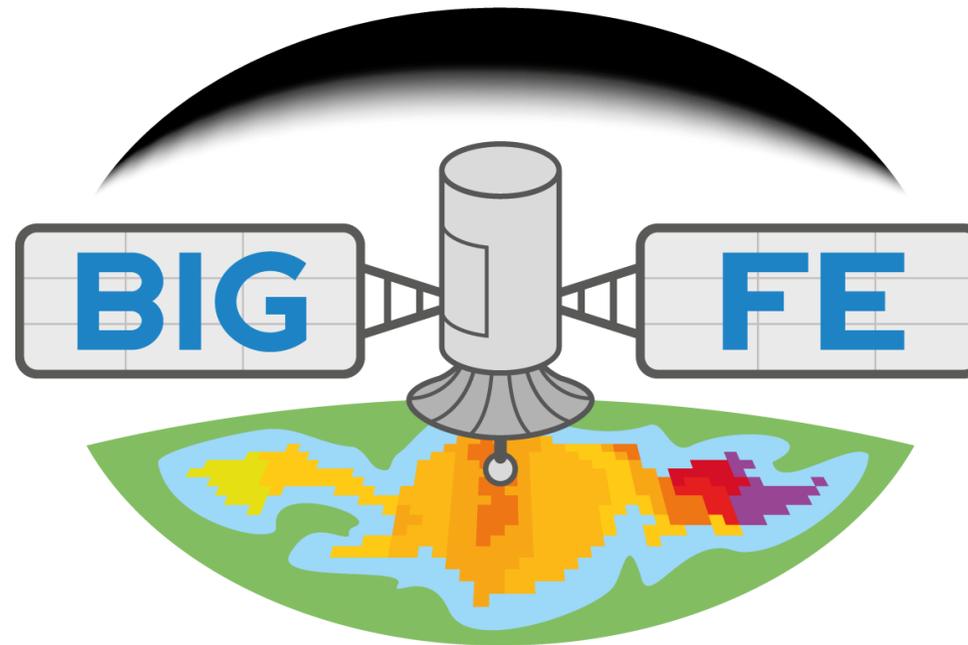


Gefördert durch:



Bundesministerium
für Verkehr und
digitale Infrastruktur



Erfassung der Wasserqualität und Wasserflächenausdehnung von **Binnengewässern** durch **Fernerkundung**



LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



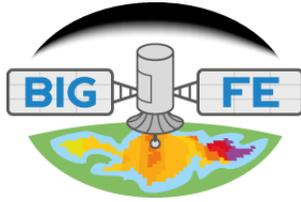


Arbeitspaket 1 - Wasserqualität

„Themenbereich Wassergüte: Belastbarkeit und Aussagekraft“



Ziele AP1



Zusammenführen von *in situ*-Wasserqualitätsdaten als Grundlage zur Validierung von Fernerkundungsprodukten

- Prozessierung,
- Extraktion und
- Post-Prozessierung der Fernerkundungsdaten

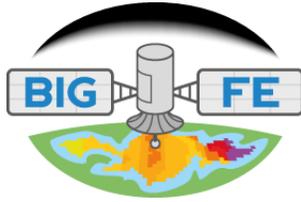
Validierung/Vergleich von *in situ*- und Fernerkundungsdaten

Mit AP2: Handlungsempfehlungen zur Methodik der Fernerkundung



Ziele AP1

- Prozessierung,
- Extraktion und
- Post-Prozessierung der Fernerkundungsdaten



Ergebnisse der Teilschritte:

Prozessierung

→ Raster-Datensatz mit Werten pro Pixel

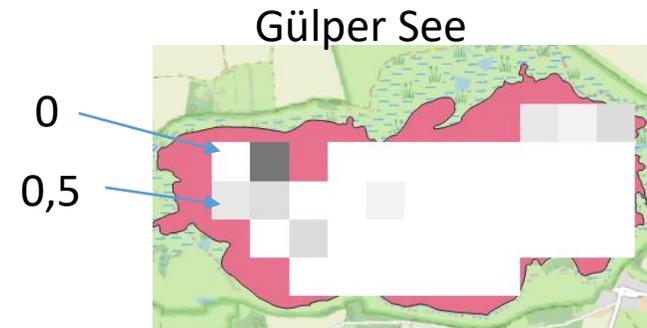
Extraktion

→ Tabelle mit (zusammengefassten) Werten pro zeitlicher und räumlicher Einheit

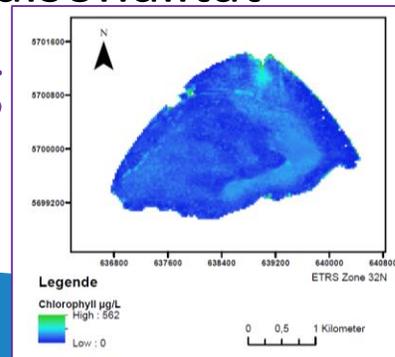
→ Zeitreihe, Saisonalität

Post-Prozessierung

→ z.B. Karten, „Cube“



Gülper See	Median Chlorophyll
16.05.20	0,6



Ziele AP1



Zusammenführen von *in situ*-Wasserqualitätsdaten als Grundlage zur Validierung von Fernerkundungsprodukten



- Prozessierung,
- Extraktion und
- Post-Prozessierung der Fernerkundungsdaten



Validierung/Vergleich von *in situ*- und Fernerkundungsdaten

Mit AP2:
Handlungsempfehlungen zur Methodik der Fernerkundung



AP1: Validierung/Vergleich von in situ- und Fernerkundungsdaten

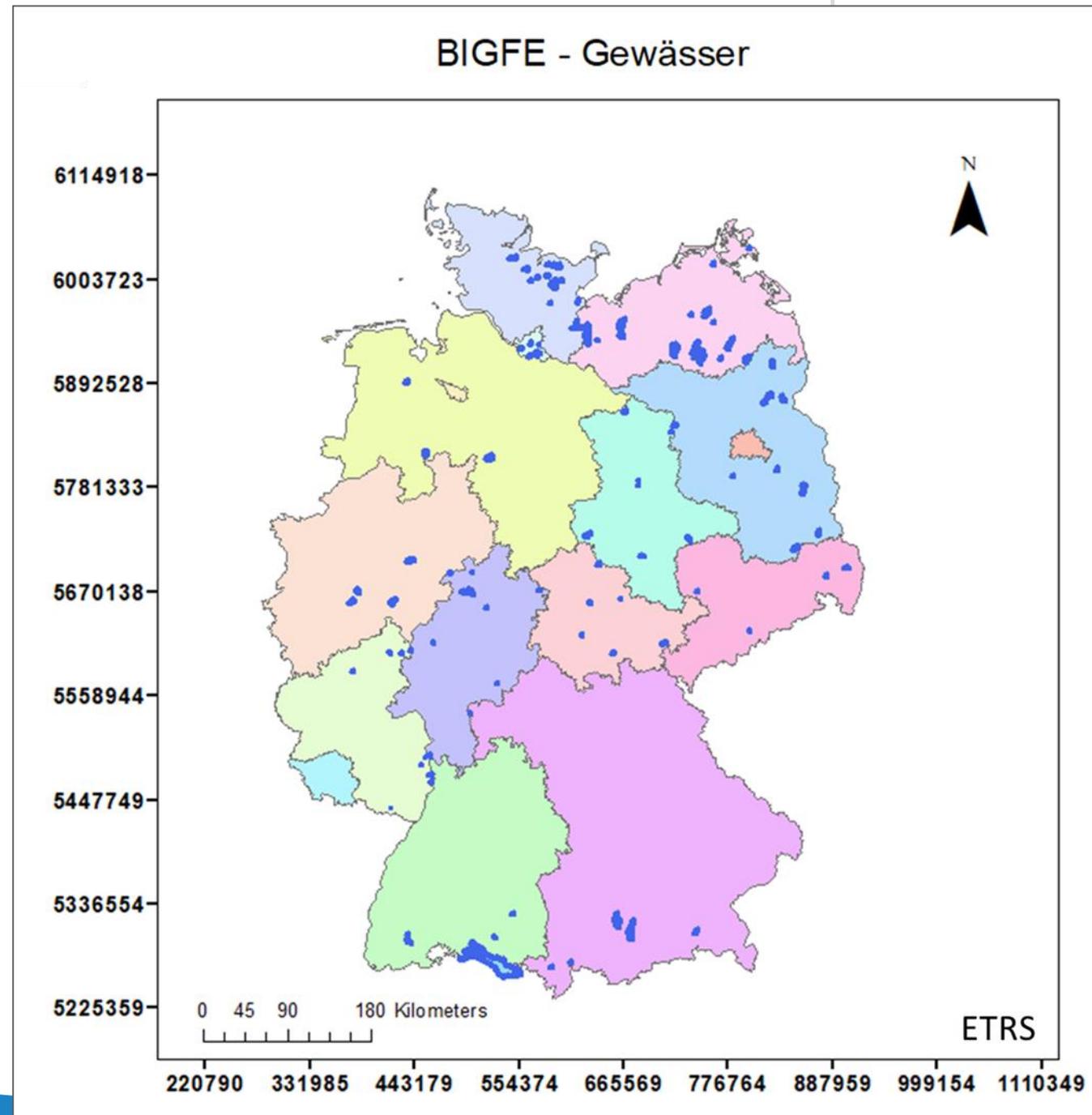


- *Ausgangslage und Vorgehen*
- *Vorentscheidungen zur Validierung*
- *Räumliche und zeitliche Auflösungen relativ zur In-situ Messstelle*
- *Vergleich Sentinel-2 und Sentinel-3*
- *Zeitreihen und Untersuchung saisonaler Muster*
- *Fazit und Ausblick*

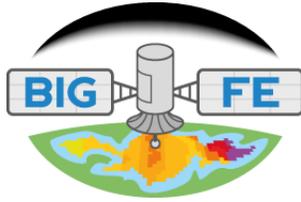


AP1: Gewässer

- 112 Gewässer in 13 Bundesländern
- Verschiedene Gewässertypen ..
- .. in verschiedenen biogeographischen Regionen

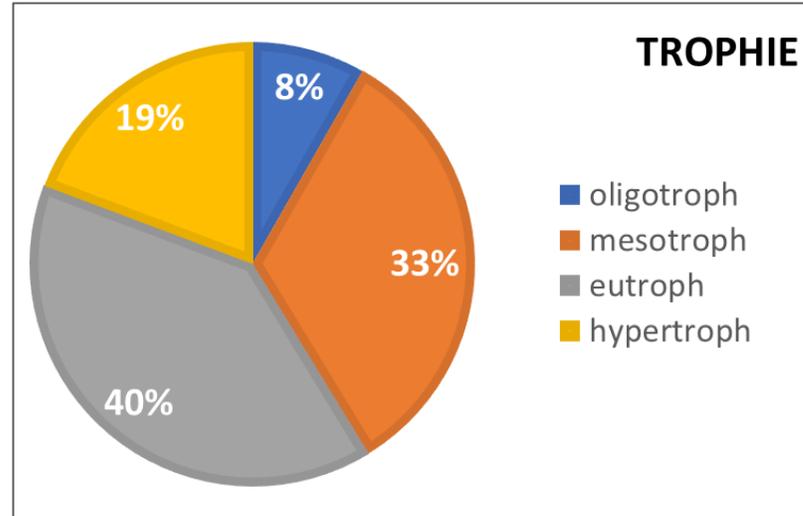


Gewässereigenschaften



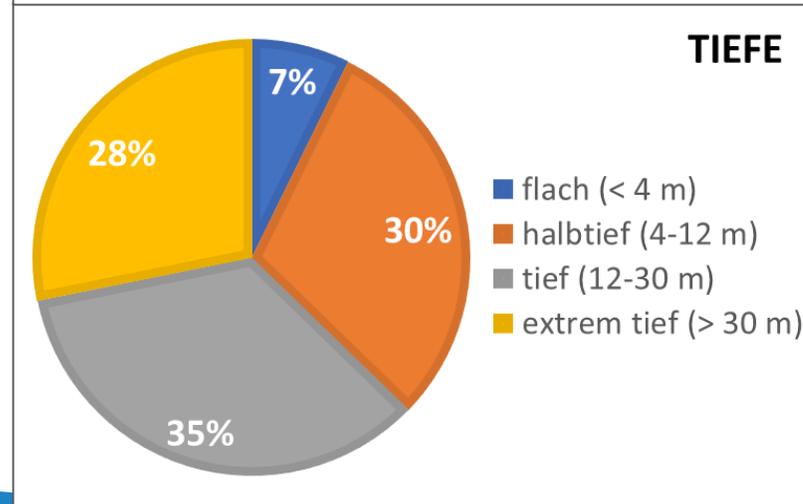
Trophie

- Alle Trophiestufen
 - Oligotroph (z.B. Trinkwassertalsperren) bis polytroph bzw. hypertroph



Tiefe

- Max. Tiefe zwischen 1,4 m (Dümmer, Niedersachsen) und 253 m (Bodensee, Baden-Württemberg)



Gewässereigenschaften

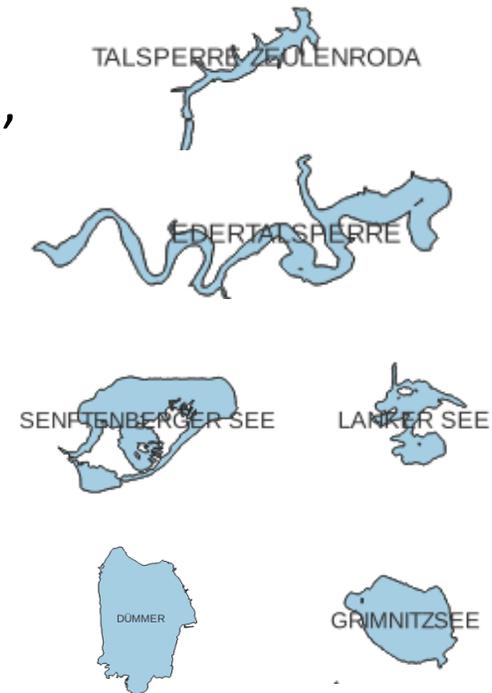


Oberfläche

- Oberfläche zwischen 6.1 ha (Badeweiher Neuhofen „Steinerne Brücke“) und 47293 ha (Bodensee, Baden-Württemberg)

Gewässerform

- Langgestreckt (diverse Talsperren, Schmäler Luzin)
- Lang und gewunden (diverse Talsperren)
- Viele „Arme“ (z.B. Lanker See, Senftenberger See)
- Kreisrund (m.o.w.) (Grimnitzsee, Dümmer)

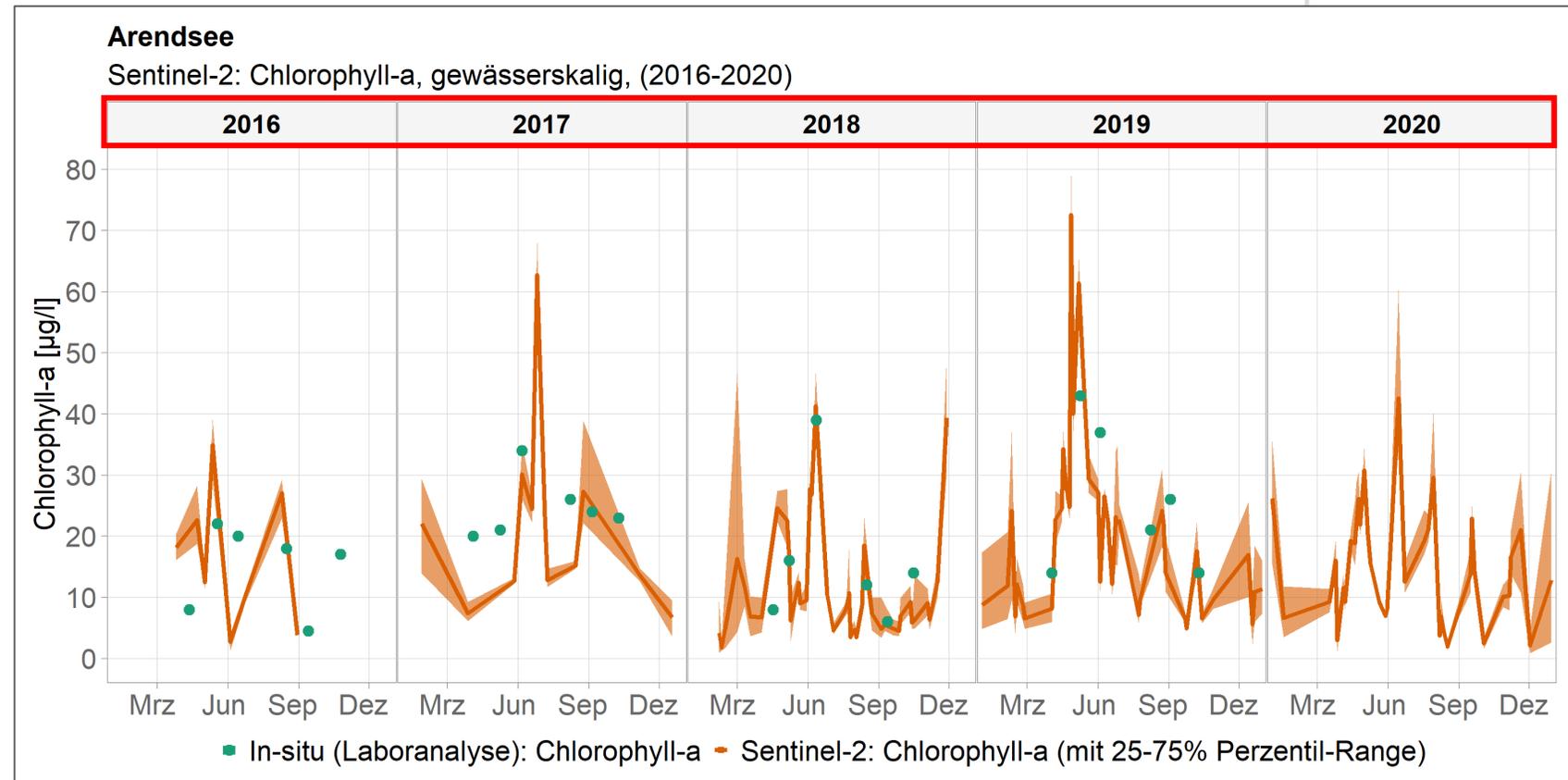


Ziel-Variablen und Zeitraum



- Variablen

- Chlorophyll-a
- Trübung
- Sichttiefe
- Cyanobakterien-Blüten
- Temperatur



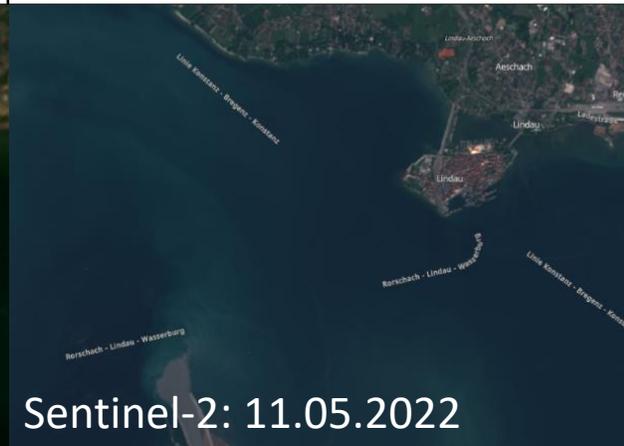
Satelliten



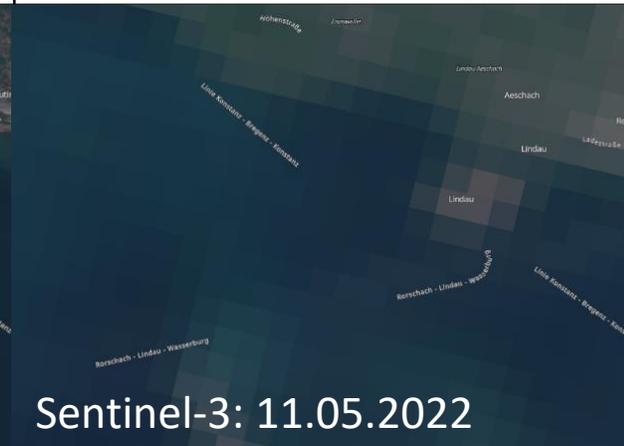
Landsat-8	Sentinel-2	Sentinel-3
30x30 m	10x10 m; 30x30 m; 60x60 m	300x300 m
Überflüge 16 Tage Rhythmus	Überflüge 5 Tage Rhythmus	Überflüge täglich
Operational Land Imager (OLI) und Thermal Infrared Sensor (TIRS)	Multispectral imager (MSI)	Ocean and Land Colour Instrument (OLCI), Sea and Land Surface Temperature Radiometer (SLSTR)
9 Bänder für OLI und 2 Bänder für TIRS	13 Bänder	21 Bänder für OLCI und 9 Bänder für SLSTR



Landsat: 14.05.2022



Sentinel-2: 11.05.2022

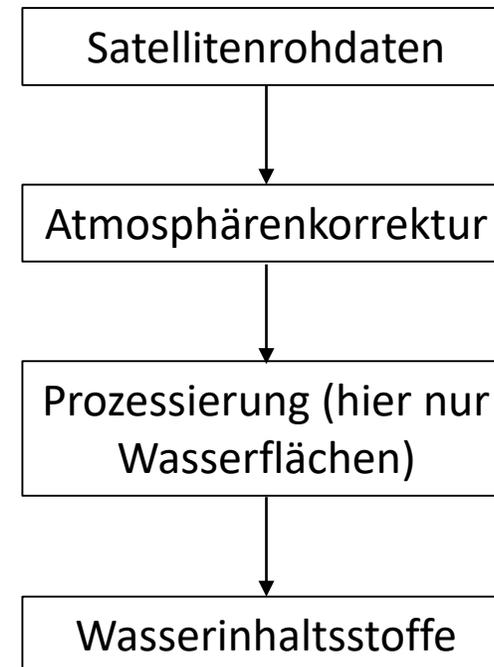


Sentinel-3: 11.05.2022

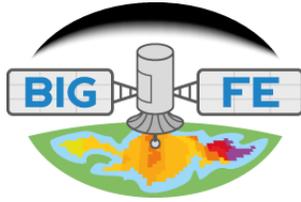


Verfahren der Prozessierung

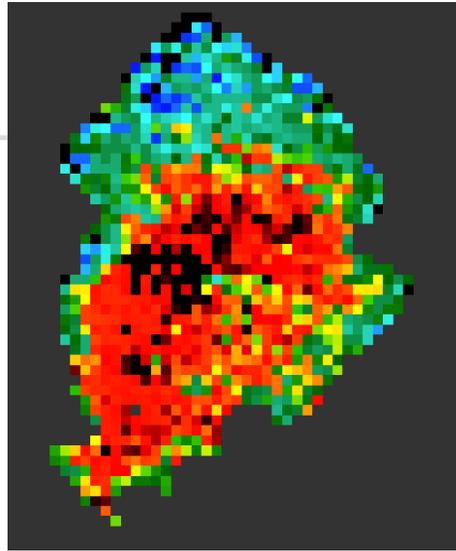
- EOMAP
 - Analytisches Modell, basierend auf physikalischen Gesetzen
- Brockmann Consult
 - Künstliche Intelligenz, basierend auf physikalischen Modellierungen, kombiniert mit an in-situ Daten kalibrierten Algorithmen



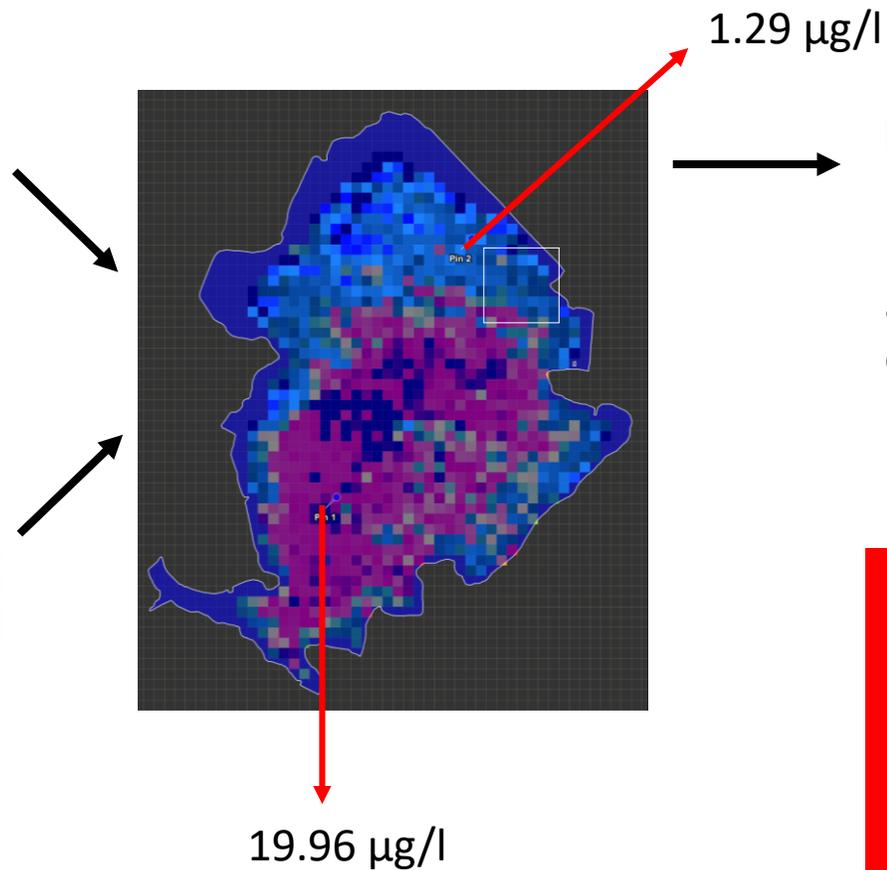
Extraktion



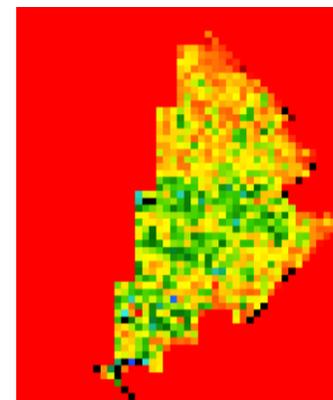
Produkt



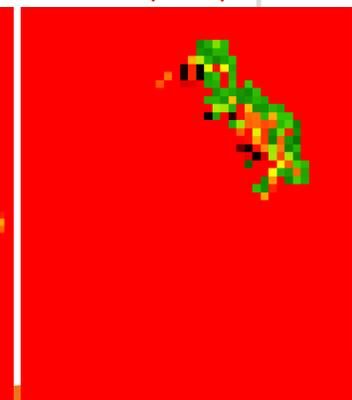
Gewässer-
umrandung/
Messstelle



Ermittlung von Median, 25% Perzentil
und 75% Perzentil
→ Tageswert entspricht dem Median
aller Pixelwerte des gesamten
Gewässers bzw. des Makropixels



06.04.2018



08.06.2018

Min.
30%

Datengrundlage – Fernerkundungsdaten

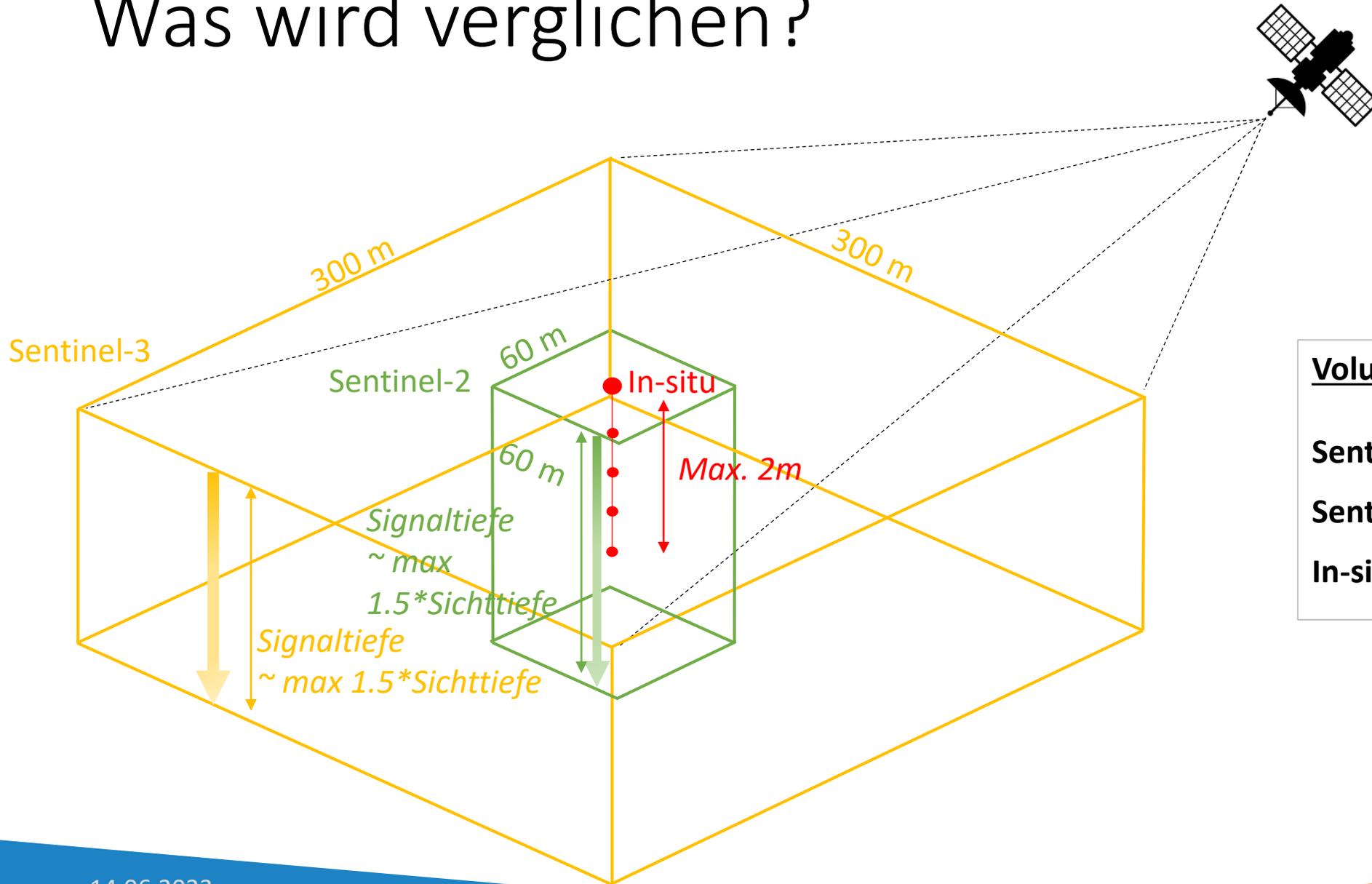


Datenanzahl - Sentinel-2	2016	2017	2018	2019	2020	Gesamter Zeitraum
Min/Gewässer	1	2	4	5	5	17
Max/Gewässer	16	34	55	49	58	209
Durchschnitt	8	11	29	25	29	102
Gesamt	823	1246	3257	2787	3294	11407

→ 21 Aufnahmen pro Gewässer und Jahr für Sentinel-2

→ 35 Aufnahmen pro Gewässer und Jahr für Sentinel-3

Was wird verglichen?



Volumina (Sichttiefe 2m):

Sentinel-3: 270.000 l

Sentinel-2: 10.080 l

In-situ: Wenige ml – einige l

Datengrundlage – In-situ-Daten



- Punkt- und Integralproben aus unterschiedlichen Tiefen
 - Anzahl Punktproben (bis 2m): **22075**
 - Anzahl Integralproben (0m – max. 34m): **4399**
 - 10 % der Integralproben mit Probenahmetiefen von mehr als 10m

Datenanzahl - In-situ	Chlorophyll	Trübung	Sichttiefe	Cyano- bakterien	Temperatur
Min/Gewässer	1	2	2	1	6
Max/Gewässer	965	972	401	979	1821
Durchschnitt	60	191	39	40	106
Gesamt	6046	2673	3643	3286	10826

Umgang mit „Ausreißern“

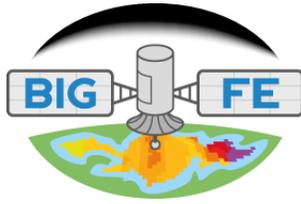


Variable	Einheit	Minimum	Maximum
Chlorophyll-a	µg/L	0.01	400
Trübung	FNU	0.01	100
Sichttiefe	m	0.05	20
Temperatur	°C	-5	40



Charakteristika der Fernerkundung

1. Wolken und Wolkenshatten



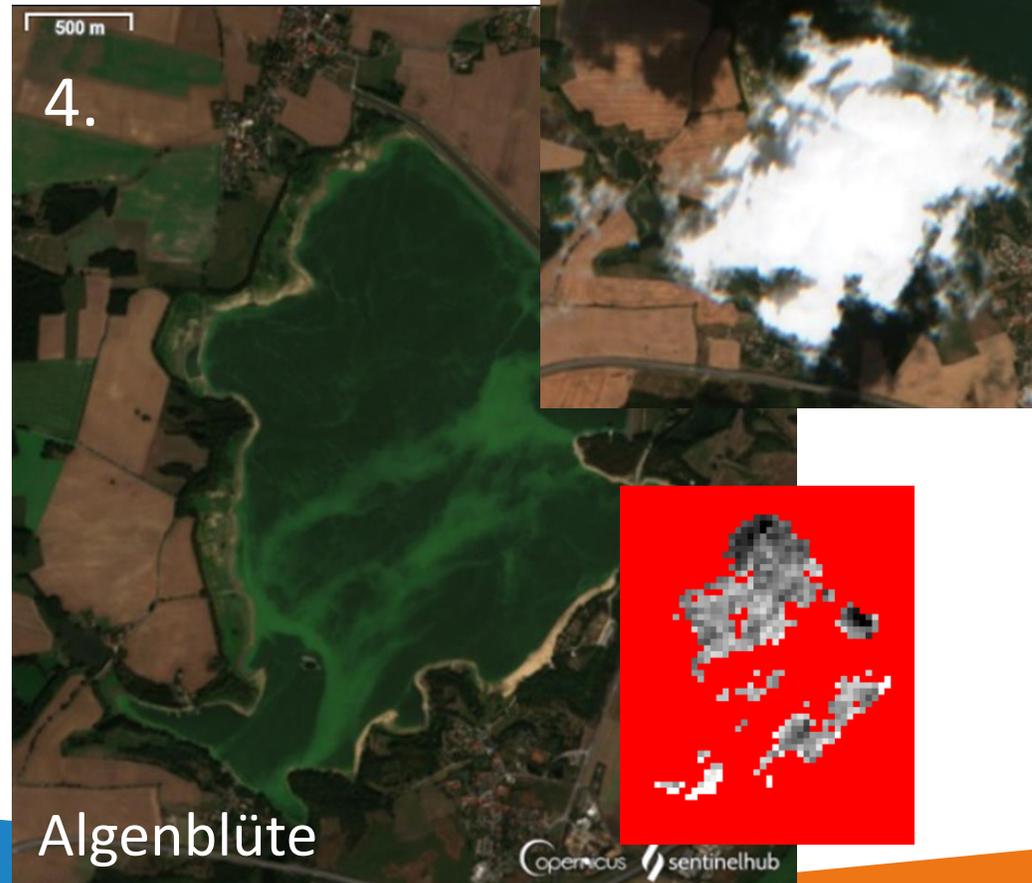
2. Dunststreifen



3. Sonnenreflektion

4. Algenblüte

5. Flachwasserzonen
/Randbereich



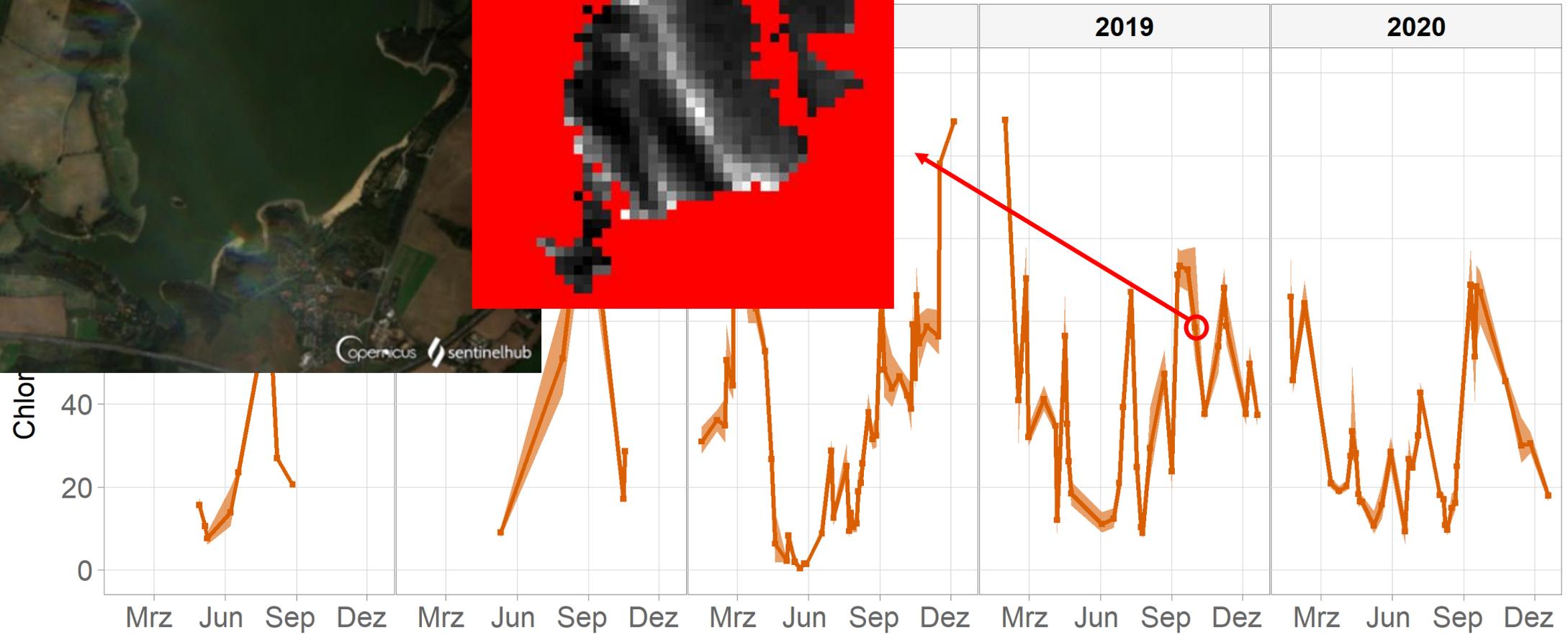
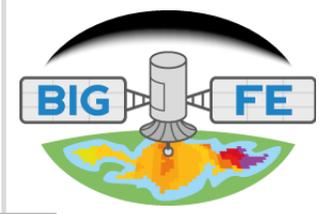


2019-10-01

500 m

copernicus sentinelhub

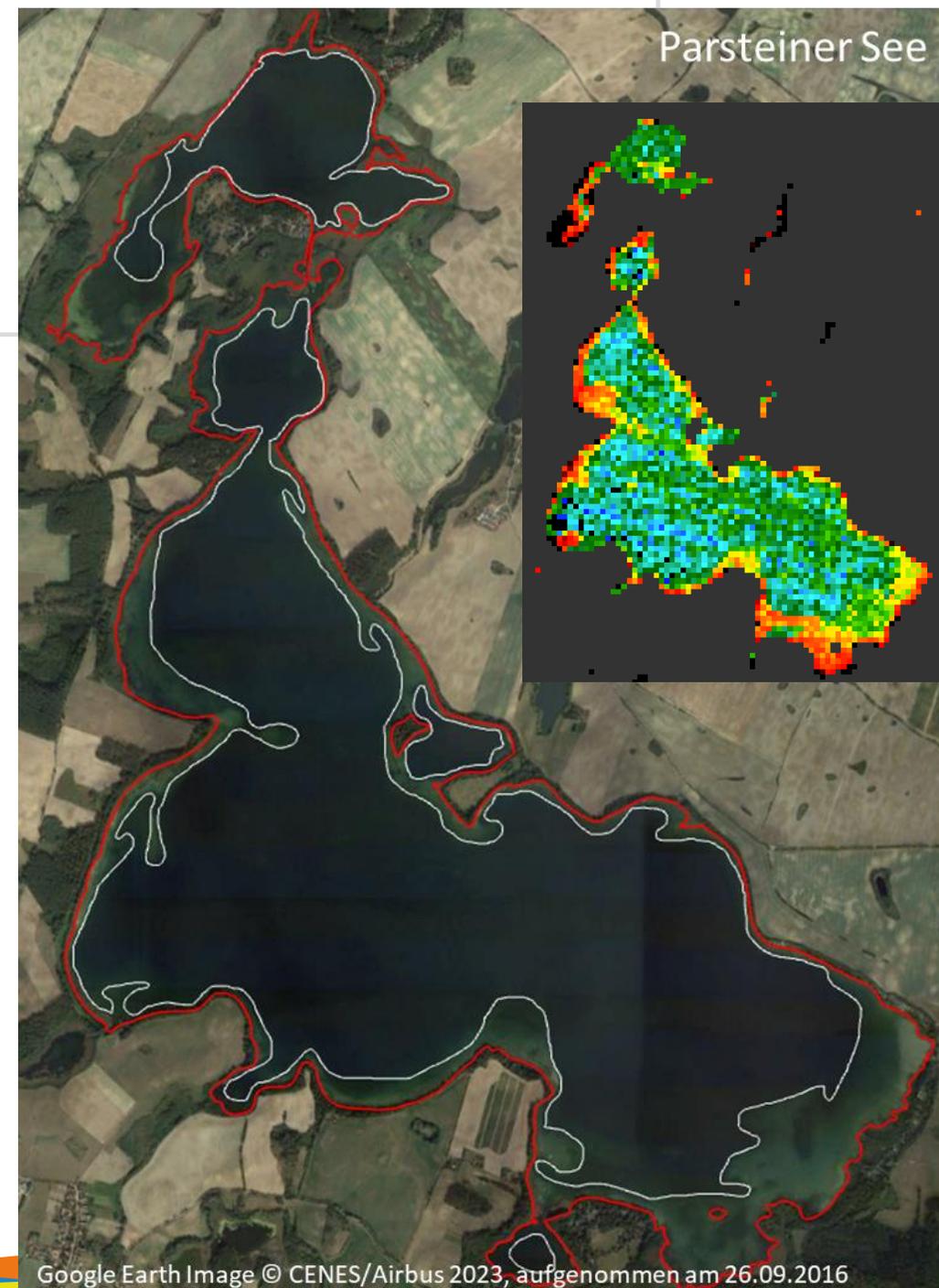
erkundung



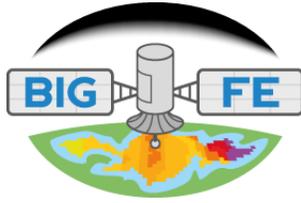
— Sentinel-2: Chlorophyll-a (mit 25-75% Perzentil-Range)

Flachwasserzonen

Satellit	Parameter	\bar{x}_d	p-Wert
Sentinel-2	Chlorophyll_a	0.44 $\mu\text{g/L}$	0.00
	Trübung	0.06 FNU	0.46
	Sichttiefe	0.08 m	0.00
Sentinel-3	Chlorophyll_a	0.29 $\mu\text{g/L}$	0.01
	Trübung	0.09 FNU	0.33
Landsat-8	Temperatur	0.06 $^{\circ}\text{C}$	0.00



AP1: Validierung/Vergleich von in situ- und Fernerkundungsdaten



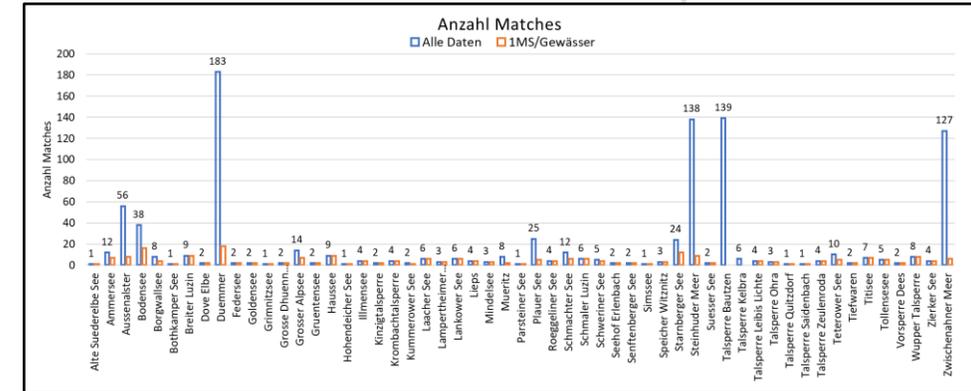
- *Ausgangslage und Vorgehen*
- ***Vorentscheidungen zur Validierung***
- *Räumliche und zeitliche Auflösungen relativ zur In-situ Messstelle*
- *Vergleich Sentinel-2 und Sentinel-3*
- *Zeitreihen und Untersuchung saisonaler Muster*
- *Fazit und Ausblick*



Vorentscheidungen/-auswahl



1. Auswahl Gewässer Sentinel-3
2. Homogenisierung der Anzahl der Matches über die Gewässer
3. Entfernen von Sonden- und Bojendaten für den Vergleich
4. Auswahl der Fehlermaße
 - **RMSE** (Mittleres Abweichungsquadrat)
 - **MB** (Verzerrung)
 - **MAE** (Mittlerer absoluter Fehler)



$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{sat} - y_{insitu})^2}$$

$$MB = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_{sat} - y_{insitu})$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_{sat} - y_{insitu}|$$

Auswahl Gewässer Sentinel-3

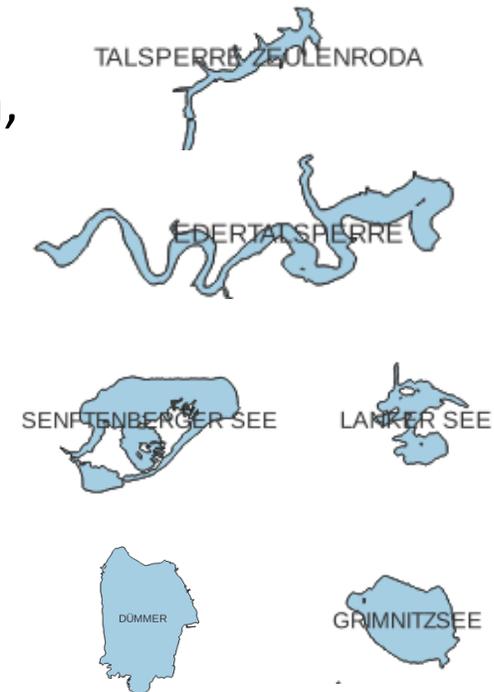


Oberfläche

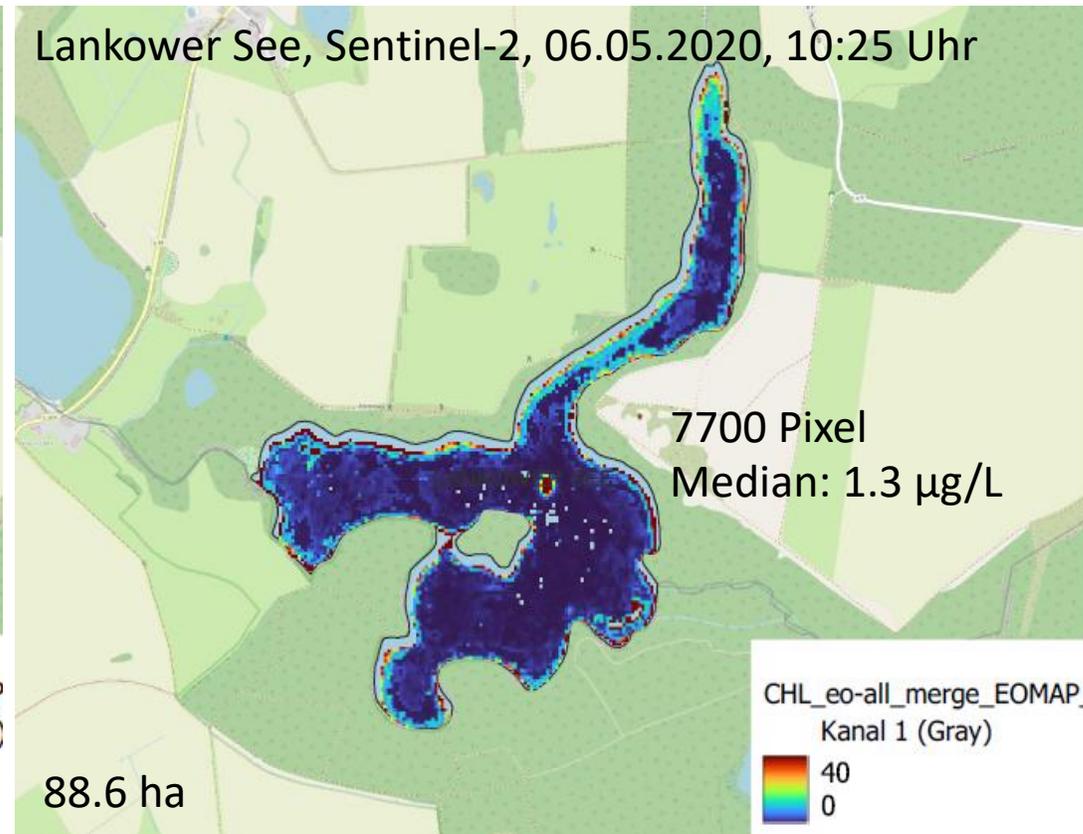
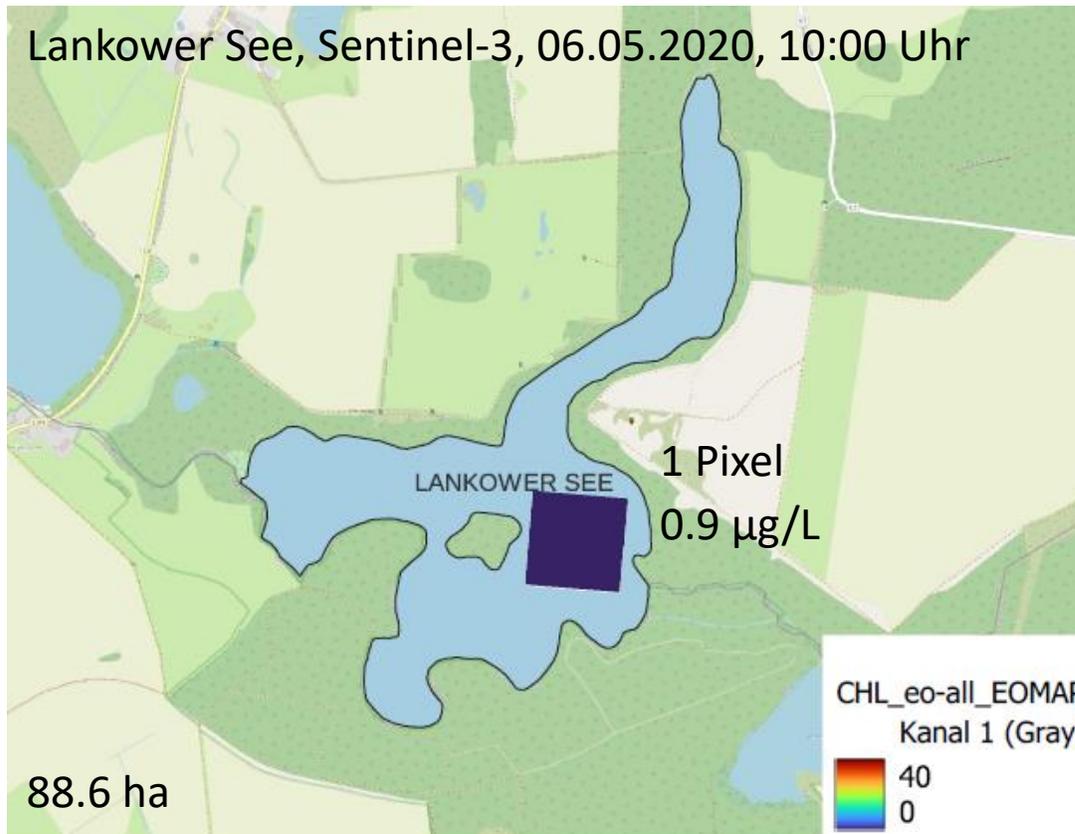
- Oberfläche zwischen 6.1 ha (Badeweiher Neuhofen „Steinerne Brücke“) und 47293 ha (Bodensee, Baden-Württemberg)

Gewässerform

- Langgestreckt (diverse Talsperren, Schmäler Luzin)
- Lang und gewunden (diverse Talsperren)
- Viele „Arme“ (z.B. Lanker See, Senftenberger See)
- Kreisrund (m.o.w.) (Grimnitzsee, Dümmer)



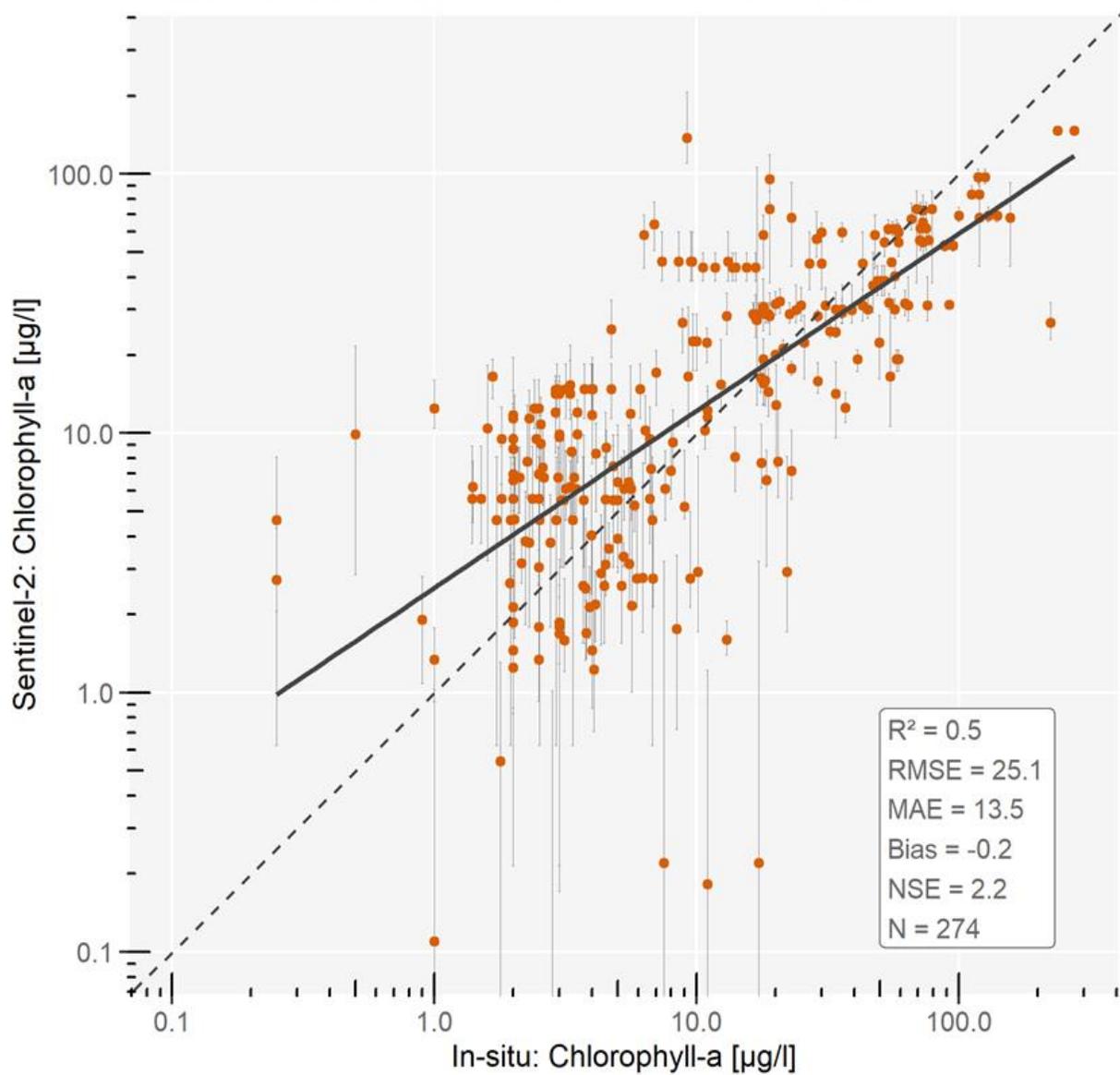
Auswahl Gewässer – Sentinel-3



→ In Abhängigkeit von Gewässeroberfläche und –form wurden 58 der Gewässer ausgewählt

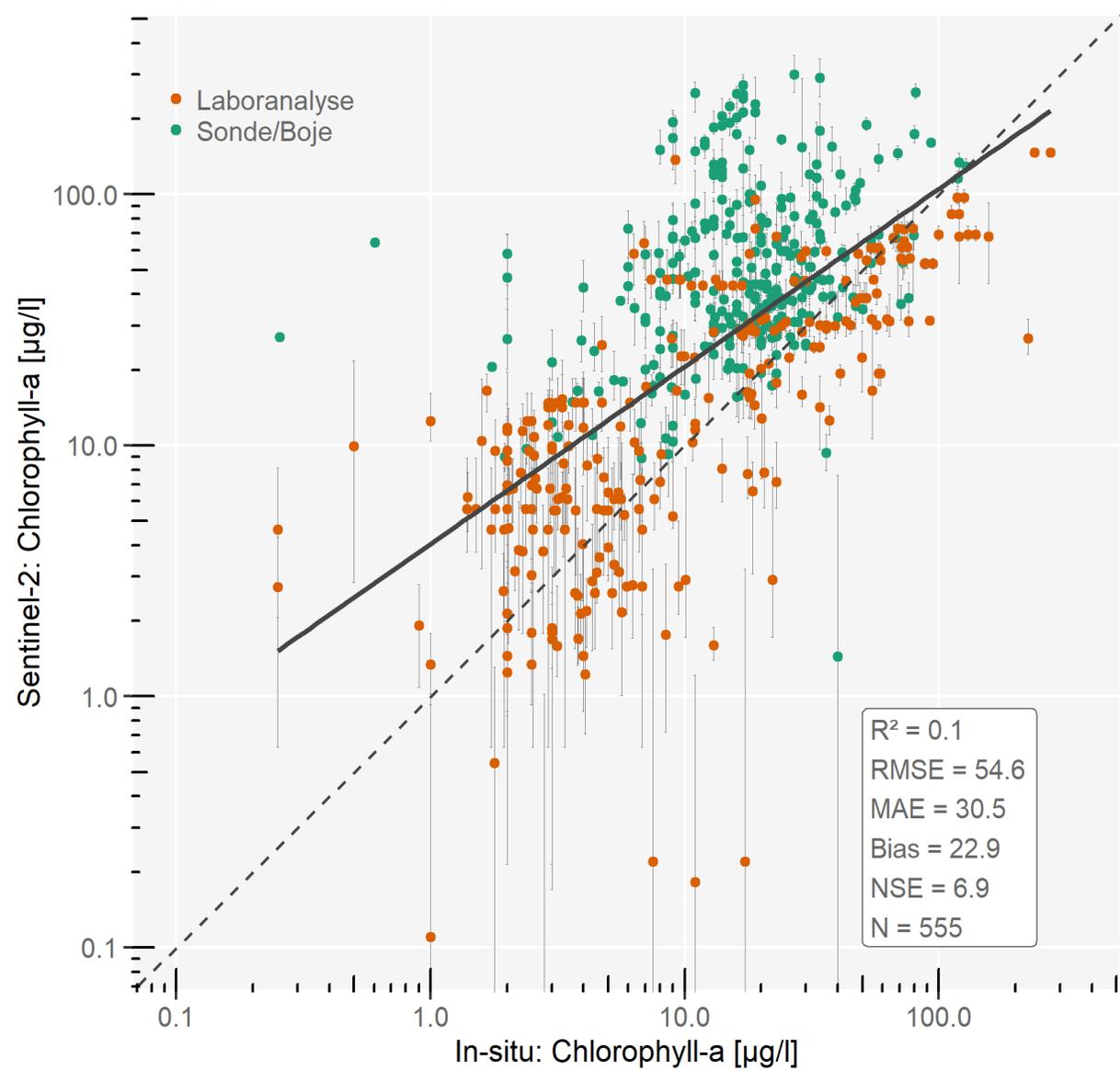
Chlorophyll-a

(Tag-genaue Matches, gesamtes Gewässer, ohne Sonde/Boje)



Chlorophyll-a

(Tag-genaue Matches, gesamtes Gewässer)



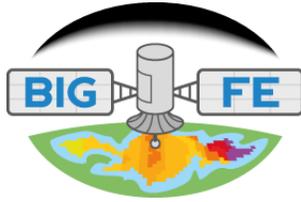
AP1: Validierung/Vergleich von in situ- und Fernerkundungsdaten



- *Ausgangslage und Vorgehen*
- *Vorentscheidungen zur Validierung*
- ***Räumliche und zeitliche Auflösungen relativ zur In-situ Messstelle***
- *Vergleich Sentinel-2 und Sentinel-3*
- *Zeitreihen und Untersuchung saisonaler Muster*
- *Fazit und Ausblick*



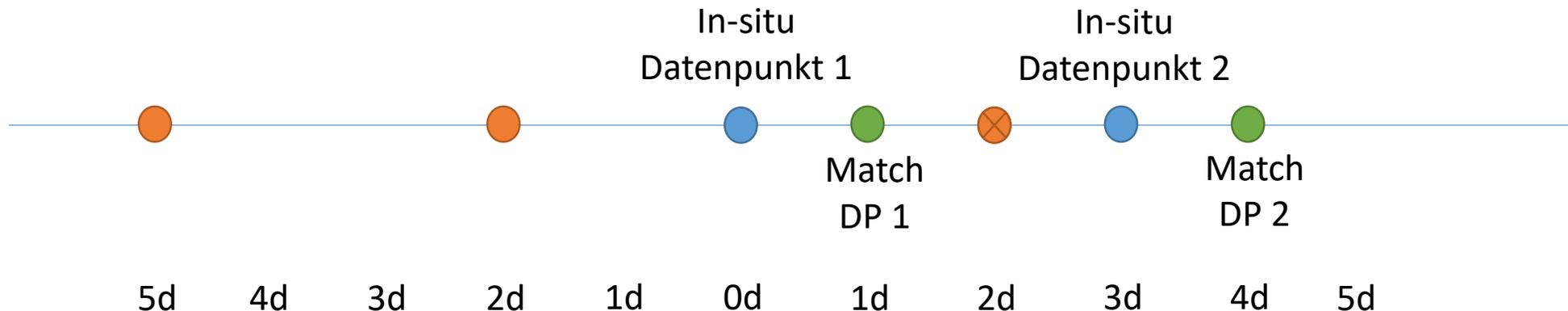
Umgang mit zeitlichen Mismatches



Zeitliche Auflösungen:

- Tag-genaue Matches, +/- 1d Matches und +/- 5d Matches

.... bei räumlicher Auflösung: Gewässerskalig



Gegenüberstellung zeitlicher Auflösungen



Fehlermaße zeitlich (räumliche Auflösung: Gewässerskalig)			1 MS/Gewässer			1 MS/Gewässer			1 MS/Gewässer			Anzahl Matches			Anzahl Gewässer			
Alle Gewässer			RMSE			Bias			MAE									
Auswertungsplattform	Sensor	Mess-Größe	0 Tage	1 Tag	5 Tage	0 Tage	1 Tag	5 Tage	0 Tage	1 Tag	5 Tage	0 Tage	1 Tag	5 Tage	0 Tage	1 Tag	5 Tage	
Calvalus	Sentinel 2	Chlorophyll	22.28	25.47	28.84	0.74	0.50	1.1	11.97	13.01	14.52	165	466	1035	64	82	91	
		Sichttiefe	1.88	1.91	1.97	0.89	0.73	0.7	1.22	1.22	1.24	132	394	912	54	71	80	
		Trübung	3.87	4.73	8.00	1.51	1.58	2.8	2.27	2.58	3.80	35	109	260	10	11	12	
	Sentinel 3	Chlorophyll	39.46	40.03	34.06	11.99	11.00	8.3	21.76	22.38	19.15	187	395	761	42	47	52	
		Sichttiefe	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		Trübung	10.26	11.72	11.06	5.84	4.31	3.4	6.86	8.12	6.89	18	38	77	2	3	3	
	Landsat 8	Temperatur	2.99	3.19	3.23	1.42	1.38	1.3	2.27	2.35	2.41	87	253	788	47	72	89	
	Eolytics	Sentinel 2	Chlorophyll	47.78	49.48	52.89	0.02	1.38	2.48	20.73	20.54	22.06	217	620	1452	59	81	86
			Sichttiefe	5.08	4.68	4.41	2.99	2.57	2.20	3.54	3.19	2.98	149	454	1169	51	72	76
Trübung			11.46	9.29	9.97	1.94	-0.14	0.23	5.24	4.54	4.63	50	183	470	10	11	11	
Sentinel 3		Chlorophyll	40.67	37.14	39.93	8.94	10.17	13.43	14.90	15.60	18.26	67	194	485	34	37	41	
		Sichttiefe	3.35	3.59	4.24	1.72	1.91	2.48	2.32	2.33	2.83	54	145	361	26	31	34	
		Trübung	8.88	21.87	20.41	6.03	10.69	11.36	6.14	10.83	11.84	10	23	71	3	3	3	
Landsat 8		Temperatur	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

Gegenüberstellung zeitlicher Auflösungen



Sensor	Variable	MAE			Anzahl Matches			Anzahl Gewässer		
		0 Tage	1 Tag	5 Tage	0 Tage	1 Tag	5 Tage	0 Tage	1 Tag	5 Tage
Sentinel 2	Chlorophyll	11.97	13.01	14.52	165	466	1035	64	82	91
	Sichttiefe	1.22	1.22	1.24	132	394	912	54	71	80
	Trübung	2.27	2.58	3.80	35	109	260	10	11	12
Sentinel 3	Chlorophyll	21.76	22.38	19.15	187	395	761	42	47	52
	Sichttiefe	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Trübung	6.86	8.12	6.89	18	38	77	2	3	3
Landsat 8	Temperatur	2.27	2.35	2.41	87	253	788	47	72	89

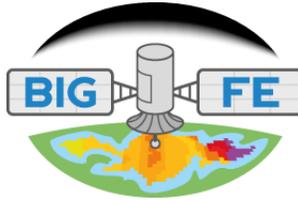
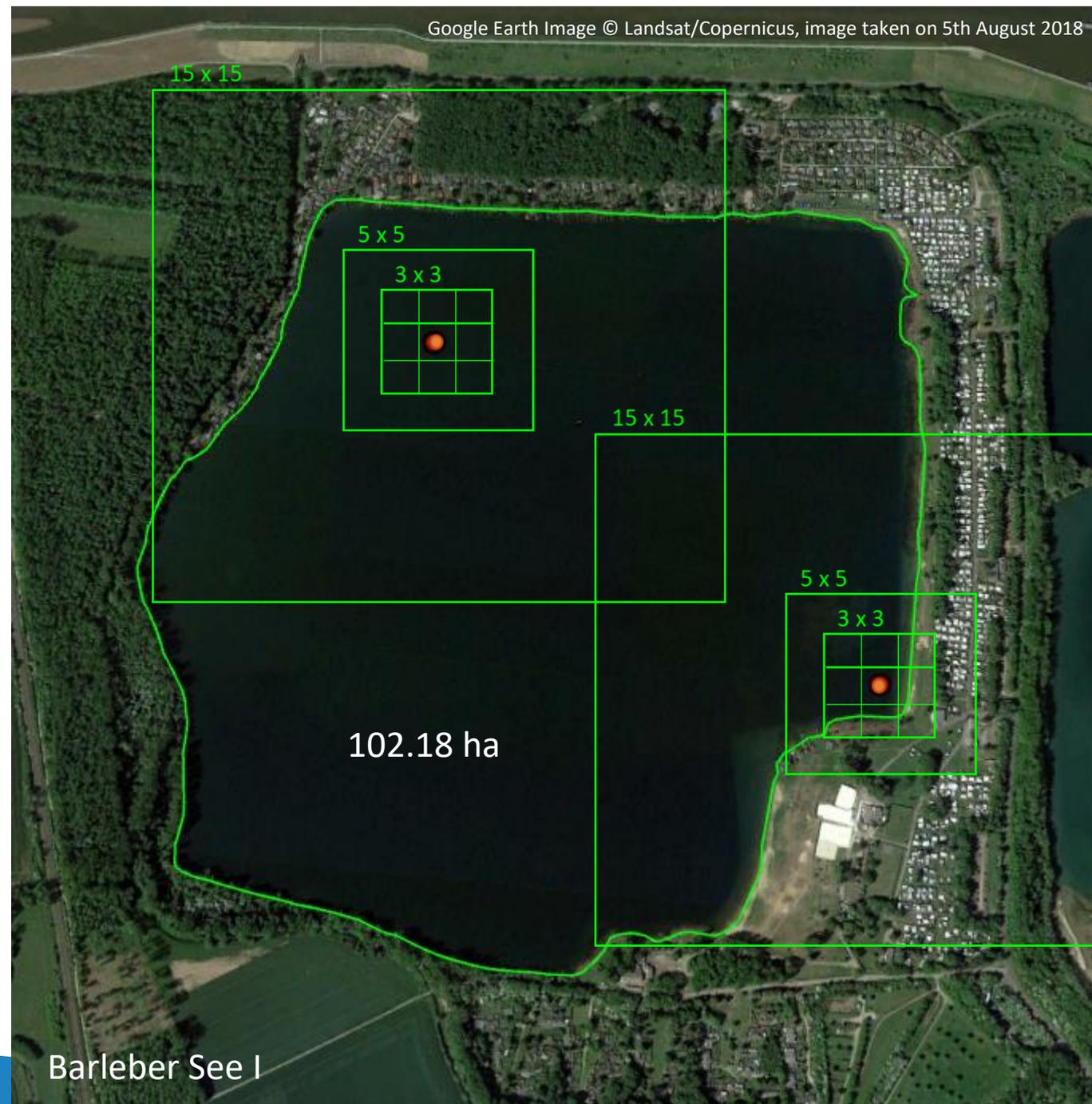
Gegenüberstellung räumlicher Auflösungen

Räumliche Auflösungen:

- Sentinel-2: **3x3 Pixel** (30x30m/ 180x180m), **5x5 Pixel** (50x50m/ 300x300m), **15x15 Pixel** (150x150m/ 900x900m), gesamtes Gewässer (Gewässeroberfläche)
- Sentinel-3: 1x1 Pixel (300x300m), 3x3 Pixel (900x900m), gesamtes Gewässer (Gewässeroberfläche)

.... bei zeitlicher Auflösung:

- Tag-genaues Match zwischen In-situ und Fernerkundungsdaten



Gegenüberstellung räumlicher Auflösungen



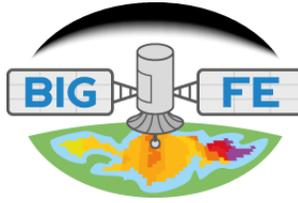
Fehlermaße räumlich (zeitliche Auflösung: Tag-genau)			1 MS/Gewässer					1 MS/Gewässer					1 MS/Gewässer					Anzahl Matches					Anzahl Gewässer				
Alle Gewässer			RMSE					Bias					MAE														
Auswertungsplattform	Sensor	Mess-Größe	1 Pixel	3 x 3 Pixel	5 x 5 Pixel	15 x 15 Pixel	Gewässer-skalig	1 Pixel	3 x 3 Pixel	5 x 5 Pixel	15 x 15 Pixel	Gewässer-skalig	1 Pixel	3 x 3 Pixel	5 x 5 Pixel	15 x 15 Pixel	Gewässer-skalig	1 Pixel	3 x 3 Pixel	5 x 5 Pixel	15 x 15 Pixel	Gewässer-skalig	1 Pixel	3 x 3 Pixel	5 x 5 Pixel	15 x 15 Pixel	Gewässer-skalig
Calvalus	Sentinel 2	Chlorophyll	-	22.28	22.97	19.04	26.04	-	0.74	0.41	0.92	0.89	-	11.97	12.57	11.83	12.83	165	165	134	165	64	63	49	62		
		Sichttiefe	-	1.88	1.88	1.90	1.81	-	0.89	0.81	0.77	0.77	-	1.22	1.22	1.19	1.81	132	131	99	125	54	54	39	53		
		Trübung	-	5.04	4.98	5.25	3.87	-	2.48	2.02	1.70	1.51	-	3.31	3.32	3.67	2.27	36	32	16	35	11	9	5	10		
	Sentinel 3	Chlorophyll	-	36.67	30.03	-	39.46	-	13.09	8.28	-	11.99	-	19.99	17.02	-	21.76	176	209	-	187	48	49	-	42		
		Sichttiefe	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
		Trübung	-	11.37	13.12	-	10.26	-	7.46	5.74	-	5.84	-	8.13	8.73	-	6.86	12	23	-	18	2	3	-	2		
	Landsat 8	Temperatur	-	-	3.63	-	2.72	-	-	2.00	-	0.93	-	-	2.68	-	2.05	52	-	-	137	32	-	-	56		
	Eolytics	Sentinel 2	Chlorophyll	-	47.78	43.40	-	60.33	-	0.02	0.99	-	5.34	-	20.73	19.61	-	26.41	217	217	-	147	59	59	-	60	
			Sichttiefe	-	5.08	4.85	-	3.40	-	2.99	2.86	-	1.73	-	3.54	3.43	-	2.28	149	150	-	114	51	51	-	53	
Trübung			-	11.46	10.93	-	6.52	-	1.94	1.71	-	0.20	-	5.24	4.98	-	3.22	50	50	-	30	10	10	-	10		
Sentinel 3		Chlorophyll	-	44.93	40.67	-	39.77	-	11.99	8.94	-	13.70	-	18.43	14.90	-	19.07	67	67	-	239	34	34	-	45		
		Sichttiefe	-	3.73	3.35	-	3.44	-	1.86	1.72	-	1.89	-	2.54	2.32	-	2.30	51	54	-	162	27	26	-	36		
		Trübung	-	8.82	8.88	-	7.77	-	5.57	6.03	-	5.20	-	6.09	6.14	-	5.43	10	10	-	18	3	3	-	3		
Landsat 8		Temperatur	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		

Gegenüberstellung räumlicher Auflösungen



Sensor	Variable	MAE					Anzahl Matches				
		1 Pixel	3 x 3 Pixel	5 x 5 Pixel	15 x 15 Pixel	Gewässer-skalig	1 Pixel	3 x 3 Pixel	5 x 5 Pixel	15 x 15 Pixel	Gewässer-skalig
Sentinel 2	Chlorophyll		11.97	12.57	11.83	12.83	165	165	134	165	
	Sichttiefe		1.22	1.22	1.19	1.81	132	131	99	125	
	Trübung		3.31	3.32	3.67	2.27	36	32	16	35	
Sentinel 3	Chlorophyll	19.99	17.02			21.76	176	209		187	
	Sichttiefe	-	-			-	-	-		-	
	Trübung	8.13	8.73			6.86	12	23		18	
Landsat 8	Temperatur		2.68			2.05		52		137	

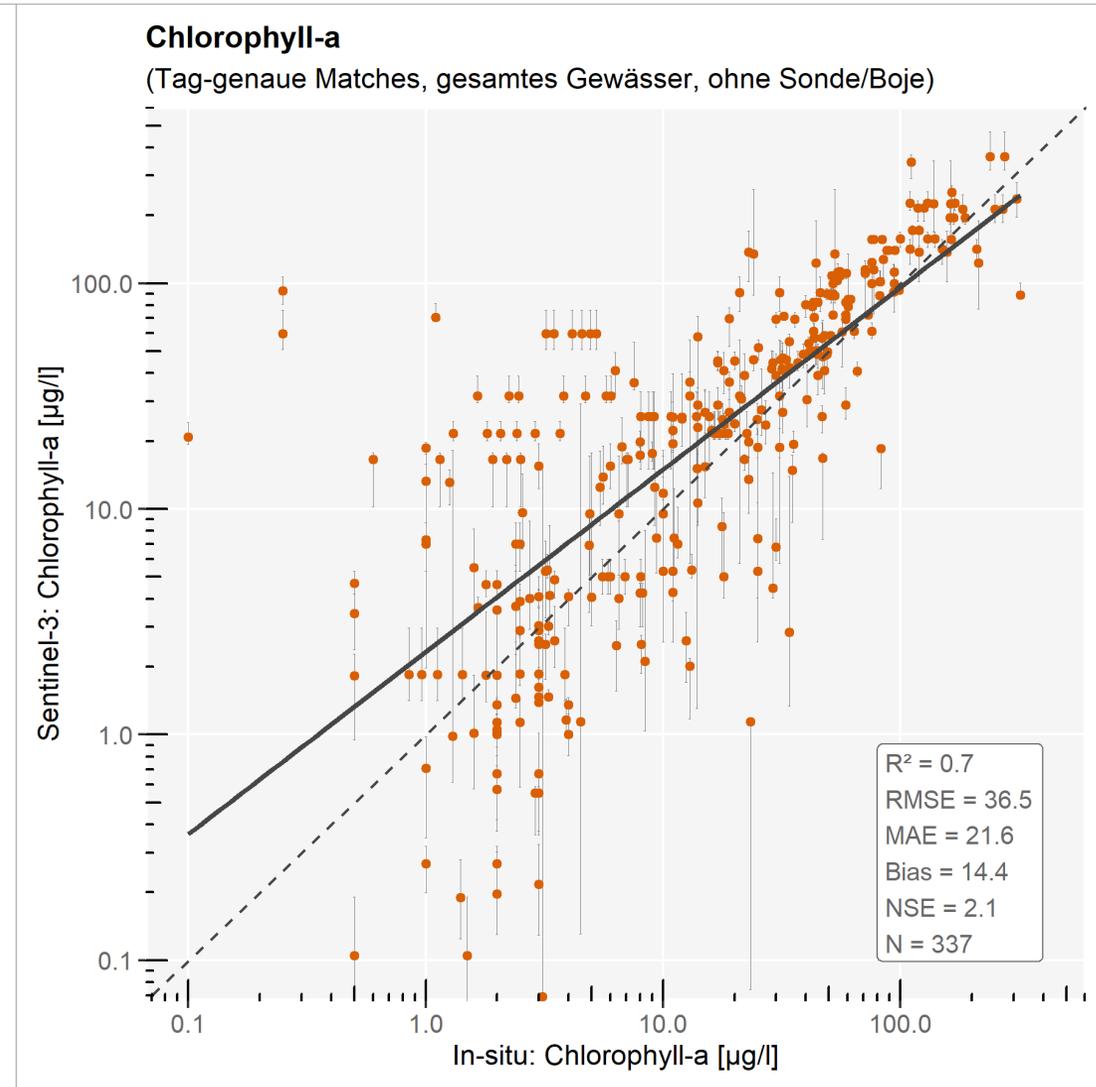
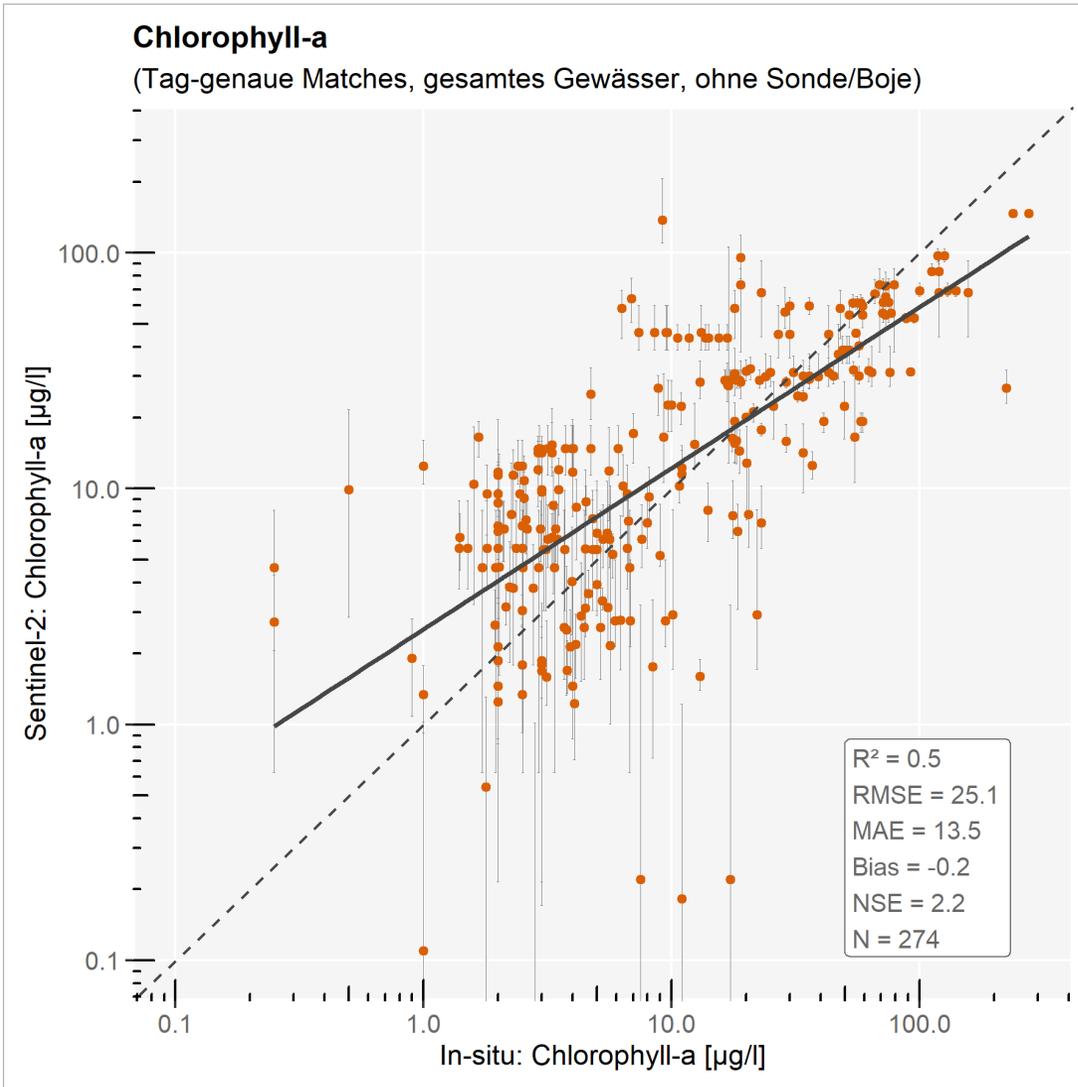
AP1: Validierung/Vergleich von in situ- und Fernerkundungsdaten



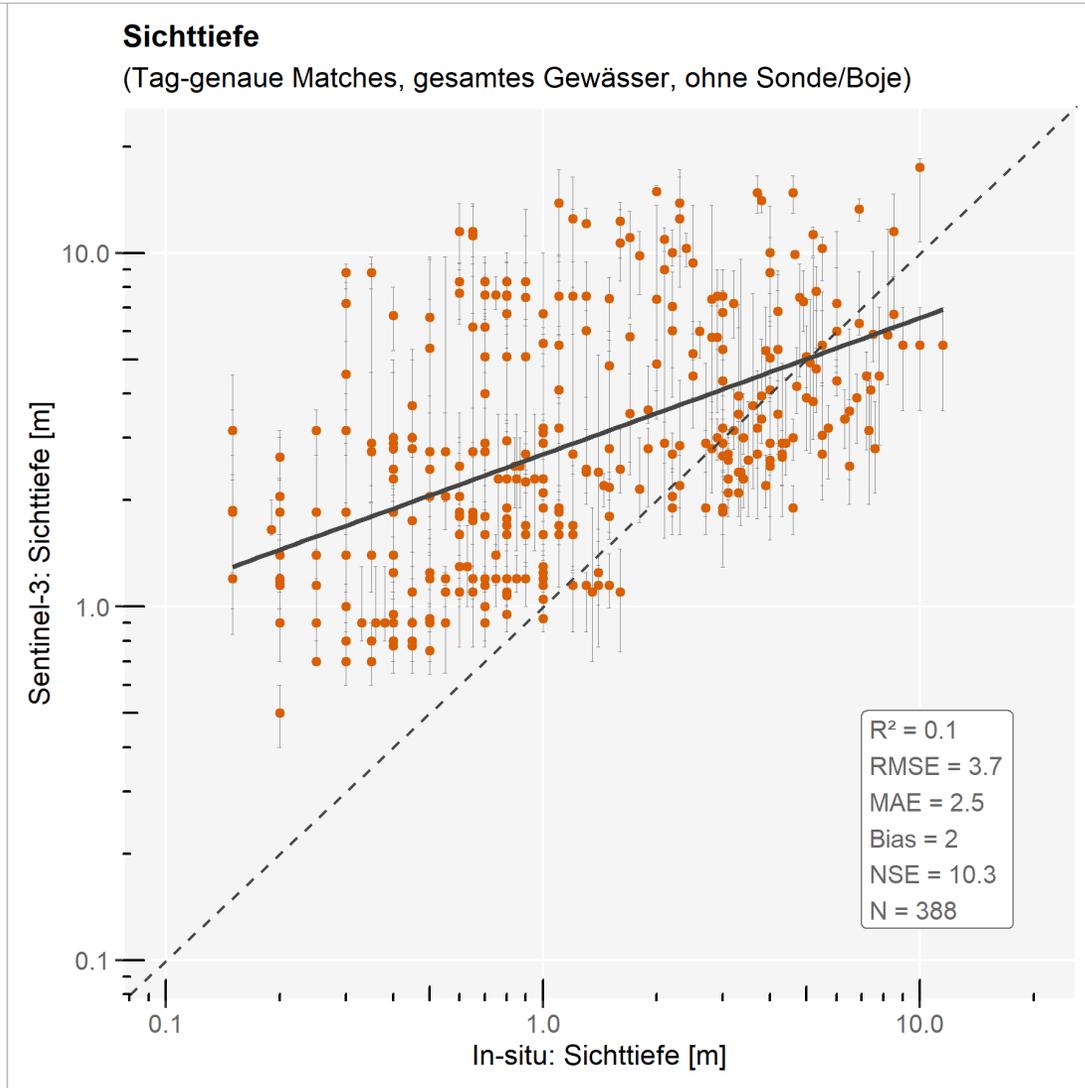
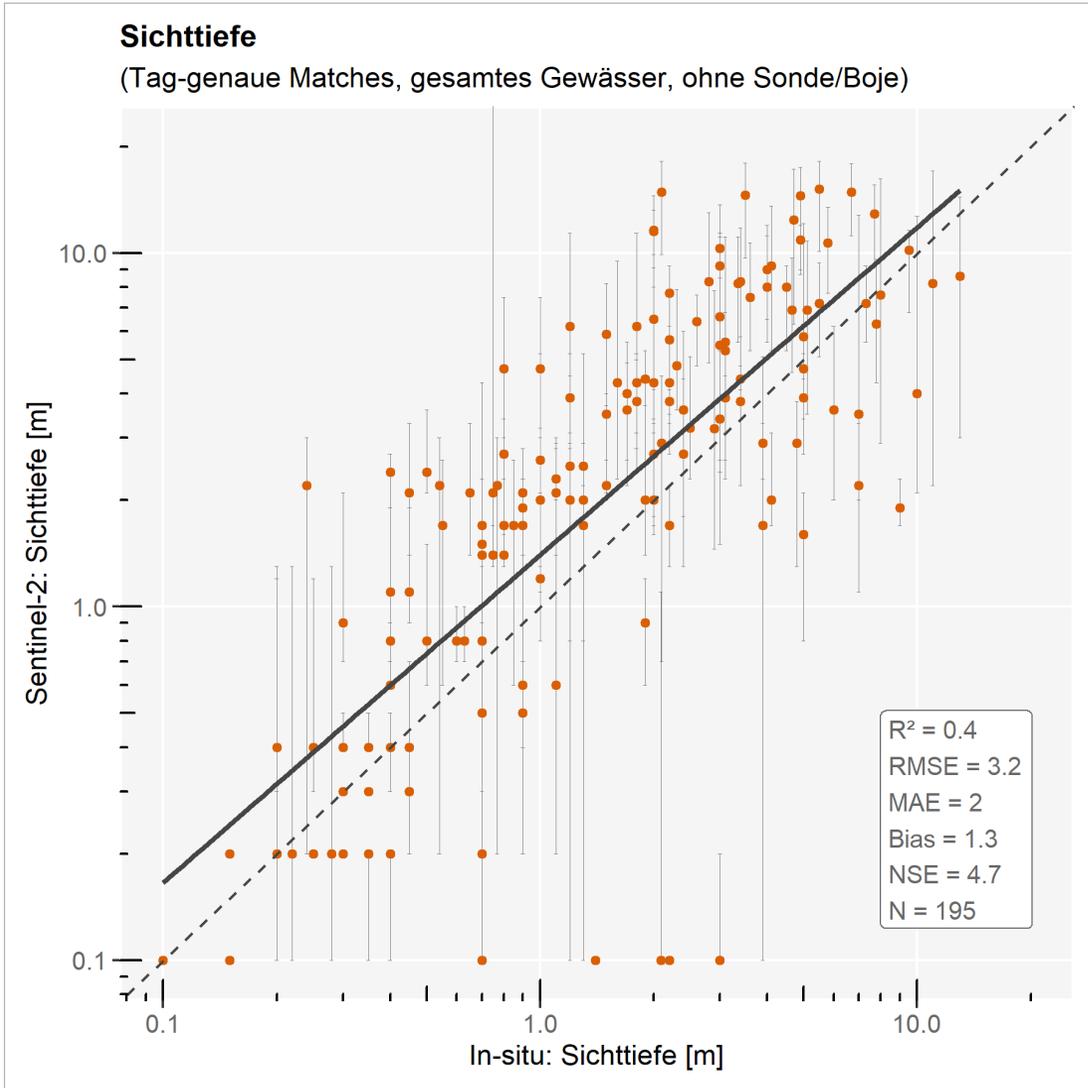
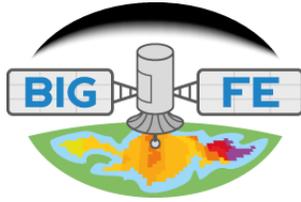
- *Ausgangslage und Vorgehen*
- *Vorentscheidungen zur Validierung*
- *Räumliche und zeitliche Auflösungen relativ zur In-situ Messstelle*
- **Vergleich Sentinel-2 und Sentinel-3**
- *Zeitreihen und Untersuchung saisonaler Muster*
- *Fazit und Ausblick*



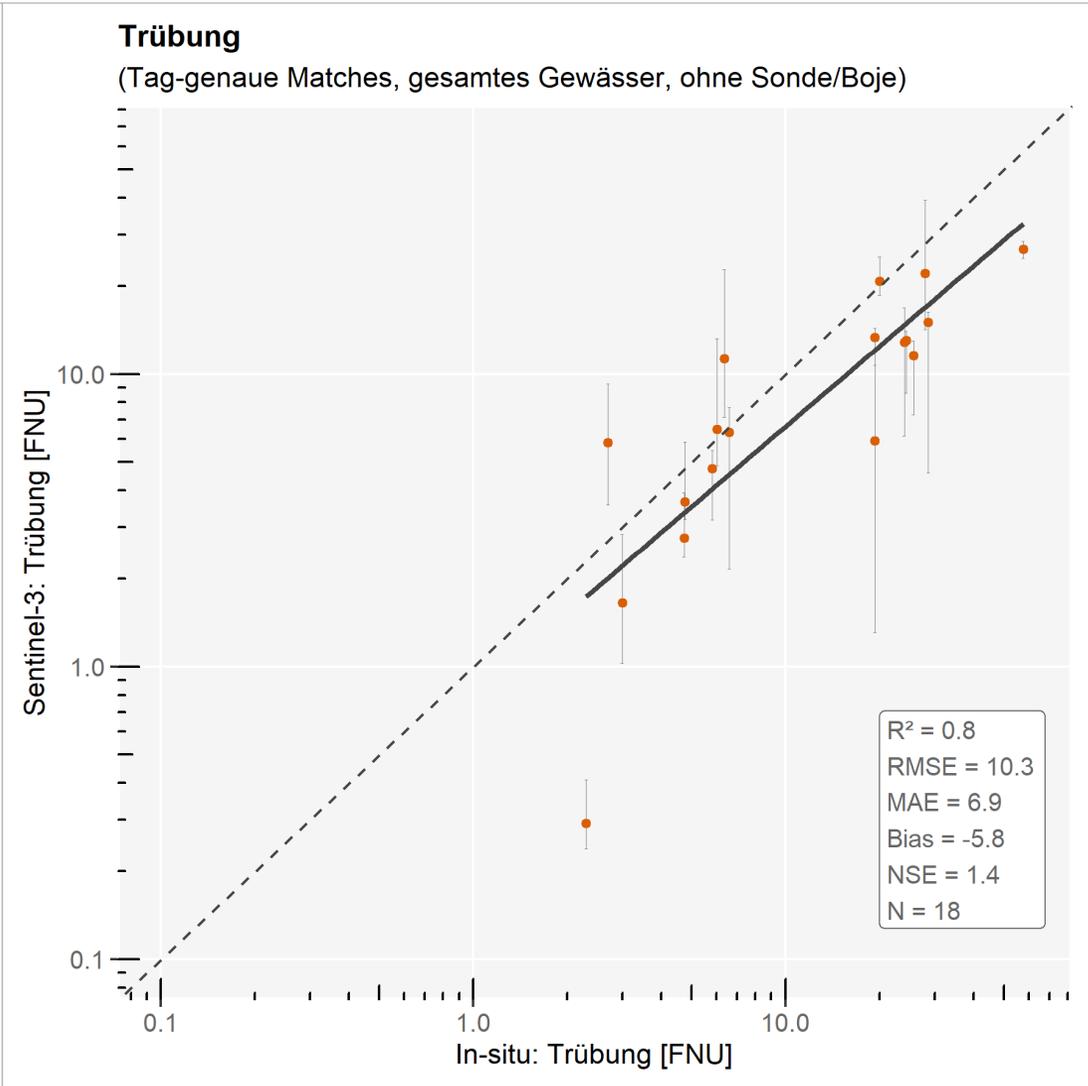
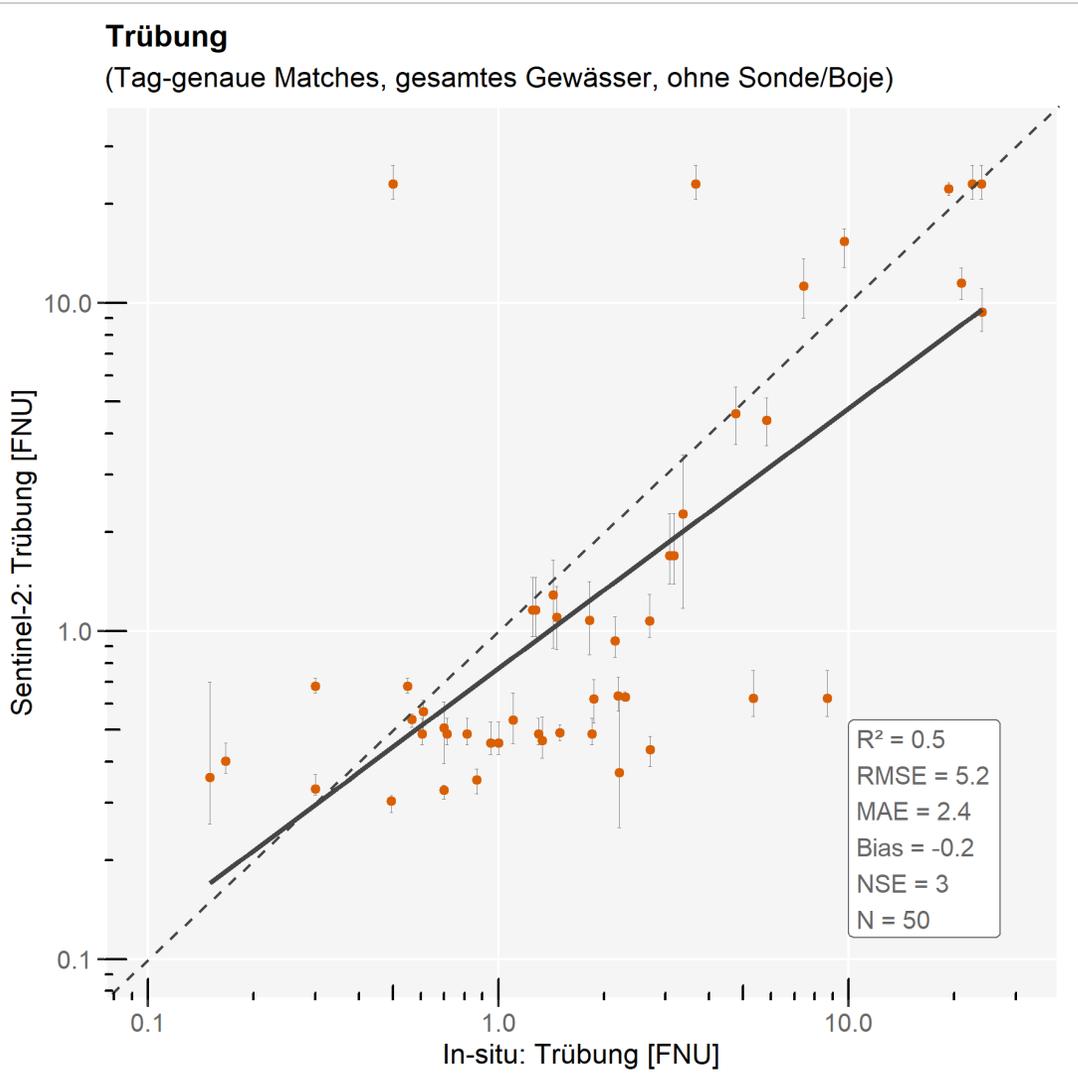
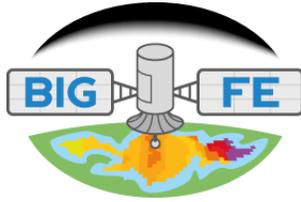
Sentinel-2 vs. Sentinel-3 - Chlorophyll



Sentinel-2 vs. Sentinel-3- Sichttiefe



Sentinel-2 vs. Sentinel-3- Trübung



AP1: Validierung/Vergleich von in situ- und Fernerkundungsdaten



- *Ausgangslage und Vorgehen*
- *Vorentscheidungen zur Validierung*
- *Räumliche und zeitliche Auflösungen relativ zur In-situ Messstelle*
- *Vergleich Sentinel-2 und Sentinel-3*
- ***Zeitreihen und Untersuchung saisonaler Muster***
- *Fazit und Ausblick*



Zeitreihen

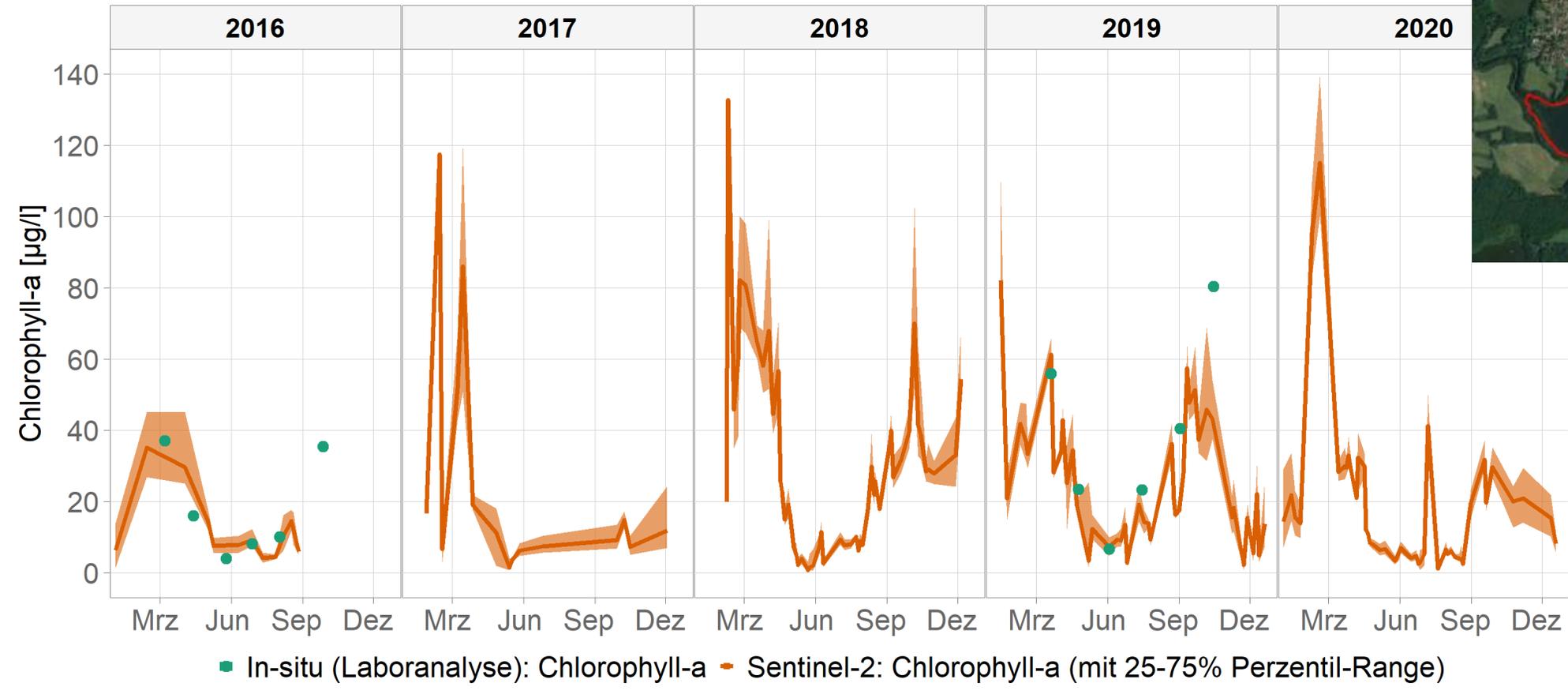
Wolziger See



Google Earth Image © Landsat/
Copernicus, aufgenommen am 31.05.2021

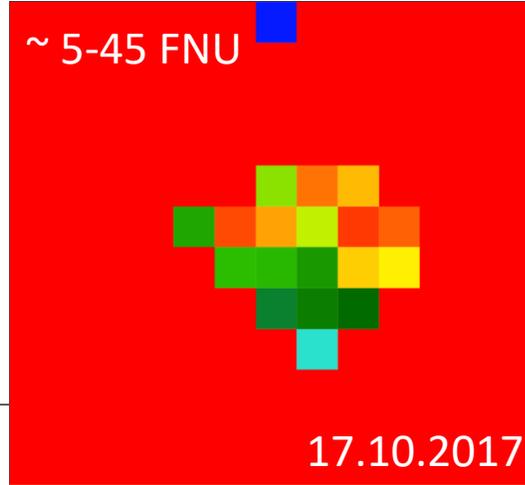
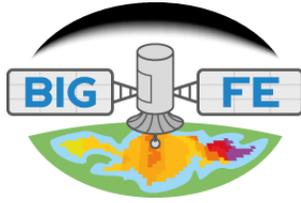
Wolziger See

Sentinel-2: Chlorophyll-a, gewässerskalig, (2016-2020)



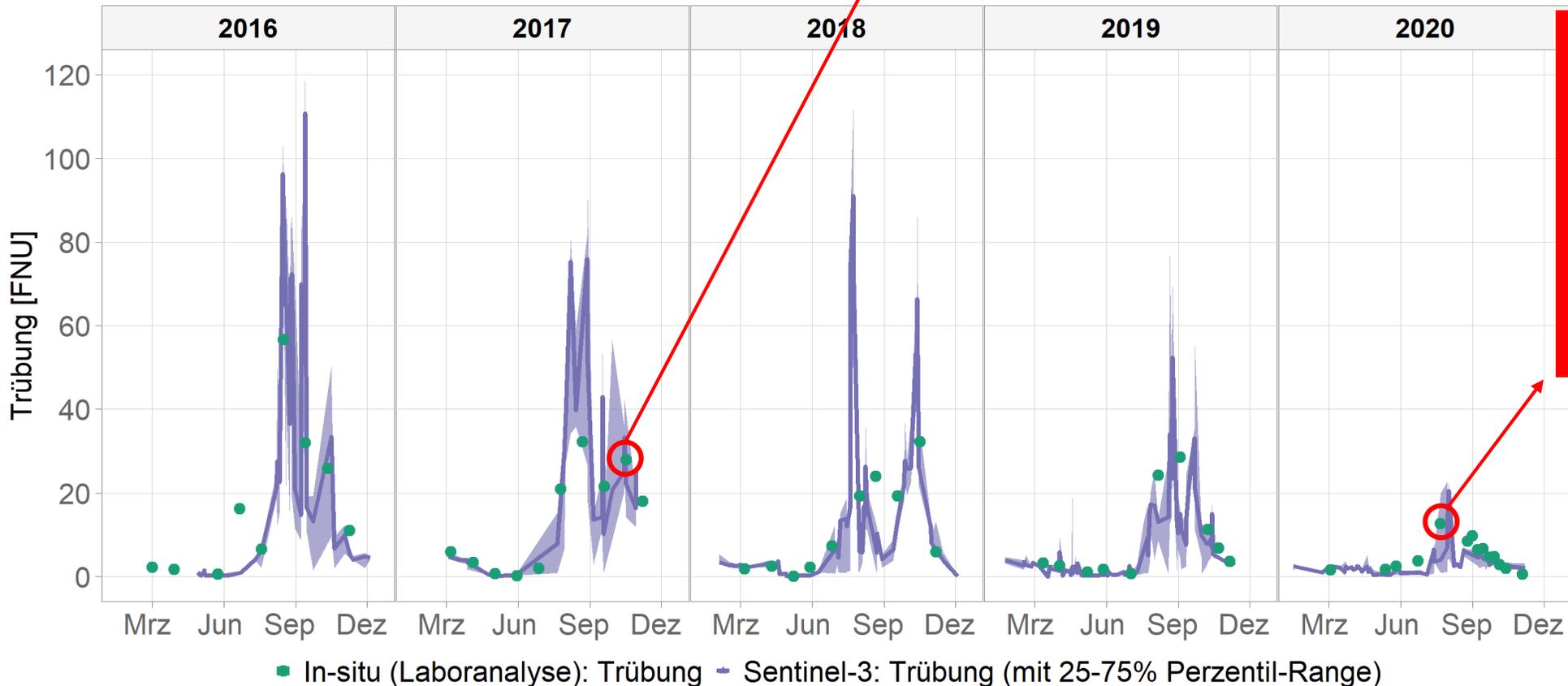
→ Satellitendaten können die Zeitreihe ergänzen

Zeitreihen



Speicher Witznitz

Sentinel-3: Trübung, gewässerskalig, (2016-2020)

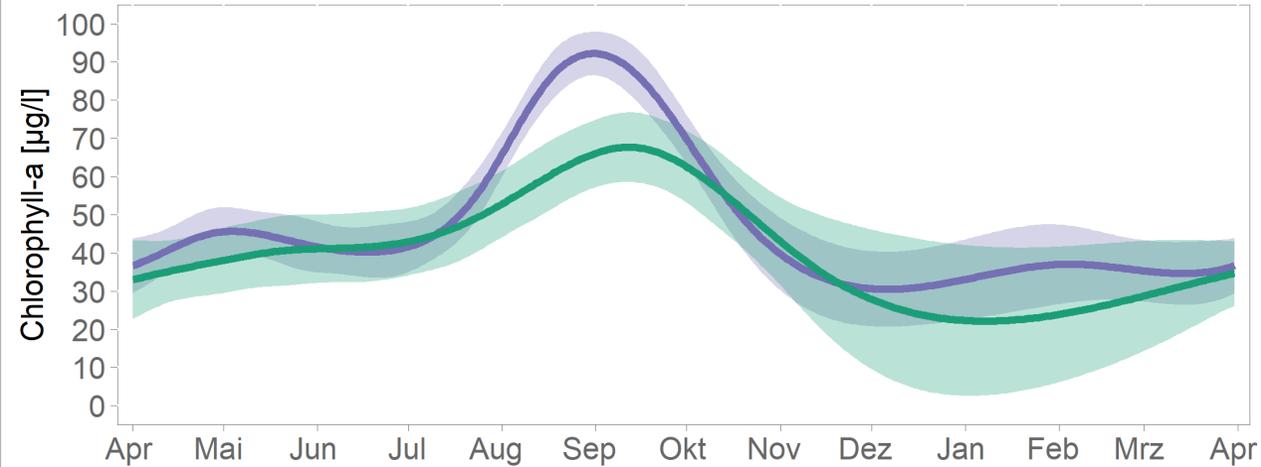


→ Aussage zur räumlichen Variabilität

Saisonale Muster

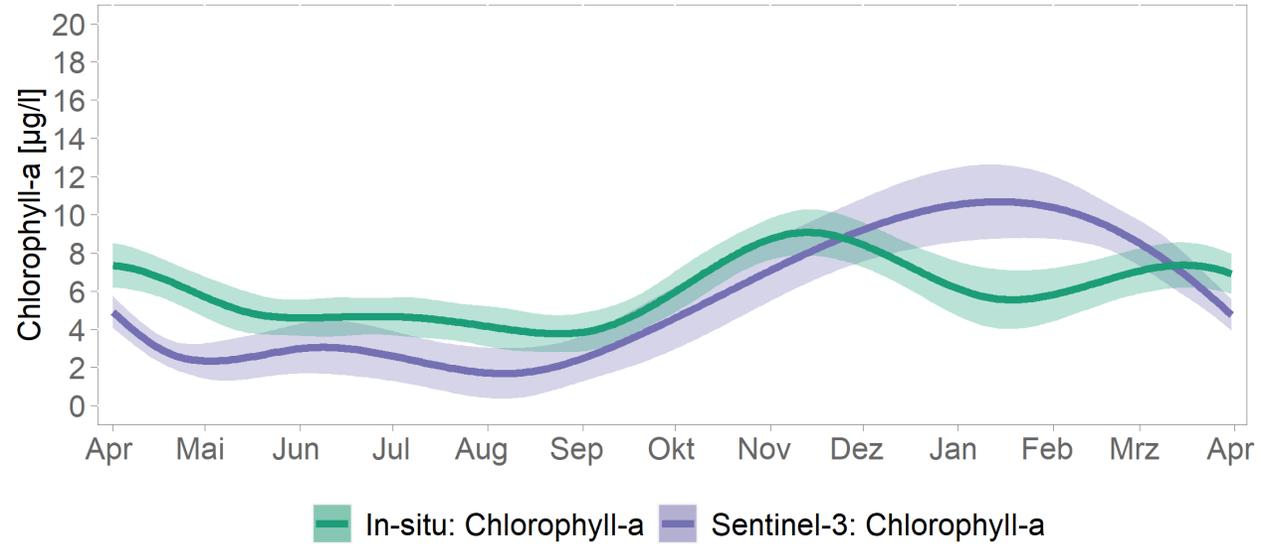
Steinhuder Meer

Chlorophyll-a, gewässerskalig, (2016-2020)



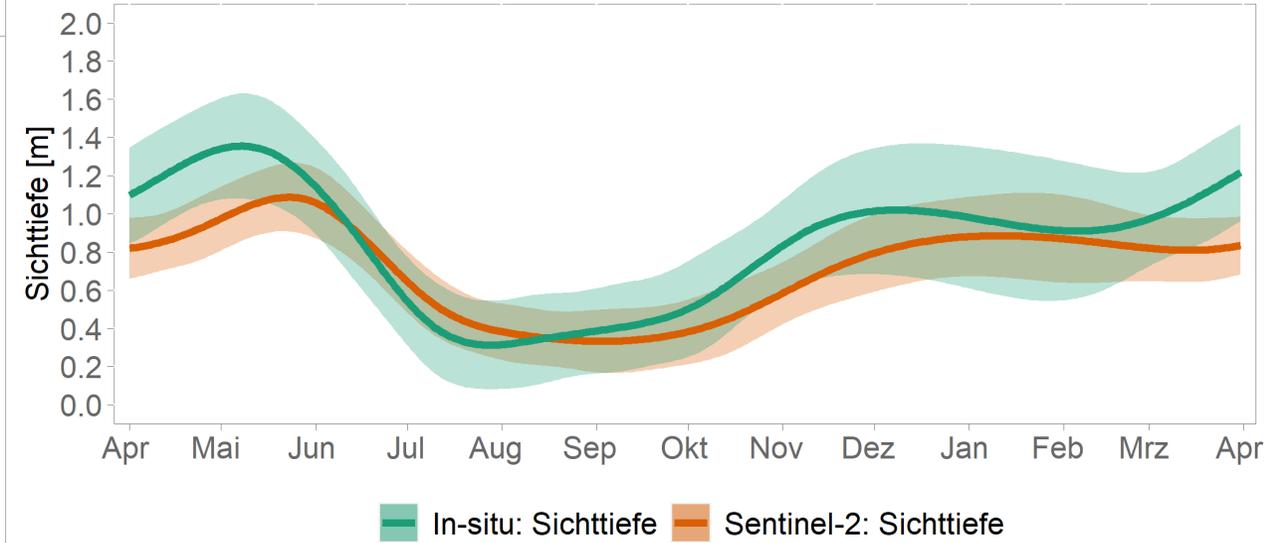
Breiter Luzin

Chlorophyll-a, gewässerskalig, (2016-2020)



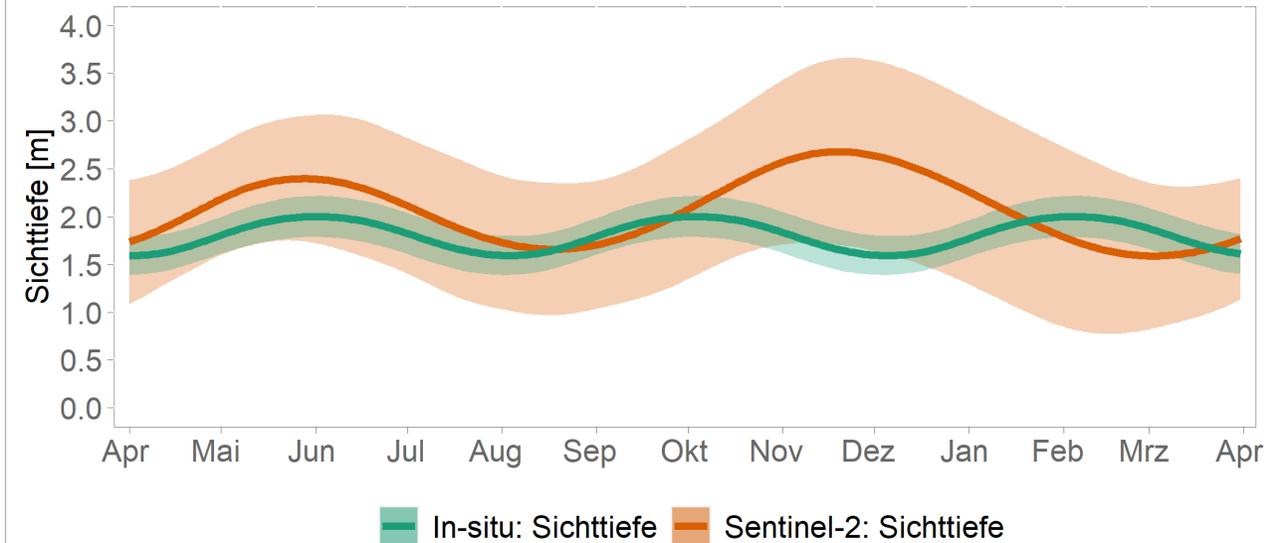
Talsperre Quitzdorf

Sichttiefe, gewässerskalig, (2016-2020)

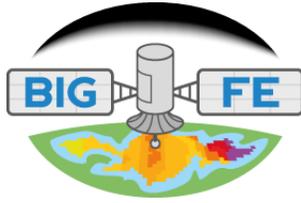


Oejendorfer See

Sichttiefe, gewässerskalig, (2016-2020)



AP1: Validierung/Vergleich von in situ- und Fernerkundungsdaten

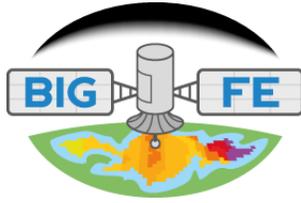


- *Ausgangslage und Vorgehen*
- *Vorentscheidungen zur Validierung*
- *Räumliche und zeitliche Auflösungen relativ zur In-situ Messstelle*
- *Vergleich Sentinel-2 und Sentinel-3*
- *Zeitreihen und Untersuchung saisonaler Muster*
- ***Fazit und Ausblick***



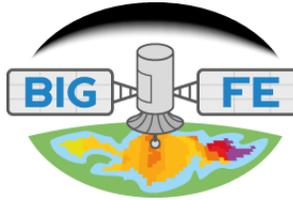
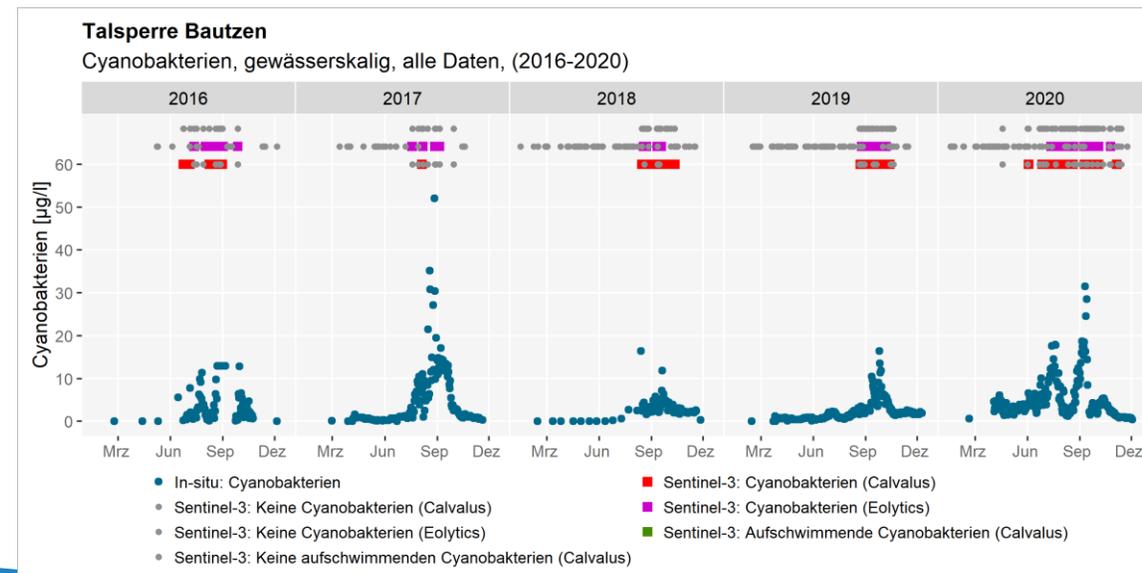
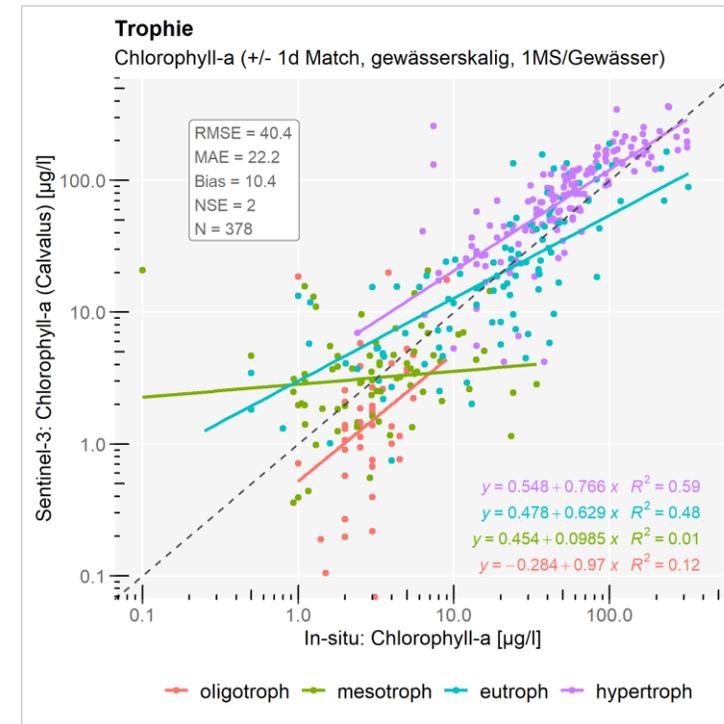
Was wir aus der Validierung für die Praxis gelernt haben

- Möglichst geringer zeitlicher Abstand zwischen Satelliten-Daten und *in situ*-Daten
- Räumliche Auflösung relativ zur Messstelle weniger entscheidend
- Die Variablen Trübung und Chlorophyll können sowohl von Sentinel-2 als auch Sentinel-3 gut wiedergegeben werden
- Die Variable Sichttiefe: eher durch Sentinel-2 Daten
- Auf welche Art Pixel als ungültig eingestuft werden, hat große Auswirkungen auf das Ergebnis



Ausblick - Validierung

- Vergleich nach charakteristischen Seengruppen (z.B. nach Trophie, Tiefe, Gewässertyp, Größe)
- Cyanobakterien-Blüten
- Vergleich der Prozessierungsverfahren



Ausblick - Standardisierung



- in situ-Daten-Erhebung
 - ist standardisiert (DIN, CEN, ISO, WRRL)
- Fernerkundung
 - Ablauf
 - Datenhaltung; z.B. Sensor Model Language (SensorML; Jin et al. 2010)
 - Atmosphärenkorrektur
 - Prozessierung
 - 1 Algorithmus über ganze Datenserie?
 - Standardisierter Entscheidungsbaum
 - Extraktion
 - 3x3 Pixel versus Gewässer-Mittelwert, Tag-genau versus ± 1 Tag etc.
 - Ausgabeformat
 - .tif, .netcdf
 - Tabelle
 - Karte
 - Harmonisierung zwischen Behörden → AP2

Papathanasopoulou et al. 2019. [White paper]
Satellite-assisted monitoring of water quality to support the implementation of the Water Framework Directive. Zenodo.



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

