

Atmosphäre und Terrestrische Ökosysteme - Können wir ihre Wechselwirkung beobachten?

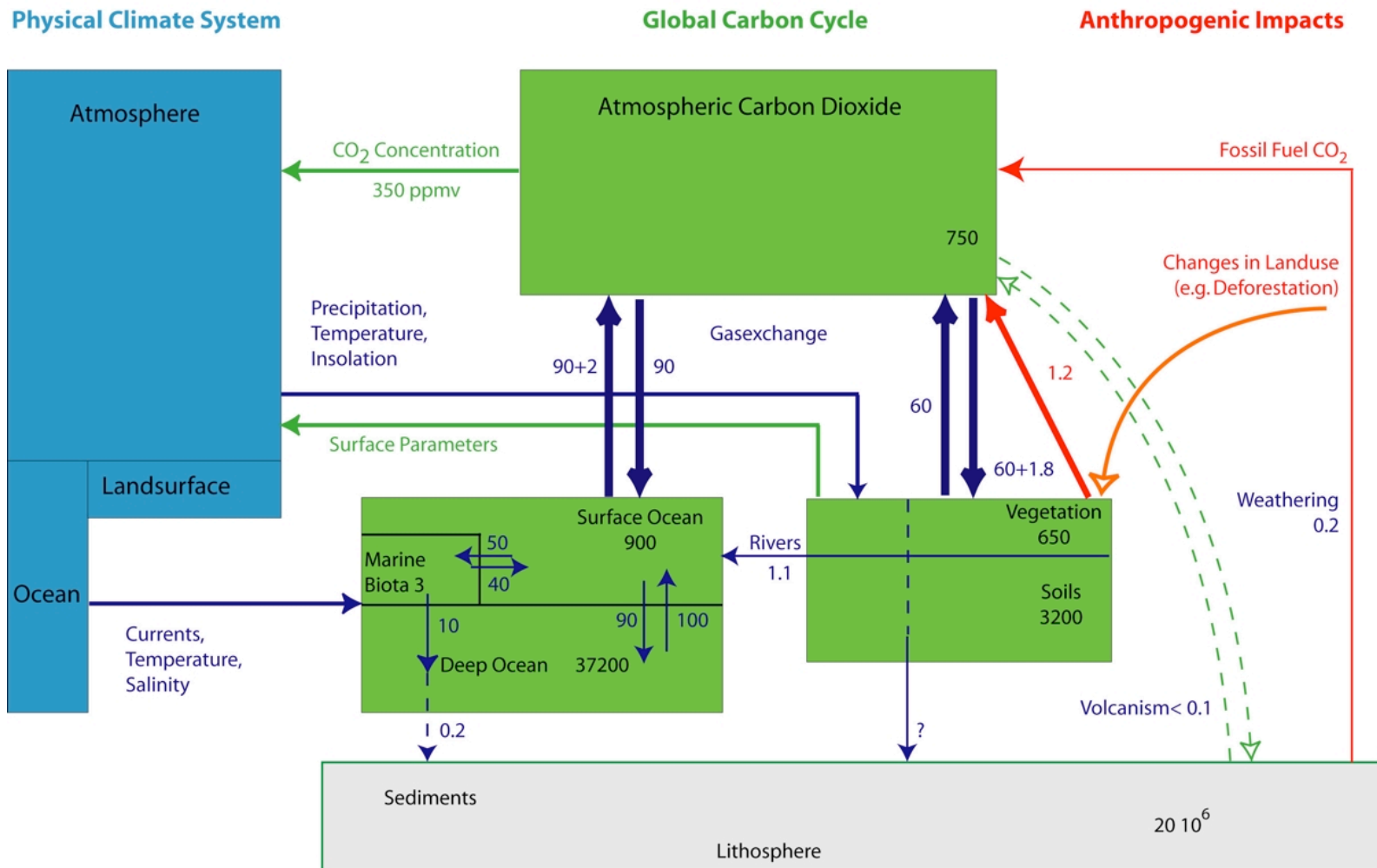


Martin Heimann
Max-Planck-Institut für Biogeochemie, Jena, Deutschland
martin.heimann@bgc-jena.mpg.de

Credits:
Christian Rödenbeck, Manuel Gloor, Stefan Körner

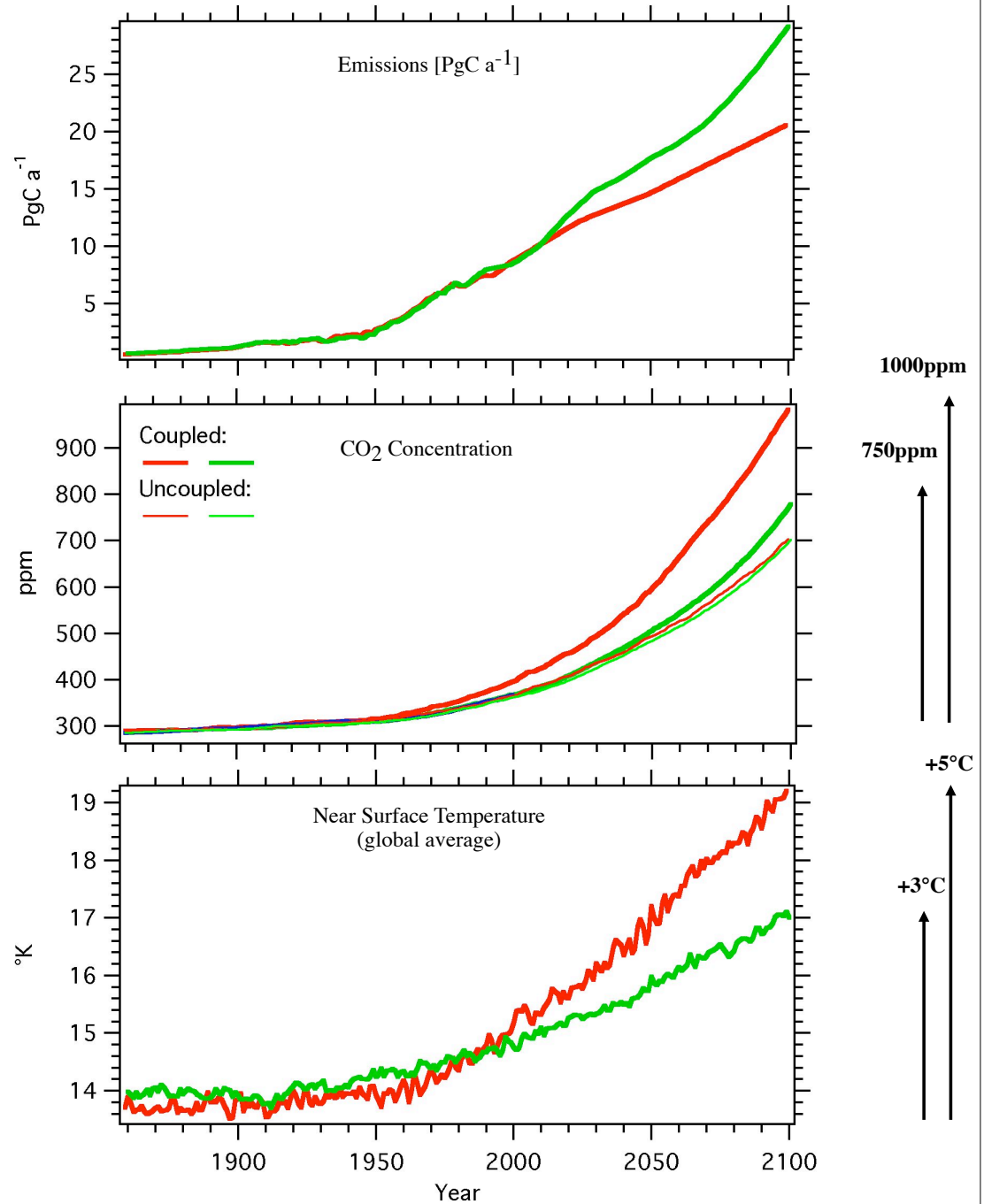


Der Kohlenstoffkreislauf im globalen Klimasystem



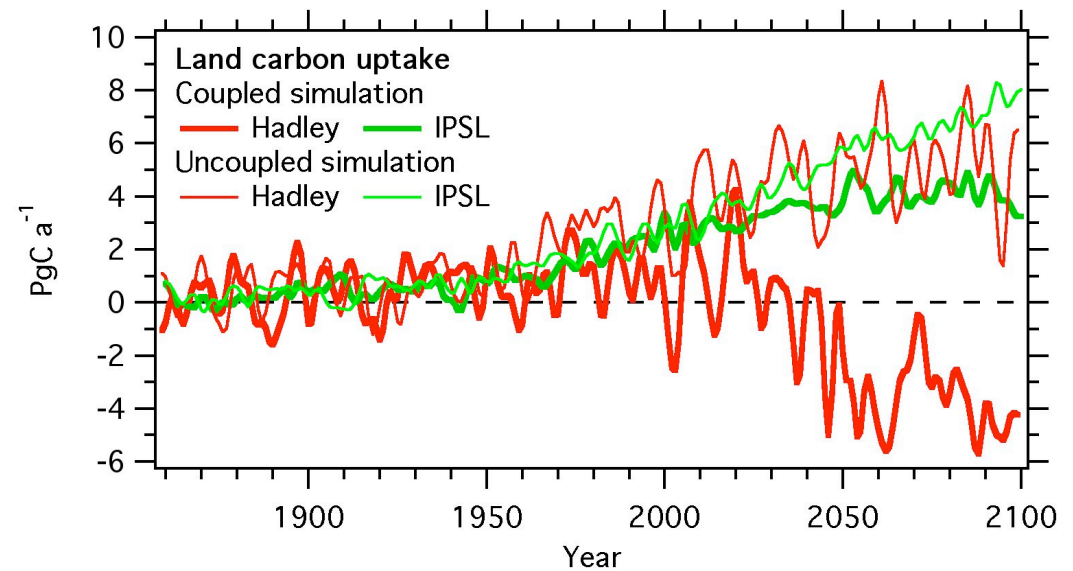
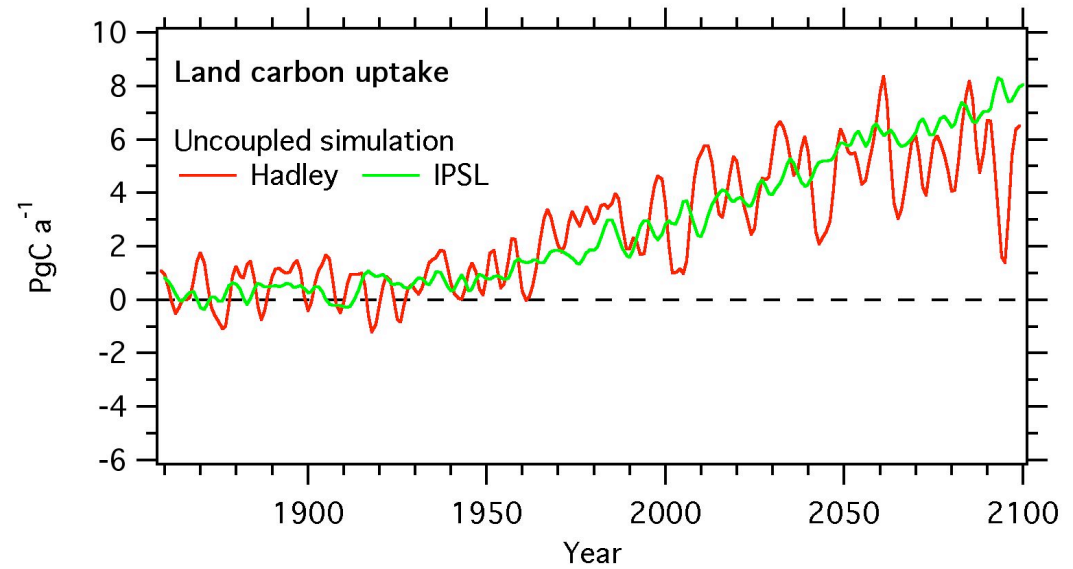
Erste Szenarienrechnungen mit gekoppelten Kohlenstoffkreislauf-Klimamodellen

Hadley —
IPSL —



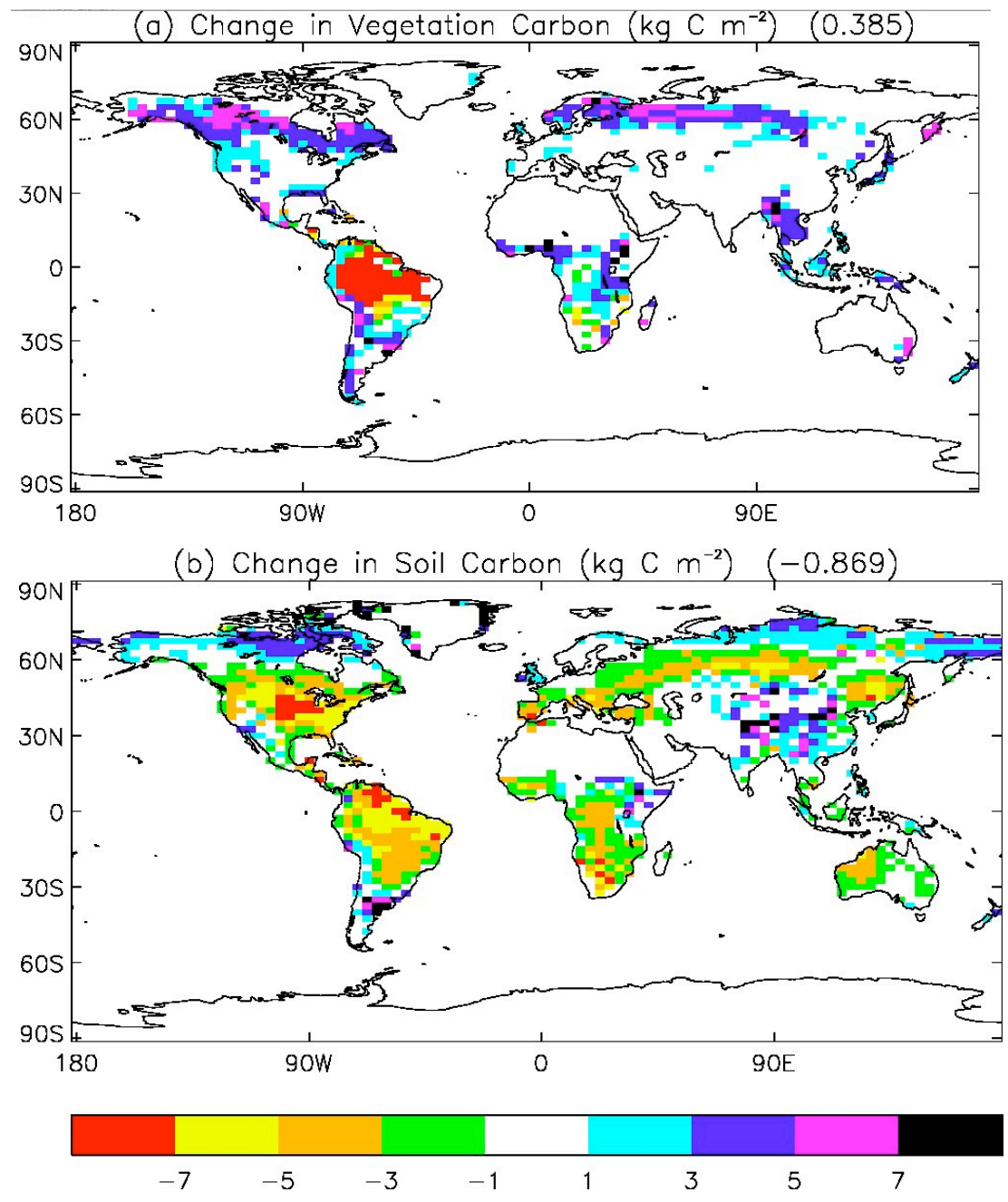
*Cox et al. 2001, Dufrene et al., 2001
IPCC 2001*

Berechnete globale CO₂ - Aufnahme durch terrestrische Ökosysteme

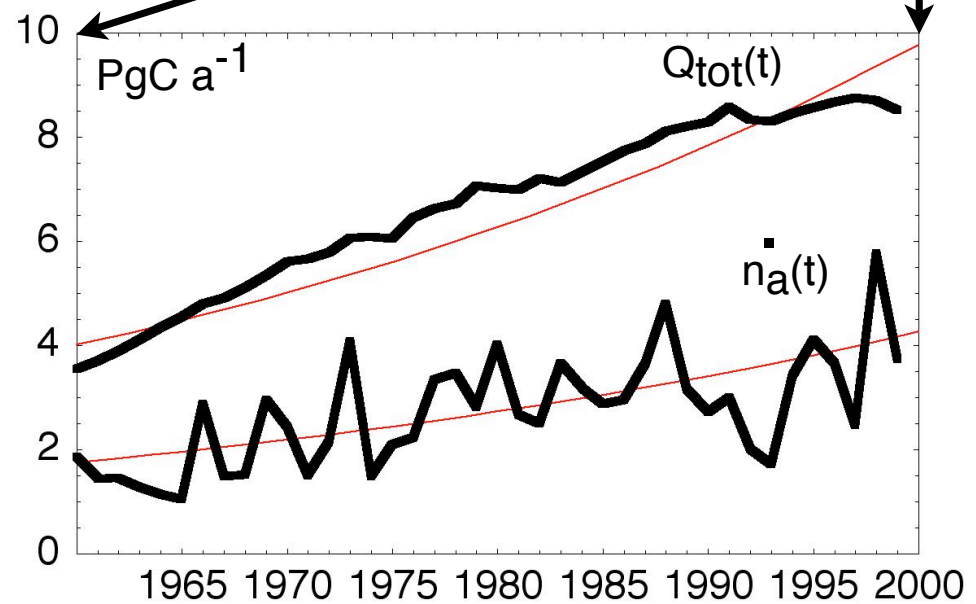
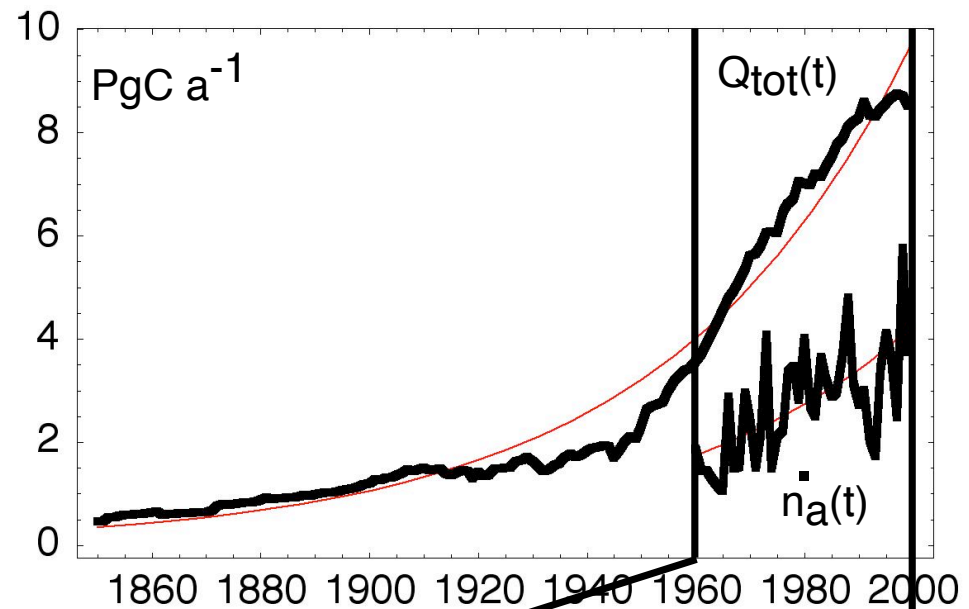


*Cox et al. 2001, Dufresne et al., 2001
Friedlingstein et al. 2003*

Berechnete Änderungen der terrestrischen Kohlenstoffinventare im Hadley Center Model 1860-2100

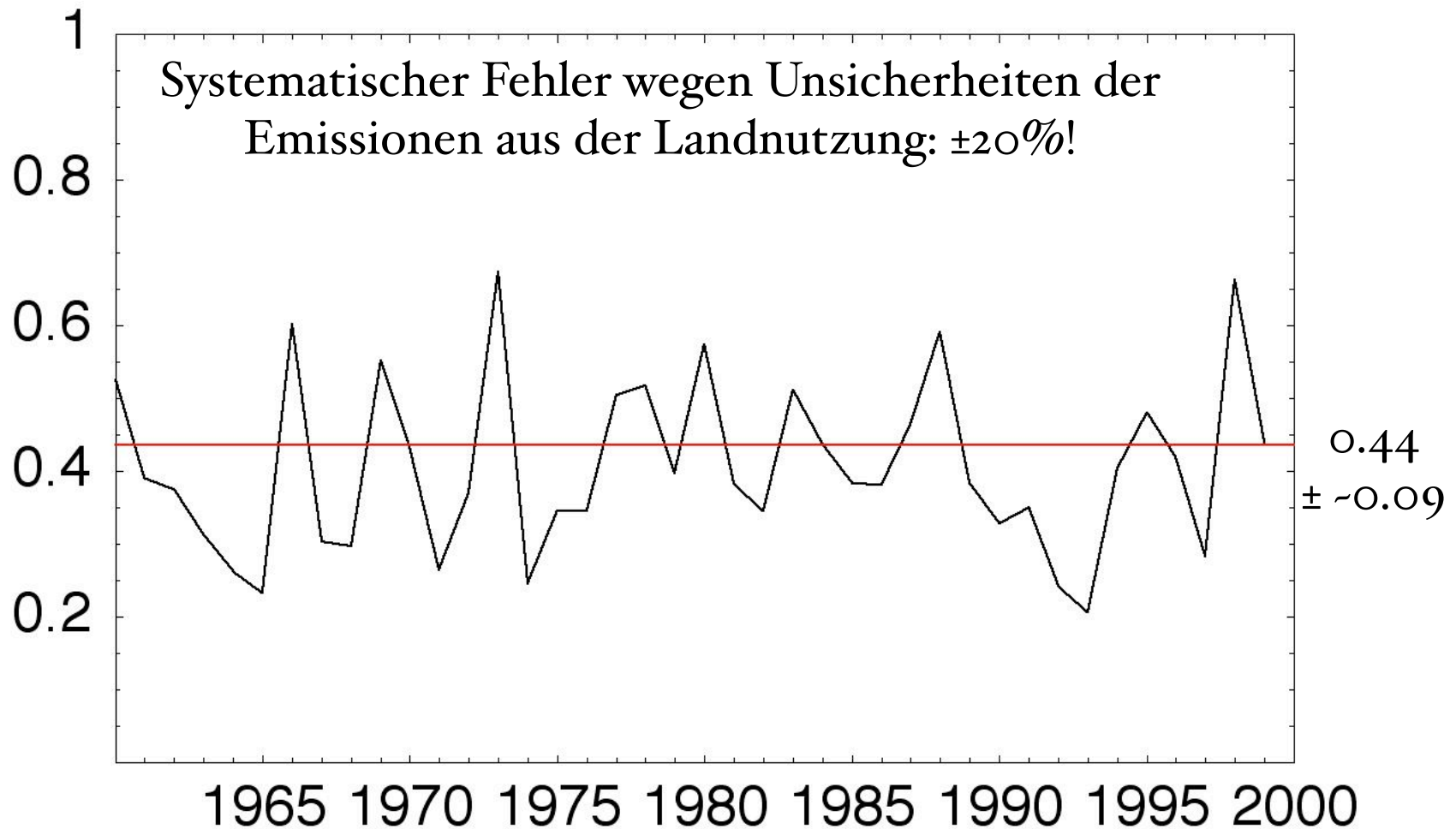


Globale Emissionen und atmosphärische CO₂ Wachstumsrate



Rote Linien:
Exponentialfunktion
mit $\mu = (45 \text{ a})^{-1}$

$$\text{“Airborne Fraction”} = \dot{n}_a / Q_{\text{tot}}$$



Simple Linear Perturbation Model of the Global Carbon Cycle

System of coupled reservoirs, each with carbon content $n(t)$:

$$\frac{d}{dt}n_i(t) = \sum_j F_{i,j}(t) + Q_i(t), i = 1, m$$

Linear expansion of exchange fluxes for small perturbations; assumption that carbon flux depends to first order on donor reservoir:

$$F_{i,j} = k_{i,j}n_i(t) + \dots$$

⇒ System of first order, linear differential equations!

If $Q(t) \sim e^{\mu t}$ then

$$n_i(t) \sim e^{\mu t}$$

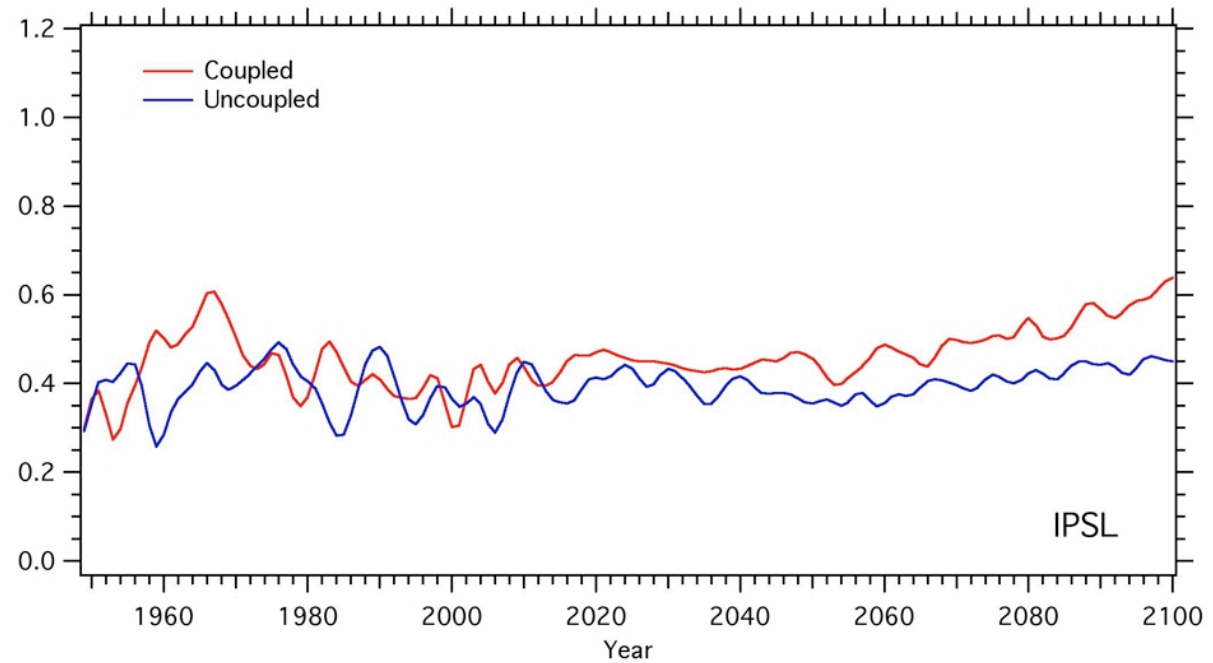
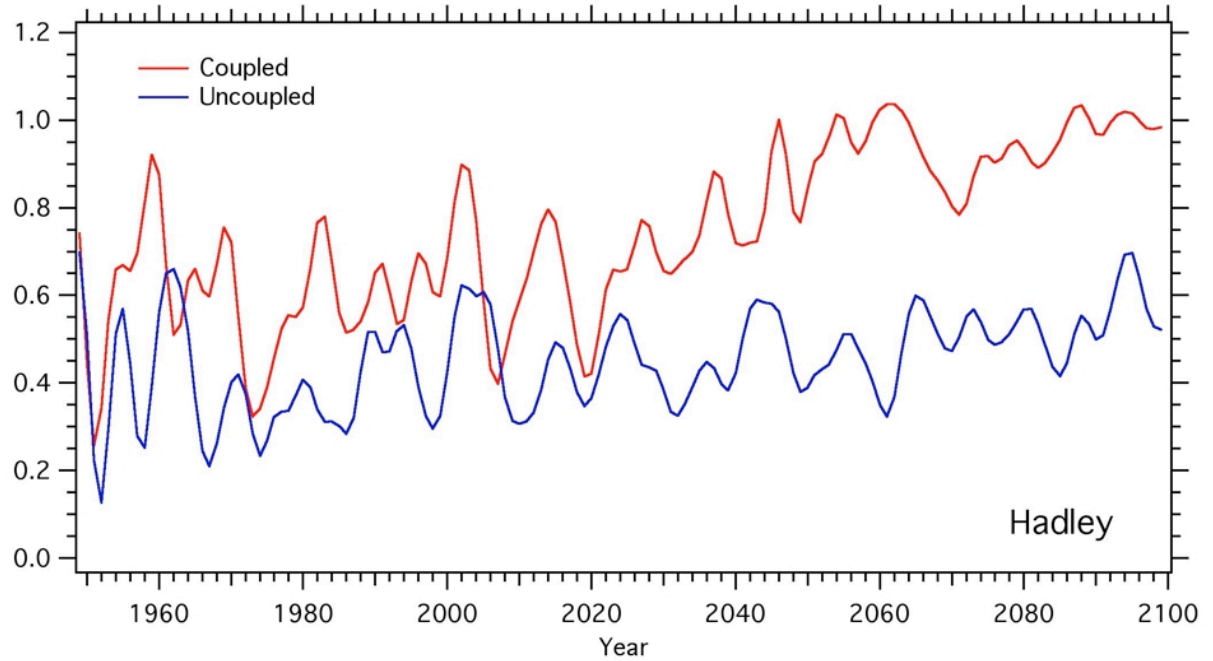
and

$$\frac{n_i}{n_j} = \text{const}$$

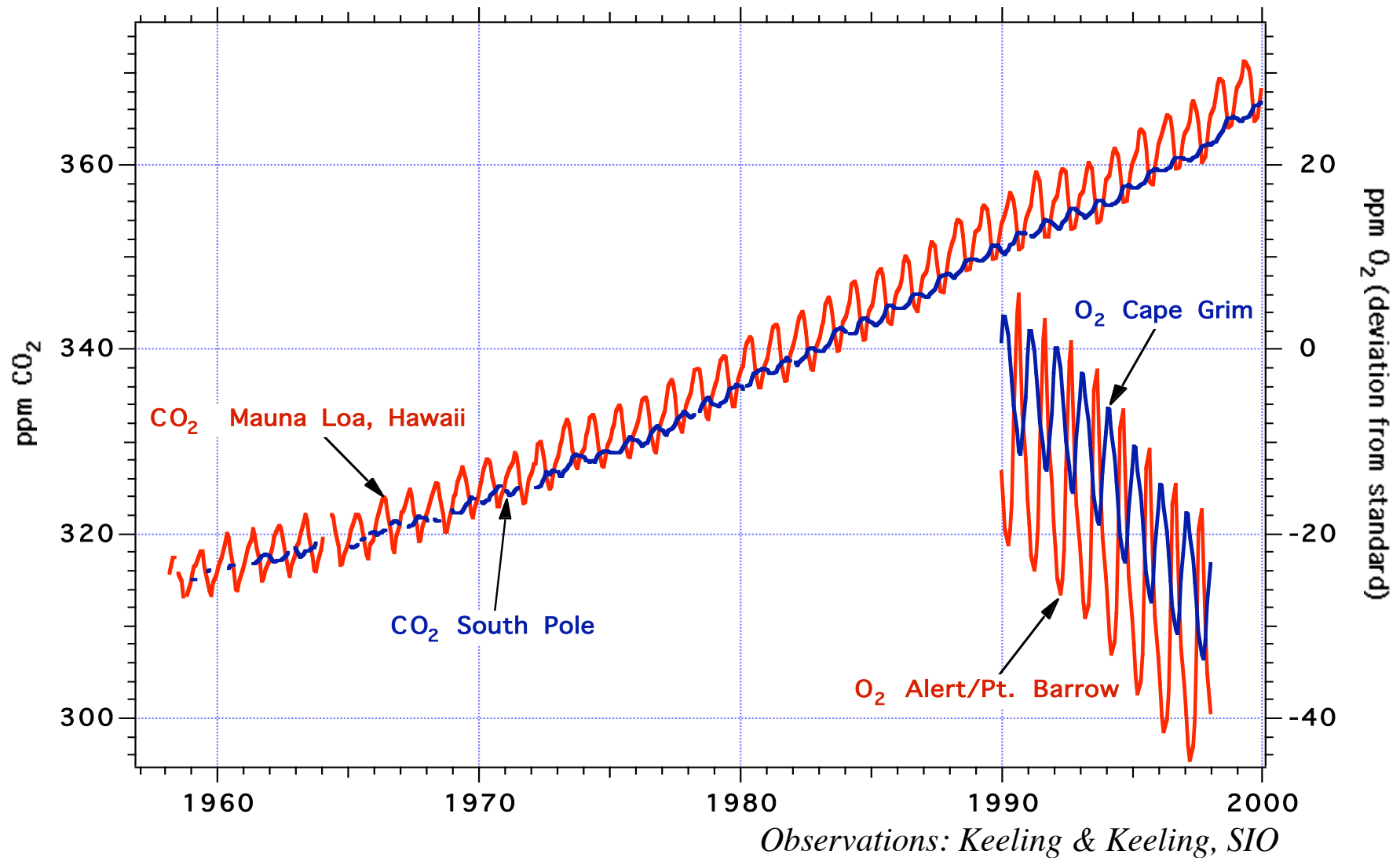
and

$$\frac{\dot{n}_a}{Q} = \text{const!}$$

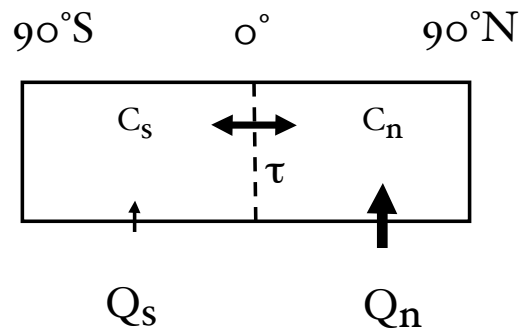
Berechnete
Airborne Fraction in
den gekoppelten
Kohlenstoffkreislauf
-Klimamodellen



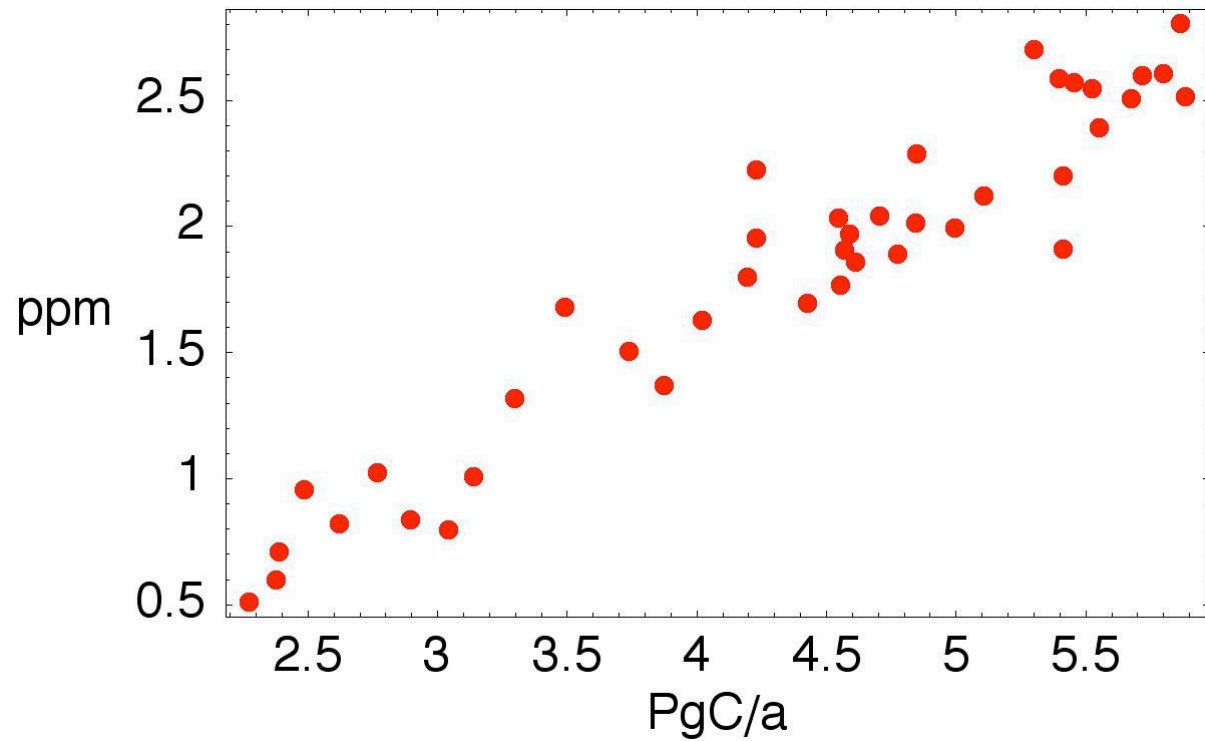
Verlauf der atmosphärischen Konzentration von CO₂ und O₂



Konzentrationsdifferenz Mauna Loa - Südpol als Funktion der Differenz der CO₂ Emissionen in Nord- und Südhemisphäre



$$C_n - C_s = (Q_n - Q_s) \tau / 2$$



Ermittlung von Quellen und Senken mit Hilfe der inversen Modellierung

- ◆ Der atmosphärische Transport definiert eine Abbildung vom Raum der Quellen Q in den Raum der Spurenstoffkonzentrationen ($C=\rho\chi$)

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho\chi = -\nabla \cdot \mathbf{v} \rho\chi + Q$$

$$C_{mod}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{T}Q(\mathbf{x}, t)$$

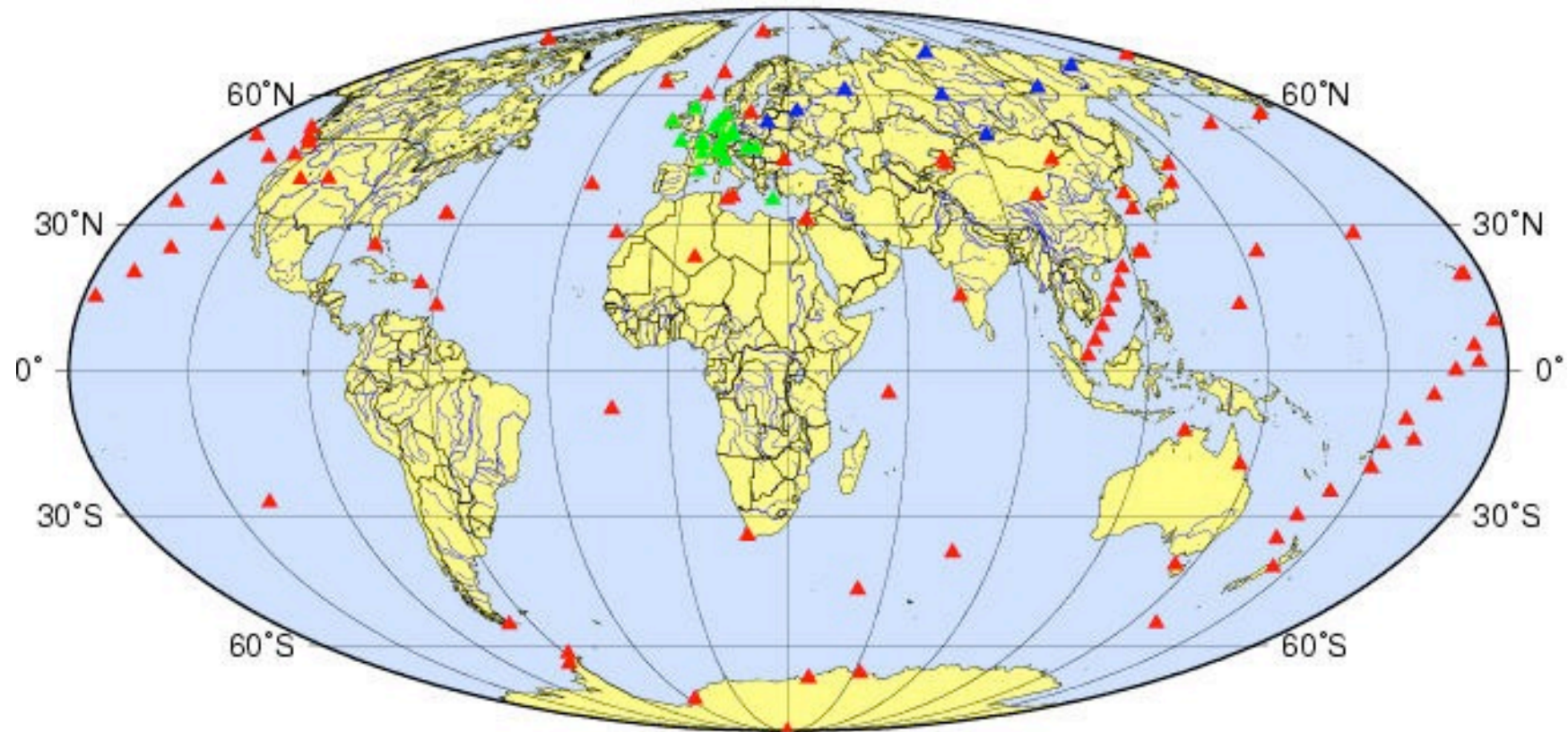
- ◆ $Q(\mathbf{x}, t)$ wird diskretisiert in Raum und Zeit: q_i , ($i=1, \dots, n_q$)
- ◆ Bereitstellung der *a priori* Information der Quellen: \mathbf{q}_{ap} , \mathbf{Cov}_q

- ◆ Suche das Minimum der Kostenfunktion:

$$S^2 = (\mathbf{T} \cdot \mathbf{q} - \mathbf{C}_{obs})^T \cdot \mathbf{Cov}_{obs}^{-1} \cdot (\mathbf{T} \cdot \mathbf{q} - \mathbf{C}_{obs}) + (\mathbf{q} - \mathbf{q}_{ap})^T \cdot \mathbf{Cov}_q^{-1} \cdot (\mathbf{q} - \mathbf{q}_{ap})$$

- ◆ Die lange Lebensdauer der betrachteten Spurengase verlangt lange spin-up und spin-down Zeiten (>2 a)

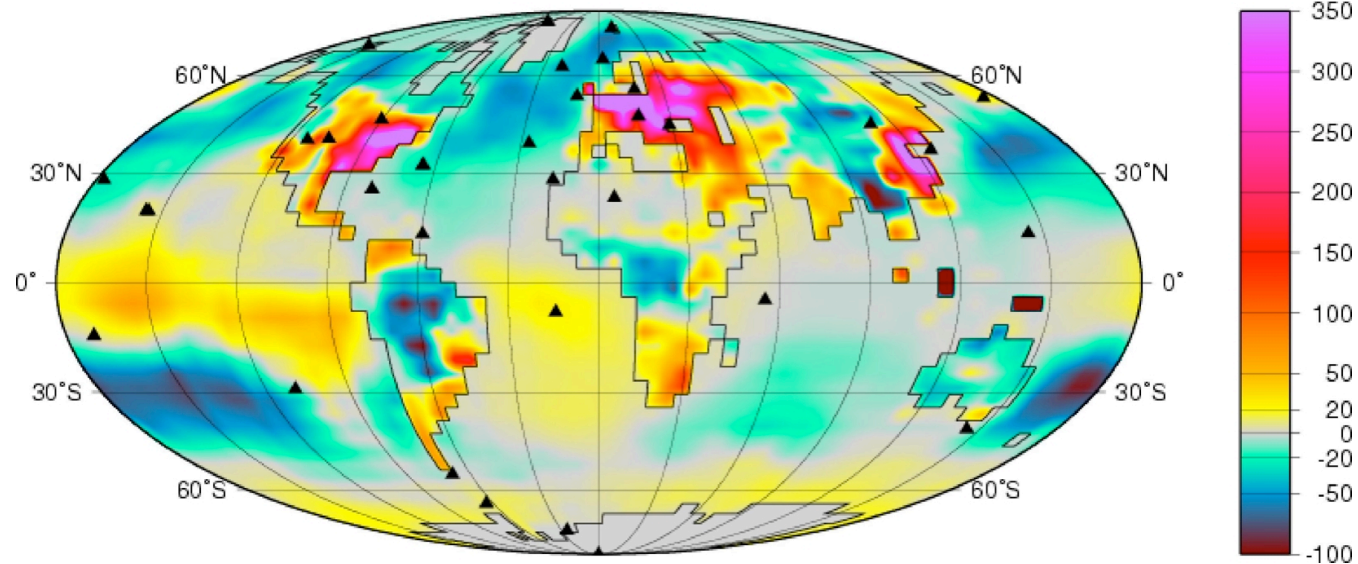
Globales *in situ* Beobachtungsnetz (Flaschendaten, 2000: ca 100 Standorte)



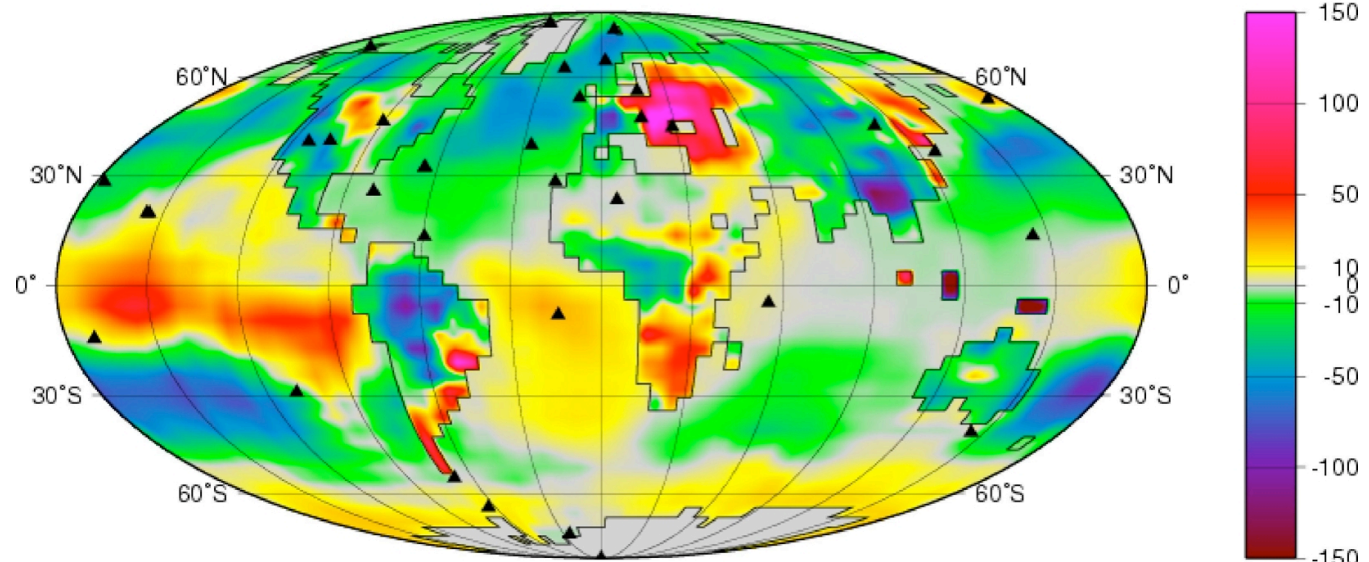
CO₂ Fluss gemittelt über den Zeitraum 1995-2000

Fossile +
natürliche
Quellen

A Posteriori Fluxes + Fossil Emissions, Average July 1995 - June 2000 [gC/m



A Posteriori Fluxes, Average July 1995 - June 2000 [gC/m²/yr]

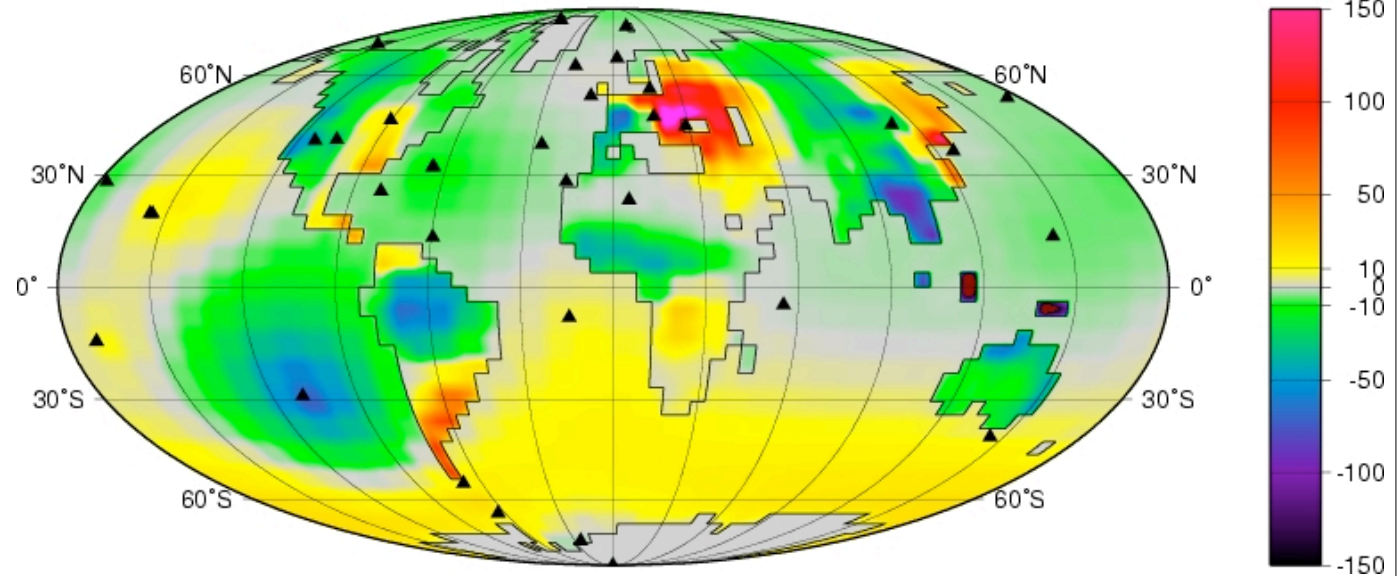


Natürliche
Quellen

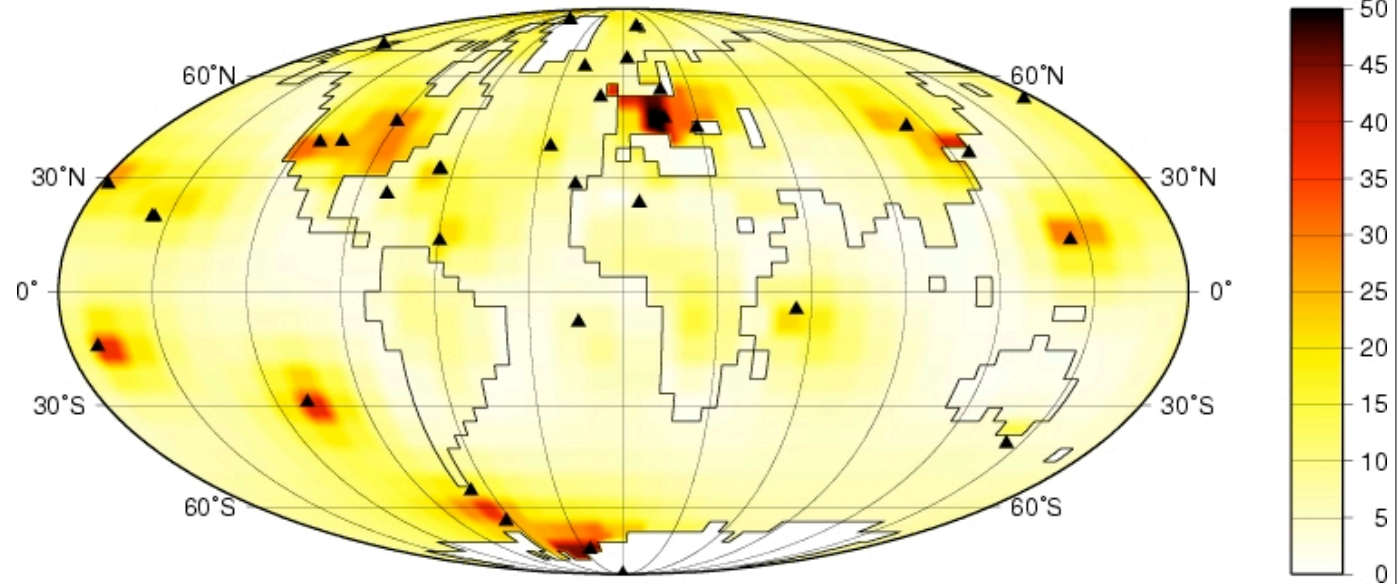
CO₂ Fluss gemittelt über den Zeitraum 1995-2000

Durch atmosphärische
Daten erzeugte
Korrektur

Difference A Posteriori - A Priori Fluxes, July 1995 - June 2000 [gC m⁻² yr⁻¹]



Uncertainty Reduction, July 1995 - June 2000 [%]

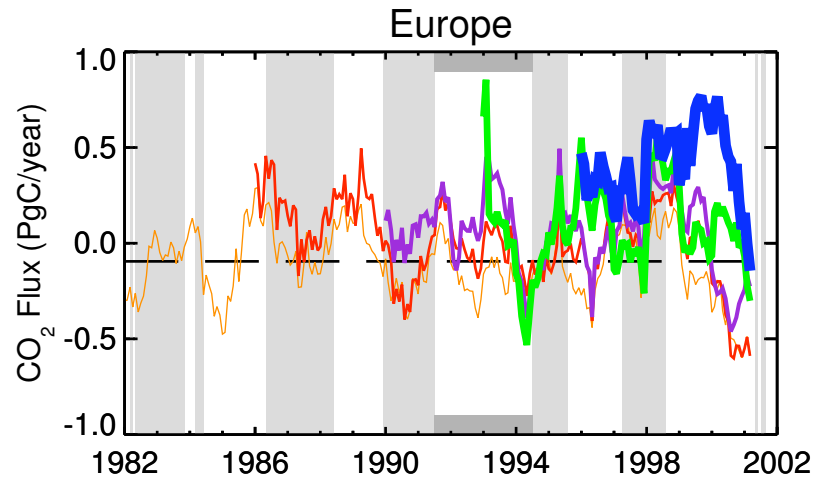


Reduktion der
Unsicherheit

$$1 - \sigma_{post} / \sigma_{pri}$$

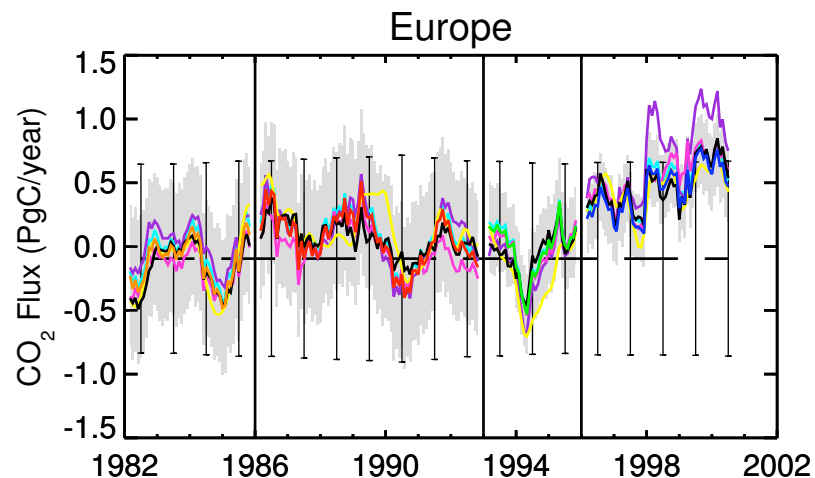
CO₂ Bilanz von Europa

- Regionally integrated
- deseasonalized
- non-fossil CO₂ only
- 11, 16, 19, 26, or 35 sampling locations
- positive: surface → atmosphere



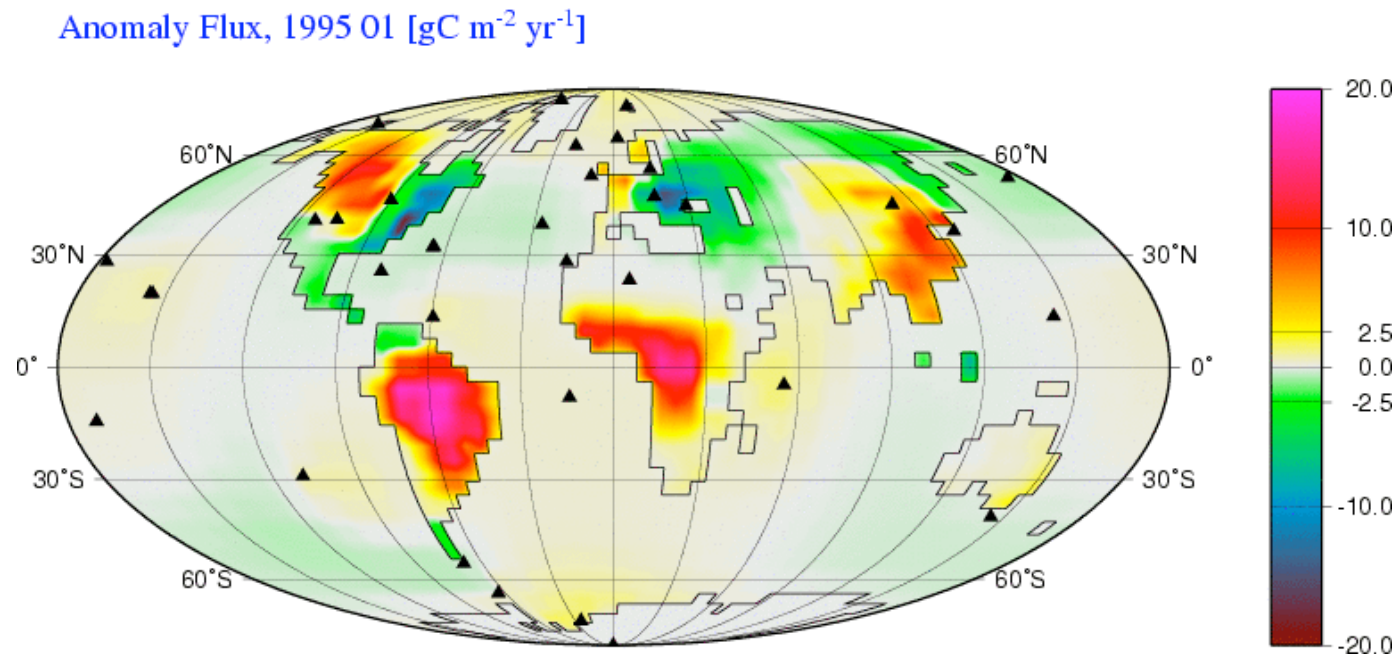
Differences due to
sampling network

- **More robust:**
Timing of anomalies
- **Less robust:**
Long-term spatial flux pattern,
Amplitudes
- Robustness scale-dependent



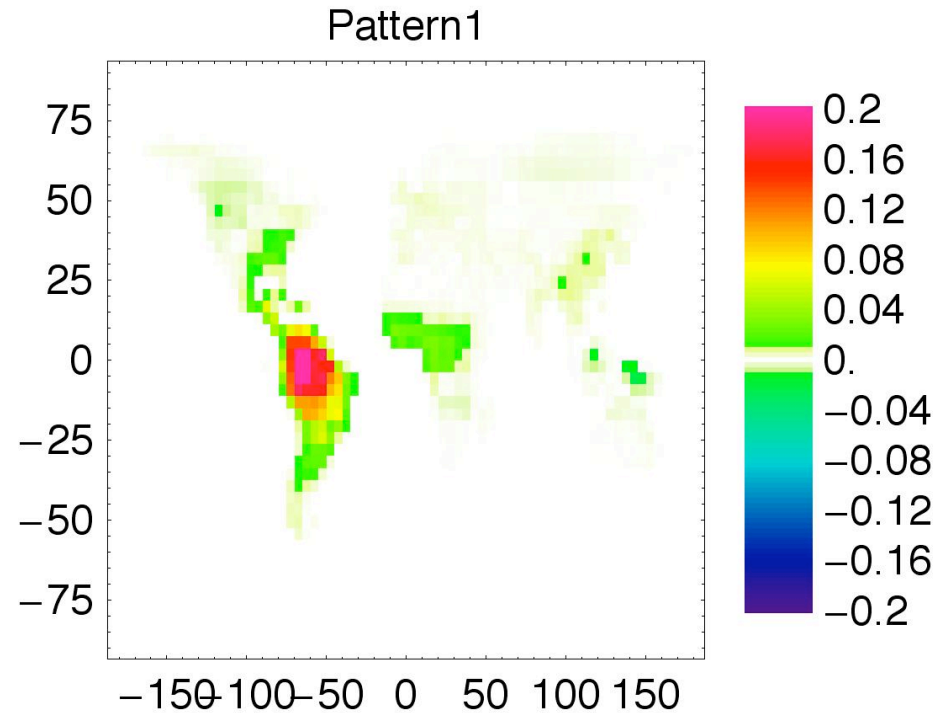
Differences due to
inversion set-up

Interannuale Variabilität ermittelt aus zeitabhängiger Inversion der atmosphärischen CO₂ Messungen 1995-2000



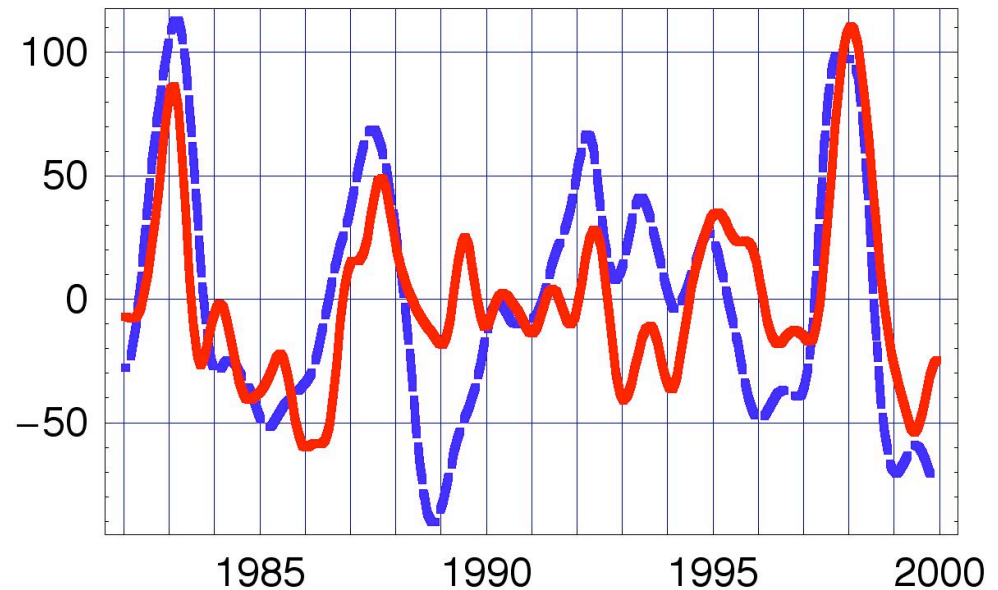
Rödenbeck et al., 2003, Observations: NOAA-CMDL

EOF Analyse:
Interannuale Variabilität ist
dominiert durch die
Amazonas-Region
(32% der totalen Varianz)



Korrelation mit MEI ENSO Index

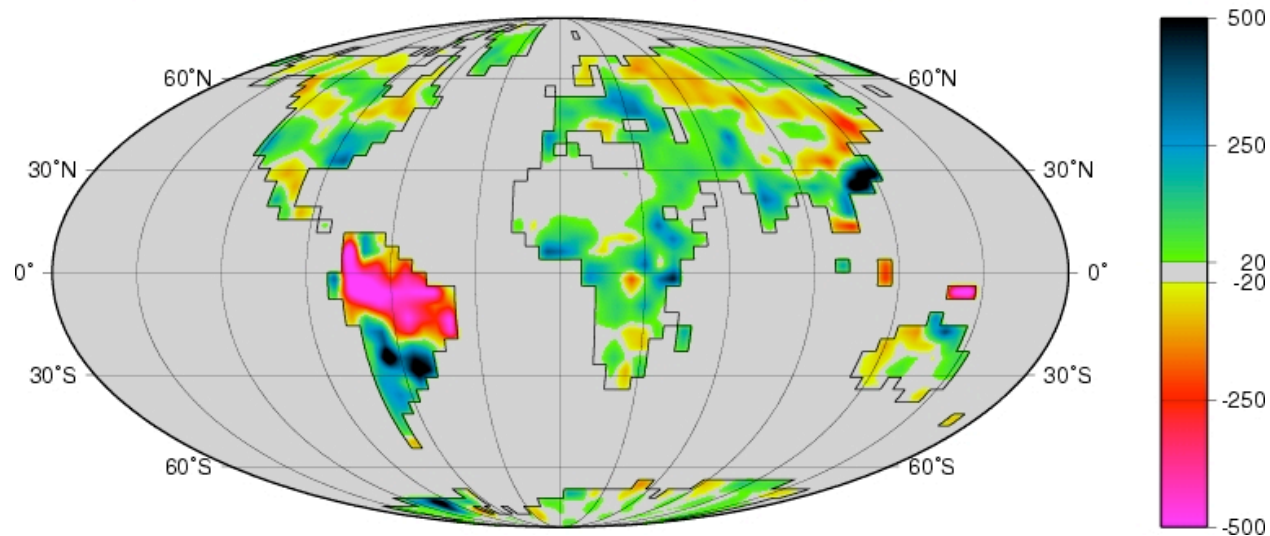
— PC1 Zeitreihe
- - - MEI ENSO Index [Wolter, 2002]



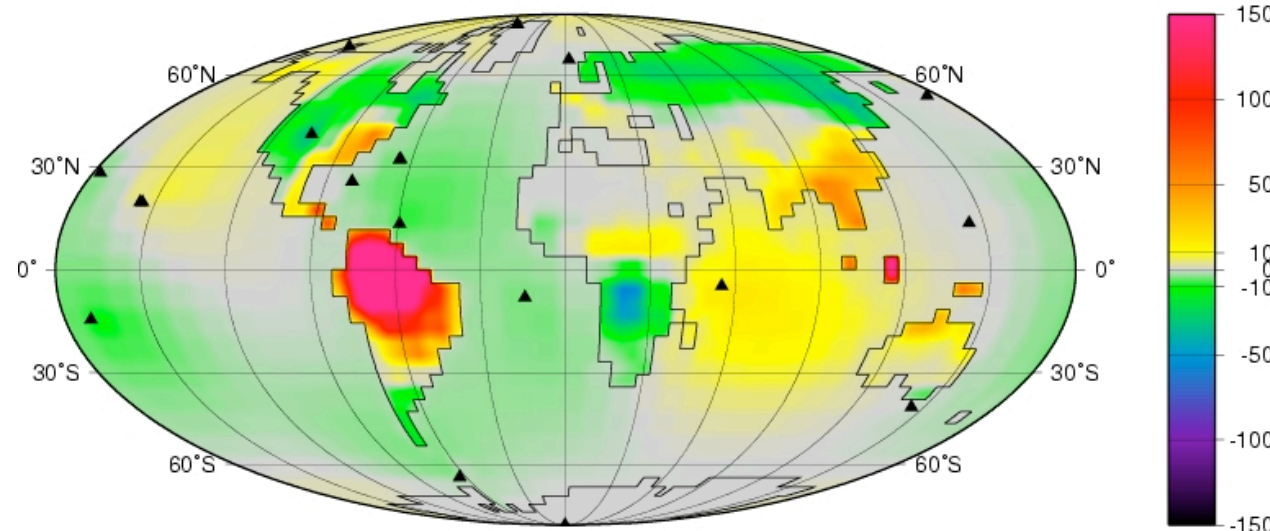
Fehlender Niederschlag als Treiber anomaler CO₂ Emissionen?

El Niño 1997/8

Precipitation Anomalies El Nino (June 1997 - May 1998) [mm]



Flux Anomalies El Nino (June 1997 - May 1998) [gC m⁻² yr⁻¹]

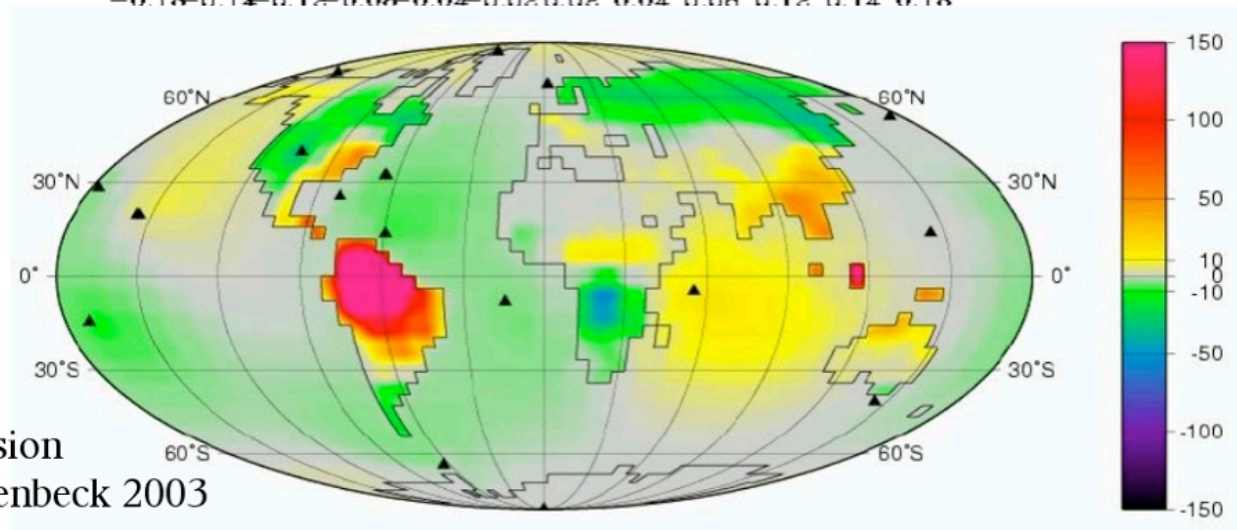
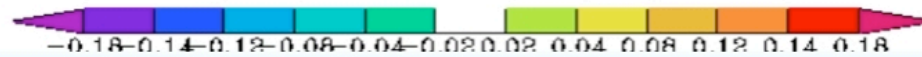
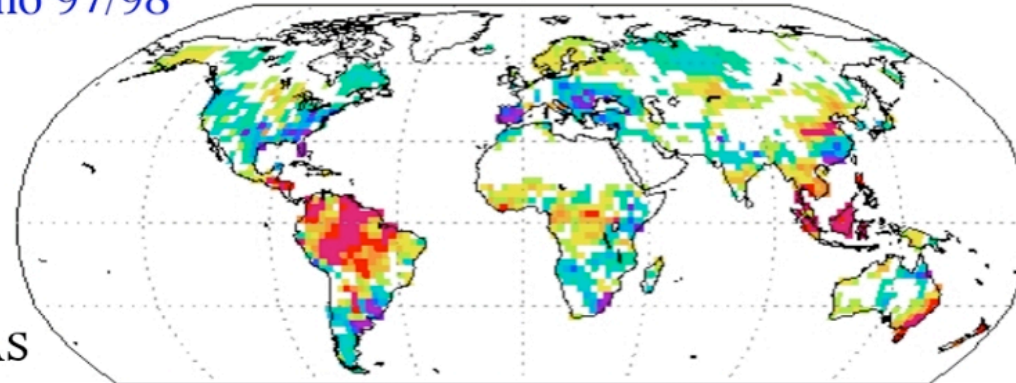


CO₂ Fluss - Anomalien: Modelliert durch globales Biosphärenmodell und beobachtet durch globale Inversionsrechnung

El Nino 97/98

C Flux anomalies (Jun1997-May1998)

VEGAS



Inversion
Roedenbeck 2003

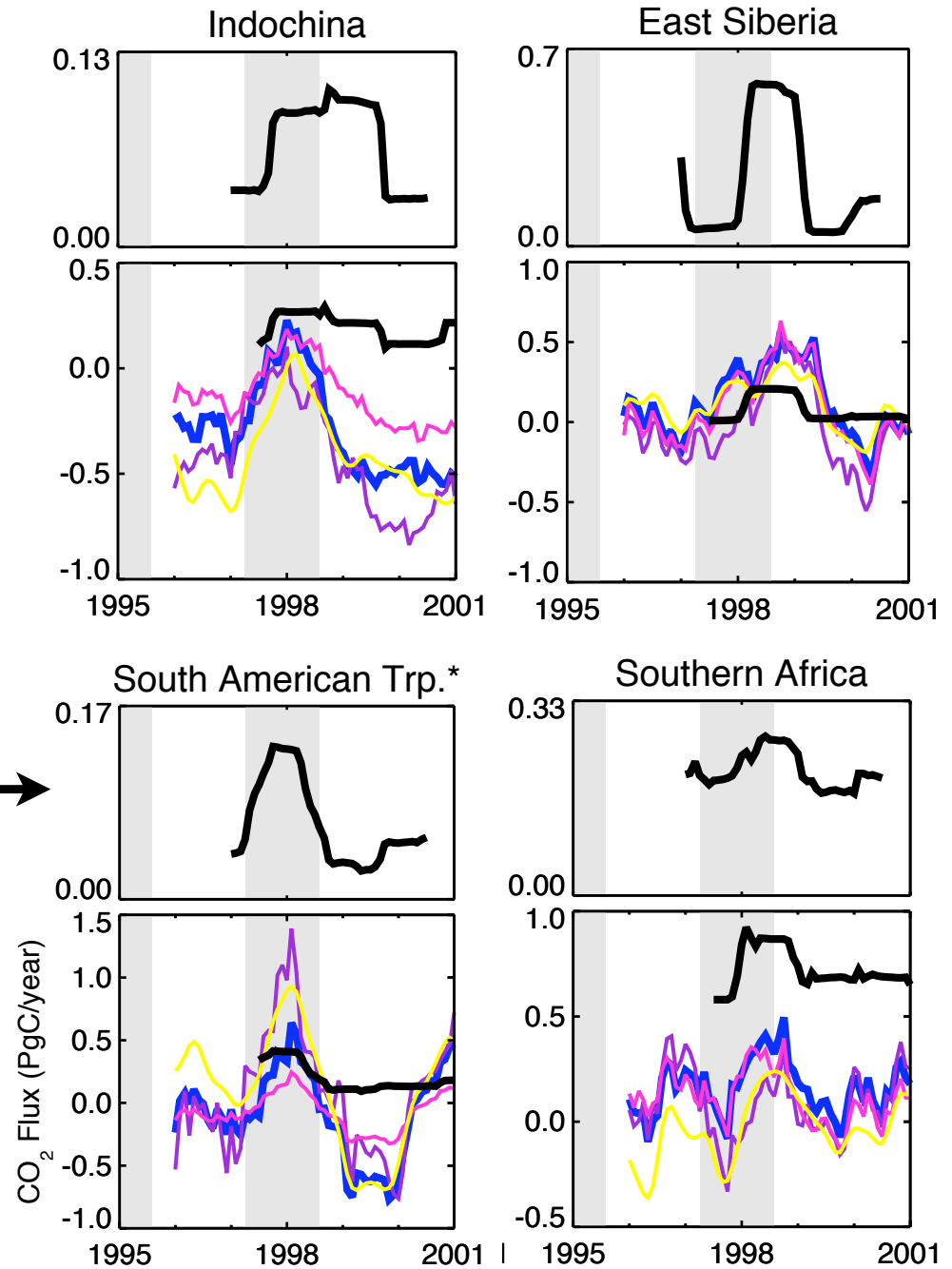
Zeng et al., in prep.

Vergleich der Inversionsrechnung mit aus Fernerkundungsdaten ermittelten Emissionen von Vegetationsfeuer

Firecounts
(abitrary scale) →

Inversions
(color lines)

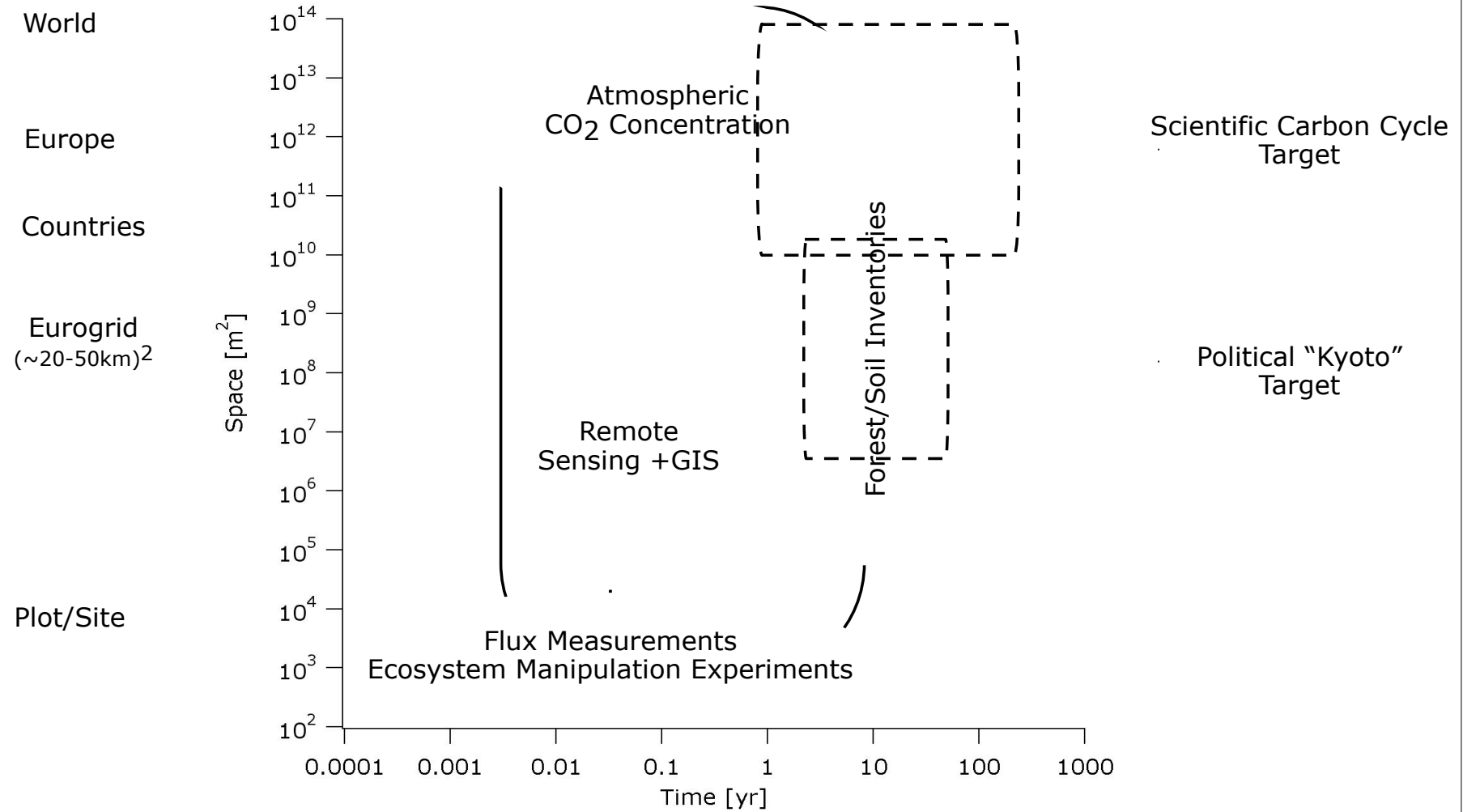
Fireflux estimate
(van der Verf et al., 2003,
black line) →



Zusammenfassung

- ◆ Erste Simulationen des globalen Wandels mit gekoppelten Kohlenstoffkreislauf-Klimamodellen zeigen potentiell signifikante Rückkopplungseffekte
- ◆ Bis heute zeigt der globale Kohlenstoffkreislauf nur ein passives, lineares Verhalten bezüglich der anthropogenen Störung
- ◆ Globale Inversionsrechnungen: heutige Auflösung auf der kontinentalen Skala; zeitliche Variabilität besser bestimmt als das zeitlich gemittelte räumliche Muster
- ◆ Interannuale (< -5a) Variabilität dominiert durch terrestrische Ökosysteme
- ◆ Vegetationsfeuer ein wichtiger Beitrag der interannualen Variabilität

Integration räumlicher und zeitlicher Skalen



Nächste Schritte zur Verbesserung der Top-Down Methode

- ◆ Ausbau des globalen Beobachtungssystems für biogeochemische Spurenstoffe
 - ◆ Verfeinerung des *in situ* Netzwerks (z.B. im Innern der Kontinente, u.a. mit Hilfe von “tall towers”)
 - ◆ Kontinuierliche Konzentrationsmessungen
 - ◆ Multi-tracer Verfahren (CO, CH₄, SF₆, O₂/N₂, C-isotope,...)
 - ◆ Entwicklung von Satelliten-gestützten Sensoren (OCO, GOSAT,...)
- ◆ Methodische Entwicklungen
 - ◆ Hohe raumzeitliche Auflösung des atmosphärischen Transportes (z.B. durch Beizug eines atmosphärischen Mesoskalen-Modellsystems)
 - ◆ Datenassimilation: Einbezug von *in situ* Beobachtungen in gekoppelte Kohlenstoffkreislauf-Klimamodelle
 - ◆ Datenassimilation: Einbezug von Beobachtungen mit unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Charakteristiken (Konzentration, Flussmessungen, Forstinventardaten, Multi-tracer Daten, Fernerkundungsdaten, etc. - GEMS)