

ForstEO

EINSATZ DER ERDBEOBACHTUNG ZUR ERFASSUNG VON KLIMABEDINGTEN SCHÄDIGUNGEN DES WALDES IN DEUTSCHLAND

Frank Thonfeld, Marco Wegler, Stefanie Holzwarth – DLR
Javier Gonzalez, Adelheid Wallner, Yan Zhang – LWF,
Jakob Wernicke, Pawanjeet Datta, Anja, Klisch, Sergey Chmara, Herbert Sagischewski – FFK Gotha
Philip Beckschäfer, David Kunze – NW-FVA
Petra Adler, Melanie Kirchhöfer, Milena Zittlau – FVA-BW

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



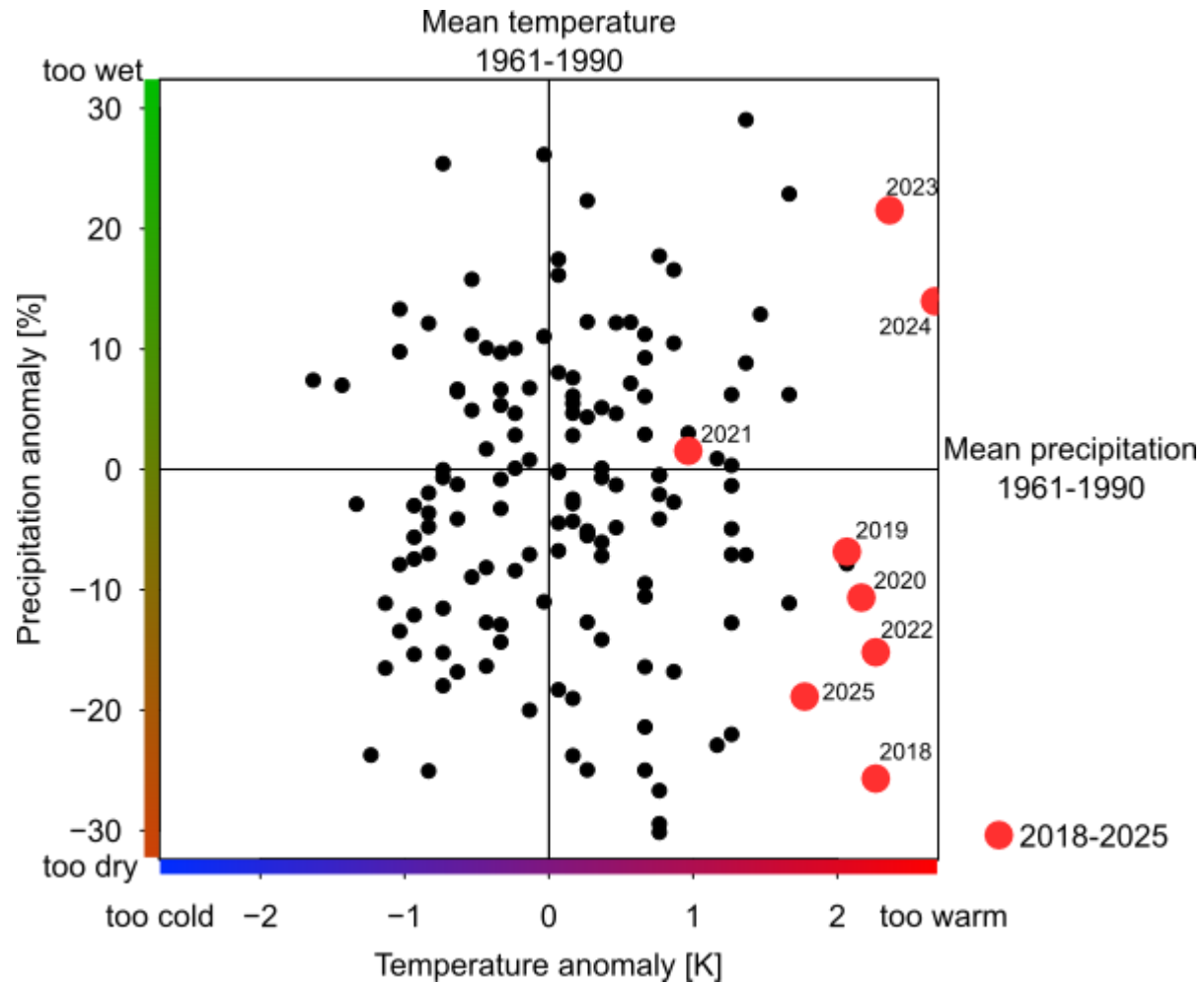
Forstliche Versuchs-
und Forschungsanstalt
Baden-Württemberg



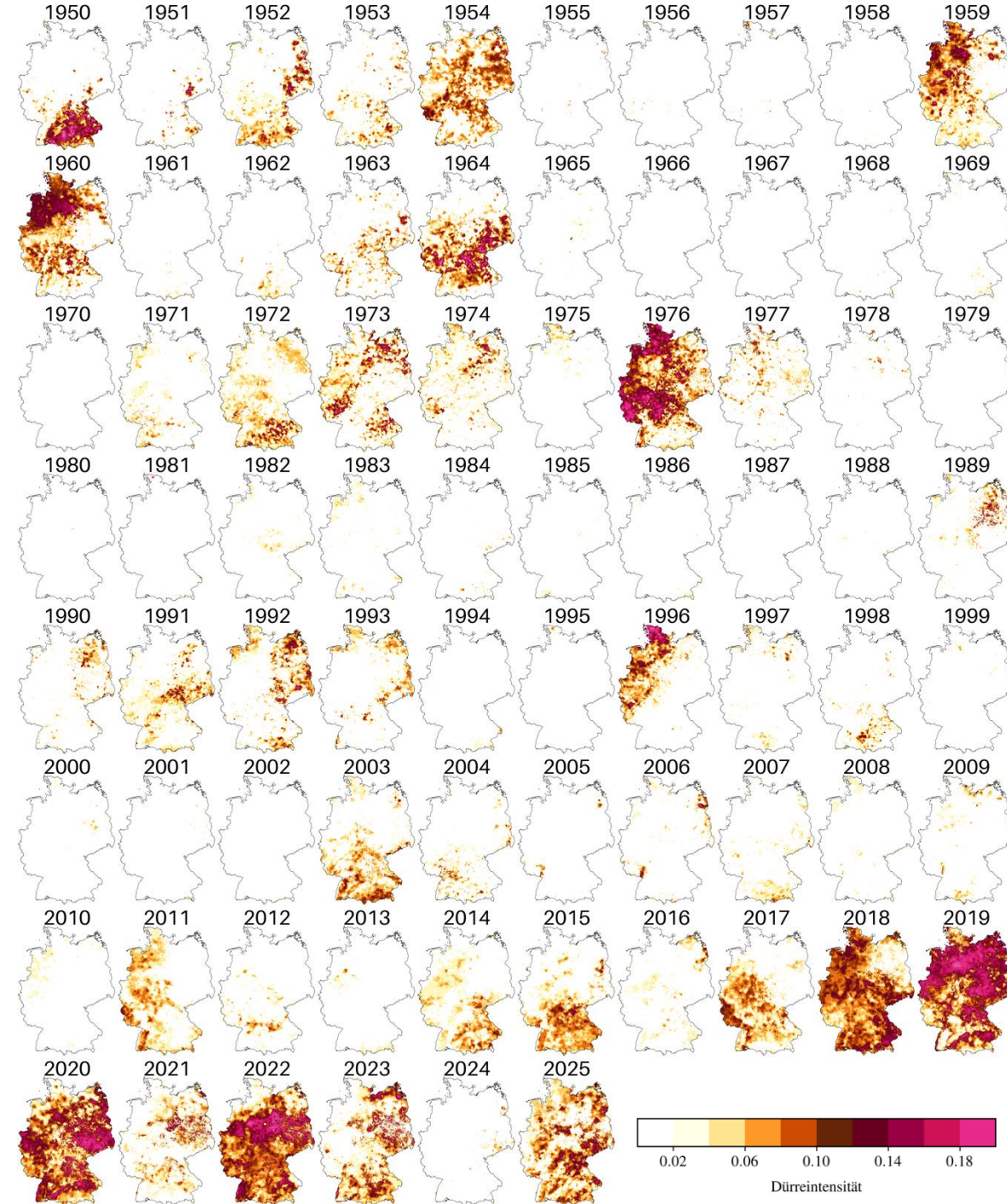
NW-FVA
Nordwestdeutsche
Forstliche Versuchsanstalt



Klima & Wetter

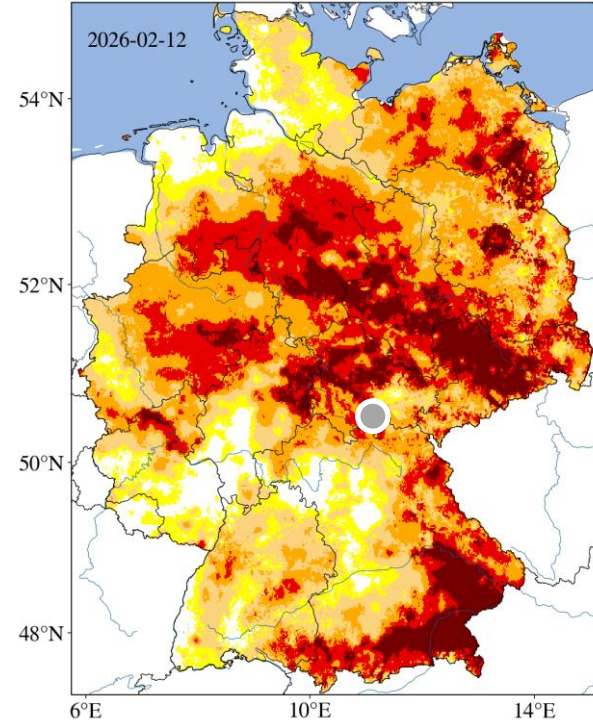
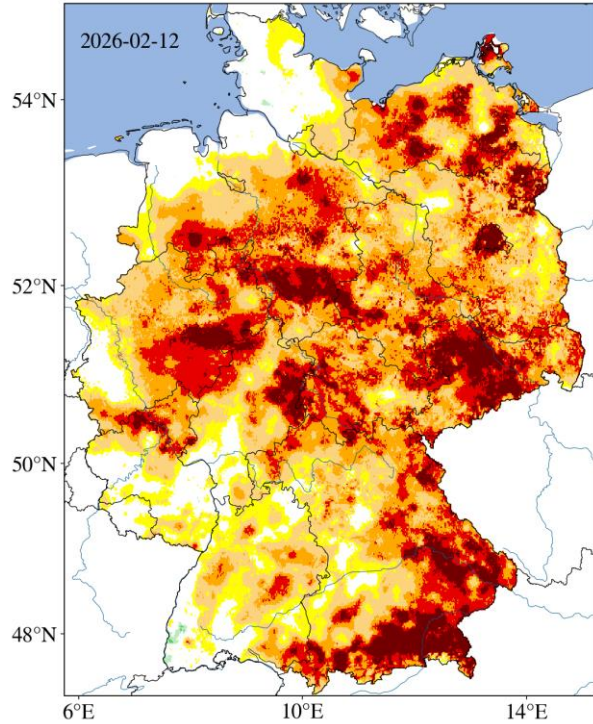


Daten: <https://opendata.dwd.de>



Gesamtboden 1,8 m

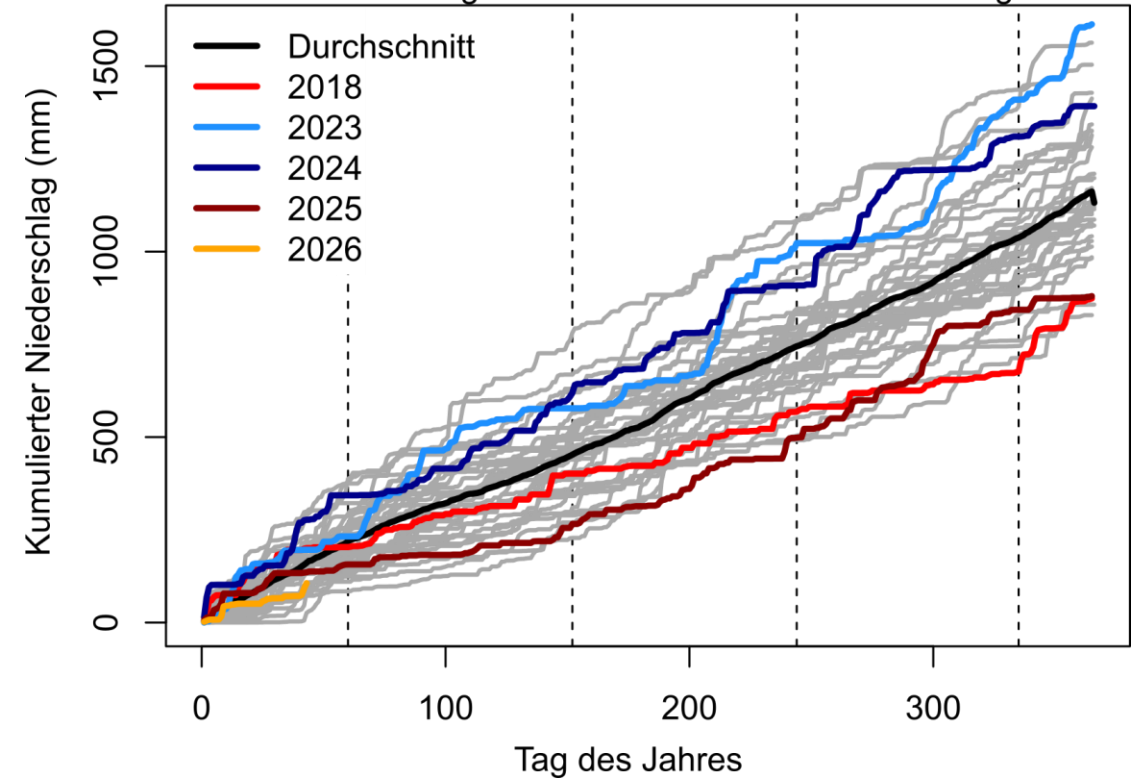
Oberboden 25 cm



□ Normalbereich

- | | |
|---------------------------|--------------------------------|
| ■ ~3-Jährlichkeit (Nässe) | ■ ~3-Jährlichkeit (Vorwarnung) |
| ■ 5-Jährlichkeit (Nässe) | ■ 5-Jährlichkeit (Dürre) |
| ■ 10-Jährlichkeit (Nässe) | ■ 10-Jährlichkeit (Dürre) |
| ■ 20-Jährlichkeit (Nässe) | ■ 20-Jährlichkeit (Dürre) |
| ■ 50-Jährlichkeit (Nässe) | ■ 50-Jährlichkeit (Dürre) |

Niederschlagssummen in Neuhaus am Rennweg



Daten: <https://opendata.dwd.de>

Projektmanagement und Bedarfe

Online-Umfrage

ForstEO



Multiskalige Methodenentwicklung & regionalspezifische Analysen

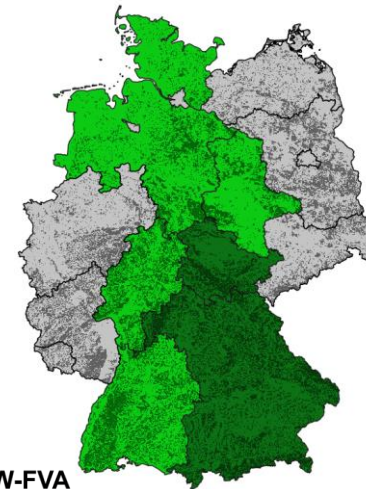
Kronendachverluste

Schadursachen

Schädigungen am Laubholz

Unterstützung

Übertragbarkeit,
Validierung,
Datenaustausch



NW-FVA
Nordwestdeutsche
Forstliche Versuchsanstalt



FVA
Forstliche Versuchs-
und Forschungsanstalt
Baden-Württemberg



Skalenübergreifendes Zusammenführen zur deutschlandweiten Erfassung von Schädigungen am Wald

Transfer auf Landes-/Regionalebene

Zielsetzung & Bedarfe

- qualitativ geprüfte und robuste **Informationsprodukte** mit Werkzeugen der Fernerkundung abzuleiten und **bereitzustellen**, um die **Weiterentwicklung** aktueller **nationaler Monitoring-Systeme** zur flächigen Erfassung **klimabedingter Schädigungen** am Wald zu **unterstützen**

Online-Umfrage (n=183)

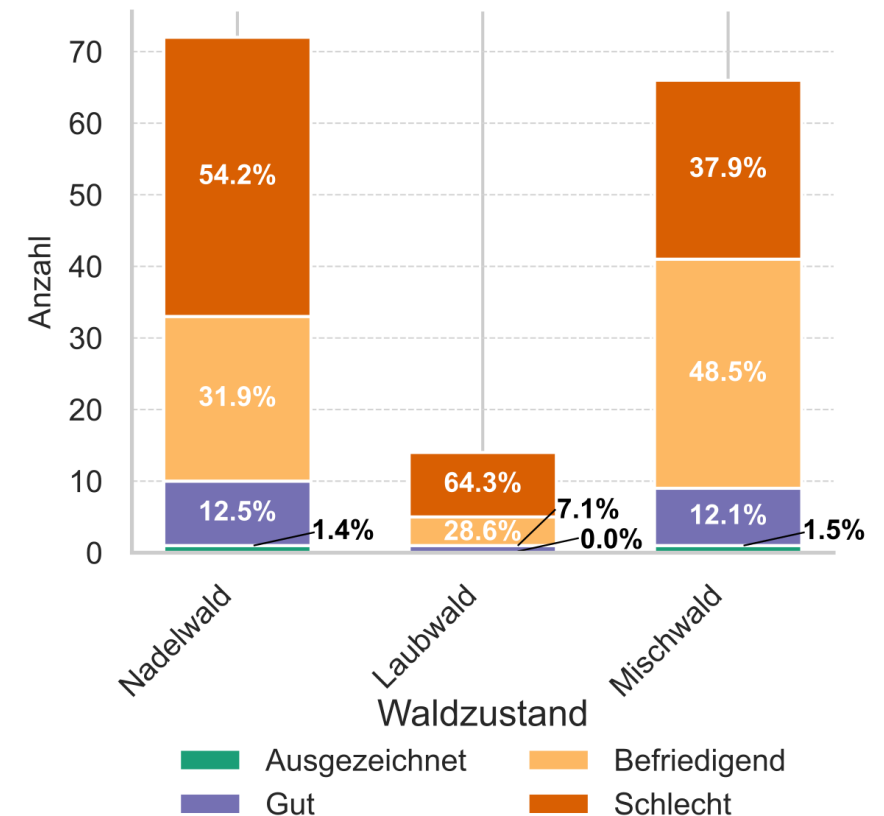
- Wichtigste Erkenntnisse als Artikel in AFZ Der Wald
- Vollständige Ergebnisse als Bericht (<https://zenodo.org/records/17977522>)

10 Waldinventuren  **Monitoring von Waldschäden**

Anforderungen an das Monitoring von Waldschäden

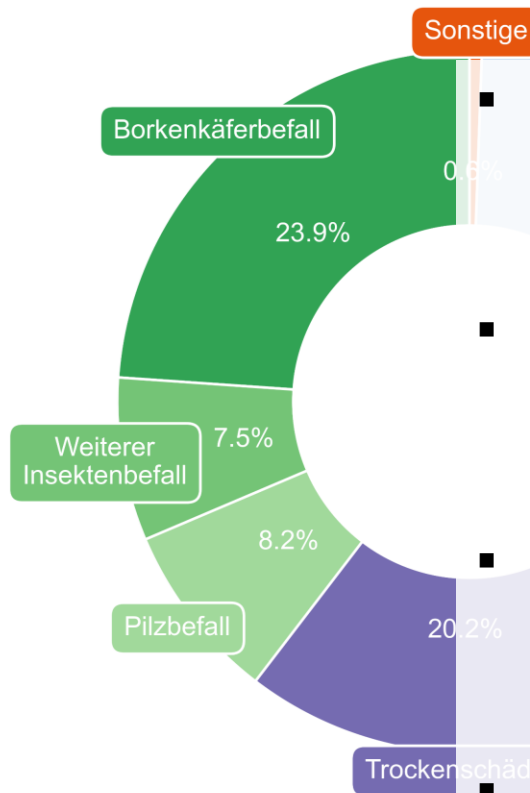
Mithilfe einer im Rahmen des Forschungsprojekts ForstEO durchgeführten Online-Nutzerumfrage wurden die Bedarfe von Forstpraktikern an Fernerkundungsprodukten zur Waldschadenserfassung ermittelt. Besonders relevant sind demnach präzise, räumlich und zeitlich abgestimmte Daten zu Schadensorten und -mengen. Als Hindernisse wurden Datenqualität, Fachkräftemangel und Kosten identifiziert. Empfehlungen beinhalten die stärkere Einbindung der Anwender, den regelmäßigen Austausch und fachliche Schulungen.

TEXT: ADELHEID WALLNER, PAWANJEET DATTA, JAVIER GONZALEZ, STEFANIE HOLZWARH, FRANK THONFELD, MARCO WEGLER, JAKOB WERNICKE



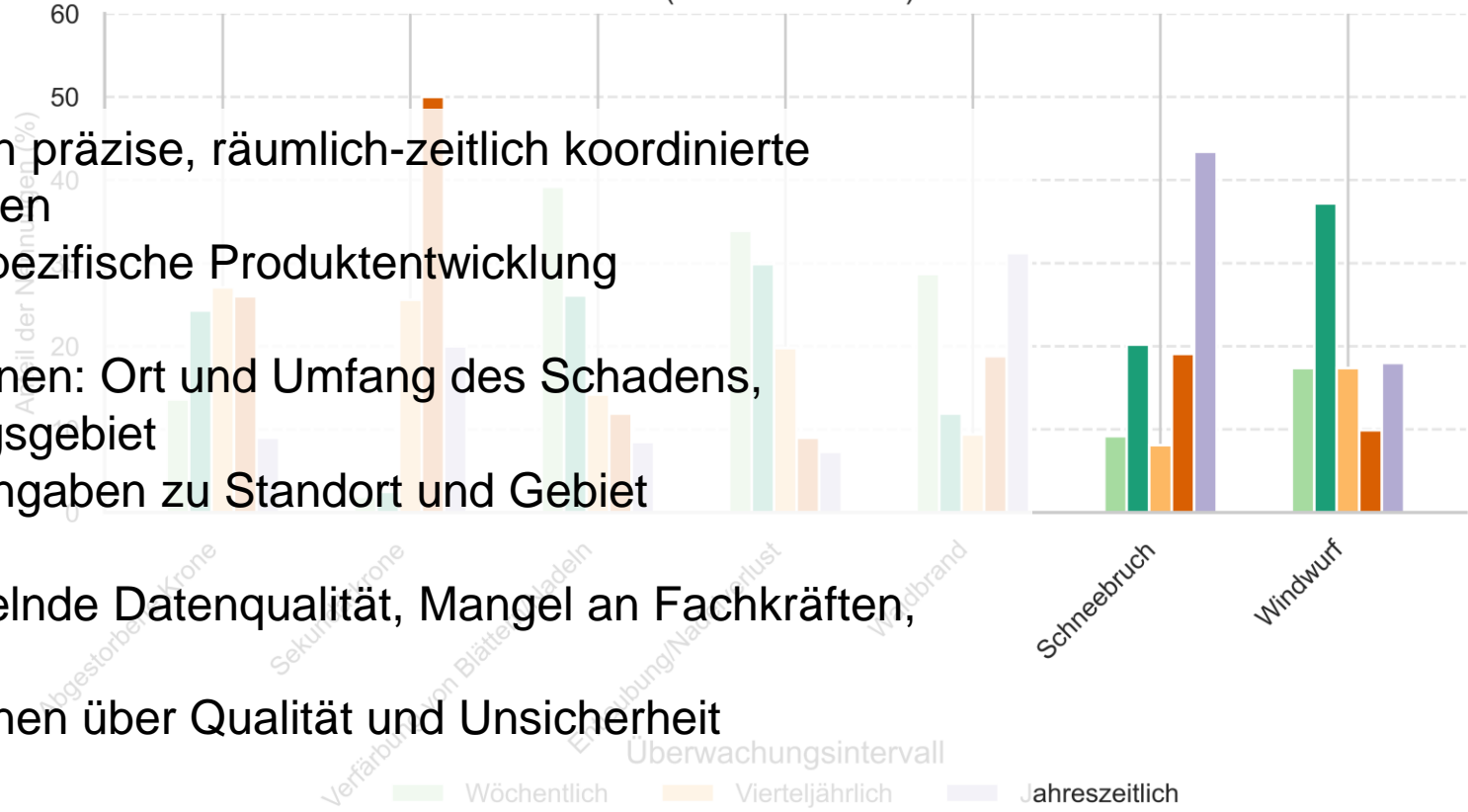
Umfrage zur Detektion von Waldschäden aus Fernerkundungsprodukten

Waldschutzprobleme



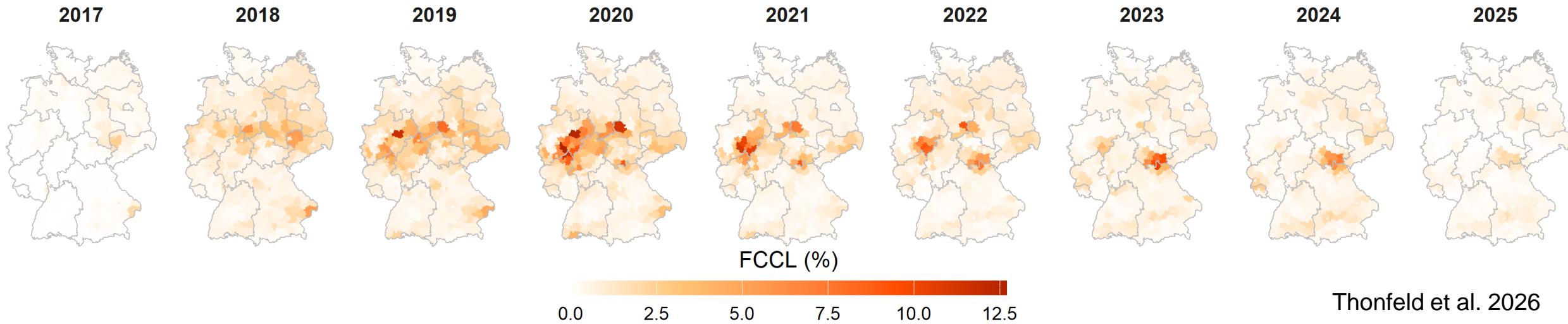
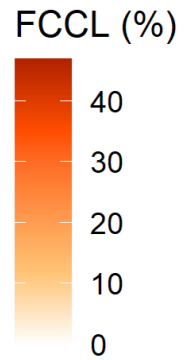
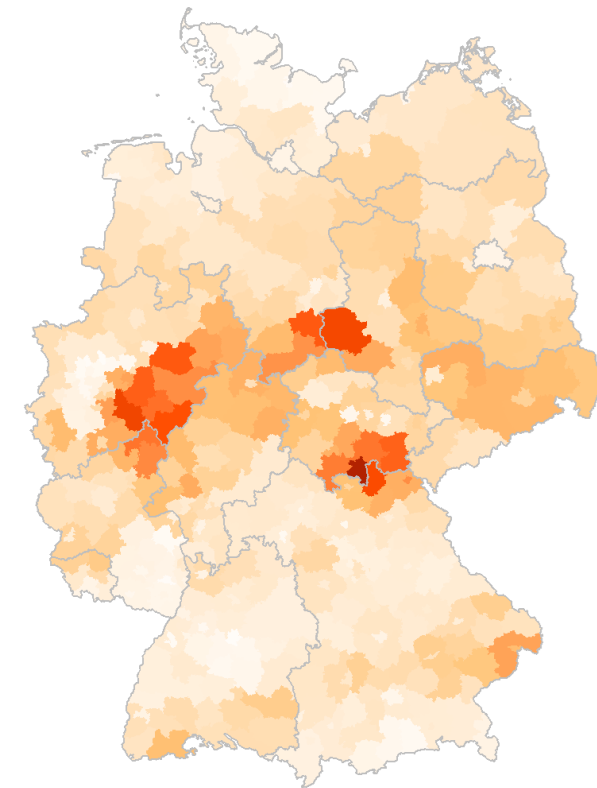
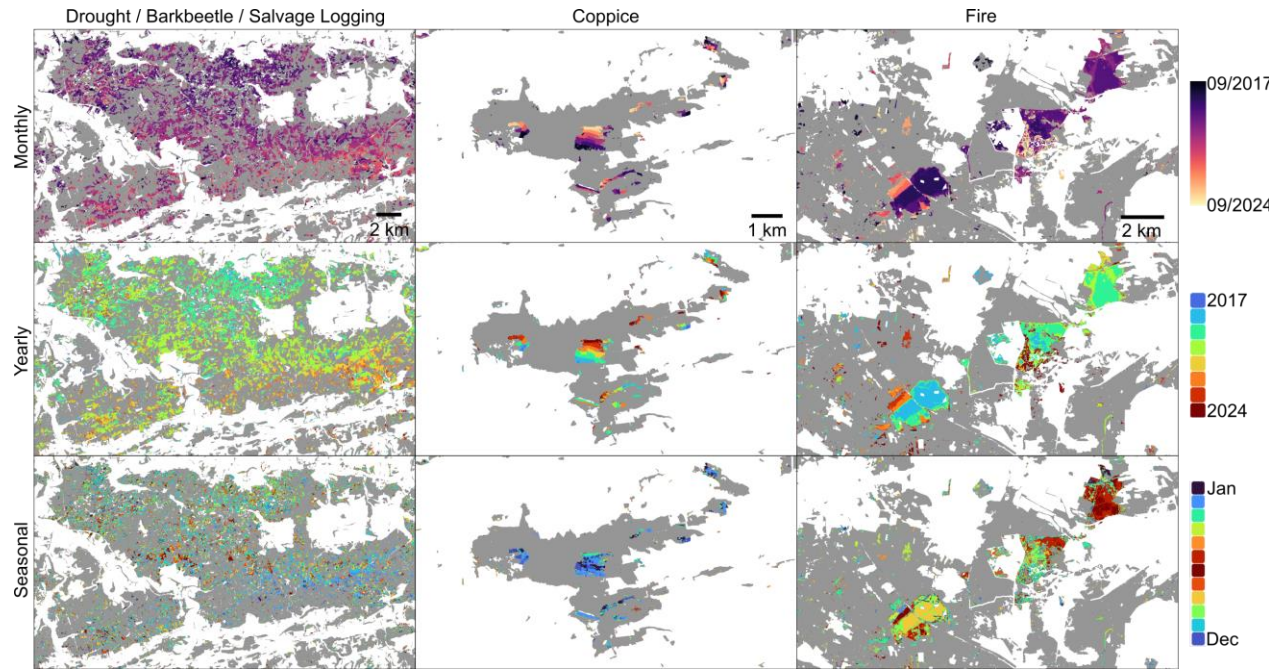
- Nutzende wünschen präzise, räumlich-zeitlich koordinierte Fernerkundungsdaten
→ störungsspezifische Produktentwicklung
- Wichtige Informationen: Ort und Umfang des Schadens, betroffenes Störungsgebiet
→ Genaue Angaben zu Standort und Gebiet
- Hindernisse: Mangelnde Datenqualität, Mangel an Fachkräften, Kosten, Zugang
→ Informationen über Qualität und Unsicherheit
- Empfehlungen: Integration der Nutzenden, regelmäßiger Austausch, Schulungen

Bevorzugte Überwachungsintervalle je Störungstyp (Anteil in Prozent)



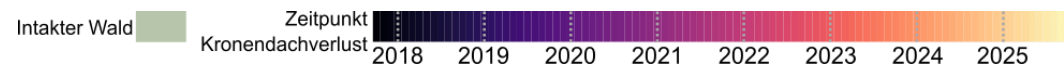
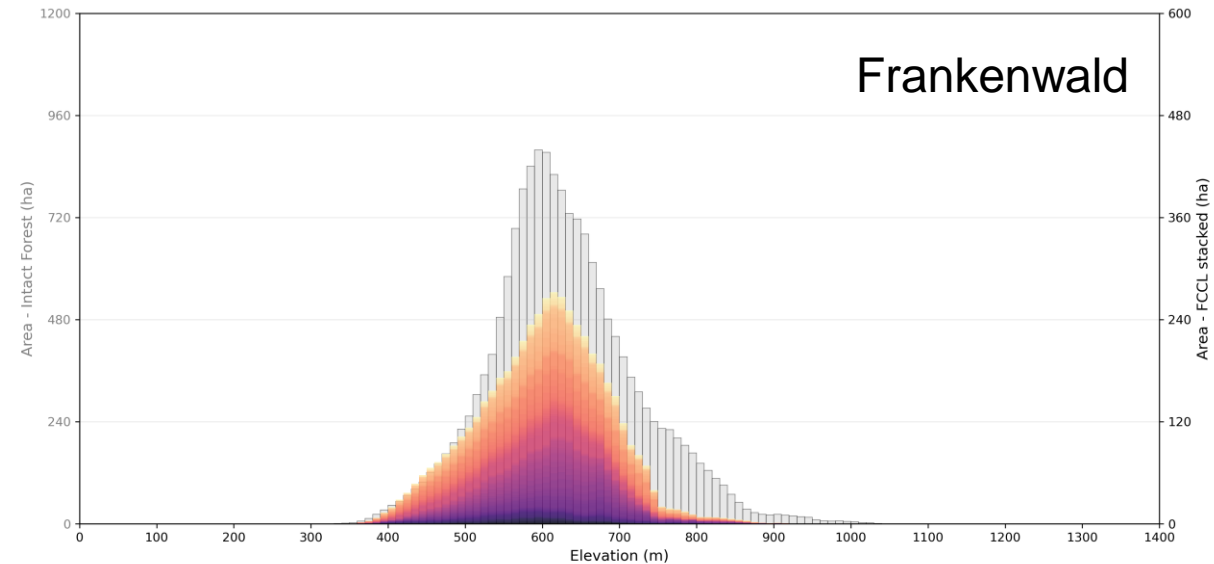
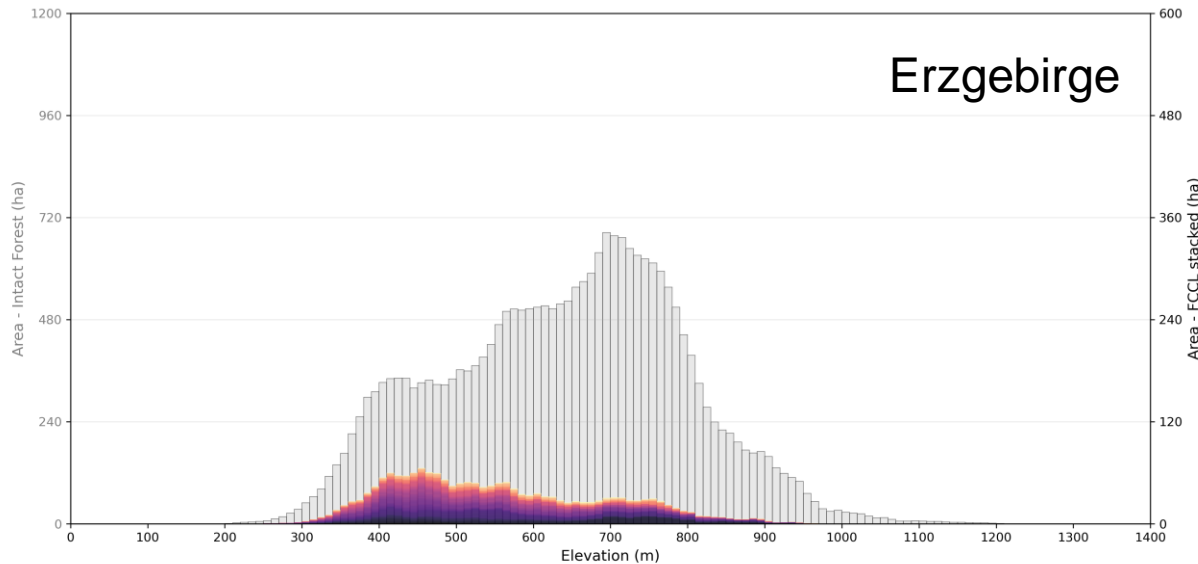
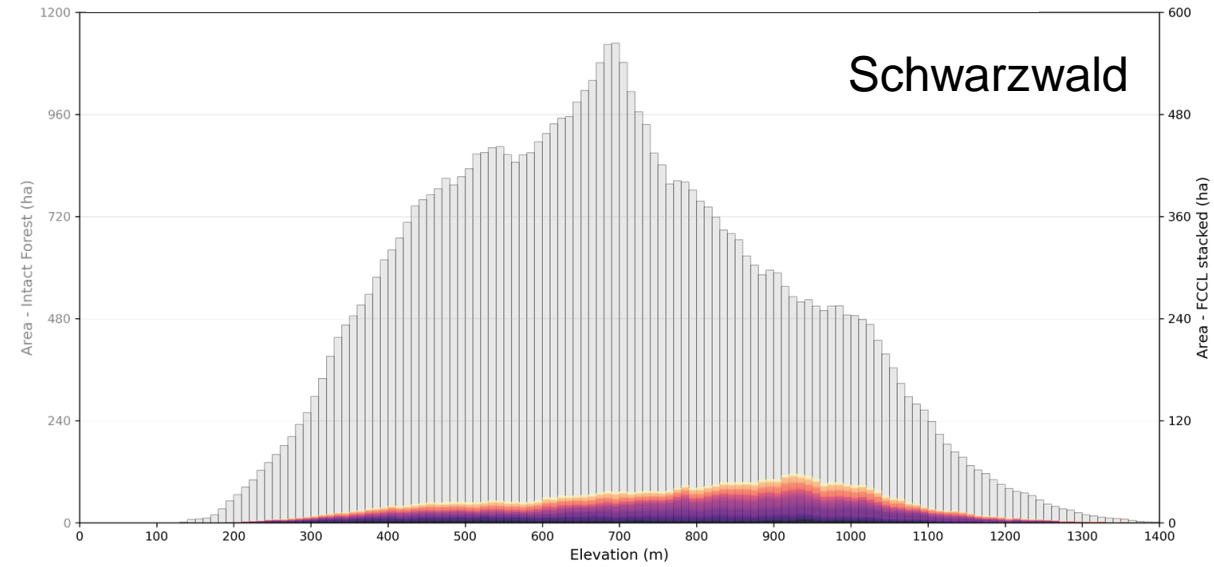
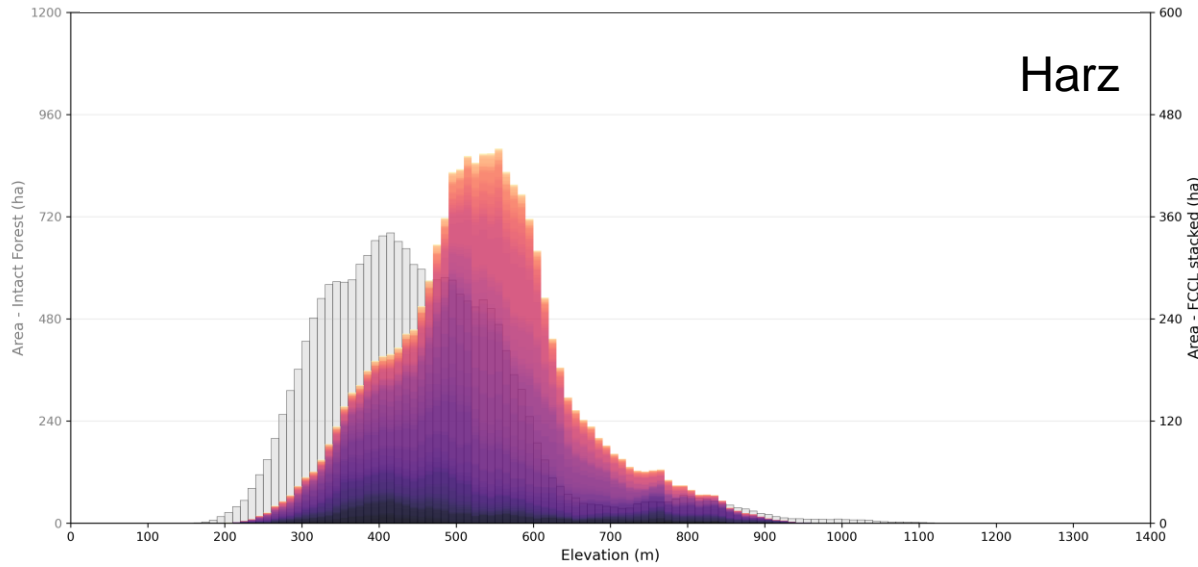
Kronendachverluste

2017-2025

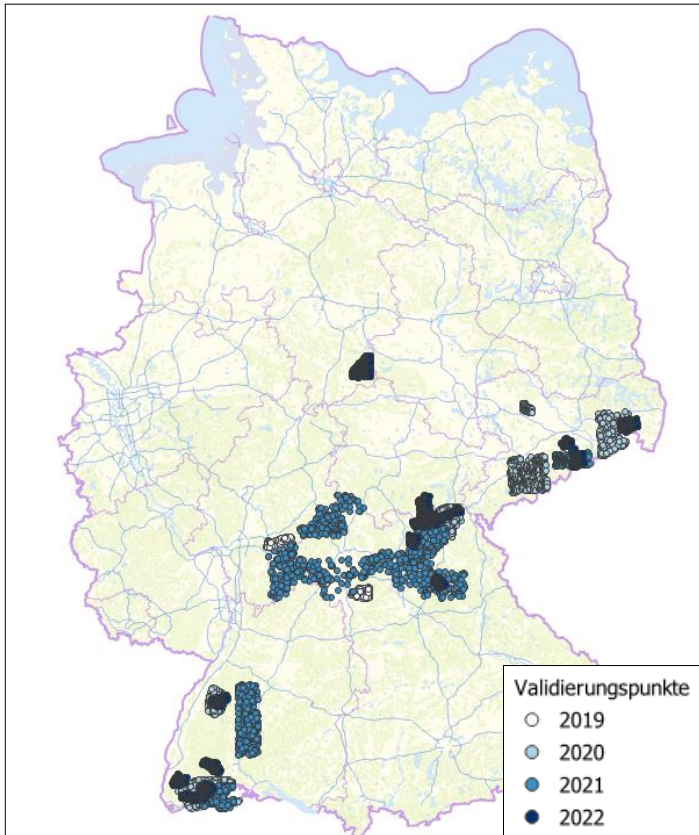


Thonfeld et al. 2026

Kronendachverluste – Regionale Unterschiede



Validierung der satellitengestützten Schadflächenerfassung (FCCL)



Verteilung der FNEWS*-Validierungspunkte in Deutschland

*Fernerkundungsbasiertes Nationales Erfassungssystem
Waldschäden – Thünen-Institut für Waldökosysteme

Vergleich des FCCL mit unabhängigen Referenzdaten

- 8.741 Validierungspunkte aus dem Projekt FNEWS*
- Validierungspunkte wurden auf Grundlage von Luftbildern für die Jahre von 2019 bis 2022 erzeugt

Ergebnis

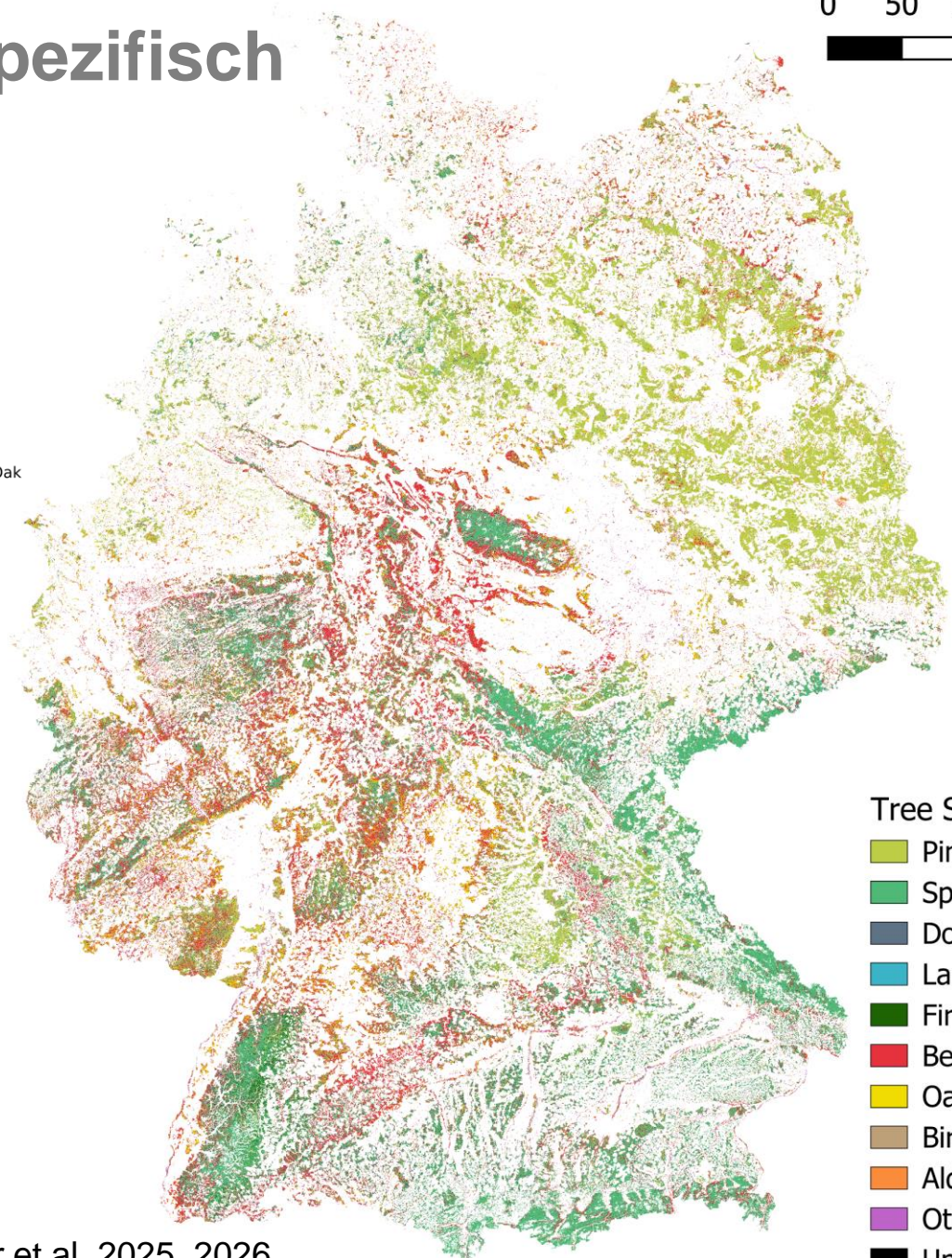
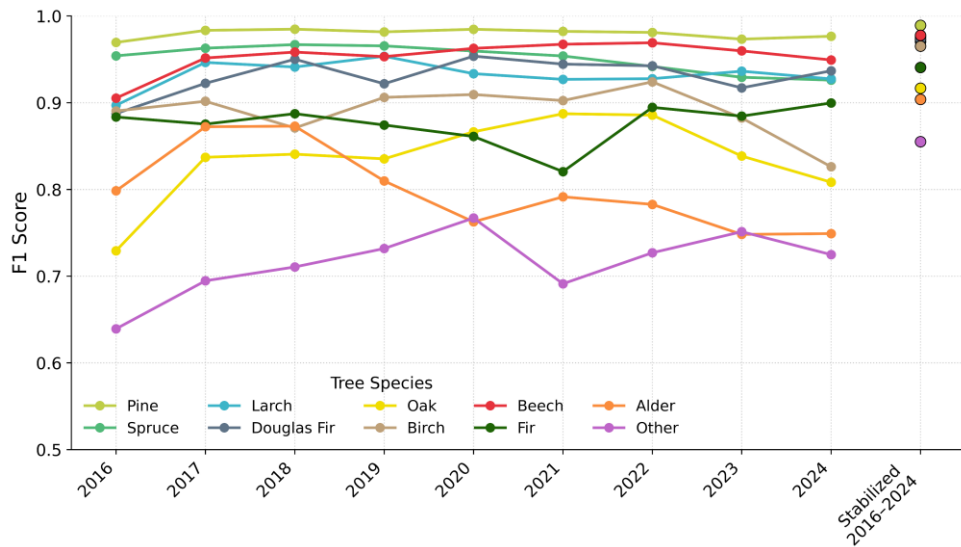
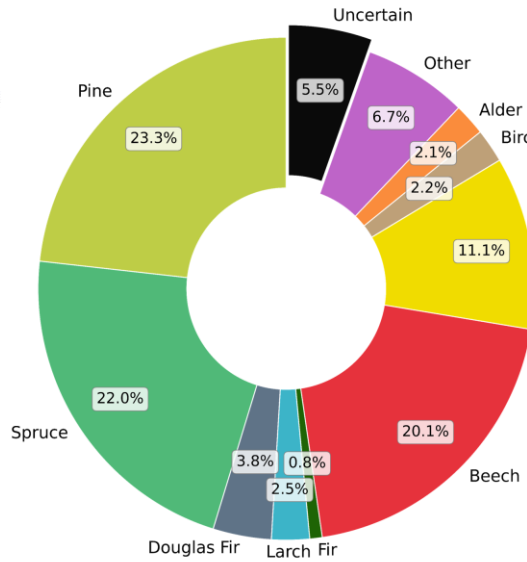
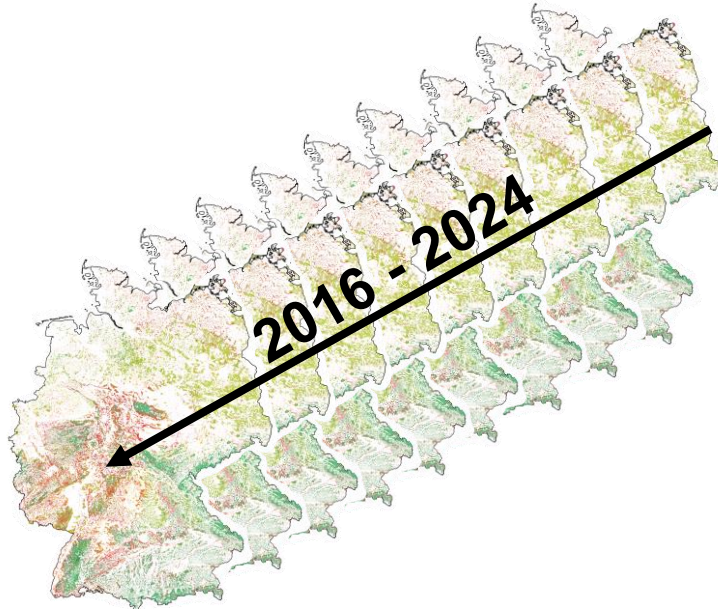
- Tendenziell unterschätzt das FCCL-Verfahren die Waldschadensflächen um ca. 30 %
- ca. 15 % der Schadflächen werden zu viel erfasst
- ca. 45 % der Schadflächen werden nicht erfasst

Jahr	Nutzergenauigkeit der Schadflächenerfassung	Produzentengenauigkeit der Schadflächenerfassung	F1-Score der Schadflächenerfassung	Gesamtgenauigkeit
2019	91.0 %	52.3 %	66.4 %	95.7 %
2020	75.5 %	43.5 %	55.2 %	97.2 %
2021	90.4 %	32.7 %	48.0 %	98.3 %
2022	78.6 %	49.2 %	60.5 %	96.0 %

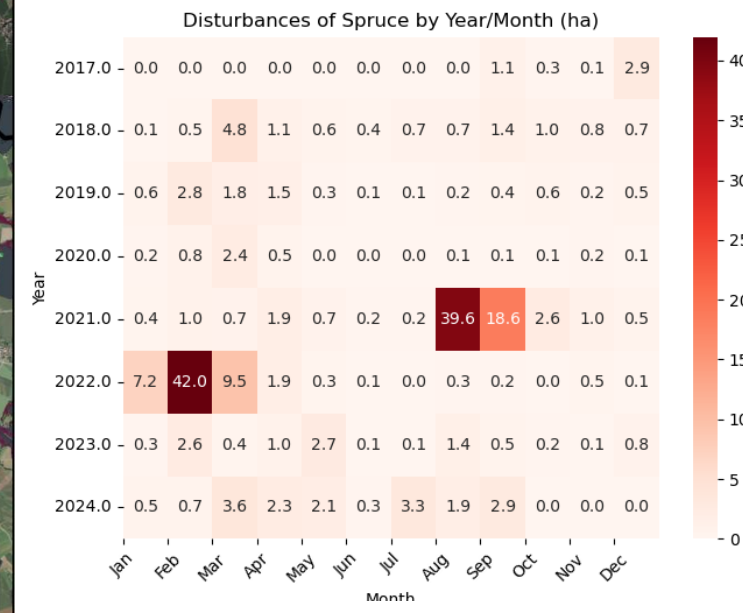
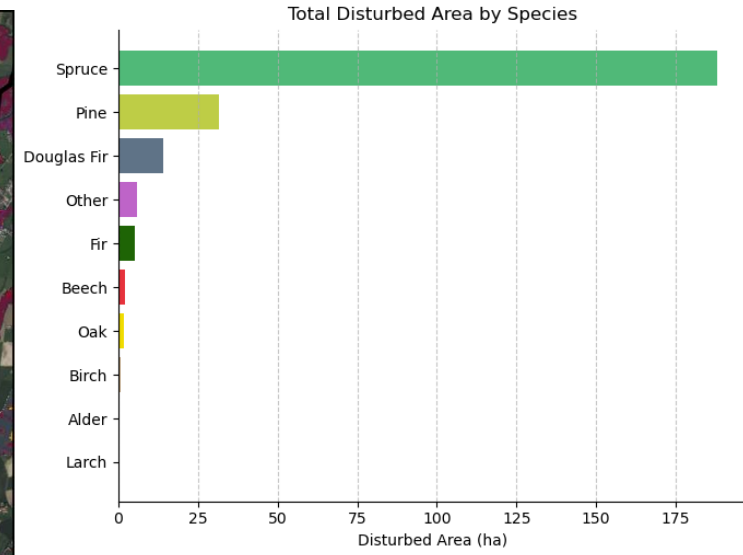
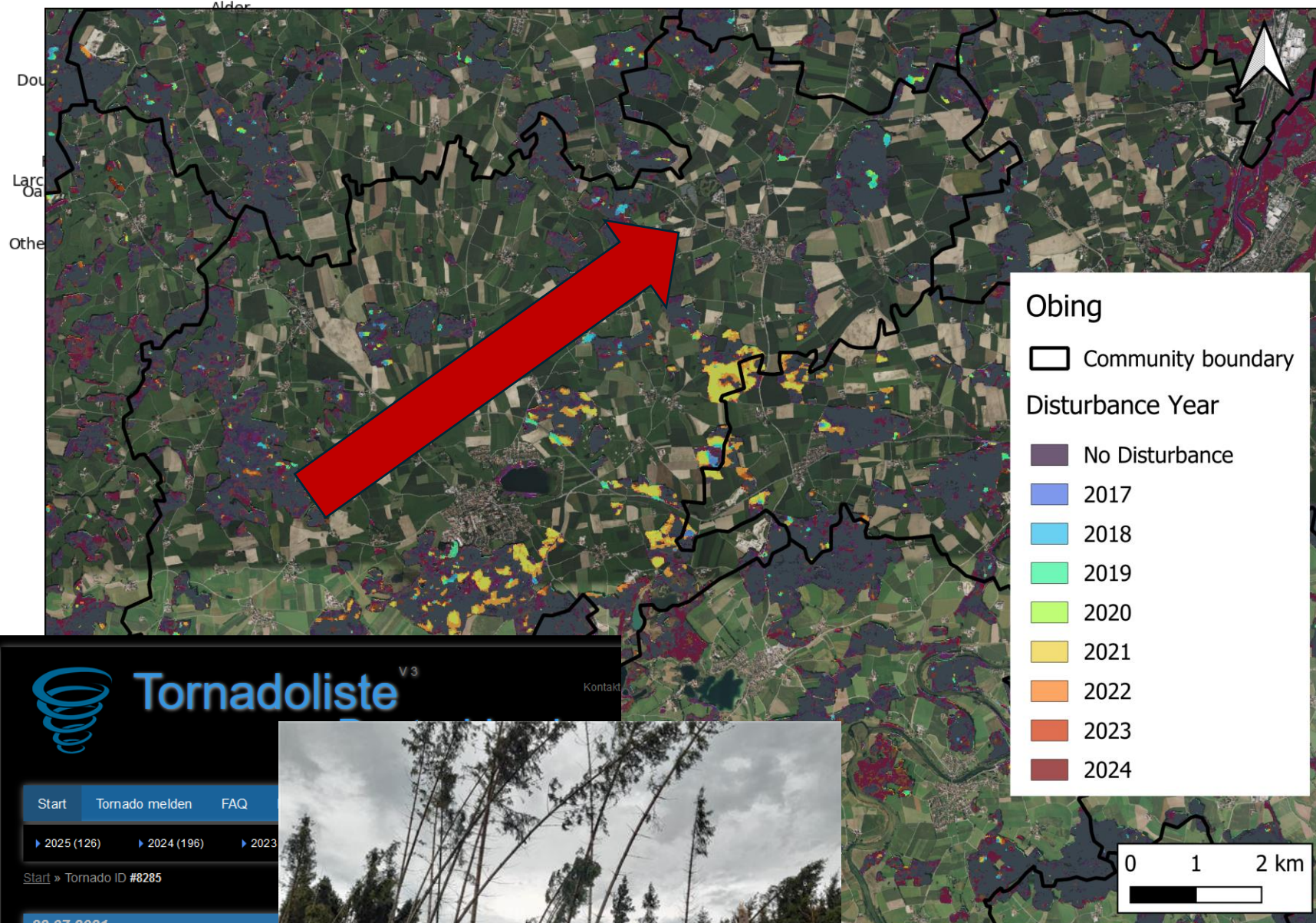
Kronendachverluste – baumartenspezifisch

Stabilisierte Karte der dominanten Baumarten 2016

0 50 100 km



Wegler et al. 2025, 2026



Tornadoliste V3

Start Tornado melden FAQ

2025 (126) 2024 (196) 2023

Start » Tornado ID #8285

28.07.2021

Obing (BY)

ovb-heimatzeitungen.de

chiemgau24-de > Chiemgau > Region Trostberg > Obing

Brachiale Zerstörung rund um Obing: „Wir stehen immer noch unter Schock“

29.07.2021, 12:46 Uhr

Baumartenklassifikation Thüringen



- **FORCE Datacube** (Feb – Okt 2023)
 - Monatliche Sentinel-2 Level-2 Komposite
 - 17 Prädiktoren → 10 spektrale Bänder + 7 Vegetationsindizes
- **Trainingsdaten**
 - vorselektierte Betriebsinventurdaten (KSP)
 - Einzelbaumarten-Plots + dominante Arten aus Mischplots
 - Pixel-Extraktion im 13 m Radius
- **Validierungsdaten**
 - unabhängig
 - Einzelbäume
 - Oberstand; hohe Positionsgenauigkeit mittels GNSS
 - getrennte Validierungssets für Rein- (**SSP**) und Mischbestände (**MSP**)



Klassifikation

- Monatliche Random-Forest Modelle
- Hyperparameter-Optimierung + 5-fach Cross-Validation
- 75 / 25 Train-/Validierungssplit
- Multitemporal Fusion:
 - 8 monatliche Klassifikationen (März–Oktober)
 - Pixelweise Aggregation über alle Monate
 - F1-gewichtetes Voting pro Klasse
 → phänologie-basierte Klassifikation

Modellgenauigkeiten

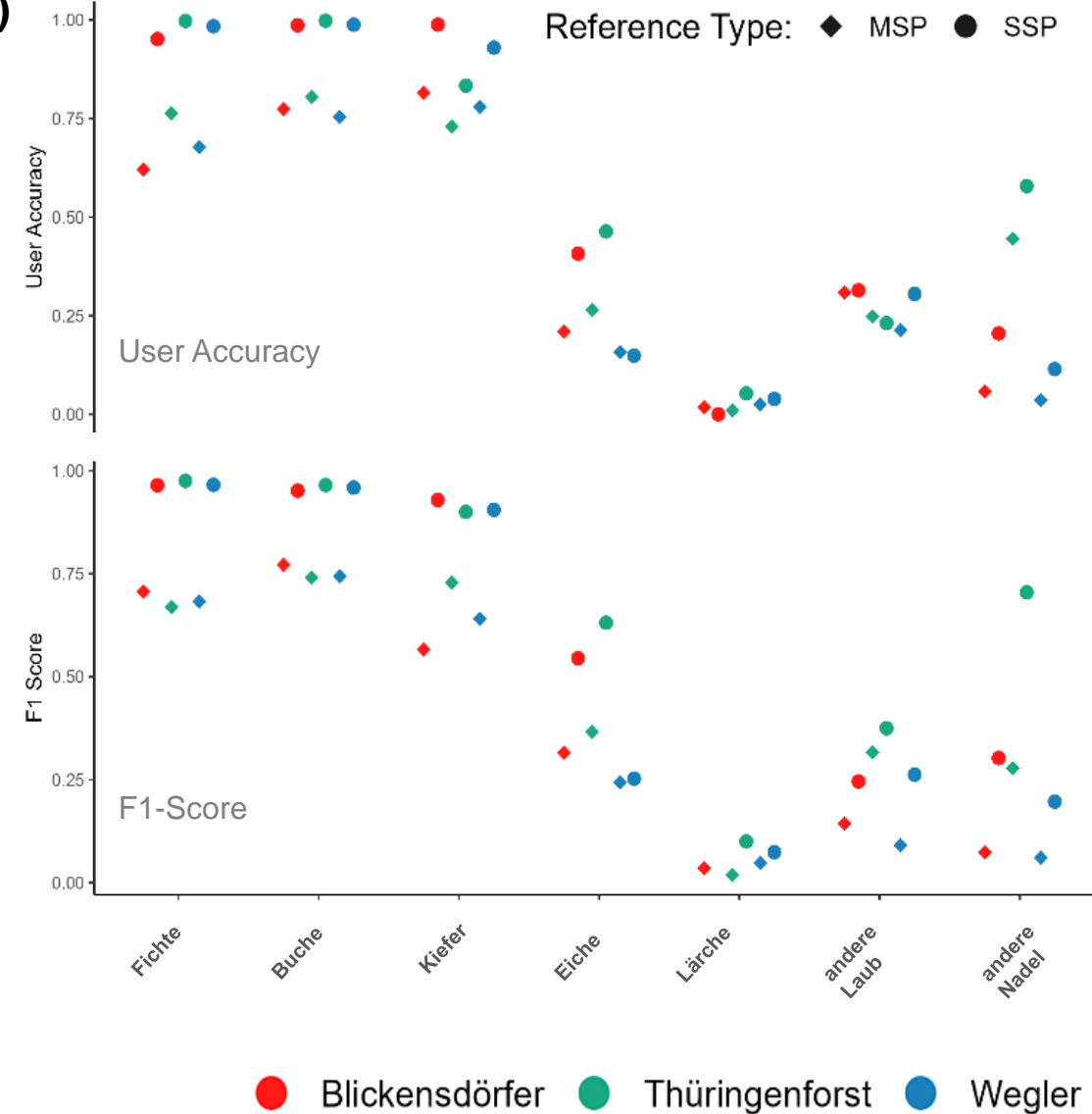
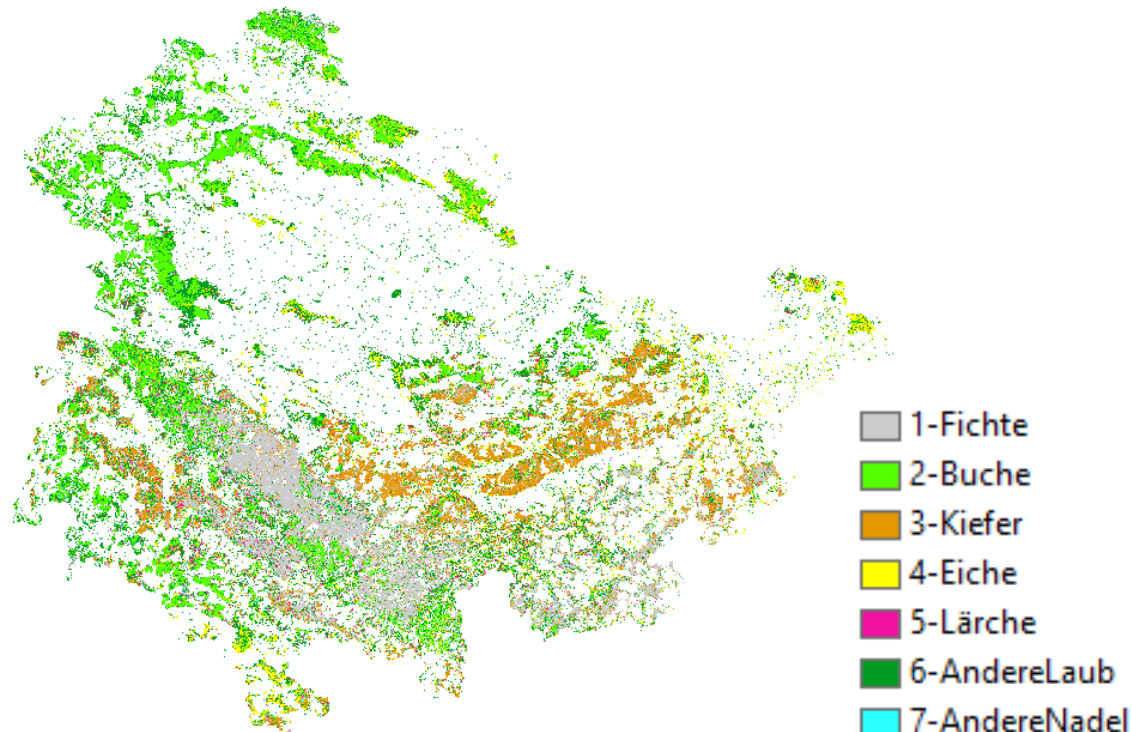
	class_names	Month_2	Month_3	Month_4	Month_5	Month_6	Month_7	Month_8	Month_9	Month_10	Mittelwert
Precision (User Accuracy)	Fichte	0,84	0,83	0,85	0,87	0,85	0,82	0,84	0,85	0,81	0,84
	Buche	0,69	0,72	0,77	0,68	0,65	0,65	0,68	0,71	0,66	0,69
	Kiefer	0,79	0,80	0,77	0,79	0,76	0,75	0,79	0,83	0,66	0,77
	Eiche	0,56	0,57	0,66	0,63	0,69	0,69	0,74	0,74	0,74	0,68
	Lärche	0,65	0,62	0,68	0,64	0,67	0,66	0,62	0,65	0,65	0,65
	anderelaub	0,46	0,49	0,54	0,57	0,59	0,55	0,53	0,54	0,54	0,54
	anderenadel	0,67	0,71	0,76	0,69	0,71	0,78	0,69	0,69	0,68	0,71
F1 Score	Fichte	0,85	0,83	0,86	0,86	0,84	0,82	0,85	0,87	0,83	0,84
	Buche	0,72	0,73	0,80	0,70	0,68	0,66	0,71	0,73	0,69	0,71
	Kiefer	0,82	0,83	0,79	0,80	0,78	0,76	0,79	0,81	0,62	0,77
	Eiche	0,58	0,58	0,66	0,63	0,68	0,68	0,71	0,73	0,73	0,68
	Lärche	0,56	0,54	0,63	0,62	0,63	0,61	0,57	0,60	0,57	0,60
	anderelaub	0,46	0,50	0,54	0,57	0,60	0,57	0,56	0,57	0,50	0,55
	anderenadel	0,54	0,60	0,61	0,54	0,57	0,60	0,56	0,59	0,59	0,58

Baumartenklassifikation Thüringen



Vergleich mit Blickensdörfer et al. (2024) & Wegler et al. (2026)

- Hohe Genauigkeiten für Fichte, Buche und Kiefer bei allen drei Karten
- Mittlere Genauigkeiten für Eiche
- Geringere Übereinstimmung bei Lärche sowie anderen Laub- und Nadelarten, insbesondere in Mischbeständen



Detektion von Waldschäden in Fichten



Ziel

- Früherkennung von Schäden

Herausforderung

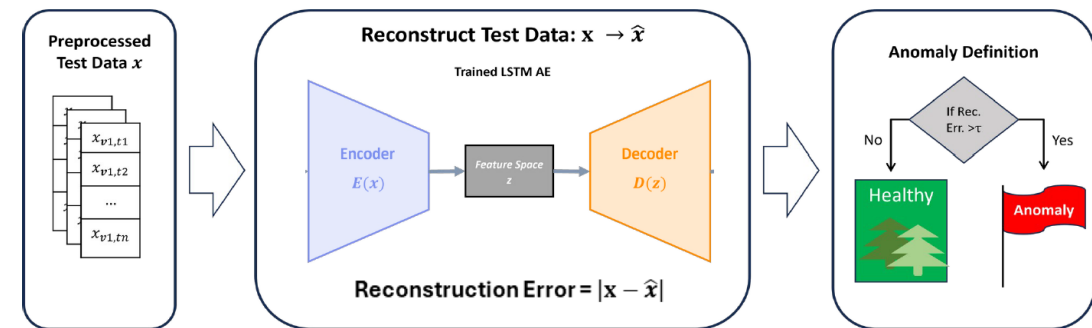
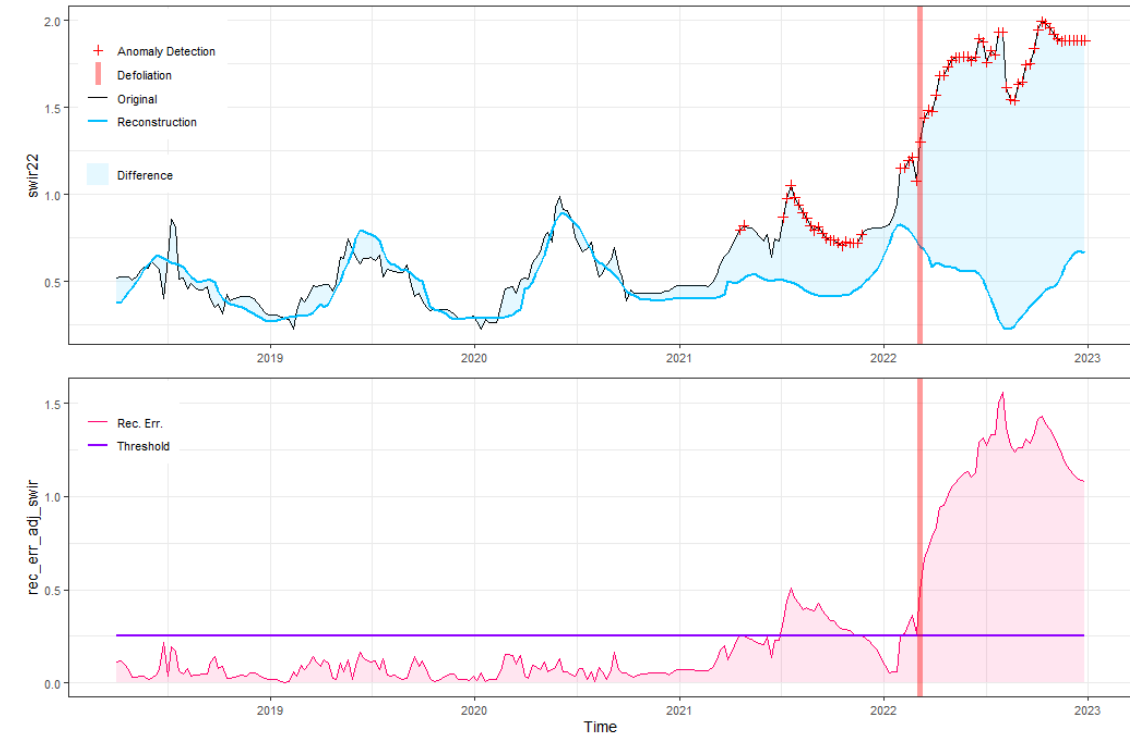
- Frühe Schadstadien kaum zu erkennen / kaum Referenzdaten

Lösungsansatz

- Long Short-Term Memory (LSTM)-Autoencoder
- Deep-Learning-Ansatz
- Training ausschließlich auf gesunden Vegetationsverläufen
- Modell lernt typische saisonale Dynamik
- Abweichungen zwischen Beobachtung und Rekonstruktion
→ potenzielle Schadereignisse

Daten & Prozessierung:

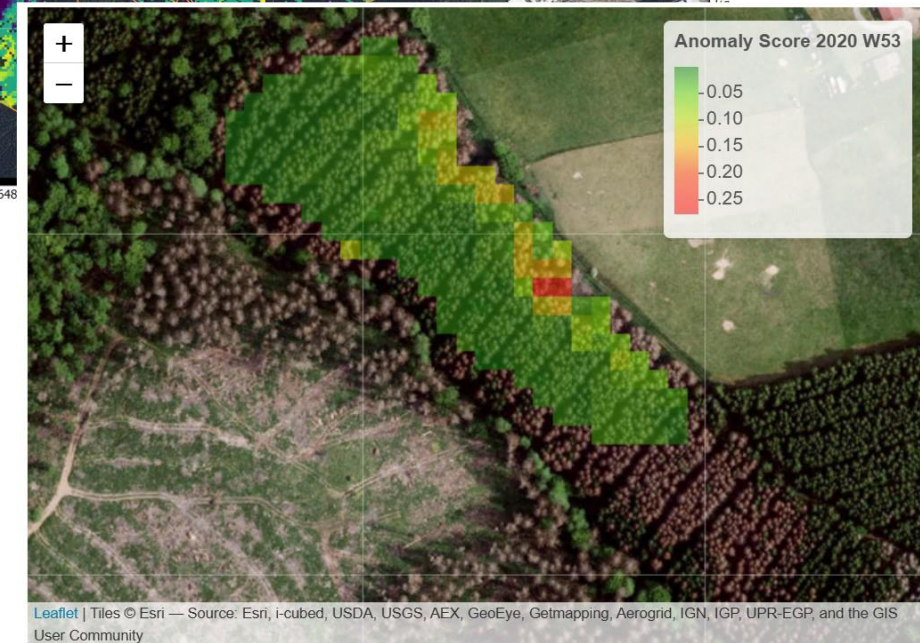
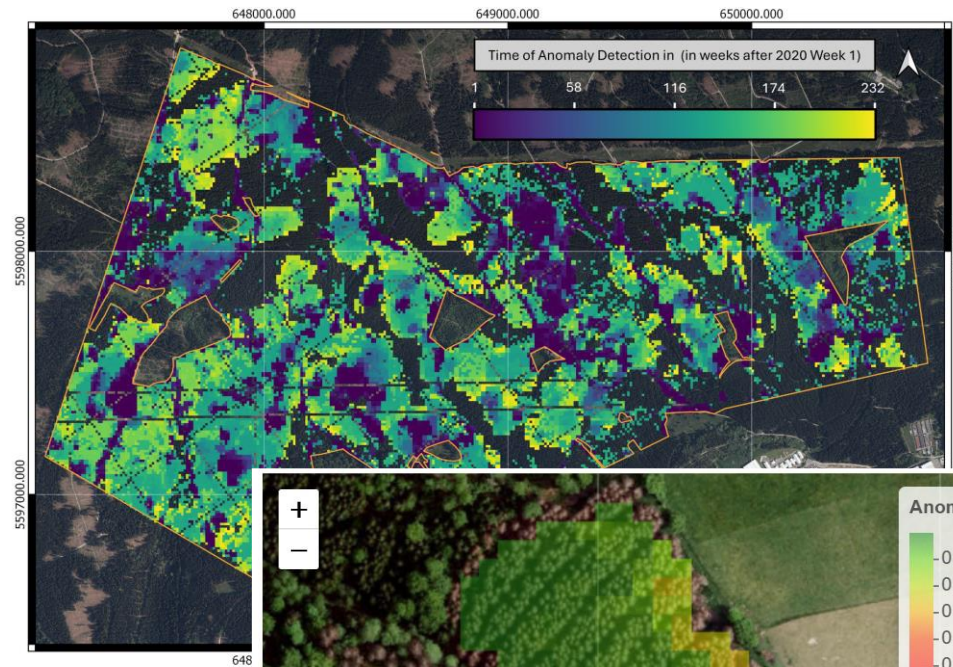
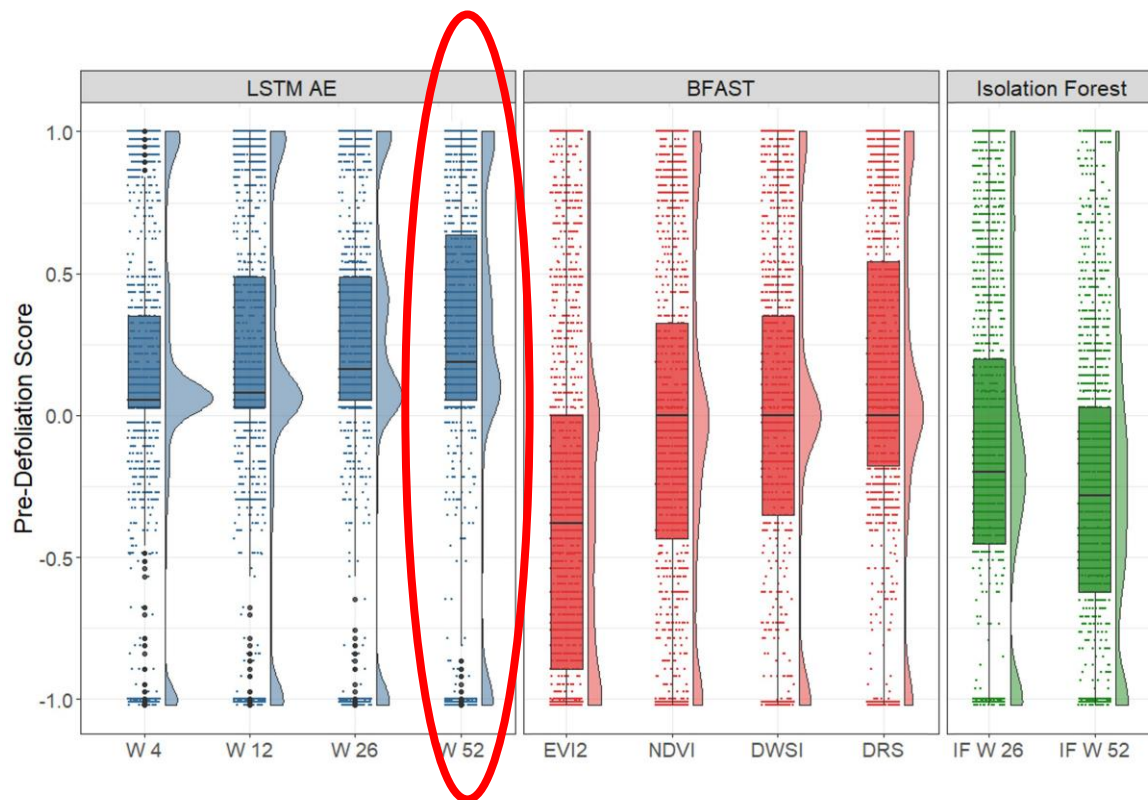
- Sentinel-2, multivariate Zeitreihen
- Qualitätsfilter, Glättung und Gap-Filling → kontinuierliche Zeitreihen
- Aufbereitung als Sequenzen für zeitliche Mustererkennung



Detektion von Waldschäden in Fichten

Bestes Modell

- LSTM-Autoencoder (52-Wochen Sequenz)
- 64,8 % der Schäden >4 Wochen vor Verfärbung erkannt
- Gesamt Genauigkeit: **0.858**
- F1-Score: **0.891**



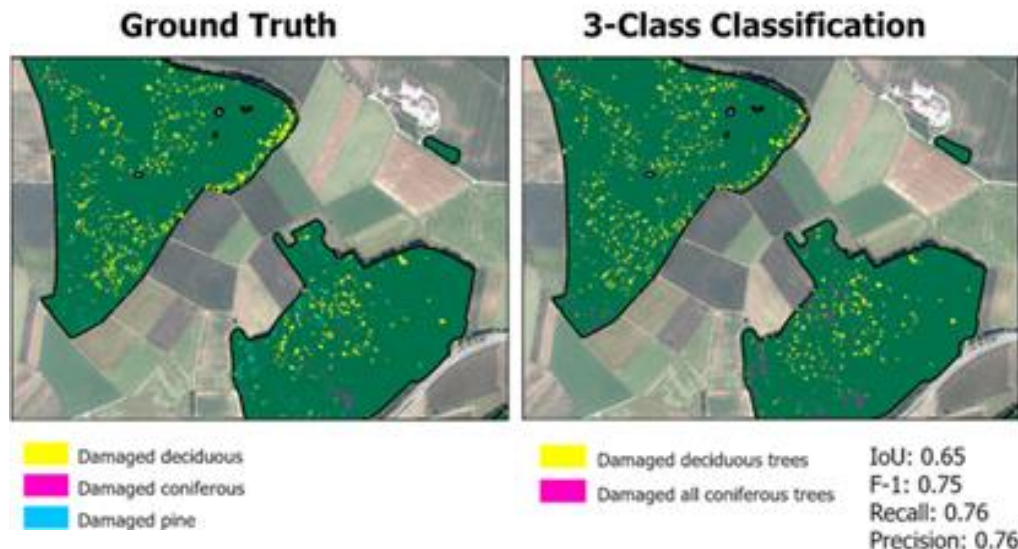
Schaddetektion basierend auf Luftbildern

KI-Modelle für Schaddetektion

- U-Net, U-Net++, DeepLabV3++, **SegFormer**, UpperNet
- Semantic Segmentation
- Geeignet für 20 cm Luftbilder (CIR)
- Klassen: stark geschädigte Laubbäume, stark geschädigte Nadelbäume und Hintergrund

Validierung

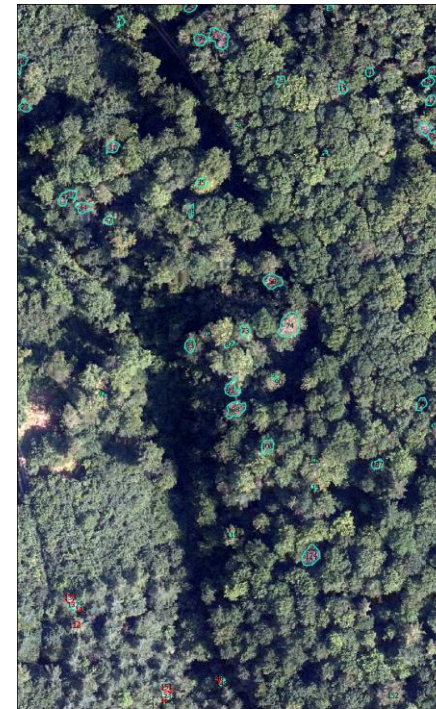
- F1-Werte von 0,75 bis 0,83 für die Testgebiete



Übertragung der KI-Modelle

- Klassifizierung von 12 Gebieten in anderen Bundesländern
- Klassifizierung von weiteren Gebieten in Nordbayern
- Ergebnisse: unbefriedigend bis sehr gut

Forchtenberg, Baden-Württemberg
Quelle: deadtrees.earth



■ Geschädigter Laubbaum
■ Geschädigter Nadelbaum

Oberkranken, Nordbayern
Quelle: LWF



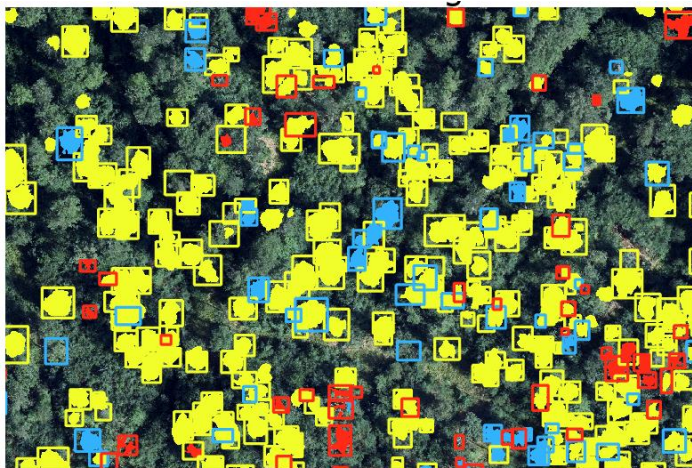
Schadstufenauswertung mit Luftbildern

Zwei verschiedene Ansätze

- YOLO (Objekterkennung → Bounding Box)
- Semantic Segmentation (SegFormer)
- 10 cm & 20 cm Luftbilder (CIR)
- 3 Klassen: Schadstufen 1-2, 3, 4

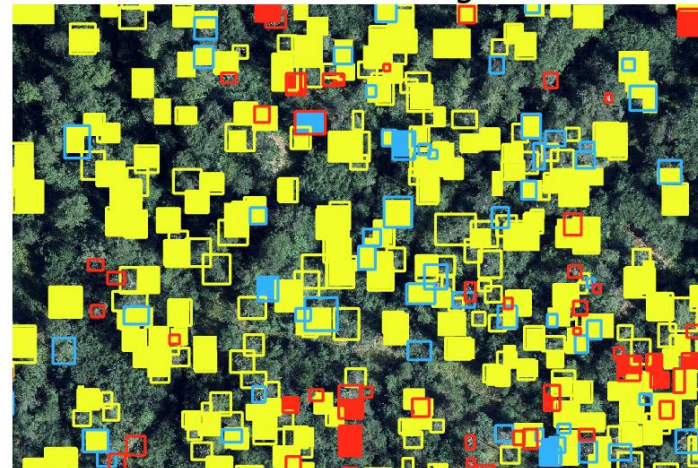


SegFormer



Mittelwert IoU: 0,54
 F1-Score (pixelbasiert): Schadstufe 1-2 (0,52);
 Schadstufe 3 (0,29); Schadstufe 4 (0,38)

YOLO



mAP50: 0,32
 F1-Score (objektbasiert): Schadstufe 1-2 (0,40);
 Schadstufe 3 (0,28); Schadstufe 4 (0,44)

Schadstufe	Verlichtung (%)	Beispiele
1	1-25	
2	26 – 60	
3	61-99	
4	100	

Validierung und Übertragbarkeit luftbildgestützter Erfassung von Kronenschäden – Teil 1



Verteilung der Validierungspunkte im Testgebiet

Validierung

- 343 Validierungspunkte im Solling (Zufallsverteilung mit Mindestabstand von 50 m)
- Validierungspunkte wurden auf Grundlage von Luftbildern in die Klassen „ungeschädigter Wald“, „geschädigter Laubwald“, „geschädigter Nadelwald“ eingeteilt
- Validierte Modelle: „t023_segFormer_Epoch50“ und „t024_segFormer_Epoch50“

Ergebnis Modell „t024_segFormer_Epoch50“

- Ca. 15 bis 40 % Übererfassung (im Laubwald höher als im Nadelwald)
- Ca. 88 bis 95 % Untererfassung (im Nadelwald höher als im Laubwald)

Probleme

- Verwechslung von Laub- und Nadelwaldschäden
- unvollständige Erfassung geschädigter Baumkronen
- Erfassung unbestockter Flächen als Schadflächen

t024_segFormer_Epoch50_postprocessing							
Karte	Referenz			Nutzergenauigkeit (CI)	Produzentengenauigkeit (CI)	F1	Gesamtgenauigkeit (CI)
	Ungeschädigter Wald	Geschädigter Laubwald	Geschädigter Nadelwald				
Ungeschädigter Wald	96,57	1,30	1,75	96.93 (2.39)	99.91 (0.05)	98.40	
Geschädigter Laubwald	0,08	0,17	0,03	60.38 (17.70)	11.38 (12.55)	19.16	
Geschädigter Nadelwald	0,01	0,004	0,08	86.65 (10.49)	4.48 (4.75)	8.52	
Gesamt							96.82 (0.40)

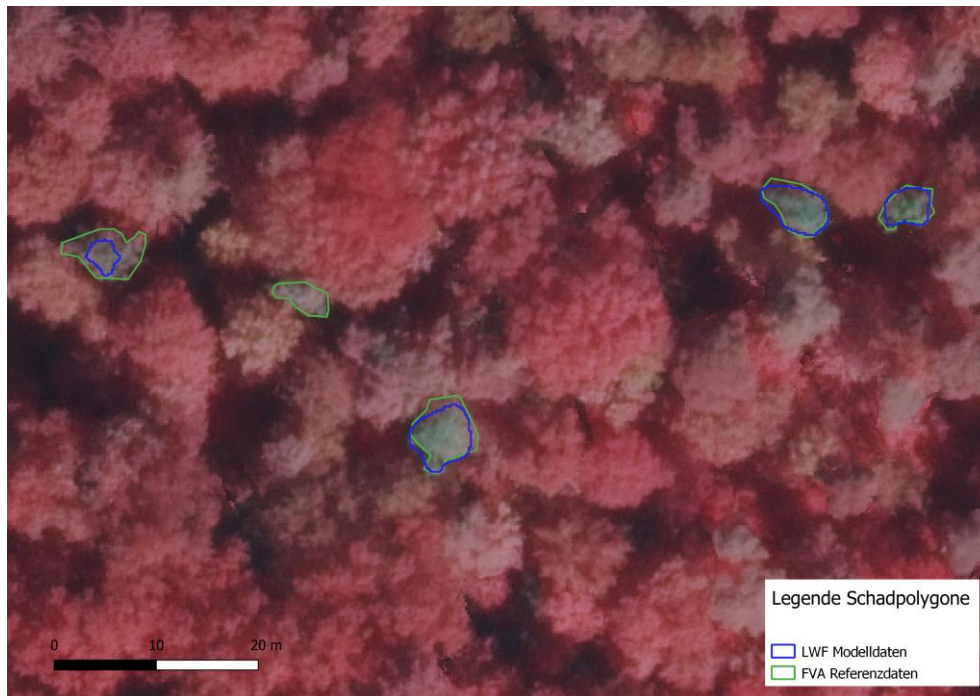
Validierung und Übertragbarkeit luftbildgestützter Erfassung von Kronenschäden – Teil 2

Validierung

- Aus Orthofotos digitalisierte Referenzpolygone
- Vergleich zu deadtrees-Ergebnissen

Ergebnisse

- Moderat; teilweise mehrere Klassen in Referenz



Beispiel für Intersektion von Schadpolygonen zwischen den Referenzdaten und dem LWF Modell 2

LWF (N = 2016)

	positive	negative
positive	843	567
negative	1173	

Modell 1

User's accuracy:
41,81 %

Producer's accuracy:
59,79 %

LWF (N = 1131)

	positive	negative
positive	668	742
negative	463	

Modell 2

User's accuracy:
59,06 %

Producer's accuracy:
47,37 %

FVA (N = 1410)

FVA (N = 1410)

Erfassung von Schädigungen am Laubholz



KI-Modelle für Schaddetektion basierend auf Luftbildern

- Sehr gute Erfassung der Schäden mit LWF und LDBV-Datensätzen, sehr unterschiedliche Ergebnisse mit anderen Datensätzen
- Akzeptable Trennung von Schäden in Nadel- und Laubbäumen mit LWF und LDBV-Datensätzen
- Gute Behandlung der Beleuchtungsunterschiede in den Trainingsgebieten.

KI-Modelle zur Erkennung von Schädigungsgrad an Bäumen anhand von Luftbildern

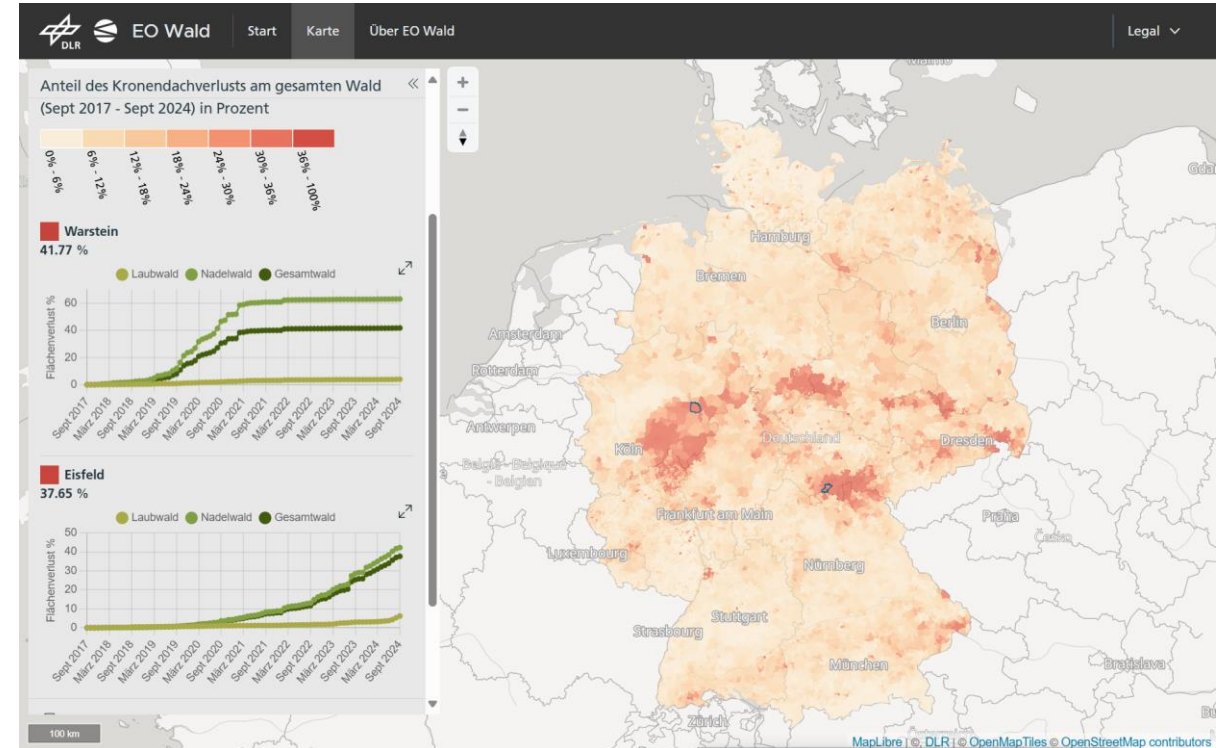
- Modelle derzeit noch nicht übertragbar

KI- und VI-basierten Modellen zur Schadenserkenkung unter Verwendung von S2-Bilddaten / Upscaling

- weiterer Entwicklungsbedarf

Zusammenfassung

- Unterschiedliche Waldschutzprobleme erfordern gezielte FE-Produkte zur Unterstützung
- Anforderungen sind je nach Zielgruppe teils unterschiedlich
- FCCL → zeitliche Auflösung
- LSTM-Ansatz für Schäden in Fichten → NRT-Potenzial
- Luftbilder grundlegend für Erfassung von abgestorbenen Baumkronen
- Übertragbarkeit & Upscaling als zukünftige Aufgaben



<https://geoservice.dlr.de/web/datasets/fccl>
https://geoservice.dlr.de/web/datasets/fccl_stats
<https://eowald.dlr.de/>

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Dr. Frank Thonfeld
frank.thonfeld@dlr.de

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit
und Verbraucherschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages