

Überwachung nationaler Treibhausgasbilanzen mit Hilfe von *in situ* Messungen und Fernerkundung

Überwachung nationaler Treibhausgasbilanzen mit Hilfe von *in situ* Messungen und Fernerkundung

Martin Heimann

Max-Planck-Institute für Biogeochemie, Jena, Germany
University of Helsinki, Division of Atmospheric Sciences, Helsinki, Finland

martin.heimann@helsinki.fi, martin.heimann@bgc-jena.mpg.de

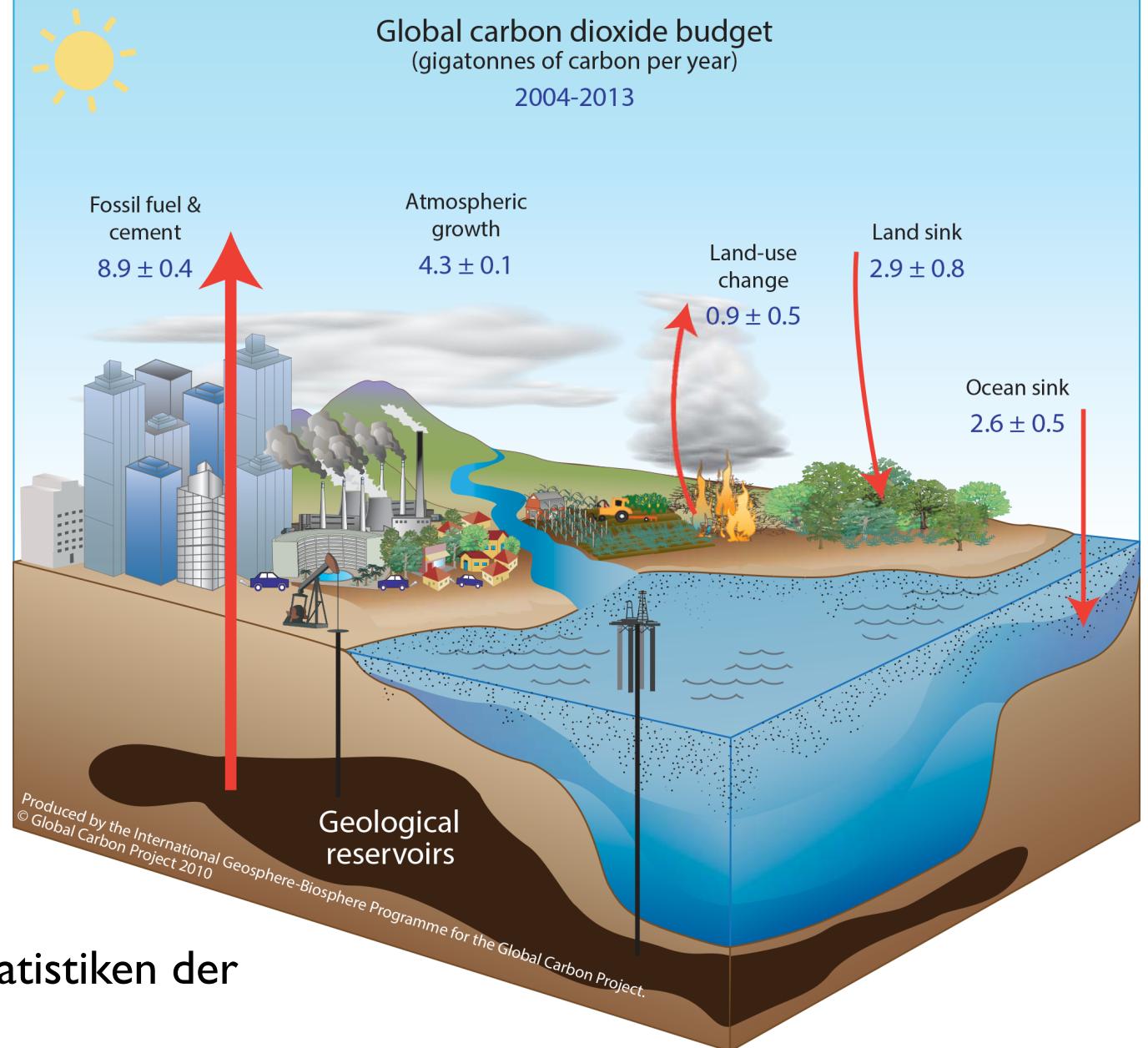
Heinrich Bovensmann

Institut für Umweltphysik, Universität Bremen
heinrich.bovensmann@uni-bremen.de

Credits:

CarbonSat mission advisory group
Copernicus report “Towards a European Operational Observing System to
Monitor Fossil CO₂ Emissions (Ciais et al., 2015)

Globale Kohlenstoffbilanz



- Fossile Emissionen aus Statistiken der Energienutzung
- Ozeansenke aus Beobachtungen
- Die globale Landsenke lässt sich nicht aus direkten Beobachtungen ermitteln

Wo liegen die Unsicherheiten?



Fossile Emissionen

- War die am zweitbesten bekannte Komponente in der globalen Bilanz
- Unsicherheiten nehmen mit der Zeit zu
- Schlechte Kenntnis von räumlicher und zeitlicher Variabilität

Ozean

- Modelle sind sich nicht einig bezüglich regionale Grösse und Trends der Ozeansenke

Landoberflächen

- Langjährige Kontroverse über dominanten Senken-Prozess und dessen geographischer Lage (Tropen vs boreale Zone)
- Ohne genaue Bilanzen, lassen sich die Beiträge der einzelnen Prozesse nicht trennen

Klimasensitivität

What is the CO₂ and CH₄ budget of poorly observed biomes
(Arctic, Tropics) and ocean gyres (N. Atlantic, S. Ocean) ?

- ⇒ Need: **Coverage of under-sampled regions**
- ⇒ **Scale : continents, sub continents**



How do regional CO₂ and CH₄ fluxes respond to climate variability ?

- ⇒ Need: **Spatial and temporal resolution**
- ⇒ **Scale : sub-continents, country scale**

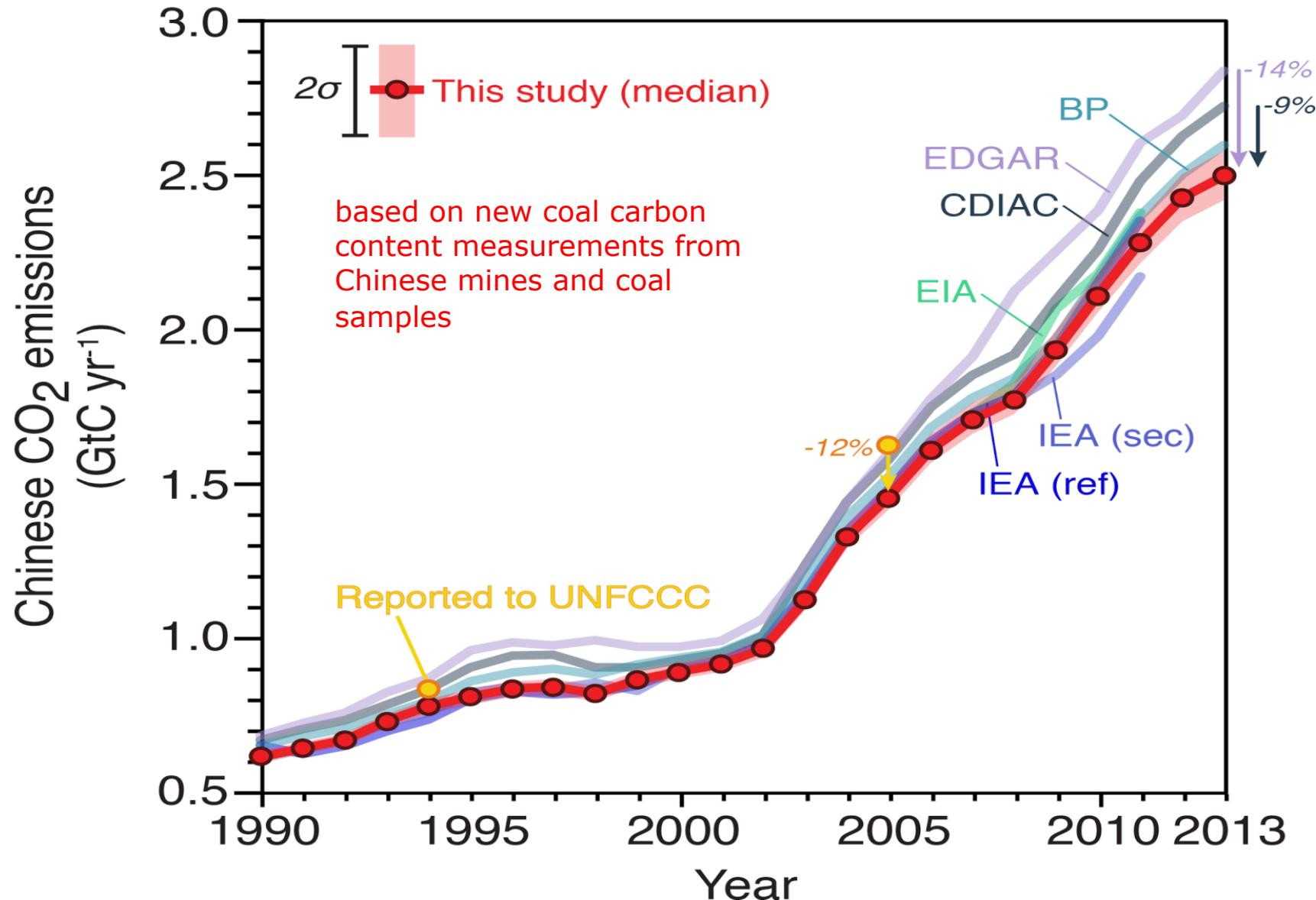


Anthropogenic emissions hotspots magnitude and location ?

- ⇒ Need: **Separate emissions** from surrounding natural fluxes
- ⇒ **Scale : local**



Beispiel: CO₂ Emissionsinventare von China



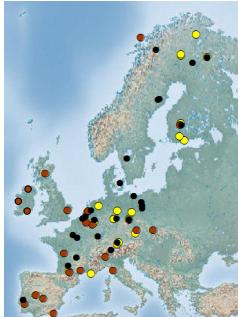
14% Unsicherheit entspricht 20% der globalen CO₂ Landesenke!

Wie lassen sich regionale Quellen und Senken bestimmen?

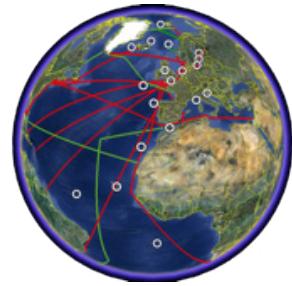
“Top-down” - “bottom-up” Strategie
Das CarboEuropeIP und ICOS Paradigma



Atmospheric network

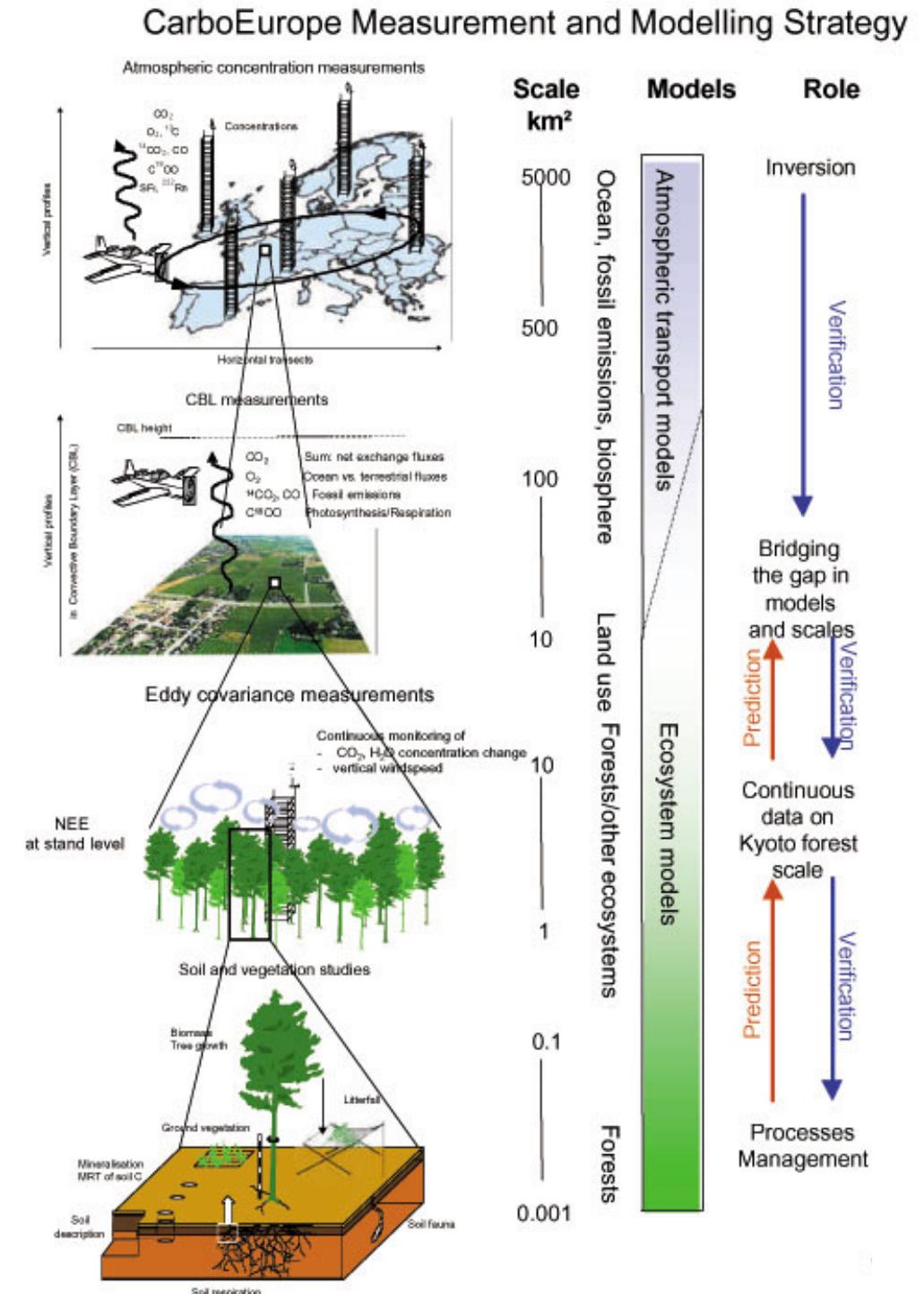


Ecosystem network

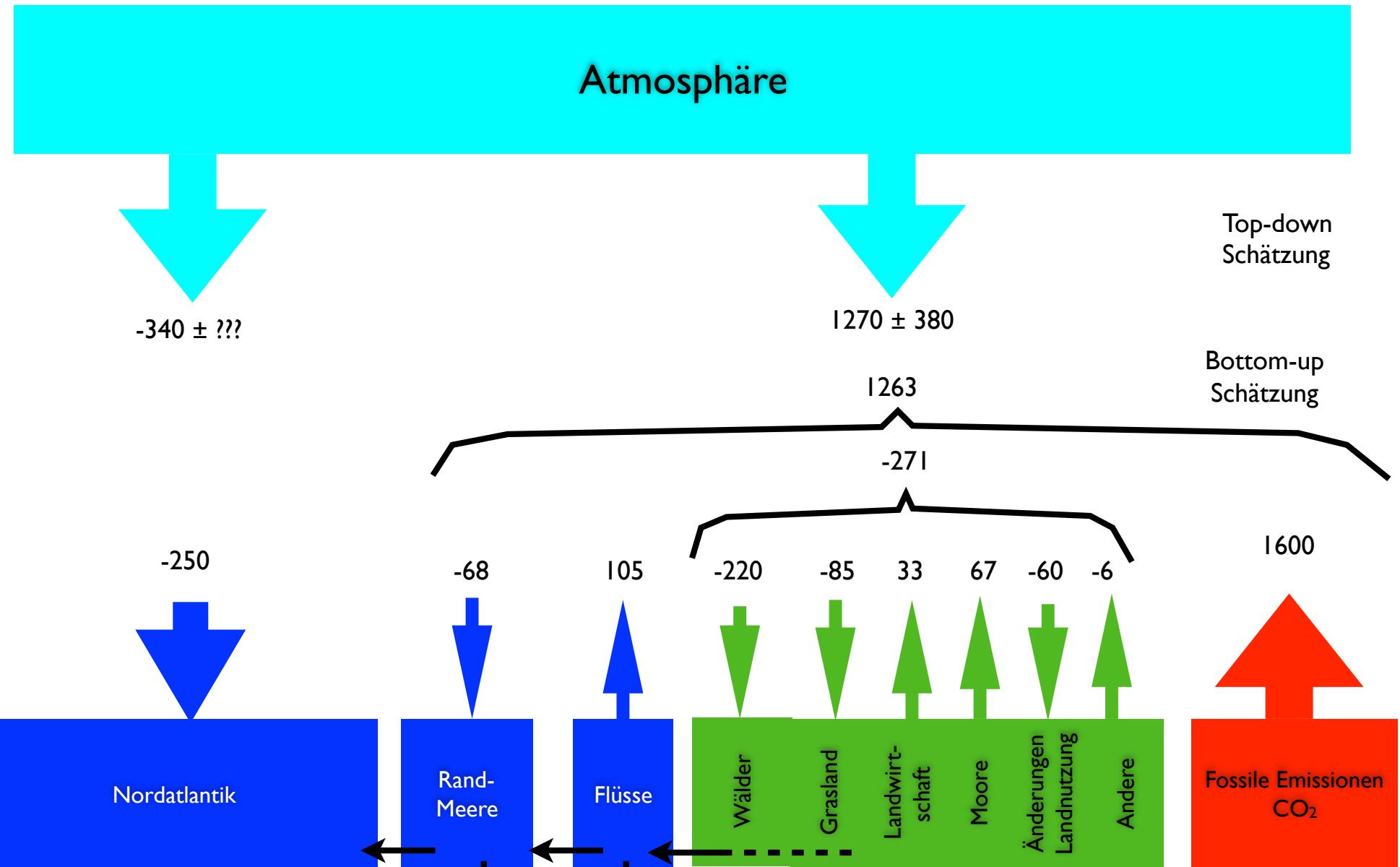


Ocean network

ICOS:
“Integrated Carbon Observation System”



Kohlenstoffbilanz Europa und Nordatlantik [TgC yr⁻¹] 2000 - 2004 (positive Zahlen: Fluss in die Atmosphäre)

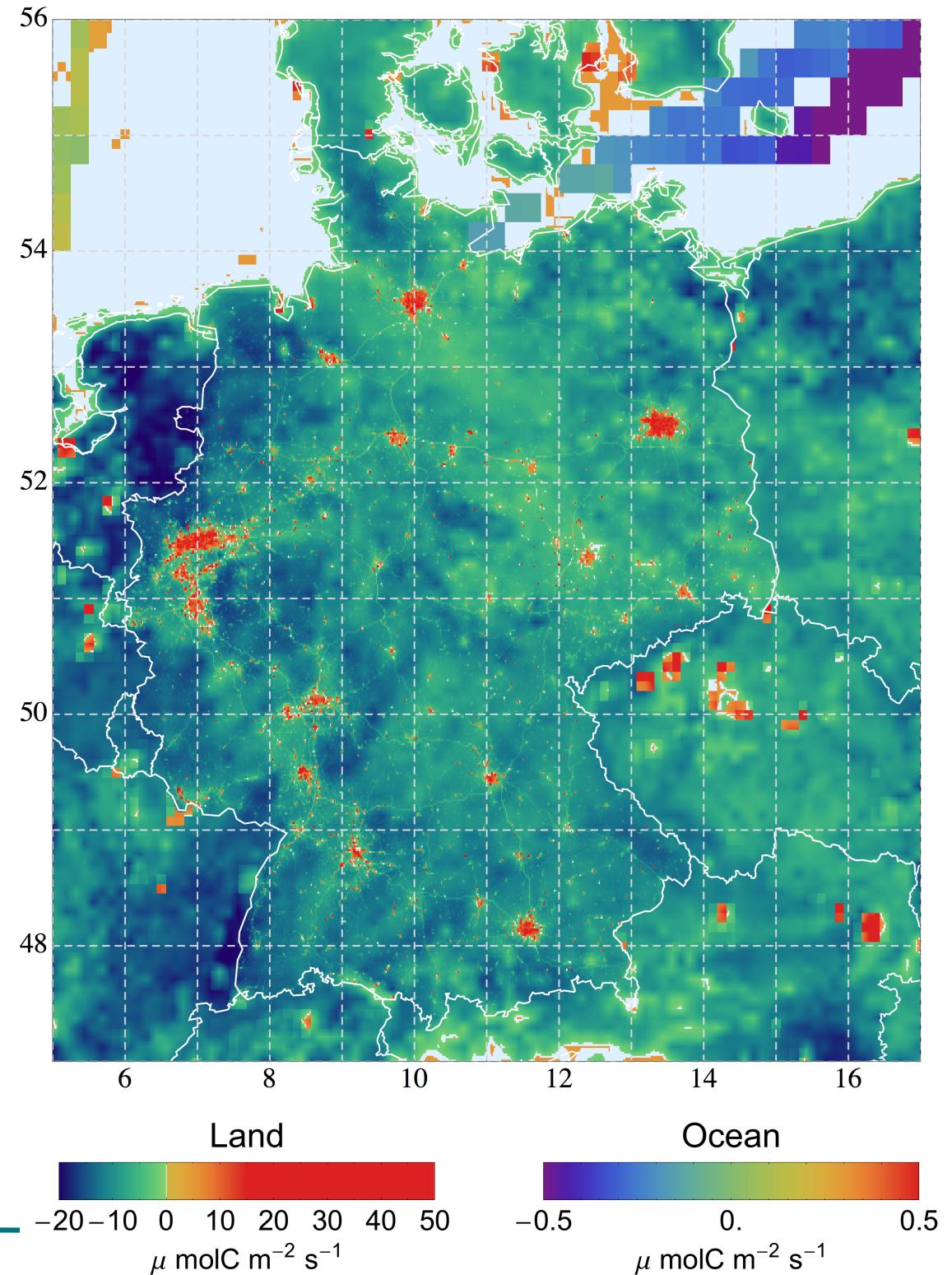


Quellen und Senken des CO₂ über Land sind extrem heterogen - in Raum und Zeit

Beispiel:
CO₂-Austauschflüsse um
12 Uhr Mittags an einem
Sommertag

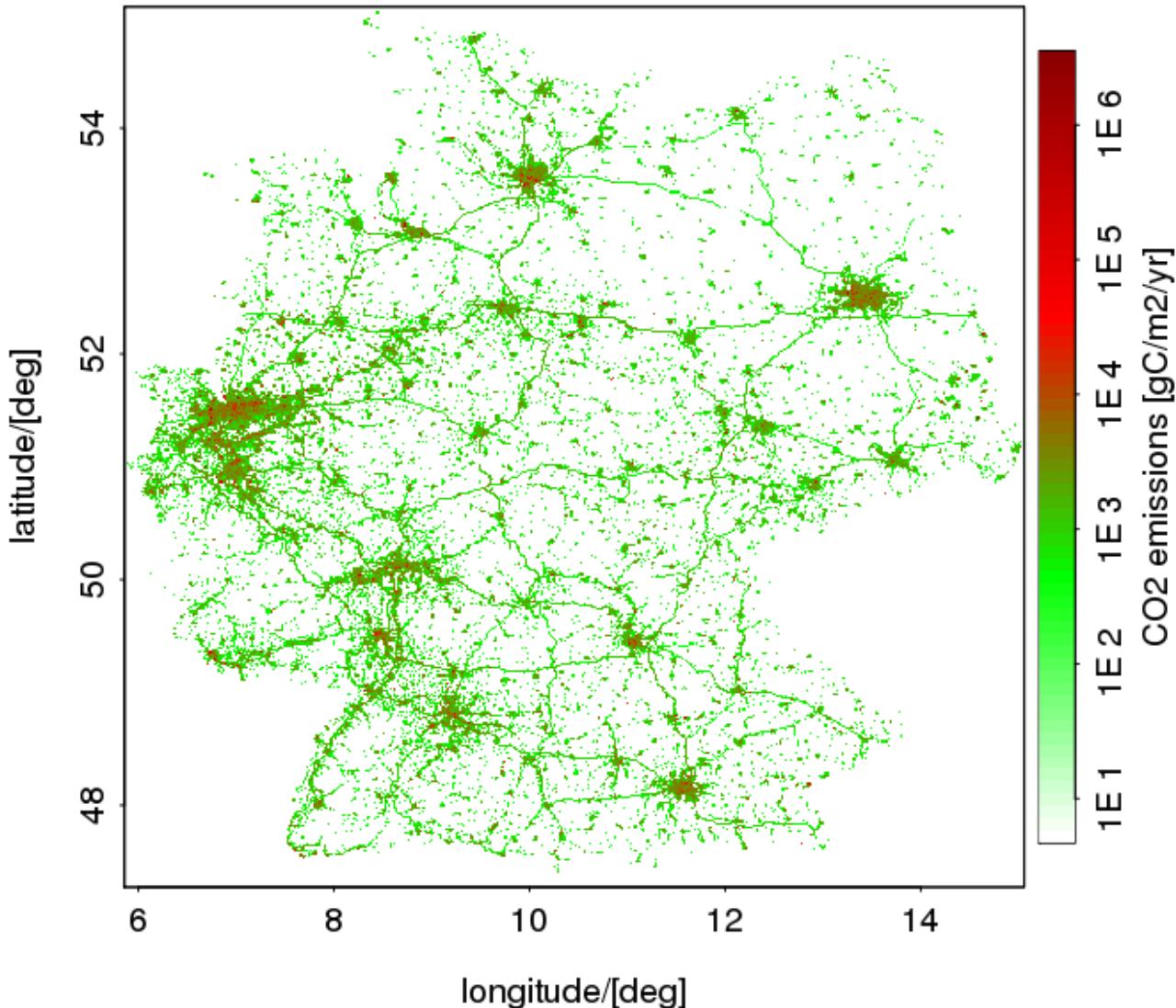
Basierend auf:

- bottom-up Inventaren,
- Satellitendaten der Landnutzung,
- Vegetationsmodell + Wetterdaten
- Eddykovarianz Flussmessstationen
- Schiffsmessungen



Verteilung der I' Pixel ($\sim 2\text{km}^2$) mit insgesamt 90% der nationalen fossilen Emissionen von Deutschland

90% largest Emissions at 1 min. resolution (IER Stuttgart)

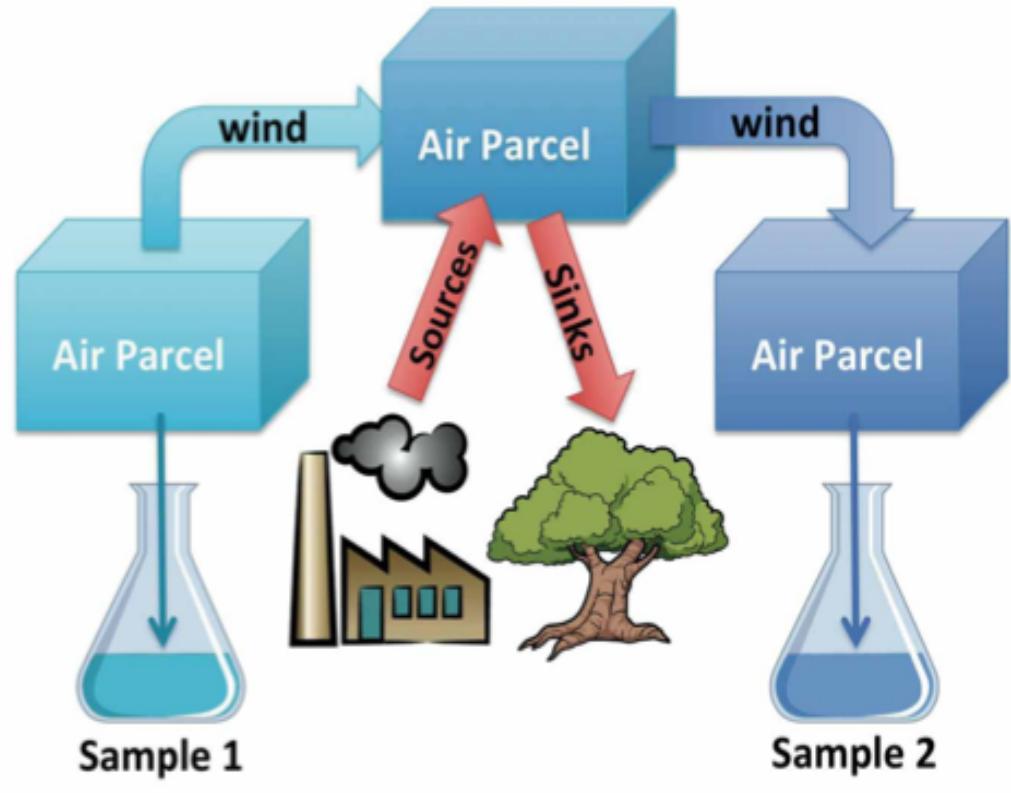


Um die nationalen Emissionen besser als 10% zu quantifizieren genügt es nicht, nur die Hotspots zu erfassen!

Die “top-down” Methode nutzt die Atmosphäre als natürlicher Integrator der heterogenen Quellen und Senken

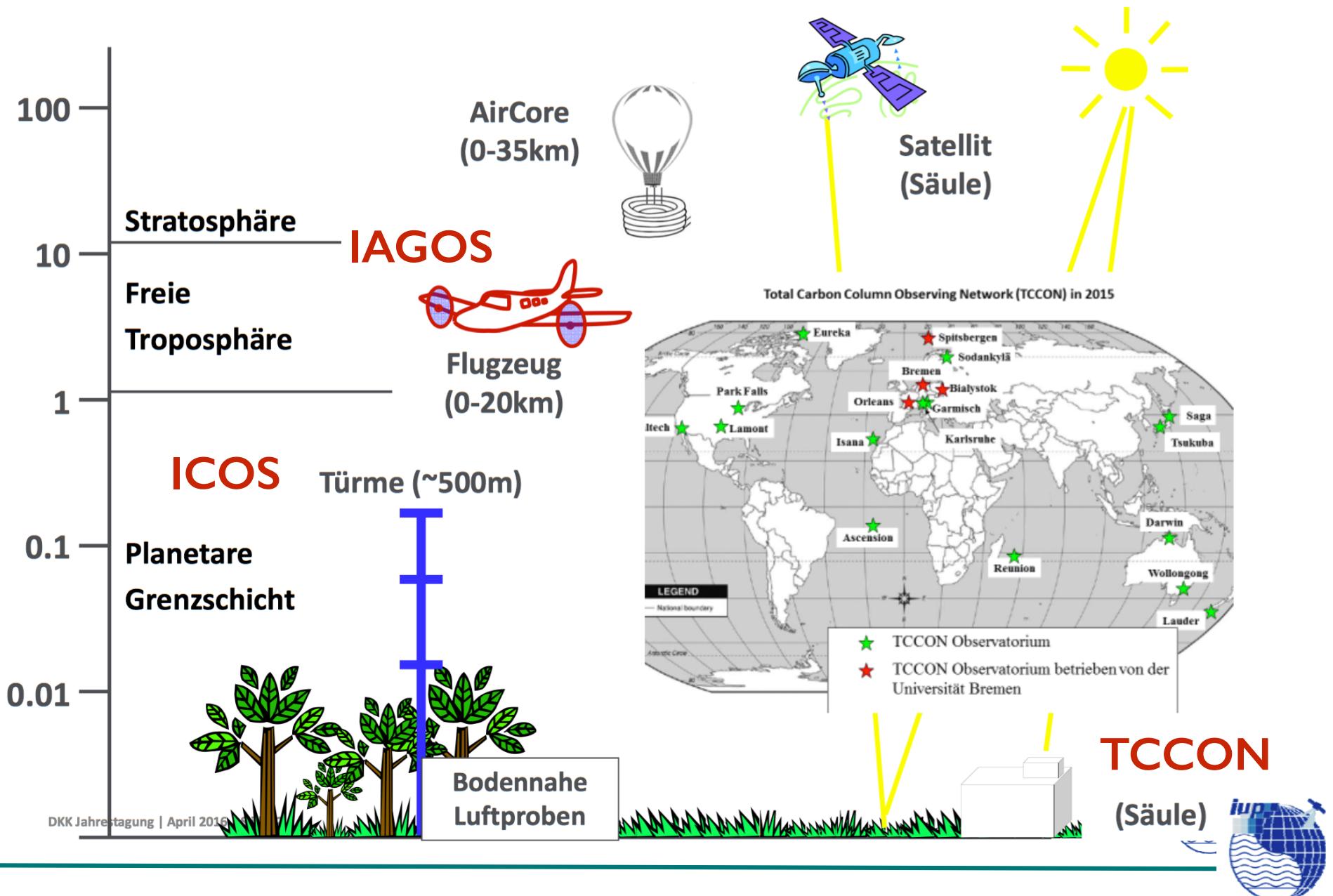
Mächtiges Werkzeug; verlangt jedoch 3 Bedingungen:

1. Dichtes Netz an Beobachtungen
2. Numerisches Modell des atmosphärischen Transportes
3. *a priori* Information zur Regularisierung des inversen Problems

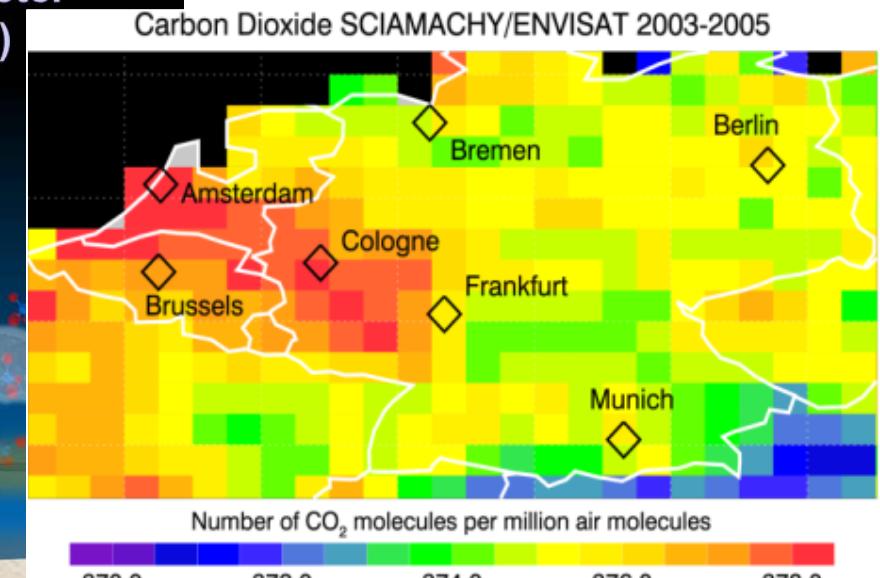
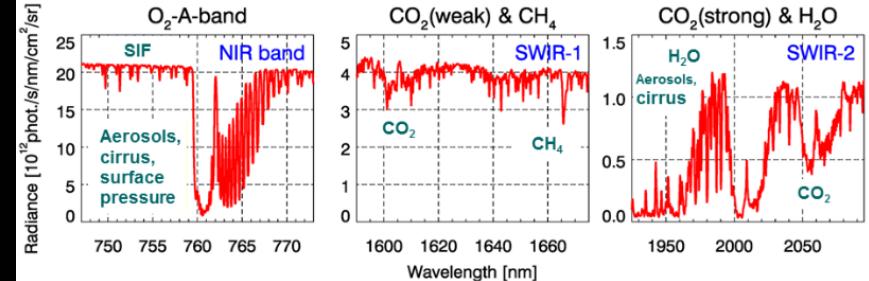
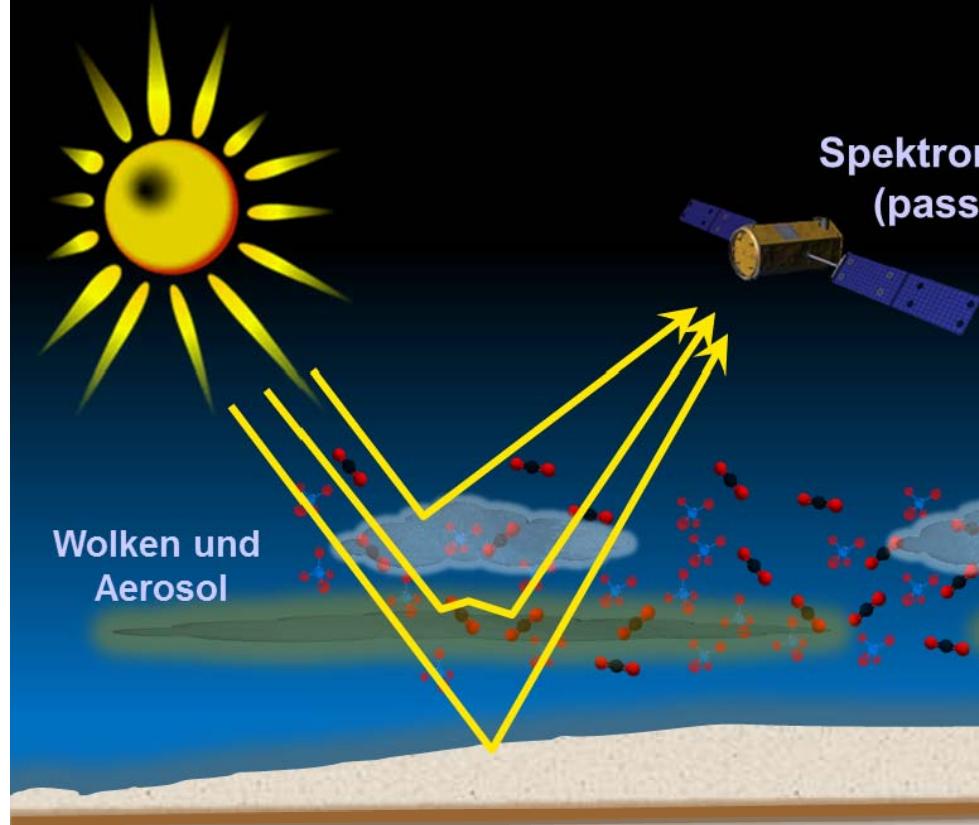


Aber: Die Atmosphäre sieht nur die Summe der verschiedenen Quellen und Senken!

Portfolio verschiedener Datenströme für die atmosphärische Messung der Treibhausgase



Passive Fernerkundung von Treibhausgasverteilungen in der Atmosphäre



SCIAMACHY auf ENVISAT (2002-2012): **CO₂, CH₄, CO, O₃, NO₂, SO₂ ...**

GOSAT (2010 – 2017):

OCO-2 (2014 - 2017):

Sentinel 5 Precursor (2016 – 2022):

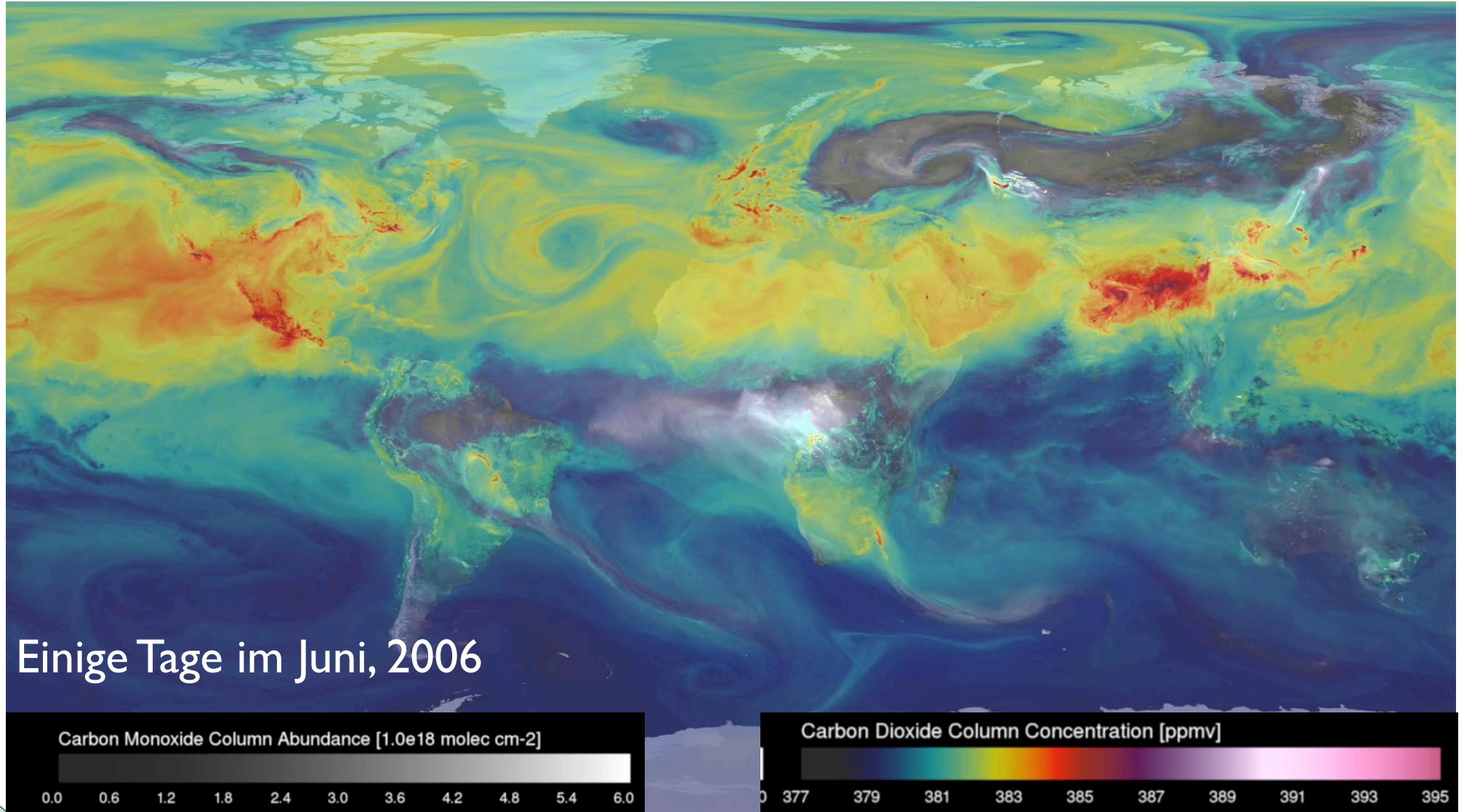
CO₂, CH₄

CO₂

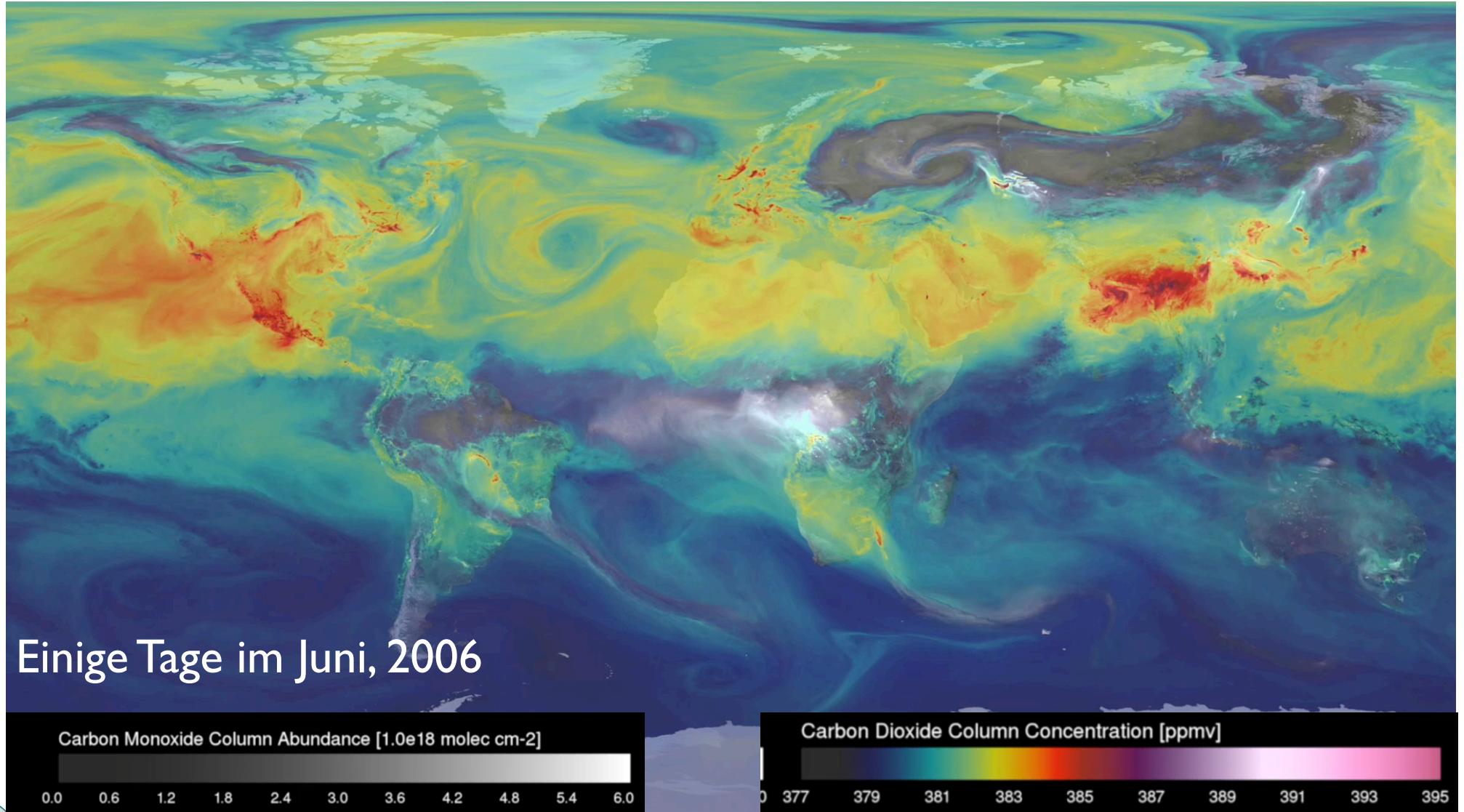
CH₄, CO, O₃, NO₂, SO₂ ...



Hochauflösende numerische Simulation des CO₂-Säulenmittels wie sie vom Satelliten aus gesehen würde (ohne Wolken!)



Hochauflösende numerische Simulation des CO₂-Säulenmittels wie sie vom Satelliten aus gesehen würde (ohne Wolken!)

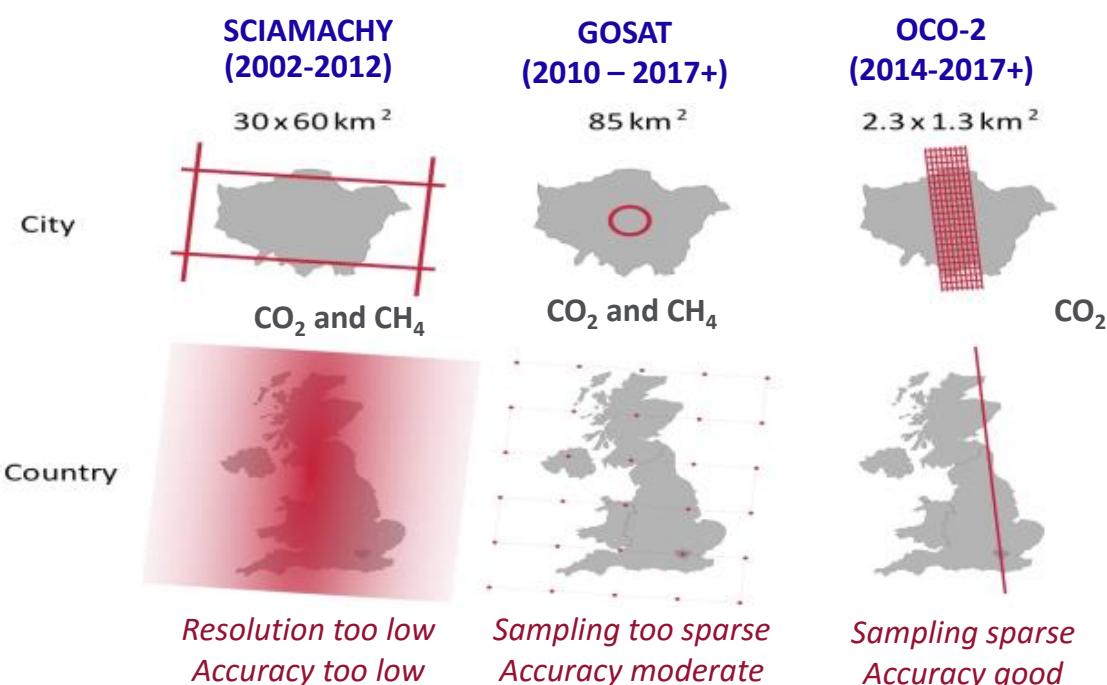


Anforderungen an zukünftige Satellitensensoren

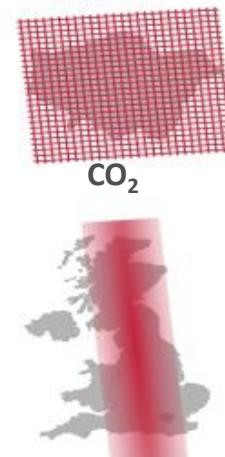


Notwendige Eigenschaften zukünftiger Satellitensensoren zum Treibhausgas-Monitoring

- ✓ **Dichte räumliche Abtastung** - "Bilder" der CO₂ und CH₄ Verteilungen,
 - Ausreichende Anzahl an Messungen pro Region
- ✓ **Hohe räumliche Auflösung** - Nachweis lokaler Hotspots, Wolken-Unempfindlichkeit
- ✓ **Hohe Genauigkeit** - Information stammt aus kleinen Gradienten
- ✓ **Globale Abdeckung**



**European CO₂
Monitoring Mission
(ESA-EU)**

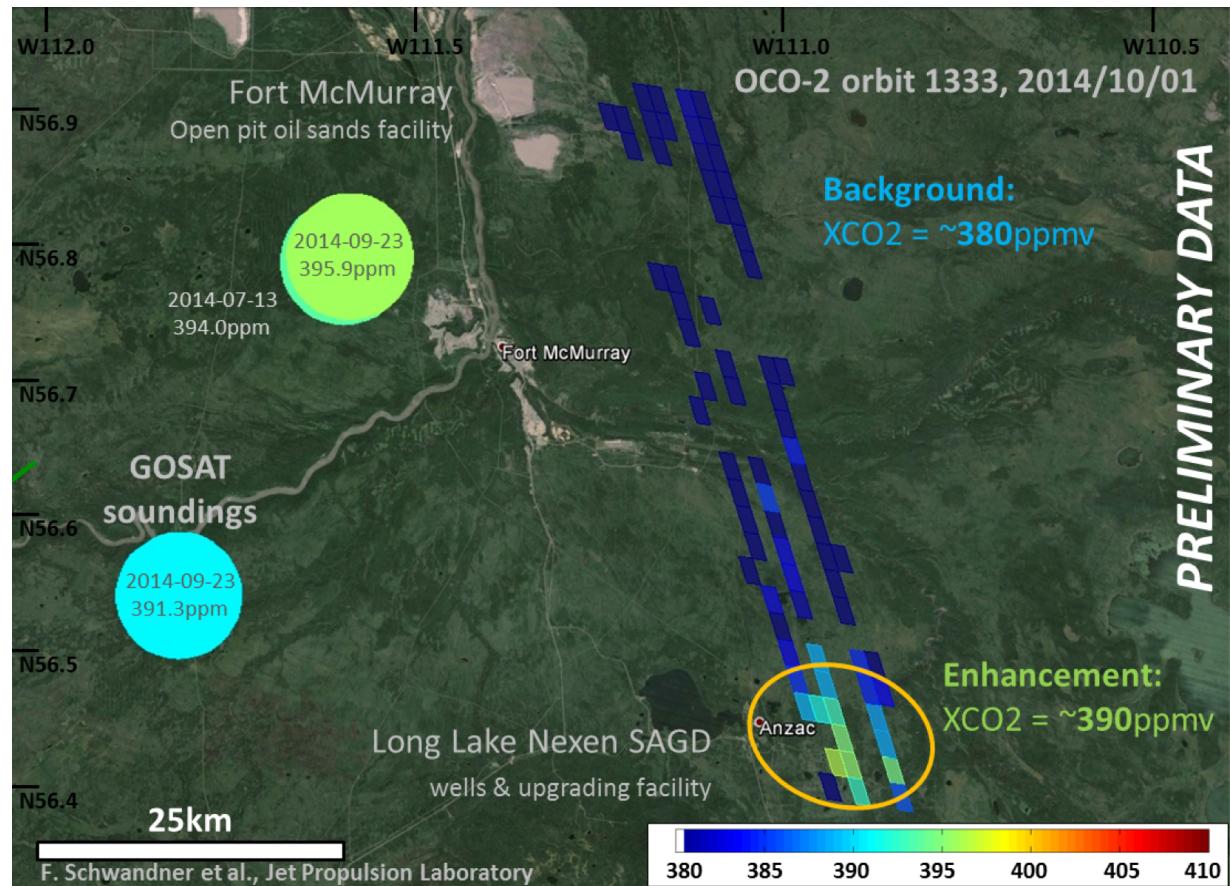


*Imager : Sampling dense
Accuracy good*



OCO-2 shows some promise for point source detection

- narrow swath (eight pixels), but high resolution
- some technical problems have not been critical
- early results are quite encouraging



Europas Biosphäre als wichtige C-Senke – unsicher?

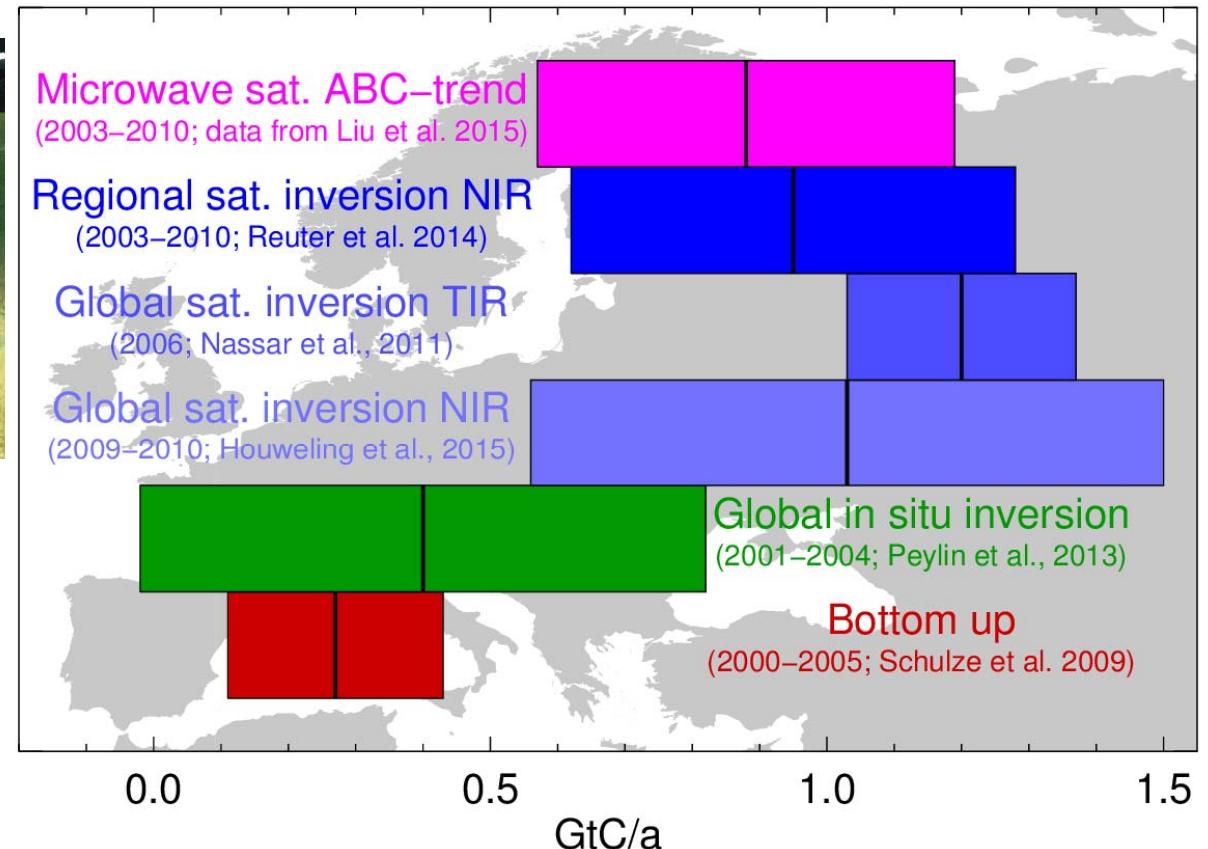


Publizierten Werte zum Kohlenstoffbudget Europas

(Unsicherheiten: 1-sigma):



Eine zukünftige CO₂-Mission kann Fehler auf 0.1-0.2 GtC/a reduzieren.

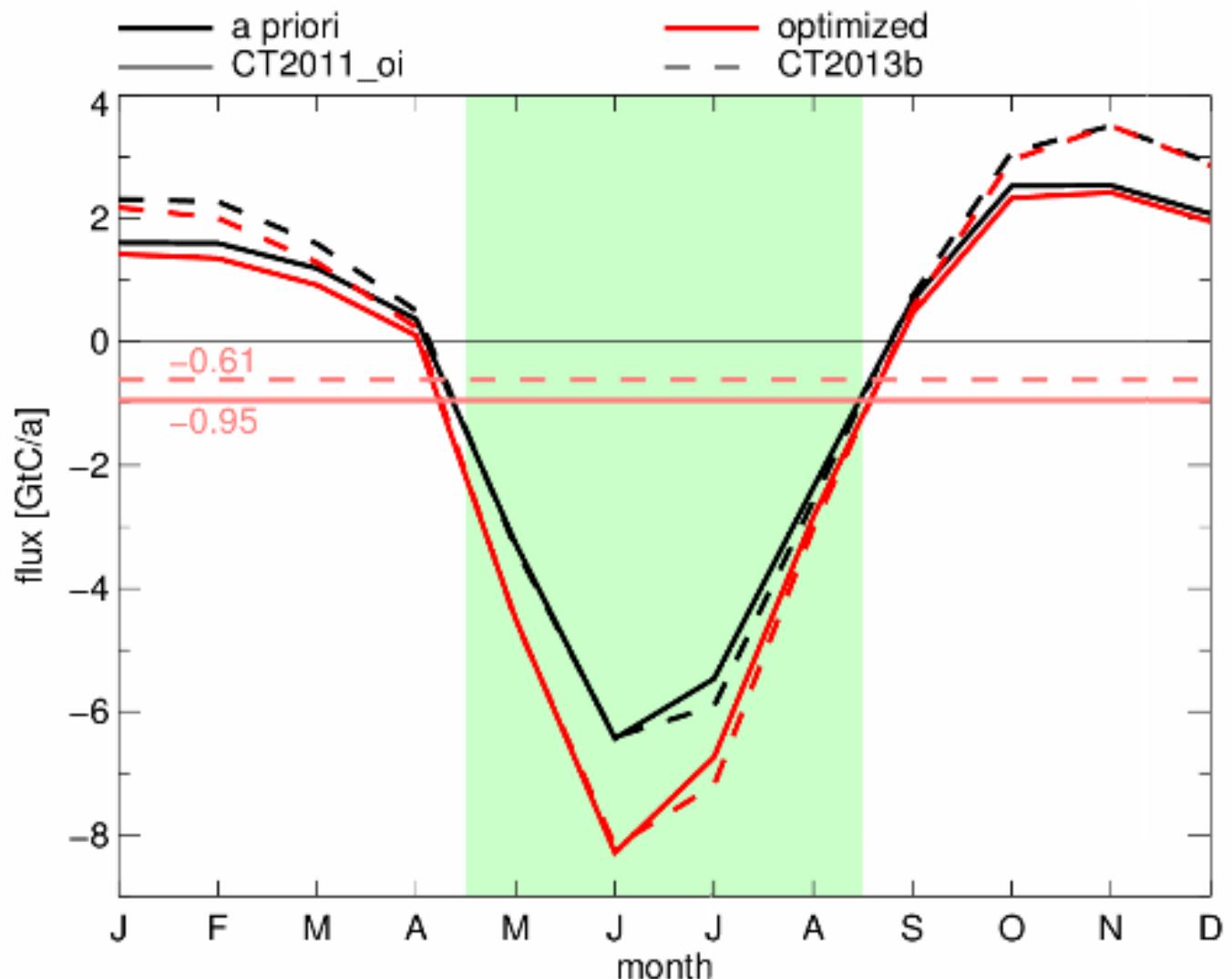


- Conventional estimates see a weaker sink
- Error bars partly overlap
- Compared with the global land sink (~2.6GtC/a)
 - Differences are large (typically > 0.6GtC/a)
 - Uncertainties are large (typically > ±0.3GtC/a)

Reuter et al. (manuscript submitted)

Bias caused by seasonal uneven coverage of satellite measurements - Net effect on annual budget: 0.3 PgC/yr

European land biosphere carbon balance estimated with CarbonTracker

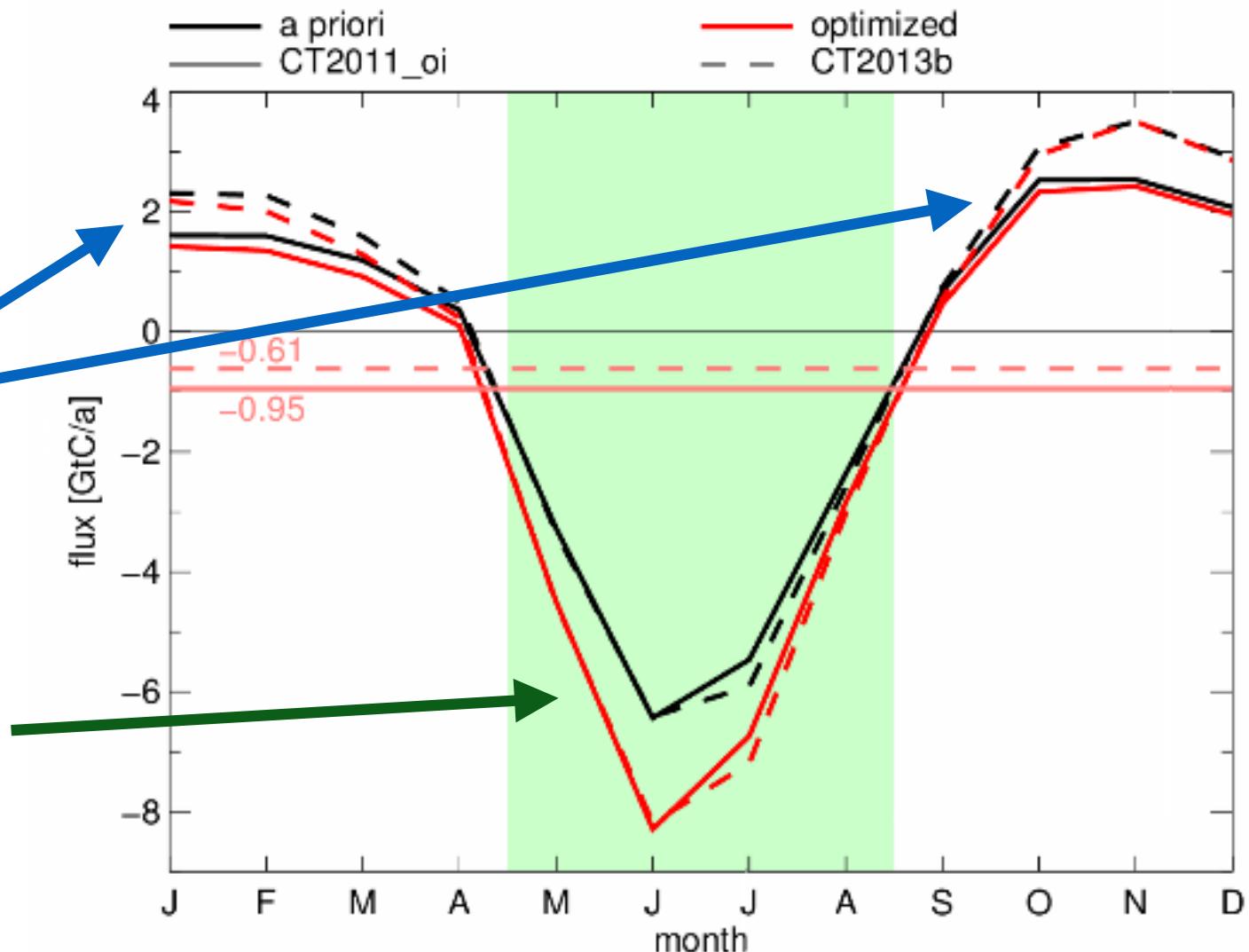


Bias caused by seasonal uneven coverage of satellite measurements - Net effect on annual budget: 0.3 PgC/yr

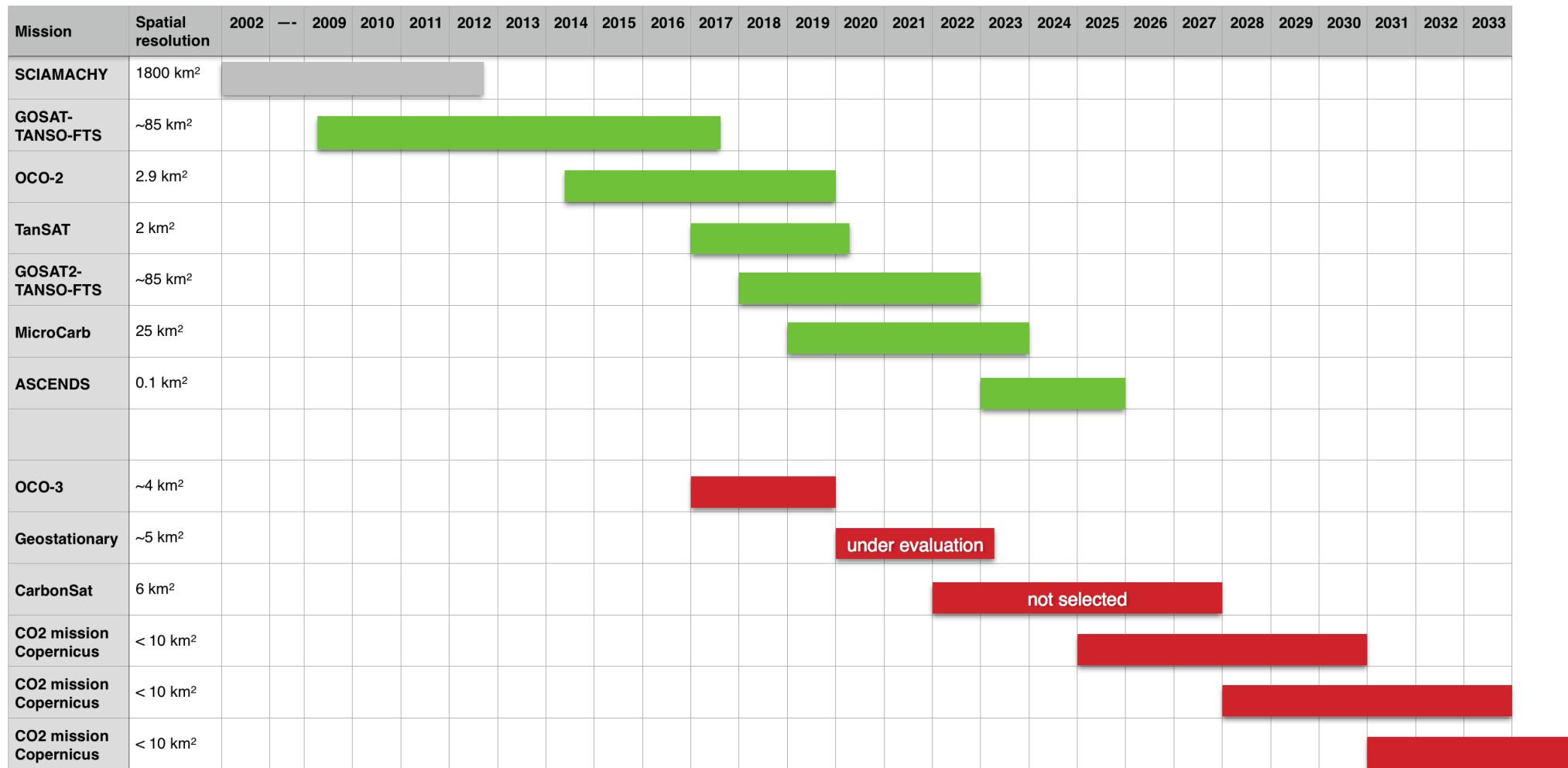
European land biosphere carbon balance estimated with CarbonTracker

Winter: few observations, priors determine balance

Summer: constrained by observations, priors do not matter



Aktuelle und geplante Satellitenmissionen



Detektion des fossilen CO₂ in regionalen Messungen

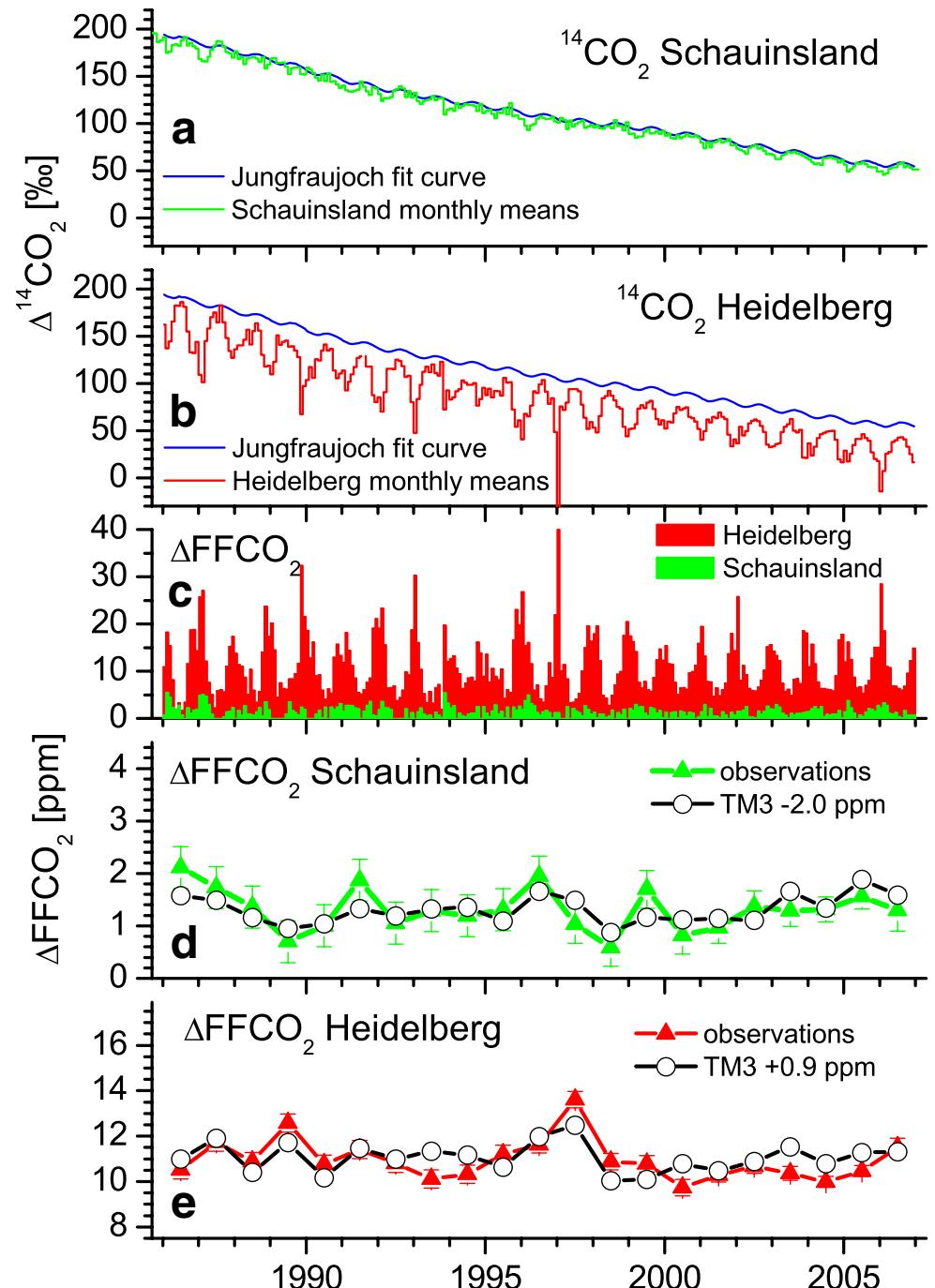
Radiokohlenstoff (¹⁴C) wird erzeugt in der Atmosphäre und zerfällt mit einer Halbwertszeit von ~5700 Jahren.
Kohlenstoff aus Erdöl, Erdgas und Kohle hat kein ¹⁴C!

Aber:

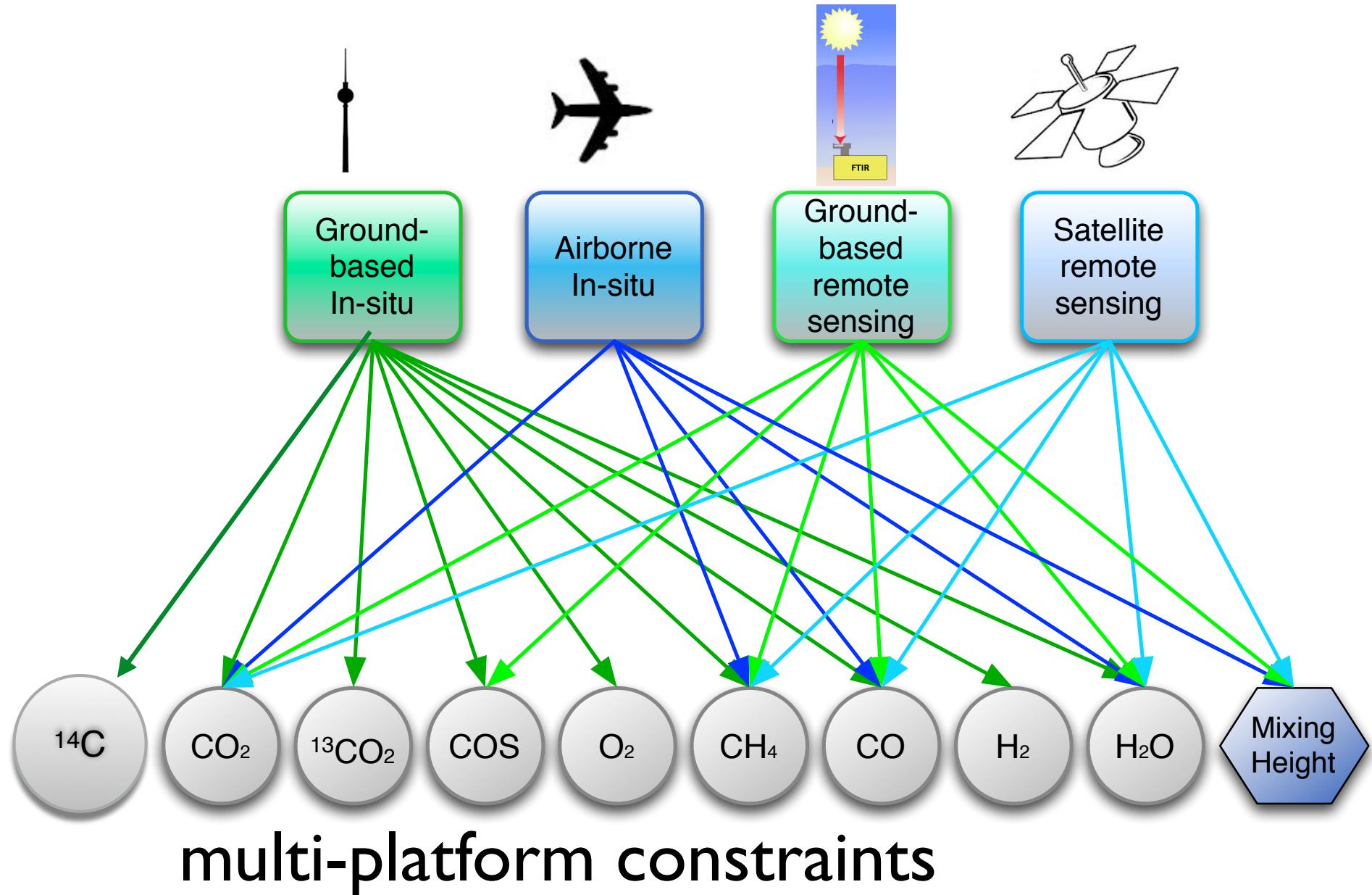
¹⁴C Messungen sind teuer und logistisch nicht einfach. Verfahren zur kontinuierlichen *in situ* Messung oder durch Fernerkundung gibt es zur Zeit nicht.

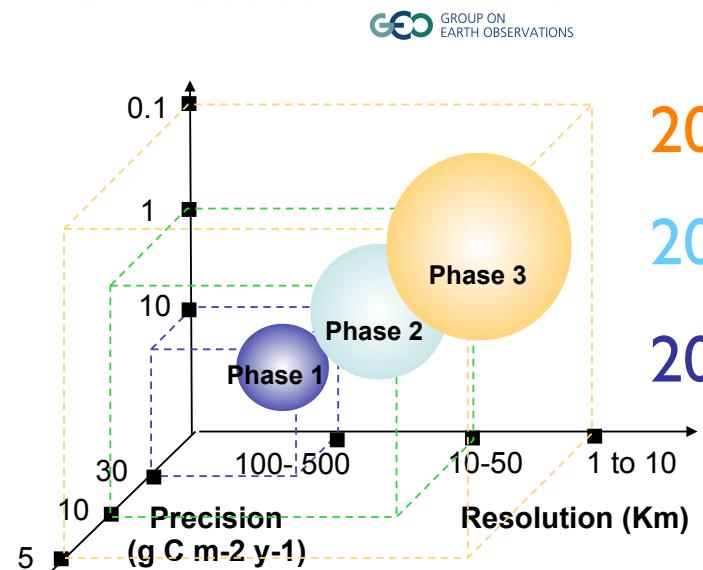
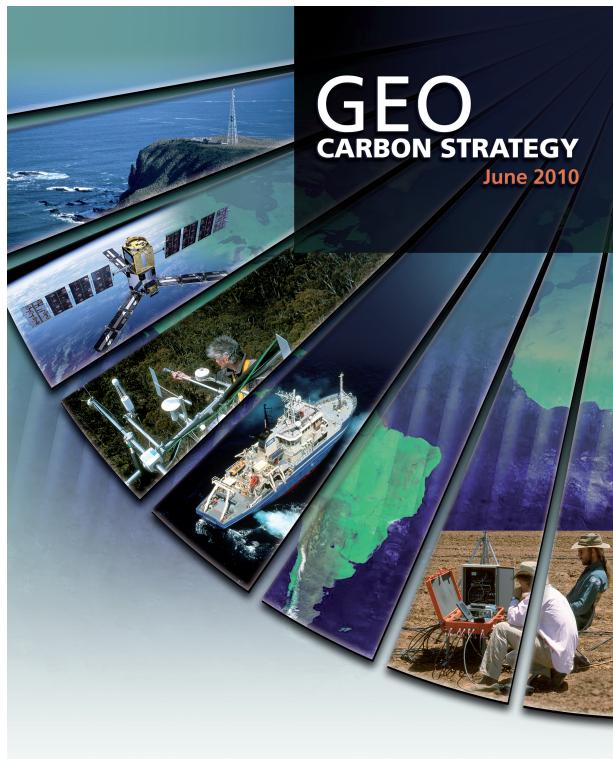
Komplikation:

¹⁴C aus AKWs und nuklearen Wiederaufbereitungsanlagen!
(Graven and Gruber, 2011)



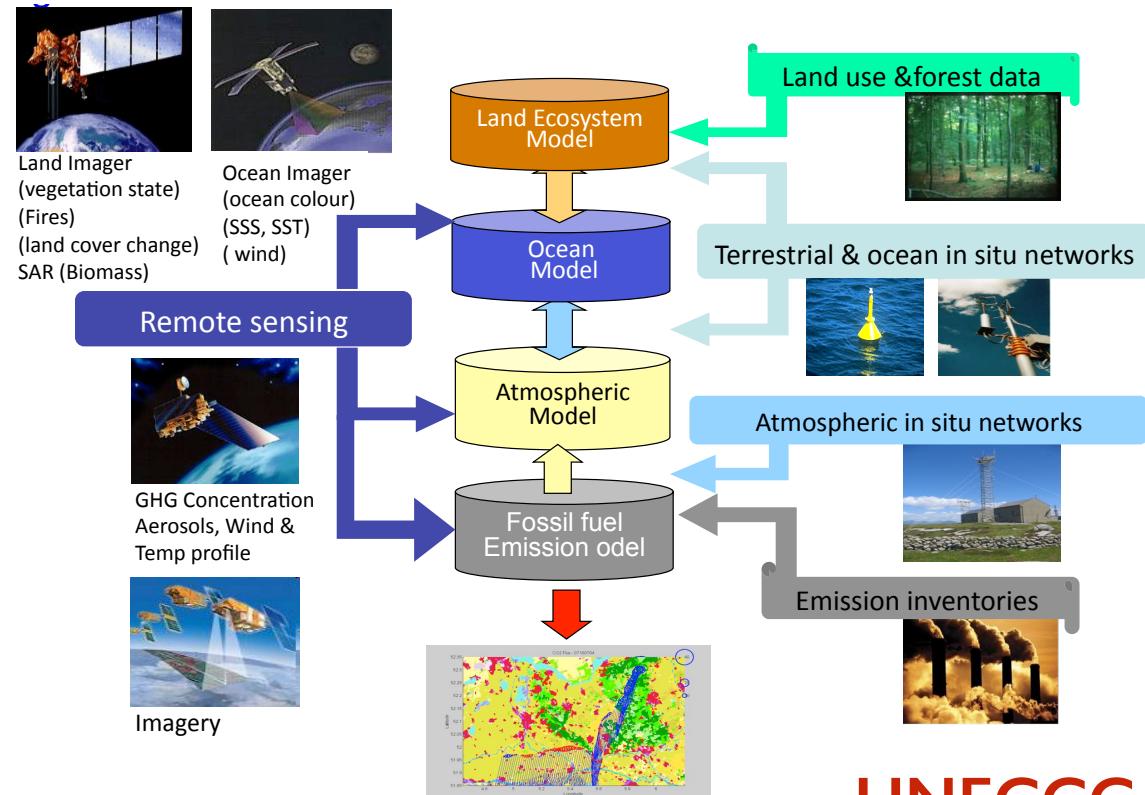
Synergy of observing systems





Ziel

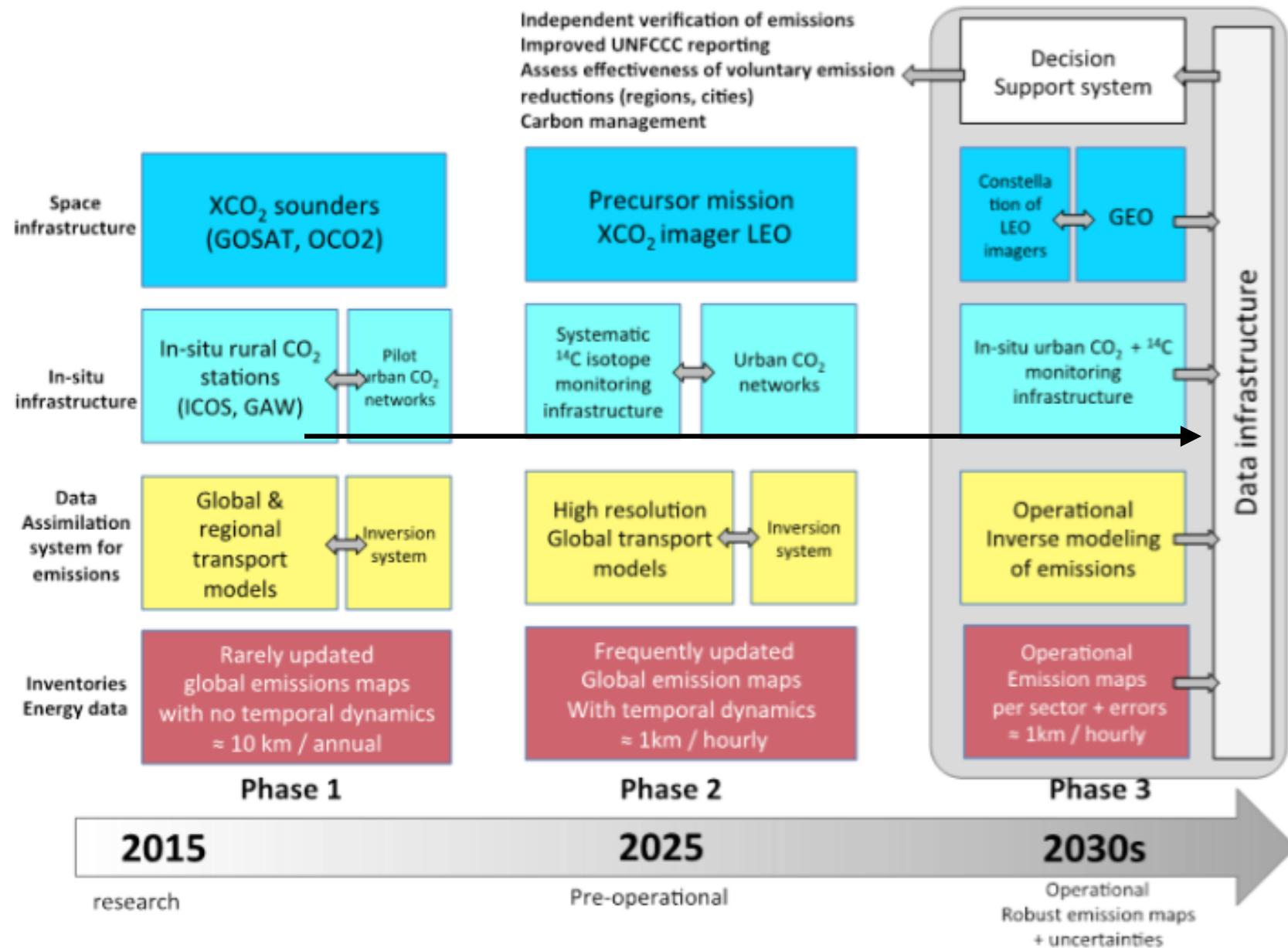
- Entwicklung eines nahtlosen operationellen Beobachtungssystem für Treibhausgasbilanzen
- Integration der verschiedenen Datenströme in ein gekoppeltes Atmosphäre-Ozean-Landoberflächen Modellsystem - analog der Datenassimilation für die Wettervorhersage



Components of an operational observation system

- A fossil CO₂ emission inventories operational production component
- An observation infrastructure component including both satellite and in-situ ground based and aircraft data.
- An atmospheric inversion modelling and data assimilation component (atmosphere, ocean, land ecosystems)
- An integration system, building upon the Copernicus services
- An Archive / Exchange system
- A decision support system

Roadmap zum Aufbau eines umfassenden Kohlenstoff (Treibhausgas) - Informationssystem

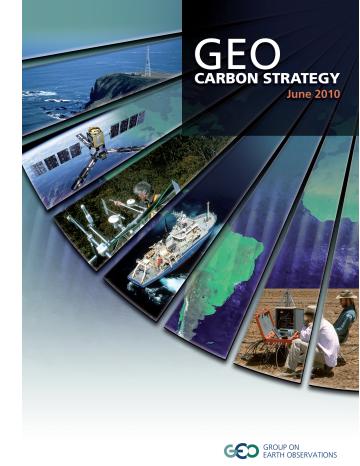


Wissenschaftliche, technische und organisatorische Herausforderungen

- Urbane Systeme (bottom-up/top-down Verfahren)
- Trennung der anthropogenen von den natürlichen Emissionen (^{14}C , andere Indikatoren: z.B. CO, COS, O₂)
- Biogeochemische Datenassimilation (“Carbon Cycle Data Assimilation System”, CCDAS)
- Homogenität der Messnetze
- Genauigkeit der Fernerkundungsmessung
- Langzeitstabilität des operationellen Systems (Organisation, Finanzen, technische Expertise)

Overall objectives of a global carbon information system

Information for science and policy



In summary, a multi-scale, coordinated system of integrated global carbon observations would contribute to answering critical scientific and societal questions, including:

- What are the size, location, and processes controlling present-day terrestrial and marine carbon sources and sinks?
- What is the effectiveness of deliberate carbon sequestration activities? What are the implications of these activities for the global carbon cycle?
- How effective are regional and national GHG management and policy interventions? How can they be improved and where?
- How will carbon sources and sinks behave in the future under higher CO₂ and altered patterns of climate, land vegetation, and ocean circulation?
- How soon will feedbacks that enhance global warming come into play and what carbon-cycle management tools are likely to be effective in combating or preventing them?