

Hagen Koch, Anne Gädeke & Fred F. Hattermann

Szenarien des globalen Wandels im bergbau-geprägten Spreegebiet – Ein Rückblick nach 20 Jahren

Scenarios of Global Change in the Spree Catchment Influenced by Lignite Mining – A look back 20 years later

Das Einzugsgebiet der Spree ist hydrologisch und wasserwirtschaftlich stark von der Entwicklung von Braunkohleförderung und –verstromung, verbunden mit Grundwasserabsenkungen, Versickerungsverlusten, Sumpfungswassereinleitungen, Kühlwassernutzung in thermischen Kraftwerken sowie Flutung ehemaliger Tagebaue, einem komplexen wasserwirtschaftlichen System und einem kontinentalen Klima geprägt. Im Projekt GLOWA Elbe wurden für das Gebiet Szenarien des globalen Wandels für den Zeitraum 2003 bis 2052 analysiert. Im Jahre 2004 war es das Ergebnis, dass das gegenwärtige System der Wasserbewirtschaftung die Folgen des angenommenen Klimawandels nicht ausgleichen kann. Nach Ablauf der ersten 20 Jahre des Simulationszeitraumes 2003 bis 2022 werden in diesem Artikel die in GLOWA Elbe und weiteren Projekten erzeugten Ergebnisse sowie die genutzten Eingangsdaten, Szenarien und Modelle hinsichtlich ihrer Übereinstimmung mit beobachteten Abflüssen bzw. Witterungsverlauf analysiert.

Es zeigt sich, dass die in den Projekten genutzten Bergbauszenarien der Entwicklung bis zum jetzigen Zeitpunkt entsprechen, während die Szenarien zur klimatischen Entwicklung zum Teil deutlich von den Beobachtungen abweichen. Letzteres hat erhebliche Konsequenzen für die simulierten Abflüsse.

Weiterhin kann gezeigt werden, dass auch in stark anthropogen überprägten Flusseinzugsgebieten die Auswirkungen des Klimawandels unter Nutzung hydrologischer und wasserwirtschaftlicher Modelle zuverlässig abgeschätzt werden können, wobei insbesondere die genutzten Klimaszenarien/-modelle eine erhebliche Unsicherheit hervorrufen. Deswegen ist es unabdingbar, in entsprechenden Klimafolgenstudien Eingangsdaten diverser Klimaszenarien/-modelle zu nutzen und die gesamte Bandbreite der hydrologischen/wasserwirtschaftlichen Ergebnisse darzustellen.

Schlagwörter: Spree, Szenarien, Klimawandel, Bergbau, Wasserbewirtschaftung

In terms of hydrology and water management, the Spree river catchment in eastern Germany is strongly influenced by the development of lignite mining and power generation (groundwater lowering, seepage losses, mine water discharges, cooling water use in thermal power plants, flooding of former opencast mines), a complex water management system and a continental climate. The GLOWA Elbe project analysed scenarios of global change for the Spree for the period 2003 to 2052. In 2004, one result was that the current system of water management cannot compensate for the consequences of the assumed climate change. After the first 20 years of the simulation period (2003 to 2022), this article analyses the results generated in GLOWA Elbe and other projects as well as the input data, scenarios and models used with regard to their agreement with observed discharges and weather patterns.

The mining scenarios used in the projects correspond to the development up to the present time, while the scenarios for climatic development partly deviate significantly from the observations. The latter has considerable consequences for the simulated discharges.

Furthermore, it can be shown that the impacts of climate change can be reliably estimated in river basins heavily anthropogenically influenced using hydrological and water management models, although the climate scenarios/models used introduce considerable uncertainty. Therefore, it is indispensable to use input data from various climate scenarios/models in corresponding climate impact studies and to present the entire range of hydrological/water management results.

Keywords: Spree river, scenarios, climate change, lignite mining, water resources management

1 Einleitung

In den letzten 30 Jahren sind national und international unzählige hydrologische Klimafolgenstudien, in geringerem Umfang auch unter Einbeziehung der Wasserbewirtschaftung, durchgeführt und veröffentlicht worden. Die geringere Anzahl an Studien, welche die Wasserbewirtschaftung berücksichtigen, wird im Allgemeinen mit der Schwierigkeit der Datenverfügbarkeit bezüglich Wassernutzungen, Talsperren bzw. Überleitungen sowie deren Steuerung erklärt.

Bei Betrachtung hydrologischer Klimafolgenstudien zeigen diverse Untersuchungen, dass die aus der Klimamodellierung stammenden Unsicherheiten in den meisten Einzugsgebieten

deutlich größer sind als die durch die hydrologische Modellierung hervorgerufenen (VETTER et al, 2017; HATTERMANN et al, 2018).

Im Fokus dieses Artikels steht der Vergleich von teilweise vor mehr als 20 Jahren erzeugten Szenarien zu Klimaentwicklung und Abflüssen der Jahre 2003 bis 2022 mit entsprechenden Beobachtungen für das Flusseinzugsgebiet der Spree bis Berlin. Den Autoren dieser Studie sind keine Veröffentlichungen bekannt, in denen die Ergebnisse der in den letzten Jahrzehnten durchgeführten Klimafolgenstudien ex post analysiert werden. Hier sei bereits auf Schwierigkeiten bei der Analyse der vor ca. 20 Jahren genutzten bzw. erzeugten Daten hingewiesen.

Trotz der inhaltlichen und räumlichen Begrenzung können aus den durchgeführten Analysen allgemeingültige Schlussfolgerungen, insbesondere für zukünftige Klimafolgestudien und die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen, gezogen werden.

Die Planung von wasserwirtschaftlichen Maßnahmen, z. B. Anpassung an einen sich verändernden Wasserbedarf oder sich verändernde Wasserverfügbarkeit, erfordert eine zuverlässige Datenbasis. Unsicherheiten bezüglich möglicher zukünftiger Entwicklungen können mittels Szenarien einbezogen werden, vergrößern jedoch den Möglichkeitsraum und können somit die Entscheidungsfindung erschweren. So wird der zukünftige Wasserbedarf von der technologischen und demografischen Entwicklung, aber auch regulatorischen Vorgaben, die Wasserverfügbarkeit dagegen von der klimatischen Entwicklung, der Landnutzung und bereits existierenden wasserwirtschaftlichen Maßnahmen beeinflusst. Insbesondere in Bergbaugebieten können wasserwirtschaftlichen Maßnahmen, z. B. die Förderung und Einleitung von Grundwasser in die Oberflächengewässer, sog. Sumpfungswässer, die Wasserverfügbarkeit stark beeinflussen (GRÜNEWALD, 2001).

Sowohl in der Analyse von Beobachtungsdaten als auch der Modellierung ist darum eine konsequente Unterscheidung zwischen hydrologischen und wasserwirtschaftlichen Prozessen geboten. Während erstere weitgehend natürliche Niederschlag-Abfluss-Prozesse beinhalten, sind letztere ausschließlich anthropogene Eingriffe, z. B. der Rückhalt und Abgabe von Wasser aus Talsperren und Speichern sowie Wasserüberleitungen in das System. Wasserwirtschaftliche Simulationen basieren auf dem natürlichen Dargebot.

Die potenzielle Größenordnung des Bewirtschaftungseinflusses auf den beobachteten Abfluss zeigt KOCH et al. (2010) für den Elbepegel Děčín für August 2003, wo bei einem beobachteten Monatsmittelwert von 99 m³/s ca. 40 m³/s hauptsächlich aus Speicherabgaben und untergeordnet aus (Klärwerks-)Einleitungen stammen.

Viele hydrologische Modelle beinhalten mittlerweile auch Routinen/Module zur Simulation von Bewirtschaftungsprozessen. Jedoch ist auch hier darauf zu achten, die hydrologischen Prozesse separat zu parametrisieren, bevor die Bewirtschaftung im Modell implementiert wird (KOCH et al., 2018).

Im Lausitzer Revier haben Sumpfungswassereinleitungen in den Einzugsgebieten von Spree und Schwarzer Elster über Jahrzehnte zu einer Vervielfachung der verfügbaren Wasservolumina geführt. Mit der Stilllegung der Mehrzahl der Braunkohletagebaue im Lausitzer Revier zu Beginn der 1990er Jahre sind diese Zusatzwassermengen und somit die Wasserverfügbarkeit deutlich gesunken (SCHOENHEINZ et al., 2011; UMWELTBUNDESAMT, 2023).

Da das langfristige, Jahrzehnte andauernde Auslaufen der Braunkohleförderung und -verstromung im Lausitzer Revier bereits in den 1990er Jahren absehbar war, wurde bereits vor mehr als 25 Jahren damit begonnen, die wasserwirtschaftlichen Planungen für Spree und Schwarze Elster entsprechend auszurichten (GRÜNEWALD et al., 2001). Für die Planung und Abstimmung wasserwirtschaftlicher Maßnahmen wurde im Auftrag einer "länderübergreifenden Arbeitsgruppe", bestehend aus den Ländern

Sachsen, Brandenburg, Berlin und Sachsen-Anhalt, des Sanierungsträgers für den auslaufenden Bergbau, die Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft LMBV mbH, sowie dem Bergbau- und Kraftwerksbetreiber ein Langfristbewirtschaftungsmodell entwickelt. Um die Unsicherheit hinsichtlich der Wasserverfügbarkeit bzw. die Klimavariabilität einzubeziehen, erfolgen die Simulationen unter Nutzung von 100 Realisierungen, welche potenziell mögliche Dargebotsregime darstellen. Bei der Erzeugung der 100 Realisierungen, wie sie seit dem Ende der 1990er Jahre im Langfristbewirtschaftungsmodell genutzt werden, wurde ein stabiles Klima entsprechend des Zeitraumes 1961 bis 1990 angenommen, im Folgenden Referenzklima bzw. Referenzszenario.

In diversen wissenschaftlichen Projekten (Tab. 1) wurden unter Nutzung des teilweise in den Projekten weiterentwickelten Langfristbewirtschaftungsmodells für Spree und Schwarze Elster in den letzten beiden Jahrzehnten insbesondere Klima- aber auch Bewirtschaftungsszenarien analysiert (KALTOFEN et al., 2004; ROERS & WECHSUNG, 2015; POHLE et al., 2016).

Die in den Projekten genutzten Eingangsdaten, Szenarien und Modelle werden in diesem Artikel dargestellt. Dabei kann hinsichtlich der einzelnen Modelle über die z. B. globale und regionale Klimamodellierung, die hier notwendigen verschiedenen Arbeitsschritte wie z. B. Bias-Korrektur, oder Szenario-Annahmen wie z. B. die Entwicklung des Bergbaus nur ein allgemeiner Überblick gegeben werden. Die genutzten Bergbauszenarien weisen bis zum Jahr 2022 keine Unterschiede auf und entsprechen im Allgemeinen dem tatsächlichen Verlauf. Dabei ist zu beachten, dass in den wasserwirtschaftlichen Simulationen jährlich konstante Werte, z. B. der Sumpfungswassereinleitungen, angenommen werden, welche in der Realität gewissen Schwankungen unterliegen. Die generelle Entwicklung, z. B. Rückgang der Sumpfungswassereinleitungen (UMWELTBUNDESAMT, 2023), entspricht den Beobachtungen.

Ziel der im Folgenden vorgestellten Studie war es, die in den unterschiedlichen Projekten erzeugten Simulationsergebnisse mit Beobachtungen der letzten 20 Jahre zu vergleichen und zu diskutieren. Voraussetzung für die Auswertung ist, dass die entsprechenden Daten zur Wetter- und Klimaentwicklung sowie den Abflüssen sowohl beobachtet, als auch simuliert, verfügbar sind.

2 Materialien und Methoden

2.1 Das Untersuchungsgebiet

Große Teile des Einzugsgebietes der Spree sind durch ein kontinentales Klima mit hohen Sommertemperaturen und geringen Jahresniederschlagssummen charakterisiert, woraus für das Sommerhalbjahr in vielen Jahren eine negative klimatische Wasserbilanz und eine ganzjährig niedrige Abflusssspende resultiert (SCHOENHEINZ et al., 2011).

Für die Förderung der Braunkohle im Lausitzer Revier muss der Grundwasserstand durch Wasserhebung unter die tiefste Abbausohle der Tagebaue gesenkt werden. Pro Tonne Kohle werden ca. 6 Tonnen Grundwasser als Sumpfungswasser gehoben und in die Vorflut abgegeben, wodurch der Abfluss in den Vorflutern ansteigt und sich der Jahresgang vergleichmäßig (SCHOENHEINZ et al., 2011). Dies gilt insbesondere für das Einzugsgebiet der Spree (POHLE et al., 2019). Im Jahr 1991 ergab

sich ein Grundwasserabsenkungstrichter von ca. 2.100 km² Fläche (GRÜNEWALD, 2001). Mit der fortschreitenden Stilllegung von Braunkohletagebauen seit Beginn der 1990er Jahre sind die Sumpfungswassermengen deutlich gesunken, bei ebenfalls sinkenden Versickerungsverlusten und kleiner werdendem Grundwasserabsenkungstrichter, jedoch zusätzlichem Wasserbedarf zur Flutung der ehemaligen Tagebaue.

Maßnahmen der Wasserbewirtschaftung im Untersuchungsgebiet sind die Speicherung von Wasser, insbesondere im Oberlauf der Spree, in Phasen des Dargebotsüberschusses mit dem Ziel der Niedrigwasseraufhöhung sowie Überleitungen zwischen den Einzugsgebieten Lausitzer Neiße, Spree und Schwarze Elster. Zur Anpassung an die absehbar sinkenden Sumpfungswassermengen im Spreegebiet wurde die Speichernutzung von Bergbaufolgeseeen geplant, wobei der mengenmäßig größte dieser Speicher das Wasserspeichersystem (WSS) Lohsa II, mit den Speichern Burghammer, Dreiweibern und Lohsa II, ist (POHLE et al., 2016).

Ungeachtet der in den letzten Jahrzehnten geplanten und umgesetzten wasserwirtschaftlichen Anpassungsmaßnahmen, wie z. B. Nutzung ehemaliger Tagebaue als Speicher, traten in den Jahren 2018 bis 2022 ausgeprägte Niedrigwasserperioden auf. Für den Pegel Große Tränke UP/Spree, Zufluss nach Berlin über die Spree (Abb. 1), weist die Berliner SENATSVERWALTUNG FÜR UMWELT, VERKEHR UND KLIMASCHUTZ (2021) deutlich sinkende mittlere sowie minimale Zuflüsse aus. Dabei wird der Bruchpunkt bei den mittleren Zuflüssen für das Jahr 1995, bei den minimalen Zuflüssen für das Jahr 1992 ausgewiesen. Dies entspricht in etwa der Periode, in der die Sumpfungswassereinleitungen deutlich sanken. Für die Jahre 2014 bis 2020, mit Ausnahme des Jahres 2017, wird wegen gesteigerter Lufttemperaturen und potenzieller Verdunstung in Verbindung mit geringen Niederschlägen eine Verschlechterung der klimatischen Wasserbilanz konstatiert.

2.2 Modelle und Modelleingangsdaten

Die genutzte Modellkette setzt sich grundsätzlich aus Modellen für drei unterschiedliche Prozesse zusammen: Klimamodelle => hydrologische Modelle => Wasserbewirtschaftungsmodelle.

In Tabelle 1 sind die Projekte, die wichtigsten Szenarioannahmen und Modelle, deren Ergebnisse in diesem Artikel genutzt werden, aufgeführt. Während sich Phase 1 von GLOWA Elbe auf die Einzugsgebiete von Spree und Schwarzer Elster konzentrierte (KALTOFEN et al., 2004), wurden die Arbeiten in den Phasen 2 und 3 auf das gesamte Elbegebiet erweitert (WECHSUNG et al., 2013). Die Forschungsarbeiten des Projekts INKA BB wiederum hatte einen Fokus auf die Einzugsgebiete von Spree und Schwarzer Elster (POHLE et al., 2016), in Klima Check wurde das gesamte Elbegebiet betrachtet (ROERS & WECHSUNG, 2015). Die in den späteren Projekten unter Nutzung des STAR 2K-Szenarios erzeugten Ergebnisse entsprechen im Prinzip denen aus GLOWA Elbe 1. Darum werden nur die Ergebnisse aus GLOWA Elbe 1 (Referenzszenario, STAR 2K) sowie aus KlimaCheck das ISIMIP-Szenario (ROERS & WECHSUNG, 2015) mit den Beobachtungsdaten der Jahre 2003 bis 2022 verglichen.

Die analysierten meteorologischen Beobachtungsdaten wurden vom Deutschen Wetterdienst (DWD) bereitgestellt. Beobachtete

Abflussdaten wurden von den Online Plattformen des LfU Brandenburg (apw.brandenburg.de/) bzw. SMEKUL Sachsen (www.umwelt.sachsen.de/umwelt/infosysteme/) heruntergeladen.

Bezüglich der im Folgenden ausgewerteten bzw. dargestellten Daten ist anzumerken, dass für das Referenzszenario nur die 100 Realisierungen des monatlichen Niederschlags für die Stationen Schönefeld und Buch zur Verfügung standen. Für das Spreeeinzugsgebiet liegen für die Referenzperiode (1961 bis 1990) die korrigierten Niederschlagssummen bei 640 mm/a, während die Niederschlagssummen für die Stationen Schönefeld und Buch geringer sind. Die Werte der 100 Realisierungen wurden entsprechend skaliert, so dass der Mittelwert der Niederschlagssummen der 100 Realisierungen 640 mm/a entspricht.

2.2.1 Klimamodelle und genutzte Klimadaten

Die von Globalen Zirkulationsmodellen (GCM) bzw. Erd-System-Modellen (ESM) generierten Klimadaten besitzen eine für die Anwendung auf der regionalen Ebene zu weite Rastergröße. Deswegen müssen entsprechende Datenreihen vor der Nutzung regionalisiert werden. Für die Regionalisierung existieren zwei grundsätzlich unterschiedliche Modellansätze.

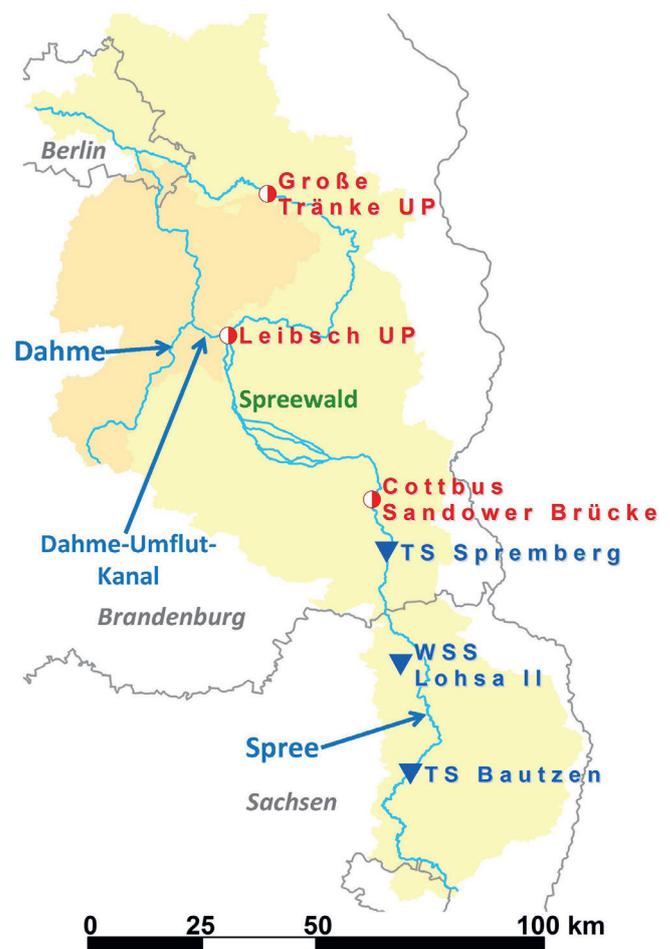


Abbildung 1

Übersichtskarte des Spreegebiets mit ausgewählten Pegeln und wasserwirtschaftlichen Speichern.

Map of the Spree catchment including selected gauging stations and reservoirs.

Tabelle 1

Übersicht zu Projekten, Szenarien und Modellen.
Overview of projects, scenarios and models.

Projekt	Projektlaufzeit	Klimaszenarien	Hydrologisches Modell	Wasserbewirtschaftung
GLOWA Elbe 1	2000 – 2003	Referenz (1961 – 1990) STAR 2K	EGMO	ArcGRM
GLOWA Elbe 2 & 3	2004 – 2010	STAR 2K	SWIM	WBalMo
INKA BB	2009 – 2014	STAR 2K	EGMO/SWIM	WBalMo
KlimaCheck	2011 – 2014	STAR 2 K 4 RCPs* (ISIMIP)	SWIM	WBalMo

* Regionalisierte und bias-korrigierte GCM-Läufe

In dynamischen regionalen Klimamodellen werden die physikalischen Vorgänge im Zusammenwirken der verschiedenen Erdsystemkomponenten (Atmosphäre, Ozean, Biosphäre usw.) simuliert, wobei Ergebnisse der GCM/ESM als Randbedingungen berücksichtigt werden.

Beim Vergleich von Beobachtungsdaten und simuliertem Referenzzeitraum (d. h. Simulation für die Vergangenheit) weisen dynamische regionale Klimamodelle beim Niederschlag häufig eine deutliche Abweichung, in Mitteleuropa häufig eine Überschätzung, auf. Aus diesem Grund erfolgt eine sogenannte Bias-Korrektur, welche die Differenz zwischen Beobachtung und Simulation verringern bzw. beseitigen soll. Die Frage, ob eine deutliche Differenz auf eine unzureichende Prozessabbildung hinweist, wird hier vernachlässigt, ebenfalls welche weiteren Größen ebenfalls korrigiert werden sollten. Zu hohe simulierte Niederschläge gehen vermutlich mit zu starker Bewölkung (und somit zu geringer Globalstrahlung) sowie zu hoher Luftfeuchtigkeit einher. Dies ist aus Sicht hydrologischer Simulationen wichtig, da Globalstrahlung und Luftfeuchtigkeit in diversen Ansätzen zur Berechnung der potenziellen Evaporation genutzt werden.

Beim statistischen Ansatz wird danach gefragt, welche in der Vergangenheit beobachteten Witterungsperioden unter den sich verändernden klimatischen Bedingungen der Zukunft entsprechend der GCM/ESM-Ergebnisse in der Betrachtungsregion häufiger oder seltener auftreten. Gibt es genügend beobachtete entsprechende Witterungsperioden, wird daraus ein entsprechendes regionales Klimaszenario zusammengesetzt. Statistische Ansätze wurden und werden häufig als zu vereinfachend oder gar falsch kritisiert, da beispielsweise gleichbleibende Zusammenhänge zwischen den meteorologischen Größen vorausgesetzt werden, weswegen im kontinental warmen Klima des Spreegebietes beobachtete warme und trockene Sommer in den Zukunftsszenarien häufig auftreten.

Referenzklima

Die für das Referenzszenario für 2003 bis 2052 durchgeführten wasserwirtschaftlichen Simulationen basieren auf dem Beobachtungsklima der Referenzperiode 1961 bis 1990 unter der Annahme, dass kein Klimawandel auftritt und entsprechen somit den Annahmen des Modells der "länderübergreifenden Arbeitsgruppe". Zur Berücksichtigung der Variabilität von Klima und Abfluss wurden 100 stochastisch generierte Realisierungen genutzt (KALTOFEN et al., 2004).

STAR

Der statistische Ansatz STAR überträgt einen, z. B. von GCM/ESM vorgegebenen, Temperaturanstieg auf Klimastationen (WERNER & GERSTENGARBE, 1997; ORLOWSKY et al., 2008), wobei in der Erzeugung der hier genutzten Realisierungen ein linearer Temperaturtrend angenommen wurde. Unter Annahme der räumlichen Erhaltungsneigungen von Temperaturänderungen und der gleichbleibenden Zusammenhänge zwischen den meteorologischen Größen wurden Niederschlag, relative Luftfeuchte, Globalstrahlung, Tagesminimum- und -maximumtemperatur mitgeführt. In dem hier genutzten Szenario STAR 2K wird eine Erwärmung bis zur Mitte dieses Jahrhunderts um 2K gegenüber der Referenzperiode 1961 bis 1990 im Untersuchungsgebiet angenommen. Es wurden 100 Realisierungen täglicher Klimagrößen für 2003 bis 2052 erzeugt.

ISIMIP

Um den Simulationen unter Nutzung des STAR 2K-Szenarios andere Szenarien gegenüberzustellen, wurden von ROERS & WECHSUNG (2015) Klimadaten des Projektes ISIMIP ("Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project", WARSZAWSKI et al., 2013) genutzt. Die unterliegenden vier Emissionsszenarien (RCPs – *Representative Concentration Pathways*) beginnen im Jahr 2006 und enden 2099. Im Rahmen des Projektes ISIMIP Fast Track (HEMPEL et al., 2013a) wurden fünf ESM-Modelle aus der fünften Generation des Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5) ausgewählt und deren Klimaprojektionen auf ein Raster von 0,5° x 0,5° nach HEMPEL et al. (2013b) regionalisiert und bias-korrigiert, wobei die absoluten Trends hinsichtlich zukünftiger Temperatur- und Niederschlagsentwicklung beibehalten wurden. Da die Unterschiede im Klimaänderungssignal zwischen den vier RCPs (2.6 bis 8.5) bis zur Mitte dieses Jahrhunderts noch relativ gering sind, wurden alle Läufe als ein Ensemble genutzt. Dabei wurden Ergebnisse von fünf ESM und insgesamt 20 Modellläufe genutzt. Da die Szenarielläufe erst im Jahr 2006 starten, die Simulationen mit dem Wasserbewirtschaftungsmodell bereits im Jahr 2003, wurde von ROERS & WECHSUNG (2015) das ISIMIP-Modelljahr 2006 dem Jahr 2003 gleichgesetzt. Diese geringfügige Verschiebung um 3 Jahre sollte aber keinen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse haben.

2.2.2 Hydrologische Modelle

In den dargestellten Studien wurden für die Generierung der natürlichen Abflüsse zwei hydrologische Modelle ausgewählt. Einerseits wurde das konzeptionelle Blockmodell EGMO (PFÜTZNER & GLOS, 1986) für die Niederschlag-Abfluss-Model-

lierung angewandt. Daneben wurde das prozessorientierte ökohydrologische Modell SWIM (KRYSANOVA et al., 2015) eingesetzt. Die genutzten Modelle wurden teilweise unter Nutzung von Beobachtungszeitreihen der Abflüsse, teilweise an quasinatürlichen Abflusszeitreihen kalibriert und validiert (z. B. POHLE et al., 2016).

Die aus der Nutzung der beiden hydrologischen Modelle resultierenden Unterschiede werden hier nicht dargestellt, da diese als gering bewertet wurden (POHLE et al., 2016). Die Differenz zwischen den natürlichen Abflüssen (MQ) am Pegel Große Tränke UP/Spree beträgt ca. 1,5 %. Die aus der Landnutzungsänderung resultierenden Änderungen der Abflussbildung, infolge Zunahme der abflussbildenden Fläche wegen der Reduzierung des Grundwasserabsenkungsgebietes, sind größer als die Differenzen zwischen den hydrologischen Modellen. Am größten sind jedoch die Änderungen auf Grund der jeweiligen Klimaszenarien.

2.2.3 Wasserbewirtschaftungsmodelle

Es wurde die lizenzpflichtige Software zur Langfristbewirtschaftungsmodellierung ArcGRM (KADEN et al., 2004) bzw. WBalMo (KADEN et al., 2005) genutzt, wobei das Modell WBalMo eine Weiterentwicklung von ArcGRM darstellt. Datengrundlage von ArcGRM/WBalMo sind das natürliche Dargebot von Teileinzugsgebieten, z. B. erzeugt mittels hydrologischer Modelle, sowie meteorologische Größen zur Bestimmung der wasserstandsabhängigen Verdunstung aus wasserwirtschaftlichen Speichern, Seen und Binnenfischereiteichen. Wassernutzer werden inklusive ihrer zeitlich variablen Entnahme und Abgabe berücksichtigt und an Bilanzprofilen verortet. Wasserwirtschaftliche Speicher werden hinsichtlich ihrer Kapazität, Wasserstands-Volumen-Beziehung und Bewirtschaftung beschrieben. Die Simulation erfolgt durch Bilanzierung des Wassers im System von Flussstrecken und Speichern, unter Berücksichtigung einer festgelegten Rangliste, die sich über die Simulationslaufzeit ändern kann. Komplexe Regeln der Bewirtschaftung, z. B. die Flutung von Bergbaufolgeseen oder Wasserüberleitungen, sind mittels dynamischer Elemente implementiert. Der im Allgemeinen genutzte Zeitschritt der Modellierung ist ein Monat, bei der Anwendung von INKA BB wurde eine Version mit wöchentlichem Zeitschritt entwickelt und genutzt. Die Basis des Modells für die Einzugsgebiete von Spree und Schwarzer Elster, d. h. Ausweisung der Teileinzugsgebiete bzw. deren natürliches Dargebot, Lage und Bedarfe der Wassernutzer, Lage und Steuervorgaben für wasserwirtschaftliche Objekte usw., sind zum Teil sensitive und deswegen öffentlich nicht zugängliche Daten der "länderübergreifenden Arbeitsgruppe" und werden beständig fortgeschrieben. In den verschiedenen Forschungsprojekten wurden diverse Änderungen und Ergänzungen, z. B. hinsichtlich Betrachtungsperiode, Wasserbedarfsentwicklung, Klimainput usw., vorgenommen.

Die Bewirtschaftung der Talsperren und Speicher, die Flutung und Nachsorge des aktuellen Sanierungsbergbaus (LMBV-Tagebaue) in den hierin ausgewerteten Wasserbewirtschaftungssimulationen entspricht den Planungen der "länderübergreifenden Arbeitsgruppe" des Jahres 2000. Ausführliche Informationen zur Bewirtschaftung finden sich in KALTOFEN et al. (2004) bzw. KOCH (2005).

2.2.4 Szenarien zur Braunkohleförderung und -verstromung

Die Entwicklung der Braunkohleförderung und -verstromung wurde mittels zweier Szenarien berücksichtigt. Diese weisen bis

zum Jahr 2022 keine Unterschiede auf, sodass sie für die hier vorgenommene Auswertung keine Bedeutung haben. Die Szenarien beinhalten u. a. die Flutung des Tagebaus Cottbus-Nord ab dem Jahr 2020 sowie einen kontinuierlichen Rückgang des Grundwasserabsenkungstrichters und der dort auftretenden Versickerungsverluste aus den Oberflächengewässern, der Sumpfungswassereinleitungen der Tagebaue und des Kühlwasserbedarfes der thermischen Kraftwerke.

Die Entwicklung der Grundwasserabsenkung wurde in der hydrologischen Simulation berücksichtigt, betroffene Gebiete tragen nicht zur Abflussbildung bei. Die Entwicklung der Versickerungsverluste, die Sumpfungswassereinleitungen, die Kühlwassernutzung der thermischen Kraftwerke, die Flutung und Nachsorge bzw. wasserwirtschaftliche Nutzung ehemaliger Tagebaue wurde in der Wasserbewirtschaftungssimulation berücksichtigt.

2.2.5 Ergebnisauswertung und -darstellung

Die Simulationen mit dem Wasserbewirtschaftungsmodell erfolgten unter Betrachtung von Fünfjahresperioden (KALTOFEN et al., 2004; POHLE et al., 2016), innerhalb derer beispielsweise das Grundwasserabsenkungsgebiet und die dort auftretenden Versickerungsverluste der Oberflächengewässer, der Kühlwasserbedarf der thermischen Kraftwerke konstant sind. Mit fortschreitender Zeit verringern sich Grundwasserabsenkungsgebiet, Versickerungsverluste und Kühlwasserbedarf. Die Ergebnisauswertung erfolgt entsprechend für Fünfjahresperioden, dabei umfasst die Periode 2005 die Jahre 2003 bis 2007 usw. Da mit Ausnahme der ISIMIP-Klimaszenarien jeweils 100 Realisierungen zur Verfügung standen, konnten je Fünfjahresperiode 500 Modelljahre zur statistischen Auswertung genutzt werden. Für die ISIMIP-Klimaszenarien mit 20 Modellläufen ergeben sich entsprechend 100 Modelljahre je Fünfjahresperiode.

In KALTOFEN et al. (2004) werden Ergebnisse für eine Überschreitungswahrscheinlichkeit (ÜWK) von 80 % dargestellt, z. B. Abfluss für den Monat Juli am Pegel Große Tränke UP/Spree (Zufluss nach Berlin über die Spree, Abb. 10 in KALTOFEN et al., 2004). Die ÜWK von 80 % wird als moderater Trockenwetterabfluss interpretiert, der im entsprechenden Monat statistisch einmal in fünf Jahren auftritt. Für diese moderaten Trockenverhältnisse wird im STAR 2K-Szenario eine deutliche Unterschreitung des Mindestabflusses von $8,00 \text{ m}^3/\text{s}$ am Pegel Große Tränke UP/Spree bereits ab dem Jahr 2003 und die Folgejahre dargestellt, woraus die Aussage resultiert, dass das gegenwärtige System der Wasserbewirtschaftung die Folgen des angenommenen Klimawandels nicht ausgleichen kann. Nach dem Jahr 2025 verbessert sich die Abflusssituation auch im STAR 2K-Szenario für einige Jahre, da neben dem WSS Lohsa II auch Abgaben aus dem Speicher Cottbus-Nord den Spreewald- bzw. Berlinzufluss in Niedrigwasserperioden stützen, nach dem Jahr 2030 verschlechtert sich die Situation als Konsequenz von Klimawandel und Rückgang der Sumpfungswassereinleitungen wieder.

Während KALTOFEN et al. (2004) auf eine Analyse potenzieller Niedrigwasser(-Konflikte) und Anpassungsmaßnahmen fokussierte (ÜWK von 80 %), stellt KOCH (2005) die ÜWK von 20 % und 80 % für das Referenzszenario bzw. STAR 2K-Szenario dar. Die zwischen ÜWK von 20 % und 80 % liegenden inneren 60 % können auch als Normalzustand, die oberhalb bzw. unterhalb liegenden Werte als moderate Abweichungen, statistisch je Monat einmal in fünf Jahren, interpretiert werden.

Da in den wasserwirtschaftlichen Simulationen Fünfjahresperioden genutzt wurden, werden im Folgenden die beobachteten mittleren monatlichen Abflüsse der Jahre 2003 bis 2022 für diese ausgewertet. Dabei würden bei statistischer Normalverteilung der Witterungsverhältnisse in jeder Fünfjahresperiode je Monat jeweils ein Wert oberhalb bzw. unterhalb der ÜWK von 20 % und 80 % liegen. Da die realen Witterungsverhältnisse oft zyklisch, z. B. als Aufeinanderfolge feuchterer bzw. trockenerer Jahre, bzw. grundlegend als stochastisch zu betrachten sind, können sich mehr oder weniger starke Differenzen zwischen den 500 simulierten Wetter-Realisierungen und der jeweiligen Ausprägung des tatsächlichen Wetters ergeben – anders ausgedrückt: das beobachtete Wetter ist nur eine Teilmenge der möglichen Witterungsabläufe. Sollten sich jedoch Trends in den beobachteten Witterungsdaten zeigen, sollte sich dies in noch deutlicheren Differenzen manifestieren.

Normalerweise entspricht die Reihenfolge der Ergebnisdarstellung der genutzten Modellkette: Klimamodelle => hydrologische Modelle => Wasserbewirtschaftungsmodelle. Bei der hydrologischen bzw. wasserwirtschaftlichen Modellierung erfolgt die Ergebnisdarstellung üblicherweise vom Ober- zum Unterlauf. Bezug nehmend auf das Zitat aus KALTOFEN et al. (2004) zum bewirtschafteten Abfluss am Pegel Große Tränke UP/Spree gehen wir hier den umgekehrten Weg: beginnend am genannten Pegel werden oberhalb gelegene Pegel ausgewertet, danach folgt eine Analyse von beobachteten und simulierten Wetterdaten. Auf diesem Weg wird dargestellt, warum die jeweils genutzte Modellkette zu kleineren oder größeren Abweichungen im Vergleich zu den beobachteten Abflüssen am Pegel Große Tränke UP/Spree führt.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Beobachtete und simulierte Abflüsse

In den folgenden Abbildungen werden Ergebnisse für in Abbildung 1 ausgewiesene Pegel für Fünfjahresperioden, z. B. für die Fünfjahresperiode 2003 bis 2007, dargestellt. Bei den beobachteten Daten sind die einzelnen Monatswerte der Jahre 2003 bis 2007 usw. dargestellt, für die Simulationen die aus den Realisierungen berechneten ÜWK der jeweiligen Fünfjahresperiode.

In Abbildung 2 sind die beobachteten und simulierten Abflüsse am Pegel Große Tränke UP/Spree dargestellt. In den Simulationen für das Referenzszenario (ohne Klimawandel, Abb. 2a) wird in den vier Fünfjahresperioden von 2003 bis 2022 auch unter moderaten Niedrigwasserverhältnissen (ÜWK 80 %) der Mindestabfluss (8,00 m³/s) durchgehend eingehalten. Die Abgaben aus den Talsperren und Speichern an der oberen und mittleren Spree erfüllen somit das Bewirtschaftungsziel Einhaltung des Mindestabflusses am Pegel Große Tränke UP/Spree. Die Beobachtungen für die Jahre 2003 bis 2007 zeigen dagegen für die Monate Juni bis September – in einigen Jahren auch im Mai und Oktober – in allen Jahren eine deutliche Unterschreitung des Mindestabflusses. Ebenfalls in der Folgeperiode 2008 bis 2012 wird der Mindestabfluss zwischen Juni bis September häufig unterschritten, lediglich im Jahr 2012 wird dieser durchgehend eingehalten. In den Jahren 2013 bis 2017 liegen die beobachteten Abflüsse fast durchgehend zwischen den simulierten ÜWK 20 % und 80 %, in einigen Monaten der Jahre 2015, 2016 und 2017 wird der Mindestabfluss unterschritten. Für die Jahre 2018 bis 2022 zeigen die Beobachtungen zwischen Mai und Oktober

fast durchgehend eine deutliche Unterschreitung des Mindestabflusses. Auch im Winterhalbjahr liegen die Beobachtungen fast durchgehend unterhalb der simulierten ÜWK 80 %.

Im STAR 2K-Szenario wird der Mindestabfluss, mit Ausnahme der ersten Fünfjahresperiode, in den Sommermonaten unter moderat feuchten Bedingungen (ÜWK 20 %) eingehalten, unter moderat trockenen Bedingungen dagegen (ÜWK 80 %) in keiner Fünfjahresperiode (Abb. 2b).

Im ISIMIP-Szenario wird der Mindestabfluss, mit einer Ausnahme in der ersten Fünfjahresperiode, in den Sommermonaten unter moderat feuchten Bedingungen (ÜWK 20 %) eingehalten (Abb. 2c). Unter moderat trockenen Bedingungen (ÜWK 80 %) wird der Mindestabfluss in der ersten Fünfjahresperiode unterschritten, ab der zweiten Fünfjahresperiode ab dem Jahr 2008 wird dieser fast durchgängig eingehalten.

Abbildung 3 zeigt die beobachteten und simulierten Abflüsse am Pegel Leibsch UP/Spree. Grundsätzlich zeigen sich für diesen Pegel ähnliche Ergebnisse wie für den Pegel Große Tränke UP/Spree. In vielen Monaten liegen die beobachteten Abflüsse unter den für moderate Niedrigwasserverhältnisse (ÜWK 80 %) simulierten Werten im Referenzszenario (ohne Klimawandel, Abb. 3a), besonders ausgeprägt in der ersten und letzten Fünfjahresperiode sowie in den Sommermonaten. Im STAR 2K-Szenario (Abb. 3b) werden die Abflussverhältnisse deutlich besser abgebildet, im ISIMIP-Szenario (Abb. 3c) werden insbesondere Niedrigwasserabflüsse (ÜWK 80 %) deutlich überschätzt.

Es stellt sich die Frage, ob fehlende Abgaben aus dem WSS Lohsa II oder erhöhte Überleitungen über den Dahme-Umflutkanal für die niedrigen beobachteten Abflüsse an den aufgeführten Pegeln verantwortlich sind. In den Simulationen gibt das WSS Lohsa II ab Betriebsbereitschaft – je nach Flutungswasserverfügbarkeit in der entsprechenden Realisierung zwischen 2003 und 2007 – Wasser zur Stützung des Zuflusses zum Spreewald bzw. für den Abfluss am Pegel Große Tränke UP/Spree ab. Aufgrund von Gewässergüterrestriktionen für die der Ausleitungen aus dem WSS Lohsa II erfolgten diese Abgaben in den letzten Jahren in deutlich reduziertem Umfang (LMBV, 2021).

Aus diesem Grund sind in Abbildung 4 die beobachteten und simulierten Abflüsse am Pegel Cottbus Sandower Brücke/Spree, der unterhalb des WSS Lohsa II liegt, dargestellt. Es gibt nur wenige beobachtete Monate, an denen die für moderate Niedrigwasserverhältnisse (ÜWK 80 %) simulierten Abflüsse im Referenzszenario unterschritten werden (ohne Klimawandel, Abb. 4a). Die beobachteten Abflüsse liegen im Allgemeinen deutlich über den simulierten ÜWK 80 %. Dies gilt ebenfalls für das STAR 2K-Szenario (Abb. 4b). Lediglich im ISIMIP-Szenario (Abb. 4c) liegen die simulierten Abflüsse für moderate Niedrigwasserverhältnisse (ÜWK 80 %) in der letzten Periode 2018 bis 2022, entsprechend den Pegeln Große Tränke UP/Spree und Leibsch UP/Spree, deutlich oberhalb der beobachteten Abflüsse. Daraus ist zu schlussfolgern, dass die reduzierten Abgaben aus dem WSS Lohsa II nicht die Ursache für die verstärkt beobachteten Niedrigwasserabflüsse an den Pegeln Leibsch UP/Spree und Große Tränke UP/Spree sind bzw. dass die anderen Speicher, insbesondere die Talsperren Bautzen und Spremberg, die fehlenden Abgaben aus dem WSS Lohsa II teilweise ausgleichen konnten.

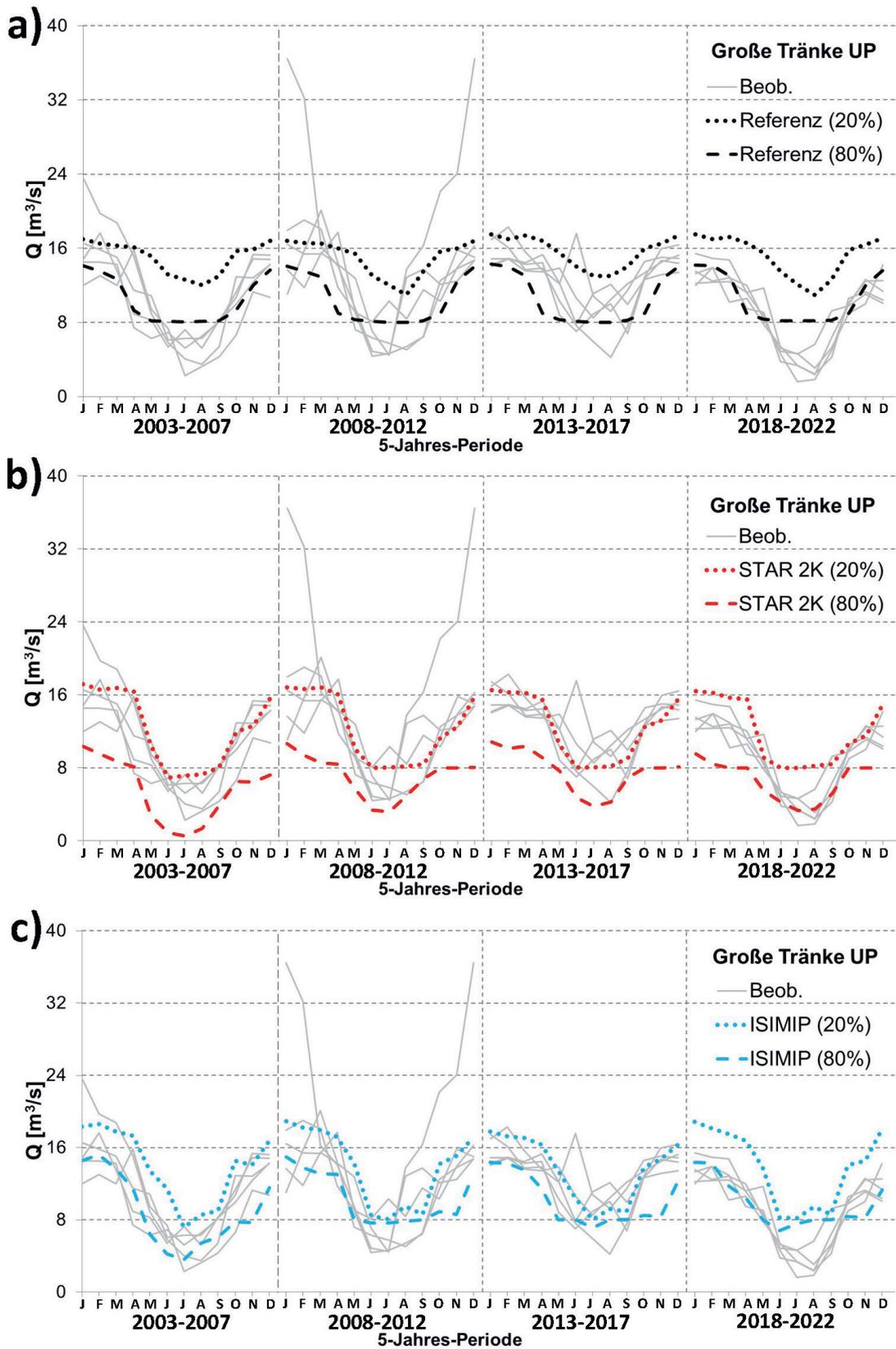


Abbildung 2

Pegel Große Tränke UP/Spre: Monatsmittelwerte beobachteter Durchflüsse sowie simulierter Durchfluss für Überschreitungswahrscheinlichkeiten von 20 % und 80 %; a) Referenzszenario, b) STAR 2K-Szenario, c) ISIMIP-Szenario; innerhalb der 5-Jahres-Perioden sind die beobachteten fünf Jahre als graue Linien dargestellt.

Gauge Große Tränke UP/Spre: mean monthly observed discharges and simulated discharge for exceedance probabilities of 20 % and 80 %; a) reference scenario, b) STAR 2K-scenario, c) ISIMIP-scenario; within 5-year-periods observed discharges of the respective five years are shown as grey lines.

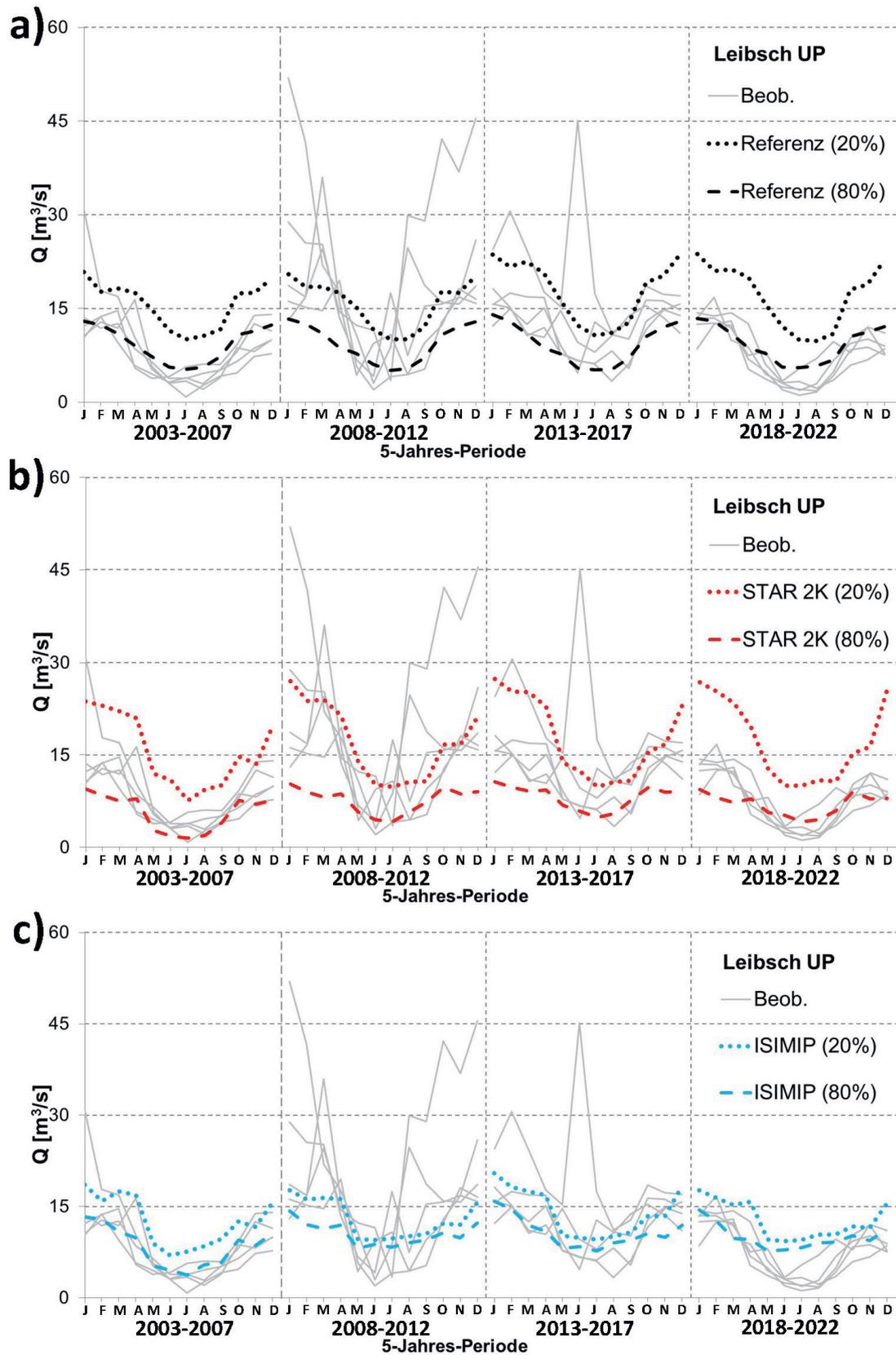


Abbildung 3

Pegel Leibsch UP/Spree: Monatsmittelwerte beobachteter Durchflüsse sowie simulierter Durchfluss für Überschreitungswahrscheinlichkeiten von 20 % und 80 %; a) Referenzszenario, b) STAR 2K-Szenario, c) ISIMIP-Szenario; innerhalb der 5-Jahres-Perioden sind die beobachteten fünf Jahre als graue Linien dargestellt.

Gauge Leibsch UP/Spree: mean monthly observed discharges and simulated discharge for exceedance probabilities of 20 % and 80 %; a) reference scenario, b) STAR 2K-scenario, c) ISIMIP-scenario; within 5-year-periods observed discharges of the respective five years are shown as grey lines.

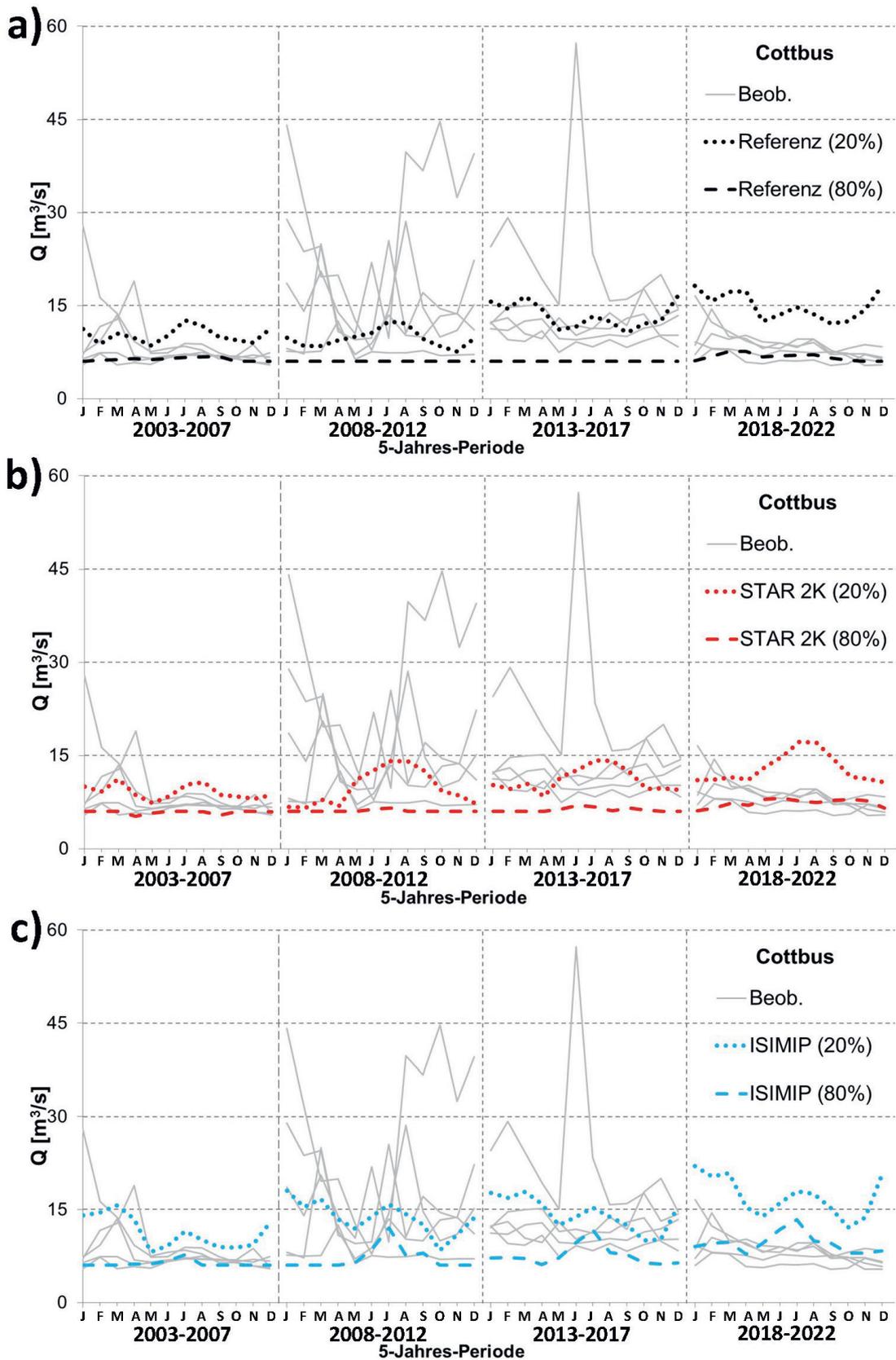


Abbildung 4

Pegel Cottbus Sandower Brücke/Spree: Monatsmittelwerte beobachteter Durchflüsse sowie simulierter Durchfluss für Überschreitungswahrscheinlichkeiten von 20 % und 80 %; a) Referenzszenario, b) STAR 2K-Szenario, c) ISIMIP-Szenario; innerhalb der 5-Jahres-Perioden sind die beobachteten fünf Jahre als graue Linien dargestellt.

Gauge Cottbus Sandower Brücke/Spree: mean monthly observed discharges and simulated discharge for exceedance probabilities of 20 % and 80 %; a) reference scenario, b) STAR 2K-scenario, c) ISIMIP-scenario; within 5-year-periods observed discharges of the respective five years are shown as grey lines.

Die beobachteten Überleitungen über den Dahme-Umflut-Kanal (nicht dargestellt) wurden ebenfalls mit den Simulationen verglichen und die Beobachtungen entsprechen den in den Modellen integrierten Regeln, z. B. bei Niedrigwasser nur Mindestwasserentnahme für die Stützung des Dahme-Umflut-Kanals, dessen Hauptaufgabe die Hochwasserentlastung der Spree ist.

Aus dem Vergleich der Abflüsse am Pegel Cottbus Sandower Brücke/Spree mit denen an den Pegeln Leibsch UP/Spree und Große Tränke UP/Spree lässt sich schlussfolgern, dass in den Simulationen die (Nutzungs-/Verdunstungs-)Verluste im Spreewald unterschätzt werden.

3.2 Klimadaten

Die im Wasserbewirtschaftungsmodell berücksichtigte Bewirtschaftung stellt entsprechend der bisher dargestellten Ergebnisse nicht den Grund für die teilweise großen Differenzen zwischen Beobachtungen und Simulationsergebnissen dar. Aus diesem Grund werden im Folgenden die genutzten Klimadaten analysiert.

Abbildung 5 zeigt die beobachteten und simulierten monatlichen Niederschlagssummen für das Spreegebiet. Grundsätzlich zeigt sich, dass die Wintermonate die niedrigsten Niederschlagssummen aufweisen. Die Bandbreite wird von den Modellen recht gut wiedergegeben, einzelne Beobachtungen liegen ober- bzw. unterhalb der ÜWK von 20 % und 80 %. Das STAR 2K-Szenario und das ISIMIP-Szenario zeigen mit fortschreitender Zeit eine Erhöhung der winterlichen Niederschlagssummen, während die Beobachtungen für die Wintermonate häufig sehr geringe Niederschlagssummen ausweisen.

In Abbildung 6 sind die beobachteten und simulierten monatlichen Temperaturen für das Spreegebiet dargestellt. Im Vergleich zum Referenzszenario sind die beobachteten Temperaturen mit fortschreitender Zeit in vielen Monaten deutlich höher, besonders ausgeprägt in den Sommermonaten (ohne Klimawandel, Abb. 6a). Im STAR 2K-Szenario werden die Temperaturen und ihre Entwicklung über die Zeit deutlich besser abgebildet (Abb. 6b). Dies gilt auch für das ISIMIP-Szenario (Abb. 6c).

Obwohl die in den Abbildungen 5 und 6 dargestellten Werte einen guten Überblick geben, können daraus noch keine Schlussfolgerungen aus hydrologischer Sicht gezogen werden. Die dargestellten Werte der ÜWK 20 % bzw. 80 % können aus unterschiedlichen Realisierungen stammen und liefern somit keine Information wie z. B. zur Andauer von Perioden mit hohen Temperaturen und/oder geringen Niederschlägen. Neben den für die einzelnen Szenarien simulierten bewirtschafteten Abflüssen (s. o.), welche das Klima räumlich und zeitlich integrieren, werden hier noch die jährlichen Niederschlagssummen bzw. Mitteltemperaturen analysiert.

Die dem Referenzszenario ohne Klimawandel zugrunde liegenden 100 Realisierungen der Referenz 2003 bis 2022 bilden das beobachtete Klima des Beobachtungszeitraumes 1961 bis 1990 gut ab, weisen allerdings sehr viele niederschlagsreiche und etwas zu kühle Jahre auf (Abb. 7). Wird der Beobachtungszeitraum 1881 bis 1960 hinzugezogen, zeigt sich gegenüber dem Beobachtungszeitraum 1961 bis 1990 eine größere Spannweite bei den Jahresmitteltemperaturen, während die Spannweite bei

den Jahresniederschlägen ähnlich bleibt. Insgesamt bildet das Referenzszenario ohne Klimawandel das Klima für die 132 Jahre des Zeitraumes 1881 bis 2012 gut ab.

Ab dem Jahr 1991 sind gegenüber dem Beobachtungszeitraum 1881 bis 1990 steigende Temperaturen zu beobachten mit einer Temperaturzunahme von 1,1 °C für 1991 bis 2020 gegenüber 1961 bis 1990 (Abb. 7, mit Ausweisung der Fünfjahresperioden ab 2003). Während die Jahre 2003 bis 2012 noch im Möglichkeitsbereich des Referenzszenarios liegen, bezüglich der hohen Temperaturen und teilweise der Niederschlagssummen aber schon als Extrema angesehen werden müssten und das Jahr 2010 als Extrem mit geringer Mitteltemperatur und höchster Niederschlagssumme seit 1881 hervorsteicht, befinden sich zwei Jahre der Fünfjahresperiode 2013 bis 2017 und vier Jahre der Fünfjahresperiode 2018 bis 2022 mehr oder weniger deutlich außerhalb des Möglichkeitsbereichs. Insgesamt weist der Zeitraum 2003 bis 2022 gegenüber dem Zeitraum 1991 bis 2020 weiter steigende Temperaturen auf, dabei aber auch leicht sinkende Niederschlagssummen, obwohl der Zeitraum das niederschlagsreichste Jahr 2010 im Gesamtzeitraum 1881 bis 2022 beinhaltet. Die Fünfjahresperiode 2018 bis 2022 weist mit einem Temperaturmittelwert von 10,7 °C eine Steigerung von 2,1 °C gegenüber der Beobachtungsperiode 1960 bis 1990 auf. Die damit verbundene Zunahme der potenziellen Verdunstung beträgt etwa 15 %, ca. 80 bis 90 mm/a.

In Abbildung 8 werden Beobachtungen und ISIMIP-Klima von 1961 bis 1990 (Mittelwert) sowie von 2003 bis 2022 (mit Ausweisung der Fünfjahresperioden) den Realisierungen von STAR 2K bzw. ISIMIP gegenübergestellt. Beide Klimaszenarien weisen die beobachtete Temperaturzunahme aus. STAR 2K zeigt im Vergleich zu ISIMIP eine deutlich größere Variabilität in den jährlichen Niederschlagssummen, sowohl bezüglich niederschlagsarmer als auch -reicher Jahre. ISIMIP beinhaltet insgesamt ein etwas höheres Temperaturniveau. Da das ISIMIP-Modelljahr 2006 dem Jahr 2003 gleichgesetzt wurde, werden in Abbildung 8 die ersten 20 Jahre des ISIMIP-Szenarios (2006 bis 2025) dargestellt. Es sei darauf hingewiesen, dass im ISIMIP-Szenario fünf der sechs Jahre mit Jahresmitteltemperaturen von ca. 12 °C vor dem Jahr 2023 liegen.

3.3 Gesamtbewertung der Simulationsergebnisse

Werden die zwischen den Überschreitungswahrscheinlichkeiten (ÜWK) 20 % und 80 % liegenden inneren 60 % als Normalzustand interpretiert, die oberhalb bzw. unterhalb liegenden Werte als moderate Abweichungen, die statistisch einmal in fünf Jahren auftreten, sollten je Fünfjahresperiode 36 Monate (60 Monate x 0,6) zwischen den ÜWK 20 % und 80 % liegen. Über den gesamten Betrachtungszeitraum von 20 Jahren, und bedingt durch die Tatsache, dass durch den längeren Zeitraum die beobachteten Abflüsse die mögliche Schwankungsbreite besser umfassen, sollten 144 Monate (240 Monate x 0,6) zwischen den ÜWK 20 % und 80 % liegen. Tabelle 2 zeigt die Häufigkeit, in der die unterschiedlichen Simulationsläufe das aufgeführte Kriterium erfüllen. Es zeigt sich, dass die Simulationen unter Nutzung von STAR 2K in zwei der vier Perioden mehr als 36 Monate zwischen den ÜWK 20 % und 80 % aufweisen, unter Nutzung des Referenzszenarios bzw. ISIMIP jeweils eine Periode. Über den gesamten Betrachtungszeitraum von 20 Jahren erfüllen nur die Simulationen unter Nutzung von STAR 2K das Kriterium.

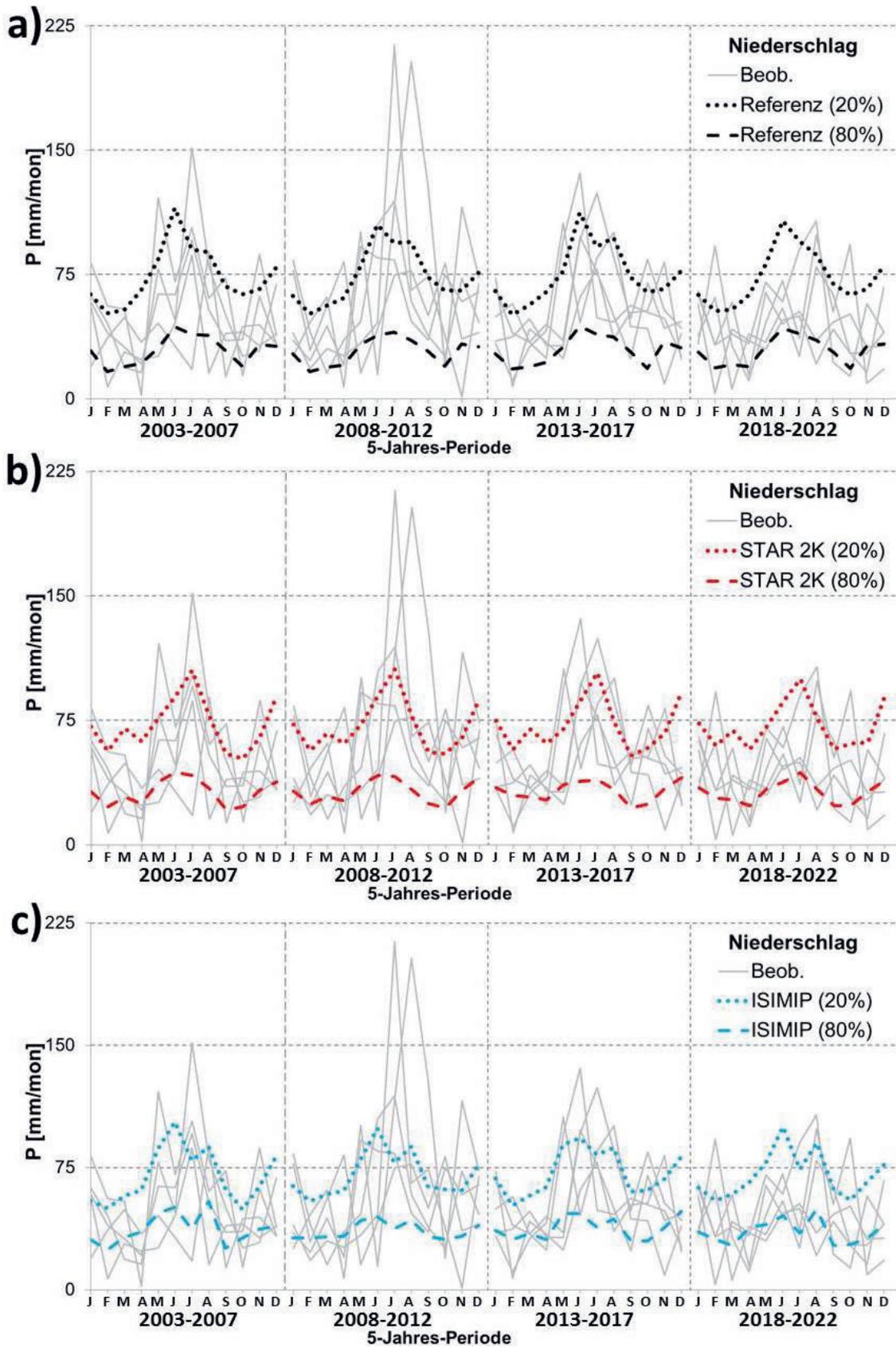


Abbildung 5
 Niederschlag für das Spreegebiet: Monatssummen beobachtet und simulierte Überschreitungswahrscheinlichkeiten 20 % und 80 %; a) Referenzszenario, b) STAR 2K-Szenario, c) ISIMIP-Szenario; innerhalb der 5-Jahres-Perioden sind die beobachteten fünf Jahre als graue Linien dargestellt.
 Precipitation for the Spree catchment: monthly sums observed and simulated with exceedance probabilities of 20 % and 80 %; a) reference scenario, b) STAR 2K-scenario, c) ISIMIP-scenario; within 5-year-periods observed discharges of the respective five years are shown as grey lines.

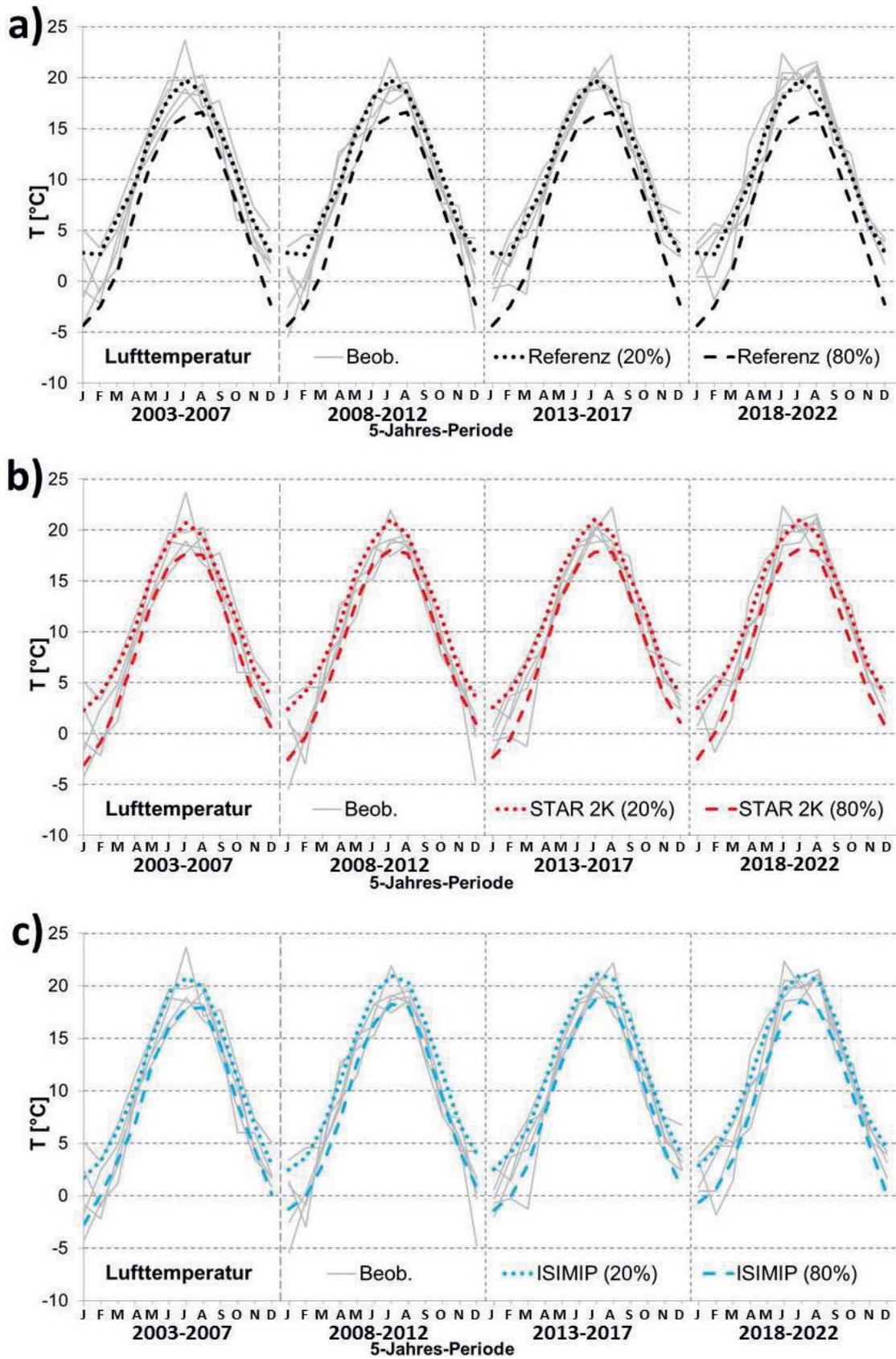


Abbildung 6

Temperaturen für das Spreegebiet: Monatsmittelwerte beobachtet und simulierte Überschreitungswahrscheinlichkeiten 20 % und 80 %; a) Referenzszenario, b) STAR 2K-Szenario, c) ISIMIP-Szenario; innerhalb der 5-Jahres-Perioden sind die beobachteten fünf Jahre als graue Linien dargestellt. *Temperatures for the Spree catchment: mean monthly values observed and simulated with exceedance probabilities of 20 % and 80 %; a) reference scenario, b) STAR 2K-scenario, c) ISIMIP-scenario; within 5-year-periods observed discharges of the respective five years are shown as grey lines.*

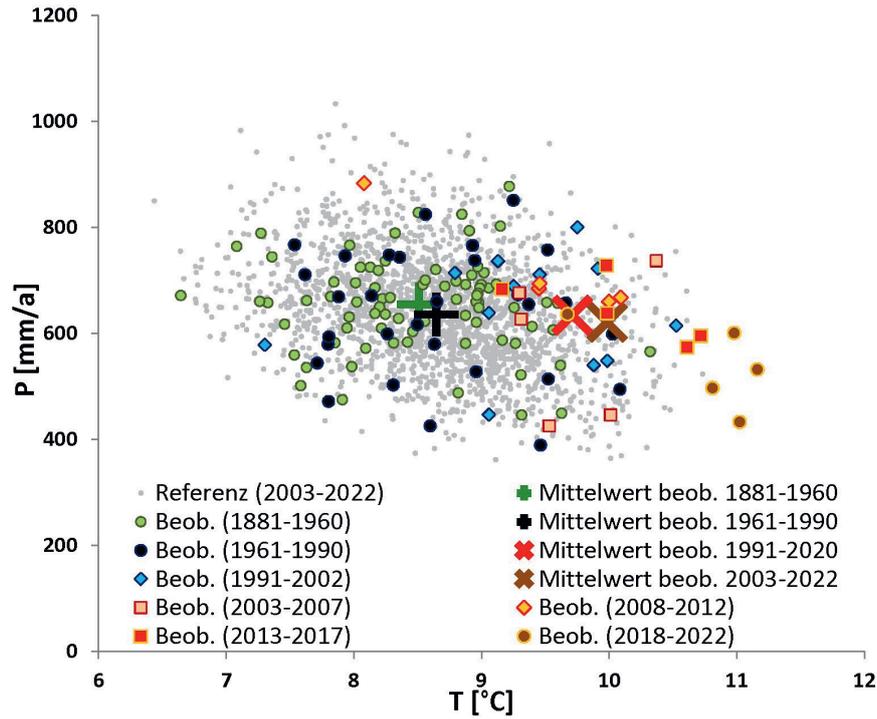


Abbildung 7

Thermopluviogramm für das Spreengebiet, Beobachtung 1881 bis 1960 sowie 1961 bis 1990, Referenzszenario (100 Realisierungen für die Jahre 2003 bis 2022 ohne Klimawandel basierend auf der Klimazeitreihe 1961 bis 1990), Beobachtungen ab 1991 mit Ausweisung der Fünfjahresperioden ab 2003. *Thermopluviogram for the Spree catchment, observations 1881 to 1960 and 1961 to 1990, reference scenario (100 realisations for 2003 to 2022 without climate change based on the climate of 1961 to 1990), observations from 1991 onwards with designation of 5-year-periods from 2003 onwards.*

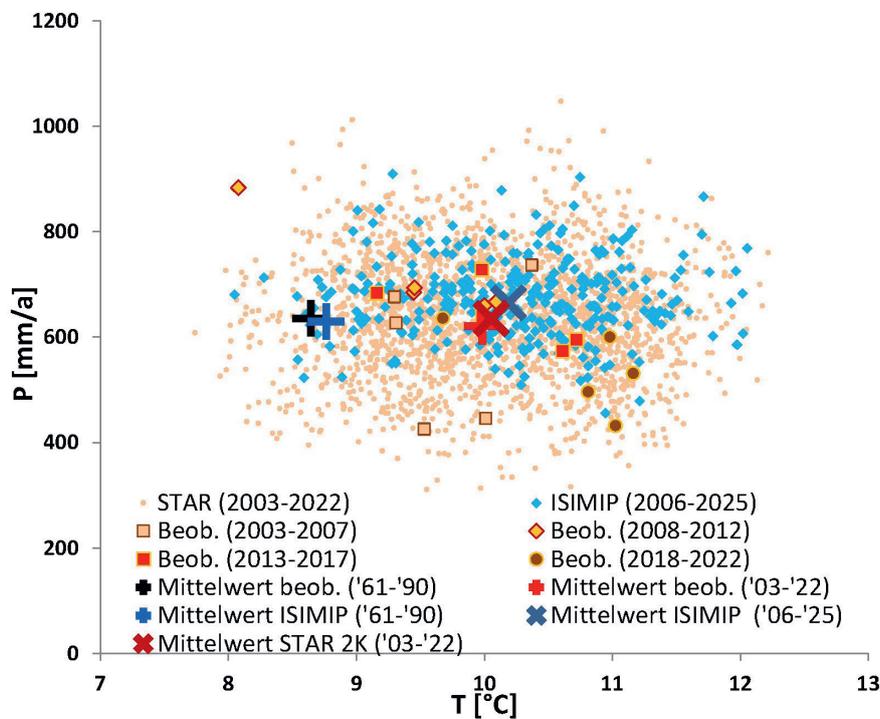


Abbildung 8

Thermopluviogramm für das Spreengebiet, Mittelwert Beobachtung und ISIMIP 1961 bis 1990, Beobachtungen ab 2003 mit Ausweisung der Fünfjahresperioden, STAR 2K-Szenario (100 Realisierungen für 2003 bis 2022), ISIMIP-Szenario (20 Läufe für 2006 bis 2025). *Thermopluviogram for the Spree catchment, mean value of observations and ISIMIP 1961 to 1990, observations from 2003 onwards with designation of 5-year-periods, STAR 2K scenario (100 realisations representing the climate of 2003 to 2022), ISIMIP scenario (20 runs representing the climate of 2006 to 2025).*

Tabelle 2

Anzahl der Monate (absolut sowie als Prozentwert von 60 Monaten je Periode bzw. 240 Monaten gesamt) in der die beobachteten Abflüsse am Pegel Große Tränke UP/Spree zwischen den ÜWK 20 % und 80 % liegen (innere 60 %).
 Number of months (absolute number, as percentage of 60 months per period and entire 240 months) where observed discharge at gauge Große Tränke UP/Spree is between exceedance frequencies of 20 % and 80 % (inner 60 %).

Periode	Anzahl Monate			Monate [%]		
	Referenz	STAR 2K	ISIMIP	Referenz	STAR 2K	ISIMIP
2003 – 2007	29	44	37	48 %	73 %	62 %
2008 – 2012	28	32	27	47 %	53 %	45 %
2013 – 2017	48	29	32	80 %	48 %	53 %
2018 – 2022	20	48	27	33 %	80 %	45 %
Summe	125	153	123	52 %	64 %	51 %

4 Schlussfolgerungen

In diesem Artikel werden die in verschiedenen Projekten zu den Auswirkungen des globalen Wandels im Spreegebiet genutzten Eingangsdaten, Szenarien und Modelle dargestellt. Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit beobachteten Abflüssen der letzten 20 Jahre für ausgewählte Pegel zeigt, dass einige Studien eine hohe, andere eine geringere Übereinstimmung aufweisen. Als Hauptgrund für Übereinstimmung bzw. Abweichung werden die jeweils genutzten Klimaingangsdaten ausgewiesen.

Nach KALTOFEN et al. (2004, S. 69) kann das gegenwärtige System der Wasserbewirtschaftung die Folgen des angenommenen Klimawandels nicht ausgleichen. Dieses Hauptergebnis von GLOWA Elbe 1 hat sich in den Beobachtungen der letzten 20 Jahre für das Einzugsgebiet der Spree als zutreffend erwiesen: die über die letzten 20 Jahre beobachtete Klimaentwicklung entspricht den Annahmen des Szenario STAR 2K. Dementsprechend wurden im analysierten Zeitraum verstärkt Niedrigwasserperioden beobachtet, in welchen die Abgaben der Talsperren und Speicher die Mindestabflüsse, z. B. an den Pegeln Leibsch UP/Spree und Große Tränke UP/Spree, nicht sicherstellen konnten.

Während die in den dargestellten Projekten genutzten Bergbauszenarien für das Lausitzer Revier der Entwicklung bis zum jetzigen Zeitpunkt entsprechen, wie z. B. das Auslaufen der Braunkohleförderung im Tagebau Cottbus-Nord und Flutungsbeginn des Tagebausees, wurden unterschiedliche Szenarien hinsichtlich der klimatischen Entwicklung genutzt. Von den in GLOWA Elbe 1 genutzten Szenarien weist das Referenzszenario ohne Klimawandel jährliche Niederschlagssummen in Höhe der Beobachtungen der letzten beiden Jahrzehnte auf, unterschätzen die Temperaturen jedoch deutlich. Das Klimaszenario STAR 2K zeigt mit den Beobachtungen korrespondierende Werte bei Niederschlägen und Temperaturen auf.

Das im Projekt KlimaCheck genutzte ISIMIP-Klimaszenario überschätzt die beobachtete Temperaturentwicklung leicht, weist jedoch eine zu geringe Niederschlagsvariabilität auf. Insgesamt weisen die in GLOWA Elbe 1 unter Nutzung des Klimaszenarios STAR 2K simulierten Abflüsse für die Spree die höchste Übereinstimmung mit den Beobachtungen auf. Die beobachteten und in den Klimaszenarien beinhalteten hohen Temperaturen führen zu deutlicher Steigerung der potenziellen Evapotranspiration, weshalb auch in normalen Niederschlagsjahren eine verstärkte Neigung zu Niedrigwasserperioden zu erwarten ist. In den

ISIMIP-Szenarien treten vergleichsweise wenige niederschlagsarme Jahre auf, woraus sich eine stabilere Dargebotssituation ergibt. Eine derartige Entwicklung wurde jedoch in den letzten Jahrzehnten nicht beobachtet.

Es ist zu beachten, dass im Lausitzer Revier seit Anfang der 1990er Jahre durch die Flutung ehemaliger Tagebaue die Wasserfläche bereits zum jetzigen Zeitpunkt um mehr als 140 km² zugenommen hat, bei einer endgültigen Fläche nach Flutung der noch aktiven Tagebaue von 250 km² (UMWELTBUNDESAMT, 2023). Die Flutung und Nachsorge der Tagebauseen sind in den hier dargestellten wasserwirtschaftlichen Simulationen berücksichtigt.

Der Vergleich der Abflüsse am Pegel Cottbus Sandower Brücke/Spree mit denen an den unterhalb gelegenen Pegeln Leibsch UP/Spree und Große Tränke UP/Spree weist darauf hin, dass in den Simulationen die Nutzungs-/Verdunstungs-Verluste im Spreewald unterschätzt werden. Deswegen sollten in hydrologischen Modellen zukünftig für die Parametrisierung der potenziellen und die Validierung der aktuellen Verdunstung Lysimeterdaten, z. B. von DIETRICH et al. (2019), genutzt werden. Die Größenordnung der nicht erfassten Wasserentnahmen, wie z. B. zur privaten Gartenbewässerung, im Spreewald sowie im gesamten Spreegebiet ist nicht bekannt und kann somit nicht in der Modellierung abgebildet werden.

Die hier dargestellten Auswertungen bestätigen die von GÄDEKE et al. (2017) getroffene Aussage, dass es für Klimafolgenstudien im Bereich von Hydrologie und Wasserwirtschaft unabdingbar ist, die genutzten Klimaingangsdaten der Globalen Zirkulationsmodelle bzw. Erd-System-Modelle sowie der dynamischen regionalen Klimamodelle einer strikten Analyse zu unterziehen. Dies betrifft sowohl Absolutwerte, als auch Trends, beispielsweise von Temperatur und Niederschlag für den Referenzzeitraum bzw. das gegenwärtige Klima. Allerdings besteht auch bei derartigen Analysen keine Garantie, dass die Modelle auch eine bessere Prognosefähigkeit für die Zukunft aufweisen.

Es kann gezeigt werden, welcher Nutzen und welche Informationen für die wasserwirtschaftliche Planung, z. B. bezüglich Anpassungsnotwendigkeit/-maßnahmen, unter Nutzung etablierter Modellketten gezogen werden kann. Dies betrifft sowohl Änderungen in den Wassernutzungen/-bedarf oder Veränderungen in der Wasserverfügbarkeit, hervorgerufen durch Landnutzungsänderungen (hier Auslaufen der Braunkohleförderung/-verstromung) oder Klimaänderungen.

Derartige Studien benötigen allerdings umfangreiche Eingangsdaten, auch zu Wassernutzungen und wasserwirtschaftlicher Infrastruktur wie Talsperren/Speicher, Überleitungen sowie die Steuerung, welche häufig nicht verfügbar oder öffentlich zugänglich sind. Die Einbeziehung der Wasserbewirtschaftung in Klimafolgenstudien sowie Studien zum globalen Wandel erfordert im Vergleich zu hydrologischen Studien wegen des größeren Umfangs der zu beschaffenden, zu analysierenden und in den Modellen zu berücksichtigten Datensätze höhere zeitliche und somit finanzielle Ressourcen.

Letztendlich zeigt sich auch wie stark die öffentliche Wahrnehmung der Ergebnisse von der Präsentationsform abhängig ist. Die Arbeiten in GLOWA Elbe fokussierten auf eine Analyse potenzieller Niedrigwasser-Konflikte und Anpassungsmaßnahmen. Deswegen wurden in KALTOFEN et al. (2004) Ergebnisse für eine Überschreitungswahrscheinlichkeit (ÜWK) von 80 % (moderater Niedrigwasserabfluss), in späteren Veröffentlichungen, z. B. WECHSUNG et al. (2013), auch ÜWK 95 % und 99 % (ausgeprägter bzw. extremer Niedrigwasserabfluss) dargestellt. Dies ist auch insofern sinnvoll, da es Ziel der Wasserbewirtschaftung ist, gerade in diesen Extrem-Situationen für wichtige Nutzer wie Wasserwerke, industrielle Nutzer inkl. thermischer Kraftwerke u. a. die benötigten Wassermengen verfügbar zu machen. Um eine unabsichtlich einseitige Darstellung zu verhindern, sollten Ergebnisdarstellungen den Großteil des Möglichkeitsraumes abdecken, z. B. Darstellung der ÜWK 20 % und 80 % (innere 60 %), ÜWK 10 % und 90 % (innere 80 %) oder Boxplots (KOCH, 2005; POHLE et al., 2016).

Conclusion

This article presents the input data, scenarios and models used in various projects on the impacts of global change in the Spree catchment. The comparison of the simulation results with observed discharges of the last 20 years for selected gauges shows that some studies show a high, others a lower agreement. The main reason for agreement or discrepancy is the climate input data used in the respective studies.

"The current water management system cannot compensate for the impacts of the assumed climate change" (KALTOFEN et al., 2004, p. 9). This sentence, being the main result of GLOWA Elbe 1, has proven to be true in the observations of the last 20 years for the Spree catchment: the climate development observed over the last 20 years corresponds to the scenario STAR 2K; as a result, low flow periods were increasingly observed in the analysed period, during which the releases of the dams and reservoirs could not ensure the minimum discharges, e. g. at the gauges Leibsch UP/Spree and Große Tränke UP/Spree.

While the mining scenarios for the Lusatian mining district (e. g. phasing out of lignite mining in the opencast mine Cottbus-Nord and start of flooding of its mining lake) used in the projects correspond to the development up to the present time, different scenarios were used with regard to the climatic development. The scenarios used in GLOWA Elbe 1 show annual precipitation sums at the level of the observations of the last two decades, but significantly underestimate temperatures ("reference scenario" without climate change) or show trends in precipitation and temperatures corresponding to the observations ("climate scenario" STAR 2K).

The ISIMIP climate scenario used in the KlimaCheck project overestimates the observed temperature development slightly, while precipitation variability generally is too low. Overall, the discharges for the Spree simulated in GLOWA Elbe 1 using the climate scenario STAR 2K show the highest agreement with the observations. The high temperatures observed and included in the climate scenarios lead to a significant increase in potential evapotranspiration, which is why an increased tendency to low-flow periods is to be expected even in normal precipitation years. Using the ISIMIP-scenarios results in a slight increase in precipitation and consequently stable water availability. However, such a development has not been observed in the last decades.

It should be noted that in the Lusatian mining region, the flooding of former opencast mines has already increased the water surface area by more than 140 km² since the beginning of the 1990s, with a final water surface area after flooding of the still active mines of 250 km² (UMWELTBUNDESAMT, 2023). The flooding and aftercare of the mining lakes is taken into account in the water management simulations presented here.

The comparison of the discharges at the gauge Cottbus Sandower Brücke/Spree with those at the downstream gauges Leibsch UP/Spree and Große Tränke UP/Spree indicates that the (water use/evaporation) losses in the Spreewald wetland are underestimated in the simulations. For this reason, lysimeter data, e. g. from DIETRICH et al. (2019), should be used in future hydrological models for the parameterisation of potential and the validation of actual evaporation. The magnitude of the unrecorded water withdrawals, e. g. for private garden irrigation, in the Spreewald wetland or in the entire Spree catchment is not known and thus cannot be represented in the modelling.

The analyses carried out here confirm the statement made by GÄDEKE et al. (2017) that it is essential for climate impact studies in the field of hydrology and water management to perform a strict quality control on the climate input data used. This concerns both absolute values and trends, e. g. of temperature and precipitation for the reference period and the current climate. However, even with such analyses, there is no guarantee that the models also have a better forecasting ability.

It can be shown which benefits and information for water management planning, e. g. with regard to adaptation needs/measures, can be obtained by using established model chains. This concerns both, changes in water use/demand or in water availability, e.g. caused by land use changes (here phasing out of lignite production/electricity generation) or climate change.

However, such studies require extensive input data on water uses and water infrastructure (reservoirs, water transfers and their operation), which are often not available or publicly accessible. Compared to hydrological studies, the inclusion of water management in climate impact studies or global change studies requires higher (time and thus financial) resources due to the larger volume of data sets to be acquired, analysed and implemented in the models.

Ultimately, it also shows how strongly the (public) perception of the results depends on the form of presentation. The GLOWA Elbe study focused on an analysis of potential low flow conditions and conflicts, and adaptation measures. Therefore, in KALTOFEN et al.

(2004) results were presented for an exceedance probability of 80 % (moderate low flow), in later publications, e. g. WECHSUNG et al. (2013), also exceedance probabilities of 95 % and 99 % (pronounced and extreme low flow, respectively). This makes sense because the aim of water resources management is to provide the required water quantities available for important users (waterworks, industrial users incl. thermal power plants, etc.) especially in these (extreme) situations. In order to avoid an (unintentionally) one-sided representation, the representations of the results should cover the major share of the probability space, e. g., representation of the exceedance probabilities of 20% and 80 % (inner 60 %), exceedance probabilities of 10 % and 90 % (inner 80 %) or boxplots (e. g., KOCH, 2005; POHLE et al., 2016).

Hinweis zu den ausgewerteten Daten

Entsprechend des wissenschaftlichen Standards sollen Projektergebnisse mindestens zehn Jahre gespeichert werden. Die in diesem Artikel ausgewerteten Eingangsdaten und Ergebnisse stammen aus der Zeit seit dem Jahr 2000. Die wasserwirtschaftlichen Simulationen innerhalb GLOWA Elbe 1 wurden vom Erstautor in den Jahren 2001 und 2003 an der damaligen BTU Cottbus durchgeführt. Diese Daten wurden, auch im Zusammenhang mit der Promotionsarbeit des Erstautors, über mehrere Generationen externer Festplatten gesichert.

Danksagung

Die Autoren danken T. Conradt, O. Dietrich, W. Finke, U. Grünewald, S. Kaden, M. Kaltofen, I. Pohle, M. Redetzky, M. Roers, M. Schramm, S. Schweigert, J. Steidel, S. Vögele und F. Wechsung für die gemeinsame Arbeit in den diversen Projekten.

Die Arbeiten wurden teilweise über das Forschungsprogramm WAX (Projekt SpreeWasser:N, FKZ: 02WEE1633F) durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Die Autoren danken des Weiteren dem Sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, dem Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg sowie der Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft LMBV mbH für die Bereitstellung von Daten.

Anschriften der Verfasser

Dr. habil. Hagen Koch
 Prof. Dr. Fred Hattermann
 Forschungsbereich II: Klimawirkung und Vulnerabilität
 Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)
 Telegrafenberg A62
 14412 Potsdam
 hagen.koch@pik-potsdam.de
 fred.hattermann@pik-potsdam.de

Dr. Anne Gädeke
 Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
 Aufbaustab zur Einrichtung des Forschungs- und
 Entwicklungszentrums Bergbaufolgen (FEZB)
 Gaglower Str. 17/18
 03048 Cottbus
 anne.gaedeke@bgr.de

Literaturverzeichnis

- DIETRICH, O., M. FAHLE, T. KAISER & J. STEIDL (2019): Eine Lysimeter-Studie zu Auswirkungen unterschiedlicher Grundwasser-Steuerregime auf den Bodenwasserhaushalt eines grundwassernahen Standorts. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 63 (1), 6-18. DOI:10.5675/HYWA_2019.1_1.
- GÄDEKE, A., I. POHLE, H. KOCH & U. GRÜNEWALD (2017): Trend analysis for integrated regional climate change impact assessments in the Lusatian river catchments (north-eastern Germany). *Reg Environ Change* 17, 1751-1762. DOI:10.1007/s10113-017-1138-0.
- GRÜNEWALD, U. (2001): Water Resources Management in River Catchments Influenced by Lignite Mining. *Ecological Engineering* 17 (2-3), 143-152.
- GRÜNEWALD, U., M. KALTOFEN, S. KADEN & M. SCHRAMM (2001): Ländübergreifende Bewirtschaftung der Spree und der Schwarzen Elster. *KA Wasserwirtschaft Abwasser* 2, 205-213.
- HATTERMANN, F.F., T. VETTER, L. BREUER, B. SU, P. DAGGUPATI, C. DONNELLY, B. FEKETE, F. FLÖRKE, S.N. GOSLING, P. HOFFMANN, S. LIERSCH, Y. MASAKI, Y. MOTOVILOV, C. MÜLLER, L. SAMANIEGO, T. STACKE, Y. WADA, T. YANG & V. KRYSANOVA (2018): Sources of uncertainty in hydrological climate impact assessment: a cross-scale study. *Environmental Research Letters* 13 (1), 015006. DOI:10.1088/1748-9326/aa9938.
- HEMPEL, S., K. FRIELER, L. WARSZAWSKI, J. SCHEWE & F. PIONTEK (2013a): Bias corrected GCM input data for ISIMIP Fast Track. *GFZ Data Services*. DOI:10.5880/PIK.2016.001
- HEMPEL, S., K. FRIELER, L. WARSZAWSKI, J. SCHEWE & F. PIONTEK (2013b): A trend-preserving bias correction – the ISI-MIP approach. *Earth System Dynamics* 4 (2), 219-236. DOI:10.5194/esd-4-219-2013
- KALTOFEN, M., H. KOCH, M. SCHRAMM, U. GRÜNEWALD & S. KADEN (2004): Anwendung eines Langfristbewirtschaftungsmodells für multikriterielle Bewertungsverfahren – Szenarien des globalen Wandels im bergbaugeprägten Spreengebiet. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 48 (2), 60-70.
- KOCH, H. (2005): Wasserbewirtschaftungsstrategien in vom Bergbau überprägten Einzugsgebieten im Kontext des globalen Wandels und deren integrierte Bewertung. *Cottbus: Aktuelle Reihe der BTU Cottbus*, 1/2005 (Dissertation). 156 S.
- KOCH, H., F. WECHSUNG & U. GRÜNEWALD (2010): Analyse jüngerer Niedrigwasserabflüsse im tschechischen Elbeeinzugsgebiet. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 54 (3), 169-178.
- KOCH, H., S. LIERSCH, J.R.G. DE AZEVEDO, A.L.C. SILVA & F.F. HATTERMANN (2018): Assessment of observed and simulated low flow indices for a highly managed River basin. *Hydrology Research*. DOI:10.2166/nh.2018.168.
- KRYSANOVA, V., F.F. HATTERMANN, S. HUANG, C. HESSE, T. VETTER, S. LIERSCH, H. KOCH & Z.W. KUNDZEWICZ (2015): Modelling climate and land use change impacts with SWIM: lessons learnt from multiple applications. *Hydrological Sciences Journal* 60 (4), 606-635.
- LMBV (2021): *Wasserwirtschaftlicher Jahresbericht 2020*. Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH, Senftenberg, 164 S.
- ORLOWSKY, B., F.W. GERSTENGARBE & P.C. WERNER (2008): A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM. *Theoretical and Applied Climatology* 92 (3-4), 209-223.
- PFÜTZNER, B. & E. GLOS (1986): Das Einzugsgebietsmodell EGMOD für wasserwirtschaftliche Planung und Durchflußvorhersagen im Flachland der DDR. *Wasserwirtschaft – Wassertechnik* 7.

- POHLE, I., H. KOCH, K. ZIMMERMANN, A. GÄDEKE, T. CLAUS, W. UHLMANN, M. KALTOFEN, M. REDEZKY, M. SCHRAMM, F. MÜLLER, D. SCHOENHEINZ & U. GRÜNEWALD (2016): Modellensemble zur Abschätzung der Auswirkungen regionaler Entwicklungen auf Wassermenge und Wasserbeschaffenheit – Anwendung am Beispiel des Spreeinzugsgebiets. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 60 (3), 176-195.
- POHLE, I., A. GÄDEKE, S. SCHÜMBERG, C. HINZ & H. KOCH (2019): Management Influences on Stream-Flow Variability in the Past and Under Potential Climate Change in a Central European Mining Region. *Water Resources Management* 33 (15), 5191-5206. DOI: 10.1007/s11269-019-02432-3.
- ROERS, M. & F. WECHSUNG (2015): Neubewertung der Auswirkung des Klimawandels auf den Wasserhaushalt im Elbegebiet. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 59 (3), 109-119.
- SENATSV ERWALTUNG FÜR UMWELT, VERKEHR UND KLIMASCHUTZ (2021): Die Niedrigwasserjahre 2018, 2019 und 2020 – Analysen und Auswirkungen für das Land Berlin. 67 S.
- SCHOENHEINZ, D., U. GRÜNEWALD & H. KOCH (2011): Aspects of Integrated Water Resources Management in River Basins Influenced by Mining Activities in Lower Lusatia. *DIE ERDE* 142 (1-2), 163-186.
- UMWELTBUNDESAMT (2023): Wasserwirtschaftliche Folgen des Braunkohleausstiegs in der Lausitz (Abschlussbericht). UBA-TEXTE 90/2023. Dessau-Roßlau, 266 S.
- VETTER T., J. REINHARDT, M. FLÖRKE, A. VAN GRIENSVEN, F.F. HATTERMANN, S. HUANG, H. KOCH, I. PECHLIVANIDIS, G. S. PLÖTNER, O. SEIDOU & V. KRYSANOVA (2017): Evaluation of sources of uncertainty in projected hydrological changes under climate change in 12 large-scale river basins. *Climatic Change* 141 (3), 419-433. DOI:10.1007/s10584-016-1794-y.
- WARSAZAWSKI, L., K. FRIELER, V. HUBER, F. PIONTEK, O. SERDECZNY & J. SCHEWE (2014): The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISI-MIP): Project framework. *P. Natl. Acad. Sci. USA* 111, 3228-3232. DOI:10.1073/pnas.1312330110.
- WECHSUNG, F., V. HARTJE, S. KADEN, M. VENOHR, B. HANSJÜRGENS & P. GRÄFE (Hrsg.) (2013): Die Elbe im globalen Wandel - Eine integrative Betrachtung. Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft, Bd. 9, Weißensee Verlag Berlin, 630 S., ISBN 978-3-89998-213-8.
- WERNER, P.C. & F.W. GERSTENGARBE (1997): Proposal for the development of climate scenarios. *Climate Research* 8 (3), 171-182.