



### 3.1.8 Die Niederschlagsentwicklung im mediterranen Raum und ihre Ursachen

JUCUNDUS JACOBET, ARMIN DÜNKELOH & ELKE HERTIG

*Mediterranean rainfall changes and their causes: Based on an improved version of the CRU monthly rainfall grids, trends in Mediterranean precipitation for the 1951-2000 period are calculated on a seasonal scale. The most important characteristic is the widespread rainfall decrease during the winter half year which is linked to particular changes in atmospheric circulation patterns identified by canonical correlation analyses: a shift to preferred positive modes of the NAO-linked Mediterranean Oscillation since the 1980s, a weakening of the central Mediterranean trough since the late 1980s, and a modal change since the 1970s implying increased pressure in the Mediterranean area. Statistical downscaling assessments for enhanced greenhouse warming conditions at the end of the 21st century indicate some different further developments: rainfall increases in high winter and decreases in spring and autumn for western and northern Mediterranean regions, but mainly negative changes throughout the rainy period for southern and eastern regions.*

Beim Thema »Niederschlagsänderungen« gewinnen insbesondere Erdräume Aufmerksamkeit, die bereits heute von einer teils angespannten wasserhaltlichen Situation gekennzeichnet sind, oder für die Indizien einer nachteiligen Zukunftsentwicklung vorliegen. Beides trifft auf den Mittelmeerraum zu und hat zu umfangreicher Literatur in diesem Themenbereich geführt (s. Überblickszusammenstellungen bei DÜNKELOH & JACOBET 2003, HERTIG 2004, HERTIG & JACOBET 2008). Im Folgenden soll zunächst ein Blick auf die rezente Niederschlagsentwicklung in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts geworfen werden, die anschließend in Zusammenhang mit atmosphärischen Zirkulationsveränderungen gebracht wird. Im letzten Teil des Beitrags folgt ein Ausblick auf die mutmaßliche künftige Entwicklung bis Ende dieses Jahrhunderts, wie sie sich unter bestimmten Szenario-Annahmen abschätzen lässt.

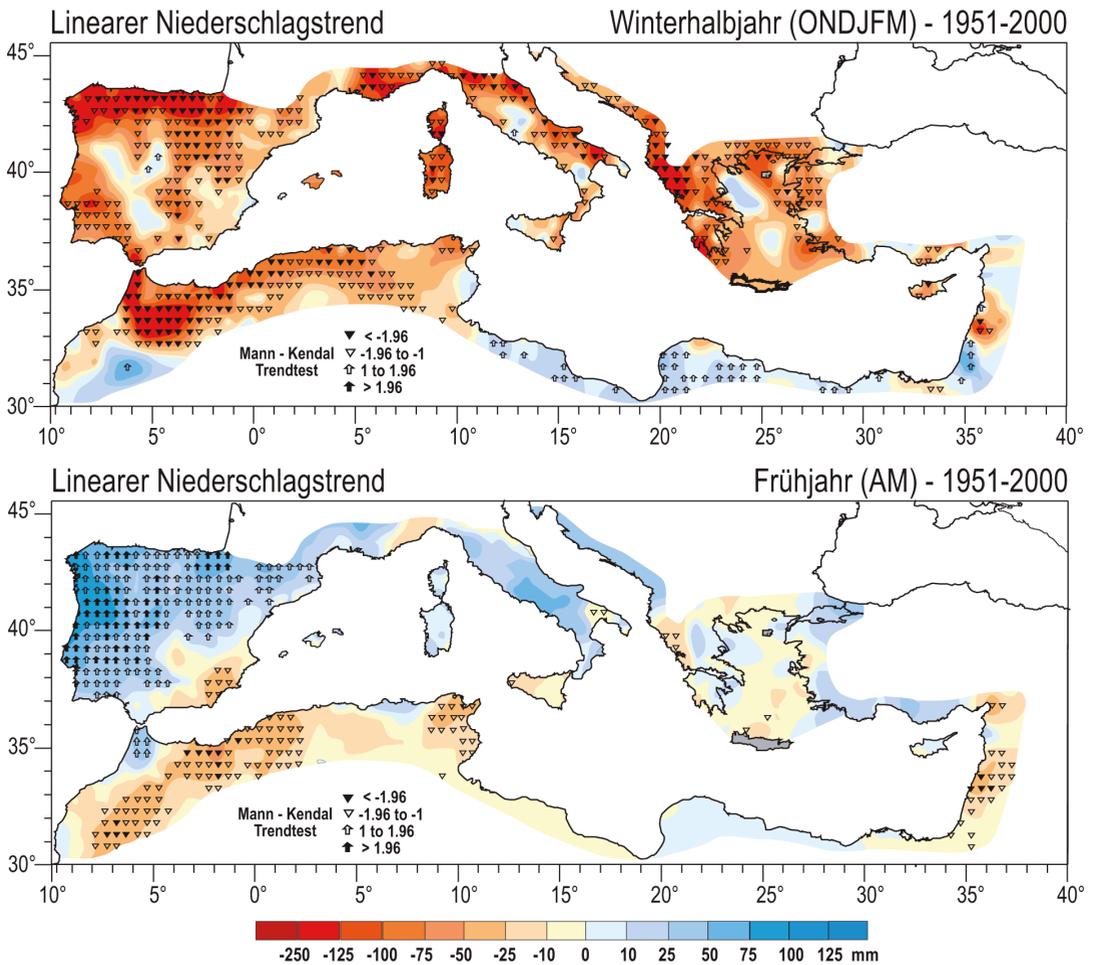
#### Niederschlagstrends 1951–2000

Als Grundlage wird der Gitterdatensatz der Climatic Research Unit (CRU) in Norwich (NEW et al. 2000) in einer am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) verbesserten und fortgeschriebenen Version (OESTERLE et al. 2003) herangezogen. Die monatlichen, stationsbasierten Daten liegen in einer  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  Auflösung vor und sind am PIK weitgehend von Inhomogenitäten bereinigt worden, die mittels gleitender t-Tests identifiziert werden konnten; darüber hinaus ist am PIK auch eine Angleichung an Stationswerte des Weltzentrums für Niederschlagsklimatologie vorgenommen worden.

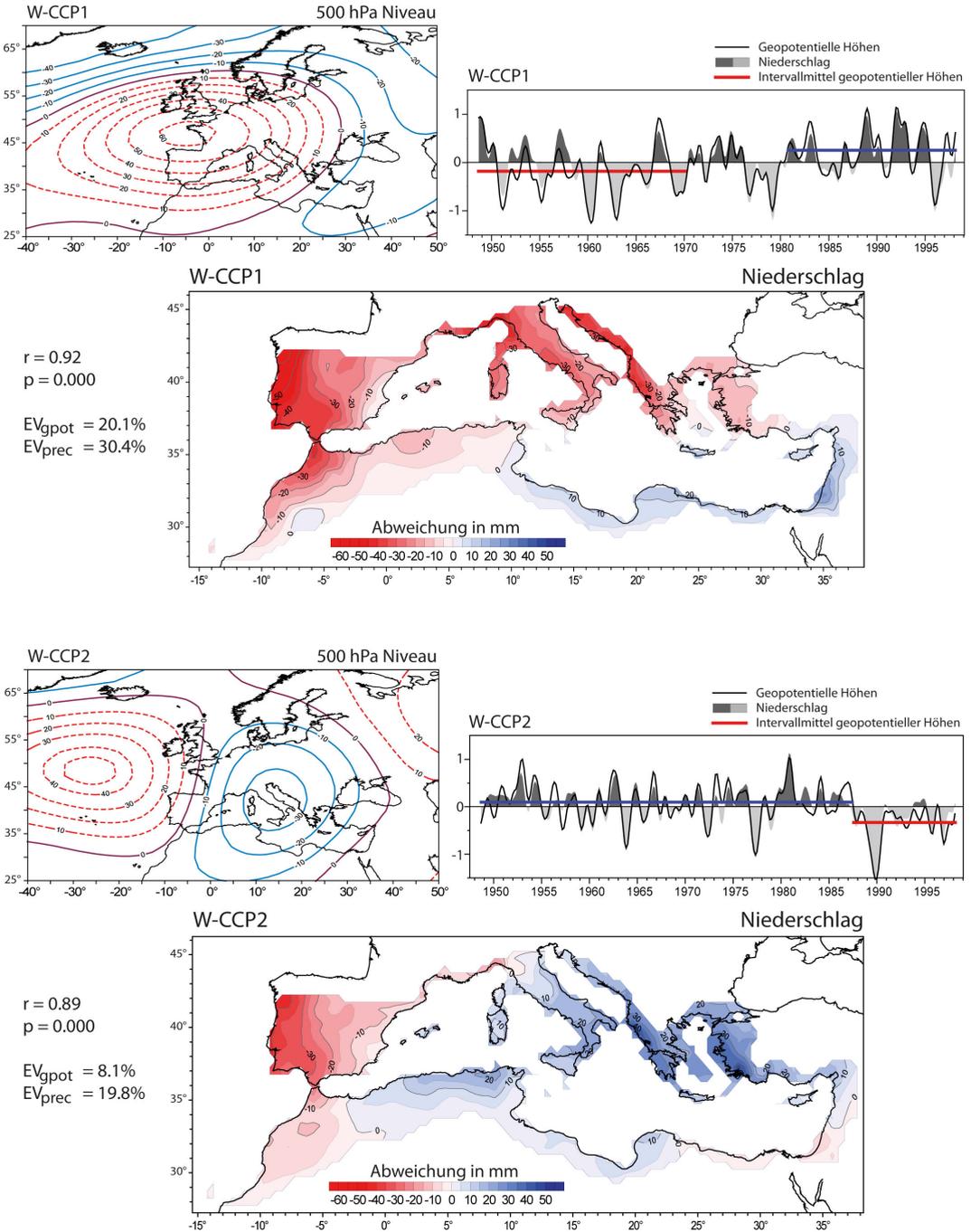
Betrachten wir *Abb. 3.1.8-1a*, in der das gesamte Winterhalbjahr von Oktober bis März zusammengefasst ist, so lassen sich signifikanzabgestuft die überwiegenden Niederschlagsabnahmen 1951–2000 erkennen,

mit einem Maximum um 250 mm im NW-griechisch-albanischen Raum. Allerdings ist dieser Entwicklung eine langfristige Niederschlagszunahme vorausgegangen, die sogar erst in den 1960er Jahren kulminiert hat. Auffallend an *Abb. 3.1.8-1a* ist weiterhin, dass ein größerer zusammenhängender Raum von der vorherrschenden Niederschlagsabnahme weitgehend ausgenommen ist und einen zwar insignifikanten, aber zirkulationskonsistenten (s. weiter unten) Anstieg zu verzeichnen hat: das südliche Israel und die benachbarte nordafrikanische Küstenregion bis nach Libyen. Ein anderes Verteilungsmuster ergibt sich für die frühjährliche Übergangszeit der Monate April und Mai (*Abb. 3.1.8-1b*): Niederschlagszunahmen, z.T. auch mit 95% Sicherheitswahrscheinlichkeit, zeigen sich vor allem in Iberien außerhalb des Südostens, in zentral-nördlichen Teilen und

östlich der Syrte, während der südwestliche Mittelmeerraum und die Levante von Abnahmen gekennzeichnet sind. Dabei bleibt zu berücksichtigen, dass die Anteile am Gesamtniederschlag wesentlich geringer sind als im Winterhalbjahr. Für die generell niederschlagsarme Sommerzeit lassen sich aufgrund der hohen Variabilität vereinzelter Schauerniederschläge kaum signifikante Langzeittrends feststellen. Fasst man schließlich die Monate September bis November zusammen, zeigen sich neben großflächigen Niederschlagsabnahmen im ägäischen und im südwestlichen Mittelmeerraum regionale Zunahmen vor allem im westlichen Iberien, im nordmediterranen Raum und an der südtürkischen Küste (JACOBEIT 2000), die allerdings kein Gegengewicht zum dominanten Niederschlagsrückgang im gesamten Winterhalbjahr darstellen (*Abb. 3.1.8-1a*).



**Abb. 3.1.8.-1:** Niederschlagstrends 1951–2000 auf der Basis des CRU/PIK Datensatzes. Die **schwarzen** Symbole bezeichnen Signifikanz mit 95% Sicherheitswahrscheinlichkeit, bei **hellen** Symbolen liegt das Vertrauensniveau lediglich bei rund 68%. **a** (oberer Teil): Oktober bis März; **b** (unterer Teil): April bis Mai.

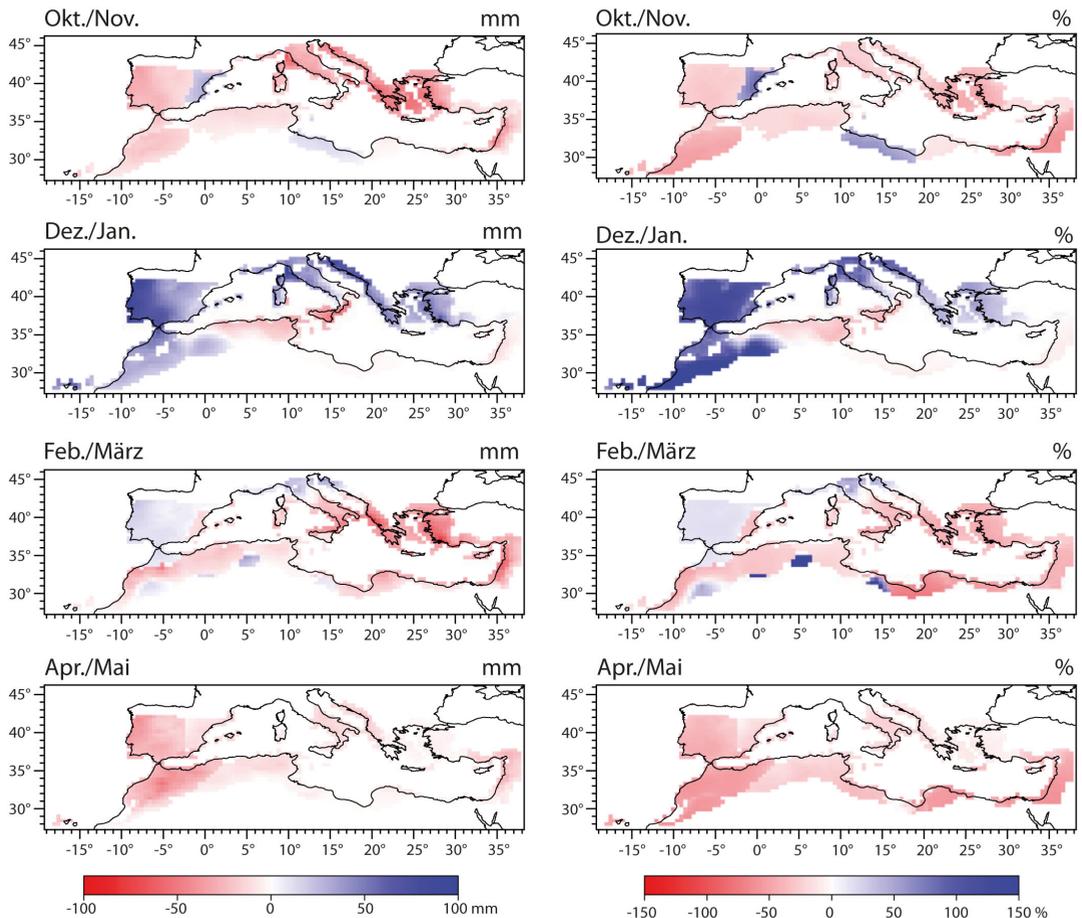


**Abb. 3.1.8-2:** Erstes und zweites kanonisches Korrelationsmusterpaar (W-CCP1, W-CCP2) für geopotentielle Höhen (500 hPa-Niveau) und mediterranen Niederschlag sowie zugehörige tiefpassgefilterte Zeitkoeffizienten aus einer Analyse für Okt.–März 1948–1998.  $r$ : kanonischer Korrelationskoeffizient;  $p$ : Signifikanzniveau;  $EV_{\text{pot}}$ : erklärte Varianz geopotentielle Höhen;  $EV_{\text{prec}}$ : erklärte Varianz Niederschlag. **Gestrichelte Linien** bei den Zeitkoeffizienten markieren mittlere Periodenwerte, die sich auf dem 0.1%-Niveau signifikant unterscheiden (nach DÜNKELOH & JACOBET 2003).

### Zusammenhänge mit atmosphärischen Zirkulationsveränderungen

Untersucht man die mediterranen Niederschlagsfelder mittels Kanonischer Korrelationsanalyse im Verbund mit nordatlantisch-europäischen Geopotentialfeldern (hier nur gezeigt für das 500 hPa- Niveau auf der Basis der NCEP/NCAR-Reanalysen), erhält man in ihrer zeitlichen Entwicklung maximal korrelierte Musterpaare von großskaliger Zirkulation und mediterranem Niederschlag, die die wesentlichen Zusammenhänge beider Größen repräsentieren. Beispielhaft wird dies anhand zweier Musterpaare für das Winterhalbjahr in *Abb. 3.1.8-2* gezeigt, vollständige Resultate sind bei DÜNKELOH & JACOBEBIT (2003), winterbezogene auch bei JACOBEBIT & DÜNKELOH (2003) sowie XOPLAKI et al. (2004) zu finden. Man erkennt beim ersten Musterpaar

(W-CCP1) mit rund 30% Erklärungsanteil an der winterhalbjährlichen Niederschlagsvarianz einen charakteristischen Gegensatz zwischen westlich-zentralem und (süd-)östlichem Mittelmeerraum, der auch als ‚Mediterrane Oszillation‘ apostrophiert worden ist (CONTE et al. 1989). So führt der in *Abb. 3.1.8-2* gezeigte positive Modus mit seinen positiven (negativen) Druckabweichungen im Westen (Osten) zu unter- (über-) durchschnittlichen Winterniederschlägen in diesen beiden Regionen, bei negativen Zeitkoeffizienten kehrt sich diese Verteilung entsprechend um (negativer Modus). Wie die hoch korrelierten ( $r = 0.92$ ) Zeitkoeffizienten des ersten Musterpaares in *Abb. 3.1.8-2* erkennen lassen, hat in der Periode 1951–2000 eine signifikante Änderung (0.1% Irrtumswahrscheinlichkeit) bei der mediterranen Oszillation stattgefunden: war noch bis 1970 bevorzugt der negative Modus zu beobachten,



**Abb. 3.1.8-3:** Abgeschätzte Niederschlagsänderungen 2071–2100 gegenüber 1990–2019. **Links:** Differenz der beiden Zeiträume in mm; **rechts:** Differenz in % des früheren Wertes. Resultate aus statistischem Downscaling mit Kanonischer Korrelation aus großskaligen ECHAM4/OPY3 Prädiktoren (siehe Text) für das Emissionsszenario B2 (nach HERTIG 2004 und HERTIG & JACOBEBIT 2008).

stellt sich seit den 1980er Jahren vornehmlich der positive Modus ein. Dieser Zirkulationsveränderung ist ein Teil der negativen Niederschlagsrends im westlichen Mittelmeerraum (*Abb. 3.1.8-1a*) geschuldet. Gleichzeitig erhält die gegenläufige Entwicklung im südöstlichen Gebiet ihre zirkulationsdynamische Begründung. Die Mediterrane Oszillation ihrerseits ist wiederum in das großräumige Zirkulationsgeschehen eingebunden, sie korreliert sowohl mit der Arktischen Oszillation AO ( $r = 0.60$ ) als auch mit der Nordatlantischen Oszillation NAO ( $r = 0.72$ ). Als regionale Manifestation übergeordneter Zirkulationsregime stellt sie damit die beobachteten Niederschlagstrends im Mittelmeerraum in den Kontext der großskaligen Entwicklung, die durch den bekannten winterlichen Anstieg im NAO-Index in diesem Zeitraum gekennzeichnet ist.

Dies erklärt jedoch noch nicht alles, wie das zweite Musterpaar (W-CCP2) in *Abb. 3.1.8-2* zeigt: es ist gerade für den nordöstlichen Mittelmeerraum von besonderer Bedeutung und kann aufgrund der Anordnung seiner Druckabweichungszentren als mediterranes Meridional-Zirkulationsmuster bezeichnet werden. Bei den Zeitkoeffizienten ergibt sich Ende der 1980er Jahre ein signifikanter Umschwung von mehrheitlich auftretendem positivem Modus zu klarer Dominanz des negativen Modus, d.h. der jüngste Zeitabschnitt wird durch die Umkehr der im Musterpaar gezeigten Abweichungen gekennzeichnet. Diese Abschwächung des zentralmediterranen Troges bedeutet also positive Druckanomalien mit entsprechend negativen Niederschlagsabweichungen über dem zentralen bis östlichen Mittelmeerraum sowie das Gegenteil davon v.a. an der Westseite. In der Überlagerung mit den Tendenzen der mediterranen Oszillation bedeutet dies, dass die gesamten Niederschlagseinbußen in Teilen des zentral-östlichen Mittelmeerraums am größten ausfallen sollten. Dies trifft auch für den NW-griechisch-albanischen Raum zu, wird jedoch nicht so großflächig wirksam wie zu vermuten wäre. Grund dafür ist ein weiteres Musterpaar (hier nicht gezeigt), das seit den 1970er Jahren zu einem mediterranen Druckanstieg mit Schwerpunkten an den westlichen und östlichen Peripherien beiträgt (DÜNKELOH & JACOBET 2003). Darauf ist auch der Umstand zurückzuführen, dass die südöstliche Niederschlagszunahme im Ganzen relativ schwach ausgebildet bleibt.

Auch die Verteilung der frühjährlichen Niederschlagstrends (*Abb. 3.1.8-1b*) lässt sich mit Zirkulationsveränderungen in Zusammenhang bringen, wobei v.a. ein dreikerniges Druckmuster (positive Abweichungen im Südwesten und Osten, negative von den Britischen Inseln bis in den zentralen Mittelmeerraum reichend) im Vordergrund steht. Allerdings sind dabei

wesentlich geringere Anteile an der gesamten Niederschlagsvarianz erfasst als im Winter, und die Einordnung in die großskalige Zirkulationsentwicklung fällt weniger deutlich aus. Selbst im Winter bleibt jedoch zunächst die Frage offen, ob die beobachteten Trends und Niveaushiftungen vornehmlich ein Ausdruck natürlicher Variabilität auf dekadischer Zeitskala sind oder maßgeblich auf den anthropogen induzierten Klimawandel zurückgeführt werden müssen. Deshalb soll ein Blick auf die mögliche zukünftige Niederschlags-situation bei anthropogen verstärktem Treibhauseffekt geworfen werden, wie sie sich unter bestimmten Annahmen abschätzen lässt.

### **Niederschlagsänderungen bei Fortgang der globalen Erwärmung**

Für diese Abschätzung nach HERTIG (2004) bzw. HERTIG & JACOBET (2008) wird die Methode des statistischen Downscalings verwendet, bei der zunächst beobachtungsgestützte Zusammenhänge zwischen großskaligen Prädiktoren (hier den nordatlantisch-europäischen Feldern der geopotentiellen Höhen im 500 und 1.000 hPa-Niveau sowie der spezifischen Feuchte im letztgenannten Niveau) und kleinskaligen Prädiktanden (hier den mediterranen CRU/PIK-Niederschlägen) hergestellt werden (hier durch kanonische Korrelationsanalysen). Nach einer spezifischen Kreuzvalidierung werden die geeigneten statistischen Modelle mit Prädiktoren aus einer numerischen Klimamodellsimulation für verstärkte Treibhausbedingungen geladen. Im vorliegenden Fall wird Output des gekoppelten Hamburger Klimamodells ECHAM4/OPYK3 aus einem Simulationslauf nach dem Emissionsszenario B2 verwendet, das eine mittlere Ebene der ökonomischen Entwicklung bei kontinuierlich steigender Weltbevölkerung unterstellt (s. NAKICENOVIC & SWART 2000). *Abb. 3.1.8-3* zeigt, in zweimonatige Zeitabschnitte differenziert, die nach statistischem Downscaling aus diesen Modellprädiktoren resultierenden mediterranen Niederschlagsänderungen im Vergleich der beiden 30-jährigen Zeiträume 2071–2100 und 1990–2019. Derartige Abschätzungen sind mit statistischen Modellen aus zehn verschiedenen Kalibrierungsperioden durchgeführt und auch in ihrer regionsspezifischen, zeitlichen Entwicklung dargestellt worden (HERTIG 2004). Zusammenfassend ergeben sich folgende Hauptresultate:

Im Herbst (Okt./Nov.) zeichnen sich bei verstärktem Treibhauseffekt überwiegend Niederschlagseinbußen ab, Ausnahmen sind nur im Osten Spaniens und an der Syrtteküste zu finden. Im Hochwinter (Dez./Jan.) dagegen entsteht ein gemischtes Bild: deutliche Zunahmen im Westen und Norden, schwächere Abnahmen

im Süden und Osten. Im Spätwinter (Feb./Mär.) weitet sich das Areal rückläufiger Niederschläge wieder aus, Zunahmen sind noch im äußersten Norden und ganz im Westen zu finden. Das Frühjahr (Apr./Mai) ist schließlich von ausnahmslosen Reduktionen gekennzeichnet. Insgesamt dominieren also die Niederschlagseinbußen in den Übergangsjahreszeiten, regional sind – und das auch im Winter – v.a. die heute bereits sehr trockenen Gebiete im Süden und Osten betroffen.

Bei diesen Abschätzungen ist allerdings eine Vielzahl von Unsicherheiten zu berücksichtigen. Zunächst liegt, gemessen am Signal-Rausch-Verhältnis, nur sehr vereinzelt statistische Signifikanz vor, bedingt durch die hohe Niederschlagsvariabilität im Mittelmeerraum. Weiterhin differieren die Resultate je nach verwendetem Klimamodell-Output sowie in Abhängigkeit vom zugrundegelegten Emissionsszenario. Schließlich bleibt auch die unterstellte Konstanz der statistischen Beziehungen zwischen Zirkulation und Niederschlag im Zuge des Klimawandels eine ungesicherte Annahme. Dennoch vermitteln die bedingten Abschätzungen einer möglichen Niederschlagsänderung eine Vorstellung latenter Risiken, wie sie etwa bei einer indizierten 30–50%-igen Reduktion in einer ohnehin schon semi-ariden Region fraglos gegeben sind. Ein weiterer Gesichtspunkt, der gegen eine völlige Verwerfung derartiger Abschätzungen spricht, mag in der qualitativen Stabilisierung von Kernaussagen bereits früherer Ansätze (z.B. JACOBET 1996) gesehen werden.

### Schlußbetrachtung

Vergleichen wir die rezenten Trends mit den Zukunftsabschätzungen, so liegt keine durchgängige Entsprechung vor: im westlichen und nördlichen Mittelmeerraum beobachten wir heute abnehmende Niederschläge im Winter, aber auch zunehmende in den Übergangsjahreszeiten, während gegen Ende dieses Jahrhunderts eine inverse Änderung indiziert wird (Zunahmen im Hoch-Winter, Abnahmen im Frühjahr und Herbst). Die primären Problemgebiete liegen im Süden und Osten des Mittelmeerraums, wo auch heute schon – neben einer bescheidenen, auf den Südosten begrenzten winterlichen Zunahme – Niederschlagsreduktionen beobachtet werden und für eine verstärkte Treibhaus-Zukunft mit weiteren Abnahmen über die gesamte Regenperiode hinweg gerechnet werden muss.

### Literatur

- CONTE M., S. GIUFFRIDA & S. TEDESCO (1989): The Mediterranean oscillation: impact on precipitation and hydrology in Italy. In: ACADEMY OF FINLAND (Ed.): Proceedings of the Conference on Climate and Water, Vol. 1. Helsinki, 121-137.
- DÜNKELOH A. & J. JACOBET (2003): Circulation Dynamics of Mediterranean Precipitation Variability 1948-98. *Int. J. Climatol.* 23, 1843-1866.
- HERTIG E. (2004): Niederschlags- und Temperaturabschätzungen für den Mittelmeerraum unter anthropogen verstärktem Treibhauseffekt. Dissertation Universität Würzburg, 274 pp.
- HERTIG E. & J. JACOBET (2008): Assessments of Mediterranean precipitation changes for the 21st century using statistical downscaling techniques. *International Journal of Climatology* 28, 1025-1045.
- JACOBET J. (1996): Atmospheric Circulation Changes Due to Increased Greenhouse Warming and its Impact on Seasonal Rainfall in the Mediterranean Area. In: NEMESOVA I. (Hrsg.): *Climate Variability and Climate Change Vulnerability and Adaptation*. Praha, 71-80.
- JACOBET J. (2000): Rezente Klimaentwicklung im Mittelmeerraum. *Petermanns Geographische Mitteilungen* 144, 2000/6, 22-33.
- JACOBET J. & A. DÜNKELOH (2003): Zirkulationsdynamik mediterraner Niederschlagsschwankungen – kanonische Korrelationsanalyse für das Winterhalbjahr seit Mitte des 20. Jahrhunderts. In: CHMIELEWSKI F.M. & T. FOKEN (Hrsg.): *Beiträge zur Klima- und Meeresforschung*. Berlin und Bayreuth, 39-49.
- NAKICENOVIC N. & R. SWART (Eds.) (2000): *Emissions Scenarios 2000*. Special Report of the IPCC. Cambridge University Press, 570 pp.
- NEW M., M. HULME & P. JONES (2000): Representing twentieth century space-time climate variability. II: Development of 1901-1998 monthly grids of terrestrial surface climate. *J. Climate* 13, 2217-2238.
- ÖSTERLE H., F.-W. GERSTENGARBE & P.C. WERNER (2003): Homogenisierung und Aktualisierung des Klimadatensatzes der Climatic Research Unit der University of East Anglia, Norwich. *Terra Nostra* 2003/6, 326-329.
- XOPLAKI E., F.J. GONZALEZ-ROUCO, J. LUTERBACHER & H. WANNER (2004): Wet season Mediterranean precipitation variability: influence of large-scale dynamics. *Clim. Dyn.* 23, 63-78.

*Prof. Dr. Jucundus Jacobeit*

*Dr. Elke Hertig*

*Dr. Armin Dünkeloh*

*Institut für Geographie*

*Universität Augsburg*

*Universitätsstr. - 86135 Augsburg*

*Jucundus.Jacobeit@geo.uni-Augsburg.de*