

Georisiken sollte die Klimawirkung „Massenbewegungen“ untersucht werden. Diese wurde jedoch aufgrund von fehlenden methodischen Ansätzen zur Berücksichtigung von Klimafaktoren bei der Entstehung von Massenbewegungen nicht weiter betrachtet.

5.2.1 R-Faktor – Regenerosivität

Autoren: Karl Auerswald², Franziska K. Fischer^{2,3}, Tanja Winterrath⁴

Hintergrund

Als Erosivität von Regen, d.h. ihre Fähigkeit, Bodenabtrag auszulösen, wird hier die Definition der Universal Soil Loss Equation USLE (Wischmeier & Smith 1978) bzw. ihres deutschen Äquivalents, der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung ABAG (Schwertmann et al. 1990; DIN-NAW 2017) zugrunde gelegt, und die Auswirkung des Klimawandels darauf untersucht. Die USLE/ABAG berechnet den Bodenabtrag A [$t\ ha^{-1}\ a^{-1}$] als Produkt von sechs Faktoren:

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

Dabei ist R die Regenerosivität (in [$N\ h^{-1}$] für Einzelregen bzw. in [$N\ h^{-1}\ a^{-1}$] für die Jahressumme), während die anderen Faktoren den Einfluss von Bodenerodierbarkeit (K) [$(t\ ha^{-1}) / (N\ h^{-1})$], Hanglänge (L), Hangneigung (S), Bewirtschaftung (C) und langfristigen Erosionsschutzmaßnahmen (P) abbilden. Wichtig hinsichtlich der Klimawirkung ist, dass – wegen der multiplikativen Verknüpfung der Faktoren dieser Gleichung – eine Erhöhung der Regenerosivität eine Zunahme des Bodenabtrags im gleichen Maß bewirkt. Nimmt also die Regenerosivität um den Faktor 2 zu, wird sich auch der Bodenabtrag verdoppeln, sofern nicht noch weitere Änderungen bei anderen Faktoren einsetzen.

Da zwischen verschiedenen Jahren enorme Unterschiede im R-Faktor der Einzeljahre auftreten können, wird in der planerischen Anwendung ein R-Faktor verwendet, der über einen langen Zeitraum (z. B. 20 Jahre) gemittelt wurde. Tritt jedoch ein Trend in den Daten auf, was durch den Klimawandel zu erwarten ist, dann gilt der Mittelwert nicht mehr über den gesamten in die Mittelung eingegangenen Zeitraum, sondern nur noch für das mittlere Jahr des Zeitraums. Dieses Jahr wird im Folgenden Zentraljahr genannt.

In dieser Studie werden alle anderen Faktoren der ABAG nicht betrachtet bzw. als konstant angenommen. Dies bedeutet, dass auch der relative Jahresgang der Regenerosivität, welcher normalerweise in die Bestimmung des C-Faktors eingeht, nicht in die Berechnung der Klimawirkung einbezogen wird. Es gibt deutliche Hinweise, dass auch der Jahresgang der Regenerosivität in Folge des Klimawandels sich ändert und mehr erosive Ereignisse im Winterhalbjahr fallen (AUERSWALD ET AL. 2019a, b). Dieser Jahresgang wirkt sich nicht direkt auf den Abtrag aus, er bestimmt die relative Erosionsgefährdung verschiedener Kulturen mit. Zusätzlich müsste aber auch der Einfluss des Klimawandels auf die phänologische Entwicklung der Kulturen einbezogen werden. Beides wird in dieser Studie nicht betrachtet.

Der R-Faktor selbst berechnet sich aus dem Produkt der kinetischen Energie eines Regens und der maximalen 30-minütigen Regenintensität. Die Gleichung zur Berechnung der kinetischen Energie kann der DIN 19708 (DIN-NAW 2017) Sie benötigt ebenso wie die Bestimmung der maximalen 30-minütigen Intensität zeitlich hoch aufgelöste Regenintensitäten. Diese stand für die hier ausgewerteten 16 Klimaprojektionen nicht zur Verfügung. Daher musste ein Verfahren entwickelt werden, um die

² Technische Universität München, Lehrstuhl für Grünlandlehre, Alte Akademie 12, 85354 Freising

³ Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Lange Point 6, 85354 Freising

⁴ Deutscher Wetterdienst Offenbach, Hydrometeorologie, Frankfurter Str. 135, 63067 Offenbach/M.

Regenerosivität auch aus Tagesniederschlägen berechnen zu können. Dabei waren weitere Schwierigkeiten zu beachten. Nach WISCHMEIER UND SMITH (1978) gilt ein Regen nur dann als erosiv, wenn er mindestens 12,7 mm erbringt oder wenn die maximale 30-minütige Intensität mindestens $12,7 \text{ mm h}^{-1}$ beträgt. Noch problematischer ist allerdings, dass ein erosiver Regen nicht durch den Tageswechsel, sondern durch Regenspauzen begrenzt ist, die mindestens sechs Stunden dauern. Ein Tag kann daher bis zu drei Regenereignisse haben, von denen einer oder mehrere erosiv sein können, sodass der erosive Niederschlag kleiner als der Tagesniederschlag sein kann. Selbst ein Tagesniederschlag von 27 mm d^{-1} muss nicht die Kriterien eines erosiven Regens erfüllen, wenn er sich aus drei 9-mm-Regen zusammensetzt, deren maximale 30-minütige Intensitäten jeweils geringer als $12,7 \text{ mm h}^{-1}$ sind. Ein erosiver Regen kann sich aber auch über mehrere Tage erstrecken und daher mehr als den Tagesniederschlag umfassen, so dass auch ein Tagesniederschlag von 1 mm d^{-1} bereits Teil eines erosiven Niederschlags sein kann. All dies ist aus Klimaprojektionen mit Tageswerten nicht ablesbar.

In der Vergangenheit wurde in Deutschland bzw. in Bayern das langjährige Mittel des standortsspezifischen R-Faktors aus einer Regression zwischen dem langjährig mittleren Sommerniederschlag und dem langjährig mittleren R-Faktor ausgewählter meteorologischer Stationen geschätzt. Diese Regression gilt nur unter den Rahmenbedingungen, unter denen sie erstellt wurde. Ein verändertes Klima kann damit nicht abgebildet werden, weil beispielsweise eine Zunahme von (erosiven) Winterniederschlägen oder auch eine Zunahme erosiver Regen im Sommer nicht abgebildet werden, denn durch beide Änderungen muss sich die Summe der Sommerniederschläge nicht ändern. Daher war es notwendig, ein neues, auch unter sich ändernden Klimabedingungen anwendbares Verfahren zu entwickeln.

Umsetzung

Die Regenerosivität wurde auf Basis von Tageswerten für ein Ensemble von 16 Klimaprojektionen für die Periode 1971 bis 2050 mit Hilfe einer Transferfunktion berechnet. Die Projektionen sind in Tab. 6 zusammengestellt und wurden vom LfU zur Verfügung gestellt. Alle Projektionen basieren auf dem RCP8.5-Szenario. Seit Fertigstellung dieser Analyse hat der DWD neue Erkenntnisse zur Qualität einzelner Projektionen sowie ihrer Verwendung in Projektionsensembles publiziert. Diese könnten die Belastbarkeit der Ergebnisse in quantitativer Hinsicht etwas einschränken (siehe Kap. 3.1). Da jedoch die Trends bei den Projektionen mit hoher Qualität und denen mit eingeschränkter Qualität gleich waren, ist der Einfluss auf die Regenerosivität offenbar gering. Da wegen der enormen Variabilität der Erosivität zwischen einzelnen Jahren mindestens 20 Jahre, besser 50 Jahre gemittelt werden sollten (Wischmeier & Smith 1978; Auerswald et al. 2019a), wurde der Verwendung aller Projektionen der Vorzug gegeben, um so den Einfluss zufälliger Extremereignisse auf die Raum- und Zeitmuster klein zu halten. Zudem wurden aber alle Aussagen hinsichtlich der Höhe des R-Faktors, seiner räumlichen Variation und seiner zeitlichen Änderung über 60 Jahre anhand eines großen Datensatzes aus Niederschlagsmessungen abgeleiteter R-Faktoren überprüft. Dies waren zum einen aus Radarmessungen für jeden Quadratkilometer in Deutschland (452503 Pixel) bestimmte Jahres-R-Faktoren der Jahre 2001 bis 2018 (in der Summe über 8 Millionen Jahres-R-Faktoren). Zum anderen waren dies aus Ombrometermessungen bestimmte R-Faktoren. Dabei wurden mindestens 50 Stationen pro Jahresmittelwert verwendet. Insgesamt standen 5515 Stationsjahre zur Verfügung.

Tab. 6: Ensemble der Klimaprojektionen, für die der R-Faktor für die Periode 1971 bis 2050 berechnet wurde. Alle Projektionen basieren auf dem RCP8.5-Szenario. Die Koordinaten der oberen Gruppe von Projektionen beruht auf dem EUR-11-Gitter, die mittlere Gruppe aus 2 Projektionen verwendet das Remo-Gitter und die letzte Projektion verwendet das Aladin-Gitter. Abkürzungen siehe Hübener et al. (2017)

General Circulation Model	Member	Institute	Regional Climate Model	Version
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	r1i1p1	CLMcom	CCLM4-8-17	DT-KLIREF2014
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	r1i1p1	SMHI	RCA4	DT-KLIREF2014
ICHEC-EC-EARTH	r12i1p1	CLMcom	CCLM4-8-17	DT-KLIREF2014
ICHEC-EC-EARTH	r12i1p1	SMHI	RCA4	DT-KLIREF2014
ICHEC-EC-EARTH	r1i1p1	KNMI	RACMO22E	DT-KLIREF2014
ICHEC-EC-EARTH	r3i1p1	DMI	HIRHAM5	DT-KLIREF2014
IPSL-IPSL-CM5A-MR	r1i1p1	IPSL-INNERIS	WRF331F	DT-KLIREF2014
IPSL-IPSL-CM5A-MR	r1i1p1	SMHI	RCA4	DT-KLIREF2014
MOHC-HadGEM2-ES	r1i1p1	CLMcom	CCLM4-8-17	DT-KLIREF2014
MOHC-HadGEM2-ES	r1i1p1	KNMI	RACMO22E	DT-KLIREF2014
MOHC-HadGEM2-ES	r1i1p1	SMHI	RCA4	DT-KLIREF2014
MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	CLMcom	CCLM4-8-17	DT-KLIREF2014
MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	SMHI	RCA4	DT-KLIREF2014
MPI-M-MPI-ESM-LR	r1i1p1	MPI-CSC	REMO2009	DT-KLIREF2014
MPI-M-MPI-ESM-LR	r2i1p1	MPI-CSC	REMO2009	DT-KLIREF2014
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	r1i1p1	CNRM	ALADIN53	DT-KLIREF2014

Als Datenbasis für eine Transferfunktion zur Berechnung der Einzelregenerosivität aus Daten der Klimaprojektionen standen R-Faktoren von mehr als 600000 erosiven Regen aus Fischer et al. (2016) zur Verfügung. Diese Einzelregenerosivitäten waren aus Radarniederschlagsmessungen (Winterrath 2016; Winterrath et al. 2017) mit einer räumlichen Auflösung von 1 km² und einer zeitlichen Auflösung von 5 min abgeleitet worden. Die Gleichung des R-Faktors der ABAG gilt für zeitlich hochauflösende Niederschlagsmessungen mit Ombrometern, die in Deutschland eine Öffnung von 200 cm² aufweisen. Durch die Messmethode der Radarniederschlagsmessung einschließlich aller Nachbereitungsschritte werden Intensitätsspitzen weniger gut aufgelöst als bei Ombrometern. Gerade die Intensitätsspitzen sind aber für die Berechnung des R-Faktors ausschlaggebend. Diese „Glättung“ durch die Radarmessung, muss durch Skalierungsfaktoren ausgeglichen werden, die von der Messmethode, der räumlichen und der zeitlichen Auflösung abhängen. Für die verwendeten 5-min-Radolan-Daten beträgt der kombinierte Skalierungsfaktor im Vergleich zu zeitlich hochauflösenden Ombrometermessungen 1,554 (Fischer et al. 2018). Er setzt sich zusammen ($1,554 = (0,35 + 1,13) \times 1,05$) aus dem Skalierungsfaktor für die Radarmessung (0,35), dem für die räumliche Auflösung von 1 km² (1,13) und dem

für die zeitliche Auflösung von 5 min (1,05). Dieser kombinierte Skalierungsfaktor wurde für die 600.000 erosiven Regen zur Entwicklung der Transferfunktion verwendet. Die Erosionsschäden dieser Regen waren für mehr als 8000 Felder an Hand von Luftbildern überprüft worden, um u.a. die Verwendbarkeit von Radarniederschlagsdaten für die Erosionsprognose zu prüfen (Fischer et al. 2017; Auerswald et al. 2018). Dabei konnten keine Konflikte identifiziert werden.

Die kinetische Energie korreliert eng mit der Niederschlagsmenge, während die mögliche Intensität stark vom Wassergehalt der Luft und damit von der Temperatur abhängt. Daher sollten sich der Tagesniederschlag und die Tagesmitteltemperatur als Proxy für die kinetische Energie und für die 30-minütige Maximalintensität eignen. Gleichzeitig sind beide Proxys sehr nahe am physikalisch korrekten Zusammenhang. Eine auf sie aufbauende Transferfunktion sollte daher auch bei einer Klimaänderung noch gültig bleiben. Dies gilt besonders, da die Spanne möglicher Tagestemperaturen und möglicher Tagesniederschläge im Jahresverlauf groß ist und diese Spanne durch eine Klimaänderung vergleichsweise wenig verschoben wird. Damit bleiben auch bei geändertem Klima die meisten Tage innerhalb der Spanne, die für die Entwicklung der Transferfunktion zur Verfügung steht. Deswegen wurde für den Entwicklungsdatensatz der R-Faktor einzelner Tage R_e [$N h^{-1}$] mit dem Tagesniederschlag P_d [$mm d^{-1}$] aus eben diesen Radarniederschlagsmessungen und mit der mittleren täglichen Lufttemperatur T_a [$^{\circ}C$] von benachbarten meteorologischen Stationen des Deutschen Wetterdienstes korreliert. Es wurde dabei nicht der erosive Niederschlag verwendet, sondern der größte Tagesniederschlag, wenn das erosive Ereignis über mehrere Tage ging. Regentage ohne erosives Ereignis gingen nur dann ein (mit $R = 0 N h^{-1}$), wenn mehr als 5 $mm d^{-1}$ Niederschlag fiel und die Tagestemperatur über $0^{\circ}C$ (kein Schnee) lag. Folgende Transfergleichung erwies sich am besten:

$$R_e = 1,57 \times 10^{-6} \times P_d^{2,63} \times T_a^{2,52}$$

Der RMSE (root mean squared error, Wurzel des mittleren quadrierten Fehlers) der mit der Transferfunktion abgeleiteten Erosivität von Einzelregen betrug im Entwicklungsdatensatz $6 N h^{-1}$, wobei Erosivitäten bis $1000 N h^{-1}$ vorkamen (Abb. 22).

Die Prognose dieser Gleichung wurde mit 15 133 R-Faktoren verglichen, welche aus Regenschreiberaufzeichnungen an 37 Stationen der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft der Jahre 2005 bis 2015 berechneten wurden. Dabei zeigte sich eine gute Übereinstimmung (Abb. 22). Der RMSE für den Validierungsdatensatz ($3 N h^{-1}$) war sogar noch etwas geringer als beim Entwicklungsdatensatz, weil beim Validierungsdatensatz die höchsten R_e , bei denen dann auch die Fehler größer sind, nur etwa $200 N h^{-1}$ betragen. Diese geringeren Werte beruhten darauf, dass trotz der großen Zahl an erosiven Ereignissen der Validierungsdatensatz viel kleiner war als der Entwicklungsdatensatz (nur ein Vierzigstel).

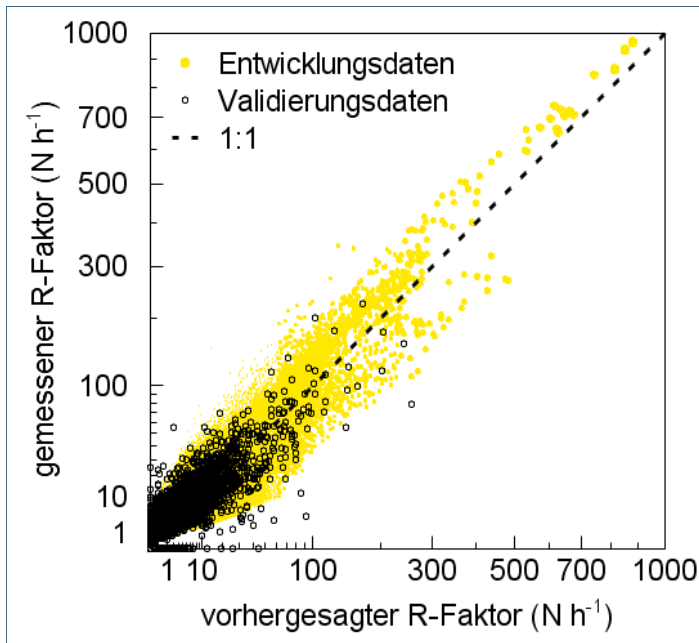


Abb. 22:
Vergleich der mit der Transferfunktion berechneten Regenerosivität mit der aus Radardaten in 5-minütiger Auflösung abgeleiteten Regenerosivität ($n = 605.738$, Entwicklungsdatensatz) und mit Regenerosivitäten aus Ombrometermessungen ($n = 15.133$, Validierungsdatensatz).

Ergebnisse für die Gegenwart und Zukunft

Die regionale Variation des aus Radar-Niederschlagsmessungen ermittelten R-Faktors für das Zentraljahr 2010,5 ist in der linken Tafel von Abb. 23 dargestellt. Der R-Faktor aus Klimaprojektionen für die Gegenwart (2001 bis 2020; Zentraljahr 2010,5) ist in der rechten Tafel von Abb. 23 dargestellt. Beide Karten gelten also für ein identisches Zentraljahr und sind daher direkt vergleichbar. Die räumlichen Muster der beiden Karten stimmen weitgehend überein, wenn man davon absieht, dass mit der Auflösung der Radarmessungen von 1 km^2 eine sehr viel größere Detailliertheit erreicht werden kann als mit der Auflösung der Klimaprojektionen. Auch der Wertebereich (siehe Legende) ist in beiden Fällen identisch trotz der völlig unterschiedlichen Weise, auf die die Daten erzeugt worden sind. Nur in Nordbayern sind die aus Klimaprojektionen berechneten R-Faktoren geringfügig geringer als die aus Radarmessungen abgeleiteten R-Faktoren. Durch einen geringfügigen zusätzlichen Skalierungsfaktor hätte sicher noch eine bessere Übereinstimmung erzielt werden können, wodurch aber die Unabhängigkeit der beiden Karten verloren gegangen wäre. Daher wurde darauf verzichtet. Dagegen sprach auch, dass selbst die aus Radarmessungen abgeleitete Karte trotz der außerordentlich hohen Zahl an eingegangenen Messungen mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist, die vor allem auf der mehr als drei Zehnerpotenzen umfassenden Variabilität der Einzelregenerosivitäten beruht. Selbst für die deutschlandweiten Mittelwerte der aus Niederschlagsmessungen berechneten R-Faktoren war daher die Variation zwischen verschiedenen Jahren groß (Abb. 24). Für das einzelne Pixel betrug das mittlere 95%-Vertrauensintervall vor der geostatistischen Glättung $34 \text{ N h}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Daraus ergibt sich eine statistische Unsicherheit der R-Karte, die etwa einer Klassenbreite entspricht. Das heißt, dass die in der linken Karte von Abb. 23 gezeigten Klassen auch um eine Klasse höher oder niedriger sein könnten. Gleiches gilt für die aus Klimaprojektionen abgeleitete rechte Karte. Trotz der Verwendung von 16 Klimaprojektionen ist der Mittelwert wegen der enormen Streuung zwischen den Jahren (nicht zwischen den Klimaprojektionen!) ebenfalls relativ unsicher (vgl. dazu auch Abb. 23 und die Erläuterungen dazu). Es ist wichtig festzuhalten, dass diese Unsicherheit nicht methodisch bedingt ist, sondern auf der natürlichen Variabilität beruht und nur durch sehr viel mehr ausgewertete Jahre verringert werden kann. Dennoch kann sehr zuverlässig geschlussfolgert werden, dass das gewählte Verfahren, beginnend mit den Klimaprojektionen bis hin zur Ableitung der R-Faktoren aus Tagesniederschlägen und Tagestemperaturen ein hinreichend genaues Verfahren darstellt, um die Auswirkung von Klima-

änderungen beurteilen zu können. Außerdem sind Projektionsläufe von Klimamodellen nicht darauf ausgerichtet, Absolutwerte korrekt wiederzugeben, sondern dienen zur Bestimmung von Trends.

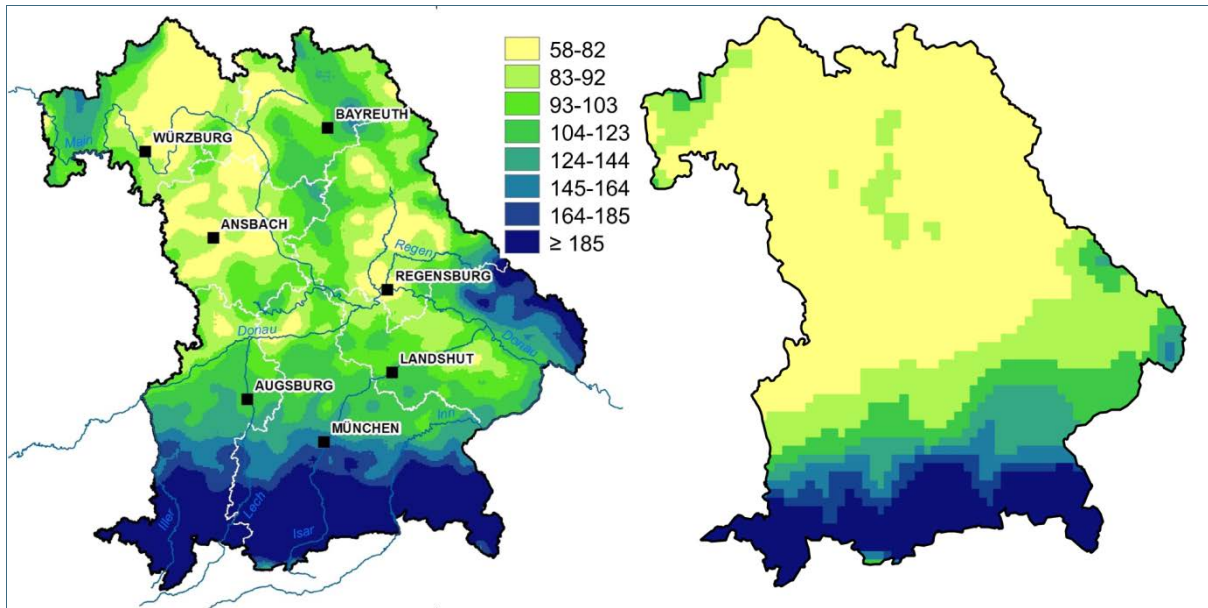


Abb. 23: Linke Karte: Aus Radardaten (2001 bis 2017; Zentraljahr 2009) ermittelter R-Faktor mit einer Auflösung von 1 km² (aus(Auerswald et al. 2019a) der nach (Auerswald et al. 2019b) für das Zentraljahr 2010,5 angepasst wurde (Anpassungsfaktor: 1,026). Rechte Karte: Aus 16 Klimaprojektionen berechnete Regenerosivität im Mittel der Jahre 2001 bis 2020 (Zentraljahr 2010,5). Die in drei verschiedenen Klimaprojektionsrastern vorliegenden Daten wurden geostatistisch auf ein gemeinsames Raster interpoliert und anschließend gemittelt.

Für die Darstellung der Änderung über die Zeit wurden die R-Faktoren relativ zum Mittelwert der Gegenwart (Zentraljahr 2010,5) angegeben, was die Änderungen deutlicher macht. Dabei zeigt sich, dass der R-Faktor deutlich über den Projektionszeitraum zunimmt (Abb. 24). Mit der Zeit wird die Zunahme immer stärker. Am Ende des Projektionszeitraums (2050) liegt die Regenerosivität 2,3-fach so hoch wie zu Beginn des Referenzzeitraums (1971). Damit werden sich, unter sonst gleichen Verhältnissen, auch die Bodenabträge gegenüber der Vergangenheit etwa verdoppeln.

Der gleiche Anstieg zeigt sich auch bei den aus Niederschlagsmessungen bestimmten R-Faktoren (schwarze Punkte in Abb. 24). Gegenüber 1950 bis 1970, dem Zeitraum aus dem die meisten von ROGLER UND SCHWERTMANN (1981) verwendeten Daten der bis 2018 eingesetzten R-Faktorenkarte von Bayern stammen, hat sich der R-Faktor etwa verdoppelt. Bemerkenswerterweise beschreibt die Regression der aus Klimadaten bestimmten R-Faktoren (braune Linie in Abb. 24), selbst wenn man sie über 30 Jahre in die Vergangenheit extrapoliert, auch die aus Messungen abgeleiteten R-Faktoren vor 1970. Dies zeigt zum einen, dass die Regression robust ist, und es zeigt noch stärker als der Vergleich der beiden Karten in Abb. 23, dass die Kombination der Klimaprojektionen mit der hier verwendeten Transferfunktion zu quantitativ plausiblen Ergebnissen führt.

Die einzelnen Jahreswerte der Regenerosivität einzelner Projektionen streuen relativ stark (Abb. 24). Dies ist aber keine Unsicherheit der Projektion, sondern spiegelt die natürliche Variabilität zwischen Jahren wieder, die sich auch in Messdaten findet. So variieren die Messwerte (schwarze Punkte in Abb. 24) praktisch ähnlich stark, obwohl sie die Mittelwerte aus mindestens 50 Stationsjahren darstellen. Soweit sie aus Radarmessungen ermittelt sind, wurden sogar 452503 Pixeljahre pro Punkt gemittelt. Diese große natürliche Variabilität zwischen den Jahren, kann leicht zu Fehlbeurteilungen führen,

weil immer wieder „normale“ Jahre vorkommen, die dann von Extremjahren gefolgt werden. Solche Extremjahre sollten nicht als „Ausreißer“ missinterpretiert werden.

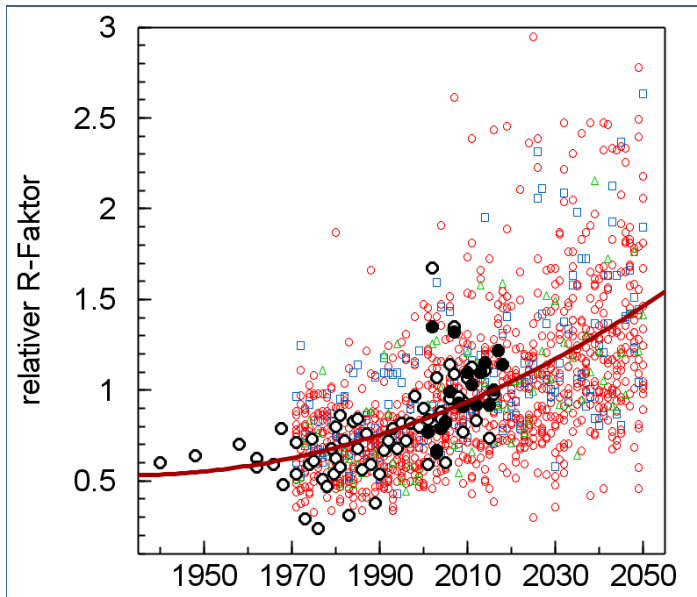


Abb. 24: Veränderung des relativen R-Faktors zwischen 1971 und 2050 für 13 Projektionen basierend auf dem EUR-11-Gitter (rote Kreise). Zum Vergleich sind die Projektionen, die das Remo-Gitter (blaue Quadrate, 2 Projektionen) und die Projektion, die das Aladin-Gitter verwenden (grüne Dreiecke) mit eingezeichnet. Die braune Linie ist eine quadratische Regression. Die schwarzen Kreise sind aus Niederschlagsmessungen bestimmt (aus AUERSWALD ET AL. 2019b). Jedem Punkt liegen bei Ombrometermessungen (weiß gefüllte Kreise) mindestens 50 Stationsmessjahre (insgesamt 5515 Stationsjahre) und bei Radarmessungen (schwarze gefüllte Kreise) 452503 Pixeljahre (insgesamt 8,2 Millionen Pixeljahre) zugrunde. Diese Werte gingen nicht mit in die Regression (braune Linie) ein.

Die Regression in Abb. 24 zeigt, dass die Erosivität gegenwärtig um etwa 10 % in sechs Jahren ansteigt. Um dies zu kompensieren, müssten die Felder alle sechs Jahre um 20 % verkleinert werden, was kaum umsetzbar erscheint. Auch durch Bewirtschaftungsmaßnahmen ist eine Kompensation des klimabedingten Anstiegs nur mit erheblichen Anstrengungen zu erzielen, da nicht eine einzelne Kultur betroffen ist, sondern auf allen Flächen, ganz unabhängig von der Kultur, sei es Wald, Wein oder Weizen, der Bodenabtrag um den gleichen Faktor zunimmt und die Bewirtschaftung erosionsmindernder gestaltet werden müsste. Bei den Problemkulturen, wie dem beispielhaft genannten Wein, geht dies meist noch deutlich leichter als beim Weizen oder gar beim Wald, denn je besser ein Boden bereits bedeckt ist, umso schwieriger wird es, zusätzliche Bedeckung zu schaffen, und umso weniger kann man mit zusätzlicher Bedeckung erreichen.

Das räumliche Muster der Regenerosivität ändert sich über den Projektionszeitraum nicht. Korreliert man nämlich die R-Faktoren der einzelnen Rasterzellen im Referenzzeitraum mit den R-Faktoren der nahen Zukunft, so ergibt sich über alle Projektionen eine bemerkenswert enge, lineare Korrelation (Abb. 25), die nur durch Extremjahre geschwächt wird. Diese Extremjahre führen aber nicht zu einem veränderten Raummuster, sondern sie treten nur zufällig im irgendwo im Projektionsgebiet auf. Die gleiche Erkenntnis ergibt sich auch aus R-Faktoren, die aus Niederschlagsmessungen bestimmt worden waren (Auerswald et al. 2019b). Auch da gab es zwischen den aus den 1960-er bis 1980-er Jahren bestimmten Mustern und den aktuellen Mustern keine über die Streuung hinausgehende Veränderung.

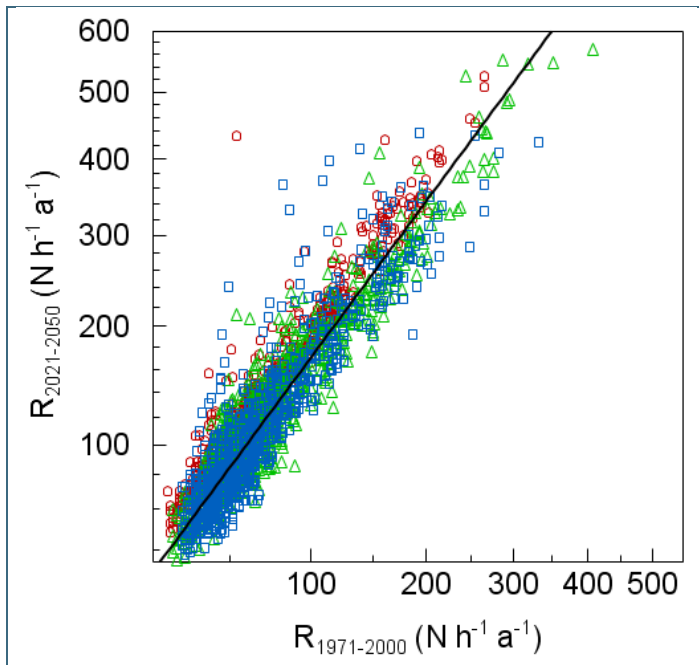


Abb. 25:
Veränderung der projizierten Regenerosivität zwischen dem Zeitraum 1971 bis 2000 und dem Zeitraum 2021 bis 2050; rote Kreise zeigen alle Rasterzellen des EUR-11-Gitters (jeweils Mittelwert aus 13 Projektionen), blaue Quadrate alle Rasterzellen des Remo-Gitters (jeweils Mittelwert aus 2 Projektionen) und grüne Dreiecke alle Rasterzellen des Aladin-Gitters (eine Projektion). Die Linie ist eine lineare Regression über alle Punkte ($y = 1,72 x$; $r^2 = 0,7827$).

Die Regenerosivität wird sich bis 2050 gegenüber dem Referenzzeitraum etwa verdoppeln. Gegenüber dem Zeitraum vor 1970 verdreifacht sie sich sogar (Abb. 25). Damit werden sich auch die Bodenabträge verdoppeln bzw. verdreifachen, sofern keine wesentlichen Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Es ist nicht zu erwarten, dass solche Gegenmaßnahmen freiwillig implementiert werden, da die Erfahrungen der Vergangenheit zeigen, dass Landwirte Bodenerosion in ihren Bewirtschaftungsentscheidungen nicht berücksichtigen (LABO 2017; Auerswald et al. 2018). Dies zeigt sich auch daran, dass die Landschaft durch Zunahme der Feldgrößen und Zunahme besonders erosionsfördernder Reihenkulturen (besonders Mais und Soja) in den vergangenen Jahrzehnten immer erosionsanfälliger bewirtschaftet wurde, obwohl gleichzeitig die Regenerosivität sich bereits verdoppelt hat gegenüber der Zeit vor 1970. Allerdings sind die Zunahmen der Regenerosivität schleichend, so dass sie im Grunde nicht wahrgenommen werden können. Es kommt daher den staatlichen Stellen eine besondere Verantwortung hinsichtlich Aufklärung, Entwicklung von erosionsmindernden Bewirtschaftungsstrategien und letztlich Anwendung des Ordnungsrechts zu.

Die Auswertung historischer Daten wie auch der Klimaprojektionen zeigte, dass die Zunahme der Regenerosivität kein plötzliches, in der Zukunft zu erwartendes Ereignis ist. Vielmehr hat die Zunahme bereits in der Vergangenheit begonnen. Allerdings wird sich unter dem angenommenen Klimaszenario die Geschwindigkeit dieser Zunahme noch weiter beschleunigen.

Kernaussage

- Eine Erhöhung der Regenerosivität bedingt eine Zunahme des Bodenabtrags im gleichen Maß.
- Die Regenerosivität wird auf Tagesbasis für ein Ensemble von 16 Klimaprojektionen für die Periode 1971 bis 2050 mit Hilfe einer Transferfunktion berechnet. Als Datenbasis für die Transferfunktion zur Berechnung der Einzelregenerosivität aus Daten der Klimaprojektionen standen R-Faktoren von mehr als 600 000 erosiven Regen (aus Radarniederschlagsmessungen) zur Verfügung.
- Das räumliche Muster der Regenerosivität ändert sich über den betrachteten Zeitraum nicht.
- Die Regenerosivität hat sich gegenüber den bis 2018 verwendeten Planungsgrundlagen aus der Zeit vor 1970 bereits verdoppelt (ca. 8 Mio. gemessene Jahresmittelwerte) und wird weiter stark ansteigen (16 Klimaprojektionen).
- Die aus Klimaprojektionen berechneten Werte, räumlichen Muster und Trends stimmen mit den aus Messungen abgeleiteten Werten, räumlichen Mustern und Trends überein.

5.3 Wald- und Forstwirtschaft

Wald- und Forstwirtschaft sind insbesondere aufgrund der langen Wachstums- beziehungsweise Produktionszeiten stark vom Klimawandel betroffen. Da Bäume selbst in intensiv bewirtschafteten Wäldern mindestens 80 Jahre alt werden, existiert ein nicht zu unterschätzendes Anpassungsproblem. Gleichzeitig trägt die Forstwirtschaft kaum zu den Ursachen des Klimawandels bei, sondern leistet durch die Speicherung von Kohlenstoff in Wäldern und Holzprodukten einen großen Beitrag zum Klimaschutz. Besonders dort, wo sich Wälder bereits heute an ihrer Wärme- oder Trockenheitsgrenze befinden, sind starke Auswirkungen zu erwarten. Dies betrifft vor allem die in Mitteleuropa weit verbreiteten Baumarten nordischer oder alpiner Herkunft, da sie anfällig für erhöhte Temperaturen und veränderte Niederschläge sind. Die Forstwirtschaft begegnet dem Klimawandel vor allem mit Maßnahmen des Waldumbaus, bei dem gefährdete Baumarten durch besser angepasste Arten ersetzt werden. Im Zuge des Waldumbaus können die Wälder an einen Temperaturanstieg bis zu 2 °C in den nächsten 100 Jahren angepasst werden. Ein höheres Ausmaß und Tempo des Klimawandels würde die Anpassungsfähigkeit der Wälder auch bei erheblichen Anstrengungen zum klimagerechten Waldumbau übersteigen (StMUV 2015).

Wälder sind multifunktionale Ökosysteme. Neben ihrem wirtschaftlichen Nutzen schützen sie vor Erosion, Lawinen, Immissionen und Lärm (Schutzfunktion), haben einen positiven Einfluss auf den Wasserhaushalt und das Lokalklima (Regulationsfunktion) und dienen der Bevölkerung als Rückzugs- und Erholungsort (Erholungsfunktion). Vor allem Mischwälder sind eines der artenreichsten Ökosysteme Mitteleuropas und haben damit eine zentrale Bedeutung für die Biodiversität und den Naturschutz (Buth et al. 2015).

Die Forstwirtschaft ist eng mit dem Klima und den Standortbedingungen verbunden. Dementsprechend tiefgreifend sind die Auswirkungen des Klimawandels auf das Handlungsfeld. Höhere Temperaturen bewirken zuerst eine verlängerte Vegetationszeit, was im Zusammenhang mit einem CO₂-Düngeeffekt einen potenziellen jährlichen Holzzuwachs bedeuten kann. Limitierend wirkt hier das Wasserangebot, was sich durch die erhöhte Evapotranspiration im Sommer verringern kann. Höhere Temperaturen in Verbindung mit Sommertrockenheit, wie sie auch für Bayern projiziert werden, erhöhen das Risiko von Hitze- und Trockenstressschäden. Letztere sollten mit der Klimawirkung „Trockenheit auf Waldflächen“ (Kap. 5.3.1) thematisiert werden. Zugleich steigt bei trocken-heißen Randbedingungen die Waldbrandgefahr, die mit der entsprechenden Klimawirkung untersucht werden sollte (Kap. 5.3.2).



**Pilotstudie
„Klimawirkungskarten Bayern“**

klima