

Johannes Suttmöller und Henning Meesenburg

Einfluss von forstlicher Bestandesentwicklung und Klimawandel auf Wasserhaushaltskomponenten im Einzugsgebiet der Langen Bramke im Harz

Impact of forest stand development and climate change on the water budget of the Lange Bramke basin, Harz Mountains, Germany

Zur Analyse der Wasserhaushaltskomponenten im forstlichen Forschungsgebiet der Langen Bramke, welches 1947 kahlgeschlagen und danach wieder aufgeforstet wurde, stehen einzigartige nahezu 70-jährige meteorologische und hydrologische Beobachtungen zur Verfügung. Das hydrologische Modell WaSiM-ETH wurde in Verbindung mit einem Waldwachstumssimulator genutzt, um den Einfluss der Bestandesentwicklung auf den Wasserhaushalt zu untersuchen. Klimaprojektionen auf der Grundlage des Klimaszenarios RCP8.5 dienen der Analyse von möglichen Effekten des Klimawandels auf das Abflussregime und das Trockenstressrisiko der Fichtenbestände im Einzugsgebiet. In den ersten 40 Jahren seit Beginn der Aufforstung verringerte sich der gemessene Abfluss relativ zum gemessenen Niederschlag. Die mit Hilfe des Wasserhaushaltsmodells berechnete Verdunstung erhöhte sich dagegen im gleichen Zeitraum deutlich. Dies kann weitgehend auf den zunehmenden Wasserbedarf des aufwachsenden Waldbestandes zurückgeführt werden. Die Klimamodelle projizieren eine Temperaturerhöhung bis zum Jahr 2070, die auch eine Verlängerung der Vegetationsperiode zur Folge hätte. Dies wird vermutlich den Verdunstungsanspruch der Atmosphäre erhöhen, so dass die Wasserverfügbarkeit für die Waldbestände sinken und damit das Trockenstressrisiko steigen wird. Die Anpassungsfähigkeit der Fichte an Trockenheit wird als gering eingeschätzt. Unter der Annahme des Klimaszenarios RCP8.5 würde die Vulnerabilität der Fichte im Einzugsgebiet der Langen Bramke langfristig zunehmen.

Schlagwörter: Wasserhaushalt, forstliche Einzugsgebiete, Bestandesentwicklung, Klimawandel, Trockenstressrisiko, WaSiM-ETH

Meteorological and hydrological time series spanning almost seven decades from Lange Bramke, a completely clear-cut and thereafter afforested hydrological research basin, were analysed with respect to the discharge regime. The hydrological model WaSiM-ETH linked to a forest growth simulator was used to evaluate the impact of forest stand development on water budgets of Lange Bramke. Climate projections based on the climate scenario RCP8.5 served for the analysis of possible climate change effects on the discharge regime and on the drought stress risk of the Norway spruce stands within the catchment. During the first 40 years after afforestation, observed runoff relative to observed precipitation decreased, whereas simulated evapotranspiration increased. This can almost exclusively be attributed to the increasing water demand of the growing forest stands. Climate models project a temperature rise and corresponding extension of the growing season until the year 2070, which will presumably increase the evaporative demand of the atmosphere. Hereby, the water availability for the forest stands will decrease, and consequently drought stress risk will increase. Under the climate change scenario RCP8.5 the future vulnerability of Norway spruce, which is rated as drought sensitive, will increase.

Keywords: water budget, forested catchments, forest stand development, climate change, drought stress risk, WaSiM-ETH

1. Einleitung

Kleine Einzugsgebiete eignen sich besonders gut für die hydrologische Forschung, da alle bedeutsamen Komponenten des Wasserkreislaufs in ihnen studiert werden können. Aufgrund ihrer meist relativ großen Homogenität kann insbesondere die hydrologische Prozessforschung, das Studium von Einflussfaktoren auf hydrologische Prozesse und die Analyse von Änderungen von Umweltbedingungen wie Klima oder Landnutzung auf den Wasserhaushalt in kleinen Einzugsgebieten durchgeführt werden (SCHMALZ et al., 2015). Weiterhin können hydrologische Prozessmodelle effektiv anhand der in kleinen Einzugsgebieten gewonnenen Daten parametrisiert und validiert werden (KELLER, 1979; SCHUMANN et al., 2010). Dementsprechend hat die hydrologische Forschung in kleinen Einzugsgebieten eine lange Tradition (BATES, 1921; HORNBECK et al., 1977; SCHUMANN & HERRMANN, 2010; STÄHLI et al., 2011). Mittels des „paired watershed approach“ konnte in zahlreichen Studien durch experimentelle Eingriffe die Wirkung von einzelnen Einflussfaktoren auf hydrologische Prozesse abgeschätzt werden (BOSCH & HEWLETT, 1982; BRECHTEL et al., 1982; SWANK et al., 2001). Insbesondere in der forsthydrolo-

gischen Forschung werden kleine Einzugsgebiete genutzt, um Effekte von Änderungen der Waldbedeckung wie durch Kahlschlag, Durchforstung oder Baumartenwechsel auf die Wasserhaushaltskomponenten oder auf Abflussextrême zu ermitteln (BOSCH & HEWLETT, 1982; PEARCE et al. 1986; BROWN et al., 2005).

Vor rund 70 Jahren wurde das forsthydrologische Forschungsgebiet Lange Bramke im Harz eingerichtet. Es ist damit eines der ältesten hydrologischen Untersuchungsgebiete in Deutschland (SCHUMANN & HERRMANN, 2010). Anlass für die Einrichtung des Untersuchungsgebietes waren großflächige Kahlschläge, die im Rahmen von Reparationsleistungen nach dem 2. Weltkrieg durchgeführt wurden (Abb. 1). Es wurde erwartet, dass es infolge der Entwaldung zu einer deutlichen Zunahme des Direktabflusses und einer verstärkten Erosion kommen würde (WAGENHOFF & VON WEDEL, 1959; LIEBSCHER, 1975). Obwohl die Befürchtungen nicht eintraten, erwies sich das Einzugsgebiet der Langen Bramke aufgrund seiner homogenen Bestockung mit Fichtenbeständen als wertvolles Untersuchungsgebiet für forsthydrologische Fragestellungen (LIEBSCHER, 1979; SCHUMANN & HERRMANN, 2010; MEESENBURG et al., 2010a).

Vergleichbare Untersuchungen finden auch im forsthydrologischen Forschungsgebiet in Krofdorf (Hessen) statt. Seit Ende der 1960er Jahre werden die Wasser- und Stoffflüsse in vier Teileinzugsgebieten messtechnisch erfasst und untersucht (BRECHTEL et al., 1982). Schwerpunkt der Untersuchungen bilden Fragestellungen zu den Auswirkungen von forstlichen Maßnahmen und dem Klimawandel sowie Stickstoff- und Säureeinträgen auf den Wasser- und Stoffhaushalt in den Einzugsgebieten. Im nahezu vollständig bewaldeten Einzugsgebiet Wernersbach (Tharandter Wald) werden ebenfalls seit Ende der 1960er Jahre hydrologische Untersuchungen durchgeführt (PESCHKE, 1991). Im Fokus der Feldforschungen steht die detaillierte Erfassung hydrologischer und meteorologischer Prozesse, um anhand des prozessbezogenen Messkonzeptes hydrologische Modelle abzuleiten und zu validieren.

In der Schweiz wurden bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts im Emmental zwei kleine hydrologische Einzugsgebiete (Sperbel- und Rappengraben) eingerichtet, um den Einfluss der Wiederaufforstung auf den Wasserhaushalt zu untersuchen (STÄHLI et al., 2011). Ende der 1960er Jahre kamen im Alptal die drei weiteren Einzugsgebiete Vogelbach, Erlenbach sowie Lümpenbach hinzu (BURCH, 1994). Neben den Fragestellungen zum Einfluss der Wälder auf die Abflussbildung und von klimatischen Trends auf hydrologische Prozesse bilden der Nährstoffhaushalt sowie der Eintrag und Transport von Geschiebe aktuelle Forschungsschwerpunkte.

Für die hydrologische Modellierung forstlicher Einzugsgebiete ist der „Hubbard Brook Experimental Forest“ (HBEF) in New Hampshire (USA) von besonderer Bedeutung (HORNBECK et al., 1977). Das Gebiet wurde Mitte der 1950er Jahre mit dem Ziel eingerichtet, die Grundwasserneubildung und dessen Qualität unter Wäldern zu untersuchen. Bereits nach einigen Jahren rückten Untersuchungen zur Ökosystemforschung in den Fokus der Forschungsarbeiten, so dass das Experimentalgebiet aufgrund seiner umfangreichen Datensätze besonders wertvoll ist. Auch für die hydrologische Modellierung forstlicher Einzugsgebiete wurden im HBEF frühzeitig Forschungsschwerpunkte gesetzt (FEDERER & LASH, 1978). Neben den genannten Untersuchungsgebieten werden weltweit in zahlreichen kleinen Einzugsgebieten Studien zu unterschiedlichen Fragestellungen durchgeführt (SCHUMANN et al., 2010; SCHMALZ et al., 2015).



Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick zu den Untersuchungen zum Wasserhaushalt im Einzugsgebiet der Langen Bramke. Es wird analysiert, welche Wirkungen ein aufwachsender Waldbestand auf die Komponenten des Wasserhaushalts ausübt und ob ein Einfluss von Klimaänderungen bereits heute feststellbar ist. Weiterhin werden die möglichen Auswirkungen zukünftiger Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt und das Trockenstressrisiko für die Waldbestände untersucht.

2. Untersuchungsgebiet

2.1 Untersuchungen im Einzugsgebiet

Im Laufe der Forschungshistorie des Einzugsgebiets Lange Bramke standen unterschiedliche Fragestellungen im Fokus der Untersuchungen. Während zunächst der Wasserhaushalt der aufwachsenden Waldbestände den Untersuchungsschwerpunkt darstellte (LIEBSCHER, 1974), wurden die Forschungsaktivitäten später auf Fragestellungen zur Abflussbildung in paläozoischen Festgesteinen erweitert (HERRMANN et al., 1984). Ab Mitte der 1970er Jahre rückte zunehmend die Beeinflussung der Stoffkreisläufe durch atmogene Depositionen ins Blickfeld der Betrachtungen (HAUHS, 1989). Grundlegende Erkenntnisse zur Rolle der Stoffeinträge und der Bodenversauerung an den neuartigen Waldschäden wurden u. a. anhand der Untersuchungen im Einzugsgebiet der Langen Bramke gewonnen und trugen in der Folge zu ersten Luftreinhaltemaßnahmen bei, die bis heute eine sehr weitgehende Reduktion der Säureeinträge bewirkten (HAUHS et al., 1994). Aktuell bestimmen atmogene Stickstoffeinträge, die trotz Rückgang noch über der Belastbarkeitsschwelle liegen, und der Klimawandel die Untersuchungsaktivitäten (AHRENDT et al., 2010; MEESENBURG et al., 2010a). Im Vordergrund der Untersuchungen steht dabei einerseits die Wirkung von Umwelteinflüssen auf Ökosystemleistungen der Wälder und Gewässer sowie andererseits die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen der durch den Klimawandel veränderten Umweltbedingungen (MÜLLER et al., 2016).

Im Einzugsgebiet der Langen Bramke wurden ab Ende der 1970er Jahre drei Intensiv-Monitoringflächen zur Beobachtung von Umwelteinflüssen auf Waldökosysteme eingerichtet. Die mittlerweile knapp 40-jährigen Zeitreihen gehören damit zu den weltweit längsten kontinuierlichen Beobachtungen zu Ökosystemprozessen und -zuständen. Diese sind in zahlreiche nationale



Abbildung 1

Das Untersuchungsgebiet Lange Bramke vor der Wiederaufforstung (links, ca. 1948, Foto: unbekannt) und 2005 (rechts, Foto: Meesenburg).
The study area Lange Bramke prior to reforestation (left, ca. 1948, source: unknown) and 2005 (right, source: Meesenburg).

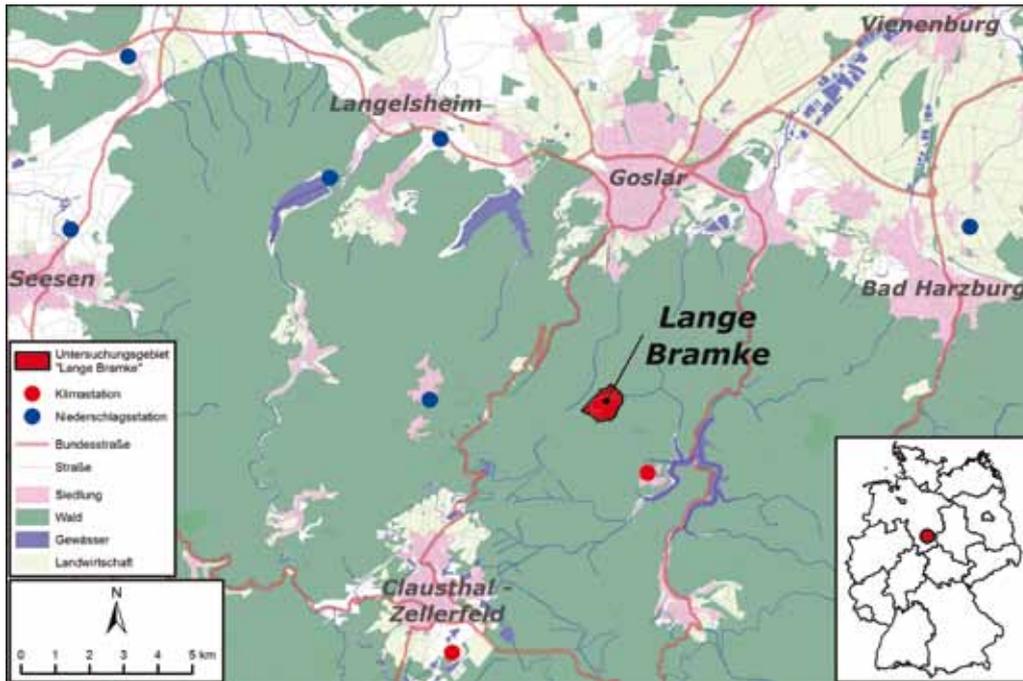


Abbildung 2
 Lage des Untersuchungsgebiets Lange Bramke im Harz (openstreetmap.org/copyright).
 Location of the Lange Bramke basin in the Harz Mountains (source: openstreetmap.org/copyright).

und internationale Umweltbeobachtungsprogramme integriert, u. a. dem Bodendauerbeobachtungsprogramm Niedersachsen (HÖPER & MEESENBURG, 2012), dem Forstlichen Umweltmonitoring in Deutschland (BMEL, 2016) und dem Europäischen Intensiven Waldmonitoring (Level II) nach ICP Forests (DE VRIES et al., 2003). Ferner ist die Lange Bramke Bestandteil des deutschen Long-term Ecological Research (LTER)-Netzwerkes (MÜLLER et al., 2016) und des Euro-Mediterranean Network of Experimental and Representative Basins (SCHUMANN et al., 2010).

2.2 Charakterisierung des Einzugsgebiets

2.2.1 Gebietsausstattung

Das Einzugsgebiet Lange Bramke ist 76 ha groß und liegt am Oberlauf der Oker im nordwestlichen Teil des niedersächsischen Harzes (Abb. 2). Es verläuft in ost-westlicher Richtung mit der Talöffnung nach Osten (DUNCKER et al., 2009). Es ist somit gegen die Luftmassen aus der westlichen Hauptwindrichtung geschützt. Nach der Exposition kann das Einzugsgebiet in nord- und süd-exponierte Hänge sowie den Kammbereich gegliedert werden, die jeweils etwa 1/3 der Fläche einnehmen. Die Höhenlage des Einzugsgebiets reicht vom Gebietsauslass bei 540 m ü. NN bis zum westlichen Kammbereich mit ca. 700 m ü. NN (Abb. 3). Aufgrund der großen Höhenunterschiede treten verbreitete Hangneigungen von rund 15 % auf, wobei der nordexponierte Hang mit durchschnittlich 12 % gegenüber dem Südhang mit 18 % Hangneigung deutlich flacher ist.

Die geologischen Ausgangssubstrate der Langen Bramke bilden quarz- und illitreiche Sandsteine und Tonschiefer des Unterdevon (HINZE, 1971). Diese sind von unterschiedlich mächtigen periglazialen Fließerden überlagert. Der Großteil des Einzugsge-

bietes wird durch geringmächtige (bis 30 cm) lehmig-sandige oder schluffig-lehmige Deckschichten eingenommen, die von skelettreichen Hangschuttdecken unterlagert werden (Skelettanteil > 50 %). Weiterhin treten 30 bis 70 cm mächtige schluffig-lehmige Deckschichten oder stark schluffgeprägte Fließerden auf (JANSEN et al., 2012). Die Wasserdurchlässigkeiten können flächendeckend als hoch eingestuft werden. Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit variiert im Oberboden zwischen $5 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ und $1 \cdot 10^{-3} \text{ m s}^{-1}$. In tieferen Bodenschichten werden $1 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ bis $5 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ erreicht, bevor beim Übergang in den Verwitterungshorizont mit zunehmendem Skelettgehalt wieder höhere hydraulische Leitfähigkeiten auftreten (DEUTSCHMANN,

1987). Aufgrund der hohen Leitfähigkeiten im Boden findet Direktabfluss nur in geringem Maße statt, so dass die Grundwasserbewegung, die überwiegend im zerklüfteten Festgestein stattfindet, eine bedeutsame Rolle spielt (HERRMANN & SCHUMANN, 2009).

Infolge des hohen Skelettgehaltes und der geringen Mächtigkeit weisen die Böden im Untersuchungsgebiet vielfach nur eine niedrige nutzbare Feldkapazität (nFK) auf. Der pflanzenverfügbare Bodenwasservorrat beträgt auf rund zwei Drittel aller Flächen weniger als 100 mm (Abb. 3). Nur im Talgrund der Langen Bramke wird eine nFK von mehr als 150 mm erreicht.

Das Gebiet der Langen Bramke liegt in der montanen bis obermontanen Vegetationsstufe des Harzes. Die aktuelle Bestockung weicht deutlich vom natürlichen Zustand ab. Als potenziell natürliche Vegetation ist aufgrund der basenarmen Ausprägung der Standorte überwiegend ein Hainsimsen-Buchenwald ausgewiesen (JANSEN et al., 2012). Auf rund 96 % der Fläche stocken jedoch Fichtenreinbestände mit einem Alter von derzeit ca. 70 Jahren. Eine in west-östlicher Richtung verlaufende ca. 20 m breite Schneise, eine Wildwiese und kleinere Bereiche entlang der Langen Bramke bilden die einzigen Flächen innerhalb des Untersuchungsgebietes ohne Baumbewuchs.

Der Vorbestand aus 140-jähriger Fichte wurde im Jahr 1947 im Rahmen von Reparationsmaßnahmen fast komplett entnommen (HAUHS & LANGE, 2010). Umgehend nach dem Kahlschlag wurde wieder aufgeforstet. Durch einzelne Ausfälle musste die Pflanzung bis in die Mitte der 1950er Jahren nachgebessert werden. Im Laufe der Bestandesentwicklung erfolgten mehrere Durchforstungen.

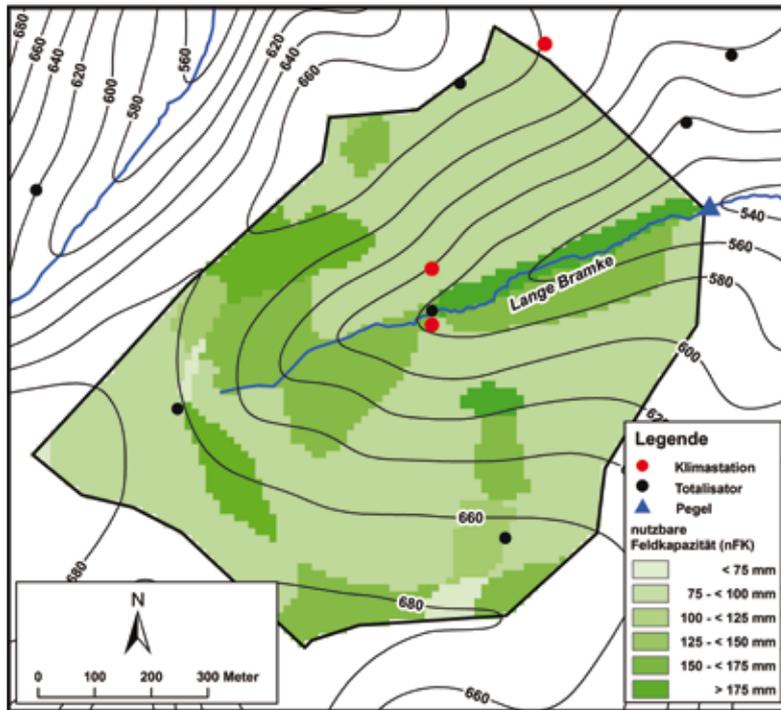


Abbildung 3
 Orographie, nutzbare Feldkapazität (nFK) und hydro-meteorologisches Messnetz im Einzugsgebiet der Lange Bramke.
Orography, available water capacity (nFK) and hydro-meteorologic observation network of the Lange Bramke basin.

2.2.2 Klima

Im langjährigen Mittel fallen im Untersuchungsgebiet rund 1.250 mm Jahresniederschlag (unkorrigiert, Klimaperiode 1961 bis 1990). Die interannuelle Variabilität ist sehr hoch und reicht von weniger als 700 mm im Jahr 1959 bis knapp 1.900 mm im Jahr 2007. Dabei ist in den letzten 40 Jahren keine wesentliche Veränderung der Niederschlagshöhe festzustellen, wie das 30-jährige gleitende Mittel zeigt (Abb. 4). Die Niederschläge im Einzugsgebiet der Lange Bramke weisen sowohl im Sommer wie auch im Winter ein schwach ausgeprägtes Maximum auf (Abb. 5). Dieses wird im Sommer vorwiegend durch konvektive Niederschlagsereignisse hervorgerufen, während im Winter die häufig auftretenden Westwindwetterlagen hohe Niederschläge bringen.

Bei den Jahresmitteltemperaturen ist seit den 1980er

Jahren eine kontinuierliche Erwärmung entsprechend dem globalen Trend zu beobachten. Die Jahresmitteltemperatur der Klimanormalperiode von 1961 bis 1990 betrug 6,3 °C. Das gleitende 30-jährige Mittel weist gegenüber der Jahresmitteltemperatur der Klimanormalperiode bereits eine Temperaturerhöhung von knapp 1 K auf. Das Jahr 2014 war mit einer Mitteltemperatur von 8,5 °C das bisher wärmste Jahr seit Messbeginn.

2.2.3 Wasserhaushalt

Der Abfluss der Lange Bramke wird überwiegend aus Regenniederschlägen gespeist. Darüber hinaus baut sich aufgrund der Höhenlage des Einzugsgebietes im Winter regelmäßig eine Schneedecke auf, so dass die höchsten Abflüsse im langjährigen Mittel mit der Schneeschmelze im März und April gemessen werden (Abb. 5). Allerdings treten auch im Winter überdurchschnittlich hohe Abflüsse auf, da es regelmäßig zu stärkeren Schneeschmelzereignissen kommt. Infolge der hohen Verdunstungsleistung der Vegetation im Sommer werden die niedrigsten Abflüsse im Spätsommer beobachtet. Diese betragen im langjährigen Mittel nur rund ein Drittel der Abflussmengen des Frühjahrs. Der Abflussgang der Lange Bramke ist durch ein pluvionivales Regime gekennzeichnet.

Unter Berücksichtigung einer windabhängigen Niederschlagskorrektur nach SCHULLA (2015) betrug die Jahresniederschlagssumme im Zeitraum von 1950 bis 2015 im Mittel 1.340 mm. Davon flossen rund 635 mm über die Lange Bramke ab und die verbleibenden 705 mm wurden verdunstet (Abb. 5).

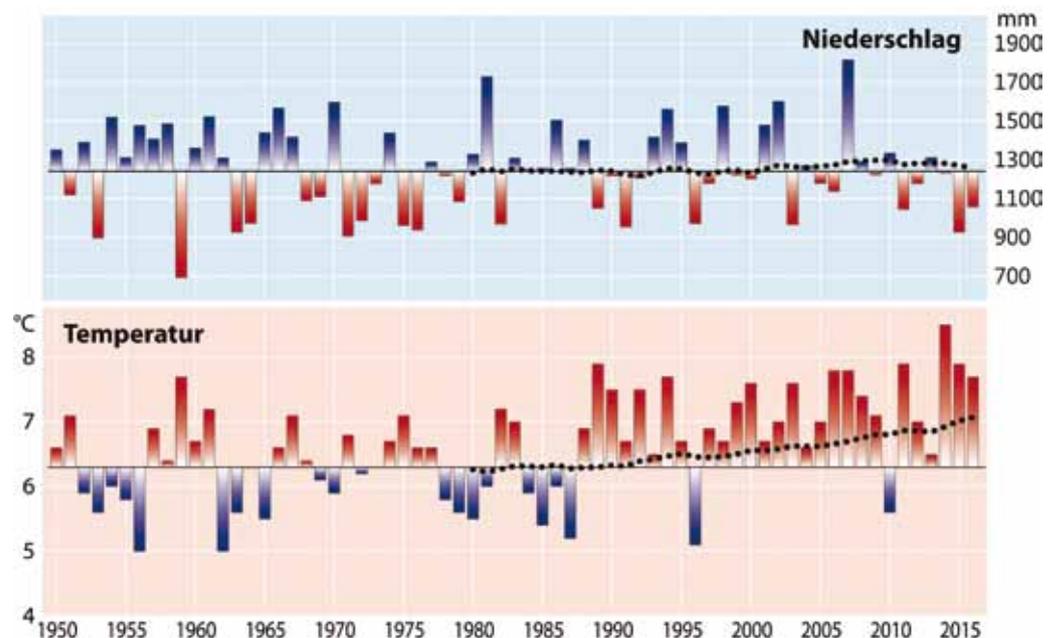


Abbildung 4
 Abweichung von Niederschlag und Temperatur vom Mittel der Klimareferenzperiode 1961 bis 1990 und gleitendes 30-jähriges Mittel (punktierter Linie).
Deviation of precipitation and air temperature from mean of climatological reference period 1961 to 1990 und 30-year moving average (dotted line).

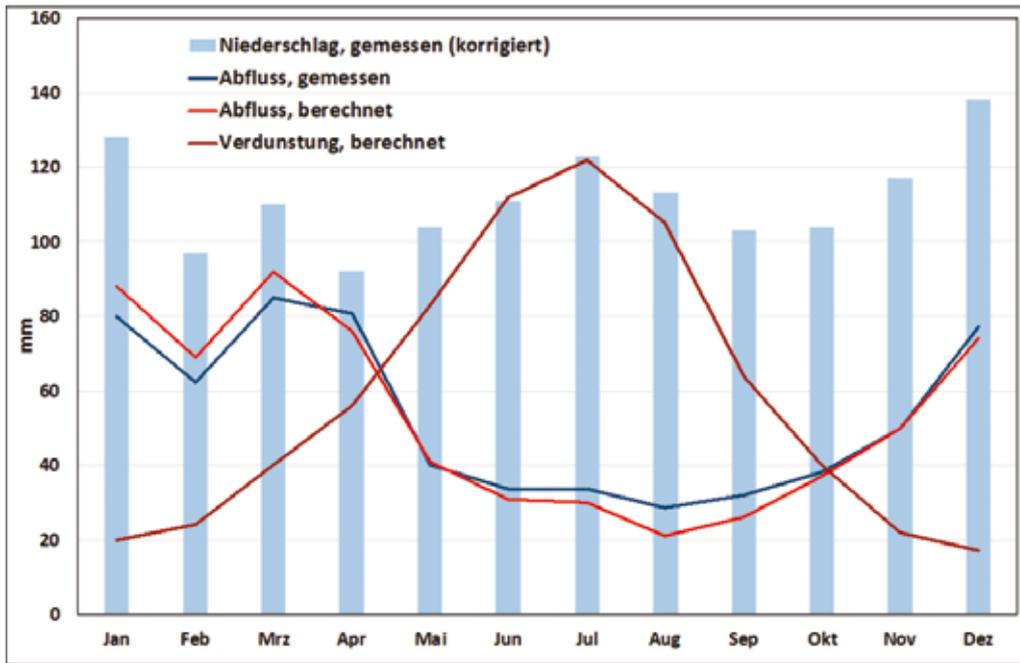


Abbildung 5

Gemessene mittlere monatliche Niederschlagssumme (korrigiert n. SCHULLA, 2015), gemessene und berechnete mittlere monatliche Abflussmenge sowie berechnete mittlere monatliche Verdunstungssumme im Einzugsgebiet Lange Bramke (Zeitraum 1950 bis 2015).

Mean monthly precipitation (corrected according to SCHULLA, 2015), observed and simulated discharge and evapotranspiration at Lange Bramke (period 1950 to 2015).

Im Einzugsgebiet der Langen Bramke ist während der bisherigen Beobachtungsperiode eine deutliche Veränderung der Anteile der Wasserhaushaltskomponenten zu beobachten. Dies zeigt exemplarisch der Abflussbeiwert, der den Anteil des Abflusses an der Niederschlagsmenge abbildet. Während im Zeitraum von Beginn der Beobachtungen bis ca. Anfang der 1960er Jahre etwa 60 % des Niederschlages in den Abfluss gelangten, verringerte sich danach der Abflussanteil in den letzten etwa 20 Jahren kontinuierlich auf 45 % (gleitendes Mittel, Abb. 6). Die hohe Variabilität des Abflussbeiwerts ist ursächlich durch die stark schwankenden Jahresniederschlagssummen bedingt.

3. Methodik

3.1 Datengrundlage

Für den Pegel Lange Bramke liegen Abflussmesswerte für den Zeitraum von 1948 bis heute vor. Die Durchflussermittlung erfolgt über die kontinuierliche Wasserstandsmessung (Wasser-

standsganglinie) und eine Wasserstand-Durchfluss-Beziehung (Abflusskurve). Der Wasserstand wurde bis zum Jahr 2009 über einen Pegelschreiber mit Schwimmersystem aufgezeichnet. Seitdem wird der Wasserstand über eine Druckpegelsonde gemessen. Die meteorologischen Verhältnisse werden für die Klimagrößen Lufttemperatur, relative Feuchte, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit und Niederschlag durch im Untersuchungsgebiet befindliche Monitoringnetze erfasst (Abb. 3). Mit Einrichtung des Untersuchungsgebietes wurden im Einzugsgebiet der Langen Bramke und seinen Nachbargebieten (Dicke Bramke, Steile Bramke und Wintertal) zahlreiche Niederschlagsmesser (Niederschlagsschreiber und 15 Totalisatoren) installiert, um die Niederschlagsver-

teilung im Einzugsgebiet räumlich differenziert zu erfassen. Zwischen 1997 und 2006 wurde die Niederschlagsmessung mit den Totalisatoren eingestellt. Am Standort Bramke Hütte (unter-

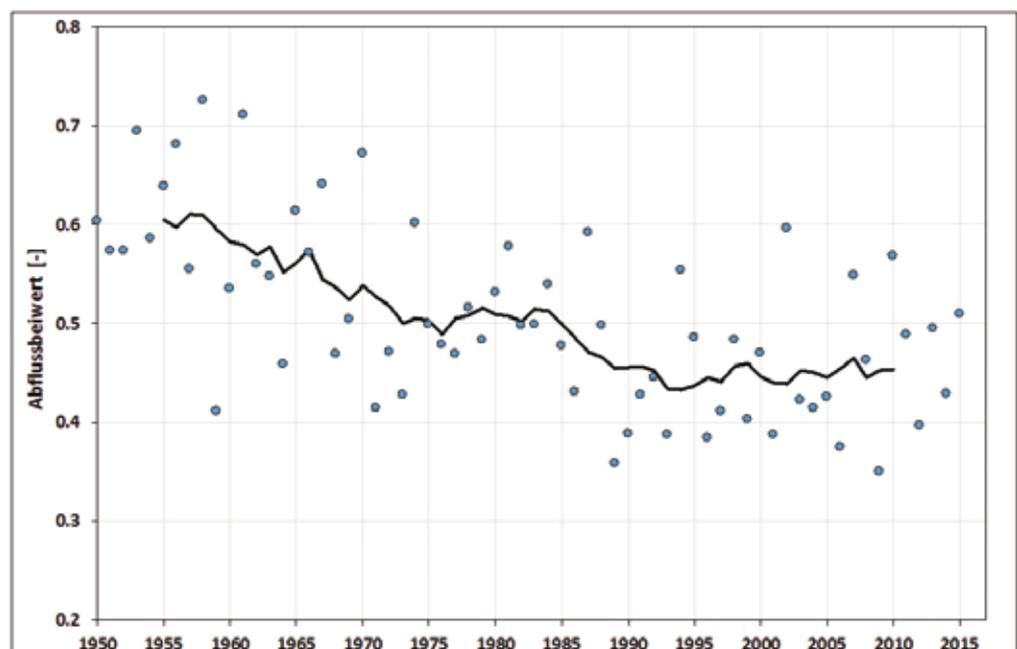


Abbildung 6

Mittlerer jährlicher Abflussbeiwert für die Lange Bramke im Zeitraum 1950 bis 2015; durchgezogene Linie = 10-jähriges gleitendes Mittel.

Mean annual runoff coefficient of Lange Bramke for the period 1950 to 2015; solid line shows 10-year moving average.

halb des Pegels Lange Bramke gelegen) liegen Tagessummen der Niederschläge von 1955 bis 1997 vor. Seit 1997 werden alle relevanten meteorologischen Variablen mit einer Auflösung von 15 Minuten gemessen. Vorhandene Datenlücken wurden durch regionalisierte Daten von Niederschlags- und Klimastationen des DWD (Abb. 2) geschlossen.

Die Geodatenbasis zur flächenhaften Beschreibung der Gebietscharakteristik setzt sich folgendermaßen zusammen:

- Digitales Höhenmodell (12,5 m); Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen (LGLN),
- Geologische Übersichtskarte (1 : 25.000); Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG),
- Forsteinrichtungsdaten 1997, 2003 und 2014; Niedersächsisches Forstplanungsamt,
- Forstliche Standortkartierung; Niedersächsisches Forstplanungsamt.

Um die Auswirkungen der Klimaveränderung auf den Wasserhaushalt im Einzugsgebiet der Langen Bramke abzuschätzen, wurde das Wasserhaushaltsmodell mit Klimaprojektionen des auf den aktuellen Szenarienvorgaben des Weltklimarates (IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change) basierenden Szenarios RCP8.5 (Representative Concentration Pathways) angetrieben (IPCC, 2013). Die Ziffer in der Szenariobezeichnung gibt die zusätzliche Strahlungsenergie (in Watt m⁻²) bis zum Ende des 21. Jahrhunderts in der bodennahen Atmosphäre an. In dieser Untersuchung wurden die Klimaprojektionen des statistischen Regionalmodells STARS II für den Zeitraum 1981 bis 2070 verwendet (ORLOWSKY et al., 2008). Dieses wurde mit den Ergebnissen des globalen Klimamodells ECHAM6-OM (JUNGCLAUS et al., 2010; STEVENS et al., 2013) angetrieben.

3.2 Wasserhaushaltsmodell

Um Ursachen für Veränderungen der Wasserhaushaltskomponenten und mögliche Effekte der Bestandesentwicklung quantitativ abschätzen zu können, ist die Anwendung eines hydrologischen Modells erforderlich, das die Bestandesstruktur dynamisch abbilden kann. Weiterhin ist es im Hinblick auf Prognosezwecke wünschenswert, die hydrologische Prozesskette flächendifferenziert und physikalisch basiert abzubilden. Um das Trockenstressrisiko für Waldbestände quantifizieren zu können, ist zudem eine differenzierte Abbildung des Bodenwasserhaushalts erforderlich. Das rasterbasierte Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH erfüllt diese Anforderungen insbesondere durch die Verwendung der Richards-Gleichung (RICHARDS, 1931) zur Simulation der Bodenwasserflüsse in der ungesättigten Bodenzone (SCHULLA, 2015). Zeitreihen der bestandesspezifischen Parameter wurden durch das Waldwachstumsmodell WaldPlaner bereitgestellt (HANSEN & NAGEL, 2014; SUTMÖLLER et al., 2011).

Das Wasserhaushaltsmodell WaSiM-ETH berechnet die Wasserumsätze auf einem Modellgitter und einer frei wählbaren Rasterweite, die für das Einzugsgebiet der Langen Bramke entsprechend der Auflösung des digitalen Geländemodells mit 12,5 m gewählt wurde. Als meteorologischer Antrieb werden Angaben zum Niederschlag und Wind, zur Temperatur, Globalstrahlung bzw. Sonnenscheindauer und relativen Feuchte benötigt. Die meteorologischen Zeitreihen flossen in dieser Anwendung als Tagesmittelwerte bzw. als Tagessumme in die hydrologische Modellierung ein, die ebenfalls mit einem täglichen Zeitschritt erfolgte. Der Simulation vorgeschaltet wurde eine windabhän-

gige Korrektur der Stationsniederschläge. Die meteorologischen Daten der Klimastationen (Beobachtungs- und Klimaprojektionsdaten) wurde mit Hilfe eines kombinierten Verfahrens aus Inverse Distance Weighting (IDW) und einer höhenabhängigen Regression auf das Flächenraster des Modells von 12,5 m interpoliert. Weiterhin wurden der Strahlungsinput und die Temperatur in Abhängigkeit von der Topographie korrigiert.

Die Evapotranspiration beschreibt die Verdunstungsprozesse der Transpiration, Interzeption und Evaporation. Die Interzeption wird von WaSiM-ETH über einen mit Blattflächenindex (LAI), Bedeckungsgrad (Überschirmungsgrad) und spezifischer Interzeptionsspeicherkapazität parametrisierten Speicheransatz ermittelt. Die potenzielle Evapotranspiration wird nach der Methode von Penman-Monteith berechnet (MONTEITH, 1965; PENMAN, 1948). Der aerodynamische Widerstand wird dabei über die Windgeschwindigkeit und die Rauheitslänge, die wiederum als Funktion der Bestandeshöhe angenommen wird, geschätzt (SUTMÖLLER et al., 2011). Die Parametrisierung der verwendeten pF-Kurven erfolgte nach Mualem/van Genuchten (VAN GENUCHTEN, 1980). Die van Genuchten-Parameter wurden in Anlehnung an WESSOLEK et al. (2009) abgeleitet.

3.3 Parametrisierung der Bestandeseigenschaften

Zur Abbildung der Bestandesentwicklung und des forstlichem Managements wurde das Waldwachstum mit dem WaldPlaner (HANSEN & NAGEL, 2014), einem auf dem empirischen Waldwachstumsmodell BWINPro aufbauenden Einzelbaumsimulator (NAGEL et al., 2002) regelbasiert modelliert. In dem Modell wird das Waldwachstum auf der Basis der Einzelbäume beschrieben, wodurch verschiedene Bestandesstrukturen und Baumartenzusammensetzungen simuliert werden können. Wichtige Größen für die Berechnung des Waldwachstums sind neben dem Alter der Brusthöhendurchmesser, die Höhe der Einzelbäume sowie die Bestandesoberhöhe. Für die Simulation der Bestandesentwicklung werden die Funktionen des Waldwachstumssimulators zur Generierung von Beständen, zur Bestandesbehandlung sowie zur Quantifizierung von Einwuchs und Verjüngung benötigt. Damit ist es möglich, die Waldentwicklung im Einzugsgebiet der Langen Bramke seit der Bestandesbegründung nachzubilden. Für die Beschreibung der Bestände im Untersuchungsgebiet wurde mit dem WaldPlaner für jede der 9 Bewirtschaftungseinheiten (4 Forstabteilungen mit insgesamt 9 Unterabteilungen) auf Basis seiner Bestandesattribute (Baumart, Alter, Durchmesser des Grundflächenmittelstammes, Höhe des Grundflächenmittelstammes, Bonität, Flächenanteil, Bestockungsgrad und Biomassevolumen je Hektar) ein Modellbestand mit seinen Einzelbäumen generiert. Hieraus werden die hydrologisch relevanten Strukturparameter LAI, Überschirmungsgrad und Bestandeshöhe generiert (SUTMÖLLER et al., 2011). Als Stützstellen für die Waldwachstumssimulation dienten die Daten der Forsteinrichtung für die Stichjahre 1997 und 2014.

Durch Nadelabwurf entstehende saisonale Schwankungen des LAI wurden mit dem phänologischen Modell von MENZEL (1997), MENZEL & FABIAN (1999) und der Parametrisierung von HAMMEL & KENNEL (2001) für den Vegetationsbeginn und dem auf einem Temperatur- bzw. Kurztagskriterium basierenden Ansatz von VON WILPERT (1990) für das Ende der Vegetationsperiode berechnet. Der LAI für Fichtenbestände im Winter wurde in Anlehnung an HAMMEL & KENNEL (2001) mit 80 % des maximalen LAI geschätzt.

Bei der Bestandesbegründung (Pflanzung) wurde der LAI in der Vegetationsperiode vorwiegend durch die Bodenvegetation, für die ein Wert von 2,0 angenommen wurde, bestimmt (DELFS et al., 1958). Nach rund fünf Jahren überstieg der LAI der Fichten den Wert der Bodenvegetation. In den folgenden 10 bis 15 Jahren entwickelte sich der Fichtenbestand zu einer Dichtung mit einem LAI um 4,0. Im Alter von 40 bis 50 Jahren waren die Fichtenbestände etabliert und voll entwickelt, so dass der LAI mit Werten zwischen 5,0 und 7,0 seine höchsten Werte erreichte. In den Jahren 2003 und 2004 wurden Durchforstungsmaßnahmen durchgeführt, die zu einer leichten Auflichtung der Bestände führten, so dass der LAI auf Werte zwischen 5,0 bis 5,5 abnahm.

Eine weitere wichtige Größe zur Parametrisierung der Landnutzung im Wasserhaushaltsmodell stellt der Bedeckungsgrad dar, über den der durch den Kronenraum durchfallende Niederschlag abgeschätzt wurde. Bei einem Bedeckungsgrad von weniger als 85 % wurde angenommen, dass sich in den Bestandeslücken eine verdunstungswirksame Bodenvegetation entwickelt hatte. In diesen Fällen wurden die Vegetationsparameter der Bodenvegetation und der Bestände flächengewichtet zu einem mittleren Bestandesparametersatz zusammengefügt.

Um den Einfluss der Bestandesentwicklung auf das Abflussschehen zu quantifizieren, wurde das hydrologische Modell über den gesamten Simulationszeitraum mit einer statischen Parametrisierung der Bestände (Referenzjahr 1997) gerechnet und mit den Ergebnissen der Simulation auf Grundlage der Bestandesrekonstruktion verglichen. Die übrigen Modelleinstellungen (meteorologischer Antrieb, Bodeneigenschaften etc.) waren für beide Simulationsläufe identisch.

Für die Projektionen der Wasserhaushaltskomponenten unter dem Klimaszenario RCP8.5 für den Zeitraum 1981 bis 2070 wur-

den ebenfalls konstante Bestandesstrukturen angenommen, um mögliche Einflüsse klimatischer Veränderungen zu verdeutlichen.

3.4 Berechnung von Trockenstressindikatoren

Zur Beschreibung des aktuellen und zukünftigen Trockenstressrisikos wurden verschiedene Indikatoren berechnet. Ein einfach zu berechnender Indikator ist die Standortwasserbilanz, die sich aus der Summe der Klimatischen Wasserbilanz und dem pflanzenverfügbarem Bodenwasser (nutzbare Feldkapazität) ergibt (GRIER & RUNNING, 1977; WAGNER et al., 2016). Die Standortwasserbilanz wurde für die dynamisch ermittelte Vegetationsperiode unter der Annahme berechnet, dass zu Beginn der Vegetationsperiode die Böden auf Feldkapazität aufgefüllt sind. Die Klimatische Wasserbilanz ist die Differenz aus dem gefallenem Niederschlag und der potenziellen Verdunstung einer Grasvegetation nach FAO-Norm (ALLEN et al., 1998). Das pflanzenverfügbare Bodenwasser wurde für die Leitprofile der forstlichen Standortskarte nach AG BODEN (2005) als nutzbare Feldkapazität für eine Tiefe von einem Meter berechnet. Als zweiter Trockenstressindikator wurde die relative Verdunstung bestimmt. Diese beschreibt das Verhältnis der realen zur potenziell möglichen Verdunstung und kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Je höher dieser Wert ist, desto geringer ist das Trockenstressrisiko.

4. Ergebnisse

4.1 Kalibrierung des hydrologischen Modells

Die Modellkalibrierung erfolgte auf Grundlage der Jahre 1990 bis 1999. Für diesen Zeitraum liegt eine detaillierte Dokumentation der Bestandesentwicklung vor. Der gesamte Simulationszeitraum beginnt kurz nach den Wiederaufforstungsmaßnahmen im Jahr 1950 und endet im Jahr 2015. Um den Einfluss des Klimawandels zu untersuchen, wurde der Zeitraum von 1981 bis 2070 mit dem Klimaszenario RCP8.5 gerechnet.

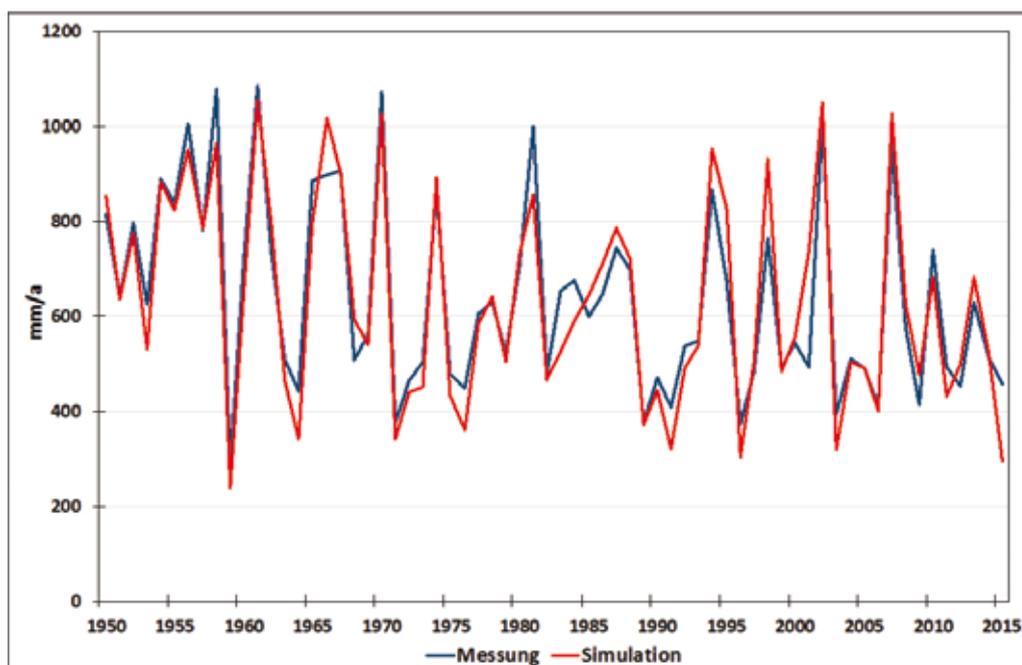


Abbildung 7
 Beobachtete (Messung) und berechnete (Simulation mit WaSiM-ETH) jährliche Abflussmenge.
 Observed (Messung) and simulated (Simulation (WaSiM-ETH)) annual discharge rate.

Das Ziel der Modellkalibrierung war, die Jahresabflussmenge möglichst gut abzubilden (Abb. 7). Über den gesamten Simulationszeitraum 1950 bis 2015 liegt der simulierte mittlere Abfluss mit 633 mm a^{-1} nur wenig unter dem gemessenen Wert von 635 mm a^{-1} .

Neben der Abflussmenge sollte auch die jahreszeitliche Dynamik im Abflussgang abgebildet werden (Abb. 5). Der Abfluss in der Langen Bramke wird überwiegend aus dem Basisabfluss gebildet (HERMANN et al., 1989). Stärkere Niederschlagsereignisse infiltrieren vollständig im Boden und werden stark verzögert über den Basisabfluss an den Vorfluter abgegeben. Erst bei intensiven und länger an-

Tabelle 1
 Berechnete Modell-Gütemaße für die Simulation der Abflüsse am Pegel Lange Bramke (r^2 : Bestimmtheitsmaß, $\ln r^2$: Bestimmtheitsmaß für logarithmierte Abflüsse, NSE: Nash-Sutcliffe-Effizienz, $\ln NSE$: Nash-Sutcliffe-Effizienz für logarithmierte Abflüsse).
Quality criteria for simulation results of discharge at Lange Bramke (r^2 : coefficient of determination, $\ln r^2$: coefficient of determination for logarithmised discharge, NSE: Nash-Sutcliffe efficiency, $\ln NSE$: Nash-Sutcliffe efficiency for logarithmised discharge).

Periode	Gütemaße			
	r^2	$\ln r^2$	NSE	$\ln NSE$
1990 - 1999	0,73	0,75	0,73	0,75
1980 - 1989	0,71	0,71	0,69	0,71
1950 - 2015	0,68	0,68	0,68	0,75

dauernden Niederschlägen oder bei einsetzender Schneeschmelze wird Direktabfluss gebildet. Daraus resultieren die typisch steil ansteigenden Abflussspitzen und der ebenso schnelle Rückgang der Abflusshöhe auf das Basisabflussniveau. Über „freie“ Parameter kann die Abflussbildung im Modell gesteuert werden. Dies betrifft den Skalierungsfaktor „ d_r “ (Wertebereich 0 - ∞) für den Interflow und die Abnahmekonstante „ k_{rec} “ (Wertebereich 0 - 1) für die gesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten mit zunehmender Bodentiefe. Wenn beide Parameter auf 0 gesetzt werden, wird kein Zwischenabfluss gebildet. Als Ergebnis der Kalibrierung erhält „ d_r “ den Wert 4,0 und „ k_{rec} “ 0,1. Als weitere Kalibrierparameter wurden die Übergangstemperatur „ TOR “, die zwischen Regen- und Schneeniederschlag trennt, und die Grenztemperatur der Schneeschmelze „ T_0 “ auf 0,5 °C gesetzt. Schließlich wurde der maximale Speicherkoeffizient für den Interzeptionsspeicher „IntercepCap“ für die Fichte mit 1,0 mm angenommen.

Die Güte der Simulation wird über die Abweichungen zwischen der gemessenen und simulierten Abflussganglinie auf Basis von Tagesmittelabflüssen bestimmt. Als Gütemaße dienen das Bestimmtheitsmaß r^2 (SCHULLA, 2015) und die Nash-Sutcliffe-Effizienz NSE (NASH & SUTCLIFFE, 1970). Beide Gütemaße wurden jeweils auch für die logarithmierten Abflüsse ermittelt, um die Gewichtung von Abflussspitzen zu reduzieren.

Für den Kalibrierzeitraum von 1990 bis 1999 beträgt das Bestimmtheitsmaß als Kriterium für die Simulationsgüte bezogen auf die täglichen Abflüsse 0,73 (Tab. 1). Die NSE liegt bei 0,73. Im Validierungszeitraum von 1980 bis 1989 werden für das Bestimmtheitsmaß 0,71 und für die NSE 0,69 erzielt. Über die gesamte Simulationsperi-

ode liegen das Bestimmtheitsmaß und die NSE bei 0,68. Beide Güteindizes für die logarithmierten Abflusswerte weisen für alle Betrachtungsperioden gleiche oder höhere Werte auf. Nach MORIASI et al. (2007) kann die Simulationsgüte bei einer NSE zwischen 0,65 und 0,75 als gut bezeichnet werden.

4.2 Einfluss der Bestandesentwicklung auf den Wasserhaushalt

Seit Beginn der Untersuchungen ist für die Jahressummen der Niederschläge trotz großer Variabilität keine signifikante Veränderung feststellbar (Abb. 4). Die Abnahme des Abflussanteils dürfte daher überwiegend auf die erhöhte Verdunstungsleistung der wachsenden Fichtenbestände im Einzugsgebiet der Langen Bramke zurückzuführen sein. Um deren Einfluss auf die Wasserhaushaltskomponenten quantifizieren zu können, werden die Modellsimulationen mit dynamischen und mit auf das Jahr 1997 bezogenen konstanten Bestandesparametern verglichen (Abb. 8).

Danach betragen die Differenzen der berechneten Abflussmenge zwischen beiden Modellszenarien kurz nach der Aufforstung in der Langen Bramke zu Beginn der 1950er Jahre 150 bis über 200 mm a⁻¹. Die jungen Fichten konnten offensichtlich noch nicht wirksam zur Verdunstung beitragen, weshalb die Flächen im Einzugsgebiet einer geschlossenen Grasvegetation vergleichbare Transpirationseigenschaften aufwiesen (s. Kap. 3.3). Bereits nach wenigen Jahren hatte die Verdunstungsleistung der jungen Fichtenbestände jedoch signifikant ($p < 0,001$) zugenommen, so dass sich die Abflüsse in der Langen Bramke und somit auch die Differenz der Abflüsse zwischen beiden Modellläufen verringerten. Im Vergleich zu den Beständen mit voll entwickelten Kro-

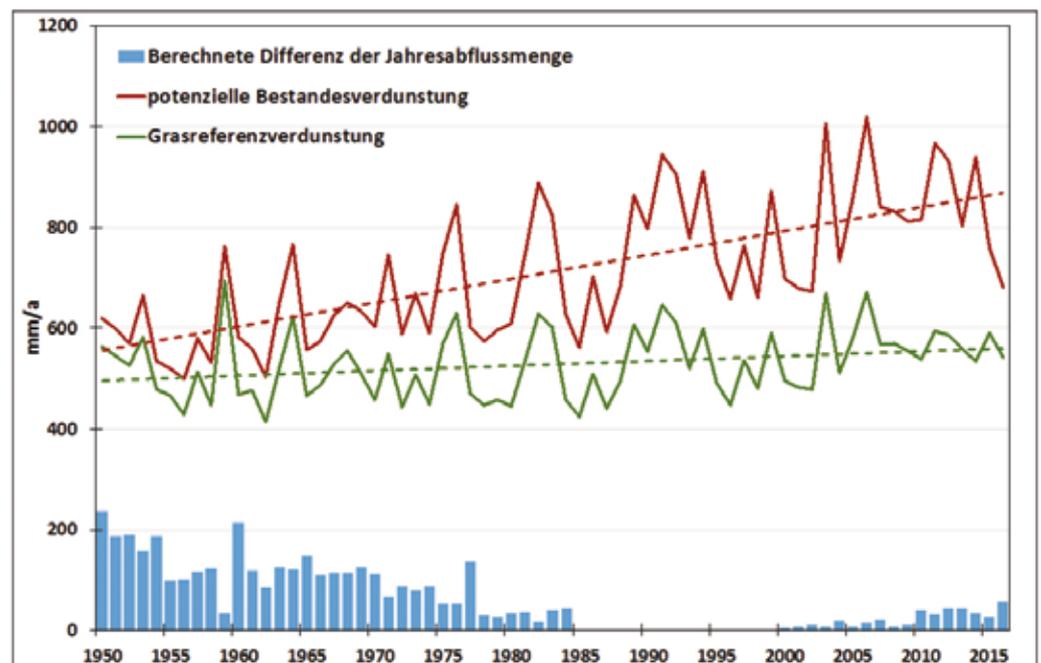


Abbildung 8
 Differenz der Jahresabflussspende zwischen der Simulation mit Berücksichtigung der Bestandesentwicklung und Simulation mit konstanten Bestandeseigenschaften (Referenzjahr 1997) sowie berechnete Grasreferenz- und Bestandesverdunstung für das Einzugsgebiet der Langen Bramke; gestrichelte Linien = linearer Trend.
Difference of annual discharge rate between simulations with consideration of forest development and constant forest stand characteristics (reference year 1997), reference evapotranspiration and stand evapotranspiration for Lange Bramke; broken lines indicate linear trend.

nenstrukturen (Referenzjahr 1997) betrug die Differenz der Abflüsse in diesem sogenannten Dickungsstadium noch rund 100 mm a⁻¹. Nach 30 bis 40 Jahren erreichten die Fichten ihre maximale Verdunstungsleistung. Während der weiteren Bestandesentwicklung kam es nach Durchforstungsmaßnahmen (2003 und 2004) zu einer Auflichtung der Bestände, so dass nachfolgend die Verdunstung leicht rückläufig war und die Differenz der Abflüsse aus den beiden Modellläufen dementsprechend wieder positive Werte annahm (Abb. 8).

Der rückläufige Abflussanteil im Einzugsgebiet der Langen Bramke kann überwiegend auf die höhere Verdunstung der einwachsenden Bestände zurückgeführt werden. Allerdings zeigt die Berechnung der Grasreferenzverdunstung, dass der beobachtete Erwärmungstrend zu einer leichten Erhöhung des Verdunstungsanspruchs der Atmosphäre geführt hat ($p < 0,05$). Seit Mitte der 1980er Jahre (Beginn der Erwärmung, Abb. 4) beträgt die Zunahme der Grasreferenzverdunstung rund 40 mm.

4.3 Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt

Nach den aktuellen Klimaprojektionen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) werden bis zum Ende des Jahrhunderts höhere Temperaturen und eine veränderte Niederschlagsverteilung für Deutschland erwartet. Die Wasserhaushaltssimulation wurde mit den Daten des Klimaszenarios RCP8.5, das auf eher pessimistischen Annahmen zur Emissionsentwicklung beruht, angetrieben. Dies hätte zur Folge, dass bis zum Ende dieses Jahrhunderts global mit einer Erwärmung von etwa 3 K bis knapp 6 K im Vergleich zur vorindustriellen Zeit (vor 1880) zu rechnen ist.

Für das Gebiet der Langen Bramke wird nach dem Medianlauf des STARS-Modells auf Grundlage des RCP8.5 Szenarios bis zum Jahr 2070 eine Erwärmung um rund 2 K im Vergleich zur Periode 1981 bis 2010 berechnet (Abb. 9). In Bezug auf die vorindustrielle Zeit bedeutet dies einen Temperaturanstieg von mehr als 3 K. Die Ergebnisse der Globalmodelle lassen für die Periode 2070 bis 2100 einen

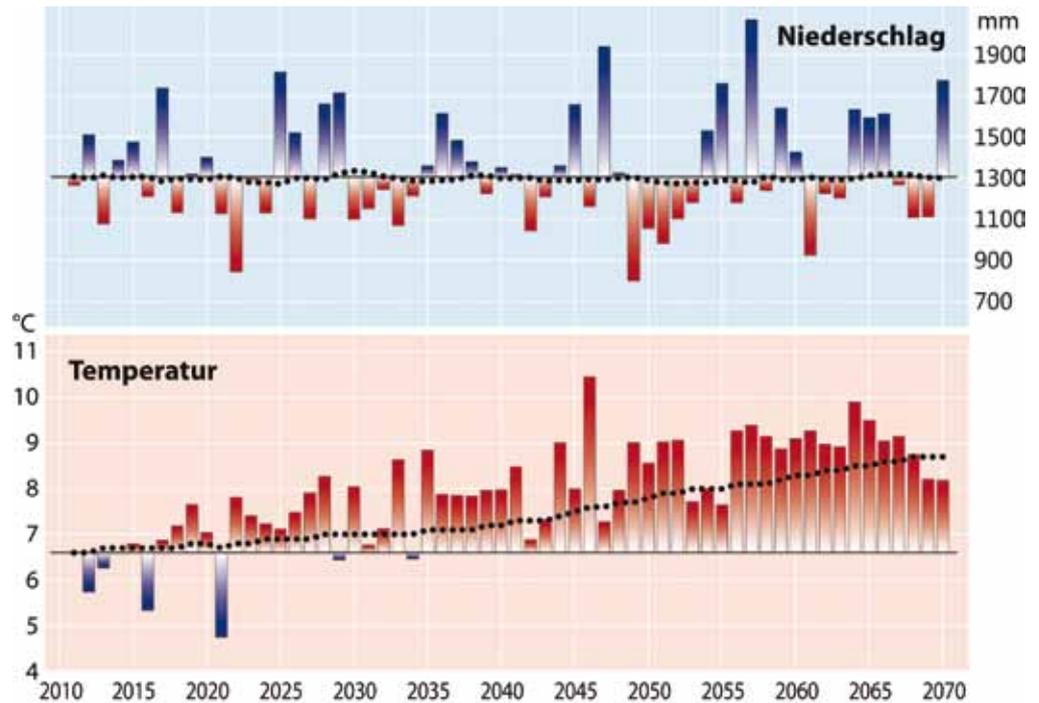


Abbildung 9
 Jährliche Abweichung von Niederschlag und Temperatur vom Mittel der Periode 1981 bis 2010 für den Zeitraum 2011 bis 2070 unter Annahme des Klimaszenarios RCP8.5 (Median) für das Einzugsgebiet der Langen Bramke (punktierte Linie zeigt gleitendes 30-jähriges Mittel).
 Annual deviation of precipitation and air temperature from mean of period 1981 to 2010 under climate scenario RCP8.5 (Median) for Lange Bramke (dotted line shows 30-year moving average).

weiteren Anstieg um 1,5 K erwarten, so dass sich die Gesamterwärmung auf 4,5 K addiert. Die Jahressumme der Niederschläge wird sich dagegen gegenüber den heutigen Bedingungen kaum verändern. Allerdings verursachen die höheren Temperaturen einen zunehmenden Verdunstungsanspruch der Atmosphäre, so dass es im Wasserhaushalt des Einzugsgebietes zu deutlichen Änderungen kommen wird.

Die mit den zahlreichen globalen Klimamodellen ermittelte Spannweite der Temperaturerhöhung kann als ein Maß für deren Unsicherheiten betrachtet werden. Um die Ergebnisse der Globalmodelle auf der regionalen Skala verwenden zu können, werden diese als Antrieb für die regionalen Klimamodelle genutzt. Für die Wasserhaushaltssimulationen wurden die Simulationen des statistischen Regionalmodells STARS II genutzt. Die ver-

	1981 - 2010		2011 - 2040			2041 - 2070		
	Beob. °C	Szenario °C	Min.-Lauf °C	Median °C	Max.-Lauf °C	Min.-Lauf °C	Median °C	Max.-Lauf °C
Winter	-0.9	-0.7	-0.8	-0.1	0.0	0.7	1.4	2.2
Frühjahr	5.9	6.1	7.1	7.0	7.3	8.0	8.1	9.7
Sommer	14.4	14.6	15.1	15.0	15.5	15.6	16.5	17.1
Herbst	7.0	7.7	8.0	8.3	8.1	8.5	10.0	9.9
Jahr	6.6	7.0	7.4	7.6	7.8	8.2	9.1	9.8

schiedenen Realisierungen mit dem Modell STARS II wurden anhand der klimatischen Wasserbilanz klassifiziert. Zur Abschätzung der Unsicherheiten bezüglich der Temperatur- und Niederschlagsentwicklung wurde das 5. (Min.-Lauf), das 50. (Median) und das 95. Perzentil (Max.-Lauf) für das Klimaszenario RCP8.5 ausgewertet (Tab. 2 u. 3).

Im Vergleich zu den Beobachtungen der Periode 1981 bis 2010 simuliert STARS II eine um +0,4 K wärmere Temperatur. Die größten positiven Abweichungen treten im Herbst auf (Tab. 2). Die Niederschläge werden um knapp 100 mm a⁻¹ unterschätzt, wobei insbesondere im Winter und Frühjahr weniger Niederschlag berechnet wird. (Tab. 2). In der Periode 2011 bis 2040 wird eine weitere Temperaturerhöhung um 0,6 K im dreißigjährigen Mittel erwartet (Median). Die Unsicherheit ist mit ±0,2 K gering (Min./Max.-Lauf). Dabei sind der Erwärmungstrend und die Unsicherheit in den einzelnen Jahreszeiten unterschiedlich. In der Periode 2041 bis 2070 steigt die Jahresmitteltemperatur im Medianlauf auf 9,1 °C (+2,1 K im Vergleich zur Periode 1981 bis 2010). Allerdings nimmt die Unsicherheit mit -0,9 K (Min.-Lauf) und +0,7 K (Max.-Lauf) deutlich zu. Die Temperaturzunahme und die Spannweite der Unsicherheit variiert dabei zwischen den Jahreszeiten sehr stark (Tab. 2). Die mittleren Jahresniederschlags-

Tabelle 3

Mittlere jahreszeitliche Niederschlagssumme für das Einzugsgebiet der Lange Bramke unter Annahme des Klimaszenarios RCP8.5 und des Regionalmodells STARS II (Winter: 12-02; Frühjahr: 03-05; Sommer: 06-08; Herbst: 09-11).
Mean seasonal precipitation at Lange Bramke according to climate scenario RCP8.5 and regional model STARS II (winter: 12-02; spring: 03-05; summer: 06-08; autumn: 09-11).

	1981 - 2010		2011 - 2040			2041 - 2070		
	Beob. mm	Szenario mm	Min.-Lauf mm	Median mm	Max.-Lauf mm	Min.-Lauf mm	Median mm	Max.-Lauf mm
Winter	344	302	330	347	332	319	381	362
Frühjahr	269	248	249	245	257	281	254	209
Sommer	318	308	280	268	260	255	206	191
Herbst	339	317	362	316	355	296	345	308
Jahr	1270	1175	1221	1176	1204	1151	1186	1070

summen werden sich in der nahen (Periode 2011 bis 2040) wie in der fernen Zukunft (Periode 2041 bis 2070) beim Medianlauf kaum verändern (Tab. 3). Während in der Periode 2011 bis 2070 der Min.- und Max.-Lauf etwas feuchter sind als der Medianlauf, nimmt in der Periode 2041 bis 2070 die Jahresniederschlagssumme von -35 mm (Min.-Lauf) bis über -100 mm (Max.-Lauf) im Vergleich zum Medianlauf ab. In der saisonalen Niederschlagsverteilung kommt es zu einer deutlichen Verschiebung zu höheren Niederschlägen im Winter und einer Abnahme im Sommer. Dieser Trend zeigt sich bereits in der Periode 2011 bis 2040 und bei allen drei Realisierungen (Tab. 3).

Der Vergleich der mittleren Monatssummen für den Niederschlag, den Abfluss und die Verdunstung für die 30-jährigen Perioden 1981 bis 2010, 2011 bis 2040 und 2041 bis 2070 zeigt,

dass der Klimawandel zu einer deutlichen Veränderung des Abflussregimes führen wird (Abb. 10). Die Simulation mit WaSIM-ETH unter Annahme des Klimaszenarios RCP8.5 (Median) und statischer Bestandesparameter lässt erwarten, dass damit im Winter mit einer deutlichen Zunahme des Abflusses zu rechnen ist. In den übrigen Monaten werden im Mittel die Abflussmengen abnehmen und es kommt zu einer Verschiebung der Abflussminima in den Herbst.

Im Vergleich zu aktuellen Verhältnissen (Periode 1981 bis 2010) ist von Juli bis November mit einem Rückgang der Abflüsse um 50 bis 75 % zu rechnen. Neben den verminderten Niederschlagsmengen ist die erhöhte Verdunstung in der Vegetationszeit für den Rückgang der Abflüsse verantwortlich. Während die reale Verdunstung um rund 100 mm a⁻¹ zunimmt,

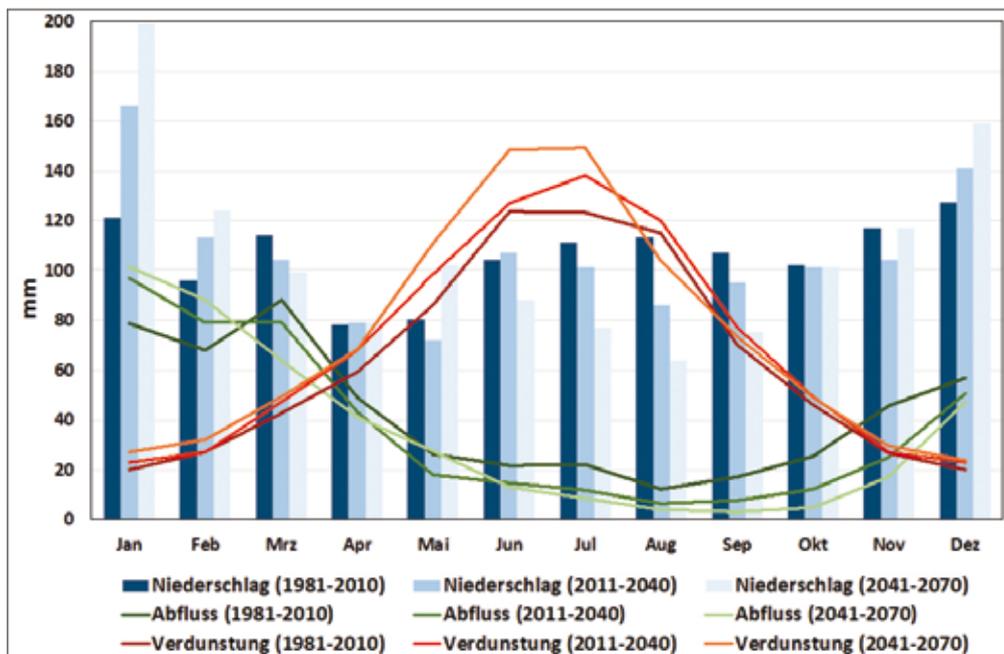


Abbildung 10

Berechnete mittlere monatliche Niederschlags-, Abfluss- und Verdunstungssumme im Einzugsgebiet der Lange Bramke für die Zeiträume 1981 bis 2010, 2011 bis 2040 und 2041 bis 2070 unter Annahme des Klimaszenarios RCP8.5 (Median) und des Regionalmodells STARS II und statischer Bestandesparameter der Forsteinrichtung 1997. *Simulated mean monthly precipitation (Niederschlag), discharge (Abfluss) and evapotranspiration (Verdunstung) at Lange Bramke for the periods 1981 to 2010, 2011 to 2040, and 2041 to 2070; climate scenario RCP8.5 (Median) and regional model STARS II under assumption of constant stand characteristics using forest inventory of 1997.*

erhöht sich die potenzielle Bestandesverdunstung um mehr als 150 mm a⁻¹. In der Periode 2041 bis 2070 wird die Schneeschmelze im Frühjahr (März) keinen wesentlichen Einfluss auf das Abflussregime der Langen Bramke mehr haben. Es ist davon auszugehen, dass infolge der Erwärmung zukünftig die Ausbildung einer mächtigen Schneedecke im Winter immer seltener zu beobachten sein wird. Das Abflussregime wird damit einen rein pluvialen Charakter mit durchschnittlich größten Abflussmengen im Januar annehmen.

4.4 Trockenheit – ein zukünftiges Problem für die Waldbestände in der Langen Bramke?

Das Wachstum und die Vitalität von Waldbeständen werden maßgeblich durch deren Wasserverfügbarkeit bestimmt. Unter den derzeitigen klimatischen Verhältnissen im Einzugsgebiet der Langen Bramke mit im Mittel ganzjährig ausreichend Niederschlägen und entsprechend der Höhenlage niedrigen Temperaturen ist bezüglich der Wasserversorgung der Waldbestände kaum mit Einschränkungen zu rechnen (Abb. 5).

Um aktuelle und zukünftige Wassermangelsituationen zu identifizieren, wurde die zeitliche Entwicklung verschiedener klimatologischer/hydrologischer Indikatoren auf Grundlage des Klimaszenarios RCP8.5 (Median) zur Abschätzung der Wasserverfügbarkeit analysiert (Kap. 3.4).

Für die Periode 1981 bis 2010 beträgt die Standortwasserbilanz in der Vegetationsperiode im Flächenmittel des Einzugsgebietes knapp 300 mm. Dabei reichen die Werte von 230 mm auf den südexponierten Hängen bis auf über 500 mm im Talgrund. Unter heutigen Klimabedingungen besteht für die Fichtenbestände im Gebiet der Langen Bramke kein Trockenstressrisiko, welches zu Wachstums- und Vitalitätseinbußen führen würde. Nach den von SPELLMANN et al. (2011) genannten kritischen Werten für das Trockenstressrisiko der Fichte wäre erst bei einer negativen Standortwasserbilanz in der Vegetationsperiode mit einem mittleren Risiko und mit einem hohen Risiko ab -80 mm zu rechnen.

Im bisherigen Beobachtungszeitraum (1950 bis 2015) lag die mittlere berechnete relative Verdunstung in der Vegetationsperiode mit statischen Vegetationsparametern der Forsteinrichtung von 1997 im Einzugsgebiet meist zwischen 0,7 und 0,9. Nur in den Trockenjahren 1959, 1976 und 2003 traten deutlich niedrigere Werte für die relative Verdunstung auf (Abb. 11). Der Vergleich zwischen der für den Zeitraum 1981 bis 2015 mit beobachteten Klimadaten und mit

STARS II berechneten relativen Evapotranspiration zeigt, dass die STARS II-Rekonstruktion zwar die einzelnen Jahre nicht wiedergeben kann, aber im Mittel zu vergleichbaren Indikatorwerten führt (Abb. 11).

Für die Zukunft werden deutlich höhere Temperaturen und trockenere Sommer erwartet (Abb. 9 u. 10). Damit wird sich die Standortwasserbilanz im Einzugsgebiet der Langen Bramke deutlich verschlechtern. Zwar sind im Mittel der Periode 2041 bis 2070 noch leicht positive Werte zu erwarten, insbesondere die südexponierten Hänge werden in der Vegetationsperiode jedoch über negative Bilanzen verfügen. Dies bedeutet gleichzeitig, dass in Trockenjahren mit weitaus höheren Defiziten in der Standortwasserbilanz zu rechnen ist. Auch die relative Verdunstung nimmt in der Simulation mit statischen Vegetationsparametern der Forsteinrichtung von 1997 im Laufe des Projektionszeitraumes kontinuierlich ab. Besonders zum Ende der Simulation werden mehrere Jahre in Folge Indikatorwerte zwischen 0,5 und 0,6 im Gebietsmittel berechnet (Abb. 11). WAGNER et al. (2013) konnten zeigen, dass es im Jahr 2003 auf Waldmonitoringflächen in Hessen bei Unterschreiten eines kritischen Wertes von 0,6 der relativen Verdunstung zu Wachstums Einschränkungen bei der Buche kam. Es ist davon auszugehen, dass in der Langen Bramke lokal zukünftig noch niedrigere Werte erreicht werden. Außerdem sind die Auswirkungen auf die Vitalität und das Wachstum der Fichtenbestände, die durch die Abfolge mehrerer extrem trockener Jahre hervorgerufen werden können, nicht abzuschätzen, da dies in der Vergangenheit im Untersuchungsgebiet noch nicht beobachtet wurde. Besonders gefährdet sind im Einzugsgebiet der Langen Bramke südexponierte Hanglagen sowie Standorte mit einer geringen Bodenwasserspeicherkapazität.

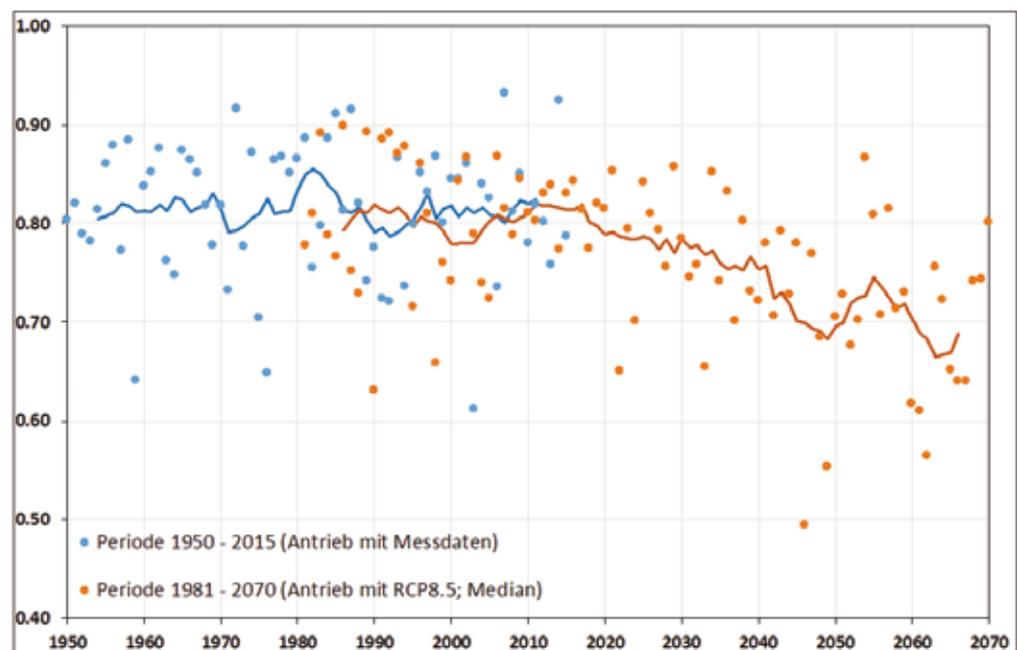


Abbildung 11 Mittlere relative Evapotranspiration in der Vegetationsperiode für das Einzugsgebiet Lange Bramke, simuliert mit beobachteten Klimadaten (1950 bis 2015) sowie mit Klimadaten aus dem RCP8.5-Szenario (1981 bis 2070) unter der Annahme statischer Bestandesparameter (Forsteinrichtung 1997); durchgezogene Linien = 10-jähriges gleitendes Mittel.
Mean relative evapotranspiration within growing season for Lange Bramke, calculated with observed climate data (1950 to 2015) and climate data using RCP8.5 scenario (1981 to 2070); solid lines show 10-year moving average.

Diese Ergebnisse zeigen, dass in Zukunft vermehrt Trockenstressbedingungen auftreten, die die Vitalität und Produktivität der Wälder beeinträchtigen können. Hierzu wird auch die bereits zu beobachtende Verlängerung der Vegetationsperioden beitragen (MENZEL, 1997). Für die Periode 1981 bis 2010 ergibt die Berechnung der Vegetationsperiode für die Fichte, exemplarisch am Beispiel der Klimastation Clausthal-Zellerfeld (553 m) und den Szenariodaten des Klimamodells STARS II (Median), einen mittleren Vegetationsbeginn am 18. Mai und ein Ende der Vegetationszeit am 26. September. Der Vegetationsbeginn wird sich auf Grundlage des Medianlaufes in der Periode 2041 bis 2070 um 12 Tage auf den 6. Mai vorverlegen. Das Vegetationsende verlängert sich im Mittel um 7 Tage auf den 3. Oktober. Ohne das Abbruchkriterium (5. Oktober, von WILPERT, 1990) würde der Nadelabwurf erst am 16. Oktober beginnen, so dass sich die Vegetationsperiode für die Fichte von derzeit 139 Tagen auf 158 Tage bzw. 171 Tage (ohne Abbruchkriterium) verlängert.

Diskussion

Die Rekonstruktion der Bestandesgeschichte mit dem Waldwachstumssimulator ist die Voraussetzung für eine erfolgreiche Simulation der Wasserflüsse in der Langen Bramke mit dem hydrologischen Modell WaSIM-ETH. Dadurch war es möglich, den Wasserhaushalt im Einzugsgebiet trotz vereinfachender Annahmen realitätsnah abzubilden. So konnte gezeigt werden, dass die etablierten Fichtenbestände im Vergleich zur Pflanzung rund 150 bis 200 mm a⁻¹ mehr verdunsten und so ausgleichend auf das Abflussgeschehen wirken. Forstliche Maßnahmen können zu einer Erhöhung der Abflüsse führen. Nach MEESENBURG et al. (2010b) können allein unterschiedliche Durchforstungsstärken zu Unterschieden der Abflusspende der Langen Bramke von bis zu 100 mm a⁻¹ beitragen. Da die Abflüsse in der Langen Bramke überwiegend aus dem Basisabfluss gespeist werden (SCHUMANN & HERRMANN, 2010), impliziert dieses gleichzeitig eine Erhöhung der Grundwasserneubildungsrate. Vor dem Hintergrund der Klimaerwärmung und knapper werdenden Wasserressourcen können häufigere Durchforstungen eine Option sein, um die vorhandenen Fichtenbestände gegen Trockenstress zu stabilisieren.

Die Auswirkung des Klimawandels auf die Vitalität und Produktivität der Wälder ist eine der zentralen Fragestellungen in der Forstwirtschaft. Dabei kommt den Messungen in kleinen hydrologischen Einzugsgebieten eine große Bedeutung zu, um mögliche Veränderungen des Wasserhaushalts zu dokumentieren. Unter der Annahme des verwendeten Klimaszenarios RCP8.5 werden bis zum Jahr 2070 die Temperaturen weltweit um einige Kelvin im Vergleich zur vorindustriellen Zeit ansteigen. Der Medianlauf mit dem Regionalmodell STARS II würde für das Einzugsgebiet der Lange Bramke bei gleichzeitig nur wenig veränderten Niederschlägen eine weitere Erwärmung im Vergleich zur Periode 1981 bis 2010 um mehr als 2 K bedeuten. Nach WECHSUNG & WECHSUNG (2015) werden die Niederschläge mit dem Modell STARS zwar systematisch unterschätzt, aber für die Wasserversorgung der Bestände ist der erhöhte Verdunstungsanspruch der Atmosphäre infolge des Temperaturanstieges gravierender. Die Auswertungen zu dieser Arbeit haben zudem gezeigt, dass die Unterschätzung der mittleren Jahresniederschlagsmenge mit STARS II für den Zeitraum von 1981 bis 2010 bei rund 7 % (95 mm) liegt. Der zusätzliche Verdunstungsbedarf der Fichtenbestände am Ende des Simulationszeitraumes übertrifft jedoch die heutigen Werte um mehr als 150 mm a⁻¹, wobei rund 100 mm a⁻¹ real

mehr verdunsten würden. Trotz der hohen Niederschläge könnte sich dadurch langfristig für die Waldbewirtschaftung in der Langen Bramke Handlungsbedarf ergeben, da die Klimaprojektionen das Auftreten mehrerer extrem trockener Jahre in Folge erwarten lassen. Besonders für die Fichte wären solche klimatischen Bedingungen, wie sie bis heute noch nicht vorgekommen sind, möglicherweise mit deutlichen Vitalitäts- und Produktivitätseinbußen verbunden. Zudem ist mit einer Zunahme biotischer und abiotischer Risiken zu rechnen. Bereits in den letzten Jahren konnte im Harz eine Zunahme des Borkenkäferbefalls der Fichte beobachtet werden (OVERBECK & SCHMIDT, 2012). Dies wird ursächlich auf erhöhte Temperaturen im Frühjahr und Sommer zurückgeführt, aber auch auf eine verminderte Harzproduktion zur Schädlingsabwehr aufgrund von verminderter Bodenwasserverfügbarkeit.

Ein Ziel der zukünftigen Waldbauplanung ist die Risikominimierung durch die Etablierung von Mischbeständen. Für die Lange Bramke würde sich anbieten, die Fichtenreinbestände entsprechend der potenziell natürlichen Vegetation mit Buchen zu unterbauen und langfristig in Fichten-Buchenbestände zu überführen. Dies würde gleichzeitig eine erhöhte Abflusspende sowie ein verringertes Trockenstressrisiko bewirken. Mittels Szenariosimulationen schätzten MEESENBURG et al. (2010b) für Buchenreinbestände gegenüber Fichtenreinbeständen gleicher Ertragsklasse eine Erhöhung der jährlichen Abflusspende um ca. 200 mm.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Das Einzugsgebiet der Langen Bramke im Harz ist eines der ältesten hydrologischen Untersuchungsgebiete Deutschlands. Die großflächigen Kahlhiebe im Jahre 1947 waren Anlass für die Einrichtung des forsthydrologischen Experimentalgebietes im Jahr 1948. Die Wiederaufforstung mit Fichten wurde ein Jahr später begonnen, so dass die vollständige Bestandesentwicklung bis heute in ihrer Auswirkung auf den Gebietswasserhaushalt messtechnisch erfasst und untersucht werden kann. Die mittlerweile fast 70-jährigen Fichtenreinbestände werden entsprechend der örtlichen forstlichen Praxis bewirtschaftet.

In den ersten 20 Jahren nach der Wiederaufforstung lag der Abflussanteil am gefallenen Niederschlag im Einzugsgebiet der Langen Bramke bei bis zu über 70 %. Zu Beginn der Bestandesbegründung entsprach die Verdunstungsleistung der Fichtenkultur einer Grasvegetation. Mit Einwachsen der Fichten in das Dickungsstadium nahm die Verdunstung kontinuierlich zu, so dass rund 40 Jahre nach der Bestandesbegründung der Abflussanteil auf im Mittel 40 bis 50 % sank. Infolge forstlicher Maßnahmen (Durchforstungen) stieg die Abflussmenge seit Ende der 1990er Jahre wieder leicht an.

Nach den vorliegenden Klimaprojektionen werden höhere Temperaturen und geringere Niederschläge während der Vegetationszeit bis zum Ende des Jahrhunderts erwartet. Neben der Erwärmung wird zusätzlich eine Verlängerung der Vegetationsperiode um rund 20 Tage den Verdunstungsanspruch der Wälder erhöhen. Nach Klimaprojektionen mit dem Regionalmodell STARS II auf Grundlage des aktuellen Klimaszenarios RCP8.5 muss im Einzugsgebiet der Langen Bramke bis zum Jahr 2070 mit einem weiteren Temperaturanstieg von mehr als 2 K gerechnet werden. Gleichzeitig könnte eine veränderte Niederschlagsver-

teilung mit trockeneren Sommer- und feuchteren Wintermonaten die Wasserversorgung der Fichtenbestände während der Vegetationsperiode langfristig beeinträchtigen.

Für die Zukunft bedeutet dies, dass bei zunehmender Erwärmung mit einem weiteren Rückgang der Abflüsse im Einzugsgebiet der Langen Bramke gerechnet werden muss. Gleichzeitig lassen die Ergebnisse der Wasserhaushaltssimulationen den Schluss zu, dass bis zum Jahr 2070 eine deutliche Zunahme von Trockenstressbedingungen zu erwarten ist, die den Fichtenanbau im Einzugsgebiet der Langen Bramke langfristig gefährden könnte.

Summary and conclusions

The catchment of Lange Bramke in the Harz Mountains is among the hydrological research basins with the longest observation periods in Germany. Large clear-cuts in 1947 were the motivation for the installation of the hydrological observatory in 1948. The afforestation with Norway spruce started only one year later. Thus, the complete stand development, including their effects on the water budget of Lange Bramke up to the present, is documented. In the meantime, the monocultures of Norway spruce, now almost 70 years old, are managed according to the local silvicultural practices.

For the first 20 years after replantation in the Lange Bramke basin, the share of runoff comprised up to over 70% of precipitation. The evapotranspiration of the Norway spruce culture corresponds to grasslands shortly after afforestation. After closing of the stands during the thicket stadium, evapotranspiration continuously increased, resulting in a decrease of the runoff coefficient to average values of 40 to 50% at stand age of 40 years. Owing to thinning operations since the late 1990s, the runoff coefficient increased slightly.

According to available climate projections, elevated temperature and reduced precipitation during the growing season are expected until the end of the century. Moreover, besides global warming, an extension of the growing season of approximately 20 days will additionally increase the evaporative demand of forest stands. According to climate projections with the regional climate model STARS II on the basis of the climate scenario RCP8.5, a further temperature increase of more than 2 K is expected until 2070 for the Lange Bramke basin. Concurrently, a shift of the precipitation regime with dryer summer and wetter winter months, respectively, may deteriorate the water availability for the Norway spruce stands during the growing season in the long-term. In the future, a further decrease of runoff from the Lange Bramke basin is to be expected if global warming continues. According to the water budget simulations, a simultaneous increase of drought stress may occur until 2070. In the long-term, the cultivation of Norway spruce in the Lange Bramke area may thus be impeded.

Anschriften der Verfasser

Dipl.-Geogr. Johannes Suttmöller
Dr. Henning Meesenburg
Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt
Grätzelstraße 2
39079 Göttingen
johannes.sutmoeller@nw-fva.de
henning.meesenburg@nw-fva.de

Literaturverzeichnis

- AG BODEN (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. – 5. Auflage, 438 S.
- AHRENDTS, B., H. MEESENBURG, C. DÖRING & M. JANSEN (2010): A spatio-temporal modelling approach for assessment of management effects in forest catchments. – Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins (Proceedings of the Workshop held at Goslar-Hahnenklee, Germany, 30 March-2 April 2009), IAHS Publ. 336, 32-37.
- ALLEN, R. G., L. S. PEREIRA, D. RAES & M. SMITH (1998): Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. – FAO irrigation and drainage paper 56, FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- BATES, C. G. (1921): First results in the streamflow experiment, Wagon Wheel Gap, Colorado. *Journal of Forestry* 19, 402-408.
- BMEL (Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft) (Hrsg.) (2016): Forstliches Umweltmonitoring in Deutschland: Durchführungskonzept Forstliches Umweltmonitoring. – BMEL, Berlin, www.bmel.de, 40 S.
- BOSCH, J.M. & J.D. HEWLETT (1982): A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 55, 8-23.
- BRECHTEL H.M., A. BALAZS & K. KILLE (1982): Natural correlation of streamflow characteristics from small watersheds in the forest research area of Krofdorf – Results of a paired watershed calibration. *Proc. Symp. Hydrol. Research Basins, Sonderheft Landeshydrologie Bern*, 1982, 291-300.
- BURSCHE, H. (1994): Ein Rückblick auf die hydrologische Forschung der WSL im Alptal. – *Hydrologie kleiner Einzugsgebiete. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz* 35, 18-33.
- DE VRIES W., E. VEL, G. J. REINDS, H. DEELSTRA, J. M. KLAP, E. E. J. M. LEETERS, C. M. A. HENDRIKS, M. KERKVOORDEN, G. LANDMANN, J. HERKENDELL, T. HAUSSMANN & J. W. ERISMAN (2003): Intensive monitoring of forest ecosystems in Europe: 1. Objectives, set-up and evaluation strategy. – *Forest Ecol. Manag.* 174, 77-95.
- DELFS, J., W. FRIEDRICH, H. KIESEKAMP & A. WAGENHOFF (1958): Der Einfluß des Waldes und des Kahlschlages auf den Abflußvorgang, den Wasserhaushalt und den Bodenabtrag: Ergebnisse der ersten 5 Jahre der forstlich-hydrologischen Untersuchungen im Oberharz (1948-1953). – *Aus dem Walde* 3, Mitt. aus der Nds. Landesforstverwaltung. Hannover, 1-223.
- DEUTSCHMANN, G. (1987): Bodenhydrologische Eigenschaften der Waldstandorte der Oberharzer Untersuchungsgebiete auf Grundlage der forstlichen Standortskartierung. – *Dipl.-Arbeit Inst. f. Geogr. TU Braunschweig*.
- DUNCKER, D., A. HERRMANN, H. MEESENBURG, B. SCHELER & S. SCHUMANN (2009): Field trip. – *International Workshop on Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins, Goslar-Hahnenklee, Germany, 30 March – 2 April 2009*, 36 S.
- FEDERER, C.A. & D. LASH (1978): BROOK: A hydrologic simulation model for eastern forests. *Water Resour. Res. Center Res. Rep. 19*, Univ. New Hampshire, Durham, New Hampshire, USA, 84 S.
- GRIER, C.G. & S.W. RUNNING (1977): Leaf area of mature Northwestern coniferous forests: Relation to site water balance. – *Ecology* 58 (4), 893-899.
- HAMMEL, K. & M. KENNEL (2001): Charakterisierung und Analyse der Wasserverfügbarkeit und des Wasserhaushalts von Waldstandorten in Bayern mit dem Simulationsmodell BROOK90. – *Forstl. Forschungsber. München* 185.
- HANSEN J. & J. NAGEL (2014): Waldwachstumskundliche Softwaresysteme auf Basis von TreeGrOSS – Anwendung und theoretische Grundlagen. – *Beitr. Nordwestdeutsche Forstl. Versuchsanst.* 11, 224 S.

- HAUHS, M. (1989): Lange Bramke: an ecosystem study of a forested watershed. – Acidic precipitation Vol. 1 Case studies (ed. D. C. Adriano & M. Havas), Springer, 275–305.
- HAUHS, M. & H. LANGE (2010): Reconstruction of the land use history of the Lange Bramke catchment from 1530-1947. – Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins (Proceedings of the Workshop held at Goslar-Hahnenklee, Germany, 30 March-2 April 2009), IAHS Publ. 336, 24-31.
- HAUHS, M., V. MALESSA, H. LANGE & S. SCHMIDT (1994): Wasser- und Stofftransport im Boden bewaldeter Einzugsgebiete. – MATSCHULAT, J. H. HEINRICHS, J. SCHNEIDER & B. ULRICH (Hrsg.): Gefahr für Ökosysteme und Wasserqualität – Ergebnisse interdisziplinärer Forschung im Harz, Springer, 217-232.
- HERRMANN, A., P. MALOSZEWSKI, R. G. RAU & W. ROSENOW (1984): Anwendungen von Tracertechniken zur Erfassung des Wasserumsatzes in kleinen Einzugsgebieten: Ein Forschungskonzept für die Oberharzer Untersuchungsgebiete. – Dt. Gewässerkundl. Mitt., 28, 65-74.
- HERMANN, A., J. KOLL, C. LEIBUNDGUT, P. MALOSZEWSKI, R. RAU, W. RAUPERT, M. SCHÖNIGER & W. STICHLER (1989): Wasserumsatz in einem kleinen Einzugsgebiet im paläozoischen Mittelgebirge (Lange Bramke, Oberharz). Eine hydrologische Systemanalyse mittels Umweltisotopen als Tracer. – Landschaftsgenese und Landschaftsökologie 17, Braunschweig.
- HERRMANN, A. & S. SCHUMANN (2009): Untersuchung des Abflussbildungsprozesses als Kontrollmechanismus für den Gebietswasserumsatz des Oberharzer Einzugsgebiets Lange Bramke. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 53 (2), 64-79.
- HINZE, C. (1971): Erläuterungen zur Geologischen Karte 1:25000, Blatt Clausthal-Zellerfeld (4128). – Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung, Hannover
- HÖPER, H. & H. MEESENBURG (Hrsg.) (2012): 20 Jahre Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen. – Geoberichte 23, 254 S.
- HORNBECK, J. W., C. W. MARTIN & C. EAGAR (1997): Summary of water yield experiments at Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire. – Canadian J. Forest Res. 27, 2043-2052.
- 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 und P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: 1535 S.
- JANSEN, M., C. DÖRING, S. HENTSCHEL, J. SUTMÖLLER, B. AHRENDTS & H. MEESENBURG (2012): SILVAQUA – Untersuchungsgebiet und Datengrundlage. – Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA) (Hrsg.): SILVAQUA – Auswirkungen forstlicher Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den Zustand von Gewässern in bewaldeten Einzugsgebieten am Beispiel der Oker im Nordharz. Beitr. Nordwestdeutsche Forstl. Versuchsanst. 9, 15-38.
- JUNGCLAUS, J. H., S. J. LORENZ, C. TIMMRECK, C. H. REICK, V. BROVKIN, K. SIX, J. SEGSCHEIDER, M. A. GIORGETTA, T. J. CROWLEY, J. PONGRATZ, N. A. KRIVOVA, L. E. VIEIRA, S. K. SOLANKI, D. KLOCKE, M. BOTZET, M. ESCH, V. GAYLER, H. HAAK, T. J. RADDATZ, E. ROECKNER, R. SCHNUR, H. WIDMANN, M. CLAUSSEN, B. STEVENS, & J. MAROTZKE (2010): Climate and carbon-cycle variability over the last millennium. – Clim. Past Discuss. 6, 1009-1044, doi:10.5194/cpd-6-1009-2010.
- KELLER, H. M. (1979): Über den Wert hydrologischer Beobachtungen in Einzugsgebieten. Mitt. Nr. 41, Vers. Anstalt f. Wasserbau, Hydrol. U. Glaziol., ETH Zürich.
- LIEBSCHER, H.-J. (1974): Einfluß des Waldes auf den Abfluvvorgang, untersucht am Beispiel der Oberharzer Versuchsgebiete. – Mitt. Arbeitskreis „Wald und Wasser“ 6, 97-120.
- LIEBSCHER, H.-J. (1975): 20 Jahre Wasserhaushaltsuntersuchungen im Oberharz. – Bes. Mitt. Dt. Gewässerkundl. Jahrbuch 39, Koblenz, 286 S.
- LIEBSCHER, H.-J. (1979): Die Untersuchung der Auswirkung forstwirtschaftlicher Maßnahmen auf das Abfluvregime am Beispiel der Oberharzer Versuchsgebiete. – Wiss. Mitt. Meteorol. Inst. Univ. München 35, 76-82.
- MEESENBURG, H., J. SUTMÖLLER & S. HENTSCHEL (2010a): Retrospective and prospective evaluation of water budgets at Lange Bramke, Harz Mountains, Germany: effects of plant cover and climate change. – Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins (Proceedings of the Workshop held at Goslar-Hahnenklee, Germany, 30 March-2 April 2009), IAHS Publ. 336, 239-244.
- MEESENBURG, H., J. SUTMÖLLER & S. HENTSCHEL (2010b): Long-term discharge and evapotranspiration of a forested catchment in the Harz Mountains, Germany: evaluation of silvicultural adaptation strategies to climate change. – Global Change: Facing Risks and Threats to Water Resources (Proc. of the Sixt World FRIEND Conference, Fez, Morocco, October 2010), IAHS Publ. 340, 258-264.
- MENZEL, A. (1997): Phänologie von Waldbäumen unter sich ändernden Klimabedingungen – Auswertung der Beobachtungen in den internationalen phänologischen Gärten und Möglichkeiten der Modellierung von Phänodaten. – Forstl. Forschungsber. München 164.
- MENZEL, A. & P. FABIAN (1999): Growing season extended in Europe. Nature 397, 659.
- MÜLLER, F., M. BERGMANN, R. DANNOWSKI, J. W. DIPPNER, A. GNAUCK, P. HAASE, M. C. JOCHIMSEN, P. KASPRZAK, I. KRÖNCKE, R. KÜMMERLIN, M. KÜSTER, G. LISCHIED, H. MEESENBURG, C. MERZ, G. MILLAT, J. MÜLLER, J. PADISÁK, C. G. SCHIMMING, H. SCHUBERT, M. SCHULT, G. SELMECZY, T. SHATWELL, S. STOLL, M. SCHWABE, T. SOLTWEDEL & D. STRAILE, (2016): Assessing resilience in long-term ecological data sets. – Ecological Indicators 65, 10-43, doi: 10.1016/j.ecolind.2015.10.066.
- MONTEITH, J. L. (1965): Evaporation and environment. – Symp. Soc. Exp. Biol. 19, 205-224.
- MORIASI, D. N., J. G. ARNOLD, M. W. VAN LIEW, R. L. BINGNER, R. D. HARMEL & T. L. VEITH (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. – Transactions of the ASABE 50 (3), 885–900.
- NAGEL, J., M. ALBERT & M. SCHMIDT (2002): Das waldbauliche Prognose- und Entscheidungsmodell BWINPro 6.1 - Neuparametrisierung und Modellerweiterungen. – Forst und Holz 57, 486-492.
- NASH, J. E. & J. V. SUTCLIFFE (1970): River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. – Journal of Hydrology 10, 282–290.
- ORLOWSKY, B., F.-W. GERSTENGARBE & P. C. WERNER (2008): A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM. – Theor. Appl. Climatol. 92 (3-4), 209-223.
- OVERBECK, M. & M. SCHMIDT (2012): Modelling infestation risk of Norway spruce by *Ips typographus* (L.) in the Lower Saxon Harz Mountains (Germany). – Forest Ecol. Manag. 266, 115-125.
- PENMAN, H. L. (1948): Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. – Proc. Roy. Meteorol. Soc. A 193, 120-145.
- PESCHKE, G. (1991): Das Einzugsgebiet des Wernersbach - Forschungsobjekt für Probleme der Hydrometeorologie, Hydrologie und Wald-ökosysteme. – Wiss. Zeitschr. TU Dresden 40 H. 5/6, 237-344.
- RICHARDS, L. A. (1931): Capillary conduction of liquids through porous mediums. – Physics 1 (5), 318-333.
- SCHMALZ, B., U. LOOSER, H. MEESENBURG & S. SCHUMANN (2015): Kleine hydrologische Untersuchungsgebiete in deutschsprachigen Ländern Mitteleuropas. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 59, 184-189.

- SCHULLA, J. (2015): Model Description WaSiM - completely revised version of 2012 with 2013 to 2015 extensions. – Technical Report, 332 S.
- SCHUMANN, S. & A. HERRMANN (2010): 60 years of the Bramke research basins: history, major hydrological results and perspectives. – Status and Perspectives of Hydrology in Small Basins (Proceedings of the Workshop held at Goslar-Hahnenklee, Germany, 30 March-2 April 2009), IAHS Publ. 336, 11-18.
- SCHUMANN, S., B. SCHMALZ, H. MEESENBURG & U. SCHRÖDER (2010): Status and perspectives of hydrology in small basins. – IHP/HWRP-Berichte 10, Koblenz, 69 S.
- SPELLMANN, H., M. ALBERT, M. SCHMIDT, J. SUTTMÖLLER & M. OVERBECK (2011): Waldbauliche Anpassungsstrategien für veränderte Klimaverhältnisse. – AFZ/Der Wald 11, 19-23
- STÄHLI M., A. BADOUX, A. LUDWIG, K. STEINER, M. ZAPPA & C. HEGG (2011): One century of hydrological monitoring in two small catchments with different forest coverage. – Environmental Monitoring and Assessment 174, 91-106.
- SUTTMÖLLER, J., S. HENTSCHEL, J. HANSEN & H. MEESENBURG (2011): Coupled forest growth-hydrology modelling as an instrument for the assessment of effects of forest management on hydrology in forested catchments. – Adv. Geosci. 27, 149-154, doi:10.5194/adgeo-27-149-2011.
- SWANK, W. T., J. M. VOSE & K. J. ELLIOTT (2001): Long-term hydrologic and water quality responses following commercial clearcutting of mixed hardwoods on a southern Appalachian catchment. – Forest Ecol. Manag. 143, 163-178.
- VAN GENUCHTEN, M. T. (1980): A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. – Soil Sci. Soc. Amer. J. 44 (5), 892-898.
- STEVENS, B. M., M. A. GIORGETTA, M. ESCH, T. MAURITSEN, T. CRUEGER, S. RAST, M. SALZMANN, H. SCHMIDT, J. BADER, K. BLOCK, R. BROKOPF, I. FAST, S. KINNE, L. KORNBUEH, U. LOHMANN, R. PINCUS, T. REICHLER & E. ROECKNER (2013): Atmospheric component of the MPI-M Earth System Model: ECHAM6. – J. Adv. Model. Earth Syst. 5, 146-172, doi:10.1002/jame.20015.
- VON WILPERT, K. (1990): Die Jahringstruktur von Fichten in Abhängigkeit vom Bodenwasserhaushalt auf Pseudogley und Parabraunerde. – Freiburger Bodenkundl. Mitt. 24, 185 S.
- WAGENHOFF, A. & K. VON WEDEL (1959): Vergleich der bisherigen Ergebnisse der Untersuchungen über den Wasserhaushalt und den Bodenabtrag im Harz mit den langfristigen Beobachtungen im Emental in der Schweiz. – Mitt. Schw. Anst. Forstl. Vers. 351, 127-138.
- WAGNER, M., J. SUTTMÖLLER, R.-V. NAGEL, J. RUDOLPH, J. H. HANSEN, B. AHRENDTS, H. MEESENBURG, S. FLECK, B. SCHELER, J. EVERS, U. PAAR, A. NOLTENSMEIER, J. NAGEL, H. SPELLMANN & J. EICHHORN (2016): Zukünftige Entwicklung der Wasserverfügbarkeit und ihre Bedeutung für das Wachstum der Buche in Hessen. – Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (Hrsg.): Gefährdungen der Ökosystemdienstleistungen von Wäldern. Fachtagung vom 9. Bis 10. Oktober 2014 in Göttingen. Beitr. Nordwestdeutsche Forstl. Versuchsanst. 14, 147-172.
- WAGNER, M., J. SUTTMÖLLER, J. RUDOLPH, J. HANSEN, J. EICHHORN, S. FLECK, B. SCHELER, H. MEESENBURG, I. DAMMANN, J. EVERS, U. PAAR, J. NAGEL & H. SPELLMANN (2013): Auswirkungen des Klimawandels auf das Trockenstressrisiko von Buchenwäldern am Beispiel hessischer BZE- und Intensivmonitoring-Standorte. – Ber. Freiburger Forstliche Forschung 96, 179-197.
- WECHSUNG, F. & M. WECHSUNG (2015): Drier year and brighter sky – The predictable simulation outcomes for Germany's warmer climate from the weather resampling model STARS. – Int. J. Climatol. 35, 3691-3700.
- WESSOLEK, G., M. KAUPENJOHANN & M. RENGER (2009): Bodenphysikalische Kennwerte und Berechnungsverfahren für die Praxis. – Bodenökologie und Bodengenese 40, Selbstverlag TU Berlin, Berlin, 80 S.