



Probabilistische Abschätzung der möglichen Folgen von Klimaveränderungen auf den Abfluss der Donau bis oberhalb der Illermündung

Andreas Schumann, Joachim Geyer, Michael Antl

Ruhr- Universität Bochum, Lehrstuhl für Hydrologie, Wasserwirtschaft und Umwelttechnik

1. Einleitung

Seit Mitte der achtziger Jahre wird versucht, die Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen auf die hydrologischen Verhältnisse abzuschätzen. Derartige Abschätzungen erfolgen heute meist auf der Grundlage von Globalen Klimamodellen, die Aussagen zu Veränderungen der regionalen klimatischen Verhältnisse infolge des anthropogen bedingten Treibhauseffektes liefern sollen. Die Umsetzung der berechneten Klimaänderungen in hydrologische Veränderungen erfolgt in der Regel mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen. Bereits 1987 hat Gleick die Ergebnisse derartiger Untersuchungen für das Einzugsgebiet des Sacramento veröffentlicht (Gleick, 1987). Seither gibt es eine sehr große Zahl vergleichbarer Untersuchungen für viele Flussgebiete der Erde (z.B. Bultot et al., 1990; Arnell und Reynard, 1996; Mimikou et al., 2000).

Generell haben derartige Abschätzungen den wesentlichen Mangel, dass die verwendeten regionalen Ergebnisse der verschiedenen Klimamodelle sehr große Unterschiede aufweisen. Globale Klimamodelle, die auch als "General Circulation Models" bezeichnet werden, verwenden die Navier-Stokes-Gleichungen um die Austauschprozesse in der Atmosphäre zu beschreiben. Diese Gleichungen werden mit Hilfe dreidimensionaler Netze gelöst, die sich sowohl in ihrer horizontalen als auch ihrer vertikalen Auflösung von Modell zu Modell unterscheiden. Infolge des extrem hohen Rechenaufwandes ist die horizontale Auflösung der Modelle dabei relativ grob. Da aber eine Reihe wesentlicher Prozesse in der Atmosphäre, wie z.B. die tropische Konvektion, auf einer Skala von einigen Kilometern ablaufen, müssen diese Prozesse in einer vereinfachten Form, mit Hilfe einer sogenannten Parametrisierung, im Klimamodell berücksichtigt werden. Da es eine Vielzahl von Möglichkeiten einer näherungsweisen Beschreibung dieser Prozesse gibt, unterscheiden sich die verschiedenen Klimamodelle auch in diesem Punkt. Andere Ursachen für unterschiedliche Ergebnisse liegen zum Beispiel in der jeweiligen Form der Berücksichtigung der Ozeane oder der Landoberflächen begründet. Als Hauptquelle von Unsicherheiten sind jedoch die Rückkopplungsprozesse anzusehen. Der wohl wichtigste Rückkopplungsprozeß ist mit dem Wasserdampfgehalt der Atmosphäre verbunden. Etwa 62% des natürlichen Treibhauseffektes sind durch den Wasserdampf in der Atmosphäre bedingt (Enquete-Kommission, 1990). Infolge der globalen Erwärmung erhöht sich der Sättigungsdampfdruck. Alle Klimamodelle erhöhen damit den Wasserdampfgehalt der Atmosphäre, wodurch sich der anthropogene Treibhauseffekt verstärken, ja gegenüber einer Erhöhung des CO₂-Äquivalents verdoppeln kann (IPCC, 1990). Ein anderer Rückkopplungseffekt ist mit der Bewölkung verbunden. Je nach dem, ob sich die hohe oder niedrige Bewölkung verändert, führt dies zu einer Temperaturerhöhung (bei Zunahme der hohen Bewölkung) bzw. zu einer Temperaturminderung (infolge der Zunahme der niedrigen Bewölkung) (Treut, 1999). Die Modellierung der Wolkenentwicklung und des Wasserdampftransports gelten aber im Rahmen der Klimamodelle als unsicher (von Storch et al., 1999). Es ist somit nicht verwunderlich, dass die Erhöhung der mittleren globalen Temperatur bei CO₂-Verdopplung je nach dem verwendeten Klimamodell eine Spannweite zwischen 1,9 und 5,3 Grad aufweist.

Eine weitere, wesentliche Unsicherheit der Ergebnisse Globaler Klimamodelle ergibt sich aus der Notwendigkeit der Abschätzung der zukünftigen Emissionen der Treibhausgase. Eine Vorhersage dieser Emissionen ist nicht möglich, da weder die sozio-ökonomische Entwicklung noch die menschlichen Verhaltensweisen vorhergesagt werden können.

Trotz dieser Probleme erfassen Klimamodelle das derzeit vorhandene Wissen zur Klimadynamik. Allerdings müssen die Grenzen der Modellierung beachtet werden, wenn die Modellergebnisse für die Abschätzung von weitergehenden Veränderungen im Rahmen von sogenannten „impact studies“ verwendet werden sollen, um z.B. die Auswirkungen auf den Wasserhaushalt eines Flussgebietes zu beurteilen. Eine Aussage zu den zu erwartenden Veränderungen des Wasserhaushaltes ist zudem zwangsläufig noch mit weiteren Unsicherheiten verbunden, wie z.B.:

- die Unsicherheit des hydrologischen Modellansatzes, der unter Umständen für veränderte Klimaverhältnisse nicht geeignet ist,
- fehlende Aussagen zu wesentlichen hydrometeorologischen Größen wie z.B. dem Wasserdampfgehalt,
- fehlende Möglichkeiten der Abschätzung von veränderten Vegetationsverhältnissen,
- die Problematik der Übertragung der großräumig vorliegenden Klimainformationen auf das jeweilige Einzugsgebiet (Wilby et al., 1999).

Um die Problematik der Anwendung von Klimaänderungsszenarien zu verdeutlichen, wird in diesem Beitrag eine probabilistische Abschätzung der möglichen Folgen von Klimaänderungen auf den Abfluss der Donau am Pegel Berg dargestellt.

2. Probabilistische Abschätzung von Klimaveränderungen

Die Anwendung von Monte-Carlo-Simulationen ist in den Ingenieurwissenschaften ein gebräuchliches Hilfsmittel zur Quantifizierung von Unsicherheiten. Wenn man die Unsicherheit eines Ergebnisses, z.B. einer Modellrechnung, charakterisieren möchte, werden die unsicheren Parameter als Zufallsvariable betrachtet, die jeweils einer Wahrscheinlichkeitsverteilung unterliegen (Prior-Verteilungen). Es folgen zahlreiche Simulationsläufe mit Zufallskombinationen der Parameter, deren jeweilige Realisierung sich innerhalb ihres Parameterraumes über die jeweilige Wahrscheinlichkeitsverteilung ergibt. Für jeden Simulationslauf wird das Ergebnis gespeichert und nach ausreichend vielen Läufen werden diese verschiedenen Ergebnisse statistisch ausgewertet. Die resultierende Posterior-Verteilung des Ergebnisses charakterisiert dann dessen Unsicherheit in Abhängigkeit von den angenommenen Unsicherheiten der Eingangsgrößen.

Um diese probabilistische Abschätzung für die Unsicherheit von Klimaänderungsszenarien durchzuführen, müssen die wesentlichen Einflussfaktoren, die dieses Ergebnis bestimmen, hinsichtlich ihrer Unsicherheiten beurteilt werden. Im Rahmen unserer Untersuchungen konnten hierzu Monte-Carlo-Simulationen für Klimamodellrechnungen eines EU-Projektpartners (Climate Research Unit der University of East Anglia in Norwich, Großbritannien, unter Leitung von Mike Hulme) genutzt werden. Die CRU berücksichtigte die Unsicherheiten folgender Einflussfaktoren:

- 1) Unsicherheit hinsichtlich der Wahl des verwendeten Klimamodells
Verwendet wurden 7 unterschiedliche Modelle, darunter auch das deutsche Modell ECHAM 4. Um die Unterschiede zwischen den einzelnen Simulationsläufen zu charakterisieren, wurde das britische Modell HadCM2 mit 8 Simulationsläufen (2 unterschiedliche Emissionsszenarien mit jeweils 4 Läufen) verwandt. Es stehen somit 14 Simulationsläufe zur Verfügung, die als gleichwertig betrachtet werden (in den Monte-Carlo-Simulationen werden jeweils gleiche Wahrscheinlichkeitswerte von 0,0714 angenommen).



2) Unsicherheit der Klimasensitivität

Die großen Unterschiede von Ergebnissen der Modellrechnungen für CO₂-Verdopplung zeigen, dass die Sensitivität des Klimas der Erde bei Erhöhung der Treibhausgaskonzentrationen eine unsichere Größe darstellt. Diese Unsicherheit der Klimasensitivität wird deshalb mit einer Dreiecks-Verteilung wie folgt berücksichtigt:

globale Klimasensitivität										
Erwärmung in °C bei CO ₂ -Verdopplung	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	
Wahrscheinlichkeit	0,04	0,08	0,12	0,16	0,2	0,16	0,12	0,08	0,04	

3) Unsicherheit in der Abschätzung zukünftiger Emissionsszenarien

Es werden vier unterschiedliche Emissionsszenarien anhand von vier (gleichwahrscheinlichen) sozio-ökonomischen Entwicklungspfaden definiert. Diese Entwicklungen unterscheiden sich u.a. in der wirtschaftlichen Entwicklung, der Entwicklung des Umweltbewusstseins und der demographischen Entwicklung. Zusätzlich wird am Beispiel der Implementierung der Vorgaben des Protokolls von Kyoto (60% Reduzierung der Emissionen bis 2100 bezogen auf 1990 für Annex I-Staaten und 20% für alle anderen Staaten) die Möglichkeit von emissionsmindernden Maßnahmen berücksichtigt. Die Wahrscheinlichkeit der Realisierung dieser Vereinbarungen wird dabei mit 50% Wahrscheinlichkeit beurteilt.

4) Unsicherheiten infolge der natürlichen Klimavariabilität

Klimagrößen weisen je nach der verwendeten Zeitreihe eine natürliche Variabilität auf. Diese natürliche Variabilität, die für Mittelwerte von 30 Jahre umfassenden Teilreihen monatlicher Temperatur- und Niederschlagswerte aus einer, mit dem Modell HadCM2 über den Zeitraum von 1400 Jahre simulierten Zeitreihe für heutige Klimaverhältnisse abgeschätzt wurde, wird als eine weitere Zufallsvariable berücksichtigt.

Die zahlreichen Simulationsrechnungen, die für eine probabilistische Abschätzung der Unsicherheiten der Modellergebnisse erforderlich sind, können nicht direkt mit Klimamodellen durchgeführt werden, da hierzu ein sehr hoher Rechenzeitaufwand erforderlich wäre. Um die Wirkungen der unterschiedlichen Emissionsszenarien und der verschiedenen Annahmen zur Sensitivität der mittleren globalen Temperatur auf CO₂-Verdopplung zu untersuchen, wurde durch die Projektpartner der CRU ein vereinfachtes Klimamodell (MAGICC) verwendet, um die globalen Temperaturerhöhungen für drei 30-Jahre Zeithorizonte in der Zukunft zu berechnen. Diese 30-Jahresabschnitte wurden um 2025, 2055 und 2085 zentriert. Da das Modell MAGICC eine Reihe von maßgebenden Prozessen in der Atmosphäre und den Ozeanen parametrisiert, kann es das Verhalten von komplexeren Klimamodellen emulieren. Mit diesem vereinfachten Klimamodell werden die mittleren globalen Temperaturänderungen für jedes der vier Emissionsszenarium und mit verschiedenen Annahmen zur Klimasensitivität für die drei Zeitebenen berechnet. Die 14 verfügbaren Läufe mit 7 unterschiedlichen Klimamodellen wurden hinsichtlich der jeweiligen Klimaänderungssignale (Änderung der mittleren Temperatur und des Niederschlages für Winter und Sommer) für den 30-Jahre-Zeitabschnitt um 2085 und für eine Rasterfläche von 3,75° longitudinal und 2,5° latitudinal mit Zentrum bei Mainz analysiert. Diese regionalen Klimaänderungen wurden dann auf die jeweilige Änderung der globalen mittleren Temperatur, die für den gleichen Zeitabschnitt mit dem jeweils gleichen Modell ermittelt wurde, bezogen. Durch diese Standardisierung war es möglich, die regionalen Änderungen mit Hilfe der Ergebnisse der MAGICC-Modellrechnungen (Änderung der mittleren globalen Temperatur) entsprechend den jeweiligen Annahmen zum Emissionsszenarium und zur Klimasensitivität zu variieren. Damit wird angenommen, dass die regionalen Muster der Klimaänderungen durch den anthropogenen Treibhauseffekt auch bei unterschiedlichen Entwicklungen der mittleren globalen Temperatur gleich bleiben. Auf diesem Wege werden einerseits die modellspezifisch regionalen Aussagen zur Zielregion bei

behalten, andererseits werden die regionalen Modellierungsergebnisse der verschiedenen Klimamodelle, denen ursprünglich unterschiedliche Annahmen zur Klimasensitivität und zu den Emissionsszenarien zugrunde liegen, vergleichbar.

Insgesamt wurden 25000 Klimaszenarien generiert. Diese gliedern sich wie folgt auf:

- Für jedes der 14 verwendeten Klimamodelle gibt es ca. 1780 Variationen. Da für das Modell HadCM2 8 unterschiedliche Läufe durchgeführt wurden, ist dieses Modell an 57% aller 25000 Szenarien beteiligt.
- Entsprechend der dreiecksförmigen Priorverteilung wird in 20% aller Szenarien eine Klimasensitivität von 3 Grad globaler Temperaturerhöhung bei CO₂-Verdopplung angenommen. Sensitivitäten von 2,5 und 3,5 werden in 16% aller Szenarien berücksichtigt usw..
- Jeweils 25% (6250) Szenarien basieren auf einem der vier verwendeten Emissionsszenarien A1, A2, B1 oder B2.

Um die damit beschriebene Streubreite möglicher zukünftiger Klimaverhältnisse zu beschreiben, sind in Abb. 1 die Veränderungen der Niederschlagssummen des Winter- und Sommerhalbjahres und die entsprechenden Mittelwerte der Temperatur dargestellt.

Jedes der 25000 Szenarien beinhaltet 12 monatliche Werte der Änderung der mittleren Temperatur und des mittleren Niederschlages. Änderungen weiterer Klimagrößen (mittlerer Dampfdruck, der mittlere Windgeschwindigkeit, mittlere monatlichen Wolkenbedeckung kurzweilige Strahlung) lagen nur für einen Teil der Modelle vor. Die Szenarien wurden direkt zur Modifizierung der meteorologischen Zeitreihen Januar 1950 bis Dezember 1996 benutzt. Dabei wurden Änderungen der Temperatur additiv, Änderungen des Niederschlages multiplikativ, bezogen auf den jeweils ausgewiesenen Änderungsanteil am heutigen Niederschlag, verwendet. Infolge der großen Zahl und der Streubreite der Szenarien (vgl. Abb. 1) erscheint ein Verzicht auf komplexe Ansätze zum „Downscaling“ wie z.B. durch geostatistische Verfahren oder durch Verwendung von spezifischen Regionalmodellen, gerechtfertigt zu sein.

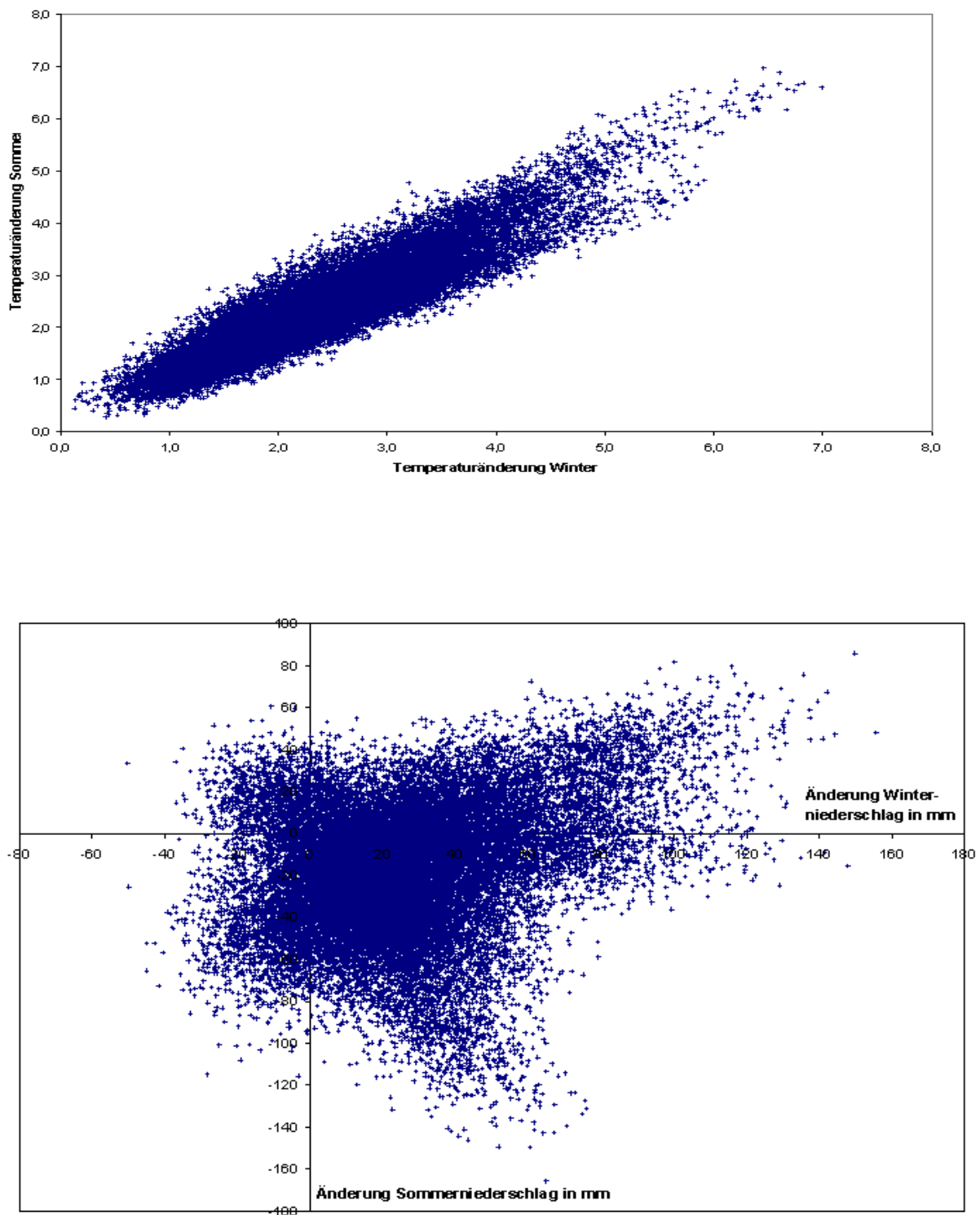


Abb.1: Änderungen der Mittelwerte von Temperatur und Niederschlag für Winter- und Sommerhalbjahr bei den verwendeten 25.000 Klimaszenarien

3. Hydrologisches Modell zur Simulation der Veränderungen des Abflussregimes

Um die 25000 Klimaänderungsszenarien in hydrologische Aussagen umzusetzen, wurde ein Wasserhaushaltsmodell an das Untersuchungsgebiet der Donau bis zum Pegel Berg angepaßt. Dieses Modell musste die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Es sollte möglichst physikalisch basiert die verschiedenen Wasserhaushaltskomponenten berechnen, wozu infolge der notwendigen Berücksichtigung der Prozeßdynamik ein Berechnungszeitintervall von einem Tag vorgegeben war.
- Die vorhandene naturräumliche Heterogenität sollte möglichst im Modell berücksichtigt werden. Im Untersuchungsgebiet betraf dies vor allem die Differenzierung zwischen Schwarzwald, Schwäbischer Alb und Alpenvorland. Dabei sollten auch die jeweils spezifischen Höhen- und Landnutzungsverhältnisse berücksichtigt werden, um die nichtlineare Wirkung dieser Faktoren, z.B. auf den Verdunstungsprozeß, berücksichtigen zu können.

Um eine repräsentative Aussage zu den hydrologischen Veränderungen zu erhalten, sollten möglichst lange Zeitreihen simuliert werden (für das Untersuchungsgebiet waren für 47 Beobachtungsjahre hydro-meteorologische Daten verfügbar). Bei 25000 Szenarien war damit der Wasserhaushalt von etwa 1,2 Millionen Jahren oder $4,3 \cdot 10^8$ Tagen zu berechnen. Um diese Aufgabe zu bewältigen, musste das Modell rechentechnisch optimiert werden, um kurze Rechenzeiten zu ermöglichen.

Grundlage der Modellierung war das Wasserhaushaltsmodell der Ruhr-Universität Bochum. Generell erlaubt dieses Modell eine räumlich verteilte Wasserhaushaltsberechnung mit minimalen Flächeneinheiten von $25 \times 25 \text{ m}^2$ Rasterweite. Je nach betrachtetem Flussgebiet sind verschiedene Gliederungs- oder Aggregationsschemata möglich (Schumann und Geyer, 2000). So wurden im obere Donauebiet zwischen drei unterschiedliche Naturräumen (Schwäbische Alb, Schwarzwald und Alpenvorland) differenziert. Zusätzlich wurde die Donauversinkung berücksichtigt.

Um die Struktur der drei Teilgebiete zu berücksichtigen, erfolgte eine Differenzierung in Höhenstufen, da diese Charakteristik sowohl für die energetischen Verhältnisse als auch die Bodenarten maßgebend ist. Weiterhin wurde in Hinblick auf die Berechnung der Verdunstung innerhalb der einzelnen Höhenstufen zwischen 6 Landnutzungsklassen differenziert (Abb.3). Das Relief wurde durch einen topographischen Index repräsentiert, wobei insbesondere die Interaktion zwischen Oberflächen- und Grundwasser in Talauen mit Hilfe dieses Parameters durch einen Ansatz zum Kapillaraufstieg berücksichtigt wurde.



Höhenklassen

Schwarzwald	Schwäb. Alp
650 - 730	500 - 710
- 780	- 760
- 900	- 810
- 1150	- 1000

Alpenvorland
500 - 590
- 640
- 840

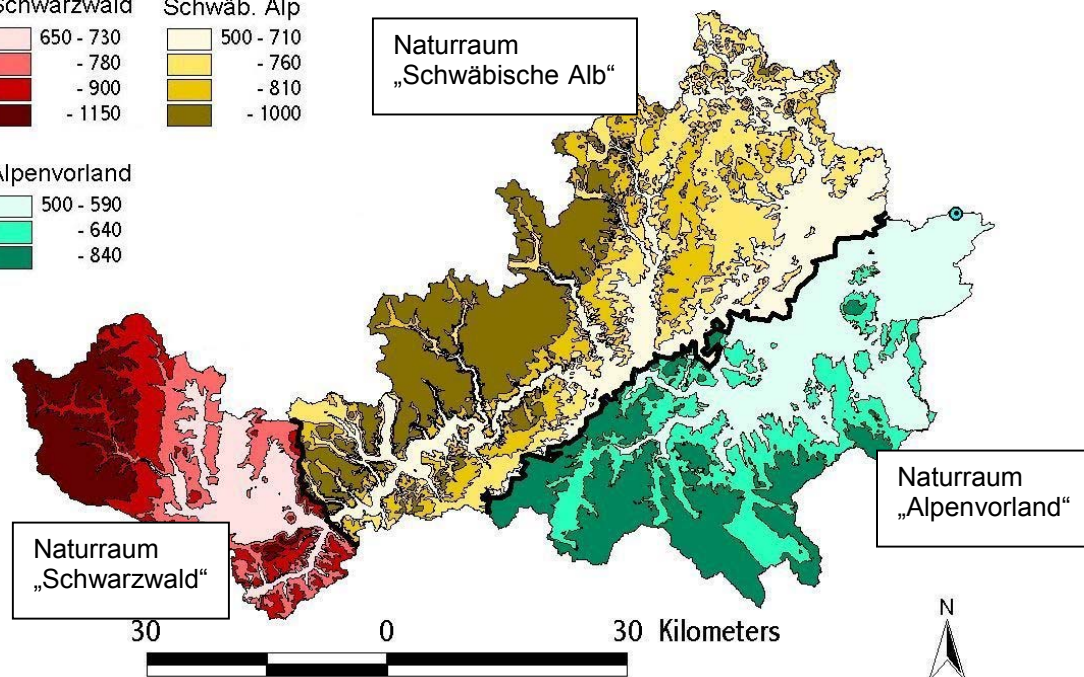


Abb.2: Das Flussgebiet der Donau bis zum Pegel Berg und die verwendete Differenzierung in drei Naturräume mit unterschiedlichen Gliederungen in Höhenstufen

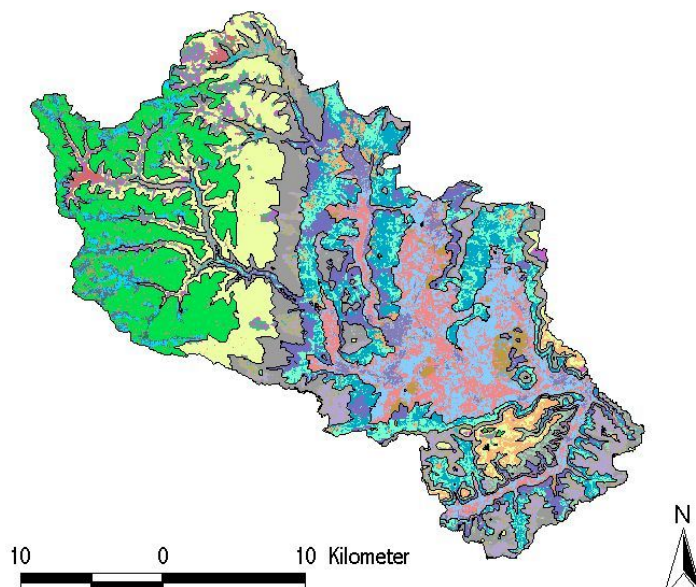


Abb.3: Ergebnis der Überlagerung von Höhenstufen und Landnutzungen im Naturraum „Schwarzwald“

Das Model wurde für den Zeitraum April 1983 bis Oktober 1993 kalibriert und anhand der beiden Zeitabschnitte Januar 1951 bis März 1983 sowie November 1993 bis Dezember 1996 validiert. Der Fehler der berechneten Abflusssummen der Einzeljahre beträgt im Mittel $\pm 4,7\%$ für die Kalibrierungsperiode und $\pm 8,1\%$ für die Validierungsperiode. Die Abweichungen der berechneten langjährigen Mittelwerte für die Monate, Halbjahre und das Jahr für den Gesamtzeitraum sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Abweichung der langjährigen Mittelwerte der simulierten Wasserhaushaltsgrößen von den beobachteten Werten

Monat/Zeit- raum	gemessener Mit- telwert 1951-1996	berechneter Mit- telwert 1951-1996	mittlerer absoluter Fehler (berechnet aus vorzeichen- freien Werten) in mm
Januar	30,9	33,1	5,2
Februar	33,2	31,1	9,1
März	38,1	38,0	6,7
April	35,5	34,5	5,7
Mai	27,0	24,3	4,7
Juni	23,7	22,3	5,1
Juli	19,6	19,5	5,5
August	16,7	16,9	4,0
September	13,6	13,8	3,1
Oktober	15,1	15,9	3,2
November	19,2	21,2	4,6
Dezember	28,7	29,9	5,7
Sommer MJJASO	115,5	112,8	13,5
Winter NDJFMA	185,6	187,6	13,6
Jahr	301,2	300,6	20,5

In Hinblick auf die Beschreibung der mittleren monatlichen Wasserhaushaltsbilanzen, sowie der Bilanzwerte der Halbjahre und Jahre kann eine gute Übereinstimmung zwischen den berechneten und den gemessenen Werten festgestellt werden. Da das Modell für feuchtere oder trockenere Klimaverhältnisse angewandt werden sollte, wurden speziell die Möglichkeiten des Modells zur Beschreibung des Wasserhaushaltes besonders trockener bzw. besonders feuchter Zeiträume analysiert. Hierzu wurden die Abweichungen der simulierten Halbjahres- und Jahreswerte von den beobachteten Werten für die jeweils 10 trockensten und 10 feuchtesten Halbjahre bzw. Jahre ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Aus diesen Angaben wird ersichtlich, dass die Ergebnisse des Wasserhaushaltsmodells keine systematischen Abweichungen für trockenere oder feuchtere Zeitabschnitte aufweisen. Die mittleren absoluten Abweichungen liegen in der Größenordnung der entsprechenden Werte der Gesamtreihe. Das entwickelte und angepaßte Wasserhaushaltsmodell für das Einzugsgebiet der oberen Donau erscheint damit als ein geeignetes Hilfsmittel, um die Klimaänderungsszenarien in Abflussveränderungen umzurechnen.



Tabelle 2: Abweichungen der simulierten 10-Jahre-Mittelwerte für die 10 trockensten bzw. 10 feuchtesten Halbjahre des Zeitraumes 1951 bis 1996

Zeitabschnitt		Gemessener Mittelwert	berechneter Mittelwert	mittlere Abweichung
Sommer	Trockenjahre	74,1	71,4	9,6
	Naßjahre	164,3	154,9	13,9
Winter	Trockenjahre	111,6	125,3	15,1
	Naßjahre	266,4	259,0	13,6
Jahr	Trockenjahre	206,5	203,5	17,0
	Naßjahre	407,5	407,8	17,0

4. Ergebnisse der Simulationsrechnungen

Im Ergebnis der Simulationsläufe wurden die 25.000 Klimaänderungsszenarien in ebenso viele Abflussszenarien umgerechnet. Die, jeweils 46 Jahre umfassenden, berechneten Reihen wurden statistisch ausgewertet. Im Rahmen dieser Auswertung war es möglich, die Auswirkungen unterschiedlicher Annahmen (Klimamodell, Klimasensitivität, Emissionsszenarien) hinsichtlich der resultierenden Auswirkungen zu beurteilen.

Infolge der Vielfalt der möglichen Auswertungen der Simulationsergebnisse beschränken sich nachfolgende Darstellungen nur auf einige wesentliche Aspekte.

4.1 Probabilistische Abschätzung der Abflussveränderung in Auswertung aller 25.000 Simulationsläufe

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse der Simulationsläufe hinsichtlich der Änderungen der Abflüsse des Sommerhalbjahres (Ordinate) und des Winterhalbjahres (Abszisse) dargestellt. In 69,7 % aller Simulationen verringerte sich sowohl der mittlere Winter- als auch der mittlere Sommerabfluss. In 13,2 % aller Berechnungen erhöhten sich die mittleren Abflüsse beider Halbjahre, in 16,8 % nahmen die Winterabflüsse zu und die Sommerabflüsse ab. Eine Zunahme der Sommerabflüsse bei gleichzeitiger Verringerung der Winterabflüsse war nur bei 0,3 % aller Simulationen zu verzeichnen.

In den Tabellen 3, 4 und 5 sind die Ergebnisse der Häufigkeitsanalyse, der Änderung der Abflusshöhe bzw. der sich ergebenden MQ-Werte, getrennt für das Sommerhalbjahr (Mai - Oktober), das Winterhalbjahr (November - April) und das Jahr dargestellt. Die entsprechenden Histogramme sind in Abbildung 5 zusammengefasst.

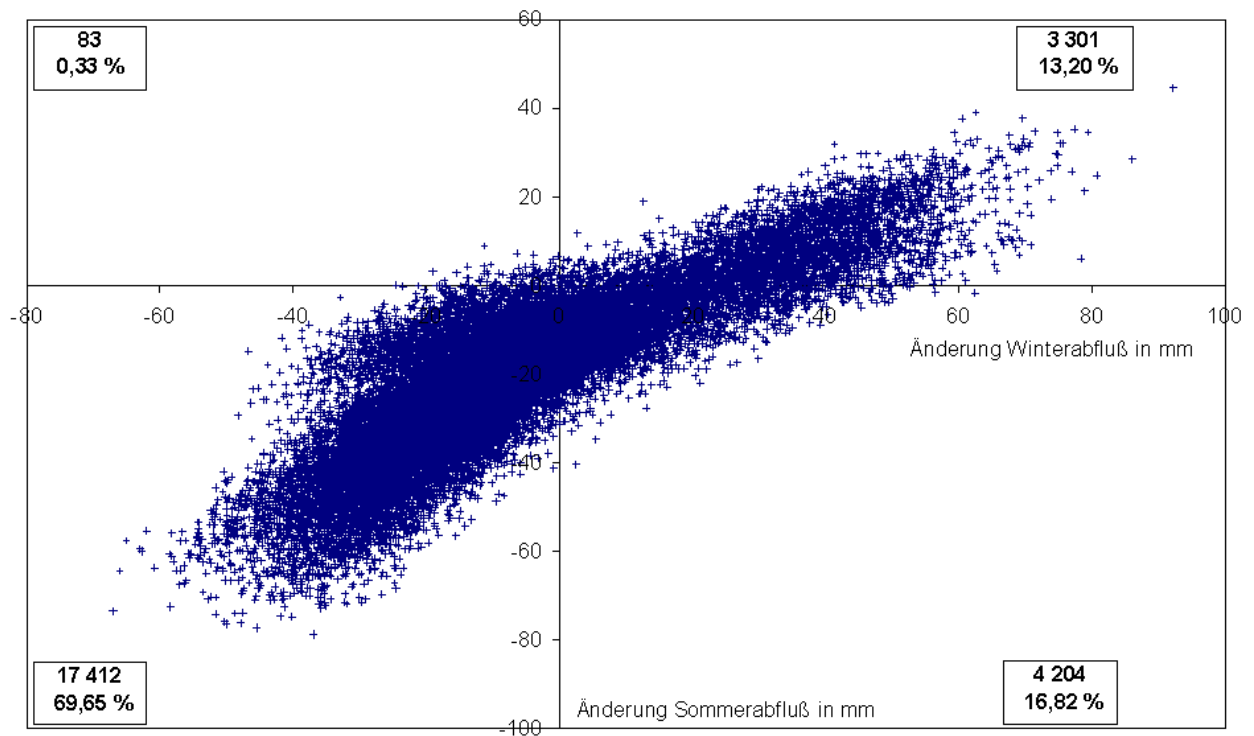


Abb.4: Berechnete Änderungen der mittleren Donauabflüsse von Winter- und Sommerhalbjahr für den Zeithorizont 2085

Tabelle 3: Häufigkeitsanalyse der Änderungen der mittleren Jahresabflusshöhe und der sich ergebenden Jahres- MQ- Werte im Ergebnis von 25000 Simulationsrechnungen für den 30-Jahre-Zeitabschnitt um 2085 (Vergleichswerte der Reihe 1950 bis 1996: 301,2 mm bzw. 38,7 m³/s)

Klasse	Änderung Abfluss- höhe in mm		MQ- Wert in m ³ /s		Häufig- keit	Relative Häufigkeit	Kumulative Häufigkeit	Kum. Rel. Häufigkeit
	Untere Grenze	Obere Grenze	Untere Grenze	Obere Grenze				
		< -160		< 18.0	0	0	0	0
1	-160	-140	18.0	20.5	1	0	1	0
2	-140	-120	20.5	23.1	23	0.0009	24	0.0010
3	-120	-100	23.1	25.7	305	0.0122	329	0.0132
4	-100	-80	25.7	28.3	1353	0.0541	1682	0.0673
5	-80	-60	28.3	30.9	3119	0.1248	4801	0.1920
6	-60	-40	30.9	33.5	4892	0.1957	9693	0.3877
7	-40	-20	33.5	36.1	5788	0.2315	15481	0.6192
8	-20	0	36.1	38.7	4237	0.1695	19718	0.7887
9	0	20	38.7	41.3	1849	0.0740	21567	0.8627
10	20	40	41.3	43.9	1414	0.0566	22981	0.9192
11	40	60	43.9	46.5	1280	0.0512	24261	0.9704
12	60	80	46.5	49.1	603	0.0241	24864	0.9946
13	80	100	49.1	51.7	114	0.0046	24978	0.9991
14	100	120	51.7	54.3	21	0.0008	24999	1
15	120	140	54.3	56.9	1	0	25000	1
16	140	160	56.9	59.4	0	0	25000	1
	> 160		> 59.4		0	0	25000	1



Tabelle 4: Häufigkeitsanalyse der Änderungen der mittleren Abflusshöhe und der sich ergebenden MQ- Werte des Sommerhalbjahres im Ergebnis von 25000 Simulationsrechnungen für den 30-Jahre- Zeitabschnitt um 2085 (Vergleichswerte der Reihe 1950 bis 1996: 115,5 mm bzw. 29,4 m³/s)

Klasse	Änderung Abfluss- höhe in mm		MQ- Wert in m ³ /s		Häufig- keit	Relative Häufigkeit	Kumulative Häufigkeit	Kum. Rel. Häufigkeit
	Untere Grenze	Obere Grenze	Untere Grenze	Obere Grenze				
		<-80	6.2	8.8	0	0	0	0
1	-80	-70	8.8	11.4	37	0.0015	37	0.0015
2	-70	-60	11.4	14.0	293	0.0117	330	0.0132
3	-60	-50	14.0	16.5	1065	0.0426	1395	0.0558
4	-50	-40	16.5	19.1	2231	0.0892	3626	0.1450
5	-40	-30	19.1	21.7	3578	0.1431	7204	0.2882
6	-30	-20	21.7	24.3	4972	0.1989	12176	0.4870
7	-20	-10	24.3	26.8	5780	0.2312	17956	0.7182
8	-10	0	26.8	29.4	3660	0.1464	21616	0.8646
9	0	10	29.4	32.0	1998	0.0799	23614	0.9446
10	10	20	32.0	34.5	1043	0.0417	24657	0.9863
11	20	30	34.5	37.1	312	0.0125	24969	0.9988
12	30	40	37.1	39.7	30	0.0012	24999	1
13	40	50	39.7	42.3	1	0	25000	1
14	>50		42.3	44.8	0	0	25000	1

Tabelle 5: Häufigkeitsanalyse der Änderungen der mittleren Abflusshöhe und der sich ergebenden MQ- Werte des Winterhalbjahres im Ergebnis von 25000 Simulationsrechnungen für den 30-Jahre- Zeitabschnitt um 2085 (Vergleichswerte der Reihe 1950 bis 1996: 185,6 mm bzw. 48,2 m³/s)

Klasse	Änderung Abfluss- höhe in mm		MQ- Wert in m ³ /s		Häufigkeit	Relative Häufigkeit	Kumulative Häufigkeit	Kum. Rel. Häufigkeit
	Untere Grenze	Obere Grenze	Untere Grenze	Obere Grenze				
		< -70		< 27.3	0	0	0	0
1	-80	-70	27.3	29.9	0	0	0	0
2	-70	-60	29.9	32.5	7	0.0003	7	0.0003
3	-60	-50	32.5	35.1	88	0.0035	95	0.0038
4	-50	-40	35.1	37.7	514	0.0206	609	0.0244
5	-40	-30	37.7	40.4	2066	0.0826	2675	0.1070
6	-30	-20	40.4	43.0	4516	0.1806	7191	0.2876
7	-20	-10	43.0	45.6	5747	0.2299	12938	0.5175
8	-10	0	45.6	48.2	4557	0.1823	17495	0.6998
9	0	10	48.2	50.8	2603	0.1041	20098	0.8039
10	10	20	50.8	53.4	1334	0.0534	21432	0.8573
11	20	30	53.4	56.0	1141	0.0456	22573	0.9029
12	30	40	56.0	58.7	1067	0.0427	23640	0.9456
13	40	50	58.7	61.3	852	0.0341	24492	0.9797
14	50	60	61.3	63.9	387	0.0155	24879	0.9952
15	60	70	63.9	66.5	96	0.0038	24975	0.9990
16	70	80	66.5	69.1	22	0.0009	24997	0.9999
17	80	90	69.1	71.7	2	0.0001	24999	1
18	90	100	71.7	74.4	1	0	25000	1
	> 100		> 74.4		0	0	25000	1

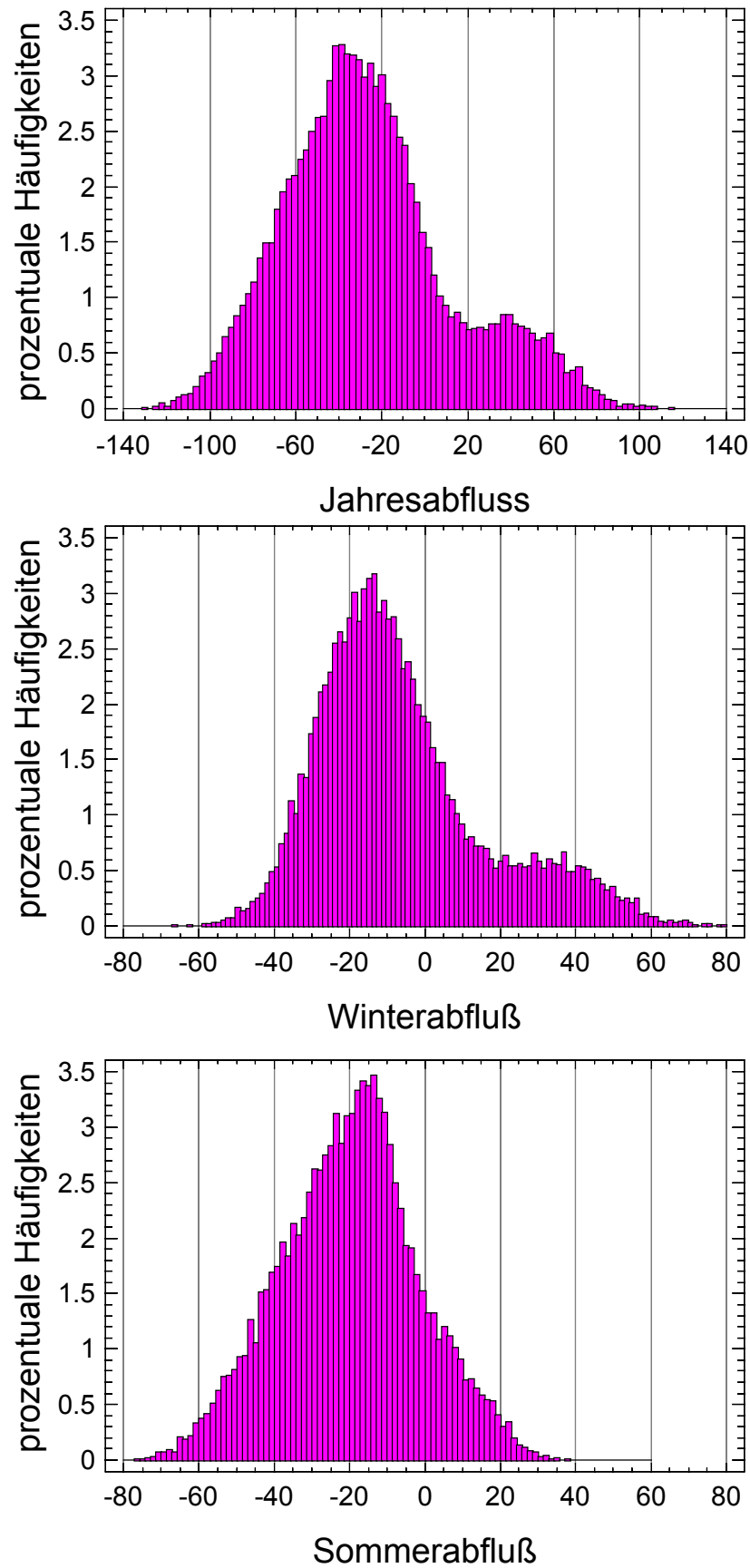


Abb.5: Histogramme der Veränderungen der Abflusshöhe in Auswertung aller Szenariorechnungen (zum Vergleich: mittlerer Jahresabflusshöhe 1950-96: 301,2 mm, mittlere Winterabflusshöhe 1950-96: 185,6 mm, mittlere Sommerabflusshöhe 1950-96: 115,5mm)



Um die Abflussveränderungen zu charakterisieren, sind in Tabelle 6 die relativen Häufigkeiten für positive und negative Abflussveränderungen von jeweils mehr bzw. weniger als 20 % zusammengestellt. Ersichtlich wird:

- die relative Häufigkeit eines verringerten Abflusses ist deutlich höher als die der Abflusszunahme,
- für das Winterhalbjahr liegen bei 88,9% aller Simulationen die Veränderungen des mittleren Abflusses im Bereich von ± 20 % des heutigen Wertes,
- für das Sommerhalbjahr wurden in 42,5% aller Simulationen Abflüsse berechnet, die um mehr als 20% geringer waren als der heutige Mittelwert. Die relative Häufigkeit der Simulationen, die einen Sommerabfluss von 50% unter dem heutigen Mittelwert ergaben, lag bei 2 %. Bei 33,7% aller Simulationen ergaben sich Verringerungen zwischen 20 und 40% des heutigen Mittelwertes. Eine Verringerung des mittleren Sommerabflusses zwischen 20 und 30% trat dabei in etwa 20,8 % aller Simulationsrechnungen auf.

Tabelle 6: Prozentuale kumulative Häufigkeiten von Abflussveränderungen in Auswertung aller Szenariorechnungen

Änderung der Abflussverhältnisse	Winter	Sommer	Jahr
Verringerung um mehr als -20 %	4,1	42,5	19,9
Verringerung zwischen -20 und 0 %	65,9	44,0	59,0
Insgesamt Abflussverringerung	70,0	86,5	78,9
Insgesamt Abflusserhöhung	30,0	13,5	21,1
Abflusserhöhung zwischen 0 und 20 %	23,0	12,7	18,0
Abflusserhöhung um mehr als 20 %	7,0	0,8	3,1

Setzt man die Schwelle der wasserwirtschaftlich spürbaren Abflussverringerung (willkürlich) bei 20% an, so ergeben sich für eine Unterschreitung dieses Grenzwertes in Auswertung aller Szenarien die folgenden Risikowerte:

- in Höhe von etwa 20% für mittlere Jahresabflüsse,
- in Höhe von 42,5% für den Abfluss des Sommerhalbjahres und
- in Höhe von nur 4 % für den Abfluss des Winterhalbjahrs.

Bei Verwendung einzelner Klimamodelle können sich diese Risikowerte beachtlich verschieben. Wird z.B. nur das Hamburger Klimamodell ECHAM4 betrachtet wird (1751 Szenarien), so ergeben sich die entsprechenden Risikowerte für über 20% Abflussminderungen wie folgt:

- 91,7 % für das Sommerhalbjahr,
- 5,9 % für das Winterhalbjahr und
- 57,5 % für den mittleren Jahresabfluss.

Unter Punkt 4.2 werden diese Unterschiede zwischen den Modellen näher erläutert.

Zusammenfassend ergab die Mehrheit aller Simulationsläufe niedrigere Abflussmittelwerte im Sommer- und Winterhalbjahr sowie für das Jahr. Die prozentuale Veränderung der Sommerabflüsse ist dabei weitaus ausgeprägter als die der Winterabflüsse. Eine häufig im Ergebnis von Szenariorechnungen genannte Abflusserhöhung für das Winterhalbjahr konnten nur in 30% aller Simulationen festgestellt werden, die berechneten Abflusserhöhung fielen zudem auch eher moderat aus.

4.2 Beurteilung der Wirkung der verschiedenen Quellen von Unsicherheiten

Die wichtigste, letztlich ergebnisbestimmende Einflussgröße stellt die Auswahl des Klimamodells dar. Ursächlich hierfür sind die großen Unterschiede zwischen den regionalen Ergebnissen der verschiedenen Klimamodelle hinsichtlich der berechneten Änderungen von Niederschlag und Temperatur. So ergeben sich je nach verwendetem Modell unter Umständen Vorzeichenwechsel in den Abflussveränderungen. Beispielsweise berechnen zwei Modelle (CGCM und CSIRO-MK2) klimatische Veränderungen, aus denen sich Abflusserhöhungen für Winter, Sommer und Jahr ableiten lassen, alle anderen Modelle (mit einer Ausnahme) dagegen Abflussverminderungen. In Abbildung 6 sind die Unterschiede der berechneten Abflussveränderungen, differenziert nach den verwendeten Klimamodellen dargestellt.

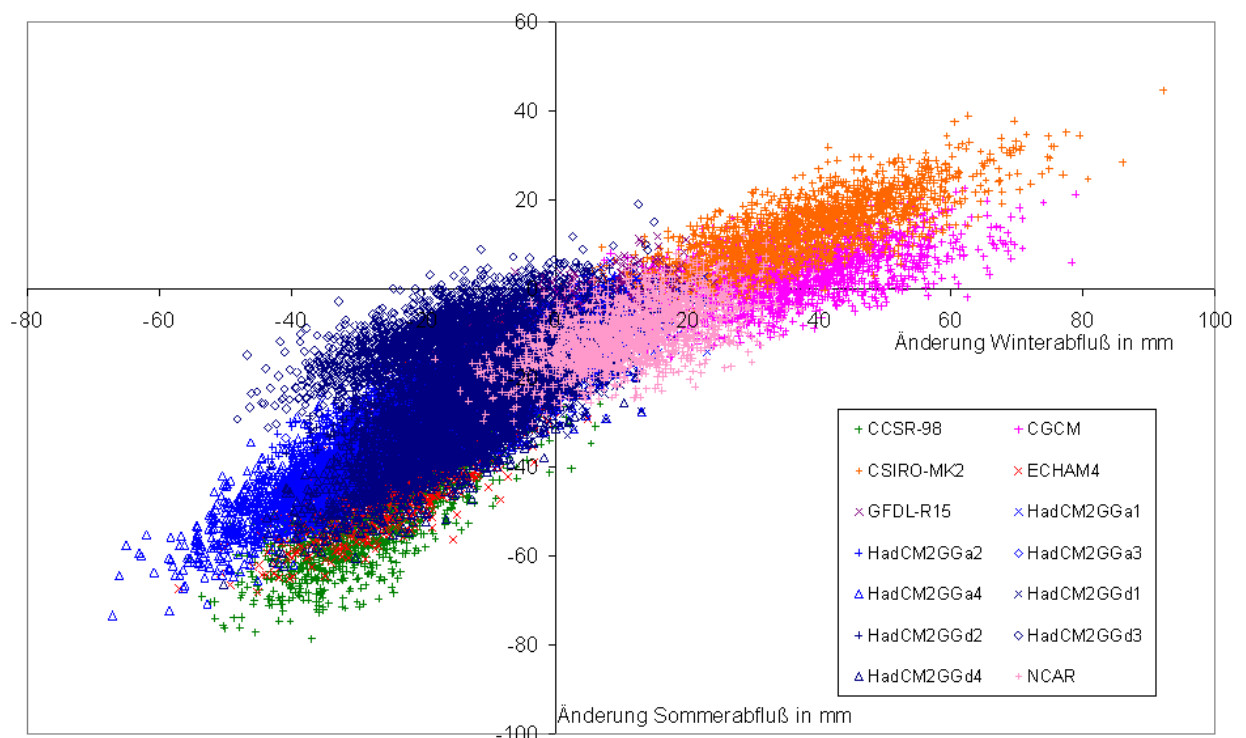


Abb.6: Unterschiede zwischen den Veränderungen der mittleren Abflusshöhe für das Winter- und Sommerhalbjahr bei Verwendung von Klimaszenarien unterschiedlicher Klimamodelle

Die zumindest in Europa sehr häufig in Impact-Studien verwendeten Modelle ECHAM4 und HadCM2 liefern für die hier betrachtete Untersuchungsregion sehr unterschiedliche Resultate. So ergeben sich für das Modell ECHAM4 überwiegend starke Abflussverminderungen, bei Auswertung der gleichen Zahl von Läufen für die Variante GGa1 des Hadley-Modells dagegen nur geringe Abflussreduzierungen und zum Teil auch deutliche Abflusserhöhungen im Winter.

Da für das Hadley-Modell 8 unterschiedliche Modellläufe verfügbar waren, lag es nahe, die Variabilität der Ergebnisse bei zwei unterschiedlichen Läufen mit gleichen Anfangs- und Randbedingungen zu untersuchen. Es zeigte sich, dass auch die Unterschiede zweier Läufe des gleichen Klimamodells gravierend sein können und sich dabei durchaus ähnliche Unterschiede wie bei Verwendung verschiedener Modelle ergeben können (Abb.7).

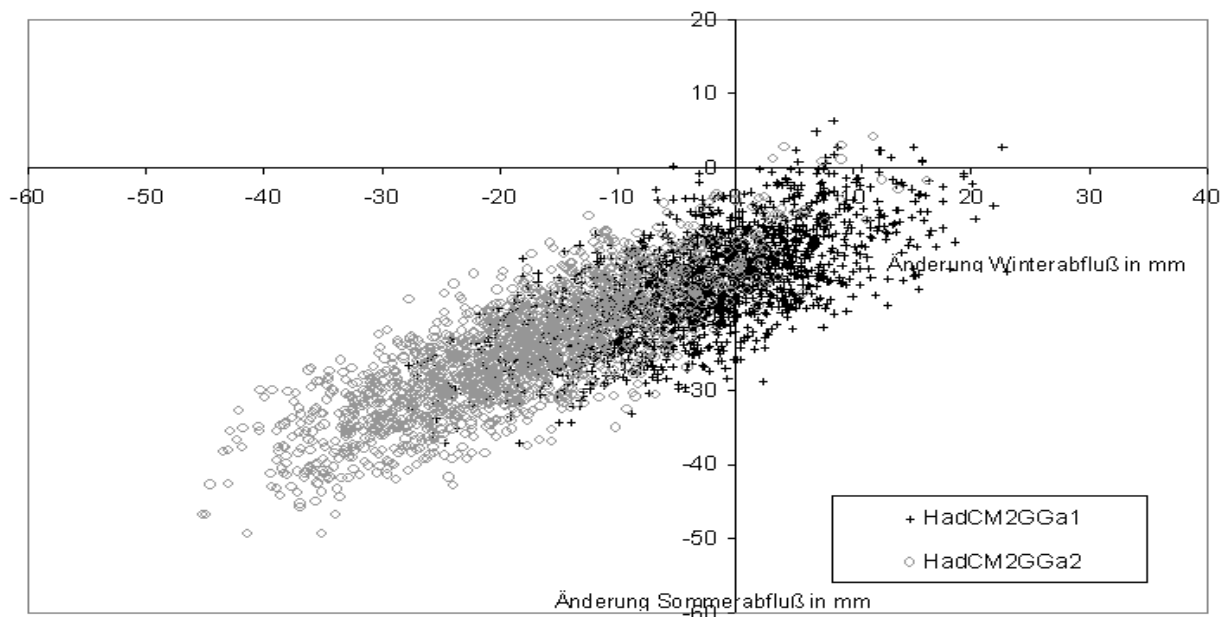


Abb.7: Unterschiede zwischen den Veränderungen der mittleren Abflusshöhe für das Winter- und Sommerhalbjahr bei Verwendung von zwei Basissimulationsläufen des gleichen Klimamodells mit gleichen Randbedingungen (Emissionsszenarien)

Bei Verwendung eines spezifischen Modells ist der wichtigste, da ergebnisbestimmende Faktor die Klimasensitivität. Dieser Faktor ist naturgemäß nicht vorhersagbar. Wenn die Sensitivität des Weltklimas auf eine Verdopplung des CO₂-Gehaltes höher wäre als die generell derzeit meist angenommenen 1,5 - 3 Grad, würden sich bei einer Reihe von Klimamodellen deutlich größere Abflussreduzierungen ergeben (Abb.8). Die verschiedenen Modelle reagieren allerdings unterschiedlich sensitiv auf die Variation dieses Parameters.

Klimasensitivität

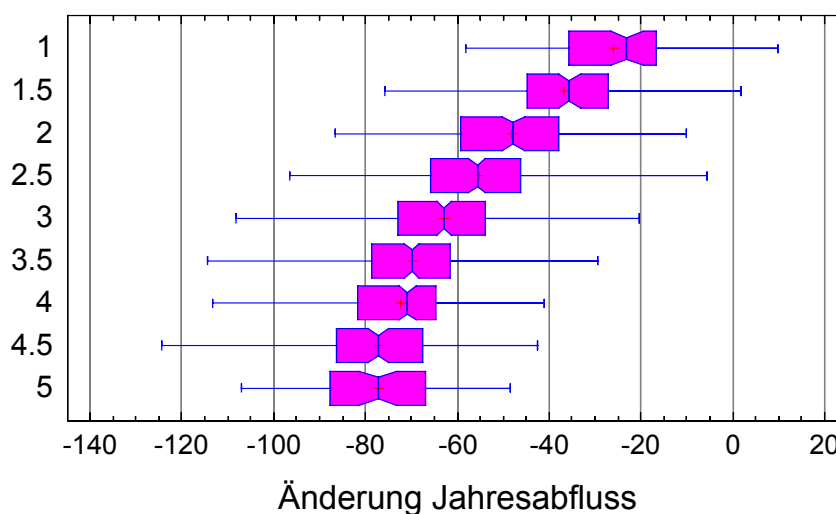


Abb.8: Abhängigkeit der Ergebnisse der Abflusssimulationsrechnungen bei Verwendung der Klimaszenarien des Modells ECHAM4 von den Annahmen zur Klimasensitivität. Dargestellt sind Box-Whisker-Plots in denen die Werte mit 50% Über- bzw. Unterschreitung als Einschnürung erkennbar sind

Überraschenderweise haben die vier Emissionsszenarien relativ wenig Einfluss auf die Ergebnisse. Dies dürfte allerdings eher durch eine geringe Sensitivität des Modells MAGICC auf diese Einflussgröße begründet sein, als auf die tatsächliche Bedeutung dieses Faktors.

5. Zusammenfassung

Im Rahmen der hier dargestellten Untersuchungen wurde erstmalig für ein deutsches Flussgebiet versucht, die Unsicherheiten von Modellrechnungen der Klimamodelle in Hinblick auf die resultierenden Unsicherheiten von Abflussveränderungen zu quantifizieren. Im Ergebnis zeigt sich eine deutliche Tendenz zu Abflussverminderungen für das betrachtete Einzugsgebiet der oberen Donau in Auswertung der Gesamtheit der 25.000 durchgeführten Szenariountersuchungen.

Die Ergebnisse relativieren sich in ihrer Aussagefähigkeit sehr stark, wenn die Szenarien unter Beachtung der jeweils verwendeten Modelle verglichen werden. Je nach dem verwendeten Modell ergeben sich sehr große Unterschiede hinsichtlich der jeweils berechneten Niederschlags- und Temperaturänderungen, sowie der resultierenden Abflussveränderungen. Weitere, gravierende Unsicherheiten ergeben sich aus den spezifischen Annahmen der Modelle, die hier unter dem Begriff der „Klimasensitivität“ zusammengefasst wurden. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt erscheint es somit nicht sinnvoll, einzelne Klimaszenarien als planungsrelevante Aussagen in Hinblick auf die zukünftigen hydrologischen Verhältnisse zu analysieren, da die regionalen Veränderungen auf der Grundlage der globalen Klimamodelle sehr unterschiedlich beurteilt werden.

Die durchgeführten Untersuchungen belegen, dass für das hier betrachtete Einzugsgebiet die Möglichkeit einer Verringerung der Verfügbarkeit der Ressource „Wasser“ nach derzeitigem Kenntnisstand stärker ausgeprägt ist, als die Möglichkeit deren Zunahme. Eine weitergehende Vorhersage der zu erwartenden Veränderungen ist nach Auffassung der Autoren infolge der vielfältigen Unsicherheiten der hierzu erforderlichen Annahmen jedoch nicht möglich. Der Umstand, dass die resultierenden regionalen Auswirkungen des anthropogen bedingten Treibhauseffektes heute noch nicht mit hinreichender Sicherheit beurteilt werden können, zeigt zu dem die beschränkten Kenntnisse zum Verhalten des Klimasystems der Erde. Diese fehlenden Kenntnisse stehen in einem eklatanten Widerspruch zu den vielfältigen und weitgehend unregulierten menschlichen Aktivitäten, die potentiell Einfluss auf das Klima der Erde besitzen.

Danksagung:

Für die Bereitstellung der Klimaszenarien danken wir unserem EU- Projektpartner von der Climate Research Unit der University of East Anglia in Norwich, Großbritannien, unter Leitung von Mike Hulme, für die Datenbereitstellung für das Donaugebiet dem DWD und der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg.



6. Literatur

- Arnell N.W., Reynard N.S., (1996) The effects of climate change due to global warming on river flows in Great Britain, *J. Hydrology* (183)3-4 (1996) pp. 397-424
- Bultot, F.; Dupriez, G.L., Gellens, D. (1990) Simulation of land use changes and impacts on the water balance.- A case study for Belgium *Journal of Hydrology*, 114, p. 327-348
- Enquete-Kommission (1990): Bericht der Enquete-Kommission des 11. Deutschen Bundestages "Vorsorge zum Schutz der Erdatmosphäre" 3, Zur Sache 90,19, Dt. Bundestag, Referat Öffentlichkeitsarbeit
- Gleick, Peter H. (1987): The Development and Testing of a Water Balance Model for Climate Impact Assessment: Modeling the Sacramento Basin, *Water Resources Research* Vol.23 (1987) No.6, p.1049-1061
- IPCC (1990): Climate Change, The IPCC Scientific Assessment, Intergovernmental Panel on Climate Change, Eds. Houghton, J.T.; Jenkins, G.J.; Ephraums, J.J., Cambridge University Press 1990
- Mimikou M.A., Baltas E., Varanou E., Pantazis K., (2000) Regional impacts of climate change on water resources quantity and quality indicators, *Journal Of Hydrology* (234)1-2 (2000)
- Schumann, A.H.; Geyer, J. (2000) GIS-based ways for considering spatial heterogeneity of catchment characteristics, *Physics and Chemistry of the Earth, Part B*, (25) 7-8, p. 691-694, 2000
- Storch, von, Hans; Güss, Stefan, Heimann, Martin (1999) *Das Klimasystem und seine Modellierung*, Springer- Verlag Berlin
- Treut Herve le, (1999) Global hydrological changes associated with a perturbation of the climate system: the role of atmospheric feedbacks, their uncertainty and their validation, *Advances In Water Resources* (23)2 (1999) pp. 121-131
- Wilby R.L., Hay L.E., Leavesley G.H., (1999) A comparison of downscaled and raw GCM output: implications for climate change scenarios in the San Juan River basin, Colorado, *Journal Of Hydrology* (225)1-2 (1999) pp. 67-91