

Praxisnahe Planungsinstrumente zur Anpassung an klimawandelbedingte
Änderungen von Bodenwasserhaushalt und Bodenabtrag

**Kumulative Dissertation
zur Erlangung des
Doktorgrades der Naturwissenschaften (Dr. rer. nat.)**

der

Naturwissenschaftliche Fakultät III
Agrar- und Ernährungswissenschaften
Geowissenschaften und Informatik

der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

vorgelegt von

Frau Köhn, Janine
Geb. am 22.06.1989 in Berlin

Von der naturwissenschaftlichen Fakultät III - Agrar- und Ernährungswissenschaften,
Geowissenschaften und Informatik der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg als Dissertation
am 01.11.2022 angenommen. In einem kooperativen Verfahren mit dem Fachbereich Wasser,
Umwelt, Bau und Sicherheit - Lehrgebiet Hydrologie und Geographische Informationssysteme der
Hochschule Magdeburg Stendal.

Erstgutachter: Prof. em. Dr. sc. techn. agr. habil. Ralph Meißner

Zweitgutachter: Prof. Dr. rer. nat. habil. Frido Reinstorf

Drittgutachter: Prof. Dr. habil. Britta Schmalz

Verteidigungsdatum: 20.04.2023

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Zusammenfassung.....	III
Summary.....	V
Abkürzungsverzeichnis.....	VII
Abbildungsverzeichnis.....	XI
Tabellenverzeichnis.....	XIII
1. Einleitung.....	1
1.1. Klimawandel und Folgen für Boden und Landwirtschaft.....	1
1.2. Klimamodelle und Modelle zur Simulation des Bodenabtrags.....	5
1.3. Zielsetzung und Überblick.....	9
2. Effekte des Klimawandels auf die Sickerwasserrate - Ein Vergleich von Ergebnissen aus Klimamodellrechnungen mit langjährigen Messungen an Grünlandlysimetern.....	12
2.1. Zusammenfassung.....	12
2.2. Einleitung.....	12
2.3. Folgen des Klimawandels für Sachsen-Anhalt.....	15
2.4. Material und Methoden.....	19
2.5. Untersuchungsergebnisse.....	22
2.5.1. Beobachtete meteorologische Trends.....	22
2.5.2. Vergleich der meteorologischen Trends mit Klimamodellprojektionen.....	23
2.5.3. Langjährige Entwicklung der Sickerwasserrate.....	24
2.5.4. Auswirkung der veränderten Sickerwasserrate auf den Bewuchs.....	28
2.5.5. Vergleich der Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz und der Sickerwasserrate mit den Ergebnissen der Klimaprojektionen.....	29
2.6. Diskussion.....	30
2.7. Schlussfolgerung und Ausblick.....	32
3. Planungsinstrumente für die Minderung der lokalen Bodenerosion durch Wasser infolge der Auswirkungen des künftigen Klimawandels.....	34
3.1. Zusammenfassung.....	34
3.2. Einleitung.....	34
3.3. Material und Methoden.....	37
3.3.1. Untersuchungsgebiete.....	37
3.3.2. Herkunft der Eingangsdaten.....	40
3.3.3. Planungsinstrumente der Erosion und erforderliche Eingabedaten.....	42
3.4. Ergebnisse.....	47
3.4.1. Erosionsgefährdung im Untersuchungsgebiet Vietzbach - Anwendung der Planungsinstrumente ero-SMINF und ABAGis.....	47

3.4.2.	Auswirkungen der Landnutzungsänderung und des Klimawandels auf die Erosivität im Untersuchungsgebiet Vietzbach - Szenarienberechnungen mit dem ABAGis	49
3.4.3.	Erosionsgefährdung im Untersuchungsgebiet Regenbeek - Ergebnisse des BEM	52
3.4.4.	Auswirkungen von Gerinneausbau und Klimawandel auf die Erosivität im Untersuchungsgebiet Regenbeek - Szenarienberechnungen mit BEM	53
3.5.	Diskussion	54
3.6.	Schlussfolgerung	56
4.	Regressionsmodelle zur Abschätzung eines klimawandelbeeinflussten zukünftigen Regenerositätsfaktors auf Basis von Monatswerten	59
4.1.	Zusammenfassung	59
4.2.	Einleitung	59
4.3.	Material und Methoden	63
4.3.1.	Informationen zum Untersuchungsgebiet	63
4.3.2.	Stationsniederschlagsdaten und projizierte Niederschlagsdaten der Klimamodelle	64
4.3.3.	R-Faktor nach DIN 19708:2017-08.....	66
4.3.4.	Aufgestellte Regressionsmodelle	67
4.4.	Ergebnisse.....	70
4.4.1.	Niederschlagsmenge, -intensität und Erosivität der Niederschlagsmessreihen	70
4.4.2.	Gütevergleich der ST- und MS-Gleichung mit Regressionsgleichung 1.....	72
4.4.3.	Projizierte R-Faktoren der Nahen und Fernen Zukunft.....	73
4.4.4.	Gütevergleich der Ergebnisse der MS-Gleichung und RG1 mit Regressionsgleichung 2	74
4.5.	Diskussion	76
4.6.	Schlussfolgerungen	80
5.	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	82
5.1.	Langzeituntersuchungen und Klimaprojektionen des Bodenwassers und der Regenerosität.....	82
5.2.	Anwendbarkeit praxisnaher Planungsinstrumenten zur Bestimmung von flächen- und linienhafter Erosion	83
5.3.	Potenziale des klimaangepassten R-Faktors und der Planungsinstrumente für Anpassungsmaßnahmen.....	85
5.4.	Fazit und Ausblick	87
	Literaturverzeichnis.....	88
	Anhang.....	103
	Angaben zur Person und zum Bildungsgang	103
	Liste der Publikationen	105
	Danksagung	106
	Eidesstattliche Erklärung/ Declaration under Oath.....	107

Zusammenfassung

Der mit dem Klimawandel verbundene Anstieg der globalen Lufttemperaturen hat weitreichende Auswirkungen auf das regionale Klimageschehen und auf die Verfügbarkeit von Wasser. Durch das vermehrte Auftreten von Starkregen und Trockenheit werden negative Auswirkungen auf den Boden und somit auch auf die Versorgungs- und Existenzsicherheit der Landwirtschaft erwartet. Um den Boden langfristig vor den Folgen des Klimawandels zu schützen, müssen nachhaltige Anpassungsstrategien entwickelt werden. Angesichts der geringen Anzahl an Langzeitbeobachtungen des Bodenwassers und der Komplexität von vorhandenen Klima- und Bodenmodellen sind Kommunen und Landwirte oft nicht in der Lage, die klimatischen Veränderungen und die Wirkungen von Maßnahmen abzuschätzen.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung praktikabler Methoden und Instrumente zur Verbesserung des Landnutzungsmanagements mit denen eine Reduktion der Bodendegradation unter den Bedingungen des Klimawandels ermöglicht wird. Zu diesem Zweck wurden anhand von der Lysimeterstation Falkenberg des Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ bereitgestellten langjährigen Feldversuchen an Grünlandlysimetern im Norden von Sachsen-Anhalt die Auswirkungen des Klimawandels auf den Bodenwasserhaushalt identifiziert. Dabei wurde eine statistisch gesicherte Zunahme der Temperatur und der Verdunstung nachgewiesen. Für die Sickerwasserrate zeichnete sich eine veränderte innerjährliche Verteilung der monatlichen Rate ab, welche jedoch noch nicht signifikant war. Die beobachteten meteorologischen Trends sowie die Änderung der Sickerwasserrate konnten von den Ergebnissen lokal ausgewerteter Klimaprojektionen nur unzureichend wiedergegeben werden. Daraus leitete sich ab, dass neue Klimamodelle in einer Bandbreite möglicher zukünftiger Klimaänderungen, perspektivisch in einem größeren Ensemble zu verwenden sind. Die Untersuchung zeigte zudem, dass durch eine erhöhte Gefahr von Trockenheit sowie durch die Zunahme von Niederschlägen im Juli und August, mit einem vermehrten Oberflächenabfluss und einem damit verbundenen erhöhten Risiko von Bodenerosion zu rechnen ist.

Um die gegenwärtige und zukünftige Bodenerosivität praxisnah abzuschätzen und langfristige Strategien zum Schutz des Bodens zu entwickeln, wurden vorhandene, empirische Modelle und Verfahren weiterentwickelt und an die Bedürfnisse kommunaler Akteure angepasst. Aufgrund von nur wenig und leicht verfügbaren Eingabedaten, die teilweise modulare Struktur sowie einfach nachvollziehbaren Rechenoperationen sind die entwickelten Modelle für die praktische Anwendung gut geeignet. Um sowohl die flächenhafte Erosion von landwirtschaftlich genutzten Böden als auch die linienhafte Bachbetterosion abzuschätzen, wurde ein Planungsinstrumentensatz entwickelt, bestehend aus den Instrumenten ero-SMINF und

ABAGis, zur Berechnung von flächenhaften Bodenabträgen sowie BEM, zur Abschätzung des kritischen Zustands für das Einsetzen von Gewässerbetterosion. Anhand von zwei, im Süden von Sachsen-Anhalt im Landkreis Mansfeld-Südharz liegenden Untersuchungsgebieten wurde die Anwendbarkeit der Planungsinstrumente geprüft. Hierbei zeigte sich, dass im von flächenhafter Erosion geprägten Einzugsgebiet des Vietzbaches (8,75 km²), Erosionsereignisse am wahrscheinlichsten im Frühjahr und Sommer und an Stellen mit vorhandenen Erosionsrinnen auftraten. Mithilfe des ABAGis konnte nachgewiesen werden, dass ausgewählte Maßnahmen, wie die konservierende Bodenbearbeitung, geeignet waren, die Folgen des Klimawandels auf den Bodenabtrag zu minimieren. Im Untersuchungsgebiet des Regenbeeks (8,51 km²), in welchem die Bachbetterosion dominierte, war mithilfe des BEM festzustellen, dass der Hochwasserabfluss zu einer deutlichen Überschreitung des als kritisch ermittelten Durchflusses führte. Durch das Einbringen von Störsteinen kann das Erosionspotenzial im Gewässer jedoch gesenkt werden.

Um die klimawandelbedingten Änderungen der Bodenerosion im ABAGis zu berücksichtigen, wurden zwei für die Praxis einfach gehaltene, regionale Regressionsmethoden zur Bestimmung des Oberflächenabfluss- und Regenerositätsfaktors (R-Faktor) aufgestellt. Die Regressionsgleichungen zur Abschätzung von gegenwärtigen und zukünftigen R-Faktoren wurden am Beispiel des Landkreises Mansfeld-Südharz validiert. Die lokal angepasste, auf Monatswerten basierende Regressionsgleichung 1 (RG1) wies gegenüber etablierten länderspezifischen Gleichungen eine höhere Genauigkeit auf, unterschätzte jedoch den zukünftigen R-Faktor. Für Regressionsgleichung 2 (RG2), die auf Niederschlagsänderungen basiert, konnte anhand von Änderungssignalen eines regionalen Klimamodellensembles eine hohe Modellgüte nachgewiesen werden.

Aus den Ergebnissen der Dissertation wurde geschlussfolgert, dass Langzeituntersuchungen für die Klimafolgenforschung sowie für die Validierung von Klimamodellen von essenzieller Bedeutung waren und weiterhin sein werden. Des Weiteren wurde nachgewiesen, dass mithilfe der neu entwickelten, praxisorientierten Planungsinstrumente, unter Anwendung flexibler Komponenten, gegenwärtige und zukünftige Bodenabträge räumlich aufgelöst abgeschätzt werden können. Sie stellen daher insbesondere für Akteure, wie z.B. Kommunen, Wirtschaftsunternehmen, aber auch Landwirte, eine geeignete Alternative zu komplexeren Erosionsmodellen dar. Durch die kombinierte Berücksichtigung von Aussagen aus Langzeitbeobachtungen und Klimaprojektionen sowie die Zurverfügungstellung von praxisorientierten Planungsinstrumenten, wird eine plausible Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels ermöglicht sowie die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen vereinfacht.

Summary

The increase in global air temperatures related to climate change has far-reaching effects on the regional climate and thus on the availability of water. The increasing frequency of intense rainfalls and droughts is expected to have a negative impact on the soil and on the security of supply and livelihood of agriculture. In order to protect the soil from long term consequences of climate change, sustainable adaptation strategies must be developed. Considering the low number of long-term observations of soil water and the complexity of existing climate and soil models, municipalities and farmers are often unable to assess climatic changes and the effects of measures.

The aim of this thesis is to develop practicable methods and instruments to improve land use management and to reduce soil degradation under the conditions of climate change. For this purpose, the effects of climate change on the soil water balance were identified based on long-term field experiments on grassland lysimeters at the Lysimeter Station Falkenberg of the Helmholtz Centre for Environmental Research - UFZ in the north of Saxony-Anhalt. A significant increase in temperature and evaporation was detected. For seepage water rate, a change in the distribution of the monthly rate within the year became apparent, which was not yet significant. The observed meteorological trends as well as the change in the seepage water rate could only be inadequately represented by the results of the climate projections. This led to the conclusion that in further investigations new climate models should be used in a range of possible future climate changes, i.e. in an ensemble. The study also showed that an increased risk of drought as well as an increase in precipitation in July and August will lead to an increased surface runoff and an associated increased risk of soil erosion.

In order to estimate current and future soil erosivity in a practical way and to develop long-term strategies for soil protection, existing empirical models and approaches were enhanced and adapted to the needs of municipal stakeholders. Due to the small amount of easily available input data, the partly modular structure as well as easily comprehensible calculation operations, the developed models are suitable for practical application. In order to estimate both the sheet erosion of agricultural soils and the linear streambed erosion, a set of planning instruments was developed, consisting of the tools ero-SMINF and ABAGis, to calculate sheet erosion, and BEM, to estimate the beginning of streambed erosion. The applicability of the planning tools was tested in two study areas in the Mansfeld-Südharz district in southern Saxony-Anhalt. It was shown that in the catchment area of the Vietzbach (8.75 sq. km), which is characterised by sheet erosion, erosion events occurred most likely in spring and summer and in places with existing erosion channels. With the help of ABAGis, it was proven that

selected measures, such as conservation tillage, were suitable for reducing the effects of climate change on soil erosion. In the study area of the Regenbeek (8.51 sq. km), in which streambed erosion dominated, it was determined with the help of the BEM that the discharge led to a significant exceedance of the critical flow rate. However, the potential for erosion in the watercourse can be reduced by the insertion of stones.

To consider changes in soil erosion caused by climate change in the ABAGis, two regional regression methods were established for the determination of rainfall and the runoff factor (R-factor), which were kept simple for practical use. The regression equations for estimating present and future R-factors were validated using the Mansfeld-Südharz district. The locally adjusted regression equation 1 (RG1) based on monthly values showed a higher accuracy for the current R-factors than established country-specific equations, but underestimated the future R-factor. For regression equation 2 (RG2), which is based on changes in precipitation, a high model quality could be demonstrated using change signals from a regional climate model ensemble.

From the results of the dissertation, it was concluded that long-term investigations were and will be of essential importance for climate impact research as well as for the validation of climate models. Furthermore, it was demonstrated that current and future soil loss can be estimated spatially with the help of the newly developed, practice-oriented planning tools, using flexible components. They are therefore a suitable alternative to more complex erosion models, especially for stakeholders such as municipalities and commercial businesses, as well as for farmers. Through the combined consideration of statements from long-term observations and climate studies as well as the provision of practice-oriented planning instruments, a robust assessment of the effects of climate change is enabled and therefore allows a simplified development of adaptation measures.

Abkürzungsverzeichnis

ABAG	Allgemeine Bodenabtragsgleichung
ABAGis	Allgemeine Bodenabtragsgleichung integriert in ein Geografisches Informationssystem
Abb.	Abbildung
ÄF	Änderungsfaktor
ANSWERS	Areal Nonpoint Source Watershed Environmental Response Simulation
Apr	April
ArcEGMO-ST	ArcGIS-EinzugsGebietsMOdell Sachsen-Anhalt
Aug	August
BebeR	Bodenerosionsminderung in bergigen Regionen am Beispiel des Landkreises Mansfeld-Südharz
BEM	Bachbetterosionsmodell
BB	Bodenbearbeitung
BTNT	Biotoptypen und Nutzungstypenkartierung
C-Faktor	Bodenbedeckungs- und Bodenbearbeitungsfaktor
D	Dauer eines Niederschlagsereignisses
Dez	Dezember
DGM	Digitales Geländemodell
DHM	Digitales Höhemodell
DIN	Deutsches Institut für Normung
DWD	Deutscher Wetterdienst
DynaC	Projekt der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg mit dem Ziel der zeitlichen und räumlichen Dynamisierung des C-Faktors (DynaC) mittels simulierter Sentinel 2-Daten unter Berücksichtigung der Bodenbearbeitung, der Vegetationsphase, des Vegetationsbedeckungsgrades sowie der innerjährlichen Niederschlagsverteilung
EPIC	Erosion-Productivity Impact Calculator
Ed./Eds.	Editor/Editoren
ero-SMINF	Stufen-Modell der INFiltration mit Berechnung des direkten Abflusses und der Bodenerosion
ESD	Empirisch-Statistisches Downscaling
ETO	FAO-Gras-Referenzverdunstung
ETP	Potenzielle Evapotranspiration
EURO-CORDEX	Coordinated Downscaling Experiment - European Domain
EUROSEM	EUROpean Soil Erosion Model
FAO	Food and Agriculture Organization
Feb	Februar
ftp	File Transfer Protocol

FZ	Ferne Zukunft (2071 bis 2100)
GCM	Global Circulation Models (dt. Globale Klimamodelle)
GIS	Geografisches Informationssystem
Gl.	Gleichung
GWN	Grundwasserneubildungsrate
H:B	Höhe zu Breite
HEC-RAS	Hydrologic Engineering Center - River Analysis System
Hrsg.	Herausgeber
HydroAS	hydrodynamisch-numerische Software für die 2D-Simulation in den Bereichen Hochwasserschutz, Gewässerentwicklung und Starkregenvorsorge
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
Jan	Januar
Jul	Juli
Jun	Juni
K	hydraulische Leitfähigkeit des Bodens
K-Faktor	Faktor für die Bodenerodierbarkeit durch Wasser
KK	Korrelationskoeffizient
KliBiW	Projekt Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung des globalen Klimawandels für die Binnengewässer in Niedersachsen
KWB	Klimatische Wasserbilanz
L1	Lysimeter 1 der UFZ-Lysimeterstation Falkenberg
L2	Lysimeter 2 der UFZ-Lysimeterstation Falkenberg
LAGB	Landesamt für Geologie und Bergwesen Sachsen-Anhalt
LAU	Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt
L-Faktor	Hanglängenfaktor
LHS	Latin Hypercube Sampling
LISEM	Llmburg Soil Erosion Model
LK	Landkreis
LLG	Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau Sachsen-Anhalt
Mai	Mai
max.	maximal
MIKE11	Software zur Simulation von Durchfluss und Wasserstand, Wasserqualität und Sedimenttransport in Flüssen, Überschwemmungsgebieten, Bewässerungskanälen, Stauseen und anderen Binnengewässern als 1-dimensionales Flussmodell
MIKE-SHE	Hydrologisches Modell der MIKE-Software zur Simulation der Landphase des Wasserkreislaufes (SHE - Système Hydrologique Européen)
min.	minimal
MLR	Multiple Lineare Regression

Mrz	März
MS	Mansfeld-Südharz
MW	Mittelwert
N.	Niederschlag
NLWKN	Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz
Nov	November
Nr.	Nummer
NZ	Nahe Zukunft (2021 bis 2050)
o.J.	Ohne Jahr
Okt	Oktober
OSM	OpenStreetMap
P	Niederschlag
PEF	Effektivniederschlag
P-Faktor	Faktor zur Berücksichtigung von Erosionsschutzmaßnahmen
P_{\max}	Maximale Niederschlagsintensität
P_{Jahr}	Jahresniederschlagssumme
Proz. Abw.	Prozentuale Abweichung
P_{So}	Sommerhalbjahresniederschlagssumme
P_{Sum}	Kumulierte Niederschlagsmenge eines Ereignisses
Q_{Dir}	Direktabfluss
$Q_{\text{Dir_Max}}$	Maximaler Direktabfluss innerhalb eines Zeitraumes
QGIS	QuantumGIS
RCM	Regional Climate Models (dt. Regionale Klimamodelle)
RCP	Representative Concentration Pathway (dt. Repräsentativer Konzentrationspfad)
REMO	REgional MOdell
R-Faktor	Oberflächenabfluss- und Regenerositätsfaktor
RG1	Regressionsgleichung 1 zur Schätzung des R-Faktors
RG2	Regressionsgleichung 2 zur Schätzung des R-Faktors
RMSE	Root Mean Square Error (Wurzel der mittleren Fehlerquadratsummen)
RUSLE	Revised Universal Soil Loss Equation
Sep	September
S-Faktor	Hangneigungsfaktor
SMINF	Stufen-Modell der INFiltration
So	Sommer
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
ST	Sachsen-Anhalt
SW	Sickerwasser
Tab.	Tabelle

TERENO	TERrestrial ENvironmental Observatoria
TS	Trockensubstanz
UFZ	Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung
USLE	Universal Soil Loss Equation
VBA	Visual Basic for Applications
WETTREG	WETTerlagen-basierte REGionalisierungsmethode
WMO	World Meteorological Organization
ZR	Zeitreihe
θ_e	effektive Porosität
ψ	Saugspannung an der Feuchtefront

Variablen und Konstanten in Gleichungen werden unterhalb der Gleichungen erklärt. Abkürzungen für physikalische Einheiten werden durch das Internationale Einheitensystem (SI) definiert.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Oben: Jahresverlauf der täglichen Klimatischen Wasserbilanz für das Szenario A1B in den Zeiträumen 1961-1990, 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 für die Klimamodelle WETTREG (links) und REMO (rechts) (KREIENKAMP 2012); Unten: Darstellung der Klimatischen Wasserbilanz in Sachsen-Anhalt – Gegenüberstellung von Simulationen der Zeithorizonte 1971-2000 (20C) und 2011-2041 (2011) (WETTREG2010) (KREIENKAMP 2012)	18
Abb. 2	Simulierte Veränderung der Grundwasserneubildung [mm] für den Zeitraum 2011-2040 gegenüber 1961-1990 nach dem Modell WETTREG (links) und REMO (rechts) unter dem Szenario A1B (PIK 2009) (KREIENKAMP 2012)	19
Abb. 3	Links: Aufnahme der Lysimeter an der Lysimeterstation Falkenberg (Lysimeter 1&2 befinden sich links vorn); Rechts: Schema der verwendeten Grünlandlysimeters (GODLINSKI, 2005)	20
Abb. 4	Jährliche und halbjährliche Temperaturen (links) und potenzielle Verdunstung (ETP) (rechts) mit Trendgeraden und jährlicher Niederschlag (als Summe aus Sommer- und Winterhalbjahresniederschlag) (mitte) mit Trendgerade	23
Abb. 5	Jährliche Sickerwasserrate (als Summe aus Sommer- und Winterhalbjahreswert) mit Trendgeraden (links) und monatliche Sickerwasserrate im April mit Trendgeraden (rechts)	25
Abb. 6	Mittlere monatliche Sickerwasserrate im Vergleich zur täglichen KWB sowie Änderung der mittleren monatlichen Sickerwasserrate im Vergleich zur Änderung der mittleren monatlichen KWB (Änderung zwischen „Vergangenheit SW“ (1984/85 bis 1999/2000) und „Gegenwart SW“ (2000/01 bis 2016/17))	26
Abb. 7	Anteil der Monate in verschiedenen Sickerwasserratenklassen (links) und Anteil der Monate in verschiedenen Niederschlagsklassen (mitte) und Verdunstungsklassen (ET0) (rechts) für die Zeitspannen „Vergangenheit SW“ (1984/85 bis 1999/2000) und „Gegenwart SW“ (2000/01 bis 2016/17)	27
Abb. 8	Trockensubstanz-Ertrag des I. und II. Schnittes von 1984 bis 2017, lineare Trendgerade des I. und II. Schnittes sowie Menge der Notberegnung	28
Abb. 9	Einzugsgebiete von Vietzbach und Regebeek im Landkreis Mansfeld-Südharz, Deutschland; Quelle: QGIS, OSM Humanitarian Date Model, Stamen Watercolor/OSM	37
Abb. 10	Einzugsgebiet des Vietzbaches: (a) Höhenkarte, (b) Landnutzungskarte, (c) Bodenkarte; Quelle: LLG, LAU, LAGB	38
Abb. 11	Lage der untersuchten Wetterstationen und mittlerer Jahresniederschlag im Landkreis Mansfeld-Südharz; Quelle: DWD	41
Abb. 12	Schema der Planungsinstrumente ero-SMINF, ABAGis und BEM mit erforderlichen Eingabedaten, Zweck der Planungsinstrumente und erzeugten Ausgabedaten	43
Abb. 13	(a) Ergebnisse des ABAGis für den Vietzbach: Langjähriger mittlerer jährlicher Bodenabtrag und Erosionsgefährdung; (b) Detailansicht des Vietzbaches mit stark betroffenem Gebiet (lineare Erosionspfade)	48
Abb. 14	Bandbreite des Bodenverlustes in der Nahen und Fernen Zukunft gemäß dem Klimamodellensemble als räumliche Mittelwerte des Einzugsgebietes des Vietzbaches (links) und des Erosionshangs (rechts, siehe Abb. 13b).	51
Abb. 15	Untersuchungsgebiet Landkreis Mansfeld-Südharz mit Höhenmodell und 17 repräsentativen DWD-Niederschlagsstationen	64
Abb. 16	Schema der Modellerstellung und -validierung der Regressionsgleichung 1	67
Abb. 17	Schema der Modellerstellung und -validierung der Regressionsgleichung 2 (Abkürzungen in der Grafik: LHS - Latin Hypercube Sampling; MLR – Multiple Lineare Regression; N. – Niederschlag; ÄF – Änderungsfaktoren; NZ – Nahe Zukunft; FZ – Ferne Zukunft; ZR – Zeitreihe)	68

Abb. 18	Verteilung der für den R-Faktor relevanten klimatischen Parameter im LK Mansfeld-Südharz, Stationen 1 bis 17 (ohne Darstellung der Ausreißer); Oben: monatliche Niederschlagssummen, Mitte: maximale Intensität der 10-Minuten-Niederschläge je Monat, Unten: monatsweise summierter RE (R-Faktor der Einzelereignisse)	71
Abb. 19	Boxplot der nach Normvorschrift berechneten R-Faktoren der Stationen 1 bis 9 und Stationsmittel für die 14 untersuchten Klimamodelle und die Gegenwart. Oben: Nahe Zukunft (2021–2050). Unten: Ferne Zukunft (2071–2100).	74

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Übersicht über ausgewählte Bodenerosionsmodelle (nach MÄRKER, 2001; MEIER, 2010)	8
	Differenz der Temperatur sowie Änderung des Niederschlags und der relativen Luftfeuchte für WETTREG2010 und REMO für die Zeitscheibe ‚Nahe Zukunft‘ (2011 bis 2040) gegenüber der Zeitscheibe ‚Referenz‘ (1971 bis 2000) als Mittelwert für Sachsen-Anhalt (KREIENKAMP 2012)	17
Tab. 2		
Tab. 3	Bodeneigenschaften der Lysimeter nach Ackermann (2016)	20
Tab. 4	Definition der Zeitspannen für die Klimamodelle und die gemessenen Klimaparameter	21
	Mittelwerte und Trends ausgewählter Klimaparameter an der Wetterstation Seehausen (Altmark) (tägliche Zeitreihe von 1984/85 bis 2016/17)	22
Tab. 5		
Tab. 6	Absolute Änderung der Lufttemperatur und relative Änderung des Niederschlags und der relativen Luftfeuchte zwischen den Zeitspannen ‚Gegenwart‘ (2001 bis 2017) und ‚Vergangenheit‘ (1977 bis 2000)	24
	Mittelwerte und Trends der Sickerwasserrate der Lysimeter 1 und 2 im Zeitraum 1984/85 bis 2016/17	25
Tab. 7		
Tab. 8	Charakteristische Werte des Vietzbach- und des Regenbeek-Einzugsgebietes	39
Tab. 9	Überblick über die in dieser Studie verwendeten global-regionalen Klimaketten (RCP8.5)	41
	Ergebnisse von ero-SMINF für das Einzugsgebiet des Vietzbaches: Charakteristik der Sommerniederschlagsereignisse mit der höchsten Intensität (links), resultierender Direktabfluss und Bewertung der Erosionsgefahr (rechts)	47
Tab. 10		
	Ergebnisse des ABAGis für verschiedene Landnutzungsszenarien: Prozentuale Veränderung der Bodenerosion für verschiedene Fruchtfolgen und Bodenbearbeitungsarten in Bezug auf die Referenz; Bild: Vergleich von drei Landnutzungsszenarien: Derzeitiges Erosionsrisiko am Vietzbach (Mitte); erhöhtes Risiko durch Umstellung auf Maisfruchtfolge (links); verringertes Risiko durch Umstellung auf Direktsaat (rechts).	49
Tab. 11	BB...Bodenbearbeitung	49
	Monatliche und jährliche mittlerer Niederschlagssumme und R-Faktor (Regenerositätsfaktor) für die Vergangenheit (gemessener Niederschlag der Station Mansfeld-Annarode), Nahe Zukunft und Ferne Zukunft (Klimamodelle)	50
Tab. 12		
Tab. 13	Eingangsdaten und Ergebnisse des SEM und Vergleichsmessungen für den von Erosion betroffenen Bachabschnitt	52
	Änderungen des kritischen Abflusses durch Variation des Manning-Strickler Rauigkeitsbeiwert, der Breite und der Uferneigung am erosiven Abschnitt des Baches Regenbeek (aktuelle Werte sind fett dargestellt)	53
Tab. 14		
Tab. 15	Übersicht der 17 Niederschlagsstationen repräsentativ für den Landkreis Mansfeld-Südharz (mit P_{Jahr} - Jahresniederschlag)	65
Tab. 16	Übersicht über die verwendeten global-regionalen Klimamodellketten (RCP8.5)	66
	Sommerhalbjahresniederschlagssumme (PS_o) und mittlere prozentuale Anteile der PS_o an der Jahresniederschlagssumme P_{Jahr} der Stationen 1 bis 17 sowie nach Normvorschrift DIN 19708 (2017) berechnete R-Faktoren im Vergleich zu den R-Faktoren nach der Länderregressionsgleichung für Sachsen-Anhalt (ST-Gleichung), der Gleichung für Mansfeld-Südharz (MS-Gleichung) und der RG1 sowie die prozentualen Abweichungen (Proz. Abw.) zum nach DIN berechneten R-Faktor. Negative Abweichungen über 10% sind blau markiert, über 25% dunkelblau, positive Abweichungen über 10% sind orange, über 25% mit dunkelorange markiert. Unten: Güteparameter der RG1 für die Modellerstellung und Validierung.	72
Tab. 17		

Tab. 18	<p>Ergebnisse der Regressionsgleichungen (MS-Gleichung, RG1, RG2) in der Nahen Zukunft (NZ: 2021 bis 2050) und Fernen Zukunft (FZ: 2071 bis 2100) als Mittelwert über alle Klimamodelle im Vergleich zu dem nach Normvorschrift berechneten R-Faktor (DIN) aus projizierten Niederschlagsdaten. Oben: Mittelwert der Stationen 1-9 (farbliche Markierung siehe Tab. 3), unten: Mittelwert der Stationen; Güteparameter (MW = Mittelwert, KK = Korrelationskoeffizient)</p>	75
Tab. 19	<p>Nach Normvorschrift (DIN) und nach RG2 berechnete R-Faktoren und Änderungsfaktoren des R-Faktors für die Stationen 1, 5, 6, 10 sowie für 3 weiter entfernte Stationen aus gemessenen Daten (ZR = Zeitraum; N. = Niederschlag; ÄF = Änderungsfaktor).</p>	76

1. Einleitung

1.1. Klimawandel und Folgen für Boden und Landwirtschaft

Die gegenwärtige, durch den Menschen verursachte globale Erwärmung beeinflusst das Klima, die Atmosphäre sowie die Wasser- und Stoffkreisläufe in erheblichen Maße (IPCC, 2021). Die von diesen Kreisläufen abhängigen Bereiche, wie die Land- und Forstwirtschaft, sind durch die Folgen des Klimawandels besonders betroffen. In hohem Maße vulnerabel ist das Bundesland Sachsen-Anhalt, in dem die Agrar- und Ernährungswirtschaft aufgrund der ertragreichen Böden einen hohen ökonomischen Stellenwert für ganz Deutschland einnimmt.

Die Folgen des Klimawandels sind schon heute im gesamten Bundesland zu beobachten. So sind die bodennahen Lufttemperaturen, nach Aussagen des Deutschen Wetterdienstes (DWD), seit Beginn der Wetteraufzeichnungen im Jahr 1881 signifikant um 1,5 K angestiegen (MULE, 2020). Sie liegen damit über dem globalen Mittel, das vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) mit 1,1 K angegeben wird (IPCC, 2021, KASPAR et al., 2020). Im Fokus allgemeiner Aufmerksamkeit standen besonders die vergangenen, überdurchschnittlich warmen Jahre seit 2018, welche um ca. 3 K wärmer waren im Vergleich zum langjährigen Durchschnitt (1961-1990) (MULE, 2020). Gleichzeitig steigt aufgrund der Erwärmung der Anteil an Wasserdampf in der Atmosphäre. Dies erhöht die Häufigkeit von Starkregenereignissen und daraus resultierende Hochwässer mit Überschwemmungen (BECKER, 2019; BLÖSCHL et al., 2019; IPCC, 2019). Erste Hinweise für eine Zunahme der Starkregenereignisse in Deutschland liefern mehr als 20-Jährige flächendeckende Regenradar Daten des DWD, die allerdings aufgrund der noch zu kurzen Datenreihe nicht als statistisch gesichert betrachtet werden können (DKK, 2021).

Die global steigenden Temperaturen, die zunehmenden Extremwetterlagen sowie die erhöhte Konzentration von Spurengasen in der Atmosphäre, wirken sich auf den Boden im Land-ökosystem aus. Dabei steht der Boden in einer Wechselwirkung mit dem Klima, d.h. Veränderungen der Temperatur und der Wasserverfügbarkeit wirken sich auf die Bodenprozesse aus, die wiederum das Klima beeinflussen (Rückkopplungseffekt) (BREVIK, 2013).

Temperatur und Niederschlags wirken auf alle im Boden stattfindenden Prozesse, wie den Bodenwasser-, Kohlenstoff- und Nährstoffhaushalt, den Humusgehalt und die Biodiversität. Physikalische, chemische und biologische Prozesse sowie Transformations- und Translokationsprozesse werden durch den Temperaturanstieg zumeist beschleunigt (HERRMANN, 2018). Dies führt zu einer verstärkten Mineralisierung und zum Abbau

organische Bodensubstanz und somit zu einer erhöhten Freisetzung der im Boden gebundenen Gase – unter der Voraussetzung einer ausreichenden Wasserversorgung (SCHRUMPF & TRUMBORE, 2011). Dies wiederum wirkt sich auf die Bodenfruchtbarkeit und andere Bodenfunktionen aus, sowie auf das Wachstum, den Ertrag und die Qualität von pflanzlichen Produkten sowie die Vegetationsperiode, d.h. Aussaat und Erntezeitpunkte (WARNER, 2017). Je nach geografischer Lage kann sich eine Temperaturerhöhung auch positiv z.B. auf die Ertragsbedingungen auf staunassen Böden oder auf den Weinanbau auswirken (VAN LEEUWEN et al., 2019; KAUR et al., 2020; SANTOS et al., 2020; DROULIA & CHARALAMPOPOULOS, 2021) oder zur Erschließung nördlicher borealer, bisher landwirtschaftlicher suboptimaler Regionen beitragen (EVANS & BROWN, 2017; KING et al., 2018; CORDEIRO et al., 2019). Deutliche Auswirkungen auf den Boden haben jedoch vor allem Temperaturextreme und Trockenphasen. Bei langanhaltenden Trockenphasen (meteorologische Dürre) tritt eine Verringerung der Bodenfeuchte (landwirtschaftliche Dürre) ein, welche zu Trockenstress bei Pflanzen führt (BERG & SHEFFIELD, 2018). Das Risiko für Dürren nimmt weltweit durch die globale Erwärmung und der damit verbundenen Zunahme der Verdunstung aus dem Boden zu, dies zeigen auch Modellrechnungen (BATHIANY ET AL., 2021). Darüber hinaus waren in den vergangenen Jahren weltweit auffällig häufig Dürren zu beobachten, wie in Ostafrika 2011 und 2012, in Kalifornien von 2012 bis 2015, in Mittel- und Osteuropa 2015 und in Europa von 2018-2020 und in vielen Teilen der Welt im Jahr 2022 (BATHIANY ET AL., 2021; HAUG, 2022).

Auch in Deutschland sind die Auswirkungen der steigenden Temperaturen bereits zu beobachten. Seit dem Jahr 2018 war Sachsen-Anhalt durch eine ausgeprägte Trockenperiode geprägt (RINKE et al., 2021). Bereits im Jahr 2018 kam es zu einer großflächigen, zum Teil außergewöhnlichen Dürre, in der 25% weniger Niederschlag fiel als in der Referenzperiode von 1961 bis 1990 und von der mehr als 50% des Ackerlands betroffen war (HARI et al., 2020). In den Folgejahren fielen ca. 7% (2019) bzw. 10% (2020) weniger Niederschlag (UBA, 2021). Auch das Jahr 2022 war bisher deutlich zu trocken. Das Frühjahr 2022 zählt zu den drei niederschlagsärmsten seit Beginn der Aufzeichnung, wobei der März 2022 als der trockenste überhaupt gilt (LAU, 2022). In den vergangenen Jahren waren häufig die für das Pflanzenwachstum entscheidenden Monate April bis September zu trocken. Besonders in den Bereichen Mittel- und Ostdeutschlands führte die anhaltende Trockenheit zu einer verminderten Bodenfeuchte und verursachte Trockenstress bis in die tieferen Bodenschichten. Infolgedessen waren regionale Ertragseinbußen zu beobachten. Im Jahr 2018 lagen die Erträge für Getreide unter dem Mittel, wobei u.a. Sachsen-Anhalt (-26%) besonders stark betroffen

war (BMEL, 2018). Zudem war auch eine Abnahme der Sickerwasserrate und der Grundwasserstände zu beobachten. In Sachsen-Anhalt haben sich die Grundwasserstände bis zum Jahr 2022 nicht vollständig erholt (LFU, 2022).

Im Gegensatz dazu zeichnet sich weltweit eine Zunahme der Niederschlagsvariabilität ab mit einer Intensivierung von Starkniederschlägen (DORE, 2005; FISCHER & KNUTTI, 2016), die mit zunehmender Wasserverfügbarkeit von trockenen zu feuchten Regionen steigen (TABARI, 2020). Die Veränderung von Häufigkeit, Größe und Intensität von Ereignissen erhöht das Risiko für Infrastrukturschäden und Überschwemmungen (NISSEN & ULBRICH, 2017). Auch in Deutschland ist vor allem in den Sommermonaten eine Zunahme der Intensität und der Häufigkeit von Extremniederschlägen zu beobachten (WARNER, 2017). Der hauptsächlich oberflächlich abfließende Niederschlag versickert nicht ausreichend und kann zu Überflutungen und Hochwasser sowie zu Bodenerosion und Erdrutschen führen. Besonders in landwirtschaftlich genutzten Hanglagen kommt es vermehrt zu Bodenerosion durch Wasser. Dabei führt schon die Energie der aufprallenden Regentropfen zu einer Ablösung von Bodenbestandteilen (splash erosion). Durch die Scherkräfte des Oberflächenabflusses werden die Bodenpartikel in Fließrichtung transportiert. Dabei können sich je nach Abflussmenge und Relief auch linienförmige Vertiefungen im Boden bilden, wobei je nach Tiefe zwischen Rillen-, Rinnen- und Grabenerosion unterschieden wird (SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL, 2010). Begünstigt wird die Bodenerosion durch eine geringe Bodenbedeckung, große Hanglängen ohne Barrieren und erosionsanfällige, schluffige und lehmige Böden. Schwerpunktgebiete in Sachsen-Anhalt sind die Berg- und Hügelländer im Süden und Südwesten, ackerbaulich genutzte Flächen des Unterharzes sowie die Lößböden des östlichen und nördlichen Harzvorlandes (DEUMELANDT et al., 2014). Schon heute sind 11% der Gesamtfläche von Sachsen-Anhalt als erosionsgefährdet ausgewiesen (FRITSCHKE & SCHRÖDTER, 2016). Es ist damit zu rechnen, dass die Häufigkeit von Extremwetterlagen und von Erosionsereignissen klimawandelbedingt noch weiter steigen werden. Die Folgen der Bodenerosion sind der Abtrag von fruchtbarem Oberboden, was eine langfristige Verringerung der Produktivität, Schäden am Pflanzenbestand, Verlust von Saat und Düngematerial nach sich ziehen wird, sowie eine Verlagerung von im Boden vorhandenen Nähr- und Schadstoffen in Gewässer sowie lokale Überschwemmungen verursacht (DEUMELANDT et al., 2014). Die Erosivität wird zudem durch veränderte Bodennutzung, in Folge der Anpassung an den Klimawandel, zunehmende Trockenheit und Veränderungen der phänologischen Jahreszeiten mit einem immer früher beginnenden Frühling und immer späteren Herbst und dadurch veränderte Aussaat- und Erntezeitpunkte, beeinflusst.

Der Klimawandel wirkt sich auf die globalen Stoffkreisläufe, insbesondere auf die Kohlenstoff- (C) und Stickstoffkreisläufe (N). Diese stellen einen integralen Bestandteil der Böden dar, da sie zum einen die Nährstoffversorgung (BRADY & WEIL, 2008), sowie auch den Ausstoß von langlebigen Treibhausgasen beeinflussen (HANSEN et al., 2007). Hierbei wird insbesondere der organischen Bodensubstanz als Kohlenstoffspeicher sowie dem Bodenmikrobiom und die von ihm erbrachte Ökosystemleistung eine besondere Bedeutung zugesprochen (BREVIK, 2013; JANSSON & HOFMOCKEL, 2020; NAYLOR et al., 2020; BEILLOUIN et al.; 2022). Zudem trägt die organische Bodensubstanz zur Verfügbarkeit von Nährstoffen, zur Wasserspeicherung, Pufferung und Filterung von Schadstoffen, zur Bodenstabilität sowie zur Diversität von Bodenorganismen bei (HAGEDORN et al., 2018). Studien deuten infolge der steigenden Temperaturen auf einen globalen Rückgang der mikrobiellen Bodenbiomasse und der Kohlenstoffvorräte hin, insbesondere in nördlichen Gebieten, was eine Ausgasung sowie eine Verlagerung von Nährstoffen in tiefere Bodenschichten nach sich zieht (PATOINE et al., 2022). Der Abbau ist jedoch auch in hohem Maße von der Wasserverfügbarkeit abhängig (BRASSEUR et al., 2017). Untersuchungen in Deutschland zeigten für den Großteil der ackerbaulich genutzten Standorte keine signifikanten Veränderungen der organischen Bodensubstanz. Verluste waren tendenziell auf sandgeprägten, grundwasserfernen Böden zu beobachten (BMEL, 2019). Veränderungen der organischen Bodensubstanz sind hierzulande vor allem auf Landnutzungs- und Bewirtschaftungsveränderungen zurückzuführen (JACOBS et al., 2018).

Die Entwicklung und Auswirkungen des Klimawandels auf den Boden und die Landwirtschaft verdeutlichen die Vulnerabilität der Agrarproduktion. Unter Berücksichtigung der bisherigen Klimaschutzpolitik wird bis zum Ende des Jahrhunderts eine Erwärmung von ca. 3,2 K projiziert. Um das politisch festgelegte Ziel von 2 K bzw. 1,5 K bis zum Jahr 2100 zu erreichen, ist eine drastische Reduktion der Treibhausgasemissionen notwendig (RANDALLS, 2010). Aus diesem Grund müssen zum einen Klimaschutzziele definiert werden. Zum anderen müssen sich Länder mit ihren Kommunen sowie Unternehmen und Privatpersonen an die schon existierenden und zukünftigen unvermeidlichen Folgen des Klimawandels anpassen. Im Jahr 2008 wurde daher die Deutsche Anpassungsstrategie (DAS, 2008) beschlossen, mit dem Ziel, die Anfälligkeit Deutschlands gegenüber den Auswirkungen der Klimaänderung zu senken, indem Gefahren und Risiken benannt, Entscheidungsgrundlagen für Akteure bereitgestellt und Handlungsmöglichkeiten aufgezeigt werden.

Um den Boden nachhaltig vor den Folgen des Klimawandels zu schützen und die Versorgungssicherheit und Biodiversität zu sichern, ist eine nachhaltige, standortangepasste Bodennutzung und eine gute landwirtschaftliche Praxis sowie deren Einhaltung- und Erfolgskontrolle von Bedeutung. Geeignete Maßnahmen sind humusbewahrende und -bildende Prozesse, wie beispielsweise die Zugabe von organischem Material, angepasste Bewässerung und Optimierung des pH-Wertes des Bodens. Zum Schutz vor Bodenerosion und Bodenverdichtung werden Maßnahmen wie eine dauerhaft pfluglose, konservierende Bodenbearbeitung, eine ganzjährige Bodenbedeckung, der Anbau von Zwischenfrüchten und Untersaaten sowie die Einarbeitung von Ernte- und Zwischenfruchtrückständen empfohlen (BMEL, 2020). Die sich dadurch aufbauende, organische Bodensubstanz fungiert nicht nur zur Stabilisierung des Bodengefüges, sondern auch als Infiltrations- und Speichermedium für längere Dürrephasen (BFN, 2021). Frühere Studien deuteten darauf hin, dass die konservierende Bodenbearbeitung zu einer geringeren CO₂-Emissionen und einer stärkeren C-Sequestrierung im Boden führt (LOKUPITIYA & PAUSTIAN, 2006). Neuere Studien zeigten jedoch, dass der Kohlenstoffvorrat nur in den obersten Horizonten ansteigt, im Gesamtprofil jedoch auf den meisten Standorten mit keiner erhöhten C-Speicherung zu rechnen ist (HAGEDORN et al., 2018). Des Weiteren ermöglicht eine klimasensible Sorten- und Artenauswahl, wie zum Beispiel die Wahl von Fruchtarten mit hoher Wassernutzungseffizienz wie Soja, Hirse, Sonnenblumen und Hartweizen, mit angepassten Fruchtfolgen und Aussaatterminen, die Anpassung an die zukünftigen Klimabedingungen (HEIDT, 2010).

1.2. Klimamodelle und Modelle zur Simulation des Bodenabtrags

Um geeignete Anpassungsmaßnahmen vornehmen zu können, müssen die wahrscheinlichsten Entwicklungen des künftigen Klimas ermittelt werden. Grundlage hierfür sind Klimaszenarien, welche verschiedene Varianten zukünftiger Emissionen in Abhängigkeit von ökonomischen, sozialen und politischen Entwicklungen darstellen, die wiederum Grundlage für Projektionen des zukünftigen Klimas bilden. Entsprechende Szenarien sind im vierten, fünften und sechsten Sachstandsbericht (Assessment Report, AR) des IPCC definiert (IPCC, 2007; IPCC, 2014; RIAHI et al., 2017; IPCC, 2021). Klimamodelle – komplexe, physikalische Computermodelle, die den natürlichen und menschlichen Einfluss auf das Klimasystem mithilfe physikalisch-numerischer Gleichungen auf Grundlage von Massen-, Impuls- und Energieerhaltungssätzen darstellen – werden eingesetzt, um mithilfe der zuvor genannten Szenarien Projektionen des Klimas zu bestimmen. Dabei unterscheidet man zwischen Globalen Klimamodellen (GCM, General Circulation Model bzw. Global Climate Model) und Regionalen Klimamodellen (RCM, Regional Climate Model) (KASANG, 2016; NKGCF, 2010). Die

Ergebnisse der Klimamodelle unterliegen Ungenauigkeiten, bedingt durch die begrenzte Systemkenntnis von physikalischen und chemischen Prozessen der Ozean-Land-Atmosphäre-Kopplung, die begrenzte Verfügbarkeit von Daten und Rechenkapazität sowie existenten Unsicherheiten hinsichtlich der nur schwer vorhersehbaren sozioökonomischen Entwicklung. Darüber hinaus steigt die Unsicherheit der Klimaprojektionen je weiter in die Zukunft simuliert wird. Um diese Unsicherheiten zu erfassen, werden die Ergebnisse der Projektionen in der Regel in einer größeren Anzahl von Klimamodellergebnissen (Ensemble) als Spann- oder Bandbreiten angegeben.

Für die Erarbeitung von standort- und nutzungsspezifischen Klimaanpassungsmaßnahmen werden praxisnahe Erosionsprognosemodelle zur Beurteilung der potenziellen Erosivität und der Effektivität von Maßnahmen gegen die Erosion in Hinsicht auf den Klimawandel benötigt (LABO, 2010). Erosionsmodelle stellen die Prozesse der Bodenablösung, des Sedimenttransportes und der Deposition in vereinfachter Form dar. Die Komplexität des Modells und der damit abgebildeten Einzelprozesse sowie die zeitliche und räumliche Auflösung ist je nach Zweck des Einsatzes und seiner Zielstellung verschieden. So werden Modelle zu Forschungszwecken, zur Einschätzung des Erosionsrisikos für einzelne Niederschlagsereignisse oder der langjährigen mittleren Erosionsgefährdung, zur Abschätzung der Auswirkung von Landnutzungsänderungen bis hin zur Vorhersage zukünftiger Entwicklungen verwendet. Grundsätzlich werden dabei zwischen empirisch-statistischen und physikalisch basierten Modellen unterschieden.

Empirische Modelle („Black Box Modelle“) basieren auf statistischen Zusammenhängen, die aus Beobachtung, Messung oder experimentellen Analysen generiert wurden. Die Komplexität dieser Modelle, hinsichtlich Eingangsdaten, Parametrisierung und Rechenzeit ist vergleichsweise gering. Ein Nachteil ist jedoch die meist geringe zeitliche und räumliche Auflösung. In der Regel handelt es sich hierbei um Langzeit- oder Jahresdurchschnittsmodelle, die zudem mit einer schlechten Übertragbarkeit auf andere Gebiete einhergehen (MERRITT et al., 2003). Eines der bekanntesten empirischen Erosionsmodelle ist die im deutschsprachigen Raum etablierte *Allgemeine Bodenabtragungsgleichung* (ABAG). Die ursprünglich von WISCHMEIER & SMITH (1978) entwickelte *Universal Soil Loss Equation* (USLE) wurde auf Basis von statistischen Messungen am Hang entwickelt und berechnet auf Grundlage von sechs Hauptfaktoren zur Charakterisierung des Regens, der Eigenschaften des Bodens, der Hanglänge und -neigung, der Bedeckung und Bearbeitung des Bodens sowie Art der Erosionsschutzmaßnahmen, den mittleren jährlichen Bodenabtrag an einem Hang. SCHWERTMANN, VOGL & KAINZ (1990) passten die Gleichung auf bayrische Verhältnisse an.

Die Vorteile der ABAG liegen vor allem in der einfachen Anwendbarkeit. Aufgrund der Fülle an Anwendungen und Messdaten, ist die Gleichung das am besten abgesicherte Boden-erosionsmodell (MÄRKER, 2001). Zur Erhöhung der räumlichen Auflösung kann die Berechnung des Bodenabtrags mit der ABAG in eine GIS(Geographische Informationssysteme)-Umgebung integriert werden, was die Darstellung von Karten des Erosionsrisikos ermöglicht (KOTZI, 2012; TSEGAYE et al., 2019; MAZIGH et al.; 2022). Die einzelnen Faktoren beruhen auf simplen Algorithmen, die wenig Expertise und keine aufwändig zu ermittelnden Eingangsdaten benötigen. Weiterhin können die Faktoren entsprechend ihrer Funktion schnell angepasst werden um so z.B. mithilfe des Regen- und Oberflächenabflussfaktor (R-Faktor) die Folgen eines veränderten Niederschlagsregimes oder mithilfe des Bodenbedeckungs- und -bearbeitungsfaktor (C-Faktor) die Auswirkungen von Landnutzungs- oder Bodenbearbeitungsänderungen zu überprüfen. Dabei werden die ABAG sowie ihre Faktoren ständig weiterentwickelt und angepasst. So wurde die USLE zur *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE) verfeinert, welche eine verbesserte Bewertung der Bewirtschaftungsrichtung sowie eine Berücksichtigung von Rinnen- und Grabenerosion sowie des Sättigungsverhaltens von Böden ermöglicht (GHOSAL & DAS BHATTACHARYA, 2020; LÓPEZ-VICENTE et al., 2021). Um die Akkumulationsmengen und -flächen besser identifizieren zu können, wurde mithilfe der *Modified Universal Soil Loss Equation* (MUSLE87) eine rasterbasierte Verarbeitung der Daten eingeführt. Dies ermöglicht die Berücksichtigung einer komplexeren Topographie und eine erhöhte Genauigkeit bei der Berechnung von Abflussmengen und Fließlängen (MEIER, 2010). Zudem wird der R-Faktor durch zeitlich genauere Spitzenabflüsse ersetzt, was mit dem Gesamtabfluss eine ereignisbasierte Berechnung ermöglicht (DJOUKBALA et al., 2018). Aufgrund der flexiblen und einfachen Anwendbarkeit und diverser Weiterentwicklungen gehört die ABAG bzw. USLE zu einer der am weitesten verbreiteten Methoden zur Quantifizierung der Bodenerosion.

Physikalisch basierte, deterministische (oder auch prozessbasierte) Modelle beschreiben das Verhalten von Erosionsprozessen anhand von physikalischen und mathematischen Grundfunktionen. Anders als beim empirischen Modell können hier naturnahe Zusammenhänge dargestellt und erforscht werden. Die Modelle sind aufgrund der wesentlich höheren Anzahl an Eingangsdaten und dem erhöhten Parametrisierungsaufwand wesentlich komplexer und werden bisher nicht flächendeckend eingesetzt. Jedoch sind die Modelle in der Lage, räumliche und zeitliche Prozesse genauer zu beschreiben und simulieren somit die dynamischen Bedingungen der Erosionsprozesse sowohl hang- als auch einzugsgebietsbezogen sowie als ereignisbezogene oder kontinuierliche Modelle. So berücksichtigen

hydrologisch basierte Modelle, wie das *Areal Nonpoint Source Watershed Environmental Response Simulation* (ANSWERS) auch diffuse Sediment- und Schadstoffeinträge und zeigen so die Folgen der Bodenerosion für angrenzende Gewässer auf (MÄRKER, 2001). Das ursprünglich auf europäischen Verhältnissen und lokalen Forschungen basierende *EUROpean Soil Erosion Model* (EUROSEM) berechnet sowohl den Gesamtabfluss und -bodenverlust als auch den Abfluss innerhalb und zwischen den Rinnsalen und berücksichtigt u.a. die Auswirkung von Pflanzenbedeckung auf die Regenadsorption und Infiltration (MORGAN et al., 1998). Mithilfe des *erosion-productivity impact calculator model* (EPIC) kann das Verhältnis von Bodenerosion und Bodenproduktivität bestimmt werden (WILLIAMS, 1985). Die mittels umfangreicher Feldversuche validierten, ereignisbezogenen Modelle Erosion-2D und Erosion-3D werden in Deutschland und Sachsen vor allem im Rahmen von gutachterlichen Boden- und Gewässerschutzuntersuchungen angewendet. Diese und weitere häufig eingesetzte Erosionsmodelle sind in Tabelle 1 aufgeführt:

Tabelle 1: Übersicht über ausgewählte Bodenerosionsmodelle (nach MÄRKER, 2001; MEIER, 2010)

Modell	Name	Referenz	Räumliche Skala	Zeitliche Skala
<i>Empirisch-statistische Ansätze</i>				
USLE	Universal Soil Loss Equation	Wischmeier & Smith 1978	Einzelhang (ungegliedert)	Langzeitbasiert
ABAG	Allgemeine Bodenabtragungsgleichung	Schwertmann, Vogl & Kainz (1990)	Einzelhang (ungegliedert)	Langzeitbasiert
MUSLE87	Modified USLE	Hensel & Bork 1988	Einzugsgebiet	Ereignisbasiert
RUSLE	Revised USLE	Renard et al. 1991	Einzelhang (ungegliedert)	Langzeitbasiert
<i>Physikalisch begründete Ansätze</i>				
ANSWERS	Areal Nonpoint Source Watershed Environmental Response Simulation	Beasley & Huggins 1980	Einzugsgebiet	Ereignisbasiert
EPIC	Erosion Productivity Impact Calculator	Williams et al. 1985	Einzelhang (ungegliedert)	Langzeitbasiert
MIKE-SHE	Système Hydrologique Européen - Soil Erosion Model	Abott et al. 1986	Einzugsgebiet	Ereignisbasiert
EROSION 2D	2D Rainfall Erosion Model	Schmidt 1991	Einzelhang (gegliedert)	Ereignisbasiert
EROSION 3D	3D Erosion Model	Von Werner & Schmidt 1997	Einzugsgebiet	Ereignisbasiert
EUROSEM	EUROpean Soil Erosion Model	Morgan et al. 1998	Parzelle, Einzugsgebiet	Ereignisbasiert
LISEM	Limburg Soil Erosion Model	De Roo et al. 1996	Einzugsgebiet	Ereignisbasiert

1.3. Zielsetzung und Überblick

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Böden und die Notwendigkeit von Anpassungsmaßnahmen stellen Entscheidungsträger, wie Länder und Kommunen aber auch landwirtschaftliche Betriebe vor große Herausforderungen. Besonders Sachsen-Anhalt, als ackerbaulich bedeutsamste Region Deutschlands, ist aufgrund vergleichsweise geringer Niederschläge, leicht erodierbarer Böden und aufgrund des mittelgebirgsgeprägten Südens vulnerabel gegenüber den Folgen des Klimawandels, wie Dürren, Extremniederschlägen und dadurch verursachte Bodenabträge (KROPP & ROITHMEIER et al., 2009). Das Land ist aus diesem Grund auf Langzeitbeobachtungen und Zukunftsprojektionen zur Abschätzung der Veränderungen des Bodenwasserhaushaltes sowie auf die Entwicklung und Beurteilung von Anpassungsmaßnahmen angewiesen.

Langzeitmessungen des Bodenwassers ermöglichen es, die Wirkungen des sich ändernden Klimas auf den Boden nachzuweisen und zu quantifizieren. Beobachtungen des Bodenwassers werden jedoch selten über einen längeren Zeitraum vorgenommen, sodass im Vergleich weniger Langzeitdaten als bei klimatischen Größen vorliegen. Für die Beobachtung der lokalen Bodenfeuchte werden z.B. Tensiometer, Bodenfeuchtesensoren und Lysimeter eingesetzt. Für die flächenhafte Beobachtung finden Verfahren wie Fernerkundungsmethoden mittels Gammastrahlung, Infrarotstrahlung oder Mikrowellen Anwendung. Insbesondere Lysimeter, nach oben offene mit einem Bodenkern gefüllte Messsysteme zur Bestimmung verschiedener Größen des Wasserkreislaufes, ermöglichen die Erfassung von Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Pflanzen und Boden unter nahezu natürlichen Randbedingungen (MIEGEL, 2016). Alternativ zur Langzeitmessung ermöglichen hydrologische Modelle, wie der UFZ-Dürremonitor, die Beobachtung der Bodenfeuchte im Landschaftsmaßstab. Die aus Langzeitversuchen gewonnenen Daten können jedoch immer nur einen aktuellen bzw. vergangenen Zeitraum darstellen. Für die Darstellung des zukünftigen Klimas und den daraus abgeleiteten Parametern des Wasserkreislaufes sind Klimaprojektionen notwendig.

Um die derzeitigen und zukünftigen Gefährdungen, insbesondere die zunehmende Trockenheit und den Abtrag von Boden, zu reduzieren, werden geeignete Planungsinstrumente zur Abschätzung der Wirkungen des Klimawandels auf den Bodenwasserhaushalt sowie zur Entwicklung von Anpassungsstrategien benötigt. Diese sollten auf die Bedürfnisse der lokalen Akteure angepasst, d.h. praxisorientiert und nutzerfreundlich sein, wenig Eingangsdaten erfordern, Variantenrechnungen ermöglichen sowie in der Lage sein, Klimaprojektionen einfach einzubinden. Prozessorientierte Modelle sind aufgrund ihrer Komplexität und

notwendigen Expertise für die Verwendung durch die Akteure nur bedingt geeignet. Zudem sind diese häufig nicht frei verfügbar, was für die Akteure ein Hindernis darstellt. Um die Anforderungen praxisnaher Erosionsprognosemodelle zur Beurteilung der potenziellen Erosivität und der Effektivität von Klimaanpassungsmaßnahmen zu erfüllen, bietet die vielfach verwendete ABAG-Gleichung Vorteile hinsichtlich der Nutzerfreundlichkeit und der flexibel anwendbaren Faktoren. Jedoch weist die Gleichung in Bezug auf die Berücksichtigung des Klimawandels noch Defizite auf und muss dahingehend angepasst und erweitert werden. Ziel dieser Arbeit ist es daher, die langfristigen Veränderungen des Bodenwasserhaushaltes zu quantifizieren und Planungsinstrumente zur Abschätzung der gegenwärtigen und zukünftigen Bodenerosion und somit Hilfestellung für die Entwicklung von Anpassungsstrategien zu schaffen. Vor diesem Hintergrund werden in der Arbeit folgende Forschungsfragen untersucht:

- i) Welche Veränderungen und Trends des Klimas, der Sickerwasserrate und der Regenerosivität sind anhand von Langzeitmessungen nachweisbar? Entsprechen die Beobachtungen den mittels Klima- und Bodenmodelle simulierten Ergebnissen der Klimaprojektionen des AR4 bzw. AR5?
- ii) Lassen sich mit für die Akteure entwickelten, praxisorientierten Planungsinstrumenten die flächen- und linienhafte Erosion zuverlässig abschätzen?
- iii) Wie kann die projizierte Änderung des Niederschlagsverhaltens in einem Erosionsmodell berücksichtigt werden? Ergeben sich durch die Verwendung eines klimaangepassten Regenerosivitätsfaktors Vorteile für die Erstellung von Anpassungsmaßnahmen?

Im Anschluss an die Einleitung und die Darstellung der Ziele in **Kapitel 1**, werden im **Kapitel 2** langfristige Trends des Klimas und des Sickerwassers ausgewertet. Dies erfolgt auf Grundlage einer mehr als 30-jährigen Messzeitreihe von zwei Grünlandlysimetern der Lysimeterstation Falkenberg des Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ im Norden von Sachsen-Anhalt. Die ermittelten Änderungen werden mit Auswertungen des SRES-A1B-Szenarios der Klimamodelle REMO und WETTREG verglichen. Somit können Aussagen über die Robustheit der AR4-Klimaprojektionen vorgenommen werden.

Um die Wirkung von Anpassungsmaßnahmen gegen die Folgen der Bodenerosion zu analysieren, wird im **Kapitel 3** ein Planungsinstrumentensatz zur Bestimmung der flächen-

haften und linienhaften Erosion vorgestellt. Die Anwendbarkeit und Aussagekraft des praxisorientierten, nutzerfreundlichen Instrumentensatzes, die eine Alternative zu den komplexen Modellen darstellt, wird am Beispiel von zwei Einzugsgebieten im östlichen Harzvorland in Sachsen-Anhalt nachgewiesen.

In **Kapitel 4** werden zwei Regressionsgleichungen zur Schätzung des gegenwärtigen und zukünftigen Regenerositätsfaktors aufgezeigt, mit dem Ziel, die Robustheit bei der Berechnung der zukünftigen Erosivität mit der ABAG zu verbessern. Zur Kalibrierung und Validierung der Regressionsgleichungen werden die aus Niederschlagsstationen geschätzten gegenwärtigen R-Faktoren und die aus Klimaprojektionen erhaltenen R-Faktoren des Landkreises Mansfeld-Südharz im Süden von Sachsen-Anhalt ausgewertet.

Eine Schlussfolgerung mit Ausblick wird in **Kapitel 5** vorgenommen, wobei die in Kapitel 1 aufgestellten Fragestellungen beantwortet werden.

2. Effekte des Klimawandels auf die Sickerwasserrate - Ein Vergleich von Ergebnissen aus Klimamodellrechnungen mit langjährigen Messungen an Grünlandlysimetern

Dieses Kapitel basiert auf dem veröffentlichten Artikel: Köhn, J., Meißner, R., Rupp, H., Reinstorf, F. (2020): Effekte des Klimawandels auf die Sickerwasserrate – Ein Vergleich von Ergebnissen aus Klimamodellrechnungen mit langjährigen Messungen an Grünlandlysimetern. *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 64, (1), 23-36. DOI: 10.5675/HyWa_2020.1_2

2.1. Zusammenfassung

Um langfristige, klimatisch bedingte Veränderungen des Sickerwasseranfalls zu quantifizieren, wird hauptsächlich auf Computermodelle unter Nutzung der Ergebnisse von Klimamodellen zurückgegriffen. Diese liefern jedoch nur dann verlässliche Ergebnisse, wenn Modellanpassungen durchgeführt werden können und ausreichende Messzeitreihen vorliegen. Mithilfe der Analyse von 33-jährigen Messzeitreihen aus zwei Grünlandlysimetern der Lysimeterstation Falkenberg des Helmholtz-Zentrums für Umweltforschung - UFZ im nördlichen Sachsen-Anhalt konnte das Langzeitverhalten der Sickerwasserrate unter realen Bedingungen ausgewertet werden. Um die lokale Entwicklung des Klimas und die Wirkung der Klimaänderungen auf das Bodenwasser zu quantifizieren, wurden zudem meteorologische Messreihen einbezogen. Der Vergleich mit Projektionen aus regionalen SRES-Klimamodellen (nach: "Special Report on Emissions Scenarios") für Sachsen-Anhalt, generiert aus überarbeiteten Szenarien des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), zeigte generell nur geringe Übereinstimmungen. Insbesondere für Niederschlagsänderungen wurden erhebliche Differenzen festgestellt, so dass Abweichungen zwischen simulierter und bisher beobachteter Grundwasserneubildung auftraten. Für die Messzeitreihen der UFZ-Lysimeterstation Falkenberg waren bei signifikant steigenden Temperaturen und Verdunstungsraten bisher keine signifikanten Trends hinsichtlich der Sickerwasserrate nachweisbar. Jedoch wurde eine Tendenz zu sinkenden Sickerwasserraten im Frühjahr deutlich, welche Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum und somit auf den Ertrag haben.

2.2. Einleitung

Der Bodenwasserhaushalt ist von wesentlicher Bedeutung für die Landwirtschaft. Dabei ist vor allem die Speicherfunktion der Böden zu nennen. Das in den oberen Bodenschichten gespeicherte Wasser trägt wesentlich zur Versorgung der Nutzpflanzen bei und wirkt bei

Verdunstung abkühlend auf den Boden. Bodenwasser, das in tiefere Schichten versickert, beeinflusst das verfügbare Grundwasservolumen. Zudem nimmt der Boden aufgrund seiner Filterwirkung eine Schlüsselposition in der Bereitstellung von qualitativ hochwertigem Trinkwasser ein. Der Bodenwasserhaushalt hat zudem einen entscheidenden Einfluss auf die ober- und unterirdischen Abflussbildungsprozesse. So hängt die Entstehung von Oberflächenwasserabfluss und die daraus resultierende Bodenerosion ebenso wie die Bildung von Hochwasser vom Bodenwassergehalt vor einem Niederschlagsereignis ab. Gleichzeitig füllen Niederschläge den Bodenspeicher auf und tragen zur Grundwasserneubildung bei. Zudem ist das Bodenwasser ein aktives Bindeglied im kontinentalen Wasseraustausch und beeinflusst das Klimasystem (GUSEV & NOVAK, 2007). Langjährige Beobachtungen und Analysen von Sickerwasserausträgen, besonders in Hinsicht auf Veränderungen und Trends, sind aus diesem Grund ein wichtiges Aufgabenfeld in der Bodenhydrologie. Vor allem die durch die globale Erwärmung zu erwartenden Veränderungen des Wasserhaushaltes nehmen dabei einen besonderen Stellenwert ein. Derzeit werden die Effekte des Klimawandels auf den Bodenwasserhaushalt zum Großteil über Computermodelle unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Szenariosimulationen der Klimamodelle untersucht (ECKHARDT & ULBRICH, 2003; HERRERA-PANTOJA et al., 2006; PFÜTZNER et al., 2012; PAUL et al., 2014). Da der Bodenwasserhaushalt wesentlich von Niederschlag und Verdunstung bestimmt wird, hat eine Änderung dieser klimatischen Größen unmittelbar Einfluss auf diesen. Besondere Bedeutung hat dabei die Änderung der Temperatur, welche die Verdunstung aber auch über Extremniederschläge in hohem Maße beeinflusst (LEHMANN et al., 2015). Nach aktuellem Kenntnisstand des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) hat die Temperatur im globalen Mittel gegenüber dem vorindustriellen Niveau um etwa 1,0 K zugenommen und wird zwischen 2030 und 2052 wahrscheinlich eine Zunahme von 1,5 K erreichen (IPCC, 2018). In diesem Zusammenhang wurden auch Trends zur Zunahme von Intensität und Häufigkeit mancher Klima- und Wetterextreme, wie z. B. bei Starkniederschlägen und Hitze- und Dürreperioden projiziert. Dies hat eine erhöhte Belastung der Landökosysteme zu Folge und birgt Risiken für die Ernährungssicherheit. Um die Auswirkung menschlicher Aktivität auf das Klima quantifizieren zu können, wurden vom IPCC Emission-Szenarien entwickelt, welche unterschiedliche Annahmen für die Entwicklung von Treibhausgasemissionen treffen (IPCC, 2000). Zur Projektion der aus den Emissions-Szenarien folgenden Klimaszenarien werden Globale Klimamodelle (GCM – aus dem engl. Global Circulation Models) genutzt, welche wiederum den Antrieb für verschiedene Regionale Klimamodelle (RCM – aus dem engl. Regional Climate Models) darstellen. RCM sollen, aufgrund ihrer höheren Auflösung, das Klima

in regionalen Maßstäben, z. B. für ein Bundesland, wiedergeben. Um den Übergang der großräumigen Informationen der GCM auf einen lokalen Maßstab zu ermöglichen, werden entweder numerisch-dynamische Klimamodelle verwendet, welche in einem dreidimensionalen atmosphärischen Zirkulationsmodell die Prozesse in der Atmosphäre mithilfe der Vorgaben des GCM simulieren, oder Empirisch-Statistische Downscaling Methoden (ESD), welche basierend auf beobachteten Daten empirisch-statistische Zusammenhänge herstellen. Derzeit kommen 35 dynamische Simulationen und 16 statistische Simulationen für Deutschland zur Anwendung (HÜBENER et al., 2017).

Sogenannte "Ensemble" aus verschiedenen Global-/Regionalmodell-Kombinationen, mehreren Realisierungen einer Klimasimulation und Emissionsszenarien erzeugen eine hohe Bandbreite von Klimaprojektionen. Die Breite dieses Spektrums ist zudem auch von der natürlichen Klimavariabilität und den Modellunsicherheiten abhängig. Da die Ergebnisse der Modellketten Grundlage für die Modellierung weitergehender hydrologischer Prozesse, wie den Abfluss, das Grundwasser oder den Bodenwasserhaushalt sind, ist es wichtig, die Bandbreite der Klimamodelle einzubeziehen. Gleichzeitig ist es jedoch auch notwendig, die Simulationsergebnisse von Bodenwasserhaushaltsmodellen durch langjährige Messungen zu verifizieren. Langzeitbeobachtungen der Sickerwasserrate bzw. Grundwasserneubildung sind jedoch kaum vorhanden, sodass Grundwassertrends häufig nur abgeschätzt werden. BRUTSAERT (2008) ermittelte beispielsweise den Langzeittrend des Grundwasservolumens aus Abflüssen in einem Gerinne, indem er den Basisabfluss berechnete. SHAMSUDDUHA et al. (2009) untersuchten den Trend von Grundwasserständen in Bangladesch. Beides stellen jedoch keine direkten Messungen der Sickerwasserrate dar. CHENG et al. (2015) nutzten einen Langzeitdatensatz des Bodenfeuchtemessnetzes in Ostasien. Hierbei konnte ein Trend zu einer verminderten Bodenfeuchte mit ausgeprägter Trockenheit im Boden ermittelt werden. Auch in Europa nimmt das Thema Trockenheit und Dürre nach den Hitzeperioden der Jahre 2003, 2015, 2017 und 2018 einen immer größer werdenden Stellenwert ein (HOY et al., 2017; IMBERY et al., 2018). In diesem Zusammenhang untersuchten SCHMIDT et al. (2018) die Grundwasserneubildungsrate in Karstgrundwasserleitern im östlichen Mittelmeerraum, welche zur Trinkwasserversorgung eingesetzt werden. SENEVIRATNE et al. (2012) analysierten schwerpunktmäßig das Trockenjahr 2003 und versuchten, die Auswirkungen anhand von Langzeitlysimetermessungen und Durchflussmessungen im Fließgewässer zu ermitteln. Die Notwendigkeit von regionalen Messnetzen sowohl für klimatische als auch bodenwasserhaushaltsbezogene Beobachtungen wurde bereits erkannt und z. B. im Projekt TERENO (TERrestrial ENvironmental Observatoria) umgesetzt (ZACHARIAS, 2011). Hier wurden Beobachtungs-

plattformen in verschiedenen terrestrischen Regionen geschaffen. Eine Überwachung des Bodenwasserhaushaltes könnte vor allem in Zukunft zentrale Entscheidungen der Landwirte erleichtern, wie zum Beispiel die Menge und den Zeitpunkt des Einsatzes von Düngemitteln, Beregnungswassermengen, den Anbau von Zwischenfrüchten oder auch die Bestimmung des Zeitpunktes der Befahrung und Bearbeitung von Ackerschlägen (RIPPEL, 2002). Zudem unterstützen Langzeitdaten die Modellierung des Bodenwasserhaushaltes und tragen entscheidend zum Verständnis von Ursache-Wirkung zahlreicher Prozesse bei. Aus diesem Grund ist eine Überwachung der Bodenfeuchte und der Sickerwasserrate bzw. Grundwasserneubildung durch Lysimetermessanlagen oder ein Monitoring in regionalen Maßstäben in Zukunft erforderlich.

An der vom Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ betriebenen Lysimeterstation am Standort Falkenberg, im Folgenden als Lysimeterstation Falkenberg bezeichnet, werden seit über 30 Jahren Experimente an Grünlandlysimetern durchgeführt. Ziel dieser Untersuchung ist es zum einen festzustellen, ob für die langjährigen Messreihen Tendenzen veränderter Sickerwasserraten zu erkennen sind und ob diese auf klimatische Änderungen zurückgeführt werden können. Ein zweiter Schwerpunkt liegt auf dem Vergleich mit Ergebnissen aus Klimamodellsimulationen für Sachsen-Anhalt. Hierbei soll überprüft werden, ob die an der Lysimeterstation Falkenberg gemessenen langfristigen Entwicklungen der klimatischen Größen und der Sickerwasserrate durch die derzeitigen Simulationsergebnisse der Klimamodelle "WETTERlagen-basierte REGIONalisierungsmethode" (WETTREG) und dem "Regional-Modell" (REMO) wiedergegeben werden können (KREIENKAMP et al., 2012). Die zwei Klimamodelle eines Emissionspfades (A1B) geben zwar nicht die gesamte Bandbreite der möglichen Klimaänderungen wieder, jedoch sollten sie den generellen Trend der beobachteten Daten widerspiegeln können. Die hier vorliegenden Untersuchungen und Ergebnisse stellen dabei einen Einstieg in eine weitergehende, modellgestützte Untersuchung mit aktuelleren Klimaszenarien dar. Dabei soll insbesondere auf die Unterschiede von Szenarien und Projektionen eingegangen werden.

2.3. Folgen des Klimawandels für Sachsen-Anhalt

Bedingt durch den Klimawandel ist von einer Veränderung der meteorologischen Größen, insbesondere der Temperatur und der Niederschlagsverteilung auszugehen. In seinem fünften Sachstandsbericht stellt der Weltklimarat (IPCC) fest, dass sich die Atmosphäre infolge der Zunahme der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter erwärmt hat und die Durchschnittstemperatur der Erde seit dem Jahr

1881 um 0,85 K gestiegen (IPCC, 2014) ist. Diese Temperaturänderungen können auch im Bundesland Sachsen-Anhalt beobachtet werden. Nach Berichten des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (LAU) kann für alle mit der Temperatur verknüpften Größen eine trendhafte Entwicklung festgestellt werden (SPEKAT, 2015). Seit 1881 war eine Erhöhung der Lufttemperatur von 1,3 K zu beobachten (LAU, 2017). Beim Niederschlag sind die beobachteten Trendentwicklungen räumlich indifferent. An einigen Stationen sind Anzeichen von Frühjahrstrockenheit zu erkennen. Grundsätzlich nehmen Sommerniederschläge ab, während die Winterniederschläge überwiegend zunehmen. Um die weiteren zukünftigen Entwicklungstrends abschätzen zu können, wurden vom LAU Untersuchungen zu den Folgen des Klimawandels für Sachsen-Anhalt in Auftrag gegeben (KREIENKAMP et al., 2012). Hier wurden die Veränderungen der Temperatur, des Niederschlags und weiterer meteorologischer Größen mithilfe von Klimamodellen bis zum Jahr 2100 simuliert. Grundlage bildeten die GCM-RCM Modellketten ECHAM5-WETTREG2010 und ECHAM5-REMO mit dem SRES (Special Report on Emissions Scenarios)-Szenario A1B. SRES spezifizieren dabei den menschlichen Einfluss in der Zukunft, z. B. sozio-ökonomische Aspekte wie das Bevölkerungswachstum, die Energienutzung, die Entwicklung der Industrie und Landwirtschaft sowie das Umweltbewusstsein und wurden im 4. IPCC-Sachstandsbericht (IPCC, 2007) vorgestellt.

A1B stellt ein Szenario mit einem hohen Wirtschaftswachstum, einer kulminierenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung, einer raschen Einführung neuer und effizienterer Technologien und einer ausgeglichenen Nutzung verschiedener Energiequellen dar (IPCC, 2007). Der Emissionspfad des A1B Szenarios ergibt folgende Änderungen zum Referenzzeitraum 1971 bis 2000 (KREIENKAMP et al., 2012):

- WETTREG (ECHAM5, A1B):
 - Zunahme der mittleren Jahrestemperatur bis 2100 um ca. 2,3°C
 - Anstieg der Tagesmaximumtemperatur im Sommer (+4,7°C) und Winter (+5,0°C) stärker als im Frühling (+2,9°C) und Herbst (+3,0°C) bis 2100
 - Zunahme an heißen Tagen ($\geq 30^{\circ}\text{C}$) um durchschnittlich 28 Tage bis 2100
 - Abnahme der klimatischen Wasserbilanz um ca. 200 mm bis 2100
 - Sinkende Jahresniederschläge (-10% bis -30%) bis 2100

- REMO (ECHAM5, A1B):
 - Zunahme der mittleren Jahrestemperatur bis 2100 um ca. 3,0°C
 - Anstieg Tagesmaximumtemperatur im Frühling (+1,5°C), Sommer (+2,7°C), Herbst (+3,2°C) und am stärksten im Winter (+4,6°C) bis 2100
 - Zunahme von heißen Tagen ($\geq 30^\circ\text{C}$) um durchschnittlich 10 Tage bis 2100
 - Steigende Jahresniederschläge (ca. +10%) bis 2100

Dargestellt sind weiterhin die Änderungssignale der aus der Simulation ermittelten meteorologischen Größen Lufttemperatur, Niederschlag und relative Luftfeuchte für die "Nahe Zukunft" 2011 bis 2040 für Sachsen-Anhalt (Tab. 2).

Tabelle 2: Differenz der Temperatur sowie Änderung des Niederschlags und der relativen Luftfeuchte für WETTREG2010 und REMO für die Zeitscheibe ‚Nahe Zukunft‘ (2011 bis 2040) gegenüber der Zeitscheibe ‚Referenz‘ (1971 bis 2000) als Mittelwert für Sachsen-Anhalt (KREIENKAMP, 2012)

	WETTREG (ECHAM5, A1B)			REMO (ECHAM5, A1B)		
	Tagesmittel Temperatur	Niederschlag	Rel. Luftfeuchte	Tagesmittel Temperatur	Niederschlag	Rel. Luftfeuchte
Hydrologisches Jahr	+0,9 K	-1,5%	-0,7%	+0,6 K	+3,1%	+0,0%
SommerHJ (MJJASO)	+0,8 K	-3,5%	-1,2%	+0,7 K	+0,4%	+0,1%
WinterHJ (NDJFMA)	+1,1 K	+0,9%	-0,2%	+0,5 K	+8,9%	-0,1%
Frühjahr (MAM)	+0,4 K	+1,8%	+0,0%	-0,4 K	+10,3%	+2,3%
Sommer (JJA)	+1,0 K	-3,6%	-1,5%	+0,6 K	+0,2%	+0,3%
Herbst (SON)	+0,8 K	-3,9%	-1,0%	+0,9 K	+7,7%	-0,6%
Winter (DJF)	+1,5 K	+0,3%	-0,3%	+1,2 K	-3,6%	-2,1%

J - Januar; F - Februar; M - März, A - April, M - Mai; J - Juni; J - Juli; A - August; S - September; O - Oktober; N - November; D - Dezember

KREIENKAMP et al. (2012) gehen in ihrer Studie davon aus, dass steigende Temperaturen, eine erhöhte Verdunstung und ein möglicher Rückgang des Niederschlags die Gründe für eine verringerte klimatische Wasserbilanz (KWB, Differenz aus Niederschlag und Referenzverdunstung) sind. Vor allem WETTREG projiziert einen deutlichen Rückgang der jährlichen KWB in der nahen Zukunft von bis zu 200 mm (Abb. 1, unten). Die Simulationen des REMO-Modells deuten auf eine höhere KWB am Anfang des Jahres, besonders im Frühjahr (Tage 70 – 110) und eine geringere KWB in Sommer hin (Abb. 1, oben rechts). Infolge der abnehmenden KWB ist für die Zukunft eine Abnahme der Grundwasserneubildungsrate (GWN) wahrscheinlich. Ein Rückgang ist vor allem im Sommer zu erwarten, während im Winter von einer zeitweise ansteigenden GWN ausgegangen wird. Phasen im Winter, in der eine GWN stattfindet, werden dabei jedoch als kürzer projiziert.

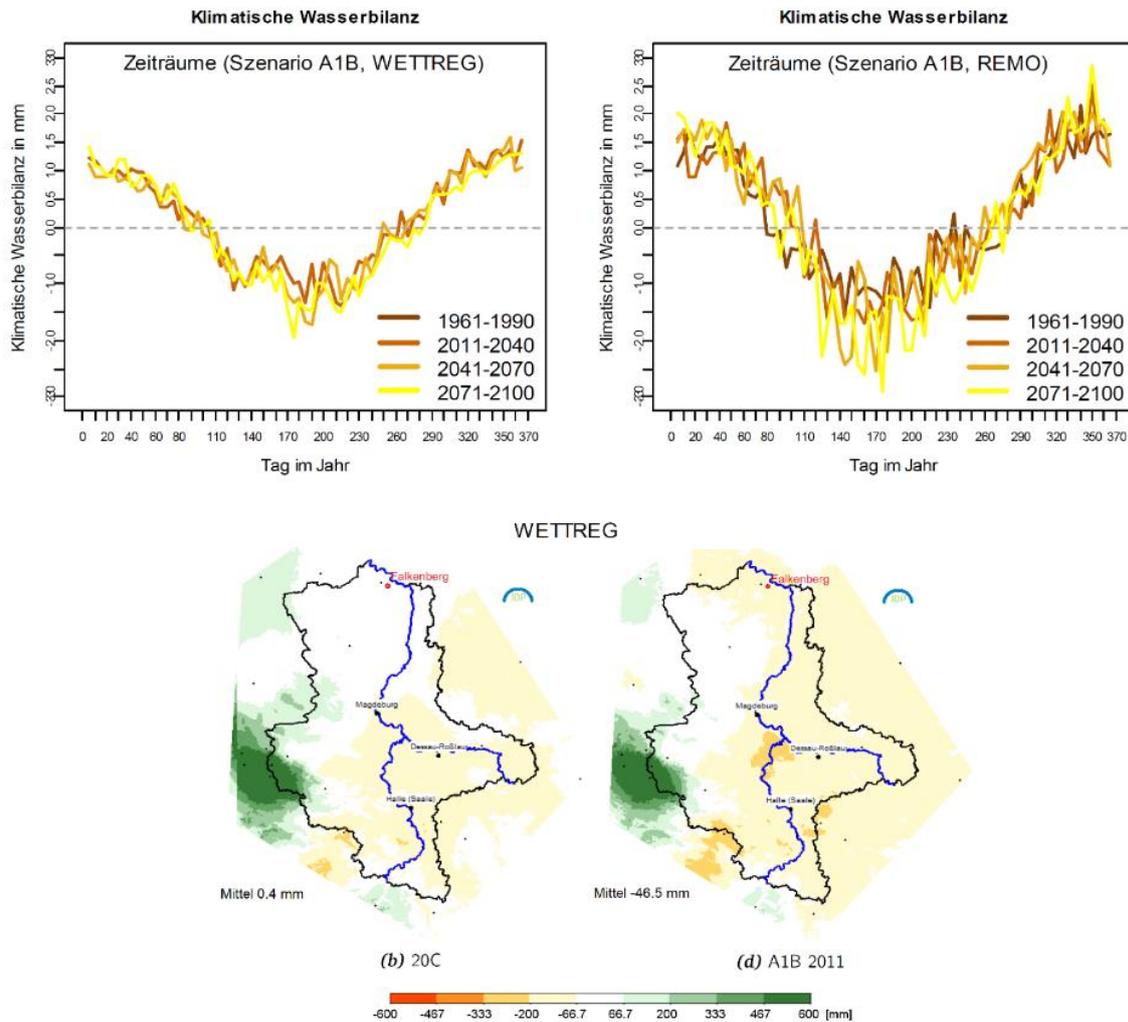


Abbildung 1: Oben: Jahresverlauf der täglichen Klimatischen Wasserbilanz für das Szenario A1B in den Zeiträumen 1961-1990, 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 für die Klimamodelle WETTREG (links) und REMO (rechts) (KREIENKAMP 2012); Unten: Darstellung der Klimatischen Wasserbilanz in Sachsen-Anhalt – Gegenüberstellung von Simulationen der Zeithorizonte 1971-2000 (20C) und 2011-2041 (11A1B) (WETTREG2010) (KREIENKAMP, 2012)

KREIENKAMP et al. (2012) untersuchten weiterhin die Auswirkungen des projizierten Klimas auf das Wasserdargebot in Sachsen-Anhalt mithilfe des ökohydrologischen Modells SWIM (Soil and Water Integrated Model) und den Klimamodellen WETTREG (ECHAM5, A1B) und REMO (ECHAM5, A1B) als meteorologische Eingangsdaten. Hierzu wurden Simulationen des Wasserhaushaltes in kleinräumlichen Maßstäben durchgeführt. Das WETTREG-Modell deutete in der "Nahen Zukunft" landesweit auf eine sinkende GWN (-20 bis -40 mm/Jahr) hin, mit Ausnahme des Harzes und in der nordwestlichen Altmark, wo geringe Zunahmen simuliert wurden. Das REMO-Modell zeigte bis zum Jahr 2040 überwiegend eine Zunahme von bis zu 20 mm. In einigen Regionen ist jedoch auch eine Abnahme der Grundwasserneubildung von bis zu 20 mm projiziert worden, wie auch beispielsweise am Standort der Lysimeterstation Falkenberg (Abb. 2).

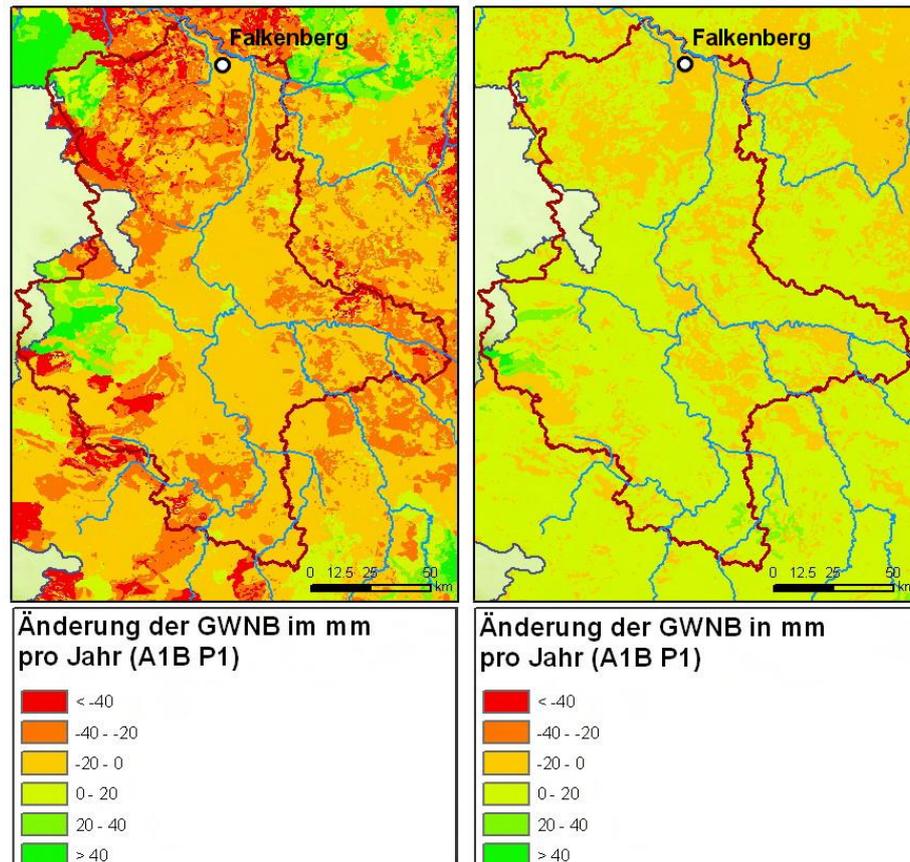


Abbildung 2: Simulierte Veränderung der Grundwasserneubildung [mm] für den Zeitraum 2011-2040 gegenüber 1961-1990 nach dem Modell WETTREG (links) und REMO (rechts) unter dem Szenario A1B (PIK 2009) (KREIENKAMP, 2012)

Weiterhin untersuchten PFÜTZNER et al. (2012) mithilfe der Simulationsergebnisse des ökohydrologischen ArcGIS-Einzugs-GebietsMODell Sachsen-Anhalt ArcEGMO-ST den Einfluss von Landnutzung und Bodenart. Hierbei wurden u. a. semiterrestrische Böden, wie sie auch in der Umgebung der Lysimeterstation Falkenberg vorkommen, berücksichtigt. Für Grünland wurde von der "Nahen Zukunft" zur "Fernen Zukunft" eine kontinuierlich abnehmende jährliche und monatliche GWN projiziert. Weiterhin wurde festgestellt, dass in der "Mittleren Zukunft" (2041 bis 2070) aufgrund eines deutlichen Wasserdefizits in der Hauptwachstumsperiode (Juni) Ertragseinbußen auftreten können.

2.4. Material und Methoden

Für die Langzeituntersuchungen wurden die Messungen von zwei Grünlandlysimetern aus der Lysimeterstation Falkenberg verwendet (Bundesland Sachsen-Anhalt; 52°51'33"N, 11°48'44"E). Hierbei handelt es sich um zwei nicht wägbare Lysimeter (Oberfläche = 1 m²; Tiefe = 1,25 m) (Tab. 2 & Abb. 3). Das Bodenmaterial stammt aus der Region Bretsch-Lückstedt (Sachsen-Anhalt, Altmark).

Tabelle 3: Bodeneigenschaften der Lysimeter nach ACKERMANN (2016)

Horizont- bezeichnung	Tiefenlage (cm uGOK)	Dichte (g·cm ⁻³)	Sand (%)	Schluff (%)	Ton (%)	Corg (%)	C/N	pH
Ah bzw. Ap	0-30	1,48	73,6	14,3	12,1	1,5	11,6	6,6
C	30-100	1,84	75,2	17,4	7,4	0,45	11,3	5,6

Corg – Anteil an organischen Kohlenstoff, C/N – Verhältnis von Kohlenstoff (C) zu Stickstoff (N)

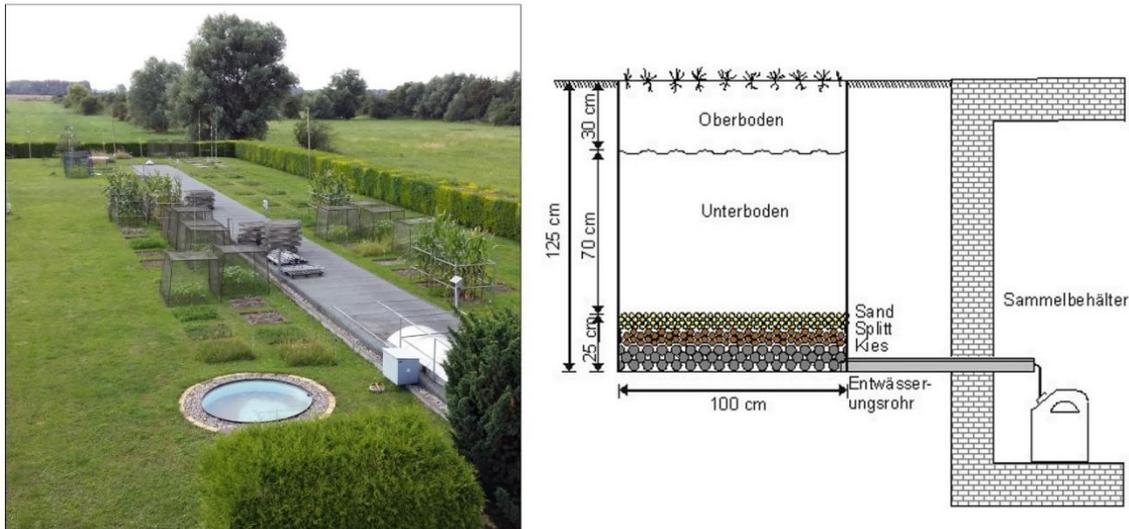


Abbildung 3: Links: Aufnahme der Lysimeter an der Lysimeterstation Falkenberg (Lysimeter 1&2 befinden sich links vorn); Rechts: Schema der verwendeten Grünlandlysimeters (GODLINSKI, 2005)

Es wurde jeweils nach Ober- und Unterboden getrennt, schichtweise manuell in die Lysimetergefäße eingebaut (GODLINSKI, 2005). Beide Lysimeter werden als echte Wiederholung mit Dauergrünland bewirtschaftet. Erntezeitpunkte, Bodenbearbeitung, Art, Menge und Zeitpunkt der Düngung sowie die Grünschnitterträge und Nährstoffentzüge wurden kontinuierlich erfasst (MEISSNER et al., 2010). Die Ernte erfolgte zwei Mal im Jahr (2-schnittig), der I. Schnitt gewöhnlich im Juni, der II. Schnitt üblicherweise im Oktober. Eine Beregnung erfolgte nur im Notfall zur Sicherung der Bestände, sodass irreversible Dürreschäden verhindert werden. Die Bewässerungsmenge ist dabei so gering, dass sie für die Sickerwasserbildung vernachlässigt werden kann. Das aus den Lysimetern am Gefäßboden austretende Sickerwasser wurde in Sammelbehältern aufgefangen, in einem monatlichen Turnus beprobt und chemisch analysiert. Messungen zur Menge und Beschaffenheit des Sickerwassers wurden seit dem Jahr 1982 dokumentiert. Aufgrund der Bodenkonsolidierung in den ersten beiden Jahren nach der Befüllung wurde die Auswertung für den Zeitraum von 1984/85 bis 2016/17 vorgenommen. Die hier aufgeführten Jahre für die Sickerwasserrate stellen Lysimeterjahre dar, die sich jeweils von Mai eines Jahres bis April des Folgejahres erstrecken.

Parallel zu den Daten aus der Lysimeterstation Falkenberg wurden ergänzend die meteorologischen Daten aus der ca. 6,6 km nordwestlich liegenden Wetterstation Seehausen (Altmark) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) herangezogen. Zur Verfügung standen die Parameter Niederschlag, Luft- und Bodentemperatur, Luftdruck, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Sonnenscheindauer als Tageswerte von 1977 bis 2017. Aufgrund der systematischen Messfehler wurden die Niederschlagshöhen von der Wetterstation Seehausen (Altmark) nach dem Verfahren von RICHTER (1995) bzw. nach ATV-DVWK-M 504 korrigiert (Annahme einer leicht geschützten Lage). Die potenzielle Verdunstung wurde als FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) gemäß ATVDVWK-M 504 berechnet.

Zur Ermittlung von Trends in den Messgrößen wurde der Mann–Kendall Signifikanztest verwendet. Dabei wurden die jährlichen, halbjährlichen und monatlichen Lysimeterdaten und die meteorologischen Messreihen untersucht. Um die Ergebnisse saisonal differenzieren zu können, wurde die Trenduntersuchung separat für jeden Monat durchgeführt. Zur Ermittlung der Signifikanz wurde eine Irrtumswahrscheinlichkeit α von 0,05 gewählt. Die Ergebnisse wurden in Signifikanzbereiche unterteilt: Eine berechnete Überschreitungswahrscheinlichkeit $p \geq 0,05$ wurde mit "nicht signifikant", $0,05 > p \geq 0,01$ mit "signifikant", $0,01 > p \geq 0,001$ mit "hoch signifikant" und $p < 0,001$ mit "höchst signifikant" bezeichnet (nach KROPP & ROITHMEIER et al., 2009). Weiterhin wurde für den Vergleich der Lysimeter 1 und 2 der zweiseitige Student-Test (t-Test) mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von $p \geq 0,05$ verwendet.

Tabelle 4: Definition der Zeitspannen für die Klimamodelle und die gemessenen Klimaparameter

Klimamodelle WETTREG & REMO		Klimatische Parameter Wetterstation Seehausen (Altmark)	
Name der Zeitspanne	von–bis	Name der Zeitspanne	von–bis
Referenz	1971–2000	Vergangenheit	1977–2000
Nahe Zukunft	2011–2040	Gegenwart	2001–2017

Um die Veränderung der klimatischen Parameter zu erfassen, wurden jeweils zwei Zeitspannen gebildet und miteinander verglichen. Die Differenz der Mittelwerte aus zwei Zeitspannen ist als Änderung bzw. Änderungssignal definiert. Aufgrund der unterschiedlichen Messzeiträume der Klimamodelle und der gemessenen Klimaparameter sind die jeweiligen Zeitspannen verschieden definiert. Die in Tabelle 4 beschriebenen Zeitspannen werden im Gliederungspunkt 2.5.2 für einen Vergleich zwischen Klimaprojektion und Beobachtung verwendet.

2.5. Untersuchungsergebnisse

2.5.1. Beobachtete meteorologische Trends

Um mögliche Veränderungen in den Langzeitmessreihen der Lysimeter interpretieren zu können, wurden zunächst die meteorologischen Messdaten aus der Wetterstation Seehausen (Altmark) auf klimatische Trends ausgewertet (Tab. 5). Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurde die Trendanalyse im Zeitraum von 1984/85 bis 2016/17 durchgeführt.

Tabelle 5: Mittelwerte und Trends ausgewählter Klimaparameter an der Wetterstation Seehausen (Altmark) (tägliche Zeitreihe von 1984/85 bis 2016/17)

Wetterstation Seehausen (Altmark) (1984/85 bis 2016/17)					
	Mittelwert Luft- temperatur [°C]	Summe korrigierter Niederschlag [mm]	Mittelwert Rel. Luft- feuchte [%]	Mittelwert Sonnen- scheindauer [h]	Summe Gras-Referenz Verdunstung ET ₀ [mm]
Hydrologisches Jahr	9,3 (+++)	641 (+)	78,7 (-)	4,5 (+)	577 (++)
SommerHJ (MJJASO)	14,9 (++++)	351 (+)	74,2 (-)	6,2 (+)	447 (++)
WinterHJ (NDJFMA)	3,7 (+)	290 (-)	83,1 (+/-)	2,8 (+)	130 (+)
Frühjahr (MAM)	8,9 (++)	135 (-)	73,5 (-)	5,8 (+)	176 (+)
Sommer (JJA)	17,6 (++++)	196 (+)	71,1 (-)	7,0 (+)	285 (+)
Herbst (SON)	9,4 (+++)	154 (+)	83,9 (+)	3,5 (+)	84 (+)
Winter (DJF)	1,4 (+)	157 (+/-)	86,3 (+)	1,8 (+/-)	32 (+/-)
-	(nicht signifikant) sinkend		+	(nicht signifikant) steigend	
--	signifikant sinkend		++	signifikant steigend	
---	hoch signifikant sinkend		+++	hoch signifikant steigend	
----	höchst signifikant sinkend		++++	höchst signifikant steigend	

Für die mittlere Jahrestemperatur (9,3 °C) wurde ein hoch signifikant ansteigender Trend festgestellt. Im Vergleich zum Jahr 1984 waren die Temperaturen im Jahr 2016 im Mittel um 1,5 °C höher (bzw. 0,5 °C pro Dekade – Steigung der linearen Regressionsgerade; Abb. 4, links). Die Temperaturzunahme war für fast alle untersuchten Zeitspannen signifikant. Besonders deutlich war ein Anstieg im Sommerhalbjahr bzw. in den Sommermonaten zu beobachten, wobei im Monat Juni die größte Zunahme der Temperatur ermittelt wurde (nicht dargestellt).

Im Gegensatz dazu konnten für den Jahresniederschlag (unkorrigiert im Mittel 562 mm, korrigiert im Mittel 641 mm) keine signifikanten Trends festgestellt werden. In der Tendenz stieg die Niederschlagsmenge im Jahresmittel und Sommerhalbjahresmittel an, in den Frühjahrsmonaten war hingegen ein Rückgang zu verzeichnen (vgl. Tab. 5). Die relative Luftfeuchte, die im Mittel 78,7 % betrug, zeigte eine sinkende Tendenz, jedoch keinen

signifikanten Trend. Die Sonnenscheindauer nahm in fast allen Zeiträumen leicht zu. Temperatur, relative Luftfeuchte und Sonnenscheindauer haben einen großen Einfluss auf die Verdunstung. Um diesen quantifizieren zu können, wurde aus den täglichen Messreihen die monatliche ETO berechnet. Die Auswertung zeigte, dass auch ETO deutlichen Veränderungen unterliegt. Die Jahres- und Sommerhalbjahresverdunstung erhöhte sich signifikant; auch in den anderen Zeiträumen war eine Zunahme zu beobachten.

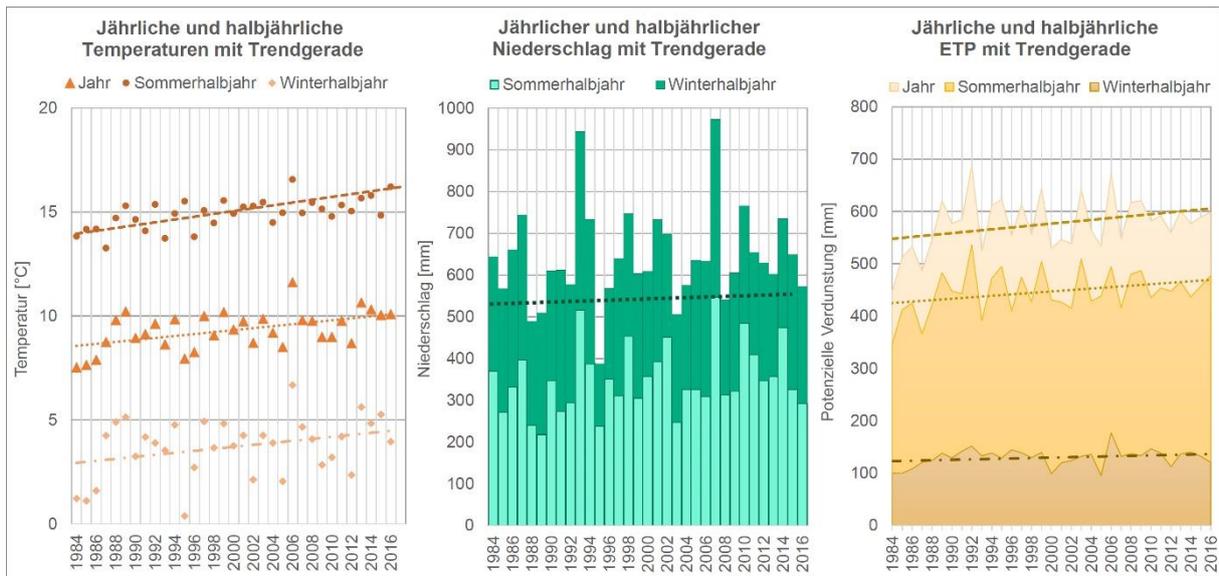


Abbildung 4: Jährliche und halbjährliche Temperaturen (links) und potenzielle Verdunstung (ETP) (rechts) mit Trendgeraden und jährlicher Niederschlag (als Summe aus Sommer- und Winterhalbjahresniederschlag) (mitte) mit Trendgerade

2.5.2. Vergleich der meteorologischen Trends mit Klimamodellprojektionen

In Tabelle 6 sind die Änderungen der gemessenen klimatischen Parameter zwischen den Zeitspannen "Gegenwart" und "Vergangenheit" der Wetterstation Seehausen (Altmark) dargestellt. Die Ergebnisse wurden im Folgenden mit den Änderungen der Klimamodelle zwischen den Zeitspannen "Nahe Zukunft" und "Referenz" verglichen (vgl. Tab. 2). Zwar wichen bei den Klimamodellen die Zeitspannen "Nahe Zukunft" (2011 bis 2040) von der "Gegenwart" (2001 bis 2017) ab. Jedoch wird davon ausgegangen, dass die Änderungstendenzen vergleichbar sind.

Sowohl bei den Messungen als auch bei den Klimamodellen war eine generelle Erhöhung der Temperaturen zu beobachten. Allerdings projizierten die beiden eingesetzten Modelle WETTREG und REMO vor allem im Winter eine verstärkte Zunahme, welche derzeit noch nicht in den Messreihen ersichtlich war. Weiterhin waren die gemessenen Temperaturänderungen in jedem Zeitraum – mit Ausnahme des Winters – höher als die projizierten Änderungen, obwohl der Zeitraum der "Nahen Zukunft" noch nicht erreicht war.

Tabelle 6: Absolute Änderung der Lufttemperatur und relative Änderung des Niederschlags und der relativen Luftfeuchte zwischen den Zeitspannen 'Gegenwart' (2001 bis 2017) und 'Vergangenheit' (1977 bis 2000)

Wetterstation Seehausen (Altmark)			
	Abs. Änderung Lufttemperatur	Rel. Änderung korrigierter Niederschlag	Rel. Änderung Rel. Luftfeuchte
Hydrologisches Jahr	+1,1 K	+6,8%	0,0%
SommerHJ (<i>MJJASO</i>)	+1,1 K	+13,3%	0,1%
WinterHJ (<i>NDJFMA</i>)	+1,0 K	-0,7%	0,0%
Frühjahr (<i>MAM</i>)	+1,1 K	-7,1%	-1,4%
Sommer (<i>JJA</i>)	+1,4 K	+14,5%	-1,2%
Herbst (<i>SON</i>)	+1,0 K	+12,8%	-1,4%
Winter (<i>DJF</i>)	+0,8 K	+4,4%	+0,7%

Das WETTREG-Modell projizierte grundsätzlich einen Rückgang des Niederschlags mit einer Zunahme im Frühjahr und Winter sowie eine Abnahme im Sommer und Herbst. Das REMO-Modell wies in den meisten Fällen, ausgenommen die Wintermonate, steigende Niederschläge aus. Demgegenüber waren an der Wetterstation Seehausen (Altmark) zunehmende Niederschläge im Winter und eine Abnahme im Frühjahr zu beobachten. Die projizierten Trends des WETTREG-Modells korrespondieren nicht mit den Messergebnissen, da die Trendrichtungen entgegengesetzt sind. Das REMO-Modell wies analog zur Messung einen Anstieg des Niederschlags auf; im Vergleich waren jedoch deutliche Differenzen in der jährlichen Verteilung der Änderungen zu erkennen. Das REMO-Modell projizierte die stärkste Erhöhung des Niederschlags im Frühjahr (+10,3 %), während im Winter von einem Niederschlagsrückgang ausgegangen wurde (-3,6 %). Gemessen wurde hingegen ein sinkender Frühjahrsniederschlag (-7,1 %), während die größte Zunahme des Niederschlags im Sommer zu beobachten (+14,5 %) war.

Für die relative Luftfeuchte wurden nur sehr geringe relative Änderungen projiziert und gemessen. Generell gab das REMO-Modell die Änderungen im Jahr und in den Halbjahren am besten wieder, jedoch waren in den Jahreszeiten starke Differenzen zu erkennen. Hierbei wies das WETTREG Modell, insbesondere im Sommer und Herbst, bessere Übereinstimmungen mit den Messwerten auf.

2.5.3. Langjährige Entwicklung der Sickerwasserrate

Im jährlichen Mittel wurde eine Sickerwasserrate von 85,2 mm (Lysimeter 1) bzw. 96,8 mm (Lysimeter 2) gemessen (Tab. 7). Unterschiede zwischen den gleich bewirtschafteten Lysimetern können beispielsweise durch präferenzielle Fließwege oder ungleiches

Graswachstum entstehen (MEISSNER et al., 2010). Es konnte zwischen den Sickerwassermessungen der Lysimeter 1 und 2 jedoch kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Daher wurde im Folgenden der Mittelwert der Sickerwasserrate aus beiden Lysimetern verwendet.

Tabelle 7: Mittelwerte und Trends der Sickerwasserrate der Lysimeter 1 und 2 im Zeitraum 1984/85 bis 2016/17

Lysimeterstation Falkenberg			
	Sickerwasser L1 [mm]	Sickerwasser L2 [mm]	
Lysimeterjahr	85,2 (+)	96,8 (+)	-
SommerHJ (MJJASO)	2,5 (+/-)	4,0 (+/-)	--
WinterHJ (NDJFMA)	82,8 (+)	92,8 (+)	---
Frühling (MAM)	36,8 (-)	39,0 (-)	----
Sommer (JJA)	0,9 (+/-)	1,3 (+/-)	+
Herbst (SON)	2,7 (+/-)	4,5 (+)	++
Winter (DJF)	44,8 (+)	52,1 (+)	+++
			++++

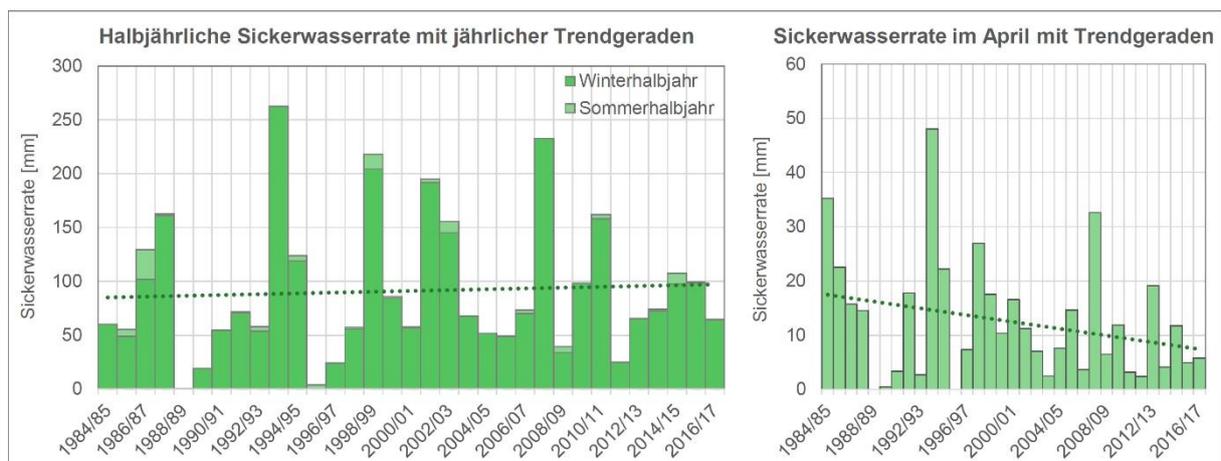


Abbildung 5: Jährliche Sickerwasserrate (als Summe aus Sommer- und Winterhalbjahreswert) mit Trendgeraden (links) und monatliche Sickerwasserrate im April mit Trendgeraden (rechts)

Grundsätzlich war die Sickerwasserrate im Winterhalbjahr am höchsten (Tab. 7 & Abb. 5), monatlich betrachtet fand die Sickerwasserbildung von Januar bis April (Abb. 6, oben) statt. Dagegen konnten im Sommerhalbjahr aufgrund der hohen Verdunstung nur geringe Sickerwasserraten gemessen werden, in den Monaten Juli und September blieb die Sickerwasserbildung sogar aus. Die klimatische Wasserbilanz (KWB), wies einen ähnlichen saisonalen Verlauf wie die Sickerwasserrate auf (Abb. 6, oben). Jedoch war aufgrund der Speichereffekte im Boden der Verlauf der Sickerwasserrate um etwa 2 Monate verschoben.

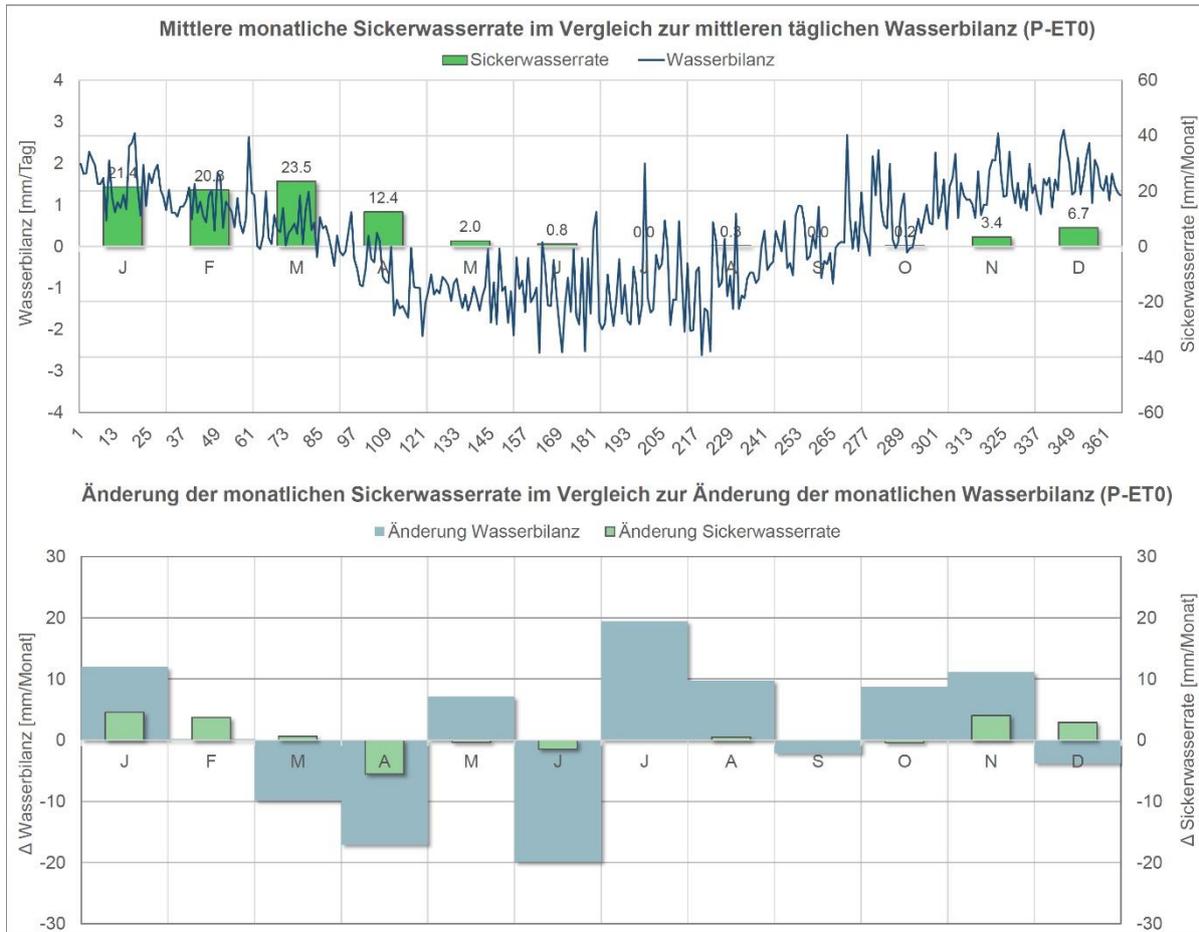


Abbildung 6: Mittlere monatliche Sickerwasserrate im Vergleich zur täglichen KWB sowie Änderung der mittleren monatlichen Sickerwasserrate im Vergleich zur Änderung der mittleren monatlichen KWB (Änderung zwischen „Vergangenheit SW“ (1984/85 bis 1999/2000) und „Gegenwart SW“ (2000/01 bis 2016/17))

Die ermittelten Trends der Sickerwasserrate im jährlichen, halbjährlichen und saisonalen Mittel waren nicht signifikant (Tab. 7). In der Tendenz war die Sickerwasserrate im jährlichen Mittel leicht zunehmend (Abb. 5, links). Auch konnten in den einzelnen Monaten keine signifikanten Veränderungen der Sickerwasserrate festgestellt werden; im April war der stärkste Rückgang der Sickerwasserrate zu beobachten (Abb. 5, rechts).

Zur näheren Analyse wurde die Differenz der monatlichen Sickerwasserrate zwischen "Gegenwart SW" (2000/01 bis 2016/17) und "Vergangenheit SW" (1984/85 bis 1999/00) untersucht (Abb. 6, unten). Vergleichend dazu wurde die Differenz der KWB dargestellt. So konnte überprüft werden, ob Änderungen der Sickerwasserrate auf Veränderungen der klimatischen Größen Niederschlag und potenzieller Verdunstung zurückzuführen waren. Grundsätzlich war für die Wintermonate, d. h. von November bis Februar, meist eine Zunahme der Sickerwasserrate festzustellen. Deutlich abnehmend war die Rate dagegen im April, hier konnte ein Rückgang von 5,6 mm/Monat beobachtet werden (entspricht 36 %). Dies ist wahrscheinlich auf den Rückgang der KWB in den Monaten März und April zurückzuführen. In den

Sommermonaten war keine deutliche Änderungstendenz zu erkennen. Hinsichtlich der KWB waren mit steigender/sinkender KWB auch äquivalente Änderungen der Sickerwasserrate verbunden. Dies galt hauptsächlich in den Monaten des Winterhalbjahres (November, Januar) und für das Frühjahr (März, April). In den Sommermonaten (Mai, Juli, August, Oktober) konnte trotz Zunahme der KWB keine Auswirkung auf die Sickerwasserrate beobachtet werden.

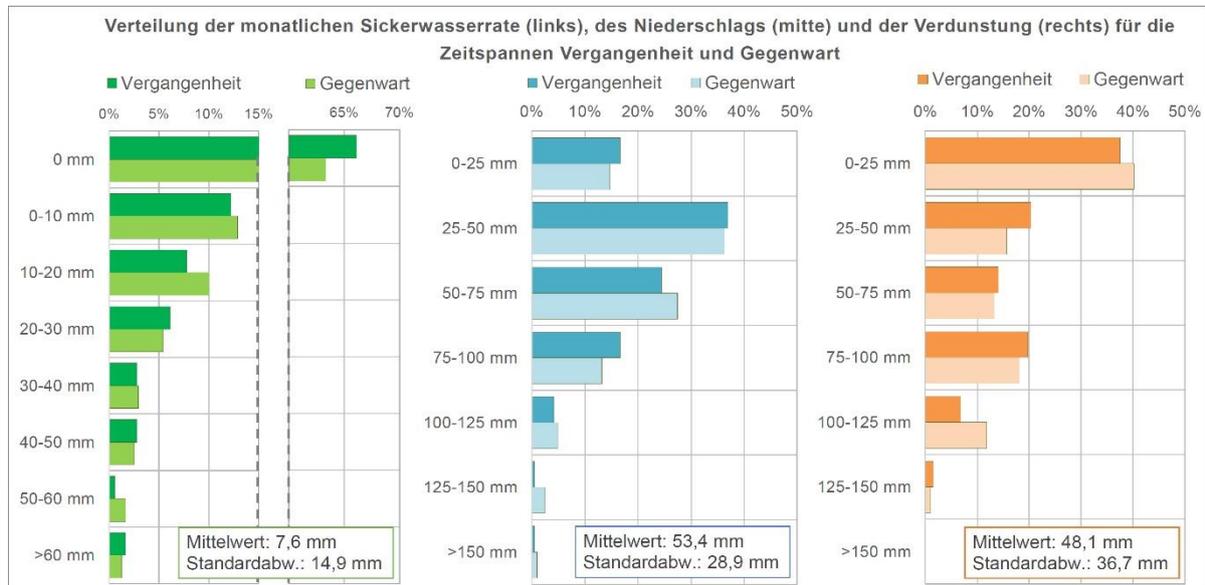


Abbildung 7: Anteil der Monate in verschiedenen Sickerwasserratenklassen (links) und Anteil der Monate in verschiedenen Niederschlagsklassen (mitte) und Verdunstungsklassen (ET_0) (rechts) für die Zeitspannen „Vergangenheit SW“ (1984/85 bis 1999/2000) und „Gegenwart SW“ (2000/01 bis 2016/17)

Weiterhin wurde die Verteilung der monatlichen Sickerwasserrate innerhalb der Zeitspannen "Vergangenheit SW" und "Gegenwart SW" untersucht und anschließend miteinander verglichen (Abb. 7, links). Grundsätzlich ist zu erkennen, dass im Großteil aller Monate kein Sickerwasser vorhanden war (in ca. 65 % aller Monate). Höhere Sickerwasserraten (> 60 mm/M) traten nur selten auf (in ca. 2 % aller Monate). Vergleicht man beide Zeitspannen, so fällt auf, dass der Anteil der Monate mit 0 mm bis zur "Gegenwart SW" abnehmend war (um ca. 3 %). Monatlich betrachtet, war dies vor allem in den Winter- und Frühjahrsmonaten zu erkennen, im Juni nahm die Anzahl der Tage mit 0 mm hingegen zu (nicht dargestellt). Monate mit Sickerwasserraten zwischen 10 und 20 mm nahmen um ca. 2 % zu, dies deutete sich vor allem im Februar an (nicht dargestellt). Im Vergleich dazu ist die Verteilung des monatlichen Niederschlags und der potenziellen Verdunstung dargestellt (Abb. 7, mittig und rechts). Der Niederschlag lag häufig in einem Bereich zwischen 25-50 mm (ca. 35 % aller Monate). Im Vergleich zwischen "Vergangenheit SW" und "Gegenwart SW" war der Anteil der Monate mit 0-25 mm und 75-100 mm abnehmend, der Anteil der Monate im Bereich zwischen 50-75 mm, aber auch in extremen Bereichen ab 100 mm ansteigend. Hohe Niederschlagssummen mit

mehr als 100 mm je Monat fielen in der "Gegenwart SW" vermehrt in den Monaten Juli, August und November (nicht dargestellt). Monate, in denen es weniger als 25 mm Niederschlag gab, traten in der "Gegenwart SW" gehäuft in den Monaten März und April auf. So konnte in den Jahren 2006 und 2008 nur knapp 3 mm Niederschlag im April gemessen werden, obwohl das Monatsmittel ca. 36 mm betrug. Die monatliche Verdunstung lag am häufigsten in einem Bereich mit weniger als 25 mm (39 % aller Monate), welche vor allem in den Wintermonaten sowie im Übergang zum Winter vorkommen. Eine monatliche Verdunstung von mehr als 100 mm trat am häufigsten in den Sommermonaten auf (ca. 10 % aller Monate). Im Winter hat der Anteil der Monate mit einer Verdunstung zwischen 0-25 mm um ca. 3 % zugenommen, im Sommer war der Anteil mit 100 – 125 mm um ca. 5 % gestiegen. In den mittleren Bereichen war die Anzahl dagegen leicht sinkend.

2.5.4. Auswirkung der veränderten Sickerwasserrate auf den Bewuchs

Um zu prüfen, welche Auswirkung eine verringerte Sickerwasserrate, insbesondere im Frühjahr, auf den Pflanzenertrag hat, wurden im Folgenden die Trockensubstanz(TS)-Erträge des I. und II. Schnittes analysiert (Abb. 8). Mithilfe des t-Tests konnten für die TS-Erträge zwischen Lysimeter 1 und 2 keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Bei den hier aufgeführten TS-Erträgen handelt es sich daher um Mittelwerte der Lysimeter 1 und 2.

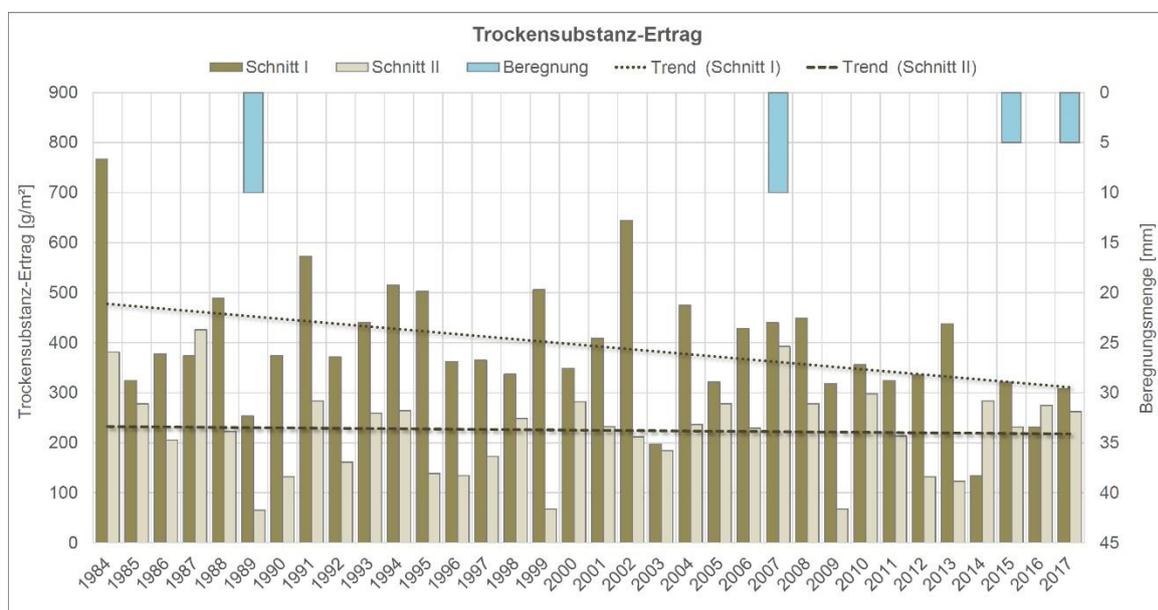


Abbildung 8: Trockensubstanz-Ertrag des I. und II. Schnittes von 1984 bis 2017, lineare Trendgerade des I. und II. Schnittes sowie Menge der Notberegnung

Grundsätzlich wurde für den I. Schnitt ein höherer TS-Ertrag erzielt als für den II. Schnitt. Hinsichtlich des Trendverhaltens unterschieden sich beide Schnitte stark voneinander. So wurde für den I. Schnitt ein hoch signifikant rückgängiger Trend ermittelt. Für den II. Schnitt

konnte kein signifikanter Trend bestimmt werden, in der Tendenz war dieser über die untersuchten Jahre etwa gleichbleibend.

Anhand der Notberechnungen zur Bestandssicherung können qualitative Rückschlüsse auf Trockenheit im Boden abgeleitet werden. Innerhalb der untersuchten 33 Jahre wurde nur 4 Mal eine solche Notberechnung durchgeführt. Sie erfolgte jeweils im Mai (2007, 2015), Juni (2017) und August (1989) mit 5 bis 10 mm. Auffällig bezüglich einer zunehmenden Tendenz zur Trockenheit ist, dass innerhalb der letzten 10 Jahre drei der vier Notberechnungen durchgeführt werden mussten. Für eine statistische Analyse oder quantitative Auswertung ist diese Feststellung jedoch nicht ausreichend.

2.5.5. Vergleich der Entwicklung der Klimatischen Wasserbilanz und der Sickerwasserrate mit den Ergebnissen der Klimaprojektionen

Vergleicht man die tägliche KWB des WETTREG und des REMO (Abb. 1, oben) mit der beobachteten KWB (Abb. 6, oben), so erkennt man grundsätzlich einen ähnlichen inner-jährlichen Verlauf. In der Änderungstendenz können jedoch Abweichungen erkannt werden. Nach WETTREG ist die KWB in der "Nahen Zukunft" im Bereich der Lysimeterstation Falkenberg stark rückgängig (vgl. Abb. 1, unten). Beobachtet wurde eine Zunahme der jährlichen Wasserbilanz von ca. 15 mm (Differenz der Zeitspannen "Vergangenheit SW" und "Gegenwart SW"). Jedoch schwankt die KWB jährlich stark und ist zudem saisonal sehr unterschiedlich ausgeprägt. Die Änderungen der täglichen KWB zur "Nahen Zukunft" sind bei WETTREG nicht zu erkennen; tendenziell ist die tägliche KWB im Sommer rückgängig (Abb. 1, oben). REMO projiziert in den Frühjahrsmonaten eine Zunahme, in den Sommermonaten eine deutliche Abnahme. Im Vergleich sind die Veränderungen der monatlichen KWB (Abb. 6), die analog zu denen der täglichen KWB sind, abweichend. So sind ein Rückgang der KWB im Frühjahr und im Juni sowie eine Zunahme im Sommer und Winter zu erkennen. Weder WETTREG noch REMO können diese Veränderungen wiedergeben.

Für einen Vergleich zwischen den Simulationsergebnissen von PFÜTZNER et al. (2012) zur GWN und den Sickerwasserraten der Lysimeterstation Falkenberg werden die genannten beiden Größen aus Gründen der Vereinfachung gleichgesetzt, auch wenn die Sickerwasserrate – im Gegensatz zur GWN – keine Zehrung d. h. kapillaren Aufstieg von Bodenwasser berücksichtigt. Diese Vereinfachung findet sich auch in der Literatur, wie aktuelle Arbeiten von PAUL et al. (2014) und FLECK et al. (2016) belegen.

KREIENKAMP et al. (2012) deuteten in ihrer Studie an, dass aufgrund einer zunehmenden Verdunstung und einer rückgängigen Niederschlagsmenge in Zukunft mit einer abnehmenden

GWN gerechnet werden muss. Obgleich die Verdunstung im Untersuchungszeitraum zunehmend war, wurde bisher an der Lysimeterstation Falkenberg kein Rückgang der Sickerwasserrate nachgewiesen. Saisonal konnte, wie KREIENKAMP et al. (2012) vermuteten, eine Zunahme der Sickerwasserrate im Winterhalbjahr beobachtet werden (Tab. 7). Gleichzeitig war die Sickerwasserrate im Frühjahr abnehmend, wodurch sich eine Verschiebung der Sickerwasserbildung vom Frühjahr in den Winter angedeutet hat.

Grundsätzlich ist festzustellen, dass die Ergebnisse des ökohydrologischen Modells SWIM (KREIENKAMP et al., 2012) nur annähernd mit den Messdaten aus der Lysimeterstation Falkenberg vergleichbar sind. Die Klimamodelle REMO und WETTREG projizierten für die "Nahe Zukunft" eine gleichbleibende bzw. abnehmende jährlichen GWN (ca. 0-20 mm). Die Trendauswertung der Sickerwasserrate zeigte eine leicht steigende Sickerwasserrate, mit einem Anstieg von 3,7 mm pro Dekade. Weiterhin wies die weiterführende Studie von PFÜTZNER et al. (2012) für die Region der Altmark im Zeitraum der "Nahen Zukunft" auf einen Rückgang der monatlichen Sickerwasserrate bei einer Grünlandnutzung in jedem Monat – außer im April – hin. Zwar konnten auch bei den beobachteten Trends an der Lysimeterstation Falkenberg für einige Monate Abnahmen der Sickerwasserrate verzeichnet werden (Abb. 6), jedoch gaben die Klimamodelle den Anstieg im Winter nicht wieder. Die Annahmen von KREIENKAMP et al. (2012) entsprechen damit mehr den bisher zu beobachtenden Veränderungen als den durch die Simulation mit Klimamodellen projizierten Ergebnissen.

2.6. Diskussion

Grundsätzlich korrespondierten die jährlich und monatlich signifikant steigenden Lufttemperaturen an der Wetterstation Seehausen (Altmark) mit den global und lokal in Sachsen-Anhalt beobachteten Trends (SPEKAT, 2015; LAU, 2017). Es konnten für einige meteorologische Größen, insbesondere im Sommerhalbjahr, statistisch gesicherte Veränderungen nachgewiesen werden. Die signifikant steigenden Temperaturen und Verdunstungsraten sowie auch die innerjährliche Umverteilung der Niederschläge mit einem trockeneren Frühjahr lassen die Vermutung zu, dass die Auswirkungen auf den Bodenwasserhaushalt vor allem innerhalb des Jahreszyklus (saisonal) stattgefunden haben.

Generell konnte für die Sickerwasserrate ein leicht ansteigender, jedoch nicht signifikanter Trend festgestellt werden. Dennoch fielen Tendenzen in einigen Monaten auf: So zeichnete sich ein starker Rückgang während des Frühjahrs, besonders im April, ab. In den Wintermonaten, vor allem im November und Dezember, nahm die Sickerwasserrate dagegen zu (Abb. 6). Diese Tendenzen konnten eindeutig auf die Veränderung der meteorologischen

Parameter, genauer der klimatischen Wasserbilanz (KWB), zurückgeführt werden. Hierbei konnte man erkennen, dass im Winterhalbjahr hauptsächlich Veränderungen in den Niederschlägen trendbestimmend auf die Sickerwasserrate wirkten, während im Sommerhalbjahr die Höhe der Verdunstung den größten Einfluss hatte. Die Betrachtung der KWB (Abb. 6) zeigte, dass dieser Zusammenhang jedoch nicht immer eindeutig war. So waren Monate zu beobachten, in denen nachweislich keine Niederschlagszunahme verzeichnet wurde und trotzdem ein Anstieg der Sickerwasserrate nachgewiesen werden konnte (u. a. Februar, Dezember). Das spricht dafür, dass weitere Faktoren, wie beispielsweise die Bodenfeuchte aus dem Vormonat, ebenfalls einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss haben.

Grundsätzlich kann auch für die Verteilung des Sickerwassers eine Verschiebung beobachtet werden. Hierbei konnten eine Abnahme der Monate mit 0 mm und vermehrte Sickerwasser-
austräge in der Klasse mit 10 – 20 mm beobachtet werden. Die Änderung dieser Verteilung ist auf eine Zunahme von Monaten mit höheren Niederschlägen zurückzuführen sowie auch auf einen Rückgang der Verdunstung in den Wintermonaten. Generell deutet sich eine Zunahme der Anzahl der Monate mit höheren Niederschlägen und steigenden Verdunstungsraten an.

Grundsätzlich ist die saisonale Entwicklung der Sickerwasserrate in Zukunft nur schwer abzuschätzen, da die Projektionen des Niederschlags und der Verdunstung in den Klimamodellen noch mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Der Beobachtung der saisonalen Entwicklungen kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Insbesondere die Sickerwasserraten im Frühjahr haben Einfluss auf den Pflanzenertrag, da dieser durch eine verringerte Bodenfeuchte gehemmt wird. Bei den bisherigen Beobachtungen konnte ein signifikanter Rückgang der TS-Erträge im I. Schnitt beobachtet werden (Abb. 8). Des Weiteren wirken sich die Änderungen der Bodenfeuchte auf weitere Größen des Bodenwasserhaushaltes aus. Verringerte Raten bedeuten sinkende Grundwasserneubildung, dadurch sinken potentiell der Grundwasserstand und die Verdunstung.

Des Weiteren zeigte der Vergleich der Messergebnisse mit den Klimamodellen WETTREG und REMO, dass Letztere nur bedingt repräsentativ für den untersuchten Standort waren. Die damit erzielten Simulationsergebnisse wiesen bei einigen meteorologischen Größen und in bestimmten Zeitabschnitten zum Teil widersprüchliche Ergebnisse gegenüber den Beobachtungen auf. Es konnte jedoch sowohl für die Messreihen als auch für die Klimamodelle ein enger Zusammenhang zwischen Änderungen des Niederschlags und dessen Auswirkung auf die Sickerwasserbildung festgestellt werden. Auch für die auf den Klimamodellen basierenden Ergebnisse der GWN wurde nur eine geringe Übereinstimmung mit den

gemessenen Sickerwasserraten festgestellt. Besonders die innerjährliche Verschiebung der Sickerwasserrate wurde durch die Modelle nur unzureichend dargestellt. Jedoch konnten die Einschätzungen von KREIENKAMP et al. (2012), die eine Zunahme der Sickerwasserrate im Winterhalbjahr und eine verkürzte Phase der Sickerwasserbildung postulierten, mithilfe der Trenduntersuchungen an den Lysimetern bestätigt werden.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass der Vergleich zwischen beobachteten Daten und Klimamodellen aufgrund der unterschiedlichen Zeithorizonte wenig robust ist. Trotzdem ist der gegensätzliche Charakter der saisonalen Veränderungen kritisch zu bewerten. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die Auswertung von lediglich zwei Klimamodellen nicht die gesamte Varianz einer Ensemble-Simulation darstellen kann. Zwar kann man hier auch anführen, dass die ausgewerteten A1B-Szenarien durch die im 5. Sachstandsbericht des IPCC (2014) vorgestellten "Repräsentative Konzentrationspfade" (Representative Concentration Pathways – RCPs) abgelöst wurden, Ergebnisse des ReKliEs-De-Projektes zeigen jedoch, dass die Ergebnisse des RCP8.5-Ensembles prinzipiell ähnliche Veränderungen projizieren (HÜBENER et al., 2017). Da jedoch auch die Modellgenauigkeit der GCM und RCM gestiegen ist, ist es anzustreben, für die Untersuchungen der zukünftigen Sickerwasserrate die neueren Szenarien zu verwenden.

2.7. Schlussfolgerung und Ausblick

Mithilfe von Trendanalysen wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf die Sickerwasserrate untersucht. Trotz signifikant zunehmender Temperatur und Verdunstung waren für die Sickerwasserrate bisher keine signifikanten Differenzierungen zu erkennen. Vielmehr war die veränderte Verteilung des Niederschlags ausschlaggebend für die Änderung der innerjährlichen Verteilung der Sickerwasserrate. So zeichnete sich vor allem im Frühjahr, besonders im April, ein deutlicher Rückgang ab. Dies ist ein Hinweis auf eine erhöhte Gefahr von Trockenheit im Boden und wirkt sich negativ auf das Pflanzenwachstum aus. Es konnte der Nachweis erbracht werden, dass die Änderung der klimatischen Größen, insbesondere der Niederschlag, einen direkten Einfluss auf die Sickerwasserrate hat, vor allem im Winter und Frühjahr.

Ein Vergleich mit den Klimamodellergebnissen aus den angewendeten Modellen WETTREG und REMO hat gezeigt, dass die aktuellen Trends nur ungenügend wiedergegeben werden konnten. Sie waren somit für kurzfristige Prognosen, z. B. zur Abschätzung der zukünftigen GWN, nur bedingt aussagefähig.

Es ist vorgesehen, zukünftig ein größeres Modellensemble mit aktuelleren Klimamodellprojektionen zu nutzen. Des Weiteren soll ein Bodenwasserhaushaltsmodell (z. B. HYDRUS) in

die Auswertungen integriert werden, um den Wasser- und Stofffluss in der ungesättigten Zone zu untersuchen. Ziel ist es hierbei, die Auswirkungen des kapillaren Aufstiegs, speziell der Zehrung, im Sommer besser zu erfassen. Weiterhin sollen auch Messergebnisse von anderen langjährig betriebenen Lysimetern ausgewertet werden, um den Einfluss von Bodenart, Landnutzung, Düngung und Bewässerung auf Sickerwasserrate und Stoffaustrag zu untersuchen.

3. Planungsinstrumente für die Minderung der lokalen Bodenerosion durch Wasser infolge der Auswirkungen des künftigen Klimawandels

Dieses Kapitel basiert auf dem veröffentlichten Artikel: Köhn, J., Meißner, R., Rupp, H., Reinstorf, F. (2021): *Tools for Planning Local Mitigation of Water-Driven Soil Erosion Resulting from Impacts of Future Climate Change*. *Clean – Soil, Air, Water* 2021, 2000385. <https://doi.org/10.1002/clean.202000385> (CC BY-NC-ND 4.0)

3.1. Zusammenfassung

Angesichts der Folgen des Klimawandels müssen kommunale Planer und Kommunen in der Lage sein, langfristige Strategien zum Schutz des Bodens zu entwickeln. Zu diesem Zweck werden praktikable und frei verfügbare Planungsinstrumente benötigt, die es erlauben, die Erosivität von Niederschlägen und Abflüssen unter Berücksichtigung der Auswirkungen von Landnutzungsänderungen und Klimawandelfolgen abzuschätzen.

In dieser Arbeit wird eine schrittweise Abschätzung der Wassererosivität auf landwirtschaftlichen Flächen sowie an Fließgewässern mit einem neu entwickelten, praxistauglichen Planungsinstrumentes des Stufenmodells der Infiltration mit Berechnung von Direktabfluss und Bodenerosion (ero-SMINF), mit der deutschen allgemeinen Bodenabtragsgleichung, integriert in ein geographisches Informationssystem (ABAGis), und mit dem Bachbetterosionsmodell (BEM) vorgenommen. Die entwickelten Planungsinstrumente werden an zwei deutschen, mittelgebirgsgeprägten Einzugsgebieten, Vietzbach und Regenbeek, getestet. Die Ergebnisse für das Einzugsgebiet des Vietzbaches, das hauptsächlich von Flächenerosion betroffen ist, zeigen, dass die meisten Erosionsereignisse im Sommer auftreten. Die wahrscheinlichste Veränderung der Bodenerosion infolge des Klimawandels (RCP8.5-Klimamodellensemble) zeigt eine zunehmende Erosion von bis zu 16 % im Vergleich zum derzeitigen Zustand. Im Einzugsgebiet des Regenbeek, wo die Bachbetterosion dominierend ist, wiesen Berechnungen mit dem BEM nach, dass die Erosion hauptsächlich durch eine Veränderung des Bachbetts verringert werden kann.

3.2. Einleitung

Bodenverluste durch Wassererosion sind ein weltweit auftretendes Problem, das vor allem in Regionen mit intensiver Landwirtschaft vorkommt. Überschwemmungen, die durch hohe Niederschlagsmengen verursacht werden, erhöhen die Erosivität in diesen Regionen. Sich

ändernde Vorschriften - wie die deutsche Düngeverordnung und die neue, verschärfte Düngeverordnung auf Basis der EU-Richtlinie 91/676/EWG (Nitratrictlinie), aber auch die EU-Richtlinie 2000/60/EG (Wasserrahmenrichtlinie) für Grund- und Oberflächengewässer - stellen die Landwirtschaft und die Entscheidungsträger vor immer neue Herausforderungen (RL (EU) 91/676/EWG, RL (EU) 2000/60/EC). Zudem erhöhen extreme Wetterereignisse, wie die Trockenjahre 2018 und 2019 und Niederschlagsereignisse mit hohen Intensitäten das Erosionsrisiko der Böden. Durch den globalen Temperaturanstieg und die damit verbundene Zunahme der latenten Energie in der oberen Atmosphäre, steigt das Risiko von Trockenheit, Extremniederschlägen, Stürmen und Überschwemmungen (IPCC, 2012). Für einen nachhaltigen Schutz des Bodens und seiner Funktionen als Wasser- und Nährstoffspeicher ist es wichtig, unter Berücksichtigung der zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels langfristige Strategien gegen Bodenerosion zu entwickeln.

Um Informationen über die aktuelle und künftige Bodenerosion zu erhalten, werden Modelle zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser eingesetzt. Die ersten Bodenerosionsmodelle stellten die Prozesse in einer vereinfachten Form dar. Exemplarisch können in diesem Zusammenhang die empirisch basierten Modelle USLE, RUSLE und EPIC genannt werden, die auf der Grundlage von Messungen am Hang statistische Zusammenhänge herstellen (WISCHMEIER & SMITH, 1978; RENARD et al., 1991; COOLEY & WILLIAMS, 1985). Durch die Zunahme der Rechenleistung und den Einsatz von geographischen Informationssystemen (GIS) wurden physikalisch basierte, raumbezogene Einzugsgebietsmodelle entwickelt, die die Abfluss- und Erosionsdynamik von Einzugsgebieten simulieren, wie z.B. LISEM, EROSION 3D, ANSWERS, TOPMODEL und MIKE-SHE (DE ROO et al., 1996; SCHMIDT et al., 1999; BEASLEY et al., 1980; BEVEN & FREER, 2001; STORM & REFSGAARD, 1990). Der Verwendungszweck von Erosionsmodellen ist stark abhängig von den Anforderungen der Nutzer, den Zielen und der Verfügbarkeit von Daten. Physikalisch basierte Modelle werden hauptsächlich für wissenschaftliche Untersuchungen verwendet, da sie Informationen auf zeitlichen und räumlichen Skalen bereitstellen, welche Zeitpunkt und Verhalten der Sedimentbewegung widerspiegeln (MERRITT et al., 2003). Allerdings erfordern die Modelle aufgrund der Parametrisierung und der Eingabedaten, die in vielen Fällen schwer zu beschaffen sind, ein hohes Maß an Fachwissen sowie eine ausreichende Datenmenge. Darüber hinaus erzielen komplexere, physikalisch basierte Modelle nicht unbedingt bessere Ergebnisse als einfache, empirische Modelle, vor allem, weil die Eingabefehler mit zunehmender Modellkomplexität steigen. Dies zeigt sich in Studien, die simulierte Erosionsmuster mit beobachteten Erosionsmustern vergleichen (JETTEN et al., 2003). In Anbetracht dessen sind empirische Modelle aufgrund von

wenigen notwendigen Eingabedaten und Formeln für die praktische Anwendung ebenfalls gut geeignet.

Im Landkreis Mansfeld-Südharz (Deutschland, Bundesland Sachsen-Anhalt, mit 63.000 Hektar intensiv genutzter Löß- und Schwarzerdeböden, Abb. 10) sind zwei Arten der Erosion, die durch intensive Niederschläge verursacht werden, vorherrschend: die Flächenerosion auf landwirtschaftlichen Flächen und die Erosion im Bachbett. Bei der flächenhaften Erosion handelt es sich um eine Form der Erosion auf landwirtschaftlich genutzten Flächen, bei der die Sedimente durch eine dünne und gleichmäßige Wasserschicht über eine große Fläche bewegt werden. Die Bachbetterosion beschreibt einen Erosionsprozess, der in einem fließenden Gewässer stattfindet, bei dem das Sediment des Bachbettes abgetragen wird, was zu einer Eintiefung führt. Aufgrund regelmäßig auftretender Erosionsereignisse wurden im Landkreis Mansfeld-Südharz bereits seit den 1970er Jahren Untersuchungen durchgeführt (THOMAS, 1980, 1983; SEILS, 2000; OLLESCH et al., 2006; SCHMIDT, 2010, 2011). Auch im Zusammenhang mit dem Klimawandel wurden Untersuchungen in dieser Region durchgeführt, wobei WURBS & STEINIGER, 2011 eine Zunahme des mittleren potenziellen Bodenverlustes bis zum Jahr 2100 projizierten. Aus diesem Grund wurden im Projekt "Bodenerosionsminderung in Bergregionen am Beispiel des Landkreises Mansfeld-Südharz" (BebeR) (HEILMANN et al., 2020) praxisnahe Modelle für Planer und Behörden entwickelt.

Teilergebnisse dieses Projektes werden im Folgenden vorgestellt. Im Rahmen des Projekts wurden zwei Einzugsgebiete im Landkreis Mansfeld-Südharz untersucht, die von den oben genannten Erosionsarten betroffen sind: Das Einzugsgebiet des Vietzbaches mit flächenhafter Erosion und das Einzugsgebiet des Regenbeeks mit Bachbetterosion. Basierend auf den Bedürfnissen der lokalen Akteure und den Erfahrungen in den Untersuchungsgebieten wurden drei Planungsinstrumente der Erosion vorgestellt, ero-SMINF für die ereignisbasierte, flächenhafte Erosion an einem Hang, ABAGis für die langjährige, mittlere Flächenerosion eines größeren Gebietes und BEM für die Erosion in einem Bachbett auf der Basis einzelner Abflüsse. Sie wurden so konzipiert, dass sie leicht anzuwenden sind, auf einfachen Ansätzen beruhen und nur eine geringe Menge an Eingabedaten erfordern.

Ziel dieser Studie war es, aufzuzeigen, dass langfristige Strategien zur Minderung der Bodenerosion auf der Grundlage praktikabler Erosionsmodelle erstellt werden können. Zunächst werden die Planungsinstrumente ero-SMINF, ABAGis und BEM mit ihren theoretischen Grundlagen vorgestellt. Anschließend werden die Ergebnisse der Planungsinstrumente am Beispiel der Untersuchungsgebiete Vietzbach und Regenbeek dargestellt.

Dabei wird die aktuelle Erosivität mit der zukünftigen Entwicklung verglichen und die Wirkung von Maßnahmen zur Abschwächung der Auswirkungen des Klimawandels quantifiziert. Abschließend wird die Eignung der Modelle für die Entwicklung von langfristigen Strategien gegen die Auswirkungen des Klimawandels diskutiert.

3.3. Material und Methoden

3.3.1. Untersuchungsgebiete

Die Untersuchungsgebiete Vietzbach und Regenbeek liegen im Landkreis Mansfeld-Südharz, welcher sich im östlichen Harzvorland im Südwesten des Bundeslandes Sachsen-Anhalt befindet (Abb. 9). Aufgrund der Lage im Regenschatten des Harzes liegen die durchschnittlichen Jahresniederschläge im Untersuchungsgebiet mit etwa 560 mm unter dem deutschen Durchschnitt (820 mm). Die mittlere Niederschlagsintensität (R-Faktor) im Landkreis betrug im Untersuchungszeitraum $78,8 \text{ N h}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$. Im Durchschnitt traten pro Jahr zwischen 5 und 38 (Mittelwert 18) erosive Niederschlagsereignisse mit einer maximalen 30-minütigen Intensität von bis zu $106 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ und einer Dauer der Ereignisse von durchschnittlich 200 min (bzw. zwischen 10 und 1200 min) auf (HELBIG et al., 2010).

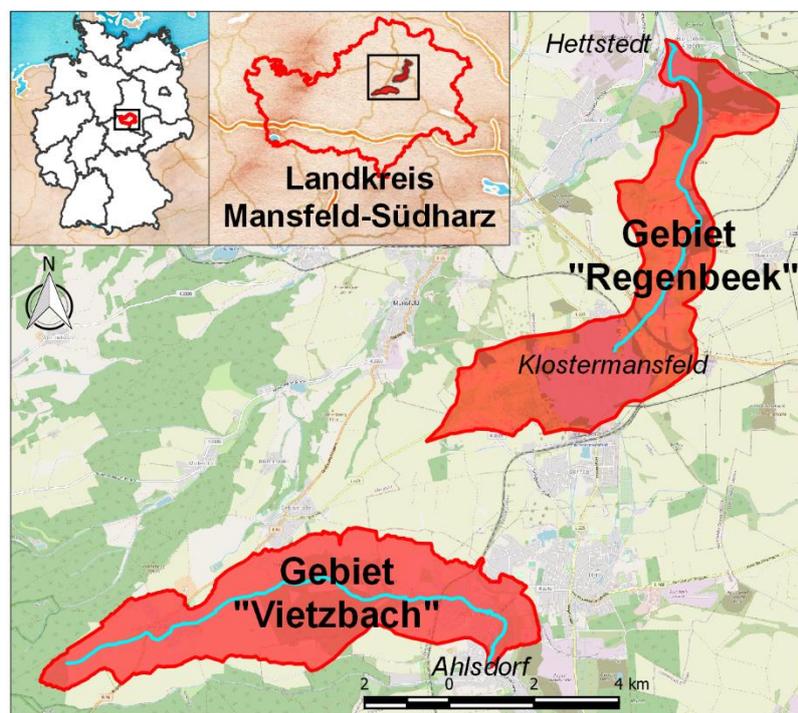


Abbildung 9: Einzugsgebiete von Vietzbach und Regenbeek im Landkreis Mansfeld-Südharz, Deutschland;
Quelle: QGIS, OSM Humanitarian Data Model, Stamen Watercolor/OSM

Das Einzugsgebiet des Vietzbaches (Untersuchungsgebiet für die flächenhafte Erosion) hat eine Größe von $8,75 \text{ km}^2$ und wird intensiv landwirtschaftlich genutzt (ca. 63 % der Gesamtfläche) (Abb. 10b). Auf etwa 61 % der Gesamtfläche wird Getreide angebaut (Tab. 8)

(STATISTISCHES LANDESAMT SACHSEN-ANHALT, 2018). Aufgrund der Hangneigung von bis zu 35° (bzw. mehr als 12% der Fläche weisen eine Neigung von >10° auf) und der lehmig-schluffigen Bodenart (Cambisol (CM)) (Abb. 10c) ist das Gebiet sehr erosionsanfällig. Durch den hohen Oberflächenabfluss nach Starkregenereignissen kam es vor allem im zentralen Bereich des Vietzbacheinzugsgebietes zu Vertiefungen im Gelände (Abflussrinnen) und zu Hangrutschungen am Flussufer. Der erodierte Boden, der in den Vietzbach gelangt, sammelte sich in einem kleinen Speicherbecken, das unterhalb des Vietzbaches liegt. Aufgrund der unterlassenen Unterhaltung war das vorgelagerte Verlandungsbecken und die Hälfte des Hauptbeckens verschlamm.

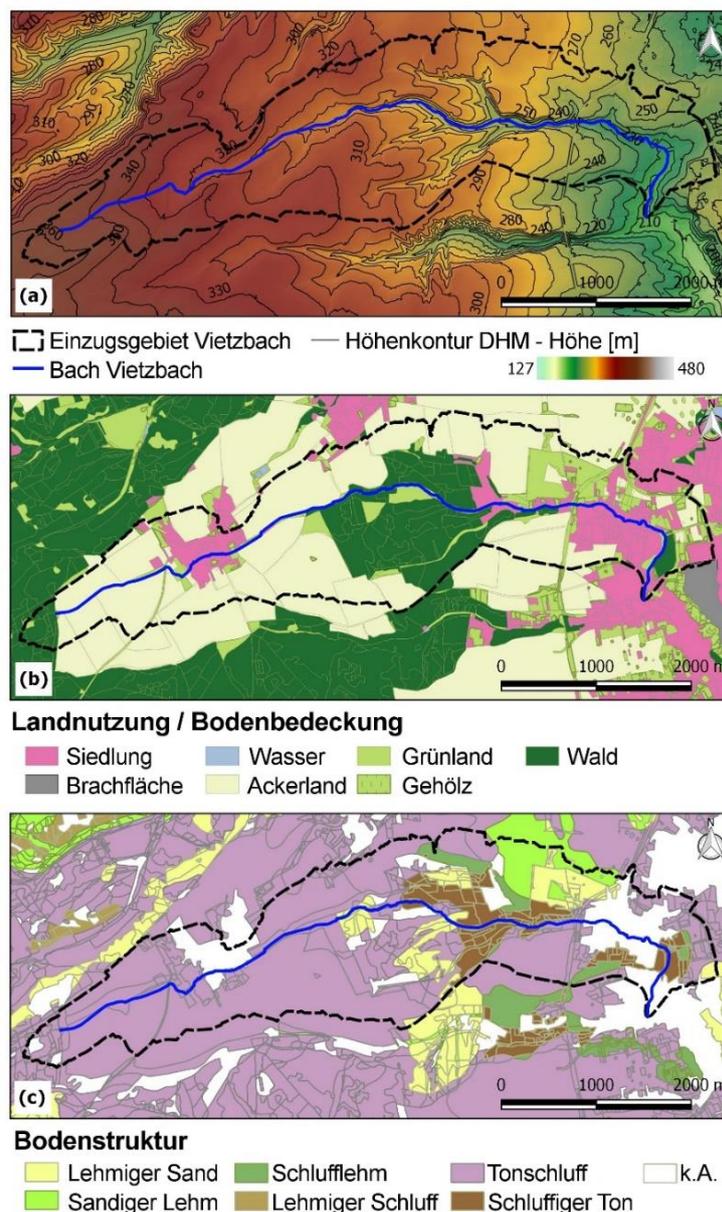


Abbildung 10: Einzugsgebiet des Vietzbaches: (a) Höhenkarte, (b) Landnutzungskarte, (c) Bodenkarte; Quelle: LLG, LAU, LAGB

Direkte Regenwasserzuflüsse aus städtischen Gebieten in den Bach waren lokal begrenzt, sodass bei Starkregenereignissen mäßige Abflussspitzen auftreten. Im Vergleich zur Flächen- und Rillenerosion war die Sohlenerosion im Vietzbach nur von untergeordneter Bedeutung.

Tabelle 8: Charakteristische Werte des Vietzbach- und des Regenbeek-Einzugsgebietes

Daten zum Einzugsgebiet und Bach Vietzbach:	
Koordinaten (Ursprung):	51°32'40"N, 11°28'3"E
Einzugsgebietsgröße:	8,75 km ²
Mittlerer Jahresniederschlag:	563 mm
Mittlere Temperatur:	8,2 °C
Mittlere Gefälle:	6,44 ‰
Hauptfruchtart:	61% Getreide
Fließgewässerlänge:	8.012 m
Daten zum Einzugsgebiet und Bach Regenbeek:	
Koordinaten (Ursprung):	51°34'60"N, 11°29'33"E
Einzugsgebietsgröße:	8,51 km ²
Mittlerer Jahresniederschlag:	558 mm
Mittlere Temperatur:	8,2 °C
Fließgewässerlänge:	5.682 m
Fließgewässergefälle:	0,014 m/m
Gewässersediment:	Lehm-Sand
Strickler Rauigkeit - Gewässerbett:	30-80 m ^{1/3} /s
Ufer:	15-80 m ^{1/3} /s
Basisabfluss:	0,02 m ³ /s
Regenwasserabfluss ^{a)} :	3,68 m ³ /s

a) Ableitung von Regenwasser aus Klostermansfeld nach einem Niederschlagsereignis von 15 Minuten, das zweimal im Jahr auftritt

Der Bach Regenbeek (Untersuchungsabschnitt für die Sohlenerosion) entspringt in der Gemeinde Klostermansfeld und hat eine Gesamtlänge von etwa 5.700 m (Tab. 8). Der Bach fließt von Klostermansfeld bis zur Stadt Hettstedt und mündet dort in die Wipper. Aufgrund von Gewässerausbaumaßnahmen in den 1970er Jahren weist der Bach Regenbeek eine lineare Struktur mit einem hohen Sohlgefälle von durchschnittlich 0,014 m·m⁻¹ auf. Nach Messungen im Bach Regenbeek wurde der Basisabfluss auf 0,02 m³·s⁻¹ geschätzt. Nach Starkregenereignissen traten Abflüsse von 3,68 m³·s⁻¹ und mehr auf, da das in Klostermansfeld gesammelte Regenwasser direkt in diesen Bach abgeleitet wurde. Die Erosion des Bachufers und des Bachbettes war ein bekanntes Problem und wurde bereits seit 35 Jahren beobachtet. Aufgrund der Erosion wurde eine Straße in der Stadt Hettstedt nach starken Regenfällen regelmäßig mit Sedimenten überschwemmt. Eine lokale Studie

kam zu dem Schluss, dass die Ufer- und Tiefenerosion sowie die daraus resultierende Sedimentation in Hettstedt durch anthropogene Aktivitäten verursacht wurden (KÖHN & REINSTORF, 2016). Durch die Begradigung in den 1970er Jahren und die Ableitung des Regenwassers aus Klostermansfeld entstanden hohe Fließgeschwindigkeiten, die die Erosionstendenz des Baches Regenbeek stark erhöhten.

3.3.2. Herkunft der Eingangsdaten

Die für die Erosionsmodelle benötigten Eingangsdaten wie Höhen-, Landnutzungs-, Boden- und Klimadaten sowie Fließgewässerdaten zur Berechnung der Erosionsgefährdung stammten für den Landkreis Mansfeld-Südharz aus folgenden Quellen:

Das Digitale Höhenmodell (DEM) wurde von der Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau Sachsen-Anhalt (LLG) mit einer räumlichen Auflösung von 5×5m (Laserscanning aus der Luft, mit Vertikalfehler $\pm 0,35$ m) bereitgestellt (Abb. 10a). Um Informationen über die Landnutzung zu erhalten, wurde eine Karte der Biotoptypen und Landnutzungstypen (BTNT) vom Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (LAU) verwendet. Die Karte klassifiziert sieben Landnutzungstypen, die in mehrere Unterkategorien unterteilt sind (Abb. 10b). Zusätzlich zum BTNT wurden Berichte des Statistischen Landesamtes Sachsen-Anhalt über die Menge der angebauten Kulturen sowie die Aussagen des örtlichen Bauernverbandes zur Bodenbearbeitung einbezogen. Um die Auswirkungen von Fruchtfolgen und Bodenbearbeitung zu veranschaulichen, wurden verschiedene Landnutzungsszenarien entwickelt. Diese Szenarien basierten auf einem Beratungsleitfaden für Bodenerosion (DEUMELANDT et al., 2014). Der Unterschied zwischen den Bodenbearbeitungsarten liegt in der Bodenbedeckung (konventionelle Bodenbearbeitung: <30% Bodenbedeckung; minimale Bodenbearbeitung: 30 % oder mehr Bodenbedeckung; Direktsaat: 50 % oder mehr Bodenbedeckung, da die Bodenoberfläche von der Ernte bis zur Bepflanzung ungestört bleibt).

Informationen zu den Bodentypen mit spezifischen Kennwerten (wie z.B. Bodentextur, Korngröße, gesättigte Wasserleitfähigkeit, gesättigte hydraulische Leitfähigkeit, effektive Porosität, Saugspannung in der Feuchtefront) wurden vom Landesamt für Geologie und Bergbau Sachsen-Anhalt (LAGB) in Form einer vorläufigen Bodenkarte im Maßstab 1:50.000 (VBK50) zur Verfügung gestellt (Abb. 10c).

Fließgewässerdaten, wie die Geometrie des Gerinnes und Manning-Strickler-Werte, wurden aus eigenen Vermessung und Auswertung des DGM1 erhalten. Die Abflussdaten des Regenbeeks wurden anhand des Regenwasserkanalsystems berechnet und durch Drucksondenmessungen validiert.

Gemessene Niederschlagsdaten wurden vom Klimadatenzentrum auf dem öffentlich zugänglichen Open Data Server (URL: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zur Verfügung gestellt. Die Daten basierten auf punktuellen Beobachtungen von 20 Wetterstationen an Standorten innerhalb (und auch außerhalb) des Landkreises Mansfeld-Südharz (Abb. 11) und wurden zur Bestimmung des R-

Faktors des Landkreises mit der Originalmethode nach WISCHMEIER & SMITH (1978) verwendet. Für alle Stationen standen Niederschlagsdaten mit einem Intervall von 10 min für maximal 23 Jahre, seit 1996, zur Verfügung. Für 14 Stationen lagen Niederschlagsdaten von 2006 bis 2018 vor. Für die Berechnung der flächenhaften Erosion im Vietzbacheinzugsgebiet mit dem ero-SMINF wurden die Niederschlagsdaten der Wetterstation Mansfeld-Annarode verwendet (ebenfalls mit einer zeitlichen Auflösung von 10 min, 2006-2018).

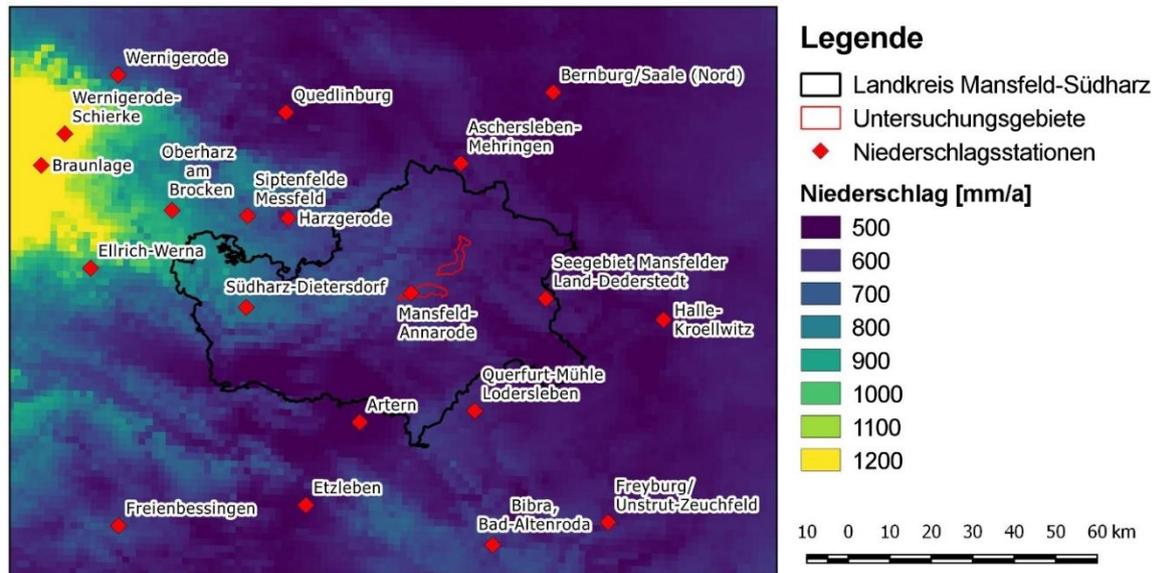


Abbildung 11: Lage der untersuchten Wetterstationen und mittlerer Jahresniederschlag im Landkreis Mansfeld-Südharz; Quelle: DWD

Tabelle 9. Überblick über die in dieser Studie verwendeten global-regionalen Klimaketten (RCP8.5)

GCM	RCM	Name	Datenlänge
CNRM-CM5	CCLM-4-8-17	CNRM_CCLM	1970-2100
CNRM-CM5	RCA4	CNRM_RCA4	1970-2100
EC-EARTH	CCLM-4-8-17	ECE_CCLM	1970-2100
EC-EARTH	HIRHAM5	ECE_HIRHAM5	1951-2100
EC-EARTH	RACMO22E	ECE_RACMO22E	1951-2100
EC-EARTH	RCA4	ECE_RCA4	1970-2100
MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17	MPI_CCLM	1951-2100
MPI-ESM-LR	RCA4	MPI_RCA4	1970-2100
MPI-ESM-LR	REMO (1) ^{a)}	MPI_REMO1	1951-2100
MPI-ESM-LR	REMO (2) ^{a)}	MPI_REMO2	1951-2100
HadGEM2-ES	RACMO22E	HadGEM2_RACMO22E	1970-2099
HadGEM2-ES	RCA4	HadGEM2_RCA4	1970-2099
IPSL-CM5A-MR	RCA4	IPSL_RCA4	1970-2100
IPSL-CM5A-MR	CCLM-4-8-17	IPSL_CCLM	1971-2100

a) Verschiedene REMO Läufe

Zusätzlich zu diesen Punktstationsdaten wurden vom DWD veröffentlichte Niederschlagsraster verwendet. Dabei handelt es sich um mehrjährig gemittelte, räumliche Niederschlagsdaten (1981-2010) mit einer Auflösung von 1000×1000 m, die als Jahres- und Monatsraster vorliegen. Die Klimamodelldaten, basierend auf einem Klima-Ensemble aus Globalen (GCM) und Regionalen Klimamodellen (RCM) der EURO-CORDEX-Datenbank, wurden vom Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) zur Verfügung gestellt (JACOB et al, 2014). Um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Hochwasserabflüsse in Niedersachsen und im Harz zu untersuchen, wurden die Modelldaten im Rahmen des KliBiW-Projekts bias-adjustiert und auf ein 10×10 km-Gitter interpoliert (HÖLSCHER et al., 2017). Die in dieser Studie verwendeten dynamischen global-regionalen Modelle basierten auf dem "Weiter wie bisher"-Szenario RCP8.5 (repräsentativer Konzentrationspfad mit einem Strahlungsantriebswert von $8,5 \text{ W/m}^2$ im Jahr 2100), entsprechend dem RCP-Szenario des 5. IPCC-Sachstandsberichts (Tab. 9). Zur Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion wurden monatliche Niederschlagssummen aus Klimamodellprojektionen ausgewertet. Dazu wurde aus den Klimamodellen die prozentuale Veränderung von der projizierten "Vergangenheit" zur "nahen" bzw. "fernen Zukunft" berechnet (Änderungssignale). Diese monatlichen Änderungsfaktoren wurden mit den monatlichen Niederschlagsrastern des DWD verrechnet, um neue Raster mit projizierten Niederschlagsdaten zu erstellen.

3.3.3. Planungsinstrumente der Erosion und erforderliche Eingabedaten

Die Flächenerosion von landwirtschaftlichen Flächen kann mit den Planungsinstrumenten ero-SMINF und ABAGis abgeschätzt werden (Abb. 12). ero-SMINF ist ein Planungsinstrument zur Berechnung des direkten Abflusses und zur Abschätzung der Erosionstendenz für ein bestimmtes Niederschlagsereignis. Das Planungsinstrument basiert auf dem Stufenmodell der Infiltration SMINF (PESCHKE & KUTÍLEK, 1982) nach dem Ansatz von GREEN & AMPT (1911). SMINF berechnet die Infiltration in den Boden über die Zeit auf Grundlage eines Niederschlagsereignisses mithilfe einer Bodensättigungskurve. In einem zweistufigen Ansatz wird zunächst die Sättigungskurve (bis zu dem Punkt, an dem der Boden gesättigt ist) bestimmt. Die Infiltrationsfunktion $f(t)$ (bis zum Zeitpunkt der Sättigung) entspricht der Niederschlagsintensität $PI(t)$:

$$f(t) = PI(t)$$

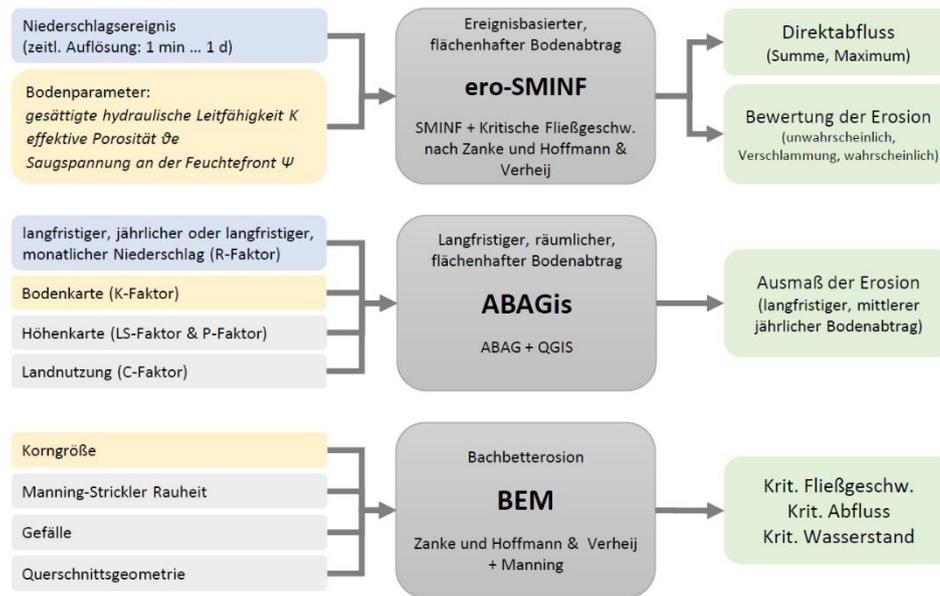


Abbildung 12: Schema der Planungsinstrumente ero-SMINF, ABAGis und BEM mit erforderlichen Eingabedaten, Zweck der Planungsinstrumente und erzeugten Ausgabedaten

Die Regressionskurve der Infiltration (reduzierter Bodenwasserfluss) $f_m(t)$ wird wie folgt bestimmt:

$$f_m(t) = \frac{K_S}{2} \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{A^2}{4} + A \cdot B + F_s^2 \right)^{-\frac{1}{2}} \cdot (A + 2B) \right]$$

mit $A = K_S \cdot (t - t_s)$

und $B = F_s + 2 \cdot \theta_e \cdot \Psi$

wobei F_s die Infiltrationsrate bis zur Sättigungszeit t_s ist (PESCHKE & KUTÍLEK, 1982).

Durch die Implementierung des SMINF in der Skriptsprache Visual Basic for Applications (VBA) von Microsoft Excel wurde die Anwendung durch die Reduzierung auf vier Eingabeparameter vereinfacht. Diese Parameter waren der Niederschlag in einem definierten Intervall, die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit K , die effektive Porosität θ_e und die Saugspannung in der Feuchtefront Ψ . Als Hilfestellung bei der Eingabe der Bodenparameter kann der Anwender aus elf Bodentypen wählen, die auf entsprechenden Literaturwerten basieren. Das Ergebnis des ero-SMINF ist die effektive Niederschlagsmenge PEF, die in etwa der Menge des direkten Abflusses entspricht. Um die Erosionsgefahr an einem Hang abzuschätzen, wird die Fließgeschwindigkeit mit der Kontinuitätsgleichung berechnet. Dazu muss der Benutzer eine Hanglänge und eine Hangneigung eingeben. Die sich näherungsweise ergebende Fließgeschwindigkeit wird mit einer kritischen Fließgeschwindigkeit verglichen, die auf den Formeln nach ZANKE (1982) (für nicht-bindige) oder nach HOFFMANS & VERHEIJ (1997) (für

bindige Sedimente) beruht. Liegt die berechnete Geschwindigkeit über der kritischen Fließgeschwindigkeit, ist ein Abtrag rechnerisch möglich. Als Ergebnis des ero-SMINF werden der kumulierte Direktabfluss und der maximale Direktabfluss innerhalb eines Intervalls sowie eine von drei Stufen der Erosionsbewertung angegeben:

- 1) Flächenhafte Erosion ist unwahrscheinlich
- 2) Flächenhafte Erosion ist mäßig wahrscheinlich
- 3) Flächenhafte Erosion ist wahrscheinlich

Um die Erosionsgefährdung im Untersuchungsgebiet zu ermitteln, wurde die maximale Niederschlagsintensität für jedes Jahr und jede Jahreszeit bestimmt und das entsprechende Niederschlagsereignis mit dem ero-SMINF untersucht. Die Erosionsgefahr basierte dabei auf einem Hang mit einer Länge von 22 m und der lokalen Hangneigung (11°) (in Anlehnung an die ABAG-Berechnungsmethode).

Das Planungsinstrument ABAGis dient der Abschätzung des langjährigen, mittleren jährlichen Bodenabtrags durch Wasser in einem definierten Gebiet. Es basiert auf der deutschen Version der Universal Soil Loss Equation (USLE), die von WISCHMEIER & SMITH (1978) entwickelt und von SCHWERTMANN, VOGL & KAINZ (1990) an bayrische Verhältnisse angepasst wurde. USLE ist ein empirisch basiertes Modell, das sich aus sechs Faktoren zusammensetzt: Dem Niederschlagserosivitätsfaktor (R), dem Bodenerodierbarkeitsfaktor (K), den topographischen Faktoren (L und S) und den Bewirtschaftungsfaktoren (C und P). Die empirische "Produktgleichung" lautet wie folgt:

$$A = R \cdot K \cdot S \cdot L \cdot C \cdot P$$

Anleitungen für die ABAG und die Faktoren sind in der DIN 19708:2017-08 des Deutschen Instituts für Normung (DIN) beschrieben, auf der das ABAGis basiert. Die S- und L-Faktoren werden dabei separat berechnet, der S-Faktor nach MORGAN ET AL. (1998) und der L-Faktor nach folgender Formel nach AUERSWALD (2002):

$$L = (0,046 \cdot l)^m$$

$$\text{mit } m = 1,2 \cdot \sin \alpha^{1/3} \text{ für } \alpha < 4^\circ$$

$$\text{und } m = 0,5 \text{ für } \alpha \geq 4^\circ$$

Um den Bodenverlust für ein Gebiet, z.B. ein Einzugsgebiet, zu berechnen, wurden der ABAG-Ansatz und die sechs ABAG-Faktoren in ein geographisches Informationssystem integriert. Dazu muss der Anwender nur drei Layer (Höhenlayer, Landnutzungslayer und Bodentyp-layer) als Grundlage für die Berechnung der Faktoren hinzufügen. Um den Bodenverlust zu

ermitteln, werden alle Faktorlayer multipliziert und grafisch im GIS dargestellt. Für das ABAGis wurde die kostenlose Open-Source-Software QuantumGIS (QGIS) verwendet. Zur Unterstützung der Berechnung des komplexen R-Faktors kann aus zwei Verfahren gewählt werden. Zum einen steht seit 2018 eine Erosionskarte von Deutschland auf Basis von RADOLAN-Daten (Radar-Online-Kalibrierung) zur Verfügung (AUERSWALD et al., 2019a), die räumlich hochauflösend für große Gebiete genutzt werden kann. Für kleinere Flächen oder hangbezogene Untersuchungen stellt die ABAGis für jedes Bundesland in Deutschland empirische Gleichungen zur Verfügung. Diese Gleichungen beschreiben eine regionale, lineare Regression zwischen dem mittleren Jahresniederschlag und dem R-Faktor. Zur Berechnung des R-Faktors gibt der Nutzer einen Niederschlagslayer ein und wählt ein Bundesland aus. Abweichend davon können auch individuelle R-Faktoren (z.B. RADOLAN) verwendet werden, was für Gebiete außerhalb Deutschlands empfohlen wird.

In dieser Studie wurden gemessene Niederschläge mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten mehrerer Wetterstationen verwendet, um einen lokal auf den Landkreis Mansfeld-Südharz angepassten R-Faktor zu ermitteln. Darüber hinaus wurde auf Basis dieser Auswertung eine eigene Regressionsgleichung in Anlehnung an die DIN 19708:2017-08 entwickelt. Um die saisonalen Veränderungen zu berücksichtigen, wurde anstelle des durchschnittlichen Jahresniederschlags der durchschnittliche Monatsniederschlag einbezogen. Die auf den Landkreis Mansfeld-Südharz anwendbare Gleichung lautet wie folgt:

$$R = (0,072 \cdot P_{Jan} + 0,043 \cdot P_{Feb} + 0,049 \cdot P_{Mär} + 0,150 \cdot P_{Apr} + 0,546 \cdot P_{Mai} + 1,055 \cdot P_{Jun} + 0,571 \cdot P_{Jul} + 0,516 \cdot P_{Aug} + 0,470 \cdot P_{Sep} + 0,083 \cdot P_{Okt} + 0,106 \cdot P_{Nov} + 0,051 \cdot P_{Dez}) - 135,744$$

wobei P für den langjährigen, mittleren Niederschlag in mm für die Monate Januar bis Dezember steht. Der R-Faktor sowie die oben beschriebene Regressionsgleichung des Landkreises Mansfeld-Südharz waren für die Berechnung des Bodenverlustes unter den gegenwärtigen Bedingungen und unter Berücksichtigung des Klimawandels erforderlich.

Das Bachbetterserosionsmodell (BEM) ist in der Lage, die Erosion der Bachsohle abzuschätzen (Abb. 12). Das Planungsinstrument berechnet die kritische Fließgeschwindigkeit in einem Gerinne. Übersteigt eine gemessene Fließgeschwindigkeit diesen kritischen Wert, beginnt der Sedimenttransport (Erosion) im Gerinne. Darüber hinaus kann ein deutlich niedrigerer Messwert auf Sedimentation hinweisen. Das Werkzeug kann verwendet werden, um Informationen über die Erosionstendenz eines bestimmten Abflusses in einem Bach zu

erhalten. Auf diese Weise können Schwellenwerte, z.B. ein maximaler Abfluss von Regenwasser, ermittelt werden. Für die Berechnung der Sohlenerosion wurde die Formel nach ZANKE (1982) für nicht-bindige Sedimente verwendet:

$$v_{m,cr} = 2.8 \cdot (\rho' \cdot g \cdot d_{ch})^{0.5} + 14.5 \frac{\nu}{d_{ch}} \cdot c_a$$

$$\text{mit } \rho' = \frac{\rho_F - \rho_W}{\rho_W}$$

wobei $v_{m,cr}$ in $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ die mittlere kritische Fließgeschwindigkeit, ρ' [-] die relative Dichte des Sediments, g in $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ die Erdbeschleunigung, d_{ch} in m die charakteristische Korngröße (hier d_{50}), ν in $\text{m}^2\cdot\text{s}$ die kinematische Viskosität des Wassers, c_a [-] die Adhäsion (für natürliche Sande $c_a = 1$) und ρ_F und ρ_W in $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ die Dichte von Sediment und Wasser bezeichnen. Für bindige Sedimente wurde die Formel nach Hoffmans & Verheij (1997) angewandt:

$$v_{m,cr} = \lg\left(\frac{8.8 \cdot h}{d_{ch}}\right) \sqrt{\frac{0.4}{\rho_W} [(\rho_F - \rho_W) \cdot g \cdot d_{ch} + 0.021 \cdot C_0]}$$

wobei h in m die Wassertiefe und C_0 in $\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$ die Kohäsion darstellen.

Die charakteristische Korngröße innerhalb des Werkzeugs BEM reicht von 0,001 bis 8 mm. Der kritische Wasserstand und der kritische Abfluss werden anhand der Geometrie des Gerinnes, der Steigung der hydraulischen Gradienten bzw. des linearen hydraulischen Druckverlusts und eines Rauigkeitskoeffizienten nach MANNING (1895) (Manning-Koeffizient) bzw. STRICKLER (1923) (Manning-Strickler-Rauhigkeitsbeiwert) berechnet. Die Formel basiert auf der Kontinuitätsgleichung und der Fließformel nach Manning-Strickler:

$$v_m = k_{Str} \cdot R^{\frac{2}{3}} \cdot S^{\frac{1}{2}}$$

wobei v_m in $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ die mittlere Querschnittsgeschwindigkeit, k_{Str} in $\text{m}^{1/3}\cdot\text{s}^{-1}$ der Manning-Strickler-Koeffizient (entspricht $1/\text{Manning's } n$), R in m der hydraulische Radius und S in $\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ die Steigung der hydraulischen Gefällelinie oder der lineare hydraulische Druckverlust ist. k_{Str} variiert von 6 bis $100 \text{ m}^{1/3}\cdot\text{s}^{-1}$ (im BEM von $20 \text{ m}^{1/3}\cdot\text{s}^{-1}$ - rauher Stein und raue Oberfläche - bis $80 \text{ m}^{1/3}\cdot\text{s}^{-1}$ - glatte Erdkanäle aus Feinsand).

Ähnlich wie beim ero-SMINF wurden die BEM-Formeln und -Anweisungen in VBA umgesetzt. Anleitungen zur Identifizierung des Sedimentkorns, Hilfestellungen zum Manning-Strickler-Wert und weitere Erläuterungen sollen dem Benutzer bei der Eingabe der Daten helfen.

3.4. Ergebnisse

3.4.1. Erosionsgefährdung im Untersuchungsgebiet Vietzbach - Anwendung der Planungsinstrumente ero-SMINF und ABAGis

Tabelle 10 stellt die Ergebnisse von ero-SMINF für verschiedene Niederschlagsereignisse exemplarisch für die Sommersaison (Juli bis September) im Untersuchungsgebiet Vietzbach dar. Die Darstellung der extremen Niederschlagsereignisse (linke Seite) zeigte, dass die Niederschläge mit den höchsten Intensitäten in der Sommersaison hauptsächlich im Juli und August auftraten. Hier wurden Intensitäten von bis zu $130 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ (22 mm in 10 min) beobachtet. Die Ergebnisse von ero-SMINF (rechte Seite) wiesen nach, dass alle untersuchten Ereignisse in der Sommersaison zu Direktabfluss geführt haben. Je nach Niederschlagsereignis waren 22% bis 70% des gemessenen Niederschlags effektiver Niederschlag und führten zu direktem Abfluss. Aus diesem Grund wurde die Erosion bei 67% aller Ereignisse als wahrscheinlich angesehen. Bei der Hälfte dieser Ereignisse bestand ein mäßiges Erosionsrisiko.

Tabelle 10: Ergebnisse von ero-SMINF für das Einzugsgebiet des Vietzbaches: Charakteristik der Sommer-niederschlagsereignisse mit der höchsten Intensität (links), resultierender Direktabfluss und Bewertung der Erosionsgefahr (rechts)

Jahr	Monat	D min	P _{Sum} mm	PI _{max} mm/h	Q _{Dir} mm	Q _{Dir_Max} mm	Erosionsrisiko
2007	Jul	520	51,4	35,6	23,6	5,2	mäßig wahrscheinlich
2008	Jul	20	4,8	27,4	0,5	0,5	unwahrscheinlich
2009	Aug	50	26,0	68,9	18,5	9,8	wahrscheinlich
2010	Jul	300	31,2	45,7	11,1	5,5	mäßig wahrscheinlich
2011	Aug	140	38,6	91,8	24,5	13,9	wahrscheinlich
2012	Aug	60	14,1	48,7	4,2	2,7	unwahrscheinlich
2013	Aug	80	22,0	45,5	12,8	6,3	mäßig wahrscheinlich
2014	Jul	80	24,0	39,7	13,5	5,0	mäßig wahrscheinlich
2015	Aug	150	93,2	131,8	76,8	20,4	wahrscheinlich
2016	Sep	330	18,6	14,3	2,3	1,6	unwahrscheinlich
2017	Jul	20	6,6	36,6	1,3	1,3	unwahrscheinlich
2018	Jul	300	43,6	80,5	30,7	12,3	wahrscheinlich

D - Dauer eines Niederschlagsereignisses; R_{Sum} - kumulierte Niederschlagssumme für ein Ereignis; PI_{Max} - Maximale Niederschlagsintensität; Q_{Dir} - Kumulierte Summe des Direktabflusses; Q_{Dir_Max} - Maximaler Direktabfluss innerhalb eines 10-Minuten-Intervalls

Die Auswertung wies einen Zusammenhang zwischen hohen Direktabflüssen bzw. Maximalabflüssen und der Erosionswahrscheinlichkeit nach. In den meisten Fällen wurde ein hoher Direktabfluss durch hohe Niederschlagsmengen innerhalb kurzer Zeitintervalle verstärkt. Die Berechnungen für das Frühjahr (April bis Juni) ergaben eine Häufung von Starkniederschlägen im Juni mit Intensitäten von bis zu $148 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ (25 mm in 10 min) (in dieser Studie nicht

dargestellt). Im Frühjahr waren nur 45 % der Ereignisse wahrscheinlich erosiv. Die Niederschlagsereignisse im Winter (Januar bis März) und im Herbst (Oktober bis Dezember) führten in der Regel nicht zu direktem Abfluss, weshalb Erosion in diesen Jahreszeiten als unwahrscheinlich eingeschätzt wurde.

Insgesamt zeigten die Modellergebnisse von ero-SMINF die hohe Vulnerabilität des Einzugsgebietes des Vietzbaches gegenüber Bodenerosion, insbesondere im Frühjahr und Sommer, verstärkt durch undurchlässige Lehm-Ton-Böden und hohe Hangneigungen. Da ero-SMINF jedoch keine Rückhalte- oder Stabilisierungseffekte durch Pflanzen berücksichtigt, waren die Ergebnisse für die Situation direkt nach der Ernte robuster.

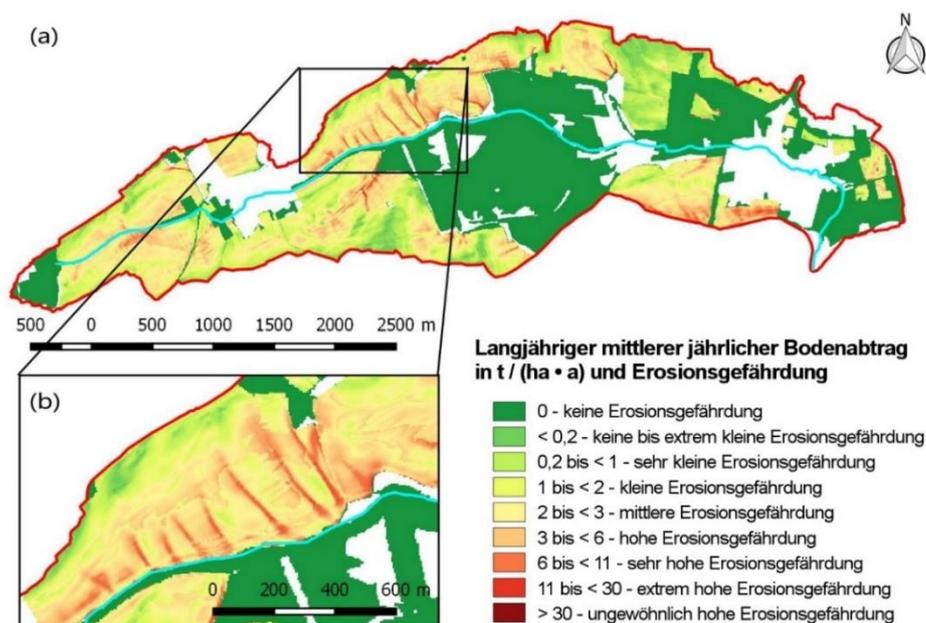


Abbildung 13: (a) Ergebnisse des ABAGis für den Vietzbach: Langjähriger mittlerer jährlicher Bodenabtrag und Erosionsgefährdung; (b) Detailansicht des Vietzbaches mit stark betroffenem Gebiet (lineare Erosionspfade)

Abbildung 13a stellt die mit ABAGis berechnete mittlere jährliche Bodenerosion für das Einzugsgebiet des Vietzbaches dar. Das Einzugsgebiet wies große Flächen ohne Erosionsrisiko auf, in den meisten Fällen Wald- oder Grünlandflächen. Für landwirtschaftliche Flächen wurde überwiegend ein geringes bis mittleres Erosionsrisiko ermittelt; Gebiete mit sehr hohem bis extrem hohem Erosionsrisiko befanden sich im Zentrum des Einzugsgebietes. Die mittlere jährliche Bodenerosion im Einzugsgebiet lag bei $1,86 t \cdot ha^{-1}$, mit lokalen Höchstwerten von bis zu $35 t \cdot ha^{-1} \cdot a^{-1}$ (Maximum). Der Ausschnitt aus Abbildung 13b zeigt mehrere lineare Erosionspfade, die durch eine Vertiefung im Gelände verstärkt wurden. Die lineare Vertiefung war auf die Konzentration des Direktabflusses und die daraus resultierende Erosion zurückzuführen. In denselben Bereichen, in denen die Erosionspfade endeten, waren Erdrutsche an

den Ufern des Baches zu beobachten. Aufgrund dieser Erosionspfade war der Eintrag von Oberflächenabfluss und Erosionsmaterial in den Vietzbach sehr wahrscheinlich. Der Uferschutzstreifen betrug durch die landwirtschaftliche Aktivität in der Nähe des Baches weniger als 1 Meter. Im Gegensatz zu ero-SMINF war das ABAGis in der Lage, das Erosionsrisiko als räumliche Information darzustellen und so die Identifizierung von gefährdeten Zonen zu ermöglichen.

3.4.2. Auswirkungen der Landnutzungsänderung und des Klimawandels auf die Erosivität im Untersuchungsgebiet Vietzbach - Szenarienberechnungen mit dem ABAGis

Durch Anpassung der Eingabedaten können mit dem ABAGis Variantenberechnungen durchgeführt werden. So konnten beispielsweise Landnutzungsszenarien mit anderen Fruchtfolgen oder Bodenbearbeitungsmethoden berechnet werden, indem der C-Faktor verändert wird. Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse der verschiedenen Landnutzungsszenarien.

Tabelle 11: Ergebnisse des ABAGis für verschiedene Landnutzungsszenarien: Prozentuale Veränderung der Bodenerosion für verschiedene Fruchtfolgen und Bodenbearbeitungsarten in Bezug auf die Referenz; Bild: Vergleich von drei Landnutzungsszenarien: Derzeitiges Erosionsrisiko am Vietzbach (Mitte); erhöhtes Risiko durch Umstellung auf Maisfruchtfolge (links); verringertes Risiko durch Umstellung auf Direktsaat (rechts).
BB...Bodenbearbeitung

Fruchtfolge	Grundbodenbearbeitung im Herbst			mit Zwischenfrucht		
	konventionell wendend	konservierend nicht wendend (geringe BB)	konservierend nicht wendend (hohe BB)	konventionell wendend	konservierend nicht wendend (geringe BB)	konservierend nicht wendend (hohe BB)
Zuckerrübe – Winterweizen – Wintergerste	54%	-46%	-64%	27%	-54%	-73%
Winterraps – Winterweizen – Wintergerste	Referenz^{b)}	-54%	-73% ^{c)}			
Mais – Winterweizen – Wintergerste	73%	-46%	-64%	46%	-54%	-73%
Mais – Winterweizen – Wintergerste – Winterraps	46%	-54%	-73%	18%	-54%	-73%
Mais	219% ^{a)}	-27%	-54%	109%	-46%	-64%

a) Schlechtes Szenario:
Änderung auf Maisanbau

b) Referenz: Winterraps -
Winterweizen - Wintergerste mit
konventioneller Bodenbearbeitung

c) Gutes Szenario:
Änderung zu konservierender
(nicht wendender) Bodenbearbeitung

Im Einzugsgebiet des Vietzbaches wurde im Allgemeinen eine Fruchtfolge Wintertraps - Winterweizen - Wintergerste mit konventioneller Bodenbearbeitung durchgeführt. Im Vergleich zu dieser Referenzbedingung nahm die Bodenerosion beim Wechsel von konventioneller zu konservierender Bodenbearbeitung ab. Somit kann eine Reduzierung von bis zu 73% erreicht werden. Eine Umstellung von der bestehenden Fruchtfolge auf eine Fruchtfolge mit Mais erhöhte die Bodenerosion. Insbesondere der Monoanbau von Mais erhöhte die Bodenerosion um 219 %. Durch den Anbau von Zwischenfrüchten wurde die Bodenerosion grundsätzlich reduziert.

Andererseits war es möglich, einen vom Klimawandel beeinflussten R-Faktor zu berechnen, indem die in Klimaszenarien projizierten Niederschläge verwendet wurden. Tabelle 12 zeigt die monatlichen Niederschläge in der Nahen und Fernen Zukunft, die durch Skalierung der gemessenen Vergangenheitswerte mit den projizierten Änderungssignalen berechnet wurden. Der R-Faktor wurde mit den resultierenden Zeitreihen berechnet. In der Nahen Zukunft nahm der Niederschlag um 1 bis 6 mm pro Monat zu. In der Fernen Zukunft war der Niederschlag um 6 bis 14 mm höher als in der Vergangenheit, außer im Juli, August und September, wo eine Abnahme von 1 bis 3 mm zu projiziert wurde. Der Jahresniederschlag nahm in beiden Zeiträumen zu.

Tabelle 12: Monatlicher und jährlicher, mittlerer Niederschlagssumme und R-Faktor (Regenerositätsfaktor) für die Vergangenheit (gemessener Niederschlag der Station Mansfeld-Annarode), Nahe Zukunft und Ferne Zukunft (Klimamodelle)

Zeitabschnitt	Niederschlag [mm]												Year
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Vergangenheit (2007-2018)	50,4	27,6	41,2	31,2	66,5	61,2	79,2	67,1	65,0	41,3	49,2	50,2	630,1
Nahe Zukunft (2021-2050)	54,9	31,0	44,4	35,0	71,8	63,4	82,7	69,5	66,1	43,8	53,6	56,0	672,2
Ferne Zukunft (2071-2100 ^{a)})	64,6	33,5	49,0	37,2	77,2	67,6	76,2	68,2	62,2	49,1	60,2	64,8	709,8

Zeitabschnitt	R-Faktor [N/(ha·a)]												Year
	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Vergangenheit (2007-2018)	2,0	0,4	1,2	2,0	13,0	21,9	22,3	16,9	13,4	1,9	1,8	1,2	98,1
Nahe Zukunft (2021-2050)	2,3	0,6	1,4	2,6	15,9	24,3	24,3	18,1	14,0	2,1	2,3	1,5	109,4
Ferne Zukunft (2071-2100 ^{a)})	3,0	0,7	1,6	2,9	18,9	28,6	20,6	17,5	12,1	2,6	3,0	1,9	113,4

a) HadGEM2-Modellkette 2070-2099

Aufgrund der linearen Beziehung ließ sich eine ähnliche Veränderung auch für den R-Faktor beobachten. Da der monatliche R-Faktor in den Monaten Januar bis April und Oktober bis Dezember sehr niedrig ist, hatten diese Monate nur einen geringen Einfluss auf den jährlichen R-Faktor, während Mai bis September die höchsten monatlichen R-Faktoren aufwiesen.

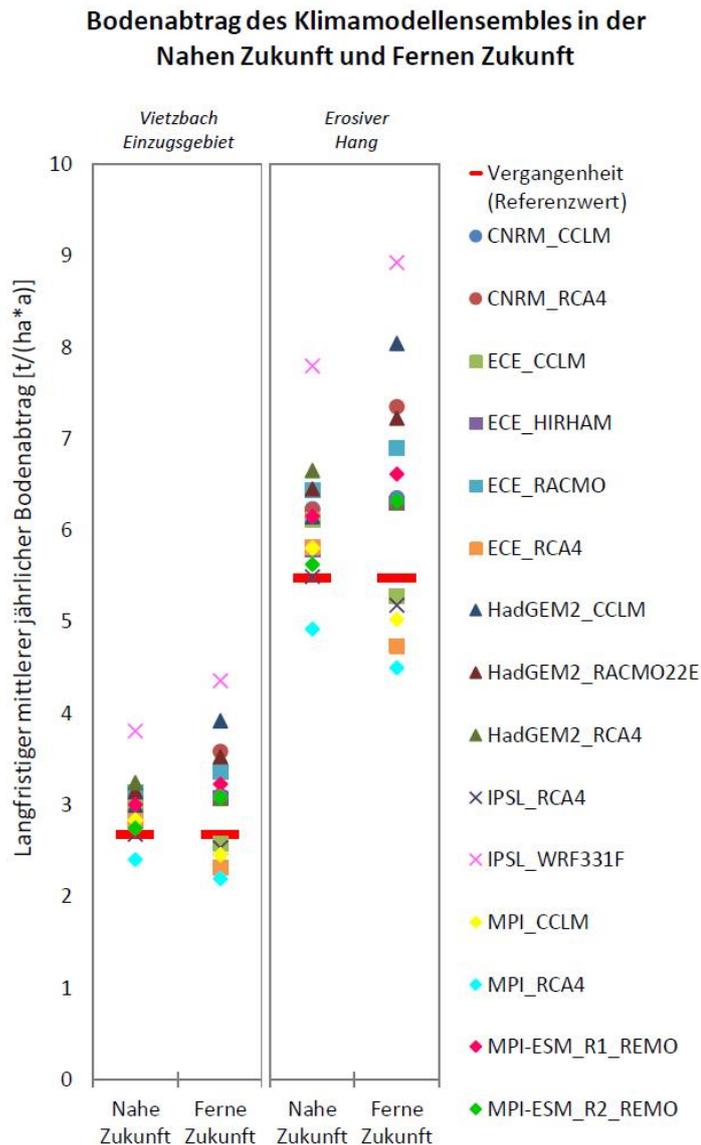


Abbildung 14: Bandbreite des Bodenverlustes in der Nahen und Fernen Zukunft gemäß dem Klimamodellensemble als räumliche Mittelwerte des Einzugsgebietes des Vietzbaches (links) und des Erosionshangs (rechts, siehe Abb. 13b).

Im Allgemeinen stieg der R-Faktor von der Vergangenheit in die Nahe Zukunft um $11,3 \text{ N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ und in die Ferne Zukunft um $15,3 \text{ N}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$. Abbildung 14 zeigt den resultierenden Bodenverlust in der Nahen und Fernen Zukunft aus dem ABAGis. Auf der linken Seite ist der langjährige, mittlere jährliche Bodenabtrag des Einzugsgebietes des Vietzbaches dargestellt. Da hier auch die Wald- und Grünlandflächen enthalten waren (Flächen ohne Erosion), wurde zusätzlich der Mittelwert der erosiven Böschung aus Abbildung 13b dargestellt (Abb. 14, rechte Seite). Für beide Flächen projizierten fast alle Modellketten in der Nahen Zukunft einen Bodenverlust, der über den bisherigen Werten liegt. Im Mittel nahm der Bodenabtrag im Einzugsgebiet des Vietzbaches um $0,3 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ und am Erosionshang um $0,4 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ zu

(jeweils 11%). In der Fernen Zukunft lagen 5 der 15 Klimamodellketten unter dem Referenzwert und projizierten somit einen Rückgang der Bodenerosion. Der größte Teil zeigte jedoch eine Zunahme an. Im Mittel wurde eine Zunahme der Erosion von $0,6 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ (Einzugsgebiet) und $0,9 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ (Erosionshang) berechnet (jeweils 16%). Der Vergleich des Einzugsgebietes und des Erosionshangs zeigte jedoch auch eine höhere Unsicherheit der absoluten Werte bei zunehmendem Bodenverlust.

Die Ergebnisse der Berechnungen wiesen die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von ABAGis hin. Am Beispiel des Einzugsgebietes des Vietzbaches wurde das Potenzial konservierender Bodenbearbeitungsmethoden aufgezeigt. Während die Bodenerosion (aufgrund erhöhter Niederschläge durch den Klimawandel) in Naher und Ferner Zukunft um 11% bzw. 16% zunahm, konnte die Bodenerosion durch die Umstellung auf bodenschonende Bodenbearbeitung (Direktsaat) um ca. 80% reduziert werden. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die konservierende Bodenbearbeitung eine geeignete Methode zur Verringerung der negativen Auswirkungen des Klimawandels darstellt.

3.4.3. Erosionsgefährdung im Untersuchungsgebiet Regenbeek - Ergebnisse des BEM

Die Ergebnisse des Bachbetterserosionsmodell BEM für den Bach Regenbeek, in dem eine Sohleintiefung zu beobachten war, sind in Tabelle 13 dargestellt. Die kritische Geschwindigkeit in diesem Abschnitt lag bei $1,12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, der entsprechende kritische Abfluss mit $0,24 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. Anhand von Wasserstandsmessungen wurde ein Normalabfluss von $0,02 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ ermittelt, welcher zu gering für eine Bachbettersosion ist.

Tabelle 13: Eingangsdaten und Ergebnisse des BEM und Vergleichsmessungen für den von Erosion betroffenen Bachabschnitt

	Eingangsdaten	
	Gefälle [m/m]	0,0169
	Manning-Strickler Wert k_{Str} [$\text{m}^{1/3}/\text{s}$]	33
	Breite [m]	0,8
	Ufergefälle [xH:1V]	2
	Ergebnisse BEM	
	Kritische Fließgeschwindigkeit [m/s]	1,12
	Kritischer Abfluss [m^3/s]	0,24
	Gemessene Werte (Spitzenabfluss)	
	Gemessene Fließgeschwindigkeit [m/s]	2,47
Gemessener Abfluss [m^3/s]	3,68	

Der Spitzenabfluss des Regenwassers, das aus dem nahe gelegenen Dorf Klostermansfeld in den Bach eingeleitet wird, wurde auf $3,68 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ bemessen. Dies entspricht dem 14-fachen des kritischen Abflusses, wodurch eine Erosion des Bachbettes als sehr wahrscheinlich eingeschätzt wurde.

Die Ergebnisse des BEM zeigten, dass die Ableitung des Regenwassers aus Klostermansfeld für die Erosion im Bach Regenbeek verantwortlich war. Durch die physikalischen Kräfte des fließenden Wassers wurde Bachmaterial direkt abgetragen und es kam zu Uferauskolkungen und Sohleintiefungen. Erodierendes Material lagerte sich anschließend auf abflussberuhigten Zonen wie dem Straßenabschnitt in Hettstedt ab.

3.4.4. Auswirkungen von Gerinneausbau und Klimawandel auf die Erosivität im Untersuchungsgebiet Regenbeek - Szenarienberechnungen mit BEM

Im Gegensatz zu ABAGis konnte das BEM nur bedingt Variantenrechnungen durchführen. Insbesondere die klimawandelbedingten Veränderungen der Hochwasserabflüsse sind noch Gegenstand der Forschung. Generell zeigten die bisherigen Auswertungen, dass die monatlichen Niederschläge von der Vergangenheit bis in die Nahe Zukunft und Ferne Zukunft zunehmen werden. Aus diesem Grund wurde eine Zunahme der lokalen Hochwasserabflüsse als wahrscheinlich eingeschätzt. Da der Abfluss im Bach Regenbeek bereits in der Gegenwart den kritischen Wert überschritten hat, werden die negativen Auswirkungen in der Zukunft zunehmen. Maßnahmen direkt am Bach Regenbeek, wie die Erhöhung der Rauigkeit, die Verbreiterung des Bettes oder die Verringerung der Uferneigung, reduzieren die Geschwindigkeit und damit die Erosionsgefahr. Diese Maßnahmen wirkten sich auch auf den kritischen Abfluss aus, wie in Tabelle 14 zu erkennen ist.

Tabelle 14: Änderungen des kritischen Abflusses durch Variation des Manning-Strickler Rauigkeitsbeiwerts, der Breite und der Uferneigung am erosiven Abschnitt des Baches Regenbeek (aktuelle Werte sind fett dargestellt)

	Manning-Strickler Rauigkeitsbeiwert k_{str} [$\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$]						
	60	55	40	33	25	20	18
Kritischer Abfluss [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	0,05	0,06	0,12	0,24	0,60	1,28	1,86
Prozentuale Änderung	-80%	-76%	-50%	0%	+145%	+428%	+665%
	Breite [m]						
	0,1	0,2	0,4	0,8	1,5	2,0	4,0
Kritischer Abfluss [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	0,23	0,22	0,22	0,24	0,32	0,38	0,65
Prozentuale Änderung	-7%	-9%	-10%	0%	+31%	+57%	+167%
	Ufergefälle [H:B = x:1]						
	1	1.5	2	3	4	5	6
Kritischer Abfluss [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$]	0,19	0,21	0,243	0,31	0,38	0,46	0,55
Prozentuale Änderung	-21%	-12%	0%	+27%	+58%	+91%	+125%

Die Rauigkeit (Manning-Strickler Wert) beeinflusste das Ergebnis erheblich. Im Allgemeinen galt: Je niedriger der Wert (d. h. je rauer das Gerinne), desto höher war der kritische Abfluss, bei dem eine Erosion beginnt. Ein Wert von $18 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ beschreibt beispielsweise einen Wildbach mit großen Felsbrocken, ein Wert von $60 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ ein mit Beton ausgekleidetes oder begradigtes Gerinne. Eine Veränderung der Rauigkeit, z.B. durch Einbringen von grobem Kies oder Steinen oder die Anpflanzung von einheimischen Bäumen (z.B. Erlen) entlang der Ufer, verringerte die Erosionsgefahr. Eine Vergrößerung der Gerinnebreite oder eine geringere Uferneigung reduzierte ebenfalls den kritischen Abfluss, allerdings in geringerem Maße als die Rauigkeit.

Im Allgemeinen waren alle drei Maßnahmen in Kombination geeignet, die Erosionsgefahr zu reduzieren. Die Umsetzung erfolgt z.B. im Rahmen einer Renaturierung des Baches.

3.5. Diskussion

Ziel dieser Arbeit war es, praktikable, benutzerfreundliche und robuste Planungsinstrumente für den Einsatz in Kommunen zu schaffen. Dies wurde einerseits durch eine geringe Anzahl von Eingabeparametern und durch die Nutzung von bewährten Methoden erreicht, andererseits durch eine verständliche Darstellung der Berechnungsergebnisse. Aufgrund der Einfachheit der Planungsinstrumente musste allerdings eine geringere Genauigkeit in Kauf genommen werden.

Im Vergleich zu anderen Methoden zur Berechnung des direkten Oberflächenabflusses, z.B. HORTON (1933) oder PHILIP (1969), welche den Abfluss aus dem Niederschlagsverlust bestimmen, wurde die SMINF-Methode durch die Einbeziehung einer Sättigungskurve als zuverlässiger und robuster eingeschätzt. Andere Methoden, wie z.B. die Richards-Gleichung (RICHARDS, 1931), die z.B. im HYDRUS1D-Modell verwendet wird, sind zwar genauer, erfordern dafür jedoch wieder mehr Eingangsparameter. Allen Methoden ist gemeinsam, dass die Genauigkeit des Ergebnisses stark von der Schätzung der Eingangsparameter abhängt, insbesondere vom Anfangswassergehalt. Durch die Umrechnung des Oberflächenabflusses in eine Fließgeschwindigkeit und den Vergleich mit einem kritischen Wert, konnte ero-SMINF zwar eine verlässliche Aussage zur Erosionswahrscheinlichkeit, aber nur eine Abschätzung der Erosionsmenge liefern. Aus diesem Grund wurde die indikativ qualitative Bewertung einer Erosionswahrscheinlichkeit bevorzugt (Erosivität des Regens). Der Vorteil des ero-SMINF war neben seiner praktischen Anwendbarkeit die Möglichkeit, hochaufgelöste Niederschläge zu verwenden. Auf diese Weise konnte die Erosivität einzelner Niederschlagsereignisse abgeschätzt werden.

ABAGis, das auf der empirischen ABAG beruht, ist erfahrungsgemäß weniger robust als physikalisch basierte Modelle wie EROSION 3D, LISEM oder MEFIDS. Einschränkungen ergeben sich durch Unsicherheiten beim Upscaling auf die Einzugsgebiets- oder Regionalskala (BENAVIDEZ et al., 2018). Da die USLE-Gleichung, auf der ABAGis basiert, auf der Grundlage kleinräumiger Untersuchungen landwirtschaftlicher Flächen in den Vereinigten Staaten von Amerika formuliert wurde, kann die Anwendung auf andere Klimaregime und Landnutzungen zu Unsicherheiten führen. Da die USLE, in Form der ABAG, jedoch an deutsche Verhältnisse angepasst wurde, reduzierten sich diese Unsicherheiten (SCHWERTMANN, VOGL & KAINZ, 1990). Eine weitere Einschränkung der ABAG-Gleichung ergab sich aus der geringen zeitlichen Auflösung. Während die meisten physikalisch basierten Modelle die Erosionsmenge für einzelne Niederschlagsereignisse berechnen können, bestimmt die ABAG den langjährigen mittleren Bodenabtrag. Obwohl die ABAG die Erosion durch Rillen und zwischen den Rillen berücksichtigen kann, ist sie nicht in der Lage, Bodenverluste durch Rinnen oder Massenabträge wie Erdrutsche zu berücksichtigen, was zu einer Unterschätzung führen kann (THORNE et al., 1985). Aufgrund der komplexen Interaktion von Erosionsprozessen und des Mangels an verfügbaren Beobachtungen von Bodenverlusten zur Validierung, sollten die ABAGis-Ergebnisse als beste Schätzungen und nicht als absolute Werte betrachtet werden (WISCHMEIER & SMITH, 1978). Trotz dieser Unsicherheiten eignet sich ABAGis aufgrund seiner Einfachheit, Robustheit und der geringen Anforderungen im Vergleich zu komplexeren, physikalisch basierten Modellen für den Einsatz durch Kommunen. ABAGis wurde zudem für das Testen von Szenarien konzipiert. Um die Genauigkeit der Modellergebnisse im Landkreis Mansfeld-Südharz zu überprüfen, wurden die Ergebnisse von ABAGis mit den vom LLG veröffentlichten Bodenerosionskarten und Erosionsmodellen sowie mit dem ABAG-Kalkulator verglichen (nicht dargestellt) (LLG, 2017). Die Unterschiede zwischen ihnen waren gering und wurden als vernachlässigbar angesehen.

Die Sohlenerosion bzw. der Sedimenttransport wird häufig mit ein- oder zweidimensionalen numerischen hydrodynamischen Modellen berechnet (z.B. HEC-RAS, MIKE11, HydroAS). Aufgrund der Komplexität des Sedimenttransports in natürlichen Gerinnen (variable Gerinnegeometrie, ungleichmäßige Korngrößenverteilungslinie, Einfluss unterschiedlicher Rauigkeiten, Turbulenzen, Einfluss der Vegetation usw.) ist die Berechnung der Sedimentmenge mit hohen Unsicherheiten behaftet (BECHTELER, 2006). Eine bessere Genauigkeit kann durch die Schaffung einer zuverlässigen Datengrundlage erreicht werden, was jedoch zeit- und kostenintensive Experimente erfordert. Um die Erosion des Bachbettes möglichst praxisnah abzuschätzen, wurde in BEM der Schwerpunkt auf den Beginn der

Sedimentbewegung gelegt und die unsichere Menge des transportierten Sediments außer Acht gelassen. Das Planungsinstrument gab eine Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für den Beginn des Transports an, angegeben als kritische Fließgeschwindigkeit. Im Vergleich mit den Ergebnissen der weit verbreiteten Hjulström-Gleichung, konnten ähnliche Ergebnisse nachgewiesen werden (nicht gezeigt) (HJULDSTROM, 1935).

3.6. Schlussfolgerung

Um die Vulnerabilität von Gebieten für flächenhafte Erosion oder Bachbetterosion zu bestimmen, sind für Planer und Behörden benutzerfreundliche, praktikable und robuste Modelle erforderlich. Die neu entwickelten Erosionsinstrumente ero-SMINF, ABAGis für die flächenhafte Erosion und BEM für die Bachbetterosion wurden für strategische Planungen von Anpassungsmaßnahmen unter Berücksichtigung des Klimawandels konzipiert. Die Planungsinstrumente lieferten Informationen über die Erosivität und Schätzungen zur Höhe des Bodenverlustes.

Mit dem Planungsinstrument ero-SMINF kann das Erosionspotenzial eines Hanges bei verschiedenen Niederschlagsereignissen abgeschätzt werden. Das Instrument ermittelt, ob Hänge erosionsgefährdet sind und welche Niederschlagsmenge zu Erosion führt. Darüber hinaus berechnet ABAGis das potenzielle Bodenerosionsrisiko und stellt es in einer Karte dar, sodass die Benutzer die stark erosionsgefährdeten Gebiete lokalisieren können. Mithilfe dieser beiden Werkzeuge ist es möglich, Strategien und Anpassungsmaßnahmen für den Umgang mit extremen Wetterbedingungen an Schwerpunktgebieten der Erosion zu entwickeln. Ein weiterer Vorteil von ABAGis ist die flexible Nutzung des Modells, z. B. für Landnutzungs- oder Bodenbearbeitungsvarianten sowie zur Ermittlung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion. Auf diese Weise können Planer und Behörden optimale Maßnahmen und langfristige Planungen entwickeln. Das Bachbetterosionsinstrument BEM berechnet die Grenzwerte für die Erosion des Bachbetts. Es hilft dem Benutzer, das Erosionspotenzial eines Baches zu bestimmen. So können Entscheidungsträger den maximalen Abfluss in Kanälen und Flüssen begrenzen oder Maßnahmen zur Verbesserung der Ufer- und Sohlstabilität festlegen.

Die Anwendbarkeit der Modelle wurde anhand der Ergebnisse der Einzugsgebiete Vietzbach und Regenbeek nachgewiesen. Im Einzugsgebiet des Vietzbaches, als ein von flächenhafter Erosion betroffenes Gebiet, zeigten die Ergebnisse von ero-SMINF, dass Starkniederschlagsereignisse von Juni bis August mit einer Intensität von mehr als $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Bodenerosion führten. Das ABAGis war in der Lage, Bereiche mit hohen

Bodenverlusten (Vulnerabilität des Gebietes) zu kennzeichnen und mit einer aufbereiteten Datenbasis im Hintergrund Szenarienberechnungen für das Untersuchungsgebiet durchzuführen. Die Ergebnisse zeigten, dass die Erosivität durch ansteigende Niederschläge in Zukunft generell zunehmen wird. Um das derzeit hohe Risiko und die zunehmenden Bodenverluste durch den Klimawandel zu verringern, war eine Umstellung auf konservierende Bodenbearbeitung am wirksamsten.

Der Regenbeek ist ein Gebiet mit einer ausgeprägten Erosion des Bachbettes. Auf Grundlage der Ergebnisse des BEM wurden der Regenwasserabfluss aus Klostermansfeld und die damit verbundenen Schubspannungen als Ursache für die im Bach beobachtete Erosion identifiziert. An strömungsberuhigten Zonen, wie der Straße in Hettstedt, sedimentiert das Material.

Die Ergebnisse der beiden Untersuchungsgebiete zeigten, dass die entwickelten Planungsinstrumente in ihrer Anwendung ausreichend waren, um die Gefährdung in einem definierten Gebiet zu ermitteln und Strategien zur Minderung der Bodenerosion zu entwickeln. Im Vergleich zu komplexen, physikalisch basierten Erosionsmodellen sind die Ergebnisse der entwickelten Erosionswerkzeuge weniger robust, was hauptsächlich auf die Einfachheit der verwendeten Werkzeuge zurückzuführen ist. Im Gegensatz zu komplexeren Modellen sind jedoch der Aufwand für die Verwendung der Planungsinstrumente, die Anzahl der Eingabeparameter und die Berechnungszeit geringer, sodass sie sich für eine kommunale Anwendung eignen. Damit zeigten die Ergebnisse dieser Studie, dass die drei Erosionsinstrumente - trotz der geringeren Genauigkeit aufgrund der Vereinfachung - für den kommunalen Einsatz deutlich besser geeignet waren als komplexe Modelle. Dies wurde in einer Reihe von Workshops evaluiert, in denen die Planungsinstrumente vorgestellt und geschult wurden. So konnten beispielsweise mithilfe der Instrumente die Ursache der Erosionsereignisse sowie deren Risiko ermittelt und Szenarienberechnungen durchgeführt werden. Gespräche mit Landwirten und Gemeinden zeigten jedoch, dass Maßnahmen nicht allein auf der Grundlage der Instrumente festgelegt werden können, da vor allem finanzielle und politische Hürden bestehen. Außerdem bestehen noch große Unsicherheiten hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels. Die Klimamodelle projizieren zwar die Veränderung der Niederschläge bis auf einen täglichen Zeitschritt, Veränderungen in der Intensität und die Auswirkung auf die Bodenerosion können jedoch nur bedingt bestimmt werden. Eine Verbesserungsmöglichkeit besteht in der monatlichen R-Faktor-Gleichung, welche im Vergleich zur Jahres- bzw. Sommerhalbjahresgleichung der DIN 19708 robuste Ergebnisse

erzielt (nicht dargestellt), jedoch im Zusammenhang mit dem Klimawandel noch validiert werden muss.

Aus diesem Grund müssen die Untersuchungen ausgeweitet werden um z.B. die Kompatibilität zwischen den Methoden nachzuweisen. Ein Hauptziel für weitere Studien ist die Verbesserung der Methoden zur Berechnung des R-Faktors für das ABAGis unter Berücksichtigung der Auswirkungen des Klimawandels.

4. Regressionsmodelle zur Abschätzung eines klimawandelbeeinflussten zukünftigen Regenerositätsfaktors auf Basis von Monatswerten

Dieses Kapitel basiert auf dem veröffentlichten Artikel: Köhn, J., Beylich, M., Meißner, R., Rupp, H. Reinstorf, F. (2022): *Regressionsmodelle zur Abschätzung eines klimawandelbeeinflussten zukünftigen Regenerositätsfaktors auf Basis von Monatswerten. Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 66, (3), 122-136. DOI: 10.5675/HyWa_2022.3_2

4.1. Zusammenfassung

Der R-Faktor als Maß für die Erosivität von Niederschlagsereignissen findet Anwendung in der Quantifizierung von Bodenverlusten mithilfe der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG). Die Berechnung des R-Faktors nach Normvorschrift bedarf zeitlich hoch aufgelöster Niederschlagsdaten, die meist nicht flächendeckend vorhanden sind. Aufgrund dessen werden Regressionsmodelle, wie z. B. die länderspezifischen Gleichungen der DIN 19708:2017-08 – "Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mithilfe der ABAG" oder auch räumlich hoch aufgelöste Radarniederschlagsdaten eingesetzt. In dieser Studie werden zwei für die Praxis einfach gehaltene, regionale Regressionsmodelle für den Landkreis Mansfeld-Südharz zur Berechnung von R-Faktoren vorgestellt. Mit Regressionsgleichung 1 wird ähnlich der Ländergleichung, jedoch auf Grundlage von 6 monatlichen Niederschlagsfaktoren, der R-Faktor auf Landkreisebene berechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Gleichung eine höhere Genauigkeit aufweist als die DIN-Gleichung für Sachsen-Anhalt. Mit Regressionsgleichung 2 wird auf Grundlage von monatlichen Niederschlagsänderungsfaktoren die Zu- bzw. Abnahme des R-Faktors ermittelt. Die Gleichung wird speziell für die Betrachtung des Klimawandels eingesetzt. Die Validierung anhand von Änderungssignalen eines regionalen Klimamodellensembles des RCP8.5-Szenarios zeigt eine hohe Modellgüte mit einer mittleren Abweichung vom DIN-R-Faktor in der Nahen und Fernen Zukunft von etwa 1 % und einem Korrelationskoeffizienten von größer 0,9.

4.2. Einleitung

Extreme Niederschlagsereignisse und der dadurch hervorgerufene Bodenabtrag sind ein global auftretendes Phänomen und ursächlich für den Verlust von fruchtbarem Boden. Die meist lokal auftretenden Ereignisse führen zu hohen Schäden, wie die Sturzflut von

Braunsbach (BRONSTERT et al., 2017; VOGEL et al., 2017) im Mai 2016 und die Überschwemmungen im Juli 2021 in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz (BÜRGER et al., 2021; JUNGHÄNEL et al., 2021) zeigen. Da sich eine projizierte Zunahme der Intensität und Häufigkeit von solchen Extremereignissen durch den Klimawandel negativ auf die Bodenabträge auswirkt (MÖLLER & WURBS, 2016), ist eine Abschätzung durch Modelle ein wesentliches Mittel, um Planungssicherheit für die Landnutzung in landwirtschaftlichen und kommunalen Bereichen zu erlangen.

Zur Quantifizierung von Bodenabträgen bzw. zur Erfassung der Erosionsgefährdung wurden seit dem 19. Jahrhundert eine Reihe von konzeptionellen, empirischen und physikalisch basierten Modellen entwickelt (BORRELLI et al., 2021). Dazu gehörte auch die von WISCHMEIER & SMITH (1978) entwickelte Bodenabtragungsgleichung, die "Universal Soil Loss Equation" (USLE), welche global Anwendung findet (FISTIKOGLU & HARMANCIOGLU, 2002; BAGARELLO et al., 2008; CAO et al., 2015; BELASRI & LAKHOUILI, 2016). Die empirische Gleichung ermöglicht die Abschätzung eines langjährig mittleren Bodenabtrags auf Grundlage von Niederschlag sowie geologischen, topografischen und landwirtschaftlichen Kennwerten. In den 1980er Jahren passten SCHWERTMANN, VOGL & KAINZ (1990) die Gleichung auf bayerische Verhältnisse an und schafften somit die Allgemeine Bodenabtragungsgleichung (ABAG). Die ABAG ist im deutschen Raum – in der DIN 19708 (2017) – etabliert und findet in zahlreichen praxisorientierten Anwendungsprogrammen, wie z. B. ABAGflux (WURBS et al., 2007), SEPAL (KIESEL et al., 2009), ABAG interaktiv (BRANDHUBER et al., 2018), ABAGis (HEILMANN et al., 2020) sowie auch in regionalen Projekten Anwendung, wie z. B. im DynaC (MÖLLER & WURBS, 2016) oder BebeR (HEILMANN et al., 2020).

Der Regenerositätsfaktor (R-Faktor) der ABAG ist eine meteorologische Größe, die aus der kinetischen Energie von erosionswirksamen Regenereignissen berechnet wird. Da hierfür Niederschlagsintensität und -menge ausschlaggebend sind, werden zur Berechnung Niederschlagsdaten mit einer sehr hohen Auflösung (< 15 Min.) benötigt (YUE et al., 2020). Die Messungen derartiger Regenreihen stellen jedoch hohe Anforderungen an die Technik bzw. Ausstattung von meteorologischen Dienstleistern und sind daher gegenwärtig nicht flächendeckend bzw. in einer ausreichend langen Zeitspanne verfügbar. Aus diesem Grund wurden alternative Ansätze zur Schätzung des R-Faktors entwickelt, die z. B. auf der Verwendung von täglichen, monatlichen, halbjährlichen oder jährlichen Niederschlagssummen bzw. exponentiellen Gleichungen, den Fournier-Index oder den modifizierten Fournier-Index basieren (LOUREIRO & COUTINHO, 2001; DIODATO, 2004; ANGULO-MARTÍNEZ

& BEGUERÍA, 2009; LEE & LIN, 2014; HERNANDO & ROMANA, 2016; TALCHABHADEL, 2020). Zudem kamen auch verschiedene Methoden zur Regionalisierung zur Anwendung (MEUSBURGER et al., 2012; BALLABIO et al., 2017; SADEGHI et al., 2017). In Deutschland wurden zur Regionalisierung des R-Faktors länderspezifische Regressionsgleichungen aufgestellt (SAUERBORN, 1994) und in die einschlägige Normvorschrift DIN 19708 (2017) integriert. Die sonst sehr zeit- und datenaufwändige R-Faktor-Berechnung wurde dadurch deutlich vereinfacht. Die ursprüngliche Datenbasis dieser Gleichungen ging auf Niederschlagszeitreihen von 1961 bis 1980 zurück (SAUPE, 1985). Diese wurde in jüngerer Zeit für Sachsen-Anhalt auf Grundlage von Zeitreihen von 2000 bis 2014 (17 Stationen) aktualisiert (WURBS & STEININGER, 2015). Dabei wurde deutlich, dass die Regressionsgleichungen den räumlichen R-Faktor für bestimmte Regionen, u. a. aufgrund der geringen Dichte von Stationen mit langjährig hochaufgelösten Niederschlagsdaten, nur eingeschränkt abbilden können. Hinzu kamen Schwierigkeiten beim Übergang zwischen den Bundesländern und die nicht ausreichende Erfassung von extremwertstatistischen Niederschlagskennwerten.

Die ungenügende räumliche Interpolation wurde auch von FISCHER et al. (2018) erkannt und verbessert. Die Autoren nutzten Radar-Niederschlagsdaten zur Ermittlung von räumlichen R-Faktoren, da für diese flächendeckend räumlich und zeitlich hochaufgelöste Daten zur Verfügung stehen. Die Nutzung von Radardaten gegenüber Regenschreibermessungen zur Erosionsabschätzung war jedoch nicht ohne Weiteres möglich, da die stark unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Messskalen zu Problematiken führten. Um diese zu minimieren, entwickelten die Autoren zeitliche und räumliche Skalierungsfaktoren und passten die Intensitätsschwelle im Berechnungsverfahren des R-Faktors an. Auf Grundlage dieser Korrekturfunktionen wurden von AUERSWALD et al. (2019a) auf Basis von radargestützten Niederschlagsdaten, eine deutschlandweit einheitliche, hochaufgelöste (1 x 1 km) Karte der Regenerosivität erzeugt, welche zur Abschätzung eines zeitlich stabilen und räumlich differenzierten R-Faktors dient. Im Vergleich mit der bisher verwendeten Karte von SAUERBORN (1994) zeigte sich in der Auswertung von AUERSWALD et al. (2019a) eine starke Zunahme der Erosivität. Diese war jedoch nicht methodisch bedingt, sondern wurde von den Autoren auf eine grundlegende Änderung der Niederschlagscharakteristik zurückgeführt. Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden von AUERSWALD et al. (2019b), ELHAUS et al. (2019) bzw. FISCHER et al. (2020) der Einfluss des Klimawandels auf Starkniederschläge und den R-Faktor mithilfe von Trendberechnungen untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass sich der R-Faktor zwischen 1962 und 2009 verdoppelt hat, d. h. jährlich um etwa 2 % angestiegen ist. Dies hätte eine regelmäßige Aktualisierung der Regenerosivitätskarte zur Folge, um eine

Unterschätzung der sich aus dem R-Faktor ergebenden Bodenabträge zu vermeiden. Die Autoren empfahlen daher die Verwendung eines projizierten R-Faktors des Zentraljahres 2025 mit einer Erhöhung um 27 %. Die angepasste Karte ist im Onlinetool "ABAG interaktiv" für Planungszwecke integriert (BRANDHUBER et al., 2018).

Der Vorteil der Regenerositätskarte liegt in der hohen räumlichen Differenzierung sowie in der Erfassung der Heterogenität von extremen Niederschlagsereignissen. Das Verfahren zur Erstellung einer Karte aus gemessenen Radardaten ist jedoch vergleichsweise aufwendig, da die Messmethode nur indirekt ist. Die Radarmessung wird von einer Reihe von Faktoren beeinflusst, wie z. B. Abschattung oder die Erfassung unerwünschter Objekte (Clutter). Deshalb sind eine umfangreiche Nachbearbeitung und Anpassung der Daten an meteorologische Stationen erforderlich. Hinzu kommen die Notwendigkeit von Skalierungs- und Berechnungskorrekturen bei der Ermittlung von R-Faktoren aus Radardaten. Erschwerend wirkt ferner, dass Radardaten erst seit Anfang des 21. Jahrhunderts vorliegen, wodurch auswertbare Datenreihen noch kurz und Auswertungen erst seit wenigen Jahren möglich sind. Häufig wird daher noch in vielen Bereichen der Praxis auf die etablierten Methoden der DIN 19708 (2017) zurückgegriffen. Insbesondere die Ländergleichungen werden aufgrund ihrer Einfachheit von Praktikern bevorzugt.

Für beide Verfahren, die Ländergleichungen und die radargestützte Regenerositätskarte, ist festzustellen, dass diese auf dem Messzeitraum ihrer Erstellung beruhen und nur begrenzt darüber hinaus gültig sind. Zudem sind die Ländergleichungen sowohl räumlich (Bundeslandebene) als auch zeitlich (jährliche bzw. halbjährliche Eingangsgrößen) als vergleichsweise grob aufgelöst einzuschätzen. Insbesondere im Hinblick auf eine sich ändernde Niederschlagscharakteristik im Zuge des Klimawandels wäre eine regelmäßige Aktualisierung erforderlich, die jedoch keine aktuellen Klimaprojektionen berücksichtigen kann.

Um die damit verbundenen Unsicherheiten zu reduzieren, wurden in dieser Studie die saisonalen Einflussfaktoren auf den R-Faktor anhand von 10-Minuten-Messreihen untersucht und darauf aufbauend eine auf mittleren Monatsniederschlagssummen (Regressionsgleichung 1) basierende regionale Regressionsgleichung entwickelt. Damit soll eine verbesserte Methodik für regionale Anwendungen geschaffen werden. Die berechneten R-Faktoren wurden am Beispiel des Landkreises Mansfeld-Südharz mit den Ergebnissen der länderspezifischen Gleichung für Sachsen-Anhalt verglichen. Weiterhin wurde die Änderung zukünftiger R-Faktoren anhand eines Klimamodellensembles untersucht und geprüft, ob die zugehörigen Änderungen der R-Faktoren mithilfe von Regressionsgleichung 1 berechnet

werden können. Darauf aufbauend wurde ein zweites Regressionsmodell (Regressionsgleichung 2) erstellt, das auf Grundlage von relativen Niederschlagsänderungen die relative Änderung des R-Faktors berechnet. Dadurch bietet sich die Möglichkeit, auf Grundlage von bereits bestehenden R-Faktoren, wie z. B. aus der Regressionsgleichung 1 oder aus hochaufgelösten Regenerosivitätskarten, die Änderung des lokalen R-Faktors durch den projizierten Klimawandel abzuschätzen.

Ziel dieser Studie war die Validierung neuer Regressionsmodelle zur robusten Abschätzung von R-Faktoren, die einfach in der Anwendung sind, sodass sie auch im kommunalen und landwirtschaftlichen Bereich eingesetzt werden können. Dabei sollen folgende Forschungsfragen beantwortet werden:

- i) Kann die auf mittleren monatlichen Niederschlagssummen basierende Regressionsgleichung 1, angepasst auf den Landkreis Mansfeld-Südharz, die gegenwärtigen R-Faktoren im Vergleich zur Ländergleichung nach DIN präziser wiedergeben?
- ii) Ermöglicht die Regressionsgleichung 1 auch, den zukünftigen R-Faktor zuverlässig abzuschätzen?
- iii) Kann durch Anwendung der auf relativen Niederschlagsänderungen basierenden Regressionsgleichung 2 die Güte zur Bestimmung der klimawandelbedingten Änderungen des R-Faktors verbessert werden?

4.3. Material und Methoden

4.3.1. Informationen zum Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet dieser Studie war der Landkreis Mansfeld-Südharz im östlichen Harzvorland, im Südwesten des Landes Sachsen-Anhalt (Abb. 15). Die Gesamtfläche von 1.448,8 km² entspricht etwa 7 % der Gesamtfläche von Sachsen-Anhalt. Das Gebiet liegt in der Nähe des Brockens, des höchsten Berges im Mittelgebirge Harz, und weist sehr heterogene Höhenverhältnisse zwischen 30 und 600 m ü. NHN auf (im Mittel 240 m ü. NHN). Trotz einer geringen mittleren Neigung von 5,4° treten vor allem an den Hängen der Flusstäler der Wipper, Eine, Helme und Böse Sieben sowie deren Nebenflüssen und an den Grenzen von geologischen Plateaus starke Hangneigungen von 30°, selten bis zu 65° auf.

Weiterhin ist das Untersuchungsgebiet von tonig-schluffigen Böden geprägt, welche zu den fruchtbarsten, aber auch erosionsanfälligsten Böden gehören. Die Hauptlandnutzungsformen sind mit 50 % der Gesamtfläche der landwirtschaftlichen Nutzung und zu 25 % der forstwirtschaftlichen Nutzung zuzuordnen.

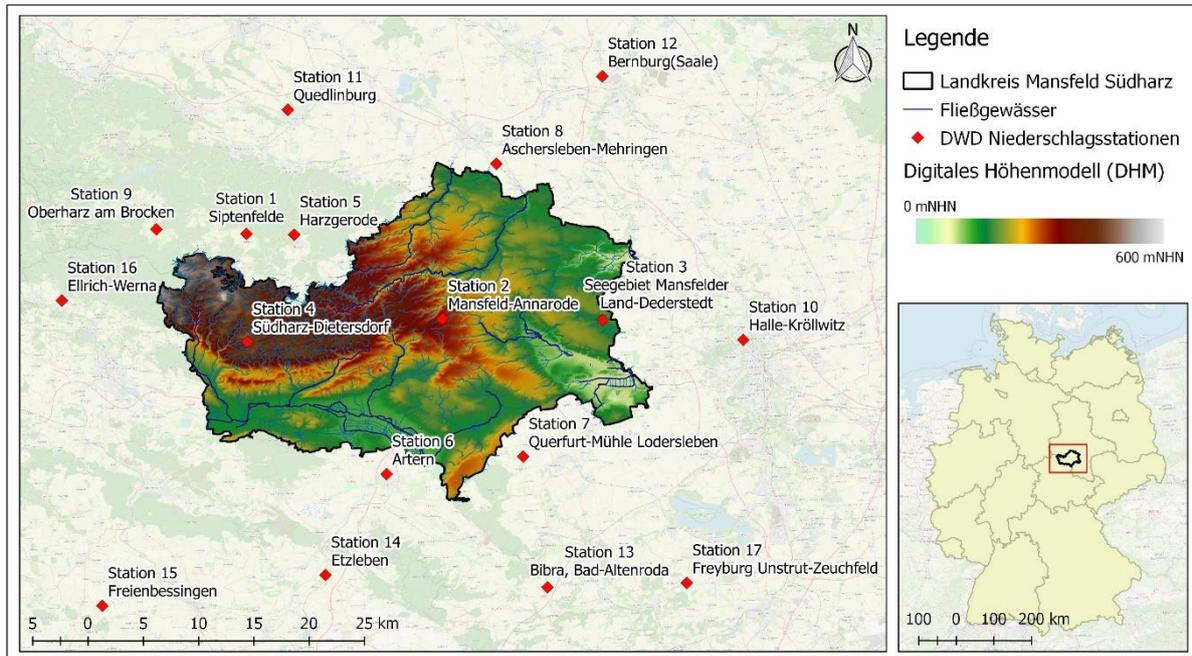


Abbildung 15: Untersuchungsgebiet Landkreis Mansfeld-Südharz mit Höhenmodell und 17 repräsentativen DWD-Niederschlagsstationen

Aufgrund der Lage im Regenschatten des Harzes liegt der langjährig mittlere Jahresniederschlag mit etwa 605 mm unter dem deutschen Durchschnitt von 792 mm (Referenzzeitraum 1991 bis 2020) (MÜHR, 2021).

4.3.2. Stationsniederschlagsdaten und projizierte Niederschlagsdaten der Klimamodelle

Grundlage der Untersuchungen zum R-Faktor waren 17 Niederschlagsstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in direkter Nähe des Landkreises Mansfeld-Südharz (Abb. 15 & Tab. 15) sowie 3 weiter entfernte Stationen, die für eine Validierungsvariante hinzugezogen wurden (Tab. 19) (DWD, o. J.). Die Niederschlagsdaten lagen in einer Auflösung von 10-Minuten vor und wurden für einen Zeitraum von min. 10 und max. 27 Jahren untersucht (insg. 266 gemessenen Stationsjahre, entspricht der Gesamtsumme der untersuchten Jahre aller 17 Stationen) (Tab. 15).

Die in dieser Studie verwendeten Klimamodelldaten basieren auf einem täglichen Klimaensemble aus Globalen Klimamodellen (GCM) und Regionalen Klimamodellen (RCM) aus der EURO-CORDEX-Datenbank und wurden vom Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) zur Verfügung gestellt (JACOB et al., 2014). Um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Hochwasserabflüsse in Niedersachsen und im Harz zu untersuchen, wurden die Modelldaten im Projekt KliBiW bias-adjustiert und auf ein Gitter von 10×10 km interpoliert (HÖLSCHER et al., 2017). Die in dieser Studie verwendeten dynamischen global-regionalen Modellketten basieren auf dem sogenannten Weiter-wie-

bisher-Szenario (RCP8.5, d. h. repräsentativer Konzentrationspfad mit einem Strahlungsantriebswert von $8,5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ im Jahr 2100, verglichen mit dem Jahr 1850), entsprechend des 5. IPCC-Sachstandsberichts (Tab. 16) (IPCC, 2014).

Tabelle 15: Übersicht der 17 Niederschlagsstationen repräsentativ für den Landkreis Mansfeld-Südharz (mit P_{Jahr} - Jahresniederschlag)

Nr.	Name der Station	Aufgabe im Regressionsmodell	Höhe	Zeitreihe	P_{Jahr}	R-Faktor
			müNN	von-bis	mm	$N\cdot h^{-1}\cdot a^{-1}$
Station 1	Siptenfelde - Messfeld	Erstellung Regressionsmodell/ Kalibrierung	395,0	1997-2018	657	73,9
Station 2	Mansfeld-Annarode		321,0	2007-2018	624	88,3
Station 3	Seegebiet Mansfelder Land-Dederstedt		154,0	2007-2018	543	93,3
Station 4	Südharz-Dietersdorf		440,0	2007-2018	709	85,5
Station 5	Harzgerode		404,0	1992-2018	588	57,0
Station 6	Artern		164,0	1992-2018	505	76,3
Station 7	Querfurt-Mühle Lodersleben		204,0	2007-2018	524	64,6
Station 8	Aschersleben-Mehringen		107,0	2007-2018	538	73,2
Station 9	Oberharz am Brocken		495,0	2005-13; 2018	757	81,5
Station 10	Halle-Kröllwitz	Validierung des Regressionsmodells	93,0	1992-2014	535	80,0
Station 11	Quedlinburg		142,0	2007-2018	515	79,6
Station 12	Bernburg/Saale (Nord)		84,0	2004-2018	520	69,6
Station 13	Bibra, Bad-Altenroda		265,0	2007-2018	565	88,7
Station 14	Etzleben		137,0	2003-2018	479	52,2
Station 15	Freienbessingen		296,0	2007-2018	563	69,3
Station 16	Ellrich-Werna		240,0	2003-2018	731	68,8
Station 17	Freyburg/Unstrut-Zeuchfeld		140,0	2005-2018	512	69,2

Es konnte nicht auf hochaufgelöste Niederschlagsdaten eines Klimaensembles zurückgegriffen werden, da diese i. d. R. nur in einer täglichen, seltener in einer stündlichen Auflösung vorliegen. Um den Berechnungsaufwand möglichst gering zu halten und die Praxistauglichkeit der Regressionsmodelle zu gewährleisten, wurde auf die Anwendung komplexer Downscaling-Verfahren verzichtet. Zur Bestimmung der Regenerosivität wurden die monatlichen Niederschlagssummen der Klimamodellprojektionen ausgewertet und die Änderungssignale zum Zeitraum der Nahen Zukunft (2021 bis 2050) bzw. Fernen Zukunft (2071 bis 2100) ausgehend von der Vergangenheit (1981 bis 2010) berechnet. Zur Erzeugung von hochaufgelösten Niederschlagsreihen der Zukunft wurden die mittleren Änderungssignale der Nahen und Fernen Zukunft mit den vorhandenen 10-Minuten-Niederschlagswerten der Stationen 1 bis 9 multipliziert. Auf diese Weise erfolgte keine Änderung der zeitlichen Struktur der

Niederschlagsreihen, jedoch wurden Häufigkeit und Intensität erosiver Ereignisse entsprechend den Änderungssignalen variiert.

Tabelle 16: Übersicht über die verwendeten global-regionalen Klimamodellketten (RCP8.5)

Globales Klimamodell (GCM)	Regionales Klimamodell (RCM)	Name	Datenlänge
CNRM-CM5	CCLM-4-8-17	CNRM_CCLM	1970-2100
CNRM-CM5	RCA4	CNRM_RCA4	1970-2100
EC-EARTH	CCLM-4-8-17	ECE_CCLM	1970-2100
EC-EARTH	HIRHAM5	ECE_HIRHAM	1951-2100
EC-EARTH	RACMO22E	ECE_RACMO	1951-2100
EC-EARTH	RCA4	ECE_RCA4	1970-2100
HadGEM2-ES	RACMO22E	HadGEM2_RACMO22E	1970-2099
HadGEM2-ES	RCA4	HadGEM2_RCA4	1970-2099
IPSL-CM5A-MR	RCA4	IPSL_RCA4	1970-2100
IPSL-CM5A-MR	CCLM-4-8-17	IPSL_CCLM	1971-2100
MPI-ESM-LR	CCLM-4-8-17	MPI_CCLM	1951-2100
MPI-ESM-LR	RCA4	MPI_RCA4	1970-2100
MPI-ESM-LR	REMO (1) ^{a)}	MPI_REMO1	1951-2100
MPI-ESM-LR	REMO (2) ^{a)}	MPI_REMO2	1951-2100

a) Verschiedene REMO Läufe

4.3.3. R-Faktor nach DIN 19708:2017-08

Zur Bestimmung des R-Faktors wird in der DIN 19708 (2017) die Berechnungsvorschrift nach SCHWERTMANN, VOGL & KAINZ (1990) (im Folgenden mit "Normvorschrift" bezeichnet) genannt. Zusätzlich wird auf die behelfsweise Verwendung von bundeslandspezifischen Regressionsgleichungen (im Folgenden "Ländergleichung") zur Abschätzung von R-Faktoren mit mittleren (Halb-) Jahresniederschlagssummen nach SAUERBORN (1994) verwiesen. In der Methode nach Normvorschrift werden zunächst die erosionswirksamen Niederschläge jedes Niederschlagsereignisses bestimmt und deren Energiedichte berechnet. Aus dem Produkt der Energiedichte und der auf eine Stunde bezogenen maximalen 30-Minuten-Intensität ergibt sich der R-Faktor eines Einzelereignisses (RE). Um die Jahreserosivität (R-Faktor eines Jahres) zu bestimmen, werden alle RE innerhalb eines Jahres aufsummiert. Da die Jahreserosivität von Jahr zu Jahr stark variieren kann, wird ein Mittel über mindestens 10 aktuelle Jahre empfohlen, woraus sich der langjährige mittlere R-Faktor ergibt. Details zum Berechnungsverfahren können der DIN 19708 (2017) entnommen werden. Der nach Normvorschrift bestimmte R-Faktor diene aufgrund seiner Genauigkeit für die in dieser Untersuchung aufgestellten Regressionsmodelle als Zielgröße bzw. Regressand.

Da die Methode nach Normvorschrift vergleichsweise zeit- und datenaufwändig ist, werden in der DIN zusätzlich die Ländergleichungen zur Ableitung des R-Faktors angegeben. Diese beschreiben einfache lineare Regressionsgleichungen zwischen dem R-Faktor und dem Jahres- bzw. Sommerhalbjahresniederschlag. Im weiteren Verlauf wurde nur die Sommerhalbjahresgleichung für das Land Sachsen-Anhalt (im Folgenden ST-Gleichung genannt) betrachtet, da diese nach DIN einen höheren Korrelationskoeffizienten (r) aufweist und damit statistisch robuster ist:

$$R = 0,28 \cdot NSo - 30,89 \quad r = 0,91$$

mit NSo mittlerer Niederschlag im Sommerhalbjahr (1. Mai bis 31. Oktober), in mm.

4.3.4. Aufgestellte Regressionsmodelle

Um die Vorteile einer regionalen, landkreisbezogenen Anpassung im Vergleich zur großräumigeren, länderspezifischen Gleichung zu prüfen, wurde eine auf den Landkreis Mansfeld-Südharz optimierte Sommerhalbjahres-Regressionsgleichung erstellt (nachfolgend als MS-Gleichung bezeichnet). Die bestmögliche regionalspezifische Modellschätzung der R-Faktoren, basierend auf den mittleren Sommerniederschlagssummen der 146 Stationsjahre der Stationen 1 bis 9 (Tab. 15), ergibt sich wie folgt:

$$R = 0,249 \cdot NSo - 11,87 \quad r = 0,688$$

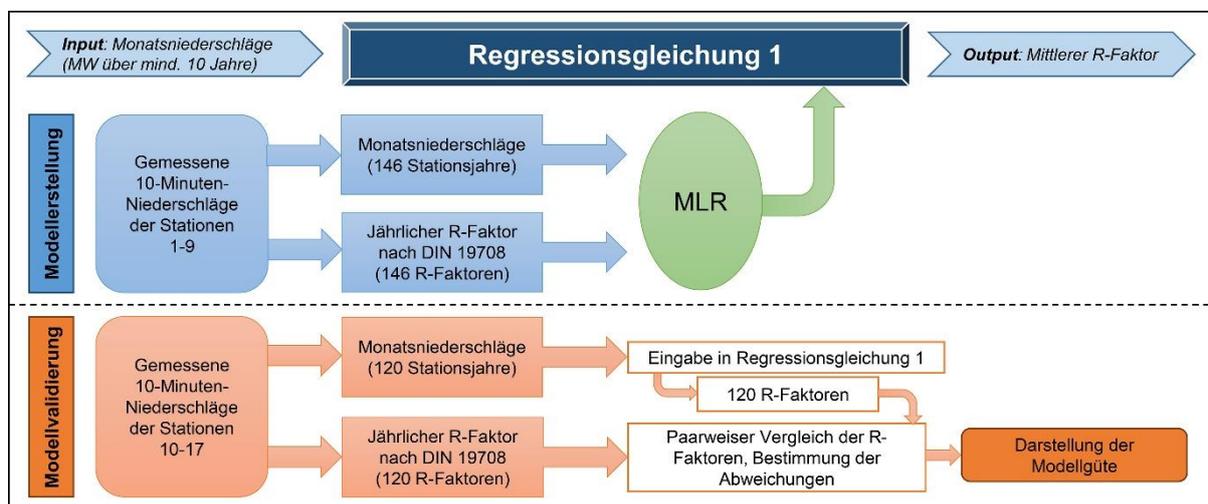


Abbildung 16: Schema der Modellerstellung und -validierung der Regressionsgleichung 1

Die Regressionsgleichung 1 (RG1) wurde unter Nutzung mehrerer monatlicher Niederschlagssummen der Stationen 1 bis 9 und dem nach Normvorschrift berechneten R-Faktor entsprechend dem Schema in Abbildung 16 aufgestellt. Da die Summen mehrerer Monate als Regressoren in das Modell eingingen, wurde eine multiple lineare Regression (MLR) durchgeführt. Im Prozess der Regressionsmodellerstellung erfolgte die Prüfung verschiedener

Varianten, wobei u. a. die Eignung verschiedener Monate als Regressoren überprüft wurde. Im Ergebnis wurden die Monate Mai bis September als signifikant festgestellt. Der Mittelwert der übrigen Monatssummen (Januar bis April und Oktober bis Dezember) wurde als separater Regressor verwendet. Die hieraus ermittelte RG1 ergab sich zu:

$$R = 0,19 \cdot N_{Mai} + 0,41 \cdot N_{Jun} + 0,26 \cdot N_{Jul} + 0,38 \cdot N_{Aug} + 0,21 \cdot N_{Sep} + 0,01 \cdot N_{Rest} - 8,56$$

mit

- $N_{Mai...Sep}$ mittlere monatliche Niederschlagssumme für die Monate Mai bis September, in mm;
- N_{Rest} Mittelwert der monatlichen Niederschlagssummen für die Monate Januar bis April und Oktober bis Dezember, in mm.

RG1 wurde entsprechend Abbildung 16 mithilfe der Niederschlagsdaten der Stationen 10 bis 17 validiert (split sampling). Als Maß für die Verfahrensgüte wurden die mittleren prozentualen Abweichungen, der Korrelationskoeffizient und die Wurzel der mittleren Fehlerquadratsummen (RMSE) berechnet.

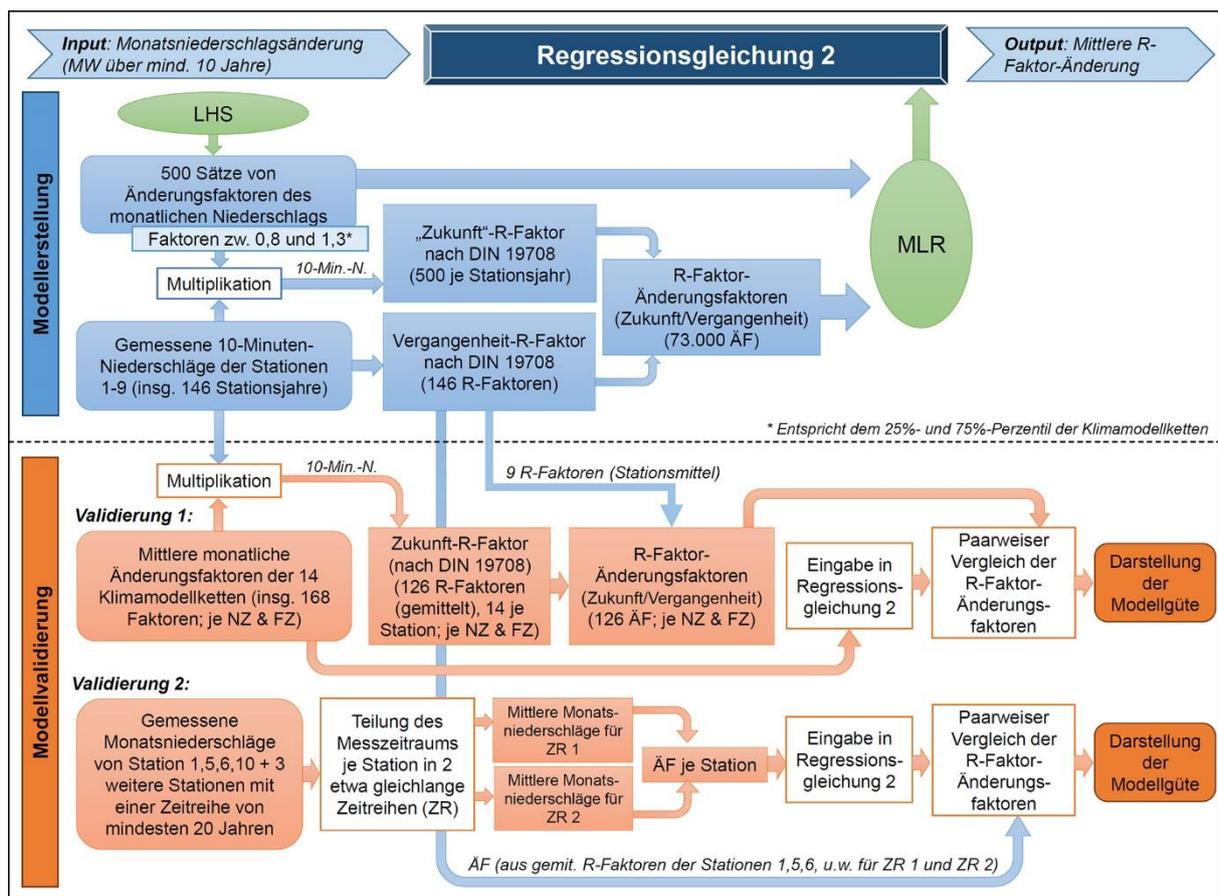


Abbildung 17: Schema der Modellerstellung und -validierung der Regressionsgleichung 2 (Abkürzungen in der Grafik: LHS - Latin Hypercube Sampling; MLR – Multiple Lineare Regression; N. – Niederschlag; ÄF – Änderungsfaktoren; NZ – Nahe Zukunft; FZ – Ferne Zukunft; ZR – Zeitreihe)

Das Schema zur Erstellung und Validierung der Regressionsgleichung 2 (RG2) ist in Abbildung 17 dargestellt. Ähnlich wie in RG1 wurde auch hier eine MLR durchgeführt, jedoch wurden die Änderungsfaktoren des R-Faktors aus den Änderungsfaktoren des monatlichen Niederschlags geschätzt. Der Bereich der untersuchten Niederschlagsänderungen sollte für eine robuste Modellerstellung möglichst großräumig (d. h. viele verschiedene Kombinationen der monatlichen Änderungsfaktoren) analysiert werden, während jedoch der Rechenaufwand durch eine begrenzte Anzahl an berechneten Kombinationen möglichst gering zu halten war. Daher wurden die zu untersuchenden Sätze an Kombinationen mittels Latin Hypercube Sampling (LHS) erzeugt. Das LHS ist eine statistische Methode zur Erzeugung einer nahezu zufälligen und gleichförmigen Stichprobe von Parameterwerten aus einer mehrdimensionalen Verteilung (MCKAY et al., 1979).

Für die Aufstellung von RG2 wurden 500 Sätze von Änderungsfaktoren der Monatsniederschläge erzeugt. Nebenbetrachtungen zeigten, dass eine größere Anzahl an Sätzen keine signifikante Verbesserung des Regressionsmodells zur Folge hatte. Die Änderungsfaktoren wurden zwischen 0,8 und 1,3 variiert, welches den 25%- und 75%-Perzentilen der Klimamodellketten entsprach. Die so entstandenen Sätze von Änderungsfaktoren wurden monatsweise mit den gemessenen 10-Minuten-Niederschlagsdaten der Stationen 1 bis 9 multipliziert und synthetische "zukünftige" Niederschlagsreihen erzeugt.

Aus diesen wurden nach genannter Normvorschrift "zukünftige" R-Faktoren für alle Stationsjahre bestimmt. RG2 wurde mit den Änderungsfaktoren der Monatsniederschläge und den Änderungsfaktoren der R-Faktoren bestimmt und ergab sich zu:

$$\begin{aligned} \ddot{A}F(R) = & 1 + 0,474 \cdot (\ddot{A}F(N_{Mai}) - 1) + 0,437 \cdot (\ddot{A}F(N_{Jun}) - 1) + 0,616 \cdot (\ddot{A}F(N_{Jul}) - 1) + \\ & 0,436 \cdot (\ddot{A}F(N_{Aug}) - 1) + 0,351 \cdot (\ddot{A}F(N_{Sep}) - 1) + 0,598 \cdot (\ddot{A}F(N_{Rest}) - 1) \end{aligned}$$

mit

$\ddot{A}F(R)$ *Änderungsfaktor des R-Faktors ($R_{Zukunft} = R_{Vergangenheit} \cdot \ddot{A}F(R)$)*

$\ddot{A}F(N_{Mai...Sep})$ *Änderungsfaktor der mittleren monatlichen Niederschlagssumme für die Monate Mai bis September, in mm;*

$\ddot{A}F(N_{Rest})$ *Rest-Änderungsfaktor der mittleren monatlichen Niederschlagssumme für die Monate Januar bis April und Oktober bis Dezember, in mm.*

Die Modellvalidierung wurde mit zwei verschiedenen Methoden durchgeführt. In der ersten Validierungsmethode wurden auf Grundlage der durch die Änderungssignale der 14 Klimamodellketten modifizierten Messreihen, Zukunft-R-Faktoren nach Normvorschrift berechnet und stationsweise gemittelt. Der daraus ermittelte Änderungsfaktor des R-Faktors

wurde für alle Klimamodellketten, jeweils für die Nahe und Ferne Zukunft, mit der Schätzung der RG2 verglichen und die Modellgüte bestimmt.

Für die zweite Validierungsvariante wurden Stationen untersucht, die eine durchgehende Zeitreihe von mindestens 20 Jahren aufwiesen. Hierfür wurden die innerhalb des Untersuchungsgebiets liegenden Stationen 1, 5 und 6 verwendet. Zwar waren die Stationen bereits zur Aufstellung von RG2 verwendet worden, jedoch mit abweichenden Änderungsfaktoren. Weiterhin wurden die Station 10 sowie die weiter entfernt liegenden Stationen Leipzig/Halle, Magdeburg und Leinefelde mit einbezogen, die die Gültigkeit von RG2 auch außerhalb des Untersuchungsgebiets nachweisen sollten. Die Zeitreihen dieser Stationen wurden jeweils in zwei etwa gleich große Zeiträume unterteilt und zwischen ihnen der Änderungsfaktor der mittleren Monatssummen bestimmt. Diese Änderungsfaktoren wurden in die RG2 eingesetzt und die sich ergebenden R-Faktor-Änderungen mit den nach Normvorschrift berechneten R-Faktor-Änderungen verglichen. Gegenüber der Validierungsmethode 1 wurde auf diese Weise auch die Anwendbarkeit der Gleichung unter Zugrundelegung variierender zeitlicher Strukturen, d. h. variierende Verhältnisse aus Niederschlagshäufigkeiten und -intensitäten, überprüft.

4.4. Ergebnisse

4.4.1. Niederschlagsmenge, -intensität und Erosivität der Niederschlagsmessreihen

Der mittlere R-Faktor der für den Landkreis Mansfeld-Südharz repräsentativen Niederschlagsstationen 1 bis 9 (Tab.14) beträgt $77,1 \text{ N}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ (N – Newton). Im Stationsmittel traten im Untersuchungszeitraum pro Jahr zwischen 5 und 38 (Mittelwert 18) erosive Niederschlagsereignisse mit einer maximalen 30-Minuten-Intensität von bis zu $106 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ und einer Dauer der Ereignisse von bis zu 200 Minuten auf. Der R-Faktor variiert je nach Station von minimal $57,0 \text{ N}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ bis maximal $93,3 \text{ N}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$. Wie in Abbildung 18 zu erkennen ist, schwanken die Mediane der monatlichen Niederschlagssummen innerhalb eines Jahres je nach Station von minimal 25 bis 40 mm in den Monaten Februar bis April und von maximal 60 bis 75 mm in den Monaten Mai und Juli (Abb. 18). Die maximale Intensität, die für alle 10-Min-Niederschlagsereignisse innerhalb eines Monats bestimmt wurde, zeigt eine innerjährliche Verteilung mit höheren Werten in den Sommermonaten Mai bis September. Für Juli beträgt der Median der maximalen Intensität $35 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$. Im Gegensatz dazu lag diese im Februar bei ca. $5 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$. Eine ähnliche Verteilung zeigt auch der monatliche RE. Die höchsten RE treten von Mai bis September auf, wobei der Monat Juli sowohl den höchsten Median ($12 \text{ N}\cdot\text{h}^{-1}$) als auch das höchste Maximum ($52 \text{ N}\cdot\text{h}^{-1}$) aufweist. Von Oktober bis April liegen die monatlichen

Mediane der RE zwischen 1 und 3 $N \cdot h^{-1}$. Bezogen auf den R-Faktor tragen die Monate Mai bis September zu ca. 80 % zum jährlichen R-Faktor bei.

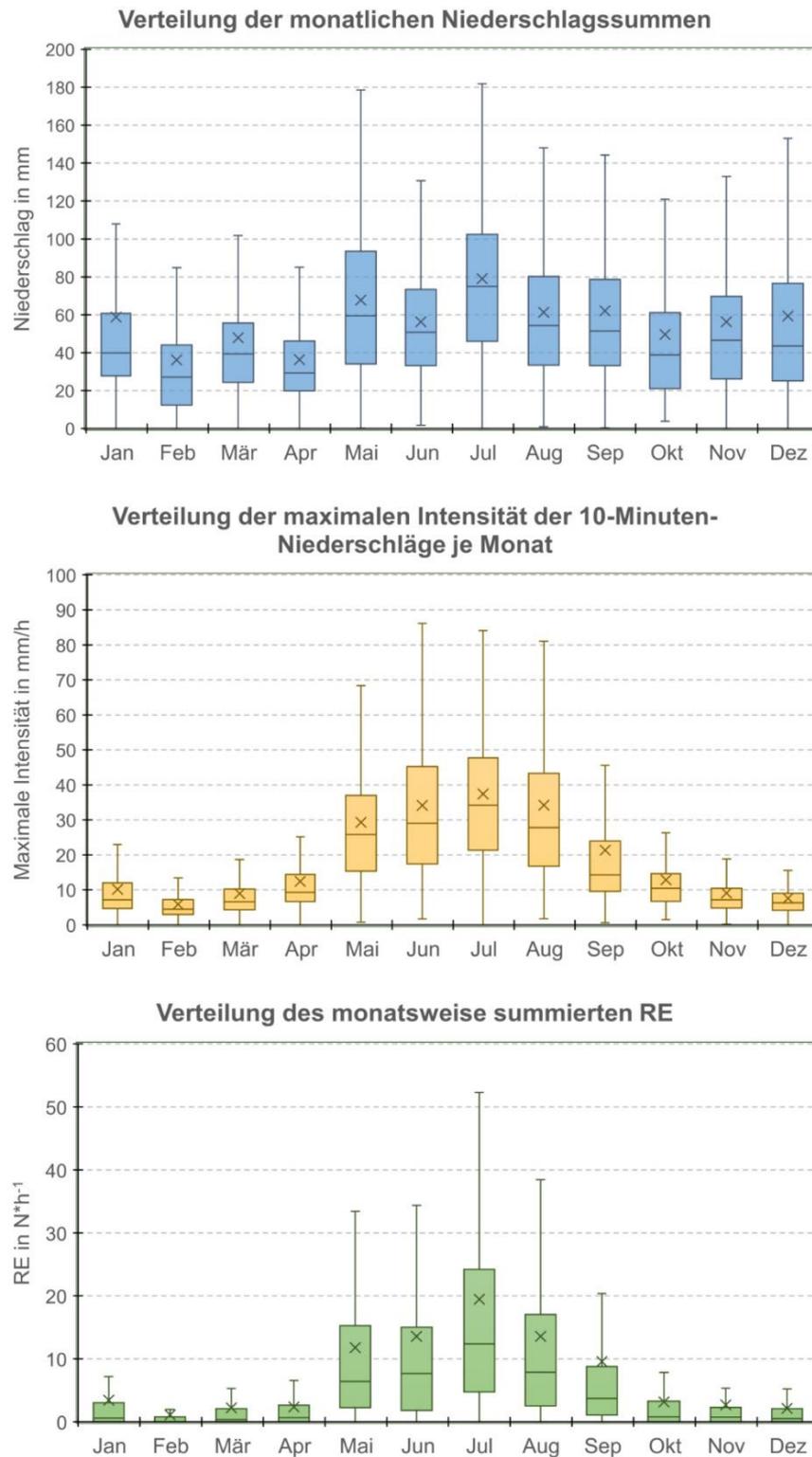


Abbildung 18: Verteilung der für den R-Faktor relevanten klimatischen Parameter im LK Mansfeld-Südharz, Stationen 1 bis 17 (ohne Darstellung der Ausreißer); Oben: monatliche Niederschlagssummen, Mitte: maximale Intensität der 10-Minuten-Niederschläge je Monat, Unten: monatsweise summierter RE (R-Faktor der Einzelereignisse)

4.4.2. Gütevergleich der ST- und MS-Gleichung mit Regressionsgleichung 1

Die farblichen Markierungen in Tabelle 17 zeigen gehäuft negative und stark streuende Abweichungen von -28 % bis +11 % (im Mittel -11 %) zwischen den R-Faktoren der ST-Gleichung und den nach Normvorschrift berechneten R-Faktoren. Der Korrelationskoeffizient der ST-Formel von 0,64 zeigt einen mäßig robusten Zusammenhang von Sommerhalbjahresniederschlag und R-Faktor. Die R-Faktoren der MS-Gleichung streuen mit -19 % bis +26 % geringfügig mehr, während die mittlere Abweichung bei 0 bis 1 % liegt.

Tabelle 17: Sommerhalbjahresniederschlagssumme (P_{So}) und mittlere prozentuale Anteile der P_{So} an der Jahresniederschlagssumme P_{Jahr} der Stationen 1 bis 17 sowie nach Normvorschrift DIN 19708 (2017) berechnete R-Faktoren im Vergleich zu den R-Faktoren nach der Länderregressionsgleichung für Sachsen-Anhalt (ST-Gleichung), der Gleichung für Mansfeld-Südharz (MS-Gleichung) und der RG1 sowie die prozentualen Abweichungen (Proz. Abw.) zum nach DIN berechneten R-Faktor. Negative Abweichungen über 10% sind blau markiert, über 25% dunkelblau, positive Abweichungen über 10% sind orange, über 25% mit dunkelorange markiert. Unten: Güteparameter der RG1 für die Modellerstellung und Validierung.

Stationen	P_{So} mm	P_{So} / P_{Jahr} -	R-Faktor (DIN) $N \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$	ST- Gleichung $N \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$	Proz. Abw. -	MS- Gleichung $N \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$	Proz. Abw. -	RG1 $N \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$	Proz. Abw. -
Station 1	356	54%	73,9	68,8	-7%	76,8	4%	73,7	0%
Station 2	374	60%	88,3	73,9	-16%	81,3	-8%	83,5	-5%
Station 3	351	65%	93,3	67,4	-28%	75,5	-19%	79,3	-15%
Station 4	398	56%	85,5	80,5	-6%	87,2	2%	84,8	-1%
Station 5	336	57%	57,0	63,3	11%	71,9	26%	70,9	24%
Station 6	313	62%	76,3	56,7	-26%	66,0	-13%	68,2	-11%
Station 7	330	63%	64,6	61,5	-5%	70,3	9%	72,7	12%
Station 8	346	64%	73,2	66,1	-10%	74,3	2%	75,2	3%
Station 9	375	50%	81,5	74,2	-9%	81,6	0%	77,6	-5%
Station 10	341	64%	80,0	64,6	-19%	73,0	-9%	76,8	-4%
Station 11	342	66%	79,6	64,9	-19%	73,3	-8%	77,0	-3%
Station 12	333	64%	69,6	62,3	-11%	71,0	2%	74,1	6%
Station 13	353	62%	88,7	68,0	-23%	76,0	-14%	77,8	-12%
Station 14	290	61%	52,2	50,4	-4%	60,4	16%	63,6	22%
Station 15	342	61%	69,3	65,0	-6%	73,4	6%	74,1	7%
Station 16	368	50%	68,8	72,2	5%	79,8	16%	76,7	11%
Station 17	320	63%	69,2	58,7	-15%	67,8	-2%	71,8	4%
MW (1-9)	353	58%	77,1	68,0	-11%	76,1	0%	76,2	0%
MW (10-17)	336	61%	72,2	63,2	-11%	71,8	1%	74,0	4%
Korrelationskoeffizient (1-17)				0,64		0,64		0,80	
RMSE (1-17)				12,24		8,37		7,43	
Güteparameter der Modellerstellung (auf Basis von Stationsjahren):				Multipler Korrelationskoeffizient				0,72	
				Adjustiertes Bestimmtheitsmaß				0,50	
Güteparameter der Modellvalidierung (auf Basis von Stationsjahren):				Gesamt Korrelationskoeffizient				0,69	
				Gesamt Bestimmtheitsmaß				0,48	

Der Korrelationskoeffizient von 0,64 weist ebenfalls auf einen mäßig robusten Zusammenhang bei kleinerem RMSE hin. Tendenziell führt die MS-Gleichung verglichen mit der Normvorschrift bei unterdurchschnittlichen Jahresniederschlagssummen (< 605 mm) (Tab. 15) zu einer Unterschätzung des R-Faktors und bei überdurchschnittlichen Jahresniederschlagssummen (> 605 mm) zu einer Überschätzung des R-Faktors.

Im unteren Bereich der Tabelle 17 werden die Güteparameter der Modellerstellung und -validierung zusammengefasst. Die RG1 wurde auf Basis von insgesamt 266 Stationsjahren erstellt, um gegenüber den nur in geringerer Zahl vorhandenen Stationsmitteln ihre Robustheit zu erhöhen. Der multiple Korrelationskoeffizient zeigt mit 0,72 eine mittlere bis hohe Modellgüte in der Modellerstellung bei einem moderaten adjustierten Bestimmtheitsmaß von 0,5. Der Gesamt-Korrelationskoeffizient und das Gesamt-Bestimmtheitsmaß beziehen sich auf den gemeinsamen Erstellungs- und Validierungszeitraum und liegen geringfügig unter den Werten im Erstellungszeitraum. In der Anwendung liegen die Abweichungen der stationsweise gemittelten R-Faktoren der RG1 zu den nach Normvorschrift berechneten R-Faktoren zwischen -15 % und 24 %, im Mittel bei 0 % (Modellerstellungsstation 1 bis 9) und 4 % (Validierungsstation 10 bis 17). Im Vergleich zur ST- und MS-Gleichung sind mit der RG1 insgesamt bessere Übereinstimmungen zu erzielen, welches an den geringeren Streuungen und dem vergleichsweise hohen Korrelationskoeffizienten von 0,8 deutlich wird.

4.4.3. Projizierte R-Faktoren der Nahen und Fernen Zukunft

Die R-Faktoren der NZ liegen je nach Station in einem Bereich zwischen 51 und $135 \text{ N}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ und in der FZ zwischen 54 und $155 \text{ N}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ (Abb. 19). Im Mittel über die Stationen 1 bis 9 ergibt sich ein R-Faktor von $90 \text{ N}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ für die NZ und von $95 \text{ N}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ für die FZ. Im Vergleich dazu liegt an den meisten Stationen der gegenwärtige R-Faktor (Abb. 19 – schwarze Linie) unterhalb des 25%-Quantils der Klimamodelle, im Mittel der Stationen bei $77 \text{ N}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$. Die mittlere Änderung von der Gegenwart zur NZ beträgt durchschnittlich 17 % und zur FZ 22 %. Das Klimamodell mit der höchsten Änderung (IPSL_WRF331F) projiziert eine Abweichung in die NZ von durchschnittlich 41 % und in die FZ von 67 %.

Nur eine Klimamodellkette projiziert mit -11 % eine Abnahme des R-Faktors in der nahen Zukunft (MPI_RCA4). Eine Verringerung des R-Faktors in der FZ ist bei den Modellketten MPI_CCLM und MPI_RCA4 (im Mittel -6 % bzw. -10 %) festzustellen.

Im Vergleich dazu wird eine Erhöhung der Jahresniederschlagssumme bzw. der Sommerhalbjahresniederschlagssumme (gemittelt über die Stationen 1 bis 9 und alle Klimamodelle) von der Gegenwart zur NZ von im Mittel 7 % (Jahr) bzw. 5 % (Sommer) (Maximum 14 % bzw.

14 %) und von der Gegenwart zur FZ von 13 % bzw. 5 % (Maximum 24 % bzw. 23 %) projiziert (nicht dargestellt).

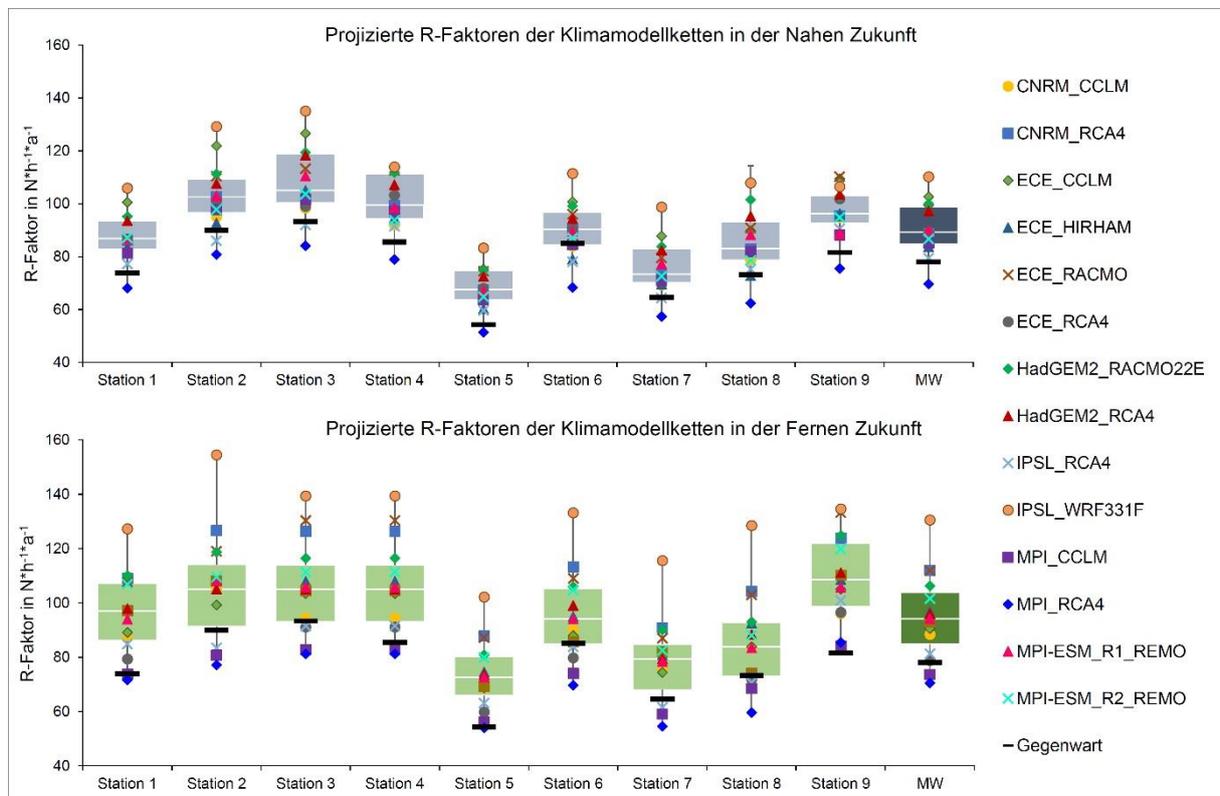


Abbildung 19: Boxplot der nach Normvorschrift berechneten R-Faktoren der Stationen 1 bis 9 und Stationsmittel für die 14 untersuchten Klimamodelle und die Gegenwart. Oben: Nahe Zukunft (2021–2050). Unten: Ferne Zukunft (2071–2100).

4.4.4. Gütevergleich der Ergebnisse der MS-Gleichung und RG1 mit Regressionsgleichung 2

In Tabelle 18 (Validierung 1) kann sowohl für die R-Faktoren der MS-Gleichung als auch der RG1 an fast allen Stationen eine negative Abweichung, d. h. Unterschätzung des nach Normvorschrift berechneten Zukunft-R-Faktors, festgestellt werden. Die Güteparameter beider Gleichungen liegen trotz der Unterschätzung im mittleren bis hohen Bereich, wobei mit zunehmender Korrelation zur FZ ebenfalls der RMSE ansteigt. Im Gegensatz dazu zeigen die Ergebnisse der RG2 eine sehr hohe Übereinstimmung mit den nach Normvorschrift ermittelten R-Faktoren, sowohl für die NZ als auch FZ. Lediglich Station 6 weist mit > 10 % geringfügig stärkere Abweichungen auf. Die hohe Güte zeigt sich auch in der mittleren prozentualen Abweichung von ca. 1 %. Der Korrelationskoeffizient der RG2 weist mit Werten von 0,96 bzw. 0,95 bei einem RMSE von 4,8 bzw. 7,3 die beste Anpassung an den nach Normvorschrift berechneten R-Faktoren auf.

Tabelle 18: Ergebnisse der Regressionsgleichungen (MS-Gleichung, RG1, RG2) in der Nahen Zukunft (NZ: 2021 bis 2050) und Fernen Zukunft (FZ: 2071 bis 2100) als Mittelwert über alle Klimamodelle im Vergleich zu dem nach Normvorschrift berechneten R-Faktor (DIN) aus projizierten Niederschlagsdaten. Oben: Mittelwert der Stationen 1-9 (farbliche Markierung siehe Tab. 17), unten: Mittelwert der Stationen; Güteparameter (MW = Mittelwert, KK = Korrelationskoeffizient)

Station	Zeitraum	P_{Jahr}	R-Faktor (DIN)	MS-Gl.	Proz Abw.	RG1	Proz Abw.	RG2	Proz Abw.
		mm	$N \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$	$N \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$	-	$N \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$	-	$N \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$	-
Station 1	Nahe Zukunft	705	87,7	81,6	-6%	77,8	-11%	86,7	-1%
	Ferne Zukunft	752	95,5	82,7	-12%	76,6	-19%	91,3	-5%
Station 2	Nahe Zukunft	668	102,7	86,3	-15%	88,0	-14%	105,6	3%
	Ferne Zukunft	705	105,2	86,7	-16%	86,6	-16%	111,2	6%
Station 3	Nahe Zukunft	579	107,8	80,2	-25%	83,6	-22%	109,4	2%
	Ferne Zukunft	608	106,2	80,6	-23%	82,5	-22%	115,2	8%
Station 4	Nahe Zukunft	760	100,5	92,5	-7%	89,4	-11%	100,3	0%
	Ferne Zukunft	808	106,2	93,4	-11%	88,0	-16%	105,6	-1%
Station 5	Nahe Zukunft	631	67,6	76,3	14%	74,8	11%	63,6	-6%
	Ferne Zukunft	668	73,5	77,1	7%	73,6	1%	67,0	-9%
Station 6	Nahe Zukunft	540	89,5	70,1	-21%	72,0	-19%	99,8	11%
	Ferne Zukunft	568	95,7	70,7	-25%	71,0	-25%	105,0	10%
Station 7	Nahe Zukunft	560	75,5	74,6	0%	76,7	2%	75,8	1%
	Ferne Zukunft	588	77,8	75,1	-1%	75,5	-1%	79,8	3%
Station 8	Nahe Zukunft	574	84,9	79,0	-6%	79,3	-5%	85,9	2%
	Ferne Zukunft	603	87,1	79,6	-7%	78,2	-9%	90,5	4%
Station 9	Nahe Zukunft	814	97,0	86,7	-10%	81,9	-15%	95,7	-1%
	Ferne Zukunft	873	109,3	87,8	-19%	80,7	-25%	100,7	-8%
Gesamt	NZ (MW)	648	90,3	80,8	-9%	80,4	-9%	91,4	1%
	FZ (MW)	686	95,2	81,5	-12%	79,2	-15%	96,3	1%
	NZ (KK)			0,68		0,82		0,96	
	FZ (KK)			0,82		0,84		0,95	
	NZ (RMSE)			14,9		14,2		4,8	
	FZ (RMSE)			18,8		20,1		7,3	

In Tabelle 19 (Validierung 2) sind für die beiden untersuchten Messzeiträume vergleichsweise hohe Variationen der R-Faktoren von bis zu $16 N \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$ festzustellen. Grundsätzlich nehmen die R-Faktoren nach Normvorschrift an allen Stationen mit Ausnahme von Halle-Kröllwitz von Zeitraum 1 (ZR 1) zu Zeitraum 2 (ZR 2) zu. Eine Zunahme ergibt sich mittels RG2 auch bei 5 der 7 Stationen, wobei die Differenz zu den R-Faktoren nach Normvorschrift bei weniger als $10 N \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$ liegt (Ausnahme bilden die Stationen Halle-Kröllwitz und Leipzig/Halle). Diese 5 Stationen weisen auch eine gute Übereinstimmung der Änderungsfaktoren (ÄF) auf, mit

äußerst geringen Abweichungen an der Station Harzgerode (welche auch für die Kalibrierung der RG2 verwendet wurde) und an der Station Leinefelde. Die nach Normvorschrift berechnete Reduktion des R-Faktors ($\ddot{A}F = 0,89$) an der Station Halle-Kröllwitz kann durch die RG2 nicht wiedergegeben werden. Hier wird mit der RG2 eine Zunahme ($\ddot{A}F = 1,33$) bei einer vergleichsweise hohen Differenz der R-Faktoren von $32 \text{ N}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ ermittelt. An der Station Leipzig/Halle wird für die nach Normvorschrift berechneten R-Faktoren eine leichte Zunahme ermittelt ($\ddot{A}F = 1,08$), während sich aus der RG2 eine Abnahme des R-Faktors ($\ddot{A}F = 0,98$) ergibt. Die Differenz der R-Faktoren ist jedoch mit $7 \text{ N}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ gering.

Tabelle 19: Nach Normvorschrift (DIN) und nach RG2 berechnete R-Faktoren und Änderungsfaktoren des R-Faktors für die Stationen 1, 5, 6, 10 sowie für 3 weiter entfernte Stationen aus gemessenen Daten (ZR = Zeitraum; N. = Niederschlag; $\ddot{A}F$ = Änderungsfaktor).

		Station 1 Siptenfelde <i>Sachsen-Anhalt</i> 22 Jahre	Station 5 Harzgerode <i>Sachsen-Anhalt</i> 27 Jahre	Station 6 Artern <i>Thüringen</i> 24 Jahre	Station 10 Halle-Kröllwitz <i>Sachsen-Anhalt</i> 21 Jahre	zus. Station Leipzig/Halle <i>Sachsen</i> 22 Jahre	zus. Station Magdeburg <i>Sachsen-Anhalt</i> 26 Jahre	zus. Station Leinefelde <i>Thüringen</i> 26 Jahre
Zeitraum 1	ZR1	1997-2007	1992-2004	1995-2006	1994-2003	1998-2008	1994-2006	1994-2006
Zeitraum 2	ZR2	2008-2018	2005-2018	2007-2018	2004-2014	2009-2019	2007-2019	2007-2019
N. (Jahr/So.)	ZR1	638 / 283	587 / 276	500 / 268	499 / 276	539 / 298	495 / 250	716 / 327
N. (Jahr/So.)	ZR2	676 / 352	590 / 307	501 / 292	536 / 307	516 / 294	524 / 284	680 / 335
R-Faktor (DIN)	ZR1	65,9	51,1	68,2	71,7	75,8	53,3	73,4
R-Faktor (DIN)	ZR2	81,9	62,5	69,9	63,9	81,5	66,2	76,8
R-Faktor (RG2)	ZR2	89,2	61,4	78,8	95,7	74,2	70,7	75,7
Diff. R-Faktoren	ZR2	7,3	-1,1	8,9	31,8	-7,3	-4,5	1,1
$\ddot{A}F$ (DIN)		1,24	1,22	1,02	0,89	1,08	1,24	1,05
$\ddot{A}F$ (RG2)		1,35	1,20	1,16	1,33	0,98	1,33	1,03

4.5. Diskussion

Ziel dieser Untersuchung war es, verbesserte und einfach anzuwendende Methoden zur Abschätzung zukünftiger R-Faktoren zu entwickeln und zu validieren. Dazu wurden zunächst die R-Faktoren der Gegenwart analysiert (Tab. 15) sowie die jährliche Verteilung einiger für die Berechnung des R-Faktors relevante klimatische Kennwerte dargestellt (Abb. 18). Die Spanne der R-Faktoren der untersuchten Stationen verdeutlicht, dass erosive Niederschlagsereignisse (und damit auch die R-Faktoren) einer räumlichen und zeitlichen Variabilität unterliegen. Dies gilt auch für benachbarte Stationen, wie z. B. die Stationen 1 (Siptenfelde) und 5 (Harzgerode), die nur ca. 5 km auseinanderliegen, sich im R-Faktor jedoch um $17 \text{ N}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ unterscheiden. Diese große Differenz ist wahrscheinlich auf die unterschiedlichen Zeitreihenlängen zurückzuführen. Jedoch unterscheiden sich die mittleren jährlichen

Niederschlagssummen beider Stationen signifikant voneinander (im Zeitraum 1997 bis 2018: 657 mm in Siptenfelde, 589 mm in Harzgerode), sodass ein abweichendes Niederschlagsregime ebenfalls eine mögliche Ursache darstellen könnte. Auch innerjährlich schwanken die R-Faktoren der Einzelereignisse (RE), wie in Abbildung 18 deutlich wird. Die RE sind in den Monaten Mai bis September am höchsten und tragen somit maßgeblich zur Jahreserosivität bei, welches sich auch mit den Untersuchungen von BALLABIO et al. (2017) und üblichen Regressionsansätzen, die das Sommerhalbjahr als Grundlage verwendeten, deckt. Dies begründet auch die Wahl der Regressoren der Regressionsgleichungen 1 und 2. Die ähnliche innerjährliche Verteilung der maximalen Intensität und RE verdeutlicht den starken Einfluss der Niederschlagsintensität auf den R-Faktor. Daraus leitet sich ab, dass man mit Regressionsgleichungen auf Basis von mittleren Niederschlagssummen den R-Faktor häufig nur mit Unsicherheiten abschätzen kann (LEE & HEO, 2011).

Die Unsicherheit von linearen Regressionsgleichungen mit der mittleren Sommerhalbjahressumme als Regressor wird in Tabelle 17 deutlich. Die R-Faktoren des Landkreises Mansfeld-Südharz werden durch die ST-Gleichung im Vergleich zu den R-Faktoren nach Normvorschrift deutlich unterschätzt. Dies ist auch auf die Verwendung von unterschiedlichen Zeitreihen und Stationen in der Modellerstellung zurückzuführen. Trotz der regionalen Modellanpassung auf Grundlage aktueller Zeitreihen kann für die MS-Gleichung zwar der mittlere Fehler reduziert, jedoch aufgrund der verbliebenen Streuung der R-Faktor-Abweichungen nur geringe Güteverbesserungen erzielt werden. Die beste Übereinstimmung mit den R-Faktoren nach Normvorschrift wird mit der neu entwickelten RG1 festgestellt. Die Nutzung von Regressionsgleichungen auf Grundlage von mittleren monatlichen Niederschlagssummen der Sommermonate Mai bis September führt damit zu einer robusteren Abschätzung der R-Faktoren gegenüber den üblichen Regressionsgleichungen auf Basis der Jahres- bzw. Sommerniederschlagssummen entsprechend der DIN 19708 (2017). Da der R-Faktor vor allem lokal sehr stark variiert, sind für eine robuste Schätzung grundsätzlich regional angepasste Gleichungen empfehlenswert (z. B. auf Landkreisebene). Hierfür eignen sich auch vorhandene räumlich hochaufgelöste Regenerosivitätskarten (AUERSWALD et al., 2019a). Sowohl Regenerosivitätskarten als auch Regressionsgleichungen sind jedoch auf Grund des sich wandelnden Klimas nur für den Zeitraum der Erstellung und in begrenztem Maße darüber hinaus gültig, welches eine regelmäßige Aktualisierung erforderlich macht. Um eine Unterschätzung der R-Faktoren (durch klimawandelbedingte Erhöhungen der Niederschläge) für Planungsfragestellungen zu vermeiden, wurde in der Regenerosivitätskarte nach AUERSWALD et al. (2019b) eine pauschale Erhöhung des projizierten R-Faktors in ganz Deutschland um 27 % (bei Verwendung

des Zentraljahres 2025) vorgenommen. Um den R-Faktor der Gegenwart robust abschätzen zu können, welcher in der RG2 für die Schätzung eines zukünftigen absoluten R-Faktors möglichst genaue R-Faktoren der Gegenwart benötigt, ist eine regelmäßige Anpassung der Regenerosivitätskarte weiterhin notwendig. Das Erstellen und die Bereitstellung einer neuen Regenerosivitätskarte aus Radarniederschlagsdaten ist dabei grundsätzlich aufwendiger als das Aufstellen einer neuen Regressionsgleichung, welches vermutlich größere zeitliche Abstände zwischen den Aktualisierungen der Regenerosivitätskarte zur Folge haben wird. Hier kann die RG1 eine Übergangslösung darstellen, da sie eine einfache Anpassung ermöglicht.

Die Ergebnisse der projizierten R-Faktoren der Nahen und Fernen Zukunft (Abbildung 17) zeigen über die Nahe zur Fernen Zukunft eine fortschreitende Erhöhung der R-Faktoren, wobei diese anteilig stärker zunehmen als der Niederschlag. Eine Unsicherheitsquelle liegt in der zeitlichen Abweichung aus dem Referenzzeitraum zur Validierung bzw. Berechnung zukünftiger R-Faktoren (1992 bzw. 2007 bis 2018) und der Vergangenheit des Klimamodellensembles (1981 bis 2010). Der Referenzzeitraum weist in den Sommermonaten grundsätzlich höhere, in den Wintermonaten grundsätzlich niedrigere Niederschlagssummen auf als der Vergangenheitszeitraum des Klimamodellensembles. Da der Referenzzeitraum bereits weiter in der Zukunft liegt als die Vergangenheit des Ensembles, kann eine Überschätzung der Änderungsfaktoren und folglich der R-Faktoren nicht ausgeschlossen werden. Da keine hochaufgelösten Messreihen für die weiter zurückliegende Vergangenheit zur Verfügung stehen, sollte in zukünftigen Untersuchungen in Betracht gezogen werden, den Vergangenheitszeitraum des Klimamodellensembles entsprechend anzupassen (z. B. auf den neuen Referenzzeitraum der WMO 1991 bis 2020).

Mit der RG2 wurde durch Verwendung von relativen monatlichen Niederschlagsänderungen eine Möglichkeit untersucht, die Unsicherheiten, die sich durch die Verwendung absoluter Niederschlagssummen ergeben, zu reduzieren. Tabelle 18 zeigt, dass die auf Absolutwerten basierenden Regressionsgleichungen (MS-Gleichung & RG1) den nach Normvorschrift berechneten, zukünftigen R-Faktor tendenziell unterschätzen und eine sich ändernde Charakteristik des Niederschlags nur unzureichend wiedergeben. Dies bestätigen auch die Ergebnisse von AUERSWALD et al. (2019b), ELHAUS et al. (2019) bzw. FISCHER et al. (2020). Im Gegensatz dazu zeigt die auf relative Niederschlagsänderungen beruhende RG2 eine sehr hohe Übereinstimmung mit den R-Faktoren nach Normvorschrift ($KK = 0,96$), welches auf die robustere Abbildung von R-Faktoränderungen hindeutet. Jedoch ist anzumerken, dass die Erzeugung der hochaufgelösten, synthetischen Zukunftsreihen ausschließlich durch

Adjustierung mittels monatlicher Klimaänderungsfaktoren erfolgte. Dies ist eine vereinfachende Methode, bei der die Verteilung erosiver Niederschlagsereignisse weitestgehend konstant bleibt und daher die Aussagefähigkeit der Ergebnisse der RG2 auf wenig komplexe Änderungen der Niederschlagsstatistik einschränkt. Da von vorneherein eine erhöhte Güte durch ein auf Niederschlagsänderungen basierendes Modell zu erwarten war (da ermittelte Klimareihen der Zukunft ebenso auf Basis von Änderungssignalen ermittelt wurden), wurde in einem zweiten Validierungsverfahren geprüft, ob die RG2 auch in der Lage ist, R-Faktoränderungen im Messzeitraum wiederzugeben (Tab. 19). Grundsätzlich kann für 5 der 7 untersuchten Stationen eine gute Übereinstimmung zwischen den nach Normvorschrift und nach RG2 berechneten R-Faktoren ermittelt werden. Diese gilt sowohl für die Stationen aus der Kalibrierung (Siptenfelde, Harzgerode und Artern) als auch für zusätzliche, weiter außerhalb liegende Stationen. Dabei sind die Differenzen der R-Faktoren immer dort gering, wo ansteigende Niederschläge auch einen ansteigenden R-Faktor zur Folge haben. Im Gegensatz dazu ist die Übereinstimmung an der Station Halle-Kröllwitz unzureichend, wo bei ansteigenden Jahres- und Sommerhalbjahressummen ein Absinken des nach Normvorschrift berechneten R-Faktors zu beobachten ist. Es ist anzunehmen, dass der Niederschlag vermehrt als nicht erosiver Niederschlag gefallen war. Gegenteiliges wurde für die Station Leipzig/Halle festgestellt, wo bei sinkenden Jahres- und Sommerhalbjahressummen nach Normvorschrift ein ansteigender R-Faktor ermittelt wurde. Dies zeigt, dass die RG2 nur positive Korrelationen zwischen Niederschlag und R-Faktor abbilden kann. Dies ist verfahrensbedingt auf die Verwendung von adjustierten Niederschlagsreihen des Klimamodellensembles zur Berechnung des zukünftigen R-Faktors zurückzuführen. Des Weiteren sind die Untersuchungszeiträume mit 10 bis max. 13 Jahren für die Ermittlung eines mittleren R-Faktors vergleichsweise kurz. Da der Jahres-R-Faktor hohen Schwankungen unterliegt, beeinflussen die Einbeziehung oder das Herausnehmen eines einzelnen Jahres das Ergebnis. Zur Überprüfung der Validierungsergebnisse sollte die Auswertung zukünftig mit längeren und robusteren Zeiträumen von 15 bis 20 Jahren durchgeführt werden. Ebenso sind alternative Ansätze denkbar, die auf disaggregierten Niederschlägen oder auf aus Niederschlagsstatistiken synthetisch erzeugten Regenreihen mit hoher zeitlicher Auflösung und ausreichender Länge basieren. Die Anwendbarkeit der RG2 war zudem auf den Wertebereich der im Latin Hypercube Sampling vorgegebenen Klimaänderungsfaktoren beschränkt. Die Genauigkeit der R-Faktoren weit außerhalb dieses Bereiches konnte aktuell nicht abgeschätzt werden.

Der Vorteil der RG2 beruht vor allem auf ihrer einfachen Anwendbarkeit. Neben den

monatlichen Niederschlagsänderungsfaktoren, welche durch aktuelle Klimamodellprojektionen vorgegeben werden können, wird zur Abschätzung eines Absolutwerts des zukünftigen R-Faktors nur ein möglichst robust ermittelter R-Faktor der Gegenwart benötigt. Dieser kann entweder durch regional angepasste Regressionsgleichungen, wie RG1, oder durch eine Regenerositätskarte ermittelt werden. Insbesondere die Kombination aus der hochaufgelösten Karte der Regenerosität (1 x 1 km) und den Gitterabmessungen der Klimamodelle (10 x 10 km) erhöht die Robustheit bei der lokalen Abschätzung eines zukünftigen R-Faktors. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass durch die alleinige Verwendung von Niederschlagsänderungssignalen keine vorgelagerten Bias-Korrekturen notwendig sind. Dadurch wird die Ensemble-Anwendung vereinfacht. Durch die ausschließliche Bestimmung von R-Faktor-Änderungen und die Entkopplung ihrer Absolutwertbestimmung vom Verfahren, können die darin liegenden Fehler mittels vorliegender, hochaufgelöster Messreihen und der anwendbaren Methodik nach Normvorschrift reduziert werden. Als Konsequenz daraus wirken sich die damit üblicherweise verbundenen Unsicherheiten nicht negativ auf das Regressionsmodell aus.

Unter Berücksichtigung der diskutierten Unsicherheiten und Anwendungsgrenzen ist von einer Anwendbarkeit der aufgestellten RG1 und RG2 in der Erosionsberechnung auszugehen.

4.6. Schlussfolgerungen

Ziel dieser Studie war es, die aus der DIN 19708 (2017) stammende, häufig verwendete länderspezifische Gleichung für das Land Sachsen-Anhalt (ST-Gleichung) hinsichtlich ihrer Berechnungsgenauigkeit für den Landkreis Mansfeld-Südharz zu prüfen und alternative, praxistaugliche Regressionsmodelle zur Berechnung gegenwärtiger und zukünftiger R-Faktoren zu validieren.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass sowohl die ST-Gleichung als auch die auf den Messzeitraum angepasste Gleichung für den Landkreis Mansfeld-Südharz (MS-Gleichung) den lokalen R-Faktor nur mit Unsicherheiten wiedergeben konnten. Grundsätzlich ist die Regressionsgleichung 1 (RG1), basierend auf den mittleren monatlichen Niederschlagssummen der Monate Mai bis September, zur Abschätzung gegenwärtiger R-Faktoren im Landkreis Mansfeld-Südharz besser geeignet als die Ländergleichung der DIN 19708 (2017). Für eine zuverlässige Schätzung eines lokalen R-Faktors wird daher die Verwendung von Regressionsgleichungen mit monatlichen Niederschlagssummen als Regressoren empfohlen. Da die RG1 jedoch die R-Faktoren außerhalb des Untersuchungszeitraumes nur mit geringer Güte wiedergibt, wurde diese für die Abschätzung der zukünftigen, klimawandelbeeinflussten

R-Faktoren als ungeeignet eingeschätzt. Dabei deuten die Ergebnisse des untersuchten Klimamodellensembles auf eine Unterschätzung der R-Faktoren hin.

Durch die Regressionsgleichung 2 (RG2), welche auf den monatlichen Niederschlagsänderungen der Monate Mai bis September basiert, konnte sowohl für den Wertebereich des Klimamodellensembles als auch für die gemessenen Daten eine sehr hohe Modellgüte nachgewiesen werden. Damit zeigt die RG2, dass die Berechnung von R-Faktoränderungen aus Niederschlagsänderungen grundsätzlich zu robusten Abschätzungen eines zukünftigen R-Faktors führt. Aus diesem Grund wird für die Ermittlung von klimawandelbeeinflussten R-Faktoren die Verwendung einer Regressionsgleichung mit relativen monatlichen Niederschlagsänderungen (statt absoluten Niederschlagssummen) als Regressoren empfohlen. Jedoch konnte durch die RG2 nur eine positive Korrelation und nur eingeschränkt die Änderung von Häufigkeiten und Verteilung von Niederschlagsereignissen abgebildet werden.

Verbesserungspotenzial der Regressionsgleichungen wird von den Autoren einerseits in der Regressorenwahl gesehen, wobei weitere Regressoren, wie die Niederschlagsintensität, geprüft werden sollten. Weiterhin kann die Nutzung nicht linearer Ansätze in Betracht gezogen werden. Für die RG2 sollte insbesondere der Einfluss klimabedingter Niederschlagsänderungen auf Basis komplexerer Änderungen der Niederschlagsstatistiken geprüft werden. Um die Robustheit beider Regressionsmodelle zu verifizieren, können Unsicherheitsbetrachtungen vorgenommen und die Einzel- und Gesamtunsicherheit quantifiziert werden.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung und Anpassung praktikabler Methoden und Instrumente zur Abschätzung der Bodendegradation und Verbesserung der Maßnahmenentwicklung unter den Bedingungen des Klimawandels. Hierzu wurde die Fragestellung untersucht, welche Trends des Klimas und der Sickerwasserrate sowie der Regenerosivität nachgewiesen werden können und inwiefern die Beobachtungen mit den Ergebnissen aus Klimaprojektionen übereinstimmen. Des Weiteren wurde die Zuverlässigkeit eines neu entwickelten Planungsinstrumentensatzes aus drei anwendungsorientierten, praxisnahen Planungsinstrumenten zur Abschätzung der flächen- und linienhaften Erosivität diskutiert. Dabei wurde untersucht, ob Niederschlagsänderungen durch einen klimabeeinflussten Regenerosivitätsfaktor berücksichtigt werden können und ob mithilfe des verbesserten Faktors und den neu entwickelten Planungsinstrumenten die Aufstellung von Anpassungsmaßnahmen unterstützt wird.

5.1. Langzeituntersuchungen und Klimaprojektionen des Bodenwassers und der Regenerosivität

In Sachsen-Anhalt können bereits Veränderungen des Klimas beobachtet werden. So zeigte die Untersuchung der meteorologischen Messzeitreihen der Wetterstation Seehausen (Altmark) des DWD zum Teil signifikante klimatische Trends, insbesondere für die Temperatur und die Verdunstung. Für den Niederschlag hingegen war zwar kein eindeutiger Trend, jedoch eine innerjährliche Umverteilung mit einem niederschlagsärmeren Frühjahr zu erkennen. Für den Bodenwasserhaushalt konnte, trotz der deutlichen klimatischen Veränderungen, bisher kein signifikanter Trend festgestellt werden. Dies zeigten erstmalig untersuchte, Langzeit-trends der Sickerwasserrate aus 33-jährigen Messzeitreihen von zwei Grünlandlysimetern an der Lysimeterstation Falkenberg des Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ. Ähnlich wie beim Niederschlag, war jedoch eine Abnahme im Frühjahr zu beobachten. Aufgrund der damit verbundenen tendenziellen Zunahme von Trockenheit war ein Rückgang der Erträge festzustellen, dem zukünftig mit Beregnung, vor allem in betroffenen und grundwasserfernen Gebieten, entgegengewirkt werden muss. Weiterhin erhöht sich durch die Hydrophobie eines stärker oder völlig ausgetrockneten Bodens dessen Anfälligkeit für Erosionsereignisse.

Untersuchungen der Exposition der Böden gegenüber Extremniederschlägen mithilfe des Oberflächenabfluss- und Regenerosivitätsfaktors (R-Faktor) des Landkreises Mansfeld-Südharz unter Nutzung von Klimaprojektionsdaten deuteten auf einen Anstieg der R-Faktoren in der Nahen Zukunft von ca. 17 % und in der Fernen Zukunft von ca. 22 % hin. Eine Zunahme konnte indirekt auch im Messzeitraum für den Großteil der untersuchten Stationen

nachgewiesen werden (Tab. 19). Jedoch unterlag der R-Faktor einer hohen zeitlichen und räumlichen Variabilität, was eine Vorhersage und Gütebeurteilung bisheriger Projektionen für einzelne Stationen oder Gebiete erschwert.

Um robuste Abschätzungen des Wasser- und Bodenwasserhaushalts der Zukunft zu erhalten, sollten Klimaprojektionen insbesondere die beobachteten Tendenzen des Niederschlags, d.h. die saisonale Umverteilung und die räumliche Differenzierung wiedergeben. Der Vergleich der Ergebnisse der Klima- und Sickerwassertrends zeigte, dass die ausgewerteten Simulationsergebnisse von Wasserhaushalts- und Bodenmodellen nur so gut waren, wie die zugrundeliegenden Projektionen bzw. Klimamodelle. Die simulierten Klimamodellketten REMO und WETTREG des SRES-Szenarios A1B (AR4) konnten den beobachteten Trend sowie die saisonalen Veränderungen des Niederschlags und der Klimatischen Wasserbilanz nur unzureichend wiedergeben. Eine Gegenüberstellung mit dem RCP8.5-Ensemble (AR5) wies ähnliche Ergebnisse auf. Zwar bildeten auch einzelne Modellketten die beobachteten Abnahmen im Frühjahr ab, sodass diese in der Ergebnisbandbreite enthalten waren. Im Ensemble-Mittel wurde jedoch grundsätzlich in allen Monaten eine leichte Zunahme des Niederschlags beobachtet. Es wurde deutlich, dass die Gefahr von Trockenheit im Frühjahr durch die Mehrheit der untersuchten Klimamodelle noch unterschätzt wird.

Der vorgenommene Vergleich mit Messungen verdeutlichte die Bedeutung von Beobachtungsdaten für die Validierung von Klimaprojektionen bzw. -modellen. Zum anderen müssen Projektionen und Klimamodelle durch fortlaufende Beobachtungen und Auswertungen sowie durch neuere Erkenntnisse in der Klimaforschung und Anforderungen der Politik in regelmäßigen Abständen angepasst und verbessert werden. Planungsinstrumente, wie beispielsweise Bodenwasserhaushaltsmodelle, mit denen Klimafolgen kenntlich gemacht werden, müssen anpassungsfähig sein, sodass die Projektionen der RCM's einfach und schnell eingebunden werden können. Aus diesem Grund bedarf es flexibler, anwenderfreundlicher und praxisorientierter Planungsinstrumente, die eine einfache Anpassung der klimatischen Eingangsgrößen und Variantenrechnungen erlauben.

5.2. Anwendbarkeit praxisnaher Planungsinstrumenten zur Bestimmung von flächen- und linienhafter Erosion

Aufgrund der oben genannten Anforderungen wurden drei praxisorientierte Planungsinstrumente zur Abschätzung der flächen- und linienhaften Erosion mit dem Ziel entwickelt, Entscheidungsträgern und Akteuren die Möglichkeit zu ermöglichen, die Ursachen und Folgen lokaler Bodenabträge zu ermitteln und darauf aufbauend Anpassungsmaßnahmen vorzunehmen. Um eine hohe Anwendbarkeit der Instrumente zu gewährleisten und die

Vorkenntnisse der Nutzer einzubeziehen, wurden bewährte Verfahren und Methoden verwendet und diese auf die Bedürfnisse der Akteure angepasst.

So kann durch das Planungsinstrument BEM die Erosionsanfälligkeit eines Bachbettes mithilfe eines kritischen Schwellenwertes ermittelt werden. Gegenüber der sonst nur schwer und mit großen Unsicherheiten verbundenen Mengenabschätzung, wird beim BEM ausschließlich eine einfache Ermittlung der Anfälligkeit vorgenommen. Im Einzugsgebiet des Regenbeeks, in dem die Ermittlung der Ursache von Schlammablagerungen im Bachbett von zentralem Interesse war, konnte diese mithilfe des BEM auf die direkte Einleitung von Niederschlagswasser ohne Rückhalt, d.h. zu hohe Fließgeschwindigkeiten und damit verbundener Gerinne-Erosion, zurückgeführt werden. Die räumlich differenzierten Ergebnisse des BEM stimmten dabei mit den Beobachtungen des örtlichen Gewässerunterhaltungsverbandes überein.

Mit dem Planungsinstrument ero-SMINF wird eine hang- und ereignisbezogene Schätzung der Erosivität ermöglicht. Während bewährte Erosionsmodelle, wie die ABAG nur eine langzeitbasierte Bestimmung der Erosion erlauben, stellt das ero-SMINF eine mögliche Alternative bzw. Erweiterung zu Langzeitmodellen dar, mit dem eine Berechnung mit hochaufgelösten Niederschlägen ermöglicht wird. Am Beispiel des Vietzbaches wurde deutlich, dass das Instrument in der Lage war, die Wirkung von unterschiedlichen Regenereignissen zu quantifizieren und so die potenzielle Erosionsgefährdung eines Hanges und einer Bodenart zu erfassen. So wurden mit ero-SMINF Kommunen und Bauernverbände bei der Gefahrenabschätzung vorhergesagter Niederschlagsereignisse unterstützt.

Das ABAGis ermöglicht durch die Integration der hangbezogenen ABAG in ein Geoinformationssystem (GIS) eine flächenhafte, meist einzugsgebietsbezogene Berechnung und somit die Lokalisierung von erosionsgefährdeten Bereichen. Durch die programminterne Vorgabe definierter Layer der natürlichen Erosionsgefährdung, die Nutzung frei verfügbarer Regenradar-daten des DWD sowie der vereinfachten farblichen Ergebnisdarstellung wurde die Anwenderfreundlichkeit erhöht. Im Bereich des Vietzbaches konnten stark erosionsgefährdete Abflussrinnen in der Geländeoberfläche identifiziert werden, welche sich teilweise auch vor Ort in Form von lokalen Uferabbrüchen wiederfanden.

Auf Grundlage der Ergebnisse der Untersuchungsgebiete Regenbeek und Vietzbach konnte die grundsätzliche Anwendbarkeit der Planungsinstrumente validiert und damit ihre Funktionsfähigkeit zur Abschätzung der Erosionsgefährdung nachgewiesen werden. Durch die Verwendung empirischer Modelle und Gleichungen war dies jedoch gegenüber prozessorientierten Modellen mit einer verminderten Genauigkeit verbunden. Grundsätzlich waren alle entwickelten Planungsinstrumente nur in der Lage, eine indikatorbasierte,

qualitative Bewertung der Erosivität vorzunehmen. Obwohl das ABAGis in der Lage ist, eine Erosionsmenge zu berechnen, besteht aufgrund der Vernachlässigung von Rillen- und Grabenerosion, Deposition sowie infolge mangelnder Validierung eine hohe Unsicherheit, weshalb die Mengenangaben als Schätzung einzuordnen sind. Eine höhere Genauigkeit kann auf Kosten der Anwenderfreundlichkeit erreicht werden, indem beispielsweise prozessorientierte Modelle verwendet werden. Für grundsätzliche Problemstellungen von Entscheidungsträgern und Planern, die zu Planungszwecken in der Regel nur örtlich differenzierte Angaben zur Erosionswahrscheinlichkeit benötigen, können die entwickelten Planungsinstrumente unter Berücksichtigung der geringeren Genauigkeit angewandt werden.

5.3. Potenziale des klimaangepassten R-Faktors und der Planungsinstrumente für Anpassungsmaßnahmen

Um den Einfluss des Klimawandels auf die Bodenerosion abzubilden, stellt der R-Faktor im ABAGis die zentrale klimatische Komponente dar. Für eine einfache und robuste Darstellung von R-Faktoren der Zukunft waren bisher vorhandene Berechnungsmethoden nur eingeschränkt anwendbar. Aus diesem Grund wurden neue, praktisch anwendbare Regressionsmodelle erstellt und untersucht. Die in Kapitel 3.3.3. aufgestellte R-Faktor-Gleichung für das ABAGis basierte auf einem ersten, vereinfachten Ansatz, der ähnlich wie Regressionsgleichung 1 (RG1) eine Verbesserung gegenüber den Ländergleichungen darstellte. Grundsätzlich wurde mit der RG1, die räumlich höher aufgelöst, auf Landkreise statt Bundesländern basiert und monatliche, statt halbjährliche oder jährliche Niederschlagssummen verwendet, eine höhere Genauigkeit bei der Berechnung des R-Faktors erzielt. Bei nur geringer Zunahme des Berechnungsaufwandes stellte sie eine Verbesserung gegenüber bisherigen Verfahren dar. Die regionalen Ergebnisse der Klimauntersuchung verdeutlichten jedoch, dass die häufig verwendeten Regressionsgleichungen auf Grundlage von absoluten Niederschlagssummen die zukünftigen R-Faktoren grundsätzlich unterschätzten und damit für Klimabetrachtungen nicht oder nur eingeschränkt geeignet waren. Um die Wirkung des Klimawandels effektiver abzuschätzen, wurde die Regressionsgleichung 2 (RG2) mit relativen Niederschlagsänderungen als Regressoren entwickelt. Im Vergleich mit den Ergebnissen des Klimamodellensembles konnte mit der RG2 eine hohe Modellgüte ermittelt werden. Dabei ermöglicht sie die einfache Einbindung von Klimaprojektionen sowie von räumlich höher aufgelösten Regenradar-daten, was eine großräumige und flexible Anwendung erlaubt.

Durch die neu entwickelte Berechnungsmethode für einen klimabeeinflussten R-Faktor wurde ein wichtiger Baustein für die Abschätzung der zukünftigen Bodenerosion geschaffen. Grundsätzlich sind alle erstellten Planungsinstrumente in der Lage, durch Variation der

Eingangsdaten Variantenrechnungen der Erosivität zu ermöglichen. Die Instrumente gelten aufgrund der verminderten Prozessgenauigkeit in Bezug auf absolute Erosionsmengen zwar als weniger robust, in Bezug auf eine zu- oder abnehmende Erosivität werden sie jedoch als vergleichsweise genau eingestuft. Dadurch sind alle Instrumente insbesondere für die Aufstellung von Anpassungsmaßnahmen geeignet.

Aufgrund seiner Faktoren, die sowohl klimatische, geologische und topografische Verhältnisse als auch die Bewirtschaftung berücksichtigen, stellte sich das ABAGis für eine Wirkungsanalyse von Nutzungsänderungen als besonders geeignet heraus. Dies erfolgte beispielsweise durch die Variation von Hanglänge, Landnutzung und Art der Bodenbearbeitung. Die Ergebnisse in Bezug auf das Einzugsgebiet des Vietzbaches zeigten, dass durch den reinen Anbau von Mais in der Fruchtfolge eine Erhöhung der Erosionsgefährdung um bis zu ca. 200% zu erwarten ist, während beim Wechsel von konventioneller zu konservierender Bodenbearbeitung hingegen eine Reduzierung um bis zu 73% erreicht wird. Auf Grundlage von Klimaprojektionen wurde mit der RG2 eine Zunahme der Erosivität um ca. 20% projiziert. Der Vergleich von Nutzungsänderung und Klimawandel verdeutlichte die Bedeutung konservierender Bodenbearbeitung zum Schutz des Bodens vor Erosion sowie als Maßnahme gegen die Folgen des Klimawandels. Da der R-Faktor räumlich und zeitlich jedoch sehr stark variierte, waren Aussagen in Bezug zum Klimawandel mit Unsicherheiten behaftet, die bei kombinierter Nutzung der RG2 mit räumlich höher aufgelösten Regenradardaten reduziert werden können. Ereignisbezogene Fragestellungen werden mit dem ero-SMINF bearbeitet, welches durch die Nutzung von Niederschlagszeitreihen mit beliebiger zeitlicher Auflösung eine detailliertere Klimabetrachtung ermöglicht. Weiterhin sind auch die Variation von Hanglänge und -gefälle sowie verschiedener Bodenparameter, zum Beispiel zur Berücksichtigung von Bodenverdichtung oder Humuszugabe, möglich.

Da im Planungsinstrument BEM keine klimatischen Parameter verarbeitet werden, können damit keine Klimabetrachtungen vorgenommen werden. Jedoch werden durch Variation des Gewässersubstrates, der Gerinnerauheit und des Abflussprofils mit dem BEM Variantenberechnungen zu Anpassungsmaßnahmen ermöglicht. So konnte in einer Untersuchung des Regenbeeks ermittelt werden, dass durch eine Verbreiterung des Gerinnes, in Kombination mit dem Einbringen von Störsteinen und dem Abflachen von Uferböschungen, der kritisch wirkende Abfluss um mehr als 600% erhöht wird, wodurch folglich ein höherer Abfluss ohne stärkere Erosionserscheinungen abgeführt werden kann. In den Ergebnissen des BEM können auch Klimawandel-Zuschläge des Abflusses Berücksichtigung finden.

5.4. Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse der Arbeit zeigten, dass Akteure durch die kombinierte Berücksichtigung von Aussagen aus Langzeitbeobachtungen und Klimaprojektionen sowie durch die Zurverfügungstellung von effektiven, praxisnahen Planungsinstrumenten in die Lage versetzt werden, die zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels abzuschätzen und entsprechende, lokale Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln. Dabei wurden insbesondere die Bedeutung von langjährigen Messzeitreihen für die Validierung von Klimaprojektionen, die Möglichkeiten und Einschränkungen einfacher, praxisorientierter Planungsinstrumente und R-Faktor-Berechnungsmethoden sowie die Bedeutung von konservierender Bodenbearbeitung als Maßnahme gegen die Auswirkungen des Klimawandels deutlich. Da sich der Kenntnisstand zum Klimawandel ständig weiterentwickelt, sind bisherige Aussagen, Instrumente und Maßnahmen fortwährend anzupassen, um den Unsicherheiten in den zugrundeliegenden Prozessen Rechnung zu tragen.

Weiterführende Ziele sind

- die Fortführung und Ausweitung langjähriger Beobachtungen des Bodenwasserhaushaltes, aber auch der Bodenerosion in Form von Felduntersuchungen zur Quantifizierung lokaler Auswirkungen des Klimawandels und zur Verbesserung von Prozessverständnis sowie statistischer und empirischer Zusammenhänge,
- eine verstärkte Beobachtung des Grundwassers in Hinblick auf Entnahmen und Stoffeinträge infolge eines erhöhten Beregnungsbedarfs,
- die Quantifizierung und Reduzierung der Unsicherheiten innerhalb der Planungsinstrumente, möglichst ohne Verminderung der Anwenderfreundlichkeit,
- die Verbesserung und Anpassung der Berechnungsverfahren der ABAG-Faktoren, z.B. C-Faktor oder P-Faktor in Hinblick auf Klimawandel und Anpassungsstrategien,
- vergleichende Untersuchungen mit physikalischen Modellen wie z.B. dem EROSION 3D um das Prozessverständnis und die Genauigkeit der Planungsinstrumente zu erhöhen.

Literaturverzeichnis

- ACKERMANN, A. (2016): Simulation des Austrags von gelöstem organischen Kohlenstoff aus landwirtschaftlich genutzten Mineralböden, Dissertation, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- ABOTT, M. B.; BATHERS, J. C.; LUNGE, J. A.; O'CONNEL, P. F.; RASMUSSEN, J. (1986): An introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européen, „SHE“ 2. Structure of physically based, distributed modelling systems. *Journal of Hydrology*, 87 (1), S. 61-77.
- ANGULO-MARTÍNEZ, M.; BEGUERÍA, S. (2009): Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: A comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain), *Journal of Hydrology*, 379 (1–2), 111-121, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.09.051>.
- Arbeitsblatt ATV-DVWK-M 504 (2002): Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden.
- AUERSWALD, K. (2002): Schätzung des C-Faktors aus Fruchtartenstatistiken für Ackerflächen in Gebieten mit subkontinentalem bis subatlantischem Klima nördlich der Alpen. *Zeitschrift für Landnutzung und Landentwicklung* 43, 1-5.
- AUERSWALD, K.; FISCHER, F.K.; WINTERRATH, T.; BRANDHUBER, R. (2019a): Rain erosivity map for Germany derived from contiguous radar rain data. *Hydrology and Earth System Sciences* 23, 1819-1832, <https://doi.org/10.5194/hess-23-1819-2019>.
- AUERSWALD, K.; FISCHER, F. K.; WINTERRATH, T.; ELHAUS, D.; MAIER, H.; BRANDHUBER, R. (2019b): Klimabedingte Veränderung der Regenerosivität seit 1960 und Konsequenzen für Bodenabtragsschätzungen. In: Bachmann G., König W., Utermann J. (Hrsg.) *Bodenschutz, Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser (Loseblattsammlung)*, Berlin, Erich Schmidt Verlag, 4090, 21.
- BALLABIO, C., BORRELLI, P., SPINONI, J., MEUSBURGER, K., MICHAELIDES, S., BEGUERÍA, S., KLIK, A.; PETAN, S.; JANEČEK, M.; OLSEN, P.; AALTO, J.; LAKATOS, M.; RYMSZEWICZ, A.; DUMITRESCU, A.; PERČEC TADIĆ, M.; DIODATO, N.; KOSTALOVA, J.; ROUSSEVA, S.; BANASIK, K.; ALEWELL, C.; PANAGOS, P. (2017). Mapping monthly rainfall erosivity in Europe. *Science of The Total Environment*, 579, 1298–1315. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.123>.
- BAGARELLO, V.; DI PIAZZA, G.V.; FERRO, V.; GIORDANO, G. (2008): Predicting unit plot soil loss in Sicily, south Italy. *Hydrological Processes*, 22 (5), pp. 586-595. <https://doi.org/10.1002/hyp.6621>
- BATHIANY, S.; NEY, P.; BELLEFLAMME, A.; EL ZOHBI, J.; GOERGEN, K.; RECHID, D. (2021): Entwicklung von Dürren in Deutschland, Europa und weltweit. In: Lozán J. L., S.-W. Breckle, H. Graßl & D. Kasang (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Boden & Landnutzung*. S. 310-318. *Wissenschaftliche Auswertungen in Kooperation mit GEO, Hamburg*. www.warnsignal-klima.de. 10.25592/warnsignal.klima.boden-landnutzung.43.
- BEASLEY, D. B.; HUGGINS, L. F.; MONKE, E. J. (1980): ANSWERS: A Model for Watershed Planning. *Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers* 23(4), <https://doi.org/10.13031/2013.34692>.
- BECHTELER, W. (2006): Sedimentquellen und Transportprozesse. In *ALPRESERV 4*, Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München (Hrsg.), Neubiberg, 277-290.

- BECKER, A. (2019): Extremerer Niederschlag im Klimawandel - Was wissen wir? *Wasserwirtschaft* 12, Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/s35147-019-0297-y>.
- BEILLOUIN, D.; CARDINAEL, R.; BERRE, D.; BOYER, A.; CORBEELS, M.; FALLOT, A.; FEDER, F.; DEMENOIS, J. (2022). A global overview of studies about land management, land-use change, and climate change effects on soil organic carbon. *Global change biology*, 28(4), 1690-1702.
- BELASRI, A. AND LAKHOUILI, A. (2016) Estimation of Soil Erosion Risk Using the Universal Soil Loss Equation (USLE) and Geo-Information Technology in Oued El Makhazine Watershed, Morocco. *Journal of Geographic Information System*, 8, 98-107. doi:10.4236/jgis.2016.81010.
- BENAVIDEZ, R.; JACKSON, B.; MAXWELL, D.; NORTON, K. (2018): A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, 6059–6086. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6059-2018>.
- BERG, A.; SHEFFIELD, J. (2018): Climate change and drought: the soil moisture perspective. *Current Climate Change Reports*, 4(2), 180-191.
- BEVEN, K.; FREER, J. (2001): A dynamic TOPMODEL. *Hydrological Processes* 15, 1993-2011. <https://doi.org/10.1002/hyp.252>.
- BfN - BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (Hrgs.) (2021): BfN Bodenreport: Vielfältiges Bodenleben - Grundlage für Naturschutz und nachhaltige Landwirtschaft. Nabel, M.; Selig, C.; Gundlach, J.; v.d. Decken, H.; Klein, M.; Jessel, B. (Autoren), Bonn, Bad Godesberg, 1. Auflage. DOI 10.19217/rep211.
- BLÖSCHL, G.; HALL, J., VIGLIONE, A.; PERDIGÃO, R. A. P.; PARAJKA, J.; MERZ, B.; LUN, D.; ARHEIMER, B.; ARONICA, G. T.; BILIBASHI, A.; BOHÁČ, M.; BONACCI, O.; BORGA, M.; ČANJEVAC, I.; CASTELLARIN, A.; CHIRICO, G. B.; CLAPS, P.; FROLOVA, N.; GANORA, D.; GORBACHOVA, L.; GÜL, A.; HANNAFORD, J.; HARRIGAN, S.; KIREEVA, M.; KISS, A.; KJELDEN, T. R.; KOHNOVÁ, S.; KOSKELA, J. J.; LEDVINKA, O.; MACDONALD, N.; MAVROVA-GUIRGUINOVA, M.; MEDIERO, L.; MERZ, R.; MOLNAR, P.; MONTANARI, A.; MURPHY, C.; OSUCH, M.; OVCHARUK, V.; RADEVSKI, I.; SALINAS, J. L.; SAUQUET, E.; ŠRAJ, M.; SZOLGAY, J.; VOLPI, E.; WILSON, D.; ZAIMI, K.; ŽIVKOVIĆ, N. (2019): Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature* 573, 108–111. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>.
- BMEL – Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hrgs.) (2018): Trockenheit und Dürre 2018 – Überblick über Maßnahmen. Online Artikel vom 12.12.2018, Bonn. <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/klimaschutz/extremwetterlagen-zustaendigkeiten.html> [Letzter Zugriff: 28.04.2022]
- BMEL – Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hrgs.) (2019): Humus in landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands - Ausgewählte Ergebnisse der Bodenzustandserhebung. Online Artikel vom August 2021, Bonn. https://www.thuenen.de/media/institute/ak/Allgemein/news/Bodenzustandserhebung_Landwirtschaft_Kurzfassung.pdf [Letzter Zugriff: 28.04.2022]
- BMEL – Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (Hrgs.) (2020): Diskussionspapier Ackerbaustrategie 2035. Online Artikel vom 08.01.2020, Bonn. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/Ackerbaustrategie.pdf?__blob=publicationFile&v=17 [Letzter Zugriff: 28.04.2022]

- BORRELLI, P.; ALEWELL, C.; ALVAREZ, P.; AYACH ANACHE, J. A.; BAARTMAN, J.; BALLABIO, C.; BEZAK, N.; BIDDOCCU, M.; CERDÀ, A.; CHALISE, D.; CHEN, S.; CHEN, W.; DE GIROLAMO, A. M.; GESSESSE, G. D.; DEUMLICH, D.; DIODATO, N.; EFTHIMIOU, N.; ERPUL, G.; FIENER, P.; FREPPAZ, M.; GENTILE, F.; GERICKE, A.; HAREGEWEYN, N.; HU, B.; JEANNEAU, A.; KAFFAS, K.; KIANI-HARCHEGANI, M.; LIZAGA VILLUENDAS, I.; LI, C.; LOMBARDO, L.; LÓPEZ-VICENTE, M.; LUCAS-BORJA, M. E.; MÄRKER, M.; MATTHEWS, F.; MIAO, C.; MIKOŠ, M.; MODUGNO, S.; MÖLLER, M.; NAIPAL, V.; NEARING, M.; OWUSU, S.; PANDAY, D.; PATAULT, E.; PATRICHE, C. V.; POGGIO, L.; PORTES, R.; QUIJANO, L.; RAHDARI, M. R.; RENIMA, M.; RICCI, G. F.; RODRIGO-COMINO, J.; SAIA, S.; SAMANI, A. N.; SCHILLACI, C.; SYRRIS, V.; KIM, H. S.; NOSES SPINOLA, D.; TARSO OLIVEIRA, P.; TENG, H.; THAPA, R.; VANTAS, K.; VIEIRA, D.; YANG, J. E.; YIN, S.; ZEMA, D. A.; ZHAO, G.; PANAGOS, P. (2021): Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis, *Science of The Total Environment*, Volume 780, 146494. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>.
- BRADY, N. C., WEIL, R. R. (2008): *The nature and properties of soils*, Vol. 13. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, pp. 662-710.
- BRANDHUBER, R., AUERSWALD, K., LANG, R., MÜLLER, A., TREISCH, M. (2018): ABAG interaktiv, Version 2.0. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising. Online verfügbar auf: https://www.lfl.bayern.de/appl/abag_interaktiv/ (letzter Zugriff am 21.02.2021)
- BRASSEUR, G. P.; JACOB, D.; SCHUCK-ZÖLLER, S. (2017): *Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven* (p. 348). Springer Nature.
- BREVIK, E. C., & HOMBURG, J. A. (2004): A 5000 year record of carbon sequestration from a coastal lagoon and wetland complex, Southern California, USA. *Catena*, 57(3), 221-232.
- BREVIK, E. C. (2013): The Potential Impact of Climate Change on Soil Properties and Processes and Corresponding Influence on Food Security. *Agriculture* 3, no. 3: 398-417. <https://doi.org/10.3390/agriculture3030398>.
- BRONSTERT, A.; AGARWAL, A.; BOESSENKOOL, B.; FISCHER, M.; HEISTERMANN, M.; KÖHN-REICH, L.; MORAN, T. UND WENDI, D. (2017): Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 – Entstehung, Ablauf und Schäden eines „Jahrhundertereignisses“. Teil 1: Meteorologische und hydrologische Analyse; *HyWa* 2017,3_1; S. 150-162.
- BRUTSAERT, W. (2008): Long-term groundwater storage trends estimated from streamflow records: Climate perspective. *Water Resour. Res.*, 44, W02409.
- BÜRGER, G., ANGELA PFISTER, A., BRONSTERT, A. (2021): Zunehmende Starkregen-intensitäten als Folge der Klimaerwärmung: Datenanalyse und Zukunftsprojektion – *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 65, (6), 262-271. DOI: 10.5675/HyWa_2021.6_1.
- CAO, L.; ZHANG, K.; DAI, H.; LIANG, Y. (2015): Modeling interrill erosion on unpaved roads in the loess plateau of China *Land Degradation and Development*, 26 (8) (2015), pp. 825-832. <https://doi.org/10.1002/ldr.2253>.
- CHENG, S.; GUAN, X.; HUANG, J.; JI, F.; GUO, R. (2015): Long-term trend and variability of soil moisture over East Asia, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 8658–8670, <https://doi.org/10.1002/2015JD023206>.
- COOLEY K.R.; WILLIAMS, J.R. (1985) Applicability of the Universal Soil Loss Equation (USLE) and Modified USLE to Hawaii. In: El-Swafi, S.A., et al., Eds., *Soil Erosion and Conservation*, Soil Conservation Society of America, Iowa, 509-528.

- CORDEIRO, M.R.C.; ROTZ, A.; KROEBEL, R.; BEAUCHEMIN, K.A.; HUNT, D.; BITTMAN, S.; KOENIG, K.M.; MCKENZIE, D.B. (2019): Prospects of Forage Production in Northern Regions under Climate and Land-Use Changes: A Case-Study of a Dairy Farm in Newfoundland, Canada. *Agronomy* 2019, 9, 31. <https://doi.org/10.3390/agronomy9010031>.
- DAS – Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen. http://www.bmu.bund.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/das_gesamt_bf.pdf [Letzter Zugriff: 18.06.2022]
- DE ROO, A.P.J.; WESSELING, C.G.; RITSEMA, C.J. (1996): LISEM: a single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins: I: Theory, input and output. *Hydrological Processes* 10, 1107-1117.
- DEUMELANDT, P., KASIMIR, M., STEININGER, M., WURBS, D. (2014): Beratungsleitfaden Bodenerosion und Sturzfluten. Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt (MLU) (Hrsg.), Magdeburg.
- DIN 19708:2017-08: Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG.
- DIODATO, N. (2004): Estimating RUSLE's rainfall factor in the part of Italy with a Mediterranean rainfall regime. *Hydrology and Earth System Sciences*. 8. <https://doi.org/10.5194/hess-8-103-2004>.
- DJOUKBALA, O.; HASBAIA, M.; BENSELAMA, O.; MAZOUR, M. (2018). Comparison of the erosion prediction models from USLE, MUSLE and RUSLE in a Mediterranean watershed, case of Wadi Gazouana (N-W of Algeria). *Modeling Earth Systems and Environment* 5, 725–743. doi:10.1007/s40808-018-0562-6.
- DKK (Deutsches Klima-Konsortium) (2021): Was wir heute übers Klima wissen. Deutsches Klima-Konsortium, Deutsche Meteorologische Gesellschaft, Deutscher Wetterdienst, Extremwetterkongress Hamburg, Helmholtz-Klima-Initiative, klimafakten.de (Hrsg.), Mitteilung der DKK, Online Artikel, Stand: Juni 2021. https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/aktuelle_meldungen/210609/basisfakten-zum-klimawandel_dkk.pdf?__blob=publicationFile&v=2 [Letzter Zugriff: 26.04.2022]
- DORE, M. H. (2005). Climate change and changes in global precipitation patterns: what do we know? *Environment international*, 31(8), 1167-1181.
- DROULIA, F.; CHARALAMPOPOULOS, I. (2021). Future climate change impacts on European Viticulture: A review on recent scientific advances. *Atmosphere*, 12(4), 495.
- DWD: Climate Data Center, online verfügbar auf: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/ (Letzter Zugriff: 06.01.2022)
- ECKHARDT, K. & ULBRICH, U. (2003): Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range, *Journal of Hydrology* 284 (2003): 244–252.
- ELHAUS, D.; WINTERRATH, T.; AUERSWALD, K.; FISCHER, F.; EBERTSEDER, F.; MAIER, H.; BRANDHUBER, R. (2019): Klimawandel und Bodenerosion – Neue Erkenntnisse zur Regenerosivität und Konsequenzen für die Abschätzung der Erosionsgefährdung. *Bodenschutz* 24: 136-142.

- EVANS, P.; BROWN, C. D. (2017): The boreal–temperate forest ecotone response to climate change. *Environmental Reviews*, 25(4), 423-431.
- FISCHER, E., KNUTTI, R. (2016): Observed heavy precipitation increase confirms theory and early models. *Nature Clim Change* 6, 986–991. <https://doi.org/10.1038/nclimate3110>.
- FISCHER F., HAUCK, J., BRANDHUBER, R., WEIGL, E., MAIER, H., UND AUERSWALD, K. (2018): Spatio-temporal variability of erosivity estimated from highly resolved and adjusted radar rain data. *Agricultural and Forest Meteorology* 223, 72–80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.03.024>.
- FISCHER, F.; AUERSWALD, K.; WINTERRATH, T.; BRANDHUBER, R. (2020): Klimabedingte Zunahme der Regenerosivität seit 1960, KW - Korrespondenz Wasserwirtschaft, 11/2020, S. 609-613.
- FISTIKOGLU, O., HARMANCIOGLU (2002): Integration of GIS with USLE in Assessment of Soil Erosion. *Water Resources Management* 16, 447–467. <https://doi.org/10.1023/A:1022282125760>.
- FLACKE, W., AUERSWALD, K., NEUFANG, L. (1990): Combining a modified USLE with a digital terrain model for computing resolution maps of soil loss resulting from rain wash. *Catena*, 17, 383-397.
- FLECK S., AHREND S., SUTMÖLLER J., MESSAL H., MEISSNER R., MEESENBURG H. (2016): Zukünftiger Anstieg der Nitratkonzentrationen unter Wald im norddeutschen Tiefland: Droht Stickstoff-Eutrophierung durch Klimawandel? *Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, (37)16: 71-81.
- FRITSCH E., SCHRÖDTER, M. (2016): Gefahr durch Erosion. Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau Sachsen-Anhalt (LLG) (Hrsg.): Bauernzeitung 33. Woche 2016, 72-73. https://llg.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MLU/LLFG/Dokumente/04_themen/agraroekologie/17_cc-erosion_bz-33-2016.pdf [Letzter Zugriff: 23.05.2022].
- GHOSAL, K.; DAS BHATTACHARYA, S. (2020): A Review of RUSLE Model. *J Indian Soc Remote Sens* 48, 689–707. <https://doi.org/10.1007/s12524-019-01097-0>.
- GODLINSKI, F. (2005): Abschätzung der Phosphorausträge aus der ungesättigten Bodenzone anhand numerischer Interpretationen von Lysimeterversuchen. Dissertation. Universität Rostock.
- GREEN, W. H., AMPT, G. A. (1911): Studies on soil physics. I: The flow of air and water through soils. *The Journal of Agricultural Science* 4(1), 1-24. <https://doi.org/10.1017/S0021859600001441>.
- GUSEV, Y.M.; NOVAK, O. (2007): Soil water - main water resources for terrestrial ecosystems of the biosphere. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 55, 3–15. doi:10.1002/hyp.362.
- HANSEN, J., SATO, M., KHARECHA, P., RUSSELL, G., LEA, D. W., & SIDDALL, M. (2007): Climate change and trace gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1856), 1925-1954.
- HAGEDORN F., KRAUSE H.-M., STUDER M., SCHELLENBERGER A., GATTINGER A. (2018): Boden und Umwelt. Organische Bodensubstanz, Treibhausgasemissionen und physikalische Belastung von Schweizer Böden. Thematische Synthese TS2 des Nationalen Forschungsprogramms «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (nfp 68), Bern.
- HARI, V., RAKOVEC, O., MARKONIS, Y.; HANEL, M.; KUMAR, R. (2020): Increased future occurrences of the exceptional 2018–2019 Central European drought under global warming. *Scientific Reports* 10, 12207. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68872-9>.

- HAUG, C. (2022): Trockenheit und Hitzewellen weltweit: Der Klimawandel-Sommer 2022. NDR. Artikel vom 11.08.2022. <https://www.mdr.de/wissen/klimawandel-trockenheit-duerre-globales-problem-100.html> [Letzter Zugriff: 10.09.2022]
- HEIDT, L. (2010): Auswirkungen des Klimawandels auf die potenzielle Beregnungsbedürftigkeit Nordost-Niedersachsens. Kaiser, K., Libra, J., Merz, B., Bens, O., Hüttl, R.F. (Hrsg.): Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen. Scientific Technical Report 10/10. Deutsches GeoForschungszentrum, Potsdam.
- HEILMANN, A.; PUNDT, H.; SCHEINERT, M.; REINSTORF, F.; KÖHN, J. (2020): Minderung der Bodenerosion als Maßnahme der kommunalen Klimaanpassung: Einsatz von Modellen und Geoinformationsdiensten auf der Grundlage partizipativer Methoden. Wernigeröder Automatisierungs- und Informatiktexte. [dx.doi.org/10.25673/35860](https://doi.org/10.25673/35860).
- HELBIG, H.; MÖLLER, M.; SCHMIDT, G. (2010): Bodenerosion durch Wasser in Sachsen-Anhalt. In BVB-Materialien (Eds: H. Helbig, M. Möller, G. Schmidt, Bundesverband Boden e.V. (BVB)), Erich Schmidt Verlag, Berlin, Germany 2010.
- HENSEL, H., BORK, H.-R. (1988): EDV-gestützte Bilanzierung von Erosion und Akkumulation in kleinen Einzugsgebieten unter Verwendung der modifizierten Universal Soil Loss Equation. Landschaftsökologisches Messen und Auswerten, 2.2/3, 106-136, TU Braunschweig.
- HERNANDO, D.; ROMANA, M. (2016): Estimate of the (R)USLE rainfall erosivity factor from monthly precipitation data in mainland Spain, *Journal of Iberian Geology*, 42, 113-124. https://doi.org/10.5209/REV_JIGE.2016.V42.N1.49120.
- HERRERA-PANTOJA, M.; HISCOCK, K. (2006): The effect of climate change on potential groundwater recharge in Great Britain, *Hydrological Processes*, 22, 73-86.
- HERRMANN, L. (2018): *Bodenkunde Xpress*. UTB 4943: Agrar- und Geowissenschaften, Ökologie, Umweltwissenschaften, Eugen Ulmer, Stuttgart, 21.
- HJULDSTROM, F. (1935): Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. *Bulletin Geol. Institute of Upsala*, Vol. XXV, Upsala, Sweden.
- HOFFMANS, G.J.C.M.; VERHEIJ, H.J. (1997): *Scour Manual*. Rotterdam, Netherlands, A.A.Balkema.
- HÖLSCHER, J.; SCHNORR, C.; PETRY, U.; ANHALT, M.; HABERLANDT, U.; PLÖTNER, S.; MEON, G.; WÖRNER, V.; KREYE, P. (2017): Final Report Phase 4 KliBiW, NLWKN, Norden, Deutschland.
- HORTON, R.E. (1933): The Role of Infiltration in the Hydrologic Cycle. *Transactions of the American Geophysical Union*, 14, 446-460. <http://dx.doi.org/10.1029/TR014i001p00446>.
- HOY, A., S. HÄNSEL, P. SKALAK, Z. USTRNUL, AND OL. BOCHNÍCEK (2017): The extreme European summer of 2015 in a long-term perspective. *International Journal Of Climatology* 37, 943-962.
- HÜBENER, H.; BÜLOW, K.; FOOKEN, C.; FRÜH, B.; HOFFMANN, P.; HÖPP, S.; KEULER, K.; MENZ, C.; MOHR, V.; RADTKE, K.; RAMTHUN, H.; SPEKAT, A.; STEGER, C.; TOUSSAINT, K.; WARRACH-SAGI, K.; WOLDT, M. (2017): ReKliEs-De Ergebnisbericht. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. doi: 10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Ergebnisbericht.
- IMBERY, F., K. FRIEDRICH, S. HAESLER, C. KOPPE, W. JANSSEN, P. BISSOLI (2018): Vorläufiger Rückblick auf den Sommer 2018 – eine Bilanz extremer Wetterereignisse, DWD (Hrsg.), Online Artikel vom 3.8.2018, https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20180803_bericht_sommer2018.pdf?__blob=publicationFile&v=10 [Letzter Zugriff 24.05.2022]

- IPCC (2007): Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- IPCC (2012): Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (Eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, England, 582 pp.
- IPCC (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151.
- IPCC (2018): Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Eds.:Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield.
- IPCC (2019): Summary for Policymakers. In: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (Eds.). In Druck.
- IPCC (2000): Special Report on Emissions Scenarios. Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Eds.) Cambridge University Press, UK. pp 570 Available from Cambridge University Press, The Edinburgh Building Shaftesbury Road, Cambridge CB2 2RU ENGLAND.
- IPCC (2021): Summary for Policymakers. In: V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (Hrsg.): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 6. Auflage. Intergovernmental Panel on Climate Change, Genf 2021.
- JACOB, D.; PETERSEN, J.; EGGERT, B.; ALIAS, A.; CHRISTENSEN, O.B.; BOUWER, L.M.; BRAUN, A.; COLETTE, A.; DÉQUÉ, M.; GEORGIEVSKI, G.; GEORGOPOULOU, E.; GOBIET, A.; MENUT, L.; NIKULIN, G.; HAENSLER, A.; HEMPELMANN, N.; JONES, C.; KEULER, K.; KOVATS, S.; KRÖNER, N.; KOTLARSKI, S.; KRIEGSMANN, A.; MARTIN, E.; VAN MEIJGAARD, E.; MOSELEY, C.; PFEIFER, S.; PREUSCHMANN, S.; RADERMACHER, C.; RADTKE, K.; RECHID, D.; ROUNSEVELL, M.; SAMUELSSON, P.; SOMOT, S.; SOUSSANA, J.-F.; TEICHMANN, C.; VALENTINI, R.; VAUTARD, R.; WEBER, B.; YIOU, P. (2014): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 563–578.
<https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>.

- JACOBS, A.; FLESSA, H.; DON, A.; HEIDKAMP, A.; PRIETZ, R.; DECHOW, R.; GENSITOR, A.; POEPLAU, C.; RIGGERS, C.; SCHNEIDER, F.; TIEMEYER, B.; VOS, C.; WITTNEBEL, M.; MÜLLER, T.; SÄURICH, A.; FAHRION-NITSCHKE, A.; GEBBERT, S.; HOPFSTOCK, R.; JACONI, A.; KOLATA, H.; LORBEER, M.; SCHRÖDER, J.; LAGGNER, A.; WEISER, C.; FREIBAUER, A. (2018). Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung (No. 64). Thünen Report. <http://hdl.handle.net/10419/189842> [Letzter Zugriff am 11.09.2022]
- JUNGHÄNEL, T.; BISSOLLI, P.; DAßLER, J.; FLECKENSTEIN, R.; IMBERY, F.; JANSSEN, W.; KASPAR, F.; LENGFELD, K.; LEPELT, T.; RAUTHE, M.; RAUTHE-SCHÖCH, A.; ROCEK, M.; WALAWENDER, E.; WEIGL, E. (2021): Hydro-klimatologische Einordnung der Stark- und Dauerniederschläge in Teilen Deutschlands im Zusammenhang mit dem Tiefdruckgebiet „Bernd“ vom 12. bis 19. Juli 2021; Online-Beitrag; DWD; online verfügbar auf: https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/niederschlag/20210721_bericht_starkniederschlaege_tief_bernd.pdf?__blob=publicationFile&v=6 (Letzter Zugriff: 22.09.2021).
- JETTEN, V.; GOVERS, G.; HESSEL, R. (2003), Erosion models: quality of spatial predictions. *Hydrological Processes* 17, 887-900. <https://doi.org/10.1002/hyp.1168>.
- KASANG, D. (2016). Klimamodelle. Von Bildungsserver - Klimawandel: <http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimamodelle> [Letzter Zugriff: 27.04.2022]
- KASPAR, F.; FRIEDRICH, K.; IMBERY, F. (2020): 2019 global zweitwärmstes Jahr: Temperaturentwicklung in Deutschland. Bericht des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main, Online Artikel vom 28.01.2020. https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20200128_vergleich_de_global.pdf?__blob=publicationFile&v=4 [Letzter Zugriff: 26.04.2022]
- KAUR, G.; SINGH, G.; MOTAVALLI, P. P.; NELSON, K. A.; ORLOWSKI, J. M.; GOLDEN, B. R. (2020): Impacts and management strategies for crop production in waterlogged or flooded soils: A review. *Agronomy Journal*, 112(3), 1475-1501.
- KING, M.; ALTDORFF, D.; LI, P.; GALAGEDARA, L.; HOLDEN, J.; UNC, A. (2018): Northward shift of the agricultural climate zone under 21st-century global climate change. *Scientific Reports*, 8(1), 1-10.
- KÖHN, J.; REINSTORF, F. (2016): Maßnahmen zur Minderung der Gewässerbetterosion. In A. Heilmann, H. Pundt, M. Scheinert (Hrsg.): *Ergebnisse aus der Modellregion Mansfeld-Südharz und der Stadt Sangerhausen - Projektabschluss "Klimpass-Aktiv"* (S. 45-55), Shaker Verlag, Aachen, Germany.
- KÖHN, J., MEIßNER, R., RUPP, H., REINSTORF, F. (2019): Langzeituntersuchungen zum Sickerwasser- und Stickstoffaustrag in Abhängigkeit von Bodenart, Nutzung und Mineraldüngung. In: Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein (Ed.), *Lysimeter – ein geeignetes Instrument zur Quantifizierung von Wasser-, Nähr- und Schadstoffflüssen*. 18. Gumpensteiner Lysimetertagung, 21.-22.05.2019, Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 73 ff.
- KOTZI, J. (2012). GIS-dABAG, GIS-gestützte Erosionsmodellierung an der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft. *Informationstechnologie für eine nachhaltige Landbewirtschaftung – Fokus: Forstwirtschaft*. <https://subs.emis.de/LNI/Proceedings/Proceedings194/167.pdf> [Letzter Zugriff am: 11.09.2022]
- KIESEL, J., SCHMALZ, B., AND FOHRER, N. (2009): SEPAL – a simple GIS-based tool to estimate sediment pathways in lowland catchments, *Adv. Geosci.*, 21, 25–32. <https://doi.org/10.5194/adgeo-21-25-2009>.

- KREIENKAMP, F.; SPEKAT, A.; ENKE, W. (2012): Durchführung einer Untersuchung zu den Folgen des Klimawandels in Sachsen-Anhalt. Teilbericht Los 1.1 und 1.2: Klima und Extreme. Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH im Auftrage des Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt unter fachlicher Begleitung des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Halle (Saale).
- KROPP, J.; ROITHMEIER, O.; HATTERMANN, F.; RACHIMOW, C.; LÜTTGER, A.; WECHSUNG, F.; LASCH, P.; CHRISTIANSEN, E.S.; REYER, C.; SUCKOW, F.; GUTSCH, M.; HOLSTEN, A.; KARTSCHALL, T.; WODINSKI, M.; HAUF, Y.; CONRADT, T.; ÖSTERLE, H.; WALTHER, C.; LISSNER, T.; LUX, N.; TEKKE, V.; RITCHIE, S.; KOSSAK, J.; KLAUS, M.; COSTA, L.; VETTER, T.; KLOSE, M. (2009): Klimawandel in Sachsen-Anhalt - Verletzlichkeiten gegenüber den Folgen des Klimawandels. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung.
- LAU – Landesamt für Umwelt (Hrsg.) (2017): Beobachteter Klimawandel in Sachsen-Anhalt; Herausgeber: Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie des Landes Sachsen-Anhalt (MULE), Berichtheft, Halle.
- LAU – Landesamt für Umwelt (Hrsg.) (2017): Zum Welttag gegen Dürre am 17. Juni 2022 - Sachsen-Anhalt weiter zu trocken. Pressebericht vom 16.06.2022, Halle, Nr.: 14/2022.
https://lau.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MLU/LAU/Wir_ueber_uns/Pressemitteilungen/2022/Pressemitteilung_Nr_14-2022_Sachsen-Anhalt_weiter_zu_trocken.pdf [Letzter Zugriff: 10.09.2022]
- LABO (2010): Klimawandel - Betroffenheit und Handlungsempfehlungen des Bodenschutzes. LABO-Positionspapier „Boden und Klimawandel“, Online Artikel vom 09.06.2010. https://www.labo-deutschland.de/documents/LABO_Positionspapier_Boden_und_Klimawandel_090610_aa8_bf5.pdf [Letzter Zugriff: 28.04.2022]
- LEE, J.-H.; HEO, J.-H. (2011): Evaluation of estimation methods for rainfall erosivity based on annual precipitation in Korea. *Journal of Hydrology*, 409 (1–2), 30-48.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.031>.
- LEE, M.-H. & LIN, H.-H. (2014): Evaluation of Annual Rainfall Erosivity Index Based on Daily, Monthly, and Annual Precipitation Data of Rainfall Station Network in Southern Taiwan. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 11(6), 214708. <https://doi.org/10.1155/2015/214708>.
- LEHMANN, J., COUMOU, D.; FRIELER, K. (2015): Increased record-breaking precipitation events under global warming. *Climatic Change* 132, 501–515. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1434-y>.
- LfU – Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (Hrsg.) (2022): Pressemitteilung: Zum Welttag gegen Dürre am 17. Juni 2022 - Sachsen-Anhalt weiter zu trocken. Nr.: 14/2022 Halle (Saale), Online-Artikel vom 16.06.2022. https://lau.sachsen-anhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/MLU/LAU/Wir_ueber_uns/Pressemitteilungen/2022/Pressemitteilung_Nr_14-2022_Sachsen-Anhalt_weiter_zu_trocken.pdf [Letzter Zugriff: 13.08.2022]
- LLG - Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau Sachsen-Anhalt (2017): ABAG-Kalkulator 2017, Wurbs, D. (Hrsg.). <https://llg.sachsen-anhalt.de/themen/agraroekologie-und-umwelt/landwirtschaftlicher-bodenschutz/abag-kalkulator-2017/> [Letzter Zugriff: 27.07.2022]
- LÓPEZ-VICENTE, M.; GUZMÁN, G. (2021): Measuring soil erosion and sediment connectivity at distinct scales. In *Precipitation* (Hrsg.: Jesús Rodrigo-Comino). Elsevier, 287-326.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822699-5.00011-2>.

- LOUREIRO, N.; AZEVEDO COUTINHO, M. (2001): A New Procedure to Estimate the RUSLE E130 Index, Based on Monthly Rainfall Data and Applied to the Algarve Region, Portugal. *Journal of Hydrology*. 250. 12-18. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00387-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00387-0).
- MANNING, R. (1895): On the flow of water in open channels and pipes. *Transactions, Institution of Civil Engineers of Ireland*, Vol. 20, Dublin, 1891; supplement, Vol. 24.
- MÄRKER, MICHAEL (2001): Regionale Erosionsmodellierung unter Verwendung des Konzepts der Erosion Response Units (ERU) am Beispiel zweier Flusseinzugsgebiete im südlichen Afrika. Doktor Thesis, Friedrich-Schiller-Universität Jena, Chemisch-Geowissenschaftliche Fakultät, Online unter: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:gbv:27-dbt-000655-2>.
- MAZIGH, N.; TALEB, A.; BILALI, A. E.; BALLAH, A. (2022): The Effect of Erosion Control Practices on the Vulnerability of Soil Degradation in Oued EL Malleh Catchment using the USLE Model Integrated into GIS, Morocco. *Trends in Sciences*, 19(2), 2059. <https://doi.org/10.48048/tis.2022.2059>.
- MCKAY, M.D.; BECKMAN, R.J.; CONOVER, W.J. (1979): A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. *Technometrics*. American Statistical Association. 21 (2): 239–245. <https://doi.org/10.2307/1268522>.
- MEIER, STEFAN (2010): Bodenerosionsmodellierung in verschiedenen Skalen: Modellvergleiche und Praxistauglichkeit am Beispiel von zwei Einzugsgebieten im Baselbieter Tafeljura (Kanton Basel-Landschaft/Schweiz). Doktor Thesis, Universität Basel, Philosophisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät.
- MEISSNER, R.; RUPP, H.; SEEGER, J.; OLLESCH, G.; GEE, G. W. (2010): A comparison of water flux measurements: passive wick-samplers versus drainage lysimeters. *European Journal of Soil Science*, Volume 61, Issue 4, pp. 609-621.
- MERRITT, W.S.; LETCHER, R.A.; JAKEMAN, A.J. (2003): A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling & Software*, 18, 8–9. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00078-1](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00078-1).
- MEUSBURGER, K., STEEL, A., PANAGOS, P., MONTANARELLA, L., ALEWELL, C. (2012): Spatial and temporal variability of rainfall erosivity factor for Switzerland. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(1), 167–177. <https://doi.org/10.5194/hess-16-167-2012>.
- MIEGEL, K. (2016): Verdunstung. In: Fohrer, N. and Bormann, H. and Miegel, K. and Casper, M. (Hrsg.), *Hydrologie*, Haupt, Bern: UTB M, 117.
- MÖLLER, M.; WURBS, D. (2016): DynaC-Schlussbericht, Halle (Saale): Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Fachgebiet Geofernerkundung und Kartographie. Verfügbar auf: https://www.dropbox.com/s/lwkjvdl8xqk11b/FKZ50EE1230_Schlussbericht.pdf?dl=0.
- MORGAN, R. P. C.; QUINTON, J. N.; SMITH, R. E.; GOVERS, G.; POESEN, J. W. A.; AUERSWALD, K.; CHISCI, G.; TORRI, D.; STYCZEN, M. E.; FOLLY, A. J. V. (1998): The European soil erosion model (EUROSEM): documentation and user guide, Silsoe College, Bedfordshire, UK.
- MULE - Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie des Landes Sachsen-Anhalt (Hrsg.) (2020): Klimawandel in Sachsen-Anhalt - Monitoringbericht 2020. Erstellt durch: Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (LAU) in Zusammenarbeit mit dem Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft und Energie des Landes Sachsen-Anhalt (MULE) und der fach- und ressortübergreifenden Arbeitsgruppe Klima des Landes Sachsen-Anhalt (AG Klima), Halle (Saale), Online Artikel: https://mwu.sachsenanhalt.de/fileadmin/Bibliothek/Politik_und_Verwaltung/

- MWU/Klimaschutz/00_Startseite_Klimawandel/210315_Monitoring_2020_bf_.pdf [Letzter Zugriff: 13.05.2022]
- MÜHR, B. (2021): Der Übergang zur neuen Bezugsperiode 1991 – 2020 und die klimatologischen Verhältnisse im Jahr 2020 in Deutschland. WGF Report. EDIM. Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe. Verfügbar auf: https://www.cedim.kit.edu/img/content/WGF_Report_Neue_Bezugsperiode_ZFGJahr2020.pdf.
- NAYLOR, D.; SADLER, N.; BHATTACHARJEE, A.; GRAHAM, E. B.; ANDERTON, C. R.; MCCLURE, R.; LIPTON, M.; HOFMOCKEL, K.S.; JANSSON, J. K. (2020): Soil microbiomes under climate change and implications for carbon cycling. *Annual Review of Environment and Resources*, 45(1), 29-59.
- NISSEN, K. M.; ULBRICH, U. (2017): Increasing frequencies and changing characteristics of heavy precipitation events threatening infrastructure in Europe under climate change, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 17, 1177–1190, <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1177-2017>.
- NKGCF - Nationales Komitee für Global Change Forschung (Hrsg.) (2010): Regionale Klimamodelle – Potenziale, Grenzen, Perspektiven, Kiel.
- OLLESCH, G.; KISTNER, I.; MEISSNER, R.; LINDENSCHMIDT, K.-E. (2006): Modelling of snowmelt erosion and sediment yield in a small low-mountain catchment in Germany. *Catena* 68, 161-176, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2006.04.005>.
- PATOINE, G., EISENHAUER, N., CESARZ, S. PHILLIPS, H. R. P.; XU, X.; ZHANG, L.; GUERRA, C. A. (2022): Drivers and trends of global soil microbial carbon over two decades. *Nature Communications* 13, 4195. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31833-z>.
- PAUL, G.; MEISSNER, R.; OLLESCH, G. (2014) Abschätzung von Auswirkungen des Klima-wandels auf den Landschaftswasserhaushalt im Fläming. *WasserWirtschaft* 10/2014: 23-28.
- PESCHKE, G., KUTÍLEK, M. (1982): Infiltration model in simulated hydrographs. In: *Journal of Hydrology*, Volume 56, Issue 3, S. 369 – 379. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(82\)90023-3](https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90023-3).
- PHILIP, J.R. (1969): Theory of Infiltration, In: V.T. Chow (Ed.): *Advances in Hydrosience*, Elsevier, 5, 215-296. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4831-9936-8.50010-6>.
- PFÜTZNER, B.; KLÖCKING, B.; SCHUMANN, A; HESSE, P. (2012): Durchführung einer Untersuchung zu den Folgen des Klimawandels in Sachsen-Anhalt. Teilbericht Los 1.3: Wasser. Büro für Angewandte Hydrologie im Auftrage des Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt unter fachlicher Begleitung des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Halle (Saale).
- RANDALLS, S. (2010): History of the 2°C climate target. *WIREs Climate Change*1, 598-605.
- REFSGAARD, J-C.; STORM, B. (1995): MIKE SHE, in: VP Singh (Ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resource Publications, Colorado, 809–846.
- RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; WEESIES, G.A.; PORTER, J.P. (1991) RUSLE: Revised Universal Soil Loss Equation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 46, 30-33.
- RIAHI ET AL. (2017): The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview, *Global Environmental Change* 42, 153-168. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.
- RICHARDS, L. A. (1931): Capillary conduction of liquids through porous mediums, *Physics* 1-5, 318-333. <https://doi.org/10.1063/1.1745010>.

- RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zu Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194, im Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach.
- Richtlinie (EU) 91/676/EWG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 12. Dezember 1991 zum Schutz der Gewässer vor Verunreinigung durch Nitrat aus landwirtschaftlichen Quellen, ABl 1991 Nr. L 375/1.
- Richtlinie (EU) 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik, ABl 2000 Nr. L 327/1.
- RINKE, K.; MIETZ, S. C.; SCHNEPPMÜLLER, M. (2021): Auswirkungen der Dürreverhältnisse 2018-2020 auf die Grundwasserstände in Mitteldeutschland. *Wasserwirtschaft*, 11, 49-56.
- RIPPEL, R.; SCHWAMM, D.; BRANDHUBER, R. (2002): Bodenwasserhaushalt unterfränkischer Ackerstandorte 1980-2000 – Bodenkultur und Pflanzenbau. Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau, Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau, Freising 3/02, 6. Jahrgang.
- SADEGHI, S. H., ZABIHI, M., VAFAKHAH, M., HAZBAVI, Z. (2017): Spatiotemporal mapping of rainfall erosivity index for different return periods in Iran. *Natural Hazards*, 87(1), 35–56.
<https://doi.org/10.1007/s11069-017-2752-3>.
- SANTOS, J.A.; FRAGA, H.; MALHEIRO, A.C.; MOUTINHO-PEREIRA, J.; DINIS, L.-T.; CORREIA, C.; MORIONDO, M.; LEOLINI, L.; DIBARI, C.; COSTAFREDA-AUMEDES, S.; KARTSCHALL, T.; MENZ, C.; MOLITOR, D.; JUNK, J.; BEYER, M.; SCHULTZ, H.R. (2020): A review of the potential climate change impacts and adaptation options for European viticulture. *Applied Sciences*, 10(9), 3092.
<https://doi.org/10.3390/app10093092>.
- SAUERBORN, P. (1994): Die Erosivität der Niederschläge in Deutschland — Ein Beitrag zur quantitativen Prognose der Bodenerosion durch Wasser in Mitteleuropa. *Bonner Bodenkundl. Abh.* 13: 189.
- SAUPE, G. (1985): Die Erosivität der Niederschläge im Süden der DDR - ein Beitrag zur quantitativen Prognose der Bodenerosion. – *Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung*, 29: 135-169.
- SCHEFFER, F.; SCHACHTSCHABEL, P. (Hrsg.) (2010): *Lehrbuch der Bodenkunde*, 16. Aufl., 550 S., Heidelberg.
- SCHMIDT, J. (1991): A Mathematical Model to Simulate Rainfall Erosion. In: Bork, H.R.; De Ploey, J.; Schick, A. P. (eds.): *Erosion, Transport and Deposition Processes – Theories and Models*. *Catena Supplement*, 19, p. 101-109.
- SCHMIDT, G.; HELBIG, H. (2010). Fallstudien zu Quantifizierung und Phasen der Bodenerosion. In H. Helbig, M. Möller, G. Schmidt (Hrsg.): *Bodenerosion durch Wasser in Sachsen-Anhalt* (Bd. 15, S. 33-55), BVB-Materialien, Halle (Saale): Bundesverband Boden.
- SCHMIDT, G. (2011): Effekte Des Kupferschieferbergbaus Für Den Wasserhaushalt Und Die Abflussverhältnisse Im Gebiet Der Mansfelder Seen. In: Ohlig, C. (Hrsg.), *Halle Und Die Saale: Verflechtungen Der 1200-Jährigen Stadt Mit Ihrem Umland Durch Wasserwirtschaft Und Bergbau Sowie Folgeindustrien*, Books on Demand GmbH, Norderstedt, 195–208.

- SCHMIDT, J.; V. WERNER, M.; MICHAEL, A. (1999): Application of the EROSION 3D Model to the Catsop Watershed, The Netherlands. In: De Roo, A. (Ed.): Modelling Soil Erosion by Water at the Catchment Scale. *Catena* 418, 449–456.
- SCHMIDT, S.; GRIMMEISEN, F.; RIES, F.; GOLDSCHIEDER, N.; SAUTER, M. (2018): Hochauflösendes Monitoring von Karst-Grundwasserressourcen beiderseits des Jordangrabens – Konzepte und Anwendungsbeispiele. *Grundwasser*, 23, 1, 59–72.
- SCHRUMPF, M., & TRUMBORE, S. (2011): Unser wichtigster Kohlenstoffspeicher: Wie der Boden als dünne Haut der Erde globale Stoffkreisläufe und das Klima beeinflusst. Online abrufbar unter: https://www.mpg.de/4705567/Kohlenstoffspeicher_Boden [Letzter Zugriff: 10.09.2022].
- SCHWERTMANN, U.; VOGL, W.; KAINZ, M. (1990): Bodenerosion durch Wasser – Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. 2. Auflage, Ulmer-Verlag, Stuttgart. <https://doi.org/10.1002/jpln.19901530111>.
- SEILS, M. (2000): Holozäne Sediment- und Bodenverlagerungen im östlichen Harzvorland – Wirkungen und Ursachen nutzungsbedingter Landschaftsveränderungen. Trift Verlag. Halle (Saale).
- SENEVIRATNE, S. I.; LEHNER, I.; GURTZ, J.; TEULING, A. J.; LANG, H.; MOSER, U.; GREBNER, D.; MENZEL, L.; SCHROFF, K.; VITVAR, T.; ZAPPA, M. (2012): Swiss prealpine Rietholzbach research catchment and lysimeter: 32 year time series and 2003 drought event, *Water Resources Research*, 48, W06526, doi:10.1029/2011WR011749.
- SHAMSUDDUHA, M; CHANDLER, R.E.; TAYLOR, R.G.; AHMED, K.M. (2009): Recent trends in groundwater levels in a highly seasonal hydrological system: the Ganges-Brahmaputra-Meghna Delta. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13 (12) 2373 - 2385.
- SPEKAT, A.; EEINFALT, T.; JACKISCH A. (2015): Klimaanalyse Sachsen-Anhalt 1951 bis 2014. Endbericht. LAU Berichtheft 1/2016. Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH und hydro & meteo GmbH & Co KG im Auftrag des Landesamtes für Umweltschutz Sachsen-Anhalt, Halle (Saale).
- STATISTISCHES LANDESAMT SACHSEN-ANHALT (2018): Daten & Fakten – Bodennutzung und Ernte. Online Artikel: https://www.stala.sachsen-anhalt.de/Internet/Home/Daten_und_Fakten/4/41/412/index.html [Letzter Zugriff: 23.04.2018].
- STORM, B., REFSGAARD, A. (1990). Distributed Physically-Based Modelling Of The Entire Land Phase of The Hydrological Cycle. In: Abbott, M.B., Refsgaard, J.C. (Eds.) *Distributed Hydrological Modelling*. Water Science and Technology Library, 22. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0257-2_4.
- STRICKLER, A. (1923): Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauigkeitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen. *Mitteilungen des Eidgenössischen Amtes für Wasserwirtschaft*, 16, Bern.
- TABARI, H. (2020): Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Sci Rep* 10, 13768. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2>.
- TALCHABHADEL, R., NAKAGAWA, H., KAWAIKE, K., & PRAJAPATI, R. (2020): Evaluating the rainfall erosivity (R-factor) from daily rainfall data: an application for assessing climate change impact on soil loss in Westrapti River basin, Nepal. *Modeling Earth Systems and Environment*. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00787-w>.

- THORNE, C.R.; ZEVENBERGEN, L.W.; GRISSINGER, E.H.; MURPHEY, J.B. (1985): Calculator programme and nomograph for on-site predictions of ephemeral gully erosion. Department of Civil Engineering, Colorado State University, Colorado, United States.
- THOMAS, M. (1980): Flächennutzungs- und Hangneigungskartierung zur Ermittlung der Erosionsdisposition im Einzugsgebiet der Bösen Sieben. Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften, 5, 1-14.
- THOMAS, M. (1983): Böden und Feststoffumlagerungen im Einzugsgebiet des Süßen Sees bei Eisleben. In: Petermanns Geographische Mitteilungen. 4, 257-259.
- TSEGAYE, K.; ADDIS, H. K.; HASSEN, E. E. (2019): Soil Erosion Impact Assessment using USLE/GIS Approaches to Identify High Erosion Risk Areas in the Lowland Agricultural Watershed of Blue Nile Basin, Ethiopia. International Annals of Science, 8(1), 120-129.
- UBA – Umweltbundesamt: Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung (Hrsg.) (2011): Themenblatt: Anpassung an den Klimawandel – Boden. Autoren: ahu AG Wasser-Boden-Geomatik; J. Mathews, Dessau-Roßlau. Online Artikel: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/364/publikationen/kompass_themenblatt_boden_net.pdf [Letzter Zugriff: 28.04.2022]
- UBA – Umweltbundesamt (Hsg.) (2021): Trockenheit in Deutschland – Fragen und Antworten. Dessau-Roßlau, Online-Artikel vom 09.07.2021: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/trockenheit-in-deutschland-fragen-antworten> [Letzter Zugriff: 28.04.2022]
- VAN LEEUWEN, C.; DESTRAK-IRVINE, A.; DUBERNET, M.; DUCHÊNE, E.; GOWDY, M.; MARGUERIT, E.; PIERI, P.; PARKER, A.; DE RESSÉGUIER, L.; OLLAT, N. (2019): An Update on the Impact of Climate Change in Viticulture and Potential Adaptations. Agronomy, 9, 514. <https://doi.org/10.3390/agronomy9090514>.
- VOGEL, K.; OZTURK, U.; RIEMER, A.; LAUDAN, J.; SIEG, T.; WENDI, D.; AGARWAL, A.; RÖZER, V.; KORUP, O. UND THIEKEN, A. (2017): Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 – Entstehung, Ablauf und Schäden eines „Jahrhundertereignisses“. Teil 2: Geomorphologische Prozesse und Schadensanalyse; HyWa 2017,3_2; S. 163-175.
- VON WERNER, M.; SCHMIDT, J. (1997): EROSION 2D/3D - Ein Computermodell zur Simulation der Bodenerosion durch Wasser - Band III: EROSION 3D Modellgrundlagen, Bedienungsanleitung. Hrsg.: Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft.
- WARNER, B. (2017): Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Raumforschung und Raumordnung | Spatial Research and Planning, 75(6) 583-585. <https://doi.org/10.1007/s13147-017-0494-z>.
- WILLIAMS, J. R. (1985): The physical components of the EPIC model. In: El-Swaify, S. A.; Moldenhauer, W. C.; Lo, A. (ed.): Soil Erosion and Conservation, Soil Conservation Society of America, 272-28.
- WISCHMEIER, W.H., SMITH, D.D. (1978): Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. Agriculture Handbook No. 537. USDA/Science and Education Administration, US. Govt. Printing Office, Washington, DC, pp. 58.

- WURBS, D., KOSCHITZKI, T. & M. MÖLLER (2007): ABAGflux – ein hierarchischer Modellansatz zur Maßnahmenplanung im Boden- und Gewässerschutz. Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 110, 721–722.
- WURBS, D.; STEININGER, M. (2011): Wirkungen der Klimaänderungen auf die Böden - Untersuchungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser. UBA-Texte 16/2011. Umweltbundesamt, Dessau.
- WURBS, D., STEININGER, M. (2015): Fortschreibung der Datengrundlagen und Bestimmung der potenziellen Erosionsgefährdung durch Wasser als Grundlage für die Einteilung der landwirtschaftlich genutzten Flächen nach dem Grad der Wassererosionsgefährdung. - Landesanstalt für Landwirtschaft und Gartenbau Sachsen-Anhalt.
- YUE, T.; XIE, Y.; YIN, S.; YU, B.; MIAO, C.; WANG, W. (2020): Effect of time resolution of rainfall measurements on the erosivity factor in the USLE in China, International Soil and Water Conservation Research, Volume 8, Issue 4, 373-382.
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.06.001>.
- ZACHARIAS, S., H.R. BOGENA, L. SAMANIEGO, M. MAUDER, R. FUß, T. PÜTZ, M. FREN-ZEL, M. SCHWANK, C. BAESSLER, K. BUTTERBACH-BAHL, O. BENS, E. BORG, A. BRAUER, P. DIETRICH, I. HAJNSEK, G. HELLE, R. KIESE, H. KUNSTMANN, S. KLOTZ, J.C. MUNCH, H. PAPEN, E. PRIESACK, H. P. SCHMID, R. STEINBRECHER, U. ROSENBAUM, G. TEUTSCH, H. VERECKEN (2011): A Network of Terrestrial Environmental Observatories in Germany. Vadose Zone J. 10. 955–973.
[doi:10.2136/vzj2010.0139](https://doi.org/10.2136/vzj2010.0139).
- ZANKE, U. (1982): Grundlagen der Sedimentbewegung. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-68660-3>.

Anhang

Angaben zur Person und zum Bildungsgang

Name: Janine Köhn (M.Eng.)
Geburtsdatum: 22.06.1989
Geburtsort: Berlin

Bildungsweg

- 05/2013 – 03/2015 **Masterstudium Wasserwirtschaft**
Hochschule Magdeburg-Stendal (Magdeburg)
- Abschlussarbeit: „Modellierung und Simulation der Grundwasserneubildung mit dem Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH am Beispiel des Elbe-Saale-Winkels“
 - Abschluss als Master of Engineering mit Auszeichnung (31.03.2015)
- 10/2009 – 04/2013 **Bachelorstudium Wasserwirtschaft**
Hochschule Magdeburg-Stendal (Magdeburg)
- Abschlussarbeit: „Untersuchung des Einflusses der Flächennutzungen im Elbe-Saale-Winkel auf die Grundwasserneubildung“
 - Abschluss als Bachelor of Engineering (15.05.2013)

Berufserfahrung

- seit 06/2020 **Sachbearbeiterin im Bereich Gewässerkunde**
Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Elbe
- Erfassen und Auswerten von Daten der Hydrometeorologie, Morphologie und Wasserbeschaffenheit von Gewässern
 - Erfassen und Auswertung von Daten der Hydrogeologie
 - Beantwortung und Beratung hydrologischer Fragestellung
- 02/2017 - 02/2020 **Wissenschaftliche Projektmitarbeiterin**
Hochschule Magdeburg-Stendal (Magdeburg)
- Projekt: „Bodenerosionsminderung in bergigen Regionen am Beispiel des Landkreises Mansfeld-Südharz (BebeR)“ (FKZ 03DAS097B)
 - Entwicklung und Anwendung eines GIS-gestützten Modells zur Simulation von Bodenerosion
 - Untersuchung projizierter Klimaszenarien
 - Organisation und Durchführung von Workshops
- 08/2015 - 01/2017 **Promotionsstipendium an der Hochschule Magdeburg-Stendal**

Lehrtätigkeit

10/2017 - 03/2020 **Lehrbeauftragter der Hochschule Magdeburg-Stendal**
HS Magdeburg Stendal, Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau
und Sicherheit (Magdeburg)
▪ B.Eng.: Angewandte Modellierung

Sonstiges

Seit 2017 **Betreuung von Bachelor- und Masterarbeiten**
Hochschule Magdeburg-Stendal (Magdeburg)

Liste der Publikationen

Köhn, J., Beylich, M., Meißner, R., Rupp, H., Reinstorf, F. (2022): Regressionsmodelle zur Abschätzung eines klimawandelbeeinflussten zukünftigen Regenerositätsfaktors auf Basis von Monatswerten. *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 66, (3), 122-136. DOI: 10.5675/HyWa_2022.3_2

Köhn, J., Meißner, R., Rupp, H., Reinstorf, F. (2021): Tools for Planning Local Mitigation of Water-Driven Soil Erosion Resulting from Impacts of Future Climate Change. *Clean – Soil, Air, Water* 2021, 2000385. <https://doi.org/10.1002/clen.202000385>

Köhn, J., Meißner, R., Rupp, H., Reinstorf, F. (2020): Effekte des Klimawandels auf die Sickerwasserrate – Ein Vergleich von Ergebnissen aus Klimamodellrechnungen mit langjährigen Messungen an Grünlandlysimetern. *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 64, (1), 23-36. DOI: 10.5675/HyWa_2020.1_2

Heilmann, A.; Pundt, H.; Scheinert, M.; Reinstorf, F.; Köhn, J. (2020): Minderung der Bodenerosion als Maßnahme der kommunalen Klimaanpassung: Einsatz von Modellen und Geoinformationsdiensten auf der Grundlage partizipativer Methoden. *Wernigeröder Automatisierungs- und Informatiktexte*. [dx.doi.org/10.25673/35860](https://doi.org/10.25673/35860), ISSN: 2702-2293.

Köhn, J., Meißner, R., Rupp, H., Reinstorf, F. (2019): Langzeituntersuchungen zum Sickerwasser- und Stickstoffaustrag in Abhängigkeit von Bodenart, Nutzung und Mineraldüngung. In: Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein (Ed.), *Lysimeter – ein geeignetes Instrument zur Quantifizierung von Wasser-, Nähr- und Schadstoffflüssen*. 18. Gumpensteiner Lysimetertagung, 21.-22.05.2019, Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 73-80.

Beylich, M., Köhn, J., Reinstorf, F. (2018): Untersuchungen zu den Auswirkungen aktueller Klimaprojektionen auf das Abfluss-Verhalten im Einzugsgebiet des Schäferbaches/Harz. *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 62, (3), 173-183; DOI: 10.5675/HyWa_2018,3_4

Köhn, J., Meißner, R., Rupp, H., Reinstorf, F. (2017): Sind die Wirkungen des Klimawandels auf den Boden anhand von Langzeit-Lysimeteruntersuchungen nachweisbar? In: Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein (Ed.), *Lysimeterforschung - Möglichkeiten und Grenzen*. 17. Gumpensteiner Lysimetertagung, 09.-10.05.2017, Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 57-64.

Köhn, J.; Reinstorf, F. (2016): Maßnahmen zur Minderung der Gewässerbettersion. In A. Heilmann, H. Pundt, M. Scheinert (Eds.): *Ergebnisse aus der Modellregion Mansfeld-Südharz und der Stadt Sangerhausen - Projektabschluss "Klimpass-Aktiv"* (S. 45-55), Shaker Verlag, Aachen, Germany.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich während der Anfertigung der Dissertationsarbeit unterstützt und motiviert haben. Ich danke der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg für die Unterstützung und Ermöglichung der Promotion in einem kooperativen Verfahren. Ich bedanke mich bei der Hochschule Magdeburg-Stendal, für die finanzielle Unterstützung meiner Forschung, die mir im Rahmen des Forschungsprojektes „Bodenerosionsminderung in bergigen Regionen am Beispiel des Landkreises Mansfeld-Südharz (BebeR)“ (FKZ 03DAS097B) ermöglicht wurde.

Meinem Betreuer Prof. Dr. Ralph Meißner möchte ich dafür danken, dass er mich zu allen Zeiten fachlich unterstützt und motiviert hat. Meinem Betreuer Prof. Dr. Frido Reinstorf danke ich für seine fachliche und organisatorische Unterstützung und für sein stets offenes Ohr für meine Probleme und Sorgen. Vielen Dank für Ihr Vertrauen und die Freiheiten, die Sie mir gegeben haben!

Mein Dank gilt auch Holger Rupp von der Lysimeterstation Falkenberg, der mich mit seiner stets positiven Art motiviert und in allen Publikationen fachlich begleitet hat. Ich danke auch Prof. Dr. Andrea Heilmann, Prof. Dr. Hardy Pundt und Martin Scheinert von der Hochschule Harz für die tolle Zusammenarbeit im Projekt BebeR. Meiner ehemaligen Kollegin und mittlerweile unersetzbaren Freundin Stefanie möchte ich für die unvergessliche Zeit an der Hochschule und vor allem dafür danken, dass sie bis heute ein offenes Ohr für mich hat.

Ich danke meiner Familie und meinen Freunden, die mir in den letzten Jahren eine wichtige Stütze waren. Insbesondere meiner Mama, Carolin und Daniel möchte ich dafür danken, dass sie mir immer mit Rat und Tat zur Seite standen. Danke, dass ihr mir stets klargemacht habt, dass die Promotion zwar kein einfacher aber ein lohnenswerter Weg ist! Mein besonderer Dank gilt meinem Partner Marcus, der, obwohl er selbst promoviert, mich all die Jahre immer wieder aufgebaut, motiviert und bestärkt hat und ohne dessen emotionale und fachliche Unterstützung ich diese Arbeit nicht geschafft hätte. Danke, dass du diesen Weg gemeinsam mit mir gegangen bist!

Eidesstattliche Erklärung/ Declaration under Oath

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, keine anderen als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

I declare under penalty of perjury that this thesis is my own work entirely and has been written without any help from other people. I used only the sources mentioned and included all the citations correctly both in word or content.

Datum / Date

Unterschrift des Antragstellers / *Signature of the applicant*