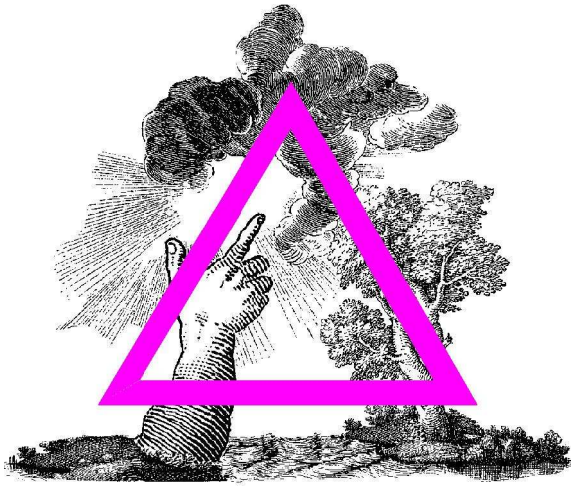
# Unsicherheit und Klimawandel




**Thomas Kleinen**
Potsdam-Institut für
Klimafolgenforschung

1.7.2005

# Überblick

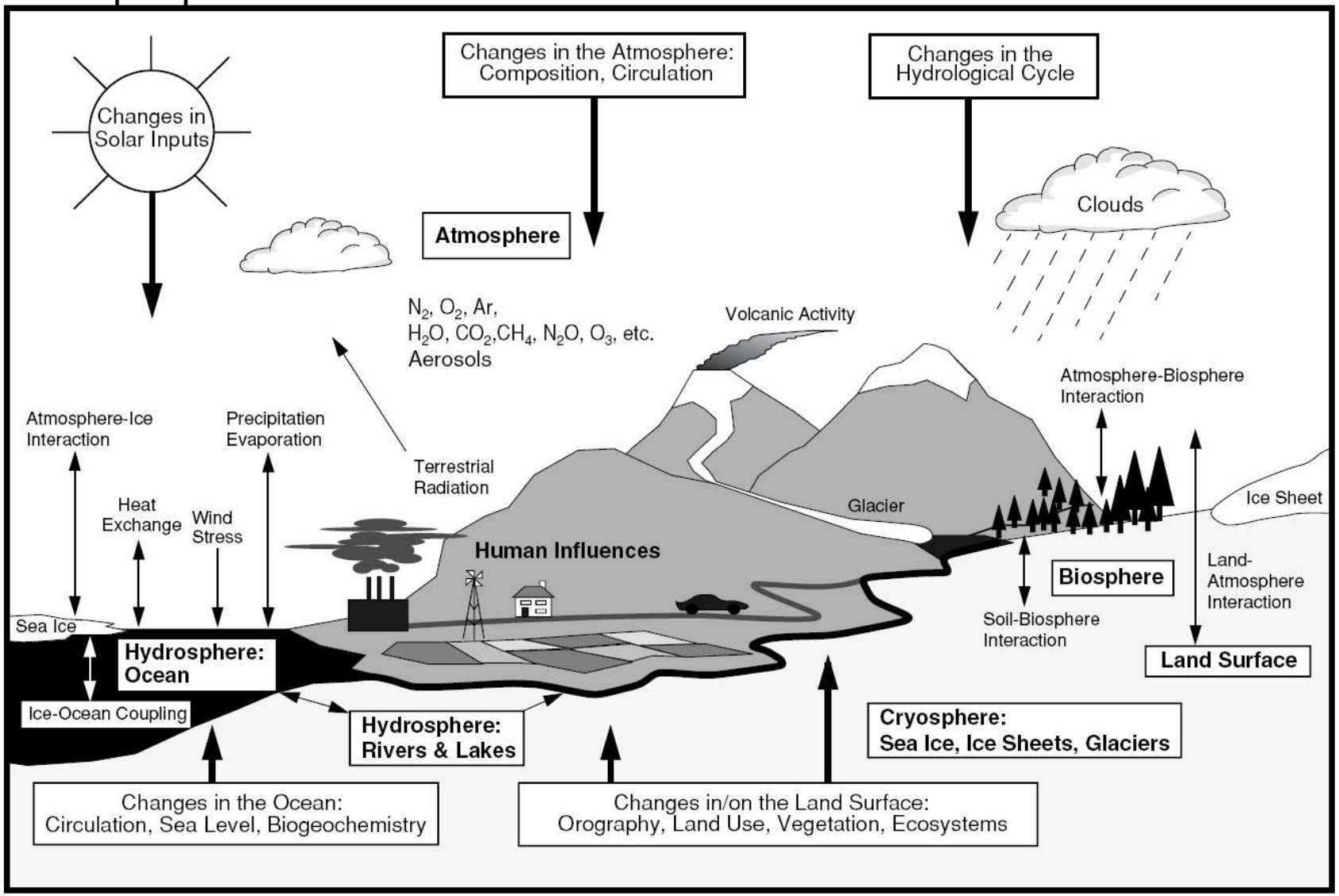
1) Beobachteter Klimawandel
2) Zukünftiger Klimawandel
3) Integrated Assessment
4) Der Leitplankenansatz
5) Der probabilistische Leitplankenansatz - explizite Berücksichtigung von Unsicherheit

# Überblick

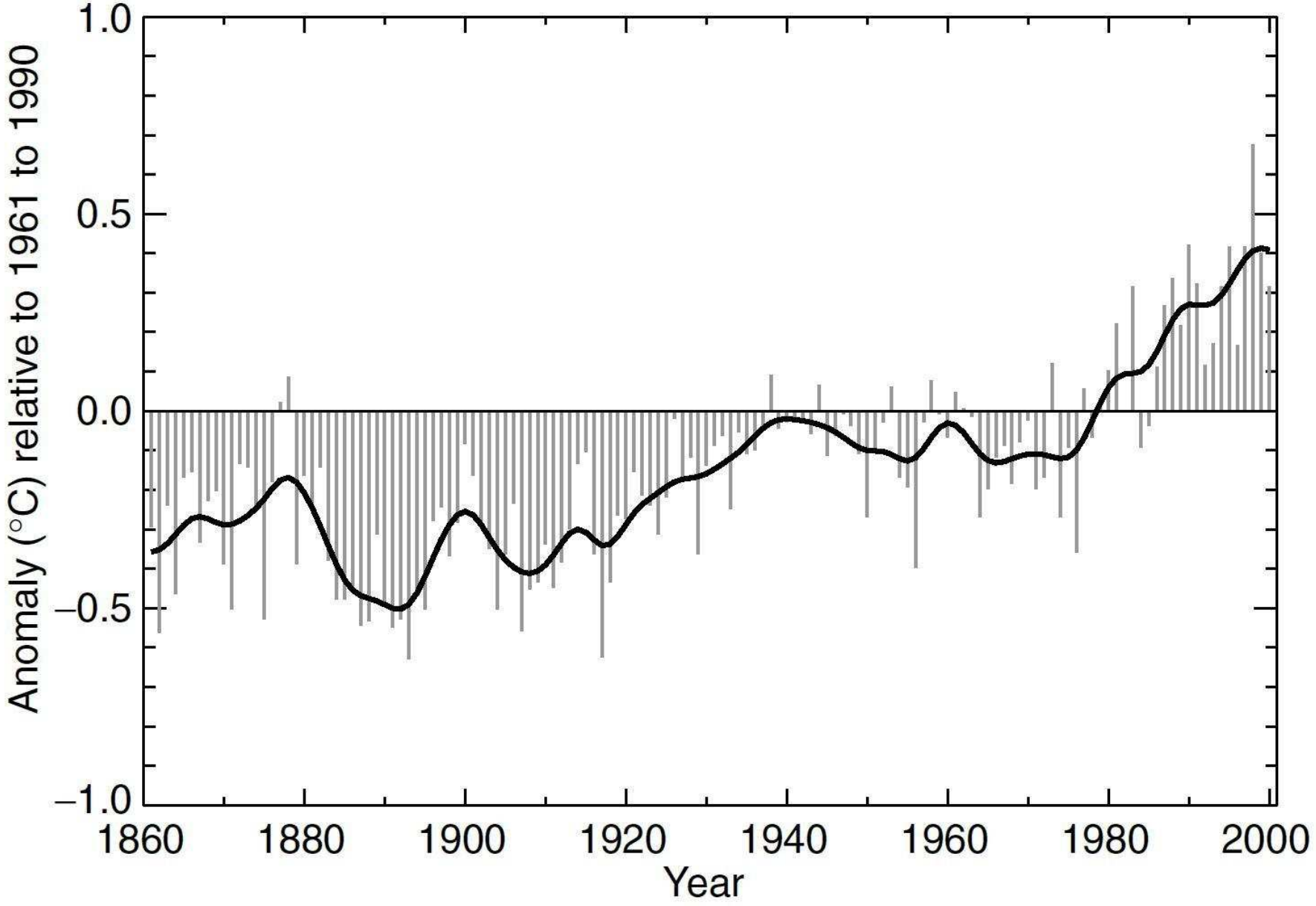
1) Beobachteter Klimawandel
   - Das Klimasystem
   - Globaler Klimawandel
   - Räumliche Verteilung
   - Auswirkungen des Klimawandels
2) Zukünftiger Klimawandel
3) Integrated Assessment
4) Der Leitplankenansatz
5) Der probabilistische Leitplankenansatz - explizite Berücksichtigung von Unsicherheit

# Das Klimasystem

- Komplexes, nichtlineares System
- Bestehend aus: Atmosphäre, Hydrosphäre, Cryosphäre, Biosphäre und Anthroposphäre



# Temperaturänderung 1860 - 2000



# Temperaturänderung letztes Jahrhundert

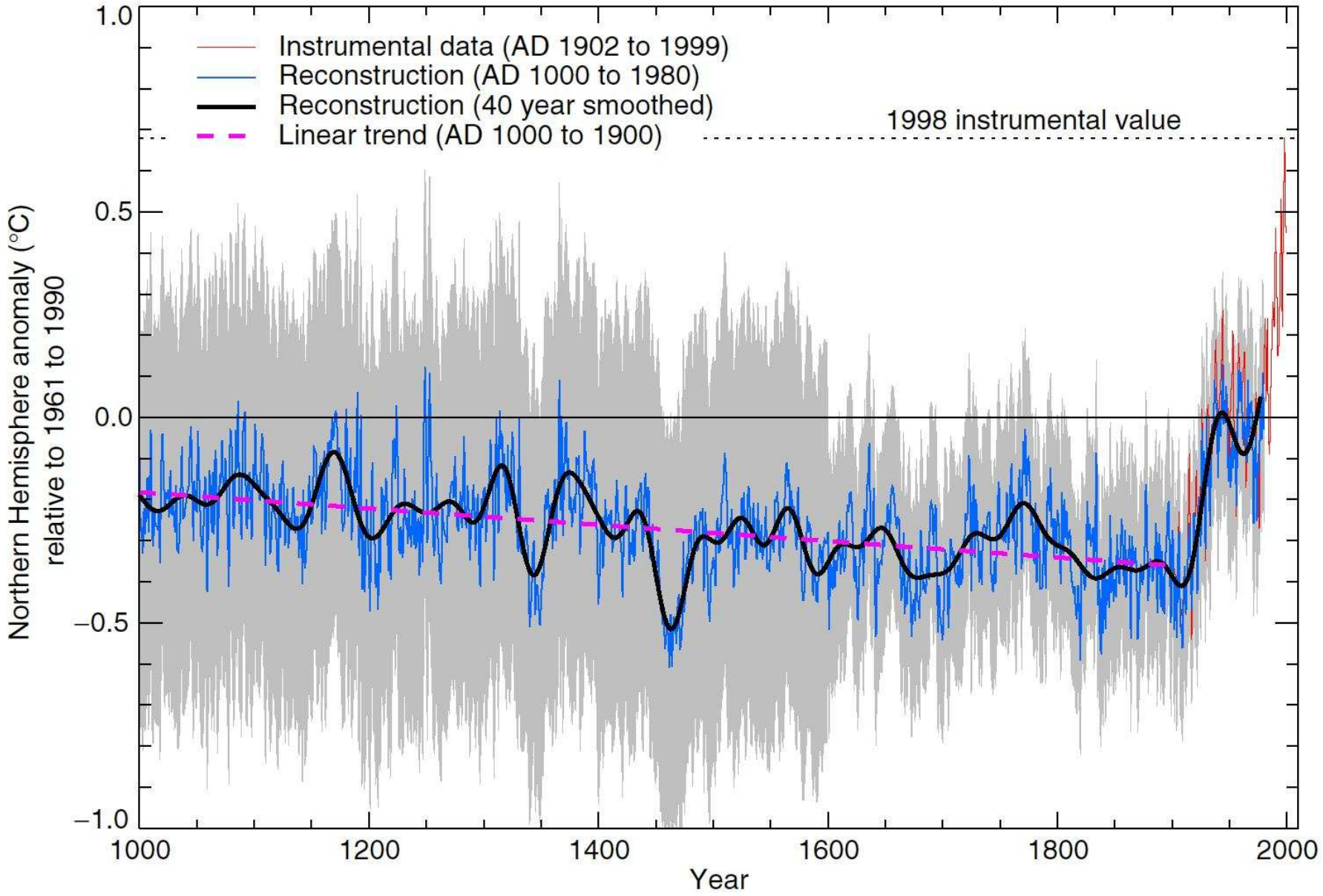
- Kontinuierliche Messreihen Temperatur seit 1679 (Messreihe Mittelengland)
- Seit Mitte 19. Jhd. weitverbreitet Temperaturmessungen
- 20. Jhd. (fast) globale Messungen "Wetter"

- Ozean - Oberfläche seit Mitte 19. Jhd. von Schiffen aus
- seit späte 40er unterhalb Wasseroberfläche und obere Atmosphäre, fast global
- seit späte 70er zusätzlich Satellitenmessungen

- Heutzutage Messnetz nicht perfekt, aber Messgenauigkeit gut genug für Bestimmung globale Mitteltemperatur, anders bei kleinräumigen Phänomenen
- Änderung globale Mitteltemperatur seit vorindustriell:

  $\Delta T = 0{,}6 \pm 0{,}2\,°C$

# Temperaturänderung 1000 - 2000



# Temperaturrekonstruktion

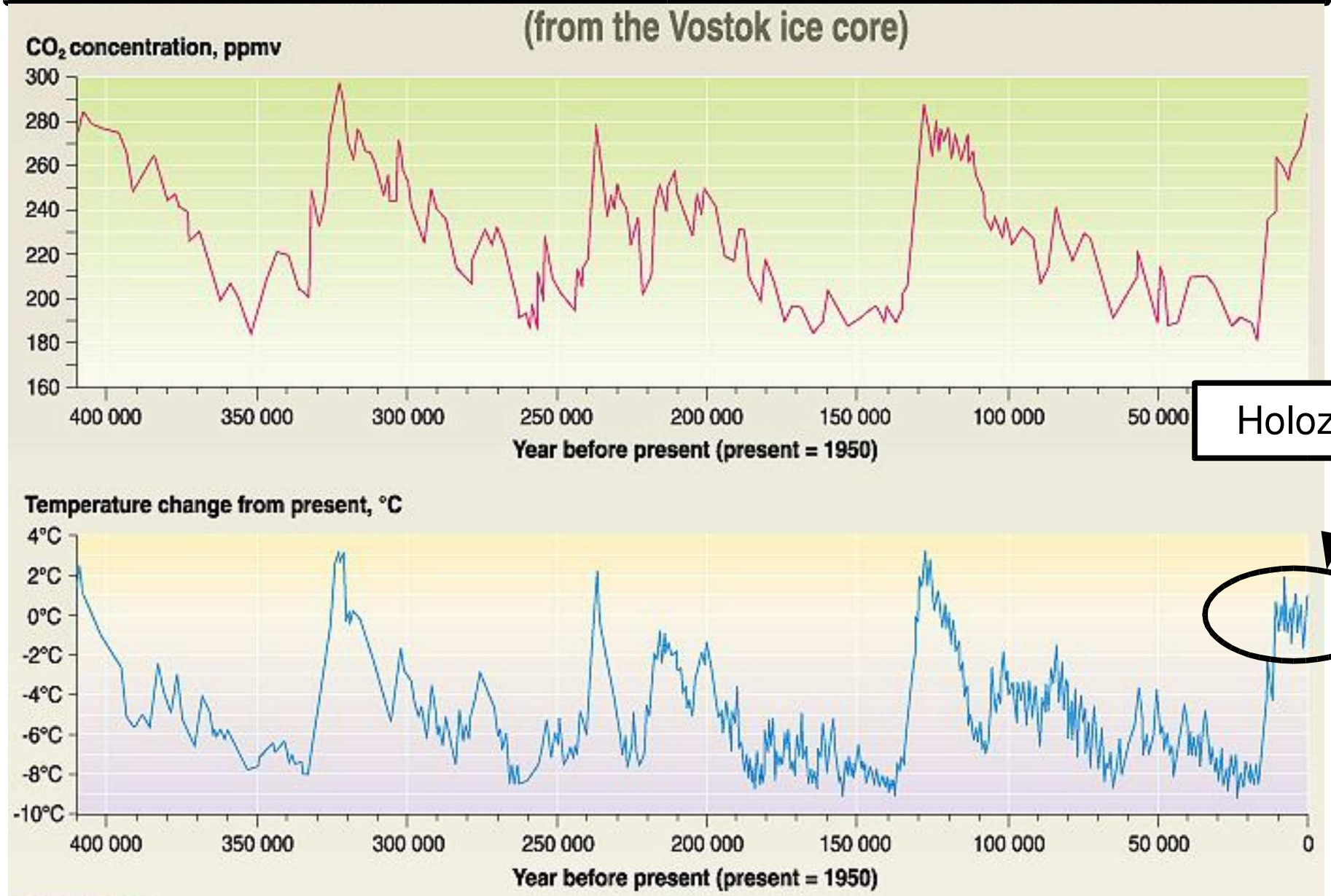
- Vor Beginn v. Messungen: Klimadaten rekonstruierbar
- Sog. “Proxy” Messungen

- Letzte ca. 1000 Jahre: Jahresringe Bäume

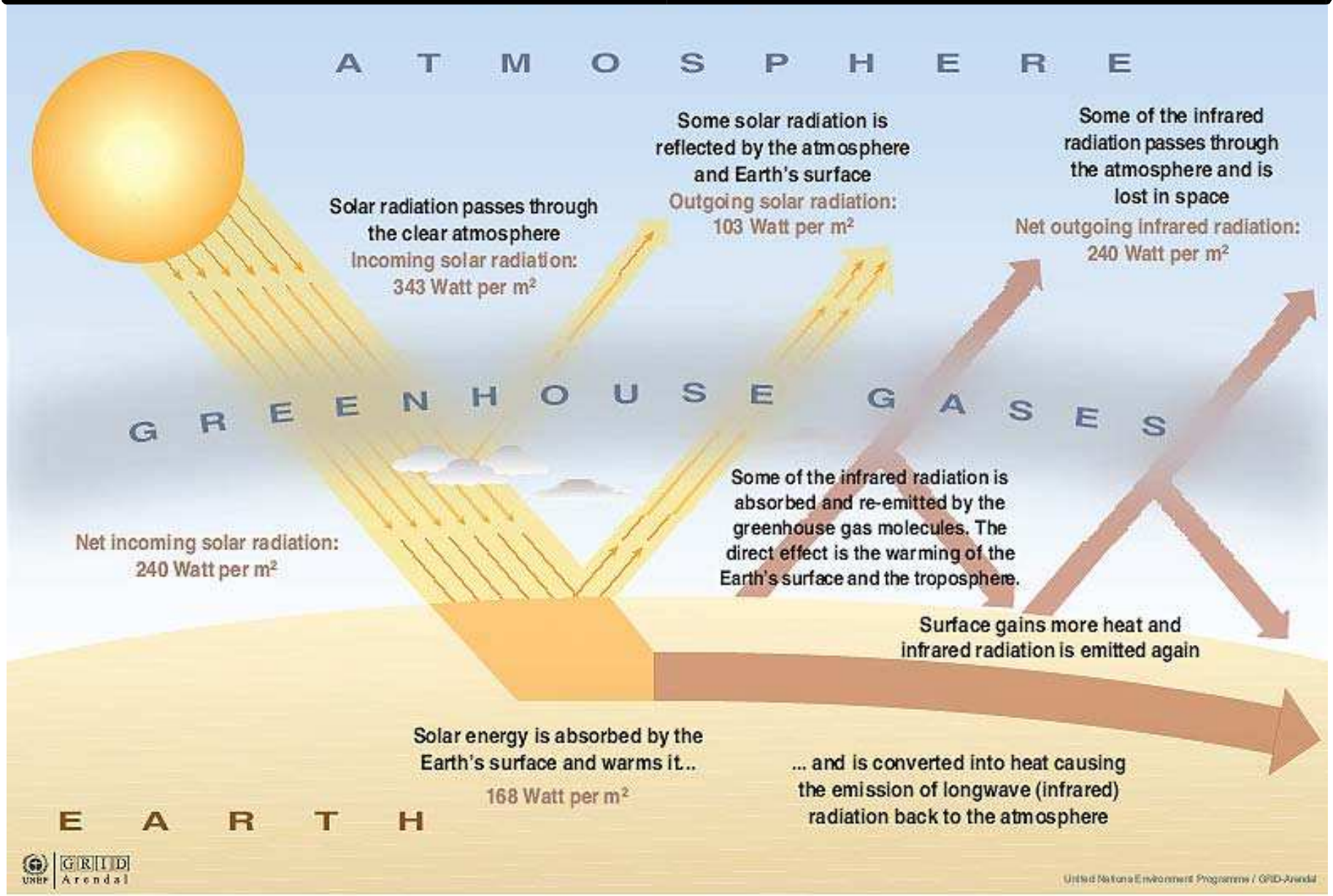
- Noch weiter zurückliegend: Sedimente, Zusammensetzung Stalagmiten

- Besonders gut: Eisbohrungen Grönland / Antarktis

# Temperatur und $CO_2$, letzte 420000 Jahre

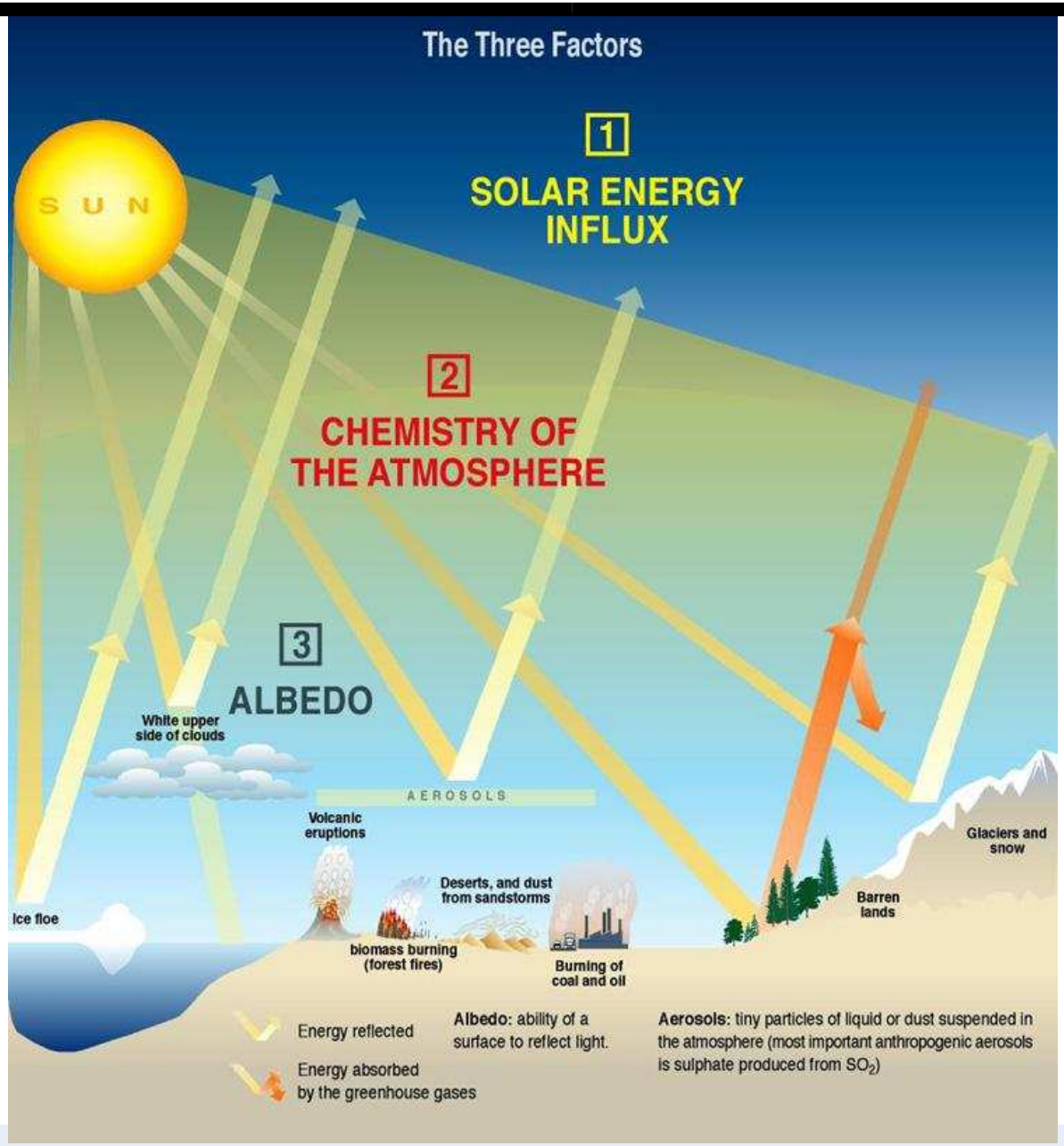


# Der Treibhauseffekt

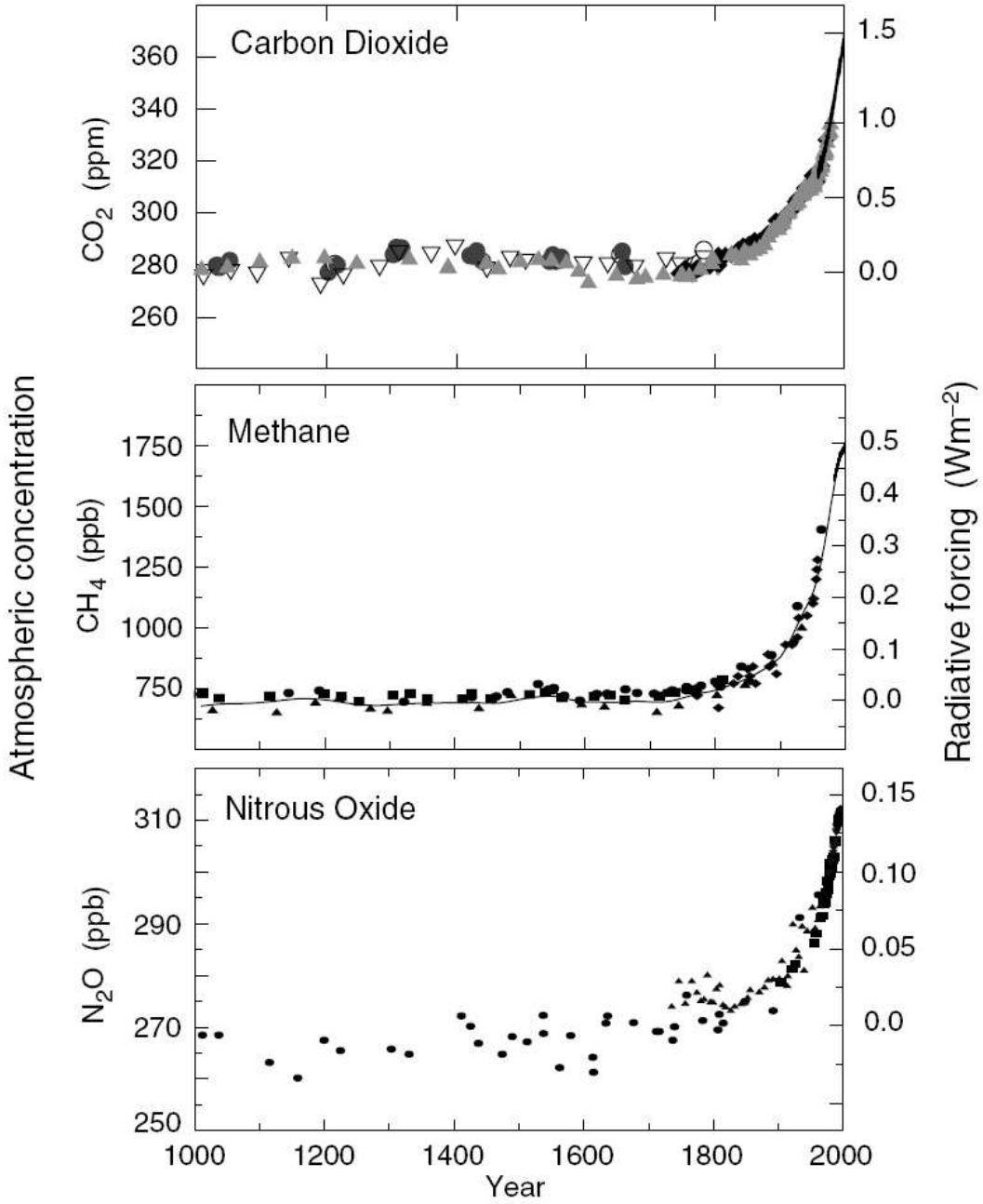



Sources: Okanagan University College, University of Oxford, EPA, IPCC.

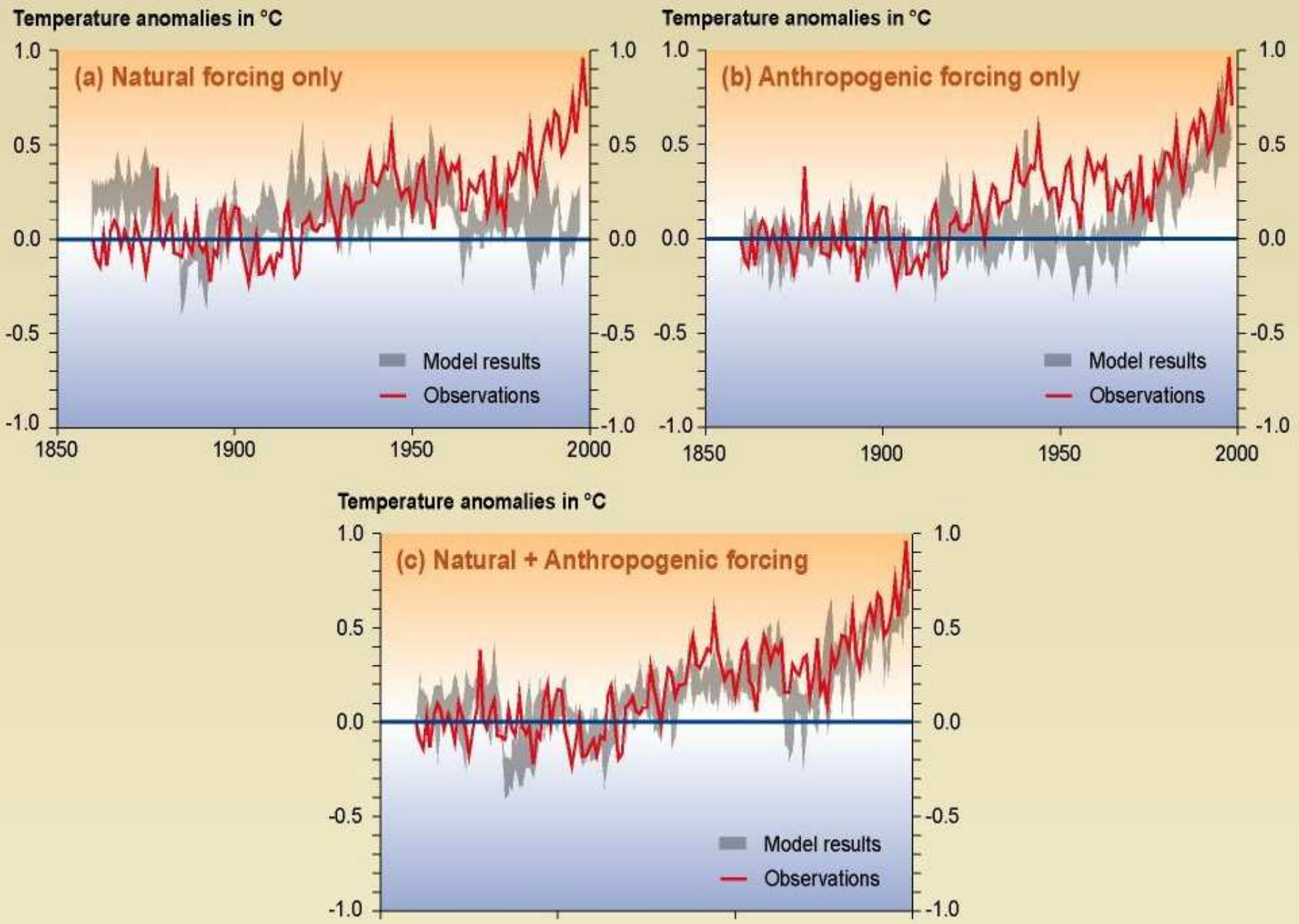
# Ursachen des Klimawandels



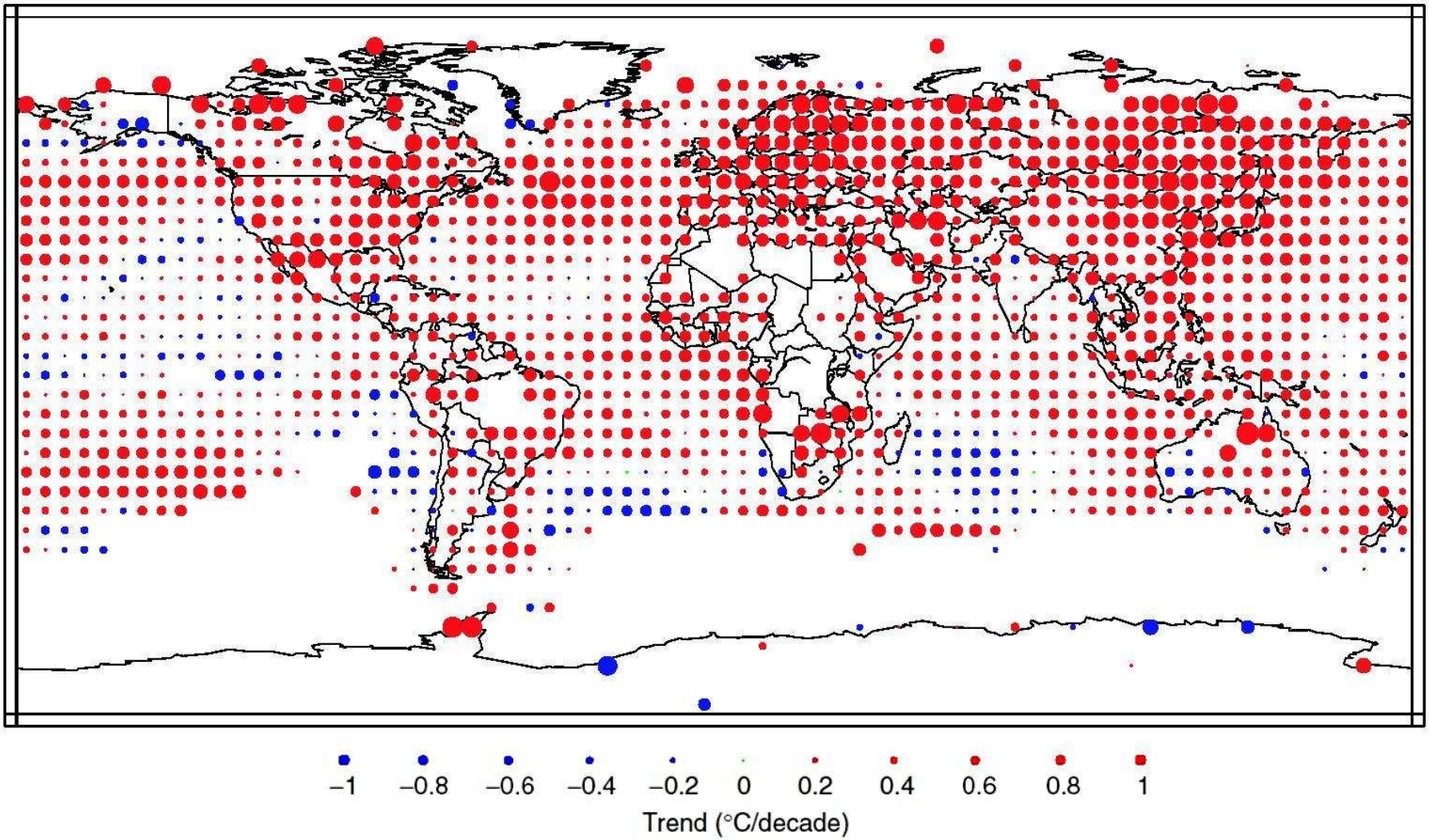
# Änderung der Treibhausgase



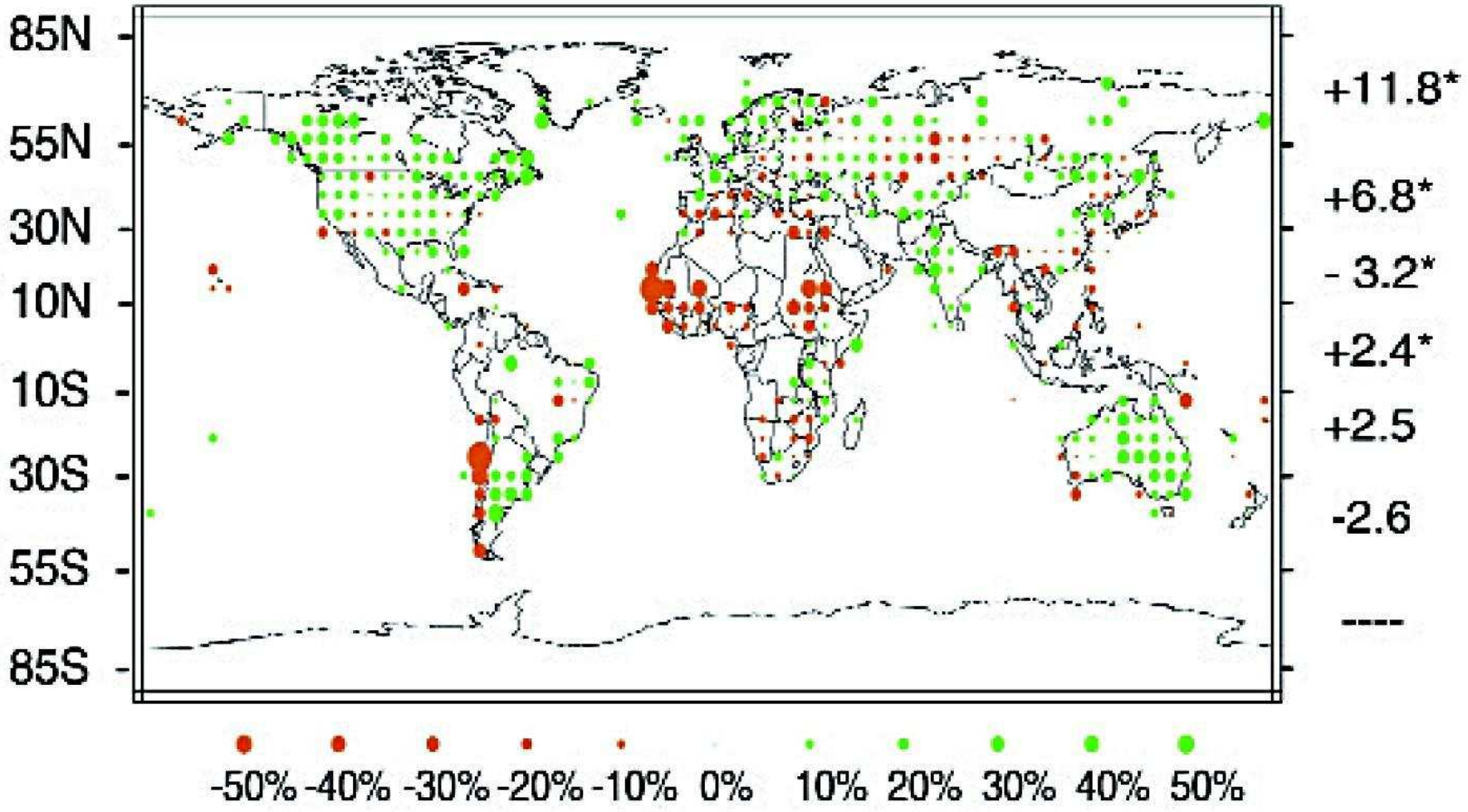
# “Attribution” - Vergleich verschiedener Änderungsmechanismen mit Messungen



# Temperaturtrend 1976 - 2000



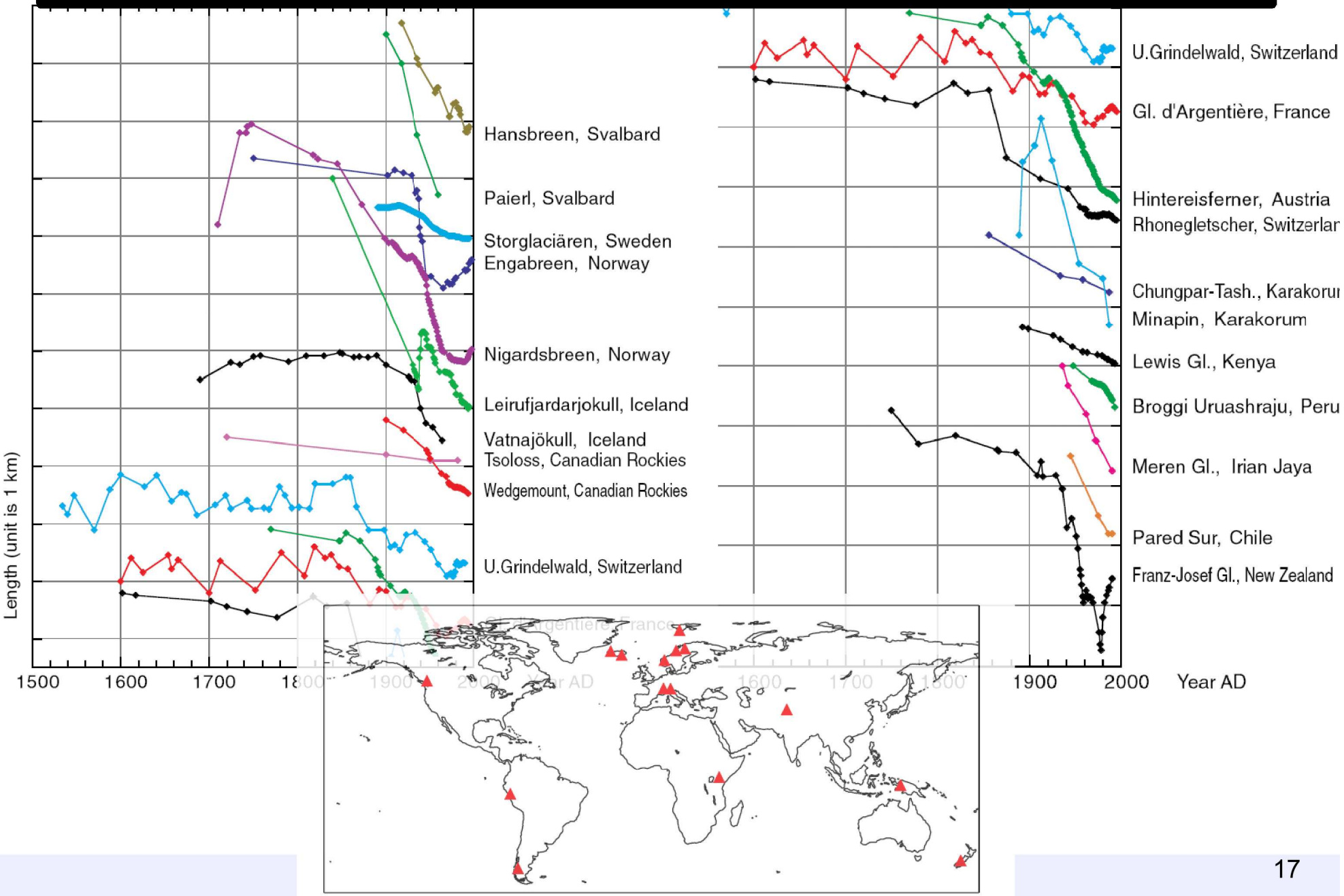
# Niederschlagstrend 1901 - 2000



# “Ötzi”

- Gefunden 1991 durch Bergwanderer, Fundort Ötztal, Grenze Italien / Österreich
- Gelebt: ca. 3300 v. Chr.
- Erstaunlich gut erhalten, muss daher bis zum Fund von Eis eingeschlossen gewesen sein => Gletscher ist so weit abgeschmolzen, wie seit 5000 Jahren nicht mehr

# Veränderung der Länge v. Gletschern



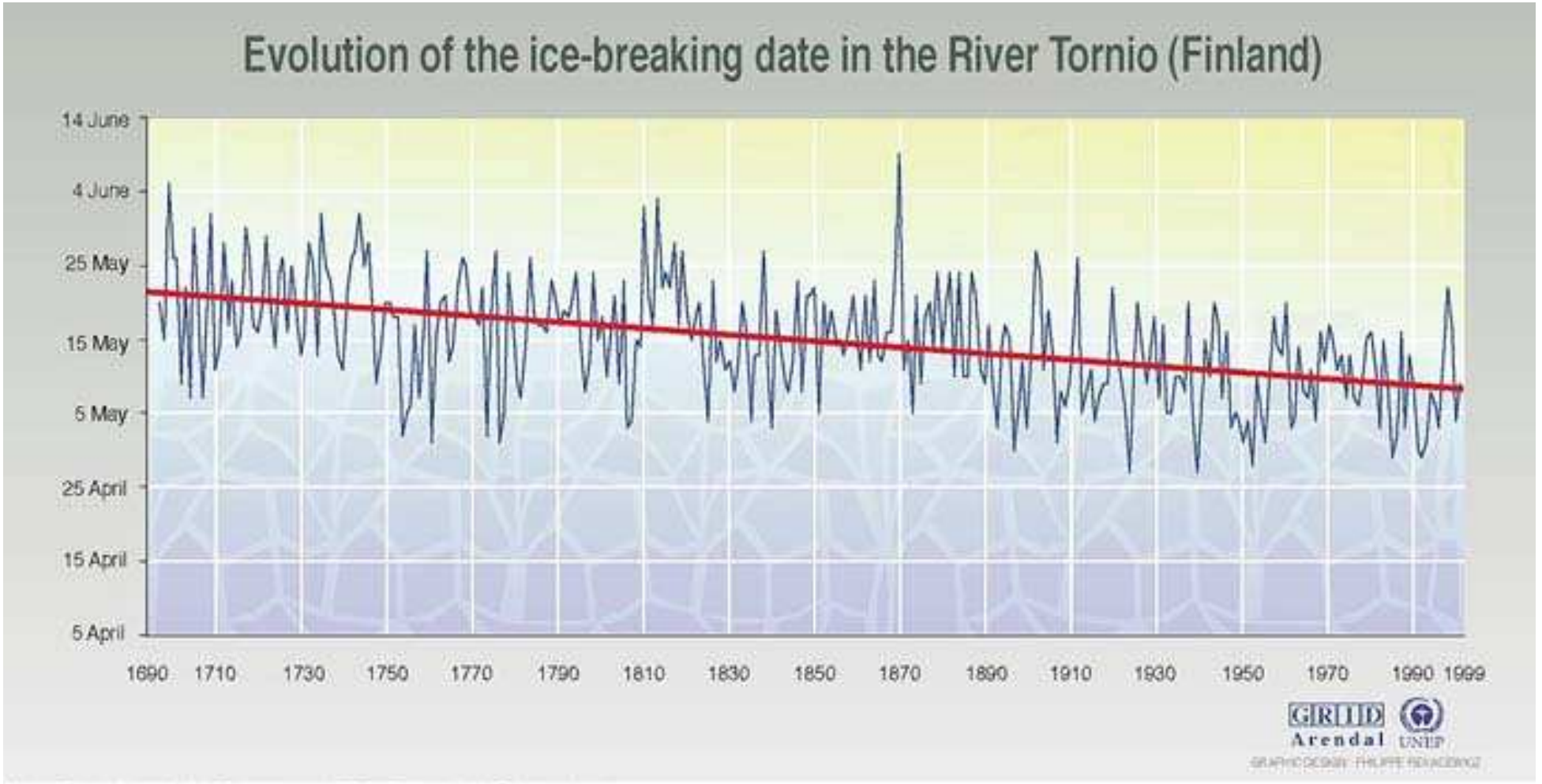
# Abschmelzen des Kilimanjaro

Sources: Meeting of the American Association for the Advancement of Science (AAAS), February 2001 ; Earthobservatory.nasa.gov.

# Zerfall des Matterhorns

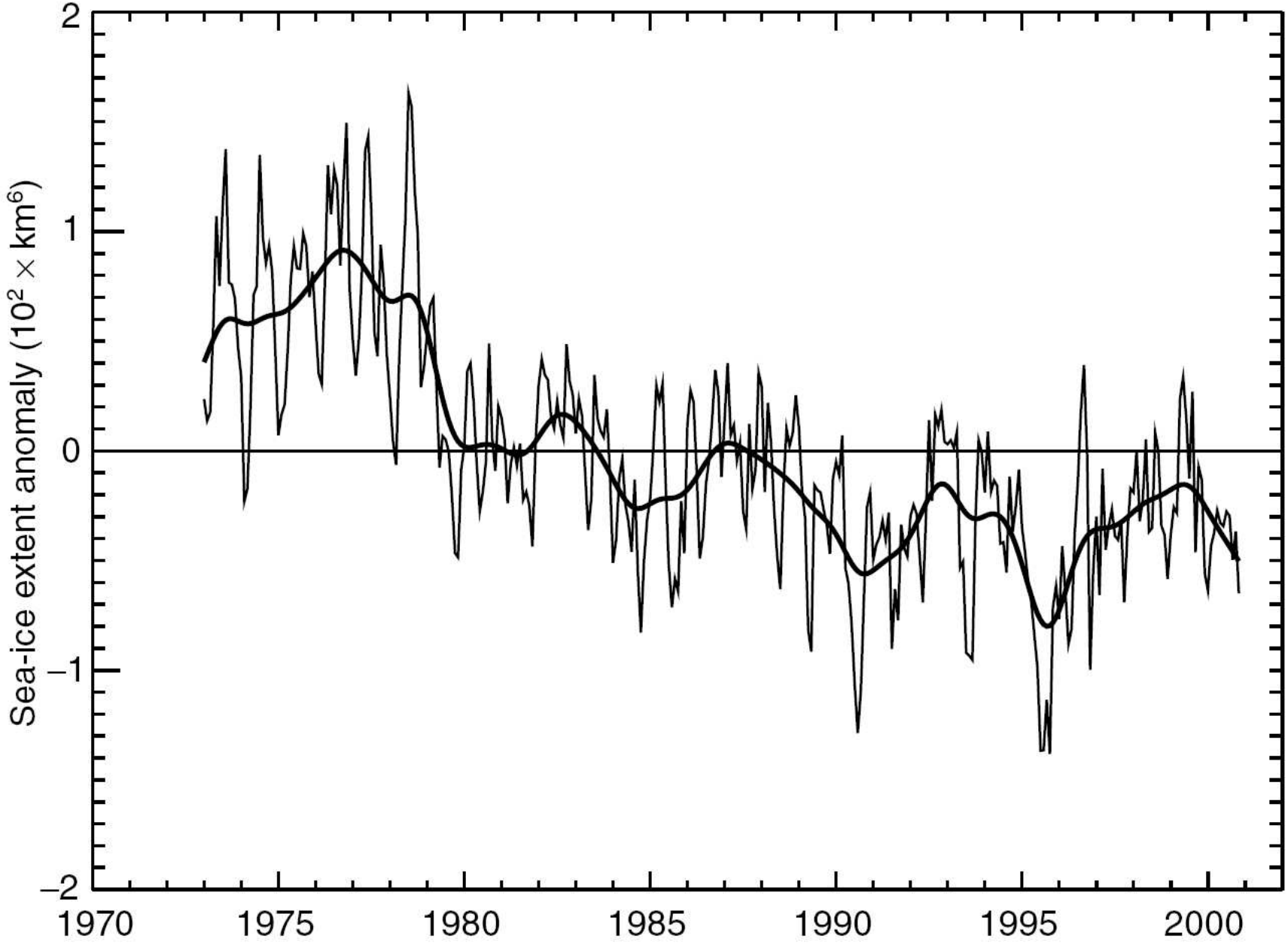
- Alpen oberhalb 2500m Permafrost
- Hält teilweise Berggipfel zusammen
- In weiten Teilen Alpen: Rückgang des Permafrostes
- 15.7.2003: ca. 100 Menschen vom Matterhorn gerettet, Rückweg durch Geröll versperrt

# Eisbruch in Finnland




Source: Trends in the finnish Environment 1997, fig. 1.7, updated in February 2000

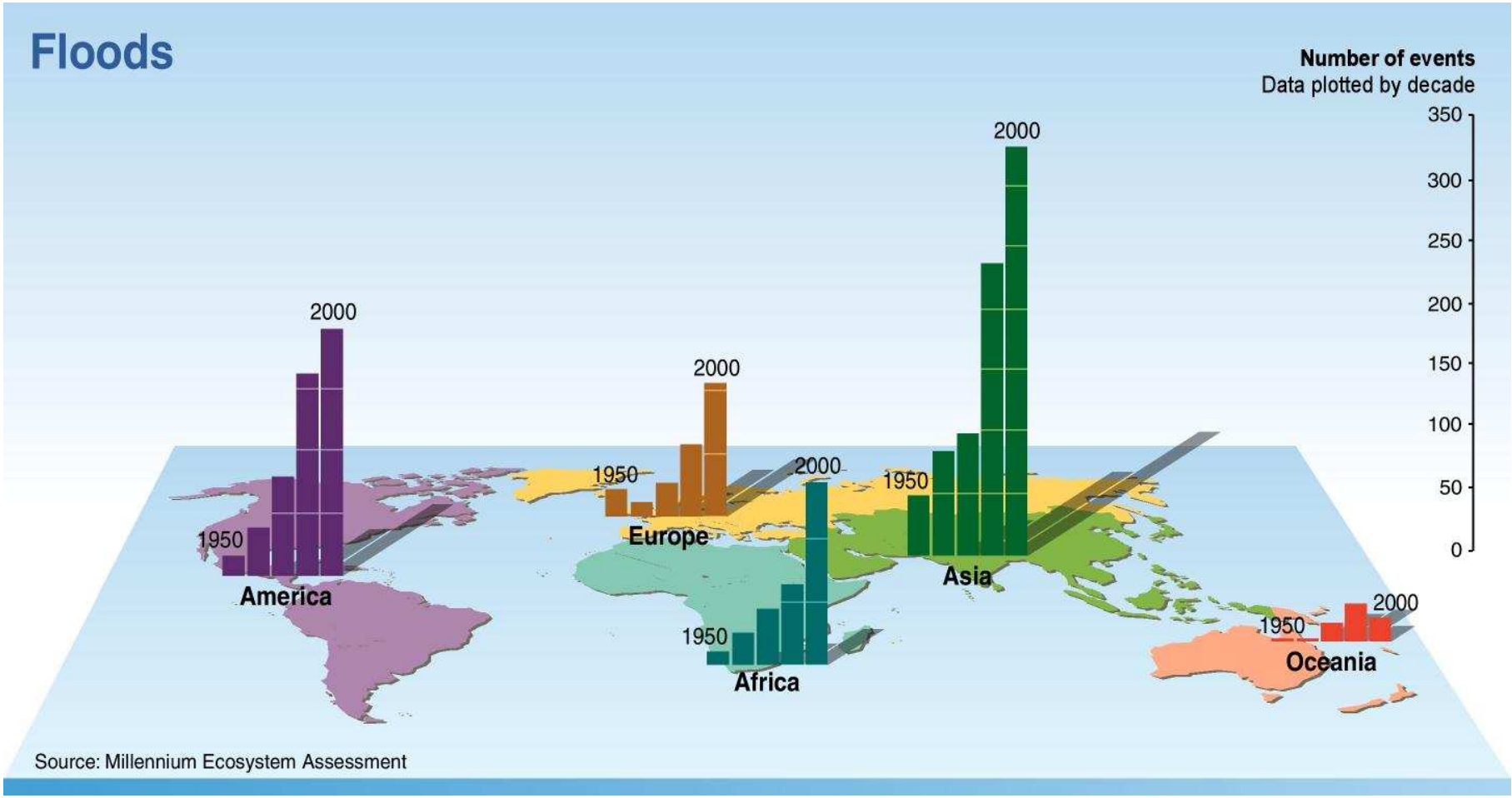
# Meereis in der Arktis



# Vegetationsänderung in Alaska

# “Elbeflut” 2002

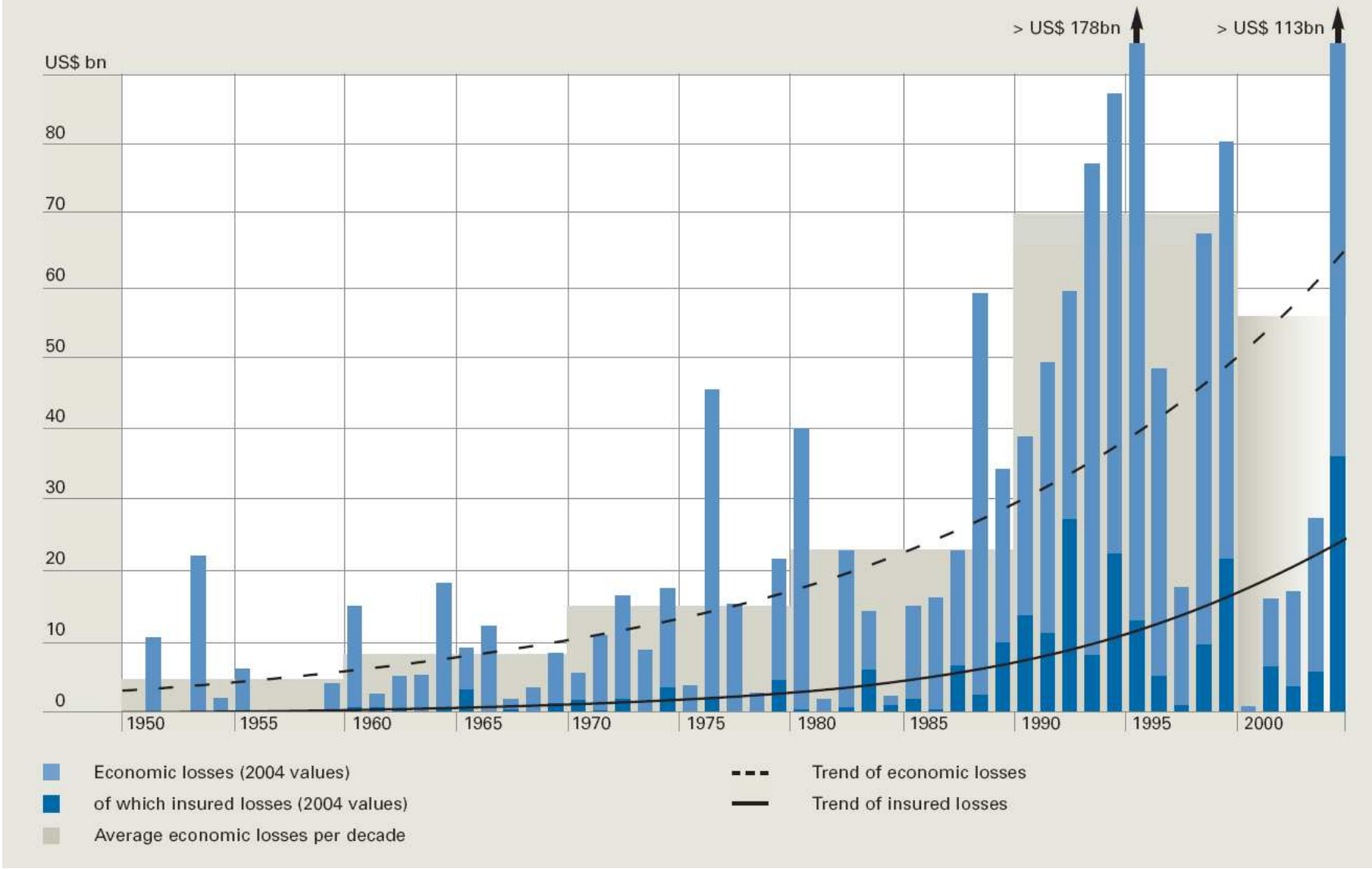
# Überflutungen letzte Jahrzehnte



# “Katastrophensommer” 2003

- Hitzewelle in Europa
- Wärmster Sommer seit mindestens 500 Jahren
- Weitverbreitete Ernteschäden
- ca. 30000 hitzebedingte Todesfälle (WHO)

# Versicherungskosten durch extreme Wetterereignisse




Quelle: Münchener Rückversicherung

# Zusammenfassung

- Der Klimawandel ist real messbar
- Bisherige Erwärmung seit vorindustriell: $\Delta T = 0{,}6 \pm 0{,}2\,°C$
- Erwärmung ist räumlich und zeitlich heterogen:
  - Hohe Breiten Erwärmung stärker als niedere Breiten
  - Kontinente stärker als Ozeane
  - Winter stärker als Sommer
  - Nacht stärker als Tag
- Erwärmung reicht bis 5 °C in der Arktis
- Inzwischen Auswirkungen deutlich zu erkennen

# Überblick

1) Beobachteter Klimawandel
2) Zukünftiger Klimawandel
   - Szenarien und Projektionen
   - Potentielle Auswirkungen
3) Integrated Assessment
4) Der Leitplankenansatz
5) Der probabilistische Leitplankenansatz - explizite Berücksichtigung von Unsicherheit

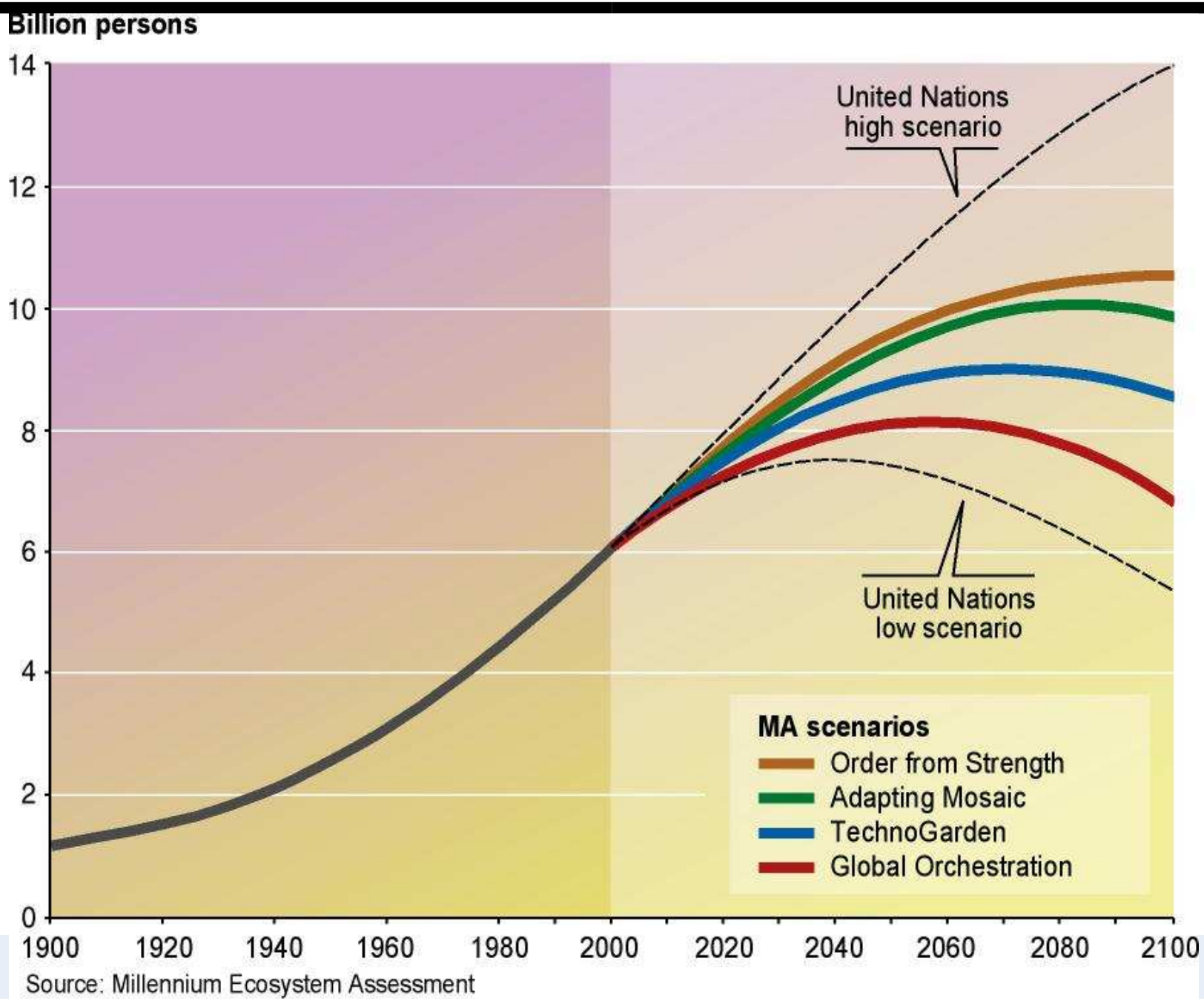
# Zukünftige Klimaentwicklung?

- Zukünftige Klimaentwicklung mit vielen Unsicherheiten
  1) Unsicherheit über zukünftige Entwicklung der Menschheit, technische Entwicklung, Treibhausgasemissionen
  2) Unsicherheit über Reaktion Klimasystem auf gegebene Trajektorie Treibhausgasemissionen
  3) Unsicherheit über Auswirkungen Klimawandel

- Größte Unsicherheit?

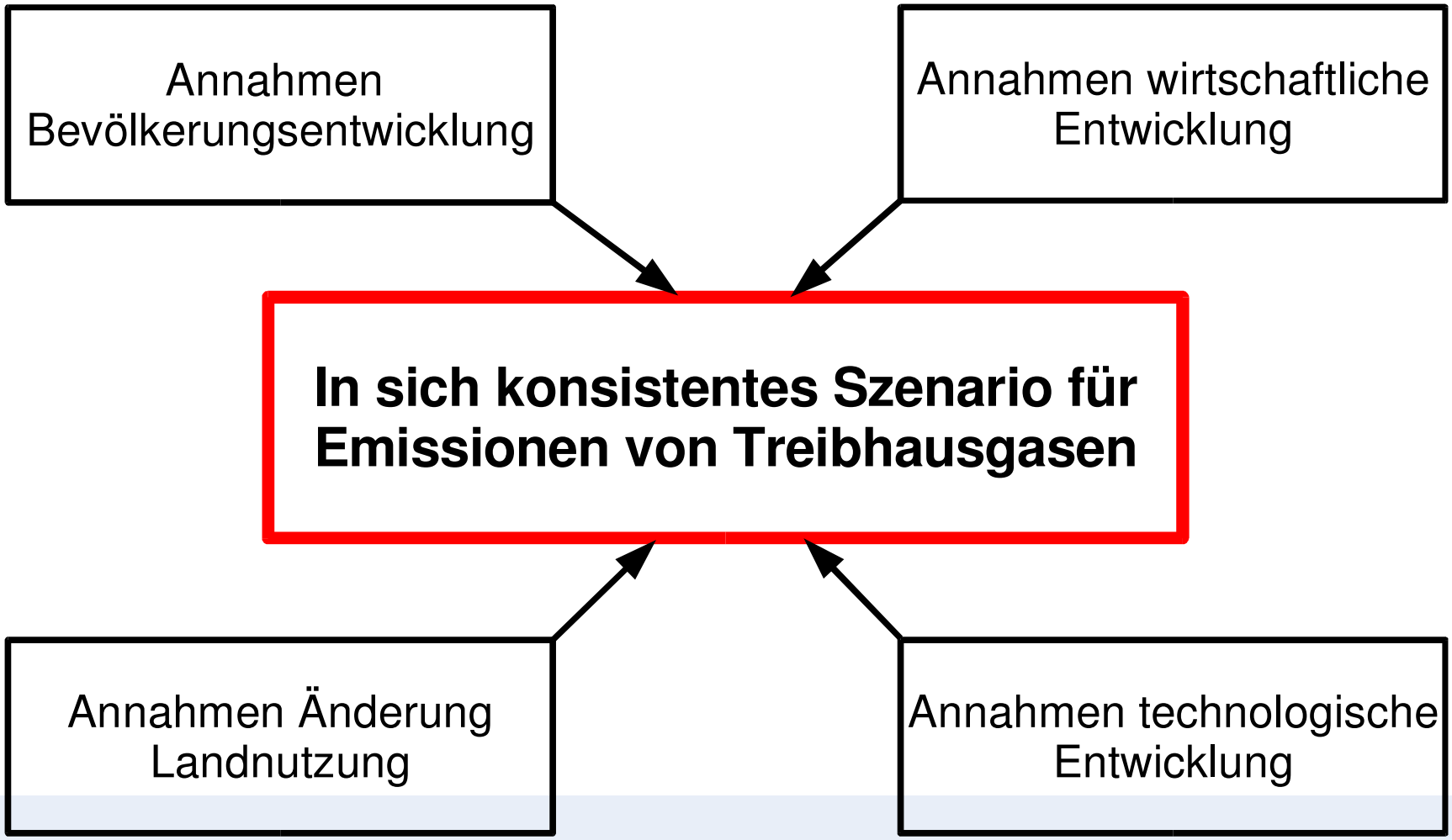
Menschliche Entwicklung

# Bevölkerungsentwicklung



# Szenarienentwicklung

- Eine Möglichkeit Umgang mit Unsicherheit: Szenarien über zukünftige Entwicklung
- Keine “Vorhersage”, sondern konsistente mögliche Entwicklung



# Entwicklungstrends der SRES Szenarien

Globalisierung

**A1**

- Sehr schnelles Wirtschaftswachstum
- Bevölkerung: 9 Mrd. 2050, 7 Mrd. 2100
- Globale Konvergenz

**B1**

- Globaler Trend zu nachhaltiger Entwicklung
- Dabei starkes Wirtschaftswachstum
- Konvergente Entwicklung der Regionen
- Bevölkerung: 9 Mrd. 2050, 7 Mrd. 2100
- Schwerpunkt bei globalen Lösungen für Nachhaltigkeitsfragen

Traditionelle Ökonomie

Nachhaltige Entwicklung

**A2**

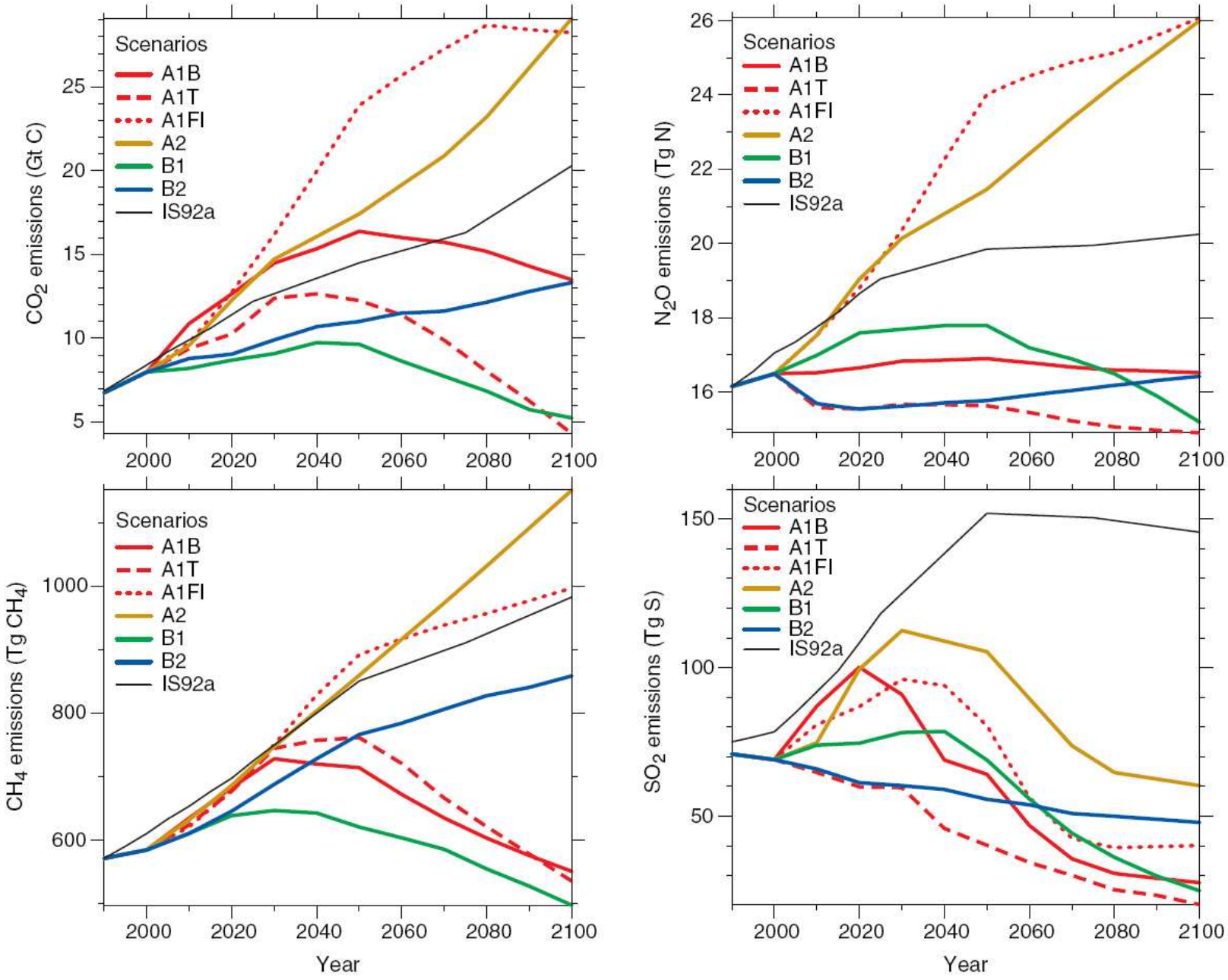
- Sehr heterogene Entwicklung Weltwirtschaft
- Entwicklung regional orientiert
- Starkes Bevölkerungswachstum
- Bevölkerung: 15 Mrd. 2100

**B2**

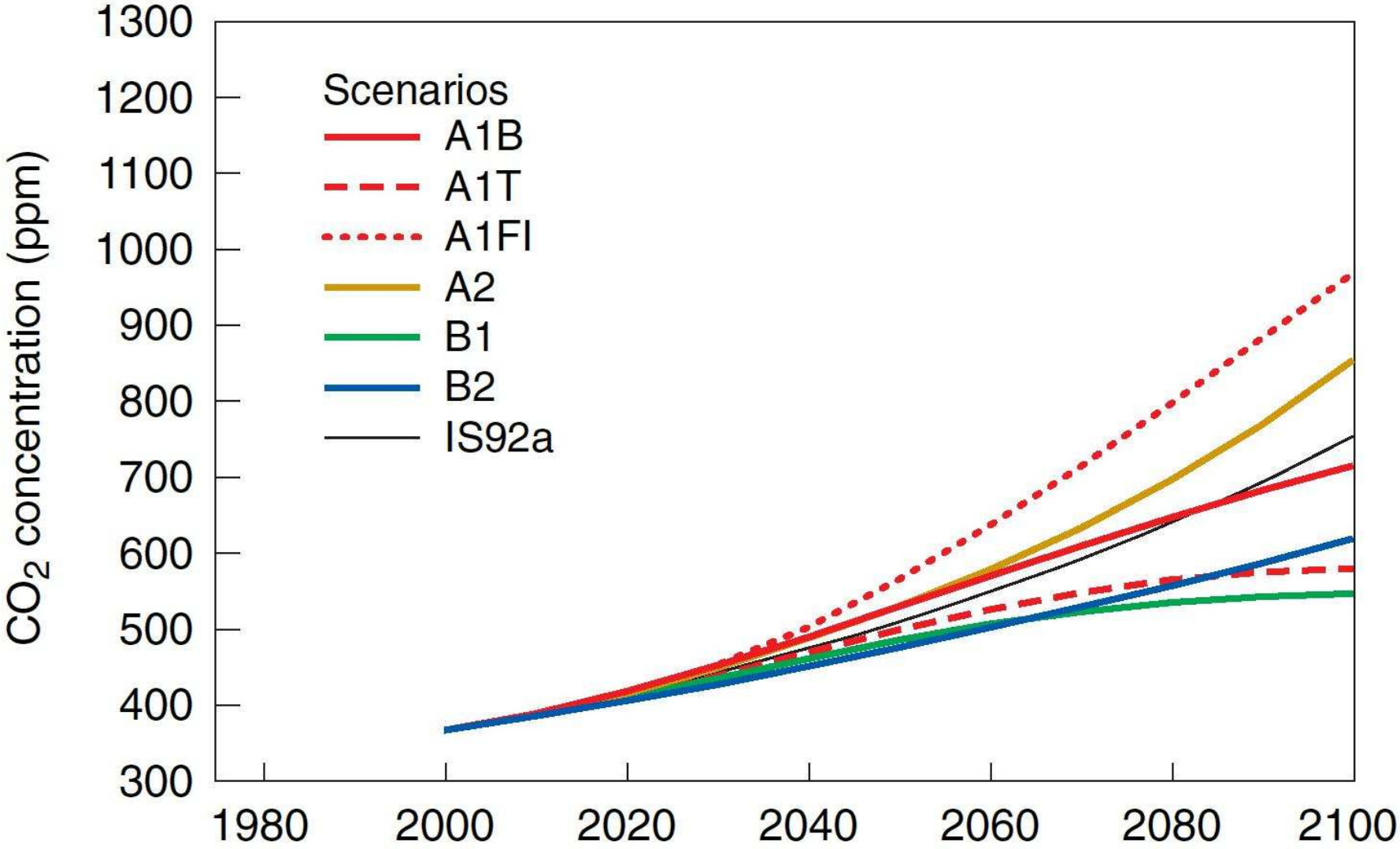
- Kontinuierlich ansteigende Weltbevölkerung
- Bevölkerung: 10 Mrd. 2100
- Moderate ökonomische Entwicklung
- Schwerpunkt bei regionalen Lösungen für Nachhaltigkeitsfragen

Regionalisierung

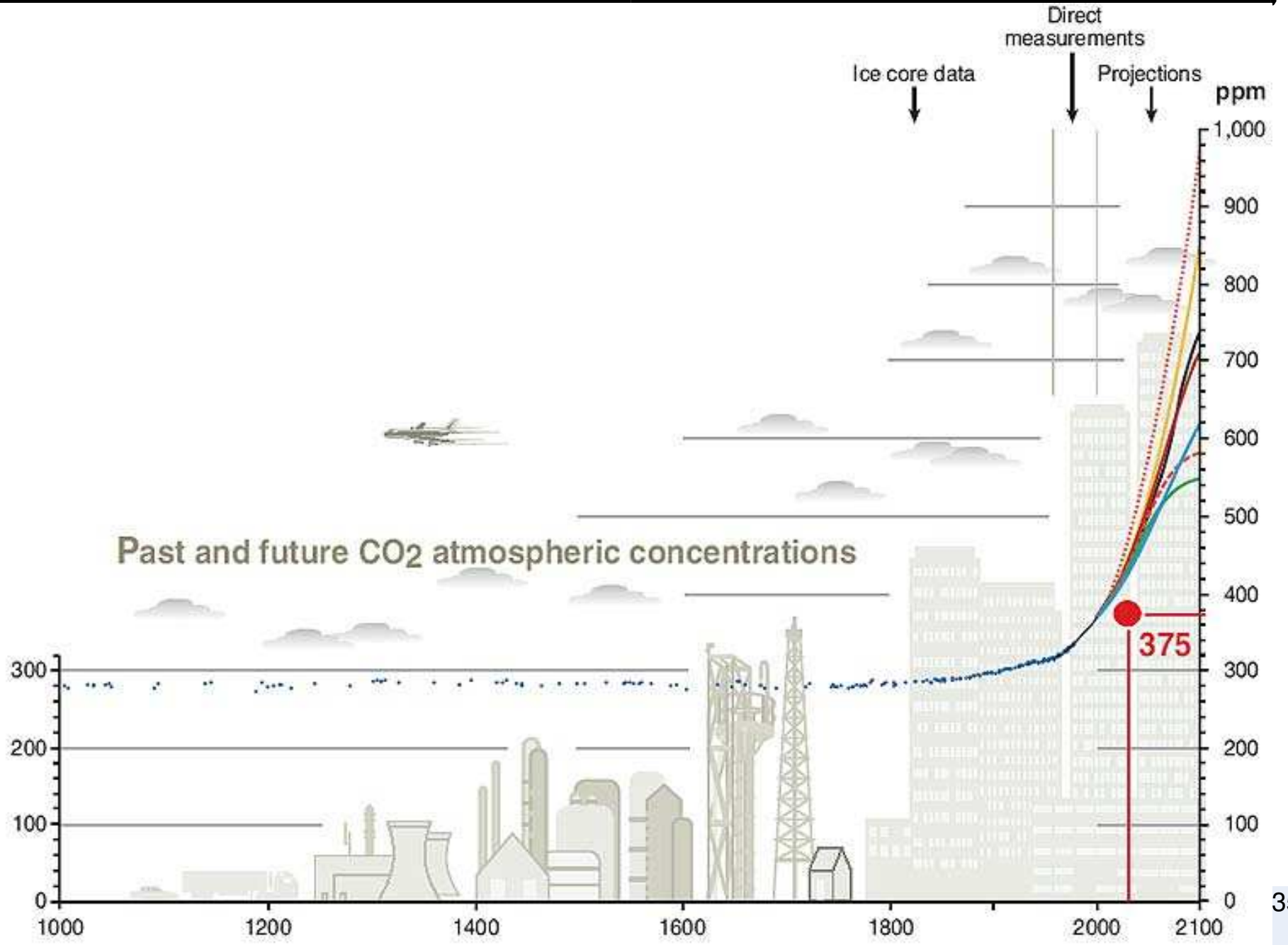
# Treibhausgasemissionen SRES Szenarien



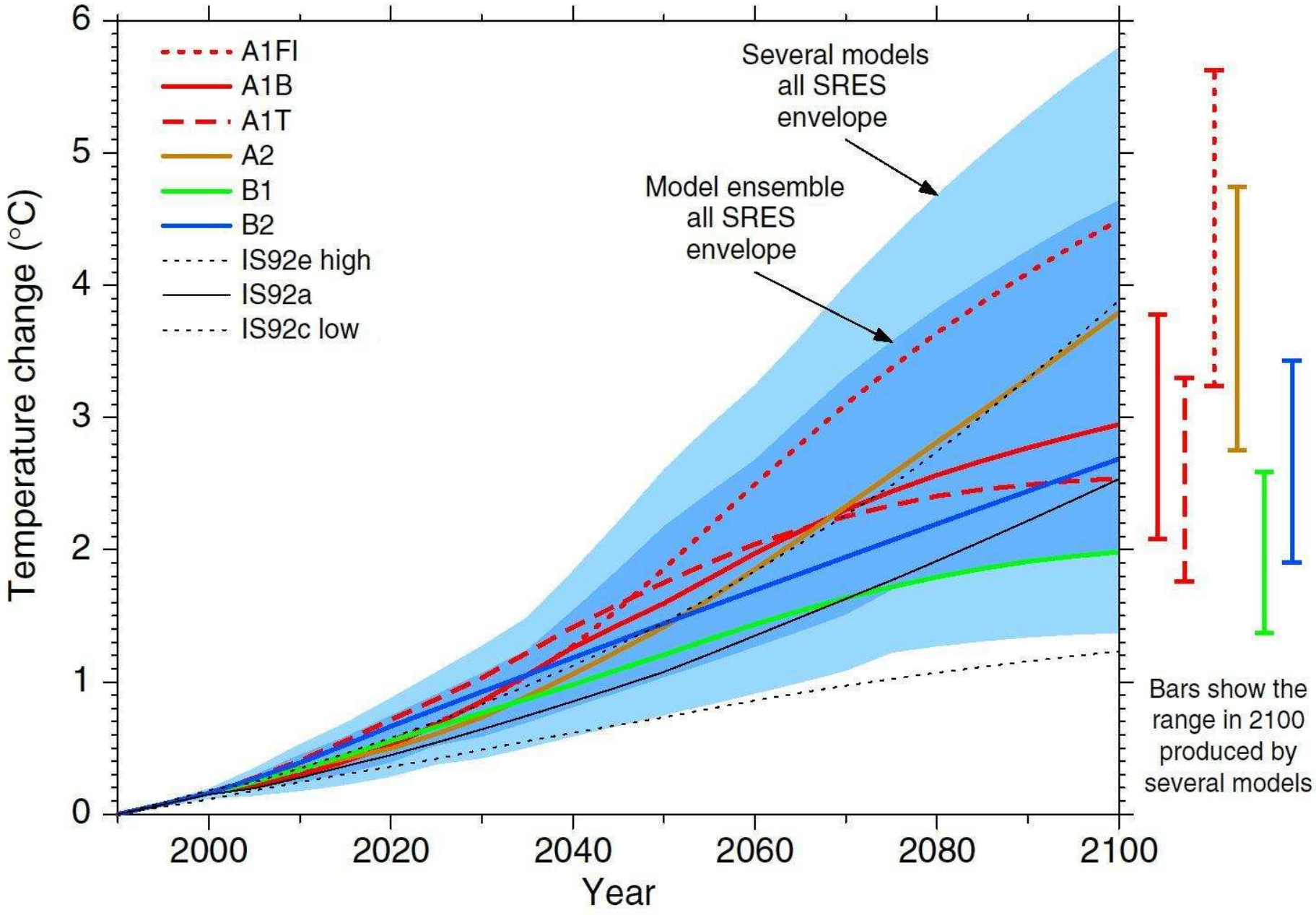
# $CO_2$ Konzentration 2000 - 2100



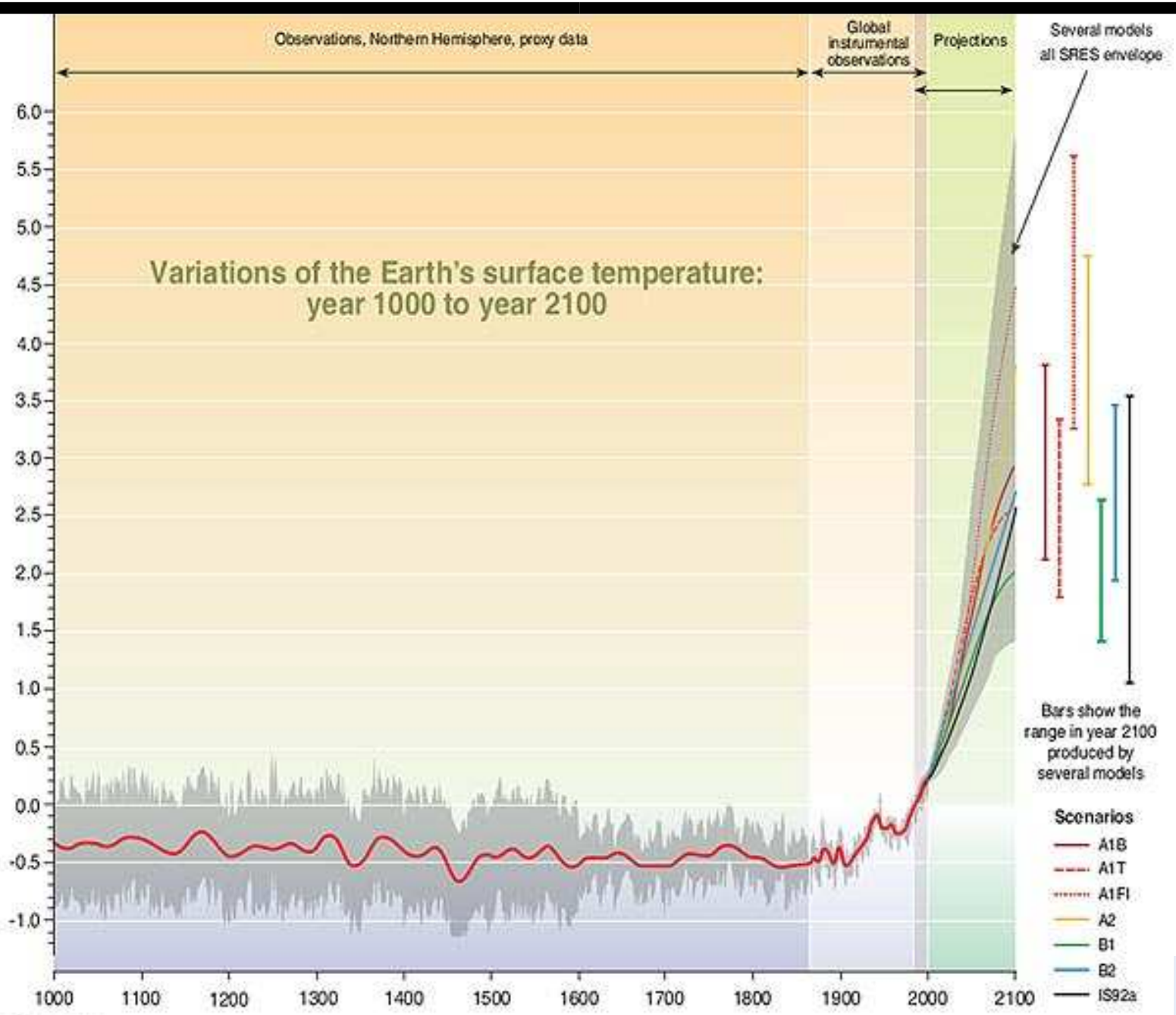
# $CO_2$ Konzentration 1000 - 2100



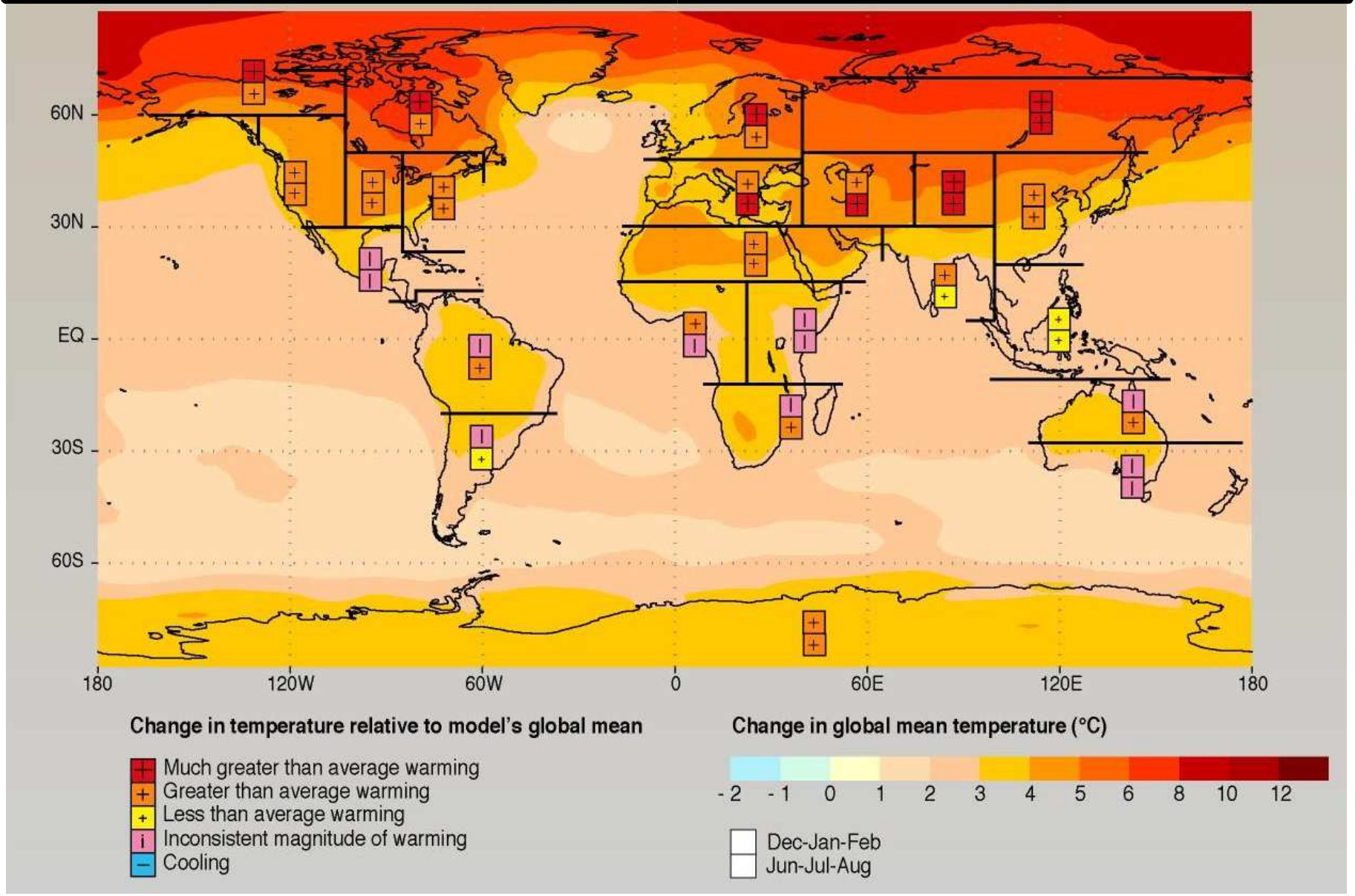
# Temperaturänderung 1990 - 2100



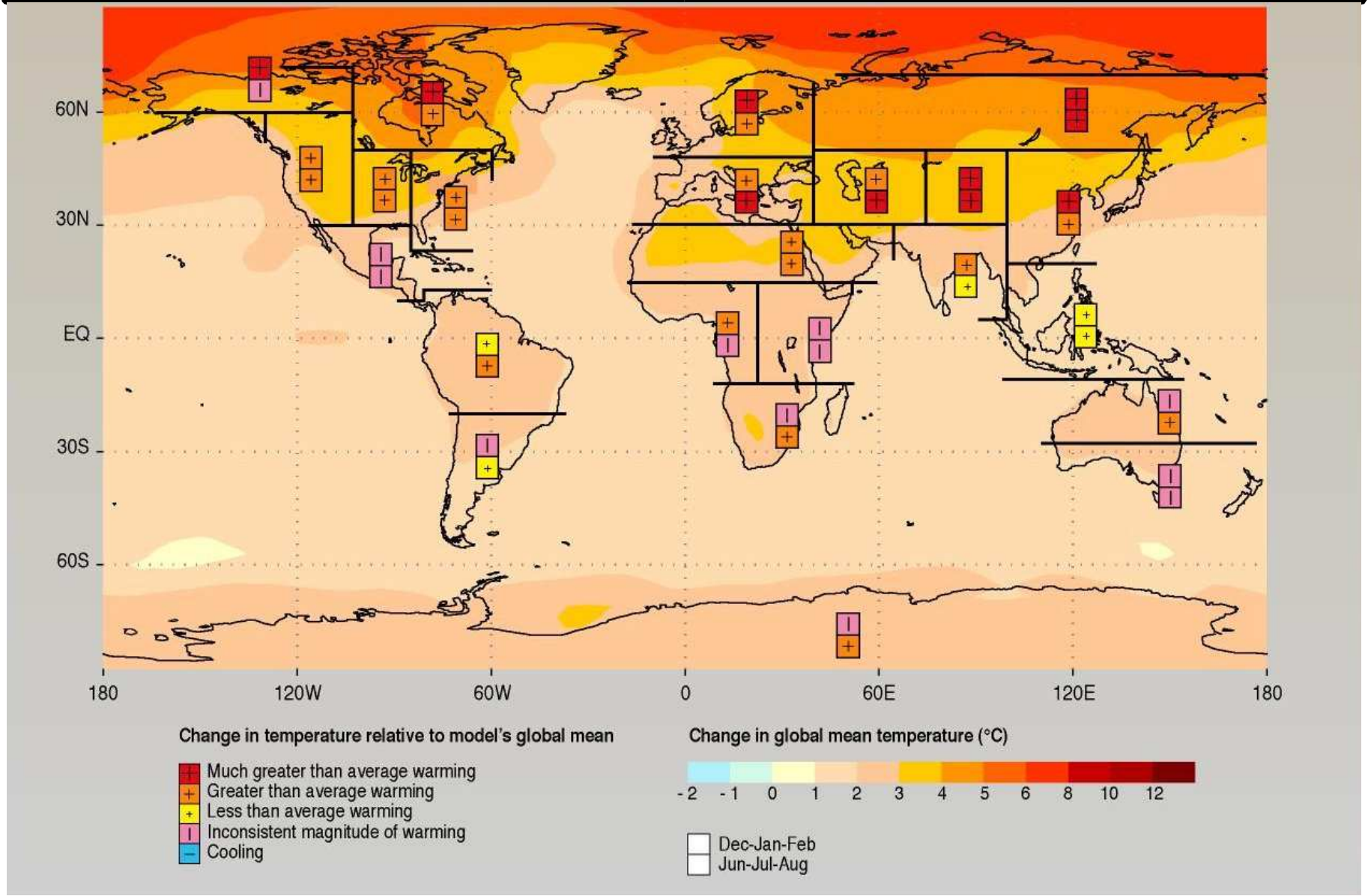
# Temperaturänderung 1000 - 2100



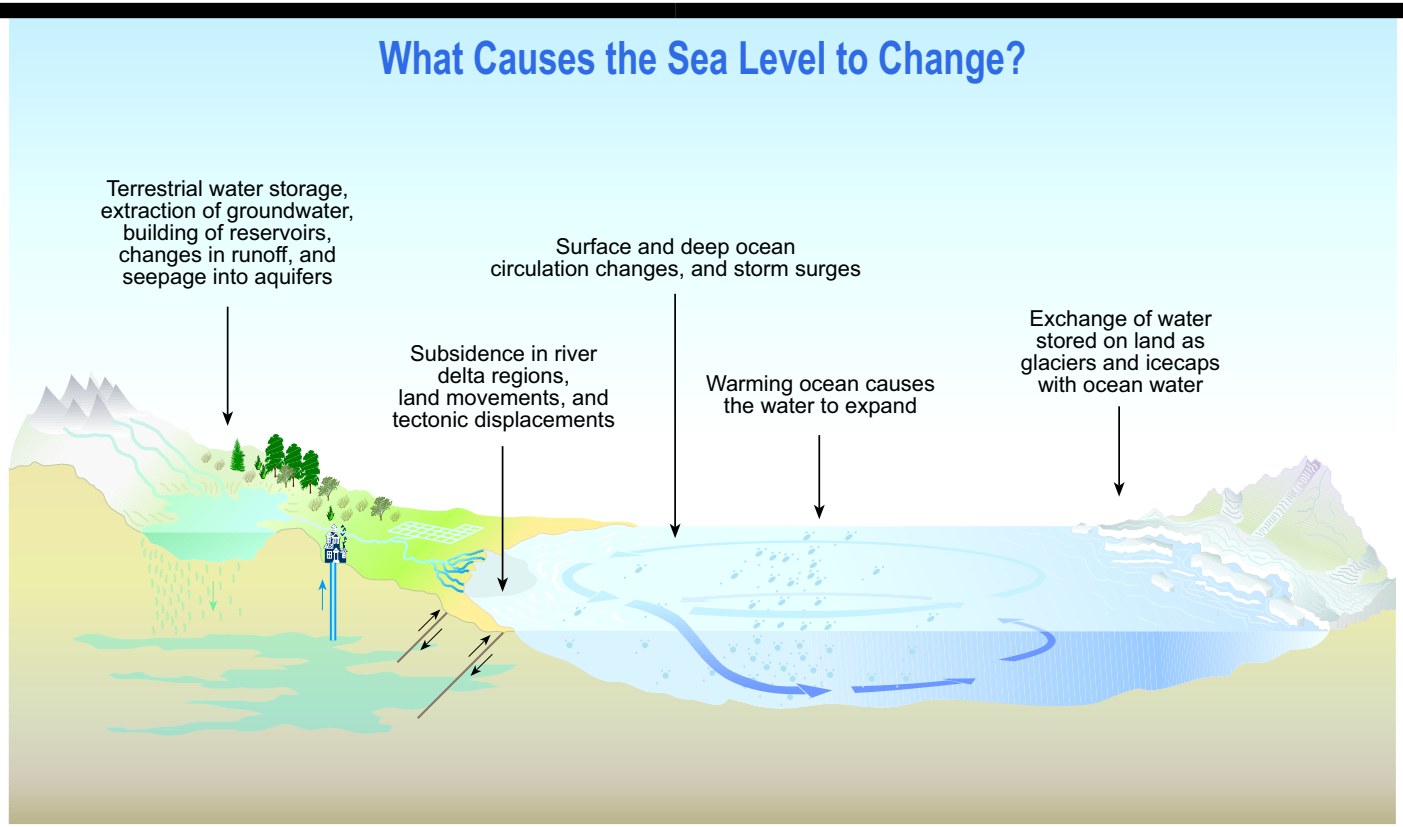
# Temperaturänderung 2071-2100 SRES A2

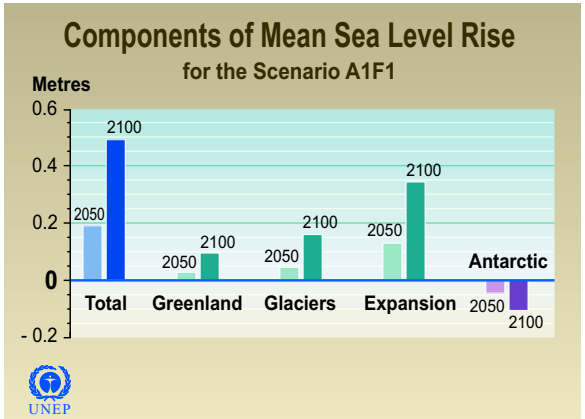


# Temperaturänderung 2071-2100 SRES B2



# Ursachen Meeresspiegelanstieg



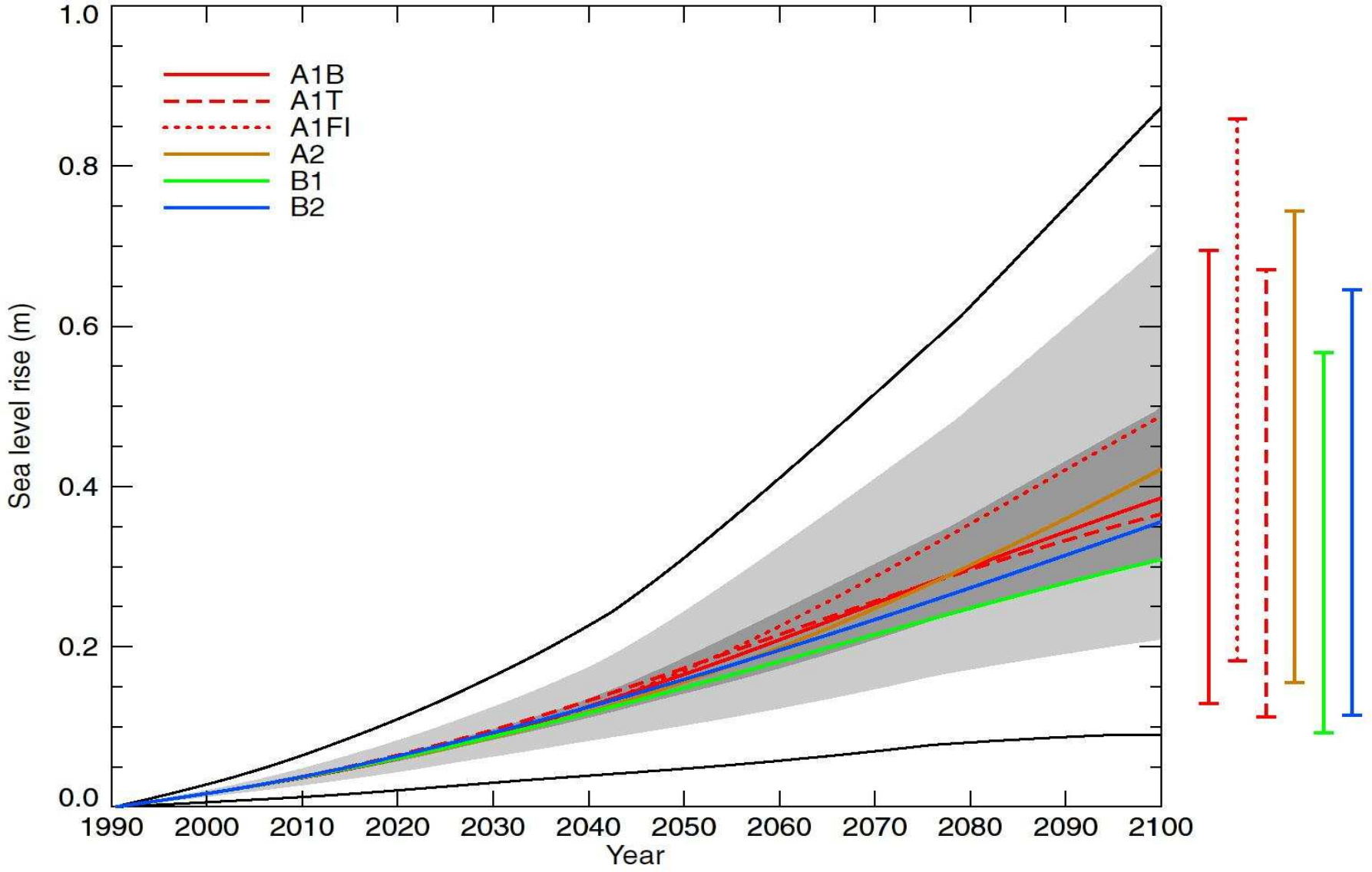




**The A1 scenario family** describes a future of rapid economic growth, a global population that peaks in the middle of the 21st century and then declines, and the rapid introduction of new and more efficient technologies. The major underlying themes are convergence among regions, capacity-building, and increased cultural and social interaction, with a substantial reduction in regional differences in per capita incomes. The A1 scenario family develops into three groups with alternative directions of technological change according to their energy systems: fossil intensive (A1FI), non-fossil energy sources (A1T), or a balance of both (A1B)

PHILIPPE REKACEWICZ
MARCH 2002

Source: David Griggs, in *Climate Change 2001*, Synthesis report, Contribution of working groups I, II and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2001.

# Meeresspiegelanstieg 1990 – 2100



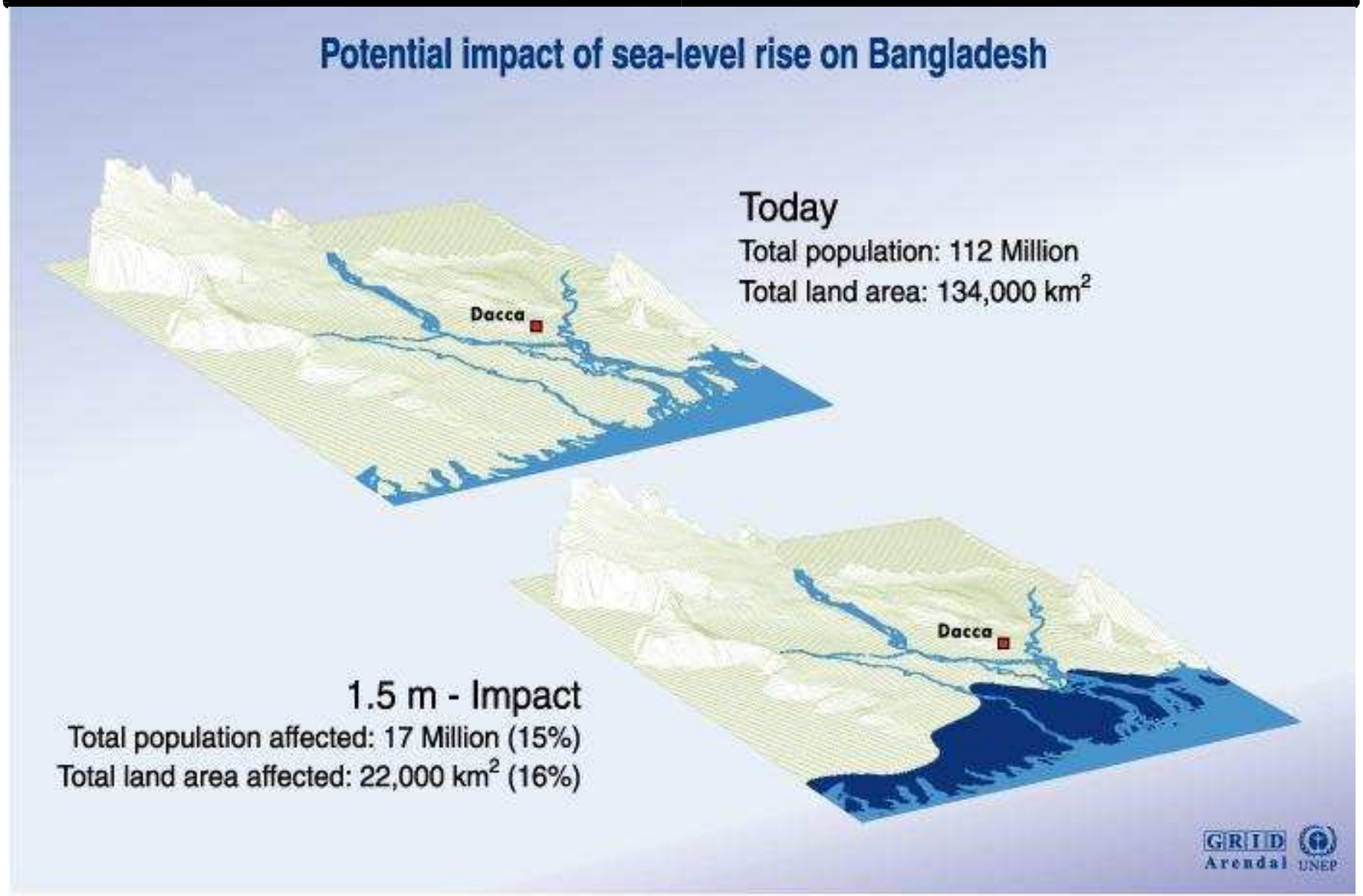
# Meeresspiegelanstieg: Nildelta

**Nile Delta**
Potential impact
of sea level rise

Sources: Otto Simonett, UNEP/GRID Geneva; Prof. G. Sestini, Florence; Remote Sensing Center, Cairo; DIERCKE Weltwirtschaftsatlas.

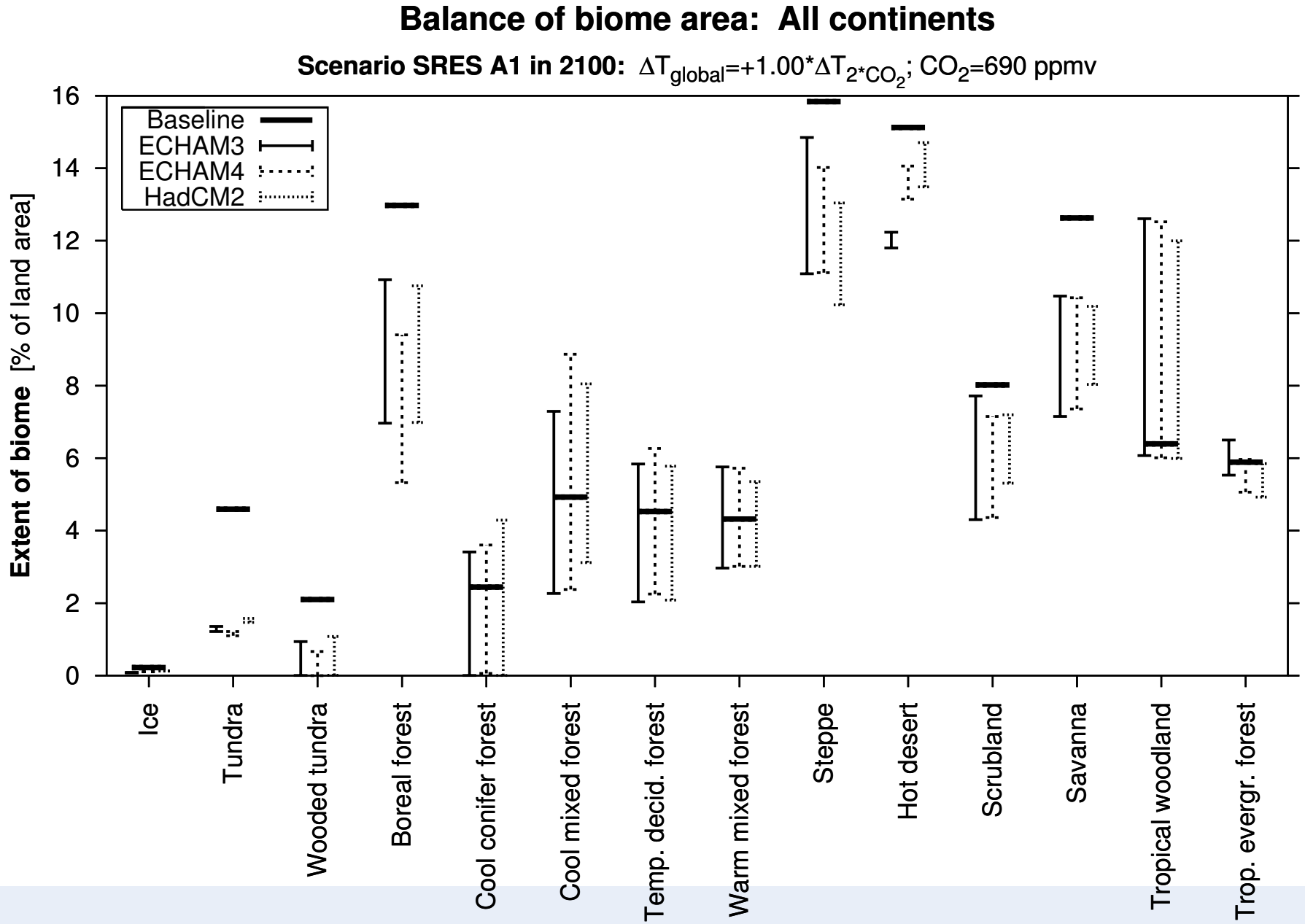
GRID Arendal UNEP

# Meeresspiegelanstieg: Bangladesh

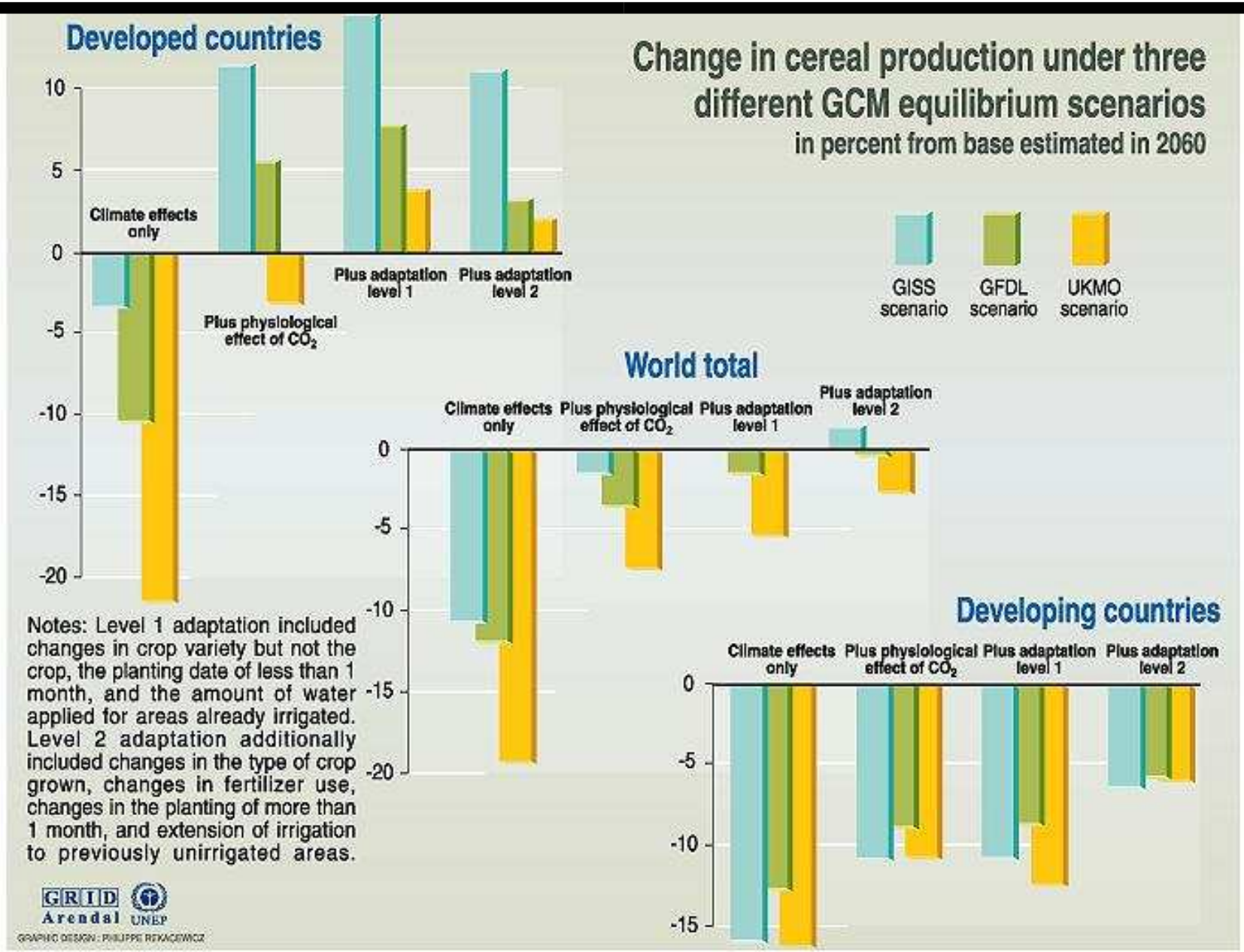



Source : UNEP/GRID Geneva; University of Dacca; JRO Munich; The World Bank; World Resources Institute, Washington D.C.

# Veränderung der Biomfläche, SRES A1

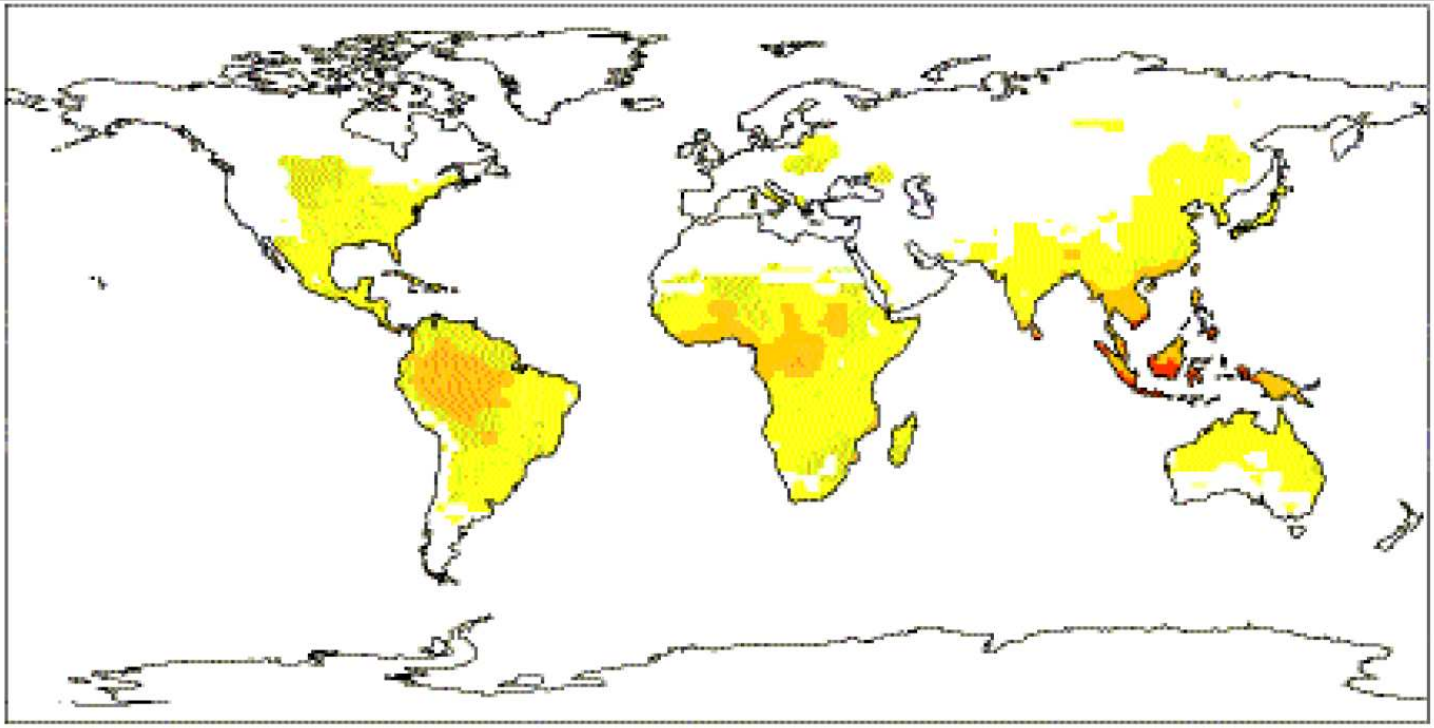


# Ernteerträge



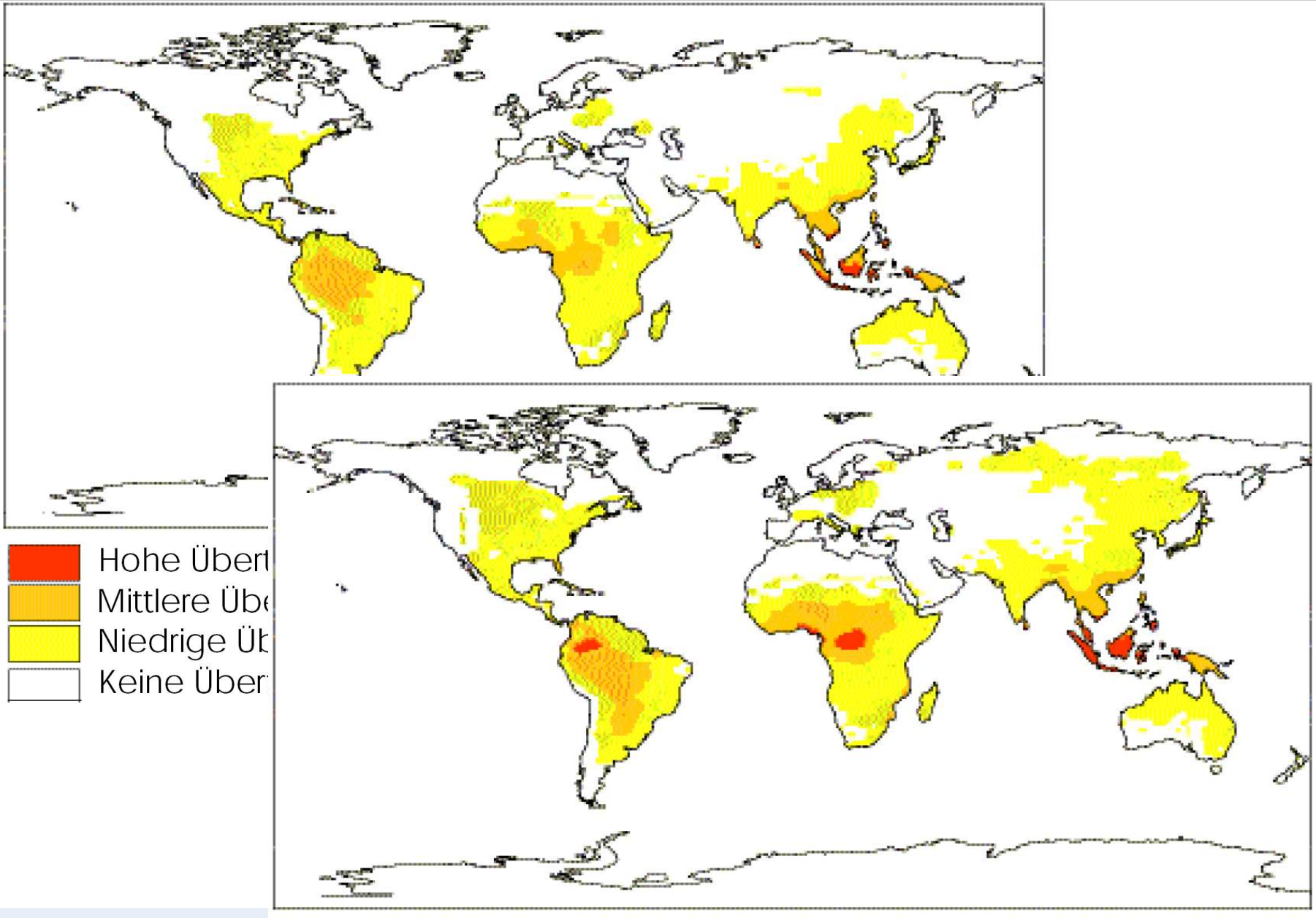

Source: Climate change 1995, Impacts, adaptations and mitigation of climate change: scientific-technical analyses, contribution of working group 2 to the second assessment report of the intergovernmental panel on climate change, UNEP and WMO, Cambridge press university, 1996.

# Malariaübertragung heute

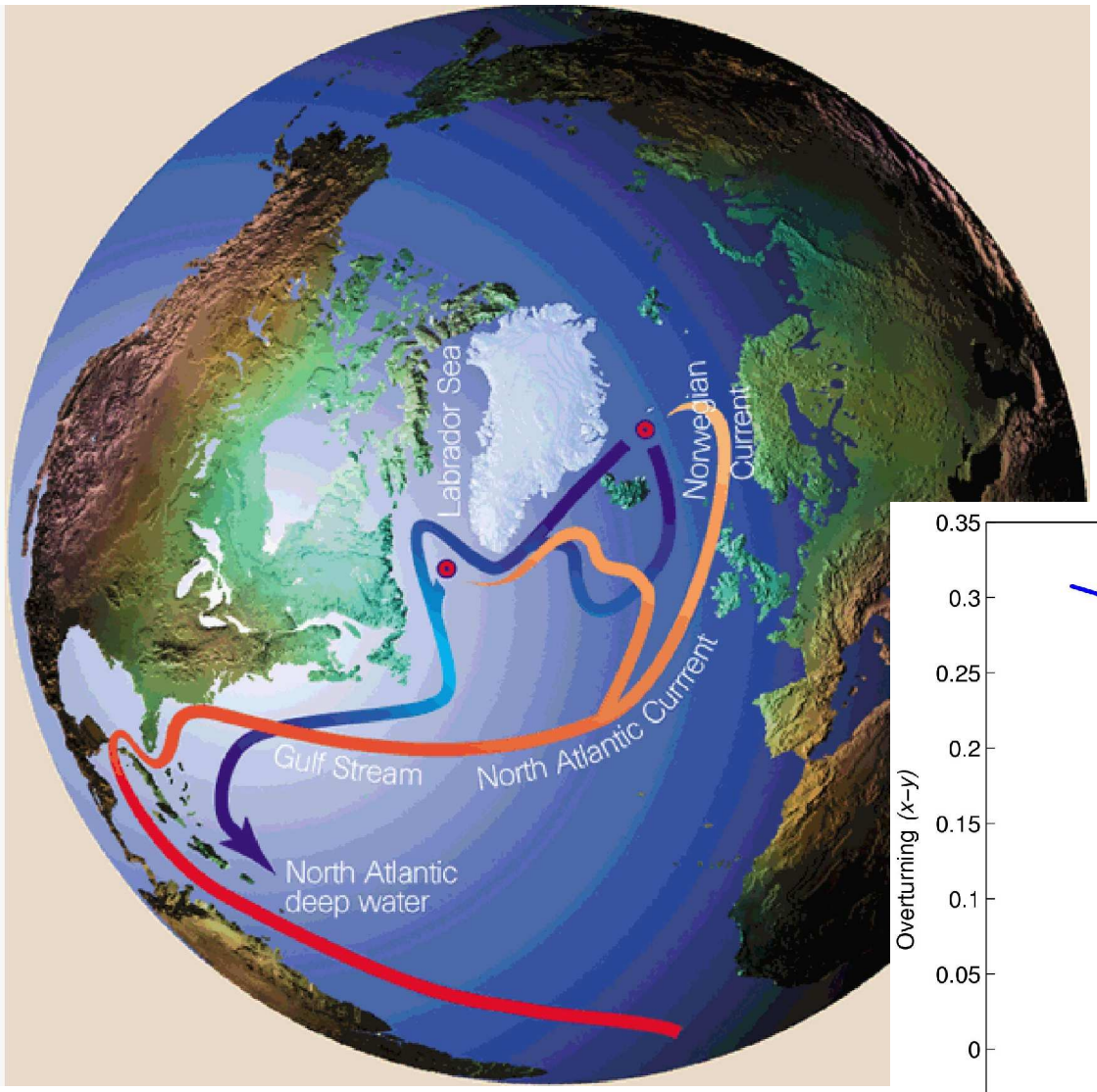


Hohe Übertragungsrate
Mittlere Übertragungsrate
Niedrige Übertragungsrate
Keine Übertragung

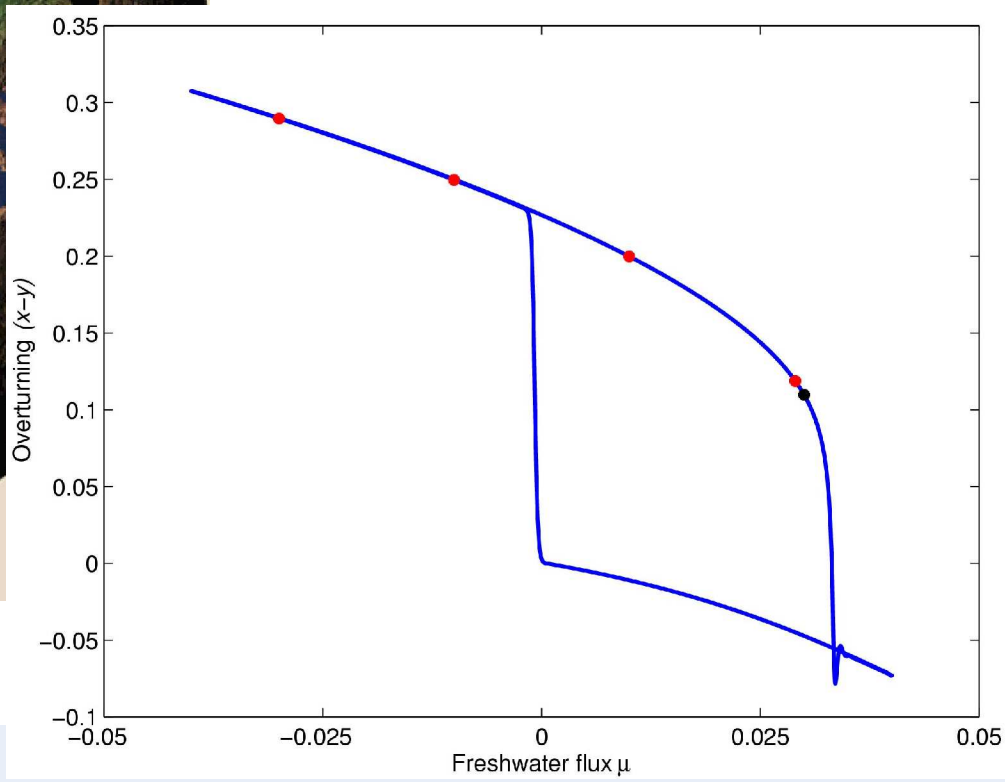
# Malariaübertragung 2050+



# Unsere Sorge: Nichtlineare Schwellen, z.B. die thermohaline Ozeanzirkulation




- Globales Zirkulationssystem
- Reagiert sensibel auf Frischwassereintrag
- Möglicherweise Zusammenbruch, dann Abkühlung Europa



# Zusammenfassung

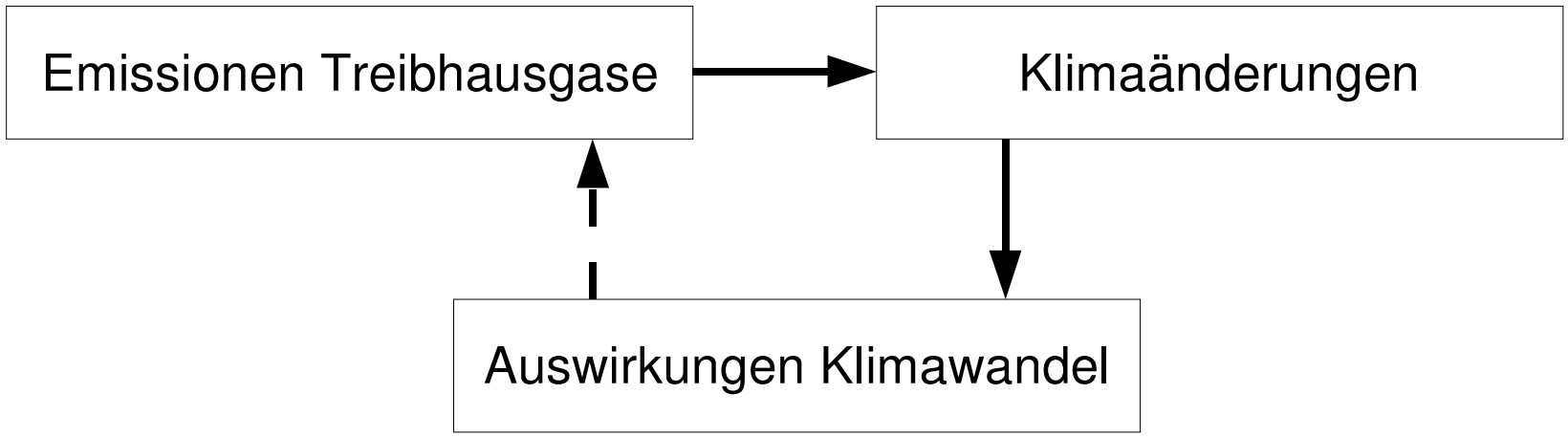
- Der zukünftige Klimawandel ist vor allem abhängig von menschlicher Entwicklung
- Zu erwarten ist:
  - Deutliche weitere Erwärmung
  - Deutiches Ansteigen des Meeresspiegels
  - Zunahme von Extremereignissen
  - Abnahme von Ernteerträgen

# Überblick

1) Beobachteter Klimawandel
2) Zukünftiger Klimawandel
3) Integrated Assessment
   - Grundproblem
   - Ansätze
4) Der Leitplankenansatz
5) Der probabilistische Leitplankenansatz - explizite Berücksichtigung von Unsicherheit

# Integrated Assessment of Climate change

- Mit “Integrated Assessment” bezeichnet: Ansätze für wissenschaftliche Politikberatung
- Betrachten gesamte Wirkungskette Klimawandel in integrierter Weise




- Starker Schwerpunkt: *Modelle*, da zukünftige Entwicklung betrachtet wird

# Grundproblem des Integrated Assessment

- Mathematisch ist integrated assessment *Kontrollproblem*

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{f}\left(\boldsymbol{x}, t; \boldsymbol{u}\right)$$

- Entwicklung Systemzustand $\boldsymbol{x}$ abhängig von Systemzustand, Zeit $t$ und *Kontrollvektor* $\boldsymbol{u}$
- Kontrollgrößen beispielsweise $CO_2$ Emissionen, Emissionszertifikate, Steuern
- Drei mögliche Herangehensweisen:
  1) "Policy evaluation modelling" - Vorgabe von $\boldsymbol{u}$ und Auswirkungen untersuchen
  2) "Policy optimization modelling" - Versuchen, ein "optimales" $\boldsymbol{u}$ zu bestimmen
  3) "Policy guidance modelling" - Bestimmung der Menge aller $\boldsymbol{u}$, die mit externen Kriterien zu vereinbaren sind

# Policy evaluation modelling

- Ansatz policy evaluation modelling: Gebe Kontrollvektor vor und untersuche Klimawandel, sowie Auswirkungen des Klimawandels
- SRES Szenarien Beispiel für policy evaluation modelling

**Vorteile**

- Sehr detaillierte Untersuchung Auswirkungen Klimawandel möglich
- Rechenzeitbedarf (beinahe) irrelevant, daher Nutzung hochauflösender Modelle möglich

**Nachteile**

- Bestimmung von Kontrollpfaden, die gegebenen Kriterien genügen sollen, per “trial-and-error”, damit sehr aufwändig

# Policy optimization modelling

- Ansatz policy optimization modelling: Bestimme $\boldsymbol{u}$ so, dass vordefinierte Nutzenfunktion optimal wird
- Meistens *Kosten-Nutzen-Analyse* oder *Kosteneffizienz-Analyse*
- Üblicherweise zu optimieren: Pro-Kopf Wohlfahrt (Einkommen)

**Vorteile**

- Einfache Bestimmung von Handlungsempfehlungen (kein trial-and-error)

**Nachteile**

- Errechnete “optimale” Lösungen häufig starker Klimawandel (ΔT bis zu 5℃ und mehr)
- Unsicherheit kann nur unvollständig berücksichtigt werden
- Nutzung einfacher Modelle notwendig (iterative Bestimmung des Optimums => großer Rechenzeitbedarf)
- Aggregation kann zu ethischen Problemen führen (wie bewertet man Menschenleben? Nach Pro-Kopf-Einkommen?)

# Überblick

1) Beobachteter Klimawandel
2) Zukünftiger Klimawandel
3) Integrated Assessment
4) Der Leitplankenansatz
5) Der probabilistische Leitplankenansatz - explizite Berücksichtigung von Unsicherheit

# Artikel 2 Klimarahmenkonvention

Erklärtes Ziel der Klimarahmenkonvention,
Artikel 2:

*„die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre [ist] auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird. Ein solches Niveau sollte innerhalb eines Zeitraums erreicht werden, der ausreicht, damit sich die Ökosysteme auf natürliche Weise den Klimaänderungen anpassen können, die Nahrungsmittelerzeugung nicht bedroht wird und die wirtschaftliche Entwicklung auf nachhaltige Weise fortgeführt werden kann."*

# Integrated Assessment: Der Leitplankenansatz

- Leitplankenansatz, engl. *Tolerable Windows Approach (TWA)*, ist ein Ansatz des *integrated assessment of climate change*
- Folgt Paradigma “Policy Guidance modelling”
- Mathematisch ist integrated assessment *Kontrollproblem*

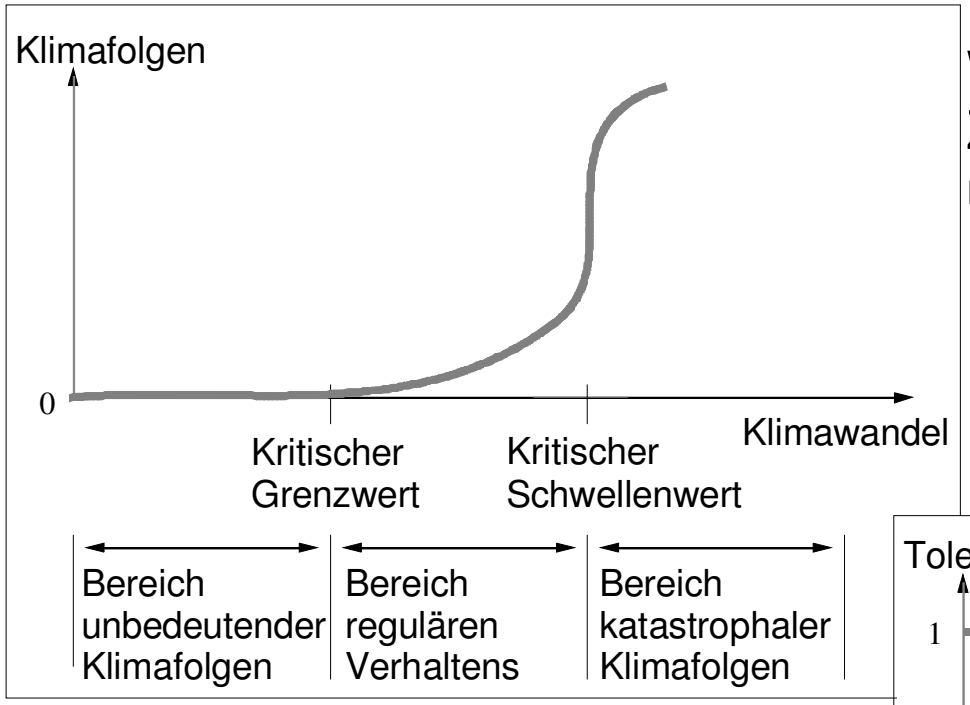
$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{f}\left(\boldsymbol{x}, t; \boldsymbol{u}\right)$$

- Im Leitplankenansatz zusätzliche Nebenbedingungen (Leitplanken), um unerwünschte Auswirkungen Klimawandel auszuschließen

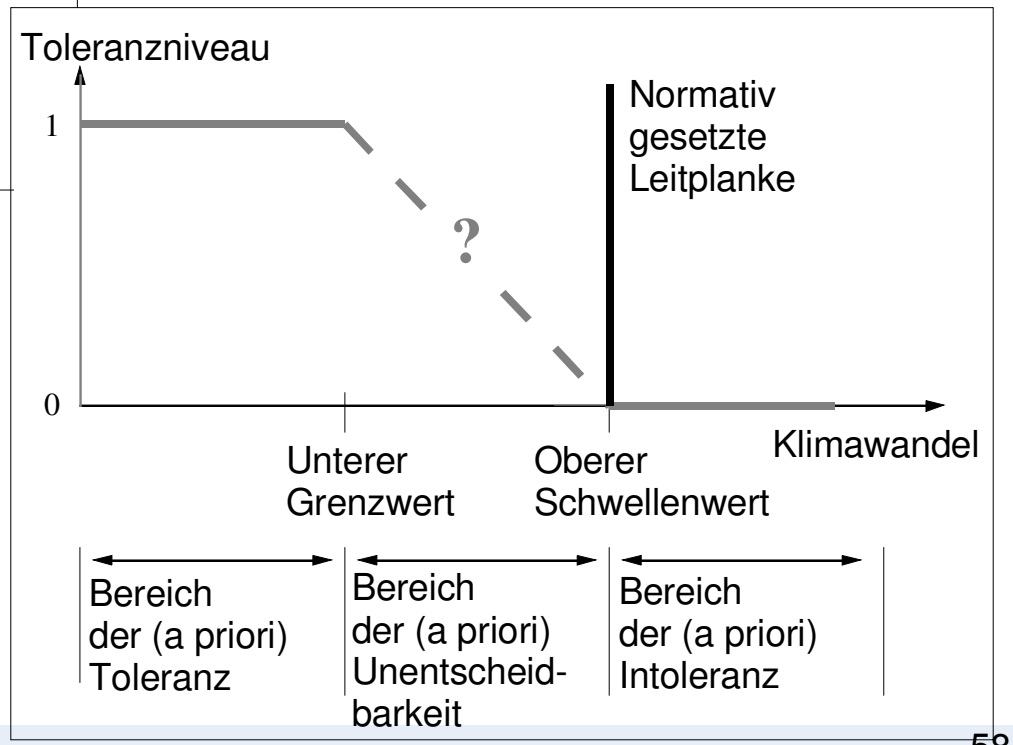
$$\boldsymbol{h}\left(\boldsymbol{x}, t; \boldsymbol{u}\right) \leq \boldsymbol{0}$$

- Ziel Leitplankenansatz: Bestimmung der Menge aller Emissionsstrategien $\boldsymbol{u}$, die mit den Nebenbedingungen verträglich sind

# Leitplankensetzung




Wissenschaftliche Wahrnehmung Zusammenhang Klimawandel und Auswirkungen: Klimawirkungsfunktion

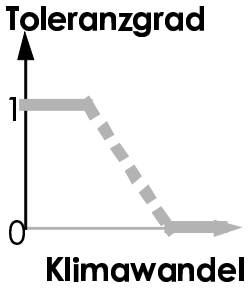



Normative Wahrnehmung Zusammenhang Klimawandel und Toleranz

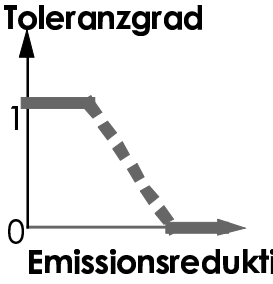
# Vorgehensweise im Leitplankenansatz

## Normative Leitplankensetzung:

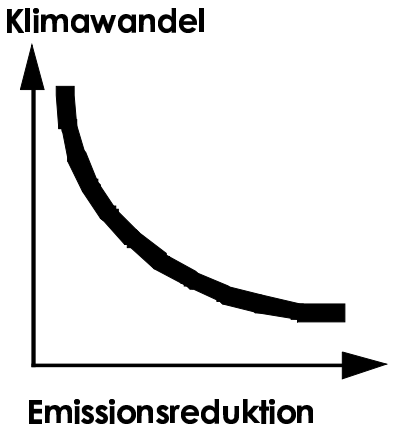
**Klimafolgen (KF):**



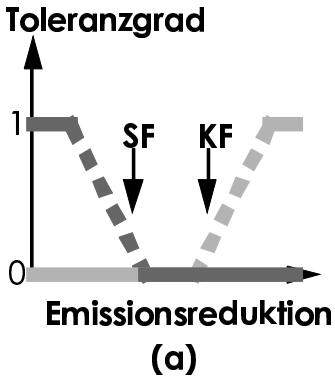

**Sozioökonomische Folgen von Klimaschutzmaßnahmen (SF):**

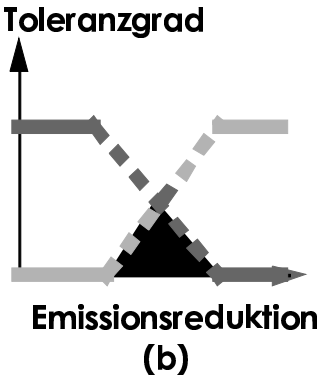


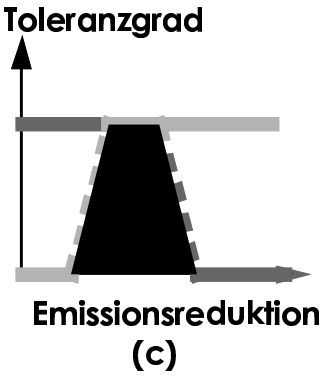

## Wissenschaftliche Analyse:



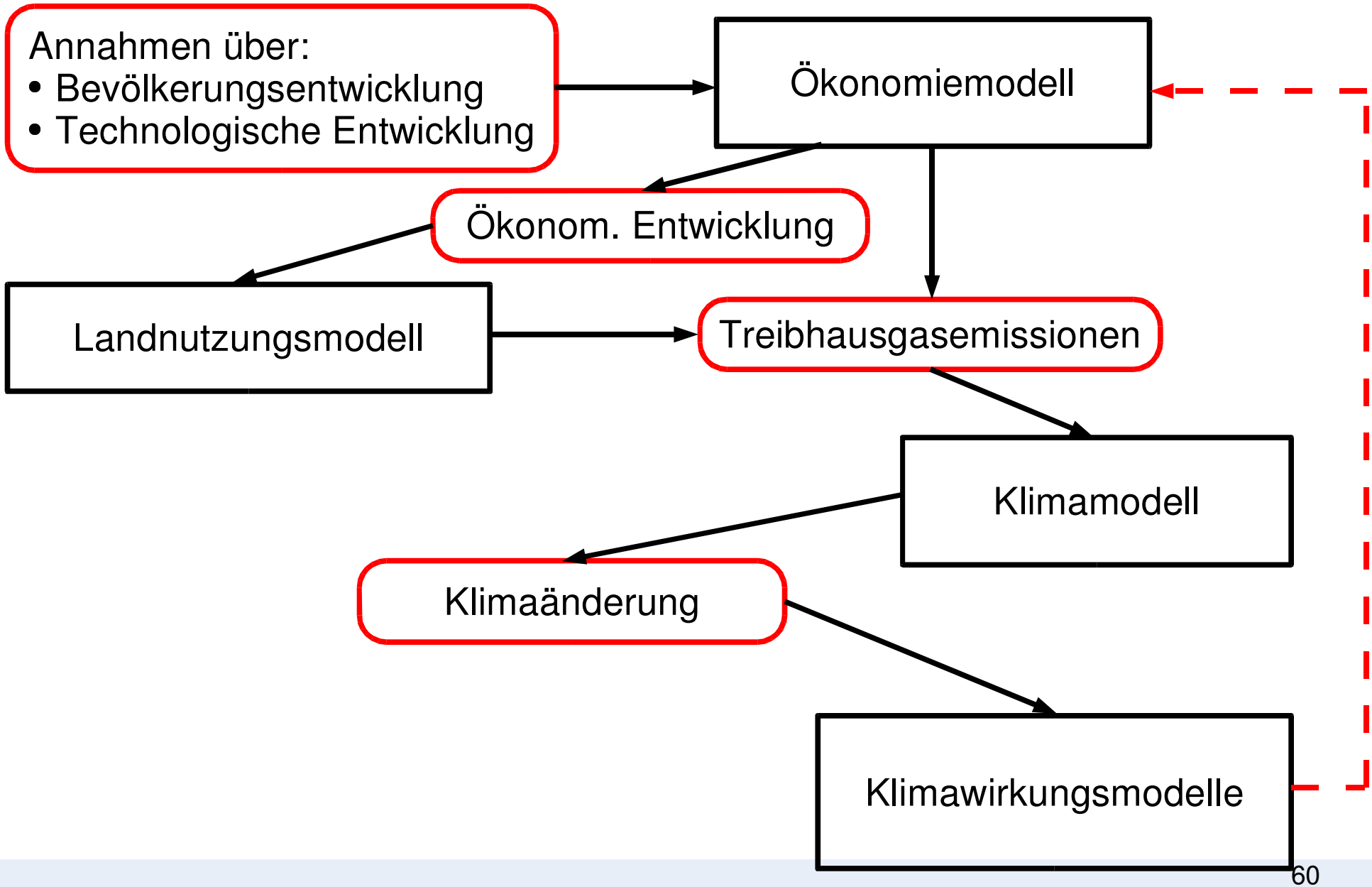

## Bestimmung aller zulässigen Klimaschutzstrategien:



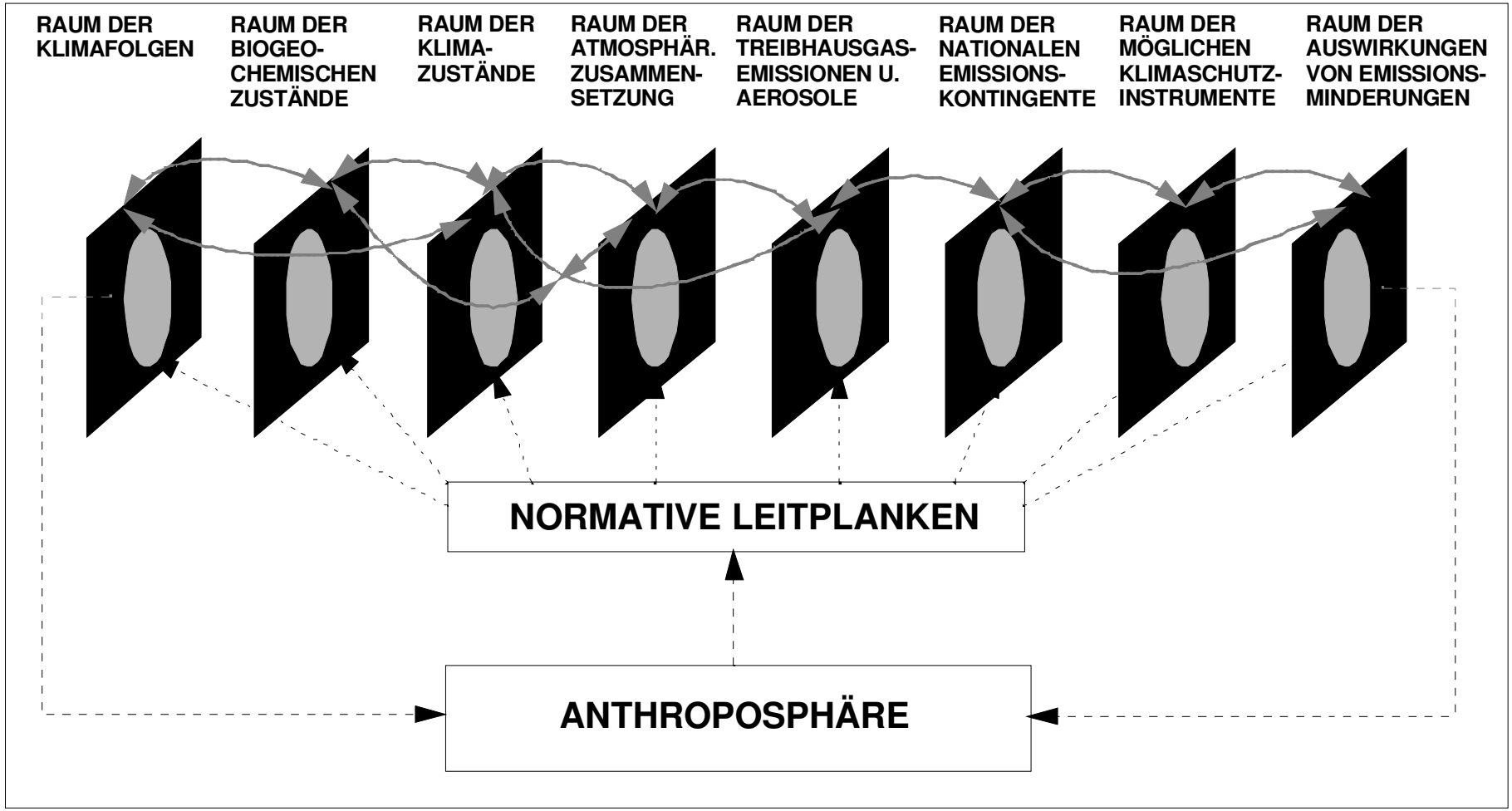



# ICLIPS – Integrated Assessment Modell



# Leitplankenansatz - konzeptionell



# Lösungen im Leitplankenansatz

- Mathematisch Differentialinklusion

$$\dot{\boldsymbol{x}} \in \mathbb{F}(\boldsymbol{x}, t) \quad \text{mit} \quad \mathbb{F} := \{\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}, t; \boldsymbol{u}) | \boldsymbol{u} \in \mathbb{U}\}$$

$$\text{unter} \quad \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}, t; \boldsymbol{u}) \leq \boldsymbol{0} \quad \forall t \in [0, t_e]$$

- Verschiedene Ansätze für “Lösung” möglich

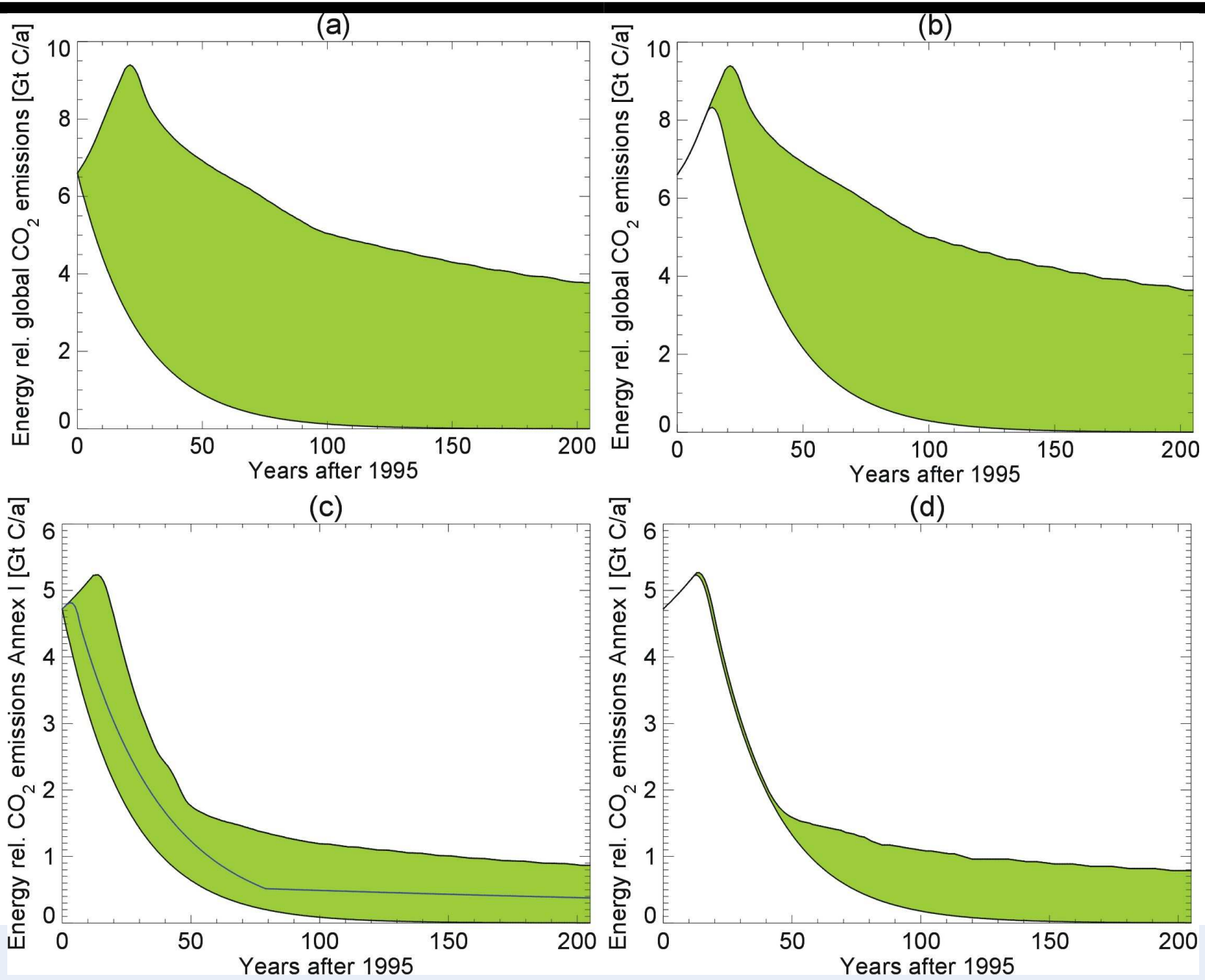
1) Zulässige Trajektorie $\boldsymbol{x}(\cdot)$ mit zulässigem Kontrollpfad $\boldsymbol{u}(\cdot)$
2) Bündel der zulässigen Trajektorien $\mathfrak{S}(\boldsymbol{x}_0)$
3) Menge der zulässigen Punkte (“Trichter”)

$$\Gamma(\boldsymbol{x}_0) = \{(t, \boldsymbol{x}(t)) | t \in [0, t_e], \boldsymbol{x}(\cdot) \in \mathfrak{S}(\boldsymbol{x}_0)\}$$

4)Projektion des Trichters auf Ebene (“notwendiger Korridor”)

- Im Leitplankenansatz übliches Ergebnis: *Emissionskorridor*

# Emissionskorridore WBGU: $\Delta T \leq 2$°C



# Zusammenfassung

- Leitplankenansatz ermöglicht Operationalisierung des Vorsorgeprinzips hinsichtlich Klimawandel
- Unerwünschte Auswirkungen Klimawandel werden durch “Leitplanken” begrenzt
- Leitplanken können für jedes Element der Wirkungskette gesetzt werden, das im benutzten Modell repräsentiert ist
- Anschließende Bestimmung des Handlungsspielraumes der Menschheit

# Überblick

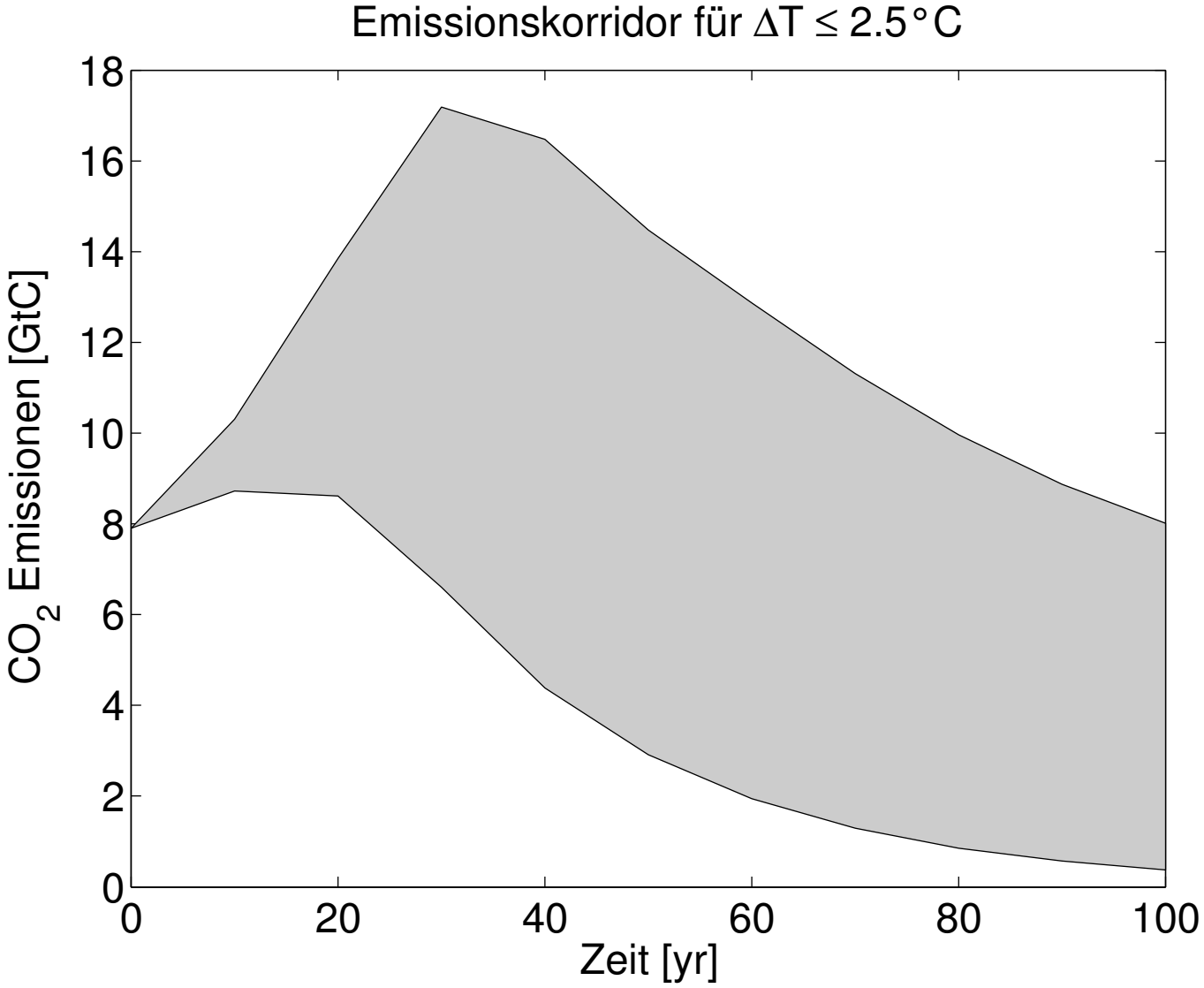
1) Beobachteter Klimawandel
2) Zukünftiger Klimawandel
3) Integrated Assessment
4) Der Leitplankenansatz
5) Der probabilistische Leitplankenansatz - explizite Berücksichtigung von Unsicherheit

# Emissionskorridor

- Emissionskorridor
- Leitplanke:

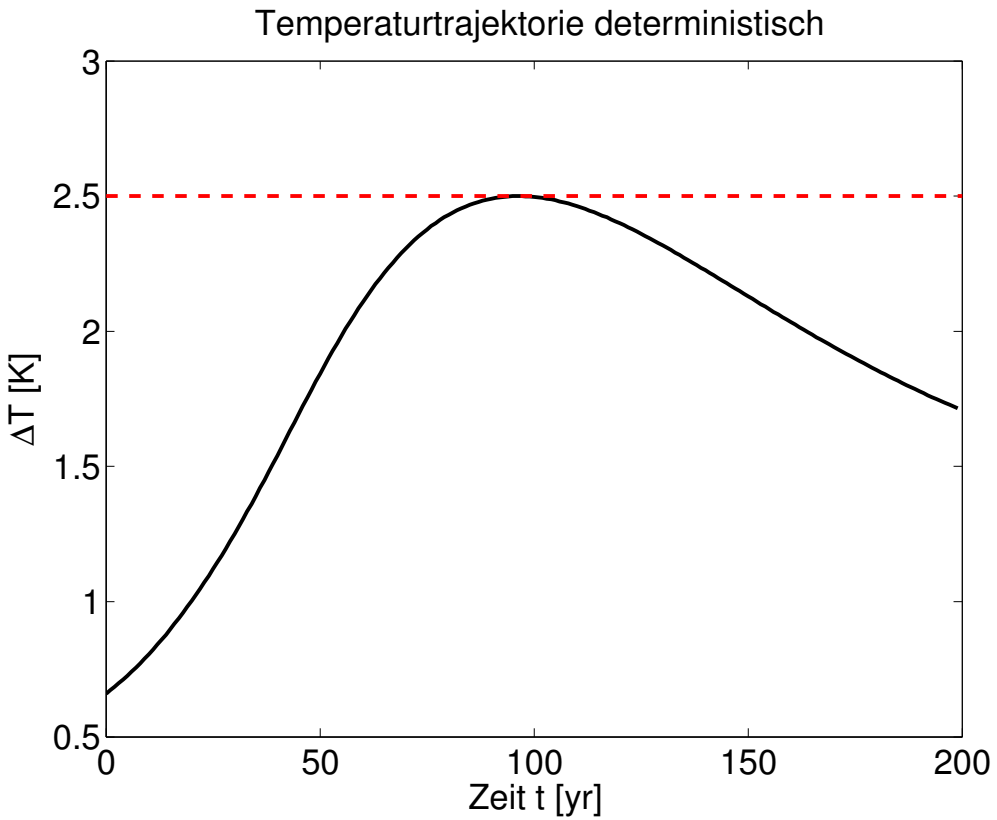
$$\Delta T \leq 2.5\,^{\circ}C$$

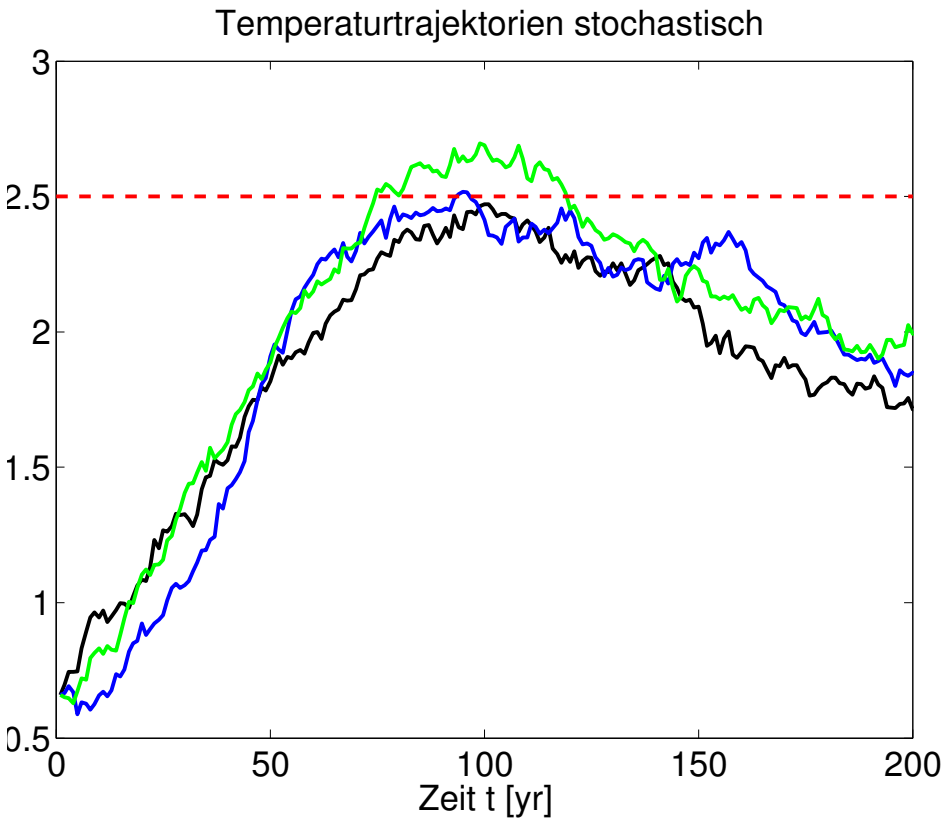
- Weitere Leitplanken an zulässige Emissionsreduktion



# Temperaturtrajektorien bei nat. Variabilität

- Berücksichtigung von natürlicher Variabilität in stochastisch modifiziertem Klimamodell möglich
- Folge: Einhalten der Leitplanke abhängig von *Realisierung* des stochastischen Prozesses => Gewisse Wahrscheinlichkeit, dass Leitplanke überschritten wird



# Unsicherheit

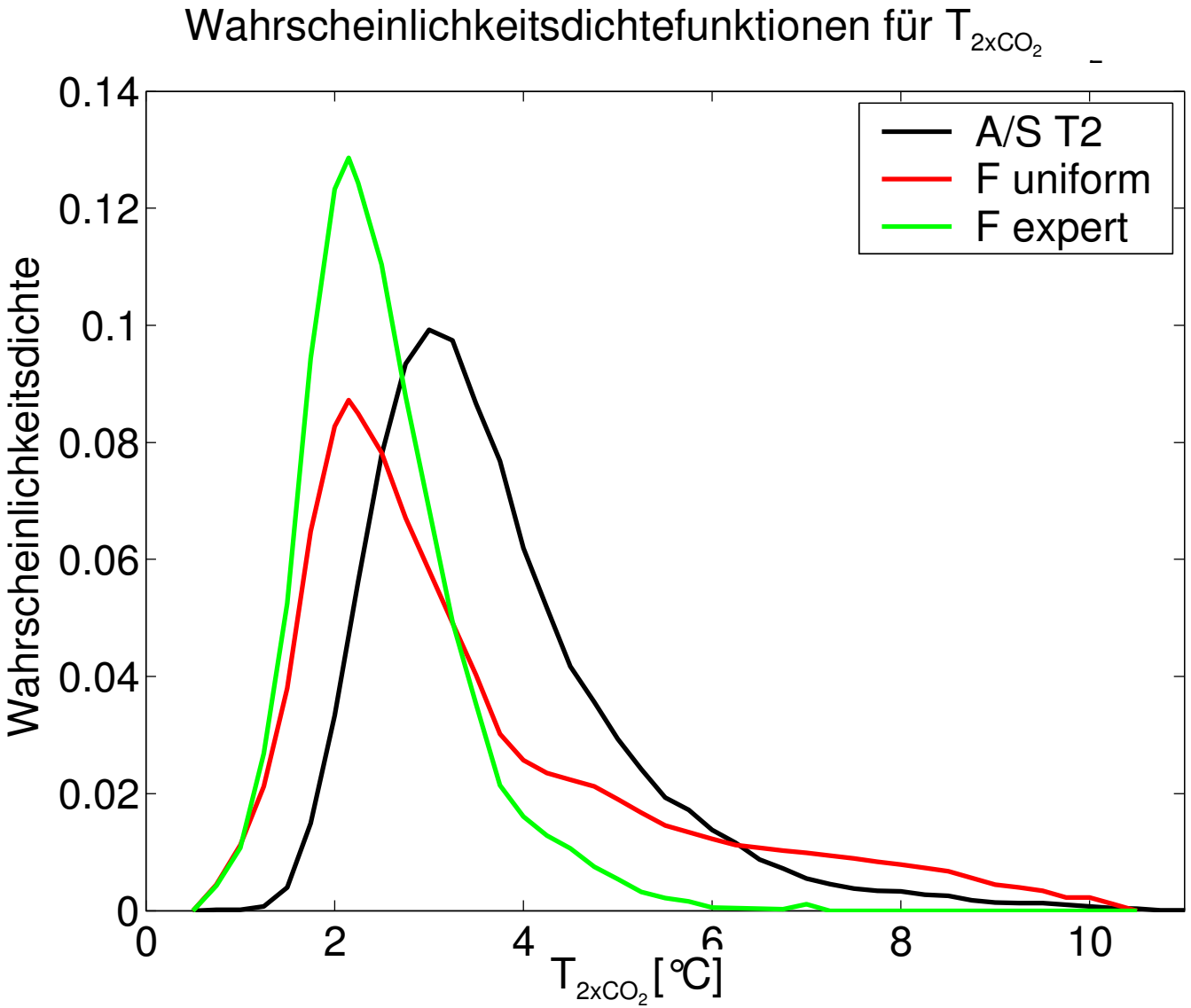
- Unsicherheit allgegenwärtiger Faktor in gesamter Wirkungskette Klimawandel
- Für diese Betrachtung sinnvolle Klassifikation nach Ursache der Unsicherheit:
  1) Unsicherheit durch Freiheit menschlicher Entscheidungen
  2) Unsicherheit durch natürliche Variabilität
  3) Unsicherheit durch unzureichendes Wissen
- Leitplankenansatz nimmt 1) teilweise vorweg, da menschliche Entwicklung nicht *vorhergesagt* wird, sondern *Spielraum für menschliche Entscheidungen* bestimmt wird
- 2) und 3) Gegenstand des probabilistischen Leitplankenansatzes

# Unsicherheit der Klimasensitivität

- Die *Klimasensitivität* ist einer der unsicheren Schlüsselfaktoren des zukünftigen Klimawandels
- Klimasensitivität $T_{2xCO_2}$ bezeichnet Erwärmung, die bei Verdoppelung präindustrieller $CO_2$ - Konzentration zu erwarten ist
- IPCC: $T_{2\,xCO_2} \in [1.5\,°C\,, 4.5\,°C\,]$
- Andere Autoren: Wahrscheinlichkeitsverteilungen für $T_{2xCO_2}$ beispielsweise aus Expertenbefragungen, Vergleichen des historischen Klimas mit Klimamodellen

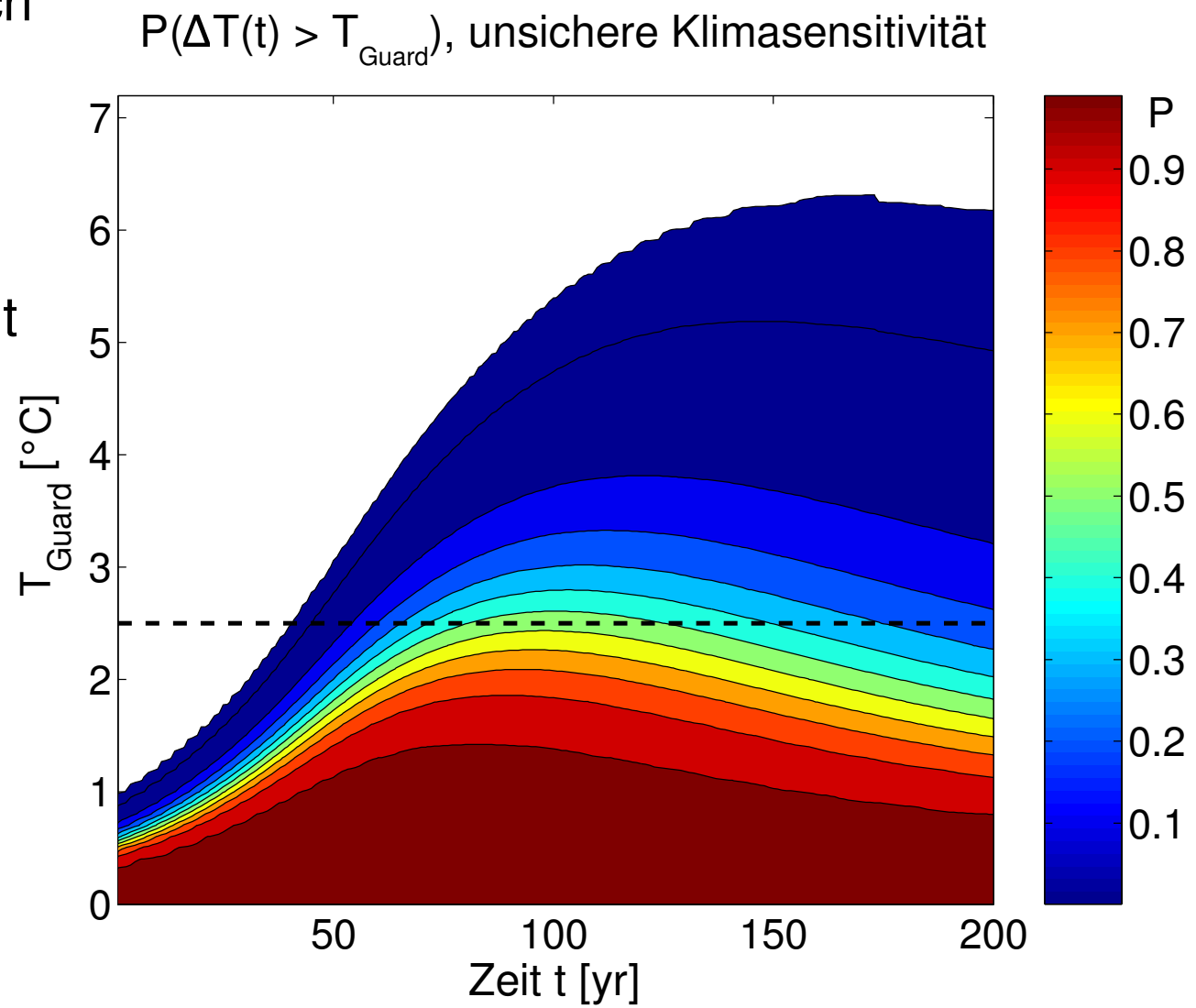
# Wahrscheinlichkeitsverteilung Klimasensitivität

- Andronova & Schlesinger (2001) (schwarz)
- Forest et al. (2002) (rot, grün)



# Konsequenzen von Unsicherheit: Klimasensitivität

- Klimasensitivität nach Andronova & Schlesinger
- Bewirkt Wahrscheinlichkeit $P > 0$, dass Leitplanke nicht eingehalten werden kann



# Der probabilistische Leitplankenansatz

- Betrachtete Unsicherheiten bewirken, dass Erweiterung Leitplankenansatz notwendig ist
- Deterministische Leitplanke für Auswirkung $I$ definiert als

$$I \leq I_{Guard} \Rightarrow P(I \leq I_{Guard}) \in \{0,1\}$$

- Jedoch bei Berücksichtigung von probabilistischer Unsicherheit

$$P(I \leq I_{Guard}) \in [0,1]$$

- Daher Einführung zusätzlicher Wahrscheinlichkeitsleitplanke notwendig:

$$I \leq I_{Guard} \Rightarrow P(I \leq I_{Guard}) \geq P_{Guard}$$

# Lösungsalgorithmus

- Zu lösendes Problem: Im allgemeinen Fall stochastische Differentialinklusion

$$d\,\xi \in \mathbb{F}(\xi\,, dt \oplus d\,\boldsymbol{W})$$

mit $\mathbb{F} := \{\boldsymbol{f}(\xi\,, t\,; \boldsymbol{u})\,dt + \boldsymbol{g}(\xi\,, t\,; \boldsymbol{u})\,d\,\boldsymbol{W} \,|\, \boldsymbol{u} \in \mathbb{U}\}$

unter $P(\boldsymbol{h}(\xi\,, t\,; \boldsymbol{u}) \leq \boldsymbol{0}) \geq P_{Guard} \quad \forall\, t \in [0, t_e]$

- Bestimmung der oberen (unteren) Grenze von Emissionskorridoren:

$$\forall\, t_i \in \{t_1, \ldots, t_n\}: \quad max\,(min)\, E(t_i)$$

unter $P(\boldsymbol{h}(\xi\,, t\,; \boldsymbol{u}) \leq \boldsymbol{0}) \geq P_{Guard} \quad \forall\, t \in [0, t_e]$

- Nutzung von Standardalgorithmen für Optimierung unter Nebenbedingungen möglich

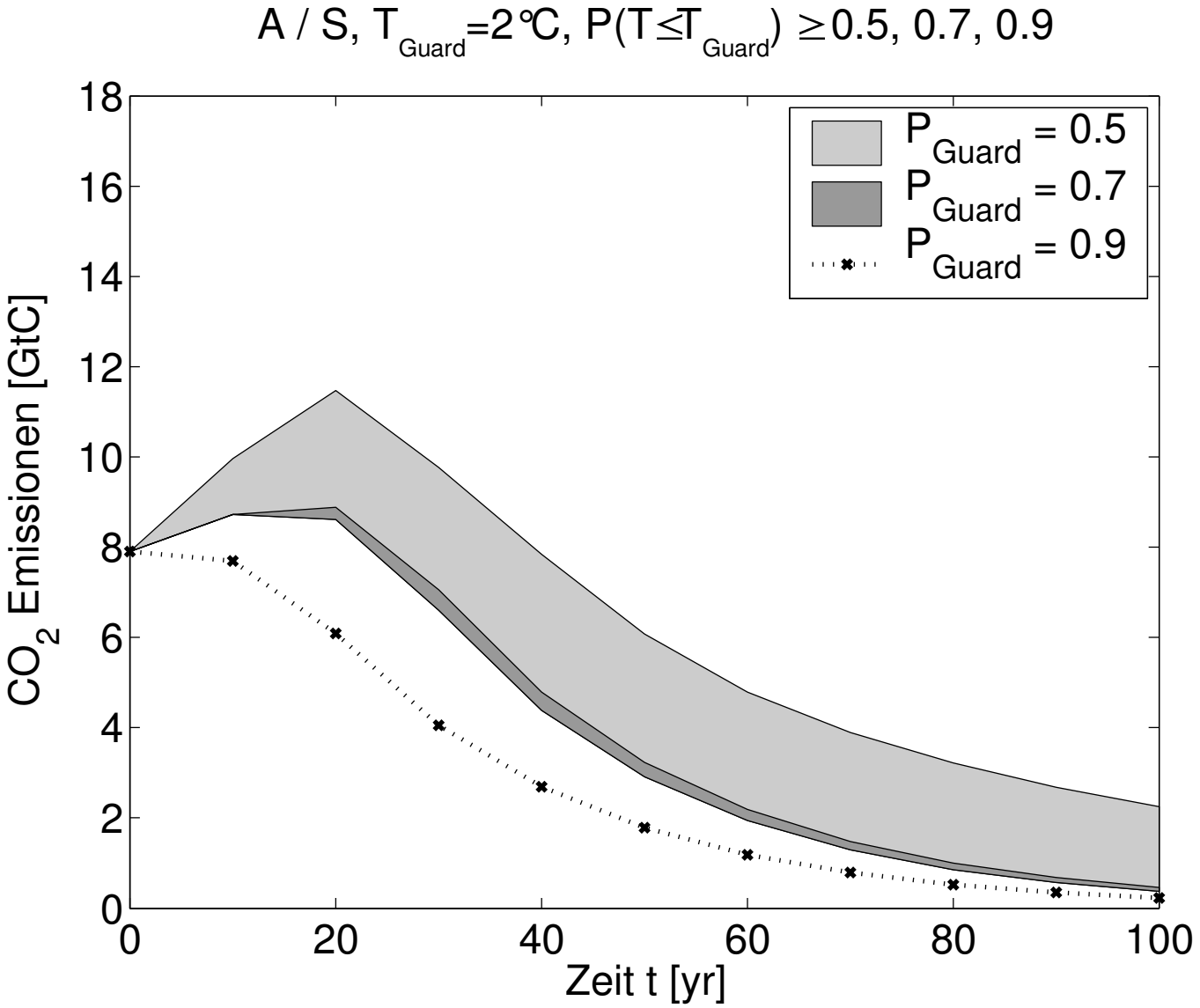
# Lösungsalgorithmus: Wahrscheinlichkeitsnebenbedingungen

- Wahrscheinlichkeitsnebenbedingungen berechenbar über Monte-Carlo Verfahren
- Optimierungsalgorithmus muss in jedem Iterationsschritt ein Ensemble von Realisierungen d. stochastischen Prozesses bzw. des unsicheren Parameters berechnen
- Sehr rechenzeitaufwändig, daher nur relativ “billige” Modelle nutzbar
- Folgende Abbildungen:
  - 50 Realisierungen stochastischer Prozess
  - 100 Realisierungen Klimasensitivität
  - Insgesamt 5000 Realisierungen in jedem Iterationsschritt zu berechnen

# Ergebnisse: Unsichere Klimasensitivität I

- Klimasensitivität nach Andronova & Schlesinger
- $\Delta T \leq 2$°C (EU-Ziel)
- Weitere Bedingungen an zulässige Emissionspfade
- Gezeigt: Emissionskorridore für Wahrscheinlich-keitsleitplanken

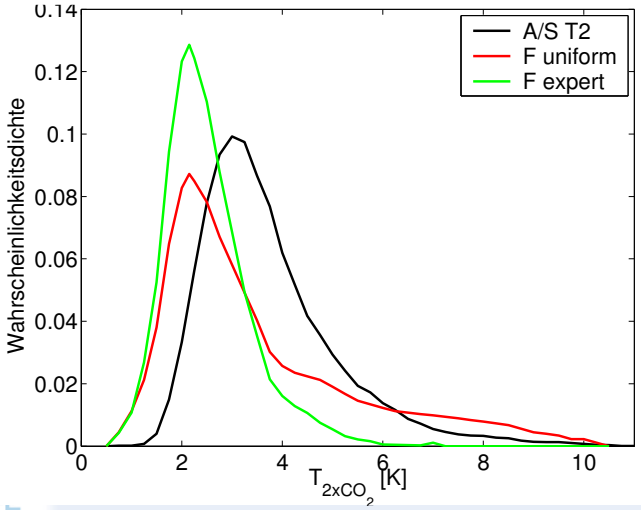
$$P_{Guard} = 0.5, 0.7, 0.9$$



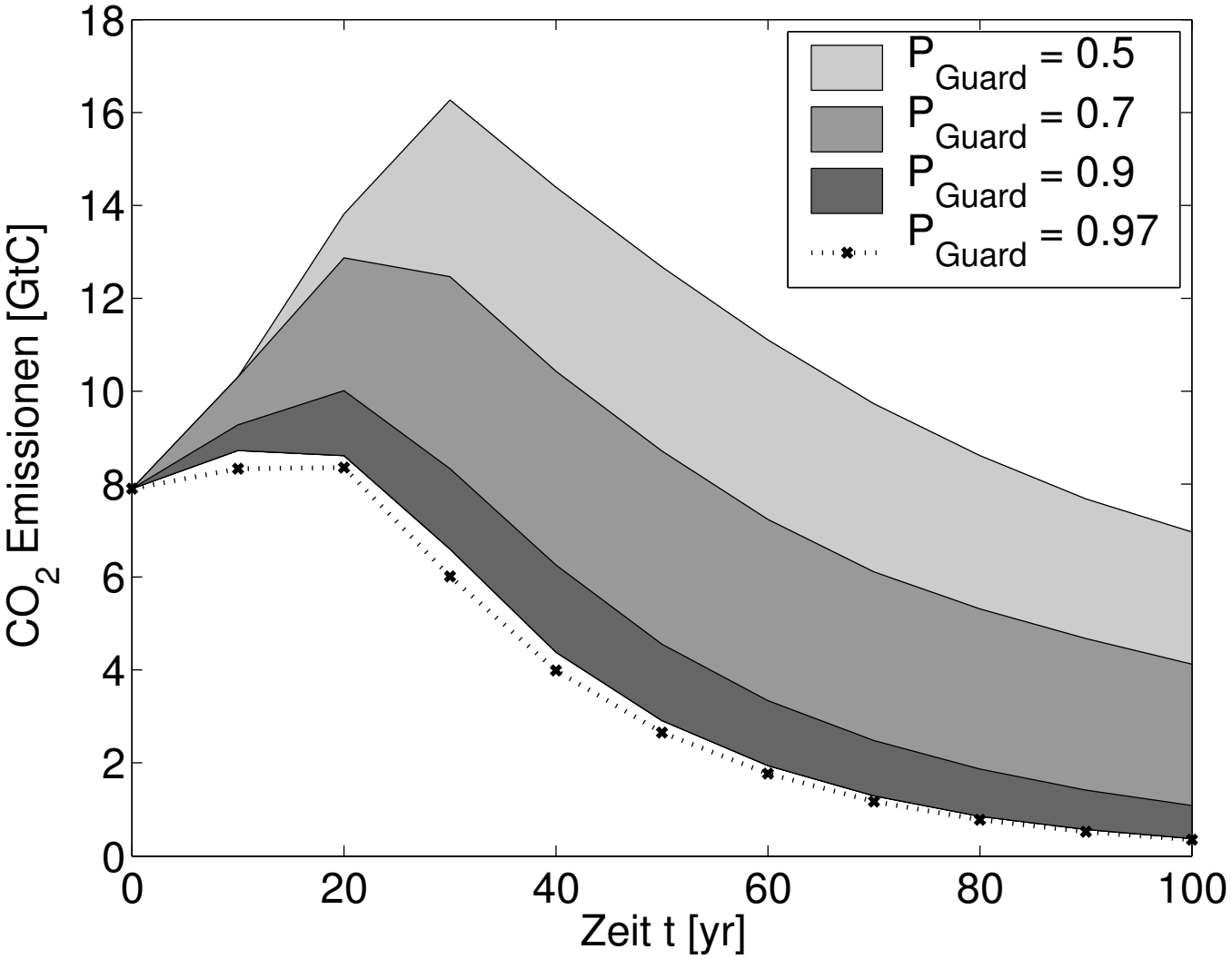
# Ergebnisse: Unsichere Klimasensitivität II

- Klimasensitivität Forest et al., Prior Expertenbefragung
- $\Delta T \leq 2$℃ (EU-Ziel)
- Bedingungen an Emissionspfade
- Emissionskorridore für

$$P_{Guard} = 0.5, 0.7, 0.9, 0.97$$

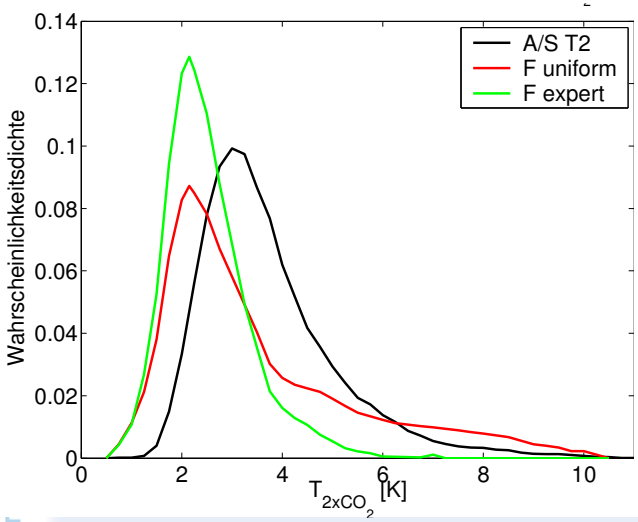



Forest expert, $T_{Guard}$=2℃, $P(T \leq T_{Guard}) \geq 0.5, 0.7, 0.9, 0.97$

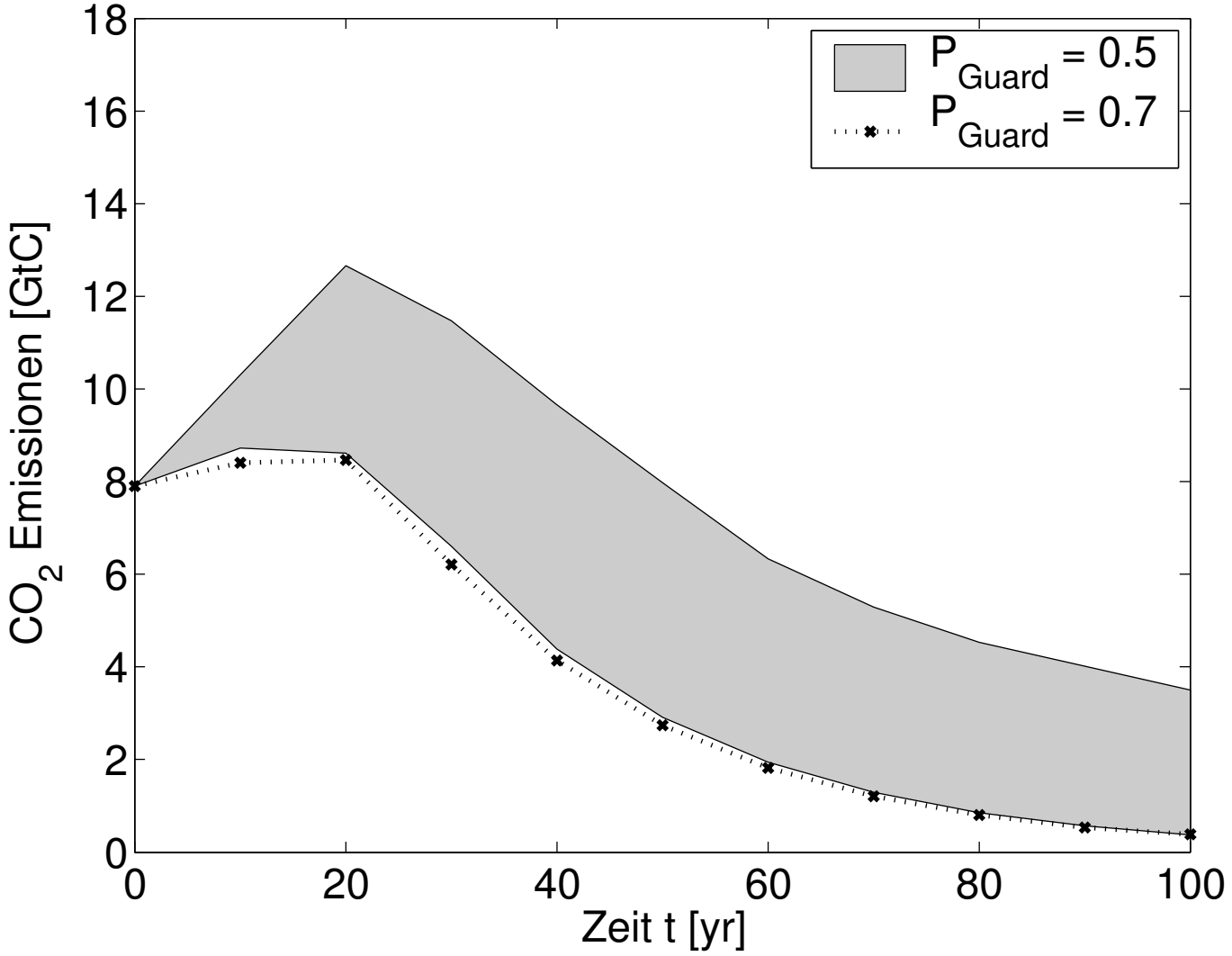


# Ergebnisse: Unsichere Klimasensitivität III

- Klimasensitivität Forest et al., Prior Gleichverteilung
- $\Delta T \leq 2$℃ (EU-Ziel)
- Bedingungen an Emissionspfade
- Gezeigt: Emissionskorridore für $P_{Guard} = 0.5, 0.7$

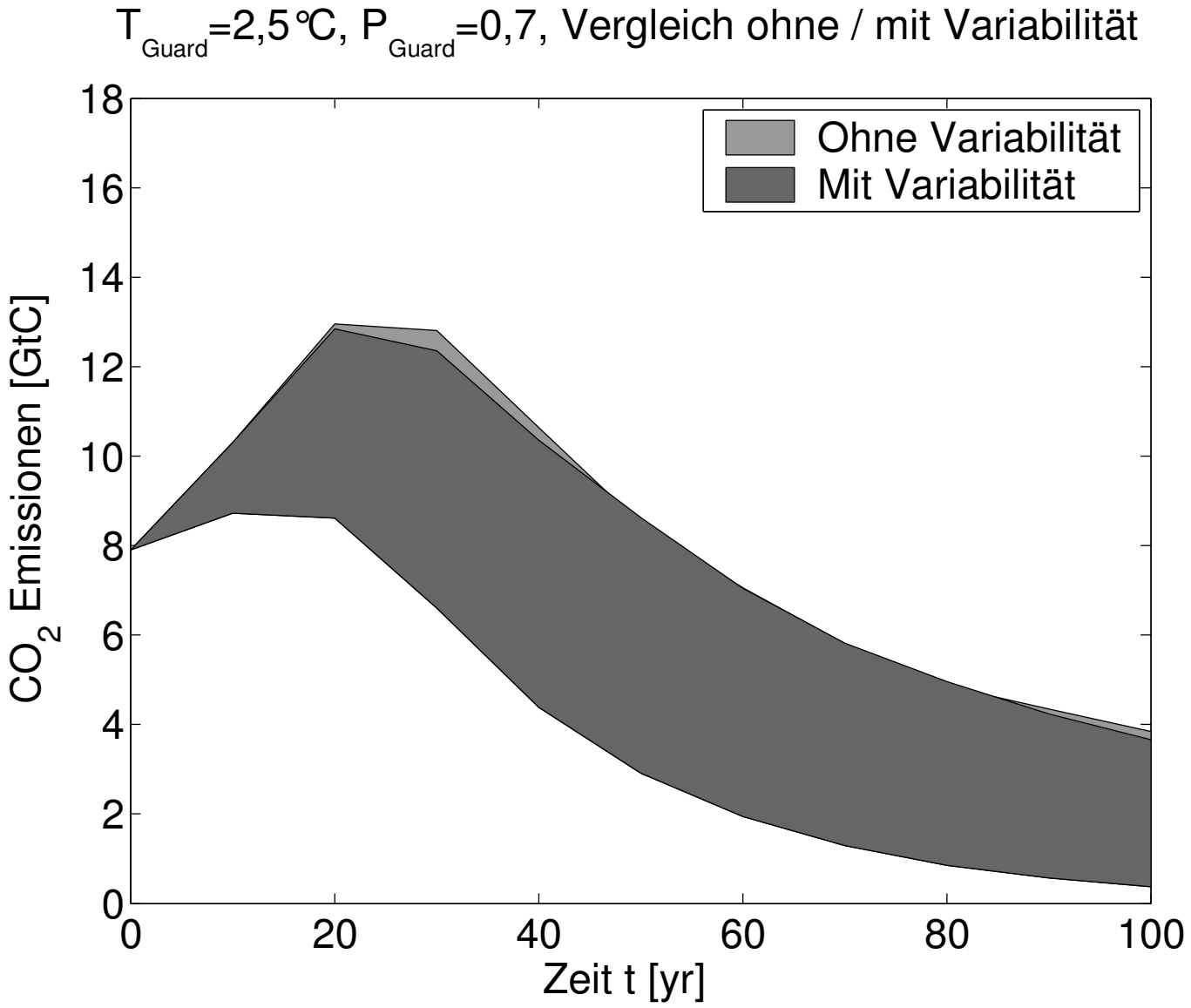



Forest uniform, $T_{Guard}$=2℃, $P(T \leq T_{Guard}) \geq 0.5, 0.7$



# Ergebnisse: Bedeutung nat. Variabilität

- Klimasensitivität nach Andronova & Schlesinger
- Max. ΔT = 2,5°C
- Vergleich ohne / mit natürlicher Variabilität
- Berücksichtigung nat. Variabilität nur minimale Auswirkungen auf Korridor
- Klimasensitivität Unsicherheit mit größerer Auswirkung



# Zusammenfassung

- Leitplankenansatz kann zu probabilistischem Leitplankenansatz erweitert werden, indem Leitplanke an Auswirkung durch Leitplanke an Wahrscheinlichkeit ergänzt wird
- Erlaubt explizite Berücksichtigung von Unsicherheiten im gekoppelten System Mensch-Klima-Auswirkungen
- Einhalten des EU-Zieles von $\Delta T \leq 2$°C mit hoher Wahrscheinlichkeit erfordert ehrgeizige Programme der Emissionsreduktion

# Vielen Dank für's Zuhören.