

BIKASA – Bildungsmodule für Klimaanpassungen für den Agrarsektor Sachsen-Anhalts

Endbericht zur den Arbeitspaketen AP 4 und AP 5

Dr. Markus Möller

Halle, 4. November 2019

TERRASYS geodatenanalyse (<https://terrasyt.github.io>) im Auftrag der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geowissenschaften und Geographie, AG Geoökologie, Halle (Saale)

Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund	5
2	Bodenerosion	5
2.1	Detektion von repräsentativen Feldblöcken	5
2.1.1	Reliefanalyse	7
2.1.2	Segmentierung und Datenintegration	7
2.2	Feldblockbewertung und -analyse	11
2.3	Dynamische Parametrisierung	20
2.3.1	Langjährige phasenspezifische Bodenbedeckung	20
2.3.2	Durchschnittliche tägliche Starkniederschläge	23
2.3.3	K-Faktor	25
2.4	Visualisierung von Steuerparametern der Bodenerosion	26
2.4.1	Hanglänge und -neigung	26
2.4.2	Bodenbeckung und Starkniederschlagsereignisse	29

Abbildungsverzeichnis

1	Fließschema (a) und R-Funktionen (b) zur Charakterisierung typischer Reliefsituationen mit hohem Erosionspotential und Detektion von repräsentativen Feldblöcken.	6
2	Lage des Testgebietes, Farbkomposit der Reliefattribute <i>Höhe über Tiefenlinie</i> , <i>Massenbilanzindex</i> und <i>Neigung</i> sowie Visualisierung des <i>LS</i> -Faktors	8
3	Visualisierung der Zusatzdaten <i>K-Faktor</i> , <i>Standorttyp</i> sowie <i>Geomorphographische Karte Sachsen-Anhalt</i> für die Detektion von repräsentativen Feldblöcken.	10
4	Visualisierung der Segmentierung anhand eines Beispieldfeldblockes (vgl. Abb. 2b).	12
5	Anteile der GMK-Klassen innerhalb der Standorttypen.	15
6	Cluster und Werteverteilungen der Variablen <i>K</i> , <i>LS</i> , <i>UL</i> , <i>US</i> sowie <i>MBI</i> (vgl. Tab. 2).	16
7	Flächenanteile der Feldblock-Standorttypen in Sachsen-Anhalt nach Anwendung des Auenfilters (<i>GMK-ID</i> > 1200; a) sowie des Erosionspotentialfilters (<i>V.TH</i> ≥ 7), des Überlappungsfilters (<i>V.OL</i> ≥ 80) und Flächengrößenfilters (b) (<i>V.OL</i> ≥ 20; vgl. Tab. 5).	17
8	Feldblockbezogene Ergebnisse der $VI^{K \times LS}$ -Bewertung im Testgebiet und Auflistung der Vergleichsindizes und korrespondierenden dominierenden Cluster (DT) für den gelb hervorgehobenen Beispieldfeldblock.	18
9	Flächenanteile der 20 häufigsten Bewertungsklassen in Sachsen-Anhalt für <i>LÖ</i> -Standorte (b) mit <i>GMK-Klasse</i> = 1200, <i>V.TH</i> ≥ 7 und <i>V.OL</i> ≥ 80.	19
10	Mediane phasenspezifischer Eintrittstermine phänologischer Winterweizen- (a) und Maisphasen (b) im Zeitraum 1993 bis 2018 für die <i>LÖ</i> -Standorte in Sachsen-Anhalt (vgl. Tab. 7).	22
11	Visualisierung der Parameter <i>Maximaler Stundenniederschlag</i> $N^{max,h}$ [mm/10] (a) und des Starkniederschlagsindikators <i>SNI</i> [$N(h) > 10\text{mm}$] (b) für den Kalendertag 170 des Jahres 2006.	23
12	Aufsummierte jährliche Verteilung des maximalen Tagesniederschlages $\Sigma(N^{max})$ (a) und des aufsummierten Starkniederschlagsindikators $\Sigma(SNI)$ (b) für das Gebiet des um 5 km erweiterten Beispieldfeldblocks (vgl. Abb. 4) und den Zeitraum 2006 bis 2018.	24
13	Einfluss der Hanglänge und Neigung auf das natürliche Erosionspotentials (a) des Beispieldfeldblocks (Abb. 8) sowie Veranschaulichung der Wirkung von Hangunterbrechungen (z.B. Blühstreifen) auf das Erosionspotential (b).	27
14	Zusammenhang zwischen phänologischen Entwicklungsstadien und Starkniederschlagsereignissen (a, b) und Visualisierung des täglichen aktuellen schlagbezogenen Erosionsrisikos (c, d) für Winterweizen (a, c) und Mais (b, d) sowie den Kalendertag 91 (1.4.) und den Beispieldfeldblock (Abb. 8). $VI^{K,L,S,E}$ – Vergleichsindizes des <i>K</i> -, <i>L</i> - und <i>S</i> -Faktors sowie des Feldblock-bezogenen Erosionspotentials.	30

15	Zusammenhang zwischen phänologischen Entwicklungsstadien und Starkniederschlagsereignissen (a, b) und Visualisierung des täglichen aktuellen schlagbezogenen Erosionsrisikos (c, d) für Winterweizen (a, c) und Mais (b, d) sowie den Kalendertag 131 (11.5.) und den Beispieldfeldblock (Abb. 8). $VI^{K,L,S,E}$ – Vergleichsindizes des K-, L- und S-Faktors sowie des Feldblock-bezogenen Erosionspotentials.	31
16	Zusammenhang zwischen phänologischen Entwicklungsstadien und Starkniederschlagsereignissen (a, b) und Visualisierung des täglichen aktuellen schlagbezogenen Erosionsrisikos (c, d) für Winterweizen (a, c) und Mais (b, d) sowie den Kalendertag 166 (15.6.) und den Beispieldfeldblock (Abb. 8). $VI^{K,L,S,E}$ – Vergleichsindizes des K-, L- und S-Faktors sowie des Feldblock-bezogenen Erosionspotentials.	32
17	Zusammenhang zwischen phänologischen Entwicklungsstadien und Starkniederschlagsereignissen (a, b) und Visualisierung des täglichen aktuellen schlagbezogenen Erosionsrisikos (c, d) für Winterweizen (a, c) und Mais (b, d) sowie den Kalendertag 193 (12.7.) und den Beispieldfeldblock (Abb. 8). $VI^{K,L,S,E}$ – Vergleichsindizes des K-, L- und S-Faktors sowie des Feldblock-bezogenen Erosionspotentials.	33
18	Zusammenhang zwischen phänologischen Entwicklungsstadien und Starkniederschlagsereignissen (a, b) und Visualisierung des täglichen aktuellen schlagbezogenen Erosionsrisikos (c, d) für Winterweizen (a, c) und Mais (b, d) sowie den Kalendertag 208 (27.7.) und den Beispieldfeldblock (Abb. 8). $VI^{K,L,S,E}$ – Vergleichsindizes des K-, L- und S-Faktors sowie des Feldblock-bezogenen Erosionspotentials.	34
19	Zusammenhang zwischen phänologischen Entwicklungsstadien und Starkniederschlagsereignissen (a, b) und Visualisierung des täglichen aktuellen schlagbezogenen Erosionsrisikos (c, d) für Winterweizen (a, c) und Mais (b, d) sowie den Kalendertag 243 (31.8.) und den Beispieldfeldblock (Abb. 8). $VI^{K,L,S,E}$ – Vergleichsindizes des K-, L- und S-Faktors sowie des Feldblock-bezogenen Erosionspotentials.	35
20	Zusammenhang zwischen phänologischen Entwicklungsstadien und Starkniederschlagsereignissen (a, b) und Visualisierung des täglichen aktuellen schlagbezogenen Erosionsrisikos (c, d) für Winterweizen (a, c) und Mais (b, d) sowie den Kalendertag 274 (1.10.) und den Beispieldfeldblock (Abb. 8). $VI^{K,L,S,E}$ – Vergleichsindizes des K-, L- und S-Faktors sowie des Feldblock-bezogenen Erosionspotentials.	36

Tabellenverzeichnis

1	fTaSA: Parameter.	9
2	Mit der RSAGA::rsaga-geoprocessor-Funktion berechnete Reliefattribute und die dabei verwendeten SAGA GIS-Bibliotheken (lib) und -Module (module). [DHM] – Name des digitalen Höhenmodells.	9

3	Übersicht der Zusatzdaten für die Detektion von repräsentativen Feldblöcken.	12
4	fZonast: Parameter.	13
5	fComparIx: Parameter.	13
6	<i>Variablenbedeutung (VB), Bestimmtheitsmaß (R^2) und Root Mean Square Error (RMSE) der Random Forest-Analyse für LÖ-Standorte in Sachsen-Anhalt für die Beziehung entsprechend Gleichung (2).</i>	19
7	Namen und Zahncodes beginnenender phänologischer DWD-Phasen (DWD, 2015) sowie korrespondierende BBCH-Codes (Bleiholder et al., 2001).	21
8	fDetectDoy: Parameter.	21
9	Beziehung zwischen phänologischen Phasen und Bodenbedeckungen (BB; nach Schmidt et al., 1996, vgl. Tab. 7, SB – Saatbett, B – Brache).	21
10	fHeavyRain: Parameter.	25
11	Mediane der K-Faktorenvergleichsindizes (VI^K) in Abhängigkeit von ihrer Zugehörigkeit zum Standorttyp (vgl. Abb. 3a u. b).	25
12	fPara: Parameter.	26
13	fPhenoRain: Parameter.	27
14	fMap: Parameter.	28

1 Hintergrund

Im Rahmen Projektvorhabens *Bildungsmodule zur Klimaanpassung für den Agrarsektor Sachsen-Anhalts* (BiKASA) ist die Unternehmung TERRASYS geodatenanalyse an der Bearbeitung der Arbeitspakete AP 4 (Entwicklung von BiKASA-Online-Lernmodulen) und AP 5 (Definition von Fallbeispielen und Szenarien) sowie AP 6 (Organisation und Durchführung von Workshops und Feldtagen) beteiligt:

- Der Bearbeitungsschwerpunkt innerhalb der Arbeitspakete AP 4 und AP 5 liegt in der Entwicklung von Modulen zur interaktiven Bodenerosionsbewertung und Steuerung des Bodenwasserhaushaltes für ausgewählte Testgebiete in repräsentativen Agrarräumen Sachsen-Anhalts. Dabei kommen vereinfachte Modelle und Algorithmen mit geringem Parametrisierungsbedarf zur Anwendung, mit denen die grundlegenden Einflussfaktoren der Bodenerosion (z.B. Volk et al., 2010) und die wichtigsten Komponenten des Bodenwasserhaushaltes abgebildet werden können (z.B. Allen et al., 1998).
- Die Tätigkeiten im Paket AP 6 umfassen die technische Betreuung und Erläuterung der Modellierungsmodelle während der geplanten Workshops und Feldtage.

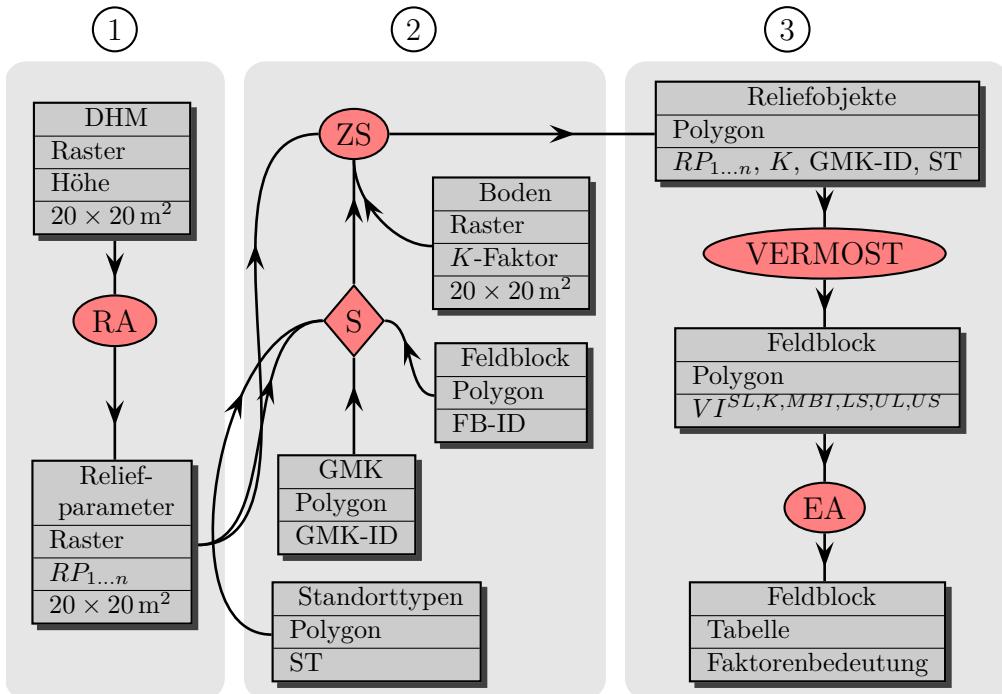
Der Schwerpunkt des Endberichts liegt in der Ergebnisdarstellung der Arbeitspakete AP 4 und AP 5, wobei sich thematisch auf den Themenbereichen "Bodenerosion" (Kap. 2) fokussiert wird.

2 Bodenerosion

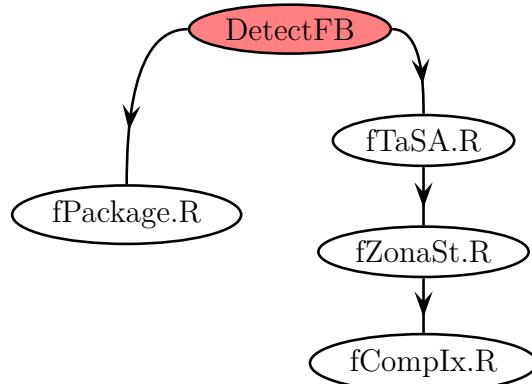
Bodenerosion ist das Ergebnis einer Störung des Faktorengleichgewichtes zwischen Niederschlag, Relief, Boden und Bodenbedeckung, wobei zeitlich stabile (Bodenart, Relief) und variable Faktoren (Niederschlag, Bodenbedeckung) unterschieden werden können (Volk et al., 2010). Die im Folgenden beschriebene zweistufige Vorgehensweise zielt zunächst auf die Detektion von repräsentativen Feldblöcken mit einer hohen potentiellen Erosionsgefährdung durch Wasser in Sachsen-Anhalt (Kap. 2.1). Dabei werden nur die Boden- und Reliefverhältnisse betrachtet. Im Anschluss werden Feldblöcke mit dynamischen Bodenerosionsfaktoren hinsichtlich einer typischen phasenspezifischen Bodenbedeckung (Kap. 2.3.1) und Starkniederschlagsverteilung während einer Vegetationsperiode parametrisiert (Kap. 2.3.2). Am Beispiel eines repräsentativen anonymisierten Feldblocks erfolgt in Kapitel 2.4 die Visualisierung der Steuerparameter Bodenbedeckung, Starkniederschläge sowie Hanglänge und -neigung.

2.1 Detektion von repräsentativen Feldblöcken

Abbildung 1a veranschaulicht die prinzipielle Vorgehensweise, die sich in die drei Schritte 1. Reliefanalyse, 2. Datenintegration sowie 3. Feldblockbewertung und -analyse gliedert. Abgesehen von der Reliefobjektbildung sind alle Schritte der Prozesskette innerhalb der Programmumgebung R in Form von Funktionen umgesetzt worden



(a) DHM – Digitales Höhenmodell | RA — Reliefanalyse | RP — Reliefparameter | ZS — Zonale Statistik | S – Segmentierung | GMK — Geomorphographische Karte 1:25000 | ST — Standorttyp | FB — Feldblock | VI — Vergleichsindex | SL — Bodenabtrag | K — K-Faktor | MBI — Massenbilanzindex | LS — LS-Faktor | UL — Hanglängenfaktor | US — Hangneigungsfaktor | EA – Erosionsanalyse.



(b)

Abbildung 1: Fließschema (a) und R-Funktionen (b) zur Charakterisierung typischer Reliefsituationen mit hohem Erosionspotential und Detektion von repräsentativen Feldblöcken.

(R Core Team, 2018). Die **R**-Funktionen und ihre gegenseitigen Abhängigkeiten sind in Abbildung 1b dargestellt. Danach besteht das BIKASA_DetectFB-Projekt aus fünf Funktionen, die auf der GitHub-Plattform¹ dokumentiert sind.

2.1.1 Reliefanalyse

Bei der Reliefanalyse kamen Funktionen der Programmumgebung SAGA GIS zur Anwendung (Conrad et al., 2015), um Reliefparameter abzuleiten, die eine feldblockbezogene Bewertung des reliefbedingten Erosionspotentials erlauben. Das betrifft in erster Linie den Hanglängen- und Hangeigungsfaktor (*UL* u. *US*), den *LS*-Faktor sowie den Massenbilanzindex (*MBI*). *LS*-Faktor und *MBI* sind in Abbildung 2 anhand eines Beispielgebietes dargestellt. Als Eingangsdatensatz diente ein digitales Höhenmodell mit einer Rasterweite von 20 m² (DHM 20) des Landes Sachsen-Anhalt.

In der **R**-Funktion `fTaSA()`² sind die verwendeten Berechnungsmethoden und in Tabelle 1 die Funktionsparameter dokumentiert. Tabelle 2 enthält eine Übersicht der resultierenden Reliefattribute sowie der verwendeten SAGA GIS-Bibliotheken (`lib`) und -module (`module`), die über das **R**-Paket RSAGA mithilfe der Codenumgebung 1 ange- sprochen werden.

Code 1: RSAGA-Funktion für den Aufruf von SAGA GIS-Bibliotheken.

```
rsaga.geoprocessor(lib = "...",  
module = ...,  
param=list(...))
```

2.1.2 Segmentierung und Datenintegration

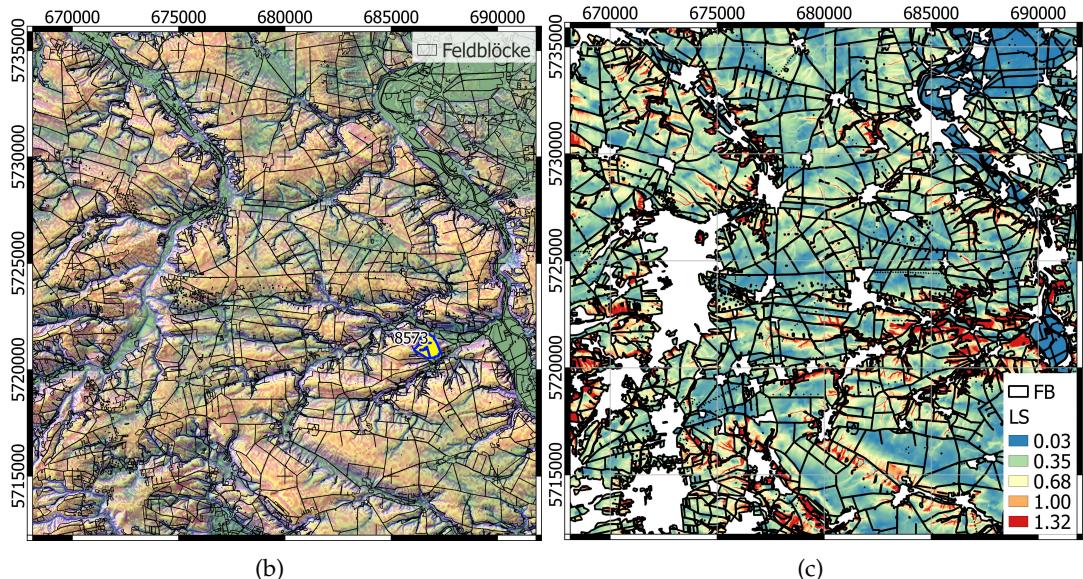
Die Reliefattribute *VDC*, *MBI*, *TWI* und *SLP* (vgl. Tab. 2) bilden die Grundlage für die Anwendung eines regionenbasierten Segmentierungsverfahrens. Dabei werden Rasterzellen zusammengefasst, wenn sie sowohl räumliche Nachbarn im Rasterdatensatz als auch Nachbarn innerhalb des n-dimensionalen Merkmalsraumes der Reliefattribute sind (Möller et al., 2008, 2012; Möller & Volk, 2015). Die räumliche Ausprägung der resultierenden Reliefobjekte ist abhängig vom Aggregationsgrad, der nutzerspezifisch angepasst werden kann. Die Größe der Reliefobjekte innerhalb eines Aggregationsniveaus wird durch die Heterogenität der Reliefs bzw. der korrespondierenden Relief- parameter bestimmt. Das heißt beispielsweise, dass Reliefobjekte in Auenbereichen in der Regel größer sind als in stark reliefierten Landschaften. Das Regionenwachstum beginnt bei lokalen Werteminima und stoppt, bis eine vom Anwender zu bestimmende Merkmasheterogenität der resultierenden Reliefobjekte erreicht wird, die wiederum im Zusammenhang mit der Objektgrößenverteilung steht. Als zusätzliches Haltekriterium können bestehende Grenzen herangezogen werden. Hier fanden die Grenzen der

¹https://github.com/terrasyss/BIKASA_DetectFB

²https://github.com/terrasyss/BIKASA_DetectFB/blob/master/_functions/fTaSA.R



(a)



(b)

(c)

Abbildung 2: Lage des Testgebietes (a), Farbkomposit der *Reliefattribute Höhe über Tiefelinie, Massenbilanzindex und Neigung* (b) sowie Visualisierung des LS-Faktors (c).

Tabelle 1: fTaSA: Parameter.

Parameter	Erläuterung
W.DIR	Arbeitsordner
IN.DIR	Ordner mit Eingangsdaten (hier: Geländemodell)
DEM	Name des Geländemodells (ohne Dateiendung)
OUT.DIR	Ordner mit Ergebnisdateien (Tab. 2)
FB	Name der Feldblockdatei (ESRI-Shapedatei mit Dateiendung)

Tabelle 2: Mit der RSAGA::rsaga-geoprocessor-Funktion berechnete Reliefattributte und die dabei verwendeten SAGA GIS-Bibliotheken (lib) und -Module (module). [DHM] – Name des digitalen Höhenmodells.

Reliefattribut	Erläuterung	lib	module
[DHM].FILL.sgrd	DHM mit gefüllten Senken	ta_preprocessor	3
[DHM].SHD.sgrd	DHM mit Reliefschummerung	ta_compound	0
[DHM].CI.sgrd	Konferenzindex	ta_compound	0
[DHM].TWI.sgrd	Bodenfeuchteindex	ta_compound	0
[DHM].VDC.sgrd	Höhe über Tiefenlinie	ta_morphometry	0
[DHM].RSP.sgrd	Relative Hangposition	ta_compound	0
[DHM].SLP.sgrd	Neigung	ta_morphometry	0
[DHM].MBI.sgrd	Massenbilanzindex	ta_morphometry	10
[DHM].TCI.sgrd	Reliefklassifikationsindex	ta_hydrology	24
[DHM].FB-UA.sgrd	Hangseitige Fläche	ta_hydrology	25
[DHM].FB-UL.sgrd	Hangseitige Länge	ta_hydrology	25
[DHM].FB-US.sgrd	Hangseitige Neigung	ta_hydrology	25
[DHM].FB-LS.sgrd	Kombinierter Hanglängen- und Hangneigungsfaktor	ta_hydrology	25
[DHM].BLC.sgrd	Massenbilanz	ta_hydrology	25

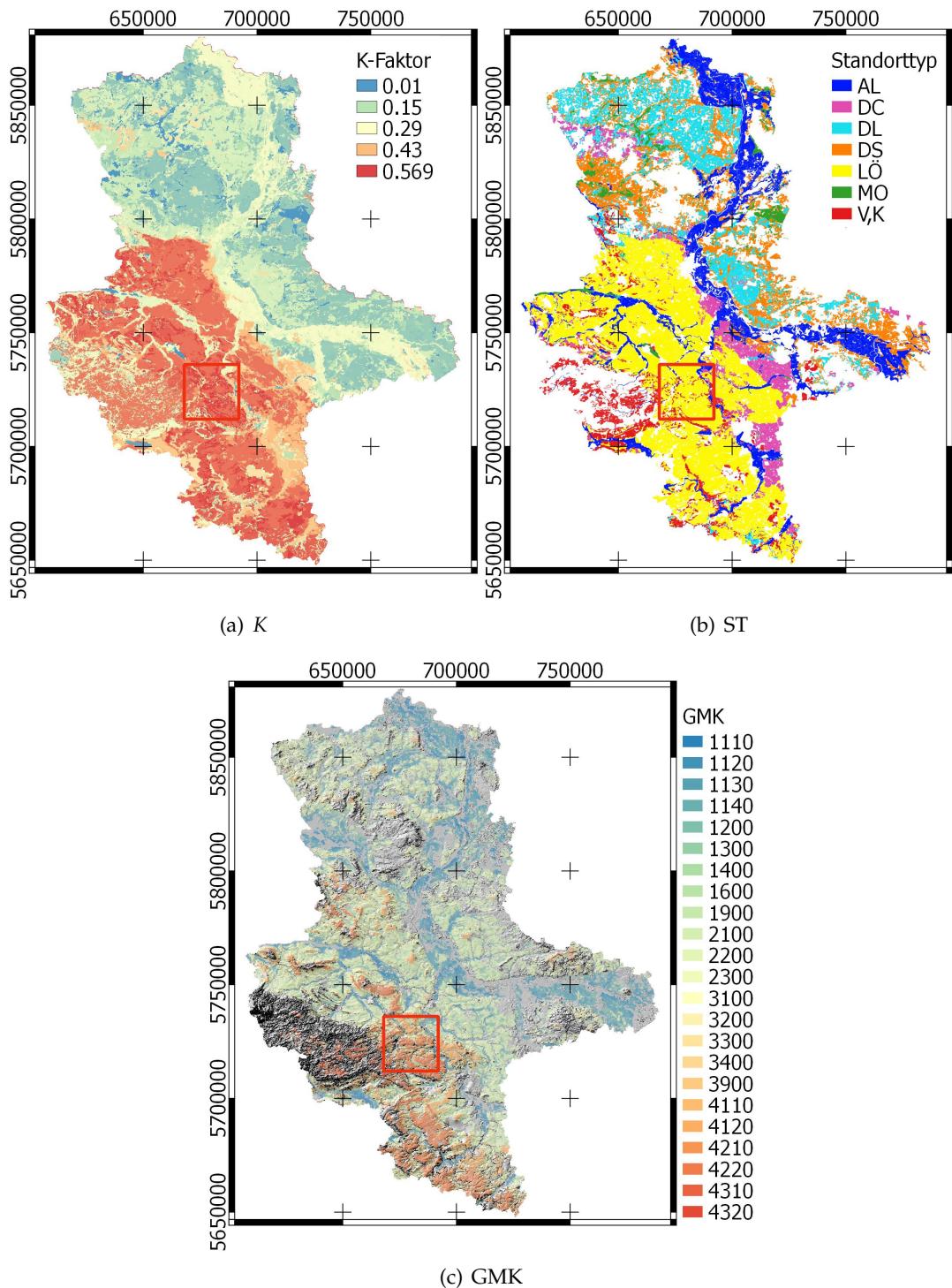


Abbildung 3: Visualisierung des K -Faktors (a), des *Standorttyps* (ST) (b) sowie der *Geomorphographischen Karte* (c) für die Detektion von repräsentativen Feldblöcken.

Geomorphographischen Karte 1:25 000 (GMK 25) und geologischen Entstehung (Standorttypen) sowie die Feldblockgeometrien Eingang in die Segmentierungsprozedur (Tab. 3; Abb. 3).

Abbildung 4 illustriert das Segmentierungsergebnis am Beispiel eines Feldblockes im Lösshügelland Sachsen-Anhalts. Jedes Segment wird durch die bei der Segmentierung verwendeten Reliefattribute *VDC*, *MBI*, *TWI* und *SLP* sowie durch Feldblock- und GMK 25-Attribute charakterisiert. Die Segmente können mittels zonaler Statistik um zusätzliche Attribute erweitert werden, was mit der Funktion *fZonast()*³ bewerkstelligt werden kann. In Tabelle 4 sind die Funktionsparameter erläutert. Danach sind das Segmentierungsergebnis und der Ordner zu definieren, in dem die zu integrierenden Attribute abgelegt sind. Das betrifft neben den in Tabelle 2 auflisteten Reliefattributen auch die Bodenerodierbarkeit (*K*-Faktor; Tab. 3), die die Anfälligkeit der Böden gegenüber Wassererosion charakterisiert (Schwertmann et al., 1990; Steininger et al., 2010). Bei den Reliefattributen sind der *Massenbilanzindex* (Möller & Volk, 2015) sowie der *Hanglängen- und Neigungsfaktor* von besonderer Relevanz (Moore & Wilson, 1992).

Die grundlegende Funktion der zonalen Statistik ist im Codebeispiel 2 dargestellt. Danach wird Modul 2 der RSAGA GIS-Bibliothek *shapes_grid* aufgerufen. Als Eingangsdaten dienen der Polygondatensatz (*POLYGONS*; hier: Segmentierungsergebnis) und der jeweilige Rasterdatensatz (*GRIDS*).

Code 2: RSAGA-Funktion der zonalen Statistik.

```
rsaga.geoprocessor(lib="shapes_grid",
module=2,
param=list(GRIDS=...),
POLYGONS=...,
MAX=1))
```

2.2 Feldblockbewertung und -analyse

Das Datenintegrationsergebnis ermöglicht eine Charakterisierung von Feldblöcken mit einem hohen Erosionspotential hinsichtlich ihrer Boden- und Reliefsituation. Dazu sind zunächst alle Feldblöcke in Sachsen-Anhalt durch die Anwendung der *Vergleichsmethode Standort* (VERMOST; Deumlich et al., 2006) einer Bewertung unterzogen worden. Entsprechend Gleichung (1) werden dabei kontinuierliche Parameter kategorisiert, wobei die Kategorien numerischer Bewertungsklassen einem frei wählbaren ganzzahligen Wertebereich zwischen 1 und n entsprechen. Bei der Berechnung des Vergleichsindex *VI* werden für jede beliebige Bezugseinheit die Bewertungskategorien *C* mit dem Anteil der jeweiligen Bewertungsklassen A^{C_i} multipliziert und durch die Anzahl der Bewertungskategorien *n* geteilt. Der Wertebereich der *VI*-Werte liegt zwischen 1 und 10, wobei der Wert 1 für eine geringe und der Wert 10 für hohe Bewertungsklasse steht. Die Kategorisierung der kontinuierlichen Parameter ist durch die Anwendung des Clusteralgorithmus *mclust* realisiert worden, der im gleichnamigen **R**-Paket implementiert ist.

³https://github.com/terrasyss/BIKASA_DetectFB/blob/master/_functions/fZonaSt.R

Tabelle 3: Übersicht der Zusatzdaten für die Detektion von repräsentativen Feldblöcken.

Zusatzdaten	Erläuterung	Quelle
K-Faktor	Faktor der Bodenerosivität	Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt
Standorttypen	Gruppen der geologischen Entstehung	Schmidt & Diemann (1974, 1981)
Feldblöcke	Feldblöcke des Integrierten Verwaltungs- und Kontrollsysteams (InVeKoS) sowie Landwirtschaftlichen Feldblockkatasters (LFK)	Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie (MULE) Sachsen-Anhalt
GMK25	Geomorphographische Karte 1:25 000	Köthe & Wurbs (2017)

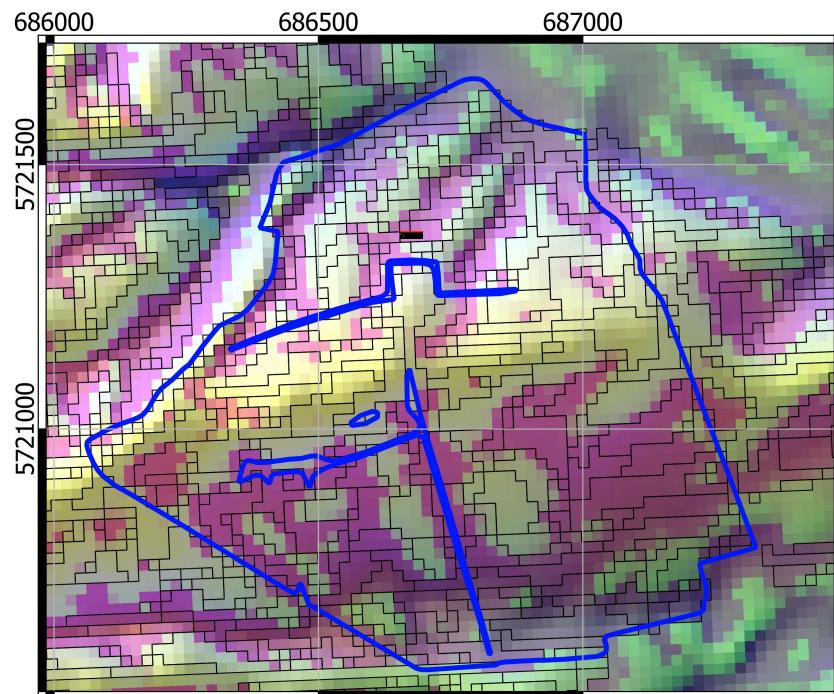


Abbildung 4: Visualisierung der Segmentierung anhand eines Beispieldfeldblocks (vgl. Abb. 2b).

Tabelle 4: fZonast: Parameter.

Parameter	Erläuterung
W.DIR	Arbeitsordner
SHP.DIR	Ordner mit Segmentierungsergebnis
SHP	Name des Segmentierungsergebnis (Shapedatei mit Dateiendung)
RASTER.DIR	Ordner mit Rasterdaten im asc-Format
OUT.DIR	Ordner mit Ergebnisdateien

Tabelle 5: fComparIx: Parameter.

Parameter	Erläuterung
W.DIR	Arbeitsordner
IN.DIR	Ordner mit Eingangsdaten
SHP	Name des parametrisierten Segmentierungsergebnis (Shapedatei mit Dateiendung; Ergebnis der fZonaSt ()-Funktion)
OUT.DIR	Ordner mit Ergebnisdateien
V.CN	Anzahl der Cluster
V.GMK	GMK-Klasse zur Auendetektion
V.MBI	Name des Spalte mit <i>MBI</i> -Werten
V.SLP	Name des Spalte mit Neigungswerten
V.K	Name des Spalte mit <i>K</i> -Faktorwerten
V.US	Name des Spalte mit <i>US</i> -Werten
V.UL	Name des Spalte mit <i>UL</i> -Werten
V.LS	Name des Spalte mit <i>LS</i> -Faktorwerten
V.OL	Überlappungsfilter: Anteil ($V.OL \in [0, 100]$) einer Standorttypklasse in einem Feldblock
V.TH	Erosionspotentialfilter: Schwellenwert ($V.TH \in [0, 10]$), ab welchem Vergleichsindex der natürlichen Bodenerosiongefährdung ($CI^{K \times LS}$) ein Feldblock als erosionsgefährdet angesehen wird
V.HA	Flächengrößenfilter: minimale Feldblockgröße

tiert ist (Fraley & Raftery, 2002; Scrucca et al., 2006). Dabei folgt die Nummerierung der Cluster der Rangfolge der geclusterten Variablenmittelwerte.

$$VI = \frac{\sum_i^n (C_i \times A^{C_i})}{n \times 10} \quad (1)$$

Clusteranalyse und Vergleichsindexberechnung wurden mit der R-Funktion `fComparaIx()`⁴ durchgeführt (Tab. 5). Die Vorgehensweise der Feldblockbewertung gliedert sich in drei Schritte:

1. Nach dem Import des parametrisierten Segmentierungsergebnisses werden für die weitere Analyse Auenbereiche ausmaskiert. Dazu muss eine GMK-Klasse bestimmt werden, die als Schwellenwert zwischen Auen- und Nichtauenbereichen in Sachsen-Anhalt angesehen wird (vgl. Abb. 3c). Für Sachsen-Anhalt wurde der Schwellenwert GMK-Klasse = 1200 bestimmt, der sich aus Abbildung 5 abgeleitet. Dort sind die GMK-Klassenanteile innerhalb der Standorttypen dargestellt. Der Standorttyp *AL* bzw. *Alluvium* repräsentiert dabei fluvial beeinflusste Bodenlandschaften, was mit der Verteilung der GMK-Klassen 1110 bis 1200 korrespondiert. In Abbildung 7a sind die Flächenanteile der Standorttypen nach der Auenfilterung dargestellt. Danach reduziert sich die zu bewertende Fläche um etwa 30 %.
2. Die Clusteranalyse des Nicht-Auenbereiches Sachsen-Anhalts ist für die Variablen *LS*, *MBI*, *K*, *UL*, *US* sowie *Enat* ($= LS \times K$) durchgeführt worden. In Anlehnung an Deumlich et al. (2006) wurde eine Clusteranzahl von *V.CN* = 6 gewählt. Abbildung 6 zeigt die Cluster und korrespondierenden Werteverteilungen der Variablen.
3. Zur Bewertung der Feldböcke hinsichtlich ihrer relief- und bodenbedingten Erosionspotentials wurden die Vergleichsindizes der Variablen *US*, *UL* und *MBI* kombiniert. Für die Variable *MBI* sind zwei Vergleichsindizes berechnet worden, die sich in der Bewertungsrichtung unterscheiden: Bei der Variante VI^{MBI^1} sind hohe Bewertungsklassen an konvexe bzw. steile Hangbereiche und bei der Variante VI^{MBI^2} an konkave Akkumulationsbereiche gekoppelt. Abbildung 8 veranschaulicht die Ergebnisse der VI^{Enat} -Bewertung im Testgebiet. Danach wird jeder Feldblock durch einen Bewertungscode charakterisiert, der die boden- und reliefbezogenen Vergleichsindizes zusammenfasst. Jede einzelne Ziffer des fünfstelligen Codes ist ein Indikator für die Stärke folgender Eigenschaften:
 - a) VI^K : Anteil von Bodenerosivitätsklassen,
 - b) VI^{US} : Anteil von Hangbereichen mit großer Hangneigung,
 - c) VI^{UL} : Anteil hoher Hanglänge,
 - d) VI^{MBI^1} : Anteil von Hangbereichen mit hoher und konvexer Hangneigung sowie
 - e) VI^{MBI^2} : Anteil von Akkumulationsbereichen .

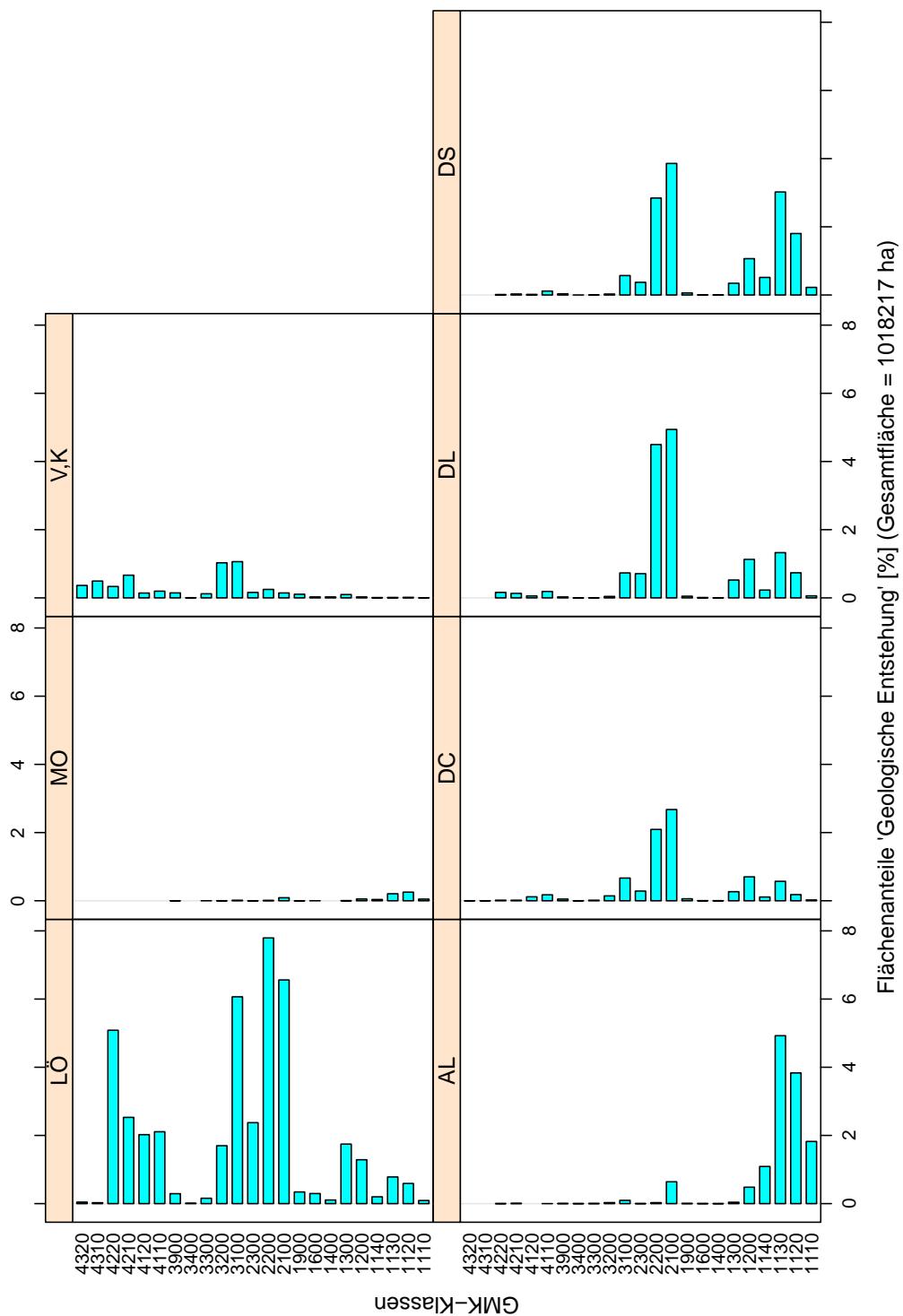


Abbildung 5: Anteile der GMK-Klassen innerhalb der Standorttypen.

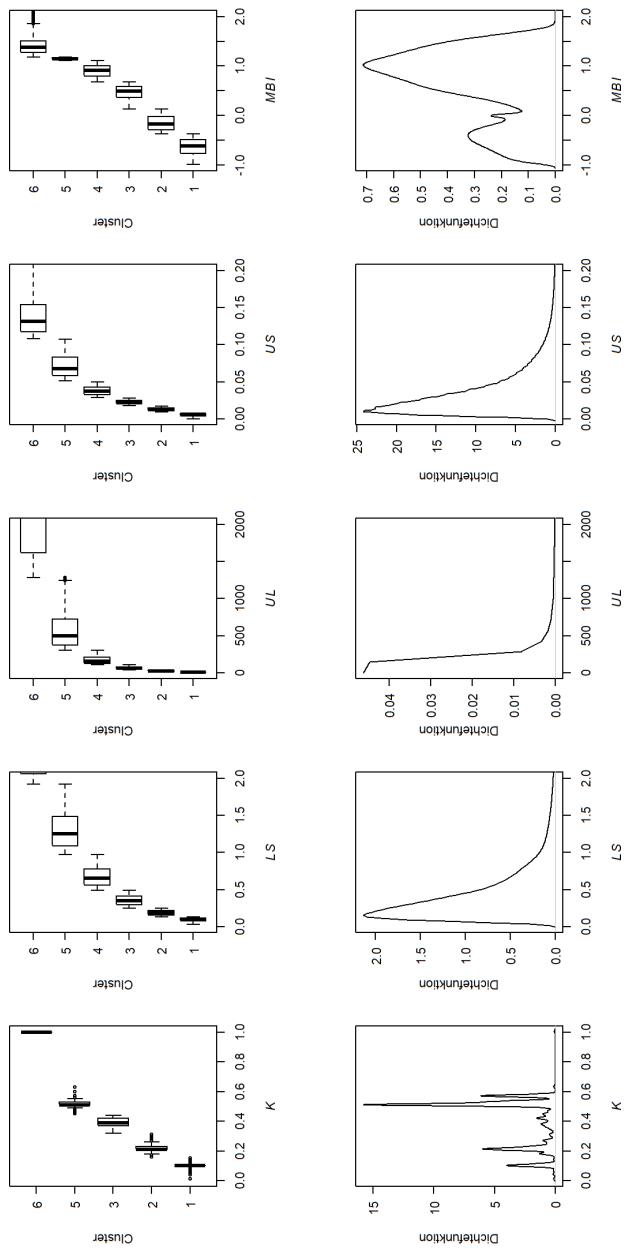


Abbildung 6: Cluster und Werteverteilungen der Variablen K , LS , UL , US sowie MBI (vgl. Tab. 2).

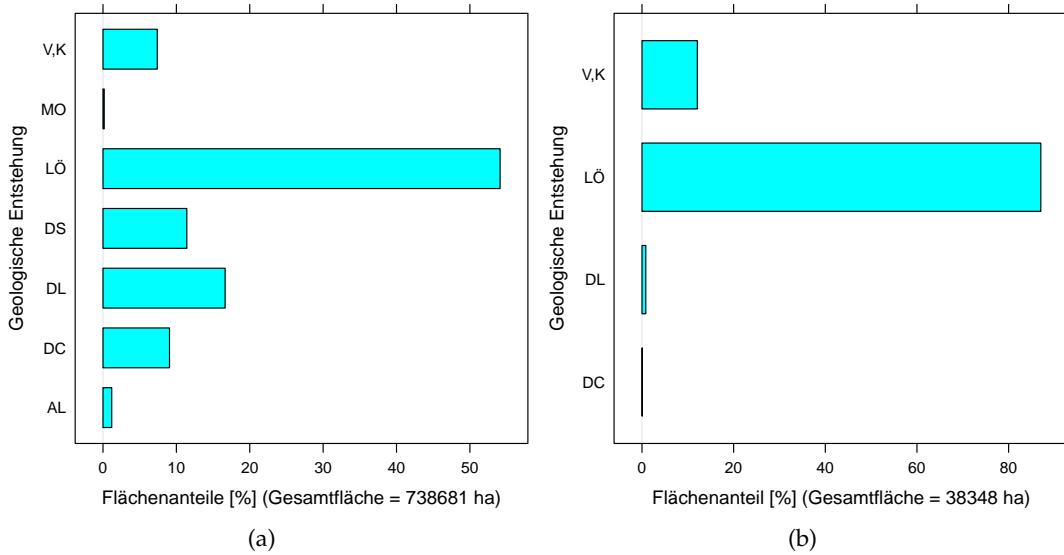


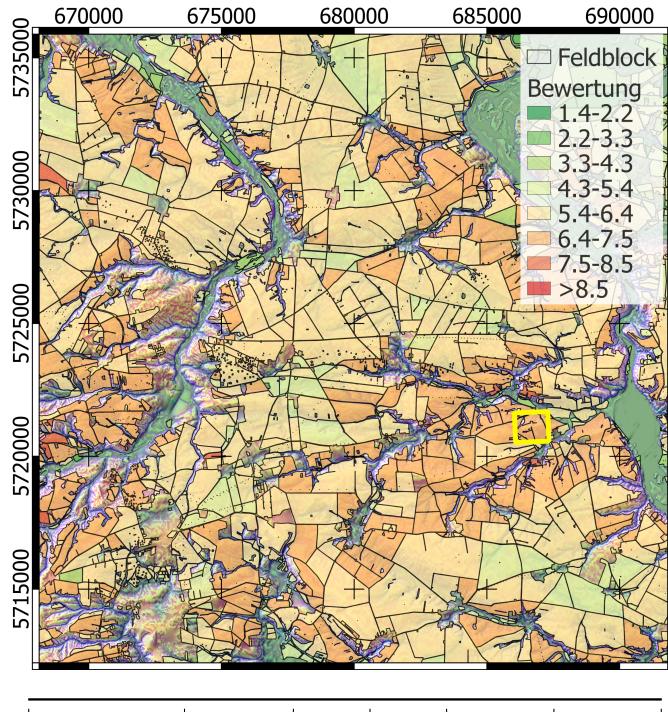
Abbildung 7: Flächenanteile der Feldblock-Standorttypen in Sachsen-Anhalt nach Anwendung des Auenfilters ($GMK-ID > 1200$; a) sowie des Erosionspotentialfilters ($V.TH \geq 7$), des Überlappungsfilters ($V.OL \geq 80$) und Flächengrößenfilters (b) ($V.OL \geq 20$; vgl. Tab. 5).

Zur Detektion von typischen Feldblöcken mit einem hohen reliefbedingten Erosionspotential sind zunächst alle Feldblöcke selektiert worden, die die Bedingung $VI^{K \times LS} \geq 7$ erfüllen (vgl. Abb. 8). Abbildung 7b zeigt die Flächenanteile der Standorttypen. Danach dominieren LÖ-Standorte, auf die sich die Detektion von typischen erosionsgefährdeten Feldblöcken konzentriert.

In Abbildung 8 sind die Bewertungscodefolge sowie die korrespondierenden drei dominierenden Bewertungscluster eines Feldblocks im Testgebiet dargestellt, der zur Kategorie “Lössstandorte, $V.TH \geq 7$, $V.HA = \geq 20$, $V.OL \geq 80$ ” gehört (vgl. Tab. 5) und sich durch ein hohes relief- und bodenbedingtes Erosionspotential auszeichnet. Danach sind die Vergleichsindizes für den K-Faktor (VI^K) und die Konvexität (VI^{MBI^1}) als hoch einzuschätzen. Die Erosionsgefährdung durch die Hanglänge (VI^{UL}) wird als mittel und der Einfluss von potentiellen Akkumulationsbereichen (VI^{MBI^2}) als vorhanden, aber geringer bewertet.

Die feldblockbezogenen $VI^{K \times LS} \geq 7$ -Werte der LÖ-Standorte sind mit dem *Random Forest*-Algorithmus entsprechend Gleichung (2) analysiert worden. Der Entscheidungsbaumalgorithmus teilt unter optionaler Berücksichtigung von thematischen Klassen den n-dimensionalen Merkmalsraum von erklärenden Variablen solange, bis der höchste statistische Zusammenhang bei minimaler Varianz erreicht wird (Breiman, 2001). In der Studie fungierten die Vergleichsindizes VI^{US} , VI^{UL} , VI^{MBI^1} , VI^{MBI^2} und VI^K als erklärende Variablen. Die Modellierungsergebnisse werden durch die beiden Genau-

⁴https://github.com/terrasyis/BIKASA_DetectFB/blob/master/_functions/fComparIx.R



Attribute	K	US	UL	MBI1	MBI2
VI	7	8	5	7	3
DT	53NA	564	342	615	162

Abbildung 8: Feldblockbezogene Ergebnisse der $VI^{K \times LS}$ -Bewertung im Testgebiet und Auflistung der Vergleichsindizes und korrespondierenden dominierenden Cluster (DT) für den gelb hervorgehobenen Beispieldfeldblock.

igkeitsmaße *Bestimmtheitsmaß* (R^2) und *Root Mean Square Error* (RMSE) beschrieben. Die *Variablenbedeutung* (VB) leitet sich aus der prozentualen RMSE-Steigerung ab, die wiederum das Ergebnis einer Kreuzvalidierungspermutation für jede Variable ist.

$$[VI^{K \times LS} \geq 7] \sim VI^K + VI^{US} + VI^{UL} + VI^{MBI^1} + VI^{MBI^2} \quad (2)$$

Tabelle 6 fasst die Ergebnisse der *Random Forest*-Analyse zusammen. So kann für LÖ-Standorttypen festgestellt werden, dass der Hangneigung der höchste Einfluss auf die natürliche Erosion zugewiesen wird. Während die Bedeutung des K-Faktors geringer ist, hat dagegen der Massenbilanzindex (Konvexität) einen höheren Einfluss. Die Hanglänge wird schließlich als der Faktor mit der geringsten Bedeutung angesehen.

Die in Abbildung 9 dargestellten Flächenanteile der 20 häufigsten Bewertungsklassen in Sachsen-Anhalt für die LÖ- (z.B. 76582, 77573 oder 76573) zeigen, dass die meisten Feldblöcke mit einem hohen boden- und reliefbedingten Erosionspotential durch ein hohe Bodenerosivität und Hangneigung bzw. (konvexe) Wölbung gekennzeichnet

Tabelle 6: Variablenbedeutung (VB), Bestimmtheitsmaß (R^2) und Root Mean Square Error (RMSE) der Random Forest-Analyse für LÖ-Standorte in Sachsen-Anhalt für die Beziehung entsprechend Gleichung (2).

VI $RMSE R^2$	$VB^{LÖ}$
VI^{US}	100,00
VI^K	17,24
VI^{UL}	0
VI^{MBI^1}	10,07
VI^{MBI^2}	35,03
R^2	0,91
$RMSE$	0,32

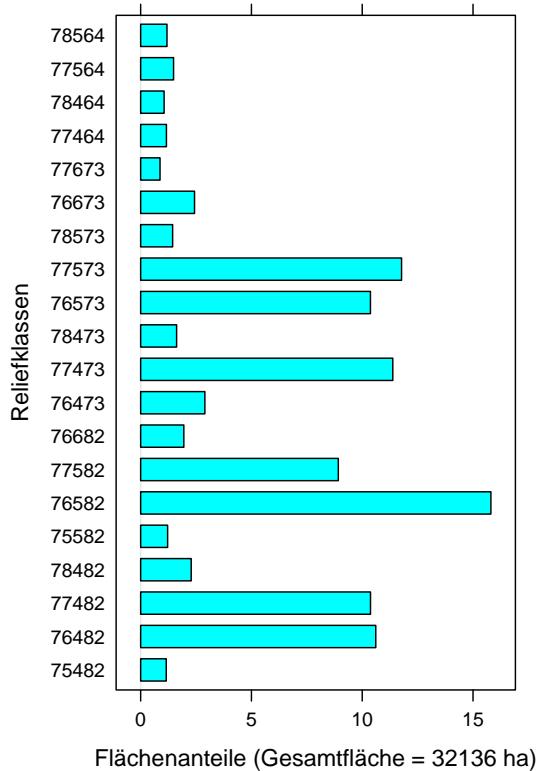


Abbildung 9: Flächenanteile der 20 häufigsten Bewertungsklassen in Sachsen-Anhalt für LÖ-Standorte (b) mit GMK-Klasse = 1200, $V.TH \geq 7$ und $V.OL \geq 80$.

sind. Der in Abbildung 8 gelb markierte Feldblock kann insofern als repräsentativ angesehen werden, als dass seine Bewertungscodefolge 78573 zusammen mit den benachbarten Codefolgen 76582, 77573, 76573 oder 77473 in einem großen Flächenanteil innerhalb der als stark gefährdet bewerteten Feldblöcken der LÖ-Standorte in Sachsen-Anhalt vertreten ist.

2.3 Dynamische Parametrisierung

2.3.1 Langjährige phasenspezifische Bodenbedeckung

Die Definition der phasenspezifischen Bodenbedeckung basiert auf der Analyse phänologischer Beobachtungen des Deutschen Wetterdienstes (vgl. Tab. 7; Kaspar et al., 2014), die für LÖ-Standorte sowie Winterweizen und Mais als repräsentative Winter- und Sommerfeldfrüchte durchgeführt worden ist. Die phänologischen Beobachtungen sind durch die Anwendung des Modells PHASE (Gerstmann et al., 2016) einer statistischen Filterung unterzogen worden. Dabei sind nur die Jahre 1993 bis 2018 betrachtet worden, da die Beobachtungen vor 1993 nur das Gebiet Westdeutschlands abdeckten (Kaspar et al., 2014).

Die Analysen sind innerhalb der statistischen Programmumgebung R umgesetzt worden (R Core Team, 2018). Die korrespondierende R-Funktion fDetectDoy() ist auf der github-Platform dokumentiert⁵ (Tab. 8). Die Prozedur kann in folgende beiden Schritte gegliedert werden:

1. Import und Verschneidung des Untersuchungsgebietes mit gefilterten phänologischen Beobachtungen spezifischer Jahre sowie
2. Ableitung von typischen durchschnittlichen phasenspezifischen Eintrittstagen.

Abbildung 10 fasst die Mediane der phasenspezifischen Eintrittstage für die LÖ-Standorte und die Feldfrüchte Winterweizen und Mais zusammen. Durch die Aussaat von Winterweizen im Herbst des Vorjahres hat die Vegetationsentwicklung nach der Winterruhe am Jahresanfang schon eingesetzt, während die Vegetationsentwicklung von Mais erst um den 8. Mai (Kalendertag 128) beginnt. Die Erntezeitpunkte unterscheiden sich dagegen im Mittel um 53 Tage.

Die Kopplung von Phasen- und monatlichen Bodenbedeckungsinformationen führt zur Ableitung von phasenspezifischen Bodenbedeckungsgraden (Tab. 9). Als Quelle für die Bodenbedeckung wurde auf die Verknüpfungsregel 3.18 der "Methodendokumentation Bodenkunde"⁶ zurückgegriffen, in der der "Bedeckungsgrad der durch Pflanzen und Pflanzenrückstände bedeckten Bodenoberfläche" aufgeführt ist (Schmidt et al., 1996). Neben den beobachteten phänologischen Phasen werden noch die Kategorien "Saatbett" (SB) und "Brache" (B) berücksichtigt, die nicht beobachtete Zeiträume repräsentieren:

⁵https://github.com/terrasyis/BIKASA_fDetectDoy.git

⁶https://www.methodenwiki-bodenkunde.de/MethodenWiki/AGBoden:Verknüpfungsregel_3.18

Tabelle 7: Namen und Zahlencodes beginnenender phänologischer DWD-Phasen (DWD, 2015) sowie korrespondierende BBCH-Codes (Bleiholder et al., 2001).

Phasename	DWD-Code	BBCH-Code
Aussaat	10	0
Auflaufen	12	10
Rosettenbildung	14	14
Schossen/Längenwachstum	15/67	31
Knospenbildung	17	50
Ährenschieben	18	51
Milchreife	19	75
Teigreife	20	83
Gelbreife	21	87
Vollreife	22	–
Ernte	24	–
Fahnenschieben	65	53

Tabelle 8: fDetectDoy: Parameter.

Parameter	Erläuterung
TS.SHP	Name der Shapedatei des Untersuchungsgebietes
PP.DIR	Ordner mit Shapedateien phänologischer Beobachtungen
OUT.DIR	Ordner mit Ergebnisdateien
YEARS	zu analysierende Jahre
PLANT	Fruchtart

Tabelle 9: Beziehung zwischen phänologischen Phasen und Bodenbedeckungen (BB; nach Schmidt et al., 1996, vgl. Tab. 7, SB – Saatbett, B – Brache).

PHASEN	5	10	12	14	15	17	18	19	20	21	24	65	67	SB	B
BB (WW)	NA	0	7	NA	60	NA	87	93	NA	93	84	NA	NA	NA	50
BB (MS)	82	0	2	NA	NA	NA	NA	82	85	85	85	60	12	0	30

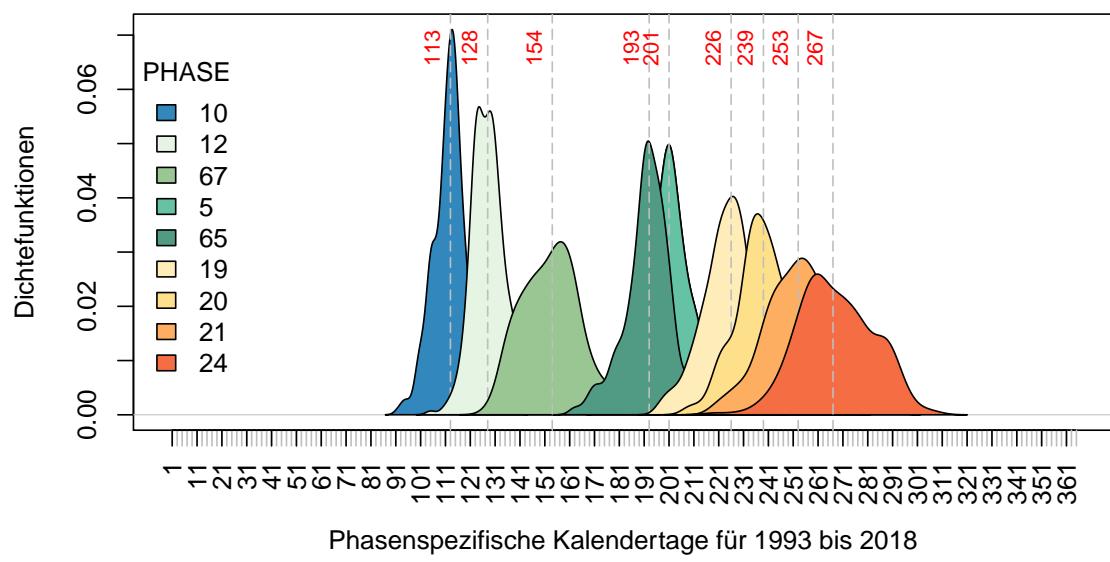
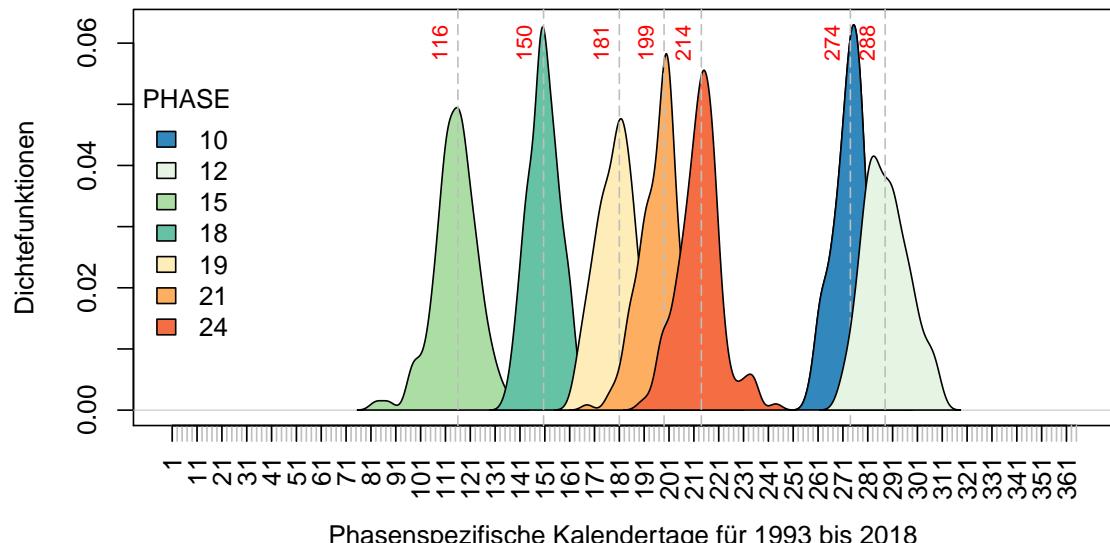


Abbildung 10: Mediane phasenspezifischer Eintrittstermine phänologischer Winterweizen- (a) und Maisphasen (b) im Zeitraum 1993 bis 2018 für die LÖ-Standorte in Sachsen-Anhalt (vgl. Tab. 7).

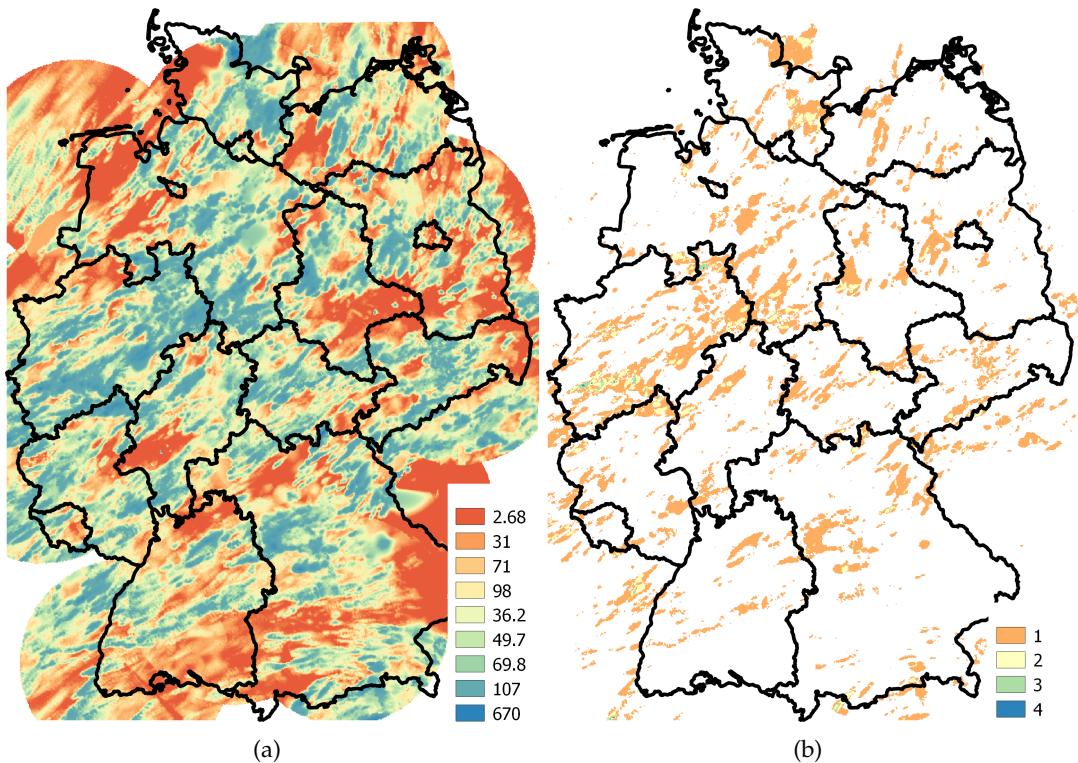


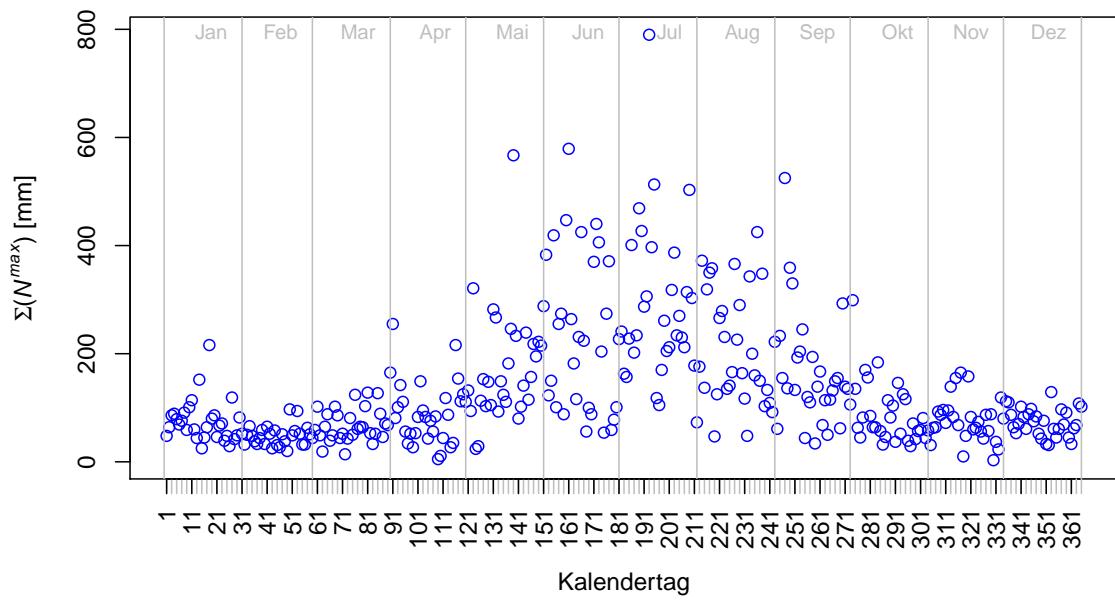
Abbildung 11: Visualisierung der Parameter $\text{Maximaler Stundenniederschlag } N^{max,h}$ [mm/10] (a) und des Starkniederschlagsindikators $SNI [N(h) > 10\text{mm}]$ (b) für den Kalendertag 170 des Jahres 2006.

- Als Saatbett wird der Zeitraum vor der Bestellung von Mais bezeichnet. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Bodenbearbeitung bereits im Herbst des Vorjahres stattgefunden hat und der Boden unbedeckt ist.
- Brache ist der Zeitraum nach der Ernte und vor Beginn der Bodenbearbeitung. Der Boden ist von Stoppeln und Pflanzenresten bedeckt, wobei für Mais und Winterweizen unterschiedliche Bedeckungsgrade angenommen werden.

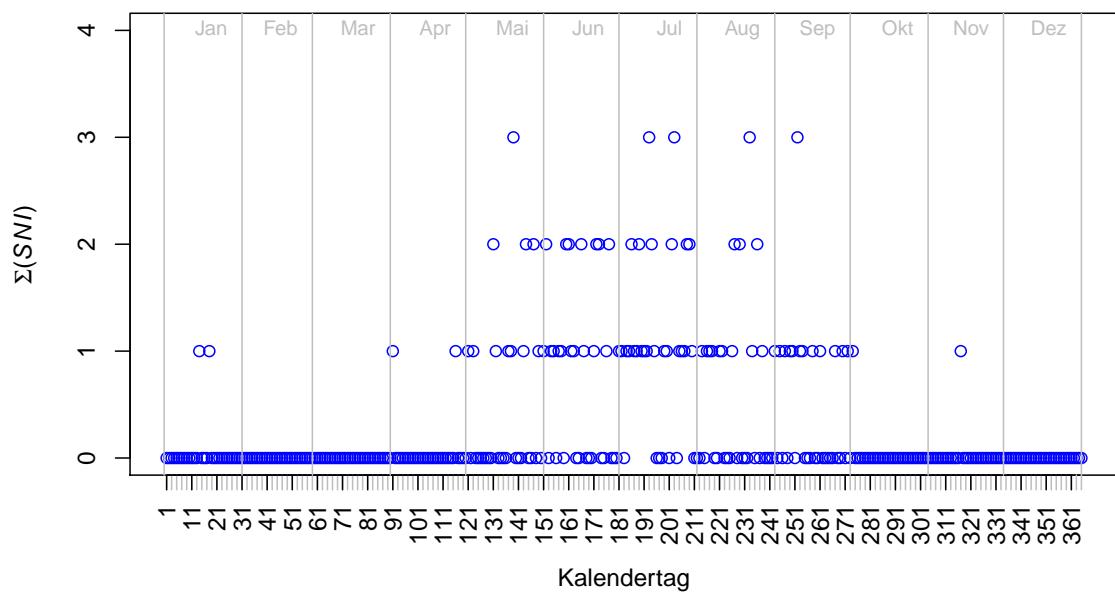
2.3.2 Durchschnittliche tägliche Starkniederschläge

Zur Charakterisierung der typischen Starkniederschlagssituation wird der Starkniederschlagsindex SNI verwendet, der sich aus Bodenradarmessungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) ableitet⁷. Die sogenannten RADOLAN-Daten zeichnen sich durch eine räumliche Auflösung von 1 km^2 und eine zeitliche Auflösung von 5 min aus. Ab-

⁷ftp://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/5_minutes/radolan



(a)



(b)

Abbildung 12: Aufsummierte jährliche Verteilung des maximalen Tagesniederschlages $\Sigma(N^{max})$ (a) und des aufsummierten Starkniederschlagsindikators $\Sigma(SNI)$ (b) für das Gebiet des um 5 km erweiterten Beispieldfeldblocks (vgl. Abb. 4) und den Zeitraum 2006 bis 2018.

Tabelle 10: fHeavyRain: Parameter.

Parameter	Erläuterung
W.DIR	Arbeitsordner
WI	Dateipräfix des Wetterindikators (hier: RADOLANGT10MM oder RADOLANMAX)
EPSG.WI	EPSG-Code des Wetterindikators
SHP	Name der Shapedatei des Untersuchungsgebietes
OUT.DIR	Ordner mit Ergebnisdateien
OUT.NAME	Name der Ausgabedateien
BUFFER	Puffer für den Umriss des Untersuchungsgebietes

Tabelle 11: Mediane der K-Faktorenvergleichsindizes (VI^K) in Abhängigkeit von ihrer Zugehörigkeit zum Standorttyp (vgl. Abb. 3a u. b).

Standorttyp	AL	DC	DL	DS	LÖ	MO	V,K
VI^K	3	4	3	2	7	1	5

Abbildung 11a veranschaulicht den Datensatz am Beispiel des aggregierten Tagesparameters *Maximaler Stundenniederschlag* ($N^{max,h}$ [mm]) für den Kalendertag 170 des Jahres 2006. Der Starkniederschlagsindikator SNI berechnet sich aus der Anzahl der Stunden pro Tag mit Niederschlagssummen größer 10 mm, der in Abbildung 11b ebenfalls für Kalendertag 170 des Jahres 2006 dargestellt ist.

Abbildung 12 zeigt die akkumulierte jährliche Verteilung der beiden Parameter für das Gebiet des um 5 km erweiterten Beispieldatums (vgl. Abb. 4) und den Zeitraum 2006 bis 2018. Danach treten Starkniederschläge vor allem in den Monaten Mai bis September auf. Der aufsummierte Niederschlagsindikator $\Sigma(SNI)$ charakterisiert somit die Starkniederschlagswahrscheinlichkeit.

Die der Analyse zugrundeliegende R-Funktion `fHeavyRain()` ist auf der Github-Plattform abgelegt⁸. Die Funktionsparameter sind in Tabelle 10 erläutert.

2.3.3 K-Faktor

Tabelle 11 fasst die Mediane der Feldblock-bezogenen Vergleichsindizes (VI^K) in Abhängigkeit von ihrer Zugehörigkeit zu den Standorttypen zusammen (vgl. Abb. Abb. 3a u. b). Danach sind auf LÖ-Standorten die höchsten VI^K -Werte zu erwarten gefolgt von DC- und V,K-Standorten.

⁸https://github.com/terrasyis/BIKASA_fHeavyRain.git

Tabelle 12: fPara: Parameter.

Parameter	Erläuterung
W.DIR	Arbeitsordner
IN.DIR	Ordner mit Eingangsdateien
HR	csv-Datei des täglichen Starkniederschlagsindex
PH	csv-Datei der Kalendertag des Beginns phänologischer Stadien
SC	csv-Datei der phasenspezifischen Bodenbedeckung
PLANT	DWD-Pflanzen-ID
OUT.DIR	Ordner mit Ergebnisdateien

2.4 Visualisierung von Steuerparametern der Bodenerosion

Die Visualisierung von Steuerparametern der Bodenerosion zielt einerseits auf die Vermittlung des Zusammenhangs zwischen Bodenbedeckung und Starkniederschlagsergebnissen (Kap. 2.4.2). Darüber hinaus wird der Einfluss der Hanglänge und der Bodenerodibilität auf das Erosionspotential dargestellt (Kap. 2.4.1). Die Zusammenhänge werden anhand zweier repräsentativer Feldblöcke veranschaulicht (Abb. 8), die als typische Landschaftsausschnitte mit einem hohen natürlichen Erosionspotential angesehen werden können (vgl. Kap. 2.1).

Die Parametrisierung insbesondere der dynamischen Parameter basiert auf der Analyse längjähriger Niederschlags- und Phänologiedaten (Kap. 2.3). Dadurch können typische Extremwettersituationen mit einem hohen Erosionspotential dargestellt werden, allerdings sind die konkreten Feldblöcke durch die Verwendung der Begrenzungsrechtecke und dem Fehlen von Koordinatenangaben anonymisiert.

Als Voraussetzung für die Visualisierung sind die dynamischen Parameter der Bodenbedeckung und Phänologie (Kap. 2.3.1 sowie des Starkniederschlagsindex (Kap. 2.3.2) mittels der Funktion `fPara()`⁹ zusammengeführt worden (Tab. 12). Die eigentlichen Visualisierungen sind mit Hilfe von R-Funktionen¹⁰ realisiert worden, was spätere Anpassungen, Veränderungen oder eine Anwendung auf andere Feldblöcke in Sachsen-Anhalt möglich macht. Die Parameter der beiden Funktionen `fPhenoRain()` und `fMap()` sind in den Tabellen 13 und 14 dokumentiert, die Ergebnisse der Funktionen veranschaulichen die Abbildungen 13 sowie 14 bis 20.

2.4.1 Hanglänge und -neigung

Abbildung 13 zeigt anhand des von Vegetation unbedeckten Beispielfeldblocks den Einfluss der Hanglänge und -neigung (LS-Faktor) auf das natürliche Erosionspotenti-

⁹https://github.com/terrasyss/BIKASA_fPara.git

¹⁰https://github.com/terrasyss/BIKASA_fMap.git

Tabelle 13: fPhenoRain: Parameter.

Parameter	Erläuterung
W.DIR	Arbeitsordner
IN.DIR	Ordner mit Eingangsdateien
V.DYN	csv-Datei; Ergebnis der Funktion fPara()
DOY	Kalendertage, für die Abbildungen erstellt werden sollen
CROP	DWD-Pflanzen-ID

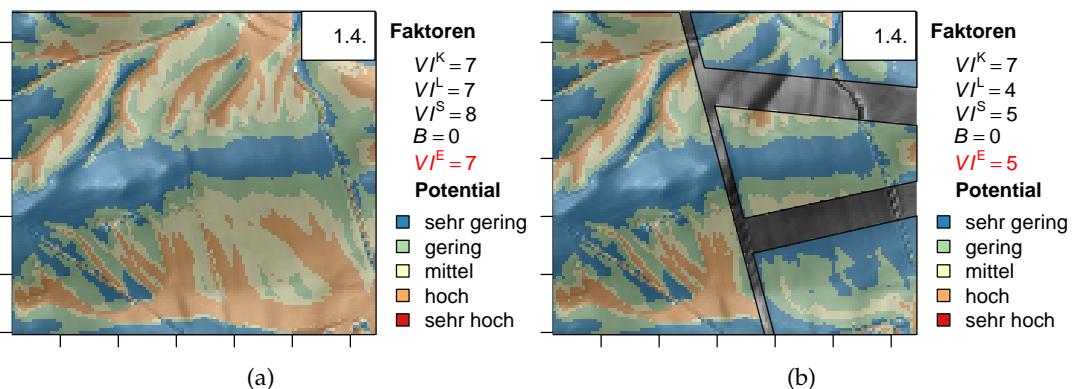


Abbildung 13: Einfluss der Hanglänge und Neigung auf das natürliche Erosionspotentials (a) des Beispieldfeldblocks (Abb. 8) sowie Veranschaulichung der Wirkung von Hangunterbrechungen (z.B. Blühstreifen) auf das Erosionspotential (b).

Tabelle 14: fMap: Parameter.

Parameter	Erläuterung
W.DIR	Arbeitsordner
IN.DIR	Ordner mit Eingangsdateien
V.DYN	csv-Datei; Ergebnis der Funktion fPara()
R.L1	asc-Rasterdatei des ersten Hanglängenfaktors
R.S1	asc-Rasterdatei des ersten Neigungsfaktors
R.L2	asc-Rasterdatei des zweiten Hanglängenfaktors
R.S2	asc-Rasterdatei des zweiten Neigungsfaktors
R.K1	asc-Rasterdatei des ersten Bodenerodibilitätsfaktors
R.K2	asc-Rasterdatei des zweiten Bodenerodibilitätsfaktors
R.SHD	asc-Rasterdatei der Reliefschummerung
F.L	Faktor, um den R.L2 reduziert werden kann
F.S	Faktor, um den R.S2 reduziert werden kann
CROP	DWD-Fruchtarttyp
D.L	Integerzahl, die den Abstand der Legende beeinflusst
ALPHA	Grad der Transparenz des Ergebnisrasterdatensatzes ($ALPHA \in [0, 1]$)
SHP1	Shape-Datei des Feldblockumrisses
SHP2	Shape-Datei des geteilten Feldblockumrisses
PREFIX	Präfix für Ergebnisdatei
SUFFIX	Suffix für Ergebnisdatei
H	Höhe der Ergebnisabbildung
W	Weite der Ergebnisabbildung

al. Der Landschaftsausschnitt repräsentiert einen LÖ-Standort, was sich in dem hohen Vergleichsindex des K-Faktors mit $VI^K = 7$ widerspiegelt. Den Landschaftsausschnitt durchzieht in west-östlicher Richtung eine Sattelstruktur. Daran schließen sich nördlich und südlich konvexe Oberhangbereiche sowie konkave Senken und Abflussbahnen an, die erosiv wirksame Reliefformen repräsentieren. Ausdruck dessen sind hohe Vergleichsindizes des L- und S-Faktors mit $VI^L = 7$ und $VI^S = 8$. Der Vergleichsindex des Erosionspotentials ergibt sich aus Gleichung (3) und ist mit $VI^E = 7$ ebenfalls hoch.

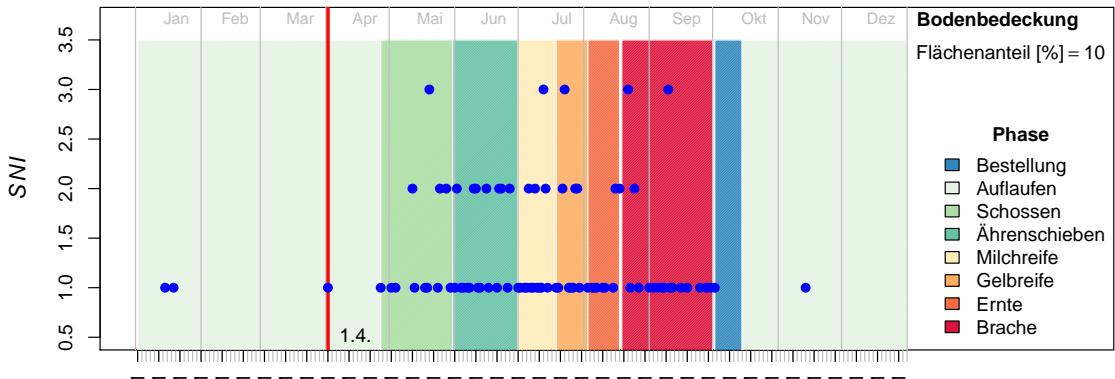
$$VI^E = \frac{(VI^K + VI^L + VI^S)}{3} \times (1 - B) \quad (3)$$

Das hohe Erosionspotential der Reliefformen spiegelt sich in den kategorisierten Rasterwerten wider (Abb. 13a), die sich vor allem in den Abflussbahnen konzentrieren. Eine mögliche Maßnahme der Reduzierung des reliefbedingten Erosionspotentials ist eine Verkürzung der Hanglänge bzw. die Unterbrechung der erosionswirksamen Abflussbahnen beispielsweise durch Blühstreifen (Abb. 13b). Als Ergebnis sinken der LS-Faktor und die korrespondierenden Vergleichsindizes ($VI^L = 4$ und $VI^S = 5$), was auch sich in einer Verringerung des Vergleichsindex des Erosionspotentials ($VI^E = 5$) sowie der kategorisierten Rasterwerten im unmittelbaren Umfeld der Hangunterbrechungen niederschlägt.

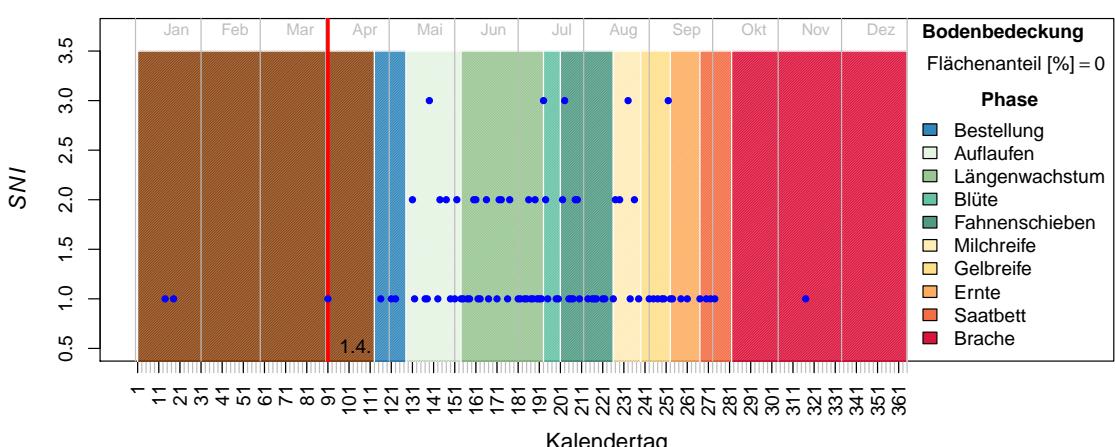
2.4.2 Bodenbeckung und Starkniederschlagsereignisse

Der dynamische Einfluss von Bodenbedeckung und Starkniederschlagsereignissen wird für den Beispieldfeldblock (vgl. Abb. 8) anhand der pänologischen Entwicklungsstadien der Winterfeldfrucht Winterweizen sowie der Sommerfeldfrucht Mais veranschaulicht. Die Abbildungen 14 bis 20 stellen sieben Extremwettersituationen dar, die sich aus dem Wechselspiel zwischen Kulturarten-spezifischer Bodenbedeckungen, phänologischen Entwicklungsstadien und Starkniederschlagsereignissen ergeben:

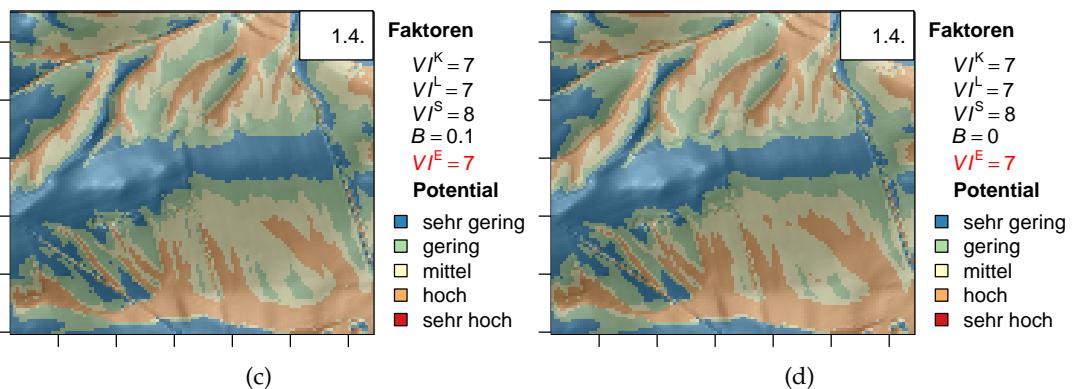
- Die ausgewählten Kalendertage 91 (1.4.), 131 (11.5.), 166 (15.6.), 193 (12.7.), 208 (27.7.), 243 (31.8.) und 274 (1.10.) sind typische Zeitpunkte, an denen Starkniederschlagsereignisse in der Region fallen (vgl. Abb. 12b).
- Die Kalendertage verdeutlichen auch phänologische Unterschiede (vgl. Abb. 10) und damit der Bodenbedeckung (vgl. Tab. 9) während der Entwicklung von Winterweizen (links) und Mais (rechts):
 - Kalendertag 91: Auflaufen \Leftrightarrow Saatbett,
 - Kalendertag 131: Schossen \Leftrightarrow Auflaufen,
 - Kalendertag 166: Ährenschieben \Leftrightarrow Längenwachstum,
 - Kalendertag 193: Milchreife \Leftrightarrow Längenwachstum,
 - Kalendertag 208: Gelbreife \Leftrightarrow Fahnenschieben,
 - Kalendertag 243: Brache \Leftrightarrow Gelbreife,
 - Kalendertag 274: Bestellung \Leftrightarrow Ernte.



(a)



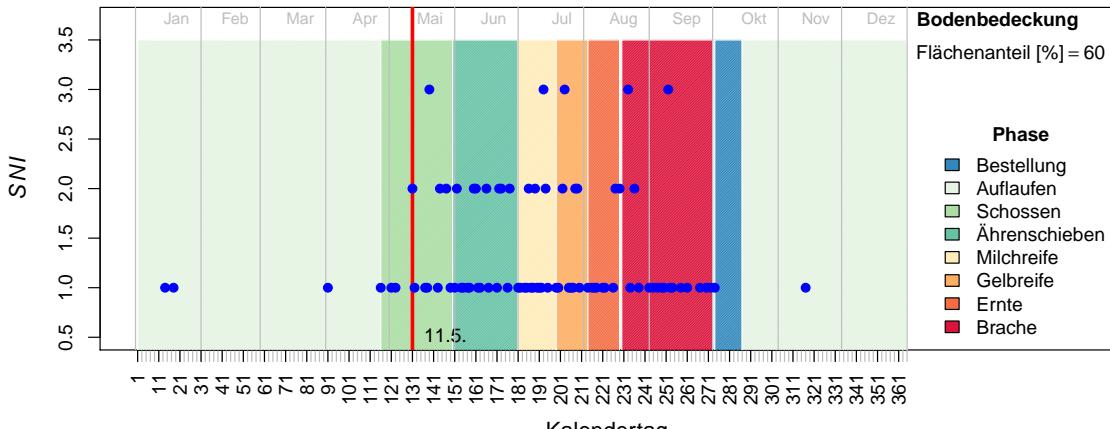
(b)



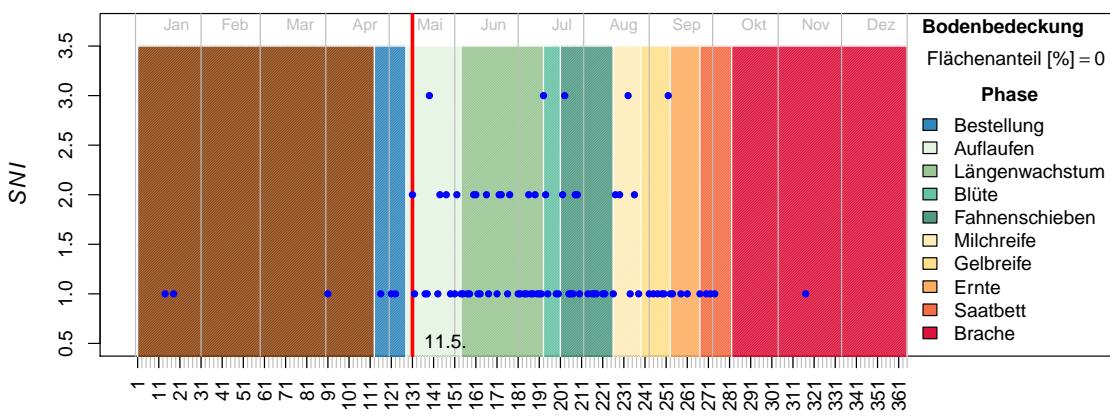
(c)

(d)

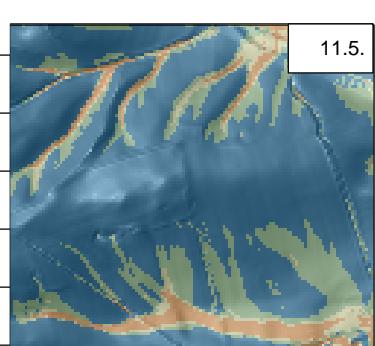
Abbildung 14: Zusammenhang zwischen phänologischen Entwicklungsstadien und Starkniederschlagsereignissen (a, b) und Visualisierung des täglichen aktuellen schlagbezogenen Erosionsrisikos (c, d) für Winterweizen (a, c) und Mais (b, d) sowie den Kalendertag 91 (1.4.) und den Beispieldfeldblock (Abb. 8). $VI^{K,L,S,E}$ – Vergleichsindizes des K-, L- und S-Faktors sowie des Feldblock-bezogenen Erosionspotentials.



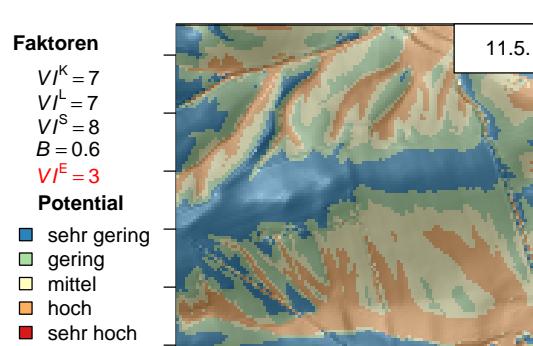
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 15: Zusammenhang zwischen phänologischen Entwicklungsstadien und Starkniederschlagsereignissen (a, b) und Visualisierung des täglichen aktuellen schlagbezogenen Erosionsrisikos (c, d) für Winterweizen (a, c) und Mais (b, d) sowie den Kalendertag 131 (11.5.) und den Beispielfeldblock (Abb. 8). $VI^{K,L,S,E}$ – Vergleichsindizes des K-, L- und S-Faktors sowie des Feldblock-bezogenen Erosionspotentials.

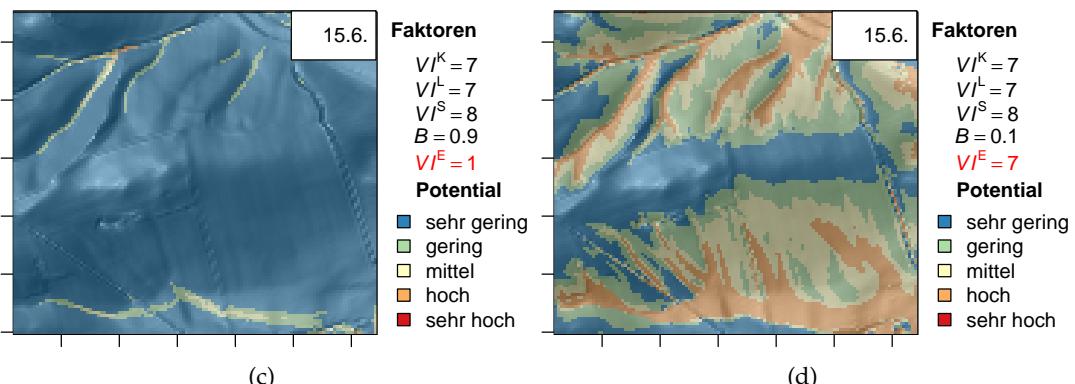
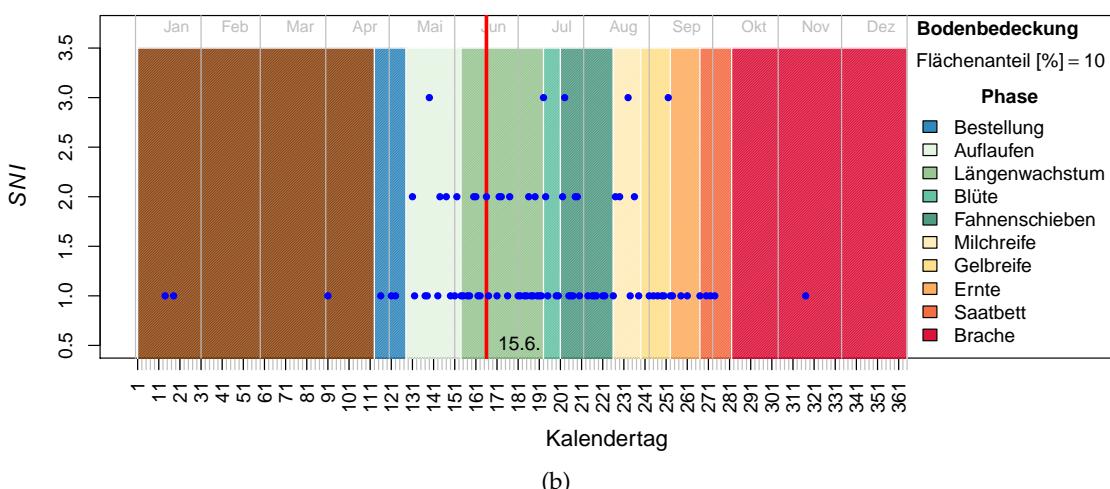
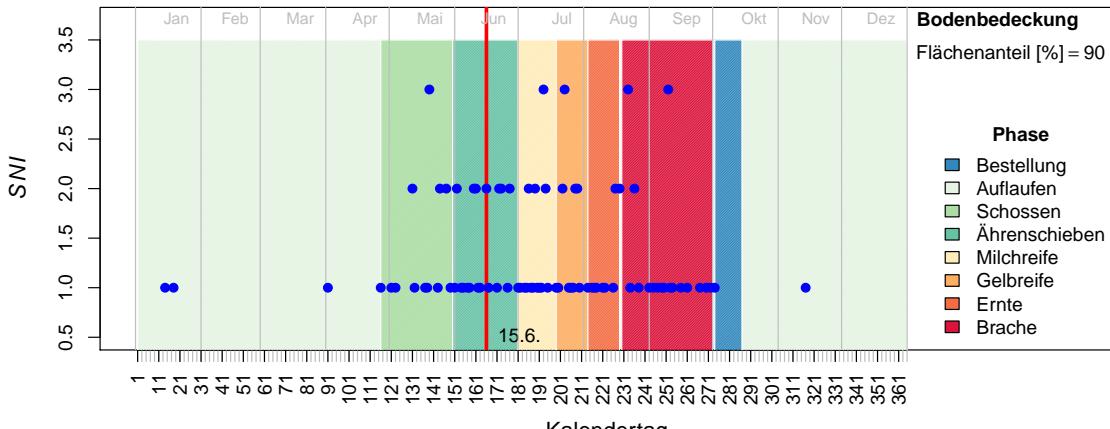
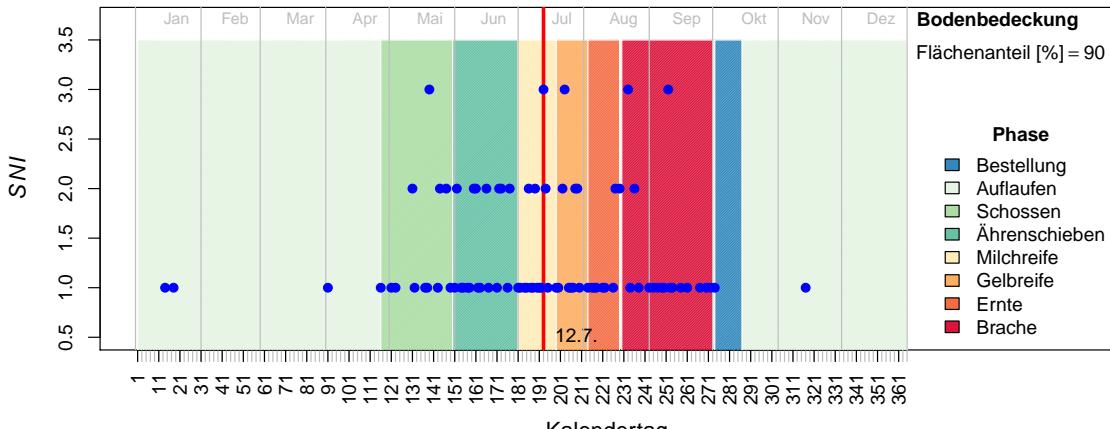
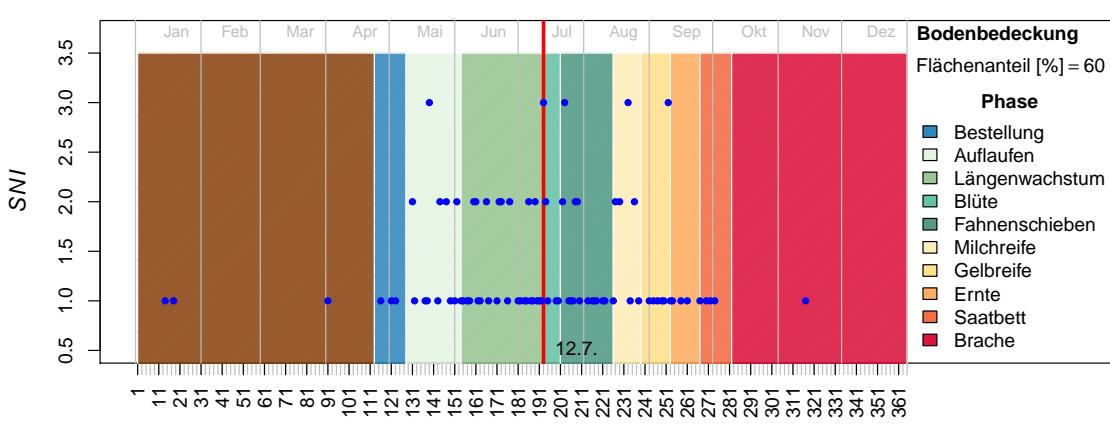


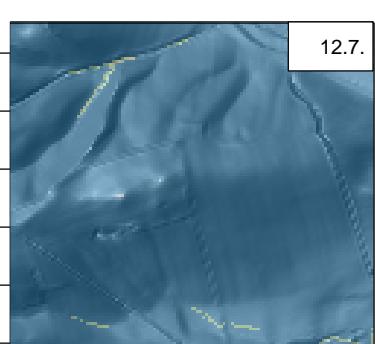
Abbildung 16: Zusammenhang zwischen phänologischen Entwicklungsstadien und Starkniederschlagsereignissen (a, b) und Visualisierung des täglichen aktuellen schlagbezogenen Erosionsrisikos (c, d) für Winterweizen (a, c) und Mais (b, d) sowie den Kalendertag 166 (15.6.) und den Beispielfeldblock (Abb. 8). $VI^{K,L,S,E}$ – Vergleichsindizes des K-, L- und S-Faktors sowie des Feldblock-bezogenen Erosionspotentials.



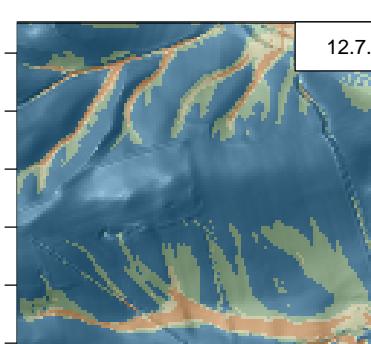
(a)



(b)

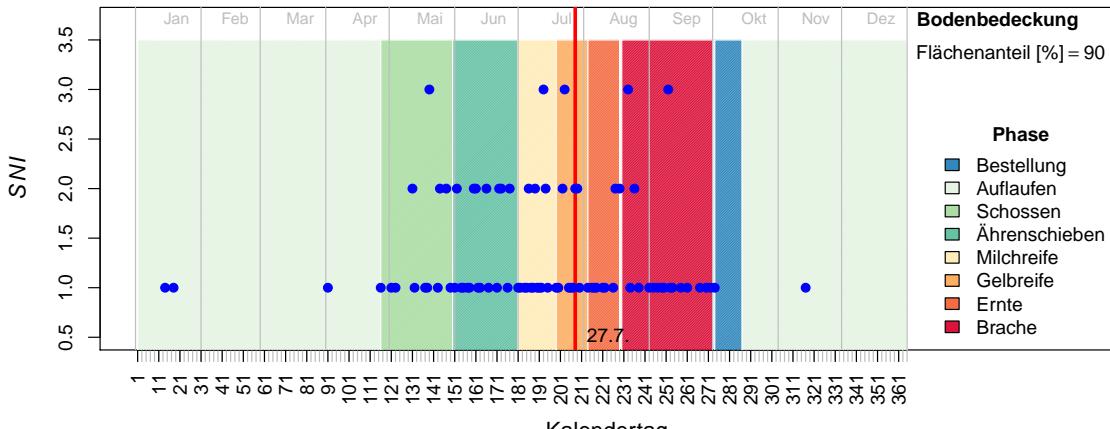


(c)

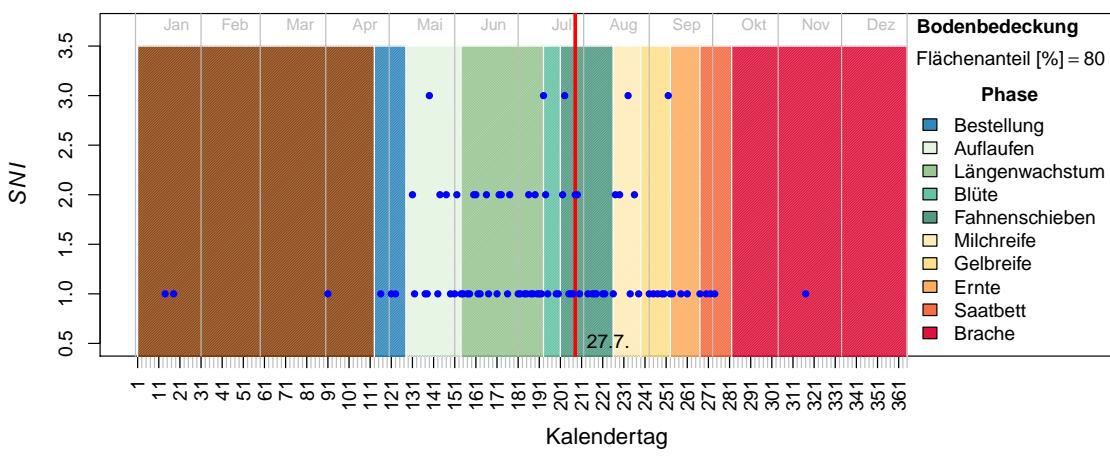


(d)

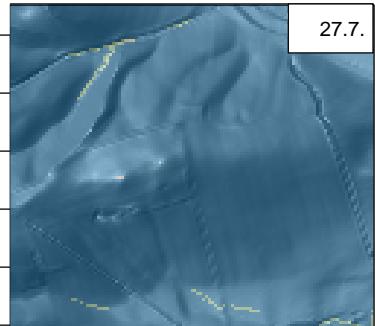
Abbildung 17: Zusammenhang zwischen phänologischen Entwicklungsstadien und Starkniederschlagsereignissen (a, b) und Visualisierung des täglichen aktuellen schlagbezogenen Erosionsrisikos (c, d) für Winterweizen (a, c) und Mais (b, d) sowie den Kalendertag 193 (12.7.) und den Beispielfeldblock (Abb. 8). $VI^{K,L,S,E}$ – Vergleichsindizes des K-, L- und S-Faktors sowie des Feldblock-bezogenen Erosionspotentials.



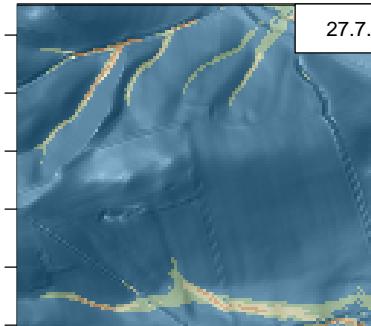
(a)



(b)

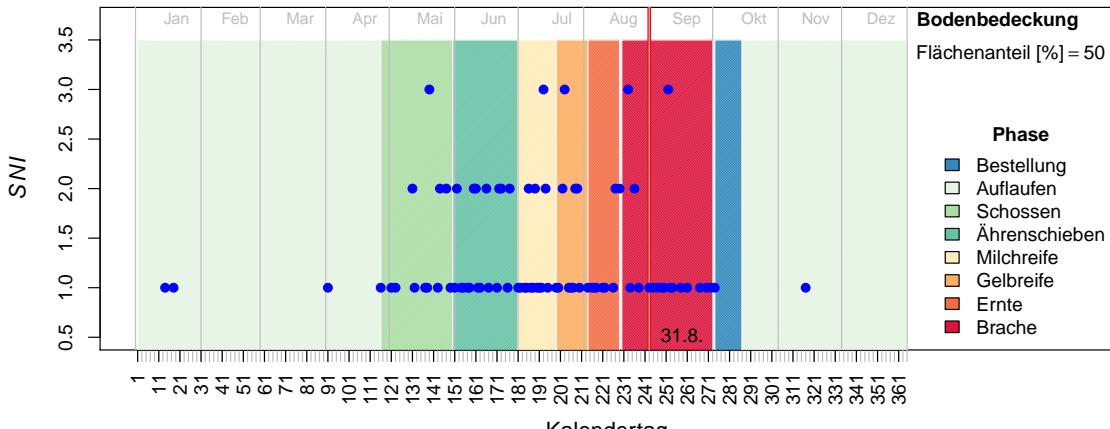


(c)

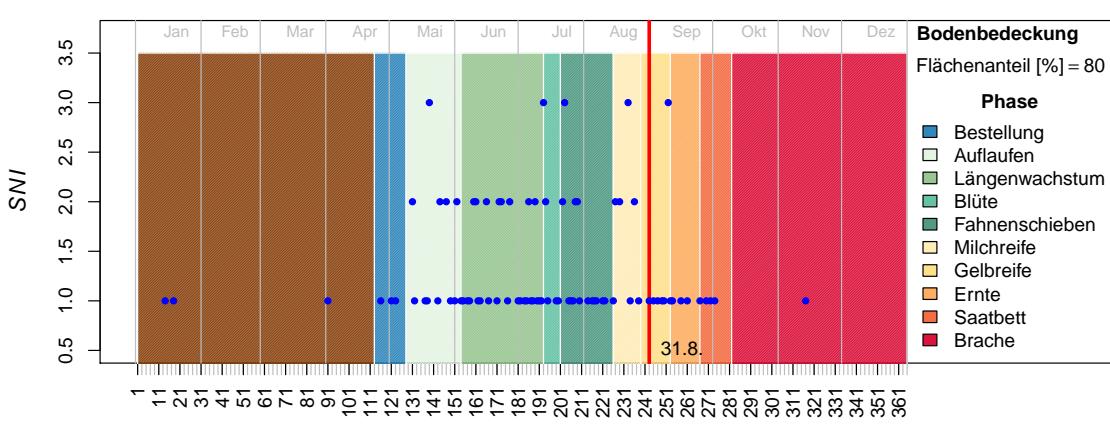


(d)

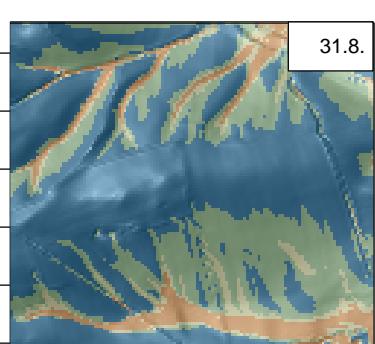
Abbildung 18: Zusammenhang zwischen phänologischen Entwicklungsstadien und Starkniederschlagsereignissen (a, b) und Visualisierung des täglichen aktuellen schlagbezogenen Erosionsrisikos (c, d) für Winterweizen (a, c) und Mais (b, d) sowie den Kalendertag 208 (27.7.) und den Beispielfeldblock (Abb. 8). $VI^{K,L,S,E}$ – Vergleichsindizes des K-, L- und S-Faktors sowie des Feldblock-bezogenen Erosionspotentials.



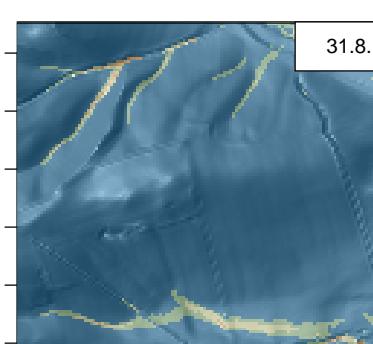
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 19: Zusammenhang zwischen phänologischen Entwicklungsstadien und Starkniederschlagsereignissen (a, b) und Visualisierung des täglichen aktuellen schlagbezogenen Erosionsrisikos (c, d) für Winterweizen (a, c) und Mais (b, d) sowie den Kalendertag 243 (31.8.) und den Beispielfeldblock (Abb. 8). $VI^{K,L,S,E}$ – Vergleichsindizes des K-, L- und S-Faktors sowie des Feldblock-bezogenen Erosionspotentials.

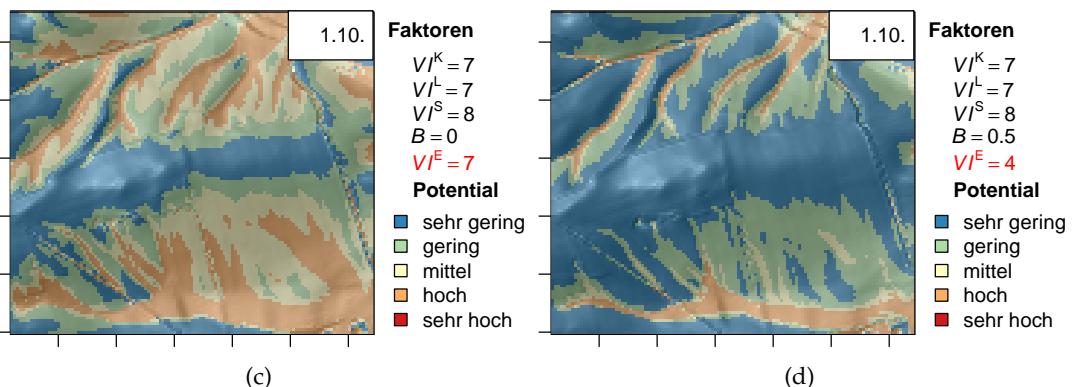
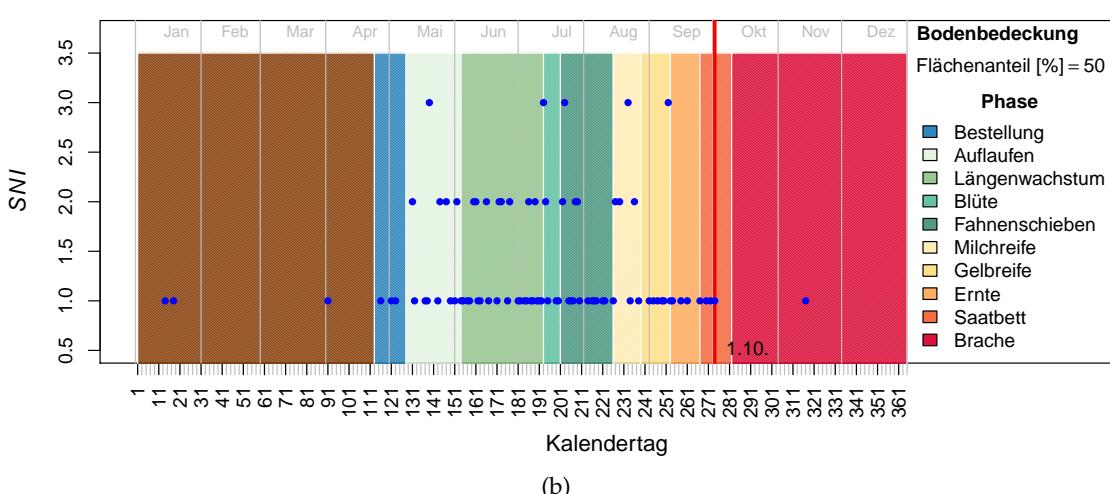
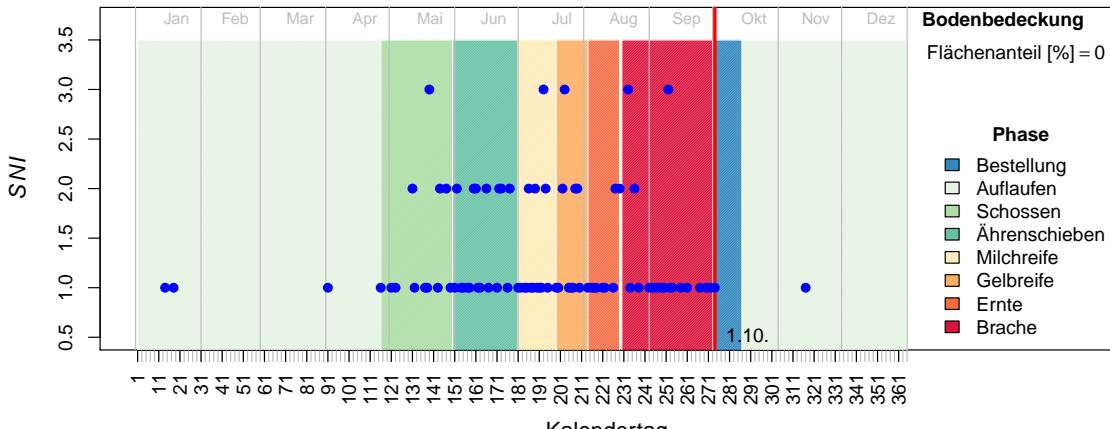


Abbildung 20: Zusammenhang zwischen phänologischen Entwicklungsstadien und Starkniederschlagsereignissen (a, b) und Visualisierung des täglichen aktuellen schlagbezogenen Erosionsrisikos (c, d) für Winterweizen (a, c) und Mais (b, d) sowie den Kalendertag 274 (1.10.) und den Beispielfeldblock (Abb. 8). $VI^{K,L,S,E}$ – Vergleichsindizes des K-, L- und S-Faktors sowie des Feldblock-bezogenen Erosionspotentials.

Während die Teilabbildungen 14 bis 20a bzw. b die durchschnittliche Feldblock-bezogene Bodenbedeckung und Starkniederschlagsbetroffenheit repräsentieren, zeigen die Teilabbildungen 14 bis 20c bzw. d die räumliche Verteilung des Feldblock-bezogenen Erosionspotentials. Die Vergleichsindizes des K-, L- und S-Faktors ($VI^{K,L,S}$) beschreiben das Feldblock-bezogene Erosionspotential (Gl. (3)), der Faktor B steht für den durchschnittlichen prozentualen Flächenanteil der Vegetationsbedeckung geteilt durch den Wert 100.

Literatur

- Allen, R., Pereira, L.S. abd Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration – Guidelines for computing and crop water requirements*. FAO Irrigation and drainage paper 56, FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Bleiholder, H., Weber, E., Feller, C., Hess, M., Wicke, H., Meier, U., van den Boom, T., Lancashire, P., Buhr, L., Hack, H., Hack, H., & Stauss, R. (2001). *Growth stages of mono- and dicotyledonous plants*. Technical report, Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry, Brunswick, Germany.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45, 5–32.
- Conrad, O., Bechtel, B., Bock, M., Dietrich, H., Fischer, E., Gerlitz, L., Wehberg, J., Wichmann, V., & Böhner, J. (2015). System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development*, 8(7), 1991–2007.
- Deumlich, D., Kiesel, J., Thiere, J., Reuter, H., Völker, L., & Funk, R. (2006). Application of the SIte COmparison method (sicom) to assess the potential erosion risk – A basis for the evaluation of spatial equivalence of agri-environmental measures. *CATENA*, 68(2–3), 141–152. Soil Erosion Research in Europe.
- DWD (2015). *Vorschriften und Betriebsunterlagen für die phänologischen Beobachtungen des Deutschen Wetterdienstes*. Offenbach, Germany.
- Fraley, C. & Raftery, A. (2002). Model-based clustering, discriminant analysis and density estimation. *Journal of the American Statistical Association*, 97, 611–631.
- Gerstmann, H., Doktor, D., Gläßer, C., & Möller, M. (2016). Phase: A geostatistical model for the kriging-based spatial prediction of crop phenology using public phenological and climatological observations. *Computers and Electronics in Agriculture*, 127, 726–738.
- Kaspar, F., Zimmermann, K., & Polte-Rudolf, C. (2014). An overview of the phenological observation network and the phenological database of Germany's national meteorological service (Deutscher Wetterdienst). *Advances in Science & Research*, 11, 93–99.
- Köthe, R. & Wurbs, D. (2017). *Kurzdokumentation zur Aufbereitung des Laser-DGM und Berechnung geomorphometrischer Reliefparameter für das Land Sachsen-Anhalt*. Technical report, scilands GmbH und geoflix GbR im Auftrag des Landesamtes für Geologie und Rohstoffe Sachsen-Anhalt, Göttingen/Halle (Saale).
- Möller, M., Koschitzki, T., Hartmann, K.-J., & Jahn, R. (2012). Plausibility test of conceptual soil maps using relief parameters. *CATENA*, 88, 57–67.
- Möller, M. & Volk, M. (2015). Effective map scales for soil transport processes and related process domains - statistical and spatial characterization of their scale-specific inaccuracies. *Geoderma*, 247-248, 151–160.

- Möller, M., Volk, M., Friedrich, K., & Lymburner, L. (2008). Placing soil-genesis and transport processes into a landscape context: A multiscale terrain-analysis approach. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171(3), 419–430.
- Moore, I. & Wilson, J. (1992). Length-slope factors for the revised universal soil loss equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 47, 423–428.
- R Core Team (2018). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Schmidt, J., Von Werner, M., & Michael, A. (1996). *EROSION 2D/3D: Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser*. Technical report, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft, Dresden, & Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- Schmidt, R. & Diemann, R. (1974). *Richtlinie für die Mittelmaßstäbige Landwirtschaftliche Standortkartierung*. Eberswalde: Akad. Landw. Wiss. der DDR, Inst. f. Bodenkunde.
- Schmidt, R. & Diemann, R. (1981). *Erläuterung zur Mittelmaßstäbigen Landwirtschaftlichen Standortkartierung*. Eberswalde: Akad. Landw. Wiss. der DDR, Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit, Bereich Bodenkunde/Fernerkundung.
- Schwertmann, U., Vogl, W., & Kainz, M. (1990). *Bodenerosion durch Wasser: Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen*. Stuttgart: Ulmer.
- Scrucca, L., Fop, M., Murphy, T., & Raftery, A. (2006). mclust 5: clustering, classification and density estimation using gaussian finite mixture models. *The R Journal*, 8, 205–233.
- Steininger, M., Helbig, H., Hartmann, K.-J., & und Daniel Wurbs, M. M. (2010). Prognose der erosionsgefährdung auf der basis von relief, boden, klima und bewirtschaftung. In H. Helbig, M. Möller, & G. Schmidt (Eds.), *Bodenerosion durch Wasser in Sachsen-Anhalt*, BVB-Materialien, Bd 15 (pp. 59–69). Halle (Saale): Bundesverband Boden.
- Volk, M., Möller, M., & Wurbs, D. (2010). A pragmatic approach for soil erosion risk assessment within policy hierarchies. *Land Use Policy*, 27(4), 997–1009.