

Klimawandel im Chiemgau und Auswirkungen auf den regionalen Wasserhaushalt

8. Mai 2008

A. Marx, M. Mast, R. Knoche, H. Kunstmann
Forschungszentrum Karlsruhe, IMK-IFU, Garmisch-Partenkirchen

Nachweis zum Klimawandel erbracht!



Wasser – Verbrauch – Verfügbarkeit

Bestandsaufnahme: Der beobachtete Klimawandel

Klimasimulationen: Das Klima der Zukunft

Auswirkungen auf den Wasserhaushalt

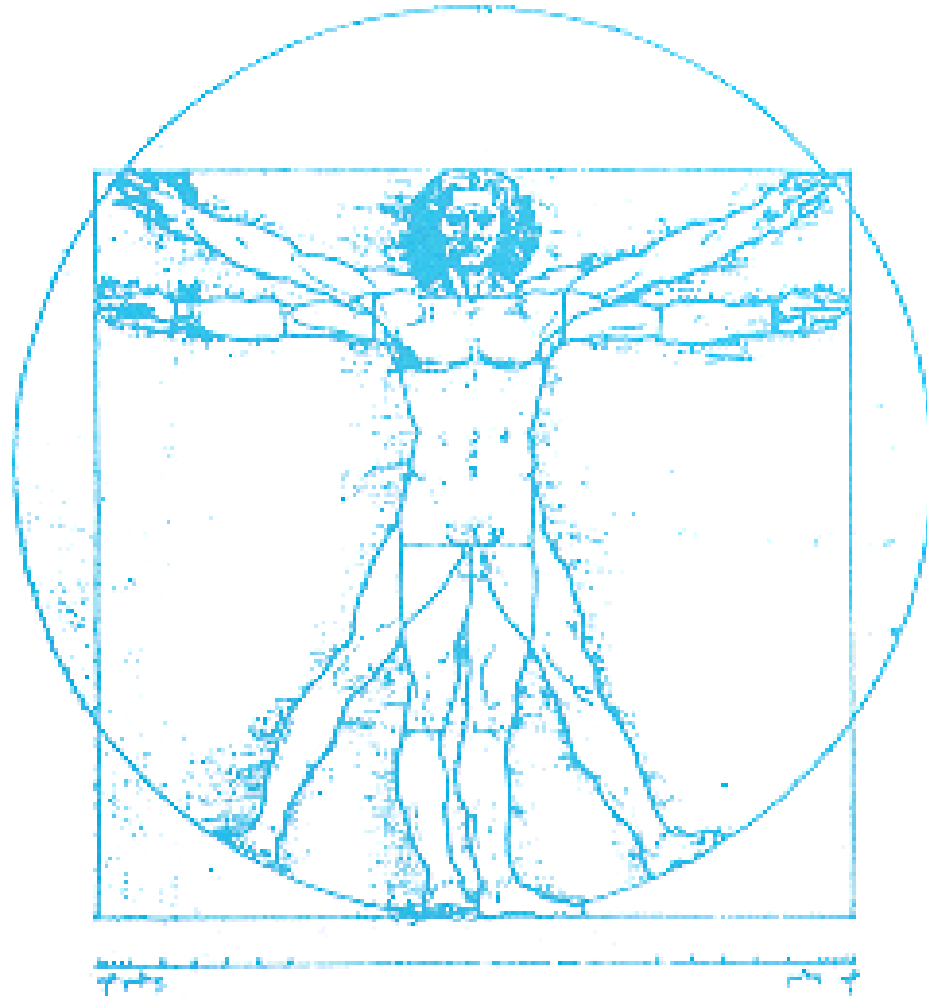
Die Erde - eine Wasserwelt



70% Ozean

30% Land

Der Mensch - ein Wasserwesen



60-70% Wasser

Rest Feststoff



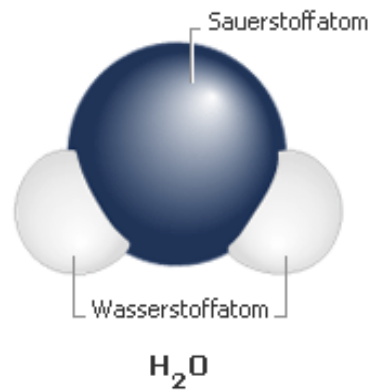
Klima und Wasser: mehr als H₂O



Hochwasser

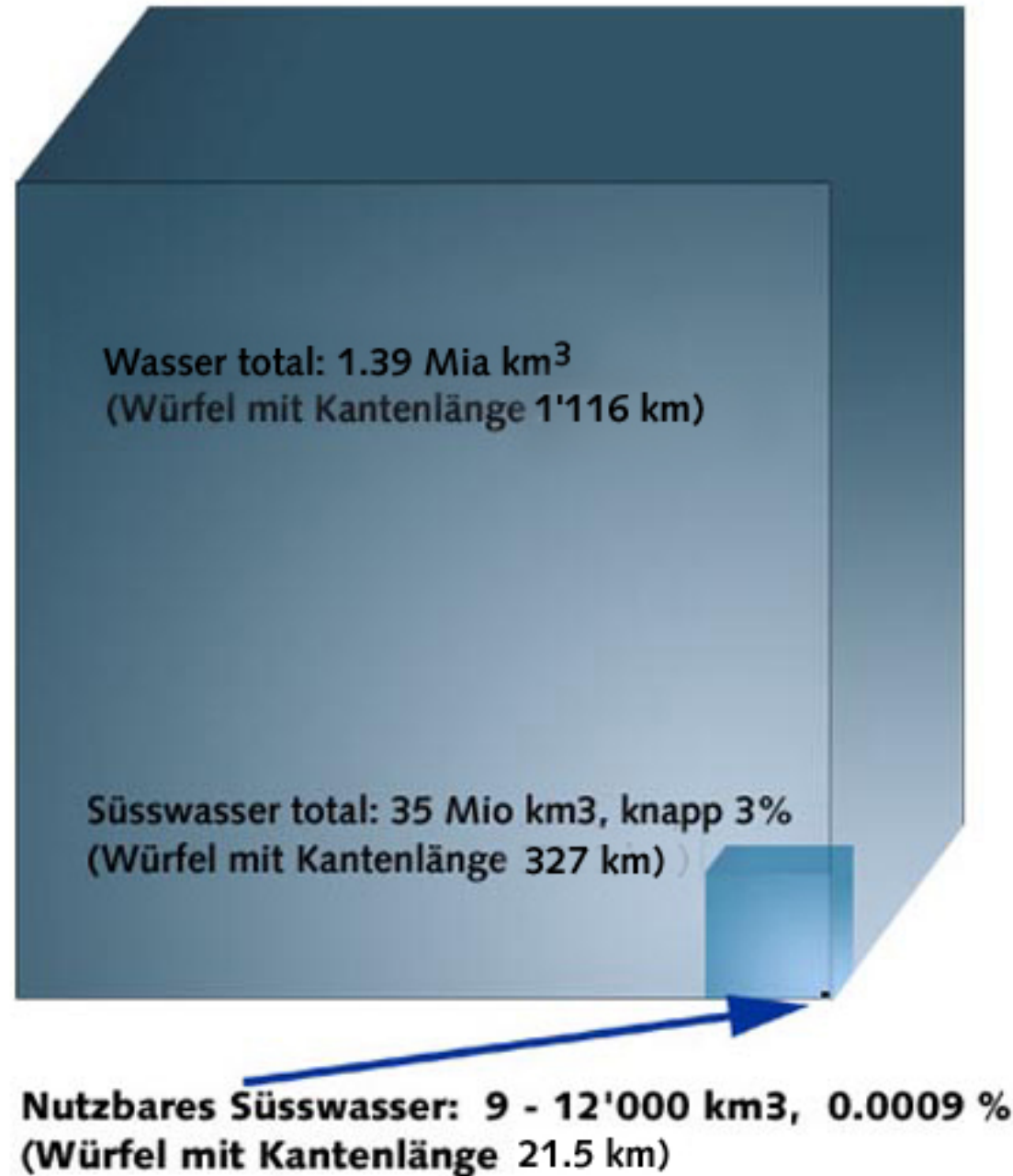


Wassermangel



- Wie beeinflussen Klimaänderung und Landnutzungsänderung die Wasserverfügbarkeit und das Hochwasserrisiko?
- Welche Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel sind von der Wasserwirtschaft durchzuführen?
- Wie können Flussgebiete nachhaltig bewirtschaftet werden?
- Wie können Hochwassersituationen besser vorhergesagt werden und die Auswirkung von hydrometeorologischen Extremereignissen gemildert werden?
- Wie kann eine steigende Weltbevölkerung mit der begrenzten Ressource Süßwasser versorgt werden?





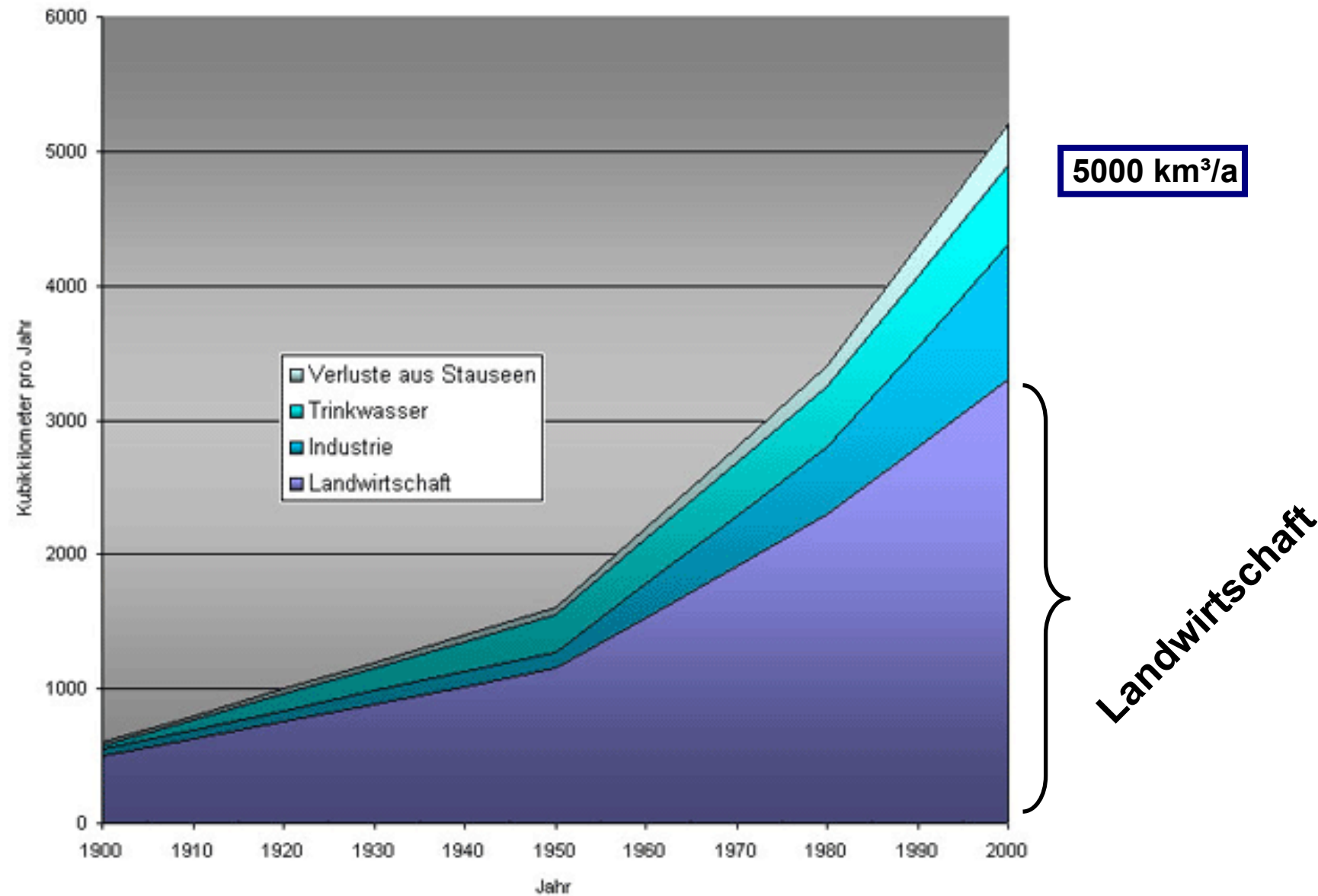
Klima und Wasser: die Fakten

Weltwasser

- Niederschläge über Land: 110,000 km³/a (Würfel mit $\Delta x=48\text{km}$)
 - Verdunstung:
 - 50,000 km³/a natürliche Vegetation
 - 18,000 km³/a Regenfeldanbau
 - Flüsse:
 - 42,000 km³/a
 - ⇒ davon nur 13,000 km³/a für Menschen zugänglich
 - ⇒ davon 2.000 km³/a Bewässerung
 - Grundwasserentnahme 800 km³/a, davon 200 km³/a nicht nachhaltig
- ⇒ **Verbrauchte Wassermenge Landwirtschaft** $\approx \frac{1}{2}$ **Verdunstung natürliche Vegetation**



Globaler jährlicher Wasserverbrauch



Bereits $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{2}$ der weltweit verfügbaren Süßwasservorräte werden genutzt!

Wasserverfügbarkeit und Weltbevölkerung

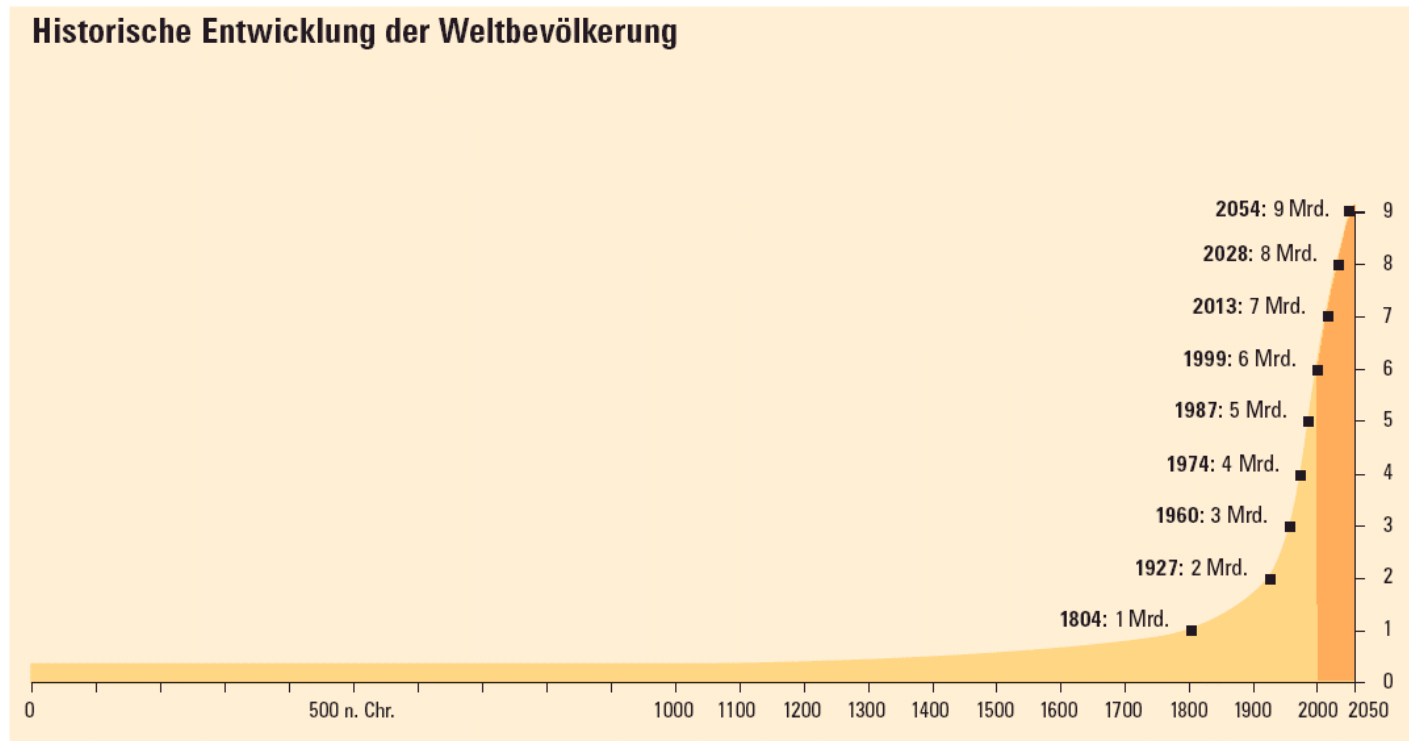
Süßwasser wird knapp

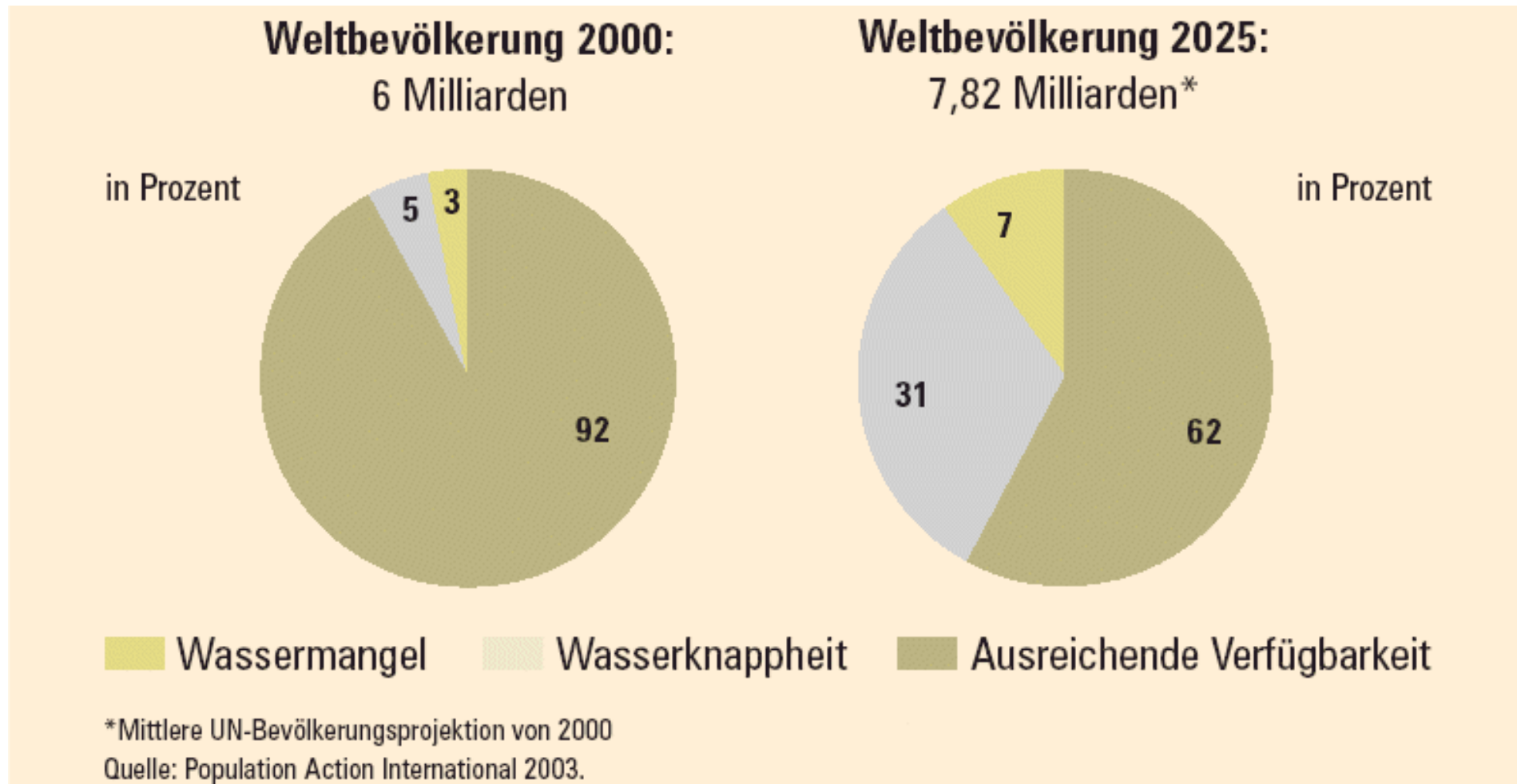
Von Wassermangel betroffene Menschen

2004: 600 Millionen \Leftrightarrow 2025: 2.7-3.2 Milliarden Menschen

Verschärfung der Situation durch überproportionalen Wasserverbrauch:

20. Jh: Verdreifachung Bevölkerung aber Versechsfachung Weltwasserverbrauch





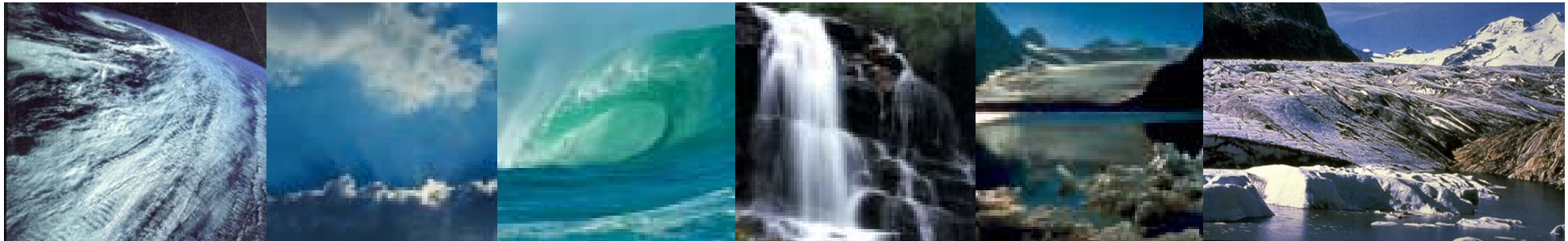
Wassermangel: weniger als 1000 m³/Person/Jahr

Wasserknappheit: weniger als 1700 m³/Person/Jahr

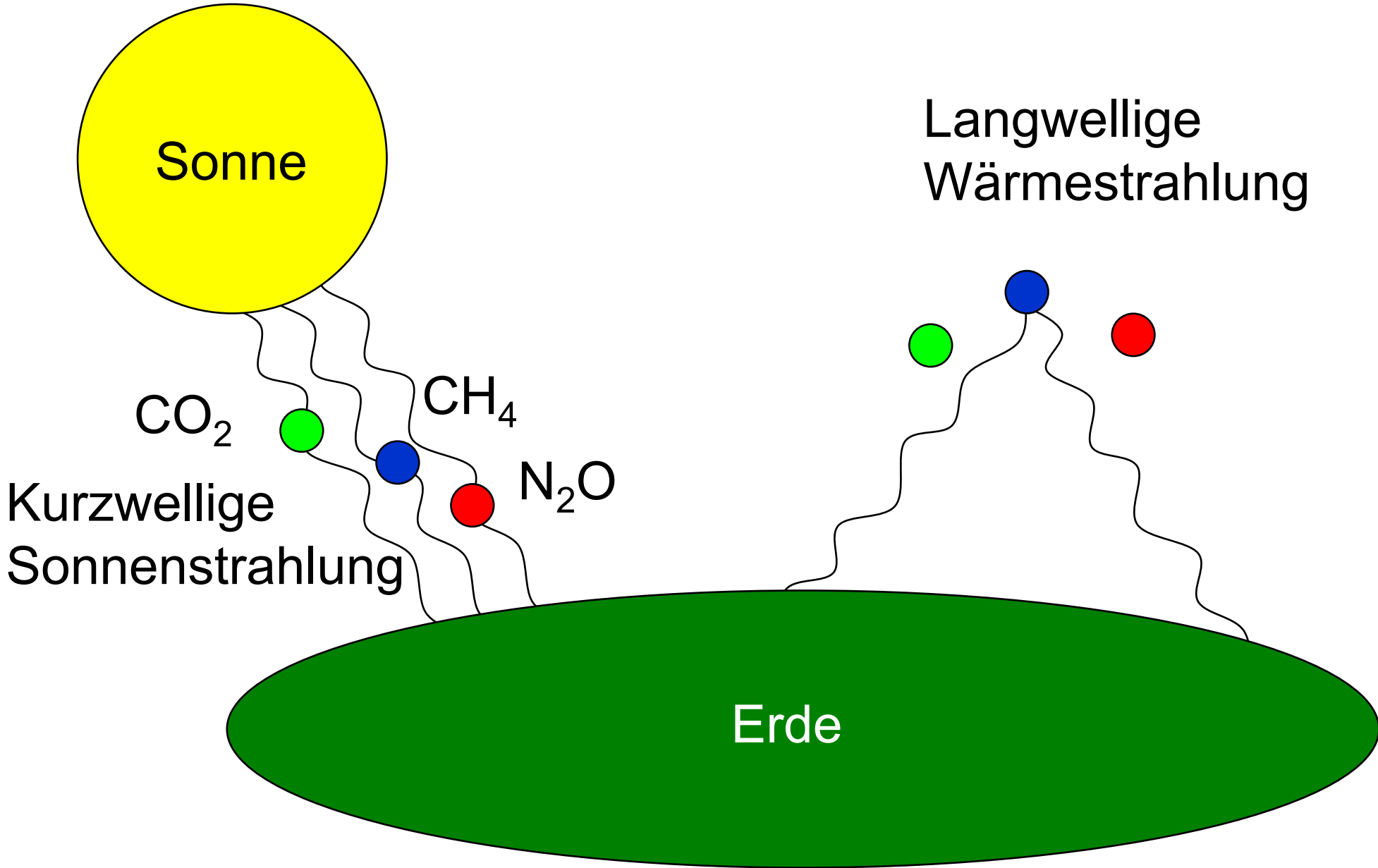
Verbrauch BRD: ~ 130l / Tag ~ 48 m³/Person/Jahr

Wasser im Klimasystem

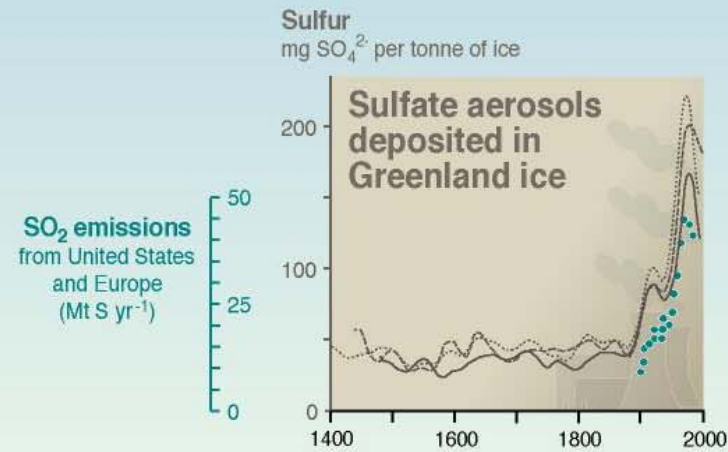
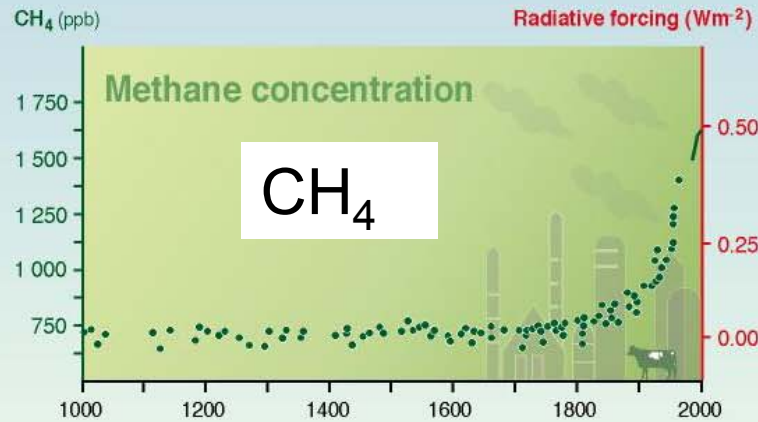
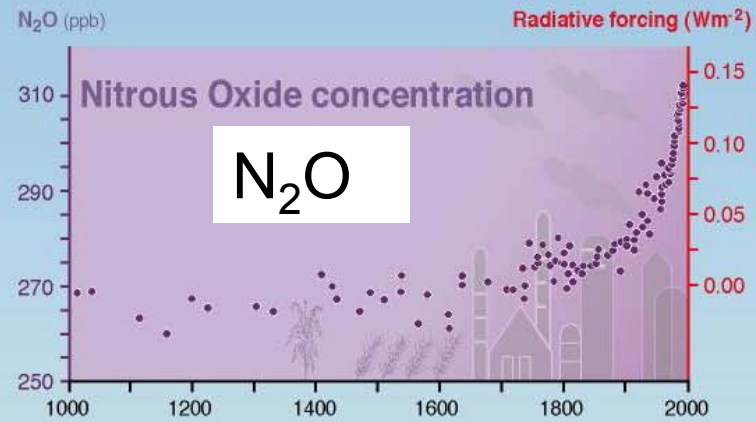
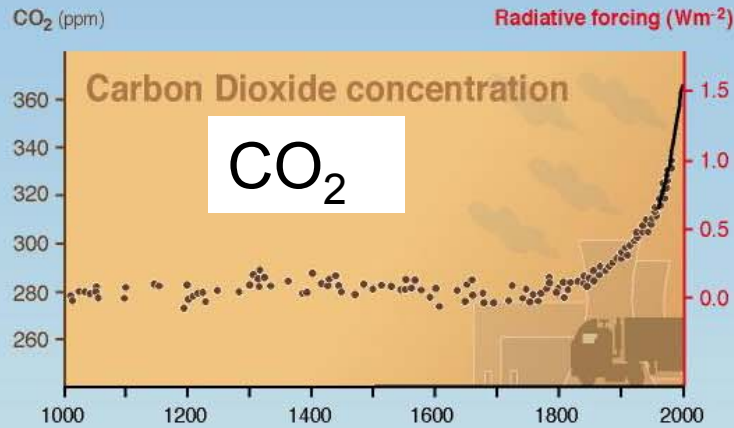
- Wasser in Atmosphäre: nur 0.001% des verfügbaren Gesamtwassers der Erde
- Massenanteil von H₂O in Atmosphäre nur 0.025%
trotzdem große Bedeutung als Treibhausgas:
absorbiert und emittiert effektiv im infraroten Strahlungsspektrum
Beitrag zum **natürlichen Treibhauseffekt von 33 °C** (-15°C → +18°C)
- Zeitskala Verdunstung bis Niederschlag: ≈ 8 Tage
⇒ atmosphärischer Wasserkreislauf ist Verbindung zu langsamer reagierenden
Reservoiren Ozean und Eis



Der anthropogene Treibhauseffekt

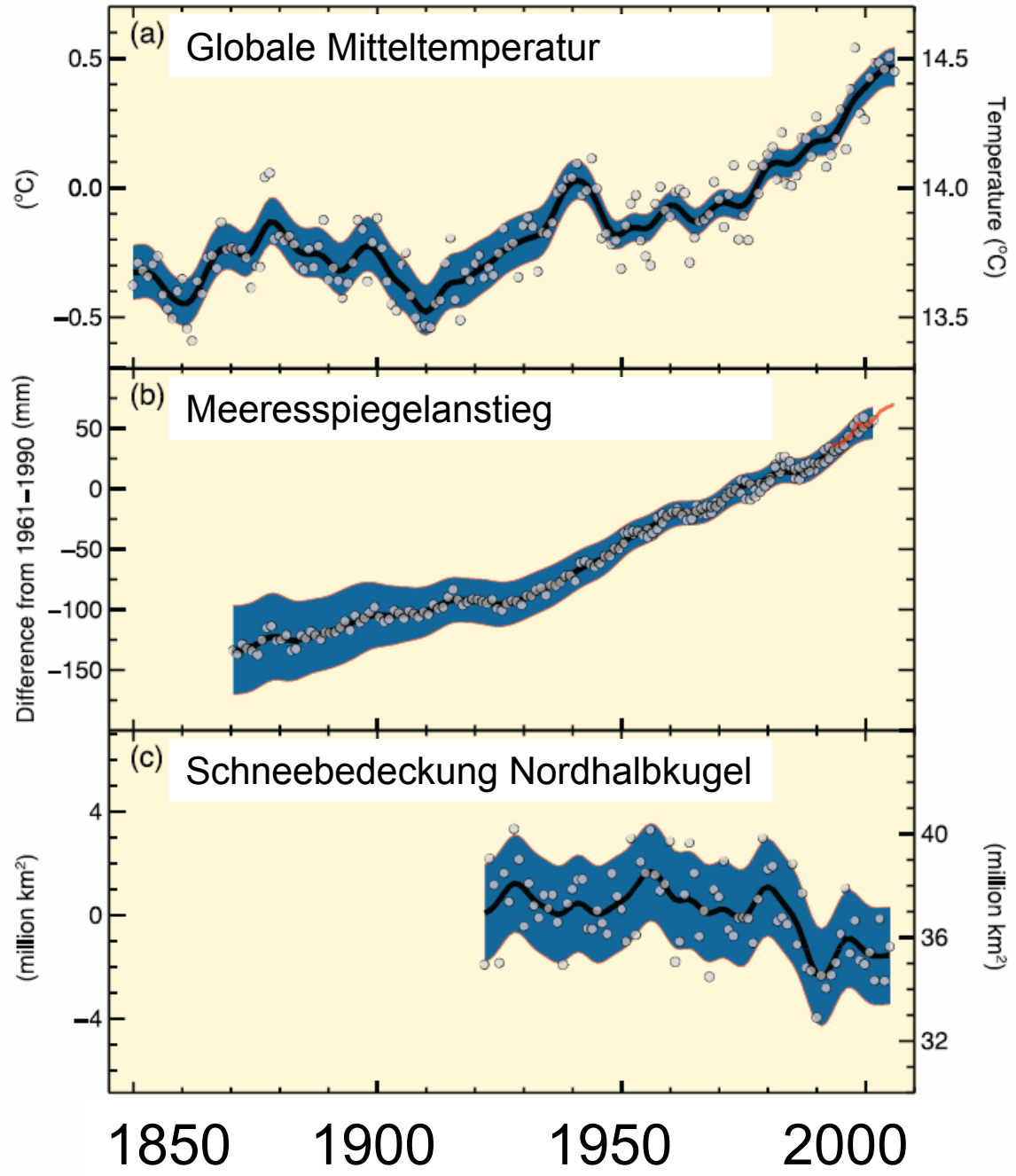


Anthropogener Einfluss seit der Industrialisierung



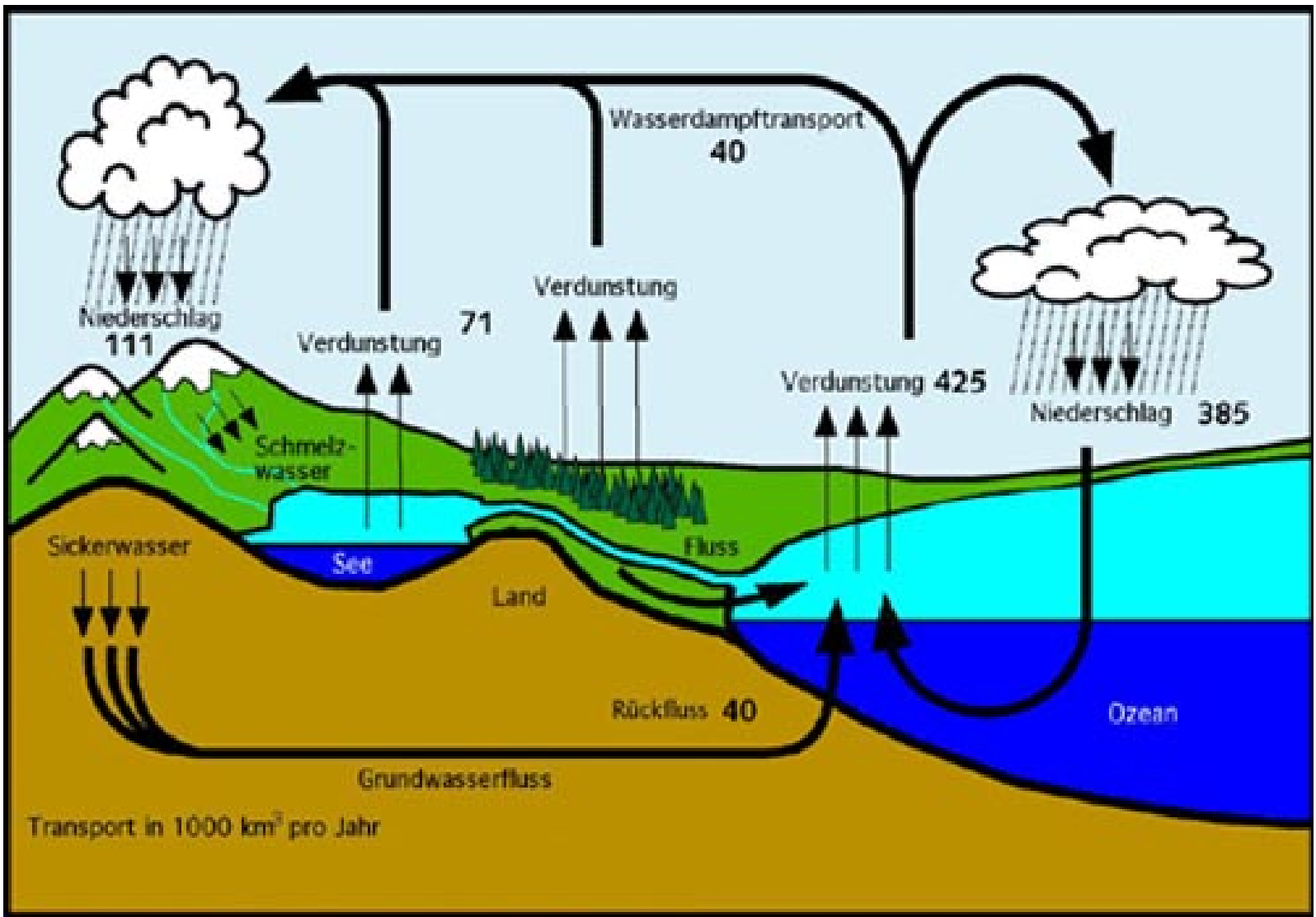
SYR - FIGURE 2-1
WG1 FIGURE SPM

Beobachteter globaler Klimawandel: Die Vergangenheit



- Ca. +0.9 °C seit Beginn der Temperaturmessungen in 1860; ca. 0.6 °C in letzten 30 Jahren mit Maximum in 2007
- Temperaturschwankungen zwischen der letzten Eiszeit und heutigen Warmzeit hat gerade einmal 4°C betragen
- Steigender mittlerer Jahresniederschlag
- Regionale Differenzen

Der Wasserkreislauf

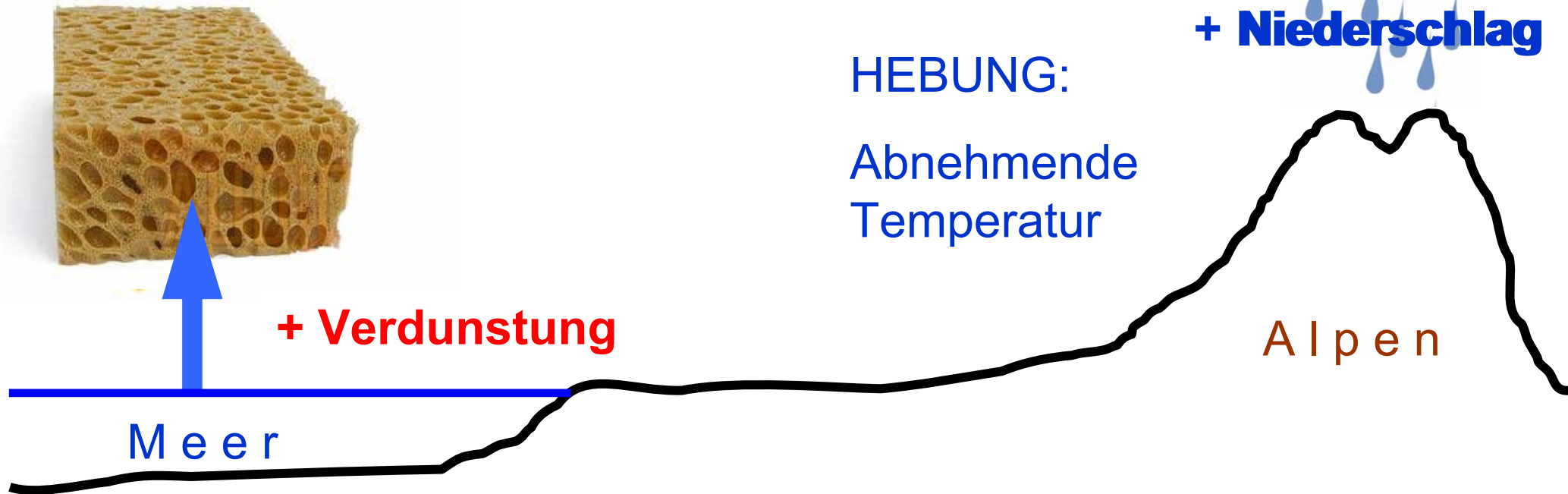


Globale Erwärmung verändert den Wasserkreislauf

- Clausius-Clapeyron: Je höher die Temperatur, desto mehr Wasser kann die Luft aufnehmen und tragen
 ≈ 6-7% feuchter pro °C Temperaturanstieg

Globale Erwärmung

+ Temperatur





Morteratsch Gletscher (Bernina Gebiet, Schweiz) Markierung: 1970

Regionale Auswirkungen: Deutschland

- Anstieg der mittleren Jahrestemperatur (ca. 1,5°C bis 2,0°C pro Jahrzehnt)
- Saisonale Umverteilung der Niederschläge (bis zu 30% um 2050) und Verschiebung im Frühjahr / Winter (bis zu 20% mehr als 20%)
Auch hier: Zunahme von Extremereignissen
- Steigende Intensitäten von meteorologischen Extremereignissen (Starkregen, Hagel, Trockenheit, Hitzewellen, Sturm)

Klimawandel bedeutet Zunahme von Extremereignissen!

Nach heftigen Regenfällen von Böhmen bis Bern

Verheerendes Hochwasser im Alpenraum

Sieben Tote in der Schweiz und in Österreich
Weite Teile Südbayerns überschwemmt

München (SZ) - Nach tagelangem Dauerregen sind große Flächen des Alpenraums überschwemmt. Bei Erdstößen und Überflutungen starben in der Schweiz und in Österreich sieben Menschen. Viele Orte sind nicht mehr zugänglich. Im bayerischen Voralpenland übertraf die Flut das Jahrhunderthochwasser von 1999. Die Donau-Städte Passau und Regensburg sind gefährdet.

„Wir haben gigantische Wassermassen“, sagte der bayerische Umweltminister Werner Schnappauf (CSU) am Dienstag. Fachleute schätzen, dass die Flut das Pfingsthochwasser von 1999 übertreffen werde. Das öffentliche Leben brach in weiten Teilen des Voralpenlandes zusammen. Garmisch wurde von der Außenwelt abgeschnitten. In Kempten, Augsburg, Penzberg sowie den Landkreisen Weilheim-Schongau, Garmisch-Partenkirchen und Bad Tölz-Wolfratshausen lösten die Behörden Katastrophenalarm aus. Während aus Bayern zunächst keine Todesopfer gemeldet wurden, starben in der Schweiz mindestens fünf Menschen in den Fluten, viele sind vermisst. Im Zürcher Oberland wurde eine Leiche aus dem Dorfbach von Dürnten geborgen, im Bündnerland ertrank eine 72-Jährige in der Landquart. In Brienz kam eine Jugendliche ums Leben, eine junge Frau wurde schwer verletzt. Am Montag waren bereits zwei Feuerwehrleute tödlich verunglückt. Im österreichischen Ötztal begrub eine Steinlawine einen Mann. Eine Frau wurde beim Abgang einer Mure in der Steiermark tödlich verletzt.

Die Niederschläge erreichten Rekordwerte. Im Berner Oberland fielen bis Dienstagmorgen binnen 48 Stunden 205 Liter Wasser pro Quadratmeter. In der Schweiz waren Brienz und das Oberhasli vom Wasser eingeschlossen, für Grindelwald und Lauterbrunnen wurde eine Luftbrücke eingerichtet. Bern ist überflu-

zes. In Kroatien riefen die Behörden für den Norden des Landes den Notstand aus. In Tschechien standen Teile Böhmens unter Wasser. Ungarn rechnet mit Schäden von 40 Millionen Euro.

In Bayern wurden Sonthofen, Kempten und Garmisch überschwemmt. An der Loisach und der Iller hielten viele Dämme der Flut nicht stand. Bei Augsburg drohte eine Autobahnbrücke einzustürzen. Die A 8 München-Stuttgart wurde deshalb gesperrt, ebenso die A 95 München-Garmisch und die A 93 bei Kufstein. Eingeschlossene wurden mit Hubschraubern gerettet. Fast tausend Anwohner in Kempten mussten ihre Häuser verlassen. Die Anrainer der Donau bereiteten sich auf die Wassermassen vor. Entlang des Stroms wurde für Mittwoch die höchste Meldestufe erwartet.

Bayerns Ministerpräsident Edmund Stoiber (CSU) unterbrach den Wahlkampf, um sich ein Bild von der Lage zu machen. Union und FDP sagten ihren für Mittwoch in Berlin geplanten „Wechselgipfel“ ab. Innenminister Otto Schily (SPD) wollte am Mittwoch ins Flutgebiet reisen, Bundeskanzler Gerhard Schröder (SPD) am Donnerstag. Am kommenden Dienstag will das bayerische Kabinett über die Unterstützung für die Betroffenen beraten. Stoiber sagte, er setze auf eine „Gemeinschaftsaktion von Land, Bund und EU“. Schröder kündigte an, die Bundesregierung werde jede ihr mögliche Hilfe leisten sowie alle Kräfte auf-



Augusthochwasser 2005:

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

Extremereignisse: Hochwasser



Bad Kötzing 2002



Eschenlohe 1999



Chiemsee 2002



Eschenlohe 2005

Extremereignisse: Trockenheit und Dürren

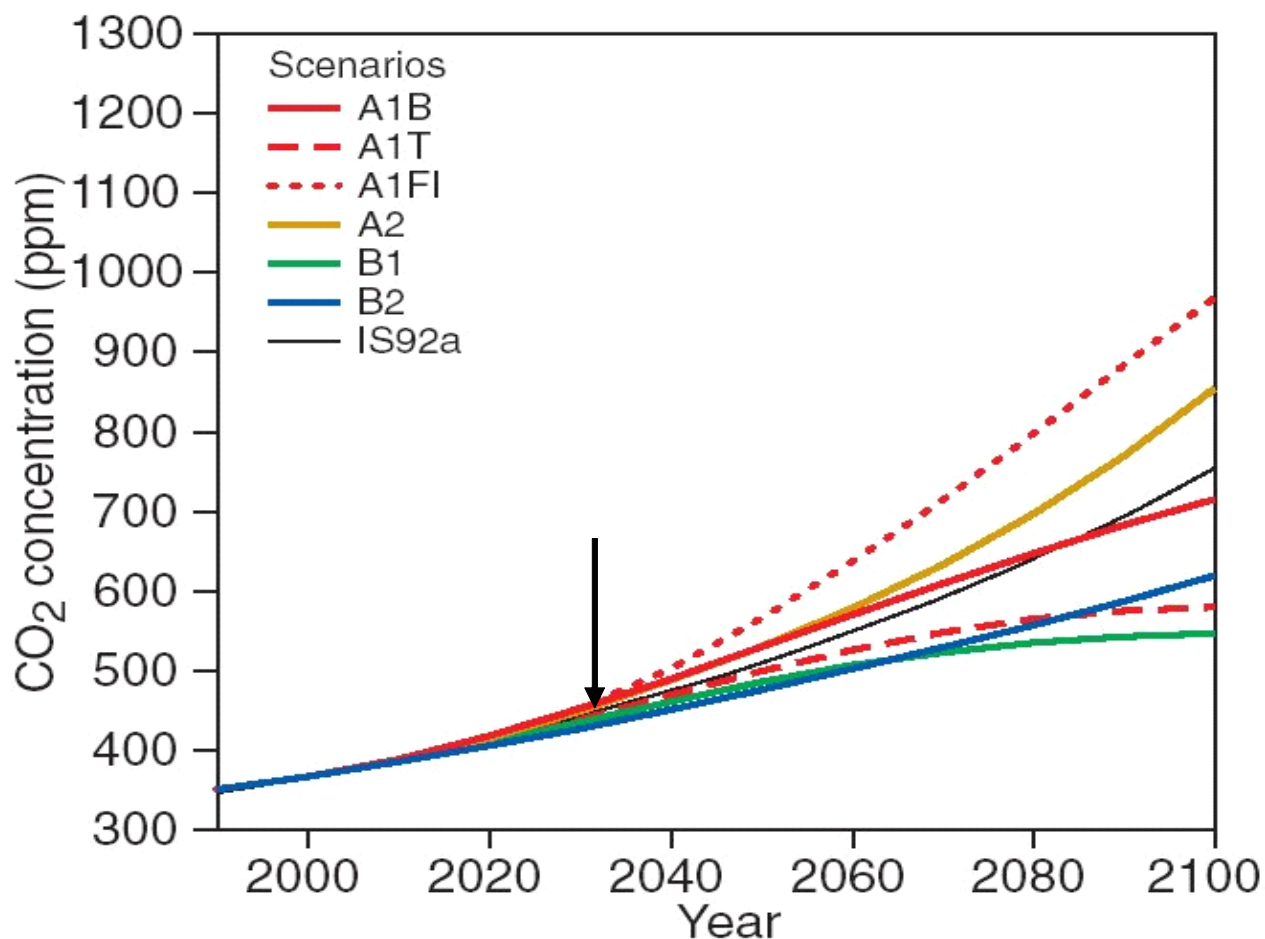
- global ca. 50% der Todesfälle durch Naturkatastrophen seit 1950



Das Klima der Zukunft

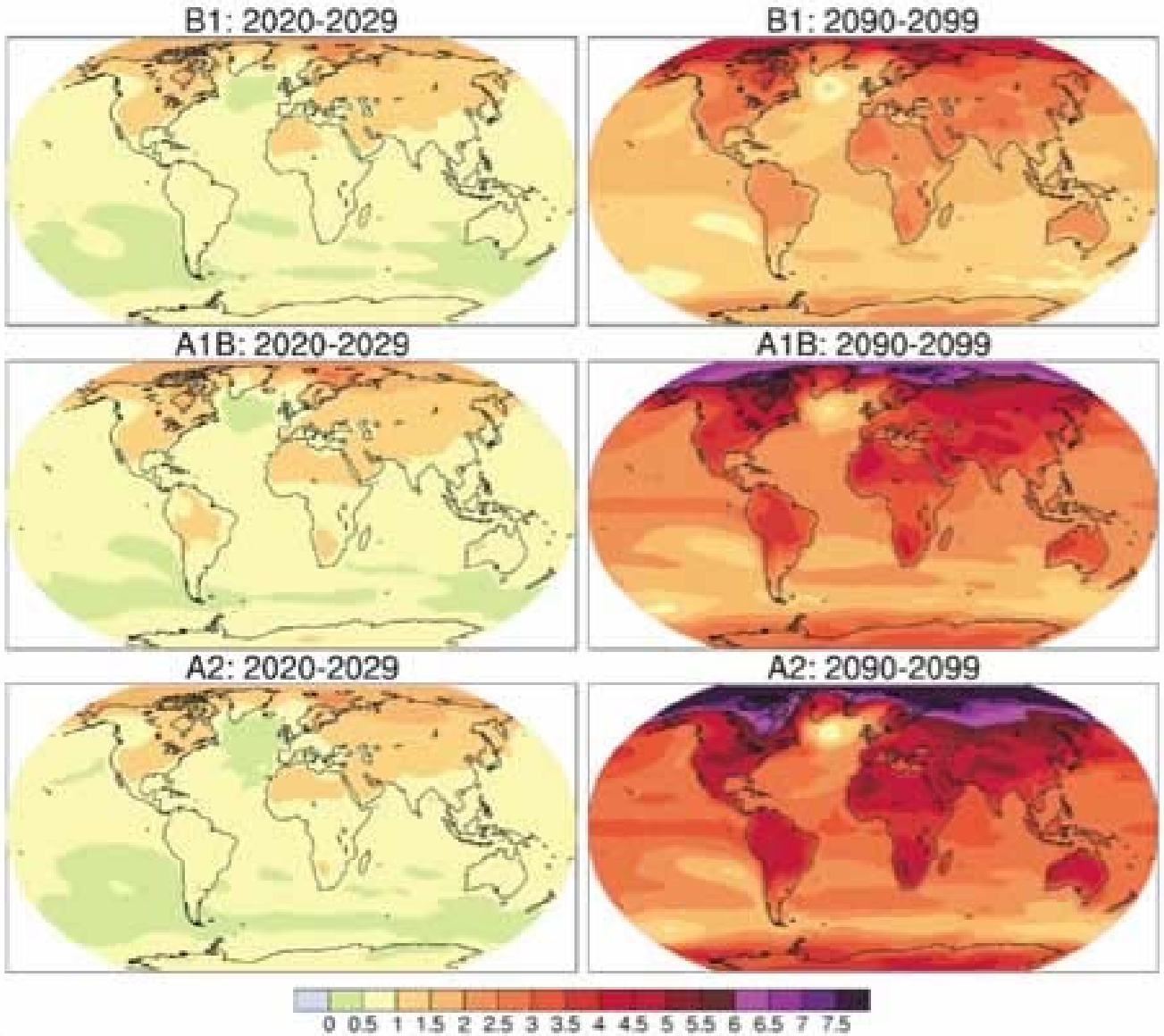
Klimaszenarien – Globale Emissionszenarien

CO₂ concentrations



Szenario B2: kontinuierlich wachsende Weltbevölkerung, die wirtschaftlichem Wachstum mit nachhaltigen, lokalen Lösungsansätzen entgegentritt

Globale Klimaszenarien: Temperaturänderung

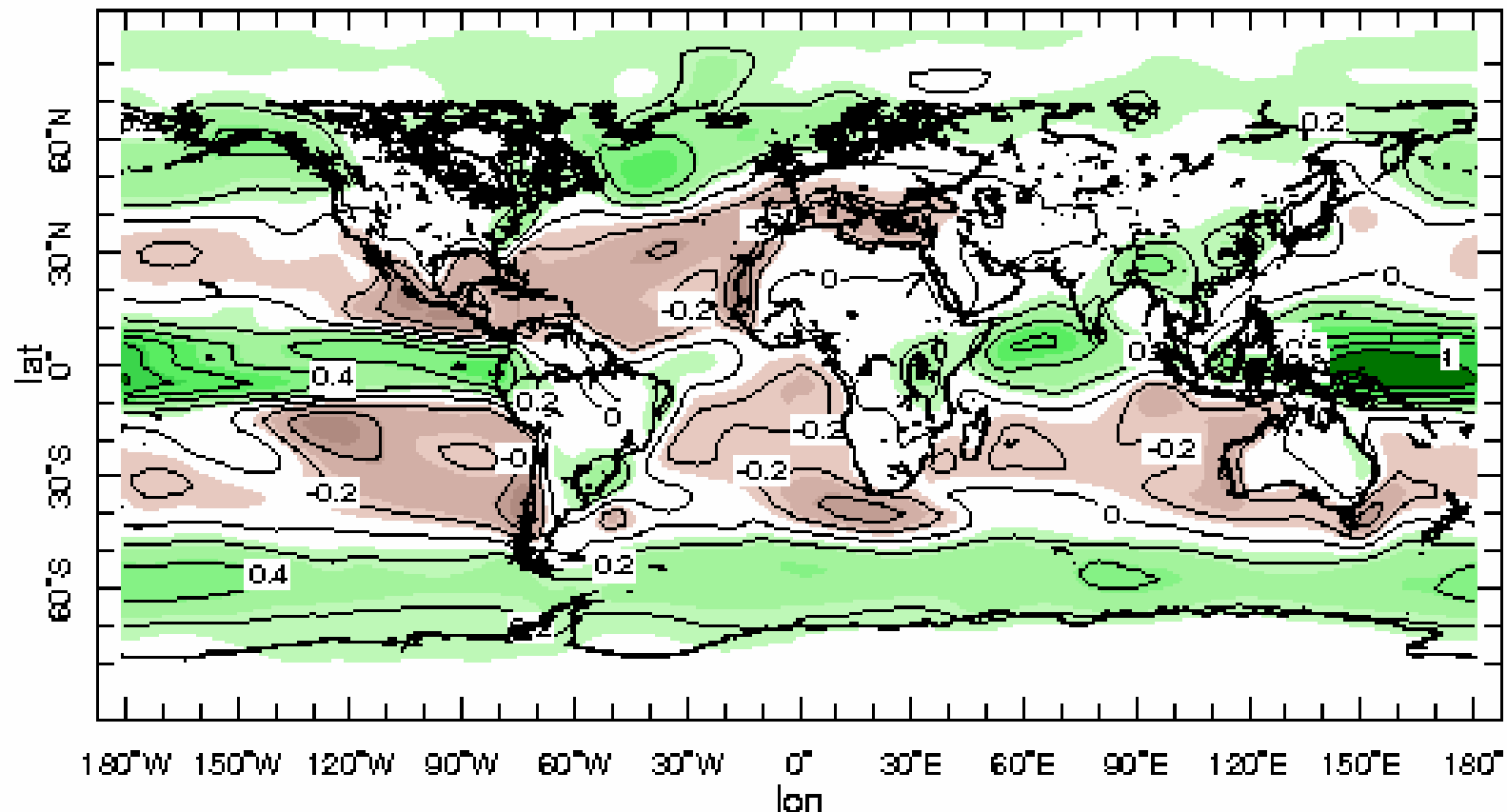


B1 Nutzung klimaschonender Technologien

A1B weiter starker CO2-Ausstoß

A2 langfristig besonders klimaschädlich

IPCC 2007: WG1-AR4



P-E SRES A1B (2080-2099) - 20C3M (1980-1999)

Niederschlag – Verdunstung (2080-99 minus 1980-99)
IPCC (AR4) A1B multi-model average

Regionale Klimamodellierung

Impulserhaltung

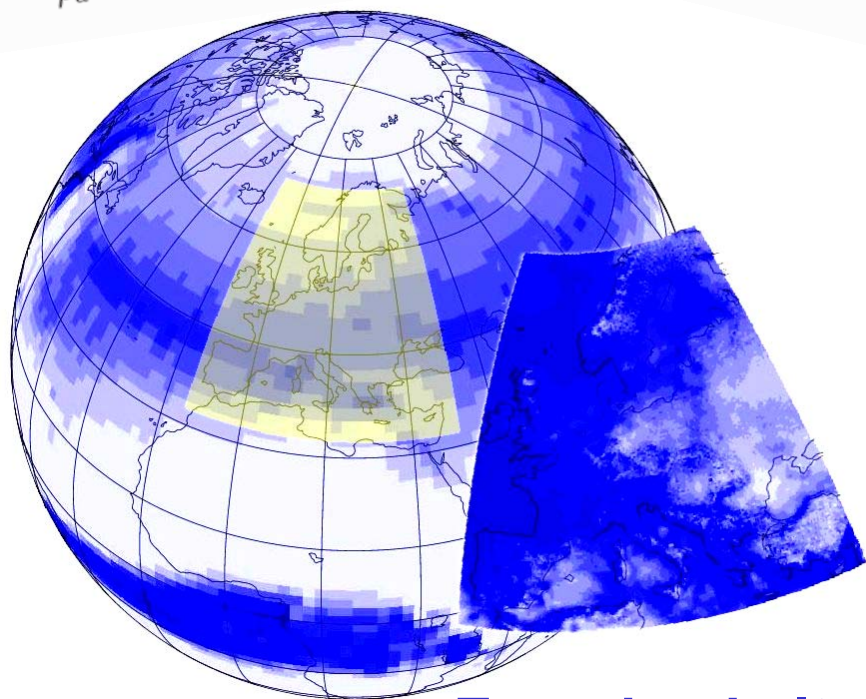
$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} = -f \vec{k} \times \vec{v} - \nabla \Phi - \frac{1}{\rho_a} \nabla p_a + \frac{\eta_a}{\rho_a} \nabla^2 \vec{v} + \frac{1}{\rho_a} (\nabla \cdot \rho_a \mathbf{K}_m \nabla) \vec{v}$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_v}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) q_v &= \frac{1}{\rho_a} (\nabla \rho_a \mathbf{K}_h \nabla) q_v + R_{evap} - R_{cond} - R_{iini} - R_{idep/sub} \\ \frac{\partial q_c}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) q_c &= \frac{1}{\rho_a} (\nabla \rho_a \mathbf{K}_h \nabla) q_c + R_{cond} + R_{iini} + R_{idep/sub} - R_{aconv} - R_{accr} \\ \frac{\partial q_r}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) q_r &= \frac{1}{\rho_a} (\nabla \rho_a \mathbf{K}_h \nabla) q_r - R_{evap} + R_{aconv} + R_{accr} - \frac{\partial V_f \rho_a g q_r}{\partial z} \end{aligned} \quad (2.32)$$

Energieerhaltung Landoberfläche

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

Bodenwärmediffusion

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

Niederschlagsphysik

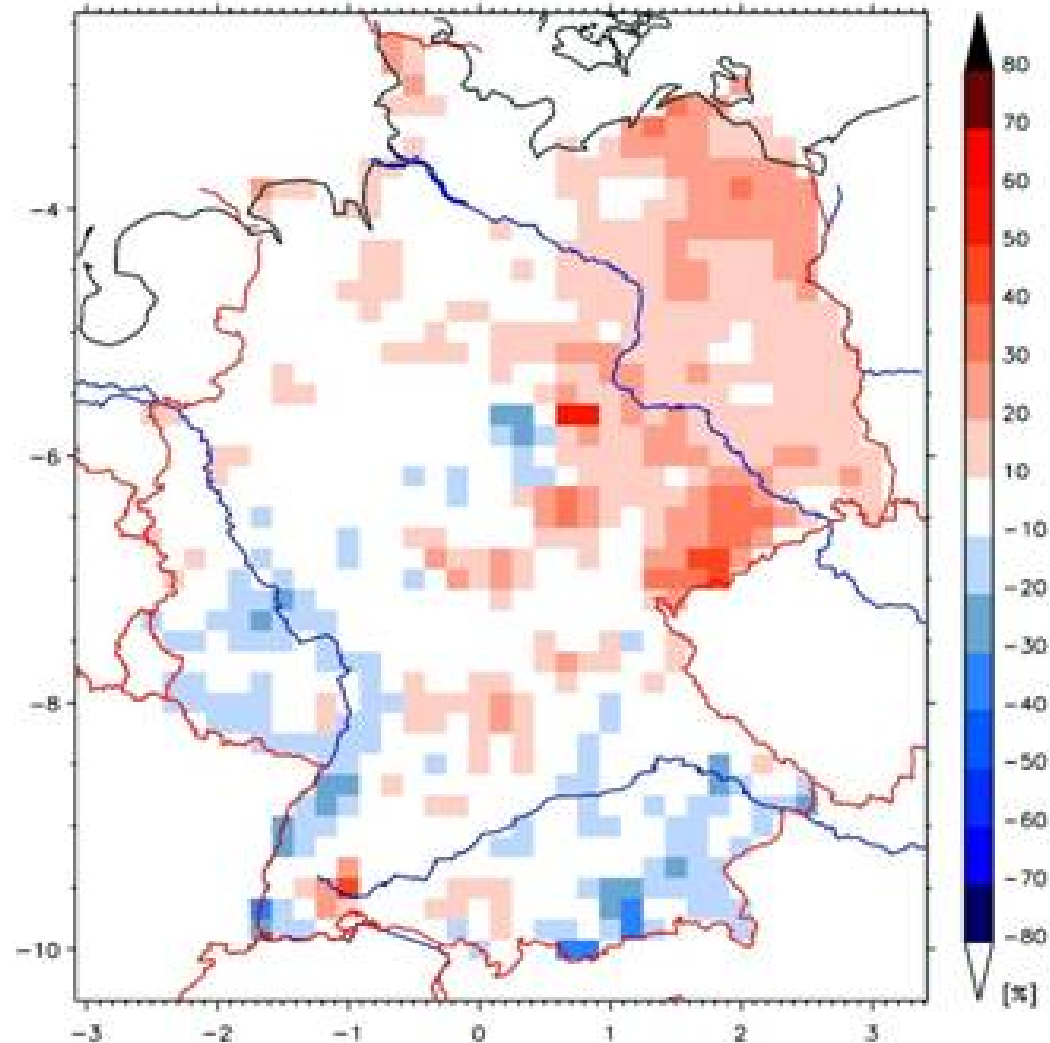
$$R_{evap(rain)} = \frac{2\pi N_{0r}(S_w - 1)}{A_r + B_r} \left[\frac{0.78}{\Lambda_r^2} + 0.32 \left(\frac{a_r \rho}{\eta_a} \right)^{1/2} S_c^{1/3} \frac{\Gamma(5/2 + b_r/2)}{\Lambda_r^{5/2 + b_r/2}} \right]$$

Bodenwasserinfiltration

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

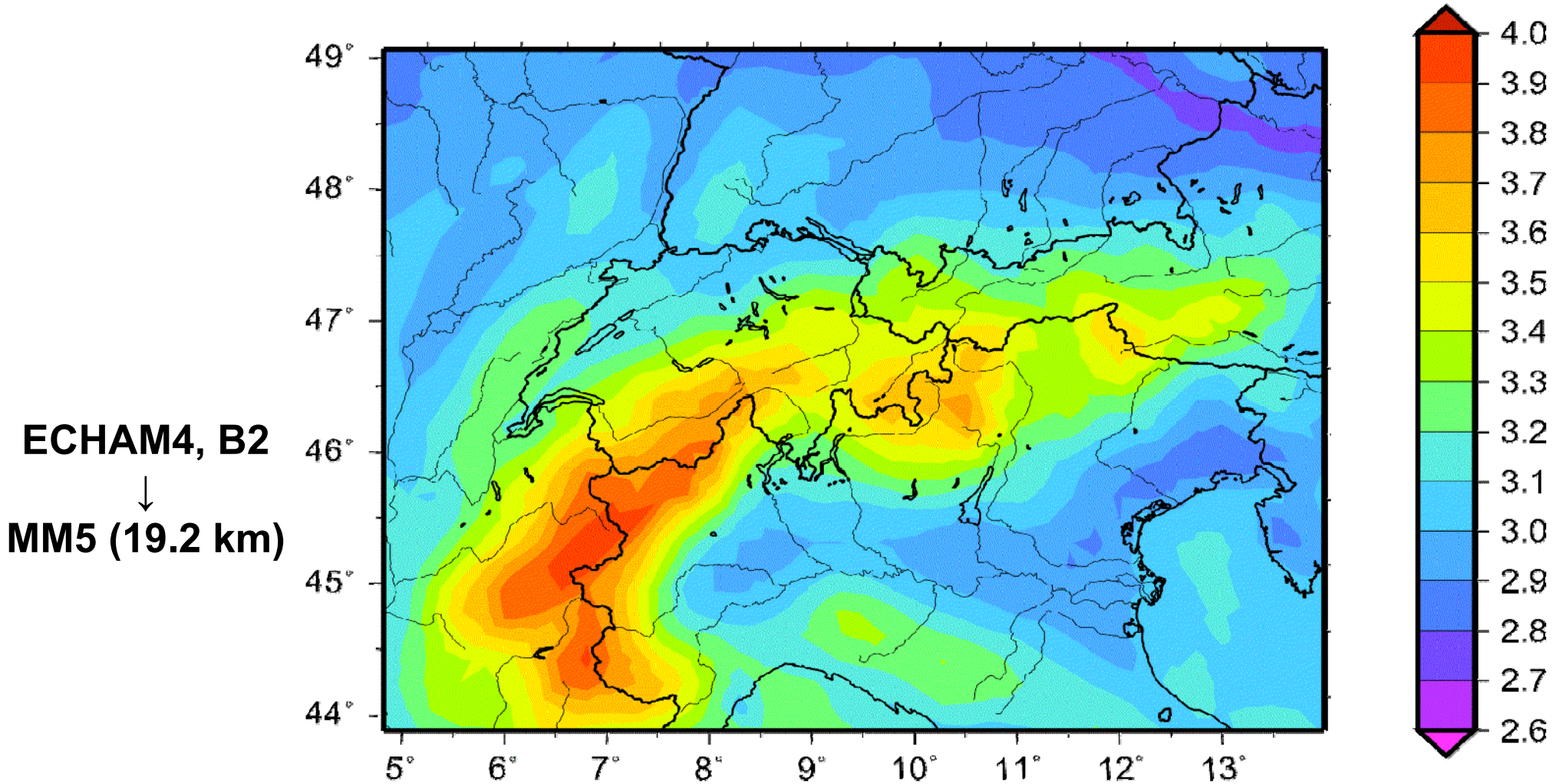
Wie gut reproduziert das **regionale** atmosphärische Modell den Niederschlag?

GLOBAL ECHAM4, B2
↓
REGIONAL MM5 (19.2 km)



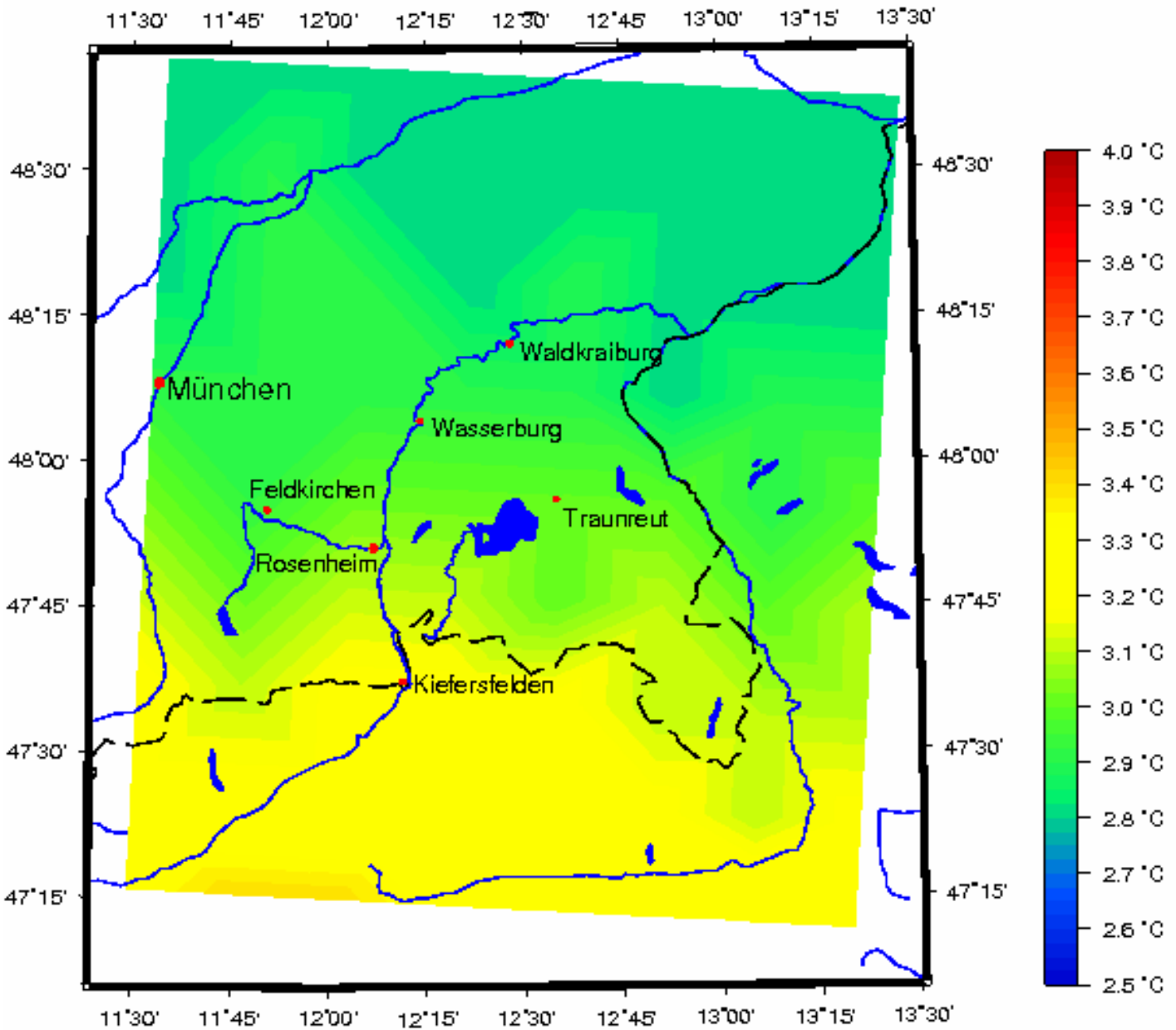
Unterschied [%] simulierter Niederschlag MM5 (19.2 km)
gegen interpolierte Stationsdaten 1979-1993 (Deutscher WetterDienst)

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



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

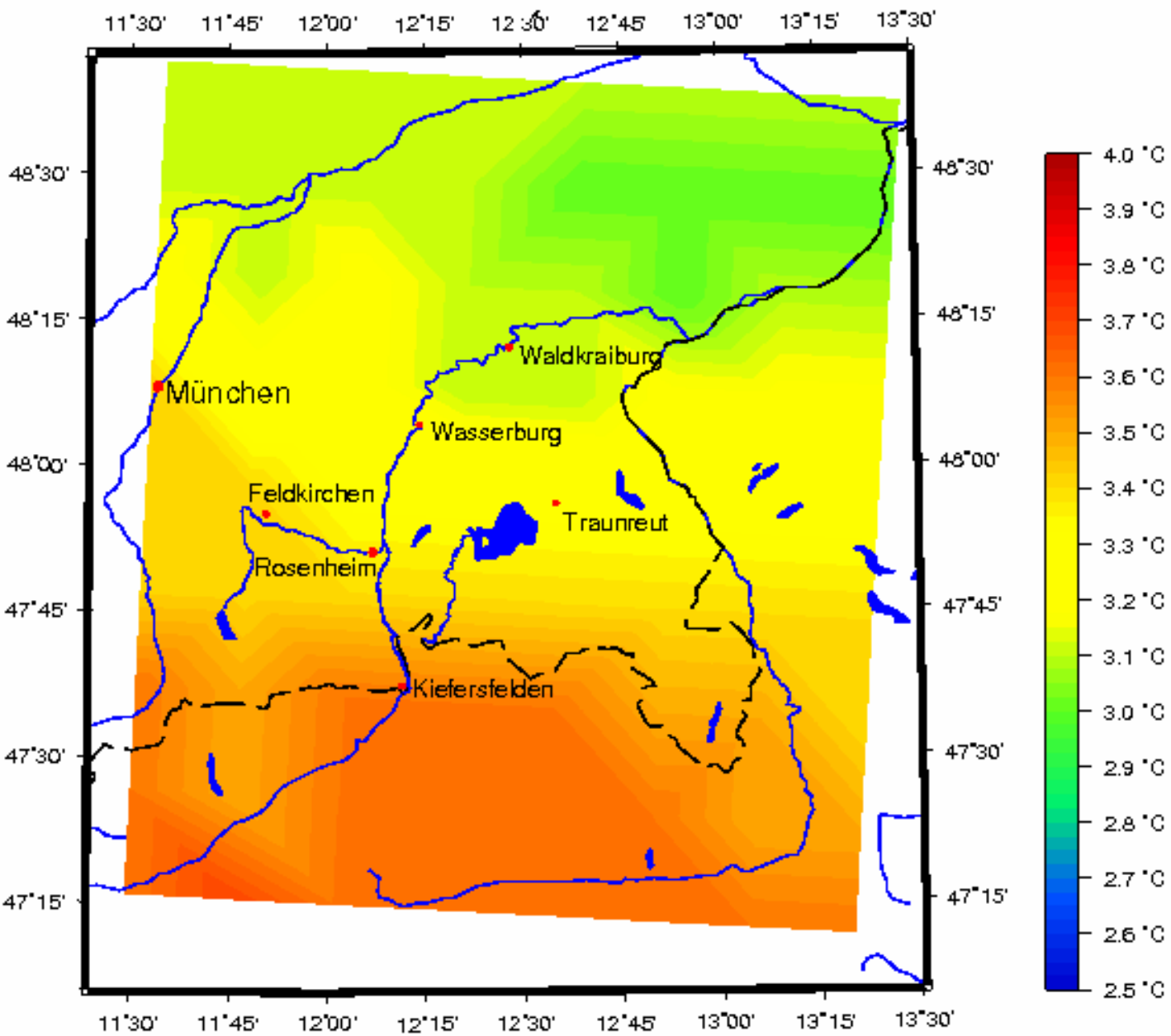
Regionale Klimaänderung CISBL



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

⇒ ~3°C
Temperaturzunahme!

Regionale Klimaänderung CISBL

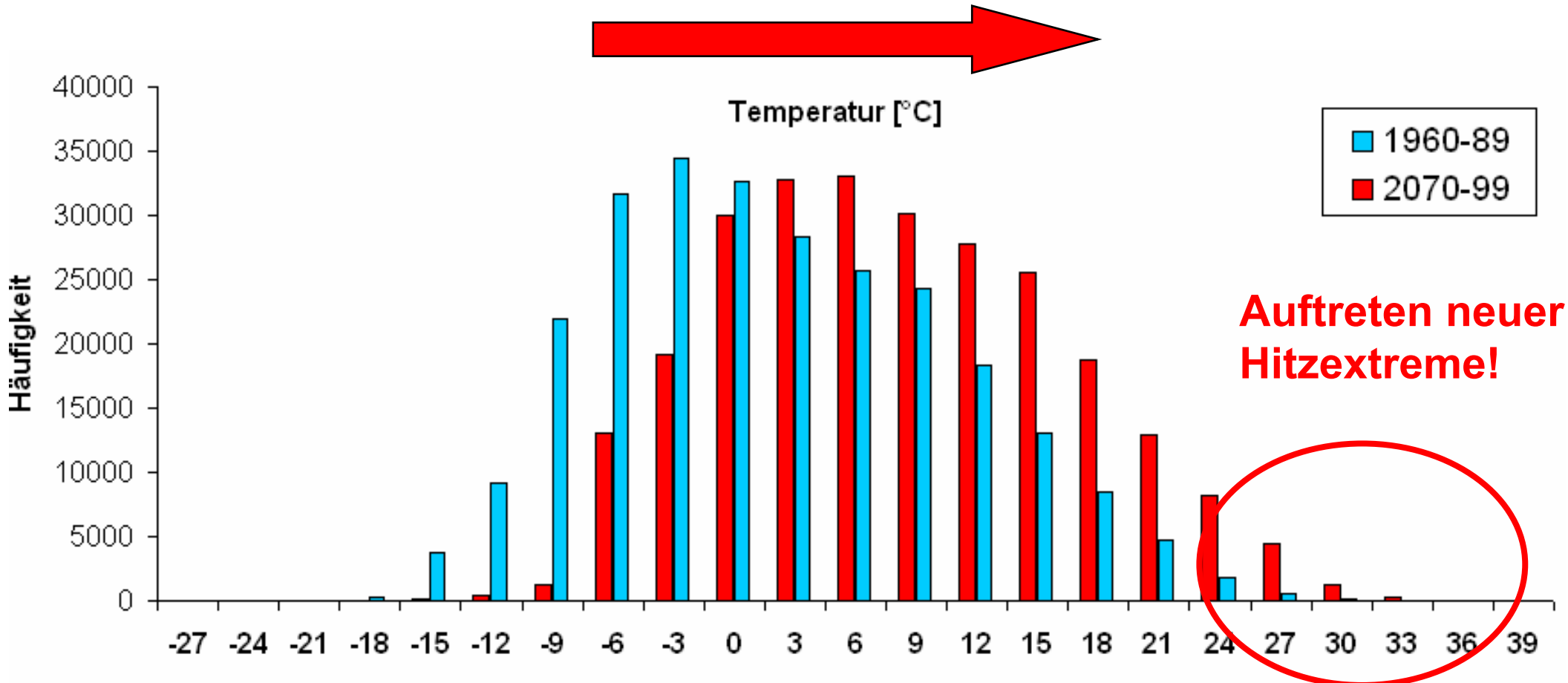


Änderung der mittleren **Sommertemperatur** 2070-99 vs. 1960-89 [°C]

⇒ **~3 - 4°C**
Temperaturzunahme!

Regionale Klimaänderung CISBL

Stundendaten am Gitterpunkt Traunstein

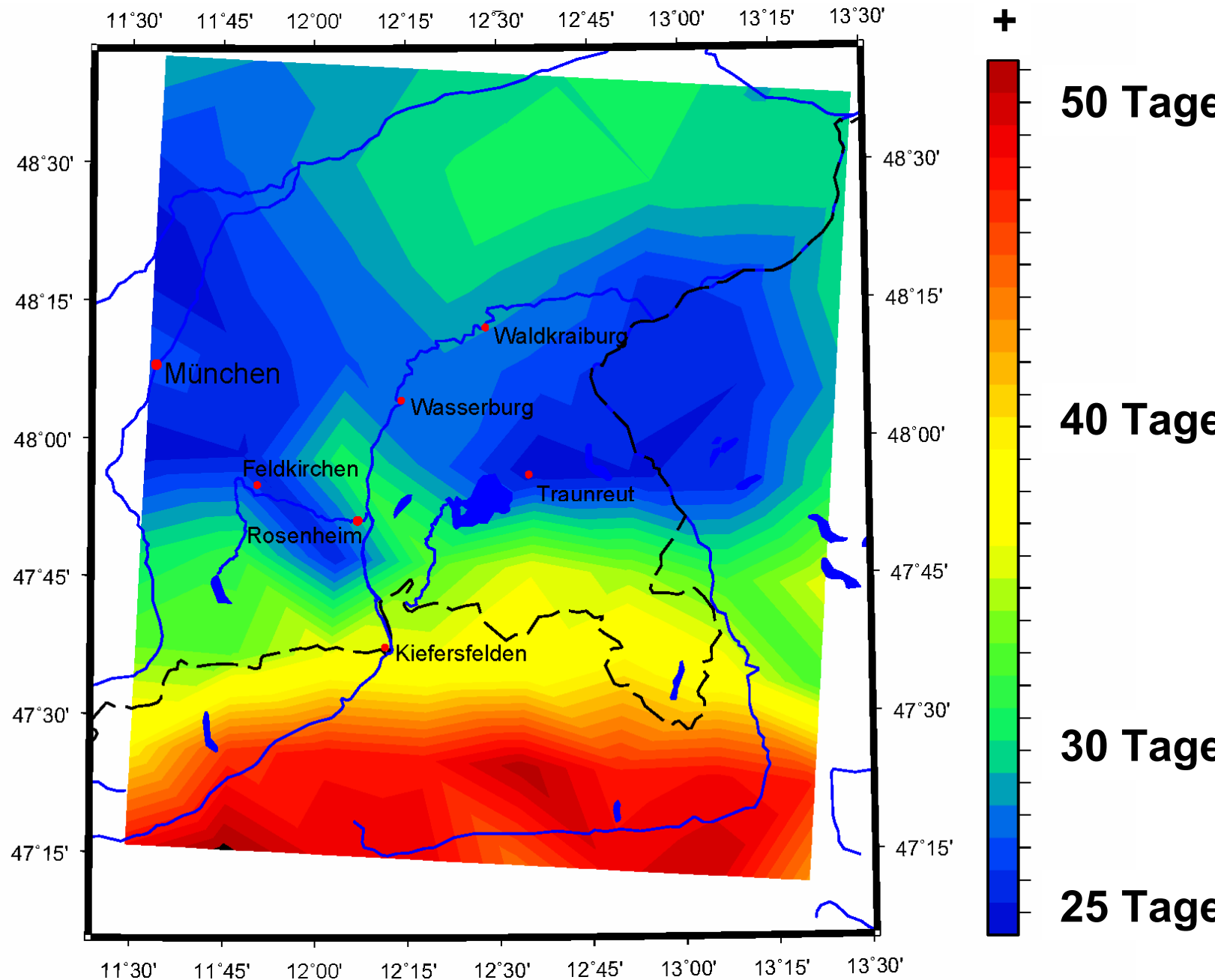


Änderung der Häufigkeiten der Temperatur 2070-99 vs. 1960-89 [°C]

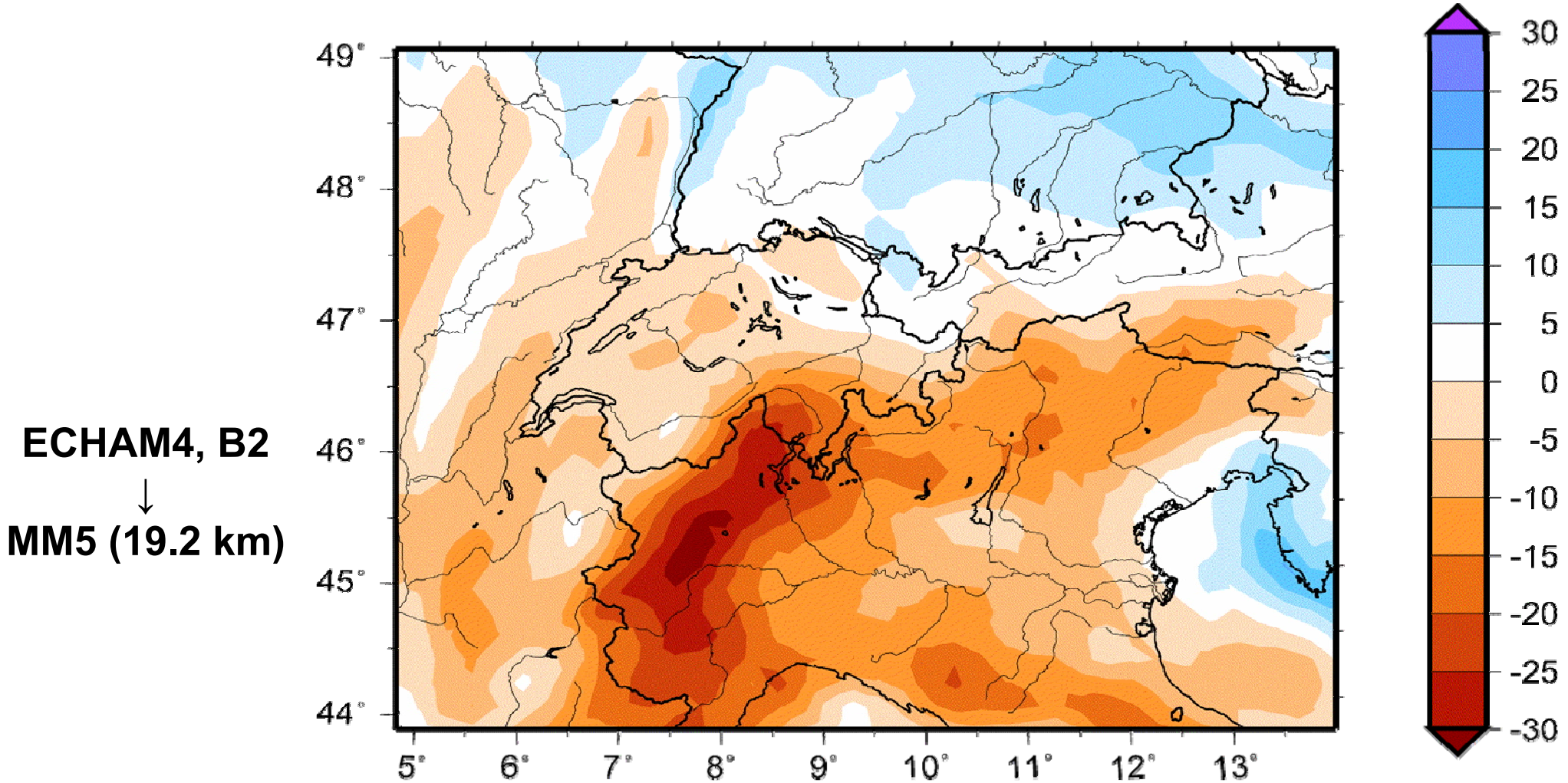
Änderung der Vegetationsperiode

Änderung Tage/Jahr
mit Tagesmittel-
temperatur > 5°C

1960-89 vs. 2070-99

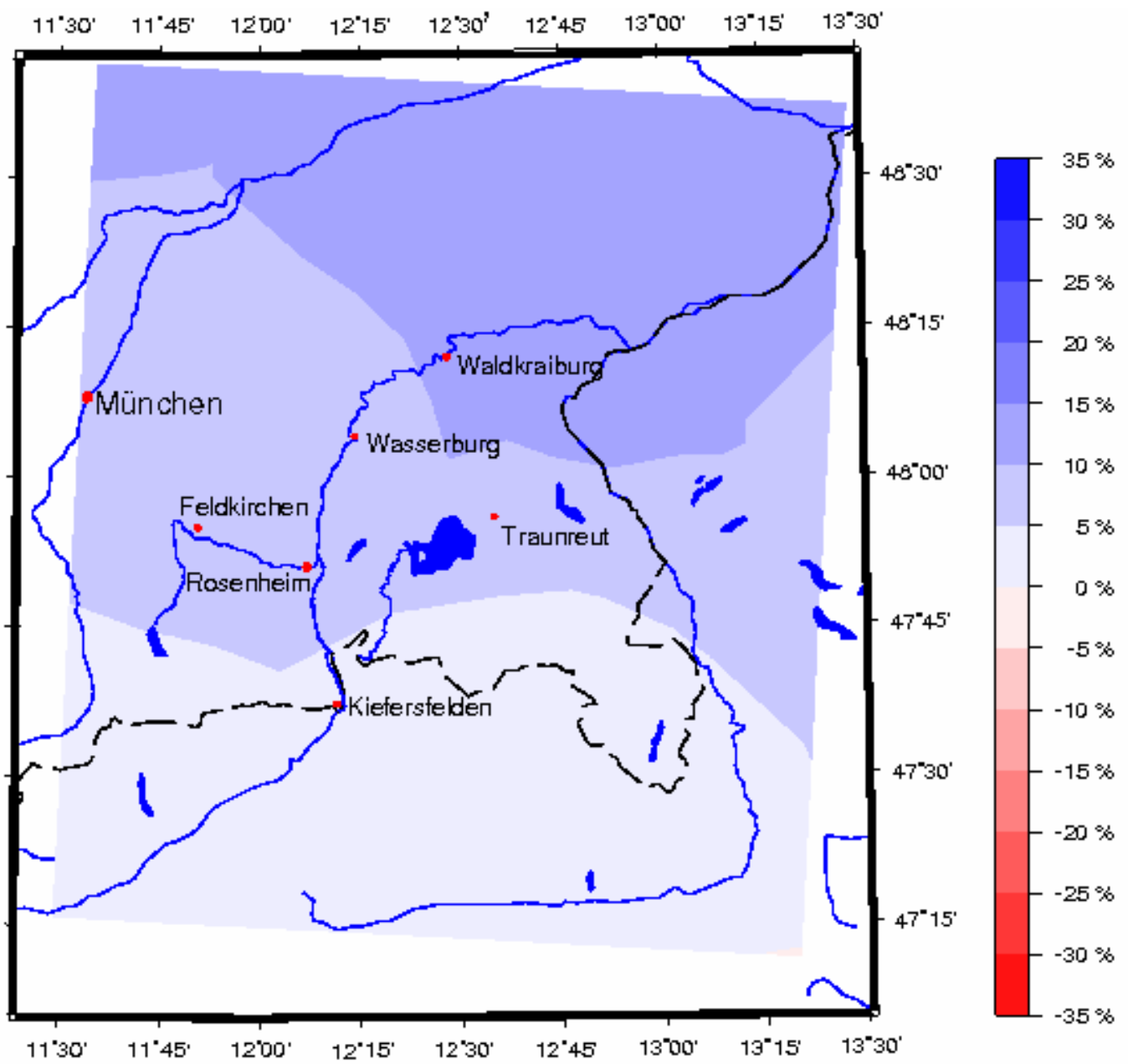


Änderung mittlerer Jahresniederschlag 2070-99 vs. 1960-89 [%]



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

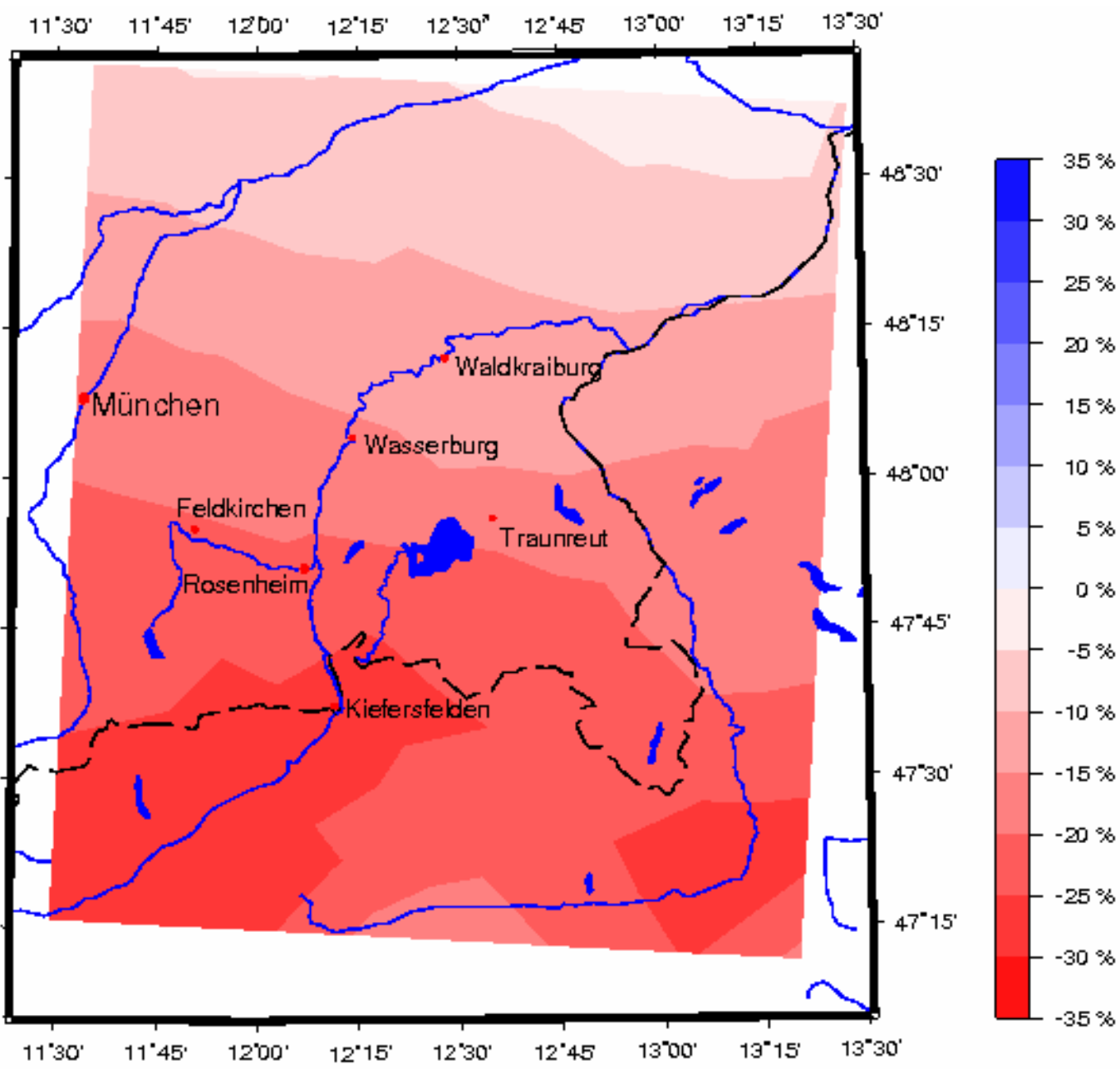
Regionale Klimaänderung CISBL



Änderung des mittleren Jahresniederschlages 2070-99 vs. 1960-89 [°C]

⇒ Zunahme des mittleren Jahresniederschlages!

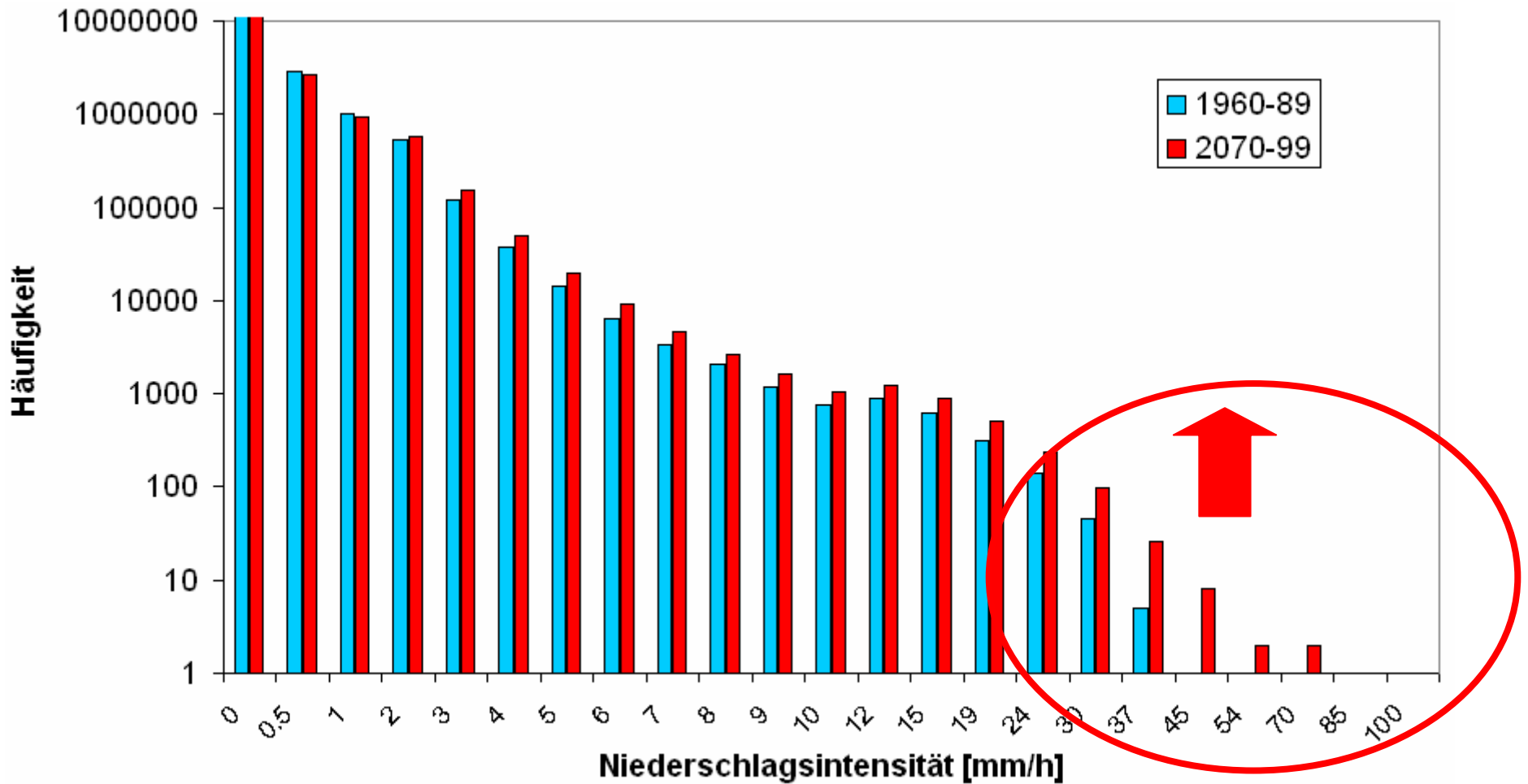
Regionale Klimaänderung CISBL



Änderung des mittleren **Sommerniederschlages** 2070-99 vs. 1960-89 [°C]

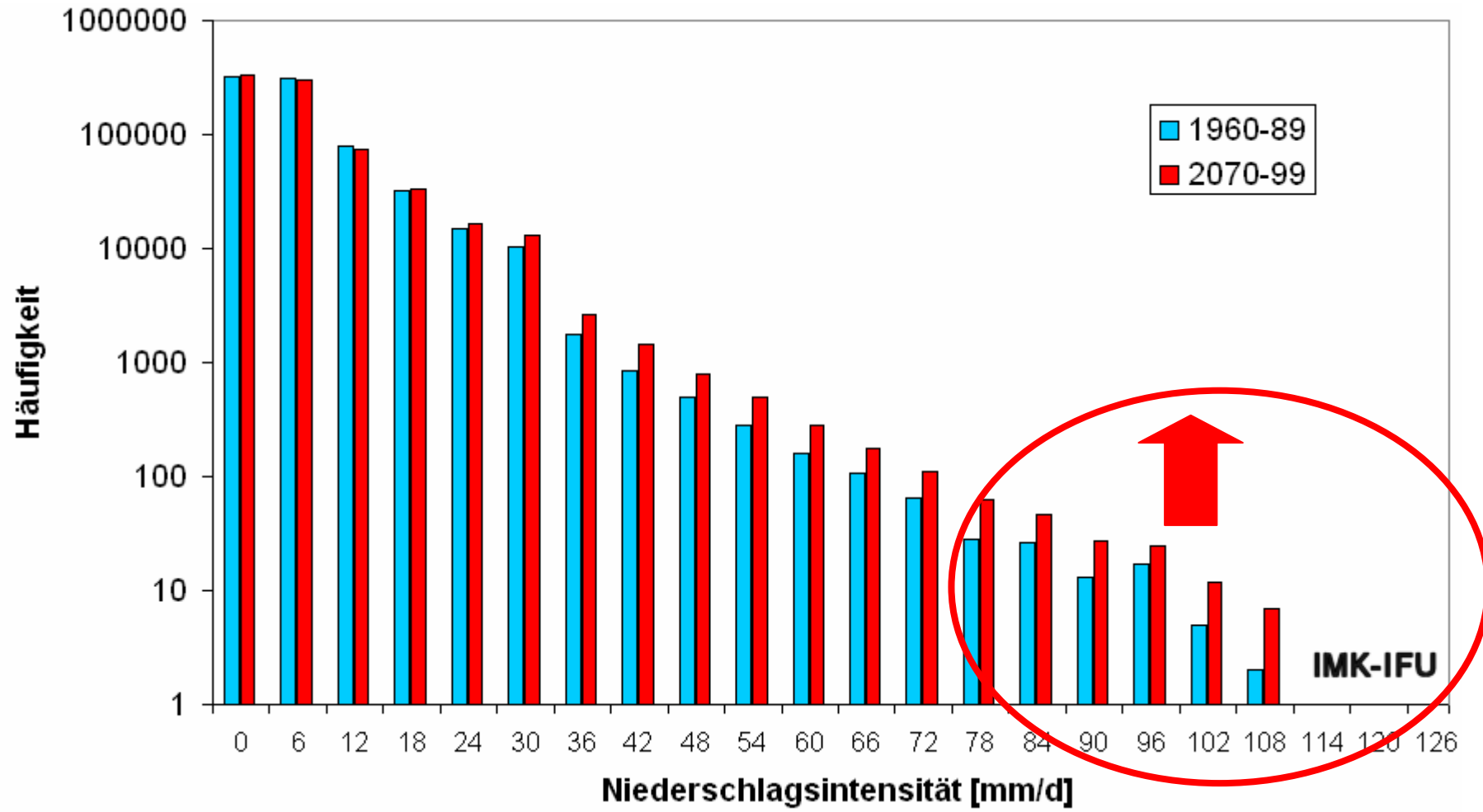
⇒ **Deutliche Abnahme de Sommerniederschlages bis -30%**

Regionale Klimaänderung CISBL



Änderung der **Stundenniederschlagsintensitäten** 2070-99 vs. 1960-89

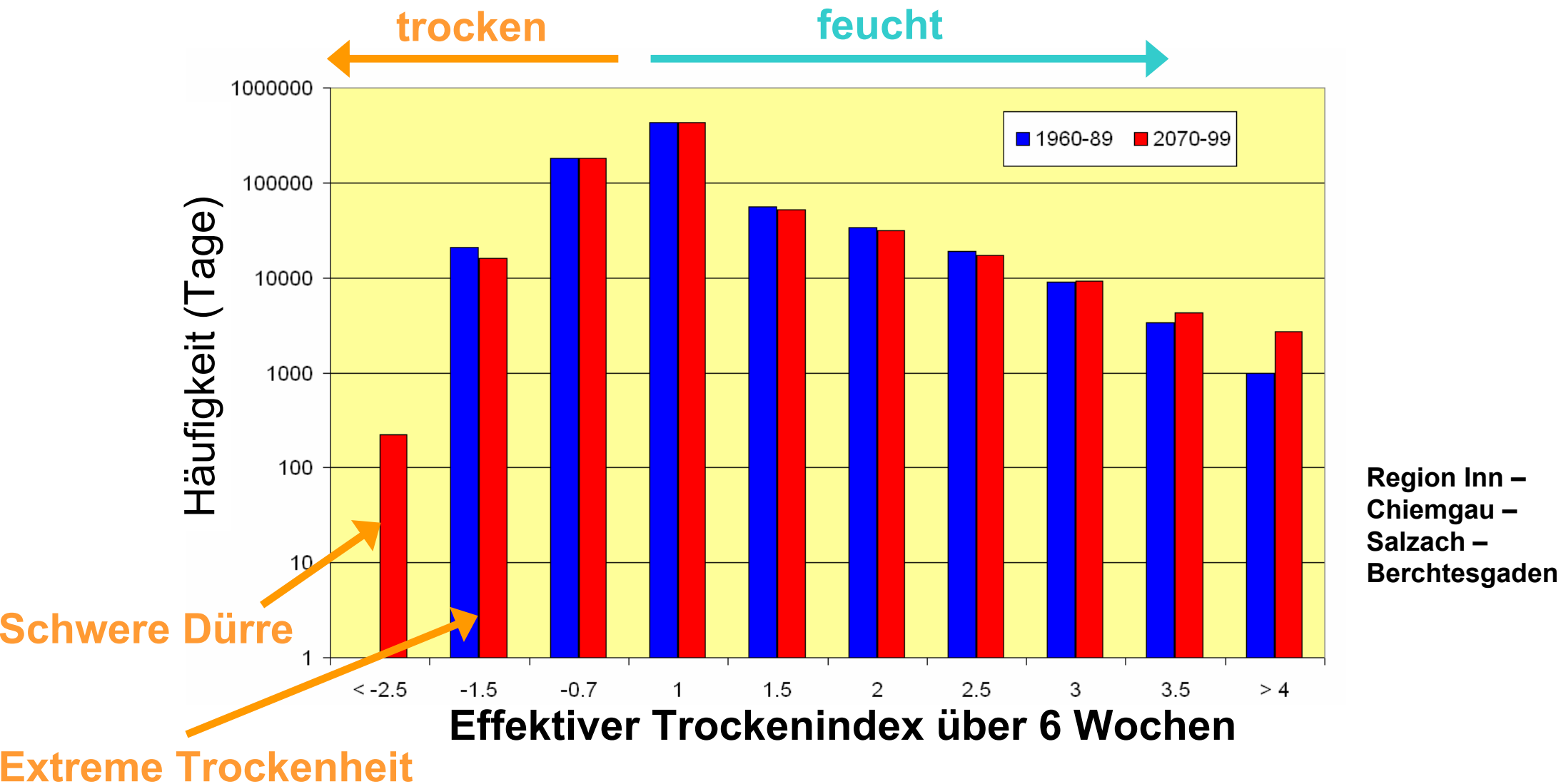
Erhöhte Gefahr **lokaler Überschwemmungen** !



Änderung der **Tagesniederschlagsintensitäten 2070-99 vs. 1960-89**

Erhöhte Gefahr großflächiger Überschwemmungen !

Änderung von Trockenperioden



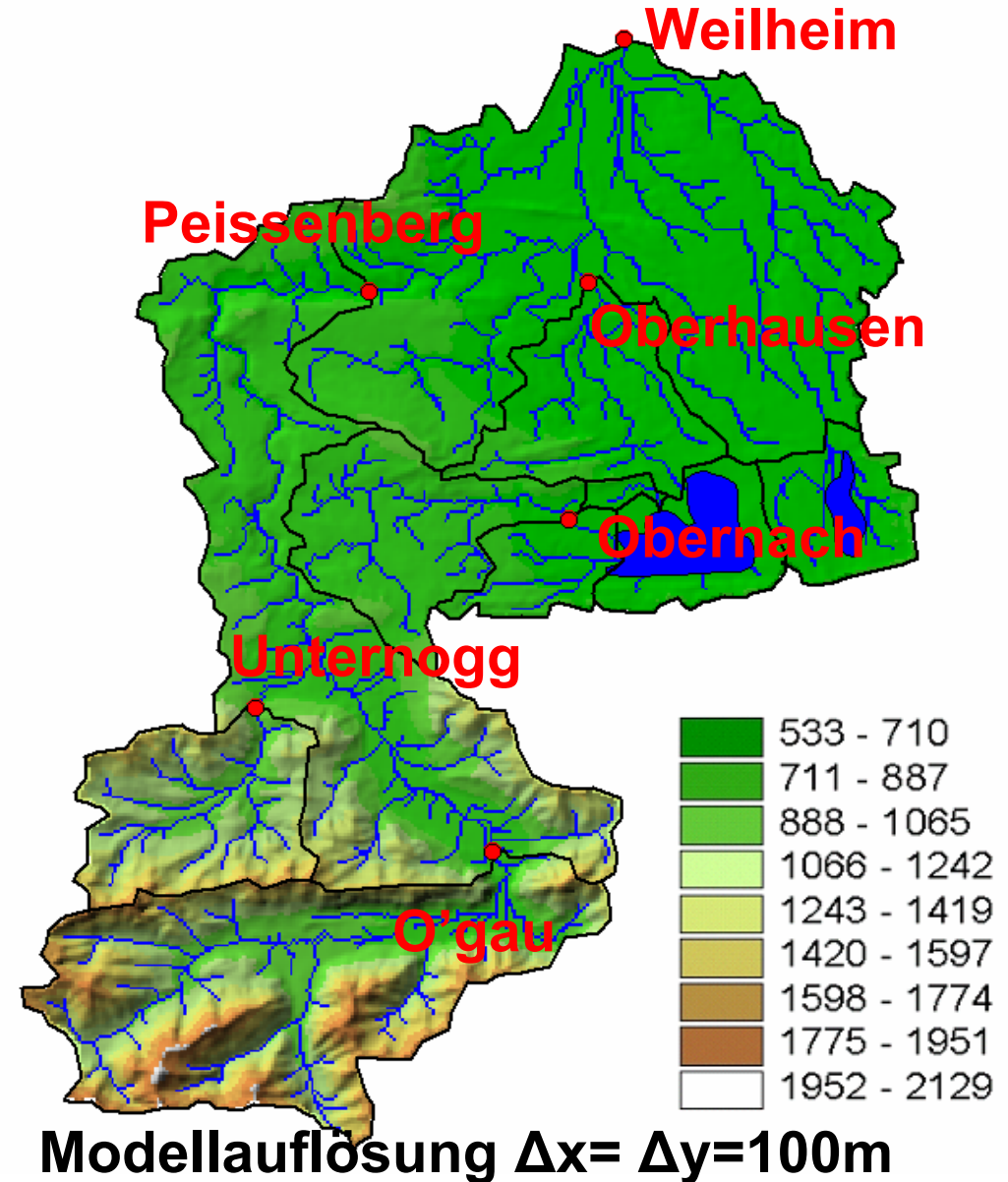
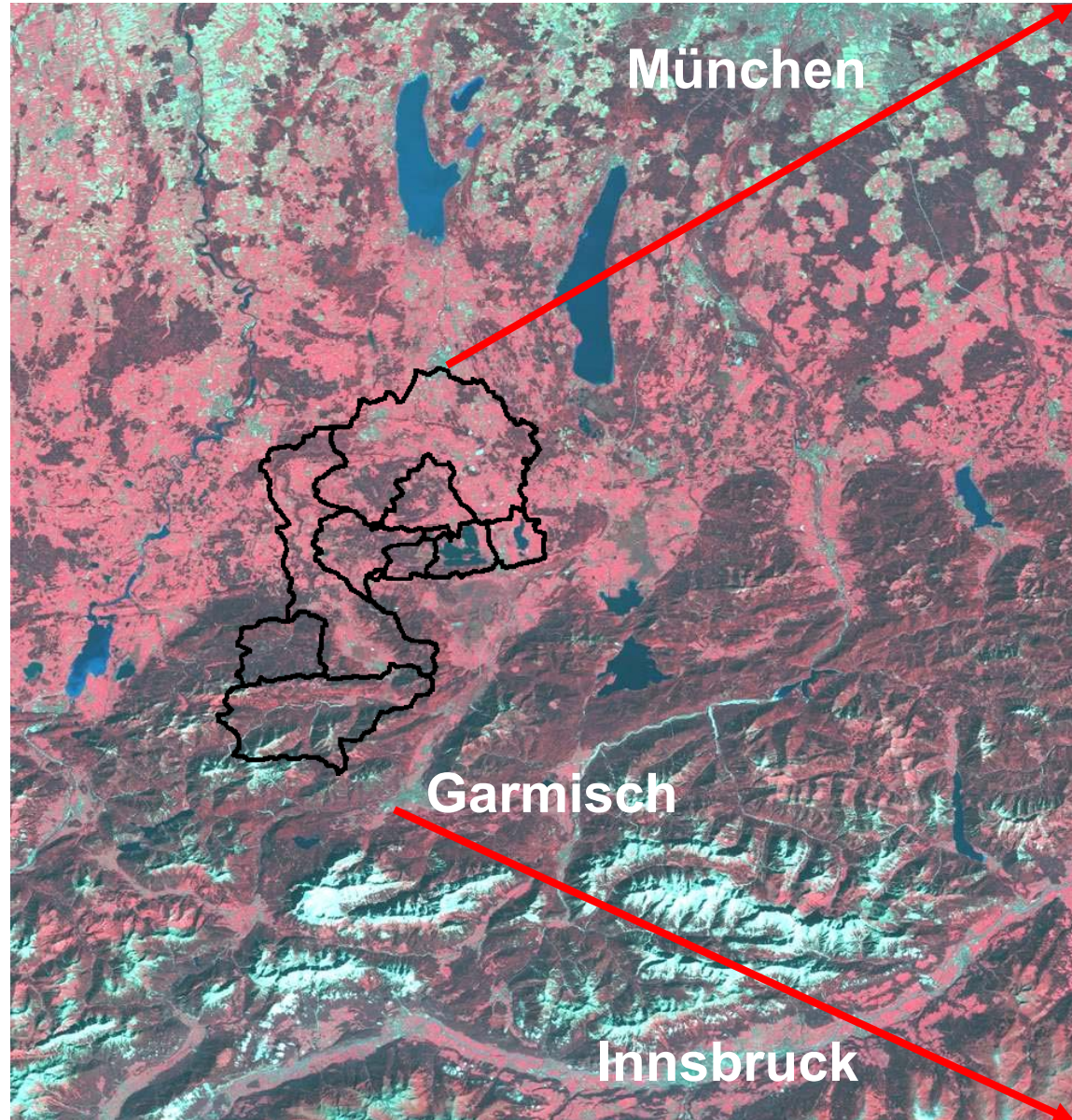
Zunahme der Intensität und Länge von Trockenzeiten!

Bestandsaufnahme: Der beobachtete Klimawandel

Das Klima der Zukunft

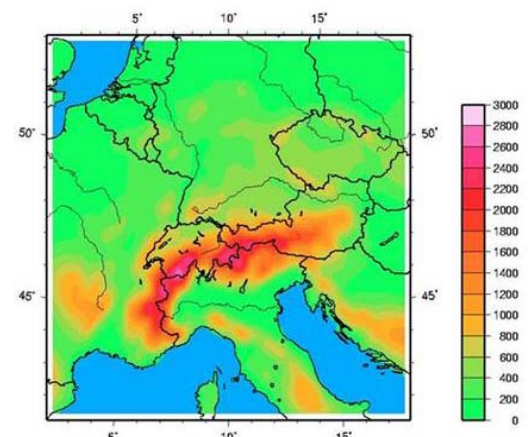
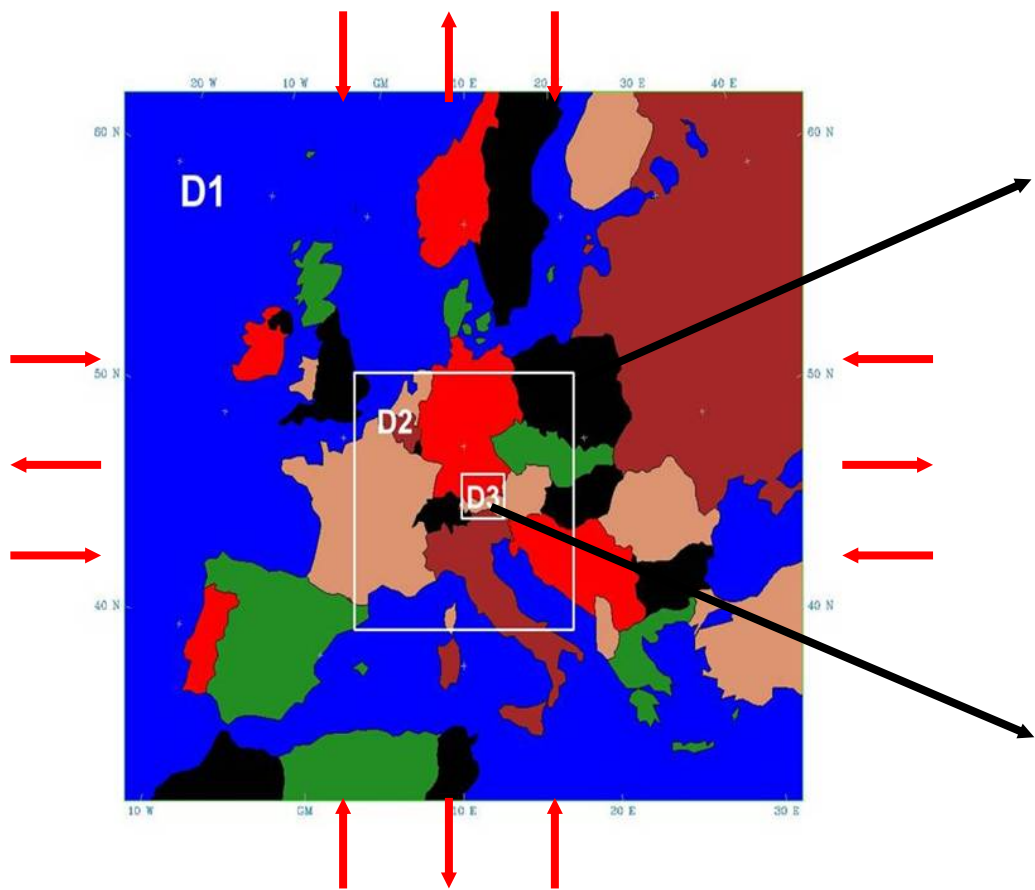
Auswirkungen auf den Wasserhaushalt

Das Ammer Einzugsgebiet

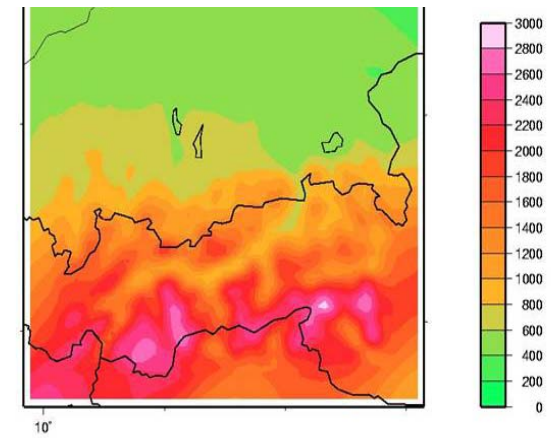


Klimasimulation 1990-99 und 2030-39

ECHAM4 (T42, ca. 2.5°), IS92a



Orographie in 20x20 km² Auflösung

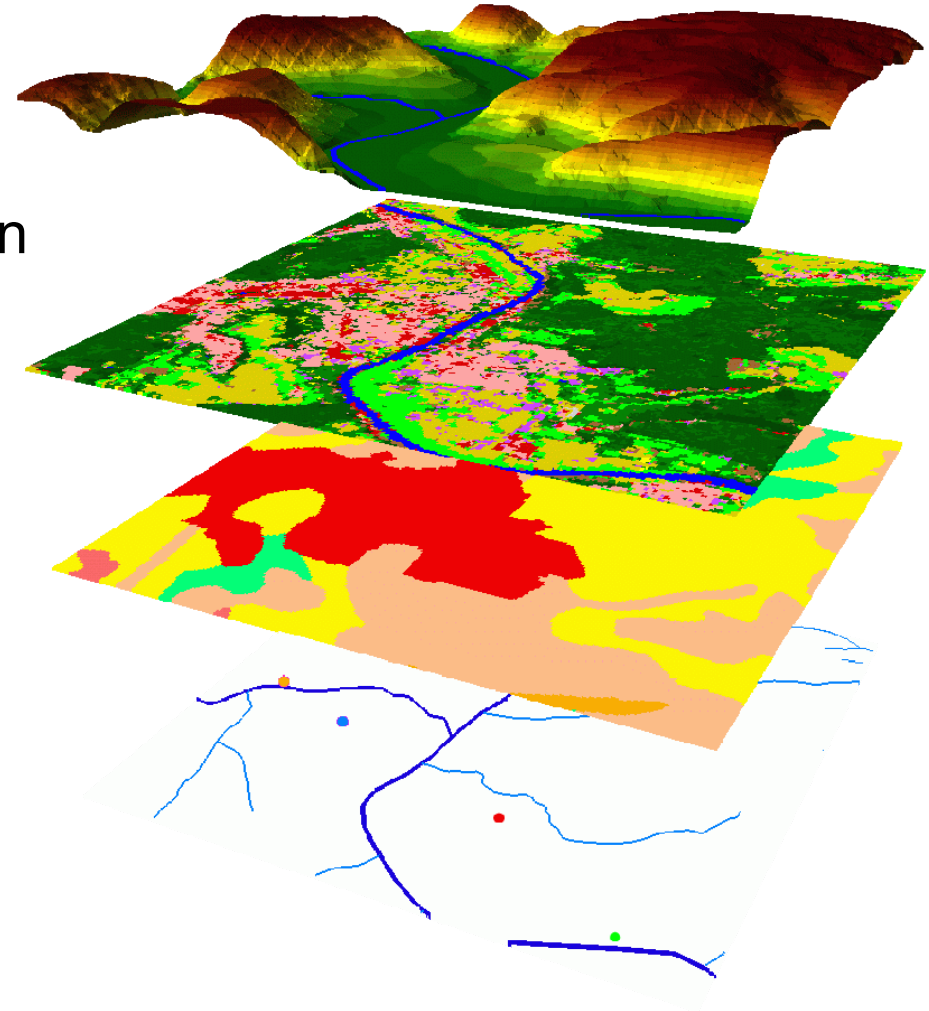


Orographie in 4x4 km² Auflösung

Antrieb Globales Klimaszenario ⇒ Langfristige Entwicklung Wasserhaushalt

Wasserhaushalts-Simulations-Modell

- Flächendifferenziert mit 500m Gitterzellen
 - Höhenmodell,
 - Landnutzung,
 - Bodeninformation,
 - Flussläufe
- Zeitschritt 1 Stunde

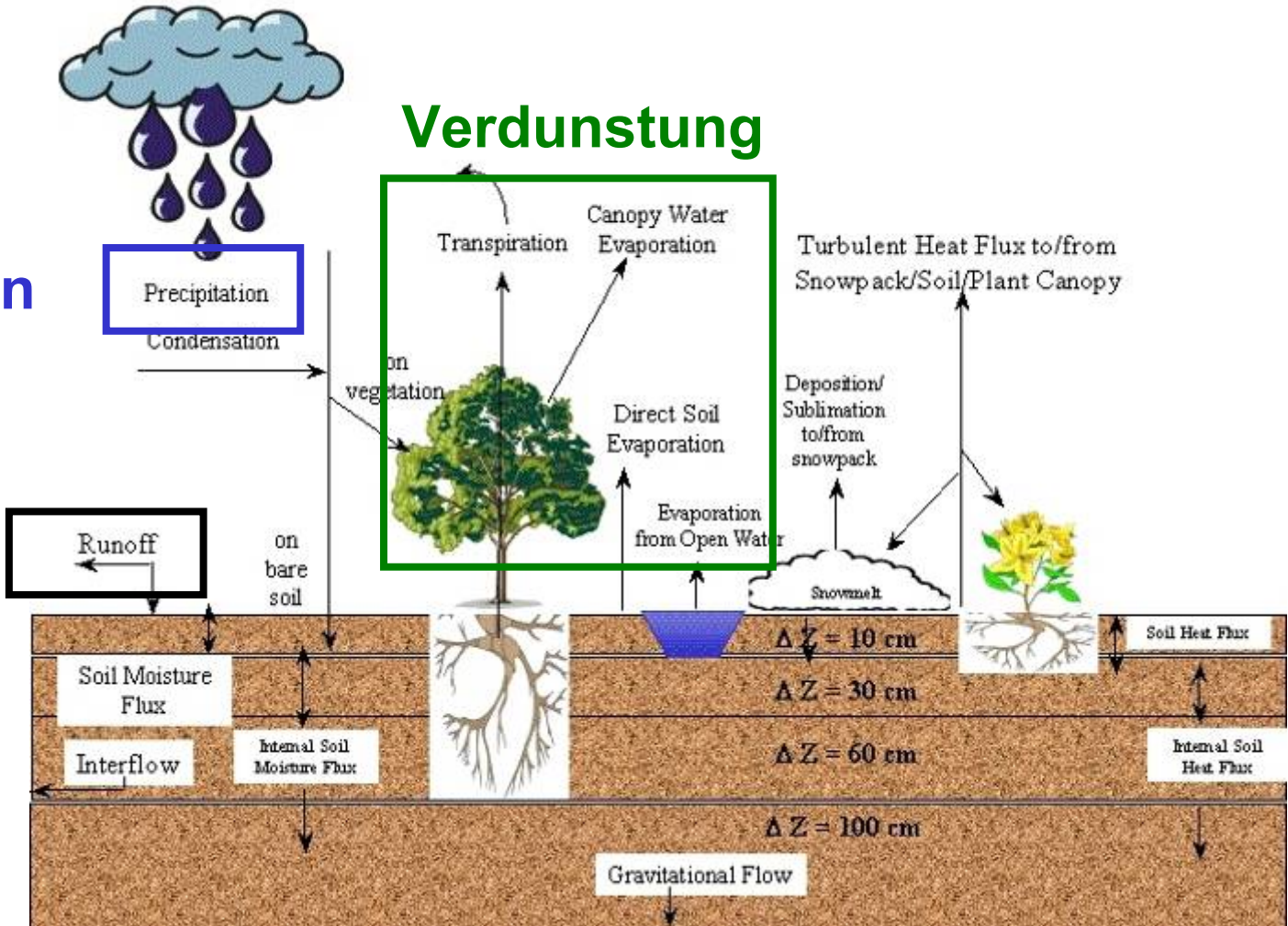


Regionale hydrologische Modellierung

Niederschlag aus
Klimasimulationen

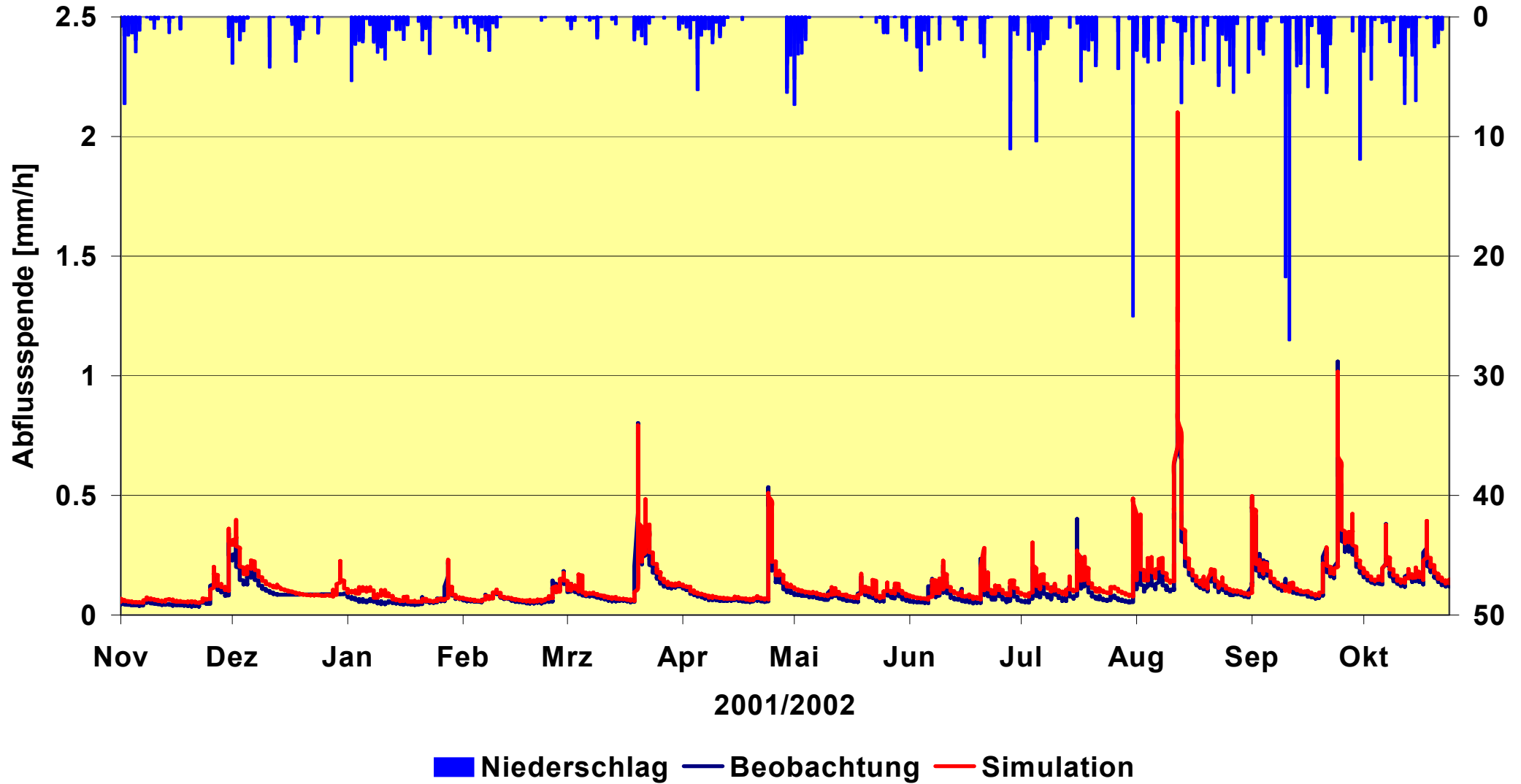
Abfluss

Grundwasser ⇐

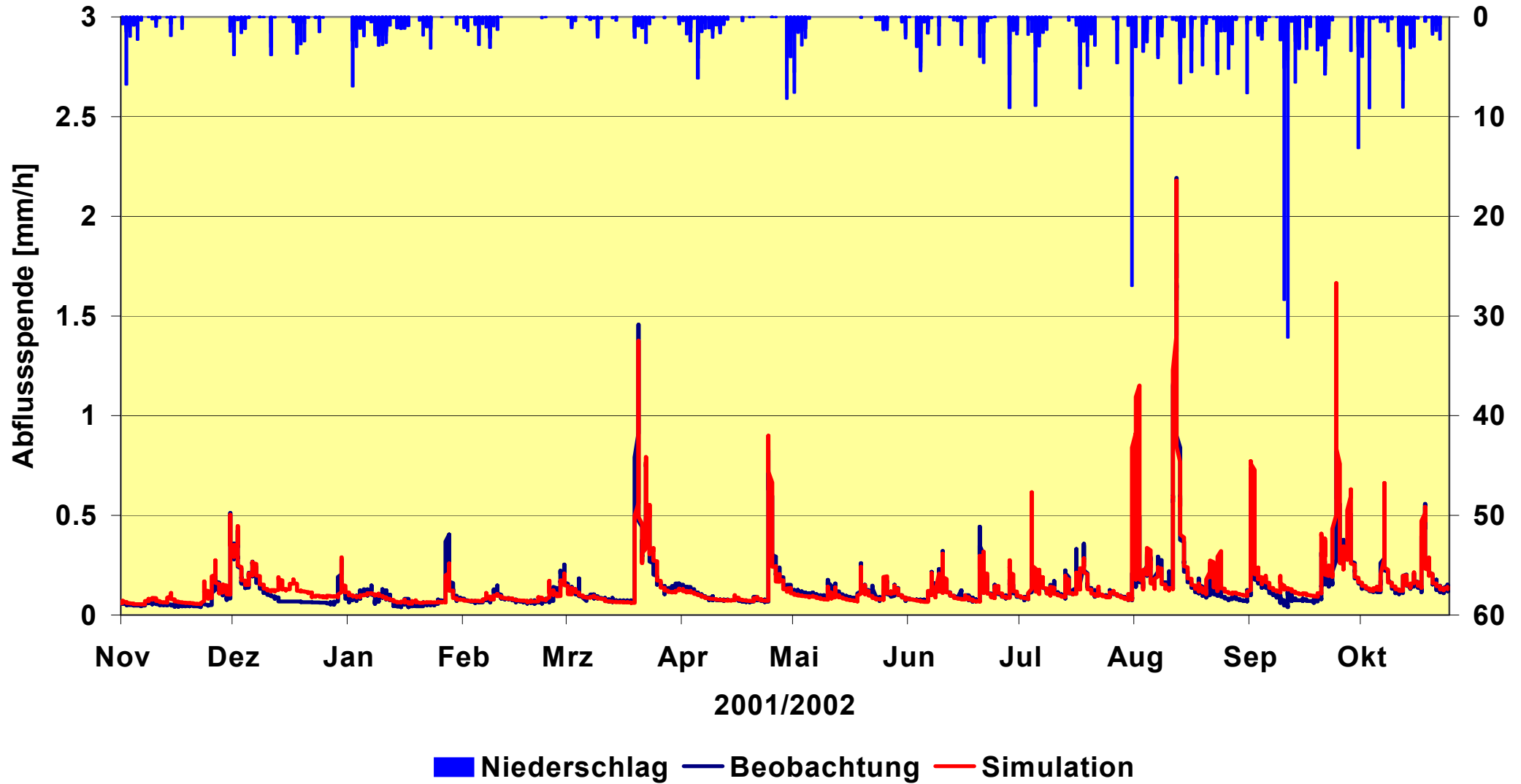


Soil-Vegetation-Atmosphere-Transfer models

Weilheim

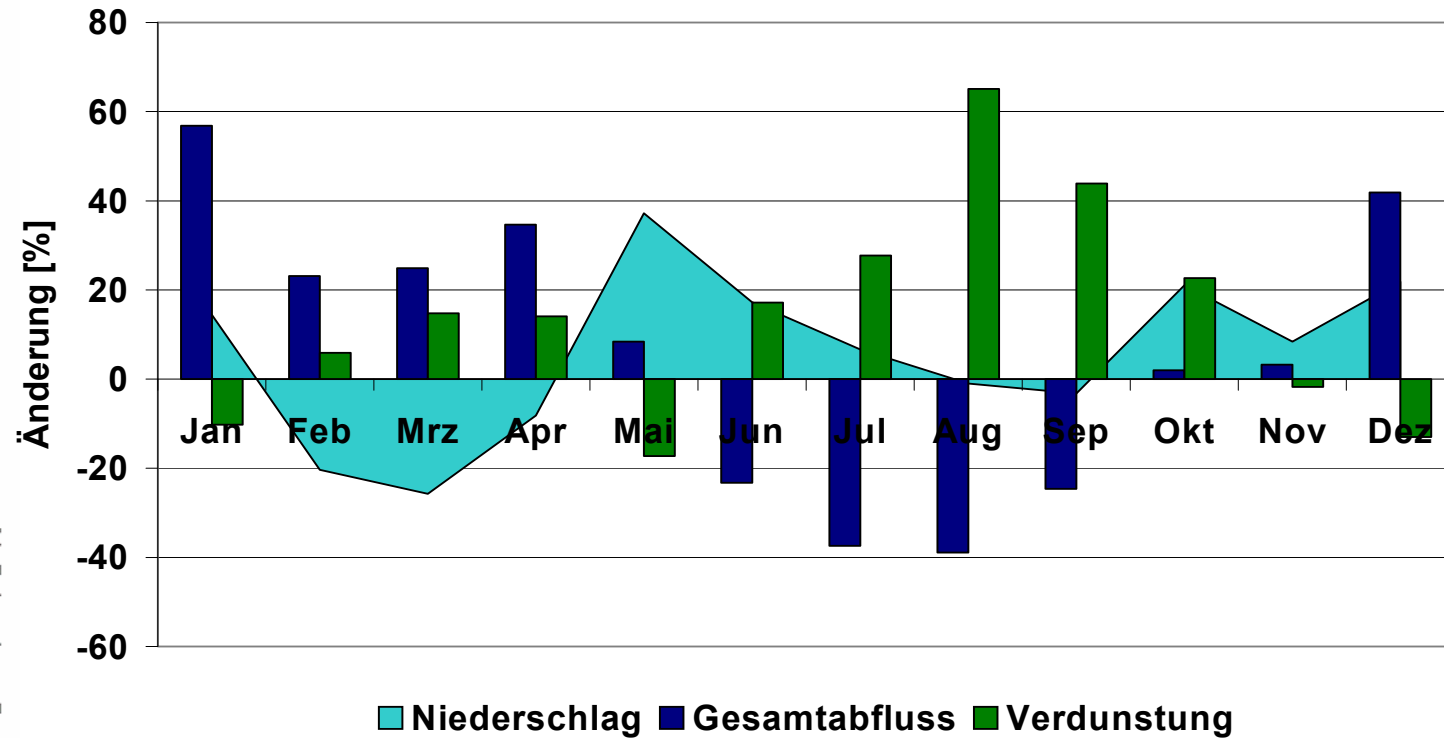
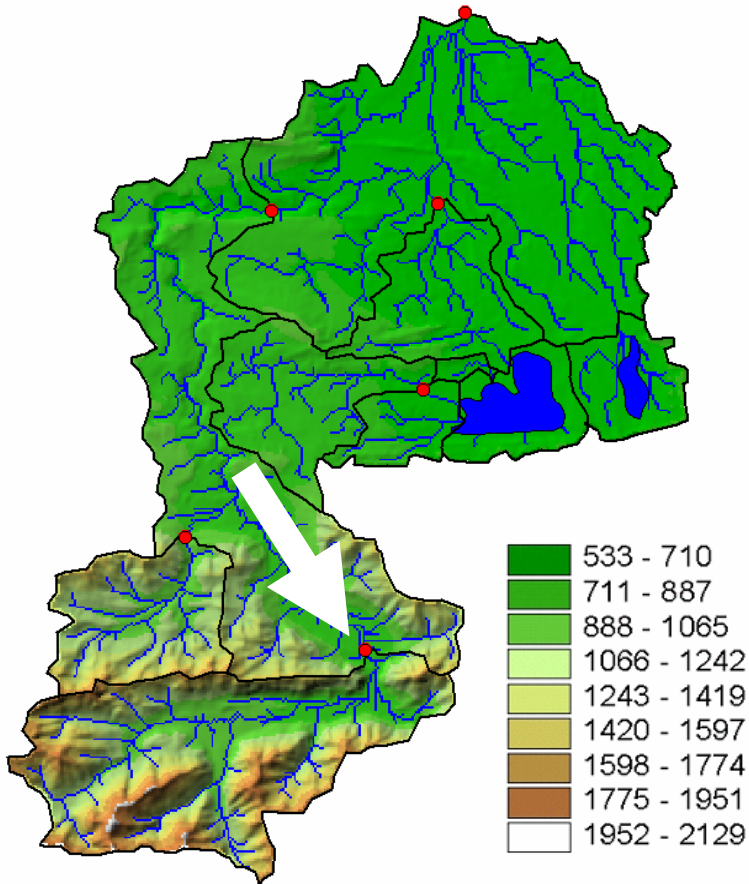


Peißenberg



Modellkette ECHAM4 – MM5 – WaSiM

Oberammergau

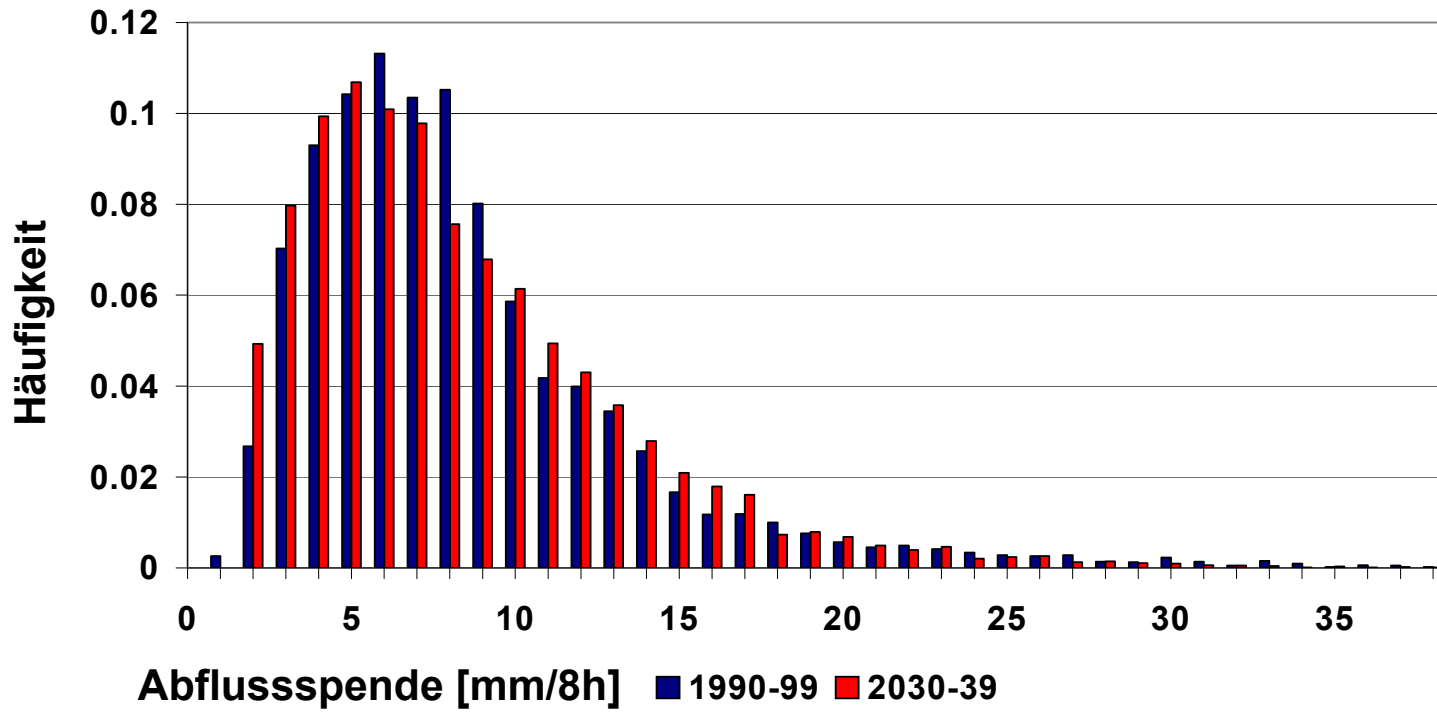
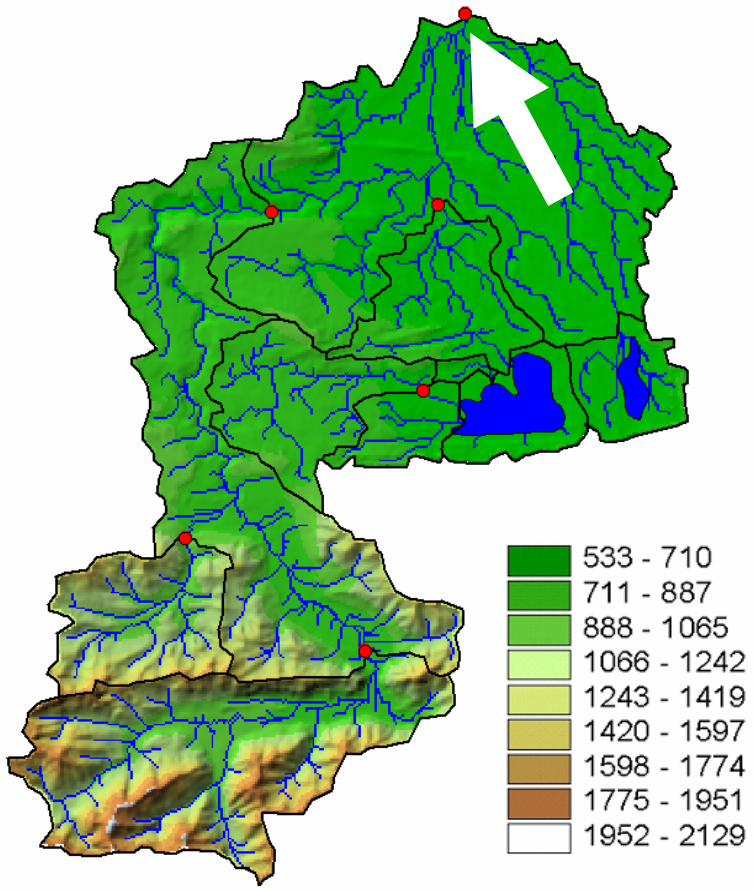


Änderung 1990-99 vs. 2030-39

Zunahme der Winter- (weniger Schnee!) und Verminderung der Sommerabflüsse

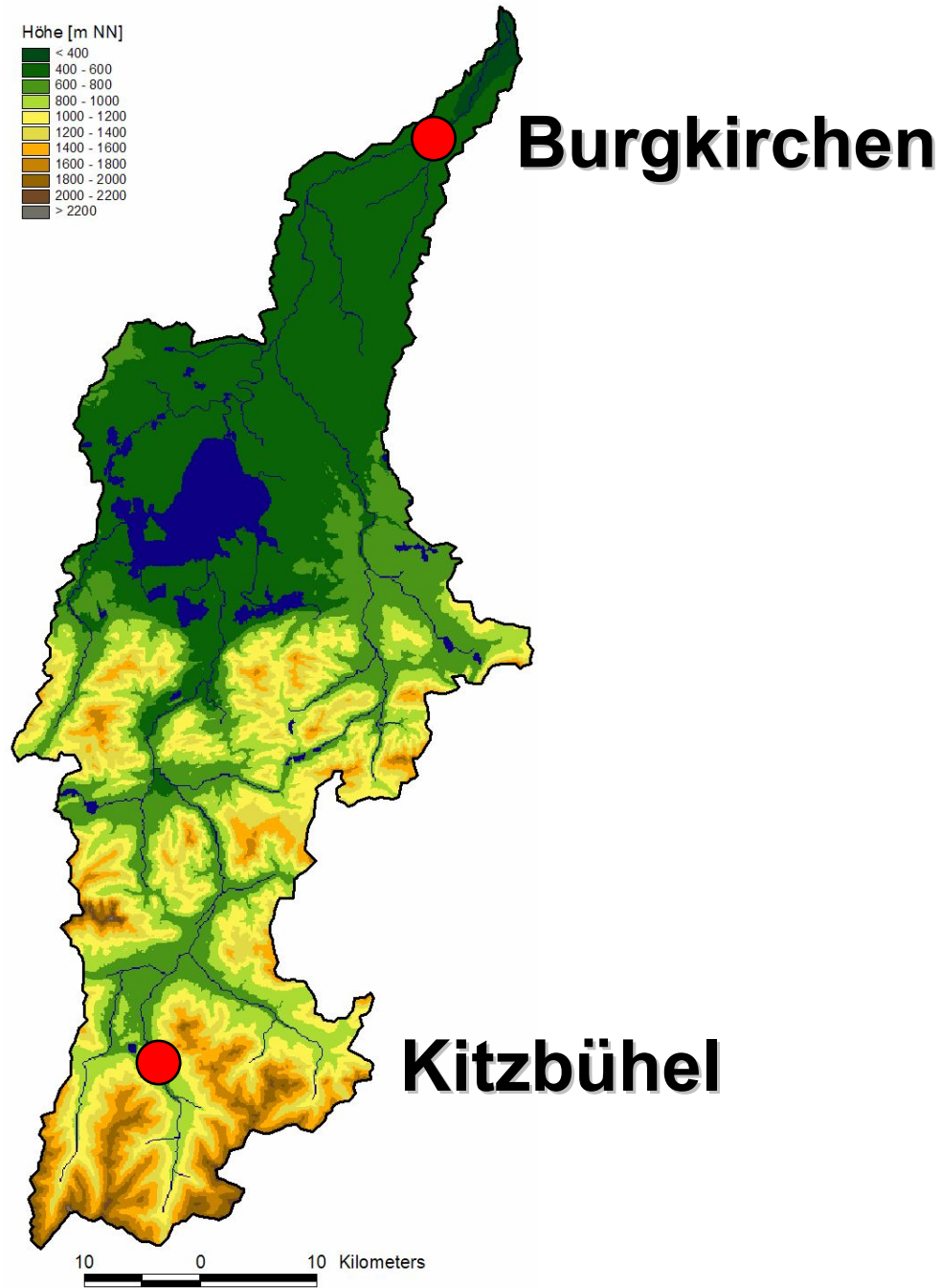
Modellkette ECHAM4 – MM5 – WaSiM

Weilheim



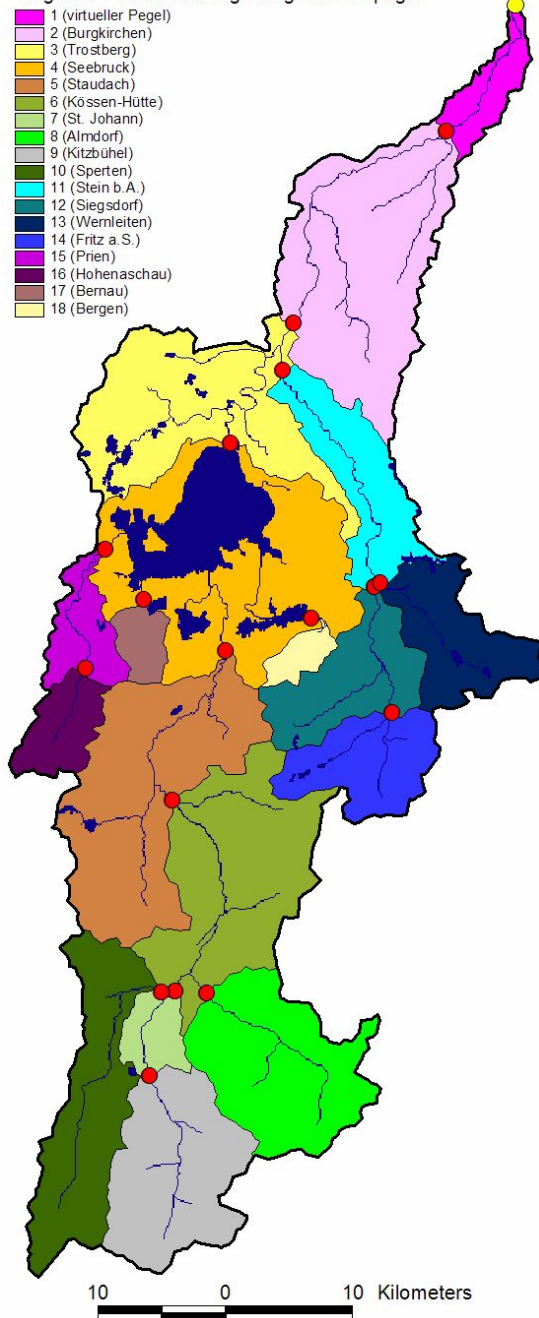
Veränderung der Häufigkeiten: Zunahme von Niedrigwasserperioden

Ausblick: Langfristige Entwicklung der Alz



Ausblick: Langfristige Entwicklung der Alz

Teilgebiets-Codes und zugehörige Abflusspegel



Modellkette ECHAM4 – MM5 - WASIM

- Zeiträume 1960-89 vs. 2070-99
- Abschluss der Arbeiten bis Ende 2008

Auswirkungen der Klimaänderung

- Ansteigende Schadenssummen durch Sturmereignisse
 - Windbruch,
 - Ernteeinbußen,
 - Gebäudeschäden,
 - Gesundheit.

- Änderung der naturnahen und land- bzw. forstwirtschaftlich genutzten Ökosysteme durch
 - Dürren,
 - Waldbrände,
 - Ausbreitung von Schädlingen,
 - veränderte Vegetationsperiode.

Projekt **Klimawerkstatt**: Klimaschutz- und Anpassungspotenziale einer Region und ihre Erschließung Chiemgau - Inn - Salzach - Berchtesgadener Land

<http://www.klimawerkstatt.wzw.tum.de/>

Klimawandel - Das Ende der Geranien?

