WET SCAPES 2.0

Satellitenradar-Interferometrie für das flächenhafte Monitoring von Mooren

Sentinel-1-Zeitreihen zur Erfassung von Bodenbewegungen und Mooratmung in Mecklenburg-Vorpommern

Luc Pienkoß und Philip Marzahn
Professur für Geodäsie und Geoinformatik, Universität Rostock
TRR 410 · WETSCAPES2.0

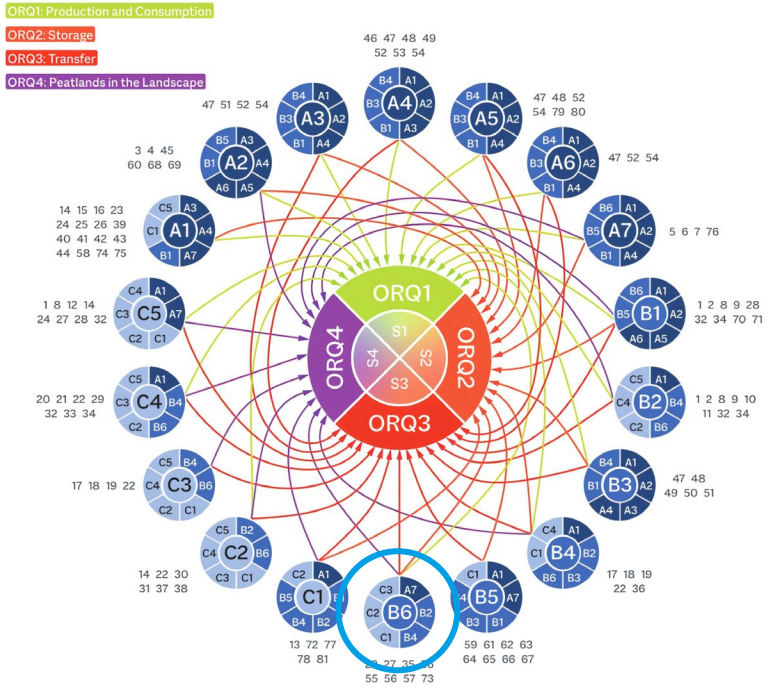
22. GeoForum MV · Technologiepark Rostock-Warnemünde
22. September 2026

Gefördert durch
DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft
Universität Rostock Traditio et Innovatio
UNIVERSITÄT GREIFSWALD Wissen lockt. Seit 1456
MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR BIOGEOCHEMIE
GFZ Helmholtz-Zentrum für Geoforschung
IGB Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei
LMU LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT MÜNCHEN
HUMBOLDT-UNIVERSITÄT ZU BERLIN
GREIFSWALD MOOR CENTRUM

WETSCAPES2.0

Senken, Verknüpfungen und Langzeitwirkungen neuartiger Ökosysteme in wiedervernässten Niedermoorlandschaften

SFB / Transregio 410 · 2025–2028 · 22 Teilprojekte in 4 Projektbereichen · 8 Institutionen · 24 Projektleitungen · 16 Promovierende · 9 Postdocs · 5 Gastwissenschaftler:innen · 9 Technik & Koordination



Datenaustausch im Verbund — jedes Teilprojekt liefert Parameter an die vier Forschungsfragen.
Grafik: WETSCAPES2.0-Konsortium.

ÜBERGREIFENDE FORSCHUNGSFRAGEN

1 Produktion & Zehrung
Was treibt Produktion und Zehrung in wiedervernässten Mooren an?

2 Speicherung
Was und wie viel wird in wiedervernässten Mooren gespeichert?

3 Transfer
Wie werden Stoffe, Energie und Information innerhalb und über die Moore hinaus ausgetauscht?

4 Moore in der Landschaft
Wie wirken wiedervernässte Moore mit der Landschaft zusammen und koppeln zurück?

B6 liefert dem Verbund

55 vertikale Bewegung der Mooroberfläche
56 Überflutungskarten
57 DGM
73 Karten der Bodenfeuchte
22 Vegetationshöhe
27 Blattflächenindex (LAI)
35 vertikale Biomasseverteilung
36 Vegetationsdichte

B6 · Projektbereich B (m – km) · Geodäsie & Geoinformatik, Universität Rostock · Pienkoß & Marzahn

Raum-zeitliches Monitoring von Mooroberflächenbewegung — Sentinel-1-InSAR (landesweit) · Extensometer-Netzwerk · UAV-LiDAR & Multispektral

→ *Trennung der reversiblen „Moor-Atmung“ von der irreversiblen Absenkung*

Warum sollten wir Absenkungsmuster in Mooren untersuchen?

Moore in Mecklenburg-Vorpommern

≈ 290.000 ha
Moorfläche – rund 13 % der Landesfläche

≈ 97 %
davon entwässert

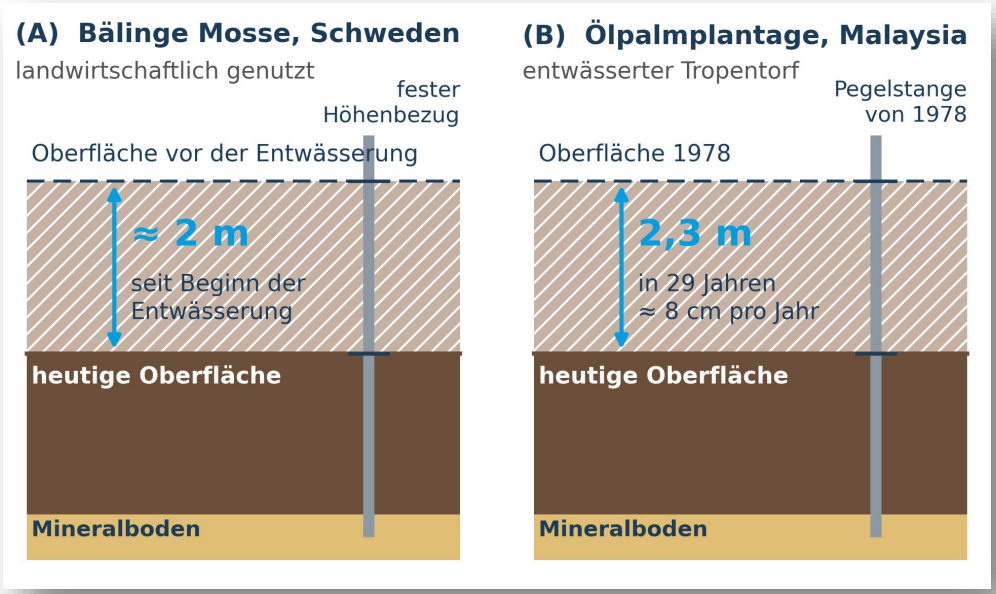


Abb. 1: Absenkung entwässerter Moore, schematisch am festen Höhenbezug. (A) Bälinge Mosse, Schweden: ≈ 2 m seit Beginn der Entwässerung. (B) Ölpalmenplantage, Malaysia: 2,3 m in 29 Jahren. Eigene Darstellung, Zahlen nach Hirschelmann et al. (2020).

Entwässerung → Torfverdichtung & Torfmineralisierung → Absenkung & CO_2-Freisetzung

Entwässerte Moore emittieren rund 6 Mio. t CO_2-Äquivalente pro Jahr (≈ 30 % der Landesemissionen) — Mecklenburg-Vorpommerns größte Einzelemissionsquelle![1]

Hirschelmann et al. (2020)[1]

Was ist mit Oberflächenbewegungen in Mooren gemeint?

Mooroberflächenbewegung ist die Überlagerung *zweier Signale*[1]:

Reversibel

„Moor-Atmung“ / Oberflächen-Oszillation (PSO)

- Saisonale Hebung und Senkung durch Wassergehaltsschwankungen
- OA — jährliche Spitze-Spitze-Amplitude

Irreversibel

Verdichtung + Mineralisierung durch Entwässerung

- Negativer (langfristiger) Trend

→ Absenkung

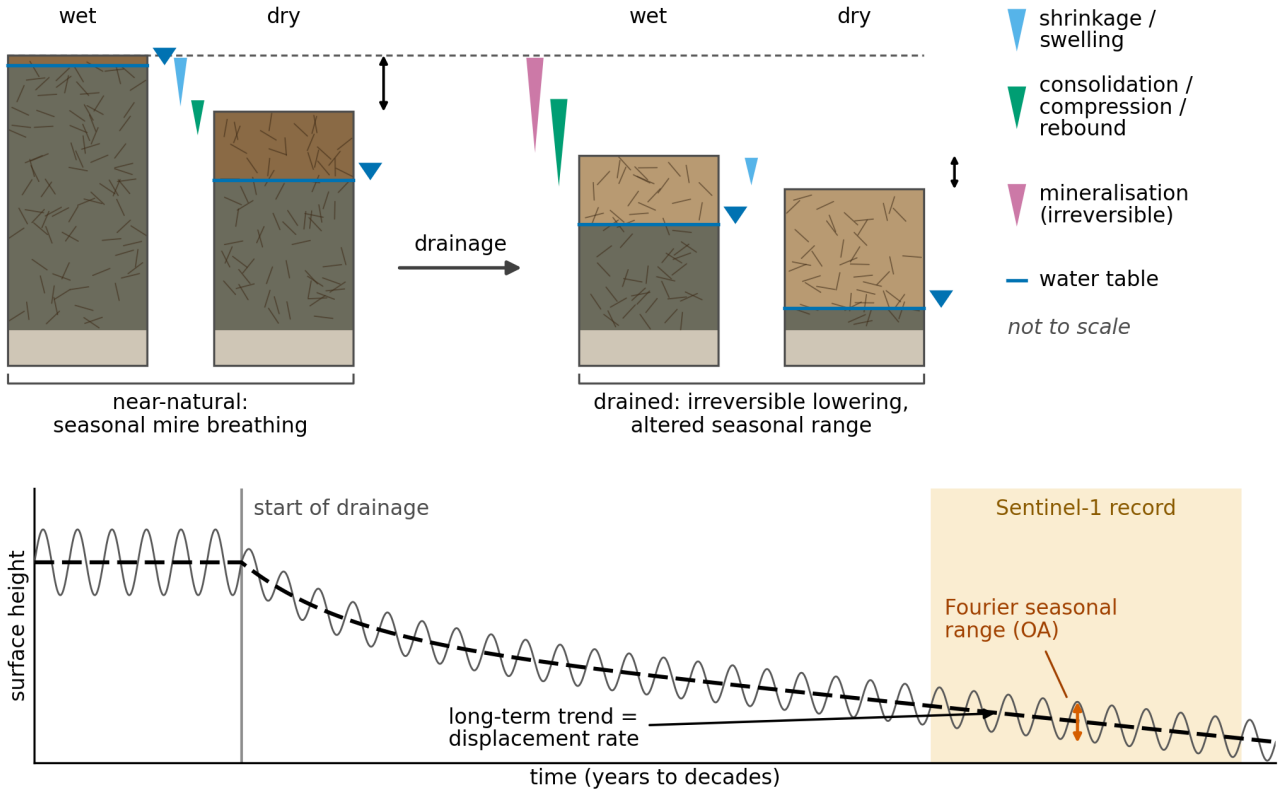


Abb. 2: *Konzeptskizze: oben Torfsäulen eines naturnahen und eines entwässerten Moores (nass/trocken), unten Oberflächenhöhe über die Zeit – Langzeittrend (Bewegungsrate) und saisonale Amplitude (OA) im Sentinel-1-Zeitraum. Vereinfacht nach Seidel et al. (2025, Abb. 1 & 2; CC BY 4.0).*

Seidel et al. (2025)[1]

Radarinterferometrie (InSAR) und der SBAS-Ansatz

Warum Radarsatellit?

- Tag & Nacht (aktiver Sensor)
- bei jedem Wetter (durchdringt Wolken)
- große Flächen, regelmäßig

Welcher Satellit?

- Sentinel-1 (ESA / Copernicus), C-Band
- Wiederkehr alle 6–12 Tage
- Bodenauflösung ≈ 40 m

InSAR

Interferometric Synthetic Aperture Radar

- vergleicht Radarbilder desselben Gebiets aus zwei Überflügen
- Phasendifferenz → Oberflächenänderung entlang der Blickrichtung (LOS)
- Genauigkeit im Millimeterbereich

SBAS

Small Baseline Subset (Berardino et al. 2002)

- nutzt nur Bildpaare mit kleiner räumlicher & zeitlicher Basislinie
- hält Dekorrelation & Orbitgeometrie-Fehler klein → geeignet für bewachsene Moore
- Interferogramstack → Zeitreihe je Pixel

→ Effizientes Werkzeug für großflächiges, kontinuierliches Monitoring

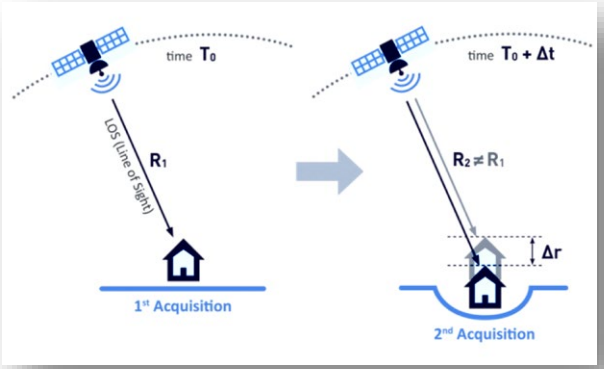


Abb. 4: Prinzip von DInSAR: Aufnahme 1 (T_0) misst die Referenzdistanz R_1; Aufnahme 2 ($T_0 + \Delta t$) liefert R_2. Aus der Differenz folgt die Bodenbewegung Δr in Blickrichtung (© Alaska Satellite Facility / TRE ALTAMIRA).

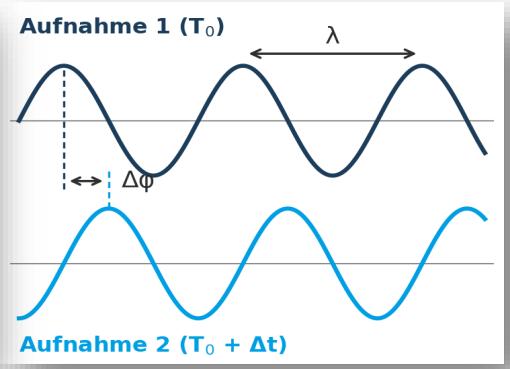


Abb. 5: Prinzip der Interferometrie: Phasenverschiebung $\Delta\varphi$ zwischen zwei Aufnahmen (eigene Darstellung).

InSAR-SBAS-Workflow

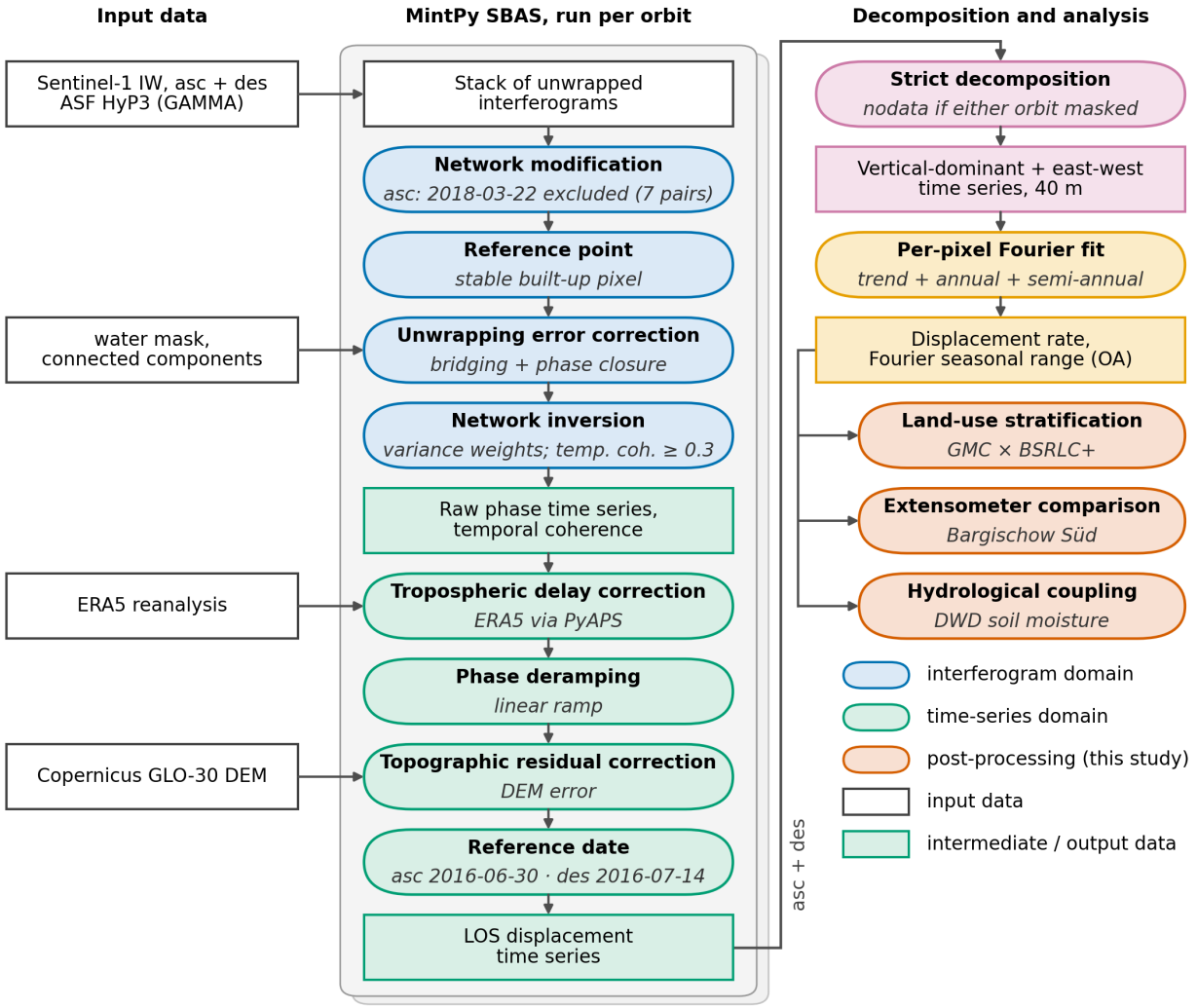


Abb. 6: Prozessierungskette: MintPy-SBAS je Orbit (asc/des), strikte Zerlegung, Fourier-Fit je Pixel und Analysen. Layout nach Zhang et al. (2019).

Zhang et al. (2019): MintPy; Fuhrmann & Garthwaite (2019): Zerlegung; Hersbach et al. (2020): ERA5; Hogenson et al. (2020): HyP3; Tiemeyer et al. (2024): „LoCoMotion"/Extensometer

Regionale Absenkungsrate & saisonale Amplitude

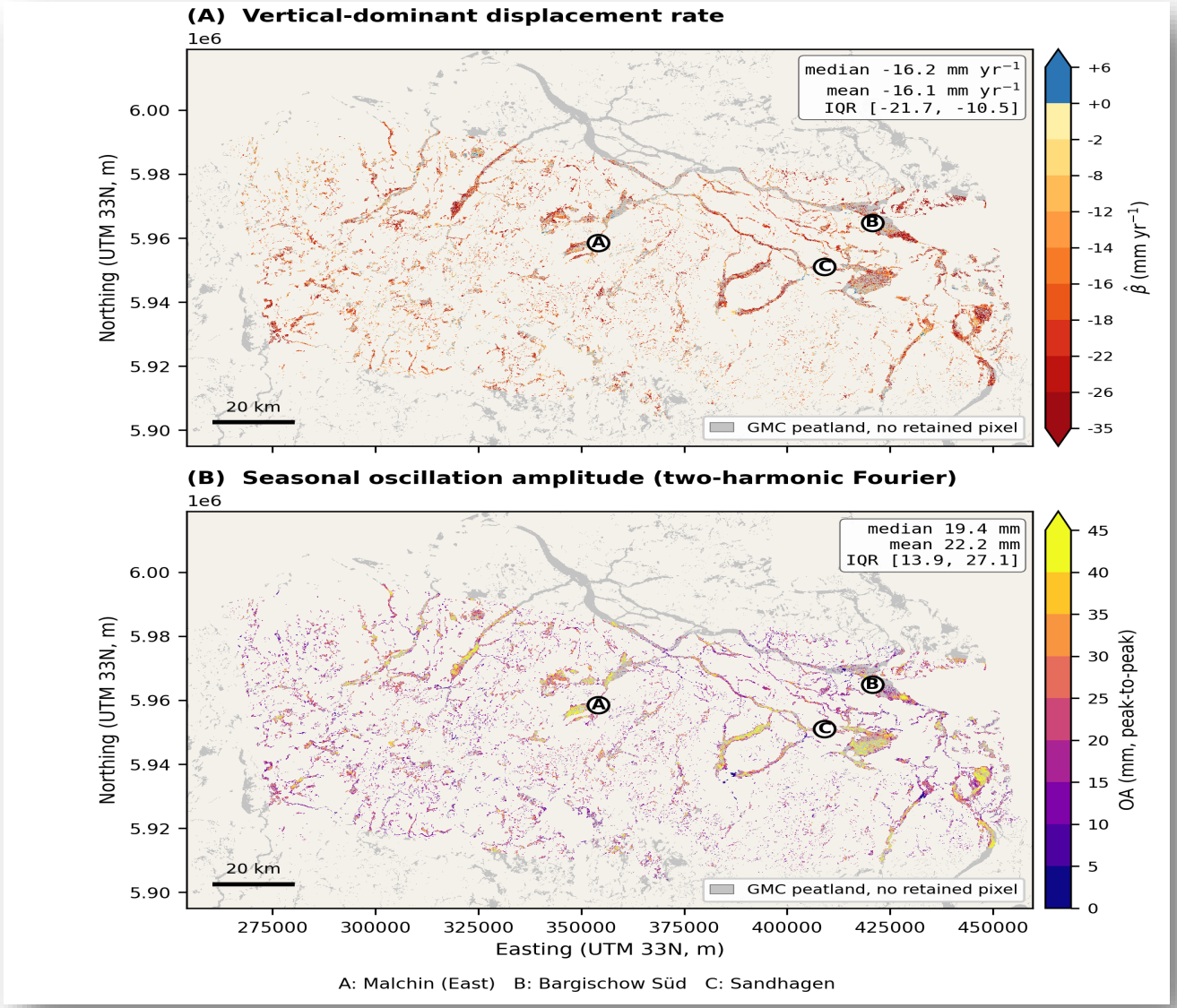


Abb. 7: Vertikal-dominierte Bewegungsrate (A) und saisonale Amplitude des zwei-harmonischen Fourier-Modells (B) über der GMC-kartierten Moorkulisse MVs (2016–2025). Regionale Mediane: Trend −16,2 mm/Jahr, Oszillationsamplitude 19,4 mm. A: Malchin (Ost) · B: Bargischow Süd · C: Sandhagen. Quelle: Pienkoß et al. (in Vorb.).

Fokusstandorte im Detail — 40-m-Raster

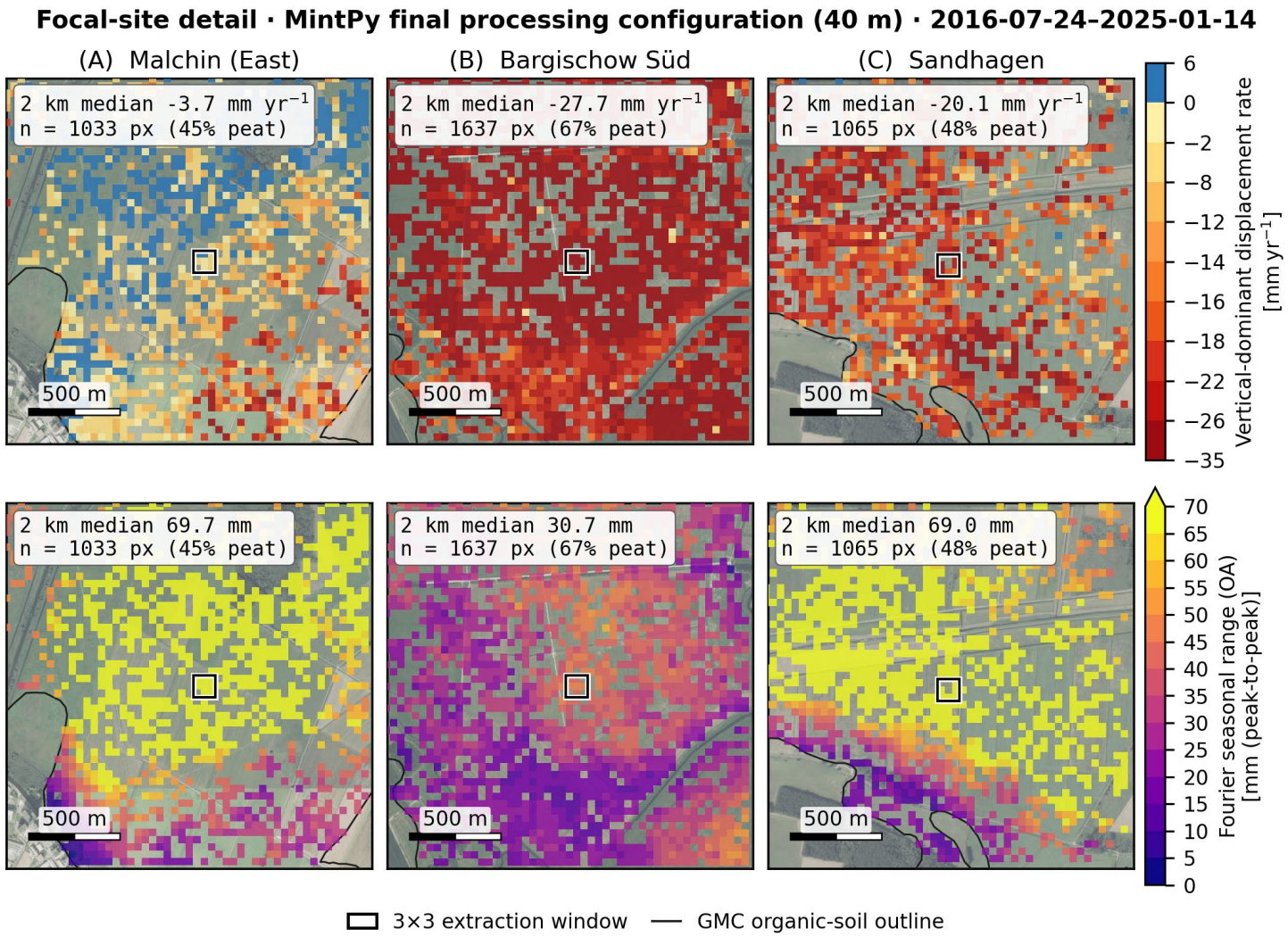


Abb. 8: Vertikal-dominierte Bewegungsrate (oben) und saisonale Amplitude OA (unten) im nativen 40-m-Raster um die drei Fokusstandorte (je 2 × 2 km, Sommer-Orthophoto © GeoBasis-DE/M-V). Quadrat: 3×3-Extraktionsfenster der Standort-Zeitreihen; schwarze Linie: GMC-Moorkulisse. Die eingetragenen Mediane beschreiben den ganzen Ausschnitt, nicht die Standortwerte. Quelle: Pienkoß et al. (in Vorb.).

Zerlegung an Fokusstandorten — Trend vs. Saison

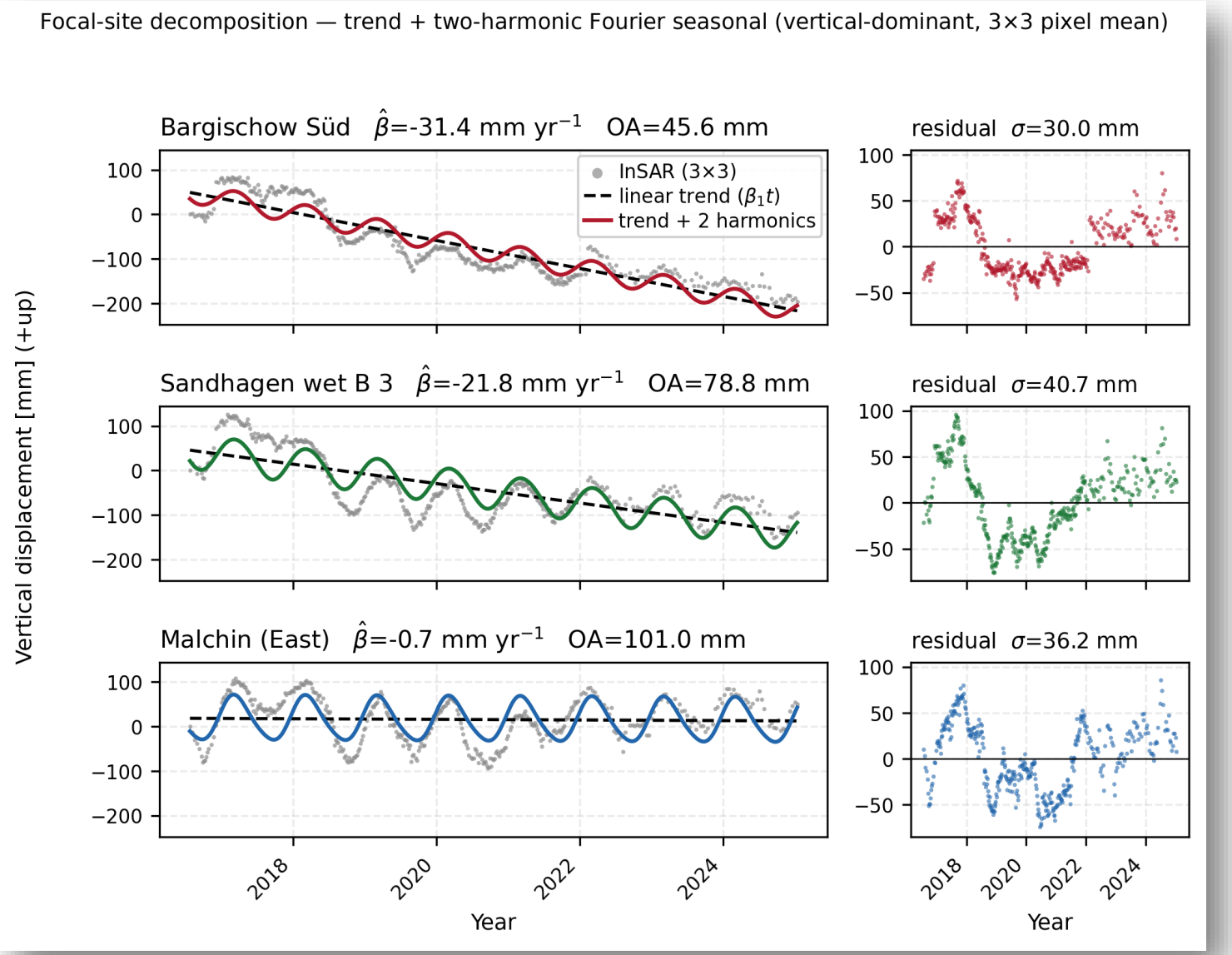


Abb. 9: Vertikal-dominierte Zeitreihen an drei Fokusstandorten, zerlegt in linearen Trend (gestrichelt) und zwei-harmonisches saisonales Fourier-Modell (farbig). Trend / Amplitude: Bargischow Süd −31,4 mm/Jahr / 45,6 mm · Sandhagen (wet B 3) −21,8 / 78,8 · Malchin (Ost) −0,7 / 101,0. Rechts: Streuung der Residuen. Quelle: Pienkoß et al. (in Vorb.).

Hydrologische Kopplung — Moor-Atmung ist wassergetrieben

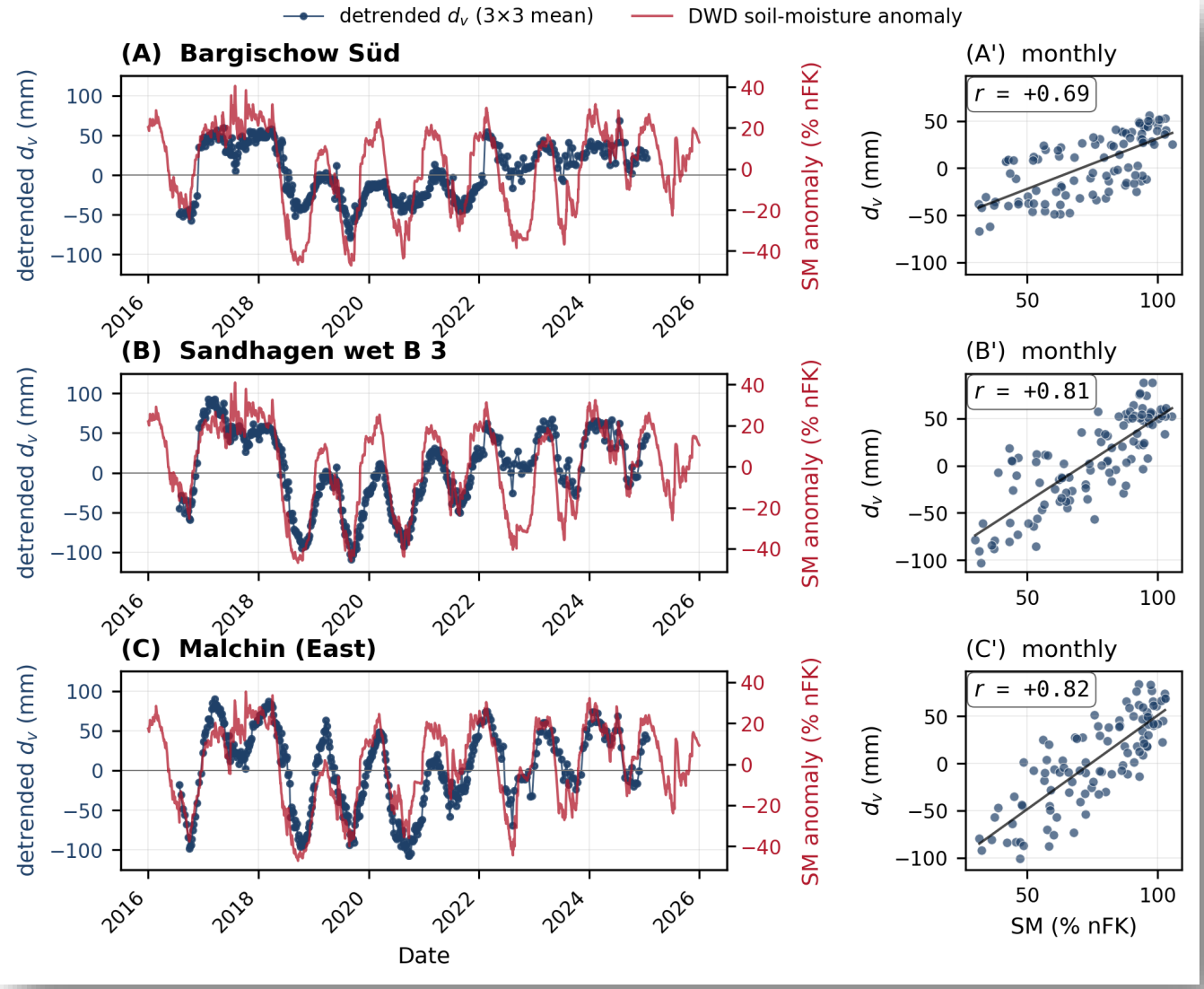


Abb. 10: Trendbereinigte vertikal-dominierte InSAR-Zeitreihe vs. DWD-Bodenfeuchteanomalie an den drei Fokusstandorten. Monatliche Korrelationen r = +0,69 (Bargischow Süd), +0,81 (Sandhagen), +0,82 (Malchin Ost) verknüpfen die saisonale Oberflächenoszillation mit Änderungen des Wassergehalts.

Degradationsmuster über Landbedeckungsklassen

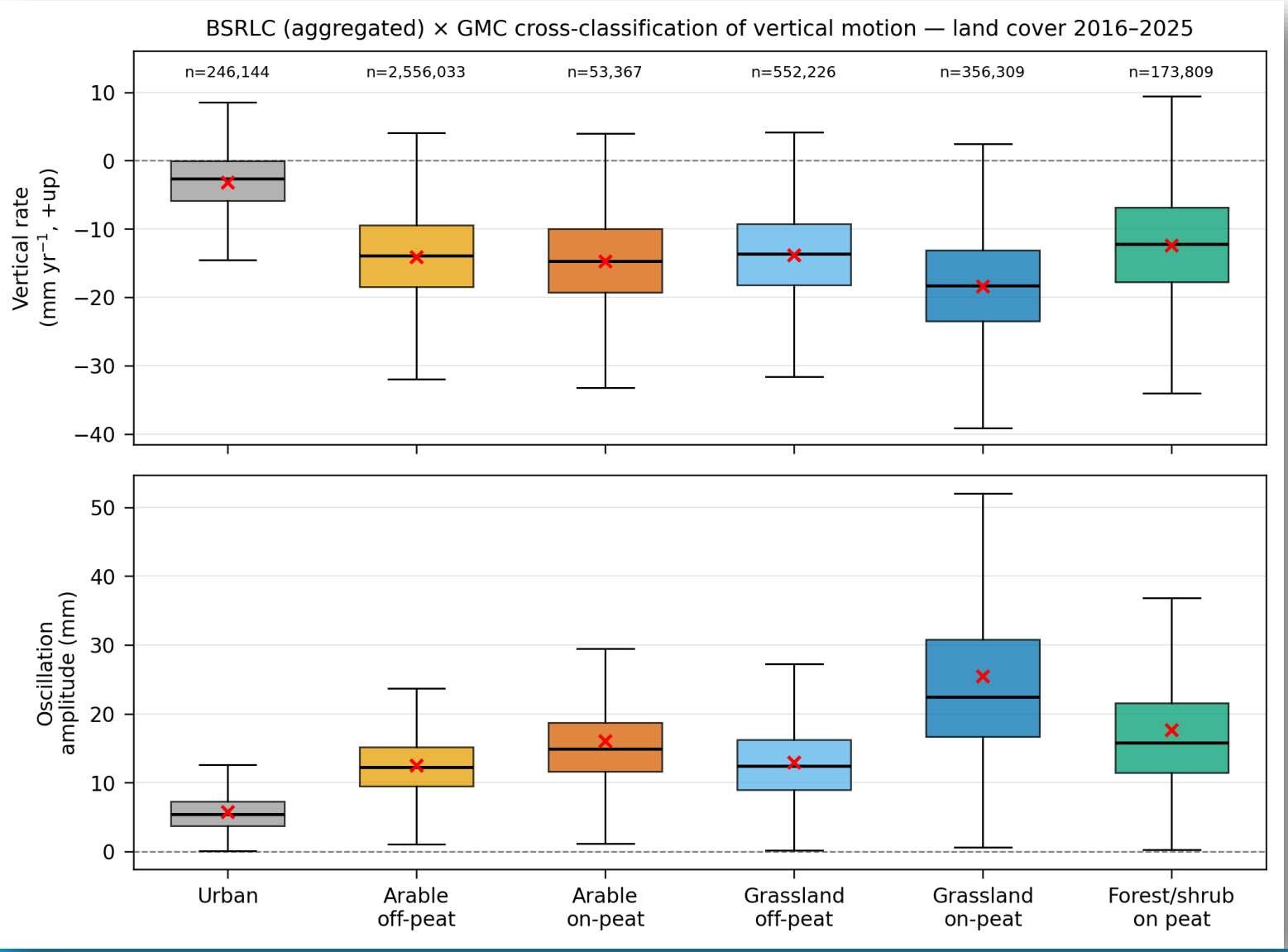
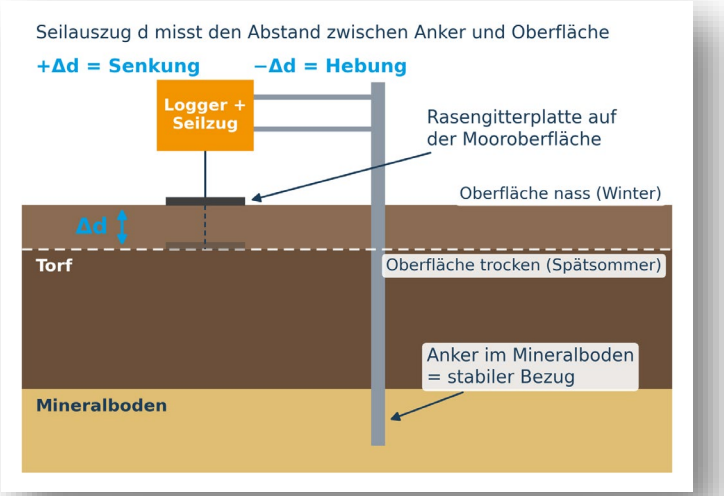


Abb. 11: Kreuzklassifikation der vertikal-dominierten Bewegungsrate (oben) und der saisonalen Amplitude (unten) nach BSRLC-Landbedeckung, getrennt in auf Torf (GMC) und außerhalb der Moorkulisse. Grünland auf Torf senkt sich am stärksten (−18,3 mm/Jahr) und zeigt die größte saisonale Amplitude (22,5 mm); der Absenkungskontrast Moor minus Siedlung beträgt −13,6 mm/Jahr. Quelle: Pienkoß et al. (in Vorb.).

Validierung mit Extensometern



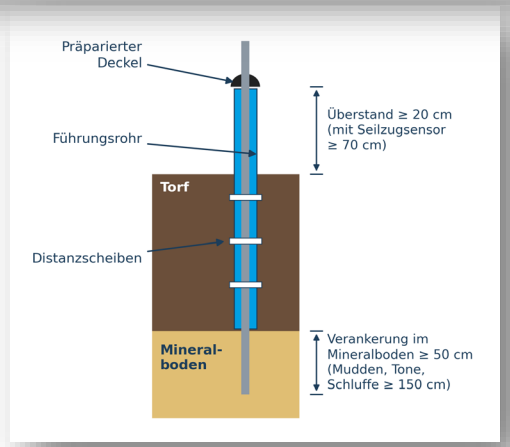


Abb. 12: Messprinzip (oben) und Aufbau (unten) des Seilzug-Extensometers (eigene Darstellung).







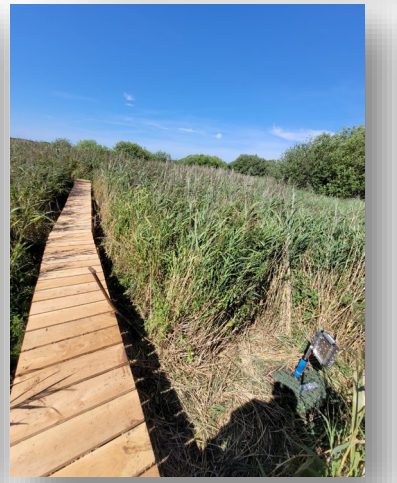






Abb. 13: *Installationen im Gelände (Fotos: Luc Pienkoß).*

Fazit & Ausblick

Kernergebnisse (2016 – 2025)

- **SBAS-InSAR erfasst** flächendeckend Signale, die mit saisonaler Mooroberflächen-Oszillation und langfristiger Absenkung konsistent sind
- **Kohärenter Jahresgang:** Hebung im Winter, Absenkung im Spätsommer/Herbst
- **Degradationskontrast:** Moore zeigen die größte saisonale Amplitude; Absenkung Moor−Siedlung −13,6 mm/Jahr

Literaturvergleich

Oszillationsamplitude (OA)

19,4 mm *(diese Studie, Fourier-Median)*

33 mm *(Jahresspanne, feldnäherer Schätzer)*

23 mm entwässertes Niedermoor / 106 mm naturnah *Seidel 2025*[1]

10–40 mm *Hrysiewicz 2024*[5]

→ nicht 1:1 vergleichbar (Schätzer, Skala)

Linearer Trend (SR)

−16,2 mm/Jahr *(diese Studie, Median)*

−14,4 mm/Jahr *Ghezelayagh 2024*[4]

−7 bis −9 mm/Jahr *Hrysiewicz 2024*[5]

−8 bis −16 mm/Jahr *Leifeld 2011*[2]

→ nur indikativ (Maske, Zeitraum)

Ausblick (WETSCAPES2.0)

- **Validierung im Sensornetz:** 35 Extensometer + Grundwasserlogger
- **OA & Trend** mit Torfmächtigkeitsmessungen verknüpfen
- **Von Absenkung zu Emissionen:** Absenkung mit In-situ-Lagerungsdichte & organischem Gehalt koppeln, um CO_2-Emissionen zu quantifizieren[6]

SBAS-InSAR liefert flächendeckende Bewegungsraten und saisonale Amplituden für MVs Moore — die regionale Amplitude liegt zahlenmäßig näher an entwässerten als an naturnahen Niedermooren.

Seidel et al. (2025)[1], Leifeld et al. (2011)[2], IPCC Wetlands Suppl. (2014)[3], Ghezelayagh et al. (2024)[4], Hrysiewicz et al. (2024)[5], Ghezelayagh et al. (2025)[6]

Literatur

- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., Sansosti, E. (2002): A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 40(11), 2375–2383. doi:10.1109/TGRS.2002.803792
- Dettmann, U., Tiemeyer, B., Amiri, E. (2022–2024): Extensometer data, Thünen Institute of Climate-Smart Agriculture, Braunschweig.
- Fuhrmann, T., Garthwaite, M. C. (2019): Resolving Three-Dimensional Surface Motion with InSAR: Constraints from Multi-Geometry Data Fusion. Remote Sensing 11(3), 241. doi:10.3390/rs11030241
- Ghezelayagh, P., Eini, M. R., Grygoruk, M. (2025): Assessing carbon accumulation through peat vertical displacement: The influence of climate and land use across diverse peatland characteristics. Science of the Total Environment 958, 178132. doi:10.1016/j.scitotenv.2024.178132
- Ghezelayagh, P., Oleszczuk, R., Stachowicz, M., Eini, M. R., Kamocki, A., Banaszuk, P., Grygoruk, M. (2024): Developing a remote-sensing-based indicator for peat soil vertical displacement. A case study in the Biebrza Valley, Poland. Ecological Indicators 166, 112305. doi:10.1016/j.ecolind.2024.112305
- Greifswald Moor Centrum (2021): Faktenpapier zu Mooren und ihrer Rolle in einem Landesklimaschutzgesetz in Mecklenburg-Vorpommern. Greifswald Mire Centre, Greifswald.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., et al. (2020): The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 146(730), 1999–2049. doi:10.1002/qj.3803
- Hirschelmann, S., Tanneberger, F., Wichmann, S., Reichelt, F., Hohlbein, M., Couwenberg, J., Busse, S., Schröder, C. & Nordt, A. (2020): Moore in Mecklenburg-Vorpommern im Kontext nationaler und internationaler Klimaschutzziele – Zustand und Entwicklungspotenzial. Faktensammlung. Greifswald Moor Centrum-Schriftenreihe 03/2020 (Selbstverlag, ISSN 2627-910X), 35 S.
- Hogenson, K., Kristenson, H., Kennedy, J., Johnston, A., Rine, J., Logan, T., Zhu, J., Williams, F., Herrmann, J., Smale, J., & Meyer, F. (2020). Hybrid Pluggable Processing Pipeline (HyP3): A cloud-native infrastructure for generic processing of SAR data [Computer software]. https://doi.org/10.5281/zenodo.4646138
- Hrysiewicz, A., Williamson, J., Evans, C. D., Jovani-Sancho, A. J., Callaghan, N., Lyons, J. et al. (2024): Estimation and validation of InSAR-derived surface displacements at temperate raised peatlands. Remote Sensing of Environment 311, 114232. doi:10.1016/j.rse.2024.114232
- IPCC (2014): 2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands. Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M., Troxler, T. G. (eds). IPCC, Switzerland.
- Leifeld, J., Müller, M., Fuhrer, J. (2011): Peatland subsidence and carbon loss from drained temperate fens. Soil Use and Management 27(2), 170–176. doi:10.1111/j.1475-2743.2011.00327.x
- Pienkoß, L., van der Linden, S., Janssen, M., Tiemeyer, B., Marzahn, P. (in Vorbereitung): Seasonal and Long-Term Peat-Surface Motion across Temperate Fen Peatlands in Mecklenburg-Western Pomerania, Germany from Sentinel-1 SBAS InSAR. Manuskript, Universität Rostock.
- Seidel, R., Dettmann, U., Tiemeyer, B. (2025): Peatland Surface Motion: Terminology, Measurement Approaches, Models and Insights From a Global Dataset. Ecohydrology 18, e70140. doi:10.1002/eco.70140
- Tiemeyer, B., Frank, S., Piayda, A., Dettmann, U., Seidel, R., Lempio, D. (2024): A new low-cost device for the continuous measurement of peatland surface motion ("LoCoMotion"). EGU General Assembly 2024, Vienna, Austria, 14–19 Apr 2024, EGU24-11763. doi:10.5194/egusphere-egu24-11763
- Zhang, Y., Fattahi, H., Amelung, F. (2019): Small baseline InSAR time series analysis: Unwrapping error correction and noise reduction. Computers & Geosciences 133, 104331. doi:10.1016/j.cageo.2019.104331

Bildquellen

- Abb. 1: Eigene Darstellung; Zahlenangaben nach Hirschelmann et al. (2020).
- Abb. 2: Eigene Darstellung, vereinfacht nach Seidel et al. (2025), Abb. 1 und 2 (CC BY 4.0).
- Abb. 3: Sentinel-1 radar vision, © ESA/ATG medialab. https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2014/01/Sentinel-1_radar_vision
- Abb. 4: Alaska Satellite Facility (ASF), Sentinel-1 InSAR Product Guide, Fig. 1 (© TRE ALTAMIRA). https://hyp3-docs.asf.alaska.edu/guides/insar_product_guide/
- Abb. 5: Eigene Darstellung (Phasenvergleich zweier Radaraufnahmen; Wellenlängen nach ESA Sentinel-1 Mission Guide).
- Abb. 6: Eigene Darstellung der Prozessierungskette (Layout nach Zhang et al. 2019; MintPy; HyP3, Hogenson et al. 2020).
- Abb. 7–12, 14–17: Eigene Auswertungen (Pienkoß et al., in Vorbereitung) auf Basis von Copernicus-Sentinel-1-Daten (© ESA/Copernicus, prozessiert mit ASF HyP3 und MintPy), DWD-Klimadaten (Climate Data Center) sowie Moorkulisse des Greifswald Moor Centrum (GMC) und BSRLC+-Landbedeckung (Pham et al. 2024). Attribution: Contains modified Copernicus Sentinel data (2016–2025); Klimadaten © Deutscher Wetterdienst (DWD), Climate Data Center (RADOLAN, Verdunstung, Bodenfeuchte). Abb. 8: Orthophoto © GeoBasis-DE/M-V.
- Abb. 12: Eigene Darstellung des Seilzug-Extensometers (Aufbau und Messprinzip nach dem WETSCAPES2.0-Feldprotokoll, M. Naumann 2025).
- Abb. 13: Fotos Luc Pienkoß, Universität Rostock (WETSCAPES2.0-Messstandorte Polder Sandhagen, Tribsees, Zarnekow).
- Logos: WETSCAPES2.0-Konsortium und Partnerinstitutionen; Piktogramme: Microsoft-365-Symbolbibliothek.
- Folie 2 und Anhang: Grafiken aus dem WETSCAPES2.0-Konsortiumsposter (Sánchez de Mingo, A., Räther, L., Felsmann, H., Wrage-Mönnig, N., Kreyling, J. und das WETSCAPES2.0-Team, 2026).

Daten & Code

Alle gezeigten Auswertungen stammen aus dem Manuskript Pienkoß et al. (**in Vorbereitung**):

"Seasonal and Long-Term Peat-Surface Motion across Temperate Fen Peatlands in Mecklenburg-Western Pomerania, Germany from Sentinel-1 SBAS InSAR"

Zenodo-Datensatz · vorläufige (reservierte) DOI

10.5281/zenodo.22790627

https://doi.org/10.5281/zenodo.22790627

Der Record wird mit dem Manuskript veröffentlicht — die DOI ist bereits reserviert und bleibt unverändert.

Dort werden liegen:

- MintPy-Zeitreihenprodukte 2016–2025 (ascending, descending und vertikal-dominiert, 40-m-Raster, EPSG:32633)
- abgeleitete Raster: Bewegungsrate und saisonale Amplitude über der GMC-Moorkulisse
- Analysecode

Kontakt: luc.pienkoss@uni-rostock.de · Professur für Geodäsie und Geoinformatik, Universität Rostock