

**Klimasensitive Gebiete:
Modellsysteme zur Abschätzung von
Hochwasserrisiko und Wasserverfügbarkeit**

Harald Kunstmann

Zu viel...und doch zu wenig Wasser?



Ob in China (gr. Bild) oder Mali (oben): In vielen Ländern der Welt ist das Wasser knapp. Nun wird versucht, den Mangel durch effizientere Bewässerungsmethoden zu lindern (links). 7200 Kubikkilometer Wasser werden jährlich weltweit in der Landwirtschaft verbraucht. Abhilfe könnte nach Ansicht mancher Wissenschaftler eine stärkere Berücksichtigung des „virtuellen Wasserverbrauchs“ schaffen, der angibt, wie viel Wasser die Produktion einer Ware verschlingt. Für ein Kilogramm Steak etwa kommt man auf 14 000 Liter, wenn man unter anderem berücksichtigt, was die Rinder trinken. Fotos: Corbis, Laif (2)

Das durstige Drittel

Schon heute leiden mehr als 30 Prozent der Weltbevölkerung unter Wassermangel – Wissenschaftler fordern eine effizientere Landwirtschaft

Weitere Verschärfung durch den Klimawandel ?

Globale Erwärmung

Globales Änderungssignal

- $\approx 0.9 \text{ }^\circ\text{C}$ seit Beginn der Temperaturmessungen in 1860
 $\approx 0.6 \text{ }^\circ\text{C}$ in letzten 30 Jahren mit Maximum in 2005
- Temperaturschwankungen letzte Eiszeit und heutiger Warmzeit: $\approx 4^\circ\text{C}$
- Steigender mittlerer Jahresniederschlag
- Starke regionale Differenzen
Globale Temperatur: $+ 0.7 \pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ in den letzten 100 Jahren
Europa: $+ 0.95 \text{ }^\circ\text{C}$, **Alpen $+ 1.6^\circ\text{C}$**
Sommer $+ 0.7^\circ\text{C}$, Winter $+ 1.1^\circ\text{C}$

**klimasensitiv:
regionale Änderung > globale Änderung**

Globale Erwärmung & Wasserhaushalt

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

Extremereignis Hochwasser



| <i>Hochwasserereignis</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 |



Extremereignis Dürren und Niedrigwasser



Italien &
Griechenland 2007



Sylvensteinspeicher
(obere Isar) 2007



Rhein 2003

Zentrale Forschungsfragen

- Langfristige Entwicklung Wasserhaushalt:

Hochwasserrisiko & Wasserverfügbarkeit

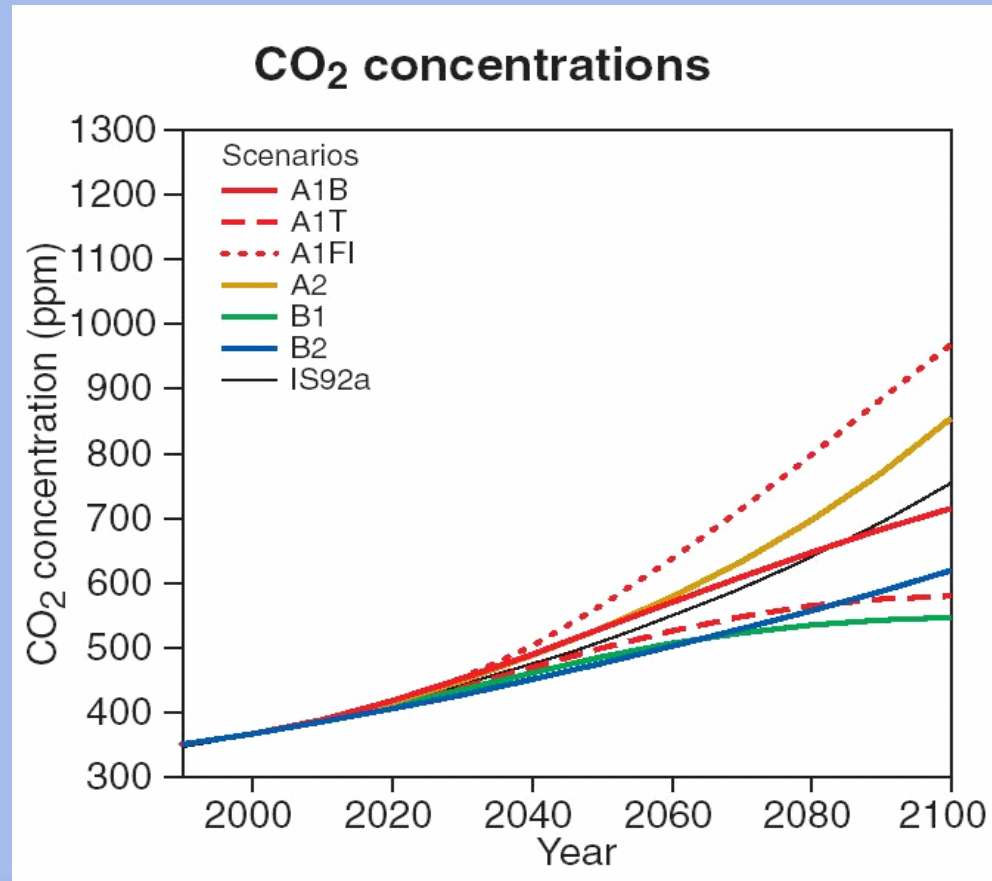
⇒ hochaufgelöste Klimaänderungsinformation &
prognostische Wasserhaushaltsmodelle erforderlich

- Entwicklung hydrometeorologischer Entscheidungsunterstützungssysteme
 - 1) Modellsysteme für **atmosphärische Prozesse & Flussgebietshydrologie**
⇒ Gekoppelte Modellsysteme für Atmosphäre und terrestrische Hydrosphäre
 - 2) Modellsysteme zur Quantifizierung von **Unsicherheiten durch raum-zeitliche Niederschlagsinterpolation**
⇒ Geostatistische Verfahren

1. Gekoppelte Modellsysteme für Atmosphäre und terrestrische Hydrosphäre

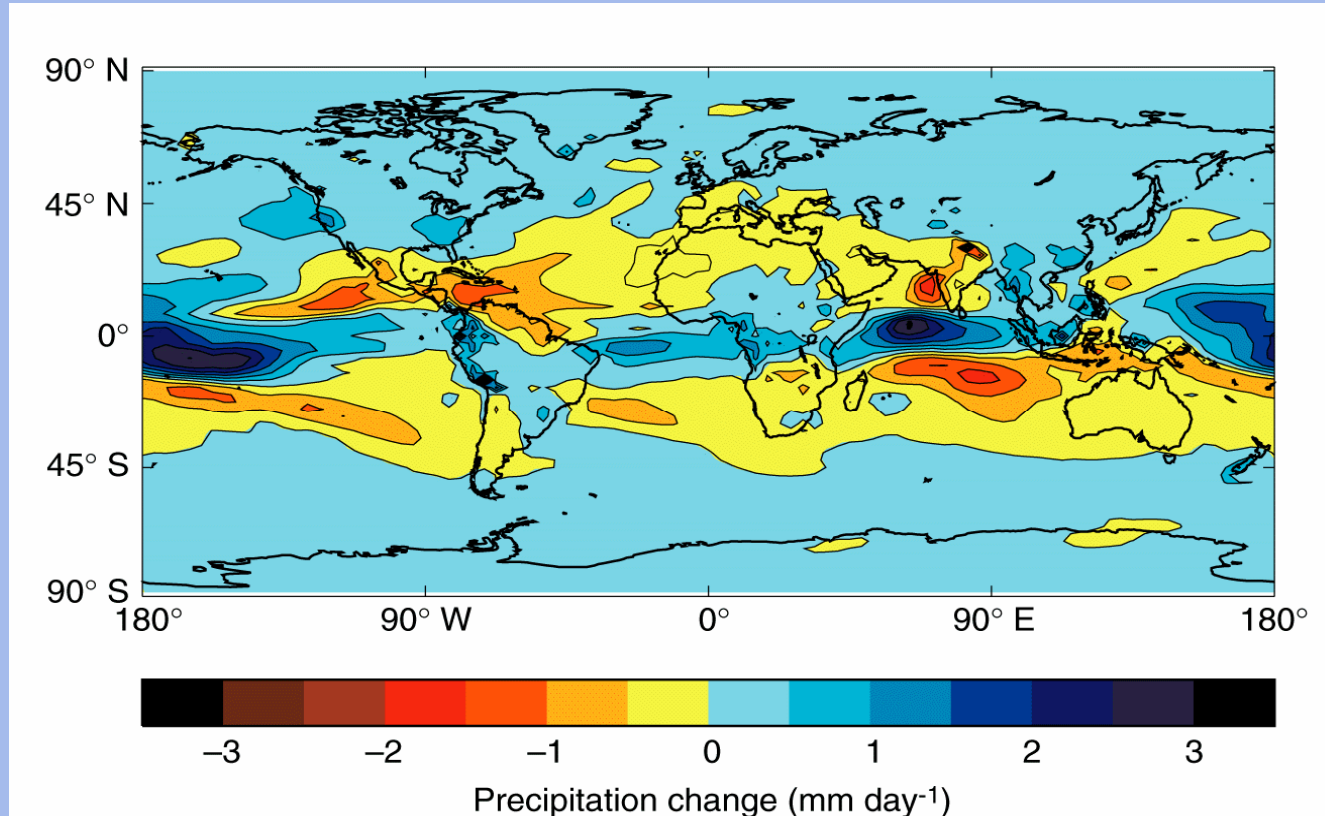
Abschätzung zukünftiges Klima und Wasserverfügbarkeit

Globale Szenarien



Abschätzung des zukünftigen Klimas: globale Klimaszenarien

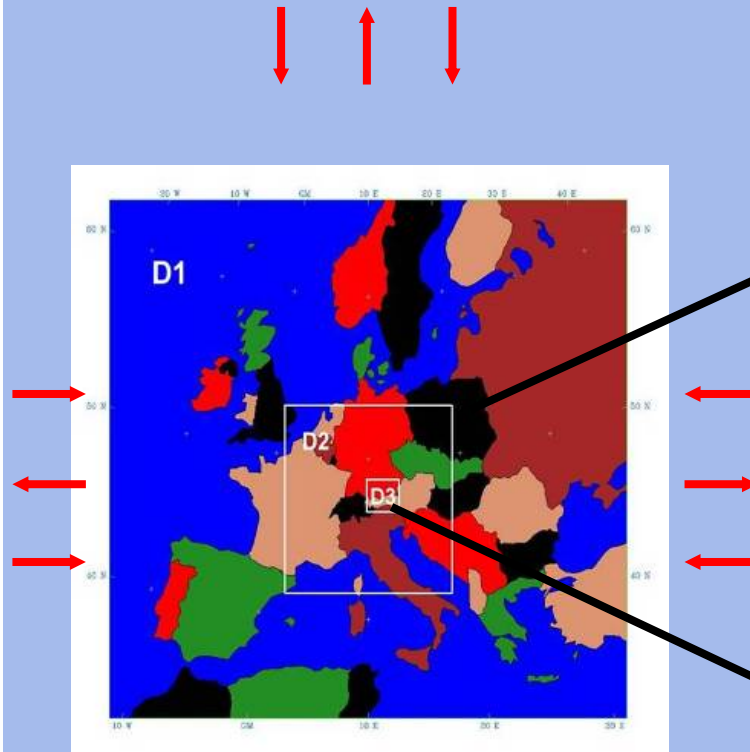
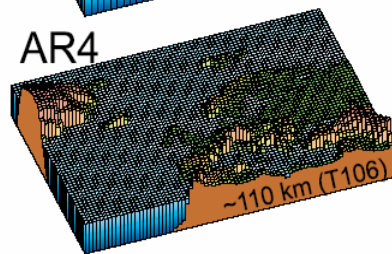
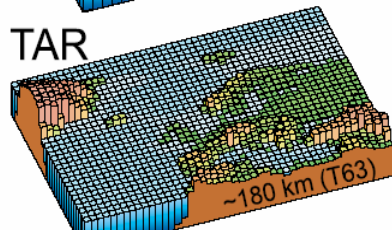
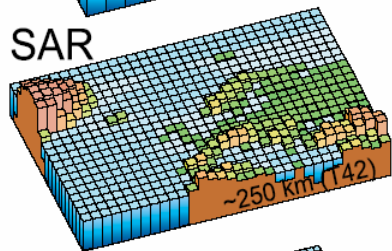
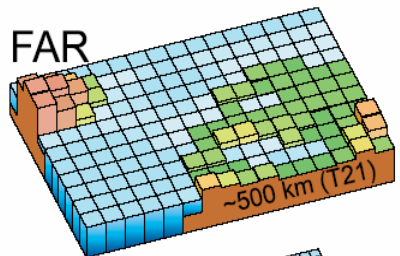
Prognose Änderungen mittlerer jährlicher Niederschlag bis 2050



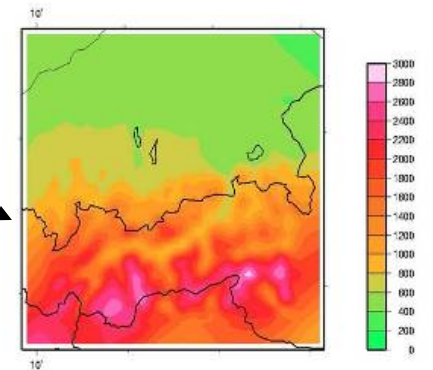
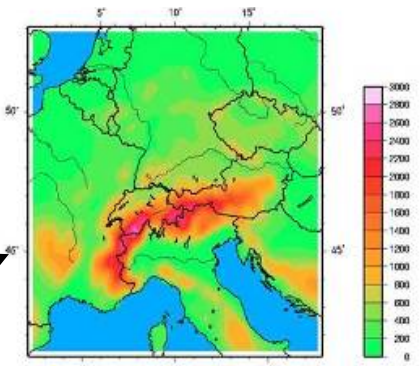
⇒ **Auflösung zu grob für regionale Impaktuntersuchungen !**

Abschätzung des zukünftigen Klimas: Regionale Klimaszenarien

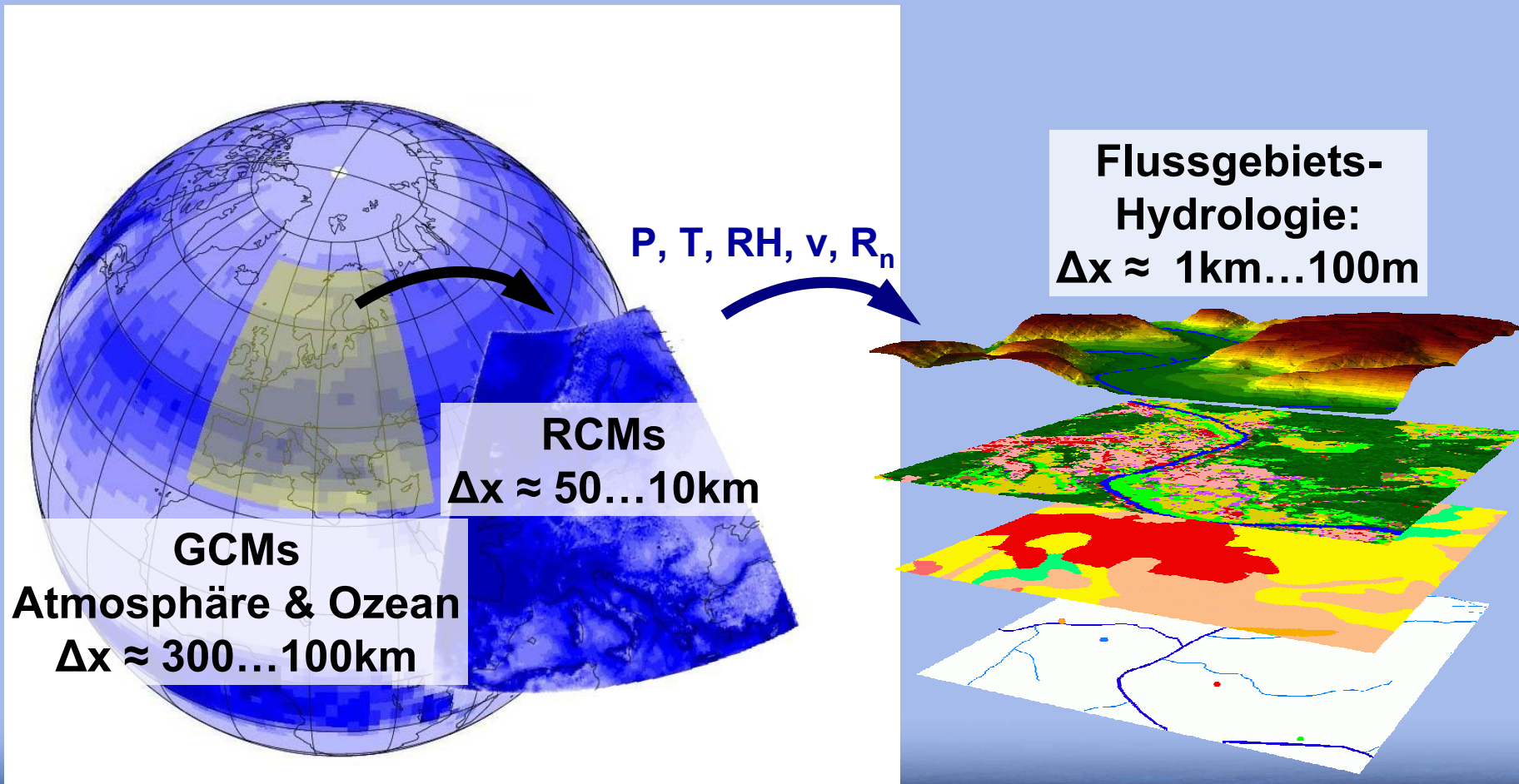
IPCC



↑ ↓ ↑ (u, v, w, T, q, p)

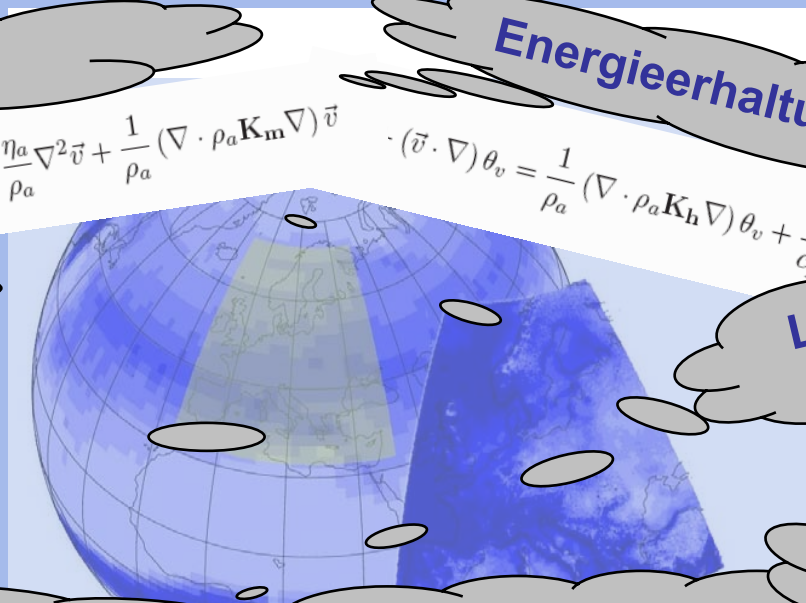


Abschätzung des zukünftigen Wasserhaushalts: Gekoppelte Modellsysteme



Regionale Atmosphärische Modellierung

Modellkomponente 1: Atmosphärisches Modell MM5/WRF/CLM



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

$$(\vec{v} \cdot \nabla) \theta_v = \frac{1}{\rho_a} (\nabla \cdot \rho_a \mathbf{K}_h \nabla) \theta_v + \frac{\theta_v}{c_p dT} N$$

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

$$\begin{aligned} L_v E + H + G &= SW_{net} + LW_{net} \\ &= (1 - \alpha) SW \downarrow + LW \downarrow - \epsilon \sigma_B T_{surf}^4 \end{aligned}$$

Bodenwasserdiffusion

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

Niederschlagsphysik

$$R_{evap} (rain) = \frac{2\pi N_0 r (S_w - 1)}{A_r + B_r} \left[\frac{0.78}{\Lambda_r^2} + 0.32 \left(\frac{a_r \rho}{\eta_a} \right)^{1/2} S_c^{1/3} \frac{\Gamma(5/2 + b_r/2)}{\Lambda_r^{5/2 + b_r/2}} \right]$$

$\Delta x, \Delta y = 1\text{km}-50\text{km}, \Delta t \approx 1-5\text{min}$

Flächendifferenzierte Wasserhaushaltsmodellierung

Modellkomponente 2: Hydrologisches Modell WaSiM

Verdunstung

$$E = \frac{s(T_a)[K + L] + \gamma K_E \rho_w \lambda_v v_a e_{sat}(T_a)[1 - RH]}{\rho_w \lambda_v [s(T_a) + \gamma]}$$

Versickerung

$$\frac{\partial}{\partial z'} \left(K_h(\theta) \frac{\partial \Psi(\theta)}{\partial z'} \right) - \frac{\partial K_h(\theta)}{\partial z'} = \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

Leitfähigkeit

$$K_h(\theta) = K_{h,sat} \sqrt{\frac{\theta - \theta_{res}}{\phi - \theta_{res}}} \left[1 - \left(1 - \left(\frac{\theta - \theta_{res}}{\phi - \theta_{res}} \right)^{1/m} \right)^m \right]^2$$

Grundwasser-Strömung

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{hx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{hy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{hz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + R = -S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Routing

$$v_h = M \left(\frac{Q_h / v_h}{B_h + \frac{2Q_h}{v_h B_h}} \right)^{2/3} \sqrt{I}$$

Wellenabflachung

$$Q_{out} = (Q_{v,i-1} \cdot e^{-\Delta t/k_v} + Q_{v,i} \cdot (1 - e^{-\Delta t/k_v})) + (Q_{h,i-1} \cdot e^{-\Delta t/k_h} + Q_{h,i} \cdot (1 - e^{-\Delta t/k_h}))$$

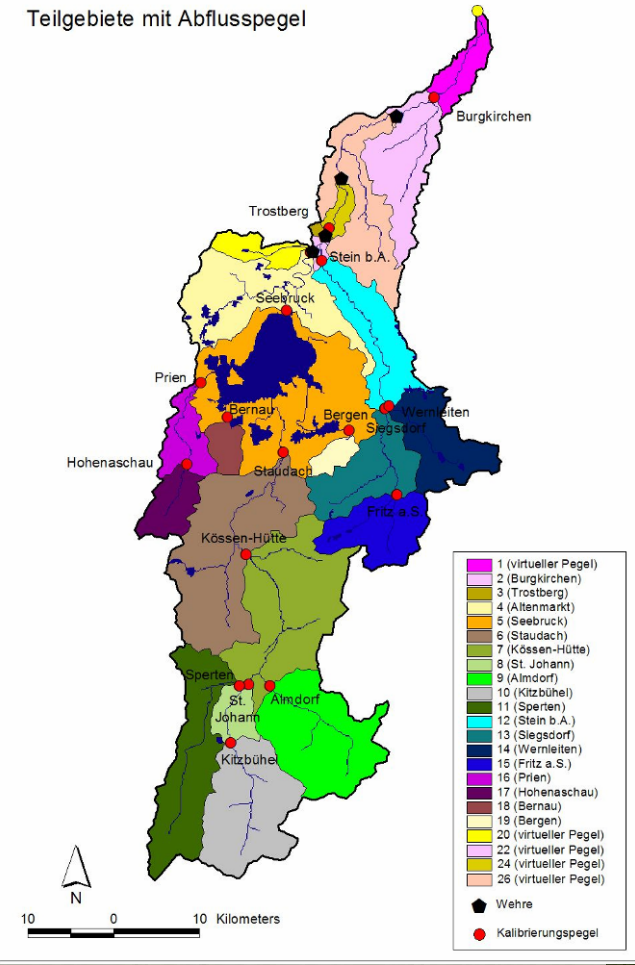
$\Delta x, \Delta y = 100\text{m}-1\text{km}, \Delta t = 1\text{h}-1\text{d}$

Klimaänderung & Wasserhaushalt Alpenraum: Beispiel Einzugsgebiet Alz/Chiemgau

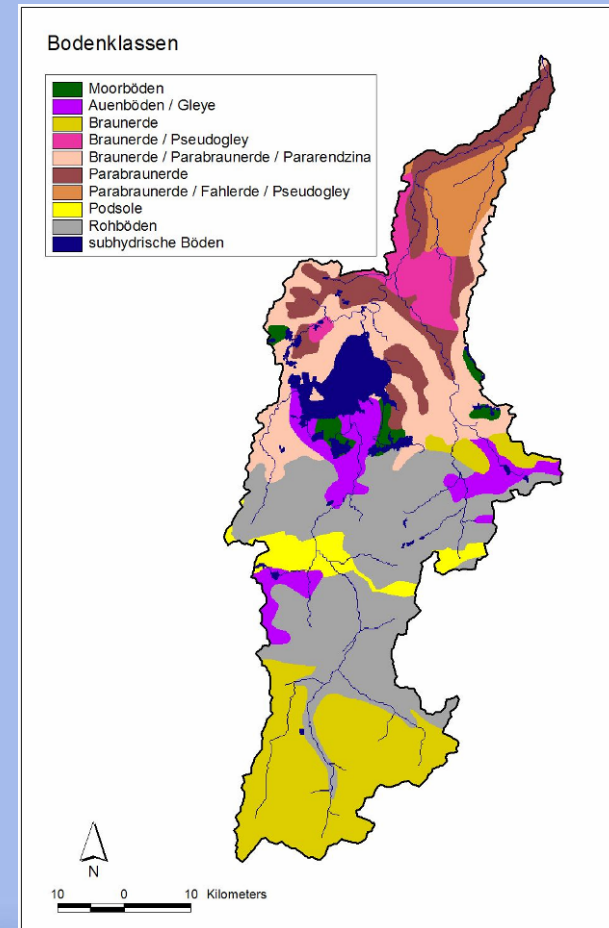
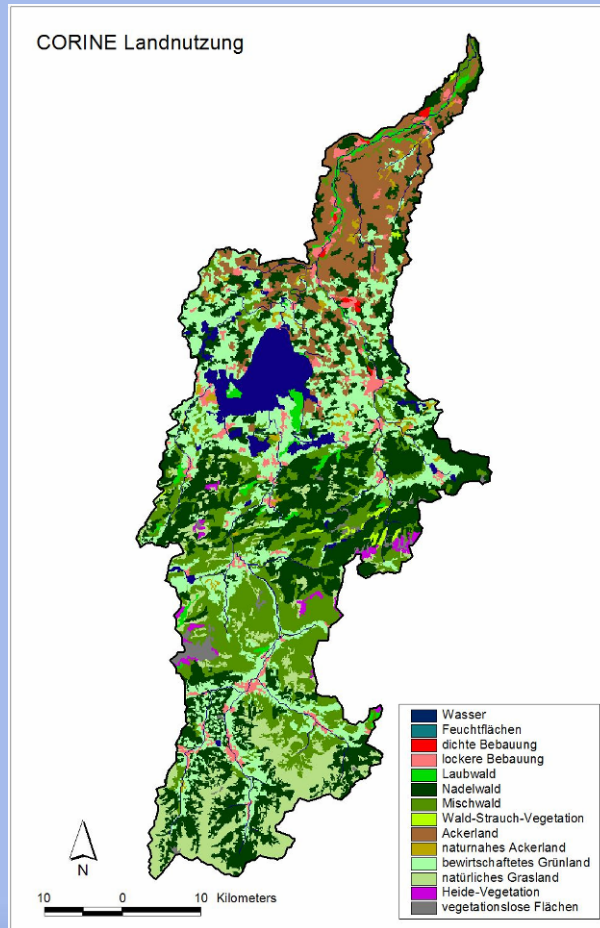
Alz EZG

- Fläche: 2256 km²
 - Komplexe Orographie
 - Höhe: 359-2328 N.N.
 - Mittlerer Niederschlag: 1450 mm/a
(1900mm/a Hochlagen, 850 mm/a Unterlauf)
 - Tage mit Schneebedeckung: ≈104/a (Kitzbühl)
 - Temperaturgradient: ≈ 0.6 °C/100m
 - Flächendifferenzierte hydrologische
- Chiemsee & Chiemgauer Alpen**

Teilgebiete mit Abflusspegel

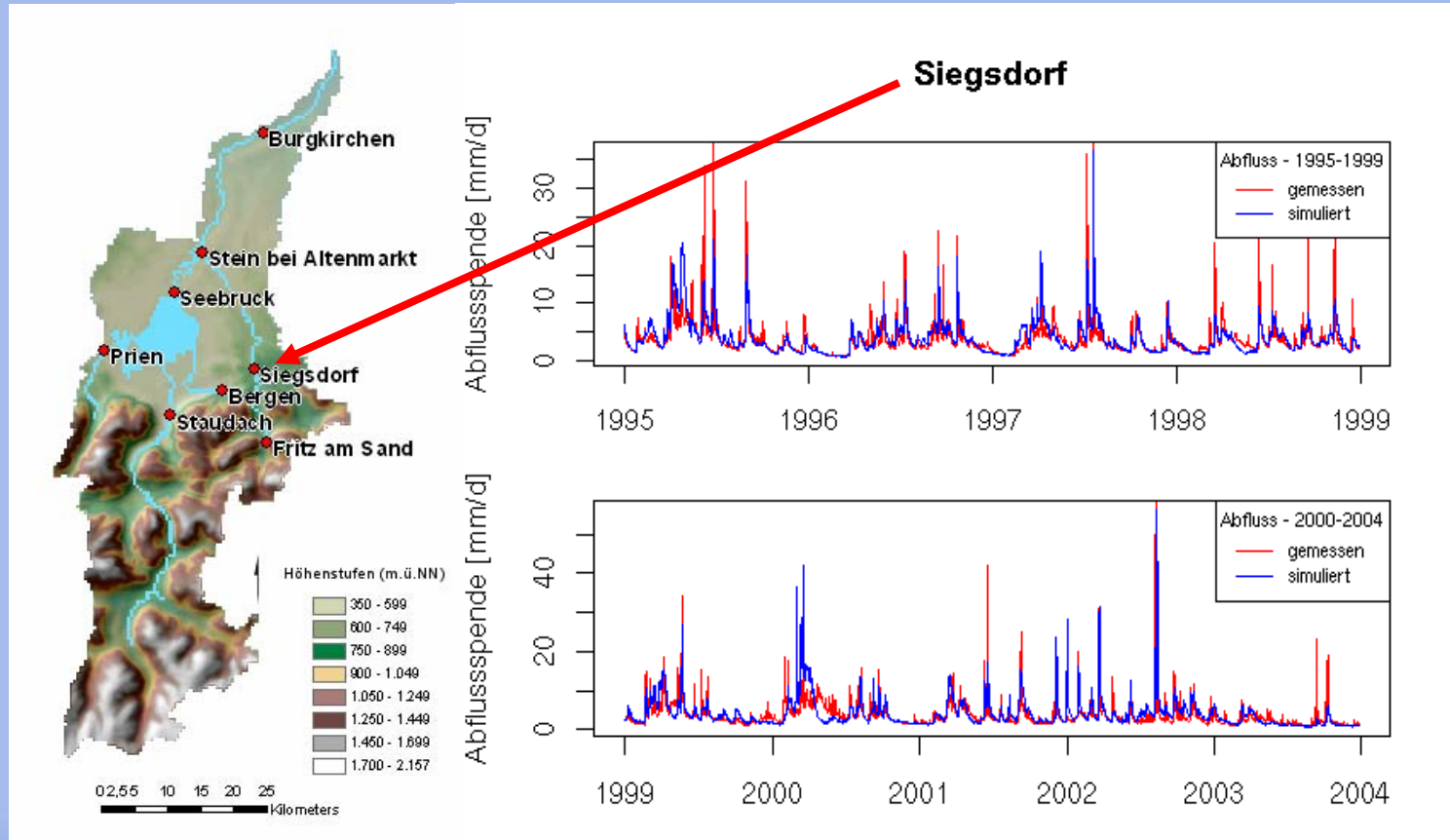


Klimaänderung & Hochwasserrisiko Alpenraum: Alz



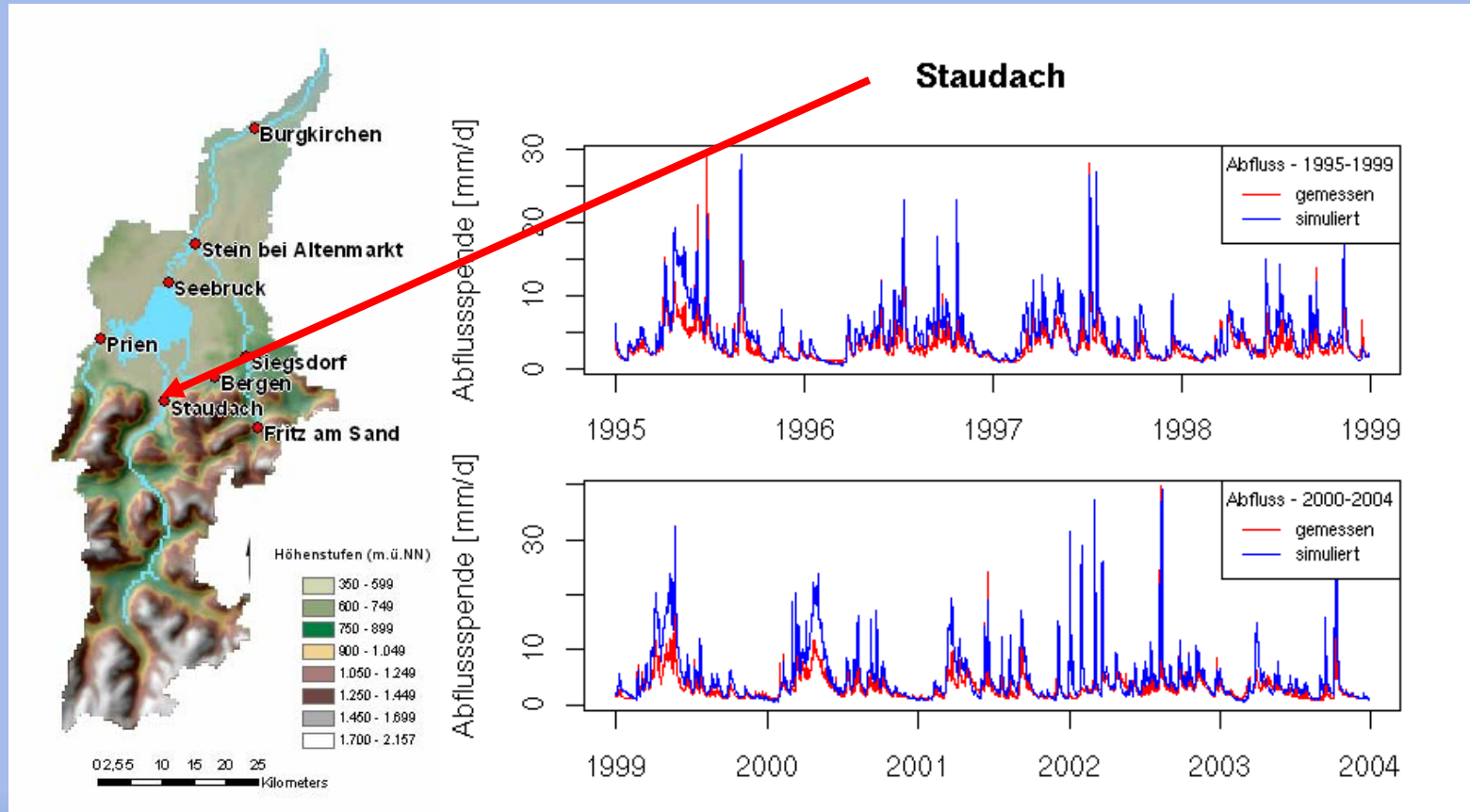
Klimaänderung & Hochwasserrisiko Alpenraum: Alz

Wasserhaushaltssimulation mit Model WaSiM



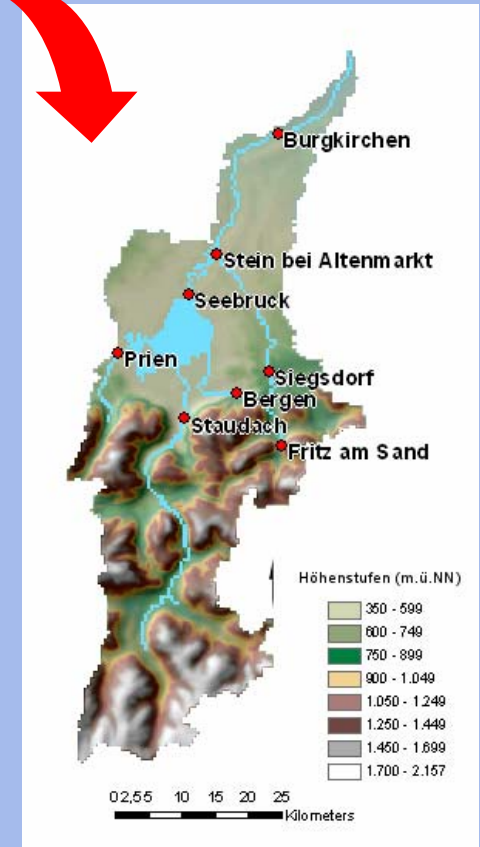
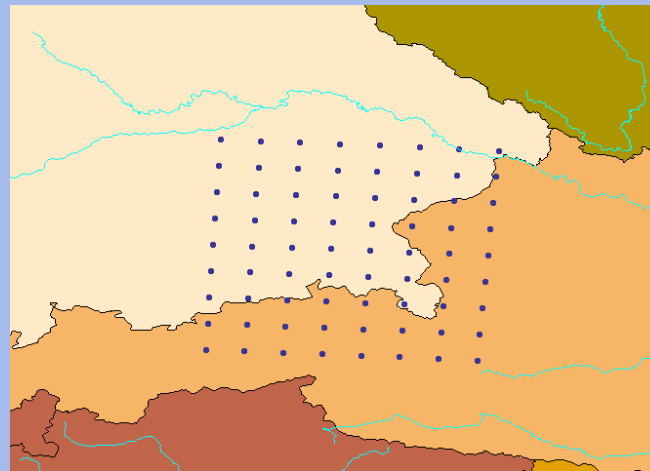
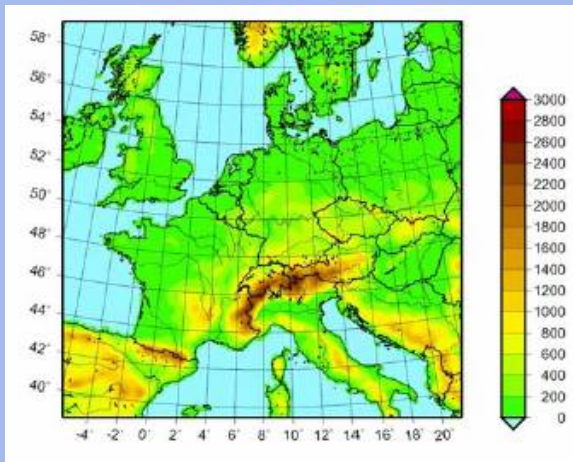
Klimaänderung & Hochwasserrisiko Alpenraum: Alz

Wasserhaushaltssimulation mit Model WaSiM



Klimaänderung & Hochwasserrisiko Alpenraum: Alz

Modellkaskade ECHAM4(B2) – MM5@18km – WaSiM@500m

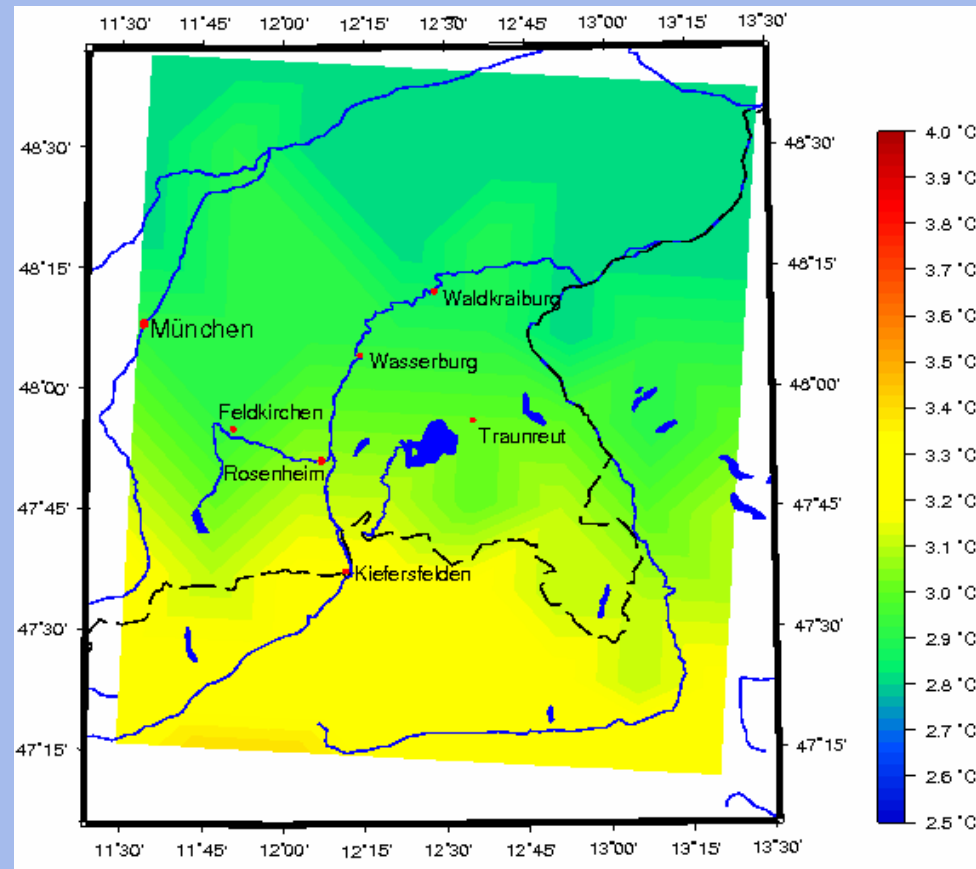


Lage der verwendeten Gitterpunkte

Methode & Bias-Korrektur nach
Kunstmann et al., 2004 (HESS, Ammer EZG), Kunstmann et al., 2007 (PCE, Volta EZG)

Klimaänderung & Hochwasserrisiko Alpenraum: Alz

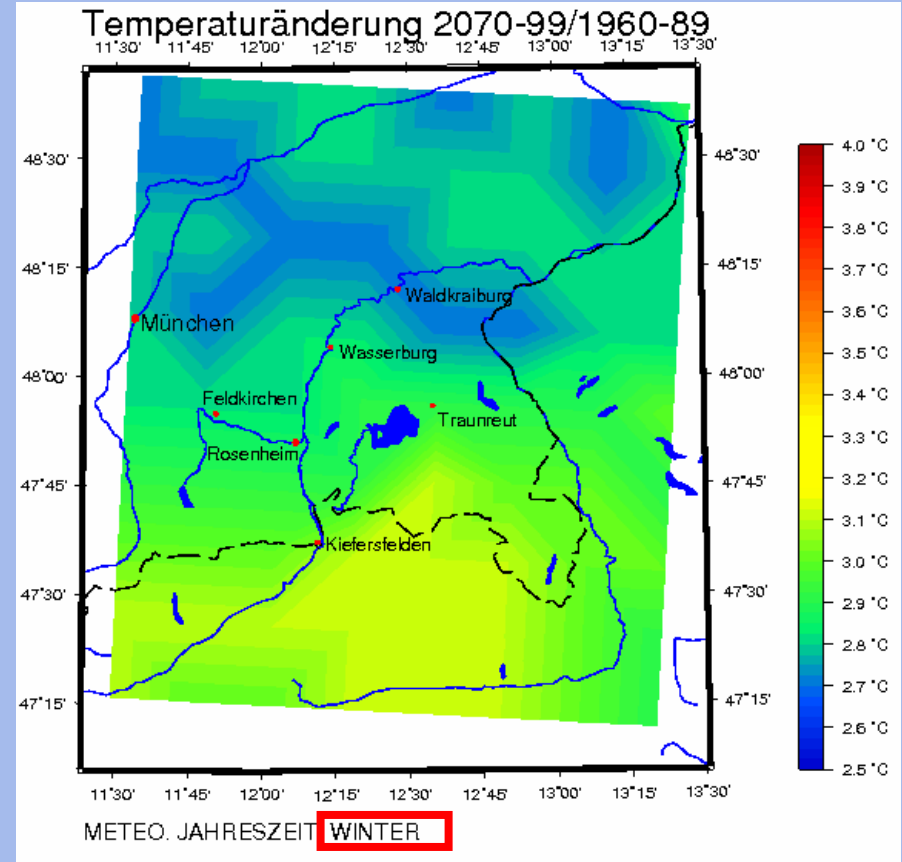
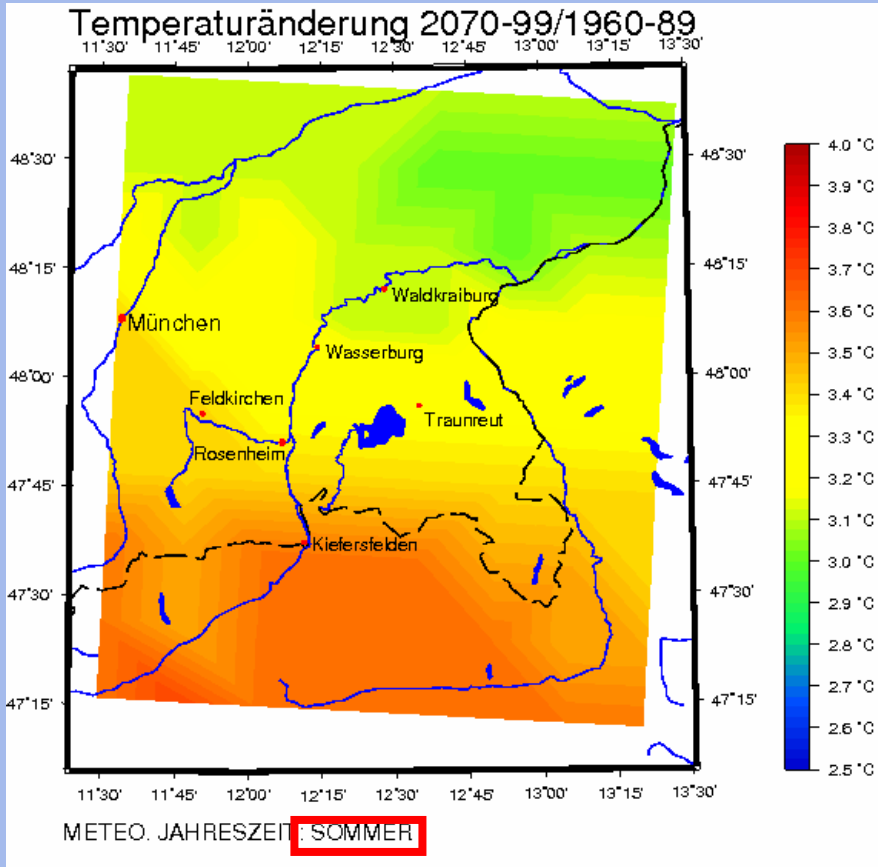
Modellkaskade ECHAM4(B2) – MM5@18km



Veränderung [°C] mittlere Jahrestemperatur

Klimaänderung & Hochwasserrisiko Alpenraum: Alz

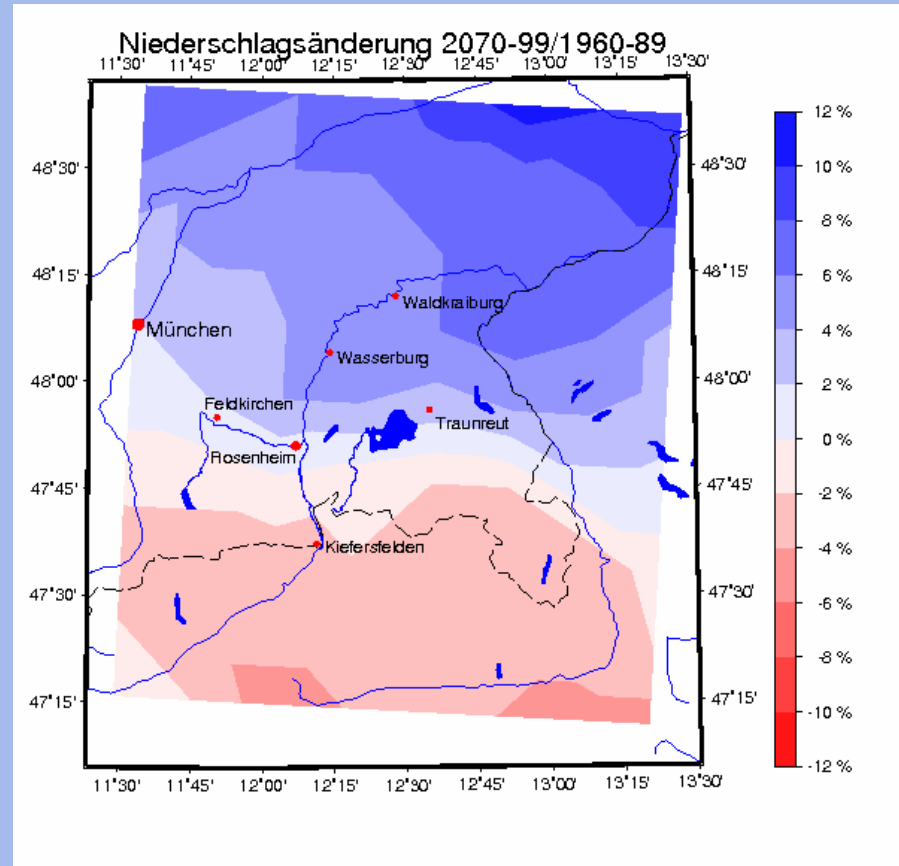
Modellkaskade ECHAM4(B2) – MM5@18km



Veränderung [°C] Temperatur

Klimaänderung & Hochwasserrisiko Alpenraum: Alz

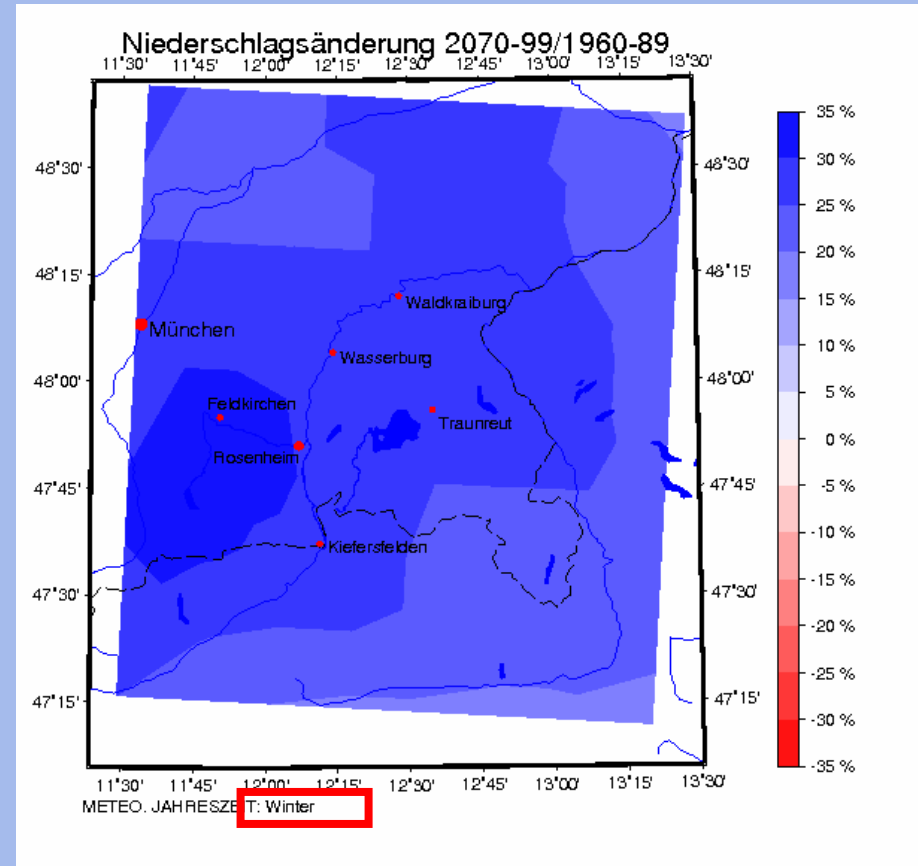
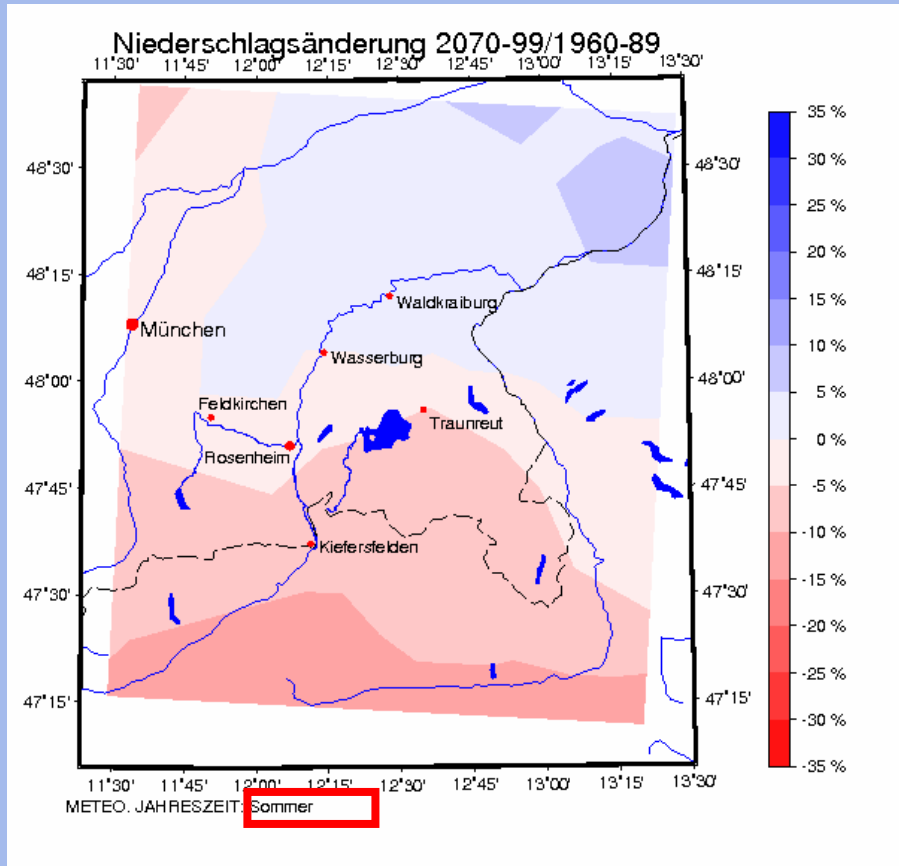
Modellkaskade ECHAM4(B2) – MM5@18km



Veränderung [%] jährlicher Gesamtniederschlag

Klimaänderung & Hochwasserrisiko Alpenraum: Alz

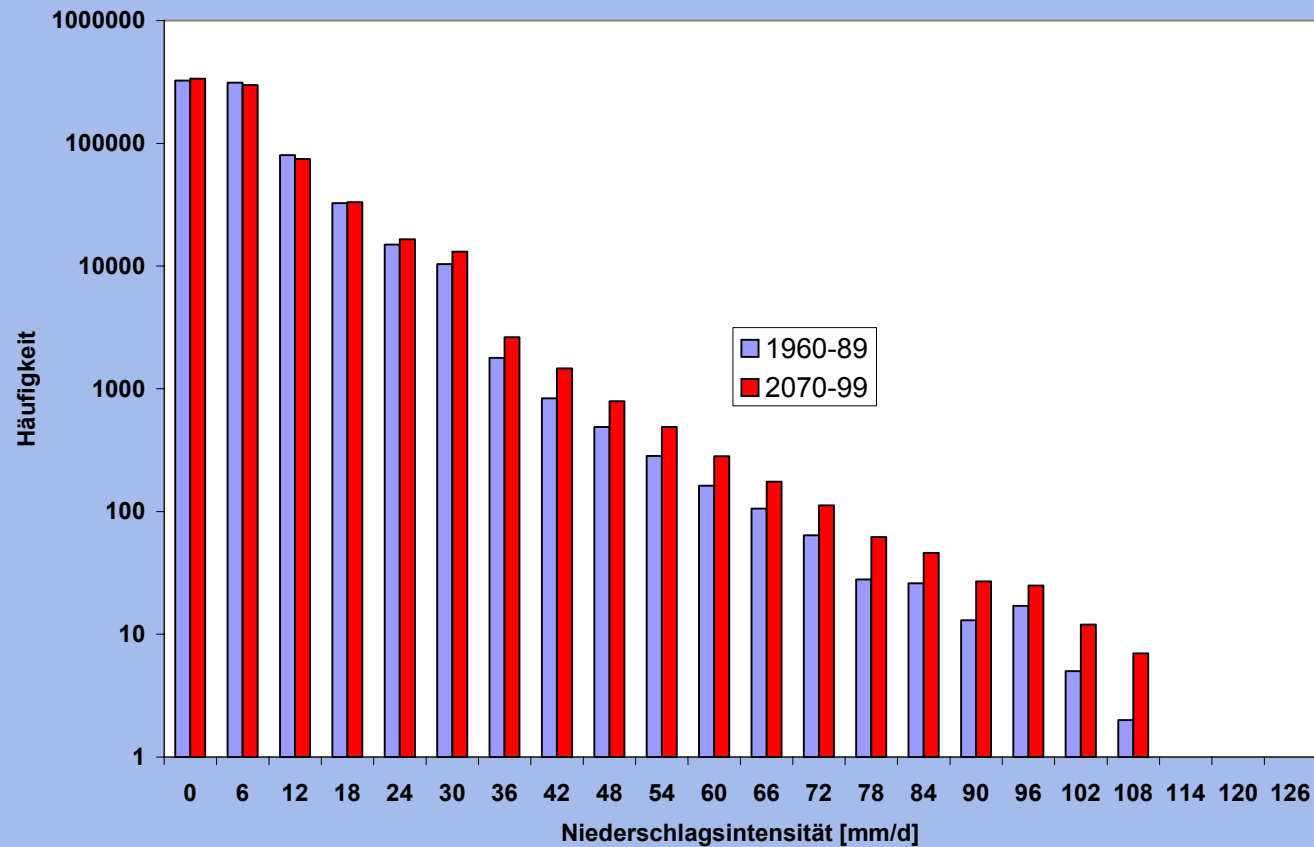
Modellkaskade ECHAM4(B2) – MM5@18km



... aber: Rückgang der Sommerniederschläge

Klimaänderung & Hochwasserrisiko Alpenraum: Alz

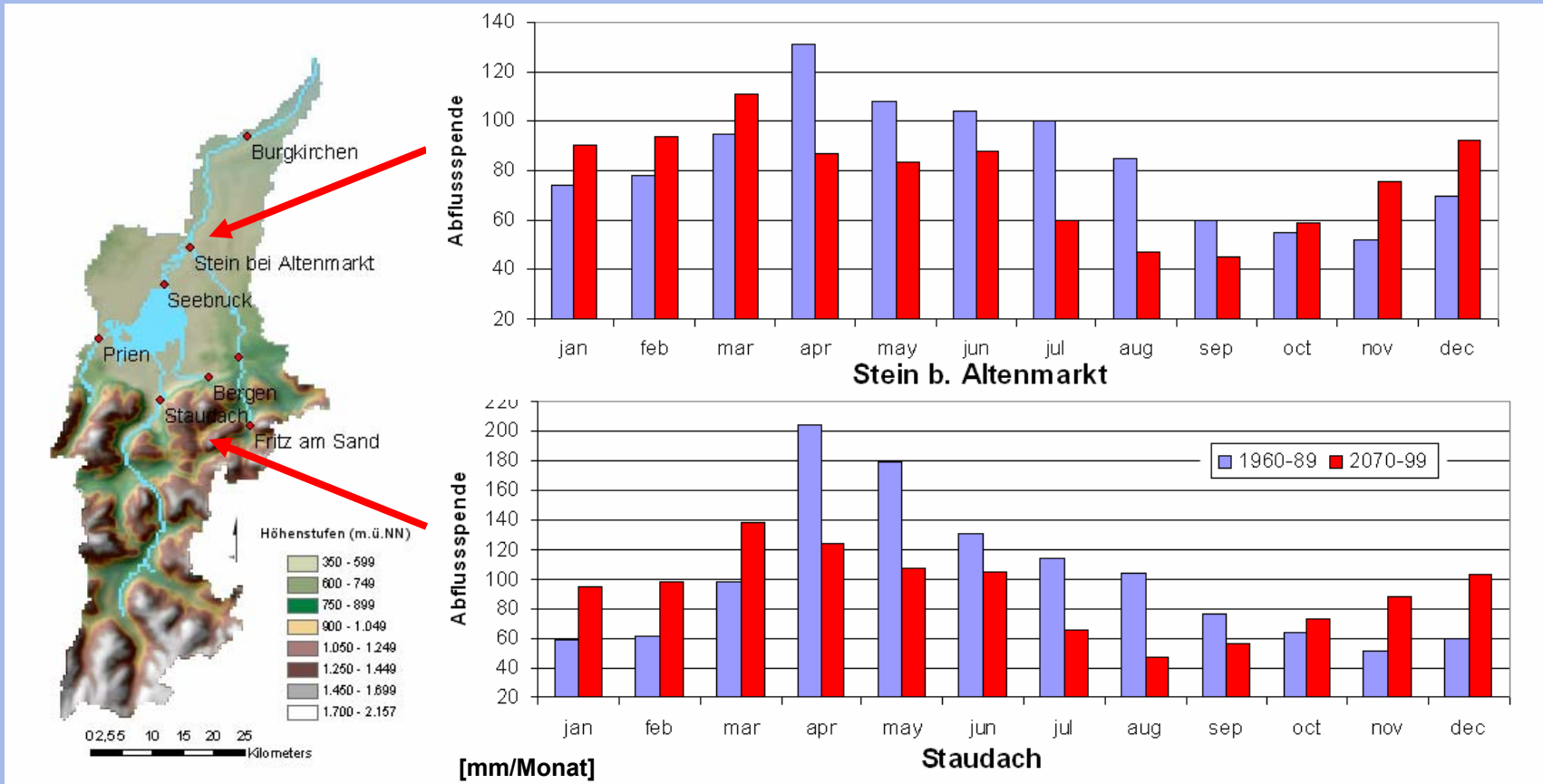
Modellkaskade ECHAM4(B2) – MM5@18km



Zunahme von extremen Niederschlagsereignissen

Klimaänderung & Hochwasserrisiko Alpenraum: Alz

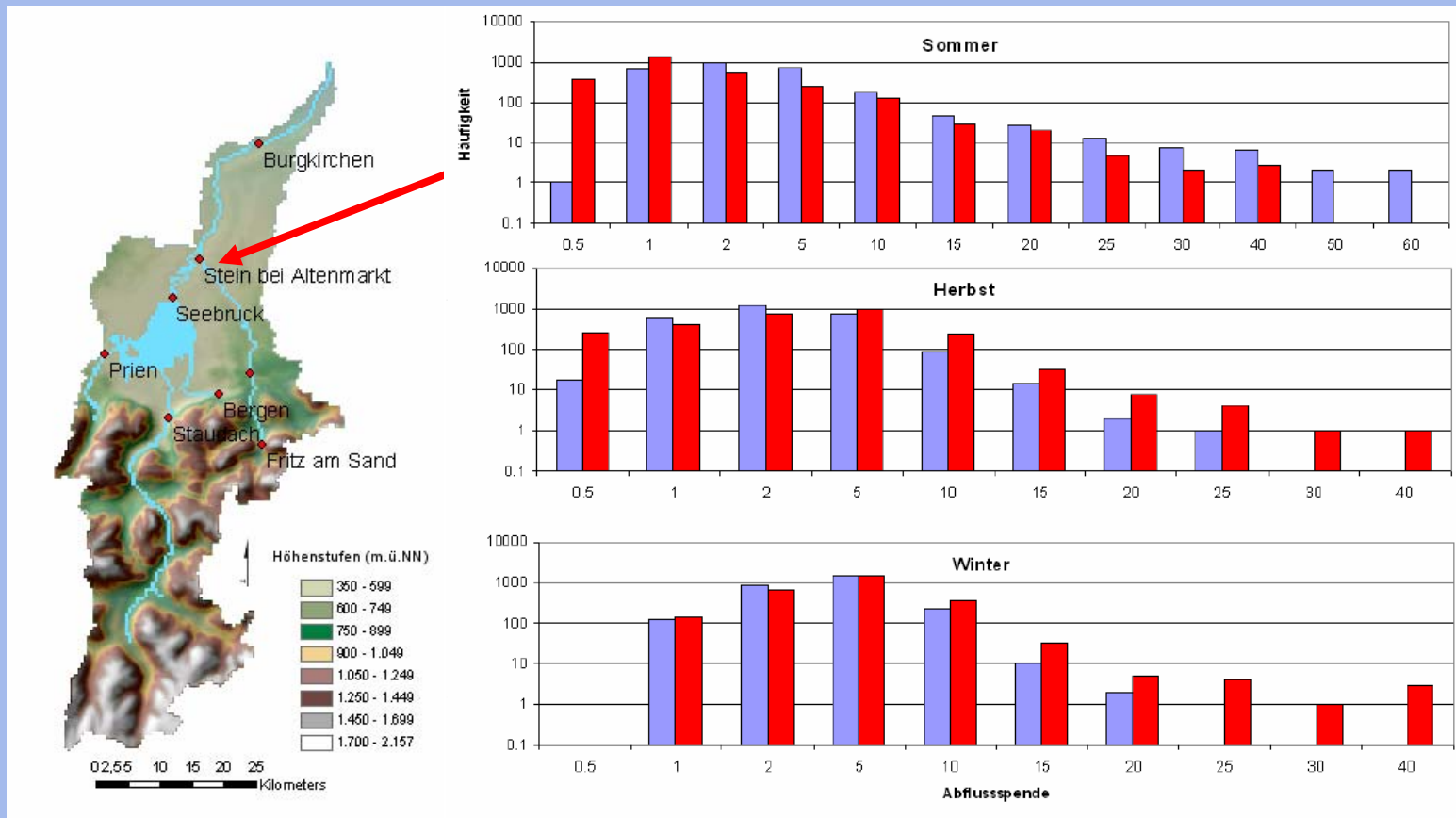
Gekoppeltes Modellsystem ECHAM4(B2) – MM5@18km – WaSiM@500m



Rückgang Sommer-, Zunahme Winterabflüsse

Klimaänderung & Hochwasserrisiko Alpenraum: Alz

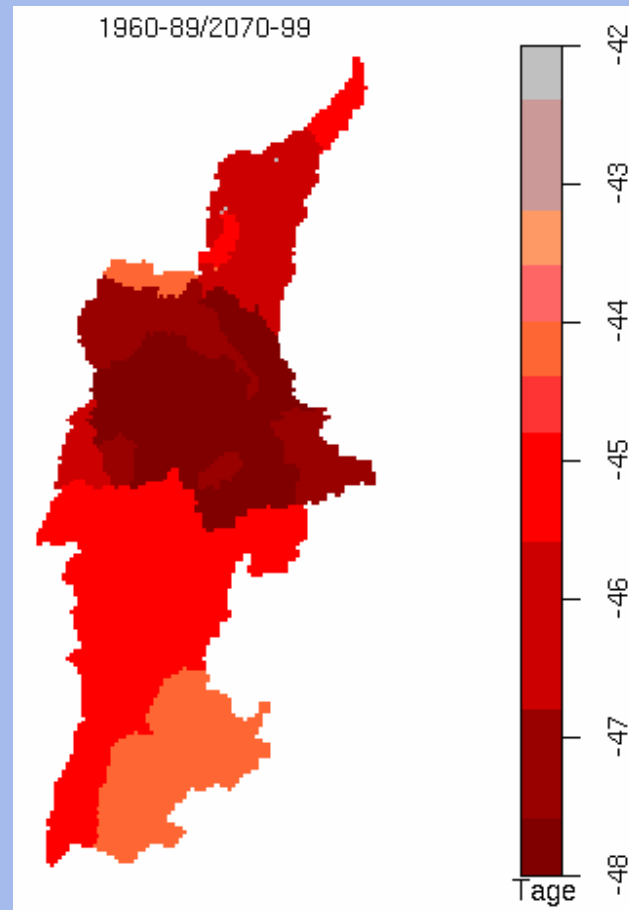
Gekoppeltes Modellsystem ECHAM4(B2) – MM5@18km – WaSiM@500m



Veränderung der Häufigkeiten: Zunahme von Niedrigwasser & Hochwasser!

Klimaänderung & Hochwasserrisiko Alpenraum: Alz

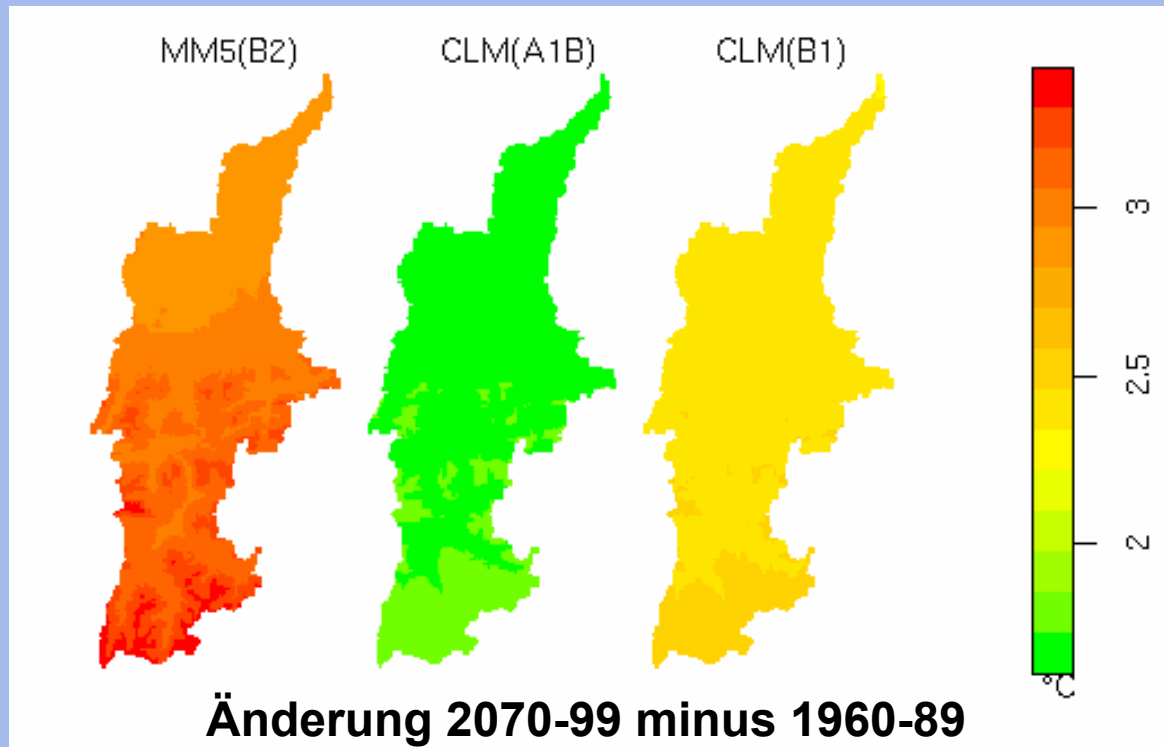
Gekoppeltes Modellsystem ECHAM4(B2) – MM5@18km – WaSiM@500m



Rückgang der Tage mit Schneebedeckung: durchschnittlich 45 Tage

Klimaänderung & Hochwasserrisiko Alpenraum: Alz

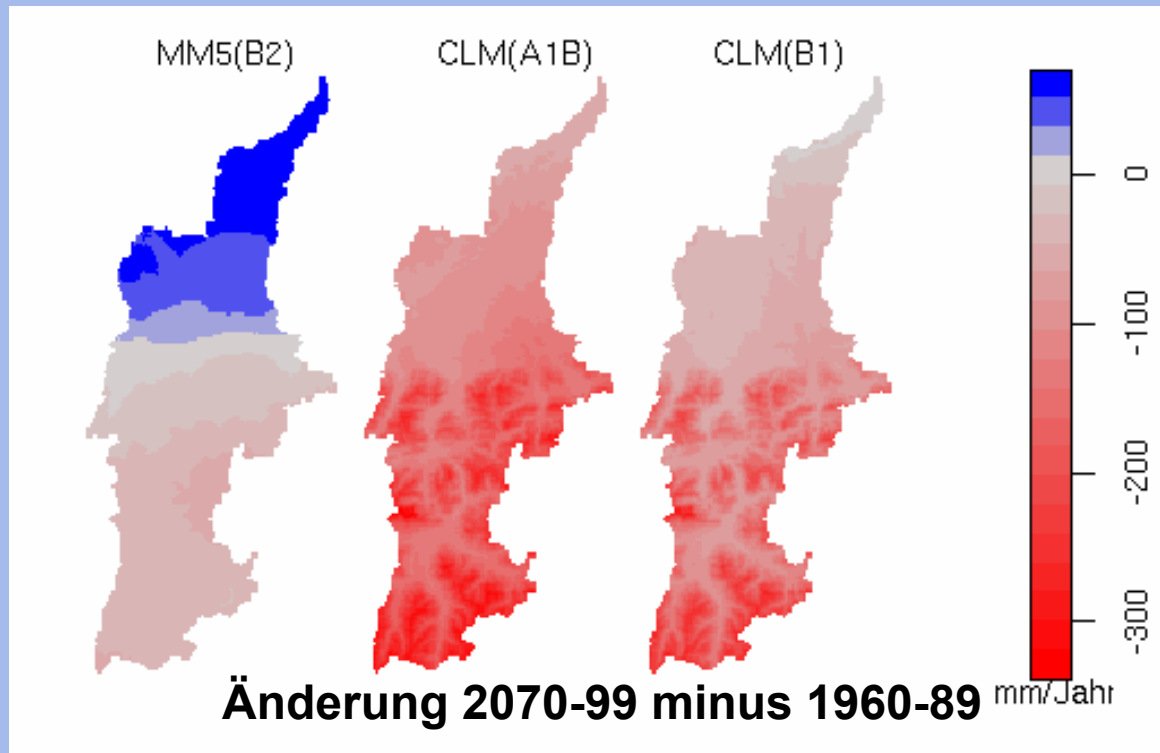
**Unsicherheiten gekoppeltes Modellsystem:
ECHA4M-MM5@18km vs. ECHAM5-CLM@19km – WaSiM@500m**



Unterschiede in Temperaturzunahme bis zu 1°C

Klimaänderung & Hochwasserrisiko Alpenraum: Alz

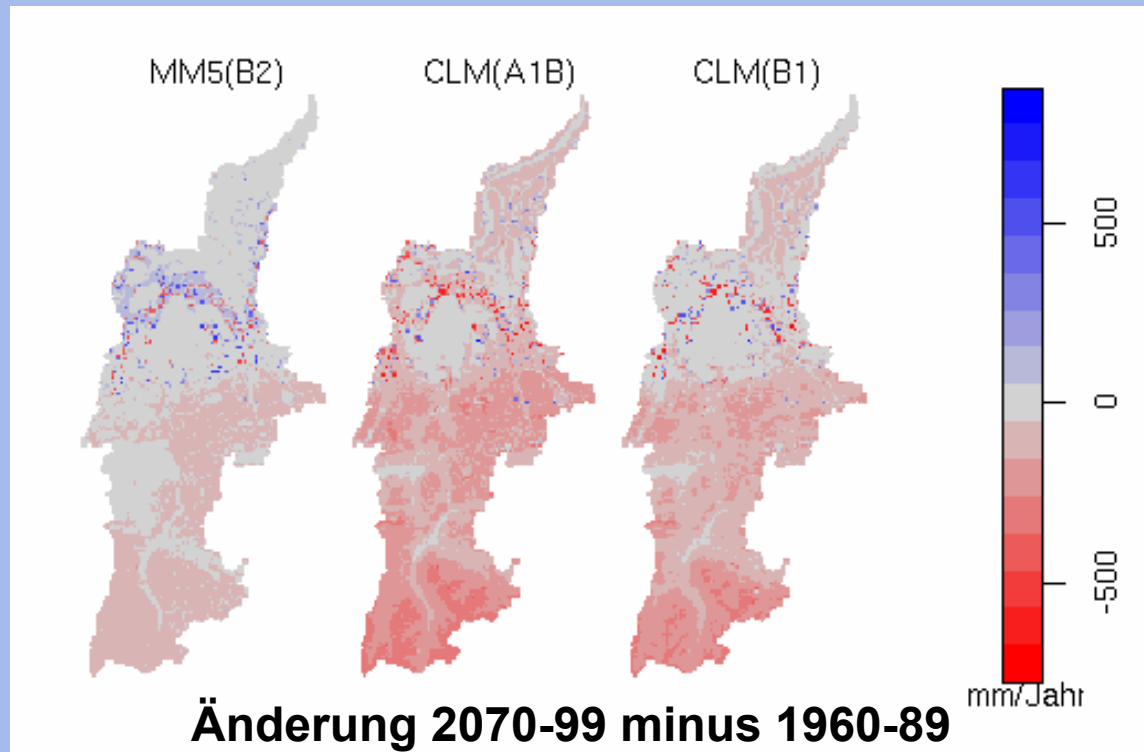
**Unsicherheiten gekoppeltes Modellsystem:
ECHA4M-MM5@18km vs. ECHAM5-CLM@19km – WaSiM@500m**



Unterschiede in Niederschlagstrends

Klimaänderung & Hochwasserrisiko Alpenraum: Alz

**Unsicherheiten gekoppeltes Modellsystem:
ECHA4M-MM5@18km vs. ECHAM5-CLM@19km – WaSiM@500m**



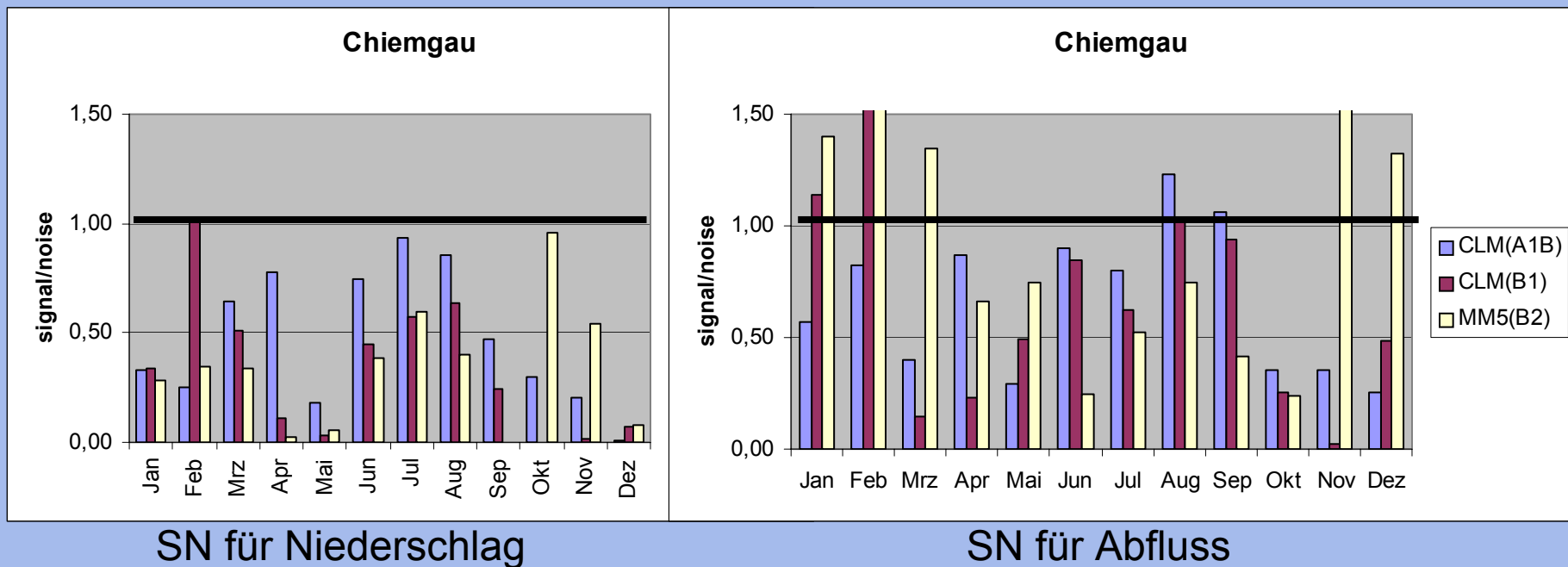
Unterschiede im Gesamtabfluss

Klimaänderung & Hochwasserrisiko Alpenraum: Alz

Modellkaskade MM5@18km/CLM@19km - WaSiM@500m

Signal to Noise ratio:

$$SN = \frac{|\bar{X}_{fut} - \bar{X}_{pres}|}{\sigma} > 1?$$



Signal Klimaänderung meist innerhalb der inter-annuellen Variabilität!

Gekoppelte Modellsysteme

Vielfältig eingesetzt für weitere hydrologische Fragestellungen

- 24-48-72h Hochwasservorhersage
- Modellbasierte echtzeitnahe Abschätzung Wasserhaushalt
- Klimaimpaktuntersuchung für Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Energiewirtschaft
- Abschätzung der aktuellen und zukünftig erwarteten

WASSERVERFÜGBARKEIT IN SEMIARIDEN REGIONEN

Atmosphäre & Ozean

Aber: Problem Quantifizierung raum-zeitliche Niederschlagsvariabilität bei hoher Variabilität oder schwacher Infrastruktur!

Flussgebiets-
Hydrologie:

$\Delta x \approx 1\text{km} \dots 100\text{m}$

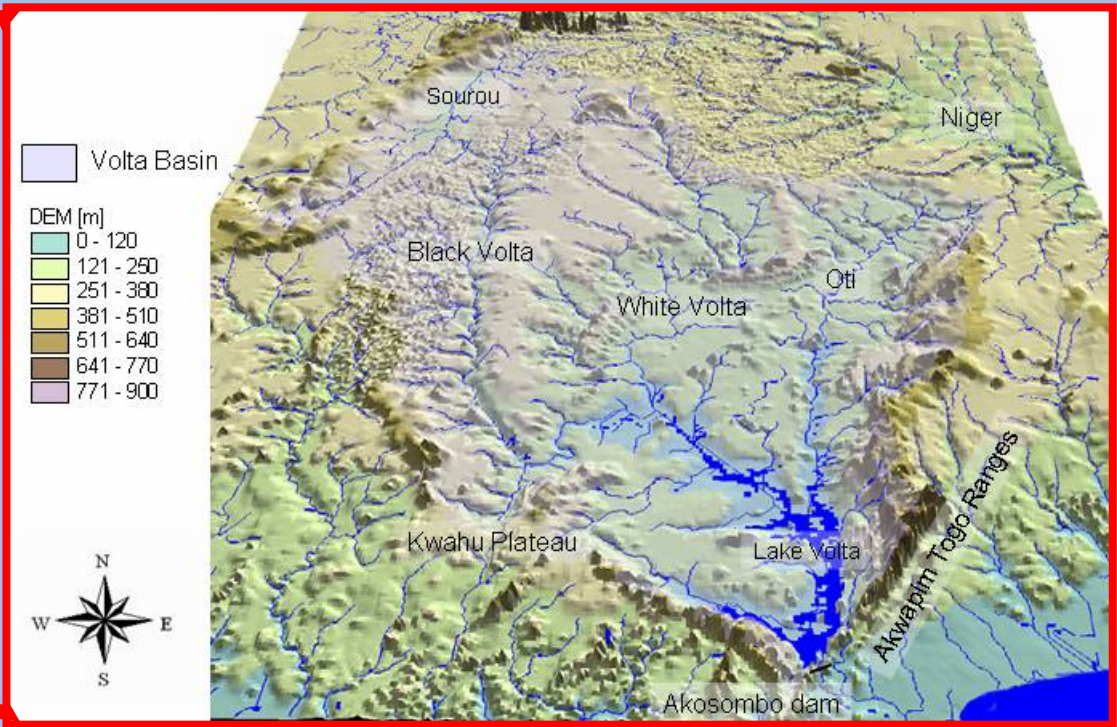
RCMs
 $\Delta x \approx 50 \dots 10\text{km}$

P T RH v R

Wasserverfügbarkeit in semiariden Regionen



Wasserverfügbarkeit in semiariden Regionen: Volta Becken

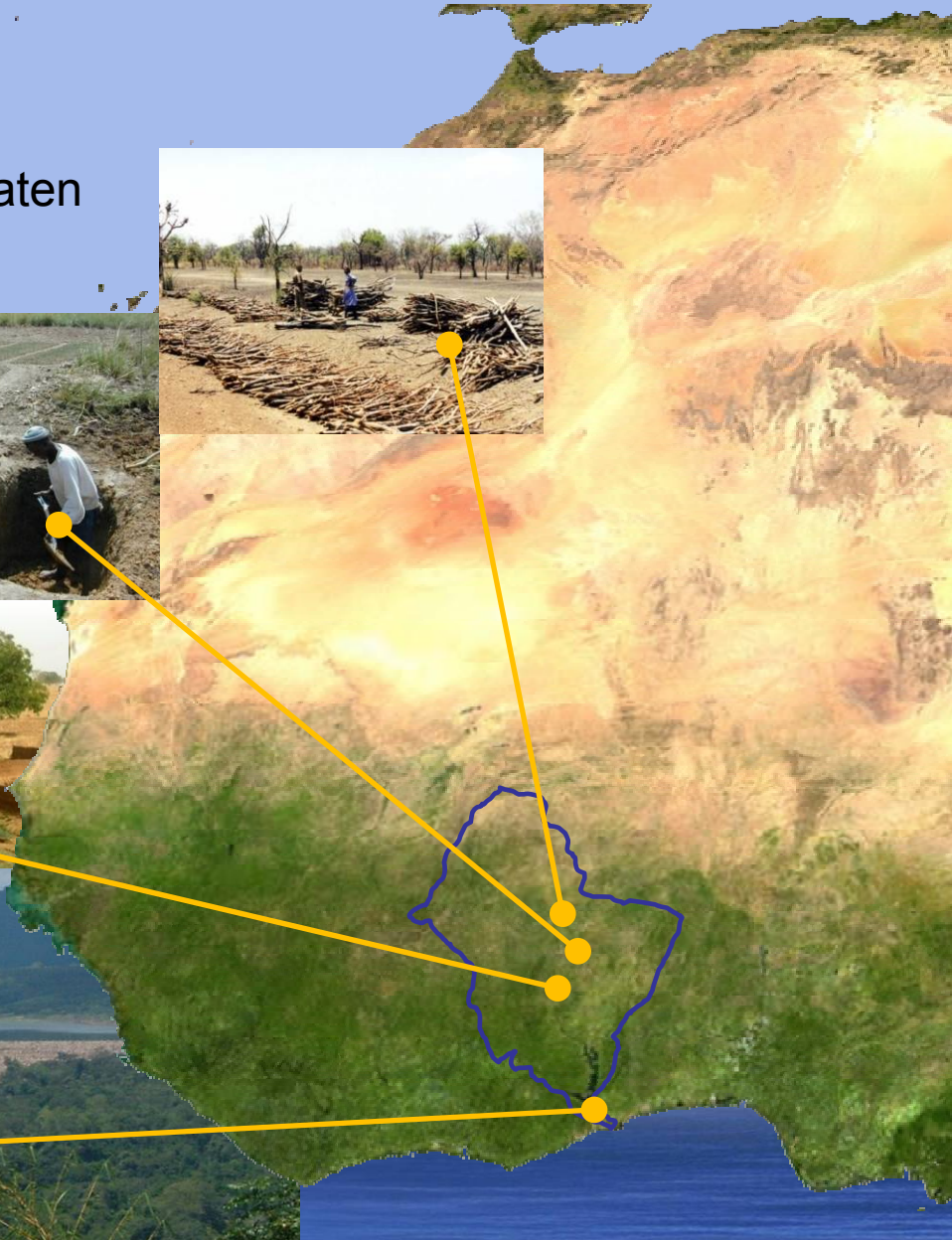


Wasserverfügbarkeit im Volta Becken

- Fläche 400,000 km²
- 20+ Millionen Einwohner, 6 Anrainerstaaten
- Hoher Bevölkerungsdruck
- Hohe Niederschlagsvariabilität
2000mm Küste - 400mm Sahel
- **+1.2°C/25 a, -25%P/25a!**

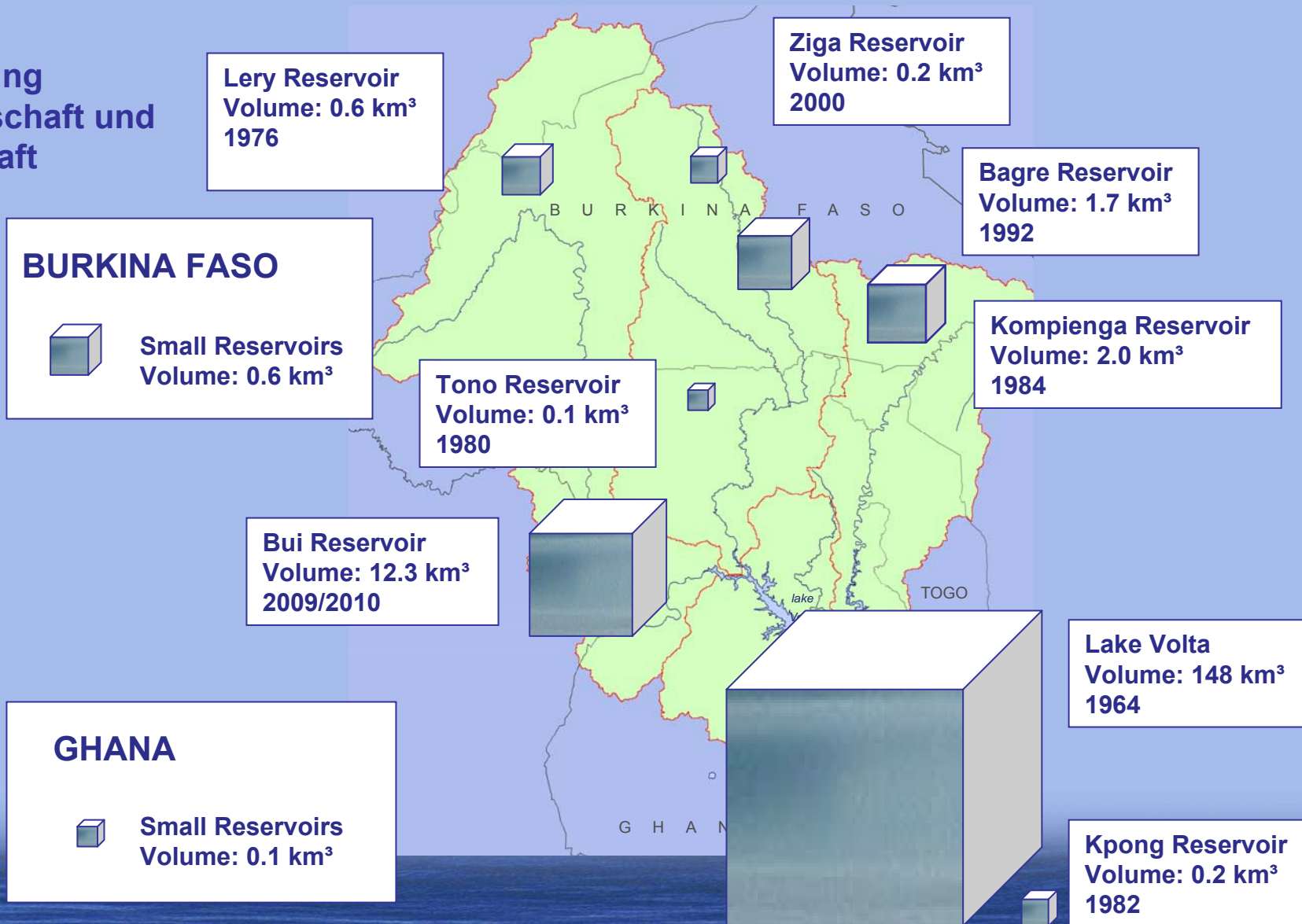


Akosombo Stauee



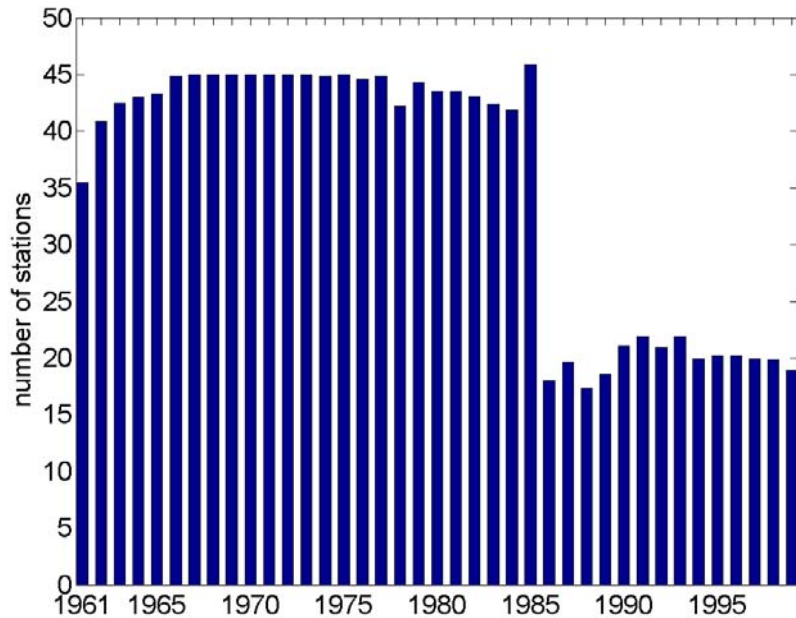
Wasserverfügbarkeit im Volta Becken

Entwicklung
Landwirtschaft und
Wasserkraft



Unsicherheiten

⇒ Niederschlagsinterpolation in datenschwacher Region



Niederschlag:

- 1 Station/6,000km² 1961-84

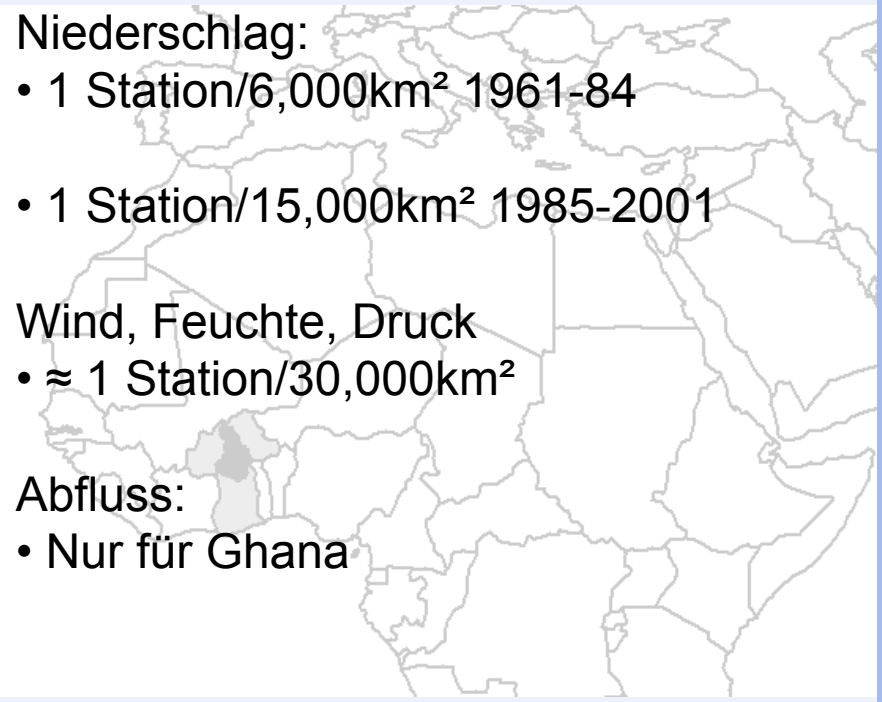
- 1 Station/15,000km² 1985-2001

Wind, Feuchte, Druck

- ≈ 1 Station/30,000km²

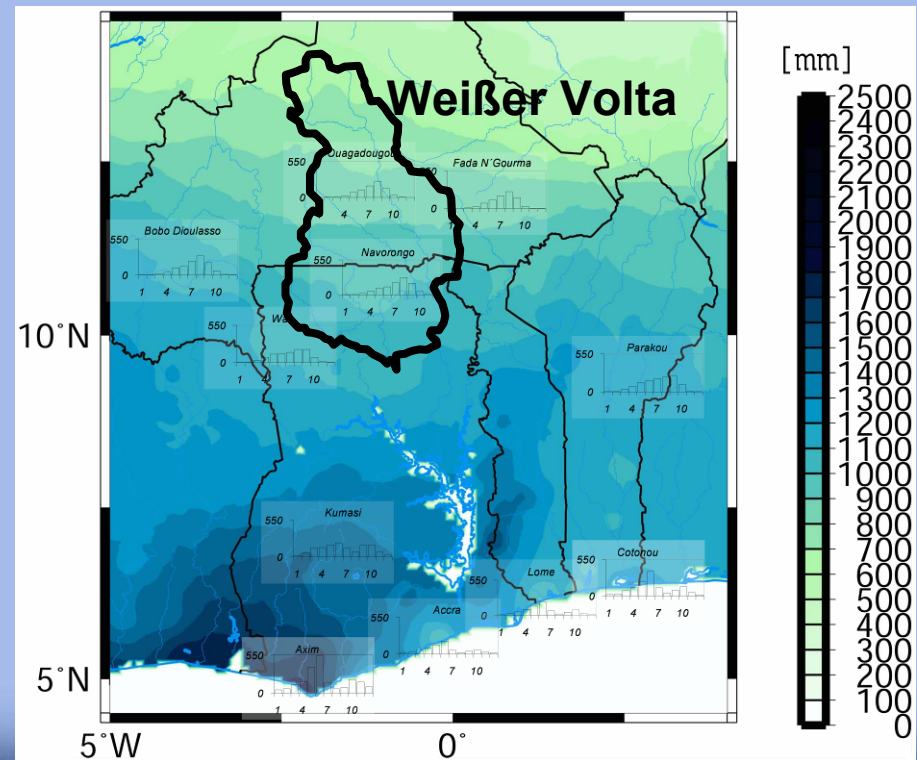
Abfluss:

- Nur für Ghana



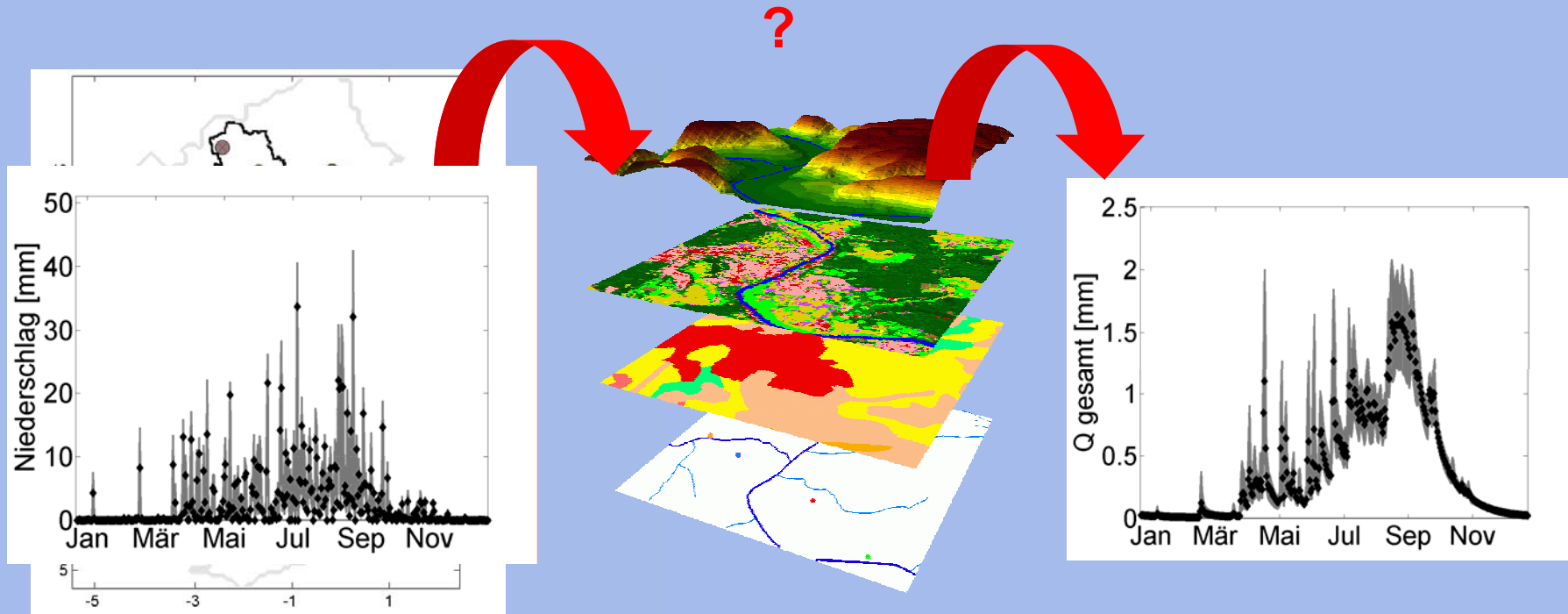
Weißer Volta

- 94000 km², stromaufwärts des Volta Stausees
- Flache Topographie
- Semiarides Klima: Regenzeit Mai - Oktober
Trockenzeit November – April



Fortpflanzung von Niederschlagsunsicherheiten

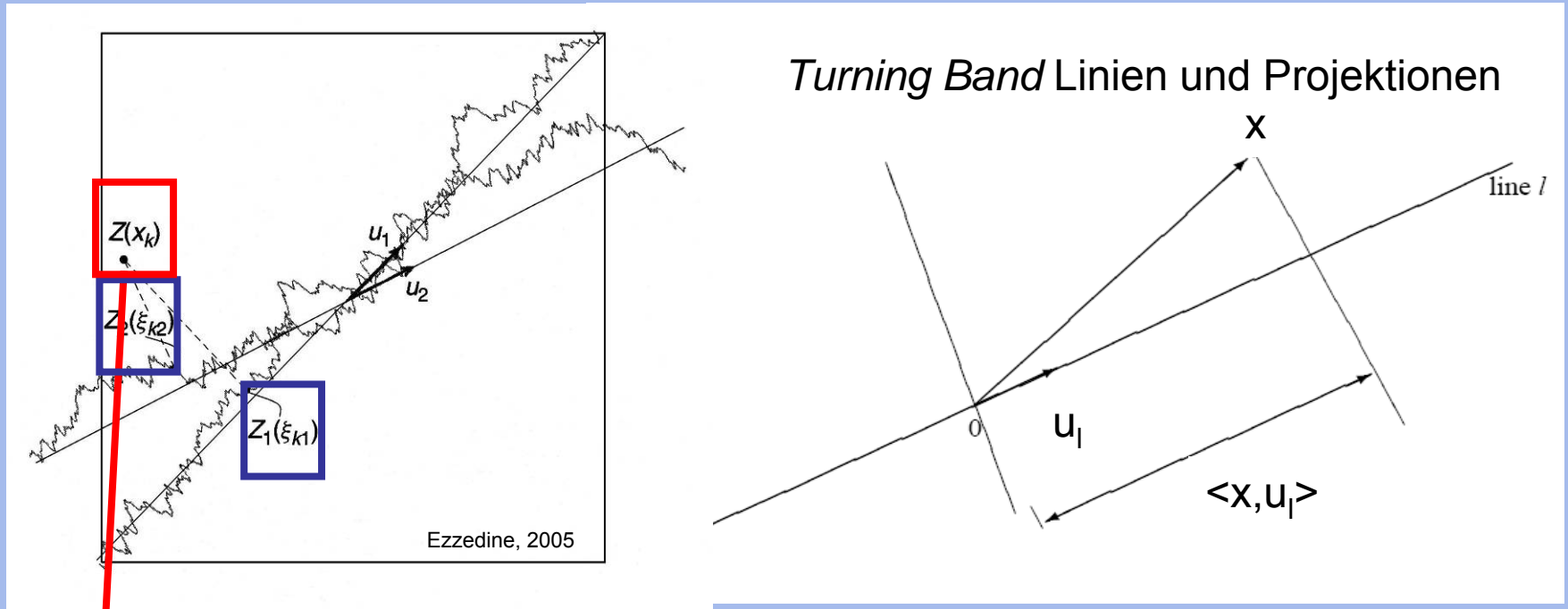
Einzugsgebiet Weißer Volta



⇒ Berücksichtigung aller „Welten“, die mit Beobachtung & Statistik vereinbar sind

Fortpflanzung von Niederschlagsunsicherheiten

Turning Band Methode



Ezzedine, 2005

$$Z(x) = \frac{1}{\sqrt{L}} \sum_{l=1}^L Z_l(\langle x, u_l \rangle)$$

$Z_l(u)$: Zufallsfunktion mit Mittelwert 0
& $C(r)$ Kovarianz Funktion
(\Leftrightarrow Variogramm)

Fortpflanzung von Niederschlagsunsicherheiten

Konditionierte Niederschlagsfelder: Turning Band & Doppelkriging

$$Z_C(x) = Z^*(x) + (Z_S(x) - Z_S^*(x))$$

$Z_C(x)$: Konditioniert simulierter Wert am Punkt x

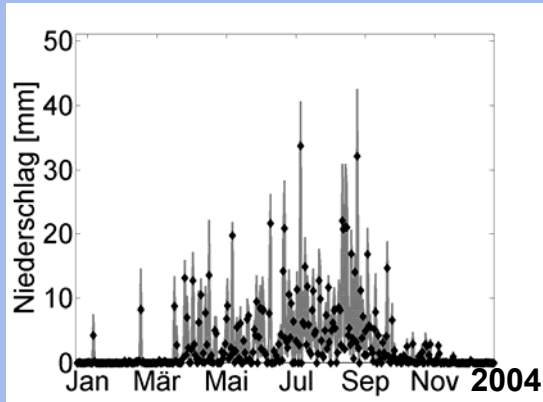
$Z^*(x)$: **Kriging**-Schätzer von Z an x basierend auf den Messungen

$Z_S(x)$: Unkonditioniert simulierter Wert an x (**TB Methode**)

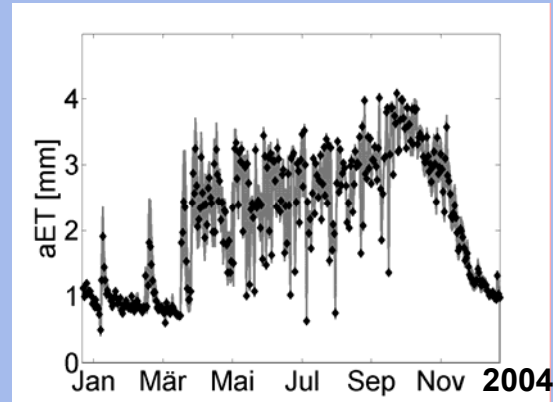
$Z_S^*(x)$: **Kriging**-Schätzer von Z_S an x basierend auf den unkonditioniert simulierten Werten an den Messpunkten

Fortpflanzung von Niederschlagsunsicherheiten

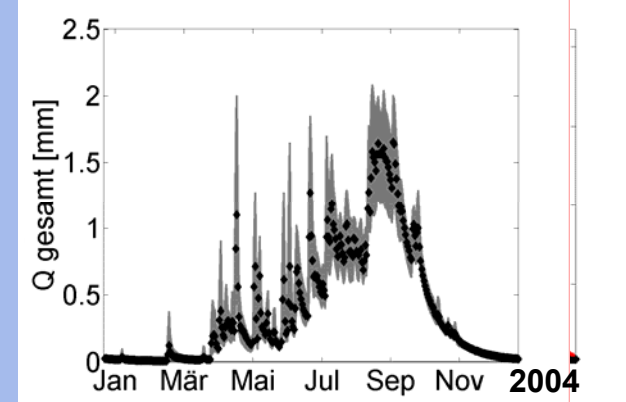
Niederschlag



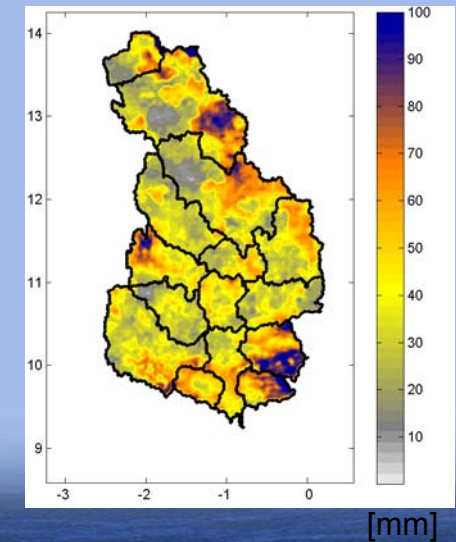
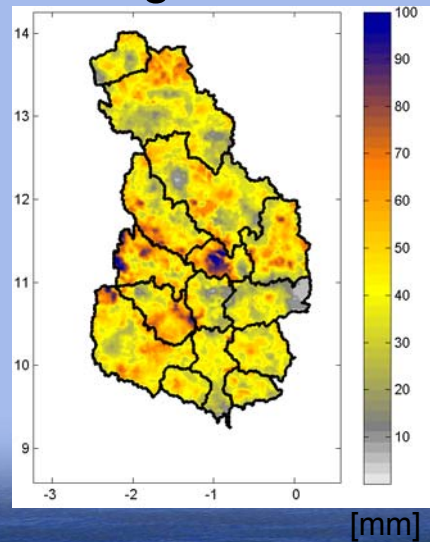
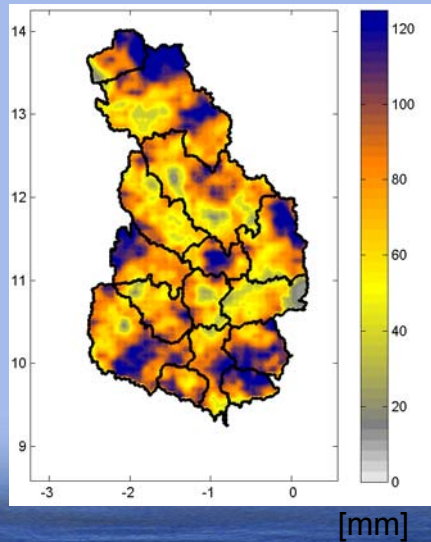
ET_a



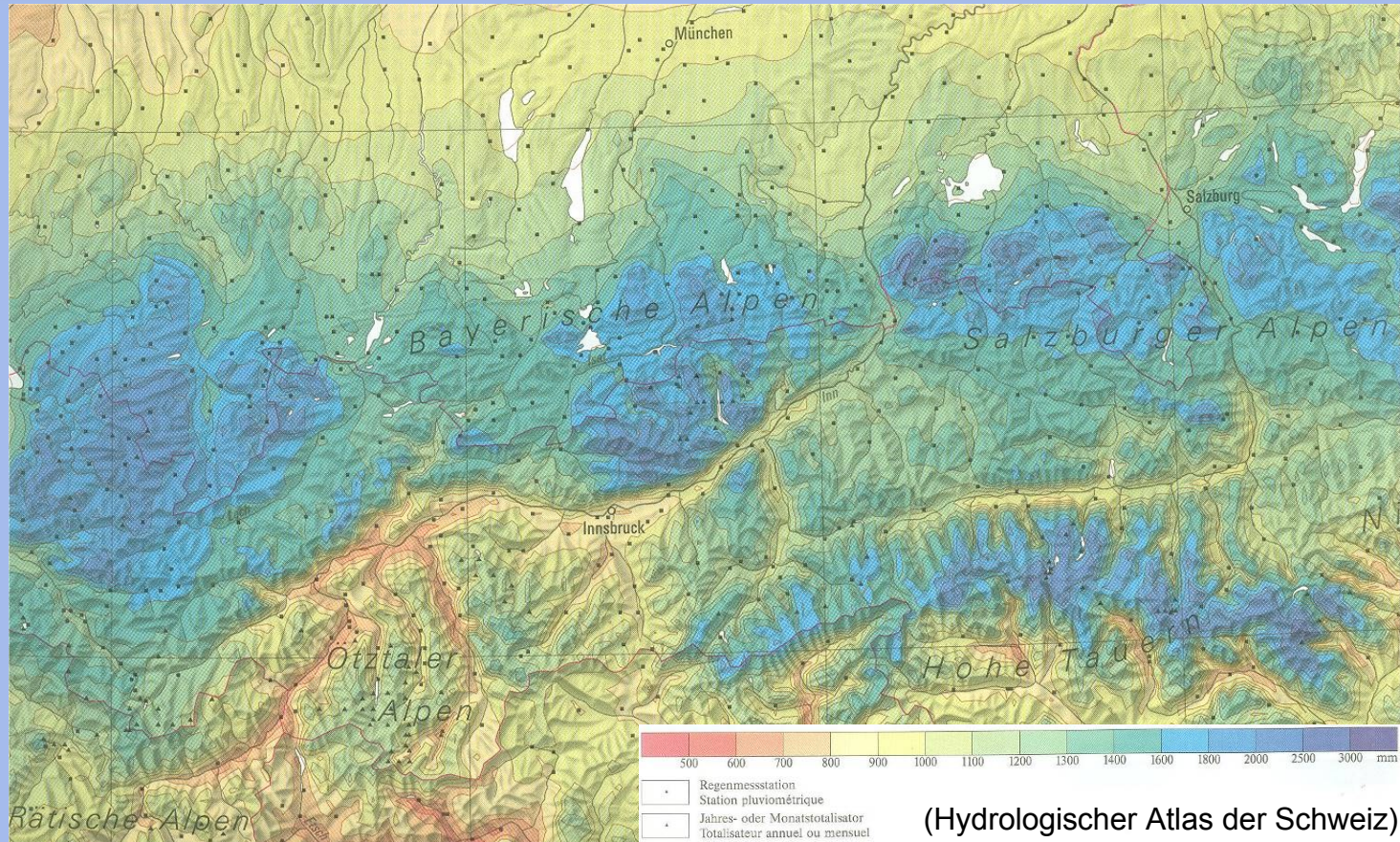
$Q_{gestingt}$



Räumliche Standardabweichung



... und im Alpenraum?



- Hohe räumliche Niederschlagsvariabilität im Alpenraum
- Geringe Stationsdichte in Höhenlagen
- ⇒ **Berücksichtigung Unsicherheiten Niederschlagsinterpolation auch für Anpassungsstrategien im Alpenraum notwendig**

Zusammenfassung

- Einsatz von **skalen- und kompartimentsübergreifenden gekoppelten Modellsystemen** zur hochaufgelösten Quantifizierung des Wasserhaushalts und zur Entscheidungsunterstützung
- Zunahme von Niedrigwasser- UND Hochwasserrisiken
- **Noch immer große Unsicherheiten in der hydrologischen Klimaimpaktanalyse**
- Größte **Unsicherheit** in der hydrologischen Simulation: flächendifferenzierter Niederschlag
- *Turning Band* Methode zur Quantifizierung von **Unsicherheitsspannen**
 - ⇒ Zentrale Voraussetzung für Entscheidungsunterstützung und **nachhaltigem Wassermanagement**



**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit**