Hilfe des statistischen *Downscaling*-Verfahrens STAR (WERNER & GERSTENGARBE, 1997) 100 stochastische Realisationen der meteorologischen Größen Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Niederschlag bis zum Jahr 2055 erzeugt. Diese Realisationen dienen als Randbedingungen für die hydrologische Modellierung. Die so erzeugten Tageswerte des Abflusses werden zu Monatswerten aggregiert und als Randbedingung eines Langfristbewirtschaftungsmodells angesetzt, welches Talsperren mit einem Betriebsraum größer einer Million m³ berücksichtigt. Die Verwendung von 100 Realisationen des Zuflusses erlaubt die statistische Auswertung der Auswirkungen des Szenarios auf die Wasserverfügbarkeit. Die Ergebnisse zeigen eine Reduktion des mittleren Abflusses an ausgewählten Kontrollpegeln von im Mittel 20 %. Die Mindestabgaben können jedoch mit hoher Sicherheit eingehalten werden, so dass sich die Abflüsse für extreme Trockenheit (Überschreitungswahrscheinlichkeit von 99 %) lediglich um 12 % verringern. Defizite in der Wasserversorgung treten unter Berücksichtigung eines zukünftig geringeren Wasserbedarfs nicht gehäuft auf (KOCH ET AL., 2008a).

Für die Shellmouth Talsperre in Kanada, deren Zufluss stark von der Schneeschmelze abhängt, untersuchen LI ET AL. (2010) den Einfluss des Klimawandels auf die Zuverlässigkeit von Wasserbereitstellung und Hochwasserrückhalt. Ergebnisse eines globalen Klimamodells werden für zwei Emissions-szenarien durch statistisches *Downscaling* zu Randbedingungen eines hydrologischen Modells aufbereitet, welches die Talsperrenzuflüsse bestimmt. Die Betriebsregeln der Talsperre mit einem Zielwasserstand während der Hochwasserperiode und einem Zielwasserstand während der Trockenperiode sowie vorgegebener Mindest- und Maximalabgabe werden von einem Simulationsmodell abgebildet. Die Ergebnisse für die Klimaszenarien zeigen eine Zunahme des jährlichen Abflusses bei häufigerem Auftreten von Hochwasser durch Schneeschmelze. Dies spiegelt sich in einer verbesserten Zuverlässigkeit der Wasserbereitstellung und einer geringeren Zuverlässigkeit des Hochwasserrückhaltes wieder.

Die oben genannten Studien beschreiben den Einfluss des Klimawandels anhand der Änderung der Zuverlässigkeit von Wasserbereitstellung und Hochwasserrückhalt der betrachteten Talsperren, also im Wesentlichen anhand des Bemessungswertes der hydrologischen Sicherheit. Wie in Kapitel 4 dargestellt wurde, sollte die Bewertung erweitert werden, indem auch die Länge und Schwere eines Versagens berücksichtigt werden. Dies kann vereinfacht anhand der Kennzahlen für Widerstandsfähigkeit und Verwundbarkeit (siehe Kapitel 4.3.1) erfolgen. Unter Verwendung dieser Kennzahlen untersuchen FOWLER ET AL. (2003) den Einfluss der Klimaänderung auf die Wasserversorgung der Region Yorkshire (England). Mit Hilfe eines Wettergenerators und eines hydrologischen Modells erzeugen sie Zeitreihen des Abflusses für den Referenzzustand und ein Klimaszenario. Diese Abflüsse dienen als Randbedingung für ein Modell des Wasserversorgungssystems, welches die Talsperren der Region vereinfacht als Cluster und im Standardbetrieb abbildet, jedoch auch das Verteilungsnetz und weitere Quellen, wie Flussentnahmen und Brunnen, berücksichtigt. Die Bewertung der Leistungsfähigkeit des Systems erfolgt anhand von Zuverlässigkeit, Widerstandsfähigkeit und Verwundbarkeit der Wasserversorgung. Für das untersuchte Klimaszenario zeigt sich, dass die Zuverlässigkeit nur geringfügig gegenüber dem Referenzzustand abnimmt, jedoch Widerstandsfähigkeit und Verwundbarkeit sich aufgrund der höheren Variabilität der Niederschläge deutlich verschlechtern. Die Verwendung nur eines Klimaszenarios schränkt die Aussagekraft der Untersuchung ein. Diese Einschränkung versuchen andere Studien durch Verwendung mehrerer Szenarien aufzuheben und mittels probabilistischer Beschreibung der Unsicherheiten oder Sensitivitätsanalyse den Einfluss der einzelnen Schritte der Modellkette zu bestimmen. Die Sensitivitätsanalyse ist definiert als Methode, den Fehler einzugrenzen und zu quantifizieren, der durch die Unsicherheit in den Modelleingangsparametern in der Berechnung von Modellergebnissen und daraus abgeleiteten Indikatoren entsteht. Hierzu wird untersucht, wie sich eine definierte Änderung eines Modellparameters auf die Ergebnisse auswirkt. Dagegen zielt eine Unsicherheitsanalyse, wie oben beschrieben, mittels probabilistischer Beschreibung der Modelleingangsparameter (Monte-Carlo-Methode) darauf ab, die Wahrscheinlichkeitsverteilung der berechneten Modellergebnisse und der Leistungsindikatoren zu bestimmen (LOUCKS & E. VAN BEEK, 2005).

Eine probabilistische Untersuchung zum Einfluss des Klimawandels auf die Wasserversorgung aus Talsperren, ebenfalls in Yorkshire (England), wird von NAWAZ & ADELOYE (2006) vorgestellt. In einem ersten Schritt werden drei globale Klimaszenarien mittels linearer Regressionsanalyse auf das Untersuchungsgebiet herunterkaliert und mittels eines Wettergenerators zu Randbedingungen für die hydrologische Modellierung aufbereitet. Diese dienen als Eingangsdaten für ein konzeptionelles Niederschlags-Abfluss-Modell mit täglicher Zeitschrittweite. Die Ergebnisse des Niederschlags-Abfluss-Modells sind der Zufluss zum betrachteten Talsperrensystem für den Referenzzeitraum und verschie-

dene Klimaszenarien. Diese täglichen Zuflüsse werden in einem zweiten Schritt auf monatliche Werte aggregiert und bilden die Stichprobe für die stochastische Monte-Carlo-Modellierung des monatlichen Zuflusses. Diese Modellierung erfolgt mittels eines multivariaten AR(1)-Modells der jährlichen Zuflusssummen, welche auf monatliche Zuflusssummen disaggregiert werden (VALENCIA & SCHAAKE, 1973), siehe Kapitel 4.3.2). Die Modellierung der Talsperrenperformance erfolgt für jeweils 1000 Jahre eines Klimas nach dem Folgescheitelalgorithmus (siehe Kapitel 3.2.1). Damit kann eine Auswertung des Einflusses der Klimawandelszenarien anhand der berechneten Speichervolumen-Zuverlässigkeit-Ertrags-Beziehungen erfolgen. Die Darstellung des Einflusses wird anhand der prozentualen Änderung des Ertrags für gegebene Speichergößen und eine Zuverlässigkeit von 100% während der untersuchten Klimaperioden von jeweils 30 Jahren vorgenommen. Die Bandbreite der Ertragsänderung liegt im Bereich der 10. und 90. Perzentile der generierten Abflüsse für verschiedene Klimaszenarien bei $\pm 14\%$. Wobei die Richtung der Änderung (Zu- oder Abnahme des Ertrags) vom jeweils betrachteten Klimaszenario abhängt. Die Anwendung der Monte-Carlo-Modellierung des Zuflusses ermöglicht die Darstellung der Bandbreite und Wahrscheinlichkeit der voraussichtlichen Änderung des Ertrags für ein Klimaszenario. Die statistische Generierung des Zuflusses ermöglicht es, die Variabilität innerhalb eines hypothetisch stationären Klimazustandes abzubilden.

Eine Sensitivitätsanalyse der Unsicherheiten, welche die Klimaanpassung der öffentlichen Wasserversorgung von Ost-Suffolk und Essex in England beeinflussen, zeigen DESSAI & HULME (2007). Sie verwenden das einfache Energie-Bilanz-Modell des globalen Klimas MAGICC (WIGLEY & RAPER, 2001), dessen Eingangsparameter variiert werden, um die Unsicherheiten der berechneten Klimaänderung zu bestimmen. Die Verteilungsfunktionen der Modellparameter werden hierzu aus der Literatur übernommen oder mittels Expertenschätzung festgelegt. Das so bestimmte globale Klima wird mittels der linearen Musterskalierungstechnik (*pattern scaling*) bezogen auf die Ergebnisse verschiedener globaler Zirkulationsmodelle auf das Untersuchungsgebiet übertragen und mit den Ergebnissen dynamischer regionaler Klimamodelle verglichen. Ergebnis dieses Schritts ist die Änderung der sommerlichen Niederschläge gegenüber dem Referenzzeitraum. Die eigentliche Übertragung der so abgebildeten Klimaänderung auf die Sicherheit der öffentlichen Wasserversorgung erfolgt anhand einer Regressionsgerade (siehe Glossar) durch drei Datenpunkte. Diese Datenpunkte repräsentieren die Ergebnisse einer Untersuchung zur Quantifizierung des Einflusses des Klimawandels mittels hydrologischer Modellierung des Talsperrenbetriebs für drei Szenarien. Die Bewertung des Einflusses erfolgt anhand der Änderung der zusätzlich benötigten Wasserbereitstellungskapazität. Die während eines Modellschrittes bzw. durch einen Parameter induzierte Unsicherheit, wird als Bandbreite der 95. Perzentile der zusätzlich benötigten Wasserbereitstellungskapazität bestimmt. Diese wird zudem verglichen mit der Unsicherheit, welche allein durch die vollständige Berücksichtigung der natürlichen Variabilität des Niederschlages zwischen 1766 und 1950 entsteht. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass die Wahl des globalen Klimamodells die größte Unsicherheit bedingt, gefolgt von der Sensitivität des Energie-Bilanz-Modells auf die CO₂-Konzentration und der Abbildung der eigentlichen Klimawirkung. An dieser Stelle ist eine Einschränkung der Studie zu sehen. Die Abbildung der Klimawirkung des wasserwirtschaftlichen Systems als lineare Funktion erlaubt zwar die einfache Durchführung der Sensitivitätsanalyse. Gerade das Ergebnis der großen Sensitivität dieses Modellschrittes verdeutlicht jedoch die Wichtigkeit, die Modellierung der Klimawirkung möglichst genau durchzuführen. Dabei spielt neben der Wirkung der immanenten Variabilität des Abflusses für einen Klimazustand, wie sie NAWAZ & ADELOYE (2006) untersuchen, auch die Abbildung des Zusammenspiels von Veränderungen der statistischen Momente des Zuflusses und der Leistungsfähigkeit der

Talsperre eine entscheidende Rolle. Dieses Zusammenspiel wurde in frühen Studien, welche entstanden noch bevor Klimaszenarien basierend auf globalen Modellen verfügbar waren, bereits für einzelne Szenarien untersucht.

BURN & SIMONOVIC (1996) verwenden keine mittels Klimamodellen generierten Szenarien, sondern eine Teilungsmethode, um das vergangene, gemessene Klima in warme und kalte Jahre zu separieren und auf Basis dieser zwei Stichproben Szenarien des Abflusses für zukünftige klimatische Bedingungen zu generieren. Die Abflussgenerierung erfolgt mittels Disaggregation des jährlichen Gesamtzuflusses, welcher mittels eines ARMA-Modells erzeugt wird. Der Betrieb der Talsperre wird mit monatlicher Zeitschrittweite simuliert für jeweils 100 mal 50 Jahre für das warme und das kalte Szenario. Hierbei werden die Betriebsregeln der untersuchten Talsperre abgebildet und als Ergebnis eine Zeitreihe der Abgaben erhalten. Diese Zeitreihe wird anschließend bezüglich der Zuverlässigkeit des Hochwasserrückhalts, der Wasserbereitstellung, der Niedrigwasseraufhöhung und der Einhaltung eines Mindestwasserstandes in der Talsperre zur Freizeitnutzung in den Sommermonaten ausgewertet. Erwartungsgemäß zeigt sich eine starke Korrelation der Zuverlässigkeit von Wasserbereitstellung und hohem Speicherstand zur Freizeitnutzung, wohingegen keine Korrelation der Zuverlässigkeit von Hochwasserrückhalt und Wasserbereitstellung bzw. Freizeitnutzung festgestellt werden konnte. Dies spricht für eine getrennte Bewertung dieser Nutzungsarten mit der Möglichkeit, die Hochwasserschutzwirkung detaillierter zu betrachten. Die Ergebnisse zeigen zudem eine erhöhte Zuverlässigkeit des Hochwasserrückhalts sowie eine niedrigere Zuverlässigkeit von Wasserbereitstellung und Freizeitnutzung im warmen gegenüber dem kalten Szenario. Die Schlussfolgerung, dass Hochwasser in wärmeren klimatischen Bedingungen weniger häufig auftreten und die Priorisierung der Hochwasserschutzwirkung der untersuchten Talsperre zugunsten einer verbesserten Wasserbereitstellung angepasst werden sollte, ist der verwendeten Teilungsmethode zur Abflussgenerierung geschuldet und widerspricht neueren Erkenntnissen. Für die Bewertung der Leistungsfähigkeit von Talsperren unter verschiedenen klimatischen Randbedingungen ist es daher wichtig, nicht die vergangene Leistung in warmen oder kalten Jahren, sondern die Wirkung veränderter statistischer Eigenschaften des Zuflusses auf den zukünftigen Betrieb zu untersuchen. Schnittstellen zur Abbildung einer solchen Veränderung können entweder die Randbedingungen des Modells des Talsperrenbetriebs, also die Zuflüsse selbst, oder die Randbedingungen der hydrologischen Modellierung sein.

In einer frühen Studie zur Beschreibung des Einflusses von Klimaänderungen auf die Wasserverfügbarkeit am Potomac-Fluss (Vereinigte Staaten von Amerika) verwendet SCHWARZ (1977) ein einfaches statistisches Modell der monatlichen Abflüsse mit den vier Parametern Mittelwert, Standardabweichung, Schiefe und serieller Korrelationskoeffizient 1. Ordnung. Es basiert auf der Annahme, dass die monatlichen Abflüsse logarithmisch verteilt sind (U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1971). Es werden neun Szenarien mit Änderung jeweils eines Parameters untersucht. Für einen Einzelspeicher werden die benötigte Speichergroße zur Erfüllung einer konstanten Abgabe sowie die Zuverlässigkeit verschiedener Abgaben, bei gegebener Speichergroße, berechnet. Die mit 95 % Zuverlässigkeit erzielbare Abgabe sinkt um 20 % im ungünstigsten untersuchten Szenario, welches von einer Reduktion des Mittelwertes um ebenfalls 20 % ausgeht. Dagegen zeigt der Zusammenhang zwischen Änderung des Mittelwertes und Zuverlässigkeit einen nicht-linearen Zusammenhang: Die Zuverlässigkeit, mit der die Referenzabgabe erzielt wird, sinkt nur auf 91 %. Eine weitere Analyse der Zusammenhänge verbietet die geringe untersuchte Zahl der Szenarien.

Auch NĚMEC & SCHAAKE (1982) verwenden die Änderung der Beziehung von Abgabe, Zuverlässigkeit und Speichergröße zur Bewertung des Einflusses von Klimaänderungen auf die Leistungsfähigkeit von Talsperren. Die Klimaänderung wird dabei für zwei Untersuchungsgebiete über die prozentuale Änderung der Niederschläge und der Evapotranspiration in einem deterministischen hydrologischen Modell mit täglicher Zeitschrittweite berücksichtigt. Hierzu werden die gemessenen Zeitreihen der Parameter mit einem entsprechenden Faktor multipliziert. Es werden je Einzugsgebiet 15 Szenarien der Klimaänderung (fünf Änderungen des Niederschlages und drei der Evapotranspiration) untersucht. Die Ergebnisse des hydrologischen Modells werden auf monatliche Werte aggregiert, um die Beziehung von Abgabe, Zuverlässigkeit und Speichergröße nach einem Summen-Differenzlinien-Verfahren zu berechnen. Der nicht-lineare Zusammenhang zwischen Klimaänderung und Speicherbedarf wird ebenfalls beobachtet.

Die Literaturrecherche zeigt, dass es aufgrund der großen Unsicherheiten in der Modellkette zur Abbildung der Wirkung des Klimawandels auf die Leistungsfähigkeit von Talsperren sehr schwierig ist, gesicherte Aussagen über zukünftige Entwicklungen zu machen. Szenarienbasierte Einwirkungsstudien sollten daher als Abschätzung der Bandbreite möglicher Klimaänderungen und ihrer Auswirkung verstanden werden. Innerhalb dieses Bereichs der plausiblen Änderung ist das Zusammenspiel von Veränderungen der statistischen Momente des Zuflusses und der Leistungsfähigkeit der Talsperre genauer zu analysieren. Bereits für die Untersuchung weniger Szenarien wird deutlich, dass das Verhalten von Talsperren auf geänderte Zuflussrandbedingungen nicht linear ist. Dieses nicht-lineare Verhalten der Speicherwirkung muss daher, im Gegensatz zum Vorgehen von DESSAI & HULME (2007), bei der Bewertung der Leistungsfähigkeit von Talsperren berücksichtigt werden.

Es liegt daher nahe, den funktionellen Zusammenhang zwischen Änderungen des Zuflusses und der Leistungsfähigkeit zu erforschen, um so Rückschlüsse auf die Sensitivität der Talsperren gegenüber klimabedingten Zuflussänderungen zu ermöglichen.

5.3.2 Klimaeinwirkungsfunktionen

Aufgrund der großen Unsicherheiten der Modellkette zur szenariobasierten Abbildung des Einflusses der Klimaänderungen sind systematische Analysen der Ursache-Wirkung-Beziehung und der grundsätzlichen Frage, wie wasserwirtschaftliche Systeme auf veränderte Randbedingungen reagieren, erforderlich (MERZ ET AL., 2012). Dies kann geschehen, indem der funktionelle Zusammenhang zwischen Eigenschaften des Zuflusses und der Leistungsfähigkeit mittels Simulationsstudien bestimmt wird. Die Beschränkung auf wenige Parameter, deren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit klar visualisierbar ist, erlaubt eine klare Bewertung der Anfälligkeit eines wasserwirtschaftlichen Systems gegenüber Änderungen des Zuflusses.

Aus Studien zur Leistungsfähigkeit von Talsperren bezüglich der Wasserbereitstellung in verschiedenen Klimazonen ist die Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit vom Mittelwert und Variationskoeffizienten der jährlichen Zuflüsse bekannt. So untersuchen MCMAHON ET AL. (2007a) diesen Zusammenhang auf Basis weltweiter Abflussdaten (siehe auch Kapitel 2.3.1) und VOGEL ET AL. (1999) für die Vereinigten Staaten von Amerika. Diese Studien verwenden statistische Verfahren zur Beschreibung des Talsperrenbetriebs (siehe Kapitel 3.2.2), wobei sie innerjährliche Schwankungen des Abflusses und die Verbundwirkung mehrerer Speicher vernachlässigen. So wie dieses Vorgehen systematisch untersucht, wie sich Talsperren an verschiedenen Orten mit von verschiedenen klimatischen Bedin-

gungen geprägten Zuflüssen verhalten, kann analog untersucht werden, wie sich verschiedene Zuflussbedingungen durch Klimaänderungen auf Talsperren an einem Ort auswirken.

So analysiert KACZMAREK (1990) den Einfluss von Klimaänderungen auf die Leistungsfähigkeit der Wasserbereitstellung der Kariba-Talsperre im Süden Afrikas (Simbabwe und Sambia). Die Talsperre mit einem Ausbaugrad von 150 % dient vorrangig der Energieerzeugung. Mit Hilfe einer statistischen Matrixmethode (siehe Kapitel 4.3.2), welche den jährlichen Zufluss als log-normal verteilt mittels einer lag-1 Markovkette abbildet, wird bestimmt, wie sich Zuverlässigkeit und Widerstandsfähigkeit für Änderungen des Mittelwertes und der Standardabweichung im Bereich von ± 20 Prozent verhalten. Es wird gezeigt, dass schon relativ kleine Änderungen der statistischen Eigenschaften des Zuflusses zu deutlichen Veränderungen der Leistungsfähigkeit der Wasserbereitstellung führen können.

Ebenfalls für einen Einzelspeicher und mittels des in Kapitel 3.2.2 beschriebenen, statistischen Verfahrens (Gleichung (3.5)) untersuchen JAIN & EISCHEID (2008) auf Basis einer paläo-hydrologischen Zeitreihe (1200 Jahre), wie sich die Bemessungsspeichergröße einer Talsperre am Colorado im Süd-Westen der USA mit historischen Klimaänderungen verändert. Die Bemessungsspeichergröße ist hier das Speichervolumen, das notwendig ist, um die geforderte Abgabe mit einer hydrologischen Sicherheit von 95 % zu befriedigen. Die Abflüsse in der Vergangenheit wurden aus den Wachstumsringen von Bäumen rekonstruiert. Der Einfluss der statistischen Parameter des jährlichen Zuflusses Mittelwert, Variationskoeffizient und Autokorrelationskoeffizient wird für jeden Parameter einzeln und für Kombinationen untersucht. Die Parameter werden jeweils für ein gleitendes Zeitfenster bestimmt, das dem Zeitraum auf dessen Basis die Talsperre bemessen wurde bzw. einer Klimareferenzperiode entspricht. Der Einfluss einzelner Parameter wird dargestellt, indem nur dieser Parameter für das gleitende Zeitfenster bestimmt wird und andere Parameter konstant belassen werden. Es wird gezeigt, dass eine alleinige Betrachtung des Mittelwertes nicht ausreicht, um den Einfluss von veränderten Klimabedingungen auf die notwendige Speichergröße zu bestimmen. Bereits für das Klima der letzten 1200 Jahre zeigen sich Zeiträume mit ganz unterschiedlichen Entwicklungen der statistischen Momente des Zuflusses wie Mittelwert, Standardabweichung und Autokorrelation. So finden sich Zeiträume, in denen bei alleiniger Betrachtung des Mittelwertes keine Anpassung der Speichergröße notwendig wäre, eine Anpassung aber durch die gleichzeitig gestiegene Standardabweichung erforderlich wird. Komplementär zeigen sich ebenso Perioden, in denen ein deutlich geringerer mittlerer Zufluss eine Vergrößerung der notwendigen Speichergröße anzeigt, diese jedoch bei genauerer Betrachtung aller Eigenschaften überflüssig ist. Für den anthropogen verursachten Klimawandel, wie er für das nächste Jahrhundert prognostiziert wird, werden die Veränderungen noch größer sein als in der Vergangenheit. Es erscheint daher unabdingbar, neben Änderungen des Mittelwertes auch solche des Variationskoeffizienten und der Autokorrelation der Zuflüsse in die Bewertung einzubeziehen. Die Ergebnisse von JAIN & EISCHEID (2008) zeigen abrupte Änderungen der Bemessungsspeichergröße für verschiedene Klimazustände. Dies macht deutlich, dass das Verhältnis von Zuflusseigenschaften und Leistungsfähigkeit einer Talsperre nicht-linear ist und die Bestimmung des funktionellen Zusammenhanges notwendig ist, um die Wirkung von Klimaänderungen auf die Leistungsfähigkeit fundiert zu bewerten. Abbildung 5-2, welche nach der Methode von JAIN & EISCHEID (2008) für die deutlich kürzere Zeitreihe des Abflusses am Pegel Urft-Malsbenden zwischen 1906 und 2009 erstellt wurde, verdeutlicht und bestätigt diese Ergebnisse.

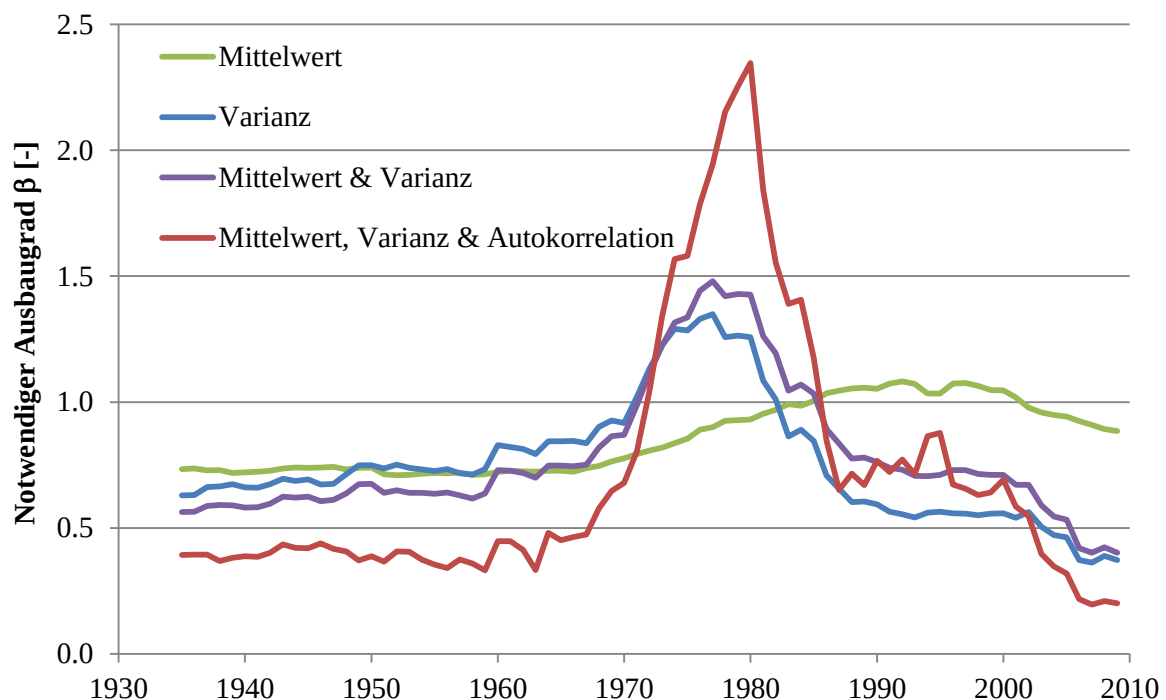


Abbildung 5-2 Notwendiger Ausbaugrad nach Gleichung (3.5) am Pegel Urft-Malsbenden für Ausgleichsgrad 0,75 und 95 % Zuverlässigkeit bei 30 Jahre Zeitfenster für Mittelwert, Varianz und Autokorrelation

Die von KACZMAREK (1990) und JAIN & EISCHEID (2008) verwendeten einfachen statistischen Verfahren zur Abbildung des Talsperrenbetriebs erlauben keine Analyse des Einflusses innerjähriger Schwankungen, anderer Betriebsregeln als dem Standardbetrieb oder die Untersuchung von Mehrspeichersystemen. Auch eine detaillierte Betrachtung der Konsequenzen von Versagensereignissen ist mit ihnen nicht möglich. Um auch komplexere Fragestellungen zu untersuchen, müssen Verfahren zur stochastischen Generierung der Randbedingungen mit Simulationsmodellen zur detaillierten Abbildung des Betriebs kombiniert werden. Damit kann die Leistungsfähigkeit zudem auch probabilistisch und unter Berücksichtigung der Konsequenzen von Versagensereignissen bewertet werden.

Einen ersten Schritt hin zu einer Analyse des funktionellen Zusammenhangs von Klimaänderung und Abflussgeschehen mittels stochastischer Generierung der Randbedingungen für die hydrologische Modellierung zeigen PRUDHOMME ET AL. (2010). Die Studie beschränkt sich auf die Hydrologie und Kennwerte für Hochwasserabflüsse und verzichtet auf ein Modell der Einwirkungen. PRUDHOMME ET AL. (2010) führen eine Sensitivitätsanalyse bezüglich Hochwasser in verschiedenen Einzugsgebieten für den plausiblen Bereich der von Klimamodellen prognostizierten Klimaänderung durch. Hierzu wird ein hydrologisches Modell mit Zeitreihen des Niederschlags und der temperaturabhängigen potentiellen Evapotranspiration beaufschlagt. Die verschiedenen Zeitreihen bilden anhand von Änderungsfaktoren die gegenüber dem gemessenen Referenzzeitraum möglichen Klimaänderungen ab. Es werden 4200 verschiedene Kombinationen der Änderungsfaktoren des Niederschlages, der saisonalen Verteilung und der Temperatur berücksichtigt. Anhand einer extremwertstatistischen Auswertung der maximalen täglichen Spitzenabflüsse mit einem Wiederkehrintervall von 20 Jahren wird die Änderung der Verwundbarkeit eines Einzugsgebietes gegenüber Hochwasser bewertet. Diese Werte werden mit den Änderungsfaktoren, welche von 17 globalen Klimamodellen für verschiedene Emissionsszenarien prognostiziert werden, verglichen, um so eine Aussage zur Notwendigkeit von Anpassungsmaßnahmen zu treffen. Hierbei lassen sich die Bandbreite der Unsicherheit in den Klimaprognosen und der

Sensitivität des Systems gegenüberstellen. Für den von PRUDHOMME ET AL. (2010) untersuchten Fall des Hochwasserabflusses lässt sich so für einzelne Einzugsgebiete visualisieren, ob eine Anpassung in Form eines prozentualen Klimazuschlags zum Bemessungsabfluss effektiv ist. Der Ansatz, die Klimaänderung quasi-kontinuierlich durch Änderungsfaktoren abzubilden, kann auf Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von Talsperren übertragen werden.

Mittels der Kombination einer stochastischen Generierung der wöchentlichen Zuflüsse und eines Optimierungsmodells untersuchen NAZEMI ET AL. (2013) die Notwendigkeit von Anpassungsmaßnahmen. Für ein von jährlicher Schneeschmelze dominiertes (nivales) Einzugsgebiet in Kanada verwenden sie die Parameter Jahresabfluss und Zeitpunkt des Spitzenabflusses im hydrologischen Jahr zur Beschreibung der Klimaänderung. Zeitreihen des Abflusses mit verändertem jährlichem Volumen und verändertem Zeitpunkt des Spitzenabflusses aus Schneeschmelze werden statistisch generiert. Diese Zeitreihen dienen als Randbedingung für ein Modell des wasserwirtschaftlichen Systems im Einzugsgebiet. Hauptwassernutzer im Gebiet ist die Landwirtschaft. Das Modell verwendet lineare Programmierung (siehe Kapitel 3.3.2) zur Optimierung der Wasserverteilung auf verschiedene Nutzer. Je Parametersatz werden 100 Realisationen des Abflusses generiert. Für 154 Parametersätze zur Abbildung der Änderung von Jahresabfluss und Zeitpunkt der Schneeschmelze wird eine Optimierung des wasserwirtschaftlichen Systems durchgeführt. Können hierbei grundlegende Bedingungen nicht eingehalten werden, bricht die Berechnung ab. Führt ein Parametersatz zu mehr als 50 Berechnungsabbrüchen (>50%), wird davon ausgegangen, dass eine Anpassung des Systems notwendig ist. So wird der funktionelle Zusammenhang von klimabedingter Änderung der Eigenschaften des Zuflusses und der Notwendigkeit von Anpassungsmaßnahmen bestimmt. Die Methode der statistischen Generierung von Zuflussganglinien erlaubt, die mögliche klimabedingte Änderung quasi-kontinuierlich zu beschreiben, was die Voraussetzung zur Bestimmung der funktionellen Zusammenhänge ist. Dagegen ermöglicht die Bewertung der Leistungsfähigkeit ausschließlich mittels der binären Zuordnung, ob eine Anpassung notwendig erscheint oder nicht, aber keine detaillierte Beschreibung des Niedrigwasserrisikos des Systems. Etwa die Frage, ob mit Häufung von Versagensereignissen auch die Versagensschwere zunimmt, kann für komplexe Talsperrensysteme nur mittels Simulationsmodellen beantwortet werden.

Tabelle 5-1 zeigt eine grobe Klassifizierung der vorgestellten Studien zur Bestimmung des Einflusses der Klimaänderung auf die Leistungsfähigkeit von Talsperren. Während szenarienbasierte Einwirkungsstudien potentiell dazu geeignet sind, die Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit der Talsperren sehr detailliert zu bewerten und hierbei mittels zeitlich hoch aufgelösten Simulationsmodellen den Betrieb genau abzubilden, kann der Szenarienansatz den nicht-linearen und teilweise sprunghaften Zusammenhang von Klimaänderung und Leistungsfähigkeit nicht darzustellen. Diese Beschreibung des funktionellen Verlaufs der Abhängigkeiten erreichen dagegen Studien, welche die Änderung der Eigenschaften der Zuflüsse quasi-kontinuierlich beschreiben. Für Einzelspeicher und geringe zeitliche Auflösung, was die Verwendung von Matrixmethoden (siehe Kapitel 3.2.2) erlaubt, können die Eigenschaften des Zuflusses direkt abgebildet werden (S. JAIN & EISCHEID, 2008; KACZMAREK, 1990). Um mehrere Talsperren mit ihrem jeweiligen Zufluss und eine höhere zeitliche Auflösung zu berücksichtigen, müssen Zuflüsse stochastisch generiert werden und der Betrieb mit diesen synthetischen Zuflüssen simuliert werden. Erste Ansätze hierzu zeigen jedoch Defizite in der Bewertung der Leistungsfähigkeit und der Abbildung von Talsperren (NAZEMI ET AL., 2013; C. PRUDHOMME ET AL., 2010).

Tabelle 5-1 Klassifizierung der Studien zur Bestimmung des Einflusses der Klimaänderung auf Talsperren

Kriterien Autor	Beschreibung des Zuflusses für Klimaänderungen	Abbildung des Talsperrenbetriebs	Bewertung der Leistungsfähigkeit
MORGENSCHWEIS ET AL. (2007)	-	+	-
NAWAZ & ADELOYE (2006)	-	-	-
DESSAI & HULME (2007)	-	-	-
LI ET AL. (2010)	-	o	o
KOCH ET AL. (2008)	-	o	-
FOWLER ET AL. (2003)	-	-	(o)
SCHWARZ (1977)	o	-	-
NEMEC & SCHAAKE (1982)	o	-	-
BURN & SIMONOVIC (1996)	o	o	o
JAIN & EISCHEID (2008)	+	-	-
KACZMAREK (1990)	+	-	(o)
PRUDHOMME ET AL. (2010)	+	keine	keine
NAZEMI ET AL. (2013)	+	+	- -

Zufluss für Klimaänderungen: + quasi-kontinuierlich; o Szenarien mittels Änderungsfaktor;

- Szenarien mittels Modellkette

Talsperrenbetrieb: + detailliert und kurzer Zeitschritt und Verbund mehrerer Speicher;

o detailliert, nur Monatszeitschritt oder nur Einzelspeicher; - nur Einzelspeicher und nur Standardbetrieb

Leistungsfähigkeit: (o) Wasserbereitstellung mit Berücksichtigung der Konsequenzen anhand von Kennzahlen; o Zuverlässigkeit Hochwasserschutz und Wasserbereitstellung; - nur Zuverlässigkeit Wasserbereitstellung; - - Berechnungsabbrüche linearer Optimierung

Es existiert bislang kein Verfahren, das alle zu berücksichtigenden Aspekte, wie quasi-kontinuierliche Beschreibung der Zuflussänderungen, detaillierte Abbildung des Talsperrenbetriebs und risikobasierte Bewertung der Leistung, kombiniert. Diese Lücke soll durch Kombination von stochastischer Generierung des Abflusses und probabilistischer Bewertung der Leistungsfähigkeit mittels Simulation geschlossen werden.

5.4 Probabilistische Bestimmung der Klimaeinwirkungsfunktion mit Hilfe von stochastischem Abflussgenerator und detaillierter Betriebssimulation

Ein eingangs definiertes Ziel dieser Arbeit ist einerseits, den Zusammenhang zwischen kontinuierlichen Änderungen der statistischen Eigenschaften des Zuflusses und der Talsperren-Leistungsfähigkeit zu beschreiben, andererseits, die Leistungsfähigkeit auch probabilistisch unter Berücksichtigung der Konsequenzen und der Wahrscheinlichkeit von Versagensereignissen zu beschreiben. Um dies zu erreichen, ist zum einen ein Simulationsmodell des Talsperrenbetriebs notwendig, das eine realitätsnahe Abbildung des Betriebs erlaubt, und zum anderen ist ein Abflussgenerator notwendig, welcher Zuflusszeitreihen mit definierten statistischen Eigenschaften erzeugt. Die probabilistische Bewertung der Leistungsfähigkeit und die hierzu verwendete Modellkette werden in Kapitel 4 dargestellt. Zur Be-

stimmung des Hochwasserrisikos kommt das bestehende Verfahren der Hochwassermerkmal-Simulation zur Anwendung (siehe Kapitel 4.2.2). Zur Abbildung des Einflusses der Klimaänderung können die Verteilungsfunktionen der Hochwassermerkmale auf Basis von Klimaszenarien verändert werden. Auf die Details des bestehenden Verfahrens der Hochwassermerkmal-Simulation wird hier nicht weiter eingegangen. Einzelheiten zum Vorgehen finden sich in Kapitel 4.2.2 und der dort genannten Literatur. Eine Anwendung zur Bestimmung des Hochwasserrisikos für veränderliche klimatische Randbedingungen wird in Kapitel 7.2.4 gezeigt.

Zur Bestimmung des Niedrigwasserrisikos wird in der vorliegenden Arbeit ein Verfahren der Generierung von Zuflusszeitreihen weiterentwickelt. Dieser in Kapitel 4.3.2 beschriebene Abflussgenerator zur Bestimmung des Niedrigwasserrisikos besteht aus drei Schritten: 1. Generierung wöchentlicher Abflüsse aus der Verteilungsfunktion, 2. Herstellung der Korrelation zwischen Abflusswochen und Stationen, 3. Berücksichtigung der jährlichen Autokorrelation. Hier soll die Anpassung des Abflussgenerators zur Berücksichtigung von Klimaänderungen erläutert werden. Die Berücksichtigung der Klimaänderung erfolgt für den Abfluss direkt anhand möglicher Änderungen des Mittelwertes, des Variationskoeffizienten, der Autokorrelation und des Winteranteils der Jahresabflüsse. Für Parameter wie den Mittelwert und den Winteranteil der Jahresabflüsse, welche mit Hilfe der Modellkette vom Klimamodell bis zum hydrologischen Modell projiziert werden, erfolgt die Änderung im Rahmen der Bandbreite der verschiedenen Szenarien. Für andere Parameter, wie Variationskoeffizient und Autokorrelation (siehe Glossar), deren Projektion mittels Klimamodellen derzeit noch ungenau und wenig erforscht ist, wird die Bandbreite der Änderung angenommen. Damit ist es möglich, die Sensitivität des Talsperrensystems zu bewerten und Hinweise dazu zu geben, bezüglich welcher Parameter Klimamodelle, *Downscaling*-Verfahren und hydrologische Modelle zukünftig genauer auszuwerten und zu kalibrieren sind. Werden diese Ergebnisse in Klimamodellen berücksichtigt, kann zukünftig genauer abgeschätzt werden, wie sich der Klimawandel auf die Leistungsfähigkeit von Talsperren auswirkt.

Wie in Kapitel 4.3.2 erläutert, erfolgt die Generierung der Zeitreihen des Zuflusses für wöchentliche Abflüsse. Dies stellt einen Kompromiss zwischen der notwendigen zeitlichen Auflösung zur realitätsnahen Abbildung des Talsperrenbetriebs und dem benötigten Rechenaufwand zur Generierung der Zuflusszeitreihen dar. Eine Änderung des Mittelwertes der jährlichen Abflusssumme $\bar{X}$ erfolgt durch eine Verschiebung der Verteilungsfunktion der Wochenabflüsse x_{ij} , da sich, wie Gleichung (5.1) zeigt, eine Änderung des Mittelwertes der einzelnen Summanden auf den Mittelwert der Summe überträgt. Darin ist N die Anzahl der Jahre der zu generierenden Zeitreihe und dm der Änderungsfaktor des Mittelwertes der Jahressumme. Entsprechend wird jeder aus der Verteilung der Abflüsse einer Woche gezogene Wert mit dem Änderungsfaktor dm beaufschlagt und bei der Überprüfung nach Erreichen der erforderlichen Anzahl a von Wochenabflüssen kontrolliert, ob die Änderung des Mittelwertes mit der erforderlichen Genauigkeit erzielt wurde.

$$\bar{X} \cdot dm = \sum_{i=1}^{52} (\bar{x}_i \cdot dm) = \sum_{i=1}^{52} \left[\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (x_{ij} \cdot dm) \right] \quad (5.1)$$

Zur Anpassung des Variationskoeffizienten wird analog vorgegangen. Nur wird nun jeder Wert nicht nur linear skaliert, sondern zusätzlich mit einem Perturbationsterm multipliziert, welcher eine Verringerung oder Vergrößerung des möglichen Wertebereichs des Wochenabflusses abbildet. Für den Fall,

dass eine Vergrößerung der Varianz abgebildet werden soll, wird der Perturbationsterm Pv , wie in Gleichung (5.2) dargestellt verwendet:

$$Pv = \begin{cases} \text{unifrnd}(1 - \delta \cdot (dv - 1), 1), & \text{wenn } x_{ij} < \bar{x} \\ \text{unifrnd}(1, 1 + \delta \cdot (dv - 1)), & \text{wenn } x_{ij} \geq \bar{x} \end{cases} \quad (5.2)$$

Darin steht $\text{unifrnd}(x,y)$ für eine gleichverteilte Zufallszahl zwischen x und y , δ für einen Dämpfungsfaktor, dv für den Änderungsfaktor der Varianz, x_{ij} für den gezogenen Wert des Wochenabflusses und $\bar{x}$ für den Mittelwert der Abflüsse der betrachteten Woche. Ein Wert von dv gleich 1,5 entspricht beispielsweise einer Erhöhung des Variationskoeffizienten um 50%.

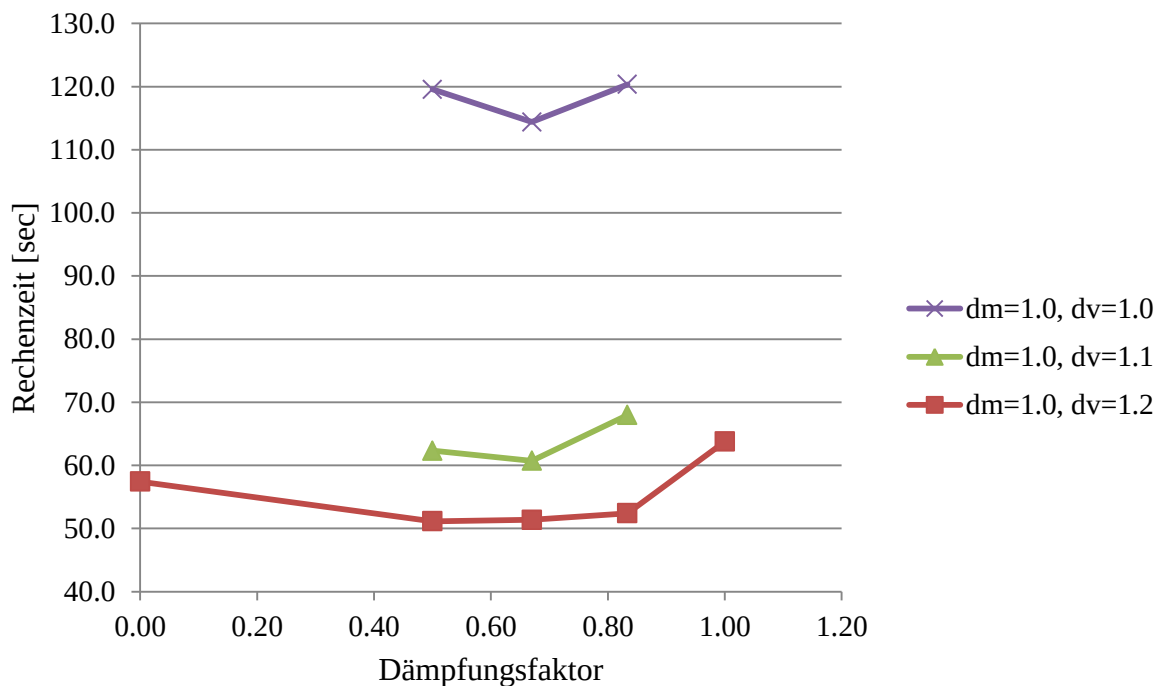


Abbildung 5-3 Einfluss des Dämpfungsfaktors auf die Rechenzeit zur Generierung perturbierter Wochenabflüsse mit verändertem Variationskoeffizienten

Ein Wert des Dämpfungsfaktors von ε gleich $\frac{2}{3}$ hat sich in Versuchen als praktikabel herausgestellt und sorgt für ein schnelles Konvergieren des iterativen Vorgehens im Anwendungsbeispiel (siehe Abbildung 5-3). Für andere Daten ist dieser gegebenenfalls anzupassen.

Der vollständige Berechnungsablauf ist in Abbildung 5-4 dargestellt. Die Beschreibung des zugrundeliegenden, nicht-parametrischen Verfahrens der Abflusszeitreihengenerierung erfolgt in Kapitel 4.3.2.

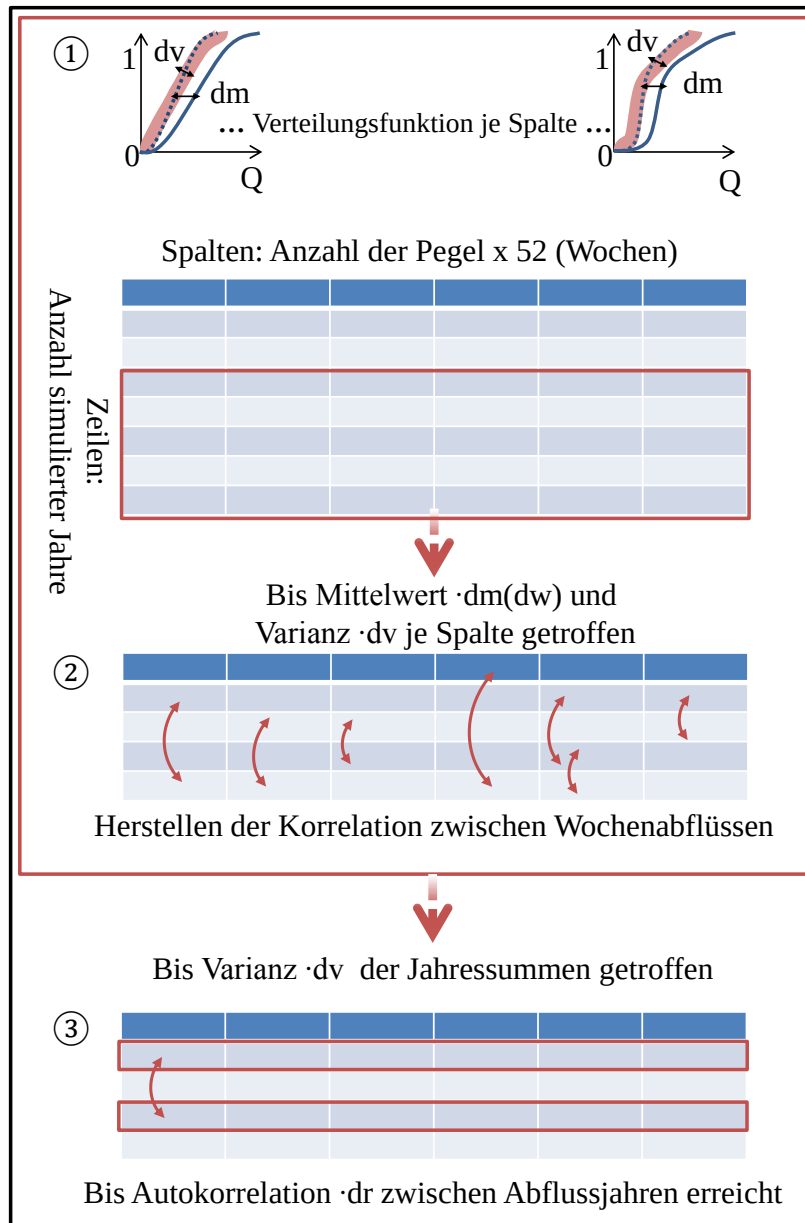


Abbildung 5-4 Vorgehen zur Generierung von wöchentlichen Abflüssen mit Abbildung von Klimaänderung

Es soll an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen werden, dass die Varianz der Jahressummen, neben der Varianz der einzelnen Wochenabflüsse, auch von der Korrelation bzw. Kovarianz der Wochenabflüsse abhängt (siehe Gleichung (4.12)). Ein iteratives Vorgehen mit Überprüfung der Einhaltung der gewünschten statistischen Eigenschaften der Zeitreihe ist daher zweimal notwendig: In Schritt 1 werden die Wochenabflüsse durch Ziehen aus der Verteilungsfunktion und Multiplikation mit dem Änderungsfaktor des Mittelwertes und dem Perturbationsfaktor der Varianz generiert. Dabei werden solange weitere Abflüsse generiert, bis Mittelwert und Variationskoeffizient den Zielwert annehmen. Diese Iteration wird in Abbildung 5-4 durch den oberen, roten Pfeil dargestellt. Zielwert für Mittelwert und Varianz der Wochenabflüsse bilden dabei die mögliche Klimaänderung anhand von Änderungsfaktoren gegenüber dem Referenzzustand ab. In Schritt 2 wird anschließend die Korrelation zwischen Abflüssen an verschiedenen Stationen und in verschiedenen Wochen hergestellt. Die Korrelation wird für verschiedene Klimaänderungen als unveränderlich gegenüber dem Referenzzeitraum angenommen. Die Korrelation wird zum größten Teil bestimmt von den physikalischen Eigenschaften

des Einzugsgebiets wie Topographie, Boden- und Grundwasserspeicher, welche von Änderungen der klimatischen Größen weitgehend unbeeinflusst sind. Mit Herstellung der Korrelation für die generierten Abflüsse entsprechend der Korrelation der beobachteten Abflüsse des Referenzzeitraumes ändert sich die Varianz der Jahressummen, wodurch eine erneute Überprüfung der Einhaltung des Zielwertes und gegebenenfalls eine Wiederholung der Abflussgenerierung notwendig wird. Diese Überprüfung entspricht einer erneuten Schleife, dargestellt wieder durch einen roten Pfeil in Abbildung 5-4.

Die Veränderung der Dichtefunktion des mittleren Wochenzuflusses für verschiedene Änderungsfaktoren des Mittelwertes dm und des Variationskoeffizienten dv zeigt Abbildung 5-5. Die Dichtefunktion der historisch gemessenen Werte des Referenzzeitraumes basiert auf 30 Einzelwerten aus 30 Jahren Referenzzeitraum. Die Dichtefunktionen der generierten Abflussszenarien basieren auf 100 Einzelwerten des betrachteten Wochenabflusses. Die generierten Zeitreihen decken entsprechend jeweils 100 Jahre ab. Es zeigt sich, dass die Form der Dichtefunktion mit mehreren Wendepunkten getroffen wird.

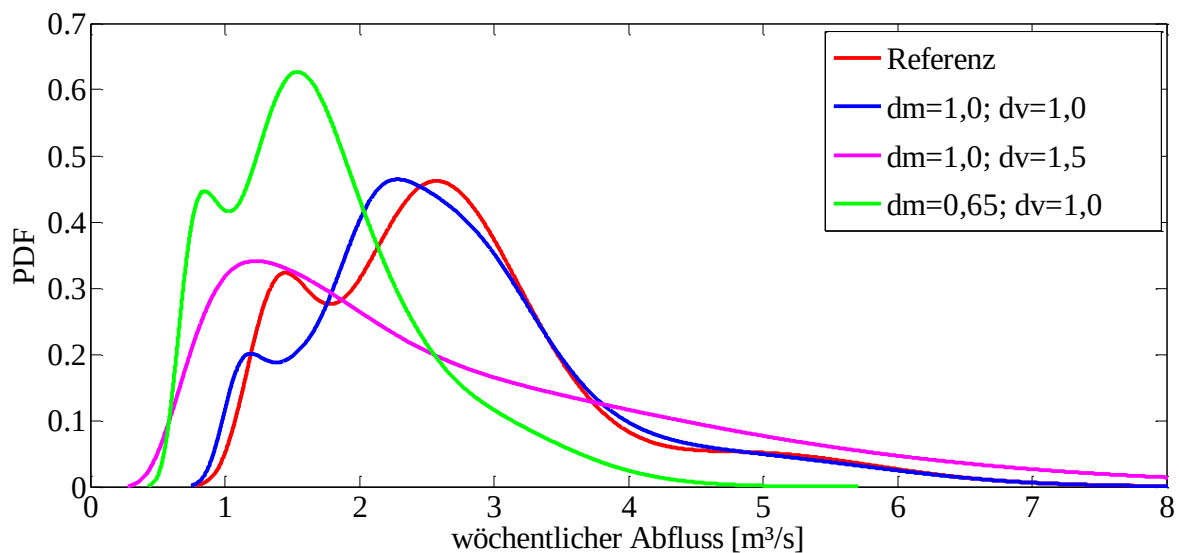


Abbildung 5-5 Veränderung der Dichtefunktion (*probability density function (pdf)*) der wöchentlichen Zuflüsse der 2. Maiwoche zur Urftalsperre für Änderungen des Mittelwertes und des Variationskoeffizienten

Abbildung 5-6 zeigt die Dichtefunktionen der jährlichen Zuflüsse für verschiedene Änderungsfaktoren von Mittelwert dm und Variationskoeffizient dv . Die Verteilung der generierten Abflüsse nähert sich der aus langfristigen Messungen bekannten, linksschiefen Verteilung an.

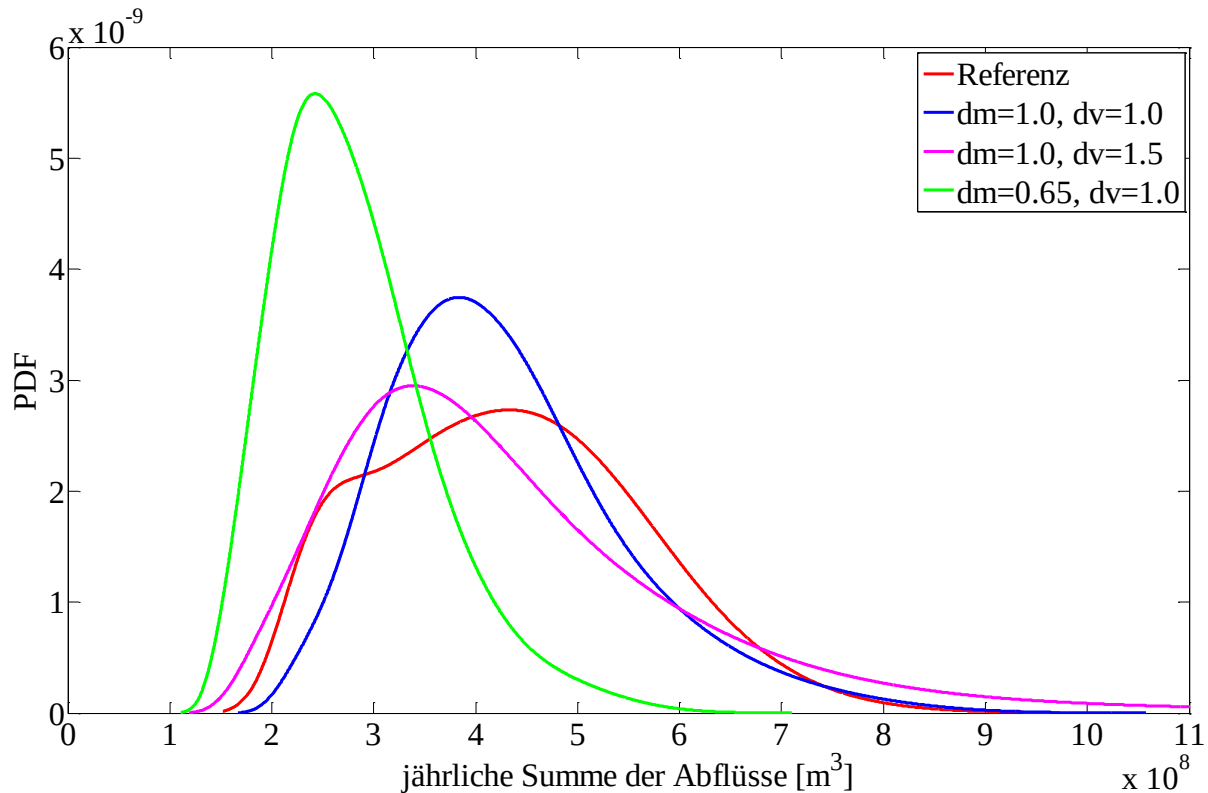


Abbildung 5-6 Veränderung der Dichtefunktion der jährlichen Zuflusssumme für Änderungen des Mittelwertes und des Variationskoeffizienten

Im dritten Schritt des Verfahrens werden die Autokorrelation der Jahresabflüsse und die Autokorrelation zwischen aufeinanderfolgenden Wochen um den Jahreswechsel eingestellt. Dies erfolgt durch Tauschen von Abflussjahren bis der Zielwert der Autokorrelation erreicht ist. Dieser Zielwert entspricht bei Generierung von Abflusszeitreihen, die einem gemessenen Zustand entsprechen, dem Wert der Autokorrelation dieses gemessenen Zustandes. Änderungen der Autokorrelation lassen sich durch Anpassen des Zielwertes direkt abbilden. Beträgt der jährliche Autokorrelationskoeffizient im Referenzzeitraum beispielsweise 0,4 und soll eine klimabedingte Erhöhung auf 0,5 untersucht werden, wird der Änderungsfaktor der Autokorrelation dr zu 1,25 gesetzt.

Die Berücksichtigung der innerjährlichen Verschiebung der Abflüsse durch Klimaänderungen erfolgt mittels Änderung der Abflussaufteilung in Sommer- und Winterhalbjahr. Beträgt der Winteranteil des Jahresabflusses beispielsweise im Referenzzeitraum $RW = 70\%$, entspricht ein Änderungsfaktor des Winteranteils dw von 1,2 einer Erhöhung auf 84 %. Um diese veränderte Abflussverteilung zwischen Winter- und Sommerhalbjahr bei der Zeitreihengenerierung einzubeziehen, werden die Änderungsfaktoren des Mittelwertes der Wochenabflüsse selektiv angepasst. Hierbei ist das Zusammenspiel einer Änderung des Mittelwertes der Jahressumme der Abflüsse und der Änderung des Winteranteiles zu berücksichtigen. Wochen im Winterhalbjahr erfahren eine Anpassung durch Multiplikation mit dem Änderungsfaktor des Mittelwertes der Jahressumme dm und dem Änderungsfaktor des Winteranteils dw . Entsprechend müssen die Zielwerte des Mittelwertes der Wochen im Sommerhalbjahr proportional angepasst, bei einer Erhöhung des Winteranteiles verringert werden. Gleichung (5.3) beschreibt den Änderungsfaktor für Sommerwochen FS :

$$FS = \frac{dm - dw \cdot dm \cdot RW}{1 - RW} \quad (5.3)$$

Die Änderungsfaktoren FS müssen aufgrund der Abhängigkeit vom Referenzwinteranteil RW für jede Station, an der eine Zeitreihe generiert werden soll, getrennt bestimmt werden. Dies ist notwendig, da die Änderung des Winteranteils dw an allen Stationen relativ zum Winteranteil des Abflusses im Referenzzeitraum RW an der jeweils betrachteten Station erfolgt.

Abbildung 5-7 zeigt die Mittelwerte der Wochenabflüsse im Verlauf eines wasserwirtschaftlichen Jahres für den Referenzzustand und verschiedene Werte des Änderungsfaktors dw .

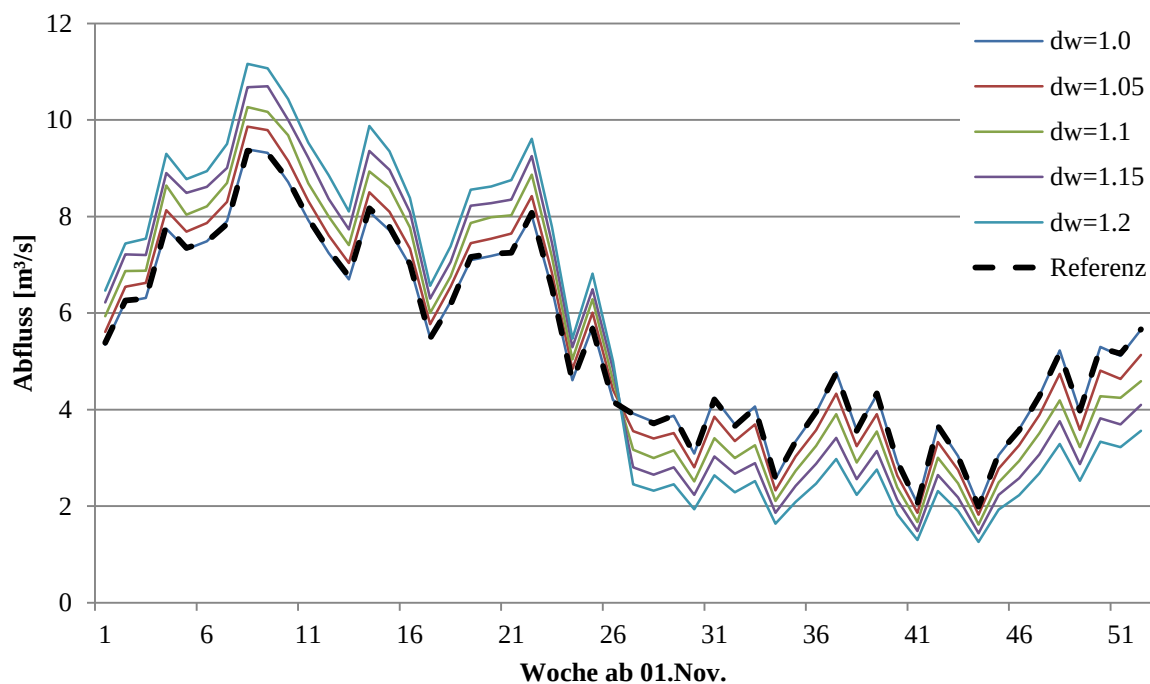


Abbildung 5-7 Veränderung der innerjährlichen Verteilung der Abflüsse für Änderung des Winteranteils

Der Zeitreihengenerator kann Änderungen der statistischen Eigenschaften des Zuflusses abbilden, wie Änderung des Mittelwertes, des Variationskoeffizienten, der innerjährlichen Verschiebung der Abflüsse und des Autokorrelationskoeffizienten. Mit Hilfe der so generierten Zuflussganglinien lässt sich mittels Simulation des Talsperrenbetriebs die Auswirkung der veränderten, statistischen Eigenschaften des Zuflusses auf die Leistungsfähigkeit probabilistisch und unter Berücksichtigung der Konsequenzen von Versagensereignissen beschreiben. Im Anwendungsbeispiel (Kapitel 7) wird der Einsatz der Methode detailliert dargestellt.

5.5 Zusammenfassung

Die Bestimmung des Einflusses der Klimaänderung auf die Leistungsfähigkeit von Talsperren dient als Grundlage zur Beantwortung der Fragen, ob zu erwarten ist, dass die Leistungsfähigkeit zukünftig beeinträchtigt ist und ob Anpassungsmaßnahmen notwendig sind. Verbreitet zur Klärung dieser Fragen sind szenarienbasierte Einwirkungsstudien. Dabei kommt eine umfangreiche Modellkette zum Einsatz: Vom Szenario der zukünftigen Entwicklung der Gesellschaft und der Emission klimawirksa-

mer Gase, über globale und regionale Klimamodelle, hin zur hydrologisch modellierten Auswirkung auf die Abflüsse und die Abbildung der Konsequenzen auf den Betrieb der Talsperre werden verschiedene Modelle verwendet. Insgesamt sind so je nach Verfahren bis zu acht Modellschritte notwendig (siehe auch Abbildung 5-1). Jeder Modellschritt beinhaltet Unsicherheiten in den Modellannahmen. Zudem erlauben die derzeitigen Klimamodelle keine gesicherten Aussagen zur Richtung der Änderung des Niederschlages und damit der Abflüsse. Verschiedene Emissionsszenarien und Klimamodelle zeigen entsprechend sowohl eine Zunahme als auch eine Abnahme des Abflusses mit einer Bandbreite der Unsicherheit von etwa $\pm 25\%$ (HAUSMANN & NACKEN, 2010; MUERTH ET AL., 2012). Szenarienbasierte Einwirkungsstudien können daher lediglich aufzeigen, wie sich die Leistungsfähigkeit von Talsperren für verschiedene Szenarien verhält und eine erste Einschätzung darüber geben, ob die Leistungsfähigkeit von Talsperren zukünftig beeinträchtigt sein könnte. Ein Vorteil der szenarienbasierten Einwirkungsstudien ist die detaillierte Abbildung des Talsperrenbetriebs mittels Simulation, welche bei Wahl geeigneter Randbedingungen und Verfahren eine probabilistische Bewertung der Leistungsfähigkeit erlaubt. Auf Simulation beruhende Verfahren sind zudem in der Lage, Mehrspeichersysteme zu beschreiben. Für eine Beantwortung der Frage, ob Anpassungen notwendig sind, ist die mit den Szenarien assoziierte Unsicherheit jedoch in den meisten Fällen zu groß. Auch zeigt sich bereits für die Untersuchung weniger Szenarien, dass das Verhalten von Talsperren auf geänderte Zuflussrandbedingungen nicht-linear und teilweise abrupt ist. Zur Bestimmung des Bereichs von Änderungen, ab dem Anpassungen notwendig werden, ist daher die Kenntnis des funktionellen Verlaufs der Abhängigkeit von Zuflusseigenschaften und Leistungsfähigkeit der Talsperren essentiell.

Bestehende Verfahren zur Abbildung dieses funktionellen Verlaufs beruhen auf statistischen Methoden zur Beschreibung des Talsperrenbetriebs, haben enge Anwendungsgrenzen und erlauben keine detaillierte und probabilistische Bewertung der Leistungsfähigkeit. Es wurden daher die Simulationsverfahren, wie sie bei szenarienbasierten Einwirkungsstudien zur Anwendung kommen, mit statistischen Methoden zur Generierung von geänderten Zuflussrandbedingungen kombiniert, um sowohl den funktionellen Verlauf der Abhängigkeit von Klimaänderungen und Leistungsfähigkeit von Talsperren wiedergeben zu können, als auch die Leistungsfähigkeit detailliert und probabilistisch bewerten zu können. Hierzu wird der in Kapitel 4 beschriebene, neue Ansatz der Bestimmung des wasserwirtschaftlichen Gesamtrisikos verwendet. Damit lassen sich zum einen genaue Aussagen dazu treffen, wie sich die Leistungsfähigkeit für verschiedene klimabedingte Änderungen der statistischen Eigenschaften des Zuflusses verhält. Zum anderen lässt sich so auf Basis der risikobasierten Bewertung der Leistungsfähigkeit bestimmen, welche Änderungen dieser statistischen Eigenschaften des Zuflusses Anpassungen am Talsperrenbetrieb notwendig machen.

Die Grundlagen des Entwurfs und der Bewertung derartiger Anpassungsmaßnahmen werden im folgenden Kapitel dargestellt.

6 Anpassung des Talsperrenbetriebs an den Klimawandel

6.1 Einleitung

Zeigt die Bewertung des Einflusses der Klimaänderung auf die Leistungsfähigkeit einer Talsperre bzw. eines Talsperrensystems, dass eine Anpassung der Betriebsregeln zukünftig notwendig ist, stellen sich im Anschluss drei Fragen:

1. Welche Zielsetzungen sollen mit einer Anpassung erreicht werden?
2. Welche Maßnahmen kommen in Frage und wie können diese bemessen werden?
3. Wie lässt sich die Wirksamkeit von Maßnahmen bewerten und wie können effiziente Maßnahmen ausgewählt werden?

Im Folgenden soll dargestellt werden, wie diese Fragen beantwortet werden können. Dabei wird zunächst auf die nur scheinbar offensichtliche Frage nach den Zielsetzungen einer Anpassung eingegangen, um anschließend mögliche Maßnahmen, ihre Bewertung und Auswahl zu beschreiben.

6.2 Ziele der Anpassung und Entscheidungsfindung: Erhalt der Leistungsfähigkeit und Robustheit

Es erscheint zunächst offensichtlich, welche Ziele mit Anpassungsmaßnahmen erreicht werden sollen: Die Wiederherstellung bzw. der Erhalt der Leistungsfähigkeit eines Talsperrensystems auch unter zukünftigen Randbedingungen. Die in Kapitel 5.2 dargestellte Unsicherheit in der Bestimmung zukünftiger Randbedingungen macht es jedoch notwendig zu hinterfragen, wie ein Erhalt der Leistungsfähigkeit unter eben diesen unsicheren Randbedingungen sicherzustellen und zu bewerten ist. Sind Erwartungswerte und Verteilung der Randbedingungen bekannt, ist es möglich, die Leistung eines Systems probabilistisch zu bestimmen und bezüglich des Risikos zu optimieren. Die zukünftigen klimatischen Randbedingungen sind jedoch weitgehend unbekannt, lediglich ihre Bandbreite kann mittels Szenarien bestimmt werden. Man spricht in diesem Fall von tiefer Unsicherheit (*deep uncertainty* (KNIGHT, 1921)). Unter tiefer Unsicherheit ist eine Optimierung der Leistungsfähigkeit des Systems bzw. eine Minimierung des Risikos nicht möglich, da sich die Eintrittswahrscheinlichkeiten von Systemzuständen nicht bestimmen lassen. Es ist jedoch möglich, Systeme und Betriebsregeln zu identifizieren, welche unempfindlich gegenüber Änderungen der unsicheren Randbedingungen sind und welche eine gute Leistungsfähigkeit für einen weiten Bereich dieser Randbedingungen zeigen. Solche Betriebsregeln werden als robust bezeichnet. Auf die Entscheidungsfindung unter Unsicherheit wird detailliert in Kapitel 6.4 eingegangen, wo auch die Auswahl möglicher Maßnahmen zur Anpassung diskutiert wird. Zunächst sollen die Ziele der Anpassung konkretisiert und der Begriff der Robustheit definiert werden.

Einige Autoren stellen die Anpassungsfähigkeit bestehender wasserwirtschaftlicher Systeme, Bemessungsverfahren und Betriebsstrategien heraus. Sie argumentieren, dass diese wasserwirtschaftlichen Systeme zwar mit Verfahren geplant wurden, welche ein stationäres Klima voraussetzen, das sich in den gemessenen hydrologischen Daten manifestiert, diese Verfahren aber auch großer Sicherheiten bei der Bemessung einbeziehen. Die so geplanten Anlagen verfügen somit über eine Kapazität zur Anpassung

sung an andere klimatische Bedingungen (RIEBSAME, 1988; LINS & STAKHIV, 1998). Eine größere Sicherheit der Bemessung entspricht in diesem Sinne einer erhöhten Robustheit des wasserwirtschaftlichen Systems. Eine Quantifizierung der Robustheit, auch vor dem Hintergrund des in Kapitel 5 dargestellten, nicht-linearen und teilweise abrupten Verlaufs der Änderung der Leistungsfähigkeit von Talsperren in Abhängigkeit der klimatischen Randbedingungen (S. JAIN & EISCHEID, 2008), ist bei einer alleinigen Berücksichtigung der Sicherheiten, welche bei Bemessung und Ausarbeitung der Betriebsregeln einer Talsperre angesetzt wurden, nicht möglich. Hier sollen daher weitergehende Ansätze zur Beschreibung der Robustheit des Talsperrenbetriebs betrachtet werden.

Eine ökonomische Interpretation der Robustheit geben HASHIMOTO, LOUCKS, ET AL. (1982). Ein optimales System kann danach die Bedürfnisse seiner Nutzer unter minimalem Kosteneinsatz befriedigen. Das Kriterium für die Auswahl eines robusten Systems wird hierbei durch die Opportunitätskosten beschrieben. Unter Opportunitätskosten wird die Differenz verstanden zwischen den minimalen Kosten des optimalen Systems $L(q)$ und den Kosten eines teureren Systems $C(q|D)$, welches ebenfalls den gegebenen Bedarf befriedigen kann, aber auch einen höheren Bedarf befriedigen könnte. Ein robustes System kann dementsprechend mittels geringen Kostenaufwands an den zukünftigen Bedarf q angepasst werden. Die Bandbreite der Randbedingungen, unter der ein System den Bedarf seiner Nutzer erfüllen können muss und für die eine Planung robust sein soll, wird durch den zukünftigen Bedarf beschrieben. Da kein Design jeden möglichen zukünftigen Bedarf befriedigen können, werden die Opportunitätskosten, also die Zusatzkosten für ein robustes System, auf einen Anteil χ der zur Befriedigung des aktuellen Bedarfs notwendigen Kosten begrenzt. Zusätzlich werden dem zukünftigen Bedarf Wahrscheinlichkeiten zugeordnet. Damit kann die Robustheit R_χ einer Planung nach Gleichung (6.1) beschrieben werden als Wahrscheinlichkeit, dass die Kosten zur Befriedigung des zukünftigen Bedarfs geringer sind als $1+\chi$ der optimalen Kosten zur Befriedigung des gegenwärtigen Bedarfs:

$$R_\chi = \text{Prob}[C(q|D) \leq (1 + \chi)L(q)] \quad (6.1)$$

Robuste Systeme haben dann einen hohen Wert von R_χ . Diese ökonomische Interpretation der Robustheit ließe sich zur Bewertung des Betriebs bestehender Systeme anwenden, wenn statt des zukünftigen Bedarfs die zukünftigen Randbedingungen als veränderlich angesetzt werden. Zur Berechnung dieser ökonomischen Interpretation der Robustheit müssen aber die Eintrittswahrscheinlichkeiten zukünftiger Randbedingungen bekannt sein, was, wie oben ausgeführt, unter tiefer Unsicherheit nicht der Fall ist. Zur Bestimmung der Robustheit unter Klimawandel ist daher eine weitergehende Definition notwendig.

Robustheit der Bemessung wasserwirtschaftlicher Systeme unter Klimawandel wird verstanden als Unempfindlichkeit der Bemessung gegenüber Fehlern bzw. Unsicherheiten in den Eingangsparametern, die die Bemessung beeinflussen (MATALAS & FIERING, 1977). Als solches impliziert Robustheit wiederum keine gute, optimale Bemessung eines wasserwirtschaftlichen Systems. Eine optimale Bemessung ist die, welche auf Basis der bekannten Information (Messung des Klimas) und den daraus abgeleiteten Randbedingungen (zum Beispiel Zufluss und Wasserbedarf) die beste Leistungsfähigkeit des Systems bewirkt. Ändern sich die klimatischen Bedingungen oder wurden bei der Ableitung von Randbedingungen Fehler gemacht, wäre entsprechend eine alternative Bemessung bzw. ein alternativer Betrieb optimal. MATALAS & FIERING (1977) bezeichnen die Differenz zwischen der Leistungsfähigkeit bei optimalem Betrieb und der Leistungsfähigkeit bei gewähltem Betrieb als Bedauern (*regret*). Besteht die Möglichkeit, die Eintrittswahrscheinlichkeit der Randbedingungen zu bestimmen,

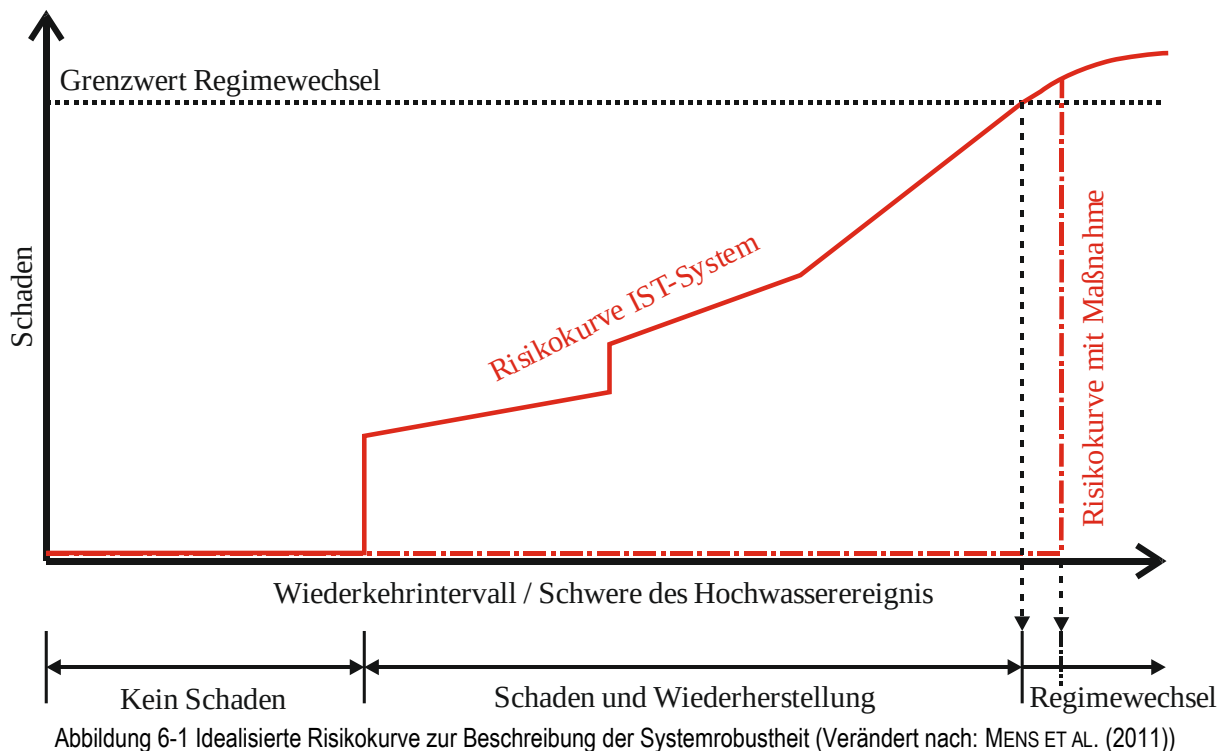
lässt sich die Betriebsalternative auswählen, für die der geringste Wert des Bedauerns zu erwarten ist. Ist eine solche Bestimmung des Erwartungswertes nicht möglich, da die zukünftigen Randbedingungen von tiefer Unsicherheit geprägt sind und sich einer probabilistischen Beschreibung verschließen, schlagen MATALAS & FIERING (1977) vor, die Standardabweichung der Werte des Bedauerns einer Alternative für verschiedene Randbedingungen als Maß für die Robustheit zu verwenden. Je kleiner die Standardabweichung des Bedauerns einer Alternative über mögliche Randbedingungen, desto größer ist ihre Robustheit. MATALAS & FIERING (1977) zeigen keine Anwendung zur Bestimmung der Robustheit für eine konkrete Fragestellung.

Ein ähnliches Kriterium der Robustheit eines wasserwirtschaftlichen Systems schlägt KACZMAREK (1990) vor. Das Kriterium vergleicht Betriebsregeln für ein Talsperrensystem anhand ihrer Zielfunktionswerte für verschiedene klimatische Randbedingungen. Als Zielfunktionswert wird die Zuverlässigkeit der Wasserbereitstellung r vorgeschlagen. Die Robustheit lässt sich dann berechnen als Kehrwert der aufsummierten, gewichteten, betragsmäßigen Abweichungen der Zuverlässigkeit im Referenzklima r_{ref} zur Zuverlässigkeit in den Klimaszenarien r_i .

$$Robustheit = \frac{1}{\sqrt{\sum_i P_i (r_i - r_{ref})^2}} \quad (6.2)$$

In Gleichung (6.2) steht P für Gewichte, welche den Szenarien gegeben werden können. Eine praktische Anwendung zeigt auch KACZMAREK (1990) nicht. Die Gewichtung von Klimaszenarien scheint zum gegenwärtigen Stand der Forschung nicht sinnvoll (BREKKE ET AL., 2009; VICUNA ET AL., 2010). Ohne Berücksichtigung von Gewichten für verschiedene Klimaszenarien entspricht Gleichung (6.2) dem Kehrwert der Standardabweichung der Zielfunktionswerte und somit dem von MATALAS & FIERING (1977) vorgeschlagenen Vorgehen.

Eine weitere Sichtweise zur Bewertung der Robustheit zeigen MENS ET AL. (2011) in Bezug auf Hochwasserrisiko. Sie übertragen Konzepte zur Beschreibung der Systemrobustheit von Ökosystemen auf den Anwendungsfall des Hochwasserschutzes. Zentrales Element der Analyse ist die Identifikation von Regimewechseln, welche in anderen Studien auch als Kipppunkte bezeichnet werden (KWADIJK ET AL., 2010). Als Regimewechsel bezeichnen MENS ET AL. (2011) Hochwasserereignisse, deren Auswirkungen die Kapazität von Menschen und Wirtschaft im betroffenen Gebiet zur Bewältigung dieser Auswirkungen übersteigt. Als Kriterien für einen Regimewechsel werden zum Beispiel Hochwasserschäden, welche höher als 50 % der jährlichen Wirtschaftsleistung des Gebiets sind oder der Tod von mehr als 10 % der Bevölkerung des Gebiets vorgeschlagen. Die Kombination von Eintrittswahrscheinlichkeit des Regimewechsels und dem Verlauf der Hochwasserrisikokurve (siehe Kapitel 4.2.1 und Abbildung 6-1) charakterisiert die Robustheit des Gebiets gegenüber Hochwasser. Die Robustheit wird damit nicht in einem Kennwert zusammengefasst, sondern wird qualitativ anhand des Verlaufs der Risikokurve bewertet.



Maßnahmen haben nur dann eine Wirkung auf den Punkt des Regimewechsels, wenn sie bis zu Belastungen wirksam sind, ab denen der Regimewechsel eintreten würde. Solche Maßnahmen, im von MENS ET AL. (2011) angeführten Anwendungsfall beispielsweise ein Speerwerk zum Küstenschutz, erhöhen die Robustheit, sind aber auch mit sehr hohen Kosten verbunden. Derartige Maßnahmen stellen eine extreme Herangehensweise an die Frage dar, wie die Robustheit eines wasserwirtschaftlichen Systems erhöht werden kann. Dies wird im Vergleich zur ökonomischen Interpretation der Robustheit nach HASHIMOTO, LOUCKS, ET AL. (1982) deutlich: Während es im ökonomischen Ansatz um die kostengünstige Anpassungsfähigkeit von Systemen geht, zielt der aus der Ökologie übertragene Ansatz nach MENS ET AL. (2011) auf die Erhaltung der Leistungsfähigkeit für einen weiten Bereich möglicher Einwirkungen und Randbedingungen ab, unabhängig von den damit verbundenen Kosten. Der Unterschied wird begrifflich daran festgemacht, ob die Robustheit des Systems oder die Robustheit der Entscheidung über eine Bemessung oder Betriebsweise des Systems betrachtet wird. Eine Betrachtung der Systemrobustheit erfolgt unabhängig von Kosten und anderen Faktoren, während diese bei einer Betrachtung der Robustheit der Entscheidung die zentrale Rolle einnehmen (MENS ET AL., 2011). So bezeichnen Regimewechsel oder Kippunkte im Sinne einer robusten Entscheidung Randbedingungen, ab denen die Betriebsweise geändert werden muss (KWADIJK ET AL., 2010).

In dieser Arbeit werden beide Herangehensweisen kombiniert. Die Bandbreite der Randbedingungen, unter denen der Betrieb eines Talsperrensystems die Bedürfnisse seiner Nutzer erfüllen kann, soll durch Maßnahmen vergrößert werden, um die Robustheit des Systems gegenüber Klimaänderungen zu erhöhen. In diesem Sinne soll also eine robuste Entscheidung für eine Betriebsweise gefunden werden, die über einen weiten Bereich möglicher Randbedingungen sinnvoll ist. Als Kriterium hierzu eignet sich die Veränderung der Leistungsfähigkeit des Talsperrensystems für unterschiedliche Randbedingungen, wie sie von MATALAS & FIERING (1977) oder KACZMAREK (1990) vorgeschlagen wurden. Daneben eignet sich aber auch die von MENS ET AL. (2011) dargestellte Analyse der Systemrobustheit anhand des Verlaufs der Risikokurve zur Beurteilung, wie das System auf Maßnahmen reagiert und

erlaubt einen visuellen Vergleich der Wirkung von Maßnahmen auf die Robustheit des Systems. Hierbei werden jedoch nicht die Risikokurven direkt, sondern die Kurven der Veränderung des Risikos (als Maß für die Leistungsfähigkeit bezüglich Wasserbereitstellung und Hochwasserrückhalt) in Abhängigkeit von den klimatischen Randbedingungen betrachtet. So lässt sich klar erkennen, bis zu welchem Ausmaß der Klimaänderung Maßnahmen wirksam sind und damit, wie robust sie sind. Diese graphische Bewertung der Robustheit gegenüber Klimaänderungen ist in Abbildung 6-2 vereinfacht dargestellt.

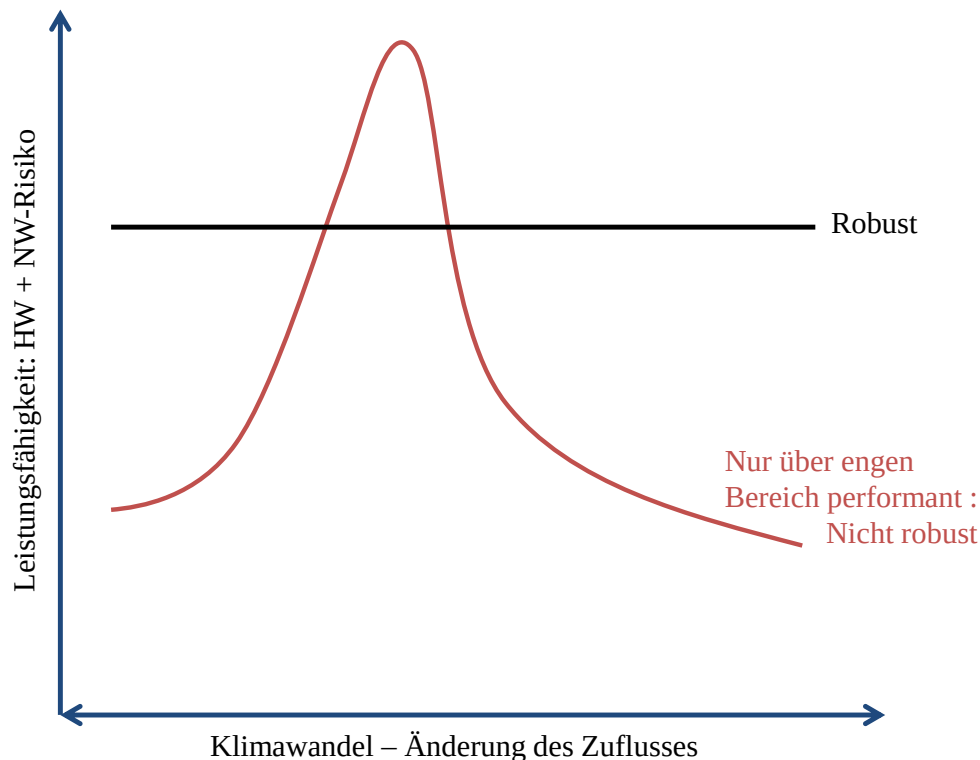


Abbildung 6-2 Bewertung der Robustheit anhand des Verlaufs der Risikoänderung mit Klimaänderungen

Die Leistungsfähigkeit des idealen, robusten Systems in Abbildung 6-2 ist unabhängig von der Klimaänderung. Entsprechend ist die Standardabweichung der Leistungsfähigkeit für verschiedene Klimabedingungen gleich Null. Ein solches System würde auch nach den mathematischen Beschreibungen der Robustheit nach MATALAS & FIERING (1977) oder KACZMAREK (1990) das ideale System darstellen. Die visuelle Bewertung nach dem Verlauf der Änderung des Risikos hat den zusätzlichen Vorteil, auch die Sensitivität gegenüber der Bandbreite der Klimaänderung direkt erfassen zu können.

Mit dieser Bewertung der Robustheit des wasserwirtschaftlichen Systems anhand der Leistungsfähigkeit für verschiedene klimatische Randbedingungen lässt sich den tiefen Unsicherheiten begegnen, wie sie aus den meteorologischen und hydrologischen Randbedingungen unter Klimawandel entstehen. Neben diesen unsicheren, klimatischen Randbedingungen spielen bei der Auswahl von Betriebsregeln für den langen Planungshorizont wasserwirtschaftlicher Anlagen auch sozio-ökonomische und institutionelle, politische Veränderungen eine große Rolle. Die Unsicherheiten aus diesen gesellschaftlichen Veränderungen übersteigen jene, welche aus der Instationarität der klimatischen Randbedingungen resultieren, in vielen Fällen bei weitem. MATALAS & FIERING (1977) betonen, dass die Entscheidung für eine bestimmte Bemessung oder Betriebsregeln im Rahmen des institutionellen, politischen, öko-

nomisch und von anderen nicht-technischen Faktoren bestimmten Kontext getroffen wird. So unterscheiden auch MERZ ET AL. (2010) Level, auf denen die Unsicherheiten der Entscheidung für Managementstrategien behandelt werden können: Von der statistischen Repräsentation der Modellunsicherheiten, der Unsicherheit bei der Auswahl von Alternativen über die Unsicherheiten durch Auswahl der Zielsetzungen bis zu Unsicherheiten durch die Entscheidungskultur politischer Institutionen. Eine Quantifizierung der Unsicherheiten mittels probabilistischer Methoden ist lediglich für die Modellunsicherheiten möglich, für die die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Randbedingungen und Modellparameter bekannt ist. Mit Hilfe der vorgestellten Bewertung der Robustheit lassen sich auch die tiefen Unsicherheiten bei der Auswahl von Alternativen und die Unsicherheiten durch Auswahl der Zielsetzungen teilweise bestimmen. Die Entscheidung für bestimmte Anpassungsmaßnahmen findet aber immer auch im Rahmen der sozio-ökonomischen Bedingungen und in Abhängigkeit der politischen Entscheidungskultur der beteiligten Institutionen statt, die sich nicht probabilistisch erfassen lassen. Für die Region Nord-West Pazifik der USA gibt HAMLET (2011) einen Überblick über die Anpassung der Wasserwirtschaft an den Klimawandel und betont dabei die Notwendigkeit der institutionellen Kapazität, solche Anpassungen planen, koordinieren und umsetzen zu können. Für in der betrachteten Region von überregionalen Institutionen koordinierte priorisierte Nutzungen wie Hochwasserschutz und Energiegewinnung sowie lokale Wasserversorgung, welche keiner überregionalen Koordination bedarf, bestehen diese Kapazitäten vielerorts. Dagegen bestehen große Defizite in der Anpassung der Bewirtschaftung von Niedrigwasser auf einer überregionalen Skala. Dieses Bild zeigt sich beispielsweise auch im Einzugsgebiet der Maas (KRUEGER ET AL., 2012; SINABA ET AL., 2013). Als verantwortlich hierfür nennt HAMLET (2011) neben dem Fehlen einer entscheidungsbefugten, übergeordneten Institution, die Tendenz, Bewirtschaftungsregeln für Talsperren nicht zu ändern, sondern zu erweitern, um neue Nutzungsansprüche zu berücksichtigen. Dies führt nach und nach zu Betriebsregeln, die so komplex sind, dass eine Anpassung weitgehend unmöglich ist.

Dieser Aspekt der Umsetzbarkeit von Maßnahmen soll daher neben der Robustheit im folgenden Kapitel berücksichtigt werden, in dem erörtert wird, welche Maßnahmen in Frage kommen und wie diese bemessen werden können.

6.3 Anpassungsmaßnahmen und ihre Bemessung

6.3.1 Vorarbeiten

Vor einer Anpassung des Betriebs mit Hilfe der in Kapitel 3.3 erläuterten Verfahren zur Bestimmung von Betriebsregeln für Talsperren, sollte eine Analyse der bestehenden Regeln durchgeführt werden. Oftmals sind diese über Jahrzehnte entstanden, sehr komplex und berücksichtigen verschiedene Nutzungen. Der erste Schritt, um zu einer Anpassung dieser gewachsenen Betriebsregeln zu kommen, ist daher eine Bestandsaufnahme der vorhandenen Aufgaben der Talsperre und ihre Priorisierung. Mögliche Nutzungsarten und Aufgaben einer Talsperre, bzw. eines Talsperrensystems wurden in Kapitel 2 erläutert. Es ist zwischen Aufgaben zu unterscheiden, welche auf der Wasserbereitstellung aus dem Speicherraum der Talsperre beruhen und solchen Aufgaben, insbesondere dem Hochwasserschutz, welche auf der kurzfristigen Rückhaltung von Abflüssen im Speicherraum der Talsperre beruhen. Ein Abwägen zwischen diesen beiden Aufgabengruppen bestimmt die Aufteilung des Gesamtspeichervolumens in den freizuhaltenden Hochwasserrückhalteraum und den möglichst gefüllt zu haltenden Betriebsraum. Dabei ist zu beachten, wie groß der Betriebsraum zur Erfüllung der Aufgaben der Wasserbereitstellung sein muss. Dies hängt wiederum ab von den einzelnen Aufgaben der

Wasserbereitstellung und ihrer Priorisierung, auch gegenüber dem Hochwasserschutz. Des Weiteren ist der freizuhaltende Hochwasserrückhalteraum jahreszeitabhängig, wenn beispielsweise Hochwasserereignisse aus Schneeschmelze im Frühjahr größer ausfallen als Sommerhochwasser aus Konvektionsregen. Eine Veränderung dieser jahreszeitabhängigen Hochwassereigenschaften im Zuge des Klimawandels ist bei der Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen entsprechend zu berücksichtigen. Gleiches gilt für die Mindestfüllung des Betriebsraums zur Einhaltung einer definierten Zuverlässigkeit der Wasserbereitstellung. Diese kann zum Beispiel in Perioden mit in der Regel hohen Abflüssen geringer ausfallen als in Trockenperioden. Diese Grundlagen der Allokation von Speicherraum für unterschiedliche Aufgaben verdeutlichen das Konfliktpotential zwischen eben diesen und zeigen damit an, wo eine Priorisierung konkurrierender Aufgaben notwendig ist.

Bei dieser Priorisierung der Nutzungen kann die in Kapitel 4 vorgestellte, probabilistische, risikobasierte Bewertung der Leistungsfähigkeit einer Talsperre, welche neben der Zuverlässigkeit auch die Konsequenzen möglicher Versagensereignisse quantifiziert, eine Hilfestellung geben. Oftmals spielen jedoch auch Nutzungen eine Rolle, die sich nur schwer oder gar nicht quantitativ bewerten lassen. Während sich Nutzungen wie Energiegewinnung, Wasserversorgung oder Hochwasserschutz quantifizieren und, mit den genannten Einschränkungen, monetär bewerten lassen, sind andere Nutzungen stark von qualitativen Bewertungen geprägt, wie sie sich aus den sozio-ökonomischen und politischen Rahmenbedingungen des Betriebs ergeben. Beispiele derartiger Aufgaben sind eine Dynamisierung des Abflusses unterstrom der Talsperre, ökologische Aufgaben und auch die Freizeitnutzung. Diese Aufgaben sind daher entsprechend ihrer subjektiven Gewichtung bei der Priorisierung zu berücksichtigen.

Anhand der so entwickelten Priorisierung der Aufgaben und mittels der in Kapitel 5 beschriebenen Bestimmung des Einflusses der Klimaänderung auf die Leistungsfähigkeit der Talsperren lassen sich Leistungsreserven identifizieren, welche sich zu einer Anpassung der Betriebsregeln, im Sinne einer Erhöhung der Robustheit gegenüber Klimaänderungen, ausnutzen lassen. Diese Leistungsreserven ergeben sich aus der Priorisierung von Aufgaben, wobei die Robustheit priorisierter Aufgaben auf Kosten von nicht priorisierten Aufgaben erhöht werden kann. Leistungsreserven können ebenso durch Effizienzsteigerungen des Betriebs geschaffen werden, beispielsweise mittels Echtzeitsteuerung oder dem Verbund von Speichern durch Überleitungen. Das Vorgehen ist in Abbildung 6-3 zusammenfassend dargestellt.

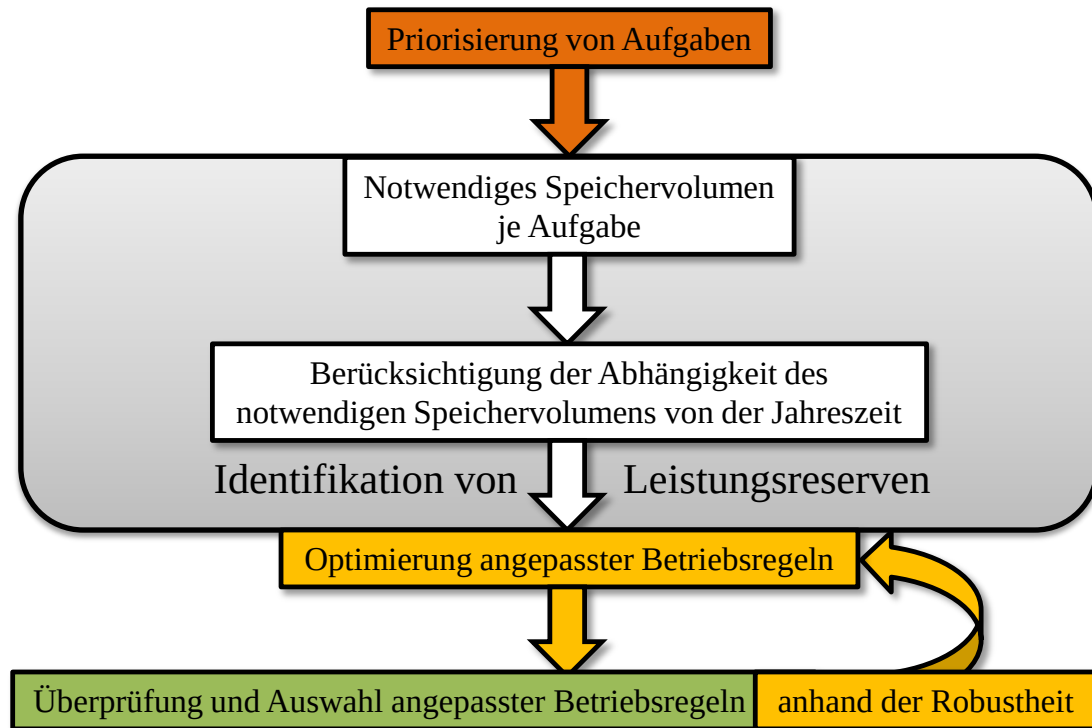


Abbildung 6-3 Ablauf der Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen

6.3.2 Maßnahmen

Die Robustheit der Leistungsfähigkeit für priorisierte Aufgaben einer Talsperre kann verbessert werden, indem das für diese Aufgaben allokierte Speichervolumen vergrößert wird oder die Effizienz der Ausnutzung des Speichervolumens erhöht wird.

Die Vergrößerung der Speichervolumen einzelner Aufgaben kann absolut erfolgen durch Anhebung oder Absenkung des Stauziels, wobei eine Anhebung den Betriebsraum vergrößert und den Hochwasserrückhalteraum verkleinert, und umgekehrt, eine Absenkung des Stauziels den Hochwasserrückhalteraum vergrößert und den Betriebsraum verkleinert. Auch in Bezug auf die einzelnen Aufgaben der Wasserbereitstellung kann das jeweils allokierte Speichervolumen relativ vergrößert oder verkleinert werden, beispielsweise durch Reduzierung der Abgaben für sekundäre Aufgaben und daraus resultierende vermehrte Speicherung von Wasser für priorisierte Aufgaben. Beide Maßnahmen sind in Abbildung 6-4 dargestellt.

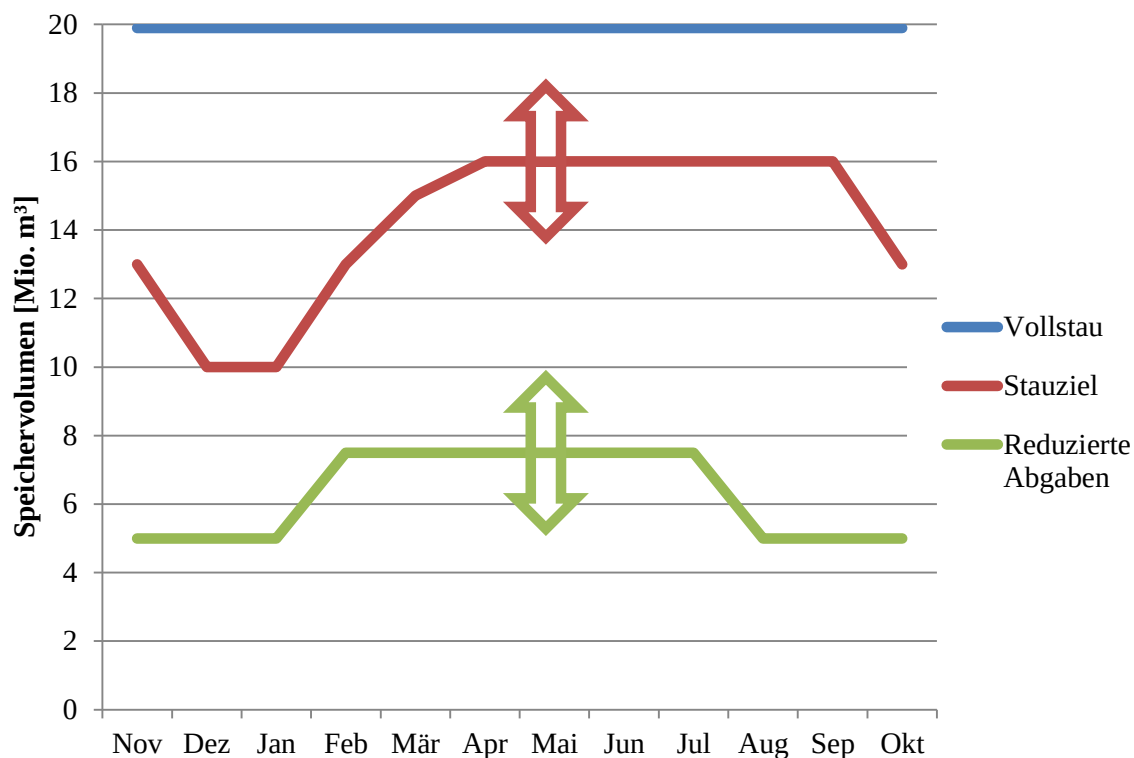


Abbildung 6-4 Absolute Änderung des für einzelne Aufgaben allokierten Speichervolumens

Die grüne, mit „reduzierte Abgaben“ bezeichnete Linie stellt dabei die Vergrößerung oder Verkleinerung des Speichervolumens dar, in dem nur priorisierte Aufgaben der Wasserbereitstellung wahrgenommen werden. Liegt der Speicherfüllstand unter der grünen Linie, werden Abgaben nur für priorisierte Aufgaben getätigt, liegt er darüber, auch für sekundäre Aufgaben. Hat beispielsweise die Bereitstellung von Rohwasser für die Trinkwasserversorgung Priorität gegenüber der Niedrigwasseraufhöhung, lässt sich die Zuverlässigkeit und damit die Robustheit der Rohwasserbereitstellung durch ein Anheben dieser Linie erhöhen.

Alternativ kann die Vergrößerung des Speichervolumens jahreszeitabhängig erfolgen, insbesondere bezüglich der Aufteilung des Gesamtspeicherraums in Hochwasserrückhalteraum und Betriebsraum. Der Betriebsplan einer Talsperre, welche Aufgaben des Hochwasserschutzes und der Wasserbereitstellung erfüllt, stellt, über das hydrologische Jahr gesehen, immer eine Abwägung zwischen der Minderung des Hochwasserrisikos und des Niedrigwasserrisikos dar. Die Linie des Stauziels in Abbildung 6-4 zeigt den idealisierten Verlauf des Speicherfüllstandes über ein hydrologisches Jahr für eine Talsperre mit Hochwasserschutzfunktion. Treten Hochwasser vermehrt im Winter auf, wird zur Sicherstellung des Hochwasserschutzes im Winterhalbjahr ein größerer Speicherraum zur Aufnahme von Hochwasserabflüssen freigehalten. Im Frühjahr wird der Speicher dann gefüllt, um den Wasserbedarf anderer Nutzungsarten während der Sommermonate decken zu können. Vielfach zeigt die Analyse des Einflusses der Klimaänderung auf die Leistungsfähigkeit der Talsperre, dass es, bedingt durch den Temperaturanstieg, zu einem früheren Einsetzen der Schneeschmelze und der damit assoziierten Frühjahrshochwasser kommt. Dadurch wird bei Beibehaltung der bestehenden Betriebsregeln der Füllstand nicht mehr erreicht, welcher zur Deckung des Wasserbedarfs im Sommer benötigt wird. Hier wäre eine Anpassung der Betriebsregeln mit einer zeitlich früheren Verkleinerung des Hochwasserschutzraumes sinnvoll (LEE ET AL., 2009). Zeigt sich dagegen, dass auch spätere oder wiederholte Schnee-

schmelzen einen größeren Hochwasserschutzraum auch noch im März notwendig machen, kann eine Verkleinerung auch später im Jahr erfolgen. Beide Möglichkeiten sind in Abbildung 6-5 dargestellt.

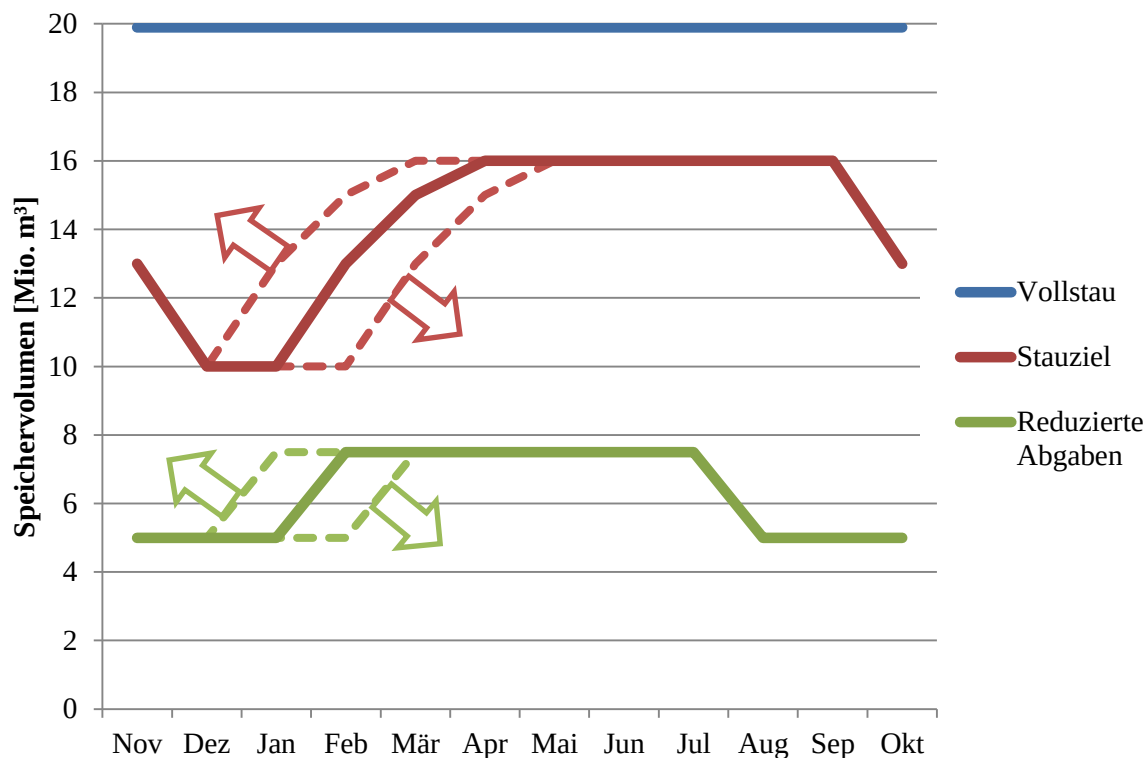


Abbildung 6-5 Jahreszeitabhängige Änderung der für einzelne Aufgaben allokierten Speichervolumen

Eine weitere mögliche Maßnahme stellt die Steigerung der Effizienz dar, mit der das vorhandene Speichervolumen ausgenutzt wird. Effizienzsteigerungen lassen sich zum Beispiel erreichen, indem Betriebsregeln die Prognose von zukünftigen Zuflüssen oder zukünftigem Bedarf berücksichtigen und eine Optimierung für die aktuelle Situation vornehmen, also eine Echtzeitsteuerung umsetzen. Die Methoden und Möglichkeiten zur Echtzeitsteuerung von Talsperren wurden in Kapitel 3.3 dargestellt. Die Echtzeitsteuerung ist auf eine möglichst genaue Vorhersage des Zuflusses angewiesen. Die Vorhersagegenauigkeit nimmt für weiter in der Zukunft liegende Zeitpunkte ab. Hinreichend genaue Vorhersagen beschränken sich auf wenige Tage. Den größten Effizienzgewinn haben somit Echtzeitsteuerungen zum Hochwasserschutz, da hier der Vorhersagezeitraum ausreicht, um beispielsweise eine Vorentlastung im Bedarfsfall umsetzen zu können. Dagegen bietet die Echtzeitsteuerung der Wasserbereitstellung meist keinen Vorteil gegenüber einer stationären Steuerung, da die Prognose des Zuflusses über die nächsten Monate in der Regel zu ungenau ist. Ausnahmen sind Regionen mit ausgeprägten und vorhersagbaren, zyklischen Klimabedingungen, wie Monsunperioden oder Klimaphänomenen wie El Niño. Hier kann die Berücksichtigung von Vorhersagen zur Steuerung der Wasserbereitstellung einen Effizienzgewinn ermöglichen (STEINSCHNEIDER & BROWN, 2012).

6.3.3 Bemessung von Maßnahmen

Welche Methoden zur Bemessung einzelner Anpassungsmaßnahmen in Frage kommen, wird im Folgenden anhand einer Literaturrecherche beschrieben.

Für die Talsperren am Columbia River im Nordwesten der USA und Teilen Kanadas untersuchen PAYNE ET AL. (2004) die Anpassung des Betriebs an den Klimawandel. Die Talsperren dienen dem Hochwasserschutz und der Wasserbereitstellung. Die Bewertung der Leistungsfähigkeit für diese Aufgaben erfolgt anhand der Zuverlässigkeit. Für ein Klimaszenario, das einmal statistisch und einmal deterministisch regionalisiert wurde, zeigt sich ein früheres Einsetzen der Schneeschmelze und geringere Abflüsse im Sommer, welche zu verminderter Energieproduktion in den Sommermonaten und geringerer Zuverlässigkeit der Niedrigwasseraufhöhung führen. Um diese negativen Auswirkungen zu begrenzen, schlagen PAYNE ET AL. (2004) vor, größere Speichervolumen für die Niedrigwasseraufhöhung vorzuhalten und Hochwasserrückhalteräume früher im Jahr zu verkleinern. Diese Maßnahmen bewirken unter dem untersuchten Klimaszenario eine Verbesserung der Niedrigwasseraufhöhung und der Energieerzeugung bei verschlechtertem Hochwasserschutz. Die Aussagekraft des verwendeten Modells mit monatlicher Zeitschrittweite bezüglich der Abbildung von Hochwassern ist jedoch eingeschränkt. Die gewählten Maßnahmen wurden nicht konkret bemessen oder ausgewählt, stattdessen wurde lediglich die Sensitivität des Systems und die Wirkung der Maßnahmen untersucht.

In Folgestudien zum gleichen Untersuchungsgebiet verwenden LEE ET AL. (2009 & 2011) ein Optimierungsmodell, um die Anpassung und zeitliche Verschiebung des Hochwasserrückhalteraaumes detaillierter bemessen zu können. Hierzu werden die Zielgewichte des Optimierungsmodells zunächst so angepasst, dass die Optimierung für die in der Vergangenheit aufgetretenen Zuflüsse die bestehenden Betriebsregeln reproduziert. Für ein Klimaszenario, welches die Änderung der Schneeschmelze durch den Temperaturanstieg, jedoch keine Niederschlagsänderung berücksichtigt, werden anschließend die Hochwasserrückhalteräume neu bestimmt. Die Wirksamkeit der so neu bestimmten Betriebsregeln wird mittels Simulation überprüft. Die Optimierung zeigt im jährlichen Verlauf und für einzelne Talsperren detaillierter angepasste Hochwasserrückhalteräume im Vergleich zu den Maßnahmen nach PAYNE ET AL. (2004). Die Aussagekraft zur Robustheit der Maßnahme ist aufgrund nur eines untersuchten Szenarios nicht vorhanden. Die Verwendung von Optimierungsmethoden zeigt jedoch, wie Betriebsregeln auch komplexer Systeme mit mehreren Speichern effizient überarbeitet werden können. LEE ET AL. (2009 & 2011) verwenden das einfache Optimierungsverfahren der linearen Programmierung (siehe Kapitel 3.3.2). Es existieren weitere, auch speziell auf die Anwendung der Klimaanpassung angepasste Optimierungsverfahren, welche im Folgenden vorgestellt werden.

Die Anwendung eines flexiblen Modells zur Optimierung des Talsperrenbetriebs mittels stochastisch dynamischer Programmierung zeigt BRASS (2006). Für ein nicht näher bezeichnetes Talsperrensystem mit fünf Speichern in einem deutschen Mittelgebirge werden für fünf Klimaszenarien jeweils angepasste Betriebsregeln aufgestellt. Die Anpassung erfolgt primär auf die Erhaltung der Leistungsfähigkeit bezüglich Niedrigwasseraufhöhung und Rohwasserbereitstellung für die Trinkwasserversorgung unter Vernachlässigung des Hochwasserrückhaltes. Die Bewertung der Maßnahmen erfolgt anhand der Zuverlässigkeit der Wasserbereitstellung und der mittleren Versagensdauer. Insbesondere für ein sehr trockenes Szenario kann eine Verbesserung der Zuverlässigkeit gegenüber den bestehenden Betriebsregeln von bis zu 15 % bei gleichzeitiger Reduktion der mittleren Versagensdauer gezeigt werden. Es werden keine Aussagen zur Auswahl von Anpassungsmaßnahmen gemacht, sondern lediglich theoretisch die Nutzen einer Optimierung auf ein ausgewähltes Szenario für die priorisierten Aufgaben nachgewiesen. Die so, mittels Optimierung auf ein Szenario, bestimmten Maßnahmen werden nicht kreuzevaluiert, also ihre Performance nicht für andere Szenarien überprüft. Eine mögliche Erhöhung des Hochwasserrisikos durch die Anpassungsmaßnahmen wird nicht berücksichtigt.

Eine Anwendung der stochastisch dynamischen Programmierung zur Anpassung der Betriebsregeln bei gleichzeitiger Berücksichtigung der Wasserbereitstellung und des Hochwasserschutzes zeigen RAJE & MUJUMDAR (2010). Anwendungsbeispiel ist die Hirakud Talsperre im Osten Indiens. Die Talsperre hat einen geringen Ausbaugrad von etwa 0,2. Zukünftige Talsperrenzuflüsse in der Monsunperiode werden für drei globale Klimamodelle, zwei Zeiträume (2046-2065 und 2075-2095) sowie drei Emissionsszenarien mittels statistischen *downscalings* bestimmt. Die Zuflüsse werden mit einem monatlichen Zeitschritt abgebildet. Da Aussagen zu Hochwasserabflüssen nur für kleinere Zeitschritte sinnvoll sind, werden die Ergebnisse einer anderen Studie (ASOKAN & DUTTA, 2008) zum relativen Anstieg der Spitzenabflüsse auf den Bedarf an Hochwasserrückhalteraum übertragen. Dieses Vorgehen setzt eine direkte Proportionalität von Spitzenabfluss und Hochwasserabflussvolumen voraus. Neben dem Hochwasserschutz werden die Aufgaben Wasserbereitstellung zur Bewässerung und Energiegewinnung betrachtet, wobei letztere die priorisierte Aufgabe der untersuchten Talsperre ist. Ein erhöhter Wasserbedarf in der Landwirtschaft wird für die Klimaszenarien berücksichtigt. Der Betrieb der Talsperre erfolgt nach Standardbetrieb (siehe Kapitel 3.2.1, Gleichung (3.1)) unter Berücksichtigung eines über das Jahr veränderlichen Hochwasserrückhalterums, das heißt es wird nur der Wasserbedarf abgegeben, solange Zufluss und Speicherinhalt dies erlauben. Ist der Zufluss höher als der Bedarf, wird die Differenz bis zum Erreichen des Hochwasserrückhaltraumes gespeichert. Alternative Betriebsregeln werden mittels stochastisch dynamischer Programmierung für gemessenen und für für Klimaszenarien generierten Zufluss erstellt. Straffunktion der Optimierung ist die gewichtete Summe der Abweichungen von Bedarf an elektrischer Energie, Bewässerungswasserbedarf und Hochwasserschutzraum. Die optimierten Betriebsregeln geben die monatliche Abgabe in Abhängigkeit des aktuellen Zuflusses und Speicherstandes an. Für die auf das jeweilige Szenario optimierten Betriebsregeln werden Simulationen mit den jeweiligen Szenariozuflüssen als Randbedingung durchgeführt. Auf diese Weise wird die Leistungsfähigkeit der Talsperre anhand der Zuverlässigkeit von Hochwasserschutz, Energieerzeugung und Bewässerung, sowie die Widerstandsfähigkeit und Verwundbarkeit der Energieerzeugung bestimmt. Die multiobjektive Optimierung erlaubt es, für den Ist-Zustand im Vergleich zum Standardbetrieb, bei geringfügig schlechterer Energieerzeugung, eine höhere Zuverlässigkeit für die Aufgaben Hochwasserschutz und Bewässerung zu erzielen. Für die Klimaszenarien mit geringerem Zufluss können auch mittels der optimierten Betriebsweise nicht alle Zielsetzungen erfüllt werden. Die für das jeweilige Szenario optimalen Betriebsregeln zeigen keine signifikante Verbesserung gegenüber der Standardbetriebsweise bezüglich der Energieerzeugung, zeigen eine Verschlechterung des Hochwasserschutzes, können jedoch die Zuverlässigkeit der Bewässerung erhalten. Das Vorgehen von RAJE & MUJUMDAR (2010) zeigt die Schwierigkeiten und Grenzen der Anwendung von Optimierungsverfahren zur Erarbeitung von Anpassungsmaßnahmen auf. Selbst wenn die Richtung der Klimaänderung (in diesem Fall trockener) deutlich ist, ist die konkrete Auswahl einer Maßnahme zur Anpassung an die zu erwartende Klimaänderung aus den untersuchten Maßnahmen, welche jeweils für ein bestimmtes Klimaszenario erarbeitet wurden, unmöglich. So würden beispielsweise die Betriebsregeln für einige Szenarien die Anhebung des Speicherstandes in den derzeitigen oder für andere Szenarien bestimmten Hochwasserschutzraum erfordern. Dies hat zur Konsequenz, dass diese Betriebsregeln zwar bei Eintreffen des Szenarios eine geringere Verschlechterung der Energieerzeugung bewirken, jedoch bei Eintreffen eines anderen Szenarios einen nicht hinnehmbaren Anstieg des Hochwasserrisikos. Dies macht deutlich, dass die Performance von Maßnahmen über die Bandbreite der möglichen Klimaänderung untersucht werden sollte, also eine Kreuzevaluierung durchgeführt werden sollte. Erst damit kann die Robustheit einer Maßnahme bei der Auswahl berücksichtigt werden.

Eine Erweiterung der stochastisch dynamischen Programmierung zur Bemessung von Anpassungsmaßnahmen an die instationären Randbedingungen des Zuflusses unter Klimawandel zeigen VICUNA ET AL. (2010). Die Instationarität des Klimas wird durch Verwendung einer Variante der stochastisch dynamischen Programmierung abgebildet, welche die Übergangswahrscheinlichkeiten nicht anhand diskreter Zuflüsse, sondern anhand diskreter Zuflussreihen bestimmt (KELMAN ET AL., 1990). Dieses *sampling stochastic dynamic programming* genannte Verfahren wird verwendet, um die Übergangswahrscheinlichkeit zwischen Klimaszenarien für Jahreszeitschritte abzubilden. Geschachtelt in diese Optimierung wird mittels einfacher stochastisch dynamischer Programmierung der innerjährliche Betrieb optimiert, wobei die Übergangswahrscheinlichkeit monatlicher Zuflüsse abgebildet wird. Ergebnis der gesamten Optimierung sind Zielfunktionswerte je Zeitraum, Klimaszenario, Anpassungsoption und Anpassungszeitpunkt. Zum Vergleich verschiedener Anpassungsoptionen wird der gemittelte Zielfunktionswert der jeweiligen Anpassungsoption über alle Klimaszenarien berechnet. Damit wird die Unsicherheit der Klimaszenarien berücksichtigt. Als Anwendungsbeispiel dient die New Exchequer Talsperre in Kalifornien mit einem Ausbaugrad von 1,07, welche zur Energieerzeugung und Bewässerung genutzt wird. Die kontinuierliche Anpassung durch den Optimierungsalgorithmus bei Beibehaltung der bestehenden Randbedingungen bezüglich Speichergröße und Hochwasserrückhalteraum zeigt eine große Bandbreite zukünftiger Zielfunktionswerte. Während einige Szenarien zu höheren Erträgen in Landwirtschaft und Energiegewinnung führen, sinkt der Mittelwert der Erträge über alle Szenarien ab Mitte des Jahrhunderts deutlich. Die alleinige automatische Anpassung durch den Optimierungsalgorithmus im Rahmen der heutigen betrieblichen Randbedingungen kann die Unsicherheit der Klimaänderung nicht kompensieren. Für eine Anpassung des Hochwasserrückhalterumes kann eine bessere Zielerfüllung im Mittel über alle Szenarien gezeigt werden. Dennoch entstehen für einige Szenarien negative Effekte und es wird eingeräumt, dass die Simulation mit monatlicher Zeitschrittweite keine gesicherten Aussagen zum Hochwasserrückhalt zulässt (VICUNA ET AL., 2010). Die Berücksichtigung der Instationarität der Abflüsse in der Optimierung erlaubt eine szenariobezogene, kontinuierliche Anpassung. Der Erfolg von Anpassungsmaßnahmen kann jedoch auch durch diese fortgeschrittene Optimierungsmethode nicht für die Bandbreite der Unsicherheit von Klimaprojektionen sichergestellt werden. Die Verwendung des Mittelwertes über die Szenarien sollte darüber nicht hinwegtäuschen.

Ebenfalls unter Verwendung mehrerer Szenarien und mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmus untersuchen EUM ET AL. für Talsperrensysteme in Korea (EUM & SIMONOVIC, 2010) und Kanada (EUM ET AL., 2012) die Möglichkeiten zur Anpassung an den Klimawandel durch Veränderungen der Hochwasserrückhalteräume. Zuflüsse zu den Talsperren werden für verschiedene Klimaszenarien mit Hilfe eines Wettergenerators und eines hydrologischen Modells mit täglicher Zeitschrittweite bestimmt. Die Simulation des Talsperrenbetriebs erfolgt innerhalb des hydrologischen Modells anhand einfacher Wasserstand-Abgabe-Beziehungen. Die Bewertung des Hochwasserrisikos erfolgt indirekt anhand der Talsperrenüberläufe (EUM & SIMONOVIC, 2010) bzw. dem Hochwasserschaden an Kontrollpunkten unterstrom der Talsperren (EUM ET AL., 2012). Für das kanadische Anwendungsbeispiel (EUM ET AL., 2012) verändert ein evolutionärer Optimierungsalgorithmus (siehe Kapitel 3.3.2) die monatlichen Wasserstand-Abgabe-Beziehungen iterativ derart, dass schadensverursachende Abgaben minimiert werden. Auf der Basis von 50 Jahren synthetischen Zuflusses werden so Betriebsregeln aufgestellt, welche für weitere 50 Jahre synthetischen Zuflusses überprüft werden. Es zeigt sich, dass die Optimierung auf ein Klimaszenario zu einer Verbesserung für dieses Szenario führen kann. Die Kreuzevaluierung der für ein einziges Szenario aufgestellten Betriebsregeln für alle möglichen Szenarien zeigt je-

doch, dass Betriebsregeln, welche für ein anderes Szenario aufgestellt wurden, teilweise eine bessere Performance im Kontrolllauf aufweisen als die für das betrachtete Szenario „optimierten“ Betriebsregeln. Insgesamt ist der Unterschied zwischen den Betriebsregeln in der Summe über alle Szenarien sehr gering. Die Kreuzevaluierung ermöglicht aber die Auswahl der Betriebsregel, die über alle Szenarien die beste Leistung aufweist. Im koreanischen Anwendungsbeispiel werden bei der Optimierung neben dem Hochwasserschutz auch die Aufgaben Niedrigwasseraufhöhung und Energiegewinnung berücksichtigt. Die Optimierung erfolgt hier für 30 Jahre synthetischen Zuflusses und wird anhand weiterer 30 Jahre überprüft. Diese Überprüfung zeigt ähnliche Ergebnisse wie die des kanadischen Anwendungsfalls. Die Berücksichtigung konkurrierender Aufgaben spiegelt sich in der Evaluierung der für verschiedene Szenarien optimierten Betriebsregeln wieder. Die Betriebsregel, die für ein Szenario optimiert wurde, zeigt jedoch nicht immer auch die beste Leistung für dieses Szenario. Es findet sich aber je eine Betriebsregel, welche über nahezu alle Szenarien die beste Leistung für Niedrigwasser aufweist und eine, welche über alle Szenarien die beste Leistung bezüglich Hochwasserrückhalt zeigt. Zumindest im untersuchten Fall scheint die Entscheidung für eine Betriebsregel damit nicht abhängig vom Klimaszenario zu sein, sondern abhängig von der Priorisierung der Aufgaben, die das Talsperrensystem erfüllen soll. EUM & SIMONOVIC (2010) empfehlen die Verwendung der Betriebsregeln, welche die beste Performance für Niedrigwasser zeigt, bei gleichzeitiger reaktionsschneller Anpassung bei Hochwasserereignissen. Hierzu ist die Berücksichtigung von Vorhersage zur Umsetzung einer Echtzeitsteuerung notwendig (siehe Kapitel 3.3.3). Diese Möglichkeit, Vorhersagen des Talsperrenzuflusses zur Anpassung der Bewirtschaftung an die veränderlichen klimatischen Randbedingungen zu verwenden, wird in weiteren Studien untersucht.

So verwenden YAO & GEORGAKAKOS (2001) eine geschachtelte Optimierung mittels dynamischer Programmierung und iterativer Verfahren für verschiedene Zeithorizonte und Vorhersagen. Anwendungsbeispiel ist die Lake Folsom Talsperre in Kalifornien, die neben der Erzeugung von Spitzenenergie auch dem Hochwasserschutz, der Freizeitnutzung und der Bereitstellung von Bewässerungswasser dient. Die Optimierung bestimmt die optimale Abflussaufteilung auf die Turbinen innerhalb einer Stunde, die optimale Beaufschlagung der Turbinen innerhalb eines Tages und die optimale Tagesabgabe unter Berücksichtigung der möglichen Zuflüsse in den nächsten 60 Tagen. Während die kurzzeitigen Optimierungen die optimale Effizienz, bzw. die Anpassung an den Bedarf der Energieerzeugung zum Ziel haben, zielt die langfristige Optimierung auf die Einhaltung von Mindest- und Maximalabgaben, sowie die Maximierung der Füllung des Betriebsraumes ab. Die langfristige Optimierung gibt mit der Festlegung einer Tagesabgabe die Randbedingung für die kurzfristigen Optimierungen der Energieerzeugung vor. Zur Berücksichtigung eines Ensembles von Zuflussvorhersagen werden die Ziele der langfristigen Optimierung probabilistisch gefasst. So kann eine Zielsetzung beispielsweise sein, dass für 90% der Ensemblemitglieder der Wasserstand nicht in den Hochwasserrückhalteraum hineinreicht. Die Optimierung erfolgt dynamisch jeden Tag neu, jeweils basierend auf neuen Ensemble-Vorhersagen für die nächsten 60 Tage. Die theoretische Wirksamkeit dieser dynamischen Regelung wird durch den Vergleich mit einer fixen Regelung in Form eines einfachen Lamellenplans überprüft. Es kann gezeigt werden, dass mit dem dynamischen Optimierungsalgorithmus für eine theoretische 60tägige, perfekte Vorhersage alle Zielsetzungen im Kontrollzeitraum immer eingehalten werden können, was bei fixen Betriebsregeln nicht der Fall ist. Die Performance der Echtzeitsteuerung für reale Vorhersagen weicht davon ab. Die Analyse verdeutlicht jedoch, dass grundsätzlich die Berücksichtigung von Ensemblevorhersagen bessere Ergebnisse als die Verwendung nur einer Vorhersage bewirkt. Die Verwendung von Vorhersagen basierend auf hydrologischen Modellrech-

nungen und Klimamodellen zeigen schlechtere Performance als ein einfaches Vorhersagemodell auf Basis von Ähnlichkeit der Abfolge des Zuflusses der vergangenen Tage mit Zuflüssen in der Vergangenheit. Diese Unterschiede zeigen sich insbesondere bei der Berücksichtigung von Hochwassern, welche nur bei Verwendung des fixen Betriebsplanes und der Echtzeitsteuerung mit Ensemblevorhersage auf Basis von Ähnlichkeit des Zuflusses vollständig zurückgehalten werden können. Diese Ergebnisse von YAO & GEORGAKAKOS (2001) unterstreichen, dass die Echtzeitsteuerung auf zuverlässige Vorhersagen angewiesen ist, um besser zu funktionieren als stationäre Betriebsregeln. Sind Vorhersagen zuverlässig und können Klimaänderungen kontinuierlich in der Vorhersage berücksichtigt werden, bietet die Echtzeitsteuerung eine adaptive Anpassung an den Klimawandel.

Tabelle 6-1 gibt einen zusammenfassenden Überblick der Vor- und Nachteile der vorgestellten Untersuchungen zur Anpassung des Talsperrenbetriebs an die Klimaänderung.

Tabelle 6-1 Auswertung der Literatur zur Bestimmung von Maßnahmen zur Anpassung des Talsperrenbetriebs

Kriterien \ Autoren	Automatische Optimierung zur Bemessung von Maßnahmen	Integrative Abbildung von Hochwasserschutz und Wasserbereitstellung	Kreuzevaluation zur Berücksichtigung der Unsicherheit
PAYNE ET AL. (2004)	-	o	-
LEE ET AL. (2009 & 2011)	+	+	-
BRASS (2006)	++	-	-
RAJE & MUJUMDAR (2010)	++	o	-
VICUNA ET AL. (2010)	++	o	+
EUM ET AL. (2010 & 2012)	++	+	+
YAO & GEORGAKAKOS (2001)	++	++	o

Optimierung: ++ automatisch und nicht-linear; + automatisch, nur linear; - keine

Integration Hochwasserschutz und Wasserbereitstellung: ++ gewichtete Zielfunktion; + nur anhand Zuverlässigkeit;

o Hochwasserschutz aufgrund großer Zeitschritte nicht gesichert bewertbar; - nicht

Kreuzevaluierung, Behandlung Unsicherheit: + für einzelne Szenarien; o kontinuierliche Anpassung; - keine

Die Literaturrecherche zeigt, dass mit Hilfe von Optimierungsmethoden mögliche Maßnahmen zur Anpassung der Betriebsregeln an den Klimawandel bemessen werden können. Hierbei sind die konkurrierenden Nutzungen, wie Hochwasserschutz und Wasserbereitstellung, integriert in einem Modell abzubilden, was häufig Probleme mit sich bringt, da zur Abbildung des Hochwasserablaufes kleine Zeitschrittweiten notwendig sind. Während eine integrative Betrachtung der konkurrierenden Aufgaben bei Verwendung eines entsprechend geeigneten Modells möglich ist, stehen Methoden zur Optimierung der Robustheit noch nicht zur Verfügung. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Erste Ansätze, wie der von VICUNA ET AL. (2010), zeigen auf, in welche Richtung diese Arbeiten gehen können, sollen im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht weiter verfolgt werden.

Zur Minderung des Konfliktes zwischen Hochwasserschutz und Wasserbereitstellung schlagen verschiedene Autoren vor, die Effizienz der Nutzung des Hochwasserrückhalteraaumes durch die Verwendung einer Echtzeitsteuerung auf Basis von Zuflussvorhersagen zu steigern (EUM & SIMONOVIC, 2010; LEE ET AL., 2011). Erste Untersuchungen zur Echtzeitsteuerung ergeben, dass, um eine Verbesserung gegenüber der stationären Steuerung zu erzielen, exakte Vorhersagen für einen möglichst langen Zeitraum notwendig sind (YAO & GEORGAKAKOS, 2001). Auch hierzu besteht weiterer Forschungsbedarf auf den Feldern der Meteorologie und Klimatologie, um die Präzision von langfristigen

Wettervorhersagen zu verbessern und damit die Möglichkeiten der Echtzeitsteuerung zu erweitern (ECMWF, 2012; YOSSEF ET AL., 2013).

Neben einer integrativen Abbildung aller relevanten Aufgaben, ist auch eine Kreuzevaluation der entwickelten Maßnahmen für die Bandbreite der Unsicherheit verschiedener Klimaszenarien notwendig, um die Robustheit möglicher Maßnahmen zu bewerten. Die in Kapitel 5 vorgestellten Verfahren zur Bestimmung der Klimaeinwirkungsfunktion für verschiedene Parameter des Zuflusses stellt eine Erweiterung einer solchen szenarienbasierten Kreuzevaluation dar. Anhand der Klimaeinwirkungsfunktion lässt sich die Robustheit verschiedener Maßnahmen detaillierter gegenüberstellen und zur Auswahl geeigneter Maßnahmen verwenden.

6.4 Maßnahmenauswahl auf Basis probabilistischer Bewertung

Wie bereits eingangs dieses Kapitels erläutert wurde, soll die Auswahl möglicher Maßnahmen zur Anpassung des Talsperrenbetriebs für sich verändernde klimatische Randbedingungen anhand der Robustheit erfolgen. Als robust werden Maßnahmen bezeichnet, die über einen weiten Bereich von Randbedingungen eine ausreichende Leistungsfähigkeit zeigen.

Bei bekanntem Erwartungswert und bekannter Verteilung der Randbedingungen ist es möglich, die Leistungsfähigkeit als Risiko für Hoch- und Niedrigwasser probabilistisch zu bestimmen und die Entscheidung für Maßnahmen zur Minderung dieser Risiken abhängig von den Kosten für diese Maßnahmen und weiteren Faktoren im Rahmen einer multikriteriellen Entscheidungsanalyse zu treffen. BACHMANN (2012) zeigt, wie diese Methode auf Hochwasserschutzmaßnahmen angewendet werden kann. Mit Hilfe des hier (Kapitel 4) gezeigten Verfahrens zur Bestimmung des wasserwirtschaftlichen Gesamtrisikos kann entsprechend, bei bekannter Verteilung der Randbedingungen, der Talsperrenbetrieb unter Berücksichtigung der Risiken für Hoch- und Niedrigwasser optimiert werden. Dieser Fall, in dem die Eintrittswahrscheinlichkeit der Konsequenzen einer Maßnahme bestimmt werden kann, wird als Entscheidung unter Risiko bezeichnet (LUCE & RAÏFFA, 1957). Sind Erwartungswert und Verteilung der Randbedingungen dagegen nicht bekannt (tiefe Unsicherheit), lassen sich zwar die Konsequenzen möglicher Maßnahmen bestimmen, jedoch nicht ihre Eintrittswahrscheinlichkeit. Die Konsequenzen lassen sich für die Bandbreite der möglichen Randbedingungen ermitteln, um die Performance einer Maßnahme abschätzen zu können. Diese Bandbreite kann im Fall des Klimawandels aus Szenarienrechnungen bestimmt werden. Eine solche Szenarienanalyse eignet sich damit als Werkzeug zur Untersuchung möglicher zukünftiger Entwicklungen, ohne deren Eintrittswahrscheinlichkeit abschätzen können zu müssen.

Eine Erweiterung der einfachen Szenarienanalyse stellen LEMPERT ET AL. (2003) vor. Sie argumentieren, dass es mit Hilfe von Computersimulationen möglich ist, die Gesamtheit zukünftiger Entwicklungen abzubilden und so die Leistungsfähigkeit alternativer Maßnahmen über diese Gesamtheit möglicher zukünftiger Entwicklungen zu bewerten. Auf Basis dieser Untersuchung ist diejenige Maßnahme zu bevorzugen, die für eine große Bandbreite von Zukunftsszenarien gute Leistungen zeigt und somit robust ist. Das Verfahren nennen sie robuste Entscheidungsfindung (*robust decision making*) (LEMPERT, 2010).

Aufbauend auf diesem Verfahren schlagen BROWN ET AL. (2012) vor, zunächst eine statistische Analyse der Systemverwundbarkeit durchzuführen und anhand dieser die relevanten Klimaänderungen zu identifizieren, die Anpassungen des Systems notwendig machen. Hierbei wird also zunächst herausge-

stellt, welche klimabedingten Änderungen des Zuflusses eine Anpassung erforderlich machen und damit für eine Entscheidung zur Anpassung des Systems relevant sind. Sie bezeichnen diese Analyse der Systemverwundbarkeit als von unten nach oben gerichtet (*bottom-up vulnerability analysis*), im Gegensatz zum verbreiteten Ansatz, die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft ausgehend von den Projektionen globaler Klimamodelle durch *downscaling*, hydrologische Modelle und Simulation des Talsperrenbetriebs zu bestimmen. *Bottom-up* wird dieses Vorgehen genannt, da die Klimaprojektionen nicht am Anfang, sondern am Ende der Modellkette stehen und zuerst analysiert wird, wie sich das System für veränderte Randbedingungen verhält und anschließend überprüft wird, ob damit für Klimaprognosen eine Anpassung notwendig ist (SIMONOVIC, 2010). Ebenso lassen sich verschiedene Anpassungsmaßnahmen vergleichen bezüglich ihrer Wirkung auf die Verwundbarkeit des Systems gegenüber möglichen prognostizierten Klimaänderungen. So lassen sich Maßnahmen identifizieren, welche für eine definierte Bandbreite von Klimaänderungen wirksam sind. Reduziert auf die Entscheidung, ob Maßnahmen notwendig sind oder nicht, ergeben sich Grenzwerte der Klimaänderung, ab denen eine Änderung des bestehenden Systems erforderlich wird. Diese Klimaänderungen werden als Entscheidungsgrenzwerte bezeichnet. Anhand des Wissens um diese Grenzwerte lassen sich die Ergebnisse der globalen Klimamodelle spezifiziert bezüglich der relevanten Größen auswerten und so die Unsicherheit reduzieren. Ergebnis der Analyse der Systemverwundbarkeit ist somit die Antwort auf die Frage, welche Klimaänderungen für das System relevant sind. Die Bedeutsamkeit der prognostizierten Klimaänderungen lässt sich so nicht nur absolut für einzelne Szenarien, die vollständig modelliert wurden, bestimmen, sondern auch relativ in Bezug auf die Sensitivität des Systems und den Einfluss einzelner Größen. In Bezug auf die Wasserbereitstellung durch Talsperren lässt sich so beispielsweise untersuchen, ob eine Änderung des jährlichen Mittelwertes des Zuflusses oder eine Änderung der Variabilität bedeutsamer für das Niedrigwasserrisiko ist.

BROWN ET AL. (2012) verwenden zur Analyse der Systemverwundbarkeit die von VOGEL ET AL. (2001) gezeigte Modellkette. Die Abbildung der Talsperren erfolgt dabei mittels eines einfachen statistischen Verfahrens (siehe Kapitel 3.2.2 und (VOGEL & BOLOGNESE, 1995)), welches die Jahreszuflüsse als autokorreliert und normalverteilt abbildet und nur Standardbetrieb berücksichtigt. Variiert wird von BROWN ET AL. (2012) zur Abbildung möglicher Klimaänderungen nur der Mittelwert der jährlichen Zuflüsse. Mit Hilfe dieses einfachen Verfahrens lässt sich lediglich die Zuverlässigkeit der Wasserbereitstellung grob für Jahreszeitschritte abschätzen, jedoch keine detaillierte Aussage zu Änderungen der Betriebsregeln machen. Hierzu sind Verfahren, wie die in Kapitel 4 und 5.4 vorgestellten, erforderlich. Der Ansatz von BROWN ET AL. (2012), das Verfahren der robusten Entscheidungsfindung (LEMPERT, 2010) auf die Talsperrenbewirtschaftung anzuwenden, verdeutlicht jedoch, wie sich Anpassungsmaßnahmen bei der tiefen Unsicherheit der Klimaänderung auswählen lassen. Grundlage dieser Entscheidung sollte jedoch eine detaillierte Abbildung des Talsperrenbetriebs und der Leistungsfähigkeit (siehe Kapitel 4), der möglichen klimabedingten Zuflussänderungen (siehe Kapitel 5.4) und der Robustheit (siehe Kapitel 6.2) sein. Auf dieser Basis kann die Maßnahme ausgewählt werden, die die größtmögliche Robustheit über die Bandbreite der prognostizierten Klimaänderung zeigt. Die Visualisierung der Robustheit in Klimaeinwirkungsfunktionen erlaubt hierzu einen direkten Vergleich möglicher Maßnahmen.

Ein weiteres Verfahren, das eine Entscheidung für Anpassungsmaßnahmen anhand der Robustheit erlaubt, geht auf BEN-HAIM (2001) zurück und wird als Informations-Lücken-Ansatz (*information gap theory*) bezeichnet. (KORTELING ET AL., 2013) zeigen die Anwendung auf die Anpassung der Talsperrenbewirtschaftung. Beim Informations-Lücken-Ansatz dient ebenfalls die Robustheit einer Maßnah-

me als Auswahlkriterium. Allen unsicheren Randbedingungen werden jedoch Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen und Erwartungswerte zugeordnet. Mittels wiederholter Simulation wird untersucht, welche Abweichung von diesem Erwartungswert zu einem Systemversagen führt. Als robuster werden damit Maßnahmen bezeichnet, welche eine größere Abweichung vom Erwartungswert der Randbedingungen erlauben, bevor es zum Systemversagen oder unzureichender Systemleistung kommt. Eine Schwachstelle der Methode ist die Beliebigkeit bei der Zuweisung von Erwartungswert, Bandbreite und Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der unsicheren Eingangsparameter. Bezogen auf die Anwendung zur Klimaanpassung impliziert der Informations-Lücken Ansatz, dass zukünftige Randbedingungen in der Nähe bisher gemessener Werte wahrscheinlicher sind als stärkere Abweichungen. Diese Implikation ist aufgrund der Unsicherheit der Klimaprognosen und der Unabwägbarkeit zukünftiger Emissionen nicht korrekt. Bezogen auf die Entscheidungsfindung wäre jedoch die Maßnahme, welche die größte Abweichung von bisherigen Randbedingungen erlaubt, entsprechend als robusteste auszuwählen. Damit sollten sowohl nach dem Verfahren der robusten Entscheidungsfindung als auch mittels Informations-Lücken-Ansatz die gleichen oder sehr ähnliche Maßnahmen ausgewählt werden.

Beide Ansätze können mit Methoden der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung zur Berücksichtigung weiterer Kriterien, neben der Robustheit, kombiniert werden. Damit lassen sich beispielsweise die Kosten, aber auch die Abwägung der Gewichtung verschiedener konkurrierender Nutzungen berücksichtigen, wie Hochwasserschutz und Wasserbereitstellung. Dies ist möglich, wenn die Methodik der multikriteriellen Entscheidungsunterstützung eine Sensitivitätsanalyse der Gewichte beinhalten. Diese liefert Informationen dazu, wie weit sich ein Gewicht, welches einem bestimmten Kriterium gegeben wurde, ändern muss, sodass es zu einer Verschiebung der Priorisierung von Maßnahmen kommt (TRIANTAPHYLLOU, 2000). Diese Ansätze sollen im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verfolgt werden. Es wird sich dagegen darauf beschränkt, die Robustheit möglicher Maßnahmen anhand der Klimaeinwirkungsfunktionen zu visualisieren. Dies kann anschließend als Grundlage für weitere Analysen dienen.

6.5 Zusammenfassung

Zielsetzung von Anpassungsmaßnahmen der Talsperrensteuerung ist der Erhalt der Leistungsfähigkeit für veränderliche klimatische Randbedingungen. Diese veränderlichen Randbedingungen sind von tiefer Unsicherheit geprägt: Die Verteilungen und Erwartungswerte zukünftiger Talsperrenzuflüsse sind nicht bekannt. Heute verfügbare Klimaszenarien auf Basis von Emissionsszenarien und globalen Klimamodellen können lediglich die Bandbreite möglicher Änderungen der Talsperrenzuflüsse bestimmen. Damit kann keine Optimierung der Leistungsfähigkeit für zukünftige Randbedingungen erfolgen, sondern lediglich untersucht werden, welche Anpassungsmaßnahmen eine gute Leistungsfähigkeit über die Bandbreite möglicher zukünftiger Randbedingungen zeigen, also robust sind.

Die Robustheit kann anhand der Klimaeinwirkungsfunktion evaluiert werden, welche den Zusammenhang von Änderungen der Zuflusseigenschaften und der Leistungsfähigkeit beschreibt. Zur Bestimmung der Klimaeinwirkungsfunktion wird das in Kapitel 4 dargestellte Verfahren zur risikobasierten Bewertung der Leistungsfähigkeit in Kombination mit der in Kapitel 5.4 gezeigten Methodik zur statistischen Generierung möglicher zukünftiger Talsperrenzuflüsse verwendet.

Erster Schritt der Planung von Anpassungsmaßnahmen ist die Priorisierung der Aufgaben einer Talsperre oder eines Talsperrensystems. Erst mittels der Priorisierung von Aufgaben und einer Analyse der Leistungsfähigkeit der bestehenden Steuerung für veränderliche klimatische Randbedingungen

lassen sich Leistungsreserven identifizieren, die Raum für Anpassungsmaßnahmen bieten. Eine Bemessung möglicher Anpassungsmaßnahmen kann dann mit Hilfe der in Kapitel 3.3 dargestellten Methoden zur Erarbeitung von Betriebsregeln erfolgen. Die durchgeführte Literaturrecherche zu Bemessung und Evaluierung von Anpassungsmaßnahmen zeigt, dass bestehende Optimierungsverfahren eine Hilfestellung zur Bemessung geben können, jedoch kein Verfahren existiert, welches Optimierung und Evaluierung bezogen auf die Robustheit gegenüber unsicheren Randbedingungen integriert.

Diese Evaluierung der Robustheit der Leistungsfähigkeit für veränderliche klimatische Randbedingungen kann jedoch durch wiederholte Berechnung der Klimaeinwirkungsfunktion erfolgen. Zur Auswahl einer Maßnahme wird die anhand der Klimaeinwirkungsfunktion bestimmte Robustheit mit weiteren Faktoren, wie den Kosten einer Maßnahme, kombiniert.

7 Anwendungsbeispiel Rur

7.1 Das Modellgebiet

7.1.1 Einzugsgebiet der Rur

Anwendungsbeispiel der vorgestellten Methode zur Anpassung der Talsperrensteuerung an Klimaänderungen ist das Rurtalsperrensystem. Die Rur gehört zur Flussgebietseinheit der Maas. Das Einzugsgebiet der Rur ist in Abbildung 7-1 dargestellt.

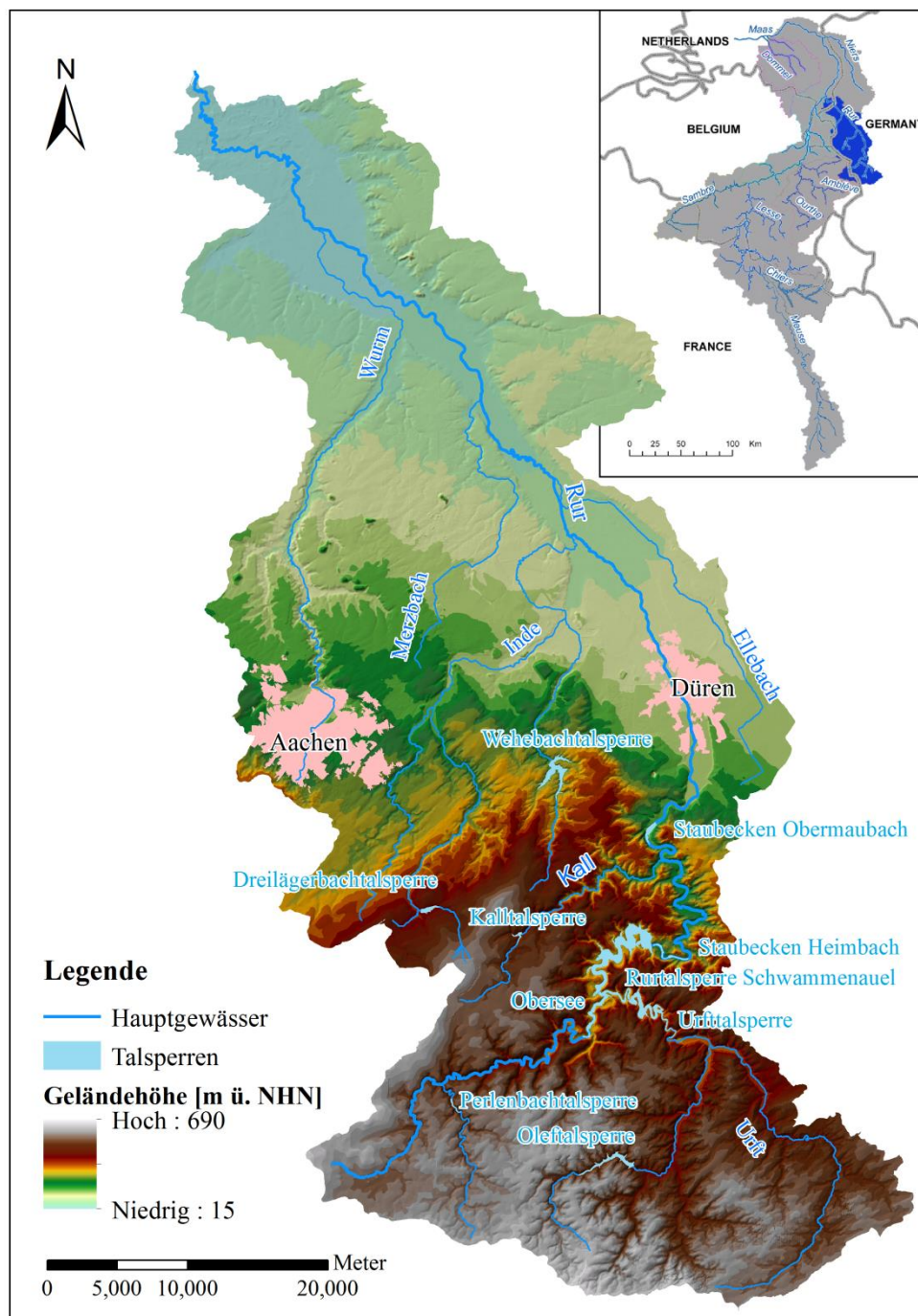


Abbildung 7-1 Das Einzugsgebiet der Rur

Das Einzugsgebiet mit einer Fläche von 2.360 km² teilt sich in zwei charakteristische Bereiche: Während der höhergelegene Süden geologisch von den Festgesteinen der Nordeifel geprägt ist, hohe Niederschläge (>1000 mm/a) erfährt und überwiegend bewaldet ist, ist der Norden des Einzugsgebiets der Rur von sedimentierten Gesteinen hoher Durchlässigkeit charakterisiert, erhält geringere Niederschläge und es finden sich hier große Siedlungsgebiete und Ackerland. Diese Ausprägung des südlichen Einzugsgebiets im Oberlauf der Rur mit hohen Niederschlägen, geringer natürlicher Speicherung und steilen Tälern führt zu einem schnellen Anschwellen von Hochwasserwellen, welche die anthropogen genutzten Flächen im nördlichen Unterlauf bedrohen. Gleichzeitig führt die natürlicherweise geringe Speicherkapazität zu sehr geringen Abflüssen in Perioden mit geringem Niederschlag. So schwankt der natürliche Abfluss am Unterlauf der Rur im Extremfall zwischen weniger als 1 m³/s bis 1000 m³/s (SCHRAMM, 1956). Um eine Nutzung der Überflutungsgebiete entlang der Rur zu ermöglichen und die Trink- und Brauchwasserversorgung der Bevölkerung im Einzugsgebiet sicher zu stellen, wurden zwischen 1905 und 1981 insgesamt neun Talsperren errichtet (siehe Tabelle 7-1). Im Rahmen dieser Arbeit sollen hiervon nur die sechs zentralen und im Verbund betriebenen Talsperren betrachtet werden. Abbildung 7-2 zeigt die Lage, das Speichervolumen und den mittleren Jahreszufluss der Talsperren. Weitere Details zum Einzugsgebiet der Rur können (KUFELD ET AL., 2010) entnommen werden.

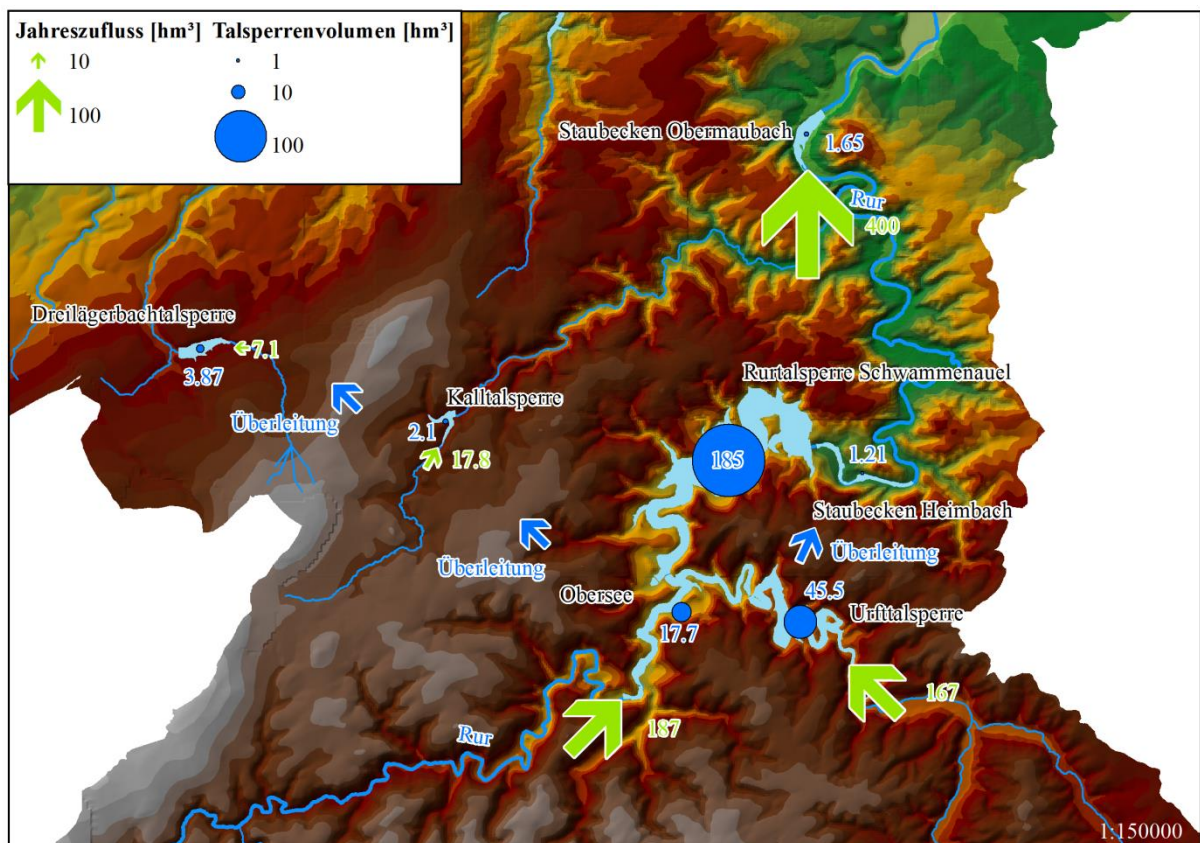


Abbildung 7-2 Lage, Volumen und Jahreszuflüsse der Talsperren des Rur-Systems

Tabelle 7-1 Übersicht der Talsperren im Einzugsgebiet der Rur

Talsperre	Absperr- bauwerk: Art + Höhe	Fertig- stellung Jahr	Beckenin- halt hm ³	Einzugs- gebiets- größe km ²	Jährlicher Zufluss hm ³	Ausbau bau- grad β %	Aufgaben
Urft	Gewichts- mauer 54 m	1905	45,51	373,9	150	30	Hochwasser Niedrigwasser Energie
Dreiläger- bach	Gewichts- mauer 33 m	1911	3,87	12+10 =22	7,1	54,4	Trinkwasser
Obermau- bach	Erddamm 6,5 m	1935	1,65	796	400	0,41	Energie (Freizeit) (Trinkwasser)
Heimbach	Gewichts- mauer 12 m	1935	1,21	669,1	364	0,33	Energie (Freizeit)
Kall	Felsschütt- damm 34 m	1935	2,1	29	17,8	11,8	Trinkwasser (Energie)
Rur	Erd- / Felsschütt- damm 55,5 / 71,5 m	1938 / 1959	101 / 202	288,1	187	53 / 108	Hochwasser Niedrigwasser Energie Freizeit Trinkwasser
Perlenbach	Felsschütt- damm 19 m	1956	0,8	64	47,5	1,7	Trinkwasser (Energie)
Olef	Pfeilerzel- lenmauer 54 m	1959	19,3	47,4	33	58	Trinkwasser Hochwasser Niedrigwasser (Energie)
Wehebach	Felsschütt- damm 46 m	1981	25,1	43,5	15,7	160	Trinkwasser Hochwasser Niedrigwasser

Zentraler Speicher des Talsperrensystems ist die Rurtalsperre. Diese gliedert sich in den Hauptsee Schwammenauel und den Obersee, einer Vorsperre, die der Verkleinerung der Wasserwechselzone und der Trennung des für die Trinkwasserversorgung genutzten Speicherraums dient. Im Stauraum des Obersees liegt der natürliche Zusammenfluss von Rur und Urft. Die Urft wird jedoch an der Stauwurzel des Obersees in der Urftalsperre gestaut und die Regelabgabe über ein Kraftwerk direkt in das Staubecken Heimbach übergeleitet. Das Staubecken Heimbach nimmt auch Abgaben aus dem Hauptsee Schwammenauel auf und gibt diese, zusammen mit dem Abfluss aus der Urft, gedämpft an den Unterlauf weiter. Zum zusätzlichen Ausgleich der Abgaben aus dem Kraftwerksbetrieb an Urftalsperre und Staudamm Schwammenauel ist unterstrom, nach Zusammenfluss von Rur und Kall, das Ausgleichsbecken Obermaubach angeordnet. Diese beiden Speicherbecken Heimbach und Obermaubach haben nur kleine Speichervolumen. Die Dreilägerbachtalsperre und die Kalltalsperre dienen der Trinkwasserversorgung des Großraums Aachen. Sie sind über Stollen untereinander und mit dem Obersee verbunden, so dass Rohwasser aus dem wasserreichen Einzugsgebiets des Obersees, und bei großer Trockenheit auch aus dem der Urft, in diese Speicher übergeleitet werden kann.

7.1.2 Talsperrenbetrieb

Die primären Aufgaben des Talsperrensystems sind die Trinkwasserversorgung, der Hochwasserschutz und die Niedrigwasseraufhöhung. Die Niedrigwasseraufhöhung unterstrom von Obermaubach dient der Versorgung der Dürener Industrie mit Brauchwasser. Sekundäre Aufgaben sind die Erzeugung elektrischer Energie aus Wasserkraft, eine erweiterte dynamische Niedrigwasseraufhöhung und die Freizeitnutzung. Die Zielwerte der primären Aufgaben sind in Tabelle 7-2 dargestellt.

Tabelle 7-2 Zielwerte der Abgaben aus dem Rurtalsperrensystem

Aufgabe	Zielwert	Bezugspegel
Rohwasserbereitstellung	28,5 hm ³ /a	Mögliche Überleitung aus Obersee
Hochwasserschutz	< 60,0 m ³ /s (Winter) < 50 m ³ /s (Sommer)	Abgabe Heimbach
Niedrigwasseraufhöhung	> 5,0 m ³ /s	Abgabe Obermaubach

Aus den sekundären Aufgaben sowie den betrieblichen Randbedingungen ergeben sich weitere Zielsetzungen, welche von den Betriebsregeln berücksichtigt werden müssen:

- Zur Sicherung der Wasserqualität im Obersee, sind Abgaben aus der Urft in den Obersee, sowohl bei Hochwasser, als auch zur Sicherung der Wasserbereitstellung zu vermeiden.
- Um Nutzern am Unterlauf möglichst viel Wasser zur Verfügung zu stellen, ist eine über die Minimalabgabe von 5 m³/s hinausgehende Niedrigwasseraufhöhung anzustreben.
- Ebenfalls aus Gründen der Wasserqualität soll die Abgabe aus dem Staubecken Heimbach je zur Hälfte aus dem Einzugsgebiet der Urft und der Rur stammen.

- Überleitungen aus dem Obersee in Kall- oder Dreilägerbachtalsperre sollen vermieden werden, da diese mit Pumpkosten verbunden sind. Eine Überleitung aus der Kall in die Dreilägerbachtalsperre ist im freien Gefälle möglich.
- Starke Schwankungen des Abflusses, beispielsweise von Minimalabgabe 5 m³/s auf Maximalabgabe 60 m³/s, sind zu vermeiden.
- Zur Freizeitnutzung in den Sommermonaten soll die Abgabe zwischen Heimbach und Obermaubach für Kanufahrer möglichst 7,5 m³/s und der Füllstand des Hauptsees für Segler möglichst hoch sein.
- Zur Energieerzeugung sollen Füllstand von Hauptsee und Urfttalsperre möglichst hoch sein.

Die derzeit gültigen Betriebsregeln berücksichtigen alle diese Zielsetzungen. Die Betriebsregeln wurden auf Basis der Zuflussmessungen seit 1905 aufgestellt und garantieren die Einhaltung der primären Ziele für diese durch Messungen abgebildeten hydrologischen Verhältnisse. Die Betriebsregeln berücksichtigen für die Bestimmung der Abgabe den Speicherstand in den einzelnen Talsperren, die Tendenz des Speicherstandes (steigend oder fallend), die Summe der aktuellen Talsperrenzuflüsse und die Schneehöhen in Einzugsgebiet.

Die Regelabgabe kann aus dem Lamellenplan abgelesen werden (siehe Abbildung 7-3). Der darin dargestellte, aufsummierte Betriebsraum der Talsperren (Olef, Urft, Obersee und Hauptsee) gliedert sich in drei Bereiche: Ein unterer Bereich dient der Niedrigwasserbewirtschaftung in ausgedehnten Trockenperioden. Für den weiten mittleren Bereich wird die Abgabe dynamisch in Anlehnung an den Zufluss bestimmt. Im oberen Bereich ergibt sich die Regelabgabe nach Lamellenplan und Tendenzregel.

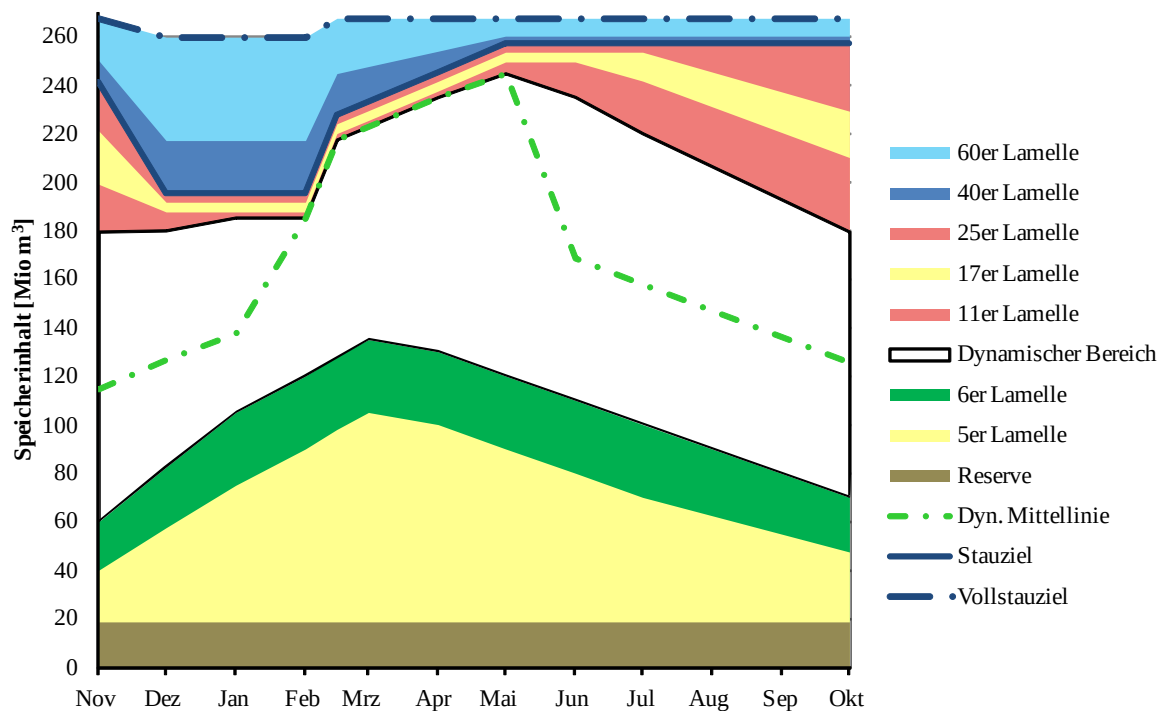


Abbildung 7-3 Lamellenplan der bestehenden Steuerung

Im Folgenden werden die Betriebsregeln nach drei Fällen unterschieden: Hochwasser, Normalabfluss und Niedrigwasser.

Hochwasserfall

Die im Lamellenplan aufgeführten Regelabgaben zwischen dynamischem Bereich und Stauziel dienen der Vorentlastung im Hinblick auf mögliche Hochwasser. Diese Lamellen sind mit den Abgaben 11, 17 und 25 m³/s belegt, die in Verbindung mit der impliziten Tendenzregel eine vorgezogene Abgabensteigerung bewirken, wenn die Ganglinie des Füllstandes eine steigende Tendenz zeigt und sich über eine Grenze bewegt. Die Grenze zur Anwendung der Tendenzregel für die Lamellen 17 und 25 m³/s ist die Lamellenmittenlinie. Bei der Abgabelamelle 11 m³/s ist die Lamellenuntergrenze für die Anwendung der Tendenzregel maßgebend.

Bei einer Überschreitung des Stauziels in Urft- und Rurtalsperre wird der Regelabfluss am Abflusspegel unterhalb des Staubeckens Heimbachs zunächst auf 40 m³/s erhöht. Dabei soll sich der Abfluss, soweit möglich, zu gleichen Teilen aus der Rur und aus der Urft zusammensetzen. Nach Überschreitung eines jahreszeitabhängigen Füllstandes innerhalb des Hochwasser-Rückhalteranges gemäß Lamellenplan wird die Hochwasserabgabe auf 60 bzw. 50 m³/s erhöht.

Ein Sonderfall besteht bei alleiniger Inanspruchnahme des Hochwasserrückhalteranges der Urfttalsperre. Wird nur ihr Hochwasserrückhalterang in Anspruch genommen, erfolgt die Abgabe bis zur maximalen Leistungsfähigkeit über das Jugendstilkraftwerk Heimbach und die Abgabe aus der Rurtalsperre wird ganz eingestellt. Damit soll ein Überlauf der Urfttalsperre in den Obersee vermieden werden. Die maximale Leistungsfähigkeit des Kraftwerks Heimbach beträgt 18 m³/s.

Ist der vorhandene Hochwasserrückhalterang (Rurtalsperre) unzulänglich und der Füllstand erreicht das Vollstauziel, so ist der gesamte Zufluss abzugeben, auch wenn dieser die Zielabgabe von 60 bzw. 50 m³/s übersteigt.

Zusätzlich gilt im Frühjahr (01. Februar bis 30. April) und, wenn der Rur zwischen den Pegeln Heimbach und Jülich weniger als 60 m³/s zufließen, die "Schneeregel". Der zufolge werden ab einer mittleren Schneedecke von 10 cm zur Bestimmung des Regelabflusses nicht die tatsächlichen Füllstände der Talsperren, sondern die um das Tauwasserpotential aufgehöhten Stauinhalte maßgeblich.

Normalabfluss

Besteht nicht gerade die Ausnahmesituation des Hochwasserfalls, erfolgt die Bewirtschaftung der Talsperren im Normal- bzw. sogenannten Regelbetrieb. Der Betriebsraum der Talsperren wird nun nach dem Mittenbereich des Lamellenplans bewirtschaftet.

Abgaben aus der Urfttalsperre werden nach Möglichkeit über das Kraftwerk Heimbach bewerkstelligt. Eine Überleitung von Wasser aus der Urfttalsperre in den Obersee der Rurtalsperre, wie sie im Hochwasserfall unvermeidlich sein kann, ist ansonsten genehmigungspflichtig und erfordert eine Überprüfung der Wasserqualitätsparameter. Dies gilt auch für eine Ableitung aus dem unterhalb der Kraftwasserentnahme gelegenen Speichervolumen der Urfttalsperre.

Im mittleren Bereich des Betriebsraums erfolgt die Bestimmung der Abgabe in Abhängigkeit von der Jahreszeit zusätzlich zum Speicherfüllstand auch in Abhängigkeit von der Summe der Talsperrenzu-

flüsse. Diese dynamische Abgabe kann vom Betreiber der Talsperren frei in Anlehnung an Abbildung 7-4 gewählt werden. Im Lamellenplan ist der Speicherinhaltsbereich von der dynamischen Mittellinie (grünen Linie) unterteilt. Fällt der Speicherstand unter diese grüne Linie, soll die Regelabgabe nach Abbildung 7-4 um eine Stufe niedriger zu wählen als sich rein anhand der Summe der Zuflüsse ergeben würde (Vorweg-Einsparung).

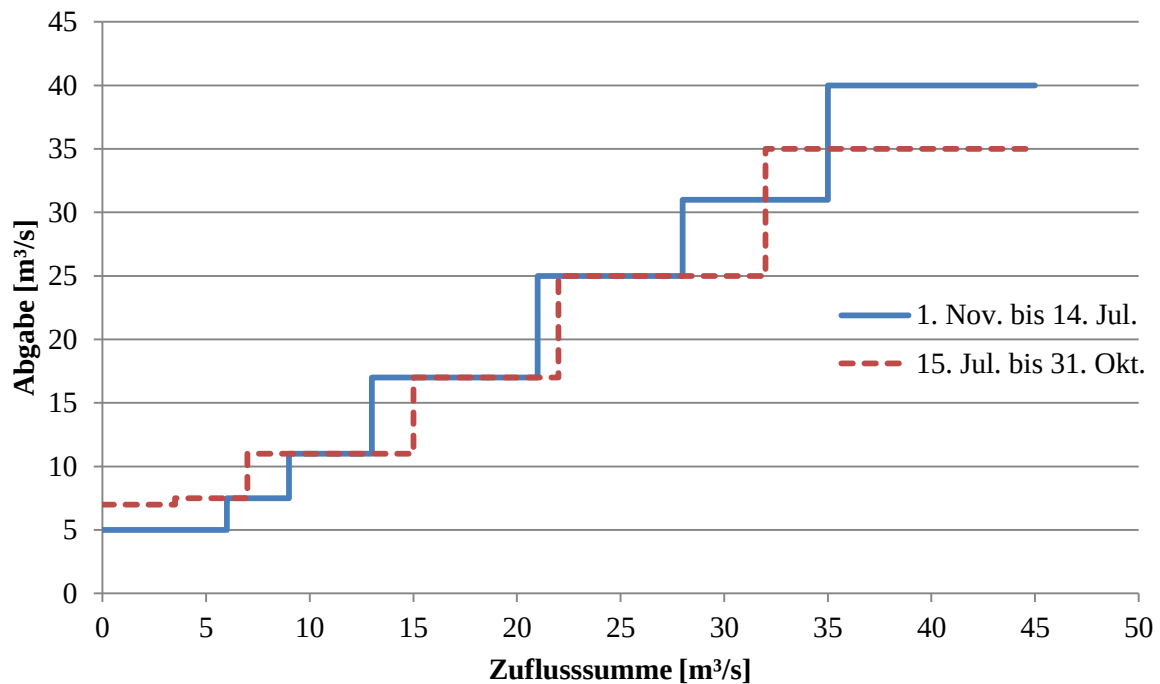


Abbildung 7-4 Dynamische Abgabe in Abhängigkeit des Zuflusses

Niedrigwasser

Ein weiterer besonderer Lastfall neben dem Hochwasserfall ist der Niedrigwasserfall. Zur Niedrigwasseraufhöhung auf mindestens 5 m³/s ab dem Pegel unterhalb des Staubeckens Obermaubach wird im unteren Bereich des Betriebsraums ganzjährig entsprechendes Speichervolumen bereitgehalten. 18,7 Mio. m³ dieses Volumenbereichs stellen die Eiserne Reserve. Dieser unterhalb des Absenckziels gelegene Reserveraum wurde bei der Berechnung des zur Sicherstellung der Mindestabgabe vorzuhaltenen Speichervolumens zum Teil unberücksichtigt gelassen, um eine Sicherheit für die Trinkwasserversorgung vorzuhalten. Eine Nutzung des Reserveraums bedarf der Genehmigung der Oberen Wasserbehörde.

Simulation

Der Betrieb der Talsperren lässt sich mit Hilfe des Simulationswerkzeugs Talsim (LOHR, 2001) abbilden. Dieses Werkzeug wurde verwendet, um die Einwirkungen veränderter Zuflussrandbedingungen zu bewerten. Für den Niedrigwasserfall wurden die Simulationen mittels eines durch das Büro Sydro zur Verfügung gestellten Modells durchgeführt. Für den Hochwasserfall wurde auf die Ergebnisse der im Rahmen des AMICE-Projekts vom Büro Sydro durchgeführten Hochwassermerkmal-Simulation

zurückgegriffen (SYDRO, 2013). Der Stauinhalt der Olefalsperre wird in allen Berechnungen vernachlässigt.

7.2 Leistungsfähigkeit für Klimaänderungen

7.2.1 Klimaszenarien

Abbildung 7-5 zeigt die Modellkette zur szenarienbasierten Bewertung der wasserwirtschaftlichen Risiken an der Rur. Regionale Klimawandelszenarien werden aus den Ergebnissen globaler Klimamodelle für verschiedene Emissionsszenarien abgeleitet. Diese lassen sich bezüglich der Änderung des Niederschlags und der Temperatur gegenüber dem Referenzzustand auswerten. Diese Änderung wird Zeitreihen von Niederschlag und Temperatur aufgeprägt, welche als Randbedingung einer hydrologischen Modellierung dienen. Aus der hydrologischen Modellierung folgen im Ergebnis Talsperrenzuflüsse für verschiedene Klimaszenarien, mit denen der Talsperrenbetrieb simuliert und die Talsperrenabgabe bezüglich der Risiken bei Hoch- und Niedrigwasser ausgewertet wird. Die Klimaszenarien dienen hier, wie in Kapitel 5.4 erläutert, der Abschätzung der Bandbreite möglicher Klimaänderungen. Sie geben einen Anhaltspunkt, wie groß der Szenarienraum zu wählen ist, für den die probabilistische Bestimmung der Klimaeinwirkungsfunktion mittels stochastischen Abflussgenerators und detaillierter Betriebssimulation durchgeführt wird.

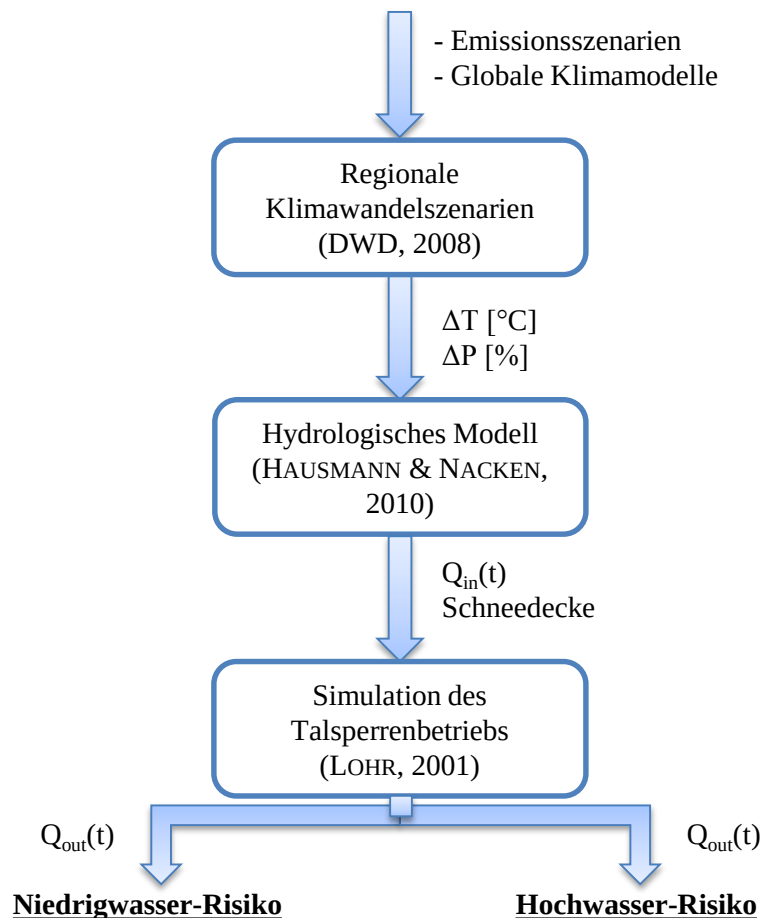


Abbildung 7-5 Modellkette zur szenarienbasierten Bewertung wasserwirtschaftlicher Risiken an der Rur

Ausgangspunkt der Generierung von Klimawandelszenarien für die Talsperrenzuflüsse bilden die Ergebnisse regionaler Klimamodelle. In dieser Arbeit werden Ergebnisse des AMICE-Projekts verwendet (DROGUE ET AL., 2010). Im AMICE-Projekt wurden Änderungen der Temperatur und des Niederschlags für das Rureinzugsgebiet aus drei Quellen genutzt:

1. Ergebnisse regionaler Klimamodelle, die im ZWEK-Projekt des Deutschen Wetterdienstes zusammengefasst werden (DWD, 2008) und im Folgenden mit *de* gekennzeichnet sind.
2. Flächengemittelte Betrachtung der Ergebnisse verschiedener regionaler Klimaszenarien für das Maaseinzugsgebiet (DROGUE ET AL., 2010). Diese Szenarien sind im Folgenden mit *tn* gekennzeichnet.
3. Extremwertstatistische Auswertung und Extrapolation von Messwerten (ARBEITSGEMEINSCHAFT AQUA PLAN GMBH - HYDRO & METEO GMBH & CO KG - DR. PAPADAKIS GMBH, 2011). Die Methode folgt (LANUV NRW, 2010a), die Datengrundlage wurde jedoch erweitert. Im Folgenden sind diese Szenarien mit *ExUS* gekennzeichnet.

Aus den Modellergebnissen (Quelle 1 und 2) wurde jeweils ein nasses (*w*) und ein trockenes (*d*) Szenario ausgewählt. Für aus Messwerten extrapolierte Trends (Quelle 3) ist eine solche Unterscheidung nicht notwendig. Je Quelle werden zwei Zukunftszeiträume betrachtet: Die nahe Zukunft (2021-2050, im Folgenden mit Präfix 2 gekennzeichnet) und die ferne Zukunft (2071-2100, im Folgenden mit Präfix 3 gekennzeichnet). Damit ergeben sich zehn Klimaszenarien, mit den in Tabelle 7-3 dargestellten Änderungen der Temperatur und den in Tabelle 7-4 dargestellten Änderungen des Niederschlags.

Tabelle 7-3 Absolute Änderung der Temperatur [°C] für Klimaszenarien (DROGUE ET AL., 2010)

	Zeitraum 2 (2021-2050)				
	d_de	w_de	tn_d	tn_w	ExUS
Januar	1.5	1.5	1.6	1.2	2.5
Februar	1.5	1.5	1.6	1.2	2.1
März	0.5	0	1.8	1.2	1.7
April	0.5	0	1.8	1.2	1.5
Mai	0.5	0	1.8	1.2	1.7
Juni	1.5	0.5	2.3	1.5	1.1
Juli	1.5	0.5	2.3	1.5	1.7
August	1.5	0.5	2.3	1.5	1.6
September	1.5	0.5	1.8	1.2	0.7
Oktober	1.5	0.5	1.8	1.2	0.9
November	1.5	0.5	1.8	1.2	1.0
Dezember	1.5	1.5	1.6	1.2	1.1
	Zeitraum 3 (2071-2100)				
	d_de	w_de	tn_d	tn_w	ExUS
Januar	3.8	3.8	3.2	2.7	5.0
Februar	3.8	3.8	3.2	2.7	4.2
März	2	1	3.8	2.5	3.4
April	2	1	3.8	2.5	2.9
Mai	2	1	3.8	2.5	3.4
Juni	3.8	2	5	3.6	2.1
Juli	3.8	2	5	3.6	3.3
August	3.8	2	5	3.6	3.3
September	3.5	2	4	2.9	1.4
Oktober	3.5	2	4	2.9	1.9
November	3.5	2	4	2.9	1.9
Dezember	3.8	3.8	3.2	2.7	2.2

Tabelle 7-4 Prozentuale Änderungsfaktoren [%] des Niederschlags für Klimaszenarien (DROGUE ET AL., 2010)

	Zeitraum 2 (2021-2050)					
	d_de	w_de	tn_d	tn_w	ExUS - Eifel	ExUS - Rheinische Bucht
Januar	-5	20	-1.3	10.9	7.0	4.4
Februar	-5	20	-1.3	10.9	32.4	27.5
März	5	10	0.7	3.5	30.5	25.6
April	5	10	0.7	3.5	11.3	8.1
Mai	5	10	0.7	3.5	-3.2	-8.2
Juni	-5	-5	-16.1	-10.3	-18.1	-0.9
Juli	-5	-5	-16.1	-10.3	-11.0	-6.3
August	-5	-5	-16.1	-10.3	-36.9	-40.7
September	5	0	-5.2	3.5	6.7	1.0
Oktober	5	0	-5.2	3.5	18.2	23.4
November	5	0	-5.2	3.5	-7.4	-2.4
Dezember	-5	20	-1.3	10.9	11.7	11.2
	Zeitraum 3 (2071-2100)					
	d_de	w_de	tn_d	tn_w	ExUS - Eifel	ExUS - Rheinische Bucht
Januar	15	55	-4.7	24.7	14.0	8.7
Februar	15	55	-4.7	24.7	64.7	55.0
März	5	5	-4.9	-3.3	60.9	51.2
April	5	5	-4.9	-3.3	22.6	16.1
Mai	5	5	-4.9	-3.3	-6.5	-16.5
Juni	-25	-10	-39.9	-22.2	-36.1	-1.9
Juli	-25	-10	-39.9	-22.2	-22.0	-12.6
August	-25	-10	-39.9	-22.2	-73.9	-81.4
September	-5	0	-13.1	2.9	13.4	1.9
Oktober	-5	0	-13.1	2.9	36.4	46.9
November	-5	0	-13.1	2.9	-14.8	-4.7
Dezember	15	55	-4.7	24.7	23.4	22.4

Für die aus Messwerten extrapolierten Klimaänderungen (ExUS-Rur) wird räumlich zwischen dem südlichen Einzugsgebiet (Eifel) und dem nördlichen Einzugsgebiet (Rheinische Bucht) differenziert.

Diese Änderungen werden den gemessenen Zeitreihen des Niederschlags im Referenzzeitraum (1971-2000) durch Multiplikation und den gemessenen Zeitreihen der Temperatur durch Addition nach dem *Delta-Change*-Verfahren aufgeprägt. Die Methodik ist in Kapitel 5.2 beschrieben. Die so erhaltenen Zeitreihen dienen als Randbedingung der hydrologischen Modellierung (HAUSMANN & NACKEN, 2010; HAUSMANN & NACKEN, 2012), welche Ergebnisse bezüglich der zu erwartenden Talsperrenzuflüsse je Klimaszenario liefert. Wie sich die Talsperrenzuflüsse für die untersuchten Szenarien ändern, ist in Abbildung 7-6 und Abbildung 7-7 für die Summen der Zuflüsse zum Talsperrensystem dargestellt. Abbildung 7-6 zeigt die Verschiebung des Mittelwertes der Jahreszuflusssummen und ihre Varianz anhand der Dichtefunktionen (siehe Glossar). Der Übersicht halber sind nur Referenzzeitraum, das in der Summe trockenste Szenario *3d_tn* und das in der Summe feuchteste Szenario *3w_de* farblich gekennzeichnet. Zusätzlich stellt Abbildung 7-7 anhand der monatlichen Mittelwerte der Zuflusssummen dar, wie sich die innerjährliche Verteilung der Zuflüsse für die Klimaszenarien ändert. In Abbil-

dung 7-7 wird auch der Bedarf für Rohwasserbereitstellung und Mindestniedrigwasseraufhöhung angezeigt.

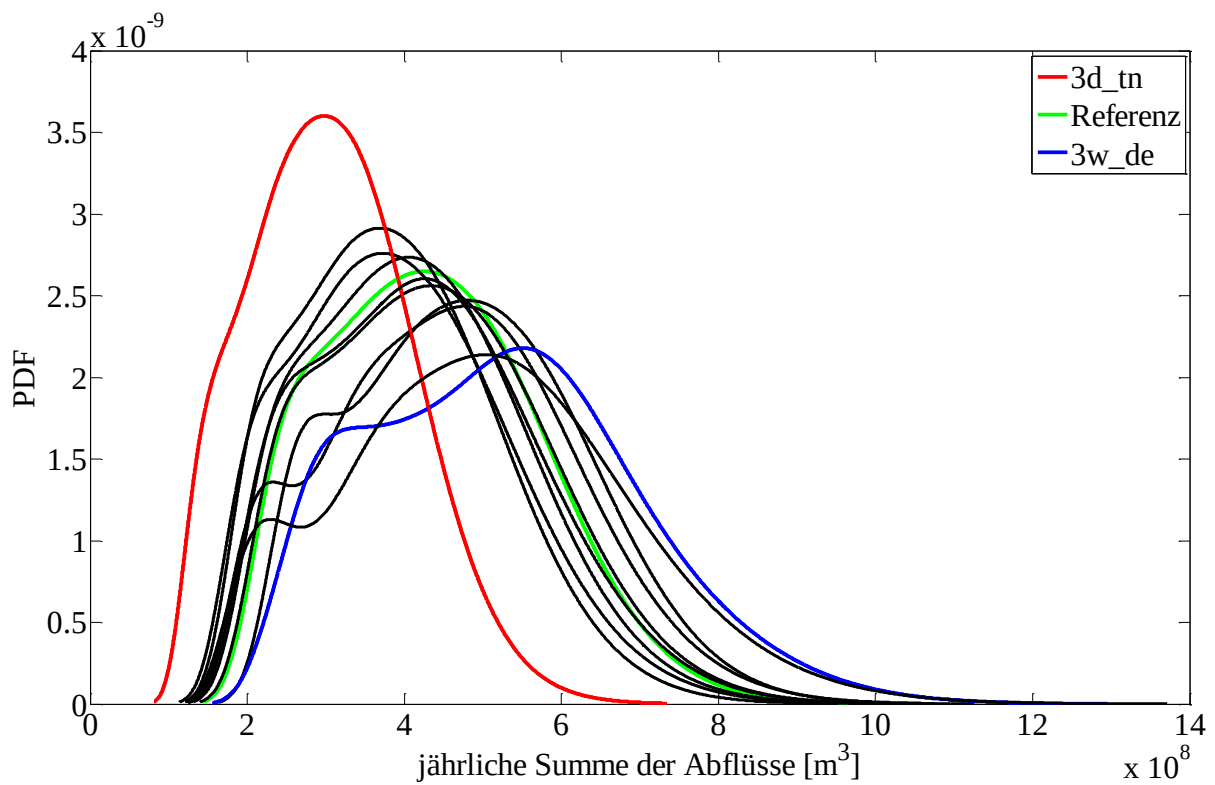


Abbildung 7-6 Dichtefunktionen der jährlichen Zuflusssumme für Klimaszenarien

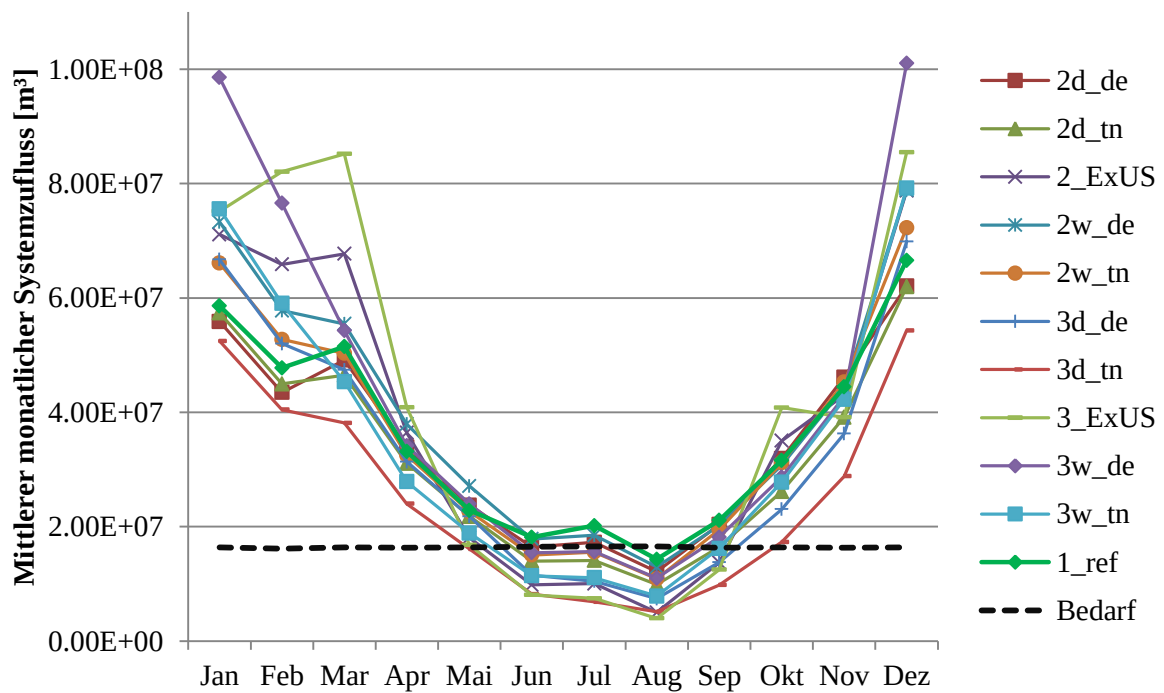


Abbildung 7-7 Mittelwerte der monatlichen Talsperrenzuflüsse (Gesamtsystem) für betrachtete Klimaszenarien

Es zeigt sich deutlich die Bandbreite der verschiedenen Szenarien: Es sind sowohl wesentlich trockenere als auch deutlich feuchtere Verhältnisse möglich. Einzige Übereinstimmung der Szenarien ist eine prognostizierte Abnahme der Talsperrenzuflüsse in den Sommermonaten. Während der mittlere monatliche Talsperrenzufluss im Referenzzeitraum nur im August geringer ausfällt als der Bedarf, reicht dieses Defizit im trockenen Szenario *3d_tn* von Mai bis Oktober. Die größte Spreizung der Abflüsse zwischen Winter und Sommer zeigt das aus Messwerten extrapolierte Szenario für die ferne Zukunft (*3_ExUS*). Werden die so dargestellten, möglichen Auswirkungen des Klimawandels zusammenfassend in Änderungsfaktoren der maßgeblichen statistischen Eigenschaften des Zuflusses ausgedrückt, ergibt sich das in Abbildung 7-8 gezeigte Bild:

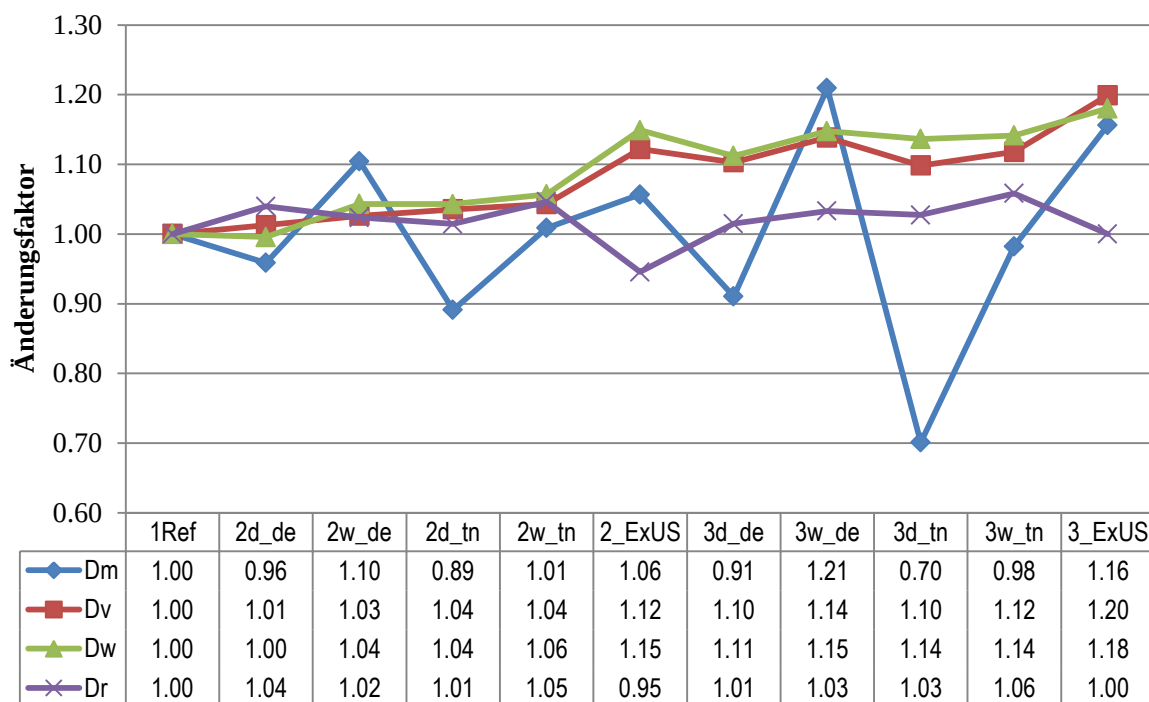


Abbildung 7-8 Änderungsfaktoren der statistischen Eigenschaften des Zuflusses für die untersuchten Klimaszenarien

Bezugspunkt für Änderungen der Zuflüsse bilden die hydrologisch modellierten Zuflüsse im Referenzzeitraum (1970-2000), siehe Tabelle 7-5. Diese unterscheiden sich geringfügig von den langjährigen Messwerten, welche in Abbildung 7-2 dargestellt sind.

Tabelle 7-5 Zuflusseigenschaften im Referenzzeitraum

Parameter	Wert
Mittelwert der jährlichen Zuflusssumme	429 hm ³ /a
Variationskoeffizient der jährlichen Zuflusssumme	0,257 [-]
Winteranteil der jährlichen Zuflusssumme	0,69 [-]

Die Änderung der Autokorrelation kann nicht auf die Summe der Zuflüsse zu den einzelnen Talsperren bezogen werden, da diese Eigenschaft von den einzelnen Zeitreihen selbst abhängt. Die Korrelati-

on des Jahreszuflusses mit dem Zufluss des Vorjahres (lag-1 Autokorrelationskoeffizient, siehe Glossar) an den betrachteten Stationen zeigt Tabelle 7-6:

Tabelle 7-6 Autokorrelation der Zuflusszeitreihen

Station	Obersee	Urft	Heimbach	Hauptsee	Kall- Fluss	Kall- TS	Dreilägerbach	Obermaubach
Autokorrelation	0,40	0,41	0,15	0,11	0,37	0,48	0,19	0,48

Änderungen der Autokorrelation mit Klimaänderungen werden auf jede einzelne Zeitreihe bezogen und die Gesamtänderung Dr als Mittelwert der einzelnen Änderungen dargestellt.

Die mögliche Änderung des Mittelwertes der jährlichen Zuflüsse Dm reicht von einer Reduktion auf 70 % bis hin zu einer Zunahme auf 121 % bezogen auf den Referenzzustand. Die Änderung des Variationskoeffizienten Dv wird vom verwendeten Delta-Change-Ansatz nicht hinreichend abgebildet (siehe Kapitel 5.2 sowie (FOWLER ET AL., 2007)). Als Ergebnis der hydrologischen Modellierung zeigt sich dennoch ein Anstieg auf maximal 120 % bezogen auf den Referenzzustand, da hier die Temperaturänderung zusätzlich zur Niederschlagsänderung berücksichtigt wird, was aufgrund der höheren Verdunstung zu einem weiteren Abflussspektrum führt, insbesondere in Richtung niedrigerer Abflüsse. Es wird hier jedoch, wie bereits in Kapitel 5.4 erläutert, davon ausgegangen, dass die verwendete Methodik die mögliche Änderung der Varianz unterschätzt. Dementsprechend wird der Raum für die Bestimmung der Klimaeinwirkungsfunktion über den von den Klimaszenarien beschriebenen Bereich hinaus erweitert. Bezüglich der Änderung des Winteranteils Dw der Zuflüsse zeigt sich für keines der Szenarien eine Abnahme und die maximale Zunahme mit 18 % im Szenario 3_ExUS. Der Winteranteil als relative Größe kann nicht größer 1 sein, was bedeutet, dass im Sommerhalbjahr der Zufluss Null ist. Damit kann die Erhöhung des Winteranteils bezogen auf den Referenzzeitraum maximal 45 % betragen. Hier werden Änderungen bis +20 % untersucht, was einer Abflussaufteilung von 83 % im Winter- und 12 % im Sommerhalbjahr führt. Die Änderung der Autokorrelation Dr , also der Wahrscheinlichkeit, dass auf feuchte Jahre wieder feuchte und auf trockene wieder trockene Jahre folgen, kann ebenfalls vom verwendeten Delta-Change-Ansatz nicht abgebildet werden. Die Änderung der Autokorrelation zeigt entsprechend nur geringe Unterschiede zwischen den untersuchten Szenarien. Daher müssen, wie schon bezüglich der Änderung der Varianz, Annahmen getroffen werden, um den Einfluss der Änderung der Autokorrelation auf die Leistungsfähigkeit der Talsperren zu evaluieren.

7.2.2 Multivariater Zuflussganglinien-Generator

Das Verfahren zur Generierung synthetischer Zeitreihen mit vorgegebener Änderung der statistischen Eigenschaften ist in Kapitel 4.3.2 beschrieben. Die Änderung der Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit der verschiedenen statistischen Eigenschaften des Zuflusses, welche sich mit dem Klima verändern, soll in Form von Klimaeinwirkungsfunktionen dargestellt werden. Hierzu werden synthetische Zuflussganglinien mit vorgegebenen statistischen Eigenschaften generiert, die es ermöglichen, die Abhängigkeit der Leistungsfähigkeit von einer statistischen Eigenschaft zu untersuchen.

Zunächst ist jedoch nachzuweisen, dass der hierzu verwendete Zuflussganglinien-Generator dazu in der Lage ist, die Zuflüsse für bestehende klimatische Verhältnisse hinreichend genau zu reproduzieren. Dieser Nachweis soll für das untersuchte Anwendungsbeispiel erbracht werden. Abbildung 7-9 stellt daher den Jahresgang sowie die Verteilung der wöchentlichen Abflüsse einer Station im Referenzzeitraum (1970-2000) den für einen Zeitraum von 1000 Jahren generierten Abflüssen gegenüber.

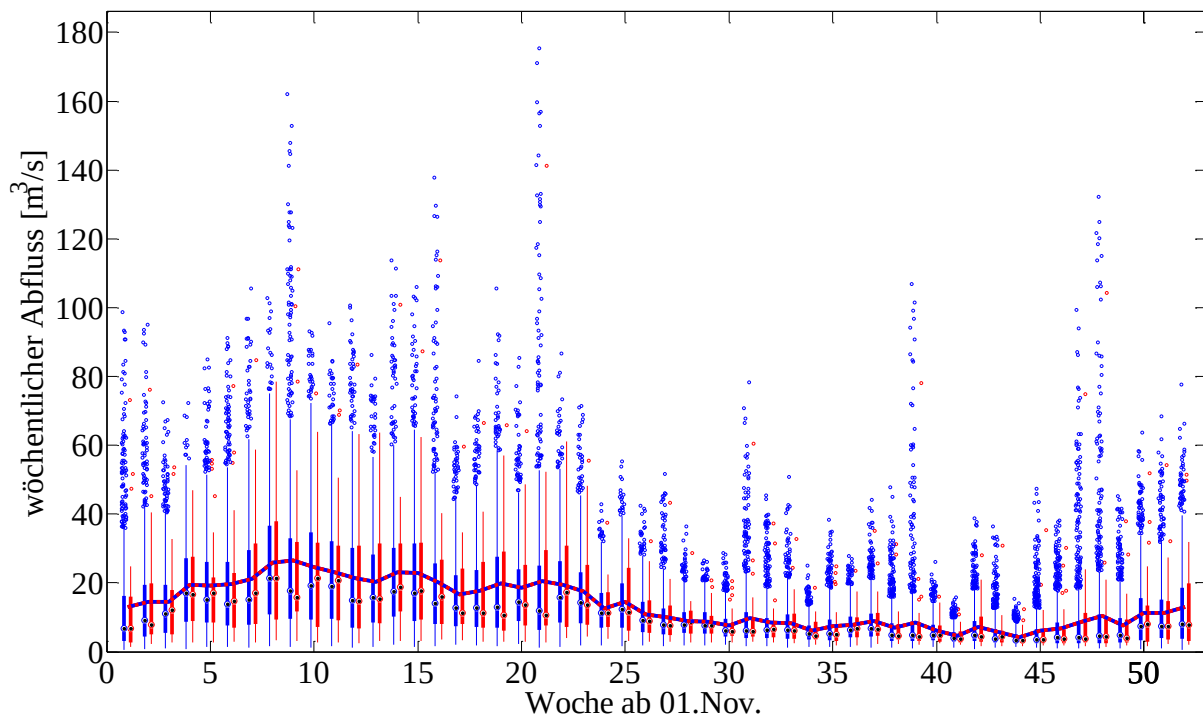


Abbildung 7-9 Jahresgang (Mittelwert) und Verteilung der wöchentlichen Abflüsse im Referenzzeitraum (1970-2000, rot) und simuliert (1000 Jahre, blau). Boxplots der Wochen zeigen Median als Kreis, 25. und 75. Perzentile als dicke Linie und Ausreißer als Punkte.

Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung des Mittelwertes der wöchentlichen Abflüsse. Dies ist zu erwarten, da diese Übereinstimmung, wie in Kapitel 4.3.2 beschrieben, iterativ hergestellt wird. Es ist ebenfalls eine gute Übereinstimmung der Verteilung der wöchentlichen Abflüsse anhand der Perzentilen zu beobachten. Ein Vorteil des verwendeten Verfahrens gegenüber *resampling*-Ansätzen (siehe Kapitel 4.3.2) zeigt sich bei Betrachtung der Ausreißer: Die generierte Ganglinie enthält neue Höchstwerte. Die Häufung der Ausreißer gegenüber der Referenzzeitreihe ergibt sich aus den unterschiedlichen Zeiträumen (30 Jahre gegenüber 1000 Jahren).

Wie es mit dem Verfahren möglich ist, Zeitreihen mit vorgegebenen Änderungen der statistischen Eigenschaften zu generieren, wird in den folgenden beiden Abbildungen dargestellt. Abbildung 7-10 zeigt die Reduktion des Mittelwertes der wöchentlichen und jährlichen Abflüsse auf 70 % bezogen auf den Referenzzeitraum. Abbildung 7-11 stellt eine erhöhte Streuung der Abflüsse mit Vergrößerung des Variationskoeffizienten der wöchentlichen und jährlichen Abflüsse auf 150 % bezogen auf den Referenzzeitraum dar.

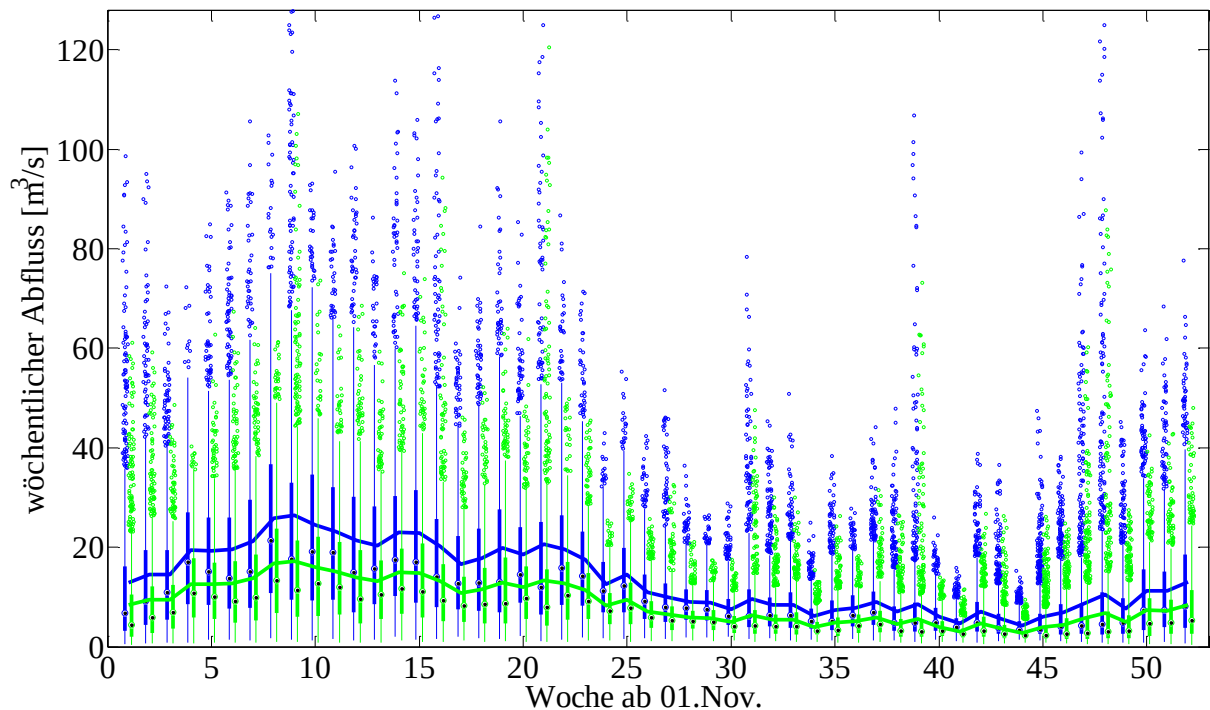


Abbildung 7-10 Veränderung von Jahresgang und Verteilung der wöchentlichen Abflüsse für trockenes Szenario (Mittelwert 70 %, Variationskoeffizient und Winteranteil konstant)

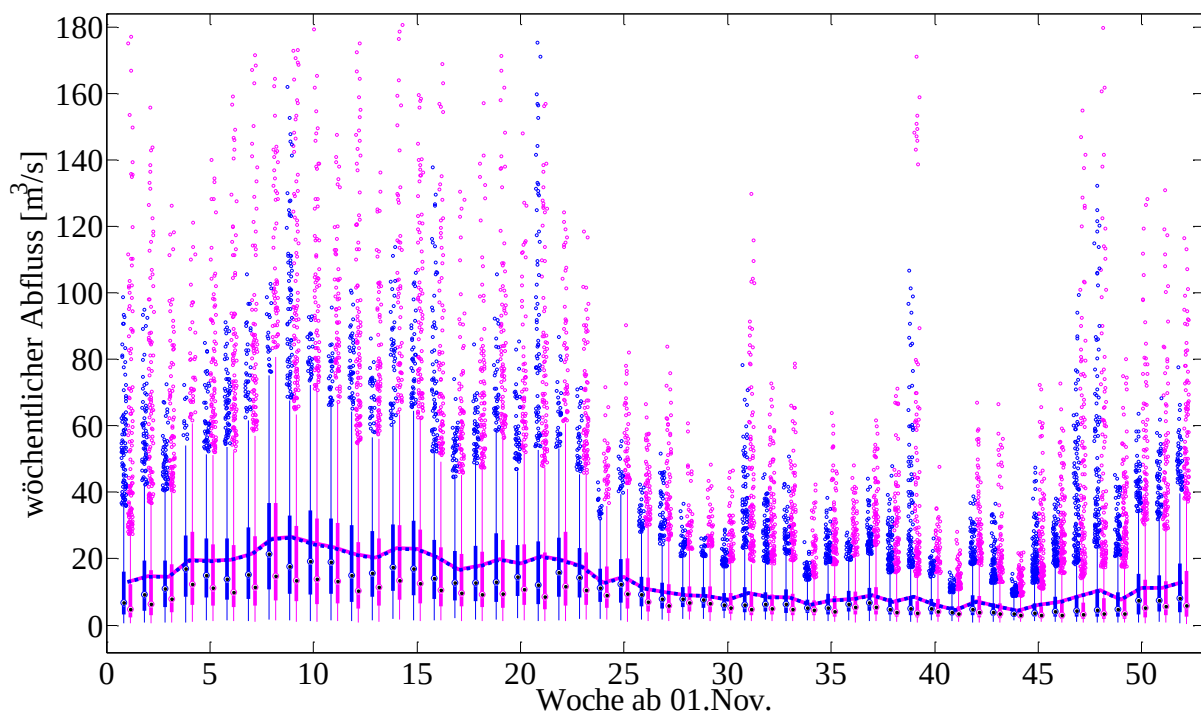


Abbildung 7-11 Veränderung von Jahresgang und Verteilung der wöchentlichen Abflüsse für erhöhte Streuung (Mittelwert und Winteranteil konstant, Variationskoeffizient 150 %)

Abbildung 7-10 zeigt, wie der Generator die Verteilung der wöchentlichen Abflüsse proportional anpasst, um die gewünschte Reduktion des Mittelwertes zu erzielen. In Abbildung 7-11 wird dagegen der Mittelwert beibehalten und es werden die aus der Verteilung der wöchentlichen Abflüsse gezogenen Werte perturbiert, wie in Kapitel 5.4 beschrieben, um eine Vergrößerung des Variationskoeffi-

zienten zu erreichen. Entsprechend lassen sich weitere Eigenschaften, wie zum Beispiel der Winteranteil der Abflüsse anpassen. So können Zeitreihen generiert werden, welche vergleichbare Eigenschaften besitzen, wie die für verschiedene Klimaszenarien mittels hydrologischer Modellierung erzeugten Zuflüsse. Abbildung 7-12 und Abbildung 7-13 zeigen beispielhaft für die Klimaszenarien *3d_tn* (Abbildung 7-12) und *3_ExUS* (Abbildung 7-13), wie der Jahresgang der Abflüsse von Zeitreihen getroffen wird, welche auf Basis der Referenzperiode und definierter Änderung des Mittelwertes (*dm*) und des Winteranteils (*dw*) generiert werden. Die Übereinstimmung ist für Szenarien geringer, welche in der hydrologischen Modellierung mit monatlichen Änderungen von Niederschlag und Temperatur beaufschlagt wurden (Beispiel *ExUS*, siehe Tabelle 7-3 und Tabelle 7-4). Die Schwankung der monatlichen Änderung kann hier nicht vollständig auf Änderungen im Verhältnis von Winter- zu Sommerabfluss übertragen werden. Die Charakteristik der Änderung des Zuflusses wird jedoch erfasst. Damit kann der Generator verwendet werden, um die Bandbreite der möglichen Änderungen der statistischen Eigenschaften des Zuflusses zu beschreiben und so die Änderung der Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit von der klimabedingten Veränderung der Zuflüsse zu bestimmen.

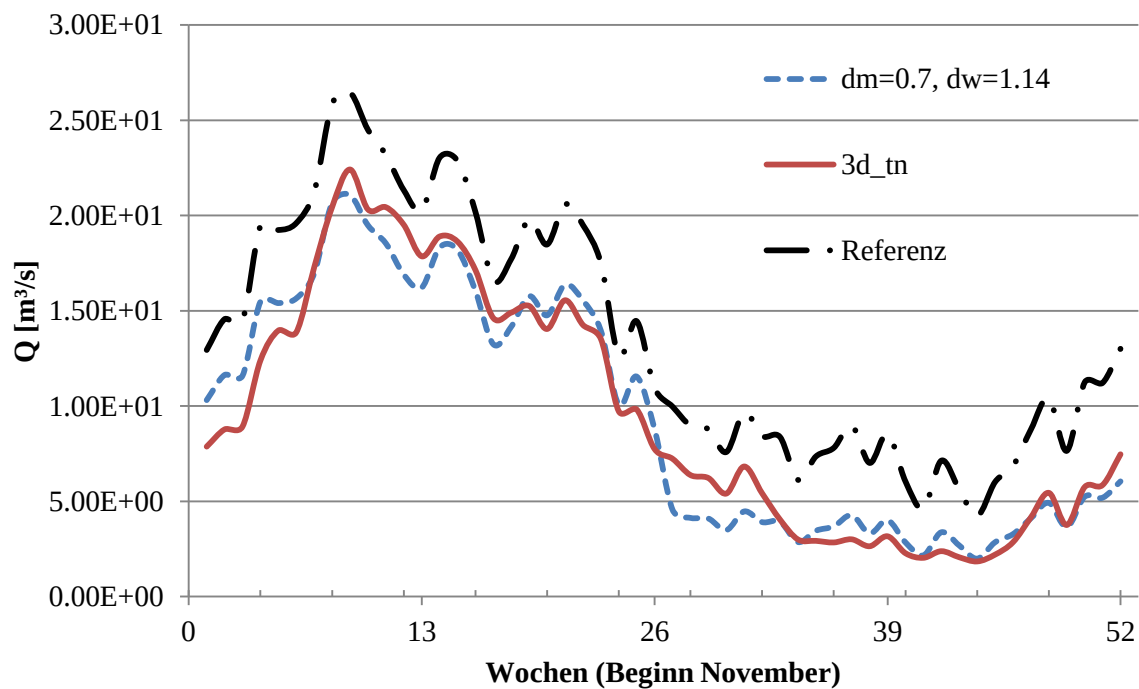


Abbildung 7-12 Vergleich des mittleren Jahresganges der Wochenmittelwerte des Abflusses für das transnationale, trockene Szenario des Zeitraumes 2070-2100 und einem synthetischen Szenario mit gleichen Änderungsfaktoren für Jahresmittelwert (*dm*) und Winteranteil (*dw*)

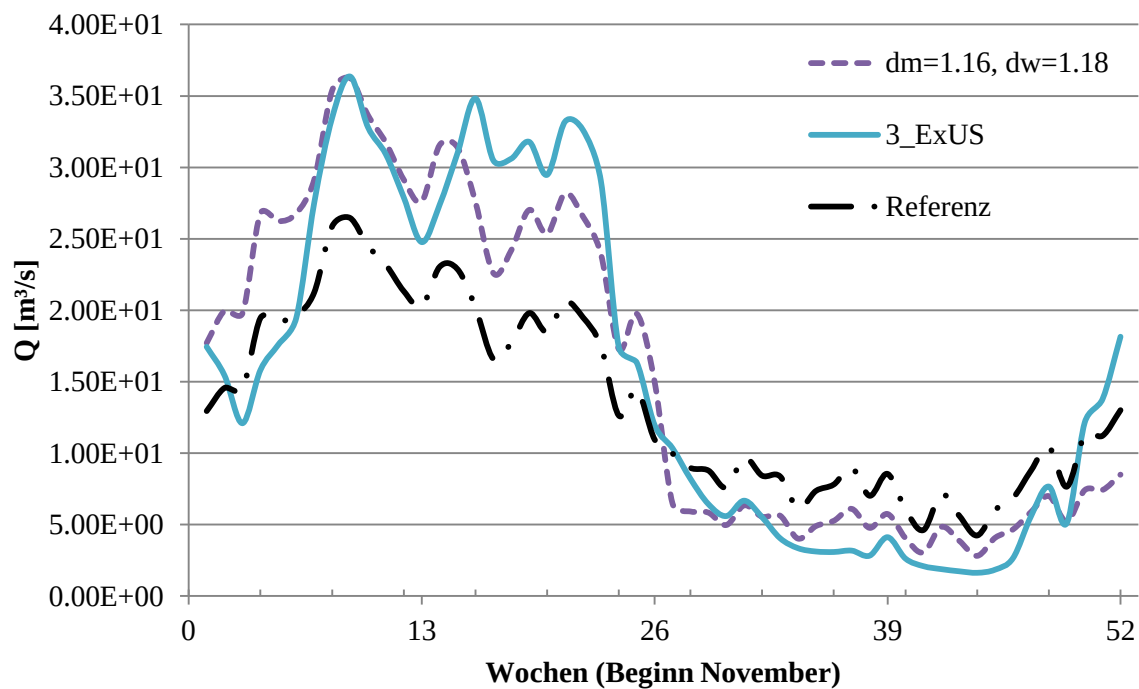


Abbildung 7-13 Vergleich des mittleren Jahresganges der Wochenmittelwerte des Abflusses für das ExUS-Rur Szenario des Zeitraumes 2070-2100 und einem synthetischen Szenario mit gleichen Änderungsfaktoren für Jahresmittelwert (dm) und Winteranteil (dw)

7.2.3 Niedrigwasserrisiko

Das Niedrigwasserrisiko wird als Produkt von empirischer Eintrittswahrscheinlichkeit und Schaden eines Versagens bestimmt, wie in Kapitel 4.3 beschrieben. Die Auswertung der Versagensfälle erfolgt für die Mindestabgabe von 5 m³/s ab dem Systemabschluss Staubecken Obermaubach. Es wurden je Parametersatz zehn Zeitreihen der wöchentlichen Zuflüsse für je einen Zeitraum von 100 Jahren generiert. Diese Zeitreihen an acht Pegeln im Untersuchungsgebiet dienen als Randbedingung für die Simulation des Talsperrenbetriebs. Ergebnis sind Zeitreihen der Systemabgabe in Obermaubach für 1000 Jahre je Parametersatz, die bezüglich der Dauer, Fehlmengen und der Häufigkeit von Versagensereignissen untersucht werden. So lässt sich die Zuverlässigkeit der Wasserbereitstellung als Mittelwert über zehn Simulationen für je 100 Jahre in Abhängigkeit der Eigenschaften der Zuflüsse darstellen.

Diesen Zusammenhang zeigt Abbildung 7-14 für Änderungen von Variationskoeffizient und Mittelwert der Zuflüsse. Hier entspricht eine Zuverlässigkeit von 0,99 im Mittel fünf Versagensfälle (Wochen, in denen die Mindestabgabe nicht eingehalten werden kann) in 100 Jahren Betrieb. Die Darstellung des Zusammenhangs von Zuverlässigkeit und Zuflusseigenschaften ähnelt der Darstellung der Speicherwirkungslinie, welche die Abhängigkeit der Zuverlässigkeit von Speichergröße und Mindestabgabe beschreibt (siehe Kapitel 2.3.1 Abbildung 2-2 sowie Abbildung 3-3). Das Rurtalsperrensystem zeigt eine hohe Robustheit der Zuverlässigkeit der Wasserbereitstellung. Erst ab einer Reduktion des Mittelwertes der Zuflüsse auf 75 % des Wertes im Referenzzeitraum, ist mit einer deutlich geringeren Zuverlässigkeit zu rechnen. Bis zu einer Reduktion des Mittelwertes auf 85 % führt auch ein Anstieg des Variationskoeffizienten nicht zu einer merklichen Verringerung der Zuverlässigkeit.

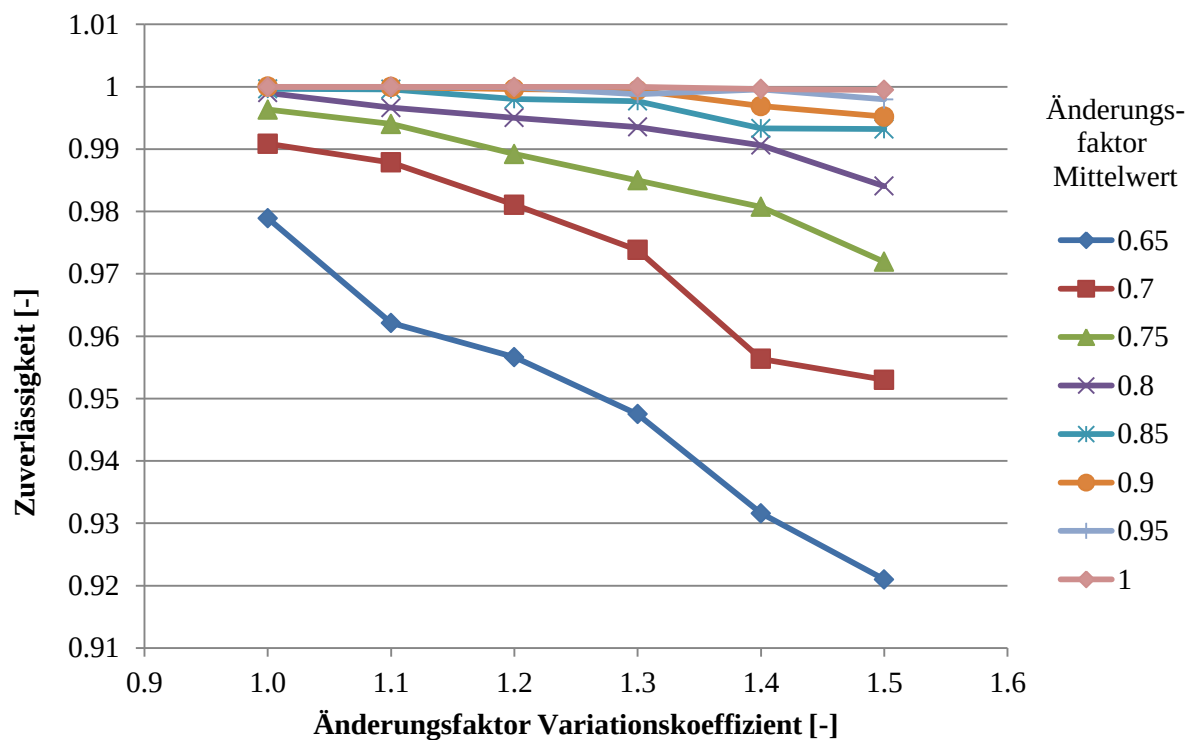


Abbildung 7-14 Veränderung der Zuverlässigkeit mit dem Variationskoeffizienten und dem Mittelwert der Zuflüsse bei konstantem Winteranteil und konstanter jährlicher Autokorrelation

Ist das System jedoch schon durch eine Reduktion des Mittelwertes belastet und kommt es gleichzeitig zu einem Anstieg des Variationskoeffizienten, so fällt die Zuverlässigkeit stark ab. Die Betrachtung der Zuverlässigkeit der Mindestabgabe erlaubt keine Aussage über die Konsequenzen eines Versagens. Hierzu müssen auch die Versagensdauer (Wie lang ist der Zeitraum, über den die Mindestabgabe nicht eingehalten werden kann?) und der Fehlmenge (Welche Wassermenge fehlt den Nutzern unterstrom der Talsperren?) untersucht werden. Das in Kapitel 4.3 vorgestellte Verfahren zur Bewertung des Niedrigwasserrisikos erlaubt eine solche Betrachtung. Hierzu werden die Schäden jedes Versagens der Wasserbereitstellung in Abhängigkeit von Versagensdauer und Fehlmenge bestimmt und anhand der empirischen Eintrittswahrscheinlichkeit im Untersuchungszeitraum zum Niedrigwasserrisiko aggregiert. Dies geschieht im Anwendungsbeispiel, indem die während der Simulation des Talsperrenbetriebs für zehn mal 100 Jahre wöchentliche Zuflüsse mit gleichen statistischen Eigenschaften aufgetretenen Versagensereignisse zusammengefasst werden. Dem während dieser Simulationen auftretenden Versagensereignis mit den höchsten Schäden wird entsprechend eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 1/1001 zugeordnet, dem zweithöchsten einmal in 500 Jahren und so weiter (siehe Gleichung (4.7)).

Abbildung 7-15 stellt dar, wie sich der so aggregierte Wert des Niedrigwasserrisikos für klimabedingte Änderungen des Mittelwertes und des Variationskoeffizienten verhält. Es zeigt sich die, schon bei der Analyse der Zuverlässigkeit beobachtete, gegenseitige Abhängigkeit des Niedrigwasserrisikos von Änderungen des Mittelwertes und des Variationskoeffizienten. Während bei keiner oder nur geringer Reduktion des Mittelwertes (bis auf 90 % des Referenzwertes) auch eine Vergrößerung der Variabilität der Jahreszuflüsse keine Erhöhung des Niedrigwasserrisikos nach sich zieht, steigt das Niedrigwasserrisiko mit einer Vergrößerung des Variationskoeffizienten bei schon durch Reduktion des Mittelwertes belastetem System steil an. Das Rurtalsperrensystem zeigt eine hohe Robustheit der Leistungsfähigkeit der Wasserbereitstellung: Ein deutlicher Anstieg des Niedrigwasserrisikos erfolgt

erst ab einer Reduktion des Mittelwertes auf 70 % oder einer Reduktion auf 75 % bei gleichzeitigem Anstieg des Variationskoeffizienten.

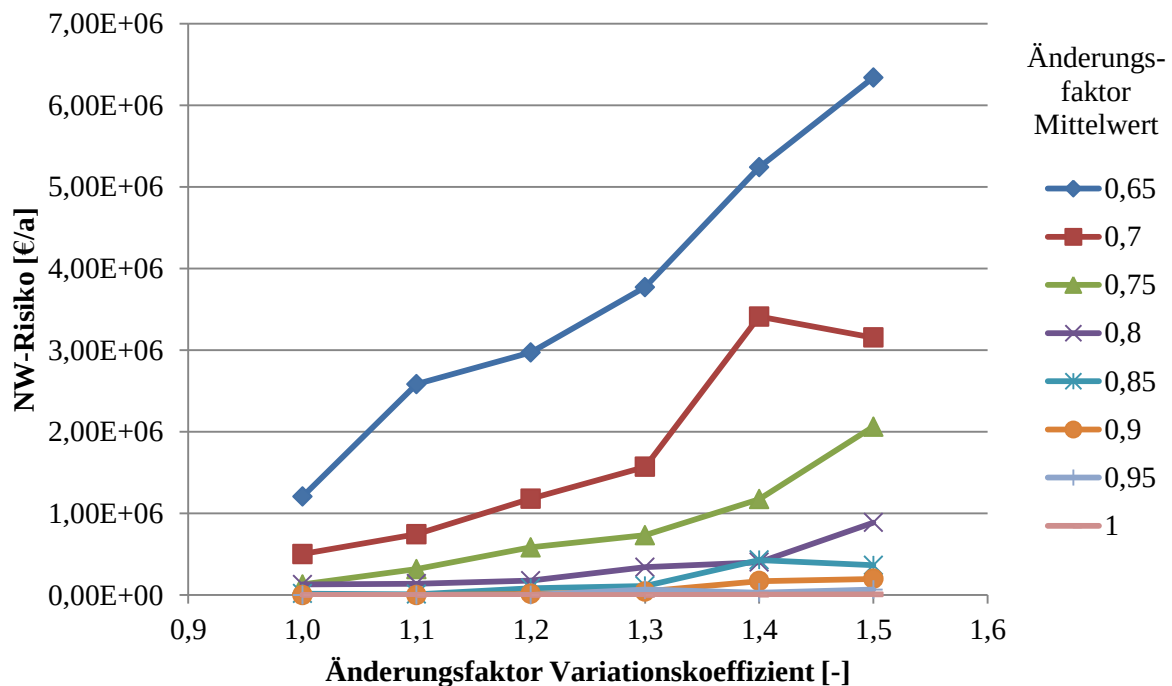


Abbildung 7-15 Änderung des Niedrigwasserrisikos mit dem Variationskoeffizienten und dem Mittelwert der Zuflüsse bei konstantem Winteranteil und konstanter jährlicher Autokorrelation

Ein ähnliches Bild zeigt sich auch für gleichzeitige Änderungen des Mittelwertes und des Winteranteils der Zuflüsse (siehe Abbildung 7-16). Hier ist ein deutlicher Anstieg des Niedrigwasserrisikos mit dem Winteranteil erst ab einer Reduktion des Mittelwertes auf 70 % des Wertes im Referenzzeitraum zu beobachten. Dieses Ergebnis bestätigt theoretische Überlegungen aus der Literatur: Bei Überjahresspeichern, wie der Rurtalsperre, ist der Einfluss der innerjährlichen Verteilung der Zuflüsse auf die Leistungsfähigkeit der Wasserbereitstellung aus dem Speicher geringer als der Einfluss der Variabilität der Jahreszuflüsse (MCMAHON ET AL., 2007a). Für ein bereits durch eine Reduktion des Mittelwertes beanspruchtes System, wirkt ein Anstieg des Winteranteils dennoch in gleichem Maße risikoe erhöhend, wie ein Anstieg des Variationskoeffizienten. Sowohl eine Erhöhung des Winteranteils der Jahreszuflüsse als auch eine erhöhte Variabilität selbiger wirken sich belastend auf die Wasserbereitstellungsleistung des Talsperrensystems aus. Dies zeigt auch Abbildung 7-17, welche die Änderung des Niedrigwasserrisikos darstellt, wenn nur Variationskoeffizient und Winteranteil, nicht jedoch der Mittelwert, geändert werden.

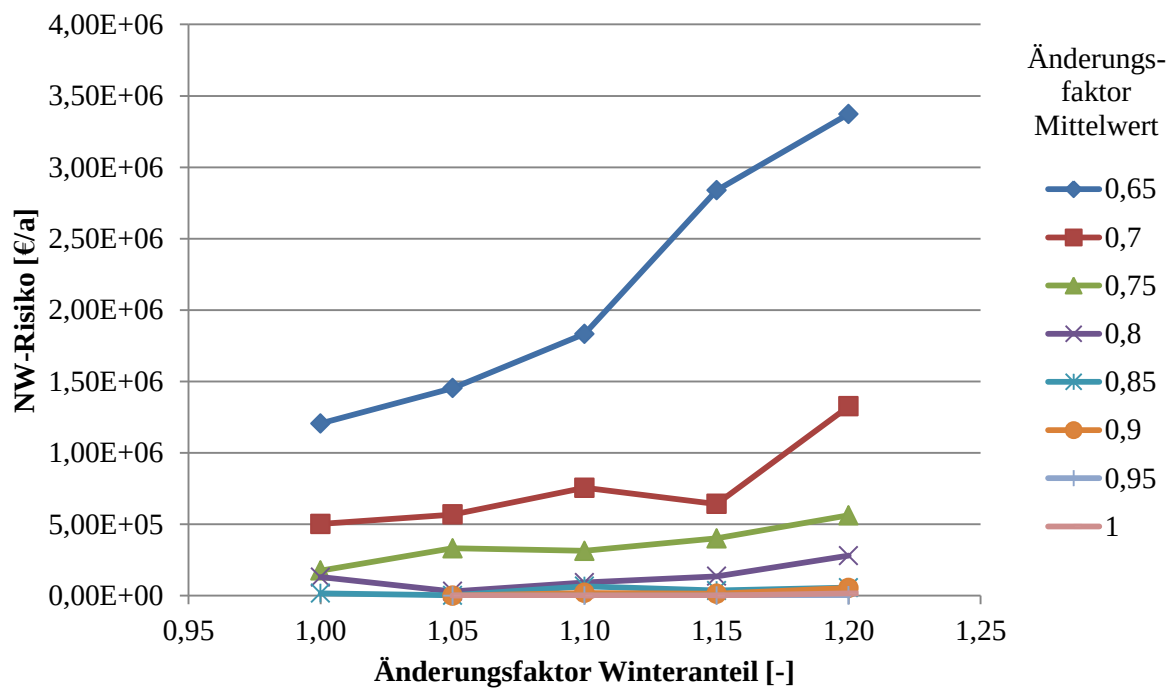


Abbildung 7-16 Änderung des Niedrigwasserrisikos mit dem Winteranteil und dem Mittelwert der Zuflüsse bei konstantem Variationskoeffizienten und konstanter jährlicher Autokorrelation

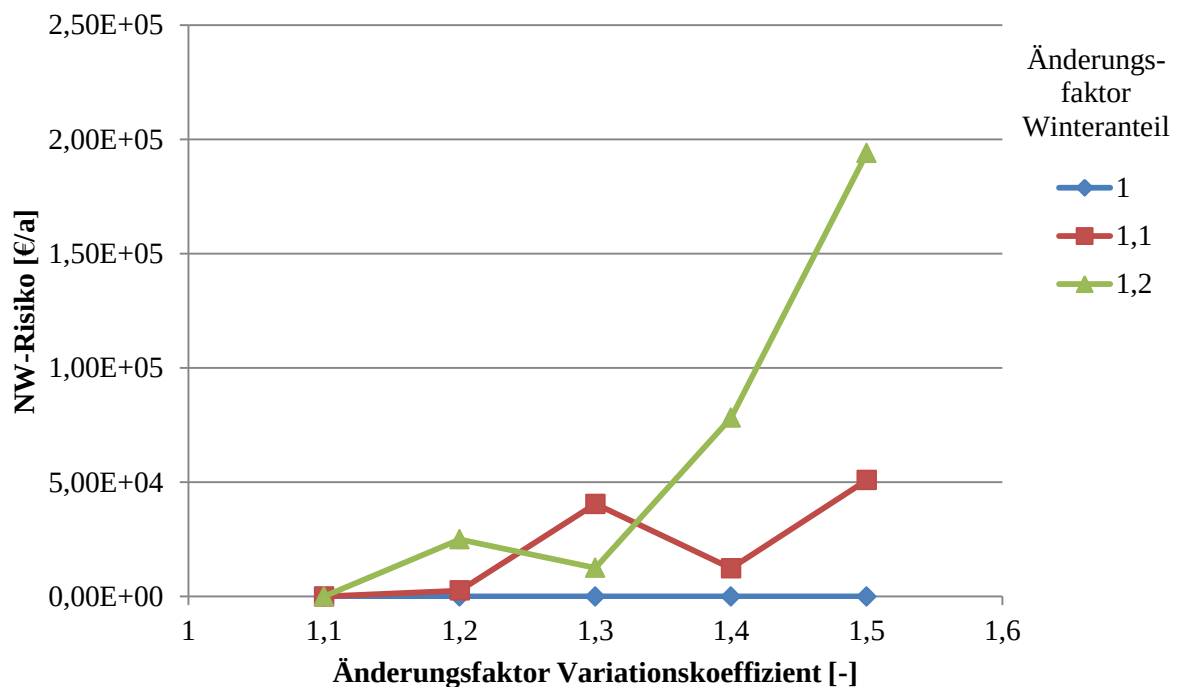


Abbildung 7-17 Veränderung des Niedrigwasserrisikos mit dem Variationskoeffizienten und dem Winteranteil der Zuflüsse ohne Änderung des Mittelwertes

Dieser Fall ist bezüglich der Ergebnisse globaler Klimamodelle durchaus plausibel, kann mittels der bisher verfügbaren Modellkette zur Abbildung der Einwirkungen jedoch nicht abgebildet werden,

bzw. ist dem Autor keine Untersuchung bekannt, die die Ergebnisse der globalen Klimamodelle diesbezüglich ausgewertet hätte. Mit Hilfe des hier verwendeten Zeitreihengenerators lassen sich nun auch solche Szenarien betrachten und bezüglich des resultierenden Niedrigwasserrisikos auswerten. So hätte eine gleichzeitige Erhöhung des Winteranteils um 20 % und der Variabilität des Jahreszuflusses um 50 % gegenüber dem Referenzzeitraum etwa einen ähnlichen Einfluss wie eine Reduktion des Mittelwertes auf 75 % der Werte des Referenzzeitraumes.

Alle genannten Interpretationen müssen mit der Einschränkung betrachtet werden, dass der Bestimmung des Niedrigwasserrisikos nur eine Auswertung über einen Simulationszeitraum von 1000 Jahren je Parametersatz zugrunde liegt. Vor diesem Hintergrund ist auch die in Abbildung 7-17 deutlich zu erkennende Überschneidung der Werte des Niedrigwasserrisikos bei Änderung des Variationskoeffizienten auf 130 % und um 10 % bzw. 20 % erhöhten Winteranteilen zu sehen.

Abschließend wird auch der Einfluss der jährlichen Autokorrelation des Zuflusses auf das Niedrigwasserrisiko untersucht. Wie Abbildung 7-18 verdeutlicht, ist der Einfluss der Autokorrelation im Vergleich zum Winteranteil und Variationskoeffizienten gering. Auch für ein bereits stark durch Reduktion des Mittelwerts belastetes System zeigt sich nur ein geringer, linearer Anstieg des Niedrigwasserrisikos. Die Änderung der Autokorrelation wird daher im Folgenden nicht zur Bewertung der Robustheit möglicher Maßnahmen weiterverwendet.

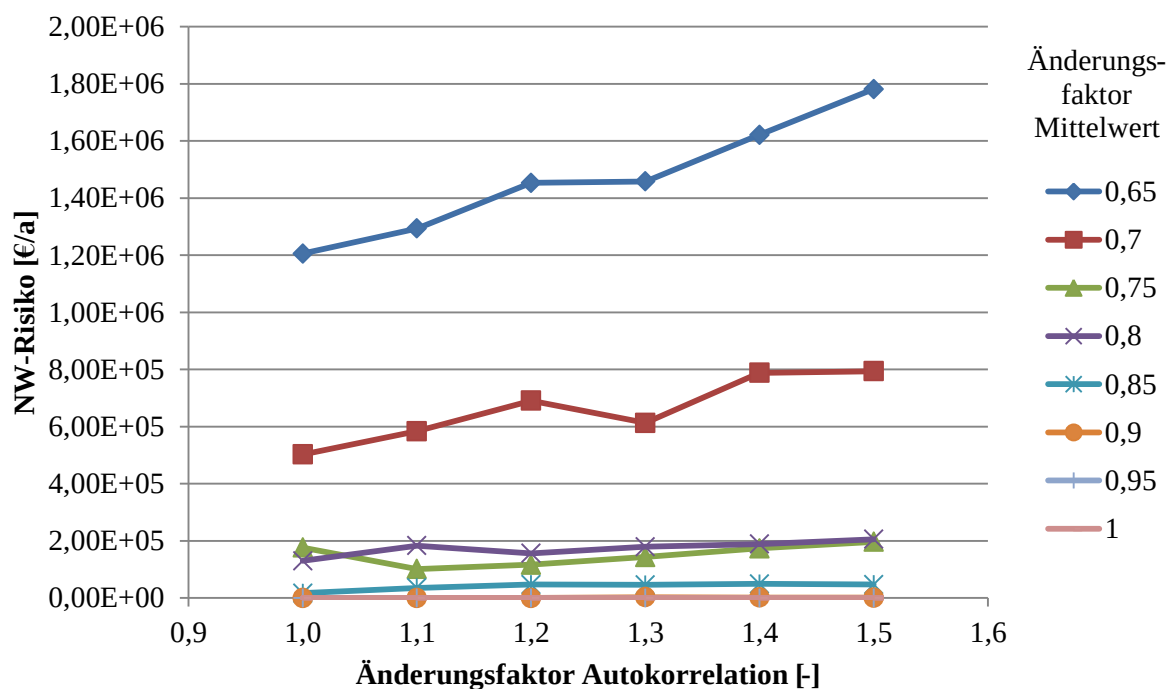


Abbildung 7-18 Änderung des Niedrigwasserrisikos mit der jährlichen Autokorrelation und dem Mittelwert der Zuflüsse bei konstantem Variationskoeffizient und konstantem Winteranteil

7.2.4 Hochwasserrisiko

Die Berechnung des Hochwasserrisikos für verschiedene Klimaszenarien basiert auf einer Hochwassermerkmal-Simulation, welche für das Untersuchungsgebiet im Rahmen des AMICE-Projekts vom Büro Sydro durchgeführt wurde (SYDRO, 2013). Das methodische Vorgehen bei der Hochwassermerkmal-Simulation ist in Kapitel 4.2.2 beschrieben. Hier soll jedoch auf einige Details der Umset-

zung zur Beschreibung der Klimaeinwirkung und die Unsicherheiten des Verfahrens eingegangen werden. Zur statistischen Beschreibung der Hochwassersituation in einem Untersuchungsgebiet werden aus Messwerten die Hochwassermerkmale wie Spitzenabfluss, Wellenformparameter und Anfangsinhalt von Talsperren bestimmt. Die daraus berechneten Verteilungsfunktionen der Merkmale dienen als Grundlage für die Generierung von synthetischen Hochwasserwellen. Hierbei kommen Methoden der Extremwertstatik zur Anwendung, um eine Extrapolation über den Messzeitraum hinaus zu ermöglichen. Je länger der Messzeitraum, desto gesicherter sind die Ergebnisse. Zur Abbildung der Klimaeinwirkung werden nun, statt Messwerten, Zeitreihen aus der hydrologischen Simulation verschiedener Klimaszenarien mit der Dauer eines Klimareferenzzeitraumes, also 30 Jahren, verwendet. Hierdurch ergibt sich eine deutliche Vergrößerung der Unsicherheit der Ergebnisse. Um diese Unsicherheit möglichst gering zu halten, wurde daher die Annahme getroffen, dass Hochwassermerkmale, wie Anlaufzeit, Formbeiwert des ansteigenden Astes, Formbeiwert des absteigenden Astes, Scheiteldauer und die Korrelation zwischen benachbarten Pegeln konstant bleiben und sich für Klimaszenarien gegenüber dem Messzeitraum nicht ändern. Lediglich die beiden Hochwassermerkmale Spitzenabfluss und Anfangsinhalt der Talsperren wurden für die Szenarien variiert und jeweils auf Basis des hydrologisch simulierten Klimaszenarios von 30 Jahren Dauer bestimmt (SYDRO, 2013). Abbildung 7-19 zeigt die Verteilung der Spitzenabflüsse des Messzeitraumes, des hydrologisch simulierten Referenzzeitraumes und eines Klimaszenarios (3 ExUS).

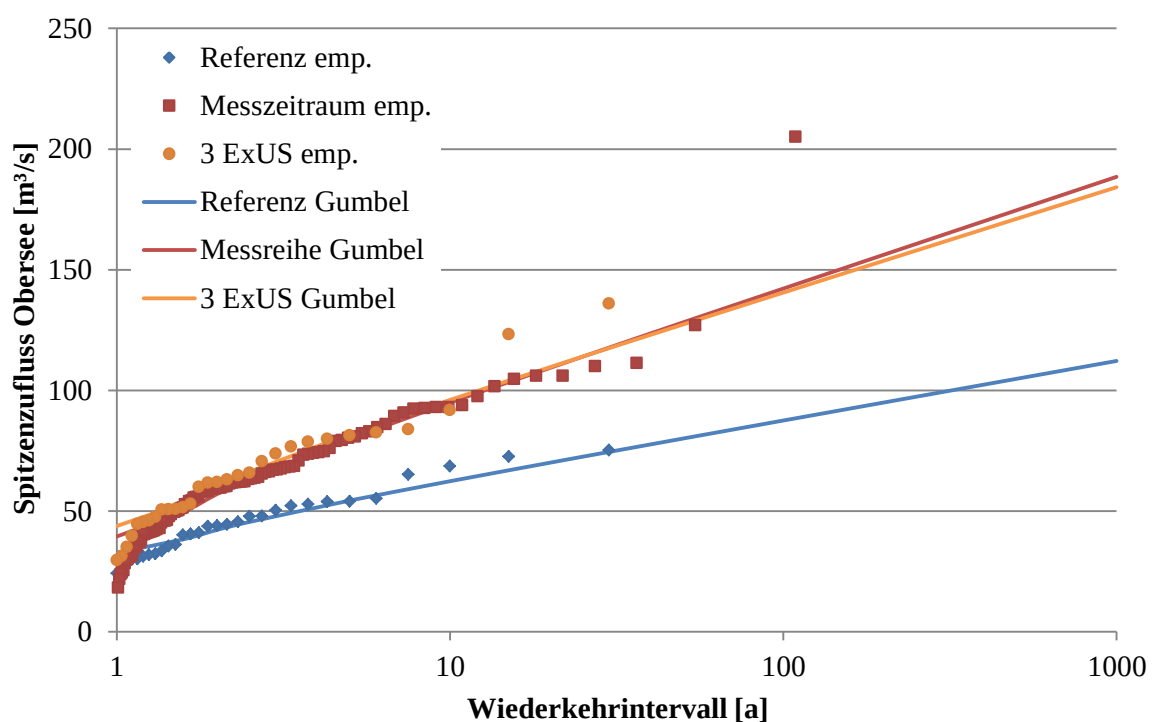


Abbildung 7-19 Extremwertstatistik der jährlichen Spitzenzuflüsse zum Obersee

Es fällt deutlich der Unterschied zwischen hydrologisch simuliertem Referenzzeitraum (1971-2000) und dem Messzeitraum (1905-2013) auf: Die Hochwasserspitzen des Messzeitraumes liegen auch für Hochwasser kleiner Wiederkehrintervalle deutlich über denen des Referenzzeitraumes. Für den Extrapolationsbereich, der die beste Anpassung gebenden Gumbel-Verteilung (SYDRO, 2013), wächst diese Abweichung noch an. Der Einfluss der Klimaänderung wird von der Modellkette als Änderung gegenüber dem Referenzzustand abgebildet. Dazu ist auch dieser hydrologisch zu simulieren, um die Ver-

gleichbarkeit der Ergebnisse sicher zu stellen. Obwohl Klimaszenario (3 *ExUS*) und Messzeitraum in Abbildung 7-19 einen ähnlichen Wertebereich zeigen, folgt daraus nicht, dass kein Anstieg der Spitzenzuflüsse zum Obersee für das Klimaszenario prognostiziert wird, sondern dieser Anstieg ist sogar deutlich, wie am Vergleich zum Referenzzeitraum zu erkennen. Um diese Vergleichbarkeit der Extremwerte gegenüber dem Referenzzeitraum zu ermöglichen, wird konsequent eine Gumbel-Verteilung zur Bestimmung der Spitzenabflüsse verschiedener Eintrittswahrscheinlichkeit angewendet. Aus den so bestimmten Hochwassermerkmalen werden 10.000 Ganglinien generiert, mittels eines Speicherkaskadenmodells bis zum Bezugspegel geroutet und anhand der dortigen empirischen Verteilung der Abflussspitzen jeweils zwei Ganglinien der Wiederkehrintervalle 10, 25, 50, 100, 250 und 1000 Jahre ausgewählt. Je Wiederkehrintervall wird ein Hochwasserereignis ausgesucht, welches einen homogenen Verlauf der aus der Hochwassermerkmals-Simulation bestimmten empirischen Eintrittswahrscheinlichkeit entlang des Gewässers aufweist, und ein Hochwasserereignis, dessen Entstehungsschwerpunkt im Oberlauf liegt, also von der Talsperrensteuerung deutlicher beeinflusst wird. Ein HQ100 bei homogener Ausprägung weist beispielsweise sowohl am Oberlauf als auch am Bezugspegel, bedingt durch entsprechende Zuflüsse aus Nebengewässer, ein Wiederkehrintervall von 100 Jahren auf. Dagegen kann ein HQ100 mit Entstehungsschwerpunkt am Oberlauf dort eine geringere Eintrittswahrscheinlichkeit, am Bezugspegel aber ebenfalls ein Wiederkehrintervall von 100 Jahren zeigen, da hohe Zuflüsse aus Nebengewässern jedoch ausbleiben. Durch Berücksichtigung dieser beiden Fälle möglicher Hochwasserausprägungen kann der Einfluss angepasster Betriebsregeln abgebildet werden, ohne diesen zu überschätzen. Beide Ausprägungen (homogen und Entstehungsschwerpunkt im Oberlauf) werden je Wiederkehrintervall als gleich wahrscheinlich angesetzt. Somit werden je Klimaszenario 12 Hochwasser untersucht und die Überflutungsflächen sowie korrespondierenden Schäden berechnet. Hierbei kommt ein instationäres hydraulisches Modell zur Anwendung, womit der Einfluss zeitlicher Verschiebungen von Hochwasserwellen im Einzugsgebiet sowie Wellenretention und –translation abgebildet werden (siehe Kapitel 2.2.2). Die Hochwasserschäden lassen sich in Verbindung mit der Eintrittswahrscheinlichkeit zum Hochwasserrisiko des unterstrom der Talsperren gelegenen Gebiets integrieren. Abbildung 7-20 zeigt den Verlauf der Hochwasserrisikokurve im Referenzklima. Die Hochwasserrisikokurve beschreibt, wie in Kapitel 4.2.1 erläutert, die Abhängigkeit des Hochwasserschadens von der Überschreitungswahrscheinlichkeit eines Hochwasserereignisses. Die Überschreitungswahrscheinlichkeit ist bei Betrachtung einer jährlichen Serie der Kehrwert des in Abbildung 7-19 verwendeten Wiederkehrintervalls. In Abbildung 7-20 ist der Verlauf durch sechs diskrete Punkte beschrieben, welche jeweils den Mittelwert des Schadens der zwei Hochwasserereignisse unterschiedlicher Ausprägung darstellen. Die Integration über alle Überschreitungswahrscheinlichkeiten ergibt das Hochwasserrisiko als Fläche unter der Risikokurve, grau dargestellt in Abbildung 7-20.

Das so bestimmte Hochwasserrisiko der unterstrom der Talsperren gelegenen Gebiete kann, wie in Abbildung 7-21 dargestellt, für die zehn untersuchten Klimaszenarien bestimmt und verglichen werden. Es zeigt sich sowohl eine deutliche Zunahme als auch eine starke Abnahme des Hochwasserrisikos für verschiedene Klimaszenarien: Während sich das Hochwasserrisiko im durch Extrapolation des Trends der Messwerte in das Jahr 2100 gewonnenen Szenario 3 *ExUS* mehr als verdoppelt, geht es im sehr trockenen, transnationalen Szenario (3d *tn*) für das Jahr 2100 um 86 % zurück.

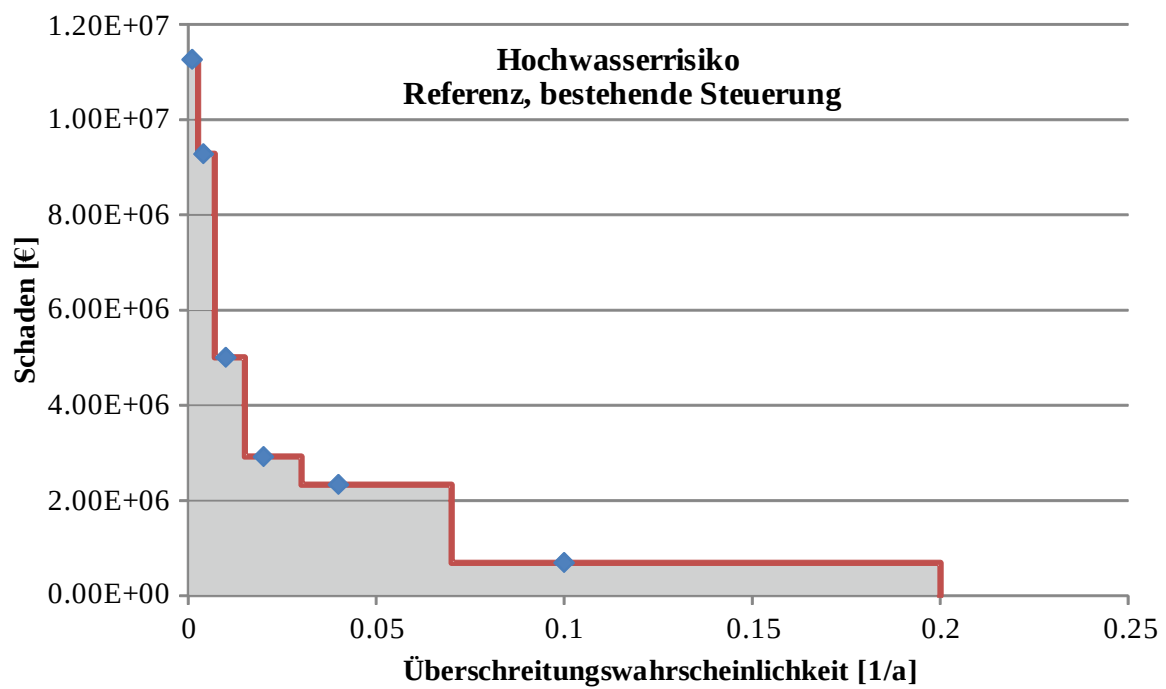


Abbildung 7-20 Approximation der Hochwasserrisikokurve im Referenzklima

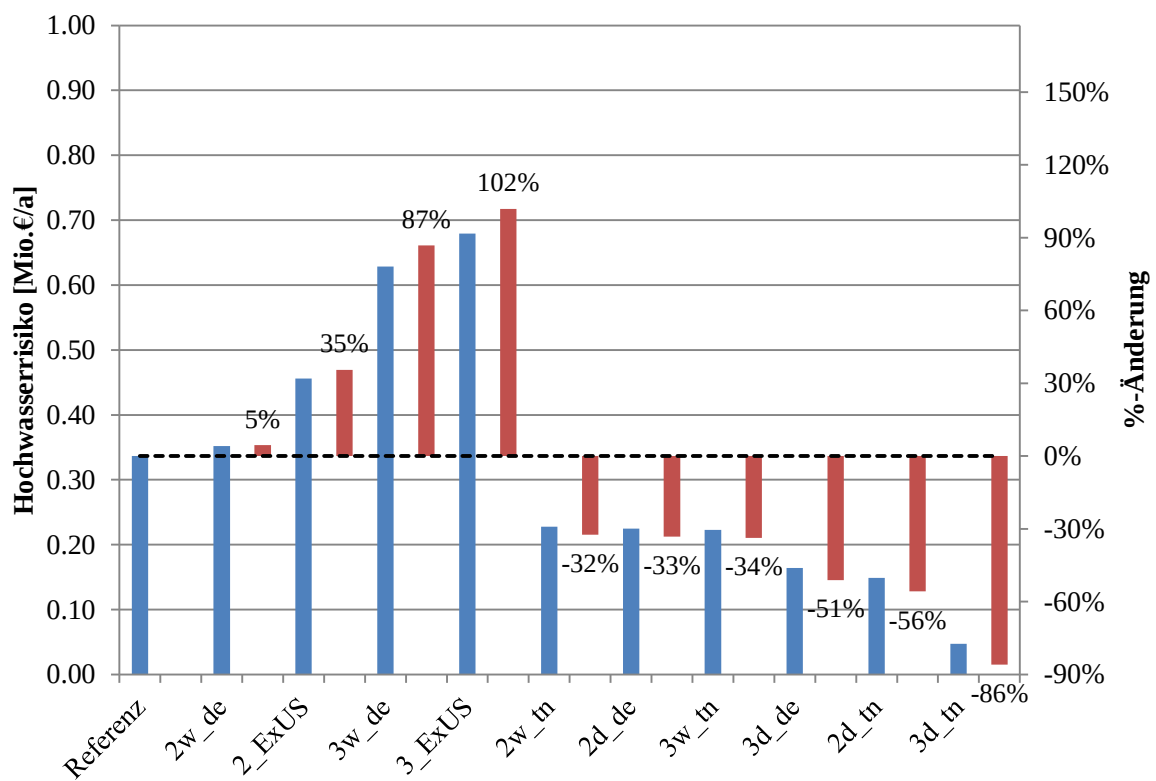


Abbildung 7-21 Änderung des Hochwasserrisikos für Klimaszenarien

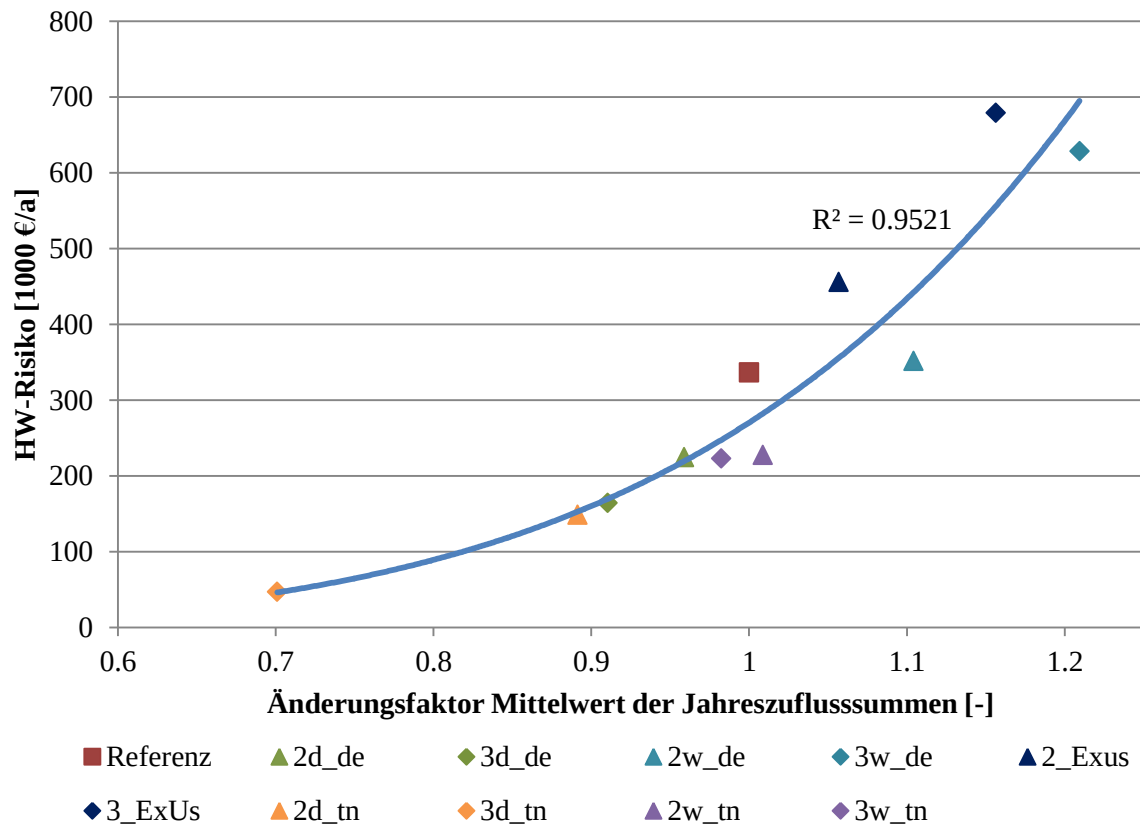


Abbildung 7-22 Änderung des Hochwasserrisikos in Abhängigkeit vom Mittelwert der Zuflüsse (Referenz rot)

Die Änderung des Hochwasserrisikos ergibt sich aus dem Zusammenspiel von veränderten Spitzenabflüssen und veränderten Anfangsfüllständen in den Talsperren. Beides wird mittelbar von der Änderung des Mittelwertes der jährlichen Zuflusssummen berücksichtigt. Im Detail ergeben sich jedoch Unterschiede zwischen den Szenarien, welche nicht allein durch den Mittelwert der Zuflusssummen abgebildet werden. So zeigen die durch Extrapolation des Trends der Messwerte gewonnenen *ExUS* Szenarien, aufgrund der weiten Spreizung zwischen Zunahme des Abflusses im Winter und Abnahme des Abflusses im Sommer, bei gleichzeitiger Abflusszunahme im Frühjahr (vergleiche Abbildung 7-7), einen stärkeren Anstieg des Hochwasserrisikos mit Zunahme des mittleren Jahreszuflusses als die restlichen Klimaszenarien.

7.2.5 Wasserwirtschaftliches Gesamtrisiko

Als Beispiel einer Klimaeinwirkungsfunktion zur Bewertung der wasserwirtschaftlichen Risiken durch Klimaänderungen zeigt Abbildung 7-23 die Abhängigkeit des Hoch- und Niedrigwasserrisikos von der Änderung des Mittelwertes der Zuflüsse zu den Talsperren. Die Änderungen des Hochwasserrisikos folgen mit einem Bestimmtheitsmaß (siehe Glossar) R^2 von 0,9521 einer Potenzfunktion der Änderung der mittleren, jährlichen Zuflüsse. Die Änderungen des Niedrigwasserrisikos lassen sich mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,9743 als Polynom 3. Ordnung darstellen.

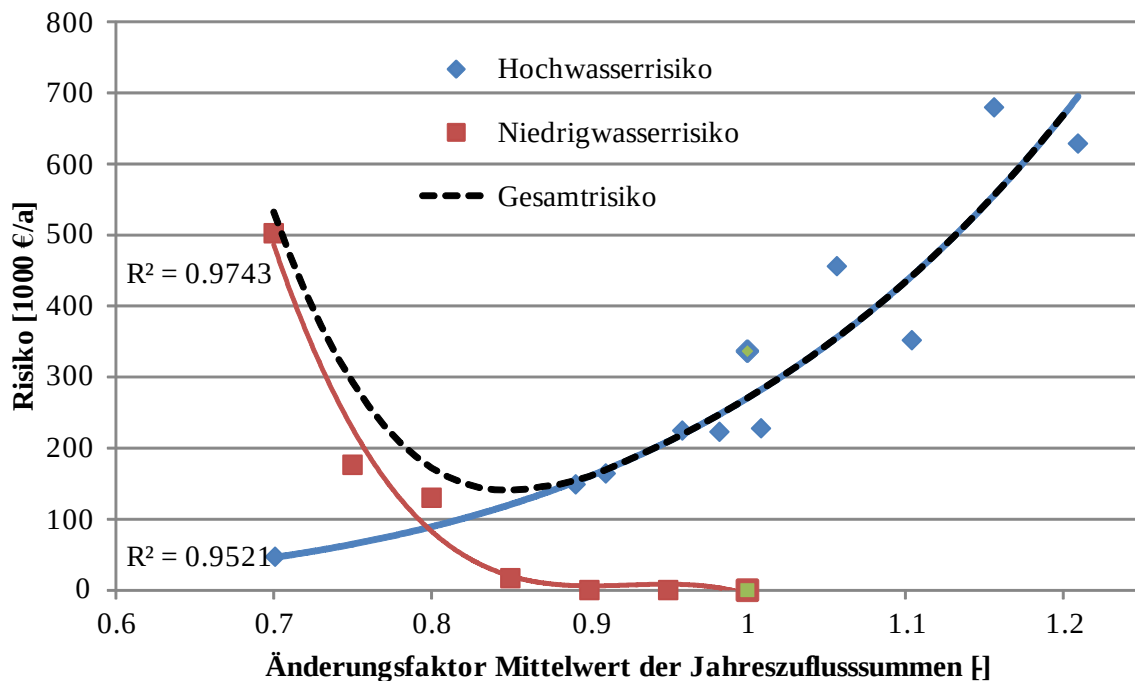


Abbildung 7-23 Klimaeinwirkungsfunktion wasserwirtschaftlicher Risiken (Referenz grün)

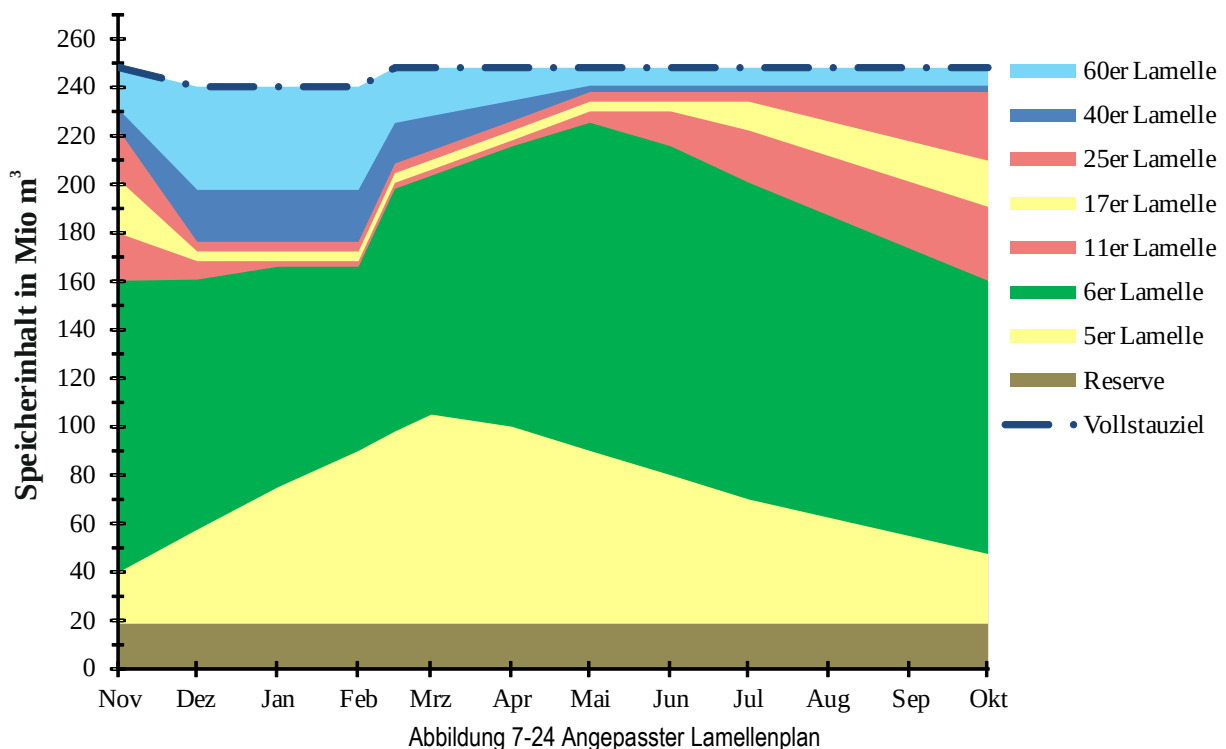
Da die Niedrigwasserbewirtschaftung bereits für die bestehende Steuerung große Reserven aufweisen und das Hochwasserrisiko maßgeblich auch von den nicht durch Talsperren beeinflussten Zuflüssen im Unterlauf geprägt wird, stellt sich nicht das erwartete Bild eines im Referenzzustand optimalen Systems ein, dessen Leistungsfähigkeit für Abweichungen vom Referenzzustand abnimmt. Die Leistungsfähigkeit ist bei einer Reduktion des Mittelwertes größer als im Referenzzustand, das wasserwirtschaftliche Risiko nimmt entsprechend den minimalen Wert an. Es ist jedoch anzumerken, dass gerade die Berechnung der Schäden durch Niedrigwasser, wie sie hier angewendet wurde, durch empirische Studien überprüft werden muss, bevor eine Abwägung zwischen Risiken aus Hochwasser und Risiken aus Niedrigwasser für eine konkrete Entscheidung Anwendung finden kann. Es kann hier jedoch gezeigt werden, wie sich die Robustheit eines wasserwirtschaftlichen Systems, sowohl für Hoch- als auch für Niedrigwasser, bewerten lässt.

7.3 Bewertung einer Maßnahme anhand der Robustheit bei Niedrigwasser

Während die Berechnung des Hochwasserrisikos auf bestehende Verfahren aufbaut und teilweise in der wasserwirtschaftlichen Praxis angewendet wird, wurde das Verfahren zur Bestimmung des Niedrigwasserrisikos in dieser Arbeit neu entwickelt. Das Anwendungsbeispiel konzentriert sich daher auf die Entwicklung einer Anpassungsmaßnahme gemäß dem in Kapitel 6 beschriebenen Vorgehen und die Bewertung der Robustheit anhand des Niedrigwasserrisikos. Auf eine erneute Berechnung des Hochwasserrisikos für die Maßnahme wird verzichtet. Stattdessen wird lediglich nachgewiesen, dass die Maßnahme die bestehenden Anforderungen an den Hochwasserschutz erfüllt.

Als Maßnahme zur Erhöhung der Robustheit des Systems gegenüber einem vergrößerten Niedrigwasserrisiko bei veränderten Zuflüssen wird eine Vereinfachung der bestehenden Steuerung untersucht. Die Maßnahme stellt einen Kompromiss dar im Sinne der in Kapitel 6 beschriebenen Abwägung bezüglich der erhöhten Robustheit der primären Ziele und der Einhaltung sekundärer Ziele. Primäres

Ziel soll hier die Einhaltung der Mindestabgabe von $5 \text{ m}^3/\text{s}$ ab sein. Als sekundäre Ziele werden die Dynamisierung des Abflusses und eine erhöhte, sommerliche Abgabe für die Freizeitnutzung betrachtet. Als Maßnahme soll zugunsten der Einhaltung der Mindestabgabe auf die Dynamisierung sowie die erhöhte Sommerabgabe verzichtet werden. Hierzu wird der dynamische Mittenbereich des Lamellenplanes durch eine große Lamelle mit einer Abgabe von $6 \text{ m}^3/\text{s}$ ersetzt. Die Steuerung der Abgabe aus Urft- und Rurtalsperre erfolgt somit nach dem in Abbildung 7-24 gezeigten Lamellenplan. Andere Regeln, wie die Abflussaufteilung aus Urft und Rur oder die Tendenzregel (siehe Kapitel 7.1.2) bleiben bestehen. Es wurden jedoch, um einem häufigen Überlaufen der Talsperren entgegen zu steuern, die Lamellengrenzen ab $11 \text{ m}^3/\text{s}$ um den Stauraum der Oleftalsperre von $19,3 \text{ hm}^3$ herabgesetzt. Der Stauinhalt der Oleftalsperre wird in allen Berechnungen vernachlässigt.



Durch diese Maßnahme kann der mittlere Speicherinhalt angehoben werden. Dies wird in Abbildung 7-25 deutlich, welche den mittleren Speicherinhalt bei bestehender und angepasster Steuerung im Referenzszenario gegenüberstellt. Während sich der Speicherstand bei der bestehenden Steuerung die meiste Zeit im Bereich der dynamischen Mittenlamelle bewegt und entsprechend teilweise hohe Abgaben getätigt werden, bewegt sich der Speicherstand nun mit der angepassten Steuerung die meiste Zeit weiterhin in diesem Bereich, es werden hier jedoch nur noch konstant $6 \text{ m}^3/\text{s}$ abgegeben.

Dass die Hochwasserschutzfunktion dennoch erfüllt wird, zeigt Abbildung 7-26 anhand der Dauerlinie der Abgabe am Systemabschluss. Sie verdeutlicht, dass im Referenzzustand keine erhöhten Abgaben getätigt werden. Der Referenzzustand beinhaltet das Bemessungshochwasser für die Rückhaltewirkung der Talsperren, sodass die Schlussfolgerung erlaubt ist, dass die Maßnahme die bestehenden Anforderungen an den Hochwasserschutz erfüllt. Die Dauerlinie der Abgabe zeigt zudem, wie sich die Abgabestufen verschieben. Mehr als die Hälfte der Zeit werden nun $6 \text{ m}^3/\text{s}$ abgegeben. Auch eine Regelabgabe von $11 \text{ m}^3/\text{s}$ kann länger als bei bestehender Steuerung gehalten werden, es kommt seltener zu Abgaben von $17 \text{ m}^3/\text{s}$ oder $25 \text{ m}^3/\text{s}$. Im Gegenzug ergeben sich bei der angepassten Steuerung häufiger Hochwasservorentlastungen mit einer Abgabe von $40 \text{ m}^3/\text{s}$. Bezugspegel für Abgaben größer

11 m³/s ist das Ablauf des Staubeckens Heimbach. Die dargestellte Dauerlinie des Abflusses aus dem Staubecken Obermaubach weist entsprechend für diesen Bereich höhere Werte auf.

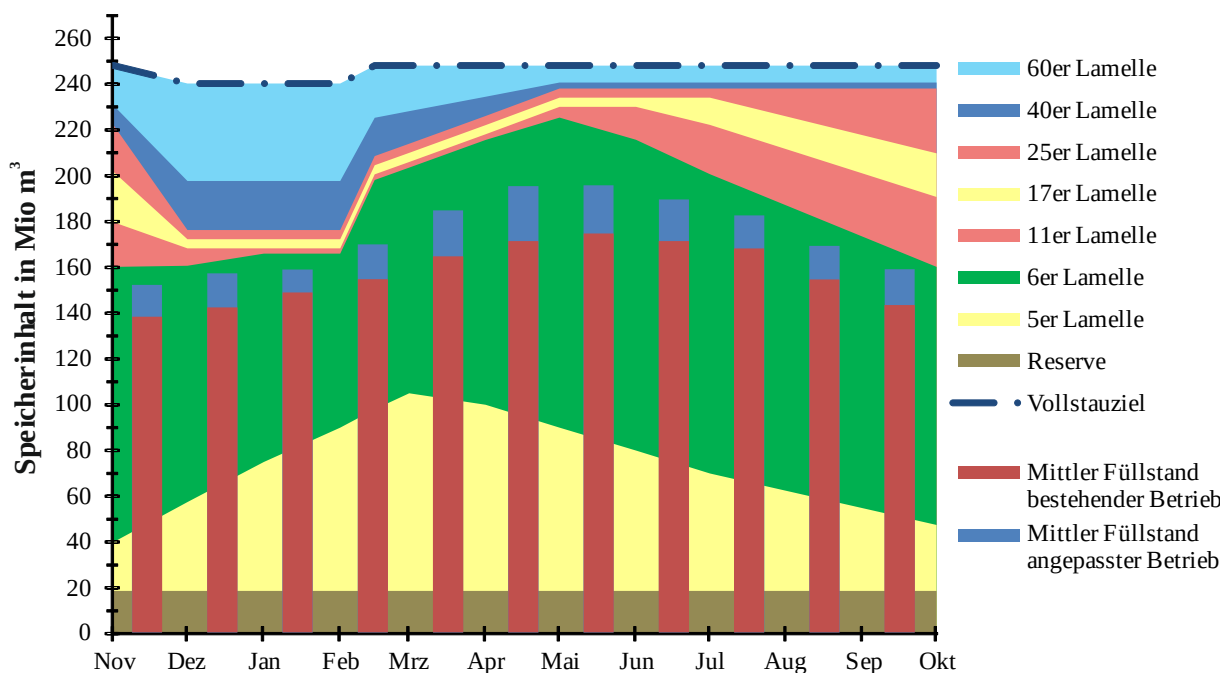


Abbildung 7-25 Angepasster Lamellenplan mit Darstellung der mittleren Füllstände

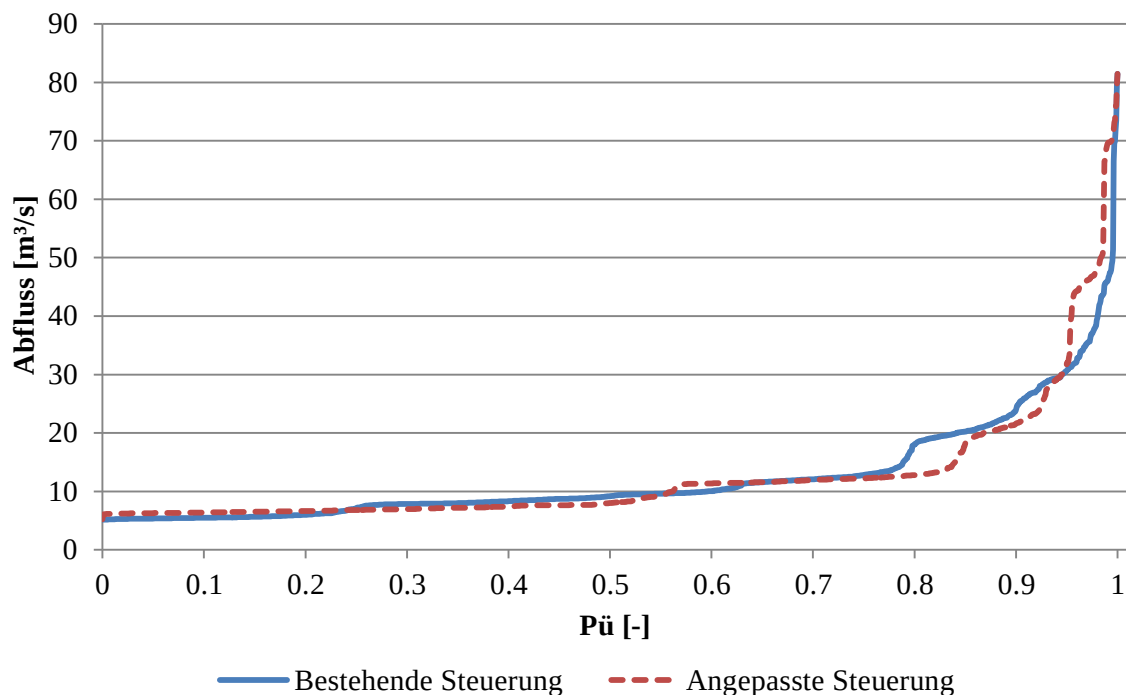


Abbildung 7-26 Dauerlinie der Abgabe aus dem Staubecken Obermaubach (Systemabschluss) im Referenzzeitraum (1970-2000) für bestehende und angepasste Steuerung

Die Konsequenzen der Maßnahme für das Niedrigwasserrisiko stellen Abbildung 7-27 bis Abbildung 7-30 dar. Ein Vergleich der durchgezogenen (mit Maßnahme) und gestrichelten (bestehende Steuerung) Linien einer Farbe stellen die Reduktion des Niedrigwasserrisikos für einen Klimazustand heraus. Der Übersichtlichkeit halber wurden in Abbildung 7-28 und Abbildung 7-29 lediglich die Klima-

einwirkungsfunktionen für eine deutliche Reduktion des Mittelwertes dargestellt, welche einen signifikanten Wert des Niedrigwasserrisikos aufweisen. Geringere Werte des Niedrigwasserrisikos bei klimabedingt veränderten Zuflussrandbedingungen bedeuten eine höhere Robustheit des Systems.

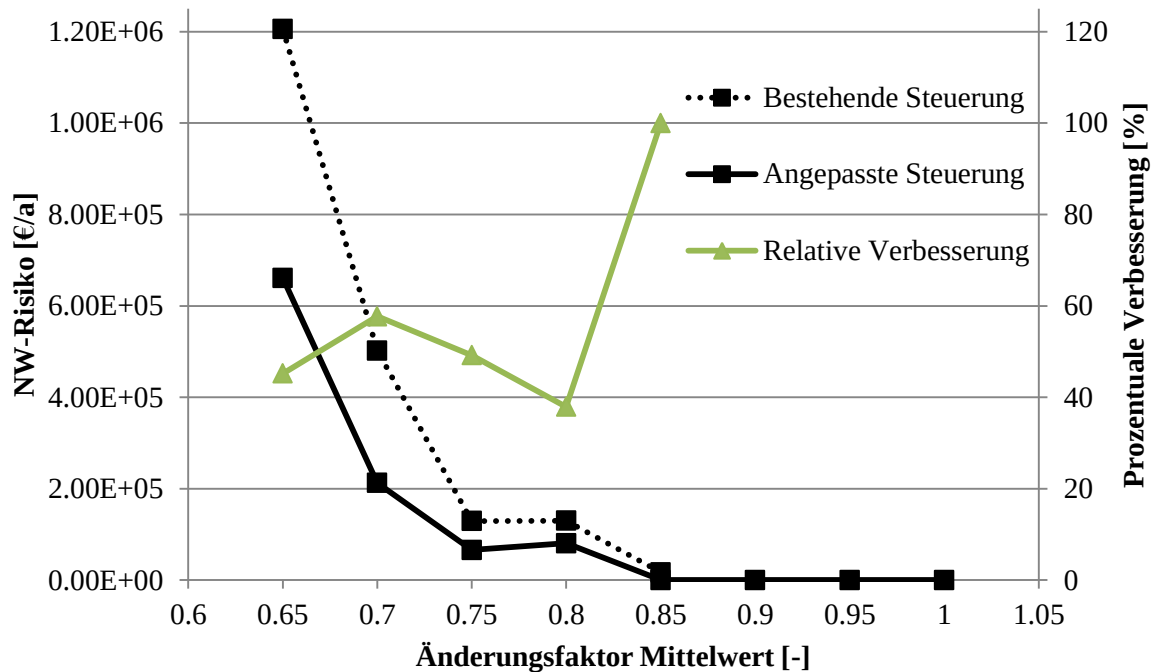


Abbildung 7-27 Verringerung des Niedrigwasserrisikos durch Maßnahme „Verzicht auf Dynamisierung“ (durchgezogene Linie) im Vergleich zur bestehenden Steuerung (gestrichelte Linie) für Änderung des Mittelwertes

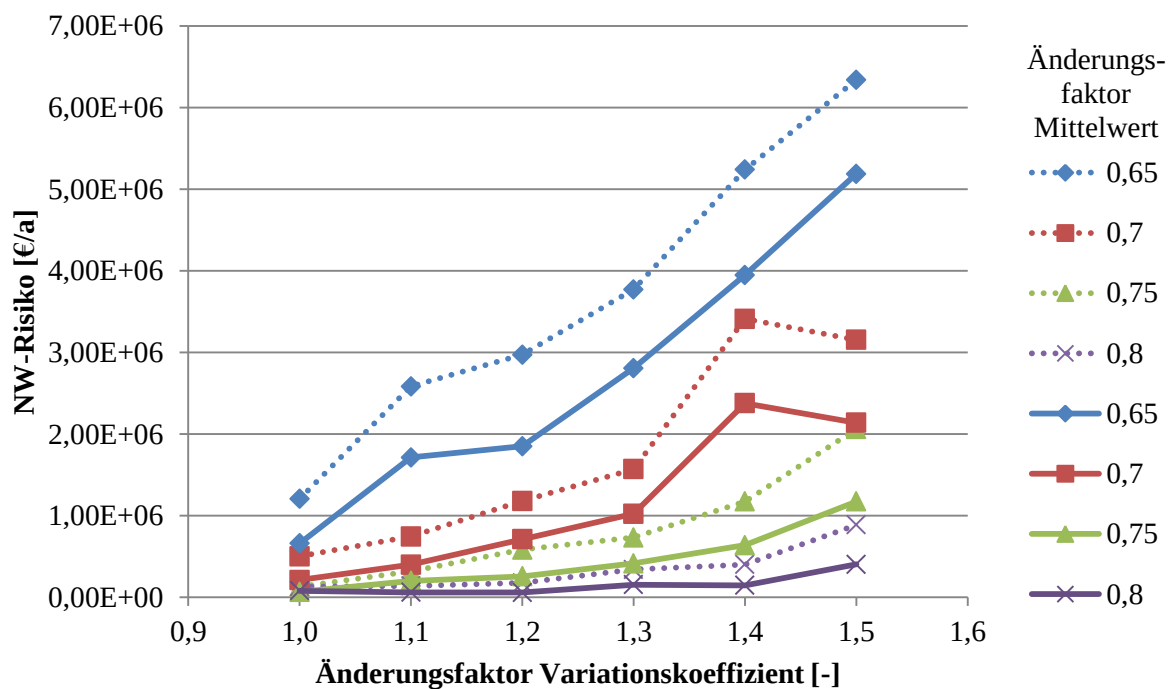


Abbildung 7-28 Verringerung des Niedrigwasserrisikos durch Maßnahme „Verzicht auf Dynamisierung“ (durchgezogene Linie) im Vergleich zur bestehenden Steuerung (gestrichelte Linie) für Änderung des Mittelwertes und des Variationskoeffizienten der jährlichen Zuflüsse

Die durch die Maßnahme erzielte Verbesserung zeigt sich sowohl gegenüber einer Reduktion des Mittelwertes als auch für einen Anstieg des Variationskoeffizienten (Abbildung 7-28) oder des Winteranteils (Abbildung 7-29). Insbesondere kann durch die Maßnahme der Bereich für den das Niedrigwasserrisiko Werte nahe Null annimmt vergrößert werden. Die Wirksamkeit der Maßnahme zeigt sich zudem über einen weiten Bereich der Änderung des Zuflusses: Wie Abbildung 7-27 darstellt, kann das Niedrigwasserrisiko bei einer Reduktion des Mittelwertes im Mittel auch für sehr trockene Verhältnisse um circa 50 % verringert werden. Für ein sehr stark belastetes System nimmt die Effektivität der Maßnahme bezogen auf die erzielte prozentuale Reduktion des Niedrigwasserrisikos jedoch ab. Während die Klimaeinwirkungsfunktionen für Anstieg des Variationskoeffizient und Winteranteil bei einer Reduktion des Mittelwertes auf 75 % der Werte des Referenzzeitraums (grüne Linien in Abbildung 7-28 und Abbildung 7-29) noch auseinanderlaufen, was eine gleichbleibende Effektivität anzeigt, verlaufen die Funktionen für einer weitere Reduktion des Mittelwertes (rote und blaue Linien) zunehmend parallel und die Verringerung des Niedrigwasserrisikos bleibt konstant.

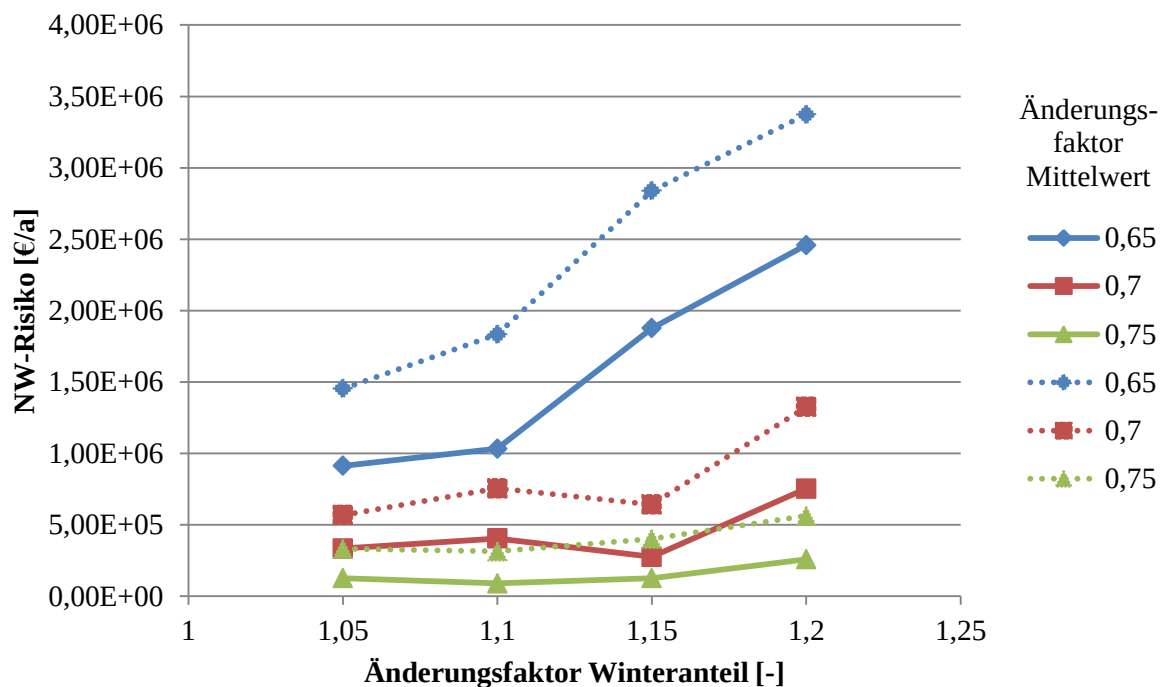


Abbildung 7-29 Verringerung des Niedrigwasserrisikos durch Maßnahme „Verzicht auf Dynamisierung“ (durchgezogene Linie) im Vergleich zur bestehenden Steuerung (gestrichelte Linie) für Änderung des Mittelwertes und des Winteranteils der jährlichen Zuflüsse

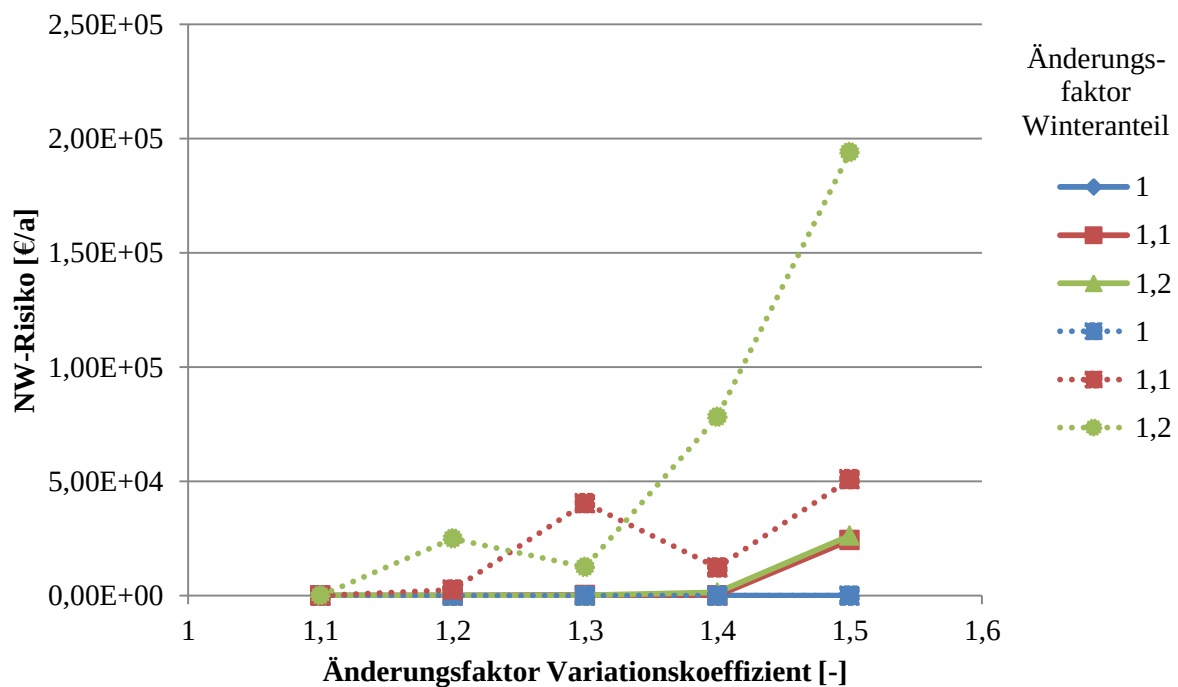


Abbildung 7-30 Verringerung des Niedrigwasserrisikos durch Maßnahme „Verzicht auf Dynamisierung“ (durchgezogene Linie) im Vergleich zur bestehenden Steuerung (gestrichelte Linie) für Änderung des Winteranteils und des Variationskoeffizienten der jährlichen Zuflüsse

Die Wirksamkeit der Maßnahme zur Reduktion des Niedrigwasserrisikos zeigt sich besonders für die untersuchten Änderungen der Eigenschaften des Zuflusses bei denen von keinerlei Veränderung des Mittelwertes jedoch einem gleichzeitigen Anstieg von Winteranteil und Variationskoeffizient ausgegangen wird. Wie Abbildung 7-30 verdeutlicht, kann hier das Niedrigwasserrisiko für nahezu die gesamte Bandbreite möglicher Änderungen auf Werte nahe Null reduziert werden.

Die untersuchte Maßnahme priorisiert die Niedrigwasseraufhöhung gegenüber einer Dynamisierung des Abflusses, mit dem Ziel die Robustheit der Niedrigwasseraufhöhung zu verbessern. Die für diese Maßnahme berechneten Klimaeinwirkungsfunktionen bezüglich Niedrigwasser zeigen, dass die Robustheit des Talsperrensystems gegenüber klimabedingten Zuflussänderungen erhöht werden kann.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Veränderliche klimatische Randbedingungen wirken sich direkt auf Bemessung und Betrieb von Talsperren aus. Erstes Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Quantifizierung des Einflusses von Veränderungen der klimatischen Randbedingungen auf die Leistungsfähigkeit von Talsperren. Eine solche Quantifizierung ist Voraussetzung, um das zweite Ziel der Arbeit zu erreichen: eine Methode zur Bewertung möglicher Anpassungen des Talsperrenbetriebs an veränderliche Randbedingungen zu entwickeln. Diese Bewertung erfolgt anhand der Robustheit als Fähigkeit des Talsperrenbetriebs die Leistungsfähigkeit für klimabedingte Veränderungen der Zuflussrandbedingungen zu bewahren.

Zunächst werden die Aufgaben von Talsperren wie Hochwasserrückhalt, Wasserversorgung, Niedrigwasseraufhöhung, Gewinnung elektrischer Energie aus Wasserkraft, Schifffahrt, Erhaltung von Ökosystemen und Freizeitnutzung im Einzelnen analysiert und zu den beiden Aufgabenbereichen Hochwasserschutz und Wasserbereitstellung zusammengefasst. Für beide Aufgabenbereiche kann eine Abschätzung der Zielerfüllung anhand der hydrologischen Sicherheit erfolgen. Die hydrologische Sicherheit gibt an, für welchen Anteil der Betriebsdauer die Abgaben aus der Talsperre den geforderten Werten entspricht. Die notwendige Speichergröße einer Talsperre wird so abhängig von den Bemessungswerten für hydrologische Sicherheit und Mindest- bzw. Maximalabgabe sowie den Zuflusseigenschaften bestimmt. Die gegenseitige Abhängigkeit der drei Größen Bemessungsabgabe, Speichergröße und hydrologische Sicherheit, wird somit von den klimatischen Bedingungen am Talsperrenstandort geprägt.

Betriebsregeln für einzelne oder im Verbund betriebene Talsperren müssen neben diesen Randbedingungen oftmals weitere Zielsetzungen berücksichtigen, wie sie sich aus den Anforderungen des Verbundbetriebs oder der Aufteilung des bereitgestellten Wassers auf einzelne Aufgaben ergeben. Die zur Herleitung solcher Betriebsregeln verwendeten Verfahren werden vorgestellt und bezüglich ihrer Eignung untersucht, als Grundlage für eine detaillierte Analyse des Talsperrenbetriebs dienen zu können. Während eine Vielzahl von Optimierungsverfahren geeignet ist, den Wasserwirtschaftler beim Entwurf von Betriebsregeln zu unterstützen, ist allein die Simulation des Talsperrenbetriebs auf Basis der mathematischen Abbildung der Betriebsregeln, Speicherzuflüsse und Abgaben in der Lage, eine detaillierte Analyse des Betriebs zu ermöglichen.

Wird eine solche detaillierte Simulation des Talsperrenbetriebs mit der umfassenden, probabilistischen Erfassung der Zuflussrandbedingungen kombiniert, kann die Leistungsfähigkeit einer Talsperre oder eines Talsperrensystems bewertet werden. Dabei sind die Konsequenzen möglicher Versagensfälle des Talsperrenbetriebs zu berücksichtigen. Die Leistungsfähigkeit ist größer je kleiner das Risiko ist, definiert als Produkt von Eintrittswahrscheinlichkeit und Konsequenzen. Zur Berechnung des Risikos sind also die Eintrittswahrscheinlichkeit und die Konsequenzen von Versagensereignissen zu ermitteln. Die Eintrittswahrscheinlichkeit von Versagensereignissen ergibt sich aus der umfassenden, probabilistischen Erfassung der Zuflussrandbedingungen. Hierbei wird aufgrund der unterschiedlichen Skalen von Hochwasser und Niedrigwasser wiederum zwischen Wasserbereitstellung und Hochwasserschutz unterschieden. Zur Quantifizierung der Leistungsfähigkeit des Hochwasserschutzes anhand des Hochwasserrisikos bestehen etablierte Verfahren (BACHMANN, 2012). Randbedingungen zur Berech-

nung des Hochwasserrisikos werden hier aus der Hochwassermerkmal-Simulation abgeleitet. Ein korrespondierendes Verfahren zur Berechnung des Niedrigwasserrisikos wird neu entwickelt. Die Eintrittswahrscheinlichkeit von Versagensereignissen der Wasserbereitstellung wird aus Langzeitsimulationen des Talsperrenbetriebs für synthetische Zuflusszeitreihen berechnet. Das hierfür verwendete Verfahren zur Generierung von Zeitreihen wird auf Basis einer Literaturrecherche ausgewählt und an die Anforderungen bezüglich der Abbildung auch veränderter klimatischer Bedingungen angepasst. Bestehende Ansätze zur Beschreibung der Konsequenzen eines Versagens der Wasserbereitstellung mittels allgemeiner Kennzahlen berücksichtigen die Dauer und die Fehlmenge repräsentativer Versagensereignisse. Dieser Ansatz wird aufgegriffen und die Konsequenz eines einzelnen Versagensereignisses als Produkt von Dauer, Fehlzeit und Anfälligkeit bestimmt. Die Berücksichtigung der Anfälligkeit mit der Einheit [$\text{€}/(\text{m}^3 \cdot \text{Tag})$] ermöglicht die Monetarisierung der Schäden eines Versagens der Wasserbereitstellung. Das Niedrigwasserrisiko ergibt sich dann analog zum Hochwasserrisiko als Produkt von Eintrittswahrscheinlichkeit und Konsequenz. Eine solche risikobasierte Bewertung der Leistungsfähigkeit bezüglich Wasserbereitstellung (Niedrigwasserrisiko) und Hochwasserschutz (Hochwasserrisiko) kann zum wasserwirtschaftlichen Gesamtrisiko aggregiert werden.

Mit Hilfe des wasserwirtschaftlichen Gesamtrisikos als ganzheitlicher Kennzahl zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Talsperren wird der Einfluss von Veränderungen der klimatischen Randbedingungen auf die Leistungsfähigkeit untersucht. Szenarien der Klimaänderung, wie sie aus den Ergebnissen von Klimamodellen abgeleitet werden können, sind geprägt von einer sehr großen Unsicherheit und können lediglich dazu verwendet werden, die Bandbreite der möglichen Klimaänderung abzuschätzen. Eine quasi-kontinuierliche Beschreibung der klimabedingten Änderung der Eigenschaften des Talsperrenzuflusses erlaubt dagegen die Bestimmung des funktionalen Zusammenhanges von Klimaänderung und Leistungsfähigkeit der Talsperren in einer Klimaeinwirkungsfunktion. Die quasi-kontinuierliche Änderung der Eigenschaften des Talsperrenzuflusses erfolgt für Niedrigwasser mit Hilfe des erarbeiteten Zeitreihengenerators. Für Hochwasser lassen sich analog die Parameter der Hochwassermerkmal-Simulation anpassen. Durch wiederholte Bestimmung des Hochwasserrisikos und des Niedrigwasserrisikos für verschiedene Änderungen der Zuflusseigenschaften wird der Verlauf der Klimaeinwirkungsfunktion bestimmt.

Diese Klimaeinwirkungsfunktion dient als Grundlage zur Bewertung möglicher Anpassungsmaßnahmen des Talsperrenbetriebs an die veränderlichen klimatischen Randbedingungen. Ziel möglicher Anpassungsmaßnahmen ist die Erhöhung der Robustheit der Leistungsfähigkeit der Talsperren gegenüber Klimaänderungen. Die Bemessung möglicher Maßnahmen baut auf einer Priorisierung der Aufgaben der Talsperren auf. Eine Literaturrecherche zeigt, dass Optimierungsverfahren eine Hilfestellung bei der Erarbeitung konkreter Anpassungsoptionen geben können. Die Bewertung der Robustheit von Maßnahmen kann nach der Klimaeinwirkungsfunktion des wasserwirtschaftlichen Gesamtrisikos für Hoch- und Niedrigwasser erfolgen.

Der letzte Teil der Arbeit widmet sich der Anwendung der entwickelten Methode zur Quantifizierung des Einflusses von Veränderungen der klimatischen Randbedingungen auf die Leistungsfähigkeit von Talsperren. Hierzu werden Klimaeinwirkungsfunktionen für das Rurtalsperrensystem bestimmt und beispielhaft die Wirksamkeit einer Maßnahme zur Verbesserung der Robustheit der Wasserbereitstellung untersucht.

8.2 Wichtige Erkenntnisse

Die Literaturrecherche bislang durchgeführter Untersuchungen zur Bestimmung des Einflusses von Klimaänderungen auf die Leistungsfähigkeit von Talsperren zeigt zwei Gruppen von Studien: Auf der einen Seite stehen Untersuchungen, welche mit sehr umfangreichen Modellketten, vom Emissionsszenario über ein Klimamodell bis hin zur Abbildung des Talsperrenbetriebs, die Auswirkungen von Klimaszenarien auf die Leistungsfähigkeit detailliert, aber eben nur für einzelne Szenarien betrachten. Auf der anderen Seite stehen Studien, die mit einfachen statistischen Verfahren Auswirkungen über die Bandbreite möglicher Klimaänderungen betrachten, dabei jedoch nicht in der Lage sind den Talsperrenbetrieb detailliert abzubilden. In der vorliegenden Arbeit werden beide Ansätze kombiniert und sowohl die Bandbreite möglicher Klimaänderungen untersucht als auch der Talsperrenbetrieb detailliert modelliert. Um diese Kombination zu erreichen, waren einige Neuentwicklungen notwendig. Diese zentralen Punkte der vorliegenden Arbeit sollen hier herausgestellt werden:

Zeitreihengenerierung

Um den Talsperrenbetrieb detailliert modellieren zu können, sind Zuflussrandbedingungen hoher zeitlicher Auflösung und langer Dauer erforderlich, welche die klimatischen Bedingungen am Standort der Talsperren repräsentieren. Der Ansatz, diese Randbedingungen statistisch zu generieren und dabei mögliche Klimaänderungen abzubilden, wird derzeit von mehreren Autoren verfolgt (NAZEMI ET AL., 2013; STAGGE & MOGLEN, 2013). Hier wird ein bestehendes nicht-parametrisches Verfahren zur Generierung wöchentlicher Abflüsse benachbarter Stationen (ILICH & DESPOTOVIC, 2008) erweitert, um mögliche Änderungen des Mittelwertes, des Variationskoeffizienten, der innerjährlichen Abflussverteilung (Änderung des Winteranteils) und der jährlichen Autokorrelation berücksichtigen zu können.

Niedrigwasserrisiko

Ausgehend von der Untersuchung bestehender Ansätze zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von Talsperren wird gefolgert, dass die Konsequenzen eines Versagens der Wasserbereitstellung von Fehlmenge und Dauer abhängen. Daraus wird eine Schadensfunktion abgeleitet, welche es ermöglicht, die monetären Schäden von Niedrigwasserereignissen zu ermitteln. Aus der Langzeitsimulation des Talsperrenbetriebs mit statistisch generierten Zuflüssen kann die Eintrittswahrscheinlichkeit von Versagensereignissen der Wasserbereitstellung bestimmt werden und so das Niedrigwasserrisiko berechnet werden. Damit ist auch für den Bereich der Trockenheit ein probabilistisches Verfahren zur Risikobewertung verfügbar.

Klimaeinwirkungsfunktion

Durch Zusammenfassen des Niedrigwasserrisikos mit dem nach bestehenden Methoden berechneten Hochwasserrisikos lässt sich das wasserwirtschaftliche Gesamtrisiko bestimmen. Werden die Risiken wiederholt für statistisch generierte Zuflüsse unterschiedlicher Klimaänderungen bestimmt, kann die Klimaeinwirkungsfunktion zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Änderungen des Zuflusses und der Leistungsfähigkeit ermittelt werden. Die Visualisierung dieses Zusammenhanges als Klimaeinwirkungsfunktion ermöglicht eine Bewertung der Robustheit der Talsperren, also eine Aussage dazu, wie empfindlich die Leistungsfähigkeit der Talsperren auf Änderungen des Zuflusses reagiert. So lassen sich verschiedene Betriebsregeln vergleichen und Anpassungsmaßnahmen zur Erhöhung der Robustheit gegenüber veränderlichen klimatischen Randbedingungen bewerten.

8.3 Zukünftiger Forschungsbedarf

Zwei Ergebnisse dieser Arbeit können als Ansatzpunkt weiterer Forschungen dienen: Zum einen die entwickelte Methode zur Bewertung der Leistungsfähigkeit, insbesondere bezüglich Niedrigwasser, und zum anderen die identifizierten besonderen Anforderungen an Anpassungsmaßnahmen.

Parameter des Talsperrenbetriebs

In der vorliegenden Arbeit wurden zukünftige Änderungen der Eigenschaften des Talsperrenzuflusses untersucht. Daneben haben aber selbstverständlich auch Änderungen des Wasserbedarfs bzw. der Hochwassergefährdung unterstrom von Talsperren durch Landnutzungsänderungen Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit und Robustheit der Anlagen. Zudem wurden die Speicherräume der Talsperren als unveränderlich angenommen. Die Speicherräume können jedoch im Laufe der Zeit durch Sedimentation signifikant abnehmen (WISSER ET AL., 2013), bzw. durch Zubau neuer Speicher zunehmen. Durch ergänzende Untersuchungen kann der Einfluss dieser hier als konstant angenommenen Parameter auf die Robustheit der Leistungsfähigkeit bewertet werden.

Niedrigwasserschäden

Um eine vergleichende Bewertung der Leistungsfähigkeit der Wasserbereitstellung aus Talsperren für verschiedene klimatische Randbedingungen und Betriebsregeln zu ermöglichen, wird in dieser Arbeit eine lineare Schadensfunktion mit den Parametern Dauer eines Versagens und Fehlmenge angesetzt. Diese Schadensfunktion basiert auf theoretischen, aus der Literatur abgeleiteten Überlegungen und muss in empirischen Studien bestätigt werden. Ebenso werden zur vergleichenden Analyse der Leistungsfähigkeit in der vorliegenden Arbeit alle Wassernutzer als ein virtueller Einzelnutzer mit gemittelter Anfälligkeit gegenüber Wasserdefiziten betrachtet. In weitergehenden Untersuchungen können Wassernutzer diskret und räumlich differenziert abgebildet werden. Dabei lassen sich unterschiedliche Anfälligkeiten, Priorisierungen und gegebenenfalls unterschiedliche Schadensfunktionen mit stärkerer Gewichtung der Fehlmenge oder der Dauer je nach Nutzung berücksichtigen.

Langfristige Vorhersagen des Zuflusses

Als Anpassungsmaßnahme an Klimaänderungen und zur Steigerung der Effizienz des Talsperrenbetriebs werden Echtzeitsteuerungen von Talsperren diskutiert, die auf exakte Vorhersagen des Zuflusses angewiesen sind. Gerade zur Beeinflussung von Niedrigwasserereignissen sind dabei mehrere Monate in die Zukunft reichende Vorhersagen erforderlich. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf sowohl auf den Feldern der Klimatologie und Meteorologie, um die Präzision langfristiger Vorhersagen zu verbessern, als auch von Seiten der Wasserwirtschaft, um derartige Vorhersagen in den Betrieb von Talsperren zu integrieren.

Automatische Optimierung

Es wurde dargelegt, dass Zielsetzung von Anpassungsmaßnahmen die Erhöhung der Robustheit des Talsperrenbetriebs sein muss und gezeigt, wie die Robustheit bewertet werden kann. Eine automatische Optimierung des Talsperrenbetriebs bezüglich des Ziels Robustheit kann die Erarbeitung von Anpassungsmaßnahmen unterstützen.

Literatur

- DIN 19700-11 (2004): Stauanlagen - Teil 11: Talsperren. Berlin: Beuth.
- DIN 2000 (2000): Zentrale Trinkwasserversorgung - Leitsätze für Anforderungen an Trinkwasser, Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung der Versorgungsanlagen - Technische Regel des DVGW. Berlin: Beuth Verlag.
- ADELOYE, A.J.; LALLEMAND, F. & MCMAHON, T.A. (2003): Regression models for within-year capacity adjustment in reservoir planning. *Hydrological Sciences Journal*, 48(4), S. 539–552.
- ANAGNOSTOPOULOS, G.G. ET AL. (2010): A comparison of local and aggregated climate model outputs with observed data. *Hydrological Sciences Journal*, 55(7), S. 1094–1110.
- ANANDHI, A. ET AL. (2011): Examination of change factor methodologies for climate change impact assessment. *Water Resources Research*, 47, S. W03501.
- ANGHILERI, D.; PIANOSI, F. & SONCINI-SESSA, R. (2011): A framework for the quantitative assessment of climate change impacts on water-related activities at the basin scale. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 8(1), S. 585–617.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT AQUA PLAN GMBH - HYDRO & METEO GMBH & CO KG - DR. PAPADAKIS GMBH (2011): Trendauswertungen für langjährige Zeitreihen des WVER. Bericht an den Wasserverband Eifel-Rur. Aachen, Lübeck, Hattingen.
- ASOKAN, S.M. & DUTTA, D. (2008): Analysis of water resources in the Mahanadi River Basin, India under projected climate conditions. *Hydrological Processes*, 22(18), S. 3589–3603.
- BACHMANN, D. (2012): Beitrag zur Entwicklung eines Entscheidungsunterstützungssystems zur Bewertung und Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen. Dissertation. Aachen: Rheinisch-Westfälische Technischen Hochschule Aachen.
- BDEW (2011): 121. Wasserstatistik Bundesrepublik Deutschland inklusive 119. und 120. Wasserstatistik. 1. Aufl. Bonn: Wirtschafts- u. Verlagsges. Gas u. Wasser. ISBN 9783895541803
- BELLMAN, R. (1957): Dynamic Programming 1. Aufl. Princeton, N.J.: Princeton University Press. ISBN 069107951X
- BENDER, J. & JENSEN, J. (2012): Ein erweitertes Verfahren zur Generierung synthetischer Bemessungshochwasserganglinien. *WasserWirtschaft*, 102(3), S. 35–39.
- BEN-HAIM, Y. (2001): Information-gap decision theory: decisions under severe uncertainty. Academic Press. ISBN 9780120882519

- BOWMAN, A.W. & AZZALINI, A. (1997): Applied Smoothing Techniques for Data Analysis: The Kernel Approach with S-Plus Illustrations. Oxford: Oxford University Press. ISBN 9780198523963
- BOX, G.E.P. & COX, D.R. (1964): An Analysis of Transformations. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 26(2), S. 211–252.
- BRASS, C. (2006): Betriebsoptimierung von Talsperrensystemen mittels Stochastisch Dynamischer Programmierung (SDP) unter Berücksichtigung veränderlicher Ziele und Randbedingungen. Dissertation. Bochum: Ruhr Universität Bochum.
- BREKKE, L.D. ET AL. (2009): Assessing reservoir operations risk under climate change. *Water Resources Research*, 45, S. W04411.
- BROWN, C.; GHILE, Y.; LAVERTY, M. & LI, K. (2012): Decision scaling: Linking bottom-up vulnerability analysis with climate projections in the water sector. *Water Resources Research*, 48(9), S. W09537.
- BURN, D.H. & SIMONOVIC, S. (1996): Sensitivity of reservoir operation performance to climatic change. *Water Resources Management*, 10(6), S. 463–478.
- BÜTTNER, M. (2008): Operative Bewirtschaftung einer Trinkwassertalsperre auf der Grundlage saisonaler Vorhersagen des Zuflusses. In *Saisonale Vorhersagesysteme in Meteorologie und Hydrologie: Kolloquium am 10. Juni 2008 in Koblenz*. Veranstaltungen. Koblenz: Bundesanstalt für Gewässerkunde, S. 53–61.
- CASTELLETTI, A.; PIANOSI, F. & SONCINI-SESSA, R. (2008): Water reservoir control under economic, social and environmental constraints. *Automatica*, 44(6), S. 1595–1607.
- CHANG, T.J. & STENSON, J.R. (1990): Is It Realistic to Define a 100-Year Drought for Water Management? *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 26(5), S. 823–829.
- CRYER, J.D. & CHAN, K.-S. (2008): Time Series Analysis: With Applications in R 2. ed. New York, NY: Springer. ISBN 9780387759586
- DANDY, G.C. & CRAWLEY, P.D. (1992): Application of linear programming to planning and operation of reservoir systems with water quality considerations. Adelaide: University of Adelaide, Department of Civil and Environmental Engineering.
- DESSAI, S. & HULME, M. (2007): Assessing the robustness of adaptation decisions to climate change uncertainties: A case study on water resources management in the East of England. *Global Environmental Change*, 17(1), S. 59–72.
- DEUTSCHER VERBAND FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU (1999): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen. Bonn: Wirtschafts- und Verl.-Ges. Gas und Wasser. ISBN 3895541109

- DITTMANN, R.; FROELICH, F.; POHL, R. & OSTROWSKI, M. (2009): Optimum multi-objective reservoir operation with emphasis on flood control and ecology. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9(6), S. 1973–1980.
- DROGUE, G. ET AL. (2010): Analysis of climate change, high-flows and lowflows scenarios on the Meuse basin. Metz: AMICE.
- DUCKSTEIN, L.; PLATE, E. & BENEDINI, M. (1987): Water engineering reliability and risk: A system framework. In *Engineering reliability and risk in water resources. Proceedings of the NATO Advanced Study Inst. on „Engineering Reliability and Risk in Water Resources“*, Tucson, Arizona, USA, May 19 - June 2, 1985. NATO ASI Series E, No. 124. Dordrecht u.a.: Nijhoff, S. 1–20.
- DWD (2008): Zusammenstellung von Wirkmodell-Eingangsdatensätzen für die Klimafolgenabschätzung.
- DYCK, S. (1980): Angewandte Hydrologie: Berechnung und Regelung des Durchflusses der Flüsse 2. Aufl. Berlin: Ernst. ISBN 9783433008812
- ECMWF (2012): The EUROSIP seasonal forecasting system.
- EUM, H. & SIMONOVIC, S. (2012): Assessment on variability of extreme climate events for the Upper Thames River basin in Canada. *Hydrological Processes*, 26(4), S. 485–499.
- EUM, H. & SIMONOVIC, S. (2010): Integrated Reservoir Management System for Adaptation to Climate Change: The Nakdong River Basin in Korea. *Water Resources Management*, 24(13), S. 3397–3417.
- EUM, H.; VASAN, A. & SIMONOVIC, S. (2012): Integrated Reservoir Management System for Flood Risk Assessment Under Climate Change. *Water Resources Management*, 26(13), S. 3785–3802.
- DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION (2007): Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken. *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften*, L 288, S. 27–34.
- DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION (1998): Richtlinie 98/83/EG des Rates vom 3. November 1998 über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch. *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften*, L 330, S. 32–54.
- FILLIBEN, J.J. (1975): The Probability Plot Correlation Coefficient Test for Normality. *Technometrics*, 17(1), S. 111–117.

- FOWLER, H.J.; BLENKINSOP, S. & TEBALDI, C. (2007): Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology*, 27(12), S. 1547–1578.
- FOWLER, H.J.; KILSBY, C.G. & O'CONNELL, P.E. (2003): Modeling the impacts of climatic change and variability on the reliability, resilience, and vulnerability of a water resource system. *Water Resources Research*, 39(8), S. 1222.
- GERB, H. & LANGE, J. (1992): Optimierung des Betriebsplanes für das Talsperrensystem der Nordeifel. *Forum Städte-Hygiene*, 43(Jan.), S. 17–22.
- GUIMARÃES, R.C. & SANTOS, E.G. (2011): Principles of Stochastic Generation of Hydrologic Time Series for Reservoir Planning and Design: Case Study. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(11), S. 891–898.
- HAMLET, A.F. (2011): Assessing water resources adaptive capacity to climate change impacts in the Pacific Northwest Region of North America. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15(5), S. 1427–1443.
- HASHIMOTO, T.; LOUCKS, D.P. & STEDINGER, J.R. (1982a): Robustness of water resources systems. *Water Resources Research*, 18(1), S. 21–26.
- HASHIMOTO, T.; STEDINGER, J.R. & LOUCKS, D.P. (1982b): Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation. *Water Resources Research*, 18(1), S. 14–20.
- HAUSMANN, B. & NACKEN, H. (2010): Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussregime der Rur. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 54(4), S. 254–257.
- HAUSMANN, B. & NACKEN, H. (2012): Possible impacts of climate change on the discharge regime of the river Rur. In *Proceedings of the 10th International Conference on Hydroinformatics*. HIC 2012: Understanding changing climate and environment and finding solutions. Hamburg.
- HAZEN, A. (1914): Storage to be Provided in Impounding Municipal Water Supply. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, LXXVII(1), S. 1539–1640.
- HENDERSON-SELLERS, A. (1993): An antipodean climate of uncertainty? *Climatic Change*, 25(3-4), S. 203–224.
- HERNÁNDEZ, J.G. (2011): Flood Management in a Complex River Basin with a Real-Time Decision Support System Based on Hydrological Forecasts. Dissertation. Lausanne: ENAC.
- HERNÁNDEZ, J.G.; SCHLEISS, A.J. & BOILLAT, J.-L. (2011): Decision Support System for the hydropower plants management: the MINERVE project. In *Proc. of International Symposium on Dams and Reservoirs under Changing Challenges*. London: CRC Press, Taylor & Francis Group, S. 459–468.

- HEUSCH, S. (2011): Modellprädiktive Abflusssteuerung mit hydrodynamischen Kanalnetzmodellen. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität.
- HIPEL, K.W. & MCLEOD, A.I. (1994): Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems. Amsterdam: Elsevier. ISBN 9780444892706
- HÖFER, J. ET AL. (2010): Hochwasserschutzwirkung der Talsperren im Einzugsgebiet der Ruhr bei ganzjährigem Betrieb unter Berücksichtigung klimabedingter Abflussänderungen einschließlich der konkurrierenden Nutzungen. Essen: Bericht des Karlsruher Instituts für Technologie und Deltares im Auftrag des Ruhrverbands.
- VAN DEN HURK, B. ET AL. (2006): KNMI climate change scenarios 2006 for the Netherlands. De Bilt: KNMI.
- ILICH, N. & DESPOTOVIC, J. (2008): A simple method for effective multi-site generation of stochastic hydrologic time series. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 22(2), S. 265–279.
- IMAN, R.L. & CONOVER, W.J. (1982): A distribution-free approach to inducing rank correlation among input variables. *Communications in Statistics - Simulation and Computation*, 11(3), S. 311–334.
- IPCC (2001): Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2007a): Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. Geneva, Switzerland: IPCC.
- IPCC (2007b): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-88009-1
- JACOB, D. ET AL. (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland: Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- JAIN, S. & EISCHEID, J.K. (2008): What a difference a century makes: Understanding the changing hydrologic regime and storage requirements in the Upper Colorado River basin. *Geophysical Research Letters*, 35(16), S. L16401.
- JAIN, S.K. & BHUNYA, P.K. (2008): Reliability, resilience and vulnerability of a multipurpose storage reservoir. *Hydrological Sciences Journal*, 53(2), S. 434–447.

- JINNO, K. (1995): Risk Assessment of a Water Supply System during Drought. *International Journal of Water Resources Development*, 11, S. 185–204.
- KACZMAREK, Z. (1990): Impact of Climatic Variations on Storage Reservoir Systems. Laxenburg, Austria: International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA).
- KAMRATH, P. (2010): Über die gekoppelte 1D- und 2D-Modellierung von Fließgewässern und Überflutungsflächen 1. Aufl. Aachen: Shaker. ISBN 3832294996
- KARAMOUZ, M. & HOUCK, M.H. (1987): Comparison of Stochastic and Deterministic Dynamic Programming for Reservoir Operating Rule Generation. *Journal of the American Water Resources Association*, 23(1), S. 1–9.
- KELMAN, J. ET AL. (1990): Sampling stochastic dynamic programming applied to reservoir operation. *Water Resources Research*, 26(3), S. 447–454.
- KENDALL, D.R. & DRACUP, J.A. (1991): A comparison of index-sequential and AR(1) generated hydrologic sequences. *Journal of Hydrology*, 122(1–4), S. 335–352.
- KJELDSEN, T.R. (2001): Sustainability assessment of water resources systems. Dissertation. Lyngby: Environment & Resources DTU. Technical University of Denmark.
- KJELDSEN, T.R. & ROSBJERG, D. (2004): Choice of reliability, resilience and vulnerability estimators for risk assessments of water resources systems. *Hydrological Sciences Journal*, 49(5), S. 755–767.
- KLEIN, B. (2009): Ermittlung von Ganglinien für die risikoorientierte Hochwasserbemessung von Talsperren. Dissertation. Bochum: Ruhr-Universität.
- KLEMEŠ, V. (1981): Applied Stochastic Theory of Storage in Evolution. In *Advances in Hydrosience*. New York: Academic Press, S. 79–141.
- KLEMEŠ, V. (1991): Design implications of climate change. In *Proc. 1st National Conf. on Climate Change and Water Res.* Washington D.C.: USACE, S. III–9 – III–19.
- KLEMEŠ, V. (1987): One hundred years of applied storage reservoir theory. *Water Resources Management*, 1(3), S. 159–175.
- KLIPSCH, J.D. & HURST, M.B. (2007): RTC-Tools a software package for modelling real-time control. Davis: US Army Corps of Engineers.
- KNIGHT, F.H. (1921): Risk, uncertainty and profit. Boston, New York, Houghton Mifflin Company.
- KOCH, H. ET AL. (2008a): Szenarioanalysen zur Wasserverfügbarkeit und zum Wasserbedarf im Einzugsgebiet der Mulde unter den Bedingungen des Globalen Wandels. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 52(6), S. 292–299.

- KOCH, H.; KALTOFEN, M.; KADEN, S. & GRÜNEWALD, U. (2008b): Auswirkungen des globalen Wandels auf die Wasserverfügbarkeit im tschechischen Elbegebiet. Potsdam: PIK.
- KORTELING, B.; DESSAI, S. & KAPELAN, Z. (2013): Using Information-Gap Decision Theory for Water Resources Planning Under Severe Uncertainty. *Water Resources Management*, 27(4), S. 1149–1172.
- KOUTSOYIANNIS, D. (2002): The Hurst phenomenon and fractional Gaussian noise made easy. *Hydrological Sciences Journal*, 47(4), S. 573–595.
- KRITSKIY, S.N. & MENKEL, M.F. (1959): Berechnung langfristiger Wassermengenbewirtschaftung für autokorrelierte Jahresabflüsse (Russisch). *Probl. Regul. Rechnogo Stoka, Vyp*, 8, S. 5–36.
- KRITSKIY, S.N. & MENKEL, M.F. (1935): Langfristige Abflussregulierung (Russisch). *Gidrotekhn. Stroit*, 11, S. 3–10.
- KRUEGER, I.; OTTOW, B. & FOURNIER, M. (2012): Towards a transnational roadmap for climate adaptation in the Meuse river basin. Delft: AMICE.
- KUFELD, M.; LANGE, J. & HAUSMANN, B. (2010): Das Einzugsgebiet der Rur: Ergebnisbericht der im Rahmen des AMICE– Projekts durchgeführten Literaturrecherche. Aachen: Institute of Hydraulic Engineering and Water Resources Management, RWTH Aachen University.
- KUNDZEWICZ, Z.W. ET AL. (2007): Freshwater resources and their management. In *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds. Cambridge, UK: Cambridge University Press, S. 173–210.
- KUNDZEWICZ, Z.W. ET AL. (2008): The implications of projected climate change for freshwater resources and their management. *Hydrological Sciences Journal*, 53(1), S. 3–10.
- KUNDZEWICZ, Z.W. & KINDLER, J. (1995): Multiple criteria for evaluation of reliability aspects of water resource systems. In *Modelling and Management of Sustainable Basin-scale Water Resource Systems*. Boulder Symposium, July 1995. Wallingford, UK: IAHS, S. 217–224.
- KUNDZEWICZ, Z.W. & STAKHIV, E.Z. (2010): Are climate models “ready for prime time” in water resources management applications, or is more research needed? *Hydrological Sciences Journal*, 55(7), S. 1085–1089.
- KUTSCHERA, G. (2008): Analyse der Unsicherheiten bei der Ermittlung der Schadenspotentiale infolge Überschwemmung. Aachen: Shaker. ISBN 9783832294984

- KWADIJK, J.C.J. ET AL. (2010): Using adaptation tipping points to prepare for climate change and sea level rise: a case study in the Netherlands. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(5), S. 729–740.
- LABADIE, J.W. (2004): Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(2), S. 93–111.
- LALL, U. & SHARMA, A. (1996): A Nearest Neighbor Bootstrap For Resampling Hydrologic Time Series. *Water Resources Research*, 32(3), S. 679–693.
- LANGE, J.; LOHR, H. & POLCZYK, H. (2010): Gekoppelte Bewirtschaftung von Wassermenge und Wassergüte an der Olefalsperre. *WasserWirtschaft*, 100(04), S. 45–47.
- LANUV NRW (2004): Ermittlung von Bemessungsabflüssen nach DIN 19700 in Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf: Landesumweltamt Nordrhein-Westfalen.
- LANUV NRW (2010a): Extremwertstatistische Untersuchung von Starkniederschlägen in NRW (E-xUS). Aachen.
- LANUV NRW (2010b): Klima und Klimawandel in Nordrhein-Westfalen - Daten und Hintergründe. Recklinghausen: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW.
- LEE, S.-Y.; FITZGERALD, C.J.; HAMLET, A.F. & BURGESS, S.J. (2011): Daily Time Step Refinement of Optimized Flood Control Rule Curves for a Global Warming Scenario. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(4), S. 309–317.
- LEE, S.-Y.; HAMLET, A.F.; FITZGERALD, C.J. & BURGESS, S.J. (2009): Optimized Flood Control in the Columbia River Basin for a Global Warming Scenario. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 135(6), S. 440–450.
- LEMPERIERE, F.; BOUTAGHOU, A.; PETTER, R. & FRANCO FILHO, J.M. (1998): Cost of flood control in dams - Review and recommendations. Paris: International Commission on Large Dams.
- LEMPERT, R.J. (2010): Robust Decision Making. In *Workshop on Nonstationarity, Hydrologic Frequency Analysis, and Water Management*. Colorado Water Institute Information Series. S. 198–209.
- LEMPERT, R.J.; POPPER, S.W. & BANKES, S.C. (2003): Shaping the next one hundred years: new methods for quantitative, long-term policy analysis and bibliography. Santa Monica, CA: RAND. ISBN 0-8330-3275-5
- LETTENMAIER, D.P. (2003): The Role of Climate in Water Resources Planning and Management. In *Water: Science, Policy, and Management: Challenges and Opportunities*. Water Resources Monograph. Washington D.C.: American Geophysical Union, S. 247–267.

- LI, L.; XU, H.; CHEN, X. & SIMONOVIC, S. (2010): Streamflow Forecast and Reservoir Operation Performance Assessment Under Climate Change. *Water Resources Management*, 24(1), S. 83–104.
- LIENHOOP, N. & ANSMANN, T. (2011): Valuing water level changes in reservoirs using two stated preference approaches: An exploration of validity. *Ecological Economics*, 70(7), S. 1250–1258.
- LINS, H.F. & STAKHIV, E.Z. (1998): Managing the Nations's Water in a Changing Climate. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(6), S. 1255–1264.
- LOHR, H. (2001): Simulation, Bewertung und Optimierung von Betriebsregeln für wasserwirtschaftliche Speichersysteme. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität.
- LOHR, H. & LEICHTFUß, A. (1999): Die stochastisch-deterministische Generierung extremer Abflußzustände. In *Bemessungsabflüsse für kleine Einzugsgebiete*. Kolloquium vom 4./5. März 1999 an der Universität Kaiserslautern. Kaiserslautern: Fachgebiet Wasserbau und Wasserwirtschaft, S. 287–300.
- LOUCKS, D.P. (1997): Quantifying trends in system sustainability. *Hydrological Sciences Journal*, 42(4), S. 513–530.
- LOUCKS, D.P. & VAN BEEK, E. (2005): Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications. Paris: UNESCO. ISBN 9789231039980
- LUCE, R.D. & RAÏFFA, H. (1957): Games and decisions: introduction and critical survey. Courier Dover Publications. ISBN 9780486659435
- LWG-NRW (1995): Wassergesetz für das Land Nordrhein-Westfalen - Landeswassergesetz - LWG.
- MANIAK, U. (2010): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN 978-3-642-05395-5
- MARAUN, D. ET AL. (2010): Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*, 48, S. RG3003.
- MATALAS, N.C. (1967): Mathematical assessment of synthetic hydrology. *Water Resources Research*, 3(4), S. 937–945.
- MATALAS, N.C. & FIERING, M.B. (1977): Water-Resource Systems Planning. In *Climate, Climatic Change, and Water Supply*. Studies in Geophysics. Washington D.C.: National Academies Press, S. 99–110.

- MCCARTHY, J.J. (2001): Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. ISBN 9780521015004
- MCLEOD, A.I.; YU, H. & MAHDI, E. (2012): Time Series Analysis with R. In TATA SUBBA RAO, S. S. R. AND C. R. R. (Hrsg.) *Time Series Analysis: Methods and Applications*. Amsterdam: Elsevier, S. 661–712.
- MCMAHON, T.A. & ADELOYE, A.J. (2005): Water Resources Yield. Highlands Ranch, Colorado: Water Resources Publication. ISBN 9781887201384
- MCMAHON, T.A.; ADELOYE, A.J. & ZHOU, S.-L. (2006): Understanding performance measures of reservoirs. *Journal of Hydrology*, 324(1-4), S. 359–382.
- MCMAHON, T.A.; PEEL, M.C.; VOGEL, R.M. & PEGRAM, G.G.S. (2007a): Global streamflows – Part 3: Country and climate zone characteristics. *Journal of Hydrology*, 347(3–4), S. 272–291.
- MCMAHON, T.A.; PEGRAM, G.G.S.; VOGEL, R.M. & PEEL, M.C. (2007b): Review of Gould–Dincer reservoir storage–yield–reliability estimates. *Advances in Water Resources*, 30(9), S. 1873–1882.
- MCMAHON, T.A.; PEGRAM, G.G.S.; VOGEL, R.M. & PEEL, M.C. (2007c): Revisiting reservoir storage–yield relationships using a global streamflow database. *Advances in Water Resources*, 30(8), S. 1858–1872.
- MENS, M.J.P.; KLIJN, F.; DE BRUIJN, K.M. & VAN BEEK, E. (2011): The meaning of system robustness for flood risk management. *Environmental Science & Policy*, 14(8), S. 1121–1131.
- MERZ, B. ET AL. (2012): Klimawandel und Wasserhaushalt. In HÜTTL, R. F. & BENS, O. (Hrsg.) *Georessource Wasser - Herausforderung Globaler Wandel*. acatech STUDIE. Berlin Heidelberg: Springer, S. 24–90.
- MERZ, B.; HALL, J.; DISSE, M. & SCHUMANN, A.H. (2010): Fluvial flood risk management in a changing world. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10(3), S. 509–527.
- MILLY, P.C.D. ET AL. (2008): Stationarity Is Dead: Whither Water Management? *Science*, 319(5863), S. 573–574.
- MORGENSCHWEIS, G. (2001): Echtzeitbewirtschaftung eines Flussgebietes am Beispiel der Ruhr. *WasserWirtschaft*, 91(12), S. 575–581.
- MORGENSCHWEIS, G.; ZUR STRASSEN, G. & SCHWANENBERG, D. (2007): Abschätzung der Auswirkung von möglichen Klimaänderungen auf die Bewirtschaftung der Talsperren im Einzugsgebiet der Ruhr. Essen: Ruhrverband.

- MORGENSCHWEIS, G.; ZUR STRASSEN, G. & SCHWANENBERG, D. (2006): Langzeitbewirtschaftungsanalyse für das Talsperrensystem im Einzugsgebiet der Ruhr. Essen: Ruhrverband.
- MOY, W.-S.; COHON, J.L. & REVELLE, C.S. (1986): A Programming Model for Analysis of the Reliability, Resilience, and Vulnerability of a Water Supply Reservoir. *Water Resources Research*, 22(4), S. 489–498.
- MUERTH, M.; GAUVIN ST-DENIS, B.; LUDWIG, R. & CAYA, D. (2012): Evaluation of different sources of uncertainty in climate change impact research using a hydro-climatic model ensemble. In International Congress on Environmental Modelling and Software (iEMSs). Leipzig, Deutschland.
- MUSCHALLA, D. (2006): Evolutionäre multikriterielle Optimierung komplexer wasserwirtschaftlicher Systeme. Dissertation. Darmstadt: Technische Universität.
- NACHÁZEL, K. (1965): Correlation Relations in the Regulation of Discharge from Reservoir (Diplomarbeit) (in Tschechisch). Prag: ČVUT.
- NANDALAL, K.D.W. & BOGÁRDI, J. (2007): Dynamic programming based operation of reservoirs: applicability and limits. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 9780521874083
- NAWAZ, N.R. & ADELOYE, A.J. (2006): Monte Carlo Assessment of Sampling Uncertainty of Climate Change Impacts on Water Resources Yield in Yorkshire, England. *Climatic Change*, 78(2-4), S. 257–292.
- NAZEMI, A.; WHEATER, H.S.; CHUN, KWOK P. & ELSHORBAGY, A. (2013): A stochastic reconstruction framework for analysis of water resource system vulnerability to climate-induced changes in river flow regime. *Water Resources Research*, 49(1), S. 291–305.
- NEEDHAM, J.T.; WATKINS JR., D.W.; LUND, J.R. & NANDA, S.K. (2000): Linear Programming for Flood Control in the Iowa and Des Moines Rivers. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126(3), S. 118–127.
- NĚMEC, J. & SCHAAKE, J. (1982): Sensitivity of water resource systems to climate variation. *Hydrological Sciences Journal*, 27(3), S. 327–343.
- NWG (2010): Niedersächsisches Wassergesetz.
- OLIVEIRA, R. & LOUCKS, D.P. (1997): Operating rules for multireservoir systems. *Water Resources Research*, 33(4), S. 839–852.
- PAYNE, J.T. ET AL. (2004): Mitigating the Effects of Climate Change on the Water Resources of the Columbia River Basin. *Climatic Change*, 62(1), S. 233–256.
- VAN PELT, S.C. ET AL. (2012): Future changes in extreme precipitation in the Rhine basin based on global and regional climate model simulations. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16(12), S. 4517–4530.

- PHILBRICK, C.R.J. & KITANIDIS, P.K. (1999): Limitations of Deterministic Optimization Applied to Reservoir Operations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125(3), S. 135–142.
- PRIEN, K.-J. & THIELE, W. (1994): Ein stochastisches Simulationsmodell für die Echtzeitsteuerung von Talsperren. *Wasser & Boden*, 46(9), S. 24–29.
- PRUDHOMME, C. ET AL. (2010): Scenario-neutral approach to climate change impact studies: Application to flood risk. *Journal of Hydrology*, 390(3–4), S. 198–209.
- PRUDHOMME, CHRISTEL; JAKOB, D. & SVENSSON, C. (2003): Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK catchments. *Journal of Hydrology*, 277(1–2), S. 1–23.
- RAJE, D. & MUJUMDAR, P.P. (2010): Reservoir performance under uncertainty in hydrologic impacts of climate change. *Advances in Water Resources*, 33(3), S. 312–326.
- RANI, D. & MOREIRA, M.M. (2009): Simulation–Optimization Modeling: A Survey and Potential Application in Reservoir Systems Operation. *Water Resources Management*, 24(6), S. 1107–1138.
- RAUSCHENBACH, T. & WERNSTEDT, J. (2006): Kybernetische Methoden für die optimale nachhaltige Führung komplexer wasserwirtschaftlicher Systeme – Strategien, Modelle, Anwendungen. *at - Automatisierungstechnik*, 54(11), S. 556–565.
- REZNICEK, K.K. & SIMONOVIC, S. (1989): Practical application of successive linear programming for reservoir operations at Manitoba Hydro. In *Closing the Gap Between Theory and Practice*. Baltimore: IAHS Press, S. 251–262.
- RIEBSAME, W. (1988): Adjusting water resources management to climate change. *Climatic Change*, 13(1), S. 69–97.
- RIPPL, W. (1883): The capacity of storage reservoirs for water supply. *Minutes of the Proceedings (Institution of Civil Engineers)*, 71(1883), S. 270–278.
- RIßLER, P. (1999): Talsperrenpraxis. München u.a.: Oldenbourg. ISBN 3-486-26428-1
- ROSSI, G.; CAPORALI, E. & GARROTE, L. (2012): Definition of Risk Indicators for Reservoirs Management Optimization. *Water Resources Management*, 26(4), S. 981–996.
- SÄCHSWG (2008): Das Sächsische Wassergesetz und die Sächsische Wasserzuständigkeitsverordnung.
- SALAS, J.D. (1980): Applied modeling of hydrologic time series. Littleton, Colorado: Water Resources Publication. ISBN 9780918334374
- SCHRAMM, J. (1956): Die Talsperren der Eifel. Düren: Eifelverein.

- SCHUMANN, A. H. (Hrsg.) (2009): Integrative Nutzung des technischen Hochwasserrückhalts in Poldern und Talsperren am Beispiel des Flussgebiets der Unstrut. Bochum: Lehrstuhl für Hydrologie, Wasserwirtschaft und Umwelttechnik.
- SCHUMANN, A.H. (1997): Impact of climatic variations on water supply from reservoirs with special reference to droughts. In *Sustainability of Water Resources under Increasing Uncertainty*. Rabat Symposium S1, April 1997. IAHS, S. 153–162.
- SCHUMANN, A.H. & SIEBERT, H.U. (2004): Hochwasserbemessung von Talsperren – Lehren aus dem Augsthochwasser 2002 in Sachsen. In 13. Deutsches Talsperrensymposium „Talsperren im 21. Jahrhundert“. Weimar: DTK.
- SCHÜTTRUMPF, H.; LENNARTZ, G.; HILL, P. & SCHUMANN, A.H. (2009): Entwicklung eines risikobasierten Entscheidungshilfesystems zur Identifikation von Schutzmaßnahmen bei extremen Hochwasserereignissen. Aachen: Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen.
- SCHWANENBERG, D. & BECKER, B. (2012): RTC-Tools: a software package for modelling real-time control. Delft: Deltares.
- SCHWARZ, H.E. (1977): Climatic Change and Water Supply: How Sensitive is the Northeast? In *Climate, Climatic Change, and Water Supply*. Studies in Geophysics. Washington D.C.: National Academies Press, S. 111–120.
- SHARMA, A.; TARBOTON, D.G. & LALL, U. (1997): Streamflow simulation: A nonparametric approach. *Water Resources Research*, 33(2), S. 291–308.
- SIMONOVIC, S. (2010): A new methodology for the assessment of climate change impacts on a watershed scale. *Current Science*, 98(8), S. 1047–1055.
- SINABA, B. ET AL. (2013): Impact of future floods and low flows on the economy in the Meuse basin. In *Transboundary Water Management in a Changing Climate*. AMICE Final. Sedan: CRC Press, Taylor & Francis Group, S. 29–36.
- SPEKAT, A.; ENKE, W. & KREIENKAMP, F. (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2: Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes ; FuE-Vorhaben, Förderkennzeichen 204 41 138. Dessau: Umweltbundesamt.
- SRIKANTHAN, R. & MCMAHON, T.A. (1999): Stochastic generation of annual, monthly and daily climate data: A review. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 5(4), S. 653–670.

- SRIKANTHAN, R. & MCMAHON, T.A. (1982): Stochastic Generation of Monthly Streamflows. *Journal of the Hydraulics Division*, 108(3), S. 419–441.
- STAGGE, J.H. & MOGLEN, G.E. (2013): A nonparametric stochastic method for generating daily climate-adjusted streamflows. *Water Resources Research*, Im Druck, S. n/a.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2009): Erhebung der nichtöffentlichen Wasserversorgung und Abwasserentsorgung. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt.
- STEINSCHNEIDER, S. & BROWN, C. (2012): Dynamic reservoir management with real-option risk hedging as a robust adaptation to nonstationary climate. *Water Resources Research*, 48, S. W05524.
- SVANIDZE, G.G. (1980): Mathematical modeling of hydrologic series for hydroelectric and water resources computations. Fort Collins, Colorado: Water Resources Publications. ISBN 9780918334329
- SYDRO (2013): Persönliche Korrespondenz.
- TAKEUCHI, K.H. (1998): Sustainable reservoir development and management. by the IAHS ICWRS project team ; (July 1993 - July 1998). Wallingford, UK: IAHS Press. ISBN 1-901502-60-0
- TEUTSCHBEIN, C.; WETTERHALL, FREDRIK & SEIBERT, J. (2011): Evaluation of different downscaling techniques for hydrological climate-change impact studies at the catchment scale. *Climate Dynamics*.
- THOMAS, H.A. & FIERING, M.B. (1962): Mathematical synthesis of streamflow sequences for the analysis of river basins by simulation. In *Design of water-resource systems: new techniques for relating economic objectives, engineering analysis, and governmental planning*. Harvard University Press.
- TRIANTAPHYLLOU, E. (2000): Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study 1. Aufl. Springer US. ISBN 0792366077
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (1971): HEC-4 Monthly Streamflow Simulation. Davis: Hydrologic Engineering Center.
- UNDHA (1992): Internationally agreed glossary of basic terms related to Disaster Management. Geneva, Switzerland: United Nations Department of Humanitarian Affairs.
- VALENCIA, R.D. & SCHAAKE, J. (1973): Disaggregation processes in stochastic hydrology. *Water Resources Research*, 9(3), S. 580–585.
- VEDULA, S.; MUJUMDAR, P.P. & CHANDRA SEKHAR, G. (2005): Conjunctive use modeling for multipurpose irrigation. *Agricultural Water Management*, 73(3), S. 193–221.

- VICUNA, S. ET AL. (2010): Basin-scale water system operations with uncertain future climate conditions: Methodology and case studies. *Water Resources Research*, 46, S. W04505.
- VKU, A., BDEW, DBVW, DVGW, DWA (2011): Branchenbild der deutschen Wasserwirtschaft 2011. Bonn: Wirtschafts- u. Verlagsges. Gas u. Wasser. ISBN 9783895541827
- VOGEL, R.M.; BELL, C.J.; SURESH, R.R. & FENNESSEY, N. (2001): Regional assessment of the impact of climate change on the yield of water supply systems. In *Risk, Reliability, Uncertainty and Robustness of Water Resources Systems*. New York: Cambridge University Press, S. 101–110.
- VOGEL, R.M. & BOLOGNESE, R.A. (1995): Storage-Reliability-Resilience-Yield Relations for Over-Year Water Supply Systems. *Water Resources Research*, 31(3), S. 645–654.
- VOGEL, R.M.; LANE, M.; RAVINDIRAN, R.S. & KIRSHEN, P. (1999): Storage Reservoir Behavior in the United States. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125(5), S. 245–254.
- VOGEL, R.M. & MCMAHON, T.A. (1996): Approximate reliability and resilience indices of over-year reservoirs fed by AR(1) Gamma and normal flows. *Hydrological Sciences Journal*, 41, S. 75–96.
- VOGEL, R.M. & STEDINGER, J.R. (1988): The value of stochastic streamflow models in overyear reservoir design applications. *Water Resources Research*, 24(9), S. 1483–1490.
- VOTRUBA, L. & BROŽA, V. (1989): Water management in reservoirs. Elsevier. ISBN 9780444989338
- WALLIS, J.R. & MANDELBROT, B.B. (1968): Self-similar synthetic hydrology. In *The Use of Analog and Digital Computers in Hydrology*. IAHS Red Book. Tuscon Symposium a contribution to the International Hydrological Decade. Gentbrugge: IASH/AIHS, S. 738–755.
- WEISSTEIN, E.W. (2013): Variance. In: Wolfram MathWorld. <http://mathworld.wolfram.com/Variance.html>.
- WERNER, P.C. & GERSTENGARBE, F.-W. (1997): Proposal for the development of climate scenarios. *Climate Research*, 08(3), S. 171–182.
- WHO (2008): Guidelines for Drinking-water Quality 3rd Aufl. Geneva: WHO Press. ISBN 978 92 4 154761 1
- WIGLEY, T.M.L. & RAPER, S.C.B. (2001): Interpretation of High Projections for Global-Mean Warming. *Science*, 293(5529), S. 451–454.
- WILBY, R.L. & DESSAI, S. (2010): Robust adaptation to climate change. *Weather*, 65(7), S. 180–185.
- WISSER, D.; FROLKING, S.; HAGEN, S. & BIERKENS, M.F.P. (2013): Beyond peak reservoir storage? A global estimate of declining water storage capacity in large reservoirs. *Water Resources Research*, Im Druck, S. n/a.

- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (Hrsg.) (2003): *Climate: Into the 21st Century*. Cambridge University Press. ISBN 9780521792028
- YAO, H. & GEORGAKAKOS, A. (2001): Assessment of Folsom Lake response to historical and potential future climate scenarios: 2. Reservoir management. *Journal of Hydrology*, 249(1–4), S. 176–196.
- YOON, K.P. & HWANG, C. (1995): *Multiple attribute decision making: An introduction*. Thousand Oaks, Calif. u.a.: Sage. ISBN 0803954867
- YOSSEF, N.C. ET AL. (2013): Skill of a global seasonal ensemble streamflow forecasting system. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*. EGU General Assembly Conference Abstracts. S. 4273.
- YOUNG, G.K. & PISANO, W.C. (1968): Operational Hydrology Using Residuals. *Journal of the Hydraulics Division*, 94(4), S. 909–924.
- ZONGXUE, X. ET AL. (1998): Performance Risk Analysis for Fukuoka Water Supply System. *Water Resources Management*, 12(1), S. 13–30.

Glossar

Autokorrelationskoeffizient Der Autokorrelationskoeffizient ist ein Maß dafür, wie stark eine Zeitreihe mit sich selbst korreliert ist. Hohe Werte des Autokorrelationskoeffizienten bedeuten, dass in der betrachteten Zeitreihe häufig auf hohe Werte wieder hohe Werte folgen und auf niedrige Werte wieder niedrige. Man spricht in diesem Zusammenhang auch vom langem Gedächtnis (hohe Autokorrelation) einer Zeitreihe. In dieser Arbeit wird insbesondere die Autokorrelation jährlicher Abflusswerte untersucht. Hierbei kommt die Formel zur Bestimmung des empirischen Korrelationskoeffizienten zur Anwendung (nach DYCK, 1980):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

mit $\bar{x}$ und $\bar{y}$ den empirischen Mittelwerten der verschobenen Zeitreihe. Werden beispielsweise $n+1 = 30$ Jahre betrachtet und soll der lag 1 Autokorrelationskoeffizient berechnet werden, ist x die Reihe der ersten 29 Jahre und y die Reihe der 29 Jahre von Jahr 2 bis 30.

Bestimmtheitsmaß Beschreibt, wie gut eine mittels Regressionsanalyse (siehe unten) bestimmte analytische Funktion sich diskreten Messwerten oder Simulationsergebnissen annähert. Das Bestimmtheitsmaß nimmt Werte zwischen 0 und 1 an, wobei ein Wert von 1 eine perfekte Übereinstimmung anzeigt. Das Bestimmtheitsmaß R^2 berechnet sich nach:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum e_i^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2}$$

mit e_i der Abweichung zwischen Stichprobenwert und analytisch berechnetem Wert, $\bar{y}$ dem empirischen Mittelwert der Stichprobenwerte y_i .

Dichtefunktion	Die Dichtefunktion oder auch Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion beschreibt die relative Wahrscheinlichkeit, dass eine Zufallsvariable einen gegebenen Wert annimmt. Relative Wahrscheinlichkeit bedeutet, dass das Integral der Dichtefunktion über den Wertebereich der Zufallsvariablen den Wert Eins hat. Dieses Integral ist die Verteilungsfunktion. Der Wert der Zufallsvariablen, für den die Dichtefunktion maximal ist, entspricht somit dem am häufigsten auftretenden Wert. Ist eine Zufallsvariable gleichverteilt, ist dagegen die Dichtefunktion konstant, da alle Werte gleich wahrscheinlich sind. Abbildung 4-11 zeigt beispielhaft die Dichtefunktion und Verteilungsfunktion wöchentlicher Abflüsse.
Korrelation	Die Korrelation beschreibt die Abhängigkeit zweier Zufallsvariablen voneinander. In der Hydrologie findet als Maß für die Korrelation oft der PEARSON oder Produkt-Moment-Korrelationskoeffizient Anwendung, welcher die lineare Abhängigkeit der Werte beider Zufallsvariablen beschreibt (SALAS, 1980). Die Formel zur Berechnung dieses Koeffizienten entspricht der oben bei Autokorrelation gezeigten. Werden statt den Werten der Zufallsvariablen ihr Rang verwendet, spricht man vom SPEARMAN oder Rang-Korrelationskoeffizienten.
Kovarianz	Kovarianz beschreibt die lineare Beziehung zwischen zwei Zufallsvariablen x und y. Zur Bestimmung der empirischen Kovarianz Cov kann folgende Gleichung verwendet werden: $Cov = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$ mit $\bar{x}$ und $\bar{y}$ den empirischen Mittelwerten der zwei Zufallsvariablen x und y mit je n Stichprobenwerten.
Median	Siehe Verteilungsfunktion.
Mittelwert	Als Schätzwert für den Erwartungswert einer Zufallsvariablen x wird allgemein der Mittelwert verwendet. Der empirische Mittelwert $\bar{x}$ aus n bekannten Werten von x berechnet sich nach folgender Gleichung: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$

Persistenz Die Persistenz oder das Beharrungsvermögen des Abflusses bezeichnet die Eigenschaft, dass hohe oder niedrige Abflüsse oftmals über einen längeren Zeitraum anhalten. Ein Maß für die Persistenz einer Zeitreihe ist die Autokorrelation (siehe oben).

Regressionsanalyse Die Regressionsanalyse bestimmt einen funktionalen Zusammenhang zwischen einer abhängigen und einer oder mehreren unabhängigen Variablen. Hierzu werden die Koeffizienten einer analytischen Funktion so bestimmt, dass diese Funktion zur Beschreibung der abhängigen Variablen die bekannten Werte dieser Variablen möglichst treffend beschreibt. Eine Regressionsanalyse ist damit ein einfaches, statistisches Modell zur Beschreibung eines Ursache-Wirkung-Zusammenhangs, welches allein auf den bekannten Werten der Variablen basiert.

Standardabweichung Die Standardabweichung ist die Wurzel der Varianz. Sie ist ein Maß für die absolute Streuung einer Zufallsvariable um ihren Mittelwert.

Varianz Die Varianz ist ein Maß für die Streuung der Werte einer Zufallsvariablen x um deren Mittelwert $\bar{x}$. Je größer die Varianz ist desto breiter ist die Dichtefunktion. Zur Berechnung der empirischen Varianz σ^2 einer Zufallsvariablen x mit n bekannten Werten kann folgende Gleichung verwendet werden:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

mit $\bar{x}$ dem empirischen Mittelwert

Variationskoeffizient Der Variationskoeffizient C_V ist das Verhältnis von Standardabweichung σ zu Mittelwert μ und damit ein relatives Maß für die Streuung einer Zufallsvariable.

$$C_V = \frac{\sigma}{\mu}$$

Ist der Variationskoeffizient größer Eins, ist die Streuung der Werte größer als der Mittelwert. Bezüglich der Wasserbereitstellung aus Talsperren ist der Variationskoeffizient die bevorzugte Größe zur Beschreibung der Streuung des Zuflusses, da auch der Ausgleichsgrad relativ zum Mittelwert des Zuflusses bestimmt wird (siehe Kapitel 2.3.1).

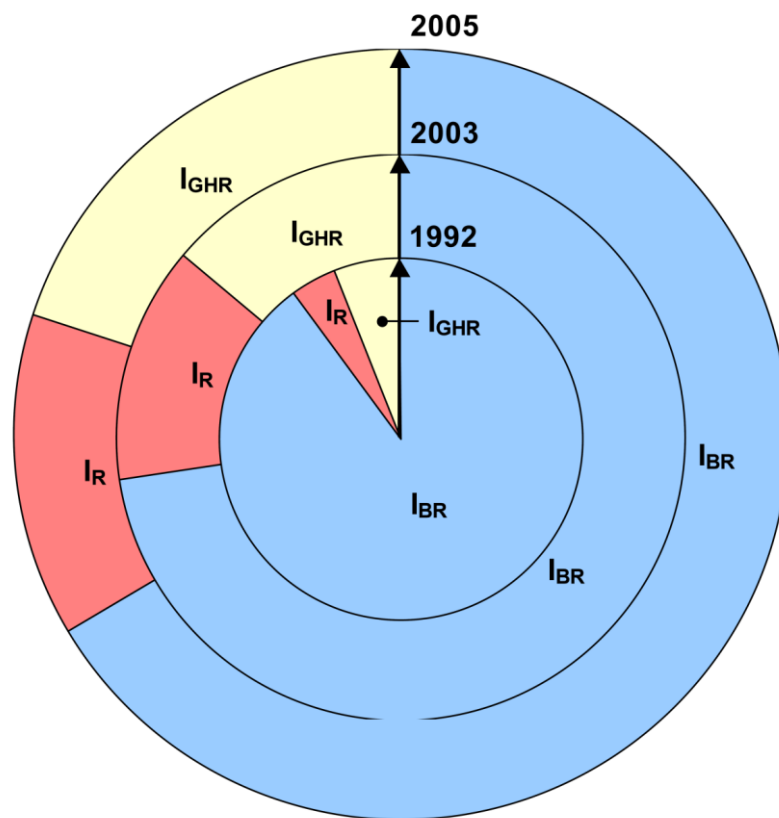
Veranlagung	Unter Veranlagung wird in der Wasserwirtschaft die Umlage der Kosten einer wasserbezogenen Dienstleistung auf ihre Nutzer verstanden.
Verteilungsfunktion	Das Integral der Dichtefunktion (siehe oben) wird als Verteilungsfunktion bezeichnet. Die Verteilungsfunktion hat den Wertebereich von Null bis Eins und ist monoton steigend. Der Wert der Verteilungsfunktion einer gegebenen Zufallsvariable gibt an, welcher Anteil der Gesamtheit der Werte kleiner als der gegebene Wert sind. Hat, bezogen auf die Verteilungsfunktion des Abflusses, die Verteilungsfunktion für $Q = 5 \text{ m}^3/\text{s}$ den Wert 0,5, heißt dies entsprechend, dass 50 % aller Abflüsse kleiner als $5 \text{ m}^3/\text{s}$ sind. Der Wert für den die Verteilungsfunktion gleich 0,5 ist wird Median genannt.

Anhang A Definition der Speichereinhalte einer Talsperre

Tabelle A-1 Begriffsdefinitionen nach DIN 19700 (2004)

Vollstauziel Z_v	Das Vollstauziel ist die maximale Höhe, die der Wasserspiegel im geregelten Betrieb, vor Anspringen der Hochwasserentlastungsanlage, erreichen kann.
Gewöhnlicher Hochwasserrückhalteraum I_{GHR}	Unterhalb des Vollstauziels wird Speichervolumen zum Rückhalt von Hochwasserabflüssen freigehalten. Dieses nur im Hochwasserfall einzustauende Volumen wird als gewöhnlicher Hochwasserrückhalteraum bezeichnet. Zusätzlich dazu gibt es den im Allgemeinen nicht steuerbaren, außergewöhnlichen Hochwasserrückhalteraum. Der außergewöhnliche Hochwasserrückhalteraum entsteht durch den zusätzlichen Wasserspiegelanstieg auch nach Anspringen der Hochwasserentlastungsanlage und entspricht, zum Beispiel bei einer wehrförmigen Entlastungsanlage, der Überfallhöhe.
Stauziel Z_s	Das Stauziel markiert die untere Grenze des gewöhnlichen Hochwasserrückhalterums. Es variiert typischerweise im Laufe des hydrologischen Jahres und liegt im Winter niedriger (größerer Hochwasserrückhalteraum) als im Sommer.
Betriebsraum I_{BR}	Unterhalb des Stauziels Z_s beginnt der Betriebsraum der Talsperre. Je nach vorrangigem Zweck der Talsperre wird dieser Stauraum bewirtschaftet.
Absenkziel Z_A	Die untere Grenze des Betriebsraums markiert das Absenkziel.
Tiefstes Absenkziel Z_T	Das maximal erreichbare Absenkziel wird oftmals von der Schwelle des Grundablasses bestimmt.
Reserveraum I_R	Der Stauraum zwischen Absenkziel Z_A und tiefstem Absenkziel Z_T wird als Reserveraum oder „Eiserne Reserve“ bezeichnet. Er dient der Speicherung von Wasser für den Fall außergewöhnlicher Trockenperioden.

Die Einteilung der Speicherräume erfolgt entsprechend den Anforderungen, welche an eine Talsperre hinsichtlich der zu erfüllenden Aufgaben gestellt werden. Diese Anforderungen können sich in dem Rahmen, der durch die Höhe von Betriebsauslässen, Entnahmeeinrichtungen und Hochwasserentlastung vorgegeben ist, über die Betriebsdauer der Talsperre ändern und an die gesellschaftlichen Rahmenbedingungen angepasst werden. So zeigt Abbildung A-1 die Anpassung der Stauraumaufteilung in den sächsischen Trinkwassertalsperren infolge des Rückgangs des Wasserbedarfs nach der deutschen Wiedervereinigung.



I_{BR} = Betriebsraum

I_R = Reserveraum

I_{GHR} = Gewöhnlicher Hochwasserrückhalteraum

Abbildung A-1 Anpassung der Stauraumaufteilung in den sächsischen Trinkwassertalsperren seit 1992 (SCHUMANN & SIEBERT, 2004)

Anhang B Klimaeinwirkungsfunktionen für Zuverlässigkeit der Wasserversorgung

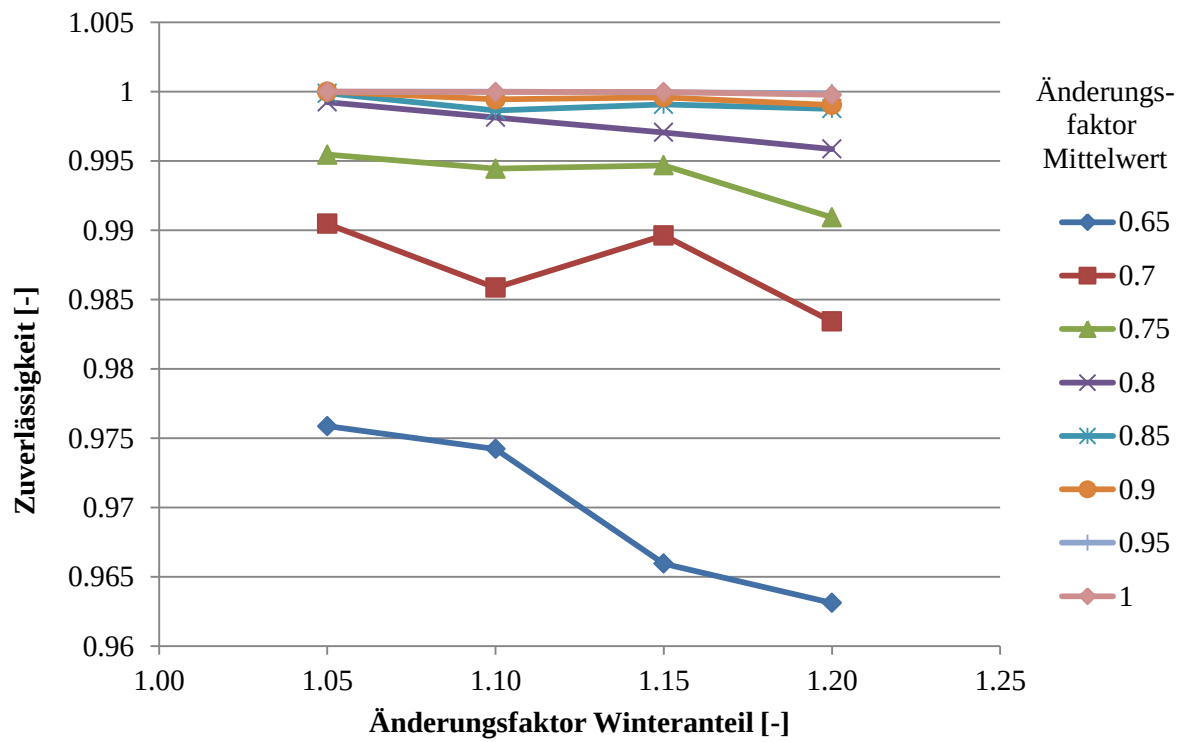


Abbildung B-1 Veränderung der Zuverlässigkeit mit dem Winteranteil und dem Mittelwert der Zuflüsse bei konstantem Variationskoeffizient und konstanter jährlicher Autokorrelation

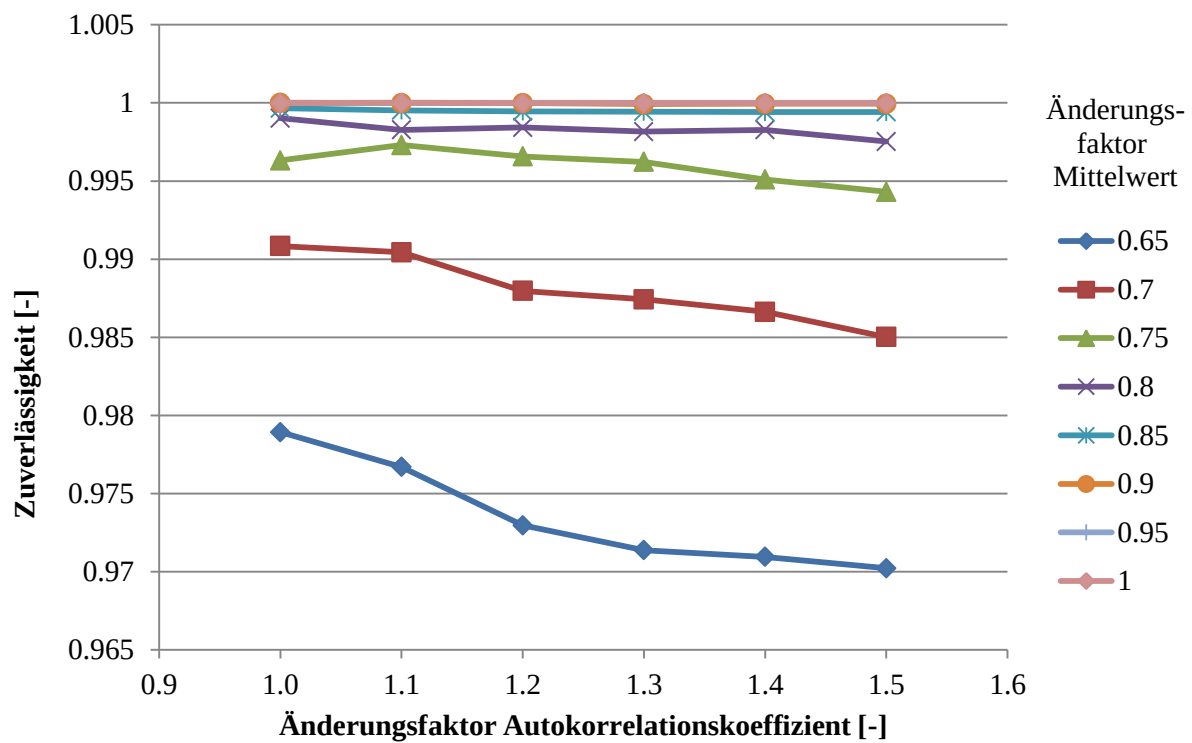


Abbildung B-2 Veränderung der Zuverlässigkeit mit der jährlichen Autokorrelation und dem Mittelwert der Zuflüsse bei konstantem Variationskoeffizient und konstantem Winteranteil

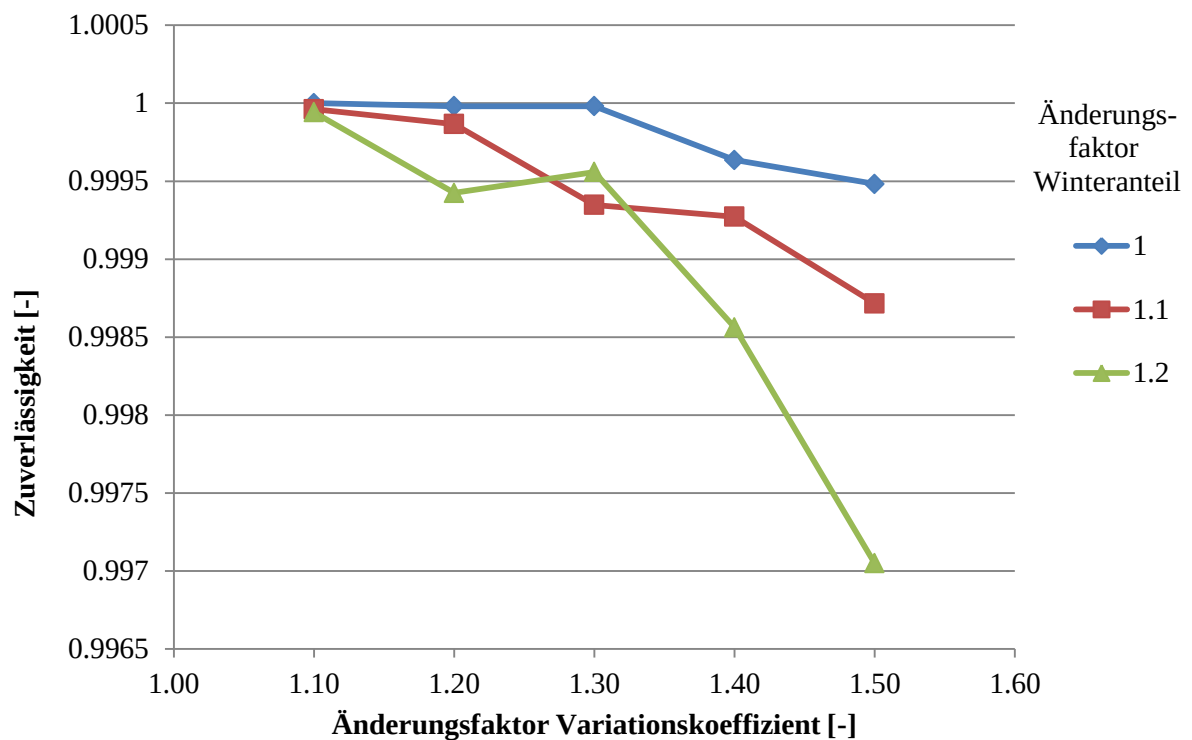


Abbildung B-3 Veränderung der Zuverlässigkeit mit dem Variationskoeffizienten und dem Winteranteil der Zuflüsse ohne Änderung des Mittelwertes

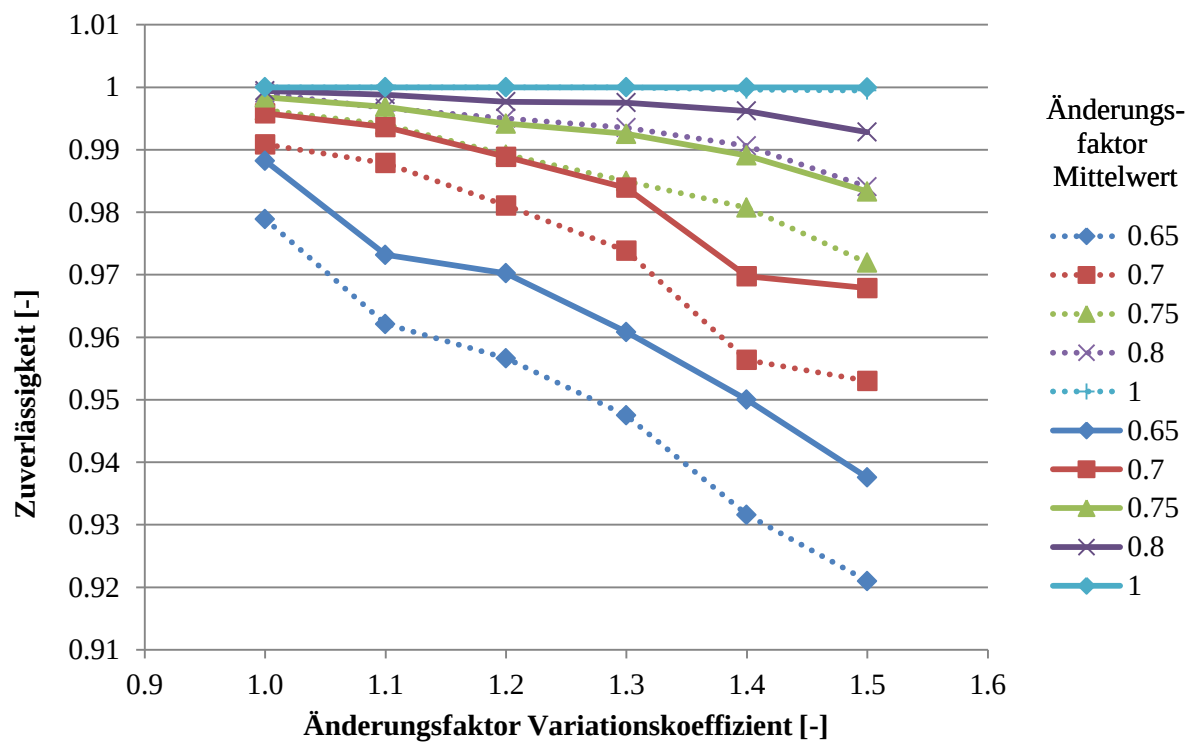


Abbildung B-4 Erhöhung der Zuverlässigkeit durch Maßnahme „Verzicht auf Dynamisierung“ für Änderung des Mittelwertes und des Variationskoeffizienten der jährlichen Zuflüsse