

# Auswirkungen der Klimaänderung auf die Bodenerosion durch Wasser in Bayern bis 2050

Rippel, R., F. Stumpf

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz, Vöttinger Str. 38, 85354 Freising-Weißenstephan  
email: rudolf.rippel@LfL.bayern.de

**Zusammenfassung:** *Unter Zugrundelegung der für den Zeitraum 2021-2050 modellierten Klimadaten (Basis: globales Klimamodell ECHAM5, Emissionsszenario A1B, Regionalisierungsmodell WETTREG 2006) werden die Veränderungen der für die Ermittlung des potenziellen Bodenabtrags mit Hilfe der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG) relevanten klimaabhängigen Parameter Oberflächenabfluss- und Regenerositätsfaktor R sowie Bodenbedeckungs- und -bearbeitungsfaktor C bestimmt und mit den Ergebnissen nach ECHAM4 (Emissionsszenario B2, WETTREG 2004) verglichen. Gegenüber dieser Modellierung kommt es nach ECHAM5 in Bayern bis 2050 zu deutlich geringeren Veränderungen beim Bodenabtrag.*

Keywords: soil erosion, climate change, USLE, ECHAM4, ECHAM5

Schlagworte: Bodenerosion, Klimaänderung, ABAG, ECHAM4, ECHAM5

## 1 Einleitung

Modelle sollen einen Blick in die Zukunft ermöglichen. Klimaforscher sagen uns mit Hilfe von Modellen, mit welchem Klima wir nach heutigem Kenntnisstand in Zukunft rechnen müssen. Für die Prognose des langjährigen mittleren Bodenabtrags ist das Modell der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG) geeignet.

In Folgendem soll mit Hilfe dieser Modelle versucht werden, die Folgen des Klimawandels für das Erosionsgeschehen in Bayern abzuschätzen. Dabei bleiben Entwicklungen außer Betracht, die die Bodenerosion künftig fördern oder bremsen können, aber nicht direkt klimabedingt sind. Zu denken wäre hier an eine weitere Verbreitung des Maisanbaus und an größere erosionswirksame Hanglängen (erosionsfördernd) oder an eine zunehmende Anwendung der konservierenden Bodenbearbeitung (erosionsmindernd).

## 2 Material und Methoden

Der für eine Abschätzung der Bodenerosion notwendigen Konkretisierung der Niederschlagsdaten liegen 10 Modellläufe des Umweltbundesamtes (METEO-RESEARCH 2006) zugrunde, die für jeweils 400 Klimastationen in Bayern berechnet wurden. Diese Modellierung basiert auf dem globalen Klimamodell ECHAM5 (Emissionsszenario A1B) und dem regionalen Modell WETTREG. Das in bisherigen Szenarienmodellierungen in Bayern vorwiegend betrachtete Emissionsszenario B2 wurde im aktuellen Sachstandsbericht des IPCC (2007) nicht mehr berücksichtigt. Das aus IPCC (2007) verwendete „höhere Emissionsszenario“ A1B geht aus von (UMWELTBUNDESAMT 2007):

- global orientierter Entwicklung mit starkem Wirtschaftswachstum,
- schneller Einführung neuer und effizienterer Techniken,
- der Nutzung fossiler und erneuerbarer Energien,
- einem Anstieg der Weltbevölkerung bis Mitte des 21. Jahrhunderts, gefolgt von einer Abnahme der Weltbevölkerung sowie
- einem Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis Mitte des 21. Jahrhunderts und einem leichten Rückgang bis 2100.

Aufbauend auf den genannten Modellen wird das Erosionsgeschehen der letzten 3 Dekaden des vergangenen Jahrhunderts mit dem in den Jahren 2021 bis 2050 verglichen. Vereinfach-

chend werden folgend die für diese Perioden stehenden Jahre „2000“ und „2050“ bzw. die entsprechenden Indizes verwendet.

Die ABAG schätzt die durch Niederschlag ausgelöste potentielle Erosionsgefährdung durch Multiplikation von 6 Faktoren ab (SCHWERTMANN ET AL. 1990):

$$\text{Abtrag } A = R * K * S * L * C * P$$

Dabei ist

R der Oberflächenabfluss- und Regenerositätsfaktor,

K der Bodenerodierbarkeitsfaktor,

S der Hangneigungsfaktor,

L der Hanglängenfaktor,

C der Bodenbedeckungs- und Bodenbearbeitungsfaktor und

P der Erosionsschutz-Maßnahmenfaktor.

Mindestens zwei Faktoren der ABAG sind klimaabhängig: der Oberflächenabfluss- und Regenerositätsfaktor R sowie der Bodenbedeckungs- und Bodenbearbeitungsfaktor C. Beide Faktoren werden unter dem Aspekt der zu erwartenden Klimaentwicklung betrachtet. Anschließend werden für verschiedene Fruchtfolgen und standardisierte Bewirtschaftungssysteme die Abträge unter den Bedingungen des Klimaabschnittes 1971-2000 mit denen des Klimaabschnittes 2021-2050 verglichen und diskutiert.

Ergänzend werden die Ergebnisse jeweils neben die von ECHAM4, Emissionsszenario B2, WETTREG 2004 abgeleiteten Ergebnisse (RIPPEL 2007) gestellt.

## **2.1 Oberflächenabfluss- und Regenerositätsfaktor im Jahr 2050 ( $R_{2050}$ )**

R wird bestimmt von der kinetischen Energie des Niederschlags in  $\text{kJ/m}^2$ , von der Intensität des Niederschlags in  $\text{mm/h}$  und von der Höhe des Niederschlags in  $\text{mm}$  (DIN 19708 2005). Da für Energie und Intensität der Niederschläge konkrete Prognosen fehlen, wird hier SCHWERTMANN ET AL. (1990) folgend angenommen, dass die Ableitung von R aus der Jahresniederschlagshöhe ausreichend genau ist. Demnach besteht gemäß der Formel  $R = 0,083 * [\text{mittlerer Jahresniederschlag in mm}] - 1,77$  eine enge Beziehung zwischen dem mittleren Jahresniederschlag und R ( $r = 0,942$ ).

## **2.2 Bodenbedeckungs- und Bodenbearbeitungsfaktor im Jahr 2050 ( $C_{2050}$ )**

C ist abhängig von

- der durch Bodenbearbeitung und fruchtartspezifischer Bodenbedeckung im Jahreslauf unterschiedlichen Erosionsempfindlichkeit des Bodens und
- dem jeweils damit zusammentreffenden Anteil erosiver Niederschläge.

Zur Ermittlung von C werden diese Größen für jede Fruchtart und jeweils 6 spezifische Kulturperioden bestimmt. Im Zuge der Klimaänderung wird es zu zeitlichen Verschiebungen sowohl der Kulturperioden als auch des Auftretens erosiver Niederschläge kommen.

Für die mittlere Vegetationszeit und der damit verbundenen Festlegung der Kulturperioden wird den vorliegenden Daten zur Erhöhung der Jahrestemperatur um  $0,8^\circ\text{K}$  (ECHAM4:  $+1,7^\circ\text{K}$ ; KLEINHANS 2007) entsprechend angenommen, dass die Vegetationszeit im Frühjahr 4 Tage früher einsetzt und im Herbst 4 Tage später aufhört.

Abb. 1 zeigt schematisch die angenommene Verschiebung der Zeitpunkte für die Saatbettbereitung und die Ernte. Die Verschiebung der für die Bestimmung des C-Faktors weiteren festgelegten Kulturperioden ergibt sich unter Berücksichtigung pflanzenbaulicher Gesichtspunkte entsprechend.

Nach ECHAM4 konnte bei entsprechender Umsetzung der Daten von einer Verlängerung der Vegetationszeit um etwa 14 Tagen ausgegangen werden (je 7 Tage in Frühjahr und Herbst).

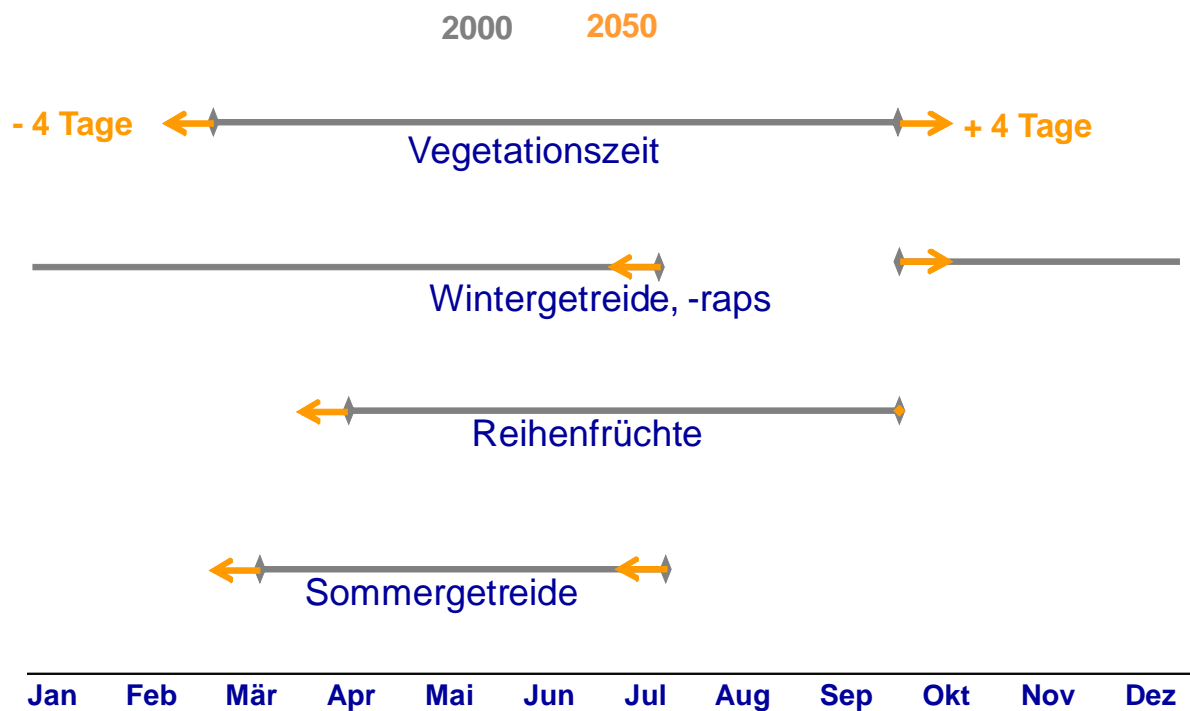


Abb. 1: Angenommene Verschiebung von Saatbettbereitung und Ernte für verschiedene Früchte (schematisch)

Die bisher geltende mittlere Jahres-R-Verteilung wurde von SCHWERTMANN ET AL. (1990) als Mittelwert von 18 bayerischen Wetterstationen ermittelt. Für die Ermittlung der künftigen Jahres-R-Verteilung werden die diesen 18 Stationen zuordenbaren Niederschlagsprognosen für jeweils 600 Modelljahre herangezogen. Wegen der nicht verfügbaren Daten zur definitionsgemäßen Ermittlung von Energie und Intensität künftiger Niederschläge nach DIN 19708 wird angenommen, dass sich der monatliche Anteil erosiver Niederschläge im gleichen Verhältnis ändert wie der monatliche Anteil der Tage mit Niederschlägen über 25 mm. Ausgehend von den heute geltenden täglichen R-Faktor-Anteilen werden die monatlichen Summenprozentente entsprechend angepasst und auf die taggenauen Summenprozentente anteilmäßig übertragen.

Um die Auswirkungen der Klimaänderung für eine möglichst breite Spanne von C-Faktoren verfolgen zu können, werden 13 verschiedene Fruchtfolgen mit jeweils drei standardisierten und nach dem Grad des damit verbundenen Erosionsschutzes unterschiedlichen Varianten der Bodenbearbeitung und Saatbettbereitung betrachtet:

- Niedriger Erosionsschutz = konventionell mit Pflug („reiner Tisch“) = „niedrig“
- Mittlerer Erosionsschutz = mit Pflug, Mulchsaat der Reihenfrucht = „mittel“
- Hoher Erosionsschutz = pfluglos, Mulchsaat der Reihenfrucht = „hoch“

Näheres zur Bestimmung der C-Faktoren im Allgemeinen kann der DIN 19708 (2005), zur vorgenommenen Anpassung des C-Faktors an die Klimaänderung RIPPEL (2007) entnommen werden.

### 2.3 Bodenabtrag im Jahr 2050 ( $A_{2050}$ )

Da es sich bei der ABAG um eine lineare Funktion handelt, entspricht der sich für 2050 ergebende Änderungsfaktor für den Bodenabtrag dem Produkt der Änderungsfaktoren für  $R_{2050}$  und  $C_{2050}$ .

### 3 Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 $R_{2050}$

Im Mittel von 400 Niederschlagsmessstationen in Bayern wird es nach ECHAM5 zu einer Senkung der Jahresniederschlagsmenge um den Faktor 0,97 kommen. Damit ändert sich der R-Faktor im Durchschnitt aller Stationen ebenfalls um den Faktor 0,97, unter Beachtung der einzelnen Messstationen allerdings mit regionalen Unterschieden (0,90 bis 1,03). Die mittlere Regenerosivität  $R_{2050}$  wird in großen Bereichen Bayerns abnehmen oder gleich bleiben, in Teilen Unterfrankens etwas zunehmen (Abb. 2, rechts).

Die auf dem globalen Klimamodell ECHAM4 beruhende Berechnung ergibt eine mittlere Anhebung des R-Faktors um den Faktor 1,05 (0,96 bis 1,21). Regional betrachtet kommt es kleinflächig zu einer Verringerung von  $R_{2050}$ , im Übrigen zu einer mehr oder weniger deutlichen Erhöhung, insbesondere in Nordbayern (Abb. 2, links).

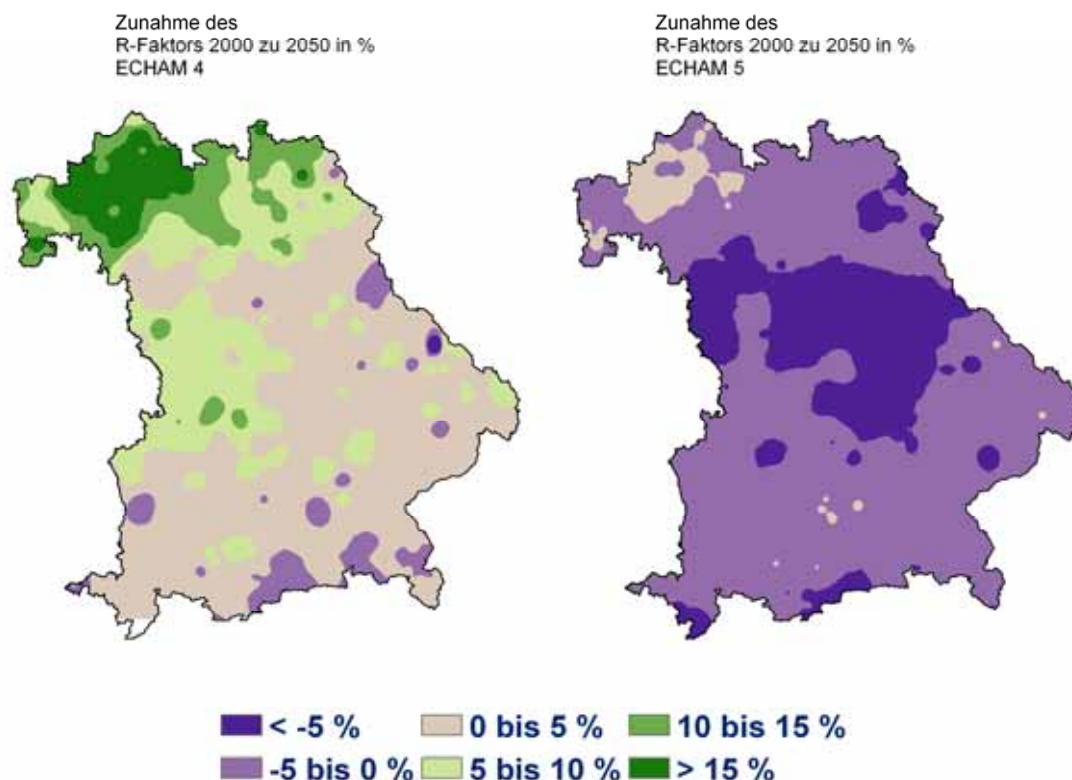


Abb. 2: Relative Veränderung des R-Faktors 2050 gegenüber 2000 in Bayern (links Ergebnisse nach ECHAM4/WETTREG 2004, rechts nach ECHAM5/WETTREG 2006)

#### 3.2 $C_{2050}$

Die Zahl der Tage mit einer Niederschlagsmenge über 25 mm nimmt nach ECHAM5 im Durchschnitt der betrachteten 18 Messstationen geringfügig von 5,00 auf 4,99 ab. Für die mittleren monatlichen R-Faktoranteile ergibt sich eine Zunahme für September, Oktober und Dezember bis Mai sowie – bei nach wie vor hohem Niveau – eine Absenkung in den Monaten Juni, Juli und August (Abb. 3).

% des Jahres-R

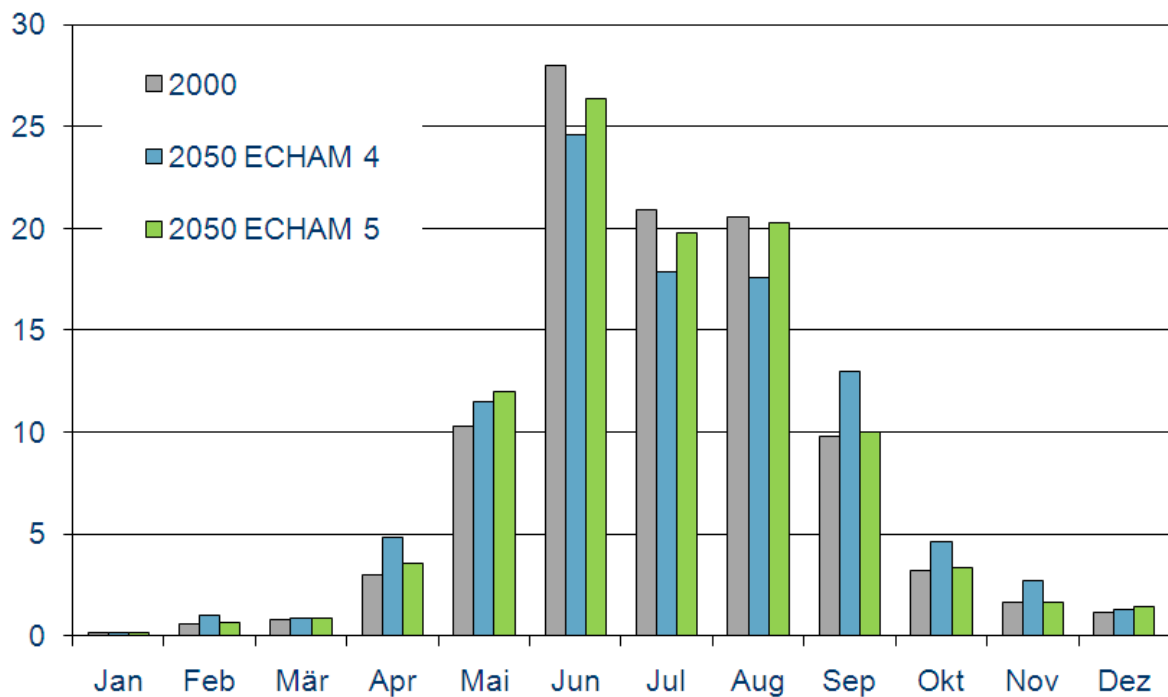


Abb. 3: Mittlere monatliche R -Faktor-Anteile (%), 2000 und 2050 (ECHAM4 und ECHAM5)

Im Vergleich zu ECHAM4 fallen die Veränderungen in der Tendenz gleich, in ihrem Ausmaß aber deutlich geringer aus (Ausnahme: Mai und Dezember).

Tab. 1 zeigt die sich hieraus ergebenden Änderungsfaktoren der Bewirtschaftungsfaktoren  $C_{2050}$  gegenüber  $C_{2000}$  für verschiedene Fruchtfolgegruppen, Erosionsschutzniveaus und Klimamodellierungen.

Tab. 1: Änderungsfaktoren der Bewirtschaftungsfaktoren $C_{2050}$ verschiedener Fruchtfolgegruppen, Erosionsschutz-Niveaus und Klimamodellierungen gegenüber $C_{2000}$						
Globales Klimamodell / Emissionsszenario / Regionalisierungsmodell	ECHAM4 / B2 / WETTREG 2004			ECHAM5 / A1B / WETTREG 2006		
	niedrig	mittel	hoch	niedrig	mittel	hoch
Mährusch-Fruchtfolgen	1,26	1,06	1,08	1,10	0,94	1,01
Mais-Fruchtfolgen	1,10	1,11	1,07	1,04	0,99	1,01
Zuckerrüben-Fruchtfolgen	1,14	1,06	1,03	1,08	0,96	0,99
Kartoffel-Fruchtfolge	1,16	1,09	1,07	1,06	1,00	1,02
Durchschnitt der Fruchtfolgegruppen	1,17	1,08	1,06	1,07	0,97	1,01
Ø der Fruchtfolgegruppen und Erosionsschutzniveaus	1,10			1,02		

Es wird deutlich, dass die relativen Veränderungen des C-Faktors vom Niveau des Erosionsschutzes abhängig sind. Bei gleichem Schutzniveau ergeben sich zwischen den Fruchtfolgegruppen Unterschiede, die sich für die Modellierung nach ECHAM5 im Wesentlichen mit folgenden Zusammenhängen erklären lassen:

Die frühere Ernte der Mähdruschfrüchte nimmt in einem Zeitraum hoher Regenerosivität den Schutz durch Abdeckung früher weg und führt zu einer Erhöhung von  $C_{2050}$ . Dies gilt insbesondere bei einer nach der Ernte rasch folgenden Grundbodenbearbeitung (niedriges Erosionsschutzniveau). Diese Erhöhung von  $C_{2050}$  fällt mit höherem Anteil spät zu erntender Früchte (Reihenfrüchte) in der Fruchtfolge geringer aus, da der Boden unter diesen Früchten während des Zeitraumes mit hohen erosiven Niederschlägen vergleichsweise gut geschützt ist.

Die Verschiebung der im Frühjahr liegenden Kulturperioden (z. B. Saatbettbereitung der Sommerungen) nach vorne und die der im Herbst liegenden (z. B. Saatbettbereitung der Winterungen) nach hinten, also jeweils in Zeiten mit geringerer Regenerosivität, führt zu einer Minderung des C-Faktors.

Je nach Fruchtart und der Kombination der Früchte in Fruchtfolgen werden diese Mechanismen mehr oder weniger wirksam. Am Beispiel der spät im Herbst zu säenden Fruchtart Winterweizen ist dies für die Variante „niedriger Erosionsschutz“ in Abb. 4 schematisch dargestellt.

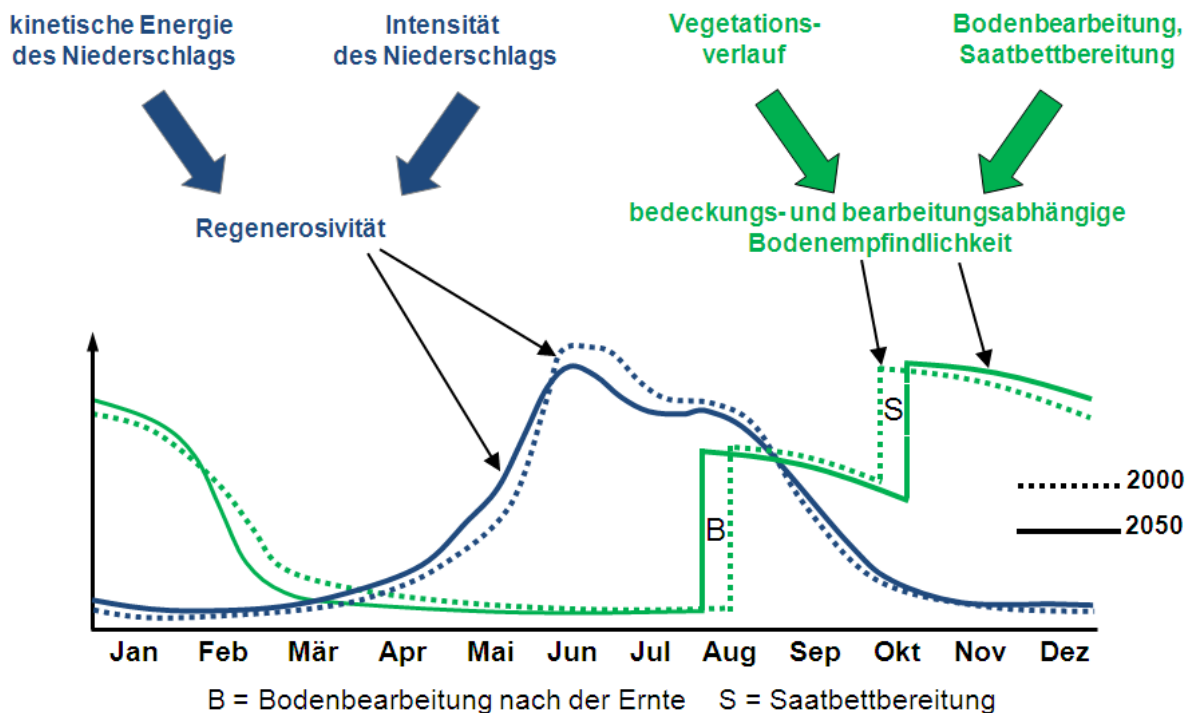


Abb. 4: Schematische Darstellung des Verlaufs der Regenerosivität (R-Faktoranteil) und der bedeckungs- und bearbeitungsabhängigen Empfindlichkeit des Bodens 2000 und 2050 am Beispiel Winterweizen, niedriges Erosionsschutzniveau (nach ECHAM 4)

Im Mittel aller geprüften Fruchtfolgegruppen kommt es nach ECHAM5 zu einer Anhebung des C-Faktors um durchschnittlich 2 % bei einer Spannweite von - 8 bis +12 % zwischen den einzelnen Fruchtfolgen.

Nach ECHAM4 muss dagegen bis 2050 mit einer deutlicheren Anhebung des C-Faktors um durchschnittlich 10 % bei einer Spannweite zwischen den einzelnen Fruchtfolgen von 2 bis 30 % gerechnet werden.

### 3.3 Bodenabtrag $A_{2050}$

Nach dem auf dem globalen Klimamodell ECHAM5 (Emissionsszenario A1B) und dem statistischen Regionalisierungsverfahren WETTREG 2006 basierenden Ergebnis kommt es in Bayern bis 2050 im Durchschnitt nur zu geringen Veränderungen beim Bodenabtrag (Abnahme um 1 %). Bei niedrigem Schutzniveau wird es eher zu einer Zunahme, bei dem heute in der Praxis weit verbreiteten mittleren Niveau eher zu einer Abnahme des Abtrags kommen.

Eine nach gleichem Prinzip durchgeführte Untersuchung auf der Grundlage ECHAM4 (Emissionsszenario B2 / WETTREG 2004) ergibt ein anderes Ergebnis. Demnach kommt es bis 2050 zu einem Anstieg des Bodenabtrags von durchschnittlich 16 % bei einer Spannweite von 98 bis 157 % (Tab. 2).

Tab. 2: Änderungsfaktor der R- und C-Faktoren 2050 gegenüber 2000 (Mittelwerte und Spannweiten)						
	$R_{2050}$		$C_{2050}$		$R_{2050} * C_{2050}$	
	Ø	von - bis	Ø	von - bis	Ø	von - bis
nach ECHAM4 / B2 / WETTREG 2004	1,05	0,96 - 1,21	1,10	1,02 - 1,30	1,16	0,98 - 1,57
nach ECHAM5 / A1B / WETTREG 2006	0,97	0,90 - 1,03	1,02	0,92 - 1,12	0,99	0,83 - 1,15

Die Klima-Modellierung nach ECHAM5 ergibt für Süddeutschland von 2000 bis 2050 einen Anstieg der mittleren Jahrestemperatur um 0,8°C und eine Zunahme der Niederschläge des hydraulischen Winterhalbjahrs um 4,5 % (KLEINHANS 2007). Dies ist jeweils weniger als in den vergangenen 50 Jahren bereits an Veränderungen gemessen wurde (WEBER ET AL. 2008). Für den Zeitraum bis 2100 werden allerdings auch nach ECHAM5 wesentlich deutlichere Veränderungen für Temperatur und Niederschlag modelliert, deren Auswirkungen auf den Bodenabtrag die auf ECHAM4 beruhenden Ergebnisse für 2050 übertreffen dürften.

Die hier angewandte Methode zur Abschätzung des künftigen Bodenabtrags berücksichtigt nicht die Effekte eines künftig wärmeren Winters (z. B. seltener gefrorener Boden, dadurch verminderter Oberflächenabfluss, andere Stabilität der Bodenteilchen durch weniger Frost, Regen anstelle von Schnee). Sie geht außerdem davon aus, dass nur die ABAG-Faktoren R und C durch die Klimaänderung beeinflusst werden. Es ist allerdings anzunehmen, dass damit die wesentlichen Auswirkungen erfasst werden. Es sei aber zumindest erwähnt, dass sich mit einer möglichen Veränderung der Humusgehalte definitionsgemäß auch die K-Faktoren ändern würden. Auch eine mit einer Klimaänderung einhergehende Umgestaltung des Kulturartenspektrums wurde nicht berücksichtigt.

Die Aussagen von Klimaprognosen zur räumlichen Verteilung und zu Wettererscheinungen, insbesondere von Niederschlägen, sind mit größeren Unsicherheiten verbunden. Andere Klima-Modelle können zu anderen Ergebnissen kommen.

## 4 Danksagung

Wir danken Herrn Prof. Dr. Karl Auerswald (TU Weihenstephan), Herrn Dr. Alexander Kleinhans, Herrn Holger Komischke (beide LfU Hof), Herrn Dr. Harald Maier (DWD Weihenstephan) sowie Herrn Robert Brandhuber (LfL) für ihre freundliche Unterstützung und ihren fachmännischen Rat.

## 5 Literatur

ARBEITSKREIS KLIWA, Hrsg. (2005): Der Klimawandel in Bayern für den Zeitraum 2021-2050.

ARBEITSKREIS KLIWA, Hrsg. (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland - Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, KLIWA-Bericht Heft 9.

AUERSWALD K. (2002): Schätzung des C-Faktors aus Fruchtfolgestatistiken für Ackerflächen in Gebieten mit subkontinentalem bis subatlantischem Klima nördlich der Alpen, Landnutzung und Landentwicklung 43, 1-5 (2002).

DIN 19708 Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG.

KLEINHANS, A. (2007): Regionenspezifische Auswertung regionaler Klimaszenarien für Süddeutschland.- [www.kliwa.de/download/fg2007/Klein hans\\_0207.pdf](http://www.kliwa.de/download/fg2007/Klein hans_0207.pdf) (04.07.2008).

METEO-RESEARCH i. A. des Umweltbundesamtes (2006): WETTREG – Statistisches Regionalisierungsverfahren basierend auf Ergebnissen von ECHAM5.

RIPPEL, R. (2007): Auswirkungen und Strategien für Landwirtschaft und Umwelt – aus der Sicht des Erosionsschutzes.- LfL-Schriftenreihe 13/2007: Klimaänderung und Landwirtschaft – Bestandsaufnahme und Handlungsstrategien für Bayern: pp. 81-96.

SCHWERTMANN, U., VOGL, W. , KAINZ, M. (1990): Bodenerosion durch Wasser – Vorhersagen des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen.- 2. Aufl., Stuttgart.

UMWELTBUNDESAMT (2007): Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen.- [www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/Regionale-Klimaaenderungen.pdf](http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/Regionale-Klimaaenderungen.pdf) (04.07.2008).

WEBER H., KOMISCHKE H. (2008): Klimawandel in Süddeutschland – Veränderungen der Kenngrößen Lufttemperatur, Niederschlag und Hochwasserabfluss.- KLIWA-Monitoringbericht 2008

ZWISCHENSTAATLICHER AUSSCHUSS FÜR KLIMAÄNDERUNGEN (IPCC), Hrsg., (2007): Klimaänderung 2007: Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger, 4. Sachstandsbericht des IPCC (AR4), deutsche Übersetzung.