



# Lausitzer Neiße

## – Wasserressourcen in der Region –

LANDESAMT FÜR UMWELT,  
LANDWIRTSCHAFT  
UND GEOLOGIE



Freistaat  
**SACHSEN**



Institut Meteorologii i  
Gospodarki Wodnej  
Państwowy Instytut  
Badawczy



**Klimatische und hydrologische Modellierung, Analyse und Prognose**



Unia Europejska. Europejski Fundusz Rozwoju  
Regionalnego: Inwestujemy w waszą przyszłość /  
Europäische Union. Europäischer Fonds für  
regionale Entwicklung: Investition in Ihre Zukunft



# Lausitzer Neiße – Wasserressourcen in der Region

## 2. Broschüre im EU-Projekt NEYMO



**Klimatische und hydrologische  
Modellierung, Analyse und Prognose**

**Modelowanie klimatyczne  
i hydrologiczne, analiza i prognoza**

Leadpartner: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Projektpartner: Institut für Meteorologie und Wasserwirtschaft Wrocław –

National Research Institute



Europäische Union. Europäischer Fonds für  
regionale Entwicklung: Investition in Ihre Zukunft/  
Unia Europejska. Europejski Fundusz Rozwoju  
Regionalnego: Inwestujemy w waszą przyszłość



## Vorwort

Wasser ist die Lebensgrundlage Nummer eins aller Ökosysteme und Lebewesen. Süßwasser ist eine knappe Ressource und dient dem Menschen vor allem als Trink- und Brauchwasser. Es ist ein Gut, das geschützt und erhalten bleiben muss. Der Schutz und die nachhaltige Nutzung der Wasserressourcen werden in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Jedoch richtet sich das Wasser nicht nach von Menschen festgelegten Grenzen, wie politischen oder administrativen. Das Wasser fließt entsprechend den „natürlichen“ Gegebenheiten. Um dem Gewässerschutz auch an Grenzgewässern gerecht zu werden, wurden so genannte Grenzgewässerkommissionen ins Leben gerufen. Sie haben das Ziel, durch bilaterale Zusammenarbeit die Gewässer auch an Ländergrenzen nachhaltig zu schützen und zu verbessern.

Ein Grenzgewässer zwischen Deutschland und Polen ist die Lausitzer Neiße. Mit dem Grenzgewässervertrag vom 19.05.1992 wurde die seit vielen Jahren praktizierte enge Zusammenarbeit am Grenzgewässer Neiße auf eine neue gesetzliche Grundlage gestellt. Eine der wichtigsten Richtlinien in der Europäischen Union, um die Aktivitäten in grenzüberschreitenden Flusseinzugsgebieten zu regulieren, ist die europäische Wasserrahmenrichtlinie. Sie vereinheitlicht den rechtlichen Rahmen der Wasserpolitik innerhalb der EU und strebt an, die Wasserpolitik stärker auf eine nachhaltige und umweltverträgliche Wassernutzung zu lenken.

Bereits heute gibt es Regionen, die mit Wasserknappheit zu kämpfen haben und die Ressourcen effektiv nutzen müssen. Die Lausitzer Region gehört ebenfalls zu den eher niederschlagsärmeren Regionen im Vergleich zu den westlich gelegenen Gebieten. Zusätzlich beanspruchen die Wassernutzungen, der Bergbau und die Rekultivierung der Restlöcher den Wasserhaushalt der Lausitzer Region stark. Dies wird sich im Zuge des Klimawandels weiter verschärfen. Deswegen bedarf es in Zeiten des Klimawandels verstärkt Abstimmungen und Festlegungen bezüglich der Wasserressourcennutzung und den zu ergreifenden Maßnahmen zwischen den Nachbarländern.

Die zweite Broschüre im Projekt NEYMO thematisiert die Problematik des grenzübergreifenden Wasserressourcenmanagements im Zuge des Klimawandels. Zunächst wird der Wasserhaushalt unter den heute gegebenen meteorologischen und wasserwirtschaftlichen Bedingungen betrachtet. Im Anschluss wird eine mögliche Entwicklung des Wasserhaushalts unter Annahme veränderter Klimabedingungen, so genannter Klimaprojektionen, modelliert und dargestellt. Damit soll die veränderte hydrologische Situation im Gebiet der Lausitzer Neiße untersucht und besonders betroffene Gebiete bzw. Gewässer lokalisiert werden. Ableitend aus den Modellergebnissen werden Rückschlüsse auf die zukünftig möglichen Entwicklungen der vorhandenen und geplanten Wassernutzungen sowie Vereinbarkeit der verschiedenen Ansprüche der Hauptnutzer gezogen. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für die Ableitung von geeigneten Maßnahmen, um eine effektive und nachhaltige Wassernutzung zu gewährleisten.

Grundlage der Betrachtungen bilden die in der ersten Broschüre vorgestellten Klimadaten und -analysen.

---

Vorwort	3
1. Einführung	7
2. Charakterisierung der hydrologischen Gegebenheiten anhand von Messdaten	31
3. Wasserhaushaltsmodellierung	39
4. Entwicklung der Wasserressourcen – Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung	75
5. Bedeutung der veränderten Wasserverfügbarkeit für Wassernutzer	121
6. Zusammenfassung	129
Literatur	132
Abbildungsverzeichnis	134
Tabellenverzeichnis	137
Impressum	139

1

Einführung

## 1. Einführung

**D**ie Einführung dient dazu, dem Leser einen Überblick über das Hauptziel des Projektes, das Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße, die allgemeine Hydrologie und den Wasserhaushalt sowie die verwendeten Datengrundlagen zu geben.

### 1.1. Projektziel, Strategie

NEYMO ist das Akronym für den Langtitel des Projektes: Lausitzer Neiße/ Nysa Łużycka - Klimatische und hydrologische Modellierung, Analyse und Prognose. Das Projekt wird aus dem Europäischen Fonds für Regionalentwicklung (EFRE) finanziert. Die Umsetzung erfolgt im Rahmen des operationellen Ziel-3-Programms zur Förderung der grenzübergreifenden Zusammenarbeit zwischen dem Freistaat Sachsen und Polen in der Förderperiode 2007-2013.

Eine grenzübergreifende Untersuchung von naturwissenschaftlichen Problemstellungen gestaltet sich in den meisten Fällen sehr schwierig, da die notwendigen Daten nicht nutzbar oder vorhanden sind, das Fachwissen über die Region eingeschränkt ist und das Verständnis bestimmter Methoden und Vorgänge verschieden ist. Das Projekt hat sich zum Ziel gesetzt, auf Basis einer gemeinsam erarbeiteten länderübergreifenden Datenbasis den Wasserhaushalt einschließlich der Wassernutzungen im grenzüberschreitenden Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße unter heutigen und zukünftigen Klimabedingungen zu betrachten. Ausgehend von der simulierten Entwicklung der Wasserressourcen sollen Handlungs- und Anpassungsmaßnahmen für eine effektive und nachhaltige Nutzung der Wasserressourcen abgeleitet und den Akteuren der Region mit einem Maßnahmenkatalog an die Hand gegeben werden. Damit soll erreicht werden, dass das Bewusstsein der Wassernutzer für mögliche Veränderungen erhöht wird. Das Projekt trägt zu einer nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der Wasserressourcen bei.

Mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen werden verschiedene Abflusskomponenten berechnet, die u. a. für die Arbeit in folgenden Themengebieten verwendet werden können:

- Braunkohletagebau zum Zwecke der Planung zukünftiger Aktivitäten in Bezug auf die Wasserrückgewinnung
- die Erteilung wasserrechtlicher Genehmigungen in Gemeinden, Landkreisen
- Wasserkraftwerke zum Zwecke der Planung künftiger Investitionen
- Potenzielle Anleger, deren Aktivitäten die Verwendung von Oberflächenwasser erfordern.

In Abbildung 1 ist das gesamte Projektgebiet, das im Rahmen von NEYMO betrachtet wird, dargestellt. Daraus ist erkennbar, dass das Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße sich über die drei Länder Tschechische Republik, Polen und Deutschland erstreckt, wobei der größte Anteil des Einzugsgebietes auf polnischer Seite liegt.

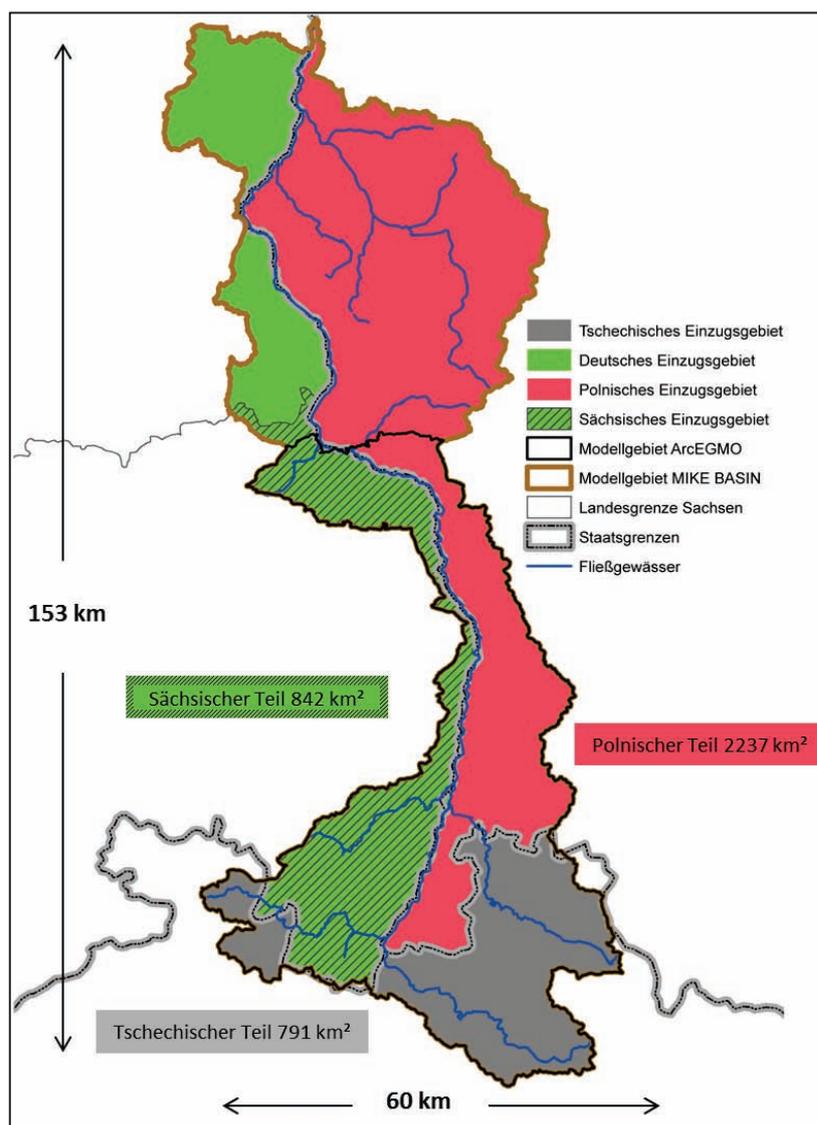


Abbildung 1: Gesamtes Projektgebiet

Aufgrund der Förderregion Sachsen-Polen ist eine gemeinsame Untersuchung des gesamten Einzugsgebietes der Lausitzer Neiße bis zur Mündung in die Oder nicht möglich. Auf deutscher Seite erstreckt sich das Einzugsgebiet bis nach Brandenburg und liegt damit nicht mehr in der Förderregion. Daher wurde eine gemeinsame Datenbasis für hydrologische und Geodaten für das Gebiet bis zur Sachsengrenze erstellt. In Abbildung 1 ist das gemeinsam betrachtete Gebiet schwarz umrandet. Die Ausführungen in der Broschüre beziehen sich im Wesentlichen auf den gemeinsam betrachteten Teil des Einzugsgebietes.

Für die Berechnung der Wasserbilanz werden von dem deutschen und polnischen Projektpartner jeweils verschiedene Modelle, die sich in ihrer Komplexität unterscheiden, verwendet. Die Modelle ergänzen sich gegenseitig und nutzen dabei ihre jeweiligen Stärken. So wird gewährleistet, dass der polnische Partner das gesamte Einzugsgebiet bis zur Odermündung betrachten kann. In Abbildung 1 sind die zwei Modellgebiete für das Modell ArcEGMO (Anwendung durch deutschen Partner) und MIKE NAM/BASIN (Anwendung durch polnischen Partner) erkennbar.

Abbildung 2 zeigt das Gesamteinzugsgebiet der Lausitzer Neiße bis zur Odermündung. Dargestellt sind die Höhenverteilung im Einzugsgebiet und die sächsischen sowie polnischen Pegel. Es ist eine deutliche Teilung des Einzugsgebietes in die Höhenstufen erkennbar. Der letzte Pegel vor der Mündung der Lausitzer Neiße in die Oder ist der Pegel Guben auf deutscher und Gubin auf polnischer Seite. Weitere Charakteristiken zum Einzugsgebiet befinden sich in den nachfolgenden Kapiteln.

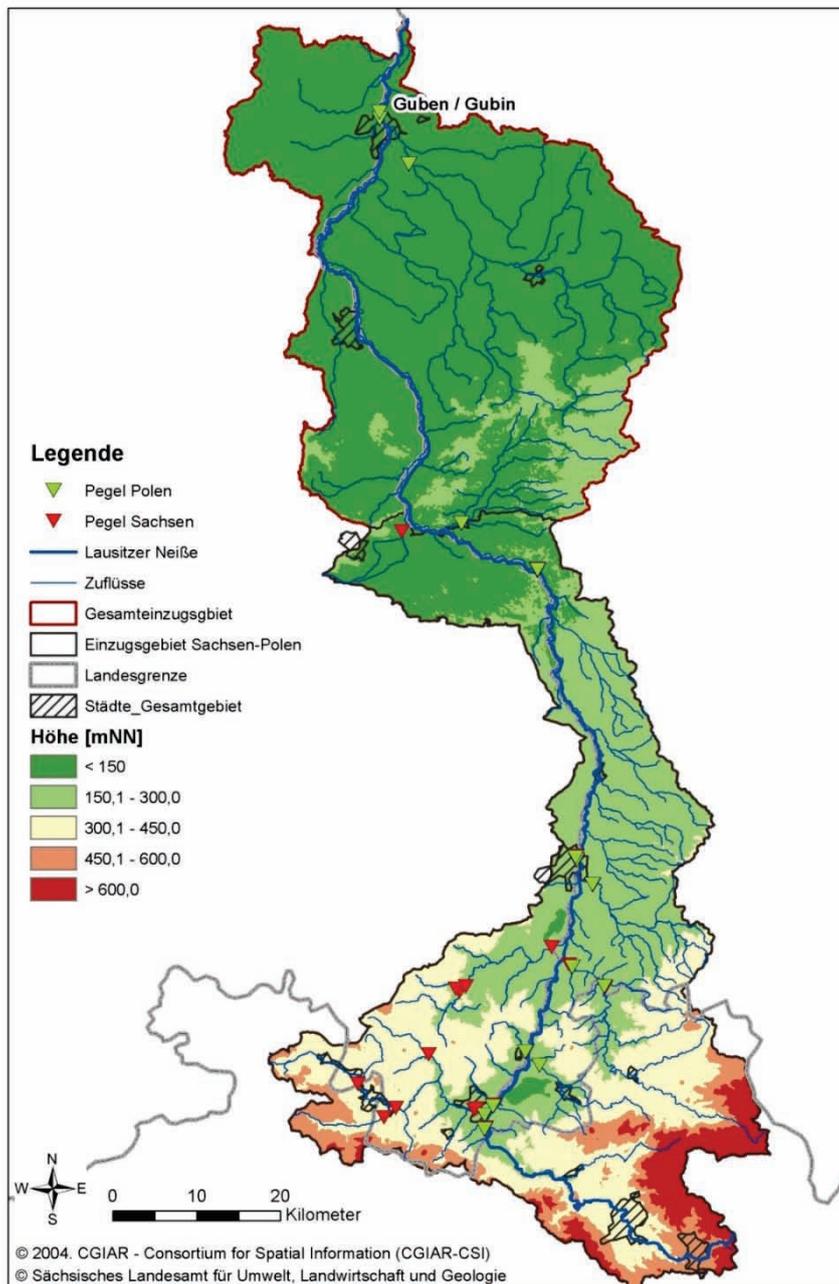


Abbildung 2: Höhen im Gesamteinzugsgebiet basierend auf SRTM 90 (Jarvis et al. 2008)

## 1.2. Der Wasserhaushalt und seine Komponenten

Zum allgemeinen Verständnis werden in diesem Kapitel zunächst die Begriffe Wasserhaushalt, -bilanz und Abfluss geklärt. Unter Wasserhaushalt wird das Zusammenwirken von Niederschlag, Verdunstung und Abfluss in einem abgeschlossenem System verstanden. Allerdings ist es nicht

ausreichend den Wasserhaushalt alleine zu betrachten. Ihm untergeordnet sind der Wasserkreislauf, der die Dynamik des Wassers, und die Wasserbilanz, die die quantitative Erfassung beschreibt. Abbildung 3 verdeutlicht das Zusammenspiel der drei Begriffe. Der Wasserhaushalt ist eng mit dem Energiehaushalt gekoppelt. Dabei verbindet die Verdunstung beide Haushalte miteinander.

Der Wasserkreislauf wird von der Sonnenstrahlung und der Schwerkraft angetrieben, die eine ständige Zustands- und Ortsveränderung des Wassers verursacht, d. h. den Transport und die Speicherung von Wasser. (Dyck 1983; 1978)

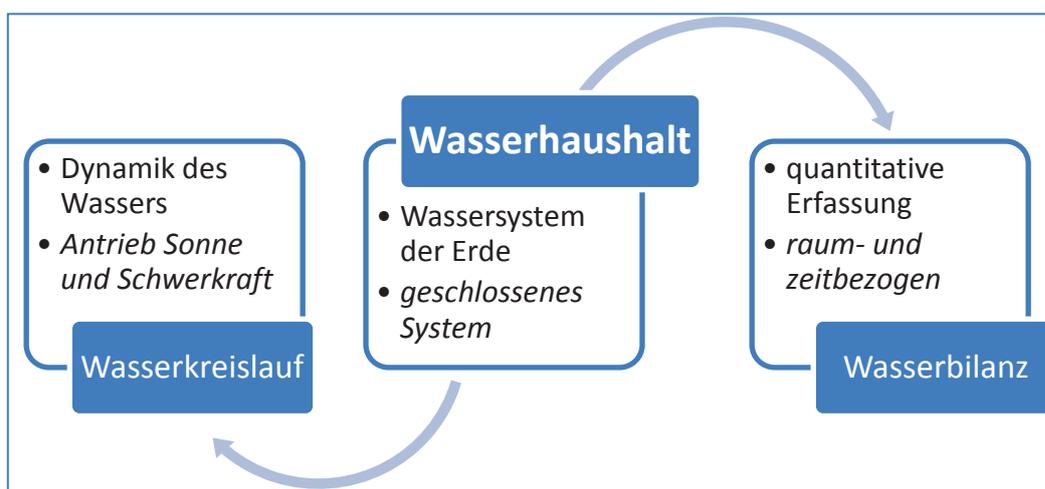


Abbildung 3: Wasserkreislauf, -haushalt und -bilanz

Die Wasserressourcen der Erde befinden sich in einem ständigen Kreislauf. Der Wasserkreislauf eines geschlossenen Einzugsgebiets kann allgemein mit einer Aufteilung des gefallenen Niederschlags auf die Komponenten Verdunstung, Abfluss und Speicheränderung beschrieben werden. Innerhalb des Einzugsgebietes kommt es zu einer vertikalen und lateralen Verteilung des Wassers, bei der die gesamte Niederschlagsmenge auf verschiedene Speicher aufgeteilt wird. Ein Teil des gefallenen Niederschlags wird auf der Vegetationsoberfläche bzw. in Mulden gespeichert und direkt wieder verdunstet. Ein anderer Teil des Niederschlags infiltriert in den Boden, wo das Wasser entweder über die Vegetation transpiert oder direkt aus der oberen Bodenschicht evaporiert wird. Das verbleibende Wasser durchläuft die verschiedenen Bodenschichten vertikal, wird der oberen Grundwasserzone zugeführt oder innerhalb der Bodenmatrix auf lateralen Fließwegen entlang des Gefälles zum Fließgewässer (Vorfluter) transportiert. Übersteigt die Niederschlagsintensität die Infiltrationskapazität des Bodens kann das Wasser nicht infiltrieren und fließt oberflächlich dem Vorfluter zu. Abbildung 4 bildet die stattfindenden Prozesse in einem geschlossenen Einzugsgebiet vom Niederschlag bis zum Abfluss und Erreichen des Gebietsauslasses ab.

Die horizontale Verteilung des Wassers im Einzugsgebiet beginnt bereits auf der Landoberfläche. Sowohl oberirdisch in Bächen und Flüssen als auch innerhalb der einzelnen Schichten der Bodenmatrix und in der Grundwasserzone wird Wasser entsprechend des vorherrschenden Gefälles mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten zum Gebietsauslass transportiert. „Der Abfluss aus einem Einzugsgebiet ist das Ergebnis der räumlichen und zeitlichen Transformation des Niederschlags durch die Hydrosphäre (Atmosphäre, Biosphäre, Pedosphäre und Lithosphäre [Luft-, Pflanzen-, Boden- und Gesteinsschicht]) des Gebietes. Während der gesamte Volumenfluss, der das Einzugsgebiet pro

Zeiteinheit ober- oder unterirdisch verlässt, als Abfluss bezeichnet wird, ist der Durchfluss der Volumenfluss durch einen Oberflächengewässerquerschnitt pro Zeiteinheit.“ (BfG 2014)

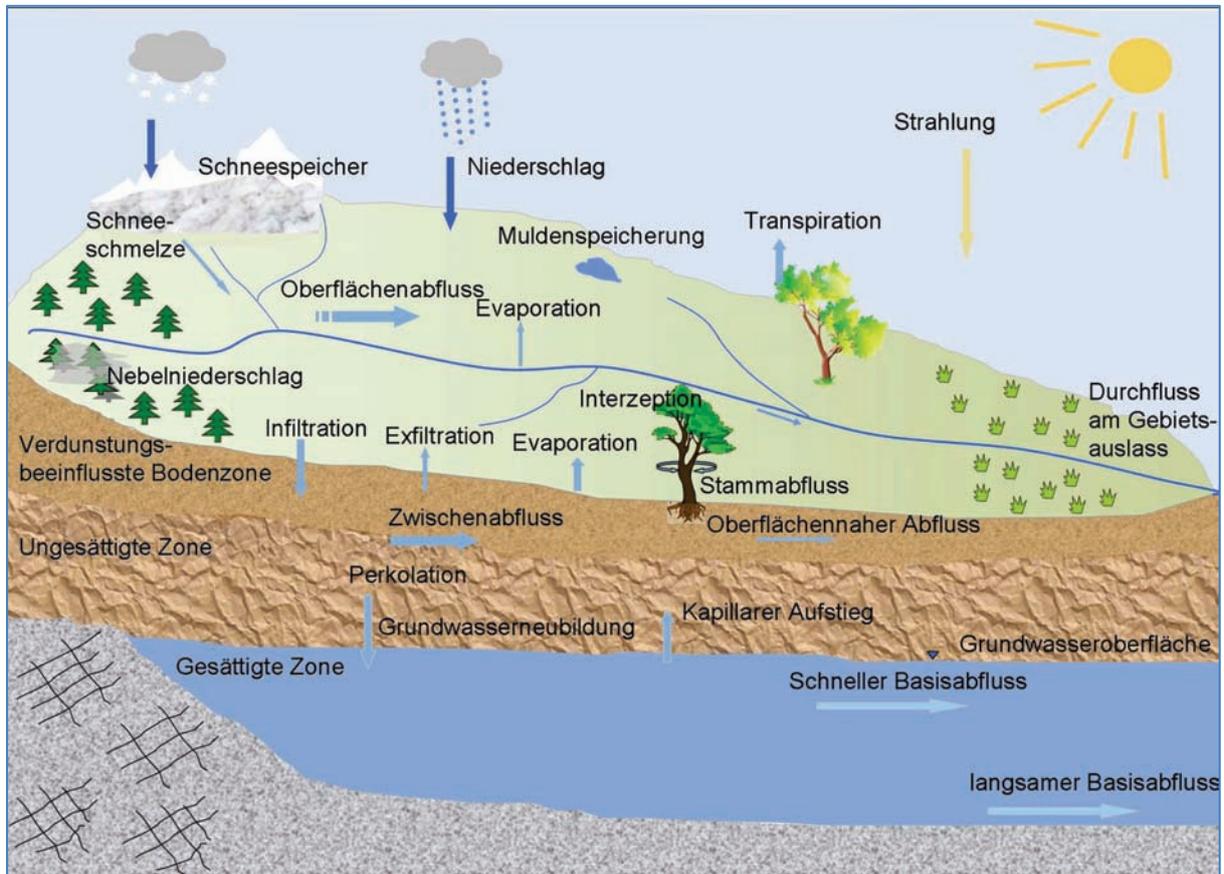


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Wasserkreislaufs (LfULG, 2013)

Die mengenmäßige Beschreibung des Wasserkreislaufs führt unter Berücksichtigung des Massenerhalts zur Wasserbilanz bzw. Wasserhaushaltsgleichung. Sie gibt das Verhältnis zwischen den zeit- und raumbezogenen Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag  $P$ , Verdunstung  $ETR$ , Abfluss  $R$  und Speicheränderung  $dS$  wieder.

$$ETR + R + dS = P$$

Formel 1: Allgemeine Wasserbilanz

Werden langjährige Mittelwerte betrachtet, kann die Speicheränderung von Wasser als vernachlässigbar klein angenommen werden und der Term vereinfacht sich zu:

$$ETR + R = P$$

Formel 2: Vereinfachte Wasserbilanz

Die Beschreibung des Wasserhaushalts in einem System ist sehr komplex und meist sind nicht alle Komponenten bzw. Prozesse im Detail bekannt. Die mengenmäßige Beschreibung der Wasserhaushaltskomponenten erfolgt üblicherweise mit Wasserhaushaltsmodellen.

Der Wasserhaushalt steht unter strenger staatlicher Kontrolle und jegliche Benutzung und Verbrauch von Wasser ohne gesetzlicher oder behördlicher Erlaubnis ist nicht gestattet. Um Gewässer zu sichern und möglichst schonend zu bewirtschaften, ist ein fundiertes Wissen über den Wasserhaushalt notwendig.

Die dargestellten Prozesse beziehen sich auf einen natürlichen Kreislauf, der nicht anthropogen gestört wird. Im Gebiet der Lausitzer Neiße existieren zahlreiche Wassernutzungen, die Wasser entnehmen, ein- oder überleiten. Damit werden die natürlichen Prozesse verändert und die Wasserbilanz ist u. U. nicht mehr ausgeglichen. Deswegen müssen bei allen wasserhaushaltlichen Betrachtungen relevante Wassernutzungen berücksichtigt werden.

### 1.3. Das Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße

Der Hauptfluss des Einzugsgebietes, die Lausitzer Neiße, ist ein 252 km langer linksseitiger Nebenfluss der Oder. Die Lausitzer Neiße entspringt im tschechischen Isergebirge in einer Höhe von 655 m ü. NN und bildet auf einer Länge von 125 km die Grenze zwischen Sachsen und Polen. Ihren Ursprung hat die Lausitzer Neiße mit den Quellflüssen Weiße Neiße, Schwarze Neiße, Gablonzer Neiße, Wiesentaler Neiße im tschechischen Isergebirge. Die wichtigsten polnischen Zuflüsse sind Miedzianka, Witka, Czerwona Woda, Jędrzychowicki Potok, Bielawka, Żółta Woda, Skroda, Wodra und Lubsza. Zu den deutschen Zuflüssen gehören die Flüsse Mandau, Pließnitz, Floßgraben, Föhrenfließ, Malxe, Schwarzes Fließ und Buderoser Mühlenfließ sowie einige weitere kleine Zuflüsse.

Das gesamte Einzugsgebiet bis zur Mündung in die Oder weist eine Größe von ca. 4400 km<sup>2</sup> auf, wovon 371 km<sup>2</sup> (9 %) auf die Tschechische Republik, 1470 km<sup>2</sup> (33 %) auf Deutschland und 2590 km<sup>2</sup> (58 %) auf Polen entfallen. Sachsen hat einen Anteil von 840 km<sup>2</sup>.

Das Einzugsgebiet weist große Höhenunterschiede auf. In den Kammlagen sind Höhen von über 1000 m zu finden, während im Tiefland Höhen von ca. 100 m ü. NN auftreten. Das Gebiet lässt sich demzufolge in die vier Höhenbereiche Kammlage, Berg-, Hügel- und Tiefland einteilen. Aus den verschiedenen Höhen und Reliefs resultieren unterschiedliche Abflussverhalten. Während im Gebirge der größte Teil oberflächlich abfließt, versickert im Tiefland der überwiegende Teil und es bildet sich nur wenig Oberflächenabfluss.

Im Einzugsgebiet gibt es zahlreiche Pegel, an denen der Wasserstand und der Durchfluss gemessen werden. Bis zum Pegel Guben/ Gubin stehen Durchflussdaten von 11 polnischen und 15 sächsischen Pegeln zur Verfügung. Wie aus Abbildung 5 erkennbar, liegt ein Großteil der Pegel an der Lausitzer Neiße. Die Pegel sind sehr heterogen verteilt. Die meisten Pegel konzentrieren sich im Berg- und Hügelland, vorwiegend in Sachsen. In den Kammlagen gibt es keine Pegel, im Tiefland nur vereinzelt.

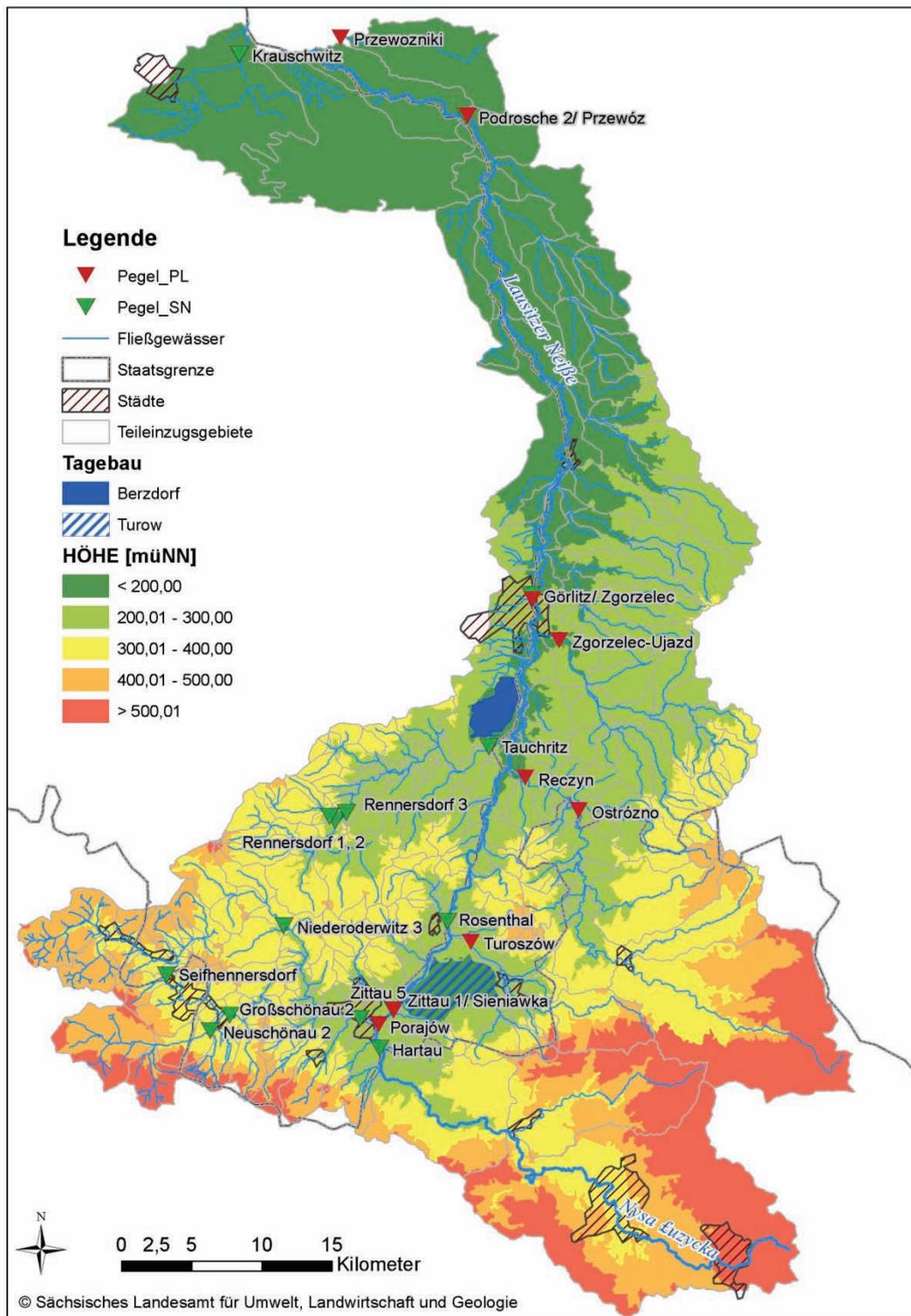


Abbildung 5: Höhen und Pegel im Einzugsgebiet

Das Einzugsgebiet gehört den vier Naturräumen Zittauer Gebirge, Östliche Oberlausitz, Oberlausitzer Heide- und Teichlandschaft und Muskauer Heide, die sich von Süden nach Norden erstrecken, an. Landschaftlich ist das Gebiet zu ca. 90 % durch Land- und Forstwirtschaft geprägt (Details siehe Kapitel 1.4). Das Gebiet ist stark anthropogen durch aktive Tagebaue und zahlreiche Wasserkraftanlagen und Wassernutzungen, wie Trinkwassergewinnung, Industrie, etc. beeinflusst.

### 1.4. Datengrundlagen und Datenaufbereitung

In diesem Abschnitt werden alle relevanten Daten, die zur Darstellung des Einzugsgebietes und somit zur Modellierung des Wasserhaushaltes notwendig sind, beschrieben. Es wird nur Bezug auf die Datengrundlagen genommen, die Eingang ins Modell fanden. Die Auswahl der Datengrundlagen erfolgte nach den Kriterien grenzübergreifende Verfügbarkeit und Auflösung. Ziel war es, eine gemeinsame grenzübergreifende Datenbasis zu erstellen, die die Grundlage für Modelle bildet.

#### Boden

Die Bodeninformationen stellen die wichtigste und zugleich herausforderndste Datengrundlage für Wasserhaushaltsmodelle dar. Für eine möglichst detaillierte Abbildung der Prozesse in der Bodenzone müssen den Modellen möglichst hochaufgelöste Bodeninformationen zugeführt werden. Von der Bodenart bis hin zu den grundlegenden Bodenparametern, wie nutzbare Feldkapazität, Leitfähigkeit, Gesamtporenvolumen und Horizontabfolge, sollten die Informationen grenzübergreifend in ähnlicher Auflösung und Informationsdichte vorliegen. Jedoch ist die grenzüberschreitende Verfügbarkeit in hoher Auflösung nicht gegeben. Es existiert ein europäischer Bodenatlas, der die Bodentypen für den Bereich Lausitzer Neiße im Maßstab 1:1.750.000 darstellt. Dieser Maßstab ist für eine Wasserhaushaltsbetrachtung viel zu grob. Zudem ist die Angabe der Bodentypen für das Wasserhaushaltsmodell nicht ausreichend. Es werden Angaben zur Bodenart benötigt. Da die Informationen zu den Bodenarten nicht grenzüberschreitend vorliegen, muss auf regionale Kartenwerke zurückgegriffen werden. Für Sachsen existiert eine amtliche Bodenkarte im Maßstab 1:50.000 (BK 50), die Angaben über die Bodenprofile enthält und im Jahr 2012 neu aufgearbeitet wurde. Dieses Kartenwerk ist ausreichend hoch aufgelöst und enthält alle notwendigen Informationen zu den Bodenparametern.

Für den polnischen Teil des Einzugsgebietes liegt eine landwirtschaftliche Bodenschätzung vor, die Aussagen über die Nutzungseignung der landwirtschaftlichen Böden zulässt. Das Kartenwerk basiert auf Basisdaten im Maßstab 1:5000, enthält aber keine Bodeninformationen von forstwirtschaftlich genutzten Böden. Die Bodenkarte weist u. a. die Bodenart mit der jeweiligen Horizontabfolge der landwirtschaftlich genutzten Flächen aus. Das bedeutet, für den polnischen Teil des Einzugsgebietes liegen nur Angaben zur Bodenart der landwirtschaftlich, nicht jedoch der forstwirtschaftlich genutzten Flächen vor. Diese Lücken müssen durch andere Bodendaten abgedeckt werden.

Der südliche Teil des Einzugsgebietes, in dem viele Quellflüsse entspringen, befindet sich in der Tschechischen Republik, für den ebenfalls Bodendaten notwendig sind. Aufgrund mangelnder digitaler und hoch aufgelöster Bodendaten in der Tschechischen Republik als auch für die forstwirtschaftlich genutzten Flächen in Polen wird auf den europäischen Bodenatlas zurückgegriffen. Zusätzlich zu dem Problem, dass der Bodenatlas nur die Bodentypen ausweist und gering aufgelöst ist, kommt erschwerend hinzu, dass die Bodenklassifikation nach einem anderen Verfahren als in Sachsen erfolgte. Die Bodenklassifikation fasst die Böden entsprechend ihrer Eigenschaften ohne Berücksichtigung ihrer Genese zusammen. Das weltweit bekannte und gültige

Bodenklassifikationssystem World Reference Base for Soil Resources der FAO (WRB 2014) dient dem grenzübergreifenden Austausch von Informationen über Böden und deren Eigenschaften (↗ Box 1). Die BK 50 Sachsen basiert allerdings auf dem deutschen Klassifikationssystem nach der bodenkundlichen Kartieranleitung von 2005 (KA 5) (↗ Box 2). Um dennoch eine einheitliche Kartengrundlage mit Bodeninformationen für das gesamte Einzugsgebiet zu erhalten, wurden die Bodentypen des europäischen Bodenatlasses entsprechend der KA 5 den deutschen Bodentypen zugeordnet. Anschließend wurden die Daten der Bodenprofile der BK 50 auf die entsprechenden Bodentypen übertragen. Eine eindeutige Übersetzung in die deutsche Systematik war mit den vorliegenden Informationen nicht möglich. In den polnischen Teilgebieten für die Angaben aus der landwirtschaftlichen Bodenkarte vorlagen, wurden diese Daten und nicht die des europäischen Bodenatlasses genutzt. Dadurch entsteht eine grenzüberschreitende Bodenkarte, die die Bodenprofile der BK 50 enthält, aber auf unterschiedlichen Ausgangskartenwerken (vgl. Abbildung 6) beruht. Dieses Vorgehen ist mit einigen Unsicherheiten (z. B. hohe Auflösung, Zuordnung Bodentypen der WRB zu BK 50, Übertragung Bodeneigenschaften aus KA5) verbunden, war aber die einzige Möglichkeit ausreichend Bodeninformationen für die tschechischen und polnischen Teilgebiete zu erhalten. In der Abbildung 7 ist die grenzüberschreitende Bodenkarte basierend auf den drei Kartengrundlagen zusammengestellt. Darin sind deutlich die Unterschiede im Detailgrad der Bodenangaben zu erkennen. Basierend auf den Bodenprofilen können die notwendigen Modellerfordernisse zur Bodenart, Horizonte, Leitfähigkeit, nutzbare Feldkapazität, etc. abgeleitet werden.

#### Box 1: World Reference Base for Soil Resources

Die weltweite Referenzbasis für Bodenressourcen (WRB) ist ein weltweit gültiges Bodenklassifikationssystem, um einheitliche Informationen über Böden und deren Eigenschaften regional und national vergleichen und austauschen zu können. Sie wurde in Zusammenarbeit vieler Nationen erarbeitet und von der Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) 1988 veröffentlicht. Die WRB definiert die Böden über einzelne diagnostische Horizonte und Einzelmerkmale, z. B. Luvisol: Boden mit argic Horizont. Sie ist in zwei Ebenen aufgeteilt: Die erste Ebene bilden die 32 Referenzbodengruppen (RSG) und die zweite Ebene die sog. Qualifier (Merkmale). Der angesprochene Boden wird nach Vorhandensein und Tiefenlage diagnostischer Horizonte, Eigenschaften und Materialien charakterisiert und entsprechend dem Bestimmungsschlüssel der ersten zutreffenden RSG zugeordnet. In der zweiten Ebene werden die Bodengruppen nach ihren Merkmalen weiter differenziert.

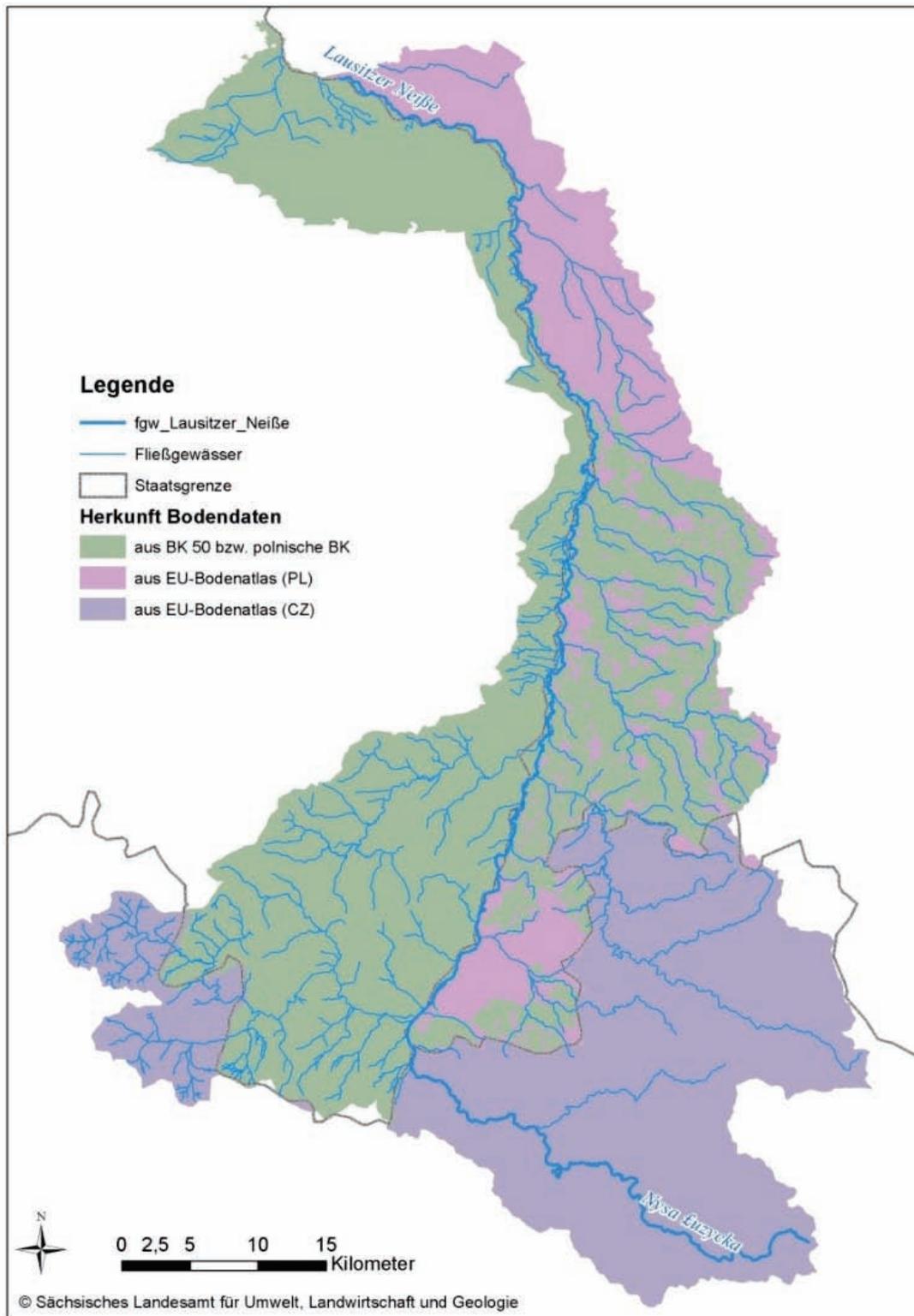


Abbildung 6: Herkunft Bodendaten

**Box 2: Bodenkundliche Kartieranleitung**

Die Bodenkundliche Kartieranleitung (KA) ist die deutsche gültige Grundlage zur Bodenbeschreibung. Sie umfasst neben der Anleitung der Bodenkartierung wesentliche Merkmale zur Bodenklassifikation und umfangreiche Kennwerttabellen.

Die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe gibt die KA in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten der Bundesländer der Bundesrepublik Deutschland heraus. Derzeit ist die 5. Auflage auf dem Markt (KA5).

Nach dem deutschen System werden die Böden über komplette Horizontfolgen definiert, z. B. Parabraunerde: Ah/Al/Bt/Cv.

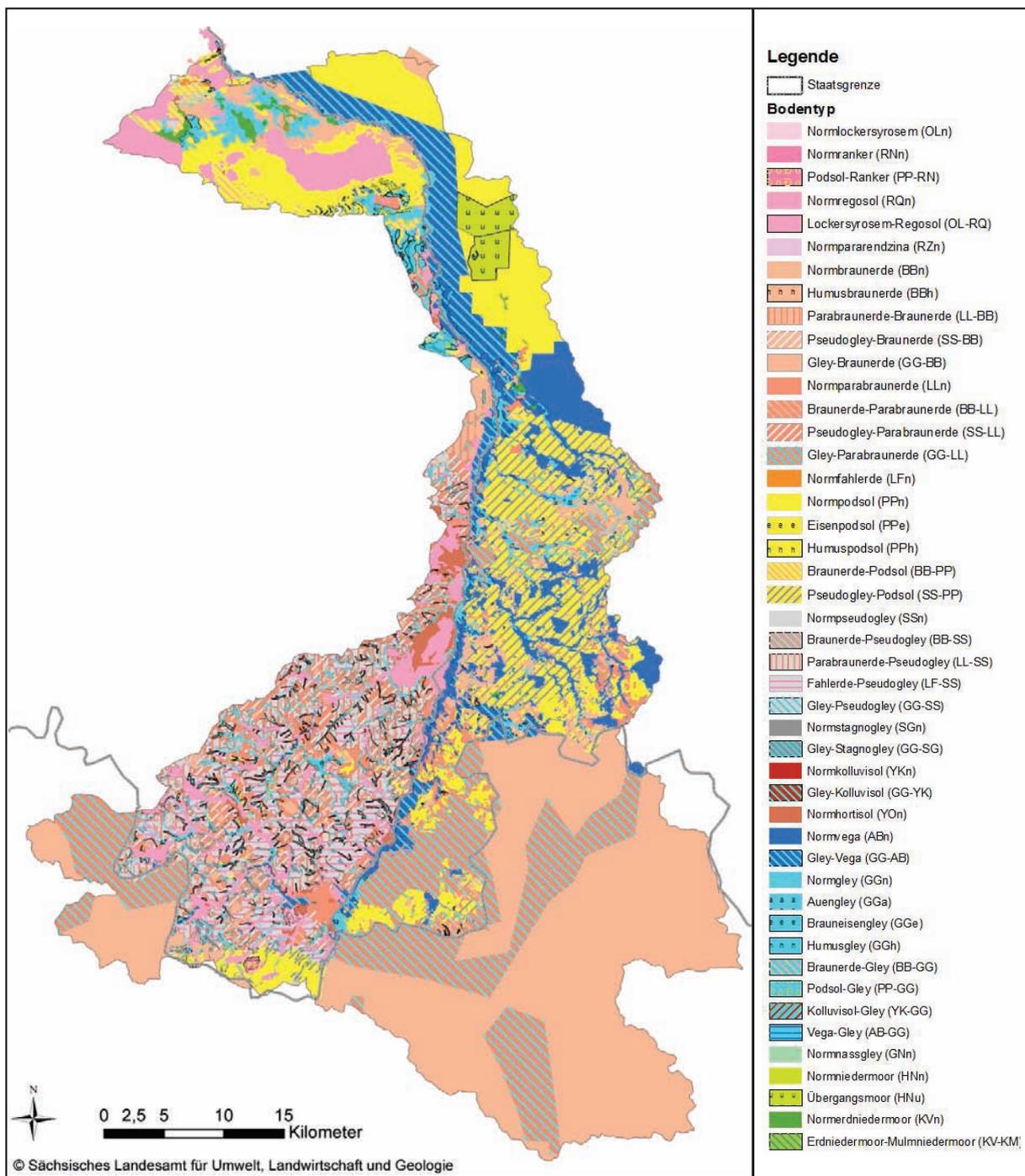


Abbildung 7: Grenzüberschreitende Bodenkarte

## Landnutzung

Eine korrekte Abbildung der Landnutzung im Modell ist insbesondere für die Berechnung der Verdunstung als wesentliches Glied der Wasserbilanz und die Abflussbildung relevant. Die CORINE Land Cover (CLC2000) liefert einheitliche und vergleichbare Daten der Bodenbedeckung für Europa basierend auf Satellitendaten. Damit steht die CLC für das Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße als grenzübergreifende Kartengrundlage im Maßstab 1:100.000 zur Verfügung. Abbildung 8 zeigt die Landnutzungen im Einzugsgebiet. Überwiegend ist das Gebiet durch Ackerland und Wald geprägt. Während die Mittelgebirgsregionen vorwiegend durch Ackerflächen geprägt sind, werden das Tiefland und die Kammlagen durch Nadelwälder dominiert. Laub- und Mischwälder treten vereinzelt im gesamten Einzugsgebiet auf. In den Ausläufern der Kammlagen, insbesondere im östlichen Teil des Einzugsgebietes, sind Wiesen und Weiden charakteristisch. Für die einzelnen Nutzungsklassen liegen typische beschreibende Parameter vor, die im Modell vorgegeben werden müssen.

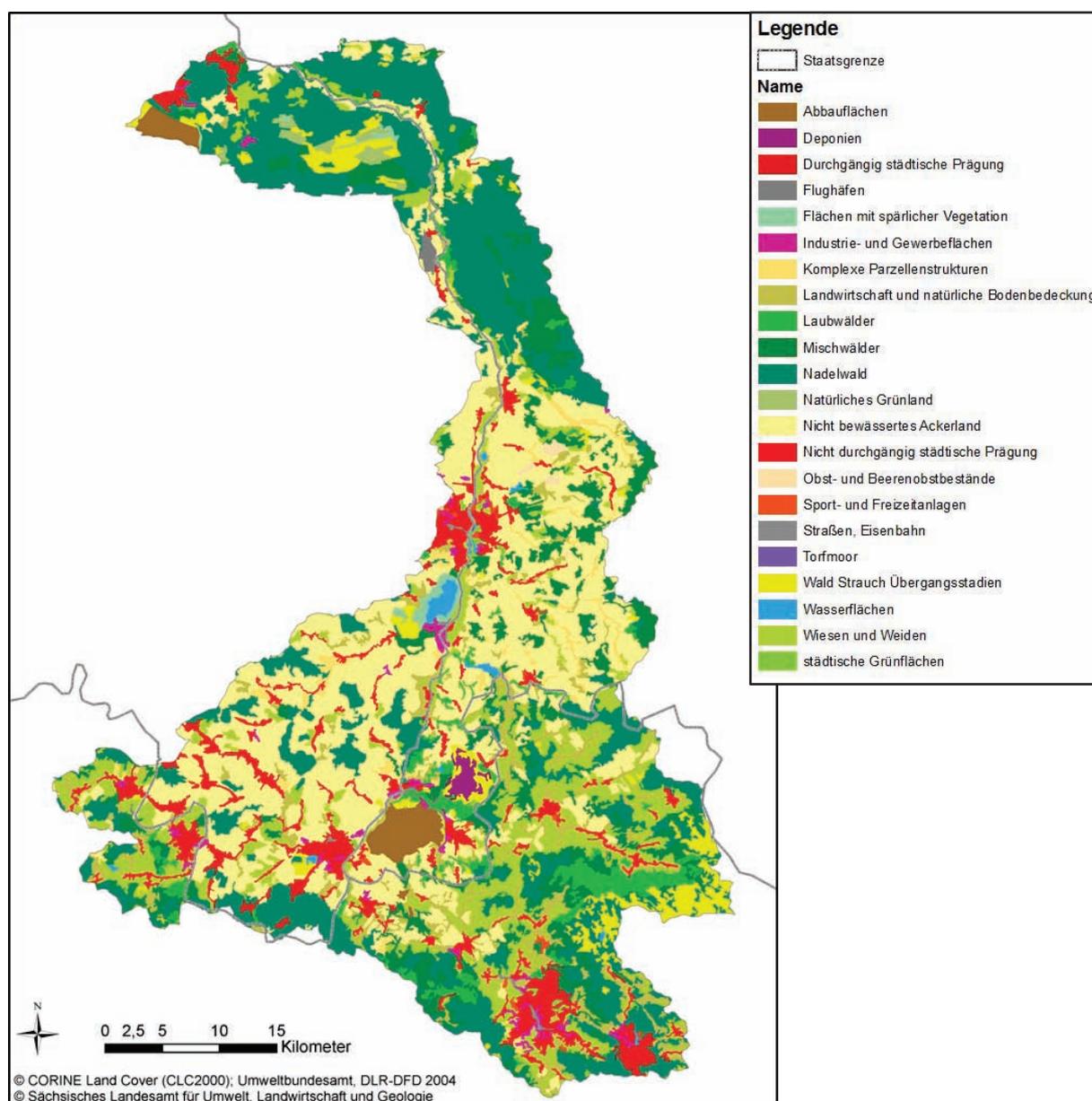


Abbildung 8: Landnutzung nach CORINE Land Cover (CLC2000) (Umweltbundesamt, DLR-DFD 2004)

### Hydrogeologie

Die Geologie und Hydrogeologie des Gebietes ist sehr komplex. Insbesondere die Hydrogeologie beeinflusst die Abflussprozesse im Untergrund maßgeblich. Für die modelltechnische Abbildung des Wasserhaushaltes müssen grundwassernahe und -ferne Standorte bekannt sein, da diese z. B. den Prozess des kapillaren Aufstiegs bestimmen. Um grundwassernahe und -ferne Standorte zu bestimmen, werden Informationen zum Grundwasserflurabstand benötigt. Da jedoch keine grenzübergreifende Karte mit den notwendigen Informationen zum Grundwasserflurabstand vorliegt, wird auf die regionalen Karten in Sachsen und Polen zurückgegriffen. Entsprechend der kartierten Flurabstände werden grundwassernahe und -ferne Standorte ausgewiesen. Für den tschechischen Teil des Einzugsgebietes wird anhand des DGM und des Fließgewässernetzes abgeschätzt, welche Flächen grundwassernahe Standorte sind.

### Hydrologische Daten

Unter den hydrologischen Daten sind sowohl Messdaten der Durchflüsse an den Pegeln, Bewirtschaftungsdaten wie Entnahme- und Einleitmengen des Oberflächen- und Grundwassers als auch Grundwasserstände an den Grundwassermessstellen zu verstehen. Da das Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße stark durch Tagebaue und Wasserbewirtschaftungen beeinflusst ist, werden für eine möglichst genaue Modellierung des Wasserhaushalts zahlreiche Informationen und Daten zur Gewässerbewirtschaftung benötigt, die ins Modell eingebunden werden müssen. Die Durchflusswerte an den Pegeln werden für die Beurteilung der Güte des Modellierungsergebnisses herangezogen.

In Tabelle 1 sind die Hauptwerte mittlerer Abfluss, mittlerer niedrigster und höchster Abfluss für die deutschen und polnischen Pegel aufgeführt. Es ist gut erkennbar, dass die mittleren Abflüsse mit zunehmender Gebietsgröße, wie zu erwarten, zunehmen. Teilweise spiegeln die Durchflusswerte nicht die natürlichen Verhältnisse wider. Die Pegelaufzeichnungen sind durch die starke anthropogene Beeinflussung verbunden mit Wasserentnahmen bzw. -einleitungen im Gebiet beeinflusst. Dies muss vor allem bei der Modellkalibrierung beachtet werden.

Die Abbildung 9 zeigt schematisch die Lage der Pegel im gesamten Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße bis zum Pegel Guben 2/Gubin. Auf polnischer Seite befinden sich 11 Pegel und auf deutscher Seite 20 Pegel im Einzugsgebiet. Fünf der deutschen Pegel liegen auf brandenburgischem Territorium. Die brandenburgischen Pegel gehen nur in das polnische Model ein, da sich das gemeinsame Projektgebiet aus den in Kapitel 1.1 genannten Gründen nur auf Sachsen-Polen bezieht. Einige Pegel an der Lausitzer Neiße messen auf deutscher und polnischer Seite den Durchfluss an nahezu demselben Flusskilometer. Die Messwerte werden in der Grenzgewässerkommission abgestimmt. Die Reihenlänge der Durchflussdaten ist für die Pegel unterschiedlich. Die meisten liegen für den zu betrachtenden Zeitraum 1971 bis 2010 in täglicher Auflösung vor. Die Zeitreihen wurden auf Homogenität und Konsistenz geprüft sowie die Lücken durch Regression geschlossen (Kapitel 2.2).

In Abbildung 10 sind die Pegel und die dazugehörigen Pegelinzugsgebiete im gemeinsam zu betrachtenden Projektgebiet dargestellt. Die abgebildeten Einzugsgebiete geben die Struktur für die Ergebnisausgabe der Wasserhaushaltsmodellierung vor.

Tabelle 1: Hauptwerte der Pegel

Pegel	Gewässer	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Zeitreihe von bis	MQ [m <sup>3</sup> /s]	MNQ [m <sup>3</sup> /s]	MHQ [m <sup>3</sup> /s]
Hartau	Lausitzer Neiße	378	1958-2010	5,99	1,68	68,7
Porajów	Lausitzer Neiße	388	1971-2010	6,06	1,28	71,0
Neuschönau 2	Lausur	47	1986-2005	0,7	0,04	8,2
Großschönau 2	Mandau	162	1964-2010	2,14	0,47	44,6
Seifhennersdorf	Mandau	75	1968-2010	0,94	0,10	20,2
Zittau 5	Mandau	296	1913-2010	3,06	0,44	73,8
Zittau 1	Lausitzer Neiße	694	1956-2010	9,03	2,31	128
Sieniawka	Lausitzer Neiße	693	1956-2010	8,94	2,06	137
Niederoderwitz 3	Landwasser	29	1987-2010	0,27	0,05	12,2
Turoszow	Miedzianka	72	1971-2010	0,83	0,13	10,5
Rosenthal	Lausitzer Neiße	879	1958-2010	10,6	3,08	123
Rennersdorf 1	Petersbach	63	1961-2010	0,44	0,09	15,5
Rennersdorf 2	Berthelsdorfer W.	13	1961-2010	0,13	0,04	4,7
Rennersdorf 3	Pließnitz	78	1967-2010	0,55	0,18	11,0
Ostroszno	Witka	266	1966-2010	4,26	0,67	72,6
Reczyn	Witka	318	1971-2010	3,52	0,33	98,9
Tauchritz	Pließnitz	63	1965-2010	1,12	0,35	29,4
Zgorzelec Ujazd	Czerwona Woda	127	1961-2010	0,79	0,17	12,8
Görlitz	Lausitzer Neiße	1633	1913-2010	17,2	4,92	181
Zgorzelec	Lausitzer Neiße	1630	1913-2010	15,5	3,47	180
Podrosche 2	Lausitzer Neiße	2074	1985-2010	17,4	5,27	154
Przewóz	Lausitzer Neiße	2108	1985-2010	19,3	5,43	185
Krauschwitz	Legnitzka	73	1980-2010	0,23	0,09	0,79
Gubin	Lausitzer Neiße	4080	1971-2010	28,8	9,27	179

Insgesamt ist das Einzugsgebiet durch relative hohe Verdunstungen, geringe Oberflächenabflüsse, hohe Sickerwassermengen und mittlere Grundwasserneubildungsraten charakterisiert.

Durch die aktiven Tagebaue in Turow, Reichwalde und Nochten wird der Grundwasserspiegel künstlich abgesenkt, um die Gruben trocken zu halten. Das abgepumpte Grundwasser wird direkt in die Oberflächengewässer inner- oder außerhalb des Einzugsgebietes eingeleitet. Die inaktiven Tagebaue wie Berzdorfer und Olbersdorfer See beeinflussten den Wasserhaushalt indem sie mit Oberflächenwasser geflutet wurden und der Grundwasserspiegel wieder anstieg. Die verschiedenen Wassernutzungen bewirken ebenfalls, dass Wasser aus den Oberflächengewässern und aus dem Grundwasser entnommen und teilweise nicht mehr zurückgeführt wird. Der Betrieb von Wasserkraftanlagen verändert lediglich den Flussverlauf auf wenigen Metern. Allerdings müssen festgelegte Mindestwasserabflüsse an den Anlagen eingehalten werden, die ebenfalls ins Modell implementiert werden. Alle genannten Bewirtschaftungen beeinflussen den Gesamtwasserhaushalt und müssen im Rahmen einer hydrologischen Modellierung Berücksichtigung finden. Im Einzugsgebiet gibt es eine große Anzahl an Wassernutzungen, die jedoch nicht alle im Modell berücksichtigt werden können. Für die kleinen und privaten Nutzungen sind die Bewirtschaftungsmengen meistens nicht bekannt, zudem verändern sie den Wasserhaushalt kaum. Um die Anzahl zu beschränken, wurden alle Wassernutzungen mit größer 10 l/s Entnahme oder Einleitung ins Modell integriert. In Abbildung 11 sind die durch Bewirtschaftung von Oberflächengewässern beeinflussten Fließgewässerabschnitte sowie Grundwasserentnahmestellen abgebildet, die im Modell berücksichtigt wurden. Die Bewirtschaftung der Fließgewässer konzentriert

sich auf polnischer Seite, während die Grundwasserbewirtschaftung auf sächsischer Seite überwiegt. Die Abbildung lässt keinen Schluss auf Entnahmen oder Einleitung zu, da für das Modell die Bewirtschaftung für einen Standort zusammengefasst wurde. Für die an der Lausitzer Neiße befindlichen Wasserkraftanlagen dienen die bekannten Mindestwasserabflüsse als Vorgaben im Modell.

Zusätzlich stehen Hauptwerte ab 1971 bzw. 1986 für 96 deutsche Grundwassermessstellen zur Verfügung. Davon konzentrieren sich 63 Messstellen im Raum Zittau, die im Rahmen des Tagebaumessnetzes betrieben werden. Auf polnischer Seite befinden sich 109 Messstellen. Der Grundwasserflurabstand im Einzugsgebiet ist nach Hydrogeologischer Karte 1:50.000 mit 5 bis 10 m unter Geländeoberkante angegeben.

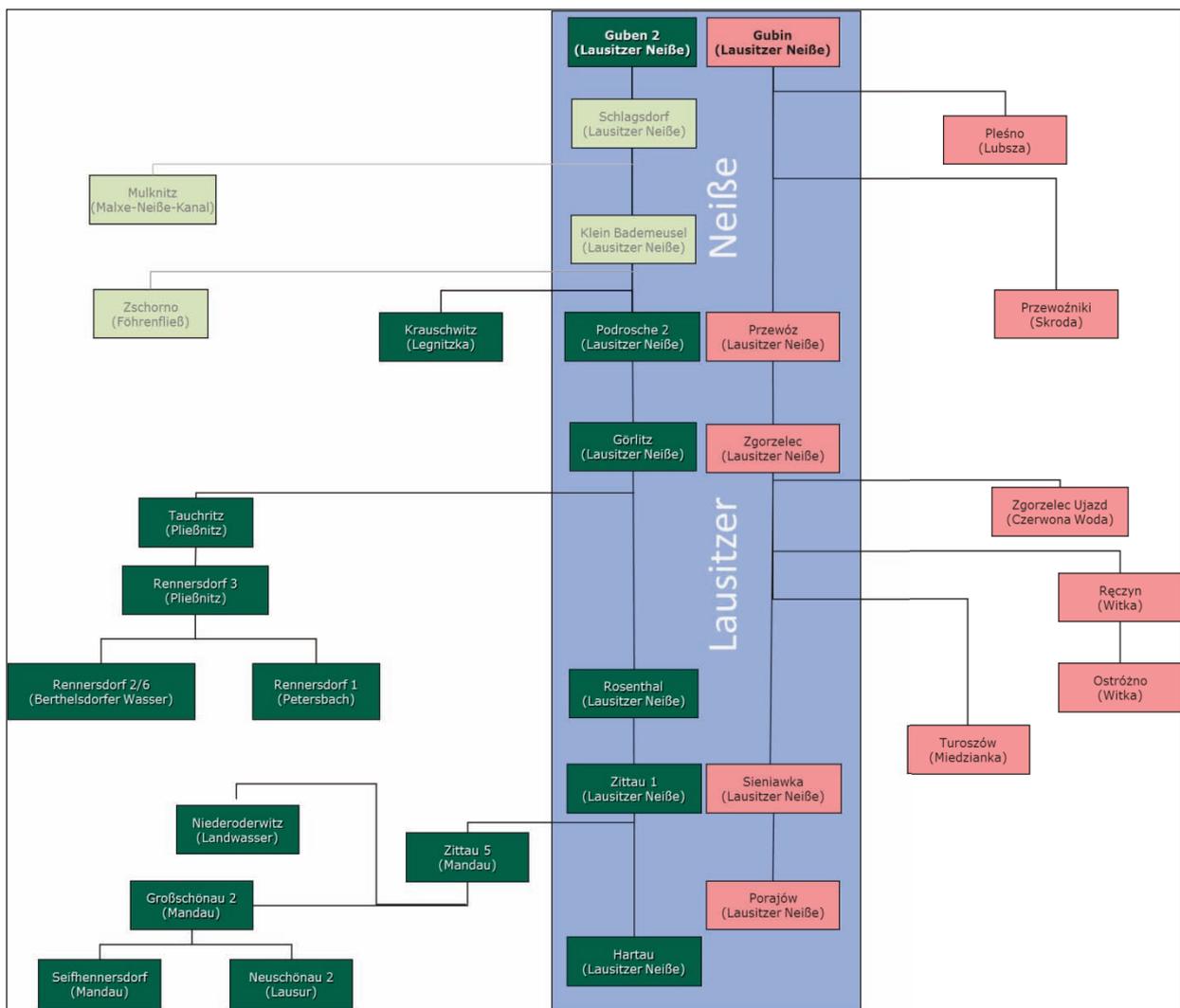


Abbildung 9: Pegelschema Lausitzer Neiße (dunkelgrün-sächsische Pegel, rot-polnische Pegel, hellgrün-brandenburgische Pegel)

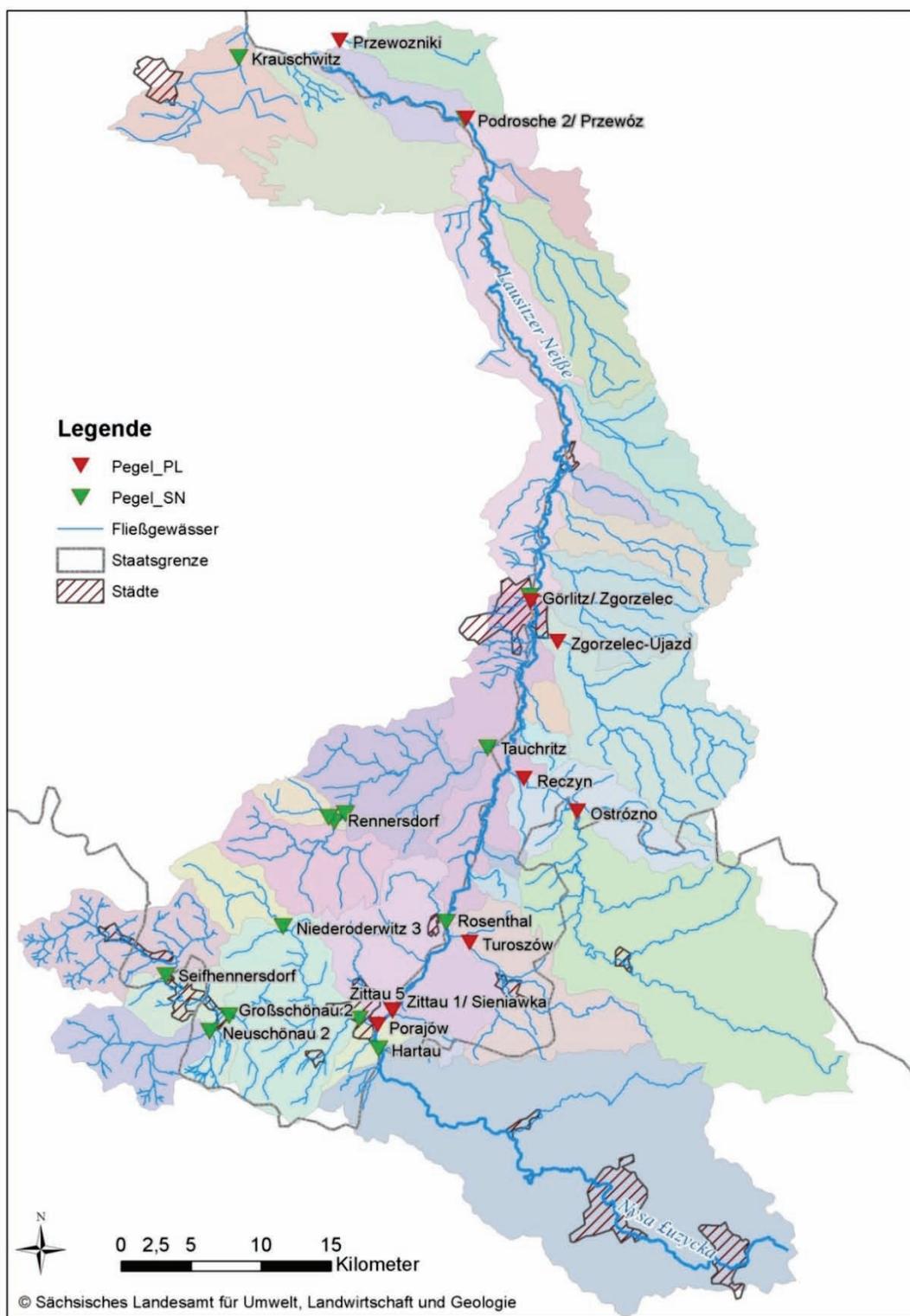


Abbildung 10: Pegel und Einzugsgebiete des Projektgebietes

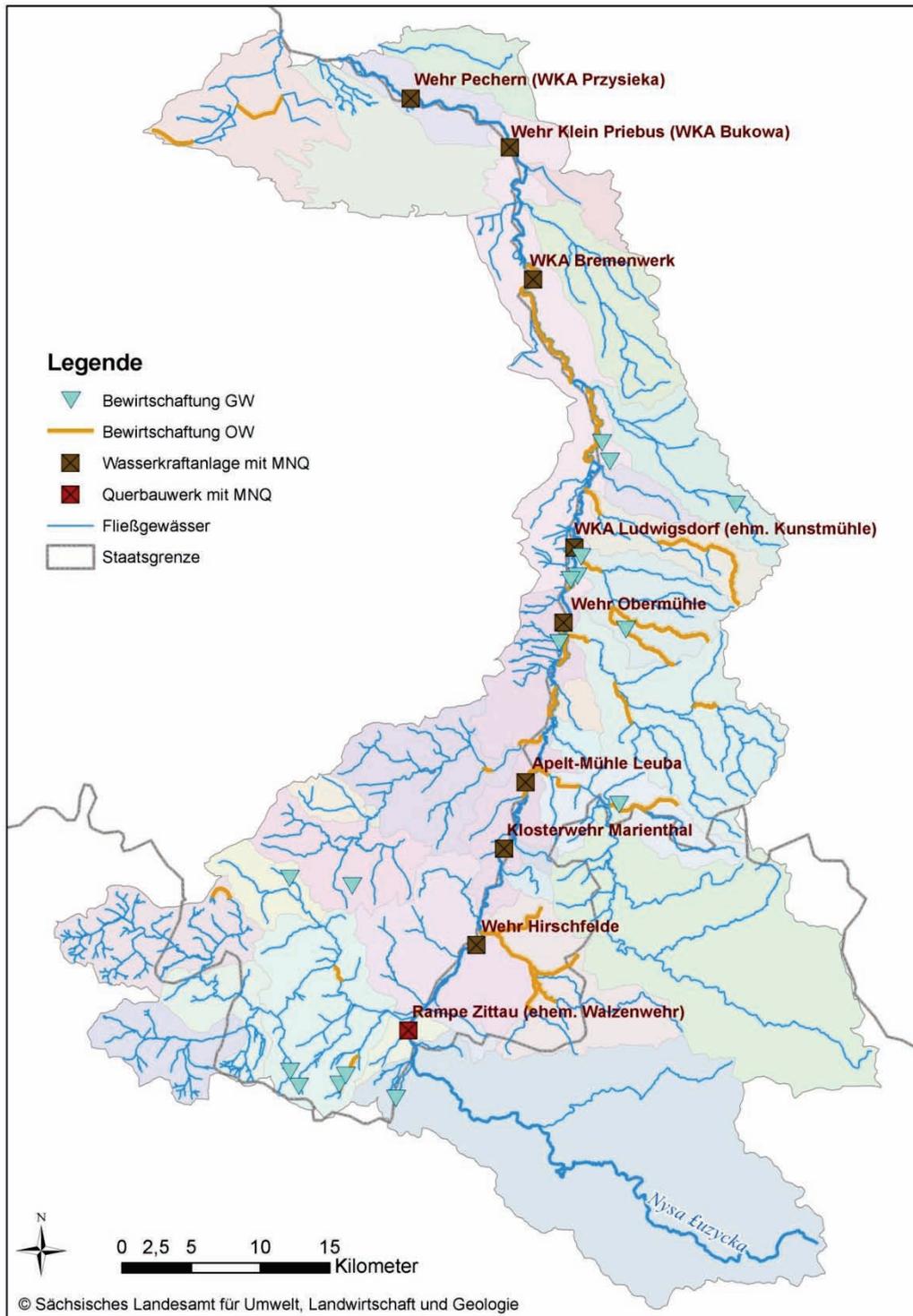


Abbildung 11: Bewirtschaftung des Oberflächen- und Grundwassers im Einzugsgebiet

### Meteorologische Daten

Meteorologische Daten sind unerlässlich für den Betrieb eines Wasserhaushaltsmodells. Die meisten hydrologischen Modelle benötigen mindestens Daten zum Niederschlag und Temperatur. Darüber hinaus können Daten zur Globalstrahlung (Sonnenscheindauer), relative Feuchte und Windgeschwindigkeit erforderlich sein, um die stattfindenden Prozesse adäquat abbilden zu können, z. B. Verdunstung. Die genannten Klimaelemente werden an Klima- und Niederschlagsstationen

(Abbildung 12) erfasst. Während an den Klimastationen alle Größen gemessen werden, registriert eine Niederschlagsstation nur den gefallenen Niederschlag.

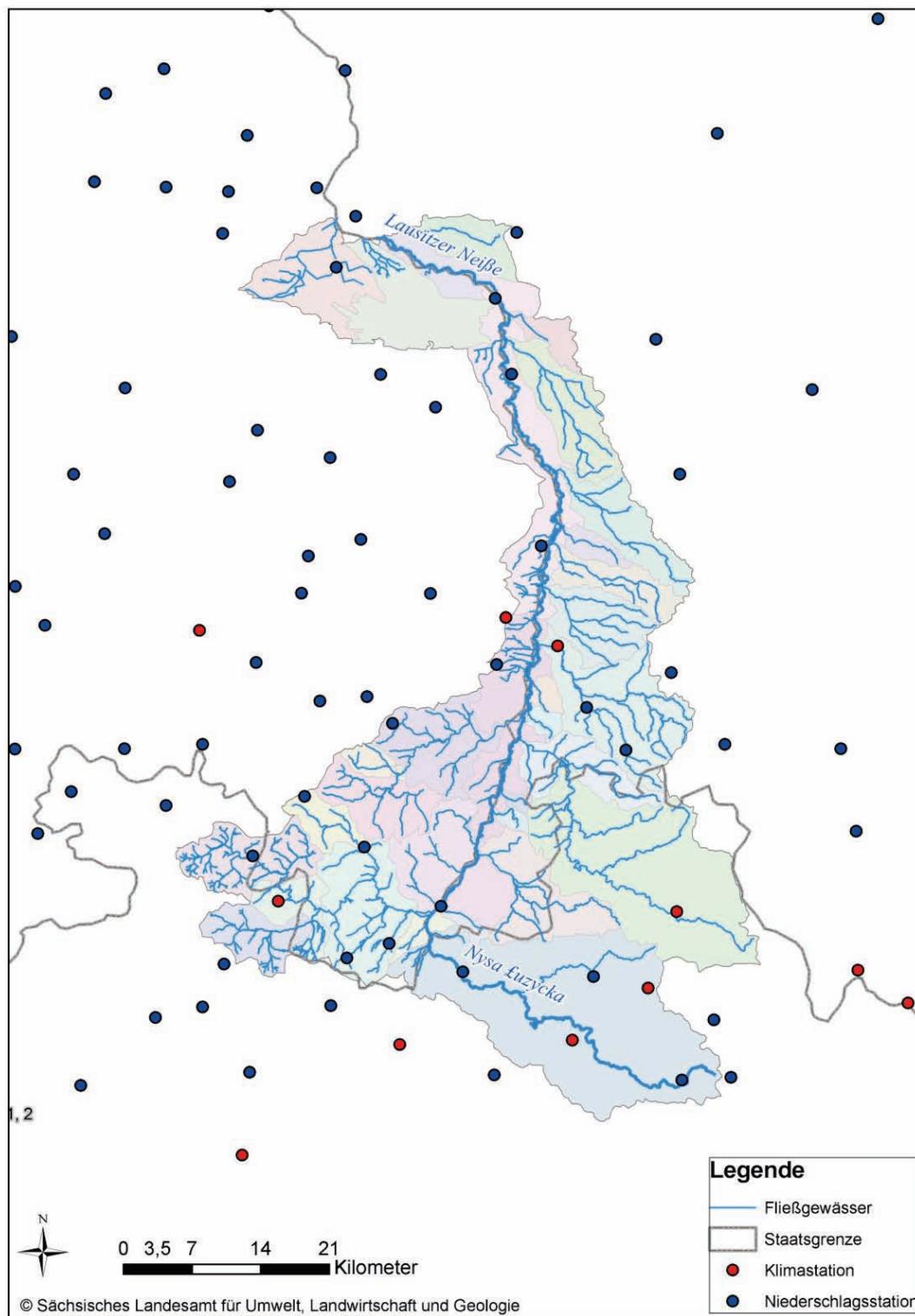


Abbildung 12: Klima- und Niederschlagsstationen im Gebiet und der Umgebung

Im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße befinden sich lediglich sechs Klimastationen und siebzehn Niederschlagsstationen. Diese Stationsdichte ist für eine aussagekräftige Beurteilung der klimatischen Verhältnisse im Gebiet und damit der Abbildung des Wasserhaushalts nicht ausreichend. Daher werden die umliegenden Stationen mit einbezogen. Der Niederschlag ist die wichtigste Eingangsgröße in das Wasserhaushaltsmodell, da sie maßgeblich (neben der Verdunstung) das Wasserdargebot bestimmt. Um eine möglichst verlässliche Aussage über den Wasserhaushalt treffen zu können, muss der gemessene Niederschlag korrigiert werden. Durch verschiedene Effekte bei der Niederschlagsmessung wie Wind, Verdunstung oder Benetzung entstehen Messfehler, die im Nachhinein behoben werden müssen. Bereits 1995 entwickelte D. Richter ein Korrekturverfahren (Richter 1995), das die genannten systematischen Messfehler des Hellmann-Niederschlagsmessers minimiert und den gemessenen Niederschlag um einen bestimmten Betrag erhöht. Die Niederschlagskorrektur wurde für alle Niederschlagsdaten sowohl Beobachtungsdaten als auch Klimaprojektionen angewendet.

Alle gemessenen Klimaelemente an den benannten Stationen wurden für den Zeitraum 1971-2010 recherchiert. Die Aufbereitung und der Umgang mit den Daten ist in der ersten NEYMO-Broschüre „Lausitzer Neiße - Charakteristik und Klima der Region“ beschrieben. Um Aussagen über eine mögliche zukünftige Entwicklung des Wasserhaushaltes treffen zu können, werden neben den Beobachtungsdaten auch Klimaprojektionen (↗ Box 3) benötigt. Die Klimaprojektionen wurden mit dem Klimamodell WETTREG2013 von 1971 bis 2100 für alle Stationen im Gebiet berechnet. Im Ergebnis liegen 50 Realisierungen mit unterschiedlich zugrunde gelegten Szenarien vor. Weitere Ausführungen zu den Klimaprojektionen können in der oben genannten NEYMO-Broschüre nachgelesen werden.

**Box 3: Klimaprojektionen (Auszug 1. NEYMO-Broschüre „Lausitzer Neiße-Charakteristik und Klima der Region“)**

„Für die Ermittlung der zu erwartenden Klimaveränderungen im Untersuchungsgebiet wird das regionale Klimamodell WETTREG (Version: WR13\_v02) verwendet. Seinen Antrieb bezieht WETTREG aus einem Ensemble von Szenarioläufen globaler Klimamodelle. Im Projekt wurde sich für das in Hamburg betriebene GCM ECHAM5 und MPI-ESM-LR entschieden. ECHAM wurde in der Vergangenheit schon vielfach und erfolgreich für Mitteleuropa angewandt. Das aktuelle Modell heißt MPI-ESM-LR und liefert für Sachsen plausiblere Ergebnisse als andere international anerkannte Modelle, wie HAD und MIROC. Als Szenarien für die Treibhausgasemissionen bzw. Konzentrationen wurde einerseits das SRES A1B verwendet, um einen Vergleich mit den zahlreich angefertigten Studien zum Klima und dessen Auswirkungen in Deutschland und Europa zu ermöglichen. Um der aktuellen Philosophie des IPCC zu folgen, wurden andererseits die RCP-Konzentrationsszenarien berücksichtigt. Um die Spannbreite zukünftiger Entwicklungen aufzuzeigen, wird empfohlen mindestens RCP 2.6 und RCP 8.5 zu verwenden. Das Szenario RCP 2.6 approximiert die atmosphärischen Bedingungen unter Einhaltung des Ziels, die globale Erwärmung am Ende des 21. Jahrhunderts unterhalb von 2 Grad bezüglich des vorindustriellen Niveaus zu halten. Jedoch werden zwischendurch Temperaturen von über 2 Grad erreicht. Dem Szenario RCP 8.5 werden ein starkes Bevölkerungswachstum und weiterhin steigende Treibhausgasemissionen unterstellt. Im Rahmen von NEYMO wird folgendes Ensemble des Typs Multi-Modell-Multi-Szenario genutzt:

- ECHAM5 MPI-OM A1B, Lauf 1 (“A1B”)
- MPI-ESM-LR RCP 2.6, Lauf 1 (“RCP 2.6”)
- MPI-ESM-LR RCP 8.5, Lauf 1 (“RCP 8.5,L1”)
- MPI-ESM-LR RCP 8.5, Lauf 2 (“RCP 8.5,L2”)
- MPI-ESM-LR RCP 8.5, Lauf 3 (“RCP 8.5,L3”)

Da lediglich eine Auswahl von Modellen zur Analyse verwendet wird, können die Modelle nicht notwendigerweise den vollständigen Bereich möglicher Resultate und Unsicherheiten umfassen.“

## 1.5. Auswahl der Klimaprojektionen für Wasserhaushaltsmodellierung

Nur ein hydrologisches Modell kann den Einfluss der Klimaelemente auf das Abflussverhalten in einem abgeschlossenen Einzugsgebiet unter Berücksichtigung der Gebietseigenschaften (Boden, Landnutzung, etc.) abbilden. Aus fachlicher Sicht wäre die hydrologische Modellierung aller 50 Realisierungen notwendig, um der Idee des Ensembleansatzes gerecht zu werden und eine Spannweite des Abflussverhaltens (und Abflusskomponenten) unter den simulierten Klimabedingungen aufzuzeigen. Der Aufwand, alle 50 Klimaszenarien (fünf Projektionen mit jeweils zehn Realisierungen) mit dem Wasserhaushaltsmodell zu simulieren und auszuwerten, ist rechentechnisch und damit auch zeitlich sehr aufwendig. Um jedoch eine mögliche Spanne der Entwicklung des Wasserhaushalts bis 2100 aufzeigen zu können, wurde im Projektkonsortium entschieden, fünf Realisierungen auszuwählen, die versuchen die Spannweite der Projektionen („feucht“, „normal“ und „trocken“; ↗ Box 4) abzudecken. Problematisch ist die Wahl der Selektionsmethode. Dabei ist das Ziel der Modellierung, die interessierenden Perioden in der Zukunft, die Auswahl der relevanten Einflussfaktoren auf die hydrologischen Prozesse, etc. zu beachten. Im Zentrum des Projektes steht der Wasserhaushalt, der in der Region aufgrund des Braunkohletagebaus anthropogenen Einflüssen unterworfen ist. Die Auswahl der fünf Realisierungen wurde anhand der Indexe klimatische Wasserbilanz (KWB) und standardisierter Niederschlagsindex (SPI) getroffen. Da es keine „korrekte“ Methode für die Auswahl gibt, entschied das Projektkonsortium, drei Realisierungen („trocken“, „normal“, „feucht“) aus den A1B-Szenario mittels des Standard Precipitation Index (SPI) und zwei Realisierungen („trocken“, „feucht“) der RCP-Szenarien mittels der Klimatischen Wasserbilanz (KWB) zu selektieren. Die beiden Indizes wurden für die hydrologischen Halbjahre Sommer und Winter im Zeitraum 2011 bis 2100 betrachtet. Im Folgenden werden die Auswahl der Realisierungen mit Hilfe der beiden Methoden KWB und SPI erläutert.

### Box 4: „feucht“, „normal“ und „trocken“

Die Begriffe „feucht“, „normal“ und „trocken“ sind mit Bedacht zu verwenden. Die Unterschiede der statistischen Kennwerte (z. B. Mittelwert) zwischen den Realisierungen innerhalb der Szenarien sind nicht sehr groß. Jedoch verändern sich die Eigenschaften zwischen den Zeitabschnitten (z. B. Dekade) in der Zeitreihe einer Realisierung. Beim Vergleich der Zeitreihen der verschiedenen Realisierungen untereinander kann es vorkommen, dass z. B. Realisierung 1 in der 6. Dekade (2021-2030) die höchste Niederschlagssumme aufweist und damit am „feuchtesten“ ist. In der 10. Dekade (2071-2080) ist allerdings Realisierung 7 die feuchteste. Das bedeutet, dass eine hier als „feucht“ bezeichnete Realisierung zwar im Mittel über den gesamten Zeitraum am feuchtesten ist, aber u. U. die längsten oder meisten Trockenperioden aufweisen kann. Umgekehrt kann eine vermeintlich „trockene“ Realisierung auch sehr feuchte Abschnitte enthalten.

### Klimatische Wasserbilanz

Ausgehend von dem Zukunftszeitraum 2011 bis 2100 wurden für die hydrologischen Halbjahre Sommer und Winter die KWB und der SPI berechnet. Die KWB ist als Kennwert geeignet, da er mehrere Klimavariablen (Niederschlag und potentielle Verdunstung) berücksichtigt. Aufgrund der Datenverfügbarkeit kann die KWB jedoch nur für neun Stationen berechnet werden. Um auf Grundlage der KWB die Realisierungen auszuwählen, wurde folgende Methodik umgesetzt: Zunächst

wurde für die Referenzperiode 1971 bis 2000 aus den simulierten Klimadaten das 5 %, 20 %, 80 % und 95 % Perzentil berechnet. Um die „trockenste“ Realisierung im Zeitraum 2011 bis 2100 zu bestimmen, wurde die Anzahl der Unterschreitung des Schwellenwertes des 5 % Perzentils jeweils für das Sommer- und Winterhalbjahr ermittelt. Die „feuchte“ Realisierung wurde ermittelt, indem die Überschreitungen des 95 % Perzentils bzw. dessen Schwellenwerts in den Halbjahren ausgezählt wurden. Die „normale“ Realisierung liegt zwischen dem 20 % und 80 % Perzentil. Im Ergebnis liegt eine Häufigkeitszählung der „trockenen“, „mittleren“ und „feuchten“ Zustände innerhalb der Halbjahre für alle Stationen und Realisierungen vor. Ein Auszug ist in der Tabelle 2 ersichtlich. Es wurden Ränge vergeben, z. B. kamen in der Realisierung MPI-ESM-LR RCP26-COTTBUS\_R01.kli 11 trockene Perioden im Sommerhalbjahr vor. Da das die maximale Anzahl für MPI-ESM-LR RCP26-COTTBUS ist, bekommt sie den Rang 1 zugeordnet. Im nächsten Schritt wurden die Ränge für jede der Realisierungen (R00 bis R09) über alle Stationen aufsummiert. Die Rangfolgensummen unterscheiden sich meist innerhalb einer Realisierung im Sommer- und Winterhalbjahr. Um trotzdem nur eine Realisierung selektieren zu können, wurde eine Wichtung eingeführt. Es wird angenommen, dass für die gesuchte „trockene“ Realisierung eher die Verhältnisse im Sommerhalbjahr ausschlaggebend sind. Daher werden die Ränge des Sommerhalbjahrs für die Auswahl der „trockenen“ Realisierung mit einer Wichtung von 0,7 belegt und die des Winters mit 0,3. Für die Auswahl der „feuchten“ Realisierung wird der Winter mit 0,7 und der Sommer mit 0,3 gewichtet. Die normale Realisierung erhält eine Wichtung von je 0,5.

**Tabelle 2: Auszug aus der Häufigkeitszählung für „trockene“, „mittlere“ und „feuchte“ Episoden für das SHJ auf der Basis der KWB (Szenario RCP26)**

	Häufigkeit			Ränge		
	trocken	normal	feucht	trocken	normal	feucht
MPI-ESM-LR RCP26-COTTBUS_R00.kli	7	38	1	4	8	2
MPI-ESM-LR RCP26-COTTBUS_R01.kli	<u>11</u>	42	0	<u>1</u>	6	6
MPI-ESM-LR RCP26-COTTBUS_R02.kli	7	42	0	4	6	6
MPI-ESM-LR RCP26-COTTBUS_R03.kli	8	38	1	2	8	2
MPI-ESM-LR RCP26-COTTBUS_R04.kli	4	45	0	7	3	6
MPI-ESM-LR RCP26-COTTBUS_R05.kli	3	43	0	8	5	6
MPI-ESM-LR RCP26-COTTBUS_R06.kli	6	37	<u>2</u>	6	10	<u>1</u>
MPI-ESM-LR RCP26-COTTBUS_R07.kli	8	44	1	2	4	2
MPI-ESM-LR RCP26-COTTBUS_R08.kli	3	46	1	8	2	2
MPI-ESM-LR RCP26-COTTBUS_R09.kli	3	<u>57</u>	0	8	<u>1</u>	6

### Standardisierter Niederschlagsindex

Neben der Auswahl der Projektionen anhand der KWB wurde eine Methodik unter Verwendung des SPI entwickelt. Der SPI wird meist genutzt, um trockene und feuchte Perioden zu identifizieren. Von Vorteil ist, dass Vergleiche des Niederschlags unter verschiedenen klimatischen Bedingungen und Zeitskalen möglich sind. Nach einer Klassifikation von McKee (1993) können die SPI-Werte in extrem feucht bis extrem trocken eingestuft werden (Tabelle 3). Es wurde wie folgt vorgegangen, um die Auswahl der drei Realisierungen des A1B-Szenarios auf Basis des SPI zu treffen:

1. Berechnung der SPI-Werte auf der Basis von monatlichen Zeitreihen des Niederschlags für alle Stationen in unterschiedlichen Zeitskalen (sechs und zwölf Monate) und alle Realisierungen der Klimaprojektionen von 2011 bis 2100. Folgende Werte wurden im weiteren analysiert:
  - SPI6 für den Oktober: liefert Informationen über die Niederschlagssumme während des hydrologischen Sommerhalbjahrs (Mai bis Oktober), welche für die Wasserverfügbarkeit in der Land- und Forstwirtschaft relevant ist
  - SPI6 für den April: liefert Informationen über die Niederschlagssumme während des hydrologischen Winterhalbjahrs (November bis April), welches insbesondere für die Grundwasserneubildung relevant ist
  - SPI12 für den Oktober: liefert Informationen über die Niederschlagssumme des vergangenen hydrologischen Jahres, welches für die Wasserressourcen (Abfluss, Speicherstände, Grundwasserstände) relevant ist
  - SPI12 für den April: liefert Informationen über Niederschlagssumme der letzten 12 Monate, welche ebenfalls signifikant für die Wasserressourcen (Abfluss, Speicherstände, Grundwasserstände) sind
2. Häufigkeitsanalyse der SPI6 und SPI12-Werte für die drei Klassifikationen (Tabelle 3):
  - <-1.5 (sehr und extrem trockene Bedingungen),
  - -0.99-0.99 (normale Bedingungen),
  - >1.5 (sehr und extrem feuchte Bedingungen).
3. Häufigkeitsanalyse für das Erreichen „trockener“, „normal“ und „feuchter“ Perioden für alle Stationen und Realisierungen von 2011-2100

Tabelle 3: Klassifikation SPI nach McKee (1993)

SPI-Werte	Klassifikation
> 2.0	extrem feucht
1.50 bis 1.99	sehr feucht
1.00 bis 1.49	moderat feucht
-0.99 bis 0.99	normal
-1.00 bis -1.49	moderat trocken
-1.50 bis -1.99	sehr trocken
< -2.0	extrem trocken

Entsprechend den Ergebnissen für KWB und SPI wurden die fünf Realisierungen ermittelt:

- A1B – „trocken“: A1B, R01
- A1B – „normal“: A1B, R06
- A1B – „feucht“: A1B, R04
- RCP – „trocken“: RCP85.3, R09
- RCP – „feucht“: RCP85.2, R05

Es sei darauf hingewiesen, dass sich z. B. die Bezeichnung „trockene“ Realisierung auf die Gesamtperiode (2011-2100) bezieht. Es ist nicht ausgeschlossen, dass diese Realisierung auch sehr

feuchte Abschnitte enthält, was die prinzipielle Schwierigkeit solch einer Selektion untermauert. Ob die unter klimatologischen Gesichtspunkten ausgewählten Klimarealisierungen zu den gewünschten hydrologischen Reaktionen (wie hydrologische Trockenperioden) führen, wird mit dem Wasserhaushaltsmodell untersucht (Kapitel 4).

# 2

## Charakterisierung der hydrologischen Gegebenheiten anhand von Messdaten

## 2. Charakterisierung der hydrologischen Gegebenheiten anhand von Messdaten

### 2.1. Allgemeines

Im Vorfeld einer objektiven Beurteilung und Einordnung der zukünftig zu erwartenden Veränderung im Abflussregime von Einzugsgebieten auf der Basis von Klimaprojektionen ist eine detaillierte Untersuchung der Abflussverhältnisse im Beobachtungszeitraum notwendig. In diesem Zusammenhang ist die Entwicklung der meteorologischen Messdaten in der Beobachtungsperiode zu betrachten, um eventuell anthropogen verursachte Niederschlags-Abfluss-Veränderungen zu erkennen. Zur Identifizierung langfristiger Abflusstrends werden möglichst lange, lückenlose und fehlerfreie Reihen gemessener hydrologischer Daten benötigt, welche auf Plausibilität und Homogenität zu prüfen sind. Für die Plausibilitätsprüfung der Abflusszeitreihen dienen unter anderem Messreihen der Klimaelemente Niederschlag und Temperatur der zugehörigen Pegel einzugsgebiete. Die Homogenität einer Reihe kann sowohl optisch als auch mittels statistischer Verfahren überprüft werden. Eine Abweichung vom Langzeitverhalten der Zeitreihe zeigt eine Inhomogenität an, welche mittels statistischer Testverfahren verifiziert werden muss. Wird damit eine inhomogene Zeitreihe nachgewiesen, werden Verfahren zur Homogenisierung angewendet. Als Referenzzeitraum wurde 1971 bis 2000 herangezogen. Für die Analyse der Abflussentwicklung in der Vergangenheit und zur Identifizierung signifikanter Trends im Abflussgeschehen der Pegel einzugsgebiete wurden gemessene Abflussdaten von 1971 bis 2010 analysiert. Nicht an allen Pegeln im Modellgebiet sind Abflussdaten für den Gesamtzeitraum verfügbar. Fehlwerte und größere Datenlücken können bei ausreichender Güte mit Hilfe von Regressionsbeziehungen mit Datenreihen benachbarter Pegel geschlossen werden.

### 2.2. Hydrologische Analyse

#### 2.2.1. Datenprüfung

Wie bereits erwähnt, werden im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße an 20 deutschen und 11 polnischen Pegeln Abflussdaten erhoben. Im Flusseinzugsgebiet der Lausitzer Neiße befinden sich auf sächsischer Seite 15 Pegel von denen 12 für Untersuchungen und Analysen des Abflussregimes herangezogen werden. Die Datenverfügbarkeit an den Pegeln Krauschwitz, Neuschönau 2 und Zittau 3 ist für eine hydrologische Analyse nicht ausreichend. Die Güten der mit Hilfe von Regressionsanalysen ermittelten Koeffizienten sind für eine Datenergänzung zu gering, wodurch diese drei Pegel in der weiteren Untersuchung unberücksichtigt bleiben. Auf polnischer Seite befinden sich 9 der insgesamt 11 Pegel im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße innerhalb des ArcEGMO Modellgebiets (Abbildung 2) und werden in die Auswertung mit einbezogen. In der Tabelle 1 sind für ausgewählte Pegel entlang der Lausitzer Neiße die Hauptwerte und die Flächen des dazugehörigen

Einzugsgebiets angegeben. Die Pegel unterscheiden sich hinsichtlich der mittleren jährlichen Abflusssummen entsprechend der mittleren Höhe des dazugehörigen Einzugsgebiets. Aufgrund des Zusammenhangs zwischen steigender mittlerer Jahresabflusssumme und zunehmender Höhe lassen sich die Pegelgebiete gemeinsam nach dem vorherrschenden Abflussregime und der Höhenlage gruppieren. Die Karte des Untersuchungsgebietes in der Abbildung 5 gibt einen Überblick zur Lage aller Pegel.

### Plausibilitätsprüfung

Die Abflusszeitreihen wurden unter Berücksichtigung des jeweiligen Bewirtschaftungseinflusses im Pegelgebiet (Entnahmen, Einleitungen, Überleitungen) mit Hilfe der im Gebiet gemessenen Klimaelemente (fester und flüssiger Niederschlag, Temperatur) auf Plausibilität überprüft. Diese optische Kontrolle mit den kausal zusammenhängenden Größen Niederschlag und Abfluss dient dem Erkennen extremer Auffälligkeiten in den Abflusszeitreihen. Zusätzlich wurde ein visueller Vergleich der Ganglinien benachbarter Pegel durchgeführt. Gefundene unplausible bzw. fehlerhafte Werte wurden aus der Zeitreihe entfernt. Die so entstandenen Lücken wurden im Rahmen der Regressionsanalyse wieder geschlossen.

### Homogenitätsprüfung

Die erhobenen Abflussdaten, sowohl die Ausgangsdaten als auch die lückengefüllten Reihen sind auf Homogenität zu überprüfen. Durch beispielsweise Pegelveränderungen (Sanierung, Hochwasserereignisse) oder durch Veränderung im Gewässerbett kann es zu systematischen Abweichungen im Langzeitverhalten des Abflusses kommen. Deutlich werden diese systematischen Fehler bei einem Vergleich der zu untersuchenden Pegeldata mit einer homogenen Referenzreihe aus dem Untersuchungsgebiet. Mit Hilfe des statistischen Testverfahrens der Doppelsummenanalyse wurden sämtliche Abflusszeitreihen auf Homogenität überprüft und auftretende Inhomogenitäten bereinigt. Die an mehreren Pegeln im Einzugsgebiet vorhandenen Einflüsse der Wasserbewirtschaftung verursachen beeinflusste Pegelmessreihen. Aufgrund der Berücksichtigung der Bewirtschaftung in Form von Entnahmen und Einleitungen im Modell können die Datenreihen der beeinflussten Pegel in der Modellkalibrierung unverändert verwendet werden.

### Lückenschließung

Für die Analyse des Abflussregimes werden lückenlose Abflussreihen für den Zeitraum von 1971 bis 2010 benötigt. Zur Schließung der Datenlücken und zur Verlängerung der Zeitreihen wurden vollständige Datenreihen der Nachbarpegel herangezogen. Zur Ergänzung der fehlenden Werte in den Abflusszeitreihen wurde eine lineare Mehrfachregression durchgeführt. Dabei wird eine Beziehung zwischen einem Pegel und mehreren unabhängigen Nachbarstationen aufgestellt. Bei ausreichender Güte der Korrelation zwischen den Datenreihen können zum Teil auch längere Abschnitte in den Zeitreihen ergänzt werden.

### 2.2.2. Methoden

Die Analyse und Charakterisierung der hydrologischen Bedingungen im Untersuchungsgebiet erfolgte auf Grundlage gemessener Abflussdaten ausgewählter Pegel im Zeitraum von 1971 bis 2010. Die Abflusszeitreihen liegen nach der Aufbereitung als geprüfter, lückenloser und homogener Datensatz vor. Zur Identifizierung von Veränderungen im hydrologischen Regime der Pegel Einzugsgebiete wurden Trendbetrachtungen auf der Basis von Monats- und Jahreswerten durchgeführt. Die Daten wurden mit dem Trendtest nach Mann-Kendall (Mann 1945; Kendall 1975) auf einen signifikanten Trend hin untersucht. Zur Identifizierung der Trendrichtung und Trendstärke wurden neben Berechnungen zum linearen Trend auf Grundlage der Methode der kleinsten Quadrate Trendstärkeschätzungen nach Sen (Sen 1968) durchgeführt. In der Trendanalyse werden die Monats- und Jahresmittel des Abfluss für die Ermittlung des Trends der Gesamtperiode von 1971 bis 2010 auf Jahresbasis, für das Sommer- und Winterhalbjahr (Mai bis Oktober und November bis April) und für eine saisonale Betrachtung verwendet. Für die Berechnung der relativen Trends werden die Mittelwerte der Referenzperiode von 1971 bis 2000 genutzt.

#### Box 5: Trendanalyse

Zur Untersuchung der Signifikanz des Trends einer hydrologischen Zeitreihe sind Testverfahren geeignet, welche keine Normalverteilung der Daten voraussetzen, sowohl lineare und nicht lineare Trends detektieren und auch auf Zeitreihen mit eventuellen Ausreißern angewendet werden können. Der auf Rängen basierende Mann-Kendall Trendtest erfüllt als nicht parametrischer Test diese Vorgaben. Von einer Signifikanz und damit von einem Trend in der Zeitreihe kann gesprochen werden, wenn der Mann-Kendall Trendtest mit einer maximalen Irrtumswahrscheinlichkeit von 10 % einen signifikanten Trend anzeigt. Die auf der Trendstärkeschätzung nach Sen basierende Untersuchung der Trendrichtung und Trendstärke ist durch die Verwendung des Median robust gegen die häufig im Zusammenhang mit Extremereignissen in hydrologischen Zeitreihen auftretenden Ausreißer.

### 2.3. Ergebnisse der hydrologischen Analyse

Das Abflussregime eines Einzugsgebiets wird von zahlreichen Faktoren bestimmt. Neben der Charakteristik des Bodens und der vorherrschenden Vegetation beeinflusst das Relief entscheidend das Abflussverhalten. Die hydrologische Analyse hat gezeigt, dass zwischen der mittleren Höhe des Pegel Einzugsgebiets und der zugehörigen mittleren jährlichen Abflusssumme ein Zusammenhang besteht. Die mit zunehmender Höhe steigenden Abflusssummen erklären sich in erster Linie aus einer Zunahme des Niederschlags mit der Höhe und größeren Gefällewerten in höheren Lagen. Zudem wirken sich die veränderten hydraulischen Eigenschaften des Untergrundes und die veränderte Vegetation auf die Zusammensetzung der Abflusskomponenten und damit auf das Abflussregime aus. Eine Zusammenfassung mehrerer Pegel innerhalb einer Höhenstufe für die hydrologische Analyse ist schwierig, da die zugehörigen Pegelgebiete sich meist über einen breiten Höhenbereich erstrecken. Des Weiteren ist die Anzahl der Pegel innerhalb des Untersuchungsgebiets für eine Zuordnung zu den 4 Höhenstufen zu gering (aus meteorologischer Auswertung: Tiefland, Hügelland, Bergland, Kammlagen). Hier kann keine statistisch verwertbare Aussage für diese Höhenstufen getroffen werden. Eingeteilt wurde das Untersuchungsgebiet für die Auswertung aus

diesem Grund in zwei Höhenbereiche, tiefere Lagen von 80 m ü. NN bis 350 m ü. NN und höhere Lagen über 350 m ü. NN. In den Kopfgebieten in Lagen über 350 m ü. NN werden die höchsten mittleren jährlichen Abflusssummen von zum Teil über 500 mm/a gemessen. In den tieferen Lagen bis 350 m ü. NN treten mittlere jährliche Abflüsse zwischen 110 – 320 mm/a auf. Sowohl in den tieferen Regionen als auch in den Lagen über 350 m ü. NN fließen im Winterhalbjahr im Mittel 62 % und im Sommerhalbjahr 38 % des Gesamtjahresabflussvolumens ab. Saisonal betrachtet ist der März in allen Höhenlagen der abflussreichste Monat. Im Mittel fließen 59 mm/Mon in den höheren Regionen und 30 mm/Mon in den tieferen Lagen ab. Im September werden mit 23,8 mm/Mon in den höheren Lagen und 12,6 mm/Mon in den tieferen Regionen im Mittel die geringsten Abflüsse gemessen.

Die Trendanalyse von 1971 bis 2010 zeigt in sämtlichen Gebieten der tieferen Lagen abnehmende Abflusssummen an (Tabelle 4). In Regionen über 350 m ü. NN ist dieser Abwärtstrend nicht mehr eindeutig. Im Flussgebiet der Mandau weisen die südlichen Zuflüsse einen Aufwärtstrend und die westlichen einen Abwärtstrend auf. Im Bereich des Oberlaufs der Lausitzer Neiße zeigt die Analyse eine schwache Abnahme der Abflüsse an. Die darauf folgenden Zwischengebiete der Lausitzer Neiße weisen hingegen einen Aufwärtstrend auf. Die Fließgewässereinzugsgebiete der polnischen Zuflüsse zur Lausitzer Neiße zeigen keinen einheitlichen Abflusstrend. Im Flussgebiet der Witka kommt es in den höheren Lagen zu einer Zunahme und in den tieferen Regionen zu einer deutlichen Abnahme der jährlichen Abflusssummen. Die Tendenz der Sommerabflüsse der letzten 40 Jahre war im gesamten Gebiet negativ, wobei auch in einigen Teilgebieten, sowohl in den höheren Lagen als auch in den tieferen Regionen signifikant negative Trends aufgetreten sind. Für die Winterabflüsse verdeutlicht die Trendanalyse, dass es in den vergangenen 40 Jahren in den Lagen über 350 m ü. NN nahezu einheitlich zu einer Zunahme und in Lagen zwischen 80 m und 350 m ü NN zu Abnahmen kam, welche allerdings nur vereinzelt statistisch signifikant waren (Tabelle 4).

### Saisonale Trends

Eine Gegenüberstellung der absoluten mittleren monatlichen Trends der Abflussspenden von 1971 bis 2010 zeigt deutlich eine Zunahme der Abflüsse im Februar bis April in den vergangenen 40 Jahren, wobei der März deutlich die stärksten positiven Abflusstendenzen aufweist, von denen nahezu alle Gebiete in den höheren Lagen einen positiven Abflusstrend mit einer statistischen Signifikanz besitzen (Tabelle 5). Sowohl in den Sommermonaten, als auch von November bis Januar zeigen größtenteils abnehmende Abflusssummen zunehmend trockenere Verhältnisse an. Die negativen Abflusstrends mit einer statistischen Signifikanz treten vor allem im Mai und in den tieferen Regionen im Dezember auf. Die saisonale Auswertung der mittleren monatlichen Abflussspenden hat eine eindeutige Abflussentwicklung in den letzten 40 Jahren aufgezeigt. Bei Betrachtung einzelner Monate kann festgestellt werden, dass innerhalb des Untersuchungsgebiets zwar vorwiegend einheitliche Trendrichtungen auftreten, diese aber deutliche Unterschiede in der Trendstärke aufweisen. Eine eindeutige Unterscheidung der saisonalen Trends zwischen den tieferen und höheren Lagen kann nicht festgestellt werden.

Tabelle 4: Abflusspenden für die Periode 1971-2000 und absolute Trends in mm/40a (positiv, negativ) für die Periode 1971-2010 für das Jahr, Sommer- und Winterhalbjahr, Pegel unterteilt nach Höhenstufen (dunkelblau: Tiefland, hellblau: Bergland), Signifikante Trends fett

Pegel	Jahr			Sommerhalbjahr		Winterhalbjahr	
	Mittlere Höhe	Mittelwert [mm/a]	Trend [mm/40a]	Mittelwert [mm/a]	Trend [mm/40a]	Mittelwert [mm/a]	Trend [mm/40a]
Guben2/Gubin	-	233.9	<b>-56.5</b>	90.9	<b>-37.5</b>	143.0	<b>-25.9</b>
Plešno	-	144.6	<b>-60.9</b>	47.4	<b>-34.7</b>	97.3	<b>-24.9</b>
Przewoźniki	143.9	158.3	<b>-77.9</b>	48.1	<b>-33.2</b>	110.2	<b>-38.0</b>
Krauschwitz *	133.0	102.5	-	42.6	-	59.9	-
Podrosche2/Przewóz	189.4	301.8	<b>-72.7</b>	120.5	<b>-41.4</b>	181.3	<b>-31.6</b>
Zgorzelec/Görlitz	236.8	304.7	<b>-44.3</b>	121.3	<b>-39.3</b>	183.4	<b>-7.4</b>
Zgorzelec Ujazd	266.8	186.2	<b>-5.5</b>	75.2	<b>-27.5</b>	111.0	15.1
Tauchritz	280.1	217.3	<b>-44.6</b>	80.6	<b>-18.8</b>	136.7	<b>-19.6</b>
Rennersdorf 1	328.4	237.6	<b>-74.4</b>	83.3	<b>-54.4</b>	154.3	<b>-33.8</b>
Rennersdorf 2	344.6	317.8	<b>-129.8</b>	132.9	<b>-72.6</b>	184.9	<b>-69.4</b>
Rennersdorf 3	285.7	223.0	<b>-28.8</b>	86.4	<b>-26.4</b>	136.6	<b>-2.0</b>
Ręczyn	282.0	368.9	<b>-98.9</b>	162.8	<b>-85.8</b>	206.1	3.1
Ostróžno	455.5	506.3	14.8	231.2	<b>-56.9</b>	275.0	<b>72.1</b>
Rosenthal	269.4	390.8	50.1	150.5	<b>-22.0</b>	240.2	47.0
Turoszów	365.8	353.1	<b>-8.3</b>	157.2	<b>-37.0</b>	196.0	18.6
Sieniawka/Zittau1	271.1	407.6	31.4	152.2	<b>-12.9</b>	255.4	39.2
Zittau35	357.4	390.4	<b>-8.4</b>	126.5	<b>-41.2</b>	263.9	21.7
Porajów	269.9	498.5	<b>-5.6</b>	197.9	<b>-39.1</b>	300.6	26.9
Hartau	479.0	512.7	<b>-5.7</b>	203.5	<b>-40.4</b>	309.2	27.9
Niederoderwitz	369.8	340.6	<b>-61.6</b>	110.7	<b>-42.4</b>	229.9	<b>-37.1</b>
Großschönau 2	404.5	463.4	9.2	150.8	<b>-57.9</b>	312.5	65.4
Seiffhennersdorf	415.5	399.0	12.5	123.8	<b>-31.2</b>	275.1	18.1
Neuschönau2 *	486.0	500.4	-	129.1	-	371.2	-

\* Datenverfügbarkeit für Analyse zu gering

### Niedrigwasseranalyse

Eine Trendanalyse der monatlichen Niedrigwasserbeobachtung der letzten 40 Jahre zeigt größtenteils abnehmende Niedrigwasserabflüsse. Vor allem in den Sommermonaten in den tieferen Lagen des Untersuchungsgebiets gehen die Niedrigwasserdurchflüsse zurück. Steigende Niedrigwasserabflüsse konnten im März für das Gesamtgebiet und im Februar zum Teil in den höher gelegenen Regionen beobachtet werden (Tabelle 6). Der Analyse zu Folge treten auch vereinzelt Pegel im Untersuchungsgebiet auf, bei denen ganzjährig ein Rückgang der Niedrigwassermenge erkennbar ist.

Tabelle 5: Absolute saisonale Trends der Abflussspenden für die Periode 1971-2010 in mm/40a (positiv, negativ - abgestufte Helligkeit Trendstärke), Pegel unterteilt nach Höhenlage ( $\leq 350$  m ü. NN,  $> 350$  m ü. NN), Signifikante Trends fett,

Pegel	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
Guben2/Gubin	-3.1	-9.6	-8.2	-2.8	4.2	-0.2	-8.6	-5.8	-4.9	-4.5	-2	-3.3
Plešno	-3.2	-9.8	-10.5	-2.9	2.5	-3	-5.8	-3.7	-3.2	-2	-1.6	-4
Przewoźniki	-8.2	-14.3	-9.7	-1.6	6.6	-4.2	-7.3	-2.5	-3	-4.3	-2.8	-1.6
Krauschwitz *	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Podrosche2/Przewóz	-2.3	-11	-9.6	-0.8	7.9	-3.1	-12	-6.8	-5.8	-2.9	-1.5	-1.4
Zgorzelec/Görlitz	-1.1	-10	-5.5	3.7	13.8	-2.1	-12.7	-6.2	-5.4	-1.9	-0.8	0.6
Zgorzelec Ujazd	-0.4	-2.6	2.1	6.7	12.3	-2.2	-5.5	-5.3	-5.7	-3.6	-2.6	-0.9
Tauchritz	-0.8	-13.1	-7.2	3.1	11.9	-3.3	-5	-4.3	-2	-1.5	-0.4	0
Rennerdorf 1	-2.6	-10.3	-3.7	3.9	11.4	-5.5	-11	-4	-2.7	-10	-3.6	-5.2
Rennerdorf 2	-7.4	-14.7	-19.9	-5.6	13.7	-9.3	-11.8	-10.3	-13.7	-14.5	-8	-10.4
Rennerdorf 3	-1.3	-4.6	-8.7	5.3	17.1	-1	-5	-3.4	-4.3	-8.7	-5.7	-3.9
Ręcyn	-5.1	-17.4	-4.3	9.2	26.3	-3.1	-32.5	-9.4	-14.5	-5.3	-1.3	-2.1
Ostróžno	-0.1	-11.3	-3.7	12.9	42.6	18.9	-26.8	-7.7	-12.9	-2.1	0	2.5
Rosenthal	4.7	-4.2	0.2	11	27.4	6.2	-7.2	-3.5	-0.5	-0.4	1.8	3.1
Turoszów	-1.8	-3.7	-6.4	9.5	19.5	-1.8	-16	-8.7	-5.5	2.6	-0.8	1.1
Sieniawka/Zittau1	3.5	-10.5	-0.7	10.4	32.1	2.7	-6.8	-3.5	-0.7	1.6	2.7	4.8
Zittau35	2.8	-13.5	-2	13.4	43.3	-6.6	-10.6	-10.4	-5.1	-3.1	-2	-0.9
Porajów	0.2	-13.2	-7.1	5.6	26	5.4	-10	-6.6	-7	-1	0.2	1.9
Hartau	-0.1	-13.6	-9.3	5.8	28.4	6.3	-11.8	-6.8	-8.2	-1.5	1.1	1.8
Niederoderwitz	3.5	-18.1	-8.9	9.7	24.3	-12.9	-13.3	-8.1	-0.2	0.4	4.5	3.4
Großschönau 2	-0.7	-6.2	0.7	16.4	57.8	-7	-16.3	-15.8	-5.4	-9.2	-5.3	-4.3
Seifhennersdorf	3.8	-12.1	2.4	15.7	47.5	-5.6	-9.8	-7.5	-3	-4	0.6	3.7
Neuschönau2 *	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabelle 6: Relativer saisonaler Trend der Niedrigwasserabflussspenden für die Periode 1971-2010 (positiv, negativ - abgestufte Helligkeit Trendstärke), Referenzperiode 1971-2000, Pegel unterteilt nach Höhenlage ( $\leq 350$  m ü. NN,  $> 350$  m ü. NN)

Pegel	Nov	Dez	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt
Guben2/Gubin	-0.27	-0.26	-0.31	-0.18	0.14	-0.08	-0.23	-0.44	-0.32	-0.32	-0.35	-0.17
Plešno	-0.27	-0.34	-0.55	-0.4	0.17	-0.18	-0.23	-0.41	-0.2	-0.08	-0.11	-0.43
Przewoźniki	-0.84	-0.56	-0.45	-0.22	0.23	-0.48	-0.63	-0.53	-0.68	-0.67	-0.73	-0.38
Krauschwitz *	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Podrosche2/Przewóz	-0.15	-0.24	-0.3	-0.18	0.1	-0.17	-0.2	-0.33	-0.24	-0.23	-0.15	-0.06
Zgorzelec/Görlitz	-0.1	-0.12	-0.15	-0.15	0.13	-0.07	-0.18	-0.3	-0.24	-0.19	-0.08	-0.02
Zgorzelec Ujazd	-0.24	-0.04	-0.17	-0.22	-0.08	-0.77	-0.26	-0.57	-1.05	-0.78	-0.77	-0.6
Tauchritz	-0.21	-0.37	-0.39	-0.21	0.1	-0.02	-0.22	-0.3	-0.09	-0.03	-0.02	0.03
Rennerdorf 1	-0.03	-0.23	-0.26	0.15	0.22	-0.28	-0.07	0	-0.12	-0.37	-0.14	-0.19
Rennerdorf 2	-0.4	-0.49	-0.49	-0.36	-0.3	-0.53	-0.57	-0.64	-0.63	-0.51	-0.56	-0.43
Rennerdorf 3	-0.34	-0.24	-0.39	-0.18	0.04	0	-0.11	-0.35	-0.55	-0.7	-0.61	-0.47
Ręcyn	-0.39	-0.7	-0.43	-0.29	-0.1	-0.2	-0.45	-0.44	-0.44	-0.64	-0.26	-0.29
Ostróžno	-0.2	-0.23	-0.11	-0.02	0.16	0.04	-0.37	-0.49	-0.39	-0.38	-0.21	-0.16
Rosenthal	0.08	0.08	0.11	-0.02	0.26	0.03	-0.04	-0.02	-0.07	0.01	0.06	0.05
Turoszów	-0.37	0	-0.3	0.35	0.27	-0.2	-0.5	-0.36	-0.75	-0.4	0	0.02
Sieniawka/Zittau1	0.06	0.02	0.04	0.15	0.44	0.01	0.03	-0.05	0.01	0.13	0.23	0.23
Zittau35	-0.06	-0.21	-0.15	0.15	0.32	-0.12	-0.27	-0.36	-0.32	-0.15	-0.26	-0.22
Porajów	-0.05	-0.16	-0.01	0	0.27	-0.03	0	-0.15	-0.15	0.02	0.04	0.04
Hartau	-0.03	-0.19	-0.05	-0.07	0.26	-0.1	-0.03	-0.2	-0.1	0.01	0.12	0.06
Niederoderwitz	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Großschönau 2	-0.24	-0.26	-0.24	-0.13	0.11	-0.36	-0.54	-0.6	-0.37	-0.56	-0.56	-0.27
Seifhennersdorf	-0.1	-0.02	0.12	0.29	0.47	-0.08	-0.29	-0.44	-0.3	-0.25	0.01	0

\* Datenverfügbarkeit für Analyse zu gering bzw. Güte der Niedrigwasserbeobachtung zu gering



# 3

## Wasserhaushaltsmodellierung

### 3. Wasserhaushaltsmodellierung

**D**amit der Wasserhaushalt eines Gebietes eingeschätzt werden kann, bedarf es Modelle, die alle relevanten Prozesse im System Boden-Pflanze-Atmosphäre abbilden können. In diesem Kapitel werden die Modelle ArcEGMO sowie MIKE NAM plus MIKE BASIN und das Vorgehen der Wasserhaushaltsmodellierung vorgestellt.

#### 3.1. Hydrologische Modelle

Modelle dienen dazu, die Realität auf vereinfachte Weise möglichst genau wiederzugeben. Hydrologische Modelle können für die Abbildung der sich gegenseitig in einem Einzugsgebiet beeinflussenden Prozesse des Wasserhaushalts verwendet werden und bedienen sich grundlegender physikalischer Gesetzmäßigkeiten, um diese Prozesse mit Hilfe mathematischer Gleichungen idealisiert beschreiben zu können. Die bekannten kausalen Zusammenhänge im natürlichen System werden bestmöglich in der Modellstruktur erfasst. Die Eigenschaften des Systems und die Randbedingungen werden über Parameter vorgegeben. Hydrologische Modelle unterscheiden sich je nach Anwendungszweck im Grad ihrer Detailliertheit und Ergebnisgenauigkeit. Aktuell werden hydrologische Modelle, neben der Abbildung der Gebietsreaktion in beobachteten Zeiträumen, für die Simulation des zukünftigen Wasserhaushaltes auf Grundlage von projizierten Klimadaten verwendet.

Vor der Anwendung steht die Auswahl eines geeigneten Modells. Hauptkriterien sind die zu lösende Modellierungsaufgabe, die Verfügbarkeit der Eingangsdaten und Prozessparameter. Im Projekt NEYMO soll der Wasserhaushalt im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße unter Berücksichtigung der zahlreichen anthropogenen Einflüsse (Tagebau, Wasserbewirtschaftung) abgebildet werden. Für die Abschätzung der in Zukunft zur Verfügung stehenden Wasserressourcen wird deren Entwicklung über einen längeren Zeitraum auf Grundlage von Klimaprojektionen simuliert. Dies bildet die Grundlage für die anschließende Erstellung von Anpassungsmaßnahmen für Nutzer von Wasserressourcen in der Region.

Das Projektkonsortium hat entschieden, dass im Projekt das Modell ArcEGMO vom deutschen Partner und das Modell MIKE NAM und MIKE BASIN vom polnischen Partner für die Abbildung der Wasserbilanz angewendet wird. Das hat den Vorteil zwei Modellergebnisse miteinander zu vergleichen und die Stärken der Modelle auszunutzen. Damit kann die Aussagesicherheit erhöht werden. Die Modelle werden für das Gebiet, wie in Kapitel 1 beschrieben, aufgebaut und angewendet.

#### 3.1.1. Das Modell ArcEGMO

Um die komplexen wasserhaushaltlichen Fragestellungen beantworten zu können, ist ein Modell auszuwählen, das die räumlichen und zeitlichen Veränderungen der Teilprozesse im Landschaftswasserhaushalt bzw. im System Boden-Pflanze-Atmosphäre adäquat erfassen und abbilden kann. Das hydrologische Modellierungssystem ArcEGMO wird aufgrund seines konzeptionellen Modellkonzepts diesen Anforderungen gerecht (Pfützner 2012). Das Modell bewährte sich in einem umfangreichen Modelltest, der im Projekt KliWES durchgeführt wurde (LfULG 2012), gegen eine Vielzahl anderer Modelle. Ein großer Vorteil des Modells ist der modulare Aufbau sowie die GIS-gestützte Arbeitsweise. Des Weiteren überzeugte das Modell mit seinem großen Anwendungsspektrum, seiner geringen Rechenzeit und der Vielzahl an Modellansätzen, die die Prozesse im System Boden-Pflanze-Atmosphäre gut abbilden können. Das Modell wurde bereits in vielen Projekten zur Berechnung des Wasserhaushalts oder der Abflussverhältnisse in Flusseinzugsgebieten angewendet.

Das öko-hydrologische Modellierungssystem ArcEGMO wurde vom Büro für angewandte Hydrologie (BAH) entwickelt. Es verwendet sowohl physikalische als auch konzeptionelle Ansätze für die mathematische Beschreibung der Systemprozesse. Damit können die Daten informations-, prozess- und problemadäquat verarbeitet werden. Das heißt je nach Fragestellung, Datenverfügbarkeit und Anwendungsmaßstab können die Teilmodule zu einem Gebietsmodell zusammengesetzt werden. Je nach Variabilität der prozessrelevanten Eigenschaften kann ArcEGMO in unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Diskretisierungen betrieben werden. Grundsätzlich ist das Modell in die Bereiche Abflussbildung für die Erfassung vertikal und Abflusskonzentration für lateral stattfindender Prozesse unterteilt.

Für die exakte Abbildung der vertikalen Prozesse benötigt das Modell detaillierte Daten z. B. zur Bodencharakteristik und der Landnutzung im Einzugsgebiet. Die Simulation der lateralen Prozesse erfordern u. a. Daten zur Topographie und Hydrogeologie. Angetrieben wird das Modell von den klimatischen Größen Niederschlag, Temperatur, Sonnenscheindauer, relative Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit, die aus den Stationsdaten in täglicher Auflösung durch die in ArcEGMO integrierten Regionalisierungsverfahren für jedes Raumelement berechnet werden.

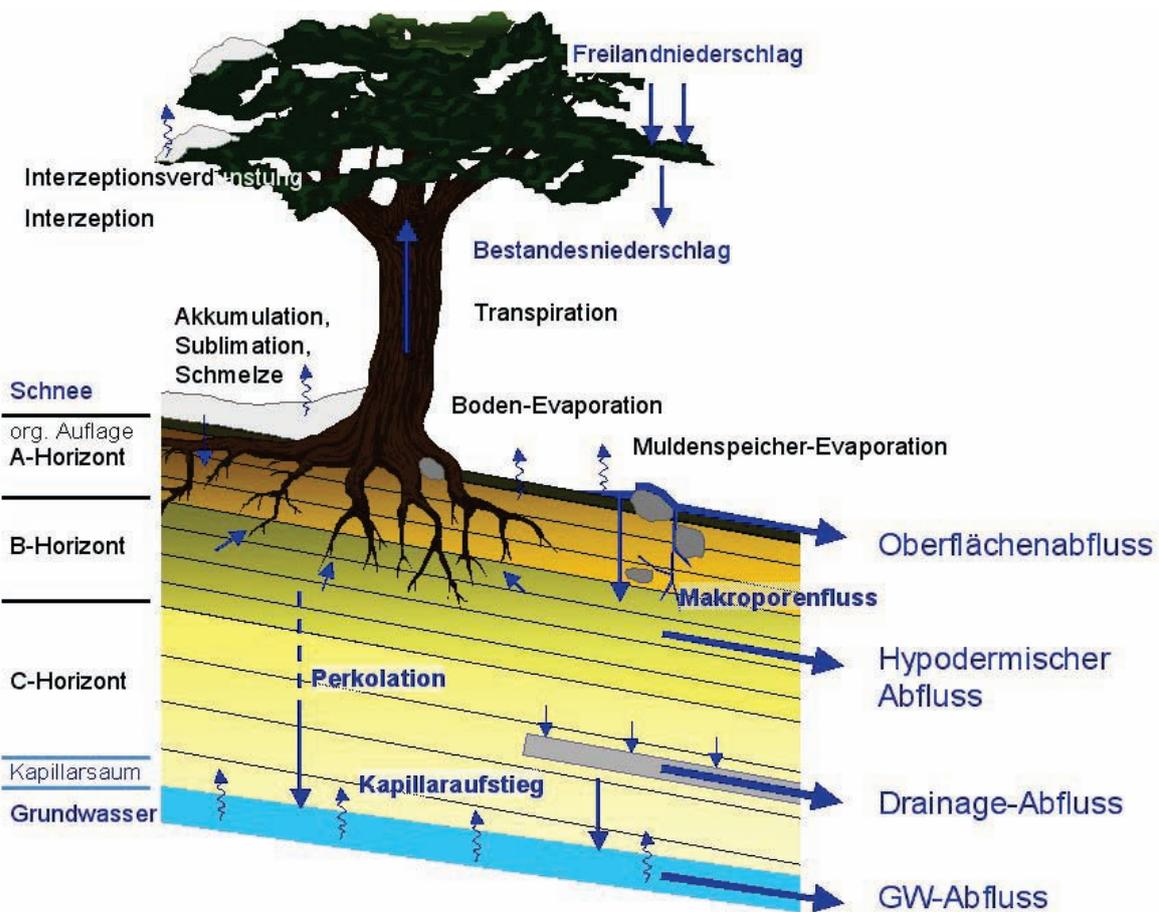


Abbildung 13: Abflussbildung in ArcEGMO mit dem Modul PSCN (Klöcking et al. 2009)

Als Ergebnis der Modellierung mit ArcEGMO liegen Daten des Gebietswasserhaushalts vor. Für eine detailliertere Beschreibung können im Modell verschiedene Wasserhaushalts- bzw. Abflusskomponenten, wie reale Verdunstung, Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss aus Bodenzone (Interflow über geneigten Stauhorizonten) und Grundwasserneubildung berechnet werden (vgl. Abbildung 13). In diesem Projekt wurde das Abflussbildungsmodul Plant-Soil-Carbon-Nitrogen (PSCN) gewählt. In diesem Ansatz werden verschiedene Wachstumsmodelle für Wald- und landwirtschaftliche Flächen mit einem detaillierten Bodenmodell gekoppelt. Dadurch kann die Entwicklung der Vegetation und Klimaänderungen simuliert werden. Eine ausführliche Modellbeschreibung ist unter [www.arcegeo.de](http://www.arcegeo.de) zu finden.

Im Modell ArcEGMO ist eine Schnittstelle integriert, an die das Grundwasserströmungsmodell MODFLOW gekoppelt werden kann. Über die Größe Perkolations stehen beide Modelle in Verbindung. Ergebnis der Modellierung mit dem Modell MODFLOW sind Angaben zur Strömungssituation im Grundwasserleiter. Durch die Modellkopplung können stattfindende Interaktionen zwischen Grund- und Oberflächenwasser erfasst werden und somit insbesondere klimabedingte Veränderungen im Grundwasser und deren Einfluss auf den Bodenwasserhaushalt berücksichtigt werden.

## 3.1.2. Aufbau des Wasserhaushaltsmodells ArcEGMO

Der Aufbau des Wasserhaushaltsmodells ArcEGMO für das Gebiet der Lausitzer Neiße erfordert die Aufbereitung sämtlicher vom Modell benötigter Eingangsdaten. Für das grenzübergreifende Modellgebiet mit Anteilen am tschechischen, polnischen und deutschen Staatsgebiet müssen die Datengrundlagen (Geodaten, hydrologische und meteorologische Daten) zusammengeführt werden (vgl. Kapitel 1). Abbildung 14 zeigt die raumbezogenen Basisinformationen, die für den Modellaufbau verwendet wurden. Durch die Verschneidung der Boden-, Landnutzung- und Einzugsgebietsdaten entstehen Hydrotope, die die Berechnungsgrundlage im ArcEGMO Modell bilden. Jedem Hydrotop sind Eigenschaften wie mittlere Höhe, Gefälle, Exposition, Landnutzungstyp, Bodenart, etc. zugewiesen. Mit Hilfe von Parametertabellen können die Landnutzung und der Boden charakterisiert werden.

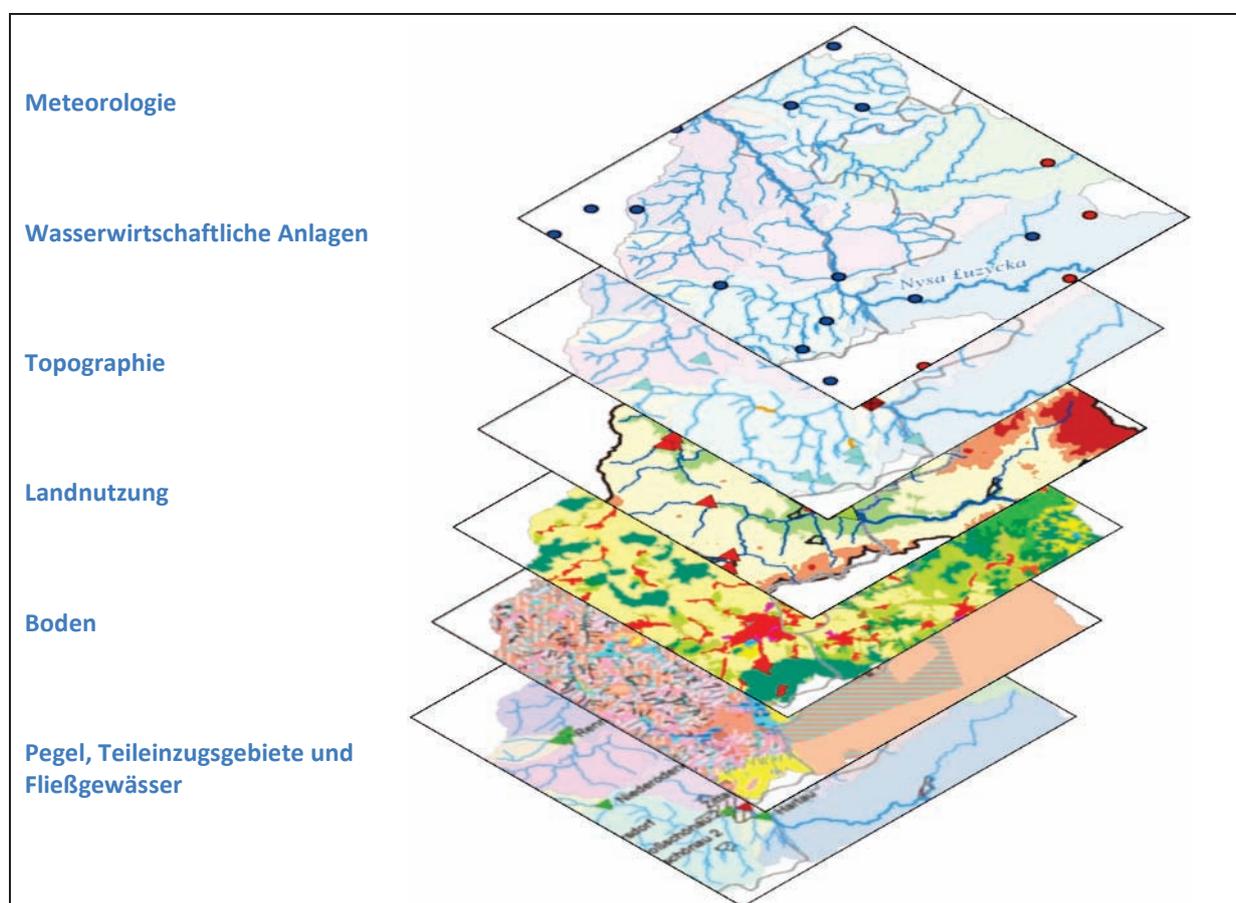


Abbildung 14: Notwendige Daten zum Aufbau des Gebietsmodell Lausitzer Neiße

Aus der Vielzahl der möglichen Modellansätze kamen in dem Projekt folgende zur Anwendung:

- Simulation der Konzentration des Landoberflächenabfluss zum Vorfluter: kinematische Welle
- Simulation des Grundwasserabflusses: Einzellinearspeicher
- Simulation der Abflussprozesse in oberirdischen Gewässern: Speicherkaskaden, Kalinin-Miljukov-Verfahren

#### Implementierung Bewirtschaftungsdaten

Um alle Bewirtschaftungsmaßnahmen im Einzugsgebiet berücksichtigen zu können, wurden Modellanpassungen vorgenommen. Damit ist es möglich, die Flutung der zukünftigen Tagebau-restlöcher zu simulieren und verschiedene Bewirtschaftungsszenarien zu implementieren. Zunächst wurden für den Istzustand alle bekannten Entnahmen und Einleitungen größer 10 l/s im Gebiet recherchiert und implementiert. Diese wurden in Grundwasser- und Oberflächenwasserbewirtschaftungen kategorisiert. Den im Modell vorhandenen Fließgewässerabschnitten wurden die entsprechenden Entnahmen und Einleitungen zugewiesen (Abbildung 11).

#### 3.1.3. Kalibrierung und Validierung Modell ArcEGMO

##### Methode

Nachdem Modellaufbau ist eine Optimierung der Modellparameter im Rahmen einer sogenannten Modellkalibrierung notwendig. Die Kalibrierung des Modells dient der Anpassung der Modellergebnisse an Beobachtungsdaten. Aus Mangel an weiteren geeigneten Beobachtungsdaten wird nur der gemessene Durchfluss an den Pegeln für die Kalibrierung herangezogen.

Sind die sensitiven Modellparameter bekannt, können diese innerhalb ihrer physikalisch sinnvollen Grenzen verändert und optimiert werden. In diesem Projekt wurde die Modellkalibrierung von dem Modellentwickler BAH mit dem Algorithmus Covariance Matrix Adaption Evolution Strategy (CMAES) durchgeführt. Dabei handelt es sich um einen evolutionären Algorithmus für schwierige nicht lineare, nicht konvexe Black-Box Optimierungsprobleme. Der Algorithmus befähigt zur Optimierung mehrerer Parameter gleichzeitig. Auf die Details der Methode soll hier nicht weiter eingegangen werden.

##### Kalibrierungsgebiete und -parameter

Für die Optimierung wurde das Modellgebiet entsprechend der Einzugsgebiete und Durchflusspegel in Kalibrierungsgebiete unterteilt. Daraus ergaben sich Kopfgebiete und Zwischengebiete. Im ersten Schritt wurden die Parameter für alle Kopfgebiete ermittelt. Anschließend wurden die Zwischengebiete kalibriert, wobei die ermittelten optimalen Parameter des jeweils oberhalb liegenden Gebietes beibehalten wurden. Ausgehend von den Kopfgebieten wurde in Fließrichtung kalibriert. Es wurden vier deutsche und vier polnische Einzugsgebiete als Kopfgebiete ( Neuschönau 2, Seifhennersdorf, Rennersdorf 3, Niederoderwitz 3, Hartau; Turoszów, Zgorzelec-Ujazd, Ostróžno) und sechs Zwischeneinzugsgebiete (Tauchritz, Réczyn, Zittau 1, Rosenthal, Görlitz und Podrosche 2) identifiziert. Um die optimalen Parametersätze zu ermitteln, waren hunderte Rechenläufe für die Kopfgebiete und bis zu 2000 Rechenläufe pro Gebiet für die Zwischengebiete notwendig.

Aufgrund der physikalisch fundierten Ansätze im Modellsystem ArcEGMO-PSCN und die Tatsache, dass die Kennwerte größtenteils in den Datengrundlagen enthalten oder aus diesen abgeleitet werden konnten, war eine direkte Kalibrierung nur für wenige Parameter bzw. bedingt sinnvoll. Insgesamt wurden sieben Parameter, die die Auslaufkonstanten, Speichergrößen des langsamen und schnellen Grundwasserspeichers sowie Retentionsparameter für das Gewässernetz beschreiben,

optimiert. Für jeden Parameter wurden die möglichen Grenzen und ein Startwert für die Kalibrierung vorgegeben.

#### Zielfunktionen und Gütemaße

Die genannten Parameter werden mit dem Ziel optimiert, dass der simulierte Abfluss mit dem gemessenen bestmöglich übereinstimmt. Bezugspunkt für den Vergleich bilden die obengenannten Pegel. Das Modell wurde auf Tageswertbasis betrieben, so dass zum einen die täglichen Abflüsse und zum anderen die monatlichen Abflüsse der Simulation mit der Beobachtung verglichen und verbessert werden konnten. Die Kalibrierung erfolgte für den Zeitraum 1971-2000, während 2001-2010 als Validierungszeitraum diente. Zur Beurteilung der Güte der Anpassungen des Abflusses wurden die weit verbreiteten Gütemaße Nash-Sutcliff-Effizienz und der Bilanzfehler (Volumenfehler) herangezogen. Ziel der Optimierung ist es, den Volumenfehler zu minimieren und die Nash-Sutcliff-Effizienz nahe 1 zu bringen. Bei der Nash-Sutcliff-Effizienz wird die Differenz zwischen beobachteten und simulierten Werten als Quadrat berechnet. Das hat den Nachteil, dass größere Werte stark überbewertet und kleine Werte unterbewertet oder sogar vernachlässigt werden (Legates & McCabe, 1999). Zudem ist das Gütemaß nicht sehr sensibel gegenüber systematisch zu hoch bzw. zu tief berechneten Werten.

#### Ergebnis der Kalibrierung

Die Güte der Anpassung konnte durch die Optimierung der Parameter deutlich verbessert werden. Abbildung 15 zeigt die Güte der Optimierung anhand der Nash-Sutcliff-Effizienz auf Tageswertbasis für alle kalibrierten Pegel. Vor der Kalibrierung wiesen die täglichen Abflüsse an den Pegeln alle negative Effizienzen auf. Durch die Parameteroptimierung wurden nach der Kalibrierung deutlich höhere Effizienzen erzielt. An fast allen Pegeln wurden Effizienzen zwischen 0.3 und 0.6 erreicht.

Auf Monatswertbasis konnten ebenfalls für fast alle Pegel die Effizienzen verbessert werden (vgl. Abbildung 16). Die Effizienzen liegen auf Monatswertbasis zwischen 0.4 und 0.8. Dies sind ausreichende bis gute Anpassungen. Die Verbesserung der Effizienz ist auf Tageswertbasis stärker ausgeprägt als für die Monatswerte, da die Abflussdynamik verändert wird. Diese Effekte mitteln sich auf Monatsbasis heraus. Mögliche Ungenauigkeiten oder Fehler in den Messdaten sowie nicht berücksichtigte Wassernutzungen bedingen schlechtere Anpassungen.

Lediglich die Pegel Rennersdorf und Zgorzelec-Ujazd konnten nicht zufriedenstellend angepasst werden. Die Pegel Krauschwitz und Przewóniki konnten aufgrund der Randlage und über die Modellgrenzen hinausgehende Gebietsanteile nicht kalibriert werden. Die Modellergebnisse für die beiden Gebiete sind nicht belastbar. Bei der Bewertung und Interpretation der Ergebnisse müssen diese Umstände berücksichtigt werden.

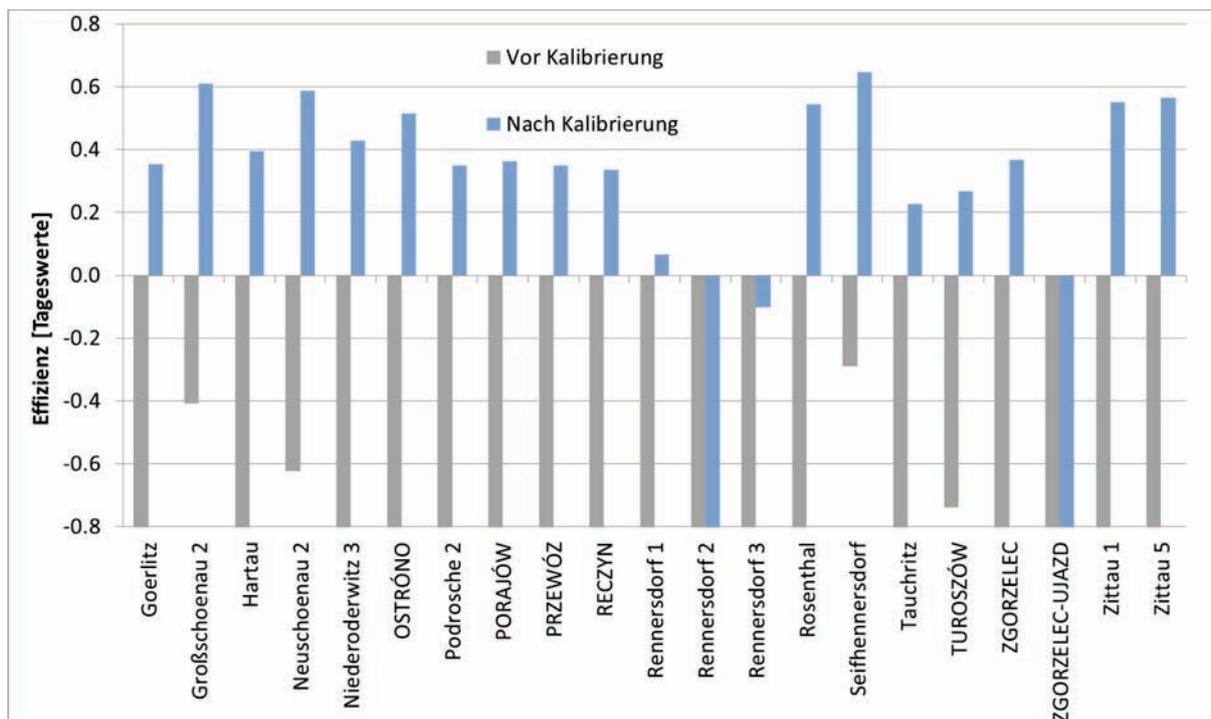


Abbildung 15: Nash-Sutcliff-Effizienz vor und nach der Kalibrierung an Pegeln auf Tageswertbasis (BAH Berlin)

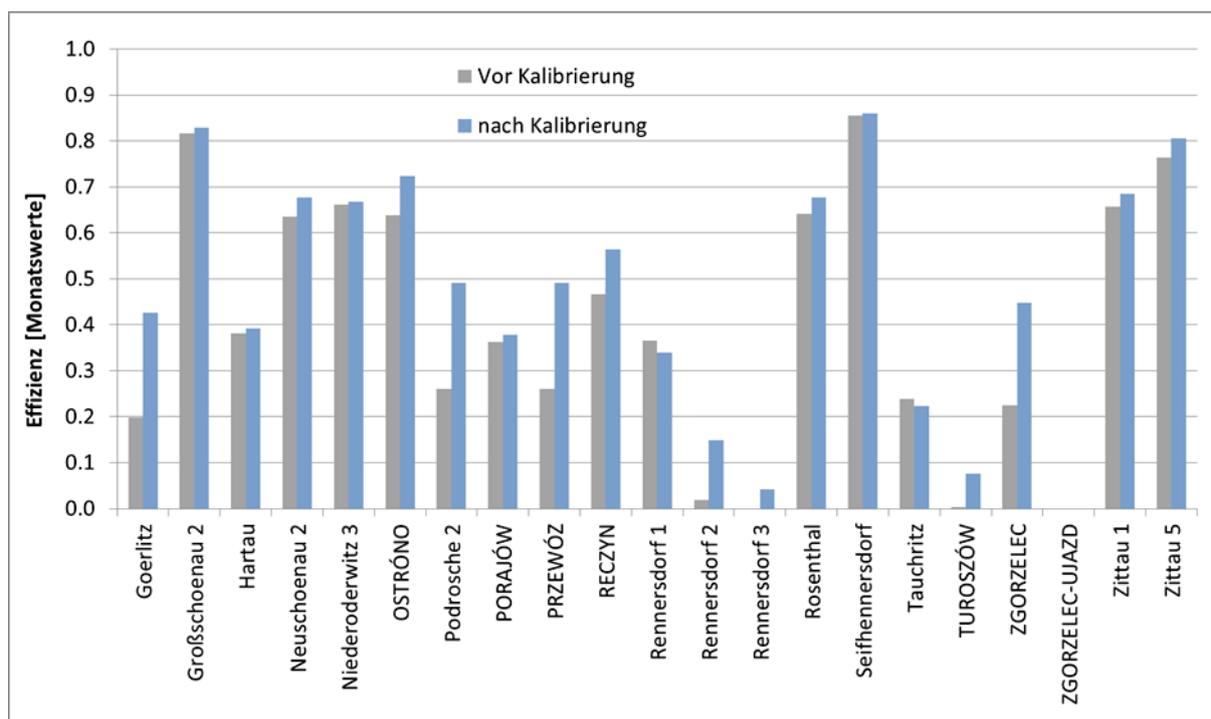


Abbildung 16: Nash-Sutcliff-Effizienz vor und nach der Kalibrierung an Pegeln auf Monatswertbasis (BAH Berlin)

### 3.1.4. Niederschlag-Abfluss-Modellierung mit dem Modellsystem MIKE NAM

In der ersten Phase des Projekts NEYMO wird ein Modellsystem zur hydrologischen Modellierung ausgewählt. Auf der Grundlage früherer Modelluntersuchungen des Staatlichen Forschungsinstituts

für Wasserwirtschaft und Meteorologie (IMGW-PIB) wurde entschieden, dass zur Erreichung der Projektziele das Niederschlag-Abfluss-Modell MIKE NAM und das Wasserhaushaltsmodell MIKE BASIN am besten geeignet sind. Anschließend wurden das Vorgehen und alle weiteren Phasen der Wasserhaushaltsmodellierung festgelegt, die nach dem folgenden Schema erfolgt (Abbildung 17).



Abbildung 17: Schematische Darstellung der Modellierung mit dem Modellsystem MIKE NAM

Im ersten Schritt wurde eine Niederschlag-Abfluss-Modellierung mit dem Modell MIKE NAM durchgeführt. MIKE NAM ist ein deterministisches konzeptionelles Modell mit unterschiedlichen Speichern, das mit Hilfe mathematischer Gleichungen Wasserretention in den interagierenden Speichern (Oberflächenspeicher unter Berücksichtigung der Schneeschmelze sowie Zwischen- und Grundwasserspeicher) idealisiert beschreibt (Abbildung 18).

Im Oberflächenspeicher wird Niederschlagswasser durch Vegetation und Muldenspeicherung in oberen Bodenschichten gespeichert. Die Menge des dem Oberflächenspeicher zugeführten Niederschlags- und Schmelzwassers ergibt sich grundsätzlich aus den Komponenten Verdunstung und Zwischenabfluss.

Der Zwischenspeicher beschreibt die Wasserverhältnisse in der Wurzelzone, also in der Bodenschicht, in der Pflanzen über ihr Wurzelsystem Wasser aufnehmen.

Der Grundwasserspeicher bildet die Verhältnisse unterhalb des Zwischenspeichers ab und kann als linearer Standardspeicher betrachtet werden. In diesem wird der Abfluss und der Speicherinhalt geteilt durch dessen Zeitkonstante in ein proportionales Verhältnis zueinander gesetzt. Der Speicher kann aber auch als oberflächennaher Speicher dargestellt werden, da die Speicherbeschreibung zusätzlich Angaben zum Grundwasserflurabstand enthält. Aufgrund der räumlichen und geografischen Unterschiede wird das Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße in 16 wasserbilanztechnisch relevante Einzugsgebiete, die sich aus 11 kontrollierten Zuflussgebieten (Betrachtung der Zuflüsse als einheitliche Systeme ohne Aufteilung in Subsysteme – Teileinzugsgebiete) und dem direkten Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße mit 5 Einzugsgebieten zusammensetzt (Abbildung 18). Für alle 16 Teileinzugsgebiete wurde das Niederschlag-Abfluss-Modell berechnet.

Grundlegende Komponenten im Modell sind:

- die täglichen Niederschlagssummen (P),
- tägliche Evapotranspiration (Ep, Ea)
- mittlere monatliche Abflüsse der Fließgewässer (Q).

Die Hauptparameter für die Beschreibung des Einzugsgebietes erfordern eine detaillierte Analyse der Archivdaten. Folgende Parameter mussten bestimmt werden:

- *maximale Kapazität des Bodenspeichers ( $I_{max}$ )* erfordert für die simulierten Systeme Angaben zur Geologie, Bodentypen, Landnutzung, Ausdehnung der Wurzelschicht und Bodenarten,
- *maximale Kapazität des Oberflächenspeichers ( $U_{max}$ )* erfordert Analyse der Daten zur Landnutzung im Einzugsgebiet, Artenzusammensetzung der Wälder und der Nutzpflanzen,
- *Koeffizienten der Komponenten des Oberflächen- (OF), Zwischen- (IF) und Grundwasserabflusses ( $CK_{BF}$ )* erfordern hydrologische Daten sowie Angaben zu Hydrografie in Bezug auf die modellierten Systeme.

Alle Parameter und Variablen für die Gleichungen wurden auf der Grundlage physikalischer Eigenschaften des Einzugsgebietes bestimmt und bei der Kalibrierung als Mittelwerte, teilweise als Schätzwerte in das Modell eingearbeitet.

Die Prüfung der Plausibilität der Modellierung erfolgt mit Hilfe eines optischen Vergleichs der Modellergebnisse, der Quelldaten und folgender statistischer Effizienzanalysen:

- NSE – Analyse der Effizienz bei langfristigen Simulationen;
- R - Analyse der wechselseitig bedingten Entwicklung betrachteter Eigenschaften;
- BIAS – Analyse wesentlicher Trends modellierter Charakteristiken.

Alle 16 Niederschlag-Abfluss-Modelle wurden für die betrachteten Teileinzugsgebiete mit Daten aus dem Zeitraum 1971 bis 2000 kalibriert. Anschließend erfolgte die Validierung der Modelle mit einer unabhängigen Stichprobe von Daten aus dem Zeitraum 2000 bis 2010. Nach Gewährleistung der erforderlichen Modellqualität wurde abschließend eine Simulation der vollständigen Zeitreihe 1971-2010 durchgeführt (Abbildung 19).

Die Ergebnisse der Simulationen für die gesamte Zeitreihe in allen Bilanzgebieten der Lausitzer Neiße werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

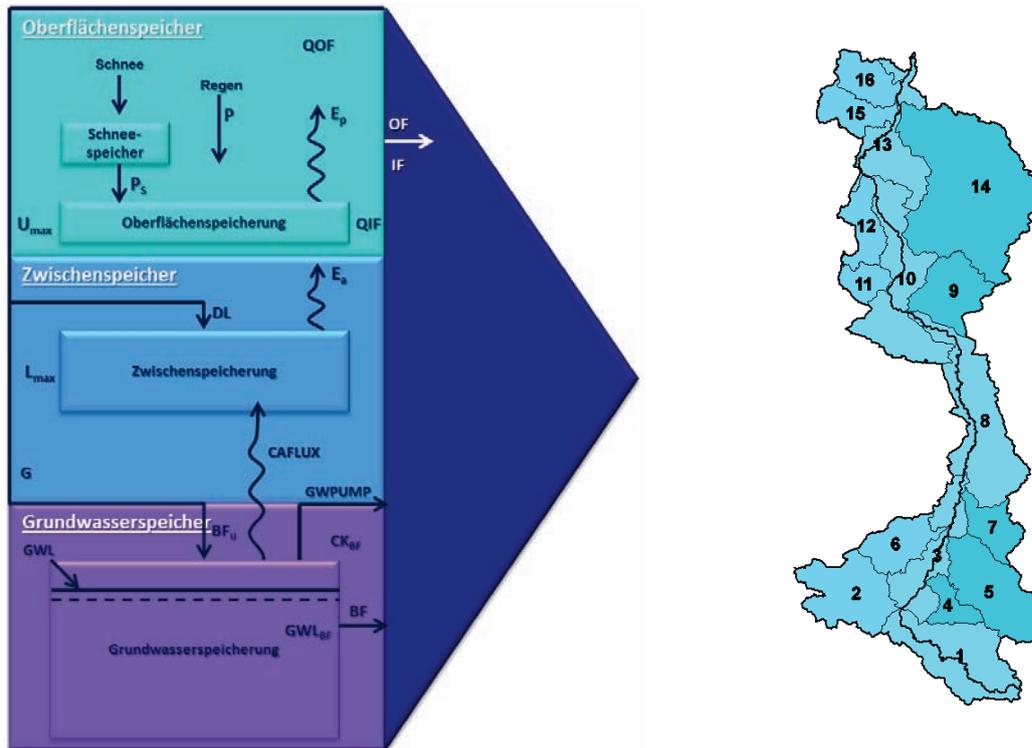


Abbildung 18: Schematische Darstellung des Modellsystems MIKE NAM und die Einteilung des Einzugsgebietes der Lausitzer Neiße in wasserbilanzrelevante Einzugsgebiete



Abbildung 19: Methodologischer Ansatz bei der Kalibrierung und Validierung der Modelle MIKE NAM

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in der ersten Phase der Berechnungen mit dem Niederschlag-Abfluss-Modellen MIKE NAM für die einzelnen Teileinzugsgebiete Simulationen mit Daten aus der Vergangenheit durchgeführt wurden. Nach Gewährleistung ausreichender Abbildungsqualität erfolgen in einem weiteren Schritt Simulationen mit Eingangsdaten aus Klimaprojektionen. Die Datenreihen der modellierten Abflüsse für den simulierten Zeitraum wurden anschließend als Eingangsdaten für das Modell MIKE BASIN verwendet.

### 3.1.5. Simulationen mit Daten aus dem vergangenen Zeitraum 1971-2010 mit dem Niederschlag-Abfluss-Modellsystem MIKE NAM

Die Niederschlag-Abfluss-Modelle wurden für 16 Bilanzgebiete aufgebaut (Abbildung 20):

- 11 kontrollierte Zuflussgebiete, die einheitliche Systeme ohne Aufteilung in Subsysteme – Teileinzugsgebiete darstellen (Mandau, Miedzianka, Witka, Pließnitz, Czerwona Woda, Skroda, Föhrenfließ, Malxe-Neiße-Kanal, Lubsza, Schwarzes Fließ, Grano-Buderoder-Mühlenfließ),
- direktes Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße mit 5 Einzugsgebieten (in den Abschnitten: von der Quelle bis zur Mandau, vor der Mandau bis zum Jędrzychowicki Potok, vom Jędrzychowicki Potok bis Skroda, von Skroda bis zum Malxe-Neiße-Kanal, vom Malxe-Neiße-Kanal bis zur Mündung in die Oder).

Eine Übersicht über die Bilanzgebiete und deren Fläche ist in der Tabelle 7 dargestellt.

**Tabelle 7: Übersicht über Bilanzgebiete, für die Niederschlag-Abfluss-Modelle erstellt wurden**

EZG Nr.	Beschreibung	Fläche [km <sup>2</sup> ]
1	Einzugsgebiet Lausitzer Neiße von ihrer Quelle bis zur Mandau-Mündung	388.0
2	Einzugsgebiet der Mandau von der Quelle bis zur Mündung	296.0
3	Abschnitt des direkten Einzugsgebiets der LN von der Mandau-Mündung bis zur Mündung des Bachs Jędrzychowicki Potok (ohne die Zuflüsse Miedzianka, Witka, Pließnitz, Czerwona Woda)	249.6
4	Einzugsgebiet der Miedzianka von der Quelle bis zur Mündung	82.4
5	Einzugsgebiet der Witka von der Quelle bis zur Mündung	326.0
6	Einzugsgebiet der Pließnitz von der Quelle bis zur Mündung	164.0
7	Einzugsgebiet der Czerwona Woda von der Quelle bis zur Mündung	131.0
8	Abschnitt des direkten Einzugsgebiets der Lausitzer Neiße von der Mündung des Baches Jędrzychowicki Potok bis zur Skroda-Mündung	471.0
9	Einzugsgebiet der Skroda von der Quelle bis zur Mündung	223.0
10	Abschnitt des direkten Einzugsgebiets der Lausitzer Neiße von der Skroda-Mündung bis zur Mündung des Malxe-Neiße-Kanals (ohne den Zufluss Föhrenfließ)	421.7
11	Einzugsgebiet des Föhrenfließ von der Quelle bis zur Mündung	81.3
12	Einzugsgebiet des Malxe-Neiße-Kanals von der Quelle bis zur Mündung	138.0
13	Abschnitt des direkten Einzugsgebiets der LN von der Mündung des Malxe-Neiße-Kanals bis zur Odermündung (ohne die Zuflüsse Lubsza, Schwarzes Fließ und Grano-Buderoser-Mühlenfließ)	250.0
14	Einzugsgebiet der Lubsza von der Quelle bis zur Mündung	910.0
15	Einzugsgebiet des Schwarzen Fließ von der Quelle bis zur Mündung	132.0
16	Einzugsgebiet des Grano-Buderoser-Mühlenfließ von der Quelle bis zur Mündung	131.0

Die Eingangsdaten für die Niederschlag-Abfluss-Modelle zur Abbildung des gegenwärtigen Zustandes bildeten Datenreihen aus der Vergangenheit, die aus der im Projekt NEYMO gemeinsam erstellten Datenbank entnommen wurden. Die in das Modell eingegebenen Eingangsdatenreihen aus ausgewählten Messstationen wurden in der Tabelle 8 zusammengestellt. Zur Optimierung der

Einstellungen und unter Berücksichtigung der Verwendung der Niederschlag-Abfluss-Modelle für die Berechnung simulierter Abflüsse wurden die Modelle mit den längsten verfügbaren Datenreihen kalibriert und validiert. Der Zeitraum für die Kalibrierung und Validierung der Modelle umfasste in den meisten Fällen 11.1971-10.2010 (Tabelle 8). Die simulierte Periode musste jedoch bei geringer Verfügbarkeit von Daten und zur Optimierung der Einstellungen der Modelle für einige Einzugsgebiete verkürzt werden (Tabelle 8).

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Kalibrierung für die 16 Modellgebiete dargestellt.

**Tabelle 8: Simulierte Zeiträume mit Übersicht über Messstellen, die beim Aufbau und Kalibrierung der Niederschlag-Abfluss-Modelle herangezogen wurden**

EZG Nr.	Fließgewässer	Kalibrierte Pegel	Simulations-zeitraum	Niederschlagsdaten	ETP-Daten
1	Nysa Łużycka	Porajów	11.1971-10.2010	Liberec	Görlitz
2	Mandau	Zittau 5	11.1971-10.2010	Varnsdorf	Cottbus
3	Nysa Łużycka	Porajów, Sieniawka, Zgorzelec	11.1980-10.1998	Sieniawka	Görlitz
4	Miedzianka	Turoszów	11.1971-10.2010	Minsek	Görlitz
5	Witka	Ostróžno	11.1971-10.2010	Hejnice	Görlitz
6	Pließnitz	Tauchritz	11.1971-10.2010	Kemnitz	Görlitz
7	Czerwona Woda	Zgorzelec Ujazd	11.1971-10.2010	Sulików	Görlitz
8	Nysa Łużycka	Zgorzelec, Klein Bademeusel, Schlagsdorf	11.1971-10.2010	Sobolice	Görlitz
9	Skroda	Przewoźniki	11.1971-10.2010	Łęknica	Cottbus
10	Nysa Łużycka	Klein Bademeusel, Schlagsdorf, Gubin	01.1995-10.2008	Łęknica	Cottbus
11	Föhrenfließ	Zschorno	11.1977-10.2010	Doeborn	Cottbus
12	Malxe-Neiße-Kanal	Mulknitz	10.1989-12.2010	Kompendorf	Cottbus
13	Nysa Łużycka	Gubin	01.1971-10.2004	Gubin	Cottbus
14	Lubsza	Plešno	11.1971-10.2010	Forst-Klein Badenmeusel	Görlitz
15	Schwarzes Fließ	Guben 5 Sprucke	11.2000-10.2010	Gubin	Görlitz
16	Grano-Buderoser-Mühlenfließ	Granoer Hammer	01.1997-10.2002	Gubin	Cottbus

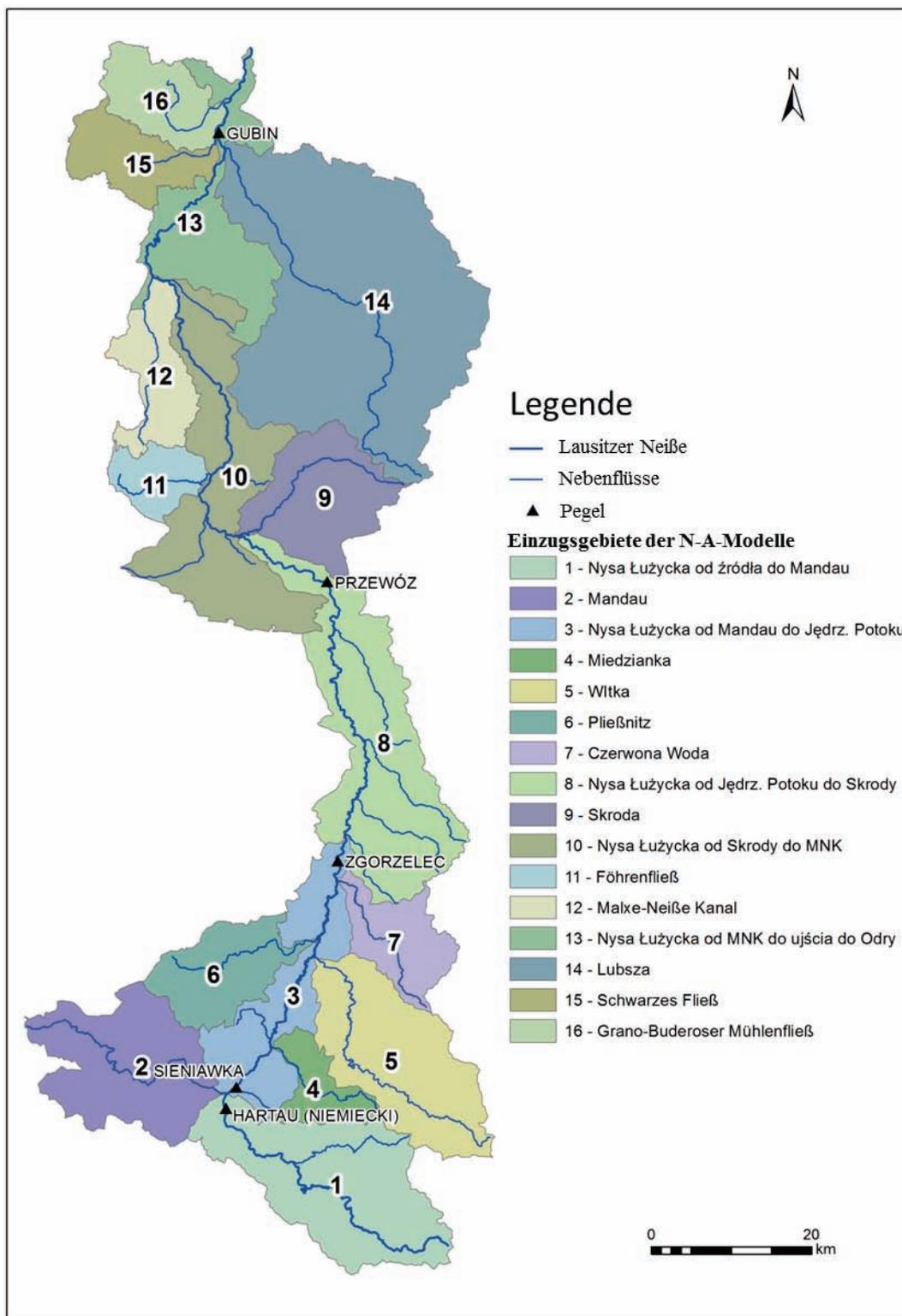
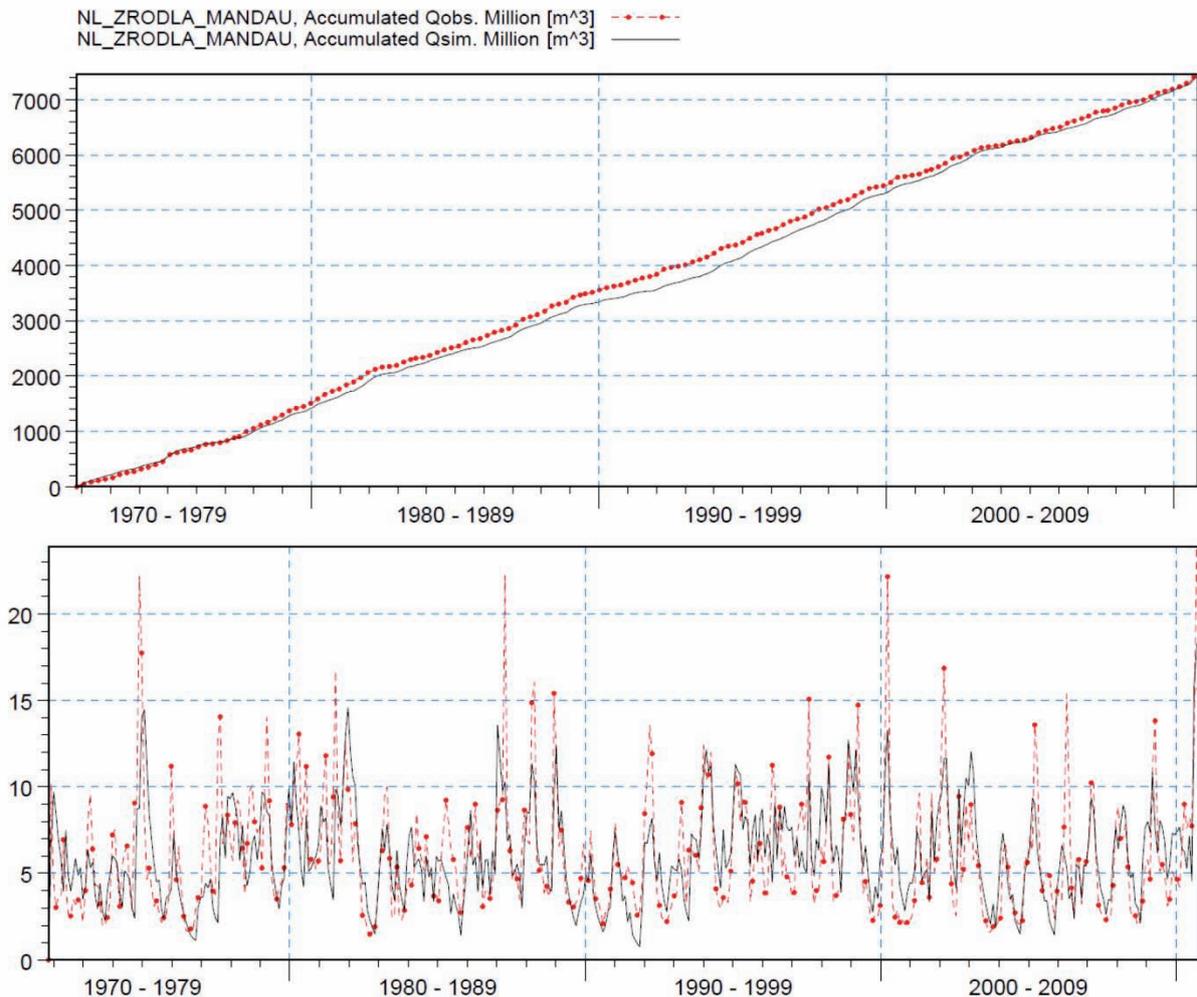


Abbildung 20: Aufteilung des Einzugsgebietes der Lausitzer Neiße in bilanzrelevante Teileinzugsgebiete

### Abschnitt Lausitzer Neiße von ihrer Quelle bis zur Mandau-Mündung (Einzugsgebiet 1)

Das für das Teileinzugsgebiet der Lausitzer Neiße von ihrer Quelle bis zur Mandau-Mündung erstellte Niederschlag-Abfluss-Modell bildet die zeitlichen Abflussschwankungen, wie sie am Pegel in Porajów beobachtet werden, richtig ab.



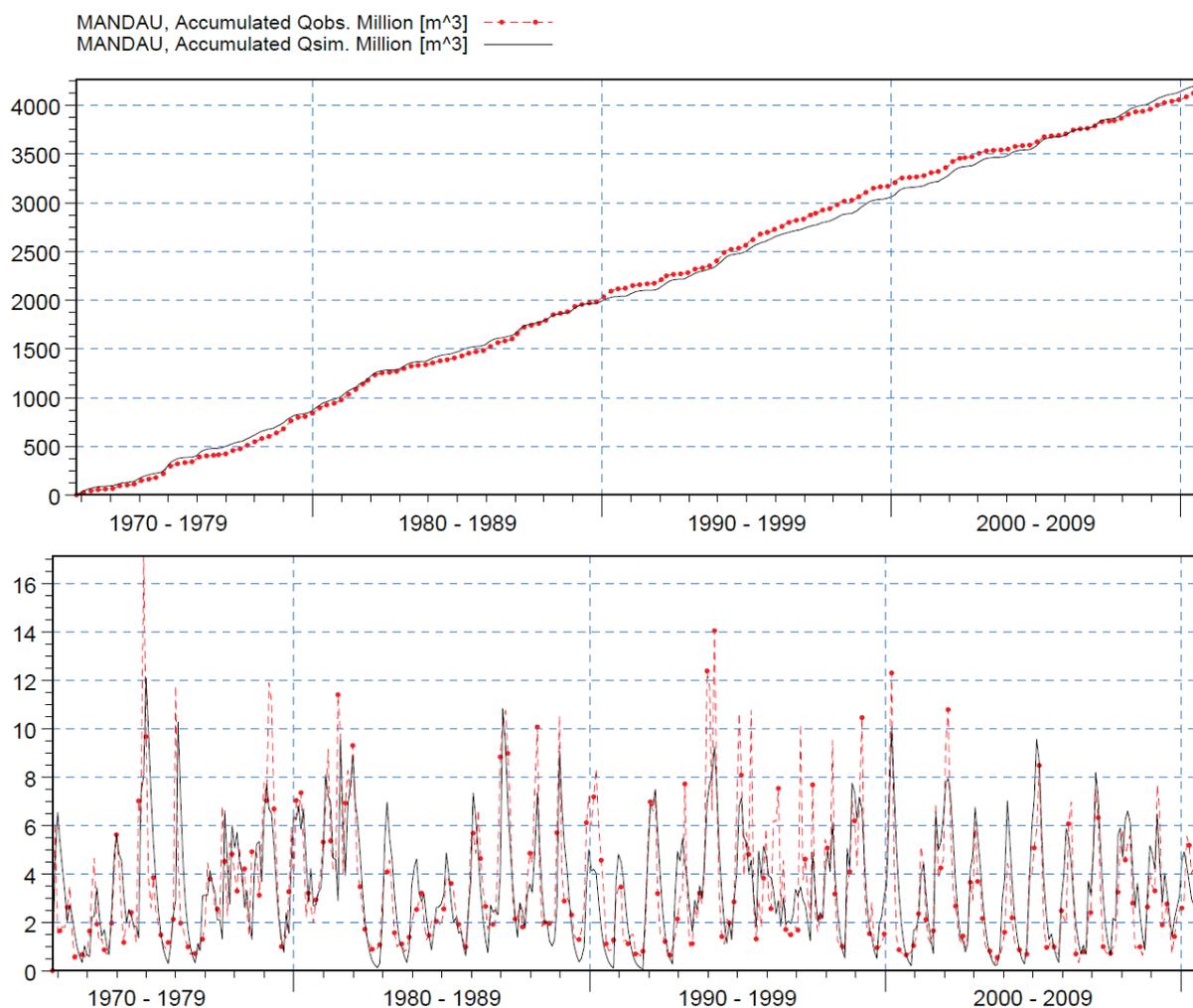
**Abbildung 21: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell des Teileinzugsgebiets der Lausitzer Neiße von ihrer Quelle bis zur Mandau-Mündung**

Das Modell bildet die Abflüsse zeitlich richtig ab. Hohe Abflüsse werden vom Modell in der Regel unterschätzt, geringe Abflüsse hingegen geringfügig überschätzt. Der im Ergebnis der Simulation ermittelte mittlere Abfluss beträgt  $6,02 \text{ m}^3/\text{s}$  und entspricht somit dem am Pegel Porajów gemessenen mittleren Abfluss, der  $6,05 \text{ m}^3/\text{s}$  beträgt (Tabelle 10).

In der kumulierten Darstellung (Abbildung 21) bildet das Modell die beobachteten Messwerte richtig ab. Es zeichnet sich eine systematische Unterschätzung der Messwerte im Zeitraum von 1980 bis 2003 ab. Am Ende des simulierten Zeitraums wird die Wasserbilanz geringfügig unterschätzt.

### Einzugsgebiet der Mandau (Einzugsgebiet 2)

Das für das Einzugsgebiet der Mandau von ihrer Quelle bis zur Mündung erstellte Niederschlag-Abfluss-Modell bildet die zeitlichen Abflussschwankungen, wie sie am Pegel in Zittau 5 beobachtet werden, richtig ab.

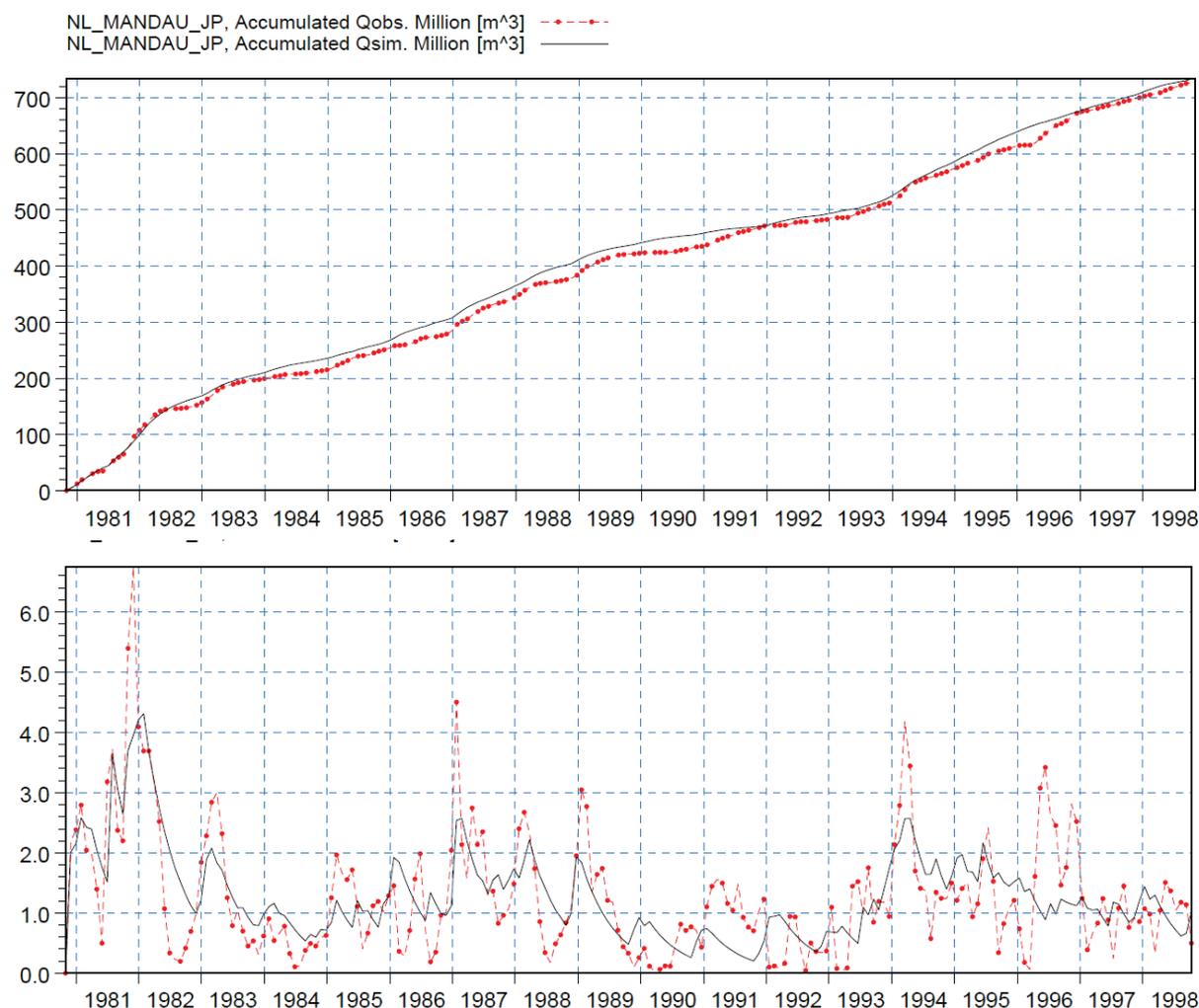


**Abbildung 22: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell des Einzugsgebiets der Mandau**

Das Modell signalisiert hohe Abflüsse zeitlich richtig, mehrheitlich werden diese jedoch unterschätzt. In der kumulierten Darstellung (Abbildung 22) unterschätzt das Modell systematisch die für den Zeitraum 1990 bis 2004 beobachteten Messwerte, für die Zeiträume 1974 bis 1979 sowie 1983 bis 1987 werden diese hingegen systematisch überschätzt. Letztlich wird die Wasserbilanz zum Ende des simulierten Zeitraums geringfügig überschätzt, der im Ergebnis der Simulation ermittelte mittlere Abfluss beträgt  $3,46 \text{ m}^3/\text{s}$  und entspricht somit dem am Pegel Zittau 5 gemessenen mittleren Abfluss ( $3,41 \text{ m}^3/\text{s}$ ) (Tabelle 10).

### Abschnitt des direkten Einzugsgebiets der Lausitzer Neiße von der Mandau-Mündung bis zur Mündung des Bachs Jędrzychowicki Potok (Einzugsgebiet 3)

Das für das Teileinzugsgebiet der Lausitzer Neiße von der Mandau-Mündung bis zur Mündung des Jędrzychowicki Potok erstellte Niederschlag-Abfluss-Modell bildet die aus dem Abfluss-Hydrogramm resultierenden zeitlichen Abflussschwankungen auf dem analysierten Abschnitt richtig ab.



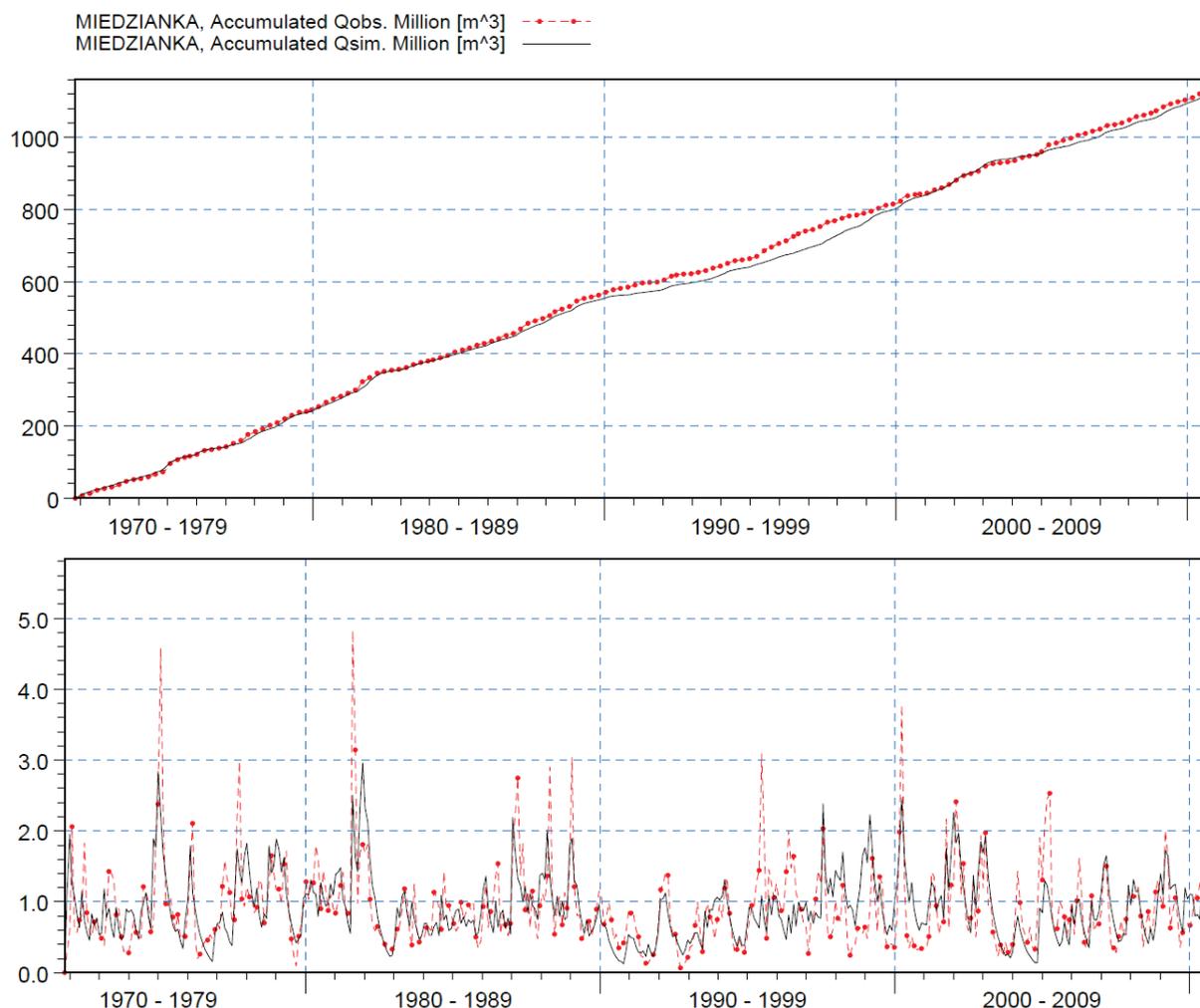
**Abbildung 23: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell für das Teileinzugsgebiets der Lausitzer Neiße von der Mandau-Mündung bis zur Mündung des Jędrzychowicki Potok**

Der Abbildung 23 können die vom Modell zeitlich richtig abgebildeten hohen Abflüsse entnommen werden. Hohe Abflüsse werden vom Modell in der Regel unterschätzt, geringe Abflüsse hingegen geringfügig überschätzt. Der im Ergebnis der Simulation ermittelte mittlere Abfluss beträgt  $1,29 \text{ m}^3/\text{s}$  und entspricht somit dem gemessenen mittleren Abfluss, der  $1,28 \text{ m}^3/\text{s}$  beträgt (Tabelle 10).

In der kumulierten Darstellung (Abbildung 23) werden die Messwerte fast im gesamten Zeitraum systematisch überschätzt. Zum Ende des simulierten Zeitraums wird die Wasserbilanz letztlich geringfügig überschätzt.

### Einzugsgebiet der Miedzianka (Einzugsgebiet 4)

Das für das Einzugsgebiet der Miedzianka von ihrer Quelle bis zur Mündung erstellte Niederschlag-Abfluss-Modell bildet die zeitlichen Abflussschwankungen, wie sie am Pegel in Turoszów beobachtet werden, richtig ab.

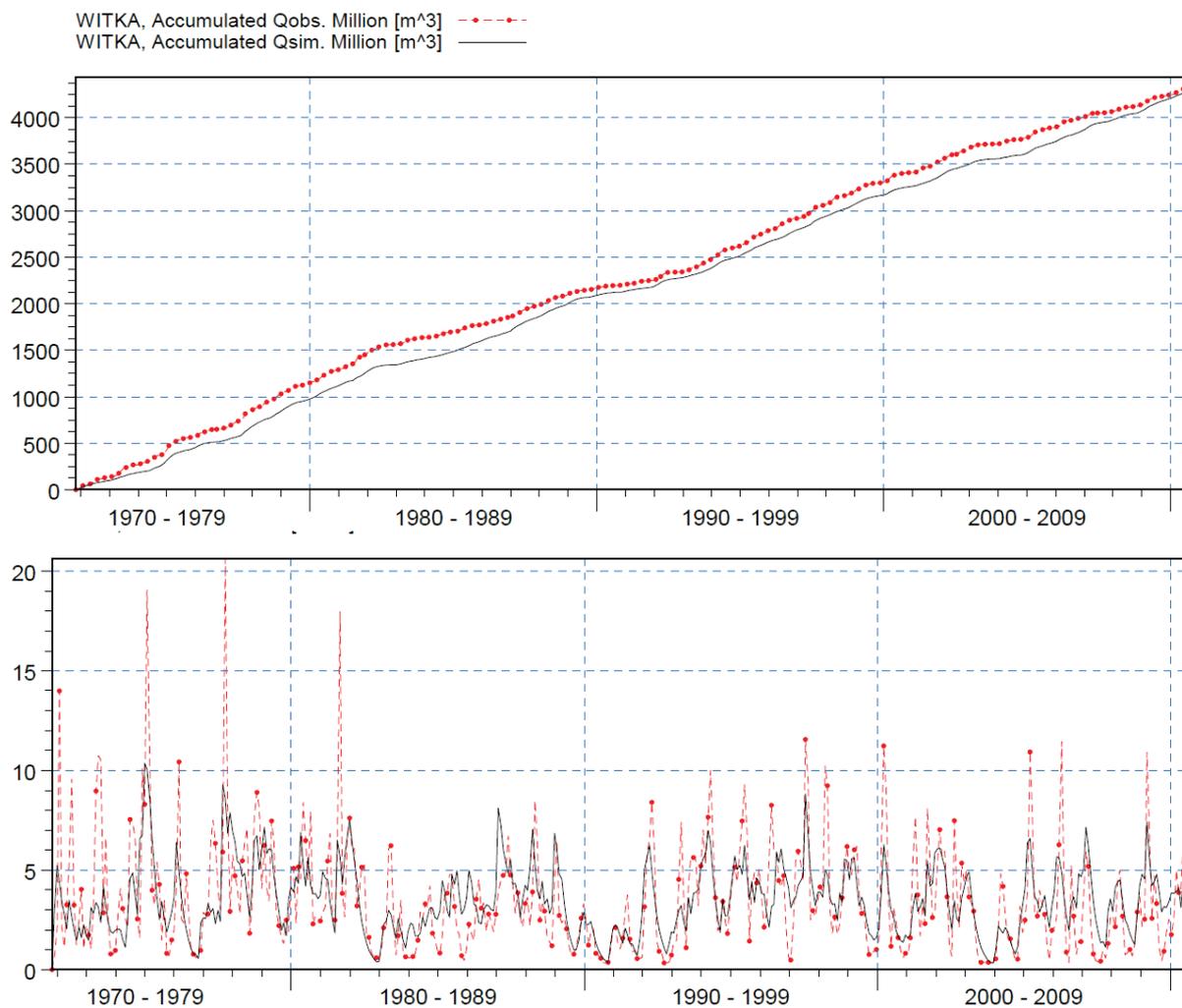


**Abbildung 24: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell für das Einzugsgebiet der Miedzianka**

Das Modell signalisiert hohe Abflüsse zeitlich richtig, mehrheitlich werden diese jedoch unterschätzt. In der kumulierten Darstellung (Abbildung 24) unterschätzt das Modell systematisch die im Zeitraum von 1988 bis 2000 beobachteten Messwerte. Letztlich wird die Wasserbilanz zum Ende des simulierten Zeitraums hin geringfügig überschätzt, der im Ergebnis der Simulation ermittelte mittlere Abfluss beträgt  $0,92 \text{ m}^3/\text{s}$  und entspricht somit dem am Pegel in Turoszów gemessenen Wert, der  $0,94 \text{ m}^3/\text{s}$  beträgt (Tabelle 10).

### Einzugsgebiet der Witka (Einzugsgebiet 5)

Das für das Einzugsgebiet der Witka von ihrer Quelle bis zur Mündung erstellte Niederschlag-Abfluss-Modell bildet die zeitlichen Abflussschwankungen, wie sie am Pegel in Ostróžno beobachtet werden, richtig ab.



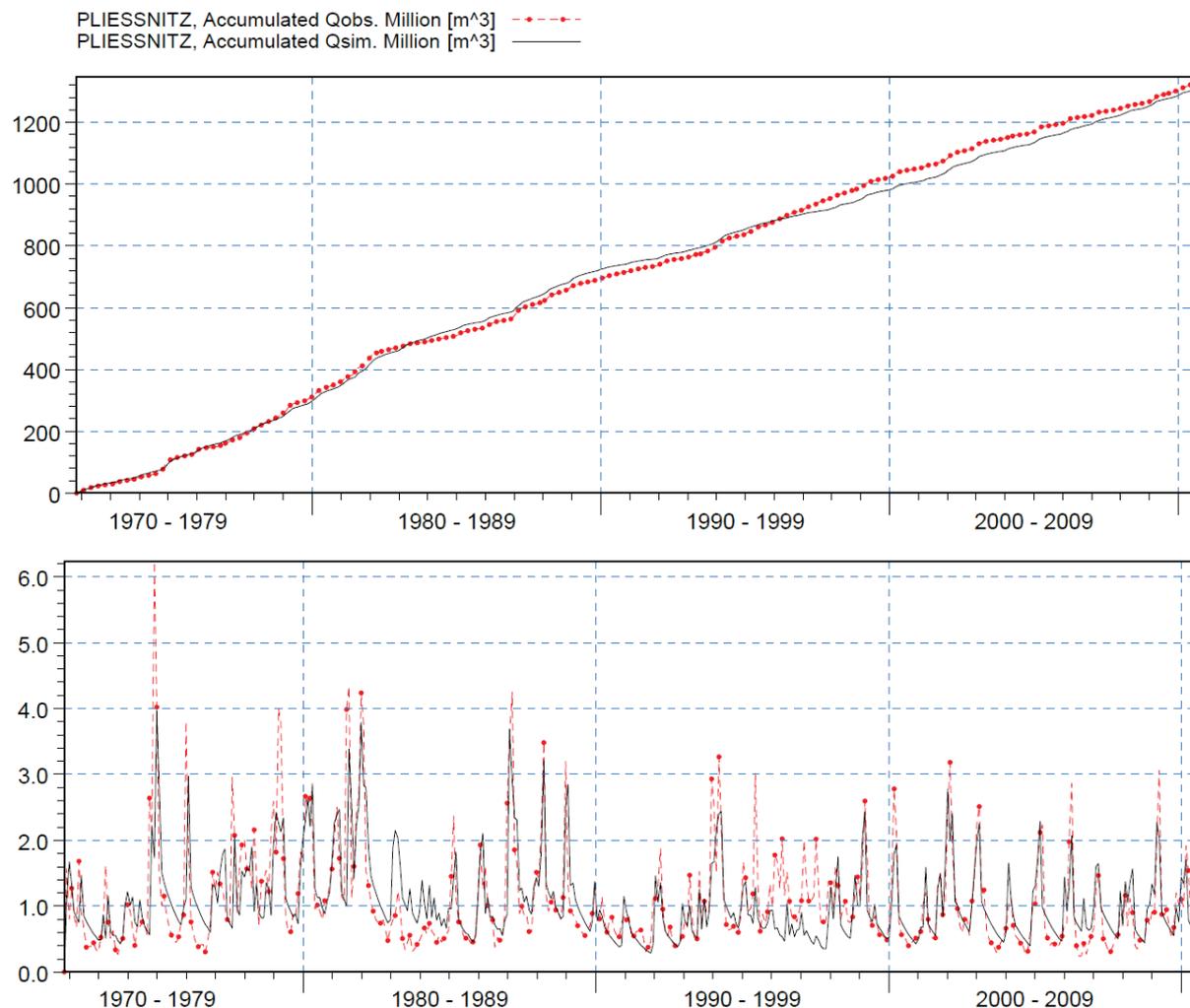
**Abbildung 25: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell für das Einzugsgebiet der Witka**

Das Modell bildet die Abflüsse zeitlich richtig ab. Hohe Abflüsse werden vom Modell in der Regel unterschätzt, geringe Abflüsse hingegen geringfügig überschätzt. Der im Ergebnis der Simulation ermittelte mittlere Abfluss beträgt  $3,52 \text{ m}^3/\text{s}$  und entspricht somit dem am Pegel in Ostróžno gemessenen Wert, der  $3,60 \text{ m}^3/\text{s}$  beträgt (Tabelle 10).

In der kumulierten Darstellung (Abbildung 25) unterschätzt das Modell systematisch die im gesamten Zeitraum beobachteten Messwerte. Letztlich wird die Wasserbilanz zum Ende des simulierten Zeitraums hin geringfügig unterschätzt.

### Einzugsgebiet der Pließnitz (Einzugsgebiet 6)

Das für das Einzugsgebiet der Pließnitz von ihrer Quelle bis zur Mündung erstellte Niederschlag-Abfluss-Modell bildet die zeitlichen Abflussschwankungen, wie sie am Pegel in Tauchritz beobachtet werden, richtig ab.

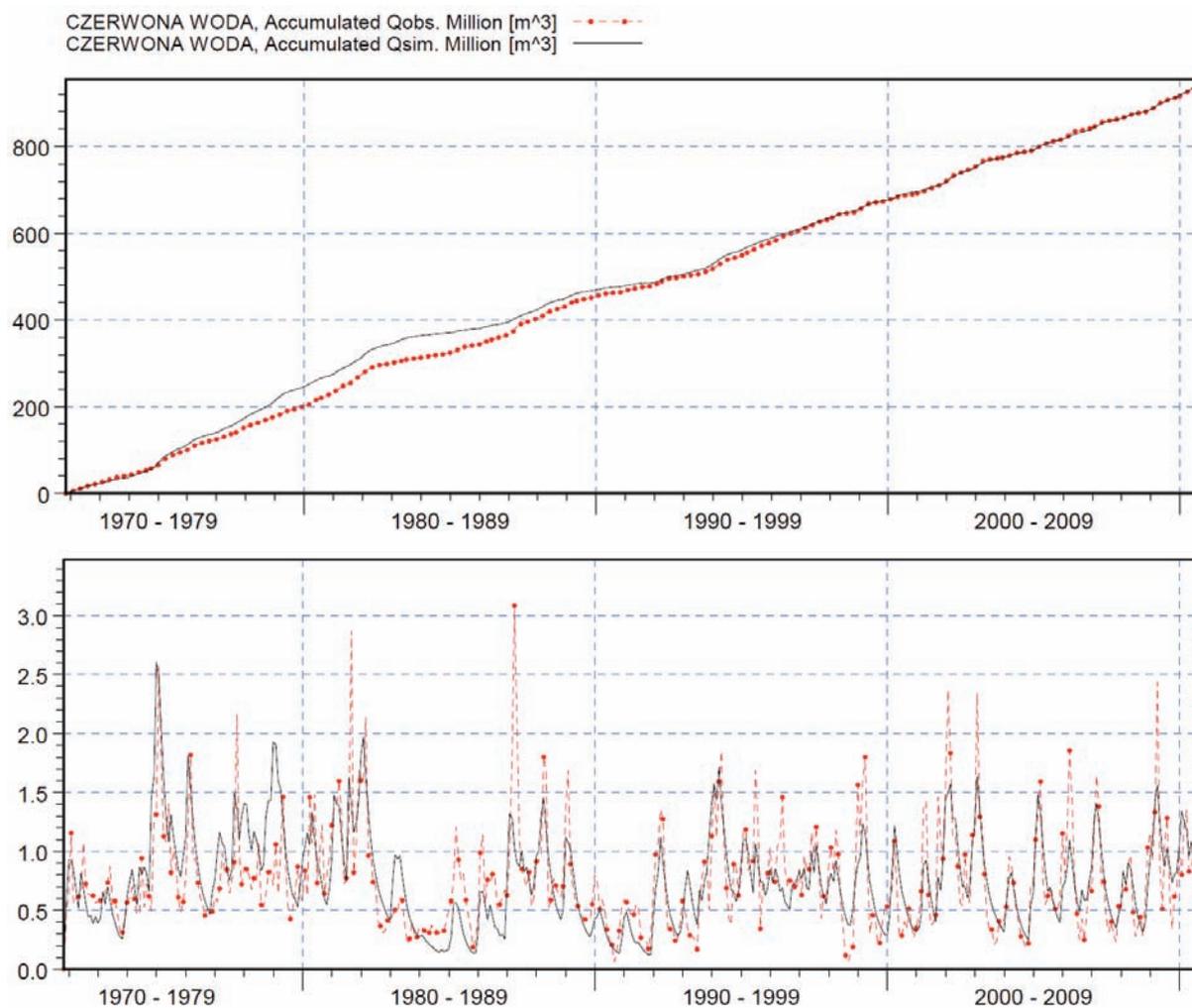


**Abbildung 26: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell für das Einzugsgebiet der Pließnitz**

Das Modell signalisiert hohe Abflüsse zeitlich richtig, mehrheitlich werden diese jedoch geringfügig unterschätzt. Geringe Abflüsse werden in der Regel unterschätzt. In der kumulierten Darstellung (Abbildung 26) überschätzt das Modell systematisch die im Zeitraum von 1984 bis 1994 beobachteten Messwerte und unterschätzt wiederum die von 1997 bis 2010 beobachteten Werte. Letztlich wird die Wasserbilanz zum Ende des simulierten Zeitraums hin geringfügig unterschätzt, der im Ergebnis der Simulation ermittelte mittlere Abfluss beträgt  $1,07 \text{ m}^3/\text{s}$  und entspricht damit dem am Pegel in Tauchritz gemessenen mittleren Abfluss ( $1,09 \text{ m}^3/\text{s}$ ) (Tabelle 10).

### Einzugsgebiet der Czerwona Woda (Einzugsgebiet 7)

Das für das Einzugsgebiet der Czerwona Woda von ihrer Quelle bis zur Mündung erstellte Niederschlag-Abfluss-Modell bildet die zeitlichen Abflussschwankungen, wie sie am Pegel in Zgorzelec Ujazd beobachtet werden, richtig ab.



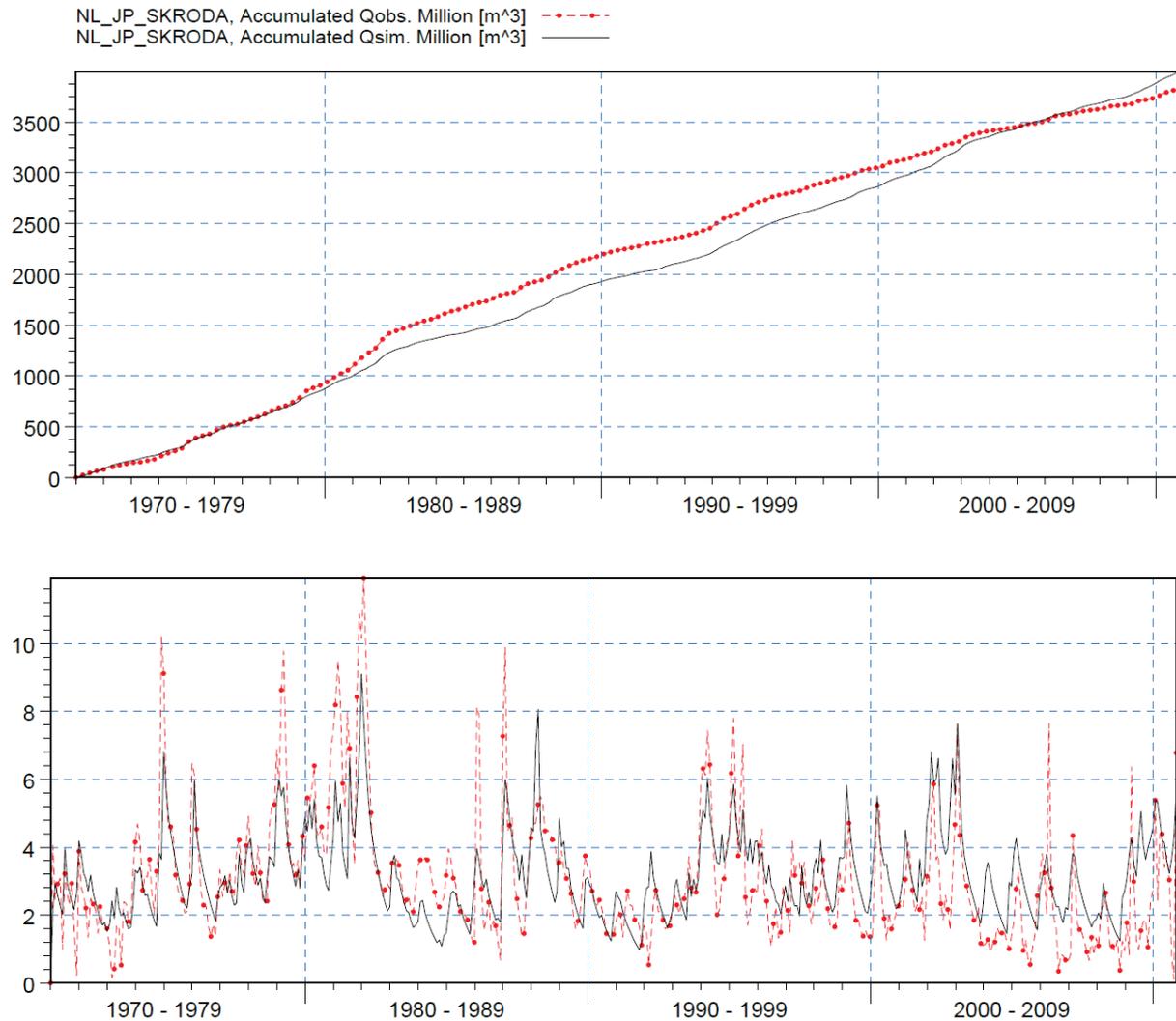
**Abbildung 27: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell für das Einzugsgebiet der Czerwona Woda**

Das Modell signalisiert hohe Abflüsse zeitlich richtig (Abbildung 27), diese werden jedoch mehrheitlich geringfügig unterschätzt. Der im Ergebnis der Simulation ermittelte mittlere Abfluss beträgt  $0,77 \text{ m}^3/\text{s}$  und entspricht somit fast genau dem beobachteten Messwert (Tabelle 10).

In der kumulierten Darstellung (Abbildung 27) bildet das Modell die beobachteten Messwerte richtig ab. Für den Zeitraum von 1974 bis 1991 werden diese systematisch überschätzt. Zum Ende des simulierten Zeitraums wird die Wasserbilanz geringfügig unterschätzt.

### Abschnitt des direkten Einzugsgebiets der Lausitzer Neiße von der Mündung des Baches Jędrzychowicki Potok bis zur Skroda-Mündung (Einzugsgebiet 8)

Das für das Teileinzugsgebiet der Lausitzer Neiße von der Mündung des Baches Jędrzychowicki Potok bis zur Skroda-Mündung erstellte Niederschlag-Abfluss-Modell bildet die aus dem Abfluss-Hydrogramm resultierenden zeitlichen Abflussschwankungen auf dem analysierten Abschnitt richtig ab.



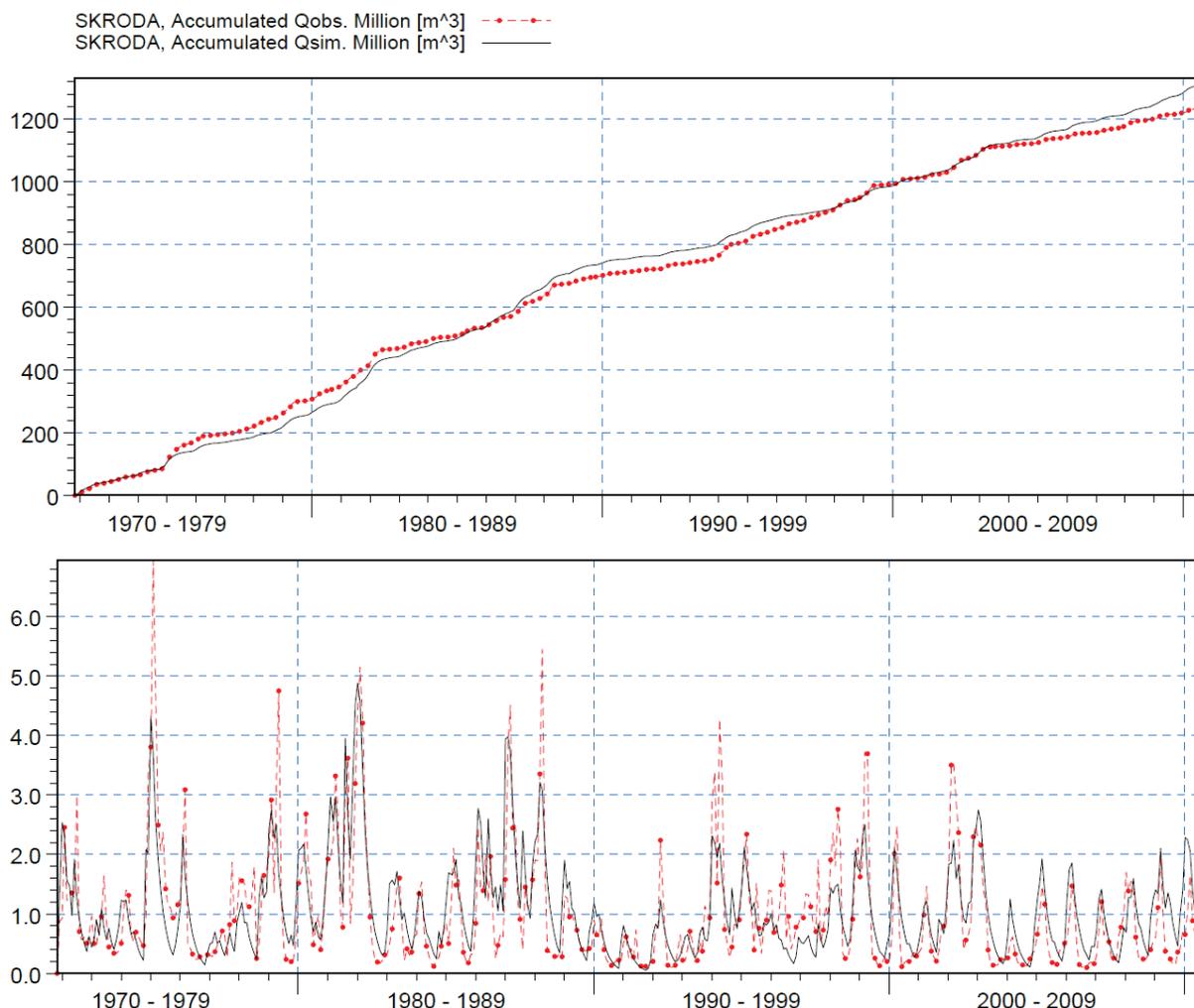
**Abbildung 28: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell für das Teileinzugsgebiet der Lausitzer Neiße von der Mündung des Baches Jędrzychowicki Potok bis zur Skroda-Mündung**

Der Abbildung 28 sind die vom Modell zeitlich gut abgebildeten hohen sowie geringen Abflüsse zu entnehmen. Hohe Abflüsse werden vom Modell in der Regel unterschätzt, geringe Abflüsse hingegen geringfügig überschätzt. Der im Ergebnis der Simulation ermittelte mittlere Abfluss beträgt  $3,17 \text{ m}^3/\text{s}$  und entspricht somit dem beobachteten Messwert, der  $3,04 \text{ m}^3/\text{s}$  beträgt (Tabelle 10).

In der kumulierten Darstellung (Abbildung 28) zeichnet sich eine systematische Unterschätzung der für den Zeitraum von 1980 bis 2003 ermittelten Messwerte ab. Zum Ende des simulierten Zeitraums wird die Wasserbilanz geringfügig überschätzt.

### Einzugsgebiet der Skroda (Einzugsgebiet 9)

Das für das Einzugsgebiet der Skroda von ihrer Quelle bis zur Mündung erstellte Niederschlag-Abfluss-Modell bildet die zeitlichen Abflussschwankungen, wie sie am Pegel in Przewoźniki beobachtet werden, richtig ab.

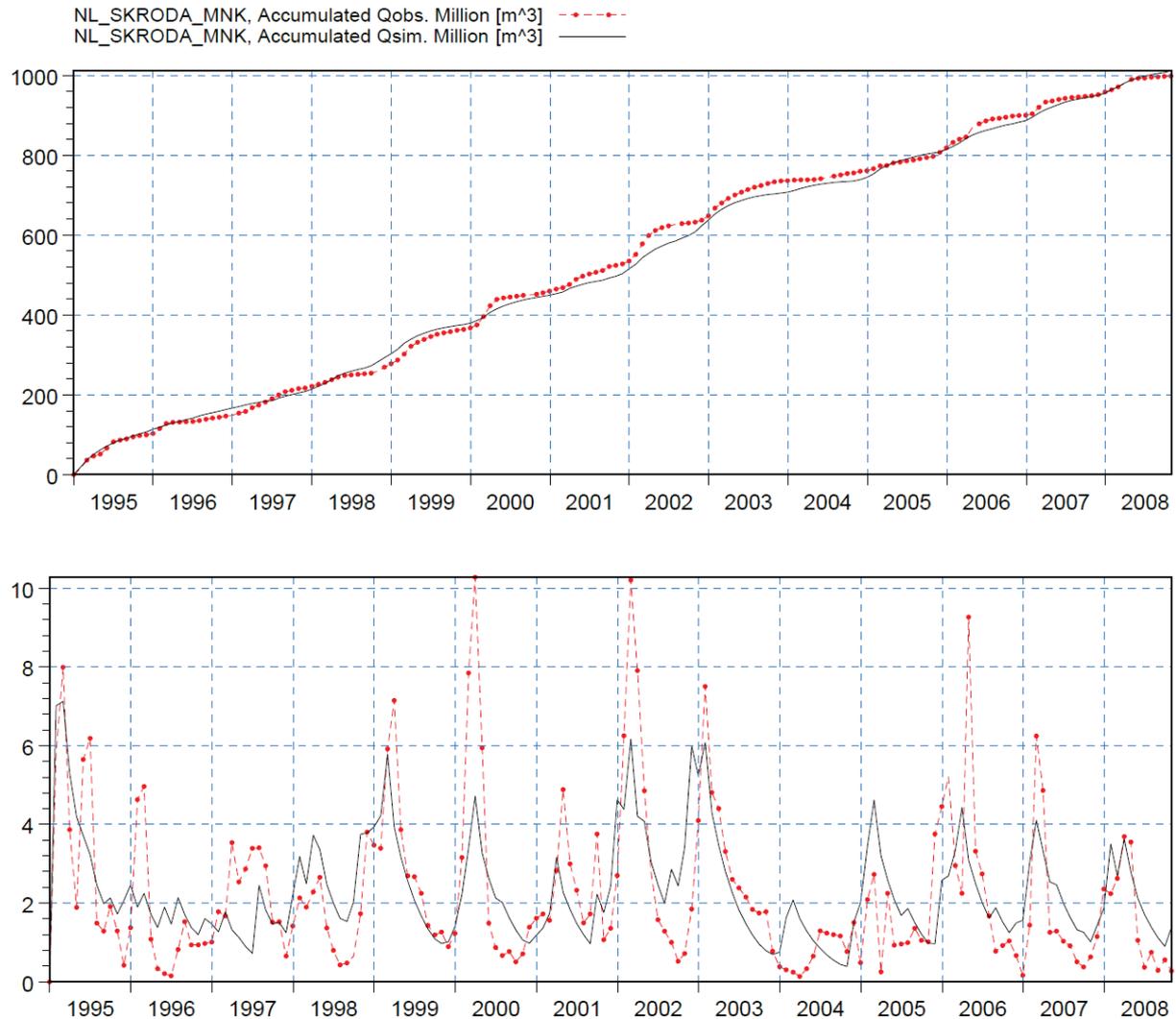


**Abbildung 29: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell für das Teileinzugsgebiet der Skroda**

Das Modell signalisiert hohe Abflüsse richtig, die mehrheitlich jedoch unterschätzt werden. Geringe Abflüsse werden meistens unterschätzt. In der kumulierten Darstellung (Abbildung 29) unterschätzt das Modell systematisch die Messwerte für den Zeitraum von 1973 bis 1984, und überschätzt diese für den Zeitraum von 1988 bis 1997. Letztlich wird die Wasserbilanz zum Ende des simulierten Zeitraumes hin geringfügig überschätzt, der im Ergebnis der Simulation ermittelte mittlere Abfluss beträgt  $1,08 \text{ m}^3/\text{s}$  und stimmt damit mit den beobachteten Messwerten ( $1,02 \text{ m}^3/\text{s}$ ) überein (Tabelle 10).

### Abschnitt des direkten Einzugsgebiets der Lausitzer Neiße von der Skroda-Mündung bis zur Mündung des Malxe-Neiße-Kanals (Einzugsgebiet 10)

Das für das Teileinzugsgebiet der Lausitzer Neiße von der Skroda-Mündung bis zur Mündung des Malxe-Neiße-Kanals erstellte Niederschlag-Abfluss-Modell bildet die aus dem Abfluss-Hydrogramm resultierenden zeitlichen Abflussschwankungen auf dem analysierten Abschnitt richtig ab.



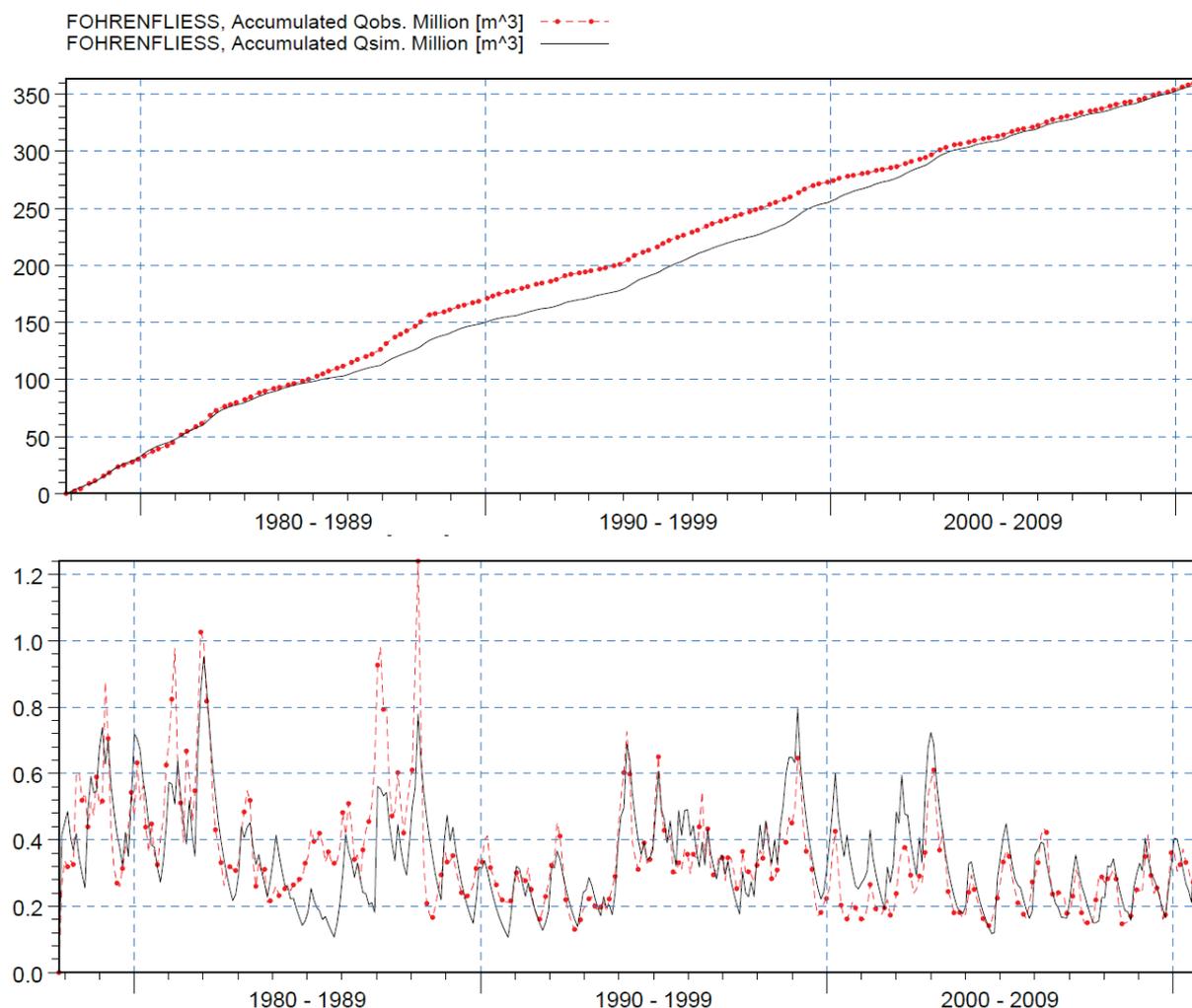
**Abbildung 30: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell für das Teileinzugsgebiet der Lausitzer Neiße von der Skroda-Mündung bis zur Mündung des Malxe-Neiße-Kanals**

Das Modell bildet die Abflüsse zeitlich richtig ab (Abbildung 30). Hohe Abflüsse werden vom Modell zumeist unterschätzt, geringe Abflüsse hingegen geringfügig überschätzt. Der im Ergebnis der Simulation ermittelte mittlere Abfluss beträgt  $2,30 \text{ m}^3/\text{s}$  und entspricht somit dem beobachteten mittleren Messwert, der  $2,27 \text{ m}^3/\text{s}$  beträgt (Tabelle 10).

In der kumulierten Darstellung (Abbildung 30) bildet das Modell die beobachteten Messwerte richtig ab. Es zeichnet sich eine systematische Unterschätzung der Messwerte für den Zeitraum von 2001 bis 2004 ab. Zum Ende des simulierten Zeitraums wird die Wasserbilanz geringfügig überschätzt.

### Einzugsgebiet des Föhrenfließ (Einzugsgebiet 11)

Das für das Einzugsgebiet des Föhrenfließ von seiner Quelle bis zur Mündung erstellte Niederschlag-Abfluss-Modell bildet die zeitlichen Abflussschwankungen, wie sie am Pegel in Zschorno beobachtet werden, richtig ab.

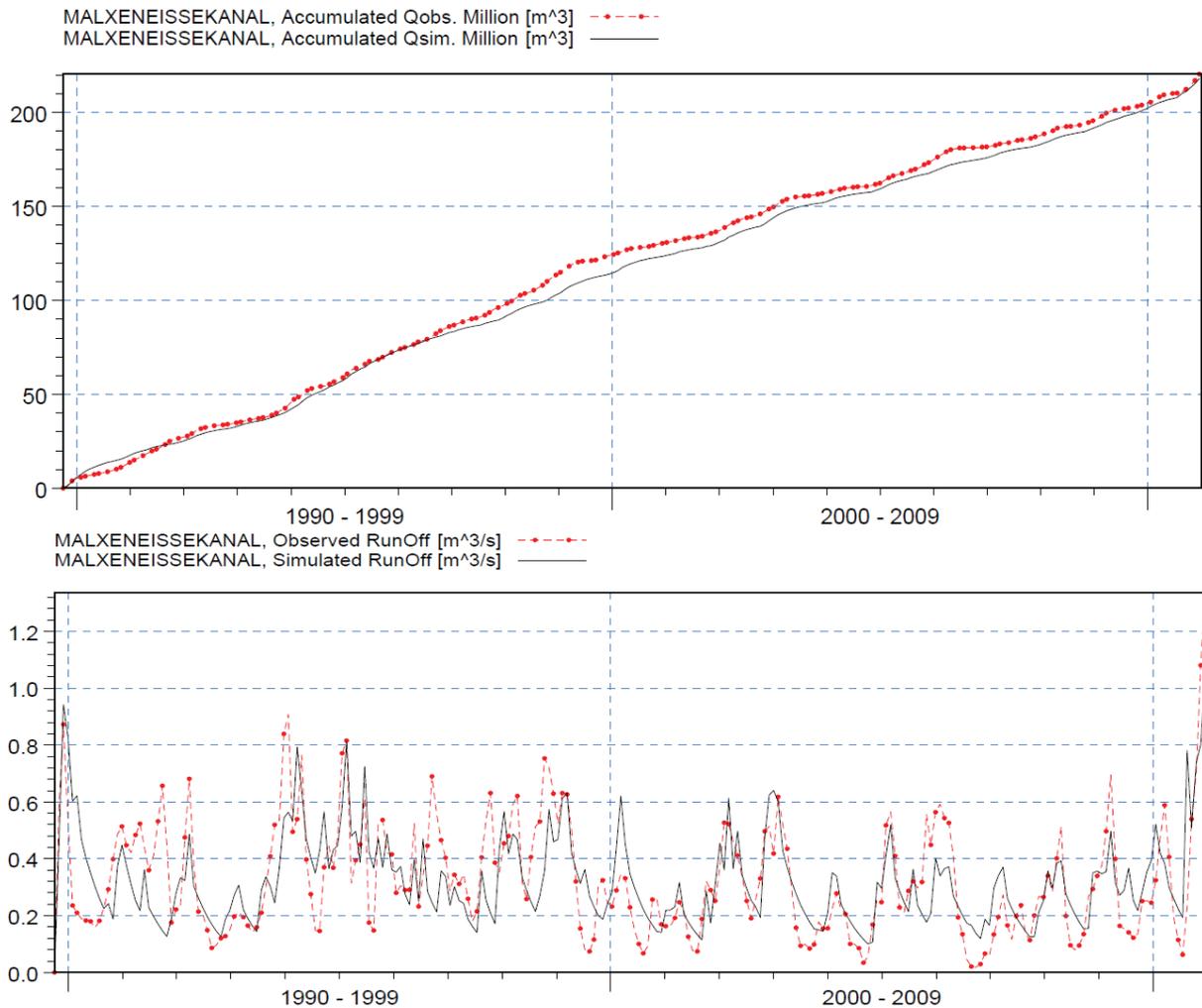


**Abbildung 31: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell für das Einzugsgebiet des Föhrenfließ**

Das Modell signalisiert zeitlich hohe Abflüsse richtig, die am häufigsten unterschätzt werden; ähnlich verhält es sich mit geringen Abflüssen. In der kumulierten Darstellung (Abbildung 31) unterschätzt das Modell systematisch die für den Zeitraum von 1985 bis 2003 beobachteten Messwerte. Letztlich wird die Wasserbilanz zum Ende des simulierten Zeitraums hin geringfügig unterschätzt, der im Ergebnis der Simulation ermittelte mittlere Abfluss beträgt  $0,35 \text{ m}^3/\text{s}$  und entspricht somit dem am Pegel in Zschorno beobachteten Messwert (Tabelle 10).

### Einzugsgebiet des Malxe-Neiße-Kanals (Einzugsgebiet 12)

Das für das Einzugsgebiet des Malxe-Neiße-Kanals von seiner Quelle bis zur Mündung erstellte Niederschlag-Abfluss-Modell bildet die zeitlichen Abflussschwankungen, wie sie am Pegel in Mulknitz beobachtet werden, richtig ab.

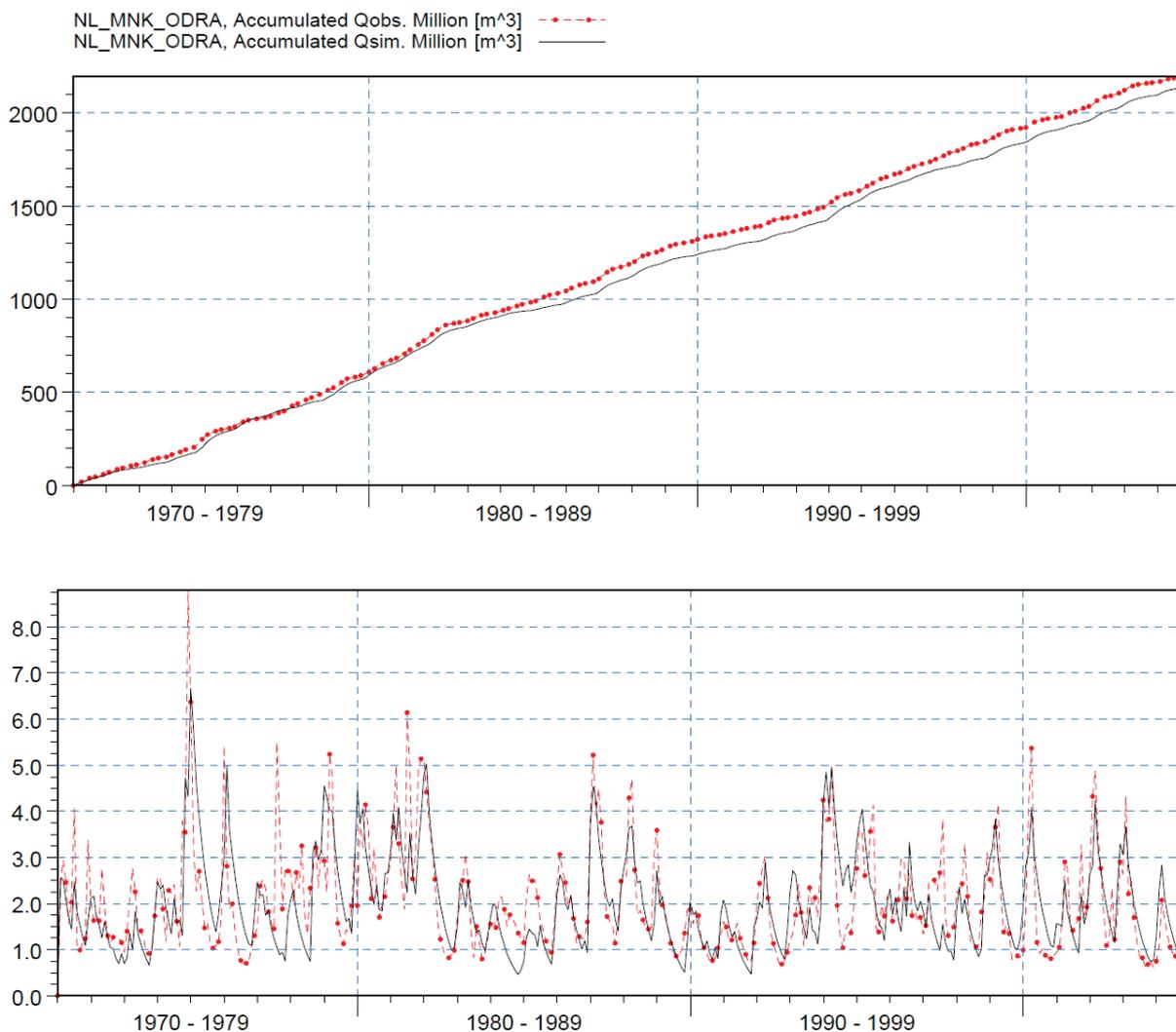


**Abbildung 32: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell des Einzugsgebiets des Malxe-Neiße-Kanals.**

Das Modell signalisiert hohe Abflüsse richtig, mehrheitlich werden diese jedoch geringfügig unterschätzt. Geringe Abflüsse werden in der Regel unterschätzt. In der kumulierten Darstellung (Abbildung 32) unterschätzt das Modell systematisch die für den Zeitraum von 1997 bis 2009 beobachteten Messwerte. Letztlich wird die Wasserbilanz zum Ende des simulierten Zeitraums hin geringfügig unterschätzt, der im Ergebnis der Simulation ermittelte mittlere Abfluss beträgt  $0,32 \text{ m}^3/\text{s}$  und entspricht damit fast genau dem am Pegel in Mulknitz gemessenen Wert ( $0,33 \text{ m}^3/\text{s}$ ) (Tabelle 10).

### Abschnitt des direkten Einzugsgebiets der Lausitzer Neiße von der Mündung des Malxe-Neiße-Kanals bis zur Odermündung (Einzugsgebiet 13)

Das für das Teileinzugsgebiet der Lausitzer Neiße von der Mündung des Malxe-Neiße-Kanals bis zur Odermündung erstellte Niederschlag-Abfluss-Modell bildet die aus dem Abfluss-Hydrogramm resultierenden zeitlichen Abflussschwankungen auf dem analysierten Abschnitt richtig ab.



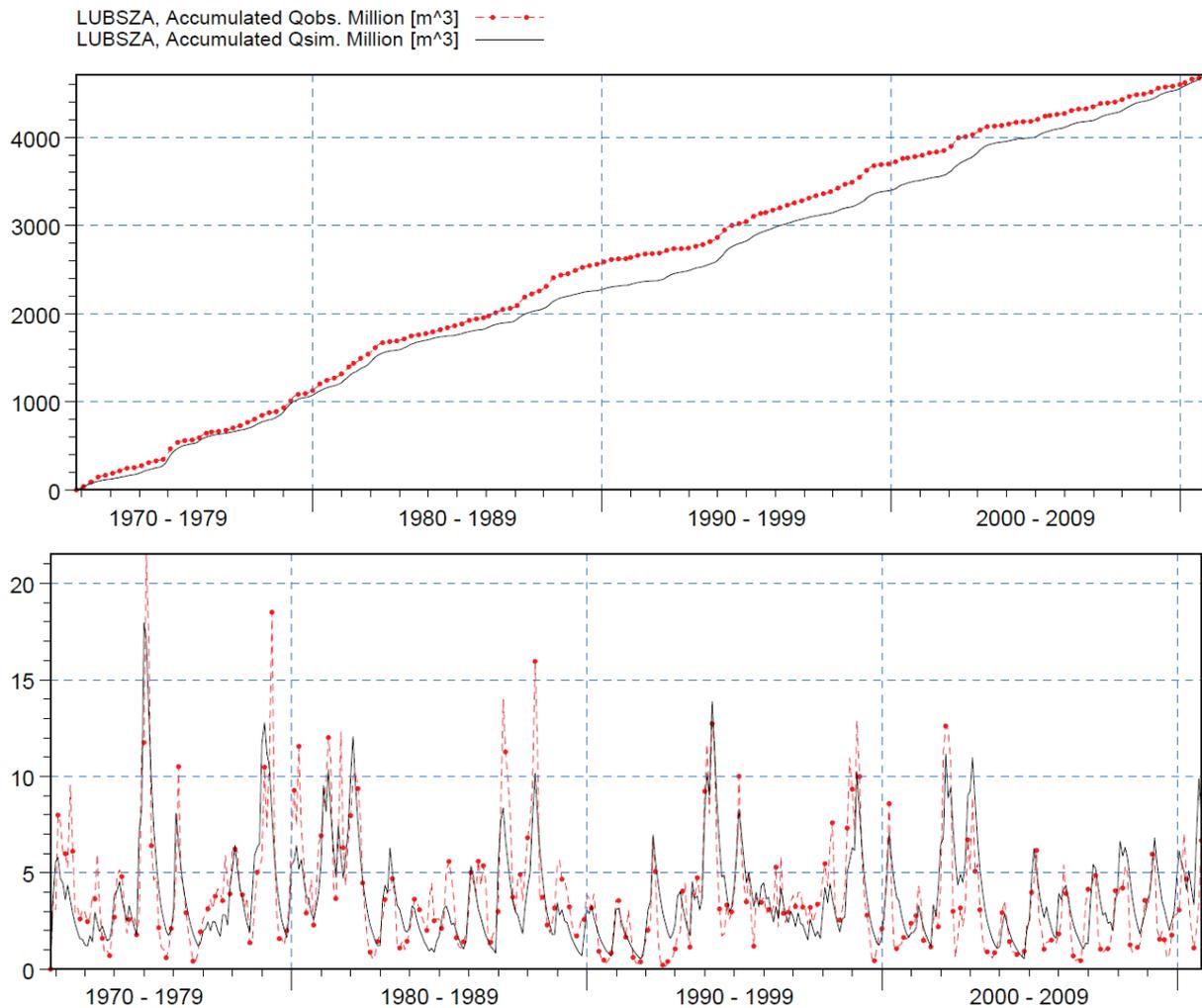
**Abbildung 33: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell für das Teileinzugsgebiet der Lausitzer Neiße von der Mündung des Malxe-Neiße-Kanals bis zur Odermündung.**

Das Modell bildet die Abflüsse zeitlich richtig ab (Abbildung 33). Hohe Abflüsse unterschätzt das Modell meistens, geringe Abflüsse werden hingegen geringfügig überschätzt. Der im Ergebnis der Simulation ermittelte mittlere Abfluss beträgt  $2,00 \text{ m}^3/\text{s}$  und entspricht somit dem beobachteten Messwert, der  $2,05 \text{ m}^3/\text{s}$  beträgt (Tabelle 10).

In der kumulierten Darstellung (Abbildung 33) bildet das Modell die beobachteten Messwerte richtig ab. Von 1982 bis zum Ende des simulierten Zeitraums zeichnet sich eine systematische Unterschätzung der entsprechenden Messwerte ab. Zum Ende des simulierten Zeitraums hin wird die Wasserbilanz geringfügig unterschätzt.

### Einzugsgebiet der Lubsza (Einzugsgebiet 14)

Das für das Einzugsgebiet der Lubsza von ihrer Quelle bis zur Mündung erstellte Niederschlag-Abfluss-Modell bildet die zeitlichen Abflussschwankungen, wie sie am Pegel in Pleśno beobachtet werden, richtig ab.



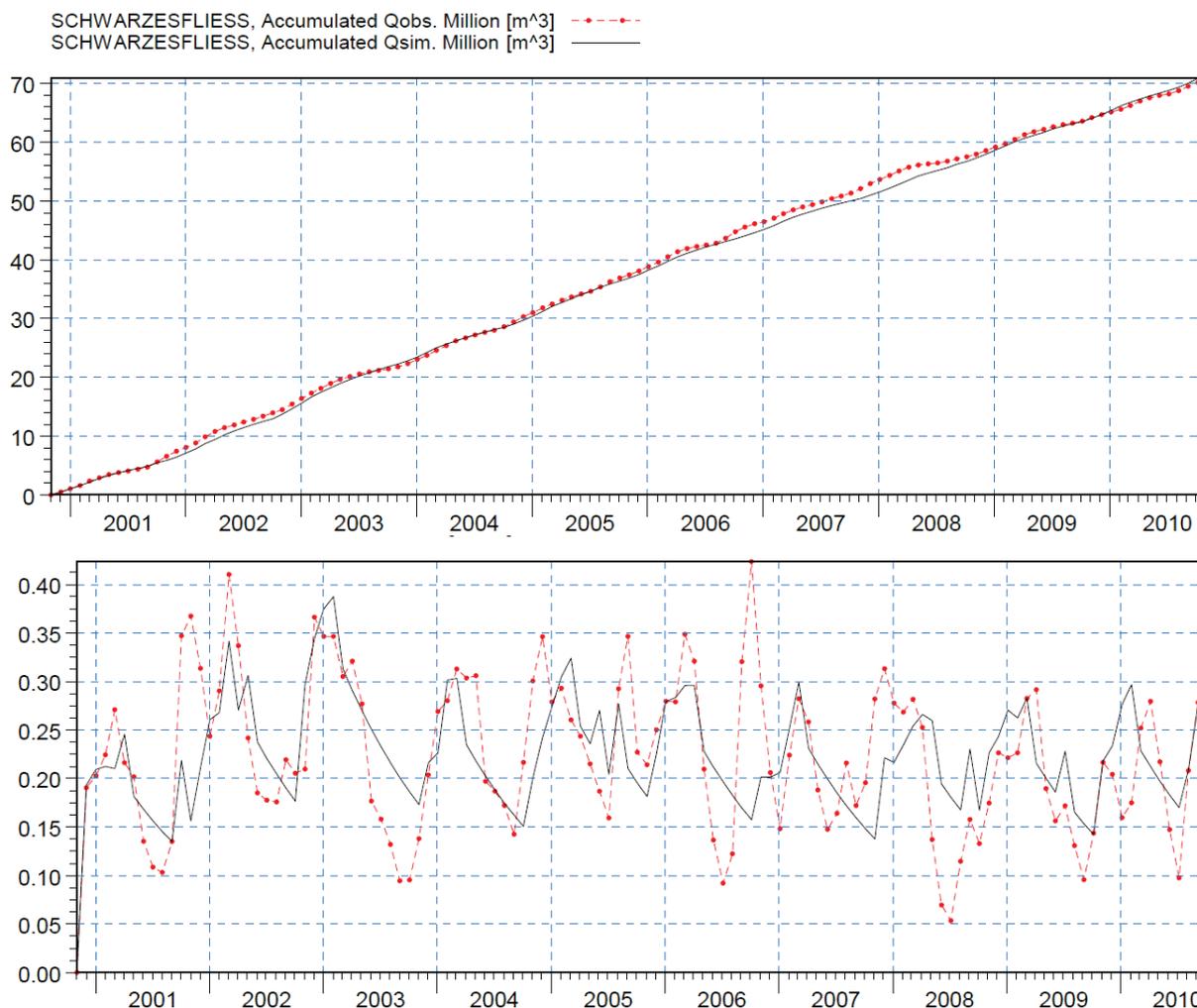
**Abbildung 34: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell für das Einzugsgebiet der Lubsza.**

Das Modell signalisiert hohe Abflüsse zeitlich richtig (Abbildung 34), diese werden jedoch mehrheitlich geringfügig unterschätzt. Der im Ergebnis der Simulation ermittelte mittlere Abfluss beträgt  $3,82 \text{ m}^3/\text{s}$  und entspricht somit dem am Pegel in Pleśno gemessenen Wert ( $3,81 \text{ m}^3/\text{s}$ ; Tabelle 10).

In der kumulierten Darstellung (Abbildung 34) bildet das Modell die beobachteten Messwerte richtig ab. Es zeichnet sich eine systematische Unterschätzung der im gesamten Zeitraum beobachteten Messwerte ab, letztlich wird die Wasserbilanz zum Ende des simulierten Zeitraums hin geringfügig überschätzt.

### Einzugsgebiet des Schwarzen Fließ (Einzugsgebiet 15)

Das für das Einzugsgebiet des Schwarzes Fließ von seiner Quelle bis zur Mündung erstellte Niederschlag-Abfluss-Modell bildet die zeitlichen Abflussschwankungen, wie sie am Pegel in Guben 5 Sprucke beobachtet werden, richtig ab.



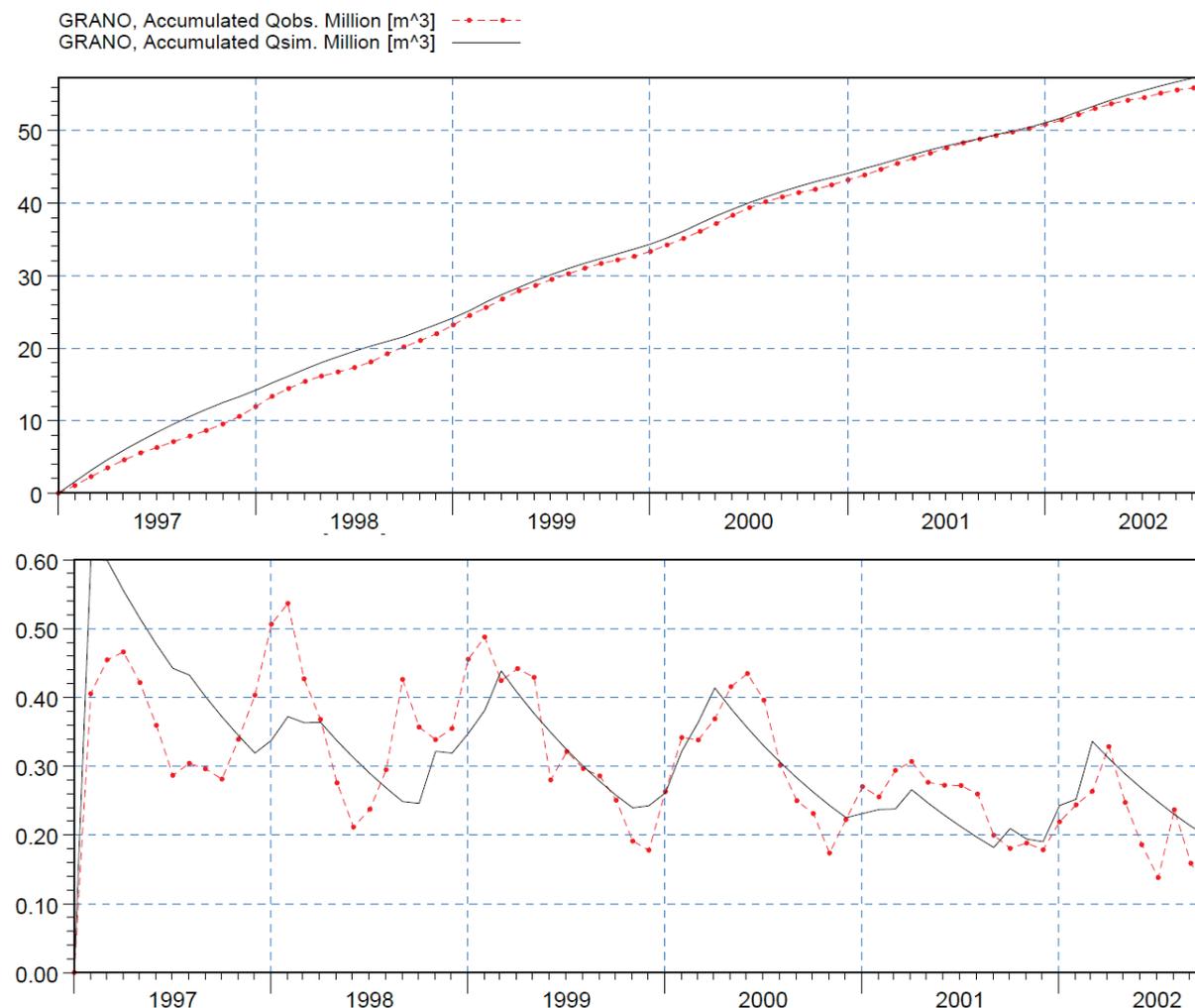
**Abbildung 35: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell des Einzugsgebiets des Schwarzes Fließ.**

Das Modell bildet die Abflüsse zeitlich richtig ab, hohe Abflüsse werden in der Regel unterschätzt, geringe Abflüsse hingegen überschätzt. Der im Ergebnis der Simulation ermittelte mittlere Abfluss beträgt  $0,22 \text{ m}^3/\text{s}$  und stimmt damit fast mit dem am Pegel Guben 5 Sprucke gemessenen Mittelwert überein (Tabelle 10).

In der kumulierten Darstellung (Abbildung 35) zeichnet sich eine systematische Unterschätzung der für den Zeitraum 2007/2008 beobachteten Messwerte ab. Letztlich wird die Wasserbilanz zum Ende des simulierten Zeitraums hin geringfügig überschätzt.

### Einzugsgebiet des Grano-Buderoser-Mühlenfließ (Einzugsgebiet 16)

Das für das Einzugsgebiet des Grano-Buderoser-Mühlenfließ von seiner Quelle bis zur Mündung erstellte Niederschlag-Abfluss-Modell bildet die zeitlichen Abflussschwankungen, wie sie am Pegel in Granoer Hammer beobachtet werden, richtig ab.



**Abbildung 36: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell des Einzugsgebiets des Grano-Buderoser-Mühlenfließ.**

Das Modell signalisiert hohe Abflüsse richtig, die jedoch mehrheitlich unterschätzt werden. In der kumulierten Darstellung (Abbildung 36) überschätzt das Modell systematisch die im gesamten Simulationszeitraum beobachteten Messwerte. Letztlich wird die Wasserbilanz zum Ende des simulierten Zeitraums hin geringfügig überschätzt, der im Ergebnis der Simulation ermittelte mittlere Abfluss beträgt  $0,31 \text{ m}^3/\text{s}$  und entspricht somit dem am Pegel Granoer Hammer gemessenen Wert ( $0,30 \text{ m}^3/\text{s}$ ) (Tabelle 10).

#### 3.1.6. Einschätzung der Richtigkeit der Niederschlag-Abfluss-Modelle

Bei der Kalibrierung und Validierung der Modelle wurde ein visueller Vergleich der simulierten Ganglinien mit den Beobachtungsdaten (Abbildung 21 - Abbildung 36) durchgeführt und die

simulierten Abflusswerte mit den tatsächlich gemessenen Werten abgeglichen. Grundlage für die Bewertung der Richtigkeit der Modelle war die Übereinstimmung der Ergebnisse mit den tatsächlichen Abflüssen an den Bilanzpegeln im Einzugsgebiet unter Berücksichtigung der systematischen Modellfehler. Kriterium für die Kalibrierung waren die Gütemaße NSE (Fehlerstatistik nach DHI und IMGW-PIB 2011), R und BIAS.

Die Modelleffizienz NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency) von Nash und Sutcliffe wird allgemein zur Bestimmung von Fehlern in langfristigen Simulationen verwendet (DHI 2011). Die NSE-Effizienz bildet die Zuverlässigkeit der simulierten Werte in Bezug auf die Beobachtungsdaten ab und wird mit folgender Gleichung berechnet:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [Q_{obs,i} - Q_{sim,i}]^2}{\sum_{i=1}^n [Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs}]^2}$$

Dabei sind:

$Q_{obs,i}$  der beobachtete Abfluss im Zeitraum  $i$ ,  $Q_{sim,i}$  der entsprechende simulierte Abflusswert und  $\bar{Q}_{obs}$  der gemessene Durchschnittsabfluss.

Zur Validierung von Modellen wird außerdem der Korrelationskoeffizient nach Pearson verwendet, der den Zusammenhang zwischen gemessenen ( $h_o$ ) und simulierten ( $h_s$ ) Größen bezeichnet und sich mit folgender Formel bestimmen lässt:

$$R = \frac{cov(h_o, h_s)}{S_o \times S_s}$$

Dabei sind:

cov – Kovarianz

$S_o, S_s$  – Standardabweichungen der gemessenen und simulierten Werte.

Das Gütemaß BIAS (Mean Bias Error) bezeichnet das arithmetische Mittel aus den Abweichungen der simulierten und gemessenen Werte:

$$BIAS = \bar{Q}_{sim} - \bar{Q}_{obs}$$

Das Ergebnis können Werte aus dem Bereich von  $-\infty$  bis  $+\infty$  sein. BIAS=0 zeigt weder positive noch negative systematische Abweichung der Modellergebnisse an. BIAS>0 bedeutet Überschätzung und ein negativer BIAS-Wert Unterschätzung der Beobachtungsdaten im Modell.

Die mit dem Gütemaß NSE (Tabelle 9) durchgeführten Berechnungen zur Bestimmung von Fehlern in langfristigen Simulationen und zur Validierung der mit dem Modellsystem MIKE NAM erstellten Niederschlag-Abfluss-Modelle für die in der Tabelle 7 dargestellten 16 Bilanzgebiete zeigen, dass fast alle Modelle die Entwicklung der Abflusszeitreihen richtig abbilden.

Die Richtigkeit der Simulationen hinsichtlich der Entwicklung der Abflusszeitreihen wird durch den verhältnismäßig hohen Wert des Korrelationskoeffizienten R (Tabelle 9) in allen modellierten

Einzugsgebieten bestätigt, der einen deutlichen Zusammenhang zwischen den analysierten Größen zeigt. Die Modelle bilden die Entwicklung der Abflusszeitreihen bei Hoch- und Niedrigwasser richtig ab, was mit Hilfe von Hydrogrammen und der Wasserbilanzdarstellung in den Abbildung 21 bis Abbildung 36 präsentiert wird. Abweichende Entwicklungen zeigen die Modelle für die Einzugsgebiete von Grano-Buderoser-Mühlenfließ und Schwarzem Fließ, trotz guter Entwicklung der simulierten Abflusszeitreihen. Frühere Untersuchungen dieser Einzugsgebiete (DHI und IMGW-PIB 2011, Fischer B et al. 2013) zeigen jedoch, dass diese Gebiete durch aktive Tagebaue stark beeinflusst sind. Die Beeinflussung bewirkt anthropogen verursachte Veränderungen der Abflüsse in Fließgewässern und führt zu Schwierigkeiten bei der mathematischen Modellierung der Prozesse vom Niederschlag bis zum Abfluss.

Die ermittelten BIAS-Werte (Tabelle 9) zeigen, dass die Modelle für die Einzugsgebiete der Flüsse Miedzianka, Witka, Pließnitz, Czerwona Woda, Föhrenfließ, Malxe-Neiße-Kanal und Lausitzer Neiße in den Abschnitten von der Quelle bis zur Mandau und vom Malxe-Neiße-Kanal bis zur Mündung in die Oder eine allgemeine Tendenz zur Unterschätzung der Werte und alle übrigen Niederschlag-Abfluss-Modelle eine allgemeine Überschätzung der Ergebnisse aufweisen. Die Tendenzen zur Über- bzw. Unterschätzung sind jedoch nach den für die Modelle berechneten BIAS-Werten ziemlich schwach.

**Tabelle 9: Effizienz der Niederschlag-Abflussmodelle für die Bilanzgebiete der Lausitzer Neiße**

Einzugsgebiet Nr.	Gütemaße für die Modelleffizienz		
	Korrelationskoeffizient R [-]	NSE [-]	BIAS [%]
1	0,69	0,5	-0,55
2	0,75	0,6	1,47
3	0,70	0,5	0,91
4	0,68	0,5	-2,10
5	0,68	0,5	-2,13
6	0,71	0,5	-2,44
7	0,73	0,5	-0,42
8	0,69	0,5	4,23
9	0,78	0,6	6,28
10	0,68	0,5	1,26
11	0,74	0,5	-0,38
12	0,68	0,5	-1,09
13	0,70	0,5	-2,59
14	0,79	0,6	0,17
15	0,57	0,3	1,03
16	0,73	0,4	2,44

Die berechnete Modelleffizienz NSE zeigt, dass die erstellten Niederschlag-Abflussmodelle für die meisten Bilanzgebiete der Lausitzer Neiße die gesetzten Zuverlässigkeitskriterien mit NSE-Werten von  $NSE \geq 0,5$  erfüllen. Die NSE-Werte für die Einzugsgebiete 15 und 16 liegen unterhalb des Grenzwertes, weshalb diese Bilanzgebiete bei weiteren Analysen nicht mehr berücksichtigt werden. (Fischer B. et al 2013).

Die systematische Unter- und Überschätzung der Niedrig- und Hochwasserabflüsse zeigt eine geringe Signifikanz für die mit den Niederschlag-Abfluss-Modellen zu lösende Aufgabe. Die endgültige,

richtige Abbildung des Wasserhaushalts und der mittleren Abflüsse in den jeweiligen Einzugsgebieten (Tabelle 10) sowie die Prüfung der statistischen Modelleffizienz bestätigen die richtige Kalibrierung der Modelle zur Berechnung des Wasserhaushalts im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße. Die kalibrierten Modelle sind ein gutes Instrument zur Analyse von Daten aus Klimaprojektionen und zur Berechnung simulierter Abflusszeitreihen in 16 Bilanzgebieten.

**Tabelle 10: Vergleich der Simulations- und Beobachtungswerte der mittleren Abflüsse im Referenzzeitraum**

Einzugsgebiet Nr.	Mittlerer Abfluss [m <sup>3</sup> /s]	
	Beobachtung	Simulation
1	6,05	6,02
2	3,41	3,46
3	1,28	1,29
4	0,94	0,92
5	3,60	3,52
6	1,09	1,07
7	0,77	0,77
8	3,04	3,17
9	1,02	1,08
10	2,27	2,30
11	0,35	0,35
12	0,33	0,32
13	2,05	2,00
14	3,81	3,82
15	0,22	0,22
16	0,30	0,31

### 3.1.7. Wasserhaushaltsmodellierung mit MIKE BASIN

Das Modell MIKE BASIN ist ein computergestütztes Modellsystem zur Unterstützung von Entscheidungen im Bereich Bewirtschaftung von Wasserressourcen in Flusseinzugsgebieten. Das Computerprogramm ermöglicht die Durchführung von quantitativen und qualitativen Wasserbilanzanalysen für Flusseinzugsgebiete oder deren Teile. Das Modell teilt in jeder Zeitstufe die Wasserressourcen unter den einzelnen Bewirtschaftungen unter Berücksichtigung der notwendigen Mindestabflüsse und entsprechend der Hierarchie der Wassernutzung auf. Der Hauptanwendungsbereich bei quantitativer Modellierung des Wasserhaushalts ist im Modellsystem MIKE BASIN die Berechnung von Simulationen zur Wasserverteilung, Wirkung von Speichern/Wasserkraftanlagen, hydrologischer Projektionen, landwirtschaftlichem Wasserbedarf sowie Management und Datenanalyse.

Im Modellsystem MIKE BASIN wird ein Netzwerkmodell erstellt, in dem Flüsse und deren Zuflüsse durch Polygone und Berechnungsknoten wie Wassernutzungen oder Bewässerungsanlagen dargestellt werden. In das Modell werden außerdem hydrologische Einzugsgebiete, Wasserspeicher, Wasserkraftanlagen und Vorfluter eingearbeitet (MIKE BASIN, 2009).

Das Verhalten der Berechnungsmodule und ihre Interaktionen werden mit Hilfe von im Modell integrierten Regeln vorgegeben. Das Modellsystem MIKE BASIN erstellt das Projekt Arc Map in der ESRI-Umgebung und generiert eine Geodatenbank (Abbildung 37).

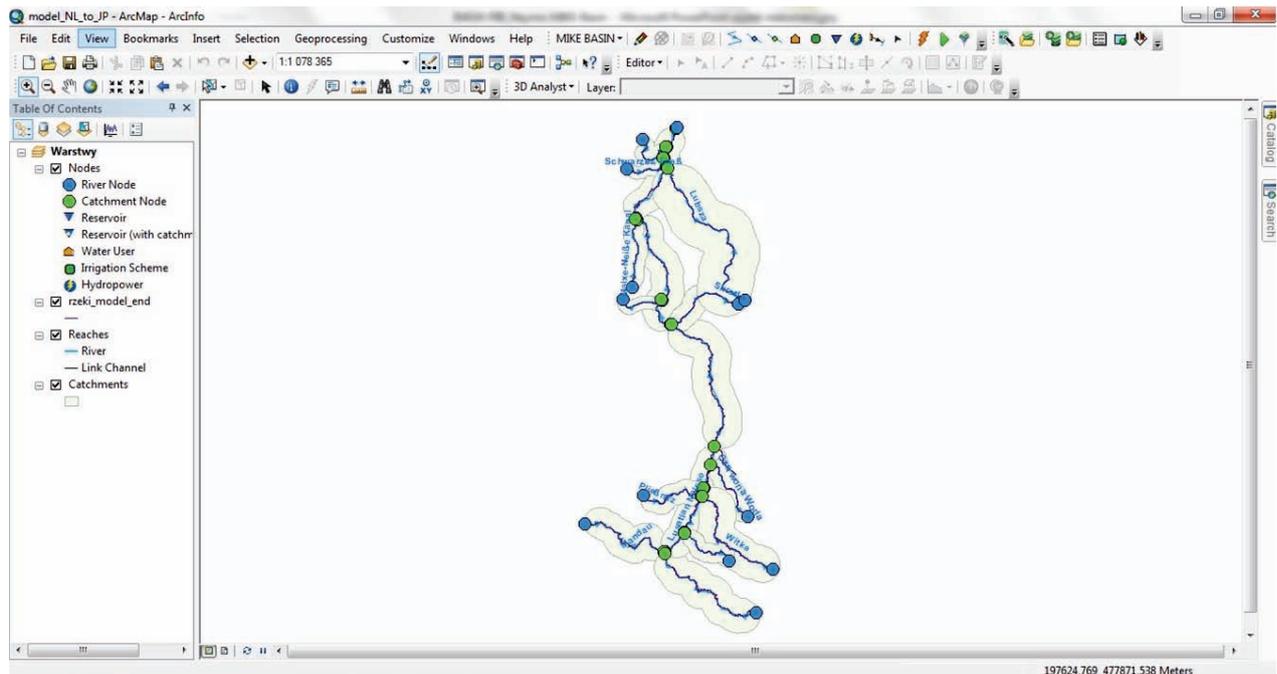


Abbildung 37: Arbeitsmaske des Modellsystems MIKE BASIN

MIKE BASIN simuliert die Wasserverhältnisse mittels Berechnung der Wasserbilanz für jeden einzelnen Knoten. Dabei wird die Wasseraufteilung unter den jeweiligen Nutzungen in den einzelnen Berechnungsknoten im gesamten Einzugsgebiet berücksichtigt.

### Modelaufbau und Eingangsdaten

Grundlegende Zeitreihen für die Modellierung des Wasserhaushalts sind monatliche Abflusswerte, die mit dem Niederschlag-Abfluss-Modell (MIKE NAM) für die im Projekt NEYMO bestimmten 16 Teileinzugsgebiete der Lausitzer Neiße generiert wurden, Kapitel 3.2.1 (Abbildung 20; Tabelle 7).

Das MIKE BASIN Modell wurde für die folgenden zwei Zeitschritte erstellt:

1. Modellierung im Beobachtungszeitraum 11.2000-10.2010
2. Modellierung im Projektionszeitraum 11.2010-10.2100

Für die Modellierung des gegenwärtigen Zustandes wurde aufgrund der Datenverfügbarkeit für die ausgewählten Bilanzgebiete der Zeitraum 11.2000 – 10.2010 ausgewählt. Das Modell umfasst alle Bilanzgebiete, wodurch der Zeitschritt an die kürzeste Datenreihe angepasst wird.

Beim Aufbau der Modelle für den Beobachtungs- und Projektionszeitraum werden die Komponenten Bilanzgebiete, Fließgewässernetz, Oberflächenwassernutzung und Mindestabfluss berücksichtigt. Das Modell simuliert die Wasserverteilung im erstellten Modellsystem und ermöglicht dadurch die Berechnung der Abflüsse für jeden Abschnitt und Knoten sowie Bestimmung des Umfangs der Wasserentnahmen durch die einzelnen Nutzer. Mit den Modellen können auch Wasserdefizite im betrachteten Bilanzgebiet geschätzt werden (Abbildung 38).

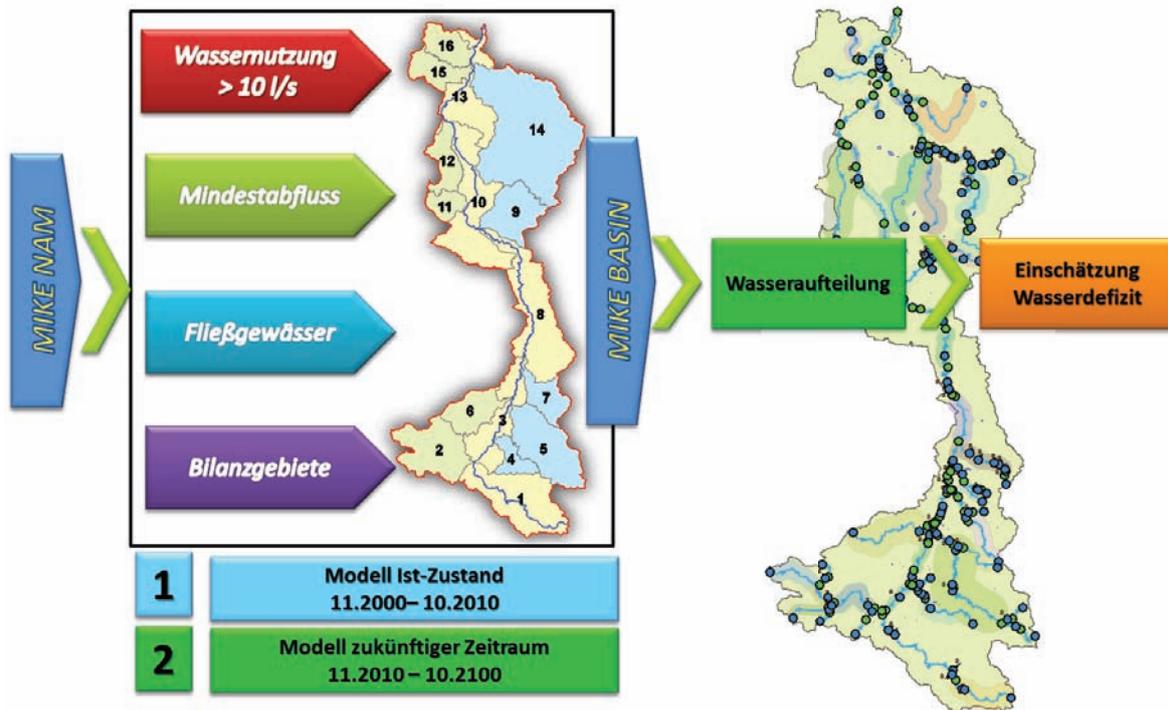


Abbildung 38: Schematische Darstellung der Modellierung mit dem Modellsystem MIKE BASIN

Eine sehr wichtige Rolle bei wasserwirtschaftlicher Bilanzierung spielt die Wassernutzung im untersuchten Einzugsgebiet, insbesondere die Entnahme- und Einleitungsmengen sowie Verteilung der Wassernutzer entlang des betrachteten Fließgewässers und seiner Zuflüsse. Mit diesen Daten können die Wasserressourcen in dem jeweiligen Einzugsgebiet eingeschätzt und die Wasserverfügbarkeit für die dort ansässigen Nutzer simuliert werden.

Die im Projekt NEYMO erstellte gemeinsame deutsch-polnische Datenbank für Klima und hydrologische Modellierung umfasst Daten für den Zeitraum 1971-2000, weshalb auch Bewirtschaftungsdaten für den gleichen Zeithorizont verwendet wurden. Die deutschen Daten wurden vom LfULG und dem LUGV zur Verfügung gestellt. Angaben zu polnischen Wassernutzern stammen aus dem Wasserkataster der Regionalverwaltung für Wasserwirtschaft (RZGW) in Wrocław. Datengrundlagen waren hierfür die bestehenden Wasserrechte.

Die Datenbank enthält u. a. folgende Nutzerdaten:

- Name des Wassernutzers
- Anschrift des Wassernutzers
- Allgemeine Beschreibung der Lage der Entnahme-/Einleitstelle (Woiwodschaft, Landkreis, Gemeinde, Ort)
- Bezeichnung des Fließgewässers/Vorfluters
- Flusskilometer der Wasserentnahme oder Einleitung
- Zweck und Zeitraum der Wasserentnahme oder Schmutzwassereinleitung
- Mittlere Jahres-, Tages- und Stundenmenge der Wasserentnahme oder Einleitung
- Maximale Jahres-, Tages- und Stundenmenge der Wasserentnahme oder Schmutzwassereinleitung.

Die verfügbaren Datenreihen wiesen Lücken, insbesondere bei Angaben zur Lage der Entnahme-/Einleitungsstelle (z. B. keine Ortsangabe) auf. In den meisten Einträgen, insbesondere für die Nutzer an den Zuflüssen der Lausitzer Neiße fehlen die Flusskilometerangaben. In diesem Zusammenhang war es notwendig die genaue Lage der Wassernutzungen festzustellen.

Für diesen Zweck wurden folgende Informationsquellen verwendet:

- Topographische Karte Polen im Maßstab 1:10 000
- Digitale Luftbildkarte im Maßstab 1:26 000
- Hydrographische Karte Polens im Maßstab 1:50 000
- Internetrecherche
- Telefonische Nachfrage
- Vor-Ort-Besuche.

Für jeden Wassernutzer wurde der Flusskilometer festgestellt und die Größe des Einzugsgebietes oberhalb der jeweiligen Nutzung ermittelt. Die Entnahme- bzw. Einleitungsmengen wurden außerdem Neuberechnet, überprüft und ggf. korrigiert (z. B. bei wasserrechtlichen Genehmigungen mit Dauer der Entnahme von unterhalb 1 Monat).

Die in der Datenbank zusammengestellten Angaben zu Entnahme-/Einleitungsmengen von Wasser/Schmutzwasser unterscheiden sich erheblich hinsichtlich ihres Detailgrades und zeitlichen Auflösung. Zur Schaffung einer Datenbasis wurde im Projekt eine Datenhierarchie festgelegt. Im ersten Schritt flossen in die Datenbank mittlere Monatswerte ein. Fehlte ein mittlerer Monatswert, wurden Daten nach folgender hierarchischen Reihenfolge eingearbeitet: der maximale Monats- und der maximale Jahreswert. Wenn die wasserrechtliche Genehmigung nur Jahreswerte für die jeweilige Nutzung enthielt, erfolgte die Berechnung der Werte für die einzelnen Monate im Zeitraum 1971-2010 nach der Geltungsdauer der jeweiligen Genehmigung.

Als Kriterium für die Berücksichtigung der Nutzer bei der Modellierung des Wasserhaushalts wurde aufgrund der Qualität der deutschen und polnischen Nutzerdaten die minimale Entnahme- oder Einleitungsmenge von 10 l/s festgelegt. Unberücksichtigt bleiben im Modell alle Einleitungen von Schmelz- bzw. Niederschlagswasser.

Keine Berücksichtigung finden bei der Modellierung auch Wassernutzer, für die aufgrund fehlerhafter Eintragungen nur eine maximale Einleitmenge für Schmutzwasser festgelegt wurde, da man keine glaubwürdigen Realwerte ermitteln konnte.



## 4. Entwicklung der Wasserressourcen – Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierung

### 4.1. Methoden

Ziel der Untersuchungen im Rahmen der Modellierung ist eine Abschätzung von Veränderungen im Wasserdargebot in der Zukunft. Die projizierten Änderungen in der Verfügbarkeit der Wasserressourcen resultieren aus veränderten klimatischen Randbedingungen, welche als Antrieb bei der Berechnung des Gebietswasserhaushaltes im hydrologischen Modell verwendet werden. Die in der Realität im Zusammenhang mit klimatischen Veränderungen auftretenden Rückkopplungseffekte werden im Modell nicht berücksichtigt. Die Charakteristik der Vegetation und des Bodens werden hier als konstant angenommen, da das verwendete hydrologische Modell den kausalen Zusammenhang zwischen Klimaänderung und Vegetationswandel nicht berücksichtigt. Die Bandbreite der projizierten Klimaveränderungen wird durch die im Vorfeld ausgewählten 5 Szenarioläufe repräsentiert. Damit soll ungeachtet der vorhandenen Projektionsdaten anderer Modelle bzw. Szenarioläufe die mögliche Entwicklung im Wasserhaushalt für einen feuchten, normalen und extrem trockenen klimatischen Verlauf in der Zukunft dargestellt werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen zeigen, mit welcher Entwicklung der Wasserressourcen im Projektgebiet unter diesen speziellen Bedingungen zu rechnen ist. Von einer Verwendung konkreter Ergebniswerte für die Erstellung gebietsspezifischer Bewirtschaftungsmaßnahmen ist aufgrund der vorhandenen Unsicherheiten in der Klima- und Wasserhaushaltsmodellierung abzusehen. Vielmehr soll das Ziel sein, das Änderungsverhalten der projizierten hydrologischen Größen zu analysieren, und im Rahmen der Auswertung ein deutliches Änderungssignal von der natürlichen Variabilität abzugrenzen. Dazu ist die Berechnung eines Vertrauensbereichs des Mittelwertes notwendig, welcher mit Hilfe der Standardabweichung der jeweiligen Variablen innerhalb der Referenzperiode 1971-2000 ermittelt wird. Das Verlassen der Vertrauensgrenzen der spezifischen hydrologischen Größe in ihrer zeitlichen Entwicklung zeigt an, dass sich diese Größe über die natürliche Variabilität hinaus ändert und damit als deutliches Änderungssignal bezeichnet werden kann.

### 4.2. Modellierung mit ArcEGMO im Beobachtungszeitraum

Die Anwendung des kalibrierten und geprüften Modells für den Beobachtungszeitraum 1971 bis 2010 liefert Ergebnisse zu den einzelnen Wasserhaushaltskomponenten Niederschlag PI, reale Verdunstung ER, Oberflächenabfluss RO, Zwischenabfluss RH und Grundwasserneubildung GWN auf Grundlage der gemessenen meteorologischen Daten. Der Gesamtabfluss ergibt sich aus den Abflusskomponenten. Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgte auf Teileinzugsgebietsebene, die zu den Pegelgebieten aggregiert werden können. Die Daten liegen auf Tagesschrittweite vor, die zu Monats- und Jahreswerten sowie langjährigen Mittelwerten zusammengefasst wurden. Es ist nicht möglich,

alle Komponenten in unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Auflösungen vollständig unter allen Gesichtspunkten in dieser Broschüre auszuwerten. Deshalb beschränkt sich die Darstellung der Ergebnisse auf eine Auswahl. Weitere Daten und Ergebnisse können über die Projektwebseite NEYMO bezogen werden.

Die langjährige Wasserbilanz für das gesamte gemeinsam betrachtete Einzugsgebiet bis zur sächsischen Staatsgrenze für den Zeitraum 1971 bis 2010 ergibt sich zu:

P	ER	RO	RH	GWN
890,8 mm/a	556,9 mm/a	12,4 mm/a	49,2 mm/a	270,3 mm/a
100 %	62,5 %	1,4 %	5,5 %	30,3 %

Q
331,9 mm/a
37,3 %

Der mittlere Gebietsniederschlag ist mit nahezu 900 mm/a relativ hoch. Der gefallene Niederschlag verdunstet zu ca. zwei Drittel und fließt zu einem Drittel am Gebietsauslass ab. Der Gesamtabfluss besteht zu 80 % aus Grundwasserneubildung, zu 15 % aus Zwischenabfluss und nur zu fünf Prozent aus Oberflächenabfluss. Damit dominiert die Grundwasserneubildung, einhergehend mit dem Grundwasserabfluss, das Abflussgeschehen. Da das Gesamtgebiet bezüglich seiner Eigenschaften wie Relief, Boden, Landnutzung sehr heterogen gestaltet ist, können aus den Werten der Gesamtbilanz keine Aussagen für Teilgebiete abgeleitet werden. Die Zusammensetzung der Abflussanteile variiert im Gebiet. In Abbildung 39 ist die Aufteilung des Niederschlages auf die einzelnen Komponenten pro Pegeleinzugsgebiet verdeutlicht. Für alle Gebiete ist erkennbar, dass die Verdunstung mit mehr als 50 % den größten Anteil an der Komponentenaufteilung einnimmt. Wobei der Anteil umso größer ist, desto tiefer das Gebiet liegt und es sich um ein Quellgebiet handelt. Der Anteil der Grundwasserneubildung ist in höheren Lagen größer als in tieferen. Die Anteile der Oberflächen- und Zwischenabflüsse sind in allen Höhenlage ähnlich. Bei der Interpretation der Abbildung ist darauf zu achten, dass beim Vergleich der Pegelgebiete untereinander die Breite der Segmente nicht aussagekräftig ist für die anteilige Zusammensetzung der Komponenten, da die Größe der Ringe nach außen hin wächst. Für einen Vergleich müssen die Prozentwerte herangezogen werden.

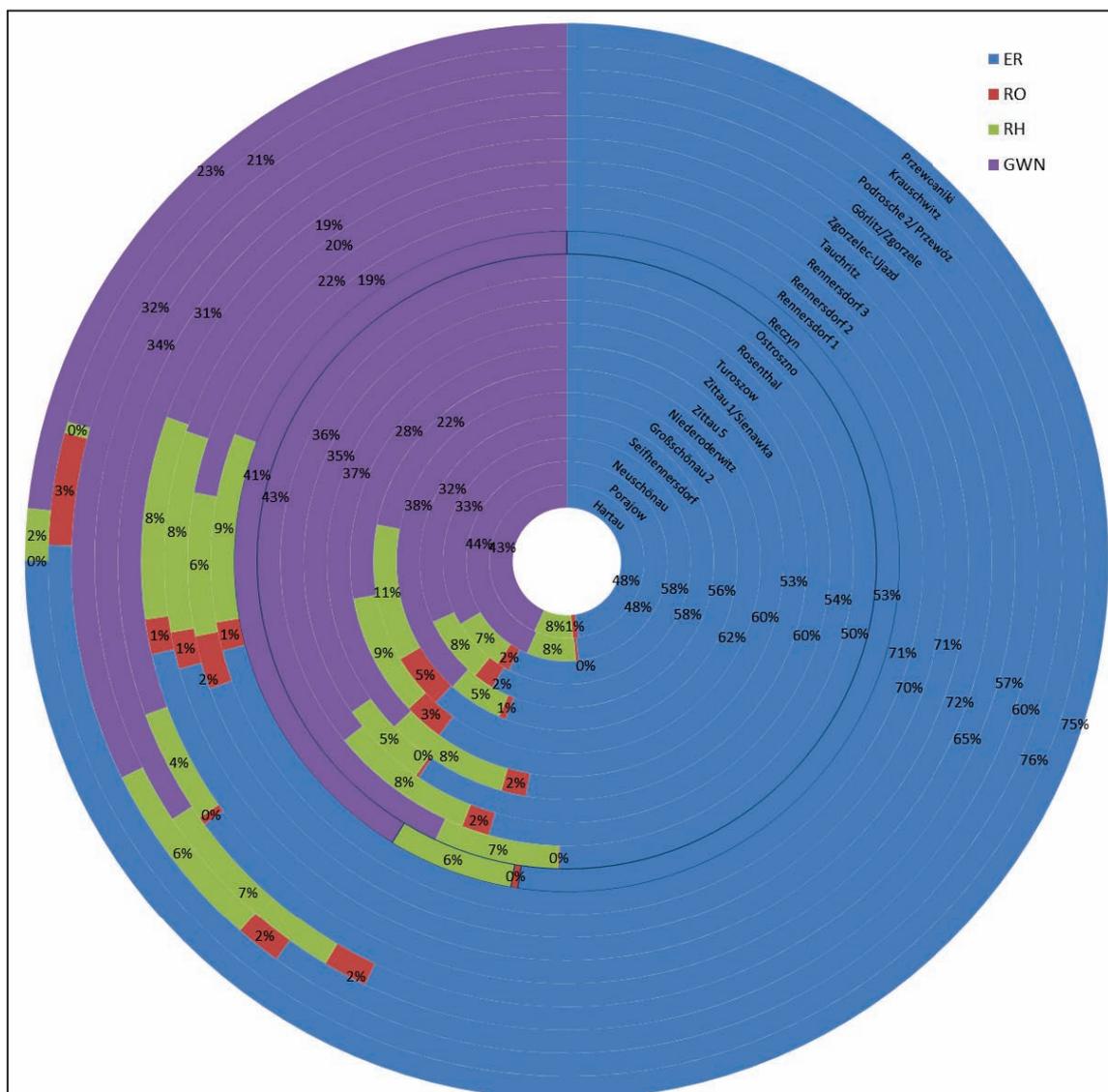


Abbildung 39: Zusammensetzung der Abflusskomponenten bezogen auf die Pegel Einzugsgebiete für den Zeitraum 1971-2010

In Abbildung 40 und Abbildung 41 ist die Verteilung der Wasserhaushaltskomponenten Niederschlag, reale Verdunstung, Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss und Grundwasserneubildung auf Basis von Teileinzugsgebieten als Mittelwert für den Zeitraum 1971 bis 2010 visualisiert. Entsprechend ihrer Größenordnung wurden die Werte der Komponenten in fünf Gruppen klassifiziert. Es ist deutlich ein unterschiedliches Verteilungsmuster aufgrund der heterogenen Relief-, Höhen- und Bodeneigenschaften erkennbar. In den höheren Lagen im Süden und Südosten des Einzugsgebietes der Lausitzer Neiße sind die größten Niederschlagsmengen zu verzeichnen. Richtung Norden nehmen die Niederschlagsmengen ab. Die Verteilung des Niederschlages beeinflusst neben den genannten Eigenschaften zum großen Teil die Größenordnung der Verdunstung und der Abflusskomponenten. Die Verdunstung ist in den tieferen Lagen größer als im Gebirge, da die Temperaturen neben dem Niederschlag und der Landnutzung die Verdunstung stark beeinflussen.

Der Oberflächenabfluss ist insbesondere von der Versiegelung, der Landnutzung und den Bodeneigenschaften abhängig. Ist die Fläche versiegelt oder der Boden stark bindig, bildet sich viel Landoberflächenabfluss, da das Wasser nicht in den Boden infiltrieren kann. Das ist in Abbildung 40 insbesondere in und um die Städte Görlitz und Zittau zu beobachten. Ansonsten sind die Mengen an Oberflächenabfluss gering. In diesen Fällen versickert der überwiegende Teil des nicht verdunsteten Niederschlagswassers in den Boden und bildet auf Stauhorizonten mit ausreichend Neigung Zwischenabfluss. Große Mengen an Zwischenabfluss werden insbesondere im Südosten und -westen des Gebietes gebildet. Die Zwischenabflüsse nehmen entlang der Lausitzer Neiße ab.

Wasser, welches nicht als Zwischenabfluss abfließt, trägt zur Grundwasserneubildung bei. Hohe Grundwasserneubildungsraten wurden im Südosten modelliert. Regionen in denen viel Niederschlag fällt, wenig verdunstet, kaum Oberflächenabfluss gebildet wird, sind trotz höherer Zwischenabflüsse begünstigt für Grundwasserneubildung. Im Tiefland sind die Grundwasserneubildungsraten geringer. Der Gesamtabfluss setzt sich aus den Abflusskomponenten in den einzelnen Teilgebieten zusammen. Er repräsentiert den mittleren Gebietswert des jeweiligen Teilgebietes.

Der Gesamtabfluss gestaltet sich entsprechend den Abflusskomponenten. In den südlichen und südöstlichen Gebieten treten die größten Gesamtabflüsse auf. Sie nehmen Richtung Tiefland ab.

Für die Pegelgebiete wurde eine Trendanalyse auf Basis von hydrologischen Jahren, Sommerhalbjahren und Winterhalbjahren durchgeführt, um die Entwicklung der Wasserhaushaltskomponenten im Beobachtungszeitraum analysieren zu können. In Tabelle 11 sind die Mittelwerte und die absoluten Trends von 1971 bis 2010 für alle Pegelgebiete dargestellt. Die Pegelgebiete sind entsprechend ihrer Höhenlage und Eigenschaften in zwei Gruppen unterteilt, die farblich voneinander abgegrenzt sind. Der absolute Trend gibt die Veränderung als Absolutwert für 40 Jahre an. Dabei sind negative Trends, d. h. Abnahmen, rot und positive Trends (Zunahmen) blau gekennzeichnet. Echte Trends sind fett gekennzeichnet. Nicht fett markierte Werte sind nur Tendenzen (↗ Box 5 und 6). Die Trendanalyse hat gezeigt, dass der Niederschlag für alle Pegelgebiete positive Tendenzen anzeigt. Das bedeutet, dass der Niederschlag in den letzten 40 Jahren leicht zugenommen hat, die Zunahme aber nicht signifikant, sondern noch als zufällig geltend, war. Bei der Verdunstung zeigt sich eine deutliche Zunahme, die für das Gesamtjahr und das Winterhalbjahr in allen Pegelgebieten eindeutig erkennbar ist. Im Sommerhalbjahr verhalten sich die Pegelgebiete differenziert. Die Quellgebiete in den hohen Lagen sowie die Pegel entlang der Lausitzer Neiße weisen signifikante Zunahmen auf, während die Pegelgebiet im Tiefland nur tendenzielle Zunahmen zeigen. Der Oberflächenabfluss zeigt unbedeutende Zunahmen für alle Pegelgebiete. Lediglich im Sommerhalbjahr treten kaum bis schwach negative Tendenzen auf. Der Zwischenabfluss im Gesamtjahr ist durch keine Auffälligkeiten gekennzeichnet. Er weist keine relevanten Zunahmen auf. Im Sommerhalbjahr sind Abnahmen des Zwischenabflusses erkennbar, die aber nicht signifikant sind. Lediglich im Winterhalbjahr sind in den Pegelgebieten Porajów und Hartau signifikante Zunahmen zu beobachten gewesen.

Die Pegel entlang der Lausitzer Neiße weisen in den Winterhalbjahren für die Grundwasserneubildung signifikante Zunahmen auf. Während im Sommerhalbjahr für alle Gebiete tendenzielle Abnahmen der Grundwasserneubildung zu verzeichnen sind. Das Gesamtjahr zeigt unbedeutende leichte Zunahmen an allen Pegeln.

Der Durchfluss an den Pegeln verhält sich unauffällig. Er zeigt minimale Tendenzen der Abnahme des Durchflusses.

### Box 6: Trend- und Signifikanztest

Die Trendrichtung wurde nach dem sogenannten nichtparametrischen linearen Regressionsverfahren Theil-Sen-Slope oder Kendall's Slope bestimmt. Neben der Trendrichtung wurde der Trend auf Signifikanz geprüft. Der Signifikanztest wurde nach dem Verfahren von Mann-Kendall durchgeführt. Dabei wurde eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 10 % angenommen. Ist die Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner 10 % ist der Trend signifikant und es kann von einem echten Trend gesprochen werden. Ergibt der Test keine Signifikanz, zeigt die Veränderung lediglich eine Tendenz an.

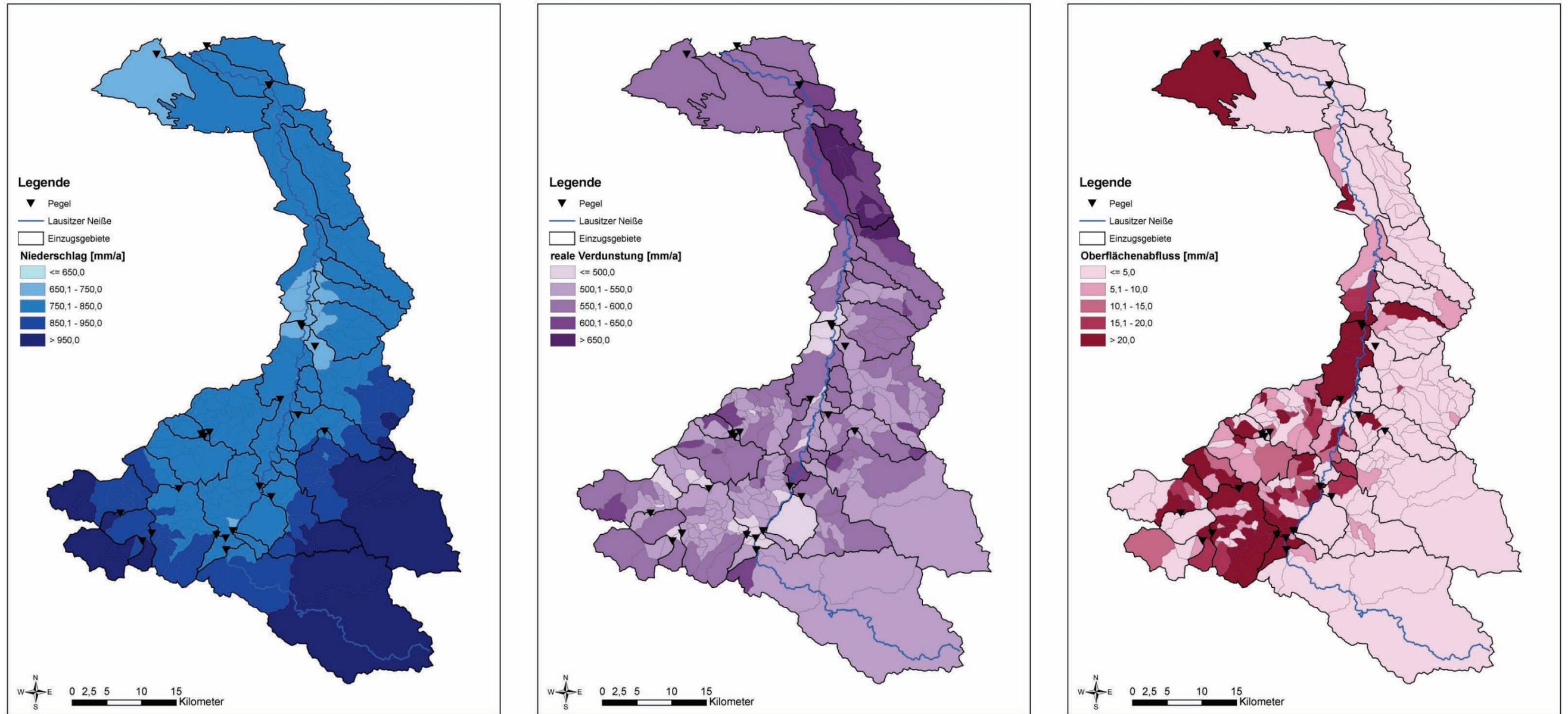


Abbildung 40: Wasserhaushaltskomponenten Niederschlag, Verdunstung und Oberflächenabfluss für Teilgebiete - Mittelwert 1971 bis 2010 als Ergebnis der Modellierung mit ArcEGMO

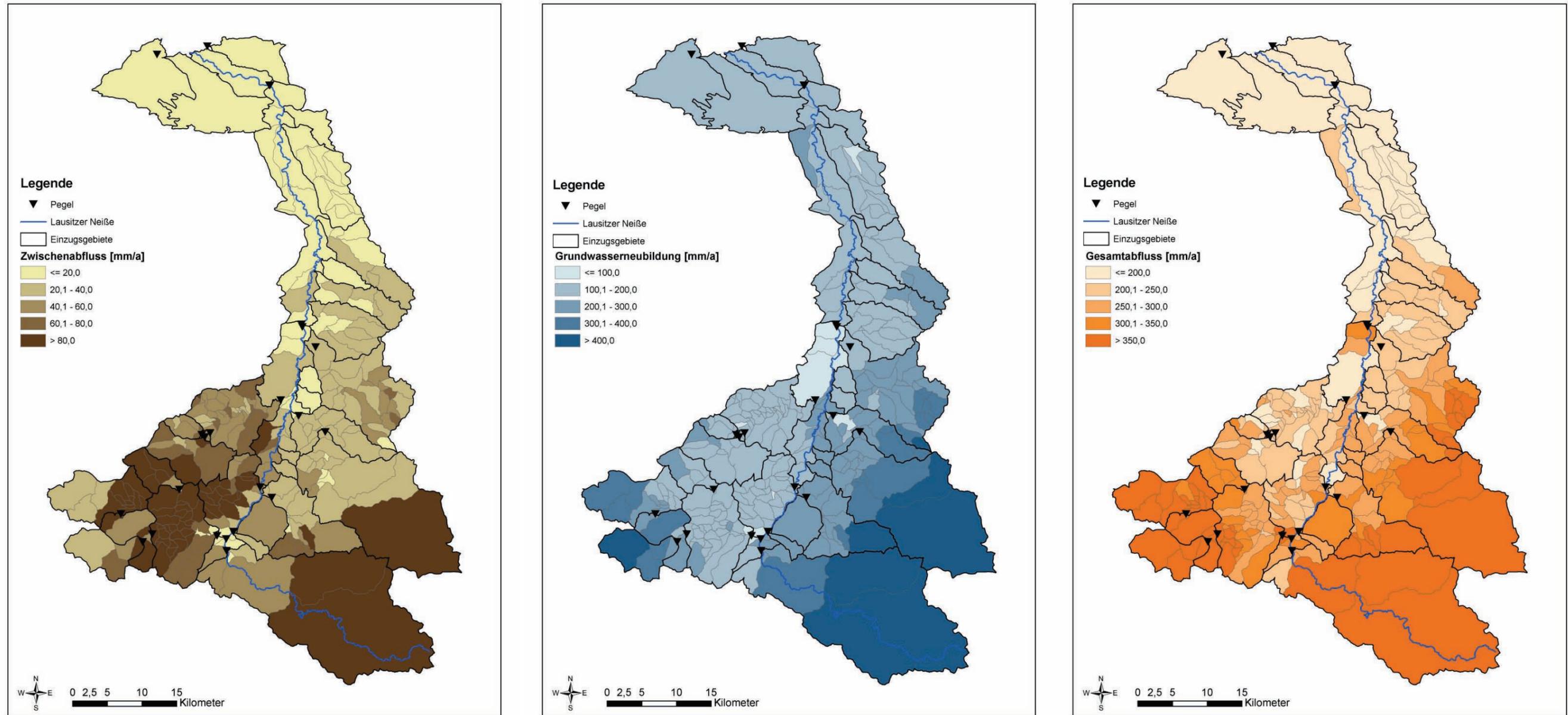


Abbildung 41: Wasserhaushaltskomponenten Zwischenabfluss, Grundwasserneubildung und Gesamtabfluss für Teilgebiete - Mittelwert 1971 bis 2010 als Ergebnis der Modellierung mit ArcEGMO

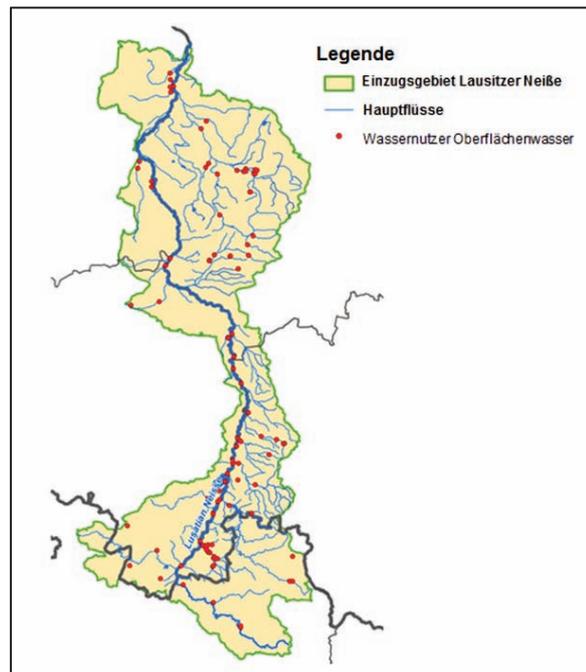
Tabelle 11: Mittlere Jahreswerte der Wasserhaushaltskomponenten und absolute Trends in mm/40a (positiv, negativ) mit Signifikanzen (signifikante Trends fett) für den Beobachtungszeitraum 1971-2010 für Jahr, Sommer- und Winterhalbjahr  
 Pegel unterteilt nach Höhenstufen (dunkelblau: Tiefland, hellblau: Bergland)

	PI				ER				RO				RH				GWN													
	Jahr		SHJ		WHJ		Jahr		SHJ		WHJ		Jahr		SHJ		WHJ		Jahr		SHJ		WHJ							
	Mittelwert [mm/a]	Trend [mm/40a]																												
Przewóniki*	779.25	135.13	409.00	62.98	370.86	39.54	583.09	24.48	417.18	16.60	166.59	15.48	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	12.11	4.21	1.90	0.21	10.21	3.86	182.02	76.47	25.66	-1.85	156.13	74.16
Krauschwitz*	740.64	80.71	402.21	54.57	338.01	14.04	559.07	26.87	410.29	13.44	149.32	14.75	25.96	2.89	13.16	1.45	12.76	0.17	2.63	0.39	0.49	0.04	2.13	0.48	152.71	38.98	-9.54	-4.70	161.53	47.36
Podrosche 2/ Przewóz	915.04	73.71	496.88	56.56	416.99	31.48	547.62	40.45	423.05	29.56	125.02	13.26	13.52	1.09	6.67	0.34	6.83	1.00	57.52	7.68	17.67	-4.06	39.73	8.43	294.32	49.29	86.42	-31.17	207.15	60.89
Görlitz/ Zgorzelec	948.96	74.76	513.23	38.99	434.05	38.33	540.20	44.99	419.42	32.29	121.03	14.66	14.22	0.99	6.90	0.25	7.30	1.29	68.19	8.23	21.17	-5.01	46.85	9.37	324.46	46.74	101.08	-35.62	222.51	58.40
Zgorzelec- Ujazd*	847.72	96.18	480.58	49.52	366.27	49.52	549.06	5.51	424.48	4.04	125.53	6.25	2.41	0.02	1.80	0.00	0.66	0.15	35.22	10.32	11.28	0.85	23.99	11.94	258.54	67.35	68.54	-7.79	189.10	82.87
Tauchritz	789.72	23.49	431.97	27.64	356.14	-13.23	562.03	37.53	426.95	19.89	135.58	14.36	10.52	0.27	4.25	-0.10	6.23	0.45	60.90	4.97	14.51	-1.20	46.12	5.89	152.91	-6.13	36.58	-10.16	115.51	13.10
Rennersdorf 1	800.28	17.84	434.51	25.19	363.79	-0.03	565.34	37.52	429.12	15.36	136.62	14.61	10.37	0.63	4.13	-0.05	6.19	0.82	68.77	4.48	15.67	-1.46	52.76	8.06	152.47	-2.54	33.88	-7.00	117.56	20.37
Rennersdorf 2	809.38	47.84	439.51	38.79	367.73	1.38	560.57	38.73	423.46	21.90	137.49	14.28	18.40	0.46	8.66	0.36	9.66	0.49	49.41	5.92	12.20	0.22	36.94	6.45	177.90	10.93	38.78	-11.12	138.13	29.58
Rennersdorf 3	801.22	18.27	435.16	27.50	364.06	0.82	563.94	39.11	427.79	15.24	136.55	14.58	11.81	0.40	4.96	0.27	6.80	0.87	64.91	5.39	14.97	-1.17	49.61	8.24	157.30	1.12	34.59	-8.69	121.69	18.30
Réczyn	1056.06	102.89	582.60	60.06	471.71	57.32	552.28	36.83	428.40	30.11	124.06	15.02	3.56	0.16	2.02	0.06	1.54	0.14	64.37	8.62	22.90	-2.96	41.38	7.56	434.60	74.45	136.07	-37.43	298.10	73.33
Ostróžno	1091.16	98.12	599.00	55.58	490.33	53.91	549.32	41.84	427.07	33.95	122.36	15.46	0.54	0.05	0.42	0.02	0.12	0.03	71.27	8.79	25.55	-3.71	45.61	7.05	468.91	81.35	151.26	-43.10	317.26	75.76
Rosenthal	974.16	93.34	516.11	32.44	456.10	39.49	529.07	52.68	413.59	37.97	115.57	14.97	15.08	2.28	7.07	0.17	7.94	1.89	79.75	12.55	24.62	-7.15	54.89	13.73	348.56	32.24	116.08	-53.20	231.36	69.60
Turoszów	938.22	97.18	528.39	43.51	407.92	49.32	557.59	47.39	438.17	40.55	119.61	15.68	1.73	0.06	1.21	-0.20	0.50	0.26	51.58	7.42	16.79	-3.85	34.73	9.12	325.68	42.91	89.84	-38.75	234.96	69.58
Zittau 1/ Sienawka	1005.39	98.07	525.59	33.25	477.79	41.45	529.42	55.04	414.46	40.87	114.97	15.26	16.66	2.06	7.82	0.29	8.78	2.00	84.19	9.26	26.24	-7.26	57.71	14.99	373.52	31.59	127.03	-57.57	245.30	66.18
Zittau 5	910.66	99.48	476.07	27.98	431.88	35.70	545.41	32.95	415.13	19.14	130.41	9.55	27.01	4.62	12.09	0.10	14.80	3.51	83.66	20.67	18.29	-2.13	65.04	19.34	252.39	46.87	50.11	-7.29	201.08	46.07
Porajów	1080.64	107.36	564.53	26.37	514.62	40.59	519.72	70.36	415.94	52.89	103.69	19.94	4.51	0.50	2.39	-0.01	2.12	0.38	85.77	7.64	32.62	-11.51	52.96	14.73	469.47	37.82	187.00	-89.13	281.26	95.35
Hartau	1089.50	105.51	568.47	21.42	519.57	41.43	520.03	70.41	416.52	52.99	103.41	20.00	2.96	0.18	1.65	-0.01	1.31	0.09	87.24	7.82	33.35	-11.91	53.69	15.02	478.15	38.20	191.41	-91.69	285.53	97.62
Großschönau 2	960.61	111.94	497.21	41.42	460.53	35.49	554.04	30.94	422.02	19.69	132.09	9.66	15.70	2.09	7.29	0.28	8.34	0.75	67.79	12.21	15.34	-0.74	52.22	12.45	321.21	69.62	63.14	-12.75	256.73	58.43
Niederoder- witz 3	849.98	30.38	449.55	40.53	397.78	6.36	524.55	33.94	399.40	18.54	125.61	10.78	39.25	0.93	17.75	0.63	21.33	0.94	98.13	5.87	21.49	-1.73	76.16	12.01	185.83	5.95	37.40	-13.96	147.13	22.79
Seiffhenners- dorf	939.05	104.98	486.83	46.30	449.22	29.33	548.01	29.91	416.48	16.33	131.66	9.32	20.81	1.73	9.70	0.76	11.01	0.67	70.25	10.56	15.58	-2.42	54.37	12.58	297.92	54.70	59.96	-12.02	236.53	52.84
Neuschönau 2	1017.08	157.41	525.47	57.52	488.82	49.82	567.49	38.70	431.04	24.01	136.46	10.91	6.58	0.97	3.03	0.30	3.53	0.48	52.88	9.25	13.53	-0.05	39.21	9.31	388.72	102.58	77.05	-6.01	310.38	85.94

\* Datenlage schwierig, keine Kalibrierung der Pegel möglich; für Zgorzelec-Ujazd wurde kein gutes Kalibrierergebnis erreicht

### 4.3. Modellierung mit MIKE BASIN im Beobachtungszeitraum

In das Modell für den Beobachtungszeitraum flossen Zeitreihen für 91 Entnahmen/Einleitungen durch 72 Oberflächengewässernutzer aus allen drei Ländern im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße ein (Abbildung 42). Das Modell verwendet den Abflusswert unterhalb des jeweiligen Knoten, weshalb die 16 betrachteten Bilanzgebiete in über 100 kleinere Gebiete aufgeteilt wurden. Dadurch war es möglich, die genauen Abflusswerte an den jeweiligen Abschnitten, z. B. an der Entnahmestelle, an Pegeln oder an Abschnitten mit Wasserkraftanlagen zu berechnen.



**Abbildung 42: Karte mit Darstellung der im Modell MIKE BASIN berücksichtigten Oberflächenwassernutzungen**

Die 91 erfassten Oberflächenwassernutzer wurden folgenden 5 Nutzergruppen zugeordnet:

- Tagebaue (KOP)
- Öffentliche Wassernutzung (KOM)
- Landwirtschaft (ROL)
- Industrie (PRZEM)
- Wasserkraftanlagen (EW).

Das Modell berechnet in der Simulation für den Zeitraum 2001-2010 Abflusswerte für jeden einzelnen Knoten und Fließgewässerabschnitt, die für die Lausitzer Neiße in der Abbildung 45 und ihre Zuflüsse in der Abbildung 43 dargestellt sind. Die Diagramme zeigen die hydrologische Lage im Einzugsgebiet für die hydrologischen Jahre 2001-2010. Das Modell für den Beobachtungszeitraum bildet die Grundlage für die Erarbeitung der Projektionsmodelle und erlaubt die ausgewählten Lösungen an Messdaten zu testen.

#### 4 Entwicklung der Wasserressourcen

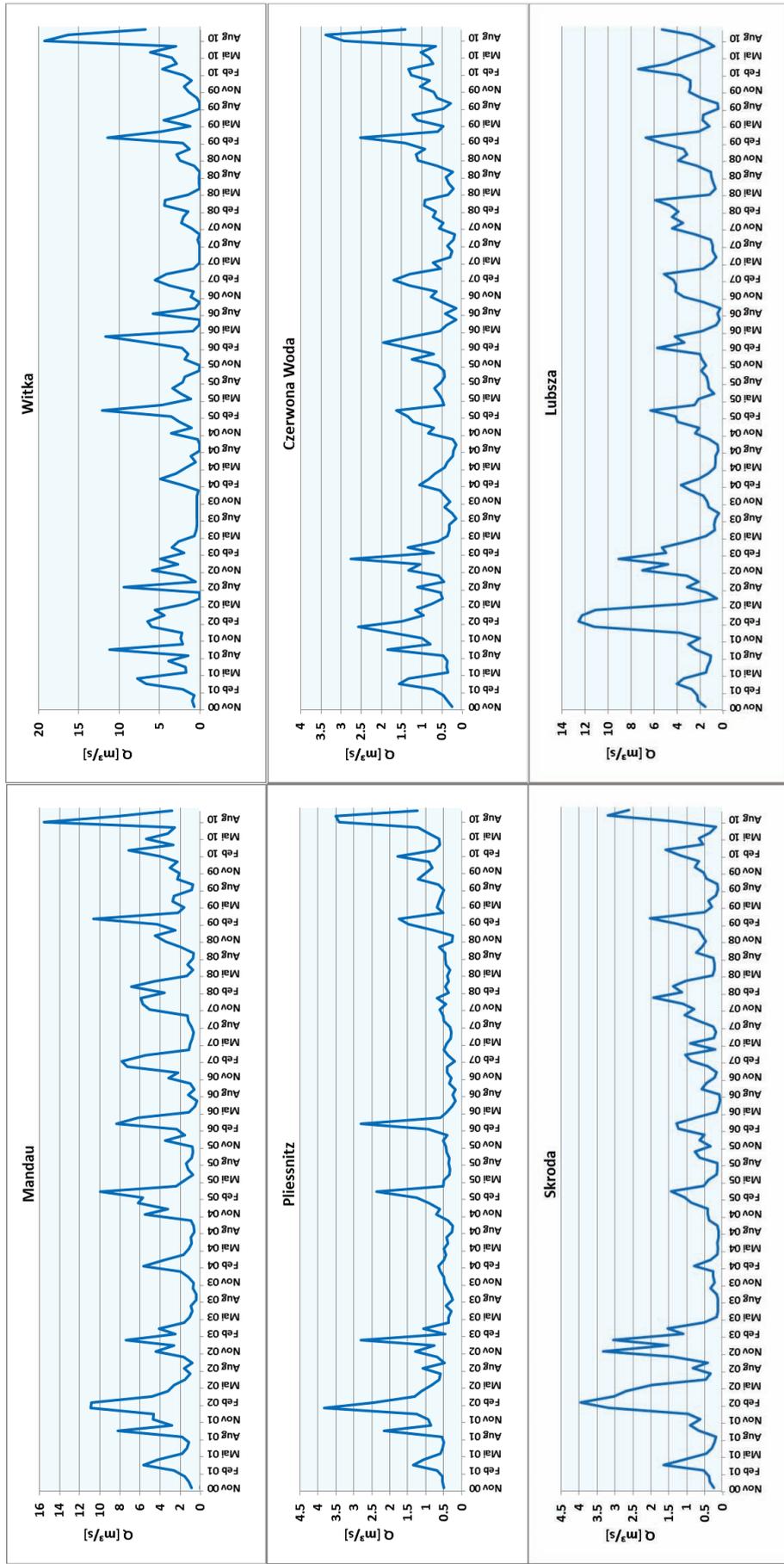


Abbildung 43: Abflüsse in Mündungsgebieten ausgewählter Zuflüsse der Lausitzer Neiße – Ergebnisse der Modellierung der Wasserbilanz mit Beobachtungsdaten

## 4 Entwicklung der Wasserressourcen

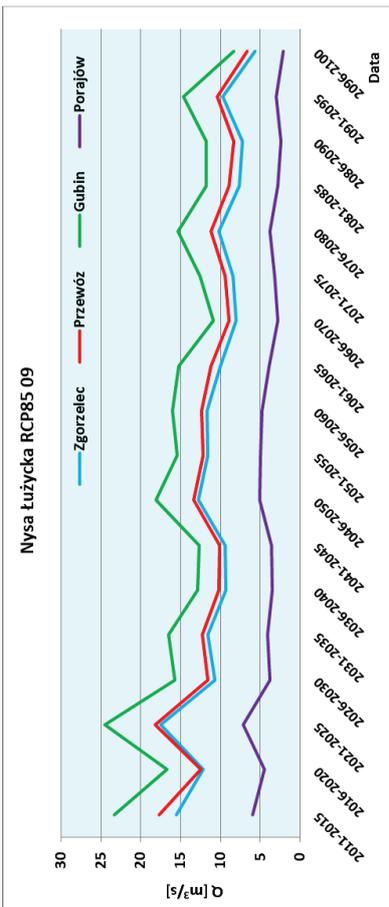
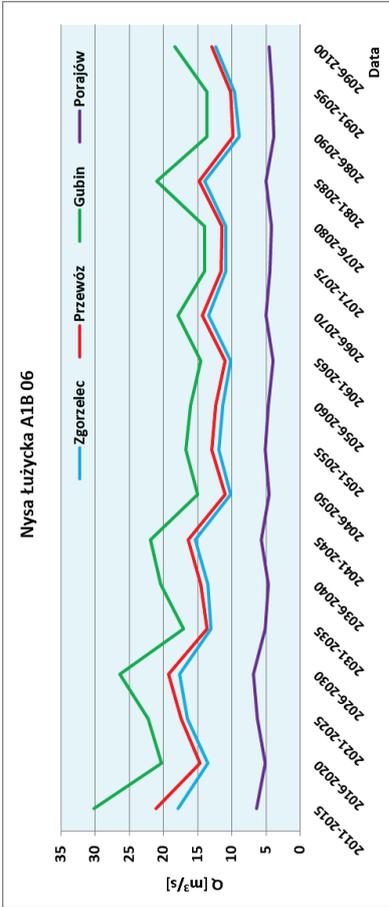
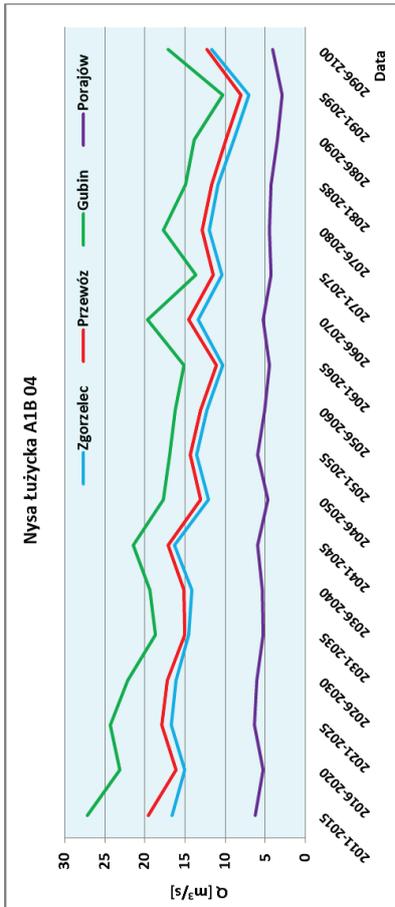
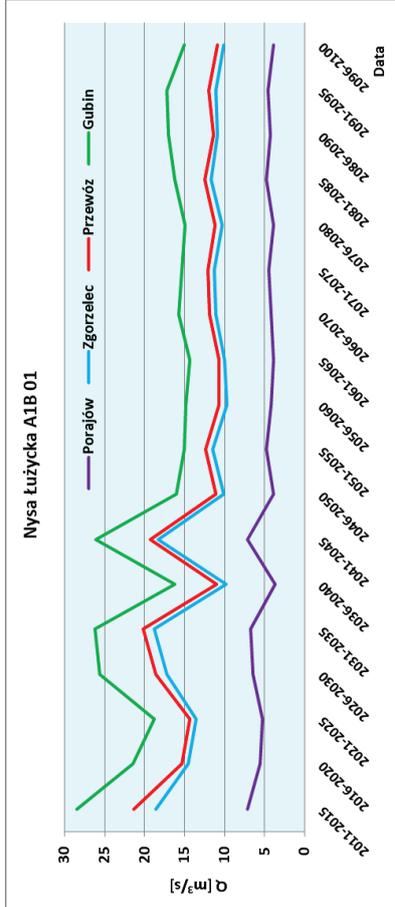
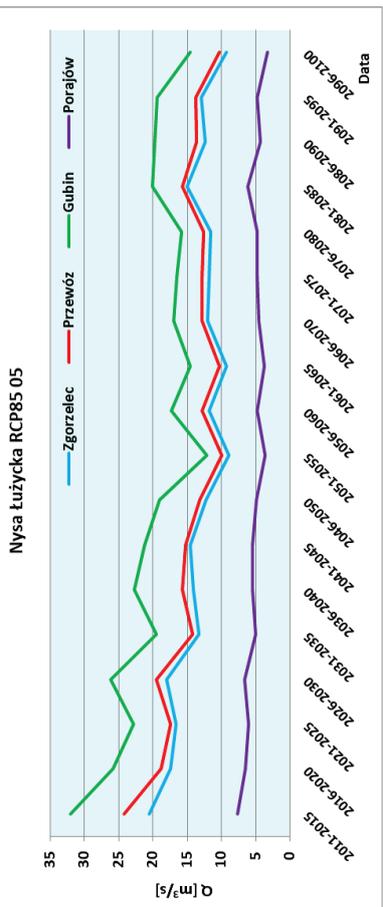
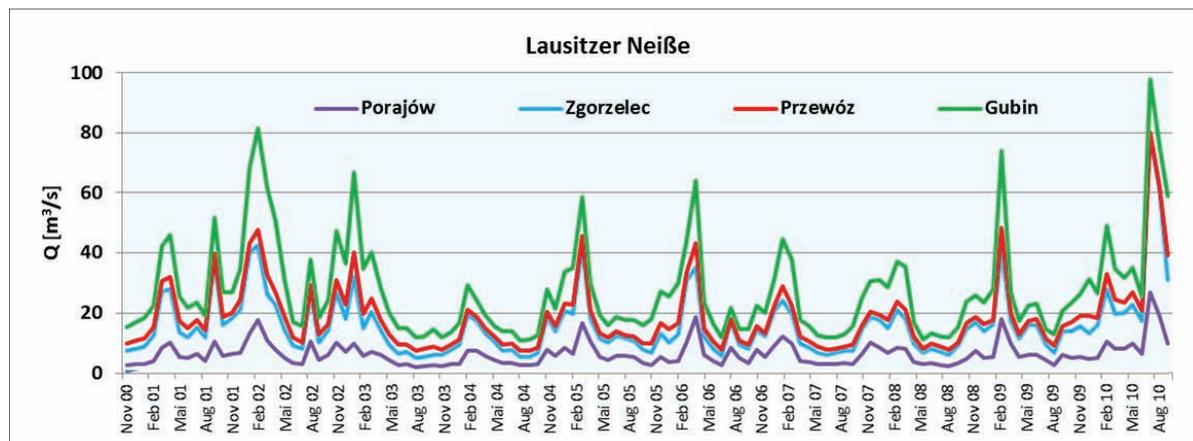


Abbildung 44: Projizierte Abflussmittel an ausgewählten Pegeln im Verlauf der Lausitzer Neiße, die als 5-Jahreswerte für den Zeitraum 2011-2100 mit Eingangsdatenreihen aus Klimaprojektionen ermittelt wurden [m<sup>3</sup>/s]





**Abbildung 45: Abflüsse an ausgewählten Pegeln an der Lausitzer Neiße – Ergebnisse der Modellierung der Wasserbilanz mit Beobachtungsdaten**

Im Untersuchungszeitraum wurden die niedrigsten monatlichen Abflusswerte 2003 (August) und 2004 (August) und die höchsten Werte im August 2010 verzeichnet (Abbildung 45).

Die monatlichen Abflussspenden an den Zuflüssen entwickelten sich ähnlich wie die Abflusswerte an der Lausitzer Neiße mit dem Unterschied, dass die monatlichen Abflussspitzen an der Pließnitz, Skroda und Lubsza 2002 auftraten (Abbildung 43).

#### 4.4. Klimaprojektionen - für veränderte Klimabedingungen

##### 4.4.1. Verifizierung ausgewählter Klimaprojektionen-Plausibilitätsprüfung

Im Rahmen der hydrologischen Modellierung im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße sollen Klimaprojektionen zum Einsatz kommen. Es existiert eine Vielzahl an Klimaszenarien, welche aufgrund unterschiedlicher Anfangs- und Randbedingungen im möglichen Verlauf des zukünftigen Klimas variieren. Daraus ergibt sich eine Bandbreite an möglichen Zuständen für den Wasserhaushalt. Im Projekt NEYMO wurden einzelne Klimaszenarien im Vorfeld der Modellierung ausgewählt (vgl. Kapitel 1.5), um so eine Bandbreite der Entwicklungen im Wasserhaushalt zu simulieren.

Aufgrund der Datenverfügbarkeit im Modellgebiet dient der Zeitraum von 1971-2000 als Klimanormalperiode, die als Vergleichszeitraum für die Analyse der zukünftigen Entwicklung des Klimas dient. Die Klimaprojektionen liegen von 1971 bis 2100 vor. Für den Zeitraum der Klimanormalperiode müssen die Projektionsdaten plausibel sein, d. h. sie sollten das aktuelle Klima hinreichend genau abbilden. Für den Nachweis dieser Güte werden die Szenariodaten den gemessenen Klimadaten gegenübergestellt. Die Plausibilität dieser Projektionen wurde bereits im Rahmen der Klimamodellierung geprüft (Kreienkamp et. al 2013). Zusätzlich wurden die simulierten Wasserhaushaltsdaten unter Verwendung der Klimaprojektionen für die Referenzperiode 1971-2000

hinsichtlich ihrer Plausibilität getestet. Dazu wurden die simulierten Wasserhaushaltskomponenten unter Verwendung der gemessenen Klimadaten denen der Klimaprojektionen gegenübergestellt. In Abbildung 46 sind die prozentualen Abweichungen des 30-jährigen Mittels 1971-2000 der Klimaprojektionen von der Klimanormalperiode für den Gebietsniederschlag und die Wasserhaushaltskomponenten dargestellt. Der Gebietsniederschlag wird vom Modell im Mittel um - 65 mm (- 7 %) unterschätzt. Die Projektion A1B, R01 unterschätzt den Niederschlag am stärksten. Insbesondere in den Quellgebieten der höheren Lagen wird der Niederschlag unterschätzt. Die mittels Szenariodaten berechnete Verdunstung weicht im Mittel um + 31 mm (6 %) von der auf Grundlage der gemessenen Klimadaten simulierten Verdunstung ab. Die Projektionen A1B, R01 und RCP8.5, R05 überschätzen die Verdunstung am stärksten. Die Projektion RCP8.5, R09 zeigt die geringste Überschätzung der Verdunstung. Sowohl der Niederschlag als auch die reale Verdunstung weichen für alle Klimaprojektionen um weniger als 10 % von den auf gemessenen Daten beruhenden Werten ab. Damit wurden beide Größen in den Klimaprojektionen für den Referenzzustand plausibel abgebildet. Die Unterschätzung der Modellinputgröße Niederschlag und die Überschätzung der realen Verdunstung ziehen eine Abweichung der Abflusskomponenten nach sich. Die gegenläufigen Abweichungen des Niederschlages und der Verdunstung benachteiligen die Abflusskomponenten, da weniger Wasser für den Abflussprozess zur Verfügung steht als im gemessenen Zustand. Daraus ergeben sich für die Abflusskomponenten Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss und Grundwasserneubildung im Mittel Abweichungen von - 2 mm (- 18 %), - 16 mm (- 26 %) und - 76 mm (- 28 %). Das bedeutet, der Fehler der Unterschätzung setzt sich mit der Tiefe des Abflussprozesses fort. Jedoch liegen die Abweichungen noch in einem akzeptablen Bereich. Ergebnis der Überprüfung ist eine hinreichend genaue Abbildung des Gebietsniederschlags, der Verdunstung und der Abflusskomponenten in der Modellregion auf Grundlage der Projektionsdaten. Für die Untersuchung von Veränderungen und Entwicklungen im Klima und im Wasserhaushalt im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße können damit sowohl die Klimaprojektionsdaten als auch die daraus resultierenden Wasserhaushaltsdaten in Bezug zum Referenzzeitraum der Szenariomodellierung ausgewertet werden. Allerdings müssen die vorhandenen Abweichungen bei der Auswertung und Interpretation der Projektionen berücksichtigt werden. Dadurch dass die Wasserhaushaltskomponenten bereits im Referenzzeitraum unterschätzt werden, wird das Signal der Veränderungen für die nahe und ferne Zukunft „verfälscht“. Daher dürfen nur prozentuale Veränderungen im Vergleich zur projizierten Referenzperiode erfolgen, niemals zur beobachteten Referenzperiode. Es sollten keine absoluten Werte der Abflusskomponenten im Detail betrachtet werden, sondern nur das Änderungssignal.

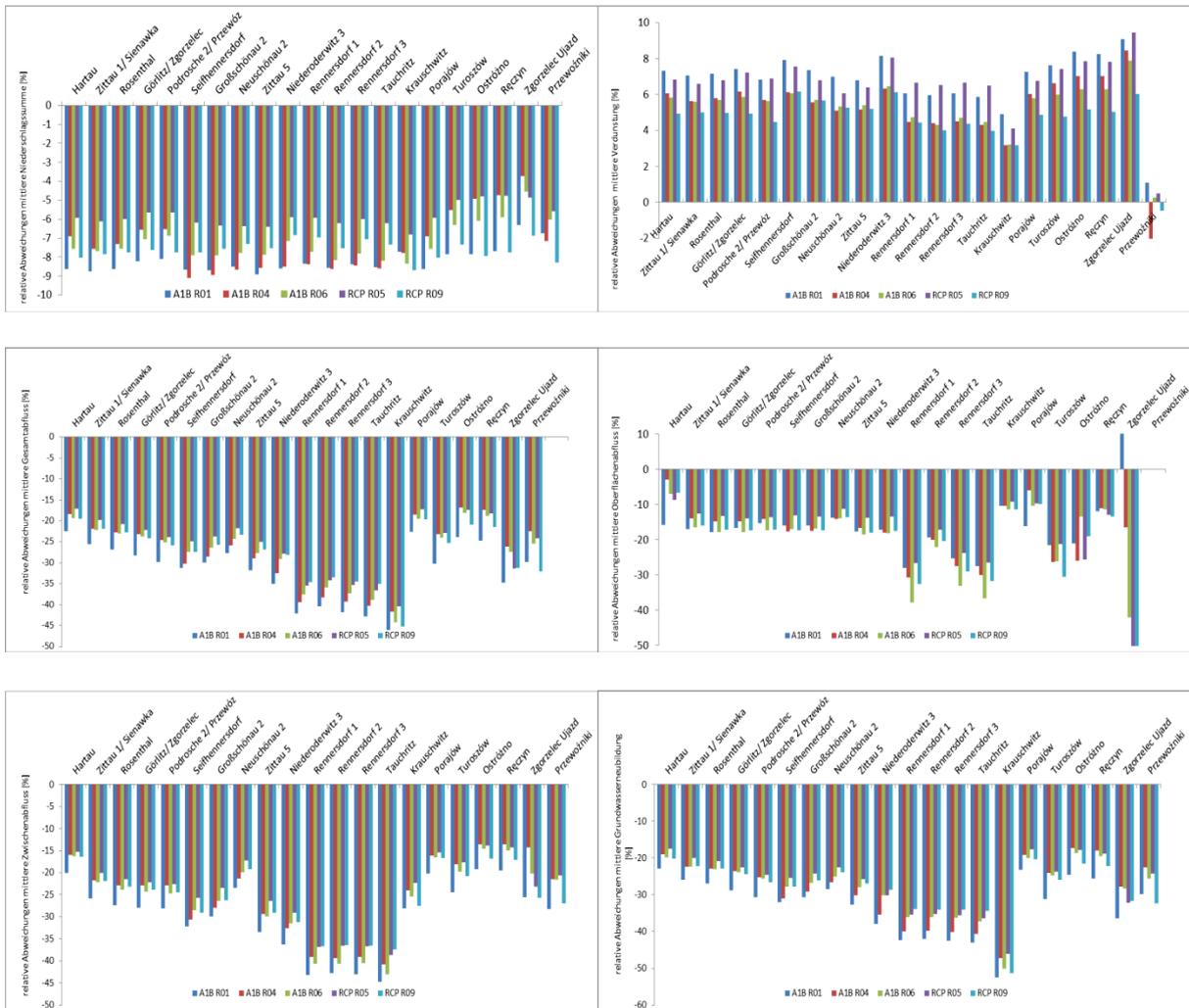


Abbildung 46: Relative Abweichungen des 30-jährigen Mittels 1971-2000 der Wasserhaushaltskomponenten unter Verwendung von Klimaprojektionen im Vergleich zur Verwendung der gemessenen Klimadaten (oben links nach rechts: Niederschlag, reale Verdunstung, Gesamtabfluss, Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss, Grundwasserneubildung)

#### 4.4.2. Ergebnisse Wasserhaushaltsmodellierung ArcEGMO unter Verwendung von Klimaprojektionen

Nach der Analyse der Wasserhaushaltsergebnisse für den Beobachtungszeitraum und der Plausibilitätsprüfung der Klimaszenarien wurde die Wasserhaushaltsmodellierung mit den fünf ausgewählten Klimaprojektionen durchgeführt. Am Modell wurden keine Änderungen an den Parametern oder Einstellungen vorgenommen. Es wurden lediglich die Klimadaten ausgetauscht und der Wasserhaushalt bis 2100 simuliert. Nachfolgend sind ausgewählte Ergebnisse dargestellt. Eine umfangreichere Darstellung ist in dieser Broschüre nicht möglich. Jedoch werden auf der Projektwebseite [www.neymo-project.eu](http://www.neymo-project.eu) die Modellergebnisse und Auswertungen veröffentlicht. Die Entwicklung der Komponenten und Bewertung der Ergebnisse unter Nutzung der Klimaprojektionen ist immer auf die Referenzperiode der jeweiligen Projektion zu beziehen.

Die langjährige Wasserbilanz für das gesamte gemeinsam betrachtete Einzugsgebiet bis zur sächsischen Staatsgrenze für den Zeitraum 2021-2050 und 2071 bis 2100 ergeben sich für die fünf Klimaprojektionen wie folgt:

2021-2050, A1B, R01

P	ER	RO	RH	GWN
810,1 mm/a	588,7 mm/a	9,5 mm/a	39,3 mm/a	173,9 mm/a
100 %	72,7 %	1,2 %	4,9 %	21,5 %
				
<b>R</b> 222,7 mm/a 27,5 %				

2071-2100, A1B, R01

P	ER	RO	RH	GWN
751,9 mm/a	597,3 mm/a	8,4 mm/a	29,2 mm/a	117,4 mm/a
100 %	79,4 %	1,1 %	3,9 %	15,6 %
				
<b>R</b> 155,0 mm/a 20,6 %				

2021-2050, A1B, R04

P	ER	RO	RH	GWN
834,2 mm/a	599,9 mm/a	10,3 mm/a	41,3 mm/a	184,3 mm/a
100 %	71,9 %	1,2 %	5,0 %	22,1 %
				
<b>R</b> 235,9 mm/a 28,3 %				

2071-2100, A1B, R04

P	ER	RO	RH	GWN
740,9 mm/a	596,1 mm/a	8,1 mm/a	27,6 mm/a	108,5 mm/a
100 %	80,5 %	1,2 %	3,7 %	14,6 %
				
<b>R</b> 144,2 mm/a 19,5 %				

2021-2050, A1B, R06

P	ER	RO	RH	GWN
816,2 mm/a	596,8 mm/a	9,3 mm/a	37,7 mm/a	174,3 mm/a
100 %	73,1 %	1,2 %	4,6 %	21,4 %
				
<b>R</b> 221,3 mm/a 27,1 %				

2071-2100, A1B, R06

P	ER	RO	RH	GWN
749,6 mm/a	592,6 mm/a	8,3 mm/a	29,7 mm/a	120,2 mm/a
100 %	79,1 %	1,2 %	4,0 %	16,0 %
				
<b>R</b> 158,2 mm/a 21,1 %				

2021-2050, RCP85, R05					2071-2100, RCP85, R05				
P	ER	RO	RH	GWN	P	ER	RO	RH	GWN
828,3 mm/a	596,6 mm/a	9,5 mm/a	40,3 mm/a	183,1 mm/a	796,8 mm/a	609,4 mm/a	8,9 mm/a	33,9 mm/a	145,3 mm/a
100 %	72,0 %	1,2 %	4,9 %	22,1 %	100 %	76,5 %	1,1 %	4,3 %	18,2 %
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">R</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">232,9 mm/a</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">28,1 %</div>					<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">R</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">188,1 mm/a</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">23,6 %</div>				

2021-2050, RCP85, R09					2071-2100, RCP85, R09				
P	ER	RO	RH	GWN	P	ER	RO	RH	GWN
801,8 mm/a	630,5 mm/a	8,7 mm/a	31,0 mm/a	132,4 mm/a	717,6 mm/a	608,6 mm/a	7,7 mm/a	23,1 mm/a	78,3 mm/a
100 %	78,6 %	1,2 %	5,9 %	16,5 %	100 %	84,8 %	1,1 %	3,2 %	10,9 %
<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">R</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">172,1 mm/a</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">21,5 %</div>					<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">R</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">109,1 mm/a</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">15,2 %</div>				

Die Tabelle 12 bis Tabelle 16 zeigen die Entwicklung der einzelnen Wasserhaushaltskomponenten als 30-jährige Mittelwerte für die Referenzperiode, die nahe (2021-2050) und die ferne (2071-2100) Zukunft. Die Ergebnisse sind auf Basis von Teileinzugsgebieten und für Klassen dargestellt. In Tabelle 12 ist ein Rückgang des Niederschlages für alle Projektionen zu erkennen. Für die nahe Zukunft zeigen die Realisierungen A1B, R06 und RCP85, R09 den stärksten Rückgang. In der gewählten Klasseneinteilung verändert sich der Niederschlag nur in den mittleren Lagen. Für die ferne Zukunft ist eine deutlichere Abnahme des Niederschlages bis in die höheren Lagen ersichtlich. Während die Unterschiede für die nahe Zukunft zwischen den Projektionen gering sind, sind für die ferne Zukunft deutliche Unterschiede ersichtlich. Die Projektion RCP85, R05 ist mit Abstand am feuchtesten. Nahezu alle Teilgebiete sind eine Klasse höher eingestuft als bei den anderen Projektionen. Die niederschlagsärmsten Verhältnisse ergeben sich bei der Projektion RCP85, R09. Vor allem ist dies in den höheren Lagen deutlich. Die A1B-Szenarien unterscheiden sich lediglich in Teilgebieten des Tieflandes. Dabei zeigt die Realisierung R06 den wenigsten Niederschlag auf.

Für die Projektionsergebnisse wurden ebenfalls Trendanalysen nach der gleichen Methode wie in Kapitel 4.1. durchgeführt. In der Broschüre ist die Trendanalyse beispielhaft für das Szenario RCP85, R09 abgebildet, da in dieser Projektion mit den größten Veränderungen zu rechnen ist. Laut den analysierten Trends (vgl. Tabelle 17) nimmt der Niederschlag der Projektion RCP85, R09 in der nahen Zukunft für alle Gebiete ab, jedoch nicht signifikant. Die Trendanalyse für die Projektion RCP85, R09

ergibt, dass der Niederschlag für die ferne Zukunft im Sommerhalbjahr tendenziell zunimmt und im Winterhalbjahr tendenziell abnimmt (Tabelle 18). Insgesamt bedeutet das für das Gesamtjahr eine Abnahme des Niederschlages. Dabei handelt es sich jedoch nur um Tendenzen und nicht um signifikante Trends. Aus der Trendanalyse geht für den Niederschlag hervor, dass sich die Verhältnisse im Sommerhalbjahr im Laufe der Zeit für diese Projektion verändern.

Die Veränderung der realen Verdunstung ist in Tabelle 13 zu sehen. Die Verdunstung nimmt für die nahe Zukunft für alle Projektionen in unterschiedlichem Maß im Vergleich zur Referenzperiode zu. Die größte Zunahme erreicht die Verdunstung in der Projektion A1B, R04 und RCP85, R09. Für die ferne Zukunft nimmt die Verdunstung innerhalb der 30 Jahre wieder ab. Die Veränderungen unterscheiden sich in den einzelnen Teilgebieten. Die kleinsten Abnahmen zeigt die Projektion RCP85, R09.

Die Trendanalyse zeigt für die Projektion RCP85, R09 im Sommerhalbjahr eine nicht signifikante Abnahme und im Winterhalbjahr eine unbedeutende Zunahme der Verdunstung innerhalb des Zeitraums 2021-2050. Da die Abnahme im Sommerhalbjahr größer ist als die Zunahme im Winter ergibt sich auch für das Gesamtjahr eine Tendenz zur Abnahme der Verdunstung. Die Abnahme der Verdunstung innerhalb der 30 Jahre von 2021 bis 2050 bedeutet nicht, dass die Verdunstung im Vergleich zur Referenzperiode sinkt. Im Gegenteil nimmt die Verdunstung tatsächlich im Mittel um 60 mm zu. Es kommt lediglich innerhalb der 30 Jahre von 2021 bis 2050 zu schwankenden Trends mit fallenden und steigenden Abschnitten. In der fernen Zukunft nimmt die Verdunstung tendenziell wieder zu, jedoch nicht mehr so stark. In einigen Teilgebieten wird die Verdunstung durch das zur Verfügung stehende Wasser limitiert.

Sowohl der Oberflächenabfluss als auch der Zwischenabfluss nehmen im Vergleich zur Referenzperiode bis zur nahen Zukunft und weiter fortsetzend bis zur fernen Zukunft für alle Teilgebiete ab. Die Trendanalyse zeigt innerhalb der beiden Zeitscheiben eine Abnahme des Oberflächen- und Zwischenabflusses. Im Sommerhalbjahr nimmt der Oberflächenabfluss von 2071 bis 2100 leicht zu. Der Oberflächenabfluss zeigt jedoch keine signifikanten Veränderungen. Der Zwischenabfluss hingegen nimmt innerhalb beider Zeitscheiben für die an der Lausitzer Neiße gelegenen Pegel signifikant ab.

Die Grundwasserneubildung sinkt im Vergleich zur Referenzperiode für alle Projektionen bis 2100. Die Projektionen A1B, R04 und RCP, R09 simulieren die größten Abnahmen der Grundwasserneubildung in allen Teilgebieten. Die Trendanalyse zeigt für die nahe und ferne Zukunft für die Pegel entlang der Lausitzer Neiße signifikante Abnahmen der Grundwasserneubildung im Sommerhalbjahr. Ansonsten zeigt die Trendanalyse kein signifikantes Verhalten für die Grundwasserneubildung.

Da alle Abflusskomponenten abnehmen, nimmt auch der Gesamtabfluss bis 2100 für alle Teilgebiete ab. Innerhalb der beiden Zeitscheiben gibt es jedoch keine signifikanten Trends.

Zusätzlich sind in den Abbildung 48 bis Abbildung 51 die Abweichungen der Einzeljahre vom langjährigen Mittelwert der Referenzperiode für alle Jahre von 1971 bis 2100 der Wasserhaushaltskomponenten dargestellt. Die Werte gelten für das Gesamtgebiet. Abgebildet sind

der langjährige Mittelwert und der Vertrauensbereich der einzelnen Projektionen pro Komponente. Verlassen die Abweichungen (Ganglinie) den Vertrauensbereich kann von einem Änderungssignal gesprochen werden. Bewegt sich die Ganglinie innerhalb der Grenzen des Vertrauensbereiches, schwankt sie im natürlichen Variabilitätsbereich. Dann liegt keine tatsächliche Veränderung vor. Angegeben sind die Abweichungen für das Gesamtjahr sowie das Sommer- und Winterhalbjahr. Im Sommerhalbjahr ist zu erkennen, dass der Niederschlag für alle Projektionen ab ca. 2050 den Vertrauensbereich verlässt und damit ein Änderungssignal vorliegt. Die Verdunstung hingegen verlässt kaum den Vertrauensbereich. Lediglich die Projektion RCP85, R09 verlässt abschnittsweise den Vertrauensbereich. Der Oberflächenabfluss verlässt nach 2060 den Vertrauensbereich für alle Projektionen bis auf A1B, R01. Sie verlässt nie diesen Bereich. Für den Zwischenabfluss ist ab 2050 ein Änderungssignal für alle Projektionen erkennbar. Bei der Grundwasserneubildung kann ab 2045 von einem Änderungssignal gesprochen werden. Das Signal zeigt eine stetige Abnahme der Grundwasserneubildung für alle Projektionen.

Im Winterhalbjahr ist lediglich für die Verdunstung ein deutliches Änderungssignal ab 2030 zu beobachten. Der Niederschlag und der Oberflächenabfluss bewegen sich immer in den Grenzen des Vertrauensbereichs. Für den Zwischenabfluss und die Grundwasserneubildung verlässt nur die Projektion RCP85, R09 den Vertrauensbereich.

Wird das Gesamtjahr betrachtet, fällt auf, dass nur der Zwischenabfluss und die Grundwasserneubildung ein Änderungssignal für alle Projektionen ab 2050 hervorrufen. Der Niederschlag, die Verdunstung und der Oberflächenabfluss bewegen sich fast immer innerhalb der Grenzen des Vertrauensbereichs und erzeugen kein klares Änderungssignal. Ausnahme bildet die Projektion RCP85, R09 und A1B, R06, die zum Ende des Jahrhunderts ein Änderungssignal aufweisen.

Die aufgezeigten Entwicklungen stellen mögliche Veränderungen dar, die nur unter der Annahme der ausgewählten Klimaprojektionen gelten. Andere Klimaprojektionen können durchaus ein differenziertes Verhalten im Wasserhaushalt hervorrufen.

### Fazit

Alle Abflusskomponenten zeigen abnehmende Tendenzen. In Abhängigkeit des betrachteten Zeitbezugs (Jahr, Sommer-, Winterhalbjahr) und Klimaprojektion fällt das Änderungssignal stärker oder schwächer aus. Prinzipiell sind erst in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts Änderungssignale simuliert wurden. Die Projektion RCP85, R09 war in allen Analysen auffällig und zeigte die stärksten Veränderungen an. Die Grundwasserneubildung und der Zwischenabfluss weisen im Sommerhalbjahr die deutlichsten Veränderungen auf. Der Oberflächenabfluss verändert sich unter den Klimaprojektionen wenig. Erst in der letzten Dekade des Jahrhunderts verlassen einige Projektionen den Vertrauensbereich und zeigen eine Änderung an.

Die Verdunstung hingegen steigt und zeigt im Winterhalbjahr ein deutliches Änderungssignal an. Dieses Signal ist bereits ab 2035 zu beobachten.

Der Niederschlag zeigt kein klares Änderungssignal. Lediglich für das Sommerhalbjahr ist ab 2060 für alle Projektionen ein Änderungssignal zu verzeichnen, dass auf einen Rückgang des Niederschlages im Sommer und tendenziell im Gesamtjahr hinweist. Im Winterhalbjahr bewegt sich der Niederschlag im Bereich der natürlichen Variabilität.

Die Aussagen bezüglich der Entwicklung des Wasserhaushalts sind als eine mögliche Tendenz zu betrachten, die nur für die angenommenen Klimabedingungen der fünf Klimaprojektionen gelten. Es ist nicht zulässig, einzelne Absolutwerte zu verwenden, um Aussagen zu speziellen Aspekten an Einzelstandorten abzuleiten. Es ist immer eine Bandbreite der Wasserhaushaltsgrößen zu betrachten. Bei den Ergebnissen handelt es sich um Modellwerte, die immer mit gewissen Aussageunsicherheiten, aufgrund von Modellfehlern, Datenungenauigkeiten, Annahmen zu der Entwicklung des Klimas, u. a. behaftet sind. Es ist darauf hinzuweisen, dass das Modell mit festen Grundwasserflurabständen arbeitet, die sich nicht mit der Zeit und den veränderten Klimabedingungen verändern. Das bedeutet, dass grundwassernahe Teilgebiete auch in der Zukunft Grundwassernah bleiben und diese Eigenschaften aufweisen, obwohl sich die Rahmenbedingungen verändert haben. Das führt dazu, dass das Grundwasser über die Vegetation durch kapillaren Aufstieg verdunstet wird, obwohl der Standort sich unter Umständen zu einem grundwasserfernen entwickelt hat und tatsächlich kein kapillarer Aufstieg mehr erfolgen würde. Dadurch werden die Verdunstung höher und die Grundwasserneubildung niedriger simuliert, als es tatsächlich bei der Verwendung von dynamischen Grundwasserflurabständen der Fälle wäre.

Die Kenntnis über die Aussageunsicherheit sowie dessen Grad ist für die Interpretation der Daten maßgeblich. Abbildung 47 verdeutlicht den Grad der Unsicherheit am Beispiel der Verwendung unterschiedlicher Klimaprojektionen für den Abfluss am Pegel Podrosche 2. Daraus ist erkennbar, dass insbesondere in den letzten Winter- und den Frühjahrsmonaten unterschiedliche Gesamtabflüsse simuliert werden. Im März wird für die Projektion RCP85, R09 nahezu halb so viel Abfluss modelliert wie für RCP85, R09. An diesem Beispiel wird deutlich wie unterschiedlich die Größenordnungen der Entwicklung der Wasserhaushaltsgrößen sein können. Dies wird von Gebiet zu Gebiet etwas variieren.

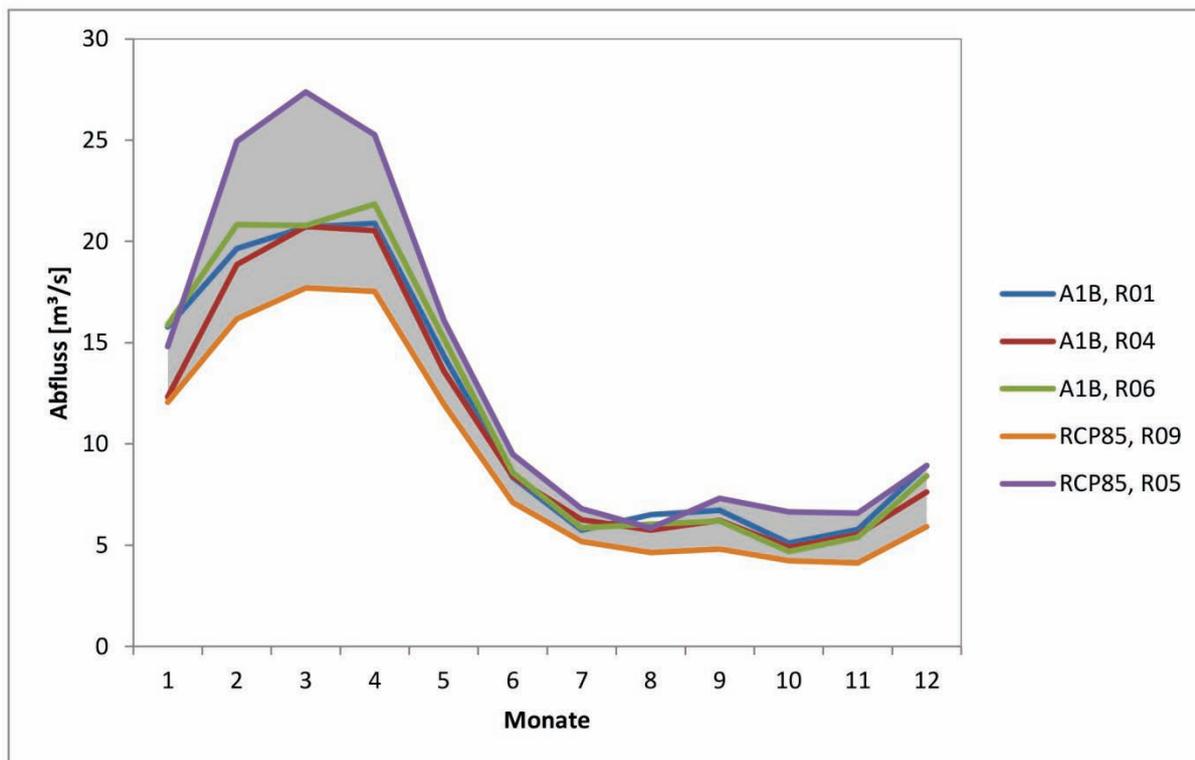


Abbildung 47: Bandbreite der mittleren monatlichen Abflüsse am Pegel Podrosche 2 in der Periode 2071-2100 als Ergebnis der Anwendung verschiedener Klimaprojektionen

Tabelle 12: Modellierter Niederschlag für verschiedene Projektionen mit dem Modell ArcEGMO

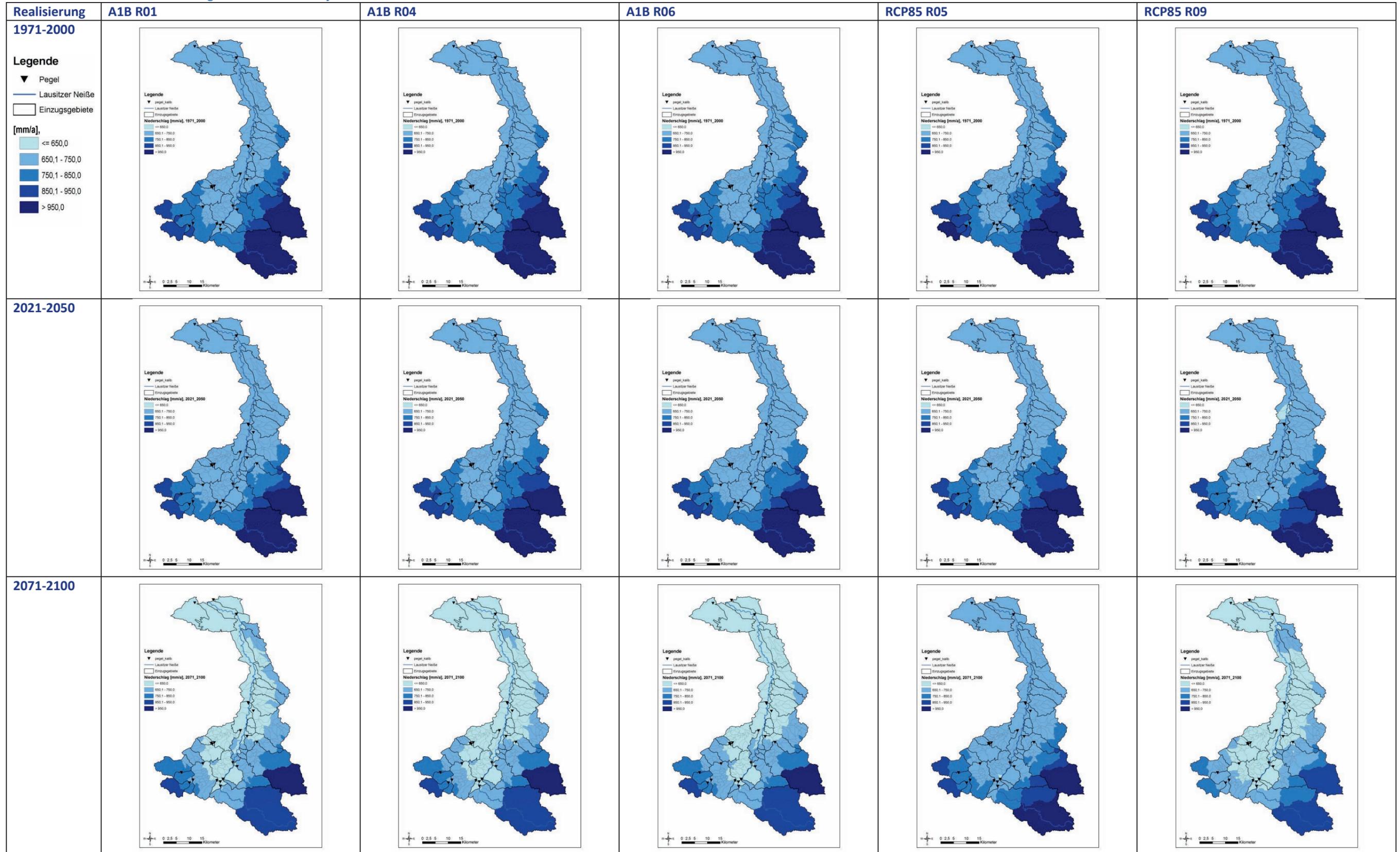


Tabelle 13: Modellerte Verdunstung für verschiedene Projektionen mit dem Modell ArcEGMO

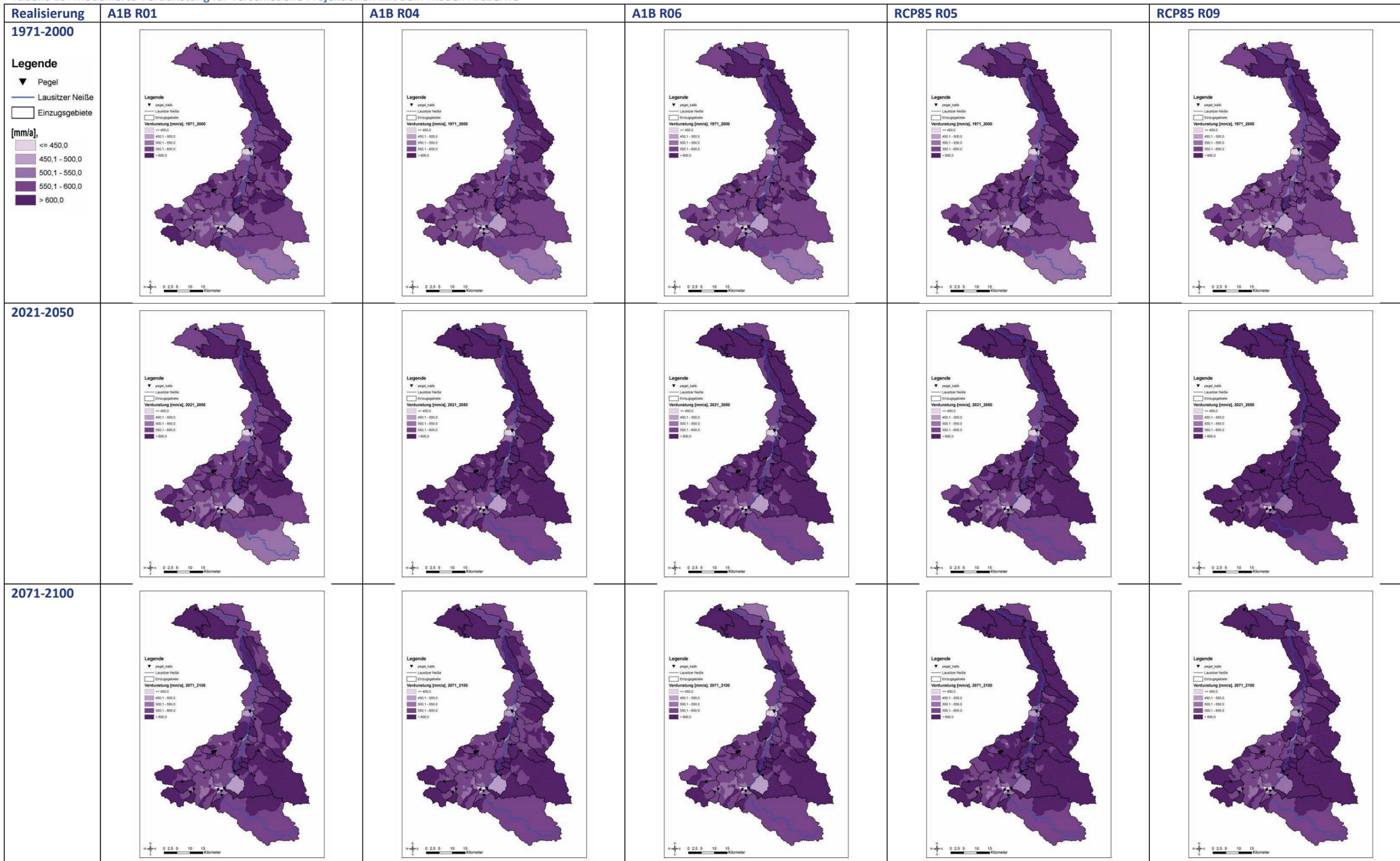


Tabelle 14: Modellierter Oberflächenabfluss für verschiedene Projektionen mit dem Modell ArcEGMO



Tabelle 15: Modellierter Zwischenabfluss für verschiedene Projektionen mit dem Modell ArcEGMO

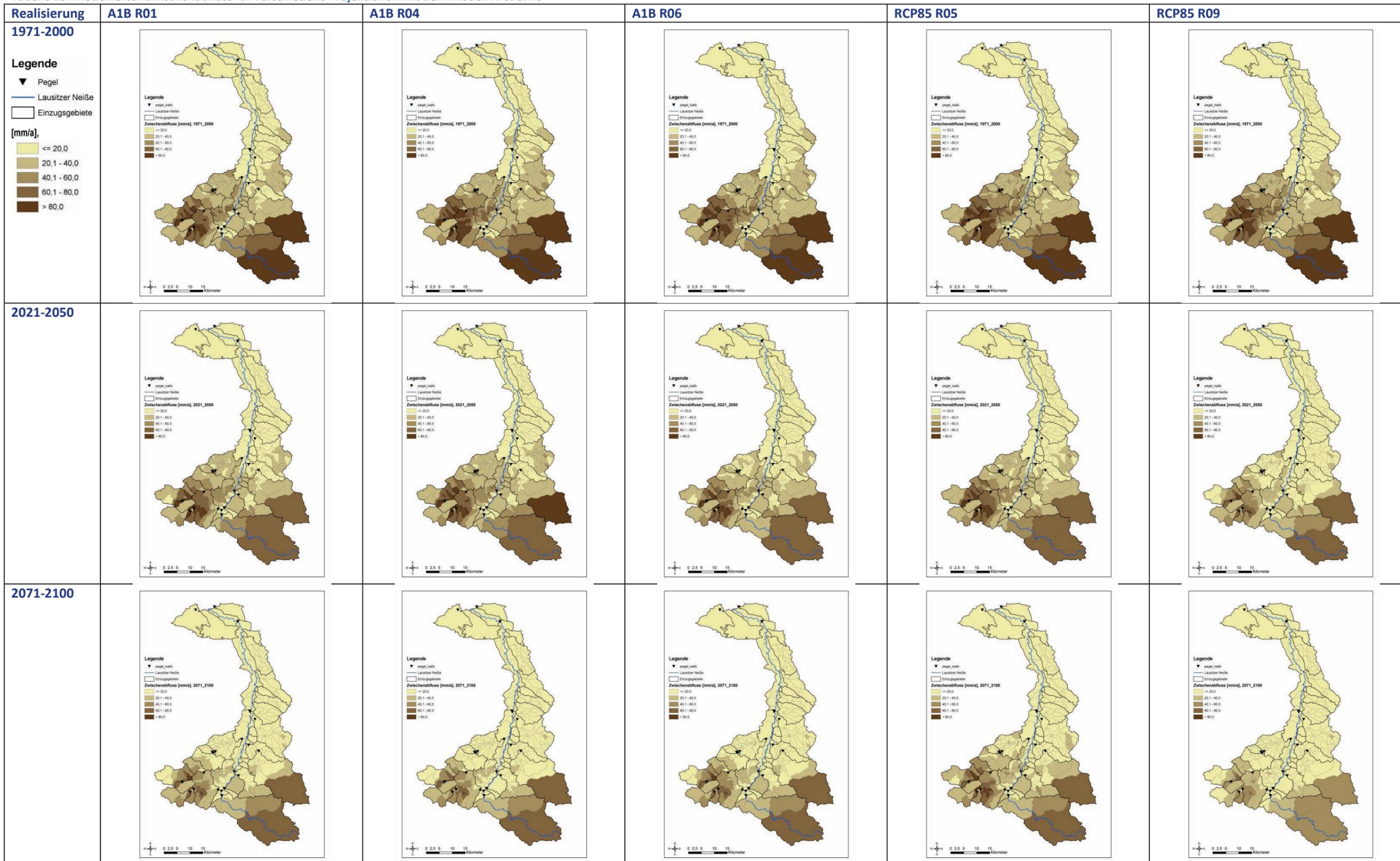


Tabelle 16: Modellierte Grundwasserneubildung für verschiedene Projektionen mit dem Modell ArcEGMO

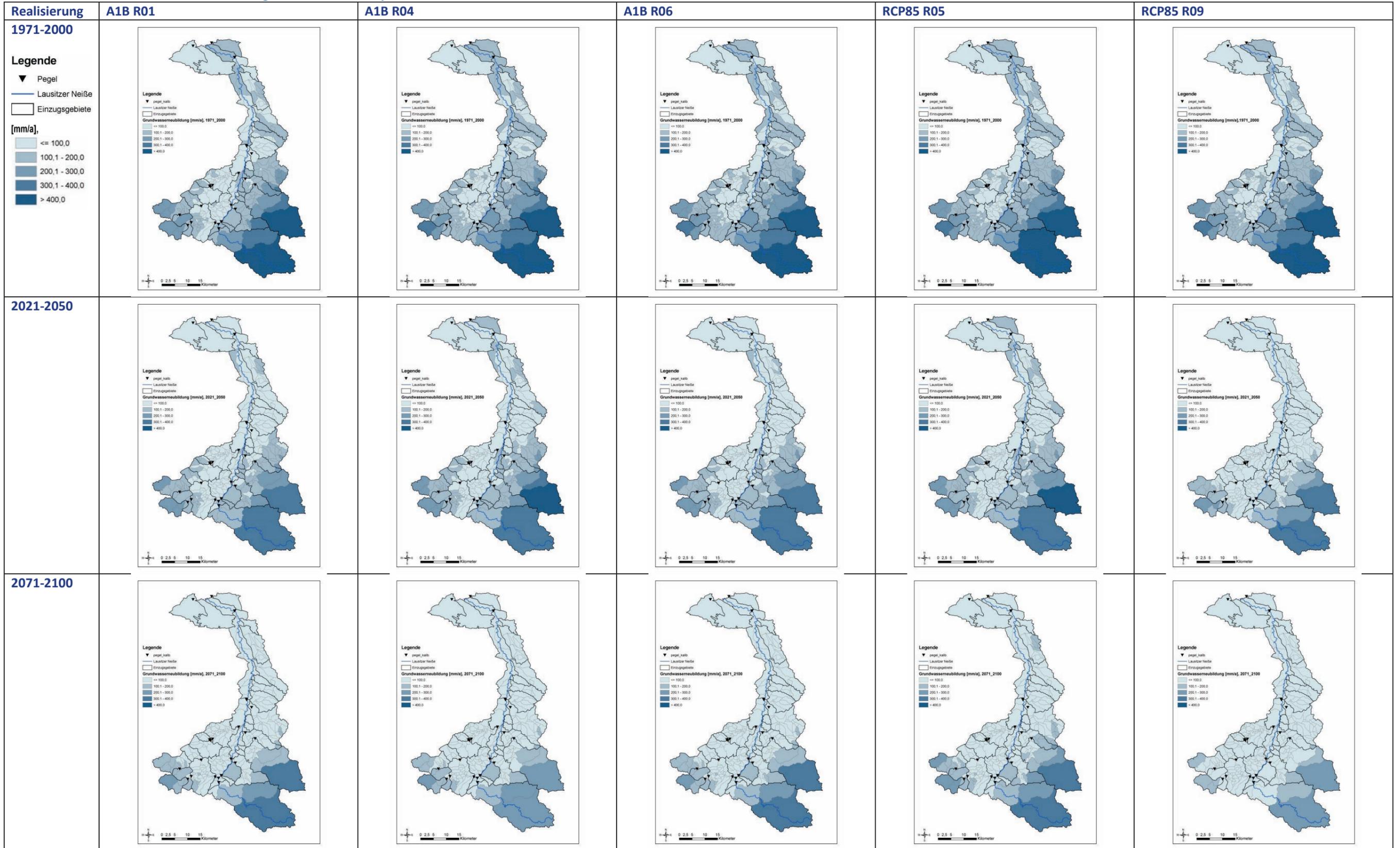


Tabelle 17: Mittlere Jahreswerte der Wasserhaushaltskomponenten und absolute Trends in mm/30a (positiv, negativ) mit Signifikanzen (signifikante Trends fett) für den Projektionszeitraum 2021-2050 für Jahr, Sommer- und Winterhalbjahr der Projektion RCP85, R09; Pegel unterteilt nach Höhenstufen (dunkelblau: Tiefland, hellblau: Bergland)

	PI				ER				RO				RH				GWN													
	Jahr		SHJ		WHJ		Jahr		SHJ		WHJ		Jahr		SHJ		WHJ		Jahr		SHJ		WHJ							
	Mittelwert [mm/a]	Trend [mm/30a]																												
Przewóniki*	686.61	-67.12	358.64	-12.26	327.97	-32.45	600.69	-45.82	396.33	-47.18	204.36	4.29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.41	-2.13	0.91	-0.26	5.51	-1.59	80.71	-21.96	15.12	-6.37	65.60	-16.30
Krauschwitz*	651.83	-96.92	351.71	-27.89	300.12	-20.10	616.69	-24.74	436.68	-25.17	180.01	3.84	21.87	-4.03	10.88	-2.07	11.00	-0.87	1.42	-0.44	0.17	-0.05	1.25	-0.24	13.17	-66.30	-67.62	-20.60	80.80	-14.62
Podrosche 2/ Przewóz	791.52	-101.24	428.79	-42.86	362.72	-48.18	630.13	-16.98	468.82	-30.28	161.31	10.37	9.48	-2.14	4.64	-1.51	4.83	-0.89	28.74	-9.11	5.76	-2.52	22.98	-4.54	124.01	-63.32	7.26	-34.89	116.75	-15.63
Görlitz/ Zgorzelec	819.66	-106.58	442.50	-39.50	377.15	-45.19	628.68	-20.23	471.80	-26.22	156.88	10.59	9.90	-2.36	4.81	-1.51	5.09	-0.84	34.91	-10.90	7.07	-3.36	27.84	-6.22	147.09	-72.84	13.57	-37.55	133.52	-15.71
Zgorzelec- Ujazd	726.77	-112.96	410.99	-21.70	315.79	-61.05	651.45	-30.23	485.40	-30.22	166.05	8.34	0.40	-0.13	0.28	-0.04	0.12	-0.02	12.07	-5.74	2.29	-0.66	9.78	-3.86	63.99	-45.16	-11.58	-21.74	75.57	-30.16
Tauchritz	696.21	-120.57	388.19	-42.45	308.02	-47.09	629.54	-35.98	457.40	-42.26	172.14	5.96	5.58	-2.11	2.67	-0.97	2.90	-0.58	17.92	-6.76	2.99	-3.19	14.93	-2.40	44.45	-33.16	-1.95	-20.27	46.40	-11.41
Rennersdorf 1	703.08	-103.90	388.71	-45.79	314.37	-45.09	634.82	-37.07	461.65	-38.18	173.17	8.81	5.17	-2.21	2.33	-1.14	2.83	-0.43	20.98	-7.42	3.14	-3.20	17.84	-3.09	43.27	-37.71	-6.18	-20.90	49.45	-11.39
Rennersdorf 2	715.73	-129.71	398.14	-44.78	317.59	-42.35	628.49	-35.96	455.58	-43.10	172.91	7.40	12.93	-3.93	6.48	-2.26	6.45	-0.86	16.47	-8.20	2.76	-3.63	13.71	-2.60	59.05	-40.77	1.14	-19.30	57.91	-11.14
Rennersdorf 3	704.79	-111.78	390.19	-44.69	314.60	-44.03	633.48	-35.72	460.60	-37.45	172.88	8.88	6.61	-2.51	3.11	-1.53	3.50	-0.54	20.12	-7.80	3.06	-3.51	17.05	-2.55	45.75	-38.73	-5.36	-21.25	51.11	-11.45
Réczyn	897.66	-110.99	485.77	-53.60	411.89	-60.05	655.46	-19.37	492.10	-26.22	163.36	8.83	2.47	-0.66	1.27	-0.36	1.20	-0.20	38.87	-10.71	8.88	-3.06	29.98	-3.81	201.61	-99.87	19.26	-29.08	182.35	-35.91
Ostróžno	926.60	-117.54	497.40	-66.08	429.20	-59.92	654.26	-15.53	492.87	-26.49	161.39	10.05	0.17	-0.10	0.09	-0.07	0.07	-0.01	44.09	-11.35	10.15	-2.94	33.94	-3.80	228.75	-95.33	27.53	-31.30	201.23	-43.15
Rosenthal	844.19	-89.62	447.77	-45.48	396.43	-32.88	614.67	-17.03	465.43	-31.46	149.25	12.35	10.46	-2.74	4.93	-2.14	5.53	-0.81	42.76	-11.72	8.47	-4.39	34.29	-7.77	177.13	-67.22	26.11	-37.13	151.02	-10.57
Turoszów	805.53	-99.42	452.02	-53.57	353.51	-39.94	659.51	-16.90	503.75	-28.33	155.76	9.35	0.43	-0.32	0.22	-0.18	0.21	-0.06	26.51	-9.87	5.04	-1.24	21.47	-3.80	120.36	-80.24	-8.14	-38.19	128.50	-28.93
Zittau 1/ Sienawka	871.40	-93.91	455.71	-35.68	415.69	-30.85	614.22	-18.38	465.86	-31.69	148.36	12.78	11.94	-2.90	5.62	-2.11	6.32	-0.94	47.52	-12.23	9.54	-4.89	37.98	-6.97	198.40	-67.26	32.26	-38.75	166.13	-8.74
Zittau 5	803.86	-84.57	425.76	-32.95	378.11	-13.84	628.96	-15.96	463.80	-21.87	165.16	7.87	19.27	-3.88	8.86	-3.35	10.41	-1.60	38.54	-9.68	4.87	-2.27	33.67	-7.10	117.68	-41.34	-3.53	-18.92	121.21	-9.98
Porajów	925.52	-98.61	479.53	-41.58	446.00	-37.53	606.05	-17.24	469.78	-25.77	136.27	11.71	3.02	-0.85	1.41	-0.60	1.61	-0.27	54.98	-14.59	13.20	-4.80	41.77	-2.54	262.21	-76.66	60.22	-45.75	201.99	-6.40
Hartau	932.74	-99.52	482.42	-39.71	450.32	-39.76	606.89	-15.92	470.89	-25.76	136.00	11.94	1.87	-0.50	0.84	-0.31	1.04	-0.17	56.27	-14.63	13.56	-4.96	42.71	-2.76	268.41	-76.19	62.34	-46.73	206.08	-5.45
Großschönau 2	851.05	-81.50	446.74	-31.18	404.31	-4.51	643.54	-15.91	476.19	-20.75	167.35	7.94	11.68	-2.21	5.46	-1.81	6.22	-0.25	35.39	-7.74	4.76	-1.56	30.63	-2.80	160.83	-54.00	-1.35	-21.26	162.18	-0.69
Niederoder- witz 3	741.75	-89.17	398.92	-44.32	342.83	-39.43	609.88	-18.94	449.93	-28.64	159.95	9.92	27.70	-7.18	12.88	-3.48	14.82	-2.21	39.17	-14.19	4.98	-3.05	34.18	-6.16	65.78	-52.95	-12.48	-22.59	78.26	-17.08
Seiffhenners- dorf	828.50	-87.88	435.31	-26.56	393.19	-14.74	637.30	-11.25	469.94	-16.94	167.36	8.75	15.41	-3.19	7.22	-1.82	8.19	-0.67	33.77	-9.03	4.29	-1.69	29.48	-2.04	142.48	-51.67	-0.53	-23.46	143.01	-9.95
Neuschönau 2	904.88	-65.32	473.85	-26.91	431.03	4.31	658.52	-16.52	487.26	-21.28	171.27	6.25	5.18	-0.67	2.38	-0.53	2.81	0.04	33.34	-6.64	5.39	-0.72	27.95	-2.81	208.11	-55.35	0.89	-21.49	207.21	-14.87

Tabelle 18: Mittlere Jahreswerte der Wasserhaushaltskomponenten und absolute Trends in mm/30a (positiv, negativ) mit Signifikanzen (signifikante Trends fett) für den Projektionszeitraum 2071-2100 für Jahr, Sommer- und Winterhalbjahr der Projektion RCP85, R09; Pegel unterteilt nach Höhenstufen (dunkelblau: Tiefland, hellblau: Bergland)

	PI				ER				RO				RH				GWN													
	Jahr		SHJ		WHJ		Jahr		SHJ		WHJ		Jahr		SHJ		WHJ		Jahr		SHJ		WHJ							
	Mittelwert [mm/a]	Trend [mm/30a]																												
Przewóniki*	645.26	-15.31	296.43	20.44	348.84	-34.69	566.88	17.23	345.88	15.21	221.00	-7.87	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.63	-2.37	0.72	0.04	4.91	-2.70	72.74	-30.65	12.31	-1.35	60.43	-30.18
Krauschwitz*	626.74	-18.15	305.02	21.35	321.72	-36.78	633.39	41.58	435.50	28.05	197.89	4.36	21.11	-2.34	9.41	-0.96	11.70	-2.13	1.26	-0.47	0.11	-0.02	1.14	-0.51	-28.53	-56.93	-103.97	-10.86	75.44	-40.04
Podrosche 2/ Przewóz	708.83	-43.72	335.37	31.44	373.45	-23.34	608.61	40.21	424.71	26.77	183.90	21.26	8.32	-0.63	3.55	0.53	4.77	-0.89	21.53	-10.12	2.96	-0.67	18.57	-9.10	70.56	-72.96	-22.98	-10.00	93.54	-55.29
Görlitz/ Zgorzelec	730.74	-32.23	344.36	41.27	386.38	-24.20	608.52	54.20	428.68	25.90	179.84	22.66	8.60	-0.56	3.61	0.49	4.99	-1.09	26.15	-11.69	3.62	-0.80	22.53	-10.83	87.73	-79.13	-19.66	-9.24	107.39	-62.02
Zgorzelec- Ujazd	659.28	-30.87	326.49	35.46	332.79	-37.36	637.67	48.63	447.92	31.01	189.76	19.46	0.48	0.06	0.36	0.07	0.12	-0.03	8.49	-6.25	1.16	-0.09	7.33	-4.99	12.77	-53.69	-41.27	-13.54	54.04	-40.08
Tauchritz	611.19	4.04	298.08	56.39	313.11	-13.36	585.36	33.44	393.39	14.71	191.97	17.87	4.73	-0.11	2.04	0.58	2.69	-0.50	10.56	-4.28	1.74	-0.11	8.82	-3.84	10.41	-27.83	-18.05	-9.62	28.46	-17.64
Rennersdorf 1	620.16	-0.53	299.35	45.43	320.81	-11.14	595.18	30.68	402.37	11.39	192.81	18.60	4.42	-0.04	1.83	0.62	2.59	-0.67	13.04	-4.27	1.98	-0.09	11.06	-4.42	7.44	-31.05	-24.48	-11.02	31.92	-20.58
Rennersdorf 2	629.77	4.39	305.67	38.51	324.10	-17.89	585.03	40.87	393.31	20.89	191.72	17.48	11.06	0.10	4.86	1.37	6.20	-0.91	10.06	-4.92	1.55	0.03	8.51	-4.50	23.31	-32.40	-13.83	-5.27	37.13	-24.65
Rennersdorf 3	621.30	0.87	300.31	46.56	320.99	-12.11	593.44	32.99	401.05	12.60	192.39	18.52	5.65	-0.06	2.39	0.72	3.26	-0.65	12.49	-4.24	1.90	-0.09	10.59	-4.44	9.61	-29.88	-23.31	-9.97	32.91	-20.35
Réczyn	813.38	-45.79	389.27	19.35	424.11	-40.59	650.31	55.31	464.46	46.68	185.86	21.75	2.23	-0.19	1.04	0.08	1.19	-0.21	30.79	-12.25	4.91	-0.27	25.88	-10.15	130.64	118.76	-16.74	-4.94	147.38	-89.81
Ostróžno	840.01	-59.52	399.00	11.75	441.01	-43.22	650.76	61.39	467.05	45.41	183.71	22.75	0.22	-0.01	0.15	0.01	0.07	-0.03	35.10	-14.27	5.61	-0.42	29.49	-11.00	154.59	121.91	-9.81	-4.52	164.40	-94.06
Rosenthal	748.29	-35.74	343.74	22.16	404.55	-34.42	592.09	56.47	418.94	30.31	173.16	23.88	9.01	-0.96	3.57	0.35	5.44	-1.24	32.23	-14.12	4.16	-0.80	28.08	-12.90	115.20	-81.04	-10.13	-9.98	125.33	-67.28
Turoszów	721.20	-12.22	357.17	23.83	364.03	-0.72	655.95	53.95	477.41	25.37	178.54	23.54	0.42	0.03	0.27	0.07	0.16	-0.06	19.31	-9.21	2.71	0.22	16.60	-6.30	45.67	-68.18	-49.43	-4.40	95.10	-46.62
Zittau 1/ Sienawka	771.82	-44.63	347.92	14.69	423.90	-41.17	590.76	53.97	417.99	34.94	172.76	24.03	10.29	-1.23	4.03	0.28	6.26	-1.33	36.34	-15.56	4.61	-0.98	31.74	-14.01	134.73	-87.88	-6.32	-9.90	141.05	-71.10
Zittau 5	710.77	-29.02	319.12	8.97	391.65	-30.44	598.37	40.31	414.21	22.94	184.16	23.34	16.56	-1.77	6.18	0.54	10.38	-2.10	28.50	-13.57	2.89	-1.06	25.61	-12.73	67.48	-66.46	-30.85	-12.49	98.33	-55.70
Porajów	820.74	-59.23	370.52	32.18	450.23	-52.41	587.83	53.19	422.92	43.45	164.91	25.04	2.65	-0.36	1.10	-0.02	1.55	-0.37	42.79	-15.65	5.97	-1.08	36.82	-11.62	187.90	108.15	12.86	-11.70	175.03	-83.85
Hartau	827.33	-62.88	372.83	31.58	454.50	-54.85	588.96	55.03	424.12	42.12	164.85	25.23	1.68	-0.35	0.69	-0.12	0.99	-0.21	43.85	-15.78	6.13	-1.07	37.73	-12.09	193.28	108.52	14.25	-11.20	179.03	-85.88
Großschönau 2	755.83	-51.06	336.37	9.84	419.45	-26.93	618.01	47.53	431.73	19.53	186.28	23.65	10.09	-0.81	3.82	0.02	6.27	-0.86	26.96	-12.90	2.56	-0.54	24.40	-12.09	100.95	-90.34	-34.18	-12.98	135.13	-69.92
Niederoder- witz 3	657.40	-10.87	305.38	37.66	352.02	-19.29	586.74	46.43	407.26	25.98	179.47	20.92	24.24	-2.01	9.68	2.00	14.56	-2.54	27.29	-12.38	3.32	-0.58	23.97	-13.50	19.14	-55.83	-39.99	-13.92	59.13	-32.51
Seiffhenners- dorf	740.77	-36.49	332.66	13.40	408.11	-20.61	615.10	45.48	428.51	16.86	186.60	22.69	13.45	-0.82	5.20	0.40	8.25	-1.08	25.17	-13.00	2.60	-0.83	22.57	-11.40	87.17	-73.18	-30.02	-12.21	117.19	-60.14
Neuschönau 2	803.43	-67.81	356.50	-9.63	446.93	-26.80	632.30	50.81	442.35	26.30	189.95	22.97	4.51	-0.59	1.66	-0.16	2.85	-0.31	26.52	-10.33	2.54	-0.28	23.99	-8.91	140.46	112.19	-35.44	-11.11	175.90	-91.71

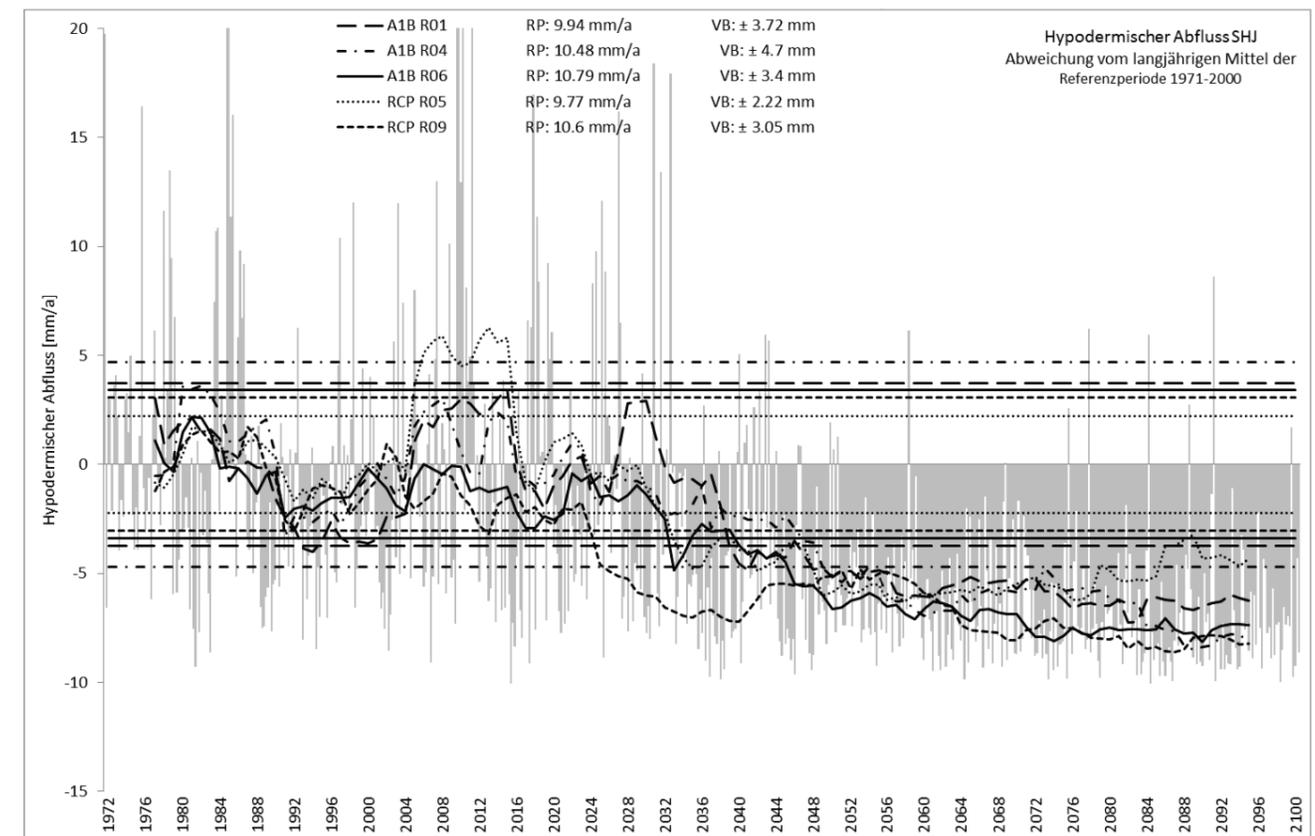
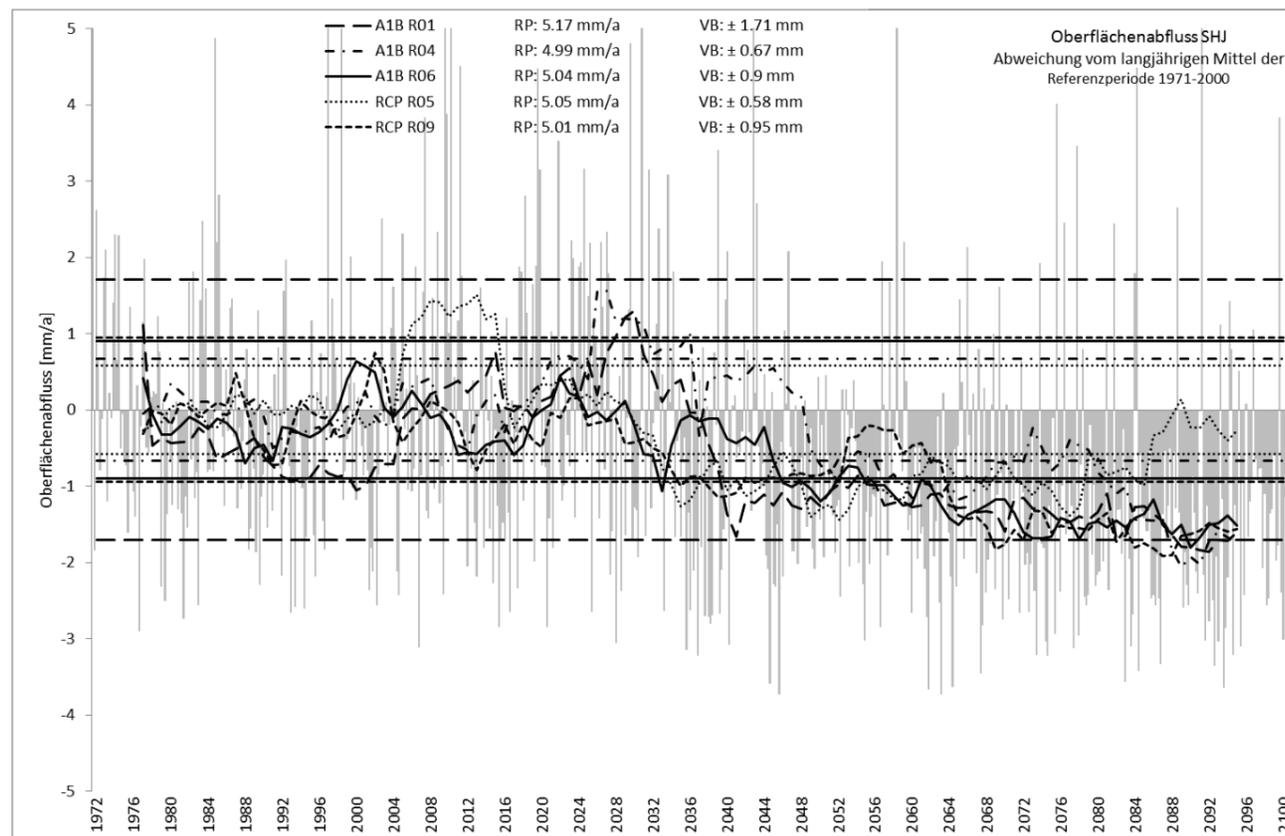
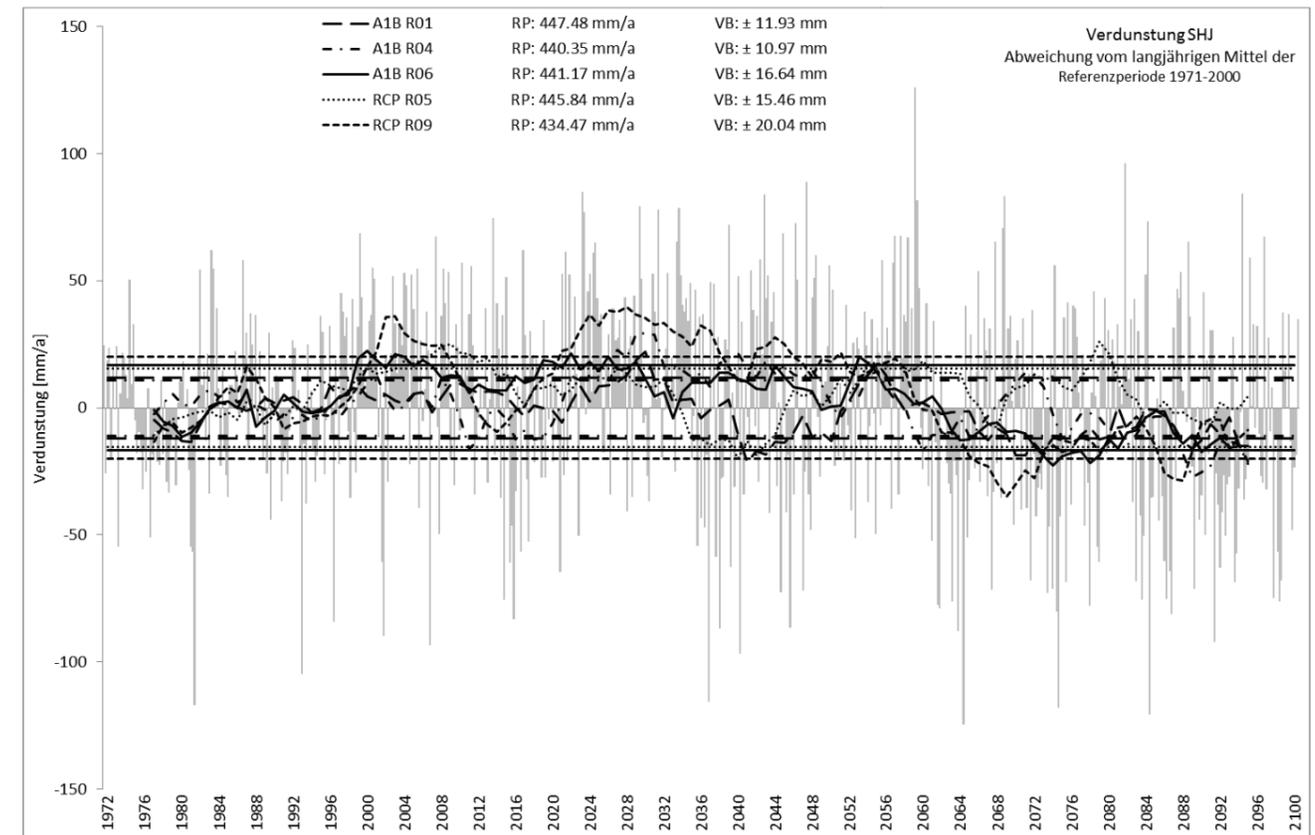
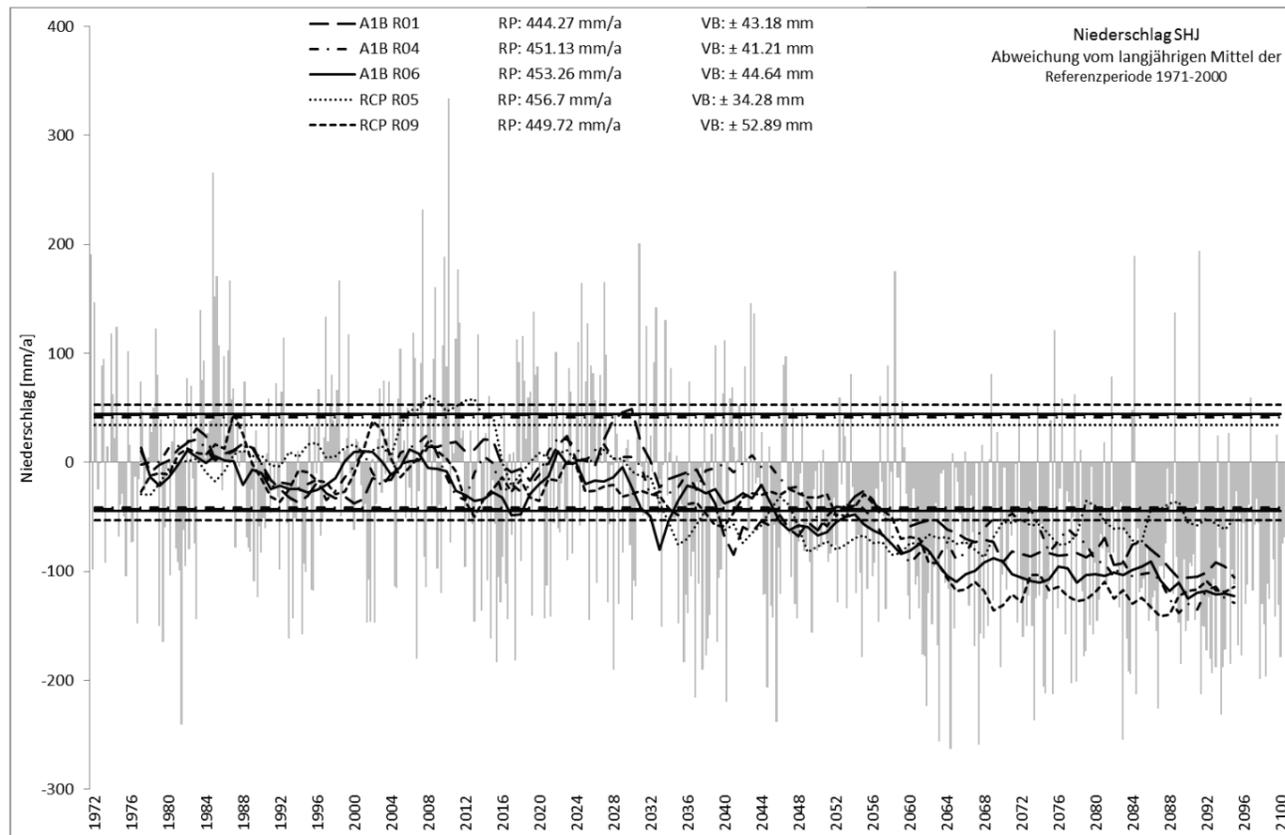


Abbildung 48: Abweichung vom langjährigen Mittel der Referenzperiode 1971-2000, SHJ, gesamtes Modellgebiet Lausitzer Neiße, Gebietsniederschlag PI, reale Verdunstung ER, Oberflächenabfluss RO, Hypodermischer Abfluss RH

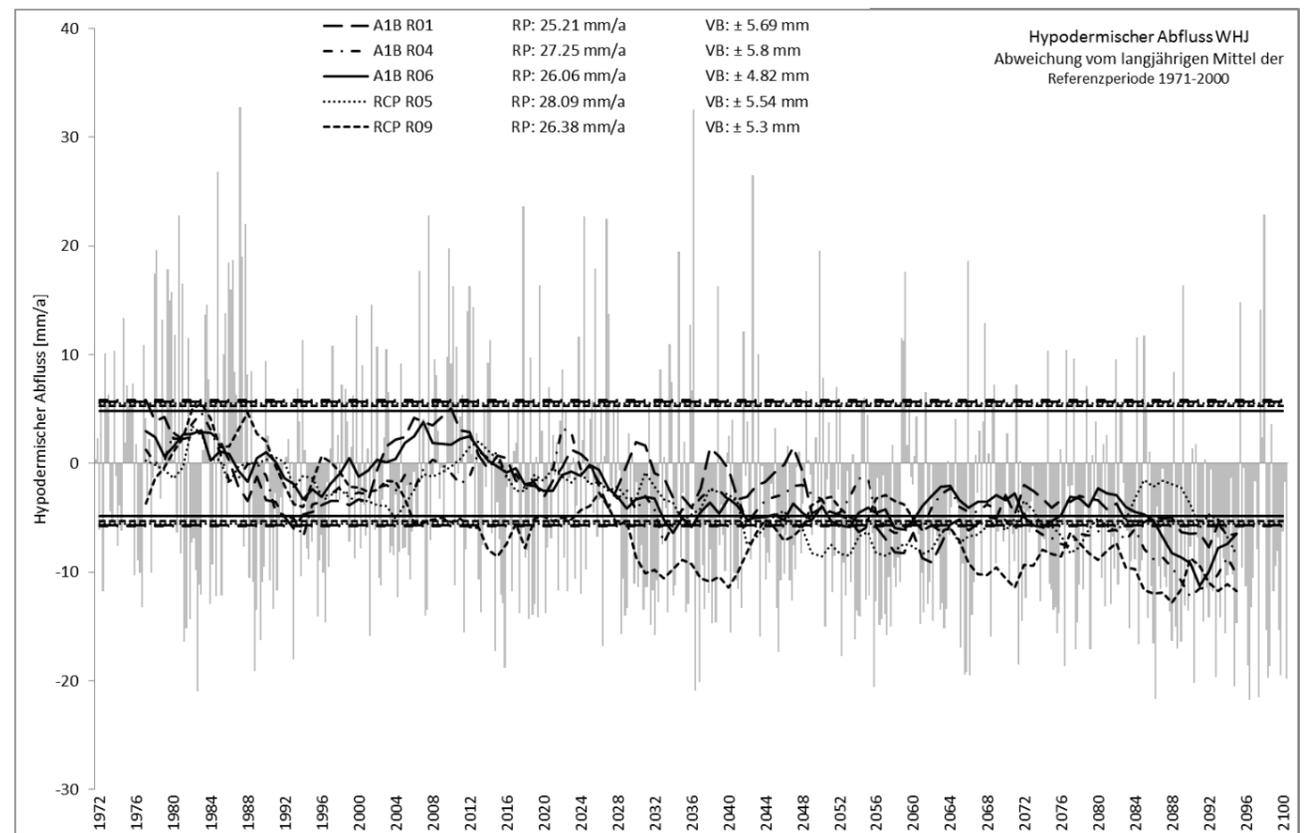
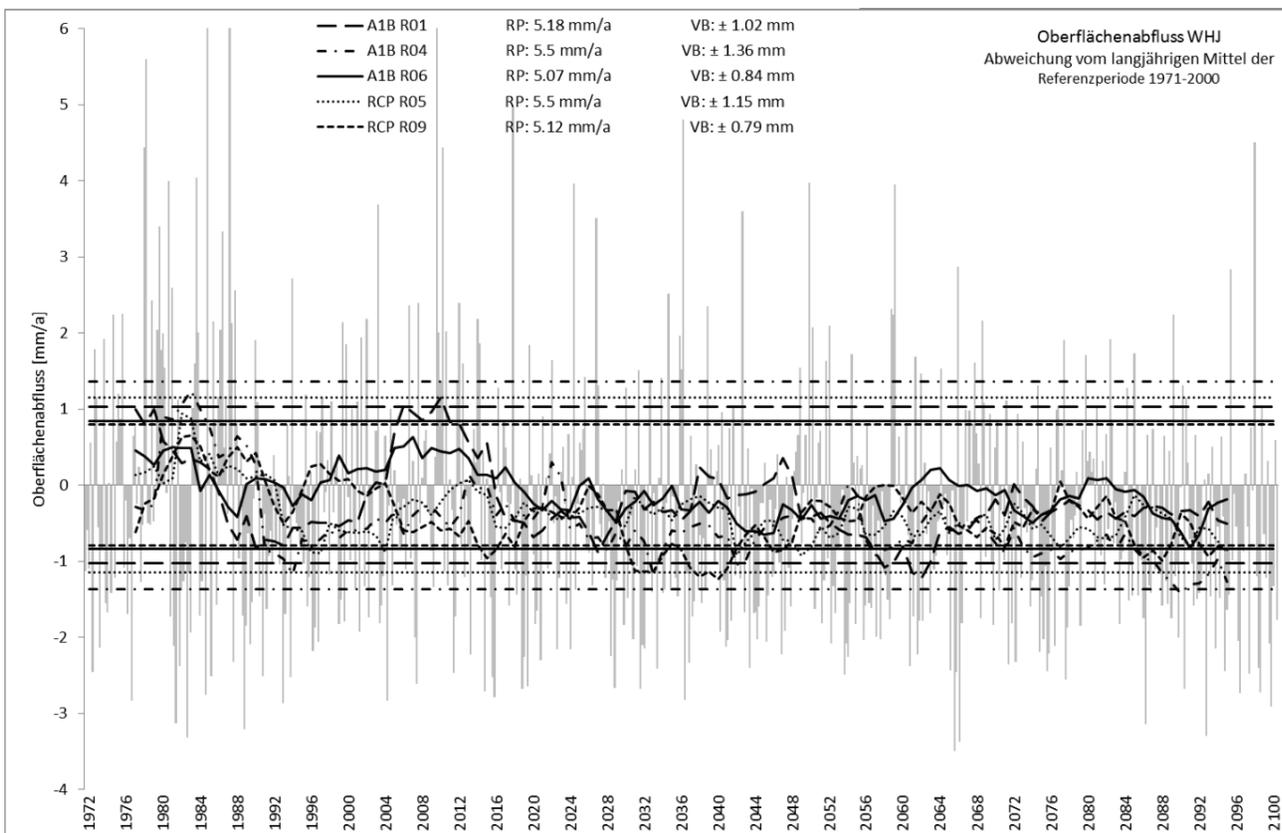
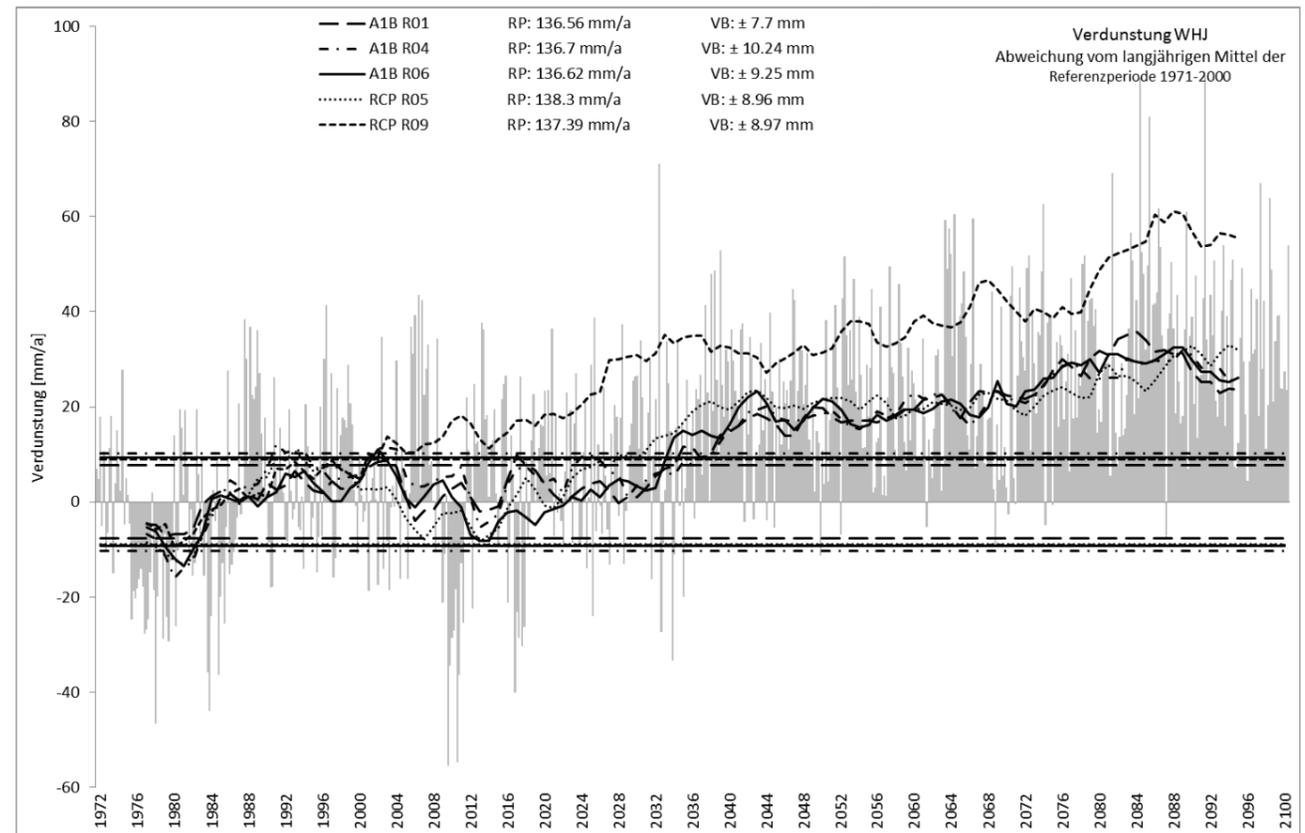
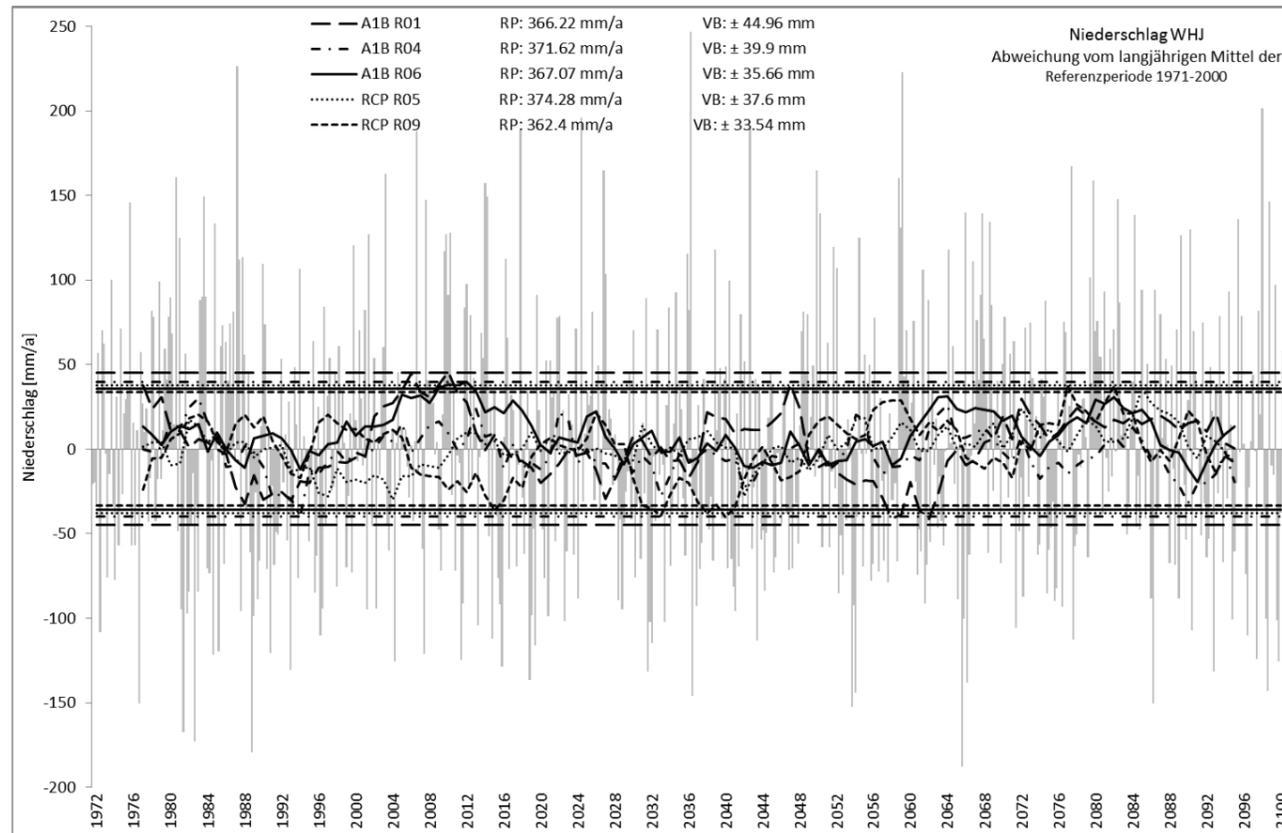


Abbildung 49: Abweichung vom langjährigen Mittel der Referenzperiode 1971-2000, WHJ, gesamtes Modellgebiet Lausitzer Neiße, Gebietsniederschlag PI, reale Verdunstung ER, Oberflächenabfluss RO, Hypodermischer Abfluss RH

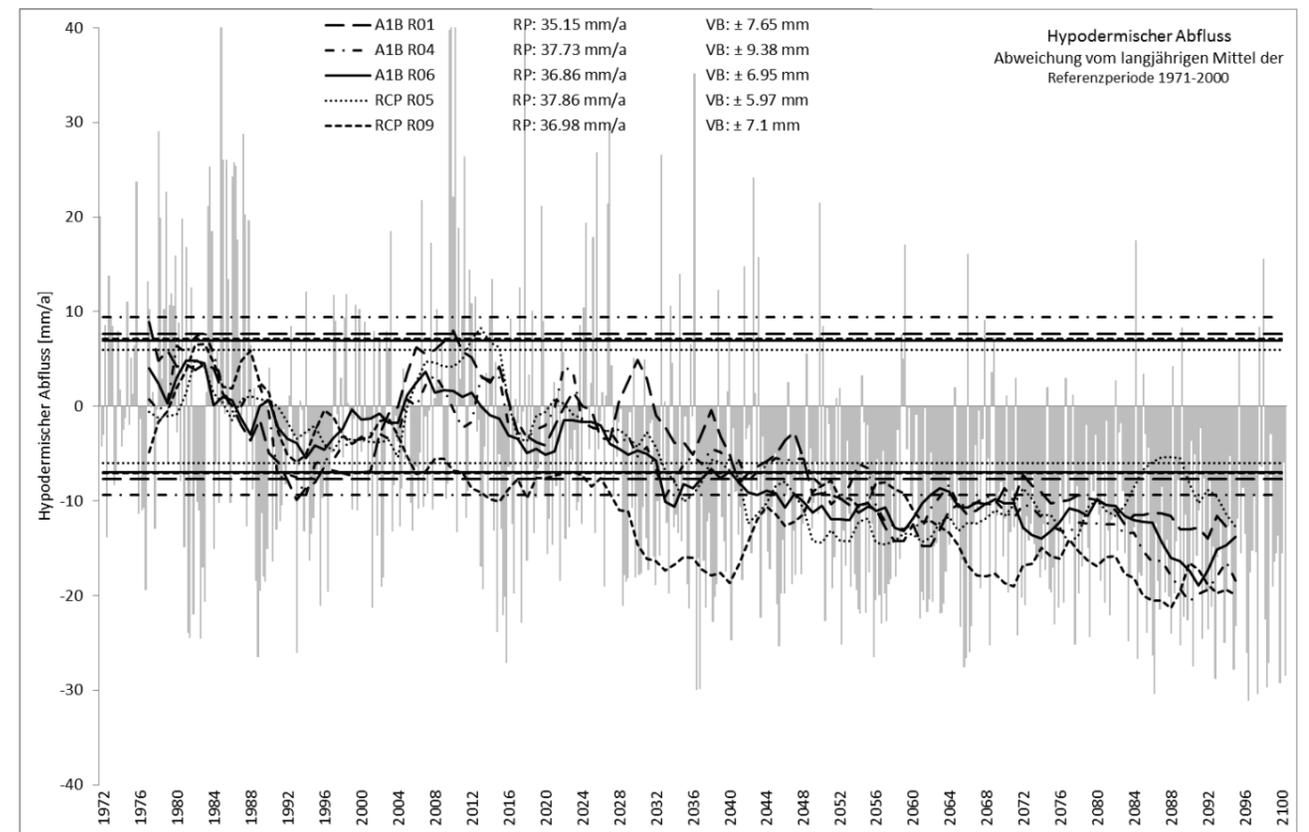
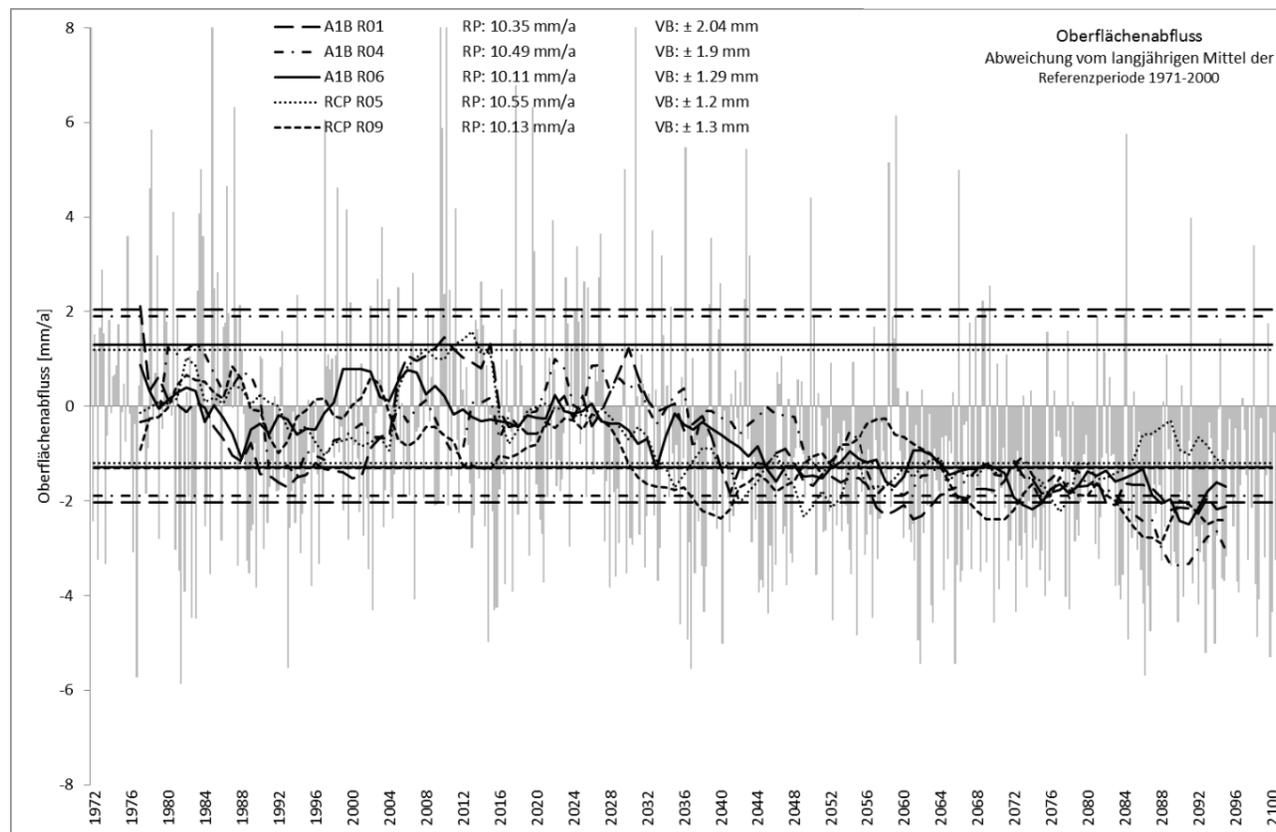
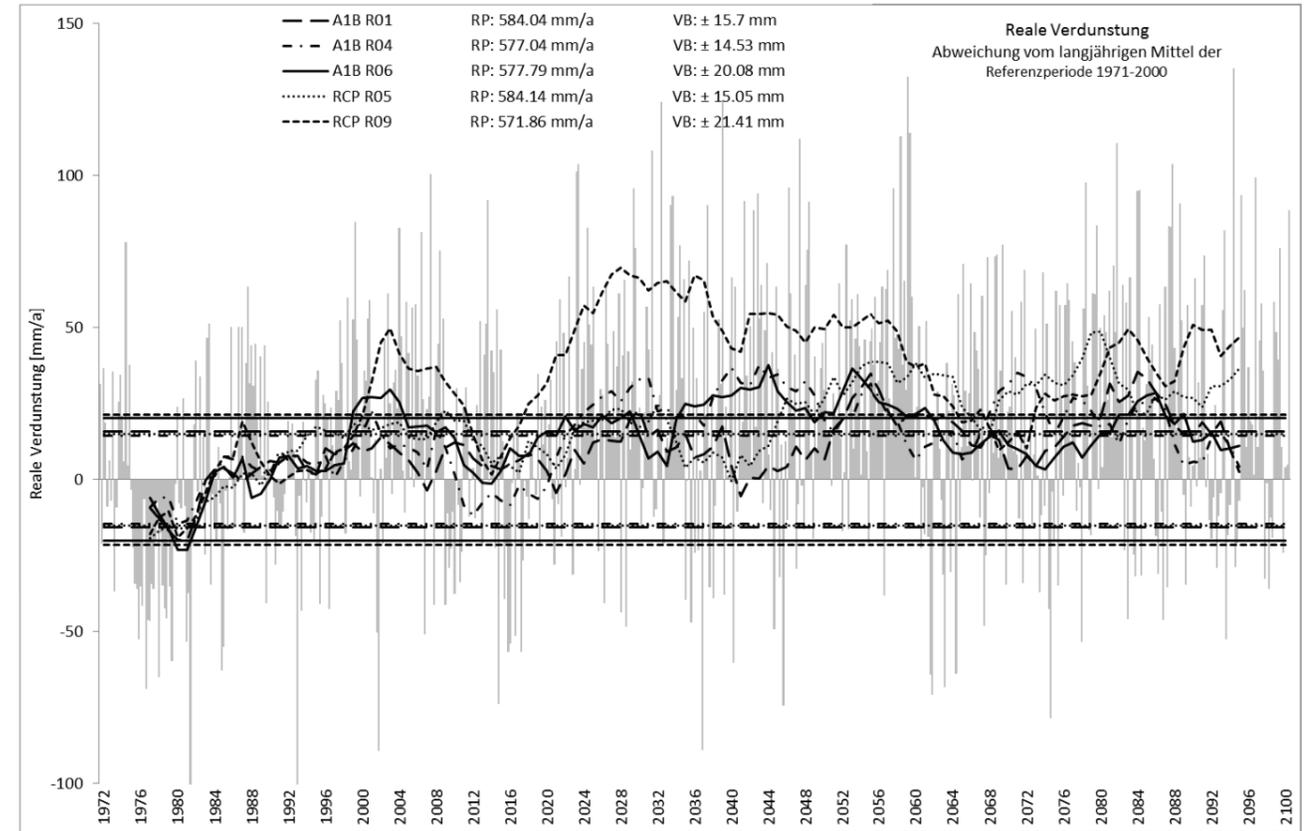
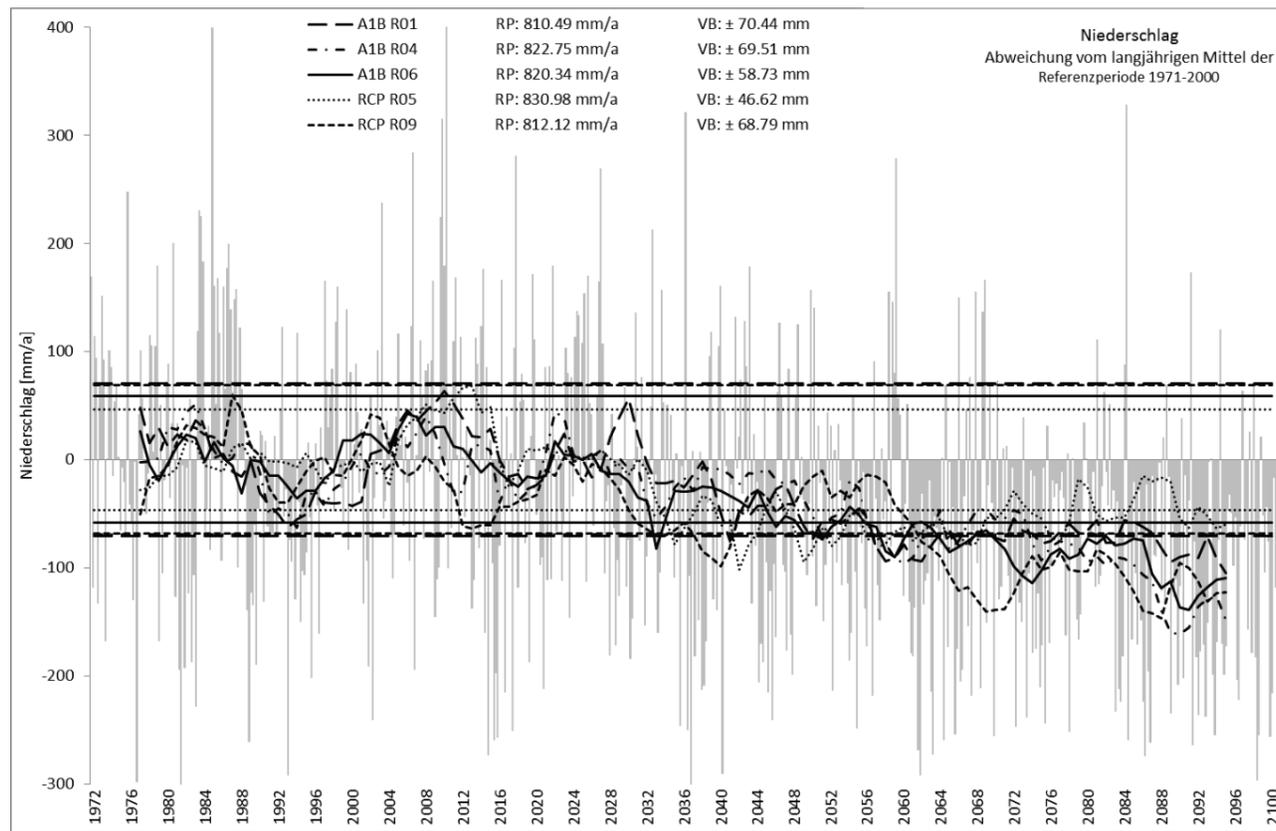


Abbildung 50: Abweichung vom langjährigen Mittel der Referenzperiode 1971-2000, Jahr, gesamtes Modellgebiet Lausitzer Neiße, Gebietsniederschlag PI, reale Verdunstung ER, Oberflächenabfluss RO, Hypodermischer Abfluss RH

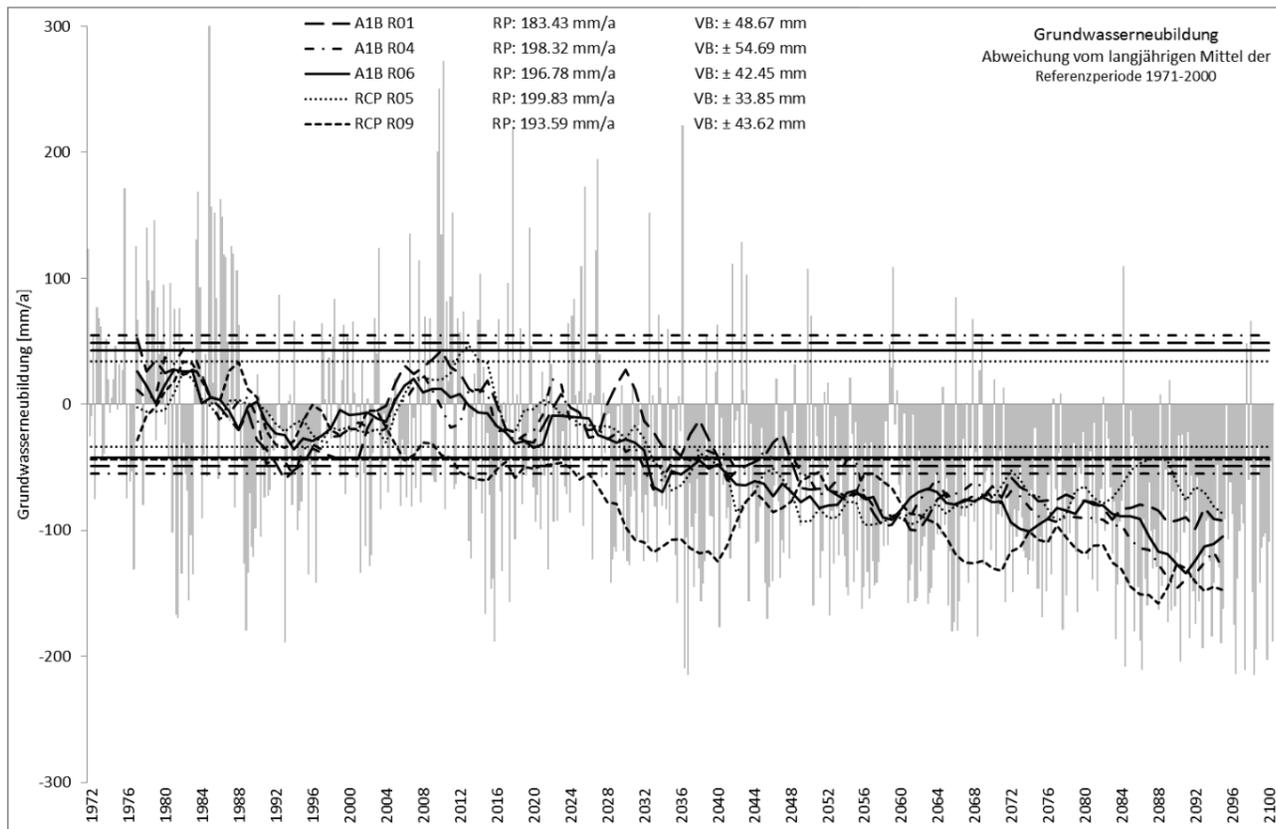
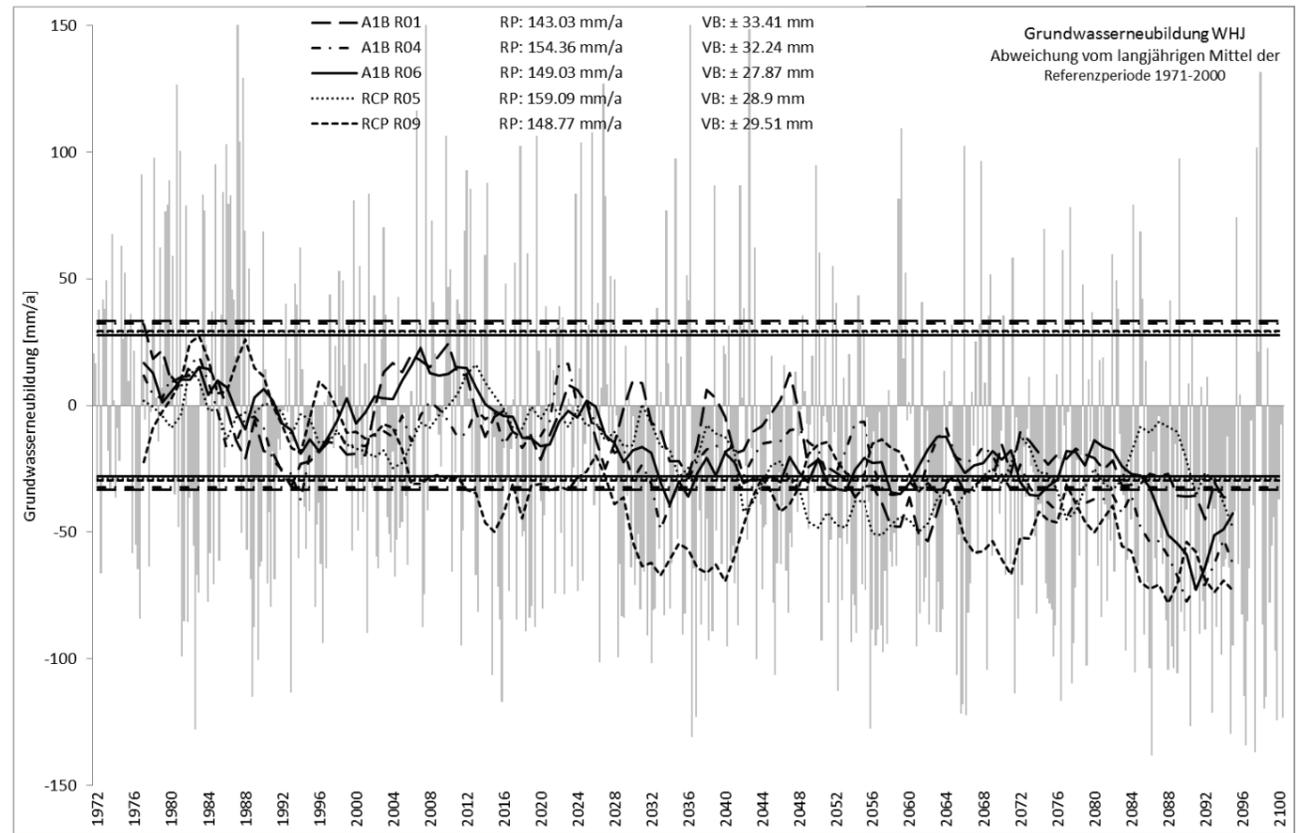
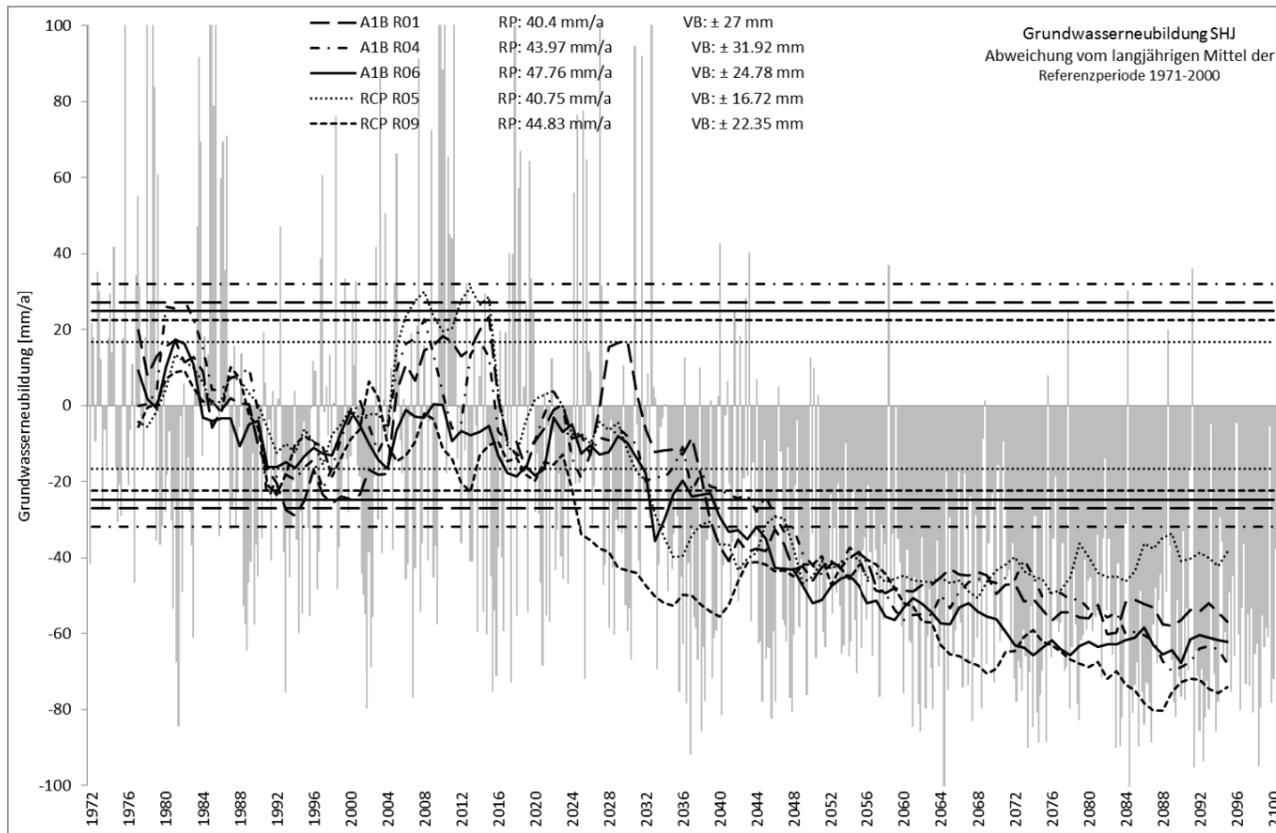


Abbildung 51: Abweichung vom langjährigen Mittel der Referenzperiode 1971-2000, SHJ, WHJ, Jahr für gesamtes Modellgebiet Lausitzer Neiße, Grundwasserneubildung GWN

#### 4.4.3. Zukunftsprojektionen mit dem Niederschlag-Abfluss-Modellsystem MIKE NAM

Mittlere Jahresabflüsse für die Referenzperiode (1971-2000) und zwei Zukunftsperioden: nahe (2021-2050) und ferne (2071-2100) Zukunft wurden für fünf ausgewählte Realisierungen der Klimaprojektionen A1B und RCP85 untersucht.

Für die Berechnung der künftigen Abflusswerte in allen 16 Bilanzgebieten verwendete man die erwähnten, mit dem Modellsystem MIKE NAM erstellten Niederschlag-Abfluss-Modelle. Eingangsdaten für die Projektionen lieferten für weitere Analysen ausgewählte simulierte Niederschlags- und Verdunstungszeitreihen der fünf ausgewählten Realisierungen. Die Verdunstungszeitreihen stammen aus den Berechnungen mit dem Modellsystem ArcEGMO.

Die Richtung und Stärke der simulierten Abflusstrends stehen im engen Zusammenhang mit Veränderungen der meteorologischen Daten, die die Eingangsdaten für Simulationen mit Niederschlag-Abfluss-Modellsystemen liefern. Die Entwicklung der Abflusstrends in 16 Bilanzgebieten der Lausitzer Neiße wurde auf der Grundlage von Projektionen der mittleren Jahresabflüsse untersucht (Abbildung 20). Die relative räumliche Entwicklung der Abflussverhältnisse in ausgewählten Klimaprojektionen der Trocken- und Feuchtperioden wird in der Abbildung 52, Abbildung 53 und in den Tabelle 19 und Tabelle 20 dargestellt. Alle grundlegenden Werte der untersuchten Klimaprojektionen für die Bilanzgebiete der Lausitzer Neiße werden zusätzlich in den Tabelle 19 und Tabelle 20 präsentiert.

Relative Entwicklung der minimalen, mittleren, maximalen und durchschnittlichen Abflüsse zeigt in allen Bilanzgebieten zumeist einen negativen Trend (Tabelle 19 und Tabelle 20). Im Szenario A1B wird in den Realisierungen 01 und 06 im allgemeinen ein Anstieg der minimalen Abflüsse im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße verzeichnet, wobei die untersuchten Projektionen (A1B Realisierungen 01, 04 und 06 sowie RCP85 Realisierungen 05 und 09) eine grundsätzliche Abnahme der mittleren Jahresabflüsse sowohl in naher (2021-2050) als auch ferner (2071-2100) Zukunft zeigen (Abbildung 52, Abbildung 53 und Tabelle 19 und Tabelle 20).

Die nicht ausreichende Kalibrierung der Modelle für die Einzugsgebiete Schwarzes Fließ (Nr. 15) und Grano-Buderoser-Mühlenfließ (Nr. 16), die auf erhebliche anthropogene Störungen der Abflussverhältnisse in Fließgewässern zurückzuführen ist, führt zu Schwierigkeiten bei der mathematischen Modellierung der Prozesse vom Niederschlag bis zum Abfluss. Aus diesem Grund weichen die Ergebnisse der Modellierung in diesen Einzugsgebieten von Analyseergebnissen aus den übrigen Modellen stark ab.

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen eine allgemeine künftige Abnahme der Oberflächenabflüsse im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße (Tabelle 19) mit einer zeitlich fortschreitenden Verstärkung der beobachteten Phänomene (Tabelle 20).

In den Abbildung 52 und Abbildung 53 sind Karten zur räumlichen Entwicklung der mittleren Jahresabflüsse unter Berücksichtigung meteorologischer Daten aus ausgewählten Klimaprojektionen – oben Projektionen für Trockenperioden und unten für Feuchtperioden – dargestellt.

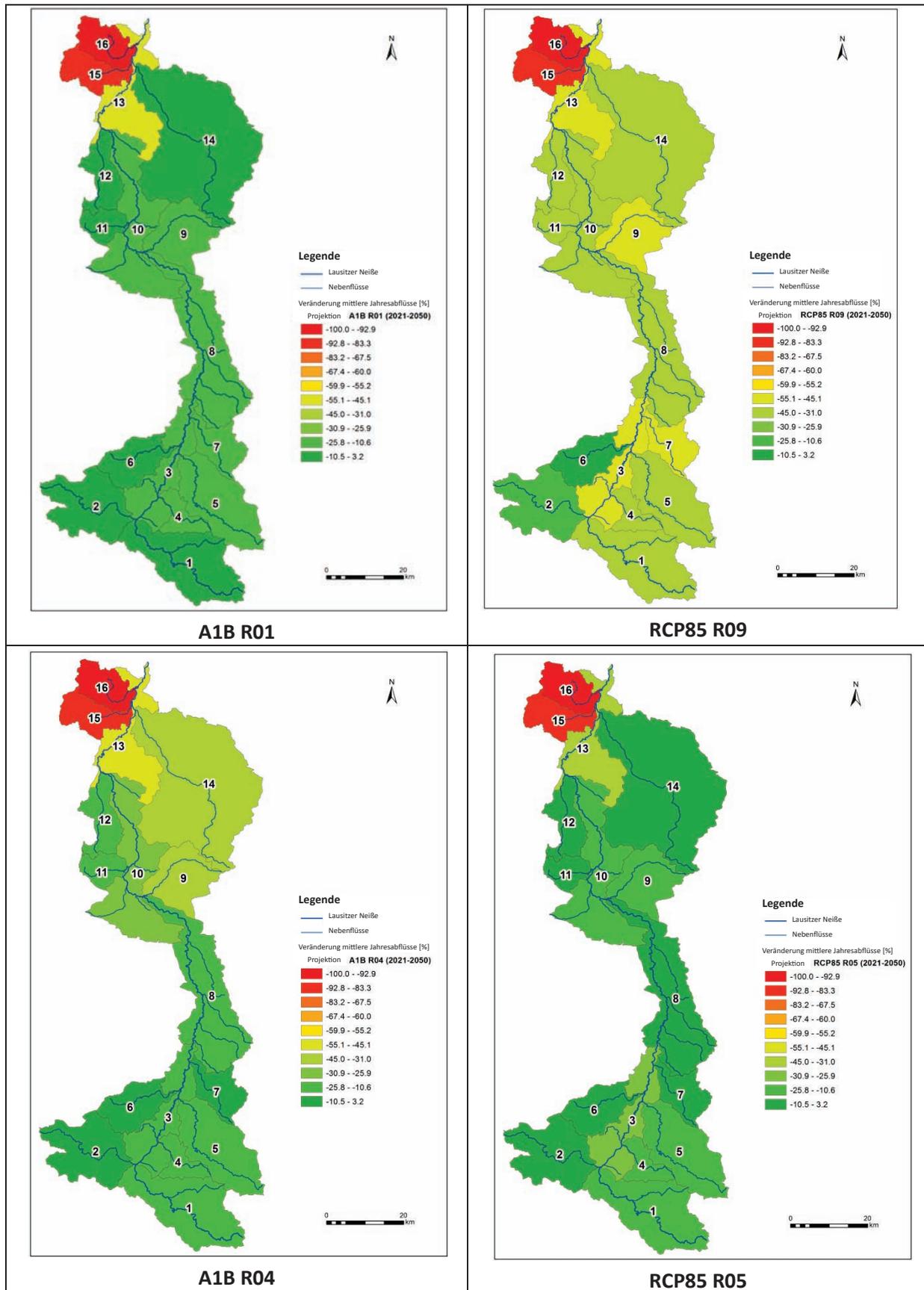


Abbildung 52: Relative Entwicklung der mittleren Jahresabflüsse für den Zeitraum 2021-2050

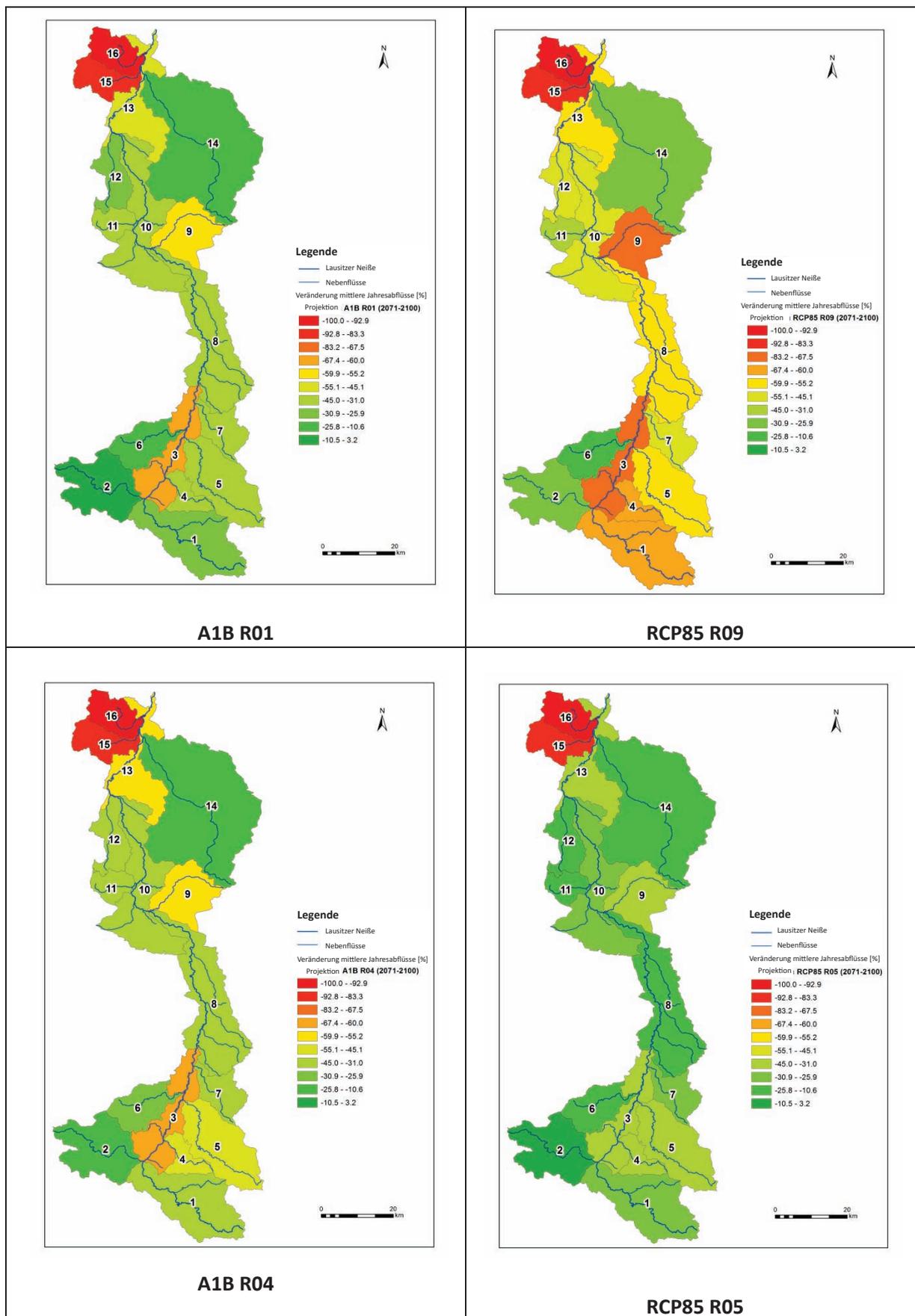


Abbildung 53: Relative Entwicklung der mittleren Jahresabflüsse für den Zeitraum 2071-2100

Der Aufbau von Niederschlag-Abfluss-Modellen ermöglicht die Verwendung von Niederschlagszeitreihen aus einer repräsentativen Klimastation. Dieses Verfahren wurde auch bei der Berechnung der Modelle für 16 Bilanzgebiete der Lausitzer Neiße angewandt (Abbildung 20). Meteorologische Analysen der Daten aus Klimaprojektionen zur Auswahl der fünf Zielprojektionen für die Untersuchung des Wasserhaushalts stützten sich auf statistische Auswertung der Daten aus allen in der Datenbank des Projektes NEYMO erfassten Klimastationen. Die Transformation der Prozesse in Niederschlag-Abfluss-Modellen erfordert die Verwendung von Daten aus dem untersuchten Bilanzgebiet oder aus seiner Umgebung, weshalb bei einigen Modellen zu weiteren Analysen der Daten aus Klimaprojektionen Zeitreihen genutzt werden konnten, die statistische Abweichungen gegenüber Daten aus den zur Auswahl der fünf Zielprojektionen analysierten Stationen zeigten. Aus diesem Grund zeigen Analysen der relativen Entwicklungen der mittleren Abflüsse für die nahe (Abbildung 52) und ferne (Abbildung 53) Zukunft, die sich auf simulierte Zeitreihen aus der ausgewählten feuchten (A1B R04) und trockenen Realisierung (A1B R01) der Klimaprojektion A1B stützen, dass bei Verwendung der simulierten Zeitreihe aus der sog. Feuchtprojektion deutlich stärkere prozentuale Rückgänge des Abflusses als bei der Zeitreihe aus der Trockenprojektion auftreten. Alle Untersuchungen zeigen jedoch, dass Abflüsse im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße in Zukunft abnehmen werden. In diesem Zusammenhang sollen Analysen aller im Projekt Neymo erarbeiteten Projektionen fortgeführt werden. Durch die Untersuchungen kann die Reaktion des hydrologischen Systems auf die simulierten Klimaveränderungen überprüft werden. Gegenwärtig lässt sich lediglich feststellen, dass nicht alle Veränderungen des Klimas den Wasserhaushalt negativ beeinflussen.

Bei Analysen von Modellen ist zu bedenken, dass sich numerische Instrumente auf eine Reihe von Eingangsbedingungen stützen, die ihrerseits mit unterschiedlich starken Risikofaktoren behaftet sind. Die methodischen Ansätze für Klimamodelle zur Prognose von Klimaveränderungen und Wasserhaushaltsmodelle können auch zur größeren Unsicherheit der Ergebnisse beitragen, dadurch dass zur Übertragung der Modellierungsergebnisse auf die lokale Ebene unterschiedliche Methoden angewandt werden. Aus diesem Grund ist bei Verwendung mehrerer numerischer Modelle zur Erstellung von Projektionen auf mögliche Fehler-Kumulierung zu achten (Sadowski M. Hrsg. 2013).

Die Abbildung 54 und Tabelle 21 zeigen die Entwicklung der Abflüsse in den Bilanzgebieten der Lausitzer Neiße, die bei Projektionen mit Niederschlag-Abfluss-Modellen auf der Grundlage der Eingangsdaten aus fünf ausgewählten Klimaprojektionen berechnet wurden. Die Ergebnisse für die Einzugsgebiete Schwarzes Fließ (Nr. 15) und Grano-Buderoser-Mühlenfließ (Nr. 16), die unter starken anthropogenen Einflüssen stehen, weichen deutlich von den Ergebnissen anderer Analysen ab. Die geringen Werte der mittleren Niedrigwasserabflussspenden können auf eine unzureichende Kalibrierung der Modelle zurückgeführt werden, die aus Problemen bei der Abbildung der Prozesse der Transformation von Niederschlag in Abfluss in durch Tagebau beeinflussten Gebieten entstehen.

Tabelle 19: Relative (minimale, mittlere, maximale, durchschnittliche) Werte der simulierten mittleren Jahresabflüsse für den Zeitraum 2021-2050 [%]

EZG-Nr.	A1B R01				A1B R04				A1B R06				RCP85.3 R05				RCP85.2 R09			
	min	mittel	max	Ø	min	mittel	max	Ø	min	mittel	max	Ø	min	mittel	max	Ø	min	mittel	max	Ø
1	60.3	-4.2	-14.7	-14.7	45.4	-14.8	-15.0	1.5	36.3	-14.2	6.2	-10.3	-23.7	-14.3	-8.2	-19.3	-28.5	-34.8	-21.2	-47.8
2	22.4	0.5	-2.7	1.1	-35.9	2.2	6.4	-0.5	189.9	-3.9	-8.4	-4.3	-3.1	-2.3	-10.7	-5.3	52.7	-20.0	19.6	-22.7
3	13.4	-17.1	-35.6	-20.1	-20.8	-24.9	-32.3	-19.2	-2.8	-24.0	-8.5	-22.4	-66.1	-26.7	-17.8	-31.2	-58.4	-49.9	-31.3	-53.3
4	-21.2	-17.7	-5.7	-27.7	26.1	-16.1	-20.7	-20.1	23.1	-22.3	4.7	-28.3	-50.5	-25.7	-8.0	-36.6	-80.6	-42.9	-9.0	-50.1
5	-10.3	-13.8	-0.7	-29.5	-35.6	-20.0	-32.6	-13.4	84.8	-19.4	-10.3	-23.9	-40.8	-20.2	-16.0	-34.6	-56.2	-41.8	-15.8	-51.5
6	205.3	3.1	-2.9	-1.1	21.4	2.2	11.9	19.5	121.7	-4.7	-11.8	-3.0	-16.2	-10.3	-18.0	-12.9	-16.2	-10.3	-18.0	-12.9
7	24.3	-11.4	-12.3	-37.0	-21.5	0.6	-21.5	19.4	65.7	-20.7	-23.7	-21.5	-33.6	-7.6	3.6	-9.2	-87.1	-45.4	12.1	-57.5
8	-15.9	-12.0	-22.8	-9.4	-15.9	-12.0	-22.8	-9.4	-16.4	-11.9	-32.2	-4.4	37.8	-10.3	-22.8	-12.6	-75.2	-38.5	-38.5	-36.4
9	93.2	-23.6	-20.7	-31.9	-74.7	-38.5	-44.7	-34.1	164.8	-29.4	-5.9	-38.6	-49.0	-21.9	-32.0	-20.1	-84.3	-51.1	-40.2	-60.6
10	-10.5	-15.5	-15.2	-17.1	-31.2	-28.2	-34.1	-18.2	273.2	-19.4	-9.1	-18.1	-22.7	-12.0	-23.8	-8.5	-79.3	-42.5	-23.0	-45.0
11	1.2	-3.7	9.7	-3.1	-5.7	-23.5	-25.3	-29.8	124.3	-4.9	10.5	-4.8	26.0	-9.0	-11.9	-13.9	-31.7	-32.1	-31.2	-35.2
12	12.5	-8.4	7.2	-7.2	20.1	-23.1	-38.7	-31.2	127.5	-14.2	-23.0	-8.5	192.7	-8.5	-9.0	-14.2	-44.1	-42.3	-24.1	-48.3
13	11.0	-46.5	-54.2	-36.1	-50.7	-50.3	-61.4	-40.4	-6.6	-47.7	-58.8	-43.7	90.5	-36.6	-49.4	-39.4	-59.5	-53.4	-40.3	-55.0
14	26.5	-9.9	-8.3	-8.2	-60.6	-32.0	-33.7	-28.0	195.9	-24.4	-20.6	-27.8	26.5	-9.9	-8.3	-8.2	-83.1	-36.4	-23.7	-42.6
15	-100.0	-89.8	-92.7	-100.0	-100.0	-90.0	-92.7	-100.0	-100.0	-90.6	-93.0	-100.0	-100.0	-89.3	-92.3	-100.0	-100.0	-89.1	-92.9	-100.0
16	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0
<b>EZG-Gesamt</b>	<b>13.3</b>	<b>-23.1</b>	<b>-24.7</b>	<b>-27.6</b>	<b>-27.5</b>	<b>-29.3</b>	<b>-34.8</b>	<b>-25.2</b>	<b>73.8</b>	<b>-28.2</b>	<b>-24.0</b>	<b>-28.7</b>	<b>-8.3</b>	<b>-25.3</b>	<b>-26.5</b>	<b>-29.1</b>	<b>-58.2</b>	<b>-45.7</b>	<b>-29.8</b>	<b>-51.2</b>

Tabelle 20: Relative (minimale, mittlere, maximale, durchschnittliche) Werte der simulierten mittleren Jahresabflüsse für den Zeitraum 2071-2100 [%]

EZG-Nr.	A1B R01				A1B R04				A1B R06				RCP85.3 R05				RCP85.2 R09			
	min	mittel	max	Ø	min	mittel	max	Ø	min	mittel	max	Ø	min	mittel	max	Ø	min	mittel	max	Ø
1	44.7	-28.9	-41.5	-26.3	-10.7	-44.0	-39.9	-43.1	25.9	-34.8	-24.2	-35.5	-56.9	-29.0	-15.0	-34.1	-61.7	-60.9	-54.8	-66.4
2	-34.0	-8.5	-1.0	-9.9	-38.5	-13.6	-8.3	-16.0	146.3	-9.7	24.7	-8.1	-21.2	-8.1	0.2	-24.6	-7.3	-29.1	12.4	-41.8
3	-67.8	-65.9	-75.6	-64.9	-78.9	-62.9	-58.4	-61.0	-27.9	-58.1	-54.8	-59.3	-61.6	-43.2	-40.5	-46.1	-86.7	-80.4	-48.8	-85.5
4	-14.2	-43.4	-48.4	-51.0	-51.2	-54.1	-41.0	-63.2	-16.0	-47.2	-18.0	-52.0	-19.6	-39.1	-35.1	-43.1	-83.8	-63.7	-51.4	-73.1
5	-29.1	-36.1	-24.6	-51.8	-62.0	-50.8	-46.4	-57.2	34.5	-42.5	-17.4	-50.4	-48.7	-34.6	-29.0	-40.7	-71.6	-58.0	-34.0	-62.3
6	117.4	-18.8	-24.3	-10.9	-20.1	-30.6	-10.7	-21.8	67.8	-21.9	6.5	-29.4	-38.6	-23.8	-5.8	-26.3	-38.6	-23.8	-5.8	-26.3
7	14.9	-40.9	-26.9	-54.7	-65.3	-35.3	-29.7	-31.6	-1.0	-42.2	-19.8	-44.0	-46.8	-27.0	-7.4	-39.9	-82.6	-54.1	-23.0	-63.6
8	-42.2	-42.3	-64.2	-37.7	-54.9	-44.6	-46.2	-41.3	-36.6	-45.7	-34.0	-49.0	-7.4	-25.1	-38.3	-25.5	-78.9	-57.5	-55.1	-53.0
9	14.2	-56.4	-60.4	-53.3	-90.8	-55.2	-48.1	-55.4	-44.2	-55.8	-28.1	-63.4	-78.5	-43.5	-44.8	-47.1	-98.0	-68.1	-58.5	-71.0
10	-36.1	-36.9	-34.3	-39.3	-62.8	-40.8	-33.0	-38.7	33.7	-39.0	-12.0	-43.6	-69.0	-28.1	-23.7	-31.6	-92.8	-48.5	-37.7	-43.7
11	-33.3	-31.8	-42.1	-23.5	-52.6	-34.1	-35.3	-31.3	41.4	-23.2	-19.8	-22.8	-18.7	-25.0	-26.6	-33.6	-53.3	-44.3	-53.1	-50.6
12	-2.1	-27.6	-40.7	-25.2	-43.2	-35.1	-42.6	-37.3	24.6	-25.7	-19.8	-16.3	158.4	-25.9	-7.3	-31.3	-80.5	-50.4	-47.2	-45.6
13	-14.9	-48.5	-69.7	-33.4	-82.7	-57.8	-56.8	-51.3	2.2	-50.9	-60.6	-53.8	14.6	-42.3	-53.6	-39.2	-74.2	-57.9	-55.3	-62.8
14	-59.0	-11.7	-10.0	-16.9	-87.7	-25.2	-17.2	-26.2	134.9	-17.7	6.6	-21.8	-59.0	-11.7	-10.0	-16.9	-77.2	-30.0	-25.5	-25.7
15	-100.0	-90.3	-92.7	-100.0	-100.0	-90.6	-92.7	-100.0	-100.0	-90.8	-93.0	-100.0	-100.0	-90.2	-92.4	-100.0	-100.0	-92.9	-92.9	-100.0
16	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-100.0	-99.9	-97.7	-100.0
<b>EZG-Gesamt</b>	<b>-21.3</b>	<b>-43.0</b>	<b>-47.3</b>	<b>-43.7</b>	<b>-62.6</b>	<b>-48.4</b>	<b>-44.1</b>	<b>-48.5</b>	<b>11.6</b>	<b>-44.1</b>	<b>-29.0</b>	<b>-46.8</b>	<b>-34.6</b>	<b>-37.3</b>	<b>-33.1</b>	<b>-42.5</b>	<b>-74.2</b>	<b>-57.5</b>	<b>-45.5</b>	<b>-60.7</b>

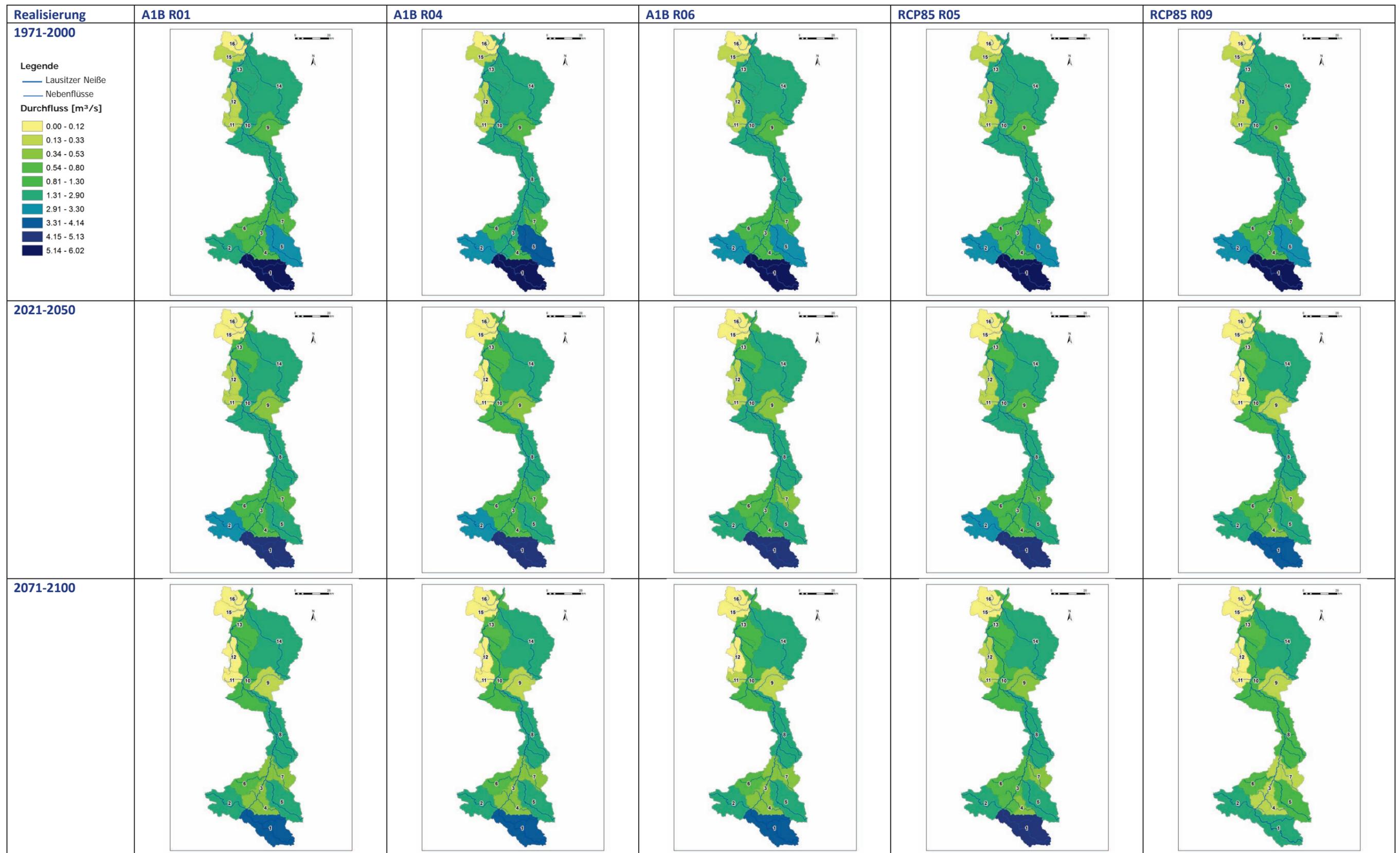


Abbildung 54: Modellierter Gesamtabfluss für verschiedene Projektionen mit dem Modell MIKE NAM

#### 4 Entwicklung der Wasserressourcen

Tabelle 21: Simulierte mittlere Abflüsse bei Verwendung der Eingangsdatenreihen aus den jeweiligen Klimaprojektionen [m<sup>3</sup>/s]

EZG-Nr.	Referenzzeitraum 1971-2000									Zeitraum 2021-2050									Zeitraum 2071-2100												
	A1B			RCP85			A1B			RCP85			A1B			RCP85			A1B			RCP85									
	R01	R04	R06	R05	R09	R01	R04	R06	R05	R09	R01	R04	R06	R05	R09	R01	R04	R06	R05	R09	R01	R04	R06	R05	R09						
1	5.32	6.01	5.86	5.84	6.00	5.10	5.12	5.03	5.01	3.92	3.78	3.37	3.82	4.15	2.35	2.90	2.92	3.00	3.10	3.11	2.91	2.98	2.88	3.03	2.49	2.65	2.52	2.71	2.84	2.20	
3	1.22	1.32	1.25	1.27	1.30	1.01	0.99	0.95	0.93	0.65	0.42	0.49	0.52	0.72	0.26	0.75	0.82	0.82	0.82	0.79	0.62	0.69	0.64	0.61	0.45	0.43	0.38	0.43	0.50	0.29	
5	2.95	3.34	3.22	3.22	3.08	2.54	2.68	2.60	2.57	1.80	1.89	1.65	1.85	2.11	1.29	0.80	0.83	0.81	0.90	0.90	0.82	0.84	0.77	0.81	0.81	0.65	0.57	0.63	0.69	0.69	
7	0.61	0.56	0.63	0.60	0.62	0.54	0.56	0.50	0.55	0.34	0.36	0.36	0.36	0.44	0.29	2.47	2.46	2.55	2.48	2.33	2.17	2.16	2.17	2.22	1.43	1.43	1.36	1.39	1.86	0.99	
9	0.67	0.70	0.70	0.70	0.69	0.52	0.43	0.49	0.55	0.34	0.29	0.31	0.31	0.39	0.22	1.69	1.71	1.74	1.69	1.70	1.42	1.23	1.40	1.48	0.98	1.06	1.01	1.06	1.21	0.87	
11	0.17	0.16	0.17	0.20	0.18	0.17	0.12	0.16	0.18	0.12	0.12	0.10	0.13	0.15	0.10	0.17	0.16	0.17	0.20	0.17	0.14	0.12	0.14	0.17	0.10	0.11	0.10	0.12	0.14	0.09	
13	1.66	1.64	1.68	1.65	1.56	0.89	0.81	0.88	1.05	0.73	0.86	0.69	0.82	0.95	0.66	2.74	2.59	2.63	2.74	2.48	2.47	1.76	1.99	2.47	1.57	2.42	1.94	2.16	2.42	1.73	
15	0.20	0.19	0.21	0.20	0.17	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.09	0.08	0.10	0.08	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
16	0.09	0.08	0.10	0.10	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	20.94	21.99	21.93	21.98	21.55	17.63	15.94	16.07	17.83	11.20	13.23	11.85	12.99	14.58	7.58	
<b>EZGLN</b>	20.94	21.99	21.93	21.98	21.55	17.63	15.94	16.07	17.83	11.20	13.23	11.85	12.99	14.58	7.58																

#### 4.4.4. Zukunftsprojektionen mit dem Niederschlag-Abfluss-Modellsystem MIKE BASIN

In einem weiteren Schritt wurden wasserwirtschaftliche Modelle für den Projektionszeitraum 2011-2100 mit den fünf ausgewählten Realisierungen erstellt.

In die Modelle flossen für den Projektionszeitraum 2011-2100 berechnete Abflusspenden ein, die von dem mit den Niederschlag-Abfluss-Modellen simulierten Abfluss (MIKE NAM) abgeleitet werden. Einen weiteren Teil der Eingangsdaten bilden die entnommenen/eingeleiteten Wassermengen. Die in die Modelle für den Beobachtungszeitraum eingearbeitete Wassernutzung zeigte in den hydrologischen Jahren 2001-2010 recht starke Schwankungen, weshalb in Modellen für den Projektionszeitraum 2011-2100 entsprechend vervielfältigte Daten zu Entnahmen und Einleitungen von 2010 unter Annahme der Unveränderlichkeit dieser Daten verwendet werden. Berücksichtigung findet auch die künftige Bewirtschaftung der Wasserressourcen im Einzugsgebiet, vor allem im Bergbau, insbesondere beim Abpumpen von Grubenwasser und Flutung der Restlöcher. In die Modelle gehen außerdem Mindestabflusswerte ein, die im Modellsystem MIKE BASIN mit der höchsten lokalen Priorität belegt sind (Tabelle 22). Die Modelle berücksichtigen Wasserentnahmen aus der Pließnitz zum Ausgleich der Verdunstungsverluste aus dem See im gefluteten Restloch des ehemaligen Braunkohletagebaus Berzdorf und bilden die Einleitungen aus der Entwässerung der Tagebaue und Entnahmen durch das Kraftwerk Turów ab. Eine Karte mit Standorten der Tagebaue in unterschiedlichen Phasen ihrer Entwicklung, von bereits rekultivierten (Berzdorf, Olbersdorf) über aktive (Turów, Jänschwalde, Reichwalde, Nochten) und geplante (Gubin, Jänschwalde Nord) Tagebaue zeigt die Abbildung 55. Auf der Karte ist außerdem die Überleitungsstelle in das Einzugsgebiet der Spree und der Standort des Tagebaus Cottbus Nord eingezeichnet, der zwar nicht im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße, aber zusammen mit dem Tagebau Jänschwalde in einem Entwässerungstrichter liegt.

**Tabelle 22: Angaben zu Wasserentnahmen durch den Braunkohletagebau im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße, die in Form von Eingangsdaten in die wasserwirtschaftlichen Projektionsmodelle eingehen**

Lfd. Nr.	Wasserentnahme oder Überleitung	Fließgewässer	Beginn der Entnahme	Entnahme Dauer [Jahre]	Q <sub>max</sub> [m <sup>3</sup> /s]	Q <sub>min</sub> [m <sup>3</sup> /s]
1	Entnahme zur Flutung des Restlochs des Tagebaus Turów	Lausitzer Neiße	I 2046	30	2.82	9
2	Entnahme zur Flutung des Restlochs des Tagebaus Turów	Miedzianka	I 2046	30	0,3	0,8
3	Entnahme für den Berzdorfer See	Pließnitz	XI 2000	laufend	nach Werte	0,4
4	Überleitung in Steinbach	Lausitzer Neiße	I 2015	bis 2100	2	17,6/10
5	Entnahme zur Flutung des Restlochs von Jänschwalde Nord	Lausitzer Neiße	I 2050	12	2	10
6	Entnahme zur Flutung des Restlochs des Tagebaus Gubin	Lausitzer Neiße	I 2065	20	2	10

Die geplante Nutzung des Oberflächenwassers zur Flutung der Restlöcher ehemaliger Tagebaue und das Klimasignal können die Wasserverfügbarkeit in naher und ferner Zukunft erheblich beeinflussen.

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Klimaprojektionen aus den fünf ausgewählten Realisierungen werden ferner wasserwirtschaftliche Bilanzmodelle für den Vergleichszeitraum 2001-2010 erstellt. Die Wahl des Vergleichszeitraumes 2001-2010 ergibt sich aus ihrer zeitlichen Übereinstimmung mit der für das Referenzmodell erstellten Datenbank der Wassernutzer. Etwaige Modelle für den Zeitraum 1971-2000 müssten dagegen aufgrund der strukturellen Änderungen der Oberflächenwassernutzungen nach gänzlich anderen Prinzipien aufgebaut werden. In die Modelle fließen Angaben zu den in diesem Zeitraum festgestellten Wassernutzungen und Abflussspenden ein, die von dem mit den Niederschlag-Abfluss-Modellen (MIKE NAM) simulierten Abfluss abgeleitet werden. Die Abflusswerte werden für den Zeitraum 2001-2010 mit Hilfe der Ergebnisse der Klimaprojektionen aus den fünf ausgewählten Realisierungen ermittelt. Die Modelle dienen dem Vergleich der Projektionsergebnisse für die nahe (2021-2050) und ferne (2071-2100) Zukunft mit den Werten aus dem Vergleichszeitraum und ermöglichen eine Einschätzung der Trendrichtung für die Wasserressourcen im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße.

Ergebnisse der wasserwirtschaftlichen Modellierung mit dem Modellsystem MIKE BASIN für die 5 ausgewählten Realisierungen zeigen eine Abnahme der Abflüsse im gesamten Untersuchungszeitraum. Das Abflussmittel im 5-Jahres-Zeitraum 2011-2015 bildet den höchsten Wert in den Darstellungen der projizierten mittleren Abflusswerte an ausgewählten Pegeln im Verlauf der Lausitzer Neiße, die in 5-Jahres-Schritten für den Zeitraum 2011-2100 mit den Eingangsdatenreihen aus Klimaprojektionen für die meisten Realisierungen (außer RCP8.5 09) ermittelt wurden (Abbildung 44). Für weitere Analysen entstanden Diagramme mit der Darstellung mittlerer Abflüsse für 5-Jahres-Zeiträume. Die meisten Abflusskurven zeigen einen ähnlichen Verlauf mit einer erheblichen Abnahme der Wasserressourcen im zweiten 5-Jahres-Zeitraum und einer anschließenden Zunahme der Ressourcen in den Jahren 2021-2025 und 2026-2030. In der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts weisen die 5-Jahreswerte eine recht ausgeglichene Entwicklung mit einer leicht abnehmenden Tendenz auf. An Pegeln unterhalb von Porajów zeigen sich mit den deutlichsten Werten am Pegel Gubin Schwankungen der Abflusswerte aufgrund der Entnahmen zur Flutung der Restlöcher ehemaliger Tagebaue.

In der Tabelle 23 sind projizierte Abflussmittel an ausgewählten Pegeln im Verlauf der Lausitzer Neiße dargestellt, die für den Vergleichszeitraum (2001-2010) sowie nahe (2021-2050) und ferne (2071-2100) Zukunft mit Daten aus Klimaprojektionen ermittelt wurden. In der nahen Zukunft wird an den dargestellten Pegeln in allen betrachteten Projektionen eine Abnahme der Durchflüsse im Flussbett der Lausitzer Neiße festgestellt. Die geringsten Rückgänge der Abflüsse zeigt das Szenario RCP8.5 in der Realisierung 05 mit Werten von -1,3 % am Pegel Zgorzelec bis zu -10,9 % am Pegel Przewóz. Die stärkste Absenkung der Abflusswerte im Vergleich zur Vergleichsperiode wird von der Projektion RCP8.5 in der Realisierung 09 mit Werten zwischen -10,8 % am Pegel Zgorzelec und -21,3% am Pegel Gubin verzeichnet. In der fernen Zukunft kommt es im Einzugsgebiet vorrangig durch festgestellte Klimaveränderungen zu einer stärkeren Abnahme der Wasserressourcen. Nach den negativsten Projektionen (A1B R04 und RCP8.5 R09) sind sogar Abnahmen der Abflüsse um über 40% möglich (Tabelle 24).

**Tabelle 23: Projizierte Abflussmittel an ausgewählten Pegeln im Verlauf der Lausitzer Neiße, die für den Vergleichszeitraum (2001-2010) sowie nahe (2021-2050) und ferne (2071-2100) Zukunft mit Daten aus Klimaprojektionen ermittelt wurden [m<sup>3</sup>/s]**

Pegel	Vergleichsperiode 2001-2010				
	A1B R01	A1B R04	A1B R06	RCP R05	RCP R09
Porajów	6.342	6.778	6.184	6.038	5.469
Zgorzelec	15.921	16.288	15.560	15.001	13.314
Przewóz	18.687	18.909	18.613	17.823	15.773
Gubin	25.209	25.442	25.371	24.494	21.250
Zeitraum 2021-2050					
	A1B R01	A1B R04	A1B R06	RCP R05	RCP R09
Porajów	5.579	5.647	5.539	5.590	4.535
Zgorzelec	14.646	14.977	14.403	14.809	11.870
Przewóz	15.754	15.911	15.396	15.884	12.622
Gubin	21.482	20.584	20.533	21.915	16.716
Zeitraum 2071-2100					
	A1B R01	A1B R04	A1B R06	RCP R05	RCP R09
Porajów	4.350	3.947	4.389	4.712	2.916
Zgorzelec	10.927	10.197	11.127	12.202	8.196
Przewóz	11.718	11.060	11.815	13.143	9.184
Gubin	15.977	14.627	15.780	17.697	12.465

**Tabelle 24: Relative Entwicklung [%] projizierter Abflussmittel an ausgewählten Pegeln im Verlauf der Lausitzer Neiße, die für den Vergleichszeitraum (2001-2010) sowie nahe (2021-2050) und ferne (2071-2100) Zukunft mit Daten aus Klimaprojektionen ermittelt wurden**

Pegel	Zeitraum 2021-2050				
	A1B R01	A1B R04	A1B R06	RCP R05	RCP R09
Porajów	-12.0	-16.7	-10.4	-7.4	-17.1
Zgorzelec	-8.0	-8.0	-7.4	-1.3	-10.8
Przewóz	-15.7	-15.9	-17.3	-10.9	-20.0
Gubin	-14.8	-19.1	-19.1	-10.5	-21.3
Zeitraum 2071-2100					
	A1B R01	A1B R04	A1B R06	RCP R05	RCP R09
Porajów	-31.4	-41.8	-29.0	-22.0	-46.7
Zgorzelec	-31.4	-37.4	-28.5	-18.7	-38.4
Przewóz	-37.3	-41.5	-36.5	-26.3	-41.8
Gubin	-36.6	-42.5	-37.8	-27.7	-41.3

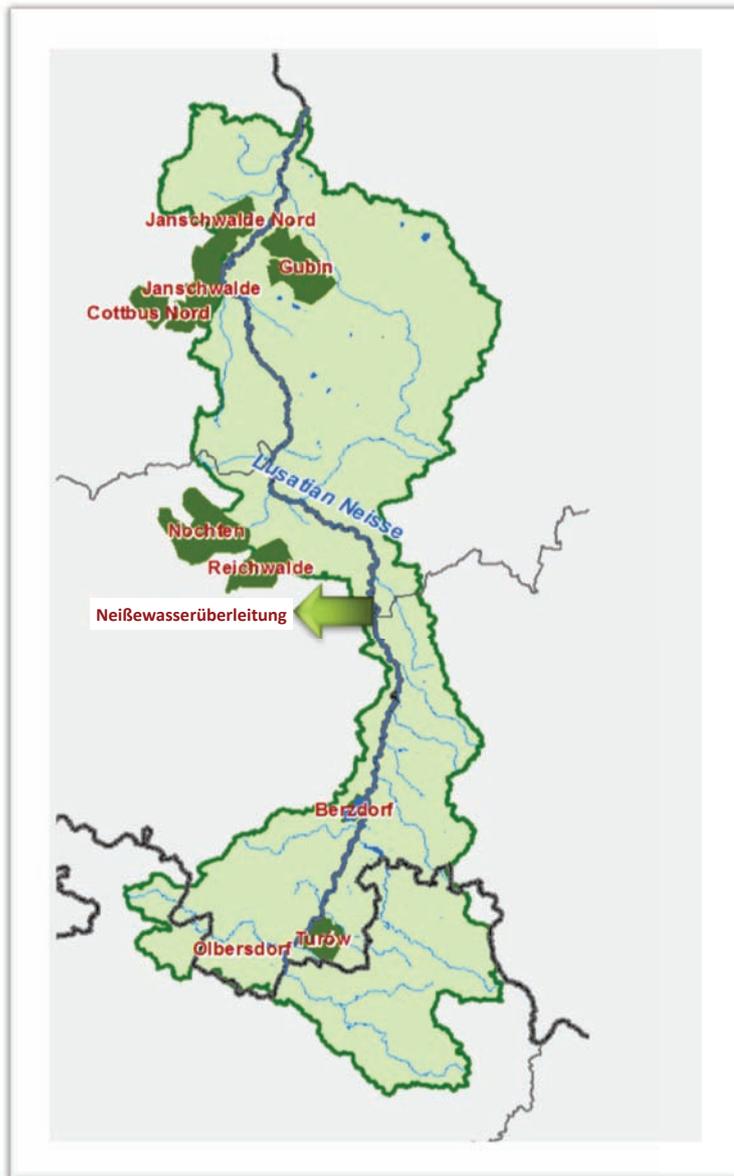


Abbildung 55: Standorte der Braunkohletagebaue und Überleitungsstelle in die Spree



## 5. Bedeutung der veränderten Wasserverfügbarkeit für Wassernutzer

Im Projekt NEYMO werden mit Hilfe ausgewählter Klimaprojektionen zahlreiche Simulationen der Wasserverfügbarkeit analysiert. Die Analysen dienen der Einschätzung der Wasserdefizite und der wasserwirtschaftlichen Planung unter veränderten klimatischen Bedingungen.

In der ersten Analysephase wurden die wichtigsten Problemstellungen der Wasserwirtschaft im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße ermittelt.

Problemstellungen im Bereich der Grundwassernutzung:

- Absenkung des Grundwasserspiegels

Problemstellungen im Bereich der Oberflächenwassernutzung:

- Veränderung des natürlichen hydrologischen Regimes der Oberflächengewässer
- Mangelnde Durchgängigkeit der Gewässer
- Nichteinhaltung der Mindestabflüsse
- zyklisch auftretende Wasserdefizite
- hydromorphologische Veränderungen (z.B. durch Regulierungsmaßnahmen und Instandsetzungen der Fließgewässer)

Bei den durchgeführten Analysen wurden auch zahlreiche Unregelmäßigkeiten bei der Verwaltung und Bewirtschaftung der Gewässer festgestellt:

- viele Komplikationen und Probleme bei der Wasserhaushaltsmodellierung, darunter Probleme mit der Erfassung der Wassernutzer (siehe Kap. 3.2.5.);
- mangelnde Verfügbarkeit tatsächlicher Entnahme- und Einleitmengen (für alle Nutzer);
- Unzulänglichkeit (Ungenauigkeit) von Rechtsdokumenten mit direktem oder indirektem Bezug zur Wasserwirtschaft (z.B. unbefristete Erlaubnisse, wasserrechtliche Erlaubnisse für Wasserbauwerke ohne Festlegung der Mindestabflusswerte);

Bei der Modellierung des Wasserhaushalts im Projekt NEYMO werden Ergebnisse aus ausgewählten Klimaprojektionen und geplante Änderungen der Wassernutzung berücksichtigt. Ergebnisse der Modellierung können zur Erstellung von Projektionen, Erarbeitung von Lösungen für die wichtigsten Problemstellungen im Bereich Wasserwirtschaft und zur Identifizierung von Feldern dienen, in denen Maßnahmen zum Schutz der Wasserressourcen notwendig sind.

Grundlage für Analysen der Wasserverfügbarkeit in naher (2051-2070) und ferner (2071-2100) Zukunft sind Ergebnisse aus einem Teil der Klimaanalysen, die mit Hilfe der gemeinsamen im Projekt NEYMO erstellten deutsch-polnischen Datenbank (für den Zeitraum 1971-2000) gewonnen werden konnten (siehe Broschüre Nr. 1). Die wichtigsten Feststellungen lassen folgende Schlussfolgerungen zu:

- schwaches oder undeutliches Klimasignal bis Mitte des 21.
- die mittlere Jahrestemperatur nimmt in ferner Zukunft (2071-2100) um ca. 3,2 bis 3,7 °C zu.
- tägliche Schwankungen der Lufttemperatur nehmen zu.
- die Niederschlagssumme nimmt im Sommerhalbjahr in ferner Zukunft (2071-2100) um ca. 12% ab. Diese Entwicklung betrifft je nach Projektion einen Teil (RCP 8.5) oder das gesamte Einzugsgebiet (A1B).
- die Niederschlagssumme nimmt im Winterhalbjahr in ferner Zukunft (2071-2100) um einige bis 10% (RCP 8.5) zu. Diese Entwicklung betrifft jedoch nur den Nordteil des Einzugsgebietes der Lausitzer Neiße (ein Teil des EZG).
- Zur Bestimmung der zukünftigen Wasserverfügbarkeit wird die KWB (klimatische Wasserbilanz – die Differenz zwischen Niederschlag und der potenziellen Verdunstung) verwendet. Die klimatische Wasserbilanz wurde für das Sommerhalbjahr betrachtet. Die Werte aus Analysen, die im Projekt NEYMO für die einzelnen Regionen durchgeführt wurden, zeigen eine Abnahme der klimatischen Wasserbilanz im gesamten Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße. Sie nimmt in naher (2051-2070) um -40 bis -100 mm und in ferner Zukunft (2071-2100) um -40 bis – 260 mm ab.
- Mit dem standardisierten Niederschlagsindex (SPI) werden die zukünftigen Niederschlagsverhältnisse beschrieben. Die SPI12-Werte bleiben in Zukunft unverändert oder nehmen leicht ab, was trockenere Klimabedingungen anzeigen könnte. Dabei werden jedoch keine wesentlichen Abweichungen der Häufigkeit von niederschlagsfreien Perioden (außer natürlicher Schwankungen) festgestellt.
- Die aufsteigenden Temperatur- und Sonneneinstrahlungstrends (in deren Folge die Verdunstung verstärkt wird) signalisieren bei einer damit zusammenhängenden Absenkung der Niederschlagssummen eine potenziell geringere Wasserverfügbarkeit im Sommerhalbjahr.

Angaben zu Wassernutzern oberhalb von Pegel Gubin ermöglichen die Analyse des größten Teils des Einzugsgebietes der Lausitzer Neiße. Tabelle 25 zeigt eine quantitative Zusammenstellung der Wassernutzung oberhalb folgender Pegel im Verlauf der Lausitzer Neiße: Porajów, Zgorzelec, Przewóz und Gubin.

**Tabelle 25: Quantitative Zusammenstellung der Wassernutzung oberhalb der Pegel im Verlauf der Lausitzer Neiße**

Nutzer- gruppe	Öffentliche Wasser- nutzer KOM	Tagebaue KOP	Industrie PRZEM	Landwirtschaft ROL	Wasserkraft- anlagen MEW	Gesamt
Porajów	3	0	1	0	0	4
Zgorzelec	12	3	6	7	2	30
Przewóz	5	1	1	6	7	20
Gubin	6	2	3	16	10	37
<b>Gesamt</b>	<b>26</b>	<b>6</b>	<b>11</b>	<b>29</b>	<b>19</b>	<b>91</b>

In der Nutzergruppe Tagebaue (KOP) werden Entnahmen und Einleitungen zur Sanierung und Entwässerung der Tagebaue, Wasserüberleitungen und Entnahmen zum Ausgleich der Verdunstungsverluste der gefluteten stillgelegten Tagebaurestlöcher zusammengefasst. Die Gruppe umfasst 6 Wassernutzer. Die wichtigsten Nutzer sind auf der polnischen Seite der Braunkohletagebau Turów mit 16 Einleitstellen (bei geringen Entnahmen von Oberflächenwasser) und der deutsche Nutzer LMBV mit den größten Wasserentnahmen. Zu öffentlichen Wassernutzungen (KOM) zählen Entnahmen und Einleitungen aus Kläranlagen und durch kommunale Einrichtungen. Die Gruppe umfasst 26 Nutzer aus Deutschland, Polen und der Tschechischen Republik. Zu den wichtigsten Wassernutzern zählen die WW Görlitz mit Entnahmen von Oberflächenwasser, die die Entnahmemengen aller übrigen Nutzer zusammengenommen übersteigen, und die COV-Anlage Liberec mit den größten Einleitungen in die Lausitzer Neiße. In den landwirtschaftlichen Wassernutzungen (ROL) werden Entnahmen und Einleitungen zur Bewässerung von Anbauflächen und für die Unterhaltung von Fischteichen zusammengefasst. Mit 29 Wassernutzern ist dies die zahlenmäßig stärkste Gruppe. Dennoch hat sie nur einen geringen Einfluss auf die Wassernutzung im betrachteten Einzugsgebiet und zeichnet sich dazu durch starke zeitliche Schwankungen aus. Die vierte Nutzergruppe (PRZEM) umfasst Entnahmen und Einleitungen durch Industriebetriebe (mit Ausnahme der Tagebaue). Die Gruppe zählt 11 Nutzer. Der größte Wassernutzer ist hier das Kraftwerk Turów mit großen Wasserentnahmen und Einleitungen, wobei die Entnahmen die Einleitungen bei weitem übersteigen. Zur letzten Nutzergruppe (EW) zählen 9 polnische und 10 deutsche Wasserkraftanlagen im Verlauf der Lausitzer Neiße. In Fließrichtung der Lausitzer Neiße liegen folgenden Wasserkraftanlagen: WKA Pieńsk (festes Wehr), Sobolice (Klappenwehr), Bukówka (Schütze mit Wasserschieber), Przysieka (Schütze mit Wasserschieber), Żarki Wielkie (Plattenschütz), Siedlec / Zieliska (Schütze mit Wasserschieber), Zasieki (Schütze mit Wasserschieber) und Gubin (bewegliches Segmentwehr). Auf der deutschen Seite existieren folgende Wasserkraftanlagen: Görlitz Obermühle (festes Wehr), Görlitz-Vierradenmühle (festes Wehr), Ludwigsdorf II (festes Wehr), Nieder Neuendorf (Schlauchwehr), Bremenwerk (festes Wehr), Lodenau (Klappenwehr), Bad Muskau (Schütze), Forst (Schütze), Grieben (Plattenschütz), Groß Gastrose (Plattenschütz).

Durch den grenzübergreifenden Charakter des Einzugsgebietes der Lausitzer Neiße spielt bei der Nutzung der Wasserressourcen der Grundsatz der Verhältnismäßigkeit eine wichtige Rolle. Die Zusammenstellung der Daten zur Nutzung der Oberflächenwasserressourcen im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße aus den hydrologischen Jahren 2001-2010 zeigt eine deutliche Dominanz von

Einleitungen gegenüber den Entnahmen. Die Gesamtmenge der Einleitungen betrug im vorgenannten Zeitraum ca. 1357 Mio. m<sup>3</sup> und überstieg um das Doppelte die Entnahmen aus Oberflächengewässern mit dem Volumen von ca. 755 Mio. m<sup>3</sup>. Der größte Teil des Einzugsgebietes liegt auf der polnischen Seite, dennoch werden die Gewässer in den letzten 10 Jahren auf der deutschen und tschechischen Seite stärker genutzt. Dieses Missverhältnis ergibt sich aus dem größeren wirtschaftlichen Stellenwert des Braunkohletagebaus und den Wassernutzungen für die Tagebausanierung.

Im Ergebnis der Analysen wird folgende Hierarchie der Wassernutzungen im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße vorgeschlagen:

- Wasserversorgung der Bevölkerung (Trink- und Brauchwasser, wobei die höchste Priorität auf Wasserverfügbarkeit für Nutzer liegt, die die Bevölkerung mit Trinkwasser versorgen);
- Notwendige Bedürfnisse von Wasserlebensräumen und wasserabhängigen Ökosystemen;
- Wasserbedarf für Industriezwecke (Produktion von Lebensmitteln);
- Wassernutzung mit dem Ziel einer verstärkten Speicherung von Wasser im Einzugsgebiet;
- Übriger Wasserbedarf

Zur Bestimmung der Wasserverfügbarkeit im betrachteten Einzugsgebiet wurde mit Hilfe der Modellsysteme MIKE NAM und MIKE BASIN unter Berücksichtigung der Nutzerdaten, der Entwicklungstrends der Klimaindikatoren sowie Ergebnisse ausgewählter Klimaprojektionen die Wasserbilanz modelliert. Bei Analysen der Richtung und Stärke der mit den Klimaprojektionen simulierten Abflussentwicklung ist zu bedenken, dass die Ergebnisse eng mit der Entwicklungsintensität meteorologischer Phänomene (Niederschlag- und Verdunstungsprojektionen) korrelieren, die ihrerseits in Form von Eingangsdaten in die Niederschlag-Abfluss-Modellierung mit dem Modellsystem MIKE NAM eingehen. Auf der Grundlage der mittleren Werte der Jahresabflüsse wurde die Entwicklung der Abflüsse in 16 Bilanzgebieten der Lausitzer Neiße analysiert.

Alle mit den hydrologischen Modellen durchgeführten Analysen zeigen für die Zukunft übereinstimmend Abnahmen der Abflüsse im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße. Analysen der Entwicklung von minimalen, mittleren und maximalen Abflusswerten sowie Abflussmitteln weisen in allen 16 Bilanzgebieten in den meisten Fällen eine negative Entwicklung auf (siehe Kapitel 4.4.3 Tabelle 20). Die Ergebnisse der Modellierung zeigen in naher Zukunft (2021-2050) eine Abnahme der mittleren Jahresabflüsse sowohl in Trocken- (in der Realisierung A1B01 um bis zu 84 % der mittleren Abflusswerte im EZG der Lausitzer Neiße im Vergleich zur Referenzperiode 1971-2000 und in der Realisierung RCP8.5 09 um bis zu 52 %) als auch in Feuchtprojektionen (in der Realisierung A1B04 um bis zu 73 % der mittleren Abflusswerte im EZG der Lausitzer Neiße im Vergleich zu Werten für die Referenzperiode 1971-2000 und in der Realisierung RCO8.5 05 um bis zu 81 %) (siehe Kap. 4.4.3, Tabelle 21). Mit der hydrologischen Modellierung wurde festgestellt, dass bei Berücksichtigung der Ergebnisse aus den 5 ausgewählten Projektionen die relativen mittleren Werte der Jahresabflüsse im EZG der Lausitzer Neiße auch in der fernen Zukunft (2071-2100) abnehmen. Die relative Reduzierung der Abflüsse kann nach der Realisierung RCP8.5 09 vor allem im südlichen Teil des Einzugsgebietes ca. 35 % des für die Referenzperiode 1971-200 simulierten Abflusses betragen (siehe Kap. 4.4.3, Tabelle 21). Bei Betrachtung der Ergebnisse der Modellierung ist festzustellen, dass in Zukunft eine allgemeine Abnahme der Abflüsse in Oberflächengewässern mit einer Zuspitzung ihrer Intensität im

weiteren zeitlichen Horizont angezeigt wird. Dabei ist zu bedenken, dass sich die numerischen Instrumente bei Analysen mit Modellsimulationen auf eine Reihe von Eingangsvorgaben stützen, die ihrerseits mit unterschiedlich starken Risikofaktoren und möglichen Fehlerkumulationen behaftet sein können.

Durch die Modellierung mit dem Modellsystem MIKE BASIN konnten simulierte Abflusswerte für die Vergleichsperiode (2001-2000) sowie für die nahe (2051-2070) und ferne (2071-2100) Zukunft unter Berücksichtigung der Wassernutzer (insgesamt 91 deutsche, tschechische und polnische Nutzer) ermittelt werden. Die projizierten mittleren Jahresabflüsse [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] für die vorgenannten Zeiträume werden im Kapitel 3.2.5 beschrieben (Tabelle 23). Die Realisierungen A1B 04 (trocken) und RCP 8.5 09 (extrem trocken) wiesen an den 4 betrachteten Pegeln (Porajów, Zgorzelec, Przewóz, Gubin) für die Vergleichsperiode (2001-2010) extreme Jahresabflüsse [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] auf. Die Realisierungen A1B 04 (feucht) und RCP 8.5 09 (extrem trocken) zeigten auch für die nahe Zukunft (2051-2070) extreme Werte der simulierten Abflüsse. Abweichend von diesen Ergebnissen wurden für den Zeitraum (2071-2100) extreme mittlere Werte der Jahresabflüsse an allen 4 Pegeln in der Projektion RCP8.5 ermittelt, wobei die Werte in der Realisierung RCP8.5 0.5 (von  $4,71 \text{ m}^3/\text{s}$  am Pegel Porajów bis zu  $17,69 \text{ m}^3/\text{s}$  am Pegel Gubin) höher als in der Realisierung RCP8.5 0.9 (von  $2,91 \text{ m}^3/\text{s}$  am Pegel Porajów bis zu  $12,46 \text{ m}^3/\text{s}$  am Pegel Gubin) ausfielen. Die vorgestellten Ergebnisse belegen damit eine Abnahme der Abflüsse in den betrachteten Zeiträumen.

Im Kapitel 4.4.4 (Tabelle 24) wird die relative Entwicklung [%] der projizierten mittleren Werte der Jahresabflüsse in der Vergleichsperiode (2001-2010) sowie in der nahen (2051-2070) und fernen (2071-2100) Zukunft beschrieben. Die kleinsten Abnahmen der Abflüsse wurden in der Realisierung 05 der Projektion RCP8.5 mit Werten zwischen  $-1,3 \%$  am Pegel Zgorzelec und  $-10,9 \%$  am Pegel Przewóz ermittelt. Die größte Abweichung zur Vergleichsperiode zeigt das mit Eingangsdaten aus der Realisierung RCP8.5 09 erstellte Modell, in dem die kleinsten Abnahmen der Abflüsse am Pegel Zgorzelec ( $-10,8 \%$ ) und die höchsten Rückgänge am Pegel Gubin ( $-21,3 \%$ ) verzeichnet wurden. Für die ferne Zukunft wird damit vorrangig durch festgestellte Klimaveränderungen eine verstärkte Abnahme der Wasserressourcen im Einzugsgebiet prognostiziert. Nach der Projektion RCP8.5 R09 sind sogar Abnahmen der Abflüsse um über  $40 \%$  möglich.

Gegenstand von Untersuchungen waren auch projizierte mittlere Monatswerte, die mit dem Modellsystem MIKE BASIN für die fünf ausgewählten Realisierungen (A1B - R01, R04, R06 und RCP 8.5 - R05, R09) ermittelt wurden. Der Vergleich der Ganglinien des Fließgewässers Lausitzer Neiße in den einzelnen Monaten (sowie der Vergleich der projizierten Abflusswerte), die mit dem MIKE BASIN Modell für die Vergleichsperiode (2001-2010) und den Projektionen für die nahe (2051-2070) und ferne (2071-2100) Zukunft berechnet wurden, zeigen, dass nach den für das Projekt NEYMO ausgewählten Realisierungen eine Abnahme der Abflüsse zu erwarten ist. In den nachfolgenden Diagrammen sind Beispiele von mittleren Werten der projizierten Monats- und Jahresabflüsse am Pegel Gubin im Zeitverlauf für die Realisierungen A1B04 (feucht) und A1B01 (trocken) dargestellt (Abbildung 57; Abbildung 56).

Aus den Diagrammen wird ersichtlich, dass die maximalen Abflusswerte im Vergleich zum Anfang des 21. Jahrhunderts mit einer Verzögerung von zwei Monaten auftreten. In weiteren zukünftigen

Zeiträumen nehmen auch die projizierten mittleren Werte der Jahresabflüsse ab. Der relative Rückgang der Abflüsse (Q) beträgt für den Zeitraum 2071-2100 über 30 % im Vergleich zur Vergleichsperiode (2001-2010). Die Ergebnisse zeigen, dass die eventuellen Retentionsmaßnahmen (Speicherung von Wasser) in der ersten Hälfte des hydrologischen Jahres zu planen sind, weil zu dieser Zeit die projizierten Abflüsse den mittleren Jahreswert und die projizierten Abflüsse in der zweiten Jahreshälfte übersteigen.

Die Ergebnisse für projizierte Abflusswerte signalisieren abnehmende Abflusswerte an den betrachteten Pegeln im Verlauf der Lausitzer Neiße, die sich in verstärkten, auf das Klimasignal zurückgehenden Abnahmen der Wasserressourcen im Einzugsgebiet äußern. Die heutigen und zukünftigen Oberflächenwassernutzer müssen sich in Zukunft auf die projizierten niedrigen Abflüsse einstellen, die nach den negativsten Projektionen sogar um über 40 % abnehmen können (A1B R04 und RCP8.5 R09).

Die vorgestellten Ergebnisse der Projektionen und Beobachtungsdaten aus vergangenen Zeiträumen zeigen Probleme, die im Zusammenhang mit Wasserwirtschaft und Wassermanagement auftreten. Die immer stärkere Abnahme der Wasserverfügbarkeit, die sich besonders deutlich in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts (ferne Zukunft) zeigt, signalisiert, dass negative Ereignisse immer häufiger auftreten können. Der Rückgang der Wasserressourcen wird für Nutzer aus allen Gruppen (KOP, KOM, ROL, PRZEM, EW) spürbar. Daher wird im Projekt NEYMO ein Maßnahmenkatalog mit Empfehlungen und Beispielen von Verhaltensweisen erarbeitet, die eine Anpassung an die erwarteten Klimaveränderungen ermöglichen.

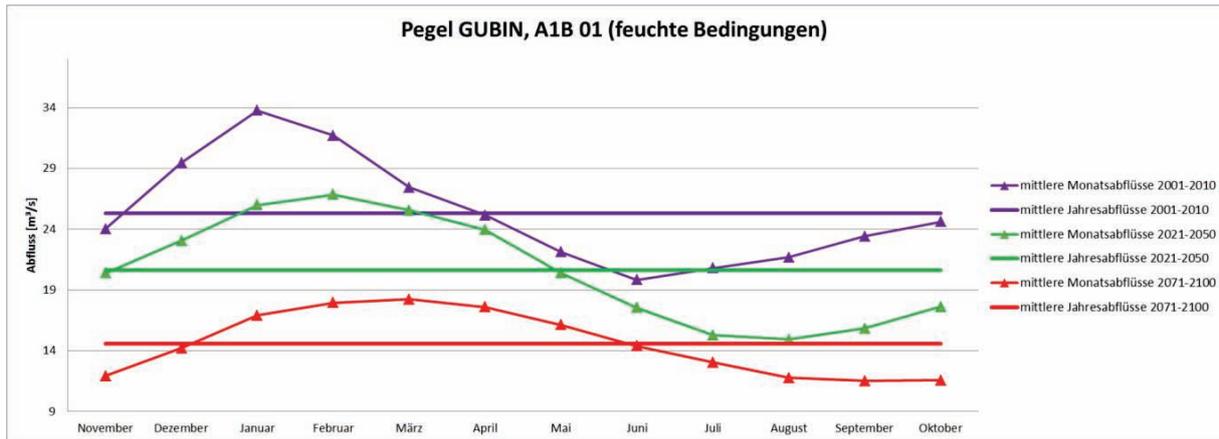


Abbildung 56: Mittlere Werte der projizierten Monats- und Jahresabflüsse Q [m<sup>3</sup>/s] am Pegel Gubin aus dem Modell MIKE BASIN für das Projektionsmodell A1B 04

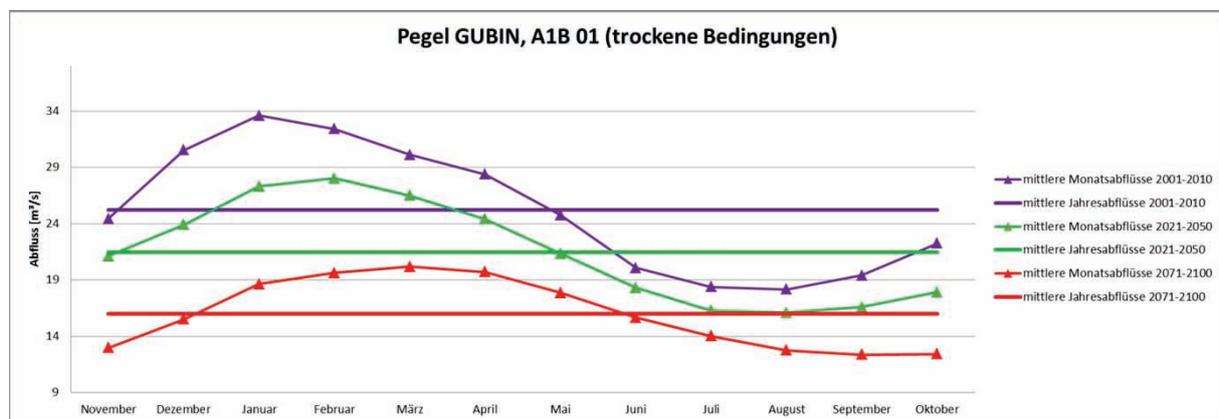


Abbildung 57: Mittlere Werte der projizierten Monats- und Jahresabflüsse Q [m<sup>3</sup>/s] am Pegel Gubin aus dem Modell MIKE BASIN für das Projektionsmodell A1B 01

6

Zusammenfassung

## 6. Zusammenfassung

**N**EYMO ist das Akronym für den Langtitel des Projektes Lausitzer Neiße/ Nysa łużycka - Klimatische und hydrologische Modellierung, Analyse und Prognose. Das Projekt wurde durch den europäischen Fonds für Regionalentwicklung gefördert. In dieser Broschüre wurden die Ergebnisse der Untersuchungen zur Entwicklung der Wasserressourcen im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße dargestellt. Ziel des Schwerpunktes Wasserhaushalt im Projekt NEYMO war die Modellierung des Wasserhaushalts für vergangene und zukünftige Klimabedingungen unter Berücksichtigung der anthropogenen Einflüsse wie Wasserentnahmen und -einleitungen mit geeigneten Wasserhaushaltsmodellen. Für die Abbildung des Wasserhaushalts wurden die Modelle ArcEGMO und MIKE NAM + MIKE BASIN genutzt. Das Modellergebnis bildeten der Gesamtabfluss und die Aufteilung in seine Abflusskomponenten Oberflächen- und Zwischenabfluss sowie Grundwasserneubildung. Die notwendigen Datengrundlagen zu Klima, Hydrologie, Geodaten, wurden recherchiert und entsprechend den Modellanforderungen aufbereitet.

Die Untersuchungen zum vergangenen Wasserhaushalt des Zeitraumes 1971-2010 verdeutlichte die starke Heterogenität des Einzugsgebietes Lausitzer Neiße. In den südlichen Kammlagen und Mittelgebirgsregionen verhalten sich die Wasserhaushaltskomponenten anders als im Tiefland. Trendanalysen der langjährigen Mittelwerte 1971-2010 zeigten an den Pegelgebieten für die Wasserhaushaltskomponenten das in Tabelle 26 zusammengestellte Verhalten.

**Tabelle 26: Entwicklung der Wasserhaushaltskomponenten 1971-2010**

	<b>Gesamtjahr</b>	<b>Sommerhalbjahr</b>	<b>Winterhalbjahr</b>
<b>Niederschlag</b>	Tendenz zur Zunahme	Tendenz zur Zunahme	Tendenz zur Zunahme
<b>Verdunstung</b>	Signifikante Zunahme in allen Pegelgebieten	Signifikante Zunahmen in Quellgebieten und entlang Lausitzer Neiße Tendenz zur Zunahme im Tiefland	Signifikante Zunahme in allen Pegelgebieten
<b>Gesamtabfluss</b>	Schwache Tendenz zur Abnahme	Schwache Tendenz zur Abnahme	Schwache Tendenz zur Abnahme
<b>Oberflächenabfluss</b>	Schwache Tendenz zur Zunahme	Schwache Tendenz zur Zunahme	Schwache Tendenz zur Zunahme
<b>Zwischenabfluss</b>	Tendenz zur Zunahme	Tendenz zur Abnahme	Tendenz zur Zunahme
<b>Grundwasserneubildung</b>	Tendenz zur Zunahme in allen Pegelgebieten	Tendenz zur Abnahme in allen Pegelgebieten	Signifikante Zunahmen entlang Lausitzer Neiße Tendenz zur Zunahme in Quellgebieten

Um mögliche Entwicklungen des Wasserhaushaltes bis Ende des Jahrhunderts abschätzen zu können, wurden fünf ausgewählte Klimaprojektionen als klimatische Randbedingung im Wasserhaushaltsmodell vorgegeben. Unter den angenommenen Klimabedingungen ergeben sich für die Wasserhaushaltskomponenten bis zum Ende des 21. Jahrhunderts die in Tabelle 27 angegebenen Entwicklungen des Wasserhaushalts.

**Tabelle 27: Entwicklung der Wasserhaushaltskomponenten bis 2100 unter Annahme veränderter Klimabedingungen (Klimaprojektionen)**

	<b>Gesamtjahr</b>	<b>Sommerhalbjahr</b>	<b>Winterhalbjahr</b>
<b>Niederschlag</b>	Signifikante Abnahme	Signifikante Abnahme	Tendenz zur Zunahme
<b>Verdunstung</b>	Signifikante Zunahmen in höheren Lagen und entlang der Lausitzer Neiße Tendenz zur Zunahme im Tiefland	Signifikante Zunahme in allen Pegelgebieten	Signifikante Zunahme in allen Pegelgebieten
<b>Gesamtabfluss</b>	Signifikante Abnahme	Signifikante Abnahme	Signifikante Abnahme
<b>Oberflächenabfluss</b>	Signifikante Abnahme	Signifikante Abnahme	Schwache Tendenz zur Abnahme
<b>Zwischenabfluss</b>	Signifikante Abnahme	Signifikante Abnahme	Tendenz zur Abnahme
<b>Grundwasserneubildung</b>	Signifikante Abnahme	Signifikante Abnahme	Tendenz zur Abnahme

Die aufgezeigten Veränderungen im Wasserhaushalt sind mögliche Entwicklungen, die unter der Annahme der genannten, ausgewählten Klimaprojektionen gelten. Andere Klimabedingungen können unter Umständen abweichende Reaktionen im Wasserhaushalt auslösen. Es ist stets eine Bandbreite der Entwicklung des Wasserhaushalts zu betrachten.

Die projizierte Abnahme des Gesamtabflusses wirkt sich auf die Wassernutzungen aus. Durch die geringere Wasserverfügbarkeit insbesondere in den Sommerhalbjahren der letzten Dekaden des Jahrhunderts wird die Wassernutzung nur eingeschränkt möglich sein. Bei der Interpretation der Daten ist zu beachten, dass es sich um Modellergebnisse handelt, die mit Unsicherheiten behaftet sind. Angefangen bei den Eingangsdaten über die Modellansätze und -annahmen bis hin zu den Parametereinstellungen sind Unsicherheiten und Fehler mit unterschiedlichen Ausmaß möglich, die sich akkumulieren können.

Auf Grundlage der Modellergebnisse zum Wasserhaushalt werden wasserwirtschaftliche Handlungs- und Anpassungsmaßnahmen abgeleitet. Diese Maßnahmen werden in einem Maßnahmenkatalog zusammengefasst und den Akteuren der Region Lausitzer Neiße als Empfehlung und Unterstützung für die zukünftige Planung bereitgestellt.

## Literatur

Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten, 5. Aufl., 438 S.; 41 Abb., 103 Tab., 31 Listen, Hannover

Bundesanstalt für Gewässerkunde (2014): Datengrundlagen zur Einordnung und Bewertung hydrologischer Extreme, <http://undine.bafg.de/servlet/is/12110/> (Stand 02.12.2014)

DHI (2011): MIKE 11 NAM by DHI Software 2011

DHI-WASY und IMGW-PIB (2011): Lignite Mining in the Lusatian Nyza River Basin - Concept for detailed model based impact studies on water resources. DHI-WASY GmbH und IMGW-PIB Wroclaw im Auftrag von Vattenfall Europe Mining AG, Februar 2011.

Dyck, S. (1978): Angewandte Hydrologie, Teil I und II, VEB Verlag für Bauwesen Berlin 1978

Dyck, S.; Peschke, G. (1983) : Grundlagen der Hydrologie; VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1983

Fischer B., Müller F., Redetzky M. Schramm M., Walther J., Adynkiewicz-Piragas M., Kryza J., Zdralewicz I. (2013): Modellbasierte wasserwirtschaftliche Konfliktanalysen und Planungen im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße unter besonderer Berücksichtigung des Braunkohlenbergbaus. Abschlussbericht. DHI-WASY GmbH und IMGW-PIB Wroclaw im Auftrag von Vattenfall Europe Mining AG, Marzec 2013.

IUSS Working Group WRB (2014): World Reference Base for Soil Resources 2014. World Soil Resources Reports, 106 (in press), FAO, Rome.

Jarvis A., H.I. Reuter, A. Nelson, E. Guevara (2008): Hole-filled seamless SRTM data V4, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), available from <http://srtm.csi.cgiar.org>.

Kendall, M.G. (1975): Rank Correlation Methods. Charles Griffin, London

Kreienkamp, F.; Spekat, A. (2013): Modellierung von Klimaprojektionen für das erweiterte Neißeeinzugsgebiet im Rahmen des Projektes NEYMO

Klöcking, B; Pfützner, B.; Suckow, F.; Lasch, P. (2009): Das ökohydrologische PSCN-Modul innerhalb des Flussgebietsmodells ArcEGMO – Theoretische Modellbeschreibung, München

Legates D.R. & McCabe Jr. (1999): Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. In: Water Resources Research, 35,1, S. 233–241.

McKee TB, Doesken NJ, Kleist J (1993): The relationship of drought frequency and duration to time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, 17-22 January 1993, Anaheim, California

LfULG (2012): Schriftenreihe Kernkomponente

LfULG (2014): Lausitzer Neiße-Charakteristik und Klima der Region, 1. NEYMO-Broschüre

Richter, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194, Selbstverlag des DWD, Offenbach am Main 1995

Sadowski, M. (2013): KLIMADA - Opracowanie i wdrożenie Strategicznego Planu Adaptacji dla sektorów i obszarów wrażliwych na zmiany klimatu. Adaptacja wrażliwych sektorów i obszarów Polski do zmian klimatu do roku 2070. IOŚ-PIB. Warszawa.

Sen, Pranab Kumar (1968): Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau, Journal of the American Statistical Association 63: 1379–1389, JSTOR 228589

Umweltbundesamt und DLR-DFD (2004):, CORINE Land Cover (CLC2000)

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gesamtes Projektgebiet.....	9
Abbildung 2: Höhen im Gesamteinzugsgebiet basierend auf SRTM 90 (Jarvis et al. 2008).....	10
Abbildung 3: Wasserkreislauf, -haushalt und -bilanz.....	11
Abbildung 4: Schematische Darstellung des Wasserkreislaufs (LfULG, 2013).....	12
Abbildung 5: Höhen und Pegel im Einzugsgebiet.....	14
Abbildung 6: Herkunft Bodendaten .....	17
Abbildung 7: Grenzüberschreitende Bodenkarte .....	18
Abbildung 8: Landnutzung nach CORINE Land Cover (CLC2000) (Umweltbundesamt, DLR-DFD 2004).....	19
Abbildung 9: Pegelschema Lausitzer Neiße (dunkelgrün-sächsische Pegel, rot-polnische Pegel, hellgrün-brandenburgische Pegel).....	22
Abbildung 10: Pegel und Einzugsgebiete des Projektgebietes .....	23
Abbildung 11: Bewirtschaftung des Oberflächen- und Grundwassers im Einzugsgebiet .....	24
Abbildung 12: Klima- und Niederschlagsstationen im Gebiet und Umgebung.....	25
Abbildung 13: Abflussbildung in ArcEGMO mit dem Modul PSCN (Klöcking et al. 2009).....	42
Abbildung 14: Notwendige Daten zum Aufbau des Gebietsmodell Lausitzer Neiße.....	43
Abbildung 15: Nash-Sutcliff-Effizienz vor und nach der Kalibrierung an Pegeln auf Tageswertbasis... ..	46
Abbildung 16: Nash-Sutcliff-Effizienz vor und nach der Kalibrierung an Pegeln auf Monatswertbasis.....	46
Abbildung 17: Schematische Darstellung der Modellierung mit dem Modellsystem MIKE NAM.....	47
Abbildung 19: Schematische Darstellung des Modellsystems MIKE NAM und die Einteilung des Einzugsgebietes der Lausitzer Neiße in wasserbilanzrelevante Einzugsgebiete.....	49
Abbildung 19: Methodologischer Ansatz bei der Kalibrierung und Validierung der Modelle MIKE NAM .....	49
Abbildung 21: Aufteilung des Einzugsgebietes der Lausitzer Neiße in bilanzrelevante Teileinzugsgebiete .....	52
Abbildung 21: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell des Teileinzugsgebietes der Lausitzer Neiße von ihrer Quelle bis zur Mandau-Mündung .....	53
Abbildung 22: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell des Einzugsgebietes der Mandau .....	54
Abbildung 23: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell für das Teileinzugsgebietes der Lausitzer Neiße von der Mandau-Mündung bis zur Mündung des Jędrzychowicki Potok .....	55

Abbildung 24: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell für das Einzugsgebiet der Miedzianka.....	56
Abbildung 25: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell für das Einzugsgebiet der Witka.....	57
Abbildung 26: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell für das Einzugsgebiet der Pließnitz .....	58
Abbildung 27: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell für das Einzugsgebiet der Czerwona Woda.....	59
Abbildung 28: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell für das Teileinzugsgebiet der Lausitzer Neiße von der Mündung des Baches Jędrzychowicki Potok bis zur Skroda-Mündung.....	60
Abbildung 29: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell für das Teileinzugsgebiet der Skroda .....	61
Abbildung 30: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell für das Teileinzugsgebiet der Lausitzer Neiße von der Skroda-Mündung bis zur Mündung des Malxe-Neiße-Kanals .....	62
Abbildung 31: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell für das Einzugsgebiet des Föhrenfließ.....	63
Abbildung 32: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell des Einzugsgebiets des Malxe-Neiße-Kanals. ....	64
Abbildung 33: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell für das Teileinzugsgebiet der Lausitzer Neiße von der Mündung des Malxe-Neiße-Kanals bis zur Odermündung. ....	65
Abbildung 34: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell für das Einzugsgebiet der Lubsza. ....	66
Abbildung 35: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell des Einzugsgebiets des Schwarzes Fließ. ....	67
Abbildung 36: Ganglinien (oben) und Abfluss-Hydrogramm (unten); MIKE NAM-Modell des Einzugsgebiets des Grano-Buderoser-Mühlenfließ.....	68
Abbildung 37: Arbeitsmaske des Modellsystems MIKE BASIN .....	72
Abbildung 38: Schematische Darstellung der Modellierung mit dem Modellsystem MIKE BASIN .....	73
Abbildung 39: Zusammensetzung der Abflusskomponenten bezogen auf die Pegelinzugsgebiete für den Zeitraum 1971-2010.....	78
Abbildung 40: Wasserhaushaltskomponenten Niederschlag, Verdunstung und Oberflächenabfluss für Teilgebiete - Mittelwert 1971 bis 2010 als Ergebnis der Modellierung mit ArcEGMO.....	81
Abbildung 41: Wasserhaushaltskomponenten Zwischenabfluss, Grundwasserneubildung und Gesamtabfluss für Teilgebiete - Mittelwert 1971 bis 2010 als Ergebnis der Modellierung mit ArcEGMO .....	82

Abbildung 42: Karte mit Darstellung der im Modell MIKE BASIN berücksichtigten Oberflächenwassernutzungen .....	85
Abbildung 43: Abflussspenden in Mündungsgebieten ausgewählter Zuflüsse der Lausitzer Neiße – Ergebnisse der Modellierung der Wasserbilanz mit Beobachtungsdaten .....	86
Abbildung 44: Projizierte Abflussmittel an ausgewählten Pegeln im Verlauf der Lausitzer Neiße, die als 5-Jahreswerte für den Zeitraum 2011-2100 mit Eingangsdatenreihen aus Klimaprojektionen ermittelt wurden [ $m^3/s$ ] .....	87
Abbildung 45: Abflüsse an ausgewählten Pegeln an der Lausitzer Neiße – Ergebnisse der Modellierung der Wasserbilanz mit Beobachtungsdaten.....	88
Abbildung 46: Relative Abweichungen des 30-jährigen Mittels 1971-2000 der Wasserhaushaltskomponenten unter Verwendung von Klimaprojektionen im Vergleich zur Verwendung der gemessenen Klimadaten (oben links nach rechts: Niederschlag, reale Verdunstung, Gesamtabfluss, Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss, Grundwasserneubildung).....	90
Abbildung 47: Bandbreite der mittleren monatlichen Abflüsse am Pegel Podrosche 2 in der Periode 2071-2100 am Pegel Podrosche 2 als Ergebnis der Anwendung verschiedener Klimaprojektionen ...	96
Abbildung 48: Abweichung vom langjährigen Mittel der Referenzperiode 1971-2000, SHJ, gesamtes Modellgebiet Lausitzer Neiße, Gebietsniederschlag PI, reale Verdunstung ER, Oberflächenabfluss RO, Hypodermischer Abfluss RH .....	104
Abbildung 49: Abweichung vom langjährigen Mittel der Referenzperiode 1971-2000, WHJ, gesamtes Modellgebiet Lausitzer Neiße, Gebietsniederschlag PI, reale Verdunstung ER, Oberflächenabfluss RO, Hypodermischer Abfluss RH .....	105
Abbildung 50: Abweichung vom langjährigen Mittel der Referenzperiode 1971-2000, Jahr, gesamtes Modellgebiet Lausitzer Neiße, Gebietsniederschlag PI, reale Verdunstung ER, Oberflächenabfluss RO, Hypodermischer Abfluss RH .....	106
Abbildung 51: Abweichung vom langjährigen Mittel der Referenzperiode 1971-2000, SHJ, WHJ, Jahr für gesamtes Modellgebiet Lausitzer Neiße, Grundwasserneubildung GWN .....	107
Abbildung 52: Relative Entwicklung der mittleren Jahresabflüsse für den Zeitraum 2021-2050.....	110
Abbildung 53: Relative Entwicklung der mittleren Jahresabflüsse für den Zeitraum 2071-2100.....	111
Abbildung 54: Grundwasserneubildung.....	114
Abbildung 55: Standorte der Braunkohletagebaue und Überleitungsstelle in die Spree.....	119
Abbildung 56: Mittlere Werte der projizierten Monats- und Jahresabflüsse Q [ $m^3/s$ ] am Pegel Gubin aus dem Modell MIKE BASIN für das Projektionsmodell A1B 01 .....	128
Abbildung 57: Mittlere Werte der projizierten Monats- und Jahresabflüsse Q [ $m^3/s$ ] am Pegel Gubin aus dem Modell MIKE BASIN für das Projektionsmodell A1B 04 .....	128

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Hauptwerte der Pegel.....	21
Tabelle 2: Auszug aus der Häufigkeitszählung für „trockene“, „mittlere“ und „feuchte“ Episoden für das SHJ auf der Basis der KWB (Szenario RCP26).....	28
Tabelle 3: Klassifikation SPI nach McKee (1993) .....	29
Tabelle 4: Abflusspenden für die Periode 1971-2000 und absolute Trends in mm/40a (positiv, negativ) für die Periode 1971-2010 für das Jahr, Sommer- und Winterhalbjahr, Pegel unterteilt nach Höhenstufen (dunkelblau: Tiefland, hellblau: Bergland), Signifikante Trends fett.....	36
Tabelle 5: Absolute saisonale Trends der Abflusspenden für die Periode 1971-2010 in mm/40a (positiv, negativ - abgestufte Helligkeit Trendstärke), Pegel unterteilt nach Höhenlage ( $\leq 350$ m ü. NN, $> 350$ m ü. NN), Signifikante Trends fett, .....	37
Tabelle 6: Relativer saisonaler Trend der Niedrigwasserabflusspenden für die Periode 1971-2010 (positiv, negativ- abgestufte Helligkeit Trendstärke), Referenzperiode 1971-2000, Pegel unterteilt nach Höhenlage ( $\leq 350$ m ü. NN, $> 350$ m ü. NN) .....	37
Tabelle 7: Übersicht über Bilanzgebiete, für die Niederschlag-Abfluss-Modelle erstellt wurden.....	50
Tabelle 8: Simulierte Zeiträume mit Übersicht über Messstellen, die beim Aufbau und Kalibrierung der Niederschlag-Abfluss-Modelle herangezogen wurden.....	51
Tabelle 9: Effizienz der Niederschlag-Abflussmodelle für die Bilanzgebiete der Lausitzer Neiße .....	70
Tabelle 10: Vergleich der Simulations- und Beobachtungswerte der mittleren Abflüsse im Referenzzeitraum .....	71
Tabelle 11: Mittlere Jahreswerte der Wasserhaushaltskomponenten und absolute Trends in mm/40a (positiv, negativ) mit Signifikanzen (signifikante Trends fett) für den Beobachtungszeitraum 1971-2010 für Jahr, Sommer- und Winterhalbjahr .....	83
Tabelle 12: Modellierter Niederschlag für verschiedene Projektionen mit dem Modell ArcEGMO.....	97
Tabelle 13: Modellierter Verdunstung für verschiedene Projektionen mit dem Modell ArcEGMO .....	98
Tabelle 14: Modellierter Oberflächenabfluss für verschiedene Projektionen mit dem Modell ArcEGMO .....	99
Tabelle 15: Modellierter Zwischenabfluss für verschiedene Projektionen mit dem Modell ArcEGMO .....	100
Tabelle 16: Modellierter Grundwasserneubildung für verschiedene Projektionen mit dem Modell ArcEGMO .....	101
Tabelle 17: Mittlere Jahreswerte der Wasserhaushaltskomponenten und absolute Trends in mm/30a (positiv, negativ) mit Signifikanzen (signifikante Trends fett) für den Projektionszeitraum 2021-2050 für Jahr, Sommer- und Winterhalbjahr der Projektion RCP85, R09; Pegel unterteilt nach Höhenstufen (dunkelblau: Tiefland, hellblau: Bergland) .....	102

Tabelle 18: Mittlere Jahreswerte der Wasserhaushaltskomponenten und absolute Trends in mm/30a (positiv, negativ) mit Signifikanzen (signifikante Trends fett) für den Projektionszeitraum 2071-2100 für Jahr, Sommer- und Winterhalbjahr der Projektion RCP85, R09; Pegel unterteilt nach Höhenstufen (dunkelblau: Tiefland, hellblau: Bergland) .....	103
Tabelle 19: Relative (minimale, mittlere, maximale, durchschnittliche) Werte der simulierten mittleren Jahresabflüsse für den Zeitraum 2021-2050 [%].....	113
Tabelle 20: Relative (minimale, mittlere, maximale, durchschnittliche) Werte der simulierten mittleren Jahresabflüsse für den Zeitraum 2071-2100 [%].....	113
Tabelle 21: Simulierte mittlere Abflussspenden bei Verwendung der Eingangsdatenreihen aus den jeweiligen Klimaprojektionen [m <sup>3</sup> /s].....	115
Tabelle 22: Angaben zu Wasserentnahmen durch den Braunkohletagebau im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße, die in Form von Eingangsdaten in die wasserwirtschaftlichen Projektionsmodelle eingehen.....	116
Tabelle 23: Projizierte Abflussmittel an ausgewählten Pegeln im Verlauf der Lausitzer Neiße, die für den Referenzzeitraum (2001-2010) sowie nahe (2021-2050) und ferne (2071-2100) Zukunft mit Daten aus Klimaprojektionen ermittelt wurden [m <sup>3</sup> /s] .....	118
Tabelle 24: Relative Entwicklung [%] projizierter Abflussmittel an ausgewählten Pegeln im Verlauf der Lausitzer Neiße, die für den Referenzzeitraum (2001-2010) sowie nahe (2021-2050) und ferne (2071-2100) Zukunft mit Daten aus Klimaprojektionen ermittelt wurden .....	118
Tabelle 25: Quantitative Zusammenstellung der Wassernutzung oberhalb der Pegel im Verlauf der Lausitzer Neiße.....	124
Tabelle 26: Entwicklung der Wasserhaushaltskomponenten 1971-2010.....	130
Tabelle 27: Entwicklung der Wasserhaushaltskomponenten bis 2100 unter Annahme veränderter Klimabedingungen (Klimaprojektionen) .....	131

## Impressum

➤ Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie  
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden  
Telefon: +49 351 2612-0  
Telefax: +49 351 2612-1099  
E-Mail: [lfulg@smul.sachsen.de](mailto:lfulg@smul.sachsen.de)  
[www.smul.sachsen.de/lfulg](http://www.smul.sachsen.de/lfulg)

➤ Autoren:

Kathleen Lünich, Michael Prasser, Corina Niemand  
Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)

Mariusz Adynkiewicz-Piragas, Iwona Zdralewicz, Irena Otop, Bartłomiej Miszuk, Joanna Kryza,  
Iwona Lejcuś, Marzenna Strońska  
Institut für Meteorologie und Wasserwirtschaft (IMGW-PIB)

➤ Redaktion:

Kathleen Lünich, Michael Prasser, Corina Niemand, Karin Kuhn, Thomas Pluntke

➤ Redaktionsschluss:

04.12.2014

➤ Umschlagfoto:

LfULG, LTV

➤ Druck:

Reprogress GmbH, Dresden

➤ Auflage:

200 Exemplare

➤ Bestelladresse:

Diese Druckschrift kann kostenfrei bezogen werden bei:  
Zentraler Broschürenversand der Sächsischen Staatsregierung  
Hammerweg 30, 01127 Dresden  
Telefon: +49 351 2103-671  
Telefax: +49 351 2103-681  
E-Mail: [publikationen@sachsen.de](mailto:publikationen@sachsen.de)  
[www.publikationen.sachsen.de](http://www.publikationen.sachsen.de)

Verteilerhinweis:

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben. Sie darf weder von politischen Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.



