

Einfluss der Klimaänderung auf Wasserhaushalt und Wasserkraft: Ergebnisse regionaler Klimaszenarien

H. Kunstmann, G. Smiatek, A. Marx, S. Wagner

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 Dürrerisiken

Extremereignisse: Hochwasser

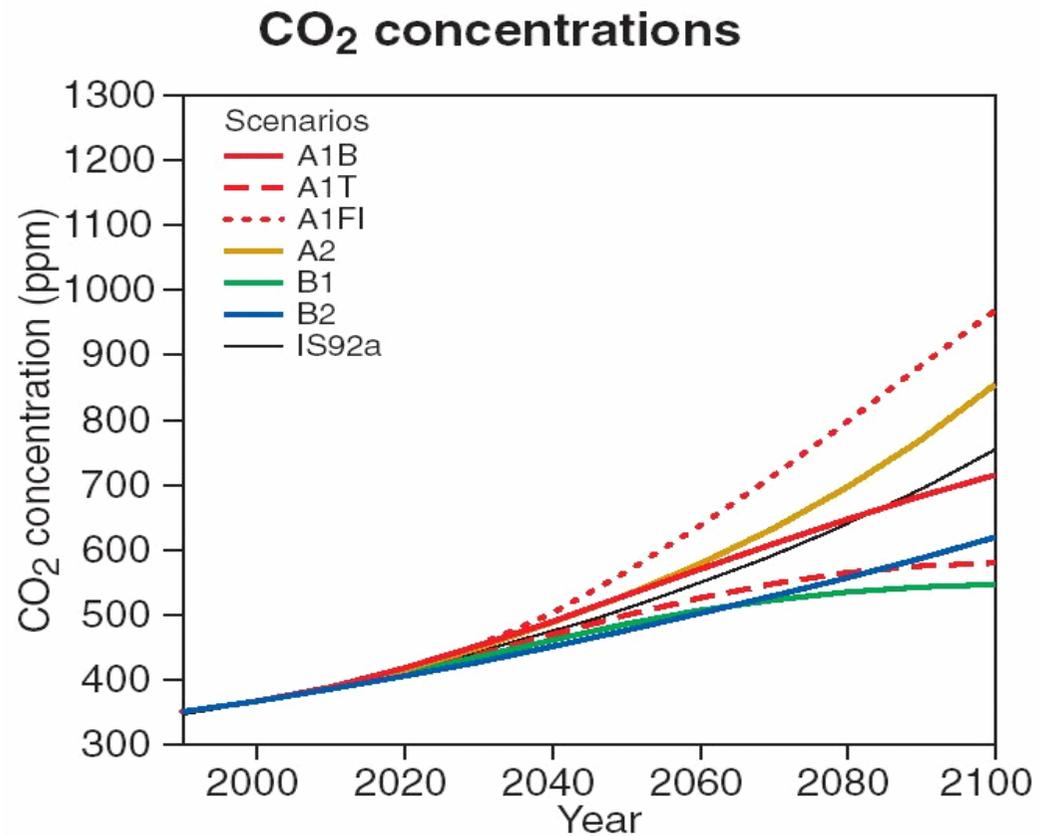


Hochwasserereignis	Total (Mio. €)	Versichert (Mio. €)
Bayern 1999	393	30
Bayern 2005	205	46
D/A/CH 1999	409	40
D/A/CH 2005	3000	1700

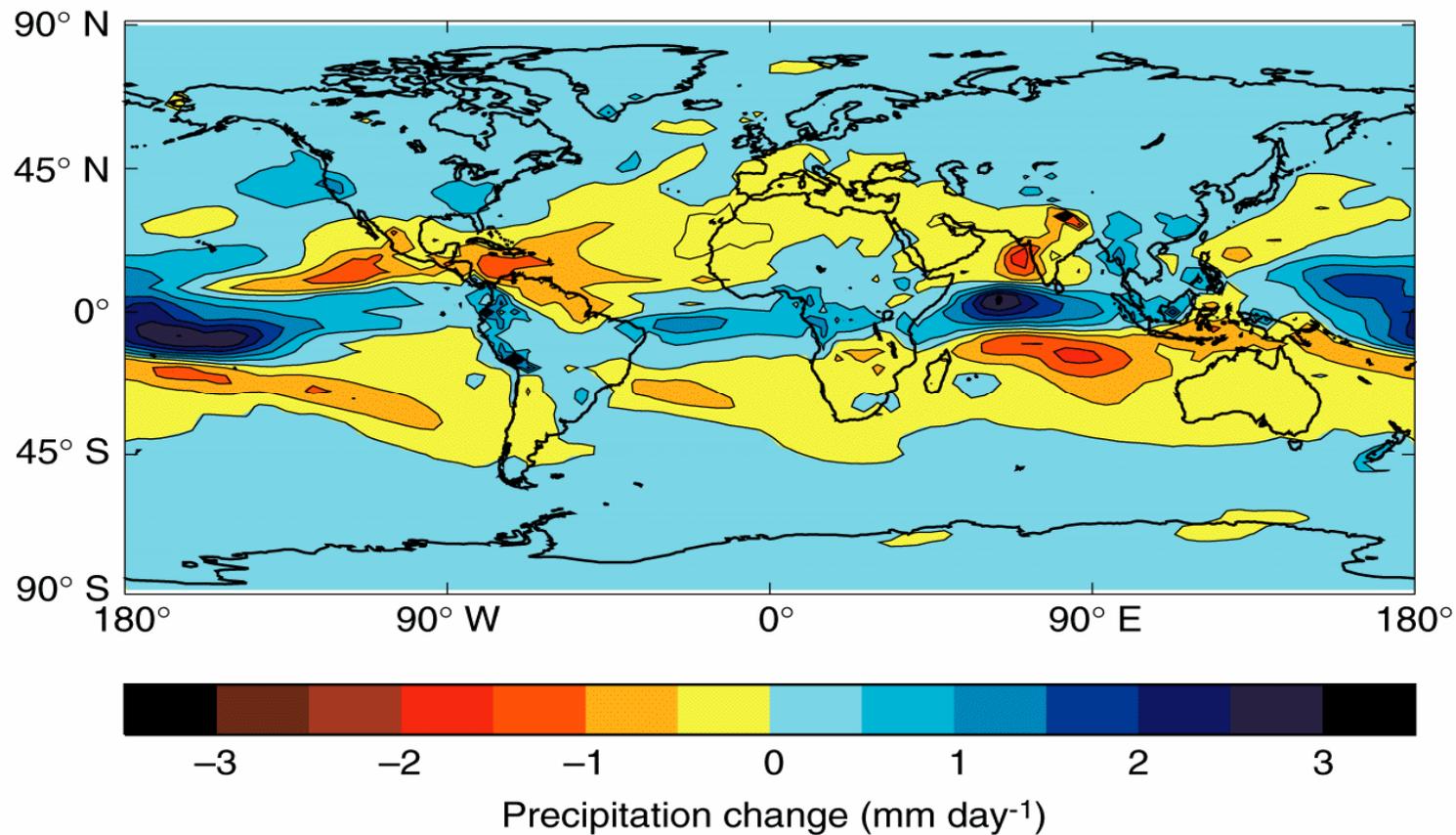


Extremereignisse: Trockenheit und Dürren





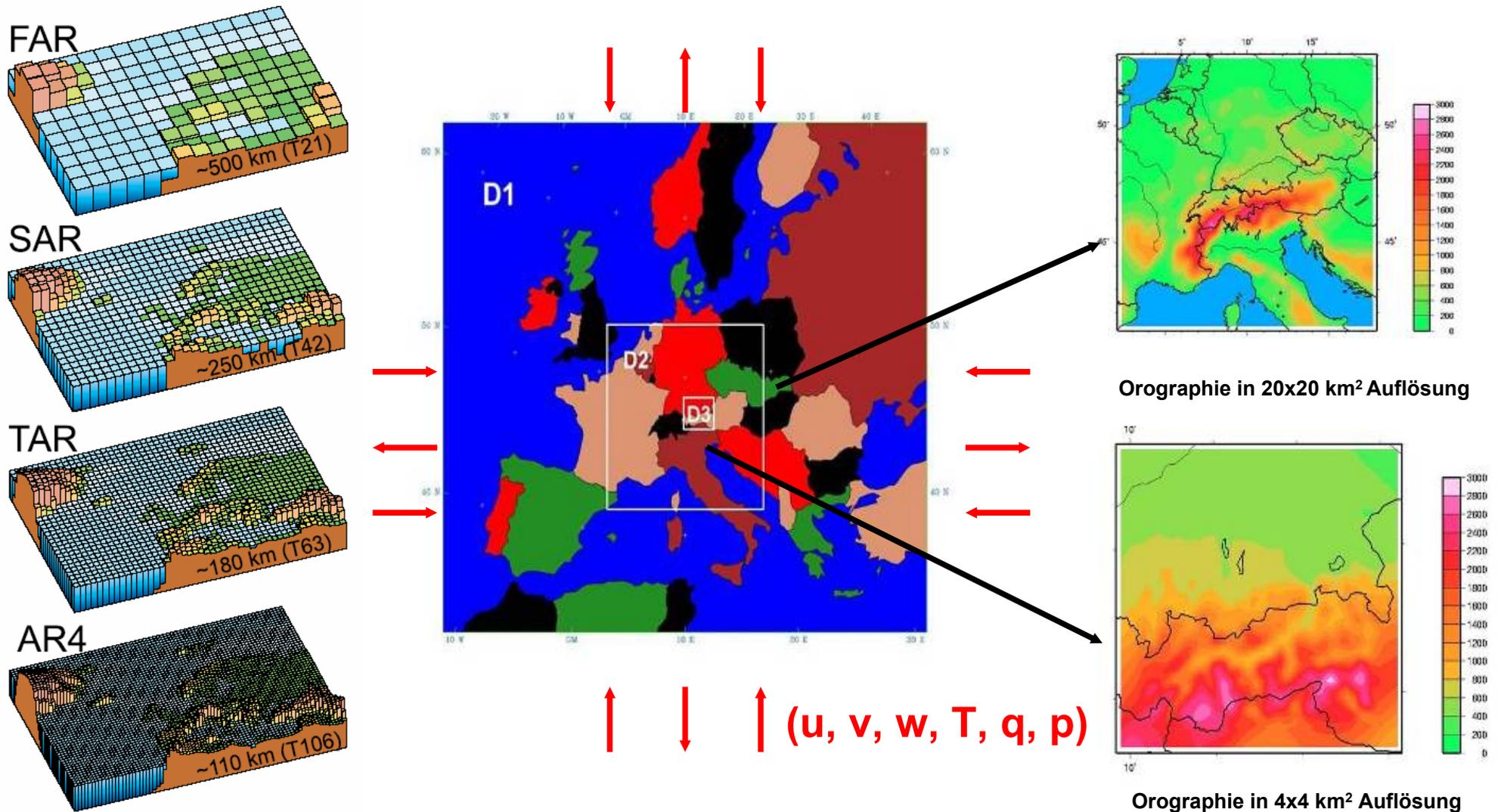
Prognose Änderungen mittlerer jährlicher Niederschlag bis 2050

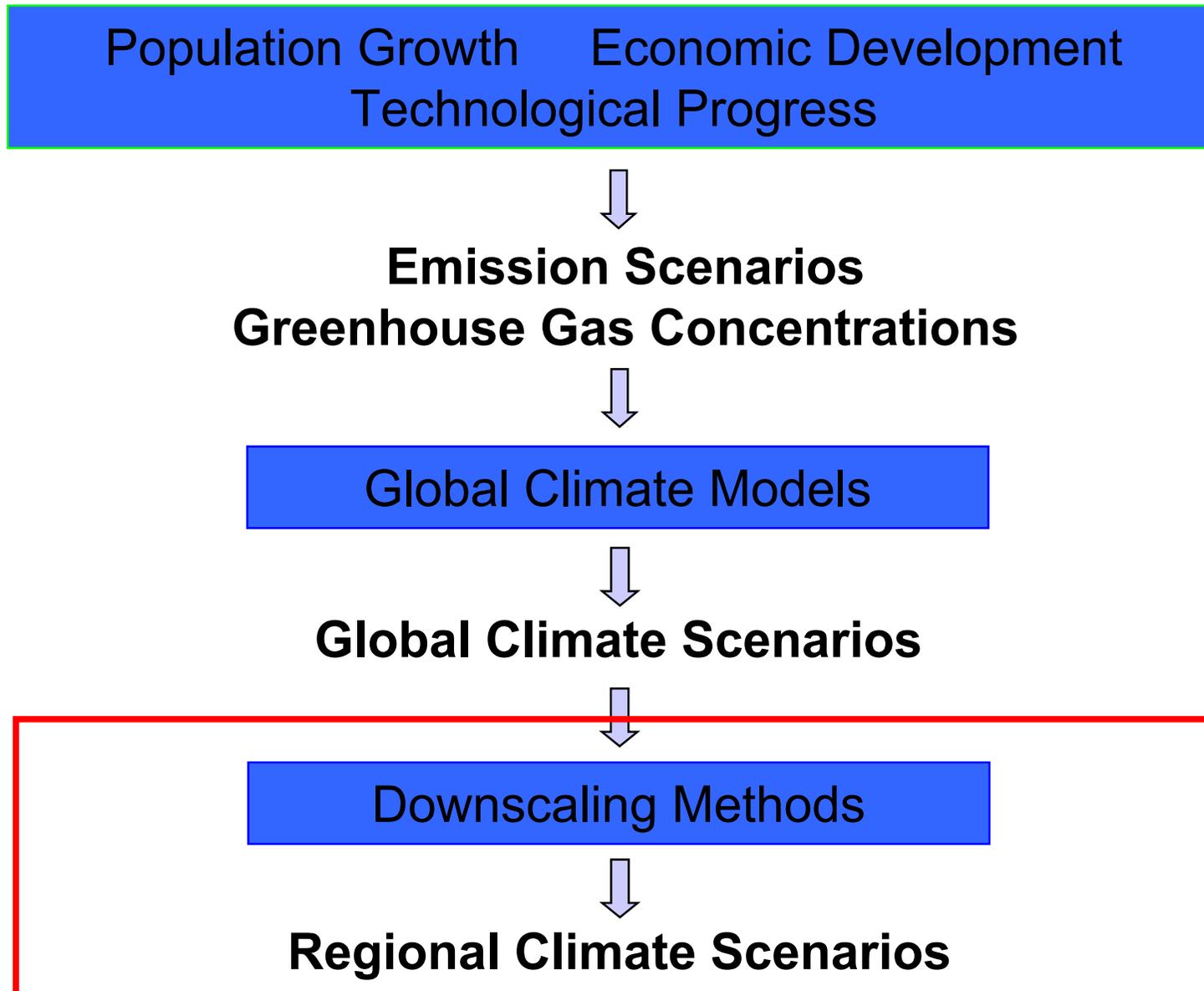


⇒ **Auflösung zu grob für regionale Impaktuntersuchungen !**

Regionale atmosphärische Modellierung

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





Regionale atmosphärische Modellierung

Impulserhaltung

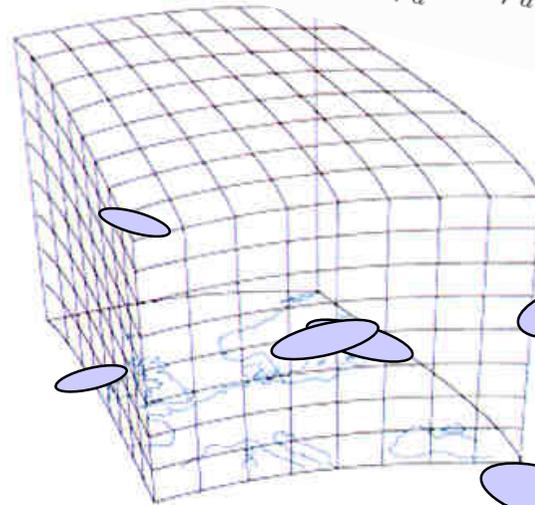
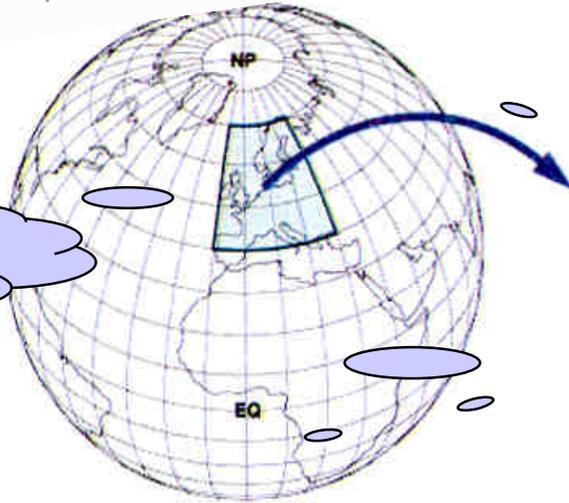
$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -f \vec{k} \times \vec{v} - \nabla \Phi - \frac{1}{\rho_a} \nabla p_a + \frac{\eta_a}{\rho_a} \nabla^2 \vec{v} + \frac{1}{\rho_a} (\nabla \cdot \rho_a \mathbf{K}_m \nabla) \vec{v}$$

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

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

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

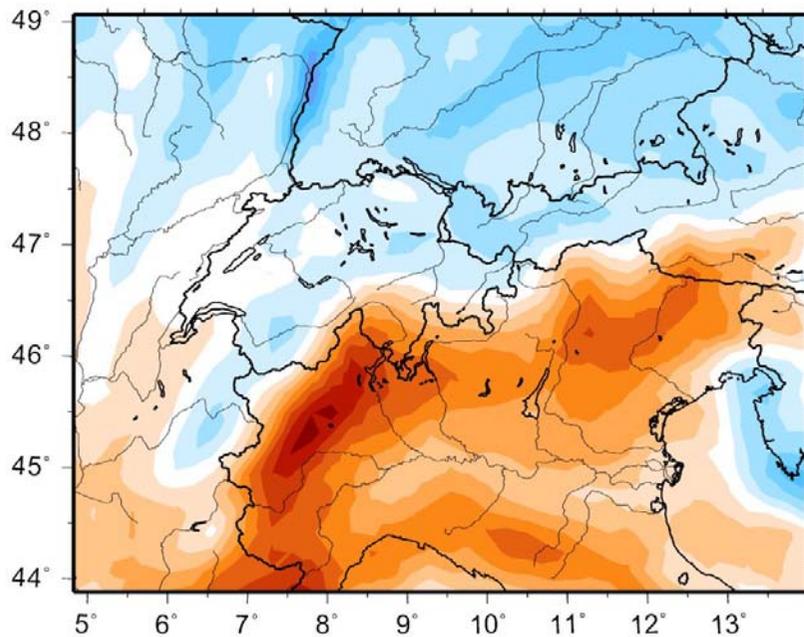
$$R_{evap(rain)} = \frac{2\pi N_{0r}(S_w - 1)}{A_r + B_r} \left[\frac{0.78}{\Lambda_r^2} + 0.32 \left(\frac{a_r \rho}{\eta_a} \right)^{1/2} S_c^{1/3} \frac{\Gamma(5/2 + b_r/2)}{\Lambda_r^{5/2 + b_r/2}} \right]$$

Bodenwasserinfiltration

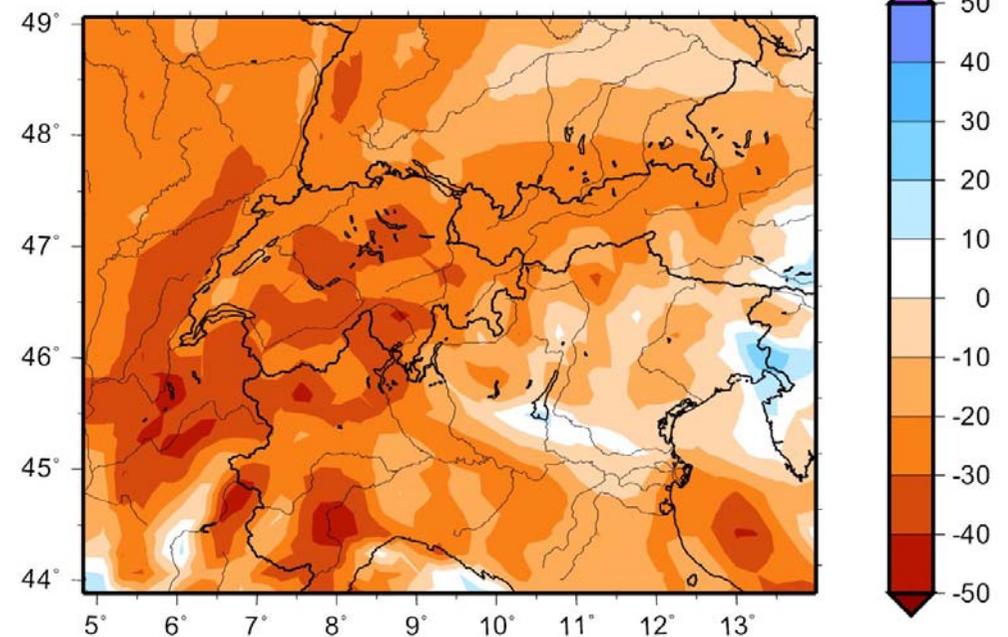
$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + \frac{\partial k(\theta)}{\partial z}$$

ECHAM4 – MM5 RCM

Precipitation Sum dec-feb
2070/99 - 1960/89 (%) MM5 19.2 km

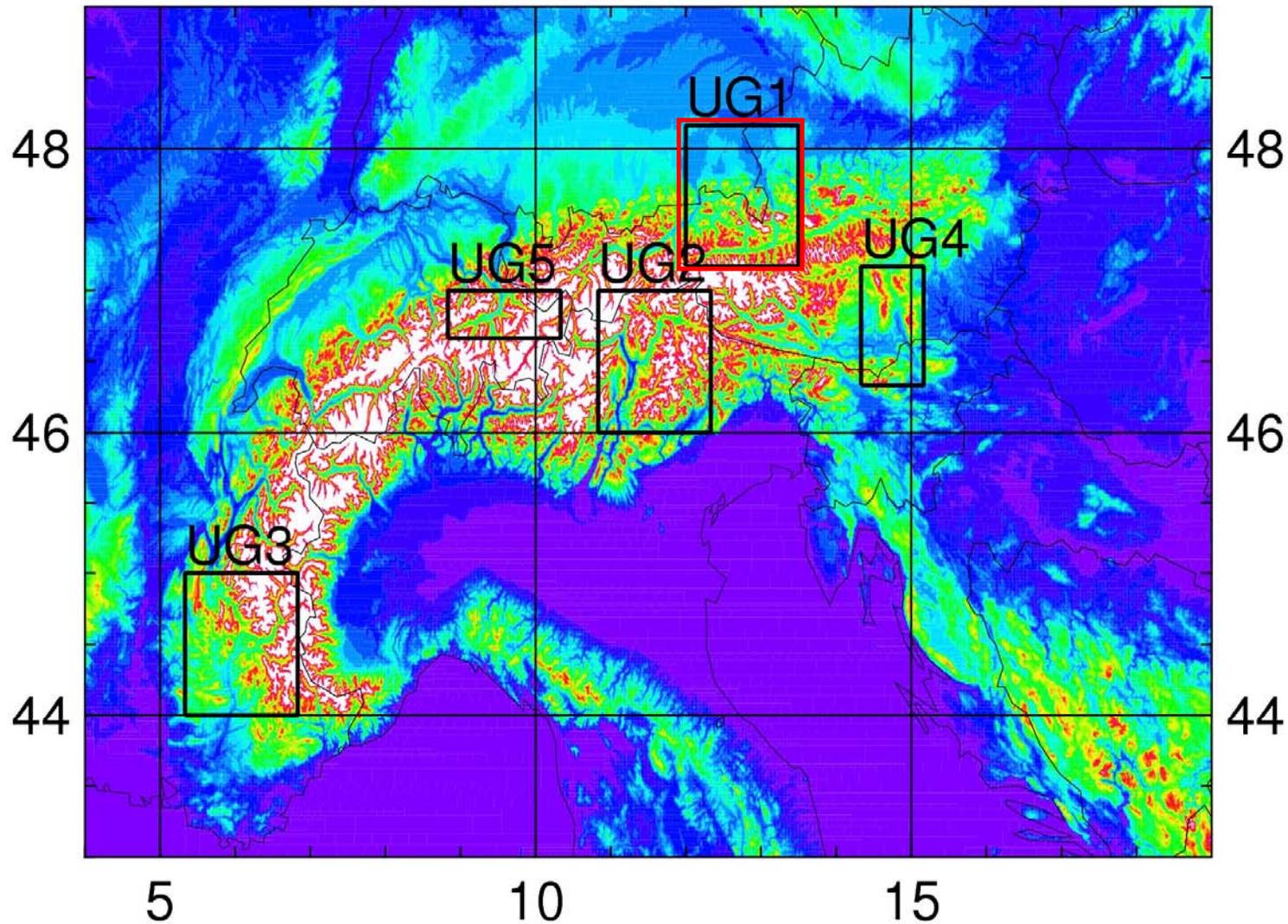


Precipitation Sum jun-aug
2070/99 - 1960/89 (%) MM5 19.2 km

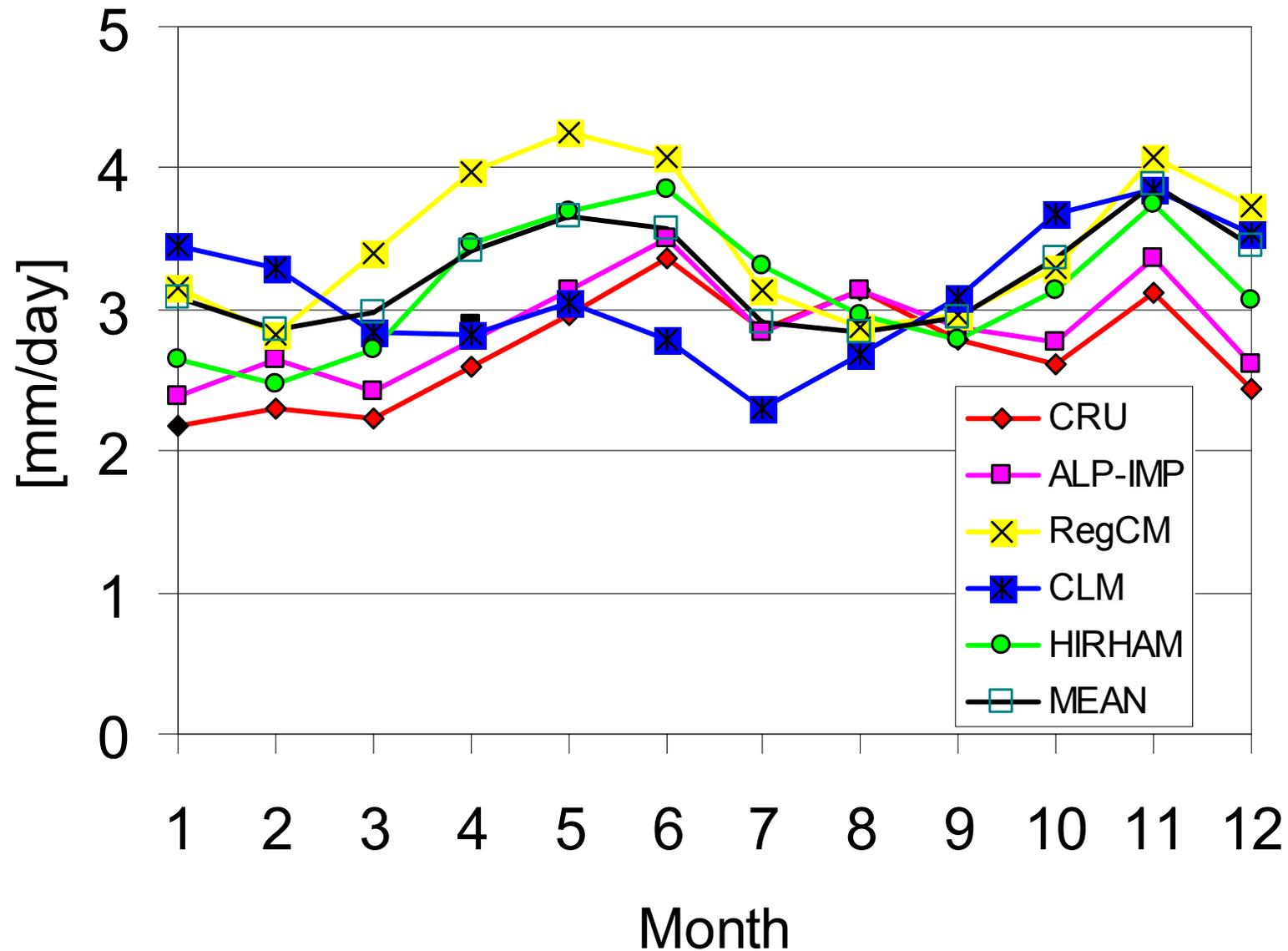


Ergebnisse und Vergleich von Regionalen Klimaszenarien für den Alpenraum (ClimChAlp-Studie)

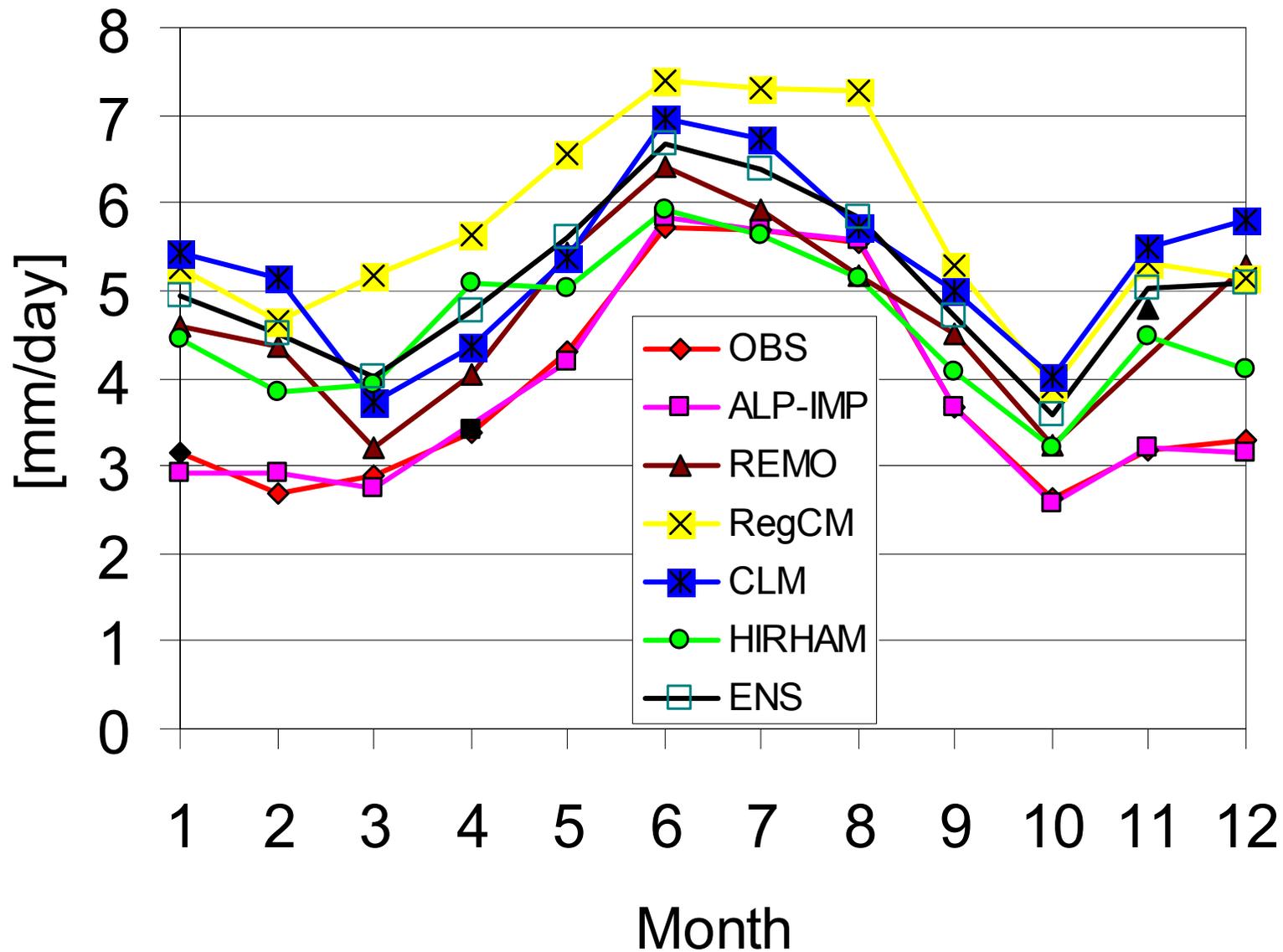
ClimChAlp Investigation areas



Precipitation 1961-1990: GAR - CRU and ALP-IMP

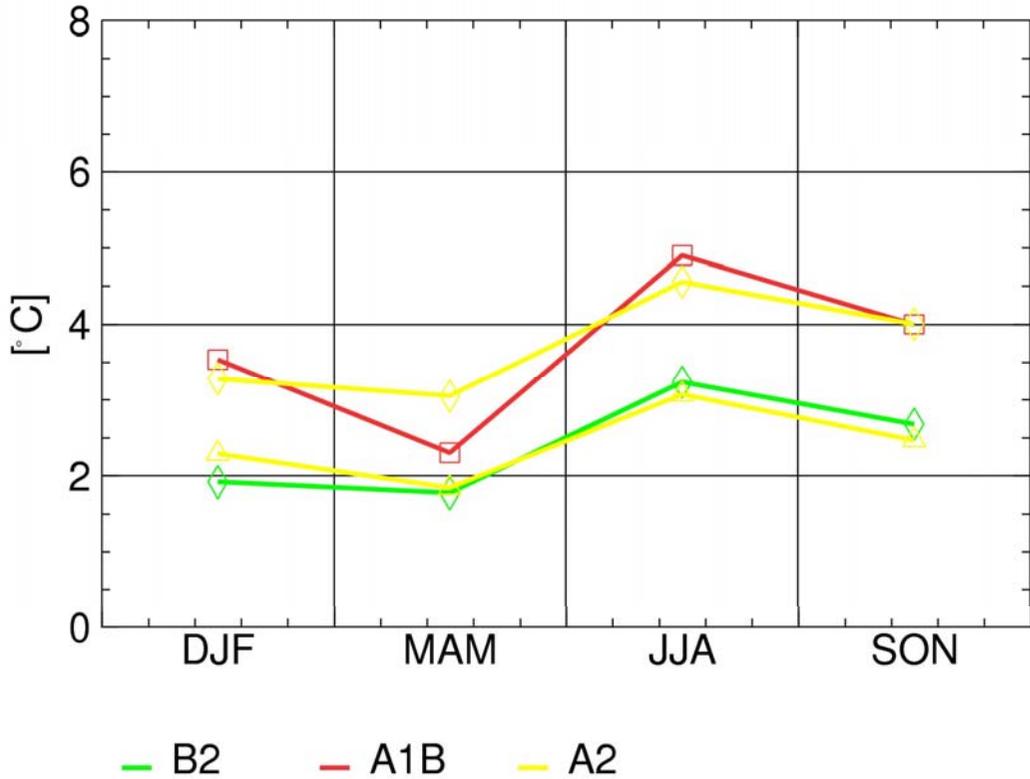


Precipitation 1961-1990: UG1 - OBS and ALP-IMP



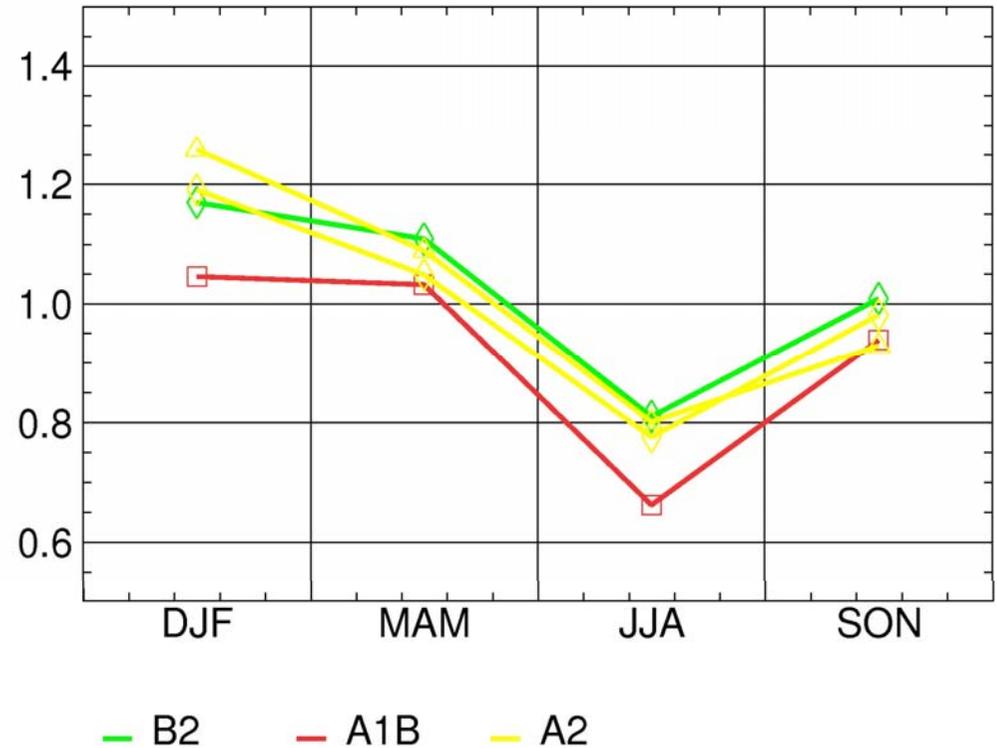
Future climate (CLM, HIRHAM and RegCM)

Temperature GAR Ts-Tc



Δ: HIRHAM (HadCM3)
 □: CLM (ECHAM5)
 ◇: RegCM (HadCM3)

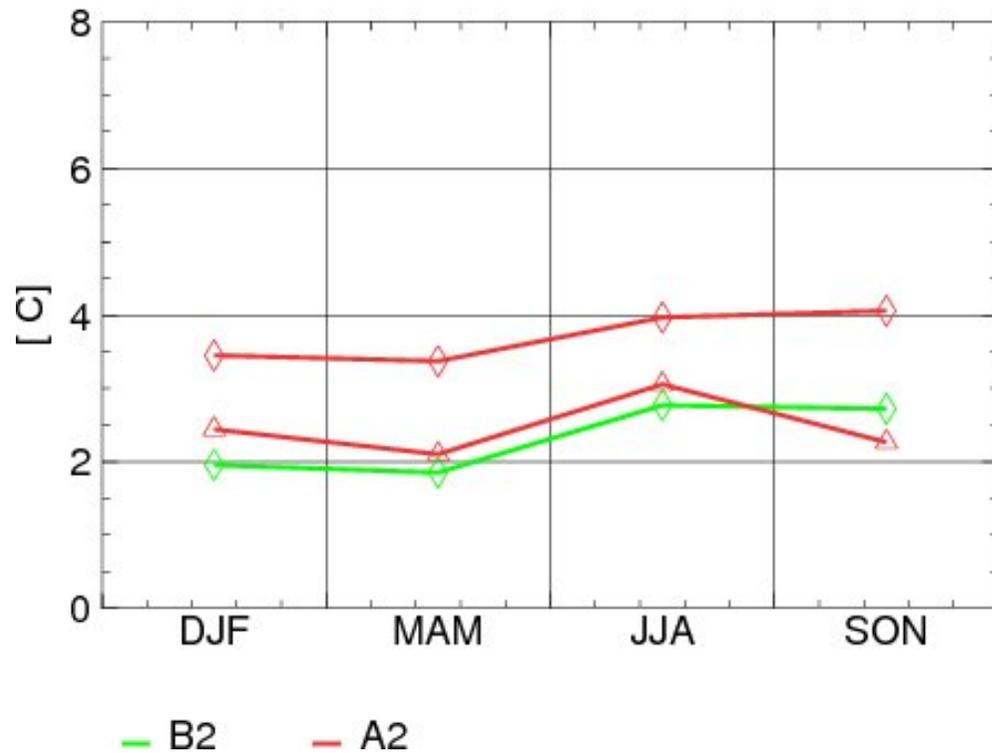
Precipitation GAR Ps/Pc



c - control run (1961 – 1990)
 s - scenario run (2071 – 2100)

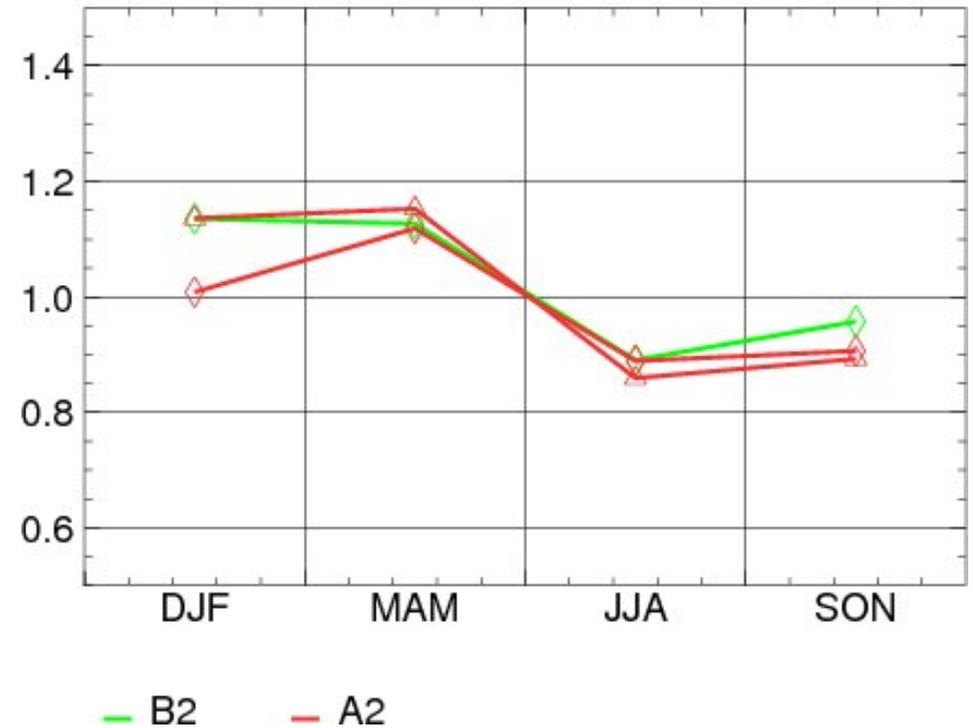
Temperature

UG1 Ts-Tc



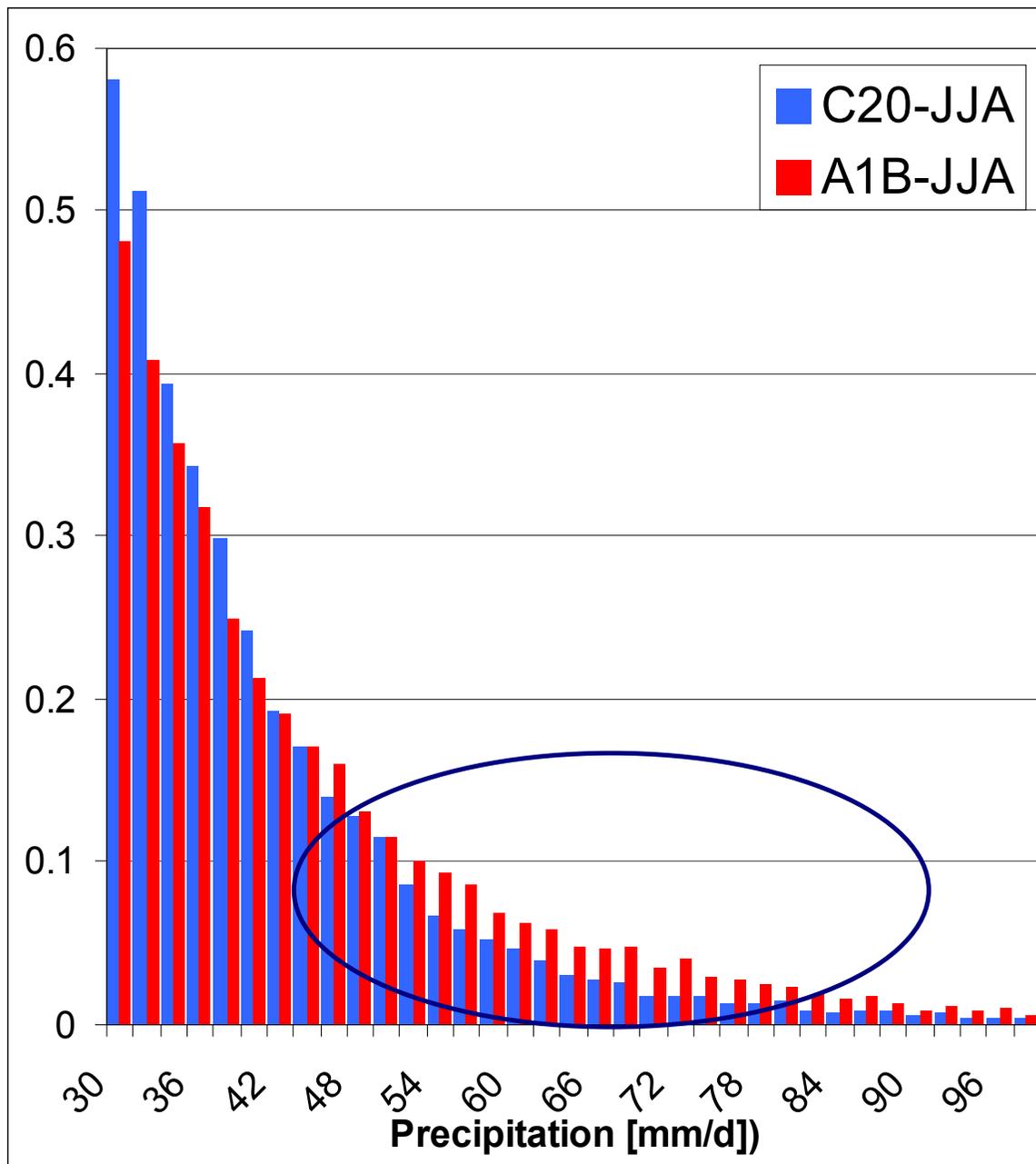
- △: HIRHAM (HadCM3)
- : CLM (ECHAM5)
- ◇: RegCM (HadCM3)

UG1 Ps/Pc



c - control run (1961 – 1990)
 s - scenario run (2071 – 2100)

Future Climate – UG1 – REMO model



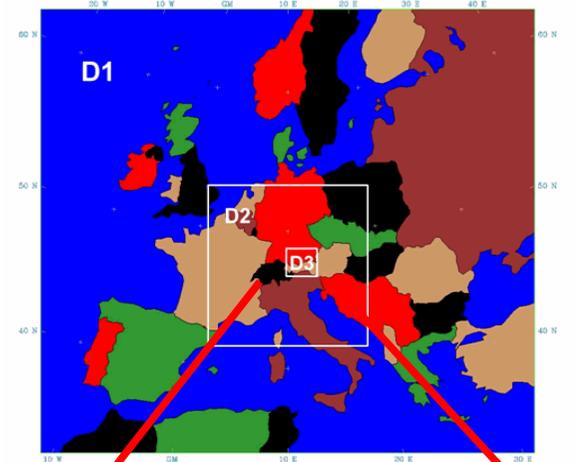
- Es gibt kein “bestes” RCM: Leistung hängt von ausgewählter Zustandsgröße ab
- Richtung der erwarteten Änderung höhere Verlässlichkeit als absoluter Wert
- Hydrologische Impaktanalyse:
 - 1) sollte Ensemble von Ergebnissen berücksichtigen \Rightarrow Unsicherheitsspannen
 - 2) erfordert Bias-Korrekturen für Niederschlag
- Erwartete Klimaänderung im Alpenraum bis 2100
 - 1) Temperaturerhöhung: $+2^{\circ}\text{C}$ im Winter bis $+5^{\circ}\text{C}$ im Sommer
 - 2) Starker Niederschlagsrückgang im Sommer (-40%)
 - 3) Niederschlagszunahmen im Winter ($+20\%$)
 - 4) Zunahme von Starkniederschlägen

Einfluss der Klimaänderung auf das Wasserkraftpotential: Klima-Hydrologie-Simulationen

Regionale Klima-Hydrologie Modellierung

- Temperatur
- Niederschlag
- Wind
- Relative Feuchte
- Globalstrahlung

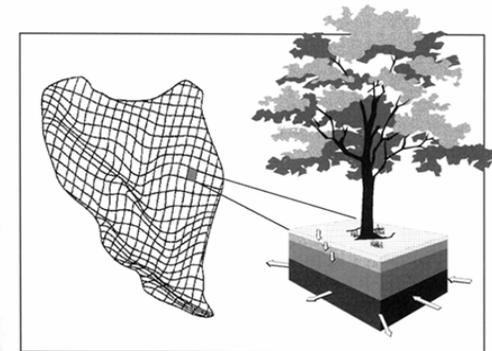
3-dim.
atmosphärisches
Modell



100x100km² → 4x4 km²

Hydrologisches
Modell

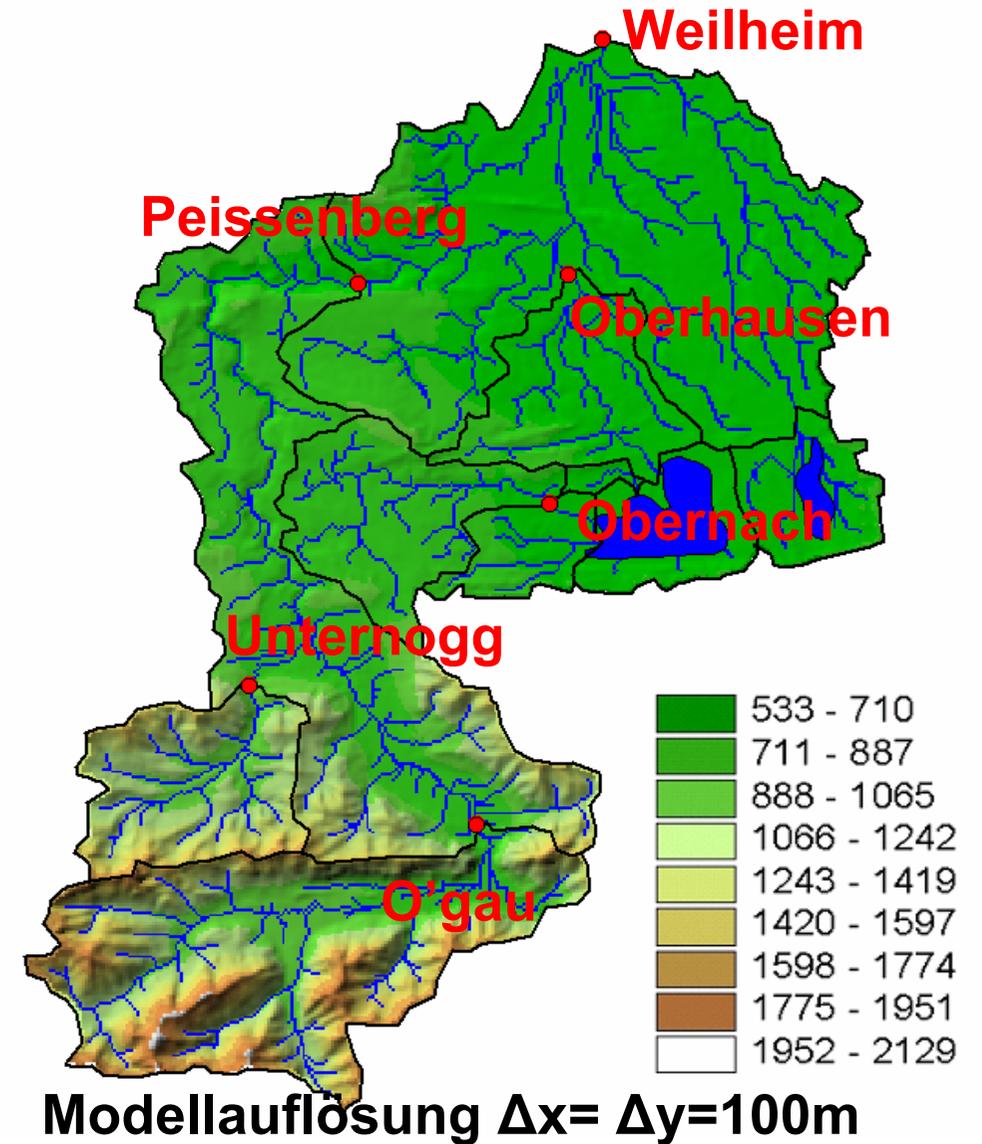
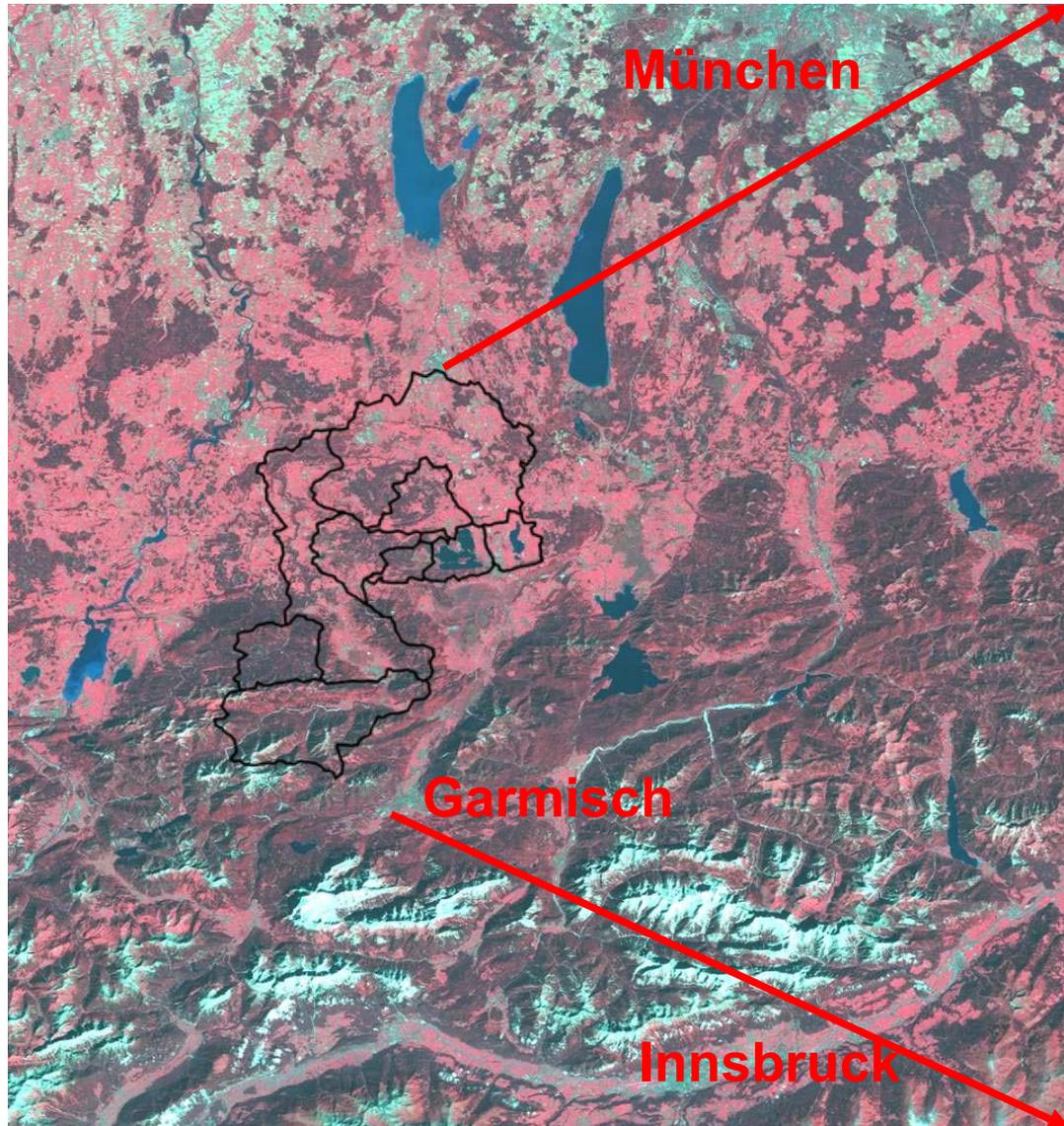
- Orographie
- Landnutzung
- Bodeneigenschaften
- Aquifereigenschaften
- Flussnetz



100x100 m² Auflösung

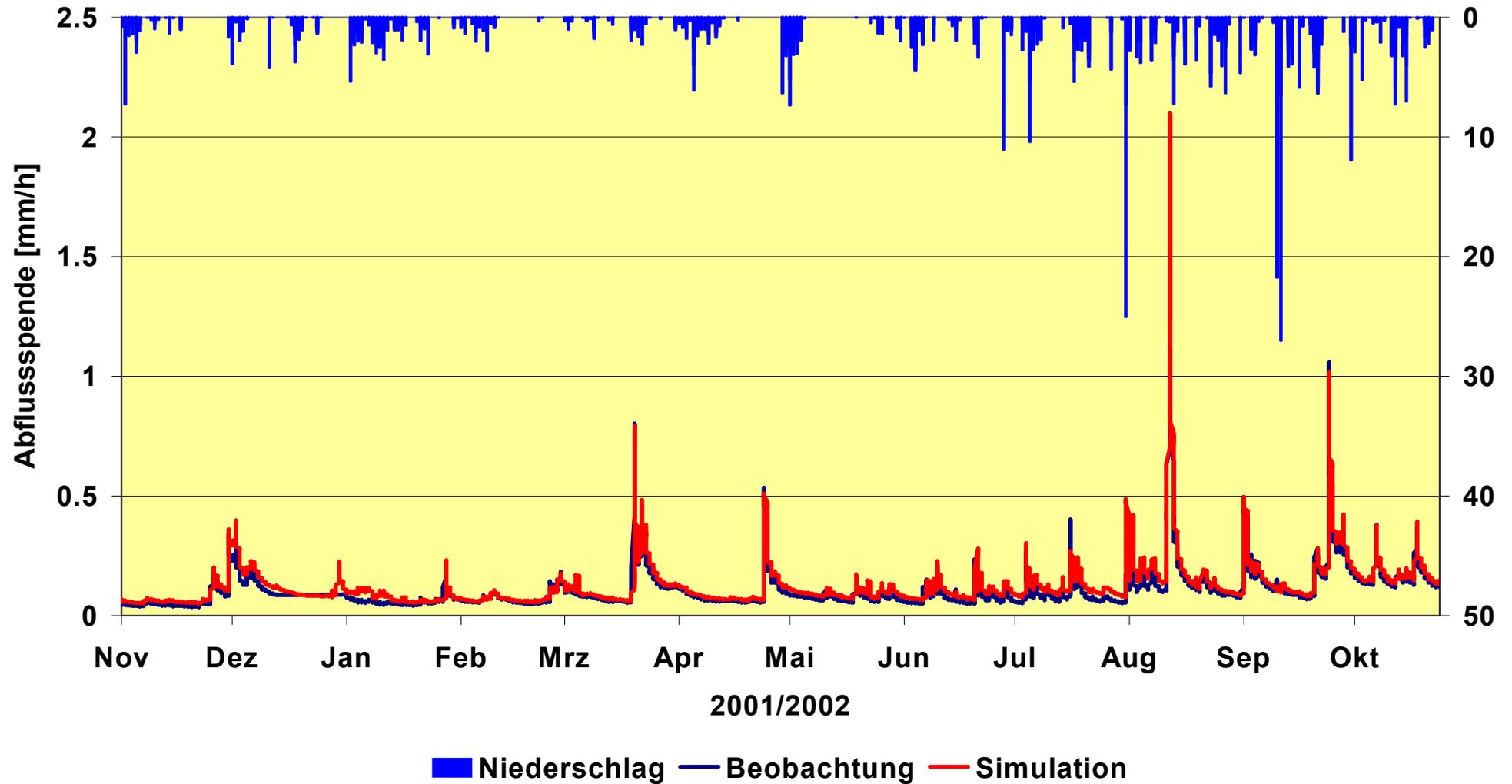
Evapotranspiration Infiltration **Abfluss** Grundwasser

Klimaänderung & Wasserverfügbarkeit Alpenraum



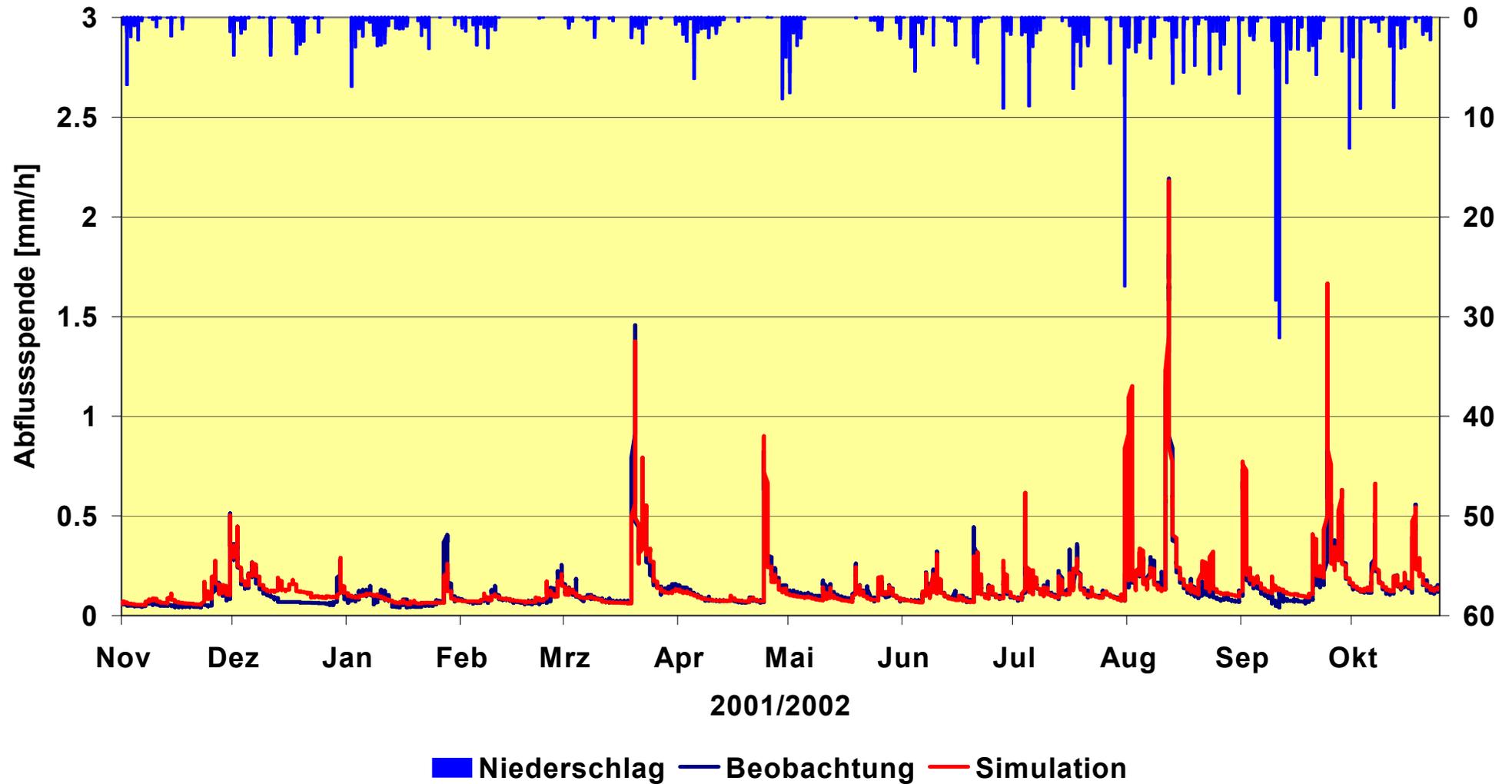
Klimaänderung & Wasserverfügbarkeit Alpenraum

Weilheim



Klimaänderung & Wasserverfügbarkeit Alpenraum

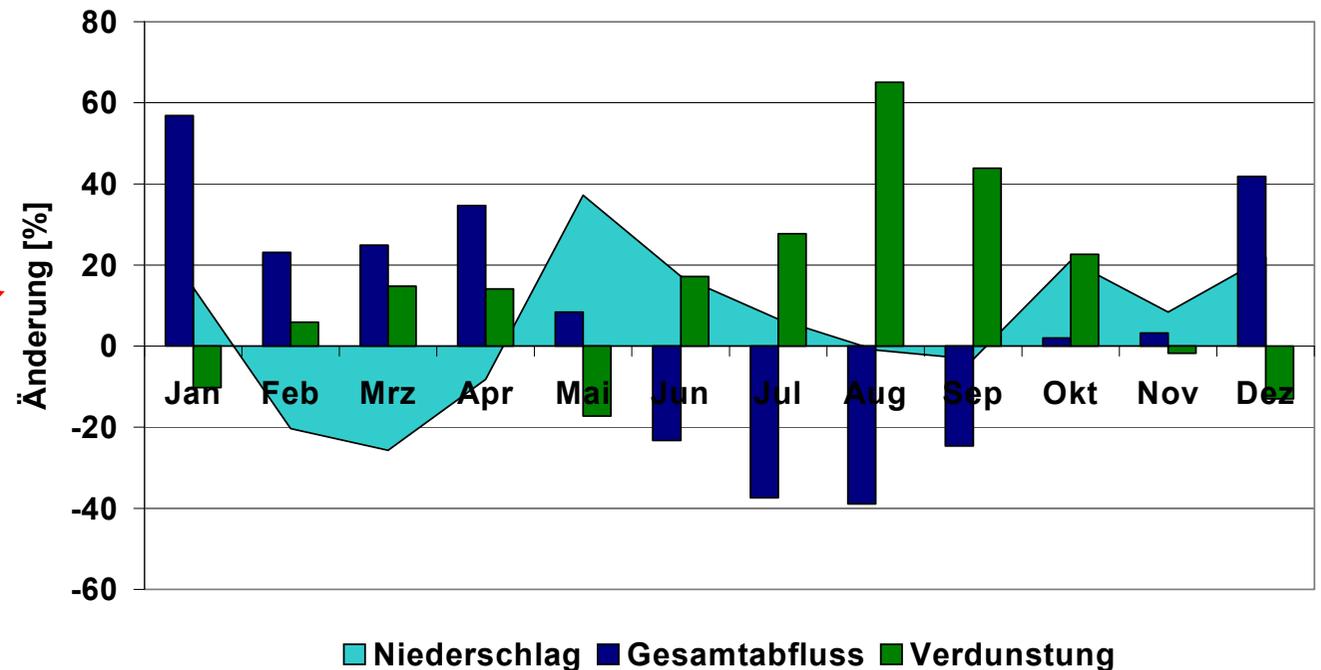
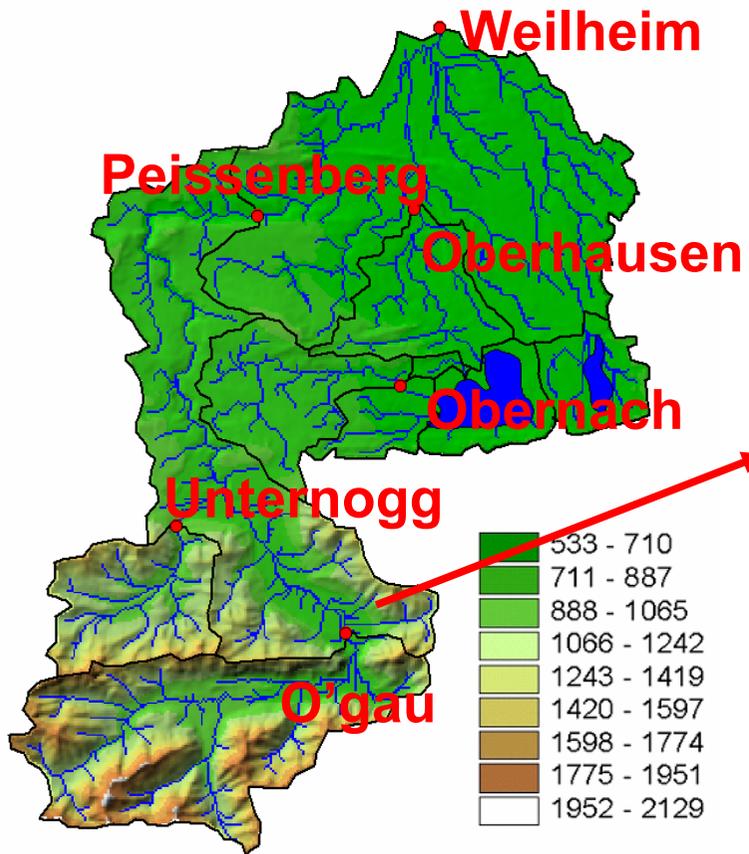
Peißenberg



Modellkaskade ECHAM4 – MM5 – WaSiM

Änderung 1990-99 vs. 2030-39

Oberammergau

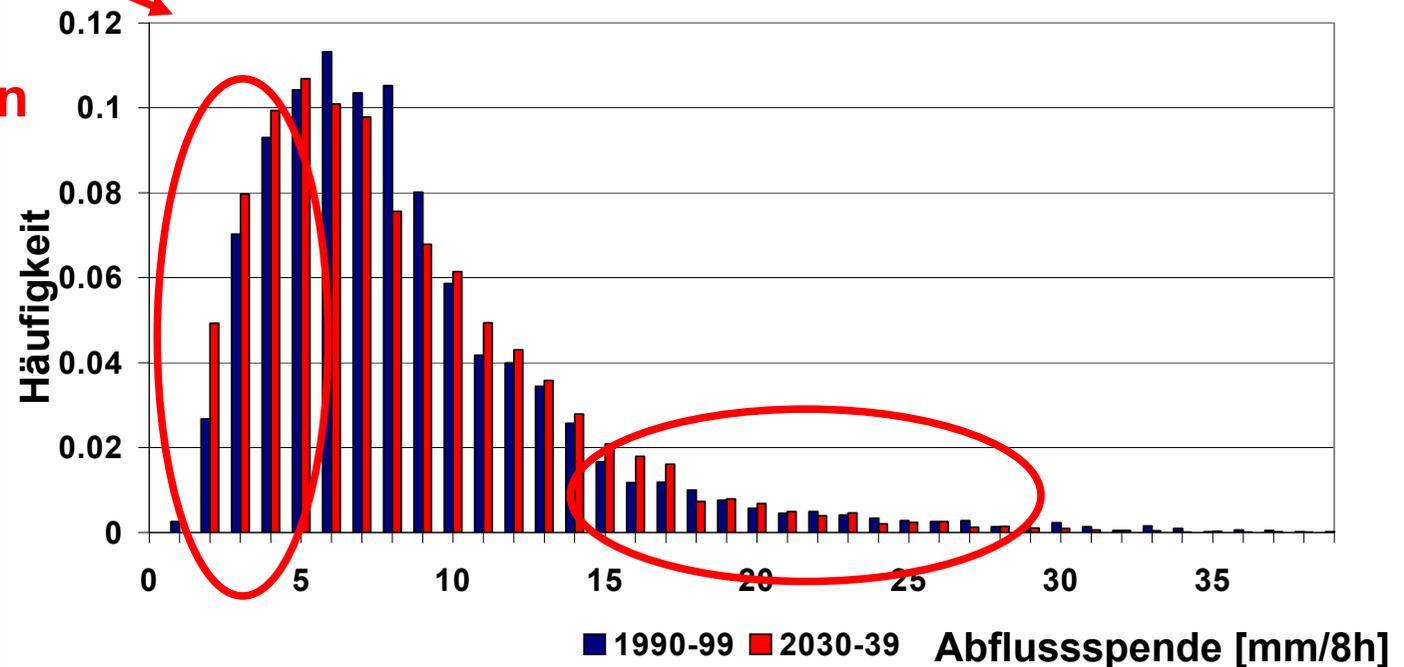
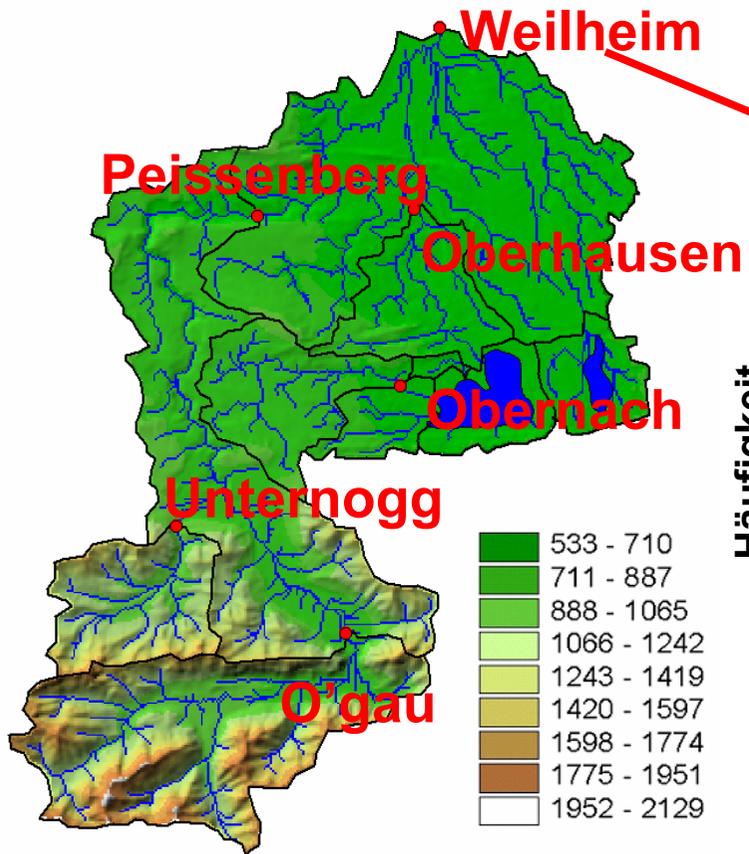


Zunahme Winter-, Verminderung der Sommerabflüsse

Modellkaskade ECHAM4 – MM5 – WaSiM

Änderung 1990-99 vs. 2030-39

Weilheim



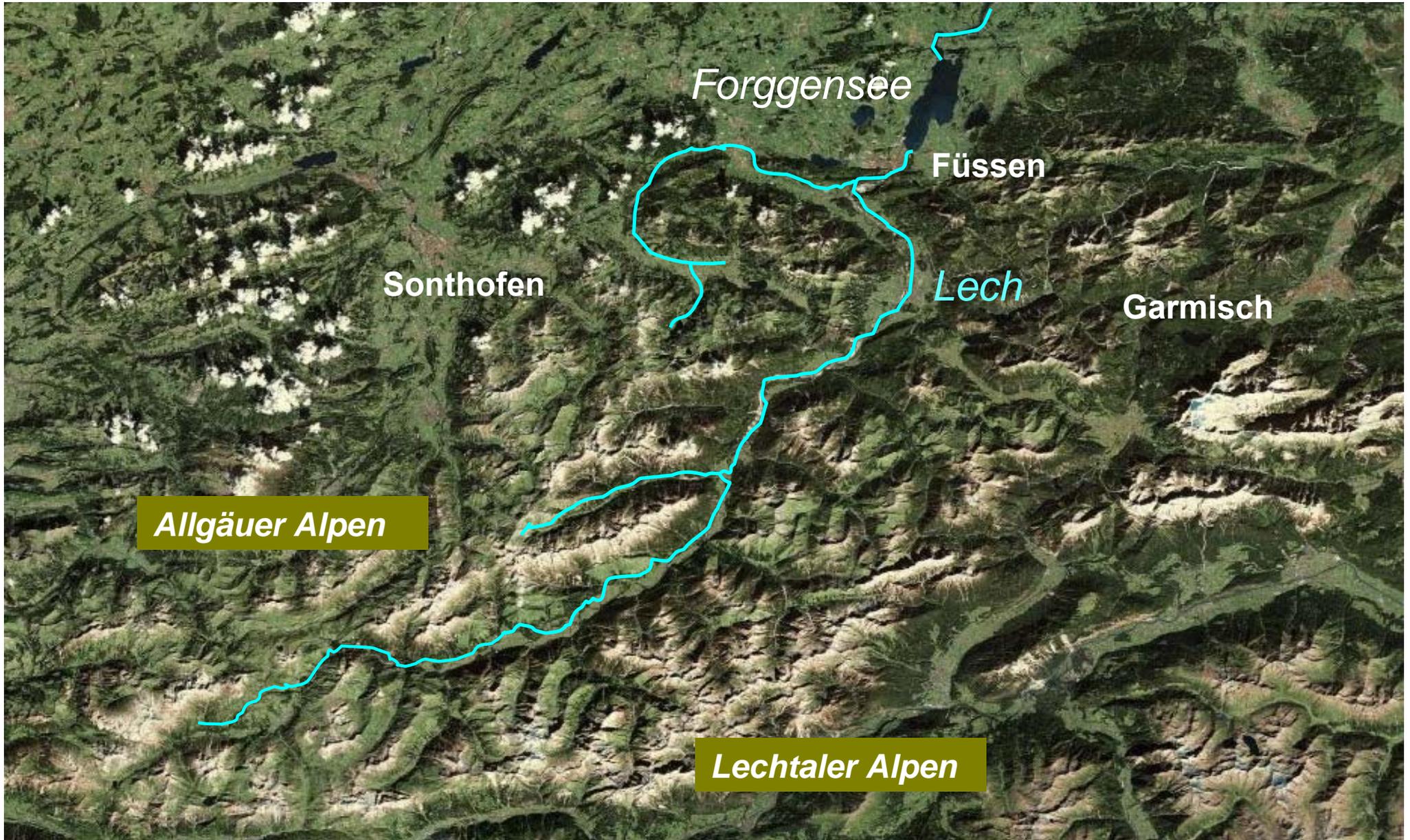
Veränderung der Häufigkeiten: Zunahme von Hochwasser & Niedrigwasser!

Ziel:

Pilotstudie über Einfluss der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt des Lechs und die Auswirkung auf das Wasserkraftpotential

- **Analyse von Beobachtungszeitreihen**
- **Entwicklung und Anwendung von Niederschlags Bias-Korrekturverfahren für Region Lech**
- **Hydrologische Modellierung des Lech-EZG**
- **Ableitung des Energiepotentials und der Wirtschaftlichkeit**
- **Optional: Veränderung der Wassertemperaturen**

Alpines Einzugsgebiet des Lech



Quelle: maps.live.de



Quelle: www.hnd.bayern.de

Operationelle Messungen durch

- Hochwassernachrichtendienst Bayern (HND)
- Landesregierung Tirol, Gruppe Umwelt & Verkehr

Pegel Füssen:

Einzugsgebiet:	1.423,62 km ²
Flußkilometer:	166,20 km
HQ1:	370 m ³ /s
HQ10:	600 m ³ /s
HQ100:	950 m ³ /s



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit

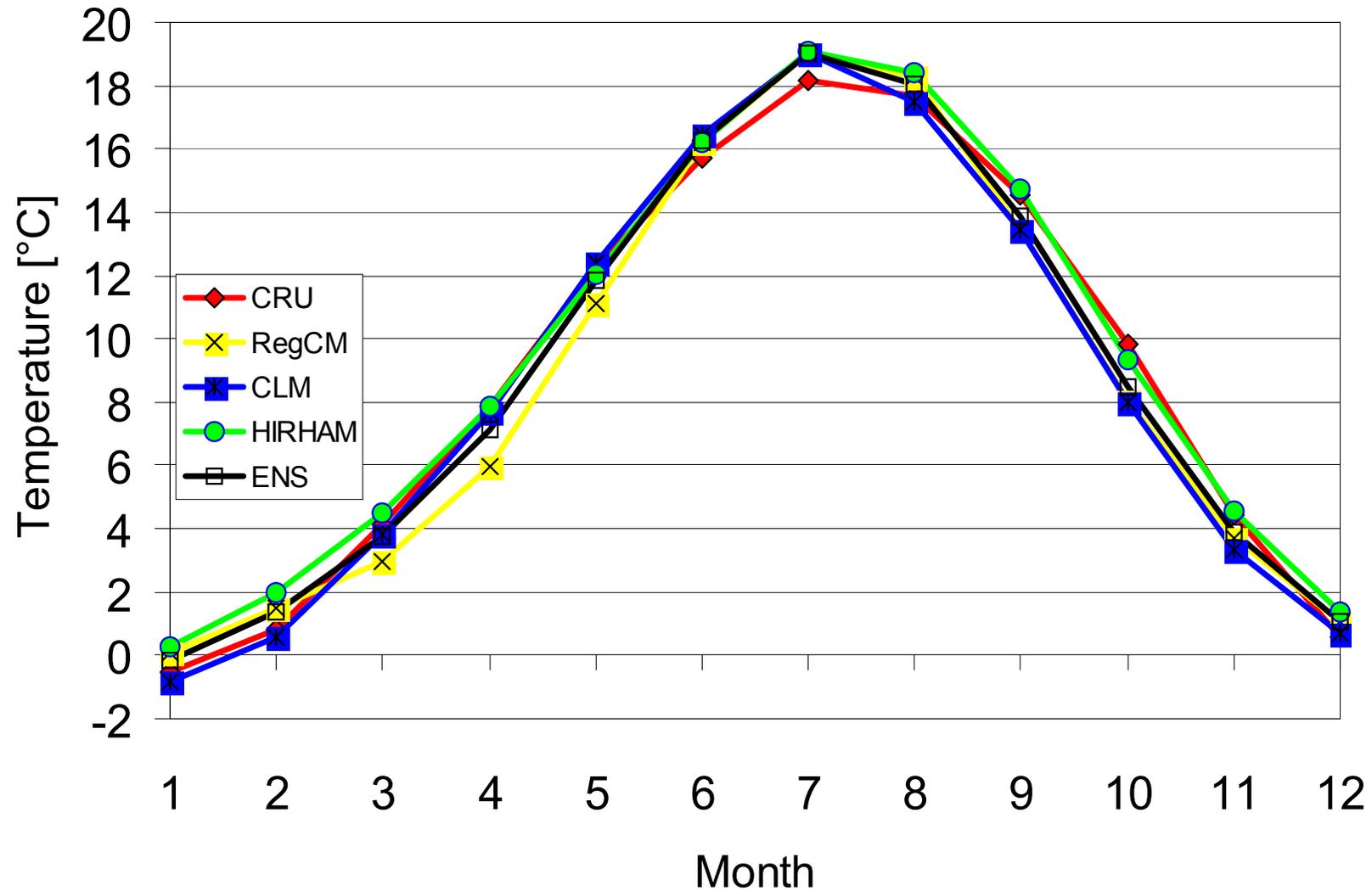
Performance for Present Climate (Precipitation)

Bias of RCM in domain mean (diagnostics in % of observed values)

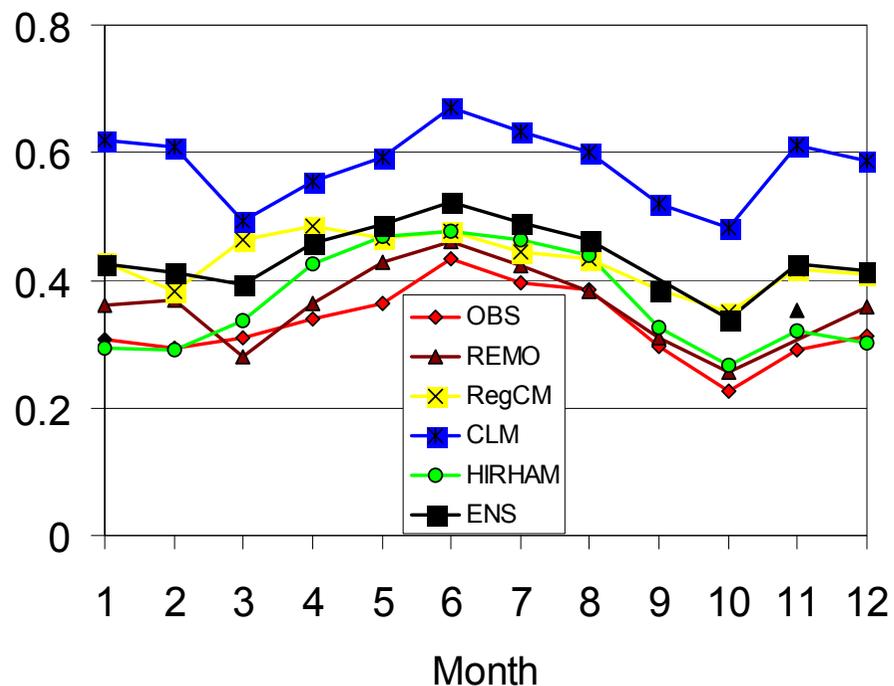
Model	DJF							
	GAR	UG1			UG2	UG3	UG4	UG5
	Mean	Mean	FRE-1	FRE-15	Mean	Mean	Mean	Mean
CLM	34	80	99	142	58	58	15	35
HIRHAM	7	36	-3	8	38	3	8	31
RegCM	27	65	34	63	36	48	-1	108
REMO	-	56	19	80	-	-	-	-
ENS	23	60	37	74	44	36	7	58
OBS	-	3.03	0.3	0.04	-	-	-	-
ALP-IMP	2.55				1.75	2.9	1.7	2.9
	JJA							
CLM	-18	15	57	34	-8	-8	-38	-9
HIRHAM	7	-2	14	-59	17	28	-9	1
RegCM	6	30	12	4	42	10	-14	35
REMO	-	3	4	-3	-	-	-	-
ENS	-2	12	22	-6	17	10	-20	9
OBS	-	5.7	0.4	0.1	-	-	-	-
ALP-IMP	3.16				4	2.3	4.6	4.6

[model resolutions < 20 km]

Mean Temperature 1961-1990: GAR - CRU



FRE-1 (fraction) UG1



FRE-15 (fraction) UG1

