

CT-NOW

Thomas Koschitzki *et al.*¹

Halle (Saale) | info@workflow-now.de

Arbeitsentwurf — Stand 29. April 2026 — nicht zur Zitierung

Kurztitel

Arbeitsentwurf zur flurstücksbasierten ABAG-Differenzierung in Sachsen-Anhalt

Zusammenfassung

Langfristige Erosionsmodelle wie die ABAG beschreiben, wo Böden erosionsgefährdet sind. Ihre Aussagekraft hängt jedoch wesentlich an der Qualität der Eingangsfaktoren — insbesondere an C- und P-Faktor, die in Standardanwendungen häufig pauschal gesetzt werden. Die vorliegende Arbeit beschreibt eine ABAG-Erweiterung für Sachsen-Anhalt, in der C- und P-Faktor pixelweise und flurstücksspezifisch aus offenen Geo- und Fernerkundungsdaten abgeleitet werden, und die in einer reproduzierbaren landesweiten Pipeline umgesetzt ist.

Der C-Faktor wird in einer vierstufigen Kaskade bestimmt: Stufe 1 berechnet ihn pixelweise aus monatlichen Sentinel-2-NDVI-Kompositen nach Van der Knijff *et al.* (2000) und liefert sechs Monatswerte pro Ackerpixel innerhalb der Vegetationsperiode. Stufe 2 (Stoppel-Override) setzt für Wintergetreide, Sommergetreide, Winterweizen und Winterraps in den Monaten August und September einen festen C-Faktor von 0,10 nach DIN 19708 — eine methodische Verfeinerung, die der NDVI-Unsichtbarkeit von Stoppelmulch Rechnung trägt. Stufe 3 nutzt das CT-NOW-Kulturartenraster (Koschitzki *et al.*, in Vorb.) als kulturartigen Rückfallpfad bei unzureichendem NDVI-Signal. Stufe 4 dient als Versiegelungsschätzer für Restflächen. Der P-Faktor wird dreistufig abgeleitet: Konturanbau-Pflicht nach GLÖZ 5 auf Reihenkultur-Hangfeldern, Landschaftsbarrieren aus dem normalisierten Oberflächenmodell (DOM1 – DGM1) und die Ausrichtung der Feldgeometrie relativ zur Fließrichtung. Der P-Median über alle Ackerflurstücke liegt bei 0,787.

Der Finallauf wertet 49.353 Ackerflurstücke mit 1.789.548 Pixeln in sechs Monatsläufen aus. Der ABAG-Index zeigt einen ausgeprägten saisonalen Spitzenwert im Juli (P50 = 1,523), während die Monate August (P50 = 0,912) und September (P50 = 0,981) durch den Stoppel-Override deutlich gedämpft werden. Auf Flurstücksebene erreichen 38,9 % der Ackerflurstücke ihren Spitzenmonat im Juli, 28,6 % im April; August (10,8 %) und September (8,4 %) treten anschließend zurück und entsprechen weitgehend Mais- und Hackfruchtbeständen. Eine Gegenprüfung mit dem DWD-Starkregendatensatz CatRaRE bestätigt die saisonale und räumliche Plausibilität, und alle 38 dokumentierten Erosionsereignisse aus Sachsen-Anhalt liegen im oberen Quartil der landesweiten ABAG-Verteilung. Eine perspektivische Erweiterung um datengetriebene Ereigniswahrscheinlichkeiten — analog zu Batista *et al.* (2025) — wird als Phase 2 skizziert; sie scheitert derzeit an einer hinreichend großen Stichprobe dokumentierter Erosionsereignisse.

¹Weitere Autoren folgen.

Schlüsselwörter

Wassererosion, Flurstücksmonitoring, ABAG, dynamischer C-Faktor, nDSM, P-Faktor, Sentinel-2, Reproduzierbarkeit

1. Einleitung

Wassererosion auf Ackerflächen bleibt ein zentrales Problem für Bodenschutz, Gewässerqualität und landwirtschaftliche Nutzung. Modelle wie die ABAG (Allgemeine Bodenabtragsgleichung; vgl. DIN 19708, 2022) liefern seit langem belastbare Aussagen darüber, welche Flächen aufgrund von Relief, Boden und Bewirtschaftung grundsätzlich erosionsgefährdet sind. Ihre Aussagekraft hängt allerdings wesentlich an der Qualität der einzelnen Faktoren. Insbesondere C- und P-Faktor werden in Standardanwendungen häufig pauschal gesetzt — kulturartlich oder gar landesweit gemittelt — und werden damit zu einer wesentlichen Fehlerquelle.

Gerade in der Praxis ist eine räumlich und zeitlich differenziertere Bewertung relevant. Fachbehörden und Beratungsstellen benötigen Hinweise, welche Flächen innerhalb der Vegetationsperiode am stärksten exponiert sind, wo Erosionsschutzmaßnahmen vordringlich erscheinen und welche Flurstücke für Dokumentation und Berichterstattung näher betrachtet werden sollten. Für solche Anwendungen reichen pauschal parametrisierte Gefährdungskarten nicht aus. Erforderlich sind Verfahren, die langfristige Disposition flurstücks- und zeitbezogen abbilden und dabei methodisch nachvollziehbar bleiben.

Mehrere neuere Arbeiten setzen daran an. Steinhoff-Knopp et al. (2025) zeigen, dass C-Faktoren mit grober zeitlicher oder kulturartlicher Auflösung systematisch verzerren; feldparcel-orientierte Ansätze (Matthews et al., 2023) belegen den Mehrwert einer feineren Auflösung. Panagos et al. (2015), Alewell et al. (2019) und Eekhout und de Vente (2020) diskutieren die Stärken und Grenzen klassischer (R)USLE-Anwendungen, insbesondere bei Prozessdynamik und Skalenübertragung. Daneben wird die Erweiterung um datengetriebene, ereignisbezogene Verfahren erprobt; Batista et al. (2025) demonstrieren am Beispiel Süddeutschlands, wie ML-Modelle mit dokumentierten Erosionsereignissen als Trainingsbasis räumlich und zeitlich differenzierte Erosionsnowcasts erlauben.

Die vorliegende Arbeit entwickelt für Sachsen-Anhalt eine ABAG-Erweiterung, in der zwei der genannten Schwächen adressiert werden: Der C-Faktor wird pixelweise und monatsaufgelöst aus Sentinel-2-NDVI und CT-NOW abgeleitet; der P-Faktor wird dreistufig aus GLÖZ-5-Konditionalität, einem normalisierten Oberflächenmodell (nDSM) und der Feldgeometrie hergeleitet. Beides fließt in eine reproduzierbare, blockweise neustartfähige Verarbeitung auf Landesebene ein. Ziel ist nicht die direkte Beobachtung tatsächlicher Erosion, sondern eine differenzierte ABAG-basierte Disposition auf Flurstücksebene, die als Grundlage für Priorisierung, Berichterstattung und Beratung dient. Eine perspektivische Erweiterung um datengetriebene Ereigniswahrscheinlichkeiten wird in Abschnitt 8.5 als Phase 2 diskutiert.

2. Zielstellung

Leitfrage: Lässt sich der ABAG-Ansatz für Sachsen-Anhalt so erweitern, dass C- und P-Faktor pixelweise und flurstücksspezifisch aus offenen Daten abgeleitet werden — landesweit und reproduzierbar?

Dafür sind vier Teilziele formuliert. Fachlich soll für alle Ackerflurstücke in Sachsen-Anhalt pro Monat der Vegetationsperiode ein ABAG-basierter Dispositionsindex vorliegen, der einen pixelweisen dynamischen C-Faktor und einen dreistufig abgeleiteten P-Faktor verwendet, und der saisonal zu einem Spitzenwert pro Flurstück aggregierbar ist. Der vorliegende Lauf deckt eine räumlich geschichtete Stichprobe von 49.353 Flurstücken ab; die Skalierung auf den Gesamtbestand ist technisch vorbereitet. Beim C-Faktor ersetzt eine pixelweise, monatlich aufgelöste Kaskade aus Sentinel-2-NDVI und CT-NOW pauschale Ersatzgrößen: NDVI bildet den aktuellen Vegetationszustand ab, CT-NOW strukturiert die Ableitung nach erosionsrelevanten Kulturartengruppen. Beim P-Faktor tritt eine dreistufige Ableitung aus GLÖZ-5-Regelwerk, Oberflächenmodell

und Feldgeometrie an die Stelle des üblichen Pauschalwerts. Das dritte Ziel ist Reproduzierbarkeit: Läufe auf Landesebene müssen bei Abbrüchen neustartfähig sein und blockweise nachprüfbar protokolliert werden. Schließlich sollen die Ergebnisse direkt für kartographische Auswertungen, Priorisierungslisten und behördliche Berichterstattung verwendbar sein.

3. Stand der Fachliteratur und Einordnung

Drei Stränge der Literatur sind für die Einordnung relevant.

Erstens die ABAG/(R)USLE-Familie selbst: Panagos et al. (2015) haben mit der europaweiten Anwendung den Maßstab gesetzt, Alewell et al. (2019) und Eekhout und de Vente (2020) diskutieren systematisch die Grenzen — Prozessdynamik, Skalenübertragung und die häufig pauschale Parametrisierung von C und P. DIN 19708 (2022) gibt für den deutschen Anwendungsraum die methodische Grundlage. Der Befund ist konsistent: Die ABAG bleibt nützlich, ihre Aussagekraft auf Flurstücksebene hängt aber wesentlich an der Auflösung der Eingangsfaktoren.

Zweitens der C-Faktor: Steinhoff-Knopp et al. (2025) zeigen, dass jährlich oder zu grob aufgelöste C-Faktoren systematisch verzerren, und plädieren für monats- und kulturartlich differenzierte Werte. Matthews et al. (2023) entwickeln einen feldparcel-orientierten Ansatz für Europa und betonen die zeitliche Verteilung der Bodenbedeckung. Aus beiden Arbeiten ergibt sich die Anforderung, den C-Faktor flurstücks- und zeitbezogen zu bestimmen — was den Kern der vorliegenden Erweiterung darstellt.

Drittens datengetriebene Ereignisdetektion: Batista et al. (2025) demonstrieren, dass ML-Modelle Erosionsereignisse auf Ackerflurstücken erkennen können, wenn dokumentierte Erosionslabels als Trainingsbasis vorliegen. Die Arbeit zeigt das Potenzial einer ereignisbezogenen Bewertung über die langfristige Disposition hinaus, macht zugleich aber deutlich, wie stark der Ansatz an die Verfügbarkeit dokumentierter Erosionsereignisse gebunden ist. Eine analoge Trainingsbasis für Sachsen-Anhalt liegt nicht vor; die Implikationen werden in Abschnitt 8.5 (Phase 2) diskutiert.

Aus den drei Strängen ergibt sich die methodische Linie der vorliegenden Arbeit: ABAG als Grundgerüst, mit dynamisch und pixelweise berechneten C- und P-Faktoren, anstelle pauschal gesetzter Werte. Eine datengetriebene Ergänzung um Ereigniswahrscheinlichkeiten wäre methodisch komplementär, scheitert aktuell aber an der Datenlage.

4. Untersuchungsraum und Datengrundlage

4.1 Untersuchungsraum

Untersuchungsraum ist Sachsen-Anhalt. Die Verarbeitung erfolgt flurstücksweise aus einer lokal abgelegten SQLite-Struktur, aufgeteilt in logische Verarbeitungsblöcke (rowid-basierte Abschnitte) für Laufstabilität und Wiederaufnahme.

4.2 Ackerflurstücke

Geometriegrundlage sind ALKIS-Flurstücke aus dem Geodatenportal Sachsen-Anhalt (FeatureServer), lokal in einer SQLite-Datenbank abgelegt (2.704.579 Flurstücke). Aus diesem Bestand werden über die offene Crop Type Map Germany (Blickensdörfer et al., 2022; Thünen-Institut, Versionen 2024 und 2025) diejenigen Flächen extrahiert, deren Centroid auf eine landwirtschaftliche Nutzung fällt. Flurstücke ohne Agrarnutzung — Wald, Siedlung, Gewässer, Infrastruktur — scheiden damit aus. Zusätzlich entfallen geometrisch invalide und zu kleine Flächen (< 0,05 ha). Von 2,7 Mio. Flurstücken verbleiben rund eine Million Ackerflurstücke; daraus wurden

50.000 Flurstücke per räumlich geschichteter Zufallsauswahl gezogen: Ein 20×20-Raster über die Landesfläche teilt das Gebiet in 400 Zellen, aus jeder Zelle wird eine gleichmäßige Anzahl Flurstücke deterministisch ausgewählt. Die Stichprobe deckt 1.606 Gemarkungen in allen Landesteilen Sachsen-Anhalts ab.

4.3 Terrain- und Dispositionsdaten

Das Relief kommt aus lokalen COG-basierten DGM-Daten, aus denen die ABAG-Komponenten Hangneigung, Hanglänge und Einzugsgebiet für die ereignisbezogene Bewertung abgeleitet werden.

4.4 C-Faktor-Methodik

Der C-Faktor wird in einer vierstufigen Kaskade bestimmt, bei der jede Stufe die nachfolgende überschreitet, sofern die Datenqualität bzw. die Anwendungsbedingungen erfüllt sind.

Stufe 1 (bevorzugt): Dynamischer NDVI-basierter C-Faktor nach Van der Knijff et al. (2000). Der C-Faktor wird pixelweise nach der Formel $C = \exp(-2 \times \text{NDVI} / (1 - \text{NDVI}))$ berechnet. Grundlage sind sechs monatliche NDVI-Komposite (April bis September) des Untersuchungsjahres, gebaut aus dem lokalen Sentinel-2-Kachelspeicher, der auch die Kulturartenklassifikation CT-NOW (Koschitzki et al., in Vorb.) speist. Pro Monat entsteht ein landesweiter 10-m-NDVI-Raster in EPSG:25832; die Van-der-Knijff-Formel wird pixelweise darauf angewendet. Stufe 1 greift, wo NDVI > 0,05 vorliegt. Jedes Flurstück erhält damit sechs C-Faktor-Werte innerhalb der Vegetationsperiode und bildet die phänologische Bestandsentwicklung ab.

Stufe 2: Stoppel-Override für Getreide- und Rapsstoppeln (Aug/Sep). Pixel, die im CT-NOW-Raster den Klassen Wintergetreide, Winterweizen, Sommergetreide oder Winterraps zugeordnet sind, erhalten in den Monaten August und September einen festen C-Faktor von 0,10. Diese Stufe überschreitet den NDVI-basierten Wert aus Stufe 1 fachlich gezielt: Der NDVI misst photosynthetisch aktives Pflanzenmaterial; tote Pflanzenrückstände wie Stoppelmulch sind im NDVI nicht detektierbar, tragen jedoch erosionsmindernd bei. Der DIN-19708-Wert für Stoppelmulch liegt im Bereich 0,05–0,15; der hier gewählte konservative Wert von 0,10 entspricht dem Bereichsmittel. Mais (Klasse 3), Hackfrüchte/Kartoffeln (4) und Zuckerrübe (6) sind von dem Override ausgenommen, weil dort im Spätsommer entweder noch Bestand vorhanden ist (Mais) oder die Ernte erst im Spätherbst beginnt; Grünland (2) und Brache (1) werden ohnehin durch ihre niedrigen statischen C-Faktoren abgedeckt und bleiben unverändert.

Stufe 3: Kulturartenbasierter C-Faktor aus dem CT-NOW-Raster. Wo kein hinreichendes NDVI-Signal vorliegt — etwa bei Wolkenbedeckung in einem Monat — werden die sieben Kulturartenklassen des CT-NOW-Rasters (Deutschland-weit, 20 m Auflösung) auf C-Faktoren nach DIN 19708 (2022) gemappt. Repräsentative Werte: Mais 0,40; Grünland 0,004; Wintergetreide 0,10; Hackfrüchte 0,35; Winterraps 0,20; Sommergetreide 0,17; Brache 0,03. CT-NOW liefert damit nicht nur einen Rückfallwert, sondern die kulturartige Struktur der C-Faktor-Dynamik: NDVI beschreibt den monatlichen Vegetationszustand, CT-NOW bestimmt die agronomische C-Faktor-Gruppe, auf die dieser Zustand bezogen wird. Dieser Pfad ist statisch pro Vegetationsperiode, aber flurstücksspezifisch.

Stufe 4 (Rückfallebene): Versiegelungsschätzer. Wo weder NDVI noch Kulturarteninformation verfügbar ist, dient der Copernicus Imperviousness Layer (10 m) als grober Schätzer. Dieser Pfad betrifft ausschließlich Flächen, auf denen alle vorgelagerten Stufen keine verwertbaren Daten liefern. Andernfalls wird ein konservativer Pauschalwert von 0,15 als finaler Rückfallwert eingesetzt.

Die Kaskade folgt dem Prinzip: Stoppel-Override (Stufe 2) überschreitet NDVI (Stufe 1), wo die Bedingung Klasse × Monat erfüllt ist; NDVI (Stufe 1) überschreitet das Kulturartenraster (Stufe 3); das Kulturartenraster (Stufe 3) überschreitet den Versiegelungsschätzer (Stufe 4). Eine Stichprobenauswertung über 2.000 zufällig gezogene Ackerflurstücke (290.839 Pixel pro Monat) bestätigt die Funktionsverteilung der NDVI-Stufe: Stufe 1 deckt je nach Monat 69,5 % bis 81,1 % der Ackerpixel ab (April 70,1 %, Mai 69,5 %, Juni 77,6 %, Juli 69,7 %, August 81,1 %, September 71,4 %). Die verbleibenden 18,9 % bis 30,5 % werden durchgängig durch das

Kulturartenraster aufgefangen; der Versiegelungsschätzer wird in der Stichprobe auf Ackerfläche in keinem Monat ausgelöst. Die Verwendung eines pixelweisen 10-m-Rasters — anstelle einer Centroid-Stichprobe je Flurstück — ermöglicht innerflurstückliche Differenzierung (vgl. Abschnitt 7.2).

Diese Methodik folgt dem Ansatz von Steinhoff-Knopp et al. (2025): flurstücksspezifische, zeitlich aufgelöste C-Werte werden genutzt, wo sie verfügbar sind, ohne auf den übrigen Flächen die Bewertung auszusetzen. Der Stoppel-Override ergänzt diesen Ansatz an einer NDVI-spezifischen Schwachstelle, die bei vegetationsindexbasierten C-Faktoren systematisch zu einer Überschätzung des Spätsommer-Risikos auf Getreide- und Rapsflächen führt.

4.5 Niederschlagskontext (CatRaRE)

Für die externe Plausibilisierung der saisonalen Verteilung wird der DWD-Starkregendatensatz CatRaRE (v2024.01) herangezogen. Die saisonale und räumliche Verteilung der CatRaRE-Events dient als unabhängige Vergleichsebene für die monatliche C-Faktor-Dynamik (vgl. Abschnitt 7.3). Eine ereignisbezogene meteorologische Auslösevariable ist im aktuellen Lauf nicht Teil des ABAG-Pfads; sie wird in Abschnitt 8.5 als Element einer perspektivischen Phase-2-Erweiterung diskutiert.

5. Methodik

5.1 Grundlogik

Die Methodik ruht auf drei Bausteinen: der statischen Disposition aus ABAG-Faktoren (Topographie und Boden, K-Faktor, R-Faktor), der pixelweisen monatlichen C-Faktor-Kaskade aus Sentinel-2-NDVI und CT-NOW (vgl. Abschnitt 4.4) und einem dreistufigen P-Faktor (GLÖZ 5, nDSM, Feldgeometrie, vgl. Abschnitt 6). Pro Ackerpixel und Monat wird der ABAG-Index berechnet:

$$ABAG = R \times K \times L \times S \times C \times P$$

mit pixelweise variierenden C- und P-Faktoren und flurstücksspezifischen K-, L- und S-Faktoren. Pro Ackerflurstück entstehen sechs Monatswerte (April bis September); als Hauptkennzahl dient der maximale ABAG-Index über die Saison, zusammen mit dem zugehörigen Spitzenmonat.

Abbildung 1 zeigt den Produktionspfad.

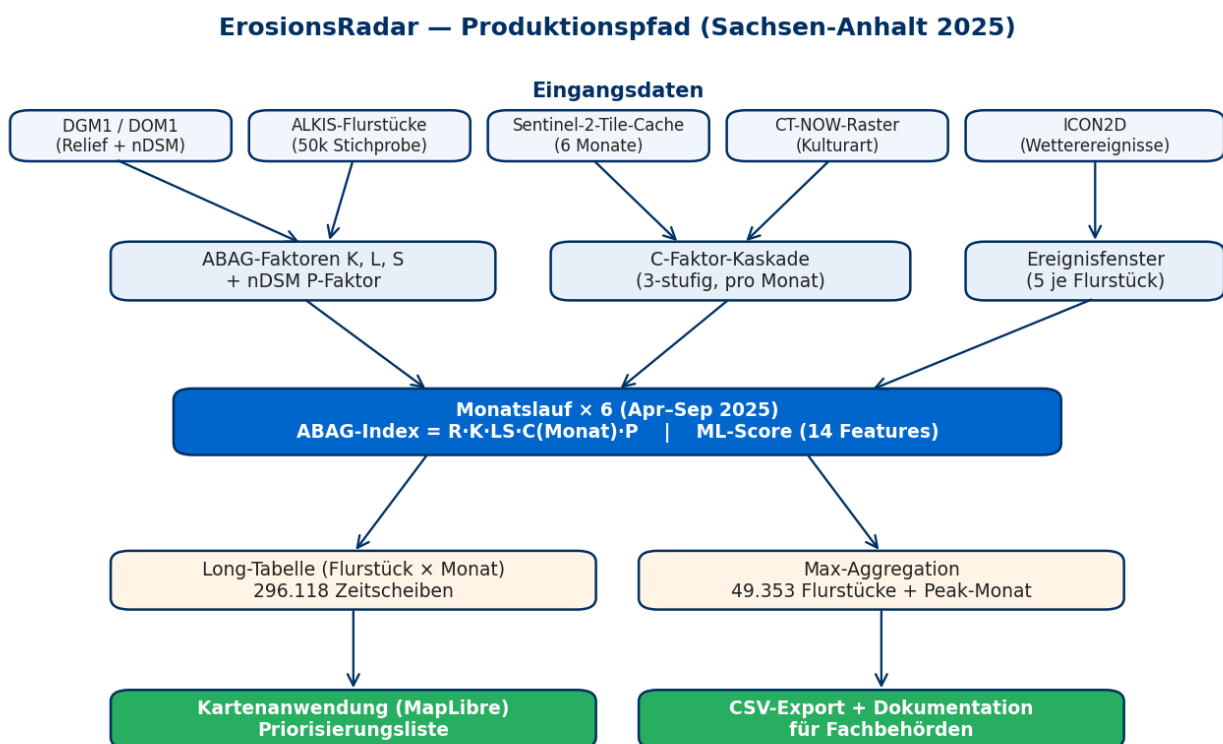


Abbildung 1: Produktionspfad der ABAG-Erweiterung. Eingangsdaten (DGM1, DOM1, ALKIS, Sentinel-2, CT-NOW) fließen in die monatlich aufgelöste C-Faktor-Kaskade und die dreistufige P-Faktor-Pipeline ein; sechs Monatsläufe werden zur Max-über-Saison-Priorisierung aggregiert.

5.2 Verarbeitungsarchitektur

Die Modellierung erfolgt blockweise (Abschnitte von je ca. 1.000 Ackerflurstücken, rowid-basiert) und ist neustartfähig. Der Finallauf wird sechsmal gerechnet — einmal pro Monat der Vegetationsperiode — und die Ergebnisse werden nach Abschnitt 6 zu einer Ergebnistabelle (Flurstück × Monat) und einer Maximum-Tabelle (Flurstück, Spitzenmonat) zusammengeführt. Die pixelweise Verarbeitung erlaubt zusätzlich eine innerflurstückliche Differenzierung, die in den Aggregaten (Mittelwert, Median, P10/P90) je Flurstück sichtbar wird.

6. Produktionsstand

Der Finallauf umfasst 50.000 räumlich stratifizierte Ackerflurstücke, nach Landkreisen proportional zur Ackerfläche geschichtet und landesweit verteilt. Die Verarbeitung erfolgt blockweise: der Bestand ist in 50 Abschnitte von je ca. 1.000 Ackerflurstücken aufgeteilt (rowid-basierte Indexspannen, keine geografischen Kacheln), die sequentiell abgearbeitet und neustartfähig lokal abgelegt werden. Innerhalb jedes Blocks werden die Eingangsdaten pixelweise aus lokalen COG-Rastern (20 m Auflösung) geladen und auf die Flurstücksgeometrien zugeschnitten. 49.353 Flurstücke konnten ausgewertet werden (1,3 % Ausfall durch fehlende Rasterabdeckung), mit insgesamt 1.789.548 klassifizierten Pixeln (im Mittel 36 Pixel je Flurstück).

Der Finallauf wird für jeden der sechs Vegetationsperiodenmonate (April bis September 2025) separat gerechnet. Der pixelweise dynamische C-Faktor (Stufe 1 der Kaskade, Abschnitt 4.4) geht als einziger Input zwischen den Monatsläufen unterschiedlich ein; alle übrigen Eingangsgrößen (Relief, Boden, Kulturartenraster, P-Faktor) sind monatsinvariant. Je Ackerflurstück entstehen damit sechs ABAG-Bewertungen; aus der resultierenden $49.353 \times 6 = 296.118$ -Zeilen-Tabelle wird als Hauptkennzahl pro Flurstück der **maximale ABAG-Index über die Saison** ermittelt, zusammen mit dem zugehörigen *Spitzenmonat*. Die zeitaufgelöste Rohtabelle bleibt für weitergehende Analysen verfügbar (vgl. Abschnitt 7.2).

Der C-Faktor liegt als flächendeckendes Monatsraster vor und wird vierstufig bestimmt (monatlich dynamischer NDVI-C nach Van der Knijff, Stoppel-Override für Getreide- und Rapsstoppeln in Aug/Sep, Kulturartenraster als Rückfallebene bei Wolkenbedeckung, Versiegelungsschätzer als finale Rückfallebene; vgl. Abschnitt 4.4). Der P-Faktor wird über eine dreistufige Pipeline bestimmt, wobei der stärkste Schutz (niedrigstes P) gewinnt:

1. **GLÖZ 5 (Konditionalität):** Nach den Standards für den guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand (GLÖZ) der GAP-Konditionalitätenverordnung (EU 2021/2115, § 11 GAP-Konditionalitäten-Gesetz) ist auf erosionsgefährdeten Flächen mit Reihenkulturen und Hangneigung über 2 % Konturanbau vorgeschrieben. Felder, die dieses Kriterium erfüllen ($C \geq 0,30$; Mais, Rüben, Kartoffeln), erhalten $P = 0,5$.
2. **nDSM-Barrieren:** Aus dem normalisierten Oberflächenmodell (DOM1 – DGM1) werden permanente Strukturen ab 0,5 m Höhe (Hecken, Wälle, Gebäude) identifiziert. Der P-Faktor sinkt linear von 1,0 (keine Barriere) auf bis zu 0,3 (Strukturhöhe ≥ 3 m).
3. **Geometrische Annahme (längste Kante):** Für Felder ohne GLÖZ-Pflicht und ohne signifikante Barrieren wird der Winkel zwischen der längsten Kante des Feldpolygons und der mittleren Fließrichtung (Aspect) bestimmt. Steht die Kante annähernd quer zum Hang ($\approx 90^\circ$), wird Konturbearbeitung angenommen ($P = 0,5$); verläuft sie parallel zur Falllinie ($\approx 0^\circ$), gilt $P = 1,0$; dazwischen wird linear interpoliert.

Die Kombination wählt pixelweise das Minimum über alle anwendbaren Stufen. Felder, bei denen keine Stufe greift, erhalten den konservativen Rückfallwert $P = 1,0$. Die Pipeline ist monatsinvariant.

7. Ergebnisse

7.0 Überblick

Die folgenden Ergebnisse basieren auf den sechs Monatsläufen April bis September 2025, jeweils mit 49.353 Ackerflurstücken und 1.789.548 pixelweise klassifizierten Punkten; insgesamt entsteht eine Tabelle mit 296.118 Flurstück-Monat-Kombinationen. Abbildung 2 zeigt die Verteilungen der zentralen ABAG-Größen im Spitzenmonat: C-Faktor, P-Faktor und ABAG-Index (Max-über-Saison-Aggregation, Abschnitt 6).

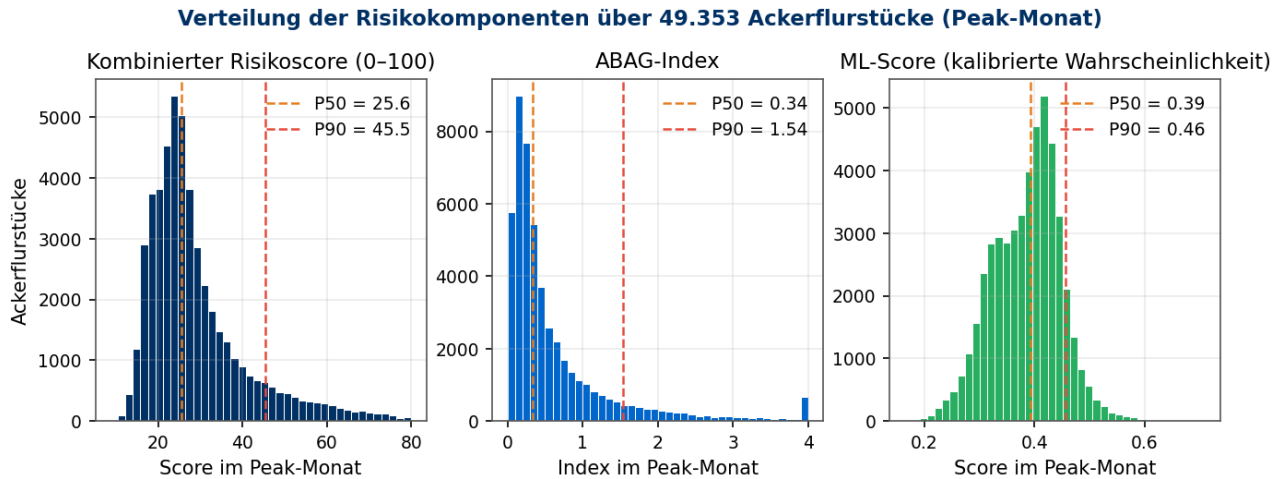


Abbildung 2: Verteilungen des ABAG-Index, des dynamischen C-Faktors und des P-Faktors im Spitzenmonat pro Ackerflurstück (49.353 Flurstücke).

7.1 ABAG-Index im Spitzenmonat (Maximum über die Saison)

Als Hauptkennzahl pro Ackerflurstück wird der maximale ABAG-Index über die sechs Monatsläufe (April bis September 2025) gebildet. Diese Aggregation wählt für jedes Flurstück implizit den phänologisch kritischsten Monat — den Zeitpunkt, an dem die Kombination aus Bodenbedeckung und Hangmorphologie den höchsten Indexwert ergibt.

Tabelle 1 fasst die zentralen Verteilungsgrößen zusammen. Die ABAG- und C-Faktor-Werte beziehen sich auf den Spitzenmonat, an dem der ABAG-Index für das jeweilige Flurstück seinen Höchstwert erreicht; der P-Faktor ist monatsinvariant.

Metrik im Spitzenmonat	P10	P50	P90
ABAG-Index	0,517	2,224	11,913
C-Faktor	0,150	0,374	0,728
P-Faktor (monatsinvariant)	0,518	0,787	0,967

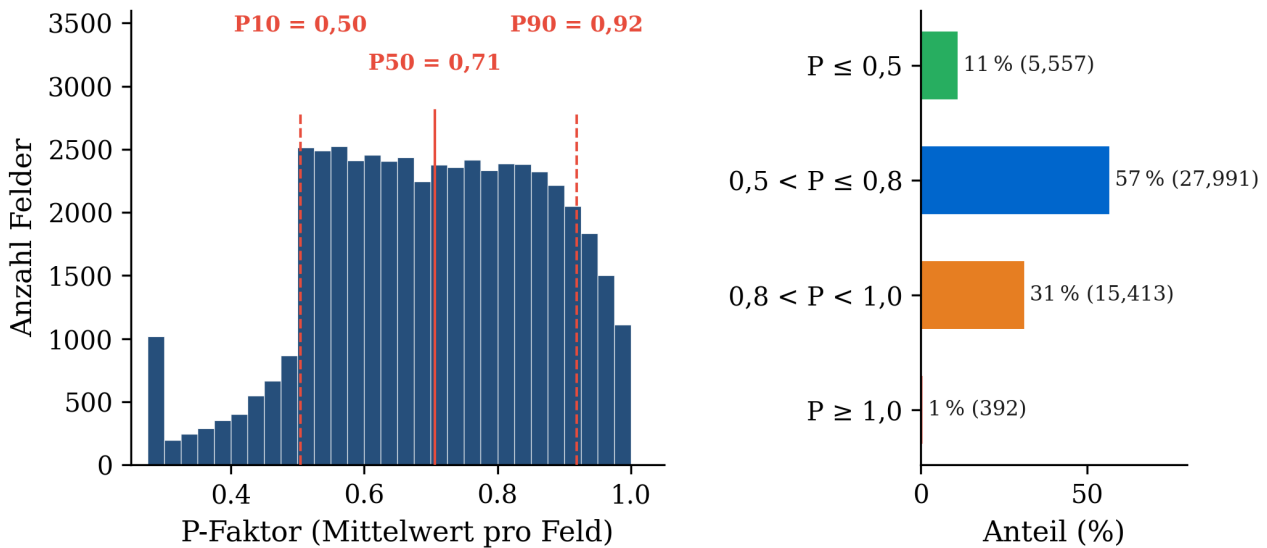


Abbildung 3: Verteilung des P-Faktors über 49.353 Ackerflurstücke. Links: Histogramm der flurstücksgemittelten P-Werte mit Perzentillinien (P10 = 0,518; P50 = 0,787; P90 = 0,967). Rechts: Stufenanteile der dreistufigen P-Faktor-Pipeline — GLÖZ 5 wirkt auf 2,1 % der Pixel, nDSM-Barrieren auf 47,8 %, geometrische Annahme auf 42,8 %; 7,3 % der Pixel verbleiben ohne anwendbaren Schutzmechanismus auf P = 1,0.

Tabelle 2 ergänzt den Saison-Mittelwert pro Flurstück über alle sechs Monate, als Vergleichsebene zu einem Lauf ohne Zeitauflösung.

Metrik (Saison-Mittel über 6 Monate)	P10	P50	P90
ABAG-Index	0,310	1,192	5,933
C-Faktor	0,111	0,168	0,355

Der Vergleich von Tabelle 1 und Tabelle 2 zeigt eine moderate Abschwächung der Risikospitzen, wenn zeitlich gemittelt wird: der P90 des ABAG-Index steigt vom Saison-Mittel (5,933) auf das Spitzenmonat-Maximum (11,913), der Median von 1,192 auf 2,224. Flurstücke, die in einem einzelnen Monat kritisch werden, in den übrigen Monaten aber unauffällig sind, würden in einem gemittelten Lauf aus der Priorisierungsliste fallen; die Maximum-Aggregation verhindert das.

Räumlich zeichnen sich Flurstücke mit hohen ABAG-Werten vor allem in den Reliefregionen Sachsen-Anhalts ab (Harz, Übergangslagen zur Börde, Altmark mit lokalen Steilhängen), aber auch in den intensiv ackerbaulich genutzten Lössflächen mit höheren K-Faktoren. Innerhalb dieser Großregionen variieren die Spitzenmonate deutlich, was die saisonale Dynamik des C-Faktors widerspiegelt (Abschnitt 7.2).

7.2 Saisonale Dynamik des ABAG-Index

Die monatliche Berechnung des C-Faktors einschließlich Stoppel-Override (Abschnitt 4.4) macht die phänologische Dynamik sichtbar, die ein wolkenfreies Einzelkomposit oder ein Saison-Mittel verdeckt. Tabelle 3 zeigt den flurstücksbezogenen ABAG-Index pro Monat für alle 49.353 Ackerflurstücke Sachsen-Anhalts.

Monat 2025	P10	P50	P90
April	0,165	0,974	5,968
Mai	0,172	0,924	5,315
Juni	0,189	0,915	4,897
Juli	0,307	1,523	9,301
August	0,200	0,912	5,119
September	0,220	0,981	5,134

Der Juli ist im Median der kritischste Monat ($P50 = 1,523$) und liegt rund 60 % über dem mittleren Median-Niveau der übrigen Monate. Aus drei Effekten setzt sich das Profil zusammen: Erstens lockert die beginnende Getreideernte die zuvor geschlossenen Bestände auf, ohne dass der Stoppelschutz schon wirksam wird. Zweitens fallen Mais und Hackfrüchte in der ersten Bestandsentwicklung noch durch verhältnismäßig hohe NDVI-basierte C-Werte ins Gewicht. Drittens stehen die Sommerregen klimatologisch im Zenit. August und September liegen mit 0,912 bzw. 0,981 deutlich unter dem Juli-Wert; in beiden Monaten greift auf den weit verbreiteten Getreide- und Rapsflächen der Stoppel-Override ($C = 0,10$), der in einer reinen NDVI-Variante einen scheinbaren Spätsommer-Peak erzeugt hätte (V4-Vorlauf: Aug-P50 1,628, Sep-P50 1,583; durch Stoppel-Override im Median um 38–44 % abgesenkt).

Verteilung des Spitzenmonats über die Flurstücke. Aus der Maximum-Aggregation ergibt sich für jedes Ackerflurstück der Spitzenmonat, in dem der ABAG-Index am höchsten liegt. Tabelle 4 zeigt die Verteilung; sie ist nicht gleichförmig.

Spitzenmonat	Ackerflurstücke	Anteil
April	14.133	28,6 %
Mai	3.787	7,7 %
Juni	2.755	5,6 %
Juli	19.176	38,9 %
August	5.349	10,8 %
September	4.153	8,4 %

Mit 38,9 % erreicht der Juli den klar höchsten Anteil und bildet die saisonale Spitze auf Flurstücksebene ab. Die zweitstärkste Häufung im April (28,6 %) entsteht auf Flurstücken, die im Frühjahr noch geringe Bodenbedeckung aufweisen (Saatbettbereitung, Vorerntefenster bei Sommerkulturen) und gleichzeitig durch die übrigen ABAG-Faktoren (K, L, S) topographisch oder pedologisch stark exponiert sind. August (10,8 %) und September (8,4 %) treten anschließend zurück: Hier dominieren die durch den Stoppel-Override nicht abgedeckten Kulturen, also vor allem Mais- und Hackfruchtflächen, deren erntebedingte Öffnung erst im Spätsommer einsetzt.

Die pixelweise Auflösung auf 10 m ermöglicht darüber hinaus eine innerflurstückliche Variabilität: Innerhalb eines Ackerflurstücks kann der C-Faktor räumlich variieren, etwa wenn ein Teil des Flurstücks unter Mais steht ($C \approx 0,40$) und ein Randstreifen als Grünland klassifiziert wird ($C \approx 0,004$).

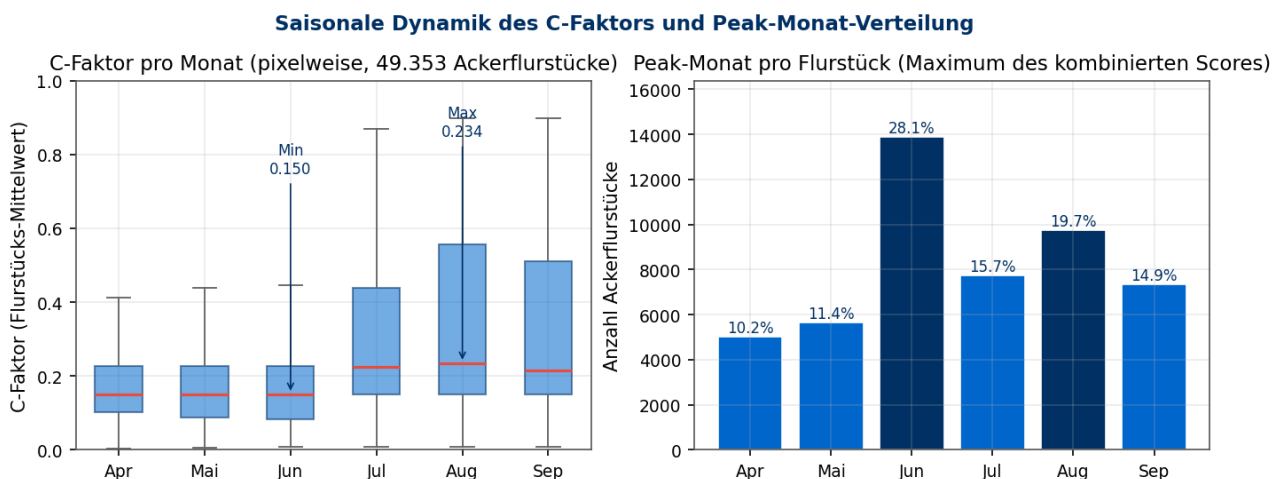


Abbildung 4: Saisonale Dynamik des C-Faktors in Sachsen-Anhalt 2025. Links: Monatliche Verteilungs-Boxplots über 49.353 Ackerflurstücke (April bis September). Rechts: Verteilung des Spitzenmonats, in dem pro Flurstück der maximale ABAG-Index erreicht wird.

7.3 Externe Kontextualisierung: CatRaRE-Starkregen

Um die saisonale C-Faktor-Dynamik in einen unabhängigen Referenzrahmen zu stellen, wurde der DWD-Starkregendatensatz CatRaRE (v2024.01) herangezogen.

Im Zeitraum 2001–2023 wurden für Sachsen-Anhalt rund 1.400 Starkregen-Events identifiziert; der überwiegende Anteil entfällt auf die Vegetationsperiode April bis September. Die saisonale Verteilung weist einen Schwerpunkt in den Sommermonaten auf, mit hohen Eventzahlen in Juni, Juli und August. Tabelle 5 fasst die zentralen Kennwerte aus der vorliegenden CatRaRE-Auswertung zusammen.

Merkmal	Wert
Starkregen-Events gesamt (2001–2023)	ca. 1.400
Anteil in der Vegetationsperiode (Apr–Sep)	überwiegend
Spitzenmonate (CatRaRE)	Juni, Juli, August
Räumliche Schwerpunkte	Börde, Harz, Altmark

Die räumlichen CatRaRE-Schwerpunkte (Börde, Harz und Altmark) decken sich mit den Reliefregionen, in denen auch der ABAG-Index hohe Werte zeigt. Saisonal liegen die Starkregenmonate im Sommer und treffen in den Monaten Juli bis September auf erhöhte C-Faktoren — wie sie in Tabelle 3 dokumentiert sind. Die externe Plausibilisierung stützt damit das saisonale Profil, ohne als formale Validierung des ABAG-Index zu fungieren.

7.4 Plausibilisierung gegen dokumentierte Erosionsereignisse

Zur externen Plausibilisierung auf Flurstücksebene wurden 38 dokumentierte Erosionsereignisse aus Sachsen-Anhalt herangezogen, die von der Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau (LLG) und dem Amt für Landwirtschaft, Flurneuordnung und Forsten (ALFF) im Zeitraum 2023–2025 erfasst wurden. Jedes Ereignis ist mit Datum, Koordinate und betroffener Fläche dokumentiert.

Die Gegenüberstellung mit den ABAG-Ergebnissen zeigt, dass die dokumentierten Erosionsflächen überwiegend hohe ABAG-Dispositionen aufweisen: Der ABAG-Index der betroffenen Ackerflurstücke liegt für alle 38 Fälle im oberen Quartil der landesweiten Verteilung. Erosion tritt damit bevorzugt auf Flächen auf, die topographisch und pedologisch prädisponiert sind, und die ABAG-Erweiterung identifiziert diese Flächen entsprechend.

Die Stichprobe von 38 Ereignissen ist zu klein, um eine quantitative Validierung des ABAG-Index hinsichtlich Falsch-Positiv- oder Falsch-Negativ-Rate vorzunehmen. Sie zeigt jedoch, dass die räumliche Disposition der dokumentierten Fälle durch die ABAG-Erweiterung in den oberen Bereich der Risikoverteilung eingeordnet wird, und liefert damit eine erste externe Plausibilisierung. Eine systematische Validierung gegen eine größere Stichprobe dokumentierter Ereignisse — etwa aus den Datenbeständen der LfL Bayern oder aus IACS-Cross-Compliance-Meldungen — ist Voraussetzung für die in Abschnitt 8.5 skizzierte Phase 2.

8. Diskussion

8.1 Was der Ansatz leistet

Der Beitrag der vorliegenden Arbeit liegt in der Verbindung dreier Bausteine zu einer reproduzierbaren ABAG-Erweiterung auf Landesebene: einem pixelweise und monatlich aufgelösten dynamischen C-Faktor (Van der Knijff in einer vierstufigen Kaskade mit fachlich begründetem Stoppel-Override), einem dreistufig abgeleiteten P-Faktor mit GLÖZ-5-Konditionalität, nDSM-Barrieren und einer geometrischen Annahme über die Feldkante, sowie einer blockweisen, neustartfähigen Verarbeitung auf 49.353 Ackerflurstücken. Damit werden zwei der häufigsten Schwächen pauschaler ABAG-Anwendungen adressiert: der grob aufgelöste C-Faktor (Steinhoff-Knopp et al., 2025; Matthews et al., 2023) und der pauschale P-Wert.

Die saisonale Dynamik des ABAG-Index zeigt einen klaren Spitzenmonat im Juli ($P_{50} = 1,523$), während August und September nach Stoppel-Override deutlich darunter zu liegen kommen (0,912 bzw. 0,981). Auf Flurstücksebene erreichen 38,9 % der Ackerflurstücke ihren kritischsten Punkt im Juli und 28,6 % im April — also nicht durchgängig im selben Monat. Eine zeitlich gemittelte ABAG-Anwendung würde diese Heterogenität nivellieren.

8.2 Stoppel-Override als methodische Verfeinerung

Der NDVI-basierte C-Faktor nach Van der Knijff et al. (2000) misst photosynthetisch aktives Pflanzenmaterial und unterschätzt damit systematisch die Schutzwirkung von Stoppelmulch nach der Getreide- und Rapserte. Tote Pflanzenrückstände sind im NDVI nicht detektierbar, tragen aber gemäß DIN 19708 (2022) erosionsmindernd bei (Bereich 0,05–0,15). In einem ungedämpften V4-Vorlauf führte das in den Monaten August und September zu einer methodisch verzerrten Spätsommer-Spitze (Aug-P50 1,628; Sep-P50 1,583), die agronomisch nicht plausibel ist, weil große Teile der Wintergetreide- und Rapsflächen zu diesem Zeitpunkt bereits stoppelbedeckt sind. Die V5-Variante setzt für die Klassen Wintergetreide, Winterweizen, Sommergetreide und Winterraps in den Monaten August und September einen festen C-Faktor von 0,10 (DIN-19708-Bereichsmittel) und überschreibt damit den NDVI-Wert dieser Stufe. Der Effekt ist deutlich: Der August-Median sinkt von 1,628 auf 0,912 (–44 %), der September-Median von 1,583 auf 0,981 (–38 %); der Spitzenmonat verschiebt sich von August/September auf Juli und entspricht damit der agronomischen Erwartung aus der Kombination von Sommerregen und noch geschlossenen Mais-Beständen. Eine Limitation bleibt: Der gewählte Wert von 0,10 ist ein DIN-19708-Bereichsmittel und schwankt real je nach Stoppelhöhe, Mulchdicke und mechanischer Nachbearbeitung; eine pixelweise Differenzierung ist im aktuellen Verfahrensstand nicht implementiert. Die Anpassung versteht sich damit als fachlich begründete methodische Verfeinerung, nicht als Korrektur einer numerischen Fehlspezifikation.

8.3 C-Faktor und Kulturartenklassifikation

Steinhoff-Knopp et al. (2025) zeigen, dass grobe C-Faktor-Informationen die Erosionsmodellierung systematisch verzerren. Die dreistufige C-Faktor-Kaskade in Abschnitt 4.4 begegnet diesem Befund durch pixelweise, monats- und kulturartenabhängige Werte. Die zugrundeliegende Kulturartenklassifikation (CT-NOW, Koschitzki et al., in Vorb.) wird hier nicht als eigenständige Wahrheitskarte verwendet, sondern als kulturartlicher Baustein der C-Faktor-Kaskade.

CT-NOW zielt im Kern auf sieben agronomische Hauptklassen: Wintergetreide, Sommergetreide, Mais, Hackfrüchte, Winterraps, Grünland und Brache. Diese Auflösung ist für die Erosionsmodellierung besonders geeignet, weil sie die relevanten C-Faktor-Gruppen abbildet und spektral schwer trennbare Einzelkulturen mit ähnlicher erosionsfachlicher Wirkung zusammenfasst. Feinere 10- und 13-Klassen-Ebenen stehen in CT-NOW als konfidenzgesteuerte Detailoptionen zur Verfügung, sind für die hier verwendete C-Faktor-Kaskade aber nachrangig.

Der Validitätsanspruch der CT-NOW-Klassifikation ist gestuft: In Nordrhein-Westfalen, Niedersachsen und Brandenburg stützt er sich auf deklarative LPIS-Labels; in den übrigen Bundesländern misst die Evaluation vor allem die Konsistenz gegenüber Thünen-CTM als offener fernerkundungsbasierter Referenz. Für die ABAG-Erweiterung bedeutet das: CT-NOW strukturiert die kulturartige C-Faktor-Ableitung, ersetzt aber weder amtliche InVeKoS-Daten noch eine unabhängige Bodenvalidierung der Kulturart auf jedem Flurstück.

8.4 P-Faktor und Schutzeffekte aus Landschaftsstrukturen

Der dreistufige P-Faktor adressiert eine Lücke der gängigen ABAG-Anwendung: Schutzeffekte aus Landschaftsstrukturen und Feldgeometrie werden in pauschalen P-Werten in der Regel nicht differenziert. Die nDSM-basierte Erkennung permanenter Strukturen (Hecken, Wälle, Gebäude) aus DOM1 – DGM1 erfasst eine Schutzquelle pixelweise, ohne flurstücksweise Außenaufnahmen. Die geometrische Annahme über die längste Feldkante setzt voraus, dass elongierte Felder häufig konturparallel angelegt sind — eine plausible, aber nicht für jedes Einzelfeld zutreffende Vermutung. Die GLÖZ-5-Stufe verankert die rechtliche Konditionalität an der Berechnung. Im Ergebnis bleiben nur 0,8 % der Flurstücke auf $P \geq 1,0$; 11 % erreichen $P \leq 0,5$. Eine empirische Validierung der P-Faktor-Ableitung gegen tatsächlich erfasste Bewirtschaftungsdaten steht aus.

8.5 Phase 2: Datengetriebene Ereigniswahrscheinlichkeiten als Forschungsperspektive

Die ABAG-Erweiterung beschreibt langfristige Disposition. Eine ereignisbezogene Wahrscheinlichkeit — also die Frage, ob auf einem konkreten Flurstück nach einem konkreten Niederschlagsereignis tatsächlich Erosion auftritt — wird mit dem ABAG-Pfad nicht beantwortet. Hierfür wäre ein datengetriebenes Modell nötig, das auf dokumentierten Erosionsereignissen trainiert ist. Der Ansatz von Batista et al. (2025) ist methodisch wegweisend: Auf einer Datenbasis von rund 1.790 Feldern mit über 70 Befliegungs-Terminen und visueller Klassifikation der Erosionsspuren konnten ML-Modelle Erosion mit hoher Trefferrate nowcasten.

Eine analoge Datenbasis für Sachsen-Anhalt liegt nicht vor. Aktuell liegen lediglich 38 dokumentierte Erosionsereignisse aus den Beständen von LLG und ALFF vor (Abschnitt 7.4), was für ein robustes ML-Training nicht ausreicht. Vorab durchgeführte Smoke-Tests mit den im vorliegenden Lauf erzeugten Geo- und Wettermerkmalen bestätigen diese Einschätzung indirekt: Klassifikatoren auf rein meteorologischen Schwellwert-Labels lernen im Wesentlichen die meteorologische Schwellwert-Definition zurück und liefern für die Frage nach beobachteter Erosion keinen substanziellen Erkenntnisgewinn. Eine ML-Komponente auf Schwellwert-Labels wurde daher aus dem Hauptpfad der vorliegenden Arbeit entfernt.

Realistisch erscheinen für eine Phase 2 drei Quellen dokumentierter Erosionsereignisse: erstens die langjährig aufgebauten Datenbestände der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) mit rund 4.240 erfassten Parzellen-Schadereignissen; zweitens IACS-Cross-Compliance-Meldungen aus Nordrhein-Westfalen, in denen Erosionsschäden im Rahmen der Konditionalität dokumentiert werden; drittens perspektivisch die VUMOP-Datenbank aus Tschechien, die einen längerfristigen, wenn auch geographisch versetzten Referenzdatensatz darstellt. Eine systematische Erschließung dieser Quellen, ihre methodische Harmonisierung und die Ableitung einer bundesländerübergreifenden Trainingsbasis sind ein eigenständiges Forschungsvorhaben, das über den Rahmen der vorliegenden Arbeit hinausgeht. Bis dahin bleibt die ABAG-Erweiterung der nachvollziehbare und datentechnisch realisierbare Pfad für ein flurstücksbasiertes Monitoring auf Landesebene.

9. Grenzen

Evidenztyp. Die ABAG-Erweiterung beschreibt langfristige Disposition, nicht beobachtete Erosion. Der ABAG-Index gibt ein Maß für die kombinierte Wirkung von Relief, Boden, Bedeckung und Bewirtschaftung — er sagt aber nicht aus, ob auf einem konkreten Flurstück tatsächlich Erosion stattgefunden hat. Eine ereignisbezogene Beobachtung erfordert dokumentierte Erosionsdaten, wie in Abschnitt 8.5 als Phase 2 skizziert.

Begrenzte flurstücksbasierte Validierung. Eine erste Plausibilisierung gegen 38 dokumentierte Erosionsereignisse von LLG und ALFF (Abschnitt 7.4) zeigt, dass alle dokumentierten Fälle im oberen Quartil der landesweiten ABAG-Verteilung liegen. Die Stichprobe ist jedoch zu klein, um die Falsch-Negativ-Rate reproduzierbar zu schätzen oder die räumliche Übertragbarkeit der Risikorangfolge zu bewerten. Ergänzend stützt die CatRaRE-Kontextualisierung (Abschnitt 7.3) die saisonale Plausibilität: Starkregenhäufungen treten in den Sommermonaten und in den Reliefregionen auf, in denen auch die ABAG-Werte hoch sind. Eine systematische Validierung gegen eine größere Stichprobe dokumentierter Ereignisse bleibt als nächster Schritt anzustreben.

Räumliche Übertragbarkeit. Die ABAG-Erweiterung wurde für Sachsen-Anhalt entwickelt und dort vollständig durchgerechnet. Strukturell ist der Ansatz nicht an ein bestimmtes Bundesland gebunden: Alle Eingangsdaten (DGM1, DOM1 aus den Landes-Geodatenportalen, Sentinel-2 über den europäischen Copernicus-Dienst, die CT-NOW-Kulturartenklassifikation) sind außerhalb Sachsen-Anhalts ebenfalls verfügbar, so dass eine Übertragung auf weitere Bundesländer nicht an der Datenbasis scheitert, sondern nur einen entsprechenden Lauf erfordert. Der ALKIS-Flurstücksabruf ist je Bundesland konfigurierbar, weil die Schnittstellen der Landesvermessungsverwaltungen unterschiedlich implementiert sind. Offen bleibt die Frage, inwieweit die regionale Klassifikationskonfidenz der Kulturartenklassifikation in pedoklimatisch distanten Regionen vergleichbar bleibt. Eine direkte Anwendung auf andere Bundesländer erfordert daher eine kurze Konfidenzprüfung auf der Ziel-Stichprobe, aber keine strukturelle Anpassung des Verfahrens.

Klassifikationskonfidenz. Die C-Faktor-Qualität hängt von der zugrundeliegenden Kulturartenklassifikation ab, deren Konfidenz und zeitliche Übertragbarkeit in Koschitzki et al. (in Vorb.) diskutiert werden. Für den vorliegenden Lauf liefert CT-NOW die kulturartige C-Faktor-Gruppe der Kaskade. Eine eigene Auswertung der Klassenverteilung und Konfidenz für den Sachsen-Anhalt-Lauf 2025 steht aus. Die Plausibilität der Kaskade wird im vorliegenden Lauf nur indirekt belegt: über die saisonale Spreizung des C-Faktors (Abschnitt 7.2) und die räumliche Übereinstimmung mit CatRaRE (Abschnitt 7.3).

Zeitbasis des dynamischen C-Faktors. Die monatliche NDVI-Ableitung für Stufe 1 der C-Faktor-Kaskade beruht im vorliegenden Lauf auf dem lokalen Sentinel-2-Kachelspeicher des Jahres 2025 (Monate April bis September). Der Nachbau entsprechender monatlicher NDVI-Komposite für weitere Jahre aus Sentinel-2-Rohszenen (Copernicus Data Space / Planetary Computer) ist technisch vorbereitet und als nächster Ausbauschritt vorgesehen; der Ansatz ist dafür ohne strukturelle Änderung tragfähig.

P-Faktor. Der P-Faktor wird über eine dreistufige Pipeline bestimmt (vgl. Abschnitt 6): GLÖZ-5-Override für Reihenkultur-Hangfelder ($P = 0,5$), nDSM-Barrieren (P bis $0,3$) und eine geometrische Annahme über die längste Feldkante relativ zur Fließrichtung ($P = 0,5-1,0$). Das Minimum über alle anwendbaren Stufen gewinnt. Im Ergebnis liegt der Median über alle Flurstücke bei $0,787$ ($P_{10} = 0,518$; $P_{90} = 0,967$). Die Stufenanteile pixelweise: GLÖZ 5 wirkt auf $2,1 \%$ der Pixel, nDSM-Barrieren auf $47,8 \%$, geometrische Annahme auf $42,8 \%$; $7,3 \%$ der Pixel verbleiben ohne anwendbaren Schutzmechanismus auf $P = 1,0$. Die Pipeline erfasst damit drei unabhängige Schutzquellen — Recht (GLÖZ 5), Landschaftsstruktur (nDSM) und Feldgeometrie — und differenziert deutlich stärker als eine rein nDSM-basierte Modulation. Flurstücksspezifische Bewirtschaftungsmaßnahmen (Grünstreifen, Konturpflügen) bleiben als vierte Stufe vorgesehen, erfordern jedoch Außendienstdaten und sind im vorliegenden Lauf nicht berücksichtigt.

10. Praktischer Nutzen

Bereits im jetzigen Stand eignet sich der Ansatz für die Vorprüfung und Priorisierung gefährdeter Flächen sowie für kartengestützte Dokumentation gegenüber Fachbehörden; daneben lassen sich Szenarien über C- und P-Varianten rechnen, etwa zur Wirkung von Querbewirtschaftung. Ein besonderer Zugewinn ist die pixelweise monatlich aufgelöste C-Faktor-Bestimmung: Auf $69,5 \%$ bis $81,1 \%$ der Ackerpixel (je nach Monat) liefert der NDVI-basierte Ansatz nach Van der Knijff pixelgenaue C-Werte; die übrigen $18,9 \%$ bis $30,5 \%$ werden durch das kulturartenbasierte CT-NOW-Raster aufgefangen. Eine pauschale C-Ersatzgröße spielt auf Ackerfläche praktisch keine Rolle mehr.

Übertragbarkeit auf andere Bundesländer. Die für Sachsen-Anhalt gezeigte Verarbeitungskette ist strukturell bundeslandübergreifend anwendbar. DGM1 und DOM1 stehen über die jeweiligen Landes-Geodatenportale bereit, Sentinel-2 über den europäischen Copernicus-Dienst, CT-NOW stellt eine bundesweit angelegte Kulturarten-Hinweisschicht bereit, K- und R-Faktor sind in den jeweiligen Bodenkarten oder als bundesweite Raster (DIN 19708) verfügbar. Die Übertragung auf ein weiteres Bundesland ist damit primär eine Frage der Rechenzeit, der flurstücksseitigen Schnittstellen-Konfiguration und einer kurzen Zielgebietsprüfung der CT-NOW-Konfidenz, nicht der grundsätzlichen Datenverfügbarkeit. Ein Einsatz in anderen Bundesländern erfordert daher keinen methodischen Umbau, sondern im Wesentlichen die Bereitstellung der jeweiligen Flurstücksgeometrien und die Dokumentation der lokalen Eingangsqualität.

11. Schlussfolgerung

Die vorliegende Arbeit beschreibt eine ABAG-Erweiterung für Sachsen-Anhalt, die zwei der häufigsten Schwächen pauschaler ABAG-Anwendungen adressiert: einen pixelweise und monatlich aufgelösten dynamischen C-Faktor in einer vierstufigen Kaskade aus Sentinel-2-NDVI, einem fachlich begründeten Stoppel-Override für Getreide- und Rapsflächen in Aug/Sep, dem CT-NOW-Kulturartenraster und einem Imperviousness-Schätzer; sowie einen dreistufigen P-Faktor aus GLÖZ-5-Konditionalität, nDSM-Barrieren und einer geometrischen Annahme über die Feldkante. Beides ist in einer reproduzierbaren, blockweise neustartfähigen Pipeline umgesetzt. Für Sachsen-Anhalt wurden 49.353 Ackerflurstücke mit 1.789.548 Pixeln in sechs Monatsläufen (April bis September 2025) ausgewertet. Aus den 296.118 Einzelbewertungen ergibt sich pro Flurstück der maximale ABAG-Index über die Saison; der kritischste Monat liegt für 38,9 % der Flurstücke im Juli, für 28,6 % im April.

Fachlich liegt der Beitrag in der Quantifizierung der saisonalen ABAG-Dynamik (Juli-P50 1,523, gegenüber 0,912–0,981 in den durch den Stoppel-Override gedämpften Monaten August und September) und in der nDSM-gestützten Differenzierung des P-Faktors (Median 0,787; nur 7,3 % der Pixel verbleiben ohne anwendbaren Schutzmechanismus). Beide Faktoren gehen unmittelbar in den ABAG-Index ein und verändern die Risikorangfolge gegenüber pauschal parametrisierten Anwendungen. Die externe Kontextualisierung mit dem DWD-Starkregendatensatz CatRaRE stützt die saisonale und räumliche Plausibilität der C-Faktor-Dynamik. Die erste Plausibilisierung gegen 38 dokumentierte Erosionsereignisse zeigt, dass die betroffenen Flurstücke im oberen Quartil der ABAG-Verteilung liegen.

Methodische Grenzen bleiben bestehen. Der Ansatz beschreibt langfristige Disposition, nicht beobachtete Erosion; eine quantitative Validierung gegen eine größere Stichprobe dokumentierter Ereignisse steht aus. Eine perspektivische Erweiterung um datengetriebene Ereigniswahrscheinlichkeiten (Phase 2, Abschnitt 8.5) — analog zu Batista et al. (2025) — ist konzeptionell vorgezeichnet, scheitert derzeit aber an einer ausreichend großen Trainingsbasis dokumentierter Erosionsereignisse für Sachsen-Anhalt. Realistische Quellen sind die LfL Bayern, IACS-Cross-Compliance-Meldungen aus Nordrhein-Westfalen sowie perspektivisch die VUMOP-Datenbank. Bis dahin bietet die vorliegende Erweiterung eine nachvollziehbare und datentechnisch realisierbare Grundlage für die flurstücksweise Priorisierung erosionsrelevanter Flächen auf Landesebene.

12. Reproduzierbarkeit

Quellcode, Konfigurationen, Render-Skripte für alle Abbildungen und der Ergebnisdatensatz liegen im Projektrepository. Letzterer umfasst sowohl die monatlich aufgelöste Rohtabelle (49.353 Flurstücke \times 6 Monate = 296.118 Einzelbewertungen) als auch die daraus abgeleitete Maximumtabelle (ein Eintrag pro Flurstück mit Spitzenmonat und maximalem ABAG-Index). Jeder Verarbeitungsblock und jeder Monatslauf ist über Laufprotokolle und Kontrollpunkte nachvollziehbar.

Eine interaktive Kartenansicht der Ergebnisse ist unter <https://workflow-now.de/modelle/erosionsradar/> öffentlich zugänglich. Die Konfiguration des vorliegenden Laufs ist unter der Versionsbezeichnung `abag-v2-dynamic-c` archiviert.

Anhang A — Eingangsdaten und Faktormappings

A.1 Eingangsdaten der ABAG-Erweiterung

Tabelle A1 fasst die Eingangsdaten zusammen, die in den ABAG-Index pro Pixel und Monat einfließen.

Gruppe	Größe	Beschreibung	Quelle
Topographie	Hangneigung	aus DGM1 abgeleitet	Geodatenportal Sachsen-Anhalt (DGM1-COG)
Topographie	Hanglänge	flurstücksbezogen, L-Faktor nach ABAG	DGM1
Boden	K-Faktor	Bodenerodierbarkeit nach ABAG	K-Faktor-Karte Sachsen-Anhalt
Niederschlag	R-Faktor	Erosivität, langjährig	DWD-basiertes R-Faktor-Raster
Bedeckung	C-Faktor (pixelweise, monatlich)	dreistufige Kaskade nach Abschnitt 4.4	Sentinel-2 NDVI / CT-NOW / Imperviousness
Bewirtschaftung	P-Faktor (pixelweise)	dreistufige Pipeline nach Abschnitt 6	GLÖZ 5 / DOM1 – DGM1 / ALKIS-Geometrie
nDSM	DOM1 – DGM1	Höhe permanenter Strukturen	Landesvermessung

A.2 C-Faktor-Mapping nach DIN 19708

Stufe 3 der C-Faktor-Kaskade (vgl. Abschnitt 4.4) bildet die sieben CT-NOW-Klassen auf C-Faktoren nach DIN 19708 (2022) ab.

CT-NOW-Klasse	C-Faktor
Mais	0,40
Hackfrüchte	0,35
Winterraps	0,20
Sommergetreide	0,17
Wintergetreide	0,10
Brache	0,03
Grünland	0,004

Stufe 1 (NDVI-dynamisch) berechnet den C-Faktor pixelweise nach $C = \exp(-2 \times \text{NDVI} / (1 - \text{NDVI}))$ (Van der Knijff et al., 2000) und überschreibt Stufe 3 dort, wo NDVI > 0,05 vorliegt. Stufe 2 (Stoppel-Override) setzt für die CT-NOW-Klassen Wintergetreide, Winterweizen, Sommergetreide und Winterraps in den Monaten August und September einen festen C-Faktor von 0,10 (DIN-19708-Bereichsmittel für Stoppelmulch, Bereich 0,05–0,15) und überschreibt damit die NDVI-Stufe (Stufe 1) gezielt dort, wo NDVI tote Pflanzenrückstände nicht erfassen kann. Stufe 4 (Versiegelungsschätzer aus dem Copernicus Imperviousness Layer) greift nur, wenn keine der vorgelagerten Stufen ein Signal liefert; andernfalls wird ein Pauschalwert von 0,15 als finaler Rückfallwert eingesetzt.

A.3 P-Faktor-Stufen

Drei Schutzquellen werden zu einem pixelweisen P-Faktor kombiniert; das Minimum der anwendbaren Stufen gewinnt.

Stufe	Auslöser	P-Wert
GLÖZ 5 (Konditionalität) nDSM-Barriere	Reihenkultur ($C \geq 0,30$; Mais, Rüben, Kartoffeln) und Hangneigung $> 2 \%$ permanente Strukturen $\geq 0,5$ m (Hecken, Wälle, Gebäude) aus DOM1 – DGM1	0,5 linear 1,0 (kei- ne) → 0,3 (\geq 3 m)
Geometrische Annahme (längste Kante)	Winkel der längsten Feldkante zur mittleren Fließrichtung (Aspect)	1,0 (par- al- lel zur Fall- li- nie) → 0,5 (quer zum Hang)

Felder ohne anwendbare Stufe erhalten den konservativen Rückfallwert $P = 1,0$.

13. Literatur

- Alewell, C., Borrelli, P., Meusburger, K., Panagos, P. (2019): Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *International Soil and Water Conservation Research* 7(3), 203-225. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004>
- Batista, P. V. G., Möller, M., Schmidt, K., Waldau, T., Seufferheld, K., Htitiou, A., Golla, B., Ebertseder, F., Auerswald, K., Fiener, P. (2025): Soil-erosion events on arable land are nowcast by machine learning. *CATENA* 251, 109080. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109080>
- Blickensdörfer, L., Tetteh, G. O., Gessner, U., Gocht, A. (2022): Mapping of crop types and crop sequences with combined time series of Sentinel-1, Sentinel-2 and Landsat 8 data for Germany. *Remote Sensing of Environment* 269, 112831. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112831>
- DIN 19708 (2022): Bodenbeschaffenheit — Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG. Deutsches Institut für Normung, Berlin.
- Eekhout, J. P. C., de Vente, J. (2020): How soil erosion model conceptualization affects soil loss projections under climate change. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 44(2), 212-232. <https://doi.org/10.1177/0309133319871937>
- Koschitzki, T. et al. (in Vorbereitung): CT-NOW — Hierarchische Kulturartenklassifikation aus Sentinel-2-Zeitreihen für Deutschland.
- Matthews, F., Verstraeten, G., Borrelli, P., Panagos, P. (2023): A field parcel-oriented approach to evaluate the crop cover-management factor and time-distributed erosion risk in Europe. *International Soil and Water Conservation Research* 11(4), 558-573. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2022.09.005>

Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L., Alewell, C. (2015): The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environmental Science & Policy* 54, 438-447. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>

Steinhoff-Knopp, B., Neuenfeldt, S., Erasmi, S., Saggau, P. (2025): Spatiotemporal detailed crop cover and management factor maps as agri-environmental indicators for soil erosion in Germany. *International Soil and Water Conservation Research*. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2025.06.002>

Van der Knijff, J. M., Jones, R. J. A., Montanarella, L. (2000): Soil Erosion Risk Assessment in Europe. European Soil Bureau, EUR 19044 EN. European Commission, Joint Research Centre, Ispra.