



DIPLOMARBEIT

Auswirkungen der Variation klimatischer Parameter auf Bemessungshochwasser

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplomingenieurs

unter der Anleitung von

Em.O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Dieter Gutknecht

Dipl.-Ing. Herbert Heindl

Dipl.-Ing. Jürgen Komma

E222 - Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie

Eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

von

ULRICH KRAL

0225854

3061 Unterwolsbach 27

Wien, im Dezember 2008

Erklärung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus anderen Quellen entnommenen Stellen als solche gekennzeichnet habe.

Wien, am 16. Dezember 2008

Ulrich KRAL

Kurzfassung

Bemessungshochwasser bilden die Grundlage für Dimensionierungsaufgaben im Bereich des technischen Hochwasserschutzes. Im Kreislauf des Hochwasserrisikomanagements quantifiziert die Gefahr gemeinsam mit der Vulnerabilität im Einzugsgebiet das Risiko eines schadbringenden Ereignisses. Mögliche Veränderungen ergeben sich in Zukunft durch geänderte klimatische Rahmenbedingungen. Sie geben Anlass, den zusätzlichen Lastfall Klimawandel innerhalb der Strategien zum Schutz vor Hochwasser zu beurteilen.

Anhand von Projektionen klimatischer Parameter werden langfristige Änderungssignale im Klimageschehen an ein, an die Messtation Frankenfels angelegtes, stochastisches Niederschlagsmodell übergeben. Anschließend werden die im ereignisbezogenen Abflussmodell generierten Abflusszeitreihen statistisch ausgewertet. Die saisonale Darstellung zeigt jene Bereiche auf, bei denen nach Trend und Ausmaß Änderungen bei Bemessungshochwassern zu erwarten sind.

Das Potential, intensivere Niederschläge und saisonale Verlagerungen der Abflusssummen zu messen, steigt aufgrund der Temperaturerhöhung im Alpenraum und den daraus abgeleiteten, qualitativ konsistenten Szenarien im Niederschlag an. Neben einem Anstieg der Intensität und einer saisonalen Verschiebung der Niederschläge vom Sommer in den Winter, weist ein Anstieg der Verdunstung bei gleichbleibender Jahresniederschlagssumme auf eine Abnahme der sommerlichen Abflusssummen um bis zu -36% , und eine Zunahme der winterlichen um bis zu $+48\%$ hin. Die bimodale Verteilung im Abflussregime bleibt erhalten. Der Minimalwert der sommerlichen Monatsmaxima im Abfluss liegt nach wie vor über den winterlichen Monatsmaxima im Abfluss, wobei im Sommer mit Steigerungen des Bemessungshochwassers HQ100 von bis zu $+17\%$, im Winter von bis zu $+35\%$ zu rechnen ist. Als für die Bemessung von Schutzbauten maßgeblicher Wert gilt nach wie vor der Sommerwert. Der Wasserstand erhöht sich im Falle eines 100-jährlichen Hochwassers, ausgehend von $2.22m$ um bis zu $25cm$. Der Lastfall Klimawandel verringert somit den Sicherheitsspielraum des Freibords.

Der nachgewiesene Beitrag für einen Anstieg der Schadensfälle aufgrund von

Hochwasser ist derzeit nach Stand des Wissens nicht ursächlich auf klimatische Veränderungen, sondern hauptsächlich auf anthropogene Einflüsse im Einzugsgebiet und der damit verbundene progressive Zunahme der Vulnerabilität zurückzuführen. Im Zuge einer integralen Risikobetrachtung lässt die Abwägung der Einflüsse das Augenmerk verstärkt auf die Verbreiterung der Informationsbasis bei der Abschätzung von Hochwasserkennwerten, Überlastszenarien, flexible Hochwasserschutzbauten und langfristiges Flächenmanagement richten.

Abstract

Design floods are the basis for technical flood control measures. Within flood risk management the damage risk consists of danger and vulnerability in the catchment area. In the future there might be a shift to other conditions due to climate change. Hence, this can lead to an additional loading scheme "climate change", which forces to build new strategies to prevent floods.

Long term projections of climate parameters are used as input to a stochastic precipitation model. The resulting precipitation events are further given to a runoff model which generates time series in order to be statistically analyzed. A seasonal division shows sectors in which changes in design floods can be expected.

The potential of more intense precipitation and a shift in seasonal runoff patterns arises. The reasons are the increasing temperature in the alpine region followed by precipitation scenarios which are qualitatively consistent. Additionally annual precipitation is going to stay constant while evaporation rises. Consequently the total runoff decreases by -36% in summer, while it increases in winter by $+48\%$. The bimodal distribution of the runoff regime doesn't change its pattern. During the summer months, the minimum runoff peak is still higher than the maximum peak during the winter months. Therefore, in summer the design flood HQ100 increases by $+17\%$ and in winter by $+35\%$. The operative value to design safety measures will still be determined by summer peaks. The water level according to a 100-yearly flood rises from the given 2.22m by 25cm. Consequently the load scheme 'climate change' reduces the freebord's safety zone.

According to the body of knowledge the verified contribution of increasing cases of damage is not solely depending on climate change. It turns out that anthropogenic actions are having more influence and are causing progressive vulnerability in the catchment area. In order to offer more understandable actions the attention turns to broaden information for the estimation of flood parameters, overloaded scenarios, flexible flood safety measures and long term floor-space management.

Inhaltsverzeichnis

Erklärung	i
Kurzfassung	ii
Abstract	iv
1 Kontext	1
2 Motivation und Ziel	2
3 Klimawandel und Hochwasser	3
3.1 Definitionen	3
3.2 Klimawandel und Extremereignisse	4
3.3 Strategien im Hochwasserschutz	6
4 Beobachtungen und Projektionen klimatischer Parameter	8
4.1 Weltweit	8
4.2 Europa	9
4.3 Österreich	12
4.3.1 Empirische Erhebungen zur Niederschlagssituation	12
4.3.2 Regionale Klimaszenarien	13
4.4 Zusammenfassung	19
5 Stochastische Hochwasserabschätzung in Kombination mit einem Niederschlagabflussmodell	20
5.1 Einleitung	20
5.2 Zweck der Modellierung	21
5.3 Modellarchitektur	22
5.3.1 Klima	22
5.3.2 Wetter	22
5.3.3 Hydrologie	25
6 Modellläufe	27
6.1 Ausgangslage	27

6.2	Intensivierung des Wasserkreislaufes	27
6.2.1	Allgemein	27
6.2.2	Szenarien	28
6.2.3	Inputparameter	33
6.3	Auswertung der Simulationsresultate	34
6.3.1	Niederschlag	34
6.3.2	Abfluss	36
6.4	Analyse der Simulationsresultate	43
6.4.1	Vorläuferszenarien	44
6.4.2	Hauptszenarien	46
6.5	Dokumentation modellinterner Kausalketten	48
6.5.1	Konstante Änderung saisonaler Verläufe im Input	48
6.5.2	Saisonale Verschiebungen im Input	51
6.5.3	Abflusskonzentration	51
6.5.4	Modellinterne Dysfunktionen	53
6.6	Zusammenfassung	54
7	Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick	56
7.1	Zusammenfassung	56
7.2	Diskussion	59
7.2.1	Strategien beim technischen Hochwasserschutz	59
7.2.2	Sicherheit von Bemessungswerten	61
7.2.3	Abwägung der Einflüsse	61
7.3	Ausblick	62
A	Grafiken	63
A.1	Ausgangslage	63
A.2	Szenario N1	70
A.3	Szenario N2	75
A.4	Szenario N3a	80
A.5	Szenario N3b	85
A.6	Szenario A1	90
A.7	Szenario N12	93
A.8	Szenario N13a	98
A.9	Szenario N12-A1	103
A.10	Szenario N13a-A1	109
A.11	Szenario N123b	115
A.12	Szenario N123b-A1	121
	Literaturverzeichnis	128
	Abbildungsverzeichnis	132
	Tabellenverzeichnis	137

Kapitel 1

Kontext

Der Umgang der Gesellschaft mit Gefahren hat sich seit der Veröffentlichung des Werkes *Risikogesellschaft* [3] von Ulrich Beck im Zuge der Tschernobyl-Katastrophe 1986 stark gewandelt. Das Gefühl der Bedrohung durch den technischen Fortschritt fand Eingang in öffentliche Debatten und wissenschaftliche Diskussionen. 1979 legte Hans Jonas mit seinem Versuch einer Ethik für technologische Zivilisationen [27] den Grundstein für ein damals aufkeimendes und heute weit verbreitetes und anerkanntes Problembewusstsein. Doch der Umgang mit der Gefahr ist 30 Jahre danach keineswegs ein abgeschlossenes Kapitel. Als Handlungsmaxime fordert Jonas „die vorausgedachte Gefahr selbst“. Gepaart mit dem in Europa etablierten Vorsorgeprinzip ergeben sich zentrale, übergeordnete Herausforderungen im Kreislauf des Hochwasserrisikomanagements. Neben der progressiv zunehmenden Vulnerabilität, angetrieben durch das Vordringen des Menschen in sensible Naturräume erfährt die Charakterisierung und Beschreibung der Gefahr einen zusätzlichen Aspekt. Ausgehend von dem, auf Basis wissenschaftlicher Beobachtungen und Modellrechnungen dokumentierten globalen Temperaturanstiegs, lassen sich qualitativ konsistente Aussagen treffen, die im Allgemeinen auf Veränderungen im Wasserhaushalt und im Speziellen auf geänderte Abflussregime hindeuten. Die durch den Klimawandel abgeleitete „vorausgedachte Gefahr“ gilt es zu analysieren, um sie in Zukunft bei der Quantifizierung des Risikos berücksichtigen zu können. Beim Schutz vor den Folgen von Hochwässern gilt es, der Prävention gegenüber der rückwärts gewandten Sicherheitsstrategie, die erst Reaktionen nach einem Schadensereignis hervorruft, Vorrang zu geben. Zahlreiche Forschungsprogramme im Bereich hydrologischer Extremereignisse wurden durch den Aspekt des sich ändernden Klimas inhaltlich erweitert. Exemplarisch sei das Nachfolgeprojekt von *Flood Risk I* mit dem Lessons-Learns-Gedanken erwähnt. *Flood Risk II* setzt die umfassende Betrachtung aus Sicht des Katastrophenschutzes, der Hydrologie/Meteorologie, der Ökonomie und Raumordnung fort und lässt die Folgen des Klimawandels mit ein fließen.

Kapitel 2

Motivation und Ziel

Der im Kontext angesprochene Risikobegriff ist in Teilbereichen des Hochwassermanagements, die sich mit wasserbaulichen Fragestellungen auseinandersetzen, eng an die Eintrittswahrscheinlichkeiten von Abflussereignissen gebunden. Diese repräsentieren die sogenannte Gefahr. Gepaart mit der Vulnerabilität im Einzugsgebiet ergibt sich das Risiko in Hinblick auf schadbringende Ereignisse.

Die Abflussbildung unterliegt zahlreichen Einflussfaktoren und ist das Resultat komplexer Phänomene in Atmosphäre, Pedosphäre und Biosphäre. Die vorliegende Arbeit greift klimatische Einflussfaktoren heraus und beurteilt die Auswirkungen auf Bemessungshochwasser aufgrund projizierter Veränderungen.

Global und regional formulierte Perspektiven klimatischer Parameter geben die Rahmenbedingungen vor, innerhalb derer die Entwicklung stattfindet. Konkret werden die Klimasignale in einen stochastischen Wettergenerator übergeben, der unter geänderten statistischen Kennwerten im Niederschlagsregime, Zeitreihen in stündlicher Auflösung generiert. Anhand eines ereignisbezogenen Abflussmodells werden Abflusszeitreihen generiert und extremwertstatistisch ausgewertet. Die saisonale Darstellung erlaubt Hinweise in welchem Bereich besonders starke Änderungen erwartet werden. Darüber hinaus erfolgt eine Dokumentation ausgewählter, modellinterner Kausalketten und der Hinweis zur Beseitigung systemimmanenter Dysfunktionen.

Generell leistet die Arbeit einen Beitrag zum besseren Verständnis hydrologischer Prozesse und ihren Abbildungen in mathematischen Modellen, um im Sinne des Schutzes vor Naturgefahren „diejenige Strategie zu wählen, bei welcher der maximal mögliche Schaden am kleinsten ist“ [34, S. 5].

Kapitel 3

Klimawandel und Hochwasser

3.1 Definitionen

Wetter [9]

„Als Wetter wird der physikalische Zustand der Atmosphäre zu einem bestimmten Zeitpunkt oder in einem auch kürzeren Zeitraum an einem bestimmten Ort oder in einem Gebiet, wie er durch die meteorologischen Elemente und ihr Zusammenwirken gekennzeichnet ist, bezeichnet. (...)“

Das Wetter wird mit Hilfe quantifizierbarer Parameter charakterisiert. Diese Parameter sind fundamentale Größen des Wetters (Wetterelemente) wie z.B. Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck, Drucktendenz, Windrichtung und Windgeschwindigkeit, Bewölkung, Niederschlag und Sichtweite.“

Klima [9]

„Das Klima ist definiert als die Zusammenfassung der Wettererscheinungen, die den mittleren Zustand der Atmosphäre an einem bestimmten Ort oder in einem mehr oder weniger großen Gebiet charakterisieren. Es wird repräsentiert durch die statistischen Gesamteigenschaften (Mittelwerte, Extremwerte, Häufigkeiten, Andauerwerte u. a.) über einen genügend langen Zeitraum. Im allgemeinen wird ein Zeitraum von 30 Jahren zugrunde gelegt, die sogenannte Normalperiode, es sind aber durchaus auch kürzere Zeitabschnitte gebräuchlich.“

Klimawandel [9]

„Klimawandel ist ein Synonym für Klimaveränderung, also allgemein jede Veränderung des Klimas unabhängig von der betrachteten Größenordnung in Raum und Zeit. Neben Veränderungen der Mittelwerte können auch Änderungen anderer statistischer Kenngrößen(Streuung, Extreme, Form der Häufigkeitsverteilungen) einzelner Klimaparameter (Temperatur, Niederschlag, Wind, Feuchte, Bewölkung usw.) auftreten.“

Extremes Wetterereignis [23, S. 75]

„Ein extremes Wetterereignis ist ein Ereignis, das an einem bestimmten Ort und zu einer bestimmten Jahreszeit selten ist. Die Definitionen für „selten“ variieren, aber ein extremes Wetterereignis wäre normalerweise so selten wie oder seltener als das 10- oder 90 Prozent-Perzentil der beobachteten Wahrscheinlichkeitsverteilung. Per Definition kann die Charakteristik von so genanntem „Extremwetter“ absolut gesehen von Ort zu Ort unterschiedlich sein. Einzelne Extremereignisse können nicht einfach und direkt der anthropogenen Klimaänderung zugeordnet werden, da immer eine begrenzte Chance besteht, dass das betreffende Ereignis natürlicherweise hätte auftreten können. Wenn ein Muster von extremem Wetter über eine bestimmte Zeitspanne, z.B. eine Saison, bestehen bleibt, kann es als „extremes Klimaereignis“ klassiert werden, vor allem wenn es ein Mittel bzw. eine Summe aufweist, die seinerseits bzw. ihrerseits extrem ist (z.B. eine Dürre oder Starkniederschlag während einer ganzen Saison).“

3.2 Klimawandel und Extremereignisse

Die quantitative Angabe zukünftiger, klimatischer Parameter ist derzeit das Ergebnis von Klimamodellberechnungen. Die Prognosen sind stets langfristig angelegte Aussagen über Mittelwerte, Standardabweichung und Varianzen. Hinsichtlich der globalen Mitteltemperatur bilden die Modelle den Verlauf in der Vergangenheit realistisch ab.

„Deutlich geringer ist die Fähigkeit der Klimamodelle, diese Aussage regional bis lokal aufzulösen, und ebenfalls problematisch ist die Modellierung der hydrologischen Parameter.“ [8, S. 6]

In weiterer Folge kann dabei nicht direkt auf die Häufigkeit beziehungsweise auf das Ausmaß von Extremereignissen geschlossen werden, da deren Simulation nicht Bestandteil globaler Klimamodelle ist [8, vgl. S. 6]. Somit ist die quantitative Angabe von Bemessungsereignissen des Niederschlages oder des Abflusses auf solider Basis derzeit noch nicht befriedigend möglich. Die prognostische Kraft ist selbst durch die Kopplung von globalen mit regionalen Klimamodellen aufgrund der unzureichenden Auflösung der für die Hochwasserentstehung relevanten Parameter und Wetterphänomene nicht ausreichend [17, vgl. S. 2] [26, vgl. S. 46]. Für die Beurteilung der Gefahren im Zuge von Hochwasser wären Aussagen zur Veränderung der chronologischen Abfolge von intensiven Niederschlagsereignissen notwendig.

Unabhängig von klimatischen Veränderungen ist die Modellierung von hydrologischen Prozessen im Einzugsgebiet, einschließlich der Abschätzung von Wiederkehrintervallen im Abfluss, mit Unsicherheiten behaftet:

- Das Abflussgeschehen entsteht durch komplexe Vorgänge in und zwischen den Systemen Atmosphäre / Pedosphäre / Biosphäre. Kenngrößen des Abflusses sind nach Ausmaß und Wiederkehr nicht zwingend an meteorologische Kenngrößen gebunden.
- Die Aufzeichnungsperiode für Niederschlagsmuster, die zu Hochwasser führen ist relativ kurz, um von der Vergangenheit auf die Zukunft schließen zu können. Extremereignisse treten der Definition nach selten auf, wobei mit rein statistischen Analysen der Zeitreihen die prognostischen Aussagen mit großen Unsicherheiten verbunden sind [17, vgl. S. 2]. Auf Basis der Extremwertstatistik wird von relativ kurzen Zeitreihen auf seltene Ereignisse geschlossen. Das BERATENDE ORGAN IN KLIMAFRAGEN in der Schweiz (OcCC¹) hält fest, dass der Nachweis von Trends auf statistischer Basis für seltene Extremereignisse praktisch unmöglich ist.

“Auch bei einem Beobachtungszeitraum von 30 Jahren ermöglichen Auswertungen von Extremwerten noch keine zuverlässige Darstellung der regionalen Charakteristik von Extremniederschlägen. Bereits durch ein einziges großflächig auftretendes Ereignis kann das räumliche Muster deutlich verändert werden.“ [39, Kap. 2.10]

Dennoch versuchte das Deutsche Umweltbundesamt die Eintrittswahrscheinlichkeiten klimabedingter Extremereignisse [10] zu ermitteln. Auf Basis von Tagesdaten wurden mit Hilfe von Zeitreihenanalysen die zeitliche Evolution statistischer Niederschlagsparameter berechnet. Neben deutlichen jahreszeitlichen Unterschieden zeigte sich die sensible Reaktion der Trends in Abhängigkeit vom Schwellenwert. Trotz starker regionaler Schwankungen wurde ein verstärkter Trend zu häufigerem, extrem hohen Niederschlag in den Wintermonaten aus den Daten abgeleitet [10, vgl. S. 9f.].

Über die Extremwertprognosen im Niederschlag hinaus finden sich auch detaillierte Angaben und Berechnungen über den Zusammenhang zwischen dem klimabedingten Wandel und den Eintrittswahrscheinlichkeiten von Hochwasser. So wurde im Rahmen eines Forschungsprojektes an der Wiener Universität für Bodenkultur der Frage nachgegangen, welchen hydrologischen Veränderungen in Österreich infolge globaler Klimaänderungen auftreten [18]. Ausgehend von einer Verdopplung des heutigen CO_2 -Gehaltes in der Atmosphäre wurden die Eintrittswahrscheinlichkeiten von Abflüssen in vier verschiedenen Regionen Österreichs ermittelt. NACHTNEBEL [31, S. 91] weist auf die systemimmanenten Unsicherheiten hin. Aufgrund der groben räumlichen Skala können die Klimamodelle nicht direkt für lokale Frage-

¹Organe consultatif sur les changements climatiques

stellungen genutzt werden. Dennoch gilt es, die Erkenntnisse auf der Ebene des Hochwasserrisikomanagements von grundsätzlicher, strategischer Natur aus mit zu berücksichtigen.

3.3 Strategien im Hochwasserschutz

Auf allen Ebenen des politischen Wirkens finden sich Grundsatzpapiere, die sich dem Schutz vor Naturkatastrophen widmen. Das verbindende Element ist die Sicherung von Leben und Gütern. Als spezielle Herausforderung gilt es, den in den öffentlichen Debatten zunehmend als Gefährdung dargestellten Aspekt des klimabedingten Wandels bei dem Umgang mit Hochwasser objektiv zu beurteilen.

So wird in einem Grünbuch der Europäischen Kommission zum Thema *Anpassung an den Klimawandel* [12] von einer Zunahme der Hochwasser in Häufigkeit und Intensität ausgegangen. In der im Jahr 2007 verabschiedeten Richtlinie über die *Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken* [13] wird die Berücksichtigung der klimabedingten Auswirkungen auf das Auftreten von Hochwasser gefordert.

In der Praxis finden sich unterschiedliche Herangehensweisen, wobei sich in den beiden folgenden Beispielen aus Deutschland und der Schweiz auch die grundsätzlichen Argumentationsstränge widerspiegeln. Auf der eine Seite die Umsetzung auf Grund scheinbar konkreter, quantitativer Angaben zukünftiger klimatischer Veränderungen und auf der anderen Seite die qualitative Herangehensweise im Kreislauf des Hochwasserrisikomanagements.

Baden-Württemberg

In Baden-Württemberg wurde für die lokale Hochwasserschutzplanung ein Sicherheitskonzept entwickelt, das den Lastfall Klimawandel berücksichtigt. Klimafaktoren, ermittelt auf Basis von Klimamodellrechnungen, erhöhen die klassischen Bemessungswerte im Abfluss mit einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren [20, vgl. S. 68]. Der auf Eintrittswahrscheinlichkeiten von Abflüssen basierende Ansatz wird dabei nicht in Frage gestellt. Es kommt lediglich zu einer Erhöhung der Belastung auf das hydrologische System, welche in weiterer Folge den Ausbau technischer Schutzbauten und Retentionsräume bewirkt [20, vgl. S. 68]. Aufgrund der unsicheren Prognosen des Niederschlages wird zusätzlich auf Hochwasser-Flächenmanagement hingewiesen [20, vgl. S. 69]. Ergänzend wird davon ausgegangen, dass die kleinen und mittleren Hochwasser landesweit deutlich zunehmen. Die Beurteilung von Extremereignissen über HQ100 bleibt unverändert, da die Extremwertstatistik auf der Basis der vorhandenen Daten keine gegenwärtige Änderung gerechtfertigen

würde [20, vgl. S. 67].

Schweiz

Einen grundsätzlich anderer Zugang wird in der Schweiz gewählt. Dieser sieht Anpassungsmaßnahmen im technischen Hochwasserschutz nicht als primäre Aufgabe, da damit nicht den Ursachen entgegengewirkt wird. In einem Standortpapier der Kommission Hochwasserschutz im Schweizerischen Abwasserverband wird festgehalten:

„Derzeit fehlen in der Schweiz verlässliche Grundlagen, um die Folgen der Klimaänderung bei der Ermittlung der Dimensionierungsgrößen für Hochwasserschutzmaßnahmen quantitativ zu berücksichtigen. (...) Aufgrund dieses vorläufig eher qualitativ ausgerichteten Vorgehens kommt der Betrachtung von Überlastszenarien, welche den Dimensionierungsfall deutlich übertreffen, eine große Bedeutung bei.“ [28, S. 57]

Zur Abschätzung der durch die Klimaveränderung in der Schweiz verursachten Hochwasser und deren schadbringenden Wirkungen gab das Schweizer Bundesamt für Umwelt (BAFU) eine Studie in Auftrag. Unter Beachtung aller zu erwartenden Schäden ist bemerkenswert, dass die Schadenssummen in Abhängigkeit von den prognostizierten Temperaturerhöhungen überproportional ansteigen, die Unsicherheitsbereiche allerdings enorm sind [1, vgl. S. 156]. Als Berechnungsgrundlage dient das Konzept der für Baden-Württemberg entwickelten Klimafaktoren. Im Zusammenhang mit der Schadensentwicklung dominiert allerdings die progressive Konzentration an Werten gegenüber den zu erwartenden Folgen aufgrund klimatischer Veränderungen [35, vgl. S. 115]. Die Gründe liegen in der Ausdehnung von Bebauungszonen, die vormals als zu risikoreich beurteilt wurden, und in der nach wie vor anhaltenden Verdichtung von Infrastrukturbauten.

Kapitel 4

Beobachtungen und Projektionen klimatischer Parameter

Wie bereits in Kap. 3 erwähnt lässt sich der extreme Einzelfall heute noch nicht befriedigend abbilden, da hierfür entscheidende Informationen fehlen. Beispielhaft sei die zukünftige, ereignisbezogene Darstellung der Niederschläge, die Chronologie innerhalb der Regenereignisse mit Vorregen und Hauptregen, der Aufbau des Bodenwassergehaltes bis hin zur Sättigung¹ erwähnt. Die in der Folge dargestellten, quantitativen Angaben drücken mittlere Entwicklungen aus. Als Basis für Entscheidungen gilt es, die hydrologisch qualitativ konsistenten Zukunftsperspektiven, welche sich bereits in Ansätzen durch Beobachtungen und Messungen erkennen lassen, zu quantifizieren.

4.1 Weltweit

Die globale Mitteltemperatur ist in den vergangenen 100 Jahren um 0.8°C gestiegen [11, vgl. S. 2]. Die Temperaturprognosen bis zum Ende des Jahrhunderts schwanken je nach Entwicklungsszenario zwischen 0.6 °C und 4°C, wobei letztere mit einer Bandbreite von 2.4°C bis 6.4°C geschätzt wird [23, S. 13, Tab. SPM.3.]. Dies wirkt sich auf den Wasserkreislauf aus, wobei aufgrund des erhöhten Energieeintrages von einer Intensivierung des Wasserkreislaufes ausgegangen wird.

Das IPCC² knüpft die Aussagen für die Zukunft über weite Teile nicht an die quantitative Angabe klimatischer Parameter. In den gegenüber den Originalarbeiten inhaltlich stark komprimierten Zusammenfassungen für Entscheidungsträger werden anhand verschiedener Emissionsszenarien [23, S. 18]

¹Durch die Verminderung der Versickerungsfähigkeit kann es zu einem hydrologischen Systemwechsel kommen, da der abflusswirksame Niederschlag ansteigt.

²Intergovernmental Panel on Climate Change

verschiedene Zukunftsperspektiven aufgezeigt. Die Projektionen zukünftiger Änderungen erfahren mittels Eintrittswahrscheinlichkeiten zu bestimmten Prozessen ihre Konkretisierung. Dem zu Folge gilt die Zunahme von Starkniederschlagsereignissen als *sehr wahrscheinlich*³ für das 21. Jahrhundert. Aufgrund von Beobachtungen aus der Vergangenheit⁴ wird festgehalten:

„Die Häufigkeit von Starkniederschlagsereignissen hat über den meisten Landflächen zugenommen, im Einklang mit der Erwärmung und der beobachteten Zunahme des atmosphärischen Wasserdampfes.“ [23, S. 9]

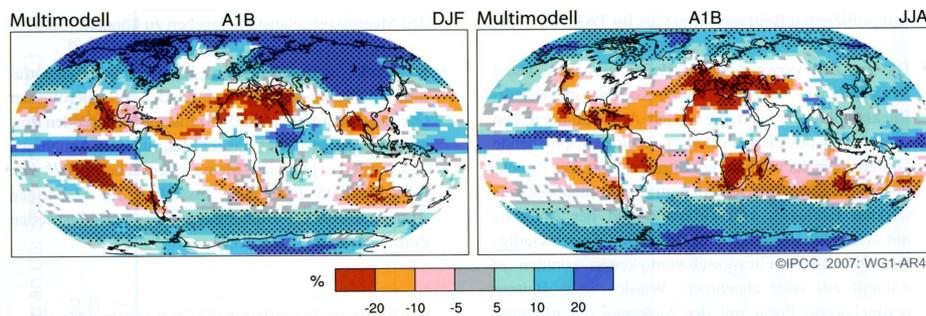


Abbildung 4.1: Projizierte relative Änderungen der Jahresniederschläge für den Zeitraum 2090-2099 anhand des SRES-A1B-Szenario für Dezember bis Februar (links) und Juni bis August (rechts) [23, S. 16, modifiziert].

„Die Niederschlagsmengen nehmen in höheren Breiten *sehr wahrscheinlich* zu, während Abnahmen über den meisten subtropischen Ländern (...) *wahrscheinlich*⁵ sind.“ [23, S. 16]

„Es wird eine Abnahme der Schneebedeckung projiziert.“ [23, S. 16]

4.2 Europa

Die in den IPCC-Berichten in Aussicht gestellte globale Mitteltemperatur ist eine über den gesamten Planeten homogenisierte, mittlere Temperatur. Bei lokalen und regionalen Fragestellungen können große Abweichungen davon auftreten. So ist der Alpenraum aufgrund seiner Gegebenheiten höheren Temperaturen ausgesetzt. Im Vergleichszeitraum 1860 bis 2000 stellt BÖHM et. al. [25, vgl. S. 19] aufgrund von statistischen Auswertungen gemessener

³ *Sehr wahrscheinlich* bezeichnet eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 90 bis 99%

⁴ Ein diesbezüglicher Beobachtungszeitraum wird in der vorliegenden Fassung des 4. Sachstandsberichtes nicht angegeben.

⁵ *wahrscheinlich* bezeichnet eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 66 bis 90%

Werte in etwa die doppelte Temperatur des Alpenraumes gegenüber den Mittelwerten in der Nordhemisphäre fest. Das Trendverhalten allerdings ist weitgehend identisch, wenngleich der für die Aussage zugrunde liegende Zeitrahmen 80 Jahre beträgt. Für Europa hält das IPCC fest:

„Für Mittel- und Osteuropa werden abnehmende Niederschläge im Sommer (...) projiziert.“ [23, S. 28]

Häufigere winterliche Hochwasser werden für Nordeuropa erwartet [23, vgl. S. 28].

Als Basis für indirekte Aussagen in Bezug auf die Entstehung von Hochwassern führt FORMAYER [17, vgl. S. 9] die Ergebnisse des europäischen GCM-ECHAM4-Modells laut Abb. 4.2 an:

- Keine Veränderung der Jahresniederschlagssumme bis 2100
- Abnahme der Niederschlagshäufigkeit um cirka 15 %
- Intensivierung der Niederschläge
- Der Anteil an Starkniederschlägen steigt von derzeit 35 % auf 50 %

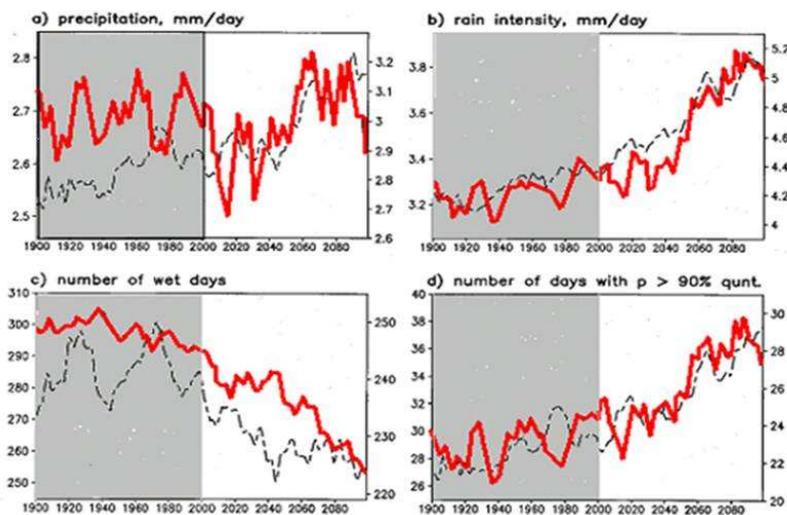


Abbildung 4.2: Niederschlagsprojektionen für Mitteleuropa (rote Linie) bis 2100. Die linke Abszisse gilt für Europa, die rechte für Ostamerika. [17, S. 10, modifiziert]

Bei Abb. 4.3 zeigt sich neben den stark gegenläufigen Trends in Süd- und Nordeuropa eine regionale Zunahme der Jahresniederschlagsmenge von bis zu 5 % bis Ende des Jahrhunderts in Österreich.

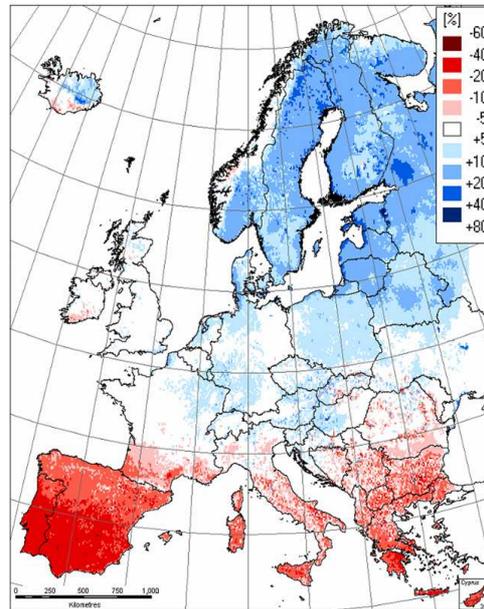


Abbildung 4.3: Veränderung der durchschnittlichen Jahresniederschläge bis Ende dieses Jahrhunderts [12, S. 10]

Einen umfangreichen Überblick bietet die Publikation *Extremereignisse und Klimaänderung*, herausgegeben vom BERATENDEN ORGAN IN KLIMAFRAGEN in der Schweiz (OcCC⁶). Darin wird die prognostische Kraft quantitativer Angaben deutlich entkräftet.

„Bei den quantitativen Angaben für den Alpenraum handelt es sich höchstens um grobe Abschätzungen“. [34, S. 64]

Die für extreme Abflüsse notwendige, aber nicht hinreichende zeitliche und räumliche Konzentration von Niederschlägen wird anhand der Starkniederschläge charakterisiert. Auf eine Zunahme deuten die Rechenergebnisse verschiedener Klimaszenarien hin:

- Zunahme des maximalen jährlichen Tagesniederschlages um 10 bis 25% [34, vgl. S. 63].
- Extrem niederschlagsreiche Winter können um den Faktor 3 bis 5 häufiger werden [34, vgl. S. 64].
- Die Zunahmen werden in den Wintermonaten in gesamt Europa erwartet, im Sommer in Zentraleuropa [34, vgl. S. 64].

⁶Organe consultatif sur les changements climatiques

4.3 Österreich

4.3.1 Empirische Erhebungen zur Niederschlagsituation

Der *Hydrologische Atlas Österreich (HAÖ)* beinhaltet eine umfassende Darstellung der hydrologischen Situation in Österreich. Die darin für das gesamte Bundesgebiet ausgewerteten Daten geben unter anderem Auskunft über die Entwicklung der Niederschlags- und Abflusssituation.

- Konvektive Starkniederschläge [7, Kap. 2.5 - 2.7]
Unabhängig eventueller Klimasignale in den konvektiven Niederschlagsmustern treten bei deren Quantifizierung der Extremwerte je nach Berechnungsmethode deutliche Unterschiede auf. Eine Interpretation hinsichtlich Häufigkeit und Intensität auf Basis von Beobachtungsdaten und möglichen Veränderung in der Zukunft sind nicht möglich.
- Extreme Tagesniederschläge [7, Kap. 2.10]
Langjährige lineare Trends größerer zusammenhängender Gebiete können trotz der Zerlegung in Teilreihen nicht festgestellt werden.
- Extreme beobachtete Mehrtagesniederschläge [7, Kap. 2.8]
Lang andauernde Niederschlagsereignisse begünstigen das Entstehen von Hochwassern. Die Auswertung der Extremwerte auf Basis des 30-jährigen Beobachtungszeitraumes lässt keine zuverlässige Darstellung der regionalen Charakteristik zu.
- Saisonale Trends im Niederschlag [7, Kap. 2.11]
Wenngleich sich bei ganzjähriger Betrachtung der Niederschlagsparameter keine wesentlichen Veränderungen beobachten lassen, so gibt die saisonale Betrachtung Hinweise auf Veränderungen der Niederschlagsmuster. Die Entwicklung bei Niederschlag und Abfluss ist durch ein regional und innerannual sehr differenziertes Bild gekennzeichnet, wobei der Alpenhauptkamm eine markante Grenze im Trendverhalten darstellt. Generelle Aussagen hinsichtlich vergangener und zukünftiger Entwicklungen sind somit nicht möglich.
 - Frühjahr: Über weite Teile leicht positive Trends, allerdings ist kein räumliches Muster erkennbar.
 - Sommer: Im Westen leicht positive Trends, in den Bundesländern Nieder- und Oberösterreich stark negative Trends.
 - Herbst: Die Analyse der letzten 50 Jahre ergab nördlich der Alpen einen Anstieg der Niederschläge im Ausmaß von 3.75 bis 7.50 %. Dies entspricht 45-90 mm. In den Abflusshöhen spiegeln sich die geänderten Verhältnisse allerdings nicht wieder. Eine Erklärung

hierfür ist der Anstieg der Verdunstung infolge des Temperaturanstieges. Südlich der Alpen lassen sich leicht negative bis keine Trends erkennen.

- Winter: Leicht negative Trends in weiten Bereichen. In Teilen Ostösterreichs keine bis leicht positive Trends.
- Saisonale Trends der Monatsabflüsse [7, Kap. 5.10]
Diese sind über weite Teile stark von der Schneespeicherung im Winter und der Schneeschmelze im Frühjahr gekennzeichnet. Die großen Monatsniederschläge treten vor allem im Sommer auf. Sie haben allerdings kaum einen Einfluss auf das bimodal verteilte Abflussregime (Höhepunkte im Frühjahr und Herbst), da eine erhöhte Verdunstung im Sommer kompensierend wirkt. Beispielweise sind die Abflüsse im Alpenvorland stark durch die Schneeschmelze geprägt und erfahren ihren Höhepunkt im April. Die Hauptniederschläge fallen allerdings im Sommer an.

4.3.2 Regionale Klimaszenarien

FORMAYER ging der Frage nach, was aus regionalen Klimamodellen in Bezug auf Hochwasserschutz abgeleitet werden kann.

Relevante Randbedingungen für die Abflussbildung zur Ermittlung von Bemessungsabflüssen in Wildbacheinzugsgebieten (nach ET-Abp 2003)			Einfluss Klimawandel	Ableitbare Informationen			
				Makroskala		Mesoskala	
				qualitativ	quantitativ	qualitativ	quantitativ
Niederschlag	Intensität und Dauer (und Jährlichkeit)	konvektive Starkregen kurzer Dauer	direkt				
		starke Aufgleitniederschläge längerer Dauer					
	Verlauf	Übergangsszenarien					
		blockförmig	direkt				
Art	endbetont						
	DVWK-verteilt		keine				
	flüssig (Regen)	direkt					
System	Vorfeuchte	fest (Hagel)					
		fest (Schnee)					
		hydrophob (trocken)	direkt				
	(jahreszeitlicher) Bewirtschaftungsverlauf	versiegelt (gefroren)					
		ungesättigt (vorbefeuchtet)	direkt				
		gesättigt (vorbeagnet, Schneeschmelze)					
	Vegetationsbedeckung	frühsaisonal	indirekt	nur über externe Modelle bedingt möglich			
		spätsaisonal					
		aktuelle Vegetation	indirekt				
	Konzentrationszeit	Beeinflussung	potentielle Vegetation				
anthropogene Eingriffe (Planien, ...)				keine			
anthropogen unbeeinflusstes Gerinne				keine			
anthropogen beschleunigt (künstl. Gerinne)				keine			
Schneedecke		anthropogen verzögert (Retention)		keine			
Fläche	Ausdehnung des Niederschlags	Schwamm-pufferwirkung der Schneedecke	direkt				
		über gesamter Fläche	direkt				
	Intensitätsverteilung über der Fläche	über Teilflächen					
		unvermindert (unter 10 km ²)	direkt				
	Zugrichtung	abgemindert (über 10 km ²)					
	mit der Fließrichtung						
	gegen die Fließrichtung	direkt					
	quer zur Fließrichtung						

Abbildung 4.4: Relevante Randbedingungen für die Abflussbildung zur Ermittlung von Bemessungsabflüssen in Wildbacheinzugsgebieten, Beeinflussung durch den Klimawandel und Ableitbarkeit quantitativer wie qualitativer Informationen durch Klimamodelle auf unterschiedlichen Raumskalen: Dunkelgrün=Ableitung möglich, Hellgrün=Ableitung bedingt möglich, Rot=Ableitung nicht möglich [15, S. 11].

Es zeigt sich, dass die quantitative Formulierung nur für advektive Niederschläge auf der Makroebene möglich sind. Konvektive Ereignisse sind vor allem für die Entstehung von Hochwassern in kleinen Einzugsgebieten von Entscheidung. Die regionalen Klimamodelle liefern dafür keine Klimasignale. Für alle weiteren Einflussfaktoren des Niederschlages auf die Abflussbildung sind quantitative Angaben nur bedingt möglich. Als belastbare Aussagen gelten jedoch überwiegend qualitative Formulierungen. Diesem Gedanken folgend wird in Bezug auf die Beurteilung der zukünftiger Hochwassersituation vorgeschlagen:

„Qualitative Untersuchungen können Hinweise darauf geben wo besonders starke Veränderungen auftreten werden.“ [15, S. 14]

„Das konkrete Hochwasserrisiko einzelner Einzugsgebiete muss jedoch explizit modelliert werden, wobei nur das Änderungssignal der regionalen Klimamodelle verwendet werden kann.“ [15, S. 14]

„Ein Ensemble aus mehreren regionalen Klimamodellen, betrieben mit mehreren globalen Klimamodellen und Emissionsszenarien wäre wünschenswert.“ [15, S. 14]

Die von der Universität für Bodenkultur, im Auftrag des WWF durchgeführten Studie *Klimawandel und Hochwasser* setzt diesen qualitativen Ansatz um und klassifiziert drei verschiedene treibende Faktoren für die Entstehung von Hochwassern [32, vgl. S. 6]:

- Ansteigen der Schneefallgrenze,
- Verstärkung der Vb-Wetterlagen,
- verstärkte Gewittertätigkeit.

Die klimabedingten Veränderungen der drei Prozesse verstärken sich im Falle von Überlagerungen und ergeben regionale Gefährdungsmuster. Diesem Ansatz folgend finden sich die in Abb. 4.5 rot dargestellten Gebiete, in denen alle Faktoren das Potential zu Entstehung extremer Abflüsse begünstigen.

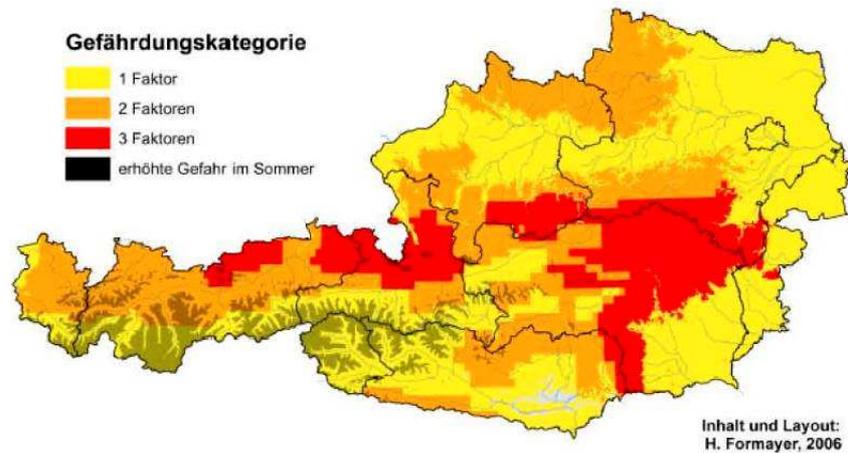


Abbildung 4.5: Gefährdungszonen [32, S. 6]

Bei den allgemeinen Niederschlagstrends aufgrund des Klimawandels zeigen sich folgende Veränderungen:

- Niederschlagssumme [32, vgl. S. 1]
 - (a) bis Ende des Jahrhunderts +15% bis +40% in den Wintermonaten, Zunahme im Februar am ausgeprägtesten
 - (b) in den Sommermonaten, Abnahme von –10% bis –50% , Höhepunkt der Abnahme im August
 - (c) in den Übergangszeiten Frühling und Herbst zeigen sich keine klaren Änderungen
- Niederschlagsintensität [32, vgl. S. 1]
 - (a) Untersuchung von Starkniederschlägen für den Alpenraum zeigen eine deutliche Zunahme der Starkniederschläge im Winter.
 - (b) Im Sommer nahm die Wahrscheinlichkeit, an Einzeltagen hohe Niederschlagsmengen zu erwarten, zu, obwohl die Monatssummen abnehmen. Speziell im Sommer ist von einer Zunahme der Niederschlagsintensität auszugehen.

Die Aussagen zu den Starkregenereignissen sind nach derzeitigem Forschungsstand nicht eindeutig zu beantworten. Die „wahrscheinlichste Interpretation“ ist die Abnahme der Niederschlagssumme mit beigleitendem Anstieg der Intensität [16, vgl. S. 43].

Mit der Niederschlagsreduktion geht eine Zunahme der Trocken- und Dürreperioden einher, von denen vor allem der Osten Österreichs stark betroffen sein wird [16, S. 43].

Im Rahmen des Forschungsprojektes *reclip:more*⁷ wurden laut Angaben der Autoren erstmals Berechnungen über künftige, regionale Klimaentwicklungen über längere Zeiträume für einen feingliedrigen Raster in Österreich erstellt [2]. Auf Basis von stündlichen Daten von 1981 bis 1990 erfolgte die Prognose für 2041 bis 2050. Die Simulationen skizzieren im 10-Jahresdurchschnitt folgende Entwicklung:

- „Die saisonalen und regionalen Niederschlagsunterschiede zeigen unterschiedliche Tendenzen“
„Im Winter und Frühling ist gelegentlich eine regional differenzierte Zunahme möglich, im Sommer und vor allem im Herbst kommt es zu einer großräumigen Abnahme.“ [2, S. 6] Hinsichtlich der lokalen Auswirkungen zeigen die beiden Regionalmodelle ALADIN und MM5 für Österreich gegenläufige Niederschlagstrends wie folgt [2, vgl. S. 6]:
 - Frühling: Alpenhauptkamm +5% bis +25%, im Osten Abnahme bis –15%.
 - Sommer: gegenläufige Modelltrends: im Osten Abnahme –15% bis Zunahme +15% bis +30%. (Südosten), in den Zentralalpen Abnahme –20% bis Zunahme +5 bis +15%,
 - Herbst: gegenläufige Modelltrends: großräumige Abnahme im Norden und Osten –25% bis –35%, Westen, teilweise im Süden Zunahme +15%, der Alpenhauptkamm bleibt konstant.
 - Winter: +15% bis +30%, im Westen +10% bzw. tw. Abnahme bis –15%.
- Starkregenniederschläge „Die Zahl der Starkregenereignisse mit 50 und mehr mm/Niederschlag pro Tag wird zunehmen: Im Mittel meist um 1-2 Ereignisse pro Jahr, entlang des Alpenbogens in Staulagen um 2-3 Ereignisse, in Vorarlberg mehr. In Oberkärnten/Osttirol verringert sich die Zahl um 1-2 Ereignisse. Da -mit Ausnahme von Vorarlberg- gleichzeitig die Niederschlagssumme insgesamt abnimmt, ist zu erwarten, dass es in Zukunft über längere Zeiträume seltener, dafür aber ausgiebiger regnet.“ [2, vgl. S. 8]
- Hitze- und Frosttage [2, vgl. S. 7]
 - Die Zahl der Sommertage pro Jahr mit über 25°C wird sich auf bis zu 80 Tage/Jahr verdoppeln.
 - Die Zahl der Hitzetage pro Jahr mit über 30°C wird sich im Osten auf bis zu 25 Tage/Jahr vervierfachen.
 - Die Zahl der Frosttage wird sich in vielen Tälern halbieren (im Mittel ca. -25 Tage).

⁷research for climate protection - model run evaluation

- Schnee [2, vgl. S. 8]

Die durchschnittliche Reduktion der Schneemenge um 50% wird auf aufgrund der höheren Temperaturen im Herbst und Frühjahr, sowie aufgrund der sinkenden Niederschlagsmengen im Herbst erwartet.

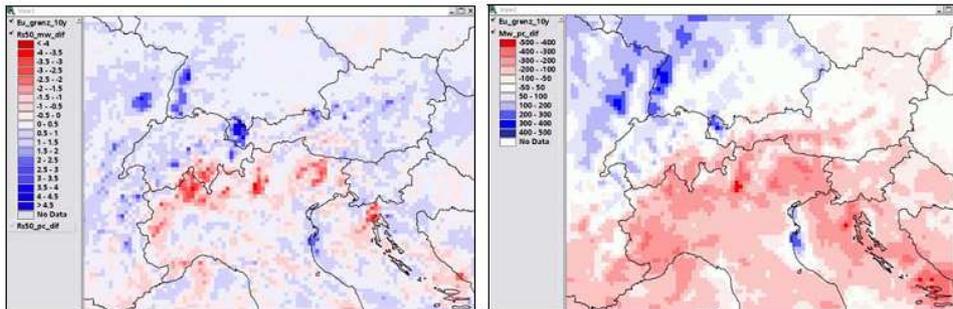


Abbildung 4.6: Veränderung der Zahl der Niederschlagsereignisse mit mehr als 50mm NS/Tag (links), Differenz der jährlichen Niederschlagssummen zwischen den 1980er und den 2040er Jahren (rechts) [2, S. 8, modifiziert]

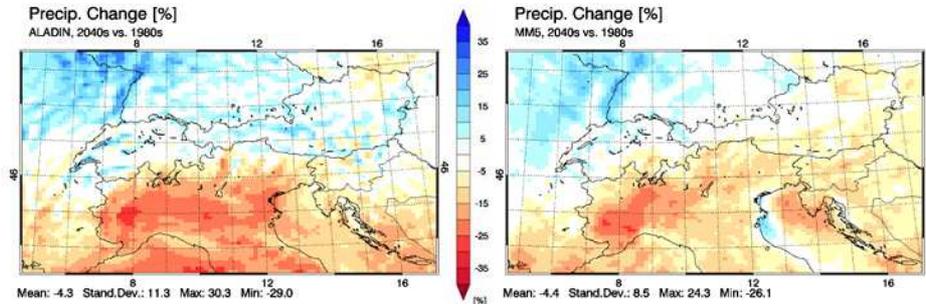


Abbildung 4.7: Regionale Änderung der mittleren Niederschlagssummen zwischen 1981-1990 und 1941-1950, Vergleich der ALADIN- (links) mit den MM5-Ergebnissen (rechts) [2, S. 6, modifiziert]

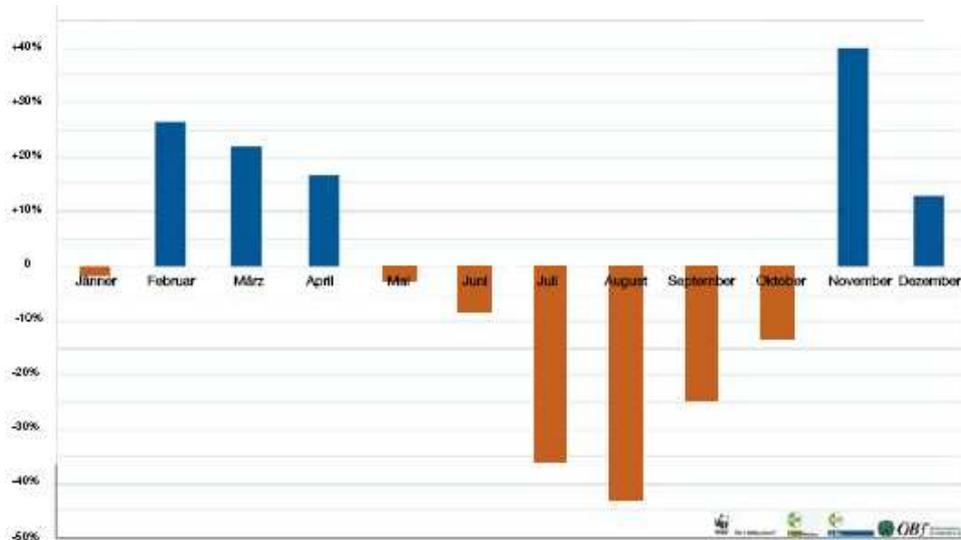


Abbildung 4.8: Relative Änderungen der monatlichen Niederschlagssummen zwischen 1961-1990 und 2071-2100 [33, S. 8, modifiziert]

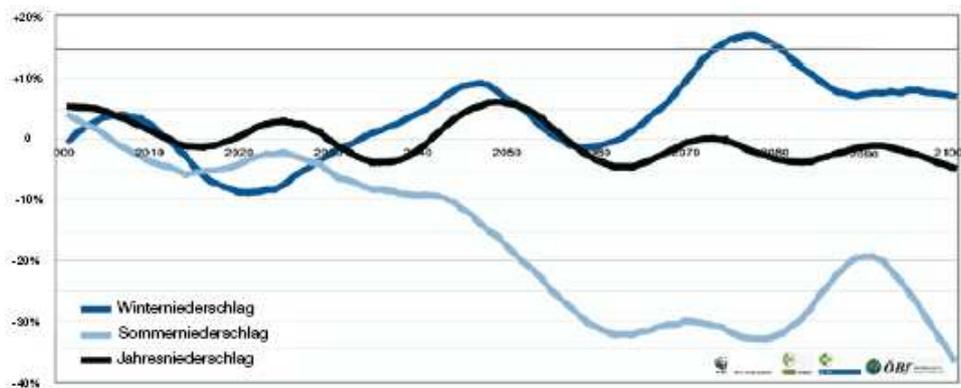


Abbildung 4.9: Zeitliche Evolution der saisonalen Niederschlagssummen gemäß dem UNO-Szenario A1B [33, S. 9, modifiziert]

4.4 Zusammenfassung

Im Kapitel 4 wurden verschiedene Entwicklungspfade des Niederschlages aufgrund der zu erwartenden klimatischen Veränderungen angeführt. Die prognostische Kraft in Bezug auf meteorologische Extremereignisse ist stark eingeschränkt, dennoch zeichnen sich langfristige Änderungen in den Niederschlagsmustern ab. Diese wiederum haben Auswirkungen auf das Abflussgeschehen und somit auch auf Hochwasser.

Die Perspektiven sind:

- Zunahme der globalen und regionalen Temperatur (siehe S. 8) und die damit einhergehende
- Intensivierung der Niederschläge (siehe S. 10, 15)
- Anstieg der Verdunstung (siehe S. 13)
- Abnahme der Schneebedeckung infolge des Anstiegs der Schneefallgrenze (siehe S. 17)
- Geringfügige Änderungen der Jahresniederschlagssumme (siehe S. 10)
- Saisonale Verschiebung der Niederschläge: Abnahmen im Sommer, Zunahme im Winter (siehe S. 10, 11, 15), zunehmend flüssige Niederschläge anstatt Schnee
- Zunahme der Trocken- und Dürreperioden (siehe S. 16, 15)

Kapitel 5

Stochastische Hochwasserabschätzung in Kombination mit einem Niederschlagabflussmodell

5.1 Einleitung

Bei Hochwasserschutzprojekten ist eine starke Verflechtung der Hydrologie mit dem konstruktiven Wasserbau notwendig. Der Beitrag der Hydrologie besteht darin, das Hochwasser produzierende System im Einzugsgebiet zu analysieren. Die zentralen Fragen beschreibt das Schweizer Bundesamt für Wasser und Geologie wie folgt [40, S. 7f.]:

- „Wie kommen Hochwasser zustande? Stichworte: Abflussbildung und Prozessverständnis“
- „Wann und wie häufig treten Hochwasser auf? Stichworte: zeitliche Variabilität, Trends, Häufigkeitsverteilungen“
- „Wie groß ist ihr Ausmaß? Stichworte: Abflussspitzen, Wiederkehrperioden“
- „Welche Methoden eignen sich, um dieses Ausmaß festzulegen?“

Dimensionierungsaufgaben im konstruktiven Ingenieurbau stellen der Einwirkung auf ein System dessen Widerstandsfähigkeit gegenüber. Unter Berücksichtigung des Wirkungszusammenhänge im System werden Aussagen über Stabilität, Beständigkeit und so weiter, getroffen. Im Bereich des Wasserbaus resultieren die Einwirkungen aus dem Niederschlag. Er ist das Ergebnis komplexer physikalischer Prozesse in der Atmosphäre und somit von Änderungen im globalen Klimasystem betroffen.

“Seine deterministische raum-zeitliche Modellierung unter Berücksichtigung der zugrunde liegenden atmosphärischen Vorgänge ist, vor allem auch wegen der im Prozess inhärenten Wechselwirkungen aus verschiedenen Skalen, sehr kompliziert.“ [29, S. 180]

Die Ableitung eines Bemessungswertes (zum Beispiel: Bemessungsregen als Einwirkung auf das hydrologische System) ist ungleich schwieriger zu fassen als die mathematische Erfassung der Belastungen im konstruktiven Ingenieurbau. Die Abschätzung erfolgt heute durch folgende drei Methoden [26, vgl. S. 30]:

- Extremwertstatistische Analyse von Stationsniederschlägen.
- durch Regionalisierung diese Werte. Aufgrund der punktuellen Erfassung der Niederschläge sind die Regenreihen stets auf einen bestimmten Ort bezogen. In datenarmen Gebieten kann der Bemessungsregenansatz von Lorenz/Skoda herangezogen werden.
- Kopplung von globalen Zirkulationsmodellen (basierend auf Grundgleichungen der Strömungs- und Thermodynamik) mit Regionalisierungsmodellen und stochastischen Wettergeneratoren.

Beispiele zur stochastischen Hochwasserabschätzung:

Im Zuge des Nationalen Forschungsprogrammes 31 der Schweiz wurde das sehr weitreichende Thema „Klimaveränderung und Naturkatastrophen“ behandelt. Die Auswirkungen der Niederschläge unter Berücksichtigung von Klimaszenarien wurden mit Hilfe von kontinuierlichen Simulationen im Einzugsgebiet der Broye untersucht [36].

In Österreich erfolgte am Beispiel der Lainsitz die Analyse der Klimafolgen für die Abflussbildung [21]. Dabei wurden die Ergebnisse eines regionalen Klimamodells als Klimasignal zur Generierung von Wetterdaten verwendet.

5.2 Zweck der Modellierung

Qualitativ konsistente Szenarien werden aufgrund der klimatischen Projektionen entwickelt, um bei der quantitativen Übersetzung im Niederschlags-Abfluss-Modell folgenden Ansprüchen zu genügen:

1. Die Szenarioläufe dienen der Dokumentation der Wirkungsweisen im Modell unter spezifischer Annahme von Inputparametern.
2. Qualitative Plausibilität der generierten Niederschlag-Abfluss-Reihen entsprechend den global, regional oder lokal prognostizierten Veränderungen klimatischer Parameter als Grundlage zur Projektion möglicher Veränderungen im Abflussgeschehen.

5.3 Modellarchitektur

Die Abschätzung von Hochwassern fußt in der Annahme, dass ein extremer Abfluss aufgrund verschiedener Niederschlags- und hydrologischer Bedingungen entstehen kann. Dieser Gedanke setzt sich bei der Simulation fort. Wie das Extremhochwasser des Kamps im Jahr 2002 lehrt, sind Extremwerte im Niederschlag keine zwingenden Voraussetzungen für extreme Abflüsse. In diesem Fall reduzierte ein Vorregen die Versickerungsfähigkeit des Bodens. Zwei Tage später führten Regenmengen, die in ihrer Jährlichkeit und Intensität unter den Extremwerten lagen, aufgrund der Vorgeschichte im Niederschlag zu extremen Abflussspitzen. Ein Bemessungsansatz, der nicht nur die Extremwerte, sondern lange Niederschlagszeitreihen heranzieht, wurde mit der Entwicklung stochastischer Niederschlagsgeneratoren gefunden. Durch den probabilistischen Ansatz werden eine Vielzahl möglicher Kombinationen generiert. Die synthetisch generierten Regenereignisse belasten ein Abflussmodell, wobei die statistische Auswertung des Abflussregimes direkt die Parameter für die Bemessungshochwasser liefert.

Dabei lassen sich Veränderungen der Niederschlagsreihe zufolge geänderter klimatischer Bedingungen und ihre Auswirkungen auf die Abflüsse simulieren. Es werden Niederschlagsserien generiert, „deren statistische Charakterisierung repräsentativ sind für verschiedene Szenarien zur möglichen zukünftigen Klimaentwicklung“ [40, S. 34].

Aufgrund der bereits in SIVAPALAN et.al. [38] erfolgten Modellkalibrierung an der Messstelle Frankenfels (Niederösterreich) wird der Fokus in der vorliegenden Arbeit auf modellinterne Kausalketten und die Szenarienbildung gelegt. Die an die Vergangenheit angepassten System- und Inputparameter, sowie Ergebnisse der Ausgangslage finden sich in Kapitel 6, S. 27.

5.3.1 Klima

Um die konkrete Abflusssituation in einem Einzugsgebiet unter dem Lastfall Klimawandel analysieren zu können benötigt es Perspektiven klimatischer Parameter. In Kapitel 4, S. 8 wurde aufgezeigt, dass die direkte Verwendung der Ergebnisse aus regionalen Klimamodellen nicht für die Modellierung hydrologischer Prozesse möglich ist. Deshalb dienen die global und regional formulierten Projektionen als Klimaänderungssignale für den Wettergenerator.

5.3.2 Wetter

Die Zuverlässigkeit von Aussagen hinsichtlich möglicher Klimasignale im Abflussgeschehen hängt stark vom Übergang der Klimadaten zu den Wetterdaten ab. Diese Schnittstelle birgt enorme Unsicherheiten. Auf der einen Seite

stehen mittlere Entwicklungen mit für lokale Fragestellungen zu hohen zeitlichen und regionalen Unsicherheiten, auf der anderen Seite das Erfordernis Daten in stündlicher Auflösung zu erhalten. Die Brücke zwischen den beiden Informationssäulen bildet ein Wettergenerator.

Mit Hilfe eines stochastischen Modells werden in stündlicher Auflösung zufallsbedingte Niederschlagshöhen über einen Zeitraum von 1.000 Jahren generiert. Die statistischen Parameter der synthetischen Zeitreihe entsprechen den beobachteten an der Messstation Frankenfels¹.

Die in den Zukunftsperspektiven formulierten und zu erwartenden Änderungen der Niederschlagsprozesse sind mittlere monatliche, saisonale oder jährliche Signale. Sie dienen als Input in den Niederschlagsgenerator und werden somit in kontinuierliche Zeitreihen mit stündlicher Auflösung übersetzt.

Die dauerstufenbezogene Auswertung der maximalen Niederschlagssummen erfolgt mit Hilfe der Gleitfenster-Statistik².

Systemparameter

Das stochastische Niederschlagsmodell wurde bei SIVAPALAN et. al [38] aufgrund eines Vorgängermodells bei ROBINSON und SIVAPALAN [37] entwickelt und an die Verhältnisse in Österreich angepasst. Die Parameter der Ausgangslage bilden die Niederschlagsverhältnisse an der Messstation Frankenfels nach [38, vgl. S. 7].

Parameterspezifische Verteilungen sind die Grundlage zur Festlegungen von Ereignisbeginn, Ereignisdauer, mittlere Regenintensität und der Intensitätsmuster innerhalb der Ereignisse. Darüber hinaus besitzen die Parameter eine saisonale Komponente.

Im Zentrum der Parametervariation stehen die Niederschlagsintensität, die Ereignisdauer und die Ereignispausen. Diese haben über das Jahr einen sinusförmigen Verlauf, wobei Mittelwert³ ($\delta_a, \delta_r, \delta_b$), Amplitude⁴ ($\alpha_a, \alpha_r, \alpha_b$) sowie die Phasenverschiebung⁵ (τ_a, τ_r, τ_b) diesen charakterisieren. Die in der Folge angeführten Formeln sind von SIVAPALAN et. al. [38, vgl. S. 5-8] entnommen.

¹Im NA-Modell wird der Punktniederschlag als Gebietsniederschlag interpretiert.

²Gleitfenster-Statistik oder Moving-Window-Statistik: Dabei gleitet ein Zeitfenster entlang der generierten Zeitreihe, filtert die Daten innerhalb dieses Fensters und wertet sie statistisch aus.

³Der Mittelwert beschreibt den über das Jahr konstanten Anteil.

⁴Die Amplitude beschreibt den saisonalen Anteil.

⁵Die Phasenverschiebung beschreibt die Lage des Hochpunktes entlang der Zeitachse.

- **Intensität i :** Zur Ermittlung der Niederschlagsintensität wird in Abhängigkeit von der Ereignisdauer t_r nachfolgende Verteilungsfunktion festgelegt. Im *Szenario N1*, sowie den darauf aufbauenden Szenarien, wird ausschließlich die Jahresmittel-Intensität δ_a modifiziert (siehe Kap. 6.2, S. 33).

$$E[i|t_r] = a_1 t_r^{b_1} \quad \text{and} \quad CV^2[i|t_r] = a_2 t_r^{b_2} \quad (5.1)$$

$$a_1 = \delta_a + \alpha_a * \cos \left\{ \frac{2\pi}{\omega} (\tau - \tau_a) \right\} \quad (5.2)$$

- **Ereignisdauer t_r :** Diese entspricht einer Weibull-Verteilung, wobei im *Szenario N2*, sowie den darauf aufbauenden Szenarien, ausschließlich die Jahresmittel-Ereignisdauer δ_r modifiziert wird (siehe Tab. 6.2, S. 33).

$$f_{T_r}(t_r|\gamma_r) = \frac{\beta_r}{\gamma_r} \left(\frac{t_r}{\gamma_r} \right)^{\beta_r-1} \exp \left(-\frac{t_r}{\gamma_r} \right)^{\beta_r} \quad t_r > 0 \quad (5.3)$$

$$\gamma_r = \mu_r \left(\Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta_r} \right) \right)^{-1} \quad (5.4)$$

$$\mu_r = \delta_r + \alpha_r * \cos \left\{ \frac{2\pi}{\omega} (\tau - \tau_r) \right\} \quad (5.5)$$

- **Ereignispause t_b :** Diese entspricht einer Weibull-Verteilung. Im *Szenario N3a*, sowie den darauf aufbauenden Szenarien, wird ausschließlich die Jahresmittel-Ereignispause δ_b modifiziert. Im *Szenario N3b* die Phasenverschiebung als Differenz von $\tau - \tau_b$ (siehe Kap. 6.2, S. 33).

$$f_{T_b}(t_b|\gamma_b) = \frac{\beta_b}{\gamma_b} \left(\frac{t_b}{\gamma_b} \right)^{\beta_b-1} \exp \left(-\frac{t_b}{\gamma_b} \right)^{\beta_b} \quad t_b > 0 \quad (5.6)$$

$$\gamma_b = \mu_b \left(\Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta_b} \right) \right)^{-1} \quad (5.7)$$

$$\mu_b = \delta_b + \alpha_b * \cos \left\{ \frac{2\pi}{\omega} (\tau - \tau_b) \right\} \quad (5.8)$$

5.3.3 Hydrologie

Die Abflusstransformation erfolgt mit einem Black-Box-Modell anhand des Einheitsganglinienverfahrens. Die Form der Einheitsganglinie spiegelt die physikalischen Prozesse im Einzugsgebiet wieder. Der Niederschlag im Einzugsgebiet wird als gleichverteilt angenommen. Die Übersetzung des Effektivregens⁶ in die Abflussganglinie am Gebietsauslass setzt Linearität und Stationarität entlang der Zeitachse voraus [14, vgl. S. 3]:

- Stationarität:
Ein Eingabeimpuls liefert stets die gleiche Systemantwort.
- Linearität:
Zwei Impulseinheiten pro Zeiteinheit führen zu einer Verdopplung der Systemantwort.
- Superposition:
Treten zwei Impulseinheiten in aufeinander folgenden Zeiteinheiten auf, so addieren sich die zeitverzögerten, singulären Systemantworten zu einer gesamten Systemantwort.

Systemparameter

- Basisabfluss q_0 :
Entsprechend des Kosinusverlaufes variiert der Basisabfluss saisonal. Der Wert wird im Zuge der Szenarien nicht verändert.

$$q_0 = \delta_q + \alpha_q \cos \left\{ \frac{2\pi}{\omega} (\tau - \tau_q) \right\} \quad (5.9)$$

- Oberflächenabfluss:
Der Effektivniederschlag ergibt sich durch die Berücksichtigung eines ereignisbezogenen Abflussbeiwertes r_c . Dieser hat einen mittleren saisonalen Verlauf r_{cm} und ist darüber hinaus mit einer Zufallskomponente σ_c^2 behaftet. Der Abflussbeiwert entspricht der Beta-Verteilung wie folgt:

$$f_R(r_c) = \frac{1}{B(u, v)} r_c^{u-1} (1 - r_c)^{v-1} \quad 0 < r_c < 1, \quad u > 0, \quad v > 0 \quad (5.10)$$

$$r_{cm} = \delta_c + \alpha_c \cos \left\{ \frac{2\pi}{\omega} (\tau - \tau_c) \right\} \quad (5.11)$$

Im *Szenario A1*, sowie den darauf aufbauenden Szenarien, wird ausschließlich der Jahresmittel-Abflussbeiwert δ_c modifiziert (siehe Kap.

⁶Unter Effektivregen wird der abflusswirksame Niederschlag verstanden.

6.2, S. 33).

Der Abflussbeiwert ist eine über das Gesamtgebiet gemittelte Kenngröße für die Abflussbereitschaft. Er repräsentiert zahlreiche weitere Effekte aus [38, vgl. S. 8]:

- Verdunstung
- Schneeschmelze
- Versickerungsfähigkeit
- Vorbefeuchtung durch vorangegangene Regenereignisse

Klimabedingte Änderungen finden sich vor allem bei der Verdunstung und der Schneeschmelze. Wie in Kapitel 4, S. 8 angeführt, steigt die Verdunstungshöhe aufgrund der progressiven Erwärmung. Diesem Gedanken folgend, reduziert sich der ereignisbezogene Abflussbeiwert in der Modellierung. Dadurch verringert sich der abflusswirksame Niederschlag.

Allfällige Prozessinformationen aus vorangegangenen Analysen der Abflussreaktionen im Einzugsgebiet erlauben an dieser Stelle eine Qualitätsverbesserung. Ein hydrologischer Systemwechsel wird durch den Anstieg der Bodenfeuchte infolge anhaltender Niederschläge erreicht. Aufgrund der verringerten Aufnahmekapazität erhöht sich der Oberflächenabfluss. Das Abflussmodell erlaubt über den ereignisbezogenen konstanten Abflussbeiwert hinaus die Festlegungen eines Schwellenwertes der Niederschlagssumme. Wird dieser erreicht, so erfolgt der Übergang auf einen vorab definierten, höheren Abflussbeiwert.

- Abflusskonzentration:

Das Modell der Abflusskonzentration entspricht einem Linearspeicher mit einer Konzentrationszeit t_c von sechs Stunden⁷. Dies ist jene Zeit, die ein Wassertropfen vom entferntesten Punkt eines Einzugsgebietes bis zu seinem Eintreffen am Gebietsauslass (Pegel) benötigt. Für ein singuläres Ereignis erfolgt die Berechnung der Abflusskonzentration somit wie folgt:

$$q(t) = q_0 + \frac{r_c}{t_c} \int_0^t i(t') \exp\left(-\frac{t-t'}{t_c}\right) dt' \quad (5.12)$$

wobei $i(t)$ die Zeitreihe des Niederschlags und $q(t)$ die Zeitreihe des Abflusses ist.

⁷Sechs Stunden ist ein typischer Wert für kleine Einzugsgebiete in Österreich.

Kapitel 6

Modellläufe

6.1 Ausgangslage

Die Parameter der Ausgangslage (siehe Tab. 6.2, S. 33) wurden vom Institut für Hydrologie an der TU Wien für die vorliegende Arbeit ebenso zu Verfügung gestellt, wie das stochastische Niederschlags- und Abflussmodell. Die Daten zur Charakterisierung der Ausgangslage wurden entsprechend den beobachteten Messdaten der Station Frankenfels angepasst. Sie entsprechen jenen Werten, die auch in der Arbeit von SIVAPALAN et. al. [38] Verwendung finden.

6.2 Intensivierung des Wasserkreislaufes

6.2.1 Allgemein

Als möglicher Erklärungsansatz für den Anstieg der Häufigkeiten und Intensitäten der Starkregenereignisse dient die Intensivierung des Wasserkreislaufes [34, vgl. S. 32]. Aufgrund des globalen Temperaturanstieges kommt es zu einer stärkeren Anfeuchtung der Atmosphäre, die für das Wettergeschehen von Relevanz ist. Das erhöhte Energieangebot bewirkt eine Beschleunigung des Wasserkreislaufes. Folglich kommt es zu einem erhöhten Durchsatz im hydrologischen Prozess. Da pro Grad Erwärmung der Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre um circa 6% zunimmt, erhöht sich das Niederschlagspotential. Gleichzeitig wird der abflusswirksame Niederschlag durch erhöhte Verdunstung reduziert. Durch die paradigmatische Annahme dieses Phänomens lassen sich die Folgen qualitativ konsistent erklären.

Zur Beschleunigung des Wasserkreislaufes führen allerdings nicht nur klimabedingte Effekte. So verkürzt sich durch die zunehmende Versiegelung die Konzentrationszeit im Einzugsgebiet. Der tägliche Verbrauch an Fläche für Siedlungs- und Verkehrsflächen liegt in der Periode 2002-2007 bei 15

Hektar [41]. Die Differenzierung der Einflüsse zwischen klimabedingten und anderen Ursachen bedarf aufwändiger Methoden. „Während sich wasserbauliche Maßnahmen meist gut spezifizieren lassen, ist dies bei Landnutzung und Klima nicht der Fall“ [4, S. 5].



Abbildung 6.1: Schema Wasserkreislauf [42]

6.2.2 Szenarien

Nomenklatur der Szenarien

- „0“ bezeichnet die Ausgangslage
- „N“ bezeichnet Modifikationen im Niederschlagsmodell
- „A“ bezeichnet Modifikationen im Abflussmodell

Saisonale Gliederung

Zahlreiche Quellen deuten auf inneranuale Verschiebungen der Niederschlags- und Abflusssituation hin, wobei die jährliche Betrachtung keine signifikanten Unterschiede feststellen lässt. Vor diesem Hintergrund erfolgt eine saisonale Einteilung:

- Frühling: März, April, Mai
- Sommer: Juni, Juli, August
- Herbst: September, Oktober, November
- Winter: Dezember, Jänner, Februar

Systematische Variation der Annahmen

Zur Abbildung der in den Perspektiven (siehe Kap. 4.4, S. 19) formulierten Phänomene erfolgt eine Variation der Inputparameter. Die Modifikation orientiert sich an den weiter unten angeführten Rahmenbedingungen. Aufgrund seiner Programmarchitektur ermöglicht das vorliegende NA-Modell die Variation einzelner Parameter. Durch die singuläre Änderung erfolgt aber keine hydrologisch konsistente Abbildung der Niederschlagsprozesse. Wie die Erfahrung lehrt, existiert ein Zusammenhang zwischen der Niederschlagsintensität und der Ereignisdauer¹.

Die Szenarien *N1*, *N2*, *N3a*, *N3b* und *A1* werden als „Vorläuferszenarien“ betrachtet, um die Wirkungsweise des Modells kennen zu lernen. Erst im zweiten Schritt erfolgt eine hydrologisch konsistente Abbildung in *N12*, *N13*, *N123b*, *N13b-A1* und *N123b-A1* durch die Überlagerung einzelner Vorläuferszenarien als Annäherung an reale Verhältnisse.

Bei der Kombination der Parameter werden die statistischen Kenngrößen von Intensität i , Ereignisdauer t_r und Ereignispause t_b so gewählt, dass die Ergebnisse nach Möglichkeit jenen der Projektionen entsprechen. Die Plausibilität wird durch die Formulierung von Rahmenbedingungen sichergestellt, die sich aus den Kernaussagen der Projektionen (siehe S. 19) ableiten.

Rahmenbedingungen

1. Geringfügige Änderungen der Jahresniederschlagssumme.
2. Intensivierung der Niederschläge. Diese zeigt sich sowohl im Sommer, als auch im Winter.
3. Die saisonale Verschiebung der Niederschläge zeigt sich im Winterhalbjahr durch Zunahme der Niederschlagssumme und Abnahme im Sommerhalbjahr.
4. Anstieg der Verdunstung.

Szenarienüberblick

Ausgehend von den in Kapitel 4, S. 8 beschriebenen Klima- und Wetterphänomenen erfolgt eine Übersetzung der projizierten Änderungssignale (*Phänomene*) in statistische Kenngrößen des Niederschlag- und Abflussgeschehens (*Inputparameter*). Die aufgrund der Modifikationen gegenüber der Ausgangslage zu erwartenden Änderungen werden vorab in den *Erwartungen* beschrieben. Die *Erfahrungen*, die durch die Modellresultate entstehen, werden in Kap. 6.4.2, S. 46 den Erwartungen gegenüber gestellt.

¹Entsprechend dem Formelapparat auf S. 24 hat die Ereignisdauer einen Einfluss auf die Verteilung der Intensität. Werden jedoch Intensitätsparameter geändert, so folgt keine Änderung der Ereignisdauer.

<i>Szenario</i>	<i>Phänomen / Inputparameter / Erwartungen</i>
N1	<p><i>Phänomen:</i> Intensivere Niederschläge.</p> <p><i>Inputparameter:</i> Anhebung der mittleren, jährlichen Niederschlagsintensität δ_a um 20%, unabhängig von den saisonalen Schwankungen.</p> <p><i>Erwartungen:</i> Konstanter Anstieg der saisonalen Niederschlagssummen. Anstieg der HQ-Werte über das ganze Jahr.</p>
N2	<p><i>Phänomen:</i> Wie die Erfahrung zeigt, steht ein Anstieg der Niederschlagsintensität kürzen Ereignisdauern gegenüber.</p> <p><i>Inputparameter:</i> Verkürzung der mittleren, jährlichen Ereignisdauern δ_r um 20%, unabhängig von den saisonalen Schwankungen.</p> <p><i>Erwartungen:</i> Ganzjährige Reduktion der Niederschlagssummen, da unter Beibehaltung der Intensität die Ereignisdauer gekürzt wird. Folglich steigt die Wahrscheinlichkeit, geringere HQ-Werte zu erreichen.</p>
N3a	<p><i>Phänomen:</i> Mit der Verkürzung der Ereignisdauern aufgrund höherer Intensitäten geht eine Verlängerung der Ereignispausen einher.</p> <p><i>Inputparameter:</i> Verlängerung der mittleren, jährlichen Ereignispausen δ_b um 20%, unabhängig von den saisonalen Schwankungen.</p> <p><i>Erwartungen:</i> Ganzjährige Reduktion der Niederschlagssummen, da unter Beibehaltung der Intensität die Ereignispausen verlängert werden. Folglich steigt die Wahrscheinlichkeit, geringere HQ-Werte zu erreichen.</p>
N3b	<p><i>Phänomen:</i> Zunahme von Trocken- und Dürreperioden im Sommer, sowie Verlagerung der Niederschläge in die Wintermonate.</p> <p><i>Inputparameter:</i> Saisonale Verschiebung der Ereignispausen t_b um 6 Monate.</p> <p><i>Erwartungen:</i> Im Sommer verringert sich die Anzahl der Niederschläge, da nun das Maximum der saisonalen Ereignispausen in dieser Saison liegt. Gleichzeitig verringert sich aber auch die Abflussbereitschaft im Sommer durch längere Ereignispausen. Somit reduziert sich auch die Wahrscheinlichkeit, dass Vorregen den ereignisbezogenen Abflussbeiwerte erhöhen und es zu höheren Abflüssen kommt. Folglich müssen sommerliche Hochwasser abnehmen, winterliche zunehmen.</p>
A1	<p><i>Phänomen:</i> Der Anstieg der Verdunstung lässt sich durch den Temperaturanstieg begründen.</p>

	<p><i>Inputparameter:</i> Der Abflussbeiwert repräsentiert im Modell Verdunstungseffekte (siehe S.26) und wird deshalb um 6% im Mittel reduziert.</p> <p><i>Erwartungen:</i> Verminderung der Abflusssummen und der HQ-Werte.</p>
N12	<p><i>Phänomen:</i> Die Intensität ($N1$) nimmt mit sinkender Ereignisdauer ($N2$) zu.</p> <p><i>Inputparameter:</i> Erhöhung der mittleren Intensität δ_a um 20% und Verkürzung der Ereignisdauer δ_r um 20%.</p> <p><i>Erwartungen:</i> Die Steigerungseffekte aus $N1$ und die Minderungseffekte aus $N2$ wirken kompensierend.</p>
N13a	<p><i>Phänomen:</i> Die Intensität ($N1$) nimmt mit sinkender Ereignisdauer zu und hat eine Verlängerung der Ereignispausen zur Folge ($N2$).</p> <p><i>Inputparameter:</i> Erhöhung der mittleren Intensität δ_a um 20% und Verlängerung der Ereignispausen δ_b um 20%.</p> <p><i>Erwartungen:</i> Es werden ähnliche Effekte wie bei $N12$ erwartet.</p>
N12-A1	<p><i>Phänomen:</i> Infolge der Temperaturerhöhung kommt es zu Verschiebungen bei den Komponenten der Wasserbilanz. Die Intensivierung des Wasserkreislaufes führt zu höheren Intensitäten ($N1$) und kürzeren Ereignisdauern ($N2$). Gleichzeitig erhöht sich die Verdunstung ($A1$).</p> <p><i>Inputparameter:</i> Erhöhung der mittleren Intensität δ_a um 20%, Verkürzung der Ereignisdauer δ_r um 20% und Verringerung des Abflussbeiwertes um 6%.</p> <p><i>Erwartungen:</i> Die Reduktion des Abflussbeiwertes wirkt sich gegenüber $N12$ dämpfend auf die Abflusssummen und die HQ-Werte aus.</p>
N13a-A1	<p><i>Phänomen:</i> Kombination von $N1$, $N3a$ und $A1$.</p> <p><i>Inputparameter:</i> Erhöhung der mittleren Intensität δ_a um 20%, Verlängerung der Ereignispausen δ_b um 20% und Verringerung des Abflussbeiwertes um 6%.</p> <p><i>Erwartungen:</i> Die Reduktion des Abflussbeiwertes bewirkt gegenüber $N13a$ eine Reduktion der Abflusssummen.</p>
N123b	<p><i>Phänomen:</i> Kombination von $N1$, $N2$ und $N3b$.</p> <p><i>Inputparameter:</i> Erhöhung der mittleren Intensität δ_a um 20%, Verkürzung der Ereignisdauer δ_r um 20% und saisonale Verschiebung der Ereignispausen t_b um 6 Monate.</p> <p><i>Erwartungen:</i> Abnahme der Niederschlagssummen und HQ-Werte im Sommer, gegenteiliges im Winter.</p>
N123b-A1	<p><i>Phänomen:</i> Kombination von $N1$, $N2$, $N3b$ und $A1$.</p>

Inputparameter: Erhöhung der mittleren Intensität δ_a um 20%, Verkürzung der Ereignisdauer δ_r um 20%, saisonale Verschiebung der Ereignispausen t_b um 6 Monate und Verringerung des Abflussbeiwertes um 6%.

Erwartungen: Abnahme der Niederschlagssummen und HQ-Werte im Sommer, gegenteiliges im Winter, aber in geringerem Ausmaß als bei N123b, da der Anteil an Verdunstung auf Kosten der Abflusskonzentration steigt.

6.3 Auswertung der Simulationsresultate

6.3.1 Niederschlag

Die folgenden Tabellen und Grafiken stellen die Zusammenfassung der im Anhang befindlichen Stufendiagramme (zum Beispiel: Abb.: A.14, S. 72 für Szenario *N1*) dar. Die monatlichen Niederschlagshöhen sind der Durchschnitt der Monatssummen aller gleichartigen Monate über alle generierten Jahre. Die saisonalen und jährlichen Angaben resultieren aus der Aufsummierung dieser und stellen somit die Niederschlagshöhe je Saison beziehungsweise je Jahr dar.

Tabelle 6.3: Saisonale und jährliche Niederschlagssummen

[mm]	0	N1	N2	N3a	N3b	A1	N12	N13a	N12-A1	N13a-A1	N123b	N123b-A1
Gesamtjahr	1223	1476	1014	1050	1165	1228	1266	1263	1251	1265	1197	1206
Frühjahr	350	413	293	304	333	351	349	357	356	358	328	330
Sommer	450	509	360	381	369	447	428	430	415	427	333	339
Herbst	270	333	229	233	280	275	295	287	289	288	302	303
Winter	153	221	132	132	183	155	194	189	191	192	234	234

Tabelle 6.4: Relative Änderung der saisonalen und jährlichen Niederschlagssummen im Vergleich zur Ausgangslage

	N1	N2	N3a	N3b	A1	N12	N13a	N12-A1	N13a-A1	N123b	N123b-A1
Gesamtjahr	21%	-17%	-14%	-5%	0%	4%	3%	2%	3%	-2%	-1%
Frühjahr	18%	-16%	-13%	-5%	0%	0%	2%	2%	2%	-6%	-6%
Sommer	13%	-20%	-15%	-18%	-1%	-5%	-4%	-8%	-5%	-26%	-25%
Herbst	23%	-15%	-14%	4%	2%	9%	6%	7%	7%	12%	12%
Winter	44%	-14%	-14%	20%	1%	27%	24%	25%	25%	53%	53%

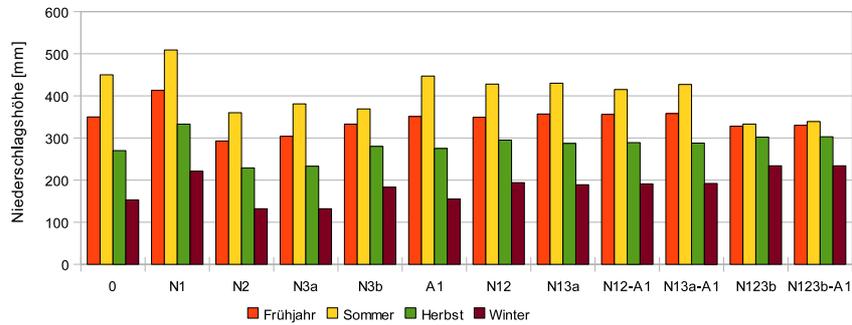
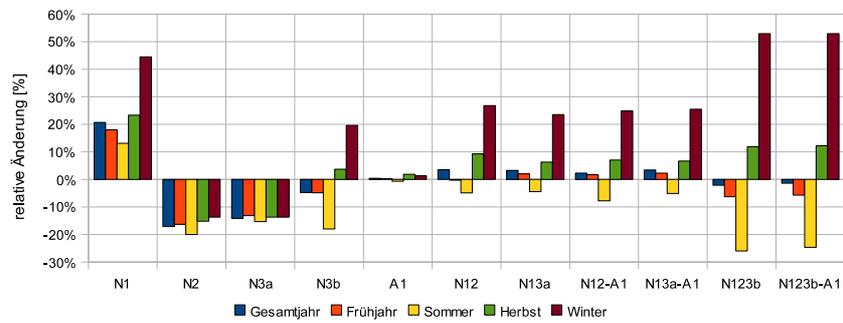
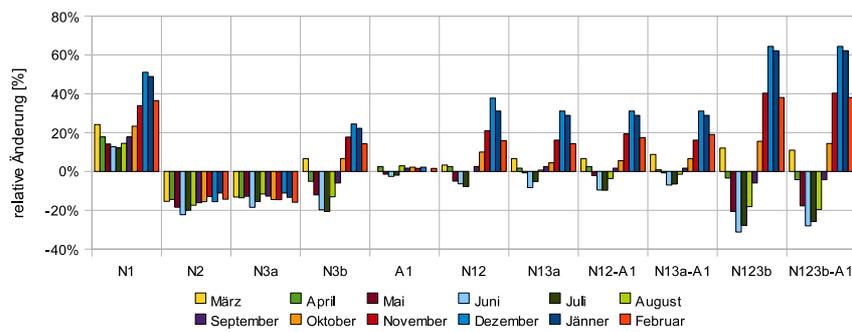


Abbildung 6.2: Saisonale Niederschlagssummen.



(a)



(b)

Abbildung 6.3: Relative Änderung der Niederschlagssummen in saisonaler (a) und monatlicher (b) Darstellung.

6.3.2 Abfluss

(a) Monatliche Abflusssummen

Die folgenden Tabellen und Grafiken stellen die Zusammenfassung der im Anhang befindlichen Stufendiagramme (zum Beispiel: Abb.: A.16, S. 73 für Szenario *N1*) dar. Die monatlichen Abflusshöhen sind der Durchschnitt der Monatssummen aller gleichartigen Monate über alle generierten Jahre. Die saisonalen und jährlichen Angaben resultieren aus der Aufsummierung dieser und stellen somit die Abflusshöhe je Saison beziehungsweise je Jahr dar.

Tabelle 6.5: Saisonale und jährliche Abflusssummen [mm].

[mm]	0	N1	N2	N3a	N3b	A1	N12	N13a	N12-A1	N13a-A1	N123b	N123b-A1
Gesamtjahr	343	433	289	295	355	308	379	371	345	351	391	368
Frühjahr	96	115	80	83	94	86	98	97	90	93	95	89
Sommer	59	66	47	50	48	44	57	56	46	48	43	38
Herbst	102	128	88	88	109	96	114	111	106	106	120	114
Winter	86	124	74	74	104	82	110	107	103	104	133	127

Tabelle 6.6: Relative Änderung der saisonalen und jährlichen Abflusssummen gegenüber der Ausgangslage

	N1	N2	N3a	N3b	A1	N12	N13a	N12-A1	N13a-A1	N123b	N123b-A1
Gesamtjahr	26%	-16%	-14%	3%	-10%	10%	8%	1%	2%	14%	7%
Frühjahr	20%	-17%	-14%	-2%	-10%	2%	1%	-6%	-3%	-1%	-7%
Sommer	12%	-20%	-15%	-19%	-25%	-3%	-5%	-22%	-19%	-27%	-36%
Herbst	25%	-14%	-14%	7%	-6%	12%	9%	4%	4%	18%	12%
Winter	44%	-14%	-14%	21%	-5%	28%	24%	20%	21%	55%	48%

Tabelle 6.7: Verhältnis der Niederschlagssummen zu den Abflusssummen

	0	N1	N2	N3a	N3b	A1	N12	N13a	N12-A1	N13a-A1	N123b	N123b-A1
Gesamtjahr	3,6	3,4	3,5	3,6	3,3	4,0	3,3	3,4	3,6	3,6	3,1	3,3
Frühjahr	3,6	3,6	3,7	3,7	3,5	4,1	3,6	3,7	4,0	3,8	3,5	3,7
Sommer	7,6	7,7	7,7	7,6	7,7	10,2	7,5	7,7	9,0	8,9	7,7	8,9
Herbst	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,9	2,6	2,6	2,7	2,7	2,5	2,7
Winter	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,9	1,8	1,8	1,9	1,8	1,8	1,8

Tabelle 6.8: Differenz des Abflussbeiwertes und dem Verhältnis von Abflusssumme/Niederschlagssumme

	0	N1	N2	N3a	N3b	A1	N12	N13a	N12-A1	N13a-A1	N123b	N123b-A1
Gesamtjahr	0,07	0,06	0,06	0,07	0,05	0,07	0,05	0,06	0,05	0,05	0,02	0,03
Frühjahr	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01
Sommer	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Herbst	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00
Winter	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01

Tabelle 6.9: Änderung der saisonalen und jährlichen Abflusssumme durch Berücksichtigung eines reduzierten Abflussbeiwertes

	N12 / N12-A1	N13a / N13a-A1	N123b / N123b-A1
Gesamtjahr	10%	6%	6%
Frühjahr	9%	4%	7%
Sommer	24%	17%	13%
Herbst	8%	5%	5%
Winter	7%	3%	5%

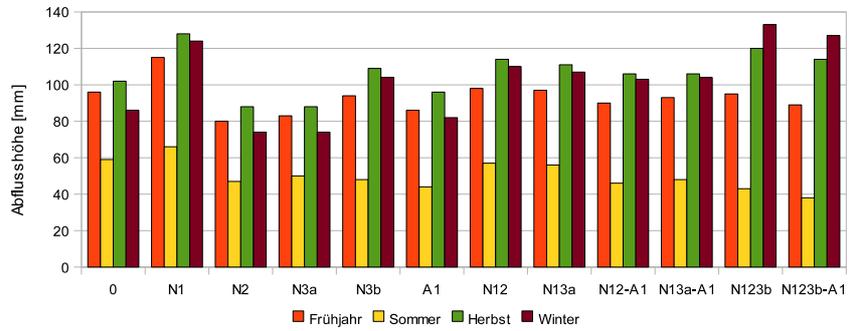
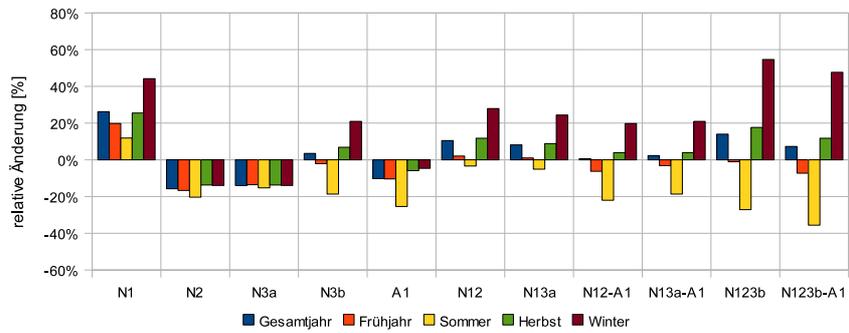
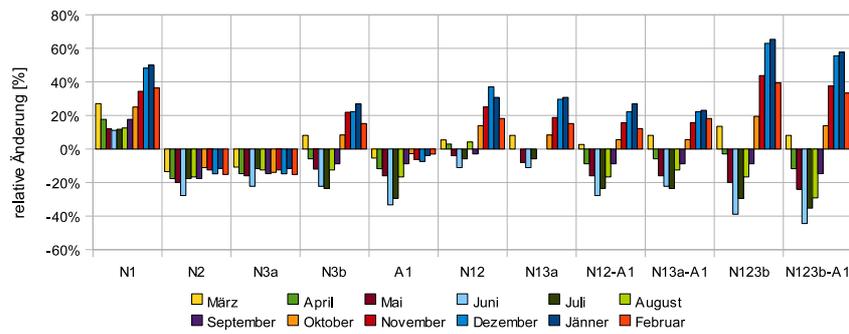


Abbildung 6.4: Saisonale Abflusssummen



(a)



(b)

Abbildung 6.5: Relative Änderung der Abflusssummen in saisonaler (a) und monatlicher (b) Darstellung.

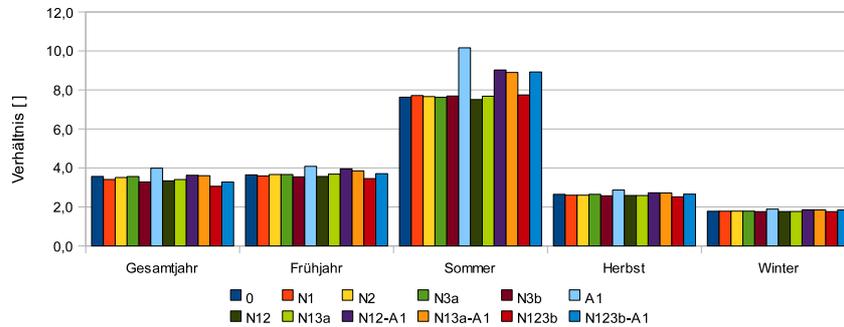


Abbildung 6.6: Verhältnis der Niederschlagssummen zu den Abflusssummen

(b) Monatsmaxima im Abfluss

Die Hochwasserstatistik basiert auf den Monatsmaxima im Abfluss, wobei die in der Folge angegebenen Abflussscheitel von den im Anhang angeführten Grafiken (z.B.: Abb.: A.18, S. 74 für Szenario *N1*) stammen. Das Zeitfenster beim Moving-Window-Verfahren zur Ermittlung des Maximums der generierten Abflussganglinie beträgt eine Stunde. Der Momentanwert ist somit ein stündlicher Mittelwert.

Tabelle 6.10: Saisonale und jährliche Abflussscheitel [mm/h]

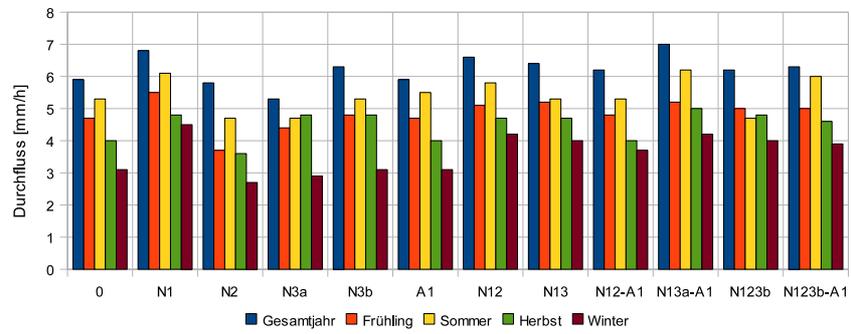
[mm/h]	0	N1	N2	N3a	N3b	A1	N12	N13a	N12-A1	N13a-A1	N123b	N123b-A1
HQ100												
Gesamtjahr	5,9	6,8	5,8	5,3	6,3	5,9	6,6	6,4	6,2	7,0	6,2	6,3
Frühling	4,7	5,5	3,7	4,4	4,8	4,7	5,1	5,2	4,8	5,2	5,0	5,0
Sommer	5,3	6,1	4,7	4,7	5,3	5,5	5,8	5,3	5,3	6,2	4,7	6,0
Herbst	4,0	4,8	3,6	4,8	4,8	4,0	4,7	4,7	4,0	5,0	4,8	4,6
Winter	3,1	4,5	2,7	2,9	3,1	3,1	4,2	4,0	3,7	4,2	4,0	3,9
HQ30												
Gesamtjahr	4,8	5,8	4,9	4,5	5,2	5,0	5,5	5,3	4,9	5,9	5,3	6,0
Frühling	3,9	4,6	3,2	2,6	4,0	3,9	4,2	4,2	4,0	4,4	3,9	3,9
Sommer	4,3	5,2	3,9	3,9	4,3	4,5	4,5	4,3	4,3	5,1	3,7	4,5
Herbst	3,2	4,0	3,0	3,3	3,7	3,4	3,7	4,0	3,4	4,2	4,1	3,9
Winter	2,7	3,9	2,3	2,5	2,7	2,7	3,5	3,4	3,1	3,5	3,5	3,4

Tabelle 6.11: Saisonale Änderungen der Abflussscheitel in Relation zur Ausgangslage

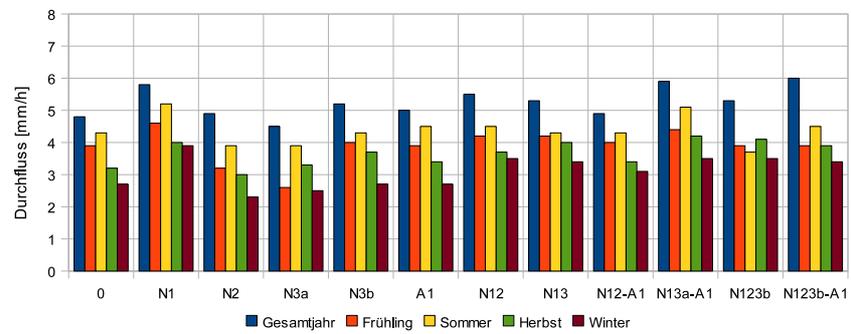
	N1	N2	N3a	N3b	A1	N12	N13a	N12-A1	N13a-A1	N123b	N123b-A1
HQ100											
Gesamtjahr	15%	-2%	-10%	7%	0%	12%	8%	5%	19%	5%	7%
Frühling	17%	-21%	-6%	2%	0%	9%	11%	2%	11%	6%	6%
Sommer	15%	-11%	-11%	0%	4%	9%	0%	0%	17%	-11%	13%
Herbst	20%	-10%	20%	20%	0%	18%	18%	0%	25%	20%	15%
Winter	45%	-13%	-6%	0%	0%	35%	29%	19%	35%	29%	26%
HQ30											
Gesamtjahr	21%	2%	-6%	8%	4%	15%	10%	2%	23%	10%	25%
Frühling	18%	-18%	-33%	3%	0%	8%	8%	3%	13%	0%	0%
Sommer	21%	-9%	-9%	0%	5%	5%	0%	0%	19%	-14%	5%
Herbst	25%	-6%	3%	16%	6%	16%	25%	6%	31%	28%	22%
Winter	44%	-15%	-7%	0%	0%	30%	26%	15%	30%	30%	26%

Tabelle 6.12: Verhältnis der Abflussscheitel von HQ100 zu HQ30

	0	N1	N2	N3a	N3b	A1	N12	N13a	N12-A1	N13a-A1	N123b	N123b-A1
Gesamtjahr	23%	17%	18%	18%	21%	18%	20%	21%	27%	19%	17%	5%
Frühling	21%	20%	16%	69%	20%	21%	21%	24%	20%	18%	28%	28%
Sommer	23%	17%	21%	21%	23%	22%	29%	23%	23%	22%	27%	33%
Herbst	25%	20%	20%	45%	30%	18%	27%	18%	18%	19%	17%	18%
Winter	15%	15%	17%	16%	15%	15%	20%	18%	19%	20%	14%	15%

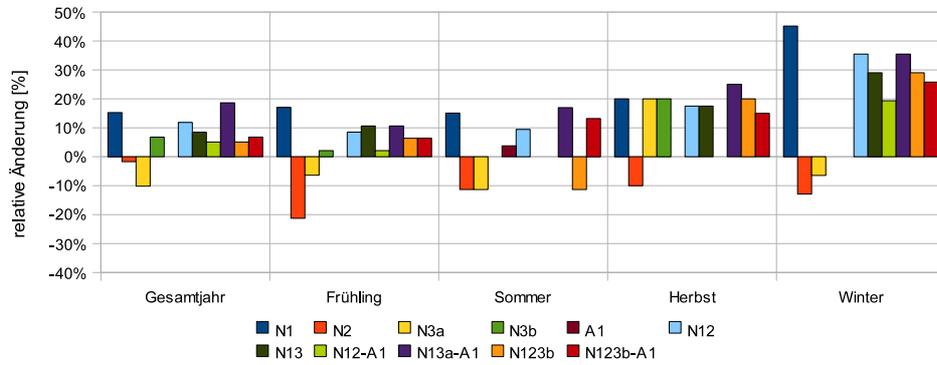


HQ100 (a)

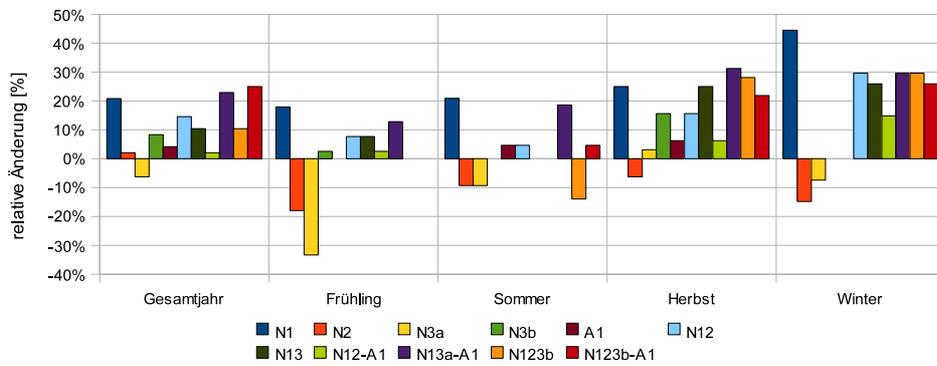


HQ30 (b)

Abbildung 6.7: Abflussscheitel bei HQ100 (a) und HQ30 (b).



HQ100 (a)



HQ30 (b)

Abbildung 6.8: Saisonale Darstellung der Abflussscheitel bei HQ100 (a), HQ30 (b)

Tabelle 6.13: Änderung der Abflussscheitel durch Berücksichtigung eines reduzierten Abflussbeiwertes

	N12 / N12-A1	N13a / N13a-A1	N123b / N123b-A1
HQ100			
Gesamtjahr	-6%	0%	0%
Frühjahr	-6%	0%	0%
Sommer	-9%	17%	28%
Herbst	-15%	6%	-4%
Winter	-12%	5%	-3%
HQ30			
Gesamtjahr	-5%	5%	0%
Frühling	-5%	5%	0%
Sommer	-4%	19%	22%
Herbst	-8%	5%	-5%
Winter	-11%	3%	-3%

6.4 Analyse der Simulationsresultate

Die Vorläuferszenarien (Kap. 6.4.1, S. 44) verfolgen den Zweck, die Wirkungsweisen des stochastischen Niederschlagsmodells sowie des ereignisbezogenen Abflussmodells im Black-Box-Ansatz zu beurteilen. Dabei werden die Auswirkungen der singulären Parametermodifikationen auf Niederschlag und Abfluss aufgezeigt. Die Erkenntnisse dienen

1. der Dokumentation der Kausalketten im Modell unter spezifischer Annahme von Inputparametern (Kap. 6.5, S. 48). Es wird der Hinweis gegeben, warum in welchem Bereich besonders starke Veränderungen auftreten.
2. der systematischen Überlagerung der Vorläuferszenarien (Kap. 6.4.2, S. 46). Ziel dabei ist, anhand bekannter hydrologischer Zusammenhänge eine Abbildung realitätsnaher Verhältnisse zu simulieren. Die in den Vorläuferszenarien berücksichtigten Phänomene werden unter Einhaltung der Rahmenbedingungen (siehe S. 29) hydrologisch konsistent überlagert. Das konkrete Hochwasserrisiko im Einzugsgebiet wird dadurch nicht wiedergegeben. Um diesem Anspruch zu genügen, bedarf es zusätzlicher extremhydrologischer Analysen. Die *Erfahrungen* der Simulationsläufe werden in Bezug zu den vorab formulierten *Erwartungen* (S. 29) gesetzt.

6.4.1 Vorläuferszenarien

<i>Szenario</i>	<i>Auswirkungen auf Niederschlag und Abfluss</i>
N1	<p><i>Niederschlag:</i> Das Anheben der mittleren Niederschlagsintensität führt zu deutlichen Unterschieden bei den Zunahmen der saisonalen Niederschlagssummen. Liegen die Zunahmen im Frühjahr und Herbst etwa im Jahresschnitt (+21%), so resultiert eine geringere Zunahme im Sommer (+13%) und eine deutliche im Winter (+44%). Die modellinterne Kausalkette ist in Kap. 6.5.1 (a), S. 48 angeführt.</p> <p><i>Abfluss:</i> Das Muster der saisonalen Niederschlagssummen spiegelt sich im gleichen Ausmaß bei den Abflusssummen und den saisonalen Extremwerten im Abfluss wieder. Der Abflussscheitel von HQ100 liegt im Winter mit +45% über jenem der Ausgangslage und damit deutlich über den übrigen Werten (zwischen +15% und +20%).</p>
N2	<p><i>Niederschlag:</i> Die Verkürzung der Ereignisdauern reduziert die saisonalen Niederschlagssummen in einem Ausmaß, das auch den Änderungen beim Jahresniederschlag (−17%) entspricht. Die modellinterne Kausalkette ist in Kap. 6.5.1 (b), S. 48 angeführt.</p> <p><i>Abfluss:</i> Der Trend setzt sich bei den Abflusssummen fort. Der jährlich Abflussscheitel von HQ100 lässt mit −2% eine schwache Veränderungen erkennen. HQ100 weist im Frühling eine Abnahme von 21% auf, im Sommer, Herbst und Winter −10% bis −13%.</p>
N3a	<p><i>Niederschlag:</i> Die Verlängerung der Ereignispausen folgt hinsichtlich der Auswirkungen im Niederschlag den gleichen Trends wie N2. Die saisonale Abnahmen finden zwischen −13% und −15% statt. Die modellinterne Kausalkette ist in Kap. 6.5.1 (c), S. 48 angeführt.</p> <p><i>Abfluss:</i> Die Abnahmetrends setzen sich bei den Abflusssummen fort. HQ100 zeigt im Herbst eine Zunahme von +20%, obwohl die saisonale Abflusssumme um −14% abnimmt. In den restlichen Saisonen sind HQ-Abnahmen zwischen −6% und −11% zu verzeichnen.</p>
N3b	<p><i>Niederschlag:</i> Die Jahresniederschlagssumme ändert sich um −5%. Deutliche Trendunterschiede zeigen sich zwischen Sommer (−18%) und Winter (+20%). Die modellinterne Kausalkette ist in Kap. 6.5.2, S. 51 angeführt.</p>

	<p><i>Abfluss:</i> Die saisonale Prägung der relativen Änderungen setzt sich bei den Abflusssummen fort. Unterliegen die saisonalen HQ30 und HQ100 Werte im Frühling, Sommer und Winter kaum Veränderungen (0% bis +3%), so sticht im Herbst HQ30 mit +16% und HQ100 mit +20% hervor. Der Zunahme der winterlichen Abflusssumme (+21%) steht keine Veränderung der HQ-Werte (0%) gegenüber.</p>
A1	<p><i>Niederschlag:</i> Bei Beibehaltung der Inputparameter im Niederschlagsmodell treten Schwankungsbreiten bei den saisonalen Niederschlagssummen von -1% bis $+2\%$ auf.</p> <p><i>Abfluss:</i> Die Verringerung des Abflussbeiwertes reduziert die Abflusssumme im Sommer mit 25% am stärksten. Im übrigen Jahr liegen die Abnahmen zwischen -5% und -10%. Entgegen diesem Trend verzeichnen die HQ-Werte Zunahmen im Sommer und Herbst zwischen 0% und +6%. Die modellinterne Kausalkette ist in Kap. 6.5.1 (d), S. 48 und in Kap. 6.5.3, S. 51 angeführt.</p>

Kernaussagen zu modellinternen Kausalketten

Folgende Phänomene dienen als Hinweis bei der Formulierung möglicher Ursache-Wirkung-Beziehungen in Kap. 6.5, S. 48:

- Eine Zunahme der mittleren Intensität dominiert bei saisonaler Betrachtung das NA-Geschehen im Winter. Sie bewirkt im Vergleich zu den Zunahmen im Frühling, Sommer und Herbst einen überproportionalen Anstieg der Abflussscheitel im Winter.
- Eine Verringerung der mittleren Ereignisdauer führt zu Reduktionen der Niederschlagssummen, wobei sich kein saisonaler Wert vom Jahreschnitt besonders abhebt.
- Eine Verkürzung der Regendauer um -20% beziehungsweise eine Verlängerung der Ereignispausen um $+20\%$ ergibt nach Trend und Ausmaß ähnliche saisonale Niederschlags- und Abflusssummen sowie Abflussscheitel.
- Eine Verlängerung der mittleren Ereignispausen bewirkt saisonal ausgeglichene Niederschlagsreduktionen.
- Die saisonale Verlagerung der Ereignispausen bewirkt markante, saisonale Verschiebungen bei den NA-Summen. Deutlichen Zunahmen im Winter steht keine Veränderung der Abflussscheitel gegenüber.
- Eine Verringerung des mittleren Abflussbeiwertes führt zu Abnahmen der saisonalen Abflusssummen, aber zu geringen Zunahmen beziehungsweise keiner Änderung der Abflussscheitel. Die Abflussreduktion wirkt sich überproportional im Sommer aus.

- Zwei Modellläufe mit den gleichen Inputparametern im Niederschlagsmodell ergeben eine Schwankungsbreite bei den saisonalen Niederschlagssummen von -1% bis $+2\%$.
- Saisonal stark rückläufige Niederschlags- und Abflusssummen werden von einem saisonalen Anstieg der Abflussscheitel begleitet.

6.4.2 Hauptszenarien

In der Folge werden die Ergebnisse im Niederschlag- und Abflussgeschehen aufgrund der Überlagerung der Vorläuferszenarien dargestellt. Die szenariospezifischen *Erfahrungen* resultieren aus der Gegenüberstellung der vorab formulierten *Erwartungen* (vgl. S. 30 ff.) und den Modellergebnissen.

<i>Szenario</i>	<i>Auswirkungen / Erfahrung</i>
N12	<p><i>Niederschlag:</i> Die Zunahme der Niederschlagssumme durch Erhöhung der Intensität wird durch die geringe Ereignisdauer weitestgehend kompensiert. Lediglich im Winter kommt es zu einer überproportionalen Zunahme von $+27\%$.</p> <p><i>Abfluss:</i> Die Niederschlagstrends setzen sich im Abfluss fort. Die Jahresabflusssumme steigt um $+10\%$, jene im Winter um $+28\%$. Der Jahresabflussscheitel von HQ100 steigt um 12% an. Der winterliche Abflussscheitel um $+19\%$, im Rest vom Jahr sind Anstiege bei HQ100 zwischen $+9\%$ und $+18\%$ zu verzeichnen.</p> <p><i>Erfahrung:</i> Das Ergebnis entspricht, bis auf die im Winter verhältnismäßig großen Zuwächse, den Erwartungen.</p>
N13a	<p><i>Niederschlag:</i> Die Kombination der Phänomene führt zur Abnahme der Niederschlagssumme im Sommer (-4%) und einer Zunahme im Winter ($+24\%$).</p> <p><i>Abfluss:</i> Die Trends im Niederschlag spiegeln sich bei den Abflusssummen wider. HQ100 unterliegt im Frühling einem Anstieg von $+11\%$, im Herbst um $+18\%$ und im Winter um $+29\%$. Im Sommer treten keine Veränderungen auf.</p> <p><i>Erfahrung:</i> Die Ergebnisse zeigen entsprechend der Erwartung die selben Trends, wie sie auch bei <i>N12</i> erzielt werden.</p>
N12-A1	<p><i>Niederschlag:</i> Siehe <i>N12</i>.</p>

	<p><i>Abfluss:</i> Die Abflusssummen weisen eine starke saisonale Prägung auf (Sommer -22%, Winter $+20\%$). Die Jahressumme unterliegt mit $+1\%$ keiner signifikanten Änderung. Die saisonalen Abflüsse reduzieren sich gegenüber <i>N12</i>, wobei die Abnahme im Sommer am stärksten ist. Der Jahresabflussscheitel HQ100 ist durch einen leicht positiven Trend ($+5\%$) geprägt. Die Änderung im Winter hebt sich mit $+19\%$ deutlich gegenüber dem Rest des Jahres ab (0% bis $+2\%$).</p> <p><i>Erfahrung:</i> Die Erwartung wird aufgrund der geringeren Abflüsse und HQ-Werte gegenüber <i>N12</i> bestätigt. Entgegen der Erwartung bestimmt die sommerliche N-Reduktion den Jahrestrend.</p>
N13a-A1	<p><i>Niederschlag:</i> siehe <i>N13a</i></p> <p><i>Abfluss:</i> Die Abflusssummen entsprechen in Trend und Ausmaß unter Beachtung geringfügiger Abweichungen jenen des Szenarios <i>N12-A1</i>. HQ100 steigt vom Frühling ($+11\%$) bis in den Winter ($+35\%$) an. Gegenüber <i>N13a</i> zeigen sich trotz reduzierter Abflusssummen höhere HQ100-Werte.</p>
N123b	<p><i>Niederschlag:</i> Trotz geringer Veränderung der jährlichen Niederschlagssumme (-2%) zeigen sich stark gegenläufige Trends bei jahreszeitlicher Betrachtung (-26% im Sommer bis $+53\%$ im Winter).</p> <p><i>Abfluss:</i> Die saisonalen Trends des Niederschlages setzen sich bei den Abflusssummen fort. HQ100 nimmt im Herbst / Winter um $+20\%$ / $+30\%$ zu, wohingegen im Sommer mit Abnahmen von -11% zu rechnen ist.</p> <p><i>Erfahrung:</i> Die Erwartungshaltung einer starken saisonalen Prägung im Abflussgeschehen und den saisonalen Änderungen der HQ-Werten entsprechend den Abflusssummen wurde bestätigt.</p>
N123b-A1	<p><i>Niederschlag:</i> Siehe <i>N123b</i></p> <p><i>Abfluss:</i> Durch Verminderung des Abflussbeiwertes reduzieren sich die Abflusssummen gegenüber <i>N123b</i>. Die saisonalen Trends des Niederschlages setzen sich im Abfluss fort und ergeben -36% im Sommer und $+48\%$ im Winter. Die saisonalen HQ30 Werte erfahren mit $+26\%$ im Winter ihren stärksten Anstieg. Bei jährlicher Betrachtung steigt der HQ30 Wert um $+25\%$ und der HQ100 Wert mit nur $+7\%$. Die deutliche Abnahme der sommerlichen Niederschlagssumme von -36% wird durch einen Anstieg des HQ100-Wertes von $+13\%$ begleitet.</p>

<i>Erfahrung:</i> Die Erwartung wird insofern befriedigt, als der Anstieg der Verdunstung zu einer Reduktion der Abflusssummen führt.

6.5 Dokumentation modellinterner Kausalketten

Wie eingangs erwähnt (siehe Kap. 5.2, S. 21), dienen die mit spezifischen Änderungen der Inputparameter behafteten Szenarioläufe der Dokumentation modellinterner Kausalketten. Anhand der Szenariocharakteristik erfolgen die Rückschlüsse auf wahrscheinliche Kausalketten. Als Grundlage zur Beurteilung dienen die singulären Parametermodifikationen der Vorläuferszenarien (Kap. 6.5.1, Kap. 6.5.2).

Die Auswertung der Ergebnisse deutet anhand von zwei statistischen Niederschlagsparametern auf Dysfunktionen im Niederschlagsmodell hin (Kap. 6.5.4, S. 53). Nach Einschätzung des Autors bleiben die prinzipiellen Erkenntnisse über die Wirkungszusammenhänge davon unberührt. Die konkrete Auswirkung auf die Abflussscheitel übersteigt das Ausmaß der vorliegenden Arbeit.

6.5.1 Konstante Änderung saisonaler Verläufe im Input

(a) Niederschlagsintensität

Die Änderung der Jahresmittelintensität δ_a übersetzt sich linear in die saisonalen Niederschlagssummen, da sie innerhalb des Formelsatzes auch linear auf die Verteilung der Intensität wirkt (siehe Formel (5.1), S. 24).

In Tab. 6.16 werden die generierten saisonalen i -Werte der Ausgangslage um den konstanten Wert $\Delta\delta_a = 0.21\text{mm}/h$ erhöht. Die relativen Änderungen der saisonalen Intensität Δi decken sich unter Berücksichtigung von Rundungsfehlern mit jenen der Niederschlagssummen ($\Delta N - \text{Summe}$). Der relative Unterschied im Jahresniederschlag entspricht somit den Änderungen bei der Jahresmittelintensität δ_a .

Aufgrund der Lineartransformation werden die starken saisonalen Effekte wirksam. Diese Szenariocharakteristik prägt die entsprechenden Überlagerungsszenarien.

Tabelle 6.16: Relative Änderung des Intensität aufgrund einer Modifikation des Jahresmittelwertes δ_a im *Szenario N1*

Szenario	0	N1	0 / N1	0 / N1
Parameter	i [mm/h]	i [mm/h]	Δi	ΔN -Summe
Frühling	1.23	1.44	+17%	+18%
Sommer	1.64	1.85	+13%	+13%
Herbst	0.92	1.13	+23%	+23%
Winter	0.49	0.70	+43%	+44%

(b) Ereignisdauer

Wie aus Tab. 6.17 hervorgeht, herrscht zwischen der Ereignisdauer und der Niederschlagssumme kein linearer Zusammenhang. Das Phänomen erklärt sich anhand des Formelsatzes (siehe Formel (5.1), S. 24). Die Variation der Ereignisdauer t_r hat einen nichtlinearen Einfluss auf die Verteilung der Intensität ($E[i|t_r] = a_1 t_r^{b_1}$). Eine angenommene² lineare Abnahme der Basis t_r hat bei gleichbleibender Hochzahl ($b_1 = const.$) eine überlineare Abnahme des Multiplikators $t_r^{b_1}$ zur Folge.

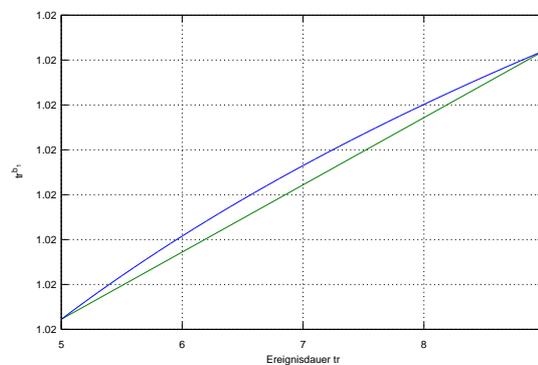


Abbildung 6.9: Einfluss der Ereignisdauer t_r auf den Multiplikator $t_r^{b_1}$ (blau). Gegenüber einer Linearität (grün) ergeben sich Abweichungen.

Die Modifikation der mittleren Ereignisdauer δ_r bewirkt eine Spannweite bei den jahreszeitlichen Niederschlagssummen von sechs Prozentpunkten³. Bei

²Die lineare Abnahme von t_r wird nur zur Demonstration der nichtlinearen Effekte herangezogen. Tatsächlich sind die Änderungen der Basis t_r durch lineare und nichtlineare Zusammenhänge geprägt. Dies zeigt sich beim Einfluss der mittleren Ereignisdauer δ_r auf die Verteilung der Ereignisdauern (siehe Formel (5.3), S. 24).

³Die Angabe der Prozentpunkte bezieht sich auf die relativen Änderungen der saiso-

der Erhöhung der mittleren Intensität δ_a ergibt sich mit einer Spannweite von 31 Prozentpunkten eine deutlich stärkere saisonale Prägungen.

Tabelle 6.17: Relative Änderung des Ereignisdauer aufgrund einer Modifikation des Jahresmittelwertes δ_r im *Szenario N2*. $\Delta \delta_r = 1.24h$. δ_r in der Ausgangslage entspricht den generierten Werten, nicht dem Verlauf aufgrund der Inputdaten (siehe Kap. 6.5.4, S. 53).

Szenario	0	N2	0 / N2	0 / N2
Parameter	t_r [h]	t_r [h]	Δt_r	ΔN -Summe
Frühling	6.69	5.45	-22%	-16%
Sommer	5.80	4.56	-27%	-20%
Herbst	7.36	6.12	-20%	-15%
Winter	8.26	7.02	-18%	-14%

(c) Ereignispause

Die konstante Erhöhung der Ereignispausen δ_b zeigt nach Trend und Ausmaß die gleichen Effekte bei den Niederschlagssummen wie die Reduktion der Ereignisdauer δ_r . Mit zwei Prozentpunkten Unterschied sind die saisonalen Differenzen ebenfalls deutlich geringer als bei der Variation der mittleren Intensität δ_a .

Tabelle 6.18: Relative Änderung des Ereignispause aufgrund einer Modifikation des Jahresmittelwertes δ_b im *Szenario N3a*. $\Delta \delta_b = 8.35h$. δ_b in der Ausgangslage entspricht den generierten Werten, nicht dem Verlauf aufgrund der Inputdaten (siehe Kap. 6.5.4, S. 53).

Szenario	0	N3a	0 / N3a	0 / N3a
Parameter	t_b [h]	t_b [h]	Δt_b	ΔN -Summe
Frühling	44.63	52.98	+19%	-14%
Sommer	40.60	48.95	+21%	-15%
Herbst	46.79	55.14	+18%	-14%
Winter	50.63	58.98	+16%	-14%

(d) Verdunstungseffekte und Auswirkungen auf den Abfluss

Trotz Berücksichtigung des Verdunstungsanstieges kommt es bei den entsprechenden Szenarien zu leichten Zunahmen bei der jährlichen Abflusssumme von +1% bis +7%. Der Stärke des Effekts führt allerdings zu keinen Abnahmen.

nalen Niederschlagssummen im betreffenden Szenario.

Interessant ist der saisonale Effekt bei der erhöhten Verdunstung⁴. Bei den Niederschlag-Abfluss-Verhältnissen (siehe Tab. 6.9, S.37) zeigt sich, dass sich der verminderte Abfluss nur im Sommer deutlich auswirkt. Daraus geht hervor, dass die sommerliche Reduktion den abnehmenden Trend im Gesamtjahr deutlich dominiert. Die Kausalkette lässt sich durch die spezifische Modifikation des Abflussbeiwertes erklären. Durch die Reduktion des Jahresmittelwertes δ_c kommt eine relative Änderung bei den kleinen Werten stärker zum Tragen. Da der Verlauf des Abflussbeiwertes im Sommer seinen Tiefpunkt erfährt, wirkt sich die konstante Änderung dort überproportional gegenüber dem Mittelwert aus. Die Verdunstung wirkt somit in den Sommermonaten deutlich stärker als in den Wintermonaten. Frühling, Herbst und Winter weisen bei allen Szenarien nach Trend und Ausmaß ähnliche NA-Verhältnisse auf. Diese Szenariocharakteristik prägt die entsprechenden Überlagerungsszenarien.

6.5.2 Saisonale Verschiebungen im Input

Die halbjährliche Phasenverschiebung $\tau - \tau_b$ des Ereignispausenverlaufes bewirkt gegenläufige Trends bei den saisonalen Niederschlagssummen. Da der Sinusverlauf um seine Jahresmittelachse gespiegelt wird, sind die betragsmäßigen Veränderungen in den saisonalen Niederschlagssummen von vergleichbarem Ausmaß. Diese Szenariocharakteristik prägt die entsprechenden Überlagerungsszenarien.

6.5.3 Abflusskonzentration

Zur Abschätzung der Einflussparameter bei der Abflusskonzentration wurde die Formel 5.12, S. 26 unter Vernachlässigung von Basisabfluss und Linear-speicher wie folgt vereinfacht:

$$q(t) = r_c \int_0^t i(t) dt \quad (6.1)$$

wobei $q(t)$ die Monatssumme des Abflusses, r_c den mittleren monatlichen Abflussbeiwert und $\int_0^t i(t) dt$ die Monatssumme des Niederschlages bezeichnet. Es werden also die Einzelereignisse im aggregierten Zustand auf Monateebene verwendet.

Wie Abb. 6.10 zeigt, haben dabei der Basisabfluss und der Linear-speicher kaum einen Einfluss.

⁴Das sind die Szenarien *N12-A1*, *N13a-A1* und *N123b-A1*.

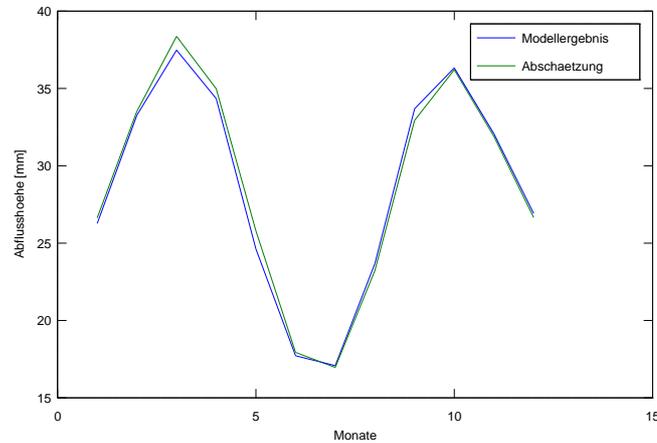


Abbildung 6.10: Vergleichende Darstellung der monatlichen Abflusssummen zwischen einer vereinfachten Abschätzung und dem Modellergebnis.

Die lineare Einfluss des Abflussbeiwertes auf die Abflusssummen wird in Tab. 6.19 veranschaulicht.

Tabelle 6.19: Relative Änderung des saisonalen Abflussbeiwertes aufgrund einer Modifikation des Jahresmittelwertes δ_c im *Szenario A1*. $\Delta\delta_c = 0.02$. Die tatsächlich generierten Werte stehen in Klammer. Die Abweichung zum theoretischen Mittel entsteht durch den Zufallsanteil.

Szenario	0	A1	0 / A1	0 / A1
<i>Parameter</i>	r_c []	r_c []	Δr_c	ΔA -Summe
Frühling	0.30	0.28 (0.27)	-7% (-9%)	-10%
Sommer	0.13	0.11 (0.10)	-15% (-23%)	-25%
Herbst	0.40	0.38	-5%	-6%
Winter	0.57	0.55	-4%	-5%

Wie der Übergang von der Ausgangslage auf das Szenario *A1* zeigt⁵, gehen abnehmende Abflusssummen zum Teil mit saisonalen Anstiegen der Abflussscheitel einher.

⁵siehe Tab. 6.6, S. 36 und Tab. 6.11, S. 40

6.5.4 Modellinterne Dysfunktionen

Ereignisdauer

Die statistische Auswertung der generierten Niederschlagsereignisse führt zu abweichenden Ergebnissen im Vergleich zu den Vorgaben durch die Inputparameter. So resultiert aus der Vorgabe einer mittleren Ereignisdauer von $\delta_r = 5.70h$ eine über das Jahr gemittelte Ereignisdauer von $\delta_r = 7.00h$ (siehe Abb.: A.2, S. 64). Saisonale Schwankungen werden entsprechend den Vorgaben korrekt wiedergegeben. Das Phänomen wurde auch beim saisonalen Verlauf der Intensität und der Ereignispausen festgestellt, konnte aber durch Modifikationen am Programmcode durch Mitarbeiter des Instituts für Wasserbau und Ingenieurhydrologie korrigiert werden. Der systematische Fehler bei der Ereignisdauer bleibt trotz Modifikation der Programmalgorithmen erhalten und setzt sich in den Szenarien fort. Eine allfällige Behebung dieses Phänomens übersteigt das Ausmaß der vorliegenden Arbeit ebenso wie die Abschätzung der Folgen auf die Zeitreihen des Abflusses.

Jahresniederschlag

Die im HYDROGRAFISCHEN JAHRBUCH 2002 [22] angegebene mittlere Jahresniederschlagssumme für Frankenfels liegt bei $1329mm$. Für die Eichung wurde ein Zeitintervall von 1990-1997 herangezogen. Das Jahresmittel aus den dortigen Daten ergibt $1446mm$ mittleren Jahresniederschlag. Das 95%-Konfidenzintervall beinhaltet in etwa $\pm 200mm$.

Der Modelllauf für die *aktuelle Situation* liefert

- im Endbericht der Projekts FLOOD RISK II [24, Tab. 5, S. 29] eine Jahresniederschlagssumme von $1057mm$. Die Abweichung zur beobachteten Niederschlagsreihe beträgt -37% . Dabei wird auf das gleiche stochastische Modell verwiesen, wie es auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit vom Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie zu Verfügung gestellt wurde.
- in der vorliegenden Arbeit eine Jahresniederschlagssumme von $1223mm$. Die Abweichung beträgt -18% .

Schlussfolgerung

Da die Inputparameter im Niederschlag bei den Modellläufen zur *aktuellen Situation* ident⁶ sind, liegt die Vermutung nahe, dass den beiden Modellläufen unterschiedliche Programmalgorithmen und Eichparameter zu Grunde liegen.

⁶siehe Übersichtstabellen [24, Tab. 4, S. 27] und Tab. 6.2, S. 33

6.6 Zusammenfassung

Die Szenarioläufe dienen dem Abschätzen möglicher Veränderungen im Niederschlags- und Abflussgeschehen. In vorliegendem Kapitel erfolgt eine kompakte Darstellung der Simulationsergebnisse unter Berücksichtigung der global formulierten Änderungen klimatischer Parameter. Die Szenarien *N12-A1*, *N13a-A1* und *N123b-A1* werden in eine Zusammenschau einbezogen, da sie den auf S. 29 formulierten Rahmenbedingungen wie folgt genügen:

1. Geringfügige Änderungen der Jahresniederschlagssumme.
2. Intensivierung der Niederschläge.
3. Saisonale Verschiebung der Niederschläge vom Sommer in den Winter.
4. Anstieg der Verdunstung.

Niederschlag

Die drei im Niederschlagsmuster formulierten Rahmenbedingungen treffen auf die als plausibel angesehenen Szenarien zu. Die Änderung der Jahresniederschlagssummen liegen zwischen -1% bis $+3\%$ und gelten somit als geringfügig. Die Intensivierung der Niederschläge wurde durch Erhöhung des Mittelwertes und somit im ganzen Jahr berücksichtigt.

Gegenläufige Trends ergeben sich bei saisonaler Betrachtung. Die Niederschläge sind von geringfügigen Zu- und Abnahmen im Frühjahr geprägt -6% bis $+2\%$. Der Sommer ist durchgehend von Abnahmen, wenn auch unterschiedlichen Ausmaßes (-5% bis -25%) betroffen. Das Gegenteil ist im Herbst der Fall ($+7\%$ bis $+12\%$). Die größten Abweichung treten im Winter auf ($+25\%$ bis $+53\%$). Die absolut größten Niederschlagssummen treten nach wie vor im Sommer auf, die geringsten im Winter.

Abfluss

Die Jahresabflusssumme unterliegt in den Szenarien gegenüber der Ausgangslage einer Schwankung von $+1\%$ bis $+7\%$. Bei saisonaler Betrachtung ergeben sich stark gegenläufige Trends. Der Sommer ist von Abnahmen (-19% bis -36%) geprägt, der Winter von Zunahmen ($+20\%$ bis $+48\%$).

Wie die saisonale Aufgliederung der N/A-Verhältnisse belegt, bewirken alleinige Änderungen der Niederschlagskomponente keine Änderung der N/A-Verhältnisse. Dies resultiert aus den Eigenschaften des Abflussmodells im Einheitsganglinienverfahren.

Verändert sich allerdings in den Szenarien auch die Verdunstungskomponente, so ändern sich auch die N/A-Verhältnisse. Wie in der Ausgangslage, treten die stärksten Verdunstungseffekte im Sommer auf. Die Szenarien verstärken durch den Anstieg der Verdunstung die saisonale Prägung deutlich. Sommerliche Abnahmen im Niederschlag werden von einem Anstieg der Verdunstung

ung begleitet. Die saisonale Aufgliederung zeigt, dass im Sommer das N/A-Verhältnis mit 8.9 (7.6 in der Ausgangslage) über dem mittleren Verhältnis im Frühling, Herbst und Winter bei 2.8 (2.7 in der Ausgangslage) liegt. Der Anstieg der Verdunstung in den Szenarien sorgt für die Dämpfung der Abflusssummen gegenüber den Niederschlagssummen. Das N/A-Verhältnis steigt. Eine überproportionale Reduktion der Abflusssummen tritt dadurch im Sommer auf. Das jährliche N/A-Verhältnis bleibt in den Szenarien mit 3.6, 3.6 und 3.3 in Bezug auf die Ausgangslage mit 3.6 weitgehend stabil.

Hochwasser

Bei jährlicher Betrachtung nehmen die 100-jährlichen Abflussscheitel um +5% bis +19% zu, die 30-jährlichen um +2% bis +25%. Wie auch in der Ausgangslage dominieren die größten Abflussscheitel im Sommer. In dieser Saison erhöhen sich die Abflussscheitel um 0% bis +17% (HQ100) und 0% bis +19% (HQ30), im Herbst um 0% bis +25% (HQ100) und +6% bis +31% (HQ30), im Winter um +19% bis +35% (HQ100) und +15% bis +30% (HQ30) und im Frühling um +2% bis +11% (HQ100) und 0% bis +3% (HQ30).

Kapitel 7

Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Klimatische Projektionen

Die Einbeziehung der „vorausgedachten Gefahr“ in die Hochwasserschutzplanung bedeutet, zukünftige Kenngrößen im Abflussgeschehen abschätzen zu können. Meteorologische Einflüsse spielen dabei eine entscheidende Rolle und unterliegen, den Erkenntnissen der Klimaforschung zufolge, langfristigen Änderungsprozessen. Aus dem Erklärungsansatz einer Intensivierung des Wasserkreislaufes, verstärkt angetrieben durch einen globalen Temperaturanstieg, lassen sich qualitativ konsistente Szenarien ableiten. Diese deuten in Österreich auf stabile Jahresniederschläge, eine Verlagerung der Niederschläge vom Sommer in den Winter, eine Intensivierung der Niederschläge, den Anstieg der Verdunstung, auf die Zunahme von Trockenperioden, sowie auf eine Abnahme der Schneedecke hin. Der Projektionszeitraum liegt zwischen 2050 und 2100.

Stochastische Modellierung

Die quantitative Angabe zukünftiger, klimatischer Parameter ist vor allem auf lokaler Ebene mit großen Unsicherheiten verbunden. Vor allem vor dem Hintergrund, dass der Extremfall nicht Bestandteil der zu Grunde liegenden Modelle ist. Hinzu kommt die Abschätzung von Trends bei Extremereignissen jeglicher Art, deren Beurteilung auf Beobachtungszeiträume angewiesen ist, die keine statistischen Aussagen zulassen. Als Teil eines extremwerthydrologischen Ansatzes wird die Anwendung des stochastischen Niederschlagsmodells angesehen. Durch die synthetische Generierung einer Vielzahl an hydrologischen Kombinationen ergeben sich unter Einfluss projizierter Veränderungen der statistischen Parameter im Niederschlag Hinweise auf Veränderungen im Abflussgeschehen. Darüber hinaus erlauben ungünstige Kom-

binationsfälle die Abschätzung möglicher Abflussspitzen.

Modellinterne Dysfunktionen

Die Aussagekraft der durch das Modell abgebildeten Abflusszeitreihen und ihrer statistischen Parameter wird abgeschwächt, da sich (a) die generierte Niederschlagssumme in der Ausgangslage nicht mit der beobachteten im Eichzeitraum deckt und (b) sich einzelne Inputparameter mit zum Teil erheblichen Abweichungen in den generierten Datensätzen wiederfinden. Die beiden Phänomene deuten auf modellinterne Dysfunktionen hin, deren Ursachen und Auswirkungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht beurteilt werden können.

Vorläuferszenarien

Mit Hilfe von Vorläuferszenarien, die sich durch singuläre Parametermodifikation im Input auszeichnen, wird deutlich, dass je nach Auswahl des zu variierenden Parameters bestimmte Effekte, Trends und Ausmaße, aufgrund modellinterner Kausalketten, vorgegeben sind. So führt ein Anstieg der Jahresmittelintensität aufgrund des saisonalen Ganges zu überproportionalen Beiträgen im Winter. Weiters bewirken zwei unterschiedliche singuläre Modifikationen nach Trend und Ausmaß vergleichbare Monatsabflusssummen. Dies bestätigt die Tatsache, dass von statistischen Daten nicht direkt auf die systemischen Ursachen beziehungsweise deren Folgen geschlossen werden kann.

Szenarien

Die plausiblen¹ Szenarien zeigen kaum ganzjährige Veränderungen der Niederschlagssituation, aber starke, saisonal gegenläufige Trends mit unterschiedlichem Ausmaß. Generell können die Projektionen nur zum Teil durch Beobachtungen bestätigt werden. Dies gilt zum Beispiel für inneranuale Verlagerungen saisonaler Niederschlagssummen. Im Sommer zeigen die Szenarien Abnahmen zwischen -5% und -25% . Dies deckt sich mit den im Hydrologischen Atlas festgehaltenen Beobachtungen nach stark negativen Trends in Nieder- und Oberösterreich. Im Winter sind in Teilen Ostösterreich keine bis leicht steigende Trends zu beobachten. Die Szenarien und die Projektionen aus den Klimamodellen bilden aber einen deutlichen Anstieg der saisonalen Niederschlagssumme ab. Die saisonalen Trends sind vor allem durch die Schneespeicherung und die Schneeschmelze im Frühjahr geprägt. Wie bisher treten in den Szenarien die größten Monatsniederschläge im Sommer auf. Deren Anstieg beeinflusst die charakteristische Form der bimodalen Verteilung im Abflussregime nicht.

¹Als plausibel gelten jene Szenarien, die die aus den klimatischen Projektionen abgeleiteten Rahmenbedingungen auf S. 29, einhalten. Dies sind Szenario *N12-A1*, *N13a-A1* und *N123b-A1*.

Für die vor allem in kleinen Einzugsgebieten für die Entstehung von Hochwassern bedeutenden, konvektiven Starkregenereignisse lassen sich aufgrund der Beobachtungen keine Veränderungen in der Zukunft ableiten. Ebenso geben Klimamodelle darüber keine Auskunft. Hier gilt es weiterhin durch eine breite Fächerung an hydrologischen Informationen und Methoden plausible Bemessungswerte abzuschätzen.

Ein Anheben der Jahresmittelintensität führt zu ganzjährigen Steigerungen bei den Niederschlags- und Abflusssummen, wobei im Winter deutliche Zuwächse auftreten. Dies deckt sich mit Projektionen zahlreicher regionaler Klimamodelle für Europa. Selbst bei der Zerlegung in Teilreihen lassen sich langjährige Trends bei den extremen Tagesniederschlägen aufgrund von Beobachtungen allerdings nicht bestätigen.

Die Verlängerung der Regenspauzen im Sommer kennzeichnet seltenere Regenereignisse und dadurch die Zunahme an Trockenperioden. Der Prozess wird durch einen Anstieg der Verdunstung verstärkt. Es verringern sich die NA-Summen. Im Gegenzug dazu verkürzen sich die Pausen im Winter und führen zu einem Anstieg der NA-Summen. Eine Zunahme der maximalen Abflussscheitel zeigt sich nur im Herbst. Durch eine zusätzliche Steigerung der Intensität erhöhen sich diese in jeder Saison, mit der stärksten Ausprägung im Winter.

Hochwasser

Der Minimalwert der sommerlichen Monatsmaxima im Abfluss liegt nach wie vor über den winterlichen Monatsmaxima im Abfluss. Je nach Szenario liegen die ganzjährigen Steigerungen zwischen +5% und +19%. Eine saisonale Aufgliederung zeigt die stärksten Anstiege vor allem im Winter, aber auch im Herbst (0% und +35%). Sogar im Frühling und Sommer kommt es zu leichten Anstiegen. Auffallend ist, dass zum Teil deutliche Reduktionen der Abflusssumme von einem Anstieg der Monatsmaxima im Abfluss begleitet werden. Deutlich tritt dies im Sommer zu Tage, in dem die Abnahmen der Abflusssummen zwischen -19% und -36% liegen und die Monatsmaxima im Abfluss um 0% bis +17% ansteigen. Im Szenariovergleich lässt sich kein eindeutiger Trend beim Einfluss der Verdunstung auf die Monatsmaxima im Abfluss erkennen.

7.2 Diskussion

7.2.1 Strategien beim technischen Hochwasserschutz

Wasserspiegeländerung

Bei der Dimensionierung technischer Hochwasserschutzbauten hat die Wasserspiegellage einen entscheidenden Einfluss. Die Höhe von Dämmen, Brückenbauwerken und Einläufen orientiert sich an dieser Kenngröße. Hinzu kommt ein möglicher Rückstau in Vorflutern. Die in den Szenarien ermittelten Monatsmaxima der Durchflüsse lassen sich unter vereinfachter Annahmen in Wasserspiegelhöhen umrechnen, um daraus Empfehlungen für Strategien beim technischen Hochwasserschutz geben zu können.

Zur Abschätzung der Wasserspiegellage wird hypothetisch angenommen:

- Flussprofil lt. Abb. 7.1, Sohlenbreite $c = 9m$.
- Durchflussermittlung nach GAUKLER, MANNING und STRICKLER [19, vgl. S. VI-4], wobei der Beiwert k_{ST} für ein künstliches Gerinne mit begrünten Böschungen und einer Sohle aus Kies mit $k_{ST} = 30m^{1/3} * s^{-1}$ [19, vgl. S. VI-6] und das Gefälle J mit $J = 1.5 ‰$ angenommen wird.
- Die Fläche des Einzugsgebietes Hofstetten an der Pielach, in der auch die Messstation Frankenfels liegt, beträgt $289.5km^2$ [6, s. OG233].

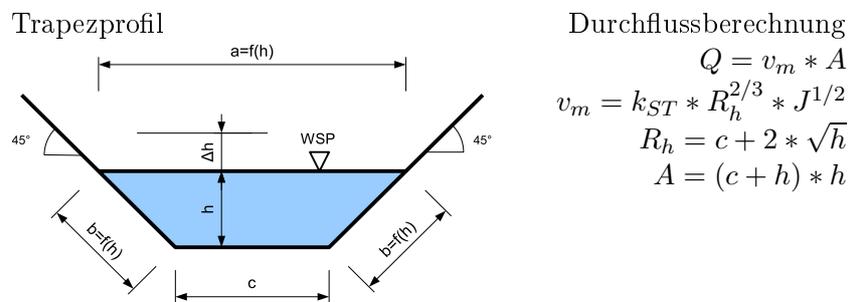


Abbildung 7.1: Trapezprofil

Tabelle 7.1: Wasserspiegeländerung in Folge Lastfall Klimaänderung

Szenario	0	N13a-A1	0	N13a-A1	0	N13a-A1	0/N13a-A1
Kennwert	$HQ_{100} [mm/h]$		$HQ_{100} [m^3/s]$		$h [m]$		$\Delta h [m]$
Gesamtjahr	5.9	7.0	474	563	1.97	2.22	0.25
Sommer	5.3	6.2	426	499	1.83	2.04	0.21

Freibord

Das Freibord ist der Abstand zwischen der Wasseroberfläche des Bemessungshochwassers und der Oberkante des Schutzbauwerkes. Es gleicht hydraulische Unsicherheiten bei der Gerinnebemessung, aber keine hydrologischen Unsicherheiten aus [5, vgl. S. 2]. Der Lastfall „Klimaänderung“ beeinflusst zweifelsohne letztere. Allerdings erhebt sich die Frage, ob

1. eine Quantifizierung der Unsicherheiten durch Windstau, Wellenaufbau, Eisstau, turbulente Abflussvorgänge und Fließwechsel, starke Querströmungen, Geschiebetrieb und variable Sohllagen, Verklausung durch Treib- und Wildholz, Gerinneverstopfung durch seitliche Lawinen- und Murenstöße und die Reduzierung des Gerinnequerschnittes durch Uferbewuchs [5, vgl. S. 3 ff] und deren Aufsummierung stichhaltig ist, um dadurch die Freibordhöhe zu legitimieren.
2. eine strikte, an Unsicherheitsquellen gekoppelte Freibordefinition unter Ausschluss der meteorologisch beeinflussten hydrologischen Prozesse zielführend ist. Angesichts der komplexen Vorgänge, die diese Faktoren bestimmen, spiegeln die Berechnungsmethoden lediglich Abschätzungen wider.

Nach Ansicht des Autors liefert die Quantifizierung eine Scheingenauigkeit, die lediglich zur Rechtfertigung der Freibordhöhe dient. Ebenso könnte der Sicherheitszuschlag in Ergänzung mit qualitativen Kriterien pauschal für bestimmte Flußabschnitte erfolgen. Laut DVWK-Richtlinie wird aber „der Ansatz eines pauschalen Freibords oder quantitativ nicht begründeter Freibordkomponenten nicht empfohlen“ [5, S. 2].

Bei Flüssen im Bergland und alpinen Gelände spielt der klimabedingte Einfluss des Eisstaus, sowie von Lawinen- und Murenstößen auf die Wasserspiegellage eine zusätzliche Rolle. Beispielsweise können in Abhängigkeit regionaler Temperaturänderungen Rückschlüsse auf die Eisstaubildung gezogen werden. Gepaart mit der diesbezüglichen empfindlichen Reaktion bestimmter Flussstrecken lassen sich lokale Gefahren abschätzen. Dies kann auch eine Gefahrenreduktion ergeben, wie MUDELSEE et. al. [30, vgl. S. 1] an der Elbe und der Oder zeigen. Dort ist der Rückgang der Winterhochwasser teilweise auf die Abnahme der Anzahl strenger Fröste zurückzuführen.

Angesichts der Vorläuferunsicherheiten bei der Abschätzung meteorologischer Änderungssignale wird die Aussagekraft von „quantitativ begründeten“ Freibordzuschlägen zu den Hochwasserständen deutlich abgeschwächt. Die vorliegenden Modellrechnungen zeigen, dass der Lastfall Klimaänderung einen Wasserspiegelanstieg von 25 cm (s. Tab. 7.1) bewirkt und die veranschlagte Freibordhöhe zusätzlich reduziert. Wie die übliche Freibordhöhe

zwischen 50 und 100 Zentimetern [5, vgl. S. 2] für norddeutsche Tieflandflüsse zeigt, liegt der maximale Anstieg innerhalb der Freibordhöhe.

7.2.2 Sicherheit von Bemessungswerten

In Abhängigkeit der wasserbaulichen Fragestellung werden zur Dimensionierung der Bauwerke verschiedene Kenngrößen herangezogen. Dazu zählt die Notwendigkeit zur Bestimmung von Wasserstand, Scheitelabfluss, Abflusssumme, Dauer und Ganglinie von Hochwassern, sowie Fließgeschwindigkeit, Schleppspannung und Fließrichtung. Das Ausmaß des quantifizierten Parameters hängt von der gewählten Methode und den damit verbundenen Problemen bei den Daten, den Skalen hinsichtlich meteorologischer und hydrologischer Ursachen, der Extrapolation und den Ausreißern ab [25, vgl. S. 151 f.].

Die Abschätzung von Hochwasserkennwerten impliziert die Quantifizierung seltener Ereignisse, wobei die verschiedenen Methoden Stärken und Schwächen mit sich bringen. Einen Überblick dazu bietet GUTKNECHT [25, vgl. S. 155 - 180]. Durch die Zusammenschau mehrerer Methoden im Rahmen der Extremwerthydrologie werden die Ergebnisse bei BLÖSCHL et. al. [4] abgesichert und die Zuverlässigkeit des Bemessungswertes erhöht. Gegenüber der rein statistischen Betrachtung verbreitet sich die Informationsbasis durch zeitliche, räumliche und kausale Zusatzangaben. Selbst wenn, „umfangreiche Informationen herangezogen werden, verbleibt in der Regel bei der Bestimmung des Bemessungshochwassers eine beträchtliche Unsicherheit“ [4, S. 6].

7.2.3 Abwägung der Einflüsse

Das Schadenrisiko setzt sich aus der Gefahr und der Vulnerabilität im Einzugsgebiet zusammen (vgl. Abb. 7.2, S. 62). Hochwasser haben in der Regel große finanzielle Schäden im Bereich der Infrastruktur zur Folge. Bei der Abwägung der Einflüsse stellt sich heraus, dass als eindeutig nachgewiesener Beitrag für den Anstieg an Schadensereignissen aber die zunehmende Verletzlichkeit und eine geringere Schadentoleranz der Betroffenen gilt [34, vgl. S. 35]. Die vermehrten Schadenssummen sind „nicht auf die Klimaänderung, sondern auf die enorme Wertekonzentration zurückzuführen“ [35, S. 115]. Demografische Veränderungen, technologische Fortschritte, sowie soziodemografische Entwicklungen ließen in der Vergangenheit die Anfälligkeit auf Naturkatastrophen und damit das Risikopotential ansteigen [34, vgl. S. 44].

Die an der Entstehung von Schäden beteiligten Entitäten sind [34, S. 35]:

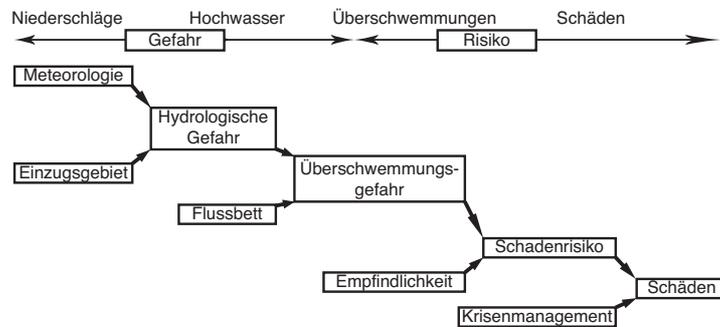


Abbildung 7.2: Wirkungskette bei Hochwasserschäden. Viele dynamische Einflussgrößen beeinflussen die Entwicklung vom Niederschlag zum Schaden. Vom angerichteten Schaden kann deshalb nicht auf die Stärke des Naturereignisses geschlossen werden. [34, S. 35]

Der Lastfall Klimawandel bringt zusätzliche Unsicherheiten, die eine Erhöhung der Gefahr zur Folge haben können. Wenn auch der Zusammenhang zwischen Klimaänderung und der Häufigkeit von Hochwasser nicht endgültig beantwortet werden kann [35, vgl. S. 115], so „dürfen Veränderungen der Häufigkeit und der Intensität von Naturgefahren wegen der Klimaänderung nicht unbeobachtet bleiben“ [34, vgl. S. 45].

7.3 Ausblick

Angesichts der Abstinenz verlässlicher Grundlagen zur quantitativen Ermittlung der Dimensionierungsgrößen von Hochwasserschutzbauten infolge des Lastfalls Klimawandel, fällt neben der qualitativen Vorgangsweise das Augenmerk verstärkt auf die

- Ansätze der Extremwerthydrologie und Beurteilung der schlimmsten zu erwartenden Szenarien.
- integrale Risikobetrachtung durch Berücksichtigung der Versagenswahrscheinlichkeit bestehender Schutzbauten bei Überlastszenarien.
- Minimierung der Restrisiken durch Krisenmanagement.
- Umsetzung eines langfristigen Flächenmanagements im Einzugsgebiet.
- Kommunikation des Risikobegriffes in der Bevölkerung.
- ursachenbezogene Reduktion der Unsicherheiten beim Lastfall Klimawandel, durch Minderung anthropogen verursachter Treibhausgasemissionen im Sinne des Vorsorgeprinzips.

Anhang A

Grafiken

A.1 Ausgangslage

Die Eingabeparameter der Ausgangslage wurden an die Messstation in Frankenfels angeeicht. Die gesamte Darstellung der verwendeten Parameter findet sich in der Publikation von SIVAPALAN et.al. [38].

PARAMETERS FOR RR-MODEL

General parameters		Runoff model	
Seed =	200000	mean_rc_low =	0.35
n_sim =	1	mean_rc_high =	0.35
Years =	1000	ampl_rc =	0.25
Nevents =	500	Betas2 =	0.04
n_cl =	100	Tcslow =	6.00
n_peak =	1	Tcfast =	6.00
detail_out =	0	p_thresh =	10000

Rainfall model

Interstorm period		Rainfall durations		seasonal intensity	
Deltai =	43.00	Deltar =	5.70	a1m =	1.05
Ampli =	5.60	Amplr =	1.40	a1a =	0.65
Phasi =	0.00	Phasr =	0.00	a1phas =	6.00
Cint =	0.70	Cdur =	0.70	time pattern =	1

Tabelle A.1: Eingabeparameter für das Niederschlags-Abflussmodell in der Ausgangslage

Hinweis: Die Ausgangslage wird in den folgende Grafiken mit **BLAU**, das jeweilige Szenario im Bezug zur Ausgangslage mit **GRÜN** gekennzeichnet.

Eingangsparameter

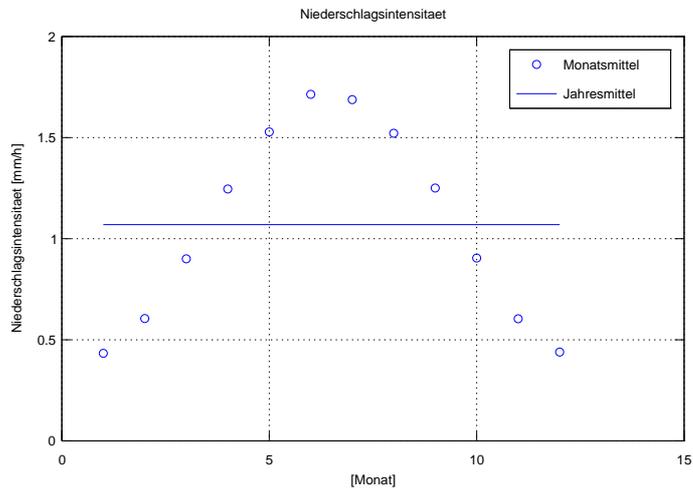


Abbildung A.1: Saisonaler Gang der Niederschlagsintensität

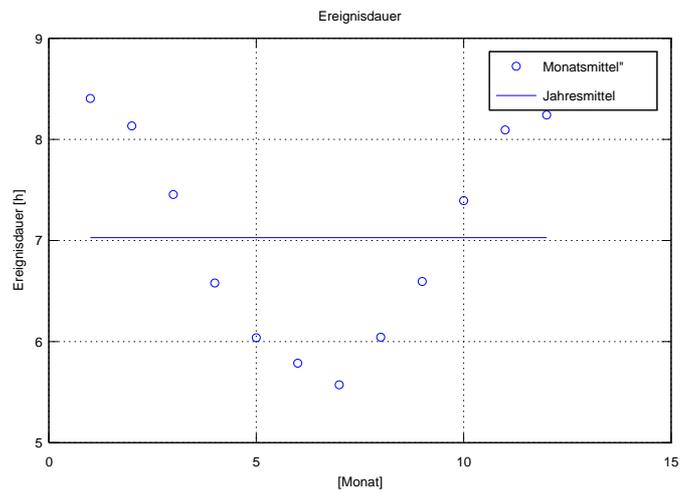


Abbildung A.2: Saisonaler Gang der Ereignisdauer

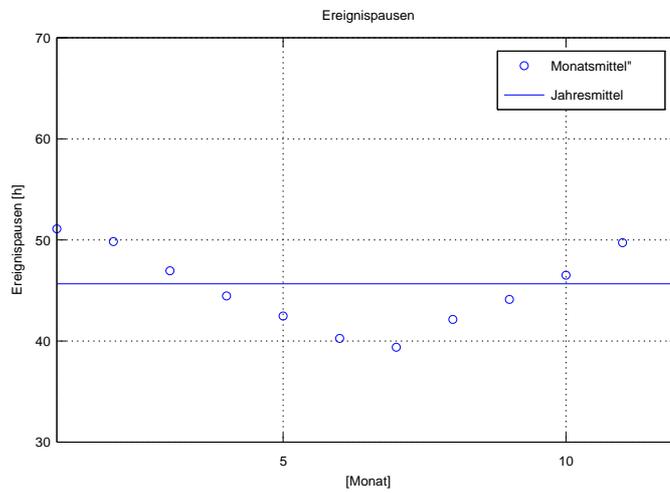


Abbildung A.3: Saisonal Gang der Ereignispausen

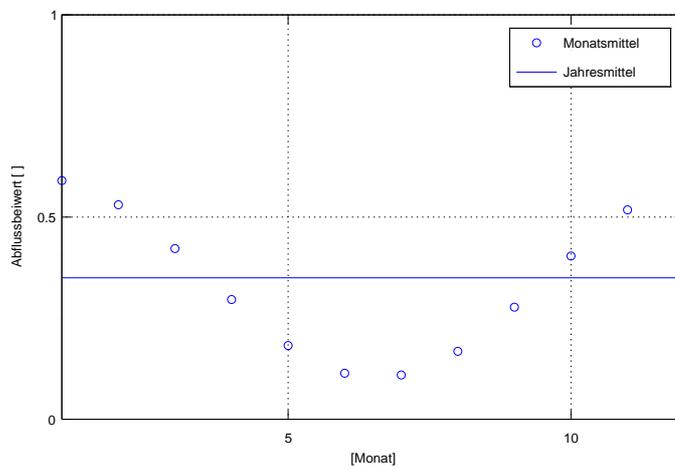


Abbildung A.4: Saisonal Gang des Abflussbeiwertes

Niederschlag

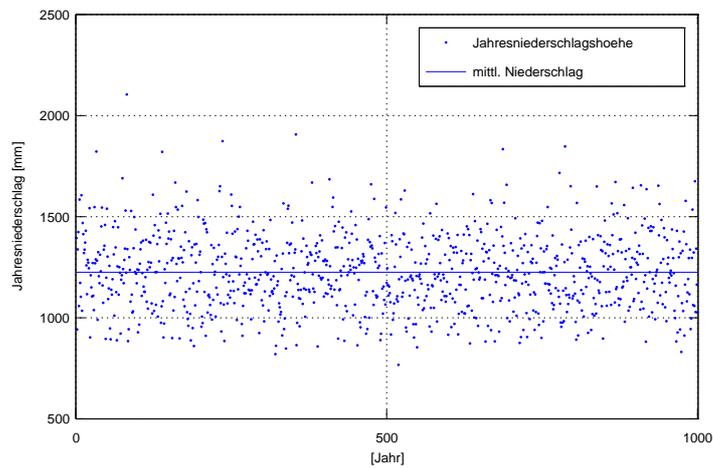


Abbildung A.5: jährliche Niederschlagshöhe

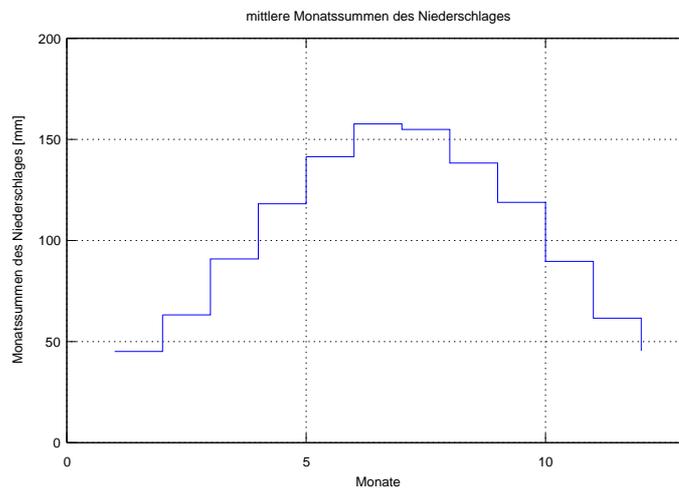


Abbildung A.6: monatliche Niederschlagssummen

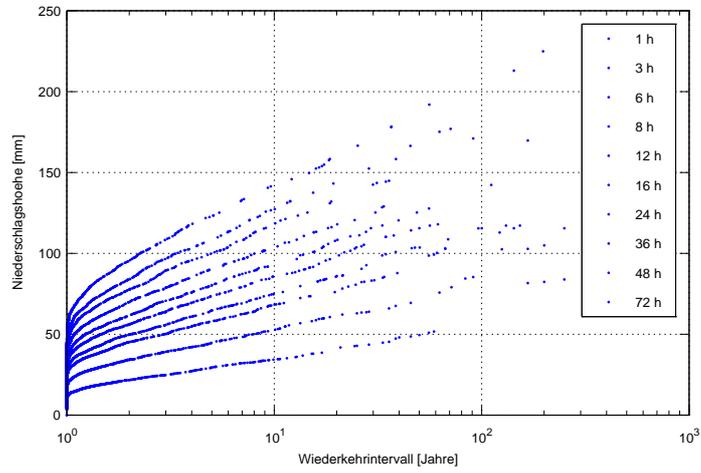


Abbildung A.7: Wiederkehrintervalle der Niederschlagshöhen, nach Dauerstufen gegliedert

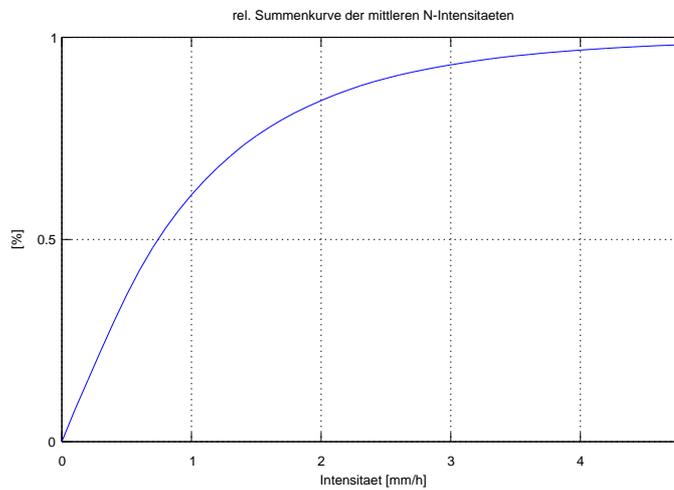


Abbildung A.8: Summenlinie der Niederschlagsintensität

Abfluss

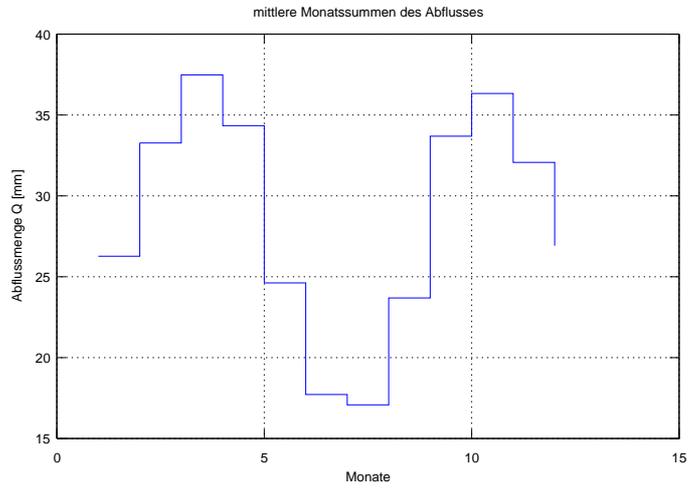


Abbildung A.9: monatliche Abflusssummen

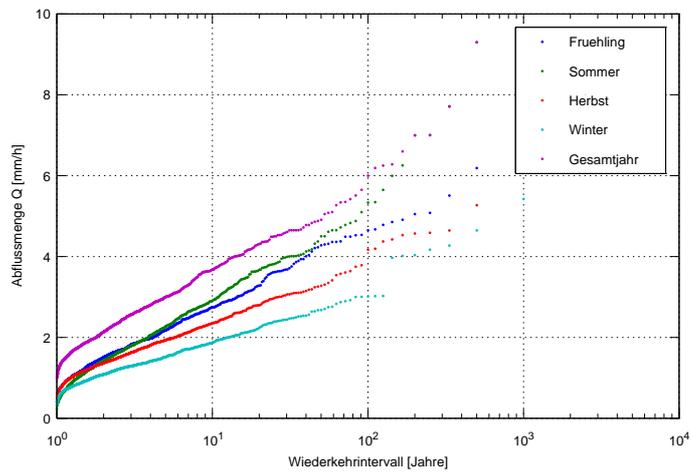


Abbildung A.10: Wiederkehrintervalle der saisonalen Abflüsse

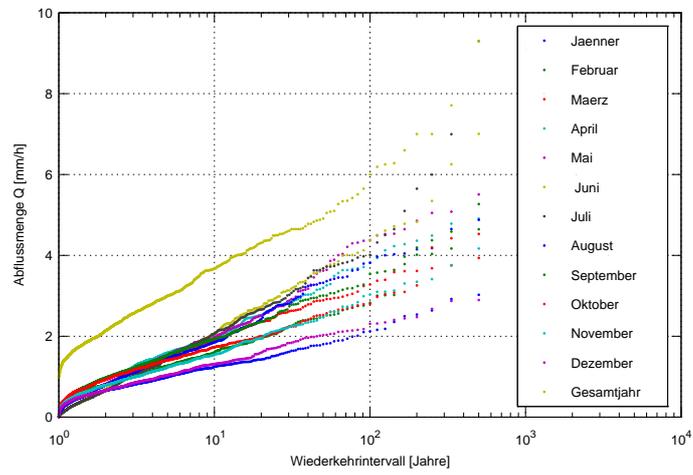


Abbildung A.11: Wiederkehrintervalle der monatlichen Abflüsse

A.2 Szenario N1

Im vorliegenden Szenario wird der über das Jahr konstante Anteil der Intensität von $a1m = 1.05mm/h$ auf $a1m = 1.26mm/h$ um 20% erhöht. Der saisonale Verlauf bleibt davon unberührt.

PARAMETERS FOR RR-MODEL

General parameters		Runoff model	
Seed =	200000	mean_rc_low =	0.35
n_sim =	1	mean_rc_high =	0.35
Years =	1000	ampl_rc =	0.25
Nevents =	500	Betas2 =	0.04
n_cl =	100	Tcslow =	6.00
n_peak =	1	Tcfast =	6.00
detail_out =	0	p_thresh =	10000

Rainfall model

Interstorm period		Rainfall durations		seasonal intensity	
Deltai =	43.00	Deltar =	5.70	a1m =	1.26
Ampli =	5.60	Amplr =	1.40	a1a =	0.65
Phasi =	0.00	Phasr =	0.00	a1phas =	6.00
Cint =	0.70	Cdur =	0.70	time pattern =	1

Tabelle A.2: Eingabeparameter für das Niederschlags-Abflussmodell in Szenario N1. Der umrahmte Parameter wurden gegenüber der Ausgangslage geändert.

Hinweis:

Die Ausgangslage wird in den folgende Grafiken mit **BLAU**, das jeweilige Szenario im Bezug zur Ausgangslage mit **GRÜN** gekennzeichnet.

Eingangsparmeter

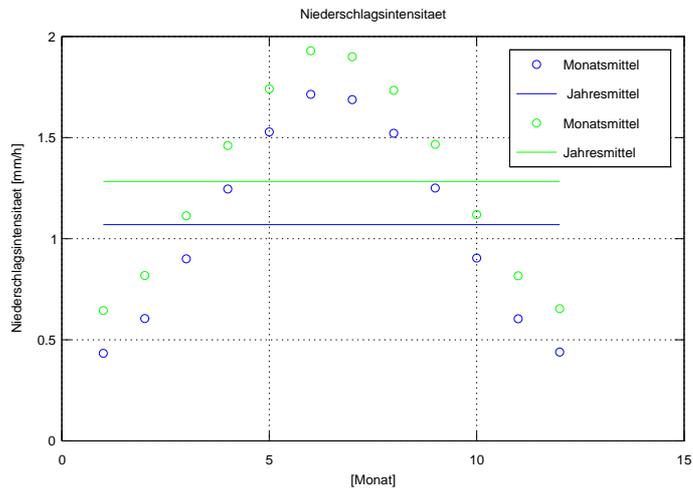


Abbildung A.12: Saisonaler Gang Niederschlagsintensität

Niederschlag

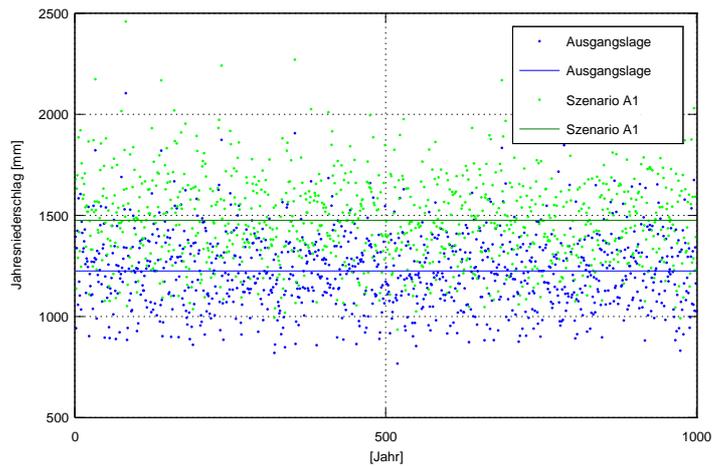


Abbildung A.13: jährliche Niederschlagshöhe

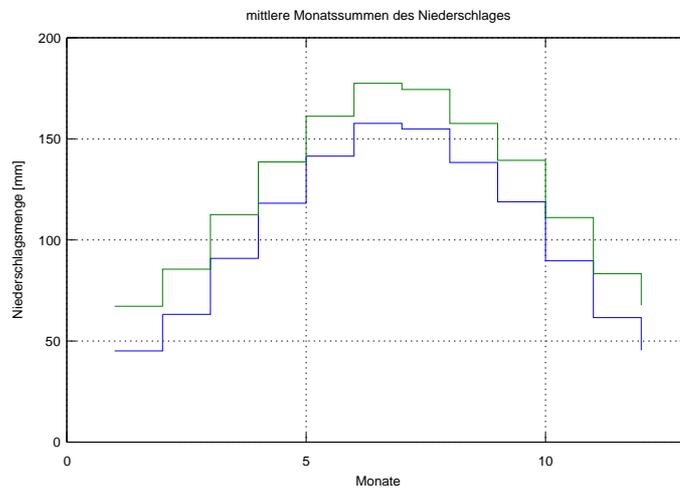


Abbildung A.14: monatliche Niederschlagssummen

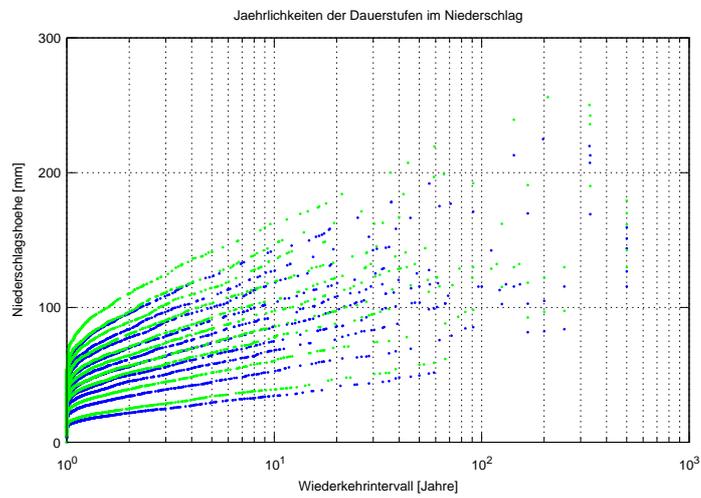


Abbildung A.15: Wiederkehrintervalle der Niederschlagshöhen, nach Dauerstufen gegliedert (1h, 3h, 6h, 8h, 12h, 16h, 24h, 36h, 48h, 72h)

Abfluss

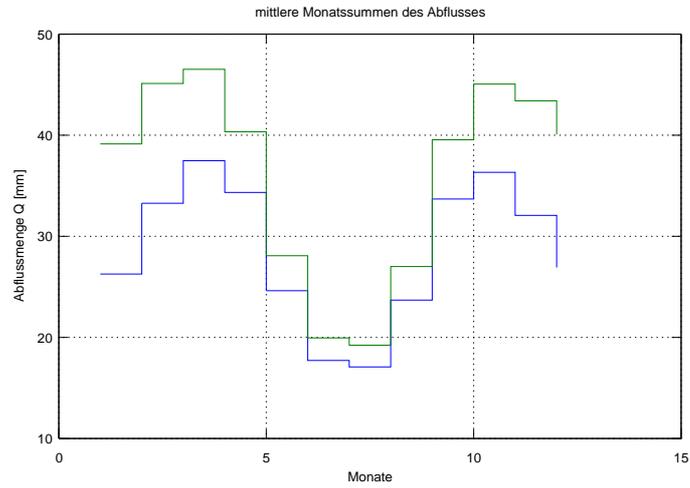


Abbildung A.16: monatliche Abflusssummen

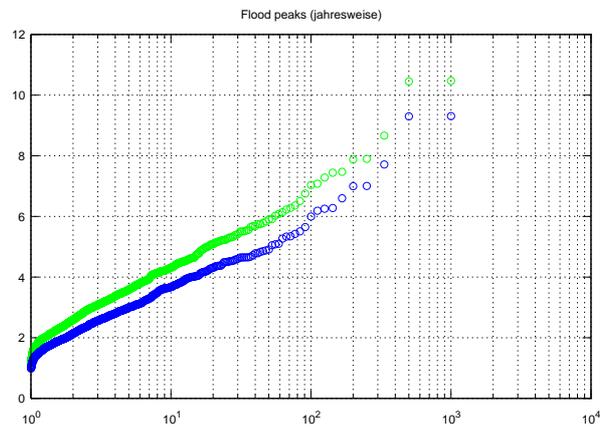
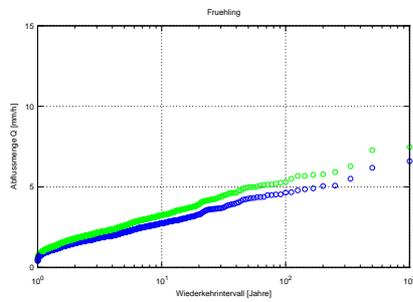
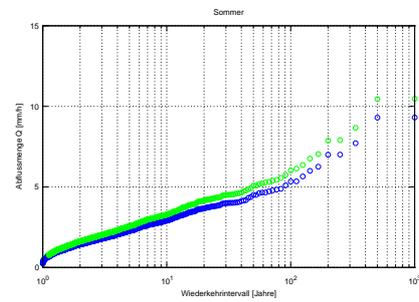


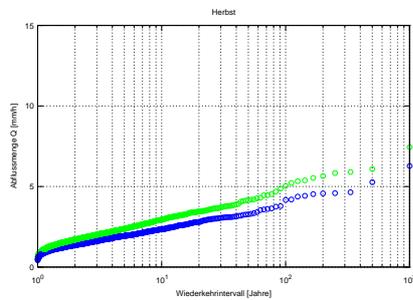
Abbildung A.17: Wiederkehrintervalle der jährlichen Abflüsse



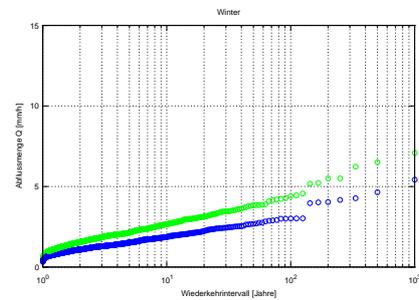
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung A.18: Saisonale Darstellung der Wiederkehrintervalle im Abfluss Frühling (a), Sommer (b), Herbst (c), Winter (d)

A.3 Szenario N2

Im vorliegenden Szenario wird der über das Jahr konstante Anteil der Ereignisdauer von $Deltar = 5.70h$ auf $Deltar = 4.56h$ um 20% vermindert. Der saisonale Verlauf bleibt davon unberührt.

PARAMETERS FOR RR-MODEL

General parameters		Runoff model	
Seed =	200000	mean_rc_low =	0.35
n_sim =	1	mean_rc_high =	0.35
Years =	1000	ampl_rc =	0.25
Nevents =	500	Betas2 =	0.04
n_cl =	100	Tcslow =	6.00
n_peak =	1	Tcfast =	6.00
detail_out =	0	p_thresh =	10000

Rainfall model

Interstorm period		Rainfall durations		seasonal intensity	
Deltai =	43.00	Deltar =	4.56	a2m =	1.26
Ampli =	5.60	Amplr =	1.40	a2a =	0.65
Phasi =	0.00	Phasr =	0.00	a2phas =	6.00
Cint =	0.70	Cdur =	0.70	time pattern =	1

Tabelle A.3: Eingabeparameter für das Niederschlags-Abflussmodell in Szenario a2. Der umrahmte Parameter wurden gegenüber der Ausgangslage geändert.

Hinweis:

Die Ausgangslage wird in den folgende Grafiken mit **BLAU**, das jeweilige Szenario im Bezug zur Ausgangslage mit **GRÜN** gekennzeichnet.

Eingangsparameter

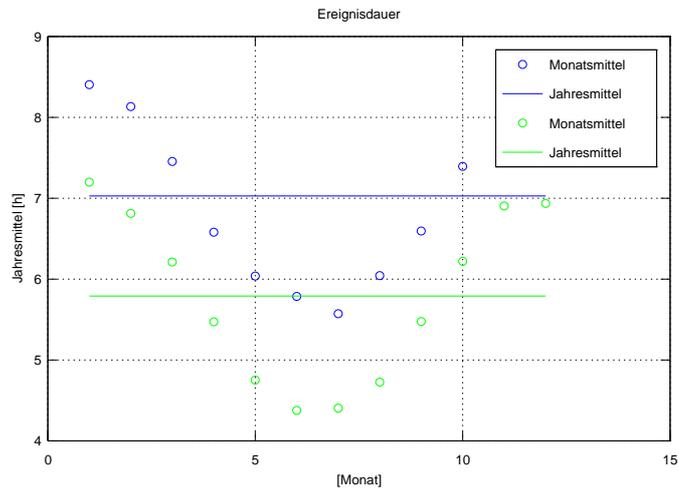


Abbildung A.19: Saisonaler Gang der Ereignisdauer

Niederschlag

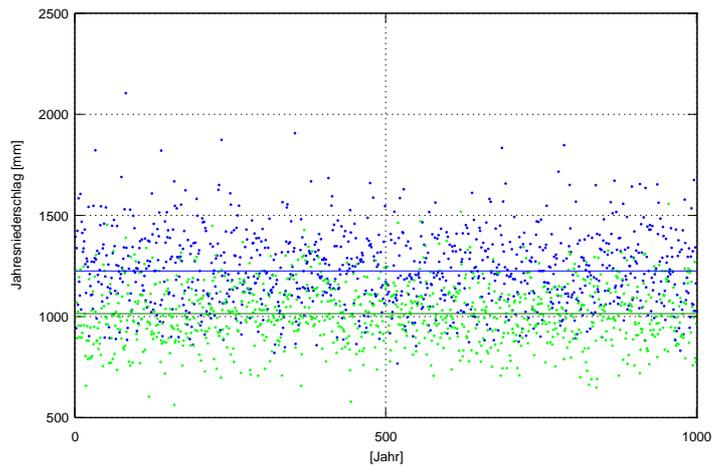


Abbildung A.20: jährliche Niederschlagshöhe

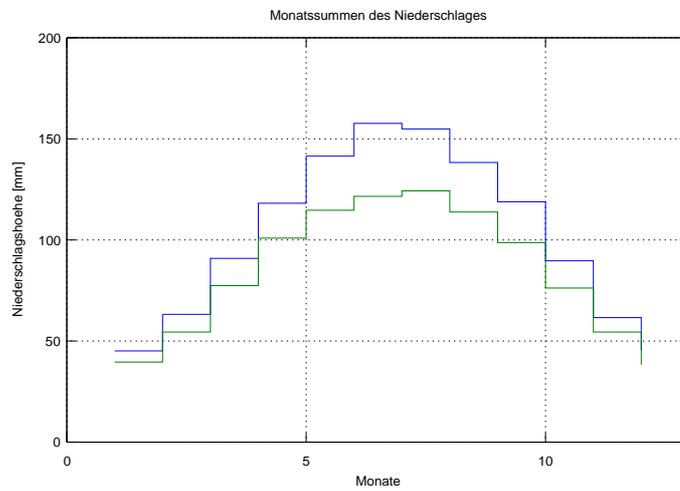


Abbildung A.21: monatliche Niederschlagssummen

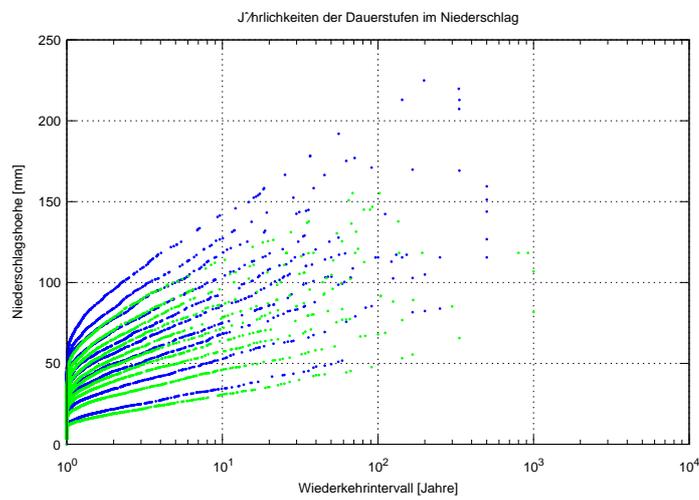


Abbildung A.22: Wiederkehrintervalle der Niederschlagshöhen, nach Dauerstufen gegliedert (1h, 3h, 6h, 8h, 12h, 16h, 24h, 36h, 48h, 72h)

Abfluss

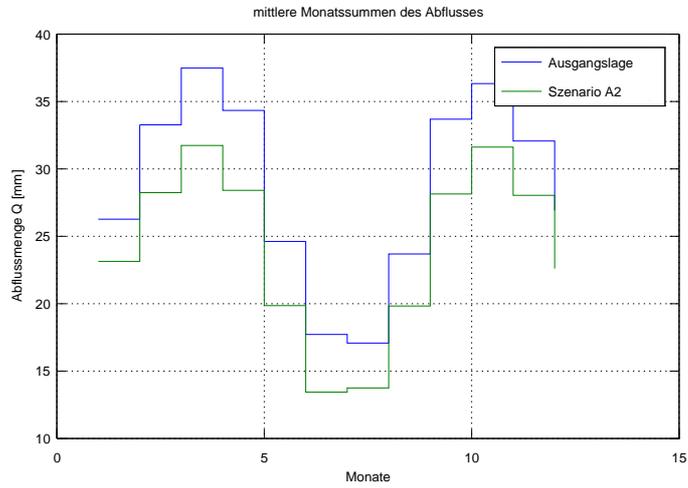


Abbildung A.23: monatliche Abflusssummen

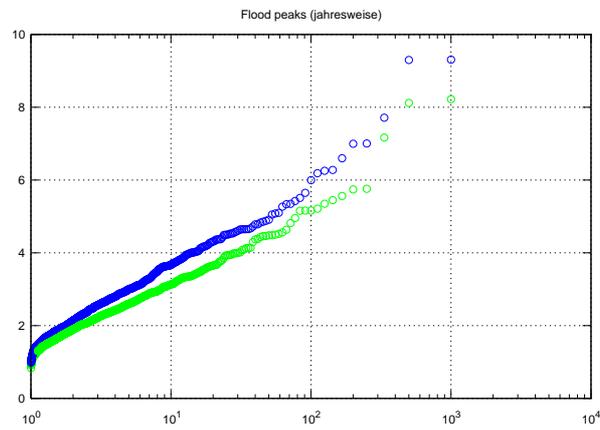
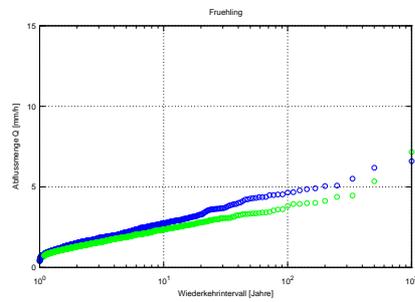
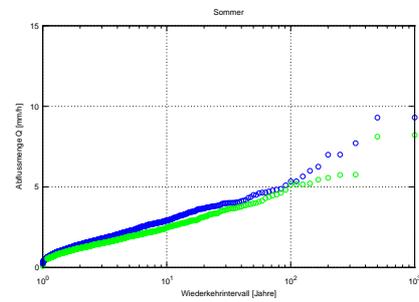


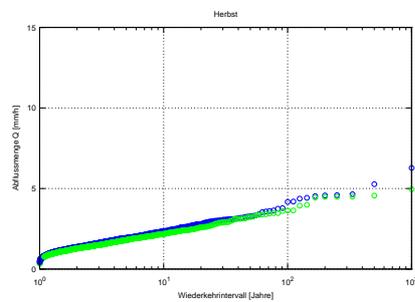
Abbildung A.24: Wiederkehrintervalle der jährlichen Abflüsse



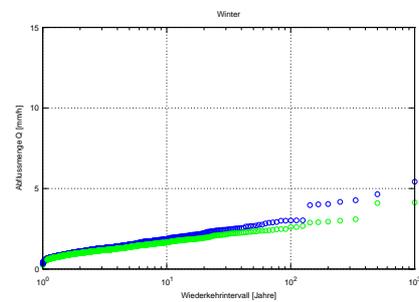
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung A.25: Saisonale Darstellung der Wiederkehrintervalle im Abfluss Frühling (a), Sommer (b), Herbst (c), Winter (d)

A.4 Szenario N3a

Im vorliegenden Szenario wird der über das Jahr konstante Anteil der Ereignispausen von $\Delta t_{ai} = 43.00h$ auf $\Delta t_{ai} = 51.60h$ um 20% erhöht. Der saisonale Verlauf bleibt davon unberührt.

PARAMETERS FOR RR-MODEL

General parameters		Runoff model	
Seed =	200000	mean_rc_low =	0.35
n_sim =	1	mean_rc_high =	0.35
Years =	1000	ampl_rc =	0.25
Nevents =	500	Betas2 =	0.04
n_cl =	100	Tcslow =	6.00
n_peak =	1	Tcfast =	6.00
detail_out =	0	p_thresh =	10000

Rainfall model

Interstorm period		Rainfall durations		seasonal intensity	
$\Delta t_{ai} =$	51.60	$\Delta t_{ar} =$	5.70	a2m =	1.05
Ampli =	5.60	Amplr =	1.40	a2a =	0.65
Phasi =	0.00	Phasr =	0.00	a2phas =	6.00
Cint =	0.70	Cdur =	0.70	time pattern =	1

Tabelle A.4: Eingabeparameter für das Niederschlags-Abflussmodell in Szenario N3a. Der umrahmte Parameter wurden gegenüber der Ausgangslage geändert.

Hinweis:

Die Ausgangslage wird in den folgende Grafiken mit **BLAU**, das jeweilige Szenario im Bezug zur Ausgangslage mit **GRÜN** gekennzeichnet.

Eingangsparameter

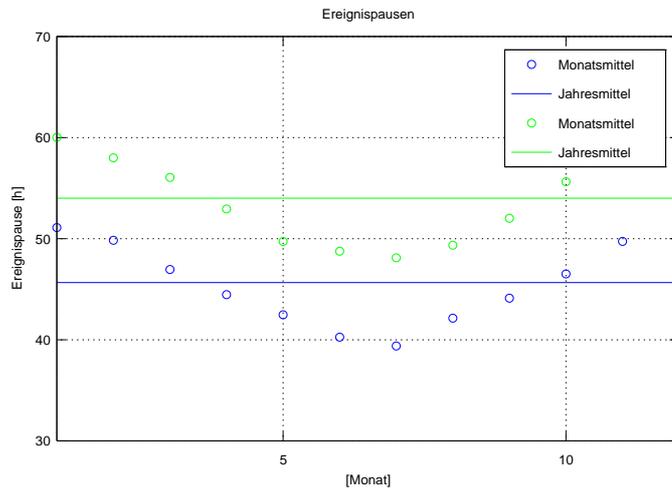


Abbildung A.26: Saisonaler Gang der Ereignispausen

Niederschlag

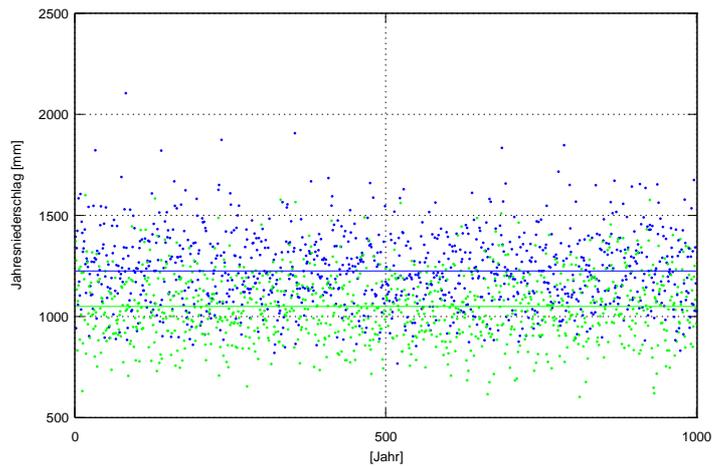


Abbildung A.27: jährliche Niederschlagshöhe

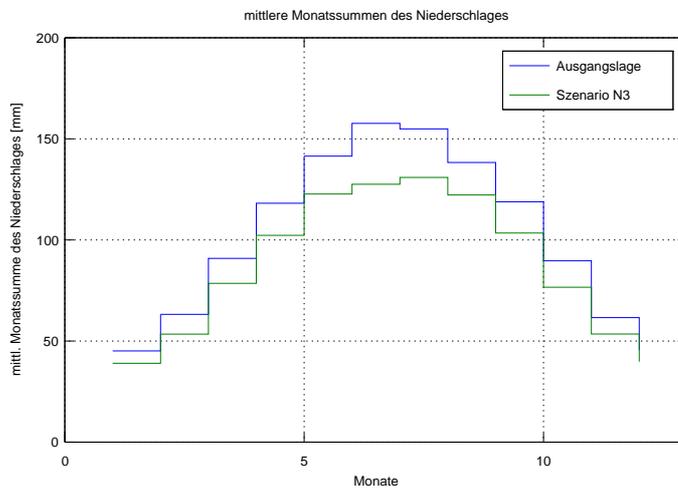


Abbildung A.28: monatliche Niederschlagssummen

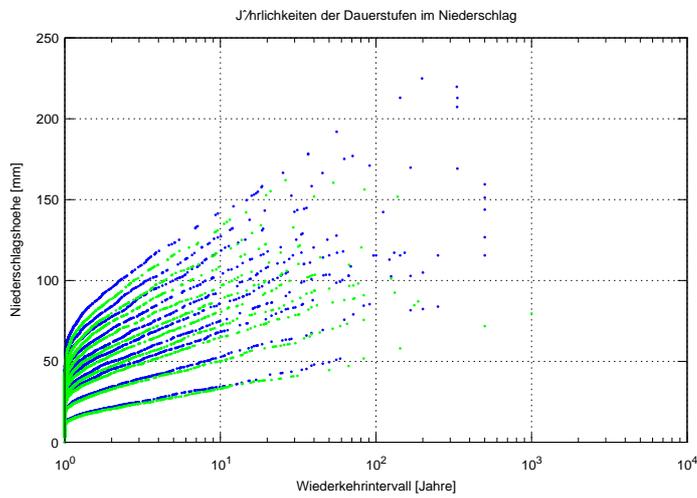


Abbildung A.29: Wiederkehrintervalle der Niederschlagshöhen, nach Dauerstufen gegliedert (1h, 3h, 6h, 8h, 12h, 16h, 24h, 36h, 48h, 72h)

Abfluss

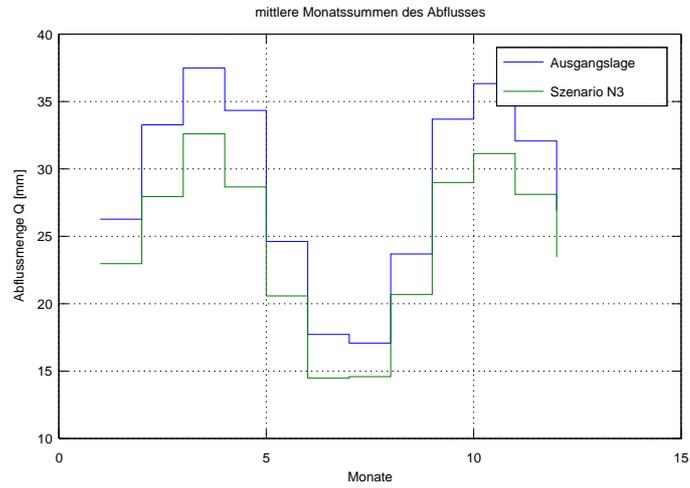


Abbildung A.30: monatliche Abflusssummen

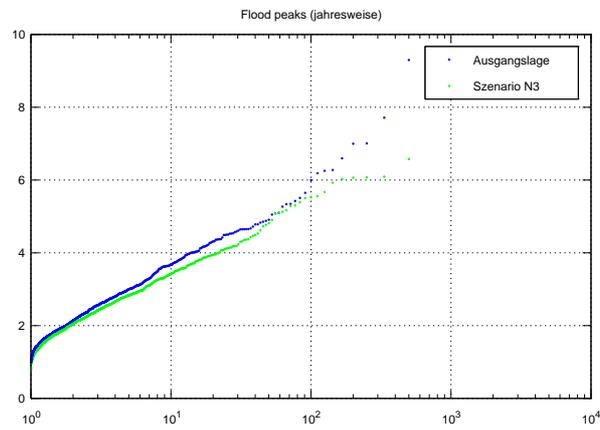
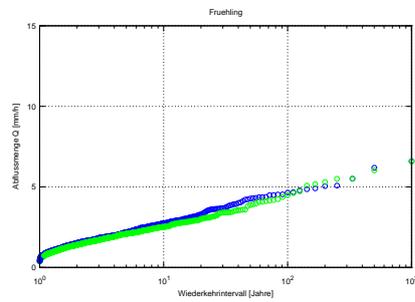
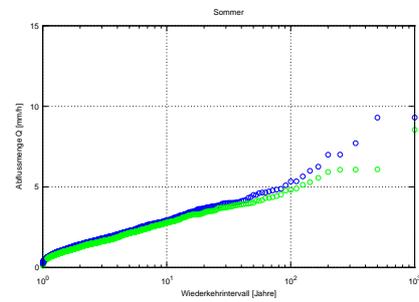


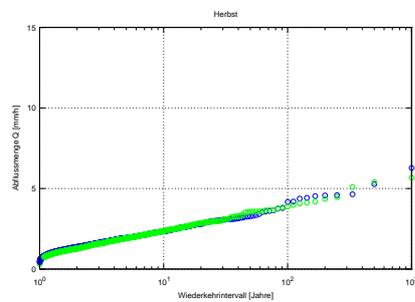
Abbildung A.31: Wiederkehrintervalle der jährlichen Abflüsse



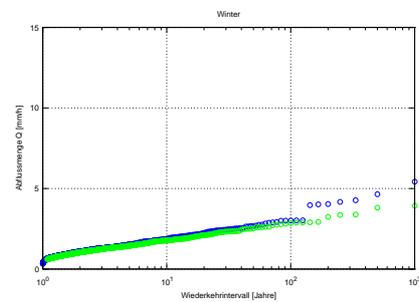
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung A.32: Saisonale Darstellung der Wiederkehrintervalle im Abfluss Frühling (a), Sommer (b), Herbst (c), Winter (d)

A.5 Szenario N3b

Im vorliegenden Szenario erfolgt eine Phasenverschiebung des Ereignispausen-Verlaufes um 6 Monate.

PARAMETERS FOR RR-MODEL

General parameters		Runoff model	
Seed =	200000	mean_rc_low =	0.35
n_sim =	1	mean_rc_high =	0.35
Years =	1000	ampl_rc =	0.25
Nevents =	500	Betas2 =	0.04
n_cl =	100	Tcslow =	6.00
n_peak =	1	Tcfast =	6.00
detail_out =	0	p_thresh =	10000

Rainfall model

Interstorm period		Rainfall durations		seasonal intensity	
Deltai =	43.00	Deltar =	5.70	a2m =	1.05
Ampli =	5.60	Amplr =	1.40	a2a =	0.65
Phasi =	6.00	Phasr =	0.00	a2phas =	6.00
Cint =	0.70	Cdur =	0.70	time pattern =	1

Tabelle A.5: Eingabeparameter für das Niederschlags-Abflussmodell in Szenario N3b. Der umrahmte Parameter wurden gegenüber der Ausgangslage geändert.

Hinweis:

Die Ausgangslage wird in den folgende Grafiken mit **BLAU**, das jeweilige Szenario im Bezug zur Ausgangslage mit **GRÜN** gekennzeichnet.

Eingangsparameter

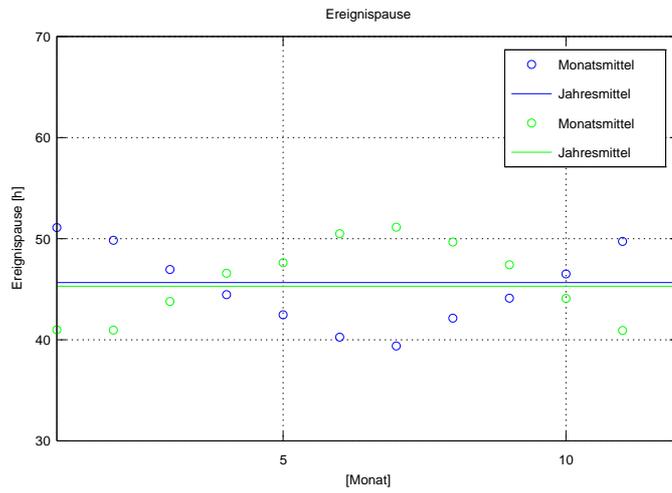


Abbildung A.33: Saisonaler Gang der Ereignispausen

Niederschlag

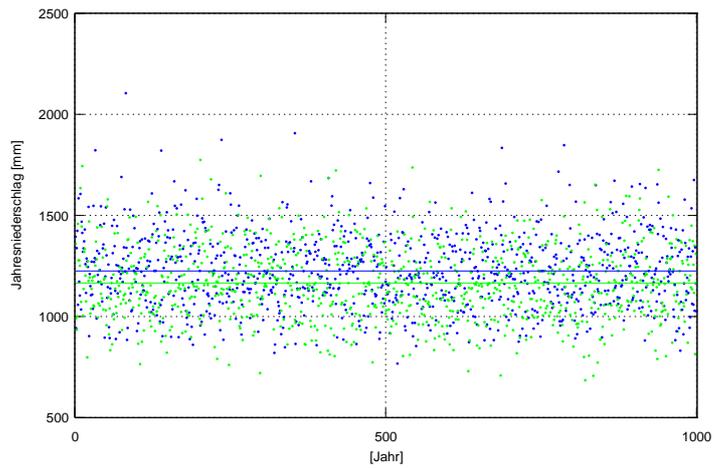


Abbildung A.34: jährliche Niederschlagshöhe

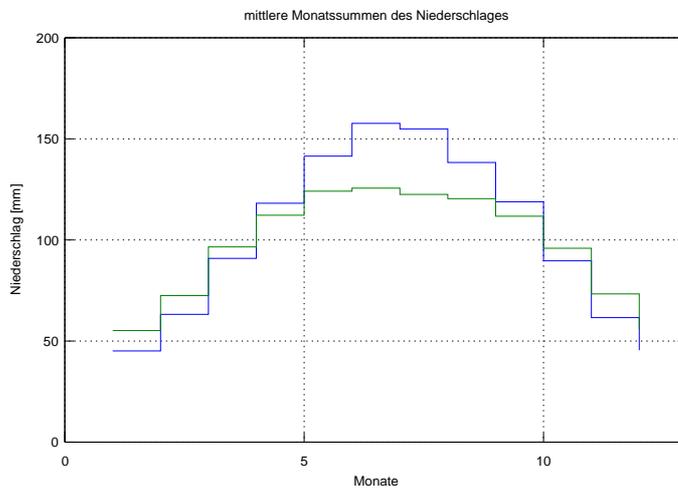


Abbildung A.35: monatliche Niederschlagssummen

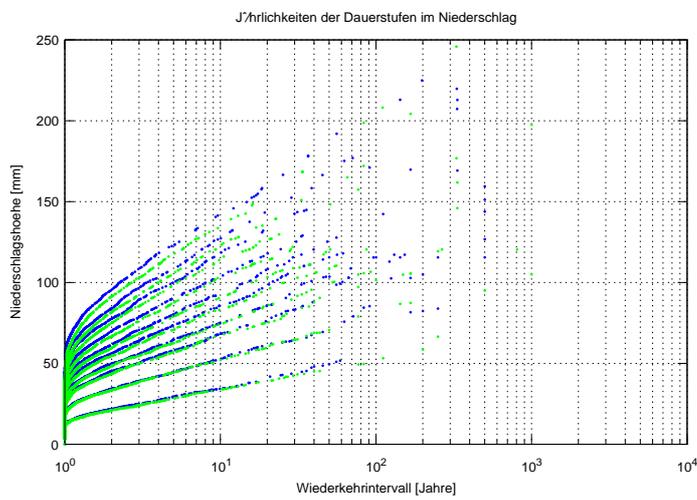


Abbildung A.36: Wiederkehrintervalle der Niederschlagshöhen, nach Dauerstufen gegliedert (1h, 3h, 6h, 8h, 12h, 16h, 24h, 36h, 48h, 72h)

Abfluss

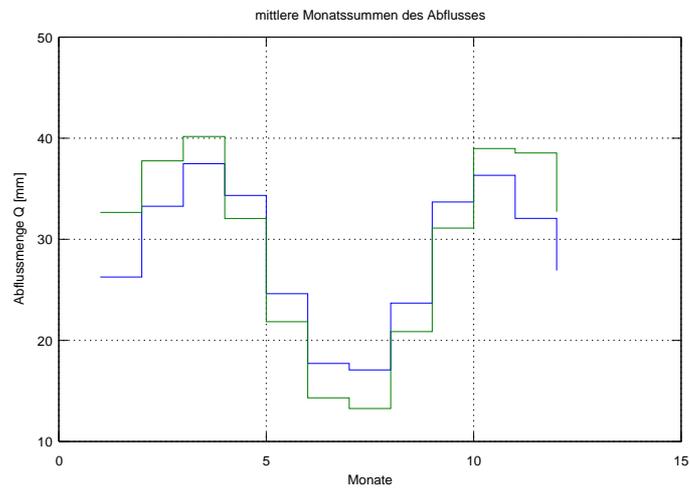


Abbildung A.37: monatliche Abflusssummen

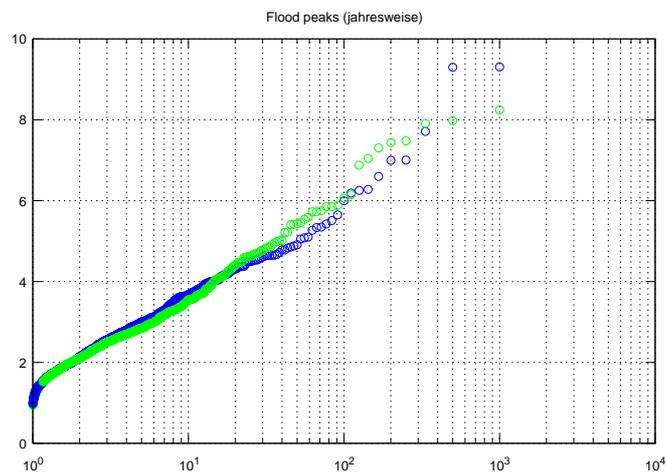


Abbildung A.38: Wiederkehrintervalle der jährlichen Abflüsse

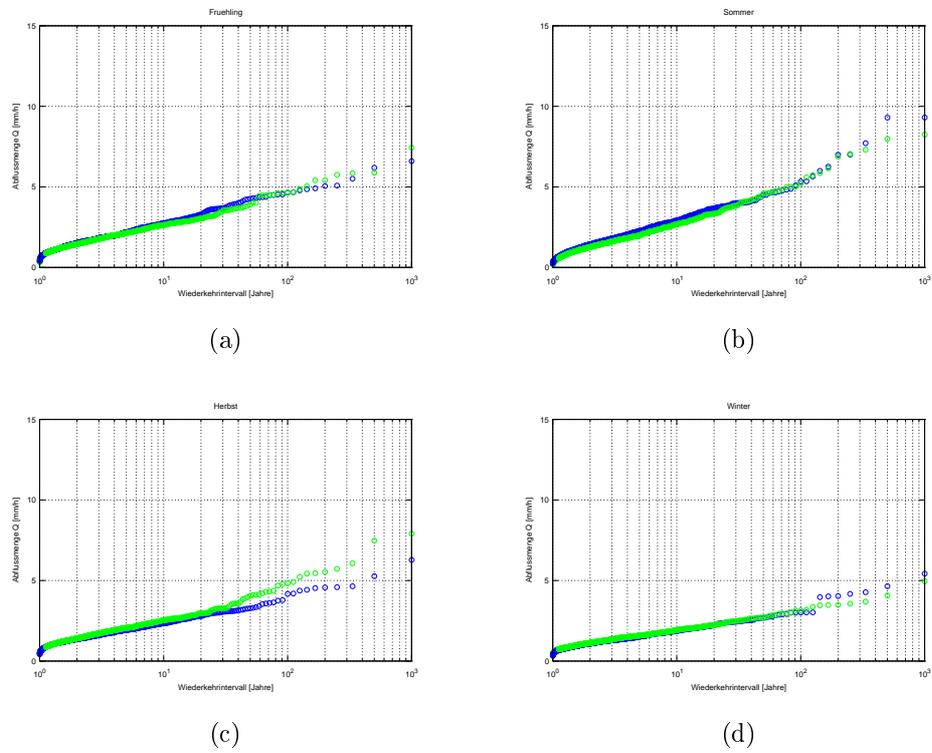


Abbildung A.39: Saisonale Darstellung der Wiederkehrintervalle im Abfluss Frühling (a), Sommer (b), Herbst (c), Winter (d)

A.6 Szenario A1

Im vorliegenden Szenario wird der über das Jahr konstante Anteil des Abflussbeiwertes von $mean_rc = 0.35$ auf $mean_rc = 0.32$ um 20% vermindert. Der saisonale Verlauf bleibt davon unberührt.

Aufgrund der starksten Simplifizierung der realen Abflussprozesse im Abflussmodell drücken sich im Abflussbeiwert zahlreiche Effekte aus. Im gegenständlichen Szenario wird eine erhöhte Verdunstung durch Minderung des Abflussbeiwertes simuliert.

PARAMETERS FOR RR-MODEL

General parameters		Runoff model	
Seed =	200000	mean_rc_low =	0.32
n_sim =	1	mean_rc_high =	0.32
Years =	1000	ampl_rc =	0.25
Nevents =	500	Betas2 =	0.04
n_cl =	100	Tcslow =	6.00
n_peak =	1	Tcfast =	6.00
detail_out =	0	p_thresh =	10000

Rainfall model

Interstorm period		Rainfall durations		seasonal intensity	
Deltai =	43.00	Deltar =	5.70	a2m =	1.05
Ampli =	5.60	Amplr =	1.40	a2a =	0.65
Phasi =	0.00	Phasr =	0.00	a2phas =	6.00
Cint =	0.70	Cdur =	0.70	time pattern =	1

Tabelle A.6: Eingabeparameter für das Niederschlags-Abflussmodell in Szenario A1. Der umrahmte Parameter wurden gegenüber der Ausgangslage geändert.

Hinweis:

Die Ausgangslage wird in den folgende Grafiken mit **BLAU**, das jeweilige Szenario im Bezug zur Ausgangslage mit **GRÜN** gekennzeichnet.

Eingangsparameter

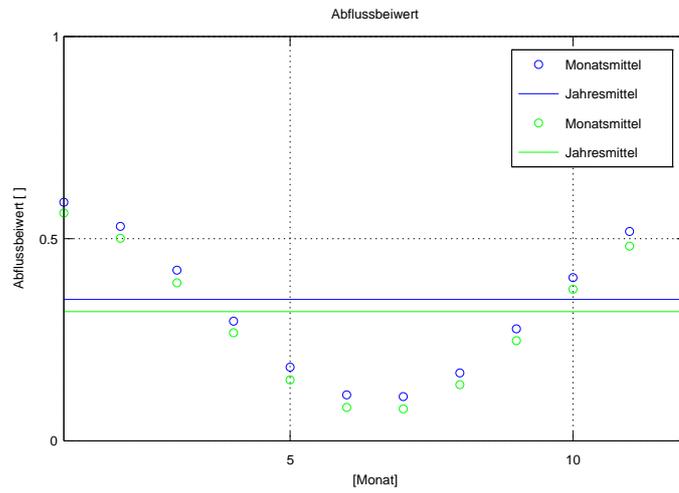


Abbildung A.40: Saisonaler Gang des Abflussbeiwertes

Abfluss

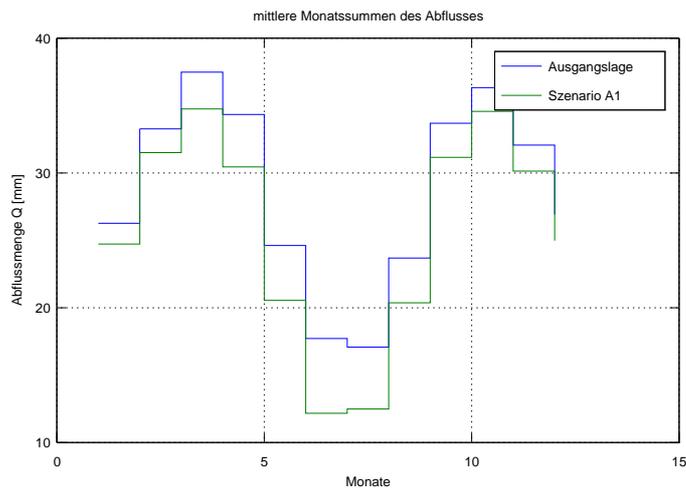


Abbildung A.41: monatliche Abflusssummen

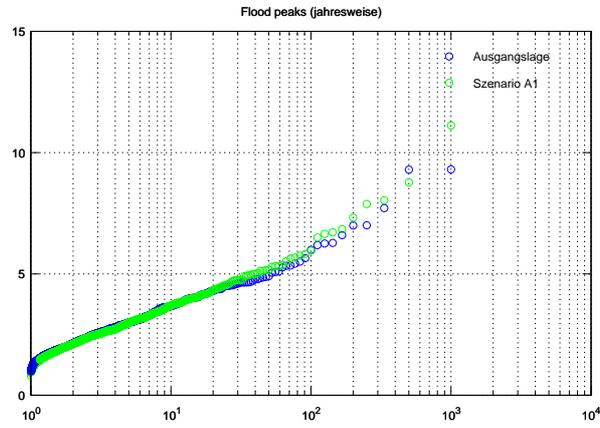


Abbildung A.42: Wiederkehrintervalle der jährlichen Abflüsse

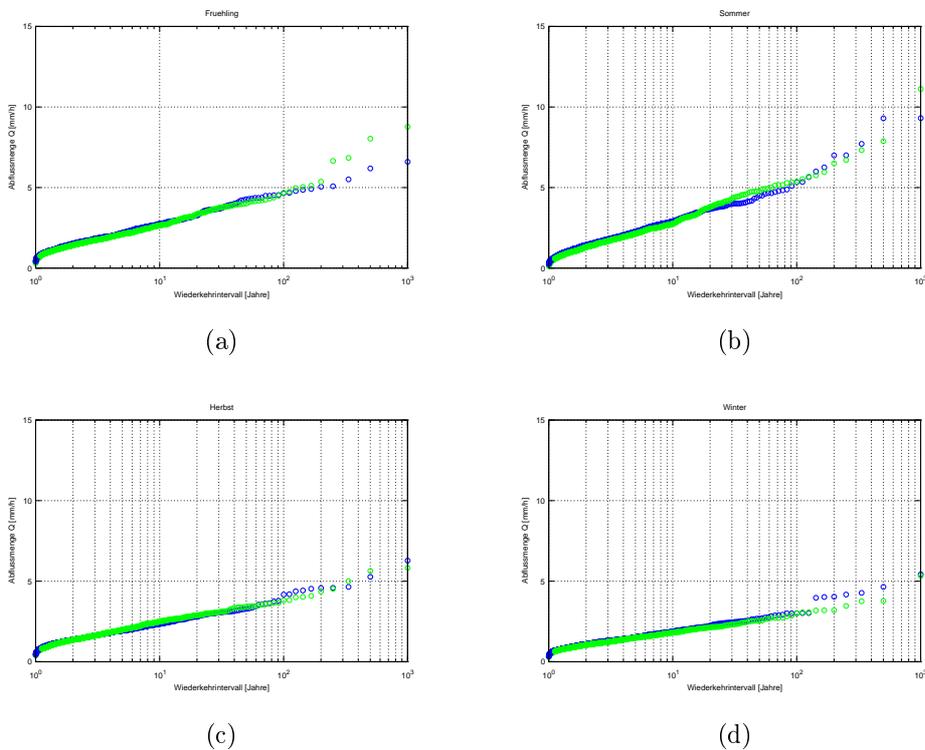


Abbildung A.43: Saisonale Darstellung der Wiederkehrintervalle im Abfluss Frühling (a), Sommer (b), Herbst (c), Winter (d)

A.7 Szenario N12

Das vorliegende Szenario entsteht durch Überlagerung von *N1* und *N2*. Eine Erhöhung der Intensität wird aufgrund der hydrologischen Konsistenz mit einer Verkürzung der Ereignisdauer verknüpft.

Es regnet kürzer, dafür intensiver.

PARAMETERS FOR RR-MODEL

General parameters		Runoff model	
Seed =	200000	mean_rc_low =	0.35
n_sim =	1	mean_rc_high =	0.35
Years =	1000	ampl_rc =	0.25
Nevents =	500	Betas2 =	0.04
n_cl =	100	Tcslow =	6.00
n_peak =	1	Tcfast =	6.00
detail_out =	0	p_thresh =	10000

Rainfall model

Interstorm period		Rainfall durations		seasonal intensity	
Deltai =	43.00	Deltar =	4.65	a1m =	1.26
Ampli =	5.60	Amplr =	1.40	a1a =	0.65
Phasi =	0.00	Phasr =	0.00	a1phas =	6.00
Cint =	0.70	Cdur =	0.70	time pattern =	1

Tabelle A.7: Eingabeparameter für das Niederschlags-Abflussmodell in Szenario A12. Die umrahmten Parameter wurden gegenüber der Ausgangslage geändert.

Hinweis:

Die Ausgangslage wird in den folgende Grafiken mit **BLAU**, das jeweilige Szenario im Bezug zur Ausgangslage mit **GRÜN** gekennzeichnet.

Eingangsparmeter

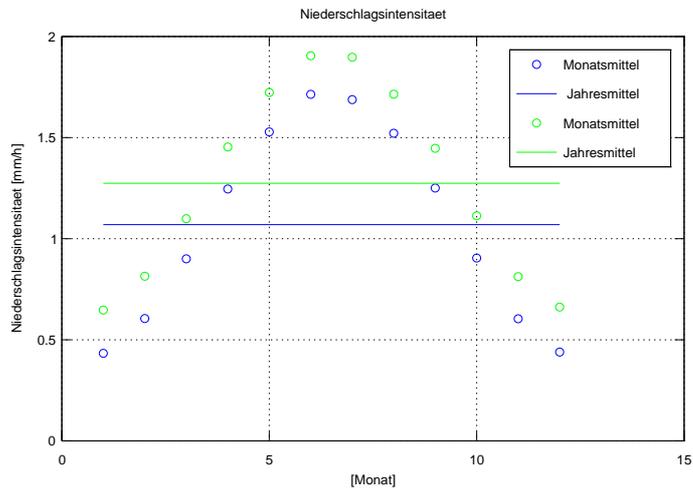


Abbildung A.44: Saisonaler Gang Niederschlagsintensität

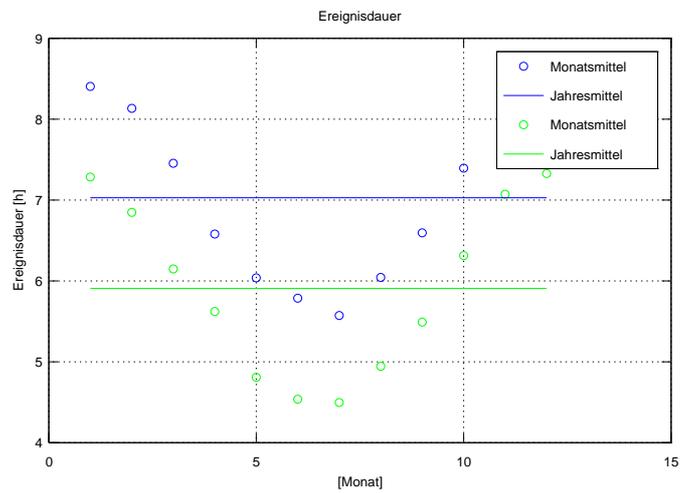


Abbildung A.45: Saisonaler Gang der Ereignisdauer

Niederschlag

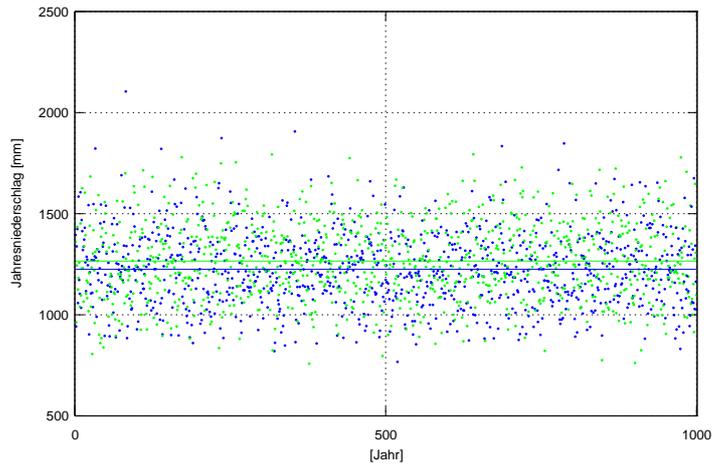


Abbildung A.46: jährliche Niederschlagshöhe

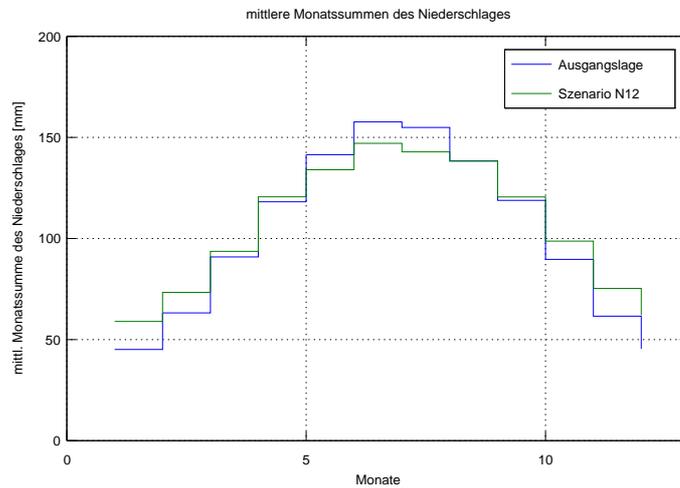


Abbildung A.47: monatliche Niederschlagssummen

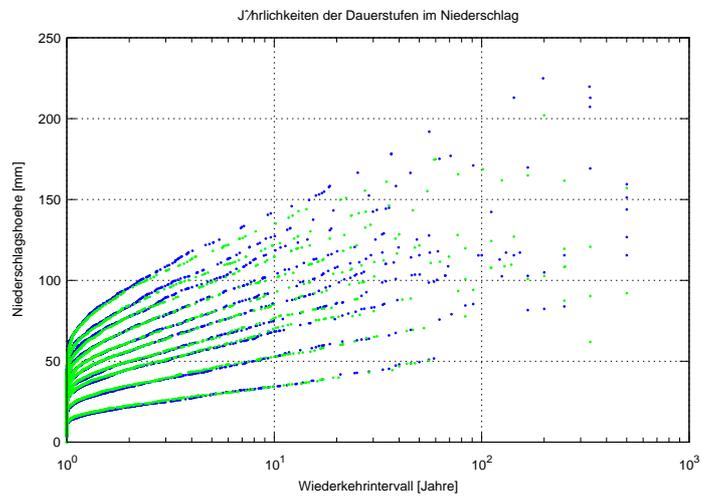


Abbildung A.48: Wiederkehrintervalle der Niederschlagshöhen, nach Dauerstufen gegliedert (1h, 3h, 6h, 8h, 12h, 16h, 24h, 36h, 48h, 72h)

Abfluss

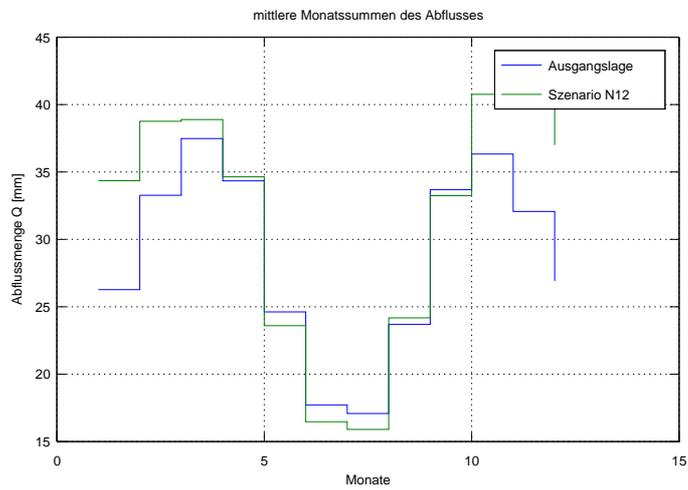


Abbildung A.49: monatliche Abflusssummen

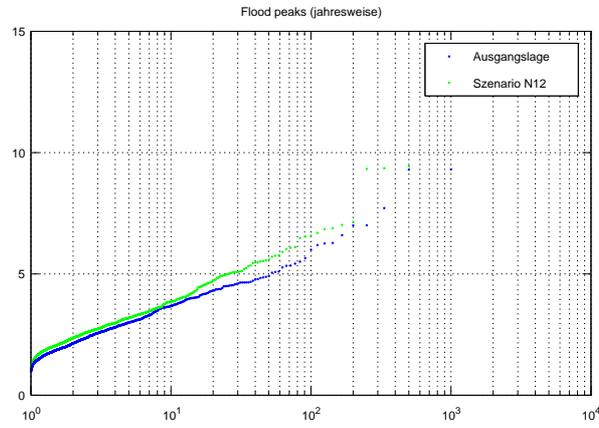
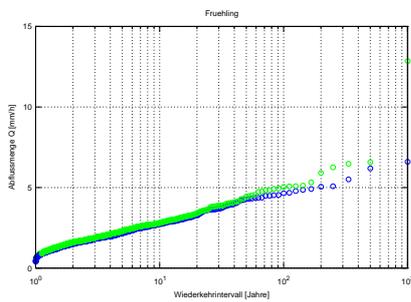
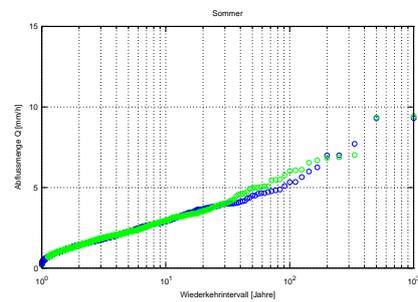


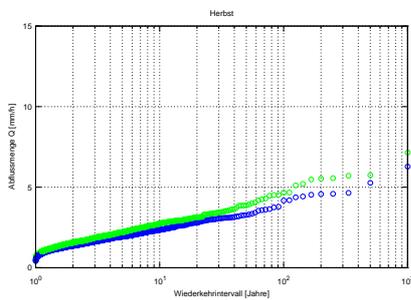
Abbildung A.50: Wiederkehrintervalle der jährlichen Abflüsse



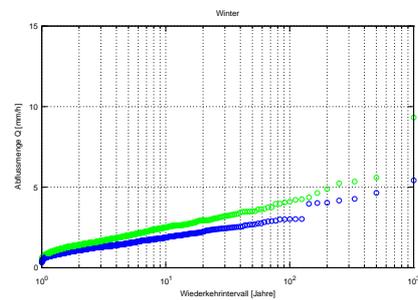
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung A.51: Saisonale Darstellung der Wiederkehrintervalle im Abfluss Frühling (a), Sommer (b), Herbst (c), Winter (d)

A.8 Szenario N13a

Das vorliegende Szenario entsteht durch Überlagerung von *N1* und *N3a*. Eine Erhöhung der Intensität hat eine Verkürzung der Ereignisdauer und somit eine Verlängerung der Ereignispausen zur Folge.

Es regnet intensiver bei längeren Trockenperioden.

PARAMETERS FOR RR-MODEL

General parameters		Runoff model	
Seed =	200000	mean_rc_low =	0.35
n_sim =	1	mean_rc_high =	0.35
Years =	1000	ampl_rc =	0.25
Nevents =	500	Betas2 =	0.04
n_cl =	100	Tcslow =	6.00
n_peak =	1	Tcfast =	6.00
detail_out =	0	p_thresh =	10000

Rainfall model

Interstorm period		Rainfall durations		seasonal intensity	
Deltai =	51.60	Deltar =	5.70	a2m =	1.26
Ampli =	5.60	Amplr =	1.40	a2a =	0.65
Phasi =	0.00	Phasr =	0.00	a2phas =	6.00
Cint =	0.70	Cdur =	0.70	time pattern =	1

Tabelle A.8: Eingabeparameter für das Niederschlags-Abflussmodell in Szenario A13. Die umrahmten Parameter wurden gegenüber der Ausgangslage geändert.

Hinweis:

Die Ausgangslage wird in den folgende Grafiken mit **BLAU**, das jeweilige Szenario im Bezug zur Ausgangslage mit **GRÜN** gekennzeichnet.

Eingangsparmeter

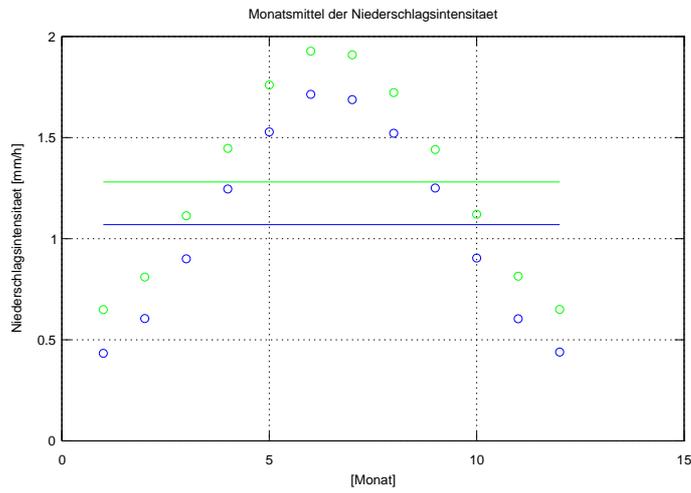


Abbildung A.52: Saisonaler Gang Niederschlagsintensität

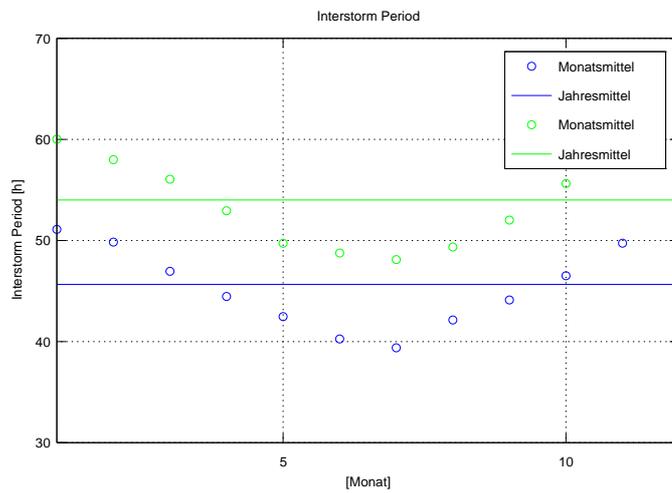


Abbildung A.53: Saisonaler Gang der Ereignispausen

Niederschlag

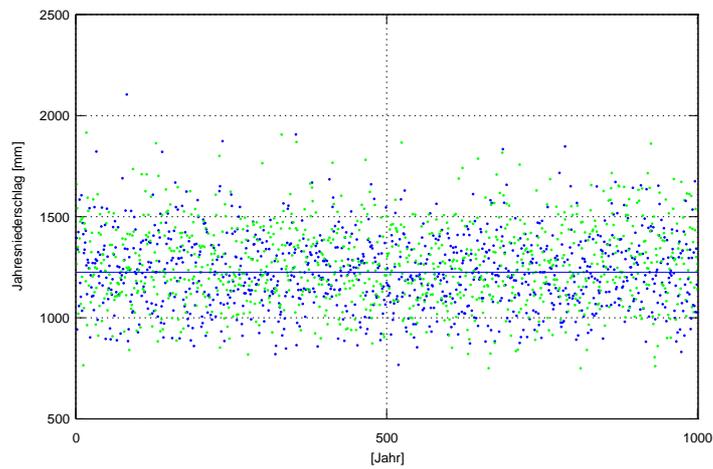


Abbildung A.54: jährliche Niederschlagshöhe

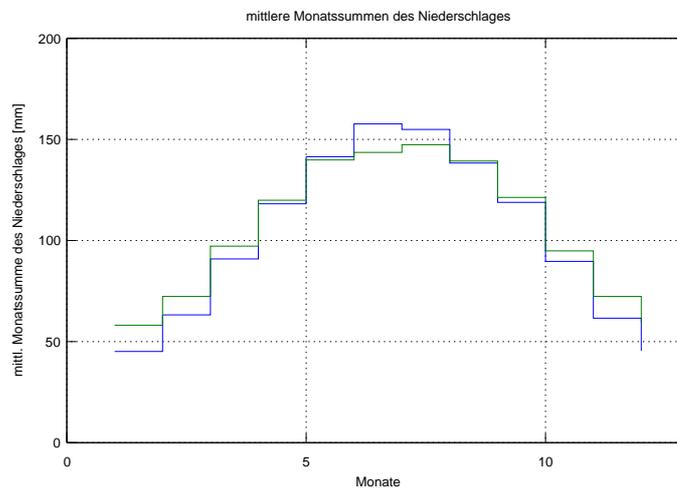


Abbildung A.55: monatliche Niederschlagssummen

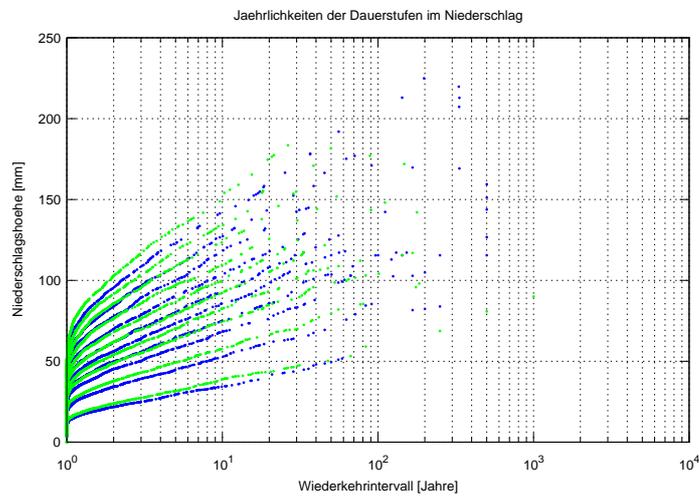


Abbildung A.56: Wiederkehrintervalle der Niederschlagshöhen, nach Dauerstufen gegliedert (1h, 3h, 6h, 8h, 12h, 16h, 24h, 36h, 48h, 72h)

Abfluss

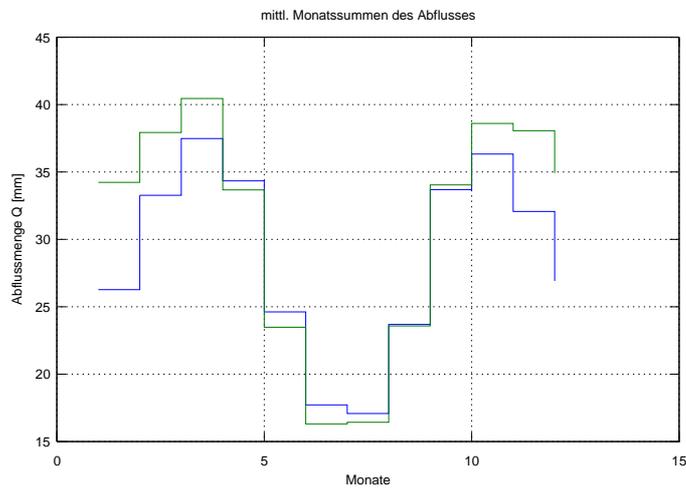


Abbildung A.57: monatliche Abflusssummen

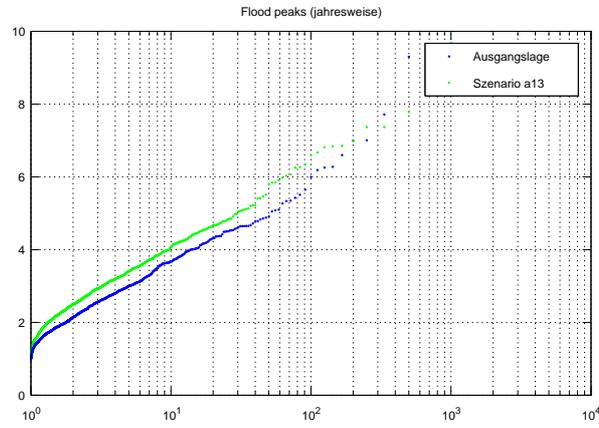
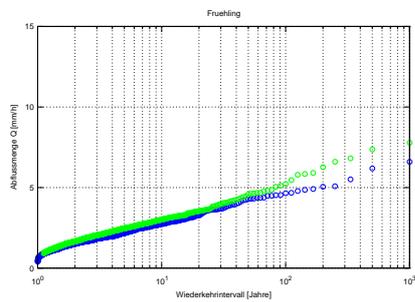
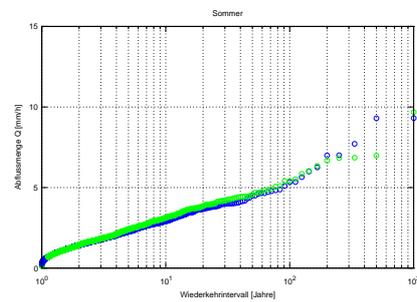


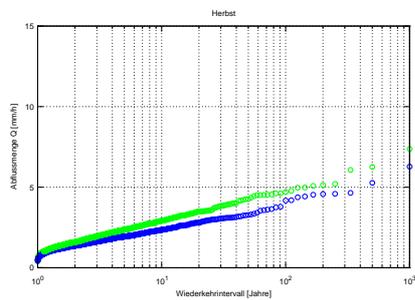
Abbildung A.58: Wiederkehrintervalle der jährlichen Abflüsse



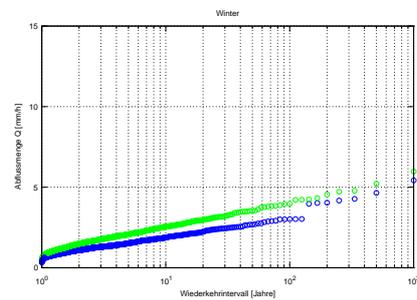
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung A.59: Saisonale Darstellung der Wiederkehrintervalle im Abfluss Frühling (a), Sommer (b), Herbst (c), Winter (d)

A.9 Szenario N12-A1

Das vorliegende Szenario entsteht durch Überlagerung von $N1$, $N2$ und $A1$.

Es regnet intensiver, dafür kürzer. Der Anstieg der Verdunstung wird mit einer Abnahme des Abflussbeiwertes berücksichtigt.

- Erhöhung der Intensität
von $a1m = 1.05mm/h$ auf $a1m = 1.26mm/h$ um 20%
- Verkürzung der Ereignisdauer
von $Deltar = 5.70h$ auf $Deltar = 4.56h$ um 20%
- Verringerung des Abflussbeiwertes
von $mean_rc = 0.35$ auf $mean_rc = 0.33$ um 6%

PARAMETERS FOR RR-MODEL

General parameters		Runoff model	
Seed =	200000	mean_rc_low =	0.33
n_sim =	1	mean_rc_high =	0.33
Years =	1000	ampl_rc =	0.25
Nevents =	500	Betas2 =	0.04
n_cl =	100	Tcslow =	6.00
n_peak =	1	Tcfast =	6.00
detail_out =	0	p_thresh =	10000

Rainfall model

Interstorm period		Rainfall durations		seasonal intensity	
Deltai =	43.00	Deltar =	4.65	a2m =	1.26
Ampli =	5.60	Amplr =	1.40	a2a =	0.65
Phasi =	0.00	Phasr =	0.00	a2phas =	6.00
Cint =	0.70	Cdur =	0.70	time pattern =	1

Tabelle A.9: Eingabeparameter für das Niederschlags-Abflussmodell in Szenario N12-A1. Die umrahmten Parameter wurden gegenüber der Ausgangslage geändert.

Hinweis:

Die Ausgangslage wird in den folgende Grafiken mit **BLAU**, das jeweilige Szenario im Bezug zur Ausgangslage mit **GRÜN** gekennzeichnet.

Eingangsparameter

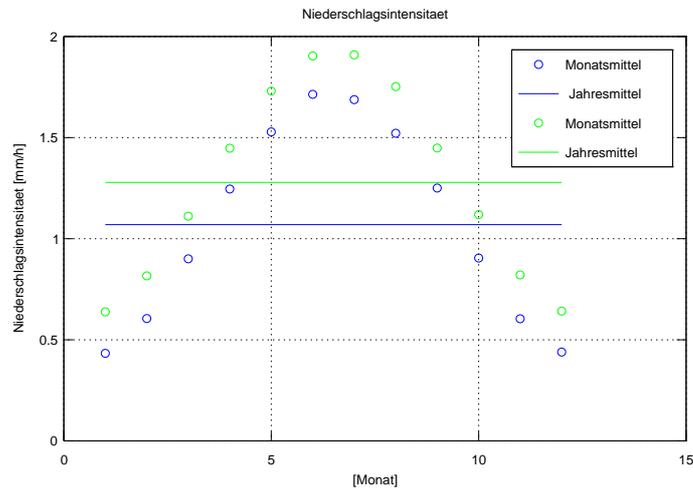


Abbildung A.60: Saisonaler Gang Niederschlagsintensität

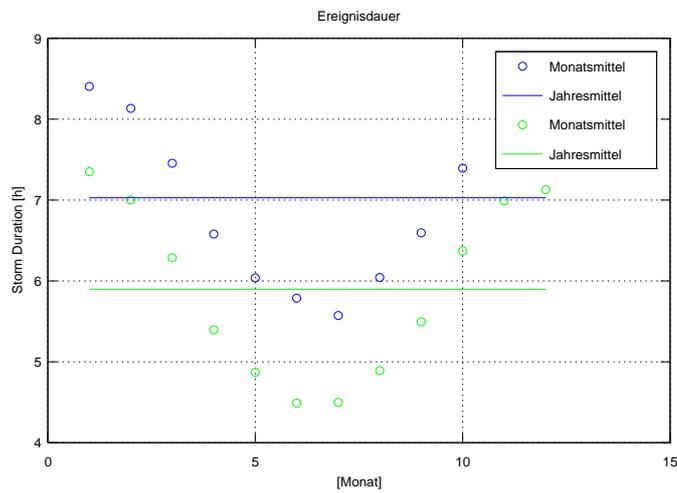


Abbildung A.61: Saisonaler Gang der Ereignisdauer

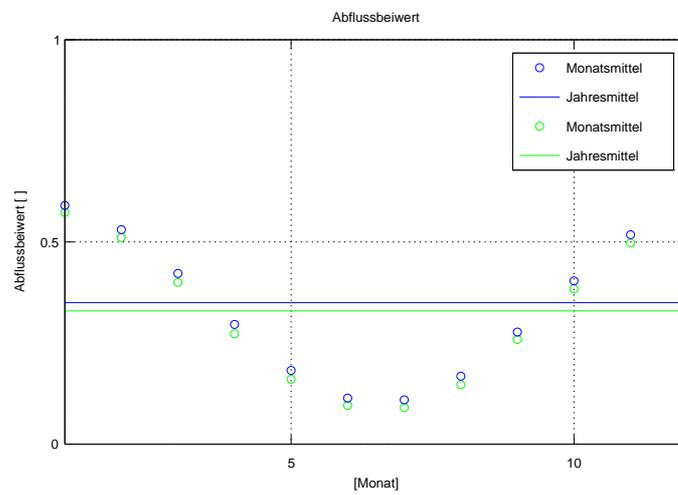


Abbildung A.62: Saisonaler Gang des Abflussbeiwertes

Niederschlag

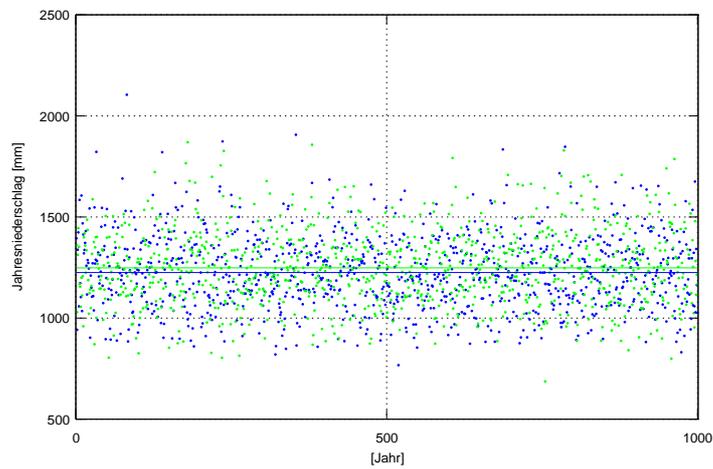


Abbildung A.63: jährliche Niederschlagshöhe

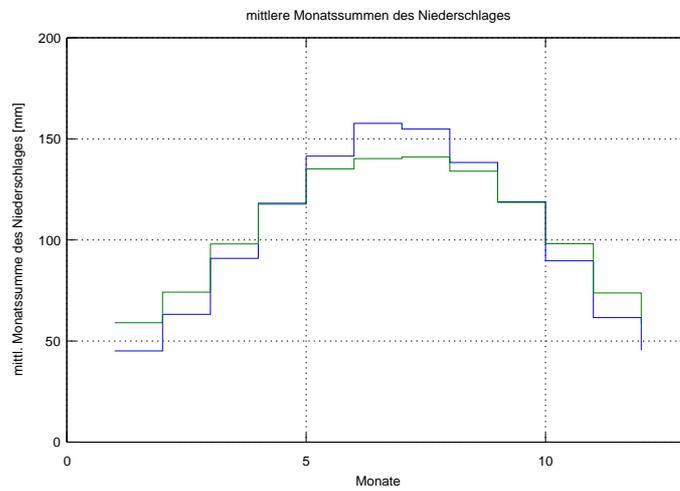


Abbildung A.64: monatliche Niederschlagssummen

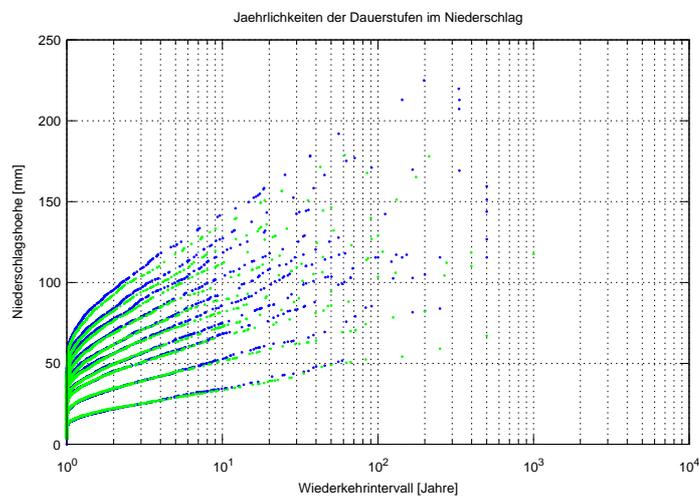


Abbildung A.65: Wiederkehrintervalle der Niederschlagshöhen, nach Dauerstufen gegliedert (1h, 3h, 6h, 8h, 12h, 16h, 24h, 36h, 48h, 72h)

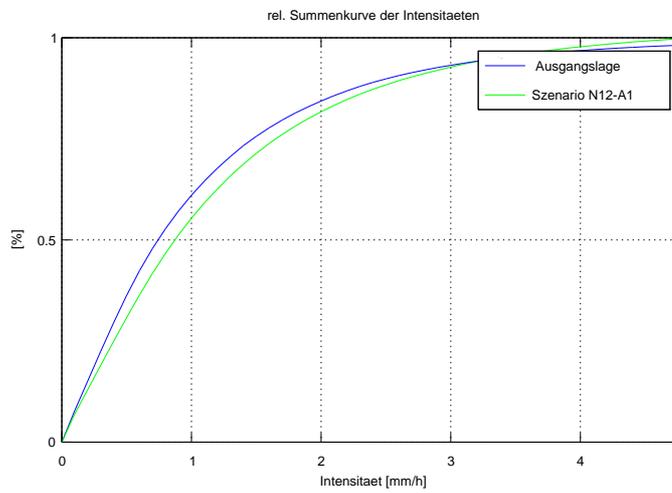


Abbildung A.66: Summenlinie der Niederschlagsintensitaet

Abfluss

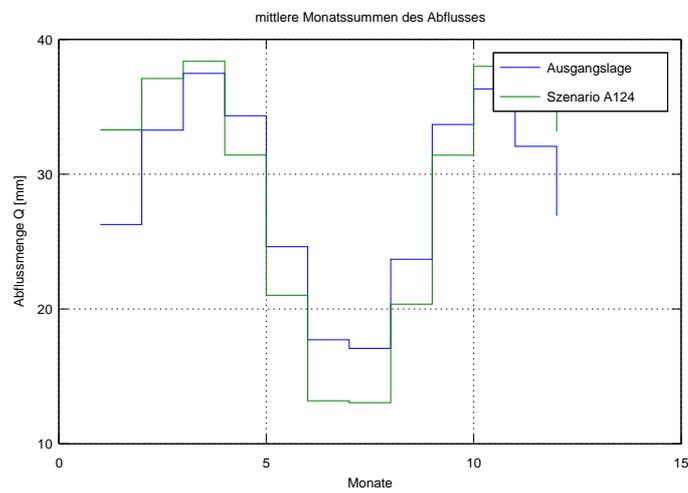


Abbildung A.67: monatliche Abflusssummen

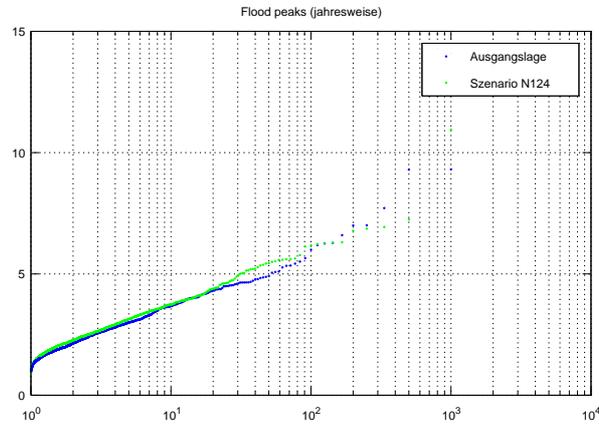
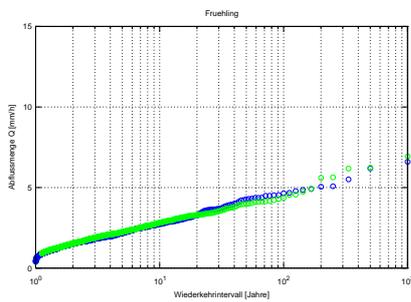
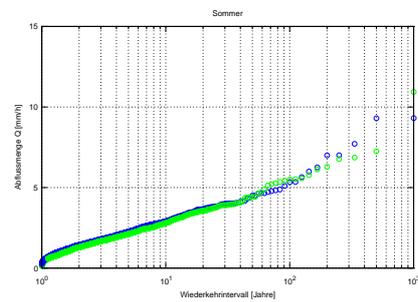


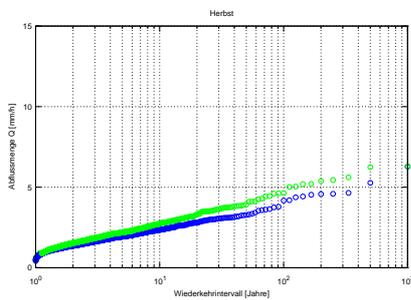
Abbildung A.68: Wiederkehrintervalle der jährlichen Abflüsse



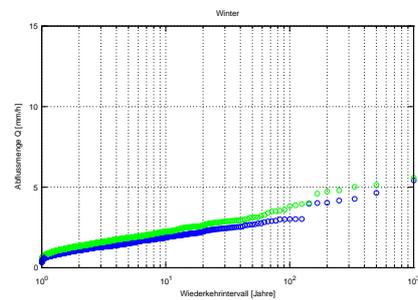
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung A.69: Saisonale Darstellung der Wiederkehrintervalle im Abfluss Frühling (a), Sommer (b), Herbst (c), Winter (d)

A.10 Szenario N13a-A1

Das vorliegende Szenario entsteht durch Überlagerung von *N1*, *N3a* und *A1*.

- Erhöhung der Intensität
von $a1m = 1.05mm/h$ auf $a1m = 1.26mm/h$ um 20%
- Verlängerung der Ereignispausen
von $Deltai = 43.00h$ auf $Deltai = 51.20h$ um 20%
- Verringerung des Abflussbeiwertes
von $mean_rc = 0.35$ auf $mean_rc = 0.33$ um 6%

PARAMETERS FOR RR-MODEL

General parameters		Runoff model	
Seed =	200000	mean_rc_low =	0.33
n_sim =	1	mean_rc_high =	0.33
Years =	1000	ampl_rc =	0.25
Nevents =	500	Betas2 =	0.04
n_cl =	100	Tcslow =	6.00
n_peak =	1	Tcfast =	6.00
detail_out =	0	p_thresh =	10000

Rainfall model

Interstorm period		Rainfall durations		seasonal intensity	
Deltai =	51.60	Deltar =	5.70	a2m =	1.26
Ampli =	5.60	Amplr =	1.40	a2a =	0.65
Phasi =	0.00	Phasr =	0.00	a2phas =	6.00
Cint =	0.70	Cdur =	0.70	time pattern =	1

Tabelle A.10: Eingabeparameter für das Niederschlags-Abflussmodell in Szenario N13a-A1. Die umrahmten Parameter wurden gegenüber der Ausgangslage geändert.

Hinweis:

Die Ausgangslage wird in den folgende Grafiken mit **BLAU**, das jeweilige Szenario im Bezug zur Ausgangslage mit **GRÜN** gekennzeichnet.

Eingangsparameter

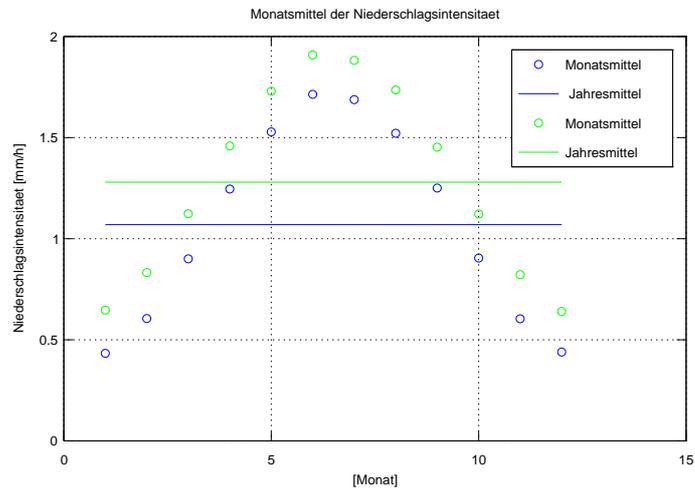


Abbildung A.70: Saisonaler Gang Niederschlagsintensität

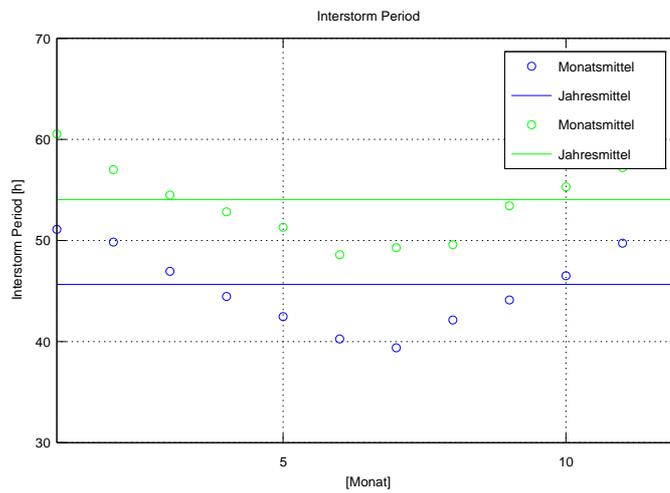


Abbildung A.71: Saisonaler Gang der Ereignispausen

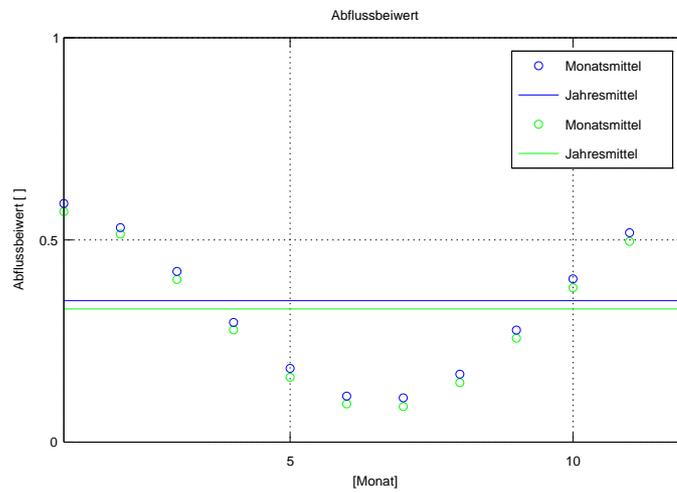


Abbildung A.72: Saisonaler Gang des Abflussbeiwertes

Niederschlag

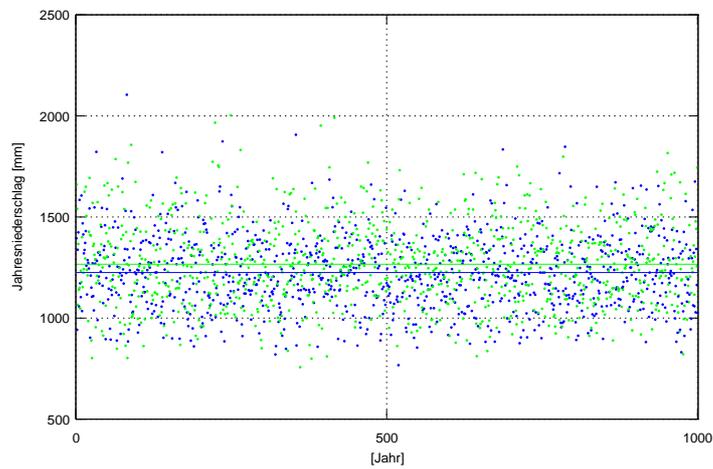


Abbildung A.73: jährliche Niederschlagshöhe

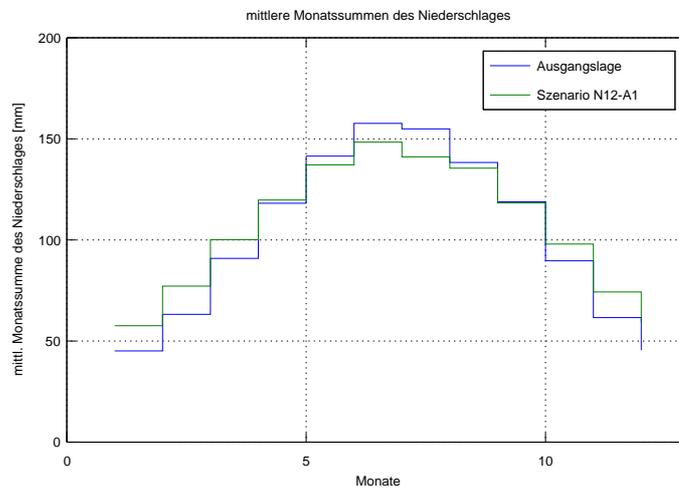


Abbildung A.74: monatliche Niederschlagssummen

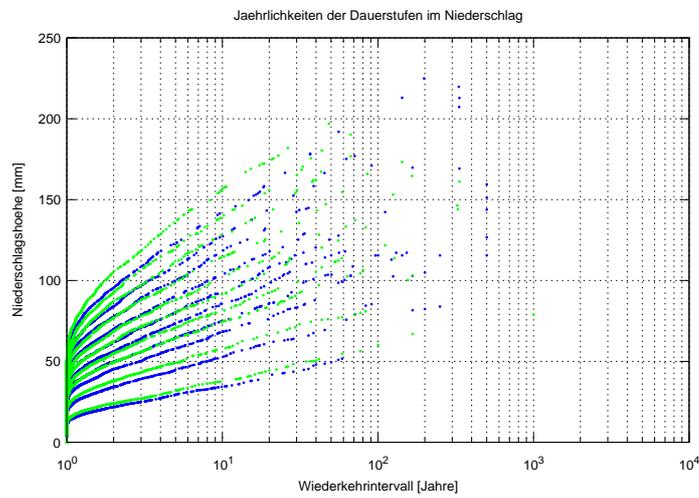


Abbildung A.75: Wiederkehrintervalle der Niederschlagshöhen, nach Dauerstufen gegliedert (1h, 3h, 6h, 8h, 12h, 16h, 24h, 36h, 48h, 72h)

Abfluss

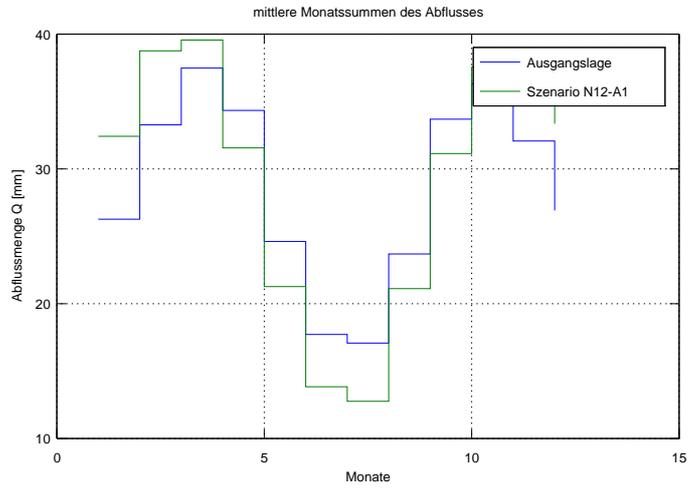


Abbildung A.76: monatliche Abflusssummen

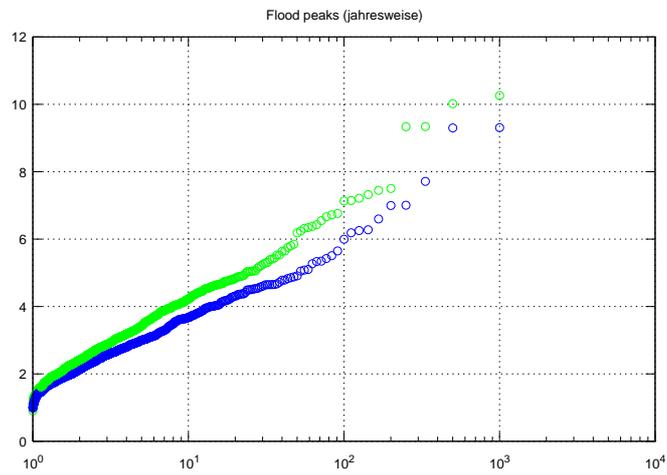
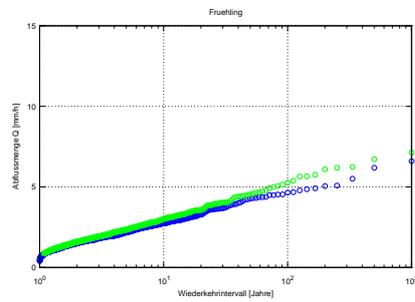
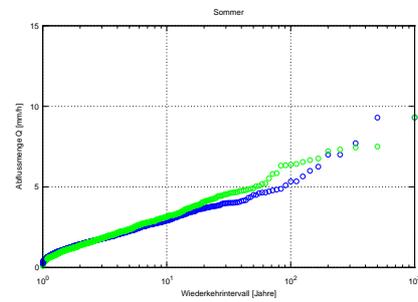


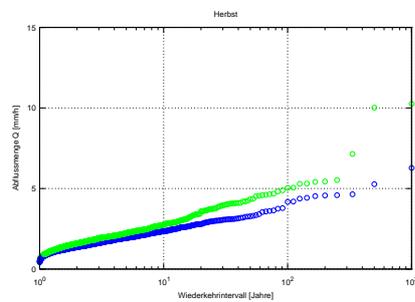
Abbildung A.77: Wiederkehrintervalle der jährlichen Abflüsse



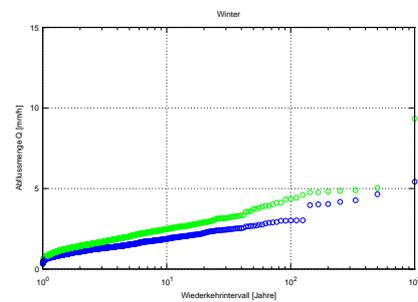
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung A.78: Saisonale Darstellung der Wiederkehrintervalle im Abfluss Frühling (a), Sommer (b), Herbst (c), Winter (d)

A.11 Szenario N123b

PARAMETERS FOR RR-MODEL

General parameters		Runoff model	
Seed =	200000	mean_rc_low =	0.35
n_sim =	1	mean_rc_high =	0.35
Years =	1000	ampl_rc =	0.25
Nevents =	500	Betas2 =	0.04
n_cl =	100	Tcslow =	6.00
n_peak =	1	Tcfast =	6.00
detail_out =	0	p_thresh =	10000

Rainfall model

Interstorm period		Rainfall durations		seasonal intensity	
Deltai =	43.00	Deltar =	4.65	a2m =	1.26
Ampli =	5.60	Amplr =	1.40	a2a =	0.65
Phasi =	6.00	Phasr =	0.00	a2phas =	6.00
Cint =	0.70	Cdur =	0.70	time pattern =	1

Tabelle A.11: Eingabeparameter für das Niederschlags-Abflussmodell in Szenario N123b. Die umrahmten Parameter wurden gegenüber der Ausgangslage geändert.

Hinweis:

Die Ausgangslage wird in den folgende Grafiken mit **BLAU**, das jeweilige Szenario im Bezug zur Ausgangslage mit **GRÜN** gekennzeichnet.

Eingangsparameter

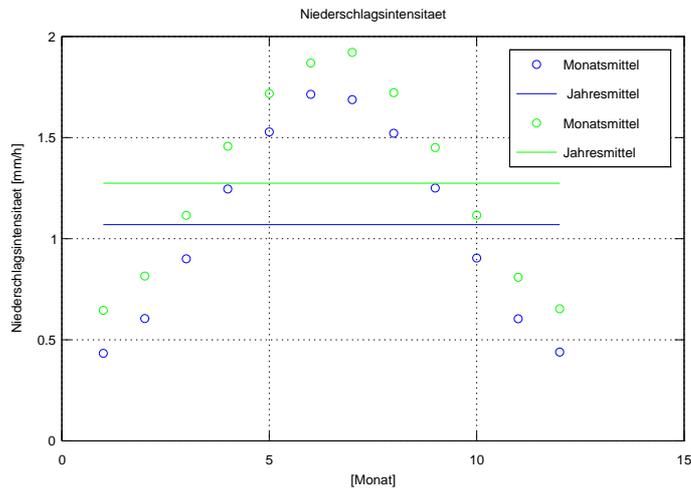


Abbildung A.79: Saisonaler Gang Niederschlagsintensität

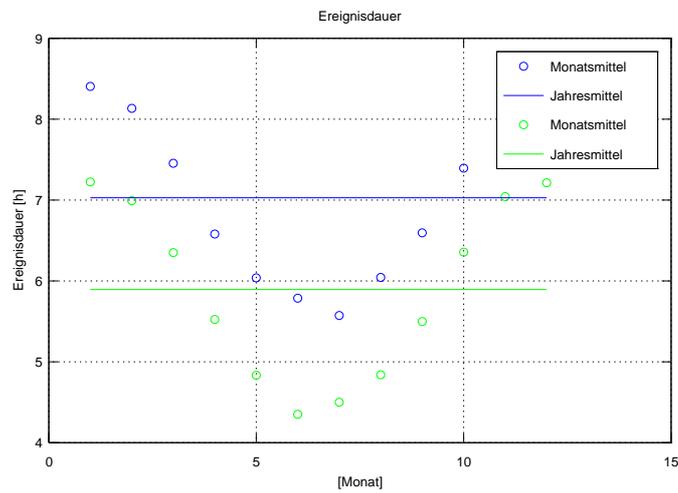


Abbildung A.80: Saisonaler Gang der Ereignisdauer

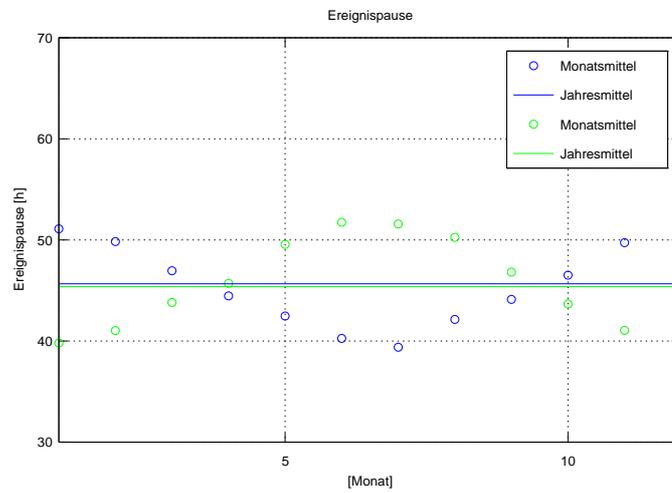


Abbildung A.81: Saisonaler Gang der Ereignispausen

Niederschlag

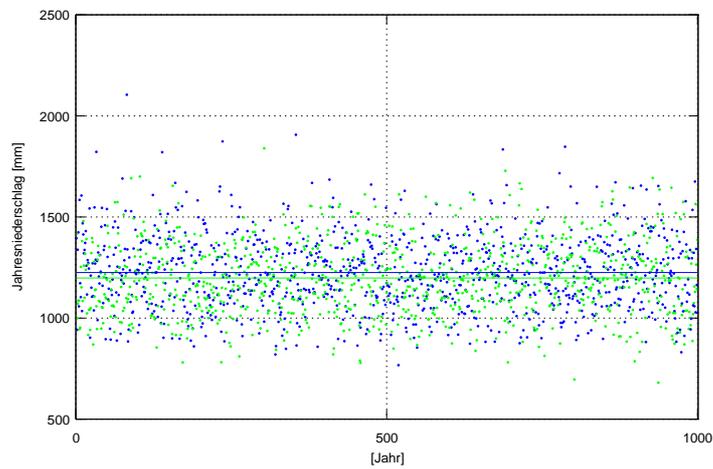


Abbildung A.82: jährliche Niederschlagshöhe

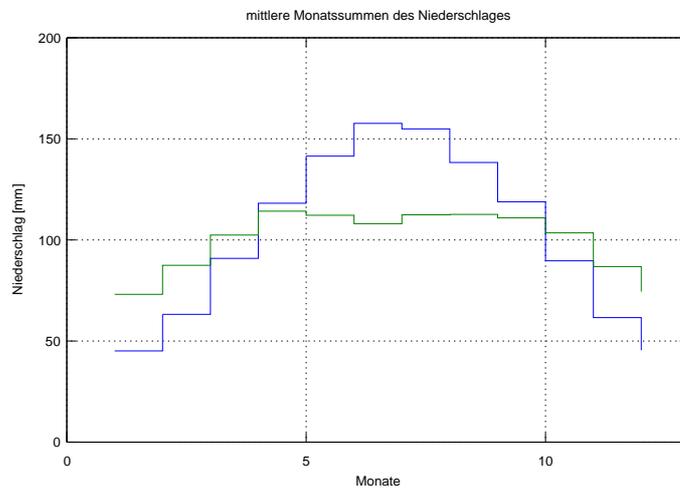


Abbildung A.83: monatliche Niederschlagssummen

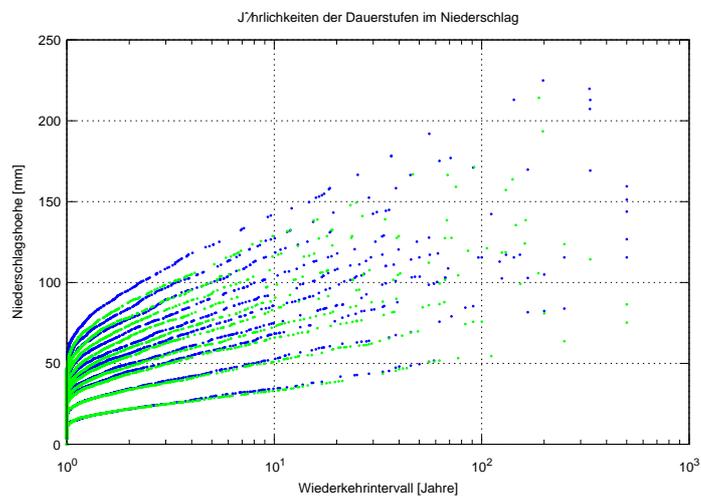


Abbildung A.84: Wiederkehrintervalle der Niederschlagshöhen, nach Dauerstufen gegliedert (1h, 3h, 6h, 8h, 12h, 16h, 24h, 36h, 48h, 72h)

Abfluss

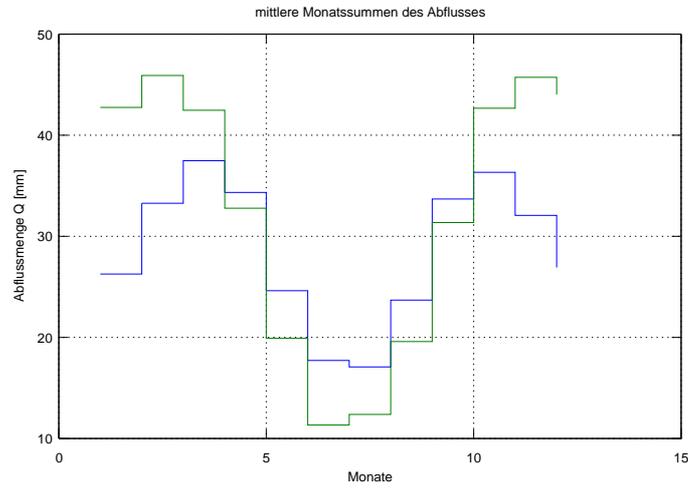


Abbildung A.85: monatliche Abflusssummen

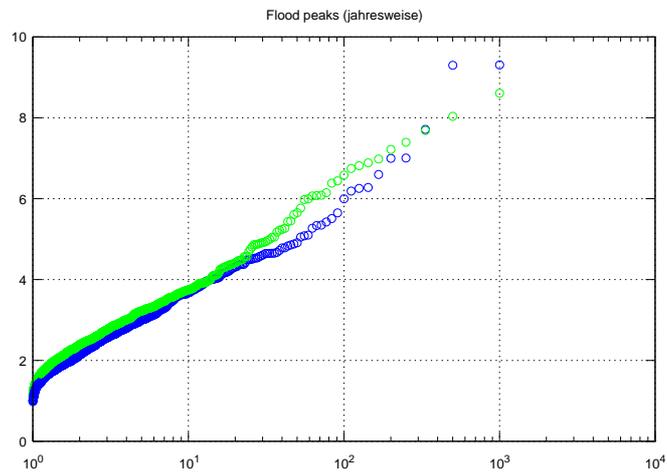
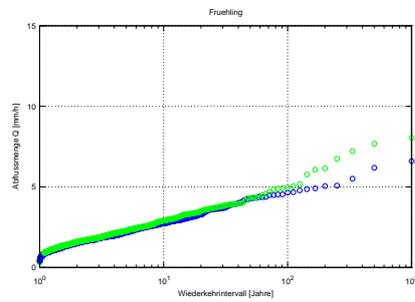
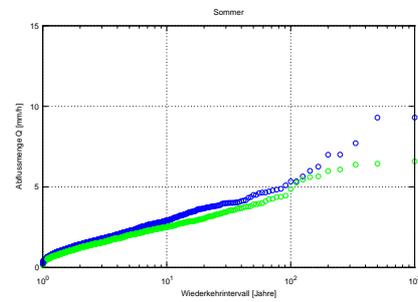


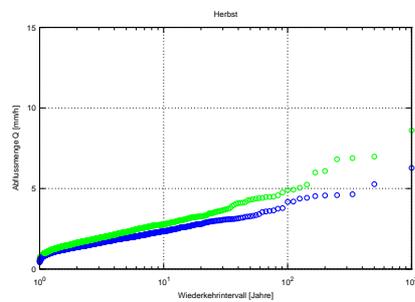
Abbildung A.86: Wiederkehrintervalle der jährlichen Abflüsse



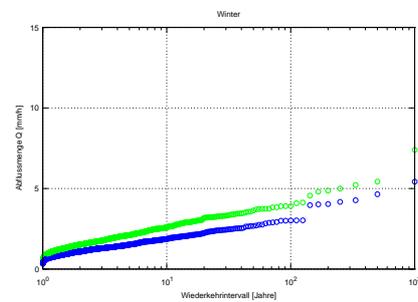
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung A.87: Saisonale Darstellung der Wiederkehrintervalle im Abfluss Frühling (a), Sommer (b), Herbst (c), Winter (d)

A.12 Szenario N123b-A1

PARAMETERS FOR RR-MODEL

General parameters		Runoff model	
Seed =	200000	mean_rc_low =	0.33
n_sim =	1	mean_rc_high =	0.33
Years =	1000	ampl_rc =	0.25
Nevents =	500	Betas2 =	0.04
n_cl =	100	Tcslow =	6.00
n_peak =	1	Tcfast =	6.00
detail_out =	0	p_thresh =	10000

Rainfall model

Interstorm period		Rainfall durations		seasonal intensity	
Deltai =	43.00	Deltar =	4.65	a2m =	1.26
Ampli =	5.60	Amplr =	1.40	a2a =	0.65
Phasi =	6.00	Phasr =	0.00	a2phas =	6.00
Cint =	0.70	Cdur =	0.70	time pattern =	1

Tabelle A.12: Eingabeparameter für das Niederschlags-Abflussmodell in Szenario N123b-A1. Die umrahmten Parameter wurden gegenüber der Ausgangslage geändert.

Hinweis:

Die Ausgangslage wird in den folgende Grafiken mit **BLAU**, das jeweilige Szenario im Bezug zur Ausgangslage mit **GRÜN** gekennzeichnet.

Eingangsparameter

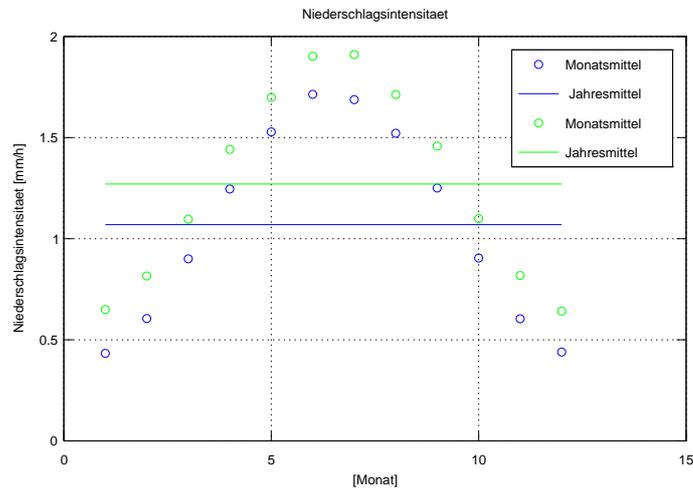


Abbildung A.88: Saisonaler Gang Niederschlagsintensität

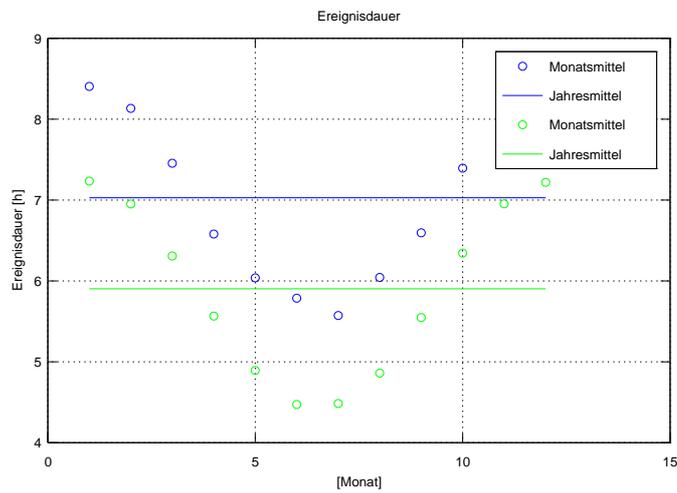


Abbildung A.89: Saisonaler Gang der Ereignisdauer

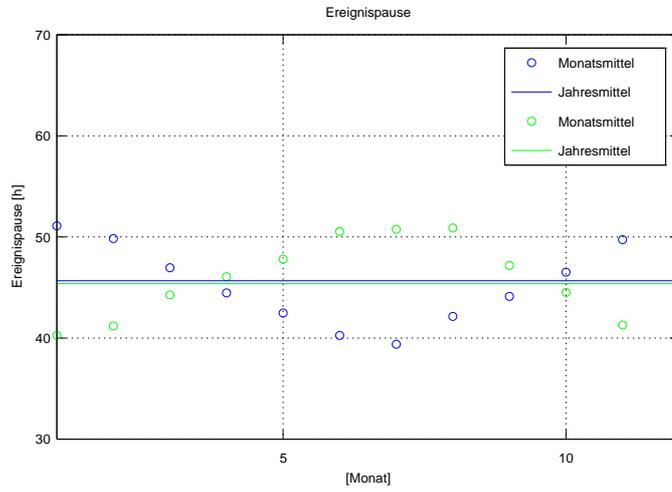


Abbildung A.90: Saisonaler Gang der Ereignispausen

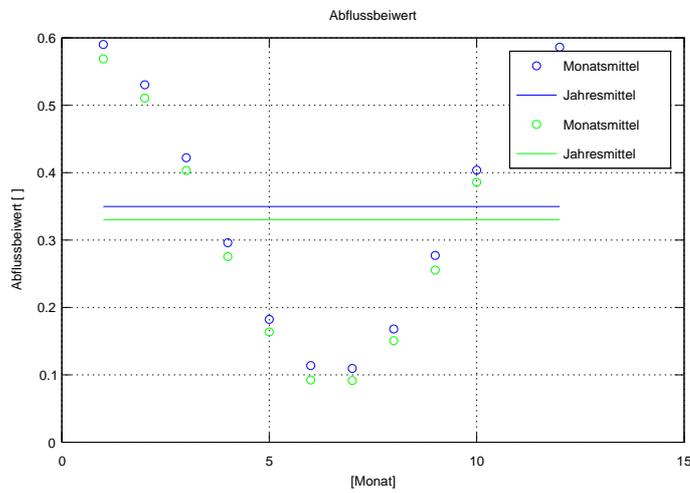


Abbildung A.91: Saisonaler Gang des Abflussbeiwertes

Niederschlag

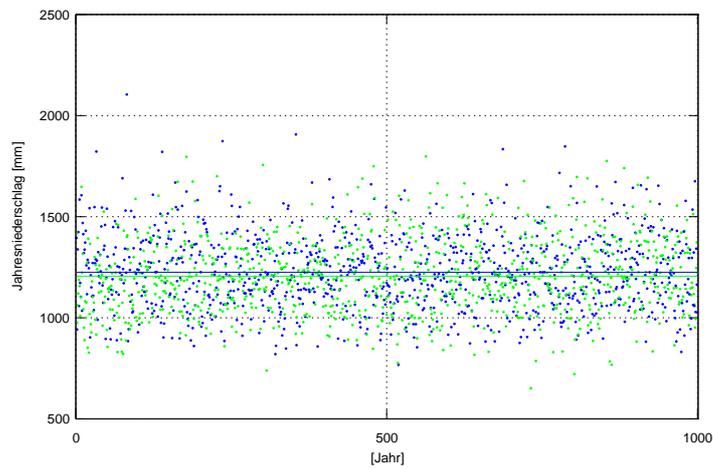


Abbildung A.92: jährliche Niederschlagshöhe

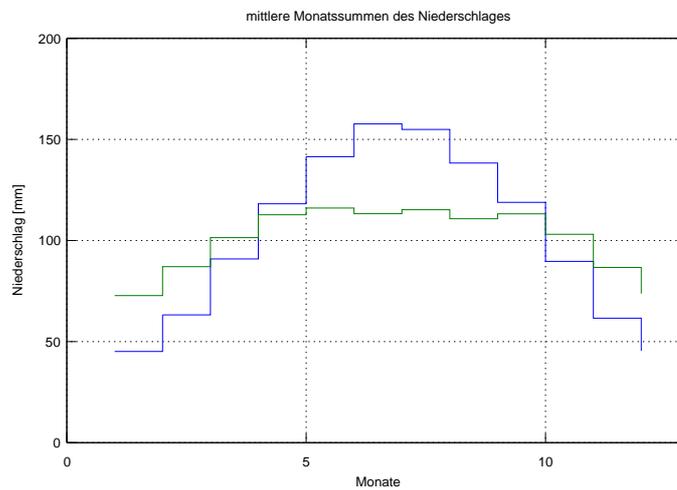


Abbildung A.93: monatliche Niederschlagssummen

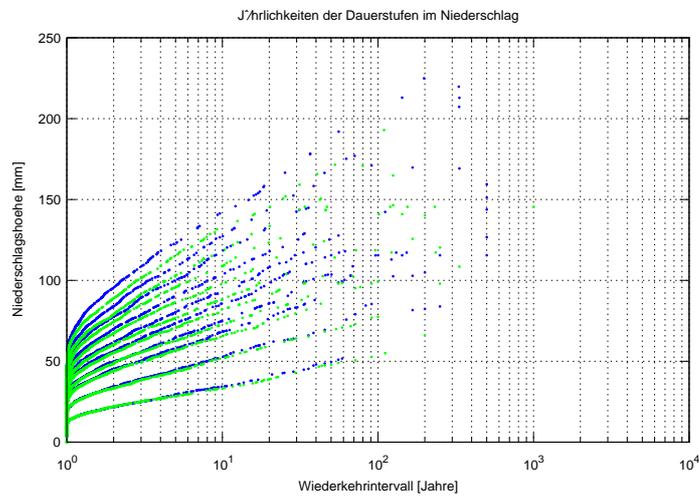


Abbildung A.94: Wiederkehrintervalle der Niederschlagshöhen, nach Dauerstufen gegliedert (1h, 3h, 6h, 8h, 12h, 16h, 24h, 36h, 48h, 72h)

Abfluss

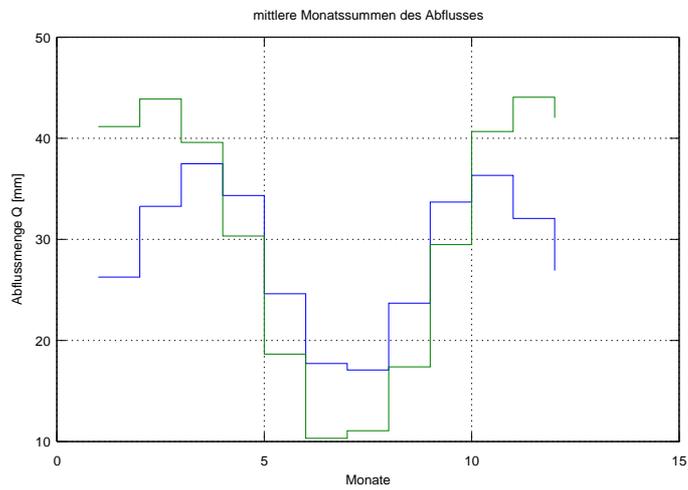


Abbildung A.95: monatliche Abflusssummen

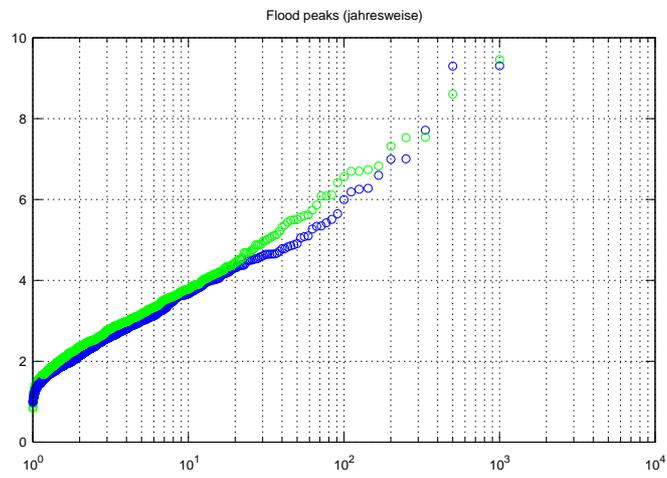
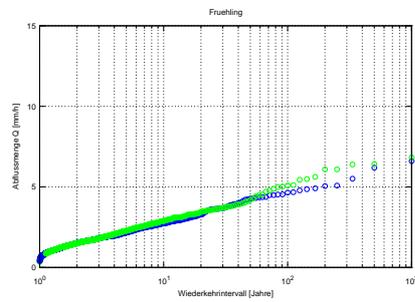
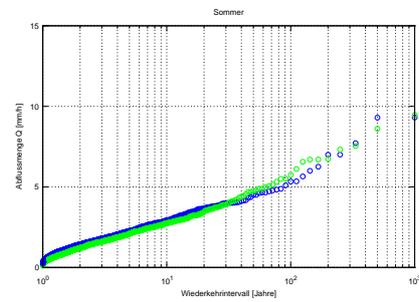


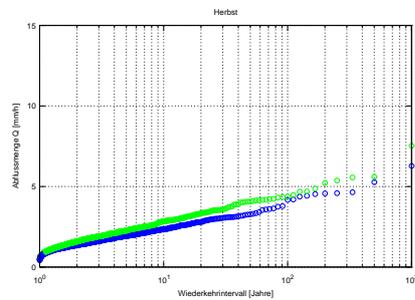
Abbildung A.96: Wiederkehrintervalle der jährlichen Abflüsse



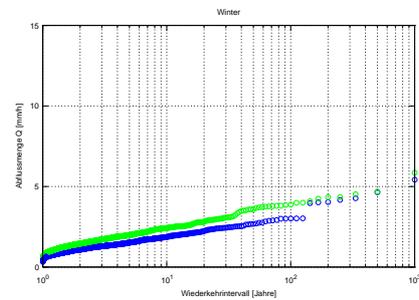
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung A.97: Saisonale Darstellung der Wiederkehrintervalle im Abfluss Frühling (a), Sommer (b), Herbst (c), Winter (d)

Literaturverzeichnis

- [1] Arbeitsgemeinschaft-Ecoplan/SigmaPlan: *Auswirkungen der Klima-
veränderungen auf die Schweizer Volkswirtschaft (nationale Einflüsse)*.
Schweizer Bundesamt für Umwelt und Schweizer Bundesamt für Energie,
Bern, 2007.
- [2] Austrian-Research-Centers: *Medieninformation zum
Projektabschluss von reclip:more.* Juni 2007;
<http://systemsresearch.arcs.ac.at/projects/climate/>, 15.6.2008.
- [3] Beck, U.: *Risikogesellschaft. Auf dem Weg in eine andere Moderne*.
Frankfurt am Main, 1986.
- [4] Blöschel, G. und R. Merz: *Bestimmung von Bemessungshochwässern
gegebener Jährlichkeit - Aspekte einer zeitgemäßen Strategie*. in *Wasser-
Wirtschaft* Nr. 11 - 2008.
- [5] BMLFUW: *Freibord - Überstromstrecken: Leitfaden zur Festle-
gung des erforderlichen Freibordes anhand projektspezifischer
Rahmenbedingungen einschließlich der Kriterien für die Anord-
nung von Überstromstrecken (Fassung 2006)*. Bundesministerium
für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft,
<http://www.wasser.lebensministerium.at/filemanager/download/28342/>
, 8.12.2008.
- [6] BMLFUW: *Hydrografisches Jahrbuch 2003*. Bundesministerium für
Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, 2003.
- [7] BMLFUW: *Hydrologischer Atlas Österreich*. Bundesministerium für
Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft - Sektion
Wasser - Abt. Wasserhaushalt, Hydrographisches Zentralbüro, 2007.
- [8] Böhm, R.: *Klimawandel oder Klimavariation?* BWF-Praxisinformation
Nr. 10 - 2006, S. 6-8. Wien, 2006.
- [9] Deutscher-Wetterdienst: *Wetterlexikon*. <http://www.dwd.de/lexikon>, 5.
Juni 2008.

- [10] Deutsches-Umweltbundesamt: *Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen*. August 2005. Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter <http://www.umweltbundesamt.de> verfügbar. 6. Mai 2008.
- [11] DWD: *Klimawandel oder Klimaschwindel? Stellungnahme des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zur Diskussion um den Klimawandel*. <http://www.dwd.de>, 15. Juni 2007.
- [12] EU-Kommission: *Grünbuch: Anpassung an den Klimawandel in Europa - Optionen für Maßnahmen der EU*. Kommission der europäischen Gemeinschaften, Juni 2007.
- [13] Europaparlament: *Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken*. EU Parlament, Oktober 2007.
- [14] Fohrer, H. und: *Hydrologische Modellierung*. Vortragsunterlagen im Rahmen einer Lehrveranstaltung, WS05/06, Fachabteilung Hydrologie und Wassewirtschaft - Uni Kiel, www.hydrology.uni-kiel.de/lehre/vorlesung/ws05-06/192_v7_05.pdf, 5. März 2008.
- [15] Formayer, H.: *Limitierungen derzeitiger regionaler Klimamodelle für eine direkte quantitative Abschätzung von Anpassungsmaßnahmen*. Vortragsfolien im Zuge der Vorbereitungen für eine nationale Anpassungsstrategie im Lebensministerium, <http://umwelt.lebensministerium.at/filemanager/download/24631/>, 27. September 2007.
- [16] Formayer, H., L. Clementschitsch und H. Komp-Kolb: *Regionale Klimaänderung in Österreich*. Universität für Bodenkultur, Wien, April 2008.
- [17] Formayer, H. und C. Frischauf: *Extremereignisse und Klimawandel in Österreich aus Sicht der Forschung*. Universität für Bodenkultur, Wien 2004.
- [18] Fuchs, M.: *Auswirkungen von möglichen Klimaänderungen auf die Hydrologie verschiedener Regionen in Österreich*. Dissertation, Universität für Bodenkultur Wien, Mai 2005.
- [19] Gutknecht, D.: *Studienblätter zur Vorlesung: Technische Hydraulik I, Sommersemester 2004*. Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft, TU Wien.
- [20] Hennegriff, W. und J. Reich: *Auswirkungen des Klimawandels auf den Hochwasserschutz in Baden-Württemberg*. In: *Die Gemeinde - Zeitung des Gemeindetags Baden Württemberg*, S. 65–69, Februar 2007.

- [21] Holzmann, H., T. Lehmann, H. Formayer und P. Haas: *Klimafolgen für die Abflussbildung am Beispiel der Lainsitz*. Universität für Bodenkultur Wien, Dezember 2007.
- [22] Hydrografischer-Dienst: *Hydrografisches Jahrbuch von Österreich 2002*. Datenauskunft von DI Heindl, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, TU Wien, November 2008.
- [23] IPCC: *Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. Klimaänderungen 2007. Deutsche Übersetzung durch ProClim-, österreichisches Umweltbundesamt, deutsche IPCC-Koordinationsstelle*. Bern u.a., September 2007.
- [24] IWI: *Flood Risk II - Vertiefung und Vernetzung zukunftsweisender Umsetzungsstrategien zu integrierten Hochwasserschutz, Workpackage 1: Meteorologie/Hydrologie, TP6.2*. TU Wien, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Stand: November 2008.
- [25] IWI: *Extreme Abflussereignisse, Wiener Mitteilungen, Band 206*. Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Mai 2007.
- [26] IWI: *Climate Change und seine potentiellen Auswirkungen auf Bemessungshochwässer*. in: Jahresbericht 2007. TU Wien, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, Wien 2007.
- [27] Jonas, H.: *Das Prinzip Verantwortung*. Frankfurt am Main, 1979.
- [28] KOHS: *Auswirkungen der Klimaänderungen auf den Hochwasserschutz in der Schweiz*. Kommission Hochwasserschutz im Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband (KHOS), 2007, <http://www.tiefbauamt.gr.ch>, 6.3.2008.
- [29] Lorenz, P. und G. Skoda: *Bemessungsniederschläge auf der Fläche für kurze Dauerstufen*. in: Wiener Mitteilungen Band 164: Niederschlag-Abfluss-Modellierung. Wien 2000.
- [30] Mudelsee, M., M. Börngen, G. Tetzlaff und U. Grünewald: *Kein Anstieg in der Auftrettsrate extremer Hochwasser in Mitteleuropa (Übersetzung der Originalquelle durch Herrn Armin Kern: No upward trends in the occurrence of extreme floods in central Europe)*. Nature 425:166-169, doi:10.1038/nature01928, 2003.
- [31] Nachtnebel, H. und M. Fuchs: *Beurteilung der hydrologischen Veränderungen in Österreich infolge globaler Klimaänderungen*. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaft, Heft 7/8:S. 79 – 91, Juli/August 2008.
- [32] Niedermayer, M.: *Klimawandel und Hochwasser, Erste Ergebnisse aus der Studie "Klimawandel und Hochwasser" der BOKU Wien im Auftrag des WWF Österreich*. Wien 2006.

- [33] Niedermayer, M., M. Lexer, G. Plattner, H. Formayer und R. Seidl: *Klimawandel und Artenvielfalt*. Juli 2007, <http://www.wwf.at/de/menu27/artikel334/>, 8. Mai 2008.
- [34] OcCC: *Extremereignisse und Klimaänderung*. Organe consultatif sur les changements climatiques, Bern, September 2003.
- [35] OcCC: *Klimaänderungen und die Schweiz 2050*. Organe consultatif sur les changements climatiques, Bern, März 2007.
- [36] Overney, O., D. Consuegra, A. Musy, J. Lazaro, P. and Boillat und R. Sinniger: *Influence des changements climatiques sur le regime hydrologique des cours d'eau. Rapport du Programme National de Recherche < Changements Climatiques et catastrophes naturelles en Suisse > PNR31*. Hochschul. Verlag an der ETH Zürich, 1997.
- [37] Robinson, J. und M. Sivapalan: *An investigation into the physical causes of scaling an heterogeneity of regional flood frequency*. in: *Water Resour. Res.*, 33(5), S. 1045 – 1059, 1997.
- [38] Sivapalan, M., G. Blöschl, R. Merz und D. Gutknecht: *Linking flood frequency to long-term water balance: Incorporating effects of seasonality*. in: *Water Resour. Res.*, 41, W06012, doi:10.1029/2004WR003439, 2005.
- [39] Skoda, L.: *Extreme Mehrtagesniederschläge*. in: *Hydrologischer Atlas Österreich*. 2007.
- [40] Spreafico, M., R. Weingartner, M. Barben und A. Ryser: *Hochwasserabschätzung in Schweizer Einzugsgebieten*. Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern, 2003.
- [41] Umweltbundesamt: *Versiegelung nimmt zu*. <http://www.umweltbundesamt.at/umweltschutz/raumordnung/flaechenverbrauch/>, 9. Oktober 2008.
- [42] USGS. <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclegermanhi.html>, 7. September 2008.

Abbildungsverzeichnis

4.1	Projizierte relative Änderungen der Jahresniederschläge für den Zeitraum 2090-2099 anhand des SRES-A1B-Szenario für Dezember bis Februar (links) und Juni bis August (rechts) [23, S. 16, modifiziert].	9
4.2	Niederschlagszenarien für Mitteleuropa (rote Linie) bis 2100. Die linke Abszisse gilt für Europa, die rechte für Ostamerika. [17, S. 10, modifiziert]	10
4.3	Veränderung der durchschnittlichen Jahresniederschläge bis Ende dieses Jahrhunderts [12, S. 10]	11
4.4	Relevante Randbedingungen für die Abflussbildung zur Ermittlung von Bemessungsabflüssen in Wildbacheinzugsgebieten, Beeinflussung durch den Klimawandel und Ableitbarkeit quantitativer wie qualitativer Informationen durch Klimamodelle auf unterschiedlichen Raumskalen: <i>Dunkelgrün</i> =Ableitung möglich, <i>Hellgrün</i> =Ableitung bedingt möglich, <i>Rot</i> =Ableitung nicht möglich [15, S. 11].	13
4.5	Gefährdungszonen [32, S. 6]	15
4.6	Veränderung der Zahl der Niederschlagsereignisse mit mehr als 50mm NS/Tag (links), Differenz der jährlichen Niederschlagssummen zwischen den 1980er und den 2040er Jahren (rechts) [2, S. 8, modifiziert]	17
4.7	Regionale Änderung der mittleren Niederschlagssummen zwischen 1981-1990 und 1941-1950, Vergleich der ALADIN- (links) mit den MM5-Ergebnissen (rechts) [2, S. 6, modifiziert]	17
4.8	Relative Änderungen der monatlichen Niederschlagssummen zwischen 1961-1990 und 2071-2100 [33, S. 8, modifiziert]	18
4.9	Zeitliche Evolution der saisonalen Niederschlagssummen gemäß dem UNO-Szenario A1B [33, S. 9, modifiziert]	18
6.1	Schema Wasserkreislauf [42]	28
6.2	Saisonale Niederschlagssummen.	35
6.3	Relative Änderung der Niederschlagssummen in saisonaler (a) und monatlicher (b) Darstellung.	35

6.4	Saisonale Abflusssummen	38
6.5	Relative Änderung der Abflusssummen in saisonaler (a) und monatlicher (b) Darstellung.	38
6.6	Verhältnis der Niederschlagssummen zu den Abflusssummen	39
6.7	Abflussscheitel bei HQ100 (a) und HQ30 (b).	41
6.8	Saisonale Darstellung der Abflussscheitel bei HQ100 (a), HQ30 (b)	42
6.9	Einfluss der Ereignisdauer t_r auf den Multiplikator $t_r^{b_1}$ (blau). Gegenüber einer Linearität (grün) ergeben sich Abweichungen.	49
6.10	Vergleichende Darstellung der monatlichen Abflusssummen zwischen einer vereinfachten Abschätzung und dem Modellergebnis.	52
7.1	Trapezprofil	59
7.2	Wirkungskette bei Hochwasserschäden. Viele dynamische Einflussgrößen beeinflussen die Entwicklung vom Niederschlag zum Schaden. Vom angerichteten Schaden kann deshalb nicht auf die Stärke des Naturereignisses geschlossen werden. [34, S. 35]	62
A.1	Saisonal Gang der Niederschlagsintensität	64
A.2	Saisonal Gang der Ereignisdauer	64
A.3	Saisonal Gang der Ereignispausen	65
A.4	Saisonal Gang des Abflussbeiwertes	65
A.5	jährliche Niederschlagshöhe	66
A.6	monatliche Niederschlagssummen	66
A.7	Wiederkehrintervalle der Niederschlagshöhen, nach Dauerstufen gegliedert	67
A.8	Summenlinie der Niederschlagsintensität	67
A.9	monatliche Abflusssummen	68
A.10	Wiederkehrintervalle der saisonalen Abflüsse	68
A.11	Wiederkehrintervalle der monatlichen Abflüsse	69
A.12	Saisonal Gang Niederschlagsintensität	71
A.13	jährliche Niederschlagshöhe	71
A.14	monatliche Niederschlagssummen	72
A.15	Wiederkehrintervalle der Niederschlagshöhen, nach Dauerstufen gegliedert (1h, 3h, 6h, 8h, 12h, 16h, 24h, 36h, 48h, 72h)	72
A.16	monatliche Abflusssummen	73
A.17	Wiederkehrintervalle der jährlichen Abflüsse	73
A.18	Saisonale Darstellung der Wiederkehrintervalle im Abfluss Frühling (a), Sommer (b), Herbst (c), Winter (d)	74
A.19	Saisonal Gang der Ereignisdauer	76
A.20	jährliche Niederschlagshöhe	76
A.21	monatliche Niederschlagssummen	77

A.22 Wiederkehrintervalle der Niederschlagshöhen, nach Dauerstufen gegliedert (1h, 3h, 6h, 8h, 12h, 16h, 24h, 36h, 48h, 72h) .	77
A.23 monatliche Abflusssummen	78
A.24 Wiederkehrintervalle der jährlichen Abflüsse	78
A.25 Saisonale Darstellung der Wiederkehrintervalle im Abfluss Frühling (a), Sommer (b), Herbst (c), Winter (d)	79
A.26 Saisonaler Gang der Ereignispausen	81
A.27 jährliche Niederschlagshöhe	81
A.28 monatliche Niederschlagssummen	82
A.29 Wiederkehrintervalle der Niederschlagshöhen, nach Dauerstufen gegliedert (1h, 3h, 6h, 8h, 12h, 16h, 24h, 36h, 48h, 72h) .	82
A.30 monatliche Abflusssummen	83
A.31 Wiederkehrintervalle der jährlichen Abflüsse	83
A.32 Saisonale Darstellung der Wiederkehrintervalle im Abfluss Frühling (a), Sommer (b), Herbst (c), Winter (d)	84
A.33 Saisonaler Gang der Ereignispausen	86
A.34 jährliche Niederschlagshöhe	86
A.35 monatliche Niederschlagssummen	87
A.36 Wiederkehrintervalle der Niederschlagshöhen, nach Dauerstufen gegliedert (1h, 3h, 6h, 8h, 12h, 16h, 24h, 36h, 48h, 72h) .	87
A.37 monatliche Abflusssummen	88
A.38 Wiederkehrintervalle der jährlichen Abflüsse	88
A.39 Saisonale Darstellung der Wiederkehrintervalle im Abfluss Frühling (a), Sommer (b), Herbst (c), Winter (d)	89
A.40 Saisonaler Gang des Abflussbeiwertes	91
A.41 monatliche Abflusssummen	91
A.42 Wiederkehrintervalle der jährlichen Abflüsse	92
A.43 Saisonale Darstellung der Wiederkehrintervalle im Abfluss Frühling (a), Sommer (b), Herbst (c), Winter (d)	92
A.44 Saisonaler Gang Niederschlagsintensität	94
A.45 Saisonaler Gang der Ereignisdauer	94
A.46 jährliche Niederschlagshöhe	95
A.47 monatliche Niederschlagssummen	95
A.48 Wiederkehrintervalle der Niederschlagshöhen, nach Dauerstufen gegliedert (1h, 3h, 6h, 8h, 12h, 16h, 24h, 36h, 48h, 72h) .	96
A.49 monatliche Abflusssummen	96
A.50 Wiederkehrintervalle der jährlichen Abflüsse	97
A.51 Saisonale Darstellung der Wiederkehrintervalle im Abfluss Frühling (a), Sommer (b), Herbst (c), Winter (d)	97
A.52 Saisonaler Gang Niederschlagsintensität	99
A.53 Saisonaler Gang der Ereignispausen	99
A.54 jährliche Niederschlagshöhe	100
A.55 monatliche Niederschlagssummen	100

A.56 Wiederkehrintervalle der Niederschlagshöhen, nach Dauerstufen gegliedert (1h, 3h, 6h, 8h, 12h, 16h, 24h, 36h, 48h, 72h)	101
A.57 monatliche Abflusssummen	101
A.58 Wiederkehrintervalle der jährlichen Abflüsse	102
A.59 Saisonale Darstellung der Wiederkehrintervalle im Abfluss Frühling (a), Sommer (b), Herbst (c), Winter (d)	102
A.60 Saisonaler Gang Niederschlagsintensität	104
A.61 Saisonaler Gang der Ereignisdauer	104
A.62 Saisonaler Gang des Abflussbeiwertes	105
A.63 jährliche Niederschlagshöhe	105
A.64 monatliche Niederschlagssummen	106
A.65 Wiederkehrintervalle der Niederschlagshöhen, nach Dauerstufen gegliedert (1h, 3h, 6h, 8h, 12h, 16h, 24h, 36h, 48h, 72h)	106
A.66 Summenlinie der Niederschlagsintensität	107
A.67 monatliche Abflusssummen	107
A.68 Wiederkehrintervalle der jährlichen Abflüsse	108
A.69 Saisonale Darstellung der Wiederkehrintervalle im Abfluss Frühling (a), Sommer (b), Herbst (c), Winter (d)	108
A.70 Saisonaler Gang Niederschlagsintensität	110
A.71 Saisonaler Gang der Ereignispausen	110
A.72 Saisonaler Gang des Abflussbeiwertes	111
A.73 jährliche Niederschlagshöhe	111
A.74 monatliche Niederschlagssummen	112
A.75 Wiederkehrintervalle der Niederschlagshöhen, nach Dauerstufen gegliedert (1h, 3h, 6h, 8h, 12h, 16h, 24h, 36h, 48h, 72h)	112
A.76 monatliche Abflusssummen	113
A.77 Wiederkehrintervalle der jährlichen Abflüsse	113
A.78 Saisonale Darstellung der Wiederkehrintervalle im Abfluss Frühling (a), Sommer (b), Herbst (c), Winter (d)	114
A.79 Saisonaler Gang Niederschlagsintensität	116
A.80 Saisonaler Gang der Ereignisdauer	116
A.81 Saisonaler Gang der Ereignispausen	117
A.82 jährliche Niederschlagshöhe	117
A.83 monatliche Niederschlagssummen	118
A.84 Wiederkehrintervalle der Niederschlagshöhen, nach Dauerstufen gegliedert (1h, 3h, 6h, 8h, 12h, 16h, 24h, 36h, 48h, 72h)	118
A.85 monatliche Abflusssummen	119
A.86 Wiederkehrintervalle der jährlichen Abflüsse	119
A.87 Saisonale Darstellung der Wiederkehrintervalle im Abfluss Frühling (a), Sommer (b), Herbst (c), Winter (d)	120
A.88 Saisonaler Gang Niederschlagsintensität	122
A.89 Saisonaler Gang der Ereignisdauer	122
A.90 Saisonaler Gang der Ereignispausen	123
A.91 Saisonaler Gang des Abflussbeiwertes	123

A.92 jährliche Niederschlagshöhe	124
A.93 monatliche Niederschlagssummen	124
A.94 Wiederkehrintervalle der Niederschlagshöhen, nach Dauerstufen gegliedert (1h, 3h, 6h, 8h, 12h, 16h, 24h, 36h, 48h, 72h)	125
A.95 monatliche Abflusssummen	125
A.96 Wiederkehrintervalle der jährlichen Abflüsse	126
A.97 Saisonale Darstellung der Wiederkehrintervalle im Abfluss Frühling (a), Sommer (b), Herbst (c), Winter (d)	127

Tabellenverzeichnis

6.2	Übersicht Inputparameter. Modifizierte Parameter sind fett gedruckt, die Werte in Klammer entsprechen den Variablenbezeichnungen nach SIVAPALAN et. al. [38]. Die mathematische Wirkungskette der Parameter ist in den Formeln auf S. 25 angegeben.	33
6.3	Saisonale und jährliche Niederschlagssummen	34
6.4	Relative Änderung der saisonalen und jährlichen Niederschlagssummen im Vergleich zur Ausgangslage	34
6.5	Saisonale und jährliche Abflusssummen [mm].	36
6.6	Relative Änderung der saisonalen und jährlichen Abflusssummen gegenüber der Ausgangslage	36
6.7	Verhältnis der Niederschlagssummen zu den Abflusssummen .	37
6.8	Differenz des Abflussbeiwertes und dem Verhältnis von Abflusssumme/Niederschlagssumme	37
6.9	Änderung der saisonalen und jährlichen Abflusssumme durch Berücksichtigung eines reduzierten Abflussbeiwertes	37
6.10	Saisonale und jährliche Abflussscheitel [mm/h]	39
6.11	Saisonale Änderungen der Abflussscheitel in Relation zur Ausgangslage	40
6.12	Verhältnis der Abflussscheitel von HQ100 zu HQ30	40
6.13	Änderung der Abflussscheitel durch Berücksichtigung eines reduzierten Abflussbeiwertes	43
6.16	Relative Änderung des Intensität aufgrund einer Modifikation des Jahresmittelwertes δ_a im <i>Szenario N1</i>	49
6.17	Relative Änderung des Ereignisdauer aufgrund einer Modifikation des Jahresmittelwertes δ_r im <i>Szenario N2</i> . $\Delta \delta_r = 1.24h$. δ_r in der Ausgangslage entspricht den generierten Werten, nicht dem Verlauf aufgrund der Inputdaten (siehe Kap. 6.5.4, S. 53).	50

6.18	Relative Änderung des Ereignispause aufgrund einer Modifikation des Jahresmittelwertes δ_b im <i>Szenario N3a</i> . $\Delta \delta_b = 8.35h$. δ_b in der Ausgangslage entspricht den generierten Werten, nicht dem Verlauf aufgrund der Inputdaten (siehe Kap. 6.5.4, S. 53).	50
6.19	Relative Änderung des saisonalen Abflussbeiwertes aufgrund einer Modifikation des Jahresmittelwertes δ_c im <i>Szenario A1</i> . $\Delta \delta_c = 0.02$. Die tatsächlich generierten Werte stehen in Klammer. Die Abweichung zum theoretischen Mittel entsteht durch den Zufallsanteil.	52
7.1	Wasserspiegeländerung in Folge Lastfall Klimaänderung	59
A.1	Eingabeparameter für das Niederschlags-Abflussmodell in der Ausgangslage	63
A.2	Eingabeparameter für das Niederschlags-Abflussmodell in Szenario N1. Der umrahmte Parameter wurden gegenüber der Ausgangslage geändert.	70
A.3	Eingabeparameter für das Niederschlags-Abflussmodell in Szenario a2. Der umrahmte Parameter wurden gegenüber der Ausgangslage geändert.	75
A.4	Eingabeparameter für das Niederschlags-Abflussmodell in Szenario N3a. Der umrahmte Parameter wurden gegenüber der Ausgangslage geändert.	80
A.5	Eingabeparameter für das Niederschlags-Abflussmodell in Szenario N3b. Der umrahmte Parameter wurden gegenüber der Ausgangslage geändert.	85
A.6	Eingabeparameter für das Niederschlags-Abflussmodell in Szenario A1. Der umrahmte Parameter wurden gegenüber der Ausgangslage geändert.	90
A.7	Eingabeparameter für das Niederschlags-Abflussmodell in Szenario A12. Die umrahmten Parameter wurden gegenüber der Ausgangslage geändert.	93
A.8	Eingabeparameter für das Niederschlags-Abflussmodell in Szenario A13. Die umrahmten Parameter wurden gegenüber der Ausgangslage geändert.	98
A.9	Eingabeparameter für das Niederschlags-Abflussmodell in Szenario N12-A1. Die umrahmten Parameter wurden gegenüber der Ausgangslage geändert.	103
A.10	Eingabeparameter für das Niederschlags-Abflussmodell in Szenario N13a-A1. Die umrahmten Parameter wurden gegenüber der Ausgangslage geändert.	109

A.11 Eingabeparameter für das Niederschlags-Abflussmodell in Szenario N123b. Die umrahmten Parameter wurden gegenüber der Ausgangslage geändert.	115
A.12 Eingabeparameter für das Niederschlags-Abflussmodell in Szenario N123b-A1. Die umrahmten Parameter wurden gegenüber der Ausgangslage geändert.	121