



KLIWA-Kurzbericht

**Entwicklung eines methodischen Ansatzes zur Kopplung
hochaufgelöster Klima- und Erosionsmodelle und
exemplarische Anwendung**

KLIWA Forschungsvorhaben Nr. 3.4.1 und 3.4.2

„Bodenabtrag durch Wassererosion in Folge von Klimaveränderungen“

im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA –
Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft

ISBN 978-3-88251-394-3

Auftragnehmer und Autoren der Projektberichte:

Assmann, A., Kempf, J., Billen, N., Schipper, H. & Engelhardt, M. (2009): Konzeptstudie „Bodenabtrag durch Wassererosion in Folge von Klimaveränderungen“, Abschlussbericht.

Schipper, H., Fossier, G., Schädler, G., Kempf, J., Assmann, A. & Billen, N. (2014): Bodenabtrag durch Wassererosion in Folge von Klimaveränderungen, Phase II: Klima- und Erosionsmodellierung, Endbericht.

Hans Schipper
Giorgia Fossier
Gerd Schädler
Markus Engelhardt

Süddeutsches Klimabüro am KIT
Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK-TRO)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Kaiserstr. 12, 76131 Karlsruhe

Jessica Kempf
André Assmann
geomer GmbH
Geoinformatik & Ressourcenmanagement
Im Breitspiel 11 B
69126 Heidelberg

Norbert Billen
Bodengut
Büro für nachhaltige Bodennutzung
Riedgrasweg 26
70599 Stuttgart

Impressum

Bearbeitung des Berichts: KLIWA Arbeitsgruppe Boden

Redaktion:

Tilman Sauer
Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen
Hauptstraße 16
67705 Trippstadt

Stefanie Groh
LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen, Naturschutz Baden-Württemberg
Postfach 10 01 63
76231 Karlsruhe

Friedhelm Vieten
Bayerisches Landesamt für Umwelt
Hans-Högn-Straße 12
95030 Hof/Saale

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	6
1 Einführung.....	7
2 Konzept- und Machbarkeitsstudie (Phase I).....	8
2.1 Auswahl des Klimamodells.....	8
2.2 Auswahl des Erosionsmodells.....	10
2.3 Auswahl der Referenz- und Piloteinzugsgebiete.....	11
3 Klima- und Erosionsmodellierungen (Phase II).....	13
3.1 Klimasimulationen mit COSMO-CLM.....	13
3.1.1 Auswertung der 2,8 km-Simulationen für Referenzperiode und Zukunft.....	16
3.1.2 Vergleich der 2,8 km- mit 1 km-Simulationen.....	19
3.1.3 Auswahl der Niederschlagsereignisse für die Erosionsmodellierung.....	23
3.2 Schnittstelle zwischen den Modellen.....	23
3.3 Erosionsmodellierungen.....	24
3.3.1 Plausibilisierung von LISEM.....	25
3.3.2 Anwendung der Modellkette.....	26
4 Diskussion und Fazit zur Modellkopplung.....	28
5 Literatur.....	30

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Lage der Referenzeinzugsgebiete und Piloteinzugsgebiete	12
Abb. 2:	Karte der drei für die Sensitivitätsanalyse ausgewählten Simulationsgebieten.....	14
Abb. 3:	Räumliche Verteilung der Abweichungen des mittleren Tagesniederschlags zwischen den Modellergebnissen und dem HYRAS-Datensatz für die hydrologischen Sommer 1980-1984.....	15
Abb. 4:	Karte der Gebiete für die 2,8 km Simulationen, der Untersuchungsgebiete für die Analyse der 2,8 km Simulationen und der Gebiete für die 1 km Simulationen.....	16
Abb. 5:	Verteilung der Niederschlagsereignisse in Abhängigkeit von Dauer und Gesamtniederschlag.....	19
Abb. 6:	Räumliche Verteilung des mittleren Tagesniederschlags im Sommer im Untersuchungsgebiet Weiherbach mit einer 1 km- und einer 2,8 km-Simulation für den Zeitraum 1990-1995.	21
Abb. 7:	Tagesgang des Niederschlags für zwei Zeiträume für die 1 km- und 2,8 km-Simulationen für die Untersuchungsgebiete Scheyern und Mertesdorf.	22
Abb. 8:	Schnittstelle zwischen COSMO-CLM und LISEM	23
Abb. 9:	Gemessene und mit Messwerten simulierte Abflussvolumina bei unterschiedlicher Feldfruchtverteilung.	25
Abb. 10:	Ganglinien gemessener und mit Realniederschlag simulierter Abflüsse am 27.06.1994 im Referenzeinzugsgebiet Weiherbach.	25
Abb. 11:	Durchgeführte Simulationen.....	26
Abb. 12:	Boxplots mit 15., 50. und 85. Perzentil sowie den Extremwertspannen von Bodenerosion und Niederschlagssummen auf Basis aller Simulationsergebnisse.	27

Tabellenverzeichnis:

Tab. 1: Übersicht der bewerteten Modelle	8
Tab. 2: Tägliche mittlere Niederschlagsmenge für alle Tage bzw. nur für nasse Tage Sommer für die Referenzperiode und die Zukunft.	17
Tab. 3: Änderungen in der Wahrscheinlichkeitsverteilung der täglichen Nieder- schlagsintensitäten im Sommer.....	17
Tab. 4: Änderungen in der Wahrscheinlichkeitsverteilung der stündlichen Nieder- schlagsintensitäten im Sommer.....	18
Tab. 5: 1 km-Simulationen im Vergleich zu den 2,8 km-Simulationen und Beobachtungen für Sommermonate ausgewählter Jahre im Untersuchungs- gebiet Weiherbach.....	22

Zusammenfassung

In dem Projekt „Bodenabtrag durch Wassererosion in Folge von Klimaveränderungen“ wurde die Möglichkeit einer Kopplung von einem Klimamodell mit einem Erosionsmodell untersucht. Dafür wurden in einer vorgeschalteten „Konzept- und Machbarkeitsstudie“ verschiedene regionale Klimamodelle und Erosionsmodelle analysiert und hinsichtlich ihrer Kopplungsmöglichkeiten bewertet sowie Referenzeinzugsgebiete zur Plausibilisierung der Modellergebnisse ermittelt. Für die Niederschlagssimulationen wurde das regionale Klimamodell COSMO-CLM gewählt, für die Erosions- und Abflusssimulationen das Modell LISEM. In einer zweiten Projektphase wurden erste exemplarische Modellierungen für drei Referenzeinzugsgebiete sowie 15 Piloteinzugsgebiete in den Bundesländern Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz durchgeführt.

Für die Erosionsmodellierung wurde die horizontale Auflösung des Klimamodells schrittweise von 7 km auf 2,8 km und 1 km erhöht. Im Rahmen einer Sensitivitätsstudie wurden die hierfür optimale Modellkonfiguration und eine geeignete Gebietsgröße für das *Nesting* (Einbettung) der 2,8 km in die 7 km-Simulation bestimmt. Auf Grundlage von Langzeitsimulationen in einer räumlichen und zeitlichen Auflösung von 2,8 km und 1 h für eine Referenz- und eine Zukunftsperiode wurden ereignisbasierte Simulationen in einer räumlichen und zeitlichen Auflösung von 1 km und 15 min für ausgewählte Referenzeinzugsgebiete durchgeführt. In den Piloteinzugsgebieten wurden für die Erosionsmodellierung Niederschlagsereignisse aus den Klimasimulationen mit einer räumlichen und zeitlichen Auflösung von 7 km und 1 h ausgewählt.

Die Abschaltung der Parametrisierung und damit die direkte Berechnung der hochreichenden Konvektion im Modell für die 2,8 km-Simulationen führte zu einer verbesserten Wiedergabe der Wahrscheinlichkeitsverteilung der stündlichen Niederschlagsintensitäten sowie des Tagesgangs der Niederschläge. Dies stellt eine Verbesserung für die Erosionsmodellierung dar und kann auch für die regionale Wasserhaushaltsmodellierung von Bedeutung sein. Im Rahmen von KLIWA werden daher die Niederschlagssimulationen in der räumlichen und zeitlichen Auflösung von 2,8 km und 1 h (nicht *bias-korrigiert*) weiter ausgewertet. Neben einer extremwertstatistischen Auswertung (Antrieb ERA 40) für das Neckar-Einzugsgebiet, werden exemplarische Wasserhaushaltssimulationen durchgeführt (Antrieb ECHAM5/MPI-OM).

Die Kopplung der beiden Modelle COSMO-CLM und LISEM war insgesamt erfolgreich. Für die Schnittstellen der Modelle wurden Transferprogramme entwickelt, die einen (halb)automatischen Datenaustausch ermöglichen. Für Fallstudien im Sinne der in Projektphase II durchgeführten „*worst-case*“-Abschätzungen, d. h. Erosionsmodellierung auf Basis einzelner, ausgewählter Starkniederschläge mit möglichst hoher Intensität, ist die entwickelte Kette aus Klima- und Erosionsmodell anwendbar. Hinsichtlich künftiger Anwendungsoptionen ist aus Sicht der KLIWA Arbeitsgruppe Boden festzuhalten, dass Erosionssimulationen in weiteren repräsentativen Kleineinzugsgebieten der Bundesländer nicht durchgeführt werden, da die benötigte Rechenkapazität und der Aufwand für die Aufbereitung der Eingangsdaten zu hoch ist. Die Anwendung der Modellkette im Rahmen von KLIWA bleibt daher vorerst auf die Fallstudien in den Referenz- und Piloteinzugsgebieten beschränkt.

1 Einführung

Im Zuge des Klimawandels werden auch in Süddeutschland Veränderungen in der Häufigkeit, Intensität sowie in der räumlichen und zeitlichen Verteilung des Niederschlags erwartet. So zeigen Auswertungen von Ensemble-Simulationen mit dem regionalen Klimamodell COSMO-CLM 4.8 zwar keine signifikanten Änderungen im mittleren Sommerniederschlag (Feldmann et al. 2012), die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Niederschlags lässt jedoch künftig auf eine Zunahme der Starkniederschlagsereignisse bei gleichzeitiger Abnahme der schwachen und mittleren Niederschläge schließen (Boberg et al. 2010; Boberg et al. 2009; Feldmann et al. 2012; Wagner et al. 2012). Für den Winter zeigen die Projektionen für Südwestdeutschland – wie auch für ganz Europa – eine Zunahme der mittleren Niederschlagsmenge (Van der Linden & Mitchell 2009).

Da die Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen das Bodenerosionsgeschehen entscheidend beeinflussen, wird infolge des Klimawandels in erosionsgefährdeten Gebieten eine Zunahme des Bodenerosionsrisikos und der damit verbundenen Gefährdung für Böden und andere Schutzgüter erwartet. Gerade in kleinen bis mittleren Einzugsgebieten wird die Höhe des Bodenabtrags vielfach von kurzen, lokal begrenzten, aber intensiven Niederschlägen (konvektive Niederschläge), die überwiegend im Sommer auftreten, bestimmt. Um Erkenntnisse über das zu erwartende Ausmaß von Bodenabträgen durch sommerliche Starkniederschläge in ausgewählten, erosionsdisponierten Kleineinzugsgebieten zu gewinnen, wurde 2008 das Forschungsprojekt „Bodenabtrag durch Wassererosion in Folge von Klimaveränderungen“ im Rahmen des Kooperationsvorhabens „KLIWA – Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ initiiert.

Ziel der Projektphasen I und II war es, einen methodischen Ansatz zur Kopplung eines regionalen Klimamodells mit einem Erosionsmodell zu entwickeln, um in verschiedenen erosionsgefährdeten Kleineinzugsgebieten in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz exemplarische Erosionssimulationen durchzuführen. Das Projekt startete 2009 mit einer „Konzept- und Machbarkeitsstudie“ (Phase I), in der verschiedene regionale Klimamodelle und Erosionsmodelle analysiert, hinsichtlich ihrer Kopplungsmöglichkeiten bewertet sowie Referenzeinzugsgebiete zur Plausibilisierung der Modellergebnisse ermittelt wurden (Assmann et al. 2009). Von 2011 bis 2013 folgte die zweite Projektphase „Klima- und Erosionsmodellierung“. In dieser Projektphase wurde erstmals ein hochaufgelöstes, dynamisches regionales Klimamodell mit einem physikalisch-prozessorientierten Erosionsmodell gekoppelt (Schipper et al. 2014). Dieser Kurzbericht basiert auf den Ergebnissen der beiden Projektphasen.

2 Konzept- und Machbarkeitsstudie (Phase I)

Im Rahmen der Konzept- und Machbarkeitsstudie wurden insgesamt 13 regionale Klimamodelle und 17 Erosionsmodelle (Tab. 1) bewertet, um geeignete Modelle für eine Kopplung zu identifizieren. Zur exemplarischen Modellierung wurde aus 25 untersuchten Einzugsgebieten je ein Referenzgebiet in den Bundesländern Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz für die Plausibilisierung der Ergebnisse ausgewählt. Darüber hinaus wurden in der zweiten Projektphase 15 weitere Piloteinzugsgebiete¹ ermittelt, um die Praxistauglichkeit der Modellkopplung zu prüfen.

Tab. 1: Übersicht der bewerteten Modelle

Regionale Klimamodelle	Erosionsmodelle
dynamisch	physikalisch
Aladin	ANSWERS
COSMO-CLM 4.8	CATFLOW-SED
CRCM	CREAMS
HadRM3	EPIC
HIRHAM	EROSION 2D
PROMES	EROSION 3D
RACMO	EUROSEM
RegCM3	KINEROS
REMO 5.7	LISEM
WRF	OPUS
	SWAT
statistisch	WEPP
STAR II	GeoWEPP
WETTREG 2006	
NiedSim-Klima*	empirisch
	ABAGflux
	AGNPS
	RUSLE
	USLE
	WATEM/SEDEM

*Programmsystem zur Erzeugung synthetischer Niederschlagszeitreihen

2.1 Auswahl des Klimamodells

Da Erosionsschäden maßgeblich durch einzelne Starkniederschlagsereignisse verursacht werden und kleinräumig variieren, müssen für die Erosionsmodellierung auf Basis individueller Niederschlagsereignisse die Niederschlagsinformationen in einer möglichst hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung vorliegen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit erosionsauslösender Niederschläge ist vor allem in den Monaten Mai bis September hoch (Auerswald, 1996, Neuhaus et al., 2010). Dabei spielen kurzzeitige intensive und relativ lokale Niederschläge (konvektive

¹ In den Projektberichten werden die „Piloteinzugsgebiete“ als „Vergleichsstandorte“ bezeichnet

Niederschläge), wie sie bevorzugt im Sommer auftreten, eine besondere Rolle (Feldmann et al., 2010). Wenn die horizontale Auflösung des Modells zu gering ist, finden Prozesse wie z. B. die Entstehung von konvektivem Niederschlag auf räumlichen Skalen statt, die kleiner als die Gitterzellen des Modells sind. Um auch diese Prozesse im Modell zu erfassen, müssen sie parametrisiert werden (IMK 2014). Für die Simulation künftiger sommerlicher Starkniederschlagsereignisse weisen auch Giorgi et al. (2004) auf die Bedeutung der Modellwahl hin, da die Parametrisierung von lokalen Prozessen wie Konvektion starke Auswirkungen auf die Ergebnisse haben kann. Für eine explizite Berechnung von Niederschlagszellen im Modell ist eine horizontale Auflösung < 3 km nötig. In diesem Fall besteht die Möglichkeit, die Parametrisierung für die hochreichende Konvektion im Modell abzuschalten. Verschiedene Studien (z. B. Baldauf et al. 2011; Hohenegger et al. 2008; Mass et al. 2002; Grell et al. 2000) zeigen den Vorteil der hohen horizontalen Auflösung vor allem bei Konvektivniederschlägen und/oder Regionen mit einem orografisch stark gegliedertem Gelände. Aus diesem Grund war für die Bewertung der Modelle die Möglichkeit, hochreichende Konvektion im Modell explizit berechnen zu können und nicht durch eine Parametrisierung indirekt zu beschreiben, ein wichtiges Kriterium.

Für die Auswahl eines geeigneten regionalen Klimamodells wurden zehn dynamische und zwei statistische Modelle sowie das Programmsystem NiedSim-Klima zur Erzeugung synthetischer Niederschlagszeitreihen mit einem Punktesystem bewertet. Die Modelle mit der besten Bewertung COSMO-CLM 4.8, REMO 5.7, WETTREG 2006, STAR II und das Programmsystem NiedSim-Klima wurden in einem zweiten Schritt hinsichtlich der Kopplung mit einem Erosionsmodell detaillierter analysiert. Statistische Modelle haben den Vorteil, dass deren Ergebnisse mit der Klimastatistik am Messort übereinstimmen. Für die Verwendung in der Bodenerosionsmodellierung müssen die Klimadaten jedoch in die Fläche übertragen werden. Voraussetzung dafür sind eine hohe Stationsdichte, lange Beobachtungszeitreihen und eine hohe zeitliche Auflösung der Messdaten. Liegen diese Voraussetzungen nicht vor, ist dieses Vorgehen mit großen Unsicherheiten behaftet. Dynamische Modelle liefern hingegen Ergebnisse, die für eine bestimmte Fläche repräsentativ sind. Wird der Gitterpunktabstand eines Modells stark verringert, können auch lokale Eigenschaften, wie die Niederschlagsverteilung, wiedergegeben werden. Dies ist für die Erosionsmodellierung in orografisch stark gegliederten Gebieten besonders wichtig. Zudem kann mit einer hohen horizontalen Auflösung auch die zeitliche Ausgabe der Daten sinnvoll erhöht werden. Im Ergebnis der Bewertung erfüllte das dynamische, nicht-hydrostatische regionale Klimamodell COSMO-CLM die gestellten Anforderungen am besten.

Das rasterbasierte regionale Klimamodell COSMO-CLM ist ein dynamisches Modell, dessen Berechnungen auf Basis der zugrunde liegenden physikalischen Erhaltungsgleichungen erfolgen. Es ist Teil vom *Consortium for Small-scale Modelling* (COSMO). Das Modell gibt meteorologische Parameter (z. B. Temperatur, Niederschlag, Globalstrahlung) aus, die für den dreidimensionalen Raum einer Gitterbox repräsentativ sind. Über ein *Postprocessing* werden die simulierten Parameter auf die Standartmesshöhen von meteorologischen Daten übertragen. Die Anfangs- und Randbedingungen erhält das Regionalmodell von einem Globalmodell, in das es eingebettet (*genestet*) ist, um für einen Gebietsausschnitt die meteorologischen Parameter in einer höheren räumlichen und zeitlichen Auflösung zu simulieren.

Die Anwendung des Modells COSMO-CLM erstreckte sich bisher auf eine räumliche Auflösung von 50 bis 7 km und ein zeitliches Ausgabeintervall von einer Stunde. Ein kürzerer Ausgabezeitschritt ist technisch möglich und wurde in diesem Projekt erstmals für das KLIWA-Gebiet realisiert. Da COSMO-CLM ein nicht-hydrostatisches Modell ist, sind theoretisch sehr geringe horizontale Rasterweiten von wenigen hundert Metern möglich. Dadurch würde sich bei gleich bleibender Gebietsgröße der Rechenaufwand jedoch erheblich vergrößern, so dass in der Praxis nur Simulationen für kleinere Gebiete umsetzbar sind. Zudem sind die physikalischen Gleichungen nicht immer für alle Skalen geeignet, bzw. erfordern sehr kleine Skalen ggf. zusätzliche Gleichungen, was zu Unsicherheiten bei den Simulationen führen kann.

2.2 Auswahl des Erosionsmodells

Bei Bodenerosionsmodellen lassen sich ebenfalls zwei Modelltypen unterscheiden: empirische und physikalisch-prozessorientierte Modelle². Während empirische Modelle auf langjährigen Beobachtungen von Feldversuchen und der Ableitung von Modellparametern auf der Grundlage von mathematisch-statistischen Auswertungen basieren, lassen sich mit Hilfe physikalisch basierter Modelle die in der Natur ablaufenden Prozesse nachbilden. Physikalisch-prozessorientierte Modelle beschreiben Mobilisierung, Transport und Deposition von Bodenmaterial unter Beachtung physikalischer Prinzipien zur Erhaltung von Masse, Impuls und Energie (Scherer 2008). Sie erlauben eine höhere zeitliche und räumliche Auflösung und damit die Berechnung von Einzelereignissen, eine bessere Abschätzung der *On- und Off-Site*-Schäden sowie eine bessere Übertragbarkeit auf andere Modelleinzugsgebiete. Die Nachteile von physikalisch-prozessorientierten Modellen liegen in der hohen Anzahl an Eingabeparametern sowie an dem meist großen rechentechnischen Aufwand. Empirische Erosionsmodelle sind dagegen einfacher in ihrer Anwendung, berechnen jedoch nur langfristige, mittlere Bodenabträge und keine Einzelereignisse.

Im Rahmen der Konzeptstudie wurden 17 Erosionsmodelle beurteilt. Die Bewertung erfolgte auf Basis von Modellbeschreibungen, bereits vorhandener Modellbewertungen (DVWK 1999; Hebel 2003; DWA 2012), Datenbanken (z. B. *Register of Ecological Models* REM) und Expertenbefragungen. Die Bewertung erfolgte auf der Grundlage der gestellten Anforderungen, allgemeingültige Aussagen lassen sich daraus nicht ableiten. Bei der Auswahl der Bodenerosionsmodelle im Zusammenhang mit Klimaveränderungen sind insbesondere Modelleigenschaften wie Abbildung von Erosion und Deposition (*on-site und off-site*), räumliche und zeitliche Auflösung, Abbildung des Bodenzustandes zum Zeitpunkt des Niederschlagsereignisses (z. B. Landnutzung, Entwicklungsstadium der Feldfrucht) sowie Abbildung klimasensitiver Bodenparameter (z. B. Bodenfeuchte) wichtig (Routschek 2012). Anhand der Bewertungen wurden die Modelle LISEM und EROSION3D als gleichwertig beurteilt. Da das Modell LISEM frei verfügbar ist und durch die Offenlegung des Quellcodes (*Open-Source*) ggf. eigene Erweiterungen implementiert werden können, wurde dieses Modell für die zweite Projektphase ausgewählt.

² Neben diesen beiden Modelltypen gibt es auch kombinierte Modellansätze.

LISEM (*Limburg Soil Erosion Model*) wurde ursprünglich für die Modellierung der Bodenerosion in der Provinz Limburg in den Niederlanden entwickelt. Es ist ein physikalisch begründetes, rasterbasiertes Ereignismodell zur Simulation von Abfluss und Bodenerosion in kleinen und mittleren Einzugsgebieten. Die Anzahl der Rasterzellen im Einzugsgebiet ist theoretisch nicht begrenzt, jedoch steigt die Rechenzeit mit zunehmender Anzahl an Rasterzellen. In anderen Projekten (z. B. AMEWAM, Krimly 2005) wurde das Modell bei einer Gebietsgröße von 10 km² mit einer Rasterauflösung von 5 Metern angewendet. Die zeitliche Diskretisierung ist von der Rastergröße abhängig, der minimale Zeitschritt beträgt 1 Sekunde, der maximale Zeitschritt ist unbegrenzt.

2.3 Auswahl der Referenz- und Piloteinzugsgebiete

Ausschlaggebend für die Auswahl der Referenzeinzugsgebiete war die Verfügbarkeit von Niederschlagsdaten sowie umfangreicher Standort- bzw. Bodenkennwerte. Für die Bewertung potenzieller Referenzeinzugsgebiete wurden Expertenschätzungen sowie Literaturrecherchen durchgeführt. Anschließend wurden die Gebiete anhand einer Bewertungsmatrix hinsichtlich der Datenverfügbarkeit für die Plausibilisierung der Ergebnisse der Klima- und Erosionsmodellierung beurteilt. Von besonderer Bedeutung für die Simulation von ereignisbasierten Erosionsprozessen und die Plausibilisierung der Modellergebnisse ist die hochaufgelöste Aufzeichnung der Niederschlagsverteilung, die Verfügbarkeit von Abfluss- und Abtragsdaten sowie die Kenntnis der notwendigen Eingabeparameter für die Erosionsmodellierung zum Zeitpunkt des Niederschlagsereignisses. Hierzu zählen beispielsweise Bodenbedeckung oder Ausgangsbodenfeuchte. Im Ergebnis sind die Kleineinzugsgebiete „Weiherbach“ in Baden-Württemberg, „Scheyern“ in Bayern und „Mertesdorf“ in Rheinland-Pfalz aufgrund der Datenverfügbarkeit als Referenzeinzugsgebiete grundsätzlich geeignet (Abb. 1). In den Gebieten wurden bereits in der Vergangenheit Untersuchungen zu Bodenerosion und Wasserabfluss durchgeführt. So konnte für die Plausibilitätsprüfung auf Berichte, Publikationen und Datenbestände früherer Projekte zurückgegriffen werden. Im Projektverlauf zeigte sich jedoch, dass die Datenverfügbarkeit bei keinem der Gebiete den Erwartungen entsprach, da für keines eine zentrale, vollständige und gepflegte Datenhaltung existierte.

Neben den drei Referenzeinzugsgebieten wurden in 15 Piloteinzugsgebieten (Abb. 1) mit unterschiedlichen Bodensubstraten Erosionsmodellierungen durchgeführt, um die Praxistauglichkeit der Modellierungen sowie die Übertragbarkeit der Methodik in andere Regionen des KLIWA-Gebietes zu überprüfen. Die Piloteinzugsgebiete sollten eine vergleichbare Größe zu den Referenzeinzugsgebieten haben, aktuell ein hohes Erosionsrisiko (Wurbs et al. 2011), ein hohes und künftig ein zunehmendes Starkniederschlagsrisiko (DWD/DH 1997; DWD/DH 2005; Feldmann et al. 2010) aufweisen sowie die wichtigsten Bodensubstrate der einzelnen Bundesländer abbilden.

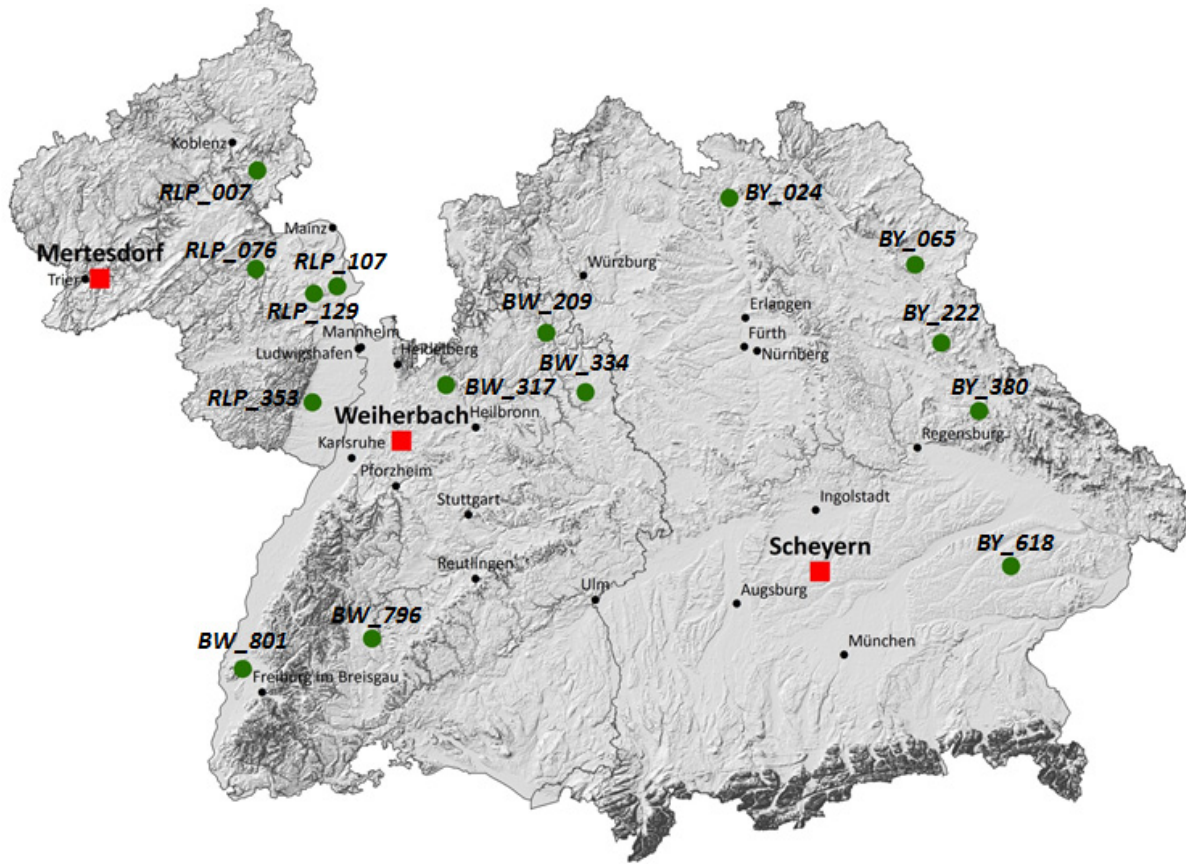


Abb. 1: Lage der drei Referenzeinzugsgebiete (rot) und der 15 Piloteinzugsgebiete (grün) für die Erosions- und Abflussmodellierung (die Nummern geben interne Kennungen an).

3 Klima- und Erosionsmodellierungen (Phase II)

Mit den ausgewählten Modellen COSMO-CLM und LISEM wurden in der zweiten Projektphase Klima- und Erosionsmodellierungen in den Referenz- und Pileteinzugsgebieten durchgeführt. Die Klimamodellierungen basierten auf dem SRES³ (*Special Report on Emissions Scenarios*) Szenario A1B des IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). Mit einem *Nesting*-Verfahren wurden hoch aufgelöste Niederschlagsdaten erzeugt. Die Simulationsergebnisse des Globalmodells ECHAM5 (Lauf 1) des Max-Planck-Instituts für Meteorologie dienten als Randbedingungen für höher aufgelösten Simulationen mit COSMO-CLM mit einer Rasterweite von 50 km. Diese wiederum trieben Simulationen mit einer Auflösung von 7 km und 1 h und schließlich 2,8 km und 1 h sowie 1 km und 15 min an. Für die 15 Pileteinzugsgebiete wurden aus Kapazitätsgründen COSMO-CLM Klimasimulationen mit einer Auflösung von 7 km und 1 h verwendet. Die Niederschläge sowie die aus dem Bodenmodul des COSMO-CLM stammenden Bodenfeuchten dienten als Eingangsdaten für die Erosionsmodellierung mit LISEM. Weitere Eingangsdaten für die Erosionsmodellierung wurden aus Bodenkarten, digitalen Geländemodellen, Landnutzungskarten sowie aus Literaturangaben zu Pflanzen-, Boden- und Reliefparameter gewonnen.

3.1 Klimasimulationen mit COSMO-CLM

Die Simulationsergebnisse der Klimamodellierung hängen vom gewählten Gebiet, der Modellkonfiguration und den betrachteten Klimavariablen ab (Bachner 2008; Suklitsch et al. 2008; Seth & Giorgi 1998). Die Größe und Lage des Simulationsgebiets sowie die Konfiguration der Auflösung ≥ 7 km wurden für COSMO-CLM bereits in früheren Studien optimiert (Berg et al. 2012; Meißner et al. 2009). Für das *Nesting* der 2,8 km in die 7 km-Simulation wurden zu Beginn der zweiten Projektphase zunächst Sensitivitätsstudien zur Lage und Größe des Simulationsgebietes und zur Modellkonfiguration durchgeführt. Alle Simulationsläufe für die Sensitivitätsuntersuchungen wurden mit ERA40-Reanalysen⁴ angetrieben. Die Simulationsergebnisse wurden gegen den HYRAS-Datensatz (Version 1.0) validiert. Dieser Datensatz enthält tägliche Niederschlagsdaten für die Periode 1951-2006 mit einer räumlichen Auflösung von 1 km (Rauthe et al. 2013). Zusätzlich wurden Stationsdaten in stündlicher Auflösung zur Validierung herangezogen.

Im ersten Schritt wurden für das Jahr 1986 drei in ihrer Lage und Größe unterschiedliche Simulationsgebiete mit einer Auflösung von 2,8 km und 1 h gerechnet, um eine geeignete Größe und Position des Gebiets für das *Nesting* der 1 km-Simulationen zu bestimmen (Abb. 2).

³ Neben den SRES-Szenarien wurden in den letzten Jahren die sogenannten RCP-Szenarien („*Representative Concentration Pathway*“) entwickelt. Trotz der neuen RCP-Szenarien behalten die SRES Szenarien ihre Gültigkeit.

⁴ Der ERA40-Reanalyse Datensatz wird vom „*European Center for Medium-Range Weather Forecasts*“ (ECMWF) bereitgestellt. Der Datensatz kombiniert globale Beobachtungsdaten mit Wettervorhersagen und beschreibt den Zustand der Atmosphäre in einer Auflösung von bis zu 6 Stunden für den Zeitraum von September 1957 bis August 2002 (Källberg et al. 2007).

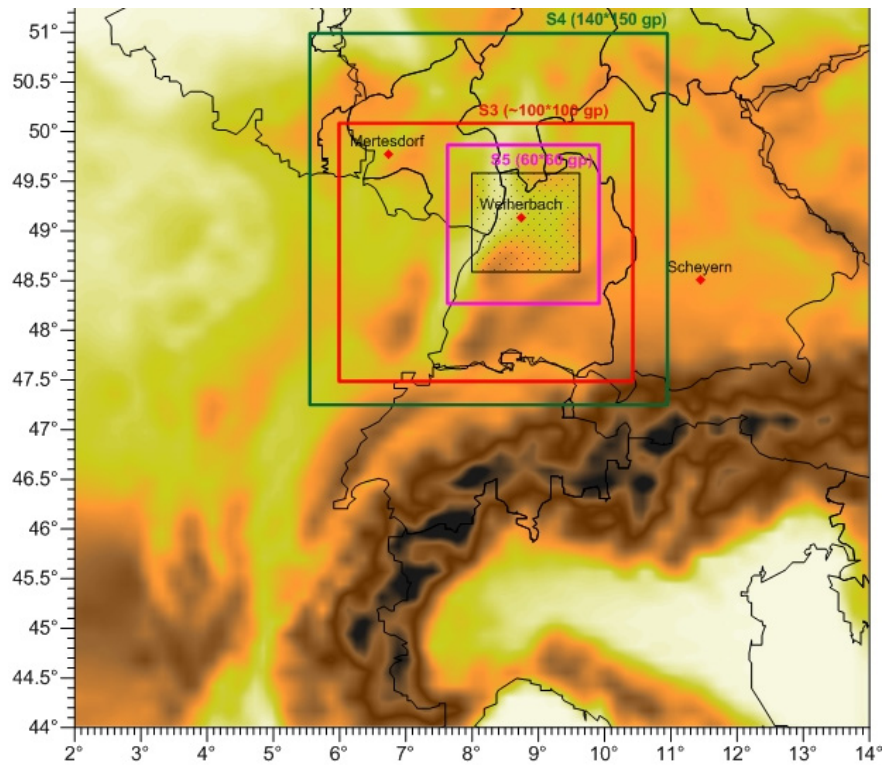


Abb. 2: Karte der drei für die Sensitivitätsanalyse ausgewählten Simulationsgebieten (S5 rosa, S3 rot und S4 grün). Das schwarze Viereck zeigt das Untersuchungsgebiet Weierbach. Die roten Punkte geben die Lage der drei Referenzeinzugsgebiete (Mertesdorf, Weierbach und Scheyern) an.

Da die Referenzeinzugsgebiete für den Vergleich der simulierten Niederschläge mit den HY-RAS-Daten sowie Stationsdaten zu klein sind, wurden größere Untersuchungsgebiete um die Referenzeinzugsgebiete Weierbach und Mertesdorf festgelegt (Abb. 2, Abb. 4). Im Ergebnis unterschieden sich die drei untersuchten Simulationsgebiete S3, S4 und S5 in der Qualität der Modellergebnisse nicht wesentlich voneinander. In einem zweiten Schritt wurden Sensitivitätsstudien zur Modellkonfiguration des Klimamodells durchgeführt. Es wurden zwei Konfigurationen überprüft; die erste basiert auf der Modelleinstellung der 7 km-Simulationen; die zweite entsprach den Empfehlungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und der „CLM-Community“ für die Durchführung hochaufgelöster Simulationen. Zusätzlich wurden Konfigurationsänderungen wie beispielsweise eine häufigere Aktualisierung der Randbedingungen geprüft. Ein weiterer Modelllauf über einen anderen, längeren Zeitraum (1980-1984) sollte sicherstellen, dass die ersten Ergebnisse nicht durch die Wahl eines bestimmten Jahres beeinflusst waren. Im Ergebnis wurden die für die Erosion wichtigen Niederschlagsmerkmale Häufigkeit, Stärke und räumliche Verteilung der Ereignisse am besten mit der Konfiguration erreicht, die auf den Einstellungen von COSMO-CLM für die 7 km-Simulation basiert.

Für die weiteren Klimasimulationen wurde das Simulationsgebiet S4 verwendet, das den Tagesgang des Niederschlags und vor allem das durch konvektive Prozesse verursachte Niederschlagsmaximum am Nachmittag gut wiedergibt (Fosser et al. 2013). Das Untersuchungsgebiet Mertesdorf wird an Tagen mit Niederschlag, mit einer maximalen Abweichung von $\pm 15\%$, gut wiedergegeben (Abb. 3). Allerdings zeigen die Modellergebnisse eine Überschät-

zung der Anzahl der Tage ohne Niederschlag um 4 % im Vergleich zu den HYRAS-Daten, was die Unterschätzung des mittleren Tagesniederschlags für alle Tage und die Überschätzung für Tage mit Niederschlag > 1 mm erklärt. Die Untersuchung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der täglichen Niederschlagsintensitäten zeigt wiederum eine gute Übereinstimmung mit den HYRAS-Daten.

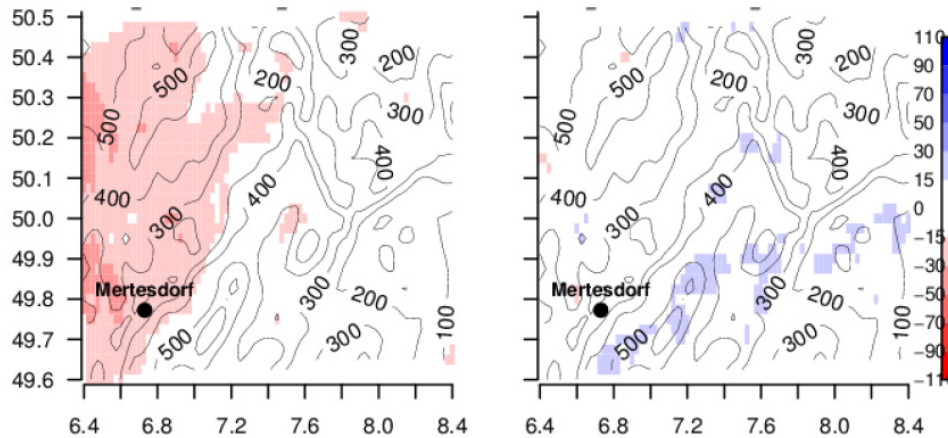


Abb. 3: Räumliche Verteilung (Länge, Breite) der Abweichungen des mittleren Tagesniederschlags zwischen den Modellergebnissen und dem HYRAS-Datensatz für die hydrologischen Sommer 1980-1984 (in Prozent) unter Berücksichtigung aller Tage (links) und Tagen mit Niederschlag > 1 mm (rechts). Blautöne zeigen eine Überschätzung der simulierten mittleren Tagesniederschläge, Rottöne eine Unterschätzung. Konturlinien zeigen die Geländehöhe.

Die Abweichung des mittleren Tagesniederschlags im Untersuchungsgebiet Weiherbach (sowohl für alle Tage als auch für Tage mit Niederschlag > 1 mm) im Vergleich zum HYRAS-Datensatz beträgt im Zeitraum 1980-1984 maximal ± 30 %.

Für das Referenzeinzugsgebiet Scheyern wurde ein zweites, kleineres Simulationsgebiet (Abb. 4) gewählt, da ein gemeinsames Simulationsgebiet für alle Untersuchungsgebiete die Rechenzeit und die Speicherkapazität vervielfacht hätte. Die Sensitivitätsstudien wurden für das Referenzeinzugsgebiet Scheyern nicht wiederholt, es wurde die gleiche Modellkonfiguration wie für das größere Simulationsgebiet S4 übernommen.

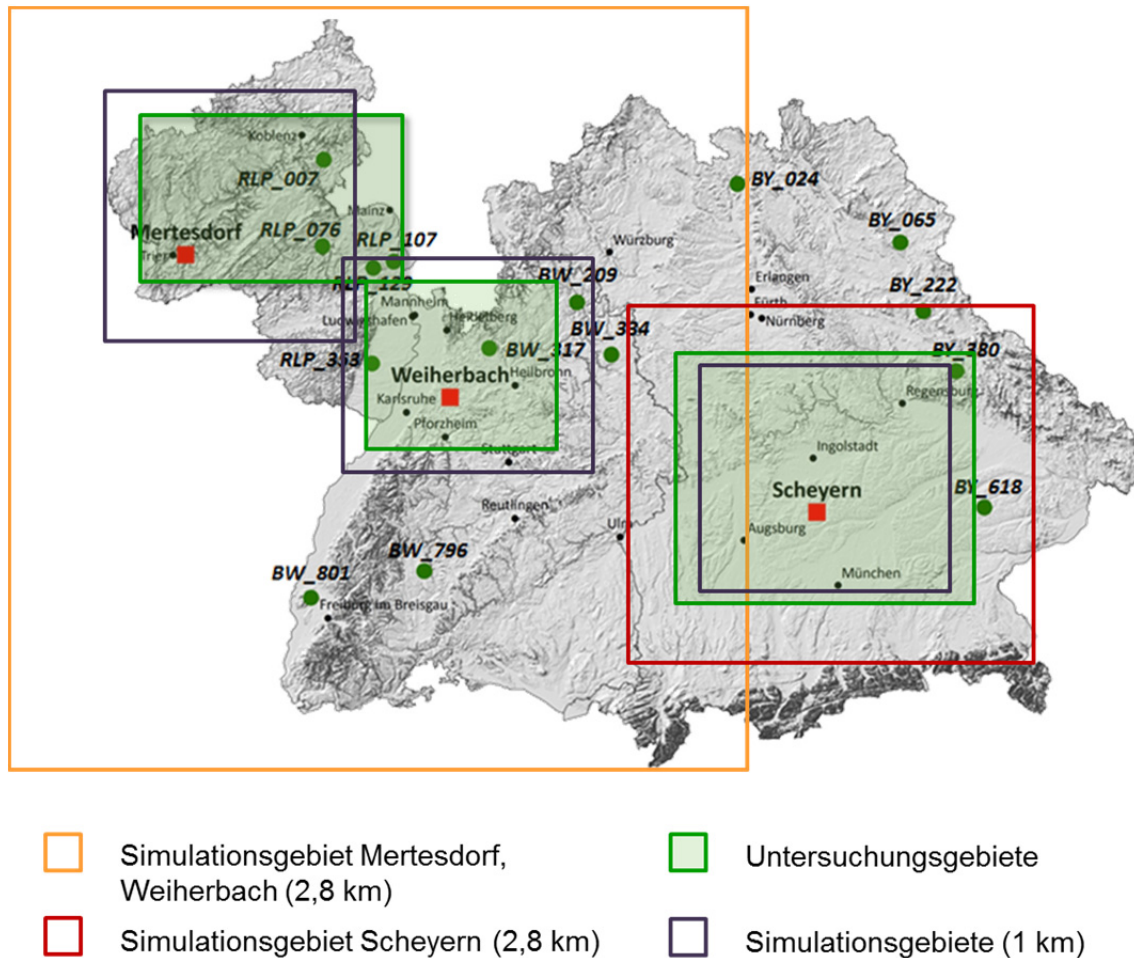


Abb. 4: Karte der Gebiete für die 2,8 km Simulationen (gelb und rot), der Untersuchungsgebiete für die Analyse der 2,8 km Simulationen (grün) und der Gebiete für die 1 km Simulationen (schwarz).

3.1.1 Auswertung der 2,8 km-Simulationen für Referenzperiode und Zukunft

Nach der Festlegung der Simulationengebiete und der Modellkonfiguration wurden Klimasimulationen für die Referenzperiode (1971-2000) und Zukunft (2021-2050)⁵, angetrieben mit ECHAM5, durchgeführt und ausgewertet. Auf Basis dieser Simulationen wurden drei Niederschlagsereignisse in der Referenzperiode und drei in der Zukunft ausgewählt und höher aufgelöst simuliert (1 km, 15 min, Kap. 3.1.2 und 3.1.3).

Tagesniederschläge: In der Referenzperiode ist Mertesdorf aufgrund der hohen Anzahl trockener Tage und dem seltenen Auftreten von hohen Niederschlagsintensitäten mit 2,5 mm mittlerem Tagesniederschlag das trockenste der drei Untersuchungsgebiete (Tab. 2). Die Untersuchungsgebiete Weiherbach und Scheyern weisen beide etwa 3,5 mm mittleren Tagesniederschlag auf. Bei der Analyse der Tage mit Niederschlag zeigt ebenfalls das Untersuchungsgebiet Mertesdorf den geringsten Wert.

⁵ Simulationengebiet Scheyern: 1990-1995 und 2045-2050. Die deutlich kürzere Simulationsperiode lässt nur eine begrenzte Statistik sowie nur einen eingeschränkten Vergleich mit den Ergebnissen des Simulationsgebiets „S4“ zu.

Tab. 2: Tägliche mittlere Niederschlagsmenge (P) für alle Tage bzw. nur für nasse Tage ($P > 1$ mm) im Sommer (JJA) für die Referenzperiode und die Zukunft. Es sind die Mittelwerte sowie das Minimum und Maximum innerhalb der Untersuchungsgebiete angegeben.

Referenzperiode			
	Weierbach	Mertesdorf	Scheyern
alle Tage	2,1 – 8,5 Ø 3,5	1,7 – 3,3 Ø 2,4	2,3 – 5,8 Ø 3,4
nasse Tage ($P > 1$ mm/Tag)	7,1 – 17,7 Ø 8,9	6,6 – 9,8 Ø 7,7	7 – 13,2 Ø 9,6
Zukunft			
alle Tage	1,8 – 7,7 Ø 3,2	1,5 – 3 Ø 2,1	2,4 – 4,7 Ø 3,2
nasse Tage ($P > 1$ mm/Tag)	7 – 18,4 Ø 9,2	6,6 – 9,7 Ø 7,7	7,6 – 12 Ø 9,7

Wahrscheinlichkeitsverteilung der täglichen Niederschlagsintensitäten: Da durch den Mittelungsprozess über alle Gitterpunkte in einem Untersuchungsgebiet Informationen verloren gehen, wurde die Wahrscheinlichkeitsverteilung der täglichen Niederschlagsintensitäten für die Referenzperiode und die Zukunft betrachtet.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung des Tagesniederschlags im Untersuchungsgebiet Weierbach zeigt eine Zunahme der niedrigen und hohen Intensitäten und eine Abnahme der mittleren Intensitäten. Auch die räumliche Verteilung ändert sich in der Zukunft. Die Anzahl der starken und sehr starken Niederschlagsereignisse nehmen im Süden des Untersuchungsgebiets Weierbach (im Anstiegsbereich des Schwarzwaldes in Höhenlagen über 600 m NN) ab, während in den tieferen Lagen eine leichte Zunahme der sehr starken Ereignisse erwartet wird.

Für das Untersuchungsgebiet Scheyern lässt sich ebenfalls eine Zunahme der niedrigen Intensitäten und eine Abnahme der mittleren Intensitäten aus der Wahrscheinlichkeitsverteilung ableiten. Bei sehr hohen Intensitäten wird sowohl für das Untersuchungsgebiet Scheyern als auch für das Untersuchungsgebiet Weierbach eine Zunahme erwartet. Für das Untersuchungsgebiet Mertesdorf wurde keine Änderung ermittelt (Tab. 3).

Tab. 3: Änderungen in der Wahrscheinlichkeitsverteilung der täglichen Niederschlagsintensitäten im Sommer.

Sommer (Juni, Juli, August)	Weierbach	Mertesdorf	Scheyern
Abnahme	4 – 30 mm/Tag	keine Änderung	2 – 50 mm/Tag
Zunahme	1 – 4 mm/Tag > 30 mm/Tag	keine Änderung	1 – 2 mm/Tag > 50 mm/Tag

Stündliche Niederschlagsintensitäten: Im Untersuchungsgebiet Weiherbach wurde für die Zukunft eine geringe Abnahme niedriger Niederschlagsintensitäten ermittelt. Bei hohen Intensitäten über 17 mm/h treten, anders als bei den Analysen auf Tagesbasis, keine Unterschiede zwischen Referenzperiode und Zukunft auf (Tab. 4).

Tab. 4: Änderungen in der Wahrscheinlichkeitsverteilung der stündlichen Niederschlagsintensitäten im Sommer.

Sommer (Juni, Juli, August)	Weiherbach	Mertesdorf	Scheyern
Abnahme	0,5 – 2 mm/h	keine Änderung	< 0,7 mm/h 1,7 – 3 mm/h
Zunahme	5 – 17 mm/h	keine Änderung	0,7 – 1,7 mm/h > 3 mm/h

Aus diesem Grund wurde für das Untersuchungsgebiet Weiherbach eine zusätzliche, ereignisbasierte Analyse durchgeführt, um die Unterschiede bei den hohen Niederschlagsintensitäten auf Tages- und Stundenbasis zu erklären. Die Dauer eines Ereignisses wird dazu als Periode definiert, in der die Niederschlagsintensität stets über $0,1 \text{ mm h}^{-1}$ liegt. Die Dauer und Niederschlagsmenge pro Ereignis wurden für jeden Gitterpunkt berechnet. Anschließend wurden diese Ereignisse nach Dauer und Menge klassifiziert und pro Klasse ausgezählt. Zu beachten ist, dass dieses Verfahren dazu führt, dass großskalige Ereignisse überdurchschnittlich berücksichtigt werden, da diese Ereignisse sich über mehrere Gitterpunkte erstrecken und deswegen mehr als einmal gezählt werden können.

In Abbildung 5 sind die Anzahl der Ereignisse für jede Klasse in der Referenzperiode (links) und die Differenz zwischen Referenzperiode und Zukunft (rechts) dargestellt. Die Klassen unterscheiden sich in Schritten von 10 mm/ Ereignis für die Menge und fünf Stunden für die Dauer der Ereignisse. Dies bedeutet, dass die erste Klasse Ereignisse mit einer Niederschlagsintensität zwischen 0,1 und 10 mm innerhalb von fünf Stunden enthält. Die Ereignisse in der zweiten Klasse erzeugen Niederschlagsintensitäten zwischen 11 und 20 mm in fünf Stunden etc.. Ähnlich wurde bei der Reduzierung der Dauer der Ereignisse vorgegangen, indem die Niederschlagsmenge konstant gehalten wurde. Für die Klassifizierung wurden 30 Simulationsjahre verwendet. Diese Auswertung liefert mehr Informationen als eine Standard-Wahrscheinlichkeitsverteilung, in der sich Abweichungen in entgegengesetzter Richtung kompensieren können. Abbildung 5 zeigt, dass die Anzahl der kurzen Ereignisse mit niedrigen Intensitäten abnehmen. Die Anzahl der Ereignisse mit einer Dauer von 10-20 Stunden und einer Niederschlagsintensität zwischen 20 und 90 mm/ Ereignis nehmen dagegen zu. Darüber hinaus nimmt die Anzahl der Ereignisse ab, die länger als einen Tag andauern, was mit einer Abnahme großskaliger Niederschlagsereignisse übereinstimmt (Giorgi et al. 2004).

Die Analysen zeigen darüber hinaus eine starke Abnahme von -14 % der Gesamtzahl der Niederschlagsereignisse, während sich die Gesamtniederschlagsmenge, vor allem in den Tiefen, kaum ändert. Diese Abnahme bestätigt die Zunahme der Länge und Häufigkeit von Trockenperioden. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass es in Zukunft weniger oft Nie-

derschlag geben kann, die Ereignisse kürzer werden und eine höhere Intensität aufweisen können. Die Zunahme an höheren Niederschlagsintensitäten und an trockenen Tagen stimmen mit Studien mit niedrigerer horizontaler Auflösung überein (z. B. Feldmann et al. 2012).

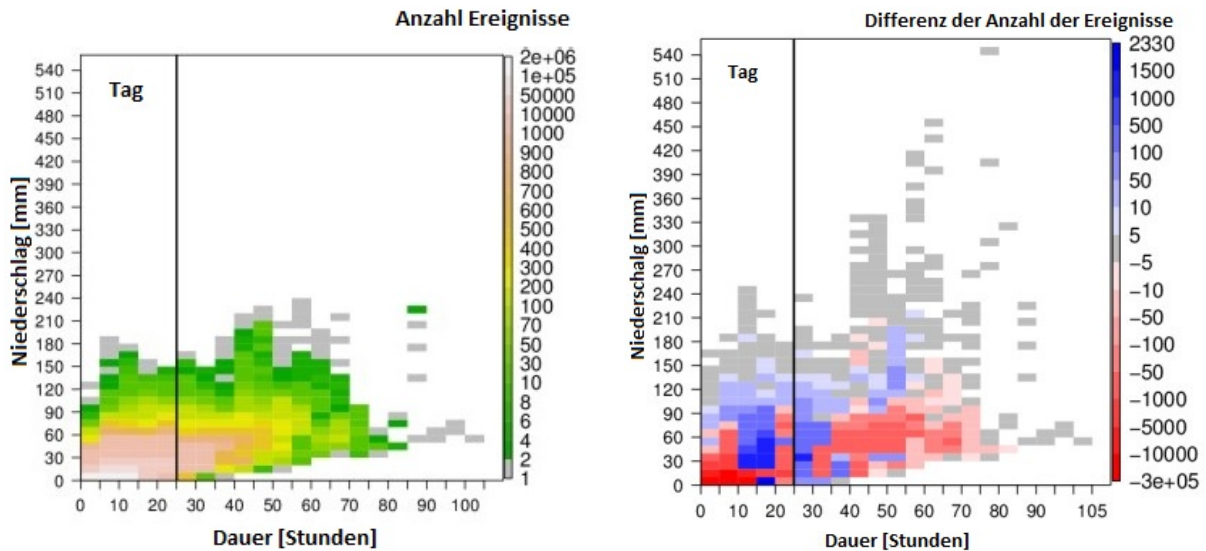


Abb. 5: Verteilung der Niederschlagsereignisse in Abhängigkeit von Dauer und Gesamtniederschlag. Dargestellt sind die Verteilungen in der Referenzperiode (links) und der Differenz zwischen Referenzperiode und Zukunft (rechts). Die Skala zeigt die Anzahl der Ereignisse in einer 30 Jahre-Simulation (Weiherbach).

3.1.2 Vergleich der 2,8 km- mit 1 km-Simulationen

Innerhalb der Projektphase II wurden für die drei Referenzeinzugsgebiete Simulationen mit einer horizontalen Auflösung von 1 km und einer zeitlichen Auflösung von 15 min durchgeführt, die als Eingangsdaten für das Erosionsmodell LISEM dienten. Wegen des hohen Zeit- und Rechenaufwands war es nicht möglich, lange Zeiträume zu simulieren. Daher wurden auf Basis der 2,8 km-Simulationen für jedes Referenzeinzugsgebiet drei Niederschlagsereignisse in der Referenzperiode und drei in der Zukunft ausgewählt (siehe Kap. 3.1.3). Diese Einzelergebnisse wurden dann in der 1 km-Auflösung erneut simuliert. Die Modellkonfiguration entsprach der der 2,8 km-Simulationen. Das Simulationsgebiet (siehe Abb. 4) für die 1 km-Simulationen ist für alle Referenzeinzugsgebiete 140 x 135 Gitterpunkte groß.

Fosser et al. (2013) und Prein et al. (2013) zeigten, dass Simulationen mit einer 2,8 km-Auflösung im Vergleich zu Simulationen mit einer niedrigeren Auflösung die Wahrscheinlichkeitsverteilung für den stündlichen Niederschlag sowie die Wiedergabe von Extremereignissen verbessern. Darüber hinaus gleicht der Tagesverlauf des Niederschlags, aufgrund einer besseren Wiedergabe der konvektionsbedingten Witterungsverhältnisse, mehr den Beobachtungen (Fosser et al. 2013). Diese Verbesserung beruht vor allem darauf, dass bei einer 2,8 km-Auflösung, die hochreichende Konvektion nicht mehr parametrisiert werden

musste. Dies wird auch für die Simulationen mit einer 1 km-Auflösung übernommen. Erfahrungen mit so hoch aufgelösten Simulationen sind jedoch bisher begrenzt.

Der Vergleich der beiden Auflösungen bezieht sich auf die Sommermonate ausgewählter Jahre im Untersuchungsgebiet Weiherbach. Für den Vergleich wurden die 1 km-Simulationen auf das Feld der 2,8 km-Simulationen interpoliert. Als Modellantrieb diente das Globalmodell ECHAM5. Abbildung 6 zeigt die räumliche Verteilung des mittleren Tagesniederschlags im Sommer in der 1 km- (links) und der 2,8 km-Auflösung (rechts). Werden alle Tage für die Auswertung berücksichtigt, nimmt die Niederschlagsmenge der 1 km-Simulationen im Vergleich zu den 2,8 km-Simulationen gleichmäßig über das gesamte Untersuchungsgebiet ab. Werden hingegen nur die Tage mit Niederschlag (> 1 mm) berücksichtigt, konzentriert sich die Abnahme auf den Süden des Gebietes (Anstiegsbereich des Schwarzwaldes). Da das Modell in der 2,8 km-Auflösung den Niederschlag im Vergleich zum HYRAS-Datensatz überschätzt, ist der Rückgang der Niederschläge bei der 1 km-Auflösung als Verbesserung zu werten.

Im Vergleich zu den Beobachtungen geben die 2,8 km-Simulationen den stündlichen Niederschlag gut wieder. Die hohen Intensitäten werden von den 1 km-Simulationen, sowohl im Vergleich zu den 2,8 km-Simulationen, als auch im Vergleich zu den Beobachtungen unterschätzt. Geringere Intensitäten in den 1 km-Simulationen und eine Zunahme der trockenen Stunden resultieren in einer Abnahme in der Amplitude des Niederschlagstagesgangs. Der Tagesverlauf des Niederschlags bleibt bei einer höheren Auflösung gleich, da bei beiden Auflösungen die hochreichende Konvektion nicht parametrisiert wird.

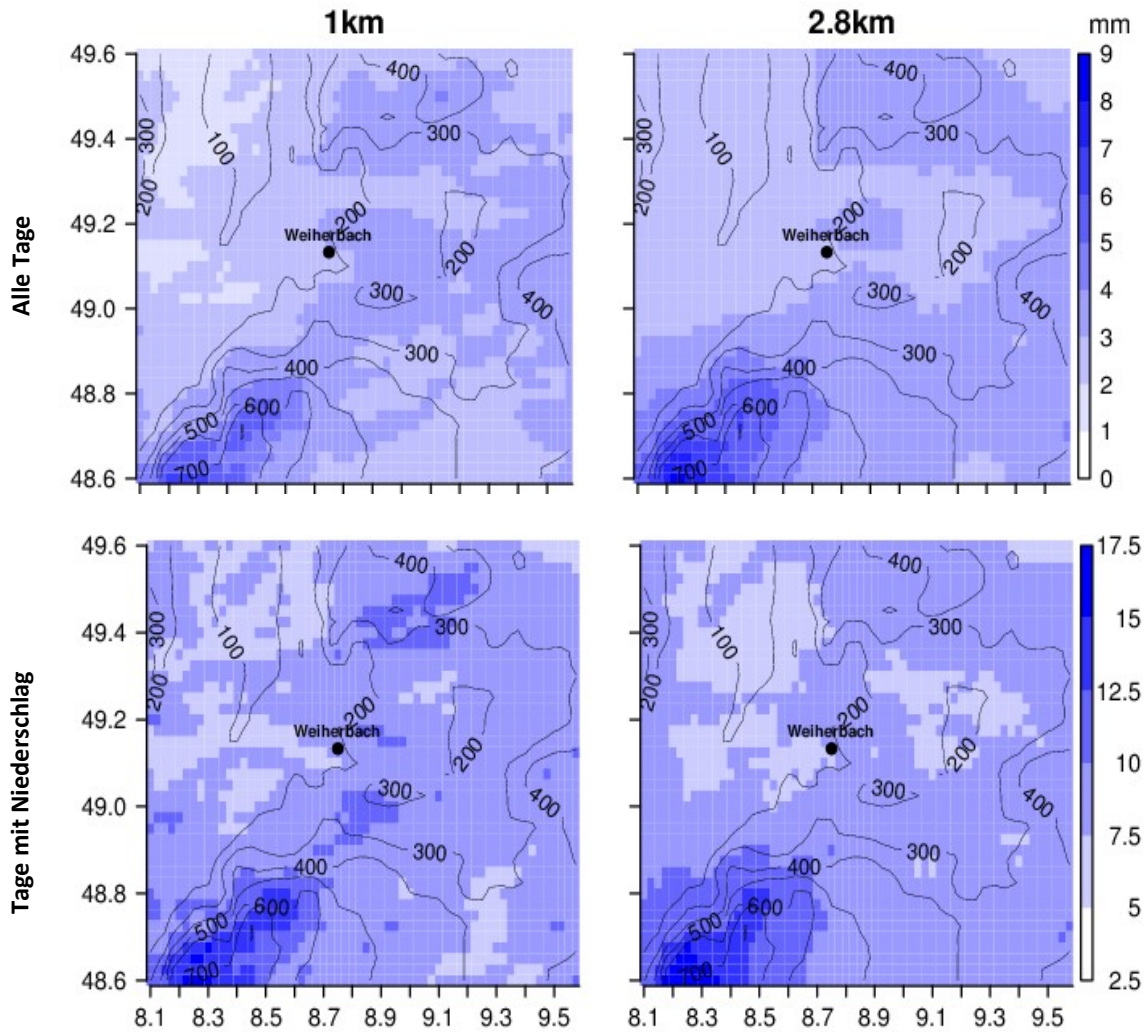


Abb. 6: Räumliche Verteilung des mittleren Tagesniederschlags im Sommer im Untersuchungsgebiet Weierbach mit einer 1 km- (links) und einer 2,8 km-Simulation (rechts) für den Zeitraum 1990-1995. Oben werden die Ergebnisse für alle Tage, unten nur für Tage mit Niederschlag (Niederschlag > 1 mm/Tag) gezeigt (unterschiedliche Skala oben und unten). Die Konturlinien zeigen die Geländehöhe.

Abbildung 7 zeigt zwei Beispielergebnisse für die Einzugsgebiete Scheyern (links) und Merstedorf (rechts). Die durchgezogene Linie zeigt den mittleren Niederschlag über die Gitterpunkte innerhalb der Referenzeinzugsgebiete. Die Daten wurden nicht auf ein gemeinsames Gitternetz gebracht, daher ist die Anzahl der Gitterpunkte für die Berechnung des Mittelwerts bei den beiden Auflösungen unterschiedlich. Obwohl das zeitliche Auftreten der Ereignisse in beiden Auflösungen ähnlich ist, zeigen die Mittelwerte zeitweise deutliche Unterschiede. Das beruht auf zwei Faktoren: Erstens unterschätzen die 1 km-Simulationen höhere Intensitäten auf Stundenbasis, zweitens ist die Anzahl der Gitterpunkte, die für die Mittelung verwendet wird, für die 1 km-Auflösung höher als für die 2,8 km-Auflösung. Dies führt dazu, dass bei höheren Auflösungen einzelne Gitterpunkte ohne Niederschlag einen großen Einfluss auf den Mittelwert haben können. Bei der Betrachtung der Maximalwerte (gestrichelte Linie), reduziert sich dieser Unterschied erheblich.

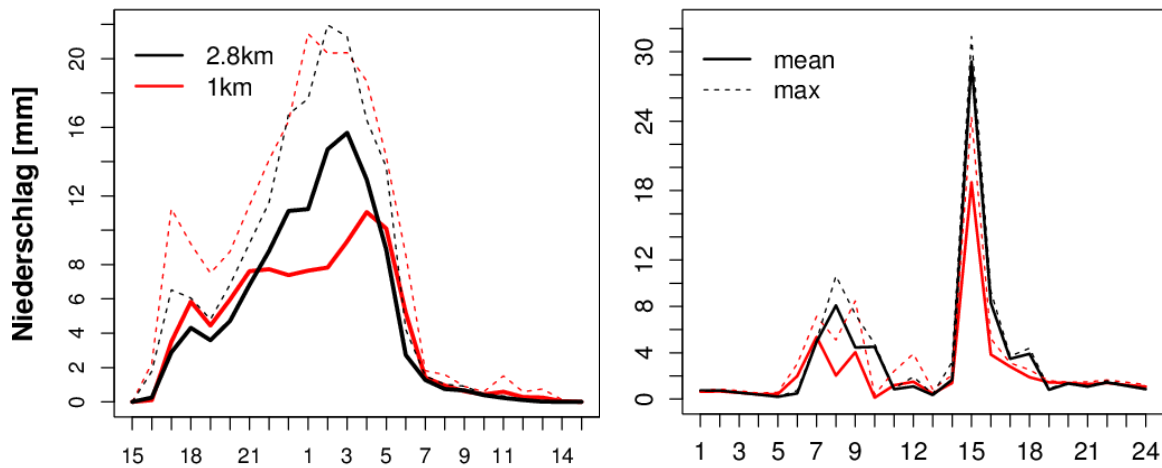


Abb. 7: Tagesgang des Niederschlags für zwei Zeiträume für die 1 km- (rot) und 2,8 km-Simulationen (schwarz) für die Untersuchungsgebiete Scheyern (links) und Mertesdorf (rechts). Durchgezogene Linien zeigen den Mittelwert, gestrichelte Linien die Maximalwerte der Gitterpunkte.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Ergebnisse der 1 km-Auflösung gut mit den Ergebnissen der 2,8 km-Auflösung übereinstimmen, vor allem in Bezug auf das zeitliche Auftreten der Ereignisse. Jedoch zeigen die Ergebnisse der 1 km-Simulationen im Vergleich zu den 2,8 km-Simulationen und den Beobachtungen eine Unterschätzung höherer Niederschlagsintensitäten auf Stundenbasis, was letztendlich auch zu einer Unterschätzung der Bodenerosion führen kann (Tab. 5).

Tab. 5: 1 km-Simulationen im Vergleich zu den 2,8 km-Simulationen und Beobachtungen (täglich: HYRAS; stündlich: Messstationen) für Sommermonate (Juni, Juli, August) ausgewählter Jahre im Untersuchungsgebiet Weiherbach.

Kriterium	Ergebnis
systematische Unterschiede	Abnahme des systematischen Unterschieds (weniger zu feucht; sowohl für alle als auch nur für nasse Tage)
relative Anzahl der trockenen Tage und Stunden	Abnahme der Unterschätzung um 6 % für trockene Tage und um 1 % für trockene Stunden
Wahrscheinlichkeitsverteilung (Tageswerte)	Verbesserte Wiedergabe von Intensitäten unter 15 mm/Tag Zunahme der Überschätzung von Intensitäten über 15 mm/Tag im Vergleich zum HYRAS-Datensatz
Wahrscheinlichkeitsverteilung (Stundenwerte)	Unterschätzung von hohen Intensitäten im Vergleich zu den 2,8 km-Simulationen sowie den Stationsbeobachtungen
Tagesgang des Niederschlags	Richtige Wiedergabe des Tagesganges Abnahme der Überschätzung der Amplitude des Tagesganges im Vergleich zu den 2,8 km-Simulationen

3.1.3 Auswahl der Niederschlagsereignisse für die Erosionsmodellierung

Die Auswahl der Niederschlagsereignisse für die Erosionssimulationen erfolgte für die drei Referenzeinzugsgebiete auf Basis der 2,8 km und für die Piloteinzugsgebiete auf Basis der 7 km COSMO-CLM Daten.

Für die Erosionsmodellierung wurden für den Zeitraum April bis September die Niederschlagsereignisse mit den höchsten Intensitäten ausgewählt. Die überwiegende Anzahl der ausgewählten Ereignisse erreichten Niederschlagsintensitäten zwischen 20 und 30 mm h⁻¹. Extremereignisse > 60 mm h⁻¹ kommen in den Referenzeinzugsgebieten bei der 2,8 km-Auflösung in geringer Anzahl und bei der 7 km-Auflösung nicht vor. Für die Referenzeinzugsgebiete wurden die ausgewählten Ereignisse aus der 2,8 km-Simulation anschließend nochmals mit einer räumlichen Auflösung von 1 km und einer zeitlichen Auflösung von 15 min erneut simuliert und an das Erosionsmodell übergeben.

3.2 Schnittstelle zwischen den Modellen

Das Klimamodell COSMO-CLM liefert Simulationsergebnisse als Raster in der gewählten räumlichen und zeitlichen Auflösung des Simulationslaufs. Die Niederschlagshöhe wird in Millimeter für jeden Gitterpunkt ausgegeben. Um die Niederschlagshöhe aus COSMO-CLM als Eingangdatensatz für die Bodenerosionsmodellierung nutzen zu können, mussten die Niederschläge in Ganglinien konvertiert und eine Karte mit Koordinaten von Niederschlagsstationen erzeugt werden. Die Koordinaten dieser „virtuellen“ Niederschlagsstationen entsprechen dabei dem Mittelpunkt der COSMO-CLM-Gitterbox. Da manuelle Konvertierungen fehleranfällig sind, wurde ein Konvertierungsprogramm (COSMO2LISEM-Werkzeug) erstellt.

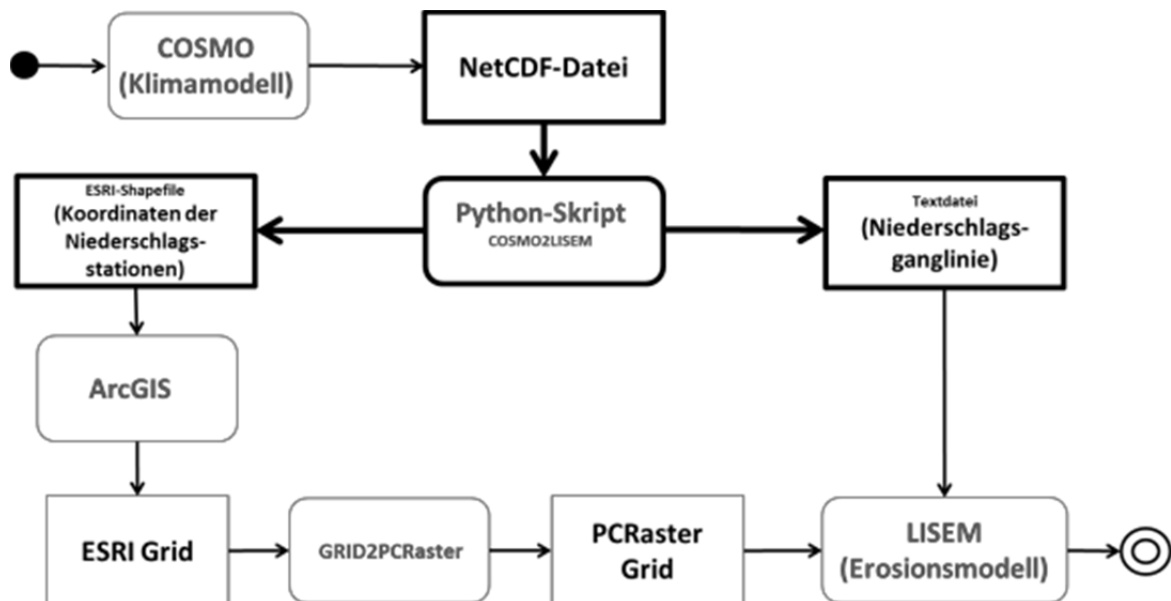


Abb. 8: Schnittstelle zwischen COSMO-CLM und LISEM

3.3 Erosionsmodellierungen

Als Eingangsdaten für die Erosionsmodellierung mit LISEM dienen digitale Grundlagendaten wie Geländemodell, Bodenkarte und Landnutzung. Weitere Parameter wie beispielsweise Blattflächenindex, Bodenbedeckungsgrad und Aggregatstabilität werden aus Literaturrecherchen gewonnen. Die raumbezogenen Daten wurden in einem Geographischen Informationssystem (GIS) aufbereitet, in einer Datenbank verwaltet und mittels eines Konverters in das für LISEM benötigte PCRaster-Format⁶ umgewandelt.

Das digitale Geländemodell diente zur Berechnung der Fließrichtung und Hangneigung. Aus Bodenkarten wurde die räumliche Verteilung von Bodentypen entnommen. Durch Leitbodenprofile, mit den zugehörigen Attributtabelle, wurden die vertikalen Eigenschaften in den Referenzeinzugsgebieten parametrisiert. Die Bodenhorizonte und die Tiefen wurden für alle Leitböden einheitlich diskretisiert (20 Bodenhorizonte bis in eine Tiefe von 250 cm). Die weitere Transformation und Parametrisierung der Bodenprofilkennwerte wie Bodenart und Lagerungsdichte dienten der Berechnung der Wasserleitfähigkeit und des Matrixpotenzials. Dazu wurden Pedotransferfunktionen des van Genuchten/ Mualem-Modells (Van Genuchten 1980) verwendet.

Die initialen Bodenwasserspannungen als sensitive Eingangsgröße für die Erosions- und Abflusssimulationen wurden aus den Bodenwasservorräten berechnet, die aus dem Bodenmodul des COSMO-CLM (Terra-ML) übernommen und für LISEM aufbereitet wurden. Die Berechnung erfolgte durch die Transformation der Wasservorräte der einzelnen Terra-ML-Bodenschichten in die Bodenhorizontierung, die sich aus den verwendeten Leitbodenformen der Bodenkarten ergab. Die Wasserspannung wurde anschließend mit dem Programm RETC (*RETention-Curve program for unsaturated soils*, Van Genuchten et al. 1991) bestimmt.

Die Ermittlung der übergeordneten Landnutzung wie Siedlung, Wald, Acker- und Verkehrsflächen basiert auf den Informationen des ATKIS⁷ oder ALK⁸ bzw. Basis-DLM⁹. Der Vergleich mit Luftbildern ergab z. T. größere Differenzen in der Flächennutzung, die jedoch nur bei gravierenden Abweichungen korrigiert wurden. Zudem zeigt das ALK eine erheblich stärkere Parzellierung der Ackerflächen, als mit Luftbildern dokumentiert ist und somit auch in der Realität vorliegt. Da eine kleingemusterte Verteilung der unterschiedlichen Feldfrüchte auf Basis des ALK (BW, RP) das Erosionsrisiko beeinflusst und die Realität nur ungenau widerspiegelt, wurden die Flurstücke an die realen Feldgrößen entsprechend einer visuellen Luftbildauswertung angepasst. Die Übereinstimmung der Größe der Ackerparzellen war zwischen DFK (BY) und Luftbildern insgesamt befriedigend.

Die Feldfruchtverteilung auf den Ackerflächen der Einzugsgebiete wurde bei entsprechender Verfügbarkeit aus Dokumentationen entnommen, andernfalls aus der Agrarstatistik auf Gemeindeebene abgeleitet. Bei der Zuweisung der Feldfrüchte wurden aufgrund der unterschiedlichen Vorgruppierungen von Feldkulturen der statistischen Landesämter von Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Bayern neun übergeordnete Feldfruchtgruppen gebildet, die

⁶ PCRaster ist eine kostenfreie Software für die Bearbeitung von Rasterdaten.

⁷ ATKIS = Amtliches Topographisches Informationssystem

⁸ ALK = Amtliches Liegenschaftskataster

⁹ Basis-DLM = Digitales Basis-Landschaftsmodell

Kulturpflanzen mit vergleichbarem Habitus und ähnlicher Erosionswirksamkeit umfassen. Allerdings waren ungünstige Gruppierungen hierbei unvermeidbar wie z. B. Gemüse und Körnerleguminosen, da diese bereits in der Agrarstatistik gruppiert waren.

Weitere Parameter zu Boden- und Pflanzeigenschaften wie z. B. Blattflächenindex, Vegetationshöhe, Rauigkeitsbeiwert nach Manning, Bodenbedeckungsgrad oder Aggregatstabilität wurden durch ergänzende Literatur- und Datenbankrecherchen gewonnen. Zeitlich variable Parameter wie z. B. der Blattflächenindex oder die Vegetationshöhe wurden monatlich angepasst. Damit nicht für die einzelnen Monate die Parameter aufwändig ausgeschrieben werden müssen, wurde ein automatisiertes Verfahren (PARA2PCRASTER Tool) entwickelt, das für den entsprechenden Monat alle Parameter aus einer Excel-Tabelle liest und die Parametertabellen für LISEM erzeugt.

3.3.1 Plausibilisierung von LISEM

Die Modelleinstellungen von LISEM wurden in erster Linie mittels Vergleich von simulierten und gemessenen Gebietsabflüssen geprüft, hierzu waren nur verlässliche Vergleichsdaten aus dem Referenzeinzugsgebiet Weiherbach verfügbar. Für das Referenzgebiet Scheyern waren weder vom gesamten Einzugsgebiet noch von kleineren Teileinzugsgebieten hochaufgelöste Abflussdaten verfügbar. Für das Referenzgebiet Mertesdorf wurden an der ehemaligen Erosionsmessstelle keine Gebietsabflüsse erhoben, sondern nur Abflüsse von den Testparzellen. Berechnungsversuche bieten zwar eine weitere Vergleichsoption, allerdings sind die verfügbaren Informationen hinsichtlich der LISEM-Eingangsdaten lückenhaft und heterogen. Für die Konfiguration des Erosionsmodells und die Ergebnisplausibilisierung wurden vom Institut für Wasser und Gewässerentwicklung des KIT Karlsruhe Niederschlags-, Abfluss- und Landnutzungsdaten für das Referenzeinzugsgebiet Weiherbach zur Verfügung gestellt. Damit wurden drei reale Niederschlagsereignisse simuliert. Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit dem realen Gebietsabfluss ergab für ein Ereignis eine gute Übereinstimmung und für zwei Ereignisse Unterschätzungen (Abb. 9).

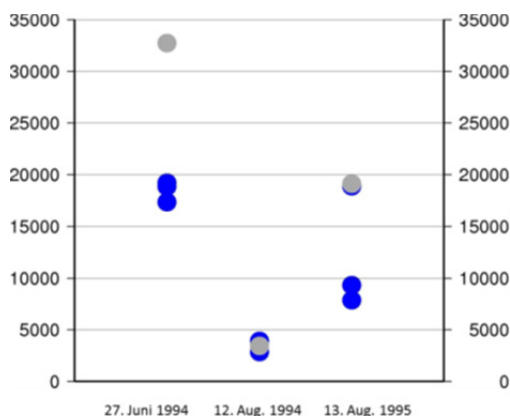


Abb. 9: Gemessene (graue Punkte) und mit Messwerten simulierte (blaue Punkte) Abflussvolumina [m³] bei unterschiedlicher Feldfruchtverteilung.

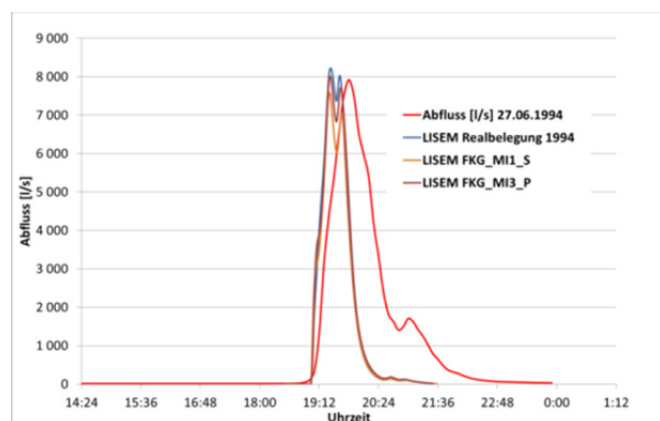


Abb. 10: Ganglinien gemessener und mit Realniederschlag simulierter Abflüsse am 27.06.1994 im Referenzeinzugsgebiet Weiherbach.

Die Unterschätzungen resultierten u. a. aus einem schneller abklingenden Abfluss gegenüber den Beobachtungen (Abb. 10). Die Abflussspitzen wurden jedoch zufriedenstellend simuliert. Für die beiden Ereignisse im Jahr 1994 standen reale Ackerbelegungsdaten und generierte Ackerbelegungen aus der Agrarstatistik zur Verfügung. Das Ereignis aus dem Jahr 1995 wurde nur mit generierten Ackerbelegungen modelliert.

3.3.2 Anwendung der Modellkette

Abbildung 11 gibt einen Überblick über die durchgeführten Simulationen. Es wurden zur Plausibilisierung der Ergebnisse des Erosionsmodells neun Simulationen von drei Realereignissen im Referenzeinzugsgebiet Weiherbach durchgeführt. Darüber hinaus wurden in den drei Referenzeinzugsgebieten für die Referenzperiode und nahe Zukunft exemplarische Erosionsmodellierung mit jeweils drei Ereignissen aus den COSMO-CLM-Simulationen mit einer räumlichen und zeitlichen Auflösung von 1 km und 15 min und jeweils drei aus der Agrarstatistik typisch-generierten Belegungen mit Feldfrüchten durchgeführt. Somit ergeben sich 54 Simulationen für die Referenzeinzugsgebiete Mertesdorf, Scheyern und Weiherbach. In den 15 Pilotgebieten wurden jeweils Erosionsmodellierungen mit einem Niederschlagsereignis mit einer Auflösung von 7 km und zwei typisch-generierten Feldbelegungen durchgeführt, somit insgesamt 60 Erosionsszenarien modelliert.

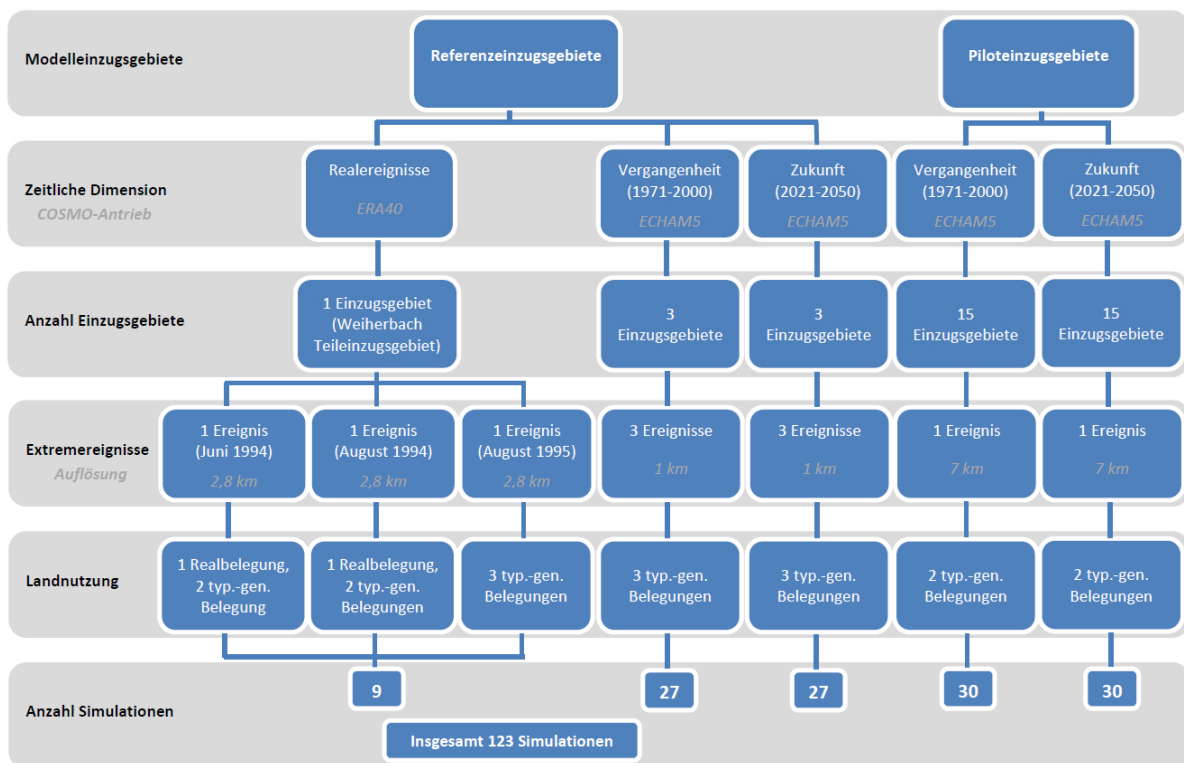


Abb. 11: Durchgeführte Simulationen (typ-gen = aus der Agrarstatistik typisch-generierte Feldbelegungen).

Bei den durchgeführten Erosionssimulationen konnte kein signifikanter Einfluss der unterschiedlichen Feldfrüchte auf das Abfluss- und Abtragsgeschehen ermittelt werden. Allerdings variierten die Feldfrüchte auch nur in der räumlichen Verteilung und nicht im Flächenanteil

erosionskritischer und erosionsunkritischer Feldfrüchte, da nur mit agrarstatistischen Mittelwerten gerechnet wurde und nicht mit unterschiedlichen Flächenanteilen.

Aufgrund der für eine statistische Auswertung zu geringen Anzahl an Simulationen pro Einzugsgebiet, ist ein direkter Vergleich der Bodenabträge zwischen Referenzperiode und Zukunft separat für jedes Einzugsgebiet nicht möglich. Für eine zusammenfassende Übersicht wurden daher alle Ergebnisse der Erosionssimulationen der Referenzperiode und der Zukunft gegenübergestellt. In Abbildung 12 ist die Verteilung der Bodenabträge und Niederschlagssummen in einem Boxplot-Diagramm dargestellt. Das 50. und 85. Perzentil der Verteilung deuten auf eine geringfügige Zunahme der Niederschlagssummen und der Erosion in der nahen Zukunft hin. Die hohen Extremwerte bleiben jedoch vergleichbar.

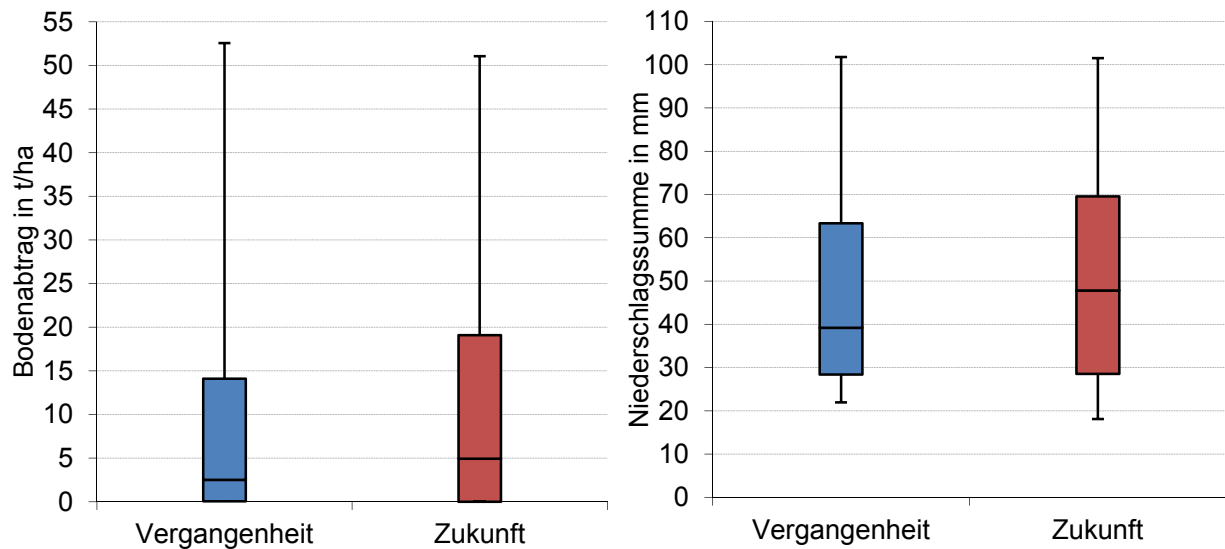


Abb. 12: Boxplots mit 15., 50. und 85. Perzentil sowie den Extremwertspannen von Bodenerosion und Niederschlagssummen auf Basis aller Simulationsergebnisse.

4 Diskussion und Fazit zur Modellkopplung

Die Abschaltung der Parametrisierung für die hochreichende Konvektion in der 2,8 km-Simulation führte zu einer verbesserten Wiedergabe der Wahrscheinlichkeitsverteilung der stündlichen Niederschlagsintensitäten sowie des Tagesgangs der Niederschläge. Dies stellt eine Verbesserung für die Erosionsmodellierung dar und kann auch für die regionale Wasserhaushaltsmodellierung von Bedeutung sein. Im Rahmen von KLIWA werden die Niederschlagssimulationen in der Auflösung 2,8 km und 1 h (nicht *bias-korrigiert*) weiter ausgewertet. Neben einer extremwertstatistischen Auswertung (Antrieb ERA 40) für das Neckar-Einzugsgebiet und dem Vergleich mit den Daten des *KOSTRA-Atlas* des DWD (DWD/DH 1997; DWD/DH 2005), werden exemplarische Wasserhaushaltssimulationen durchgeführt (Antrieb ECHAM5/MPI-OM). Die Ergebnisse werden mit bisherigen Ergebnissen der Wasserhaushaltssimulation mit *bias-korrigiert* Daten in 7 km-Auflösung verglichen.

Die Ergebnisse der Niederschlagssimulationen in der Auflösung 1 km stimmen gut mit denen der 2,8 km-Auflösung überein, vor allem im Hinblick auf das zeitliche Auftreten der Niederschlagsereignisse. Im Vergleich zu den 2,8 km-Simulationen unterschätzen die 1 km-Simulationen jedoch die höheren Niederschlagsintensitäten auf Stundenbasis. Das kann in der Folge auch zu einer Unterschätzung von Abfluss und Bodenabtrag führen. Ob diese Unterschätzung ein systematischer Fehler ist, konnte aufgrund der geringen Anzahl simulierter Niederschlagsereignisse im Rahmen dieses Projektes nicht ermittelt werden.

Eine wichtige Eingangsgröße für die Erosions- und Abflussmodellierungen mit LISEM sind die Ausgangsbodenfeuchten zu Beginn eines Starkniederschlagsereignisses. Da das Bodenmodul Terra-ML in COSMO-CLM sowohl für die Referenzperiode als auch für die Zukunft Bodenfeuchten ausgibt, wurden die entsprechenden Werte als Eingangsdaten für die LISEM-Modellierung verwendet. Allerdings müssen die Bodenfeuchten, die als Wasservorrat bzw. „Wasserstand“ in Terra-ML spezifischen Bodenschichten ausgegeben werden, für LISEM in Wasserspannungswerte transformiert werden. Hierbei ergeben sich Ungenauigkeiten aufgrund der eingeschränkten Differenzierung der Bodenarten im Terra-ML (5 Klassen) gegenüber den Bodenkarten (20 Klassen). Die Differenzen sind unvermeidbar, da Terra-ML auf der europäischen Bodenkarte im Maßstab 1: 1.000.000 basiert, die LISEM-Modellierungen hingegen auf Angaben aus Bodenkarten im Maßstab von 1: 25.000 bis 1: 200.000 beruhen. Auch verwendet Terra-ML andere Bodenhorizontierungen als die verwendeten Bodenkarten. Die Umrechnung der Bodenfeuchtwerte aus Terra-ML erfolgte manuell, so dass der Aufwand für die Aufbereitung sehr hoch ist.

Für die prozessorientierte Erosionsmodellierung sind vielfältige Eingabedaten erforderlich. Damit verbunden ist ein hoher Parametrisierungsaufwand, der sich aufgrund der heterogenen Datensituation der drei beteiligten Bundesländer nochmals vergrößert. Durch die Entwicklung (halb)automatisierter GIS-gestützter Werkzeuge konnte die Aufbereitung der Datengrundlage erleichtert, aber nicht vereinheitlicht werden. Eine einfache Übertragung der Aufbereitungsschritte zwischen den drei Bundesländern war nicht möglich. Zudem musste der Simulationszeitschritt für jedes Einzugsgebiet angepasst werden, da die Speicherkapazität des Erosionsmodells für einige Simulationen nicht ausreichte und dies zu Modellinstabilitäten führte.

Für Fallstudien im Sinne der in Projektphase II durchgeführten „*worst-case*“-Abschätzungen, d. h. Erosionsmodellierung auf Basis einzelner, ausgewählter Starkniederschläge mit möglichst hoher Intensität, ist die entwickelte Kette aus Klima- und Erosionsmodell anwendbar.

Hinsichtlich künftiger Anwendungsoptionen hält die KLIWA Arbeitsgruppe Boden fest, dass Erosionssimulationen zwar in weiteren Kleineinzugsgebieten der Bundesländer durchgeführt werden könnten, eine flächendeckende Modellierung des KLIWA-Gebietes gegenwärtig jedoch nicht in Betracht gezogen wird, da die benötigte Rechenkapazität und der Aufwand für die Aufbereitung der Eingangsdaten zu hoch ist. Zudem sind Erosionsmodellierungen auf Basis vieler einzelner Niederschlagsereignisse, die für eine notwendige statistische Auswertung durchzuführen sind, zu aufwendig und kostenintensiv. Die Anwendung der Modellkette im Rahmen von KLIWA bleibt daher zunächst auf die Fallstudien in den Referenz- und Pileinzugsgebieten beschränkt

5 Literatur

- Auerswald, K. (1996): Jahrgang der Eintrittswahrscheinlichkeit erosiver Starkregen in Süddeutschland. – Zeitschrift für Kulturtechnik und Landentwicklung 37: 81-84.
- Assmann, A., Kempf, J., Billen, N., Schipper, H. & Engelhardt, M. (2009): Konzeptstudie „Bodenabtrag durch Wassererosion in Folge von Klimaveränderungen“, Abschlussbericht.
- Bachner, S. (2008): Daily precipitation characteristics simulated by a Regional Climate Model, including their sensitivity to model physics. – Dissertation. Bonn.
- Baldauf, M., Seifert, A., Förstner, J., Majewski, D., Raschendorfer, M. & Reinhardt, T. (2011): Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: description and sensitivities. – Monthly Weather Review 139(12): 3887-3905. doi: 10.1175/MWR-D-10-05013.1
- Berg, P., Feldmann, H. & Panitz, H.-J. (2012): Bias correction of high resolution RCM data. – Journal of Hydrology 448: 80-92. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.04.026
- Boberg, F., Berg, P., Thejll, P., Gutowski, W. J. & Christensen, J. H. (2009): Improved confidence in climate change projections of precipitation evaluated using daily statistics from the PRUDENCE ensemble. – Climate Dynamics 32: 1097-1106. doi: 10.1007/s00382-008-0446-y
- Boberg, F., Berg, P., Thejll, P., Gutowski, W. J. & Christensen, J. H. (2010): Improved confidence in climate change projections of precipitation further evaluated using daily statistics from ENSEMBLES models. – Climate Dynamics 35: 1509-1520. doi: 10.1007/s00382-009-0683-8
- Bachner, S. (2008): Daily precipitation characteristics simulated by a Regional Climate Model, including their sensitivity to model physics. – Dissertation. Bonn.
- DIN 19708 (2005): Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG.
- DVWK (Hrsg.) (1999): Einflüsse land- und forstwirtschaftlicher Maßnahmen auf den Hochwasserabfluss - Wissensstand, Skalenprobleme, Modellansätze. – Materialien 7/1999, Bonn.
- DWA (Hrsg.) (2012): Merkblatt DWA-M 910 - Berücksichtigung der Bodenerosion durch Wasser bei der Maßnahmenplanung nach EG-Wasserrahmenrichtlinie (2009 im Entwurf).
- DWD/DH (Hrsg.) (1997): Starkniederschlagshöhen für Deutschland (KOSTRA-DWD), Offenbach am Main, 1997, 80 S.
- DWD/DH (Hrsg.) (2005): KOSTRA-DWD-2000 Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951-2000) - Grundlagenbericht. Offenbach.

- Feldmann, H., Früh, B., Kottmeier, C., Panitz, H. J. & Schädler, G. (2010): Hochauflösende regionale Simulationen künftiger Starkniederschlagsereignisse in Baden-Württemberg (ReSiPrec). – Forschungsvorhaben innerhalb des Programms Herausforderung Klimawandel Baden-Württemberg, Institut für Meteorologie und Klimaforschung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
- Feldmann, H., Schädler, G., Panitz, H.-J. & Kottmeier, C. (2012): Near future changes of extreme precipitation over complex terrain in Central Europe derived from high resolution RCM ensemble simulations. – *International Journal of Climatology* 33:1964-1977. doi: 10.1002/joc.3564
- Fosser, G. (2013): Precipitation statistics from regional climate model at resolutions relevant for soil erosion. – *Wissenschaftliche Berichte des Instituts für Meteorologie und Klimaforschung des Karlsruher Instituts für Technologie* 66, 177 S.
- Giorgi, F., Bi, X. & Pal, J. (2004): Mean, interannual variability and trends in a regional climate change experiment over Europe. II: climate change scenarios (2071-2100). – *Climate Dynamics* 23: 839-858.
doi: 10.1007/s00382-004-0467-0
- Grell, G. A., Schade, L., Knoche, R., Pfeiffer, A. & Egger, J. (2012): Nonhydrostatic climate simulations of precipitation over complex terrain. – *Journal of Geophysical Research* 105: 29595-29608.
doi: 10.1029/2000JD900445
- Hebel, B. (2003): Validierung numerischer Erosionsmodelle in Einzelhang- und Einzugsgebiet-Dimension. – Dissertation, Geographisches Institut der Universität Basel, Geographisches Ethnologische Gesellschaft Basel.
- Hohenegger, C., Brockhaus, P. & Schär, C. (2008): Towards climate simulations at cloud-resolving scales. – *Meteorologische Zeitschrift* 17: 383-394.
doi: 10.1127/0941-2948/2008/0303
- IMK Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Süddeutsches Klimabüro, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (2014): Das Klima auf den Gitterpunkt gebracht. Ein Handbuch über Klimasimulationsdaten.
- Källberg, P., Simmons, A. & Uppala, S. & Fuentes, M. (2007): The ERA-40 Archive. – ERA-40 Project Report Series No. 17.
- Krimly, T. (2005): Agricultural measures for water management and their integration into spatial planning - AMEWAM. – *The Parliament Magazine*, Issue 197, 14 February 2005, S. 3.
- Mass, C. F., Ovens, D., Westrick, K. & Colle, B. A. (2002): Does Increasing Horizontal Resolution Produce More Skillful Forecasts? – *Bulletin of the American Meteorological Society* 83: 407-430.
doi: 10.1175/1520-0477(2002)083%253C0407:DIHRPM%253E2.3.CO;2

- Meißner, C., Schädler, G., Panitz, H.-J., Feldmann, H. & Kottmeier, Ch. (2009): High-resolution sensitivity studies with the regional climate model COSMO-CLM. – *Meteorologische Zeitschrift* 18(5): 543-557.
- Neuhaus, P., Fiener, P. & Botschek, J. (2010): Einfluss des globalen Klimawandels auf die räumliche und zeitliche Variabilität der Niederschlagserosivität in NRW. – Hrsg.: LANUV Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen.
- Prein, A., Gobiet, A., Suklitsch, M., Truhetz, H., Awan, N., Keuler, K. & Georgievski, G. (2013): Added value of convection permitting seasonal simulations. – *Climate Dynamics* 41(9-10): 2655-2677.
- Rauthe, M., Steiner, H., Riediger, U., Mazurkiewicz, A & Gratzki, A (2013): A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS), *Meteorologische Zeitschrift*, Vol 22, No 3, 235–256, *doi:10.1127/0941-2948/2013/0436*
- Routschek, A. (2012): Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion. – Schriftenreihe des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie 29/2012.
- Scherer, U. (2008): Prozessbasierte Modellierung der Bodenerosion in einer Lösslandschaft. – Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften (BGU), Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG), Schriftenreihe SWW, Band 129, Karlsruhe.
- Schipper, H., Fosser, G., Schädler, G., Kempf, J., Assmann, A. & Billen, N. (2014): Bodenabtrag durch Wassererosion in Folge von Klimaveränderungen, Phase II: Klima- und Erosionsmodellierung, Endbericht.
- Seth, A. & Giorgi, F. (1998): The Effects of Domain Choice on Summer Precipitation Simulation and Sensitivity in a Regional Climate Model. – *Journal of Climate* 11: 2698–2712.
doi: 10.1175/1520-0442(1998)011<2698:TEODCO>2.0.CO;2
- Suklitsch, M., Gobiet, A., Leuprecht, A. & Frei, C. (2008): High Resolution Sensitivity Studies with the Regional Climate Model CCLM in the Alpine Region. *Meteorologische Zeitschrift* 17: 467-476.
doi: 10.1127/0941-2948/2008/0308
- Van der Linden, P. & Mitchell, J. (2009): ENSEMBLES: Climate Change and Its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, U.K. 160.
- Van Genuchten, M. Th. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. – *Soil Science Society of America Journal* 44: 987-996.
- Van Genuchten, M. Th., Leij, F. J. & Yates, S. R. (1991): The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, Version 1.0. – EPA Report 600/2-91/065, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California.

-
- Wagner, S., Berg, P., Schädler, G. & Kunstmann, H. (2012): High resolution regional climate model simulations for Germany: Part II – projected climate changes. – *Climate Dynamics* 40: 415-427.
doi: 10.1007/s00382-012-1510-1
- Wurbs, D. & Steininger, M. (2011): Wirkungen der Klimaänderungen auf die Böden - Untersuchungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser. – UBA-Texte 16/2011. Dessau.

Herausgeber:

Arbeitskreis KLIWA

- Deutscher Wetterdienst;
- Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg;
- Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz;
- Bayerisches Landesamt für Umwelt

Weitere aktuelle Informationen finden Sie auf unserer Internetseite:

<http://www.kliwa.de>