



**TUBAF**

Die Ressourcenuniversität.  
Seit 1765.

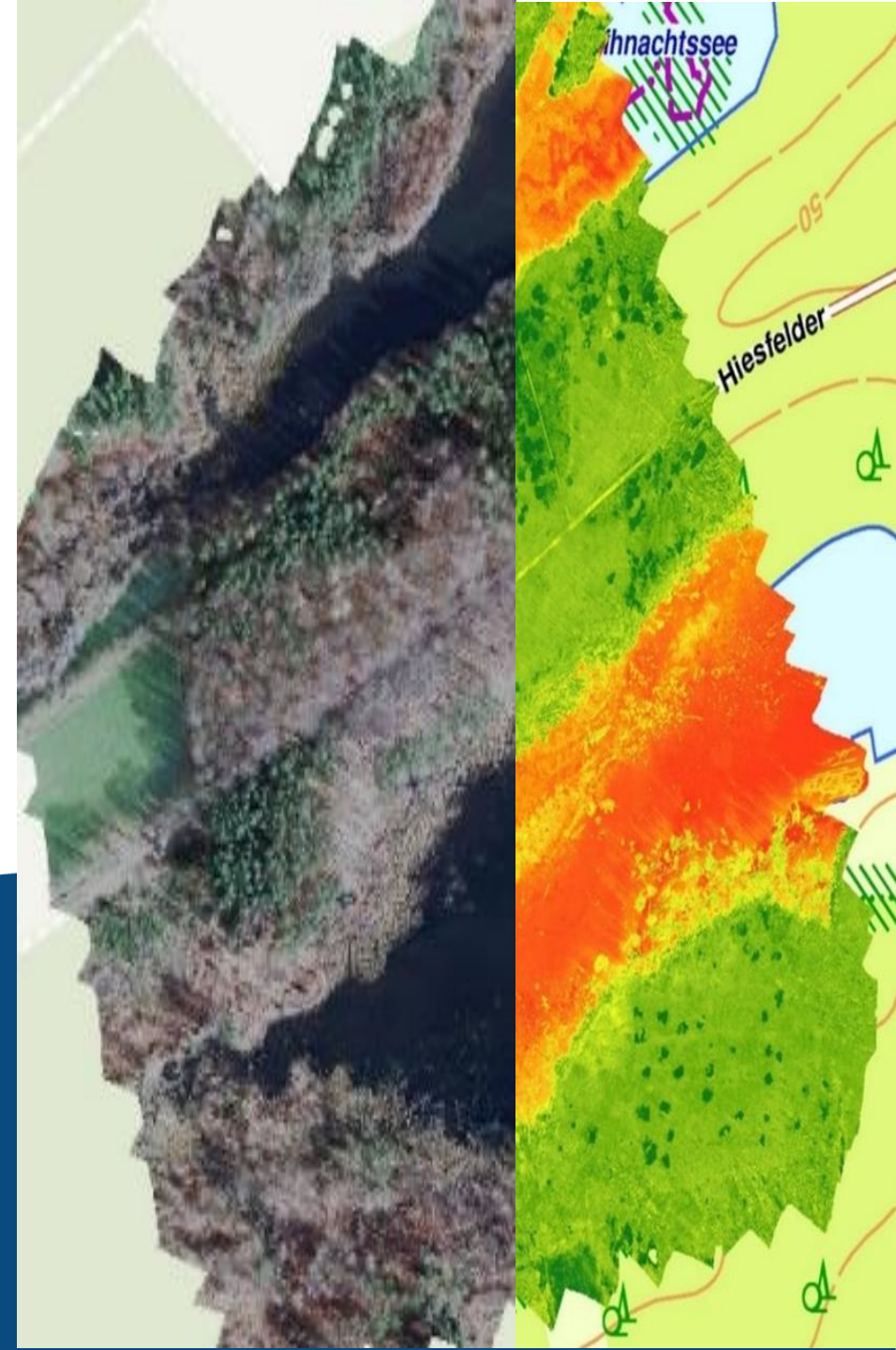


Technische  
Hochschule  
**Georg Agricola**

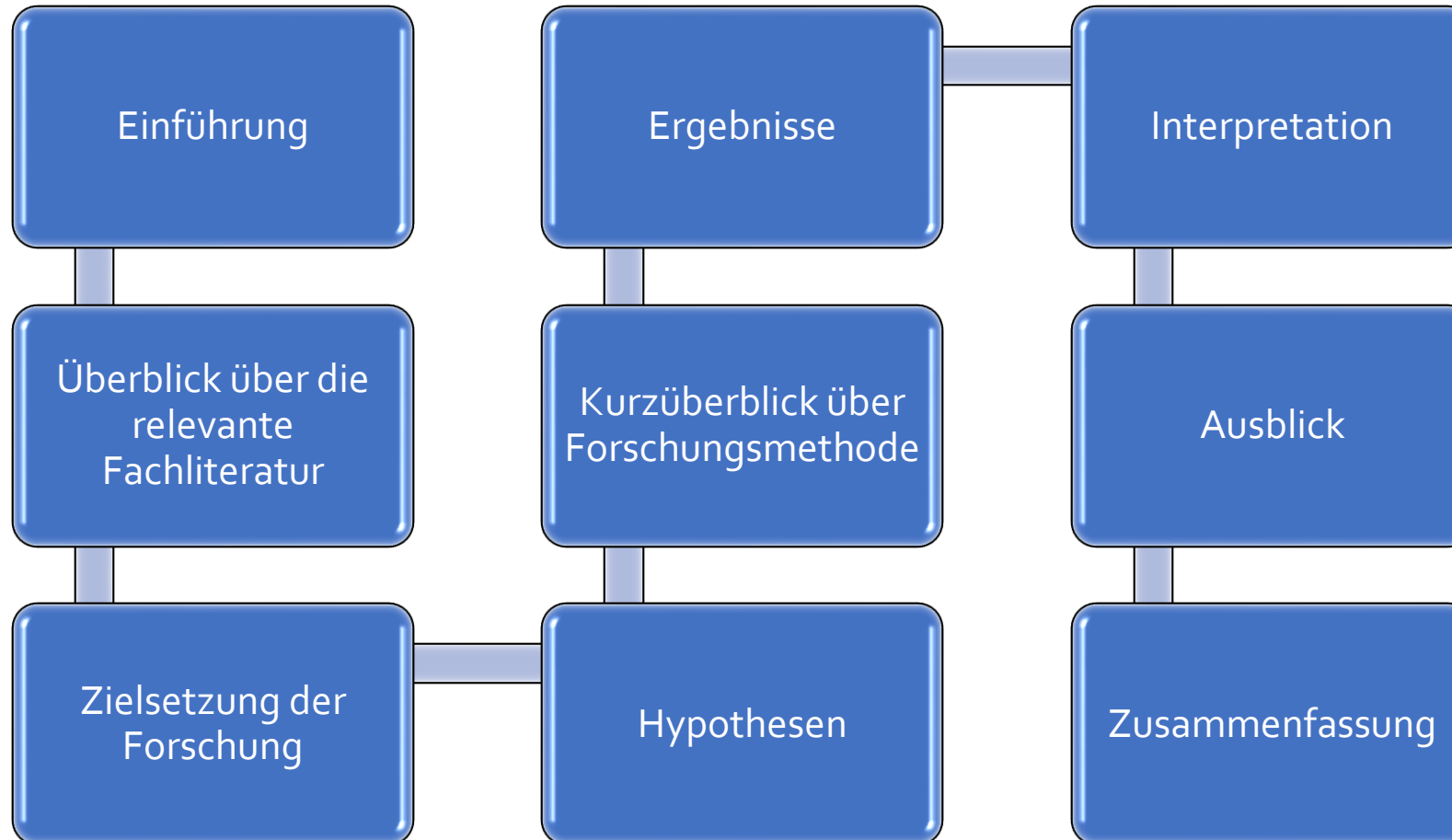
# DER EINSATZ VON MULTISPEKTRALEN SATELLITENBILDERN IM GEOMONITORING VON NACHBERGBAULICHEN PROZESSEN

Dr. –Ing. Marcin Pawlik

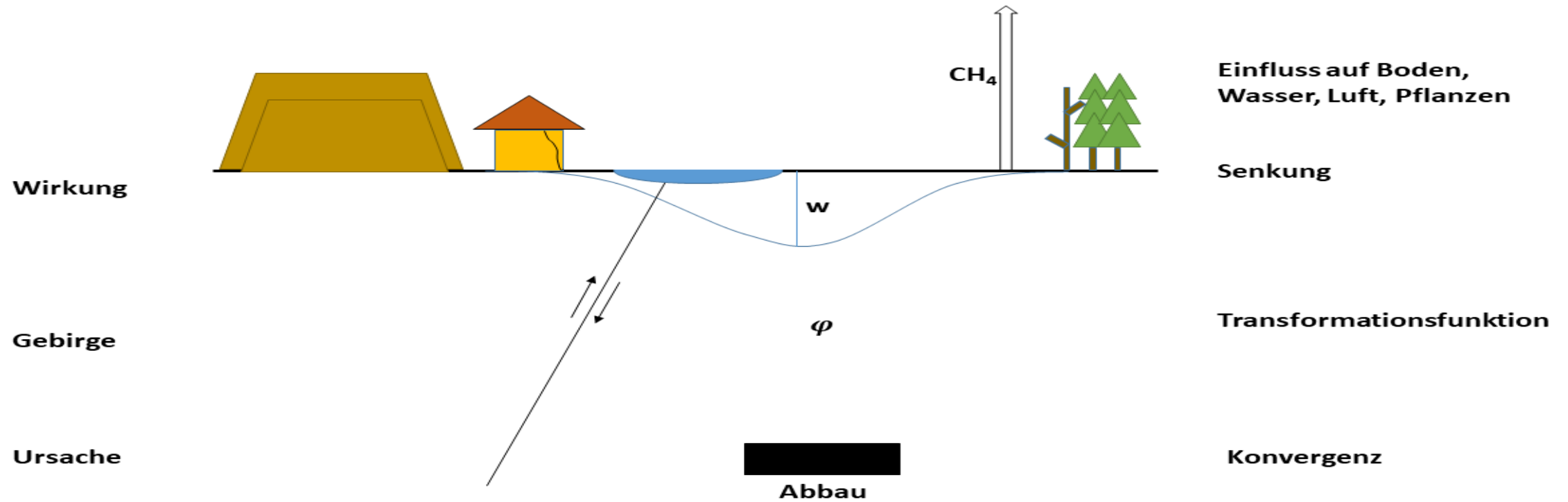
**GEOWEBTALK ERDE**  
**03.06.2026**



# Agenda



# Einfluss des Bergbaus auf die Umwelt



Schematische Darstellung (Sroka und Wittkopf 1996; Kratzsch 2005; Goerke-Mallet et al. 2016; Kretschmann et al. 2017; Rudolph 2019)

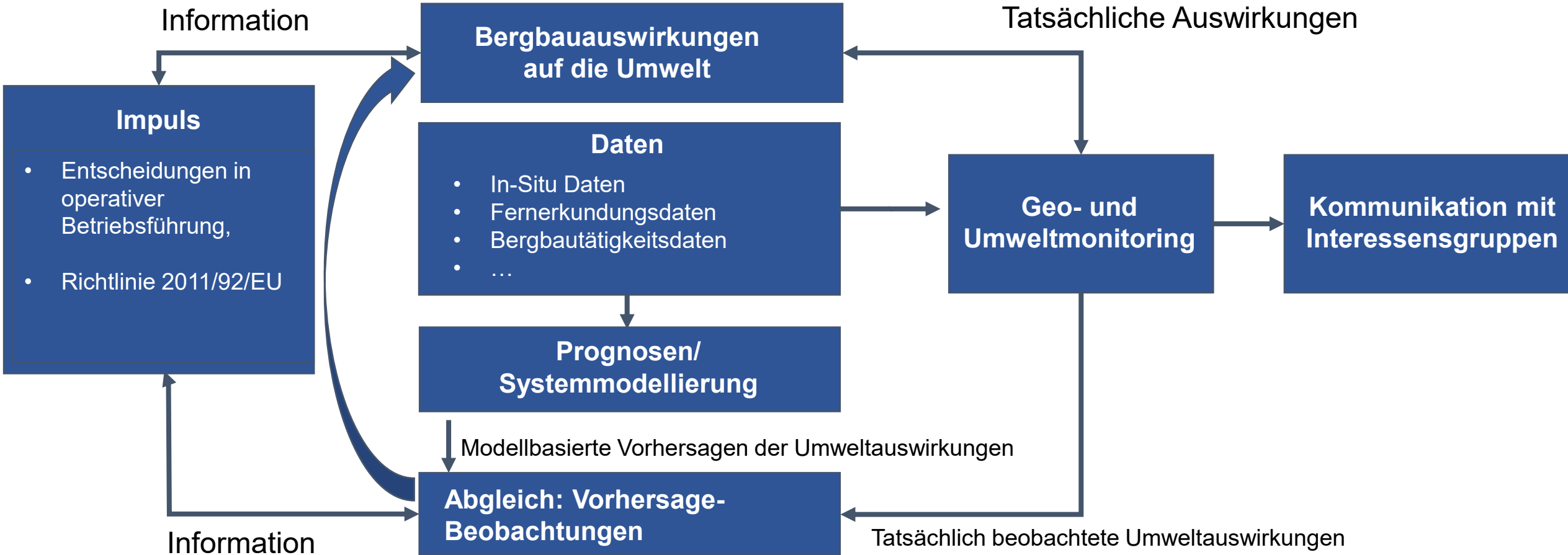
## Rechtliche Grundlagen

### Richtlinie 2011/92/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Dezember 2011 über die Umweltverträglichkeitsprüfung bei bestimmten öffentlichen und privaten Projekten

Diese Bewertung sollte den direkten und indirekten Einfluss der Untersuchungen auf folgende Komponenten überprüfen:

- " a) Mensch, Fauna und Flora;
- b) Boden, Wasser, Luft, Klima und Landschaft;
- c) Sachgüter und kulturelles Erbe;
- d) die Wechselwirkung zwischen den unter Buchstaben a, b und c genannten Faktoren.“

# Schema des Umweltmanagementsystems



(Benndorf und Jansen 2017; Benndorf 2021)

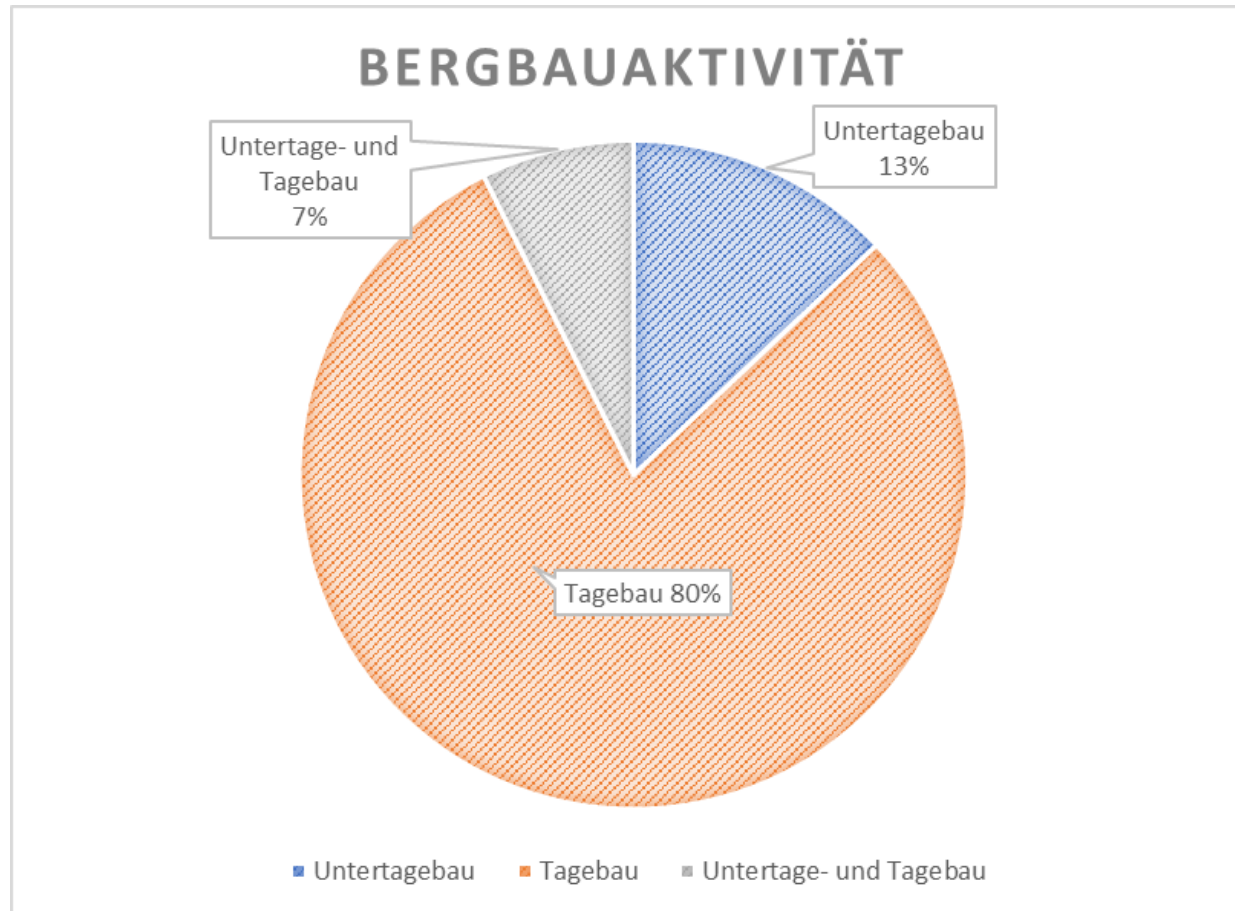
# Ziel

**Neuentwicklung von Fernerkundungsindikatoren zur Überwachung des Umweltzustands im Gebiet des Steinkohlenbergwerks Prosper-Haniel.**

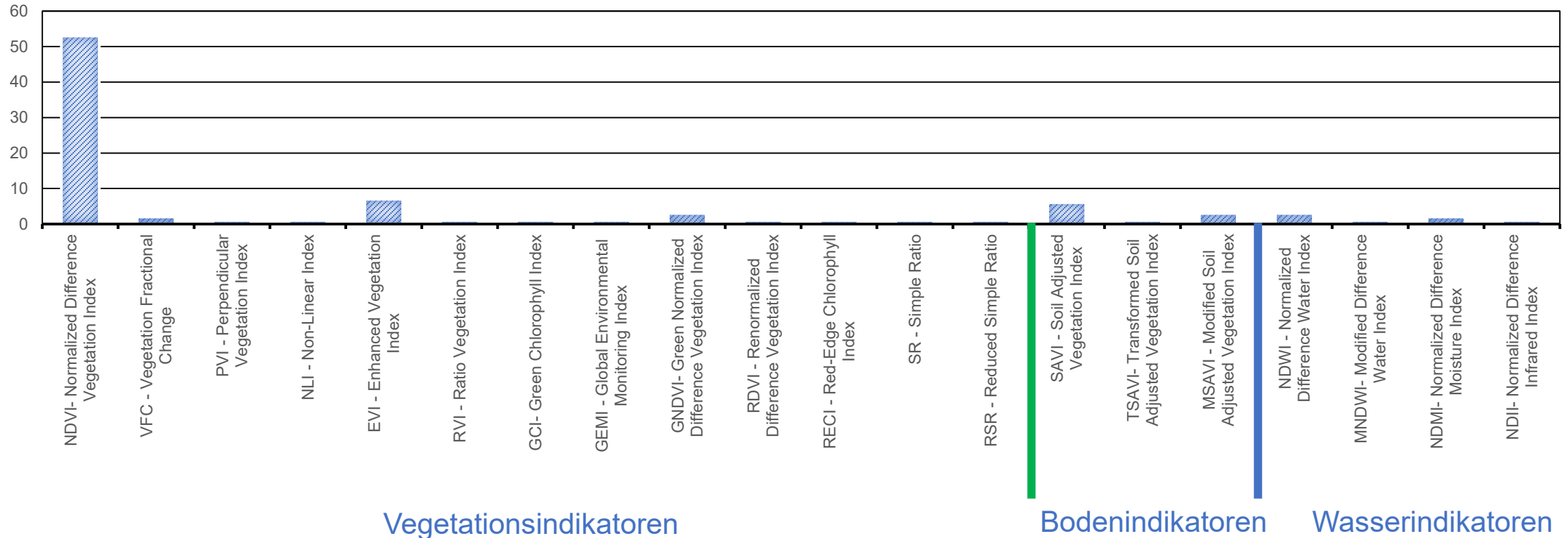
## Spezifische Ziele

- Beschreibung der Veränderungen der Umweltbedingungen im Gebiet Prosper-Haniel zwischen 1984 und 2022 anhand der Analyse multispektraler Satellitenbilder
- Bestimmung der Zusammenhänge zwischen den ausgewählten Umweltkomponenten, insbesondere der **Vegetation und Wasserwirtschaft**

# Überblick über die relevanten Fachliteratur

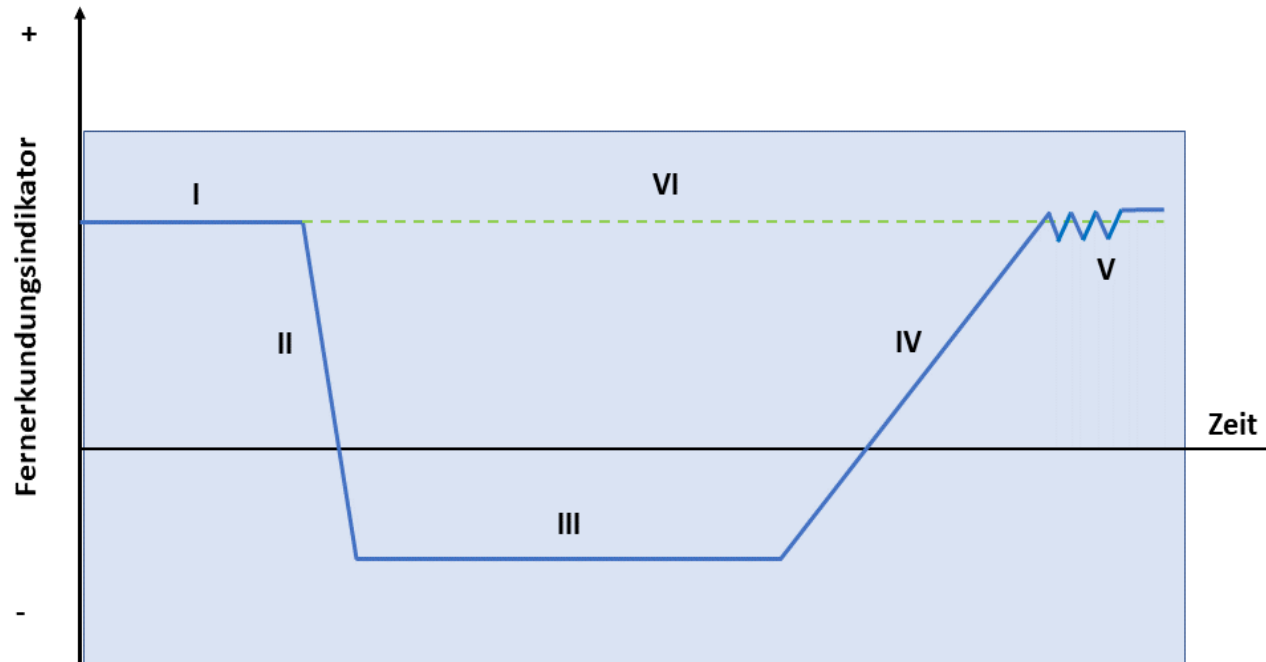


Die Nutzung spektraler Indizes für die langfristige Beobachtung der Umweltauswirkungen verschiedener Bergbauaktivitäten



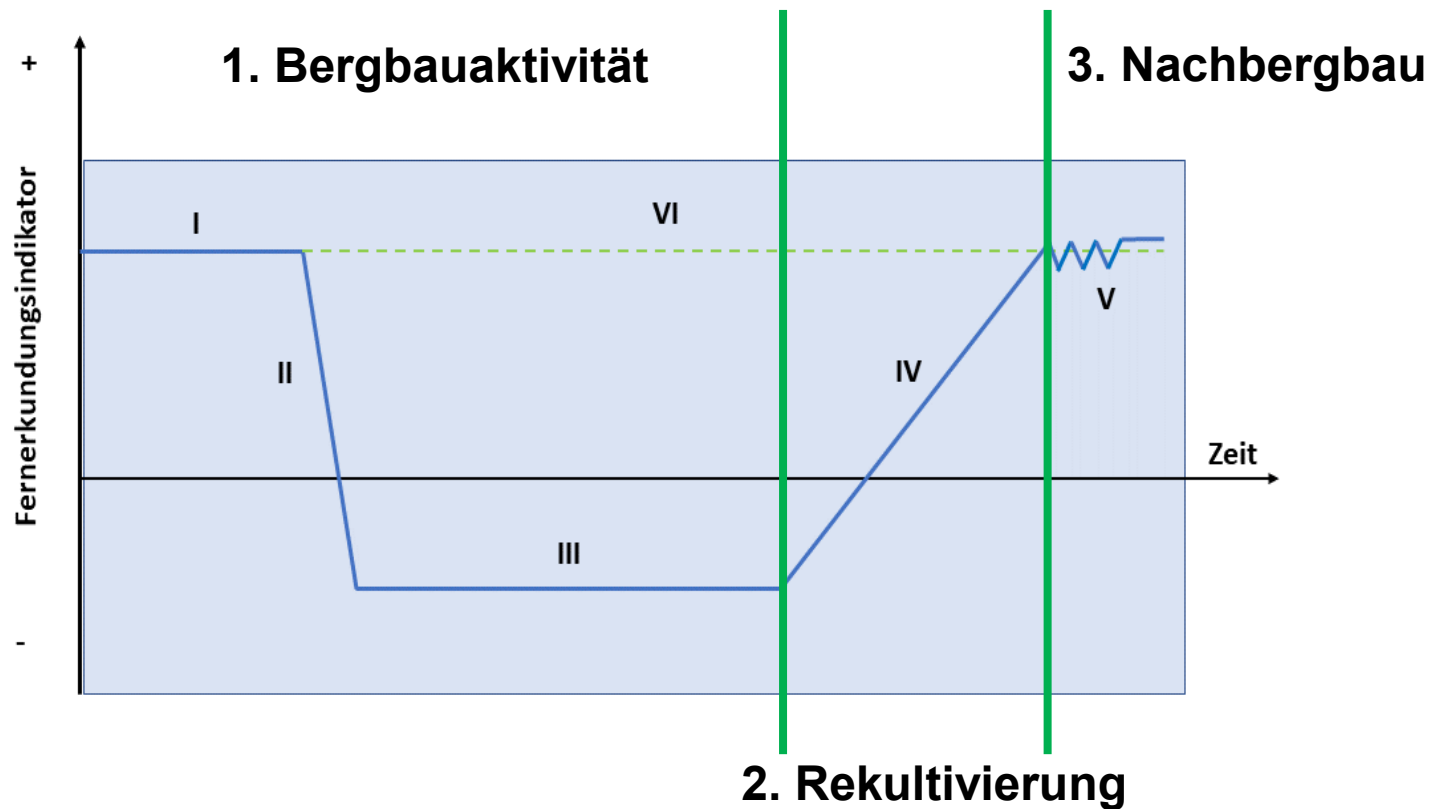
Anzahl der Veröffentlichungen, in denen verschiedene spektrale Indizes zur Analyse der Umweltauswirkungen von Bergbauaktivitäten verwendet wurden.

# Zeitliche und räumliche Variabilität von Fernerkundungsindikatoren für einen Tagebau



- I – Vegetationsstand vor dem Bergbau,
- II – Schädigung der Vegetation,
- III - Abbau,
- IV – Vegetationswachstum,
- V – Vegetationsstand nach dem Bergbau,
- VI – ungestörter Vegetationsstand

Hypothetischer Verlauf eines Fernerkundungsindikators (Sen et al. 2012; Yang et al. 2018; Liu et al. 2022b; Blachowski et al. 2023b; Wang et al. 2023)

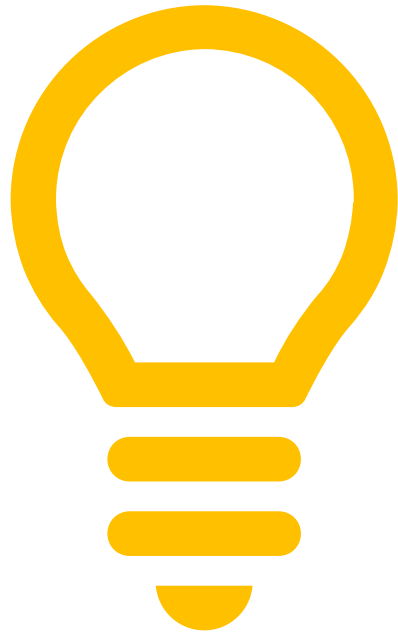


Sen et al. (2012) beschreiben ein Modell mit drei Hauptphasen zur Analyse von Vegetationsveränderungen und zur Bewertung von Rekultivierungsmaßnahmen:

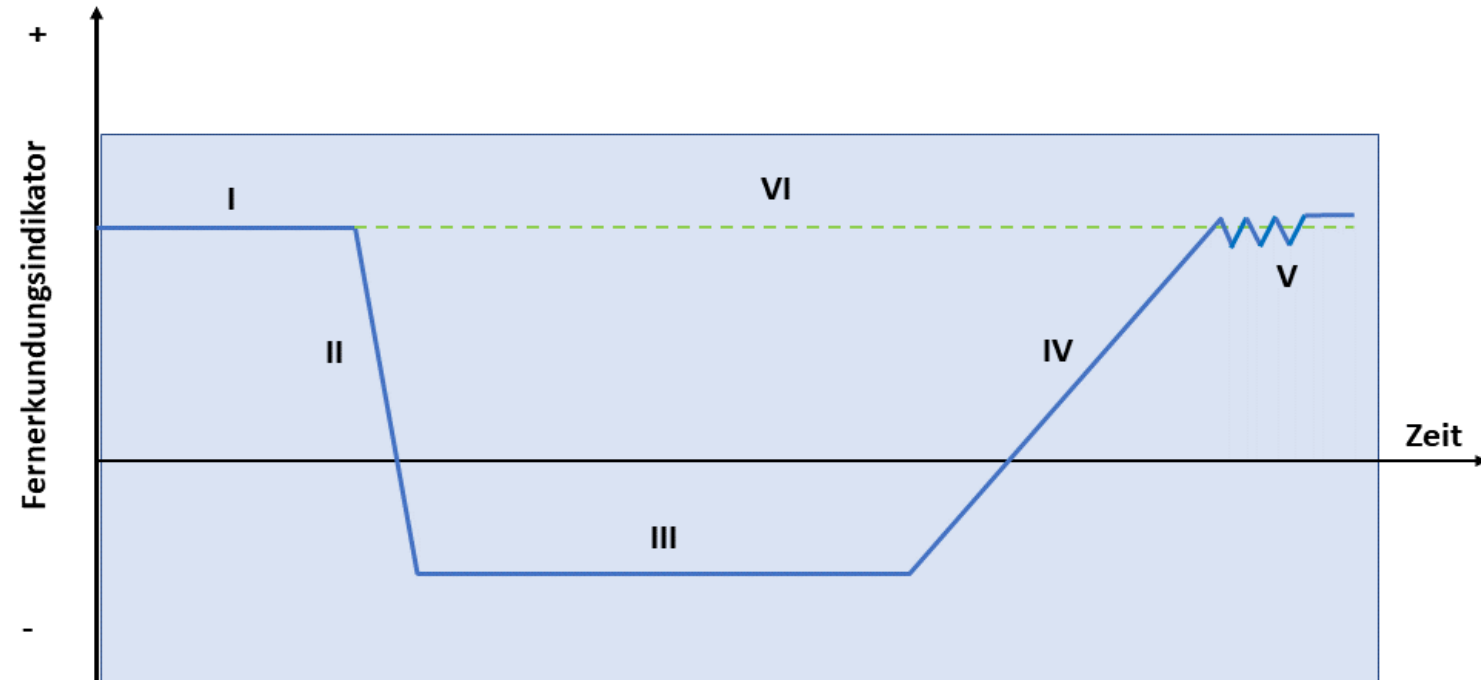
1. Bergbauaktivität
2. Rekultivierung
3. Nachbergbau

Hypothetischer Verlauf eines Fernerkundungsindikators (Sen et al. 2012; Yang et al. 2018; Liu et al. 2022b; Blachowski et al. 2023b; Wang et al. 2023)

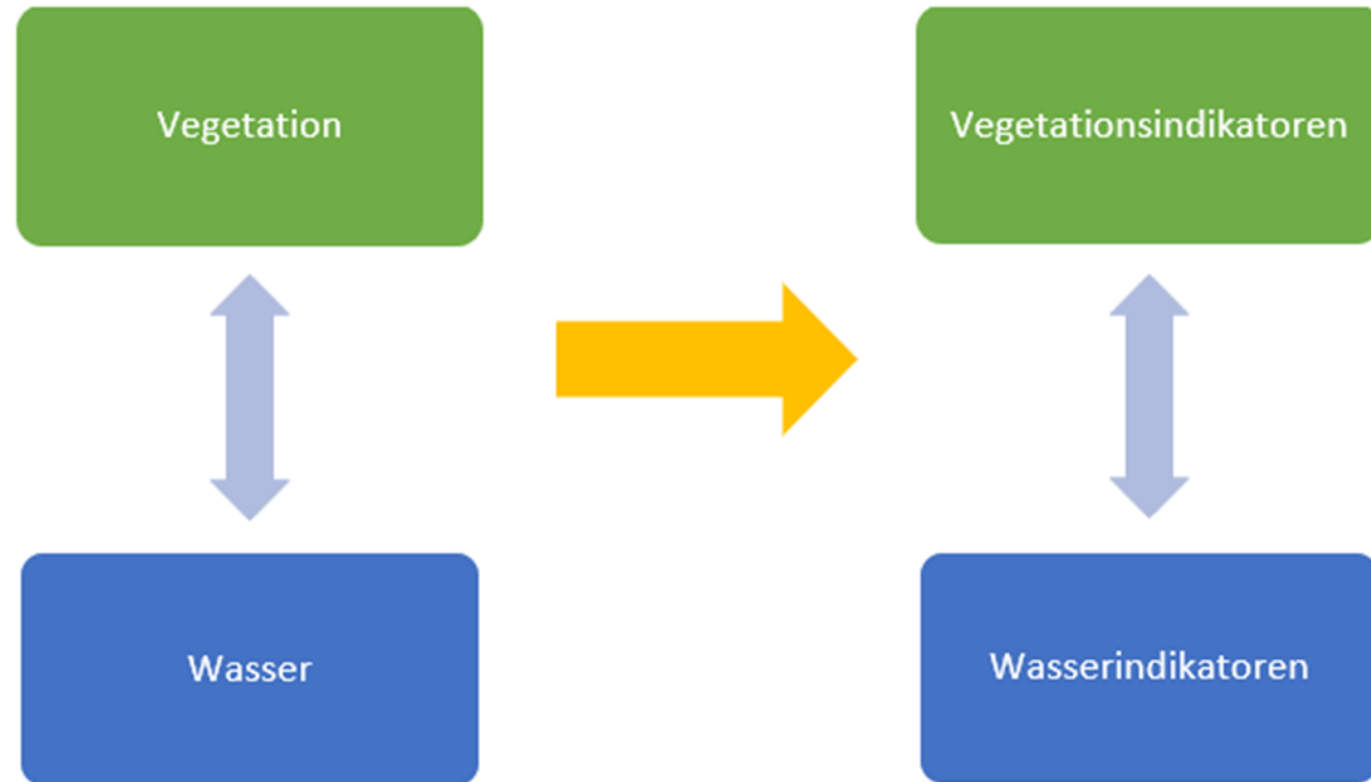
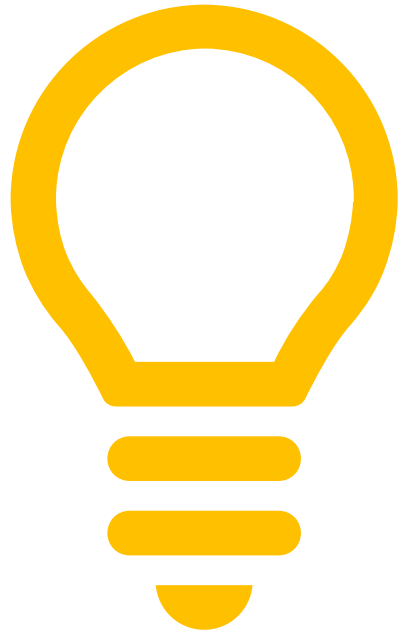
# Hypothese



## ➤ Für untertägliches Steinkohlenbergwerk?

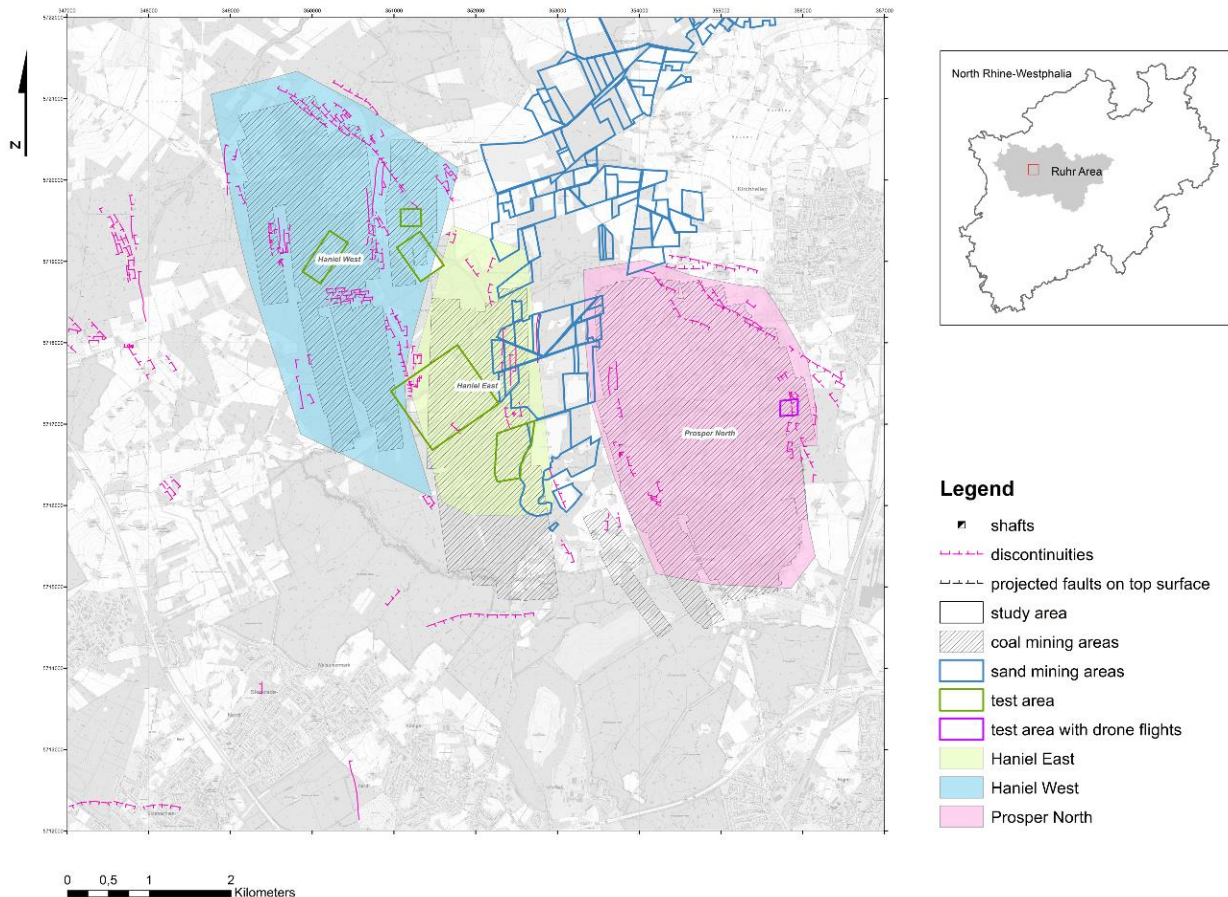


Hypothetischer Verlauf eines Fernerkundungsindikator (Sen et al. 2012; Yang et al. 2018; Liu et al. 2022b; Blachowski et al. 2023b; Wang et al. 2023)



Hypothetischer Verlauf der Abhängigkeit zwischen Vegetation und Wasserverfügbarkeit sowie der Zusammenhang zwischen Vegetations- und Wasserindikatoren

# Standort des Forschungsgebietes



Quelle: Pawlik et al. 2025

## Lage:

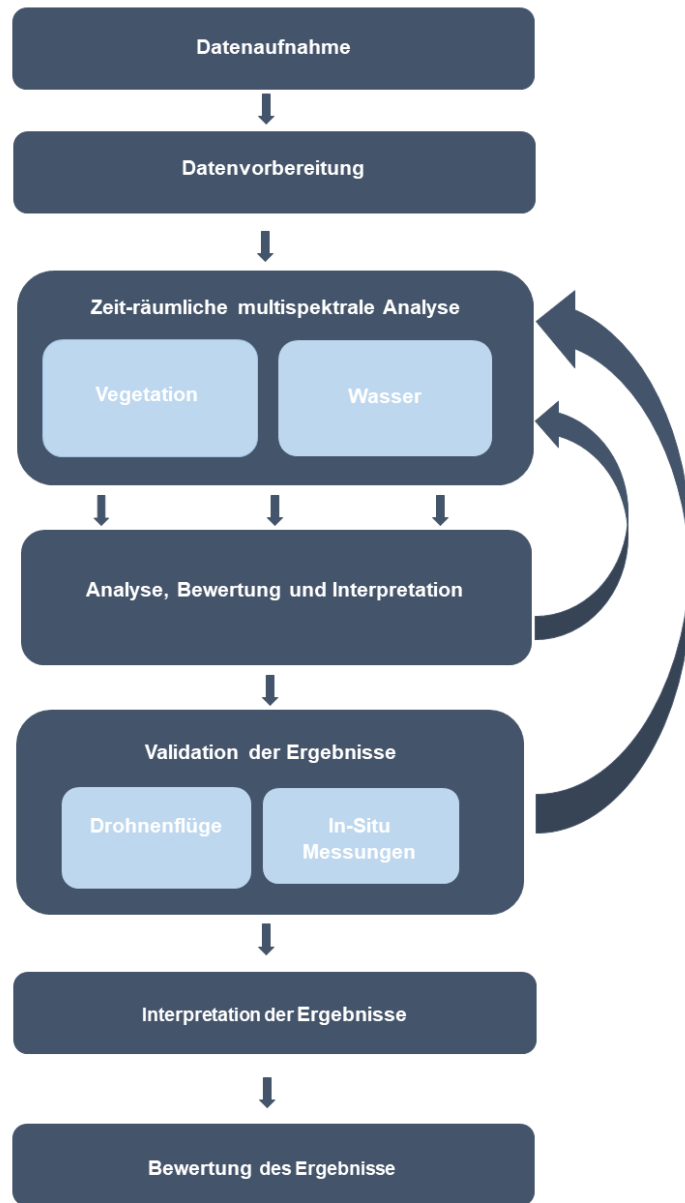
- westliches Ruhrgebiet, ehemaliges Bergwerk Prosper-Haniel

## Bergbau:

- Beginn 1976,
- Hauptabbau in den 1990er Jahren, Stilllegung 2018

## Naturschutz:

- vorhandene Naturschutzgebiete im Untersuchungsgebiet



Qualitätskontrolle

- 162 – Satellitendaten- Landsat 4,5,8,9
- Semi-Automatic Classification Plugin in QGIS
- Zwei Gruppen von Fernerkundungsindikatoren (Vegetation und Wasser), insgesamt 28 Indikatoren, berechnet in einer zeiträumlichen Analyse in 4 Testgebieten.
- Nutzbar daher nur 6 Indikatoren die Änderungen und Trends
- Regelmäßige In-Situ Fotodokumentation und Drohnenflüge zur Vor-Ort Validation der Ergebnisse
- Entwicklung eines neuen Indikators – Green Red Water Index – auf Basis der Drohnen Daten

## Eingabedaten

### Räumliche Auflösung

Landsat 4

30m

**5** Satellitenbilder im Zeitraum 1987-1990

Landsat 5

30m

**98** Satellitenbilder im Zeitraum 1984-2011

Landsat 8

30m

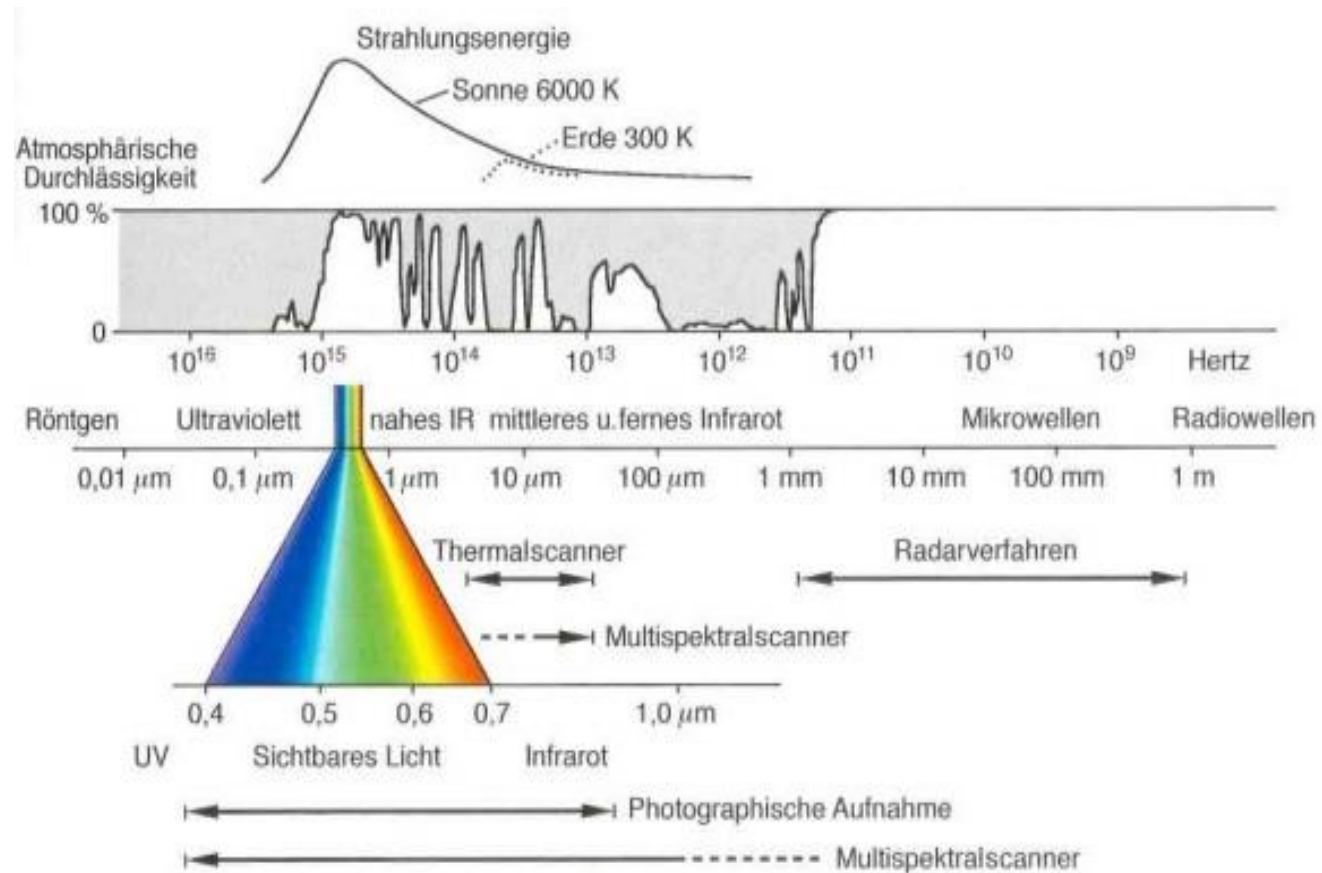
**54** Satellitendaten im Zeitraum 2013-2022

Landsat 9

30m

**5** Satellitendaten im Zeitraum 2022

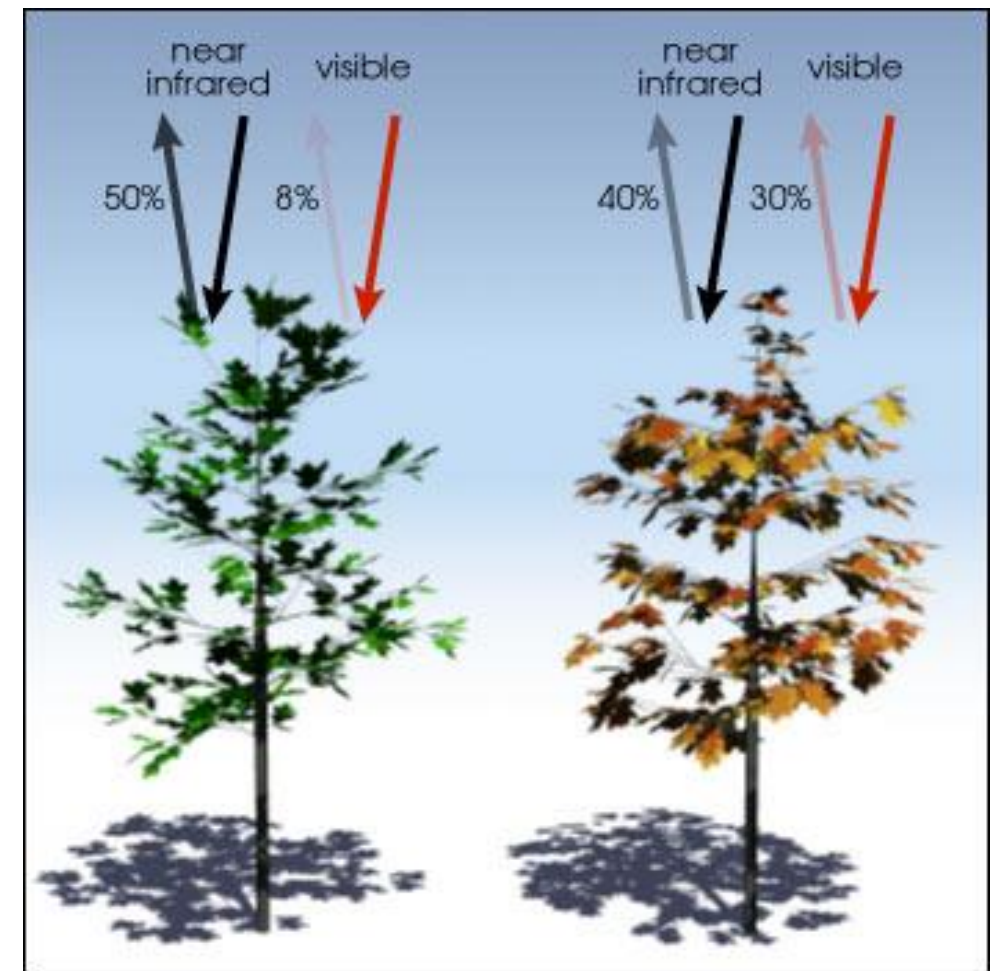
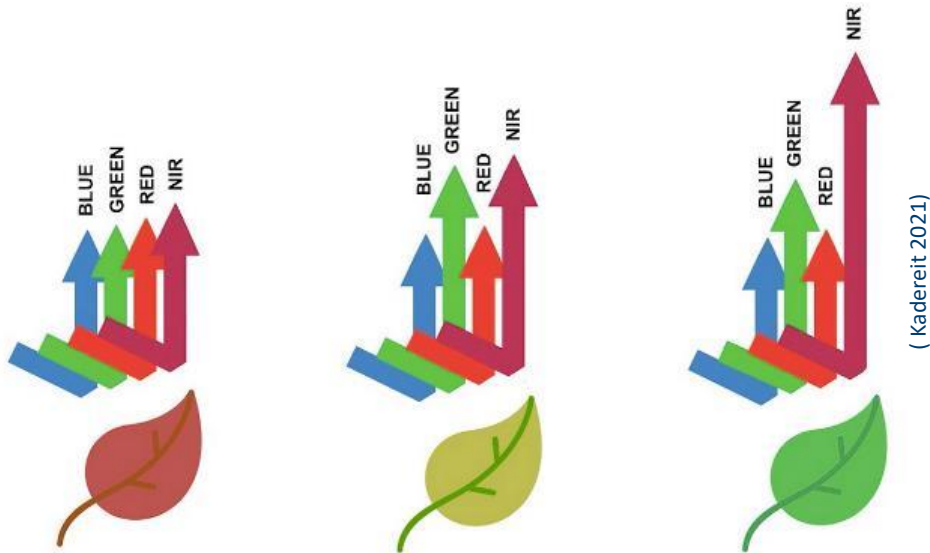
# Multispektrale Analyse



Das elektromagnetische Spektrum (Albertz 2007)

Die spektrale Signatur der Vegetation ist im Wesentlichen durch den Prozess der Photosynthese gekennzeichnet.

Gesunde Pflanzen absorbieren im Allgemeinen Wellen im **roten und blauen Bereich** und reflektieren Wellen im **grünen und nahen Infrarotbereich**.



$$\frac{(0.50 - 0.08)}{(0.50 + 0.08)} = 0.72$$

$$\frac{(0.4 - 0.30)}{(0.4 + 0.30)} = 0.14$$

Verwendung von Vegetationsindizes in der Umweltüberwachung und im Geomonitoring (Simmon 2000)

## Vegetationsindikatoren

Index	Formel	Beschreibung
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$(\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED})$	Wichtiger Vegetationsindex zur Überwachung der Photosyntheseintensität
GNDVI (Green Normalized Difference Vegetation Index)	$(\text{NIR} - \text{GREEN}) / (\text{NIR} + \text{GREEN})$	Sensibler für Chlorophyllgehalt als NDVI, nützlich zur Überwachung von Wasserstress.
GRNDVI (Green-Red Normalized Difference Vegetation Index)	$(\text{GREEN} - \text{RED}) / (\text{GREEN} + \text{RED})$	Erweiterter NDVI, empfindlicher für Pigmentveränderungen in Pflanzen.
GLI (Green Leaf Index)	$(2 * \text{GREEN} - \text{RED} - \text{BLUE}) / (2 * \text{GREEN} + \text{RED} + \text{BLUE})$	Bestimmt den Anteil der grünen Fraktion im reflektierten Spektrum.

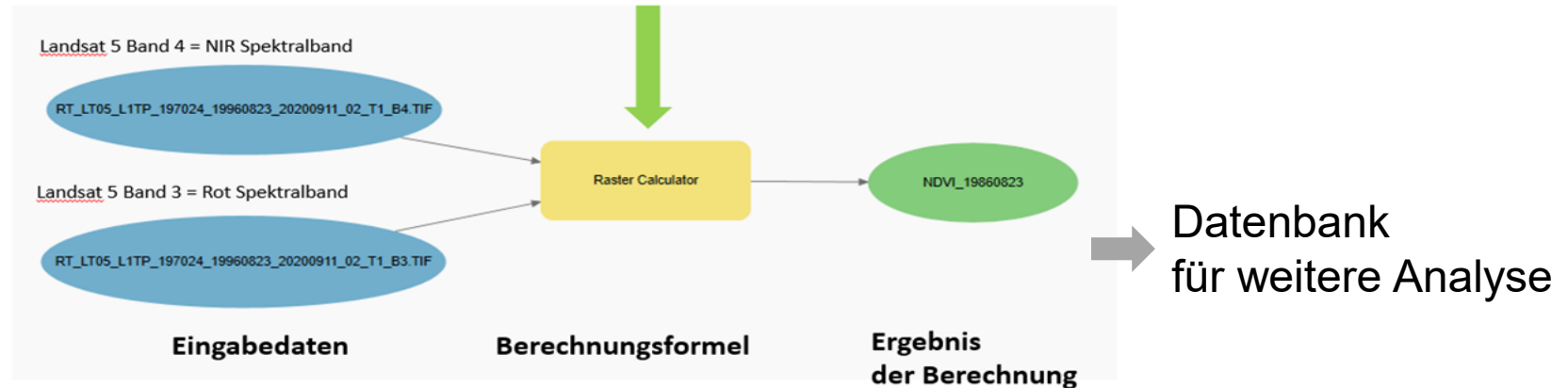
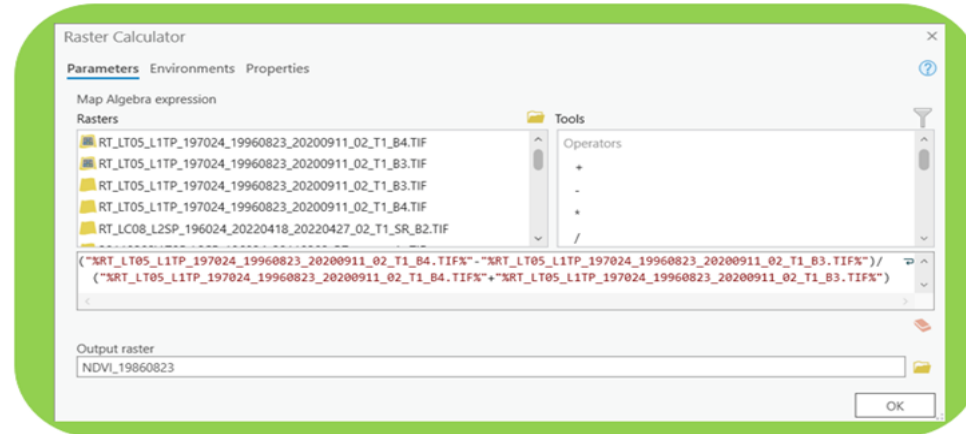
## Wasserindikatoren

Index	Formel	Beschreibung
NDWI Gao (Normalized Difference Water Index – Gao)	$(NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$	Misst den Wassergehalt in Pflanzen und Boden durch die Reflexionsdifferenz zwischen NIR und SWIR.
MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index)	$(GREEN - SWIR) / (GREEN + SWIR)$	Verbesserte Version des NDWI Gao, empfindlicher für die Trennung von Wasser und bebauten Gebieten.
GRWI (Green Red Water Index)	$(NIR - (Green - RedEdge)) / (NIR + (Green + Red + RedEdge))$	Der Indikator nimmt Werte zwischen -1 und 1 an, wobei die Werte für Wasserflächen zwischen 0,2 und 0,6 liegen.

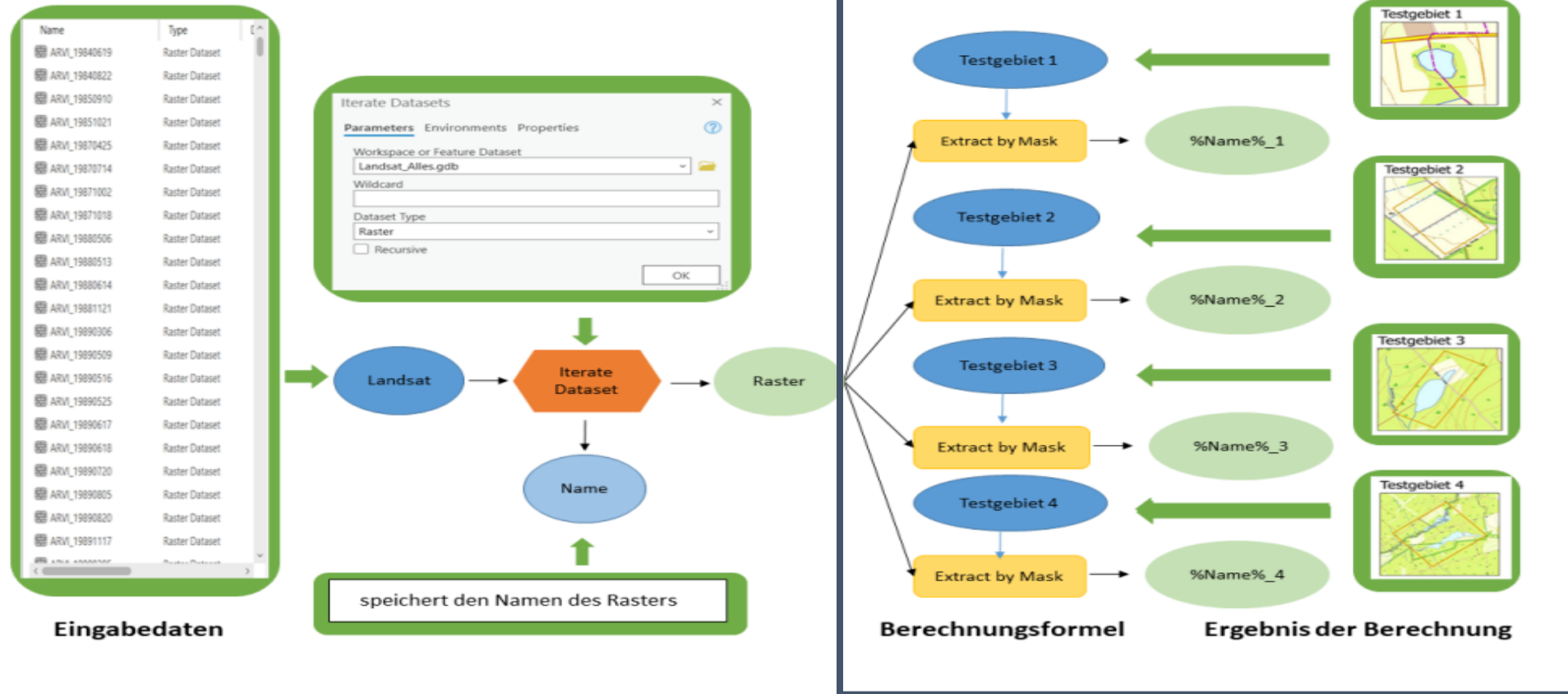
# Raum- und zeitliche Analyse der Indikatoren

Am Beispiel NDVI

$$NDVI = \frac{\rho^{NIR} - \rho^{Rot}}{\rho^{NIR} + \rho^{Rot}}$$



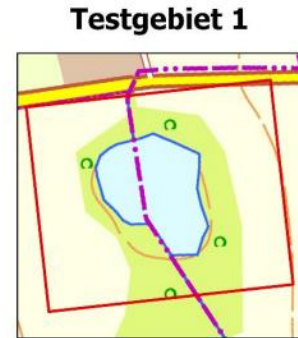
# Anwendung der Datenbank



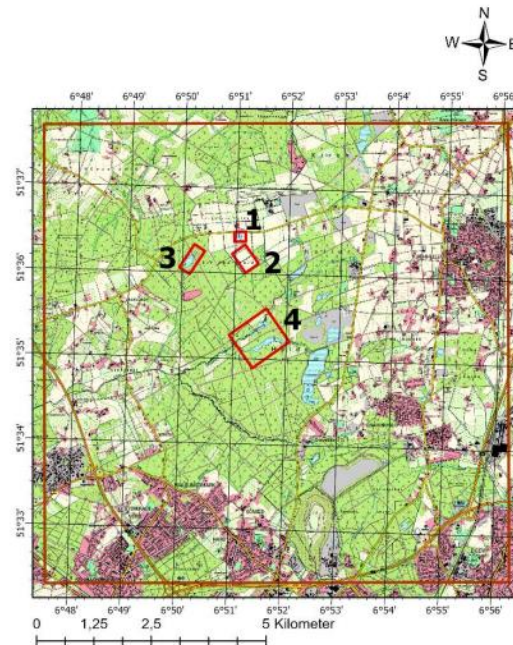
Verwendung auf Arbeitsgebiete

# Auswahl und Charakteristik des Testgebietes

Landnutzungs-kategorie:  
**Ackerland**  
Abbau:  
**1994-2013**



Landnutzungs-kategorie:  
**Ackerland**  
Abbau:  
**1994-2004**

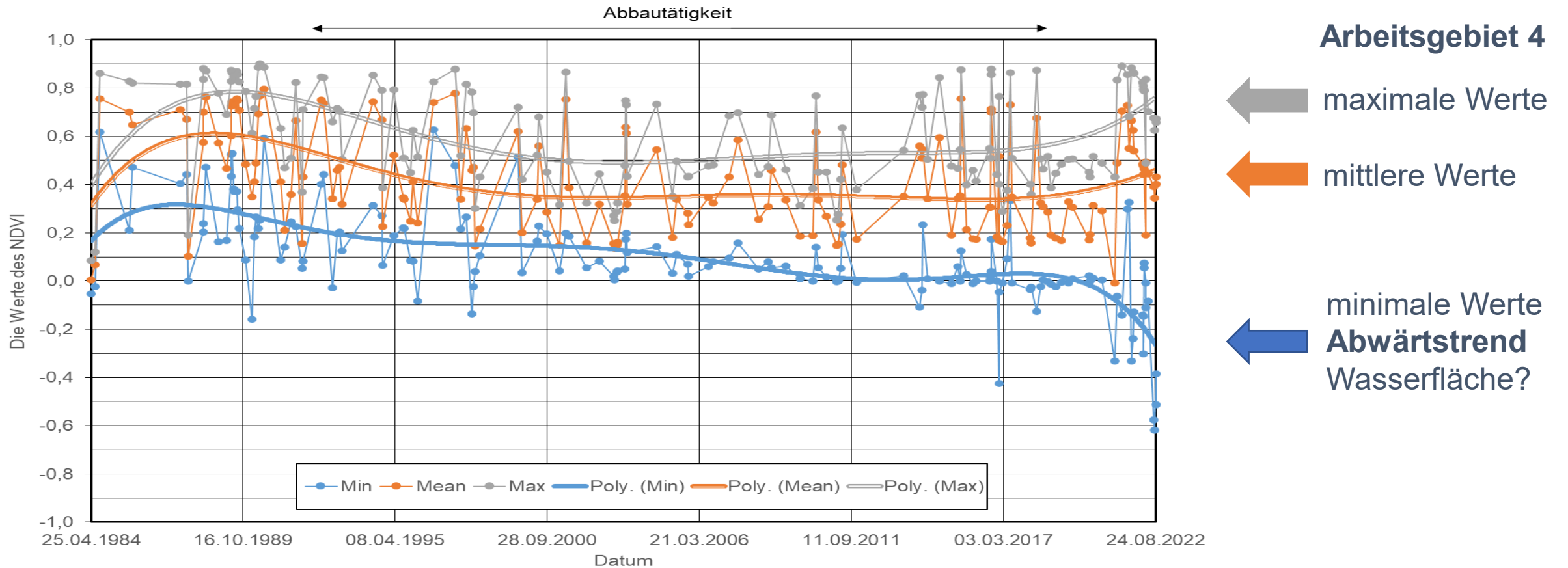


Landnutzungs-kategorie:  
**Wiese und Wald**  
Abbau:  
**1990-2014**

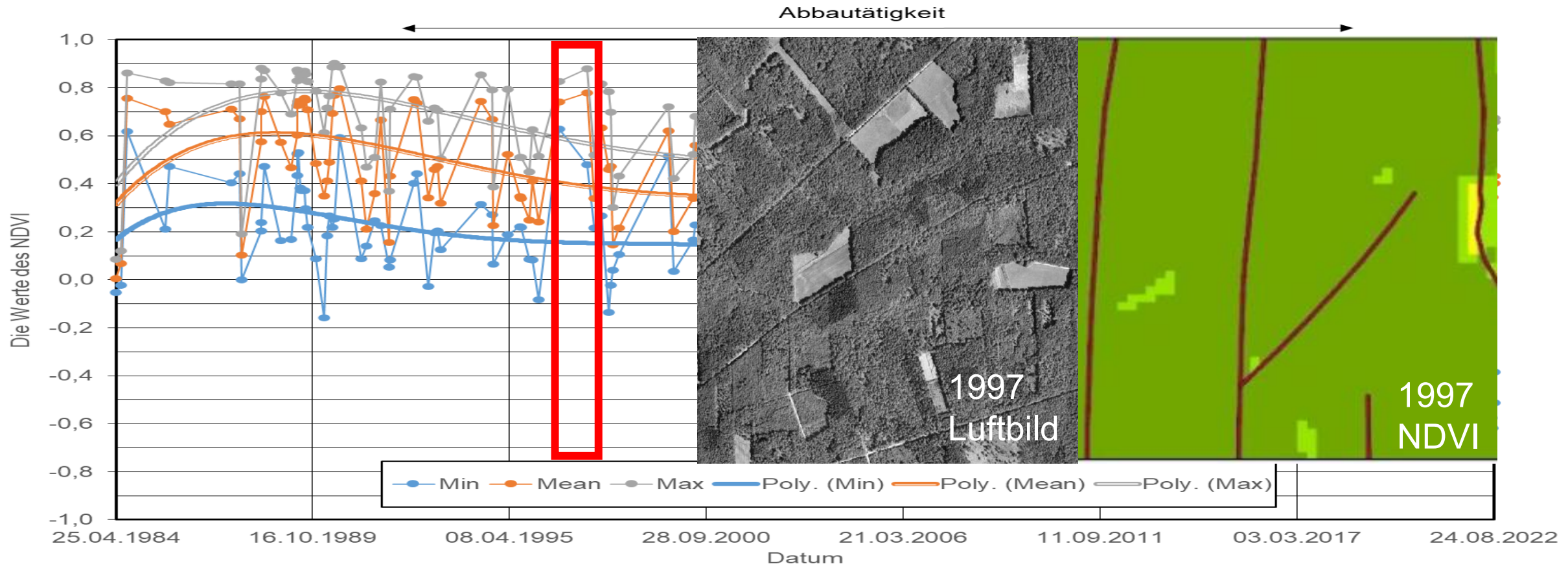


Landnutzungs-kategorie:  
**Wiese und Wald**  
Abbau:  
**1992-2018**

# Zeitreihenanalyse des NDVI

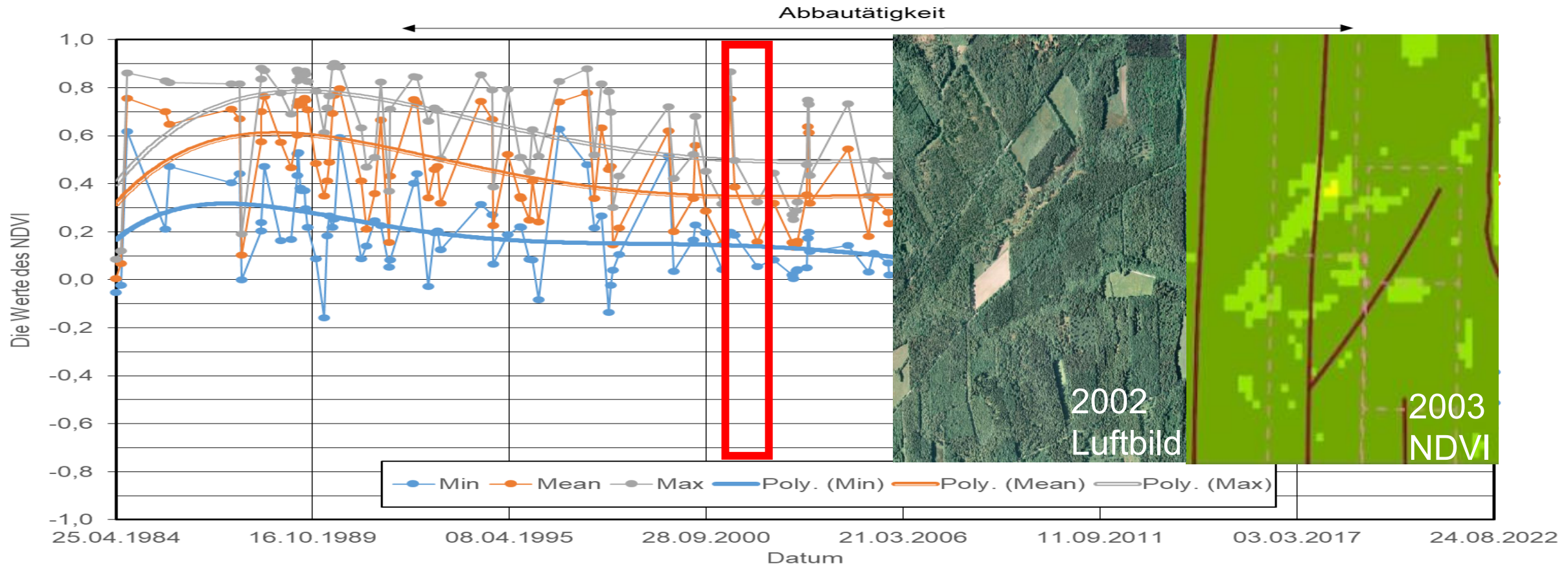


# Zeitreihenanalyse des NDVI - 1997



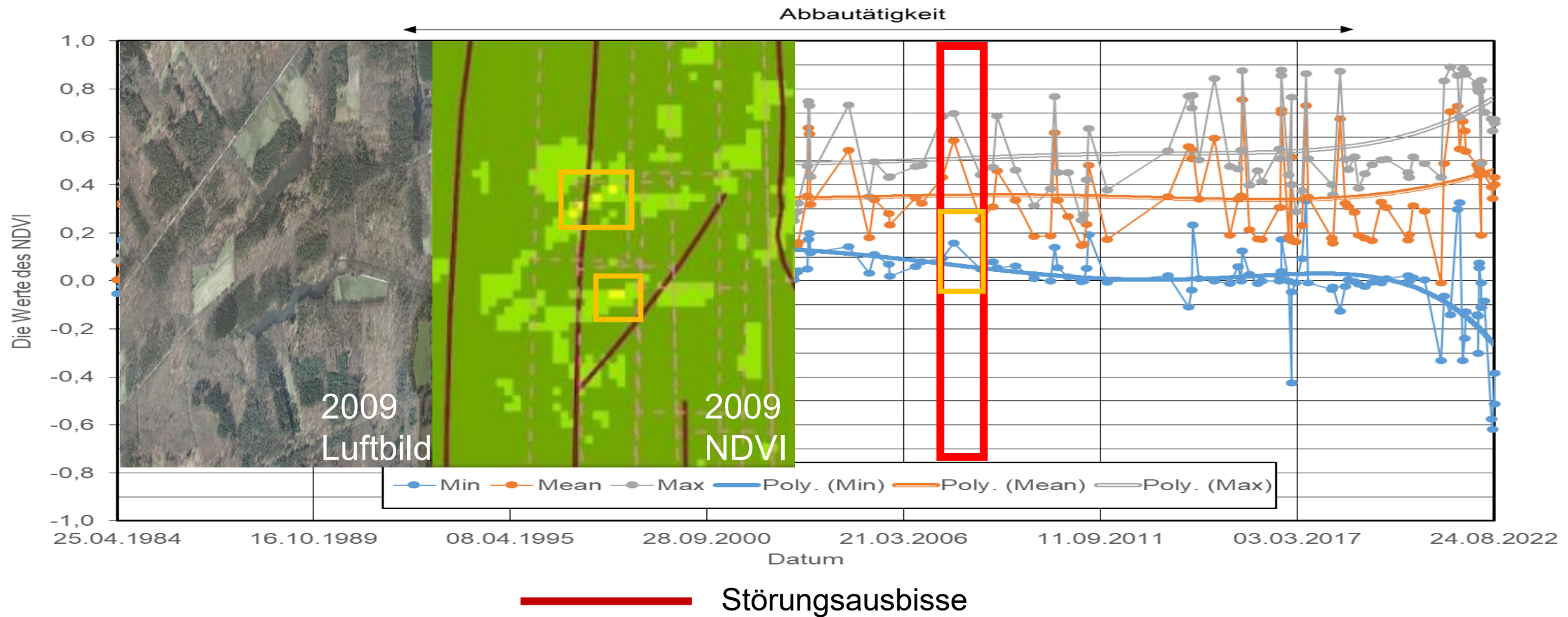
— Störungsausbrüche

# Zeitreihenanalyse des NDVI - 2002

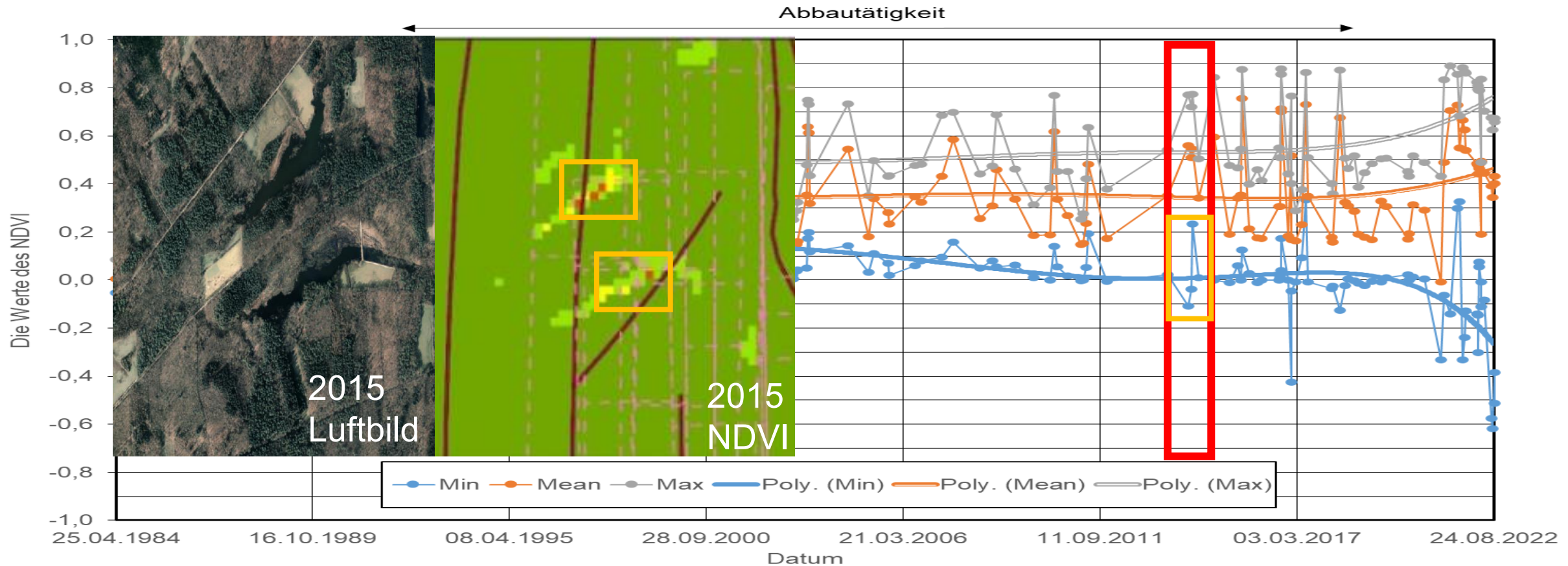


**— Störungsausbisse**

# Zeitreihenanalyse des NDVI - 2009

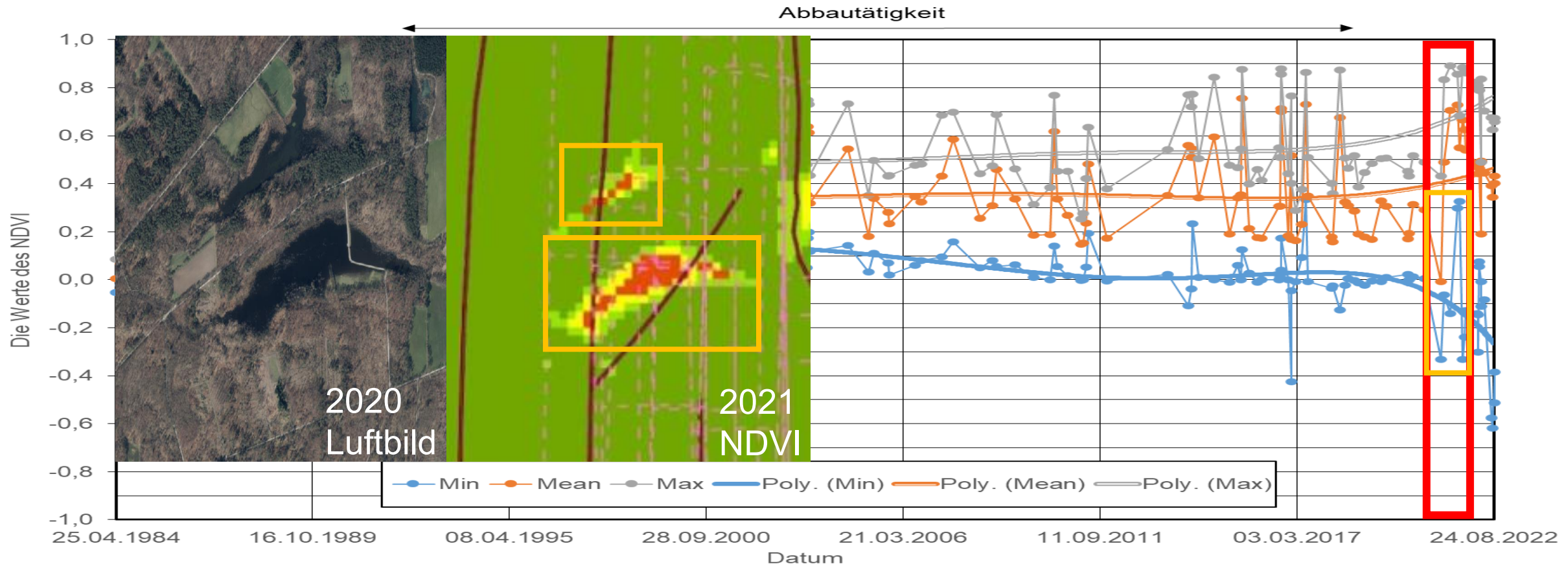


# Zeitreihenanalyse des NDVI - 2015



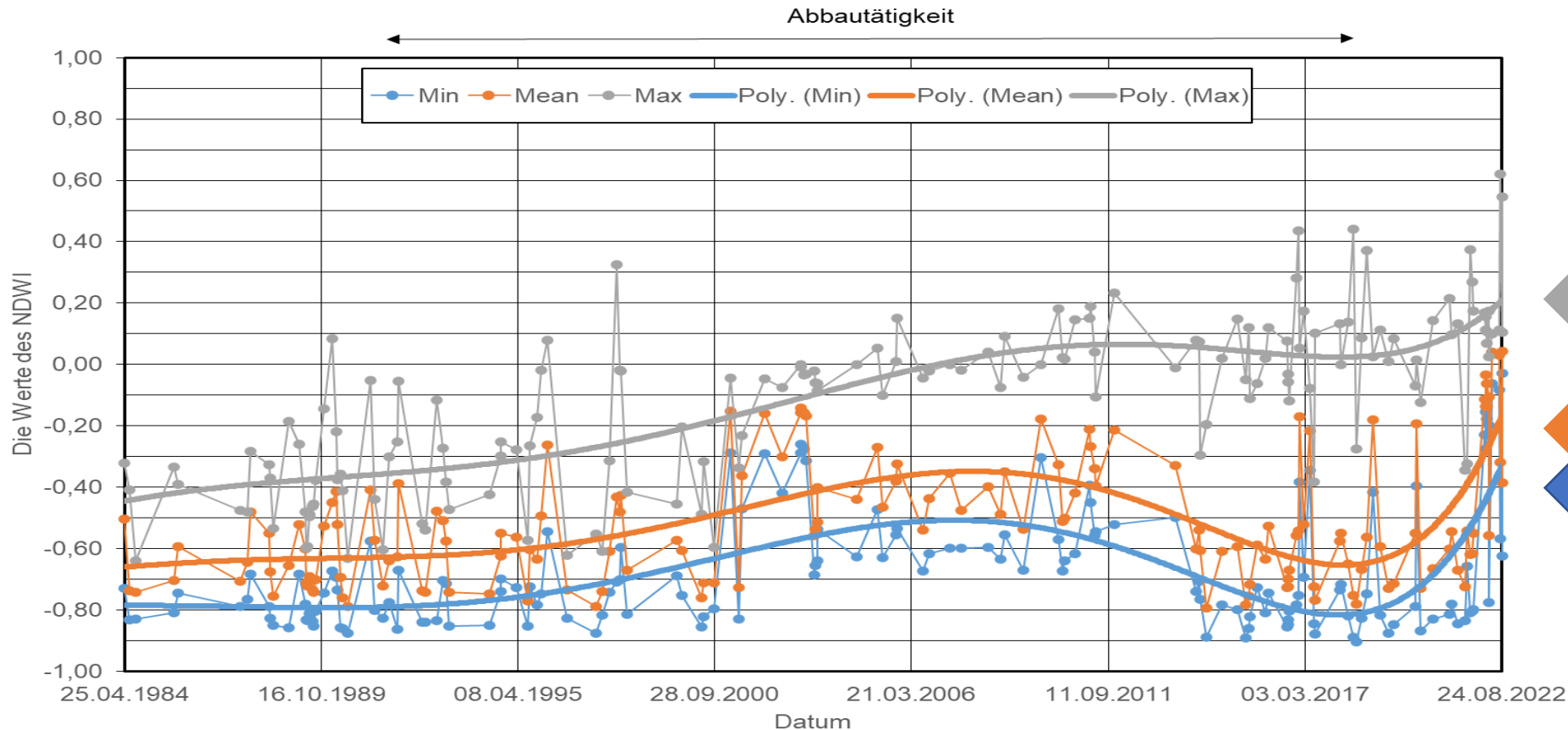
— Störungsausbisse

# Zeitreihenanalyse des NDVI - 2020



**Störungsausbisse**

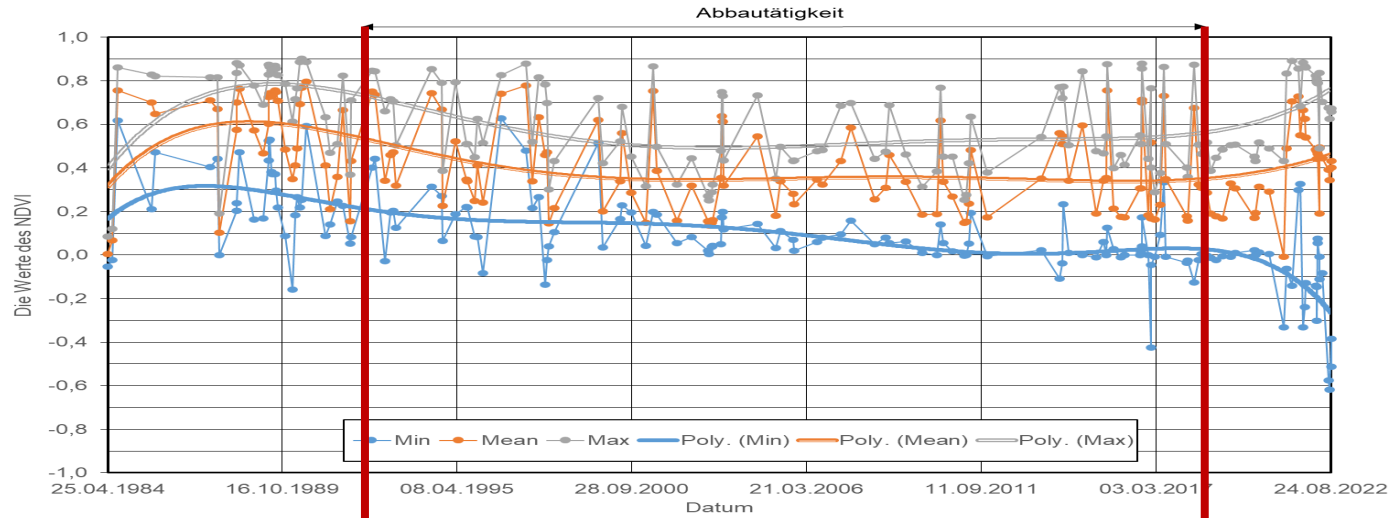
# Zeitreihenanalyse des Wasserindex NDWI Gao



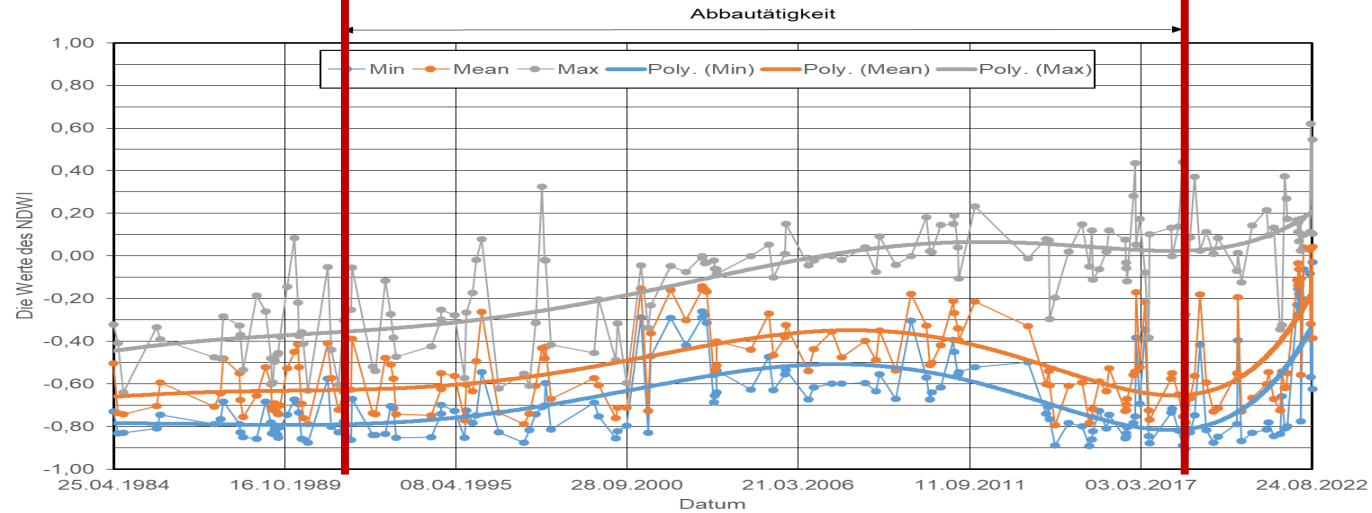
Arbeitsgebiet 4

# Vergleich

Vegetationsindikator  
NDVI

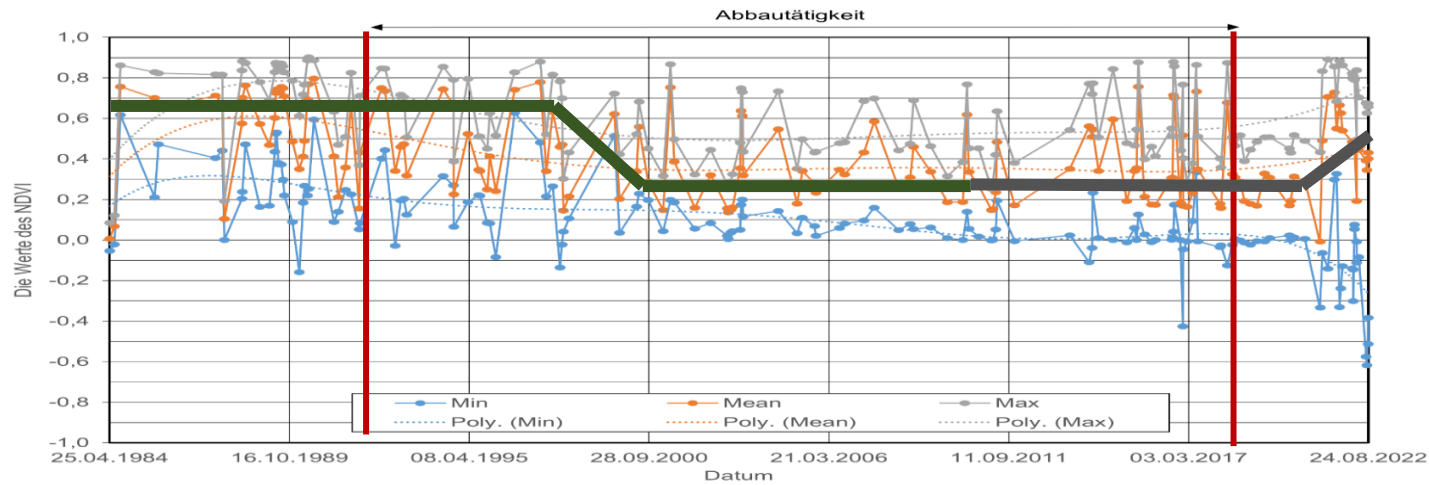


Wasserindikator  
NDWI Gao



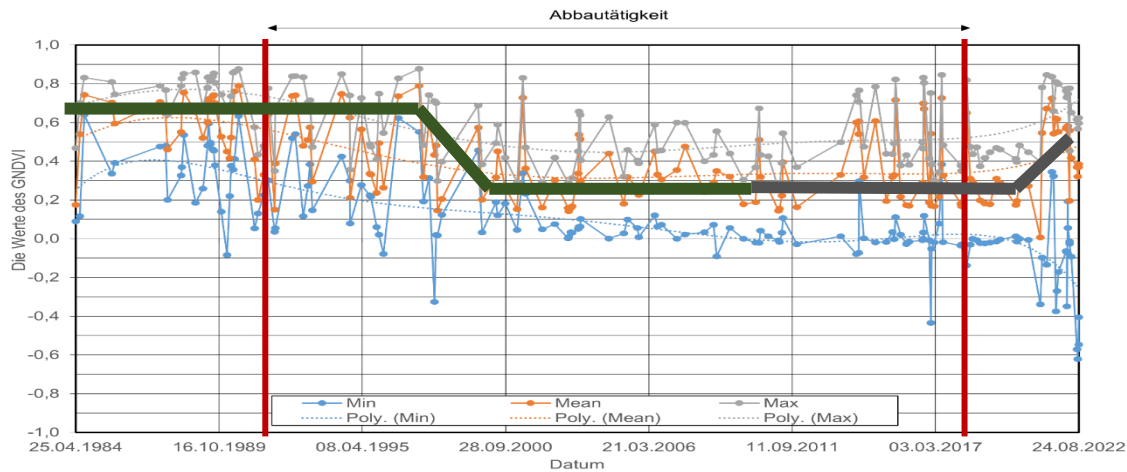
Abbautätigkeit  
1992-2018

# Vegetationsindikator - NDVI

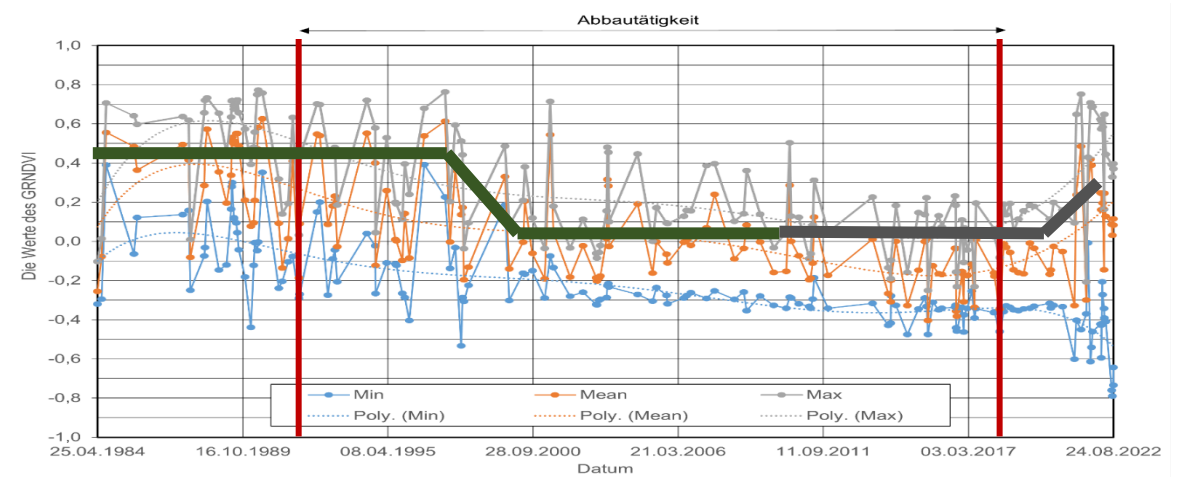


Abbautätigkeit  
 1992-2018  
  
 Trendlinie

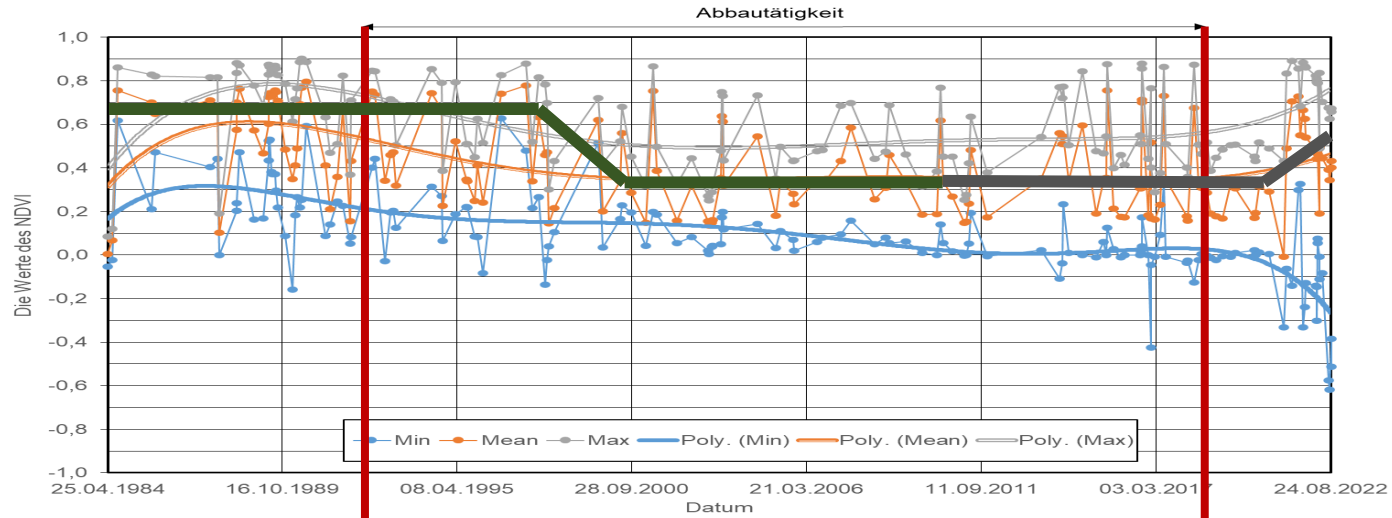
# Vegetationsindikator - GNDVI



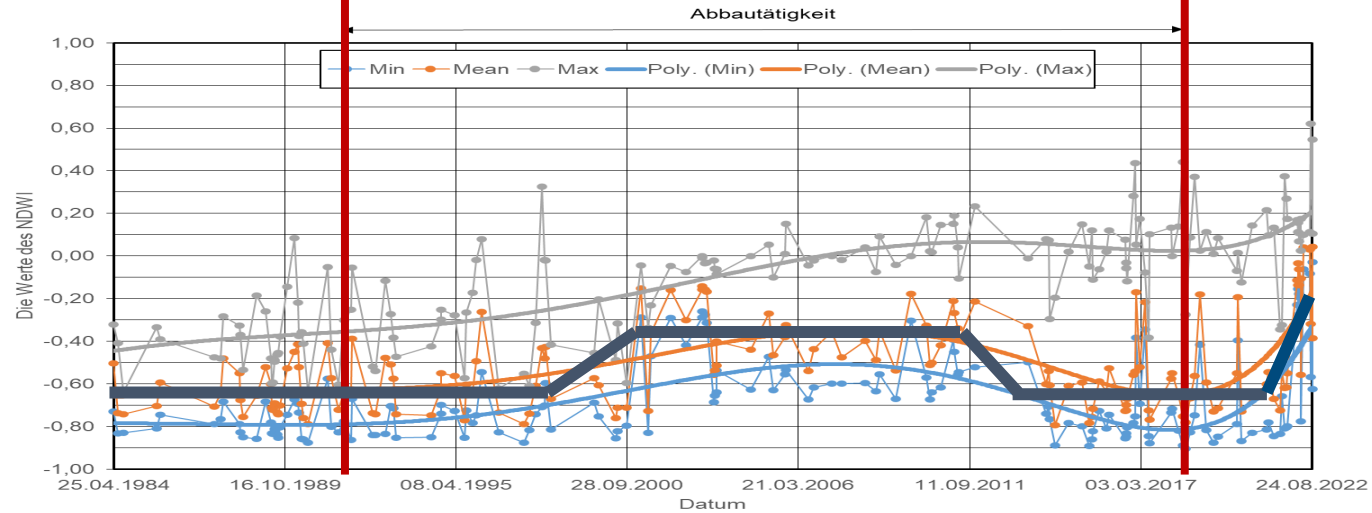
# Vegetationsindikator - GRNDVI




## Vegetationsindikator NDVI



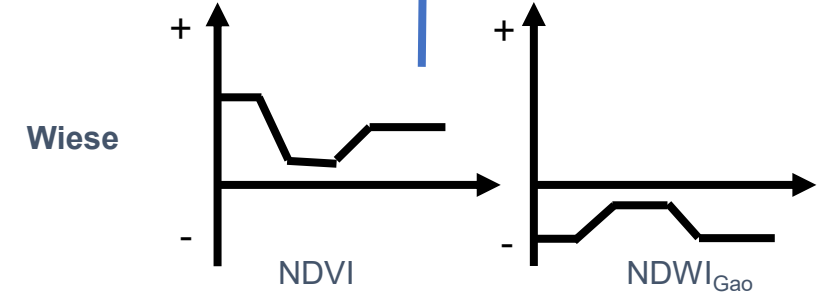
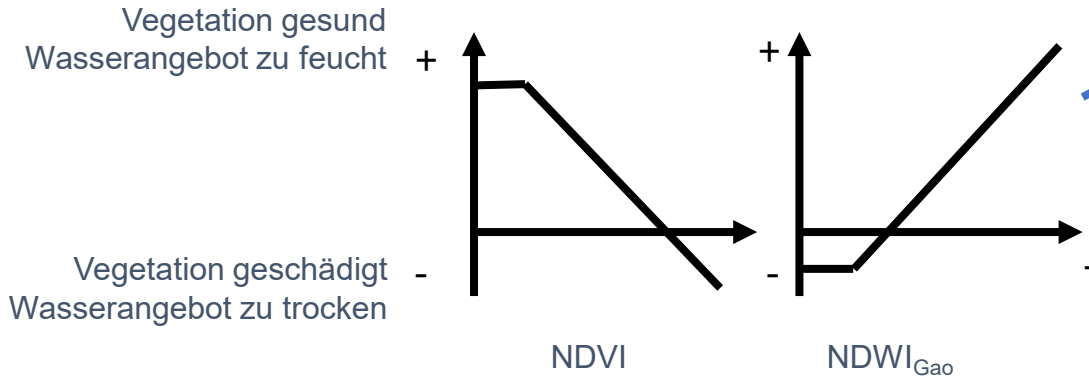
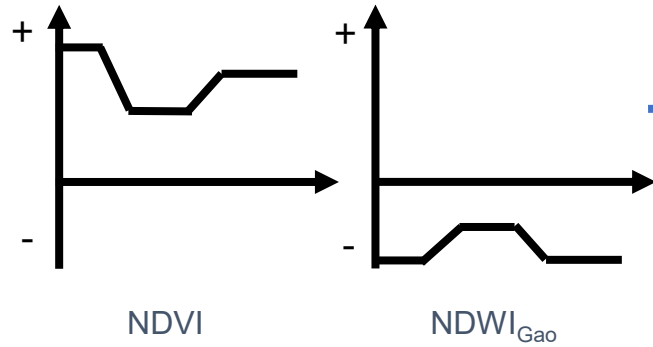
## Wasserindikator NDWI<sub>Gao</sub>



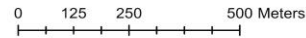
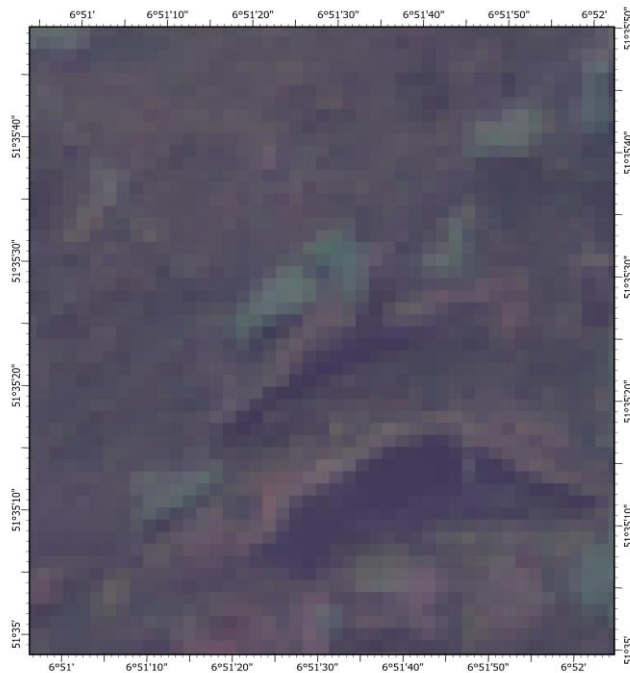
-  Abbautätigkeit  
1992-2018
-  Trendlinie von NDVI
-  Trendlinie von  
NDWI<sub>Gao</sub>

# Zeitliche und räumliche Variabilität von Fernerkundungsindikatoren für ein Bergbaugebiet

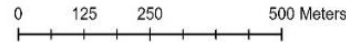
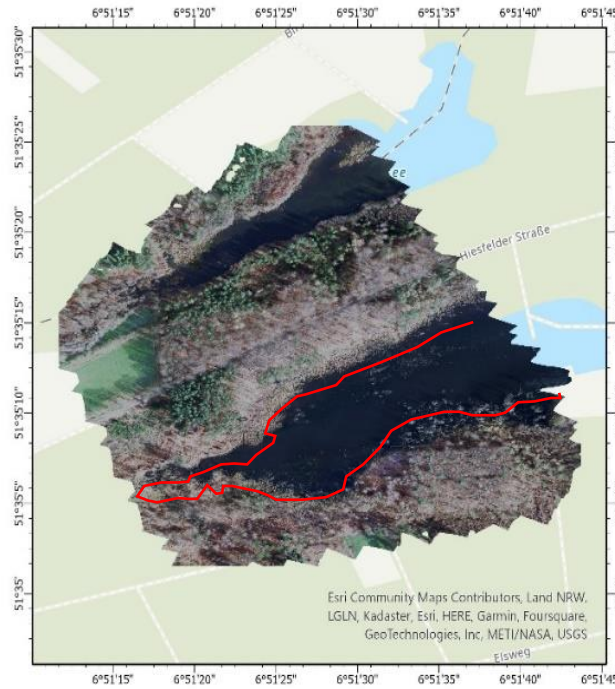
Am Beispiel Pfingstsee (Testgebiet 4)



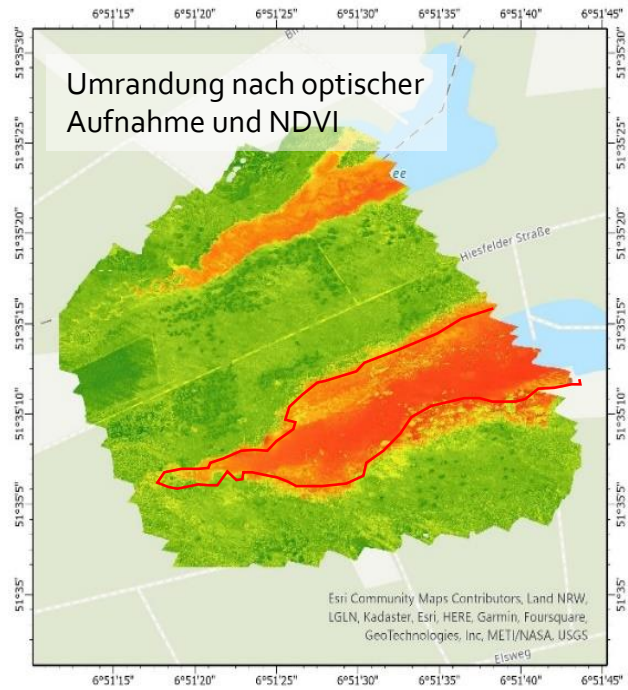
# Validation der Ergebnisse – Drohnenflüge



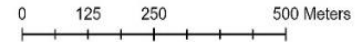
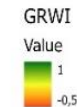
Landsat 8 aus 27.10.2022



DJI Phantom 4 MS aus 06.10.2022

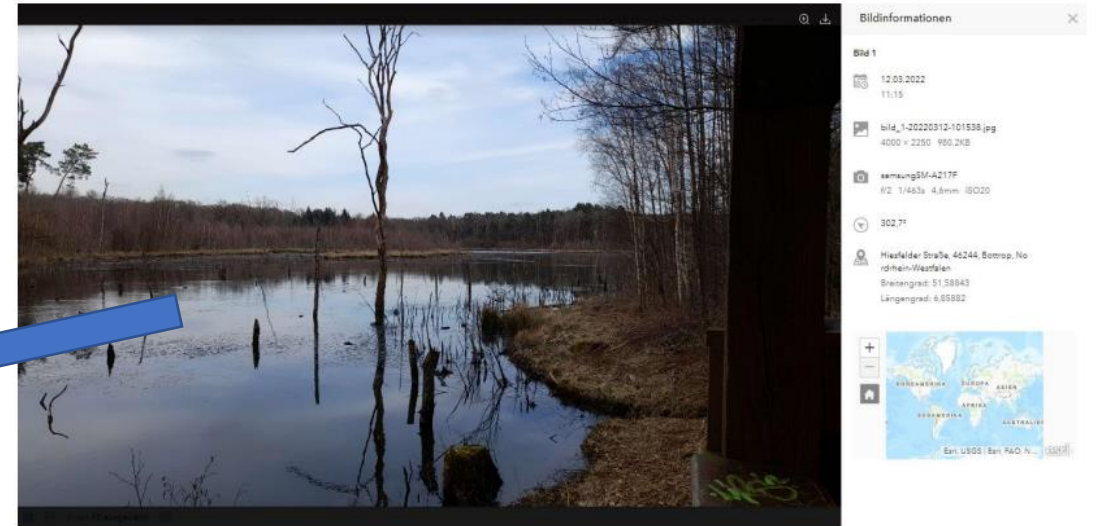
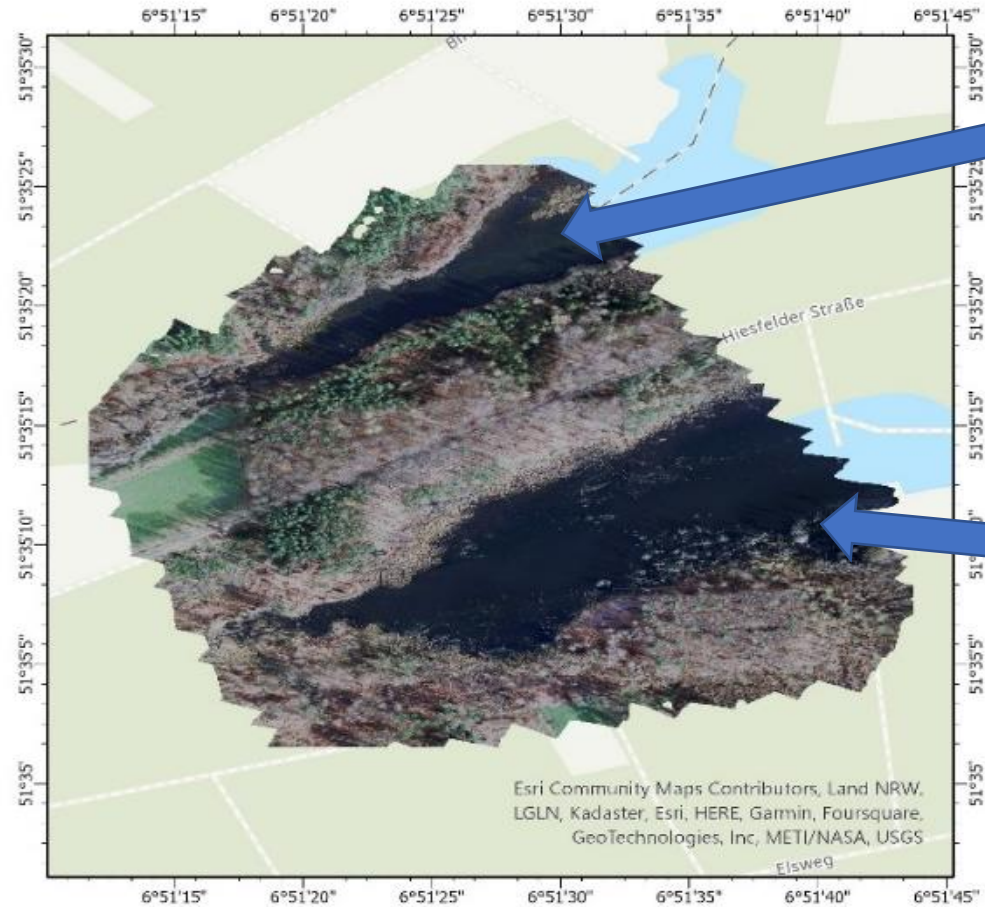


## Legend



Umrandung nach optischer Aufnahme und NDVI

# Verifikation mit mobilem GIS



# Empfehlung

- **Neue Entwicklung** integrierter Monitoring-Systeme, die Satellitendaten, Drohnendaten und Felddaten
- Notwendigkeit der Einführung integrierter Managementstrategien für nachbergbauliche Gebiete unter Berücksichtigung ökologischer und hydrologischer Aspekte
- Erhöhte Beteiligung lokaler Behörden am Rekultivierungsprozess sowie Aufklärung der lokalen Bevölkerung über potenzielle Risiken im Zusammenhang mit Bodenverformungen und hydrologischen Veränderungen

# Zusammenfassung

## Forschungsfragen:

1. Welche **Vegetationsindizes** funktionieren im Nachbergbau?
2. Welche **Pflanzen- /Wasserindikatoren** liefern eine raum-und zeitliche Veränderungsüberwachung?

## Ergebnisse:

- Analyse von 162 Satellitenbilder der Landsat-Missionen von 1984 bis 2022
- nicht alle Indizes ( $\Sigma 28$ ) sind in der Lage, Veränderungen und Trends zu erkennen
- **Verwendbare nachbergbauliche Indikatoren**
  - Vegetation: **NDVI, GNDVI, GRNDVI, GLI**
  - Wasser: **NDWI<sub>Gao</sub>, MNDWI**
- Der neue **GRWI** basiert auf Drohnendaten und ist auf Sentinel-2 übertragbar
- **Neue Art der Zeitreihenanalyse ermöglicht nun für (Bergbau-)Gebiete eine verbesserte Zustandsbeschreibung**

- Notwendigkeit zur vollen Integration der Geoinformationen in der nachbergbaulichen Fernerkundung!
- Nur die Kombination von Vegetations- und Wasserindikatoren ermöglicht eine detaillierte Zeitreihenauswertung!
- Entwickelte Forschungsmethodik ermöglicht die Anwendung auf andere Bergbauggebiete!

**Danke für Ihre Aufmerksamkeit!**



@THGA/Marcin Pawlik

# Literatur

- Albertz, J. (2007): Einführung in die Fernerkundung. Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern. 3., aktualisierte und erw. Aufl. Darmstadt: Wiss. Buchges.
- Benndorf, J.; Jansen, J. D. (2017): Recent Developments in Closed-Loop Approaches for Real-Time Mining and Petroleum Extraction. In: Math Geosci 49 (3), S. 277–306. DOI: 10.1007/s11004-016-9664 8.
- Benndorf, J. (2021): Geomonitoring und Markscheidewesen als integrativer Teil des Umweltmanagements in der Rohstoff- und Energiebranche – zukünftige Aufgabe. In: avn 128 (5), 237 247.
- Blachowski, J.; Dynowski, A.; Buczyńska, A.; Ellefmo, S. L.; Walerysiak, N. (2023b): Integrated Spatiotemporal Analysis of Vegetation Condition in a Complex Post-Mining Area: Lignite Mine Case Study. In: Remote Sensing 15 (12), S. 3067. DOI: 10.3390/rs15123067.
- Gao, B., (1996): NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment Vol. 58, pp. 257-266
- Goerke-Mallet, P.; Melchers, C.; Kretschmann, J. (2016): Global post-mining challenges – Experiences gained from the German hard coal mining industry. In: 16TH INTERNATIONAL CONGRESS FOR MINE SURVEYING, BRISBANE, AUSTRALIA, 12-16 SEPT 2016, S. 287–292.
- Kaderzeit J.W.; Körner C.; Nick P.; Sonnewald U (2021) Strasburger – Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften, Springer Spektrum Berlin, Heidelberg, <https://doi.org/10.1007/978-3-662-61943-8>
- Kratzsch, H (2005) Bergschadenkunde, Bochum: Deutscher Markscheider-Verein
- Kretschmann, J.; Efremenkov, A. B.; Khoreshok, A. A. (2017): From Mining to Post-Mining: The Sustainable Development Strategy of the German Hard Coal Mining Industry. In: IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 50, S. 12024. DOI: 10.1088/1755-1315/50/1/012024.
- Liu, Y.; Xie, M.; Liu, J.; Wang, H.; Chen, B. (2022b): Vegetation Disturbance and Recovery Dynamics of Different Surface Mining Sites via the LandTrendr Algorithm: Case Study in Inner Mongolia, China. In: Land 11 (6), S. 856. DOI: 10.3390/land11060856.

# Literatur

- Pawlik, M., Gellendin M., Bernsdorf B., Rudolph T., Benndorf J. (2022): Digital Twin – How to Observe Changes and Trends on the Post-Mining Areas? International Journal of Earth & Environmental Sciences, 7:195, pp. 1-13.
- Pawlik, M., Rudolph T., Bernsdorf B., Benndorf J. (2023): Green Red Water Indices – vegetation indices for environmental Geomonitoring, Book of abstracts XXIII Conference of PhD Students and Young Scientists, June 13 – 15, 2023, hybrid event, pp. 1-3.
- Pawlik, M. (2025) Der Einsatz von multispektralen Satellitenbildern in Geomonitoring von nachbergbaulichen Prozessen. Dissertation. Technische Universität Bergakademie Freiberg
- Pawlik, M., Gellendin, M., Rudolph, T. (2025) Integrated Digital Twin and Geo-Fusion for Post-Mining Geomonitoring: Subsurface Modelling and Remote Sensing Applications. Civil and Environmental Engineering Reports, 35(3), 48–70.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., & Deering, D.W. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS.
- Rudolph, T. (2019): Digital Twin – Integriertes Geomonitoring weiterentwickelt. 11.-13. September 2019, Technische Hochschule Georg Agricola, Bochum, S. 15–22. DOI: 10.48771/v93z-jd67.
- Sen, S.; Zipper, C.E.; Wynne, R.H.; Donovan, P. F. (2012): Identifying Revegetated Mines as Disturbance/Recovery Trajectories Using an Interannual Landsat Chronosequence. In: *photogramm eng remote sensing* 78 (3), S. 223–235. DOI: 10.14358/PERS.78.3.223.
- Simmon, R. (2000) Illustration des NDVI .In: Weier, J. und Herring, D. (2000) “Measuring Vegetation (NDVI & EVI)”
- Sroka, A.; Wittkopf, M. (1996): DEFORMATIONSMESSUNGEN UNO -ANALYSEN ZUR PARAMETERIDENTIFIKATION GEOMETRISCHER BODENBEWEGUNGSMODELLE IM MARKSCHEIDEWESEN. In: H. Pelzer und R. Heer (Hg.): Proceedings of the 6th International FIG Symposium on Deformation Measurements. Hannover: WISSENSCHAFTLICHE ARBEITEN DER FACHRICHTUNG VERMESSUNGSWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER, S. 691–707.
- Yang, Y.; Erskine, P. D.; Lechner, A. M.; Mulligan, D.; Zhang, S.; Wang, Z. (2018): Detecting the dynamics of vegetation disturbance and recovery in surface mining area via Landsat imagery and LandTrendr algorithm. In: Journal of Cleaner Production 178, S. 353–362. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.01.050.
- Wang, Y.; Zhao, S.; Zuo, H.; Hu, X.; Guo, Y.; Han, D.; Chang, Y. (2023): Tracking the Vegetation Change Trajectory over Large-Surface Coal Mines in the Jungar Coalfield Using Landsat Time-Series Data. In: Remote Sensing 15 (24), S. 5667. DOI: 10.3390/rs15245667.