

REGIONALE AUSWIRKUNG DER KLIMAÄNDERUNG AUF DIE WASSERVERFÜGBARKEIT IN KLIMASENSITIVEN GEBIETEN

Harald Kunstmann, Garmisch-Partenkirchen

1. Das Problem

Wasser hat eine zentrale Bedeutung für Mensch und Umwelt. Wasser formt Landschaften und seine jahreszeitliche Verfügbarkeit prägt Flora und Fauna. Die Bewältigung von zu viel, zu wenig oder zu schmutzigem Wasser begleitet die gesamte menschliche Kulturgeschichte. Mit der globalen Klimaänderung verändert sich der Wasserkreislauf, insbesondere die Quelle erneuerbaren Süßwassers, nämlich der Niederschlag. Grund ist die mit der globalen Erwärmung einhergehende Intensivierung des Wasserkreislaufs: Einerseits kann die Luft durch die erhöhte Atmosphärentemperaturen generell mehr Feuchtigkeit aufnehmen – was zu größeren Niederschlagsintensitäten führen kann –, andererseits wird durch die erhöhten Verdunstungsraten der Atmosphäre mehr latente Wärmeenergie zugeführt, die bei der Kondensation wieder frei wird. Dies führt zu vergrößerten atmosphärischen Energieumsätzen. In manchen Regionen sind heftigere Niederschläge, in anderen aber entgegengesetzte Extreme, nämlich längere und häufigere Trockenperioden und Dürren die Folge. Die Abschätzung der zukünftigen räumlichen und zeitlichen Verteilung der terrestrischen Wasserverfügbarkeit gehört zu den zentralen wissenschaftlichen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts (WBGU, 1997). Dies gilt insbesondere für klimasensitive Gebiete, in denen bereits geringe Änderungen der großskaligen atmosphärischen Randbedingungen zu erheblichen regionalen Auswirkungen auf Niederschlag und Abflussverhalten führen können.


2. Wasserkreislauf und terrestrischer Wasserhaushalt

Das Wasser auf der Erde befindet sich in einem ständigen Kreislauf. Wasser verdunstet aus den Meeren und über den Kontinenten und gelangt so in die Atmosphäre. Der Wasserdampf steigt auf, bildet Wolken, und das Wasser fällt als Regen, Hagel oder Schnee wieder auf die Erde. Sonneneinstrahlung, Schwerkraft und Erdrotation bewirken den großskaligen Transport und die Phasenumwandlungen des Wassers. Ein Teil des Niederschlags über den Landmassen wird

von der Vegetation aufgefangen und gelangt über die Evapotranspiration zurück in die Atmosphäre. Fällt der Niederschlag auf die Erde, so verdunstet auch hiervon ein Teil. Der Rest versickert im Erdreich, wo er langsam bis zum Grundwasser durchsickert oder hangabwärts fließt. So werden Flüsse und Seen gespeist, die wiederum das Wasser bis in die Meere transportieren. Die Erde ist nach heutigem Wissen der einzige Planet, auf dem Wasser in größeren Mengen und in allen drei Aggregatzuständen – gasförmig, flüssig und fest – vorkommt. Die Erdoberfläche wird von Wasser dominiert: Weltmeere, Eisflächen, Seen, Flüsse und Feuchtgebiete ergeben eine Wasserbedeckung von 75 %. Der gesamte Vorrat an Wasser auf unserem „blauen Planeten“ ist riesig (etwa 1,56 Milliarden km³, das entspricht einem Würfel mit einer Kantenlänge von rund 1.100 km), jedoch ist mit über 94 % der größte Anteil Salzwasser der Ozeane und nur 6 % sind als Süßwasser auf den Kontinenten zu finden. Der größte Teil der gesamten Süßwasservorkommen ist tiefes Grundwasser (65 %) oder in Gletschern und Eismassen gebunden (ca. 30 %) und damit für den Menschen nicht zugänglich. Die nutzbaren Süßwasservorräte aus Flüssen und Seen machen nur 0,35 % des gesamten Süßwassers aus (z.B. Lozán et al., 2005).

3. Wasserverfügbarkeit und Weltwasserverbrauch

Über den Landmassen fallen pro Jahr etwa 110.000 km³ Niederschläge (das entspricht einem Würfel mit einer Kantenlänge von 48 km). Davon verdunsten jährlich etwa 50.000 km³ aus natürlicher Vegetation und den Böden und weitere 18.000 km³ aus Regenfeldanbau landwirtschaftlich genutzter Flächen. Die übrigen 42.000 km³ sammeln sich in Flüssen, wovon aber nur 13.000 km³ für den Menschen zugänglich sind (letzteres entspricht einer Würfelkantenlänge von 23 km). Davon werden wiederum 2.000 km³ zur Bewässerung in der Landwirtschaft eingesetzt, wo sie verdunsten (Postel et al., 2006; Lozán et al., 2005). Weiterhin wird pro Jahr etwa 800 km³ Süßwasser aus Grundwasserleitern entnommen (Kunstmann und Kinzelbach, 1998). Etwa ein Viertel dieser Entnahmen ist nicht nachhaltig in dem Sinne, dass diese langfristig unter den heutigen klimatischen Bedingungen nicht durch Neubildung ersetzt werden. Sie führen also zu einer kontinuierlichen Zehrung der unterirdischen Wasserspeicher. Die durch den menschlichen Eingriff auf landwirtschaftlich genutzten Flächen verdunstete Wassermenge (20.000 km³ insgesamt) hat also schon fast die Hälfte der Verdunstungsmengen natürlicher Ökosysteme erreicht (50.000 km³). Dies zeigt, dass die Landwirtschaft



hinsichtlich des verfügbaren Süßwassers ein starker Konkurrent für die natürliche Vegetation ist. Der globale Wasserverbrauch durch Landwirtschaft, Industrie und Haushalte wird derzeit auf etwa 4.200 km³ pro Jahr geschätzt (das entspricht einem Würfel mit einer Kantenlänge von 16 km). Davon entfallen 70 % auf die Landwirtschaft. Der Vergleich mit den zugänglichen erneuerbaren Süßwasserreserven (13.000 km³) zeigt, dass der Mensch bereits jetzt 1/3 aller zugänglichen Süßwasserressourcen nutzt. Diese Zahlen stellen Mittelwerte über Zeit und Raum dar, so dass regional starke Verteilungsunterschiede bestehen, denn z.B. werden Dürren gegen Überschwemmungen gemittelt.

Stellt man diesen Nutzungsgrad der begrenzten Ressource Süßwasser von 1/3 der exponentiellen Zunahme der Weltbevölkerung gegenüber (es wird eine Zunahme um weitere 3 Milliarden von 2000 bis 2050 auf 9 Milliarden erwartet) und berücksichtigt zusätzlich den überproportionalen Anstieg des Wasserverbrauchs (im 20. Jahrhundert gab es eine Versechsfachung des Wasserverbrauchs bei einer Verdreifachung der Weltbevölkerung), so wird deutlich, warum verstärkt von einer Weltwasserkrise gesprochen wird. Es zeigt ebenso, warum der nachhaltige Umgang mit der Ressource Wasser zu den großen Herausforderungen der Gegenwart und der nahen Zukunft gehört.

Ein nachhaltiges Wassermanagement erfordert Abschätzungen der zukünftigen räumlichen und zeitlichen Verteilung der Niederschläge sowie der oberflächlichen Abflüsse. Die zukünftige Wasserverfügbarkeit wird aber von der globalen Klimaänderung beeinflusst, da das Wasser selbst zentraler Teil des Klimasystems ist. Verlässliche Abschätzungen zukünftiger Niederschlags- und Abflussverteilungen erfordern die Berücksichtigung der komplexen Rückkopplungsmechanismen zwischen Wasser und Klima.

4. Wasser in der Atmosphäre und im Klimasystem

Von den Komponenten im Erdsystem, die das Klima der Erde bestimmen, ist die Atmosphäre diejenige mit der höchsten Mobilität. Mit einer typischen Zeitskala von etlichen Tagen zwischen Verdunstung und Niederschlag, stellt der atmosphärische Wasserkreislauf die Verbindung zu den langsam reagierenden Reservoirs „Ozean“ und „Eis“ dar. Der atmosphärische Wasserkreislauf besteht aus dem Transport von Wasserdampf sowie aus den Phasenumwandlungen zu flüssigen und festen Wasserpartikeln in den Wolken, die mit großen Energieumwandlungen und -flüssen

verbunden sind. Obwohl die Atmosphäre nur 0,001 % des auf der Erde verfügbaren Wassers enthält und der Massenanteil des gasförmigen Wassers an der Zusammensetzung der realen Atmosphäre im Mittel nur 0,25 % beträgt, kommt dem atmosphärischen Wasser eine besondere Bedeutung im Klimasystem zu. Wasserdampf absorbiert und emittiert sehr effektiv im infraroten Strahlungsspektrum und stellt das wichtigste Treibhausgas in der Atmosphäre dar. Ohne Treibhausgase würde die mittlere Temperatur an der Erdoberfläche nicht ca. 15°C, sondern -15 bis -18°C betragen. Zu diesem natürlichen Treibhauseffekt von ca. 30 bis 33°C trägt der Wasserdampf in der Troposphäre (das ist die Atmosphäre bis ca. 10 km Höhe) mit etwa 20,6°C bei.

Abschätzungen der aufgrund der anthropogenen Treibhausgas-Emissionen und der damit verbundenen globalen Erwärmung veränderten Wasserverfügbarkeit erfordern daher die genaue Kenntnis und die Quantifizierung der Prozesse des atmosphärischen Wasserkreislaufs und ihrer Wechselwirkung mit der Landoberfläche und den Ozeanen. Zur Quantifizierung werden Klimamodelle eingesetzt, die physikalische Erhaltungsgleichungen (z.B. für Masse, Energie und Impuls) und physikalische Zustandsgleichungen (z.B. die Gasgleichung) bei gegebenen Anfangs- und Randbedingungen numerisch lösen.

5. Regionale Projektionen zukünftiger Wasserverfügbarkeit

Globale Klimamodelle können aufgrund ihrer geringen räumlichen Auflösung (im Allgemeinen mehrere Hundert Kilometer) nur großräumig gültige, regional wenig differenzierte Aussagen über meteorologische Größen liefern. Sie sind nicht in der Lage, die für die regionale Klimaausprägung oder Wetterentwicklung wichtigen Einflussfaktoren wie z.B. Küstenform, Höhenlage, Lee- oder Luvbereich ausreichend detailliert zu erfassen. Die Vorhersagen globaler Modelle müssen daher mit Hilfe statistischer oder physikalisch-dynamischer Verfahren in entsprechende regionale Muster umgesetzt werden. Die konsequenteste aber auch aufwändigste Methode der Regionalisierung ist das „Nesten“ eines regionalen Meteorologiemodells in ein antreibendes globales Modell (Abb. 1). Bei diesem so genannten explizit-dynamischen *Downscaling* simuliert das regionale Modell für einen ausgewählten Zeitraum kontinuierlich den Wetterablauf über einen Teilbereich der Erdoberfläche, wobei es die an den seitlichen Rändern benötigten Informationen aus dem antreibenden globalen Klimamodell bezieht. Aufgrund der räumlichen Beschränkung ist eine deutlich höhere Modellauflösung

möglich, und zwar bis in die Größenordnung von etlichen Kilometern. Im globalen Modell simulierte und in den „genesteten“ Modellbereich „einwandernde“ Strukturen können daher eine der höheren Auflösung

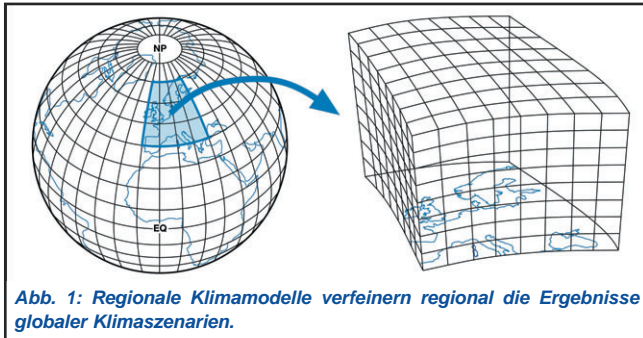


Abb. 1: Regionale Klimamodelle verfeinern regional die Ergebnisse globaler Klimaszenarien.

entsprechende regionale Ausprägung annehmen. Erst so ist die Modellierung des Einflusses topografischer Details möglich wie z.B. Land-Seewind-Zirkulationen, Berg-Talwindssysteme, Stau- oder Föhnlagen.

Um den Einfluss der atmosphärischen Änderung auf den terrestrischen Wasserhaushalt einzelner Einzugsgebiete abzuschätzen, werden mittels der prognostizierten meteorologischen Felder anschließend regionale Wasserhaushaltsmodelle angetrieben, die detailliert eine räumliche und zeitliche Änderung der Abflusskomponenten, der Schneespeicher, der Verdunstung, der Bodenfeuchte bis hin zur Grundwasserneubildung im Detail erlauben (Abb. 2).

Die hydrologischen Modelle werden dabei häufig in räumlich höheren Auflösungen als die regionalen Klimamodelle betrieben. Die Gitterpunkte des regionalen Klimamodells werden dabei als fiktive meteo-

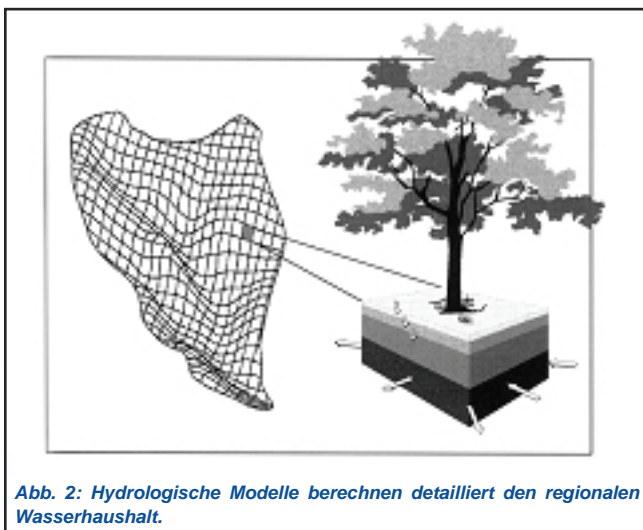


Abb. 2: Hydrologische Modelle berechnen detailliert den regionalen Wasserhaushalt.

rologische Stationen aufgefasst, und die simulierten Zustandsvariablen Niederschlag, Temperatur, Wind, Feuchte und Globalstrahlung auf die Gitterpunkte des hydrologischen Modells interpoliert.

Da Änderungen des regionalen Klimas signifikant vom allgemeinen Trend des globalen Klimawandels abweichen können, müssen regionale Untersuchungen durchgeführt werden. Dies kann nur durch hoch aufgelöste regionale Simulationen erreicht werden. Die wissenschaftlichen Herausforderungen für dieses Unterfangen sind 1) die exakte Wiedergabe des beobachteten derzeitigen Klimas in regionalen Klimamodellen, 2) die korrekte Transformation atmosphärischer Änderungen in Änderungen des terrestrischen Wasserhaushalts und 3) die Quantifizierung von Unsicherheiten sowie die Identifizierung und Trennung von Klimaänderungssignal und natürlicher Variabilität (z.B. Rauschen).

Die folgende Analyse konzentriert sich auf zwei wasserarme Regionen, in denen eine Änderung der Wasserverfügbarkeit mit enormen sozioökonomischen Auswirkungen verbunden ist:

- Das Voltabecken in Westafrika (Ghana und Burkina Faso) und
- das Einzugsgebiet des Oberen Jordan im Mittleren Osten (Israel, Libanon, Syrien).

6. Zukünftige Wasserverfügbarkeit in Westafrika und im Voltabecken

Der jährliche Niederschlag variiert in Afrika räumlich stark zwischen 10 mm in der inneren Sahara und über 2000 mm in den tropischen Gebieten beiderseits des Äquators. Besonders ausgeprägt ist der regionale Niederschlagsgradient am Südrand der Sahara - in der so genannten Sahel-Zone in Westafrika - wo sich der mittlere jährliche Niederschlag auf einer Distanz von 750 km um mehr als 1000 mm ändert. Die bekannte Sahel-Dürre in den 1970er und 1980er Jahren ist durch viele Untersuchungen gut belegt (z.B. Neumann et al.,

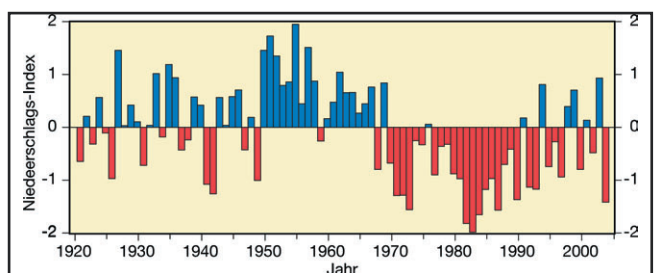


Abb. 3: Abweichungen der jährlichen Niederschlagsmengen vom Mittelwert im Sahel im 20. Jahrhundert [Einheit: Standardabweichungen].

2007). Die extreme Abnahme der Niederschläge in der Sahelzone seit Ende der 1960er Jahre ist im 20. Jahrhundert weltweit einmalig. Gegenüber der Periode 1931-1960 hat der mittlere Niederschlag in der Zeit von 1970 bis 1990 um 20-49 % abgenommen. Seit den 1990er Jahre fielen in manchen Jahren zwar überdurchschnittlich viele Niederschläge, ohne dass sich jedoch ein neuer Trend abzeichnet und die Dürreverhältnisse beendet wären, wie u.a. das Jahr 2004 belegt (Abb. 3)

Außerdem wird für ein Teilgebiet Westafrikas – das Voltabecken – abgeschätzt, welche Folgen die zukünftig erwartete Klimaänderung regional für den Wasserhaushalt haben kann.

Das Volta Einzugsgebiet in Westafrika besitzt eine Fläche von rund 400.000 km² und erstreckt sich vom Süden Burkina Fasos nach Ghana mit angrenzenden Teilen Togos, Benins, Malis und der Elfenbeinküste (Abb. 4).

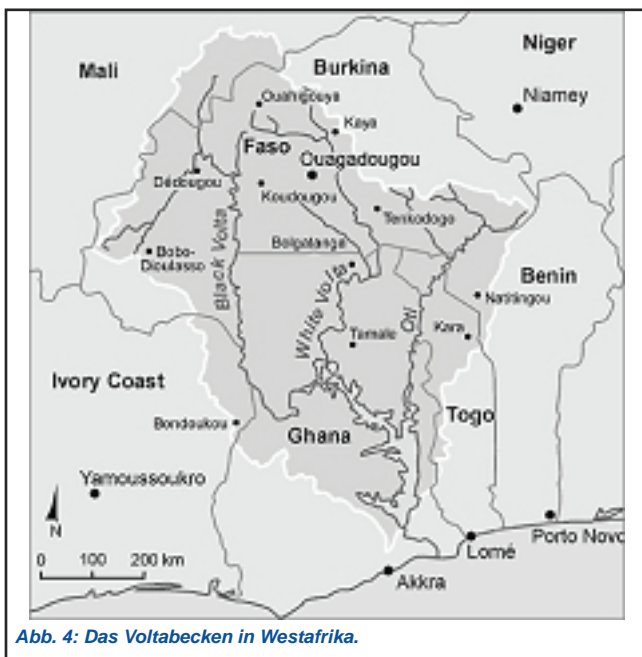


Abb. 4: Das Voltabecken in Westafrika.

Zur Abschätzung der zukünftigen Wasserverfügbarkeit wurden zwei Zeitreihen (1991-2000 und 2030-2039) des globalen Klimamodells ECHAM4 mit dem Emissionsszenario IS92a („business as usual“) mittels des regionalen Modells MM5 dynamisch auf eine Auflösung von 9x9 km² herunterskaliert (Jung und Kunstmann, 2007; Kunstmann et al., 2007a). Die hohe erzielte Güte des regionalen Klimamodells bei der Reproduktion des rezenten Klimas zeigt die Abbildung. 5.

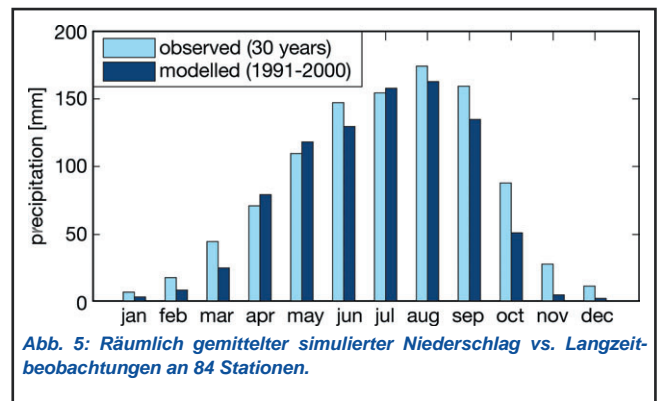


Abb. 5: Räumlich gemittelter simulierter Niederschlag vs. Langzeitbeobachtungen an 84 Stationen.

Der simulierte Anstieg der Temperatur während der Trockenzeit beträgt ca. 1°C, dagegen wird während der Regenzeit ein Anstieg von bis zu 2°C beobachtet. Der erwartete mittlere jährliche Temperaturanstieg (Abb. 6) ist in den Küstengebieten am geringsten (~ 1°C) und steigt in Richtung Norden des Beckens an (um 1,7°C in der Sahelzone).

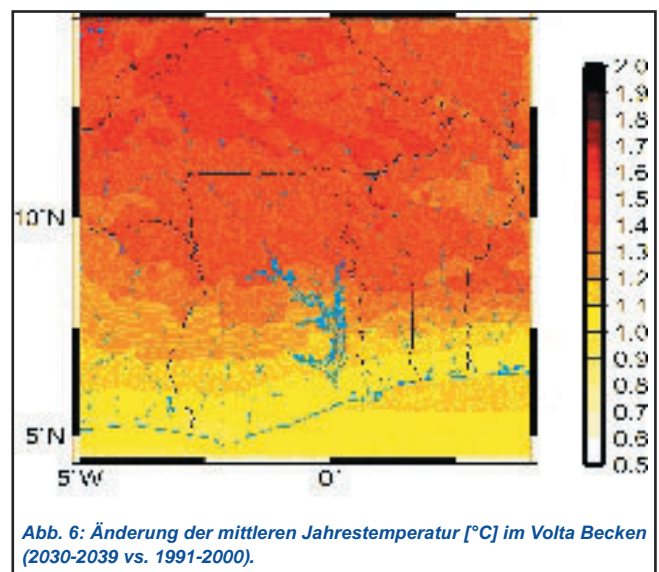
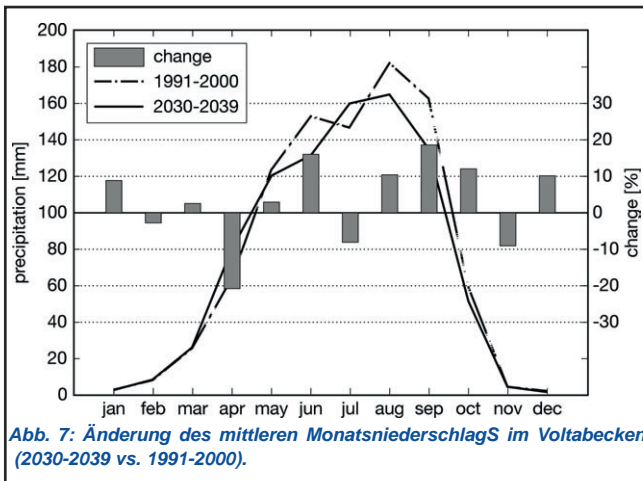


Abb. 6: Änderung der mittleren Jahrestemperatur [°C] im Volta Becken (2030-2039 vs. 1991-2000).

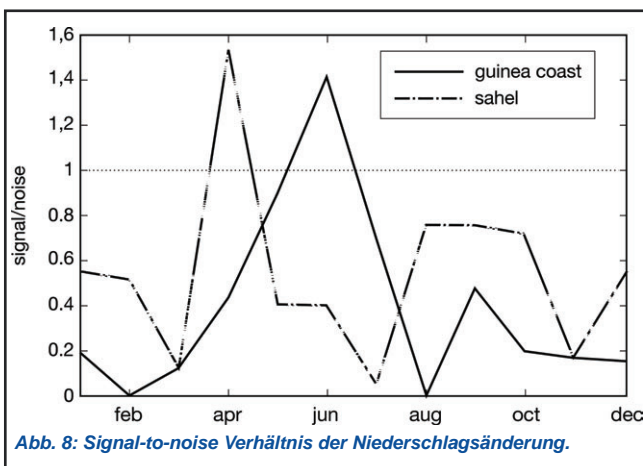
Es wird ein geringfügiger Anstieg des jährlichen Gesamtniederschlags um 5 % festgestellt, aber auch ein signifikanter Rückgang des Niederschlages im April (20 %, in manchen Gebieten sogar bis zu 70 %), der den Übergang von der Trocken- zur Regenzeit markiert (Abb. 7).

Die Gesamtdauer der Regenzeit ist verkürzt. Dieser Trend wird durch Zeitreihenanalysen von 28 Stationen innerhalb des Beckens gestützt, für die eine Verzögerung des Einsetzens der Regenzeit von bis zu 30 Tagen während der letzten 40 Jahre nachgewiesen



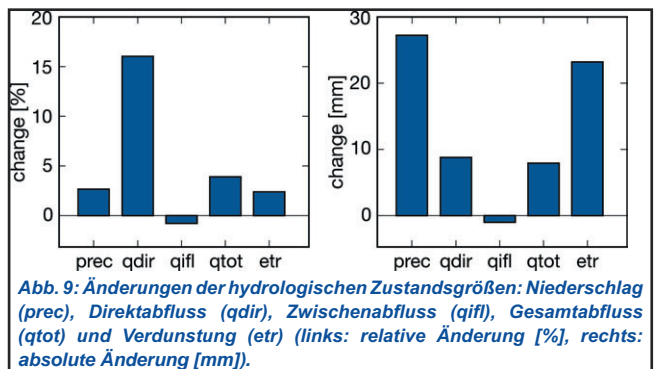
wurde (Laux et al., 2007).

Die Signifikanz der Niederschlagsänderung wird durch das *Signal-to-Noise* Verhältnis (SN), also das Verhältnis von Signal und Rauschen, analysiert. Dabei wird die simulierte regionale Klimavarianz berücksichtigt. Wird zwischen der Sahelzone und der ghanaischen Küste unterschieden, so werden hohe Verlässlichkeitswerte ($SN > 1$) im April für den Sahel und im Juni für die Küstenregion ermittelt (Abb. 8).



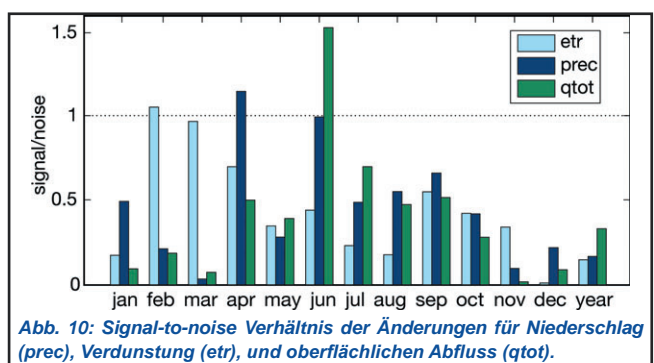
Langzeitplanungen im Wassermanagement benötigen Aussagen über zu erwartende Abänderungen des terrestrischen Wasserhaushalts, besonders der Abflüsse und der Grundwasserneubildung. Zu diesem Zweck wurde ein flächendifferenziertes hydrologisches Modell für das Voltabecken mit einer räumlichen Auflösung von $1 \times 1 \text{ km}^2$ aufgesetzt, kalibriert und validiert. Basierend auf den Ergebnissen der beiden dynamisch regionalisierten Zehnjahreszeitreihen wurde das

hydrologische Modell mit den jeweiligen meteorologischen Feldern angetrieben und die Änderungen der Komponenten des terrestrischen Wasserhaushalts wurden analysiert. Abbildung 9 zeigt die nichtlineare Reaktion der Abflusskomponenten und der Evapotranspiration in Bezug auf den Niederschlag im Untersuchungsgebiet. Der Großteil des Zugewinns an Niederschlag im Voltabecken geht durch erhöhte Evapotranspiration wieder verloren.



Dies erklärt sich durch höhere Temperaturen des zukünftigen Klimas, die zu einer erhöhten potentiellen Verdunstung und bei ausreichender Bodenfeuchte auch zu einem Anstieg der realen Evapotranspiration führen. Nur ein kleiner Betrag der erhöhten Niederschlagssummen geht in einen zusätzlichen Direktabfluss über.

Das *Signal-to-Noise* Verhältnis in Abbildung 10 zeigt an, dass der über das Untersuchungsgebiet gemittelte Niederschlag nur im April und die Evapotranspiration nur im Juni einen Wert von $SN > 1$ aufweist.



Zusammenfassend kann gefolgert werden, dass zukünftig hauptsächlich der Rückgang des Niederschlags im April und der verspätete Beginn

der Regenzeit die Vulnerabilität landwirtschaftlicher Aktivitäten erhöhen.

Im Folgenden wird für eine weitere prominente Region eine Abschätzung der zukünftigen Wasserverfügbarkeit vorgestellt.

7. Zukünftige Wasserverfügbarkeit im mittleren Osten und im Oberen Jordan Einzugsgebiet

Das Einzugsgebiet des Oberen Jordans (*Upper Jordan Catchment*, kurz: UJC) besitzt eine Fläche von 855 km²; was nur einen kleinen Teil des gesamten Jordaneinzugsgebietes darstellt (18.200 km²). Trotz der geringen Größe ist das Einzugsgebiet des Oberen Jordans von großer Bedeutung, da es den Großteil des jährlichen Gesamtabflusses und zudem 1/3 der Süßwasserreserven Israels liefert. Das UJC befindet sich im Grenzgebiet Israels, Syriens, der Golanhöhen und dem Libanon (Abb. 11). Das Gebiet ist in die Teileinzugsgebiete der drei Quellflüsse Snir im Westen, Dan im Zentrum und Banias im Osten unterteilt. Ihre

Quellen befinden sich an den westlichen und südlichen Hängen am Fuße des Hermons (2814 m über N.N.). Zur Abschätzung der künftigen Wasserverfügbarkeit wurden zwei Zeitreihen (1961-1990 und 2070-2099) mit dem Emissionsszenario B2 vom Globalen Klimamodell ECHAM4 dynamisch auf eine Auflösung von 18 x 18 km² mit dem regionalem Modell MM5 regionalisiert (*Kunstmann et al., 2007b*). Die erzielte Güte des regionalen Klimamodells bei der Reproduktion des rezenten Klimas der Region zeigt Abbildung 12.

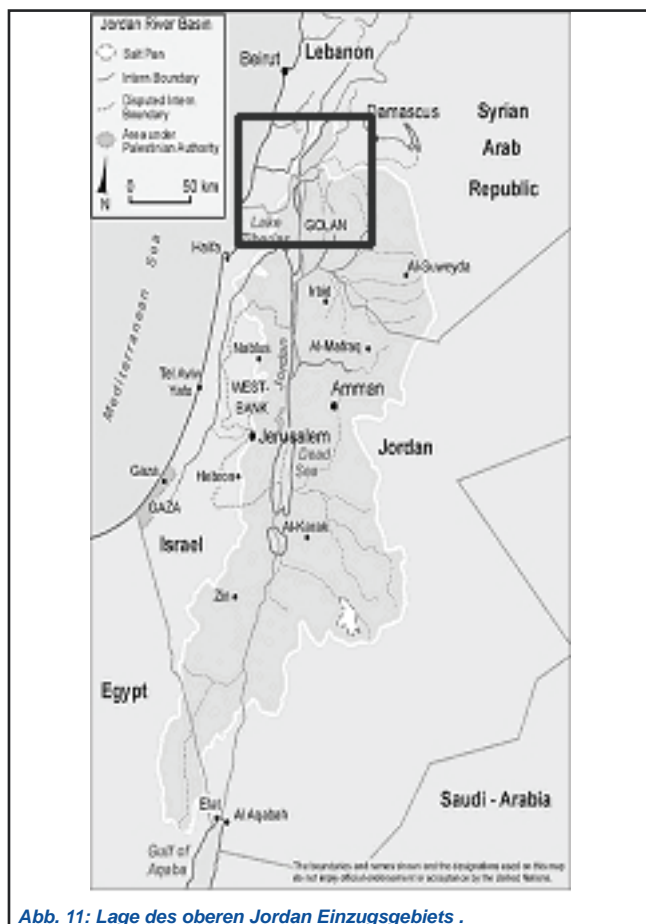


Abb. 11: Lage des oberen Jordan Einzugsgebiets .

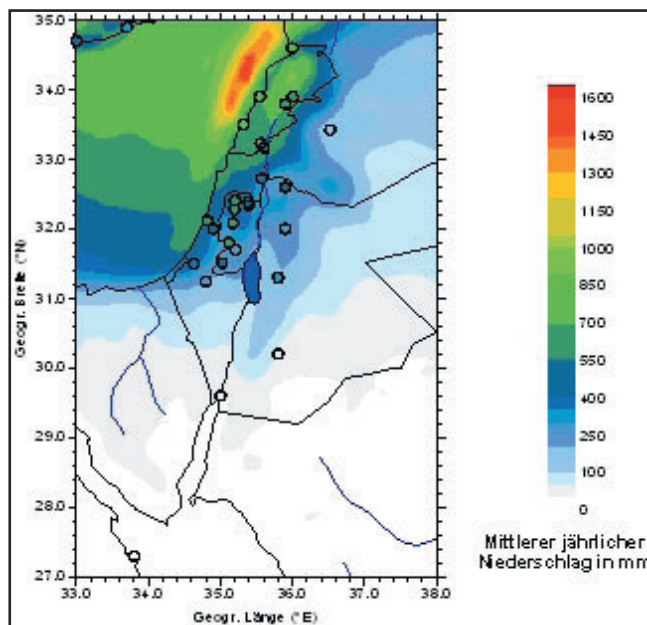


Abb. 12: Simulierter mittlerer Jahresniederschlag (1961-1990) in 18x18 km² Auflösung vs. Langzeit Stationsbeobachtung [mm].

Trotz des großen Niederschlagsgradienten zwischen dem mediterranen Klima an der israelischen Küste und dem ariden Wüstenklima im Südosten des Domains zeigen der simulierte mittlere jährliche Niederschlag und die Langzeitmessungen an den Stationen gute Übereinstimmungen.

In Abbildung 13 sind die erwarteten Temperatur- und Niederschlagsänderungen dargestellt. Neben einer Zunahme der Jahresmitteltemperatur von bis zu 4°C in der Region, ist auch ein genereller Trend zu einer Abnahme der Niederschläge erkennbar. Die größten Rückgänge werden für das Zentrum Jordaniens (bis zu -40 %) erwartet, während nur geringe Änderungen (unter 10 %) für die Küstenregionen erwartet werden. Ebenso wie bei den Untersuchungen für das Voltabecken wurde auch hier der Einfluss angenommener Klimaänderungen auf die Wasserverfügbarkeit im UJC durch gekoppelte Klima-Hydrologie-Simulationen

analysiert. Zu diesem Zweck wurde ein flächendifferenzierendes hydrologisches Modell mit einer räumlichen Auflösung von 90 x 90 m² angewandt. Um der komplexen Hydrologie, den tiefen Aquiferen und der Interaktion zwischen Grund- und Oberflächenwasser gerecht zu werden, wurde die untere Grenze (d. h. die

maximale Ausdehnung der ungesättigten Zone) auf 100 m unter der Geländeoberfläche gesetzt.

Änderungen in den mittleren Monatsniederschlägen innerhalb des UJC zeigt Abbildung 14. Besonders für die Winterniederschläge wird eine Abnahme von bis zu 35 % angenommen. Es wird erwartet, dass es das ganze Jahr über zu einer Reduzierung der Oberflächenwasserverfügbarkeit kommt. Ebenso wie bei den

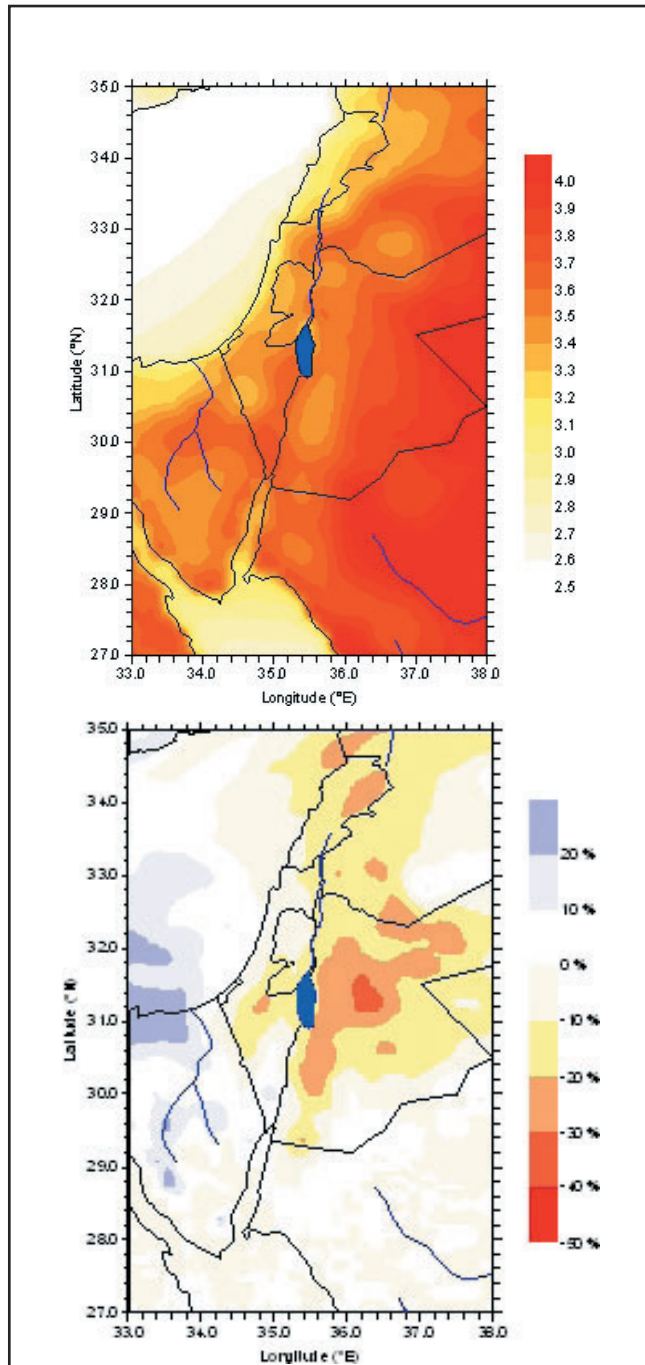


Abb. 13: Erwartete absolute Änderungen der Jahresmitteltemperatur [°C] (oben) und relative Änderungen des mittleren Jahresniederschlags [%] (unten) (2070-2099 vs. 1961-1990).

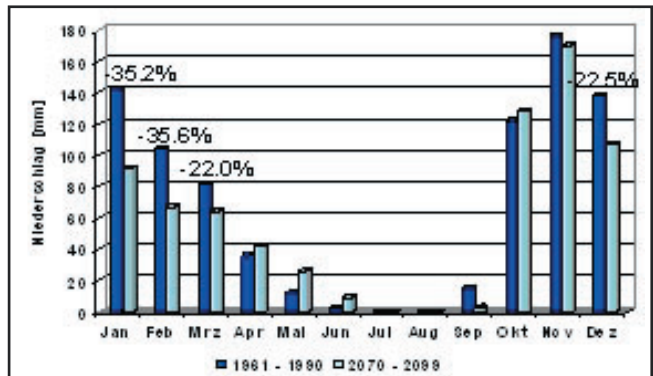


Abb. 14: Änderungen der mittleren monatlichen Niederschläge im UJC.

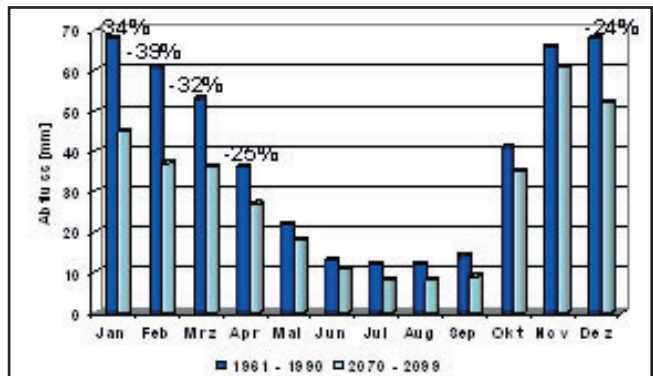


Abb. 15: Änderungen im mittleren monatlichen Gesamtabfluss im UJC.

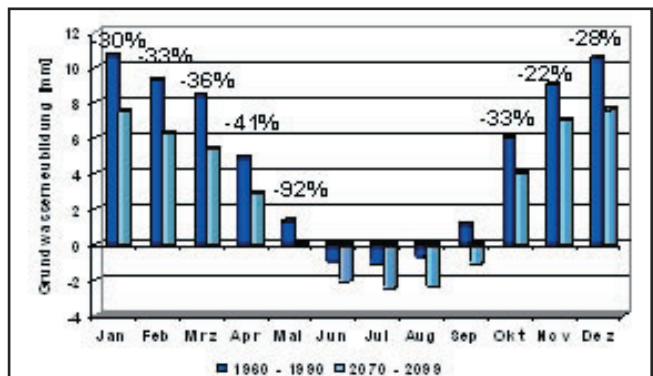


Abb. 16: Änderungen in der mittleren monatlichen Grundwasserneubildung im UJC.

Änderungen im Niederschlag fällt auch die größte relative Abnahme der Abflüsse in die Regensaison von Dezember bis April (Abb. 15).

Als Folge der abnehmenden Niederschläge, der Temperaturzunahme und der erhöhten Evapotranspiration ist mit einem starken Rückgang der Grundwasserneubildung zu rechnen (Abb. 16). Negative absolute Neubildungsraten (siehe die Monate Juni, Juli und August) weisen auf vertikale Wasserbewegungen entgegen der Schwerkraft von der gesättigten Zone (Grundwasserleiter) zur darüber liegenden ungesättigten Zone entsprechend des kapillaren Aufstiegs hin. Die Ergebnisse deuten also auf eine insgesamt signifikante Abnahme der Wasserverfügbarkeit in der ohnehin schon extrem wasserarmen Region hin.

8. Schlussbetrachtung

Die mit der globalen Erwärmung einhergehenden regionalen Veränderungen der Wasserverfügbarkeit können die durch den Bevölkerungszuwachs bedingte Zunahme von Wasserknappheit noch weiter verstärken. Hinzu kommt, dass mit höheren Temperaturen auch die Wassernachfrage weiter steigt. Der Klimawandel wird aber nicht nur die Wassermenge, sondern auch die Wasserqualität beeinflussen.

Die Wissenschaft arbeitet an der Entwicklung von fundierten Entscheidungsunterstützungssystemen die es erlauben, Anpassungsstrategien an den Klimawandel zu entwickeln. Dies betrifft nicht nur das hier diskutierte „zu wenig“ an Wasser, sondern auch das „zu viel“, nämlich die sich verändernden Hochwasserrisiken. In der Tendenz ist zu erwarten, dass trockene Gebiete noch trockener werden und feuchte Gegenden noch feuchter.

Moderne Werkzeuge der Hydrologie und Klimaforschung wie hochaufgelöste Modellierung und Fernerkundung helfen in Regionen mit schwacher Infrastruktur bei der Quantifizierung der Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserverfügbarkeit und der Beurteilung der Nachhaltigkeit gegenwärtiger Praktiken und zukünftig geplanter Anpassungsstrategien. Nachhaltige Anpassungsstrategien an den Klimawandel und die damit verbundene veränderte Wasserverfügbarkeit werden teils schmerzhaft Anpassungsprozesse erfordern.

Literatur

- Jung, G., Kunstmann H. (2007): High-Resolution Regional Climate Modelling for the Volta Basin of West Africa, *Journal of Geophysical Research*, in press
- Kinzelbach, W., Kunstmann, H. (1998): Nachhaltige

Grundwassernutzung: Kriterien und Strategien, *Spektrum der Wissenschaft*, April 1998.

Kunstmann, H., Jung, G., Wagner, S., Clotey, H. (2007a) Integration of atmospheric sciences and hydrology for the development of decision support systems in sustainable water management, *Physics and Chemistry of the Earth*, doi:10.1016/j.pce.2007.04.010

Kunstmann, H., Suppan, P., Heckl, A., Rimmer, A. (2007b), Regional climate change in the Middle East and impact on hydrology in the Upper Jordan catchment, *IAHS publication 313, Quantification and reduction of predictive uncertainty for sustainable water resources management*, in press

Laux, P., Kunstmann, H., Bárdossy, A. (2007): Predicting the Regional Onset of the Rainy Season in West Africa. *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.1542

Lózan, J., Graßl, H., Hupfer, P., Menzel, L., Schönwiese, C. D. (Hrsg.) (2005), *Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle?*, Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg, 400 Seiten

Neumann, R., Jung, G., Laux, P., Kunstmann, H. (2007) Climate trends of temperature, precipitation and river discharge in the Volta Basin of West Africa, *International Journal of River Management*, Vol. 5, issue 1, 17-30.

Postel, S., Daily, G. C., Ehrlich, P. R. (1996), Human appropriation of renewable freshwater resources, *Science*, 271, 785-788

WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung, globale Umweltveränderungen) (1997), *Wege zu einem nachhaltigen Umgang mit Süßwasser*, www.wbgu.de