



Wie arbeiten Klimaforscher?

Am Beispiel der Analyse von CO₂ Konzentrationen und Satelliten-Beobachtungen

11.Mai 2026

Wolfgang Marcus (Marc) Wefers
HGU Geisenheim

Motivation

Diese dünne Schicht ermöglicht erst Leben auf der Erde

- Temperatur der Erde ohne Atmosphäre: -18°C
- beinhaltet klima-relevante Spurengase (aktive und passive) und Aerosolpartikel



Agenda

- Globale Transportmodelle für Spurengase und Aerosolpartikel
- Zwei wesentliche Beiträge von CO_2 zum Leben auf der Erde
- Satellitenbeobachtungen und mathematische Approximationsverfahren zur Bestimmung langjähriger CO_2 Zeitreihen

Vielleicht zu einem späteren Zeitpunkt

- Modell zur Analyse der Dynamik beim Aufbau von Biomasse von Weinreben durch sich verändernde Klima- Variablen und CO_2 Konzentrationen

Teil 1

Globale Transportmodelle für Spurengase und Aerosolpartikel



Quellen, Transport und Senken für Spurengase und Aerosole

Quellen*

von klima-relevanten Spurengasen durch Verbrennung, anerobe Stoffwechsel, Düngung, auftauende Böden, Ozon (Stratosphäre)

Quellen*

von Aerosol-Partikeln durch aride Gebiete (Staub) und Ozeane (Seesalz)



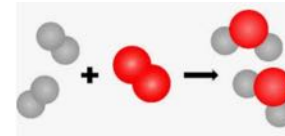
globaler Ferntransport



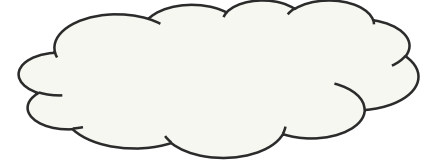
*ausgewählte Beispiele

Senken

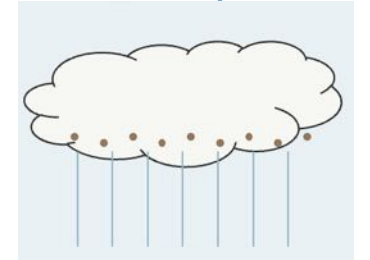
chemische Umwandlung



Wolken-Bildung



nasse Deposition



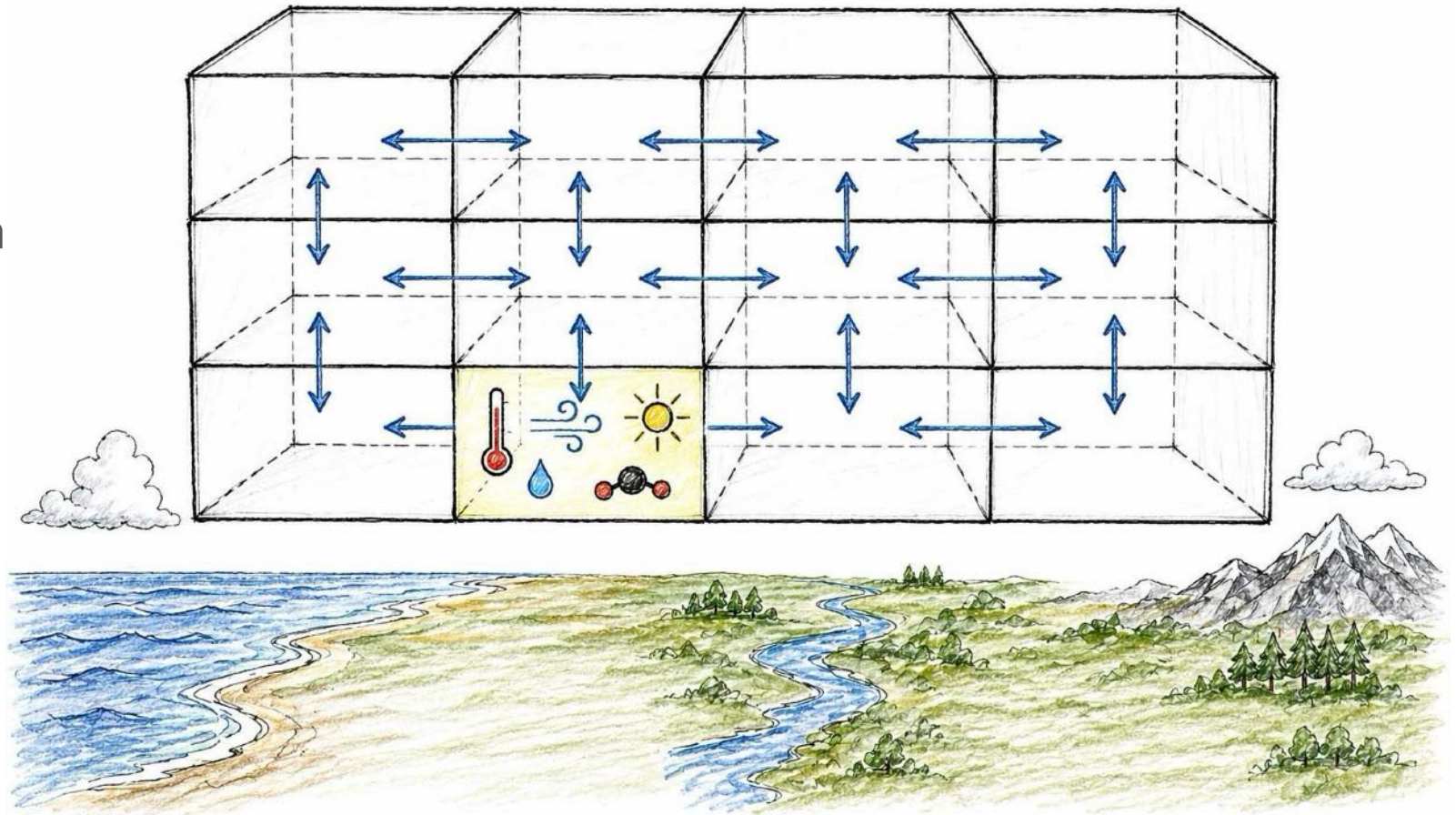
Lösung in Meeren



Globale Modelle mit Transport, Physik, Chemie

Globale Modelle

- Gitterboxen z.Bsp:
horizontal 100 x 100 km und
vertikal 1.000 m
- Berechnung pro Zeitschritt in
jedem Grid:
Transport der Gase
physikalische Prozesse
chemische Prozesse
- Antrieb:
Temperatur, Wind, Feuchte,
Strahlung Sonne, Strahlung
Erde, ...
- Quellen (Stärke, Ort)
- Senken (Stärke, Ort)



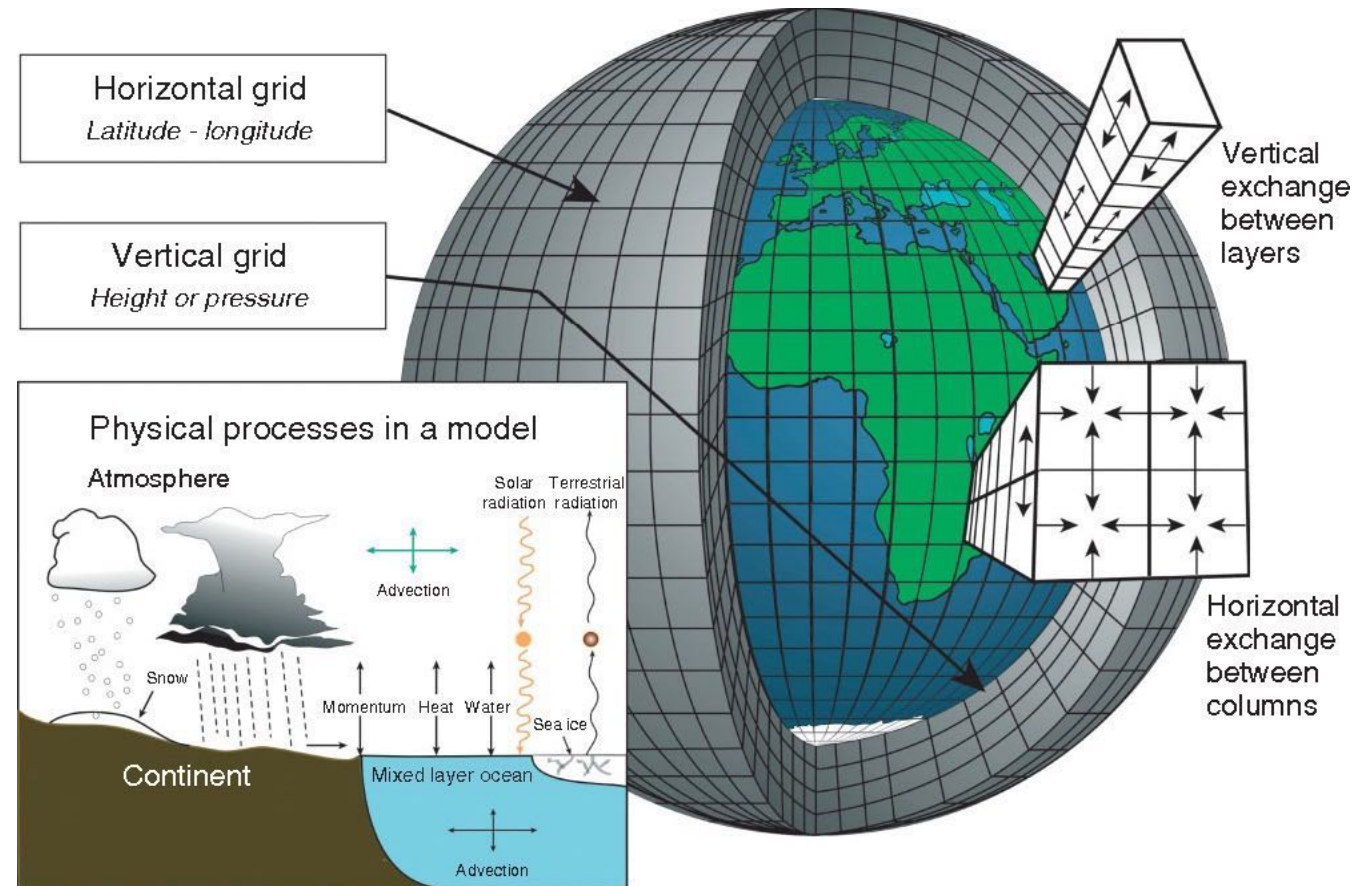
Globales Modell des MPI für Chemie in Mainz

Max-Planck Institut für Chemie

- Arbeitsgruppe Prof P.Crutzen
- Globales Modell zur Bestimmung von Spurengas-Konzentrationen weltweit
- Validierung mittels Emissionen aus nuklearen Aufbereitungsanlagen (US, UK, FR, RUS)
- Fokus 1: nuklearer Winter
- Fokus 2: Berechnung Ozonabbau in der Stratosphäre über N_2O , FCKW, Strahlung, Temperatur
- Nobelpreis für Chemie, 1995

Mein bescheidener Beitrag:

- Erweiterung des MPI Modells für Aerosolpartikel



Globales Modell des MPI für Chemie in Mainz

Numerical simulation of the global three-dimensional distribution of aerosol particles

Aerosol Partikel

0.1 to 100 μm

Quellen

Aride Gebiete weltweit

Ozeane weltweit

Antrieb

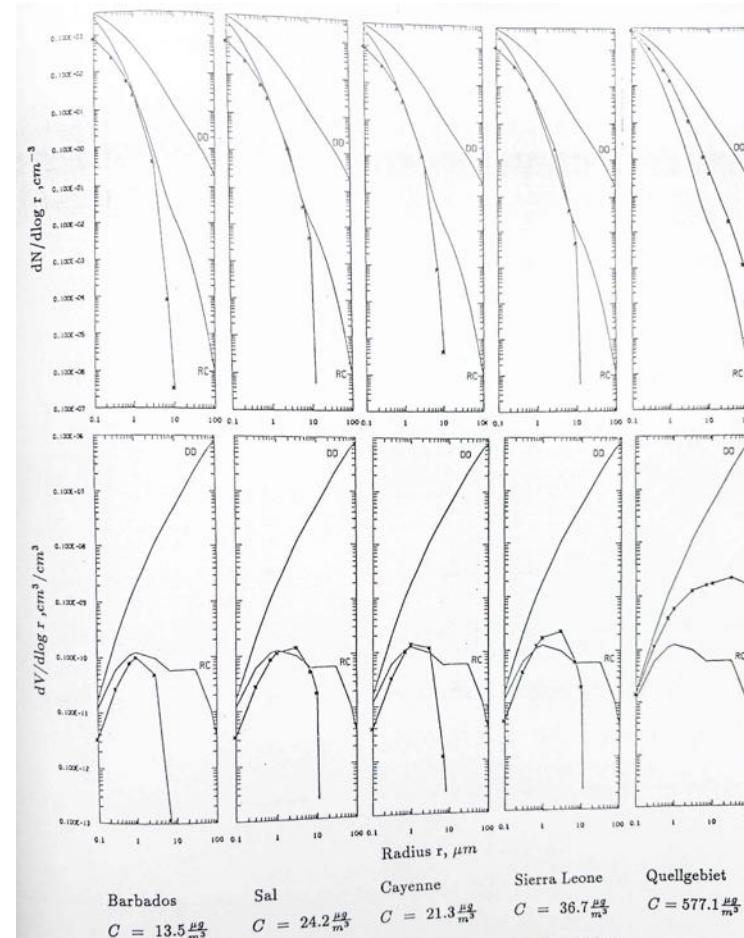
Wind mit u-/v-/w-Komponente

Senken

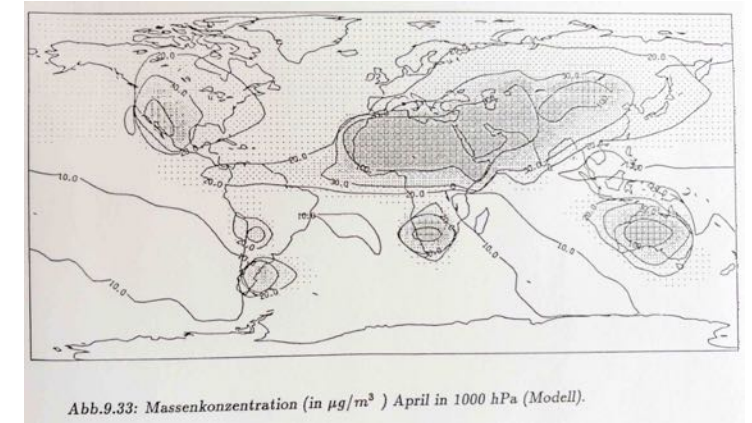
Sedimentation via
Navier-Stokes Gleichung

$$m_p \frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = 6\pi\mu a(\mathbf{u} - \mathbf{v}_p) + (\rho_p - \rho_f)V_p\mathbf{g}$$

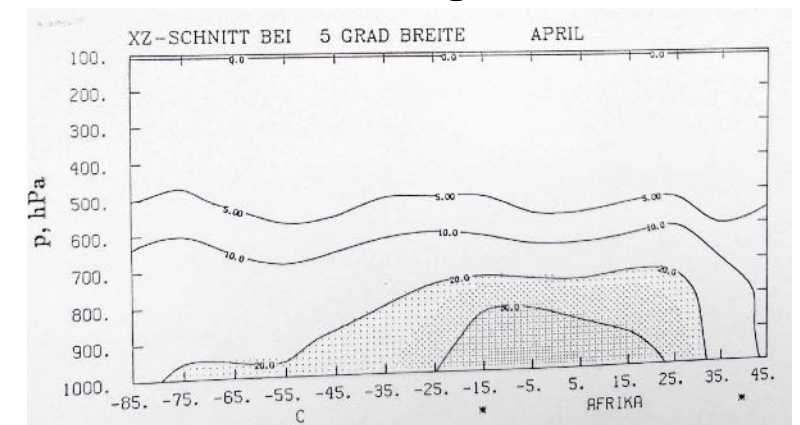
Anzahl- und Größenverteilung



Horizontale Verteilung



Vertikale Verteilung



Aerosole wichtig für Klima-Modelle: Kondensationskerne für Wolken → Albedo Änderung Erde

Globales Modell des MPI für Chemie in Mainz

Numerical simulation of the global three-dimensional distribution of aerosol particles

Ferntransport Aerosole

- 180 Mio To / Jahr aus der Sahara
- davon 28 Mio To / Jahr Ablagerung im Amazonas Gebiet
- davon 22.000 To / Jahr Phosphor als Dünger des Regenwaldes



Der phosphorreiche Staub ersetzt Teile der kontinuierlichen Nährstoff-Verluste
→ stabilisiert die langfristige Nährstoffbilanz des Amazonas-Ökosystems.

Teil 2

Zwei wesentliche Beiträge von CO₂ zum Leben auf der Erde



Unsere Sonne



$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right) - 1}$$

idealisiertes Sonnen
Spektrum mit
Maximum bei Grün
(500 nm = 0.5 µm)

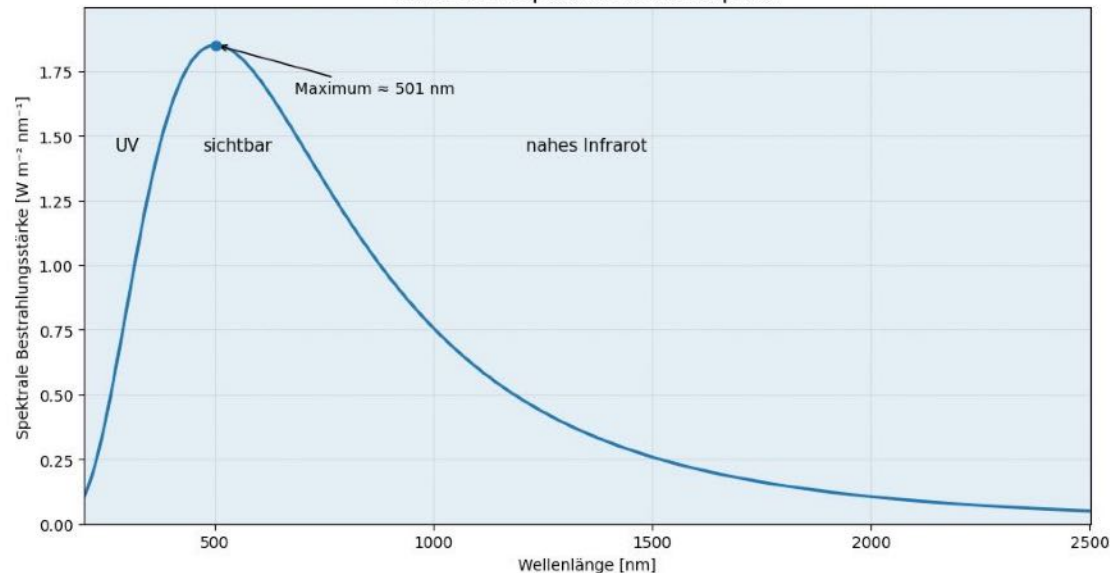
Temperatur der Sonne

Innen: mehrere Millionen Grad

Äußere Hülle (Photosphäre): nur ca. 5.800°K

Strahlungsgesetz von Max Planck

Spektrum des Sonnenlichts außerhalb der Erdatmosphäre
ohne atmosphärische Absorption



Wichtig für uns Menschen

Sonnen-Temperatur

wäre die Temperatur der äußeren Hülle 10% heißer, wäre das Strahlungs-Maximum Richtung violett verschoben und die abgestrahlte Leistung ca.45% höher. Leben auf der Erde wäre nicht mehr möglich.

Sonnenwind und kosmische Strahlung (Teilchenstrahlung)

Geladene Teilchen werden durch das Magnetfeld der Erde abgelenkt.

Harte UV-Strahlung der Sonne

Absorption durch Spurengas Ozon (O₃ für UV-C) in der Stratosphäre - sowie Sauerstoff (O₂ für Far-UV)

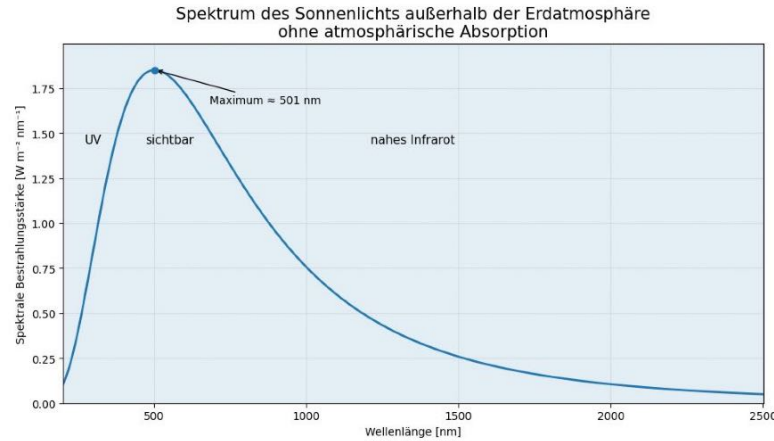
Einstrahlung der Sonne und Spurengase (O_3 , H_2O , CO_2 , ...)



Temperatur Sonne

innen: Mio. Grad / außen: 5.800°C

Maximum bei Grün ($500\text{ nm} = 0.5\text{ }\mu\text{m}$)



gefährliches
kurzwelliges
UV
(200-300 nm)
durch
Spurengas
Ozon (O_3)
absorbiert

Spurengas: Wasserdampf (H_2O)
mit starken Absorptionsbanden

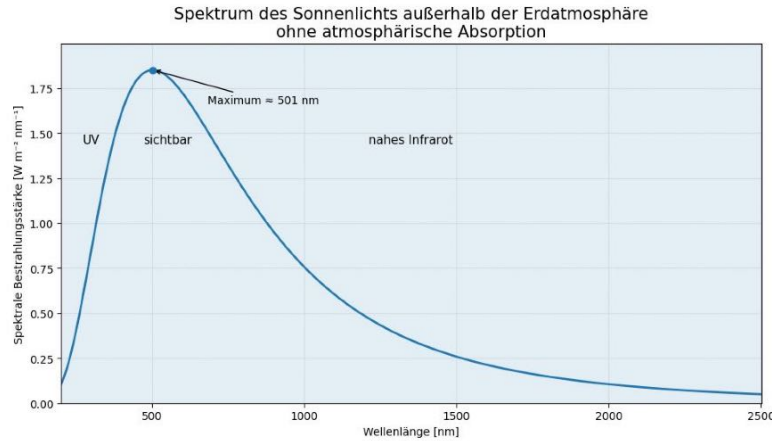
Einstrahlung der Sonne und Spurengase (O_3 , H_2O , CO_2 , ...)



Temperatur Sonne

innen: Mio. Grad / außen: 5.800°C

Maximum bei Grün ($500\text{ nm} = 0.5\text{ }\mu\text{m}$)



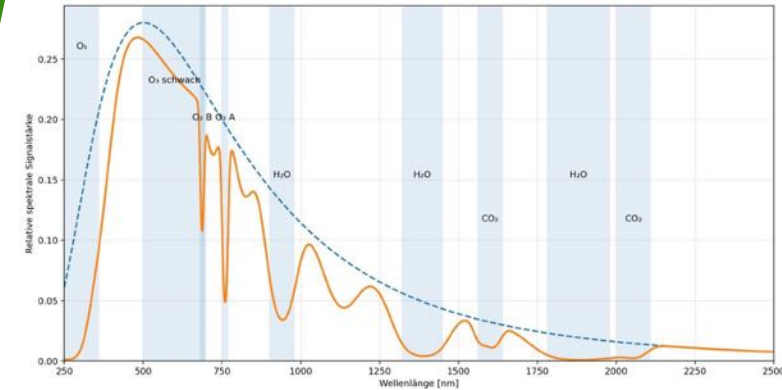
gefährliches
kurzwelliges
UV
($200\text{-}300\text{ nm}$)
durch
Spurengas
Ozon (O_3)
absorbiert

Spurengas: Wasserdampf (H_2O)
mit starken Absorptionsbanden

Erdboden: Sonnenstrahlung wird **reflektiert** oder **absorbiert** und in **Wärme** ($4\text{-}50\text{ }\mu\text{m}$) umgewandelt

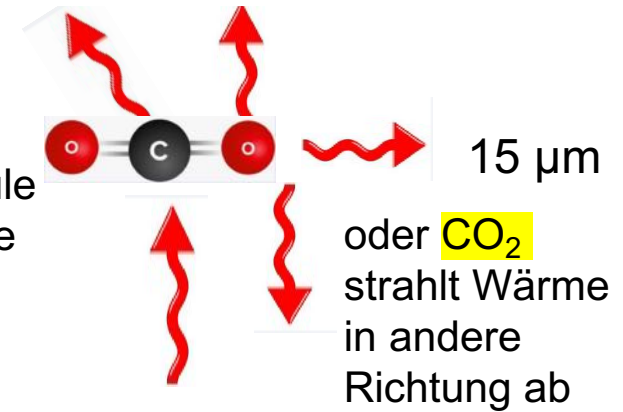


Satellit mit Strahlungs-Detektor



Spektrum
(orange) nach 2
Atmosphären
Durchgängen
(abwärts und
aufwärts)

CO_2 Molekül schwingt und
stößt an N_2 und O_2 Moleküle
→ erhöht kinetische Energie
→ Erhöhung Luft-Temp.



Erkenntnis Nr. 1

Klima-relevante Spurengase ermöglichen das Leben auf der Erde

Absorption gefährlicher UV-C Strahlen

- Ozon (O_3)

Erhöhung der Mittel-Temperatur

Aktive Spurengase

- Kohlendioxid (CO_2)
- Methan (CH_4)
- Lachgas / Distickstoffmonoxid (N_2O)
- Halogenierte Kohlenwasserstoffe (HKW)
- Ozon (O_3)

Passives Spurengas

- Wasserdampf (H_2O)



Erkenntnis Nr.1

- Temperatur der Erde ohne Atmosphäre: **-18°C**
- mit Atmosphäre inklusive Spurengasen: **+ 15°C**

Fixierung von atmosphärischem Kohlenstoff in Biomasse

Photosynthese C3 Pflanzen

- Input: Sonnenlicht, Wasser, grüne Pflanzenteile (Chloroplasten mit Chlorophyll), CO_2
- Output: O_2 , Glucose, Stärke
- Zentraler Teilschritt: Kohlenstoff-Fixierung, also der Einbau von CO_2 in organische Kohlenstoffverbindungen im Calvin-Zyklus.



Kohlenstoff Fixierung in AGB

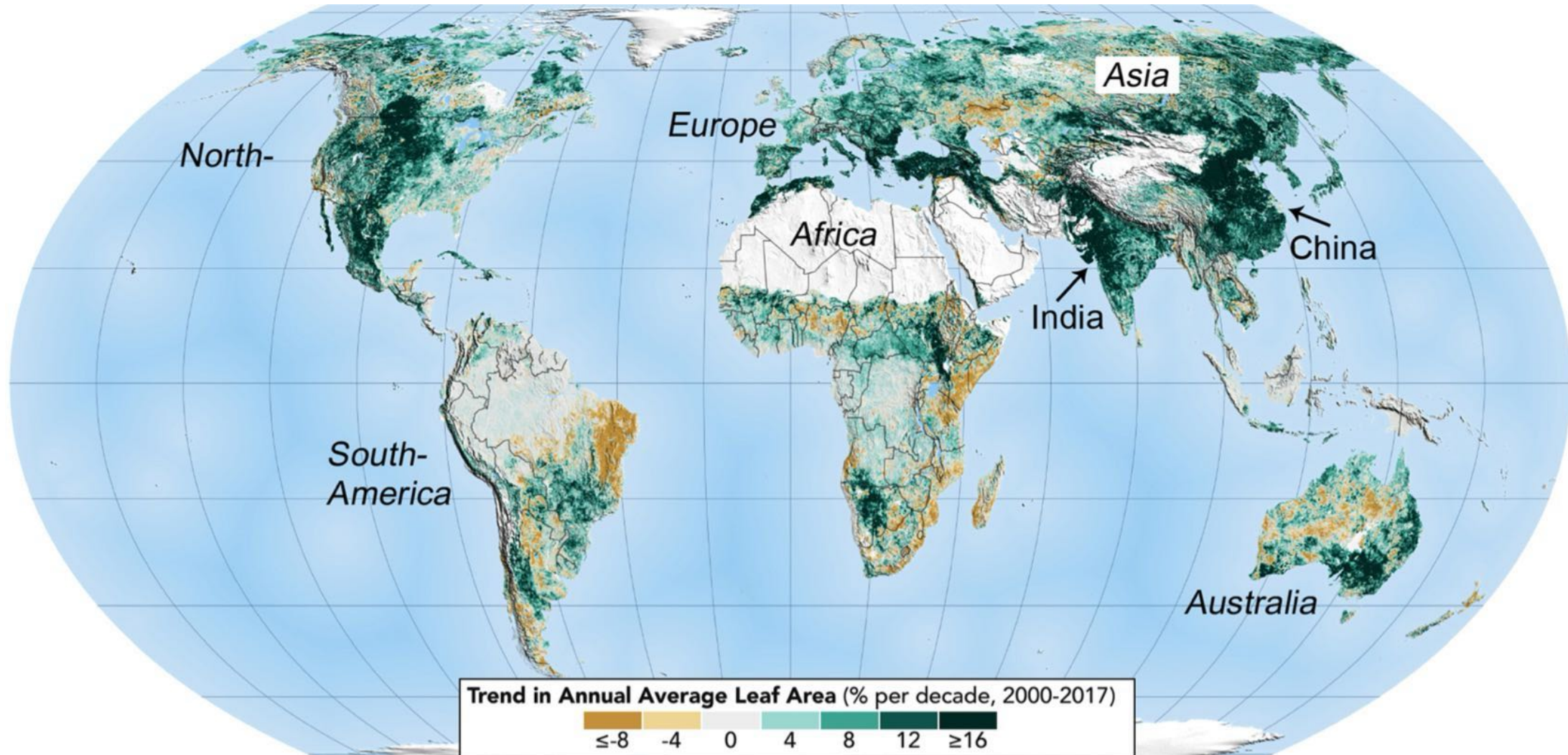
- Above Ground Biomass (AGB): Grüne Pflanzenteile plus Trauben
- AGB Trockenmasse bei *Vitis vinifera* mit 1 m² Standfläche: große Varianz: 0,8 – 1,5 kg
- Bei 1,0 kg AGB (Trockenmasse) und Kohlenstoffanteil 45% wird 0,45 kg Kohlenstoff (C) pro Rebe fixiert aus 1,65 kg atmosphärischem CO_2
- Pro Hektar werden 16,5 Tonnen CO_2 aus der Luft entfernt und mit 4,5 Tonnen C in der AGB gebunden

Erkenntnis Nr.2

- Spurengas CO_2 ist ein wesentlicher Bestandteil der Photosynthese, der beim Aufbau von Sauerstoff und Biomasse für Nahrungsmittel (Kartoffeln, Weizen, Reis, Zuckerrohr, Mais (C4)) beteiligt ist.

Weltweit steigende CO₂ Konzentrationen

Der Beitrag des CO₂ Fertilization Effect (CFE) zum “Global Greening”



Teil 3

Satellitenbeobachtungen und mathematische Approximations- Verfahren zur Bestimmung langjähriger CO₂ Zeitreihen



ESA Satellit ENVISAT – Start 2002 in Kourou / French Guayana



ESA Satellit ENVISAT



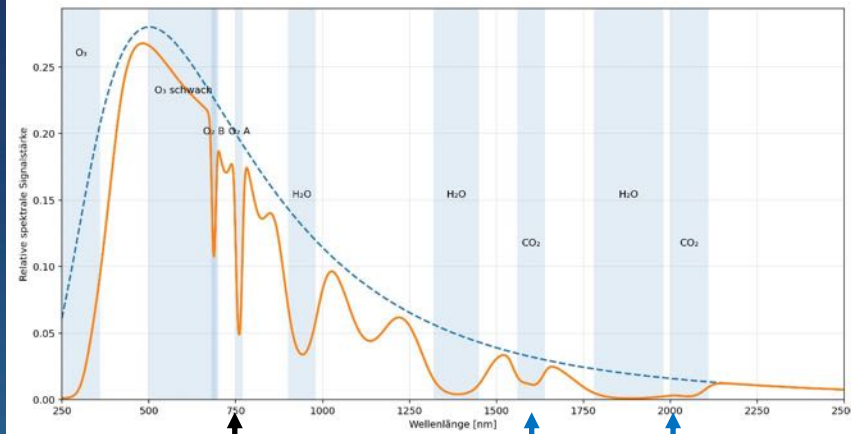
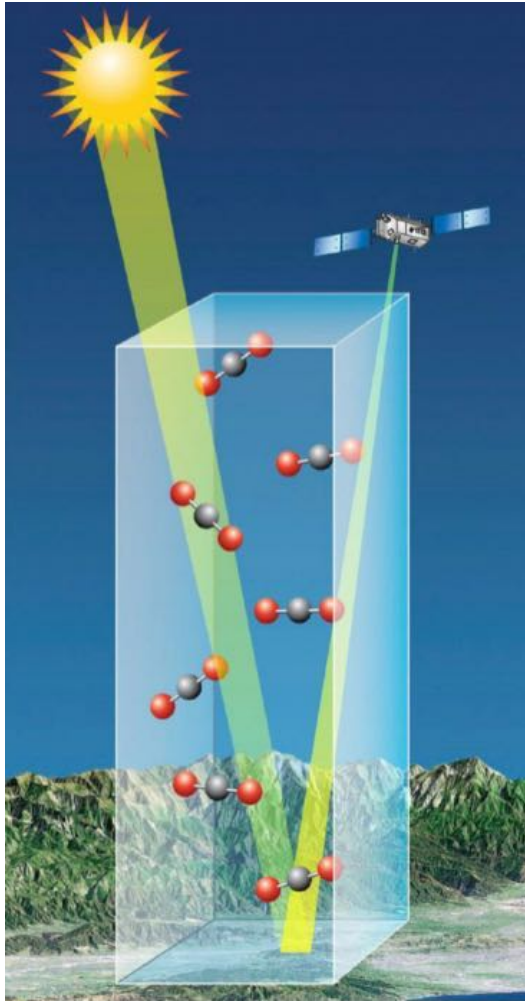
Gewicht: 8 Tonnen (300 kg Treibstoff für Bahnmanöver)

Flughöhe: knapp 800 km

Flugbahn: Sun Synchroner Orbit (SSO)

Messung der XCO₂ Konzentration der Erdatmosphäre

1) Satellit

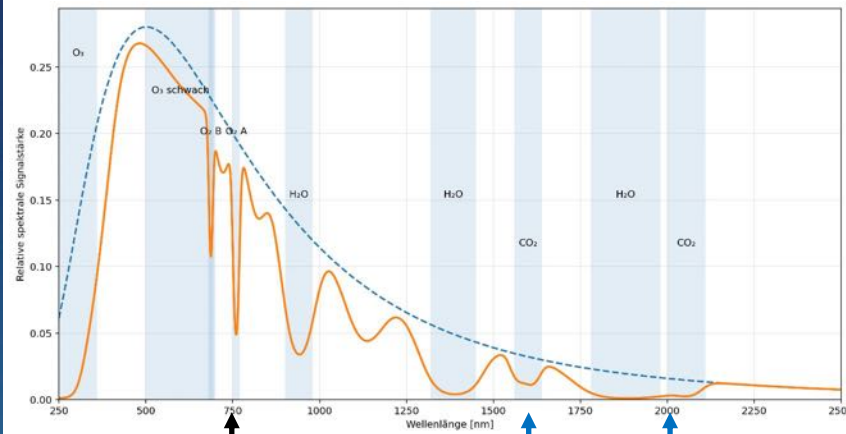
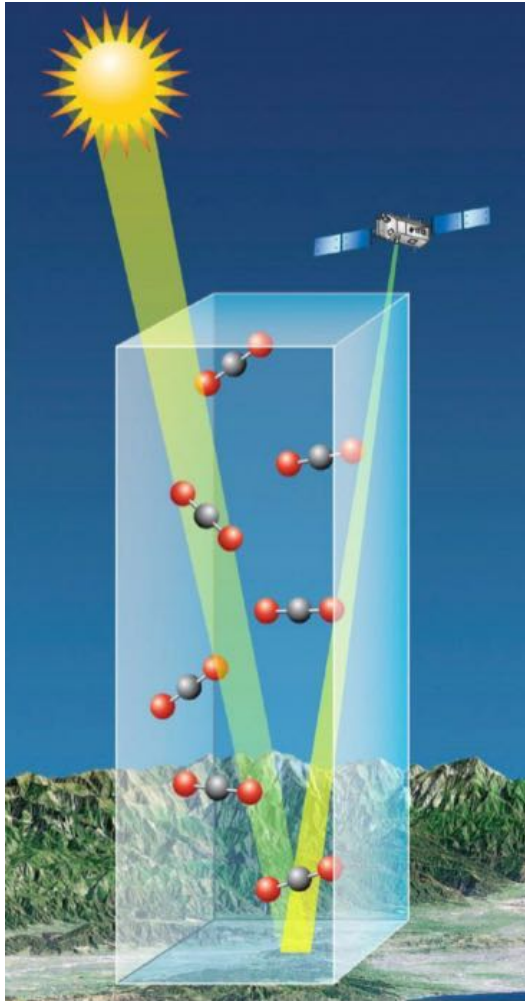


O₂ Bande zur
Bestimmung der
Luftmenge

CO₂ Banden zur
Bestimmung der
CO₂ Konzentration

Messung der XCO₂ Konzentration der Erdatmosphäre

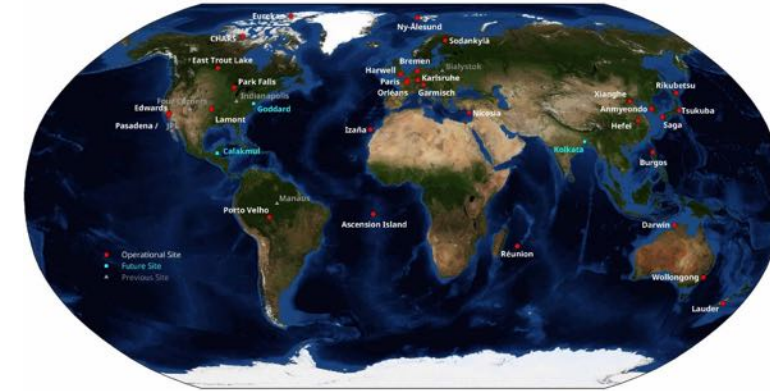
1) Satellit



O₂ Bande zur
Bestimmung der
Luftmenge

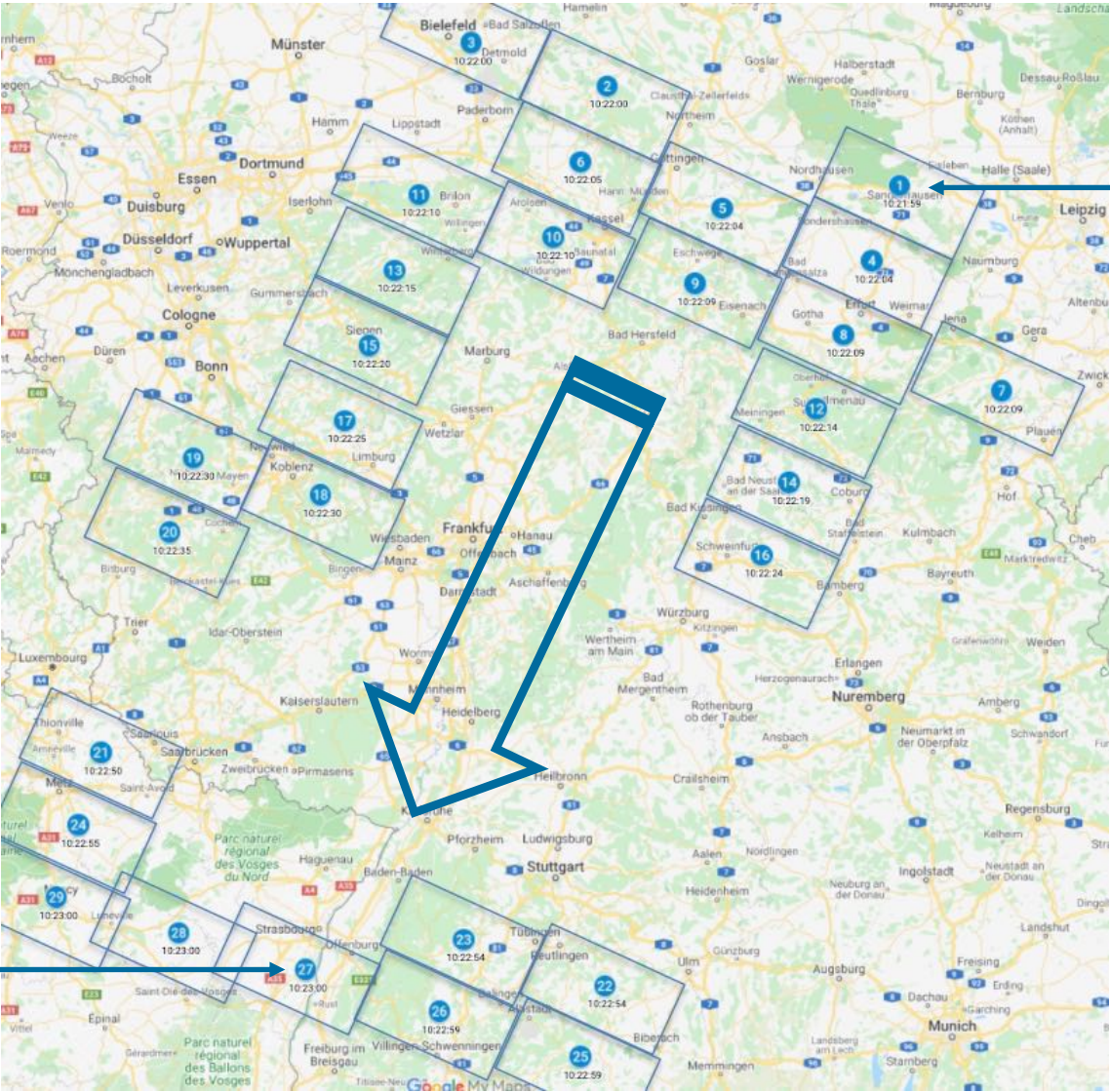
CO₂ Banden zur
Bestimmung der
CO₂ Konzentration

2) Total Carbon Column Observing Network → mit hochpräzisen FTIR-Spektrometer



TCCON observations site Pasadena, California, USA

ESA Satellit ENVISAT – Flugbahn am 13.April 2003



Pixel 1 um 10:21

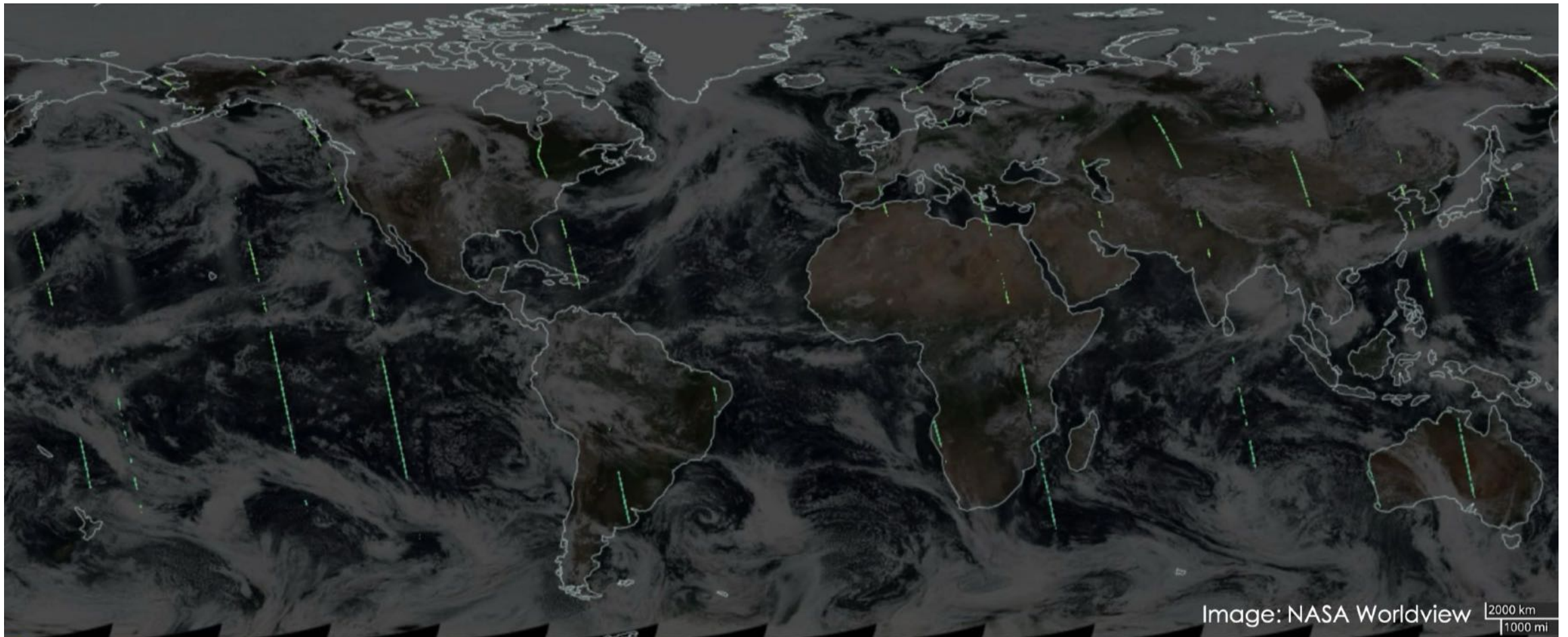
10:21:59	
googleLocation	51.4709015, 11.2681885
XC02	375.3781738

- 1 10:21:59
- 2 10:22:00
- 3 10:22:00
- 4 10:22:04
- 5 10:22:04
- 6 10:22:05
- 7 10:22:09
- 8 10:22:09
- 9 10:22:09
- 10 10:22:10
- 11 10:22:10
- 12 10:22:14
- 13 10:22:15
- 14 10:22:19
- 15 10:22:20
- 16 10:22:24
- 17 10:22:25
- 18 10:22:30
- 19 10:22:30
- 20 10:22:35
- 21 10:22:50
- 22 10:22:54
- 23 10:22:54
- 24 10:22:55
- 25 10:22:59
- 26 10:22:59
- 27 10:23:00
- 28 10:23:00
- 29 10:23:00

Pixel 27 um 10:23

10:23:00	
googleLocation	48.4067993, 7.6665955
XC02	377.9163818

NASA Satellit OCO-2 – Beobachtungen am 24.Mai 2021

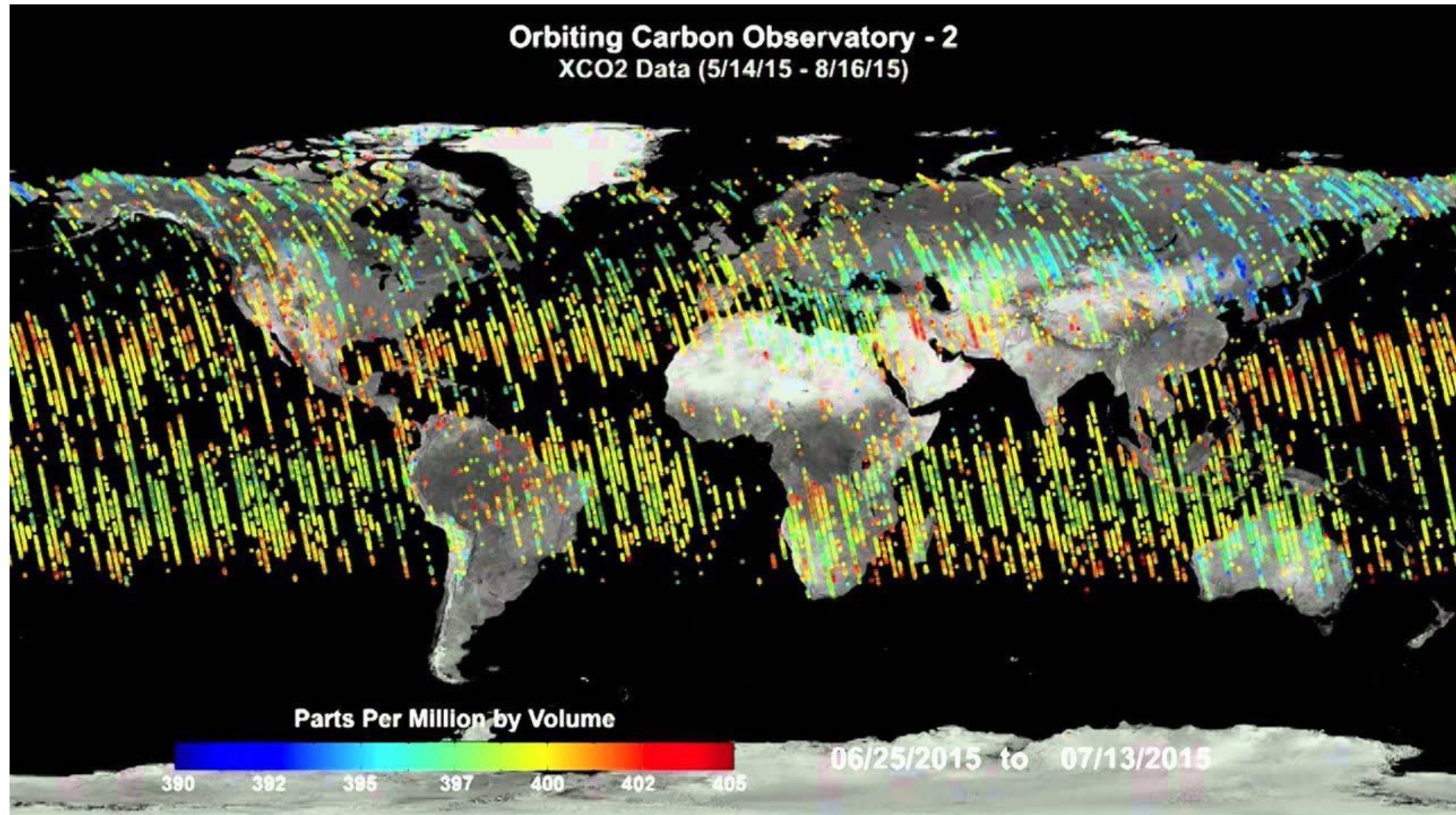


OCO-2 orbits the Earth 14.5 times a day, gathering data over sunlit, cloud-free regions. This image shows the locations of successful XCO₂ measurements for a single day (24th May 2021).

NASA's Applied Remote Sensing Training Program



NASA Satellit OCO-2 – Beobachtungen über einige Wochen in 2015

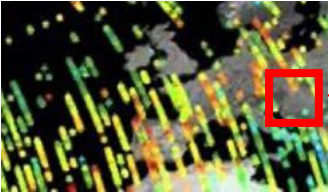


Approximations-Verfahren XCO2SAT+

SAT data Input

Data product L2 EMMA based on 4 satellite instruments (Reuter et al., 2020, 2023)	 ENVISAT ESA / EU 01/2003 - 03/2012	 GOSAT JAXA / JP 04/2009 - today	 OCO-2 NASA / USA 09/2014 - today	 GOSAT-2 JAXA / JP 02/2019 - today
---	--	--	---	--

SAT data gap



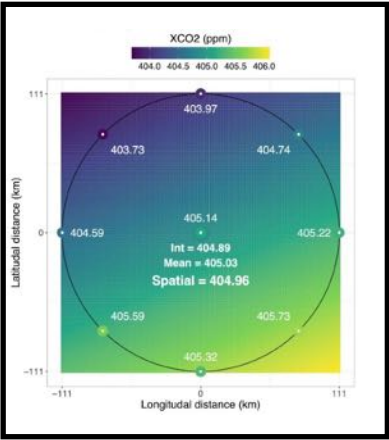
SAT data gap at Location L1 and Date yyyy-mm

XCO₂ Approximation Method XCO2SAT+

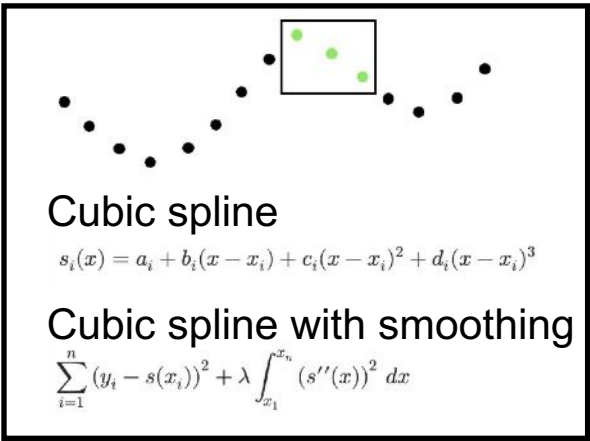
Approximation approach

- Select SAT data around Loc.
- Spatial approximation
- Spatial + temporal approx.
- Temporal approx. (Spline, ...)
- Quality filter → whitespace

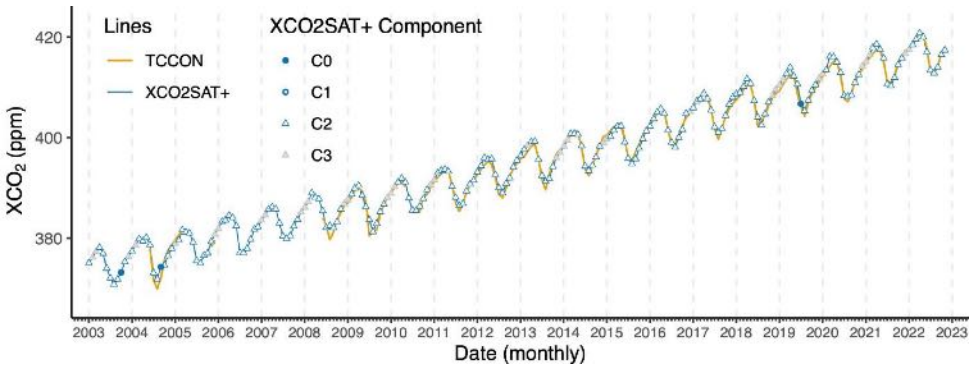
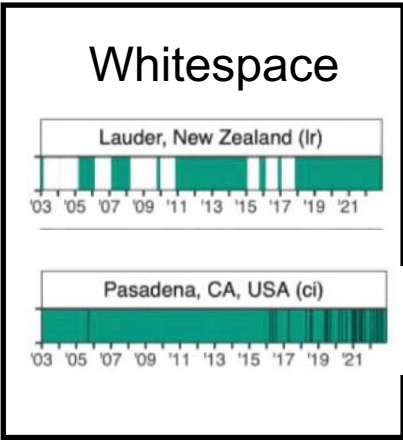
(1) Spatial



(2) Temporal



(3) Quality filter



Monthly mean XCO₂ concentration for > 25,000 locations worldwide
Location size: 7,774 km² – 95 km distance between adjacent polygon centers

Time intervall: Jan 2003 – Dec 2022
Data validation against 28 worldwide TCCON sites: MAE = 0.76 ppm

Data Product XCO2SAT+

Wefers et al., 2025, DOI <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2025.108408>

XCO2SAT+ Method: Validation and Comparison

Absolute Error (AE)

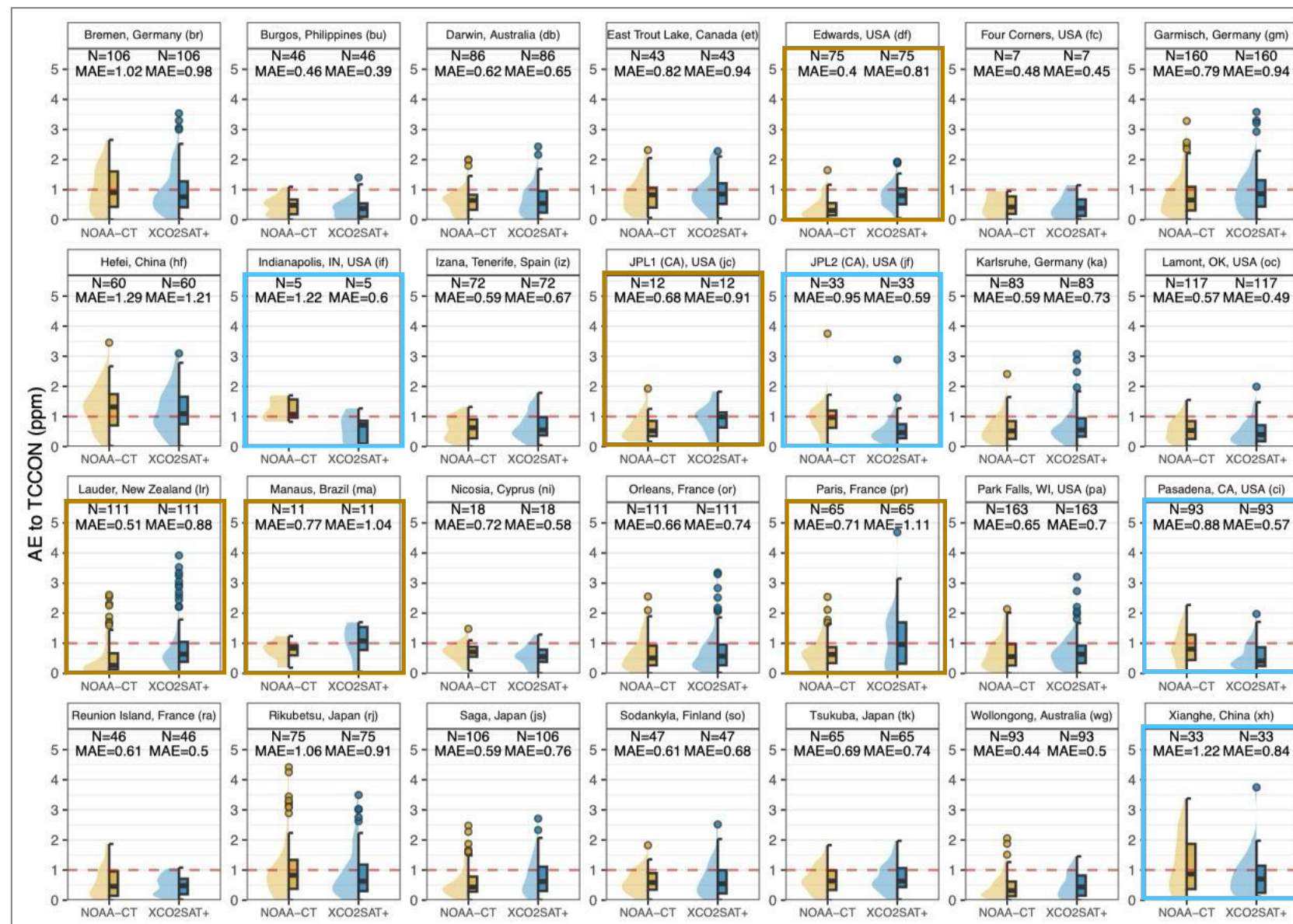
- for XCO₂ concentrations (ppm)
- at 28 TCCON sites between NOAA CT2022 and XCO2SAT+ and years 2009 to 2021
- N: contributing number of month
- Boxplot data,
 - minimum: Q1-1.5 interquartile range (IQR),
 - maximum: Q3 + 1.5 IQR)

Symbols for XCO2SAT+ vs NOAA CT

- better (≥ 0.2 ppm)
- worse (≥ 0.2 ppm)

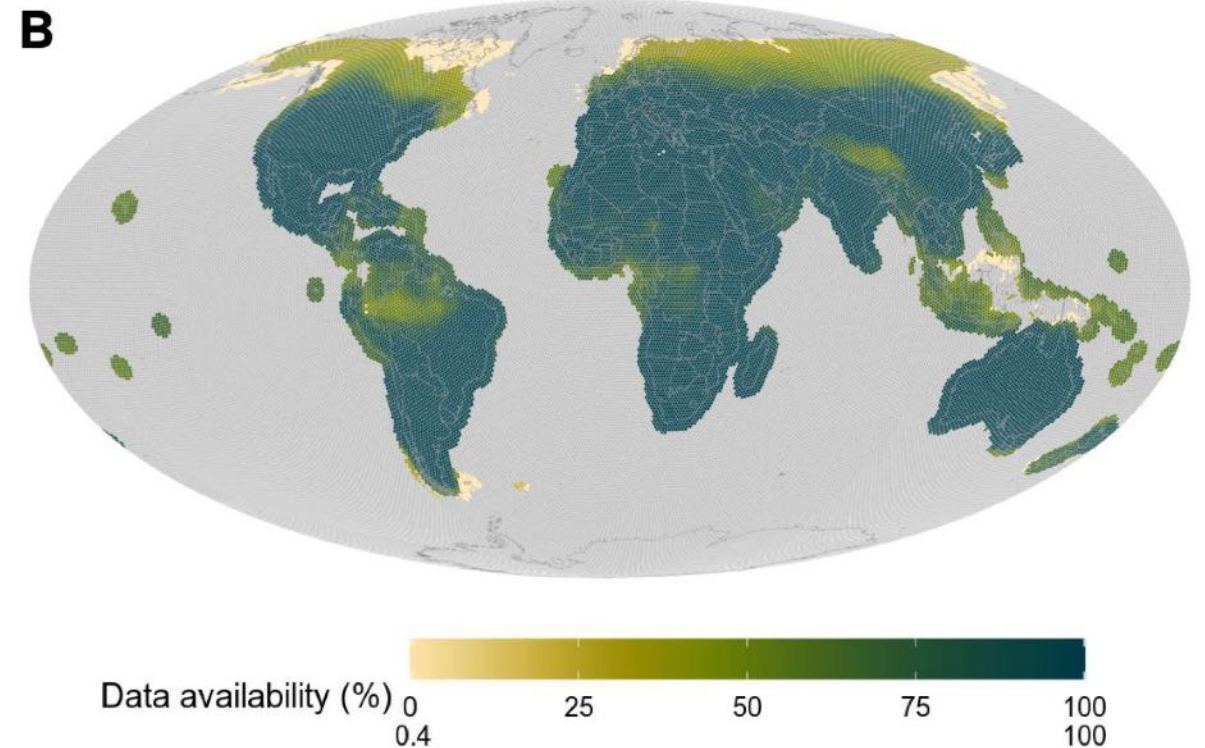
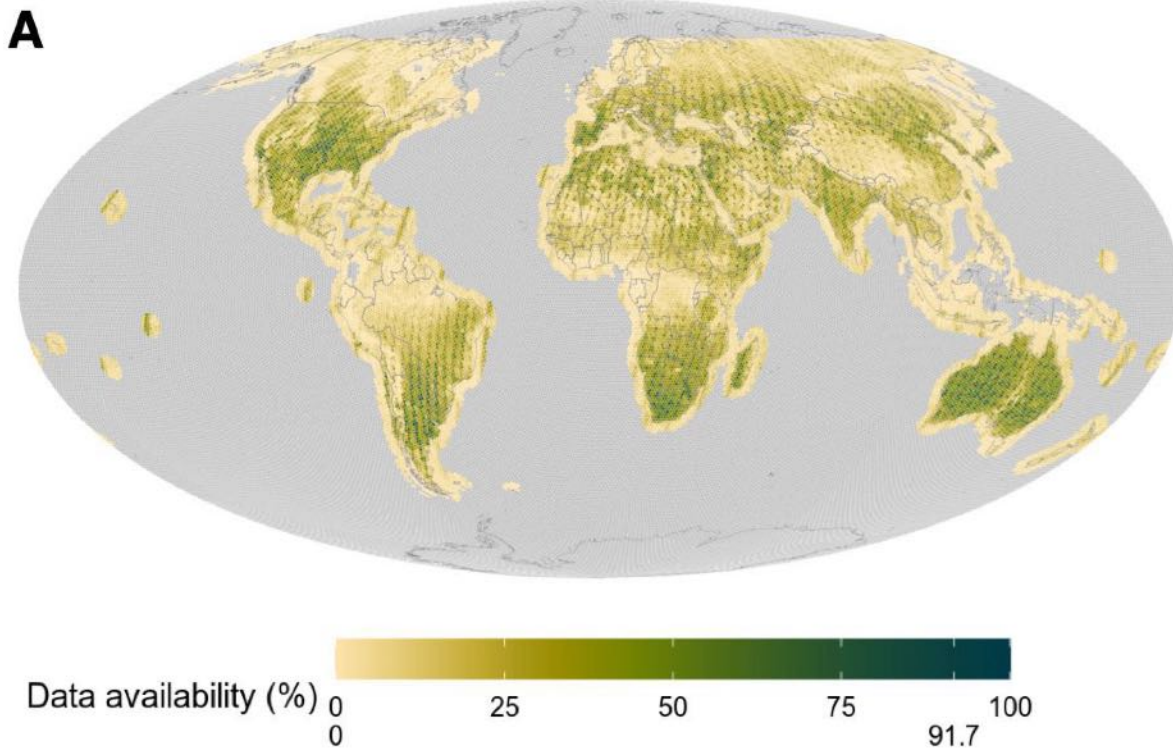
Result for all sites

- XCO2SAT+: MAE 0.76 ppm
- NOAA CT2022: MAE = 0.71ppm



Approximations-Verfahren XCO2SAT+

XCO2SAT+ erhöht die Datenverfügbarkeit für 25.000 Lokationen weltweit für 20-jährige Zeitserie



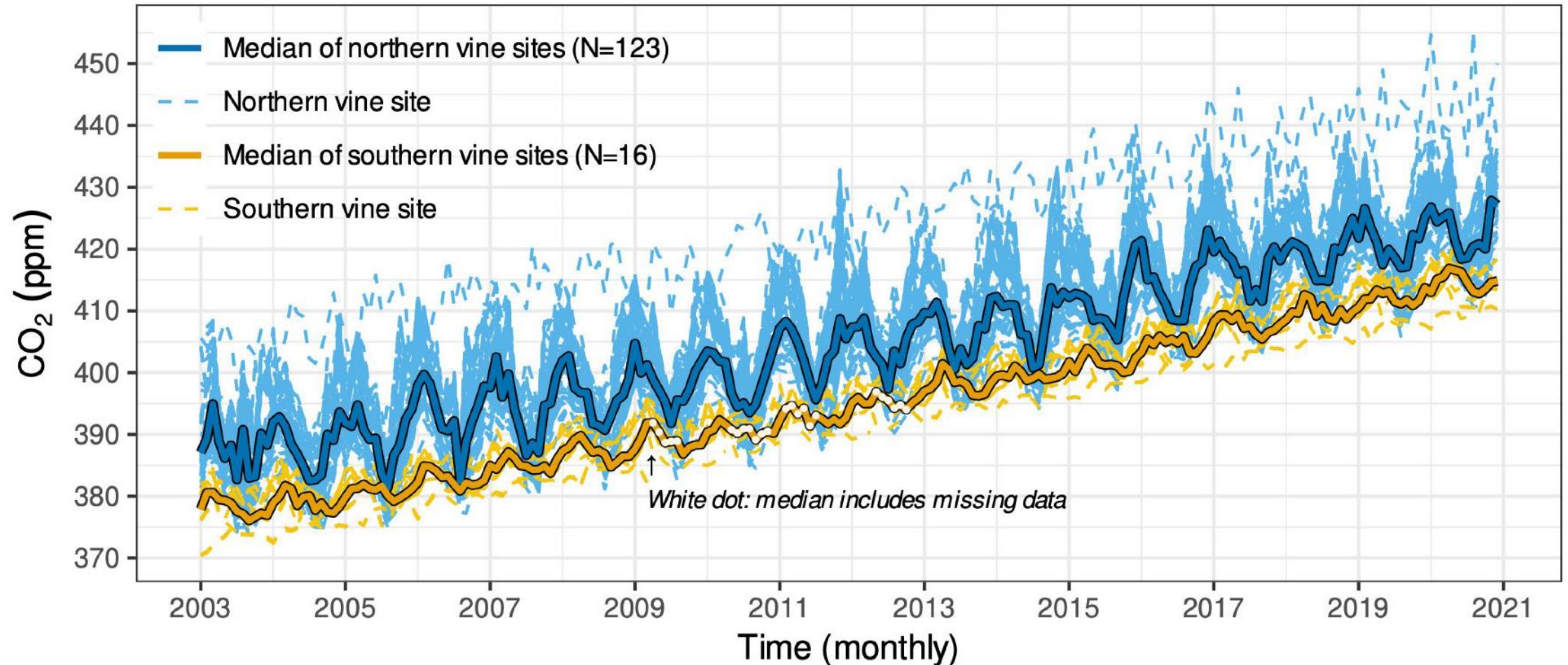
Vorteile des XCO2SAT+ Verfahrens

- Sehr lange Zeitserie über 20 Jahre
- XCO₂ Konzentrationen verfügbar weltweit 1) auf einem Gitter mit 25.000 Lokationen (95 km Entfernung zwischen Polygonen) und 2) beliebigen weltweiten Lokationen → höhere räumliche Auflösung als die meisten globalen Spurengas Modelle
- Genauigkeit von MAE = 0.76 ppm - vergleichbar zu globalen Spurengas Modellen

Approximations-Verfahren XCO2SAT+

XCO2SAT+ erlaubt die Approximation von CO₂ für beliebige Lokationen.

Hier: ausgewählte Weinberge von der Nord- und Südhalbkugel

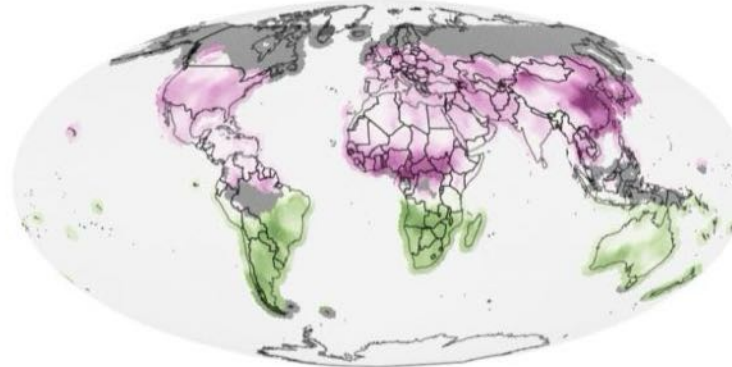


XCO2SAT+ Method: Delta-XCO₂ concentrations in Spatial Maps

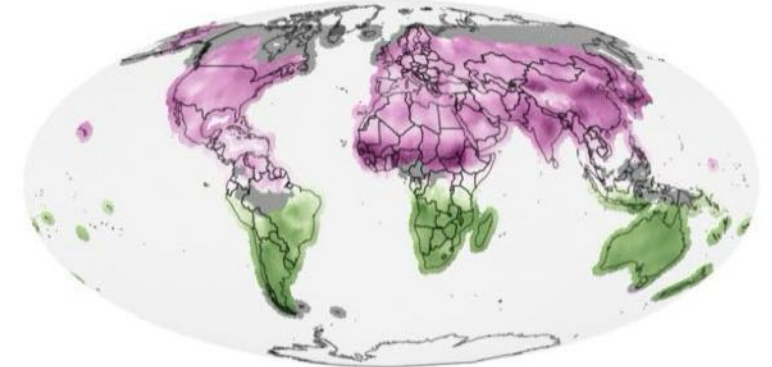
Delta XCO₂ Determination

- Latitude band median XCO₂ concentration represents XCO₂ **background** for the latitude (LAT)
- Latitude (LAT) band: width +/- 10° LAT related to selected location in 1° LAT increments
(modified from Hakkarainen et al., 2019, Buchwitz et al., 2021)
→ Background conc. of LAT band
- ΔXCO_2 conc. = **deviation** between site-specific monthly XCO₂ conc. from XCO2SAT+ and monthly latitude band median
- Video animation for 2003 - 2022

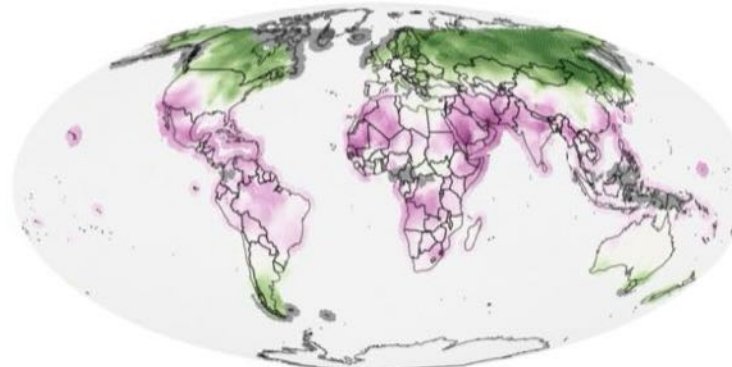
2019 / 01 — Mean XCO₂ : 409 ppm



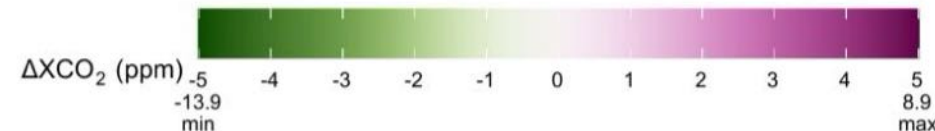
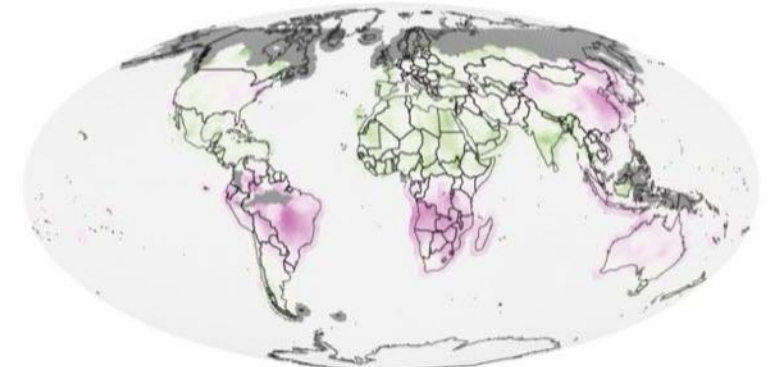
2019 / 04 — Mean XCO₂ : 411 ppm



2019 / 07 — Mean XCO₂ : 409 ppm



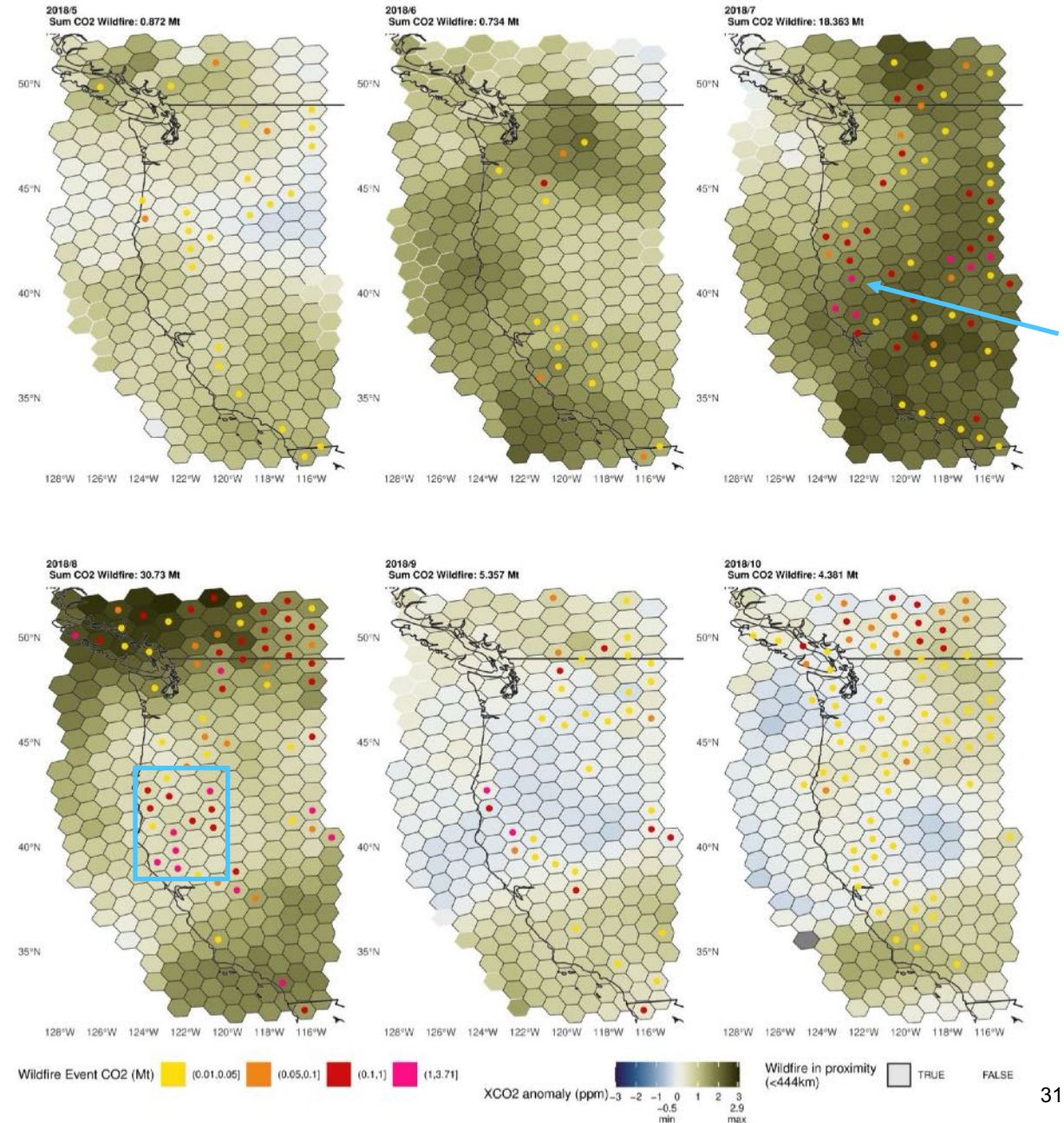
2019 / 10 — Mean XCO₂ : 409 ppm



XCO2SAT+ Method: Case Study: XCO₂ Anomalies (2)

California (CA), USA, 2018

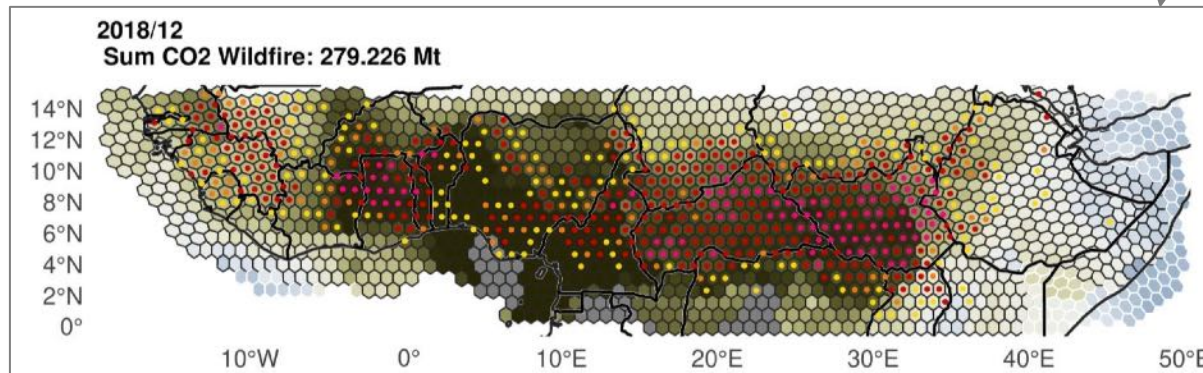
- **Occurance:** every other year
- Multiple separate large fire systems: 95 five people died and 22,000 buildings destroyed
- Peak CO₂ emissions attributed to fire: July 2018 (18 Mt) and Aug 2018 (31 Mt)
- Blue arrow: Carr Fire
- Blue area: Mendocino Fire Complex
- Maximum XCO₂ anomaly of selected area:
 - July 2018: 2.5 ppm
 - August 2018: 2.9 ppm
- NOAA wind monitoring: strong south-easterly winds - deviation from long-term trend
- Future research: overlay monthly wind patterns



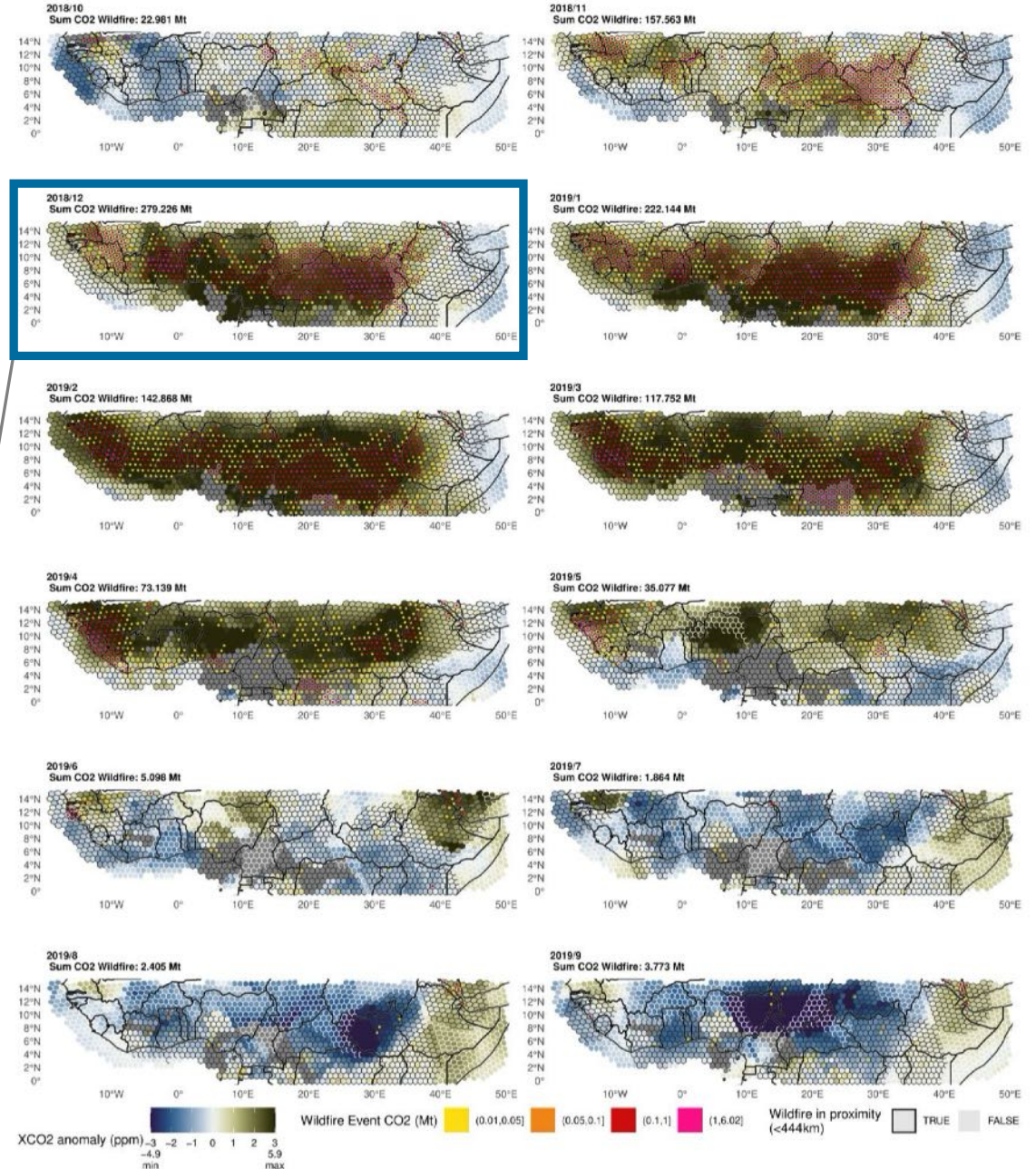
XCO2SAT+ Method: Case Study: XCO₂ Anomalies (3)

Tropical Africa north of equator, 2018 - 2019

- **Occurance:** every year Nov – Apr (dry season)
- Several thousand small-scale fires caused by lightning, man-made fires in preparation for agriculture and tropical timber extraction (Prof.J.Goldammer, MPI for Chemistry, Mainz)
- Maximum XCO₂ anomaly of selected area:
 - Dec 2018: 5.6 ppm (280 Mt month / GER annual 580 Mt)
 - Jan 2019: 5.9 ppm
- Fires are extinguished by monsoon at the beginning of the rainy season (ITCZ northward shift during Q2)



Wefers et al., 2025



... auch die NASA ist interessiert





Status of OCO-2 and OCO-3: OCO-2/OCO-3 Science Team Telecon

Vivienne Payne and Abhishek Chatterjee
for the OCO-2/OCO-3 Science Team
(Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology)
November 04, 2025

© 2025 California Institute of Technology.
US Government sponsorship acknowledged

OCO-2/OCO-3 –Science Team Telecon

1

JL

TC

SK

SF

CO

RL



HN

DR

< 1/4 >

