

Janine Köhn, Marcus Beylich, Ralph Meißner, Holger Rupp & Frido Reinstorf

Regressionsmodelle zur Abschätzung eines klimawandelbeeinflussten zukünftigen Regen-erosivitätsfaktors auf Basis von Monatswerten

Regression models for the evaluation of the rainfall factor with regard to climate change on the basis of monthly values

Der R-Faktor als Maß für die Erosivität von Niederschlagsereignissen findet Anwendung in der Quantifizierung von Bodenverlusten mithilfe der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (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 mit Hilfe 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.

Schlagwörter: R-Faktor, Erosivität, Regressionsmodell, Klimawandel, Bodenerosion

The R-factor as a measure of the erosivity of precipitation events is used to quantify soil losses using the Universal Soil Loss Equation (USLE). The calculation of the exact R-factor requires precipitation data with a high temporal resolution, which are usually not available widely. Due to this, regression models, such as the German Federal State related equation of DIN 19708:2017-08 – "Soil quality – Predicting soil erosion by water by means of ABAG" or spatially high-resolution radar rain data are used. In this study, two simple and practical, regional regression models for the Mansfeld-Südharz district for the calculation of R-factors are presented. Regression equation 1 calculates the R-factor at the county level similar to the state equation, but based on 6 monthly precipitation factors. The results show that the equation has a significantly higher accuracy than the DIN equation for Saxony-Anhalt. Regression equation 2 is used to determine the changes in the R-factor on the basis of monthly precipitation change factors. The equation is specifically developed for the consideration of climate change issues. Validation using change signals from a regional climate model ensemble of the RCP8.5 scenario shows high model quality with a mean deviation of the DIN-R factor in the Near and Far Future of about 1 % and a correlation coefficient of greater than 0.9.

Keywords: R-Factor, rainfall erosivity, regression model, climate change, soil erosion

1 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 Bodenabtragsgleichung, die "Universal Soil Loss Equation" (USLE), welche global Anwendung findet (FISTIKOGLU & HARMANCIOGLU, 2002; BAGARELLO et al., 2008; CAO et al., 2015; BELASRI & LAKHOUILLI, 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 Bodenabtragsgleichung (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., 2021) sowie auch in regionalen Projekten Anwendung, wie z. B. im

DynaC (MÖLLER & WURBS, 2016) oder BebeR (HEILMANN et al., 2021).

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 Regenerosität 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 Erkenntnis-

se 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 Regenerositätskarte 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 Regen-erosivitätskarten, 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?

2 Material und Methoden

Informationen zum Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet dieser Studie war der Landkreis Mansfeld-Südharz im östlichen Harzvorland, im Südwesten des Landes Sachsen-Anhalt (Abb. 1). 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.

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).

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. 1 & Tab. 1) sowie 3 weiter entfernte Stationen, die für eine Validierungsvariante hinzugezogen wurden (Tab. 5) (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. 1).

Die in dieser Studie verwendeten Klimamodelldaten basieren auf einem täglichen Klimaensemble aus Globalen Klimamodellen (GCM) und Regionalen Klimamodellen (RCM) aus der

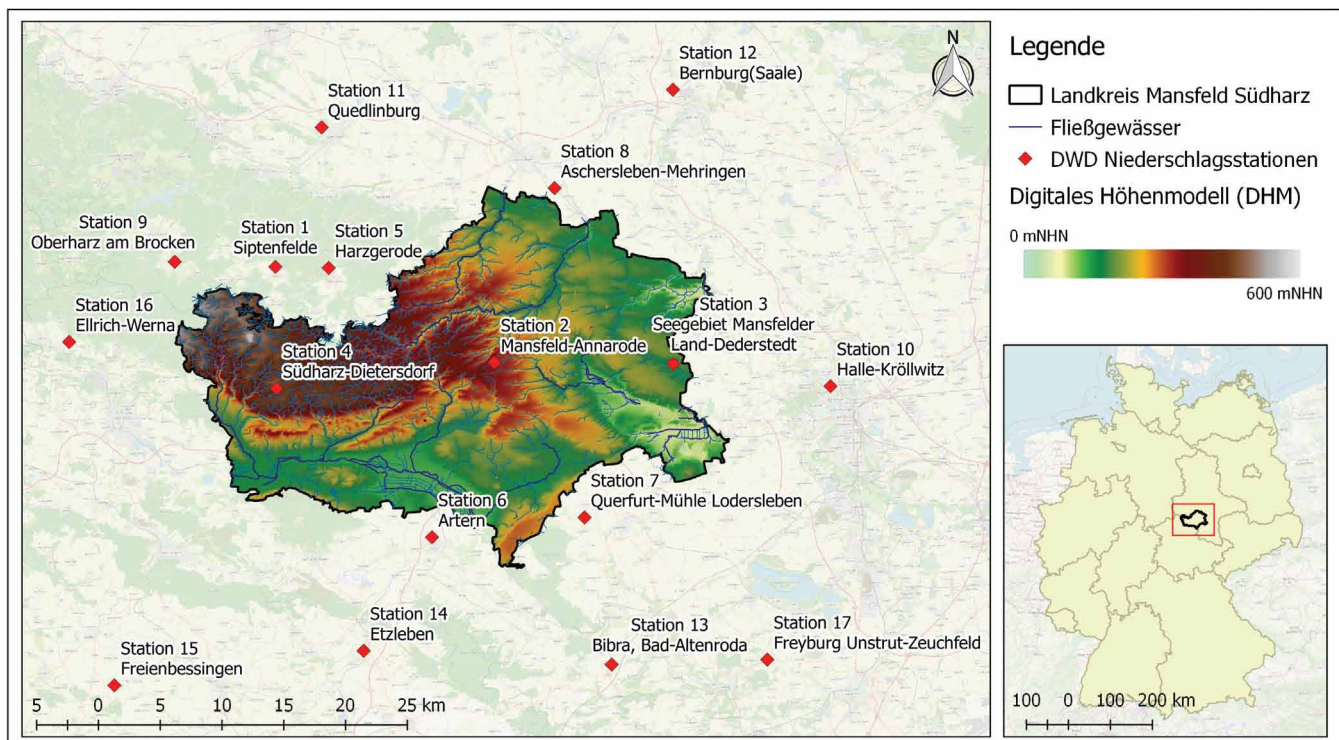


Abbildung 1

Untersuchungsgebiet Landkreis Mansfeld-Südharz mit Höhenmodell und 17 repräsentativen DWD-Niederschlagsstationen.
Study area district Mansfeld-Südharz with elevation model and 17 DWD representative precipitation stations.

Tabelle 1 Übersicht der 17 Niederschlagsstationen repräsentativ für den Landkreis Mansfeld-Südharz. <i>Overview of the 17 precipitation stations representative for the district Mansfeld-Südharz.</i>						
Nr.	Name der Station	Aufgabe im Regressionsmodell	Höhe	Zeitreihe	Jahresniederschlag 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

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. 2) (IPCC, 2014).

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-

Tabelle 2 Übersicht über die verwendeten global-regionalen Klimamodellketten (RCP8.5). <i>Overview of the global-regional climate model chains used in this study (RCP8.5).</i>			
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

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.

R-Faktor nach DIN 19708:2017-08

Zur Bestimmung des R-Faktors wird in der DIN 19708 (2017) die Berechnungsvorschrift nach SCHWERTMANN et al. (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:

$$R = 0,28 \cdot N_{So} - 30,89 \quad r = 0,91 \quad [1]$$

mit

N_{So} mittlerer Niederschlag im Sommerhalbjahr (1. Mai bis 31. Oktober), in mm.

Aufgestellte Regressionsmodelle

Um die Vorteile einer regionalen, landkreisbezogenen Anpassung im Vergleich zur grobräumigeren, 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. 1), ergibt sich wie folgt:

$$R = 0,249 \cdot N_{So} - 11,87 \quad r = 0,688 \quad [2]$$

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 2 aufgestellt. Da die Summen mehrerer Monate als Regressoren in das Modell eingingen, wurde eine multiple lineare Regression (MLR) durchgeführt. Im Prozess der

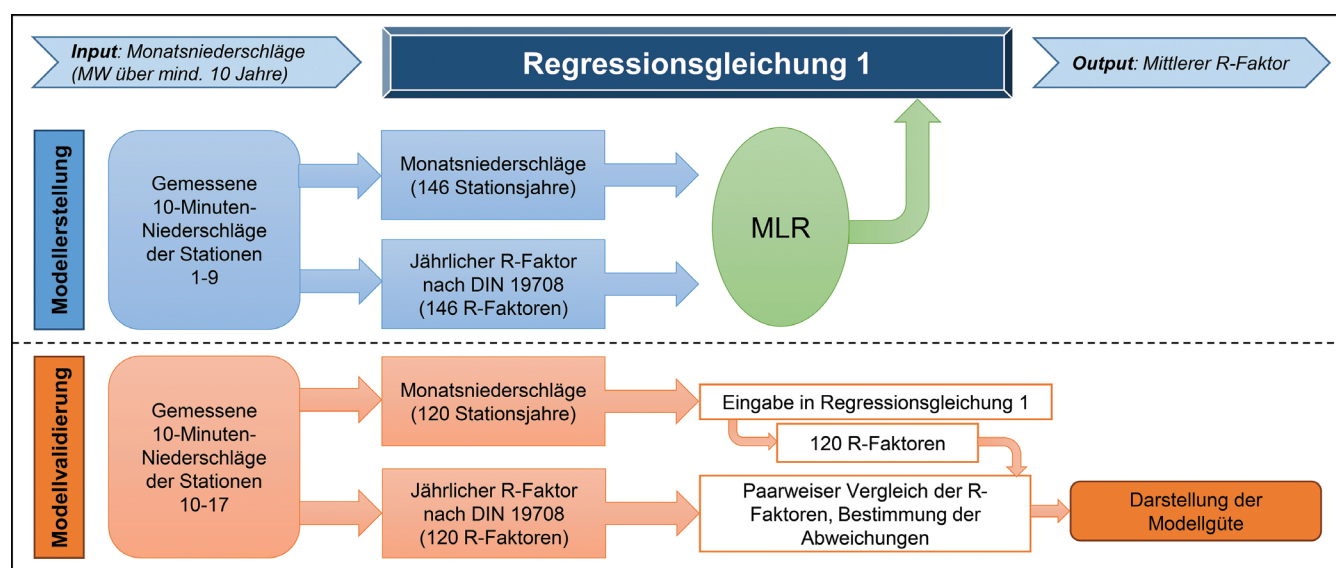


Abbildung 2

Schema der Modellerstellung und -validierung der Regressionsgleichung 1.
 Scheme of model building and validation of the regression 1.

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:

$$R = 0,19 \cdot N_{\text{Mai}} + 0,41 \cdot N_{\text{Jun}} + 0,26 \cdot N_{\text{Jul}} + 0,38 \cdot N_{\text{Aug}} + 0,21 \cdot N_{\text{Sep}} + 0,01 \cdot N_{\text{Rest}} - 8,56 \quad [3]$$

mit

$N_{\text{Mai...Sep}}$ 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 2 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.

Das Schema zur Erstellung und Validierung der Regressionsgleichung 2 (RG2) ist in Abbildung 3 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 entspricht. 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:

$$\begin{aligned} \Delta F(R) = & 1 + 0,474 \cdot (\Delta F(N_{\text{Mai}}) - 1) + 0,437 \cdot (\Delta F(N_{\text{Jun}}) - 1) + \\ & 0,616 \cdot (\Delta F(N_{\text{Jul}}) - 1) + 0,436 \cdot (\Delta F(N_{\text{Aug}}) - 1) + \\ & 0,351 \cdot (\Delta F(N_{\text{Sep}}) - 1) + 0,598 \cdot (\Delta F(N_{\text{Rest}}) - 1) \end{aligned} \quad [4]$$

mit

$\Delta F(R)$ Änderungsfaktor des R-Faktors
($R_{\text{Zukunft}} = R_{\text{Vergangenheit}} \cdot \Delta F(R)$)

$\Delta F(N_{\text{Mai...Sep}})$ Änderungsfaktor der mittleren monatlichen Niederschlagssumme für die Monate Mai bis September;

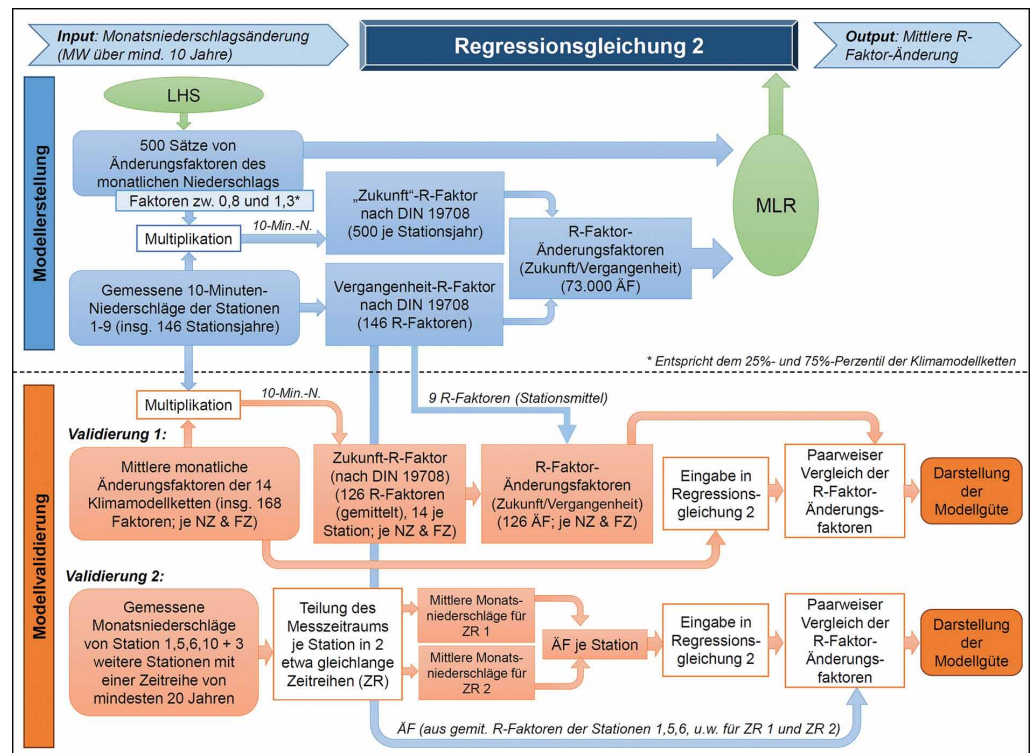


Abbildung 3

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

Scheme of model building and validation of the regression 2 (Abbreviations: LHS – Latin Hypercube Sampling; MLR – Multiple Linear Regression; N. – precipitation; ΔF – change factors; NZ – near future; FZ – far future; ZR – time series).

ÄF(N_{Rest}) Rest-Änderungsfaktor der mittleren monatlichen Niederschlagssumme für die Monate Januar bis April und Oktober bis Dezember.

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.

3 Ergebnisse

Niederschlagsmenge, -intensität und Erosivität der Niederschlagsmessreihen

Der mittlere R-Faktor der für den Landkreis Mansfeld-Südharz repräsentativen Niederschlagsstationen 1 bis 9 (Tab.1) beträgt $77,1 \text{ N}^* \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$ ($\text{N} = \text{Newton}$). Im Stationsmittel traten im Untersuchungszeitraum pro Jahr zwischen 5 und 38 (Mittelwert 18) erosive Niederschlagsereignisse mit einer maximalen 30-Minuten-Intensität von bis zu $106 \text{ mm}^* \text{h}^{-1}$ und einer Dauer der Ereignisse von bis zu 200 Minuten auf. Der R-Faktor variiert je nach Station von minimal $57,0 \text{ N}^* \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$ bis maximal $93,3 \text{ N}^* \text{h}^{-1} \text{a}^{-1}$. Wie in Abbildung 4 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. 4). 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 $35 \text{ mm}^* \text{h}^{-1}$. Im Gegensatz dazu lag diese im Februar bei ca. $5 \text{ mm}^* \text{h}^{-1}$. 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 ($12 \text{ N}^* \text{h}^{-1}$) als auch das höchste Maximum ($52 \text{ N}^* \text{h}^{-1}$) aufweist. Von Oktober bis April liegen die monatlichen Mediane der RE zwischen 1 und $3 \text{ N}^* \text{h}^{-1}$. Bezogen auf den R-Faktor tragen die Monate Mai bis September zu ca. 80 % zum jährlichen R-Faktor bei.

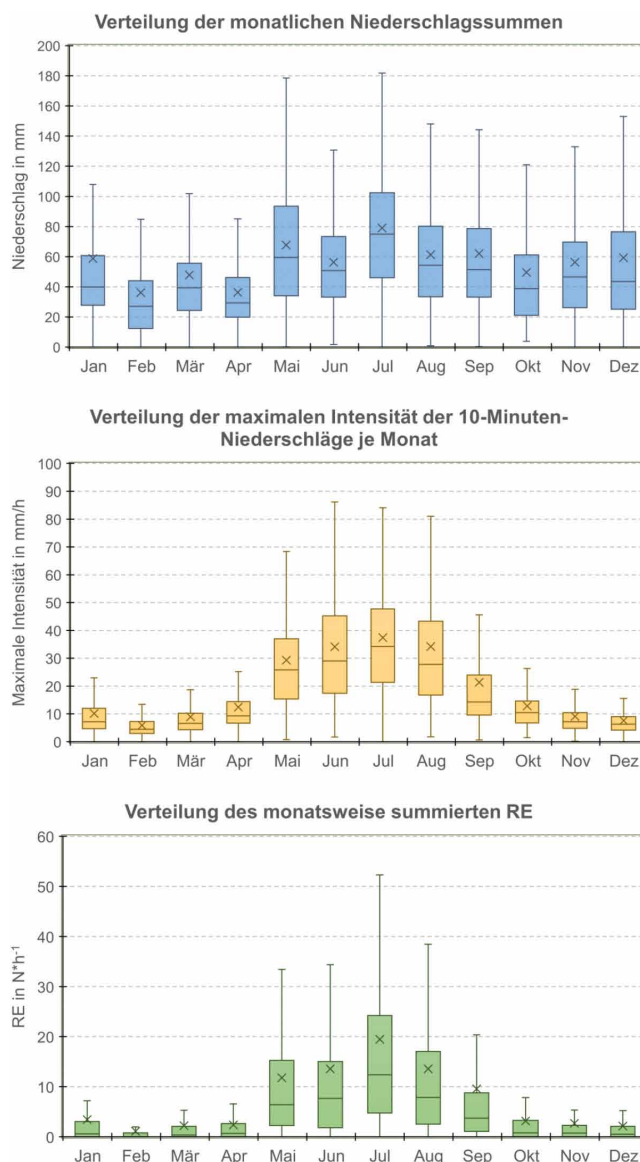


Abbildung 4

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 Einzelergebnisse).

Distribution of climatic parameters relevant to the R-factor in the district of Mansfeld-Südharz, stations 1 to 17 (without representation of outliers). Upper: monthly precipitation sums. Middle: maximum intensity of the 10-minute precipitation per month. Lower: monthly summed RE (R-factor of the single rainfall events).

Gütevergleich der ST- und MS-Gleichung mit Regressionsgleichung 1

Die farblichen Markierungen in Tabelle 3 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 3

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.

Sum of summer half-year precipitation (P_{So}) and mean percentage of P_{So} in the sum of annual precipitation P_{Jahr} of stations 1 to 17 as well as R-factors calculated according to the standard DIN 19708 (2017) in comparison to the R-factors according to the state regression equation for Saxony-Anhalt (ST-Gleichung), the equation for Mansfeld-Südharz (MS-Gleichung) and RG1 as well as the percentage deviations (Proz. Abw.) from the R-factor calculated according to DIN. Negative variances above 10 % are marked in blue, above 25 % in dark blue, positive variances above 10 % are marked in orange, above 25 % in dark orange. Below: quality parameters of modelling and validation.

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. 1) zu einer Unterschätzung des R-Faktors und bei überdurchschnittlichen Jahresniederschlagssummen (> 605 mm) zu einer Überschätzung des R-Faktors.

Im unteren Bereich der Tabelle 3 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.

Projizierte R-Faktoren der Nahen und Fernen Zukunft

Die R-Faktoren der NZ liegen je nach Station in einem Bereich zwischen 51 und $135 N \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$ und in der FZ zwischen 54 und $155 N \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$ (Abb. 5). Im Mittel über die Stationen 1 bis 9 ergibt sich ein R-Faktor von $90 N \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$ für die NZ und von $95 N \cdot h^{-1} \cdot a^{-1}$ für die FZ. Im Vergleich dazu liegt an den meisten Stationen der gegenwärtige R-Faktor (Abb. 5 – schwarze Linie) unterhalb des 25%-Quantils der Klimamodelle, im Mittel der Stationen bei

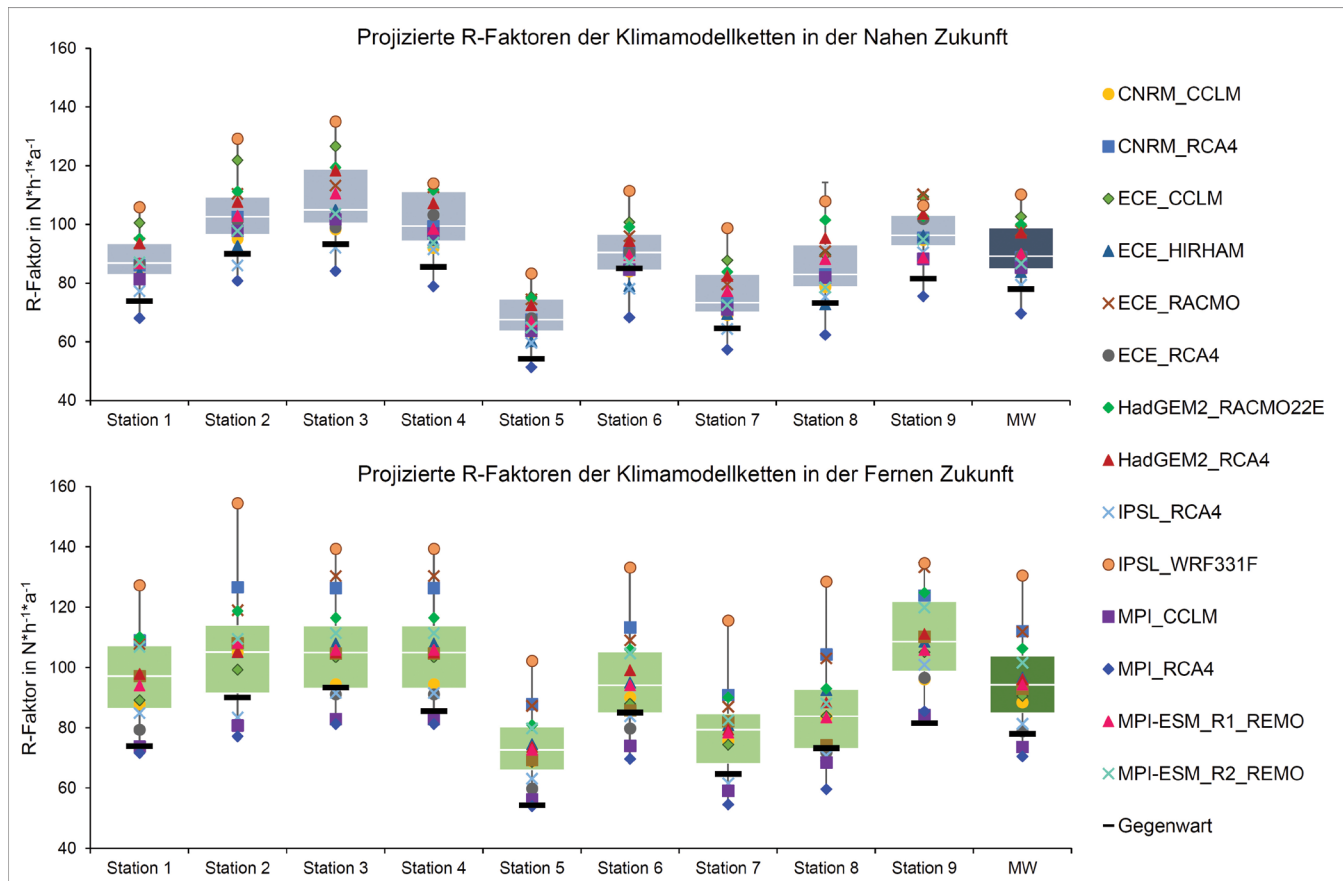


Abbildung 5

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).

Boxplot of the R-factors calculated according to the standard specification of stations 1 to 9 and station mean for the 14 climate models and the present. Upper: Near future (2021–2050). Lower: Far future (2071–2100).

77 $\text{N}^*\text{h}^{-1}\text{a}^{-1}$. 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).

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

In Tabelle 4 (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.

In Tabelle 5 (Validierung 2) sind für die beiden untersuchten Messzeiträume vergleichsweise hohe Variationen der R-Faktoren von bis zu 16 $\text{N}^*\text{h}^{-1}\text{a}^{-1}$ 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 $\text{N}^*\text{h}^{-1}\text{a}^{-1}$ 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

Tabelle 4
 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).
Results of the regression equations (MS-equation, RG1, RG2) in the Near Future (NZ: 2021 to 2050) and Far Future (FC: 2071 to 2100) as mean value over all climate models in comparison with the R-factor calculated according to DIN from projected precipitation data. Upper: Mean value of Stations 1–9 (coloured markings see Tab. 3). Lower: mean value of the stations; Quality parameters (MW = mean value, KK = correlation coefficient).

Station	Zeitraum	P _{Jahr} mm	R-Faktor (DIN) N*h ⁻¹ *a ⁻¹	MS-Gleichung N*h ⁻¹ *a ⁻¹	Proz. Abw. –	RG1 N*h ⁻¹ *a ⁻¹	Proz. Abw. –	RG2 N*h ⁻¹ *a ⁻¹	Proz. Abw. –
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	

Tabelle 5
 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).
R-factors and change factors of the R-factor calculated according to standard specification (DIN) and RG2 for stations 1, 5, 6, 10 and for 3 other distant stations from measured data (ZR = time period; N. = precipitation, ÄF = change factor).

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

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

4 Diskussion

Ziel dieser Untersuchung war es, verbesserte und einfach anzuwendende Methoden zur Abschätzung zukünftiger R-Faktoren zu entwickeln sowie zu validieren. Dazu wurden zunächst die R-Faktoren der Gegenwart analysiert (Tab. 1) sowie die jährliche Verteilung einiger für die Berechnung des R-Faktors relevante klimatische Kennwerte dargestellt (Abb. 4). 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 $17 \text{ N}^*\text{h}^{-1}\text{a}^{-1}$ 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 4 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 3 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 Regres-

sionsgleichungen 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 Regenerositätskarten (AUERSWALD et al., 2019a). Sowohl Regenerositätskarten 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 Regenerositätskarte 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 Regenerositätskarte weiterhin notwendig. Das Erstellen und die Bereitstellung einer neuen Regenerositätskarte aus Radarniederschlagsdaten ist dabei grundsätzlich aufwendiger als das Aufstellen einer neuen Regressionsgleichung, welches vermutlich größere zeitliche Abstände zwischen den Aktualisierungen der Regenerositätskarte 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 3) 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 4 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 Überein-

stimmung 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 vornherein 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. 5). 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 ($1 \times 1 \text{ km}$) und den Gitterabmessungen der Klima-

modelle ($10 \times 10 \text{ km}$) 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-Faktoränderungen 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.

5 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.

Conclusions

The aim of this study was to examine the commonly used state-specific equation for the state of Saxony-Anhalt (ST equation) from DIN 19708 (2017) with regard to its calculation accuracy for the Mansfeld-Südharz district. Furthermore, alternative, practical regression models for the calculation of current and future R-factors were investigated. The results of the study showed that both the ST equation and the equation for the Mansfeld-Südharz district (MS equation) could only reproduce the local R-factor with uncertainties. Basically, the regression equation 1 (RG1) based on the mean monthly precipitation sums of the months May to September was better suited for estimating current R-factors in the Mansfeld-Südharz district than the country equations of DIN 19708 (2017). For reliable estimation of a local R-factor, the use of regression equations with monthly precipitation totals as regressors are therefore recommended. Since RG1 only reproduced the R-factors outside the study period with low quality, it was assessed as inappropriate for the estimation of future climate change-influenced R-factors. The results of the investigated climate model ensemble indicated an underestimation of the R-factors.

Regression equation 2 (RG2), which was based on the monthly changes in precipitation from May to September, demonstrated very high model quality both for the climate model ensemble and for the measured data. Thus, RG2 showed that the calculation of R-factor changes from precipitation changes basically led to robust estimates of a future R-factor. For this reason, the use of a regression equation with relative monthly precipitation changes (instead of absolute precipitation totals) as regressors is recommended for the determination of R-factors influenced by climate change. However, only a positive correlation and only limited changes in the frequency and distribution of precipitation events could be represented by RG2.

The potential for the improvement of the regression equations is seen by the authors on the one hand in the choice of regressors, whereby further regressors, such as precipitation intensity, should be examined. Furthermore, the use of non-linear approaches can be considered. For RG2, the influence of climate-induced precipitation changes based on more complex changes in precipitation statistics should be examined in particular. In order to verify the robustness of both regression models, uncertainty considerations can be carried out and the individual and total uncertainty quantified.

Erklärung zur Data Policy

Die Grundlagendaten der Studie sind Niederschlagsdaten des DWD, die vom öffentlichen ftp-Server des DWD bezogen wurden. Die während der aktuellen Studie erzeugten und/oder analysierten Datensätze können auf Anfrage vom Verfasser erhalten werden. Ausgenommen sind die von Drittparteien übernom-

menen Klimamodelldaten, die einer Nichtweiterverbreitungsklausel unterliegen.

Anschrift der Verfasser

Janine Köhn (M.Eng.)
 Marcus Beylich (M.Eng.)
 Prof. Dr. Frido Reinstorf
 Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit
 Lehrgebiet Hydrologie und Geographische Informationssysteme
 Hochschule Magdeburg Stendal
 Breitscheidstraße 2
 D-39114 Magdeburg
 janine.koehn@h2.de
 marcus.beylich@h2.de
 frido.reinstorf@h2.de

Prof. Dr. Ralph Meißner
 Naturwissenschaftliche Fakultät III
 Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften
 Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg
 Julius-Kühn-Straße 23
 D-06112 Halle (Saale)
 ralph.meissner@ufz.de

Dr. Holger Rupp
 Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ
 Lysimeterstation
 Falkenberg 55
 D-39615 Altmärkische Wische
 holger.rupp@ufz.de

Literaturverzeichnis

- ANGULO-MARTÍNEZ, M. & S. BEGUERÍA (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. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.09.051.
- AUERSWALD, K., FISCHER, F.K., WINTERRATH, T. & R. BRANDHUBER (2019a): Rain erosivity map for Germany derived from contiguous radar rain data. *Hyrol. Earth Syst. SSci.* 23, 1819–1832. DOI: 10.5194/hess-23-1819-2019.
- AUERSWALD, K., FISCHER, F.K., WINTERRATH, T., ELHAUS, D., MAIER, H. & R. BRANDHUBER (2019b): Klimabedingte Veränderung der Regen-erosivität 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. S.
- 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. & P. PANAGOS (2017): Mapping monthly rainfall erosivity in Europe. *Science of The Total Environment*, 579, 1298–1315. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.123.
- BAGARELLO, V., DI PIAZZA, G.V., FERRO, V. & G. GIORDANO (2008): Predicting unit plot soil loss in Sicily, south Italy. *Hydrological Processes*, 22 (5), pp. 586–595. DOI: 10.1002/hyp.6621.
- 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., NAI-PAL, 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. & P. PANAGOS (2021): Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis, *Science of The Total Environment*, Volume 780, 146494. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.146494.
- BELASRI, A. & A. LAKHOULI (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.
- BRANDHUBER, R., AUERSWALD, K., LANG, R., MÜLLER, A. & M. TREISCH (2018): ABAG interaktiv, Version 2.0. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising. Verfügbar auf: https://www.lfl.bayern.de/appl/abag_interaktiv/ (letzter Zugriff am 21.02.2021).
- BRONSTERT, A., AGARWAL, A., BOESSENKOOL, B., FISCHER, M., HEIS-TERMANN, M., KÖHN-REICH, L., MORAN, T. & D. WENDI (2017): Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 – Entstehung, Ablauf und Schäden eines "Jahrhundertereignisses". Teil 1: Meteorologische und hydrologische Analyse – *Hydrologie & Wasserbewirtschaftung*, 61, (3), 150–162. DOI: 10.5675/HyWa_2017.3_1.
- BÜRGER, G., PFISTER, A. & A. BRONSTERT (2021): Zunehmende Starkregenintensitäten 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. & Y. LIANG (2015): Modeling interrill erosion on unpaved roads in the loess plateau of China *Land Degradation and Development*, 26 (8) (2015), pp. 825–832. DOI: 10.1002/ldr.2253.
- 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. DOI: 10.5194/hess-8-103-2004.
- DWD: Climate Data Center; verfügbar auf: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/ (Letzter Zugriff: 06.01.2022).
- ELHAUS, D., WINTERRATH, T., AUERSWALD, K., FISCHER, F., EBERTSEDER, F., MAIER, H. & R. BRANDHUBER (2019): Klimawandel und Bodenerosion – Neue Erkenntnisse zur Regenerosivität und Konsequenzen für die Abschätzung der Erosionsgefährdung. *Bodenschutz* 24: 136–142.
- FISCHER, F., HAUCK, J., BRANDHUBER, R., WEIGL, E., MAIER, H. & K. AUERSWALD (2018): Spatio-temporal variability of erosivity estimated from highly resolved and adjusted radar rain data. *Agricultural and Forest Meteorology* 223, 72–80. DOI: 10.1016/j.agrformet.2016.03.024.
- FISCHER, F., AUERSWALD, K., WINTERRATH, T. & R. BRANDHUBER (2020): Klimabedingte Zunahme der Regenerosivität seit 1960, *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 11/2020, S. 609–613.
- FISTIKOGLU, O. & N.B. HARMANCIOGLU (2002): Integration of GIS with USLE in Assessment of Soil Erosion. *Water Resources Management* 16, 447–467. DOI: 10.1023/A:1022282125760.
- HEILMANN, A., PUNDT, H., SCHEINERT, M., KÖHN, J. & F. REINSTORF (2021): Minderung der Bodenerosion als Maßnahme der kommunalen Klimaanpassung: Einsatz von Modellen und Geoinformationsdiensten auf der Grundlage partizipativer Methoden, *Wernigeröder Automatisierungs- und Informatik-Texte (WAIT)*, Hochschule Harz, Wernigerode. DOI: 10.25673/35860.
- HERNANDO, D. & M. ROMANA (2016): Estimate of the (R)USLE rainfall erosivity factor from monthly precipitation data in mainland Spain, *Journal of Iberian Geology*, 42, 113–124. DOI: 10.5209/REV_JIGE.2016.V42.N1.49120.
- HÖLSCHER, J., SCHNORR, C., PETRY, U., ANHALT, M., HABERLANDT, U., PLÖTNER, S., MEON, G., WÖRNER, V. & P. KREYE (2017): Final Report Phase 4 KlibiW, NLWKN, Norden, Deutschland.
- IPCC (2014): Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II 32 and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change 33, IPCC, Geneva, Switzerland.
- 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., HAENSLE, 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. & P. YIOU (2014): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg Environ Change* 14, 563–578. DOI: 10.1007/s10113-013-0499-2.
- JUNGHÄNEL, T., BISSOLLI, P., DÄBLER, J., FLECKENSTEIN, R., IMBERY, F., JANSSEN, W., KASPAR, F., LENGFELD, K., LEPPERT, T., RAUTHE, M., RAUTHE-SCHÖCH, A., ROCEK, M., WALAWENDER, E. & E. WEIGL (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; 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).
- KIESEL, J., SCHMALZ, B. & N. FOHRER (2009): SEPAL – a simple GIS-based tool to estimate sediment pathways in lowland catchments, *Adv. Geosci.*, 21, 25–32. DOI: 10.5194/adgeo-21-25-2009.
- LEE, J.-H. & J.-H. HEO (2011): Evaluation of estimation methods for rainfall erosivity based on annual precipitation in Korea. *Journal of Hydrology*, 409 (1–2), 30–48. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.07.031.
- LEE, M.-H. & H.-H. LIN (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. DOI: 10.1155/2015/214708.
- LOUREIRO, N. & M. AZEVEDO COUTINHO (2001): A New Procedure to Estimate the RUSLE EI30 Index, Based on Monthly Rainfall Data and Applied to the Algarve Region, Portugal. *Journal of Hydrology*. 250. 12–18. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00387-0.
- MCKAY, M.D., BECKMAN, R.J. & W.J. CONOVER (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. DOI: 10.2307/1268522.
- MEUSBURGER, K., STEEL, A., PANAGOS, P., MONTANARELLA, L. & C. ALEWELL (2012): Spatial and temporal variability of rainfall erosivity factor for Switzerland. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(1), 167–177. DOI: 10.5194/hess-16-167-2012.
- MÖLLER, M. & D. WURBS (2016): DynaC-Schlussbericht, Halle (Saale): Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Fachgebiet Geoförderung und Kartographie. Verfügbar auf: https://www.dropbox.com/s/lwkjvdl8xqk11b/FKZ50EE1230_Schlussbericht.pdf?dl=0.
- 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.
- SADEGHI, S.H., ZABIHI, M., VAFAKHAH, M. & Z. HAZBAVI (2017): Spatiotemporal mapping of rainfall erosivity index for different return periods in Iran. *Natural Hazards*, 87(1), 35–56. DOI: 10.1007/s11069-017-2752-3.

- 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 S.
- 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.
- SCHWERTMANN, U., VOGL, W. & M. KAINZ (1990): Bodenerosion durch Wasser – Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. 2. Aufl.: 64 S., 8 Abb., 18 Tab.; Ulmer-Verlag, Stuttgart.
- TALCHABHADEL, R., NAKAGAWA, H., KAWAIKE, K. & R. PRAJAPATI (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. DOI: 10.1007/s40808-020-00787-w.
- VOGEL, K., OZTURK, U., RIEMER, A., LAUDAN, J., SIEG, T., WENDI, D., AGARWAL, A., RÖZER, V., KORUP, O. & A. THIEKEN (2017): Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 – Entstehung, Ablauf und Schäden eines "Jahrhundertereignisses". Teil 2: Geomorphologische Prozesse und Schadensanalyse; Hydrologie & Wasserbewirtschaftung, 61, (3), 150-162. DOI: 10.5675/HyWa_2017,3_1.
- WISCHMEIER, W.H. & D.D. SMITH (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. 58pp.
- 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. & M. STEININGER (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. & W. WANG (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. DOI: 10.1016/j.iswcr.2020.06.001.