

Marcus Beylich, Janine Köhn, Frido Reinstorf

Untersuchungen zu den Auswirkungen aktueller Klimaprojektionen auf das Abfluss-Verhalten im Einzugsgebiet des Schäferbaches/Harz

Investigations of the effects of current climate projections on the runoff behavior in the catchment area of the Schäferbach/Harz Mountains

Das Einzugsgebiet der Bode besitzt eine hohe gesellschaftlich-ökonomische Relevanz in Mitteldeutschland. Es ist bedeutend für die Trinkwasserversorgung des Ballungsraumes Leipzig-Halle, für die Energieversorgung, den Tourismus und den Hochwasserschutz. Es ist geplant, in einer mehrjährigen Untersuchung im Bodeeinzugsgebiet die skalenbezogenen Effekte des Klimawandels zu erforschen. Für das Kleineinzugsgebiet des Schäferbaches im Harz wurde ein Wasserhaushaltsmodell erstellt, mit dem Abfluss-Simulationen durchgeführt werden können. Die hier erläuterten Ergebnisse aus dem Schäferbach-Einzugsgebiet charakterisieren die kleinste Skalenebene in der Untersuchung und haben das Ziel festzustellen, inwieweit im Verlauf des prognostizierten Klimawandels mit einer Veränderung von Extremabflussereignissen in der Kleineinzugsgebietskala zu rechnen ist. In der Studie wird mit Hilfe einer etablierten Vorgehensweise, unter Nutzung eines kleinen Klimamodellensembles von vier Modellketten für das RCP8.5-Szenario, die zukünftige Entwicklung von Hochwasserspitzenabflüssen mit 20-jährigem Wiederkehrintervall (HQ20), die Beeinflussung der Winterhochwasser durch Schneeschmelze und die Verteilung der Winterhochwasser im Schäferbach-Einzugsgebiet untersucht. Eine Herausforderung besteht insbesondere in der Untersuchung eines kleinen Einzugsgebiets bei Vorhandensein von vergleichsweise grob aufgelösten Klimamodelldaten. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Verringerung der HQ20-Winterspitzenabflüsse bis zum Jahr 2100, während gleichzeitig eine zunehmende Häufung von Winterhochwasser und eine Verschiebung der Abflussanteile in die früheren Wintermonate auftreten. In der Ursachenanalyse wird im Einzugsgebiet des Schäferbaches eine Verminderung der Schneeschmelze infolge Temperaturerhöhungen bei gleichzeitiger Erhöhung der Niederschlagsmenge im Winterhalbjahr herausgearbeitet. Im Sommerhalbjahr deuten die Ergebnisse auf eine künftige Zunahme der HQ20-Spitzenabflüsse als Folge von häufigeren und erhöhten Starkniederschlagsereignissen hin.

Schlagwörter: Klimawandel, Extremhochwasser, Winterhochwasser, Schneeschmelze, Kleine Einzugsgebiete

The Bode catchment area has a high socio-economic relevance in central Germany. It is important for the fresh water supply of the Leipzig-Halle metropolitan area, for the energy supply, tourism and the flood protection. A study of the scale-related effects of climate change in the Bode catchment is planned over the span of several years. A water balance model was created for the small catchment area of the Schäferbach in the Harz with which runoff simulations can be performed. The results from the Schäferbach catchment characterize the smallest scale level in the study and pursue the goal of determining to what extent extreme runoff events in the small catchment scale can be expected in course of the predicted climate change. The study made use of a well-established approach. By using a small climate model ensemble of four climate model chains for the RCP8.5 scenario, the future development of 20-year return period flood peaks (RP20), the influence of snowmelt on winter floods and the distribution of winter floods in the Schäferbach catchment are examined. A particular challenge is the investigation of a small catchment area by using comparatively low resolved climate model data. The results show a significant reduction of the HQ20 winter peaks by the year 2100. At the same time, an increasing recurrence of winter floods and a shift of the runoff components into the earlier winter months occur. During the cause analysis, a reduction of the snowmelt in the Schäferbach catchment due to temperature increases accompanied by the simultaneous increase of the precipitation amount in the winter half-year was discovered. In the summer, the results point to a future increase in HQ20 peaks as a result of increasing heavy precipitation events.

Keywords: climate change, extreme floods, winter floods, snow melt, small catchments

1. Einleitung

Eine zentrale Eigenschaft des gegenwärtig zu beobachtenden Klimawandels sind die steigenden Temperaturen, die sich im globalen Mittel von 1880 bis 2012 um + 0,85 K erhöht haben und voraussichtlich weiter erhöhen werden (IPCC, 2014). Die Temperaturerhöhungen ziehen dabei zahlreiche weitere langfristige Veränderungen klimatischer Größen des Wasserhaushalts nach sich. Insbesondere soll hier auf Charakteristika des Wasserhaushalts, wie beispielsweise die Niederschlagsintensität und -häufigkeit oder die Abflussbildung und Schneeschmelze, hingewiesen werden. Hierbei weisen mehrere Studien auf eine Zunahme von Klima- und Wetterextremen hin (LEHMANN et al., 2015). Einige Untersuchungen zeigen zudem große regionale

Unterschiede zu den Auswirkungen der Klimaprojektionen, wobei beispielsweise im Westen und Norden Europas eine Vergrößerung und in zentralen, nordöstlichen und südlichen Bereichen Europas eine Verminderung von Hochwasserspitzenabflüssen prognostiziert werden (DANKERS UND FEYEN, 2008). Im Fokus der meisten Untersuchungen stehen hierbei die Veränderungen und Auswirkungen in größeren Einzugsgebieten, wenngleich auch jüngere Ereignisse, wie z. B. die Sturzflut von Braunsbach, gezeigt haben, dass insbesondere in kleinen Einzugsgebieten verheerende Folgen von Wetterextremen zu beobachten sind (BRONSTERT et al., 2017).

Um Veränderungen der Systemreaktion durch den Klimawandel zu beschreiben, hat sich die Methodik der Ensemblesimulationen



Abbildung 1

Einzugsgebiet des Schäferbaches (rot) und Überblickskarte zur Lage des Gebietes im Bundesland Sachsen-Anhalt. Datenquelle: Landesamt für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt (www.lvermgeo.sachsen-anhalt.de).

The Schäferbach catchment area (red) and overview map of the location of the area in Saxony-Anhalt. Source: Landesamt für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt (www.lvermgeo.sachsen-anhalt.de).

nen etabliert. Dabei werden Realisierungen unterschiedlicher Regionaler Klimamodelle (RCM) für ein bestimmtes Klimaszenario nebeneinandergestellt und so die Spannweite möglicher Gebietsreaktionen ermittelt. Die Grundlage dafür ist jedoch ein angepasstes Lokales Niederschlag-Abfluss-Modell (LNA-Modell) bzw. ein Wasserhaushaltsmodell, welches die Realisierungen der verschiedenen RCM auf ein spezielles Gewässereinzugsgebiet bezieht. Im vorliegenden Artikel wird das Einzugsgebiet des Schäferbaches im Harz vorgestellt, das bereits seit dem Jahr 1968 messtechnisch erfasst ist und das mit einer Einzugsgebietsfläche von 1,44 km² den kleinen Einzugsgebieten zugeordnet wird.

Ziel dieses Beitrags ist es am Beispiel des Schäferbach-Einzugsgebiets zu untersuchen, ob im Verlauf des prognostizierten Klimawandels mit einer Veränderung von Extremabflussereignissen in Kleineinzugsgebieten zu rechnen ist. Mit einem für das Gebiet erstellten Wasserhaushaltsmodell werden auf Grundlage eines verwendeten Klimaensembles zu erwartende Änderungen im Abflussverhalten des Schäferbach-Einzugsgebiets simuliert und die zukünftige Entwicklung von Hochwasser und Spitzenabflüssen untersucht. Hierbei soll herausgearbeitet werden, welche Entwicklungen Sommer- und Winterhochwasser nehmen können und welche Klimamechanismen diese Entwicklungen antreiben. Das Schäferbach-Einzugsgebiet steht hierbei am Anfang einer umfangreicheren Untersuchung von Teileinzugsgebieten der Bode, anhand derer zukünftig Skaleneffekte und Charakterisierungsmethoden für die Ermittlung der Auswirkungen der projizierten Klimaveränderungen abgeleitet werden sollen.

2. Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

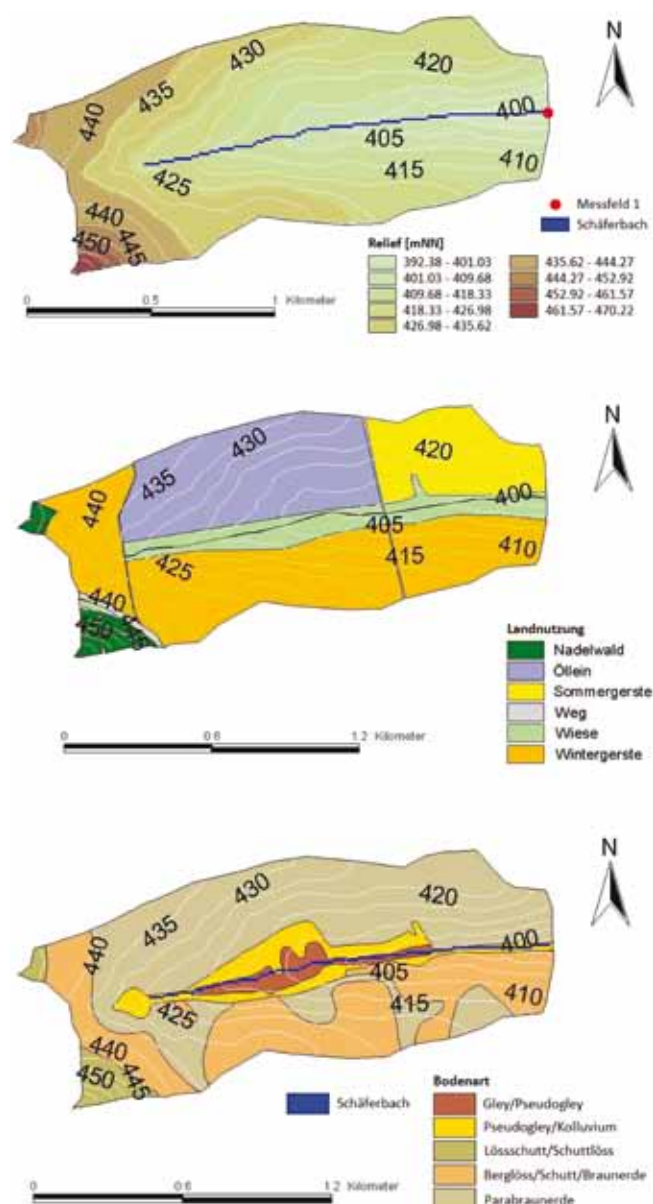
Das hydrologische Experimentalgebiet des Schäferbaches befindet sich hydrographisch im Gewässereinzugsgebiet der Oberen Selke und liegt als Teil des Bode-Einzugsgebiets im Unterharz im Bundesland Sachsen-Anhalt (Abb. 1).

Das Gebiet wurde 1968 im Zuge der Internationalen Hydrologischen Dekade der UNESCO als kleines hydrologisches Experimentalgebiet mit einer Fläche von 1,44 km² eingerichtet und ist seitdem kontinuierlich messtechnisch erfasst. Ausführungen zu Untersuchungen im Einzugsgebiet des Schäferbaches sind u. a. in BORCHARDT (1982), KISTNER (2007), OLLESCH (2008), OLLESCH et al. (2010), REINSTORF et al. (2010), MARTINI et al. (2015) und WOLLSCHLÄGER et al. (2012, 2017) beschrieben. Das Tal weist ein Oberflächengefälle in West-Ost-Richtung auf und erstreckt sich dabei auf einer Länge von 2 km über 78 Höhenmeter (Abb. 2).

Die Landnutzung im Modellgebiet erfolgt mit dem Anbau von Öllein und Gerste überwiegend landwirtschaftlich (81 % der Fläche), während im Kolluvialbereich um den Schäferbach Grasland/Dauergrünland (16 % der Fläche) und auf den Höhenlagen im Westen die Ausläufer eines Nadelwaldes (3 % der Fläche) vorzufinden sind. Das Gebiet wird von den Bodenarten Berglöss/Schutt und Parabraunerde dominiert, im Bereich des Schäferbaches ist dagegen überwiegend Gley/Pseudogley vorzufinden (Abb. 2). Der tiefere Untergrund wird durch geringdurchlässige Schluffe und Tone geprägt, die Mächtigkeiten von bis zu 7 m im Kolluvium aufweisen. Der Gebietsabfluss wird durch Zwischenabfluss (Interflow) dominiert.

Der Gebietsauslass wurde als Messkanal mit einem Überfallwehr (Thompsonwehr) sowie mit einer Grundwasserbarriere ausgebaut (Abb. 2, Messfeld 1). Die Barriere ist eine unterirdische Mauer von ca. 55 m Länge und bis zu 7 m Tiefe, die das Gebiet bis zum anstehenden Festgestein hinsichtlich unterirdischer Abflüsse abdichtet und das Wasser über ein Dränagesystem dem Messkanal zuführt. Damit ist die komplette Erfassung aller ober- und unterirdischen Abflusskomponenten am Überfallwehr gegeben (Gesamtabfluss).

Zur Bestimmung des Durchflusses wurde im Jahr 1968 ein Schwimmerschreibpegel mit Schwimmerschacht eingerichtet.

**Abbildung 2**

Oben: Digitales Höhenmodell vom Schäferbach-Einzugsgebiet (Harz) mit Messfeld 1 und Schäferbach; Mitte: Landnutzung im Schäferbach-EZG; Unten: Bodenarten im Schäferbach-EZG.

Top: Digital elevation model of the Schäferbach catchment (Harz Mountains) with measuring station 1 and Schäferbach; Middle: land use in the Schäferbach catchment; Bottom: soil types in the Schäferbach catchment.

Tabelle 1

Mittlere meteorologische/hydrologische Kenndaten des Schäferbach-Einzugsgebietes (Zeitreihe: 1997 bis 2014).

Mean meteorological/hydrological characteristics of the Schäferbach catchment (time series: 1997 to 2014).

Niederschlag (korrigiert)	758,6	mm/a
Gesamtabfluss	170,0	mm/a
Globalstrahlung	123,9	W/m ²
Windgeschwindigkeit (in 2 m Höhe)	2,1	m/s
Relative Luftfeuchte	79,9	%
Lufttemperatur (in 2 m Höhe)	7,2	°C

Ab den 1990er Jahren wird zusätzlich ein Ultraschall- und seit 2010 - als Ersatz dafür - ein Radarpegel eingesetzt. Die 76 installierten Grundwasserbeobachtungsrohre in und in der Umgebung des Gebietes gestatten zudem ein großräumiges Monitoring des Grundwasserstandes und seiner Dynamik. In einem hydro-meteorologischen Messgarten am Gebietsauslass (Abb. 2, Messpunkt 1) werden mit meteorologischen Standardkonfigurationen u. a. Niederschlagsmengen, Strahlungswerte, Windrichtung und -geschwindigkeit in 2,4 und 5,0 m Höhe, Luftfeuchte, sowie Luft- und Bodentemperaturen erfasst. Die Messung der meteorologischen Größen und des Abflusses reichen überwiegend bis in das Jahr 1968 zurück, wobei Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung/Sonnenscheindauer und relative Luftfeuchte jedoch erst ab den 90er Jahren digital aufbereitet vorlagen. Für frühere Zeiträume wurden für diese Größen Messwerte der nahen Klimastation Harzgerode verwendet. Die mittleren meteorologischen und hydrologischen Kenndaten des Gebiets (Zeitreihe der Modell-Kalibrierung/-Validierung: 1997 bis 2013) sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Im Zeitraum von 1975 bis 1994 wurde der Gebietswasserhaushalt durch bergbauliche Aktivitäten zum Abbau von Flussspat in der Region beeinflusst. In dieser Zeit wurden im Umfeld des Experimentalgebietes Grundwasserabsenkungen durchgeführt, die sich auch im unteren Teil des Schäferbach-Einzugsgebietes auswirkten. Seit Einstellung des Bergbaus und der Bergsanierung hat sich wieder ein Grundwasserstand im vorbergbaulichen Ausgangsniveau eingestellt. Die Kalibrierungsperiode wurde ab 1997 angesetzt, da zu diesem Zeitpunkt kein bergbaulicher Einfluss auf die Abflüsse im Schäferfalter mehr vorhanden war.

2.2 Wasserhaushaltsmodell

In der Untersuchung wurde das modulare und in Raum und Zeit frei wählbar arbeitende Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH (v. 9.09) verwendet (SCHULLA, 1997, SCHULLA 2017). Als Eingangsdaten benötigt WaSiM-ETH meteorologische Zeitreihen und regelmäßig gegitterte räumliche Informationen. Im Modell existieren u. a. Module zur räumlichen Interpolation von meteorologischen Eingangsdaten, für Niederschlags- und Strahlungskorrekturen sowie zur Berechnung von potenzieller Evapotranspiration (ETP), Schneeschmelze, Interzeption, Grundwasserströmung, Abflussrouting und diverser weiterer hydrologischer Prozesse. WaSiM-ETH greift dabei, wo möglich, auf physikalisch-basierte Prozessbeschreibungen zurück und wurde insbesondere für die Modellierung von Auswirkungen von Klimamäanderungen auf den Wasserhaushalt entwickelt (SCHULLA & JASPER, 1998). Für die Untersuchung wurde für die ungesättigte Zone der RICHARDS-Ansatz (RICHARDS, 1931), für die potenzielle Verdunstung der PENMAN-MONTEITH-Ansatz (MONTEITH, 1975), für das Schneemodell das kombinierte Verfahren von ANDERSON (ANDERSON, 1973) und für die Grundwasserströmung ein Multilayer 2D-Grundwassermodell verwendet.

Die räumliche Modellauflösung des Schäferbach-Modells wurde auf Grundlage eines digitalen Höhenmodells (DHM 20) und Layern zur vorhandenen Land- und Bodennutzung mit 20 x 20 m diskretisiert. Aus dem DHM 20 wurden weitere modellrelevante Rasterdaten, wie die Gefälle- und Expositionsgrids, abgeleitet. Als meteorologische Eingangsdaten wurden Niederschlag, Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung, jeweils bezogen auf eine Höhe von 2 m über dem Gelände, in täglicher Auflösung verwendet. Für die Kalibrierung wurden

Tabelle 2

Kalibrierungs- und Validierungsergebnisse des WaSiM-Modells vom Schäferbach-Einzugsgebiet; links: tabellarische Ergebnisse der täglichen und monatlichen Gütekriterien (R^2 und NSE); rechts: Grafik-Vergleich von monatlichen Mess- und Simulationswerten (oben: Kalibrierungsphase/unten: Validierungsphase).
Calibration and validation results of the WaSiM model of the Schäferbach catchment; left: tabular results of daily and monthly quality criteria (R^2 and NSE); right: graphic comparison of monthly measurement and simulation values (top: Calibration Phase/bottom: Validation Phase).

Phase	Abfluss-jahr	Tageswerte		Monatswerte		Grafiken - Vergleich monatl. Messung und Simulation
		R^2	NSE	R^2	NSE	
Kalibrierungszeitraum (1999-2005)	1999	0,86	0,86	0,93	0,93	
	2000	0,88	0,85	0,98	0,93	
	2001	0,78	0,73	0,76	0,74	
	2002	0,74	0,61	0,82	0,70	
	2003	0,93	0,93	0,98	0,98	
	2004	0,75	0,72	0,82	0,74	
	2005	0,68	0,55	0,78	0,63	
	Arithm. Mittel	0,80	0,75	0,87	0,81	
Validierungszeitraum (2006-2013)	2006	0,70	0,56	0,77	0,67	
	2007	0,80	0,78	0,89	0,88	
	2008	0,78	0,78	0,89	0,89	
	2009	-	-	-	-	
	2010	0,52	0,51	0,52	0,48	
	2011	0,83	0,82	0,90	0,88	
	2012	0,82	0,32	0,92	0,30	
	2013	0,74	0,74	0,81	0,79	
	Arithm. Mittel	0,74	0,64	0,81	0,70	

tägliche Gesamtabflussmessungen genutzt. Auf Grund der geringen Ausdehnung des Untersuchungsgebiets wurde eine gleichförmige Verteilung der Messwerte aus dem Messgarten im Gebiet angenommen und keine räumliche Interpolation bzw. Regionalisierung durchgeführt.

Das Modell wurde durch den Vergleich von täglich gemessenen und täglich simulierten Gesamtabflüssen kalibriert. Der Gesamtabfluss, die Summe aus Direktabfluss, Interflow und Basisabfluss, wird an der Pegelstation gemessen und vom Simulationsmodell direkt ausgegeben. Als Gütekriterien wurden das Bestimmtheitsmaß (R^2) und der Nash-Sutcliffe-Koeffizient (NSE) verwendet. Simuliert wurde für den Zeitraum von 1996 bis 2013, wobei die Ergebnisse der ersten drei Jahre als Einschwingperiode verworfen wurden. Kalibriert wurde anhand der hydrologischen Abflussjahre 1999 bis 2005, während die Jahre 2006 bis 2013 als Validierungsperiode dienten. Das Abflussjahr 2009 wurde aus der Betrachtung ausgeschlossen, da auf Grund von mehrmonatigen Umbauarbeiten an der Messstation keine durchgehend verlässlichen Daten für den Durchfluss vorlagen. Die Kalibrierungsergebnisse sind in Tabelle 2 dargestellt.

Die Kalibrierungsperiode zeigt mit täglichen Gütewerten von $R^2 = 0,80$ und $NSE = 0,75$ gute Übereinstimmungen zwischen Messung und Simulation. Die Validierungsperiode liefert mit $R^2 = 0,74$ und $NSE = 0,64$ geringfügig erhöhte Abweichungen zwischen Messung und Simulation. Die monatlichen Gütewerte zeigen insgesamt bessere Übereinstimmungen, sowohl für die Kalibrierungs- als auch Validierungsperiode.

Abweichungen zwischen Messung und Simulation sind insbesondere in den Hochwasserspitzen einiger Jahre festzustellen. Dies ist insbesondere auf die tägliche Zeitschrittweite zurück-

zuführen, die in Relation zur Größe des Gebietes vergleichsweise grob ist. Dies lässt sich jedoch für eine Vergleichbarkeit innerhalb der angestrebten größeren Untersuchung des Bodegebiets nicht vermeiden. Teilweise werden auch Niedrig- bis Nullabflüsse in den Sommermonaten vom Modell nicht erreicht. Insbesondere Nullabflüsse sind generell schwer durch WaSiM abbildbar (nach persönlicher Mitteilung von SCHULLA, 2016). Das Abflussjahr 2010 liefert im Vergleich zu den anderen Jahren relativ geringe Übereinstimmungen. Ursache hierfür können Nachwirkungen aus dem Abflussjahr 2009, z. B. abweichende Bodensättigungen durch interpolierte Klimadaten, aber auch nach dem Umbau der Station noch nicht

vollkommen verlässlich arbeitende Messinstrumente sein. Deutlich wird eine Häufung der Hochwasser des Schäferbachs in den Wintermonaten, was auf eine Dominanz der Schneeschmelze auf die höheren Scheitelabflüsse hindeutet.

Im Allgemeinen sind Kalibrierung und Validierung plausibel und akzeptabel. Das WaSiM-Modell des Schäferbach-Einzugsgebiets kann damit als Modellgrundlage für weitergehende Untersuchungen und Klimaanalysen verwendet werden. Da es jedoch insbesondere bei den Spitzenabflüssen zu einer Unterschätzung des Modells kommt, werden anstatt der absoluten Werte die als robuster zu erwartenden Änderungssignale der Hochwasser (HÖLSCHER et al., 2017, S. 127) bewertet.

2.3 Klima-Projektionsdaten

Als Klimaensemble wurden vier Klimamodellketten aus Global-Regionalmodell-Läufen der Datenbank EURO-CORDEX (JACOB et al., 2014) verwendet. Konkret handelt es sich um die dynamischen Modellketten CNRM-CM5/RCA4, EC-EARTH/HIRHAM5, EC-EARTH/RACMO22E und MPI-ESM-LR/CCLM4-8-17, wobei der erste Namensteil das Globalmodell und der zweite Namensteil das Regionalmodell bezeichnet. Diese werden im Folgenden vereinfachend als CNRM_RCA4, ECE_HIRHAM, ECE_RACMO und MPI_CCLM bezeichnet. Zur Verfügung gestellt wurden die Daten vom Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) und fanden unter anderem im Projekt KliBiW Anwendung (HÖLSCHER et al., 2017). Die Modelle beruhen auf den Vorstellungen der RCP-Szenarien des aktuellen IPCC Fifth Assessment Reports (AR5; IPCC, 2013). Als mögliches Klimaszenario wurde die Variante des Szenarios RCP 8.5 untersucht. Dieses geht von sehr hohen Treibhausgasemissionen aus und stellt ein Basiszenario dar, bei dem keine zusätzlichen Bemühungen unternommen werden die Emissionen einzuschränken (IPCC, 2014).

Tabelle 3

Gemessene und projizierte Temperaturen [°C] im Schäferbach-Einzugsgebiet für das untersuchte Klimamodell-Ensemble RCP 8.5 (Jahres-, Winter- und Sommer-Tagesmittel), unkorrigiert (u) und bias-korrigiert (k), mit signifikanter Änderung gegenüber der Vergangenheit (t-test, $\alpha = 0,05$).
Measured and projected temperatures [°C] in the Schäferbach catchment according to the analyzed climatic model ensemble RCP 8.5 (mean daily values for year, summer and winter), uncorrected (u) and bias-corrected (k), with significant change compared to the past (t-test, $\alpha = 0,05$).

	CNRM_RCA4			ECE_HIRHAM			ECE_RACMO			MPI_CCLM			
	Jahr	Wi	So	Jahr	Wi	So	Jahr	Wi	So	Jahr	Wi	So	
Messung/Referenz	6,4	1,0	11,8	6,4	1,0	11,8	6,4	1,0	11,8	6,4	1,0	11,8	
Vergangenheit	(u)	6,3	0,3	12,3	6,5	1,2	11,6	6,0	0,7	11,2	7,3	2,0	12,5
	(k)	6,4	0,7	12,0	6,4	1,1	11,7	6,4	0,9	11,9	6,4	1,0	11,8
Nahe Zukunft	(k)	8,0	2,0	12,9	7,9	2,7	13,1	7,8	2,2	13,1	7,2	1,6	12,7
Ferne Zukunft	(k)	10,0	5,0	14,8	9,9	4,6	15,1	10,0	4,6	15,3	9,4	4,0	14,7

Das ursprünglich zur Verfügung stehende Ensemble des Szenarios RCP 8.5 umfasste dabei 15 Modellketten, von denen auf Grund des hohen Aufwands die vier beschriebenen Modellketten für die vorliegende Untersuchung ausgewählt wurden. Die Modellkettenwahl erfolgte auf Grundlage der Übereinstimmungsgüte von Temperaturen, Niederschlägen und Abflüssen zwischen den Klimamodellwerten und Beobachtungsdaten in Niedersachsen und dem Harzbereich des KliBiW-Projektes. Mit der Auswahl bestimmter Modellketten aus einem größeren Ensemble geht gleichzeitig ein Informationsverlust über die mögliche Spannweite der zukünftigen Klimaentwicklung einher. Das untersuchte Ensemble ist somit nur in der Lage gemittelte Aussagen zu einem begrenzten Spannungsbereich möglicher klimatischer Entwicklungen zu treffen, insbesondere solchen, die in ihrer Charakteristik eine Ähnlichkeit zu den Auswahlkriterien aufweisen.

Das Modellgitter der dynamischen Modellketten wurde bereits im Zuge des KliBiW-Projektes auf ein geographisches Gitter interpoliert (10 x 10 km) und dabei räumlich aggregiert. Für die Untersuchung dienten diejenigen Klimareihen der Gitterzelle als Modellantrieb, die dem Schäferbach-Einzugsgebiet am nächsten liegt. Eine Aggregation ist notwendig, da die räumliche Auflösung von Prozessen in den RCMs üblicherweise größer als der verwendete Gitterpunktabstand ist (LINKE et al., 2017). Gleichzeitig wird dabei jedoch auch eine Glättung von Modellwerten in Kauf genommen. Zudem ist anzumerken, dass für das relativ kleine Untersu-

chungsgebiet eine Gitterzelle verwendet wird, die ein 100 km² großes Gebiet repräsentiert. Die Betrachtung weist demnach für Ereignisse mit einem starken lokalen Charakter (z. B. lokale Starkregen) vergleichsweise große Unsicherheiten auf. Hinzu kommen Unsicherheiten in den ermittelten Absolutwerten von Extremhochwasser, die sich durch die Verwendung von relativ grob aufgelösten täglichen Klimamodellwerten ergeben.

Zur Korrektur systematischer Modellabweichungen (Bias) wurde im Zuge dieser Untersuchung durch Vergleich der Messdaten aus dem Schäferbach-Einzugsgebiet bzw. dort wo Messlücken im

Tabelle 4

Gemessene und projizierte 95 %-Niederschlagsquantile (Q) [mm] und mittlere jährliche Anzahl an Niederschlagstagen über dem 95 %-Quantil (T) [d/a] für tägliche Niederschläge (≥ 1 mm) im Schäferbach-Einzugsgebiet. Dargestellt sind unkorrigierte (u) und bias-korrigierte (k) Ergebnisse des untersuchten Klimamodell-Ensembles RCP 8.5.
Measured and projected 95% precipitation quantiles (Q) [mm] and mean annual number of precipitation days above the 95% quantile (T) [d/a] for daily precipitation (≥ 1 mm) in the Schäferbach catchment. Depicted are uncorrected (u) and bias-corrected (k) results of the analyzed climatic model ensemble RCP 8.5.

Selected (a) and cross-correlated (b) results of the analyzed climate model ensembles for 2012										
		CNRM_RCA4		ECE_HIRHAM		ECE_RACMO		MPI_CCLM		
		Q	T	Q	T	Q	T	Q	T	
		[mm]	[d/a]	[mm]	[d/a]	[mm]	[d/a]	[mm]	[d/a]	
Messung/Referenz		19,3	6,1	19,3	6,1	19,3	6,1	19,3	6,1	
Vergangenheit	(u)	16,8	9,2	15,1	8,3	11,3	7,0	14,1	8,5	
	(k)	19,1	6,2	19,2	6,2	19,3	6,1	19,2	6,2	
Nahe Zukunft		(k)	19,1	6,1	18,8	6,4	20,8	6,2	19,9	6,3
Ferne Zukunft		(k)	21,6	6,5	20,3	6,4	22,3	6,2	22,2	5,9

Tabelle 5

Projizierte Veränderung der Tage pro Sommerhalbjahr mit Niederschlägen (≥ 1 mm) über dem 95 %-Quantil der Vergangenheit des Klimaensembles. Veränderung des 95 %-Quantils der Sommerniederschläge (≥ 1 mm) gegenüber der Vergangenheit des Klimaensembles.

Projected change in days per summer half-year with precipitation (≥ 1 mm) above the 95% quantile of the past of the climate ensemble. Change in the 95% quantile of summer precipitation (≥ 1 mm) compared to the past of the climate ensemble.

Klimamodelle (RCP 8.5-Szenario)	Tage pro Sommerhalbjahr mit Niederschlägen über dem 95 %-Quantil der Vergangenheit			Veränderung des 95 %-Quantils gegenüber der Vergangenheit	
	Vergangenheit	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
CNRM_RCA4	3,6	4,1	5,6	+ 5,2 %	+ 16,3 %
ECE_HIRHAM	3,2	4,1	4,8	+ 5,6 %	+ 11,7 %
ECE_RACMO	3,4	4,8	5,6	+ 11,9 %	+ 19,2 %
MPI_CCLM	2,9	3,5	3,8	+ 4,6 %	+ 17,1 %
Mittelwert	3,3	4,1	5,0	+ 6,8 %	+ 16,1 %

Einzugsgebiet vorhanden waren, der nahen Station Harzgerode, und der Vergangenheitsprojektion im 20. Jhd. (C20-Projektion) der Klimamodelle eine Bias-Korrektur mittels „Quantile Delta Mapping“ (QDM) durchgeführt (CANNON et al., 2015). Für die Untersuchung erfolgte eine Ergebnisuntergliederung in die Zeithorizonte „Vergangenheit“ (1971 bis 2000), „Nahe Zukunft“ (2021 bis 2050) und „Ferne Zukunft“ (2071 bis 2100).

Die Tabellen 3 und 4 zeigen die Ergebnisse der durchgeführten Bias-Korrektur am Beispiel der mittleren Temperaturen für das Jahr, Winterhalbjahr (November bis April) und Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) sowie der 95 %-Niederschlagsquantile und mittleren jährlichen Anzahl an Niederschlagstagen über dem 95 %-Quantil. Hervorgehoben sind die Werte für Messung/Referenz und die korrigierten Vergangenheitswerte, um die Anpassung der Klimamodelldaten an die Messwerte zu verdeutlichen.

Die Projektionsdaten (Tab. 3) zeigen durch die Bias-Korrektur in allen Modellketten sowohl im Jahr, im Winter als auch im Sommer eine verbesserte Übereinstimmung der Temperaturwerte aus Messung und Vergangenheit. Besonders deutlich wird die verbesserte Übereinstimmung in der Modellkette MPI_CCLM (z. B. Korrektur um 1 K im Winter auf den Mittelwert der Messungen) und allgemein in der Übereinstimmung der Jahreswerte. Teilweise sind jedoch noch Abweichungen in den Halbjahreswerte festzustellen (z. B. 0,3 K im Winter von CNRM_RCA4), sodass in der zukünftigen Untersuchung eine verbesserte Korrektur der Halbjahreswerte angestrebt werden sollte. Die korrigierten Zukunftsprojektionen zeigen eine signifikante Veränderung der Temperaturen, wobei bis in die „Ferne Zukunft“ in allen Modellketten eine signifikante Erhöhung von ca. 3 °C bis über 4 °C projiziert wird.

Die Ergebnisse (Tab. 4) zeigen, dass durch die Bias-Korrektur ebenfalls eine verbesserte Übereinstimmung zwischen den 95 %-Niederschlagsquantilen und der mittleren jährlichen Anzahl an Niederschlagstagen über dem jeweiligen Quantil erzielt werden konnte. Insgesamt wurde das Quantil dieser Starkniederschlagsereignisse von den Klimamodellketten vor der Korrektur unterschätzt (insbesondere Modellkette ECE_RACMO), was vermutlich auf die schon beschriebenen großen Unterschiede in der räumlichen Auflösung zwischen den Klimamodellen und dem Einzugsgebiet zurückzuführen ist. Die korrigierten Zukunftsprojektionen aller Modellketten zeigen eine Erhöhung des 95 %-Niederschlagsquantils bis in die „Ferne Zukunft“, wobei in der „Nahen Zukunft“ keine eindeutige Veränderung festzustellen ist. Für die Anzahl der Niederschlagstage über dem jeweiligen Quantil des gleichen Projektionszeitraums ist ebenfalls keine eindeutige Veränderung festzustellen.

Vergleicht man für den Sommer die projizierten Starkregentage (Anzahl Tage $\geq$ 95 %-Quantil) und Starkregenhöhen (95 %-Quantile) mit den Starkregentagen und Quantilen der Vergangenheit ist eine deutliche Zunahme festzustellen (vgl. Tab. 5).

Im Ensemble-Mittel werden im Schäferbach-Einzugsgebiet bis zur „Fernen Zukunft“ 1 bis 2 Starkregenereignisse mehr pro Sommerhalbjahr projiziert. Gleichzeitig erhöhen sich die Starkregensmengen um 16,1 % gegenüber der Vergangenheit. Im Einzugsgebiet des Schäferbaches ist somit in den zukünftigen Sommerhalbjahren mit einer größeren Zahl von Starkregentagen und mit größer werdenden Starkregenereignissen zu rechnen.

3. Simulationsergebnisse

Aus den betrachteten Klimamodellketten des RCP 8.5-Szenarios wurde der Gesamtabfluss im Schäferbach-Einzugsgebiet für die unter Abschnitt 2.3. genannten Zeiträume simuliert. Den Ergebniszeitreihen wurden die Tages-Höchstwerte je Jahr/Winterhalbjahr/Sommerhalbjahr entnommen und in einer Extremwertanalyse ausgewertet, wobei die Jährlichkeiten des 20-jährigen Hochwassers (HQ20) jeweils aus der Extremwertverteilung Typ 1 (E1, Gumbel-Verteilung) und der Pearson-III-Verteilung (P3) abgeleitet wurden. Die notwendigen Parameterschätzungen erfolgten jeweils wo möglich mit der Momentenmethode (MM), der Maximum-Likelihood-Methode (MLM) und der Wahrscheinlichkeitsgewichteten Momentenmethode (WGM). In Tabelle 6 ist für das Klimaensemble die zeitliche Entwicklung der aus allen Parameterschätzmethoden und Extremwertverteilungen gemittelten HQ20-Hochwasserspitzenabflüsse aufgeführt. Es werden die projizierten Änderungen der Spitzenabflüsse ausgewertet, da diese gegenüber den Absolutwerten als robuster eingeschätzt werden. Grundlage dafür sind für jedes Klimamodell die jeweils simulierten HQ20-Werte der Vergangenheitsprojektionen, die im Mittel über das Ensemble mit 10,3 mm (Jahr), 9,7 mm (Winter) und 5,2 mm (Sommer) berechnet wurden. In den nebenstehenden Abbildungen sind die HQ20-Änderungen gegenüber der Vergangenheit für jede Verteilungsfunktion und Parameterschätzmethode einzeln aufgeführt, um die Spannweiten der statistischen Schätzmethoden aufzuzeigen.

Die Entwicklung der jährlichen Spitzenabflüsse variiert je nach betrachteter Klimamodellkette von - 44,0 % bis + 33,6 %, wobei zwei Modellketten eine Zunahme und zwei Modellketten eine Abnahme der Jahres-Hochwasserspitzen projizieren. Die ermittelte jährliche Veränderung ist damit wenig robust, zeigt jedoch im Ensemble-Mittel eine tendenzielle Abnahme der Hochwasserspitzen von 5,5 % („Nahe Zukunft“) bzw. 8,9 % („Ferne Zukunft“). Aufgrund der jährlichen Uneindeutigkeiten wurden die Sommer- und Winterhalbjahre separat untersucht.

Im Winterhalbjahr variiert die Entwicklung der Spitzenabflüsse von - 43,3 % bis + 18,4 %, wobei sich insbesondere für die „Ferne Zukunft“ eine Reduktion der HQ20-Hochwasserspitzen abzeichnet. Ausnahme bildet hier die Modellkette CNRM_RCA4, bei der die Spitzenabflüsse steigen. Im Mittel sinken die Hochwasserspitzen um 8,3 % („Nahe Zukunft“) bzw. 16,9 % („Ferne Zukunft“). Die ermittelte Abnahme wird vom Ensemble deutlicher sichtbar als in der jährlichen Auswertung.

Im Sommerhalbjahr wird über das gesamte Modellensemble eine Zunahme der HQ20-Spitzenabflüsse projiziert (+ 2,2 % bis + 45,4 %). Die ECE-Modellketten deuten auf eine stärkere Zunahme der Spitzenabflüsse in der „Nahen Zukunft“ hin, während die beiden anderen Modellketten die größte Zunahme der Spitzenabflüsse in der „Fernen Zukunft“ projizieren. Im Mittel wird ein Anstieg der HQ20-Hochwasserspitzen von 23,3 % („Nahe Zukunft“) bzw. 20,0 % („Ferne Zukunft“) simuliert.

Zusätzlich wird die Entwicklung der Häufigkeiten von Sommer- und Winterhochwasser untersucht. Dies geschieht durch Auswertung der Abflusstage des jeweiligen Halbjahres, die über dem 90 %-Quantil der Vergangenheit liegen (vgl. Abb. 3 und Abb. 4).

Tabelle 6

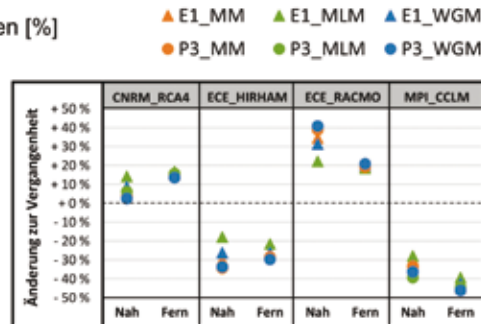
Berechnete Veränderung der HQ20-Hochwasserspitzen des Klimamodellensembles gegenüber der Vergangenheit [%] als Jahres- (A), Winter- (B) und Sommerhochwasser (C). Links: Änderungsmittel je Modell und Zeitraum aus allen Verteilungsfunktionen (E1, P3) und Parameterschätzmethoden (MM, MLM, WGM). Rechts: Änderungen je Modell und Zeitraum für alle Verteilungsfunktionen (E1, P3) und Parameterschätzmethoden (MM, MLM, WGM).

Calculated changes in RP20 flood peaks of the climatic model ensemble from past [%] as annual (A), winter (B) and summer flood peaks (C). Left: Mean changes for each model and period of all distribution functions (E1, P3) and parameter estimation methods (MM, MLM, WGM). Right: Changes for each model and period of all distribution functions (E1, P3) and parameter estimation methods (MM, MLM, WGM).

A: Änderungen der HQ20 Jahres-Hochwasserspitzen [%]

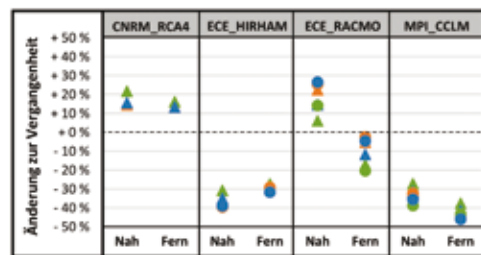
Changes in RP20 annual flood peaks [%]

Klimamodelle (RCP8.5-Szenario)	Projektionszeitraum (Jahr)	
	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
CNRM_RCA4	+ 6,9 %	+ 15,4 %
ECE_HIRHAM	- 28,9 %	- 26,8 %
ECE_RACMO	+ 33,6 %	+ 19,8 %
MPI_CCLM	- 33,7 %	- 44,0 %
Mittelwert	- 5,5 %	- 8,9 %

**B: Änderungen der HQ20 Winter-Hochwasserspitzen [%]**

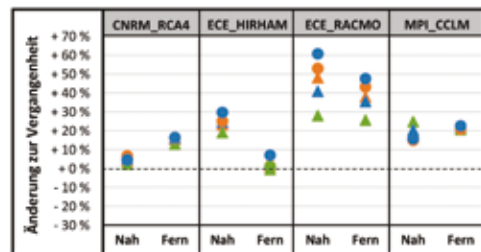
Changes RP20 winter flood peaks [%]

Klimamodelle (RCP8.5-Szenario)	Projektionszeitraum (Winter)	
	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
CNRM_RCA4	+ 18,4 %	+ 15,4 %
ECE_HIRHAM	- 36,8 %	- 29,4 %
ECE_RACMO	+ 18,2 %	- 10,3 %
MPI_CCLM	- 33,0 %	- 43,3 %
Mittelwert	- 8,3 %	- 16,9 %

**C: Änderungen der HQ20 Sommer-Hochwasserspitzen [%]**

Changes RP20 summer flood peaks [%]

Klimamodelle (RCP8.5-Szenario)	Projektionszeitraum (Sommer)	
	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
CNRM_RCA4	+ 5,4 %	+ 15,4 %
ECE_HIRHAM	+ 23,2 %	+ 2,2 %
ECE_RACMO	+ 45,4 %	+ 40,8 %
MPI_CCLM	+ 19,1 %	+ 21,4 %
Mittelwert	+ 23,3 %	+ 20,0 %



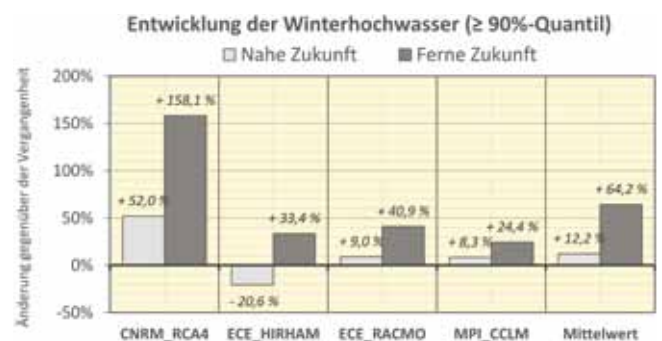
Im Sommerhalbjahr werden zum Teil sinkende und zum Teil steigende Hochwasserabflusstage projiziert. Im Modellmittel ergibt sich eine Zunahme der Hochwassertage von 14,2 % („Nahe Zukunft“) bzw. 13,2 % („Ferne Zukunft“). Im Winterhalbjahr projiziert das Modellensemble eine deutlichere Häufung von Hochwasserereignissen als im Sommerhalbjahr. Hierbei zeigt insbesondere die Modellkette CNRM_RCA4 eine starke Zunahme von 158,1 % für die „Ferne Zukunft“, während ECE_HIRHAM in der „Nahen Zukunft“ eine Reduzierung um 20,6 % aufweist. Im Modellmittel ergibt sich eine Zunahme der Hochwassertage in der „Nahen Zukunft“ (+ 12,2 %) und eine deutlichere Steigerung in der „Fernen Zukunft“ (+ 64,2 %).

Zur näheren Analyse der Winterhochwasser wurde die Häufigkeit der schneeschmelzbeeinflussten Hochwasser ausgewertet, die aus den Ausgabewerten von WaSiM bestimmt werden konnte (Abb. 5).

Hier zeigt das Modellensemble einheitlich eine Abnahme der Hochwasser, die von Schneeschmelze beeinflusst wurden von im Mittel 15,7 % („Nahe Zukunft“) bzw. 40,4 % („Ferne Zukunft“).

**Abbildung 3**

Klimaensemble-Auswertung der simulierten Sommerhochwasser (Abflusstage ≥ 90 % Quantil der Vergangenheit).
Climate ensemble analysis of simulated summer floods (discharge days ≥ 90% quantile of the past).

**Abbildung 4**

Klimaensemble-Auswertung der simulierten Winterhochwasser (Abflusstage ≥ 90 % Quantil der Vergangenheit).
Climate ensemble analysis of simulated winter floods (discharge days ≥ 90% quantile of the past).



Abbildung 5

Klimaensemble-Auswertung der simulierten schneesmelzbeeinflussten Hochwasser (Abflusstage ≥ 90 % Quantil der Vergangenheit).
Climate ensemble analysis of simulated snow melt-influenced floods (discharge days ≥ 90 % quantile of the past).

Um die Entwicklung der Winterhochwasser näher zu charakterisieren, ist die Verteilung der simulierten Winterhochwasser im Kleinzugsgebiet des Schäferbaches als Netzdiagramm dargestellt (Abb. 6). Hierbei sind die monatlichen Anteile der Abflusstage und schneesmelzbeeinflussten Abflusstage am Winterhalbjahr dargestellt, die über dem 90 %-Quantil der Vergangenheitsrealisierungen liegen.

Über das Modellensemble zeigt sich generell eine Verschiebung der Hochwasser des Winterhalbjahrs vom Frühjahr (März bis April) in die früheren Wintermonate hinein (blaue Linie). Deutlich wird dies besonders in der Modellkette ECE_HIRHAM, bei der die Hochwasseranteile im April und Februar bis in die „Ferne Zukunft“ merklich sinken und im Dezember bis Januar ansteigen. Gleichzeitig sinkt in allen Modellketten der Anteil der Hochwasser, die als Folge von Schneeschmelzereignissen auftreten, bis zum Ende des Jahrhunderts deutlich ab (rosa Linie). Teilweise sind in den Modellketten der „Nahen Zukunft“ Zunahmen der Schneeschmelzanteile im März zu erkennen (ECE_RACMO, MPI_CCLM), die sich bis in die „Ferne Zukunft“ jedoch zurückbilden.

4. Diskussion

Die Ergebnisse der HQ20-Spitzenabflüsse für das Gesamtjahr (Tab. 6) zeigen keine eindeutigen Entwicklungen, weil Sommer- und Winterhalbjahr gegensätzliche Tendenzen aufweisen. Da somit eine jährliche Auswertung wenig aussagekräftig ist, wird nachfolgend eine separate Diskussion zu den Ergebnissen für Sommer- und Winterhalbjahr geführt. Hierbei sei auf mögliche Einschränkungen hinsichtlich ermittelter mittlerer Werte und Spannweiten hingewiesen, die sich durch die Auswertung von vier Modellketten aus dem ursprünglichen Modellensemble von 15 Modellketten ergeben. Ebenfalls bestehen Unsicherheiten hinsichtlich der betrachteten kleinen Einzugsgebietsskala bei Nutzung von Modellantrieben aus einer deutlichen größeren räumlichen und zeitlichen Auflösung. Dies betrifft insbesondere die ermittelten Absolutgrößen von lokalen Starkniederschlägen und anderen Extremereignissen, die für gewöhnlich einen starken lokalen bzw. zeitlich hochaufgelösten Charakter haben.

Der ermittelte deutliche Anstieg der HQ20-Spitzenabflüsse im Sommerhalbjahr (Tab. 6) ist auf eine Erhöhung der Starkniederschläge sowohl in Häufigkeit als auch in Niederschlagsmenge

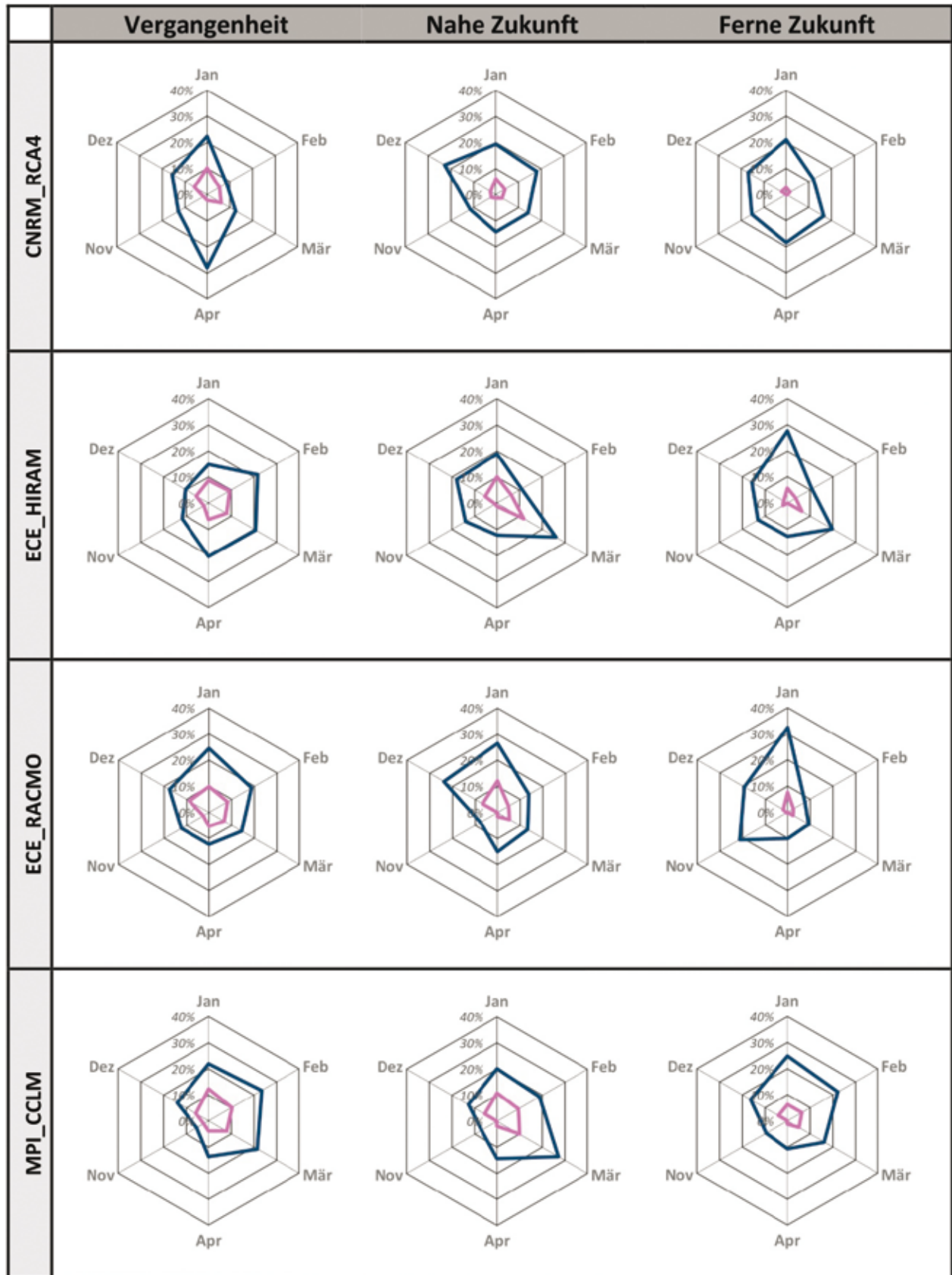
zurückzuführen (Tab. 5). Die ermittelte Häufung von Starkniederschlägen bis in die „Ferne Zukunft“ von ca. 1,7 Ereignissen pro Jahr und die Erhöhung der Starkniederschlagsmenge um 16,1 % führen zu einer Erhöhung der HQ20-Hochwasserspitzen von im Mittel 20 %. Diese Entwicklung wird durch die Simulationen bereits in der „Nahen Zukunft“ projiziert, wobei die ECE-Ketten dort auf größere Abflussspitzen als in der „Fernen Zukunft“ hindeuten, was sich auch im Modellmittel widerspiegelt. Auffällig ist hierbei, dass die prozentualen Zuwächse der Hochwasserspitzen im Kleinzugsgebiet (23,3 % bzw. 20 %) die prozentualen Zunahmen der untersuchten Niederschlagsquantile (6,8 % bzw. 16,1 %) übersteigen. Insbesondere in einem Kleinzugsgebiet wie dem des Schäferbaches erstrecken sich Starkniederschläge über das gesamte Gebiet, wodurch sie kaum durch Retentionseffekte gedämpft werden und unmittelbar zum Abfluss kommen (FOHRER, 2016). Zunahmen der Starkniederschläge haben daher eine Vergrößerung der Abflussquantile in einer ähnlichen Größenordnung zur Folge. Die im Vergleich größere Zunahme der Abflussquantile im Schäferbach-Einzugsgebiet kann durch eine reduzierte Bodenvorfeuchte als Folge der zu erwartenden höheren Temperaturen begründet werden. Weiterhin konnte für das Sommerhalbjahr keine eindeutige Veränderung in der Häufung von Sommerhochwasser festgestellt werden (Abb. 3).

Die simulierten Abnahmen der HQ20-Spitzenabflüsse im Winterhalbjahr (Tab. 6) sind auf eine starke Abnahme der Schneeschmelze zurückzuführen (Abb. 5 und 6). Die projizierte Steigerung der mittleren Wintertemperaturen (Tab. 3) auf Werte deutlich über dem Gefrierpunkt führt zur verminderten Bildung und verkürzten Akkumulation von Schnee im Winterhalbjahr, was sich bis in die „Ferne Zukunft“ auch in einer Reduktion von schneesmelzbeeinflussten Hochwasser von im Mittel 40,4 % bemerkbar macht (Abb. 5). Die Schneeschmelze kann insbesondere in kleinen Einzugsgebieten schnell und ungedämpft zum Abfluss kommen, was beim projizierten Rückgang von Schmelzereignissen zur simulierten Reduktion der Hochwasserspitzen führt (OLLESCH et al., 2005; OLLESCH, 2008). Durch die projizierten moderaten Temperaturerhöhungen bis in die „Nahe Zukunft“ ist bei den Modellen ECE_HIRHAM und MPI_CCLM zunächst eine Verschiebung der Schneeschmelze des Aprils in den März festzustellen (Abb. 6). Mit zunehmender Temperaturerhöhung in der „Fernen Zukunft“ zeigt sich jedoch bei diesen, wie auch den anderen Modellketten ein schwindender Einfluss der Schneeschmelze auf die Hochwasser, so dass diese in Zukunft vermehrt auch im Winterhalbjahr als Folge von Starkniederschlägen auftreten werden. Auf Grund der verminderten Schneeakkumulation und der erhöhten Niederschlagsmengen im Winterhalbjahr wird jedoch bei Abnahme der Spitzenabflüsse eine gleichzeitige Häufung von Winterhochwasser (Abb. 4) und einer Verschiebung der Hochwasser in die früheren Wintermonate (Abb. 6) eintreten.

Demnach ist für das Kleinzugsgebiet des Schäferbaches abzusehen, dass neben Veränderungen im Niederschlagsregime auch die projizierten Temperaturerhöhungen einen erheblichen Einfluss auf die zukünftige Entwicklung und Verteilung der Spitzenhochwasser nehmen werden.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse zeigen am Beispiel des Schäferbach-Einzugsgebiets, dass zukünftig in Kleinzugsgebieten deutliche Veränderungen in den Spitzenabflüssen, Hochwasserhäufigkeiten und

**Abbildung 6**

Simulierte Verteilung der Hochwasser (blaue Linie) und schneesmelzbeeinflussten Hochwasser (rosa Linie) über das Winterhalbjahr. Dargestellt ist der Anteil an Abflusstagen über dem 90 %-Quantil der Vergangenheit, gemittelt je Monat und Zeitperiode für das Klimaensemble im Schäferbach-EZG.
 Simulated distribution of floods (blue line) and snow melt-influenced floods (pink line) over the winter half-year. Depicted is the number of discharge days above the 90% quantile of the past, averaged per month and time period for the climate ensemble in the Schäferbach catchment.

Hochwasserverteilungen eintreten können. Die Untersuchung ergibt, dass im Sommerhalbjahr die Häufigkeit und Menge von Starkniederschlägen steigt und zu vergrößerten Spitzenabflüssen führt. Gleichzeitig wurde keine eindeutige Veränderung in der Häufung der Sommerhochwasser ermittelt. Im Winterhalbjahr werden die Spitzenabflüsse tendenziell als Folge verminderter Schneeakkumulation und Schneeschmelze sinken. Gleichzeitig sind eine zunehmende Häufung von Winterhochwasser und eine Verschiebung in die früheren Wintermonate zu erkennen.

In Einzugsgebieten, in denen die Schneeschmelze bisher die Extremhochwasser prägte, wird daher auf Grund steigender Temperaturen der Anteil an schneeschmelzbeeinflussten Hochwasser sinken und der Anteil an Regenhochwasser zunehmen. Es ist davon auszugehen, dass durch Starkregen bedingte Extremereignisse wie beispielsweise das Hochwasser 2016 in Braunsbach (BRONSTERT et al., 2017), in Regionen mit ähnlicher klimatischer Entwicklung wie das Schäferbach-Einzugsgebiet im Harz, zukünftig verstärkt auftreten können.

Offen bleibt die Frage, in welchem Ausmaß sich die Reaktionen von Kleineinzugsgebieten von denen größerer Einzugsgebiete unterscheiden. In aufbauenden Untersuchungen wird daher das untersuchte Einzugsgebiet schrittweise vergrößert werden, sodass mögliche Skaleneffekte der Ergebnisse herausgearbeitet werden können. Weiterhin wird zur Erhöhung der Aussagefähigkeit das untersuchte Klimamodell-Ensemble vergrößert werden. Hierbei ist insbesondere von Interesse, welche Klimagrößen und Gebietseigenschaften in Abhängigkeit von der betrachteten Skala den größten Einfluss auf die Hochwasserentwicklung nehmen werden. Mit diesen Erkenntnissen soll untersucht werden, ob auf Basis von szenario-neutralen Verfahren eine Reproduktion der Simulationsergebnisse möglich ist.

Summary and Outlook

According to the example of the Schäferbach catchment, the results show significant changes in peak flows, flood frequencies and flood distributions can be expected in small river catchment areas. The study shows that the frequency and amount of heavy precipitation increases in the summer half-year and leads to increased peak flows. At the same time, no clear change was found in the frequency of summer floods. During the winter half-year, peak flows will tend to decrease as a result of reduced snow accumulation and snowmelt. At the same time, there is an increasing frequency of winter floods and a shift into the earlier winter months.

In catchment areas where snowmelt has so far been the main cause for extreme floods, rising temperatures will lead to a decreasing proportion of floods influenced by snow melt while the proportion of floods due to rain events will increase. It can be assumed that extreme events caused by heavy rainfall, such as the 2016 flood in Braunsbach, are more likely occur in the future in regions with a similar climatic development as the Schäferbach catchment area in the Harz.

The question remains to what extent the reactions of small catchment areas differ from those of larger catchment areas. In following studies, the investigated catchment area will therefore be gradually enlarged in order to identify scaling effects of the results. Furthermore, the investigated climate model ensemble

will be enlarged to increase the informative value. Of particular interest is to identify which climatic variables and area characteristics, depending on the scale considered, will have the greatest influence on flood development. These findings are intended to provide insights whether a reproduction of the simulation results is possible on the basis of scenario-neutral methods.

Danksagungen

Wir danken der Hochschule Magdeburg-Stendal und den zuständigen Mitarbeitern für die langjährige Erfassung und Bereitstellung der Daten des Schäferbach-Einzugsgebiets und den Projektbeteiligten von EURO-CORDEX für die Erzeugung und Zurverfügungstellung der Klimaprojektionen. Weiterhin danken wir dem NLWKN und den anderen Projektbeteiligten, die die Klimadaten im Zuge des KliBiW-Projektes aufbereitet haben. Unser Dank gilt auch den Gutachtern für die hilfreichen Hinweise und Anregungen.

Autoren

Marcus Beylich, M. Eng.
Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit
Hochschule Magdeburg-Stendal
Breitscheidstr. 2
39114 Magdeburg
marcus.beylich@hs-magdeburg.de

Janine Köhn, M. Eng.
Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit
Hochschule Magdeburg-Stendal
Breitscheidstr. 2
39114 Magdeburg
janine.koehn@hs-magdeburg.de

Prof. Dr. rer. nat. habil. Frido Reinstorf
Fachbereich Wasser, Umwelt, Bau und Sicherheit
Hochschule Magdeburg-Stendal
Breitscheidstr. 2
39114 Magdeburg
frido.reinstorf@hs-magdeburg.de

Literatur

- ANDERSON, E.A. (1973): National Weather Service river forecast system - snow accumulation and ablation model. National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA), Technical Memorandum NWS-HYDRO-17, U.S. Department of Commerce, Washington D.C. Silver Spring, MD.
- BORCHARDT, D. (1982): Untersuchungen zur Variabilität von Abflussbildungsprozessen in Hochwasserentstehungsgebieten des unteren Mittelgebirges. *Wasserwirtschaft-Wassertechnik*, 11: 382-385.
- BRONSTERT, A., AGARWAL, A., BOESSENKOOL, B., FISCHER, M., HEISTERMANN, M., KÖHN-REICH, L., MORAN, T. & WENDI, D. (2017): Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 – Entstehung, Ablauf und Schäden eines „Jahrhundertereignisses“. Teil 1: Meteorologische und hydrologische Analyse. In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 61, H.3, doi: 10.5675/HyWa_2017,3_1.
- CANNON, A.J., SOBIE, S.R. & MURDOCK, T.Q. (2015): Bias correction of simulated precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve relative changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, 28, 6938-6959. doi:10.1175/JCLI-D-14-00754.1.
- DANKERS, R. & FEYEN, L. (2008): Climate change impact on flood hazard in Europe: An assessment based on high-resolution climate simulations. In: *Journal of Geophysical Research*, 113, D19, doi:10.1029/2007JD009719.

- FOHRER, N., BORMANN, H., MIEGEL, K., CASPER, M., BRONSTERT, A., SCHUMANN, A., WEILER, M. (2016): „Hydrologie“ Haupt Verlag, Bern, S. 215f.
- HÖLSCHER, J., SCHNORR, C., PETRY, U., ANHALT, M., HABERLANDT, U., PLÖTNER, S., MEON, G., WÖRNER, V., KREYE, P. (2017): Globaler Klimawandel – Wasserwirtschaftliche Folgenabschätzung für das Binnenland – Abschlussbericht – Phase 4, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz. http://www.nlwkn.niedersachsen.de/startseite/wasserwirtschaft/sonderthemen_projekte/klimawandel/projekt_kliwiw/das-projekt-kliwiw-104191.html (12/2017)
- IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- IPCC (2014): Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen [Hauptautoren, R.K. Pachauri und L.A. Meyer (Hrsg.)]. IPCC, Genf, Schweiz. Deutsche Übersetzung durch Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn 2015.
- JACOB, D., PETERSEN, J., EGGERT, B., ALIAS, A., CHRISTENSEN, O. B., BOUWER, L. M., BRAUN, A., COLETTE, A., DÉQUÉ, M., GEORGIEVSKI, G., GEORGOPOULOU, E., GOBIET, A., MENU, L., NIKULIN, G., HAENSLER, A. (2014): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. In: Regional Environmental Change, 14 (2), 563-578, doi: <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>.
- KISTNER, I. (2007): Anwendung des Modells ANIMO zur Simulation des gelösten Phosphors im Oberflächenabfluss auf der Feldskala und der Phosphorverfügbarkeit im Oberboden auf der Einzugsgebietskala; Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg.
- LEHMANN, J., COUMOU, D. & FRIELER, K. (2015): Increased record-breaking precipitation events under global warming. In: Climatic Change, 132, 501–515, doi: [10.1007/s10584-015-1434-y](https://doi.org/10.1007/s10584-015-1434-y).
- LINKE, C. et al. (2015): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgespräches „Interpretation regionaler Klimamodelldaten“, Hannover Okt. 2015.
- MARTINI, E., WOLLSCHLÄGER, U., KÖGLER, S., BEHRENS, T., DIETRICH, P., REINSTORF, F., SCHMIDT, K., WEILER, K., WERBAN, U., ZACHARIAS, S. (2015): Spatial and Temporal Dynamics of Hillslope-Scale Soil Moisture Patterns: Characteristic States and Transition Mechanisms, Vadose Zone Journal, April 2015, v. 14, doi:10.2136/vzj2014.10.0150.
- MONTEITH, J.L. (1975): Vegetation and the atmosphere, 1. Auflage. Principles. London: Academic Press.
- OLLESCH, G., SUKHANOVSKI, Y., KISTNER, I., RODE, M., MEISSNER, R. (2005): Characterization and modelling of the spatial heterogeneity of snowmelt erosion. Earth Surface Processes and Landforms, 30(2): 197-211.
- OLLESCH, G. (2008): Erfassung und Modellierung der Schneeschmelzerosion am Beispiel der Kleineinzugsgebiete Schäfertal (Deutschland) und Lubazhinka (Russland), Habilitationsschrift, Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau, TU Bergakademie Freiberg.
- OLLESCH, G., JOHN, H., MEISSNER, R. AND REINSTORF, F. (2010): Anthropogenic alteration of water balance and runoff processes in a small low mountain catchment, STATUS AND PERSPECTIVES OF HYDROLOGY IN SMALL BASINS, IAHS PUBL. 336, 2010.
- REINSTORF, F., TIEDGE, J., BAUSPIß, J., JOHN, H., OLLESCH, G. (2010): Time series modelling in the Schäfertal catchment in the Lower Harz Mountains/Central Germany, STATUS AND PERSPECTIVES OF HYDROLOGY IN SMALL BASINS, IAHS PUBL. 336, 2010.
- RICHARDS, L. A. (1931): Capillary conduction of liquids through porous mediums. In: Journal of Applied Physics 1, 318, S. 318-333.
- SCHULLA, J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen. Diss. ETH 12018, Zürich: Verlag Geographisches Institut ETH Zürich.
- SCHULLA, J., JASPER, K. (1998): Modellbeschreibung WaSiM-ETH. Technischer Bericht (PDF), 06.06.2017. http://www.wasim.ch/de/products/wasim_description.htm
- SCHULLA, J. (2016): Re: Simulation GW-Stände und Basisabfluss im Schäfertal. Email: j.schulla@wasim.ch (05.08.2016).
- SCHULLA, J. (2017): Model Description WaSiM. Technical report, pp. 347. http://www.wasim.ch/downloads/doku/wasim/wasim_2017_en.pdf (03/2018)
- WOLLSCHLÄGER, U., BAEßLER, C., DE ROOIJ, G.H., DIETRICH, P., FLECKENSTEIN, H.J., FRENZEL, M., KLOTZ, S., LAUSCH, A., MARTINI, E., MUSOLFF, A., OSWALD, S., PAUSE, M., REINSTORF, F., RODE, M., SAMANIEGO-EGUIGUREN, L., VOGEL, H.-J., WERBAN, U., ZACHARIAS, S. (2012): The Schäfertal-Catchment – An intensive research site within the TERENO Harz/Central German Lowland Observatory; Geophysical Research Abstracts, Vol. 14, EGU2012-12525, 2012.
- WOLLSCHLÄGER, U., ATTINGER, S., BORCHARDT, D., BRAUNS, M., CUNTZ, M., DIETRICH, P., FLECKENSTEIN, J. H., FRIESE, K., FRIESEN, J., HARPKE, A., HILDEBRANDT, A., JÄCKEL, G., KAMJUNKE, N., KNÖLLER, J., KÖGLER, S., KOLDITZ, O., KRIEG, R., KUMAR, R., LAUSCH, A., LIESS, M., MARX, A., MERZ, R., MUELLER, C., MUSOLFF, A., NORF, H., OSWALD, S. E., REBMANN, C., REINSTORF, F., RODE, M., RINK, K., RINKE, K., SAMANIEGO, L., VIEWEG, M., VOGEL, H.-J., WEITERE, M., WERBAN, U., ZINK, M., ZACHARIAS, S. (2017): The Bode hydrological observatory: a platform for integrated, interdisciplinary hydro-ecological research within the TERENO Harz/Central German Lowland Observatory, Environmental Earth Sciences, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, Jan. 2017, doi:10.1007/s12665-016-6327-5.