

Regionale Auswirkung der Klimaänderung auf die Wasserverfügbarkeit in klimasensitiven Gebieten

Harald Kunstmann

Forschungszentrum Karlsruhe

Institut für Meteorologie und Klimaforschung 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



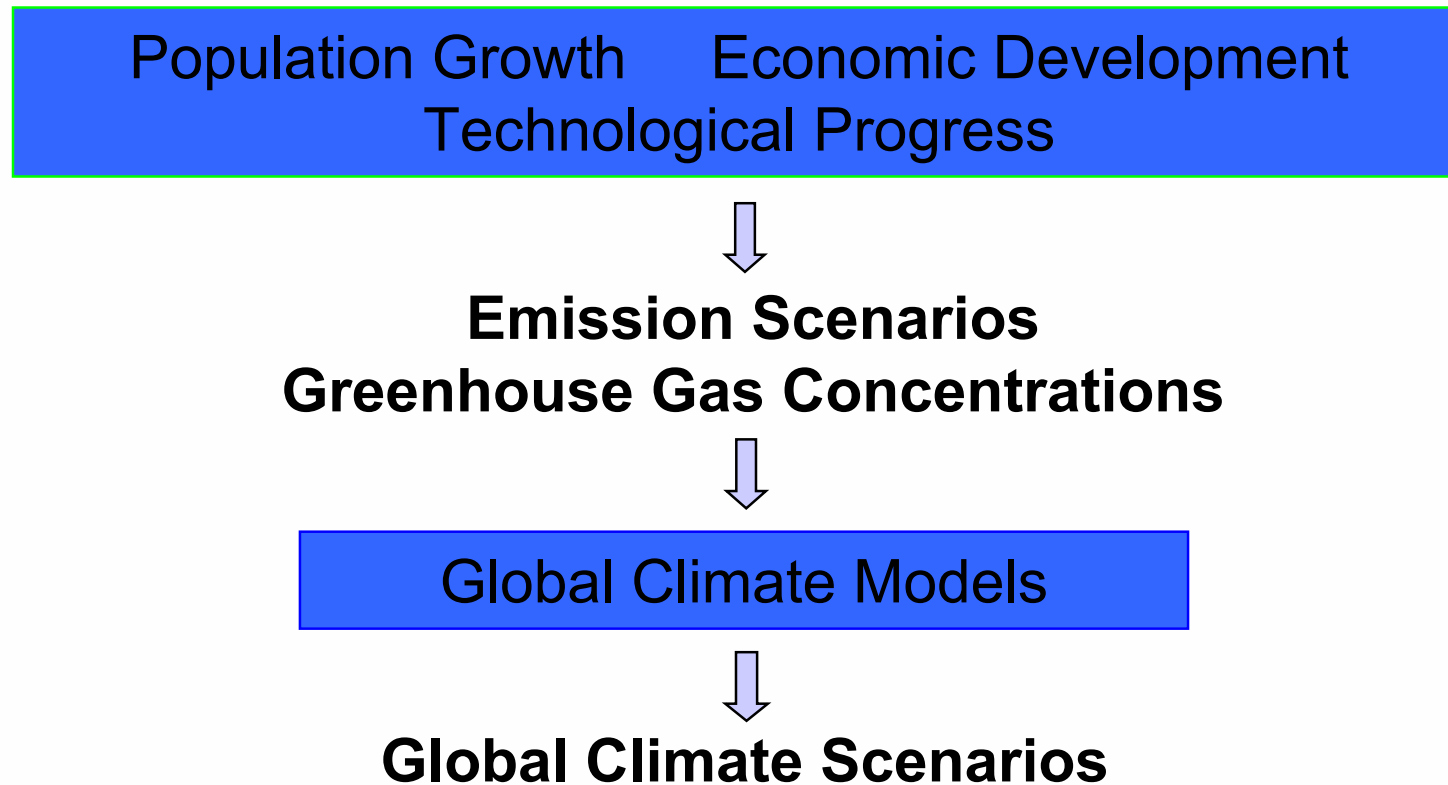
**Italien &
Griechenland 2007**

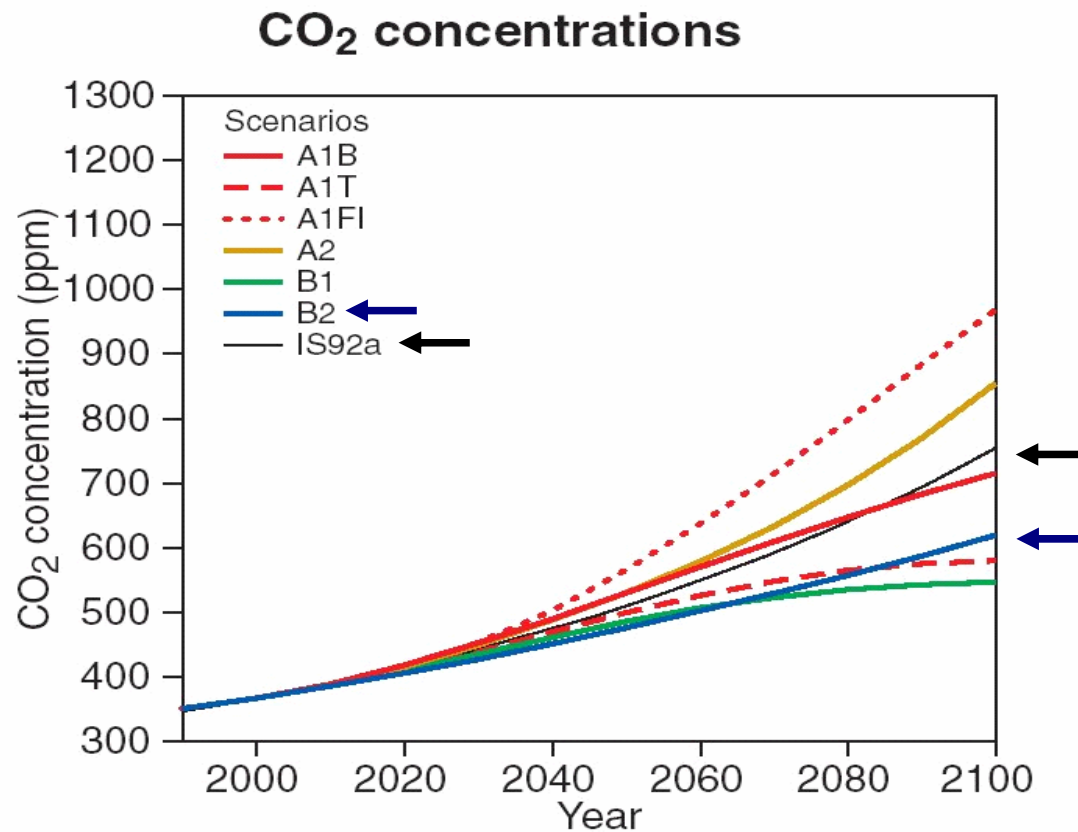


**Sylvensteinspeicher
(obere Isar) 2007**

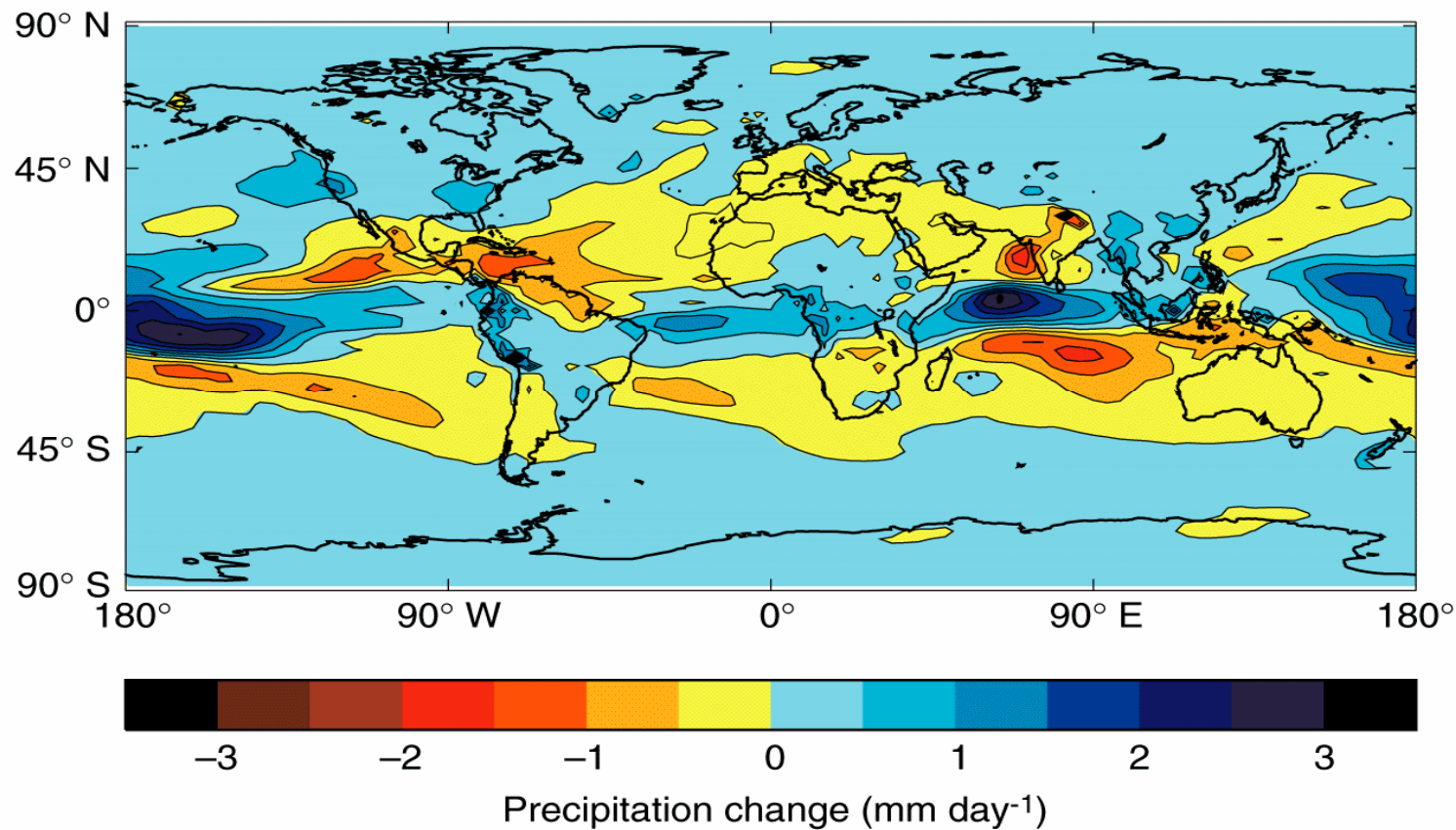


Rhein 2003

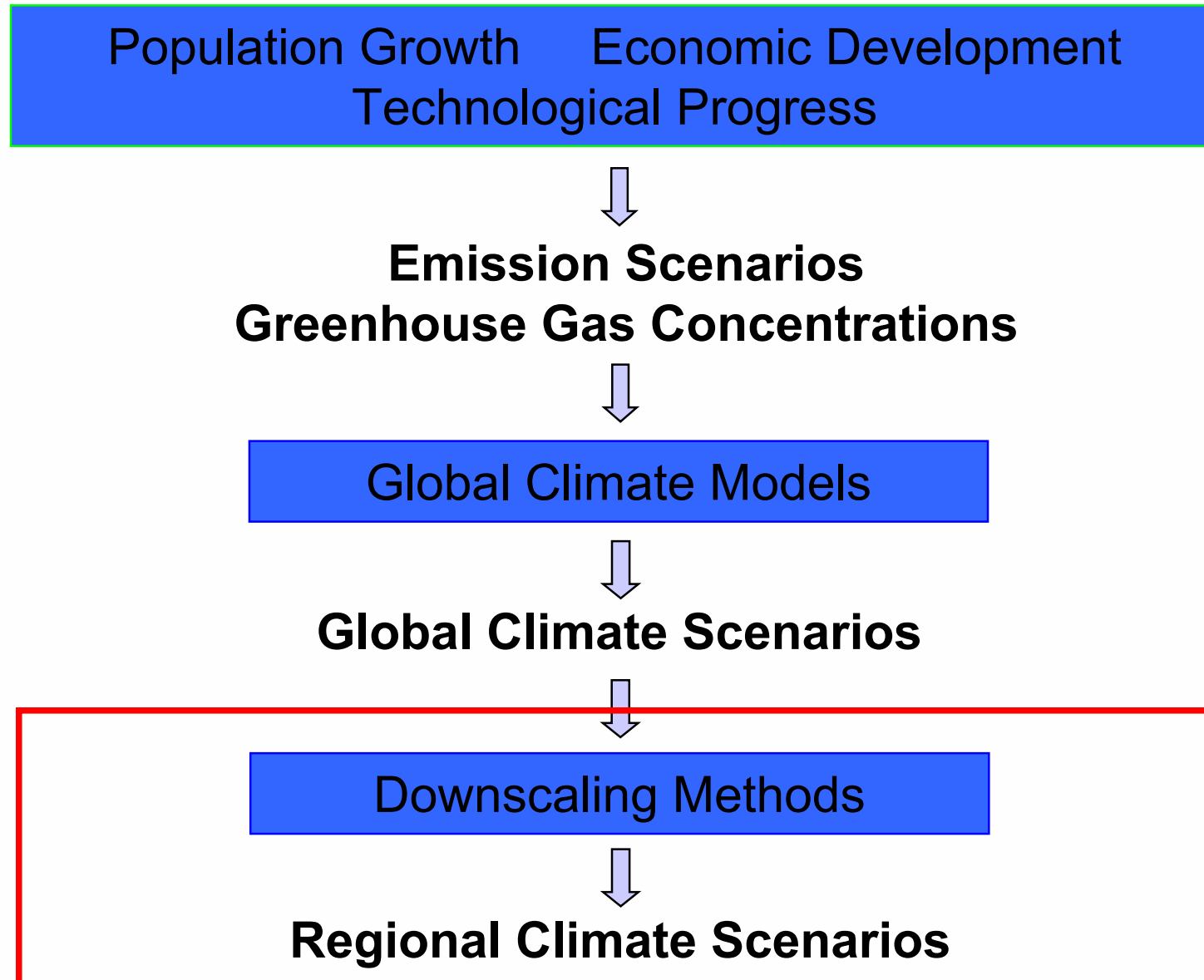




Prognose Änderungen mittlerer jährlicher Niederschlag bis 2050



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



Regionale atmosphärische Modellierung

Impulserhaltung

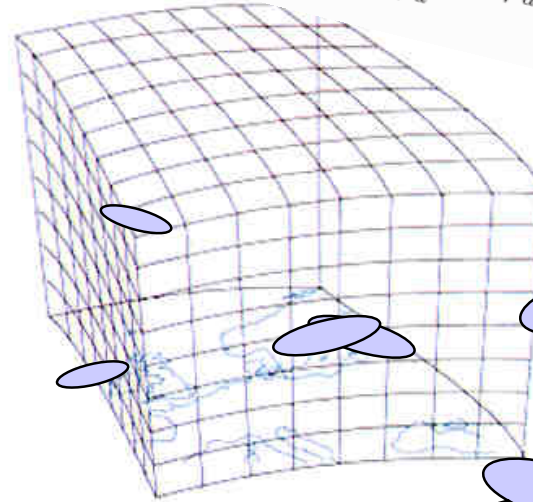
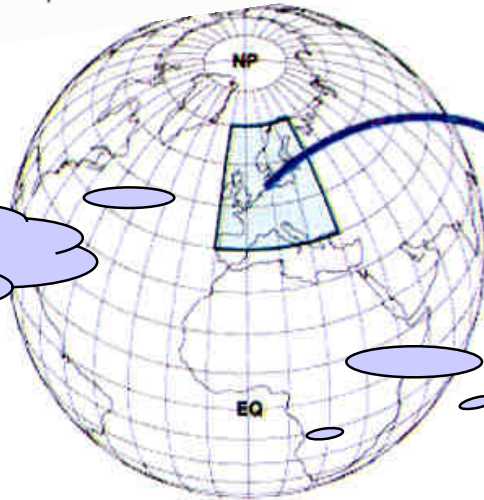
$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -f \vec{k} \times \vec{v} - \nabla \Phi - \frac{1}{\rho_a} \nabla p_a + \frac{\eta_a}{\rho_a} \nabla^2 \vec{v} + \frac{1}{\rho_a} (\nabla \cdot \rho_a \mathbf{K}_m \nabla) \vec{v}$$

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

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

Bodenwasserdiffusion

Bodenwasserinfiltration

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

- 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, ...

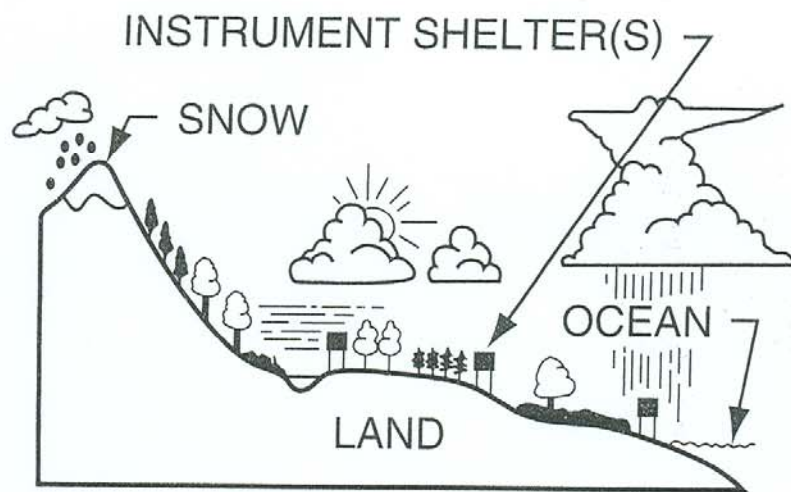
Wassermassenerhaltung

**Energieerhaltung
Landoberfläche**

Niederschlagsphysik

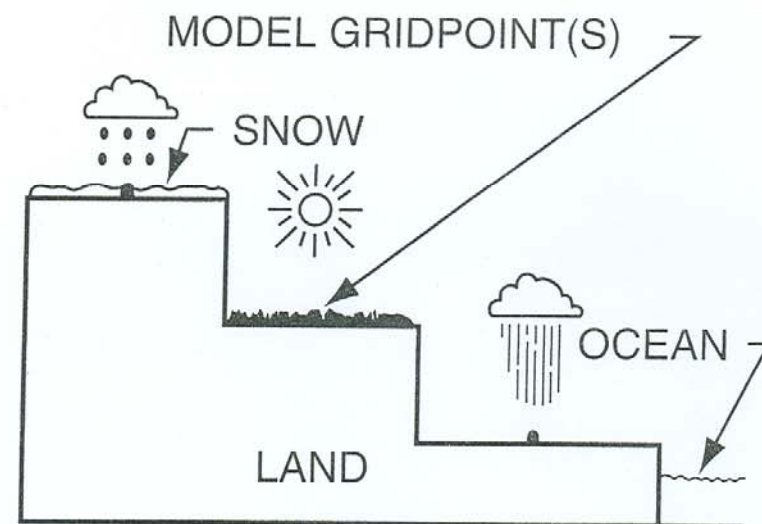
Regionale atmosphärische Modellierung

REAL WORLD



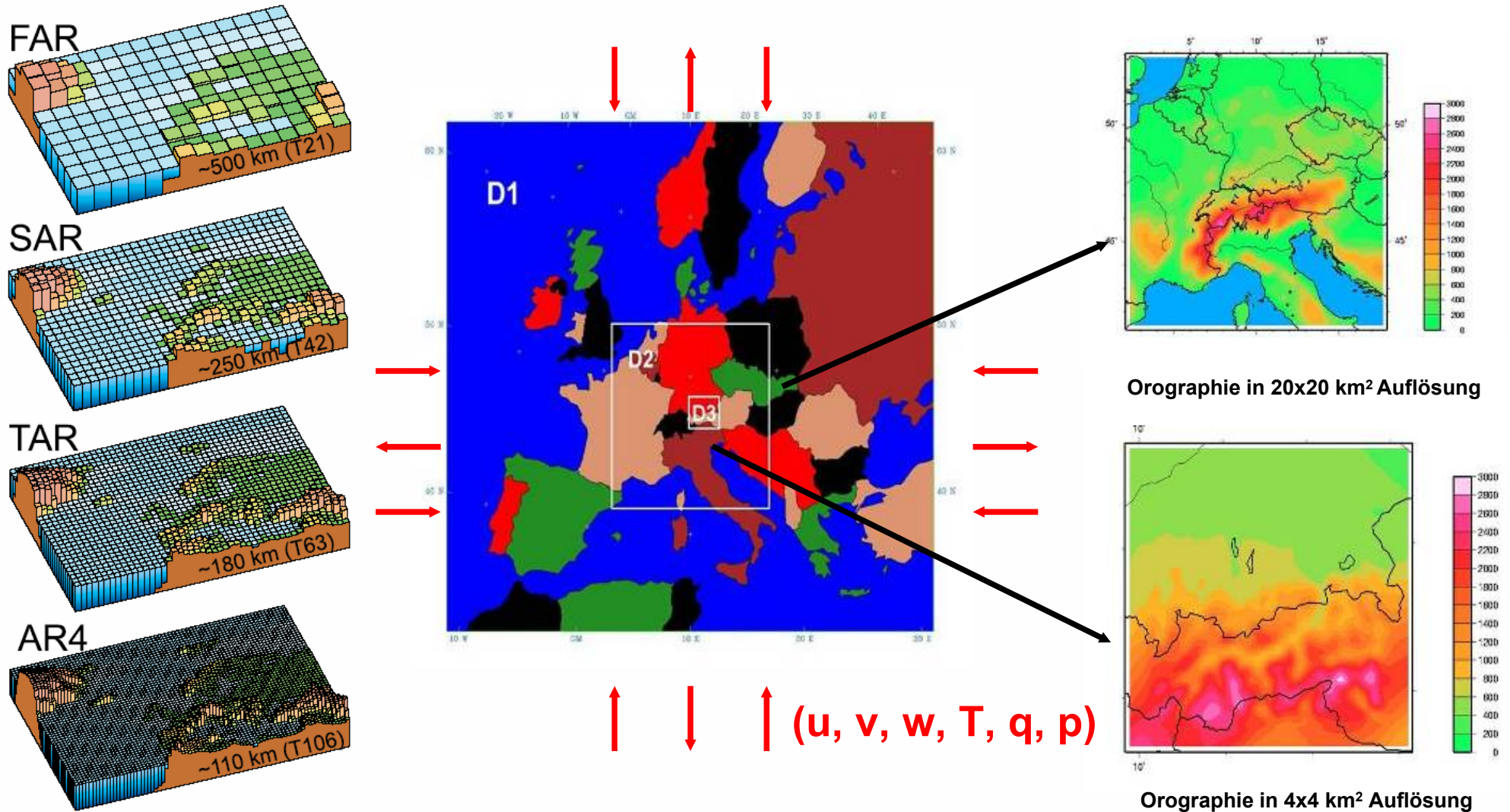
Vs.

MODEL WORLD

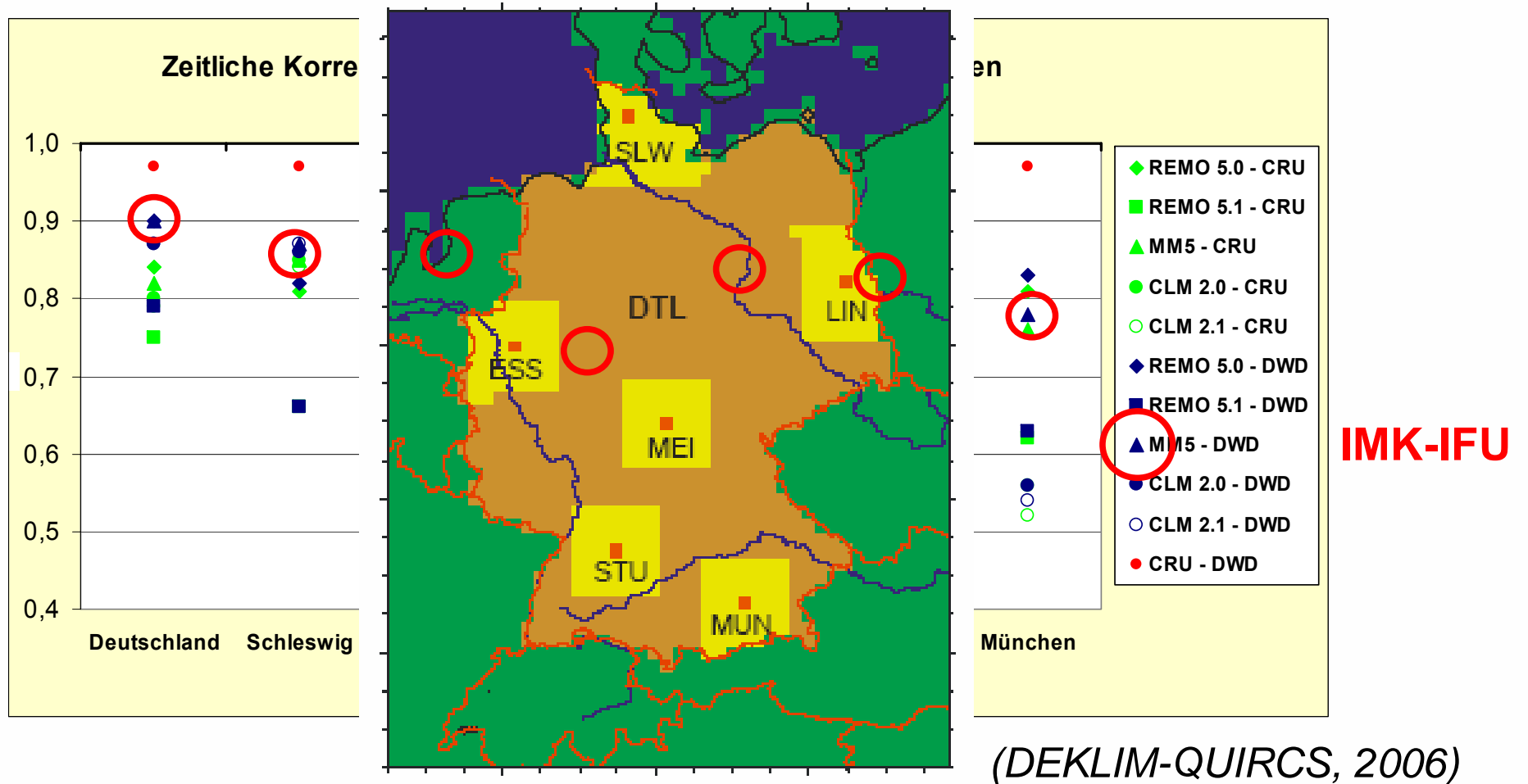


Regionale atmosphärische Modellierung

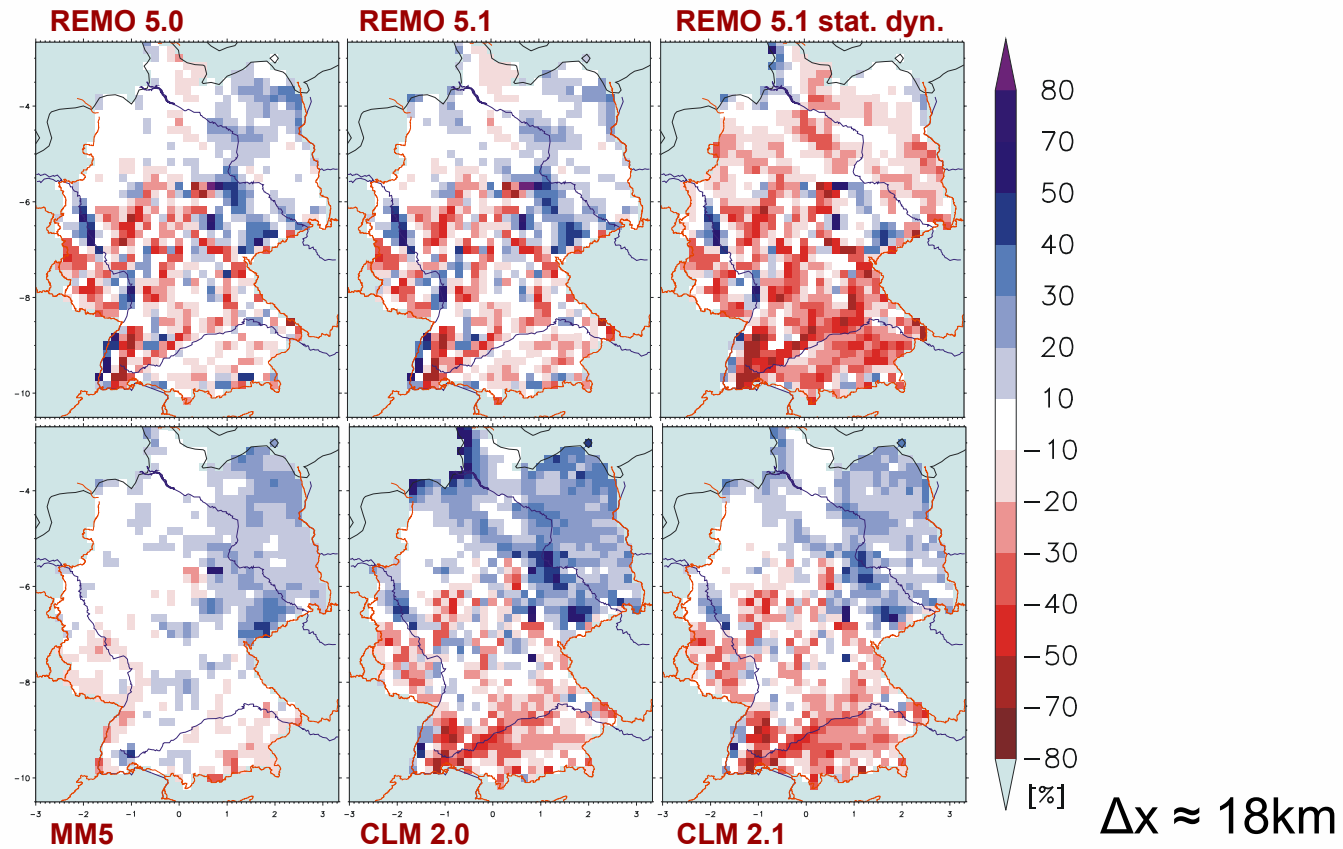
RCM: angetrieben durch globales Modell (Anfangs- und Randwertproblem)
 Hohe räuml. Auflösung \Rightarrow Detaillierte Berücksichtigung der Orographie



Performance of Atmospheric Models (Global driving: ERA 15, 1979-93)

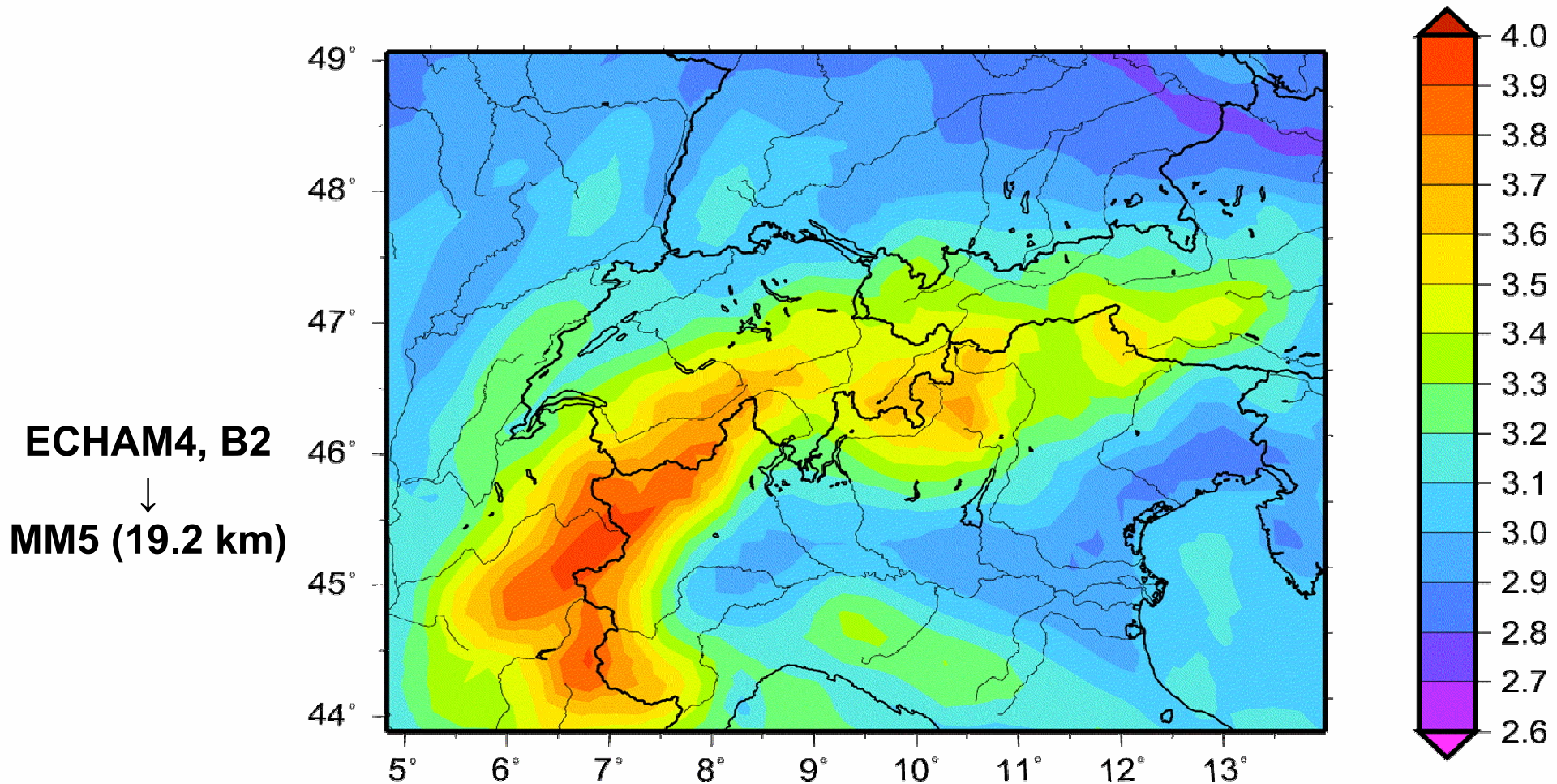


Performance of Atmospheric Models (Global driving: ERA 15, 1979-93)



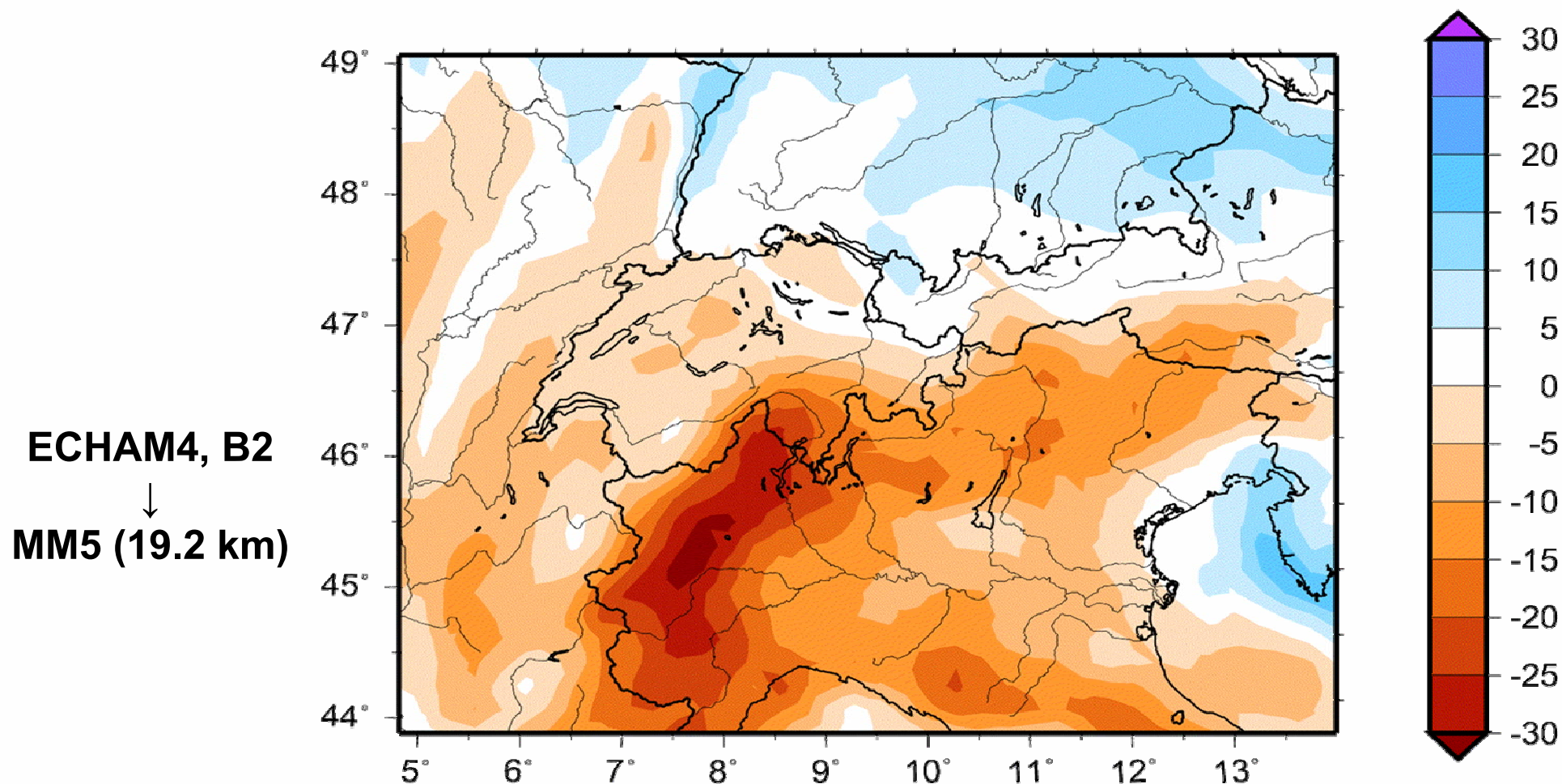
% difference simulated vs. gridded observed precipitation 1979-93 (*DEKLIM-QUIRCS, 2006*)

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



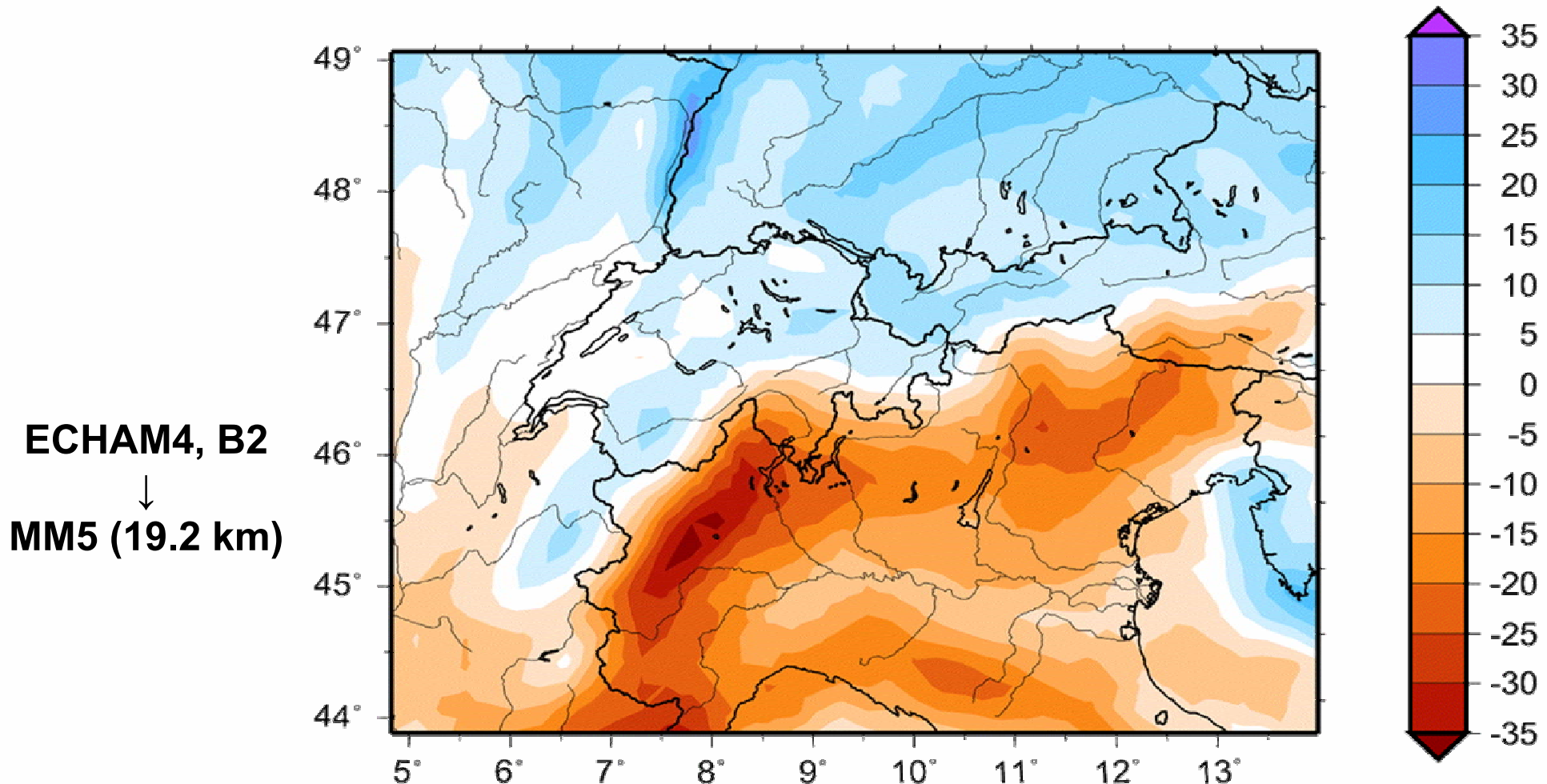
⇒ **Regional bis zu 4°C Temperaturzunahme!**

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



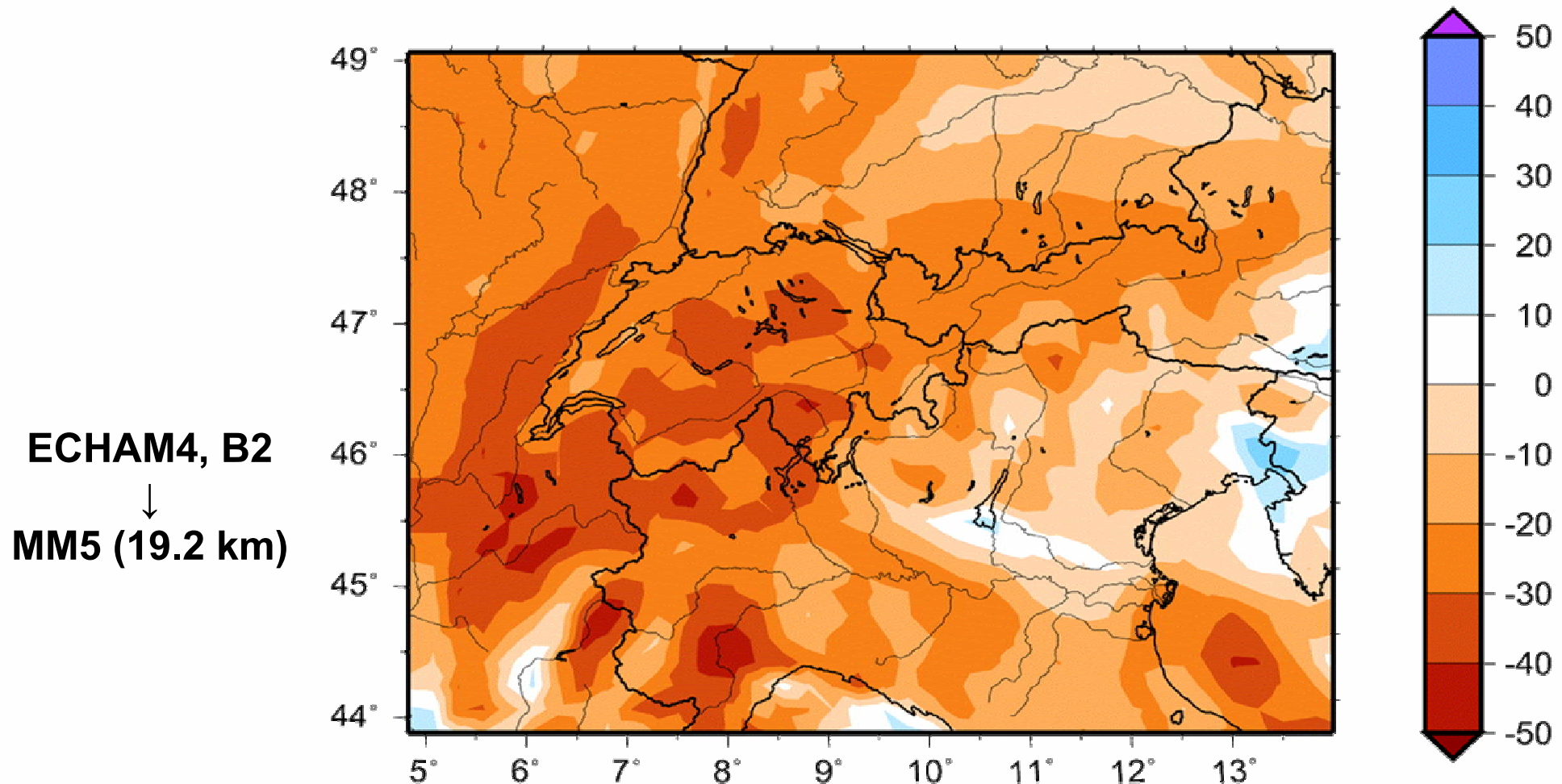
- ⇒ Regional bis zu 30% weniger Gesamtniederschläge
- ⇒ Zunahme bis zu 20% in Süddeutschland!

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

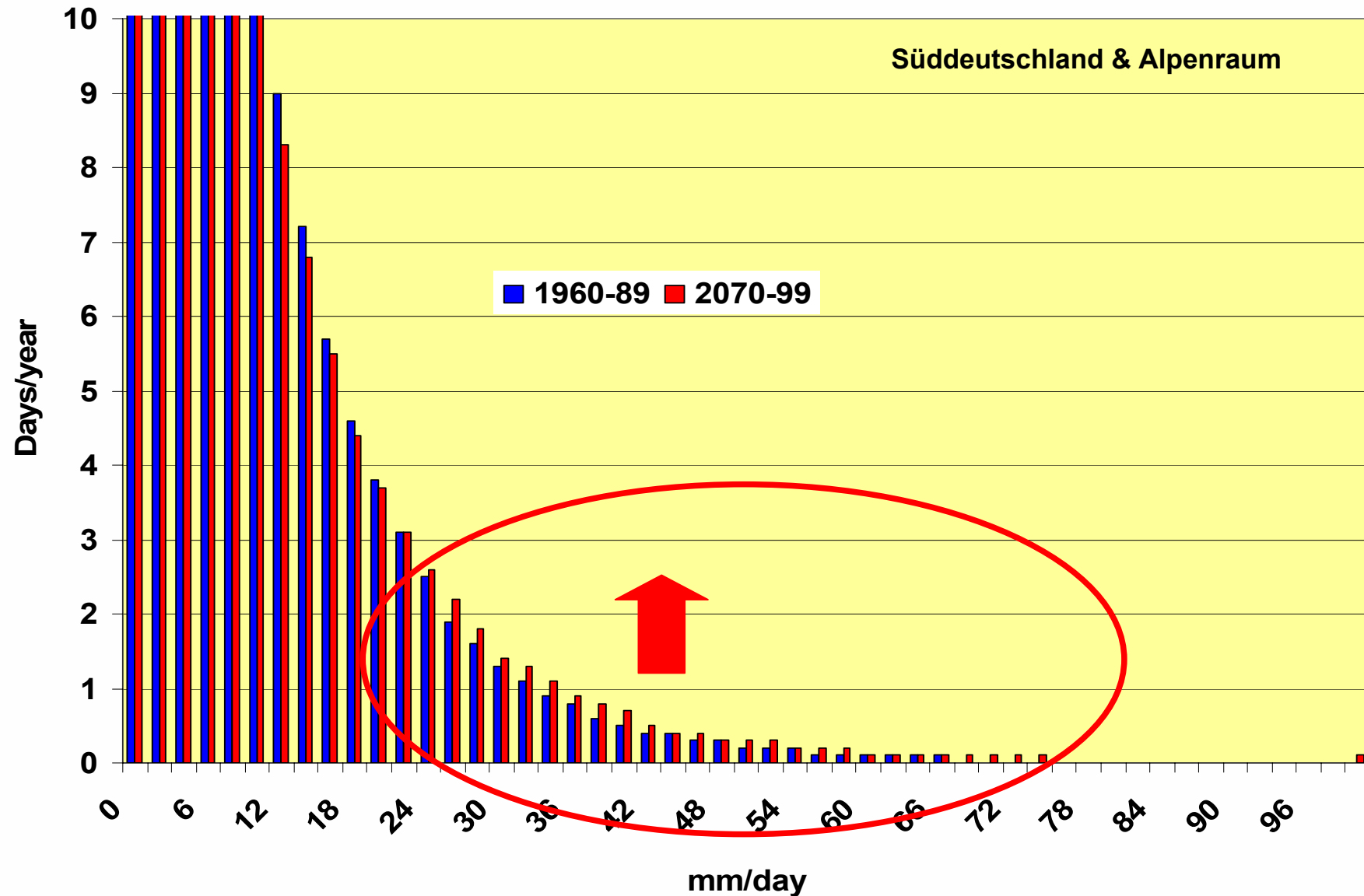


**Winterniederschlag: gegenläufige Trends Nordalpen vs. Südalpen
+10% Nordalpen vs. -30% Südalpen**

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

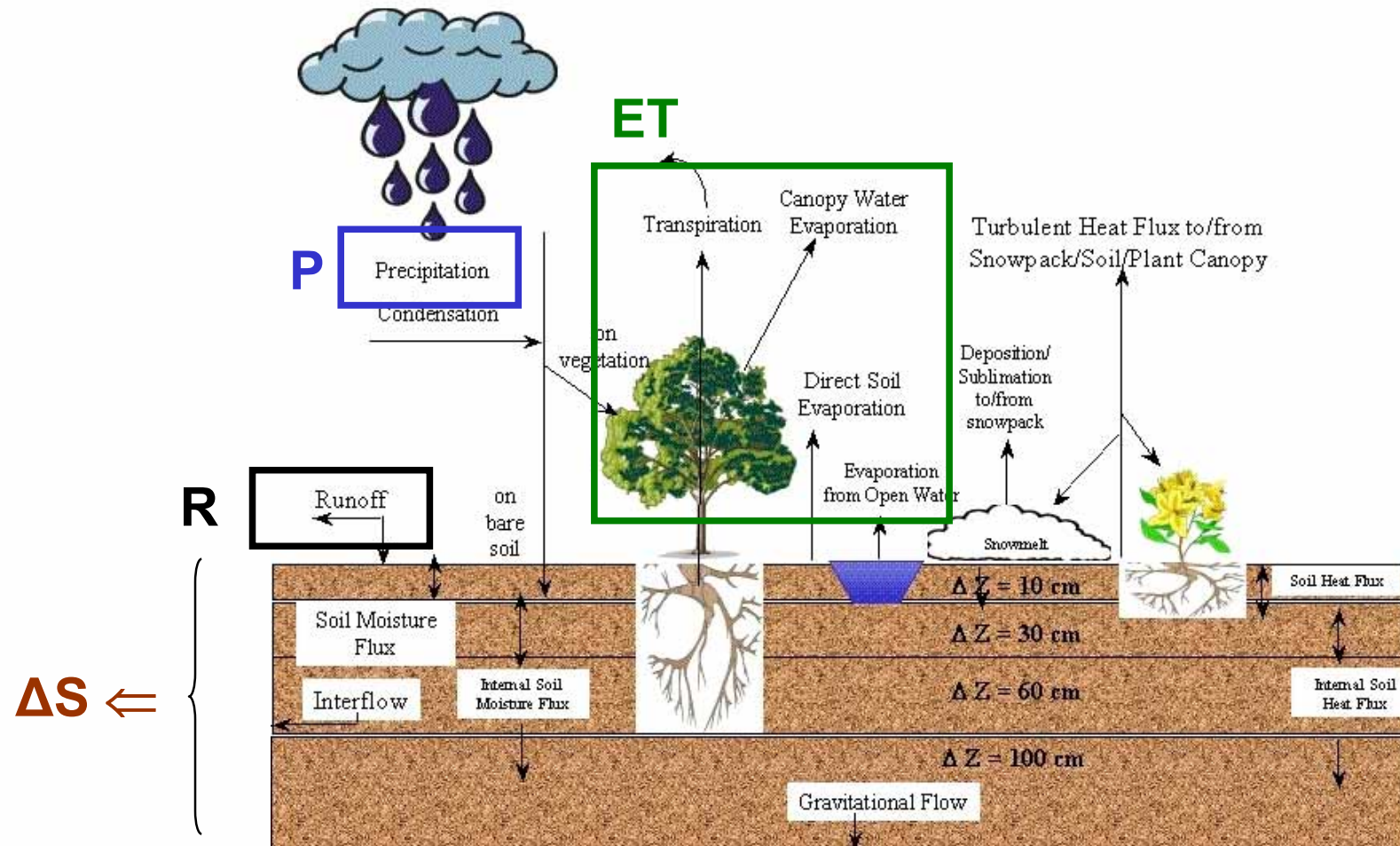


- ⇒ **Sommerniederschlag: bis zu 40% weniger (Westalpen)**
- ⇒ **Süddeutschland: ~ 20 % weniger**



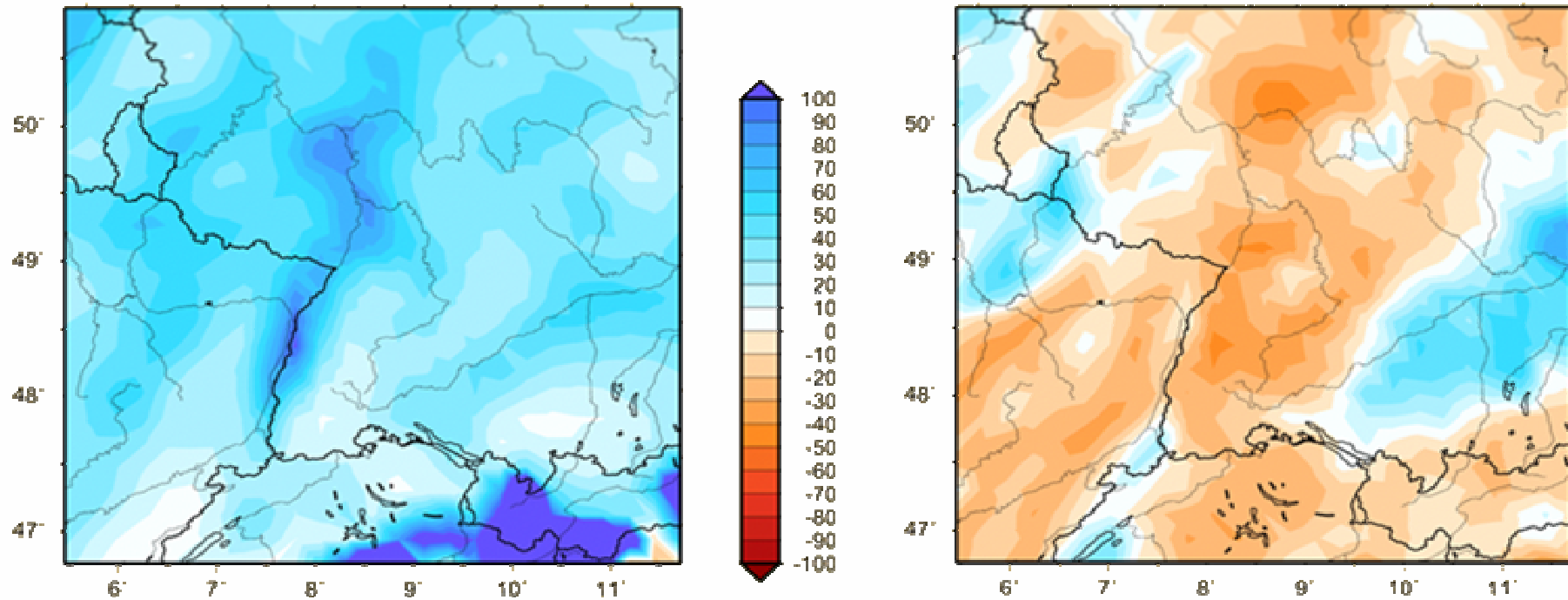
Zunahme der Häufigkeit von Starkniederschlägen!

SVAT-Modell als untere Randbedingung an jedem Gitterpunkt



Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer (SVAT) Model

Example: Regional Climate Modeling Impact of Climate Change on Runoff



DJF

JJA

Change in runoff [%] 2070-2099 vs. 1960-89, ECHAM4 & MM5, B2

Amplification of runoff change compared to precipitation change!

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

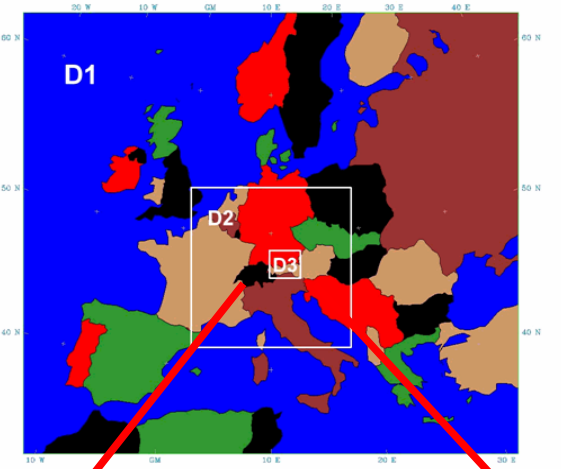
1-Wege Kopplung:

- 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

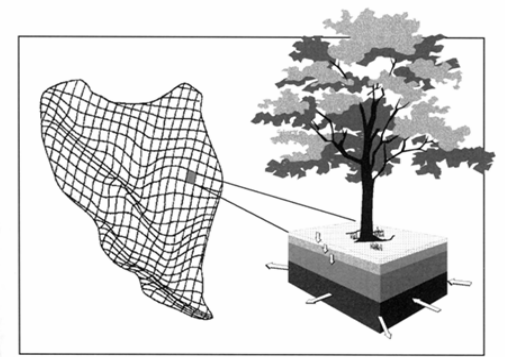
3-dim.
atmosphärisches
Modell



100x100km² → 4x4 km²

Hydrologisches
Modell

- Orographie
- Landnutzung
- Bodeneigenschaften
- Aquifereigenschaften
- Flussnetz



100x100 m² Auflösung

Evapotranspiration Infiltration **Abfluss** Grundwasser

z.B. Hydrologisches Modell WaSiM-ETH

Physikalisch basierte Algorithmen
für vertikale Wasserflüsse & Grundwasser:

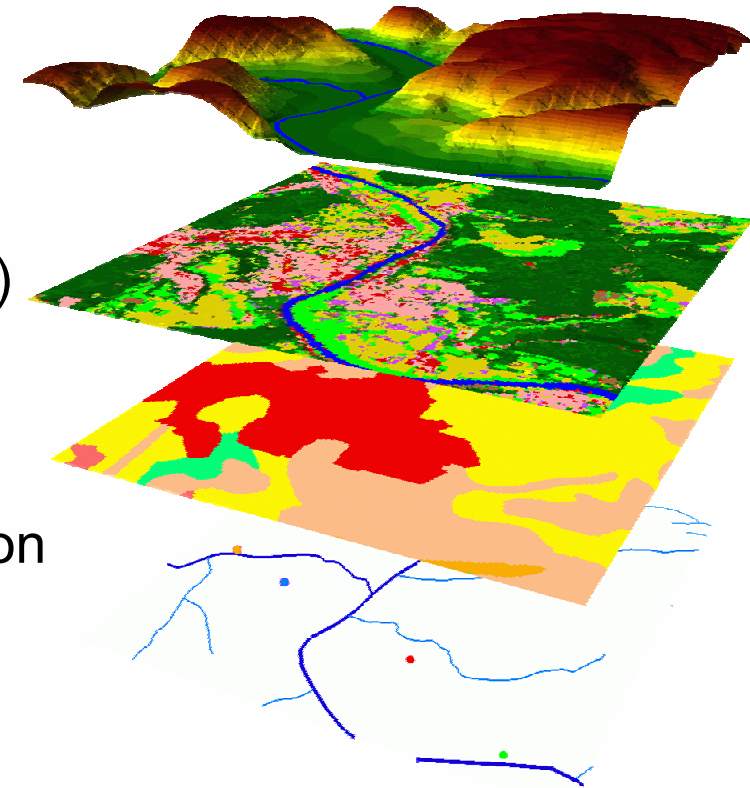
- Evapotranspiration: Boden- & vegetationsspezifisch
- Flüsse in ungesättigter Zone (Richards)
- Saugspannung & hydr. Leitfähigkeit (van Genuchten)
- 2-dim Grundwassermodell dynamisch gekoppelt an ungesättigte Zone

Konzeptionelle Ansätze für laterale Abflussaggregation

- Fließzeitzone gefaltet mit Linearspeicher
- Abflussrouting: kinematische Welle

z.B. Alpiner Raum

- räumliche Auflösung: 100x100 m²
- zeitliche Auflösung: stündlich bis täglich



Was bedeutet die Klimaänderung für einzelne Einzugsgebiete?

Beispiel I: Ammer Einzugsgebiet Süddeutscher Alpenraum

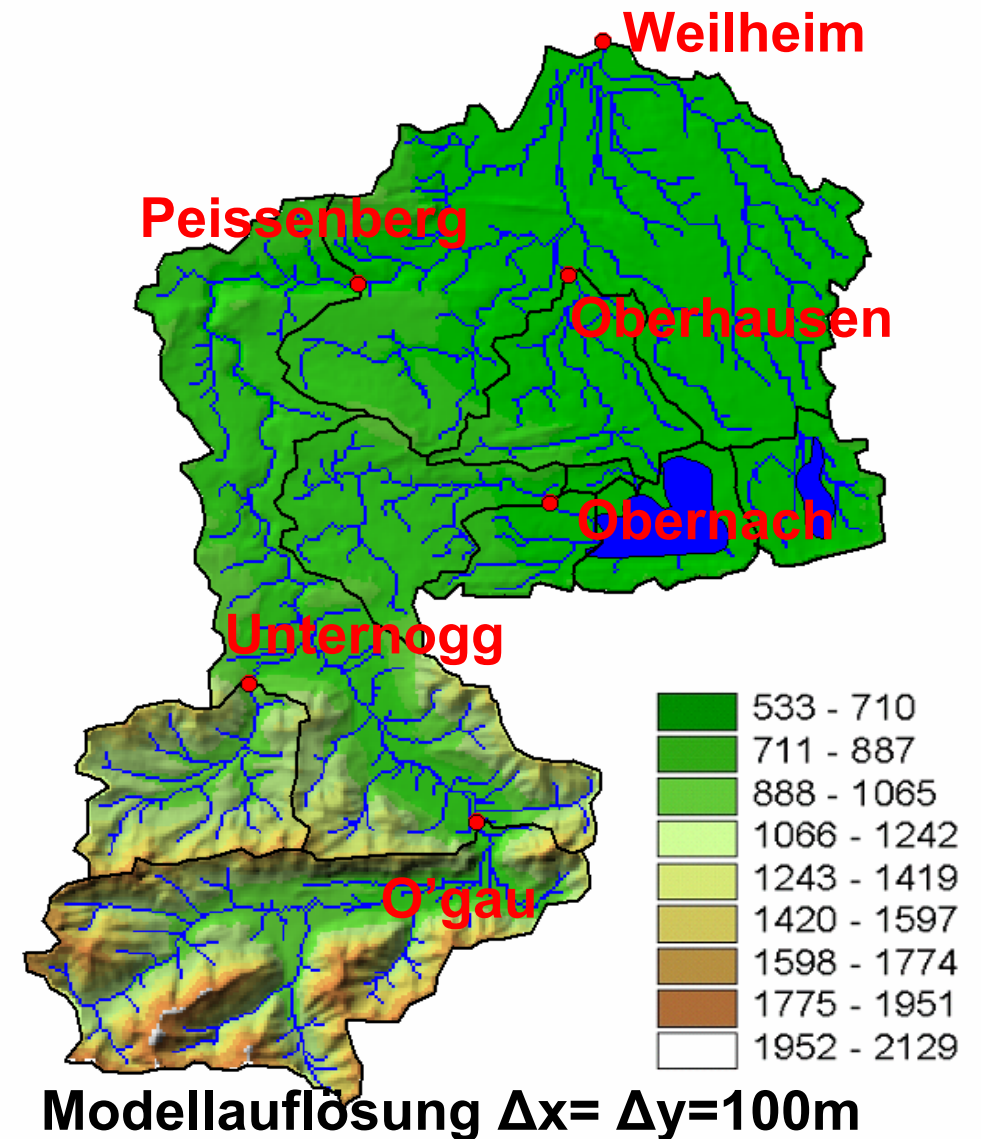
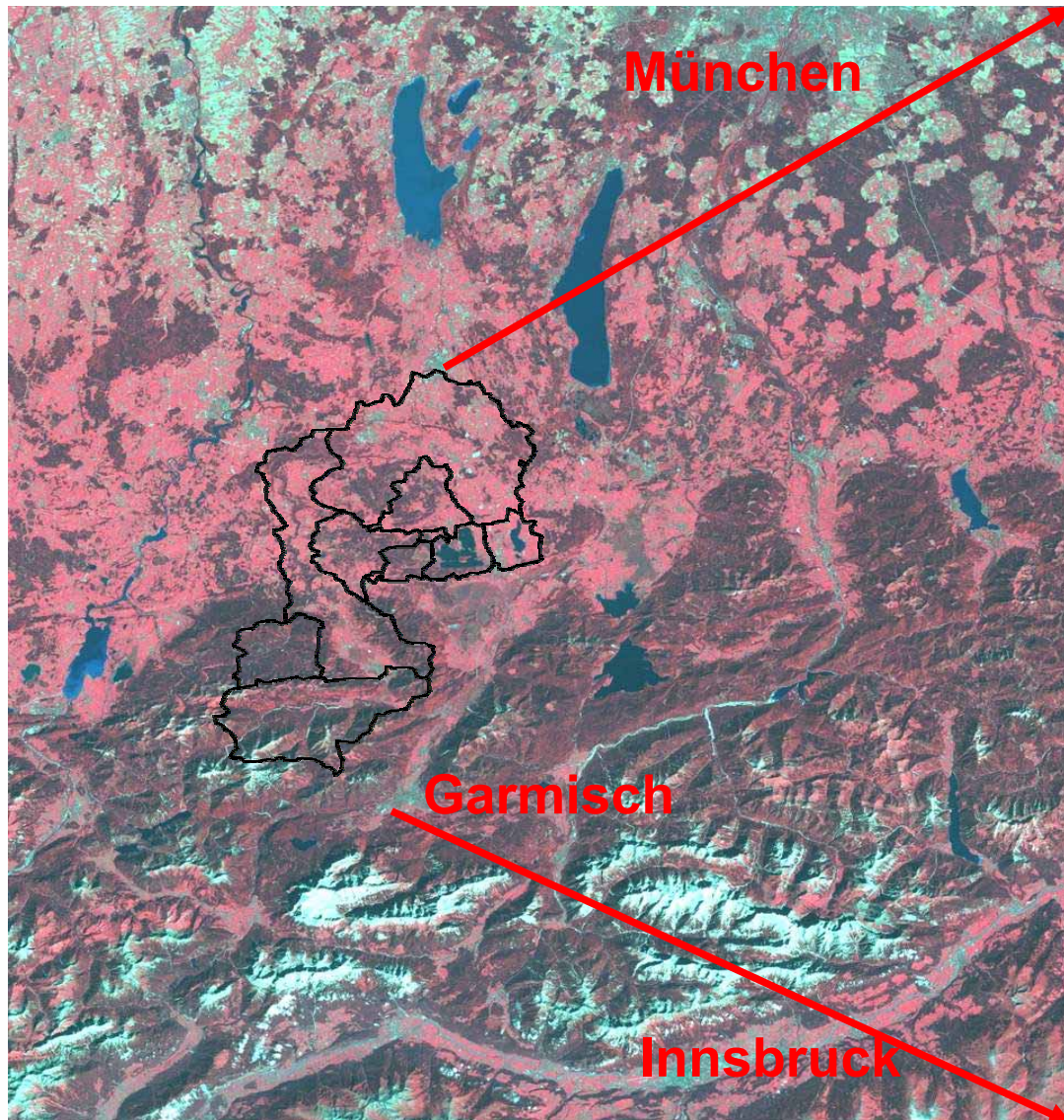
Augusthochwasser 2005:

- **Alpennah oft mehr als 150 mm in 72h**
- **Oberstdorf: 147mm/24h**
- **Einsiedl: 216 mm/24h**

Alpine Einzugsgebiete

- Kurze Niederschlag-Abfluss Reaktionszeit \Rightarrow Kurze Frühwarnzeiten!
- Schneedeckendynamik/Schmelzwasser beeinflusst signifikant Abflussgeschehen
- Hohe räumliche Niederschlagsvariabilität (Lee-Luv, Staueffekte)
- Alpen: “klimasensitive“ Region:
kleine Änderung in großskaliger Zirkulation \Rightarrow große regionale Änderung
- Mehrere Klimazonen auf kurzer räumlicher Distanz!
- Änderung alpiner Wasserhaushalt & Extremereignisse \Rightarrow wirtschaftliche Folgen:
 - Winter-/Sommer Tourismus!
 - Hochwasserschäden!

Klimaänderung & Wasserverfügbarkeit Alpenraum





River Ammer Catchment

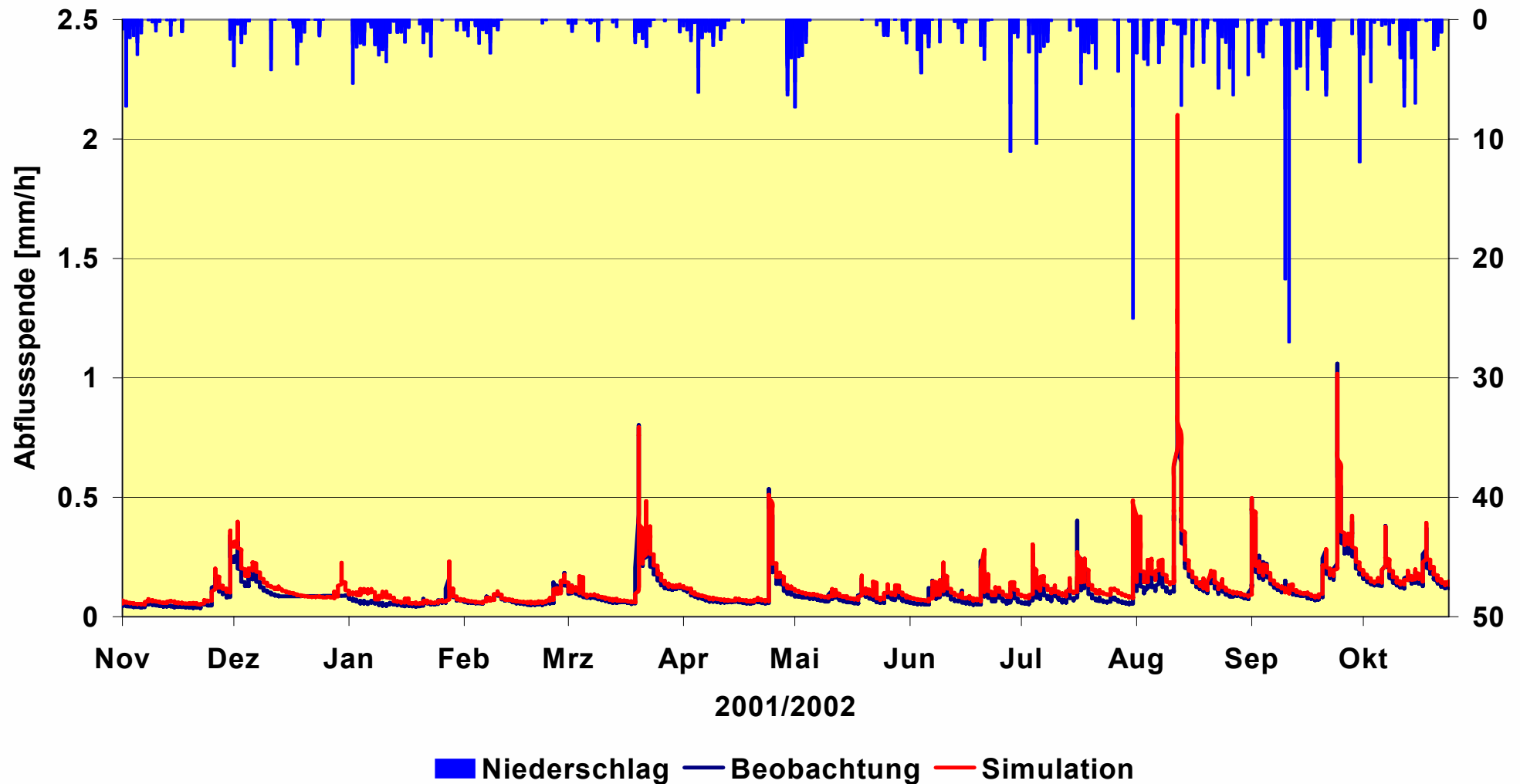
- Location: Southern Bavaria / Germany
- Area: 710 km²
- Alpine/Prealpine environment
- Complex orography

- Elevation: 530-2190m above sea level
- Mean precipitation: 1400 mm/a (67% in summer)
- Days with snow cover: 127/a
- Temperature gradient: ≈ 0.6 °C/100m



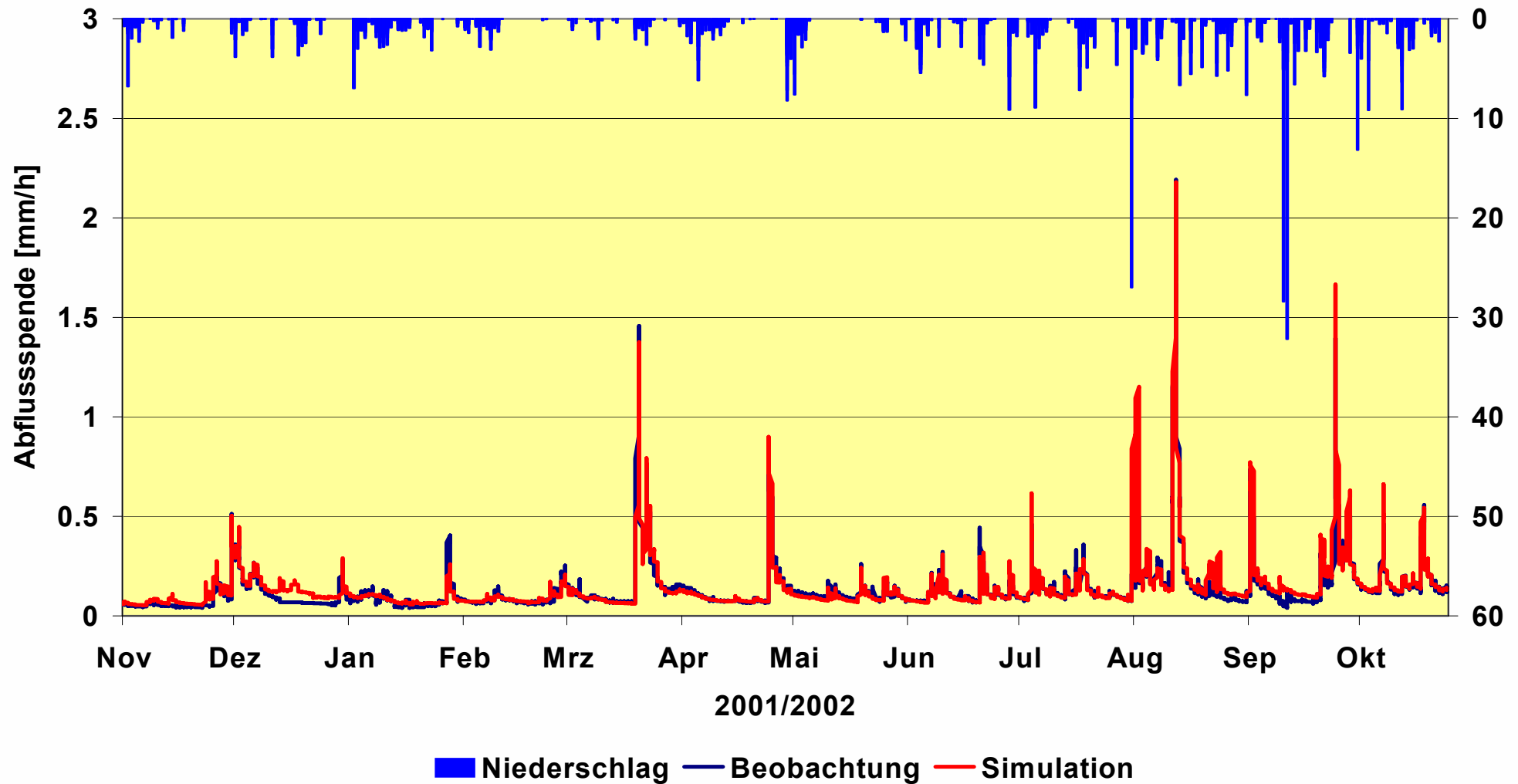
Klimaänderung & Wasserverfügbarkeit Alpenraum

Weilheim



Klimaänderung & Wasserverfügbarkeit Alpenraum

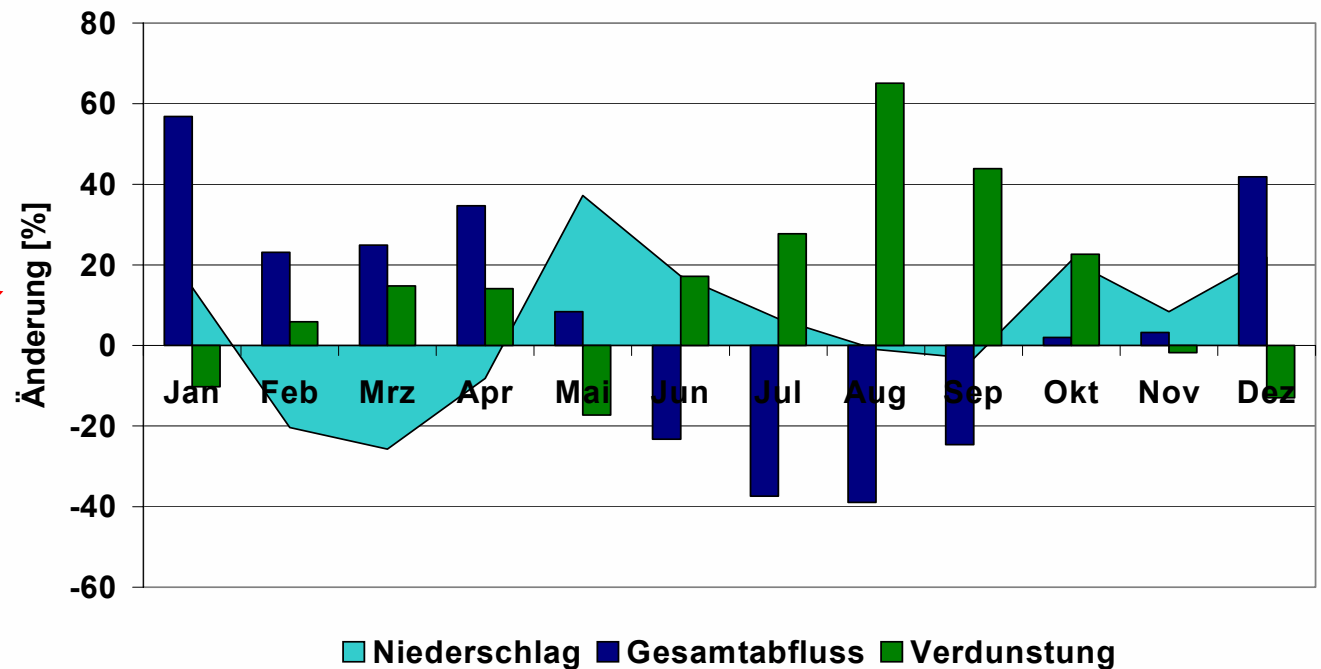
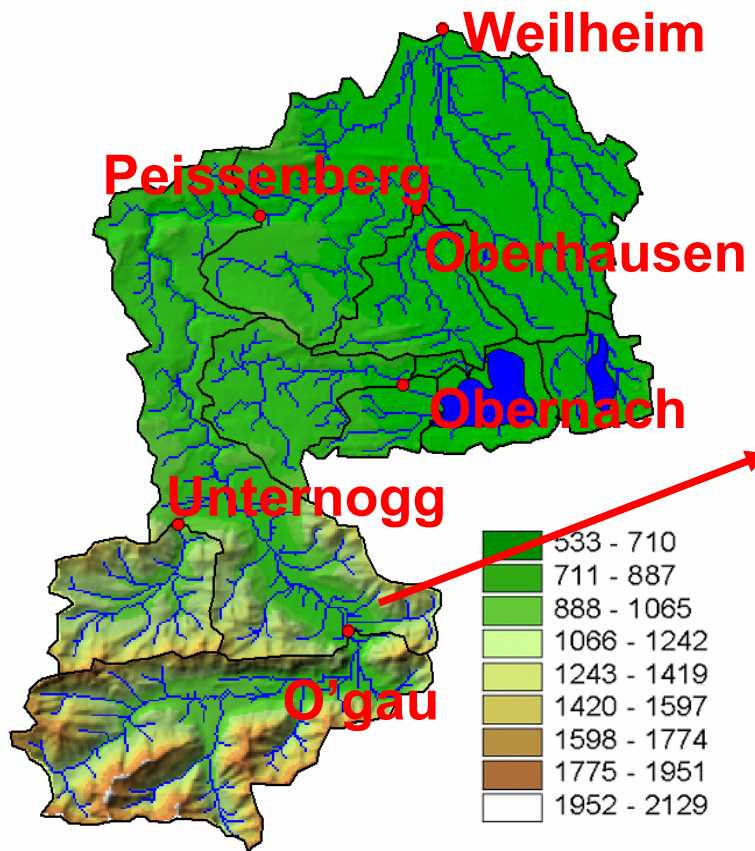
Peißenberg



Modellkaskade ECHAM4 – MM5 – WaSiM

Änderung 1990-99 vs. 2030-39

Oberammergau

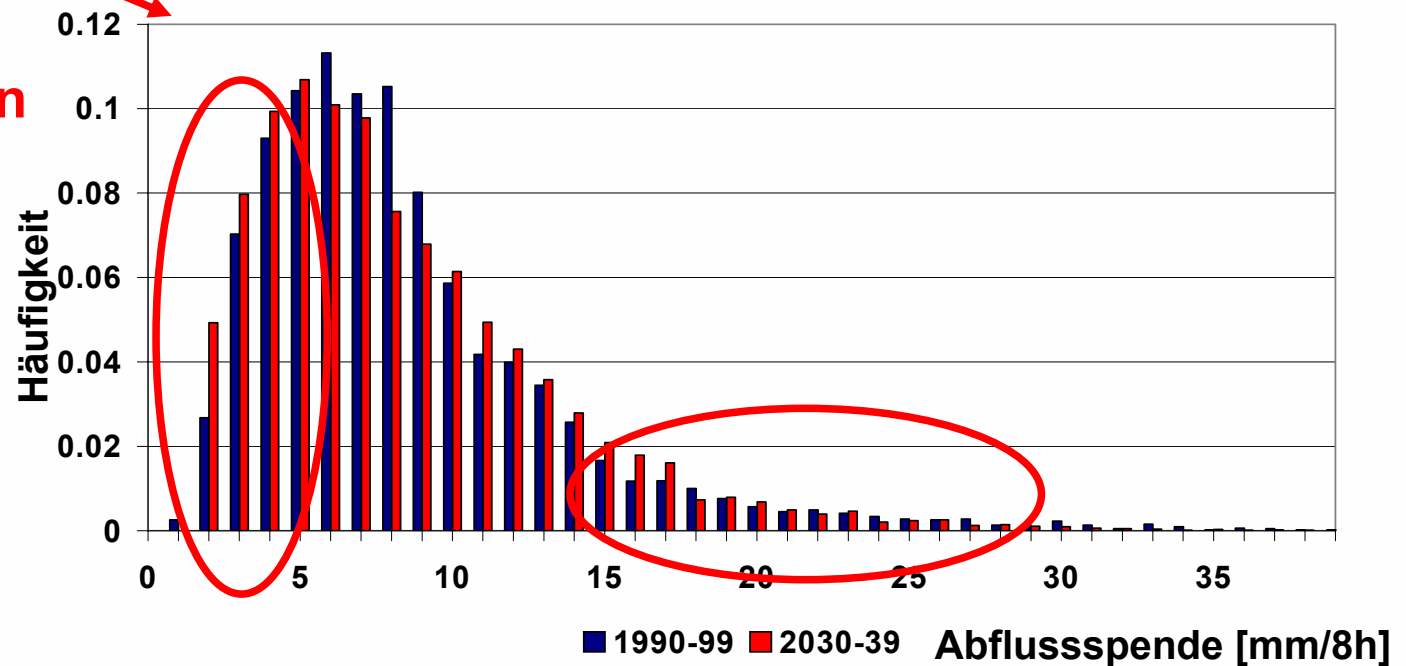
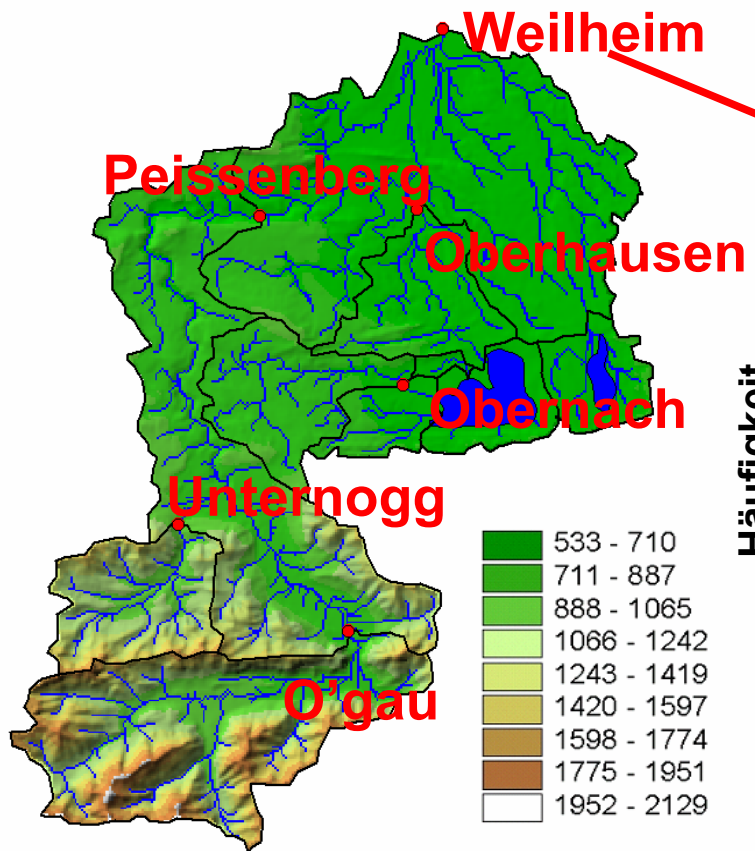


Zunahme Winter-, Verminderung der Sommerabflüsse

Modellkaskade ECHAM4 – MM5 – WaSiM

Änderung 1990-99 vs. 2030-39

Weilheim

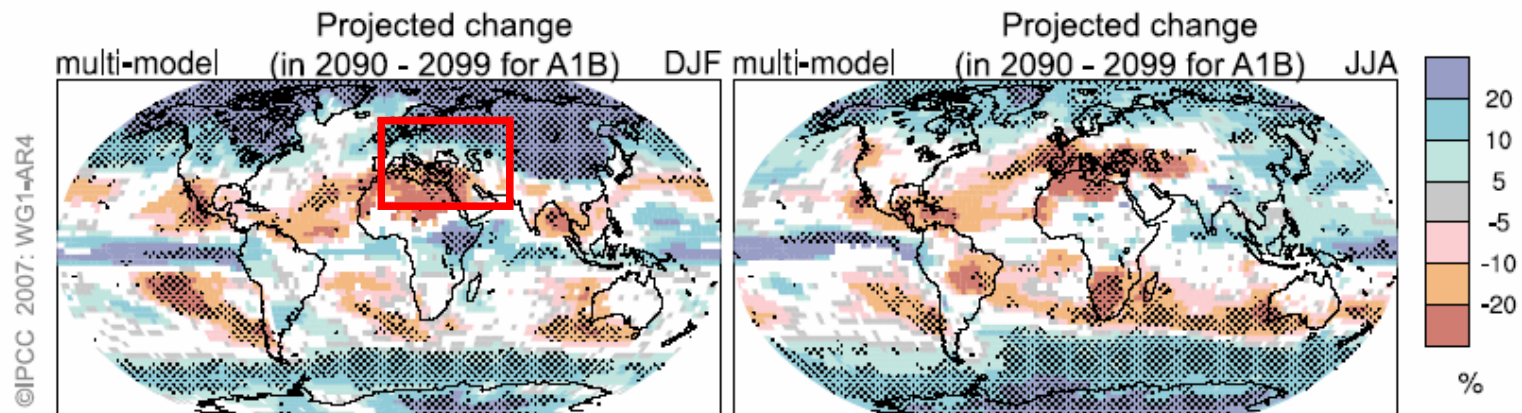


Veränderung der Häufigkeiten: Zunahme von Hochwasser & Niedrigwasser!

Was bedeutet die Klimaänderung für einzelne Einzugsgebiete?

Beispiel II: Oberes Jordan Einzugsgebiet

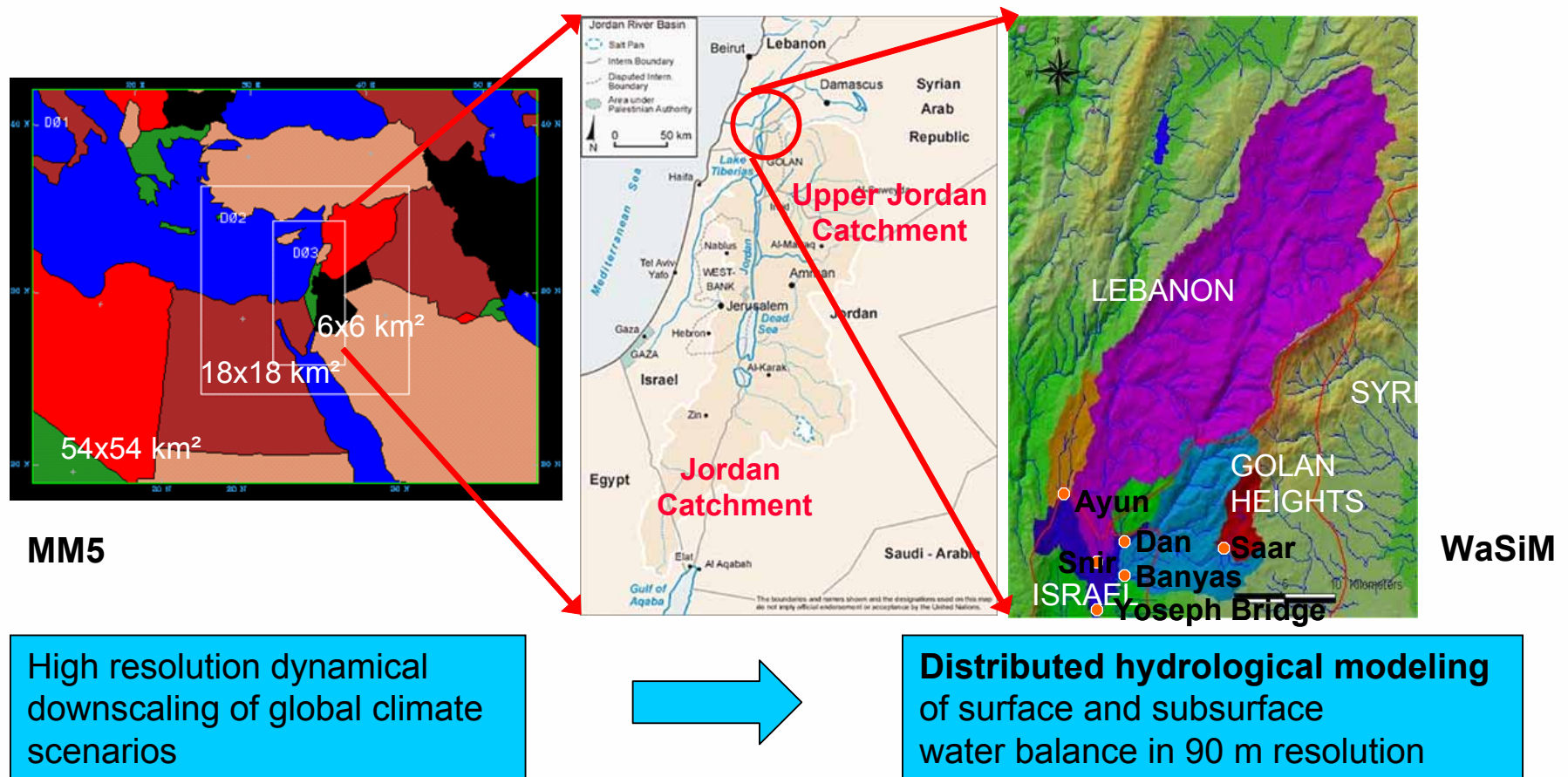
Östliches Mittelmeer / Mittlerer Osten



IPCC 4AR, 2007

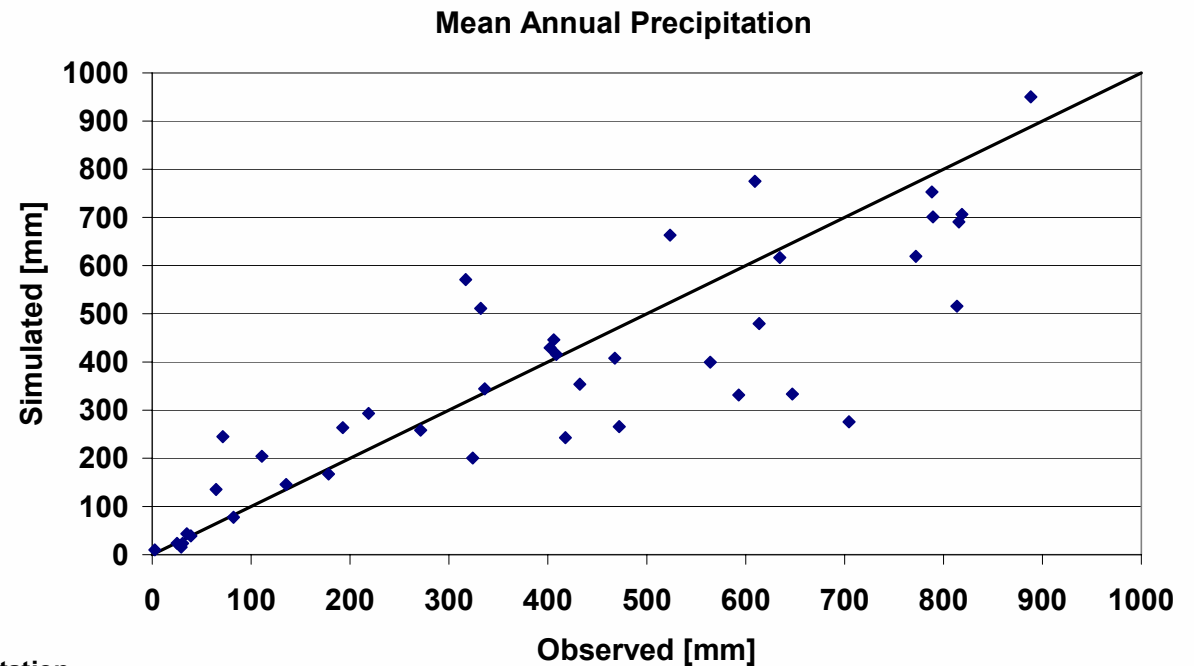
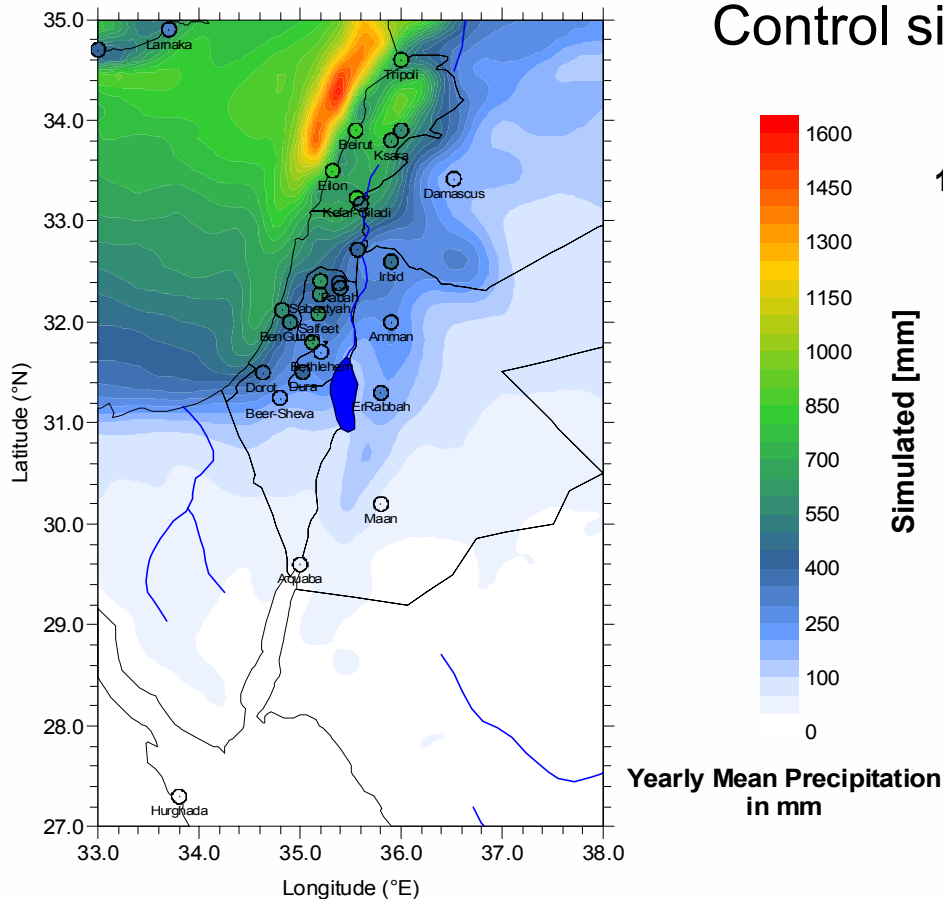
**Eastern Mediterranean/Near East:
is in between increasing and decreasing dominant
large scale patterns of DJF precipitation change**

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



Performance of regional climate simulations for hydrological impact analysis

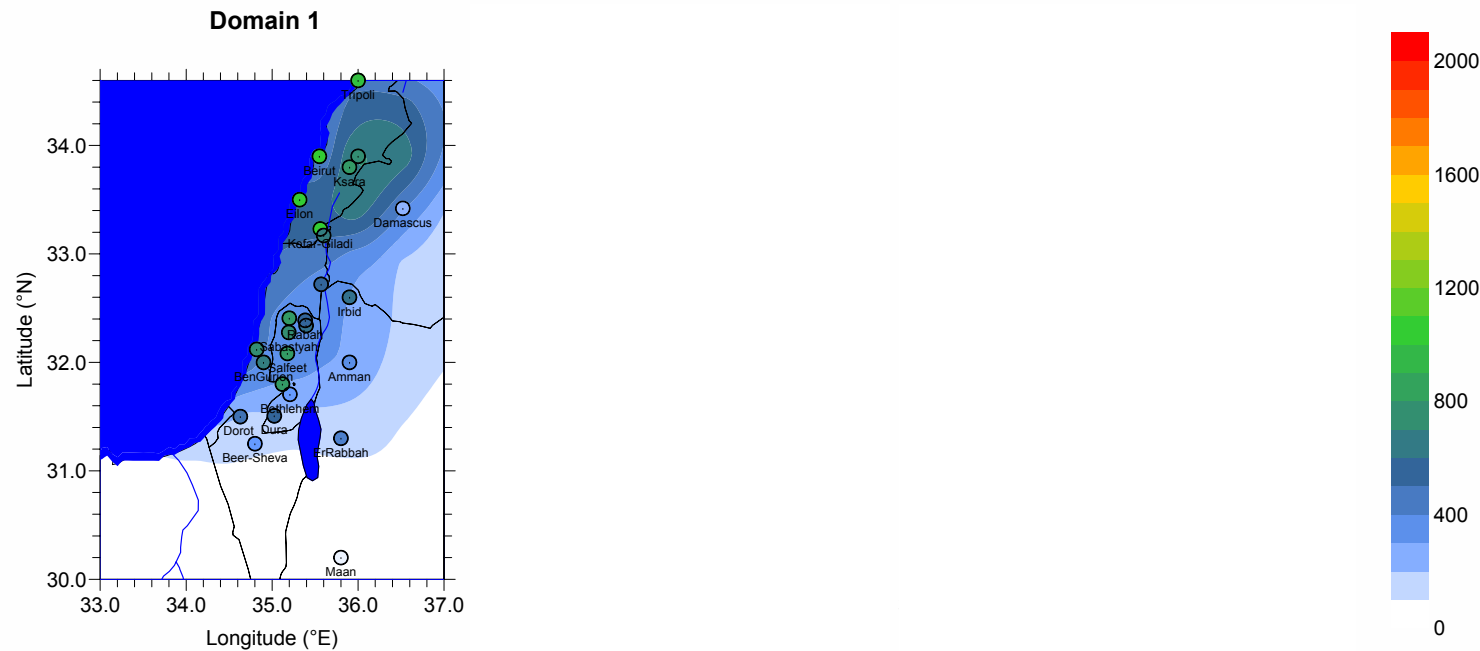
Control simulations (present day climate)



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

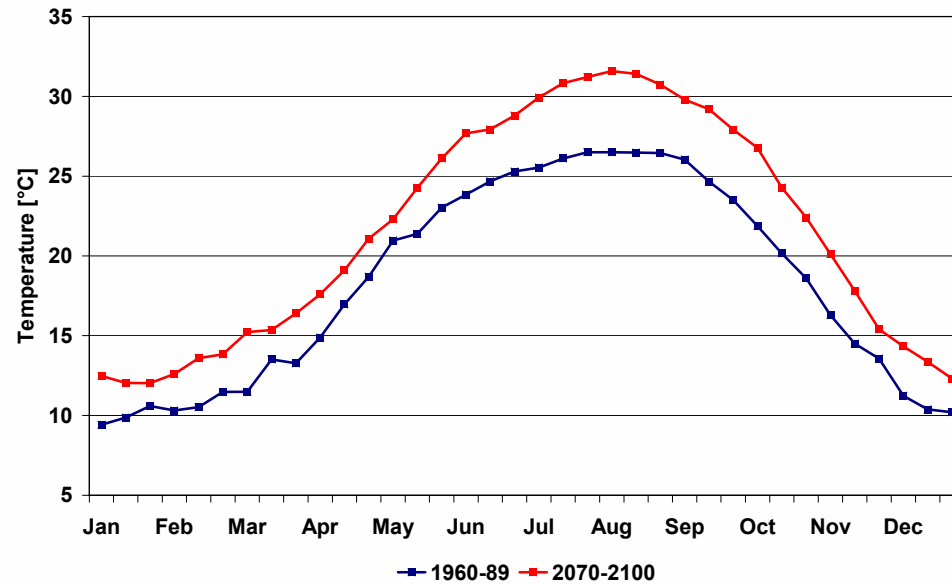
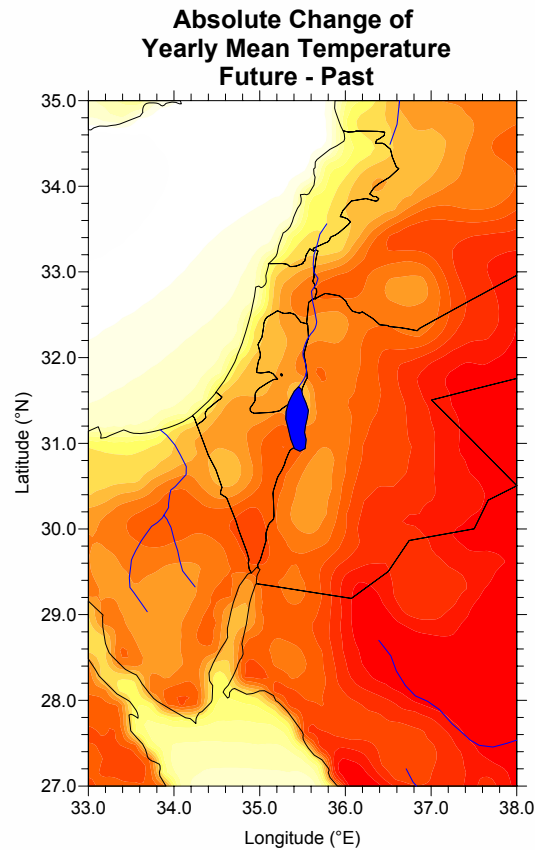
54km

18 km

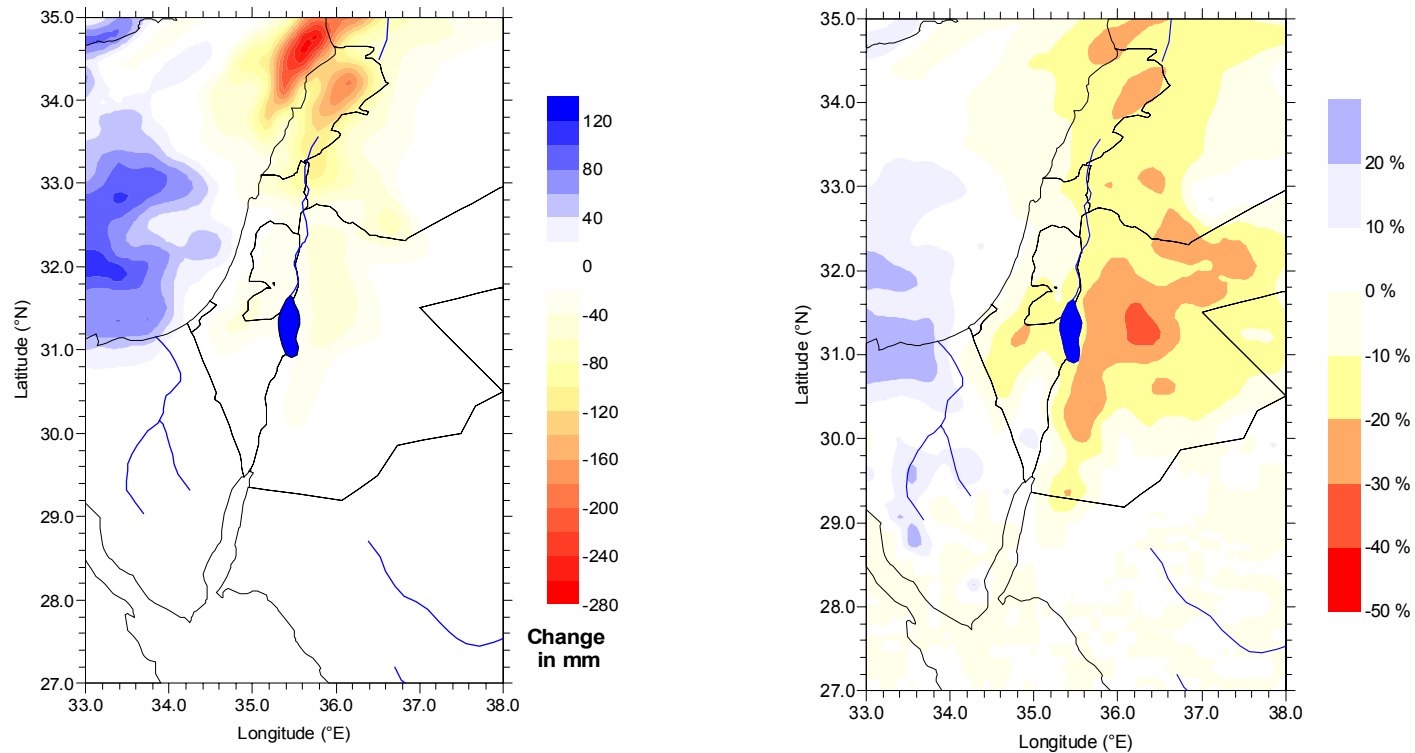
6 km

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

What are the expected changes in temperature?

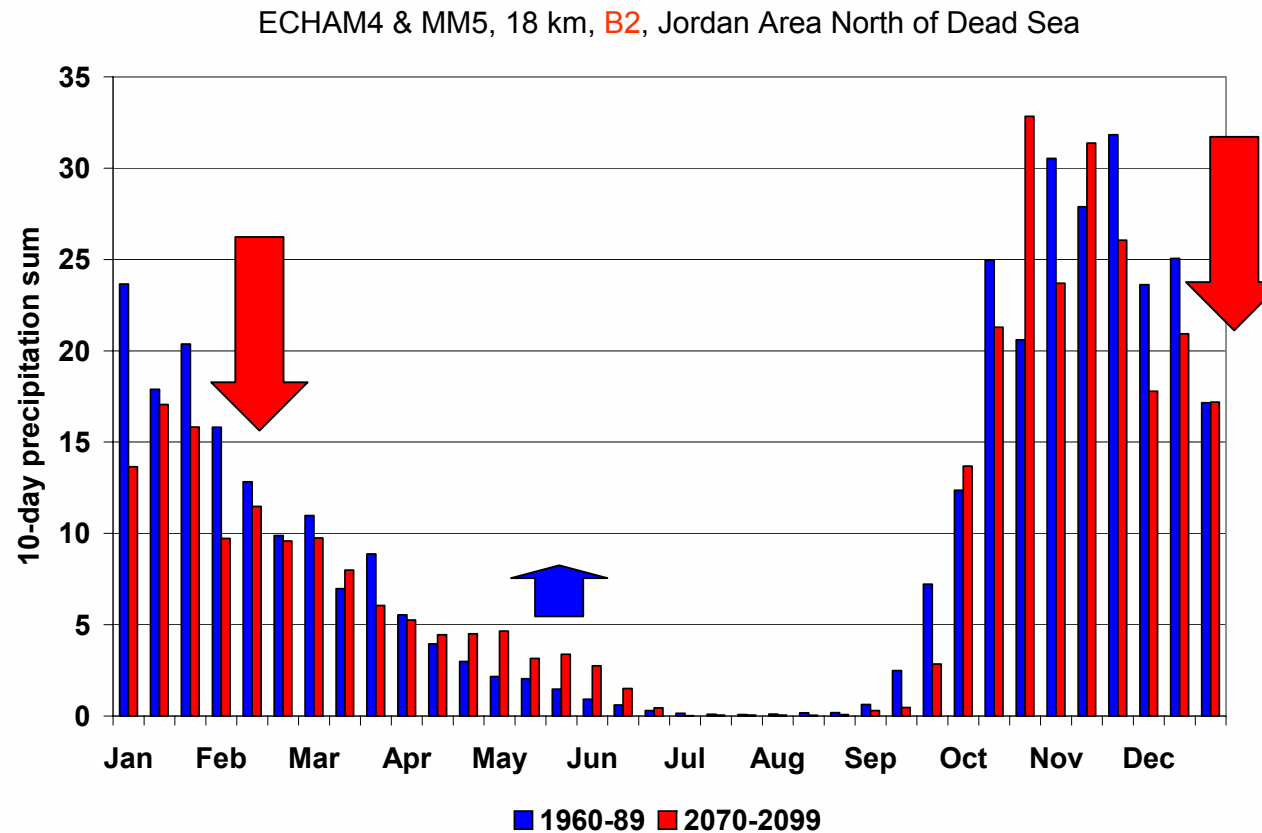


What are the expected changes in precipitation?



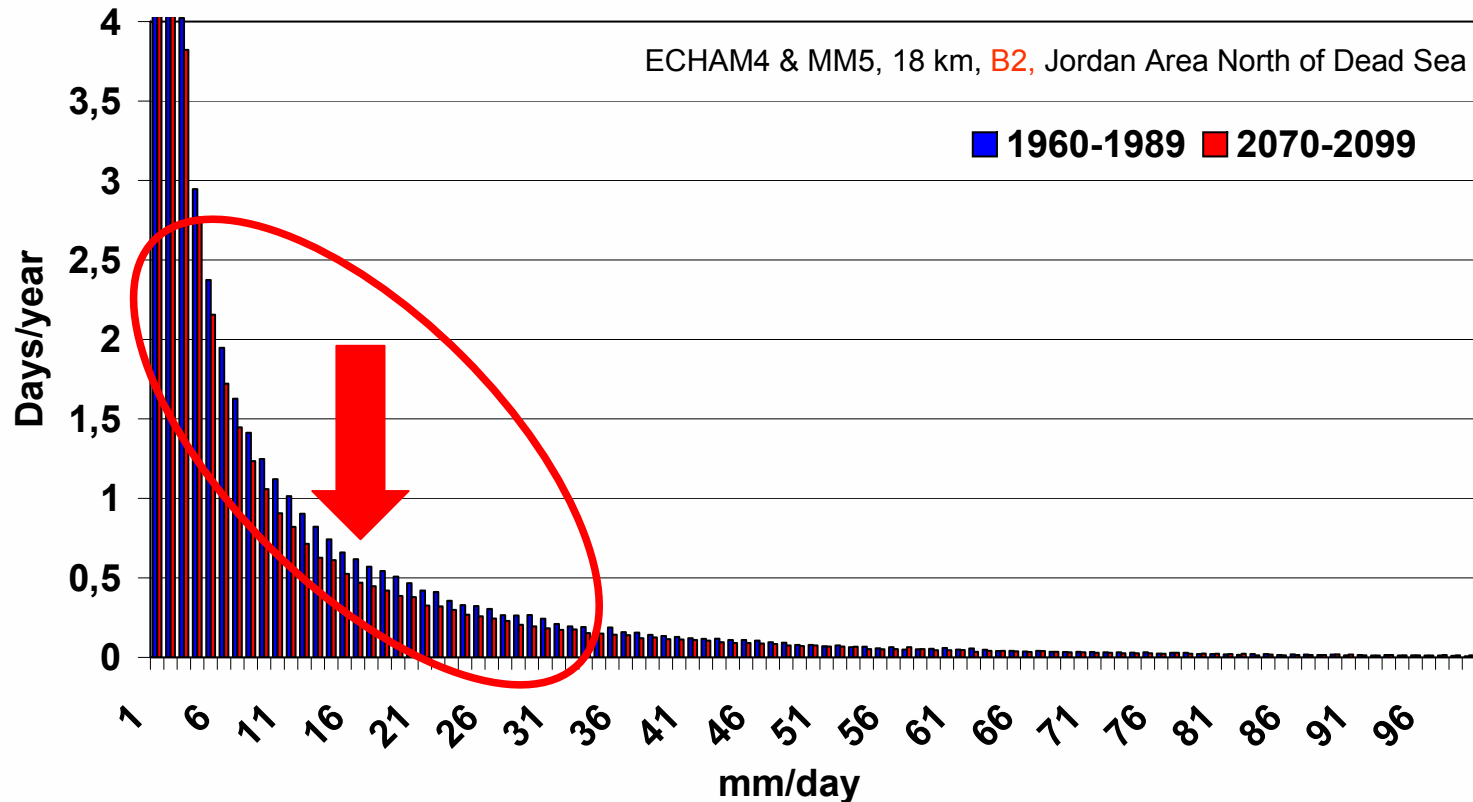
ECHAM4 & MM5, 18 km, B2, 2070-2099 vs 1961-1990

How does the temporal distribution of precipitation change?



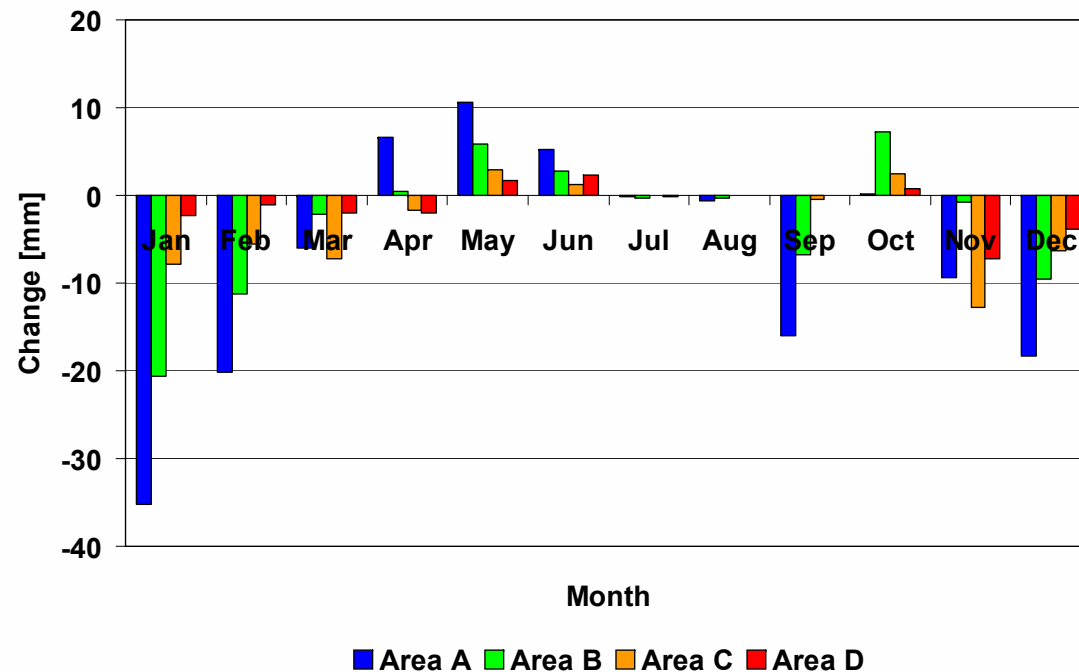
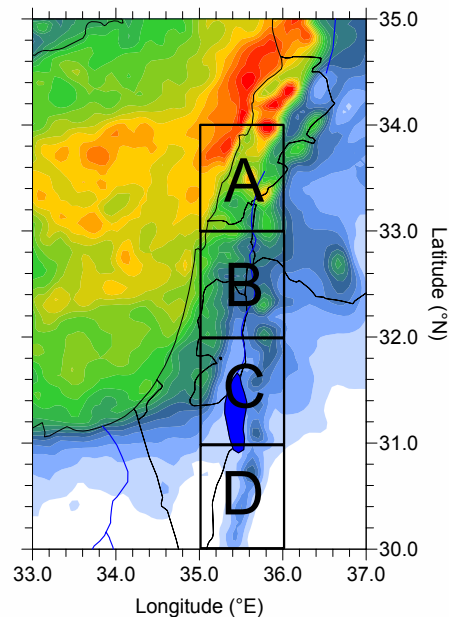
Strongly decreased winter, slightly increased absolute late spring precipitation

How do precipitation intensities change?



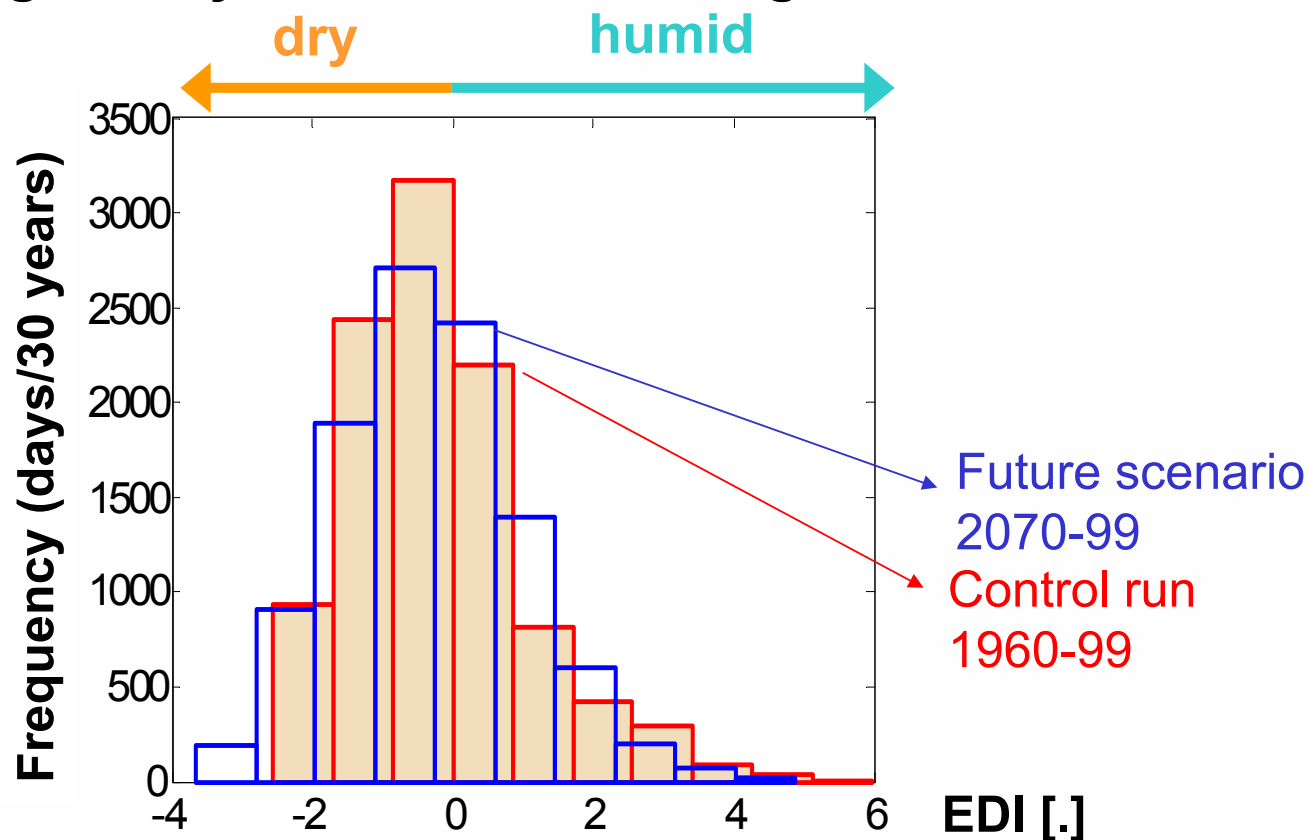
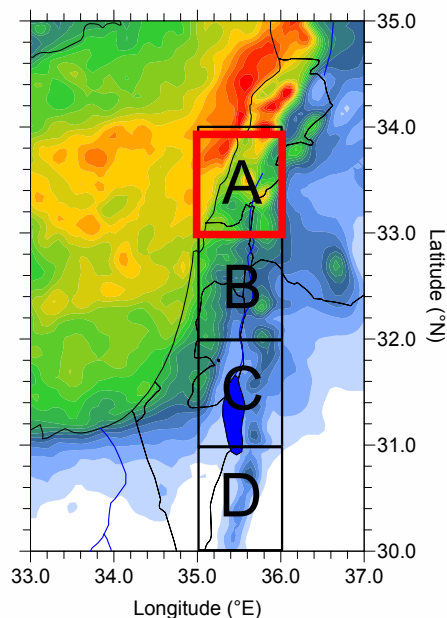
Tendency towards decrease of precipitation intensity

How does seasonal precipitation change depend on the region?



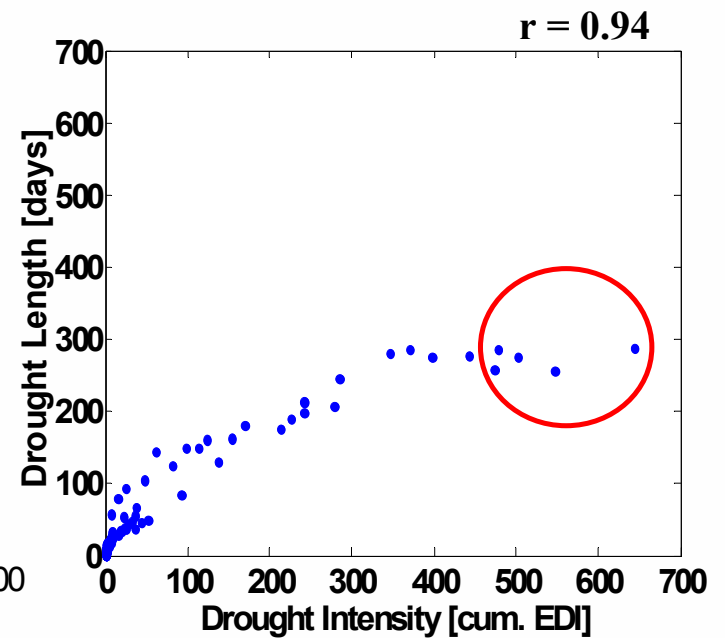
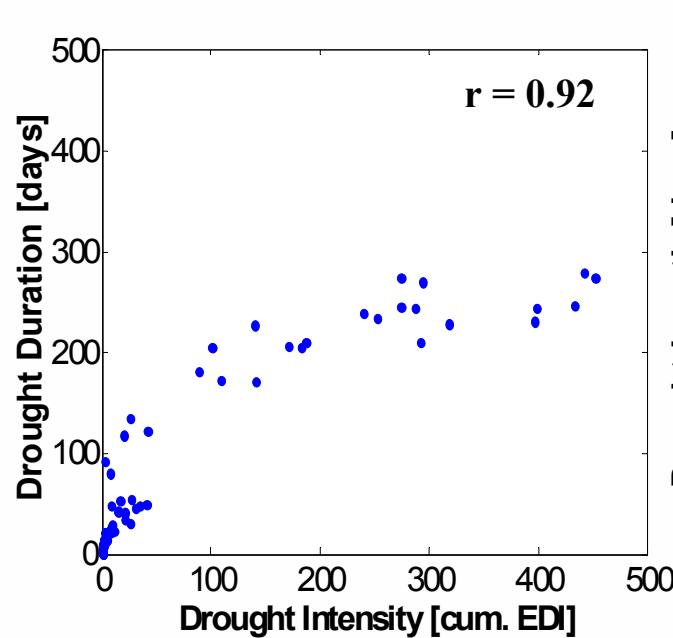
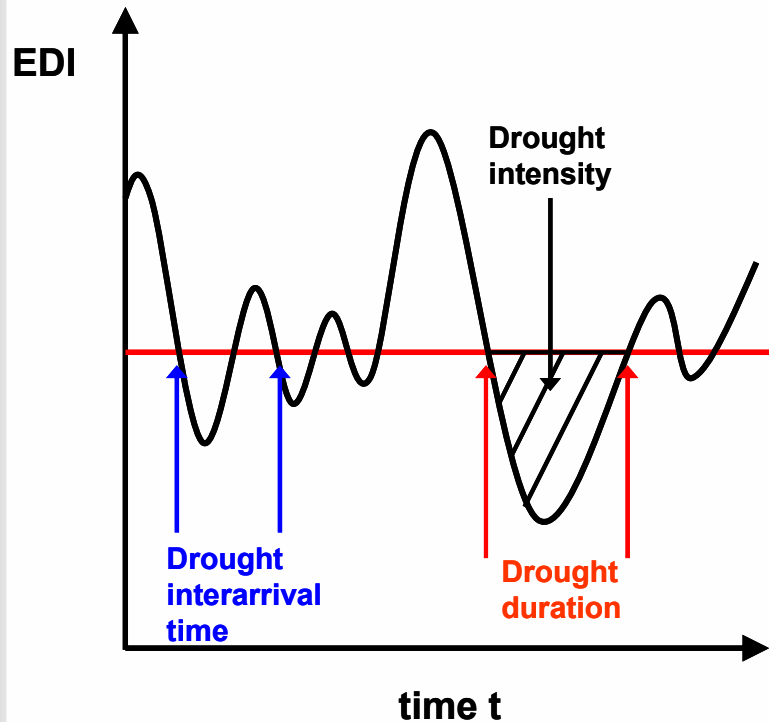
For all subregions: Decreased winter, increased spring precipitation

Are drought risks changing? Analysis of effective drought index EDI



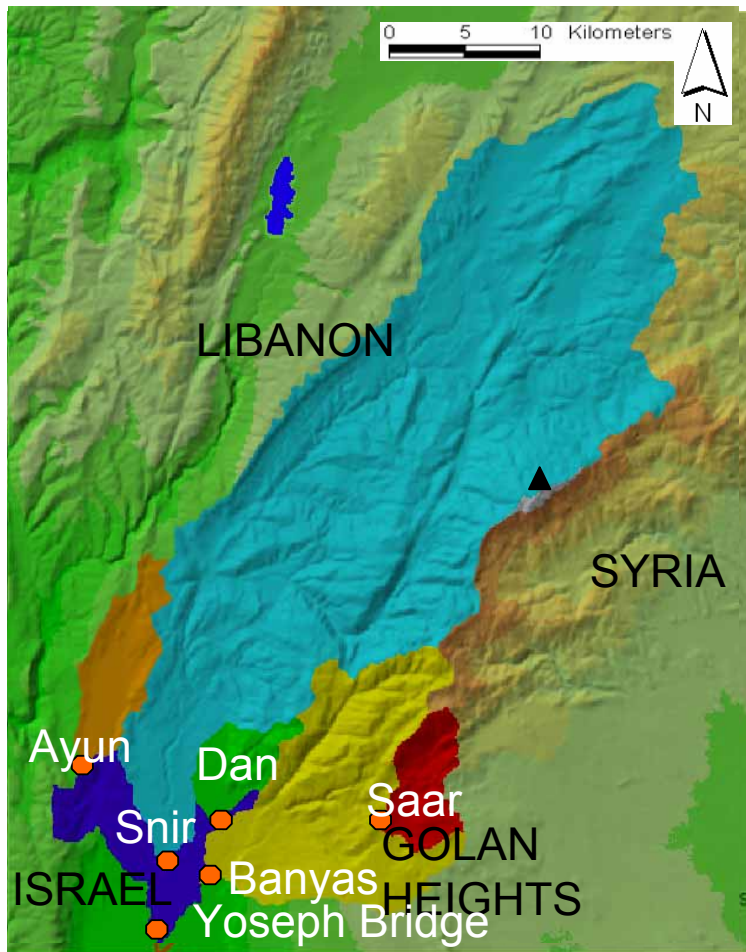
Subregion A: shift towards drier conditions & increased drought risks

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 km²

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

Klimaänderung & Wasserverfügbarkeit Naher Osten



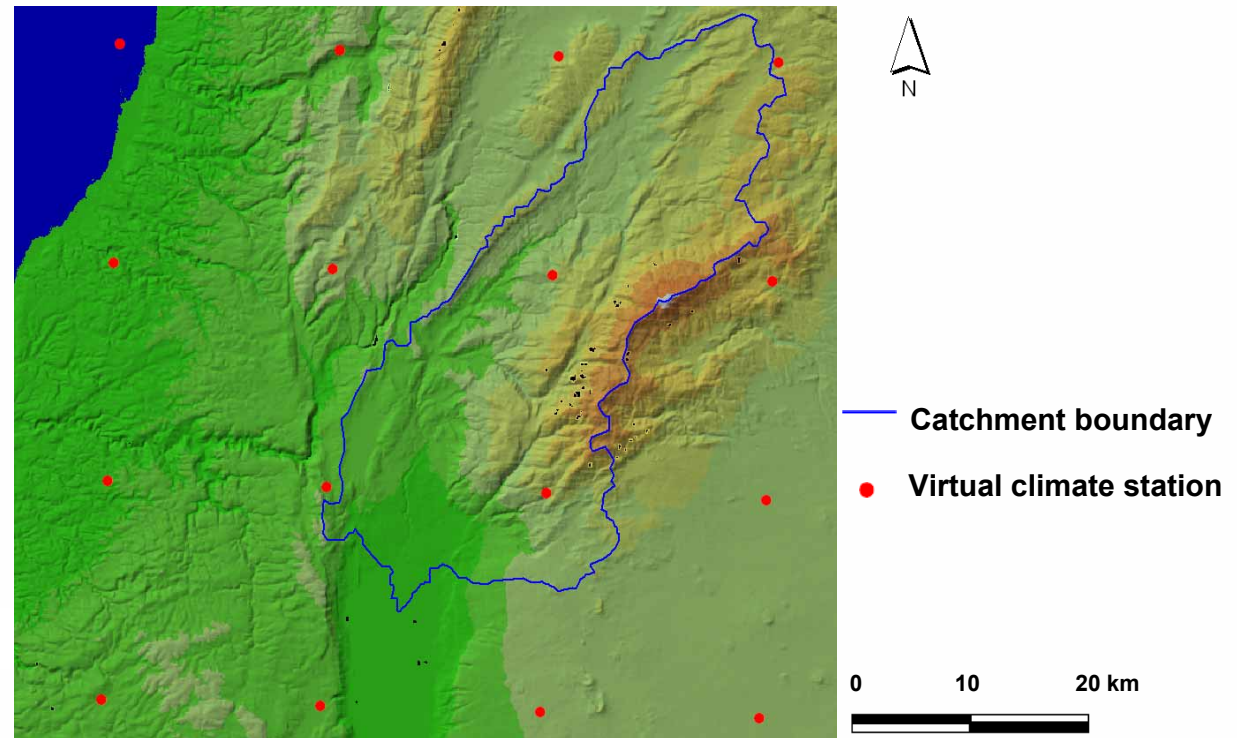
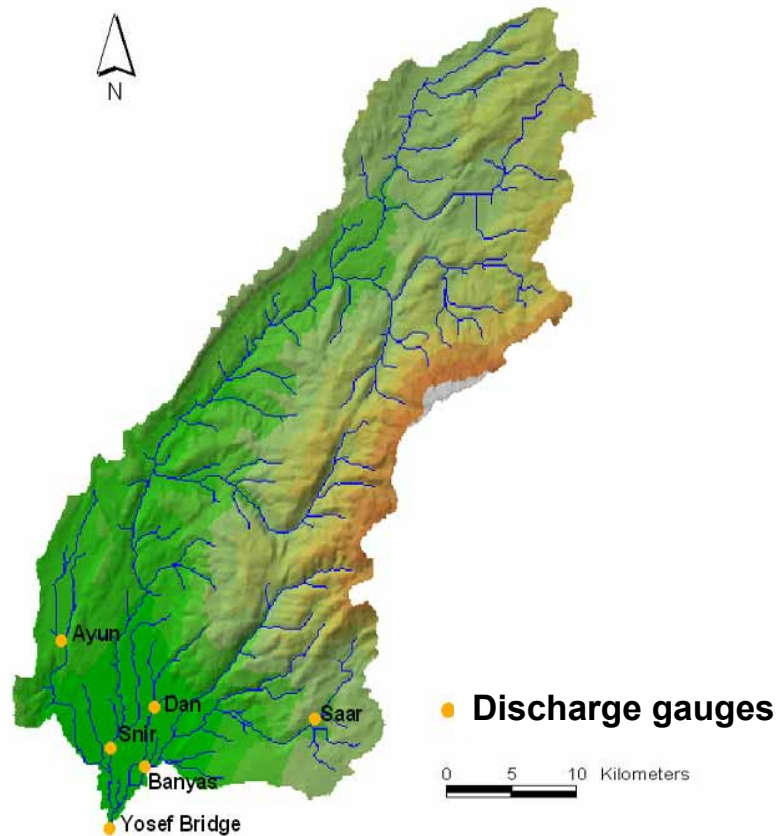
Banyas



Jordan & Mount Hermon

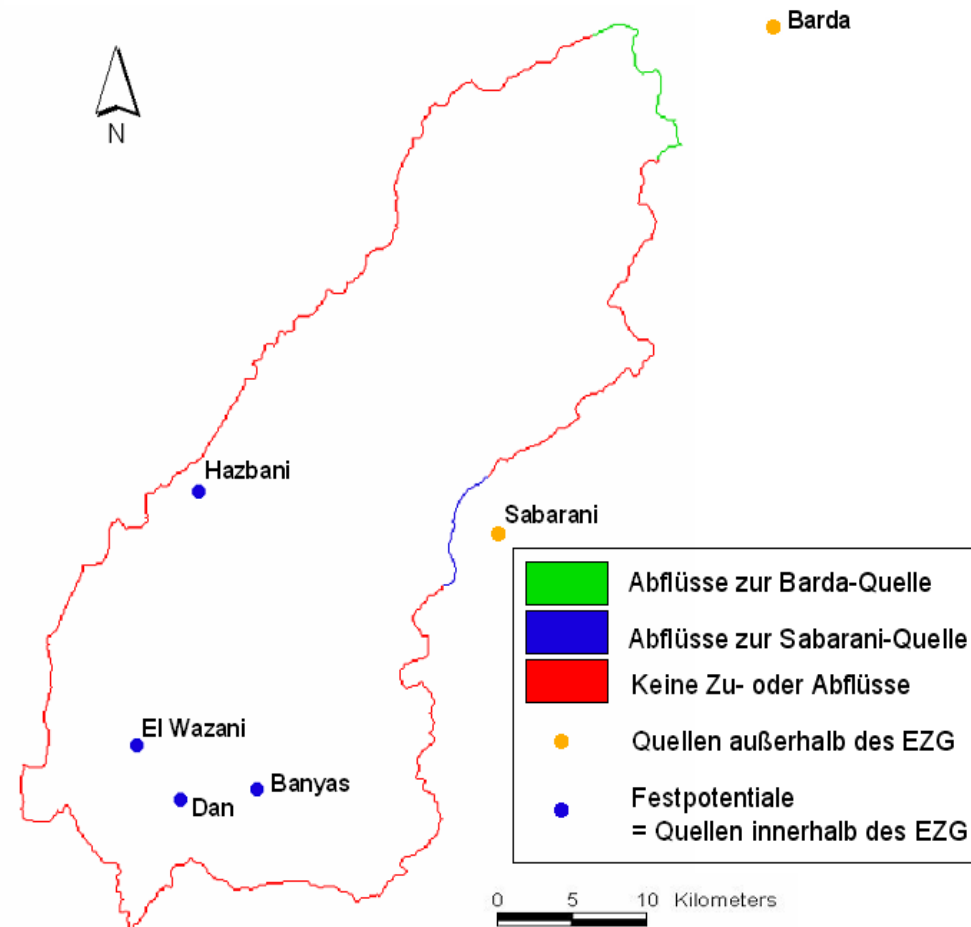


Grid points RCM \Rightarrow virtual meteorological observation stations



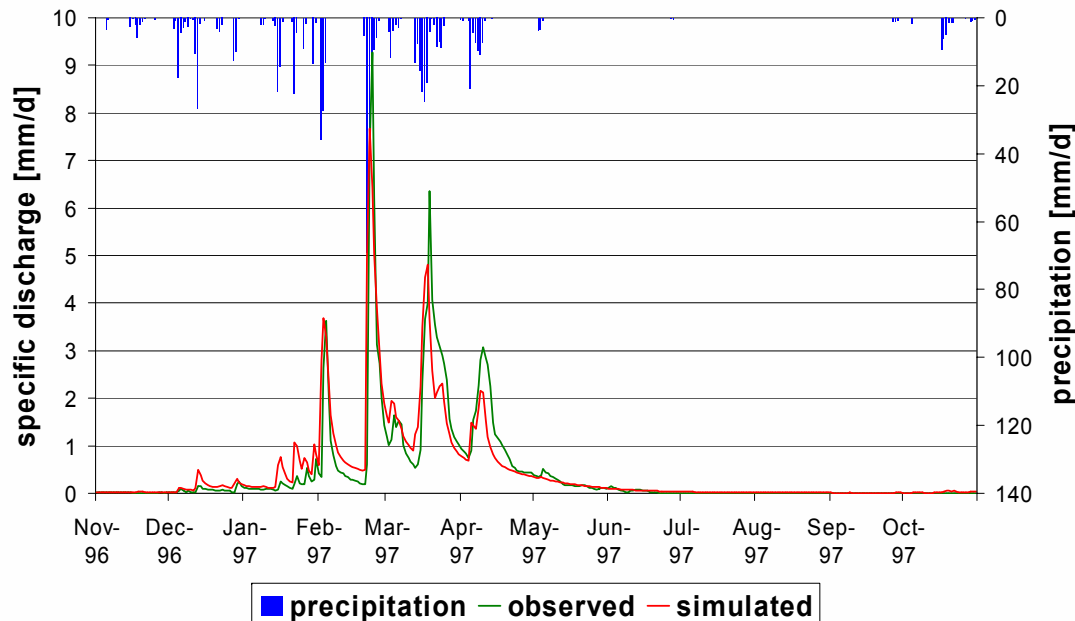
Boundary Conditions for Groundwater Model

Maximum depth of
unsaturated zone
assumed:
= 100 m

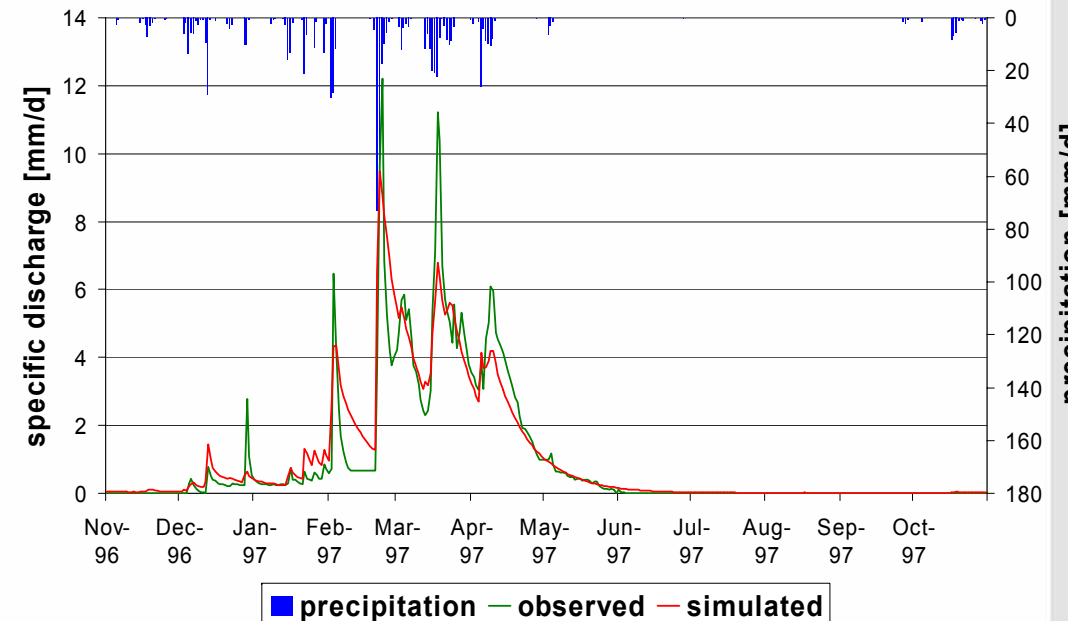


Hydrological Simulations

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

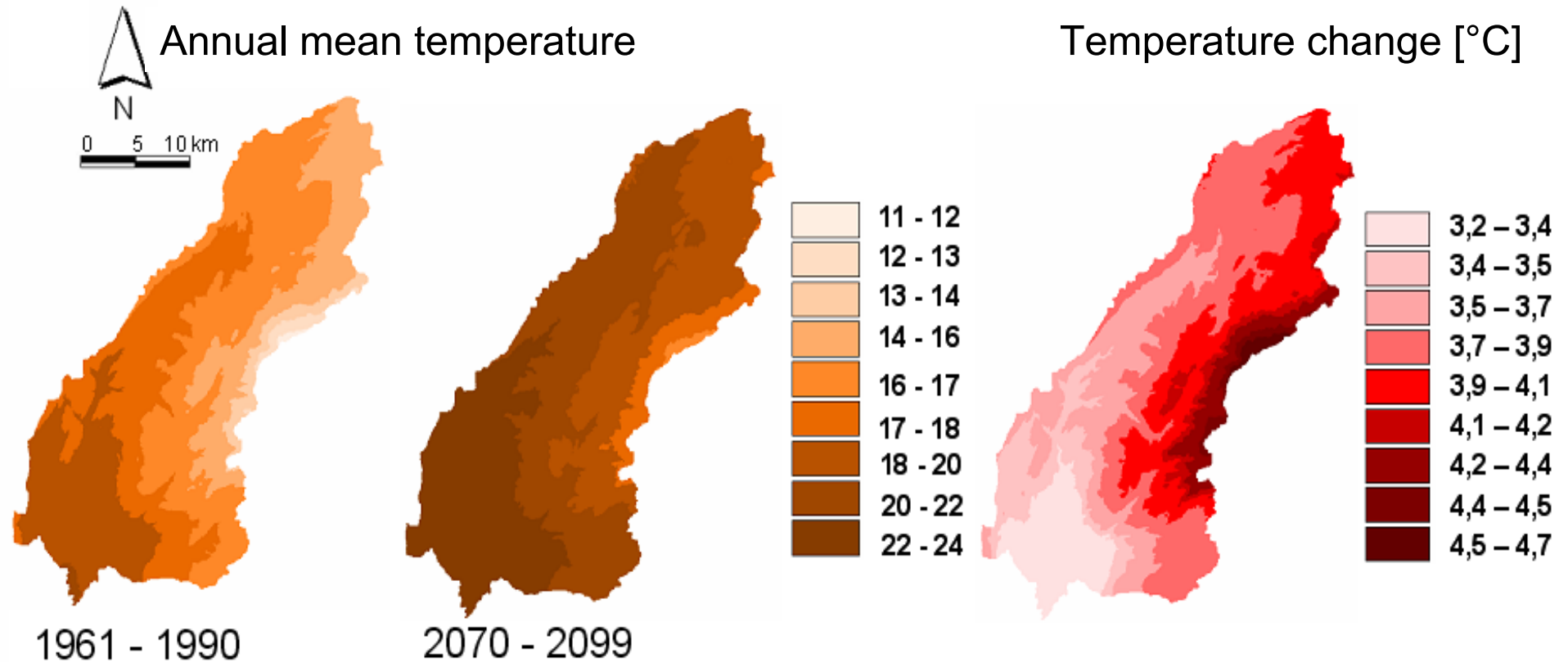


Gauge Ayun

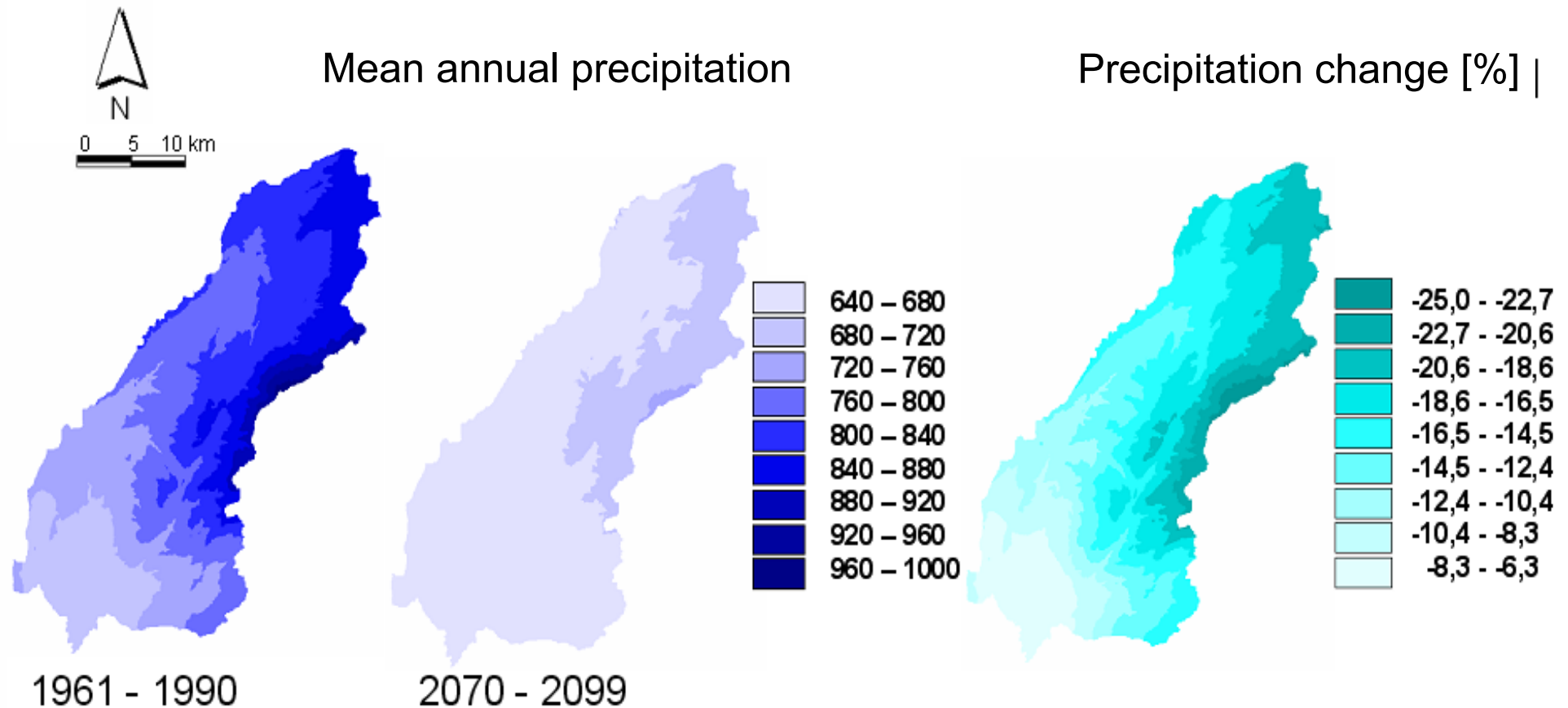


Gauge Saar

Upper Jordan River catchment

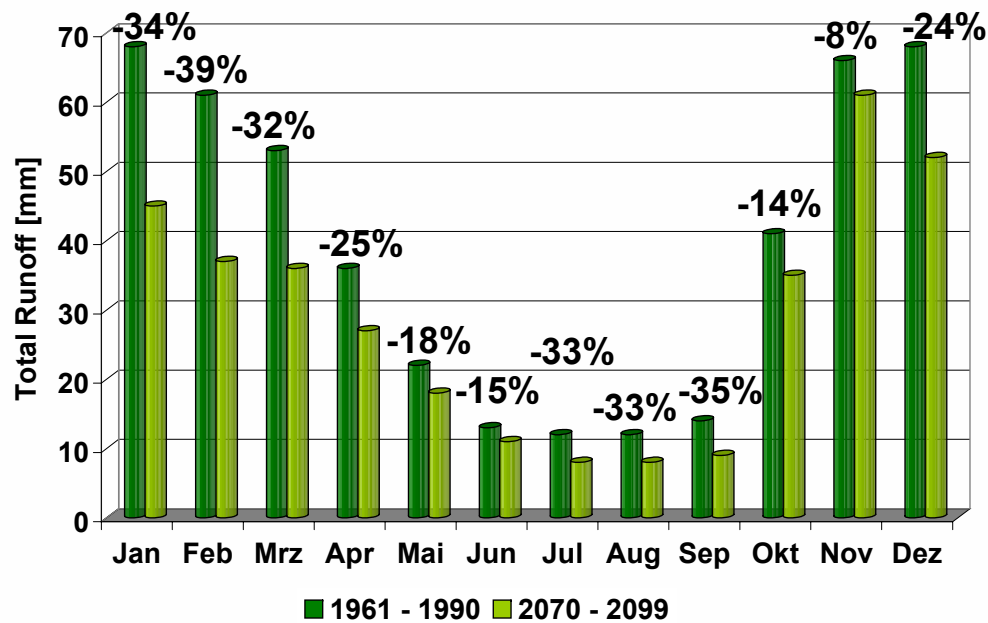


Upper Jordan River catchment

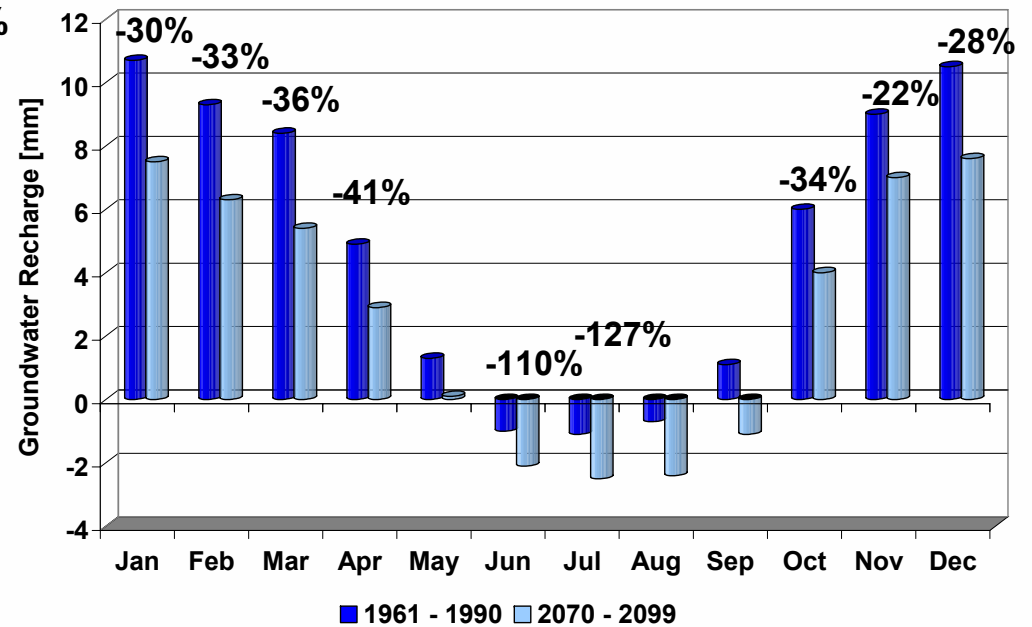


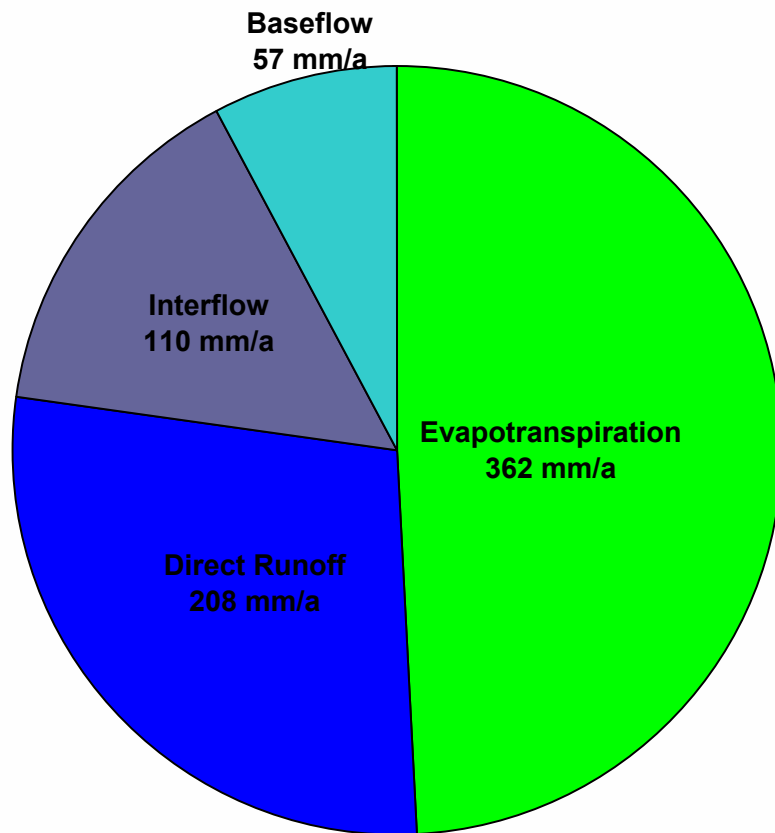
Upper Jordan River catchment

Runoff

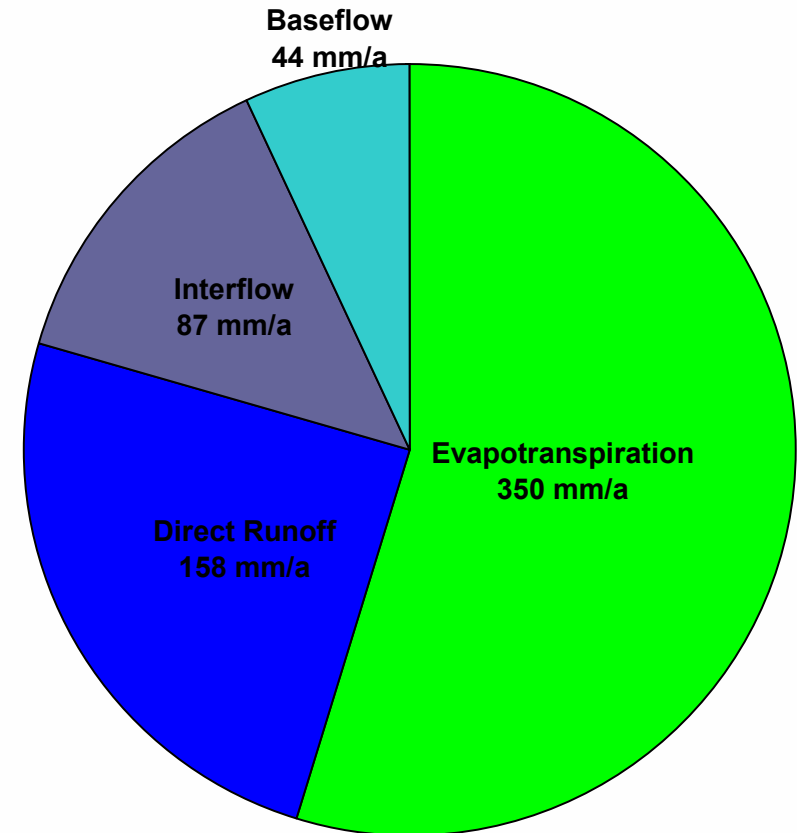


Groundwater Recharge





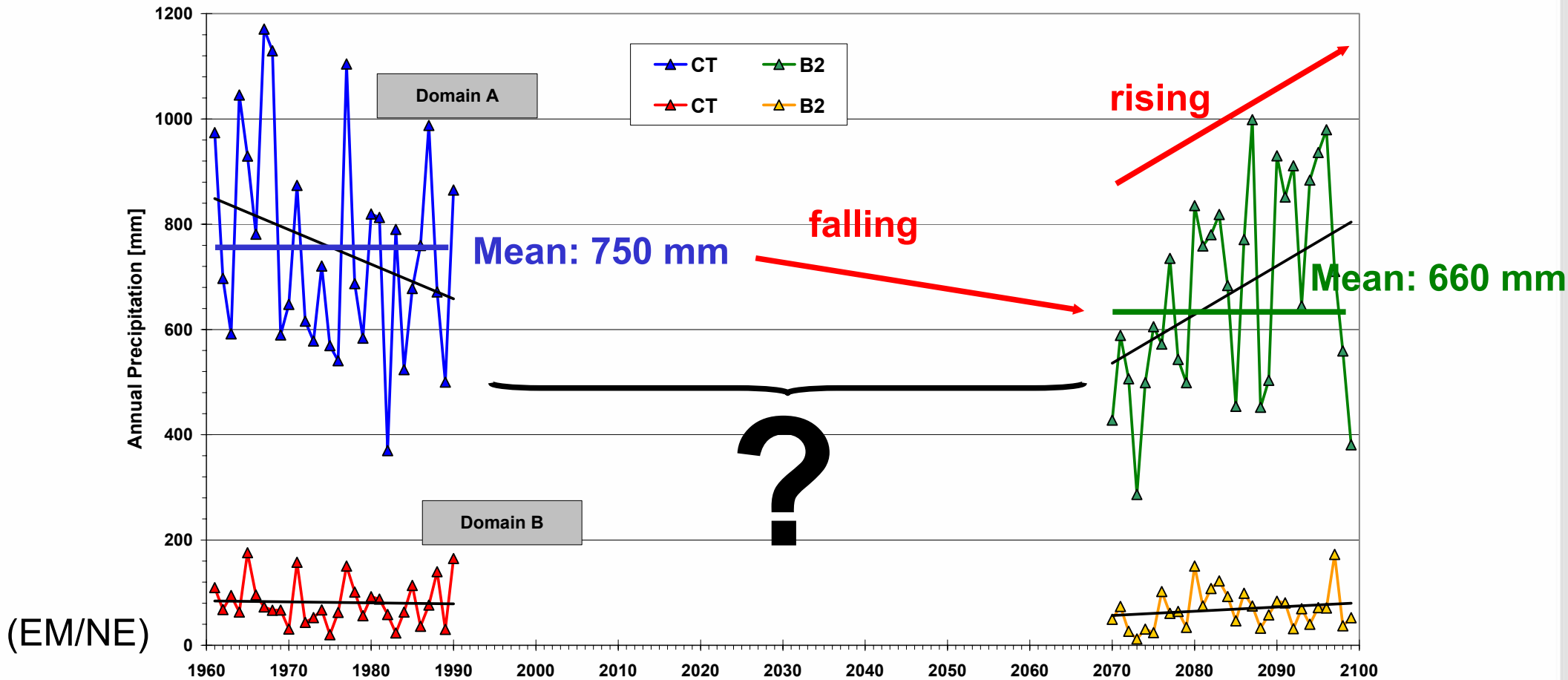
1961-90



2070-99

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

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



Zusammenfassung

- Hydrologische Impaktanalyse erfordert Regionalisierung globaler Klimaszenarien mit hoher räumlicher Auflösung
- Beispiele 1-Wege gekoppelter Klima-Hydrologie-Simulationen

Ammer EZG

Häufigkeit Trockenperioden ↑ , Häufigkeit Hochwasser ↑
Zunahme der Winter-, Abnahme der sommerlichen Abflüsse

Oberes Jordan EZG:

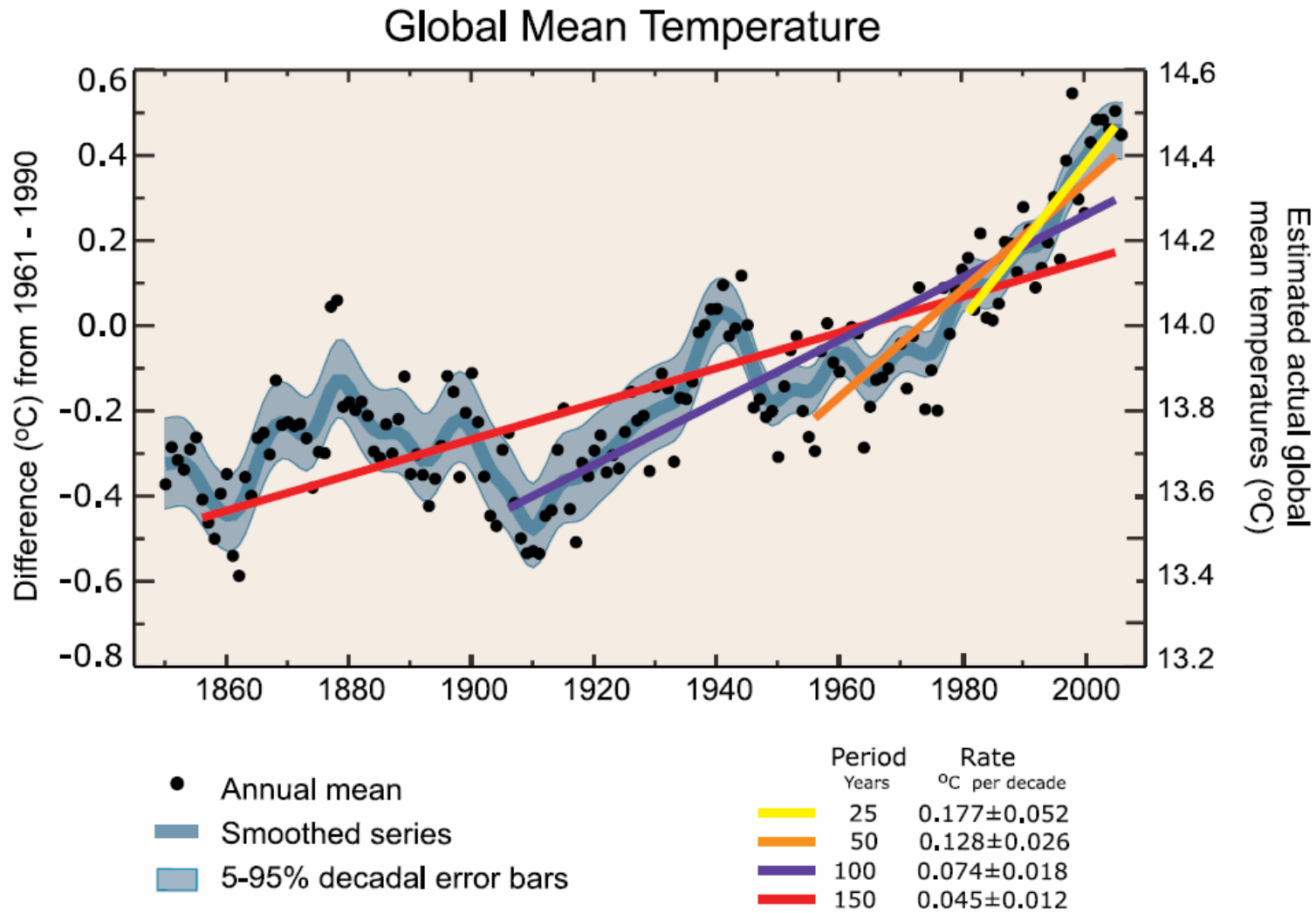
mittlere Jahrestemperatur ↑ 3.5°C, Sommer ↑ 5°C
Winterniederschläge ↓ 35%, Intensitäten ↓ (⇒ Reservoir!)
Amplifizierte Änderungen GW-Neubildung vs. Abfluss

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



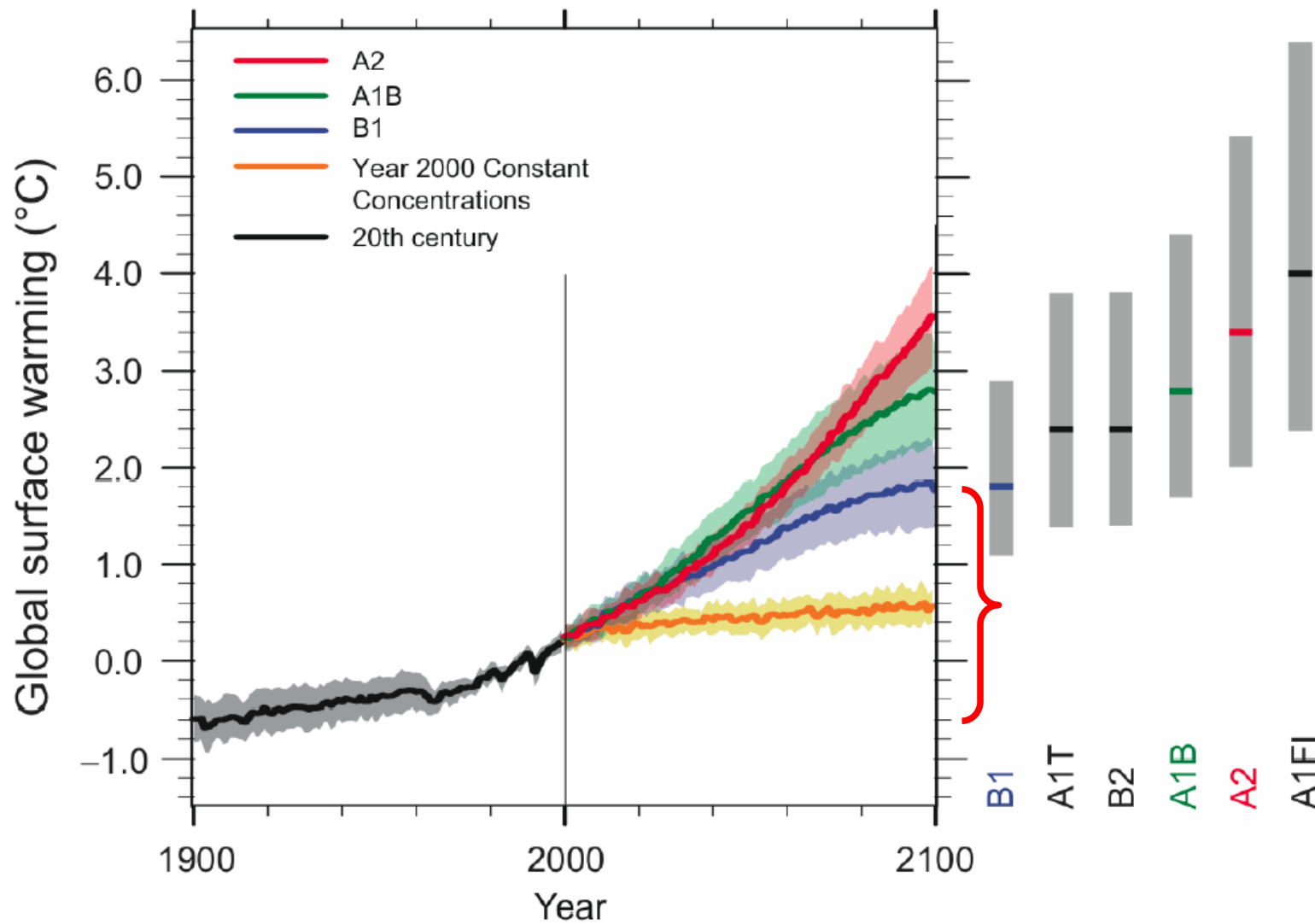
Vielen Dank für die Aufmerksamkeit

Unsere Motivation: **der globale Klimawandel**



IPCC, 4AR

Globaler Klimawandel: was uns erwartet

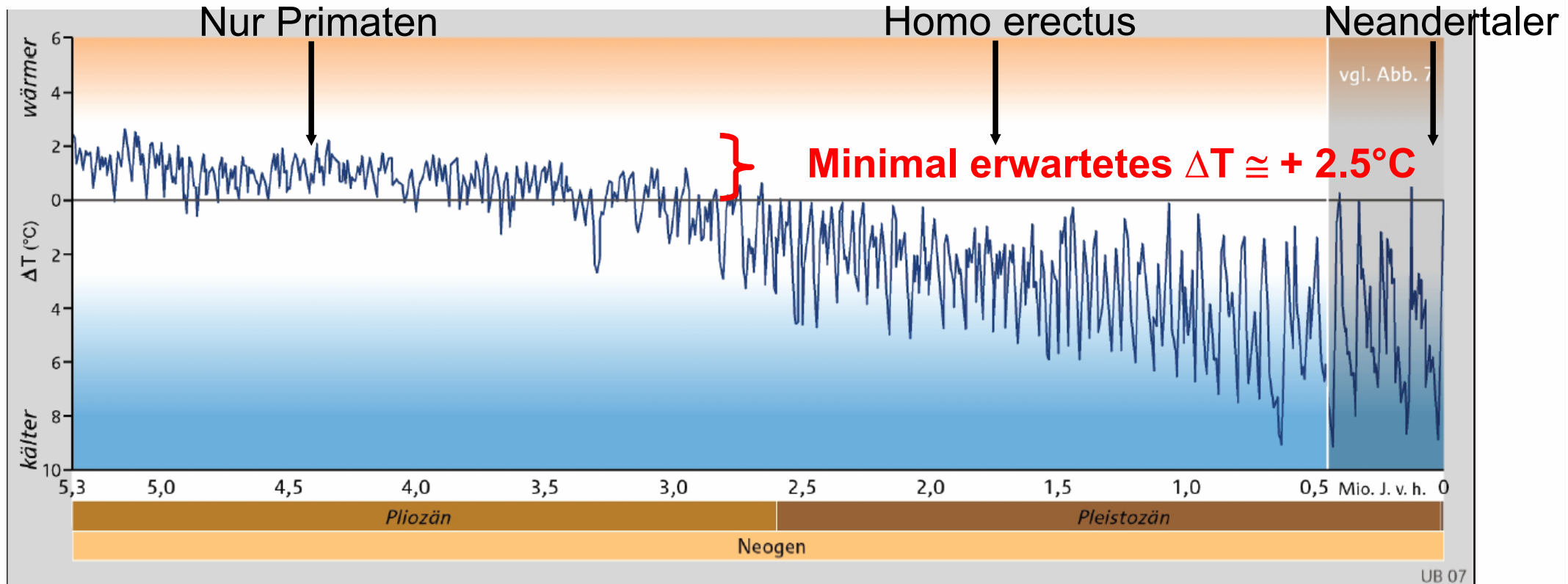


Selbst optimistische Szenarien: 2.5°C ↑

IPCC, 4AR

Globaler Klimawandel: was uns erwartet

Globale Temperaturänderungen gegenüber heutigem Mittelwert



Nach Lisiecki und Raymo, 2005

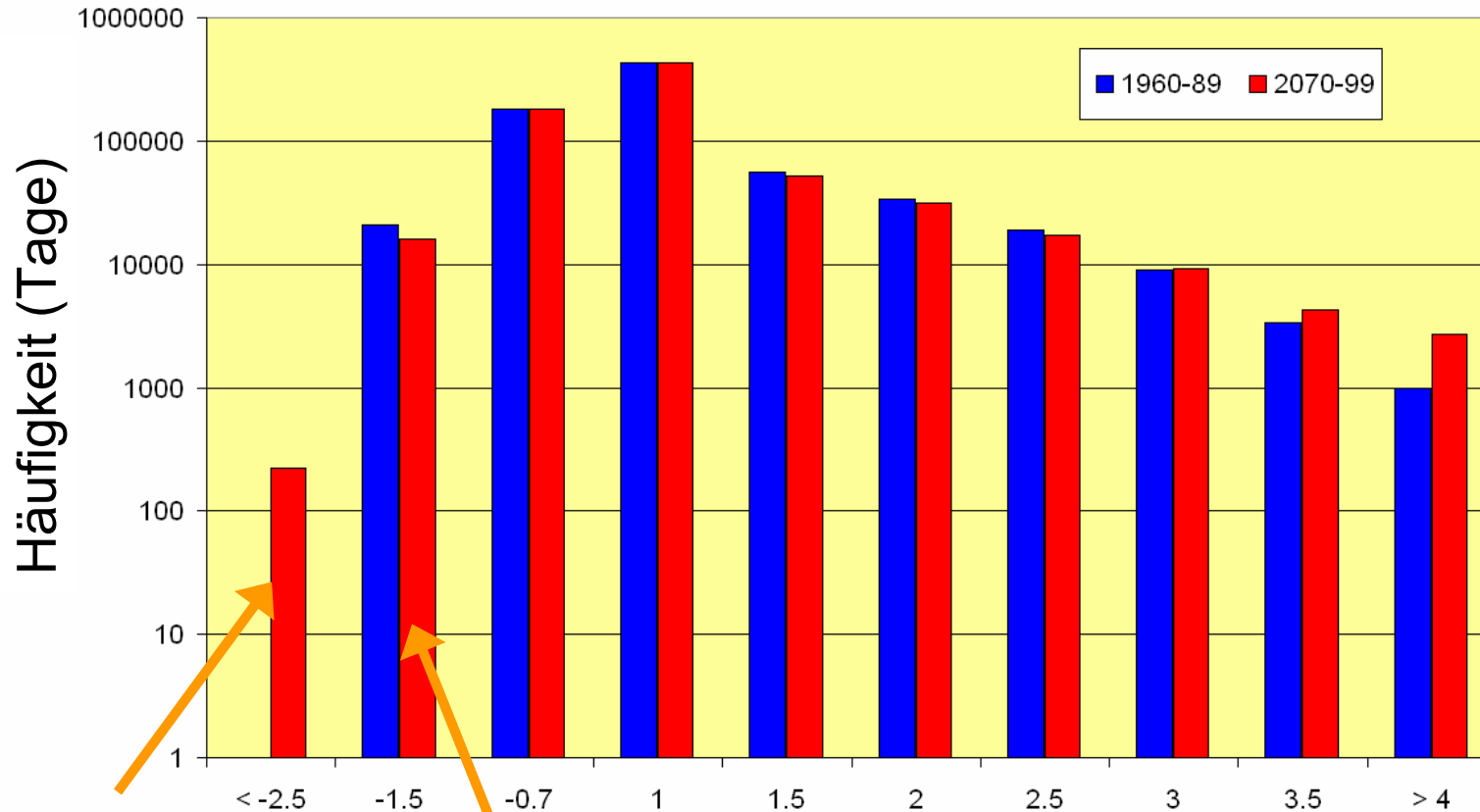
Erwartetes $\Delta T \Rightarrow$ keine vergleichbaren Klimaperioden in letzten 5 Mill. Jahren!

Klimaänderung & Wasserverfügbarkeit Alpenraum

Trockenheitsindex EDI

trocken

feucht



Region
Inn – Chiemgau –
Salzach-
Berchtesgaden

Schwere Dürre

Extreme Trockenheit

Zunahme der Intensität und Länge von Trockenzeiten!