

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Sentinel-basierte Atmosphärenprodukte zur Bewertung des Einflusses von Verkehrsemissionen auf die Luftqualität in Deutschland (S-VELD)

S-VELD Abschlussveranstaltung
Online, 16. Februar 2022

Pieter Valks und das S-VELD Team



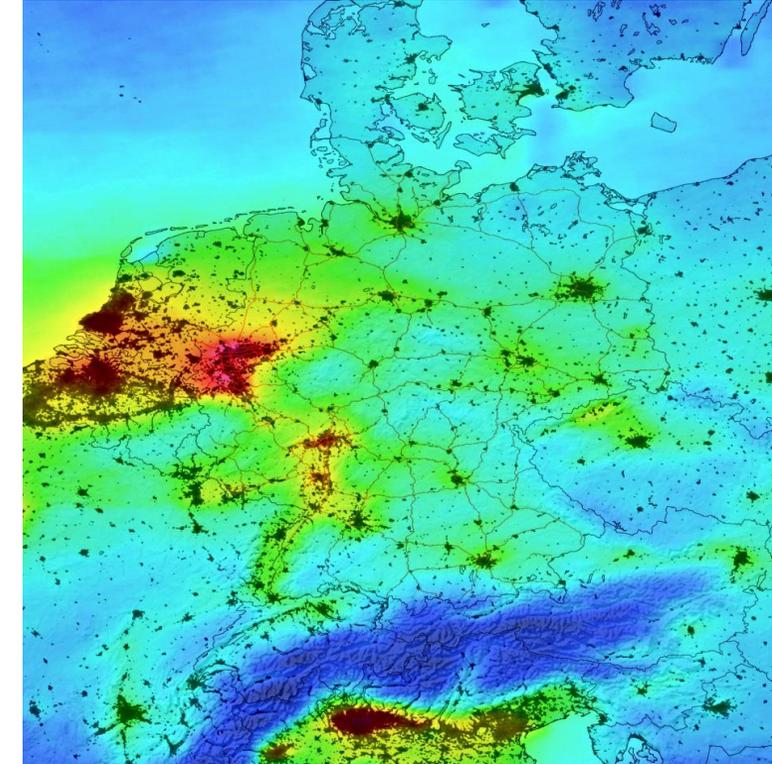
Freie Universität  Berlin



- Luftverschmutzung ist umwelt- und gesundheitsschädlich
 - ~ 400.000 vorzeitige Todesfälle pro Jahr in der EU
 - Wichtigste Schadstoffe: Feinstaub und Stickstoffdioxid (NO₂)
 - EU Luftqualitätsrichtlinie : Grenzwerte werden oft überschritten
- Verkehr gilt als ein wichtiger Verursacher der Luftverschmutzung
 - Kfz Emissionen: Feinstaub, NO_x, VOCs, CO, Ammoniak, (Ozon)
- Ferntransport von Schadstoffen:
 - Luftverschmutzung hat nicht nur eine regionale Dimension
 - Europäisches und weltweites Problem



- Besseres Verständnis der **verkehrsbedingten Schadstoffemissionen** in Deutschland auf Grundlage neuester **Sentinel-Satellitendaten**
 - Planungsgrundlage und Entscheidungshilfe für Behörden
- Die Copernicus Sentinel Instrumente liefern **tägliche NO₂ and Feinstaub** Informationen einer hohen räumlichen Auflösung
- Nutzung von Sentinel-daten in Kombination mit **Emissions- und Luftqualitäts-Modellierung**
 - Bottom-up Emissionsmodellierung u.a. basiert auf Verkehrszähl-daten (BASt)
 - Top-Down Emissionsanalyse basiert auf Sentinel-data und Luftqualitäts-Modellen



- Projekt im Rahmen des 3. mFUND Förderaufrufs
- Themenbereich: [Datenbasierte Anwendungen im Bereich “Fernerkundung/Satelliten”](#)
- Laufzeit: [August 2018 – Januar 2022](#)

Partner

- **Institut für Methodik der Fernerkundung (IMF), DLR, Oberpfaffenhofen**
- **Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum (DFD), DLR, Oberpfaffenhofen**
- **Institut für Meteorologie, Freie Universität Berlin (FU-B), Berlin**
- **TNO, Climate Air and Sustainability Unit, Utrecht, Niederlande**
- **IVU Umwelt GmbH, Freiburg**

Satellitenbasierten NO₂ und Aerosoldaten aus Sentinel Beobachtungen

Pieter Valks, Jana Handschuh, Ka Lok Chan, Song Liu, Sora Seo, Frank Baier

DLR - Institut für Methodik der Fernerkundung (IMF)

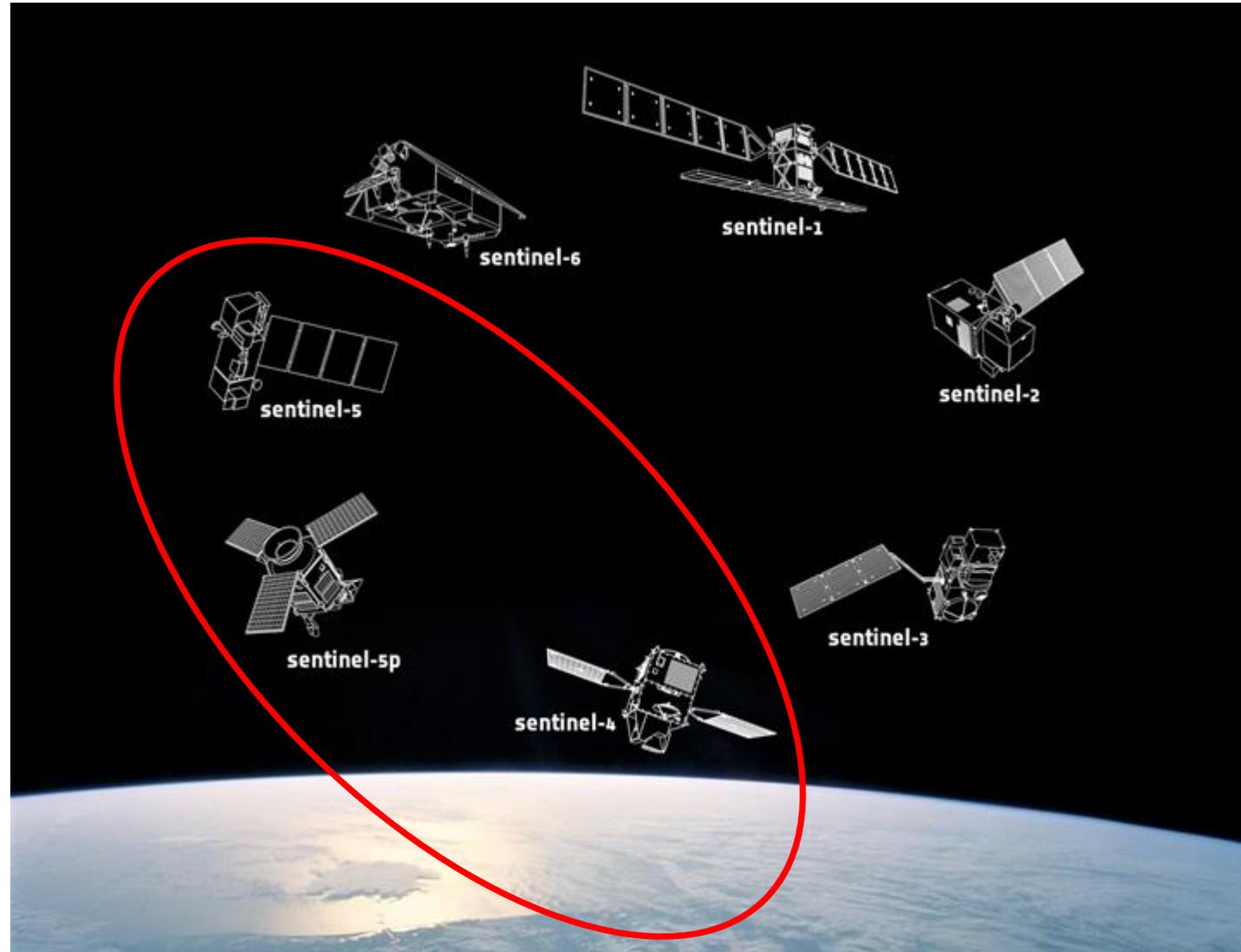
DLR - Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum (DFD)

atmos.eoc.dlr.de/sveld/data/

Atmosphärenbeobachtung mit dem europäischen Copernicus Erdbeobachtungsprogramm

Sentinel-5P/TROPOMI

- operationelle Daten seit Juli 2018
- Polare Satellit mit globale Abdeckung
- Tägliche Messung (~13:30 LT)
- Auflösung: 3.5 x 5.5 km²



Atmosphärenbeobachtung mit dem europäischen Copernicus Erdbeobachtungsprogramm

Sentinel-5P/TROPOMI

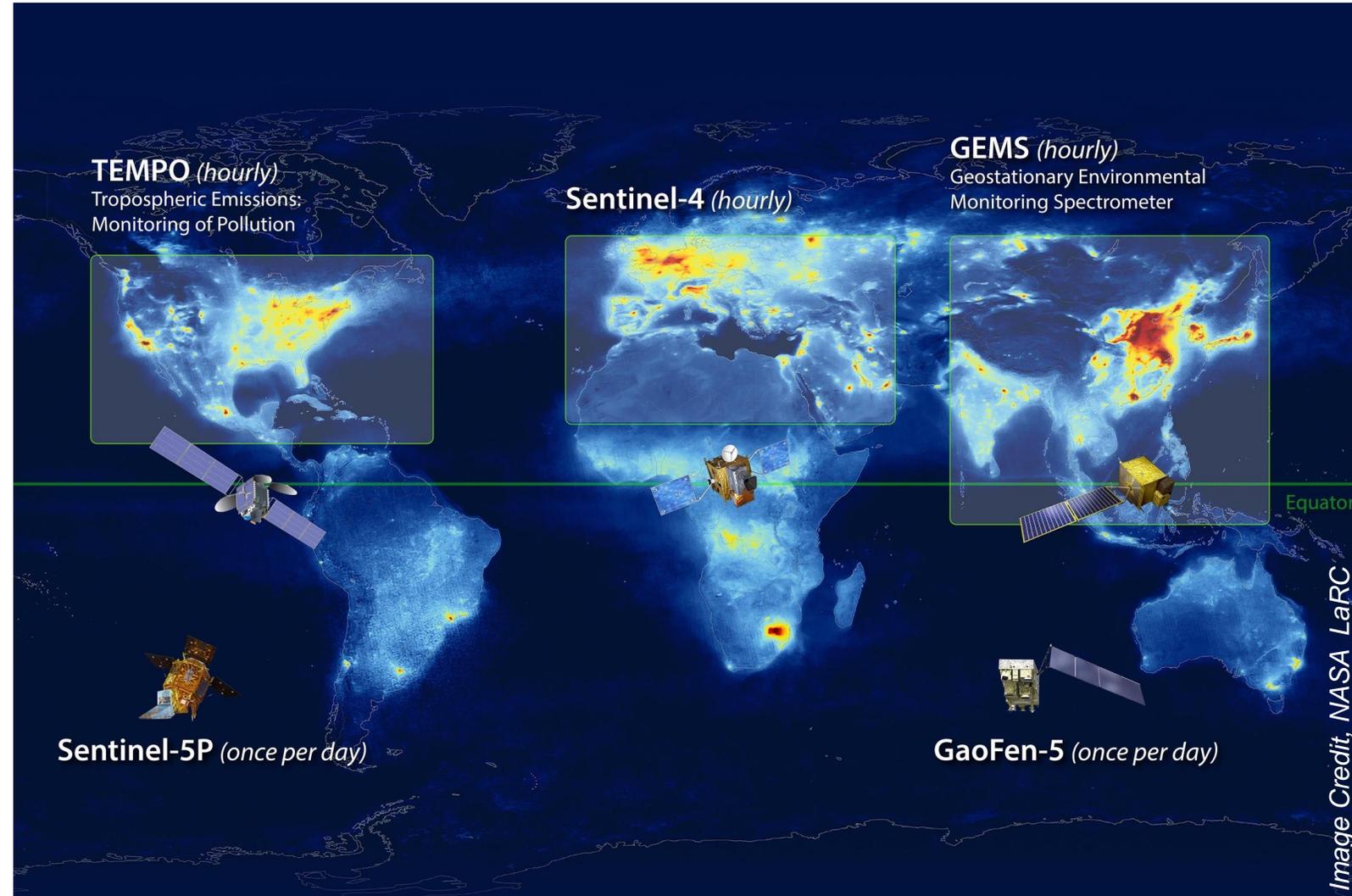
- operationelle Daten seit Juli 2018
- Polare Satellit mit globale Abdeckung
- Tägliche Messung (~13:30 LT)
- Auflösung: 3.5 x 5.5 km²

Sentinel-4 (2024)

- Stündliche Messungen über Europa
- Auflösung: ~ 8 x 8 km²

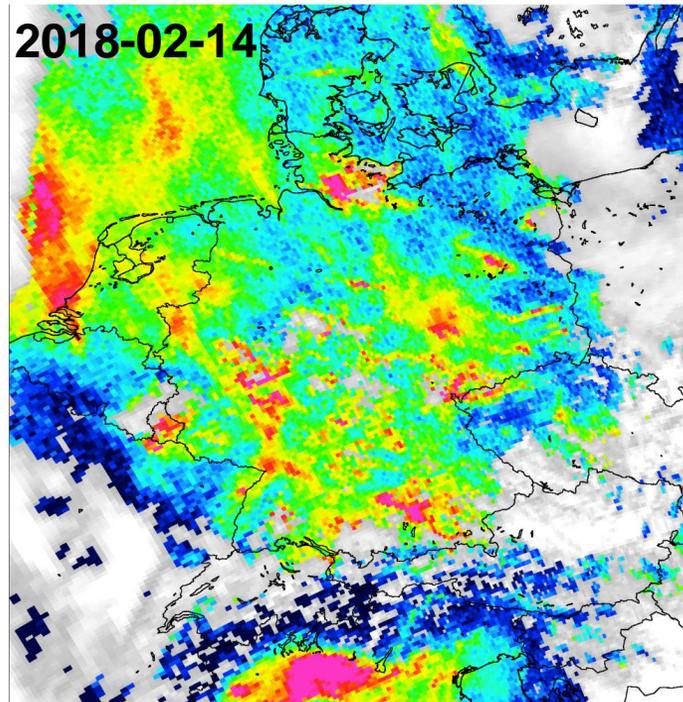
Sentinel-5 (2025)

- Polare Satellit mit globale Abdeckung

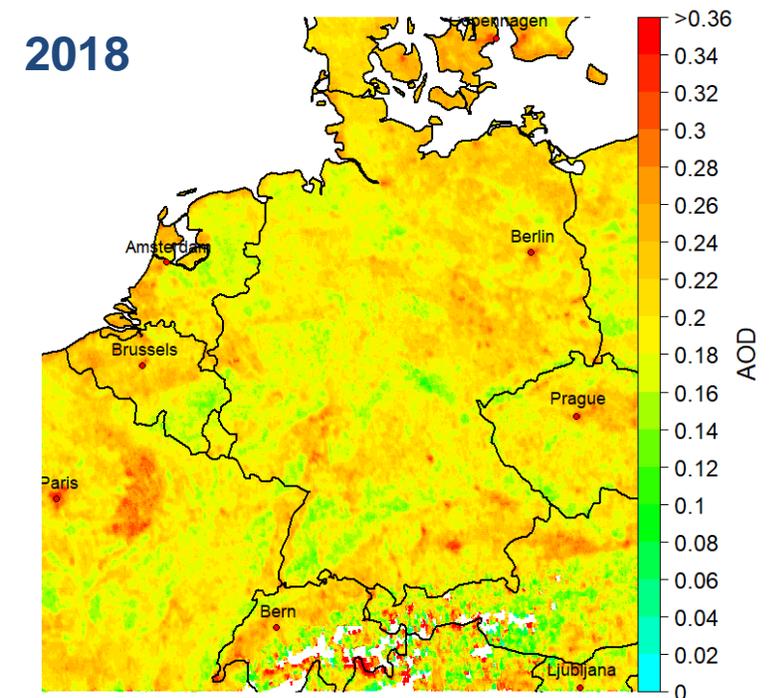


- TROPOMI: Spektrometer im UV und sichtbaren Spektralbereich
- Erfasst wichtige Spurengase (troposphärische Gesamtmenge), Aerosole und Wolkeninformationen
- Auflösung: $\sim 3,5 \times 5,5 \text{ km}^2$

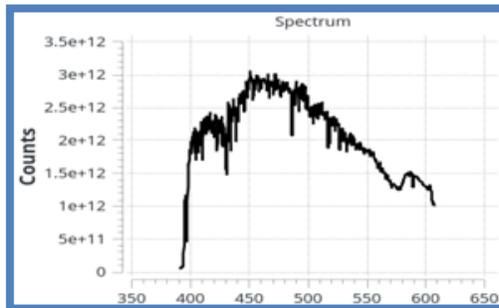
Troposphärisch NO₂



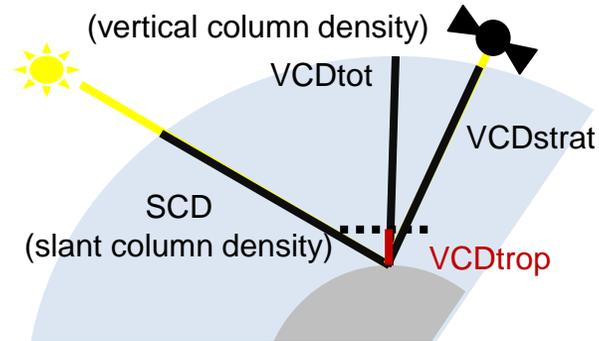
Aerosol-optische Dicke



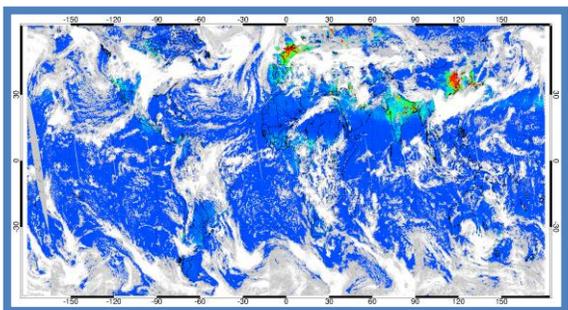
Trop. NO₂ retrieval



Spectrum

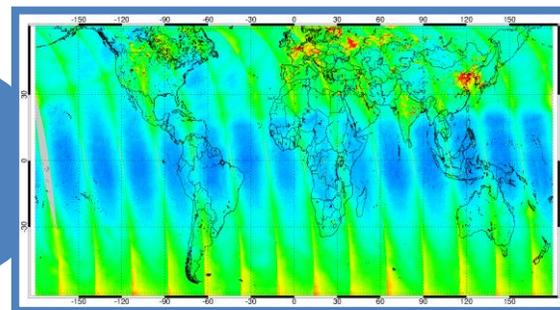


spectral fitting



VCD trop.

tropospheric AMF calculation



SCD

air mass factor (AMF) calculation

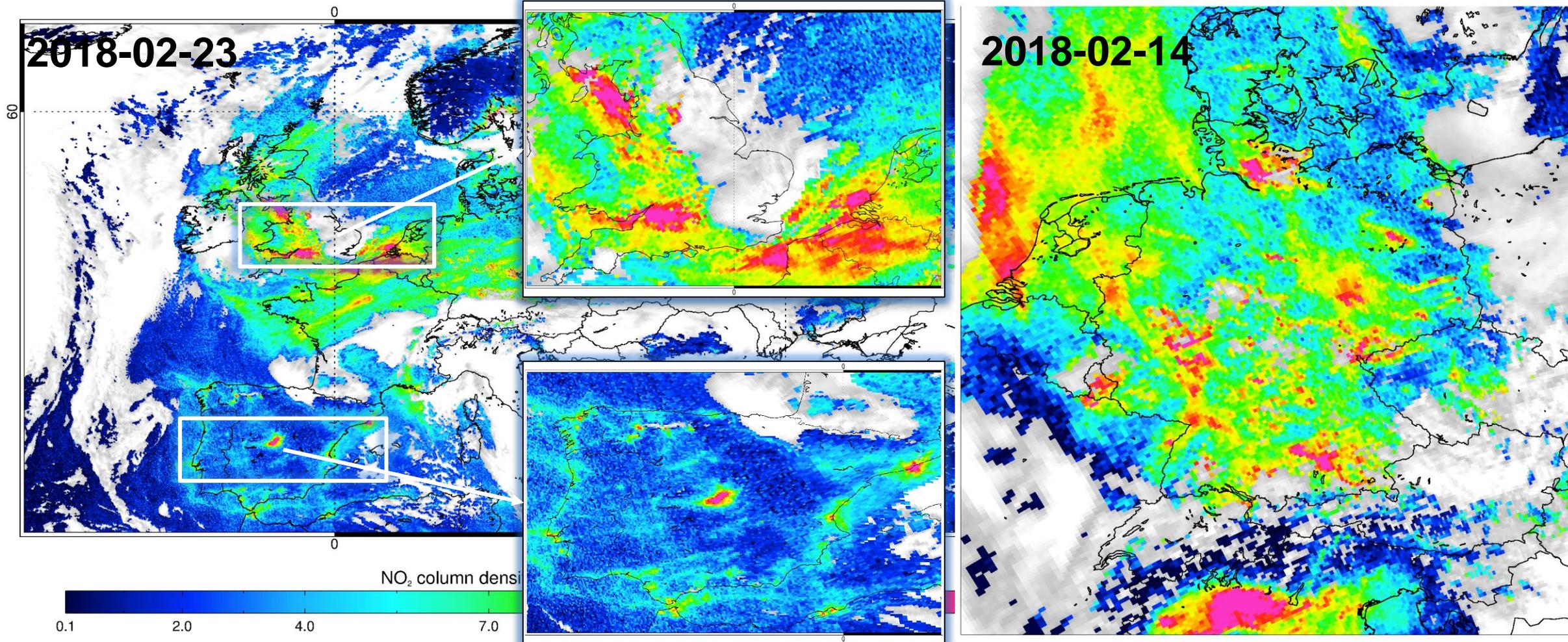


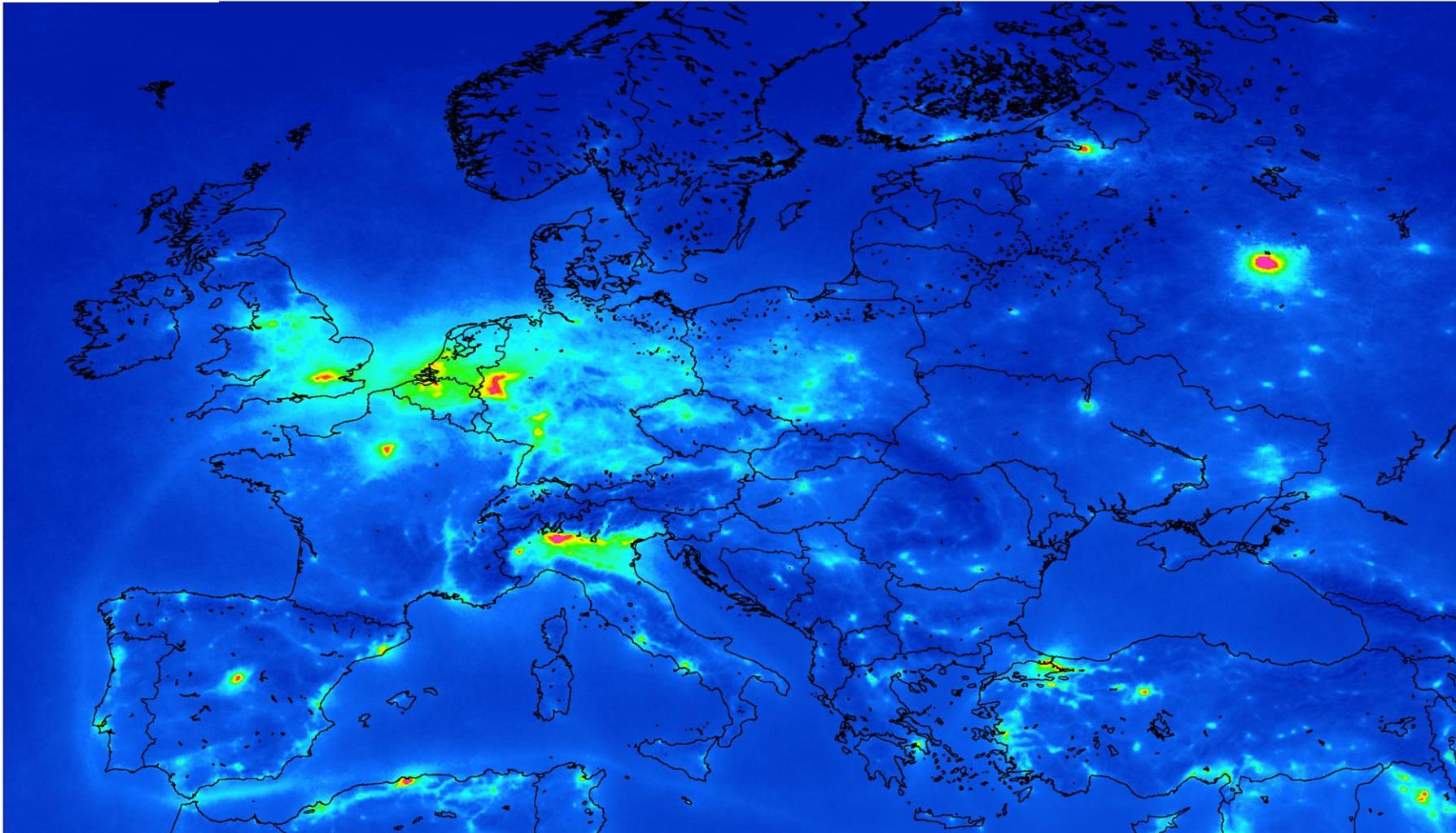
VCD strat.

Stratosphere-Troposphere-Separation



VCD tot.





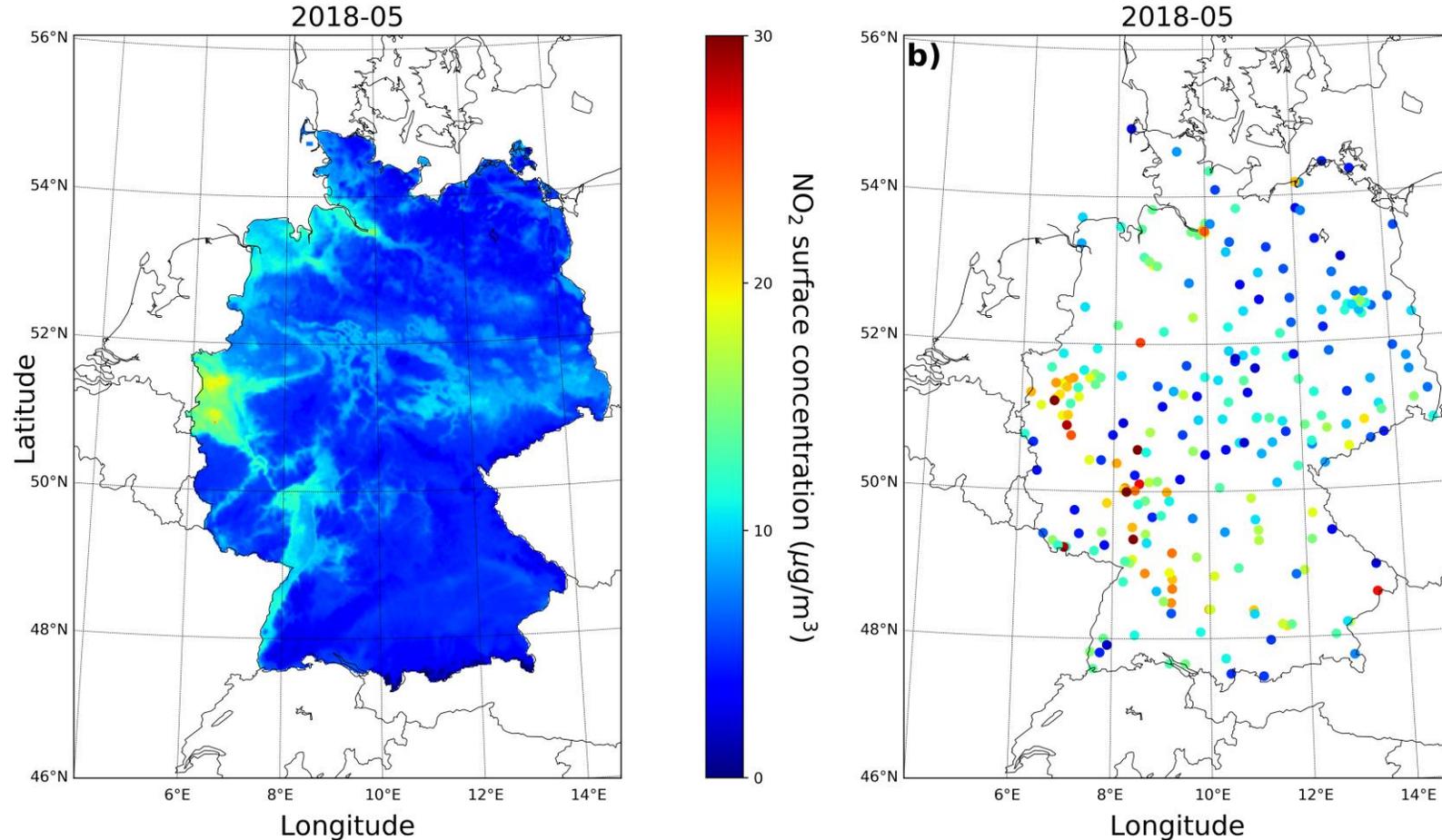
Europa

2018-2020

NO₂ column density [10^{15} molec/cm²]



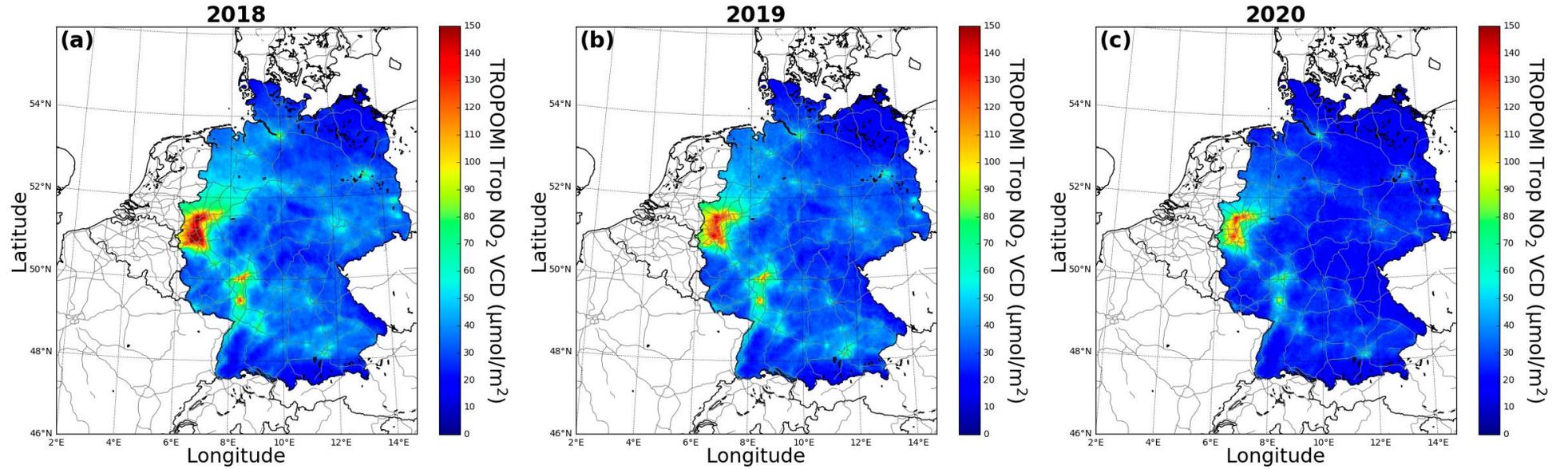
- **Monatliche** Bodenkonzentrationen von NO₂ mit 2 km Auflösung
- **Regressions-analyse (NN model)** basierend auf **S-5P NO₂ Daten**, **meteo. Daten** (Grenzschichthöhe, Windgeschwindigkeit, Temperatur) und **Bodenhöhe**.
- **Training/Verifikation** der Ergebnisse mit **in-situ Beobachtungen** (268 Hintergrund-Stationen)



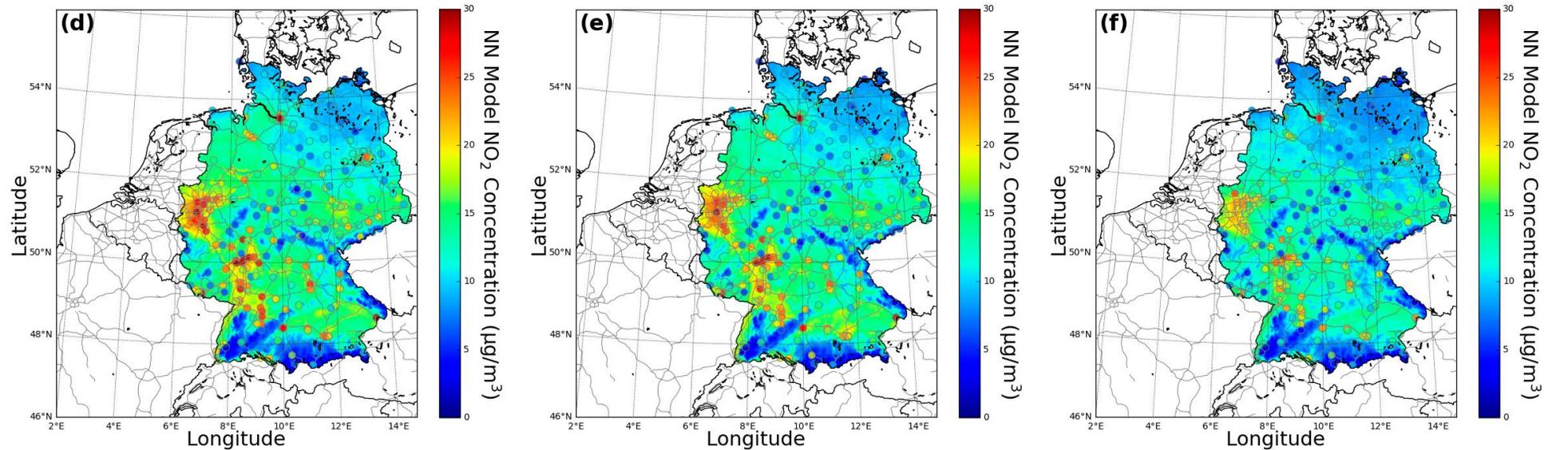
**Bodennahes NO₂ aus S-5P NO₂ Daten
(Mai 2018)**

Bodennahe NO₂: Jahresmittel

Sentinel-5P
Trop. NO₂



Bodennahe
NO₂ Konz.



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Bodennahe PM2.5 Konzentrationen

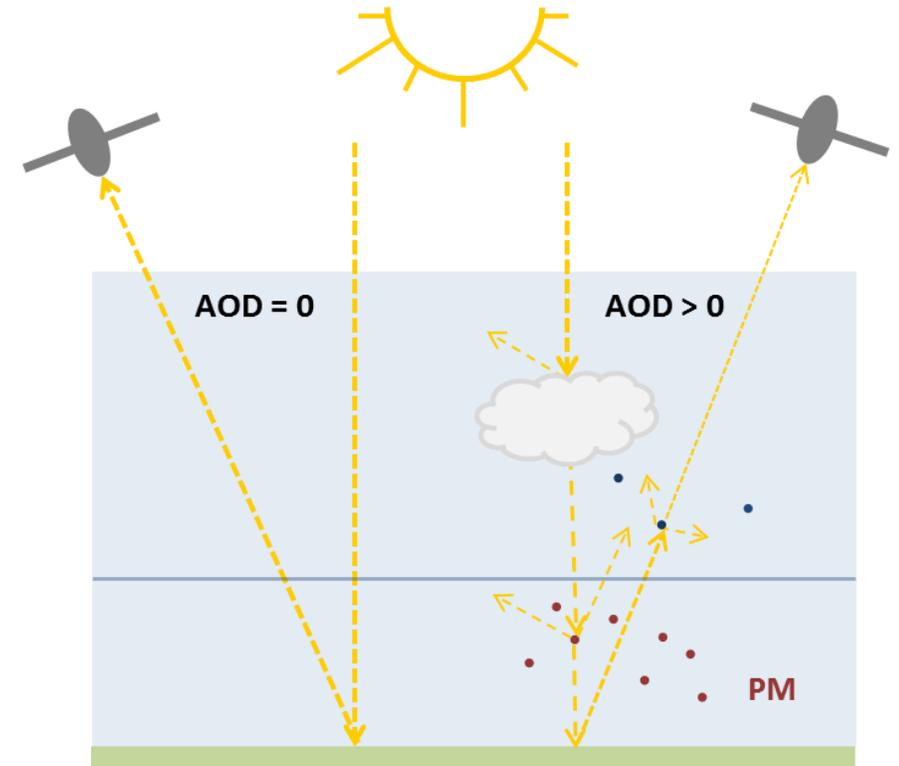
Jana Handschuh

atmos.eoc.dlr.de/sveld/data/



Aerosol Optische Dicke (AOD) und Feinstaub

- Satellit erfasst Aerosolgehalt integriert über atmosphärische Säule
- AOD – Abschwächung elektromagnetischer Strahlung auf ihrem Weg durch die Atmosphäre (Extinktion)
 - Streuung und Absorption an Aerosolpartikeln
- Feinstaub – tatsächliche Menge an Aerosolpartikeln $< 2,5\mu\text{m}$ innerhalb der Grenzschicht
- Ableitung der Bodenkonzentrationen (PM_{2.5}) über semi-empirischen physikalischen Zusammenhang
 - Berücksichtigung meteorologischer und aerosol-optischer Parameter
 - Korrektur mit in-situ-Daten



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

AOD-Datensätze

MODIS

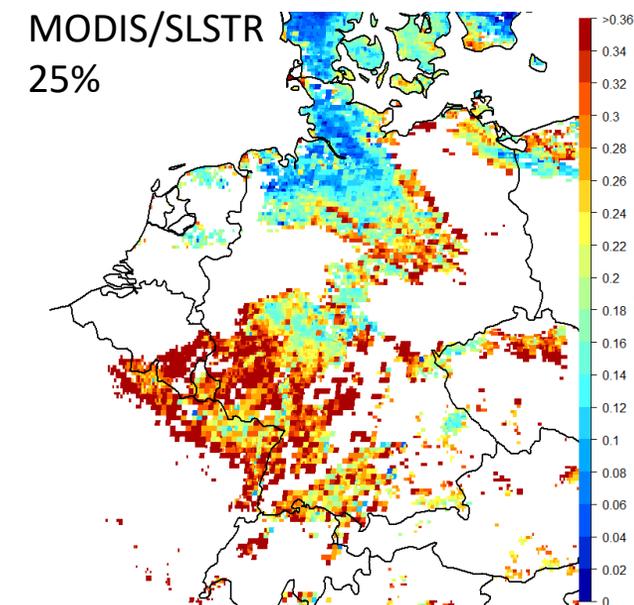
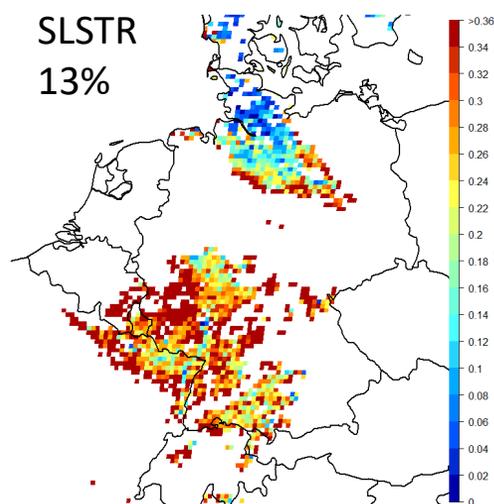
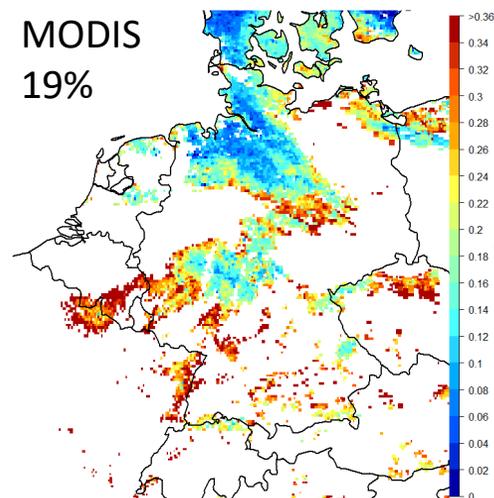
Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

- Satellit: Aqua
- Auflösung: 3km
- Retrieval: Collection 6 – Dark Target Algorithm
- Überflug: 13:30 Uhr
- Schwadbreite: 2330km (nadir)

SLSTR

Sea and Land Surface Temperature Radiometer

- Satellit: Sentinel-3A
- Auflösung: 10km
- Retrieval: Swansea University Aerosol Algorithm
- Überflug: 10:30 Uhr
- Schwadbreite: 1400km (nadir) / 740km (along track)
- „Dual-view“

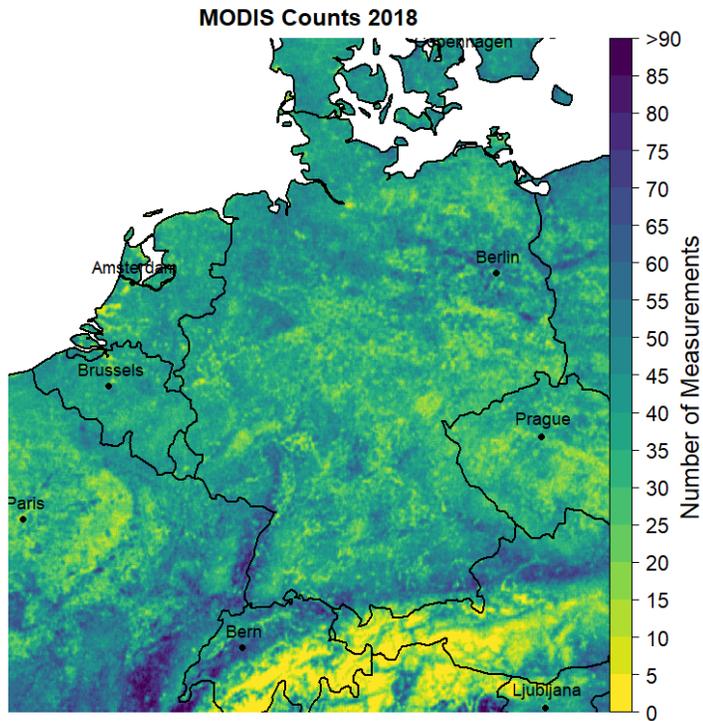


Beispiel: 05.06.2018

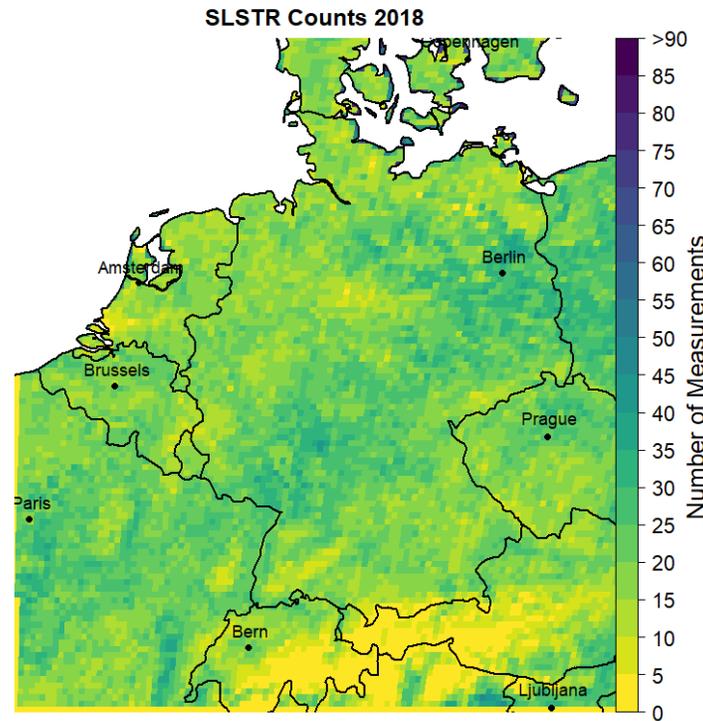
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kombination von Aqua/MODIS und Sentinel-3A/SLSTR

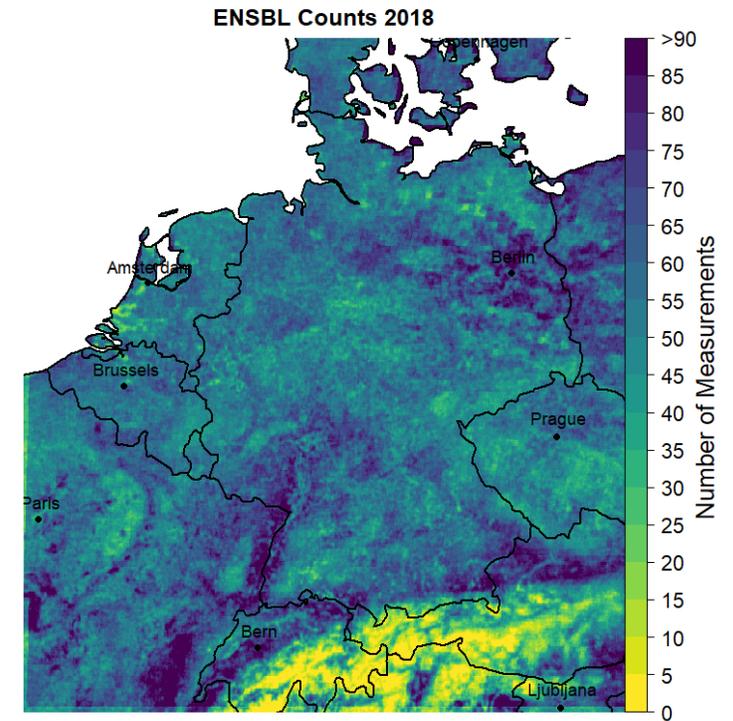
Motivation: Verbesserung der Abdeckung und Datengrundlage für PM2.5-Kartierung



Ø 38 Beobachtungen pro Gitterbox
 99 max. Beobachtungen pro Gitterbox
 7,5% tägl. Abdeckung



Ø 20 Beobachtungen pro Gitterbox
 98 max. Beobachtungen pro Gitterbox
 4,2% tägl. Abdeckung

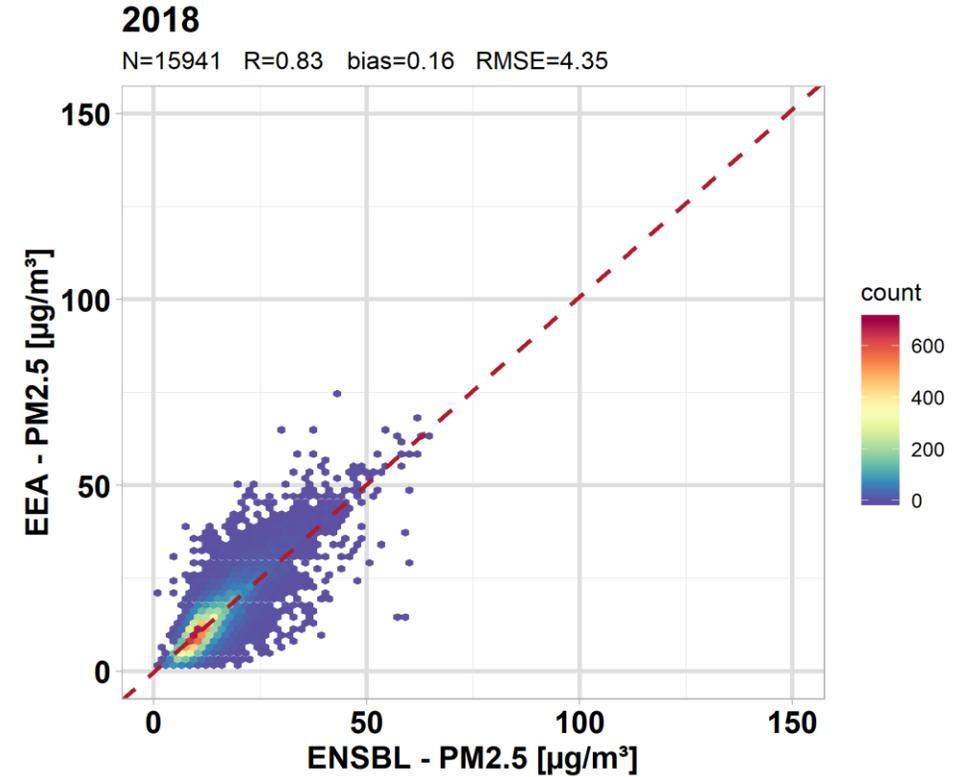
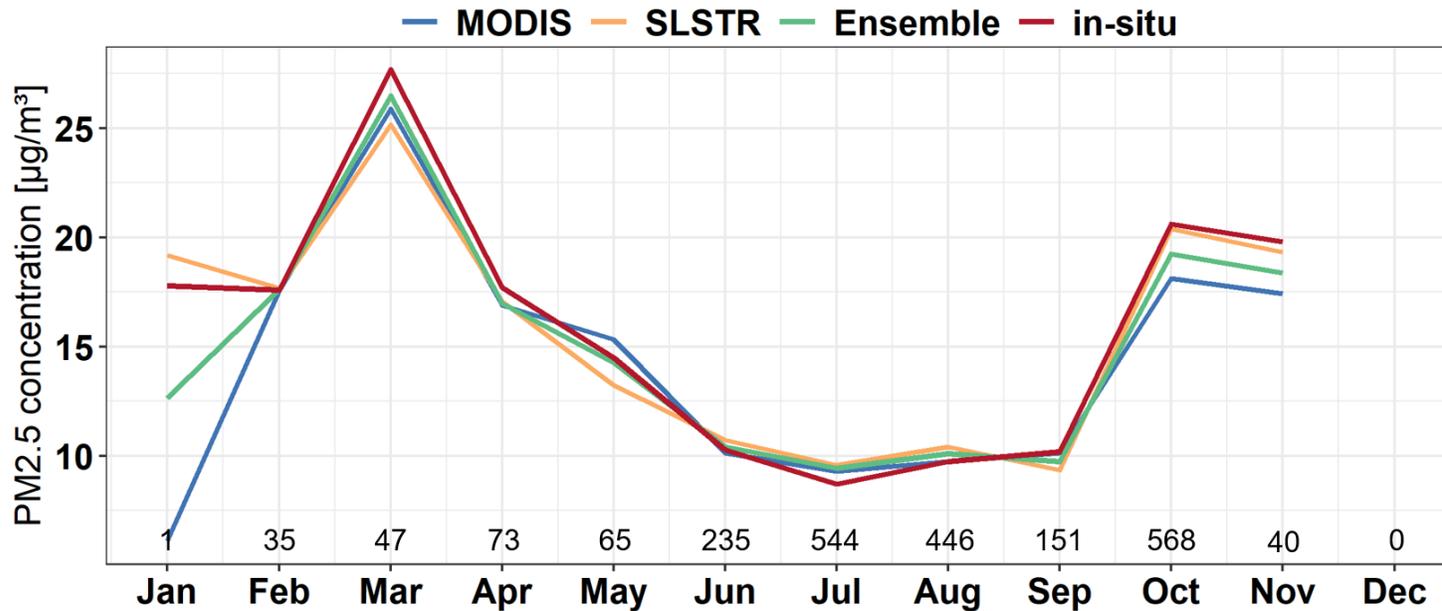


Ø 55 Beobachtungen pro Gitterbox
 165 max. Beobachtungen pro Gitterbox
 10,3% tägl. Abdeckung

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Qualität der abgeleiteten PM2.5-Daten

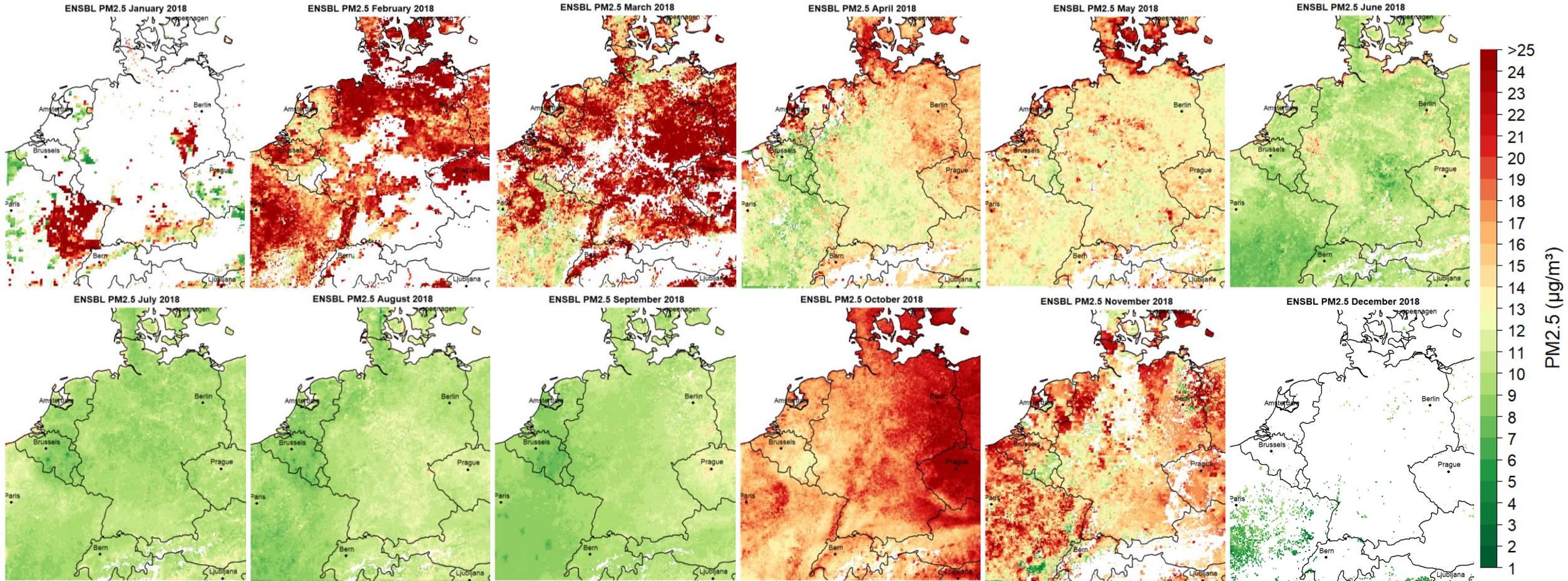
➤ Gute Übereinstimmung mit in-situ Messungen





aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Monatsmittelwerte PM2.5-Konzentrationen 2018

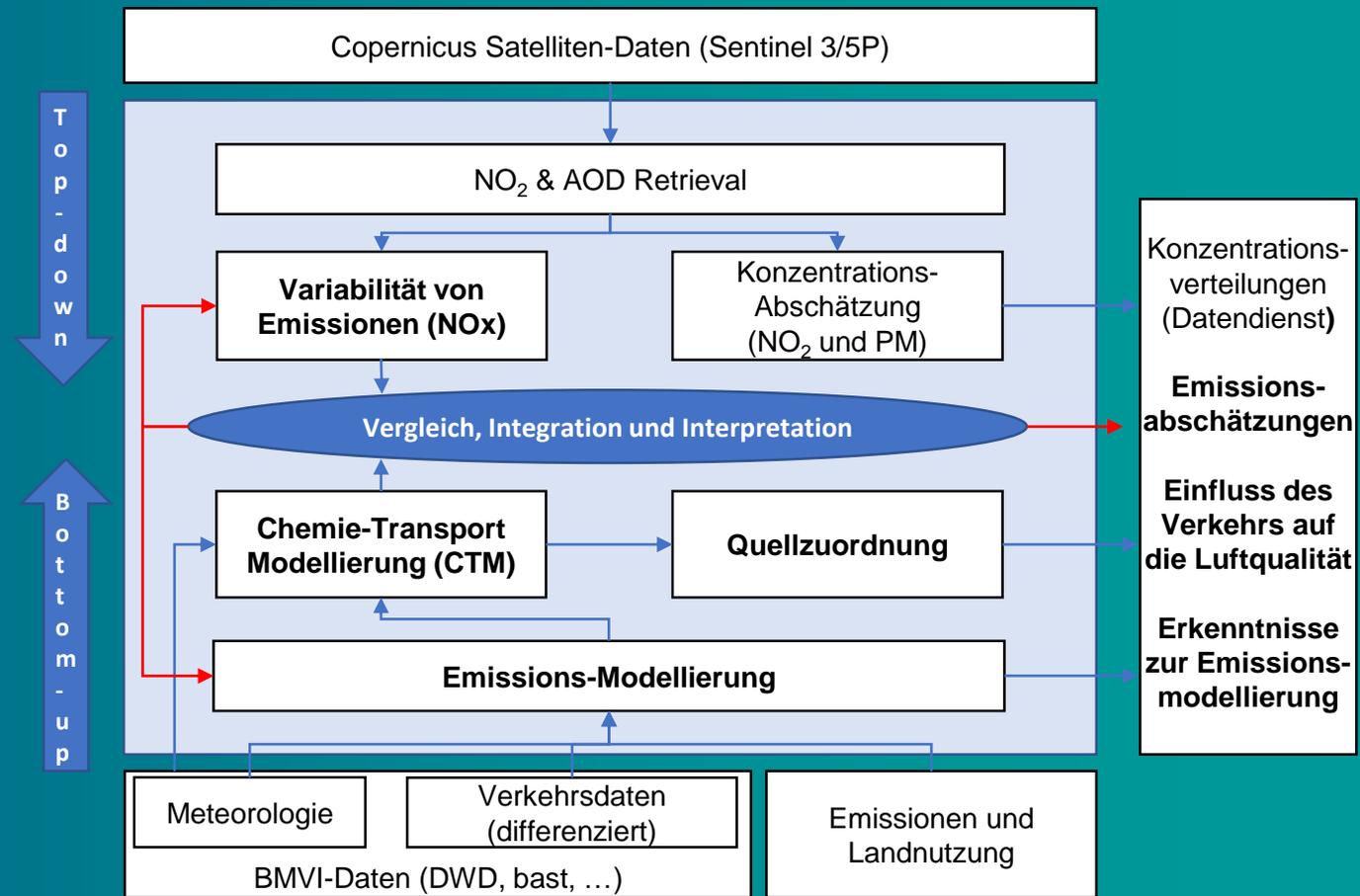


Wesentliche Ergebnisse

- Starke räumliche und tägliche Schwankungen in der Satelliten-Abdeckung beeinflussen Qualität der PM2.5 Produkte
- Kombination von MODIS und SLSTR erhöht Datenbasis für PM2.5-Kartierung
- Gute Übereinstimmung mit in-situ Messungen
- Emissionen hauptsächlich aus Landwirtschaft und Heizaktivitäten, Verkehr kann nicht als Quelle identifiziert werden
- Einbindung weiterer Satellitensensoren um Datenbasis weiter zu verbessern

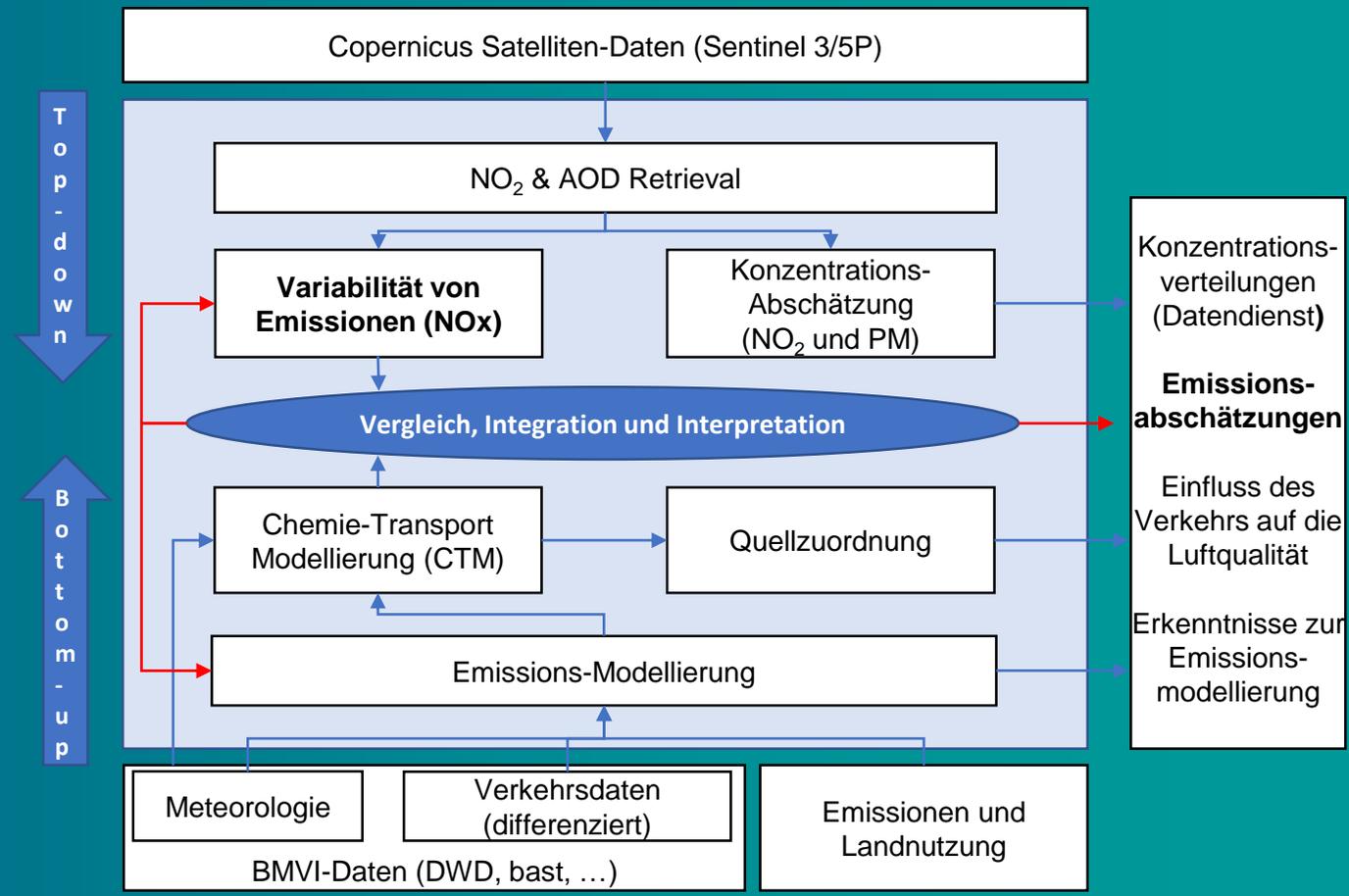
Übersicht Modellierung

Martijn Schaap



Langzeitassimilation von TROPOMI-NO₂

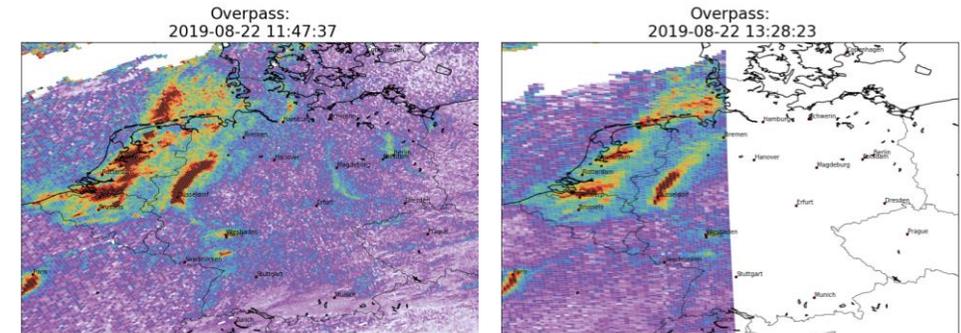
Martijn Schaap



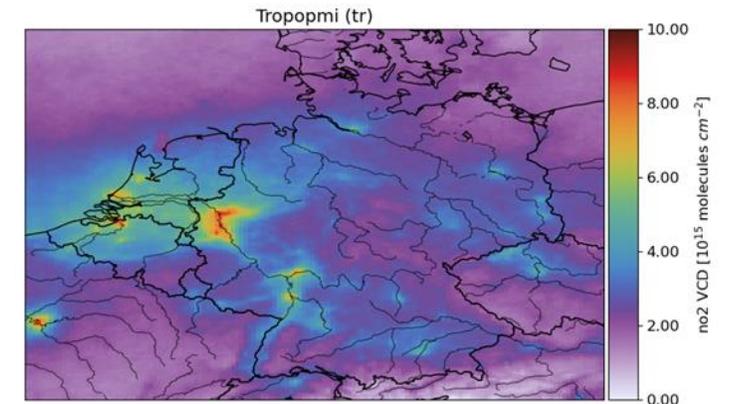
Einführung Satellitenassimilation

- TROPOMI liefert eine Fülle von Informationen in hoher räumlicher Auflösung ($\sim 3,5 \times 5 \text{ km}^2$), die zur Abschätzung von Parametern im Modell verwendet werden können.
- Ziel des Projektes war es, die TROPOMI-Informationen zu nutzen und mittels der Datenassimilation in das LOTOS-EUROS-Modell zu integrieren und auf diese Weise Emissionsparameter zu schätzen.
- Aufgrund erheblicher Rechenzeiten, die mit der Datenassimilation von Satellitendaten verbunden sind, konzentrieren sich die meisten Forschungsarbeiten auf kurze Zeiträume.
- In S-VELD wurde hingegen ein dreijähriger Zeitraum (2018-2020) betrachtet, um auch mögliche Emissionsschwankungen zwischen verschiedenen Jahren zu erfassen.
- Hierzu wurden zwei Produkte verarbeitet: das "operationelle" TROPOMI-Produkt und das im Rahmen dieses Projekts entwickelte Produkt des DLR (S-VELD).

Beispiel für einzelne TROPOMI-Überflüge

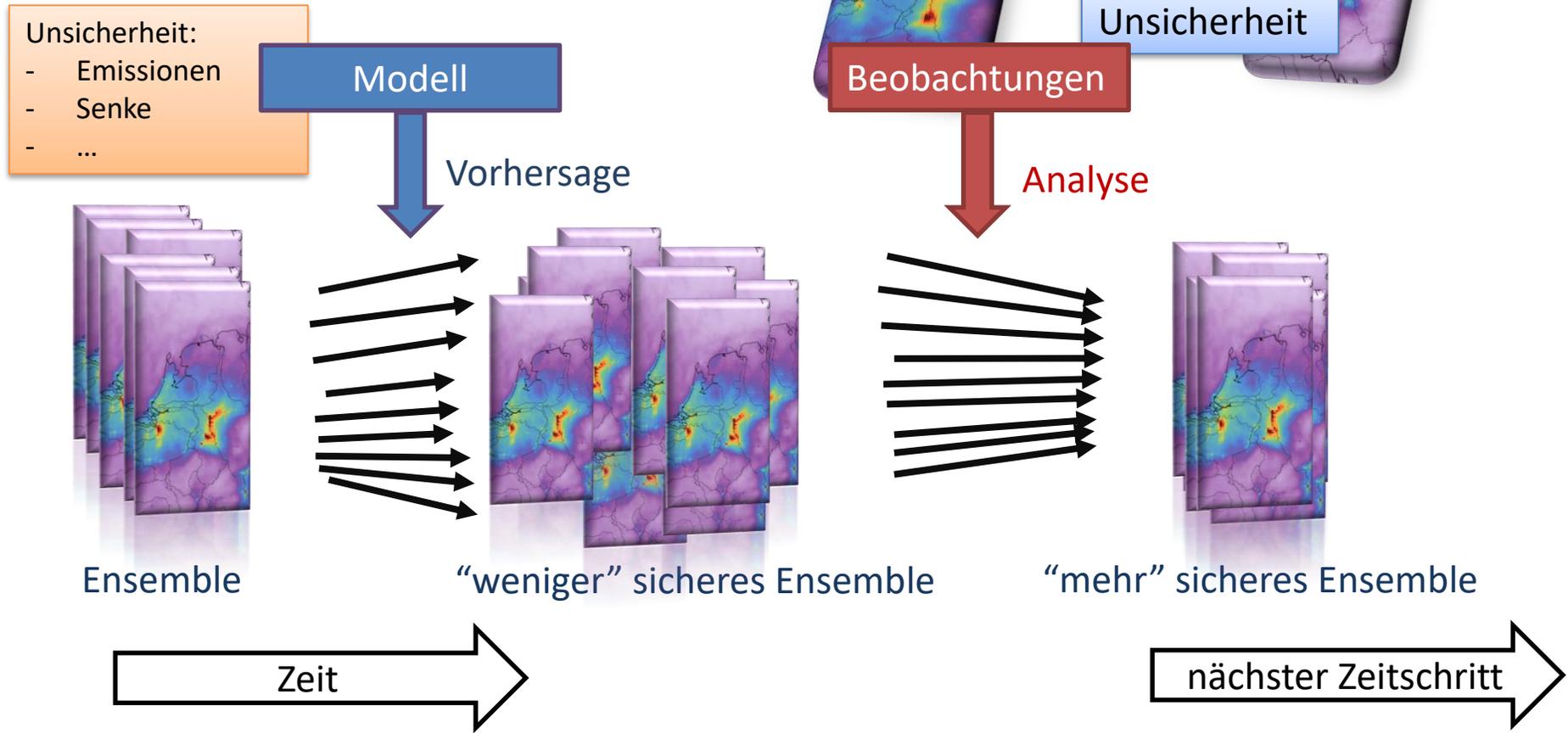


Mittelwert aller TROPOMI-Messungen im Jahr 2019



Daten-Assimilationsroutine

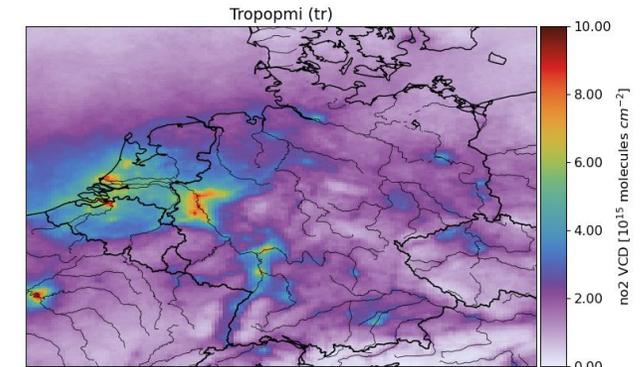
LETKF (Local Ensemble Transform Kalman Filter)



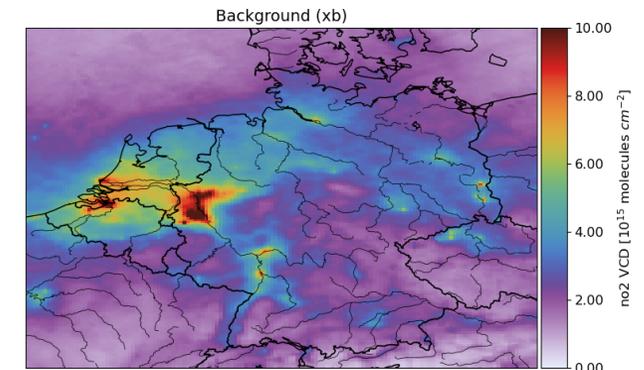
Effekt der S-VELD Assimilation Säulendichte

- Assimilationsläufe umfassen die Jahre 2018-2020
- Das Satellitenprodukt wurde aufgrund der geringen Verfügbarkeit von Validierungspunkten nicht korrigiert.
- Die Assimilation reduziert die modellierte Säulendichte (VCD) des Basislaufes und zieht die Verteilung in Richtung des TROPOMI-Produktes.

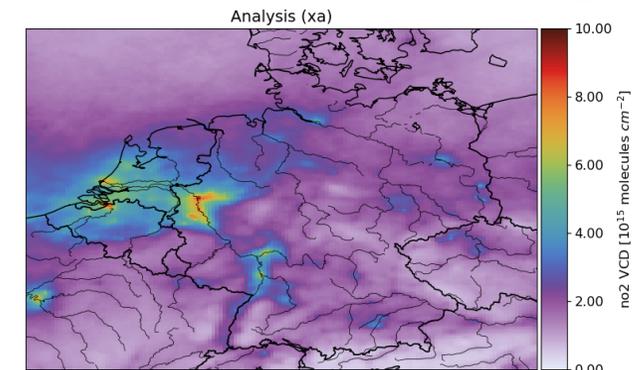
TROPOMI



Basislauf

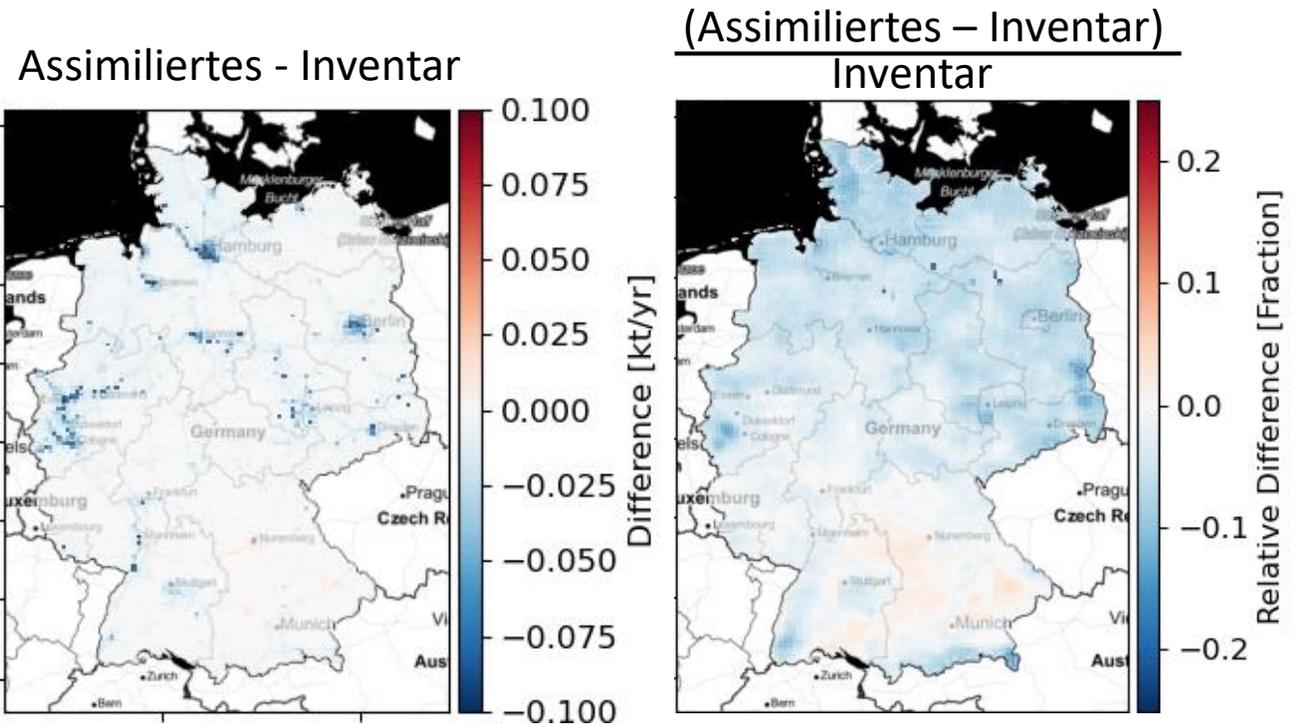


Assimiliert



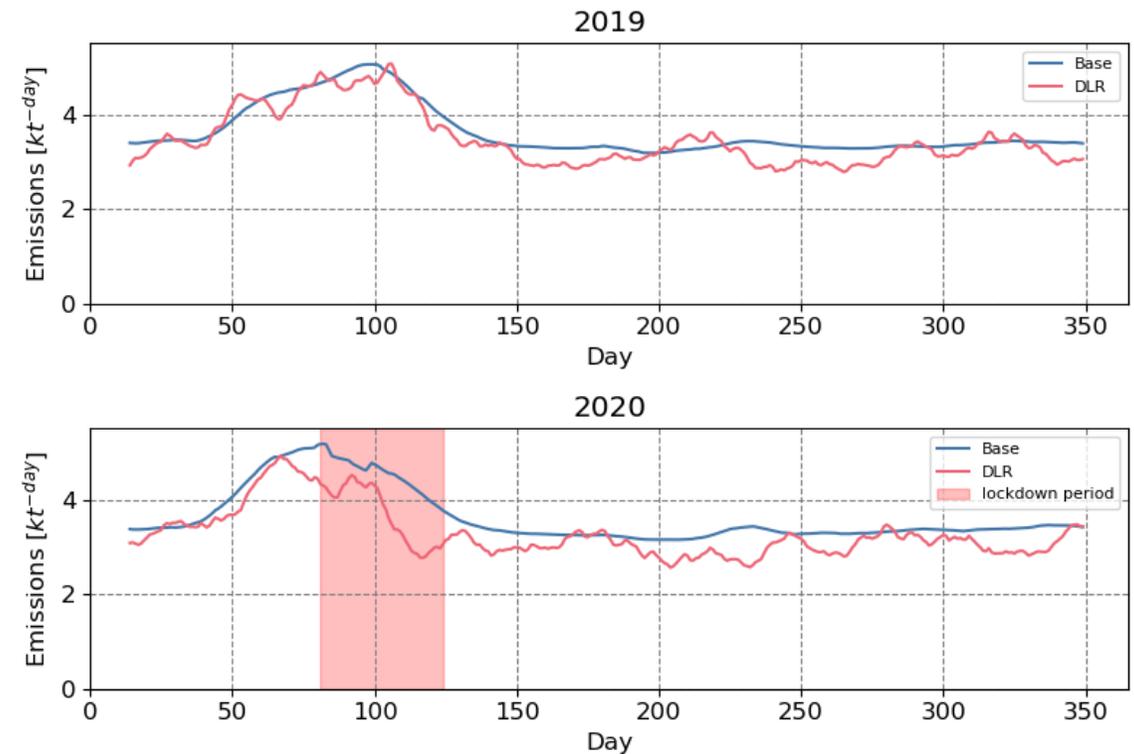
Ergebnisse S-VELD Produkt: Emissionen

- Es ist ein Rückgang der Emissionen in den meisten Städten und Industrieregionen im Norden, insbesondere bei einzelnen Großkraftwerken zu erkennen.
- Außerhalb der Städte/Industriegebiete sind die Emissionen in Süddeutschland geringfügig angestiegen.
 - Es sind Gegensätzliche Ergebnisse zwischen Nord- und Süddeutschland zu beobachten.



Ergebnisse S-VELD Produkt: COVID Periode

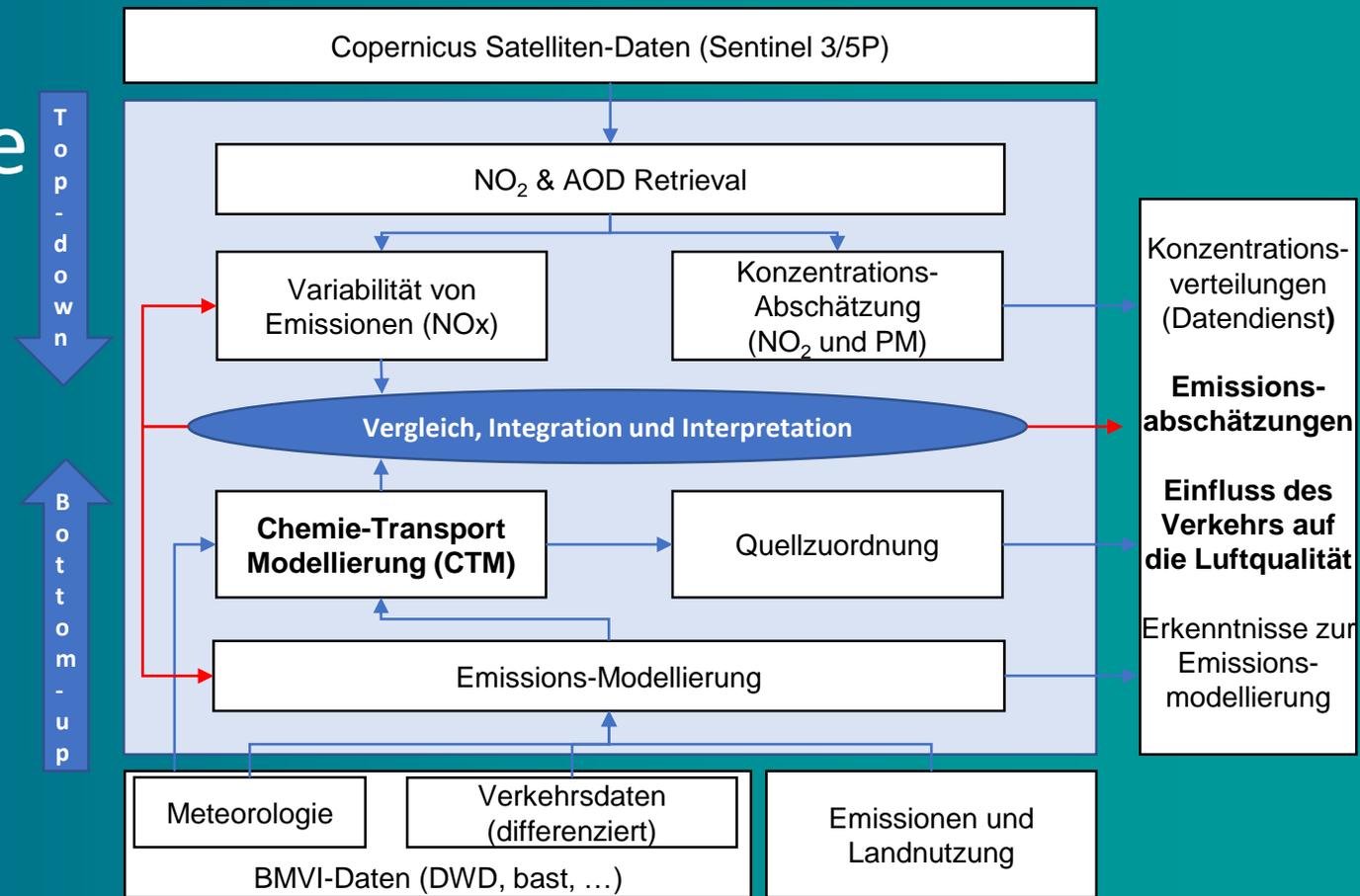
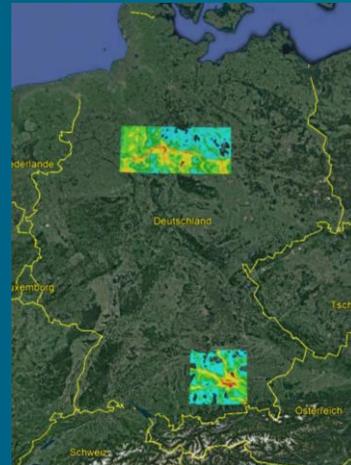
- Maßnahmen aufgrund der COVID-Pandemie führten zu einer Verringerung der Emissionen im Jahr 2020.
- Emissionen berechnet aus der Assimilation des COVID-Lockdowns 2020 werden anbei mit Emissionen derselben Periode aus dem Jahr 2019 verglichen.
- Chemietransportmodelle sind für derartige Studien von Vorteil, da sich ändernde meteorologische und chemische Effekte hierbei direkt berücksichtigt werden.
- Die Emissionen wurden in der gesamten Bundesrepublik reduziert, wobei in Hintergrundregionen eine geringere Abnahme zu verzeichnen ist.
- Die Gesamtabweichung für 2020 im Vergleich zu 2019 beträgt in etwa **-20 %** während der Lockdownperiode.



Modellierung Detailgebiete

Florian Pfäfflin (Emissionen)

Frank Baier (Assimilation)



Bereitstellung stündlicher gerasterter Kfz-Emissionen für Detailgebiete

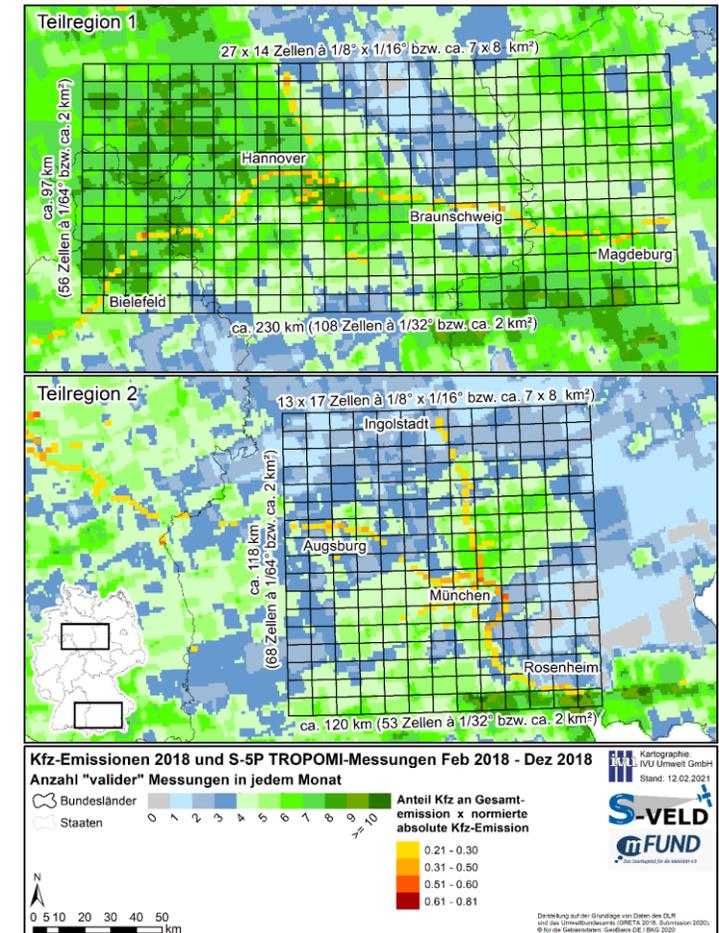
1. Definition von Detailgebieten
(hohe Relevanz von Kfz-Emissionen und gute Satellitenabdeckung)
2. Zusammenstellung und Verknüpfung von Verkehrsnetzen, Zählraten der BAST und Gültigkeitsbereichen; Füllen von Lücken
3. Attribuierung für Emissionsberechnung
4. stündliche Emissionsberechnungen für diese Strecken auf Basis HBEFA unter Berücksichtigung von u. a.

- Verkehrssituation, incl. Level-of-Service
- Längsneigung
- teilweise richtungsgetreunt
- PM mit Wiederaufwirbelung
- Temperatur

5. stündlich gerasterte Emissionen, differenziert nach

- Leichtverkehr und Schwerverkehr
- Autobahnen und Bundesstraßen

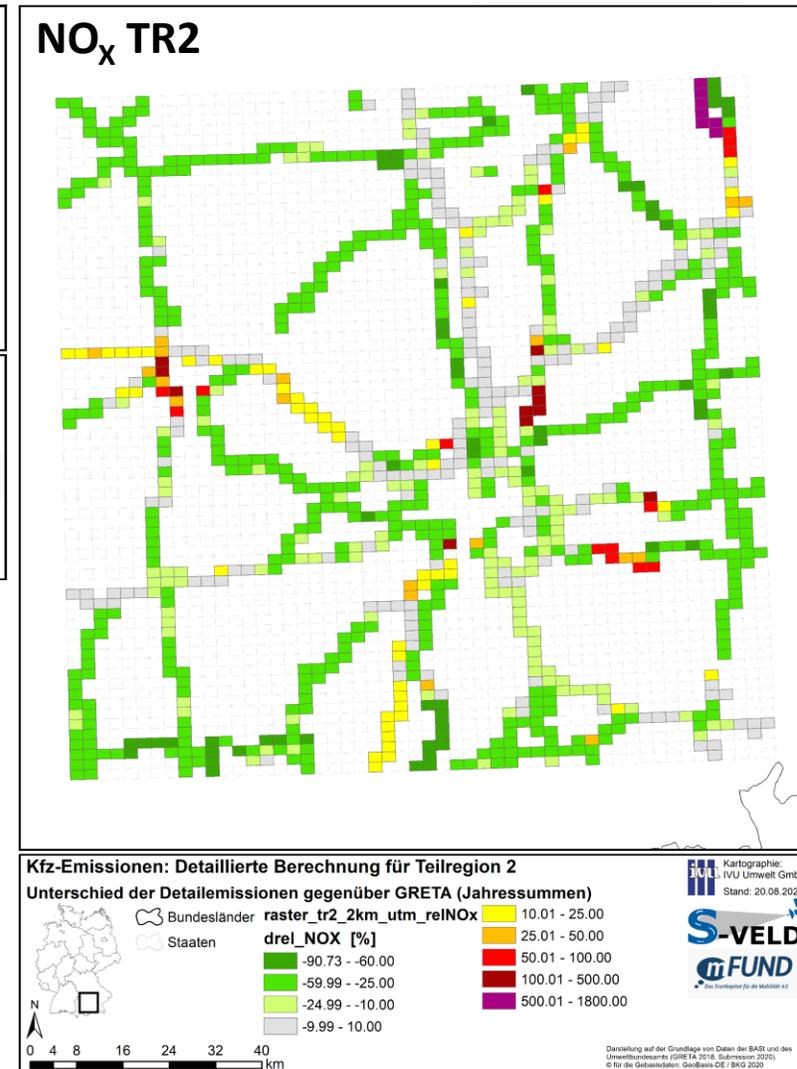
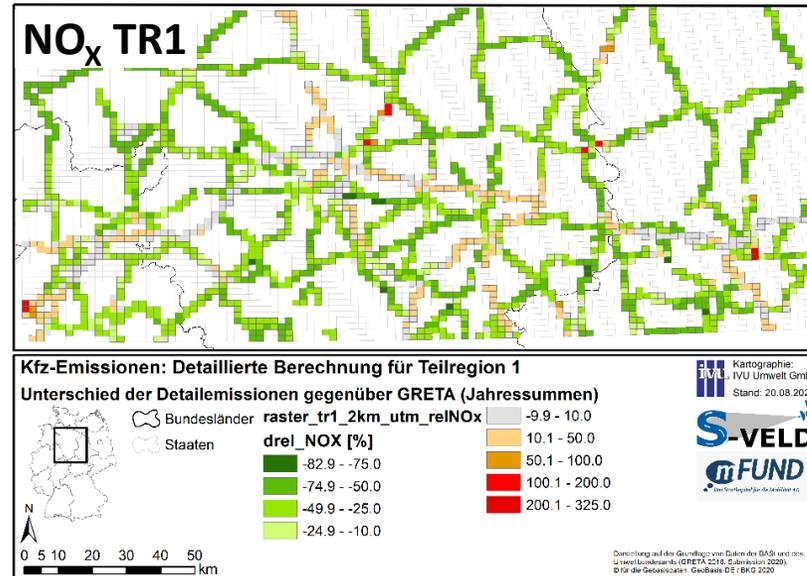
*sehr viel manuelle
Arbeit erforderlich*



Änderungen Emissionen durch detaillierte Berechnung

	TR1	TR2
NO _x	-11.1%	-15.4%
PM10	13.6%	7.5%

bezogen auf die detailliert modellierten Strecken

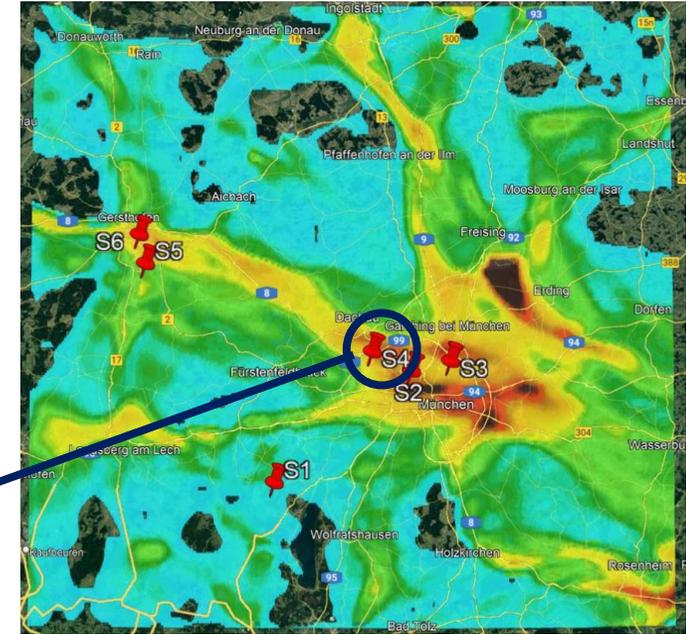
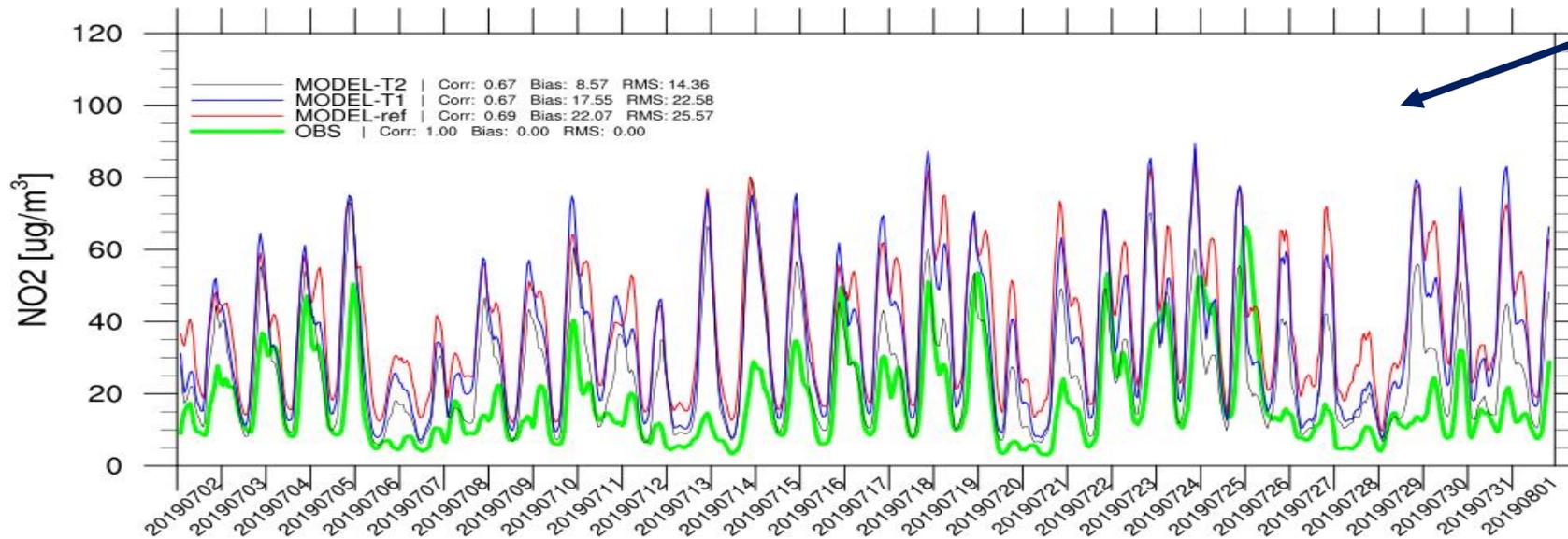


Mögliche Ursachen für Unterschiede

- Bezugsjahr 2019 (detailliert) versus 2018 (GRETA)
- generell anderes Vorgehen: „bottom-up“ versus „top-down“
- PM10: Aufwirbelung in Detailberechnung berücksichtigt
- Verkehrsqualität nicht auffällig als Ursache
- NO_x: je höher Anteil Schwerverkehr, Längsneigung und insbesondere Kombination aus Beidem, umso deutlicher sind Emissionen bottom-up > top-down und umgekehrt

Polyphemus: Vergleiche mit Stationen im Raum Augsburg-München

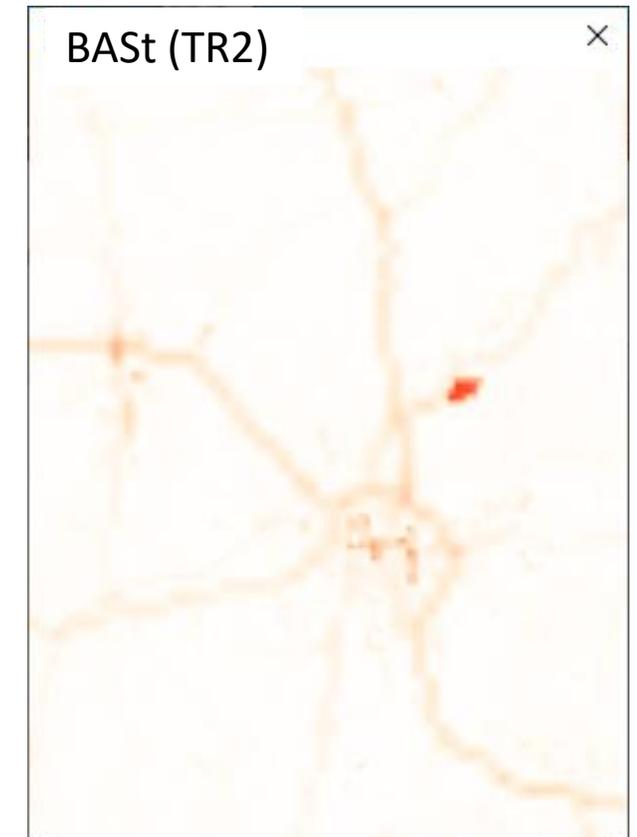
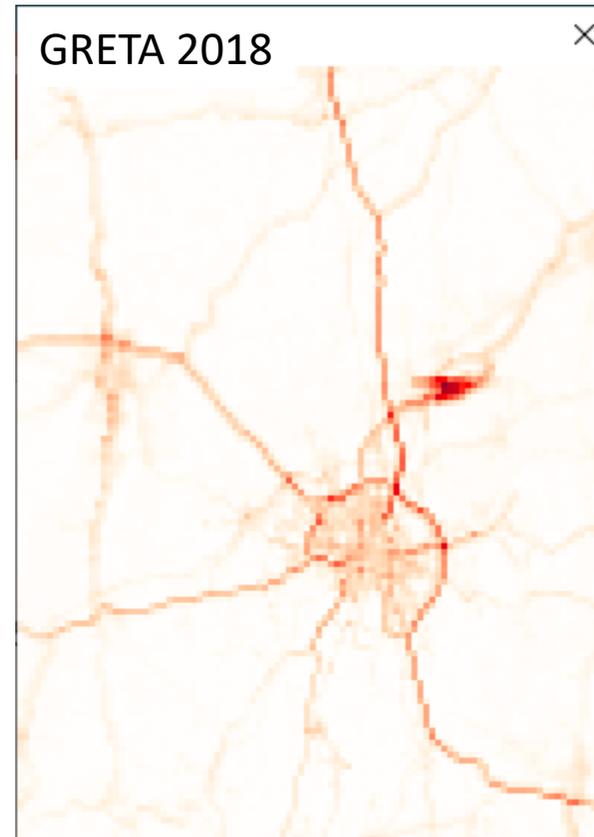
Juli, 2019



- **Model-ref: GRETA 2018**
- **Model-T1: neue Zeitfaktoren**
- **Model-T2: BASt 2019**

Korrektur der bodennahen NO₂-Emissionen für Detailgebiete: Augsburg-München, Juli 2019

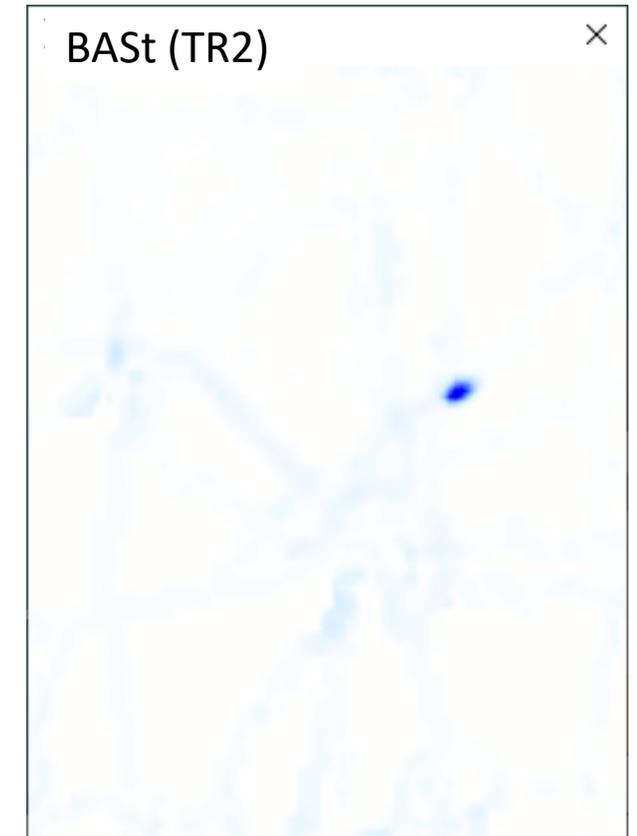
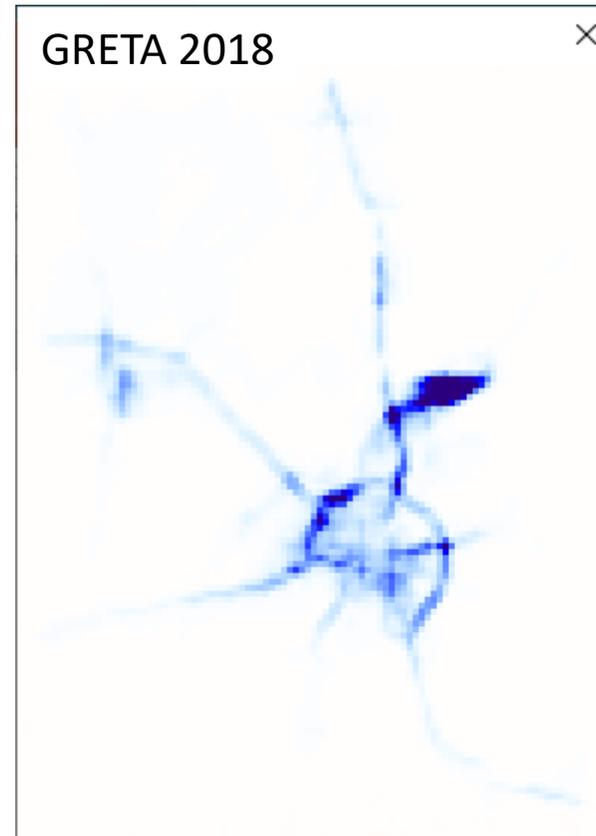
- **Bottom-up Emissionen:**
 - Vergleich GRETA 2018, BAST2019
 - in BAST 2019 deutlich reduziert



ug/m³/s

Korrektur der bodennahen NO₂-Emissionen für Detailgebiete: Augsburg-München, Juli 2019

- **Top-Down Korrekturen:**
 - GRETA 2018: Deutliche Reduktion der NO₂ Emissionen zwischen -5% (Ring, A9) und -35% (Flughafen)
 - Nur geringe Korrekturen für BAST



Relative Änderung



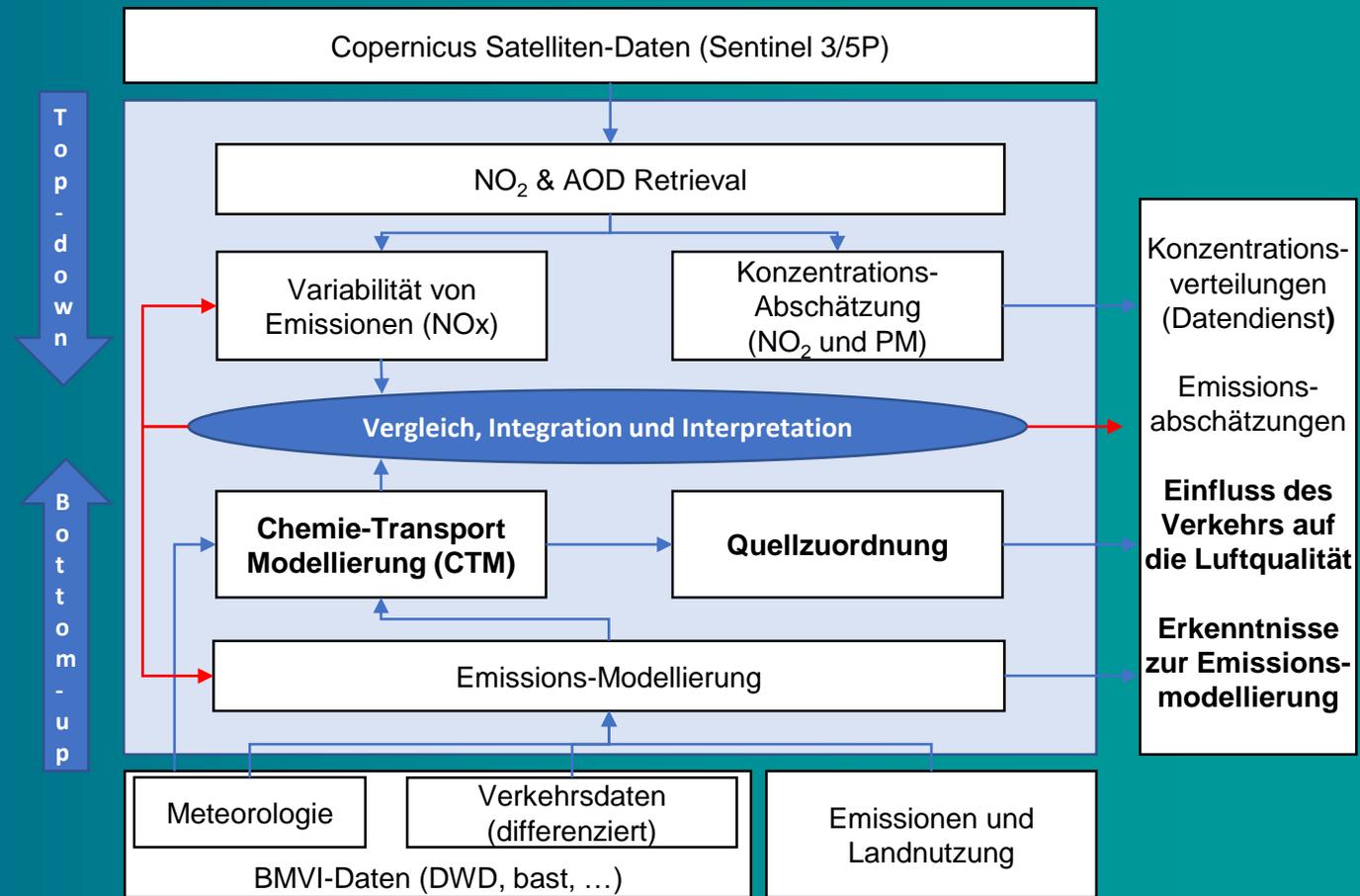
Zusammenfassung: S5P-Assimilation Detailgebiete

- Ergebnisse zeigen für beide Detailgebiete i.a. deutlich reduzierte NO₂ Emissionen mit S5P
- Veränderungen BASt – GRETA (top-down) und Inversion S5P (top-down) i.a. konsistent
- Reduzierte NO₂ Emissionen zwischen -15% (BASt) und -35% (S5P) geg. GRETA
- Mit BASt Emissionen nur noch geringe Korrekturen durch S5P (<<5%)

Deutschlandweite Modellierung

Florian Pfäfflin (Emissionen)

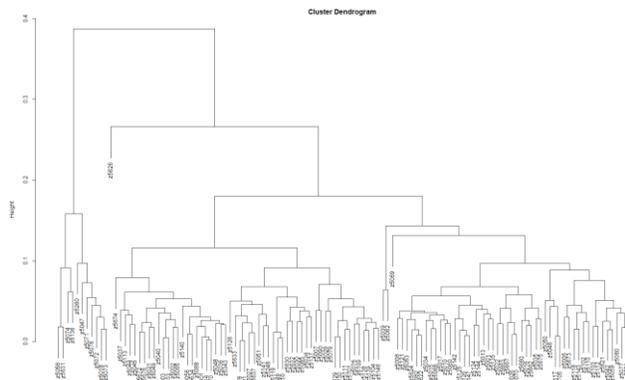
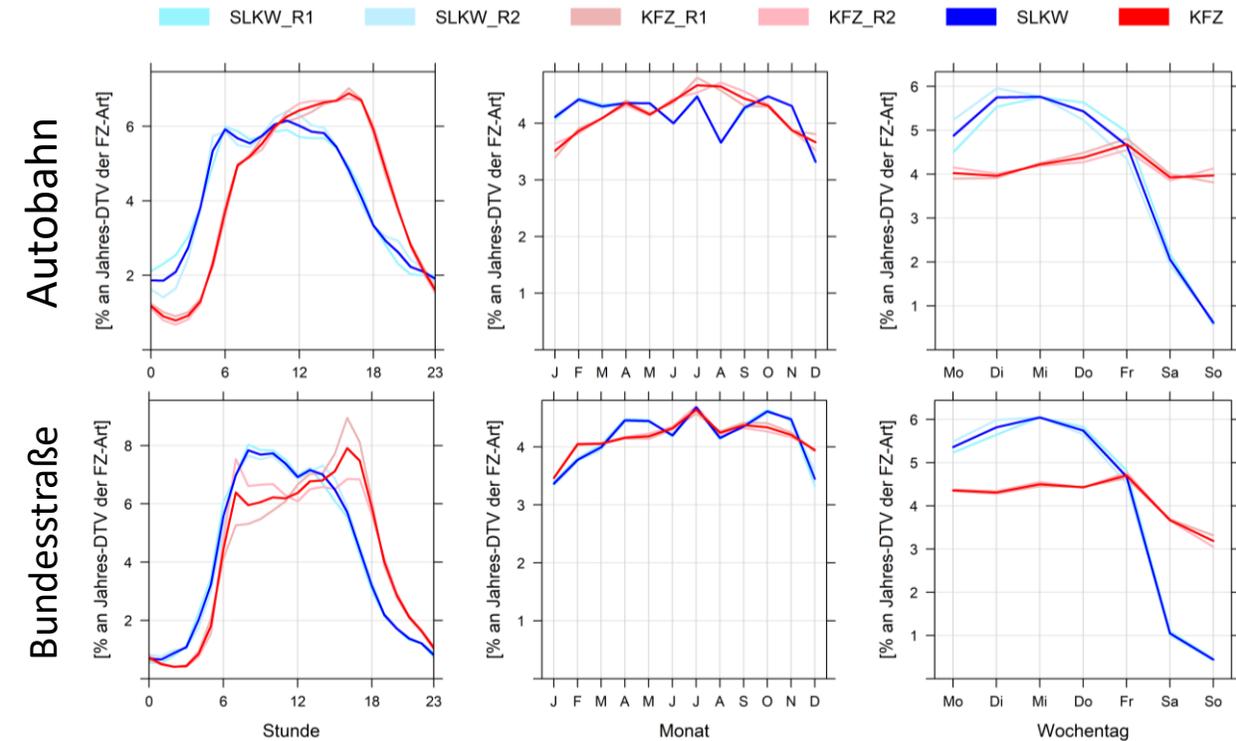
Markus Thürkow (CTM-Modellierung)



Deutschlandweite Emissionen mit differenzierten Zeitreihen für Kfz-Verkehr

1. UBA-GRETA-Emissionen als Grundlage
2. Differenzierung Kfz-Verkehr
 - 2 Kfz-Gruppen: Leicht- und Schwerverkehr
 - 4 Straßenarten: Autobahn, Bundesstraßen, sonstige Straßen „innerorts“ und „außerorts“
3. Analyse der Daten der Dauerzählstellen der BASt
 - Clusterung der Zeitreihen pro Bundesland
 - getrennt für Autobahn und Bundesstraße

Beispiel Bayern

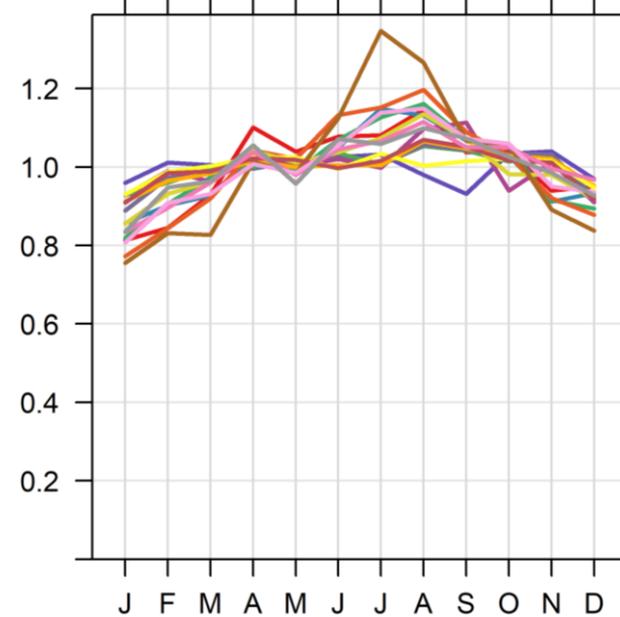


Erstellung detaillierter Zeitreihen für Kfz-Emissionen für Deutschland

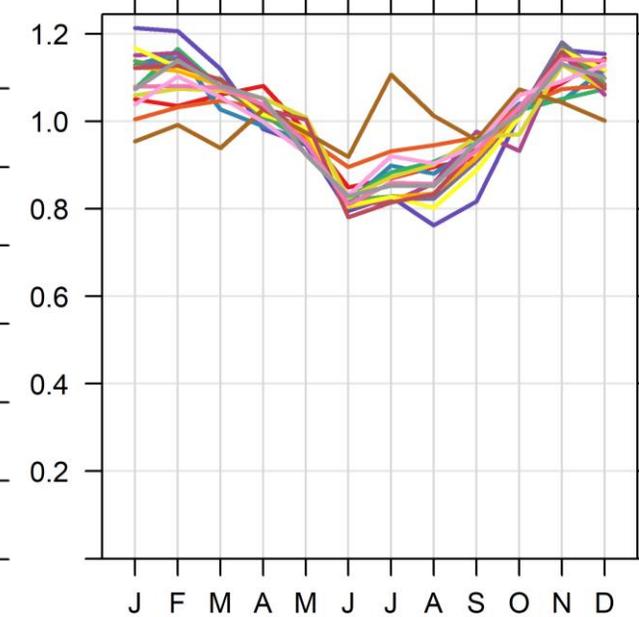
4. Berücksichtigung der Temperatur für NO_x-LV
 - Basis DWD TRY-Regionen
 - Temperatureinfluss gemäß HBEFA
5. Stündliche bottom-up-Emissionsberechnung für die Cluster-Medoide
 - je Bundesland
 - Autobahn / Bundesstr.
 - LV / SV
 - ergänzt um eine Zeitreihe innerorts
6. Erzeugung stündlicher relativer Emissionszeitreihen

Relative Emissionsanteile auf Autobahnen (LV)

temperaturunabhängig



temperaturabhängig (NO_x-LV)



Welchen Anteil hat der Verkehr an der NO₂ Hintergrundbelastung in ländlichen und städtischen Gebieten?

CTM

- ❖ LOTOS-EUROS Version 2.2

Emissionen

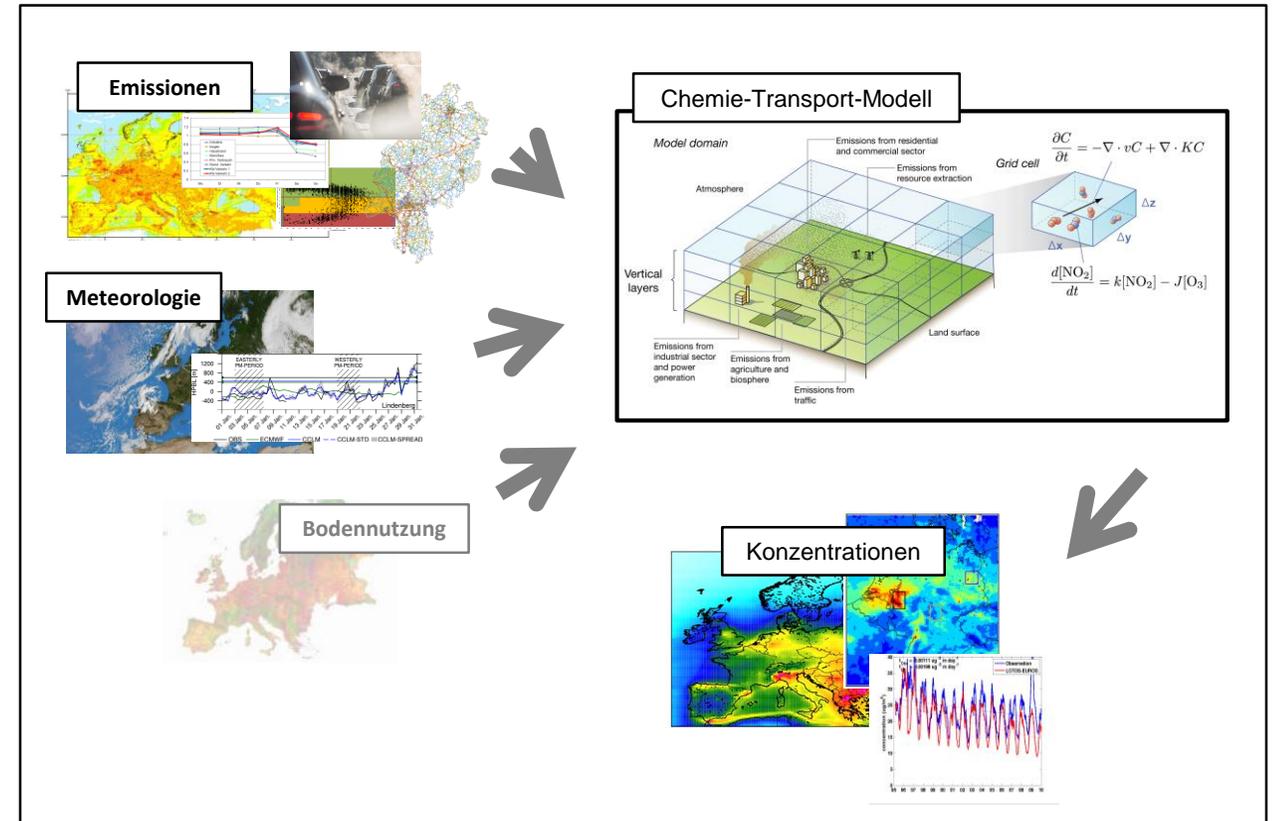
- ❖ CAMS (EU) + UBA-GRETA (DE), inkl. Differenzierung nach Kfz-Verkehr, Straßenarten und Temperatur

Meteorologie

- ❖ ICON (DWD), als S-Veld Entwicklung

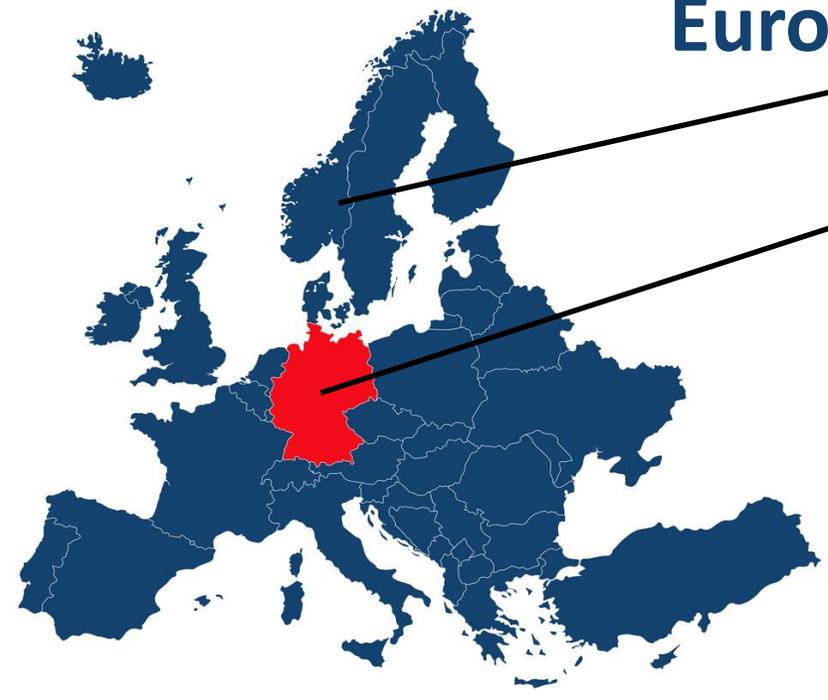
Simulationen

- I. CAMS-GRETA Emissionen nach einem standardisierten/repräsentativen Zeitprofil Deutschlandweit identisch (Referenz)
- II. Stündliche Emissionen mit separaten temperaturabhängigen Zeitprofilen pro Bundesland

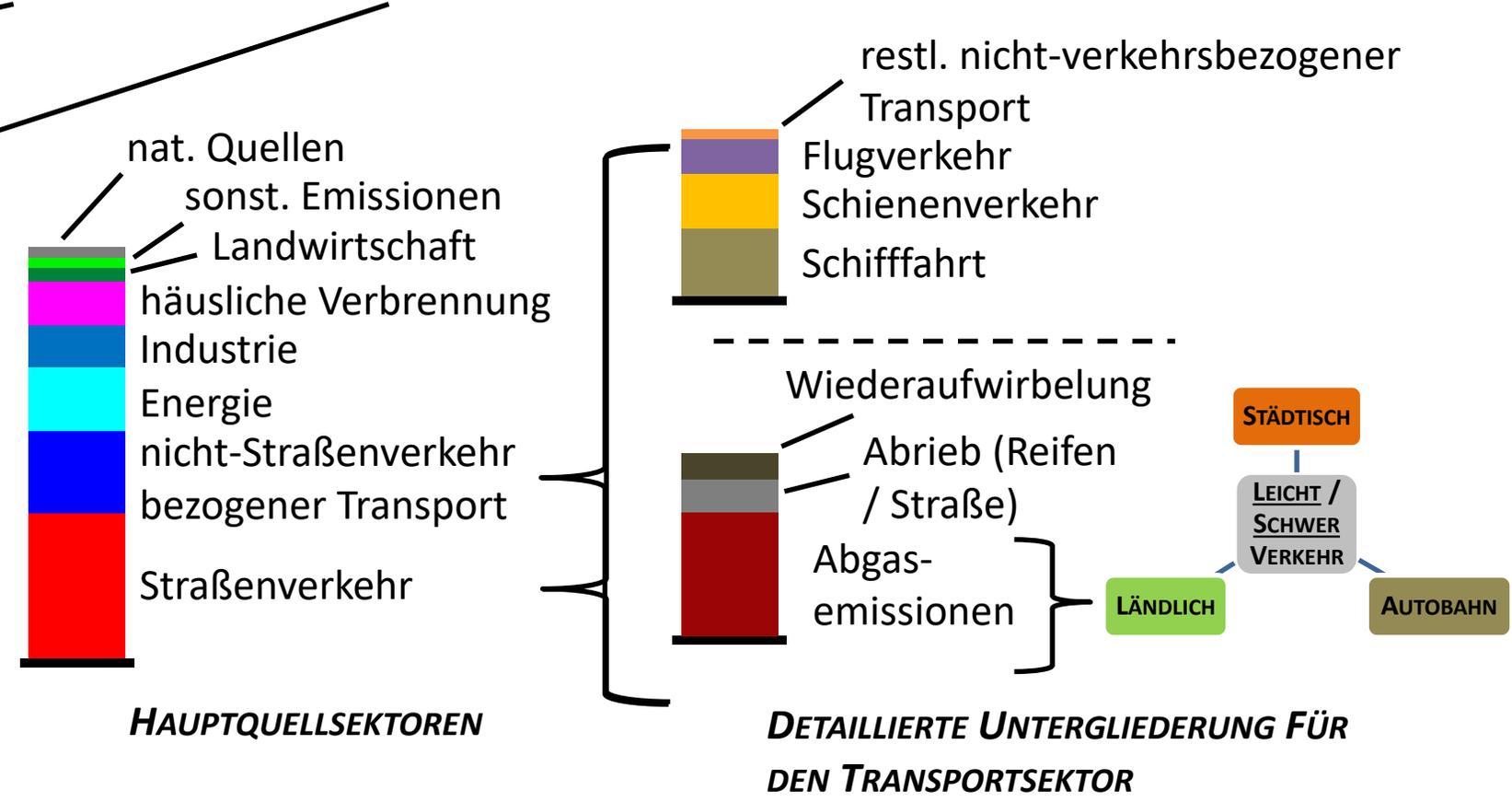


„ Inwieweit verbessern die Aktualisierungen der Zeitprofile die Performance des Modells? “

Europäische & Deutsche Quellenzuordnung

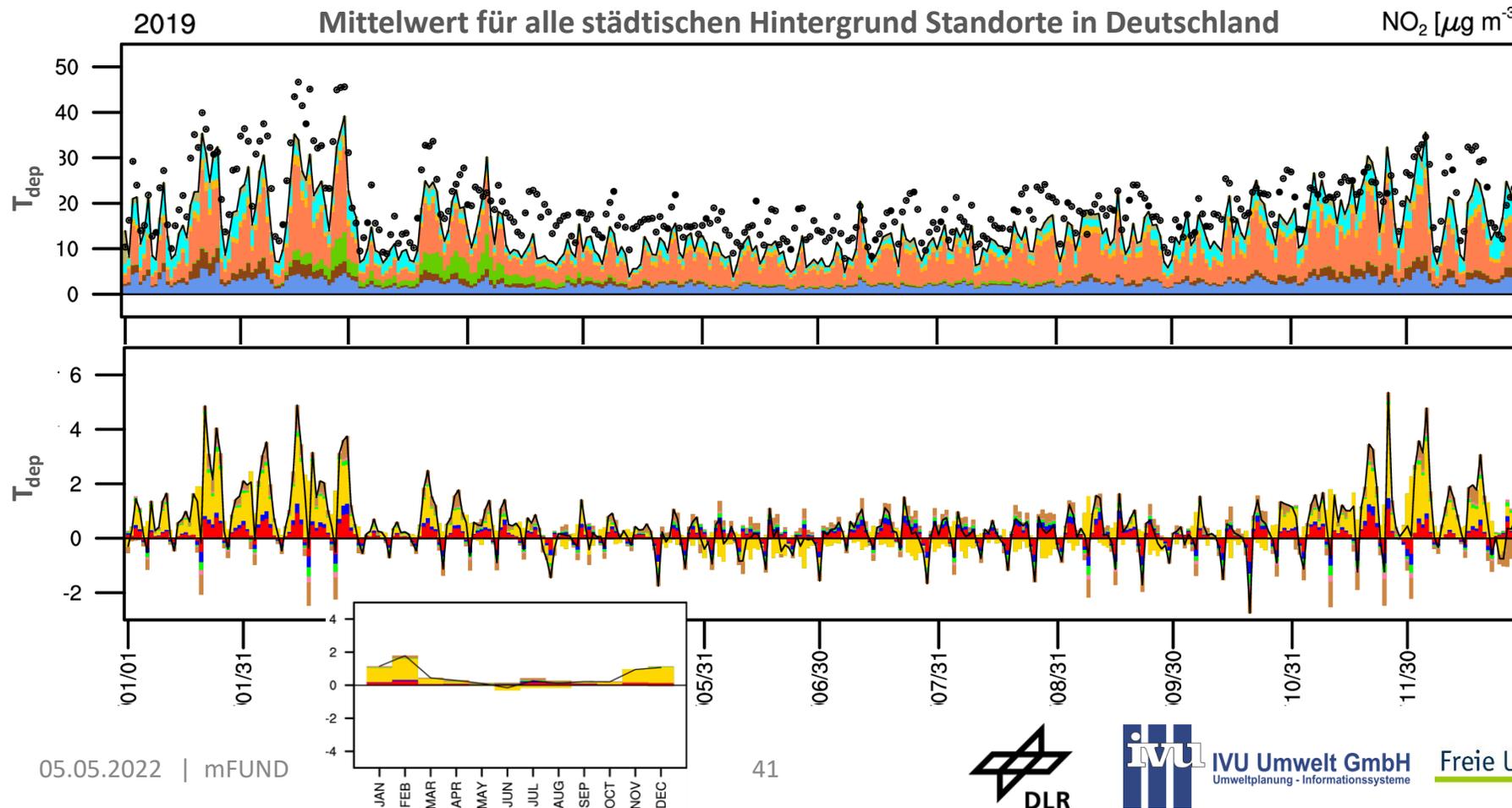


20 EMISSIONS-SEKTOREN
KATEGORISIERT



NO₂ Luftqualität in Deutschland

- Verbesserter saisonaler Verlauf in modellierten NO₂-Zeitreihen



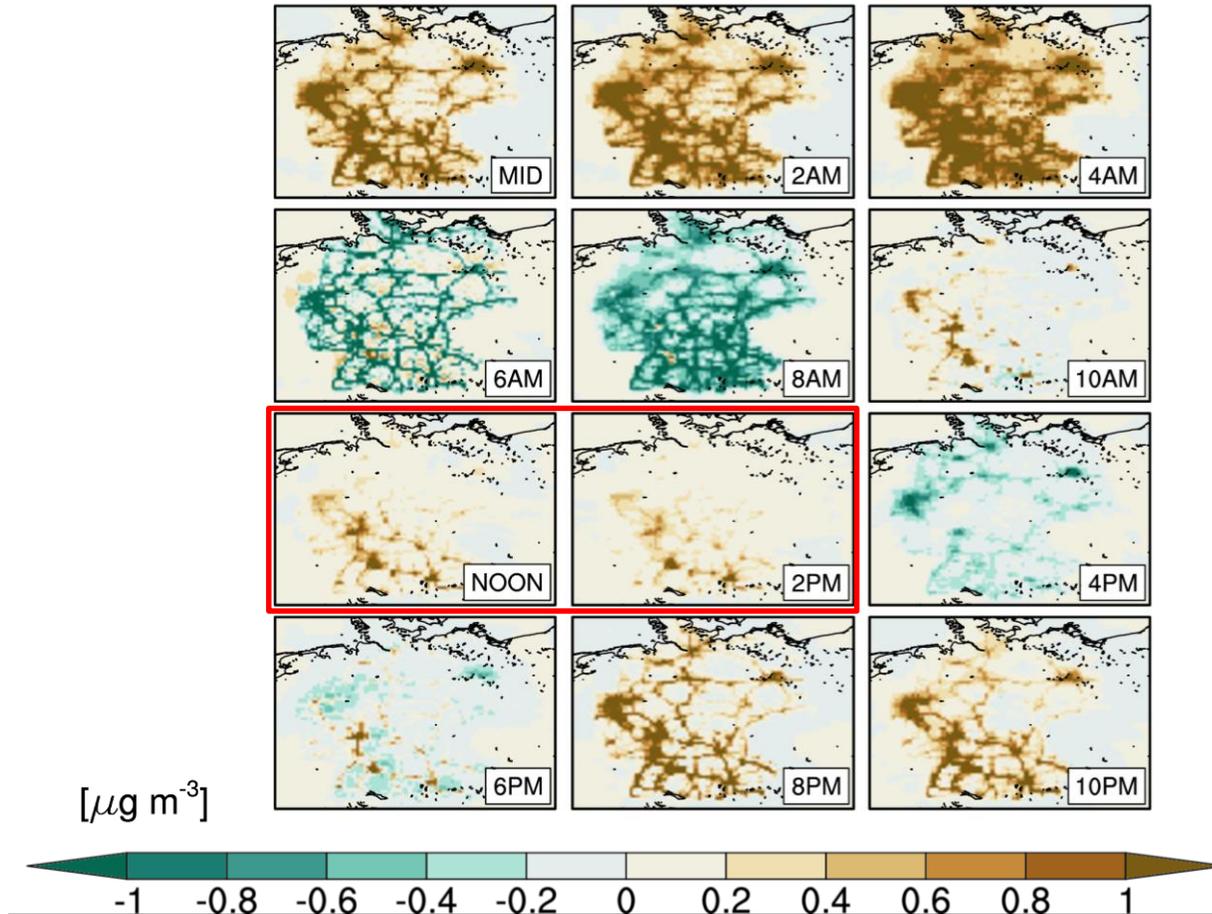
- Messungen
- Energie & Industrie
- häusliche Verbrennung
- Landwirtschaft
- Straßenverkehr
- nicht-Staßenv. bez. Transport
- nicht- deutsche Emissionen
- sonstige Emissionen

- LV-städtisch
- SV-städtisch
- LV-ländlich
- SV-ländlich
- LV-Autobahn
- SV-Autobahn

Tagesgang der mittleren Straßenverkehrsbeiträge für 2019 als Differenz für T_{dep} und Ref

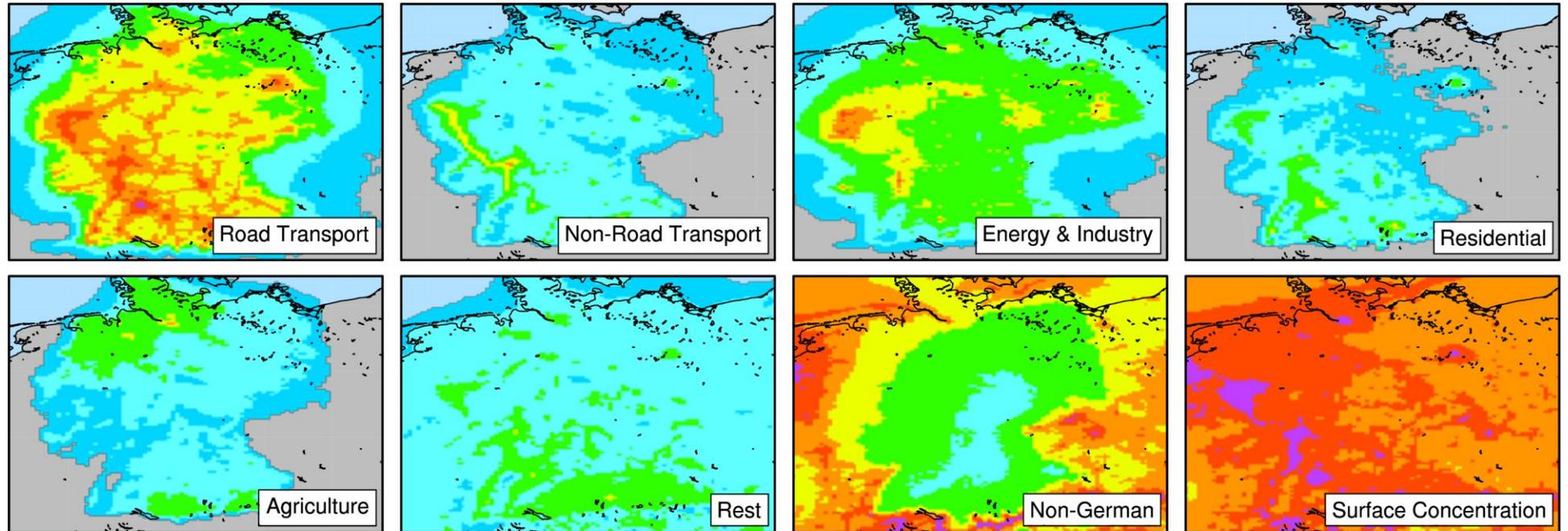
NO_2

Zu Beachten ist die Ähnlichkeit mit den Korrekturfaktoren der TROPOMI-Assimilation!



NO₂ Luftqualität in Deutschland

„sektorielle Beiträge“



NO₂



Zusammenfassung

Die in der Emissionsbeschreibung verwendeten temperaturabhängigen Zeitprofile pro Bundesland führen zu einer verbesserten Modellperformance in Form

- I. einer verbesserten Abbildung der Tages-, Wochen- und Jahregänge der modellierten NO_2 Konzentration sowie einer insgesamt genaueren Abbildung des zeitlichen Verlaufs der modellierten Konzentrationen,
- II. einer geringeren Modellunterschätzung in städtischen Gebieten, insbesondere aufgrund der Zunahme von Autobahnemissionen während kalter Episoden.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

- Sentinel-3 and -5P-Produkte (AOD, troposphärisches NO₂) wurden entwickelt
- erstmalig wurden satellitenbasierte bodennahe NO₂- und PM2.5 Konzentrationen für Deutschland ermittelt
- diese Daten sind auf dem EOC-Geoservice frei verfügbar
- Detaillierte Bottom-up-Emissionsmodellierung für den Kfz-Verkehr ist möglich, erfordert aber viel manuelle Arbeit bei der Zusammenführung, Harmonisierung und Attribuierung der Datensätze
- Die detaillierte Abbildung der zeitlichen Variabilität der Emissionen des Straßenverkehrs wirkt sich positiv auf die Modellgüte aus, sowohl bei ländlichen als auch bei städtischen Hintergrundstationen
- Erstmalig wurden TROPOMI-NO₂-Daten für drei Jahre in ein CTM integriert und Aussagen zu Emissionsstärken abgeleitet
- Bottom-up-Emissionsermittlung und satellitenbasierte Emissionskorrektur liefern qualitativ vergleichbare Ergebnisse
- Top-Down und bottom-up-Analyse zeigen gute Qualität des GRETA-Emissionsinventars für deutschlandweite Anwendungen
- Quellanalyse zeigt u. a. hohe Bedeutung der Autobahnen auch für städtische Hintergrundstationen
- Sich ergänzende Expertise zu Emissionen, Satellitendaten, Luftqualitätsmodellen und Datenassimilation verbesserte in der engen Zusammenarbeit das Gesamtverständnis für die korrekte Nutzung der Satellitendaten bei allen Beteiligten

Empfehlungen und Ausblick

- Weiterführung der Entwicklung von Monitoring-Strategien durch Kombination von Satellitendaten und Modellierungen in Teams mit Fachwissen aus allen Teilaspekten der Modellierung und Beobachtung
 - Weiterführung der Bereitstellung alternativer (abgeleiteter) Satellitenprodukte als Ergänzung zu operationellen Produkten der ESA für den Erkenntnisgewinn und zur Qualitätsverbesserung
 - Verbesserung von TROPOMI-Produkten auf nationaler Skala durch Nutzung hochauflösender A-priori-Informationen
 - Ausweitung der meteorologieabhängigen Emissionsmodellierung für den Verkehr und andere Sektoren
 - Durchführung zusätzlicher hochauflösender Modellierungen in Kombination mit Satelliteninformationen, um Top-down- und Bottom-up-Emissionen miteinander in Einklang zu bringen
 - Vergleich verschiedener Verfahren zur Emissionsinversionen
- „Formalisierung“ der Bereitstellung und Kombination von Grundlagendaten (Straßennetze, Mengen, Zuordnungen, ...) zum Verkehr, um sowohl Bottom-up- als auch Top-down-Emissionsberechnungen zu verbessern und aufwendige manuelle Arbeiten zu verringern
- Die Nutzung von Satellitendaten zu Aerosolen und Feinstaub erwies sich als wesentlich schwieriger als bei NO₂ und könnte von der Verwendung von Polarisationsinformationen aus neuen Missionen profitieren
- Weitere Arbeiten zur Vorbereitung der Nutzung der Daten der bevorstehenden geostationären Mission Sentinel-4 (ab 2024/25), die stündliche Daten für ganz Europa verspricht
- Anwendung der S-VELD Methoden für andere-(EU) Länder

Vielen Dank ...

- dem BMDV bzw. mFUND für die Förderung
- dem Projektträger TÜV für die Begleitung und Unterstützung
- dem S-VELD Beratungsgremium für die Begleitung und Unterstützung
- den Datenlieferanten
 - Deutscher Wetterdienst
 - Bundesanstalt für Straßenwesen
 - Umweltbundesamt
 - European Environment Agency
 - Space Agencies: ESA, EUMETSAT, NASA
 - Swansea University
- den weiteren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern

atmos.eoc.dlr.de/sveld/

DLR-IMF	DLR-DFD	IVU Umwelt	FU Berlin	TNO
Ka Lok Chan Song Liu Sora Seo Thomas Trautmann Jian Xu Diego Loyola	Thilo Erbertseder Gina Campuzano Ortiz Torsten Heinen Elena Kalusche Ehsan Khorsandi Andre Twele	Yvonne Breitenbach Volker Diegmann Anna Mahlau Lina Neunhäuserer Florian Tautz Heike Wursthorn	Sabine Banzaf Bijan Fallah Ingo Kirchner Joscha Pültz Ilona Jäkel	Enrico Dammers Arjo Segers Richard Kranenburg