

# Gemeinsame Klima-Hydrologie Simulationen zur Untersuchung der Auswirkung der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt in klimasensitiven Regionen

**Harald Kunstmann**

**Forschungszentrum Karlsruhe, IMK-IFU, Garmisch-Partenkirchen**

## Globales Änderungssignal

- Ca. 0.9 °C seit Beginn der Temperaturmessungen in 1860; ca. 0.6 °C in letzten 30 Jahren mit Maximum in 2005
- Temperaturschwankungen zwischen der letzten Eiszeit und heutigen Warmzeit hat gerade einmal 4°C betragen
- Steigender mittlerer Jahresniederschlag
- Starke regionale Differenzen  
Globale Temperatur: + 0.7 ± 0.2 °C in den letzten 100 Jahren  
Europa: + 0.95 °C; **Alpen + 1.6°C**  
Sommer + 0.7°C ; Winter + 1.1°C

**klimasensitiv:  
regionale Änderung > globale Änderung**

## Hintergrund:

- Höhere Temperaturen  $\Rightarrow$  höhere Verdunstungen
- Warme Luft kann mehr Feuchtigkeit transportieren  $\Rightarrow$  erhöhter atm. Wassergehalt
- Latente Wärmeenergie  $\Rightarrow$  höherer atmosphärischer Energieinhalt

**$\Rightarrow$  Intensivierung des Wasserkreislaufs**

## Folgen

- Veränderte Intensitäten
- Veränderte zeitliche & räumliche Verteilung

**$\Rightarrow$  Zunahme von Hochwassergefahr & aber auch Dürreerisiken**

# Extremereignisse: Hochwasser



<i>Hochwasser- ereignis</i>	<i>Total (Mio. €)</i>	<i>Versichert (Mio. €)</i>
Bayern 1999	393	30
Bayern 2005	205	46
D/A/CH 1999	409	40
D/A/CH 2005	3000	1700



# Extremereignisse: Trockenheit und Dürren



**Italien &  
Griechenland 2007**



**Sylvensteinspeicher  
(obere Isar) 2007**



**Rhein 2003**

Population Growth    Economic Development  
Technological Progress



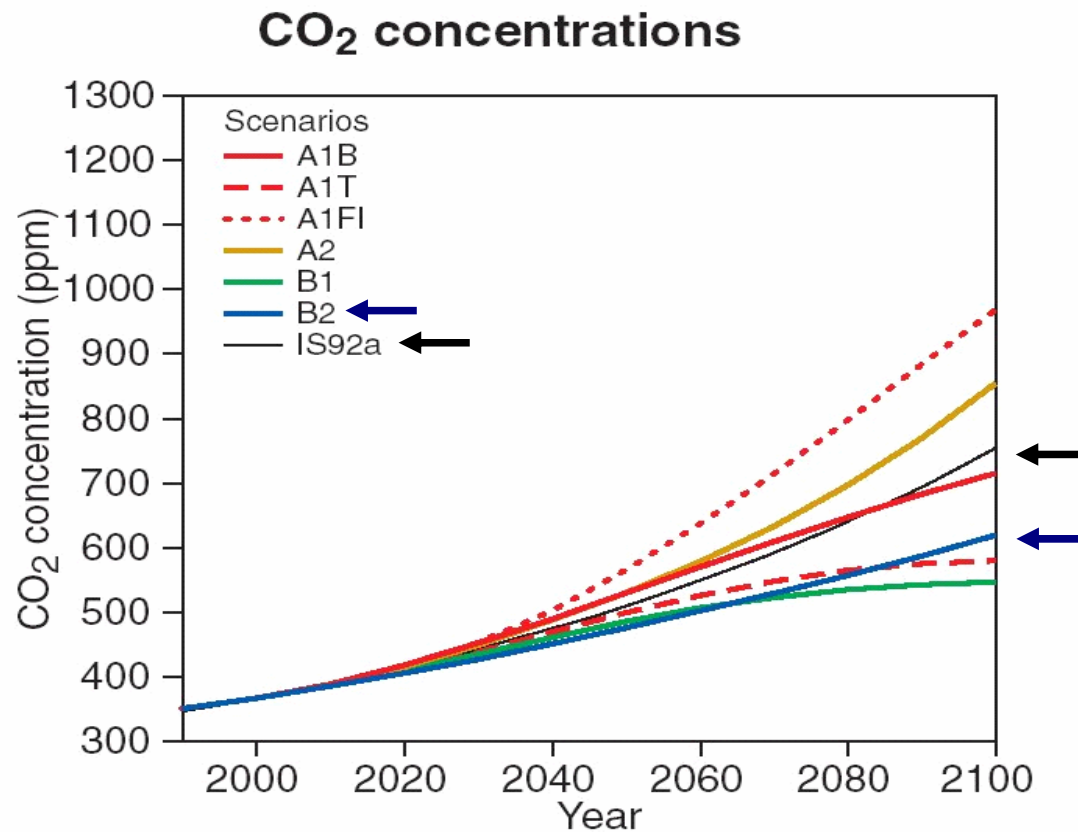
**Emission Scenarios**  
**Greenhouse Gas Concentrations**



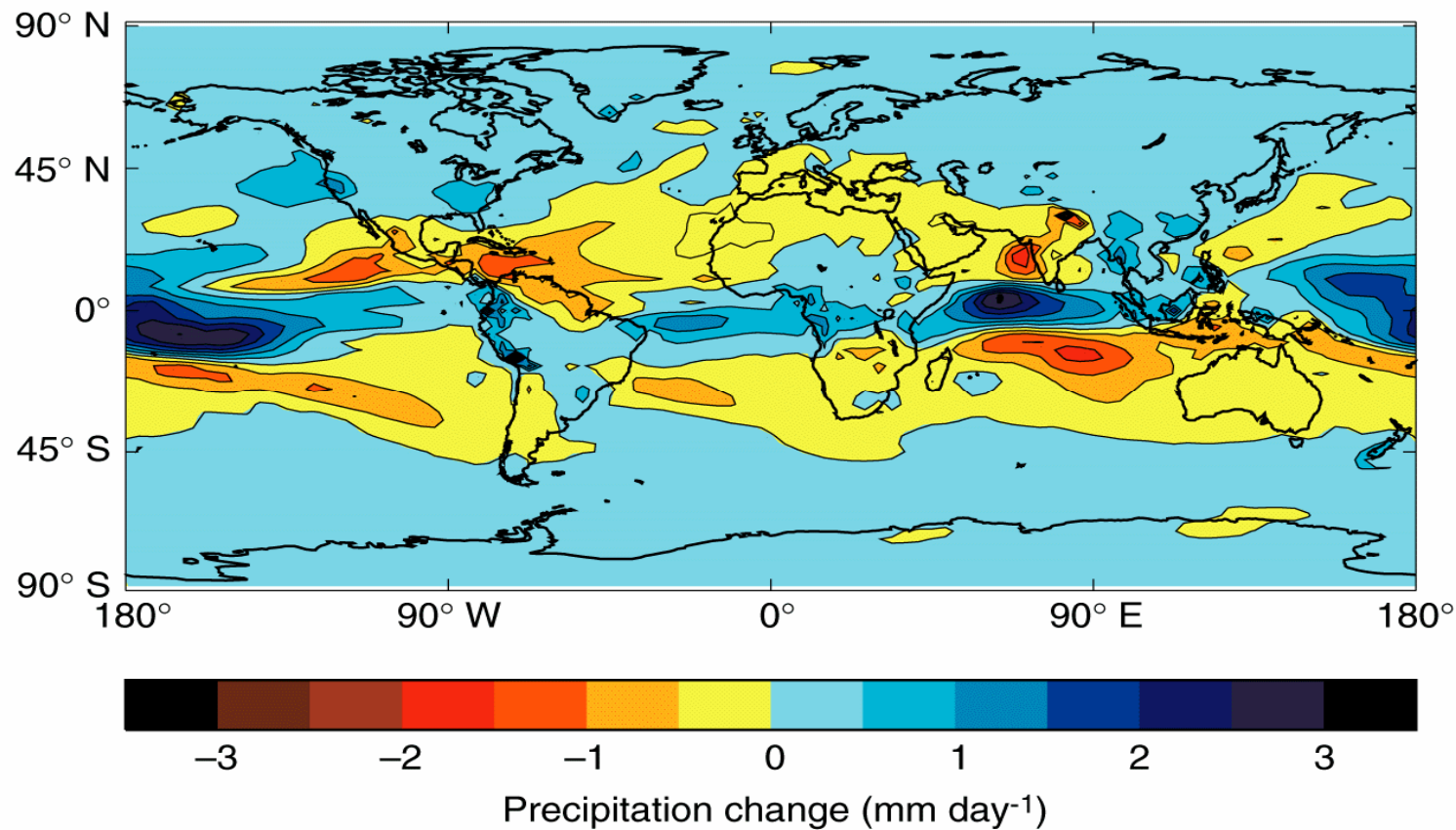
Global Climate Models



**Global Climate Scenarios**



## Prognose Änderungen mittlerer jährlicher Niederschlag bis 2050



⇒ **Auflösung zu grob für regionale Impaktuntersuchungen !**



Population Growth   Economic Development  
Technological Progress



**Emission Scenarios**  
**Greenhouse Gas Concentrations**



Global Climate Models



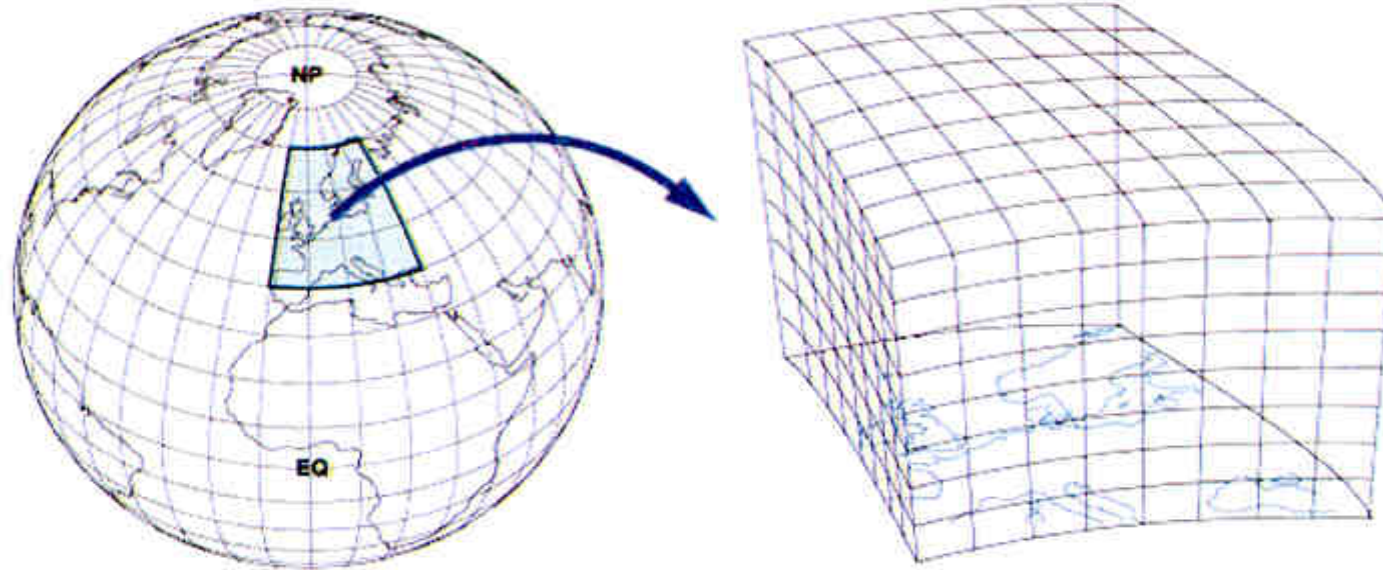
**Global Climate Scenarios**



Downscaling Methods



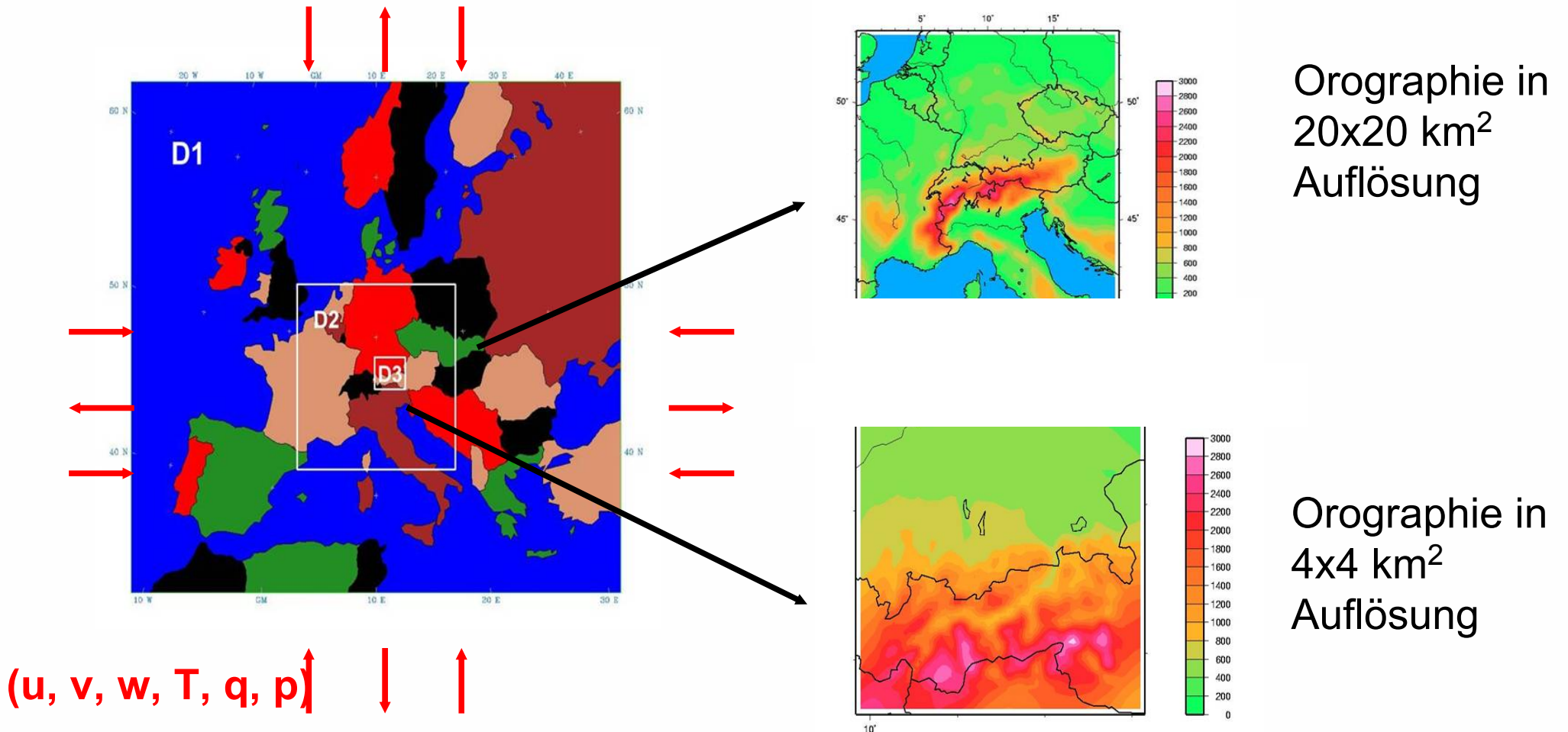
**Regional Climate Scenarios**



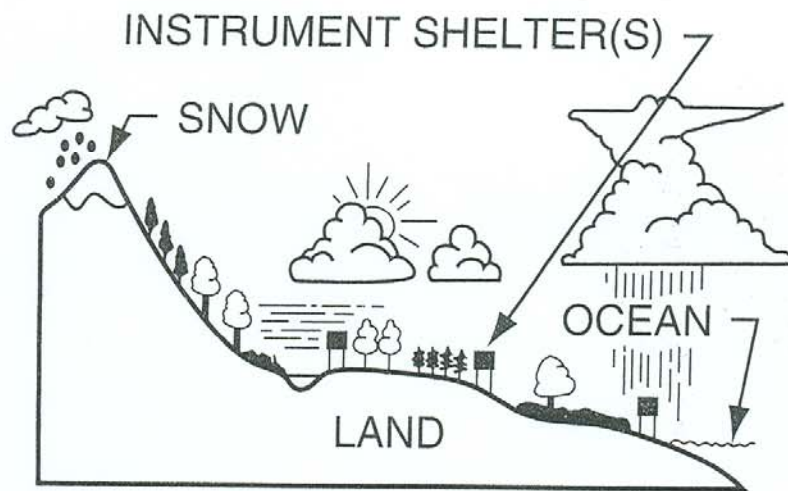
- Erhaltungsgleichungen für Energie & Impuls
- bis zu 7 Erhaltungsgleichungen für Feuchtevariablen
- verschiedene Parameterisierungsschemen für *subgrid*-skalige Prozesse (z.B. für turbulente Grenzschicht & konvektive Niederschläge)
- $\Delta t \approx 6 \text{ sec}-3 \text{ min}$ , z.B.  $80 \times 80 \times 25 = 160,000$  Gitterpunkte
- FD-Schemen zur numerischen Lösung
- Community-codes: MM5, WRF, CLM, ...

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

Hohe räuml. Auflösung  $\Rightarrow$  Detaillierte Berücksichtigung der Orographie

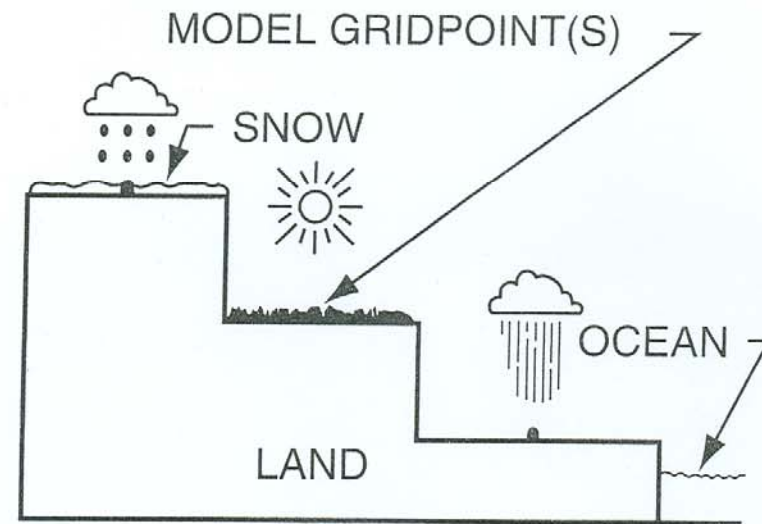


REAL WORLD

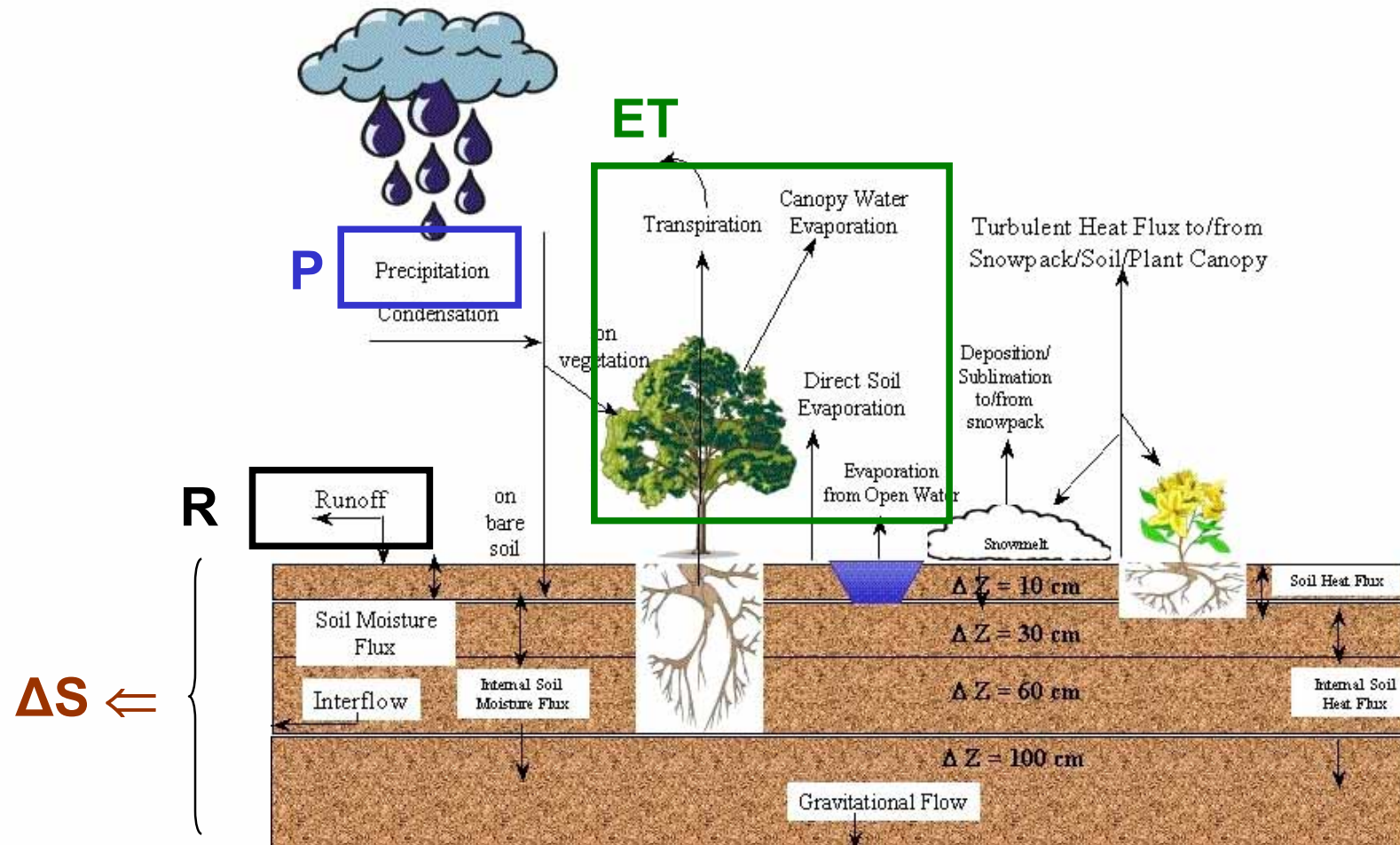


Vs.

MODEL WORLD



## SVAT-Modell als untere Randbedingung an jedem Gitterpunkt



**Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer (SVAT) Model**

## **SVAT- Modelle ( $\Rightarrow$ Rückkopplungen Landoberfläche & Atmosphäre):**

- Berücksichtigung der Energiebilanz (Boden- und sensible Wärmeflüsse)
- 2-Wege Interaktion mit atmosphärischer Grenzschicht
- Focus: vertikale Wasserflüsse (Bodenfeuchte, ET)

## **“Übliche”- Hydrologische Modelle ( $\Rightarrow$ rein hydrologische Fragestellungen):**

- vertikale + laterale Wasserflüsse, Routing Oberflächenabfluss
- Berücksichtigung tieferer Bodenschichten, höhere vertikale & horizontale Auflösungen
- häufig Grundwassr-Interaktion, Erweiterungen für Transportprozesse, Erosion, etc.

## Ansätze zur gemeinsamen/gekoppelten Klima-Hydrologie Simulation

### 2-Wege Kopplung:

- wenige Beispiele, meistens großskalig (z.B. BALTIMOS)
- meistens Anwendung von Routing Schemen auf SVAT-Modelle

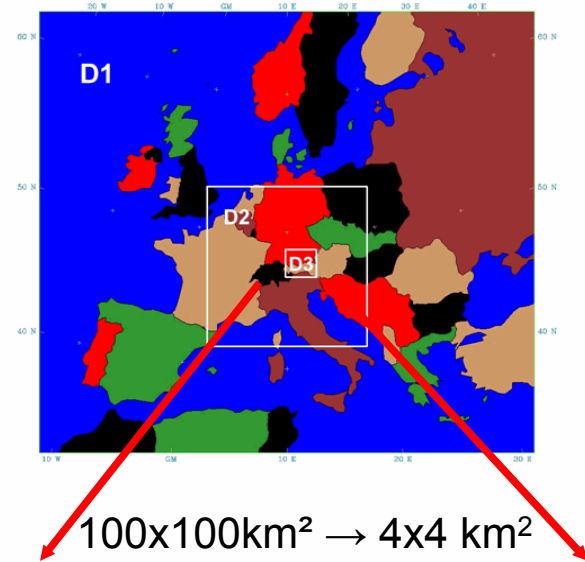
### 1-Wege Kopplung:

- Antrieb des hydr. Modells durch met. Felder des RCM
- Rückkopplung Landoberfläche und Atmosphäre via SVAT-Modell des RCM
- Vielzahl von Beispielen: verschiedene. Skalen, antreibende Modelle Szenarios, etc.

# Regionale Klima-Hydrologie Modellierung

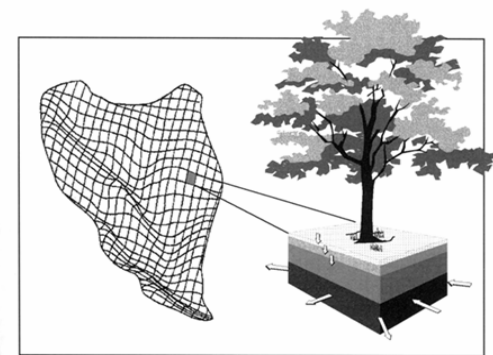
- Temperatur
- Niederschlag
- Wind
- Relative Feuchte
- Globalstrahlung

3-dim.  
atmosphärisches  
Modell



Hydrologisches  
Modell

- Orographie
- Landnutzung
- Bodeneigenschaften
- Aquifereigenschaften
- Flussnetz



100x100 m<sup>2</sup> Auflösung

Evapotranspiration Infiltration **Abfluss** Grundwasser



## z.B. Hydrologisches Modell WaSiM-ETH

**Physikalisch basierte** Algorithmen  
für vertikale Wasserflüsse & Grundwasser:

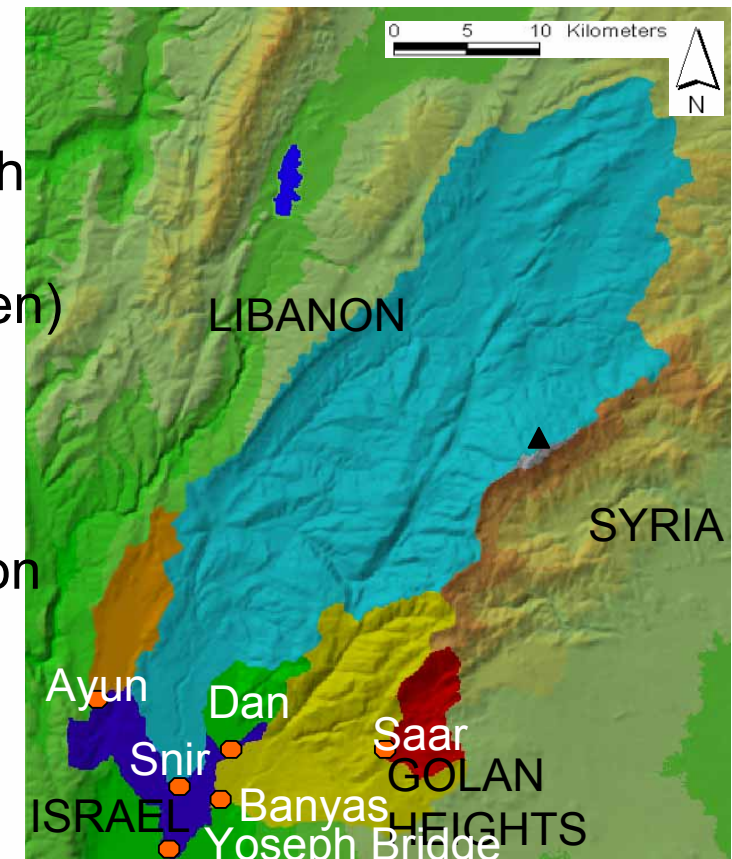
- Evapotranspiration: Boden- und vegetationsspezifisch
- Flüsse in ungesättigter Zone (Richards)
- Saugspannung und hydr. Leitfähigkeit (van Genuchten)
- 2-dim Grundwassermodell dynamisch gekoppelt an ungesättigte Zone

**Konzeptionelle Ansätze** für laterale Abflussaggregation

- Fließzeitzone gefaltet mit Linearspeicher
- Abflussrouting: kinematische Welle

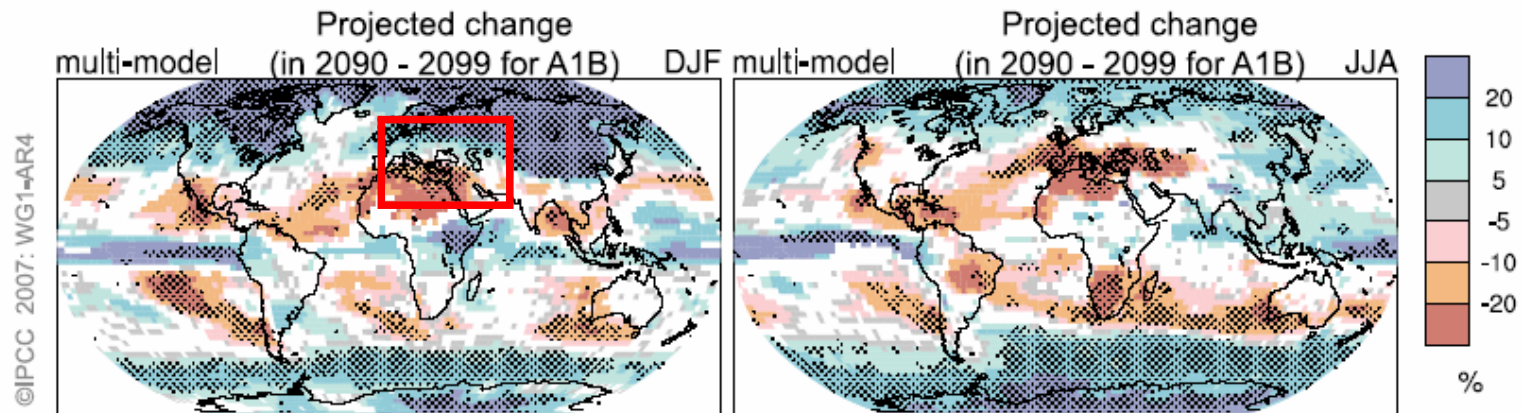
## z.B. Oberes Jordan Einzugsgebiet

- räumliche Auflösung: 90x90 m<sup>2</sup>
- zeitliche Auflösung: täglich



# Was bedeutet die Klimaänderung für einzelne Einzugsgebiete?

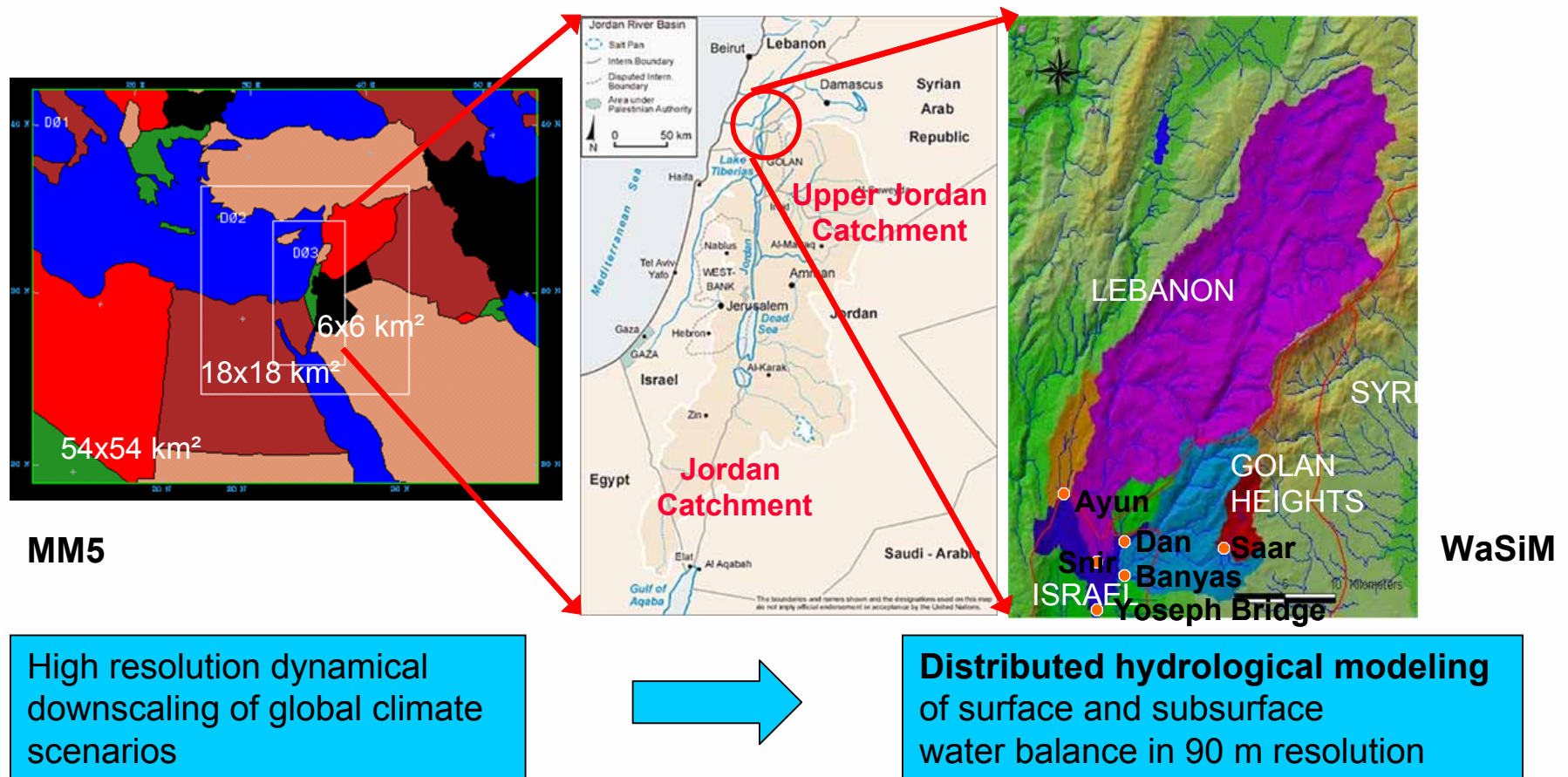
**Beispiel I: Oberes Jordan Einzugsgebiet  
Östliches Mittelmeer / Mittlerer Osten**



IPCC 4AR, 2007

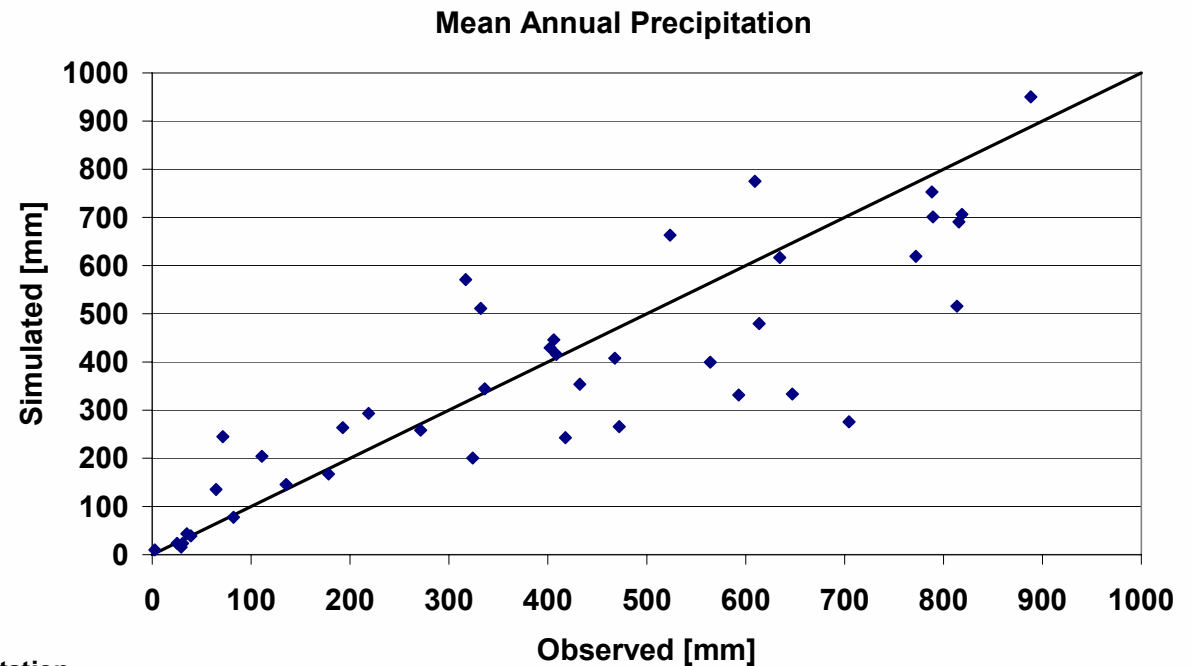
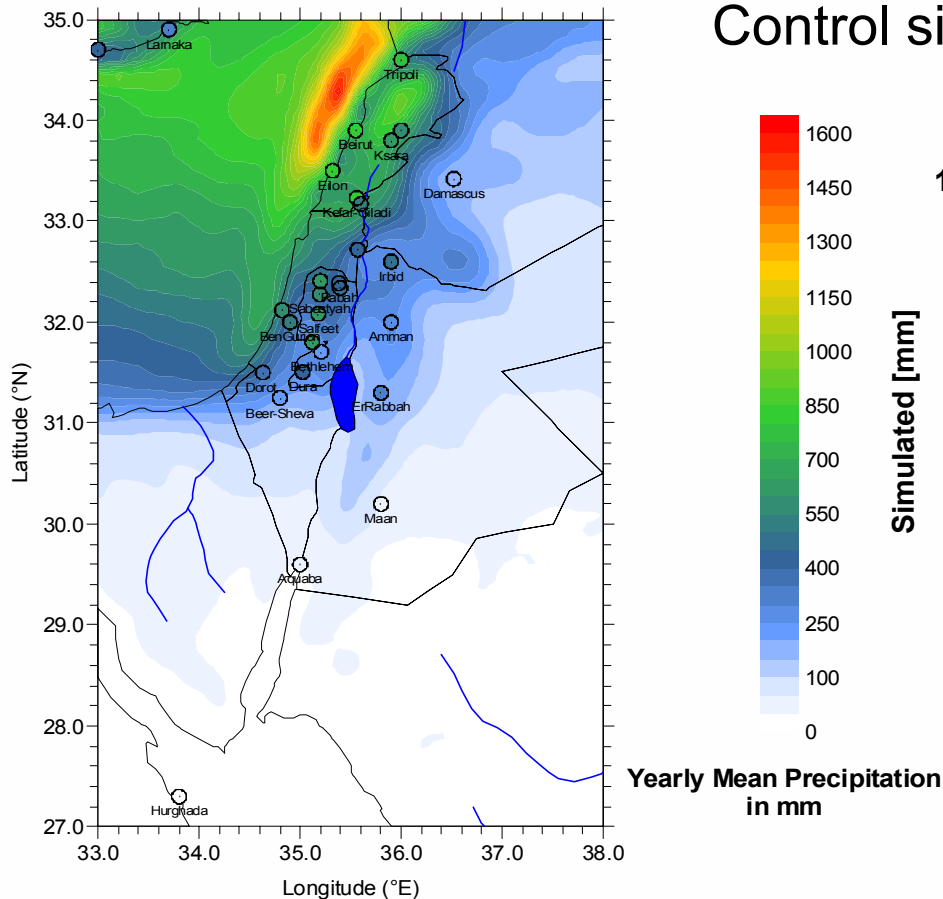
**Eastern Mediterranean/Near East:  
is in between increasing and decreasing dominant  
large scale patterns of DJF precipitation change**

## Eastern Mediterranean/Near East (EM/NE) & Upper Jordan River Catchment



## Performance of regional climate simulations for hydrological impact analysis

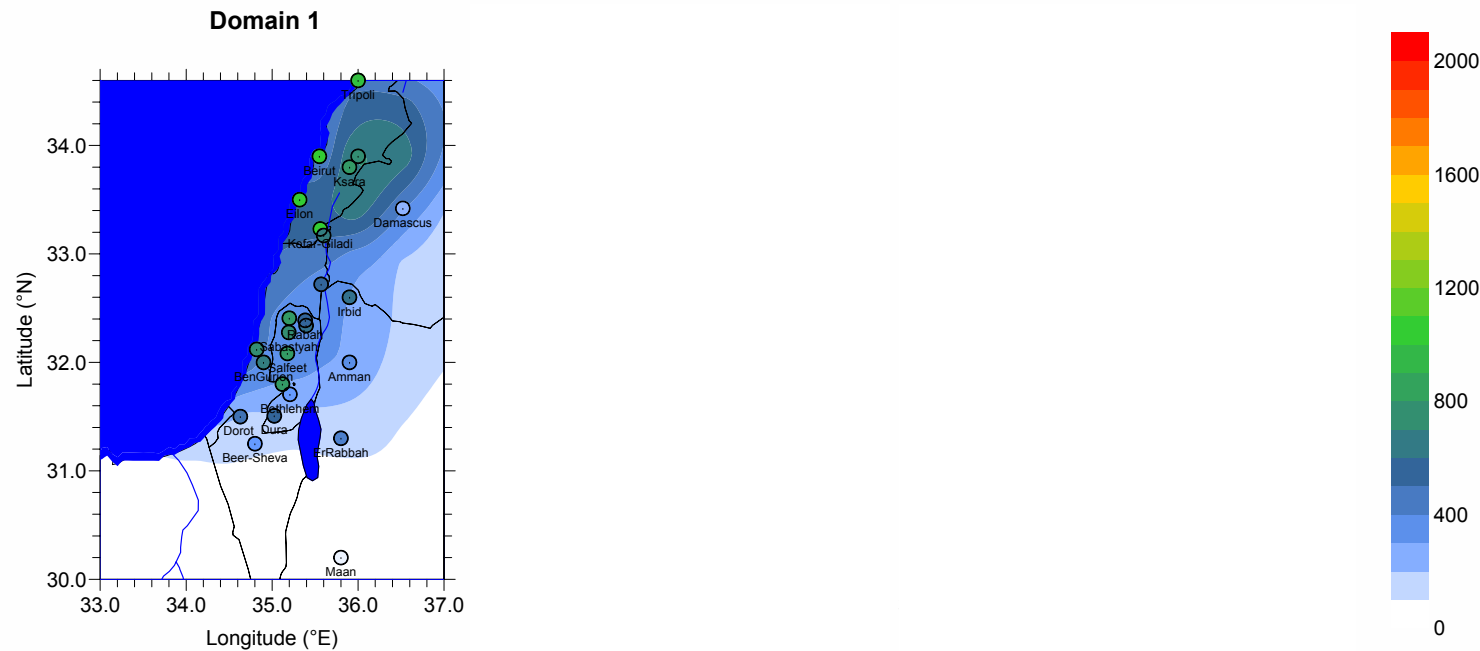
### Control simulations (present day climate)



Simulated annual mean precipitation (ECHAM4 + MM5,  $\Delta x=18$  km, 1961-1990) vs. observed long term annual mean (for selected stations 1961-1990)

## High Resolution Control Run

Intermediate results of 6 km runs: mean 1961-1975



Yearly Mean Precipitation 1961-1975

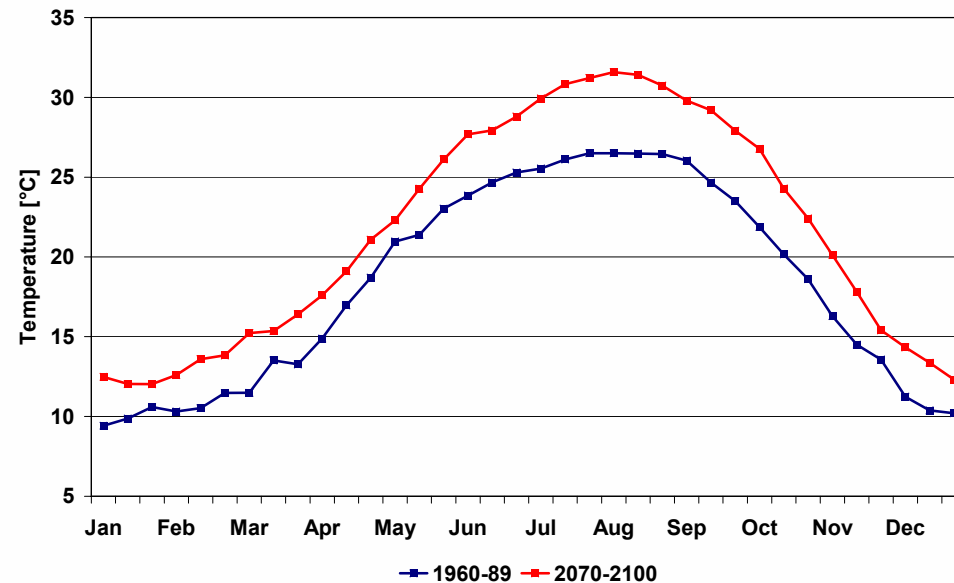
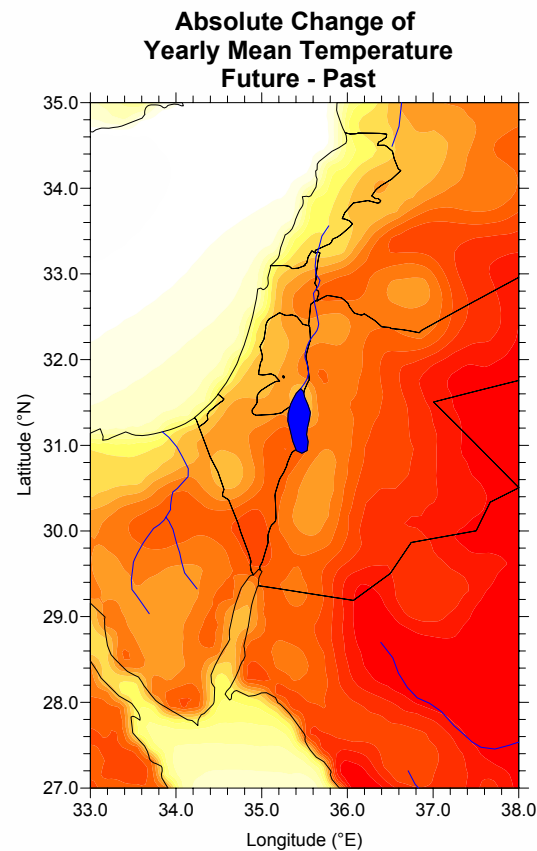
54km

18 km

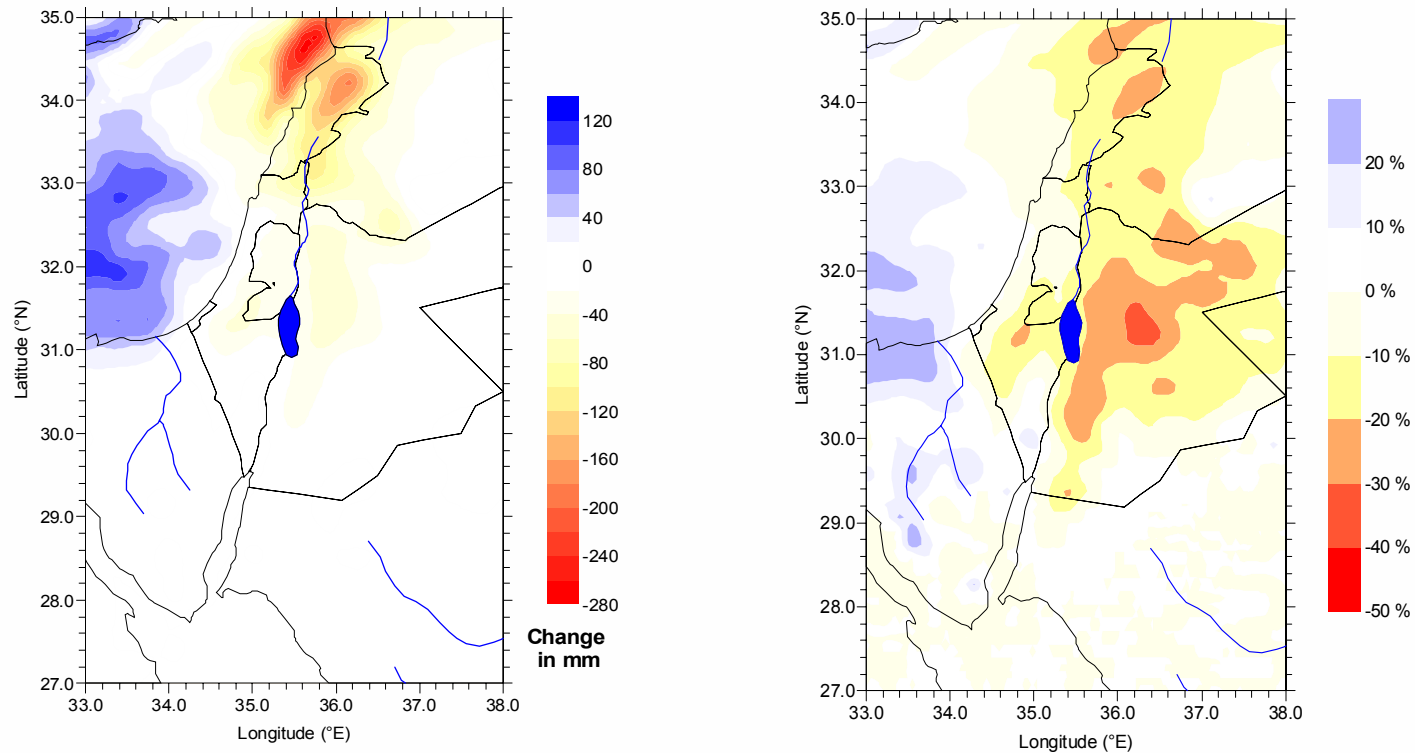
6 km

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

## What are the expected changes in temperature?



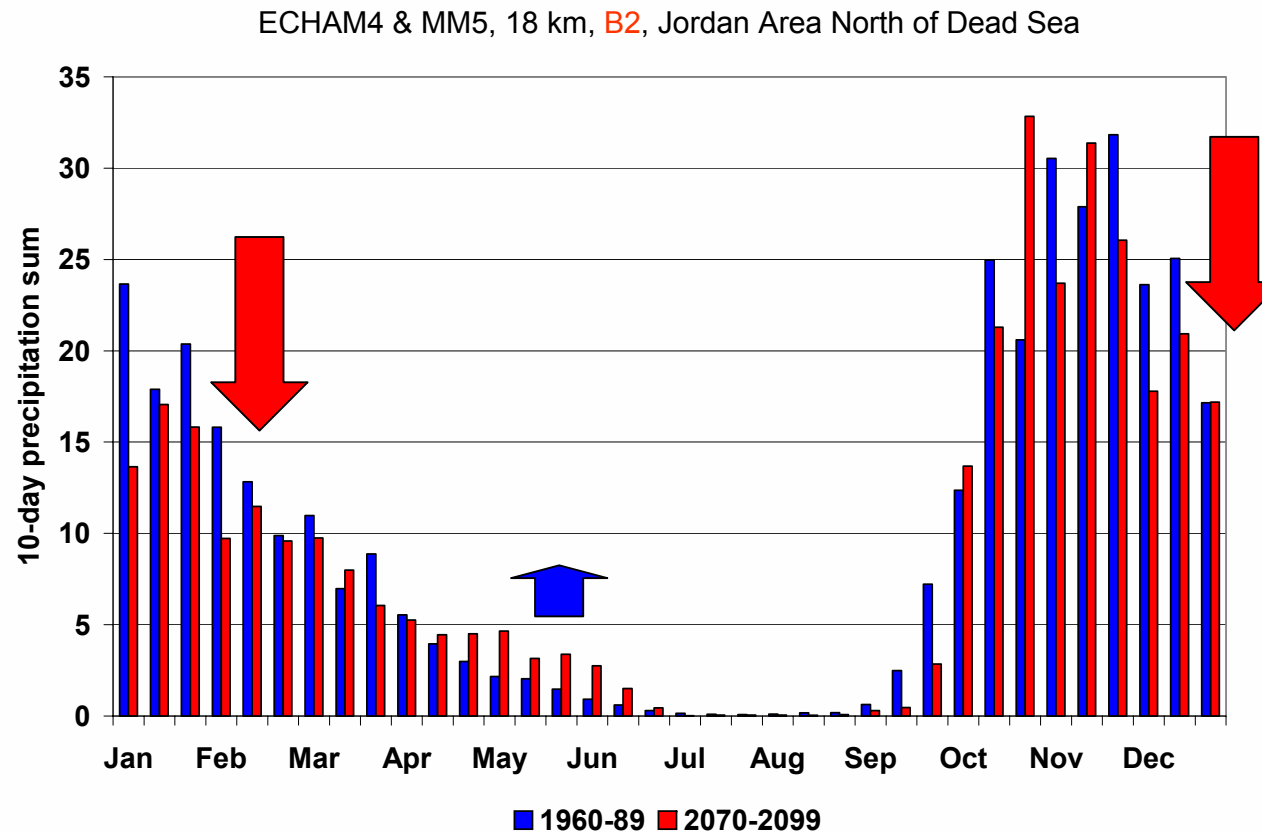
## What are the expected changes in precipitation?



ECHAM4 & MM5, 18 km, B2, 2070-2099 vs 1961-1990

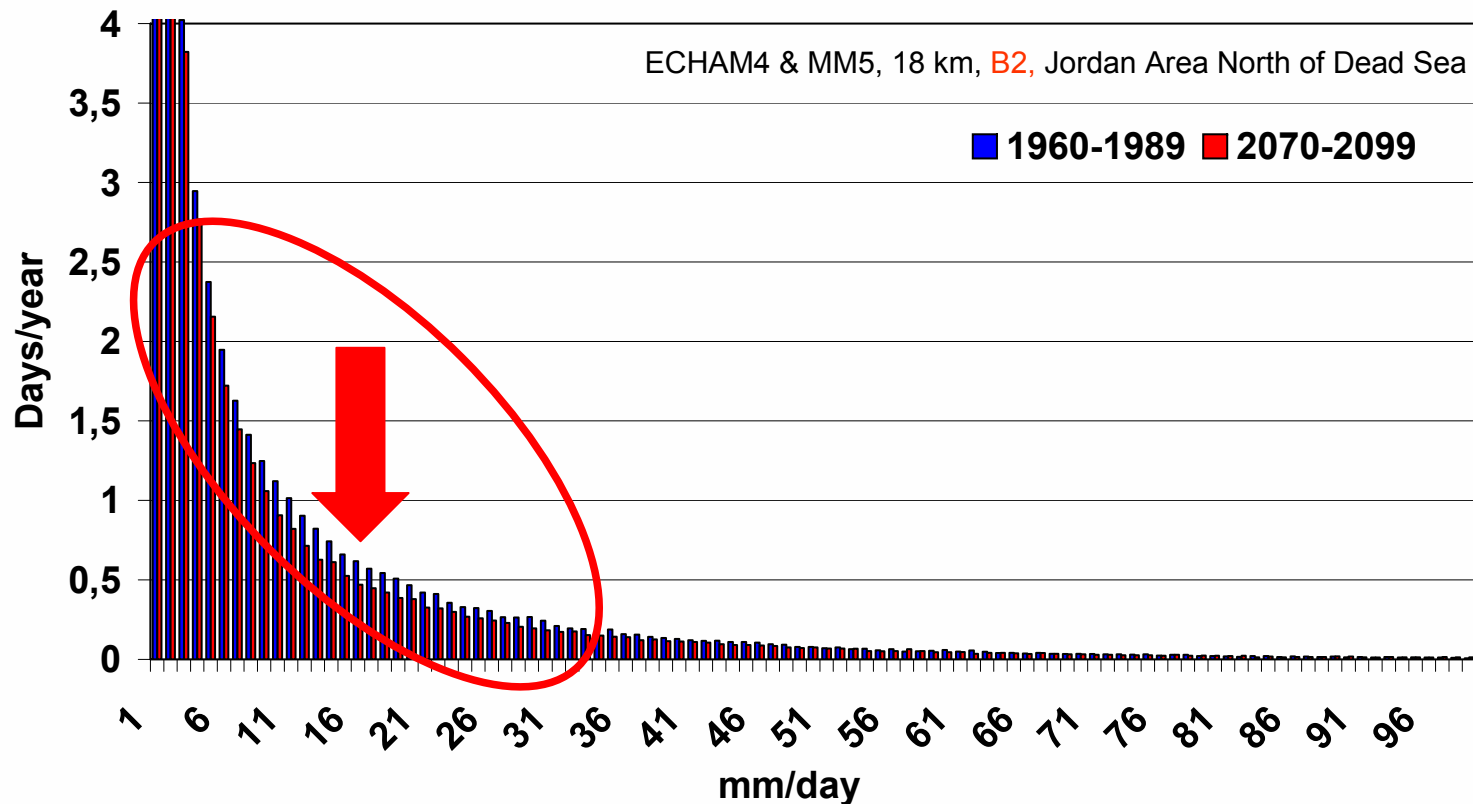


## How does the temporal distribution of precipitation change?



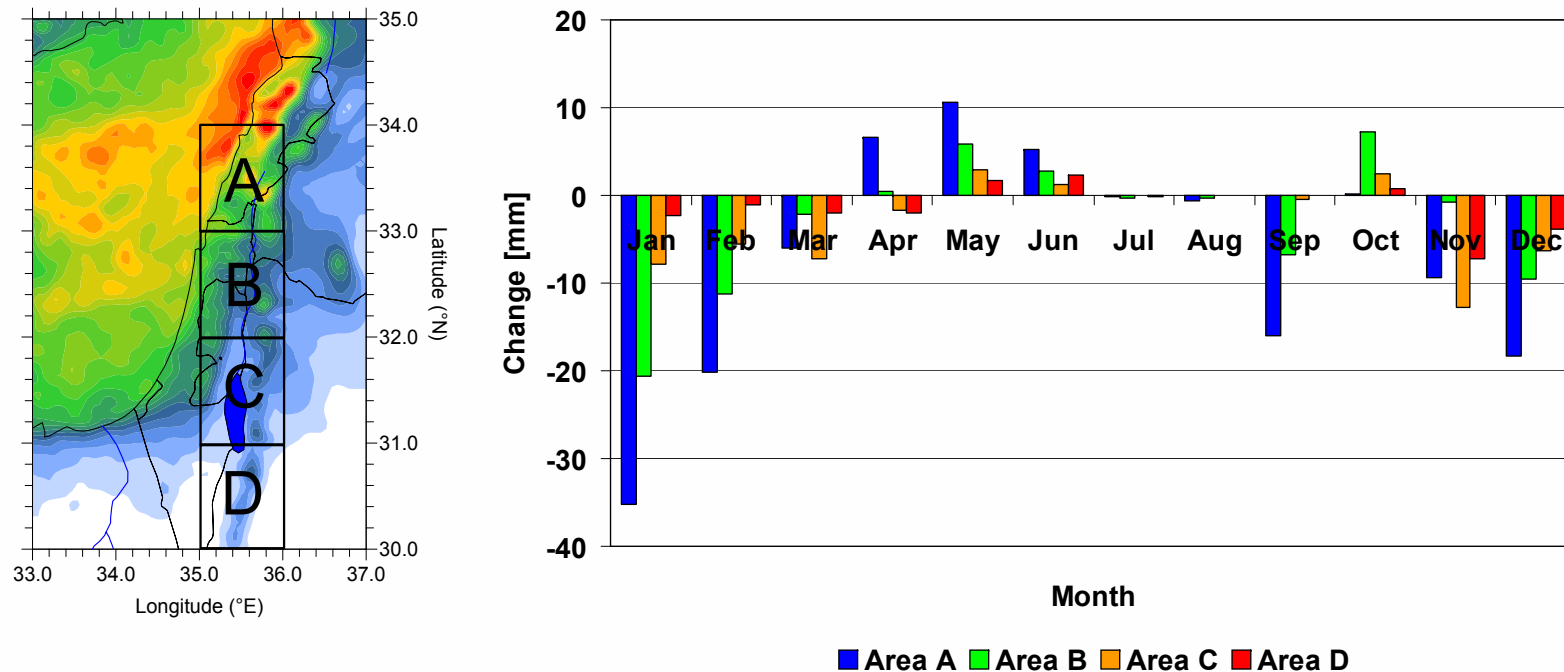
**Strongly decreased winter, slightly increased absolute late spring precipitation**

## How do precipitation intensities change?



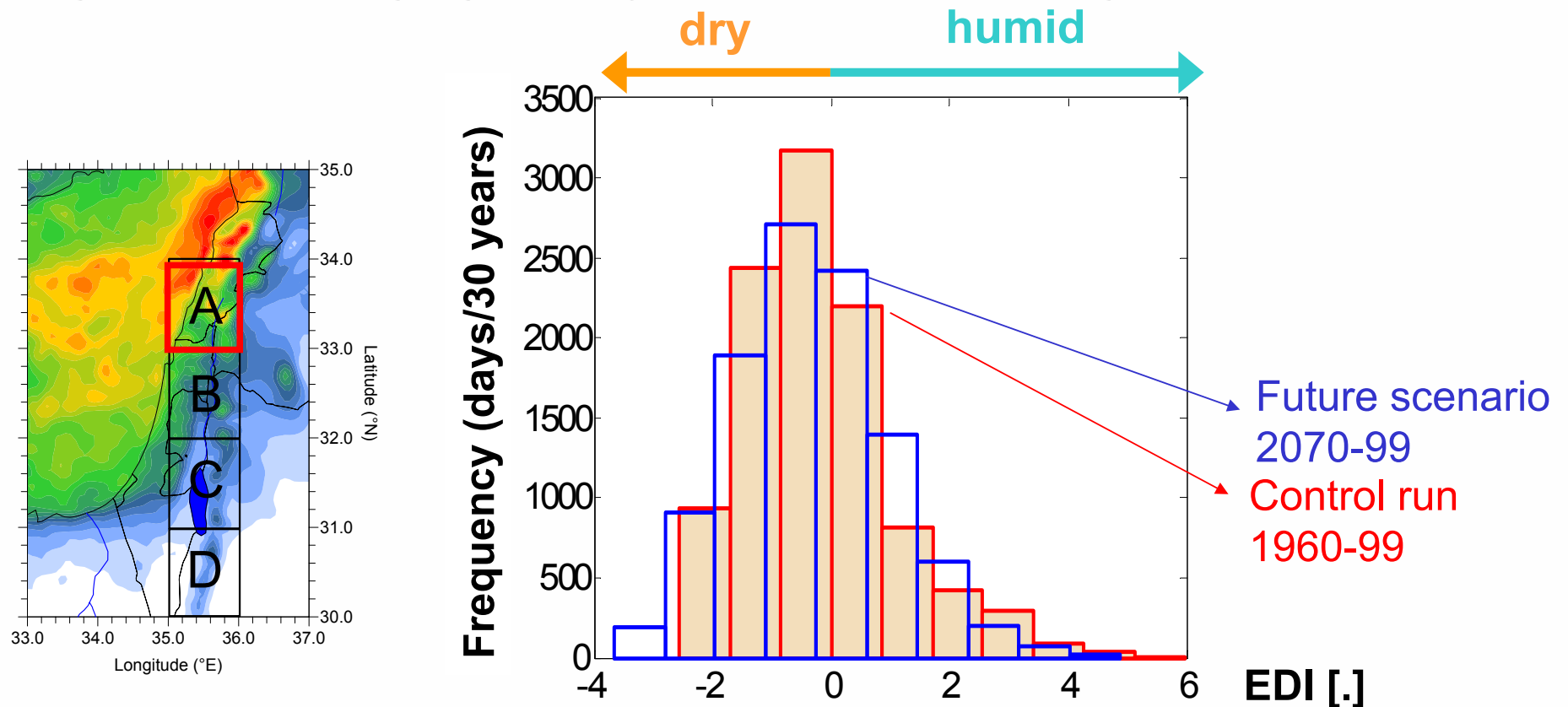
**Tendency towards decrease of precipitation intensity**

How does seasonal precipitation change depend on the region?



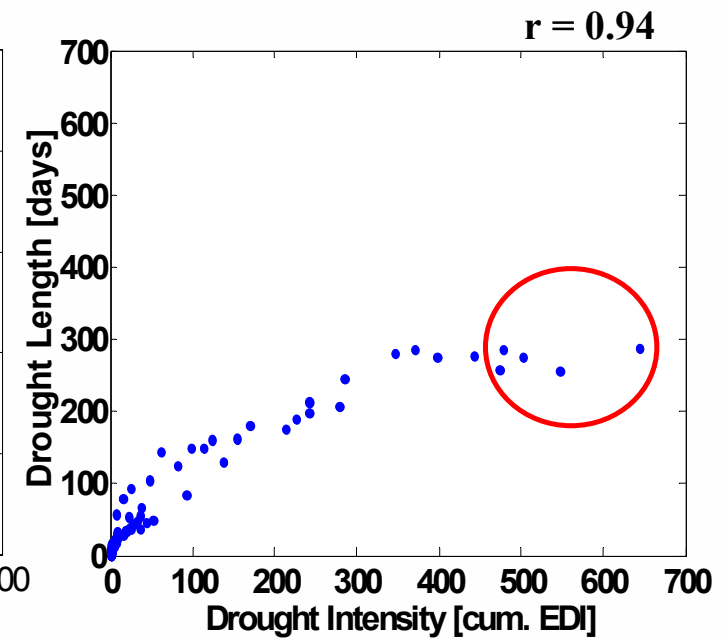
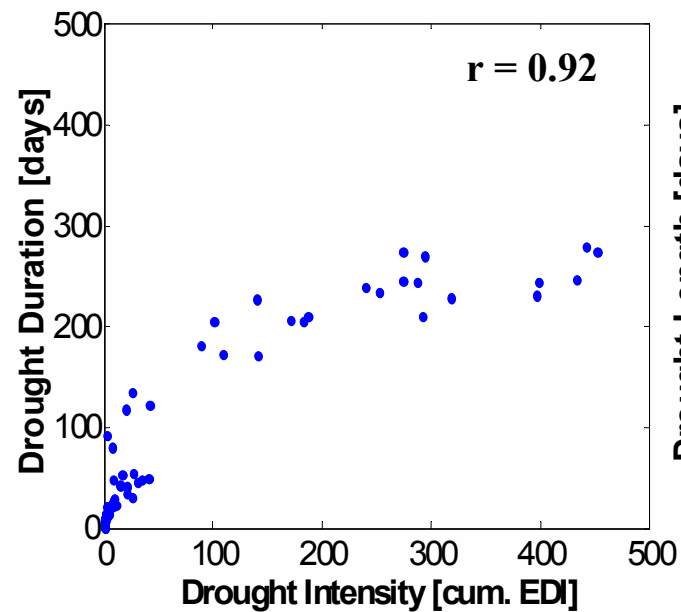
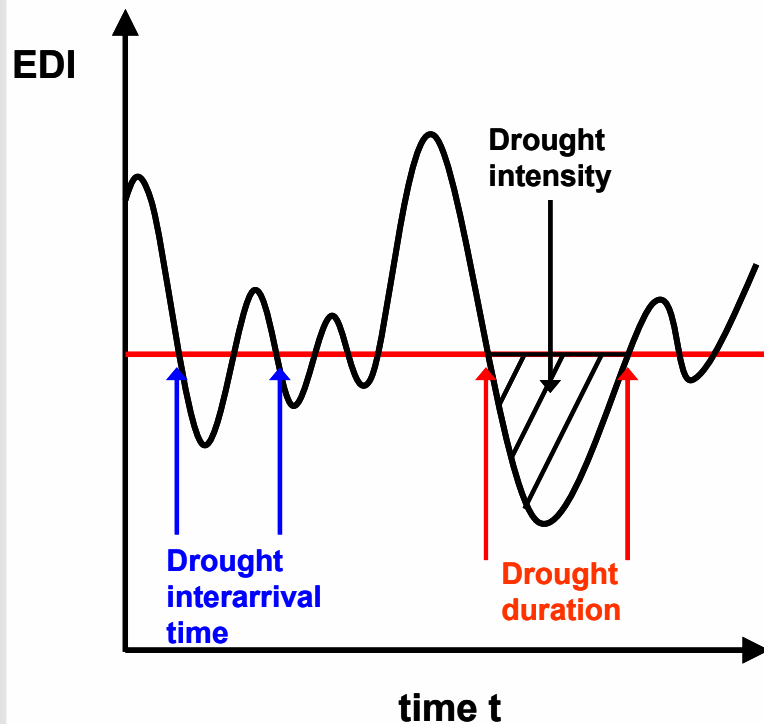
**For all subregions: Decreased winter, increased spring precipitation**

## Are drought risks changing? Analysis of effective drought index EDI



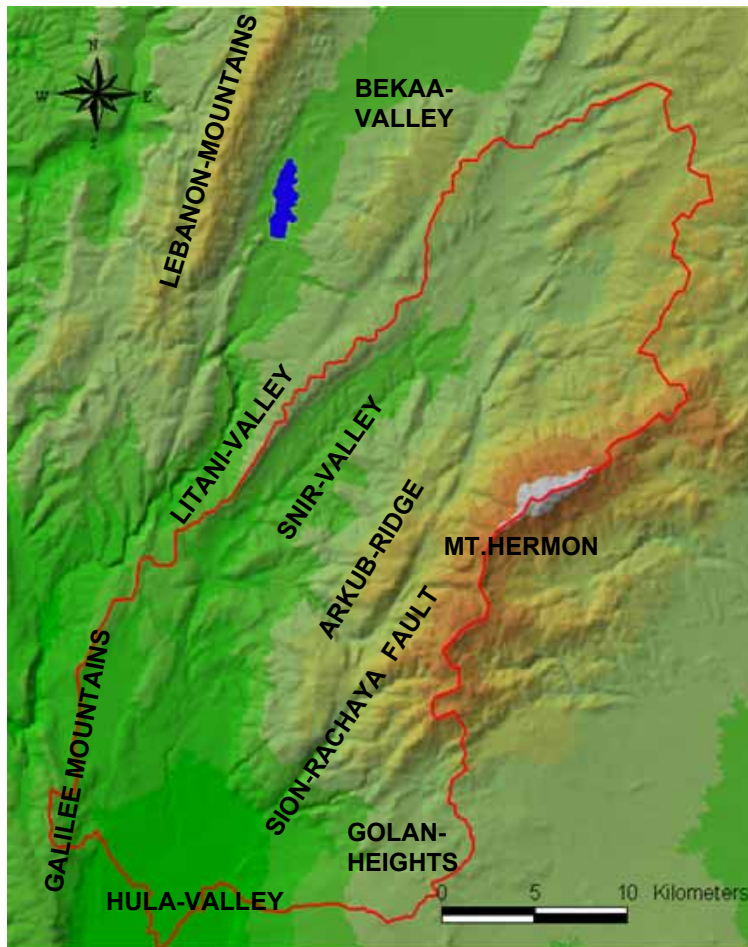
**Subregion A: shift towards drier conditions & increased drought risks**

## Are drought risks changing? Analysis of effective drought index EDI



**Subregion A: Increasing drought intensities, but “unchanging” drought durations**

## The Upper Jordan Catchment



**Area:** 855 km<sup>2</sup>

Max. height: 2814 m.a.s.l. (Mount Hermon)

Min. height: 80 m.a.s.l. (Hula-Valley)

**Complex hydrogeology** & groundwater/surface water interactions

**Precipitation:**

750 mm/a: in the valleys

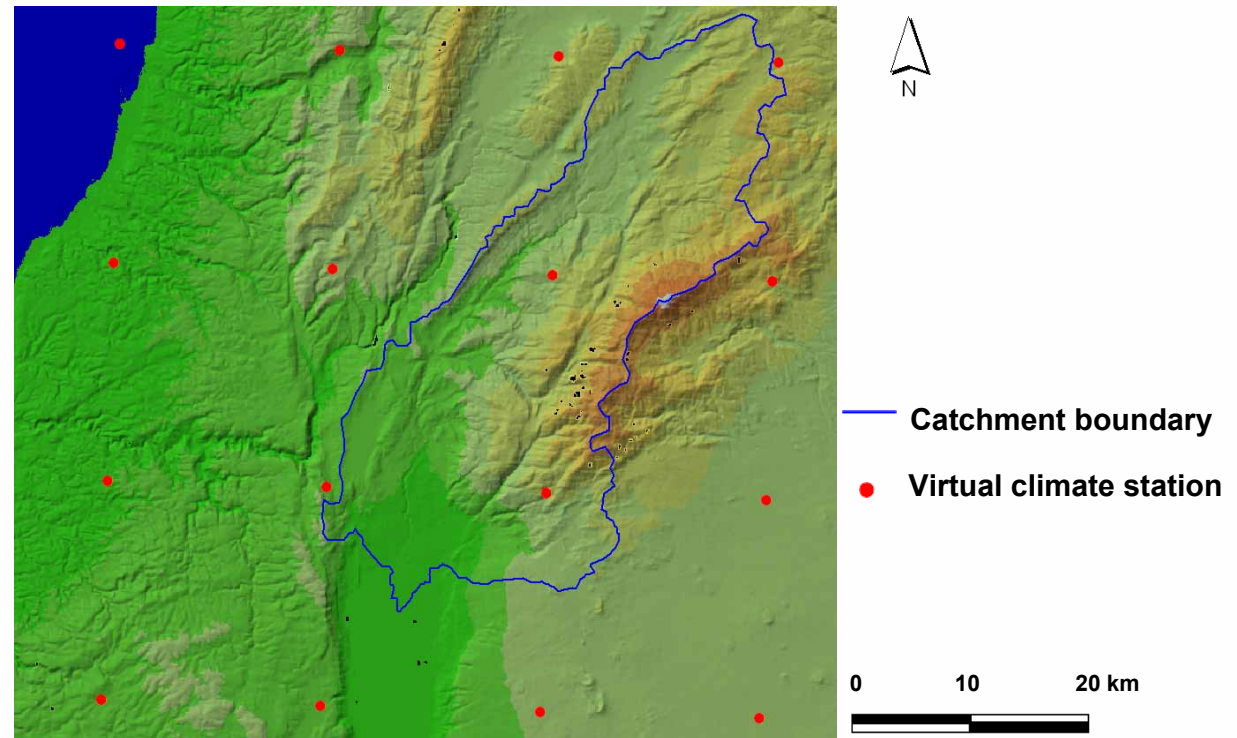
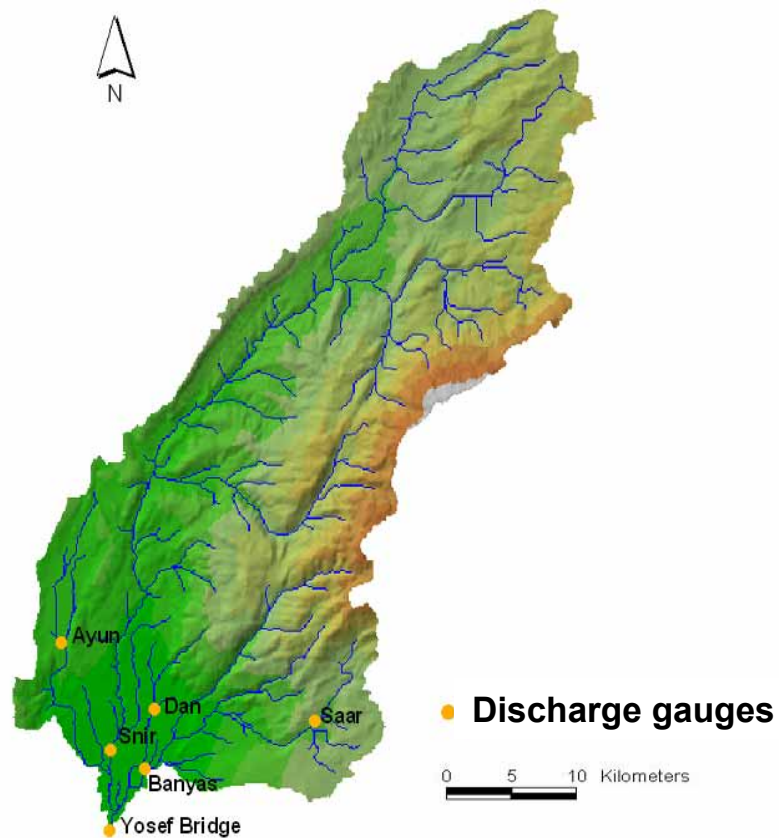
1200-1500 mm/a: top of Mt. Hermon

**Cross-bordering:** Lebanon, Syria, Israel, Golan Heights

Restricted and **limited data availability**

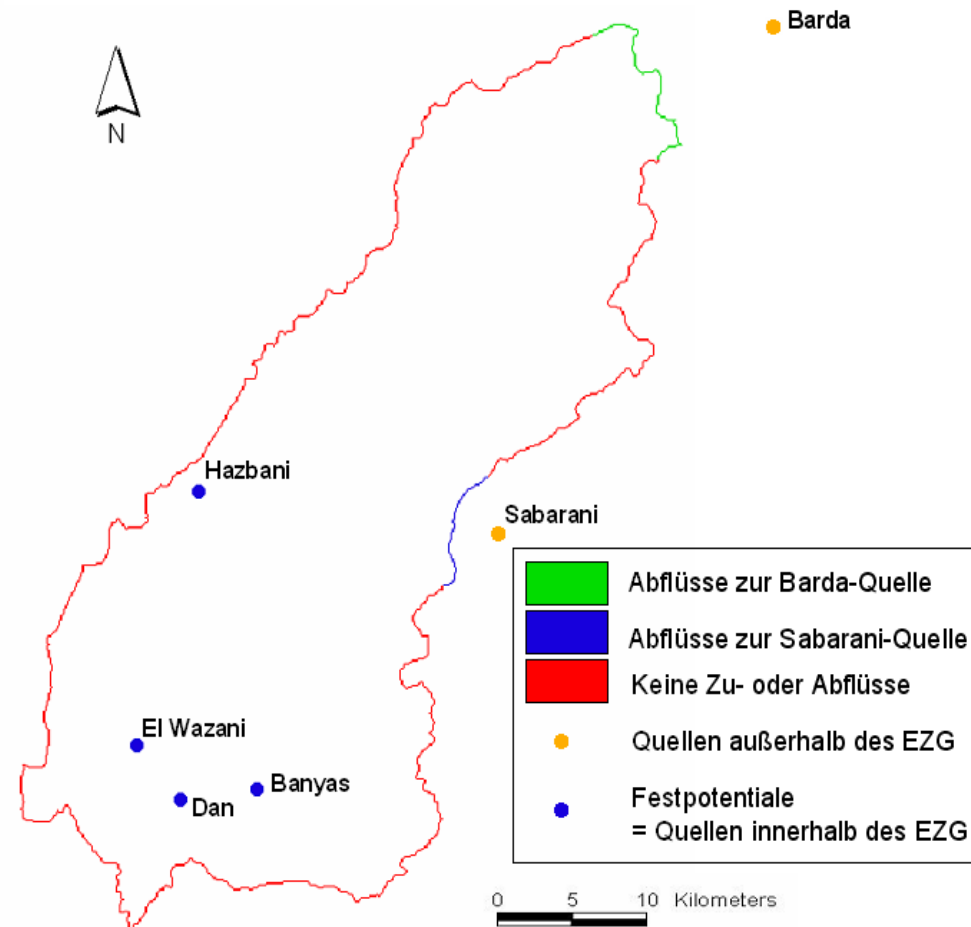
**6 Gauges:** Ayun, Snir, Banyas, Dan, Saar, Yoseph Bridge

Grid points RCM  $\Rightarrow$  virtual meteorological observation stations



## Boundary Conditions for Groundwater Model

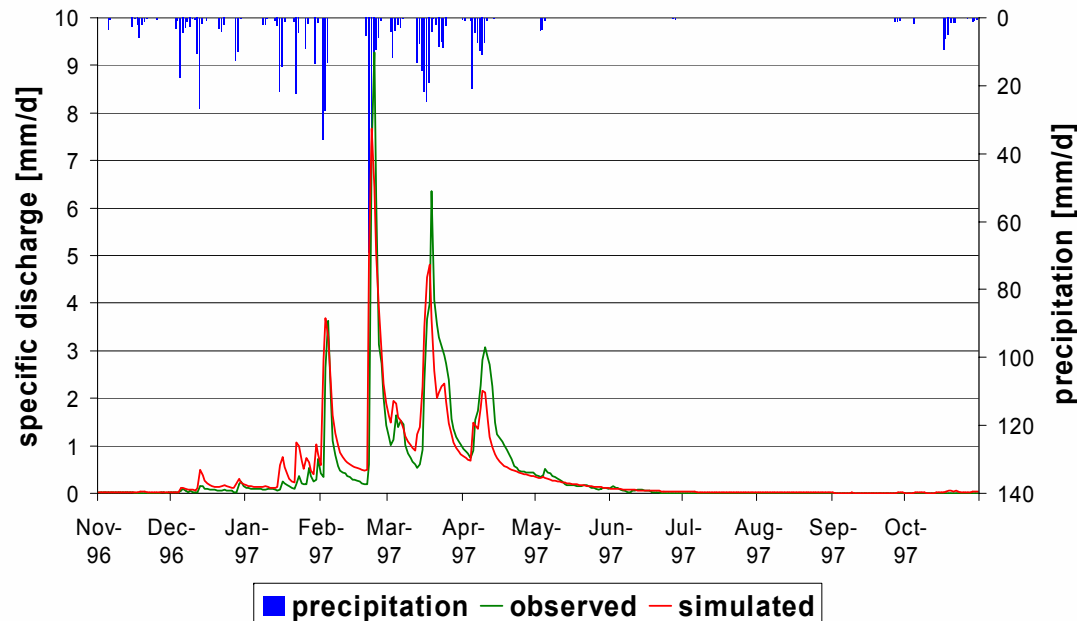
Maximum depth of unsaturated zone assumed:  
= 100 m



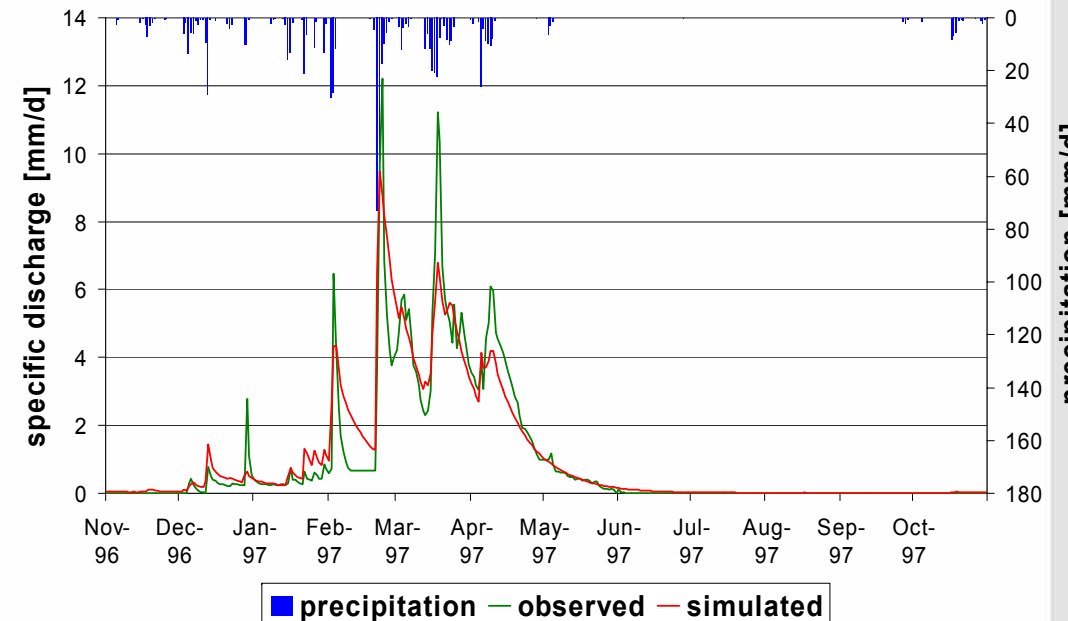


## Hydrological Simulations

Episode	Gauge	Banyas	Saar	Snir	Ayun	Yoseph Bridge
Validation (1998)	NSE-lin	0.8525	0.4066	0.3839	0.5527	0.7402
	NSE-log	0.7894	0.2997	0.6128	0.4098	0.5502
Calibration (1997)	NSE-lin	0.7187	0.5938	0.782	0.7311	0.8408
	NSE-log	0.4602	0.5377	0.69	0.3726	0.6472

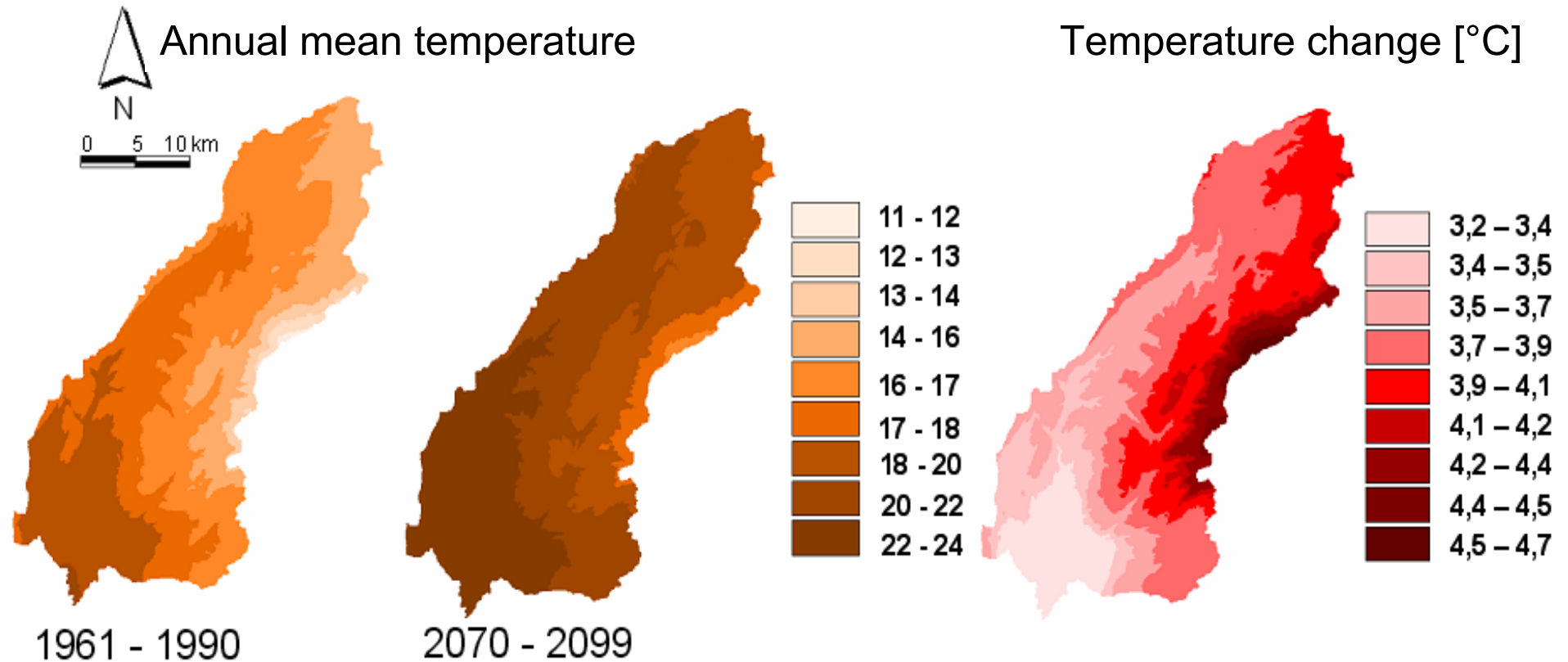


### Gauge Ayun

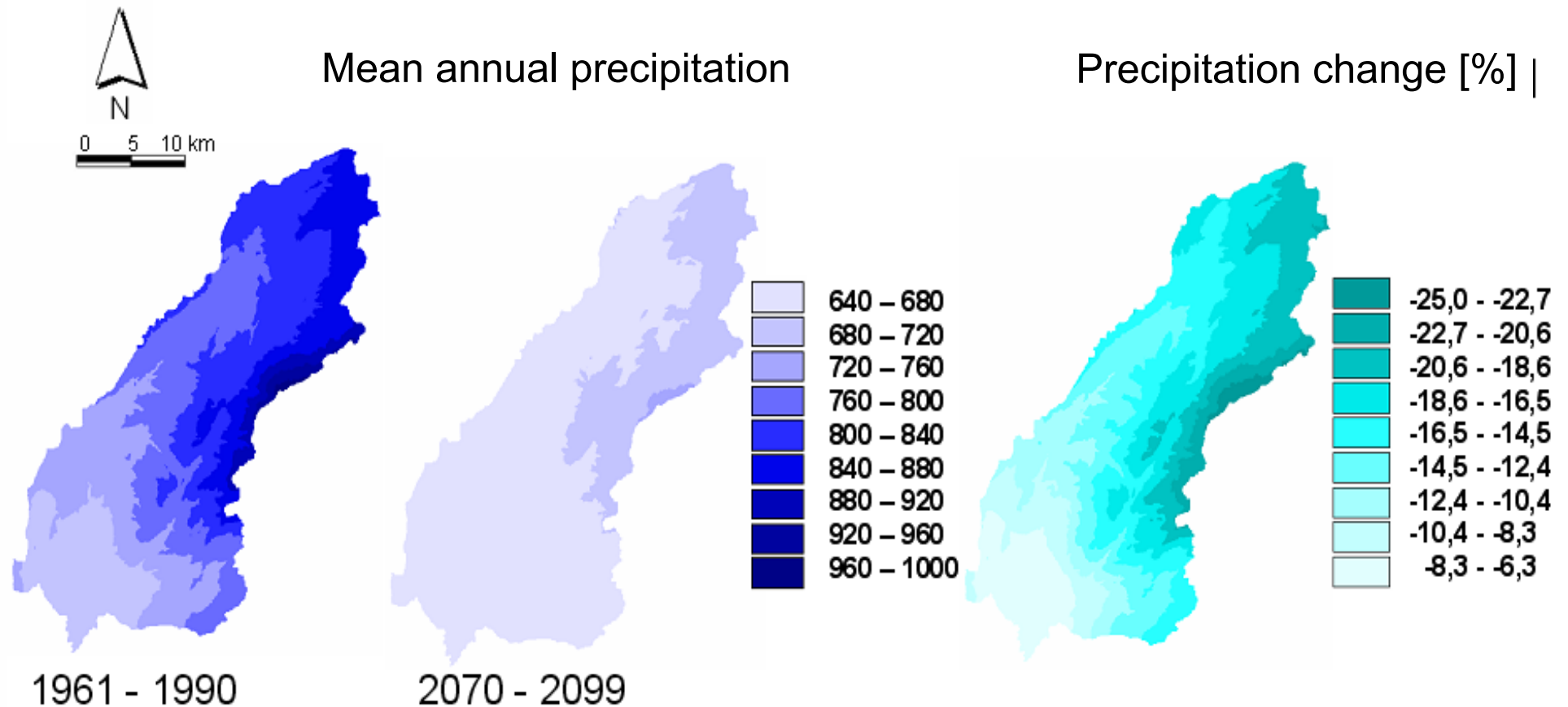


### Gauge Saar

## Upper Jordan River catchment

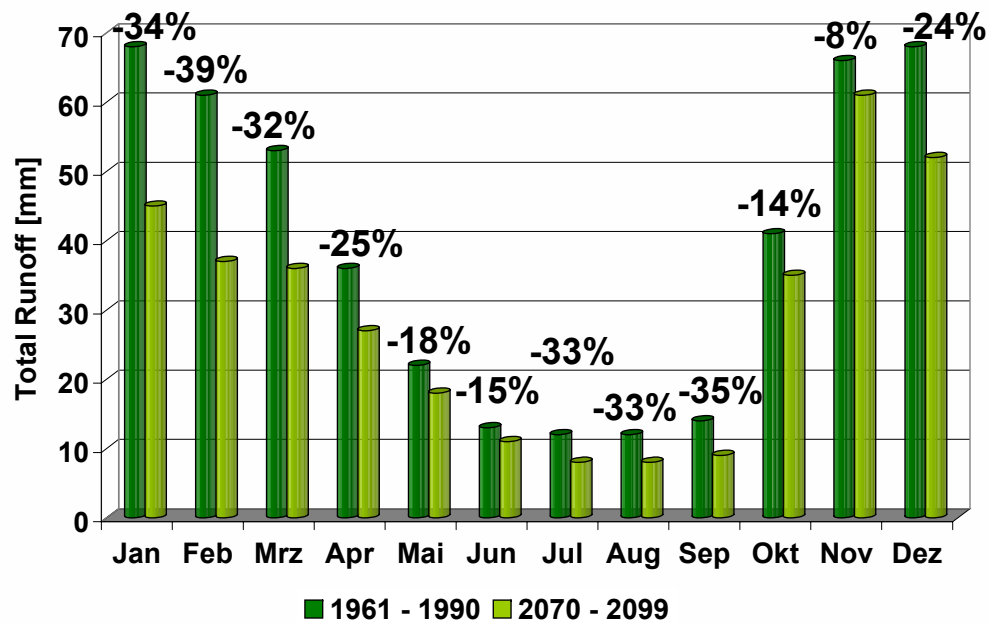


## Upper Jordan River catchment

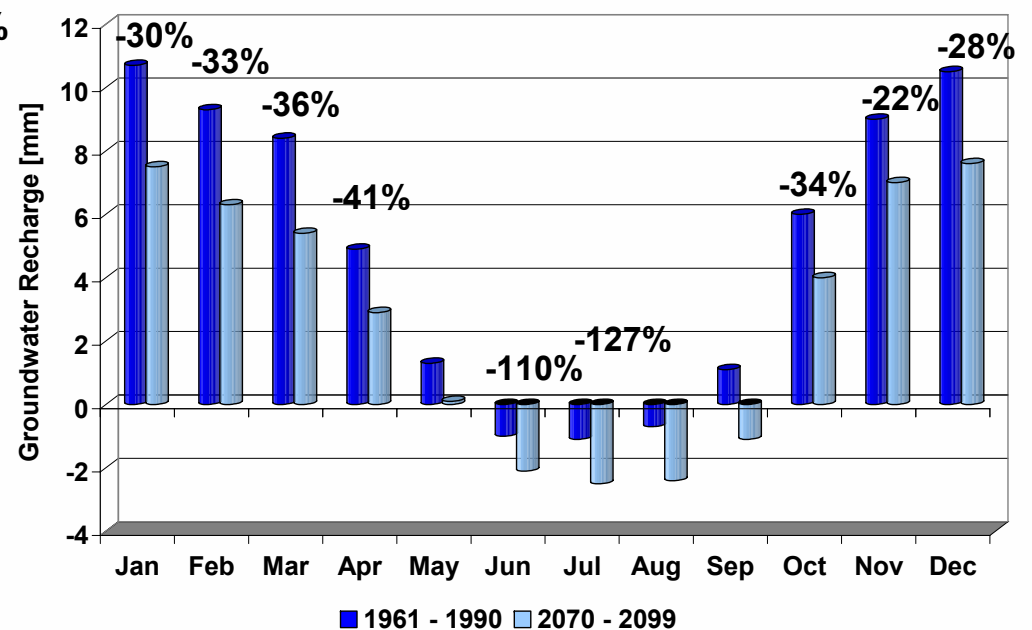


## Upper Jordan River catchment

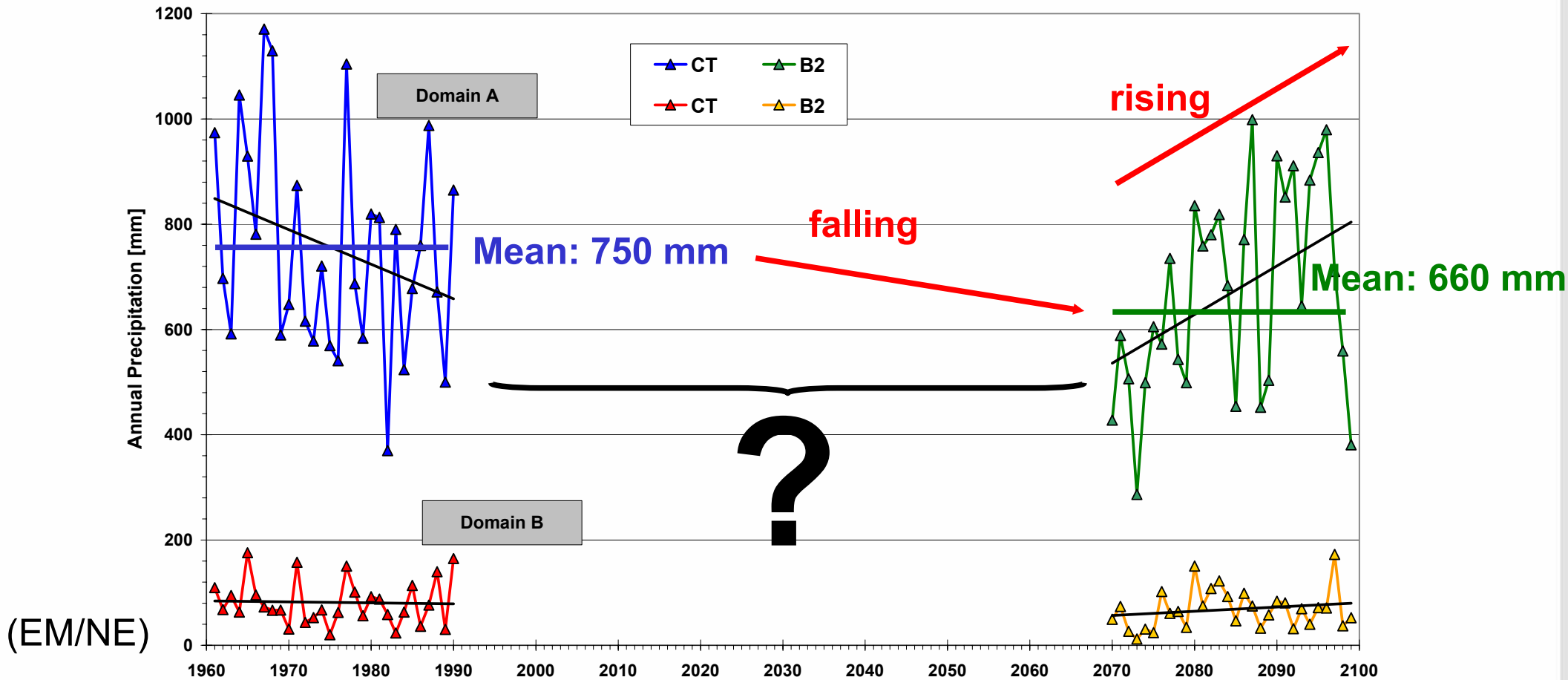
### Runoff



### Groundwater Recharge

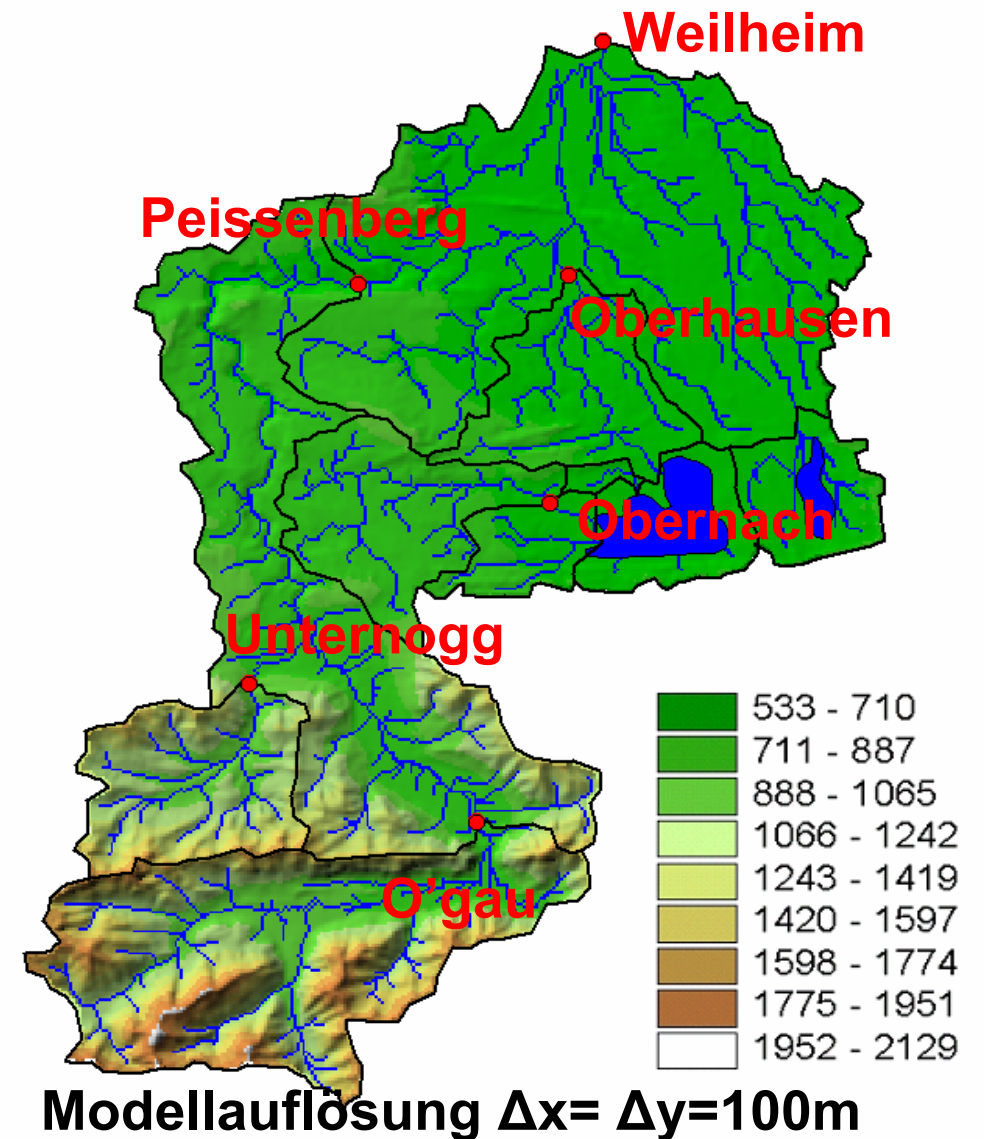
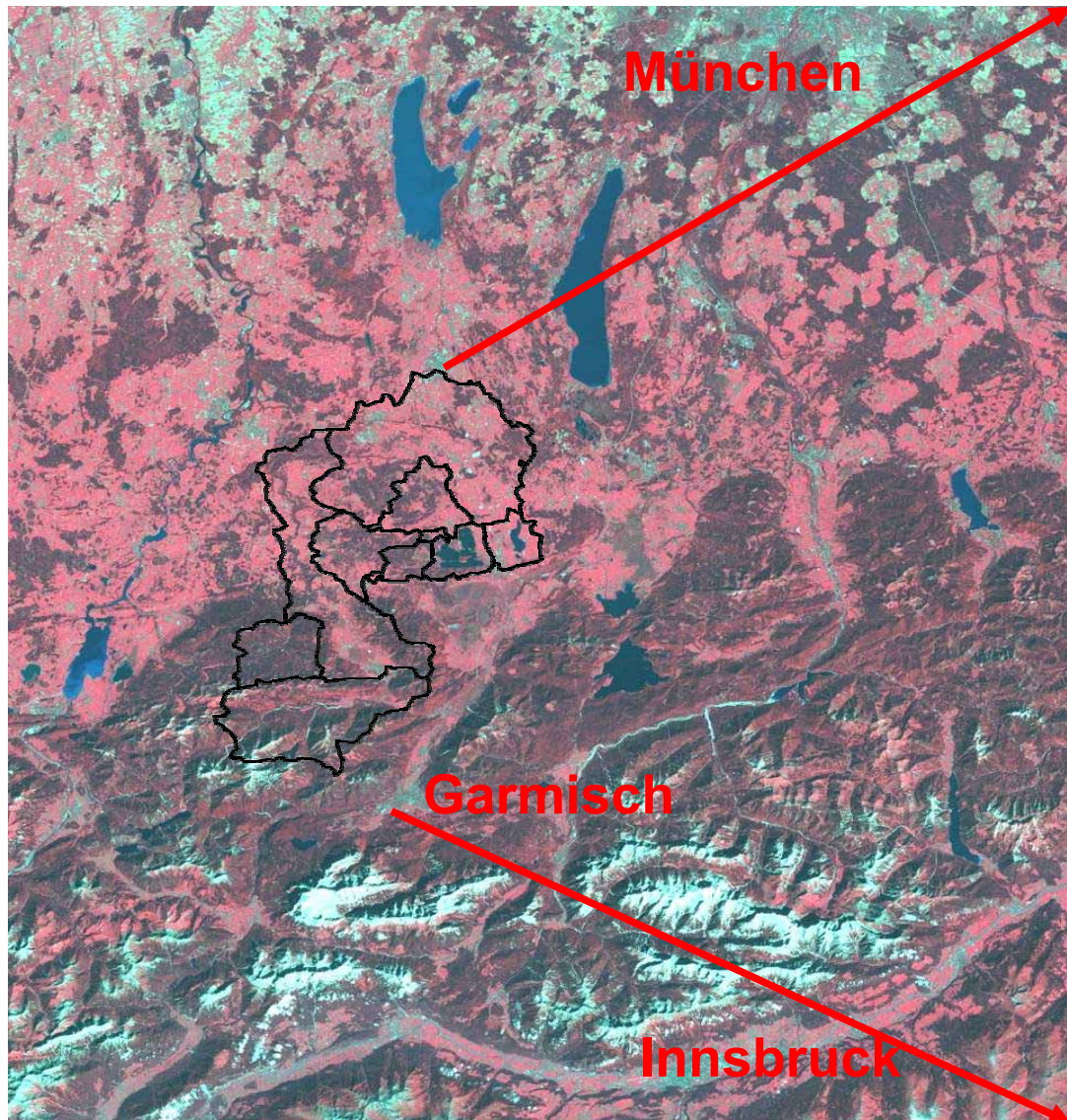


## Problem of comparing time slices: long term trend vs. short term trend



# Was bedeutet die Klimaänderung für einzelne Einzugsgebiete?

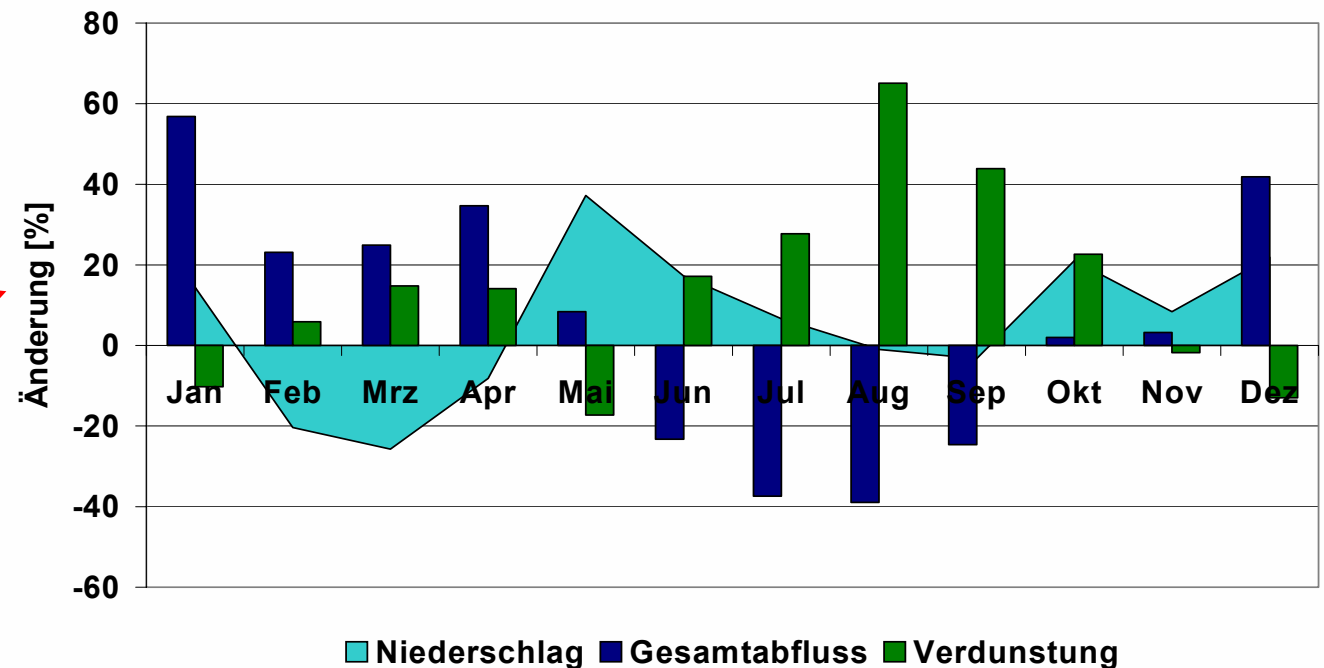
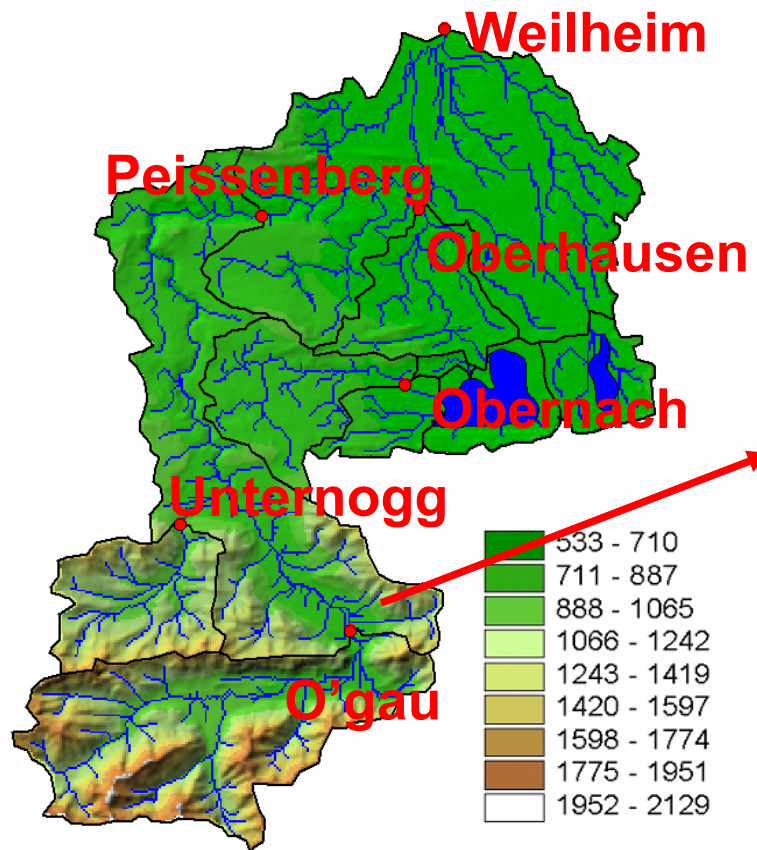
## Beispiel II : Ammer Einzugsgebiet Süddeutscher Alpenraum



Modellkaskade ECHAM4 – MM5 – WaSiM

Änderung 1990-99 vs. 2030-39

Oberammergau



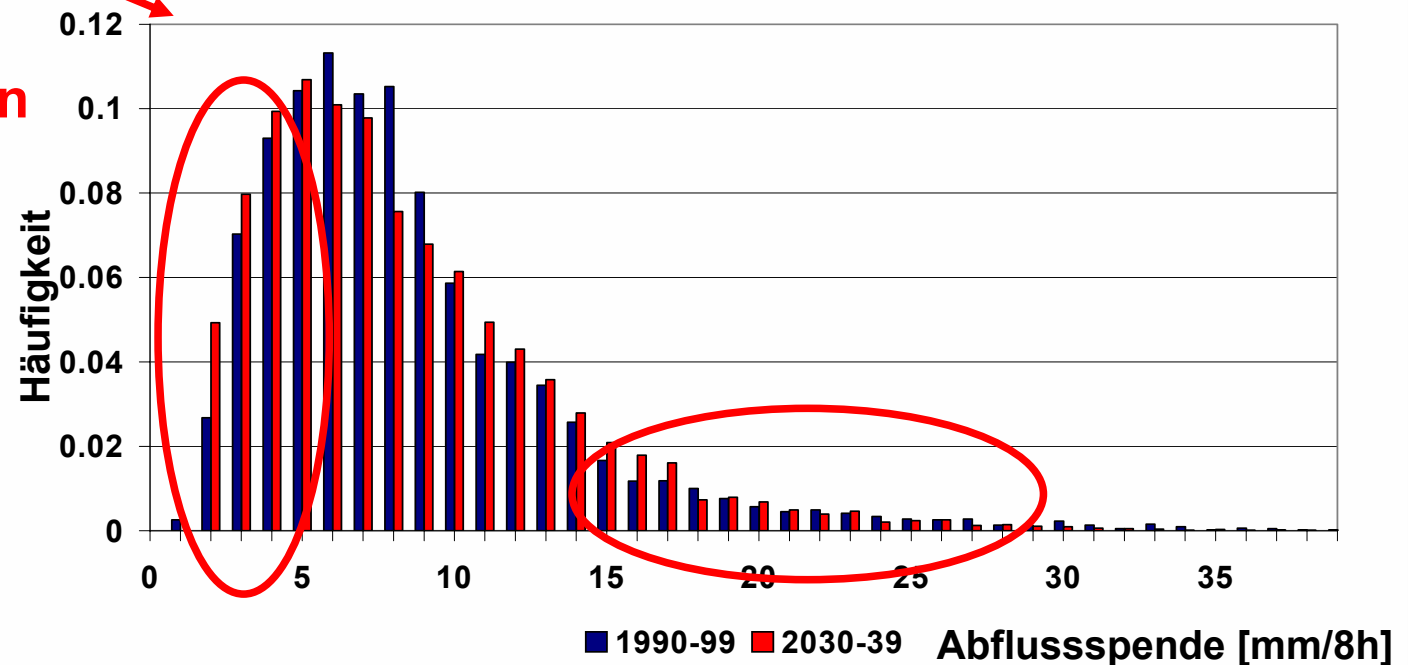
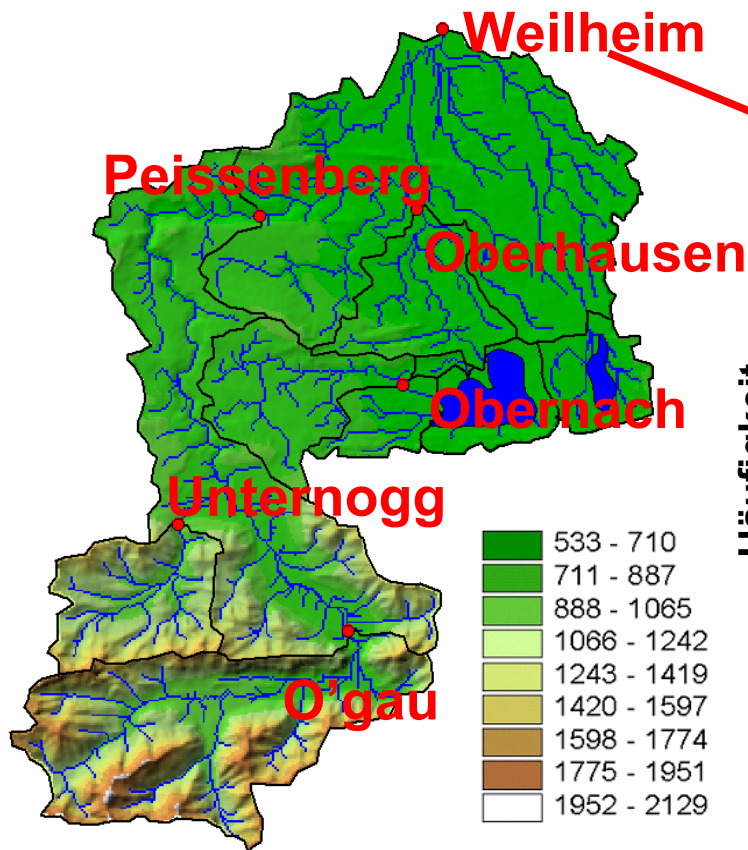
**Zunahme Winter-, Verminderung der Sommerabflüsse**



Modellkaskade ECHAM4 – MM5 – WaSiM

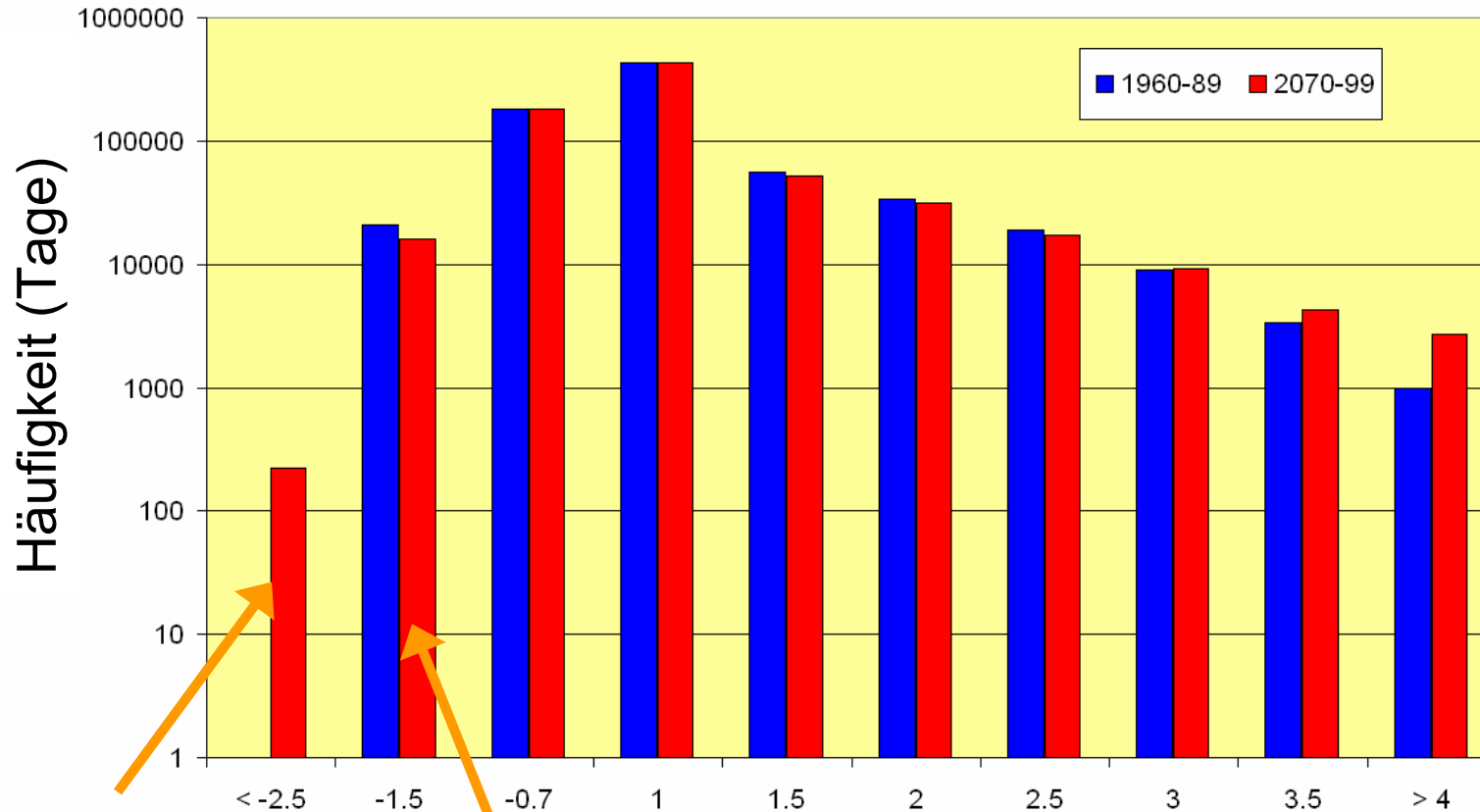
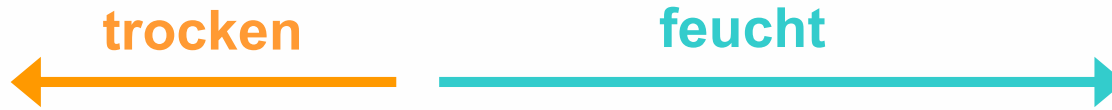
Änderung 1990-99 vs. 2030-39

Weilheim



**Veränderung der Häufigkeiten: Zunahme von Hochwasser & Niedrigwasser!**

## Trockenheitsindex EDI



Region  
 Inn – Chiemgau –  
 Salzach-  
 Berchtesgaden

Schwere Dürre

Extreme Trockenheit

**Zunahme der Intensität und Länge von Trockenzeiten!**

## Zusammenfassung

- Hydrologische Impaktanalyse erfordert Regionalisierung globaler Klimaszenarien mit hoher räumlicher Auflösung

- Beispiele 1-Wege gekoppelter Klima-Hydrologie-Simulationen

### **Oberes Jordan EZG:**

mittlere Jahrestemperatur  $\uparrow 3.5^\circ\text{C}$ , Sommer  $\uparrow 5^\circ\text{C}$

Winterniederschläge  $\downarrow 35\%$ , Intensitäten  $\downarrow$  ( $\Rightarrow$  Reservoir!)

Amplifizierte Änderungen GW-Neubildung vs. Abfluss

### **Ammer EZG**

Häufigkeit Trockenperioden  $\uparrow$  , Häufigkeit Hochwasser  $\uparrow$

Zunahme der Winter-, Abnahme der sommerlichen Abflüsse

- **Ziel: Entscheidungsunterstützung für nachhaltiges Flussgebietsmanagement**  
Unsicherheitspannen (globaler Antrieb vs. Regionalisierung vs. Szenario)  
Klare Trennung von Signal vs. Rauschen (nicht gezeigt)



**Vielen Dank für die Aufmerksamkeit**

**&**

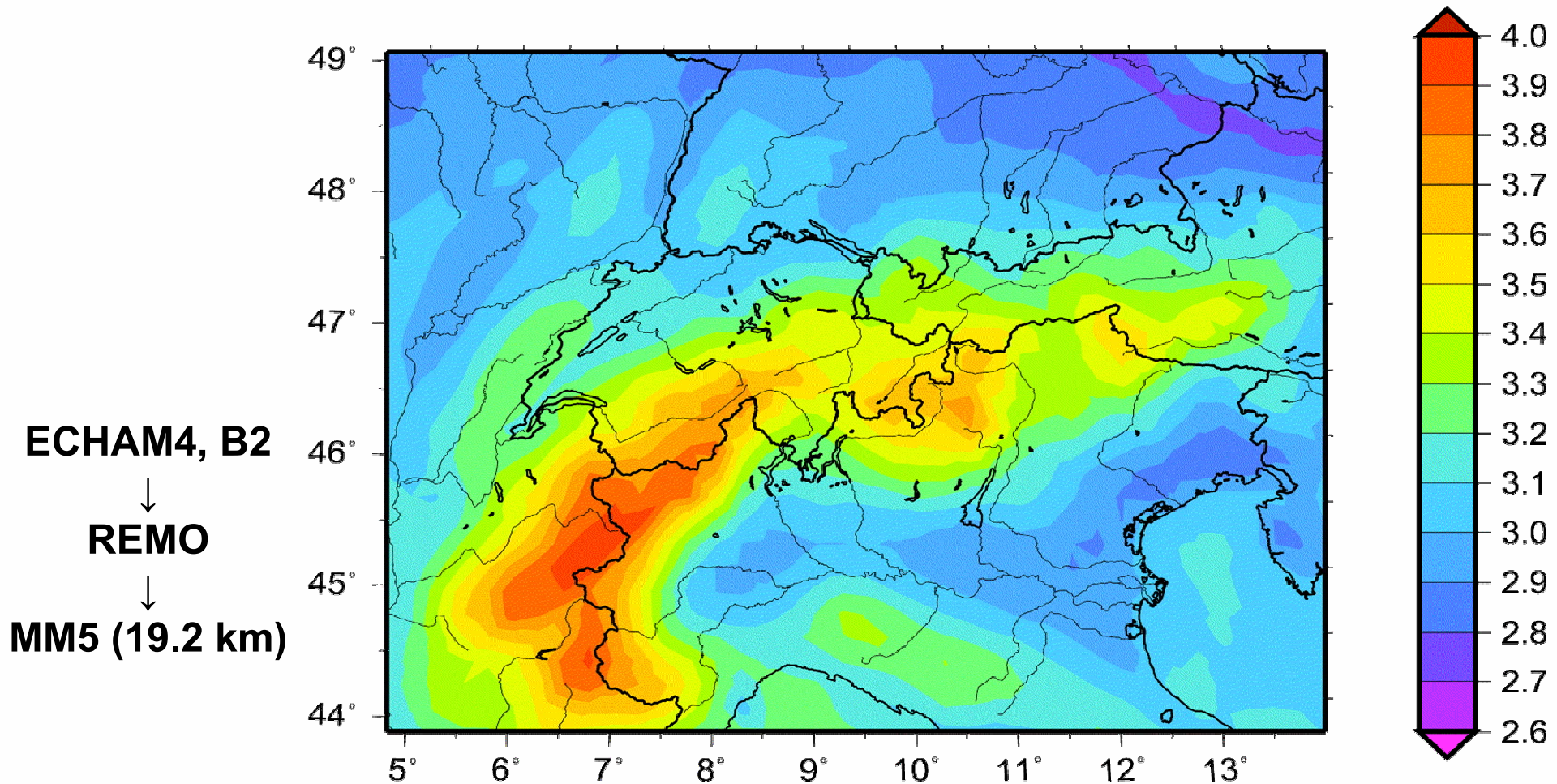
**Dank an Andreas Heckl, Richard Knoche**

## Hochwasserschutz und Sicherstellung von Mindestabflüssen

- Erhöhung der Speicherkapazität durch Naturverjüngung der Ufer
- Ausweitung der Retentionsflächen
- Renaturierung der Flussläufe
- Anpassung von Dammhöhen,
- Bau von Rückhaltebecken
- Hochwassernebenwirkungen, z.B. durch Buhnen
- Verbundsysteme, z.B. Wetter- und Abflussvorhersagen
- und weitere Konzepte für ein integriertes **Katastrophenmanagement**
- Nutzung von **Klimasimulationen** für die Bemessung von wasserbaulichen Maßnahmen

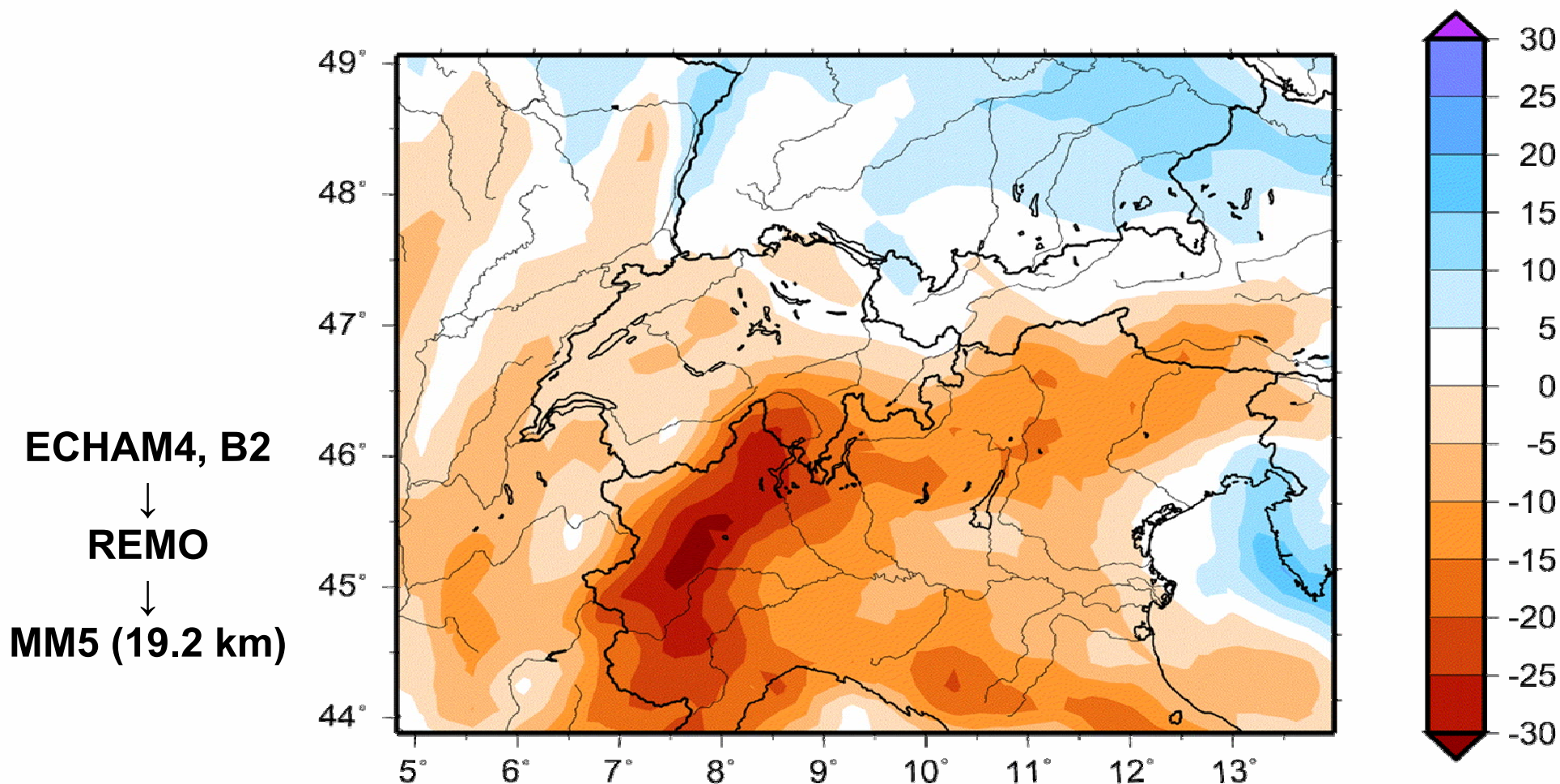
**Umsetzung von Anpassungsstrategien erfordert  
Zeiträume von bis zu 30 Jahren**

## Änderung mittlere Jahrestemperatur 2070-99 vs. 1960-89 [°C]



**⇒ Regional bis zu 4°C Temperaturzunahme!**

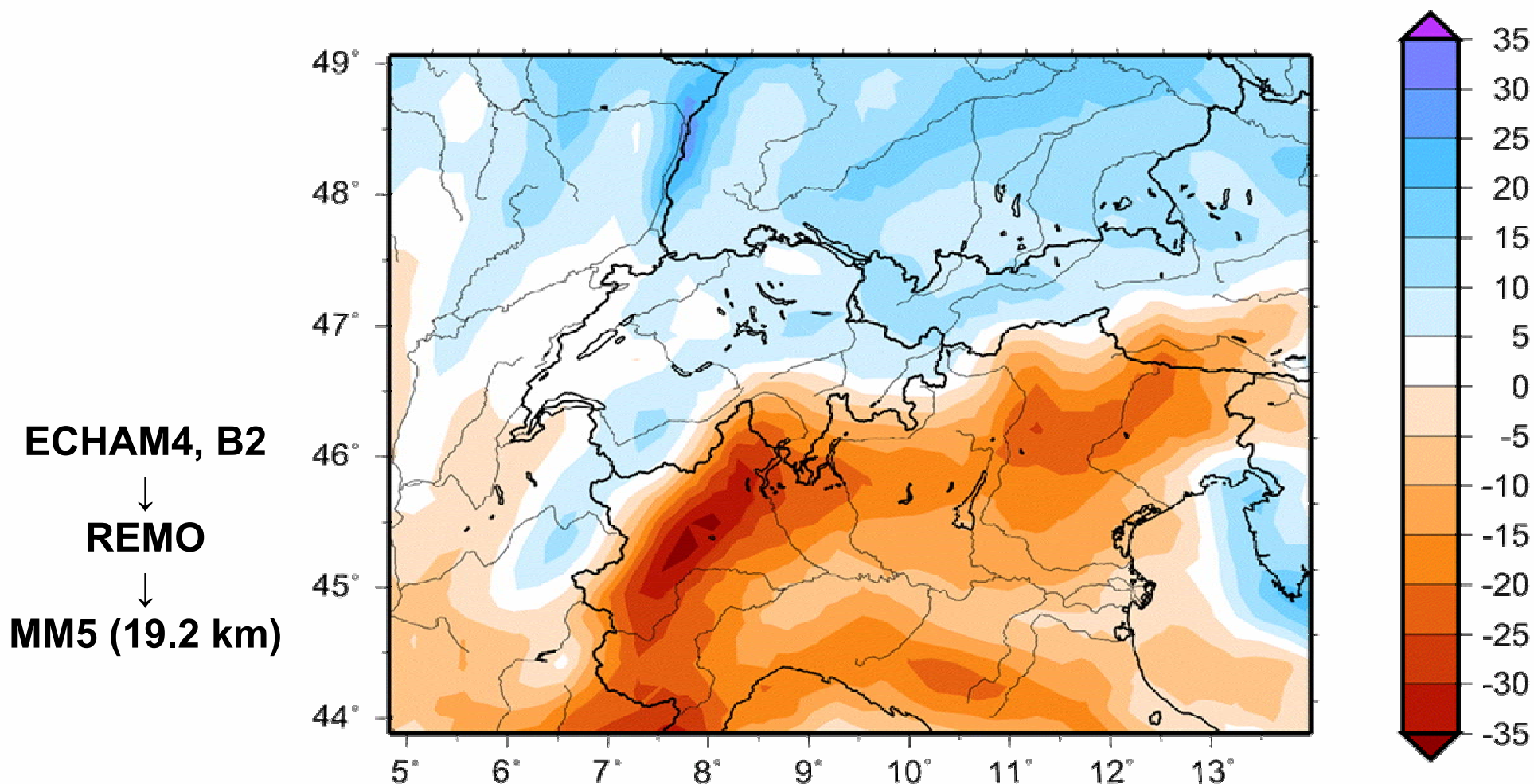
## Änderung mittlerer Jahresniederschlag 2070-99 vs. 1960-89 [%]



⇒ **Regional bis zu 30% weniger Gesamtniederschläge**

⇒ **Zunahme bis zu 20% in Süddeutschland!**

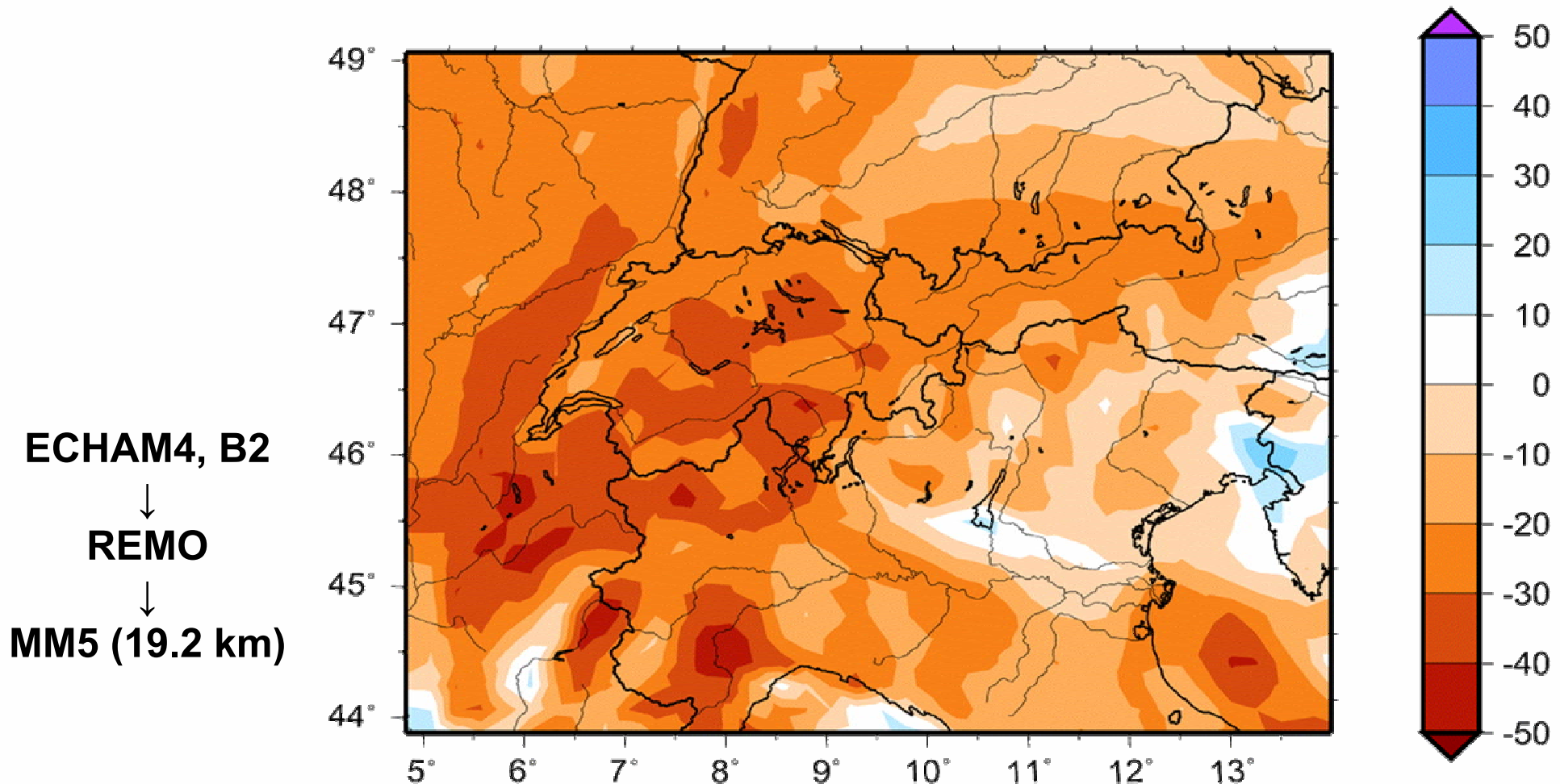
## Änderung der Winterniederschläge DJF 2070-99 vs. 1960-89 [%]



- **Winterniederschlag: gegenläufige Trends Nordalpen vs. Südalpen  
+10% Nordalpen vs. -30% Südalpen**

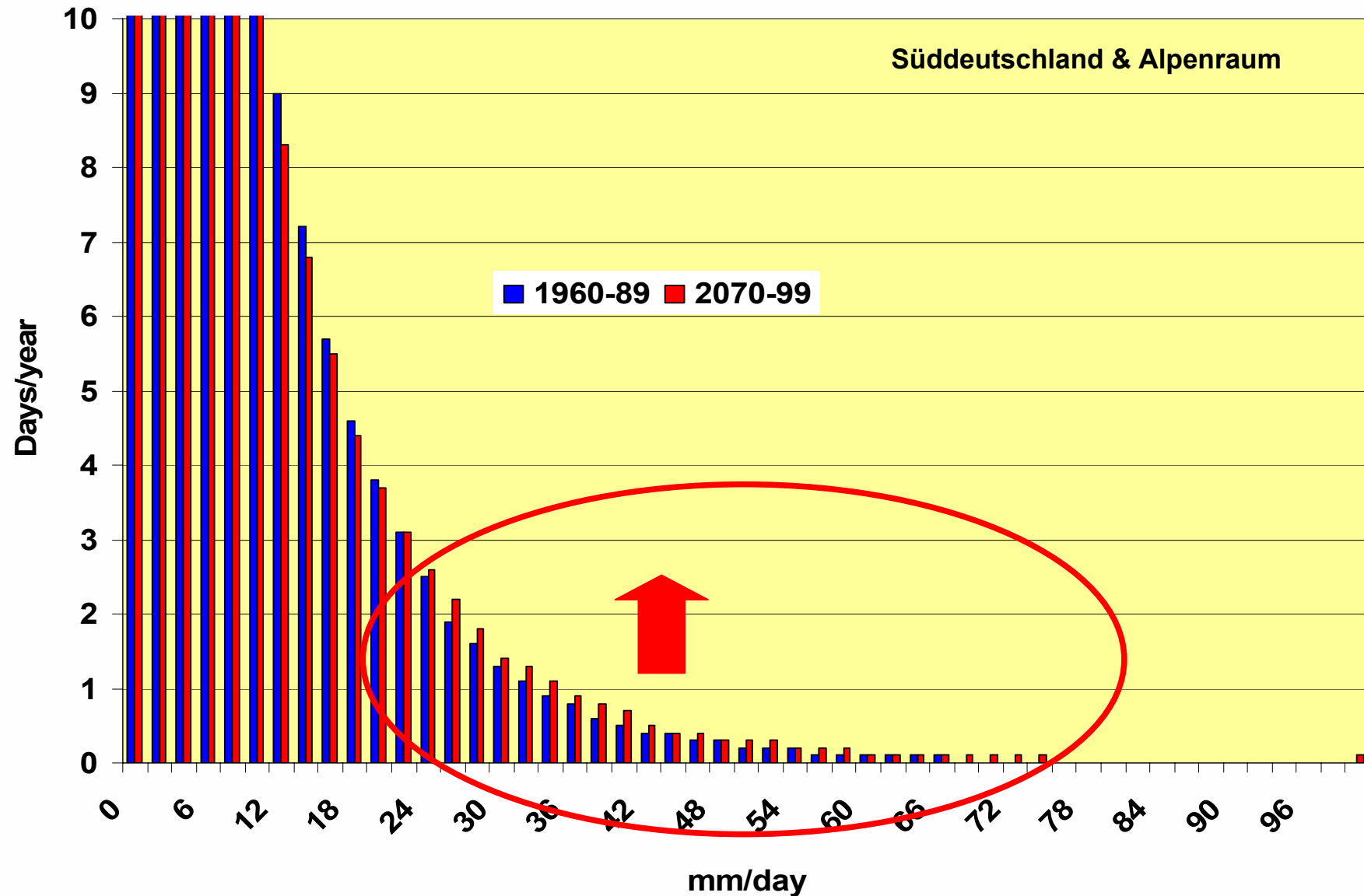


## Änderung der Sommerniederschläge JJA 2070-99 vs. 1960-89 [%]

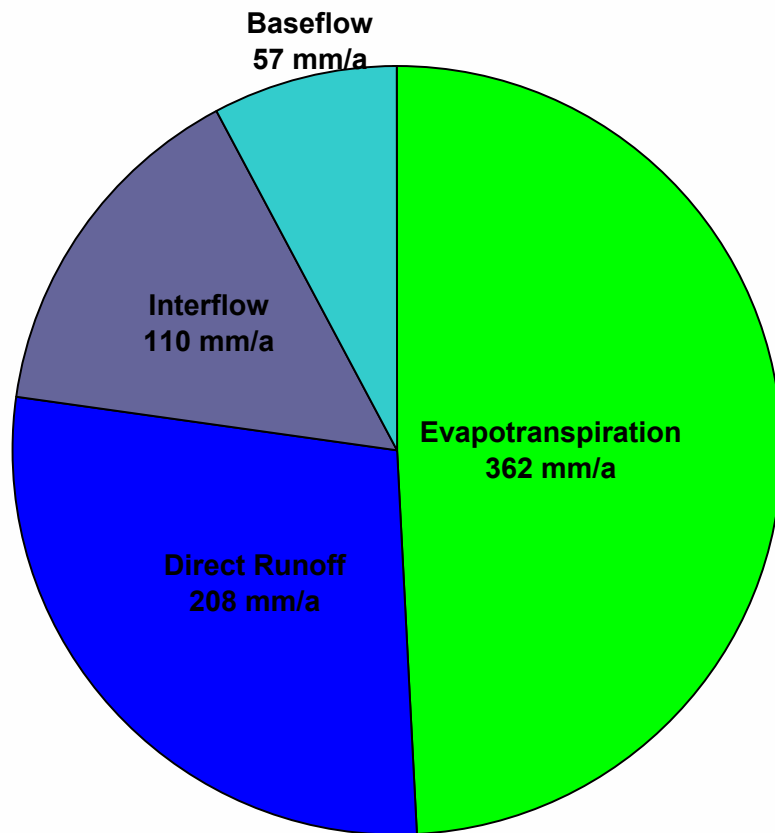


- **Sommerniederschlag: bis zu 40% weniger (Westalpen)**
- **Süddeutschland: ~ 20 % weniger**

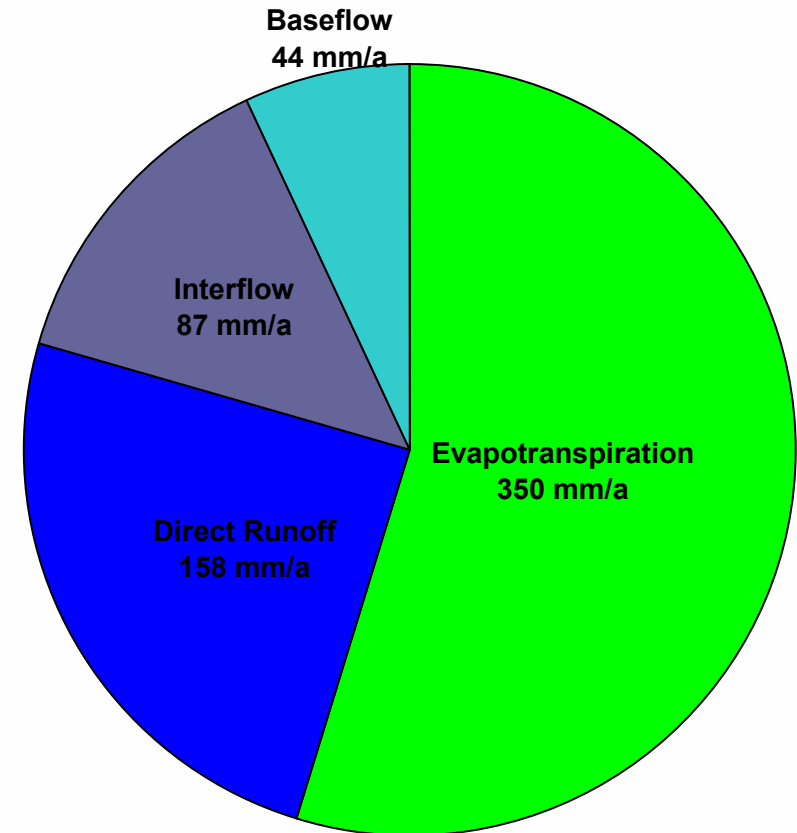
# Regionale Klimaänderung Alpenraum



**Zunahme der Häufigkeit von Starkniederschlägen !**



1961-90



2070-99

$Q_{tot} + ET:$	737 mm	$\Rightarrow$	639 mm (-13%)
$Q_{tot}:$	375 mm	$\Rightarrow$	289 mm (-23%)