

Wasser und Klima – eine innige Beziehung

Harald Kunstmann

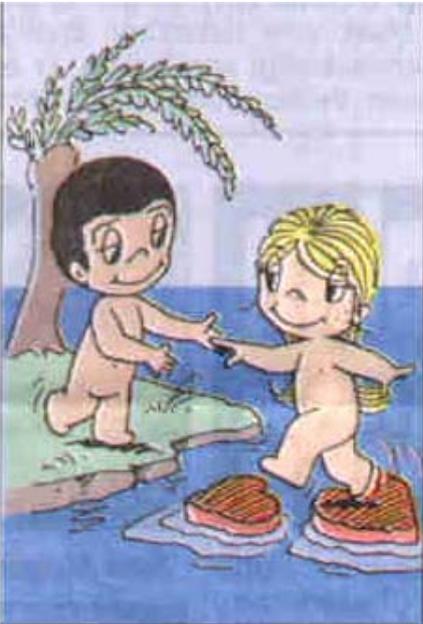
Forschungszentrum Karlsruhe
Institut für Meteorologie und Klimaforschung IMK-IFU
Garmisch-Partenkirchen

<http://kit.gap.fzk.de>

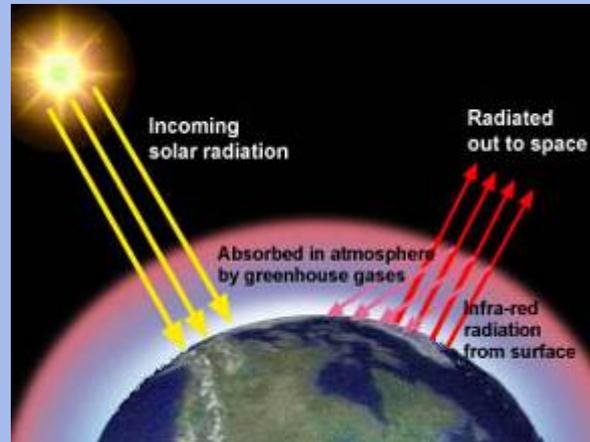
Klima und Wasser

Eine innige
Beziehung ...

... wärmt
und hilft



- Globale mittlere Temperatur $\approx -18^{\circ}\text{C}$
 $\Rightarrow \text{H}_2\text{O}, \text{CO}_2, \text{CH}_4, \text{N}_2\text{O}: -18^{\circ}\text{C} \Rightarrow +15^{\circ}\text{C}$
- H_2O absorbiert und emittiert effektiv im infraroten Strahlungsspektrum

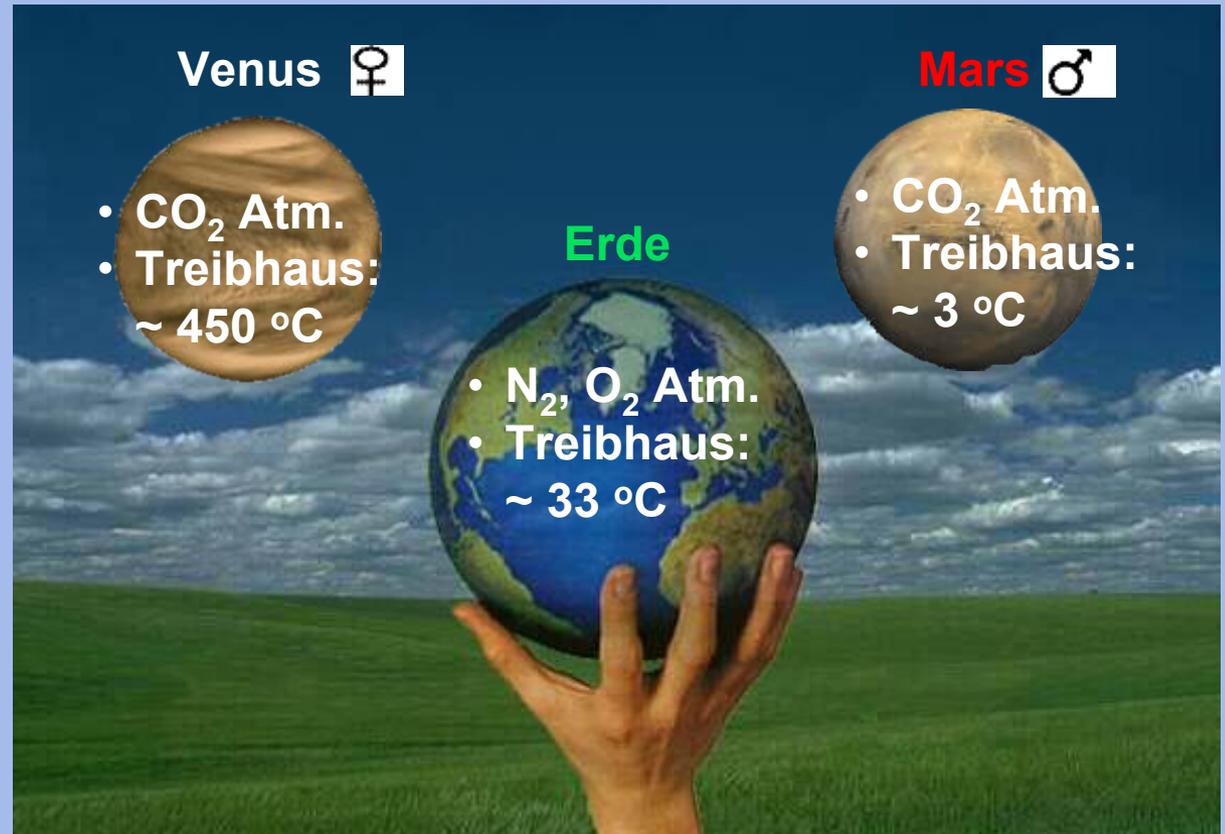


- Wasserdampf ist das „potenteste“ Treibhausgas: trägt 60% zum natürlichen Treibhauseffekt bei
- **Atmosphärischer Wasserdampf:** ermöglicht lebensfähige Temperaturen auf der Erde

Klima und Wasser

Eine innige
Beziehung ...

... ist etwas
besonderes



Hydrosphäre:

**Wasserkreislauf entfernt viel CO₂ aus der
Atmosphäre (Ozeane, Sedimente)**

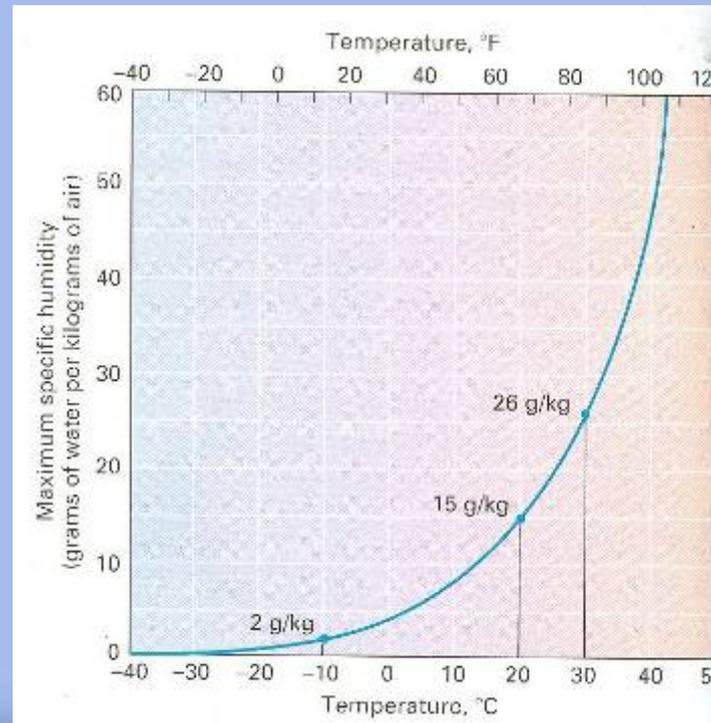
Klima und Wasser

Eine innige
Beziehung ...

**... hält fest
zusammen**



- Zusammenhang Temperatur & Wasserdampftragfähigkeit
⇒ Clausius Clapeyron (1834)
- Warme Luft kann mehr Wasserdampf halten



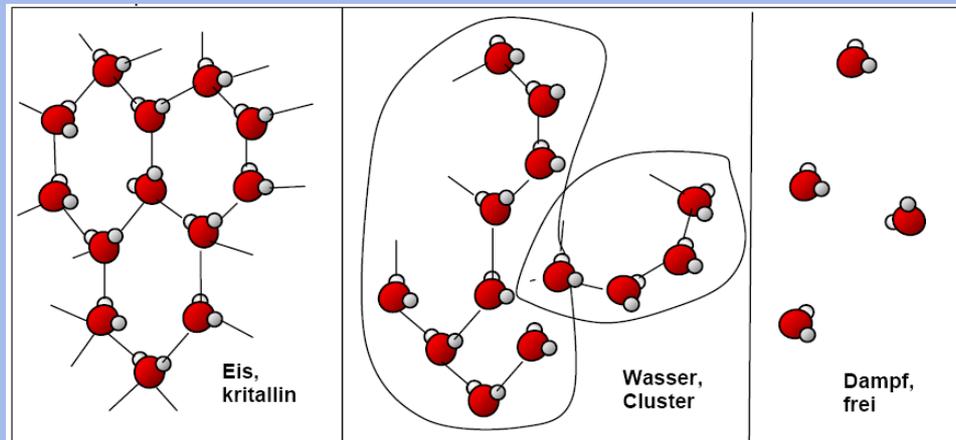
Klima und Wasser

Eine innige
Beziehung ...

... ist einzigartig



Die Erde ist der einzig bekannte Planet
in dem Wasser in allen drei Aggregatzuständen
vorkommt



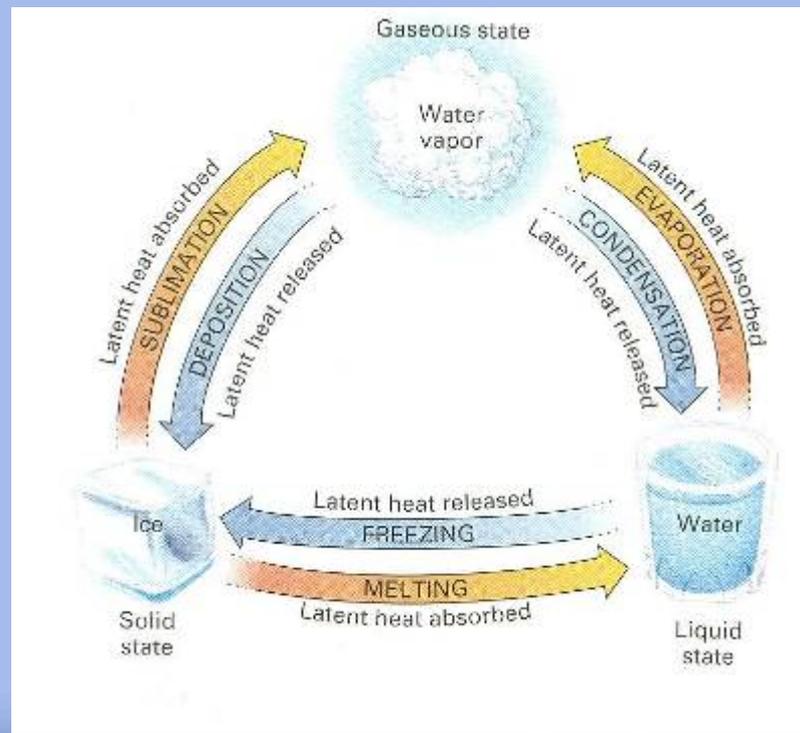
Klima und Wasser

Eine innige
Beziehung ...

... ist häufig
verborgen &
energiegeladen



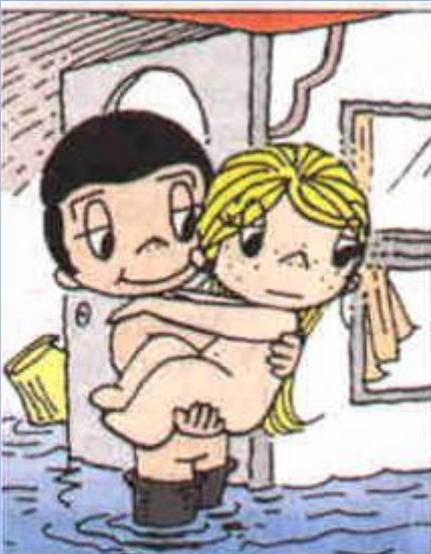
- Bei der Verdunstung wird Wärme entzogen (Phasenübergang flüssig-gasförmig) die bei Kondensation wieder frei wird
⇒ *latente* Wärmeenergie, z.B. 2260kJ/kg (100°C)



Klima und Wasser

Eine innige
Beziehung ...

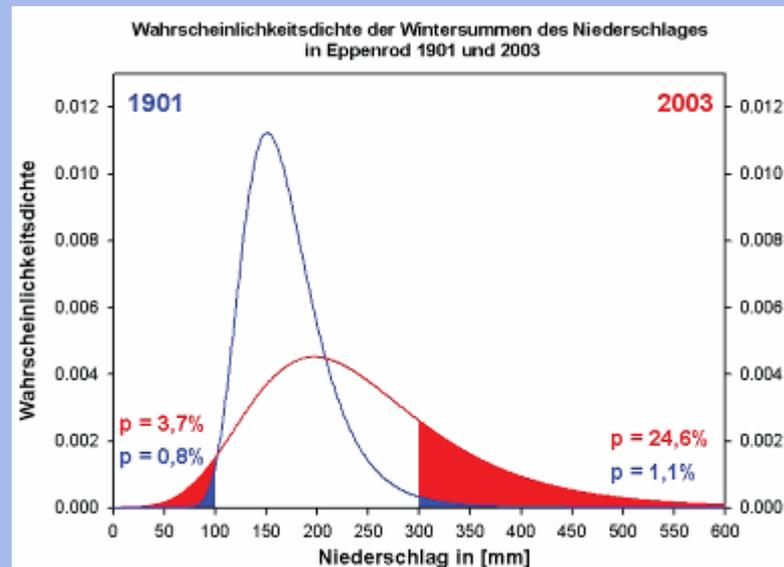
... ist intensiv



- Globale Erwärmung führt zu höherem atmosphärischen Wassergehalt und Energieinhalt

⇒ Intensivierung des Wasserkreislaufs

- z.B. Zunahme von extremen Niederschlägen



Schönwiese et al., 2006

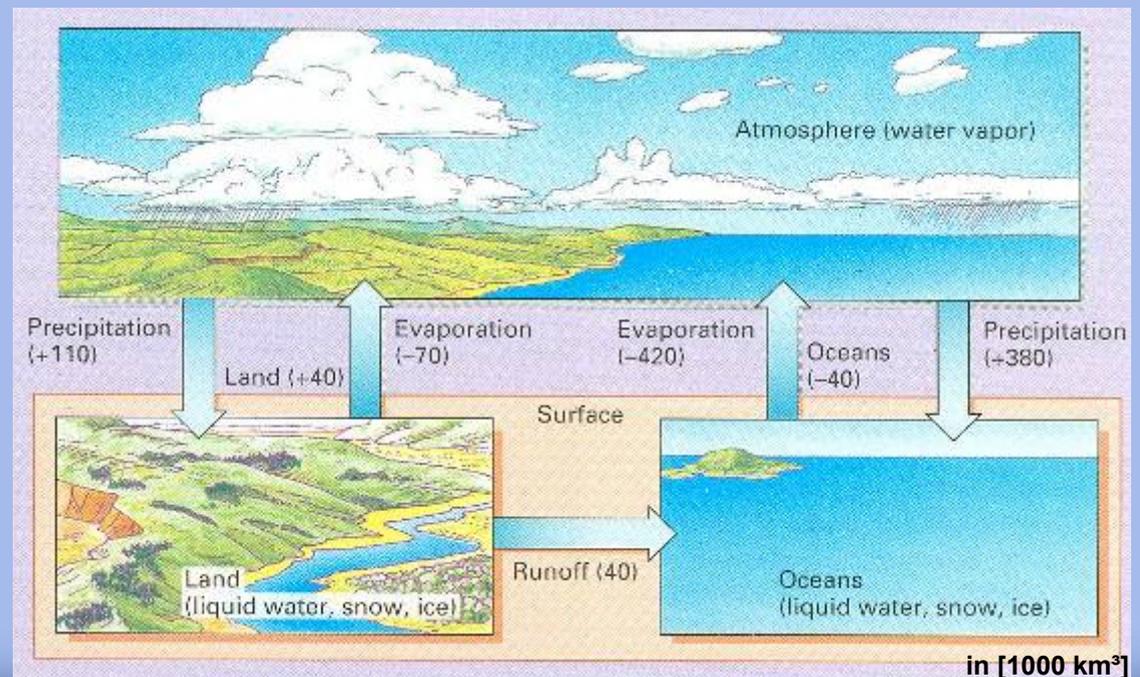
Klima und Wasser

Eine innige
Beziehung ...

... bewegt viel



- Zeitskala Verdunstung bis Niederschlag: ≈ 8 Tage
- Zeitskala Aufenthalt Wasser in Flüssen: ≈ 17 Tage
- Zeitskala Aufenthalt Wasser im Ozean: ≈ 2500 Jahre



Klima und Wasser

Eine innige
Beziehung ...

... ist
leidenschaftlich



... LEIDEN

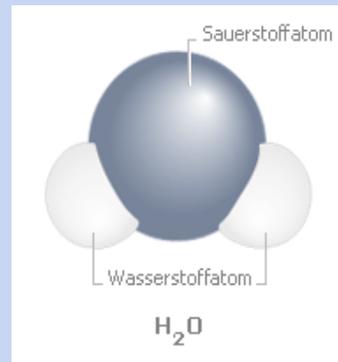
SCHAFTLICH ...



Klima und Wasser: mehr als T und H₂O



Hochwasser



Wassermangel



Klima und Wasser

Weltwasser

- Niederschläge (Land): 110,000 km³/a (Würfel mit $\Delta x=48\text{km}$)
- Verdunstung: 50,000 km³/a natürliche Vegetation
18,000 km³/a Regenfeldanbau
- Flüsse: 42,000 km³/a
⇒ davon nur 13,000 km³/a für Menschen zugänglich
⇒ davon 2,000 km³/a Bewässerung
- Grundwasserentnahme 800 km³/a, davon 200 km³/a nicht nachhaltig

⇒ Verdunstung **Landwirtschaft** $\approx \frac{1}{2}$ Verdunstung **natürliche Vegetation**

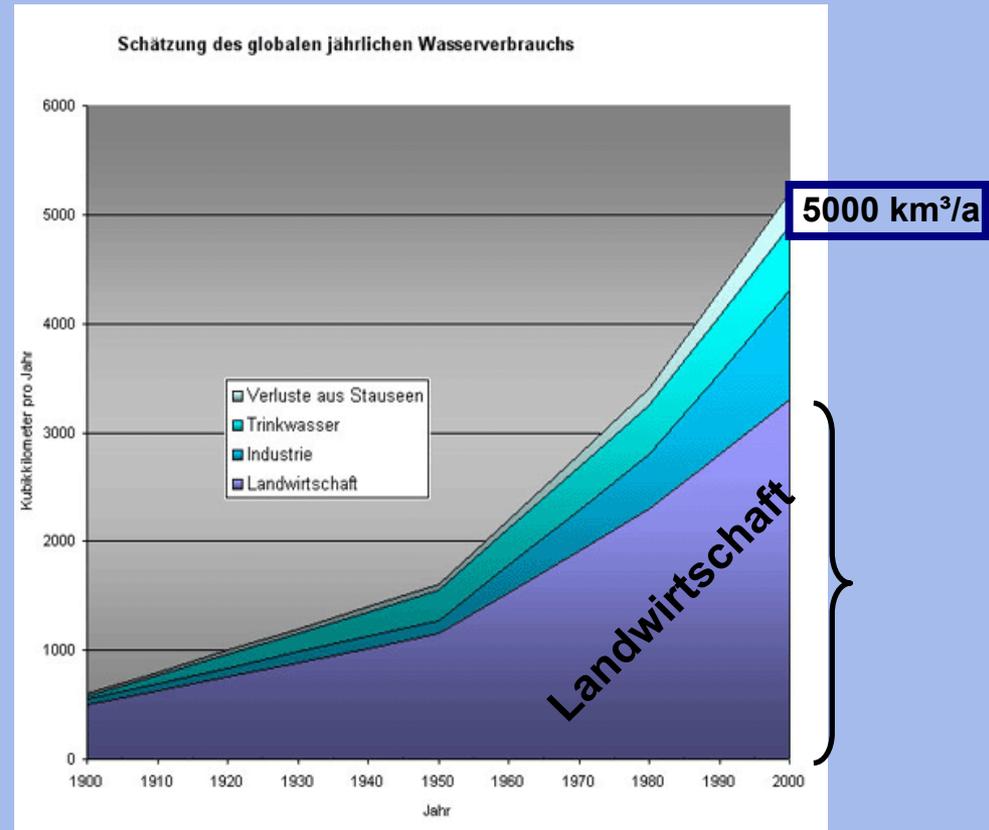


Klima und Wasser

Weltwasser: zu viel und doch zu wenig



Nutzbares Süßwasser: **9 - 12'000 km³** 0.0009 %
(Würfel mit Kantenlänge 21.5 km)



Bereits $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{2}$ der weltweit verfügbaren Süßwasservorräte werden genutzt!

Klima und Wasser

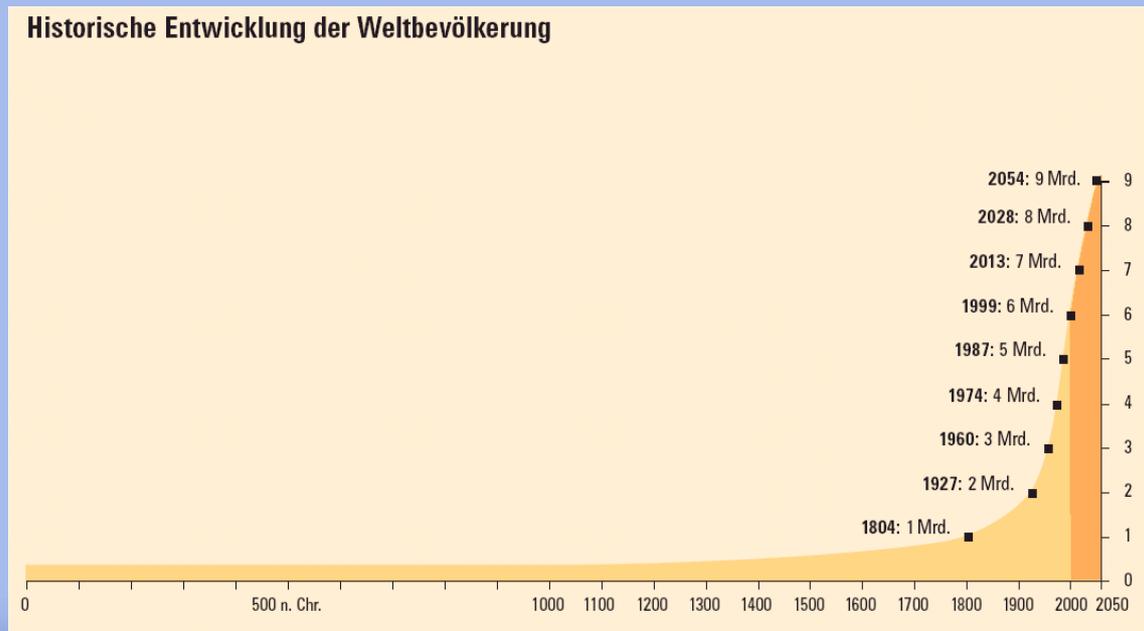
Süßwasser wird knapp

Von Wassermangel betroffene Menschen

2004: 600 Millionen \Leftrightarrow 2025: 2.7-3.2 Milliarden Menschen

Verschärfung der Situation durch überproportionalen Wasserverbrauch:

20. Jh: Verdreifachung Bevölkerung aber Versechsfachung Weltwasserverbrauch



Die Wasserreserven versiegen schneller als die Ölreserven

Sauberes Wasser wird immer knapper auf der Welt. Ein neuer Milliardenmarkt tut sich auf. Einige Unternehmen haben erkannt, dass sich mit der Aufbereitung des kostbaren Gutes viel Geld verdienen lässt.

Von Georg Giersberg

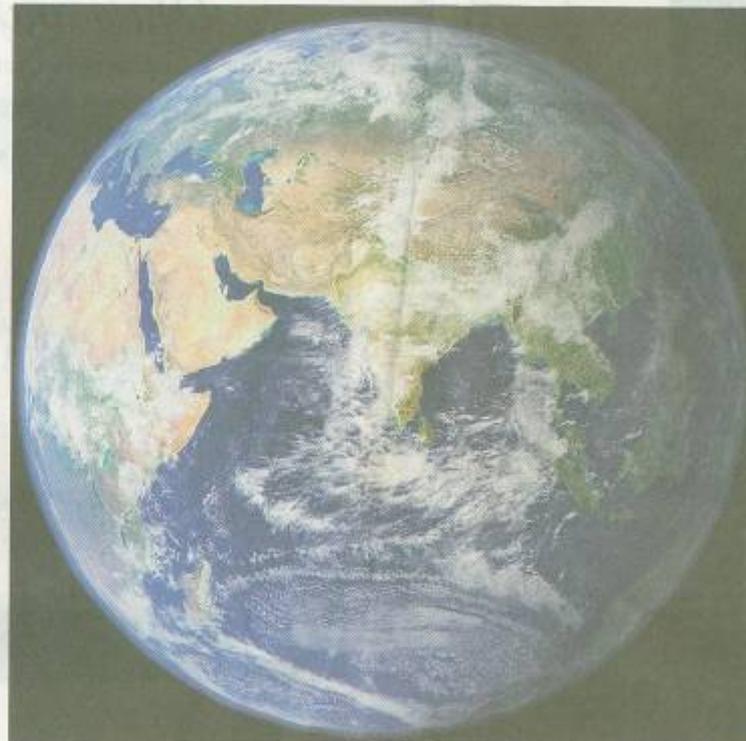
FRANKFURT, 6. Juni. Der Blaue Planet leidet. Er leidet gerade unter der schlechten Qualität jenes Elements, dem unsere Erde diesen ehrenvollen und in unserem Sonnensystem einmaligen Titel verdankt: Wasser. Barcelona war in diesem Frühjahr nur ein prominentes Beispiel. Fünf Millionen Menschen litten unter der schlimmsten Dürre seit sechzig Jahren. In Schiffen aus Tarragona und Marseille wurde Trinkwasser herangeschafft, um die Bevölkerung mit dem kostbaren Nass zu versorgen. Nach Ansicht aller Experten werden sich Fälle von Wasserknappheit und Wassernot häufen: Schon heute leiden 20 Prozent der Weltbevölkerung in dreißig Ländern unter Wassermangel, im Jahr 2015 werden es 30 Prozent in fünfzig Ländern sein.

Zunächst einmal überrascht diese Prognose. Denn an Wasser herrscht auf dem Blauen Planeten wahrlich kein Mangel. 70 Prozent der Erdoberfläche sind von Wasser bedeckt – allerdings von Salzwasser, das für den Menschen unverträglich ist. Vom verträglichen Süßwasser sind wiederum 96 Prozent in Gletschern oder geologischen Schichten der Erde über Jahrtausende gebunden. So bleiben nur 4 Prozent oder 110.000 Kubikkilometer Wasser übrig. Das ist in etwa die Menge, die jährlich durch Niederschlag auf die Erde fällt und wieder verdunstet. Aber auch davon sehen Menschen zwei Drittel nie; Sie verdunsten über die Pflanzen. Dann bleiben noch

menschlichen Trink- und Brauchwassers aus Sicht der Leistungsfähigkeit des Erdsystems nicht ansetzt“, schreibt denn auch der Geograph Wolfram Mauser.

Das Problem liegt nämlich nicht in der Menge, sondern ausschließlich in der Qualität des Wassers. Immer mehr Menschen haben keinen Zugang zu sauberem Trinkwasser. Verschmutztes Wasser wird immer häufiger zur Quelle von Krankheitsregern. Trotz aller internationalen Programme sind auch heute noch eine Milliarde Menschen ohne Zugang zu adäquatem Trinkwasser und 2,8 Milliarden Menschen ohne Zugang zu ausreichender Hygiene – Tendenz steigend, wie die Zahlen der Vereinten Nationen belegen. Während einem Nordamerikaner heute direkt im Haushalt und indirekt über die Erzeugung externer Güter 366 Kubikmeter Wasser im Jahr zur Verfügung stehen und einem Europäer 232, sind es für einen Afrikaner im Durchschnitt nur 25 Kubikmeter im Jahr. Mit zunehmender Erdbevölkerung, weiterer Umweltverschmutzung und fortschreitendem Klimawandel mit Ausdehnung vor allem der Trockenregionen der Erde nimmt die Zahl der Menschen dramatisch zu, die kein geeignetes Trinkwasser haben. Vor allem Lateinamerika, Afrika und Asien werden nach Ansicht von Experten zunehmend unter Wasserknappheit leiden.

Experten gehen davon aus, dass sich bis zum Jahr 2050 bei einer auf mehr als



Wasser gibt es auf dem Blauen Planeten zur Genüge. Doch für Menschen ist nur ein Bruchteil davon überhaupt nutzbar. So ist denn das Hauptproblem die mangelnde Qualität des wertvollen Elements. Diese zu verbessern wird eine wichtige Aufgabe in der Zukunft sein. Einige Unternehmen haben die vielfertigen Möglichkeiten der Wiederaufbereitung schon für sich entdeckt.

keine allein natürliche Sache mehr. Viele Unternehmen leben davon. An ganz konkreten Beispielen will die heute startende

Wassermarkt erkannt und um den amerikanischen Siemens hat vor wenigen Jahren den

menschlichen Verzehr aufzubereiten, effizienter mit dem Wasser umzugehen und es weniger zu verschmutzen. Dieser

h
H
n
L
D
8
v
b
n
w
z
fe
2
st
2
w
w
w
w
2
a
d
zi

el
ke
sc
7
3
pi
ch
ur
2
ni
G
let
2
au
in
zie
W
au
de
tes
od

Klima und Wasser

Finanzkrise So holen Sie sich Ihr Geld zurück



Verschärfung der Wasserkrise durch den Klimawandel

Zukünftige Wasserverfügbarkeit

in klimasensitiven Regionen?

Blaues Gold

Klimawandel, Verschwendung und die Bevölkerungsexplosion machen **Wasser** zur wertvollsten Ressource der Welt. Der Mangel lässt in vielen Ländern Millionen Menschen dürsten, während in anderen wie in England hingegen profitiert von seiner Lage, einem sorgsamem Umgang mit dem kostbaren Nass – und dem Einfallsreichtum der Ingenieure.

So hart hat es Australien seit Metachengedenken nicht getroffen. Im wichtigsten landwirtschaftlichen Anbaugelände, dem Murray-Darling-Becken – das etwa so groß ist wie Frankreich und Spanien zusammen –, herrscht seit sechs Jahren akuter Wassermangel. Im Juni erreichte die gemessene Regenmenge den niedrigsten Wert seit Beginn der Messungen vor 117 Jahren. Sie betrug nur 16 Prozent der durchschnittlichen Niederschlagsmenge.

Weil sie ihre Bäder nicht mehr besuchen können und die Stra-

im Jahr. In immer mehr Regionen hat die Regierung damit begonnen, das Wasser für den privaten und industriellen Verbrauch zu rationieren. Fabriken müssen ihre Produktion drosseln, an manchen Tagen sogar gänzlich einstellen. Der stellvertretende Umweltminister Pan Yue schätzt, dass 90 Prozent aller Flüsse, die Städte passieren, so trocken sind, dass aus ihnen kein Trinkwasser entnommen werden kann. Seine Warnung: „Wassermangel und Wasserverschmutzung bedrohen unsere wirtschaftliche Entwicklung, die Stabilität der Gesellschaft und die Gesundheit der Menschen.“

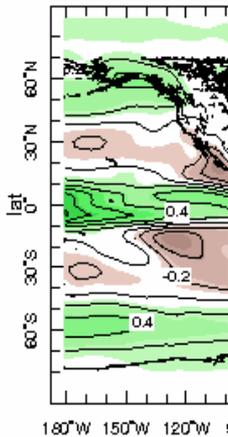
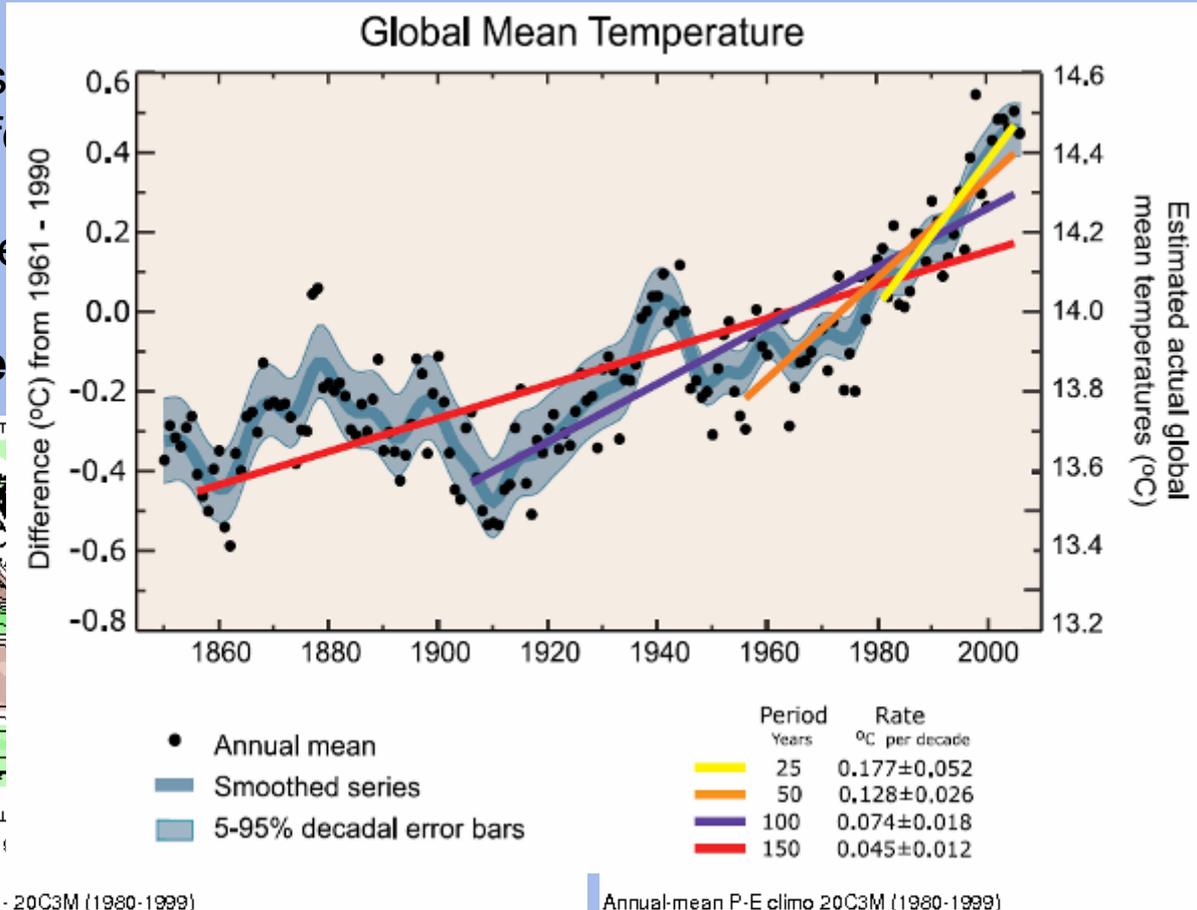
Klima und Wasser

Globale Erwärmung verändert den Wasserkreislauf

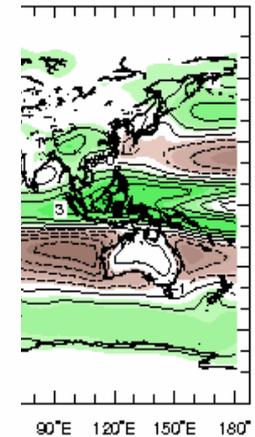
- Clausius
- $\approx 6-7\%$ f
- Trockene
- **Aber: re**

ragfähigkeit“:

em Trend

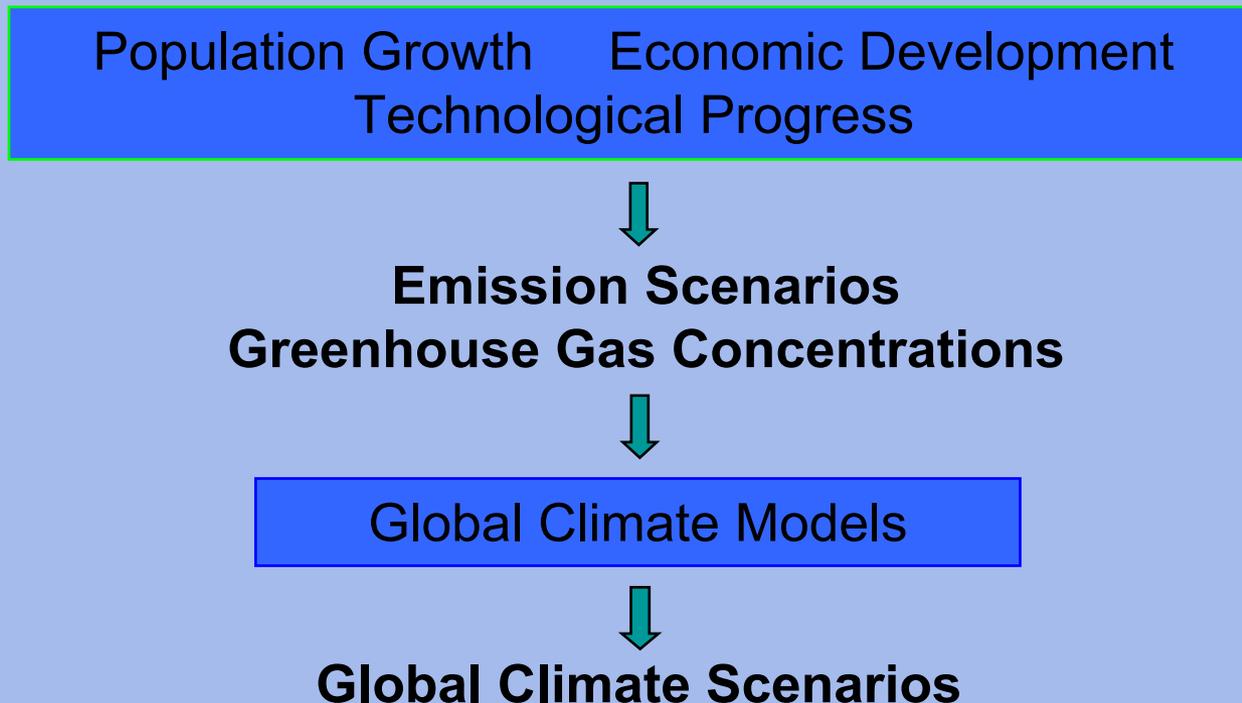


P-ET 2080-99 minus 1980-99
 IPCC (4AR) A1B multi-model average

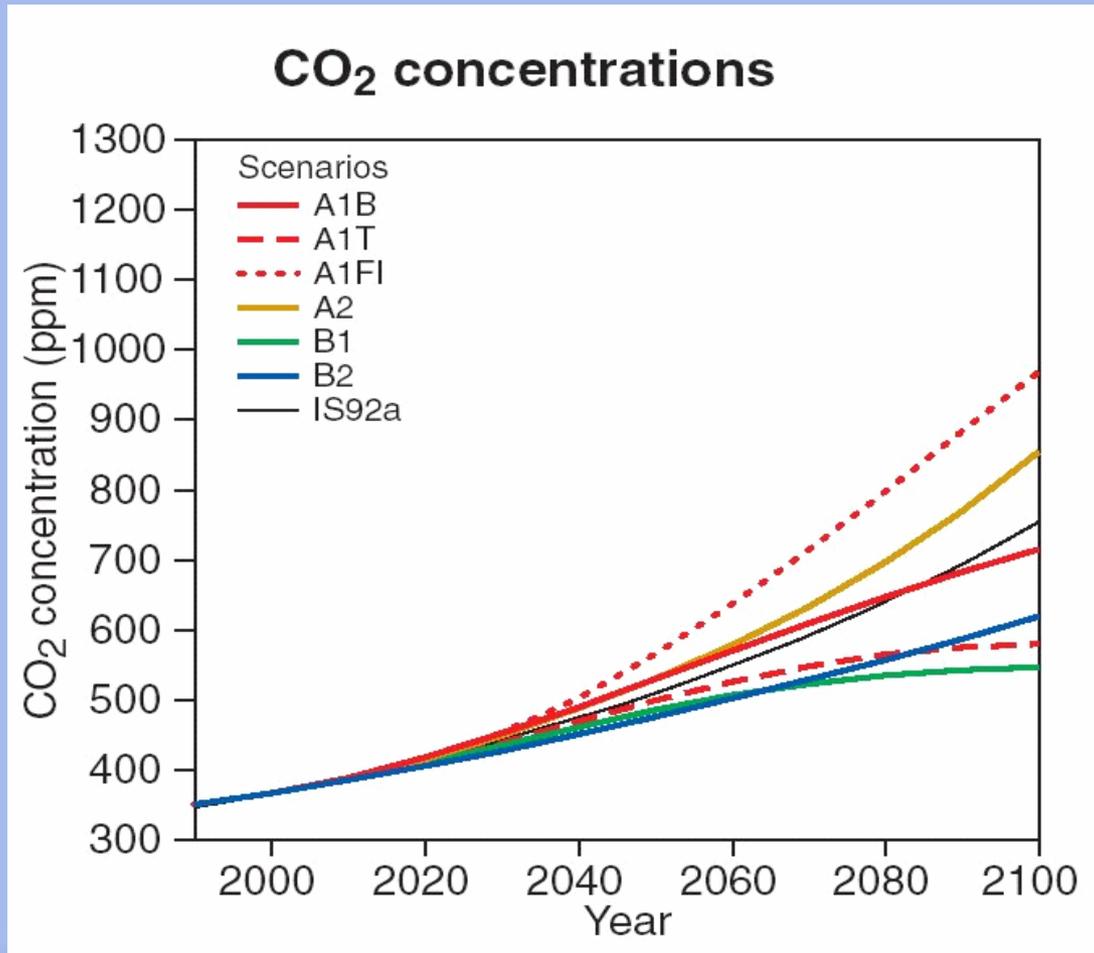


P-ET 1980-99
 IPCC (4AR) 20C3M

Abschätzung des zukünftigen Klimas: Klimaszenarien

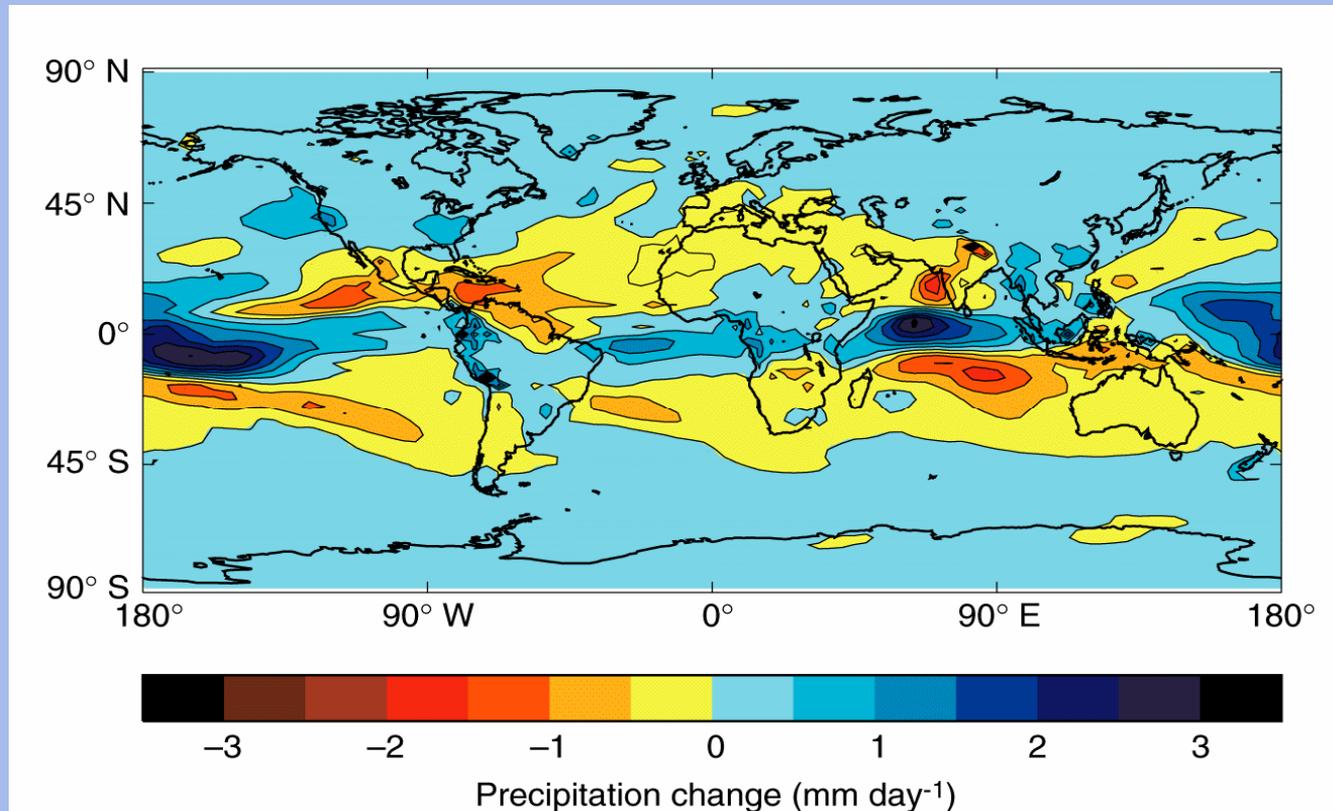


Globale Klimaszenarien



Globale Klimaszenarien

Prognose Änderungen mittlerer jährlicher Niederschlag bis 2050



Hadley Centre
for Climate
Prediction and
Research

⇒ Auflösung zu grob für regionale Impaktuntersuchungen !

Regionale Klimaszenarien

Population Growth Economic Development
Technological Progress



Emission Scenarios
Greenhouse Gas Concentrations



Global Climate Models



Global Climate Scenarios



Downscaling Methods



Regional Climate Scenarios

Dynamische Regionalisierung

Impulserhaltung

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -f \vec{k} \times \vec{v} - \nabla \Phi - \frac{1}{\rho_a} \nabla p_a + \frac{\eta_a}{\rho_a} \nabla^2 \vec{v} + \frac{1}{\rho_a} (\nabla \cdot \rho_a \mathbf{K}_m \nabla) \vec{v}$$

Energieerhaltung

$$\frac{\partial \theta_v}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \theta_v = \frac{1}{\rho_a} (\nabla \cdot \rho_a \mathbf{K}_h \nabla) \theta_v + \frac{\theta_v}{c_{p,d} T_v} \sum_{n=1}^N \frac{dQ_n}{dt}$$

Gasgleichung

$$p = \frac{nR^*T}{V}$$

Luftmassenerhaltung

$$\frac{\partial \rho_a}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} \rho_a) = 0$$

Wassermassenerhaltung

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_v}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) q_v &= \frac{1}{\rho_a} (\nabla \rho_a \mathbf{K}_h \nabla) q_v + R_{evap} - R_{cond} - R_{iini} - R_{idep/sub} \\ \frac{\partial q_c}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) q_c &= \frac{1}{\rho_a} (\nabla \rho_a \mathbf{K}_h \nabla) q_c + R_{cond} + R_{iini} + R_{idep/sub} - R_{aconv} - R_{accr} \\ \frac{\partial q_r}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) q_r &= \frac{1}{\rho_a} (\nabla \rho_a \mathbf{K}_h \nabla) q_r - R_{evap} + R_{aconv} + R_{accr} - \frac{\partial V_f \rho_a g q_r}{\partial t} \end{aligned}$$

Energieerhaltung Landoberfläche

$$L_v E + H + G = SW_{net} + LW_{net}$$

$$= (1 - \alpha) SW \downarrow + LW \downarrow - \epsilon \sigma_B T_{surf}^4$$

Bodenwasserdiffusion

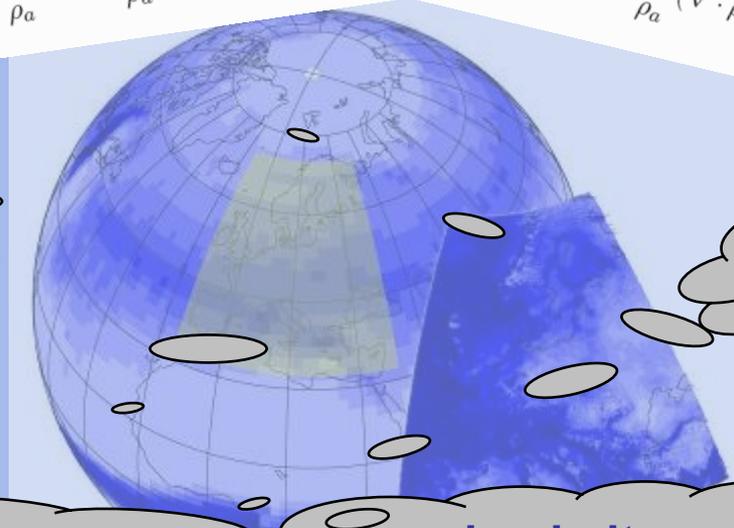
$$C(\theta) \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_t(\theta) \frac{\partial T_s}{\partial z} \right]$$

Niederschlagsphysik

$$R_{evap} (rain) = \frac{2\pi N_{0r} (S_w - 1)}{A_r + B_r} \left[\frac{0.78}{\Lambda_r^2} + 0.32 \left(\frac{a_r \rho}{\eta_a} \right)^{1/2} S_c^{1/3} \frac{\Gamma(5/2 + b_r/2)}{\Lambda_r^{5/2 + b_r/2}} \right]$$

Bodenwasserinfiltration

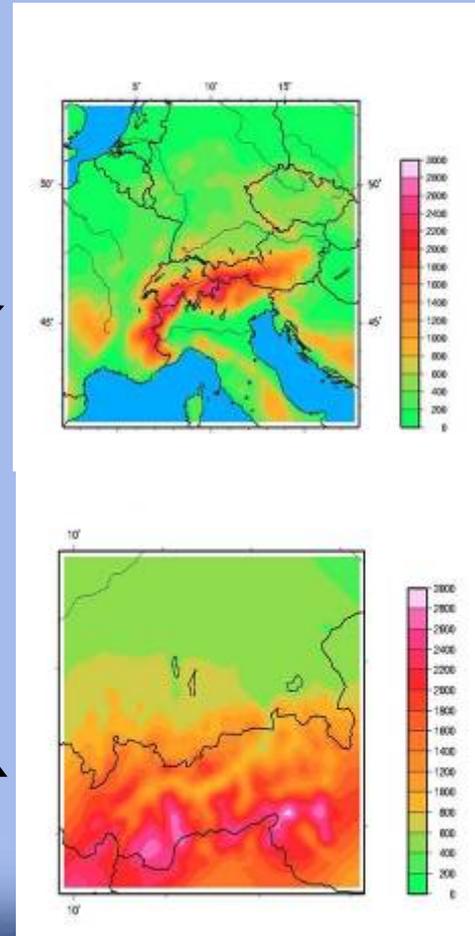
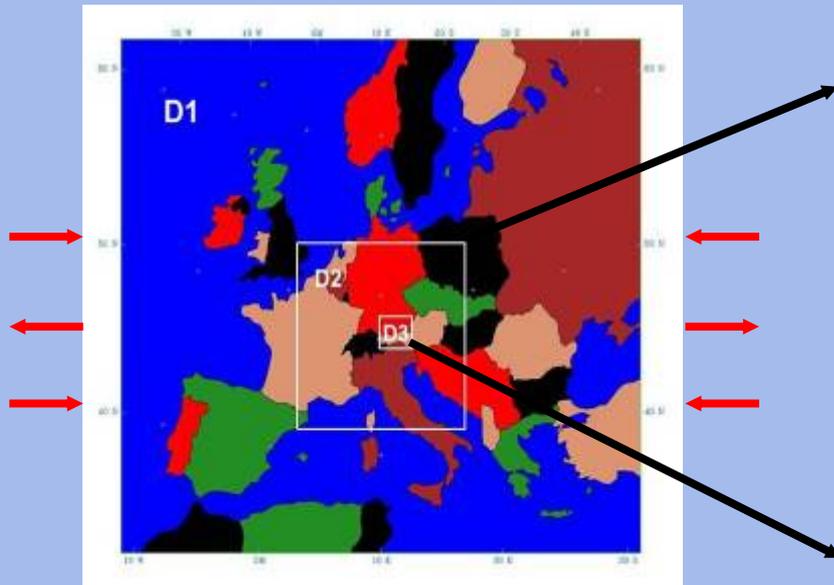
$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + \frac{\partial k(\theta)}{\partial z}$$



Atmosphärische Modellierung

RCM: angetrieben durch globales Modell (Anfangs- und Randwertproblem)

Hohe räumliche Auflösung \Rightarrow Detaillierte Berücksichtigung der Orographie



Orographie in
 $20 \times 20 \text{ km}^2$
Auflösung

Orographie in
 $4 \times 4 \text{ km}^2$
Auflösung

(u, v, w, T, q, p) \uparrow \downarrow \uparrow

04



**Was bedeutet die Klimaänderung
für den Wasserhaushalt**



Severe flooding (1999, 2005)

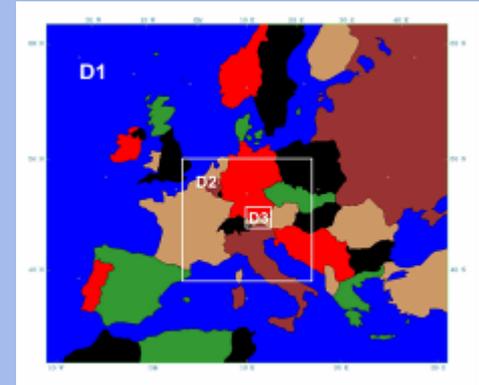


Severe droughts (Rhine, 2003)

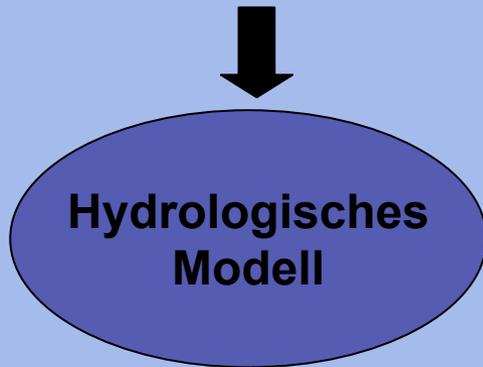
Regionale Klima-Hydrologie Modellierung

- Temperatur
- Niederschlag
- Wind
- Relative Feuchte
- Globalstrahlung

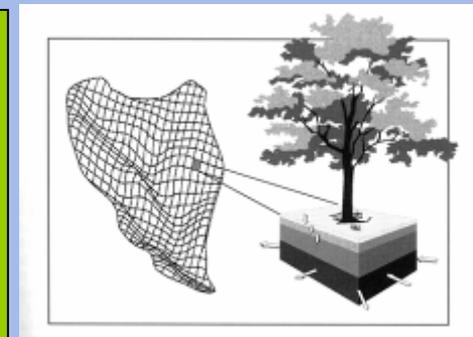
3-dim.
atmosphärisches
Modell



100x100km² → 4x4 km²



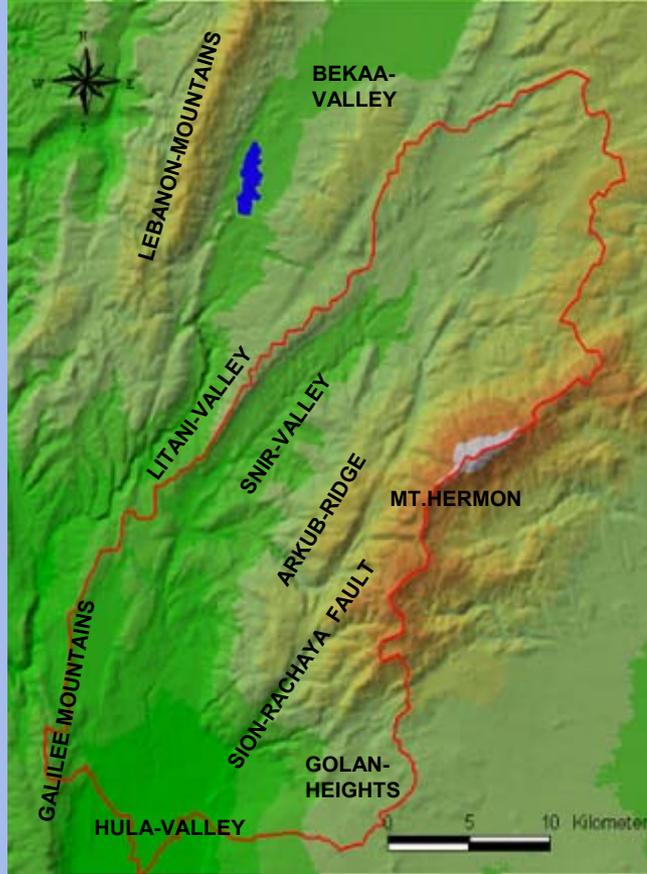
- Orographie
- Landnutzung
- Bodeneigenschaften
- Aquifereigenschaften
- Flussnetz



100x100 m² Auflösung

Evapotranspiration Infiltration **Abfluss** Grundwasser

Einzugsgebiet des Oberen Jordan



Fläche: 855 km²

2814 m (Mount Hermon)

80 m (Hula-Valley)

Komplexe Hydrogeologie

Grundwasser/Oberflächenwasser Interaktionen

Niederschlag:

750 mm/a: in Tälern

1200-1500 mm/a: Mt. Hermon

Hermon

Das Einzugsgebiet des oberen Jordan ⇒ 1/3 Trinkwasserressourcen Israels

See Genezareth



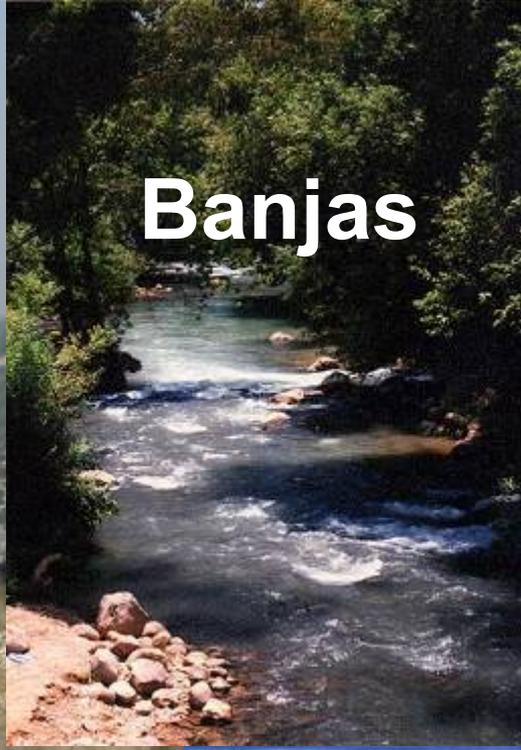
Mount Hermon



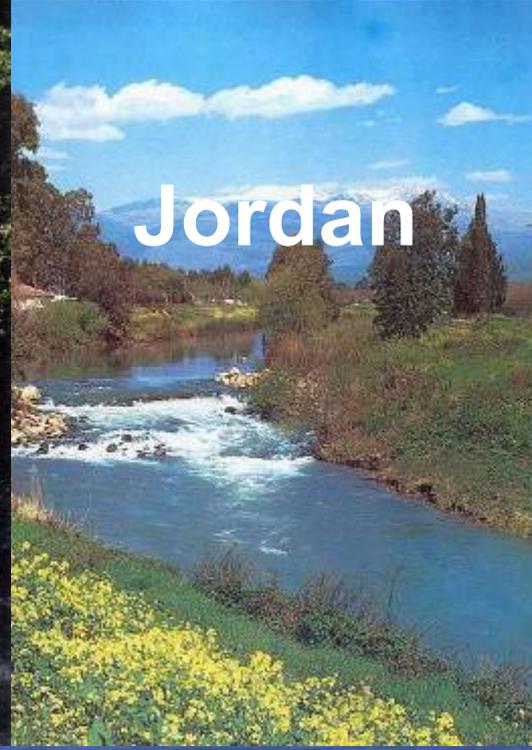
Golan Höhen



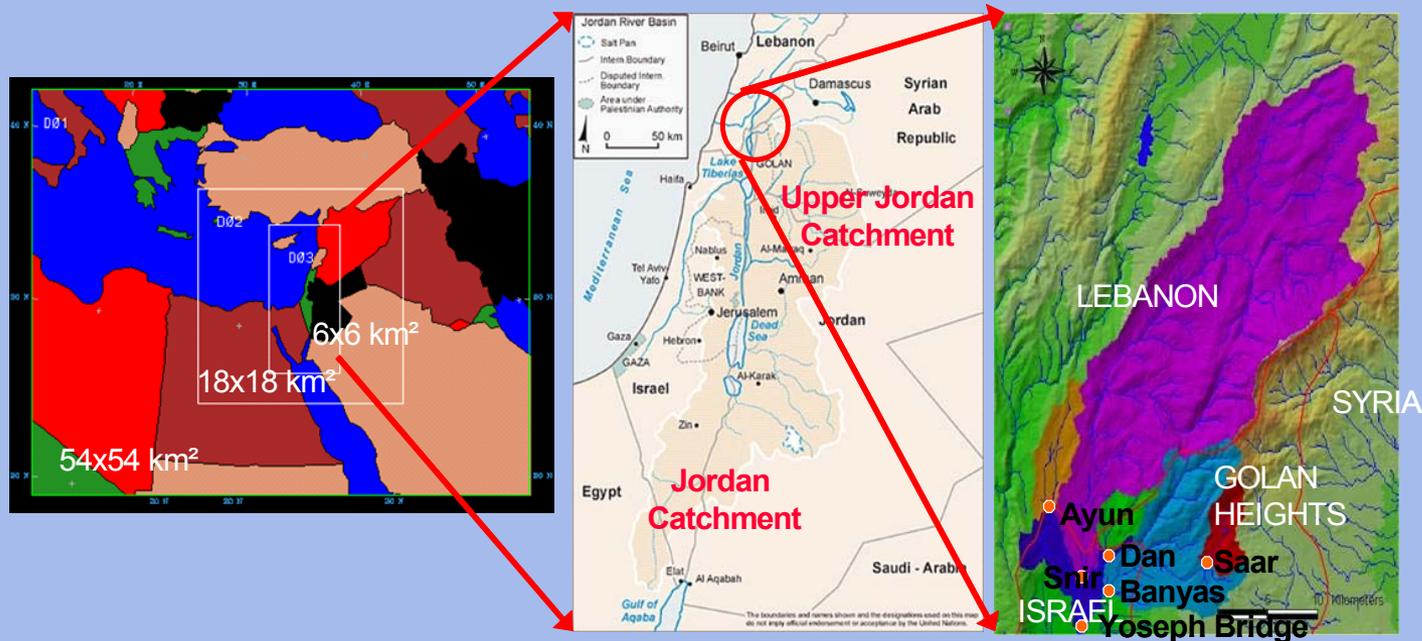
Banjas



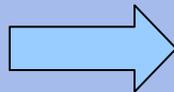
Jordan



Scale- & Compartment Crossing Model Systems



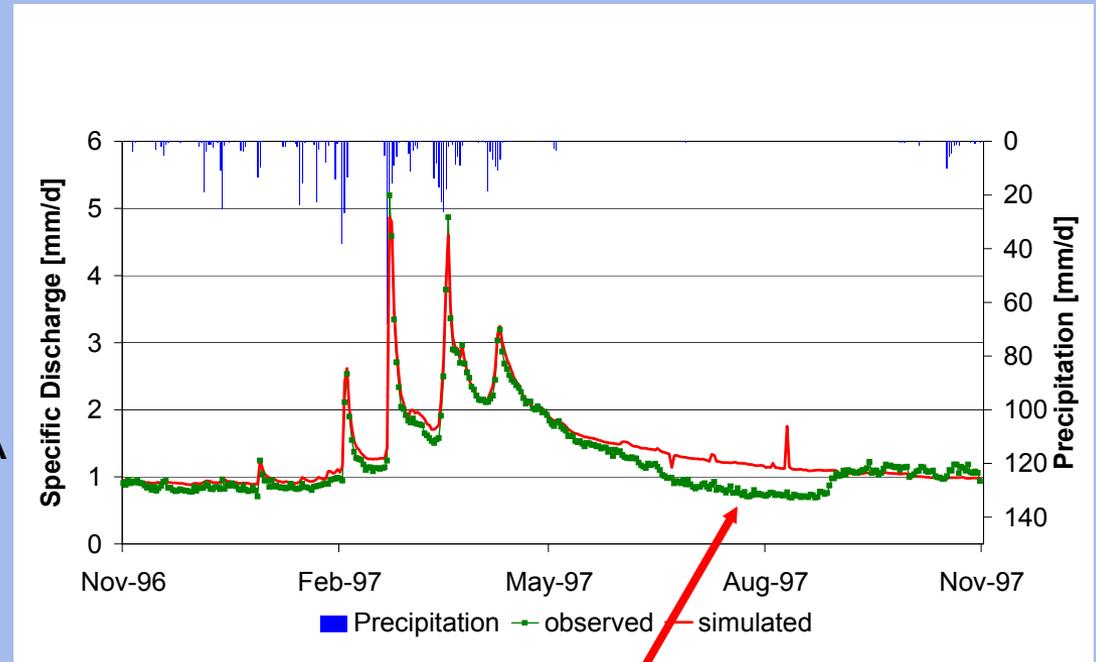
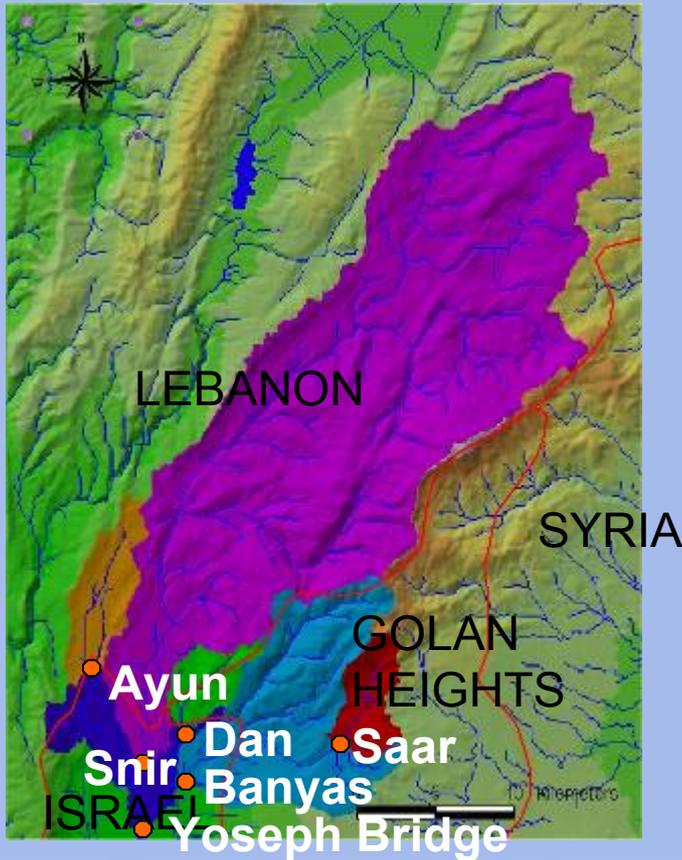
High resolution dynamical downscaling of global climate scenarios



Distributed hydrological modeling of surface and subsurface water balance in 90 m resolution

Hydrological Modeling Upper Jordan River

How accurate does the hydrological model reproduce observed discharge?

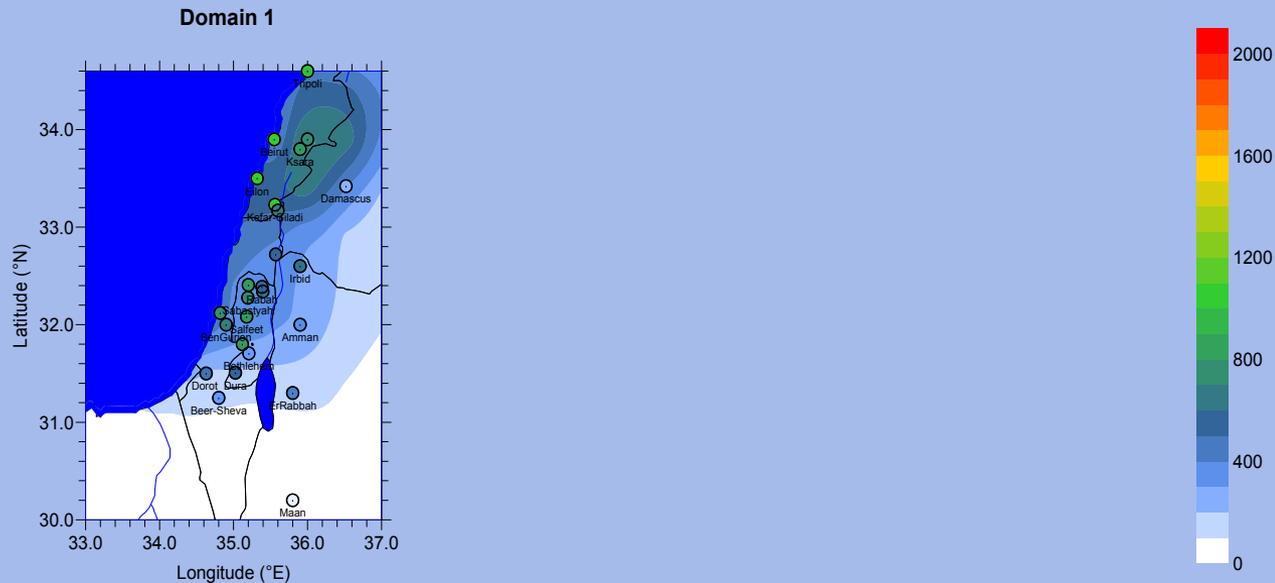


Technically bypassed water not yet accounted for

Regional Climate Modeling Near East

High Resolution Control Run

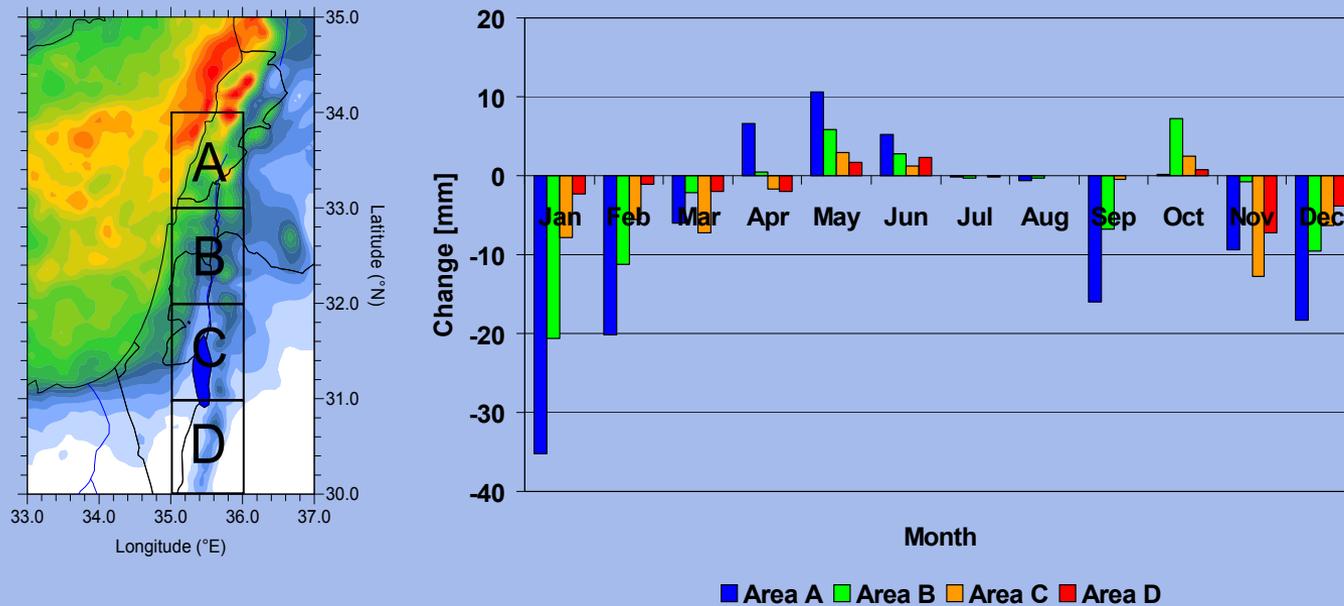
Intermediate results of 6 km runs: mean 1961-1975



... more detailed spatial information: land-sea & orography dependent features

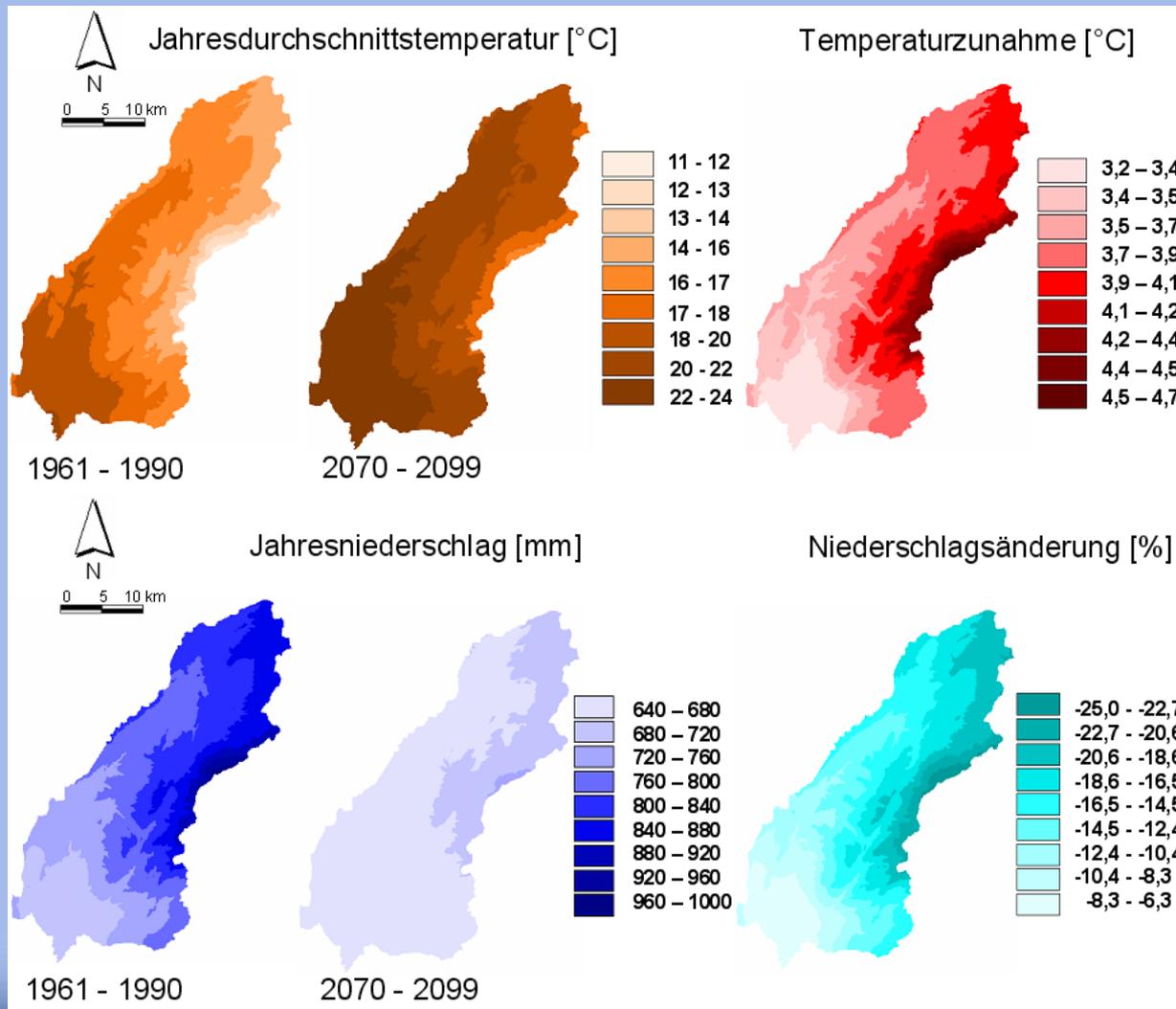
Regional Climate Modeling Near East

How does seasonal precipitation change depend on the region?



For all subregions: Decreased winter, increased spring precipitation

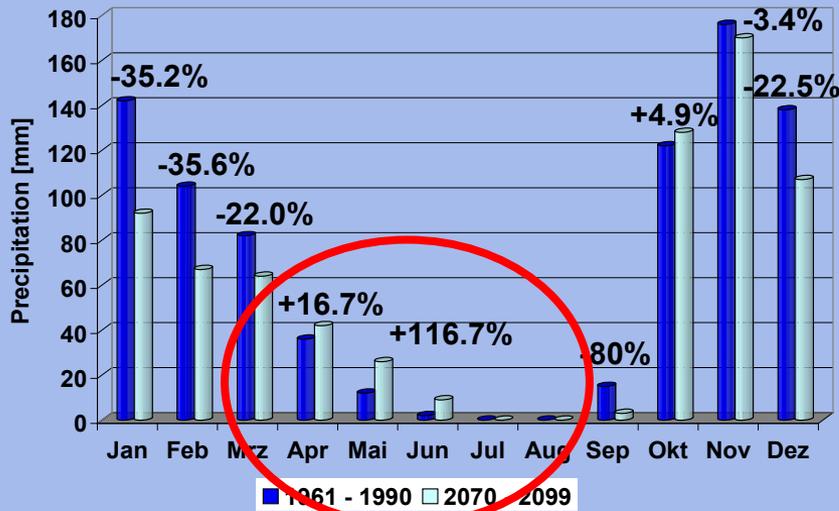
Climate Change and Water Availability UJC



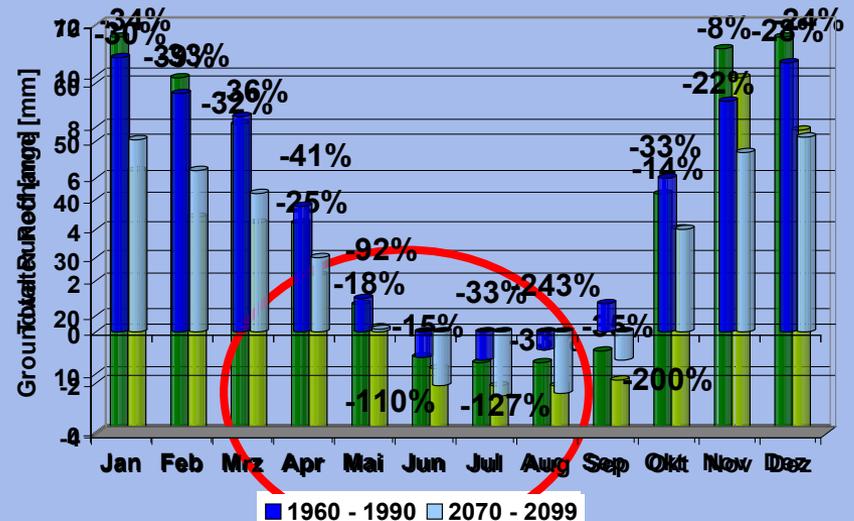
Climate Change and Water Availability UJC

What is the impact of expected climate change on river discharge in the UJC?

Precipitation



Recharge

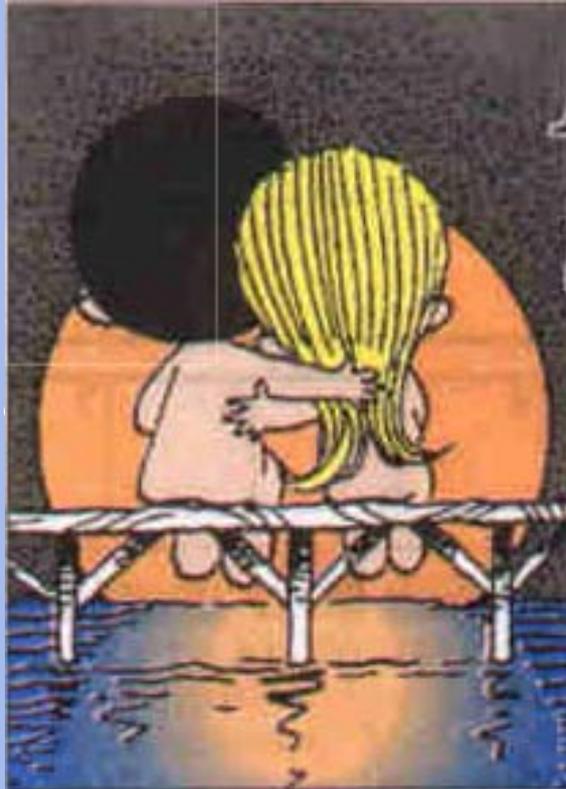


Different signs of precipitation change and runoff change
 Amplified change for groundwater recharge

Zusammenfassung

- „Innige Beziehung“ von Klima + Wasser
 - ⇒ Globale Erwärmung führt zu **Veränderung der Wasserverfügbarkeit**
- **Ressource Süßwasser**: durch Bevölkerungszuwachs & Klimaveränderung zunehmend limitierender Faktor für Entwicklung
- Globale Klimamodelle zu grob aufgelöst für **regionale Klimaimpaktanalysen**
- Dynamische Regionalisierung & **gekoppelte Modellsysteme**
 - ⇒ Abschätzung zukünftiger Wasserverfügbarkeit & Hochwasserrisiken
- Wissenschaft trifft **Entscheidungssträger**: Bereitstellung von wissenschaftlicher fundierter Planungsinformation für Wasserwirtschaft, Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Energiewirtschaft
 - ⇒ Unsicherheitsspannen (globaler Antrieb vs. Regionalisierung vs. Szenario)
 - ⇒ Klare Trennung von Signal vs. Rauschen (nicht gezeigt)

Vielen D



ksamkeit

Ende

