



## Untersuchung und Bewertung möglicher Folgen des Klimawandels für das Grundwasser im Süden Deutschlands -

### Möglichkeiten und Grenzen integrierter Modelle

Roland Barthel,

Jungwissenschaftlergruppe Grundwasserhydraulik und Grundwasserwirtschaft,

Institut für Wasserbau,

Universität Stuttgart



#### Inhalt

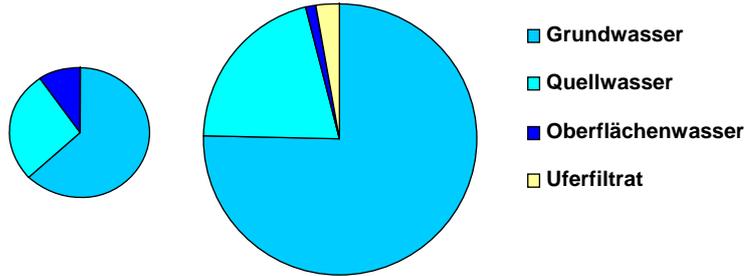
1. Hintergrund: Grundwasser, Klimawandel und integrierte Modelle
2. Grundkonzepte der integrierten Modellierung: Beispiele aus *GLOWA-Danube* und *RIVERTWIN*
3. Grenzen und Möglichkeiten der integrierten Modellierung:
  1. Beispiel: Kopplung Grundwassermodelle – „Hydrologische Modelle“
  2. Beispiel: Kopplung Grundwassermodelle - Sozioökonomische Modelle
4. Schlussfolgerungen

## Grundwassernutzung im Donaeinzugsgebiet

### öffentliche Trinkwasserversorgung

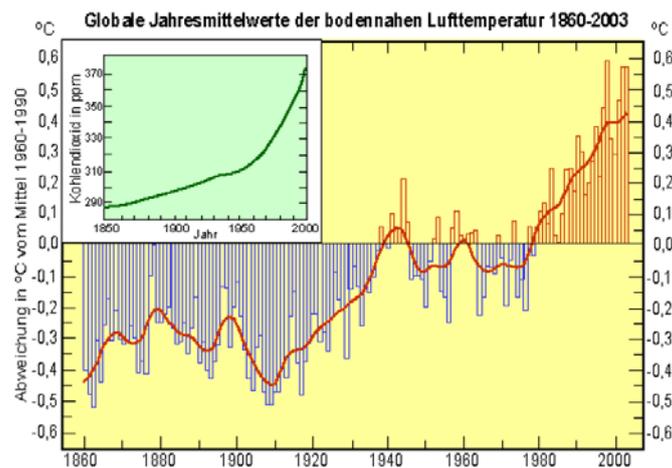
Baden-Württembergisches  
Donaeinzugsgebiet  
163 Mio m<sup>3</sup>/a

Bayerisches  
Donaeinzugsgebiet  
664 Mio m<sup>3</sup>/a



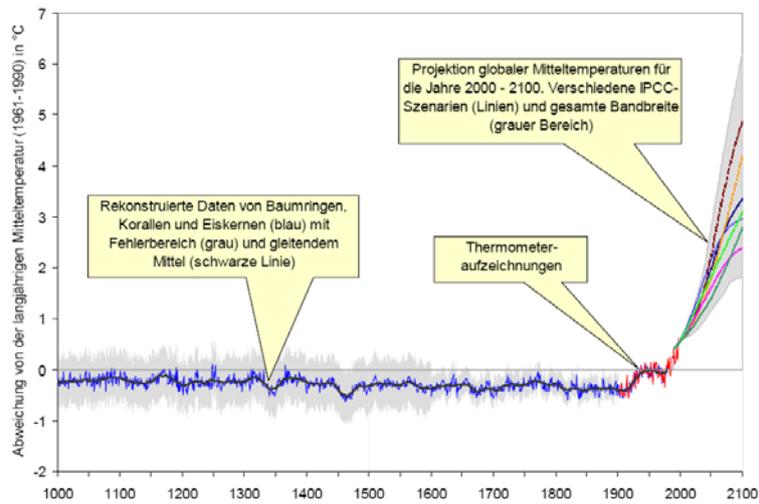
nach Emmert, 1999

## Globaler Klimawandel: Messbar



Aus: Forschungsbericht 201 41 253 UBA-FB 000844: Klimawandel in Deutschland Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme (2006)

### Globaler Klimawandel: Historisch und Projektion



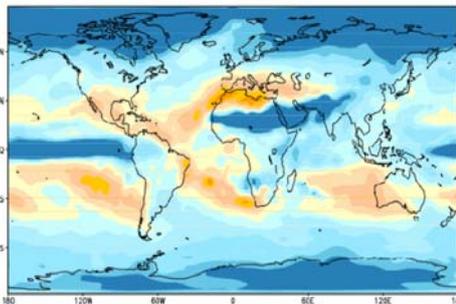
Entwicklung der Mitteltemperatur der Nordhemisphäre in den letzten 1000 Jahren und Projektionen für die nächsten hundert Jahre (IPCC, 2001; Mann et al., 1999).

Aus: Forschungsbericht 201 41 253 UBA-FB 000844: Klimawandel in Deutschland Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme (2006)

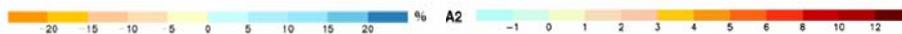
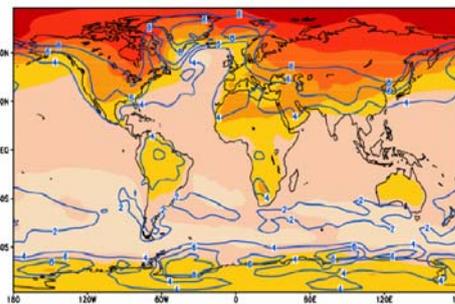
### Global – Regional ?

# 2100

Niederschlag



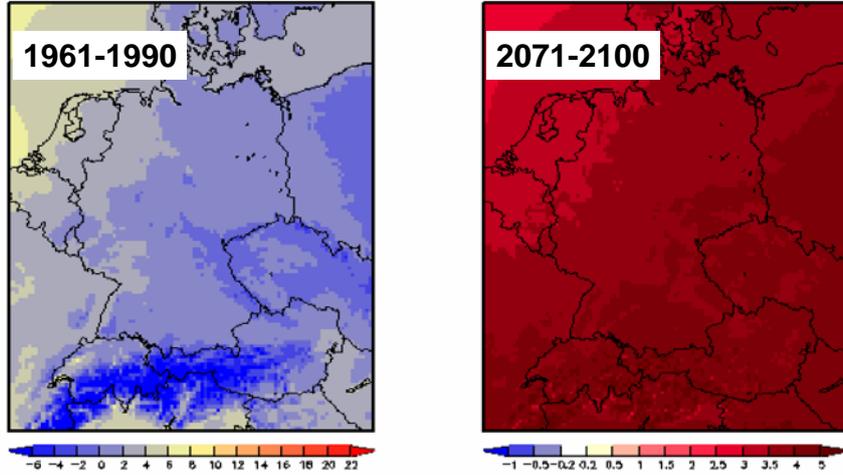
Temperatur



IPCC

### Regional: Temperatur

Abb.2: Wintertemperatur (°C) der Periode 1961-90 (links) und Temperaturanstieg im Jahresmittel für die Jahre 2071-2100 gegenüber dem Vergleichszeitraum 1961-90 (rechts). Szenario A1B.



### Wintertemperaturen

aus: Künftige Klimaänderungen in Deutschland – Regionale Projektionen für das 21. Jahrhundert, Hintergrundpapier, April 2006 (UBA, MPI)

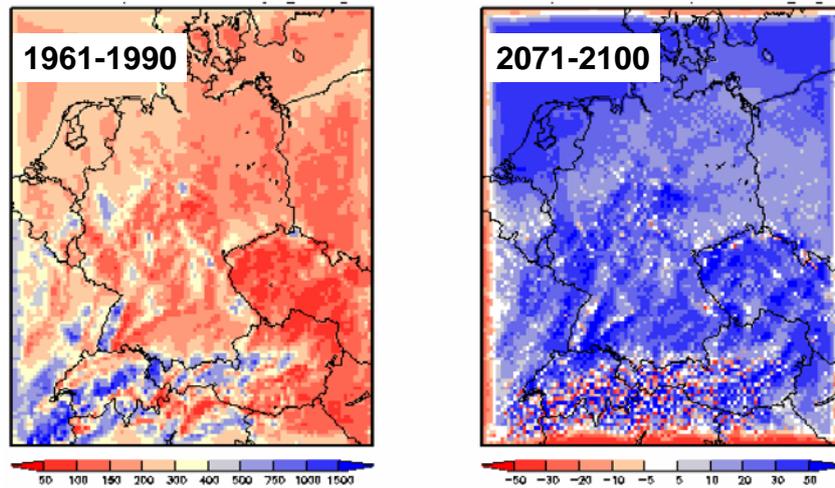
Universität Stuttgart

Geowissenschaftliches Kolloquium, Universität Jena, 22. Januar 2007

7

### Regional: Niederschläge - Winter

Abb.4: Winterniederschläge (mm) der Periode 1961-90 (links) und Niederschlagsveränderung im Jahresmittel für die Jahre 2071-2100 gegenüber dem Vergleichszeitraum 1961-90 (rechts). Szenario A1B.



### Winterniederschläge

aus: Künftige Klimaänderungen in Deutschland – Regionale Projektionen für das 21. Jahrhundert, Hintergrundpapier, April 2006 (UBA, MPI)

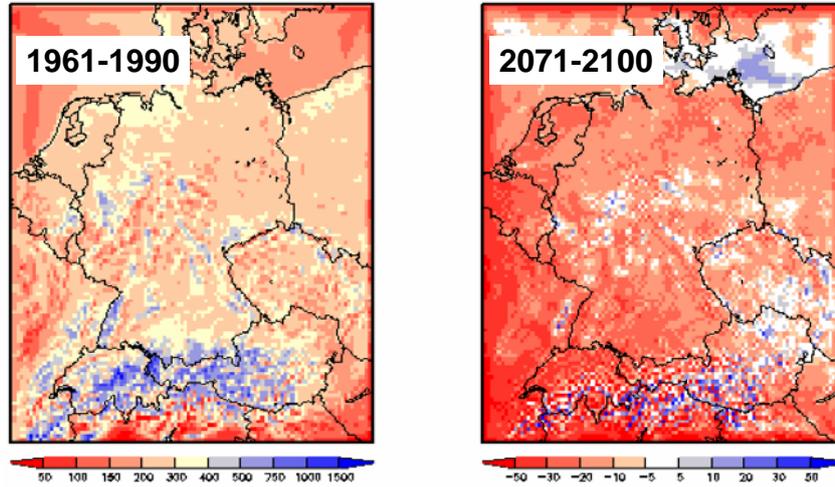
Universität Stuttgart

Geowissenschaftliches Kolloquium, Universität Jena, 22. Januar 2007

8

### Regional: Niederschläge - Sommer

Abb. 3: Sommerniederschläge (mm) der Periode 1961-90 (links) und Niederschlagsveränderung im Jahresmittel für die Jahre 2071-2100 gegenüber dem Vergleichszeitraum 1961-90 (rechts). Szenario A1B.



### Sommerniederschläge

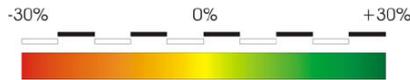
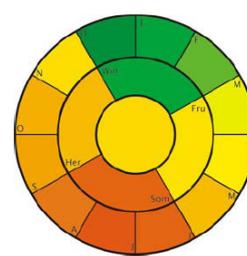
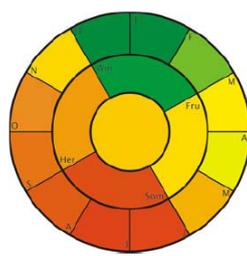
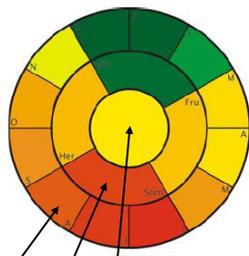
aus: Künftige Klimaänderungen in Deutschland – Regionale Projektionen für das 21. Jahrhundert, Hintergrundpapier, April 2006 (UBA, MPI)

### Zeitliche Differenzierung (Niederschlag, D)

Emissionsszenario A1B

Emissionsszenario A2

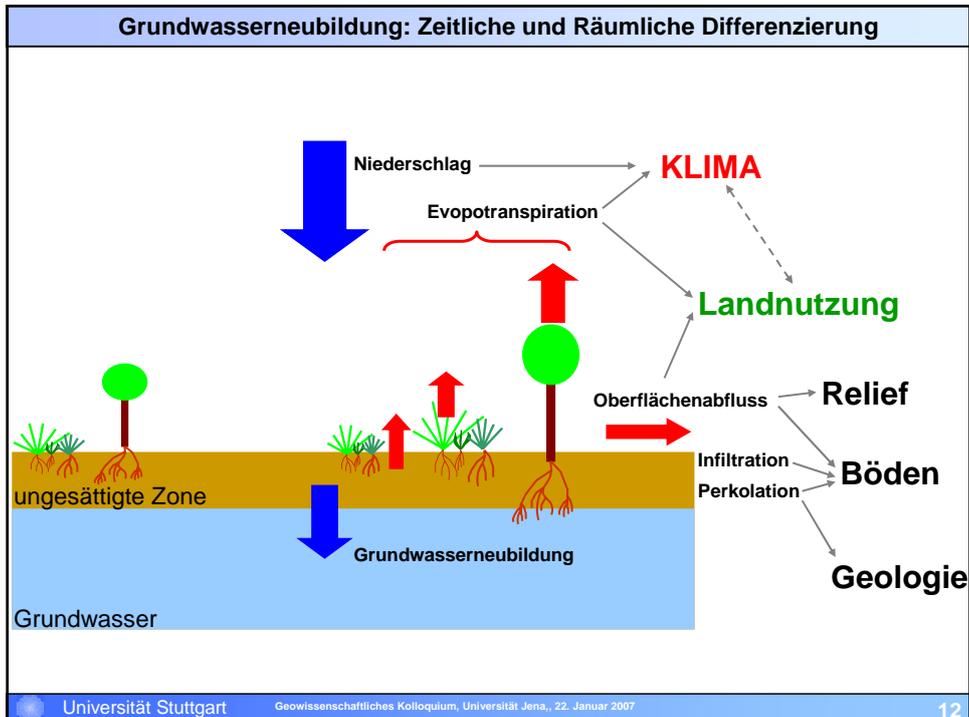
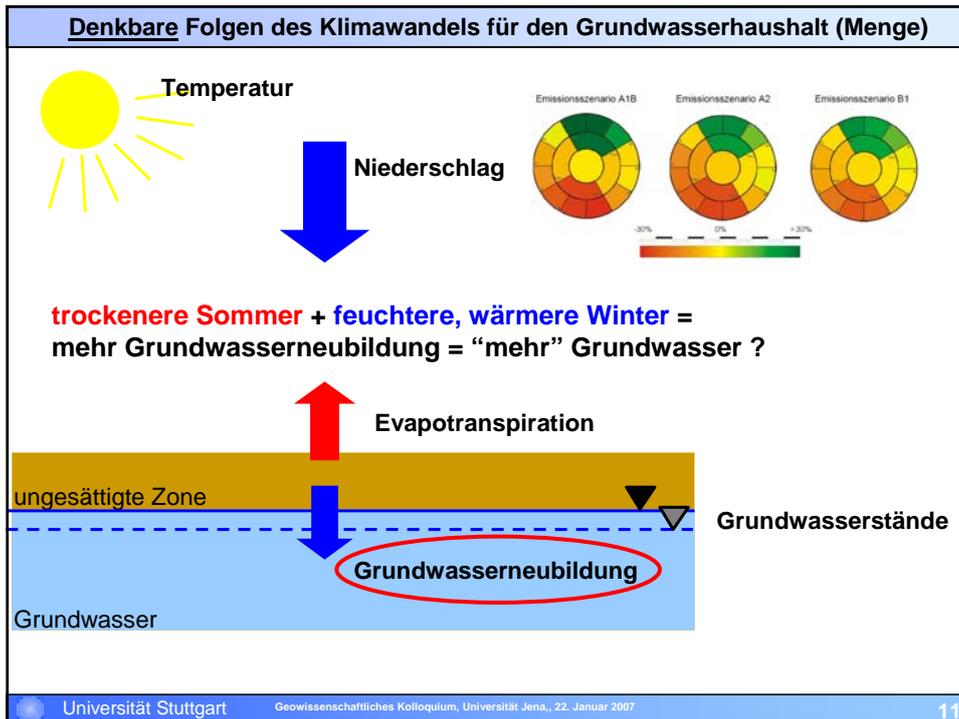
Emissionsszenario B1



Jahresmittel  
Jahreszeitenmittel  
Monatsmittel

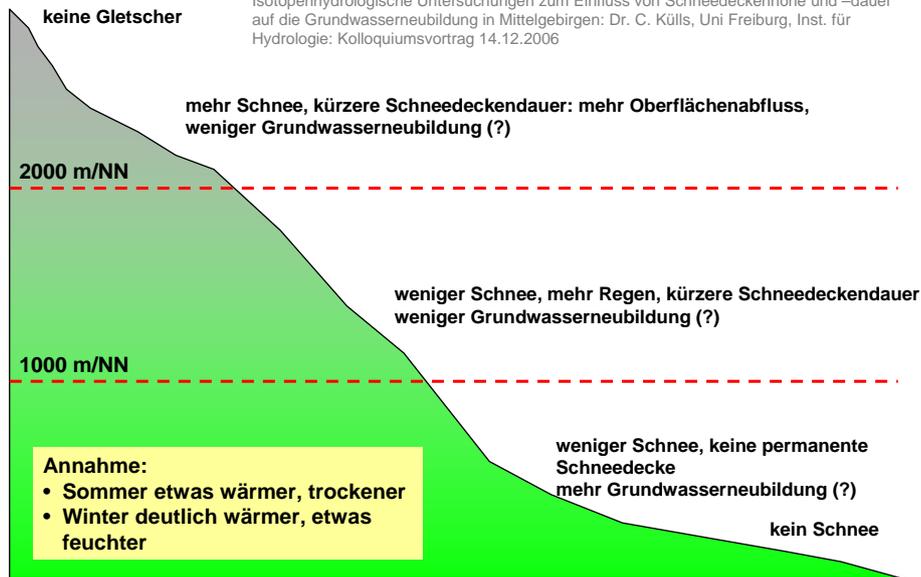
Veränderungen im Zeitraum 2071/2100 relativ zu 1961-1990

UBA: Hintergrundpapier „Anpassung an Klimaänderungen in Deutschland“ Oktober 2006



## Räumlich-Zeitliche Differenzierungen der GWN: Beispiel Schnee

Isotopenhydrologische Untersuchungen zum Einfluss von Schneedeckenhöhe und –dauer auf die Grundwasserneubildung in Mittelgebirgen: Dr. C. Külls, Uni Freiburg, Inst. für Hydrologie: Kolloquiumsvortrag 14.12.2006



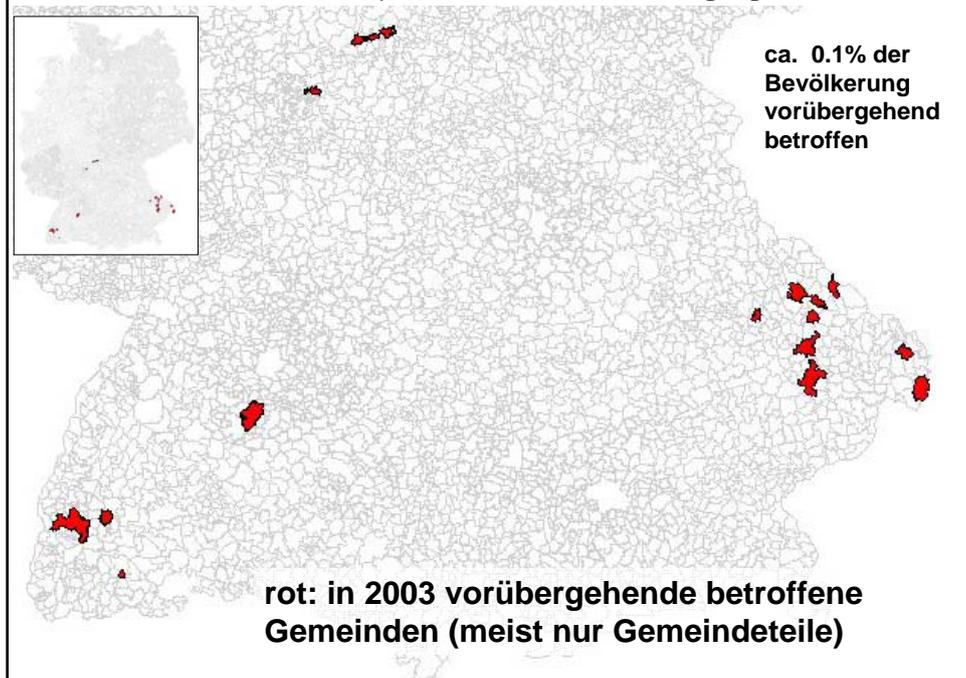
## Denkbare Folgen des Klimawandels für den Grundwasserhaushalt (Menge)

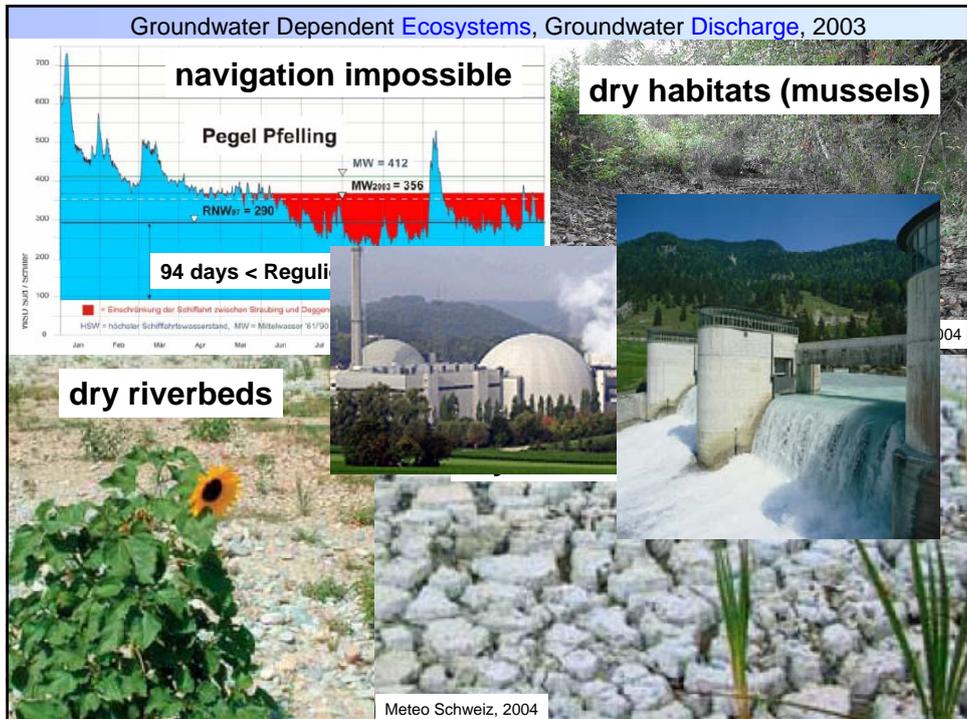
- Veränderungen der **Grundwasserneubildung** (zeitlich / räumlich differenziert) aufgrund von:
  - Zu-/Abnahme der Niederschläge insgesamt
  - Zu-/Abnahme der Evapotranspiration (Temperatur/Niederschlag) insgesamt
  - Erhöhung der **Intensität** von Niederschlagsereignissen (z.B. mehr Oberflächenabfluss)
  - Geänderte **zeitliche Verteilung** der Niederschläge (Sommer / Winter)
  - Geänderte **räumliche** Verteilung der Niederschläge (Sommer / Winter)
  - Veränderung von Schneedeckenhöhe und –dauer
  - indirekt über klimabedingte **Landnutzungs-/Landbedeckungsänderungen**

### Denkbare Folgen des Klimawandels für den Grundwasserhaushalt (Menge)

- unmittelbare Folgen geänderter Grundwasserneubildung:
  - Veränderungen der Grundwasserstände und -Speicherung:  
Steigend - Fallend, Erhöhung der saisonalen Variabilität
- mittelbare Folgen steigender Grundwasserstände:
  - **Vernässung, (Hochwässer) → Gebäudeschäden, Landwirtschaft (lokale Phänomene)**
- mittelbare Folgen sinkender oder stärker variabler Grundwasserstände:
  - **Rückgang der Grundwasserspende in Trockenperioden → Ökologie, Schifffahrt, Energieerzeugung, Kühlwasser**
  - **Wasserstress in grundwasserabhängigen Ökosystemen**
  - **Verringertes Dargebot (potentielle Entnahmemengen) für die Wasserversorgung (Trink-, Brauchwasser, Agrarsektor, Tourismus ... )**

### 2003: Konsequenzen für die Wasserversorgung

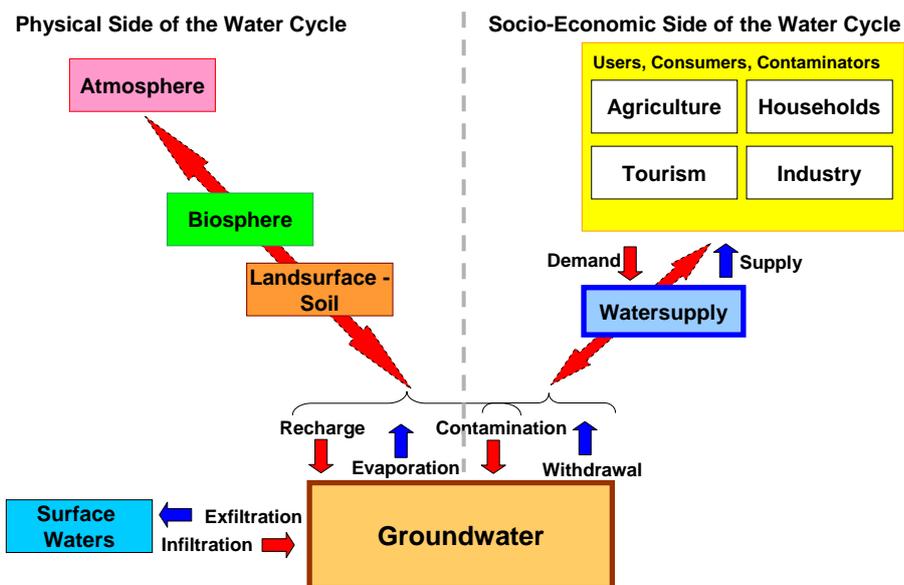




### Zwischenfazit: Klimawandel und Auswirkungen auf das Grundwasser

- Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser sind wahrscheinlich, aber räumlich und zeitlich differenziert und nicht mit „einfachen“ Modellen vorherzusagen
- Wesentlich ist eine möglichst realistische Beschreibung und Prognose der Änderungen der Grundwasserneubildung
- Versorgungsengpässe (Trinkwasser) in SD unwahrscheinlich
- Problematisch in SD könnten die zunehmenden Sommer–Winter-Kontraste sein:
  - im Sommer sinkende Grundwasserstände und verringerte Grundwasserspende in schnell reagieren Aquiferen
  - Häufung extremer Niedrigwassersituationen und Temperaturerhöhung in Sommermonaten, ökologische & ökonomische Probleme
  - Probleme mit Brauchwasser (Kühlung) und Bewässerung ???
- Das Grundwasser ist kein isoliertes System, eine integrative Betrachtung ist erforderlich

### Ein „integrierter“ Blick auf den Wasserkreislauf aus der Grundwasserperspektive

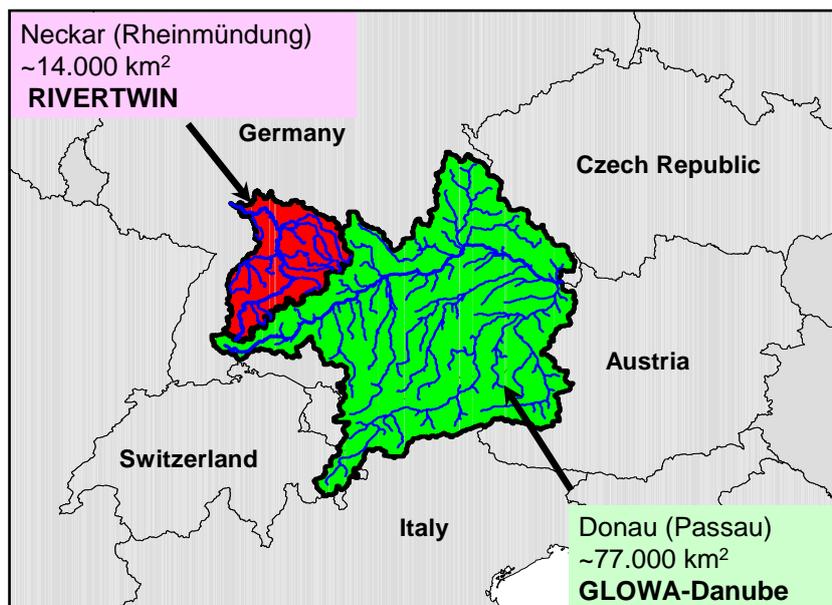


**Integrierte Modelle zur Beschreibung des  
Wasserkreislaufs für das  
Flusseinzugsgebietsmanagement und zur Untersuchung  
von Folgen des Globalen (Klima-)Wandells**

**GLOWA-Danube**

**RIVERTWIN**

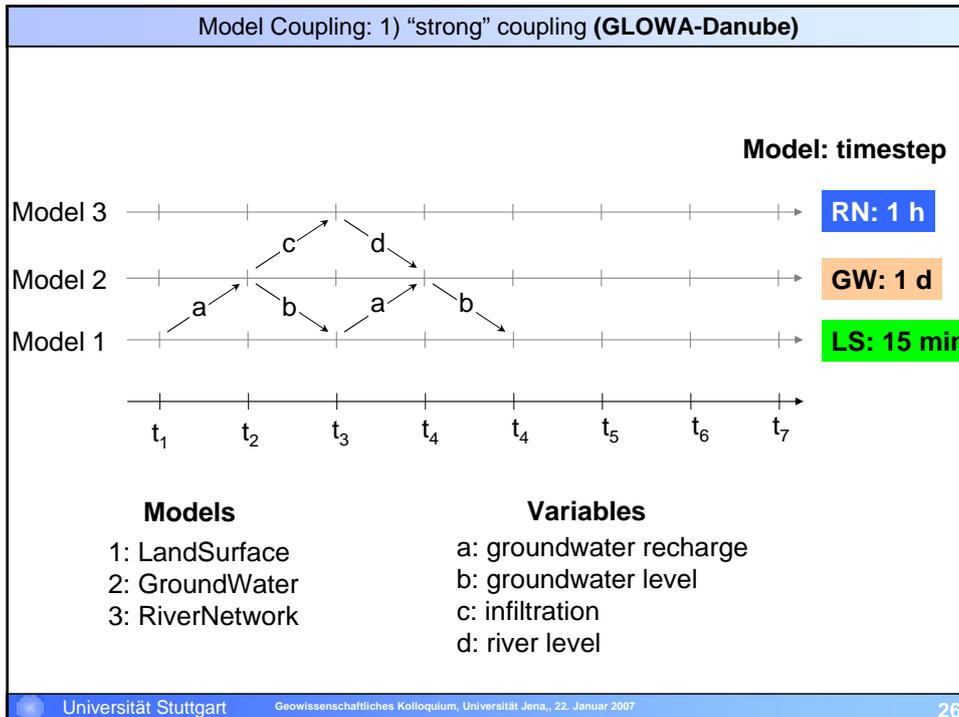
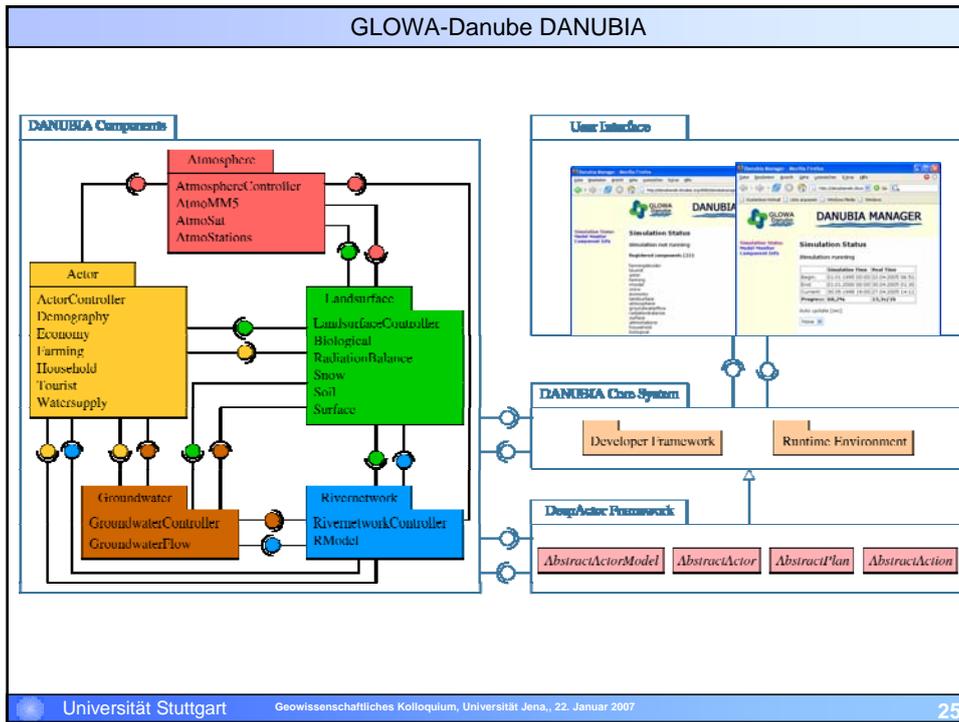
**2) Integrierten Modellierung : GLOWA-Danube und RIVERTWIN**



Project Overview		
	RIVERTWIN	GLOWA-Danube
<b>Funding</b>	European Commission	German Ministry of Research and Education
<b>Duration</b>	01.03.2004 to 28.02.2007: <b>3 years</b>	01.01.2001 to 30.04.2010: <b>9 years in three phases</b>
<b>Budget</b>	~ 3 Million Euro	~ 16 Million Euro
<b>Partners</b>	6 (Neckar only)	12
<b>Scientists</b>	~ 15 (Neckar only)	~ 40
<b>Stakeholders / Administration</b>	Included in DSS development from the beginning	Included in DSS development at a later stage (first results)
<b>Overall Objective</b>	Research <b>and</b> Development of practical tools	Research mainly: Advanced DSS Technology

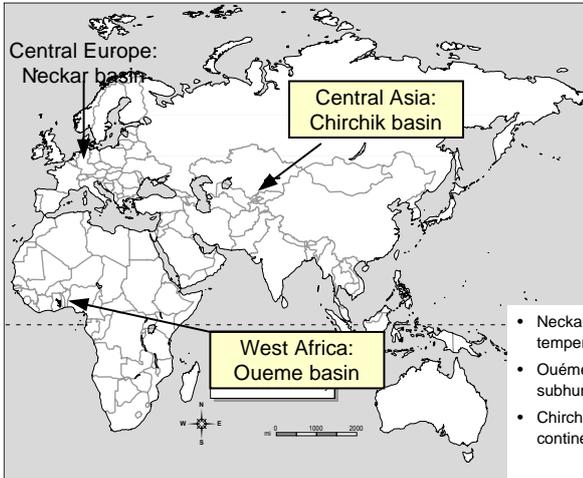


GLOWA-Danube: Zusammenfassung
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>‚Global Change‘ (i.w. Klima) Folgen im Donaeinzugsgebiet</b> (Wasser, Landnutzung, Landwirtschaft, Ökonomie, Tourismus ....)</li> <li>• <b>Entscheidungs-Unterstützungs-System ‘DANUBIA’</b>, bestehend aus 16 voll gekoppelten Einzelmodellen</li> <li>• <b>Integrierter / Interdisziplinärer Ansatz:</b> 12 Gruppen aus unterschiedlichen Disziplinen (Meteorologie ... Tourismusforschung)</li> <li>• <b>Teilprojekt Grundwasser und Wasserversorgung IWS Stuttgart:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Grundwasserströmungsmodell und ein Modul für Nitrattransport und –Abbau im GW</li> <li>– Wasserversorgungs- und Verteilungsmodell</li> </ul> </li> </ul>



## RIVERTWIN (www.rivertwin.org)

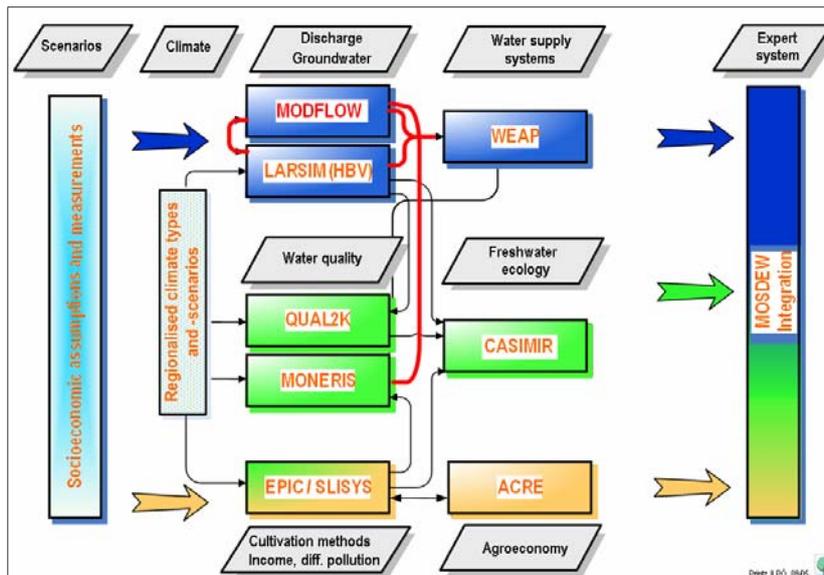
- **EU Global Water Initiative (www.euwi.org)** → Übertragung der Prinzipien der EU-WRRL auf andere Kontinente

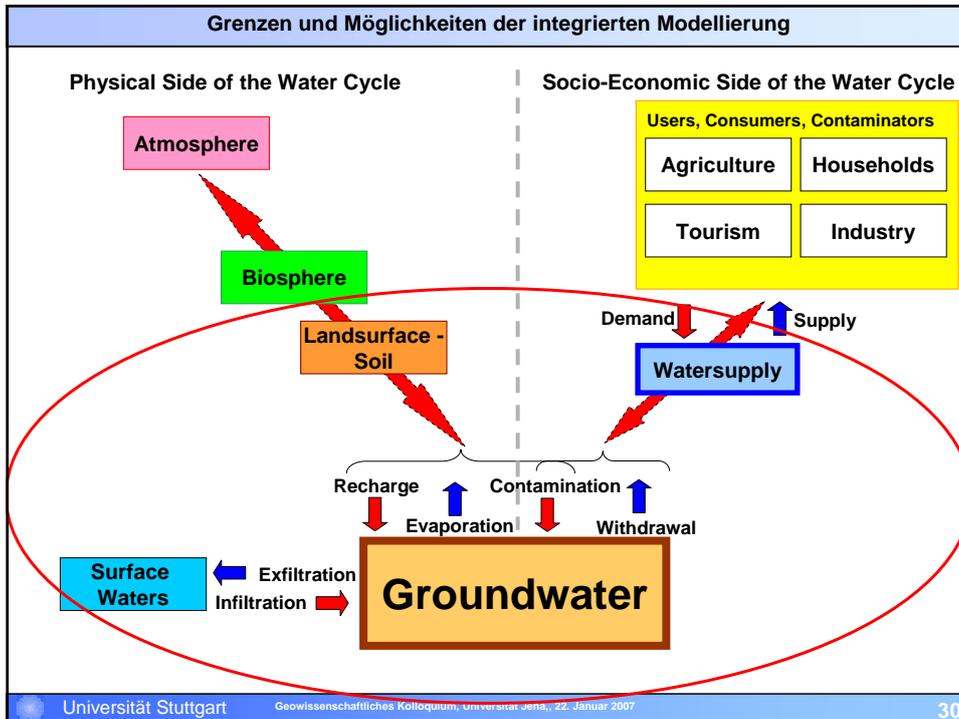
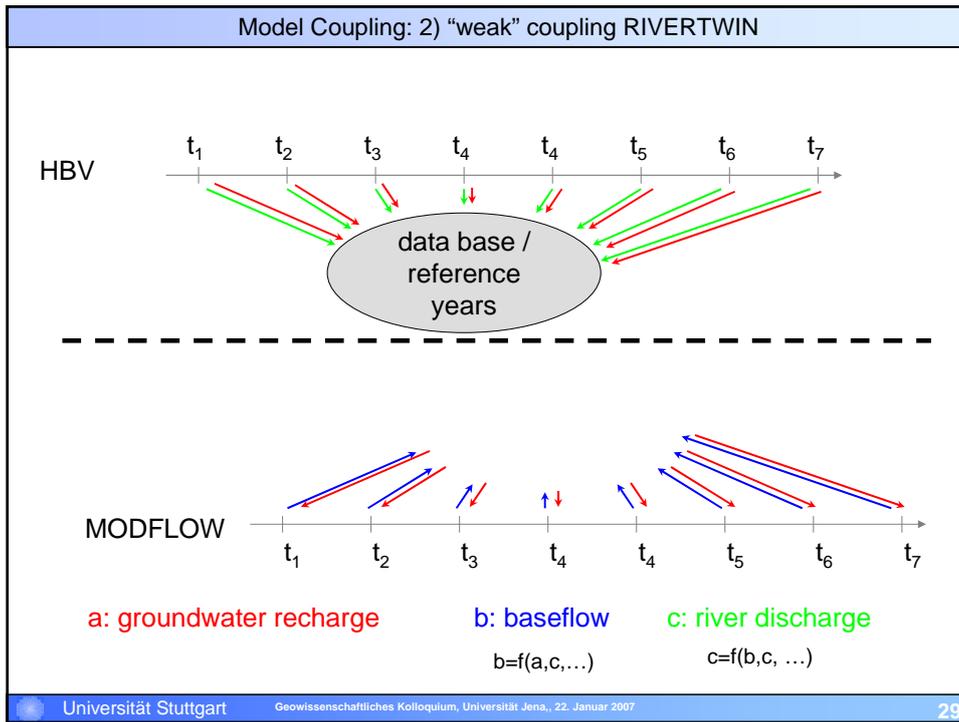


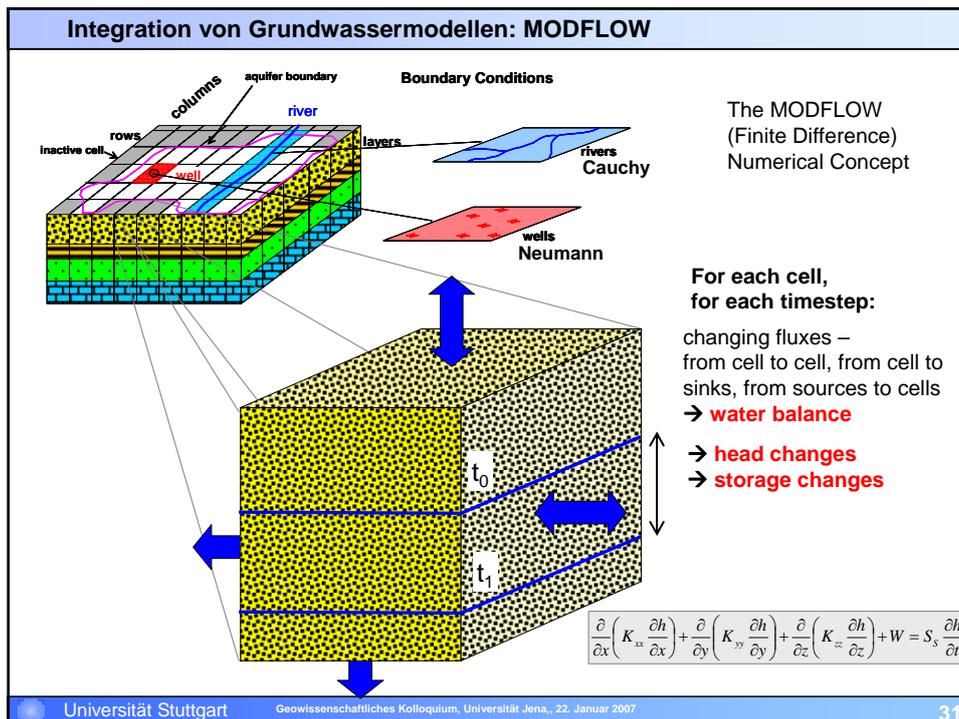
- Integriertes Modell,
- GIS basiert, 10 Einzelmodelle, lose gekoppelt
- Strategie:
  - 1) Integriertes Modell Neckar
  - 2) Übertragung

- Neckar basin (Germany, temperate-humid);
- Ouémé basin (Benin, tropical-subhumid);
- Chirchik basin (Uzbekistan, continental-semiarid).

## RIVERTWIN – MOSDEW integrated tool: Models and Scenarios







- ### Grenzen und Möglichkeiten der Integration von Grundwassermodellen
1. 'Technische' Probleme:
    - Verknüpfung und Kopplung von Prozessgleichungen, Interaktion verschiedener Programmcodes (Schnittstellen, Steuerung → Informatik, (Mathematik), i.A. lösbar
  
  2. 'Konzeptionelle' Probleme:
    - Sicherstellen, dass die Kopplung eine adäquate Repräsentation der natürlichen Prozesse darstellt
  
  3. Güte der zu koppelnden Modelle selbst?
- Universität Stuttgart      Geowissenschaftliches Kolloquium, Universität Jena, 22. Januar 2007      32

## Probleme bei der Modellintegration (Kopplung)

### 1. 'Technisch':

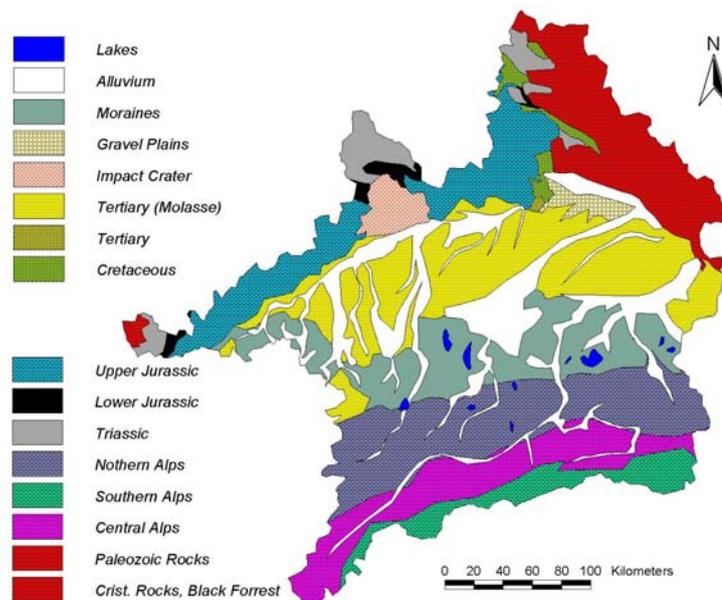
- Verknüpfung und Kopplung von Prozessgleichungen, Interaktion verschiedener Modellcodes (Schnittstellen, Steuerung → Programmierung, (Mathematik), i.A. lösbar

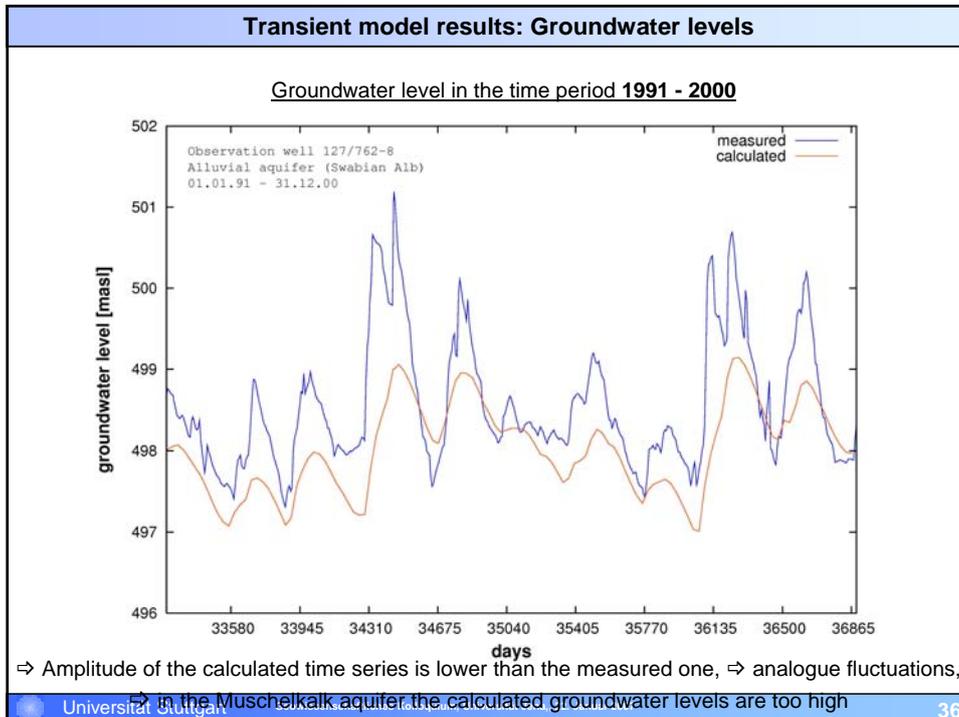
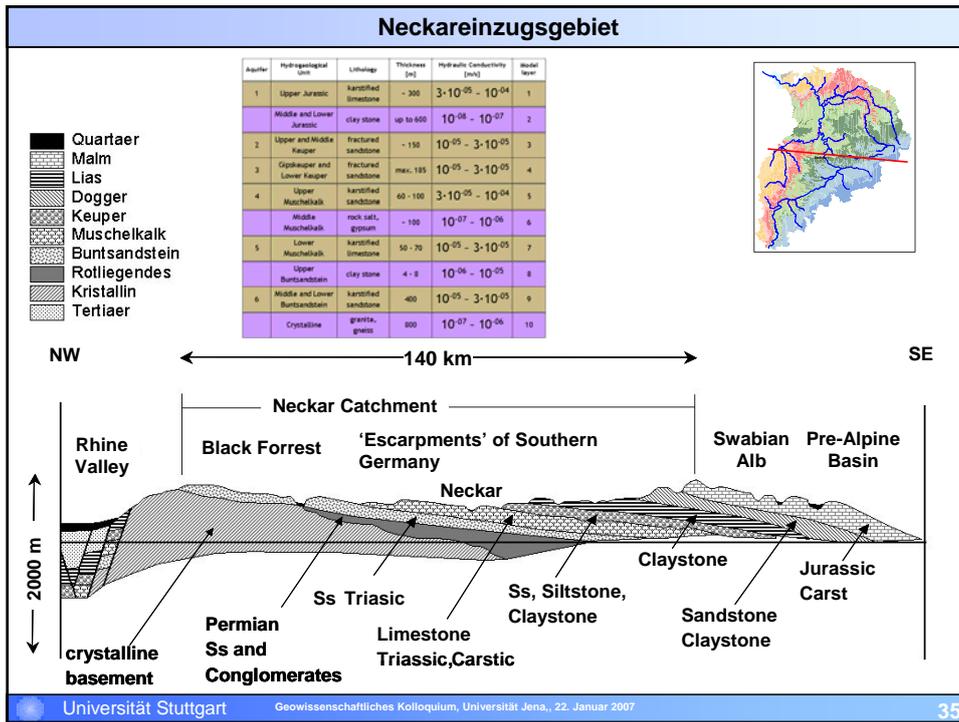
### 2. 'Konzeptionell':

- Sicherstellen, dass die Kopplung eine adäquate Repräsentation der natürlichen Prozesse darstellt

### 3. Güte der zu koppelnden Modelle selbst?

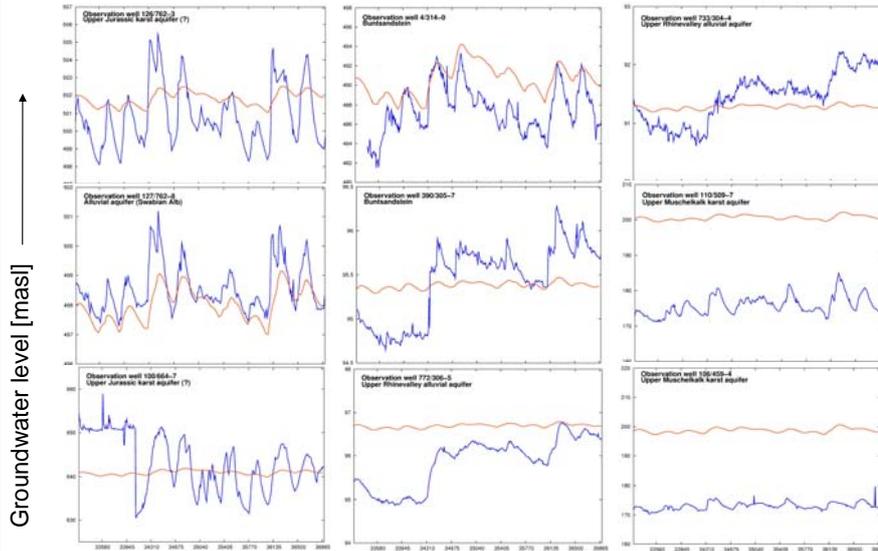
## Modellgüte, Grundwasserströmungsmodell: Donaeinzugsgebiet





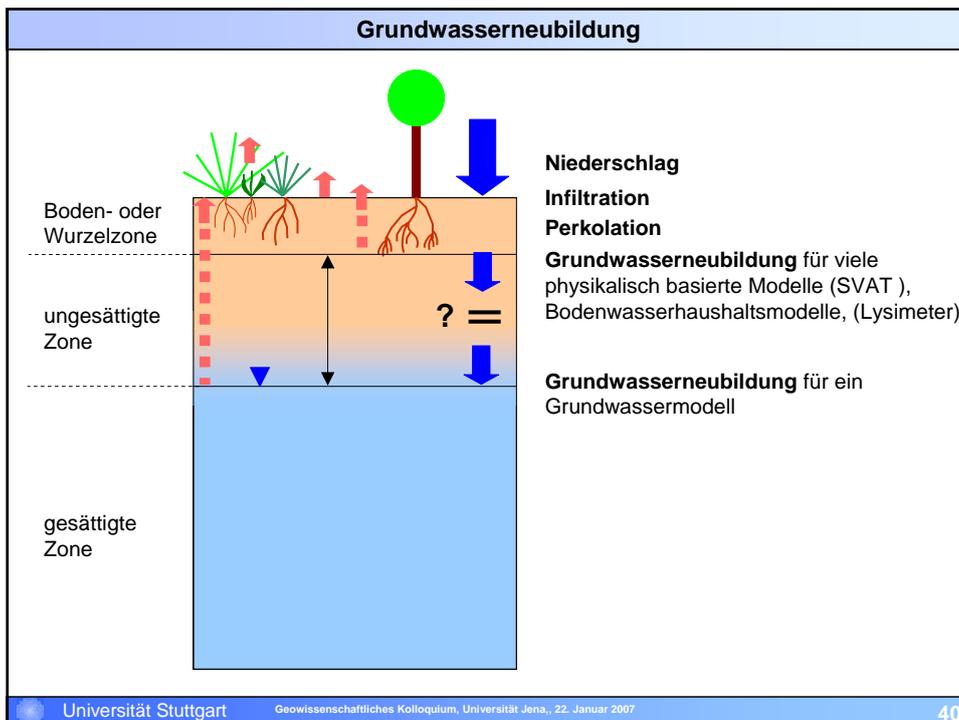
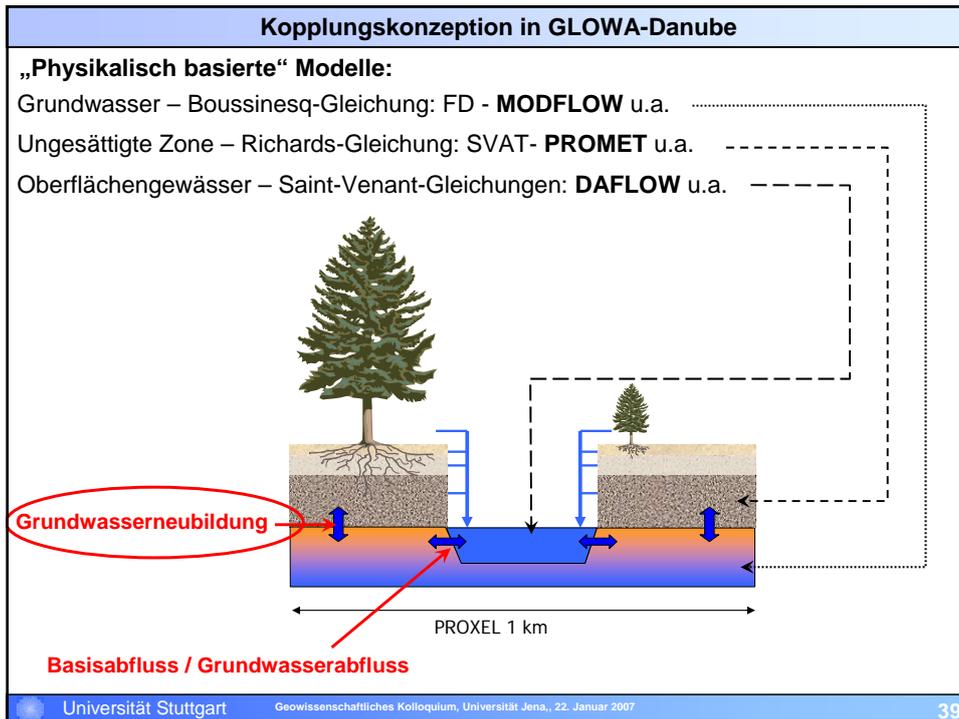
## Transient model: Groundwater levels

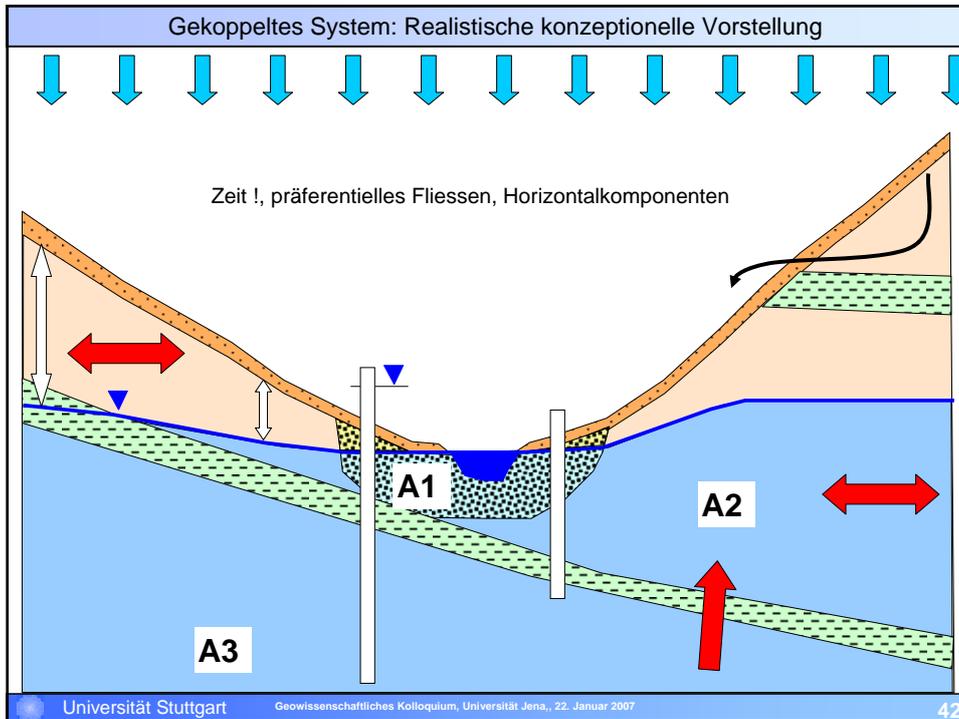
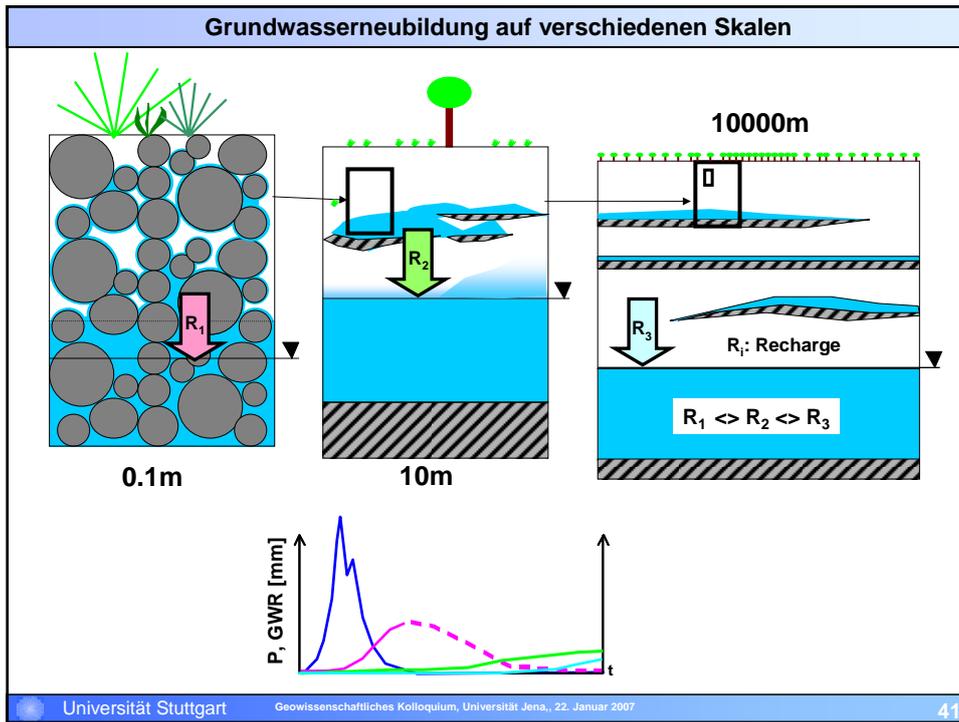
Groundwater levels at selected observation wells in the time period 1991 - 2000



## Konzeptionelle Grenzen der Integration

Kopplung von Grundwassermodellen mit  
konzeptionellen und physikalisch basierten  
„hydrologischen“ Modellen





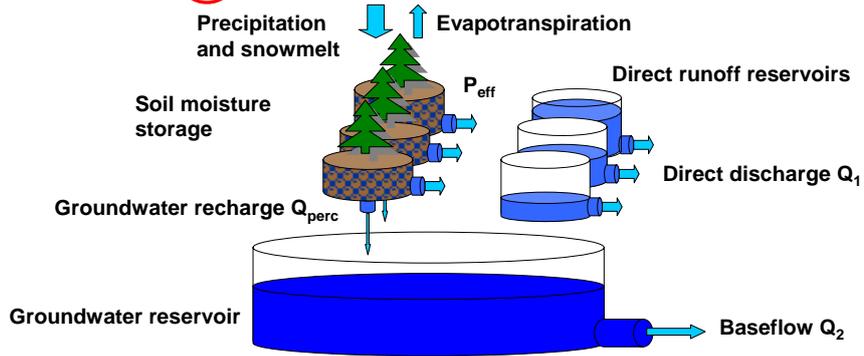
Distributed HBV model

$$P_{eff} = \left( \frac{SM}{FC} \right)^\beta \cdot P$$

$$Q_{perc} = k_{perc} \cdot SM \cdot \left( \frac{SM}{FC} \right)^2$$

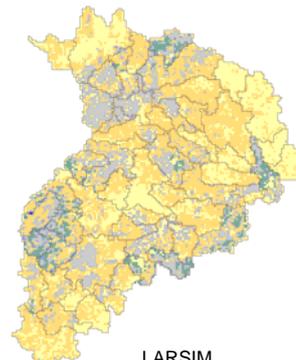
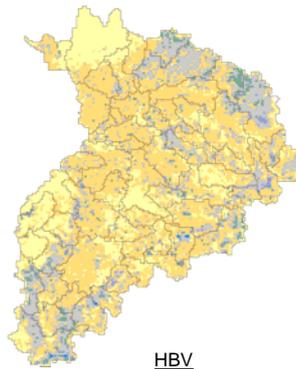
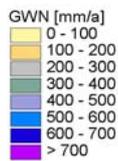
$$Q_1 = k_1 \cdot S_1^{1+\alpha}$$

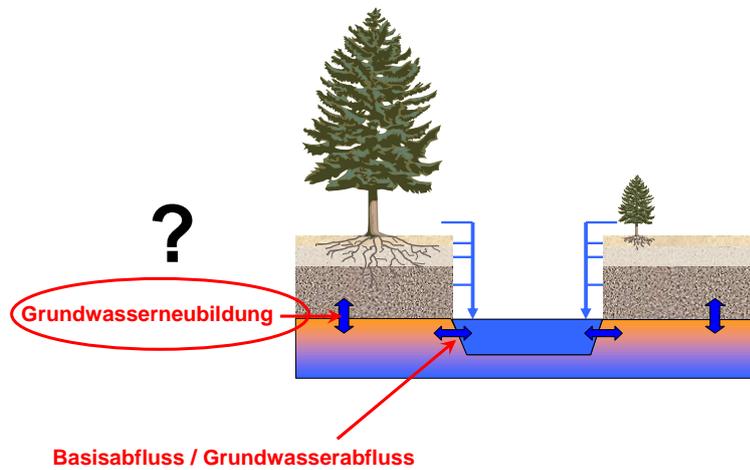
$$Q_2 = k_2 \cdot S_2$$



From Götzing & Bardossy

GROUNDWATER RECHARGE Long term average (1991 – 2001)





## Integration naturwissenschaftliche – sozio-ökonomische Modelle

Kopplung Grundwassermodell –  
Wasserversorgungsmodell

- Was tun eigentlich sozioökonomische Modelle?
- Was benötigen sie dazu für Informationen von naturwissenschaftlichen Modellen?
- Wie muss also die Integration aussehen?

#### Was tun sozioökonomische Modelle? **Multi-Akteurs-Modelle in GLOWA-Danube**

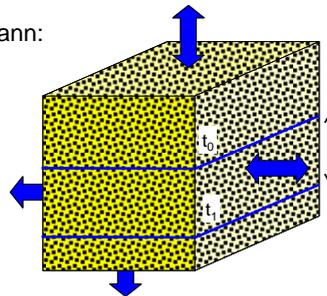
- **Beispiel 1:** Simulation des zukünftigen **Wasserbedarfs** von Haushalten unter Einbeziehung:
  - der demographischen Entwicklung
  - von sozialen, politischen, gesellschaftlichen Tendenzen
  - der ökonomischen Bedingungen
  - der naturräumlichen Veränderungen: **Wasserverfügbarkeit, Wasserqualität, Klima ...**
- **Beispiel 2:** Agrarökonomisches Modell zur Simulation **Landnutzungsänderungen** und landwirtschaftlichem **Wasserbedarfs** unter Einbeziehung von
  - ökonomischen-politischen Bedingungen (Markt, Subventionen)
  - naturräumlichen Veränderungen: **Klima, Bodenfeuchte, Wasserverfügbarkeit, Stickstoffangebot ...**

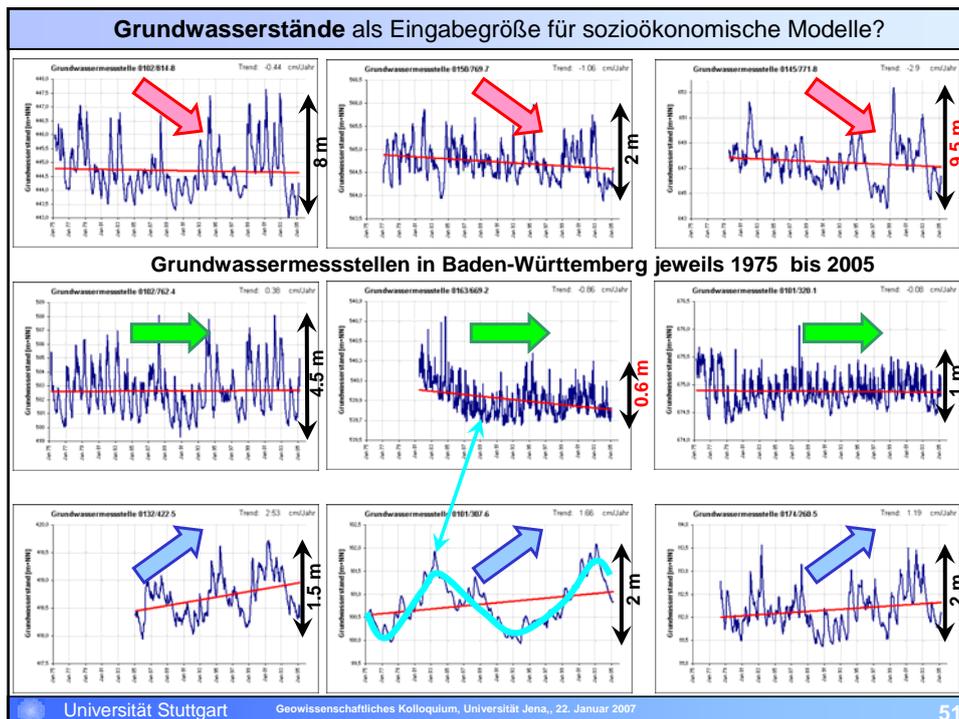
Beispiel: **Wasserverfügbarkeit** (Trink- und Brauchwasser aus Grundwasser);

- Wesentliche relevante Größen:
  - Grundwasserstände → Speicheränderungen
  - Grundwasserneubildung

Beispiel: **Wasserverfügbarkeit** (Trink- und Brauchwasser aus Grundwasser);

- Wesentliche relevante Größen:
  - Grundwasserstände → Speicheränderungen
  - Grundwasserneubildung
- Informationen, die ein **Grundwassermodell** liefern kann:
  - **Grundwasserstände**
  - Speicheränderungen
  - Flüsse (in/out)
- Im integrierten System zusätzlich:
  - Niederschlag, Temperatur
  - Grundwasserneubildung
  - Abfluss
  - Bodenfeuchte
  - ....





**Das bedeutet:**

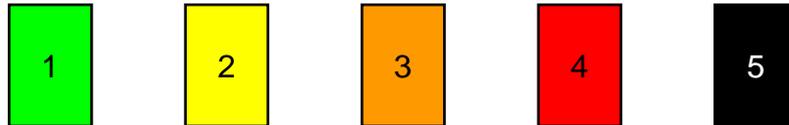
- Aktuelle und lokale Werte von Grundwasserstand und Grundwasserneubildung sind allein nicht aussagekräftig im Hinblick auf die zukünftige Wasserverfügbarkeit
- Eine Prognose der zukünftigen Entwicklung auf Basis von Trends in der Vergangenheit ist nicht ohne Einbeziehung **standortspezifischer Faktoren** möglich:
  - Aquifergeometrie
  - hydraulische Aquifereigenschaften
  - Eigenschaften des hydrogeologischen Systems

**→ Expertenwissen ist erforderlich für die Interpretation!**

Universität Stuttgart      Geowissenschaftliches Kolloquium, Universität Jena, 22. Januar 2007      52

## Übersetzung von naturwissenschaftlichen Größen in Indikatoren: „Flaggen“

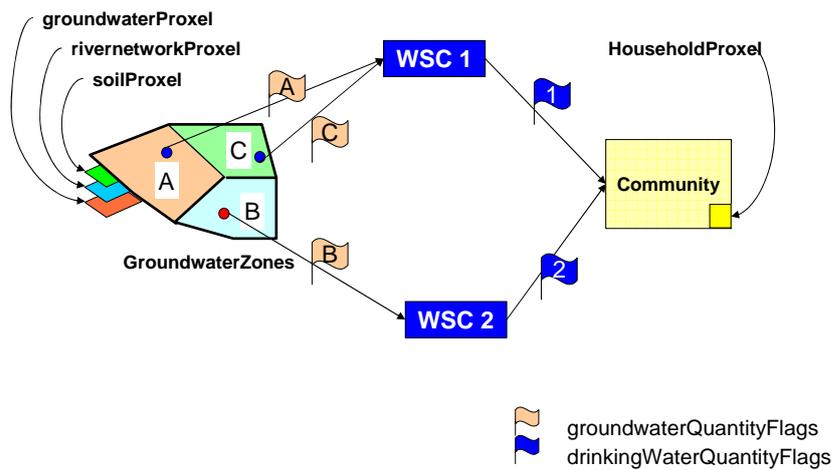
everything is fine → critical situation → catastrophic situation

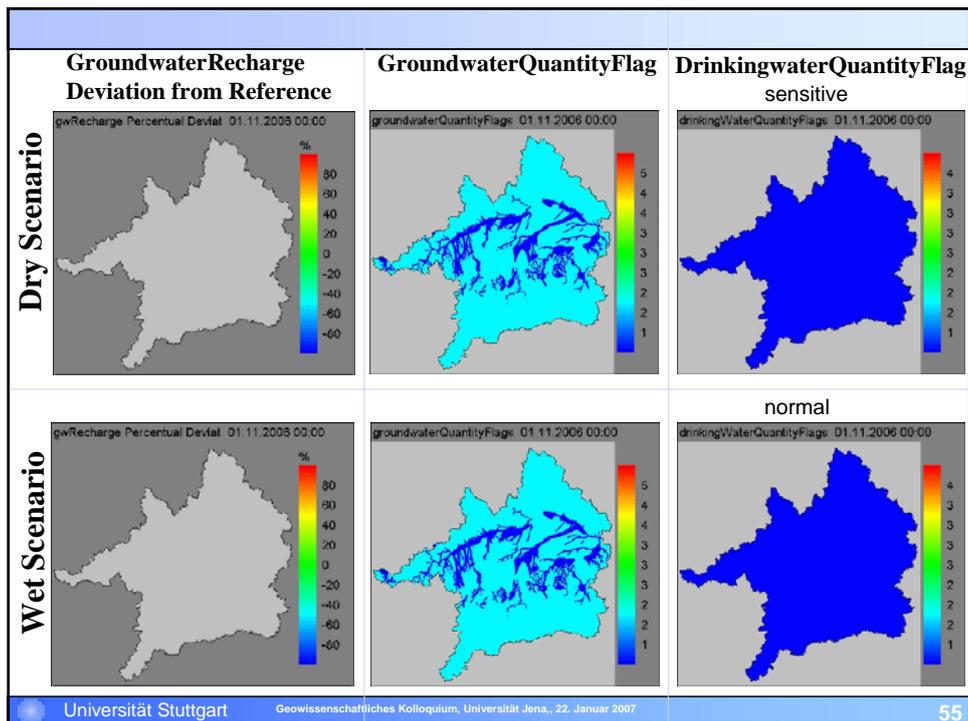


Vor-interpretierte Ergebnisse statt disziplinär bekannte naturwissenschaftliche Größen

## Kopplungsschema

Naturwissenschaftliche Modelle → Indikatoren-Berechnung → Individuelle Auswertung der Indikatoren



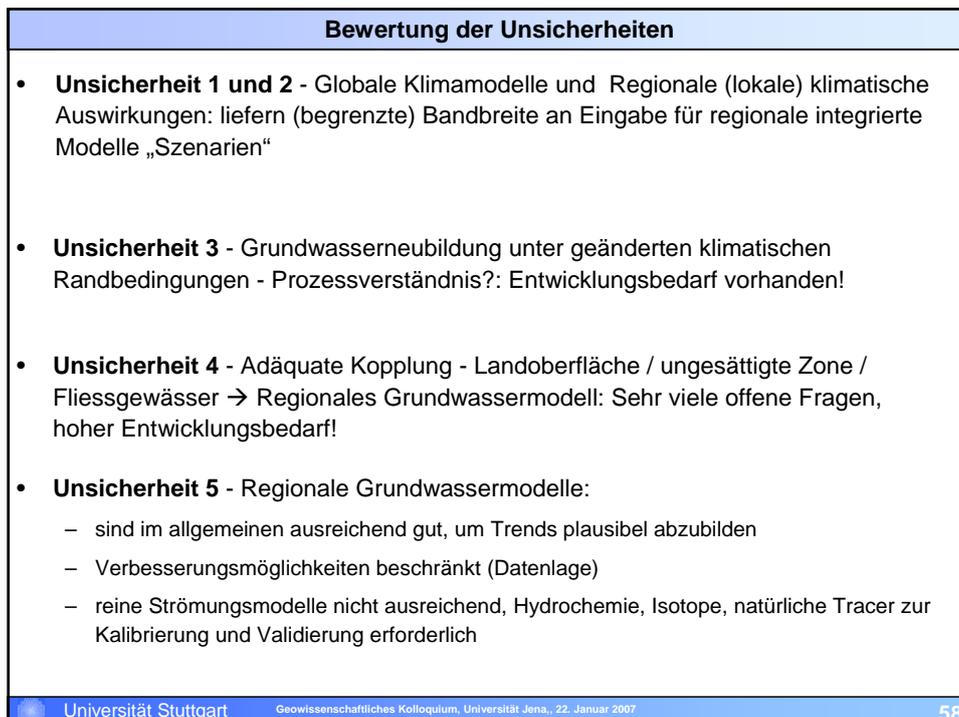
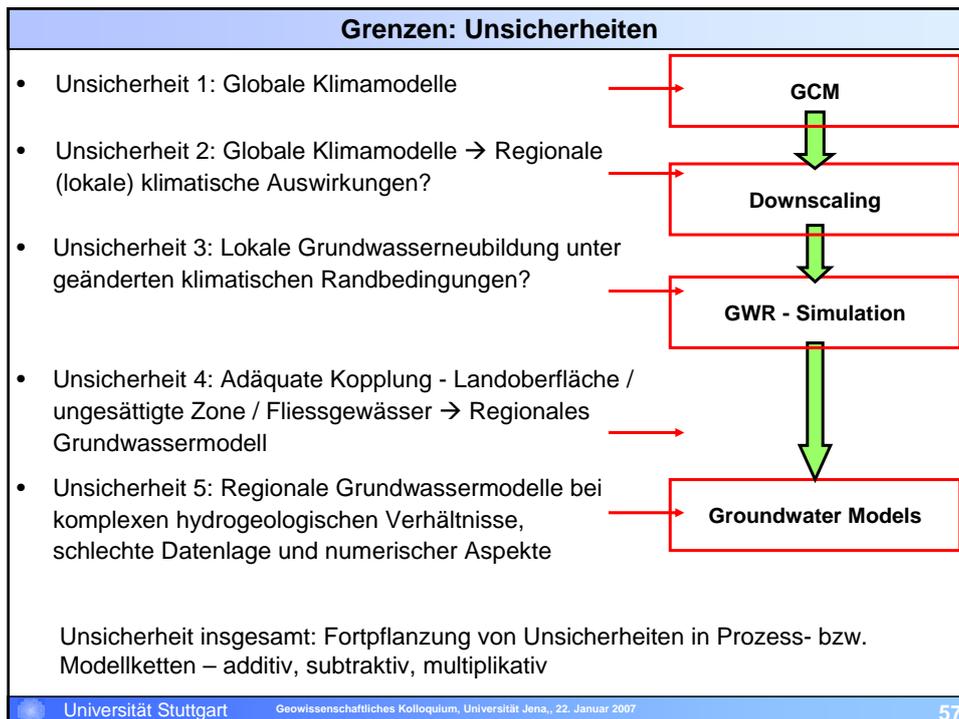


**Zusammenfassung**

Untersuchung und Bewertung möglicher Folgen des Klimawandels für das Grundwasser im Süden Deutschlands -

Möglichkeiten und **Grenzen** integrierter Modelle

Universität Stuttgart      Geowissenschaftliches Kolloquium, Universität Jena, 22. Januar 2007      56



### Zusammenfassung: Grenzen

- Integrierte Modelle können die prinzipiell bestehenden Unsicherheiten, die sich aus unzureichenden Beschreibungen von Teilprozessen ergeben nicht aufheben
- Die sektoralen Modelle erweisen sich als
  1. Selbst noch zu stark fehlerbehaftet
  2. Eine sinnvolle Kopplung (Integration) ist noch nicht möglich

### Zusammenfassung Möglichkeiten

- Integrierte Modelle bieten einen „ganzheitlichen“ Blick auf den Wasserkreislauf
- Sie machen Defizite von sektoralen Modellen sichtbar
- Sie fördern das Verständnis von Prozessen, die im Randbereich der typischen sektoral-disziplinären Sichtweise angesiedelt sind (z.B. Tiefe Ungesättigte Zone)
- Integrierte Modellierung fördert den Dialog von Disziplinen und zwingt dazu sich intensiver mit den Nachbardisziplinen auseinander zusetzen
- Integrierte Modellierung zwingt dazu sektorale Modellergebnisse in „verständlicher“ Form zu erzeugen, insbesondere bei Kopplungen zwischen naturwissenschaftlichen und sozioökonomischen Modellen



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Roland Barthel,  
Jungwissenschaftlergruppe Grundwasserhydraulik und Grundwasserwirtschaft,  
Institut für Wasserbau,  
Universität Stuttgart

