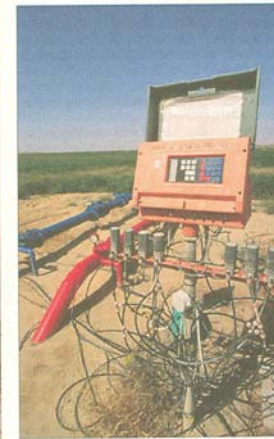


# Einfluss der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt

## Beispiel Volta/Westafrika

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

- $\approx 0.9$  °C seit Beginn der Temperaturmessungen in 1860  
 $\approx 0.6$  °C in letzten 30 Jahren mit Maximum in 2005
- Temperaturschwankungen letzte Eiszeit und heutiger Warmzeit:  $\approx 4$ °C
- Steigender mittlerer Jahresniederschlag
- Starke regionale Differenzen  
Globale Temperatur:  $+ 0.7 \pm 0.2$  °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**

# 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**

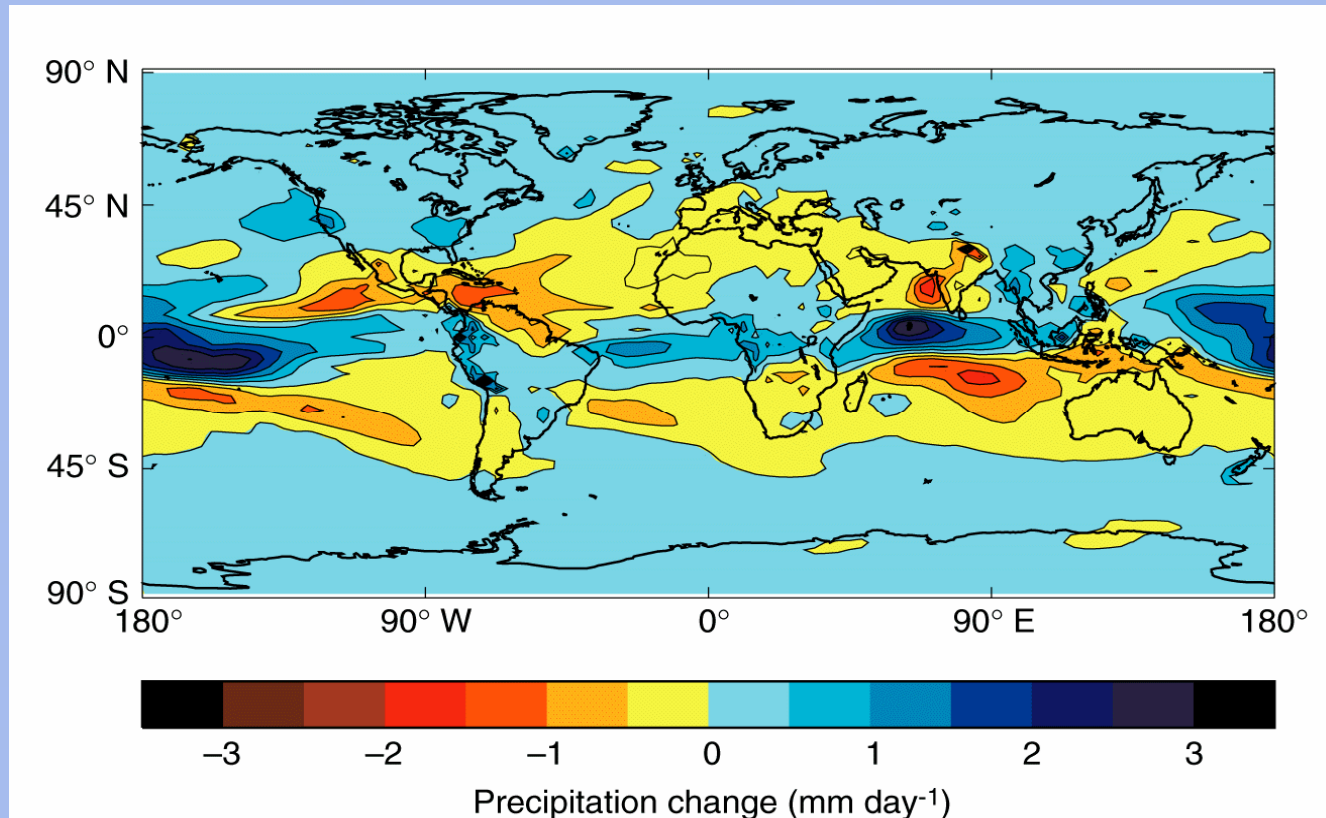
## Folgen

- Veränderte Intensitäten
- Veränderte zeitliche & räumliche Verteilung

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

# Abschätzung des zukünftigen Klimas: globale Klimaszenarien

## Prognose Änderungen mittlerer jährlicher Niederschlag bis 2050



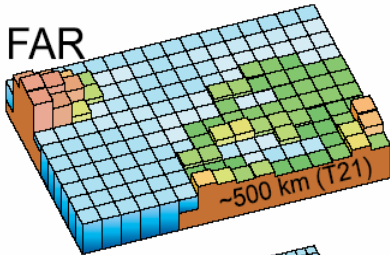
Hadley Centre  
for Climate  
Prediction and  
Research

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

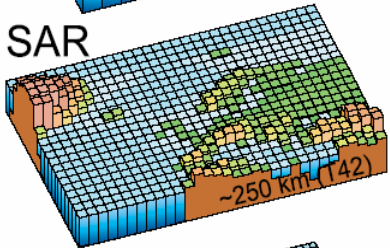
# Abschätzung des zukünftigen Klimas: Regionale Klimaszenarien

IPCC

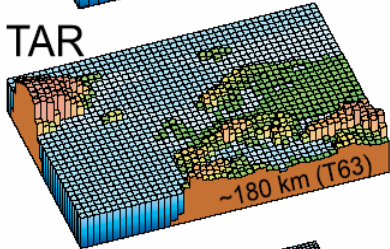
FAR



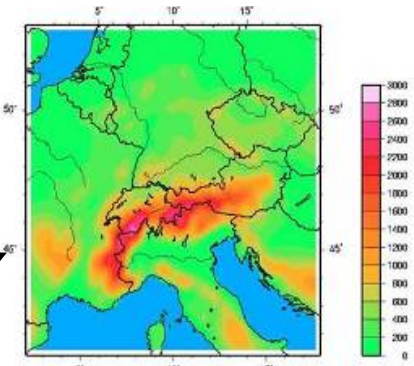
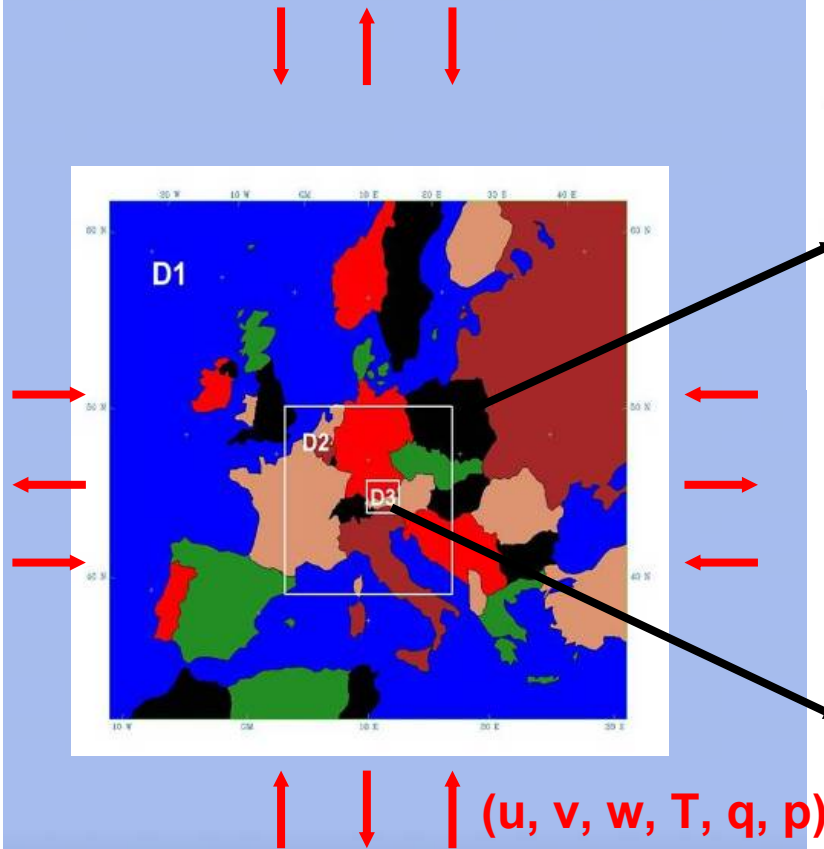
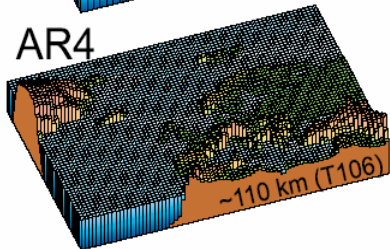
SAR



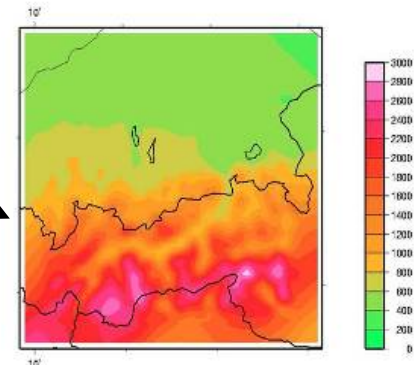
TAR



AR4

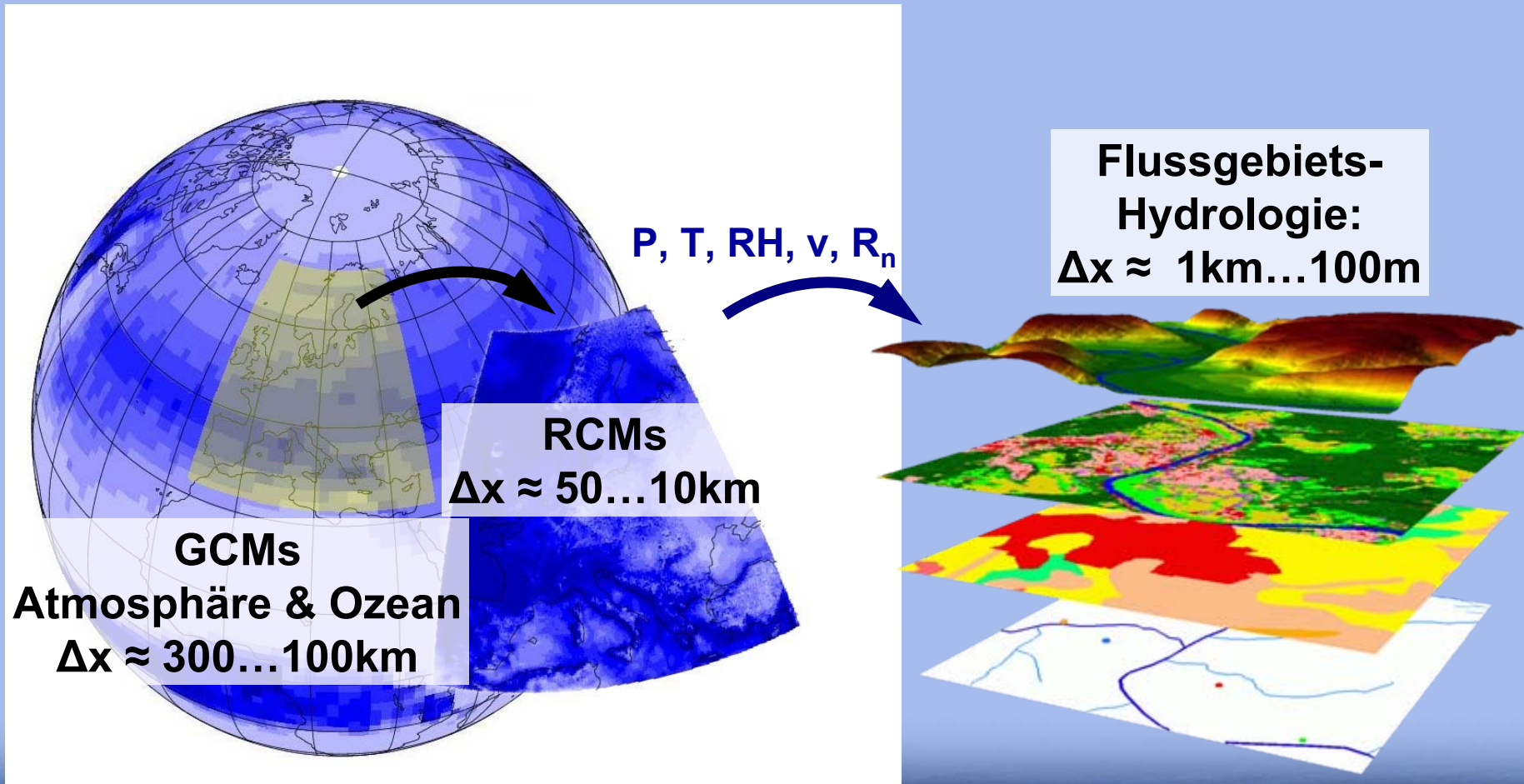


Orographie in 20x20 km<sup>2</sup> Auflösung



Orographie in 4x4 km<sup>2</sup> Auflösung

# Abschätzung des zukünftigen Wasserhaushalts: Gekoppelte Modellsysteme



# Flächendifferenzierte Wasserhaushaltsmodellierung

## 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

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

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



# 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

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

## 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

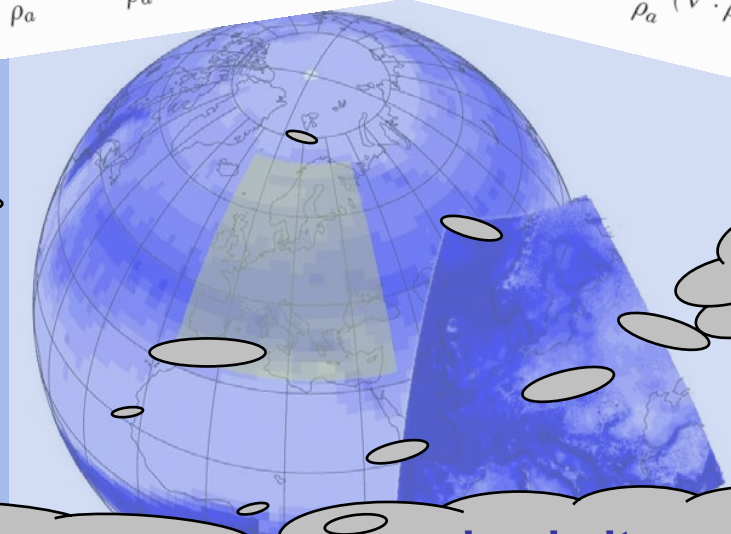
$$C_v(\Theta) \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_t(\Theta) \frac{\partial T_s}{\partial z} \right]$$

## Niederschlagsphysik

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

## Bodenwasserinfiltration

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



# Gekoppeltes Modellsystem

## Vielfältig eingesetzt am IMK-IFU

- 24-48-72h Hochwasservorhersage Alpenraum (Ammer EZG)
- Abschätzung aktuell und zukünftig erwartetes

### Hochwasserrisiko Alpenraum

- 1) Ammer EZG
- 2) Chiemgau

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

### Wasserverfügbarkeit in semiariden Regionen

- 1) Naher Osten (Oberer Jordan)

$\Delta x \approx$  **2) Westafrika (Volta)**

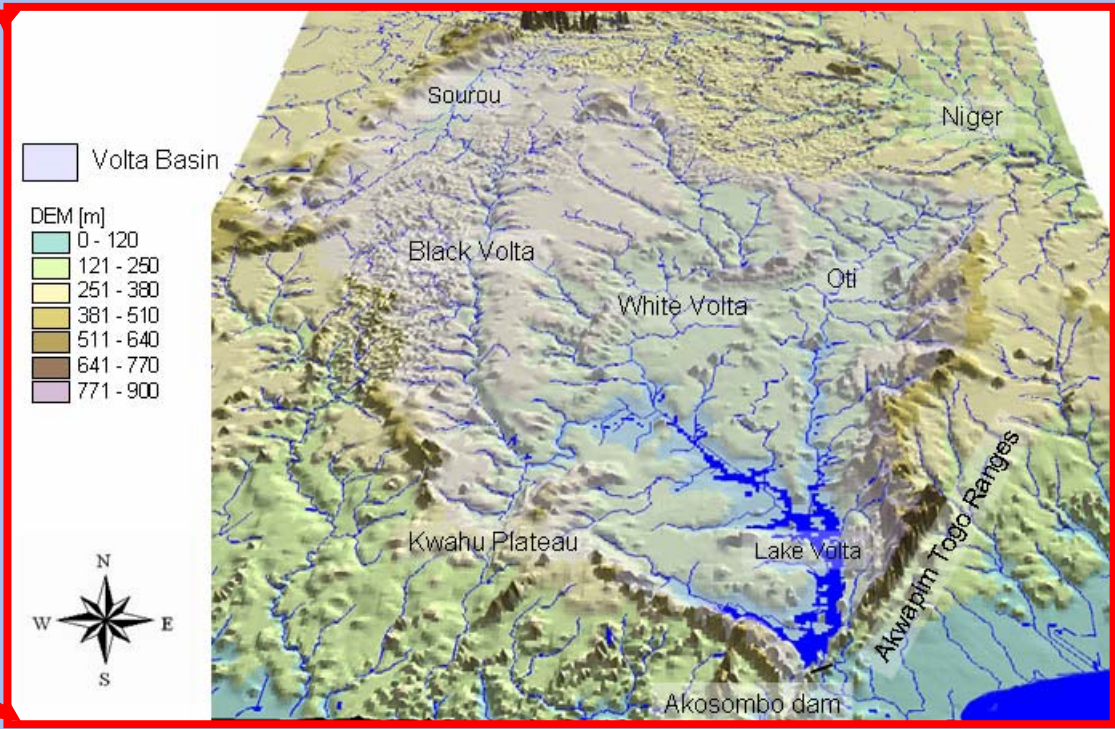
Flussgebiets-  
Hydrologie:  
 $\Delta x \approx 1 \text{ km} \dots 100 \text{ m}$



# Wasserverfügbarkeit in semiariden Regionen



# Veränderung Wasserverfügbarkeit Westafrika: Volta Becken



# Veränderung Wasserverfügbarkeit Volta Becken

- Fläche 400,000 km<sup>2</sup>
- 20+ Millionen Einwohner, 6 Anrainerstaaten
- Hoher Bevölkerungsdruck
- Hohe Niederschlagsvariabilität  
2000mm Küste - 400mm Sahel
- **+1.2°C/25 a, -25%P/25a!**

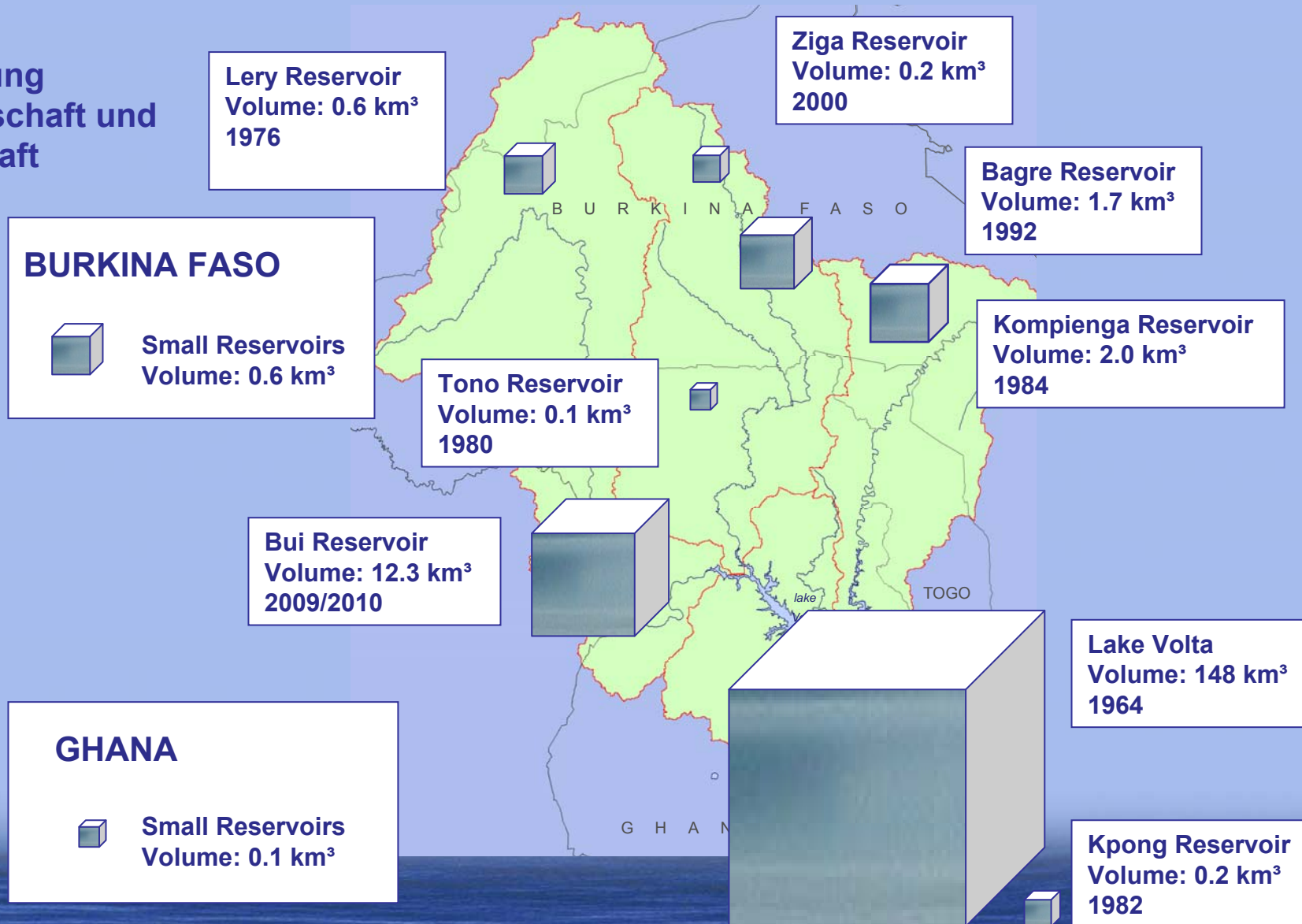


Akosombo Stausee



# Veränderung Wasserverfügbarkeit Volta Becken

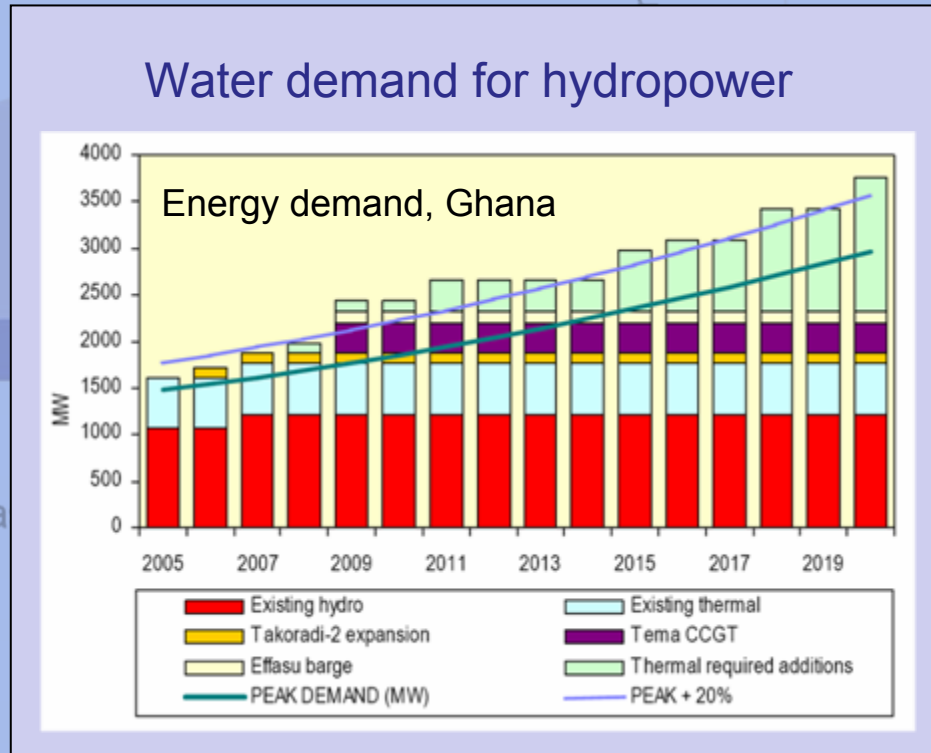
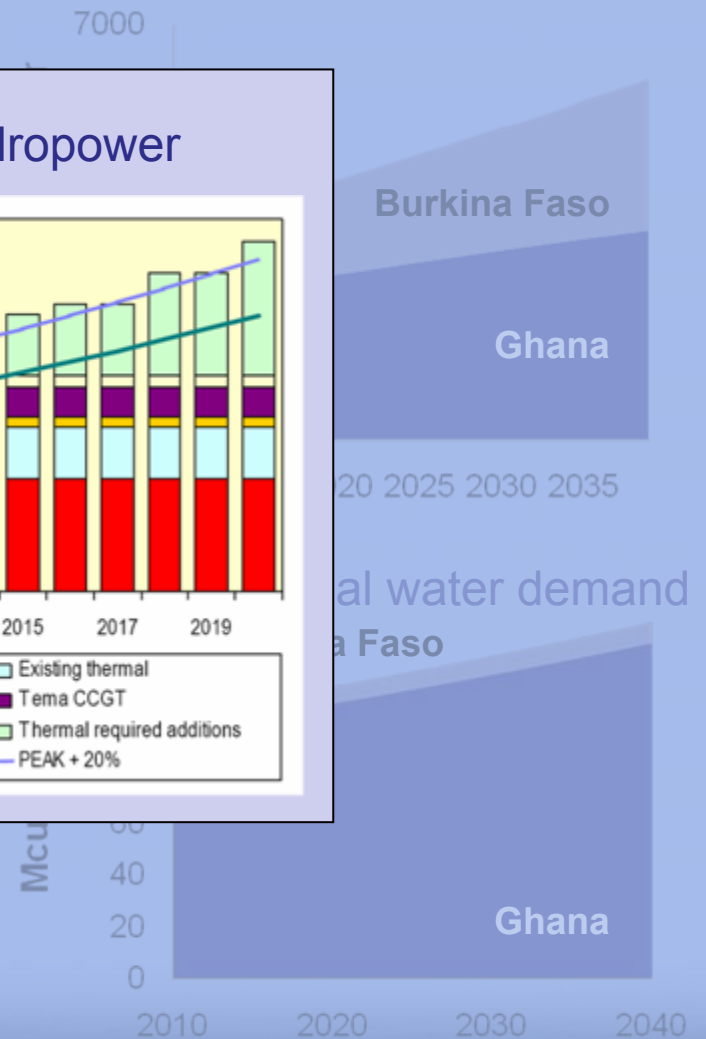
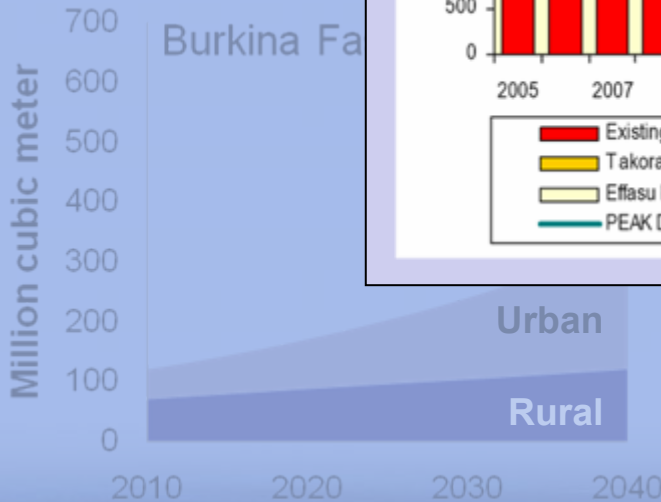
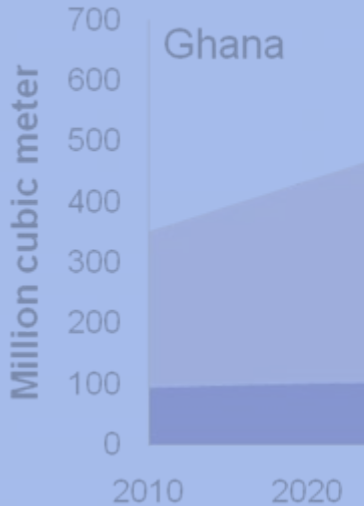
Entwicklung  
Landwirtschaft und  
Wasserkraft



# Veränderung Wasserverfügbarkeit Volta Becken

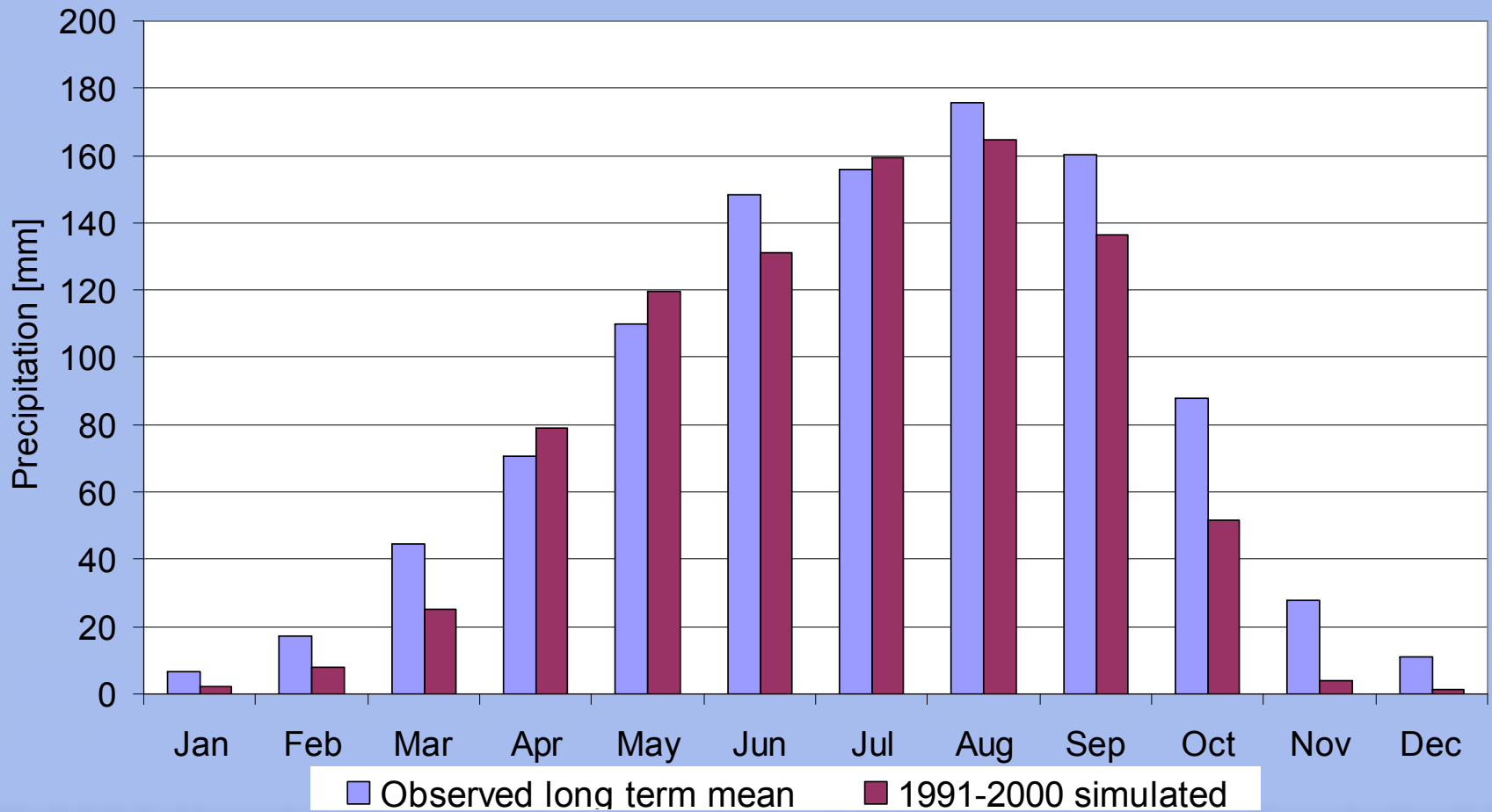
Domestic water demand

Agricultural water demand



# Veränderung Wasserverfügbarkeit Volta Becken

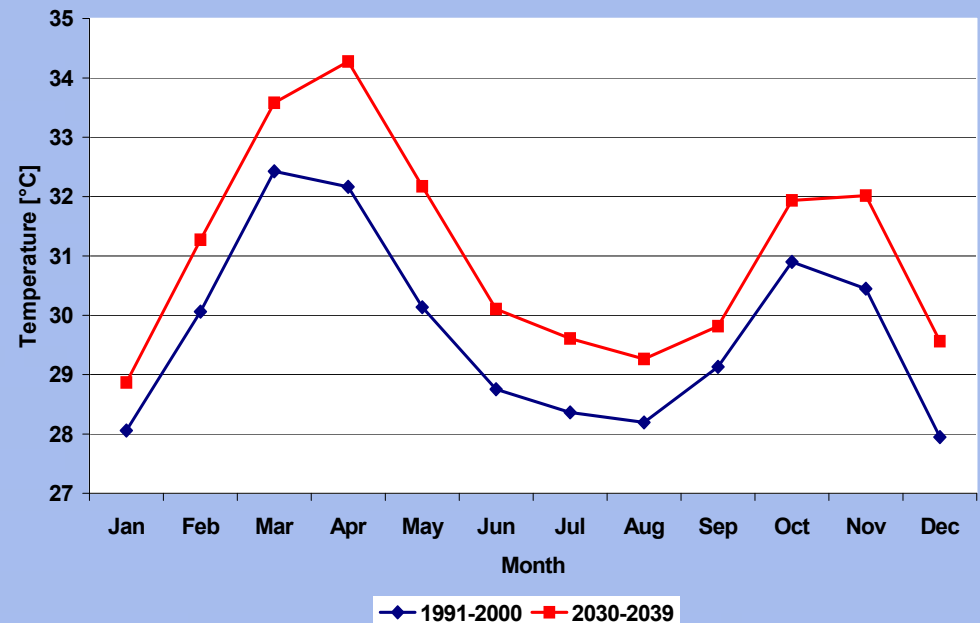
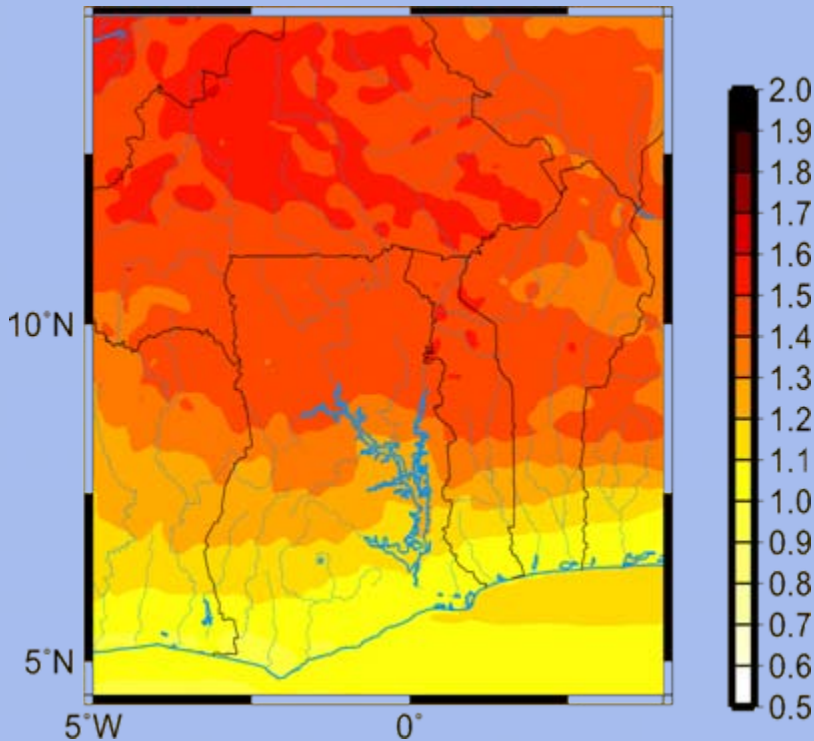
## Validation Control Run ECHAM4(IS92a)-MM5@9km





# Veränderung Wasserverfügbarkeit Volta Becken

Modellkaskade ECHAM4(IS92a)-MM5@9km



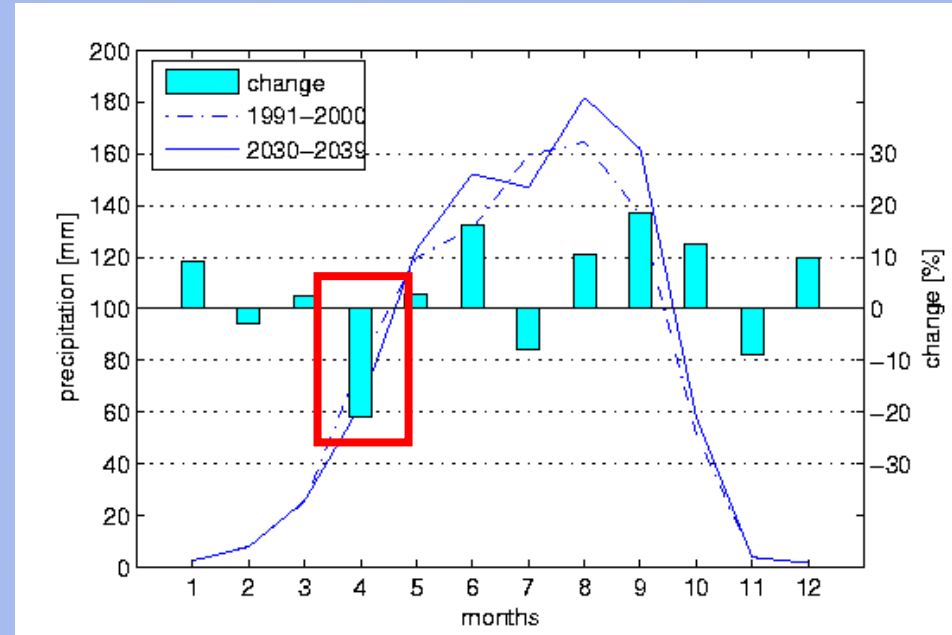
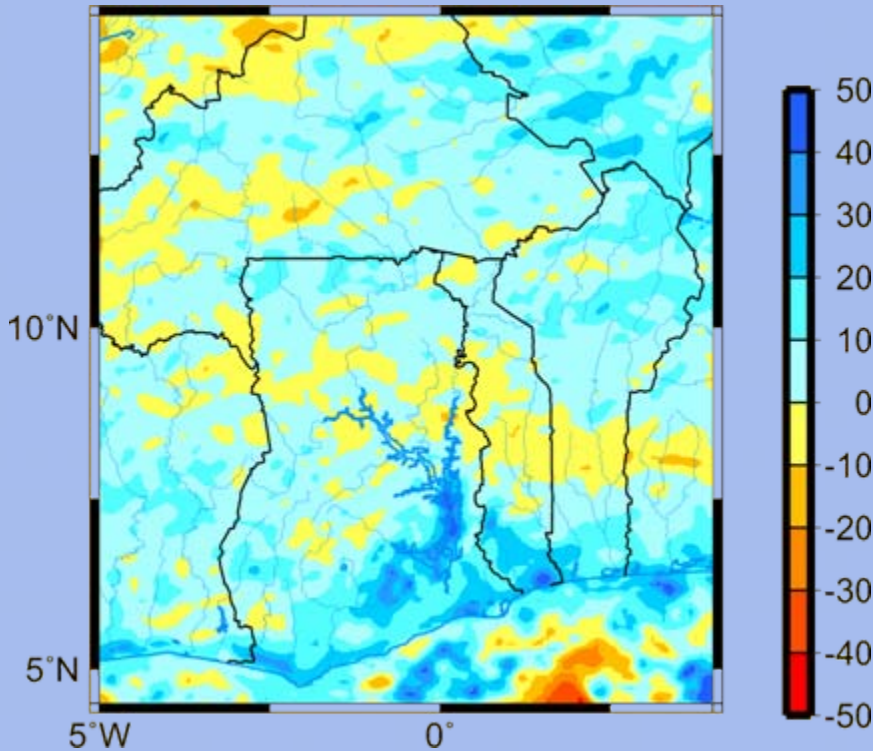
Änderung mittlere Jahrestemperatur [°C]

Mittlere Monatstemperatur [°C]  
(2030-2039 vs. 1991-2000)

# Veränderung Wasserverfügbarkeit Volta Becken

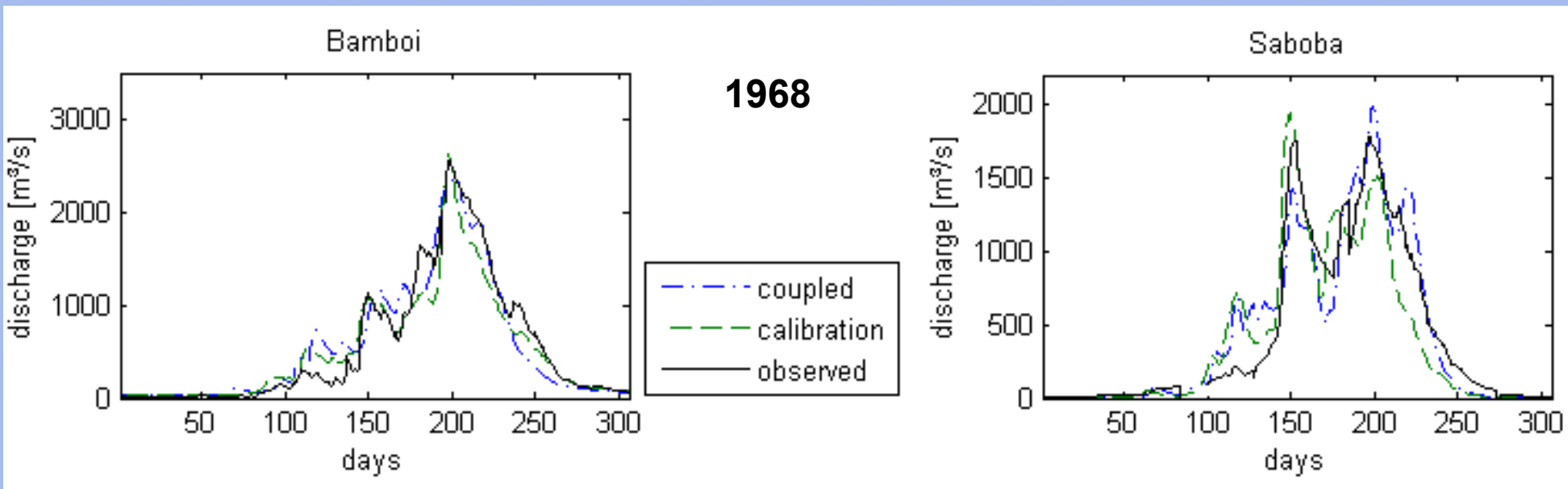
Modellkaskade ECHAM4(IS92a)-MM5@9km

## Signifikante Rückgänge im April



# Veränderung Wasserverfügbarkeit Volta Becken

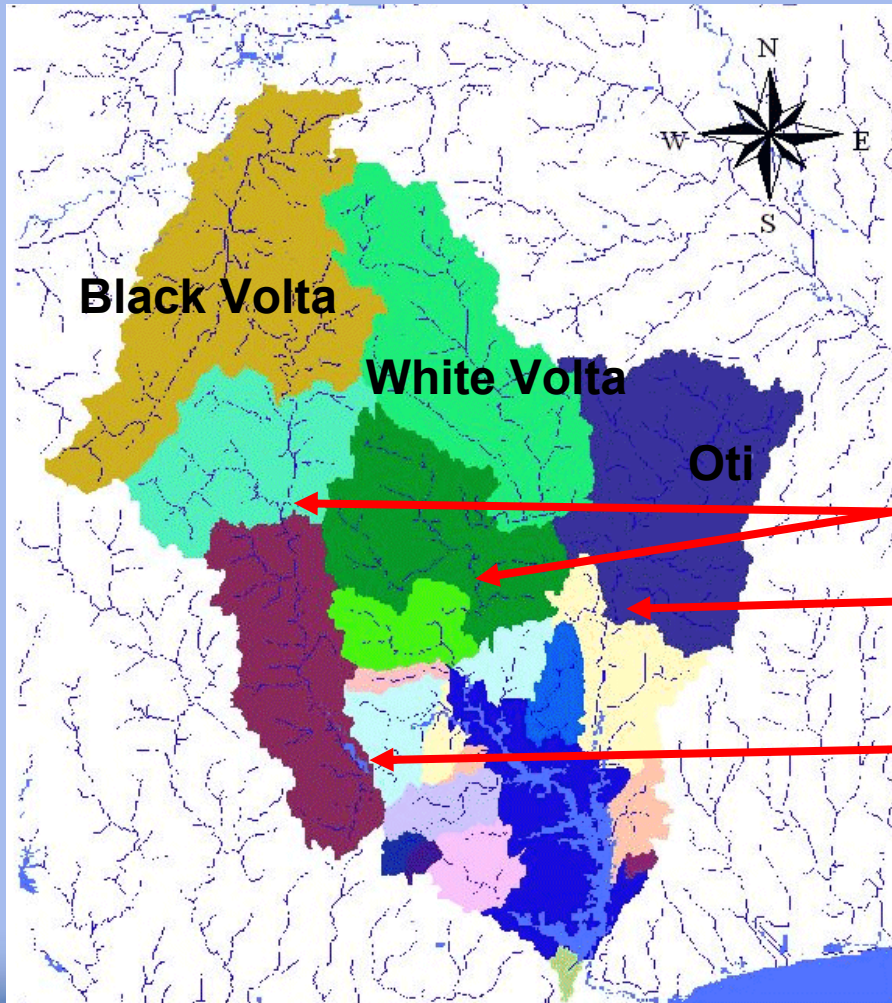
Gekoppeltes Modellsystem MM5@9km-WaSiM@1km



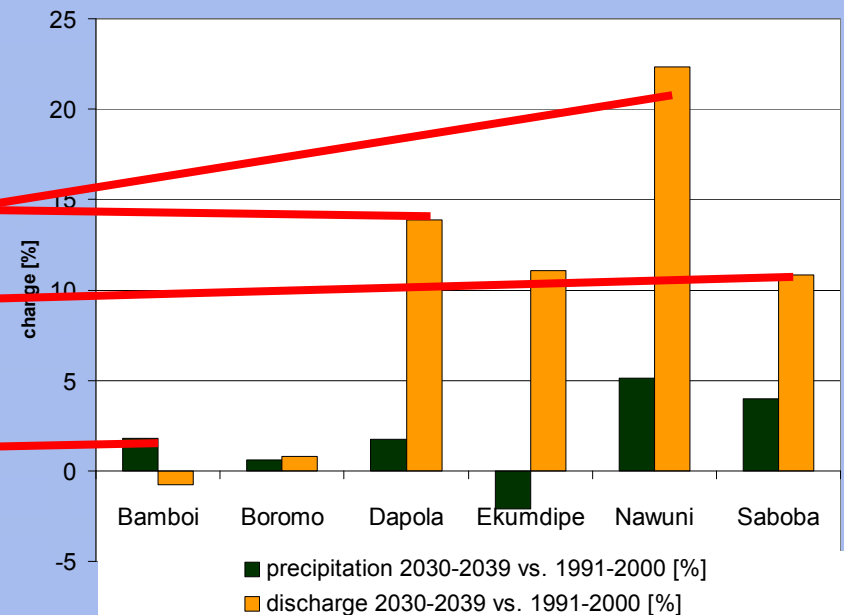
	Bamboi	Boromo	Dapola	Nawuni	Pwalugu	Saboba
NSE(d)	0.95	0.31	0.82	0.84	0.3	0.85
NSE(m)	0.84	0.74	0.85	0.79	0.33	-

# Veränderung Wasserverfügbarkeit Volta Becken

Gekoppeltes Modellsystem MM5@9km-WaSiM@1km

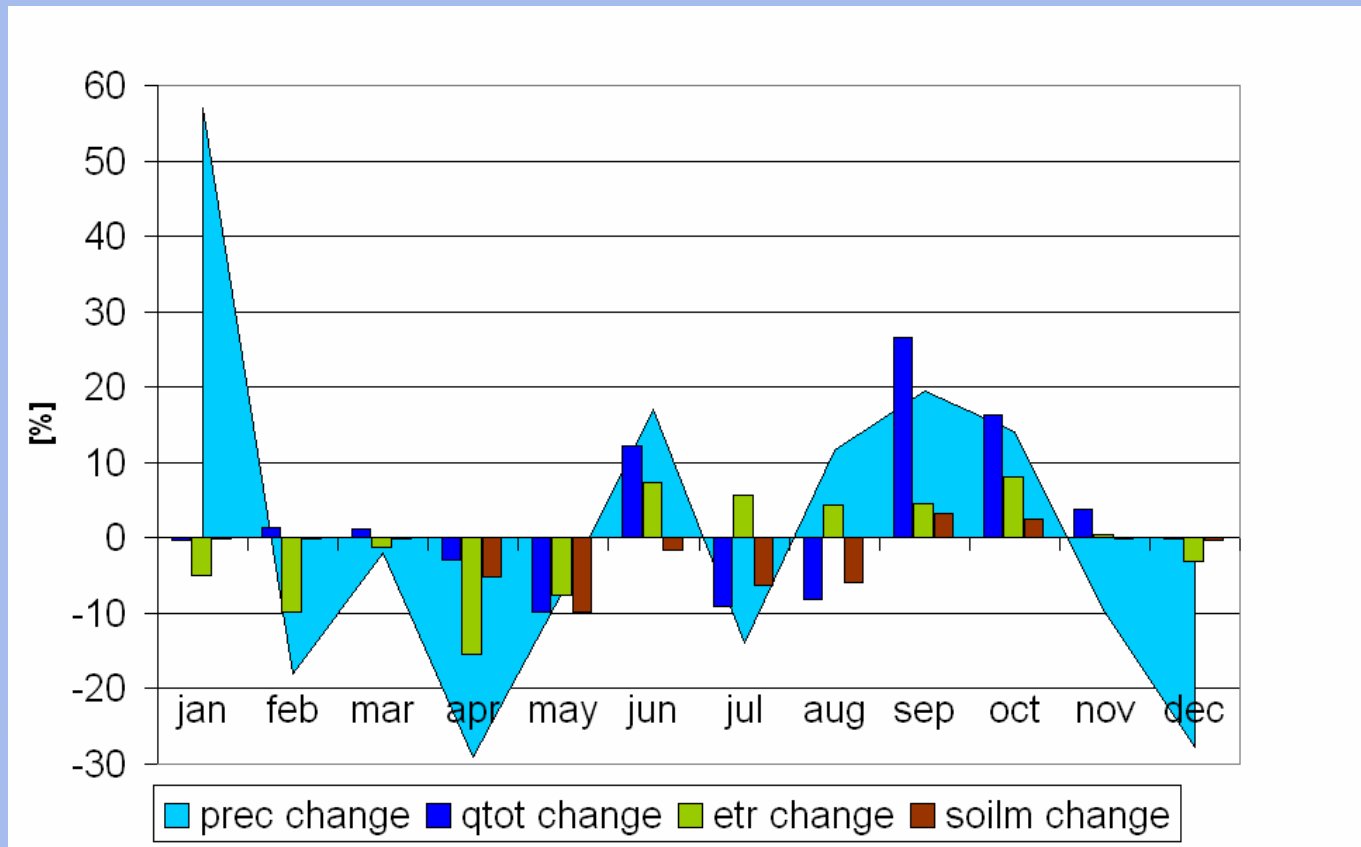


**Nonlinear & amplified response of change in discharge to change in precipitation**



# Veränderung Wasserverfügbarkeit Volta Becken

Gekoppeltes Modellsystem MM5@9km-WaSiM@1km



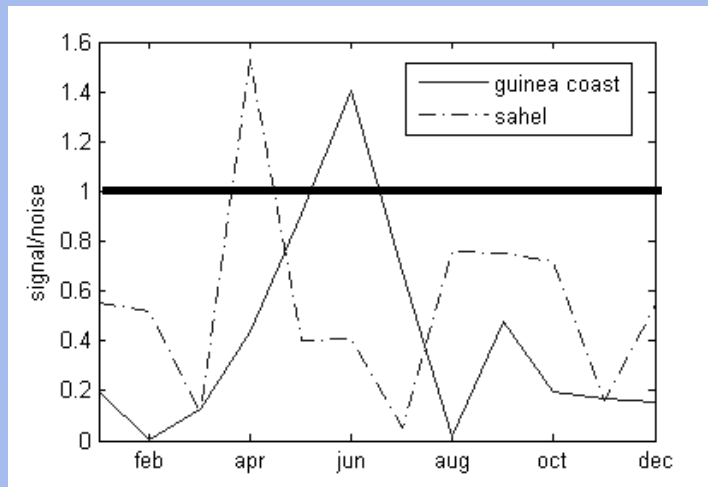
**Veränderung in der saisonalen Verteilung der Wasserverfügbarkeit**

# Veränderung Wasserverfügbarkeit Volta Becken

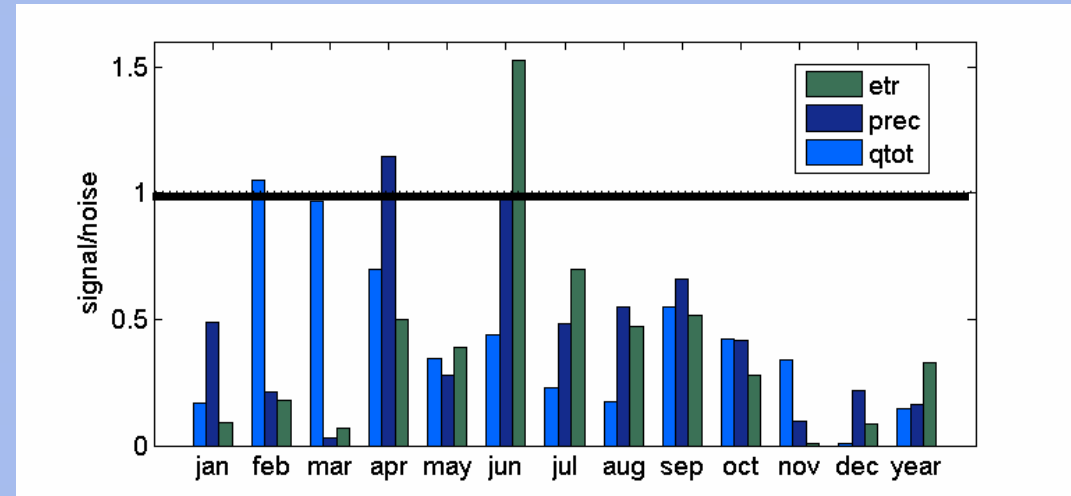
Gekoppeltes Modellsystem MM5@9km-WaSiM@1km

Signal to Noise ratio:

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



SN für Niederschlag

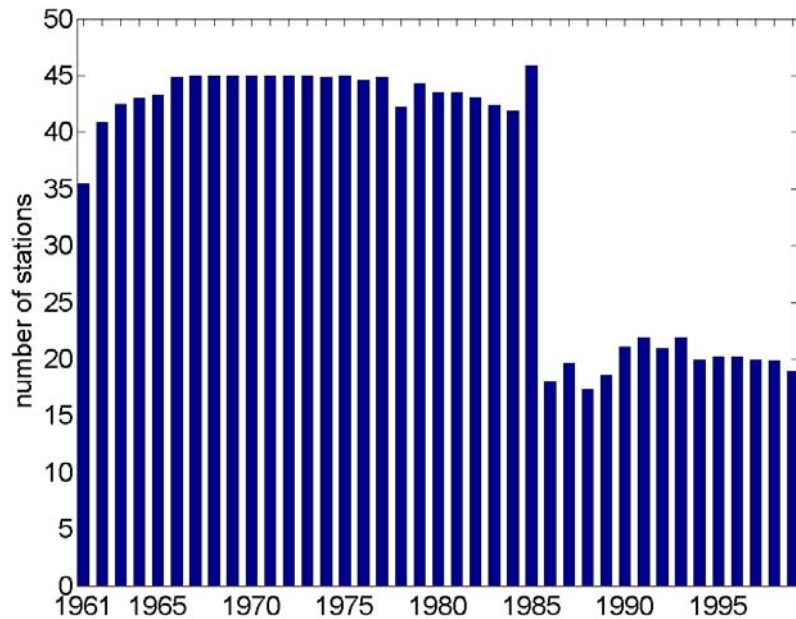


SN für Niederschlag, Evapotranspiration & Abfluss

**Signal Klimaänderung meist innerhalb der inter-annuellen Variabilität**

# Unsicherheiten

⇒ Niederschlagsinterpolation in datenschwacher Region



Niederschlag:

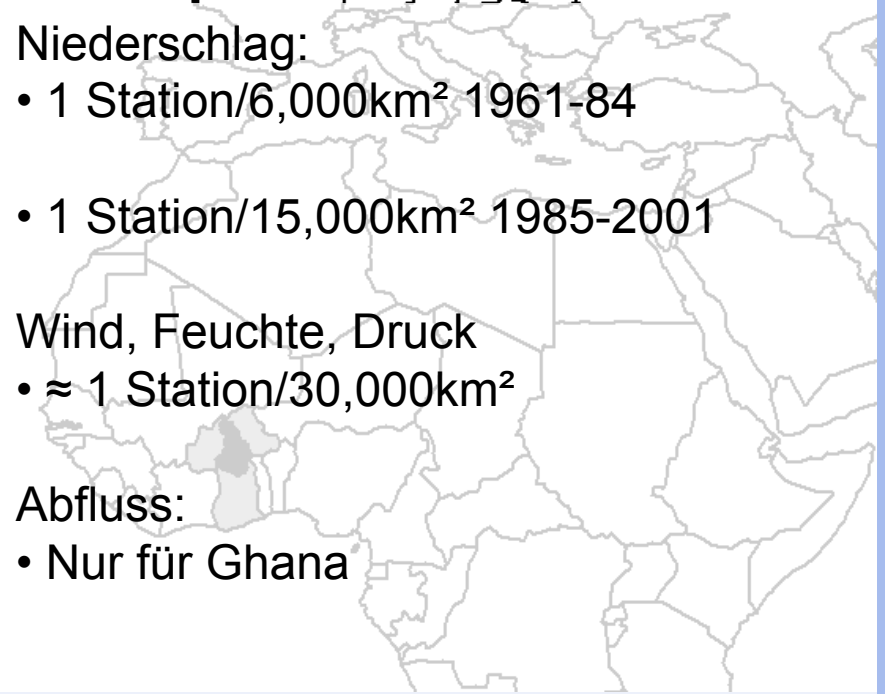
- 1 Station/6,000km<sup>2</sup> 1961-84
- 1 Station/15,000km<sup>2</sup> 1985-2001

Wind, Feuchte, Druck

- ≈ 1 Station/30,000km<sup>2</sup>

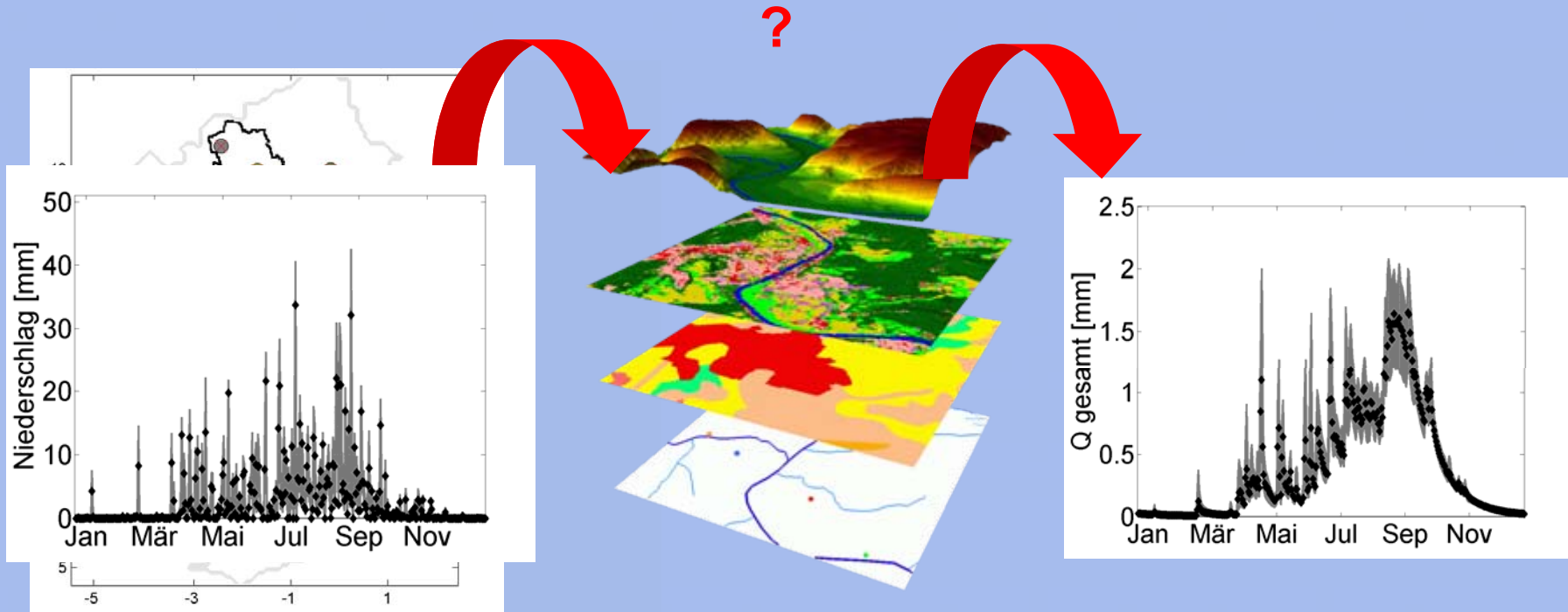
Abfluss:

- Nur für Ghana



# Fortpflanzung von Niederschlagsunsicherheiten

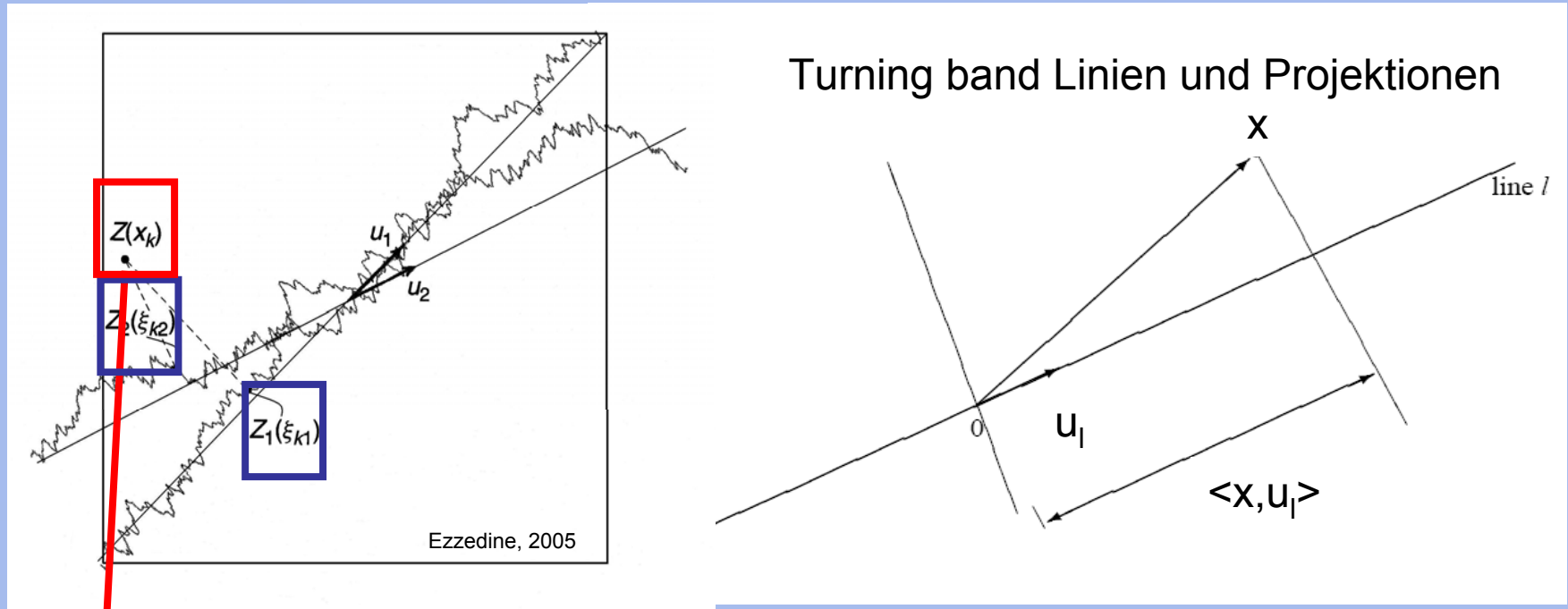
## Einzugsgebiet Weißer Volta





# Fortpflanzung von Niederschlagsunsicherheiten

## Turning Band Methode



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

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

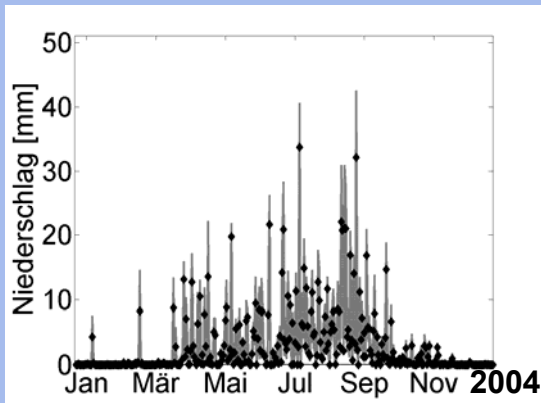
$Z^*(x)$ : **Kriging**-Schätzer von Z an x basierend auf den Messungen

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

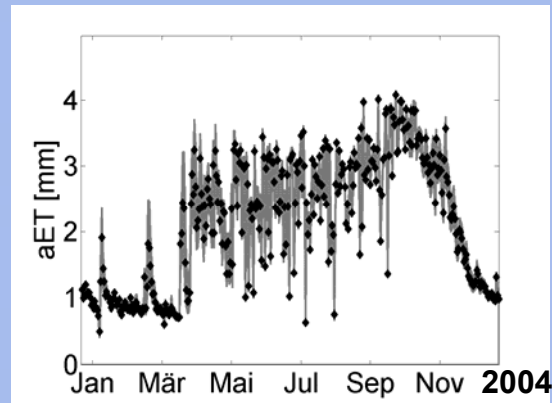
$Z_S^*(x)$ : **Kriging**-Schätzer von  $Z_S$  an x basierend auf den unkonditioniert simulierten Werten an den Messpunkten

# Fortpflanzung von Niederschlagsunsicherheiten

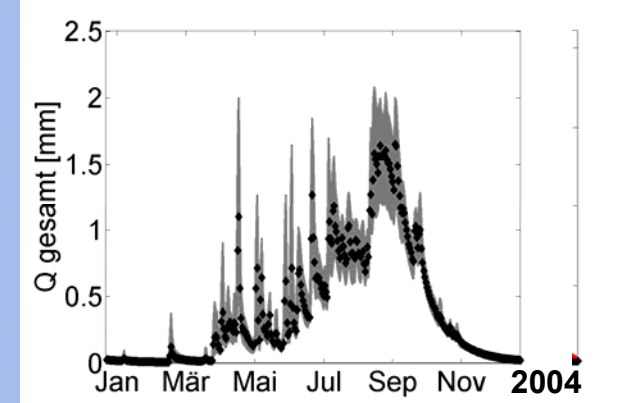
## Niederschlag



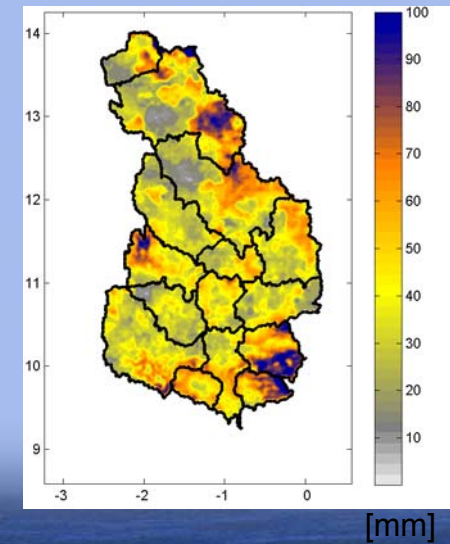
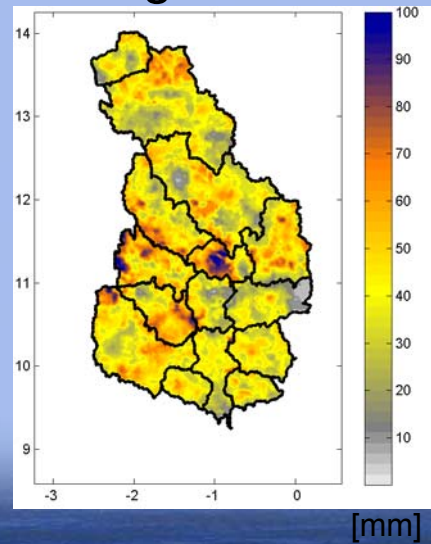
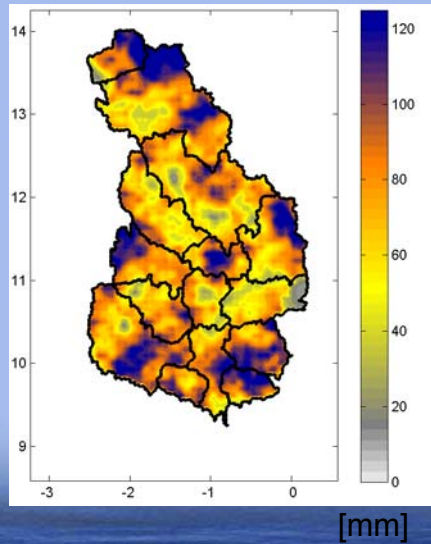
## $ET_a$



## $Q_{gestingt}$



## Räumliche Standardabweichung



# Zusammenfassung

- Klimasensitive Regionen: globales Änderungssignal **regional amplifiziert**
- Einsatz von **skalen- und kompartimentsübergreifenden gekoppelten Modellsystemen** zur hochaufgelösten Quantifizierung des Wasserhaushalts und zur Entscheidungsunterstützung
- **Westafrika**: massiver **Rückgang** der **Niederschläge** zu **Beginn der Regenzeit**
- Größte **Unsicherheit** in der hydrologischen Simulation: flächendifferenzierter Niederschlag
- *Turning Band* Methode zur Quantifizierung von **Unsicherheitsspannen**
  - ⇒ Zentrale Voraussetzung für Entscheidungsunterstützung und **nachhaltigem Wassermanagement**

A blue-tinted image featuring a crown with a central jewel, set against a background of water ripples. The crown is positioned in the center, and the water ripples create a sense of depth and movement. The overall color scheme is a gradient of blues, from light to dark.

**Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit**

**und an Sven Wagner und Gerlinde Jung**

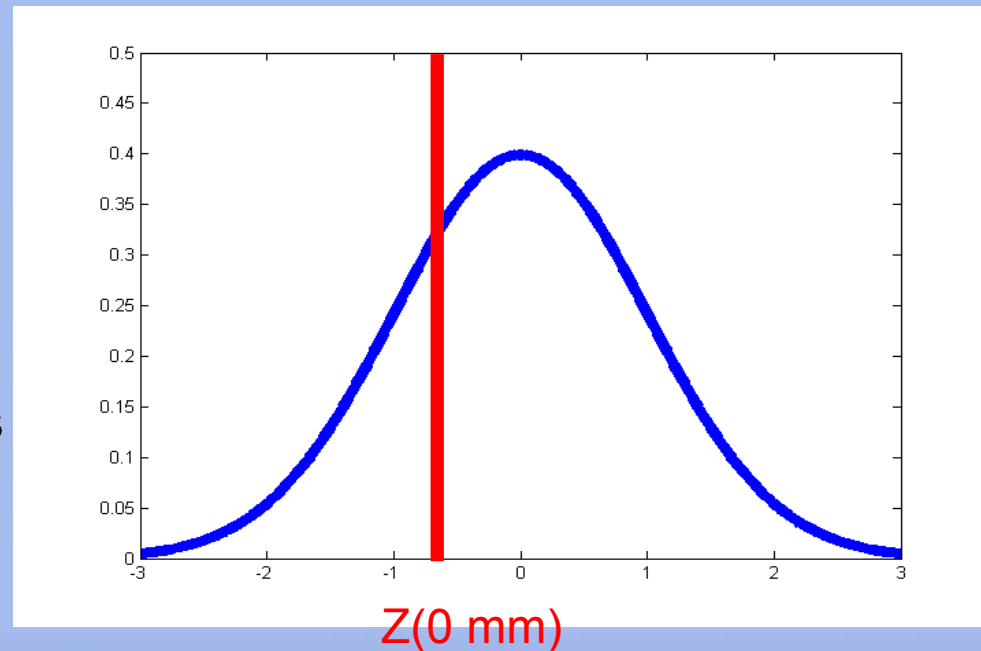
# Normal Score Transformation

- Transform daily precipitation data to Gaussian distribution
- Problem: no negative precipitation exists
- Standard normal distribution:  $Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$

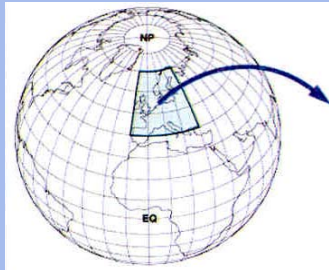
Using random numbers (normally distributed &  $X \leq 0$  mm) for  $Z(0 \text{ mm})$ :

⇒ fill the curve left of  $Z(0 \text{ mm})$

- Using transformed variable:
  - Calculate variograms
  - Perform turning band simulations
- *Creating conditional fields*
- Results are transformed back to original scale



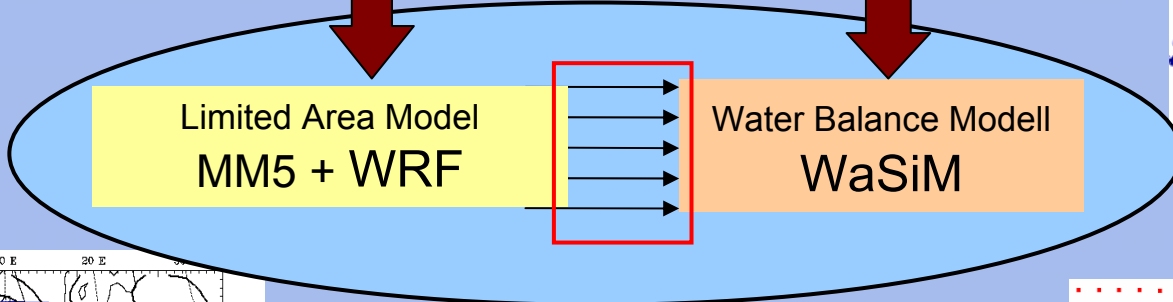
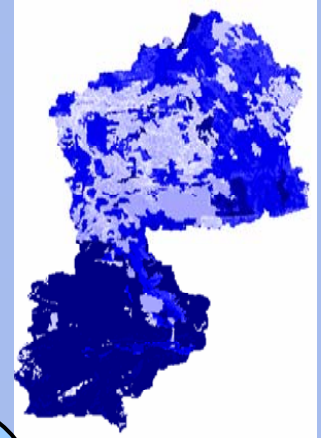
# Gekoppeltes Modellsystem zur operationellen Hochwasservorhersage



Global Forecasting System  
**NCEP GFS (AVN)**

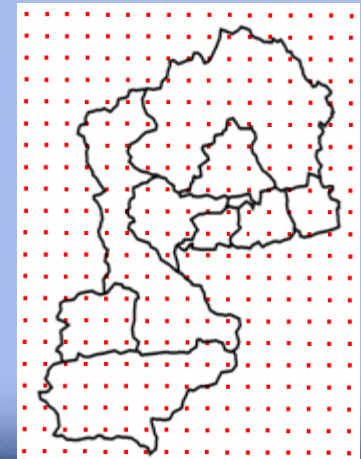
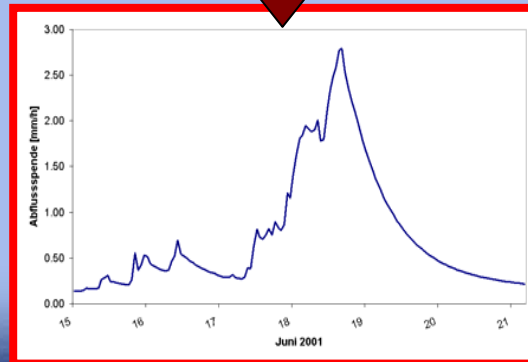
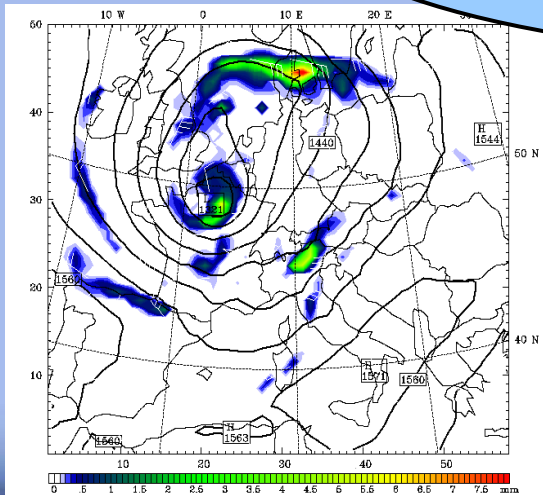
Online available  
Observed Met-station  
data

2-week WaSiM-run to  
provide **initial conditions**



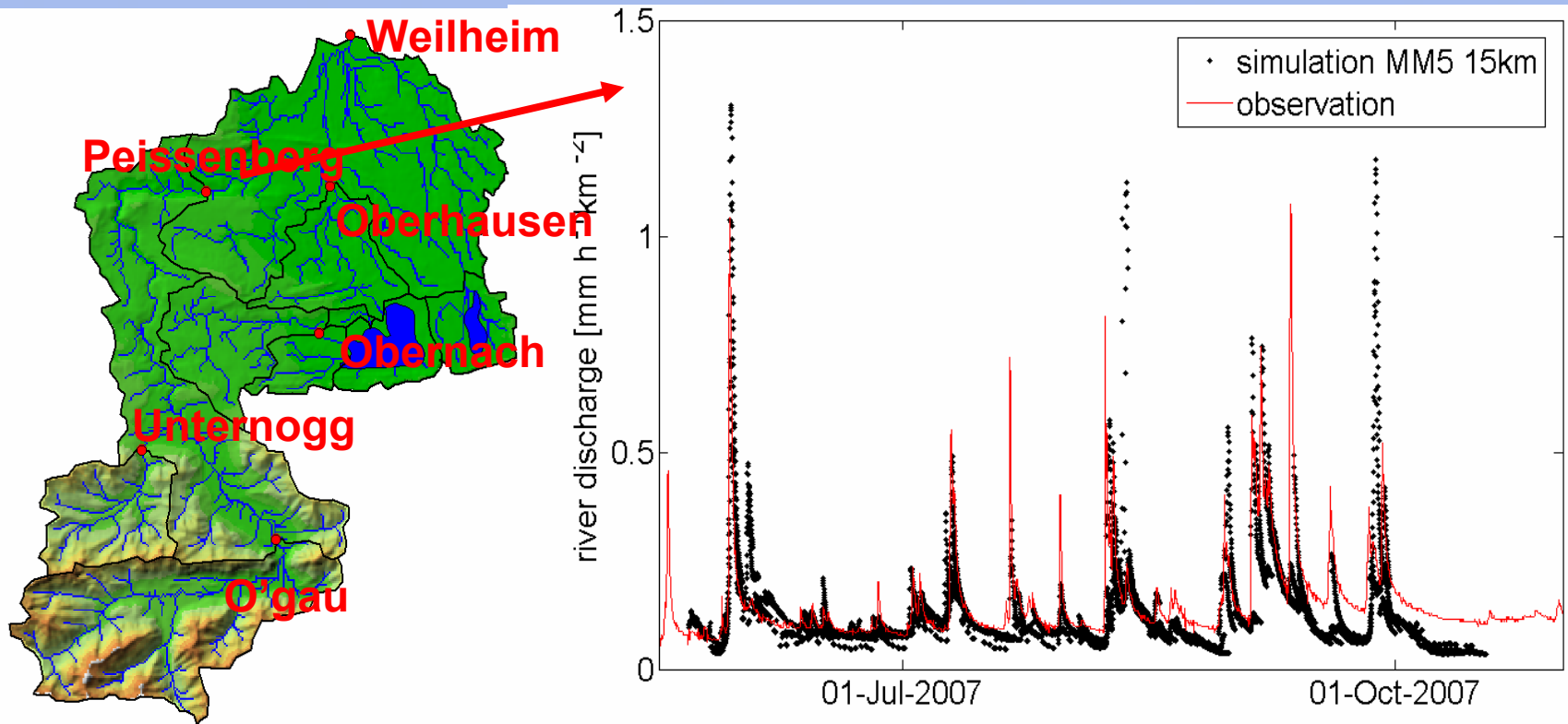
Limited Area Model  
**MM5 + WRF**

Water Balance Modell  
**WaSiM**



# Gekoppelte Niederschlags-Abflussvorhersage

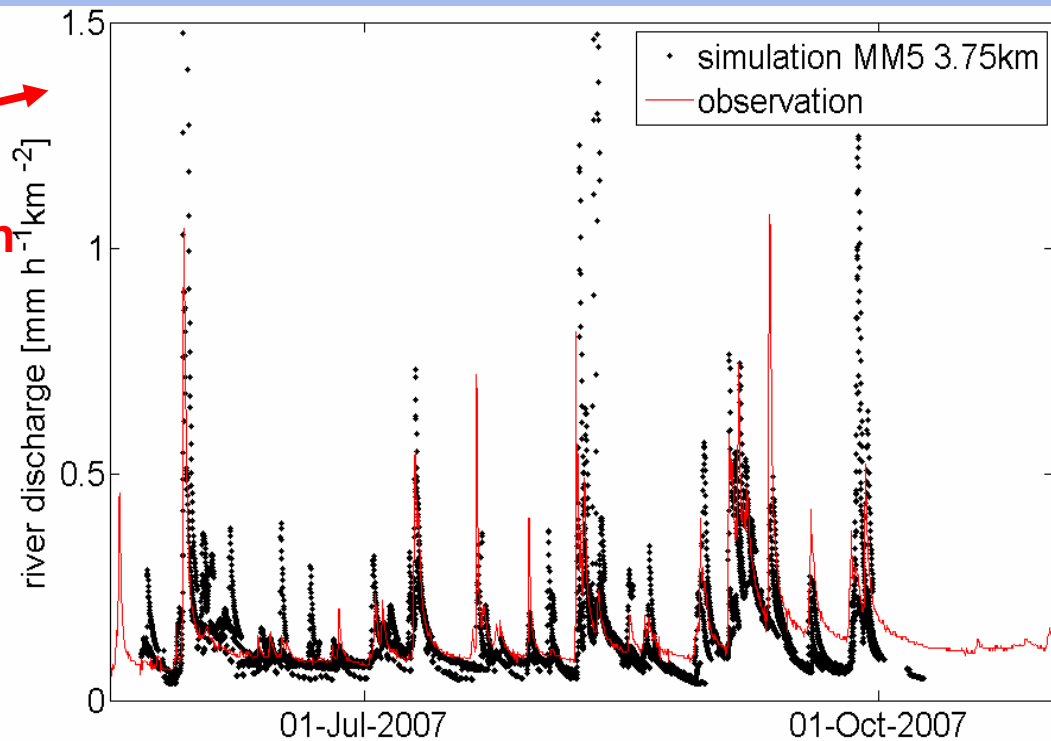
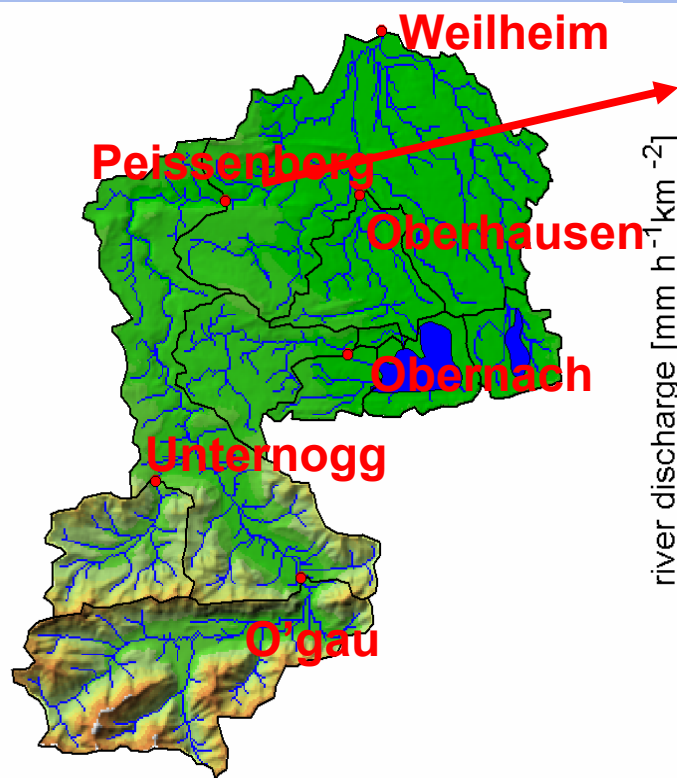
Operationelle Vorhersage 24h-48h-72h  
Modellkaskade MM5@15km – WaSiM@100m





# Gekoppelte Niederschlags-Abflussvorhersage

Operationelle Vorhersage 24h-48h-72h  
Modellkaskade MM5@3.75km – WaSiM@100m



# Klimaänderung & Wasserhaushalt Alpenraum: Ammer

## Ammer EZG

- Fläche: 710 km<sup>2</sup>
- Komplexe Orographie
- Höhe: 530-2190m N.N.
- Mittlerer Niederschlag: 1400 mm/a
- Tage mit Schneebedeckung: 127/a
- Temperaturgradient:  $\approx 0.6 \text{ }^\circ\text{C}/100\text{m}$
- Flächendifferenzierte hydrologische Modellierung  $\Delta x, \Delta y = 100\text{m}$

München

Garmisch

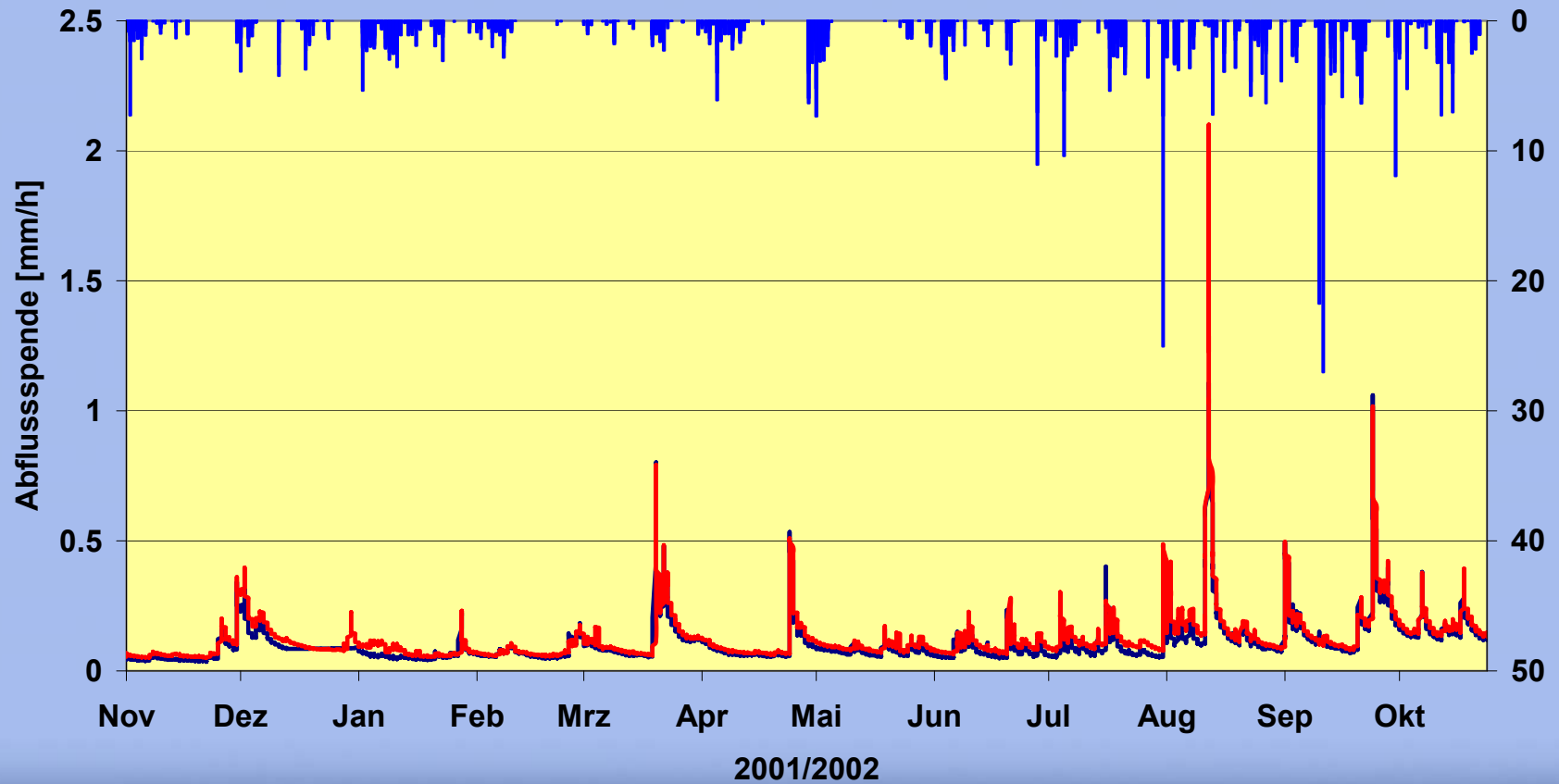
Innsbruck



# Klimaänderung & Hochwasserrisiko Alpenraum: Ammer

## Wasserhaushaltssimulation mit Model WaSiM

Weilheim

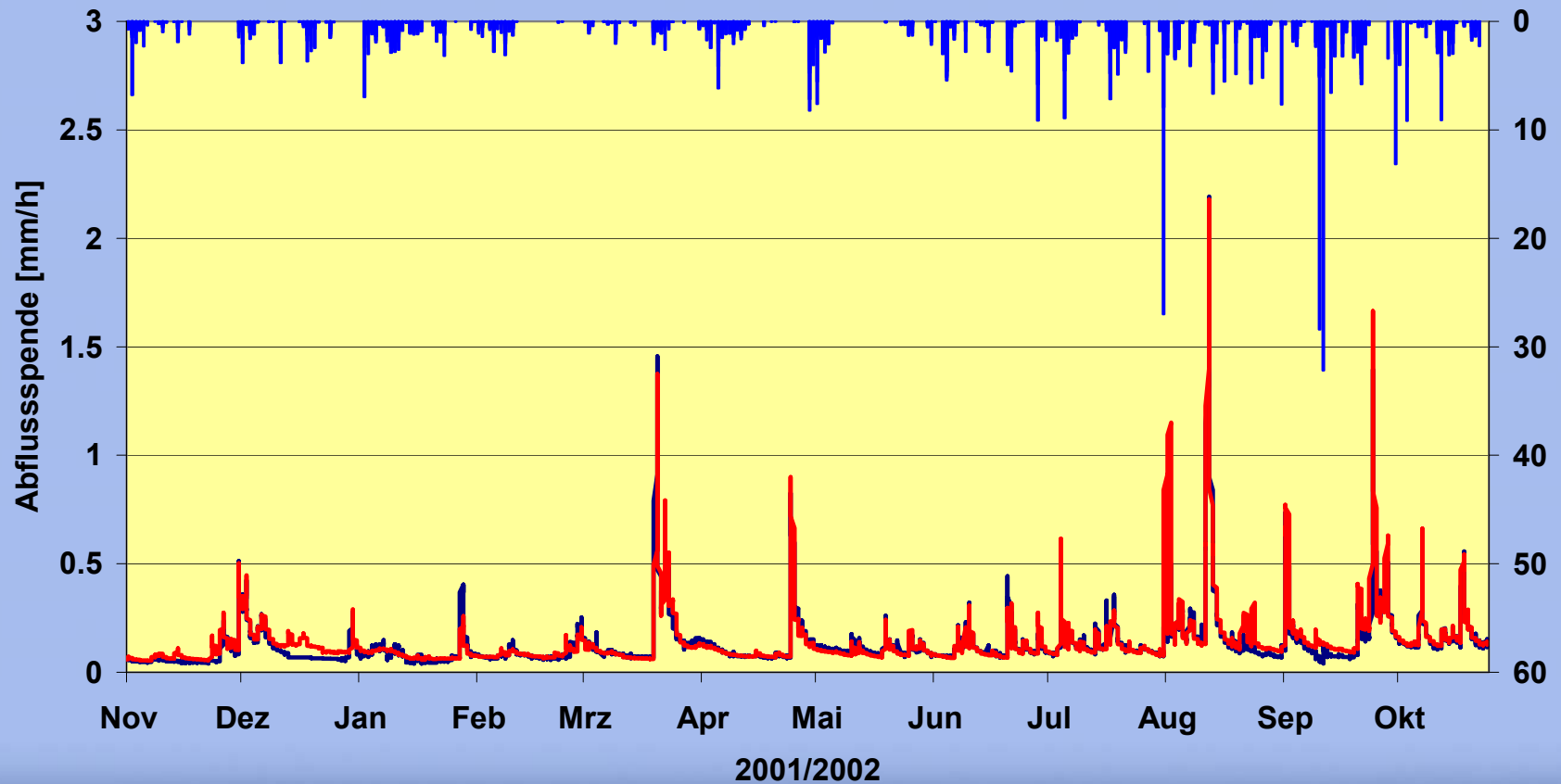


■ Niederschlag — Beobachtung — Simulation

# Klimaänderung & Hochwasserrisiko Alpenraum: Ammer

## Wasserhaushaltssimulation mit Model WaSiM

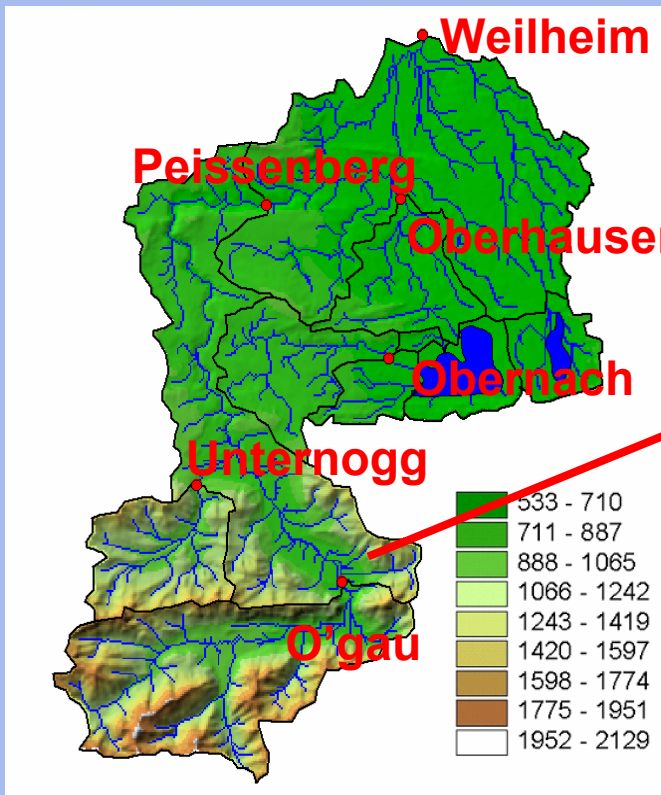
Peißenberg



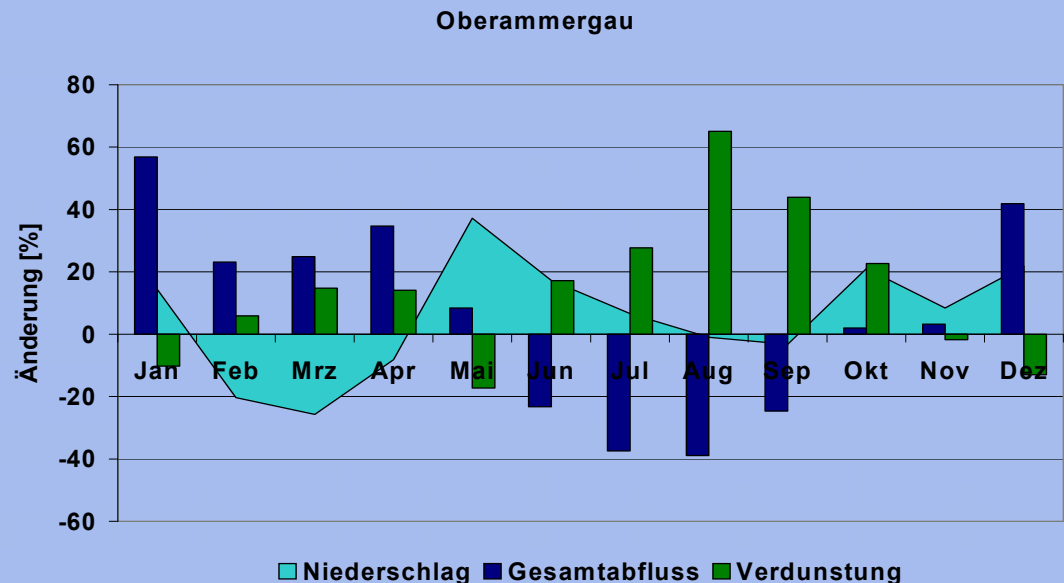
■ Niederschlag — Beobachtung — Simulation

# Klimaänderung & Hochwasserrisiko Alpenraum: Ammer

Modellkaskade ECHAM4(IS92a) – MM5@4km– WaSiM@100m



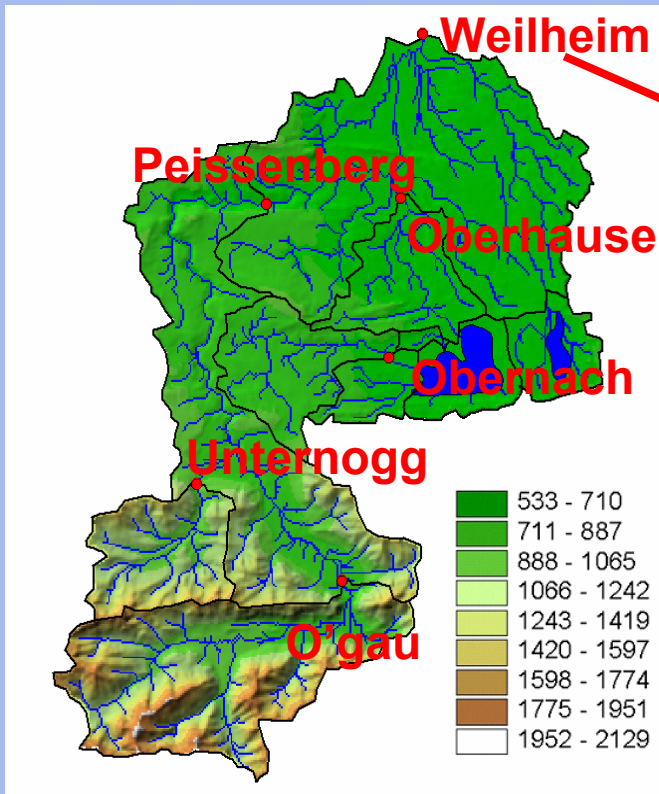
Änderung 1990-99 vs. 2030-39 (Szenario IS92a)



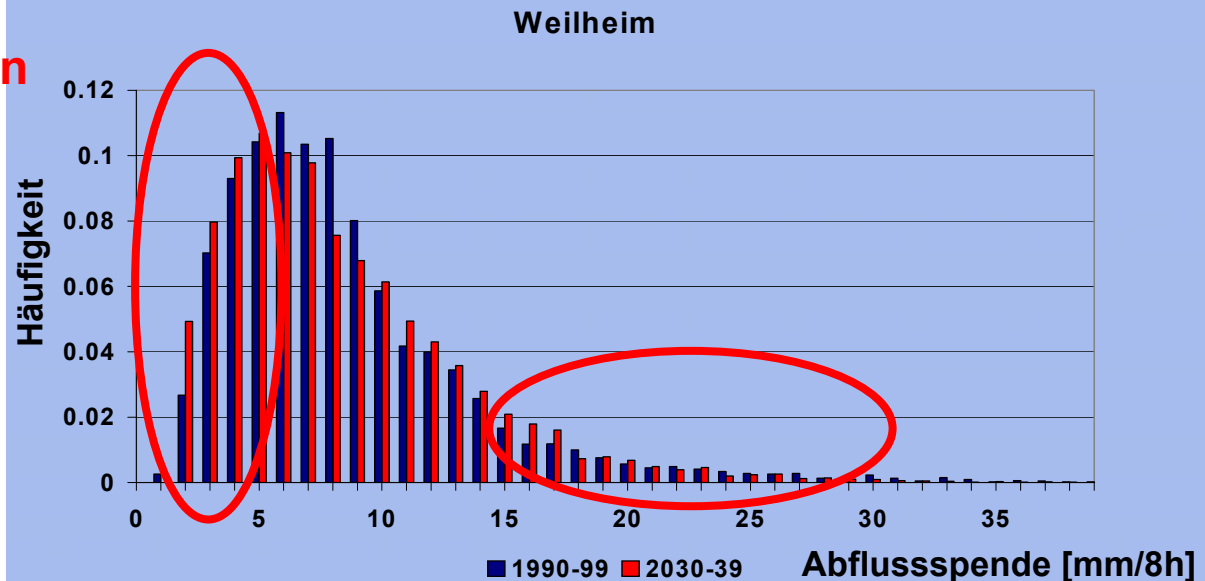
**Zunahme Winter-, Verminderung der Sommerabflüsse**

# Klimaänderung & Hochwasserrisiko Alpenraum: Ammer

Modellkaskade ECHAM4(IS92a) – MM5@4km– WaSiM@100m



Änderung 1990-99 vs. 2030-39 (Szenario IS92a)



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

# Abschätzung zukünftiges Klima und Wasserverfügbarkeit

## Globale Szenarien

