



IWB  
Dr. Uhlmann  
Institut für Wasser und Boden

gerstgraser  
INGENIEURBÜRO  
FÜR RENATURIERUNG



Arbeitsgemeinschaft  
GMB × DHI WASY × IWB × gIR  
Wasserwirtschaftliche Folgen  
des Braunkohleausstiegs  
in der Lausitz

IM AUFTRAG DES  
UMWELTBUNDESAMTES  
RESSORTFORSCHUNGSPLAN 2020  
FKZ: 3720 24202 0

„Wasserwirtschaftliche Folgen  
des Braunkohleausstiegs in der Lausitz“

## Arbeitspaket 3

**Wasserwirtschaftliches Großraummodell**

**„WBalMo-Ländermodell“ -**

Wartung, Unterhaltung, Weiterentwicklung und Betrieb

20.12.2021

## Inhaltsverzeichnis

<b>INHALTSVERZEICHNIS</b> .....	<b>2</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>4</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>6</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS</b> .....	<b>7</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>9</b>
<b>1 WBALMO-LÄNDERMODELL: WASSERWIRTSCHAFTLICHES GROßRAUMMODELL SPREE/ SCHWARZE ELSTER/ LAUSITZER NEIßE</b> .....	<b>15</b>
1.1 Bestandsaufnahme – Funktionen .....	16
1.1.1 Abflussbildung unter Berücksichtigung der bergbaulichen Grundwasserabsenkung und im Spreewald .....	16
1.1.2 Wechselwirkung zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser .....	20
1.1.3 Wasserentnahmen und -Einleitungen.....	23
1.1.4 Bewirtschaftung der Talsperren und Speicher.....	24
1.1.5 Bewirtschaftung von Überleitungen und Kanälen.....	27
1.1.6 Sulfatprognosemodul .....	29
1.1.7 Ergebnisse .....	32
1.1.8 Szenariofähigkeit.....	33
1.1.9 Schnittstellen.....	33
1.2 Bestandsaufnahme – Daten .....	34
1.2.1 Überblick .....	34
1.2.2 Zusammenfassung zu Witterung und Abfluss .....	34
1.2.3 Zusammenfassung zu Wasserdargebot und Wasserbedarf .....	38
1.2.4 Zusammenfassung zu Sulfatmissionen und Sulfattranslation .....	40
1.3 Bestandsaufnahme – Nutzung, Unterhaltung und Weiterentwicklung .....	40
1.4 Anpassungsbedarf – Funktionen und Daten .....	42
1.4.1 Stärken-Schwächenanalyse im Überblick .....	42
1.4.2 Bilanzierungstaugliche Lösung für klimarelevante Aspekte im WBalMo- Ländermodell .....	42
1.4.2.1 Grundlagen .....	42
1.4.2.2 Erstellung und Prüfung meteorologischer und hydrologischer Eingangsdaten aus Klimaprojektionen .....	43
1.4.2.3 Anpassung der wasserwirtschaftlichen Simulation .....	53
1.4.2.4 Auswertung der Ergebnisse.....	53
1.4.3 Schnittstellen zu anderen Modellen .....	57
1.4.4 Überarbeitung und Aktualisierung der DYN-Elemente .....	59
1.4.5 Überarbeitung des Spreewald-Moduls .....	59
1.4.6 Aktualisierung des Dargebotes und der Nutzungen in den Gebieten der Malxe und Trinitz .....	60

1.4.7	Dokumentation und Aktualisierung von Daten.....	60
1.5	Anpassungsbedarf - Nutzung, Unterhaltung und Weiterentwicklung.....	61
<b>2</b>	<b>WBALMO: SOFTWARE ZUR SIMULATION WASSERWIRTSCHAFTLICHER PROZESSE IN FLUSSEINZUGSGEBIETEN.....</b>	<b>63</b>
2.1	Bestandsaufnahme – Funktionen .....	63
2.1.1	Anwendung und Zielstellung des WBalMo .....	63
2.1.2	Benutzeroberfläche zum Aufbau der Komponenten eines WBalMo Modells .....	63
2.1.3	Modellkomponenten.....	65
2.1.4	Featureoptionen .....	68
2.1.5	Navigations-Tools .....	69
2.2	Bestandsaufnahme – Nutzung, Unterhaltung und Weiterentwicklung .....	69
2.3	Anpassungsbedarf – Funktionen .....	70
2.3.1	Klimakomponente WBalMo-Ländermodell: Pflichtenheft .....	71
2.3.1.1	Zielstellung und Vorgehensweise .....	71
2.3.1.2	Anforderungsspezifikation.....	72
2.3.1.3	Implementierungsspezifikation.....	72
2.3.2	Integration in/ von externe/n Modelle/n.....	76
2.3.3	Erweiterung von Modellelementen um typische Parameter .....	77
2.4	Anpassungsbedarf - Nutzung, Unterhaltung und Weiterentwicklung.....	79
<b>3</b>	<b>QUELLENVERZEICHNIS.....</b>	<b>80</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Grundwasserabsenkung im Gebiet des WBalMo-Ländermodells für den Zeitraum 2020-2030 .....	18
Abbildung 2: Flutung (oben) und Nachsorge: Volumenströme vom/ zum Cottbuser Ostsee, berechnet von einem detaillierten Grundwasserströmungsmodell und einem reduzierten Grundwassermodell für den Zeiträume innerhalb der Parametrisierungszeitreihe und außerhalb (Validierung) unter Annahme der gleichen Oberflächenwasserbilanz einer Realisierung .....	22
Abbildung 3: Monatliche Absenkziele der SB Lohsa II und Bärwalde .....	25
Abbildung 4: Steuerung der Überleitung in den Dahme-Umflutkanal .....	28
Abbildung 5: Struktur der Sulfatmissionen und Sulfattranslationen (STM) des Sulfatprognosemoduls (DHI WASY, 2017) .....	30
Abbildung 6: Validierung der Sulfatprognose für das SB Lohsa II für die Jahre 2013-2015 (DHI WASY, 2017) .....	31
Abbildung 7: Validierung der Sulfatprognose für den Pegel Leibsch OP für die Jahre 2013-2015 (DHI WASY, 2017).....	31
Abbildung 8: Meteorologische Teilgebiete (MetTG) von SESIM08 und der Lausitzer Neiße .....	36
Abbildung 9: Simulationsteilgebiete (STG) im WBalMo-Ländermodell.....	37
Abbildung 10: Gegenüberstellung der Wassernutzungen und des Dargebotes für den Zeitraum 2020 – 2040 für den Längsschnitt der Spree für mittlere Abflussverhältnisse.....	38
Abbildung 11: Gegenüberstellung der Wassernutzungen und des Dargebotes für den Zeitraum 2070 – 2100 für den Längsschnitt der Spree für eine ausgeprägte Trockenphase.....	39
Abbildung 12: Entnahme- und Einleitungsmengen der Teichwirtschaften im Spreegebiet....	39
Abbildung 13: Exemplarische Darstellung der Nutzung, Unterhaltung und Weiterentwicklung des WBalMo-Ländermodells.....	41
Abbildung 14: Statistik der Realisierungen des RCP2.6 und RCP8.5-Szenarios aus dem MDK für die Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990: Temperaturänderung sowie Niederschlagsänderung im Sommer (JJA) und Winter (DJF), aus (Struve, et al., März 2020).....	44
Abbildung 15: Verwendung von Klimaprojektionen im WBalMo-Ländermodell .....	47
Abbildung 16: Prinzipschema der Erzeugung der meteorologischen und hydrologischen Eingangsdaten für das WBalMo-Ländermodell .....	48

Abbildung 17: Gegenüberstellung der beobachteten und simulierten Abflüsse am Pegel Bautzen Weite Bleiche / Spree .....	50
Abbildung 18 Gegenüberstellung der mittleren monatlichen Abflüsse (Jahr, Winter, Sommer) und der mittleren Jahresgänge am Pegel Bautzen WB / Spree (Kalibrierungs- und Validierungszeitraum) .....	51
Abbildung 19: Statistische Auswertung des N-Omega <sup>2</sup> -Kriteriums für 2 Verteilungstypen (BfG, 2013).....	52
Abbildung 20: Kolmogorov-Smirnov-Test p-Werte, ENS1, Niederschlag (BfG, 2013).....	52
Abbildung 21: Gliederung des Betrachtungszeitraums in Phasen .....	54
Abbildung 22: MQ der Pegel Borgsdorf und Havelberg Stadt sowie des Gesamtabflusses der Spree für den Status Quo bei den betrachteten Dargebotsszenarien auf Basis des Zeitraumes von 1951-2006 (BfG, 2013) .....	55
Abbildung 23: Übersichtskarte mit den zu betrachtenden 11 regionalen Grundwassermodellen (DHI WASY, 2015) .....	58
Abbildung 24: WBalMo-Benutzeroberfläche .....	64
Abbildung 25: Exemplarische Ergebnisse einer Registrierung Typ 1 – Sicherheiten für vordefinierte Durchflüsse eines Gewässerquerschnitts (oben), einer Registrierung Typ 3 - Mittelwerte, Standardabweichungen, Minima und Maxima von Durchflüssen eines Gewässerquerschnitts (mittig) und einer Registrierung Typ 5 - Durchflüsse der Perzentile (=Überschreitungswahrscheinlichkeit - ÜWK) einer Periode eines Gewässerquerschnitts (unten). .....	67
Abbildung 26: Zeitstruktur des WBalMo-Ländermodells .....	75

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Berechnung der maximal möglichen NWA-Abgabe (Startwert 20 Mio. m <sup>3</sup> ) ....	26
Tabelle 2:	Anwendung des WBalMo-Ländermodells für Untersuchungen zum Klimawandel .....	43

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erläuterung
AG Flussgebietsbewirtschaftung	Arbeitsgemeinschaft Flussgebietsbewirtschaftung
AK Wassermenge	Arbeitskreis Wassermenge
ArcView	Geoinformationssystem-Software des Unternehmens ESRI
ASCII	American Standard Code for Information Interchange, dient der Codierung von Zeichen im englischen Alphabet.
DOS	Disk Operating System, Betriebssystem
DYN-Element	dynamisches Plugin
ERLK	Erweiterte Restlochkette
FEFLOW	Programm zur Simulation des Grundwasserflusses, des Stoffübergangs und des Wärmeübergangs in porösen und gebrochenen Medien.
GLOWA Elbe	Forschungsprojekt zur Untersuchung der Wirkung des globalen Wandels auf den Wasserkreislauf
gGRML	Geohydraulisches Großraummodell Lausitz
GRMSTEU	Modell zur operativen Steuerung der Wasserbewirtschaftung in der Flutungszentrale Lausitz
gw	Grundwasserstrom
GWRA	Grubenwasserreinigungsanlage
HYRAS	Hydrometeorologische Rasterdaten des DWD
LBGR	Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg
LD Sachsen	Landesdirektion Sachsen
LEAG	Gemeinsames Unternehmen der Lausitz Energie Verwaltungs GmbH, Lausitz Energie Bergbau AG (kurz LE-B) und der Lausitz Energie Kraftwerke AG (kurz LE-K)
LfU Brandenburg	Landesamt für Umwelt ist eine Landesoberbehörde in Brandenburg
LfULG Sachsen	Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Sachsen
LMBV	Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH
LTV Sachsen	Landestalsperrenverwaltung Sachsen
MDK	Mitteldeutsches Kernensembles
MetTG	Meteorologische Teilgebiete
NHN	Normalhöhennull
NWA	Niedrigwasseraufhöhung
OP	Oberpegel
OpenMI	definiert Modell-Schnittstellen zum Austausch Memory-basierter Daten zur Laufzeit der Modelle
PEST	Softwarepaket zur automatisierten Kalibrierung und kalibrierungsbedingter Unsicherheitsanalyse numerischer Modelle
q	Durchfluss
RCP	representative concentration pathway (dt. repräsentativer Konzentrationsverlauf), Szenarien für den Verlauf der absoluten Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre

<b>Abkürzung</b>	<b>Erläuterung</b>
ReKIS	Regionales Klimainformationssystem
RLK	Restlochkette
SB	Speicherbecken
SESIM08	Dargebotsmodell zur stochastische Dargebotssimulation für das WBalMo-Ländermodell, erstellt 2008
SIKOSIMO	Programm zur stochastischen Analyse und Simulation
Spreetal NO	Spreetal Nordost
STG	Simulationsteilgebiete
STM	Sulfattranslationsmodul
SVN	Quellcodeverwaltungssystem Subversion
TS	Talsperre
UP	Unterpegel
ÜWK	Überschreitungswahrscheinlichkeit
WABI	Modell zur Wasserbilanzierung von staugeregelten Niederungen
WAV	Wasserstand-Flächen-Volumen-Beziehung
WBalMo	Water Balance Model, Wasserbewirtschaftungsmodell
WBalMo-Ländermodell	Wasserwirtschaftliches Großraummodell Spree/ Schwarze Elster/ Lausitzer Neiße
WEREX	auf den Freistaat Sachsen adaptierte Version des statistischen Regionalisierungsverfahrens WETTREG zur Erzeugung von regionalen Klimaprojektionen
WSA Berlin	Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Berlin
WSS Lohsa II	Wasserspeichersystem Lohsa II, bestehend aus den Speicherbecken Dreiweibern, Lohsa II und Burghammer
XML	Extensible Markup Language (dt. Erweiterbare Auszeichnungssprache), Auszeichnungssprache zur Darstellung hierarchisch strukturierter Daten



## Zusammenfassung

Das **WBalMo-Ländermodell** ist ein wasserwirtschaftliches Großraummodell der Flussgebiete Spree, Schwarze, Elster und Lausitzer Neiße. Seine Entstehung beginnt mit den wasserwirtschaftlichen Untersuchungen zum Ökologischen Sanierungs- und Entwicklungsplan Niederlausitz. Die Entwicklung und Nutzung wird durch den „Anwenderkreis WBalMo-Ländermodell“ der AG Flussgebietsbewirtschaftung fachlich begleitet.

Nach mehr als 25 Jahren Entwicklung zählt zu den Stärken des WBalMo-Ländermodells, dass für Prognosen bis zum Ende des Jahrhunderts alle relevanten wasserwirtschaftlichen Komponenten in den Flussgebieten der Spree, Schwarzen Elster und Lausitzer Neiße enthalten sind:

- Abflussbildung unter Berücksichtigung der Besonderheiten der bergbaulichen Grundwasserabsenkung und des Spreewalds,
- Wechselwirkung zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser in Speichern, Seen und Fließgewässern,
- Wasserentnahmen und -Einleitungen sowie Mindestabflüsse,
- Bewirtschaftung der Talsperren und Speicher sowie Überleitungen und Kanäle,
- Prognose der Sulfatkonzentration in Fließgewässern und Speichern sowie deren Bewirtschaftung nach Menge und Sulfat.

Im WBalMo-Ländermodell sind an 95 Fließgewässerelementen mit 262 Bilanzquerschnitten wasserwirtschaftliche Elemente in folgender Anzahl enthalten:

▪ Teileinzugsgebiete:	64
▪ Meteorologische Gebiete:	10
▪ Wasserentnahmen und -einleitungen:	ca. 200
▪ Talsperren und Speicher:	21
▪ Abgaberegeln für Talsperren und Speicher:	149
▪ Konstanten (Flächen, Porenvolumina, Flutungstermine, Überleitungskapazitäten, Grenzwasserstände etc.):	932
▪ DYN-Elemente (modellspezifische Plugin für Bewirtschaftungsregeln):	95
▪ Ergebnisindikatoren (Mittelwerte, Minima, Maxima, Perzentile, Wahrscheinlichkeiten):	166
▪ Sulfatmissionen:	75

Die Nutzung des WBalMo-Ländermodells erfolgt durch die maßgeblich auf die Wasserbewirtschaftung einflussnehmenden Behörden und Unternehmen in drei Bereichen:

- Behördliche Abstimmung der länderübergreifenden Bewirtschaftungsgrundsätze,
- Operative, wöchentliche länderübergreifende Steuerung mit dem GRMSTEU auf der Basis des WBalMo-Ländermodells,
- Gutachten zur großräumigen Bewertung von wasserwirtschaftlichen Planungen und geänderten Rahmenbedingungen.

Die Weiterentwicklung des WBalMo-Ländermodells soll in folgende Richtungen erfolgen:

- Integration einer Klimamethodik Ländermodell, die sowohl die Erweiterung des Referenzklimas als auch Klimaprojektionen umfasst,
- Modellierung des mit der Bewirtschaftung der Stau und Verteilerwehre verknüpften Wasserhaushalts des Spreewaldes,
- Aktualisierung der Hydrologie und Bewirtschaftung der Trinitz und Malxe.

Die erreichte Komplexität und Leistungsfähigkeit des WBalMo-Ländermodells haben aber auch eine Kehrseite:

- Der Aufwand für die Laufendhaltung ist groß und hängt von dem Arbeitsfortschritt vieler Beteiligten und dem Wissen voneinander ab,
- Die Nachvollziehbarkeit und Anwendungsbreite des WBalMo-Ländermodells sind geringer geworden. Ausreichend spezialisierte Bearbeiter, die die Akzeptanz und das Vertrauen in das WBalMo-Ländermodell stärken können, sind nicht mehr in allen Institutionen verfügbar, die über seine Nutzung und Weiterentwicklung mitentscheiden.

Die Planung der Laufendhaltung erfordert ein detailliertes und konkretes Wissen über den aktuellen Datenstand aller Komponenten des WBalMo-Ländermodells. Gegenwärtig werden in diesem Sinne die Eckdaten der Bergbaufolgeseen und die Versorgungsbilanzen der Kraftwerke durch die bergbauliche Wasserwirtschaft in einem mindestens jährlichen Rhythmus aktualisiert bzw. auf ihren Aktualisierungsbedarf geprüft. Dieses Vorgehen muss systematisch auf den gesamten Datenbestand ausgedehnt werden. Als Grundlage dafür sollte ein Kompendium WBalMo-Ländermodell aufgebaut werden, mit folgenden Inhalten:

- Gegenüberstellung der Bewirtschaftungsgrundsätze und der sie erfüllenden Modellkomponenten (Ranglistenelement, Abgaberegeln, DYN-Element) mit Funktionsbeschreibung,
- Wissensdatenbank zur Bewertung der wasserwirtschaftlichen Verhältnisse auf der Basis von mit dem WBalMo-Ländermodell erstellten Gutachten,
- Ergebnishistorie der Varianten des WBalMo-Ländermodells,
- Bearbeitungs- und Funktionshistorie der Modellkomponenten,
- Kalibrierungs- und Validierungsnachweise von Modellkomponenten.

Zur Nachvollziehbarkeit des WBalMo-Ländermodells kann neben dem Kompendium auch ein internetbasiertes Repository der DYN-Elemente (Plugins) beitragen, auf das ausgewählte Anwender Zugriff erhalten.

Die umrissene breitere Zusammenarbeit setzt Vereinbarungen zwischen den Beteiligten voraus, die die Nutzung, Unterhaltung und Weiterentwicklung des WBalMo-Ländermodells regeln. Darüber hinaus wird aufgrund der Vielfalt der in das WBalMo-Ländermodell integrierten fachlichen Belange und die damit verbundene Komplexität seiner Weiterentwicklung empfohlen, diese Arbeiten extern in einem Rhythmus von 2 bis 5 Jahren zu evaluieren. Dafür wäre eine Universität zu empfehlen, deren Fachlehrstühle einerseits mit Monte-Carlo-Methoden und Wasserbewirtschaftung befasst sowie andererseits grundlegend mit Softwareentwicklung vertraut sind.

Die **Software WBalMo** wird seit 1992 durch die WASY GmbH und ihre Nachfolgerin DHI WASY GmbH vertrieben, lizenziert und entwickelt. Zunächst als PC-GRM unter Microsoft DOS verfügbar, wurde mit der Entwicklung des WBalMo 4 das Programmsystem von Fremdsoftware unabhängig. Es basiert auf der in Microsoft Windows enthaltenen .NET Bibliothek. Die jahrzehntelange Anwendung des WBalMo der aktuellen Versionen 4.x zeigt, dass es sich um eine robuste, valide und moderne Software handelt.

Das Design der Software WBalMo folgt dem Prinzip, über die Benutzeroberfläche die wesentliche Funktionalität für Flussgebietsmodelle zur Verfügung zu stellen und bietet mit den DYN-Elementen eine flexible Schnittstelle an, mit der sich nahezu jedes Bewirtschaftungsproblem und dafür erforderliche Modellmodule integrieren lassen. Dieses Prinzip vereint eine einfach zu nutzende Software mit nahezu unbegrenzter Erweiterbarkeit.

Eine hohe Komplexität der Bewirtschaftung des Flussgebietes:

- zeitliche variierende komplexe Bewirtschaftungsregeln von Speicher- und Überleitungssystemen,
- vom Oberlieger-Unterlieger-Prinzip abweichende Wasserbereitstellung insbesondere aus Speichern,
- Grundwasserwechselwirkung der Fließgewässer und Speicher,
- Staubewirtschaftung sowie
- verknüpfte Bewirtschaftung nach Menge- und Sulfat

hat dazu geführt, dass die Analyse, Anpassung, Szenariobildung und Auswertung des Modells in Bezug auf die abgebildete Wasserbewirtschaftung nur noch zum geringen Teil über die Benutzeroberfläche und zum größeren Teil über die DYN-Elemente erfolgt. Dies erschwert die Nachvollziehbarkeit und Anwendungsbreite eines solchen Modells.

Deshalb wird die Übertragung von ausgewählten, spezifisch für das WBalMo-Ländermodell bereits erfolgten oder geplanten Modellbausteinen aus den DYN-Elementen (Plugins) in die Benutzeroberfläche vorgeschlagen. Zugleich sollte die Integration von Modellbausteinen als externes Modul wie auch umgekehrt die Integration in andere Softwaresysteme erweitert und vereinfacht werden.

Im Einzelnen werden folgende Entwicklungen vorgeschlagen:

- Parallelisierung der Simulation der Realisierungen, um mit einer hohen Anzahl von Realisierungen bei praktikabler Rechenzeit eine sichere Ermittlung von Niedrigwasserkennwerten extremer Situationen zu gewährleisten,
- Erweiterungen der Modellelemente Speicher und Speicherabgaben um typische Parameter,
- Erweiterung um Modellelemente Restsee, Teichwirtschaft, Staubereich, Sulfatemission und Immissionsrichtwert,
- Migration des WBalMo-Ländermodells zur Anpassung an die genannten Entwicklungen.

Diese Entwicklungen werden zu einer deutlichen Reduzierung und Vereinfachung der DYN-Elemente (Plugins) des WBalMo-Ländermodells führen und damit dessen Nachvollziehbarkeit und seine Anwendungsbreite erhöhen.

Zur Organisation und Finanzierung dieser spezifisch für das WBalMo-Ländermodell erforderlichen Arbeiten erscheint es angemessen, die Weiterentwicklung der WBalMo Software auf die Anwender des WBalMo-Ländermodells zu erweitern. Diese Option würde einschließen, dass DHI WASY als Besitzer der Software WBalMo mit der AG Flussgebietsbewirtschaftung Spree / Schwarze Elster oder einer von ihr beauftragten Institution die weitere Nutzung, Weitergabe und Weiterentwicklung regelt. Denkbar wäre hier eine Vereinbarung, nach der DHI WASY den Quellcode der WBalMo Software gegenüber der AG Flussgebietsbewirtschaftung offenlegt und die AG Flussgebietsbewirtschaftung mit einer dauerhaft kostenfreien Lizenz für den Einsatz der Software ausstattet. Für die Weiterentwicklung sollte festgelegt werden, unter welchen Bedingungen, z. B. der Eingrenzung des Zwecks durch eine Leistungsbeschreibung, die Weitergabe des Quellcodes an Dritte möglich ist. Die praktische Realisierung der Weiterentwicklung könnte beispielsweise mittels des aktuellen, auf dem Quellcodeverwaltungssystem Subversion (SVN) basierenden Repository der DHI WASY erfolgen.

Mit der Umsetzung eines solchen Betreibermodells müsste eine Entwicklungsgemeinschaft WBalMo beauftragt werden. Ihre Zusammensetzung würde auf Vorschlag des Anwenderkreises WBalMo-Ländermodell durch die AG Flussgebietsbewirtschaftung bestätigt. Dieser Entwicklungsgemeinschaft WBalMo könnte beratend eine Universität angehören, deren Fachlehrstühle einerseits mit Monte-Carlo-Methoden und Wasserbewirtschaftung befasst sowie andererseits grundlegend mit Softwareentwicklung vertraut sind. Sie könnte die Arbeit der Entwicklungsgemeinschaft WBalMo in einem Rhythmus von 2 bis 5 Jahren evaluieren.

Die vorgeschlagenen Weiterentwicklungen des WBalMo-Ländermodells und der Software WBalMo weisen Abhängigkeiten auf. Darüber hinaus kann ihnen ein unterschiedlicher Stellenwert für die wasserwirtschaftliche Bewertung des Kohleausstiegs zugeschrieben werden. Unter Berücksichtigung dieser Gesichtspunkte wird nachfolgend eine **Zeitplanung** der Weiterentwicklungen hinsichtlich Aufeinanderfolge und Dauer vorgeschlagen. Sie soll als Startpunkt einer Diskussion zu Priorisierung, Ableitung von Abhängigkeiten wie Synergien von Teilarbeiten dienen.

Quartal Jahr	I 22	II 22	III 22	IV 22	I 23	II 23	III 23	IV 23	I 24	II 24	III 24	IV 24	I 25	II 25	III 25	IV 25	...
Finanzierung																	
Leistungs- beschreibung																	
Vergabe																	
Fachliche Begleitung																	
<b>WBalMo- Ländermodell</b>																	
Integration Klimamethodik Referenzklima																	
Integration Klimamethodik Klimaprojektionen																	
Wasserhaushalt und Bewirtschaftung des Spreewaldes																	
Hydrologie und Bewirtschaftung der oberen Traritz und Malxe																	
Aktualisierung und Standardisierung DYN-Elemente																	
Schnittstellen zu bzw. Migration von GRMSTEU, Wasserhaushalts- modellen, Grundwasser- modellen																	
Kompodium WBalMo- Ländermodell Teil Bewirtschaftungs- grundsätze																	
Kompodium WBalMo- Ländermodell Teil Wissensdatenbank Ergebnisse, Historie & Nachweise																	

Quartal Jahr	I 22	II 22	III 22	IV 22	I 23	II 23	III 23	IV 23	I 24	II 24	III 24	IV 24	I 25	II 25	III 25	IV 25	...
<b>WBalMo- Software</b>																	
Einrichtung Entwicklungs- gemeinschaft WBalMo																	
WBalMo: Parallelisierung																	
WBalMo: Modellelemente																	
Migration Ländermodell für Parallelisierung und Modellelemente																	

## **1 WBalMo-Ländermodell: Wasserwirtschaftliches Großraummodell Spree/ Schwarze Elster/ Lausitzer Neiße**

Die Entstehung des WBalMo-Ländermodells beginnt mit den wasserwirtschaftlichen Untersuchungen (Kaden, Schramm, Fröhlich, & Pietschmann, 1993) zum Ökologischen Sanierungs- und Entwicklungsplan Niederlausitz (Dornier GmbH, 1993). Grundlagen standen aus Vorarbeiten zur Abflusssimulation (Schramm, Glos, & Jahnke, 1984) und zu Nutzungs- und Bewirtschaftungsdaten (Jahnke, Glos, & Krippendorf, 1984) zur Verfügung. Zu den Aktualisierungen und Erweiterungen bis zum Pegel Große Tränke/ Spree trug maßgeblich die Außenstelle Cottbus des damaligen Landesumweltamtes Brandenburg bei. Das Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg beauftragte im Anschluss die Verifizierung des WBalMo-Ländermodells anhand der Nutzungsverhältnisse der Jahre 1988 – 1992 (WASY, 1993) und legte damit den Grundstein für seine Anwendung als maßgebendes Planungs- und Entscheidungsinstrument der Flussgebietsbewirtschaftung (AG FGB, 2019). Daran schloss sich 1998 der Beginn der Nutzung des WBalMo-Ländermodells als Teil der operativen Steuerung mit dem GRMSTEU in der Flutungszentrale Lausitz an. Im Jahr 2016 wurde im Auftrag des Landesamtes für Bergbau, Geologie und Rohstoffe des Landes Brandenburg, kofinanziert durch die Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt des Landes Berlin und das Landesamt für Umwelt des Landes Brandenburg, ein Sulfatprognosemodul ergänzt (DHI WASY, 2017).

Die Entwicklung und Nutzung des WBalMo-Ländermodells wird durch den Anwenderkreis WBalMo-Ländermodell der AG Flussgebietsbewirtschaftung fachlich begleitet. Seine Nutzung basiert auf der Abbildung der Bewirtschaftungsgrundsätze (AG FGB, 2019) und erfolgt daher durch die maßgeblich auf die Wasserbewirtschaftung einflussnehmenden Behörden und Unternehmen. Beispiele hierfür sind Gutachten zum Cottbuser Ostsee (WASY et al., 1998) und (DHI WASY, 2013b), zu den Immissionsrichtwerten für Sulfat (DHI WASY, 2019a), zum Rahmenbetriebsplan Nochten (DHI WASY, 2013a) und zum Bedarf an Zuschusswasser aus den sächsischen Talsperren (DHI WASY, 2021).

In den folgenden beiden Abschnitten werden die Funktionen des WBalMo-Ländermodells und die zu ihrer Umsetzung enthaltenen Daten dargestellt. In Abgrenzung hierzu berichtet das Kapitel 2 zur Software WBalMo.

## **1.1 Bestandsaufnahme – Funktionen**

### **1.1.1 Abflussbildung unter Berücksichtigung der bergbaulichen Grundwasserabsenkung und im Spreewald**

#### **Abflussbildung und Grundwasserabsenkung**

Risikoanalysen mit dem WBalMo-Ländermodell erfolgen nach dem Prinzip der Monte-Carlo-Methode. Dafür müssen die Eingangszeitreihen, insbesondere des Durchflusses an den Fließgewässerquerschnitten, einen im statistischen Sinne großen Umfang aufweisen. Diese Anforderungen können von Messdaten nicht erfüllt werden. Deshalb werden die Eingangsdaten für die Abflusssimulation, Zeitreihen des Niederschlags und der potenziellen Verdunstung von stochastischen Modellen erzeugt. Die dafür erforderlichen statistisch-mathematischen Analysen der Messdaten sind in der Software SIKOSIMO (DHI WASY, 2001) umgesetzt. Für den Simulationszeitraum des WBalMo-Ländermodells von 100 Jahren (2003 bis 2102) werden 10.000 Jahre monatlicher Daten stochastisch erzeugt, die somit 100 Dargebotsszenarien (=Realisierungen) des Simulationszeitraums ergeben. Die erzeugten Daten sind sowohl quantitativ als auch hinsichtlich ihrer räumlichen und Autokorrelation mit den gemessenen statistisch identisch. Darüber hinaus sind extremere Ereignisse, besonders Niedrigwassersituationen, in Bezug auf Dauer und Ausprägung enthalten.

Die Witterungsdaten sind im WBalMo-Ländermodell in 18 Teilgebiete strukturiert worden, für die 36 stochastische Modelle vorliegen. Ihre Parametrisierung erfolgte auf der Basis von gemessenen Daten des DWD für die Einzugsgebiete der Spree und Schwarzen Elster von 1951 bis 2006. Für das Gebiet der Lausitzer Neiße, die teilweise auf tschechischem und polnischem Staatsgebiet liegt, konnten Reihen für die 21 Kalenderjahre 1986 - 2006 verwendet werden. Aufgrund der unterschiedlichen Reihenlänge konnte kein stochastisches Modell gemeinsam für alle Flussgebiete aufgestellt werden. Stattdessen wurde für die Witterung im Gebiet der Lausitzer Neiße ein eigenes Modell parametrisiert, zu dessen Eingangsdaten die Witterung in zwei Teilgebieten der Spree gehört. Die Simulation erfolgte dann auf der Basis der bereits erzeugten Daten für die Spree. Dafür kommt das Werkzeug SIMO-S zum Einsatz, das eine abgerüstete Variante des SIKOSIMO darstellt.

Im Ergebnis liegen für die meteorologischen Teilgebiete in der Spree, Schwarzen Elster und der Lausitzer Neiße Reihen des Niederschlags und der potenziellen Verdunstung mit einer Reihenlänge von je 10 000 Jahren vor (100 Realisierungen mit 100 Jahren). Die Abflussdaten der Teileinzugsgebiete werden durch einen Komplex von 64 Niederschlag-Abfluss-Modellen erzeugt, auf der Basis von MIKE NAM (DHI, 2020) für das Neißengebiet und NAM-EGMO (Glos, 1984) für alle anderen Teileinzugsgebiete. Dafür wurden insgesamt 32 Parametersätze für das gesamte Modellgebiet kalibriert.

Der Einfluss der bergbaulichen Grundwasserabsenkung (Abbildung 1) auf den Abfluss im Gewässer wird in der Fläche von den Niederschlag-Abfluss-Modellen und im Gewässerlauf vom WBalMo-Ländermodell berücksichtigt. In den Niederschlag-Abfluss-Modellen wird die Grundwasserabsenkung mit zwei Methoden einbezogen: Entweder es wird die gesamte Fläche des Teileinzugsgebietes angesetzt bei prozentualer Abminderung des



hypodermischen und des Basisabflusses in Übereinstimmung mit dem Flächenanteil der Grundwasserabsenkung oder es wird nur die abflusswirksame Fläche eingesetzt ohne prozentuale Abminderung. Die erste Methode ist der „klassische“ Ansatz für das WBalMo-Ländermodell, der besser für Gebiete mit dominanter Kreislaufführung aus Grundwasserneubildung und Grundwasserhebung geeignet ist. Die zweite Methode wurde seit ca. 2010 bei jeder Neubearbeitung eines Teileinzugsgebietes angewandt, da sie besser für Gebiete mit dominantem Grundwasserwiederanstieg geeignet ist. Abfluss, der aus einem Gebiet der Abflussbildung in einem benachbarten Teilgebiet in der Vorflut wirksam wird, kann mit den Anteilsfaktoren den Fließgewässerabschnitten im WBalMo-Ländermodell lagerichtig zugeordnet werden. Dazu gehört auch die Veränderung der Entwässerung des oberirdischen Einzugsgebietes durch Bergbaufolgeseen, da sie Strömungssenken bilden und über in der Regel feste Auslaufbauwerke in die Vorflut ausleiten. Dazu wird im WBalMo-Ländermodell eine kontinuierliche Bilanz aus Niederschlag und Verdunstung von der Seefläche berechnet und beim Überschreiten des Wasserstandes am Auslaufbauwerk ein Vorflutbeitrag berechnet. Die Größe der Eigeneinzugsgebiete der Bergbaufolgeseen wird aus den Prognosen für die Grundwasserströmung abgeleitet.

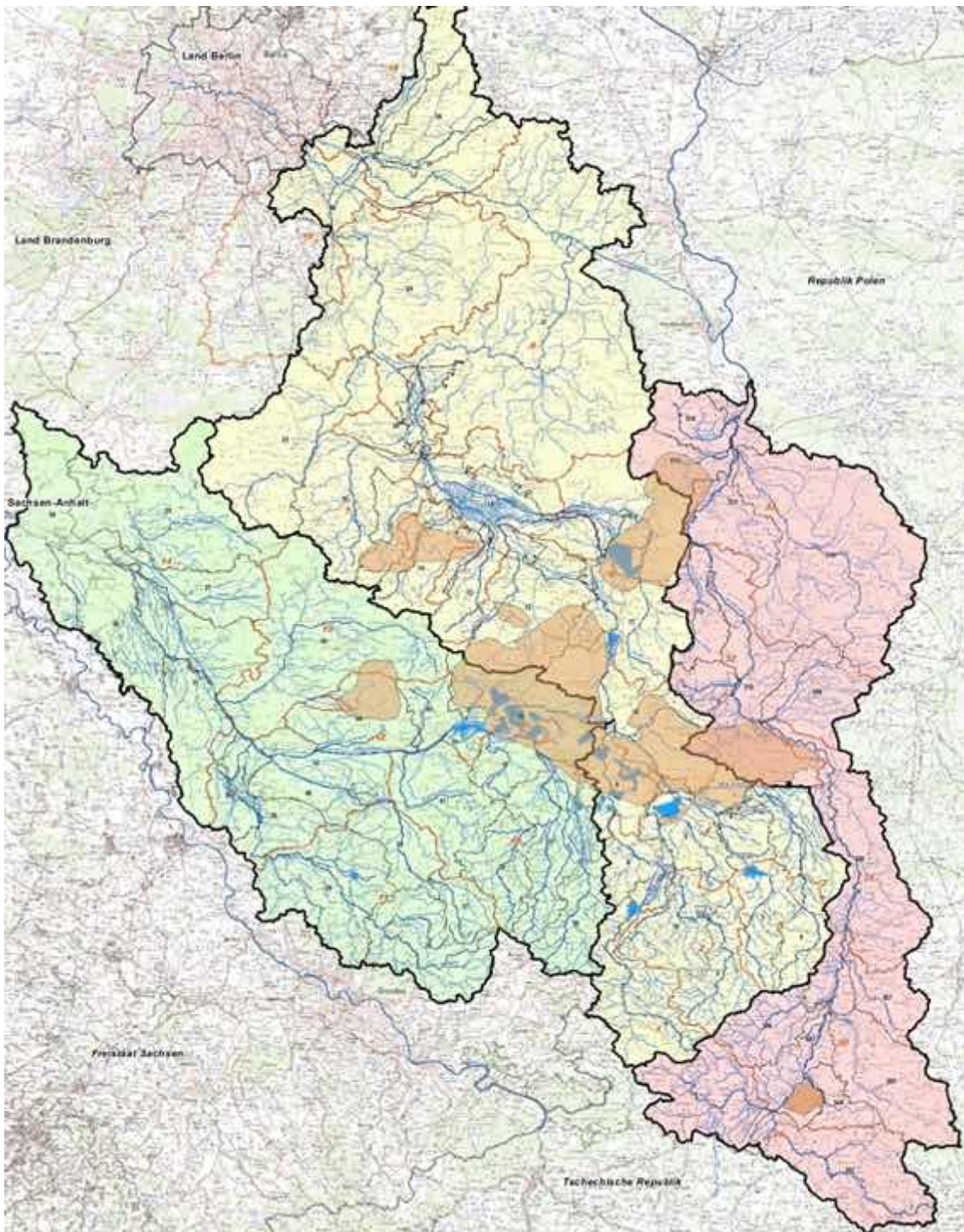


Abbildung 1: Grundwasserabsenkung im Gebiet des WBaMo-Ländermodells für den Zeitraum 2020-2030

Die Anteilsfaktoren des WBalMo-Ländermodells dienen darüber hinaus dazu, gedichtete oder Fließgewässerabschnitte ohne Grundwasseranschluss von der Abflusskonzentration auszuschließen.

Da sich Grundwasserabsenkung und mit ihr die Abflussbildung nach Lage und Zeit verändern, werden auch die Anteilsfaktoren des WBalMo-Ländermodells zeitabhängig über den Prognosezeitraum angepasst. Dies trifft ebenfalls auf die Niederschlag-Abfluss-Modelle zu: für die erste Methode wird die Abminderung angepasst, für die zweite Methode die abflusswirksame Fläche. Dies erfolgt durch zyklische Wechsel der Parametersätze.

Ergänzend sei noch angemerkt, dass in Fließgewässerabschnitten ohne Grundwasseranschluss die Versickerung im Grundwasserabsenkungsbereich über entsprechende absolute Verlustgrößen berücksichtigt ist. Zum Teil sind sie zeitveränderlich oder werden über einfache Modelle durchfluss-(wasserstands-)abhängig ermittelt.

Abschließend noch der Hinweis, dass die Berücksichtigung vielfältiger Kreislaufeffekte nicht durch eine geschlossene Modellierung der beteiligten Prozesse erreicht werden kann, sondern das Schließen der Bilanz im WBalMo-Ländermodell durch die Einbeziehung des diffusen Zustroms zu Gewässerabschnitten, die Versickerung aus Tagebauseen sowie die Sumpfungswassereinleitungen annähernd erreicht wird.

### **Abflussbildung und Verlegung von Gewässern**

Mit der Entstehung des Cottbuser Ostsees und dem zukünftigen (Wieder-)Anschluss der alten bzw. neugestalteten Gewässerläufe von oberer Trinitz und Malxe gehen auch Änderungen der Einzugsgebietsgrößen und der Zuordnung zu Fließgewässerabschnitten einher. Diese Änderungen werden in gleicher Weise wie für die Grundwasserabsenkung modelliert:

- über die Dynamik von Einzugsgebietsgrößen in den Niederschlag-Abfluss-Modellen und
- die Umverteilung der Zuordnung des Abflusses zu Fließgewässerabschnitten über die Anteilsfaktoren im WBalMo-Ländermodell.

### **Abflussbildung im Spreewald**

Der Einfluss des Spreewaldes auf die Veränderung des Durchflusses der Spree ist überwiegend auf die komplexe Bewirtschaftung der Staugürtel und auf den besonderen hydrologischen Charakter als Niederungsgebiet, hier insbesondere die Verdunstungsverluste, zurückzuführen. Ihre modellseitige Darstellung wird durch die Verknüpfung beider Prozesse über die Flurabstände besonders erschwert. Der Ansatz des WBalMo-Ländermodells geht davon aus, dass die Summe beider Prozesse entscheidend durch:

- die Zuflüsse über die Hauptsprees und die Malxe,
- den Umfang der Nebenflüsse der Spree südlich des Spreewaldes und
- die meteorologischen Bedingungen

gesteuert wird. Aus diesen Eingangsdaten wurde im Projekt GLOWA Elbe mit einem speziellen Modell für Staubewirtschaftung in einem separaten WBalMo Spreewald eine Datenbank mit dem dazugehörigen Dargebot bzw. Verlust des Spreewaldes erzeugt. Im WBalMo-Ländermodell wird mit den jeweils für den Zeitschritt gültigen Eingangsdaten für

jeden Datensatz eine in Bezug auf die Eingangsdaten gewichtete Abweichung berechnet und das Dargebot des „besten“ angesetzt. Die Gewichte der Eingangsdaten wurden anhand der Simulationsgüte aus Messdaten bestimmt.

### **1.1.2 Wechselwirkung zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser**

Der Einfluss des Grundwassers auf Fließ- und Standgewässer wird im WBalMo-Ländermodell in Bezug auf drei Bestandteile des wasserwirtschaftlichen Systems in den Flussgebieten der Spree, Schwarzen Elster und Lausitzer Neiße integriert:

(1) In Bezug auf die Abflusswirksamkeit in hydrologischen Teileinzugsgebieten durch folgende Funktionen:

- Reduktion der Abflussbildung im Absenkungsbereich,
- Zeitvariable Aufteilung des Abflusses auf Aussagequerschnitte entsprechend den abflusswirksamen Gewässerabschnitten,
- Wirksamkeit von Abflussbildung in Richtung von Tagebauseen,
- Versickerung aus Gewässern und Tagebauseen,
- Diffuser Zustrom zu Gewässerabschnitten,
- Grubenwassereinleitung.

Diese Funktionen sind im Abschnitt 1.1.1, Abflussbildung unter Berücksichtigung der bergbaulichen Grundwasserabsenkung und im Spreewald, beschrieben.

(2) In Bezug auf Bergbaufolgeseen als Speicher durch reduzierte Grundwassermodelle mit spezifischen Ansätzen:

- Bereichsspezifische Hysterese-Modelle für SB Lohsa II und SB Burghammer mit Sulfatkonzentrationen,
- Zeitvariable und wasserstandsabhängige Austauschmengen für das SB Bärwalde,
- Zeitvariable Austauschmengen mit Berücksichtigung der benachbarten Seen für den Komplex Erweiterte Restlochkette,
- Mehrfachregressionsmodelle bis und nach Flutungsende für den Cottbuser Ostsee.

Diese Funktionen greifen auf detaillierte Modellierungen zurück, z. B. zu Hysterese-Modellen in (IWB, 2014) und (DHI WASY, 2017), zum Komplex Restlochkette in (GUB, 2017) und zum Cottbuser Ostsee in (DHI WASY, 2013b). Grundsätzlich ist eine direkte Kopplung detaillierter Grundwassermodelle nicht praktikabel, die unterschiedliche Modellmethodik und insbesondere die Zeitschrittsteuerung im Vergleich zum WBalMo-Ländermodell erfordern komplexe Schnittstellen und führen zu inakzeptablen Rechenzeiten. Deshalb werden vereinfachte, reduzierte Grundwassermodelle im WBalMo-Ländermodell verwendet.

Zum Beispiel wurden für den Cottbuser Ostsee zwei multiple Regressionsmodelle entwickelt. Die beiden Modelle weisen eine unterschiedliche Gleichungsstruktur auf, die den Spezifika der Flutungs- und Nachsorgephase angepasst ist. Für die Flutung wird zum einen der Grundwasserzustrom im Rahmen des natürlichen großräumigen Grundwasserwiederanstiegs

erfasst, damit der Anstieg des Beckenwasserstandes auch ohne Flutung gewährleistet ist. Zum anderen wird ein lokaler Grundwasserzu- bzw. -abstrom berücksichtigt, der infolge der Differenz zwischen Beckenwasserstand bei natürlichem Wiederanstieg und bei Flutung sowie infolge der Speicherwirkung im seenahen Porenraum variiert. In der Nachsorge entfällt die Berücksichtigung der Differenz zwischen Beckenwasserstand bei natürlichem Wiederanstieg und bei Flutung. Die Parametrisierung des reduzierten Modells für den Cottbuser Ostsee erfolgte mit den Ergebnissen eines detaillierten Grundwassermodells auf der Basis von FEFLOW. Abbildung 2 zeigt die mit dem reduzierten Modell erreichbare Genauigkeit.

(3) In Bezug auf Bergbaufolgeseen ohne Speicherfunktion durch Bilanzkomponenten:

- Flutung: Aufzufüllender Porenraum,
- Nach Flutungsende: kumulierte Grundwasserbilanz.

Für Bergbaufolgeseen ohne Speicherfunktion muss berücksichtigt werden, dass ein Teil des eingeleiteten Flutungswassers in den Porenraum versickert, wenn der Wasserspiegel im See über dem großräumig erreichten Grundwasserstand liegt. Damit spielt auch die Flutungsgeschwindigkeit eine Rolle, da sie über die genannte Wasserstandsdifferenz entscheidet. Im WBalMo-Ländermodell wird dieser Abstrom als aufzufüllender Porenraum erfasst. Für einige der Bergbaufolgeseen wurde er durch wenige Iterationen zwischen dem WBalMo-Ländermodell und einem detaillierten Grundwasserströmungsmodell ermittelt: Unter Annahme einer mittleren Flutungsrate aus dem WBalMo-Ländermodell wird mit dem Grundwassermodell die bis zum Flutungsende kumulativ in den See eingeleitete Wassermenge berechnet. Der gesuchte Porenraum ergibt sich aus der Differenz der eingeleiteten Flutungswassermenge und dem Seevolumen. Die Wechselwirkung wird über Iterationen berücksichtigt.

Im WBalMo-Ländermodell ist bei Flutungsende sowohl der Porenraum als auch das Seevolumen gefüllt. Aus den 100 Dargebotsszenarien (siehe 1.1.1, Abflussbildung unter Berücksichtigung der bergbaulichen Grundwasserabsenkung und im Spreewald) ergeben sich 100 verschiedene Flutungsdauern, so dass für verschiedene Risikoniveaus das Flutungsende angegeben werden kann.

Ergänzend sei an dieser Stelle angemerkt, dass für die Prognose der Flutungsdauern neben den Kapazitäten der Flutungsanlagen auch temporäre, geotechnisch bedingte Grenzwasserstände vorgegeben werden können. Sie führen zu einem zeitweiligen Aussetzen der Flutung.

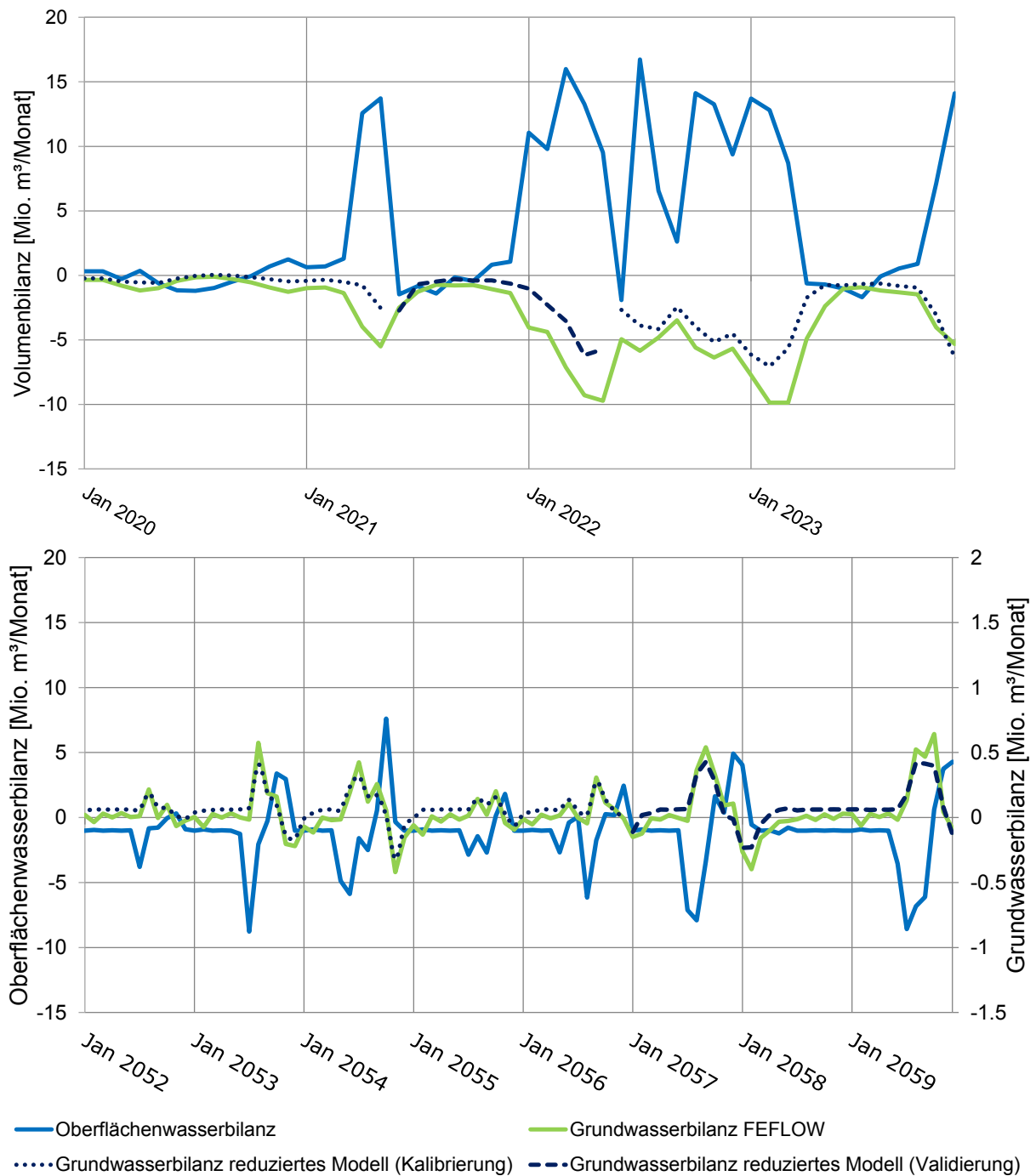


Abbildung 2: Flutung (oben) und Nachsorge: Volumenströme vom/ zum Cottbuser Ostsee, berechnet von einem detaillierten Grundwasserströmungsmodell und einem reduzierten Grundwassermodell für den Zeiträume innerhalb der Parametrisierungszeitreihe und außerhalb (Validierung) unter Annahme der gleichen Oberflächenwasserbilanz einer Realisierung

### 1.1.3 Wasserentnahmen und -Einleitungen

Zur Bewirtschaftung werden im Modellgebiet ca. 200 Nutzungen berücksichtigt:

Entnahmen durch Industrie, Gewerbenutzer, Tagebaurestgewässer (ca. 110 Nutzungen):

- Wasserwerke,
- Brauchwasser für Kraftwerke,
- Industrie,
- Teichwirtschaften,
- Landwirtschaftliche Beregnung,
- Flutungswasser.

Einleitungen (ca. 30 Nutzungen):

- Sumpfungswasser,
- Kläranlagen,
- Ausleitungen aus Tagebaurestgewässern.

Sonstige Nutzungen (ca. 65):

- ökologische Mindestdurchflüsse,
- nutzungsbedingte Mindestdurchflüsse,
- Überleitungen.

Entsprechend der Zeitstruktur des WBalMo-Ländermodells (Abschnitt 1.2.1, Überblick zu den Daten) wird die zeitliche Dynamik eines Großteils dieser Daten hinterlegt. Für die Abbildung typischer Verbrauchsmuster realisiert die Bilanzierung intern zwei Funktionen:

- Die in einem Modellelement verknüpften Entnahmen und Einleitungen bleiben stets im gleichen Verhältnis zueinander (z. B. für die Entnahme und Wiedereinleitung von Prozesswasser in der Industrie). D. h., dass die Wiedereinleitung in dem gleichen Verhältnis reduziert wird, wie die Wasserbereitstellung für die Entnahme im Defizitfall verringert wurde,
- Übersteigt in einem Modellelement die Einleitung die Entnahme, wird nur die Einleitung und nur in dem Umfang bilanziert, in dem sie die Entnahme übersteigt.

Bei der Bilanzierung der Teichwirtschaften ist letztere Funktion nicht gewünscht, da das Bespannen und Ablassen der Teiche nicht in einem unmittelbaren zeitlichen Zusammenhang stehen. Daher werden Entnahme und Einleitung in getrennten Modellelementen verwaltet. Dies ist besonders bei der Verwendung des WBalMo-Ländermodells für die operative Steuerung im GRMSTEU wesentlich, da hierbei durch operativ veränderte Vorgaben die Größenverhältnisse zwischen Entnahme und Einleitung auch von denen im Modell vorgegebenen abweichen können.

Die Eingriffe der zahlreichen Teichwirtschaften in das natürliche Abflussregime der Spree und der Schwarzen Elster nehmen nicht zu vernachlässigende Größen an, was vor allem auf die Phasen der Anspannung und der Entleerung der Teiche zutrifft. Als Hilfsmittel zur Aktualisierung der Daten der Teichwirtschaften wurde das so genannte Bifi-Programm entwickelt. Dieses Programm arbeitet auf Tagesbasis und berücksichtigt alle Teiche in den Einzugsgebieten der Spree und der Schwarzen Elster. Das Programm hat folgende Aufgaben:

- Speichern von Stammdaten wie Anzahl, Fläche und Tiefe der Teiche, Entnahme- oder Rückleitungsprofil der Teichwirtschaft,

- Erfassung der vorgesehenen Termine für Anfang und Ende des Bespannens und des Ablassens der Teiche,
- Berechnung der Entnahme- oder Rückleitungsmengen,
- Export der Daten zu Entnahmen, Rückleitungen und Flächen für die im WBalMo-Ländermodell definierten Nutzer in das Flutungssteuerungsmodell GRMSTEU.

Insgesamt werden 56 Teiche/ Teichgruppen berücksichtigt, wobei 45 im sächsischen Teil des Untersuchungsgebietes und 11 im brandenburgischen Bereich liegen.

Die Wasserbereitstellung wird in den Flussgebieten der Spree, Schwarzen Elster und Neiße häufig nicht nach dem Oberlieger-Untерlieger-Prinzip, sondern durch eine davon unabhängige Rangfolge geregelt (AG FGB, 2019). Eine Wasserentnahme ist für einen rangniederen Nutzer nur in dem Fall möglich, solange flussabwärts liegende, ranghöhere Nutzer ihren Wasserbedarf decken können. Im WBalMo-Ländermodell erfolgt die Umsetzung der Nutzerhierarchie mit Hilfe von Rangzahlen. Die Bilanzierung erfolgt dann in dieser Reihenfolge, so dass kleine Rangzahlen eine höhere Priorität der Wasserbereitstellung sichern. Dieses Prinzip gilt auch für Mindestdurchflüsse: Wassernutzer im Oberlauf können nur so lange Wasser entnehmen, solange der Mindestdurchfluss nicht unterschritten wird. Damit wird die Forderung der Bewirtschaftungsgrundsätze (AG FGB, 2019) umgesetzt, dass die Flutung der Bergbaufolgeseen die niedrigste Priorität hat.

#### **1.1.4 Bewirtschaftung der Talsperren und Speicher**

Von herausragender Bedeutung für die Wasserbewirtschaftung im Spree- und Schwarze-Elster-Gebiet sind die Talsperren und Speicher. Im WBalMo-Ländermodell werden alle für die Bewirtschaftung und Steuerung relevanten Talsperren und Speicher berücksichtigt:

- Spreegebiet: 6 Talsperren, Speicherbecken und Speichersysteme mit einem Gesamtstauraum von ca. 141 Mio. m<sup>3</sup>,
- Schwarze Elster: 6 Talsperren, Speicherbecken und Speichersysteme mit einem Gesamtstauraum von ca. 64 Mio. m<sup>3</sup>,
- Lausitzer Neiße: 3 Talsperren mit einem Gesamtstauraum von 8 Mio. m<sup>3</sup>.

Die genannten Zahlen stellen das speicherwirtschaftliche Potential dar, das durch Beschränkungen aus güterwirtschaftlicher, geotechnischer und Hochwassersicht jedoch nur zu Teilen nutzbar ist. Die in diesem Rahmen stattfindende Bewirtschaftung unterliegt weiteren Regelungen. Sie werden im WBalMo-Ländermodell durch folgende Funktionen realisiert, von denen einige anschließend erläutert werden:

- Monatlich spezifische und zeitabhängige Absenk- und Stauziele,
- Zeitversetzte Größe des Betriebsraumes, um bspw. im Winter einen größeren Hochwasserrückhalteraum und im Sommer einen größeren Speicherinhalt bereitzustellen. Derartige Regelungen sind für die TS Spremberg und das SB Knappenrode enthalten.
- Verbundbewirtschaftung zur gleichmäßigen Lastverteilung,
- Prognose der Betriebsbereitschaft neuer Speicher und Einhaltung der Probestauphase,



- Monatlich spezifische Bewirtschaftung des Kontingents zur bedarfsorientierten Niedrigwasseraufhöhung (NWA) unter Einhaltung der jährlichen Maximalmenge,
- Sulfatsteuerung der Abgaben aus dem WSS Lohsa II in Bezug auf den Immissionsrichtwert am Pegel Spremberg-Wilhelmsthal auf der Grundlage der im WBalMo-Ländermodell dynamisch prognostizierten Sulfatkonzentrationen im SB Burghammer und am Querschnitt Spremberg-Wilhelmsthal,
- Sulfatrückhalt im Schlabendorfer See und optional im Cottbuser Ostsee in Bezug auf den Immissionsrichtwert am Pegel Leibsch auf der Grundlage der im WBalMo-Ländermodell dynamisch prognostizierten Sulfatkonzentration am Querschnitt Leibsch und der festen Sulfatkonzentration am Ablauf der Seen,
- Sulfatverdünnung aus dem SB Bärwalde und den sächsischen Talsperren sowie optional mit der Neiße-Überleitung,
- Durchleitung von Spreewasser durch das WSS Lohsa II,
- Ermittlung der zusätzlichen bzw. Gesamtverdunstung von neuen und bestehenden Wasserflächen,
- Berücksichtigung innermonatlicher Schwankungen der Durchflüsse bei der Ermittlung des verfügbaren Zuflusses zu Speichern im Nebenschluss.

Abbildung 3 demonstriert das Prinzip der monatlichen Absenk- bzw. Stauziele am Beispiel der SB Bärwalde und Lohsa II. Sie zeigen, wie in der Abgabeperiode von Mai bis Oktober als Absenkziele die mindestens noch einzubehaltenden Wassermengen festgelegt sind. Die Nutzung des SB Lohsa II ist auf 27 Mio. m<sup>3</sup> (113 m NHN) als das tiefste Absenkziel begrenzt. Demgegenüber zeigen die Stauziele ab November bis April, wie schrittweise ein vollständig gefüllter Betriebsraum bis zum Mai erreicht sein soll.

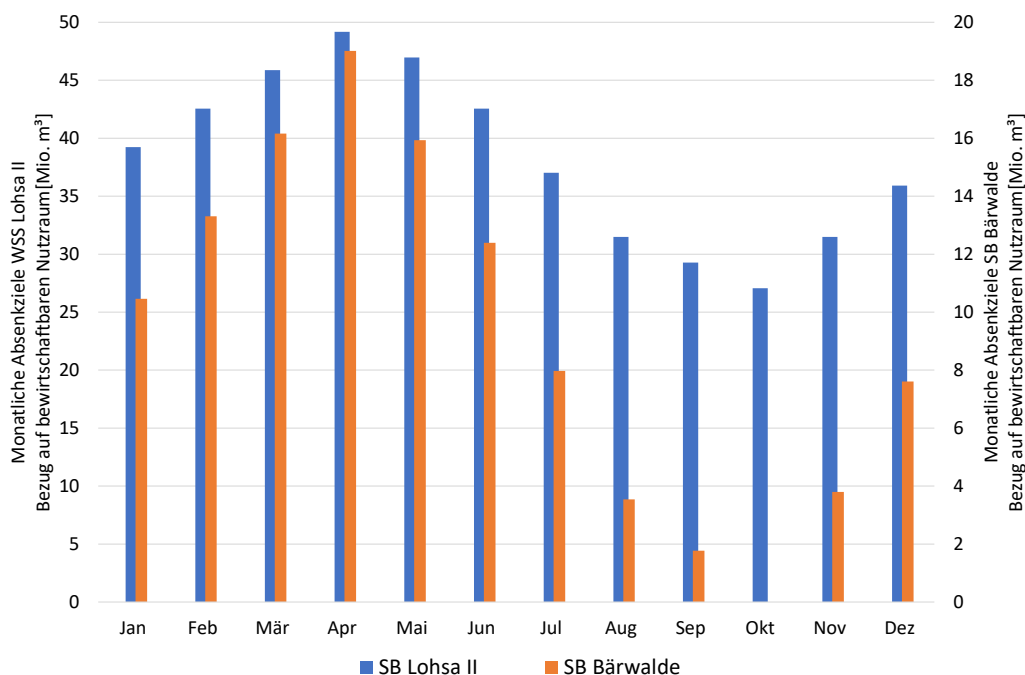


Abbildung 3: Monatliche Absenkziele der SB Lohsa II und Bärwalde

Die Talsperren Bautzen und Quitzdorf stützen ganzjährig die sächsischen Nutzungen, wenn notwendig mit dem gesamten Nutzraum. Brandenburgische und Berliner Nutzungen werden im Rahmen der vertraglich geregelten Niedrigwasseraufhöhung (NWA) gestützt, wenn den Talsperren das entsprechende Wasser tatsächlich zur Verfügung steht. Die Stützung darf in den Monaten Mai bis September neben der NWA auch zur Sulfatverdünnung erfolgen. Die Abgaben dürfen monatlich nur bis zu einem festgelegten Teil der von der Vorhaltemenge verbliebenen NWA-Reserve erfolgen (siehe Tabelle 1). Sollten die Talsperre Quitzdorf einmal nicht zur Stützung beitragen können, besteht die Möglichkeit, dass der Speicher Lohsa I bei verfügbaren Reserven und im Rahmen der maximal möglichen NWA-Abgabe einspringt.

Tabelle 1: Berechnung der maximal möglichen NWA-Abgabe (Startwert 20 Mio. m<sup>3</sup>)

Monat	Anteil an der verbliebenen NWA-Reserve zur Berechnung der maximal möglichen NWA-Abgabe
1	keine NWA-Abgabe
2	
3	
4	
5	10 %
6	25 %
7	50 %
8	100 %
9	100 %
10	keine NWA-Abgabe
11	
12	

Im Sulfatprognosemodul des WBalMo-Ländermodells sind in Bezug auf Sulfat drei verschiedene Bewirtschaftungsoptionen realisiert:

- Sulfatsteuerung,
- Sulfatrückhalt und
- Sulfatverdünnung.

Die Sulfatsteuerung begrenzt notwendige Speicherabgaben aus dem SB Burghammer, wenn dadurch der Immissionsrichtwert in Spremberg-Wilhelmsthal überschritten würde. Dafür wird die Sulfatkonzentration im SB Burghammer unter Berücksichtigung von Grundwasserzu- und -abstrom, Zufluss aus dem SB Lohsa II und der Kleinen Spree berechnet. Um die insgesamt notwendige Wasserbereitstellung aus den Speichern zu gewährleisten, wird das Abgabedefizit des WSS Lohsa II nach Möglichkeit auf das SB Bärwalde und die sächsischen Talsperren umverteilt.

Der Sulfatrückhalt bewirkt die Begrenzung der Ausleitung aus einem Bergbaufolgesee, wenn dadurch der unterhalb gültige Immissionsrichtwert überschritten würde. Ist das maximale Stauziel erreicht, erfolgt eine zwangsweise Ausleitung ohne Rücksicht auf den

Immissionsrichtwert. Im Unterschied zur Sulfatsteuerung erfolgt die Bewirtschaftung der Speicherlamelle allein aus Sulfatsicht. Daher wird immer eine maximale Ausleitung angestrebt, um bei Bedarf möglichst viel Speicherraum für den Sulfatrückhalt verfügbar zu haben. Die Bewirtschaftung mit dem Ziel des Sulfatrückhalts ist für den Schlabendorfer See und den Cottbuser Ostsee implementiert.

Sulfatverdünnung hat zum Ziel, durch Speicherabgaben die Sulfatkonzentration in der Spree abzusenken, um den Immissionsrichtwert nicht zu überschreiten. Dabei spielt der Bedarf aus Mengensicht keine Rolle.

Zur Senkung der Sulfatkonzentration im WSS Lohsa II trägt eine Durchleitung von Spreewasser bei. Einerseits kann aus der Kleinen Spree Wasser durch das SB Burghammer durchgeleitet werden. Andererseits kann auch eine Spülung des SB Lohsa II aus der Spree erfolgen. Im WBalMo-Ländermodell werden darüber hinaus folgende Vorgaben der Bewirtschaftung nachgebildet:

- der Mindestabfluss unterhalb des Entnahmequerschnitts in der Spree wird nicht unterschritten,
- Da die Verdünnungswirkung von Abgaben aus der TS Bautzen für das Profil Spremberg-Wilhelmsthal durch die Durchleitung aufgehoben würde, darf nur durchgeleitet werden, wenn Verdünnungsabgaben nicht erforderlich oder deaktiviert sind,
- vollständige Zurückführung in die Spree der entnommenen Wassermenge über die Kleine Spree,
- Berücksichtigung der Kapazität des Ableiters am SB Burghammer,
- Grundsätze zur Wasserverteilung (u. a. Verbundbewirtschaftung, vorrangige Auffüllung SB Bärwalde gegenüber Lohsa II) dürfen nicht beeinträchtigt werden.

Damit wird kein Wasser im WSS Lohsa II eingespeichert. Abgaben aus der TS Bautzen im Rahmen der Niedrigwasseraufhöhung (NWA) können durch das System durchgeleitet werden. Zugleich werden keine Abgaben aus der TS Bautzen über den Bedarf für Brandenburg hinaus zur Verfügung gestellt. Das Sulfatmodul für das WSS Lohsa II aktualisiert die berechneten Sulfatkonzentrationen in den SB Burghammer und Lohsa II unter Berücksichtigung der Durchleitung.

### **1.1.5 Bewirtschaftung von Überleitungen und Kanälen**

Das WBalMo-Ländermodell berücksichtigt eine Reihe von Überleitungen in und zwischen Flussgebieten:

- Verteilerwehr Spreewiese zur Wasserbereitstellung in der Kleinen Spree,
- Verteilerwehre im Spreewald (nur Sulfattranslationsmodul, nicht Mengenmodell) zur Aufteilung u. a. auf Nordumfluter unterhalb Wehr VI und V sowie unterhalb der Rückführung über das Eichenfließ, auf Hauptspreewiese unterhalb Wehr VII und des Dückers vom Großen Fließ,

- Pumpstation Steinbach (Neißewasserüberleitung) für die Flutung/Nachsorge der Erweiterten Restlochkette (ERLK),
- Pumpwerk Sprewitz (Oberer Landgraben) für die Flutung/Nachsorge der ERLK,
- Dahme-Umflut-Kanal,
- Pumpwerk Neuhaus zur Speisung der Scheitelhaltung des Oder-Spree-Kanals,
- Schleuse Kersdorf vom Oder-Spree-Kanal,
- Schleuse Wernsdorf zum Oder-Spree-Kanal,
- Ableitung Gosener Kanal.

Wesentliche Bewirtschaftungsaspekte sind:

- Ermittlung des Überleitungsbedarfs unter Berücksichtigung des bereits nutzbaren Wasserdargebots,
- Berücksichtigung der Überleitungskapazität bzw. Leistungskurven der Wehre (vgl. Abbildung 4, Steuerung der Überleitung in den Dahme-Umflutkanal),
- Berechnung der maximal zulässigen Menge (z. B. wegen einzuhaltender Mindestabflüsse),
- Berücksichtigung des verfügbaren Wasserdargebotes (außer Schleuse Kersdorf vom Oder-Spree-Kanal: hier muss die Überleitungsmenge sinnvoll gewählt werden, um die Pumpkapazität in Eisenhüttenstadt und Neuhaus, Brückendurchfahrtshöhen usw. zu beachten)
- Berücksichtigung von Schleusungs- und Spaltwasser.

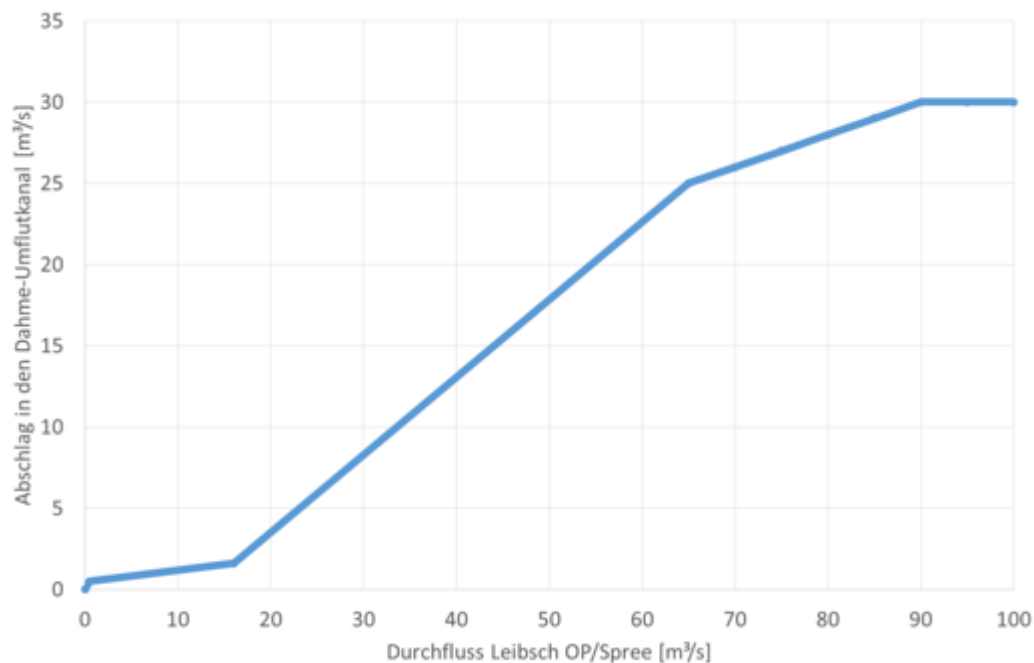


Abbildung 4: Steuerung der Überleitung in den Dahme-Umflutkanal

### **1.1.6 Sulfatprognosemodul**

Das Sulfatprognosemodul weist als Einzelfunktion des WBaIMo-Ländermodells den größten Umfang im Vergleich zu allen anderen Funktionen auf. Dies geht insbesondere auf die Frachtbilanzierung im Längsschnitt der Spree vom Pegel Bärwalde bis zum Müggelsee und auf die Steuerung von Ausleitung und Verdünnung zurück. Das Sulfatprognosemodul erfasst knapp 80 Sulfatmissionen. Eine Übersicht zeigt Abbildung 5.

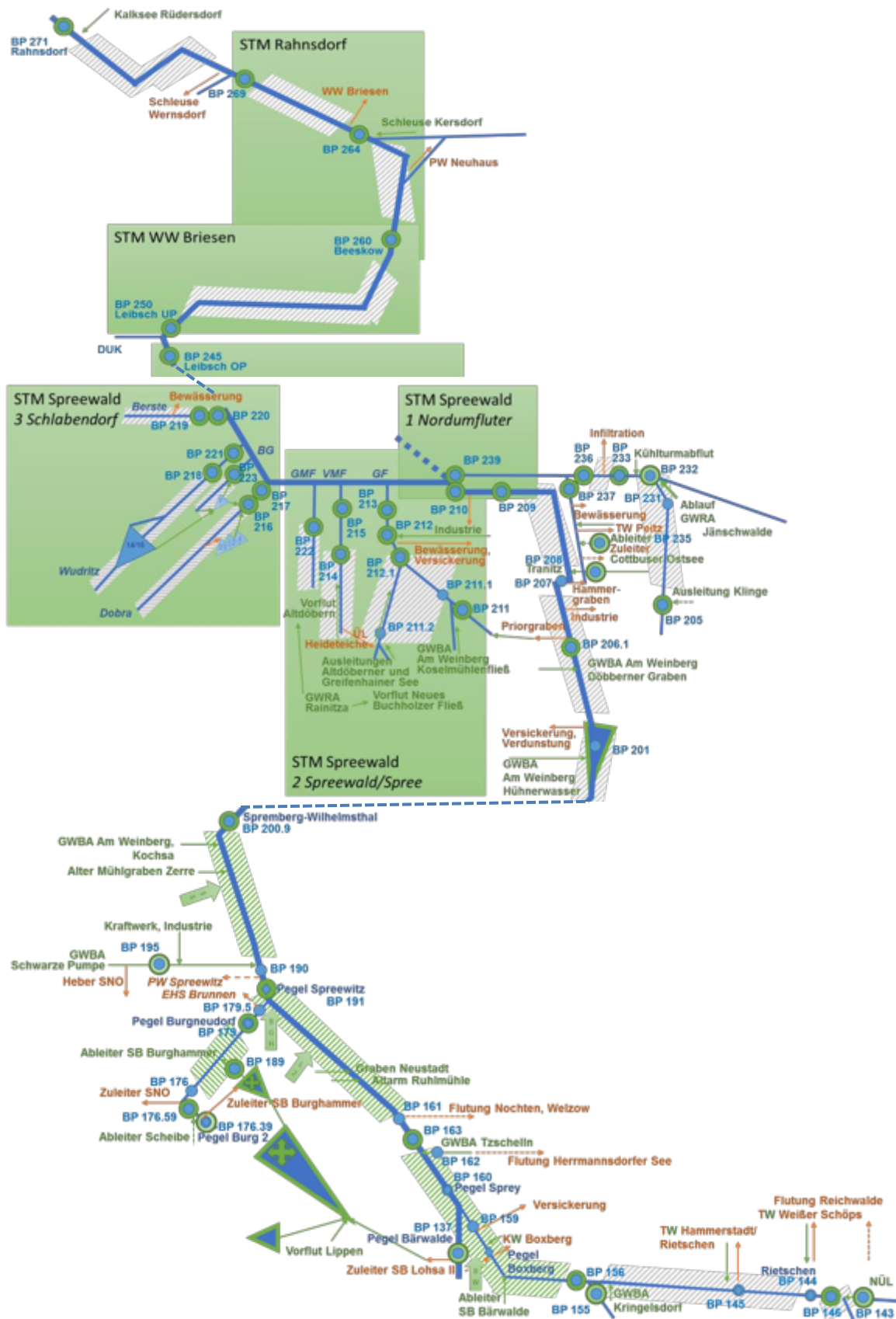


Abbildung 5: Struktur der Sulfatmissionen und Sulfattranslationen (STM) des Sulfatprognosemoduls (DHI WASY, 2017)

Die Kalibrierung der Sulfattranslationsmodule (STM) und die Validierung des Sulfatprognosemoduls an wichtigen Querschnitten erfolgte für die zur Entwicklungszeit vorliegenden Daten zu Sulfatkonzentrationen im Längsschnitt der Spree für den Zeitraum 2013 bis 2015, Beispiele zeigen Abbildung 6 und Abbildung 7.

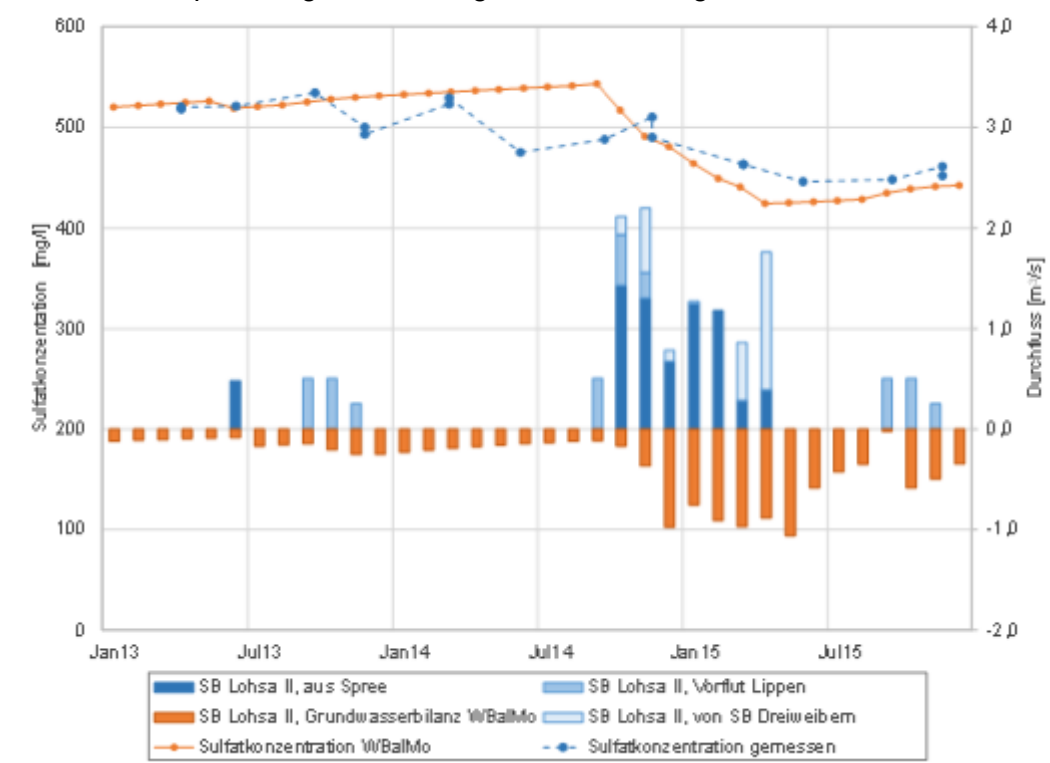


Abbildung 6: Validierung der Sulfatprognose für das SB Lohsa II für die Jahre 2013-2015 (DHI WASY, 2017)

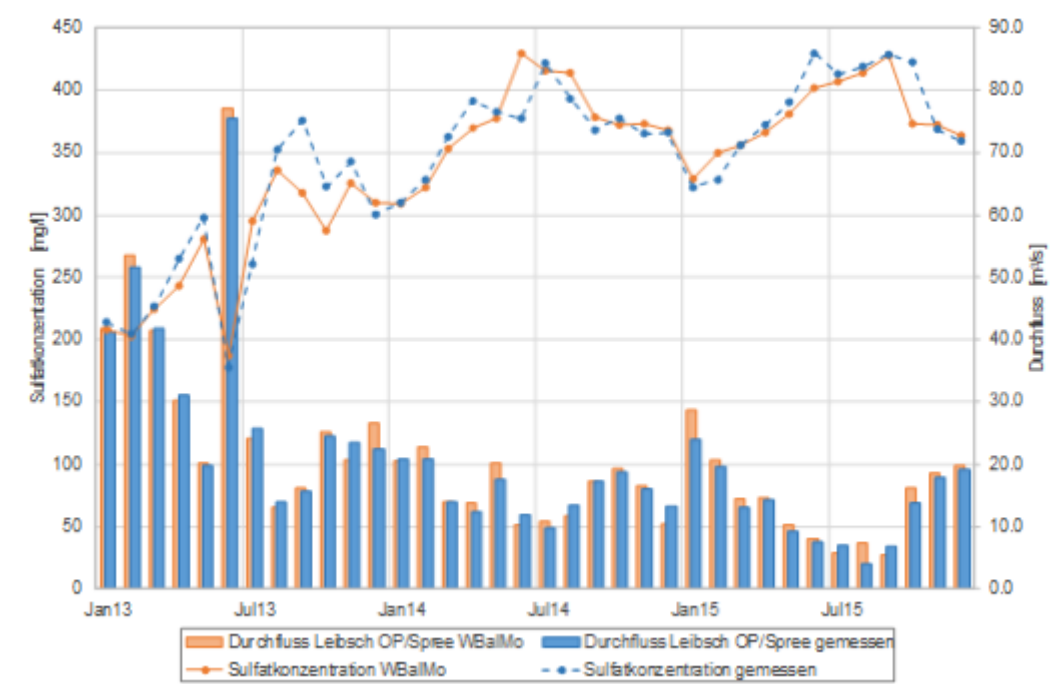


Abbildung 7: Validierung der Sulfatprognose für den Pegel Leibsch OP für die Jahre 2013-2015 (DHI WASY, 2017)

Einzelheiten zur Sulfatsteuerung und Sulfatverdünnung können Abschnitt 1.1.4, Bewirtschaftung der Talsperren und Speicher, entnommen werden.

### **1.1.7 Ergebnisse**

Wie in Abschnitt 1.1.1, Abflussbildung unter Berücksichtigung der bergbaulichen Grundwasserabsenkung und im Spreewald, beschrieben, ermöglichen 100 Dargebotsszenarien/ Realisierungen basierend auf der Monte-Carlo-Methode Risikoanalysen, die auf einer statistischen Auswertung der Modellergebnisse beruht. Typische Ergebnisformen sind z. B. Schwellenwerte oder Versorgungsgrößen für bestimmte Perzentile (z. B. 90 %). Zugleich können für festgelegte Werte, z. B. einer Bedarfsforderung oder eines Mindestinhaltes eines Speichers, deren Sicherheit angegeben werden.

Im WBalMo-Ländermodell stehen dafür Registrierungsmodule (siehe Abschnitt 2.1.3) und tabellarische Dateiausgaben, die in DYN-Elementen (vgl. Abschnitt 2.1.3) realisiert werden, zur Verfügung.

Die Registrierungsmodule werten Systemvariable mit Hilfe von Häufigkeitsverteilungen, statistischen Kennzahlen und Extrema, Sicherheiten und Perzentilwerten aus. Sie umfassen folgende Themenbereiche:

#### **Wassermenge**

- LEAG-Bergbaufolgeseen (Bilanzierung der Seen inkl. Nachsorgephase),
- Komplex Restlockkette (Bilanzierung der Seenkomplexe Spreetal NO, Bluno, Restlockkette und Niemtsch),
- Lausitzer Neiße (relevante Durchflüsse, Speicherinhalte sowie Abgaben zur Bedarfsdeckung von Nutzungen relevanter Wasserwerke, der Binnenfischerei etc.),
- Variantenvergleich (Durchflüsse, Überleitungen und Speicherinhalte im Einzugsgebiet der Spree und Schwarzen Elster).

#### **Wassergüte**

- Sulfatkonzentrationen an ausgewählten Querschnitten im Einzugsgebiet der Spree.

Dateiausgaben enthalten fortlaufende Systemvariable für jeden Zeitschritt. Sie werden auch zur weiteren Auswertung über die Registrierungsmodule hinaus benutzt. Sie umfassen:

#### **Wassermenge**

- Flutungsendtermine,
- Nutzung der NWA-Reserve (Mittlere Speicherabgaben, Mittlere nicht verbrauchte Speicherabgaben, Sicherheiten für uneingeschränkte Nutzung der Speicherreserve, Mittleres Defizit bei der Nutzung der Reserven),
- Abflüsse und Überleitungen an relevanten Gewässern der Einzugsgebiete Spree und Schwarze Elster,
- Seebilanzen (Zuflüsse, Nutzer am Zuflussprofil, Speicherinhalte, Wasserstand, Speicherverdunstungsverluste, Länder-getrennte Speicherabgaben,



Speicherabgaben für den Spreewald und die Schifffahrt, wesentliche Abflusskenngrößen unterhalb des Speichers, Gesamtabgabe, Betriebsbereitschaft, Flutungen).

### **Wassergüte**

- Sulfatkonzentrationen mit dazugehörigem Durchfluss zur Frachtberechnung für alle relevanten Querschnitte.
- Durchfluss und Sulfatkonzentrationen für Zuflussquerschnitte der Sulfattranslationsmodule.

Die Dateiausgaben können auf eine bestimmte Anzahl von Realisierungen beschränkt oder ganz abgeschaltet werden.

### **1.1.8 Szenariofähigkeit**

Für Prognosen sind die iterative Erstellung, Anpassung und Analyse von Szenarien typisch. Grundlegende Instrumente für den Wechsel zwischen Szenarien stellt das WBalMo-Ländermodell in einem DYN-Element zur Verfügung. Die für ein Szenario erforderlichen Anpassungen von Systemzuständen wie Flutung oder Nachsorge, Betriebsbereitschaft, Bewirtschaftungsoptionen usw., können selektiv aktiviert werden. Die wichtigen, am Anfang der Simulation gültigen Daten und Optionen, werden in einer Datei mit Zeitstempel protokolliert.

Es bleibt festzuhalten, dass damit nur die grundlegendsten Funktionen einer Szenarienverwaltung bereitgestellt werden und sie sich an einen versierten Anwender des WBalMo-Ländermodells richten.

### **1.1.9 Schnittstellen**

Das WBalMo-Ländermodell nutzt mit den DYN-Elementen eine universelle Schnittstelle der WBalMo Software (vgl. Abschnitt 2.1.3). Die in den Abschnitten 1.1.1 bis 1.1.8 beschriebenen Funktionen sind fast ausnahmslos in DYN-Elementen realisiert. Die Funktionen werden in eine dynamische Bibliothek (DLL) gelinkt und werden aus dem WBalMo-Ländermodell heraus, mit einer Rangzahl versehen, aufgerufen.

Darüber hinaus ist das WBalMo-Ländermodell auch insgesamt von außen für einen Zeitschritt aufrufbar. Dies nutzt das GRMSTEU, eine Software zur operativen Steuerung bei der Flutungszentrale Lausitz.

Als Schnittstelle im weitesten Sinne können auch Daten bezeichnet werden, die durch andere Modelle oder Untersuchungen erzeugt worden sind. Dazu gehören die Werte einer monatsabhängigen zusätzlichen Verdunstung einer Wasserfläche gegenüber einer generalisierten Landoberfläche oder die Sulfatmissionen.

## 1.2 Bestandsaufnahme – Daten

### 1.2.1 Überblick

Im WBalMo-Ländermodell sind an 95 Fließgewässerelementen mit 262 Bilanzquerschnitten wasserwirtschaftliche Elemente in folgender Anzahl enthalten:

▪ Teileinzugsgebiete:	64
▪ Meteorologische Gebiete:	10
▪ Wasserentnahmen und -einleitungen:	ca. 200
▪ Talsperren und Speicher:	21
▪ Abgaberegeln für Talsperren und Speicher:	149
▪ Konstanten (Flächen, Porenvolumina, Flutungstermine, Überleitungskapazitäten, Grenzwasserstände etc.):	932
▪ DYN-Elemente (modellspezifische Plugin für Bewirtschaftungsregeln):	95
▪ Ergebnisindikatoren (Mittelwerte, Minima, Maxima, Perzentile, Wahrscheinlichkeiten):	166
▪ Sulfatmissionen:	75

Daten zu Wassernutzungen, Sulfatmissionen und weiteren Konstanten weisen häufig einen Jahresgang auf. Darüber hinaus verändern sie sich in der Zukunft. Dafür ist im WBalMo-Ländermodell der Prognosezeitraum von 100 Jahren in 20 Fünf-Jahres-Perioden unterteilt worden, denen die für den jeweiligen Zeitraum repräsentativen Daten zugewiesen werden können. Aufgrund des Zeitpunkts der Modellerstellung beginnt die Simulation im Jahr 2003 (ursprünglich 1998, um eine Periode später eingekürzt). Relevante Änderungen innerhalb der Perioden können für beliebige Zeitpunkte erfasst werden.

Eine Dokumentation aller enthaltenen Werte und ihrer zeitlichen Änderungen würde mehrere hundert Seiten umfassen. Im Folgenden soll deshalb eine Zusammenfassung gegeben werden, die sich mit der räumlichen Gliederung des WBalMo-Ländermodells in Bezug auf Witterung und Abfluss, mit den quantitativen Ansätzen des Wasserdargebotes und des Wasserbedarfs sowie mit den Sulfatparametern befasst.

### 1.2.2 Zusammenfassung zu Witterung und Abfluss

Die folgende Abbildung 8 zeigt die räumliche Gliederung für die Witterung. Für die Teilgebiete der Spree und Schwarzen Elster standen als Datengrundlage für die Erstellung der stochastischen Reihen Gebietsmittelwerte der meteorologischen Prozesse Niederschlag und potenzielle Verdunstung zur Verfügung (DHI-WASY, 2009). Im Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße wurden als Datengrundlage Stationsmesswerte des Niederschlages, der Temperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit sowie der Sonnenscheindauer verwendet. Bei der Bestimmung der Gebietsmittelwerte wurden die Höhenabhängigkeit sowie beim Niederschlagsdargebot die Schneeverlagerung (verzögerte Abflusswirksamkeit), berücksichtigt. Die potenzielle Verdunstung wurde nach TURC/IVANOV bestimmt.

Die Abbildung 9 zeigt die räumliche Gliederung für den Abfluss. Für die Teilgebiete wurden insgesamt 32 Parametersätze kalibriert. Für Parameter der zeitveränderlichen Grundwasserabsenkung (siehe Abschnitt 1.1.1) gilt die Zeitstruktur gemäß Abschnitt 1.2.1.

Weitere methodischen Einzelheiten sind in Abschnitt 1.1.1, Abflussbildung unter Berücksichtigung der bergbaulichen Grundwasserabsenkung und im Spreewald, dargestellt.

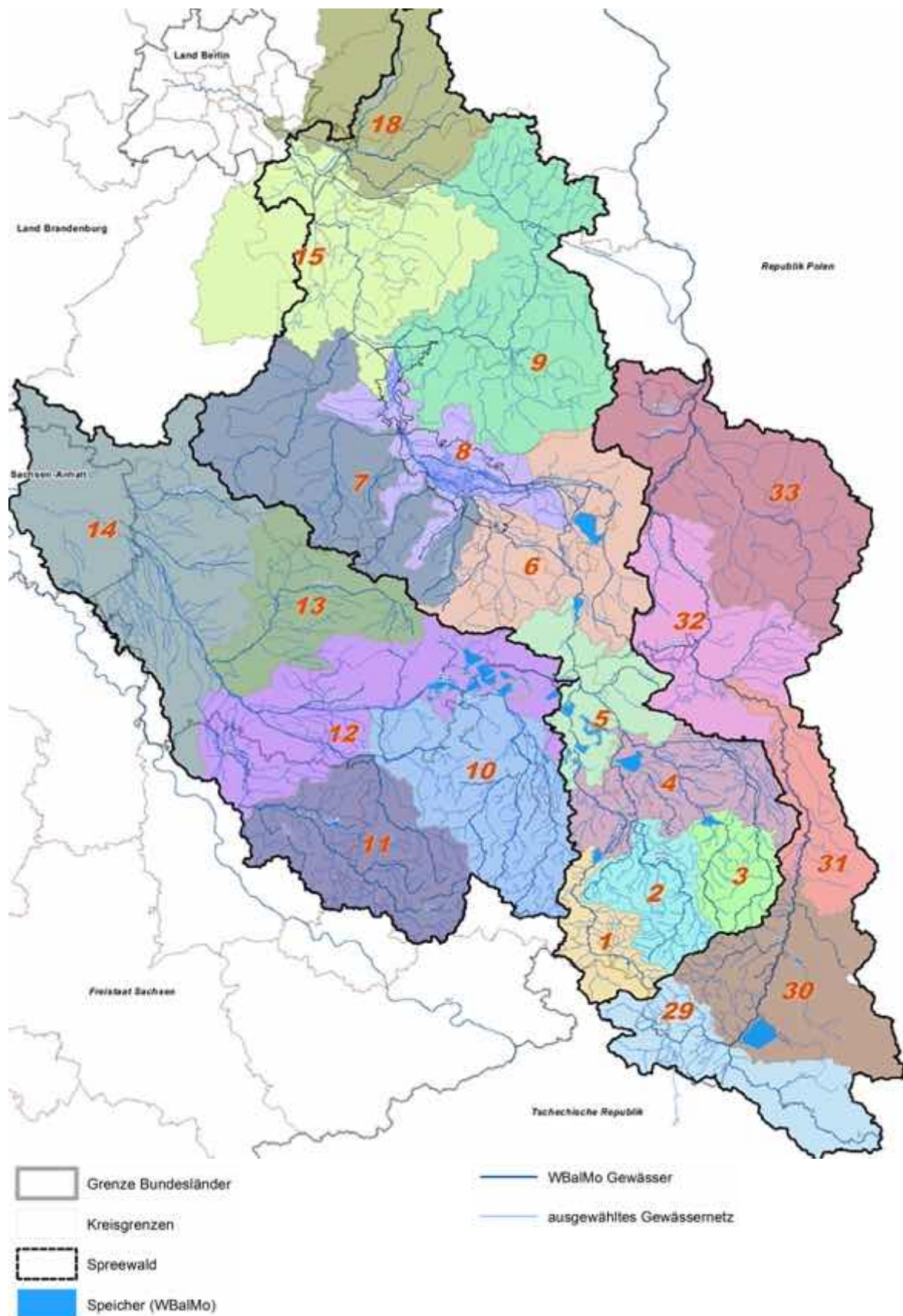


Abbildung 8: Meteorologische Teilgebiete (MetTG) von SESIM08 und der Lausitzer Neiße

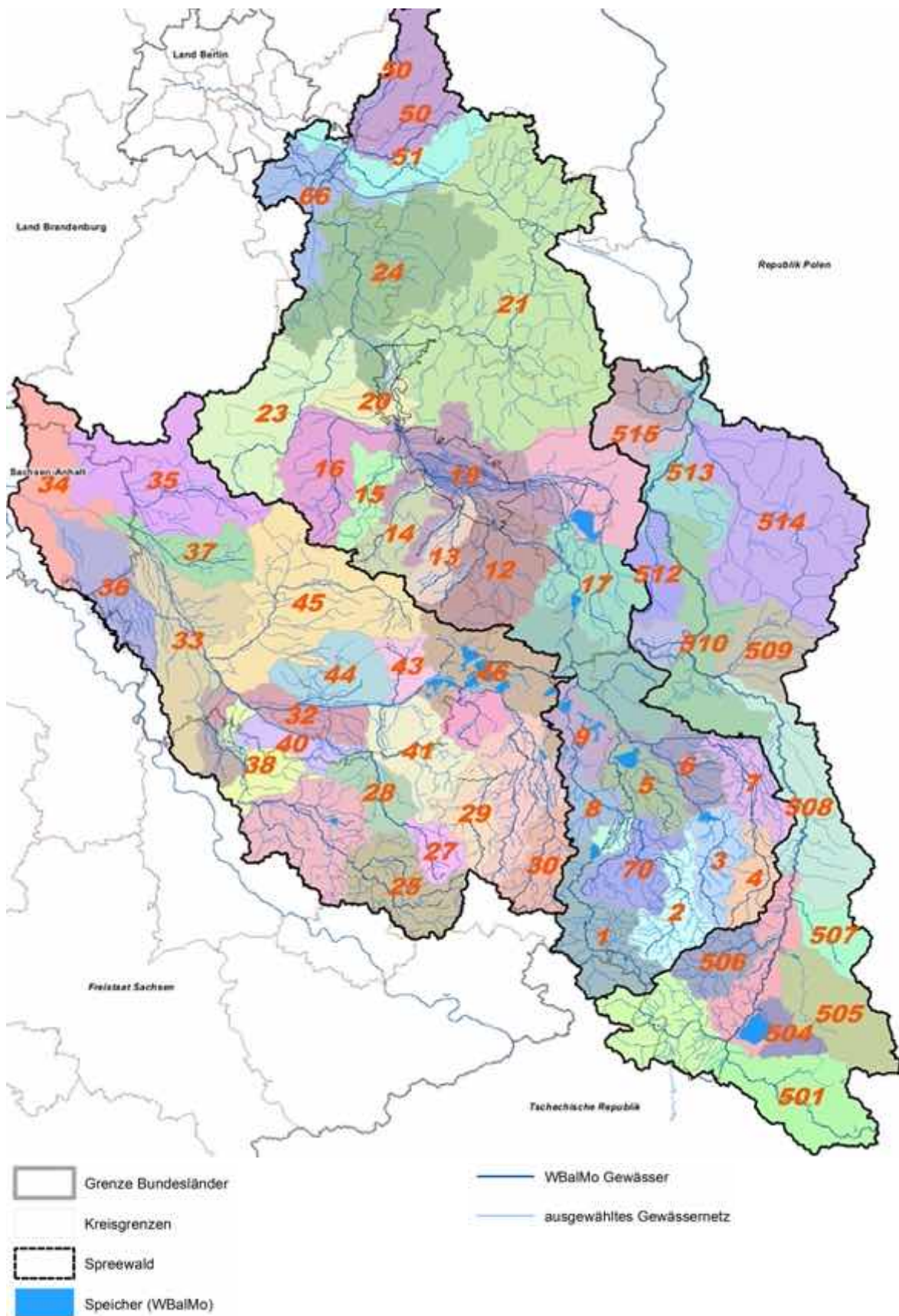


Abbildung 9: Simulationsteilgebiete (STG) im WBalMo-Ländermodell

### 1.2.3 Zusammenfassung zu Wasserdargebot und Wasserbedarf

Im Abschnitt 1.1.3, Wasserentnahmen und -Einleitungen, wurde ein Überblick gegeben, welche Nutzergruppen im WBalMo-Ländermodell enthalten sind. Für eine summarische Bilanz werden diese hier mit Hilfe eines Längsschnittes der Spree in Abbildung 10 dem Dargebot gegenübergestellt. Auf der linken Seite der Grafik wurden die Entnahmeforderungen dargestellt. Dabei handelt es sich um Nutzergruppen Flutung/ Nachsorge, Teichwirtschaften, Kraftwerke, Schifffahrt, Versickerung und Sonstiges (Industrie, Überleitungen etc.). Diesen Nutzern wurde das summarische Dargebot auf der rechten Seite gegenübergestellt. Das enthält zum einen das natürliche Dargebot, die Ableitungen aus den Teichwirtschaften, Kühlwasserabgaben der Kraftwerke, Sumpfungswasser der Tagebaue, Überleitungen für die Schifffahrt und Sonstiges. Alle Daten sind als Jahresmittelwerte zu verstehen und geben deshalb einen Überblick.

Der bis zum Müggelsee aufsummierte Wasserbedarf für den Zeitraum 2020 - 2040 beläuft sich dabei auf über 20 m<sup>3</sup>/s. Bei mittleren Verhältnissen kann der Bedarf durch das zur Verfügung stehende Dargebot gedeckt werden.

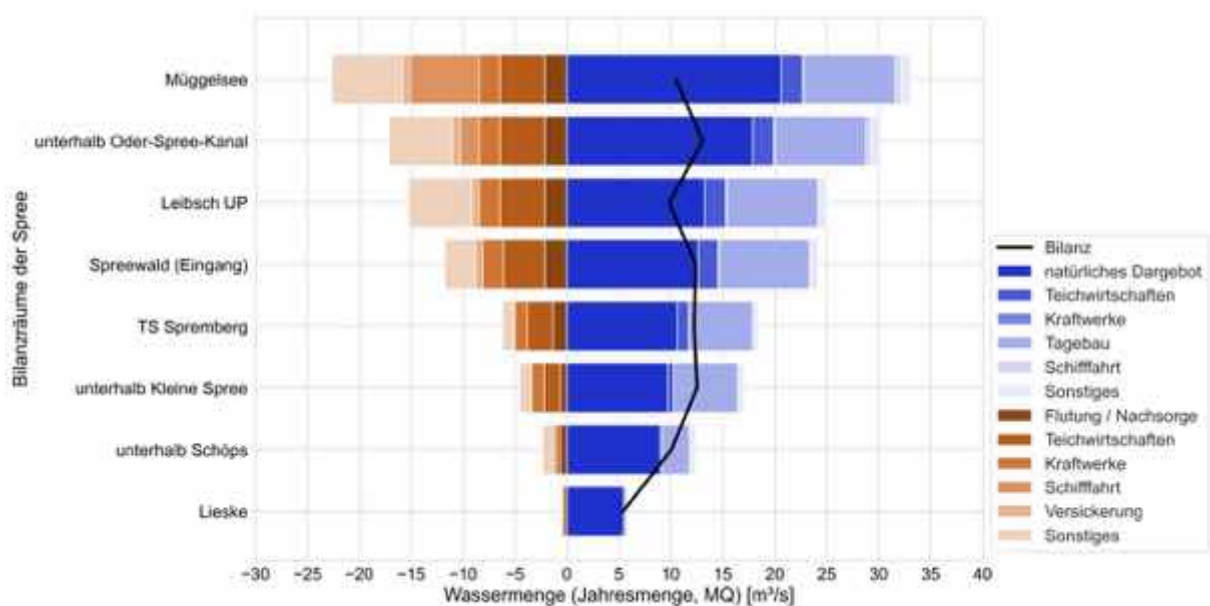


Abbildung 10: Gegenüberstellung der Wassernutzungen und des Dargebotes für den Zeitraum 2020 – 2040 für den Längsschnitt der Spree für mittlere Abflussverhältnisse

Mit dem Kohleausstieg ist der Wegfall des Kraftwerksbedarfs, ein allmählicher Grundwasserwiederanstieg und der Wiederanschluss von Fließgewässern verbunden. Dies kann den Wegfall der Sumpfungswässer der Tagebaue nicht kompensieren. Einschränkungen der Wasserbereitstellung werden häufiger. Bei ausgeprägten Trockenphasen (Abbildung 11) sind dann eine ebenso ausgeprägte Nutzung von Wasser aus Speichern und Überleitungen wie auch ein durchgreifendes Bedarfsmanagement erforderlich.

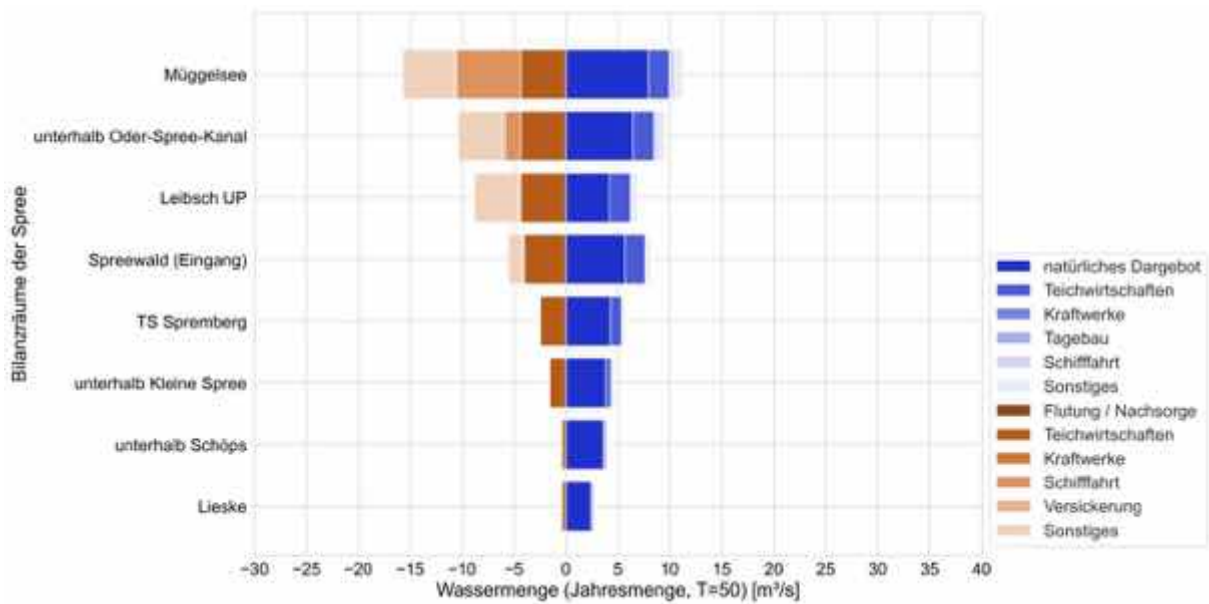


Abbildung 11: Gegenüberstellung der Wassernutzungen und des Dargebotes für den Zeitraum 2070 – 2100 für den Längsschnitt der Spree für eine ausgeprägte Trockenphase

Für die Bewertung von Maßnahmen ist eine detaillierte Bilanzierung erforderlich. Diese Notwendigkeit zeigt exemplarisch der Zeitversatz zwischen Bespannen und Ablassen der Teiche in der Binnenfischerei. In Abbildung 12 ist summarisch der Bedarf und der Umfang der Wiedereinleitung für alle Teichwirtschaften des Spreegebietes gezeigt.

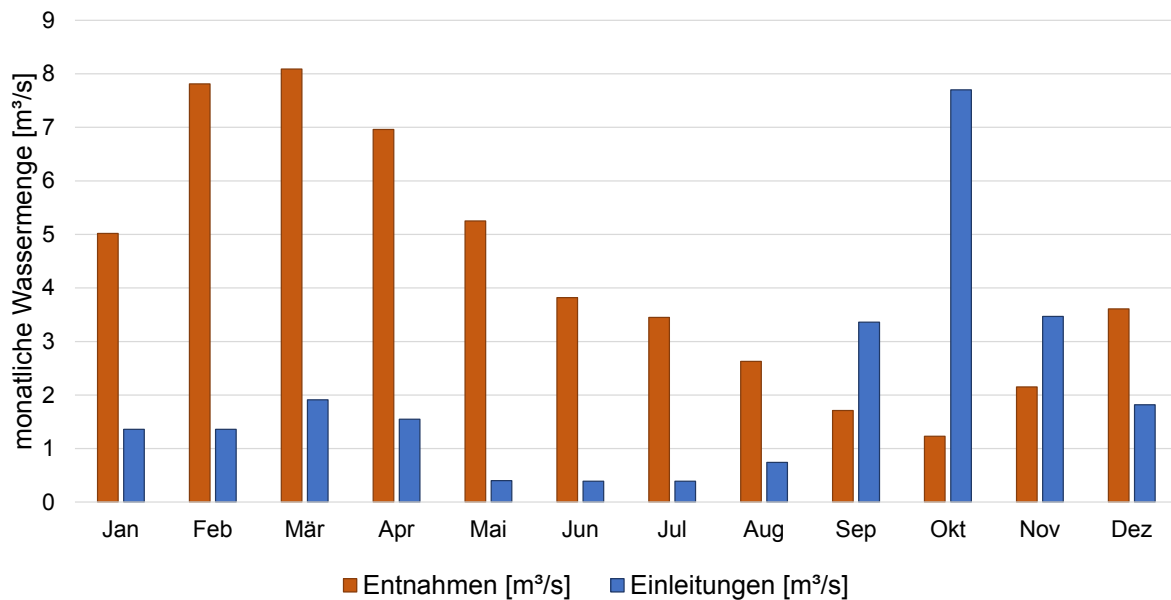


Abbildung 12: Entnahme- und Einleitungsmengen der Teichwirtschaften im Spreegebiet

Weitere methodische Details können Abschnitt 1.1.3, Wasserentnahmen und -Einleitungen, entnommen werden.

## **1.2.4 Zusammenfassung zu Sulfatmissionen und Sulfattranslation**

Für 75 Sulfatmissionen sind über den Prognosezeitraum bis 2102 Sulfatkonzentrationen und die dazugehörigen Volumenströme im Sulfatprognosemodul enthalten, soweit sie nicht im WBalMo-Ländermodell selbst berechnet werden. Diese Daten beruhen auf Messungen und prognostische Gutachten, z. B. (IWB, 2014), und wurden von der LMBV, der LEAG, dem LfULG Sachsen, der LTV Sachsen, dem LfU Brandenburg und dem WSA Berlin zur Verfügung gestellt.

Für den Aufbau und die Kalibrierung der Sulfattranslationsmodule für den Spreewald, für Briesen und für Rahnsdorf wurden Daten vom Zeitraum 2010 bis 2016 verwendet. Hintergrund ist, dass die Sulfatkonzentrationsdaten bei mehreren Messstellen zwei Bereiche mit unterschiedlichem Verhalten aufwiesen. Im ersten Abschnitt war zu beobachten, dass mit steigenden Abflüssen auch die Sulfatkonzentrationen steigen. Im zweiten Abschnitt war das gegenteilige Verhalten zu beobachten. Das Verhalten im zweiten Abschnitt erschien plausibel, da bei höheren Abflüssen eine stärkere Verdünnung über das Einzugsgebiet stattfindet, wenn die punktuellen Sulfatquellen (z. B. GWRA, Tagebaufolgeseen) weiterhin konstant einleiten. Für die TS Spremberg wurde ein Stoffmengenbilanzmodul erstellt. Hier wurde eine Zeitreihe von 2012 bis 2016 zu Grunde gelegt, da nur für diesen Zeitraum Tageswerte der Sulfatkonzentrationen vorlagen.

Zu weiteren methodischen Details wird auf den Abschnitt 1.1.6, Sulfatprognosemodul, verwiesen.

## **1.3 Bestandsaufnahme – Nutzung, Unterhaltung und Weiterentwicklung**

Die Rechte am WBalMo-Ländermodell gehören der AG Flussgebietsbewirtschaftung. Sie hat den Anwenderkreis „WBalMo-Ländermodell“ durch den AK Wassermenge mit seiner Nutzung, Unterhaltung und Weiterentwicklung beauftragt. Im Anwenderkreis sind die LMBV, das LfU Brandenburg, die LD Sachsen, die LTV Sachsen und das LfULG Sachsen vertreten. Mit der Umsetzung der durch den Anwenderkreis geplanten Aufgaben in das WBalMo-Ländermodell ist überwiegend die DHI WASY beauftragt, die seit mehr als 25 Jahre die Erstellung und Weiterentwicklung des Modells durchführt. Für die sichere, nachvollziehbare und verteilte Weiterentwicklung des WBalMo-Ländermodells nutzt DHI WASY seit 2018 ein Quellcodeverwaltungssystem.

Die Nutzung, Unterhaltung und Weiterentwicklung des WBalMo-Ländermodells veranschaulicht die Abbildung 13.



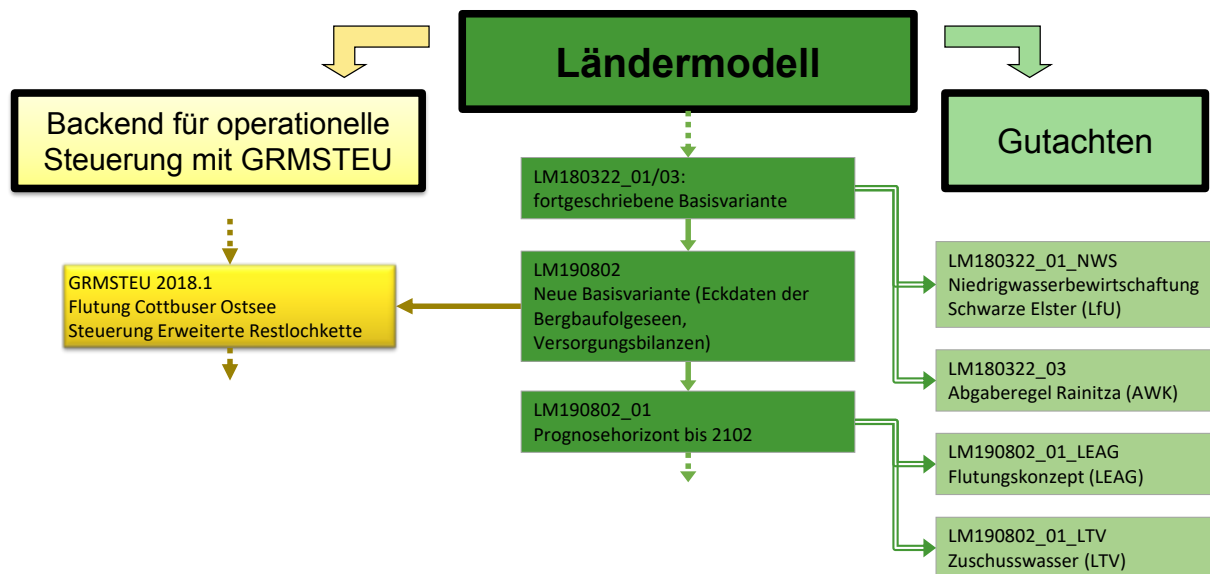


Abbildung 13: Exemplarische Darstellung der Nutzung, Unterhaltung und Weiterentwicklung des WBalMo-Ländermodells

In der mittleren, dunkelgrünen Säule ist die Weiterentwicklung des WBalMo-Ländermodells gemäß dem Arbeitsplan des AK Wassermenge dargestellt. Einer jährlichen Aktualisierung unterliegen:

- der Flutungsstand und die Eckdaten der Bergbaufolgeseen der LMBV und der LEAG,
- die Versorgungsbilanzen der Kraftwerksstandorte mit dem Abschlag der GWRA in die Spree.

Alle anderen Daten werden nach dem Ermessen des Anwenderkreises aktualisiert. Dazu zählen insbesondere Anpassungen, die sich aus Änderungen der Bewirtschaftungsgrundsätze ergeben.

Der linke, gelbe Bereich illustriert die Verwendung des WBalMo-Ländermodells als Backend für das operative Steuerungsmodell GRMSTEU. Damit werden für die wöchentliche Prognose die im Modell hinterlegten Bewirtschaftungsgrundsätze angewendet. Aktualisierungen werden daher auch im GRMSTEU wirksam. Umgekehrt dienen die Erfahrungen aus Soll-Ist-Vergleichen bei der Anwendung des WBalMo-Ländermodells im GRMSTEU zur Verbesserung des Ländermodells.

Im rechten, hellgrünen Bereich ist die Nutzung des WBalMo-Ländermodells durch Behörden und Unternehmen gezeigt. Auf der Grundlage einer Nutzungsvereinbarung an den jeweils aktuellen Versionen des Ländermodells werden Anpassungen und Erweiterungen vorgenommen, die für die Aufgabenstellung erforderlich sind. Wenn diese Änderungen dann Relevanz für die wasserwirtschaftlichen Planungen bekommen, werden sie nach dem Ermessen des Anwenderkreises in das WBalMo-Ländermodell übernommen. Beispiele sind Untersuchungen der LEAG, der Bundesanstalt für Gewässerkunde, des LBGR, des LfU Brandenburg, der LTV sowie Forschungseinrichtungen wie das Potsdam Institut für Klimafolgenforschung.

Das Quellcodeverwaltungssystem der DHI WASY für das WBalMo-Ländermodell erfasst ebenfalls die dargestellten drei Bereiche. Somit sind die Beziehungen zwischen den Varianten stets nachvollziehbar und zusammenführbar, überwiegend mit geringerem Aufwand als bisher. Die Nachvollziehbarkeit bezieht sich auf die durchgeführten Änderungen, auf ihren Autor und den Zeitpunkt. Damit kann auf beliebige Versionen wieder zurückgegriffen werden.

## **1.4 Anpassungsbedarf – Funktionen und Daten**

### **1.4.1 Stärken-Schwächenanalyse im Überblick**

Nach mehr als 25 Jahren Entwicklung zählt zu den Stärken des WBalMo-Ländermodells, dass alle relevanten wasserwirtschaftlichen Komponenten in den Flussgebieten der Spree, Schwarzen Elster und Lausitzer Neiße enthalten sind:

- Berücksichtigung der bergbaulichen Grundwasserabsenkung,
- Besonderheiten des Wasserdargebotes im Spreewald,
- Wechselwirkung zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser,
- Wasserentnahmen und -Einleitungen,
- Bewirtschaftung der Talsperren und Speicher sowie Überleitungen und Kanäle,
- Sulfatprognose.

Die erreichte Komplexität hat aber auch eine Kehrseite:

- Der Aufwand für die Laufendhaltung ist groß und hängt von dem Arbeitsfortschritt vieler Beteiligter und dem Wissen voneinander ab,
- Die Nachvollziehbarkeit und Anwendungsbreite des WBalMo-Ländermodells ist geringer geworden. Ausreichend spezialisierte Bearbeiter, die die Akzeptanz und das Vertrauen in das WBalMo-Ländermodell stärken können, sind nicht mehr in allen Institutionen verfügbar, die über seine Nutzung und Weiterentwicklung mitentscheiden.

Für den erforderlichen Anpassungsbedarf steht die Frage im Mittelpunkt, worauf kommt es im WBalMo-Ländermodell für den Kohleausstieg an? In erster Linie sind hier die Aktualisierung eines Teils der Daten des WBalMo-Ländermodells sowie die Einbeziehung von Klimaprojektionen in die Bewertung von Maßnahmen zur wasserwirtschaftlichen Bewältigung des Kohleausstiegs zu nennen. Diese und weitere Aspekte werden nachfolgend detailliert beschrieben.

### **1.4.2 Bilanzierungstaugliche Lösung für klimarelevante Aspekte im WBalMo-Ländermodell**

#### **1.4.2.1 Grundlagen**

Eine bilanzierungstaugliche Lösung für klimarelevante Aspekte für das WBalMo-Ländermodell wird von der im Abschnitt 2.3.1, Klimakomponente WBalMo-Ländermodell: Pflichtenheft, beschriebenen Erweiterung der Software dahingehend abgegrenzt, dass hier die Integration

von Klimaszenarien durch ein geeignetes Pre- und Postprocessing der Eingangs- bzw. Ergebnisdaten erreicht werden soll. Im Weiteren wird der Kürze wegen und zur Kennzeichnung dieses Unterschiedes anstelle des Begriffs „Bilanzierungstaugliche Lösung für klimarelevante Aspekte im WBalMo-Ländermodell“ von der „Klimamethodik Ländermodell“ gesprochen.

Die Vermeidung von Änderungen am WBalMo-Ländermodell wird auch von der Überlegung veranlasst, dass mit der Klimamethodik Ländermodell möglichst zeitnah die Bewertung von Klimaprojektionen möglich sein soll.

Bisherige Anwendungen des WBalMo-Ländermodells für Klimafolgenabschätzungen erfolgten in Zusammenhang mit Forschungsprojekten, Tabelle 2 zeigt eine Übersicht. Darin ist der im WBalMo-Ländermodell verwendete Klimadatensatz mit eingeordnet.

Tabelle 2: Anwendung des WBalMo-Ländermodells für Untersuchungen zum Klimawandel

Klimadatensatz	Prognosehorizont	Bearbeitungszeit	Auftraggeber/ Projekt
„Referenzklima“	2100	1993-2021ff	LMBV und Landeswasserbehörden
STAR 2K	2050	2000-2010	BMBF, GLOWA Elbe
STAR xK	2050	2009-2014	BMBF, INKA BB
ENSEMBLE 2009 (1) EH5r3_RE-ENS Max Planck Institute for Meteorology (2) ARP-ALD51 Météo-France, Centre National de Recherches Météorologiques (3) HCQ0-HRQ0 Hadley Centre for Climate Prediction and Research	2100	2010-2013	BfG, KLIWAS

Methodische Details und ausgewählte Ergebnisse dieser Klimaanalysen werden im Kapitel „Wassermenge“ des Hauptberichts beschrieben. Wesentliche Grundlagen für die im Folgenden beschriebene Klimamethodik Ländermodell legten die Untersuchungen durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG, 2013).

#### 1.4.2.2 Erstellung und Prüfung meteorologischer und hydrologischer Eingangsdaten aus Klimaprojektionen

##### Auswahl der Klimaprojektionen und eines „Referenzklimas“

Auf Empfehlung der Expertengruppe „Klima“ (EG Klima, 03.11.2020) hat die AG Flussgebietsbewirtschaftung die Verwendung des Mitteldeutschen Kernensembles v1.0 (Struve, et al., März 2020), kurz MDK, und des Klimaszenarios RCP8.5 als verbindlich erklärt. Für das MDK sind in einem komplexen Verfahren für drei Klimaszenarien insgesamt 22 Klimaprojektionen ausgewählt worden, die aus bestimmten Realisierungen der Simulationsläufe verschiedener Klimamodellketten stammen. Das Klimaszenario RCP8.5 stellt einen „repräsentativen Konzentrationspfad“ der anthropogenen Einflussfaktoren des

Klimas dar, der sich aus einem „Weiter-so-wie-bisher“ ergibt und die höchste Erwärmung aller Klimaszenarien erzeugt.

Für das Szenario RCP8.5 umfasst das MDK 7 Realisierungen von Modellläufen, die den Zeitraum 1961 bis 2100 umfassen und die Flussgebiete der Spree und Schwarzen Elster vollständig, der Lausitzer Neiße zum Teil, abdecken. Das Informationssystem ReKIS (ReKIS, 2020) enthält neben dem MDK auch WEREX-Ensemble, die umgekehrt zwar die Lausitzer Neiße vollständig abdecken, dagegen fehlt aber der nördliche Teil des Spreeinzugsgebietes. Die 7 Realisierungen des MDK für das RCP8.5 weisen ihrerseits deutliche Unterschiede auf, wie Abbildung 14 zeigt:

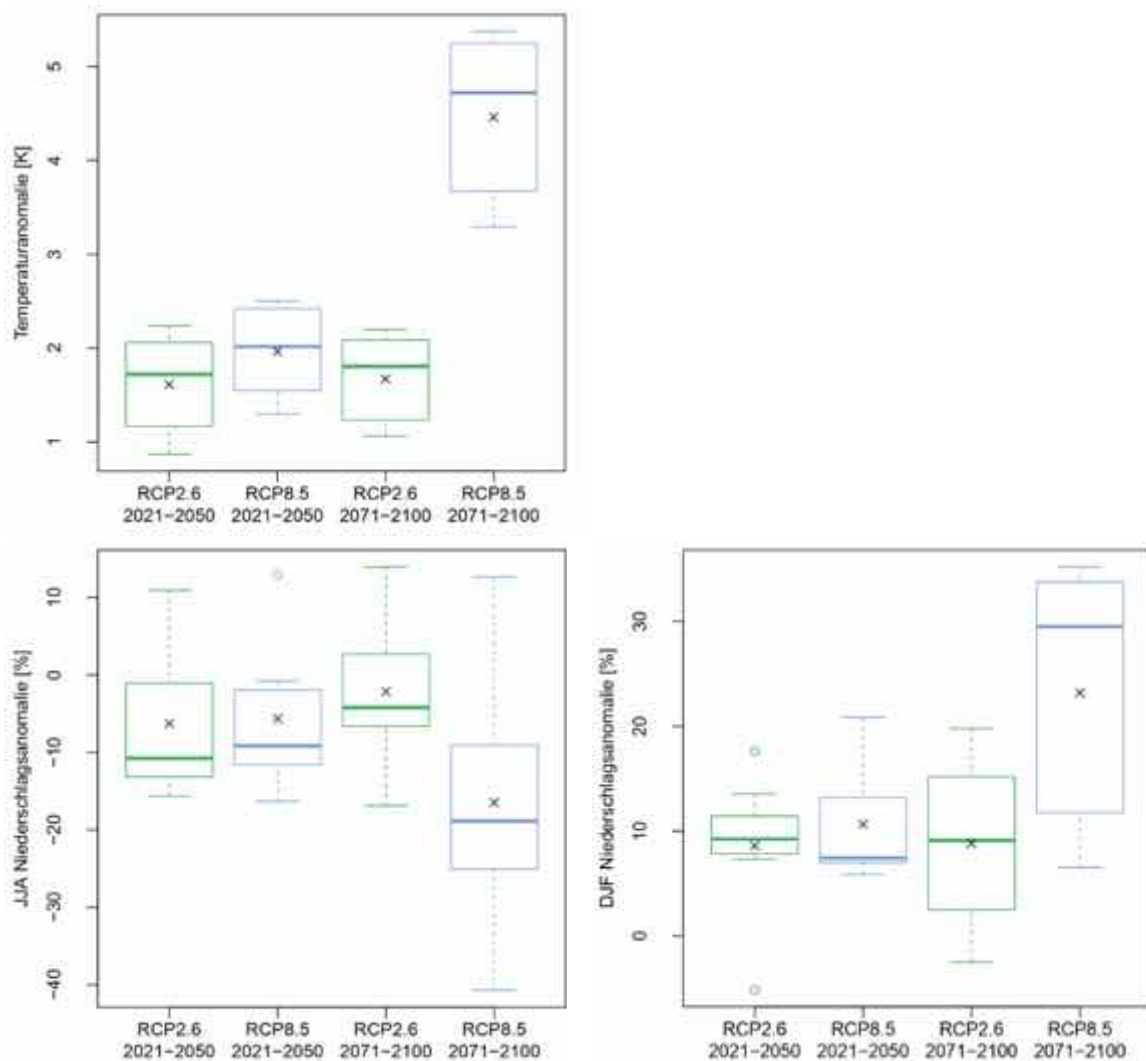


Abbildung 14: Statistik der Realisierungen des RCP2.6 und RCP8.5-Szenarios aus dem MDK für die Zeiträume 2021-2050 und 2071-2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-1990: Temperaturänderung sowie Niederschlagsänderung im Sommer (JJA) und Winter (DJF), aus (Struve, et al., März 2020)

In der Dokumentation des MDK heißt es dazu (Struve, et al., März 2020): „Unterschiedliche Projektionen weisen unterschiedliche Änderungssignale auf, die in Summe die Bandbreite der zukünftigen Klimaänderung bilden. Die zu erwartende Klimaänderung bewegt sich innerhalb dieser Bandbreiten. ... Der (möglichst vollständige) Erhalt dieser Ensemblebandbreite bei der

Reduzierung des Referenzensembles auf Kernensemblegröße ist dabei das Ziel.“ Das Erreichen dieses Zieles ist mit einem Bandbreitenindikator dokumentiert worden.

Damit würde die Entscheidung für eine Realisierung einen bedeutenden Einfluss auf die Ergebnisse haben. Eine Objektivierung dieser Reduktion des MDK wird von der LMBV angestrebt, die auf Empfehlung der Expertengruppe „Klima“ einen Vergleich der relevanten Parameter (Temperatur, Niederschlag, Verdunstung, ...) aller 7 Projektionen mit und ohne bias-Adjustierung vornehmen lässt, um auf dieser Grundlage zu entscheiden, welche Datensätze bei der Weiterbearbeitung Verwendung finden sollen (EG Klima, 10.05.2021). Dieser Weg kann optional auch für das WBalMo-Ländermodell gegangen werden. Zunächst soll aber die zitierte Zielstellung des MDK, die Bandbreite der Klimaänderung möglichst vollständig zu erhalten, auf einfache, direkte Weise beibehalten werden. Das WBalMo-Ländermodell bietet die technischen und methodischen Voraussetzungen für die Integration aller 7 Realisierungen, da seine Anwendung ohnehin an der Monte-Carlo-Methode ausgerichtet ist. Das konkrete Vorgehen ist im Abschnitt „Erstellung statistisch stationärer und instationärer Dargebotsdaten“ nachfolgend beschrieben.

Im Mittelpunkt der Klimamethodik Ländermodell steht die Ermittlung des Klimaänderungssignals in Bezug auf den Umfang der Wasserbereitstellung, die Sicherheit der Einhaltung von Mindestdurchflüssen usw. Als Bezug für die Klimaänderung dient das „Referenzklima“, das als das gegenwärtige Klima verstanden wird. Der Begriff des „Referenzklimas“ soll hier verwendet werden, um sich von dem beim Vergleich der Klimaprojektionen benutzten „Referenzzeitraum“ und einem bereits wertenden Begriff des „Istklimas“ abzugrenzen. Die Abgrenzung eines repräsentativen Zeitabschnittes für das gegenwärtige Klima ist nicht eindeutig geklärt. Einerseits weisen Analysen der Messwerte des Zeitraumes 2001-2020 eine deutliche Häufung warmer und trockener Jahre auf. Andererseits liegen in den zum Vergleich benutzten, früheren Zeiträumen die maßgebenden Trockenperioden der beiden sächsischen Talsperren im Spreengebiet. Die Abwägung dieser zumindest auf den ersten Blick gegensätzlichen Indizien führte bisher beim Anwenderkreis WBalMo-Ländermodell zu der Schlussfolgerung, stets die maximal mögliche Reihenlänge heranzuziehen. Bei der letzten Erweiterung des Dargebotsmodells in den Jahren 2008/2009 war das die Reihe 1951 - 2006. Für die Aktualisierung des Referenzklimas wird der Zeitraum 1951 - 2020 angestrebt.

Wie im Abschnitt 1.4.2.4, Auswertung der Ergebnisse nach der Klimamethodik Ländermodell, beschrieben werden wird, wird für die „Biaskorrektur“ der Ergebnisse auch ein „Bezugsklima“ aus den Realisierungen des MDK benötigt. Der dafür zu wählende Zeitabschnitt orientiert sich am Anliegen der Biaskorrektur, nämlich die Abweichungen des Klimamodells von den gemessenen Werten des als „aktuell“ aufgefassten Klimas zu erfassen. Dafür wird möglichst der gleiche Abschnitt wie für das erweiterte Referenzklima angestrebt. Da die Modellläufe des MDK 1961 beginnen, ist dieses Jahr der Beginn und das Jahr 2020 das letzte Jahr des Bezugsklimas.

Abschließend ist noch die Frage zu klären, ob mit der Wahl des Referenzklimas noch die Absicht realisierbar ist, diese Dargebotsdaten dem Klimaszenario RCP2.6 zuzuordnen (EG Klima, 03.11.2020). Dem widerspricht, dass die Messungen 2001-2020 für das Untersuchungsgebiet in guter Näherung dem RCP2.6 zum Ende 21. Jahrhunderts

entsprechen (EG Klima, 03.11.2020). Die Variabilität der Witterung in den Realisierungen des MDK für das RCP2.6 gegenüber dem Referenzzeitraum 1961-1990 lässt annehmen, dass das Referenzklima noch am unteren Rand der Statistik der MDK-Realisierungen liegt. Der Aufwand für die gesonderte Betrachtung der Realisierungen des RCP2.6 wird daher als nicht gerechtfertigt angesehen.

### **Erstellung statistisch stationärer und instationärer Dargebotsdaten**

Das WBalMo-Ländermodell nutzt die Monte-Carlo-Methode für Risikoanalysen. Dafür erfolgt eine statistische Erweiterung der Eingangsdaten, in der Regel Messdaten. D. h. im Einzelnen, dass ein stochastisches Modell auf der Grundlage dieser Messdaten parametrisiert wird. Die erzeugten Daten sind dem Modellprinzip folgend statistisch stationär. Für die erforderliche praktische (die mathematische ergibt sich zwingend) Konsistenz zwischen Messdaten und simulierten Daten, müssen auch die Messdaten stationär sein.

Für die Simulation der Dargebotsdaten aus Klimaprojektionen finden die Realisierungen des MDK Verwendung. Sie sind per Definition statistisch nicht stationär. Dieser Widerspruch wird aufgelöst, indem Zeitabschnitte der Realisierung herausgelöst und als ausreichend stationär angesehen werden. Auf einen statistischen Nachweis soll verzichtet werden. Es wird als ausreichend erachtet, dass dies prinzipiell bereits nachgewiesen wurde (BfG, 2013). Da in der Analyse von Klimaprojektionen die Zeiträume 2021-2050 (Klima der „Nahen Zukunft“) und 2071-2100 (Klima der „Fernen Zukunft“) bereits etabliert sind, liegt es nahe, sie auch für das WBalMo-Ländermodell zu verwenden, zumal die Länge der Zeitabschnitte von 30 Jahren die Mindestanforderungen für eine ausreichende statistische Sicherheit der zu ermittelnden Parameter erfüllt.

Unter Einbeziehung der im vorhergehenden Abschnitt definierten Referenz- und Bezugsklimata ergeben sich:

- Referenzklima aus Messwerten des Zeitraumes 1951-2020,
- Bezugsklima aus Daten der Modellläufe für den Zeitraum 1961-2020,
- Klima der „Nahen Zukunft“ aus Daten der Modellläufe für den Zeitraum 2021-2050,
- Klima der „Fernen Zukunft“ aus Daten der Modellläufe für den Zeitraum 2071-2100.

Diese Zeitreihen werden nun zur Parametrisierung eines stochastischen Modells benutzt. Anschließend können für den gesamten Prognosehorizont des WBalMo-Ländermodells die benötigte Anzahl von Realisierungen stationärer Dargebotsdaten erzeugt werden.

Abbildung 15 illustriert die Zusammenhänge zwischen den Zeitabschnitten der Klimaprojektionen und der Zeitstruktur des WBalMo-Ländermodells.

Es sei daran erinnert, dass letztlich für insgesamt 64 Teileinzugsgebiete der Abfluss mit spezifischen Parametern erzeugt werden muss, siehe Abschnitt 1.2.2, Zusammenfassung zu Witterung und Abfluss, mit Abbildung 8, Meteorologische Teilgebiete (MetTG) von SESIM08 und der Lausitzer Neiße, und Abbildung 9, Simulationsteilgebiete (STG) im WBalMo-Ländermodell.

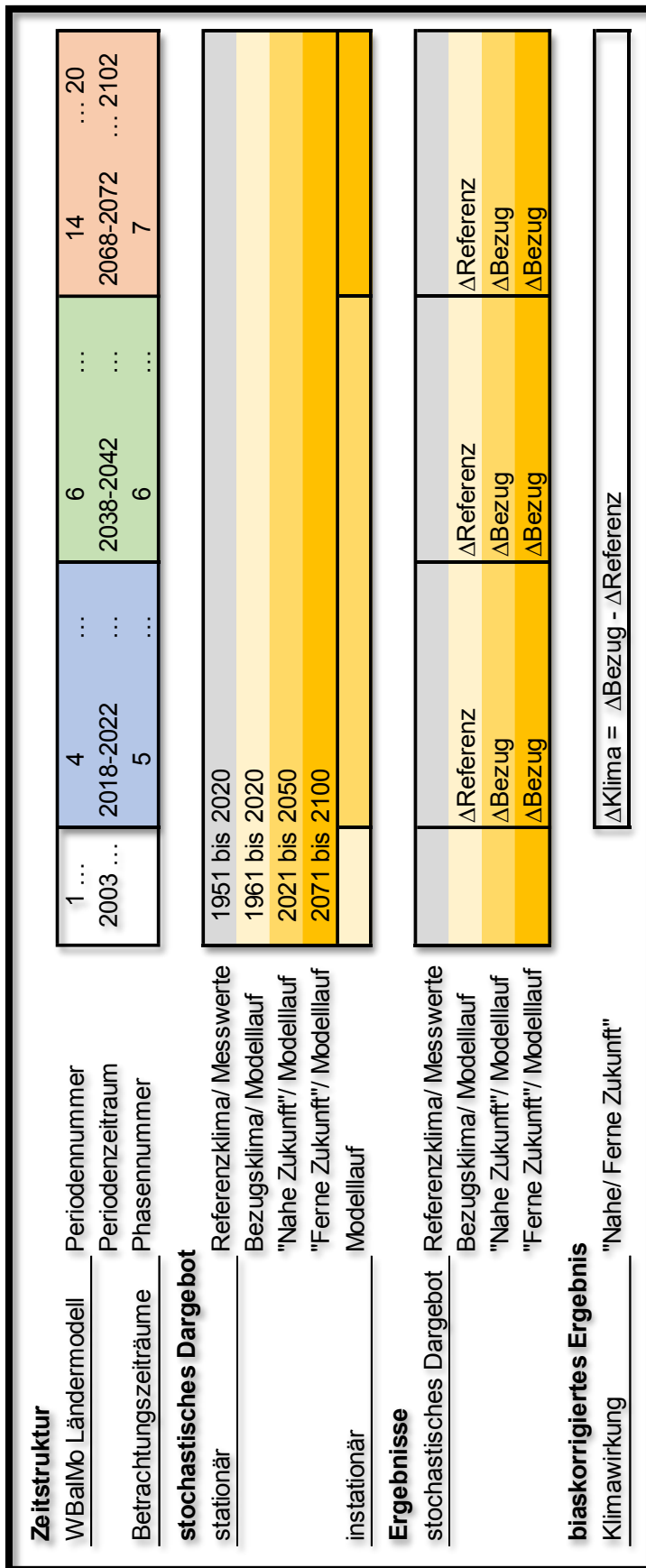


Abbildung 15: Verwendung von Klimaprojektionen im WBalMo-Ländermodell

Die Simulation der Wasserbewirtschaftung mit stationären Dargebotsdaten aus Klimaprojektionen ist nur anwendbar, wenn ausschließlich bestimmte Phasen des wasserwirtschaftlichen Systems bewertet werden sollen. Dann sind die mit dem untersuchten Zeitraum jeweils konsistenten Dargebotsdaten zu verwenden, z. B. für (eine Periode der) Phase 5 die „Nahe Zukunft“, siehe Abbildung 15. Besteht die Fragestellung in der Analyse von Zeitdauern oder damit verknüpfter Werte (z. B. Flutungsdauer, Flutungsmenge, Betriebsbereitschaft) sind stationären Dargebotsdaten ungeeignet. Die Dargebotsdaten müssen dann, wie die Klimaprojektionen des MDK, den instationären Verlauf des Klimas wiedergeben. Dies erfolgt, indem die zugehörigen Zeitabschnitte aus den stationären Dargebotsdaten herausgetrennt und wieder zusammengefügt werden. Eine Realisierung der Eingangsdaten enthält dann in Bezug auf den Prognosehorizont des WBalMo-Ländermodells:

- Daten des Bezugsklimas zu 2003 bis 2017,
- Daten des Klimas der „Nahen Zukunft“ von 2018 bis 2067,
- Daten des Klimas der „Fernen Zukunft“ von 2068-2102.

Auf das Zusammenwirken von meteorologischen und hydrologischen Daten an den Grenzen der Zeitabschnitte wird im folgenden Abschnitt eingegangen.

### Niederschlag-Abfluss-Simulation und optionale Anwendung eines Wasserhaushaltsmodells

Zum WBalMo-Ländermodell gehört die stochastische Simulation meteorologischer Daten und ihre anschließende Verwendung als Eingangsdaten für die Niederschlag-Abfluss-Simulation. Der prinzipielle Ablauf ist auf der linken Seite der folgenden Abbildung 16 gezeigt und wird nachfolgend erläutert.

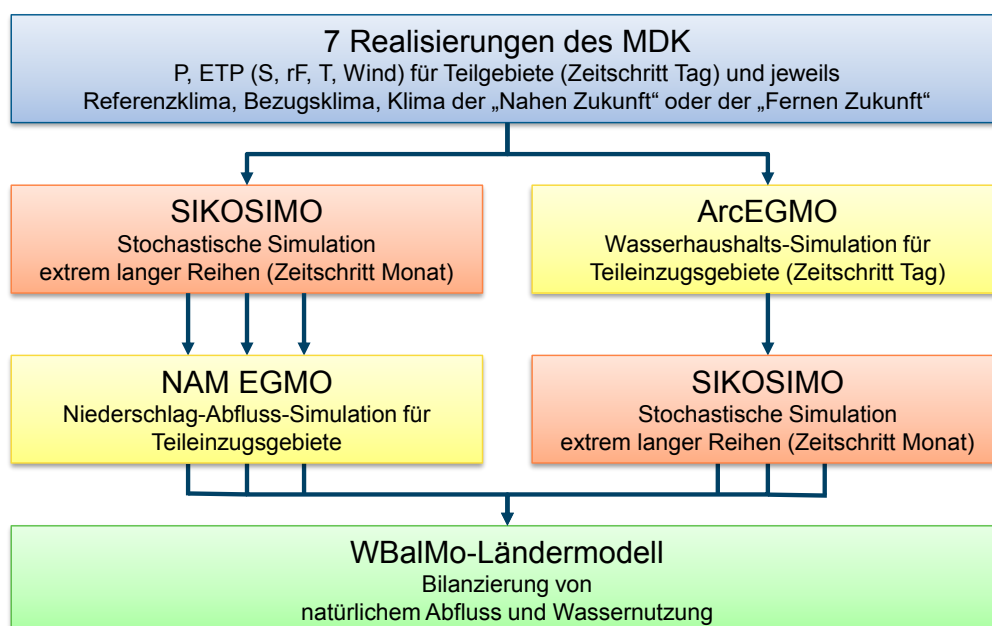


Abbildung 16: Prinzipschema der Erzeugung der meteorologischen und hydrologischen Eingangsdaten für das WBalMo-Ländermodell



Die Erzeugung stationärer Dargebotsdaten erfolgt, indem z. B. für das Klima der „Nahen Zukunft“ 7x30 Jahre Witterungsdaten aneinandergereiht werden. In den resultierenden 210 Jahren sind an 6 Jahresgrenzen die Korrelationen, ohnehin gering beim Niederschlag, gestört. Das wird als unerheblich angesehen, da die Simulationsbeziehungen des stochastischen Modells von den verbleibenden 204 Übergängen zwischen Dezember und Januar bestimmt werden.

Die Erzeugung instationärer Dargebotsdaten erfolgt, indem die mit dem stochastischen Modell erzeugten langen Reihen von Witterungsdaten fortlaufend aus den drei Datenquellen für die Klimata aneinandergereiht werden. D. h., aus dem Bezugsklima werden die ersten 15 Jahre entnommen, dann werden die Jahre 16 bis 65 aus den Klimadaten der „Nahen Zukunft“ und die Jahre 66 bis 100 aus denen der „Fernen Zukunft“ angefügt, vgl. Abbildung 15. Das ergibt die erste Realisierung. Danach wird mit dem Jahr 101 des Bezugsklimas in gleicher Art und Weise fortgesetzt, bis die erforderliche Anzahl von Realisierungen erzeugt ist. Die zeitrichtige Zuordnung aus den Datenquellen ist erforderlich, um einen Einfluss der Sequenz des Zufallszahlengenerators des stochastischen Modells auszuschließen. Je 100 Jahre sind also an drei Jahresgrenzen die Korrelationen gestört. Dies ist ebenfalls vernachlässigbar, da zusätzlich noch das nachfolgende Niederschlag-Abfluss-Modell über das „Gedächtnis“ des Einzugsgebietes, die Linearspeicher, die Korrelationen weitgehend wiederherstellt.

Alternativ kann mit einem Wasserhaushaltsmodell, aus dem für das WBalMo-Ländermodell nur der Abfluss benötigt wird, die Simulation der Abflüsse vorgenommen werden, vgl. rechte Seite der Abbildung 16. Hier muss die Abfolge der Modelle getauscht werden: Das Wasserhaushaltsmodell rechnet im Tagesschritt, um den Bodenwasserhaushalt prozessgerecht abbilden zu können. Die Analyse- und Simulationsbeziehungen der stochastischen Modelle sind für Monatswerte entwickelt worden. Daher müssen zuerst die Abflüsse simuliert werden, die dann nach Aggregation zu Monatswerten weiterverwendet werden können.

Für die Erzeugung der Abflussdaten gilt das zuletzt für instationäre Dargebotsdaten erläuterte: Inkonsistenzen an den Jahresgrenzen verschwinden über die Persistenzeigenschaften der Modellansätze nahezu vollständig. Für die anschließende stochastische Simulation der stationären Abflussdaten sind also keine Inkonsistenzen gegeben. Das Zusammensetzen der instationären Dargebotsdaten erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie oben. Da danach die Abflussdaten direkt in das WBalMo-Ländermodell eingehen, verbleiben die unterbrochenen Korrelationen an drei Jahresgrenzen je 100 Jahre. Das erscheint als vernachlässigbar.

### **Analyse der Güte der Abflusssimulation**

Für den bestehenden Komplex der 64 Niederschlag-Abfluss-Modelle des WBalMo-Ländermodells ist unmittelbar keine Notwendigkeit einer neuen Kalibrierung gegeben, wengleich für die meisten Modelle dies noch manuell erfolgte, während aktuell die Kalibrierung automatisiert auf der Basis von PEST erfolgt (Watermark Numerical Computing, 2010). Das folgende Beispiel illustriert das Vorgehen mit PEST für den Pegel Bautzen/ Weite Bleiche (Abbildung 17).

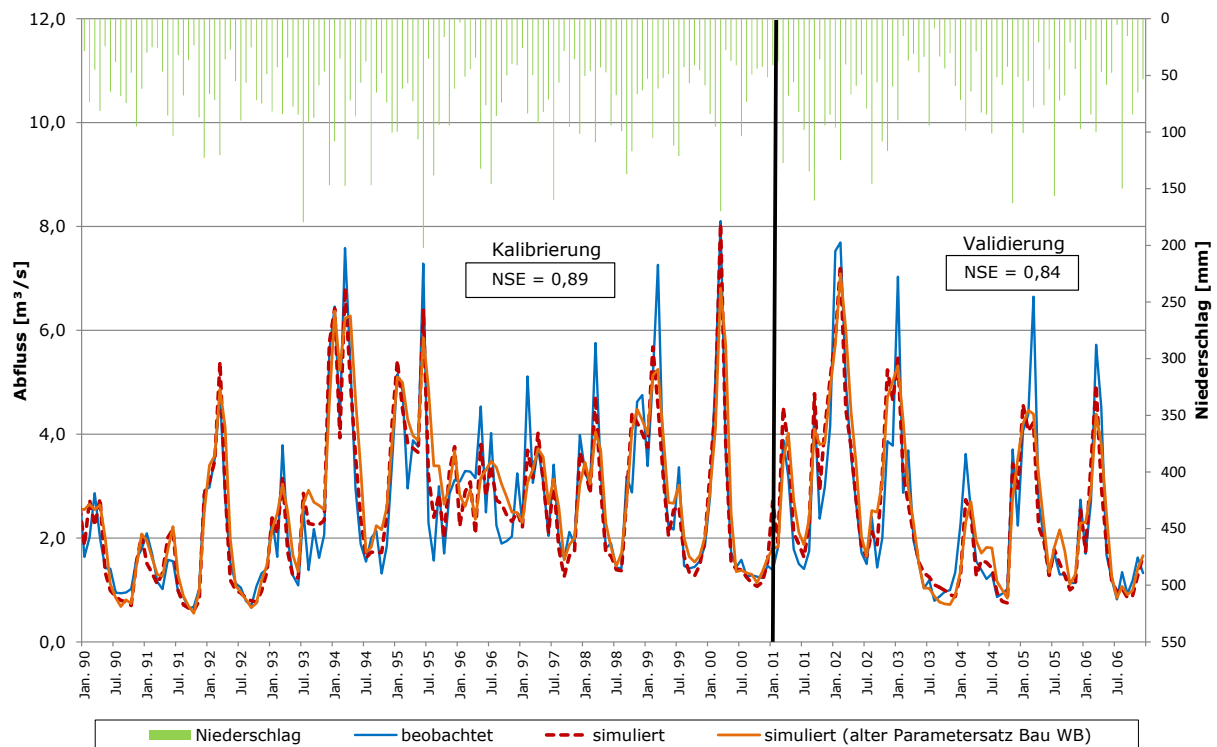


Abbildung 17: Gegenüberstellung der beobachteten und simulierten Abflüsse am Pegel Bautzen Weite Bleiche / Spree

Die vorhandenen Messdaten werden zunächst um Nutzungen bereinigt. Anschließend wird die verfügbare Zeitreihe in einen Kalibrierungs- und einen Validierungszeitraum unterteilt. Der Kalibrierungszeitraum wird von PEST genutzt, um die Abweichungen zwischen Simulation und bereinigten Messungen zu minimieren, indem Parameter des Niederschlag-Abfluss-Modells variiert werden. Im Validierungszeitraum wird geprüft, wie die gefundenen Parameter in einem Abschnitt funktionieren, der nicht zur Kalibrierung diente. Abschließend werden Gütemaße und das langfristige Verhalten der simulierten Daten geprüft (Abbildung 18).

Wenn die Verwendung eines anderen Modells für die Simulation der Abflüsse in Betracht gezogen wird, ein Wasserhaushaltsmodell oder ein konzeptionelles Modell, dann sind vorher eine Reihe von Aspekten zu bewerten. Zunächst ist der Aufwand für den Aufbau eines mit dem bereits für alle 64 Teilgebiete bestehenden Komplex von Niederschlag-Abfluss-Modellen qualitativ vergleichbaren Systems gegen den Nutzen abzuwägen. Dabei sind auch die notwendigen Vergleichsrechnungen mit dem WBalMo-Ländermodell zu berücksichtigen, um die Simulationsgüte des Abflussmodells auch von der Seite des Bewirtschaftungsmodells zu prüfen. Darüber hinaus sind Parallelentwicklungen zu vermeiden und einheitliche Instrumente für vergleichbare Fragestellungen anzustreben. Auch die gleichzeitige Einbindung in die operationelle Anwendung für das GRMSTEU einschließlich der Notwendigkeit einer automatisierten Nachführung ist zu beachten. Eine Abwägung ist an dieser Stelle nicht möglich und liegt auch nicht im Ermessen der Autoren.

**Bautzen WB / Spree**

**Mittlere Monatsabflüsse in m³/s**

Monat	Kalibrierungszeitraum		Validierungszeitraum	
	beo	sim	beo	sim
1	3,23	3,23	4,00	3,61
2	3,60	3,43	3,85	3,77
3	4,60	4,19	4,58	3,89
4	3,11	3,06	2,92	2,68
5	2,35	2,29	1,83	1,96
6	2,22	2,24	1,32	1,51
7	2,10	2,03	1,32	1,45
8	1,44	1,60	1,41	1,50
9	1,73	1,65	1,66	1,77
10	1,55	1,72	1,44	1,63
11	2,00	2,03	2,39	2,68
12	3,05	3,06	2,59	2,96
Mittel	2,58	2,54	2,44	2,45
proz. Abw.		-1,4		0,2
So	1,90	1,92	1,50	1,63
Wi	3,26	3,17	3,39	3,26
Spende	9,4	9,2	8,9	8,9
AE	276 km²			

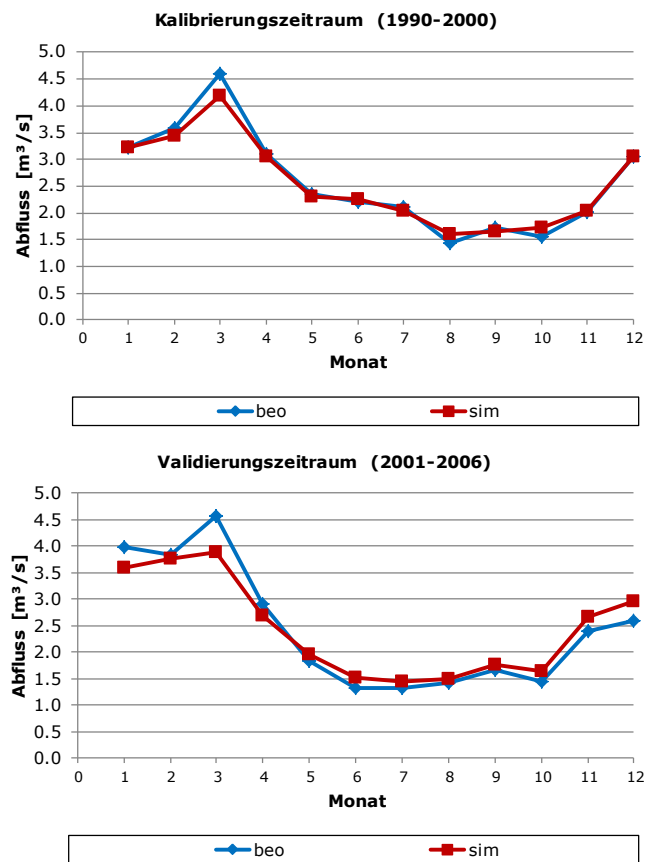


Abbildung 18 Gegenüberstellung der mittleren monatlichen Abflüsse (Jahr, Winter, Sommer) und der mittleren Jahrgänge am Pegel Bautzen WB / Spree (Kalibrierungs- und Validierungszeitraum)

**Analyse der Güte der stochastischen Simulation**

Die stochastische Simulation wird über statistische Tests für den Vergleich der Eingangsdaten mit den simulierten Daten geprüft. Dabei darf die Prüfgröße des Testkriteriums die Testgröße für eine vorgegebene Konfidenzschwelle, meist  $p = 0.05$ , nicht überschreiten. In einem ersten Schritt werden die Eingangsdaten mit verschiedenen Verteilungstypen in den standardnormalverteilten Bereich transformiert. Die Güte der Anpassung wird z. B. mit dem N-Omega<sup>2</sup>-Kriterium beurteilt. Für alle Teilgebiete und Prozesse werden die Testergebnisse in Boxplots zusammengefasst und ermöglichen so die begründete Zuordnung eines Verteilungstyps. Ein Beispiel dafür zeigt Abbildung 19.

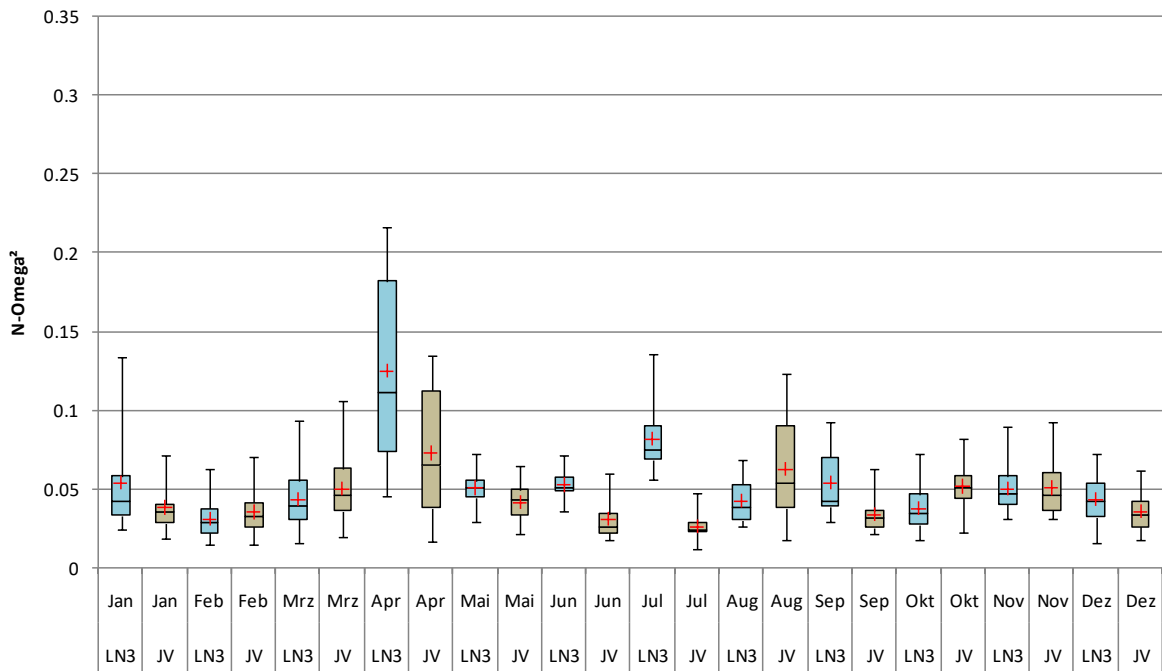


Abbildung 19: Statistische Auswertung des N-Omega<sup>2</sup>-Kriteriums für 2 Verteilungstypen (BfG, 2013)

Der Vergleich der simulierten Daten mit den Eingangsdaten erfolgt über Tests auf die Nullhypothese der statistischen Identität der Häufigkeitsverteilungen bzw. der Auto- und Kreuzkorrelationen. Dazu werden der Kolmogorov-Smirnov-Test bzw. der Z-Test genutzt. Eine exemplarische Darstellung der Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests für die Häufigkeitsverteilungen zeigt Abbildung 20.

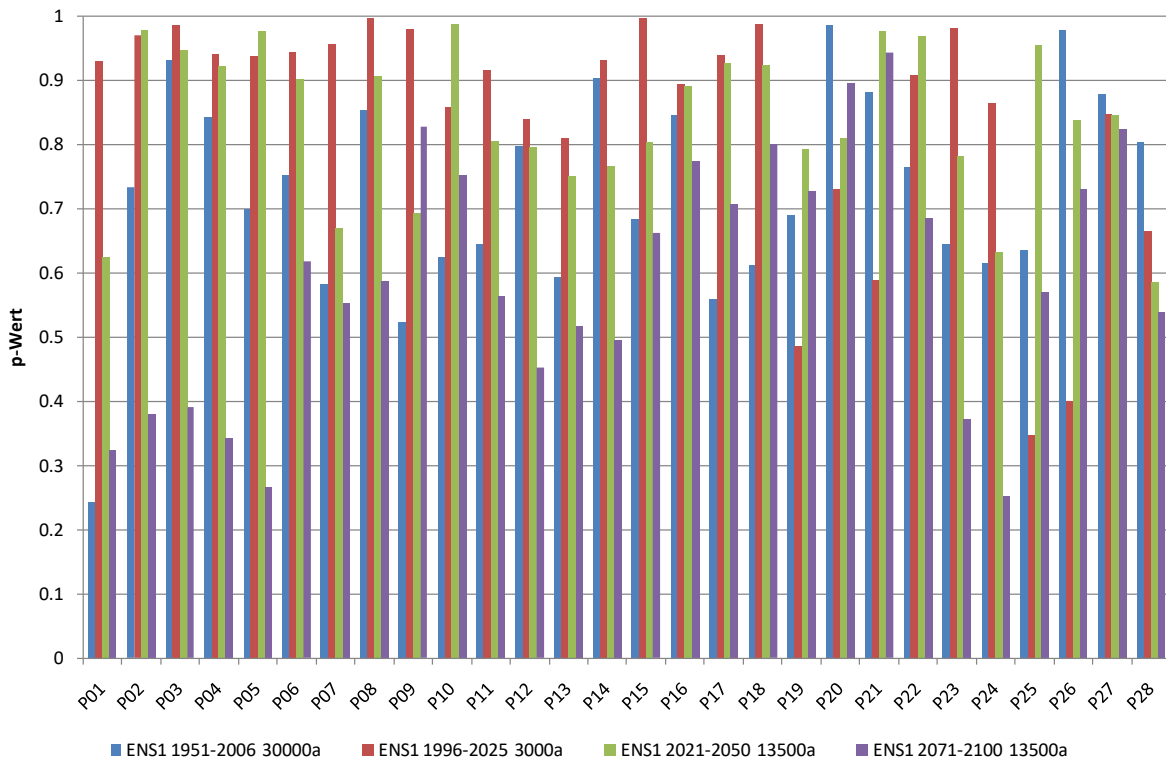


Abbildung 20: Kolmogorov-Smirnov-Test p-Werte, ENS1, Niederschlag (BfG, 2013)

Sie zeigt für vier verschiedene Zeitabschnitte einer Klimaprojektion in 28 Teilgebiete den Vergleich zwischen den Häufigkeitsverteilungen einerseits der Realisierung und andererseits der daraus erzeugten stochastischen Zeitreihe anhand des p-Wertes. Der p-Wert gibt die Wahrscheinlichkeit an, dass die Nullhypothese des Kolmogorov-Smirnov-Tests, dass die verglichenen Häufigkeitsverteilungen statistisch identisch sind, nicht abgelehnt werden kann. Hohe Werte geben demzufolge eine hohe Übereinstimmung an. Ist der p-Wert kleiner als 0,05 wird ein signifikanter Unterschied angenommen.

#### **1.4.2.3 Anpassung der wasserwirtschaftlichen Simulation**

Die Simulation der instationären Wasserbewirtschaftung ist der Standard für das WBalMo-Ländermodell. Vorkehrungen müssen nur für den Fall stationärer Fragestellungen getroffen werden, wie z. B. in den Untersuchungen zu den Immissionsrichtwerten (DHI WASY, 2019a) oder zum Zuschusswasser aus den sächsischen Talsperren (DHI WASY, 2021). Diese Untersuchungen erfordern das Einstellen des WBalMo-Ländermodells auf eine bestimmte Bewirtschaftungsvariante. Dafür müssen dann die betroffenen Modellobjekte und Regeln über Parametersetzungen fixiert werden, damit sie nicht mehr der Prognose im WBalMo-Ländermodell unterliegen. Dabei handelt es sich z. B. um die Betriebsbereitschaft eines Speichers oder einer Überleitung oder den Flutungsabschluss eines Bergbaufolgesees.

#### **1.4.2.4 Auswertung der Ergebnisse**

##### **Klimaänderung und Betrachtungszeiträume für die Wirkungsanalyse**

Für die Analyse von Klimaprojektionen haben sich als geeignete prognostische Zeiträume die „Nahe Zukunft“ (2021-2050) und „Ferne Zukunft“ (2071-2100) erwiesen. Als Vergleich zum bisherigen Klima wird häufig der „Referenzzeitraum“ 1961-1990 benutzt. Diese Zeiträume sind einerseits lang genug, um für Vergleiche ausreichend sichere statistische Aussagen zu treffen und sind andererseits so im Simulationszeitraum der Klimamodelle angeordnet, dass die Unterschiede im Klima von Relevanz sind. Für wasserwirtschaftliche Untersuchungen in der Lausitz sind die Zeiträume allerdings nur wenig geeignet. Die in kurzen Zeiträumen ablaufenden, signifikanten Änderungen in der wasserwirtschaftlichen Situation gehen hier von der Einleitung von Grundwasser durch den Bergbau und der Bewirtschaftung der Speicher und Überleitungen aus (Inbetriebnahme WSS Lohsa II und Bärwalde, Nutzung des NWA-Zuschusswassers aus den sächsischen Talsperren, Überleitung von Weißwasser). Um eine Vermischung mit den Änderungen der Witterung in den Klimaprojektionen zu vermeiden, müssen also diese Zeitpunkte besonders beachtet werden. Diesem Konzept folgen die Betrachtungszeiträume in Kapitel 3.2 des Hauptberichts, die in Abbildung 21 noch einmal gezeigt werden.

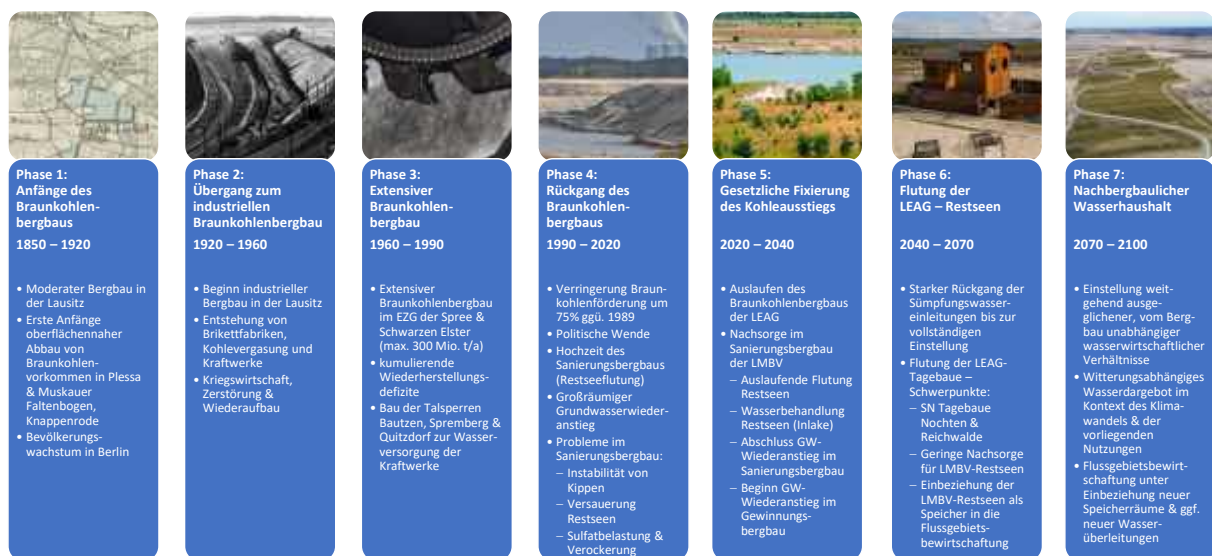


Abbildung 21: Gliederung des Betrachtungszeitraums in Phasen

Für die wasserwirtschaftliche Fragestellungen ergeben sich aus der Überlagerung der klimatischen und wasserwirtschaftlichen Änderungen folgende Schlussfolgerungen:

- Bis zum Kohleausstieg sind aus den Klimaprojektionen die Zeitabschnitte der „Nahen Zukunft“ (2021-2050) anzuwenden,
- Unmittelbar nach dem Kohleausstieg kann ebenfalls die „Nahe Zukunft“ verwendet werden,
- Dem nachbergbaulichen Wasserhaushalt sind die Klimaprojektionen im Zeitraum „Ferne Zukunft“ (2071-2100) zuzuordnen.

Für das Periodenkonzept des WBaIMo-Ländermodells (vgl. Abschnitt 1.2.1) heißt das, dass die Perioden 4 bis 13 zur „Nahen Zukunft“ gehören, alle ab Periode 14 zur „Fernen Zukunft“.

### Wirkungsanalyse und Bias der Klimaprojektionen

Für die Bewertung des Klimaeinflusses ist zu beachten, dass die Klimaprojektionen im Zeitraum des Bezugsklimas von den gemessenen Werten abweichen. Um die Übertragung dieser Abweichung in die prognostischen Zeiträume zu vermeiden, erfolgt eine sogenannte Bias-Korrektur. Dieses Vorgehen weist Vor- und Nachteile auf. Nach den Erfahrungen bei der Nutzung des WBaIMo-Ländermodells können allerdings die Unterschiede trotz Bias-Korrektur der meteorologischen Eingangsdaten bei den Ergebnissen des Bewirtschaftungsmodells bestehen bleiben, wie die folgende Abbildung 22 u. a. für den Gesamtabfluss der Spree bei Mittelwasser zeigt: HYRAS steht dabei für die (auf Raster interpolierte, biaskorrigierte) gemessene Witterung, während die drei anschließenden Säulen die Ergebnisse verschiedener Klimamodelle zeigen.

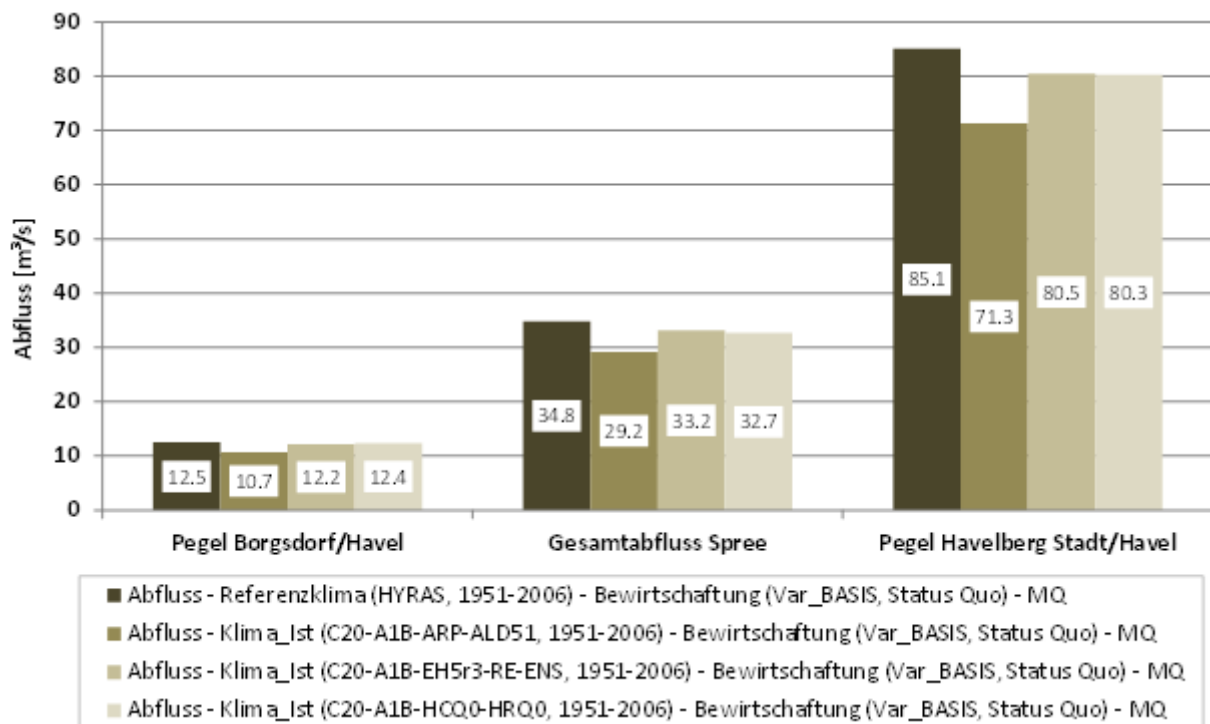


Abbildung 22: MQ der Pegel Borgsdorf und Havelberg Stadt sowie des Gesamtabflusses der Spree für den Status Quo bei den betrachteten Dargebotsszenarien auf Basis des Zeitraumes von 1951-2006 (BfG, 2013)

Ausgehend davon ist eine Berücksichtigung dieses „Versatzes“ der Klimaprojektionen bei der Wirkungsanalyse zwingend, unabhängig davon, ob eine Bias-Korrektur der Eingangsdaten erfolgte oder nicht. Um aber die Zahl der Transformationen der Eingangsdaten so klein wie möglich zu halten, erscheint die Verwendung unkorrigierter Daten geeigneter.

Der Versatz der prognostischen Ergebnisse auf der Basis der Klimaprojektionen muss für die Ergebnisse des WBaIMo-Ländermodells berücksichtigt werden. Das Vorgehen für die meteorologischen Daten, den Versatz aus der Vergangenheit in die Zukunft zu übertragen, kann dabei nicht direkt übernommen werden, da sich die wasserwirtschaftlichen Systeme vor und nach dem Kohleausstieg deutlich unterscheiden. Stattdessen werden Modellergebnisse in Bezug auf Dargebotsdaten für das Referenzklima, aus historischen gemessenen Daten, und das Bezugsklima, für den historischen Abschnitt der Klimaprojektionen, für die Zeiträume vor und nach dem Kohleausstieg miteinander verglichen und ein  $\Delta$ Referenz berechnet (vgl. Abbildung 15). Dieser Versatz wird relativ zum Ergebnis in Bezug auf das Referenzklima ausgewiesen. Die gleiche Berechnung erfolgt für das  $\Delta$ Bezug, jetzt relativ zum Ergebnis aus den Dargebotsdaten des Bezugsklimas. Die relative, biaskorrigierte Änderung  $\Delta$ Klima der Ergebnisse aus der Klimaänderung ergibt sich aus der Änderung  $\Delta$ Bezug nach Abzug des relativen Versatzes  $\Delta$ Referenz der Bezugsklima-Ergebnisse zu den Referenzklima-Ergebnissen. Diese Korrektur muss für jeden Indikatortyp (Mittelwert, Perzentil) und jedes wasserwirtschaftliche Element (Defizit der Wasserbereitstellung, Durchfluss, Betriebsraum) separat durchgeführt werden, da die  $\Delta$ Referenz und  $\Delta$ Bezug vermutlich spezifisch sind. Die absolute Änderung kann man wiederum durch Multiplikation der relativen, biaskorrigierten Änderung  $\Delta$ Klima mit dem entsprechenden Wert für das Referenzklima erhalten.

Abschließend sei noch darauf hingewiesen, dass die Extrapolation der historischen Daten, der Daten des Klimas für die Nahe oder Ferne Zukunft auf den gesamten Prognosezeitraum des WBalMo-Ländermodells durch die stochastische Simulation der Dargebotsdaten erfolgt (siehe vorherigen Abschnitt 1.4.2.2).

### **Analyse von Extremereignissen ausgeprägter Niedrigwasserphasen**

Die Analyse der wasserwirtschaftlichen Auswirkungen von Szenarien des Klimawandels muss sich insbesondere auf ausgeprägte Niedrigwassersituationen fokussieren. Bereits die Erfahrungen der vergangenen Niedrigwasserjahre zeigen, dass im Spreegebiet der Übergang von „noch durch Speicherabgaben beherrschbar“ zu „das wenige Wasser muss noch für viele Wochen reichen“ innerhalb kurzer Zeiträume erfolgt. Dies ist auf den heute, wie auch künftig enorm ausgleichenden Einfluss der Bewirtschaftung auf die Wasserverfügbarkeit zurückzuführen: Die wasserwirtschaftlichen Verhältnisse des Flussgebietes sind über einen bestimmten Bereich der Ausprägung von Trockenheit stabil. Wird diese Belastungsgrenze überschritten, nimmt die Wasserknappheit deutlich überproportional zu. Dieser Kipppunkt ist jenseits eines Wiederkehrintervalls von  $T = 10$  a zu vermuten.

Zum Vergleich: Anhand der 100 Szenarien (=Realisierungen, siehe Abschnitt 2.1.3) des WBalMo-Ländermodells für den Flutungsverlauf des Cottbuser Ostsees konnte für den Ende 2019 erreichten Flutungsstand ein Wiederkehrintervall von ca. 35 Jahren abgeschätzt werden. Die Entwicklung und Bewertung von Bewirtschaftungsszenarien für vergleichbare Niedrigwassersituationen erfordert daher die Betrachtung von Wiederkehrintervallen von  $T = 50$  a und 100 a. Dies würde – bildlich gesprochen – eine Lupe für die Analyse trockener bis extrem trockener Ereignisse mit Überschreitungswahrscheinlichkeiten deutlich kleiner als 10 % bereitstellen. Dafür bieten die 100 Realisierungen des WBalMo-Ländermodells gegenwärtig eine zu schmale Datenbasis. Ihre Erweiterung würde auch die vergleichende Betrachtung prognostischer und bereits durchlebter Niedrigwassersituationen ermöglichen, was die Anschaulichkeit der Modellergebnisse erhöhen und die Wirkungen alternativer Steuerungen nachvollziehbarer illustrieren würde. Die auf diese Weise extrahierten Szenarien erlauben eine Bewertung der Bewirtschaftung zusätzlich zur statistischen Einordnung. So begründete Maßnahmenpläne für eben diese extremen Fälle können als politische Grundlage zur zukünftigen Strategieentwicklung bis hin zur Nutzungspriorisierung eingesetzt werden.

Das Problem der Erweiterung auf 1.000 oder 10.000 Realisierungen liegt in der Effizienz der Simulation durch die WBalMo Software. Das WBalMo-Ländermodell benötigt für 100 Realisierungen ca. 6 Stunden Simulationszeit, wenn alle Module, einschließlich aller Registrierungen, aktiviert sind. 1.000 Realisierungen können bis zu 2,5 Tage benötigen. Daher wäre die Prüfung und Entwicklung von Varianten des WBalMo-Ländermodells sowie erste Abschätzungen auf der Basis von Wiederkehrintervallen bis zu  $T = 10$  a mit 100 oder weniger Realisierungen durchzuführen, für Tests genügen auch 5. Die Ergebnisse werden dann mit 1.000 Realisierungen erzielt. Da dann Excel-basierte Berechnungen der monatlichen Ergebnisse nicht mehr möglich sind, würden generell Python-Skripte zur Auswertung benutzt. Dafür liegen bereits Erfahrungen mit dem WBalMo-Ländermodell vor.



### 1.4.3 Schnittstellen zu anderen Modellen

Im Abschnitt 1.1.9 wurde dargestellt, dass über dynamische Bibliotheken die Kopplung beliebiger Software nicht nur auf Zeitschrittebene, sondern auch je Bilanzierungsschritt möglich wäre. Zugleich ist es häufig gar nicht möglich, Modelle direkt zu koppeln, z. B. ein detailliertes Grundwassermodell: Methodisch-technisch aufgrund der unterschiedlichen Modellprinzipien (Finite Volumen/ Elemente vs. Querschnitte im Flusslängsschnitt) sowie der Notwendigkeit, bidirektional Daten auszutauschen (z. B. aus dem WBalMo-Ländermodell die Information über den Anschluss eines Restsees nach Flutungsende an die Vorflut) und dabei eine zeitsynchrone Simulation von 120.000 bis zu 12 Mio. Monatszeitschritten zu gewährleisten; organisatorisch: für eine konkrete Aufgabenstellung und einen Anwender die Modelle und ggfs. die Nutzungserlaubnis bzw. Lizenzierung der dazugehörigen Daten und Software zur Verfügung zu stellen. Dagegen liegen im WBalMo-Ländermodell sehr gute Erfahrungen der Kopplung z. B. der Grundwasserströmung über reduzierte Modelle oder über entsprechende Modellergebnisse vor. Einzelheiten enthalten die Abschnitte 1.1.1, Abflussbildung unter Berücksichtigung der bergbaulichen Grundwasserabsenkung und im Spreewald, 1.1.2, Wechselwirkung zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser, und 1.1.6, Sulfatprognosemodul. Auch die Kopplung zu Wasserhaushaltsmodellen ist nach diesem Prinzip möglich, wie in Abschnitt 1.4.2.2, Erstellung und Prüfung meteorologischer und hydrologischer Eingangsdaten aus Klimaprojektionen für die Klimamethodik Ländermodell, beschrieben.

Seit längerem wird die Erstellung eines geohydraulischen Großraummodells Lausitz (gGRML) diskutiert. In (DHI WASY, 2015) wurden die Machbarkeit geprüft und dabei auch die vorhandenen Regionalmodelle analysiert (Abbildung 23).

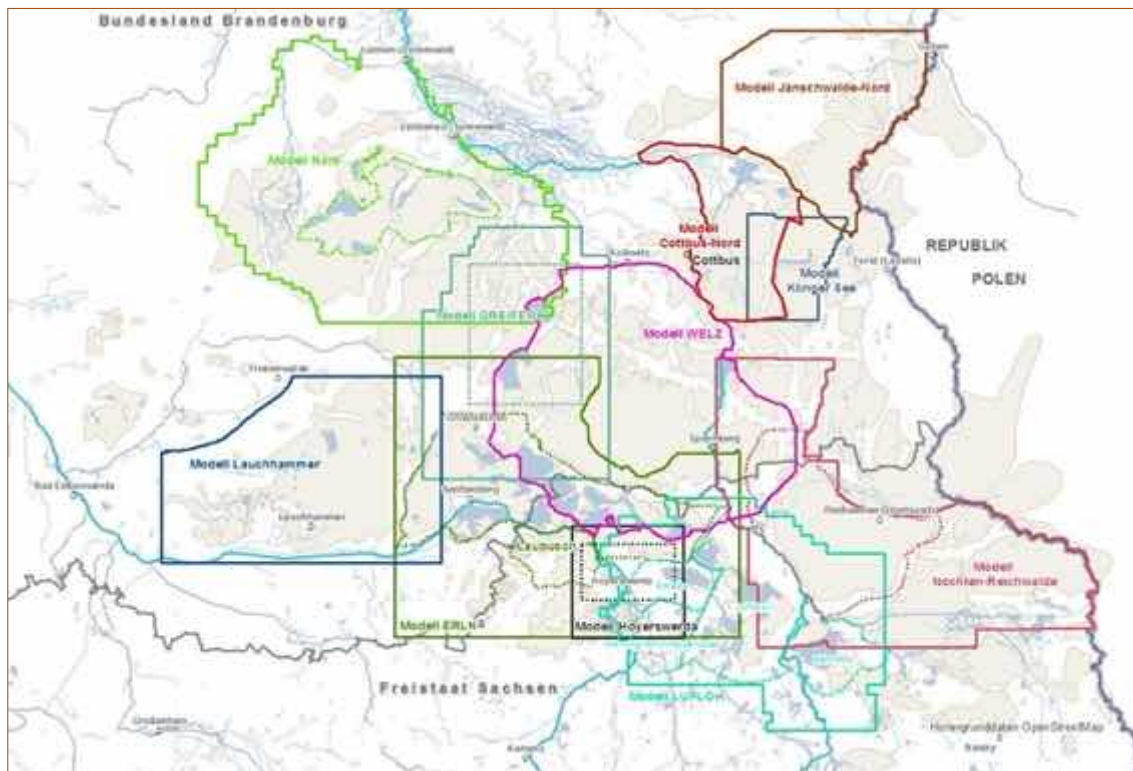


Abbildung 23: Übersichtskarte mit den zu betrachtenden 11 regionalen Grundwassermodellen (DHI WASY, 2015)

In (Hoth, Rascher, Thom, Geißler, & Koch, 2019) werden als Zielstellungen des gGRML an erster Stelle revierweite Güteprognosen für bergbautypische Wasserinhaltsstoffe mit Berücksichtigung der Kopplung zu den maßgeblich betroffenen Oberflächengewässern sowie Wasserbilanzen, auch bezüglich potenzieller Trocken- und Feuchtperioden, genannt. Ebenso wird eine Kopplung an das WBalMo-Ländermodell hinsichtlich Sulfattransport im Fließgewässer erwogen, um „die Möglichkeit Ergebnisse des GRML zu Grundwasserständen, zur Grundwasserneubildung und dem Grundwassersulfattransport als Eingangsgrößen im WBalMo zu verwerfen. Mit diesem Ansatz könnten die Sulfatfrachten in den Fließgewässern fundierter simuliert werden.“

Eine direkte Kopplung des gGRML an das WBalMo-Ländermodell wird aus den eingangs dieses Abschnittes dargestellten Gründen als nicht möglich eingeschätzt. Es wird auf die derzeit im WBalMo-Ländermodell etablierten Schnittstellen hingewiesen: Daten (Porenräume, Grundwasserbilanzen von Bergbaufolgeseen) bzw. reduzierte Modelle (zeit- und wasserstandsabhängige Grundwasserbilanz für den Cottbuser Ostsee, Erweiterte Restlochkette und SB Bärwalde sowie wasserstandsabhängiger, böschungsbereichsspezifischer Grundwasserzu- und abstrom der SB Lohsa II und Burghammer), die auf Ergebnisse detaillierter Regionalmodelle zurückgehen, vgl. Abbildung

23. Diese Daten und reduzierten Modelle werden überwiegend für die Bestandteile des wasserwirtschaftlichen Systems benötigt, für die auch die wasserrechtlichen Erlaubnisverfahren des Sanierungs- und Gewinnungsbergbaus durch die LMBV und die LEAG bearbeitet werden. In der Machbarkeitsstudie wird dazu festgestellt, dass die diesbezüglichen Anforderungen abgewogen berücksichtigt werden. Es wurden lediglich Defizite in Bezug auf die Abstimmung zwischen den bestehenden Modellen in den vielfältig vorhandenen Überlappungsbereichen erkannt (DHI WASY, 2015). Für das WBalMo-Ländermodell ist es entscheidend, dass die in Abschnitt 1.1.2, Wechselwirkung zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser, genannten Daten aktuell im Sinne der Planung und ihrer Varianten sind. Hier bestehen insbesondere Nachholbedarf bei den Prognosen der Grundwasserabsenkung bis 2100 und dem Grundwasseranschluss der Fließgewässerabschnitte. Daneben ist noch die Neukalibrierung des Hysteresemodells für das WSS Lohsa II zu nennen, dessen Teilströme über Böschungsbereiche bisher nur über das Gesamtvolumen kalibriert werden konnten. Demgegenüber sind die Eckdaten zu den Bergbaufolgeseen der LMBV und der LEAG auf einem jährlich aktualisierten Stand.

#### **1.4.4 Überarbeitung und Aktualisierung der DYN-Elemente**

Der in 25 Jahren Entwicklungsarbeit der DYN-Elemente einerseits erreichte Leistungsumfang (vgl. Abschnitte 1.1 und 2.1.3) erschwert andererseits durch ihre Größe und weitverzweigte Struktur die Nachvollziehbarkeit des WBalMo-Ländermodells. Zugleich erhöhte sich der Aufwand für Anpassungen. Eine Verringerung des Umfangs der DYN-Elemente würde durch folgende Arbeiten erreicht werden:

- Beginn der Simulation im Jahr 2018. Damit könnten Regelungen aus der Anfangszeit der Flutung entfallen.
- Standardisierung der Routinen zur Synchronisation des Volumens (Summe aus Totraum, Reserveraum und Betriebsraum) und des Betriebsraumes,
- Standardisierung der Berechnung der Verdunstung.

Die inkrementelle, kleinteilige Entwicklung der DYN-Elemente verdeckte die Notwendigkeit der Dokumentation. Der nun erreichte Umfang macht ihre Dokumentation aufwändig und zeitintensiv. Die oben aufgeführten Arbeiten zur Verringerung könnten durch eine begleitende Dokumentation zur effizienteren und verbreiterten Arbeit mit dem WBalMo-Ländermodell beitragen.

#### **1.4.5 Überarbeitung des Spreewald-Moduls**

Dieser Anpassungsbedarf soll hier nur erwähnt werden, da er bereits Teil des Arbeitsplanes des AK Wassermenge ist. Es sollen variable Bewirtschaftungsmaßnahmen innerhalb des Spreewaldes an den Verteilerwehren und Staugürteln z. B. zur Reduzierung von Verdunstungsverlusten oder Sulfatausträgen berücksichtigt werden können. Sie sollen flexibel modellierbar werden, so dass sie ggfs. von den Zuflüssen oder Bewirtschaftungszielen und sich ändernden meteorologische Bedingungen abhängig sein können.

#### **1.4.6 Aktualisierung des Dargebotes und der Nutzungen in den Gebieten der Malxe und Tranitz**

Die Prognosen des WBalMo-Ländermodells gehen vom wasserbaulichen Anschluss der Tranitz oberhalb Kathlow ab 2023, der Malxe oberhalb Heinersbrück ab 2028 aus. Der Abflussbeitrag dieser Einzugsgebiete wird ab Flutungsbeginn der Bergbaufolgeseen in diesem Bereich (2029) nur noch um 15 % aufgrund der noch verbliebenen Grundwasserabsenkung reduziert. Die diesbezüglichen Datengrundlagen stammen aus dem Jahr 1998.

Die Lage der Wasserentnahmen an den Gewässern wurde in Bezug auf die Wasserbereitstellung durch die bergbauliche Wasserwirtschaft bestimmt. Mit Beginn der Wasserversorgung aus dem natürlichen Dargebot sind diese Zuordnungen ggfs. nicht mehr zutreffend. In diesem Zusammenhang ist auch eine Prüfung der Bedarfswerte zu empfehlen.

Aus den Modifikationen werden sich Änderungen der Wasserverfügbarkeit in der Tranitz und Malxe ergeben, die sowohl für den Flutungsverlauf der Bergbaufolgeseen in diesem Gebiet als auch für den verbleibenden Zufluss zum Spreewald von Bedeutung sind.

#### **1.4.7 Dokumentation und Aktualisierung von Daten**

Naturgemäß muss ein wasserwirtschaftliches Großraummodell für die Flussgebiete der Spree, Schwarzen Elster und Lausitzer Neiße angesichts der intensiven Wassernutzung und Wasserbewirtschaftung eine hohe Komplexität aufweisen. Der Aufwand für die Laufendhaltung ist daher groß und hängt von dem Arbeitsfortschritt vieler Beteiligten und dem Wissen voneinander ab. Die Ermittlung des Anpassungsbedarfs in Bezug auf Daten ist daher eine dauerhafte Aufgabe. Gegenwärtig werden in diesem Sinne die Eckdaten der Bergbaufolgeseen (Flächen, Porenvolumina, Flutungstermine, Überleitungskapazitäten, Grenzwasserstände etc.) und die Versorgungsbilanzen der Kraftwerke durch die bergbauliche Wasserwirtschaft in einem mindestens jährlichen Rhythmus aktualisiert bzw. auf den Aktualisierungsbedarf geprüft. Dieses Vorgehen sollte systematisch auf den gesamten Datenbestand ausgedehnt werden. Eine erste thematische Orientierung kann die folgende Liste von Datengruppen geben:

- Räumliche Struktur der Teileinzugsgebiete,
- Grundwasserabsenkung, Versickerung,
- Meteorologische Daten,
- Wasserentnahmen und -einleitungen,
- Talsperren und Speicher,
- Abgaberegeln für Talsperren und Speicher gemäß Bewirtschaftungsgrundsätzen,
- Konstanten (Leistungskurven von Zu-, Ab- und Überleitern, Pumpwerken sowie Verteilerwehren, Schleusungshäufigkeit, bewirtschaftete Teichflächen der Binnenfischerei),
- Sulfatemissionen und ihre Volumenströme.

Durch den Anwenderkreis WBalMo-Ländermodell sollte das Zeitintervall jeder Datengruppe festgelegt werden. Ein solcher Datenkatalog kann Aufnahme in den Arbeitsplan des AK Wassermenge finden.

## **1.5 Anpassungsbedarf - Nutzung, Unterhaltung und Weiterentwicklung**

Das im Abschnitt 1.3, Bestandsaufnahme – Nutzung, Unterhaltung und Weiterentwicklung, dargestellte System hat sich bewährt und wurde stets weiterentwickelt, zuletzt durch eine abgestimmte Nutzervereinbarung, die künftig bei „Ausleihen“ des WBalMo-Ländermodells durch den jeweiligen Anwender zu bestätigen ist. Mit der Weiterentwicklung des WBalMo-Ländermodells für die Unterstützung der Entscheidungen zu den wasserwirtschaftlichen Herausforderungen des Kohleausstiegs sollte abgesichert werden, dass die realisierten Arbeiten am Modell für die Planung und den Betrieb der wasserwirtschaftlichen Systeme langfristig verfügbar bleiben.

Um die Qualität und den Umfang der Nutzung, Unterhaltung und Weiterentwicklung des WBalMo-Ländermodells beizubehalten, sollte in einem ersten Schritt die Nachvollziehbarkeit des WBalMo-Ländermodells spürbar verbessert werden. Mit einer Änderungsdokumentation wurde 2019 bereits ein Anfang gemacht. Dies sollte zu einem Kompendium WBalMo-Ländermodell ausgebaut werden, das folgende Inhalte aufweisen sollte:

- Gegenüberstellung Bewirtschaftungsgrundsätze und sie erfüllende Modellkomponenten (Ranglistenelement, Abgaberegeln, DYN-Element) mit Funktionsbeschreibung,
- Wissensdatenbank zu Bewertung der wasserwirtschaftlichen Verhältnisse auf der Basis von mit dem WBalMo-Ländermodell erstellter Gutachten,
- Ergebnishistorie der Varianten des WBalMo-Ländermodells,
- Bearbeitungs- und Funktionshistorie der Modellkomponenten,
- Kalibrierungs- und Validierungsnachweise von Modellkomponenten.

Ein zweiter Schritt für die Verbesserung der Nachvollziehbarkeit und Evaluierung der durch DHI WASY vorgenommenen Änderungen an den DYN-Elementen durch den Anwenderkreis könnte in einem durch DHI WASY administrierten, internetbasierten Repository bestehen. Damit wären alle Änderungen inhaltlich und verantwortungsbezogen nachvollziehbar und rücksetzbar.

Das Kompendium WBalMo-Ländermodell und das Repository der DYN-Elemente sollte um einen automatisierten Vergleich von Varianten des WBalMo-Ländermodells ergänzt werden. Dessen Ergebnisse können dann die übergreifenden Auswirkungen von Änderungen sowohl der Modelldaten als auch der DYN-Elemente auf die Prognoseergebnisse darstellen. Sie sind in gleicher Weise wie die Bestandteile des Kompendiums fortzuschreiben.

Der Anwenderkreis WBalMo-Ländermodell, als mit der Nutzung, Unterhaltung und Weiterentwicklung von der AG Flussgebietsbewirtschaftung beauftragte Gruppe, kann für die langfristige Planung und Priorisierung der Unterhaltung und Weiterentwicklung in z. B. jährlichem Abstand auch weiteren Sachverstand einbeziehen, um der fachlichen Vielfalt der

für die Entwicklung wesentlichen Aspekte Rechnung zu tragen. Dazu könnte eine interessierte Universität herangezogen werden, deren Fachlehrstühle einerseits mit Monte-Carlo-Methoden und Wasserbewirtschaftung befasst sowie andererseits grundlegend mit Softwareentwicklung vertraut sind. Eine solche breitere Zusammenarbeit setzt einerseits den Aufbau des oben genannten Kompendiums voraus, erfordert andererseits aber auch die Regelung der Nutzung, Unterhaltung und Weiterentwicklung des WBalMo-Ländermodells, wie sie mit der Nutzungsvereinbarung begonnen wurde.

## **2 WBalMo: Software zur Simulation wasserwirtschaftlicher Prozesse in Flusseinzugsgebieten**

### **2.1 Bestandsaufnahme – Funktionen**

#### **2.1.1 Anwendung und Zielstellung des WBalMo**

WBalMo (DHI WASY, 2019b), Abkürzung der englischen Bezeichnung **Water Balance Model**, bezeichnet ein interaktives Simulationssystem zur Planung und Bewirtschaftung von Flussgebieten. Sein Anwendungsbereich sind insbesondere Flussgebiete mit komplexen Bewirtschaftungsregeln, Mehrzweckspeichern und komplizierten Speichersystemen mit variablen Abgaberegeln. Die zugrundeliegenden Simulationsmethoden für stochastische Eingangsdaten im Monatszeitschritt erlauben insbesondere die adäquate Nachbildung von Niedrigwassersituationen und deren Bewirtschaftung.

Das Simulationssystem WBalMo bildet, vor dem Hintergrund einer konkreten wasserwirtschaftlichen Fragestellung, ein Flussgebiet mit seinem natürlichen Dargebot (Abfluss, Niederschlag und Verdunstung) ab und stellt diesem die Wassernutzungen (bspw. Industrie & Landwirtschaft) gegenüber. Die resultierende Bilanz wird durch Wasserbewirtschaftung (bspw. Talsperrenbewirtschaftung oder Mindestabflüsse an bestimmten Flusspegeln) unter Einhaltung definierter Bewirtschaftungsregeln und der Priorität von Wassernutzungen zielgerichtet beeinflusst.

Die Bilanzierung erfolgt lagegerecht und monats- oder wochenweise in hinreichend vielen Simulationen des zu untersuchenden Zeitraumes. An die Bilanzierung schließt eine Registrierung interessierender Ereignisse an, die nach Simulationsende über eine statistische Analyse die Berechnung von Sicherheiten der Wasserbereitstellung, von einfachen statistischen Merkmalen und von Extremwerten gestattet.

Ein Anwendungsbeispiel für eine WBalMo Untersuchung stellt die Ermittlung von Zielwerten für die Sulfatkonzentrationen dar (DHI WASY, 2019a), die den Zusammenhang zwischen Sulfat- und Mengenbewirtschaftung einerseits und die Wirkungen auf TS und Speicher, Wasserbereitstellung und Abfluss andererseits verdeutlicht.

#### **2.1.2 Benutzeroberfläche zum Aufbau der Komponenten eines WBalMo Modells**

Die Komponenten eines WBalMo-Modells bestehen aus:

- Systemskizze,
- Modellelementen und
- Registrierungen.

Sie werden über die Benutzeroberfläche erstellt, angepasst und visualisiert. Einen Überblick über die Benutzeroberfläche von WBalMo zeigt Abbildung 24.

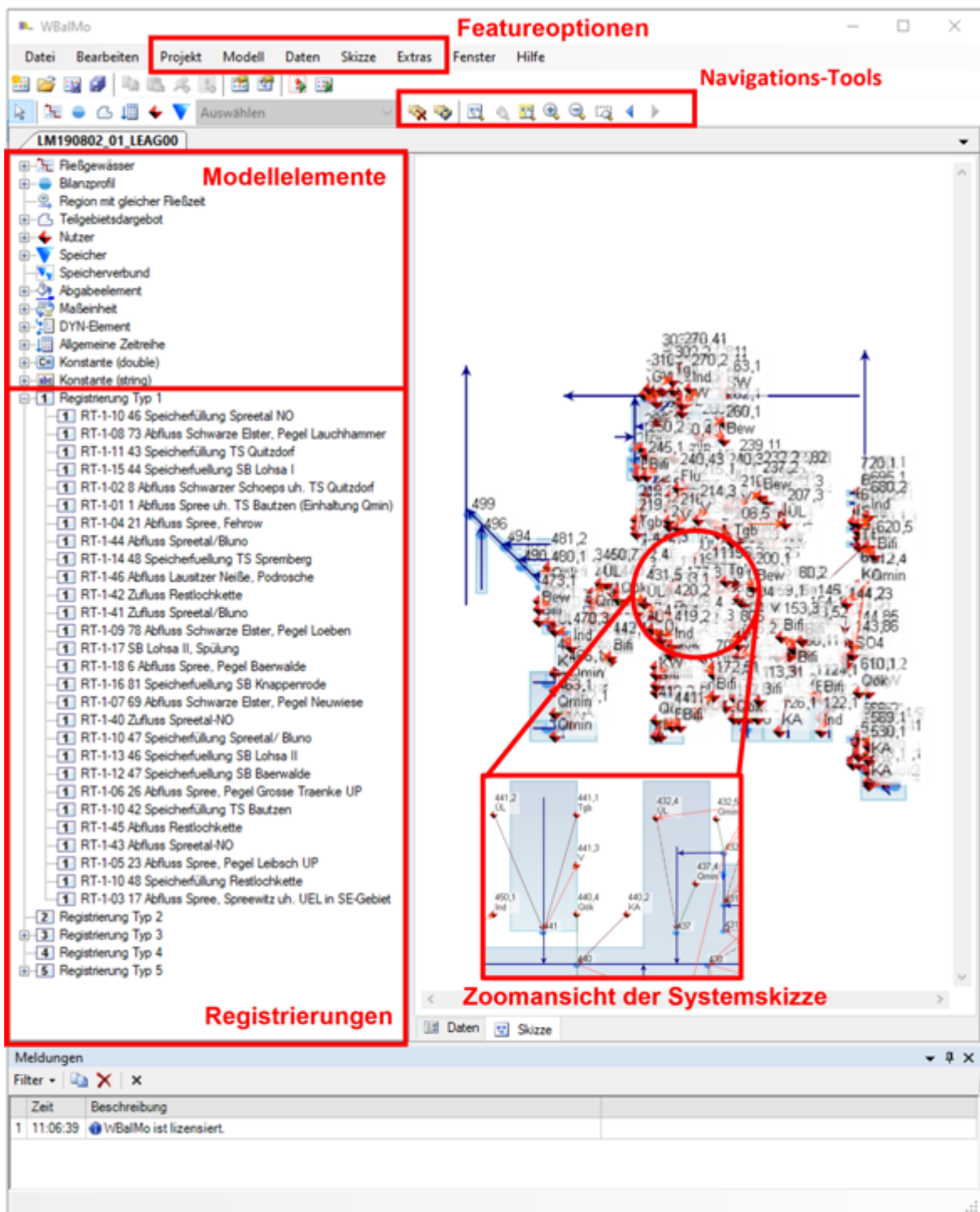


Abbildung 24: WBalMo-Benutzeroberfläche

Die Komponenten des Modells sowie Featureoptionen und Navigationstools zur Arbeit mit dem Modell werden nachfolgend kurz beschrieben.



### 2.1.3 Modellkomponenten

#### Systemskizze mit der Struktur des Flussgebietes

Der grundlegende Aufbau eines WBalMo beginnt mit der Abstraktion des Simulationssystems in Form einer Systemskizze, welches die nachfolgenden Modellelemente beinhaltet:

- Die zu berücksichtigenden Fließgewässer des Gewässernetzes mit Bilanzprofilen (BP) zur lagegerechten Einordnung von wasserwirtschaftlichen Objekten,
- die Grenzen der Teilgebietsdargebote für die Erfassung des natürlichen Wasserdargebotes,
- die Wassernutzungen mit ihren Entnahme- und Rückleitungsquerschnitten an den definierten BP,
- die Speicher.

#### Modellelemente

Das natürliche Wasserdargebot wird durch meteorologische und hydrologische Daten je definiertem Teilgebiet als Zeitreihen mittlerer monatlicher natürlicher Abflüsse bereitgestellt (bspw. beobachtete, um Nutzungen bereinigte oder auf deren Basis stochastisch generierte Abflüsse, dazu konsistent Verdunstung von Wasserflächen).

Als Nutzer werden im Flussgebiet definierte Angaben zu Entnahme- und/ oder Rückleitungsmengen bezeichnet. Damit werden auch Überleitungen mit Entnahme und Einleitung in unterschiedlichen Gewässern modelliert.

Speicherabgaben beinhalten Angaben zur aus dem Speicher maximal abzugebenden Wassermenge sowie der damit zu bewirtschaftenden Nutzer.

DYN-Elemente umfassen darüber hinaus im Flussgebiet vorliegende Bewirtschaftungsregeln, welche nicht mit Hilfe der Standardelemente des WBalMo formuliert werden können. Darüber hinaus können Modelle in diesen DYN-Elementen realisiert werden, wie z. B. Staubewirtschaftung, Grundwassereinfluss oder Stoffbilanzen.

#### Simulation

Allen Eingangsdaten (Nutzer, Speicher, DYN-Elemente) werden Rangzahlen entsprechend ihrer Priorität zugeordnet (hohe Priorität der Wasserbereitstellung = kleine Rangzahl, niedrige Priorität = hohe Rangzahl). Daraus leitet sich eine Rangliste der Wassernutzungen ab, welche aufsteigend in jedem Zeitschritt durchlaufen wird. Sie repräsentiert damit die Wasserbewirtschaftungsgrundsätze des zu untersuchenden Flussgebiets.

Die beschriebene Abarbeitung der Rangliste überführt somit im jeweils betrachteten Zeitschritt den natürlichen Abflusszustand im Flussgebiet (Beginn der Rangliste im jeweiligen Zeitschritt) schrittweise in den bewirtschafteten Zustand (Ende der Rangliste). Nur dieser Endzustand entspricht dem realen Abflusszustand und ist daher von wasserwirtschaftlichem Interesse.

### **Auswertung mit Registrierungen**

Nach Abschluss der Bilanzierung je Zeitschritt erfolgt die Registrierung interessierender Zustandsgrößen des Flussgebietssystems (bspw. Abflüsse an ausgewählten Bilanzprofilen, Wasserbereitstellung und Defizit bestimmter Nutzer oder Füllungen einzelner Speicher).

Grundsätzlich lassen sich fünf Typen von Registrierungen, Auswertungsmöglichkeiten von Bewirtschaftungssimulationen mittels statistischer Kennwerte, unterscheiden:

1. Angabe prozentualer Überschreitungsdauern für Zustandsgrößen (bspw. die Überschreitungshäufigkeit eines definierten Abflusses an einem Bilanzprofil).
2. Ausgabe von Ereignisdauern (bspw. die Unterschreitungsdauer eines Mindestabflusses).
3. Mittelwerte, Standardabweichungen, Minima und Maxima von Zustandsgrößen (bspw. der maximale Abfluss an einem Bilanzprofil).
4. Ausgabe von kontinuierlichen Zeitreihen für jeden Simulationszeitschritt (bspw. der Speicherinhalt einer Talsperre).
5. Perzentilwerte zur Ableitung von Über- bzw. Unterschreitungswahrscheinlichkeiten von Systemzuständen (bspw. die Unterschreitungswahrscheinlichkeit eines ökologischen Mindestabflusses an einem Bilanzprofil).

In Abbildung 25 sind exemplarische Ergebnisse der Registrierungen von Systemvariablen für den Typ 1, 3 und 5 aufgezeigt.

### **Stochastischer Ansatz und Realisierungen**

Für einen zukünftigen Zeitraum sind Abfluss und Witterung nicht genau bestimmbar. Sie lassen sich aber mit den Kenntnissen vergangener (beobachteter) Daten stochastisch generieren, so dass statistisch identische aber hinsichtlich Variabilität und Spannweite erweiterte Verläufe ebendieser Daten für das Modell vorliegen (vgl. Teilgebotsdargebot). Eine Zeitreihe über den Prognosezeitraum wird als Realisierung bezeichnet. Werden eine geeignete Anzahl an Realisierungen erzeugt, kann mit diesen als Eingangsdaten nach der Monte-Carlo-Methode mit dem WBalMo eine statistische Prognose für die Bewirtschaftungsergebnisse und damit eine Analyse verschiedenster prognostischer Risiken erfolgen (Risiken für Defizite, Speicherversagen, Unterschreiten von Mindestabflüssen usw.). Dafür müssen der in der Zukunft liegende Wasserbedarf sowie eine entsprechende Bewirtschaftungsstrategie ebenfalls im Modell als Eingangsdaten abgebildet werden.



Abbildung 25: Exemplarische Ergebnisse einer Registrierung Typ 1 – Sicherheiten für vordefinierte Durchflüsse eines Gewässerquerschnitts (oben), einer Registrierung Typ 3 - Mittelwerte, Standardabweichungen, Minima und Maxima von Durchflüssen eines Gewässerquerschnitts (mittig) und einer Registrierung Typ 5 - Durchflüsse der Perzentile (=Überschreitungswahrscheinlichkeit - ÜWK) einer Periode eines Gewässerquerschnitts (unten).

## 2.1.4 Featureoptionen

Featureoptionen sollen die Visualisierung, Analyse und Anpassung der Modellkomponenten erleichtern:

### Modellerstellung und -organisation:

- **Projekte & Modelle anlegen/verwalten:** Organisationsrahmen für mehrere Modelle sind sogenannte Projekte, welche einen rein arbeitsorganisatorischen Zweck bedienen: das Anlegen und Verwalten (importieren, kopieren und löschen) von Modellen.
- **Modelleigenschaften aufrufen & überprüfen:** Angelegte Modelle lassen sich hinsichtlich ihrer einzelnen Modelleigenschaften (Modellelemente) untersuchen, spezielle Eigenschaften wie die Zeitbasis definieren, Reportlisten erstellen, Modellvergleiche durchführen, Datenprüfungen durchführen und Fehlerlisten erstellen.
- **Modellelemente und Datenverknüpfungen erstellen:** Neue Modellelemente der Systemskizze hinzufügen, Modelle mit Zeitreihen, dynamischen Elementen und zusätzlichen Systemvariablen unterlegen zur Einbindung wasserwirtschaftlicher Bewirtschaftungsregeln.

### Modell- und Datenanalyse:

- **Ansicht auf andere Objekte:** Überprüfung von Modellelementen auf deren verknüpfte Daten.
- **Datenprüfung und Fehlerliste:** Automatische Datenprüfung der Modellelemente eines Bewirtschaftungsmodells und Fehlerlistenausgabe zu überprüfender Daten zur Gewährleistung einer fehlerfreien Initialisierung von Simulationsrechnungen.
- **Modellvergleich:** Abgleich von Modellelementen sowie der dem jeweiligen Element zugeordneten Datengrundlage verschiedener Modellvarianten.
- **Report:** Ausgabe von Modellberichten, welche für die vom Anwender selektierten Modellelemente sämtliche im Modell enthaltenen Daten wiedergibt.
- **Suchfunktion:** Suche einzelner Modellelemente, z. B. nach Bezeichnung, Kennzahlen, Rangfolgen etc.
- **Systemskizze:** vereinfachte Darstellung des Simulationssystems unter Einbindung aller notwendigen Modellelemente.

### Auswertungsmöglichkeiten erzeugter Ergebnisse:

- **Ergebnisdateiausgabe:** Ergebnisdateien einer WBalMo Simulation werden entweder als \*.wbtable (XML-Datenbank) oder als ASCII Datei ausgegeben und ermöglichen somit neben der Einbindung in WBalMo eine vereinfachte, weitere Prozessierung in Tabellenkalkulationsprogrammen wie Excel oder umfangreiche Datenanalysen mittels Programmiersprachen wie Python. Zur Ergebnisauswertung kann der Anwender ein Registrierungsmodul anlegen, eine Zusammenstellung von Auswertungsoptionen bestimmter Modellvariablen. Dieses Modul kann vom Anwender modellübergreifend geladen und über selektives Abspeichern einer Registrierungsselektion oder Löschen bestimmter Registrierungen editiert werden.

- **Ergebnisvergleich:** Simulationsergebnisse als von WBalMo erzeugte wtable Dateien können vom Anwender direkt in WBalMo eingeladen, analysiert und über einen Ergebnisvergleich mit Ergebnissen einer weiteren WBalMo Simulation verglichen werden. Dieser WBalMo-Ergebnisvergleich geht grundsätzlich von übereinstimmender Struktur beider wtable Dateien aus, Differenzen zwischen zwei wtable Dateien werden farblich markiert hervorgehoben. Über die Angabe einer Toleranzgrenze kann der Anwender definieren, ab welcher Differenz die Abweichungen zwischen zwei Simulationen markiert hervorgehoben werden sollen.

### 2.1.5 Navigations-Tools

Um sich in Systemskizzen komplexer Simulationssysteme zurechtzufinden, wie dies bspw. beim WBalMo-Ländermodell Spree, Schwarze Elster und Lausitzer Neiße der Fall ist, werden dem Anwender eine Palette von Navigations-Tools bereitgestellt.

Nach dem Öffnen eines Modells wird dem Anwender stets die komplette Modellausdehnung angezeigt. Der Anwender hat die Optionen, innerhalb der Systemskizze auf bestimmte Bereiche zu navigieren (*Auf Ausschnitt zoomen*) oder den angezeigten Ausschnitt speziell auf ein oder mehrere selektierte Modellelemente anzupassen (*Auf markierte Objekte zoomen* oder *Auf Objekt zoomen*).

Generell lässt sich der aktuelle Ausschnitt über die Icons *Ausschnitt verkleinern* bzw. *Ausschnitt vergrößern* justieren, gesteuert werden kann dies ebenso über das Mausrad. Die einzelnen Teilansichten der Systemskizze, welche der Anwender aufruft, werden in einer Historie abgespeichert, so dass der Anwender über die Icons *Vorige Ansicht* bzw. *Folgende Ansicht* diese stets wieder aufrufen kann. Um auf die Gesamtansicht der Systemskizze zurückzukehren, kann das Icon *Auf gesamte Ausdehnung zoomen* ausgewählt werden.

## 2.2 Bestandsaufnahme – Nutzung, Unterhaltung und Weiterentwicklung

Die Software WBalMo wird seit 1992 durch die WASY GmbH und ihre Nachfolgerin DHI WASY GmbH vertrieben und entwickelt. Zunächst als PC-GRM unter Microsoft DOS verfügbar, wurde das Programmsystem zum PC-GRMDYN weiterentwickelt, mit dem die Anwendung in durch Gewinnungs- und Sanierungsbergbau geprägten Flusseinzugsgebieten möglich wurde. Der Prognosezeitraum konnte nun gegliedert, variable Eingangsdaten konnten den einzelnen Perioden zugewiesen und die Auswertungen in gleicher Weise unterteilt werden. Die Relevanz ergibt sich aus dem nach Zeit und Umfang dynamischen Einfluss des Gewinnungs- und Sanierungsbergbaus auf die wasserwirtschaftlichen Verhältnisse. Mit der kontinuierlichen Simulation des instationären Prognosezeitraumes können z. B. Flutungsdauern der Bergbaufolgeseeen ermittelt werden.

Mit der Portierung des PC-GRMDYN nach ArcView konnte die Modellstruktur visualisiert und für die interaktive Erstellung und Analyse des Modells genutzt werden. Diese als ArcGRM bezeichnete Software wurde noch durch die Möglichkeit erweitert, separate Modelle als Module aus einem Zentralmodell heraus zu starten. Damit konnten auch sehr große

Flussgebiete komfortabel modelliert werden, wie z. B. nahezu die gesamte Elbe im GLOWA-Projekt (Kaltofen, Koch, & Schramm, 2011).

Mit der Entwicklung des WBalMo 4 wurde das Programmsystem von Fremdsoftware unabhängig. Es basiert auf der in Microsoft Windows enthaltenen .NET Bibliothek. Visualisierung und interaktive Bearbeitung sind in Abschnitt 2.1 beschrieben. Während in allen vorherigen Versionen die Nutzung eines Fortran-Compilers zwingend war, können nun Modelle ausschließlich unter Nutzung des Programmsystems erstellt und genutzt werden. Für die Erweiterung des Modells um DYN-Elemente wird selbstverständlich ein Compiler benötigt. Mit WBalMo 4 kann jede Programmiersprache, die die Erstellung dynamischer Bibliotheken unter Microsoft Windows unterstützt, dafür verwendet werden.

Mit der Erstellung des WBalMo 4 wurde zugleich die Möglichkeit geschaffen, die Funktionalität des WBalMo für andere Software verfügbar zu machen. So wurden für die Erstellung des GRMSTEU 4 (Software zur operativen Steuerung in den Flussgebieten der Spree, Schwarzen Elster und Lausitzer Neiße) Funktionen wie „Modelldaten lesen/schreiben“ oder „Ausführung eines Zeitschritts“ exportiert. Damit kann das GRMSTEU über die WBalMo Software mit dem WBalMo-Ländermodell interagieren.

Die aktuelle Version WBalMo 4.1 (MIKE Powered by DHI, 2021) enthält Verbesserungen in der Verwaltung von Ergebnismodulen und der Modellelemente in der Baumansicht (siehe Abschnitt 2.1.4). Zugleich erfolgte der Übergang auf die nächste Compilergeneration und die Integration des Quellcodes in ein Verwaltungssystem.

Die Nutzung der WBalMo Software erfolgt durch wasserwirtschaftliche Behörden, zu deren Aufgaben die wasserwirtschaftliche Planung gehört. Zu den ersten Lizenznehmern gehörte die Bundesanstalt für Gewässerkunde. Mit der Erstellung des WBalMo-Ländermodells Spree (später dann Erweiterung um Schwarze Elster und Lausitzer Neiße) kamen die wasserwirtschaftlichen Landesbehörden Brandenburgs und Sachsens hinzu. Ende der 90er erwarb der Landesbetrieb für Hochwasserschutz Sachsen-Anhalt Lizenzen für das WBalMo Bode (mit Hochwasserkomponente) und das WBalMo Drömling (mit Staubbewirtschaftung). Seit der oben genannten Entwicklung des GRMSTEU 4 nutzt auch die Flutungszentrale Lausitz die WBalMo Software.

Weitere ausführliche Informationen zur Anwendung des WBalMo-Ländermodells sind dem Abschnitt 1.3, Bestandsaufnahme – Nutzung, Unterhaltung und Weiterentwicklung, zu entnehmen.

### **2.3 Anpassungsbedarf – Funktionen**

Das Design der Software WBalMo folgt dem Prinzip, über die Benutzeroberfläche die wesentliche Funktionalität für Flussgebietsmodelle zur Verfügung zu stellen und bietet mit den DYN-Elementen eine flexible Schnittstelle an, mit der sich nahezu jedes

Bewirtschaftungsproblem und dafür erforderliche Modellmodule integrieren lassen. Dieses Prinzip vereint eine einfach zu nutzende Software mit nahezu unbegrenzter Erweiterbarkeit.

Eine hohe Komplexität der Bewirtschaftung des Flussgebietes:

- zeitliche variierende komplexe Bewirtschaftungsregeln von Speicher- und Überleitungssystemen,
- vom Oberlieger-Untерlieger-Prinzip abweichende Wasserbereitstellung insbesondere von Speicherwasser,
- Grundwasserwechselwirkung der Fließgewässer und Speicher,
- Staubewirtschaftung sowie
- verknüpfte Bewirtschaftung nach Menge- und Beschaffenheit

kann dazu führen, dass die Analyse, Anpassung, Szenariobildung und Auswertung des Modells in Bezug auf die abgebildete Wasserbewirtschaftung nur noch zum geringen Teil über die Benutzeroberfläche und zum größeren Teil über die DYN-Elemente erfolgt. Dies erschwert die Nachvollziehbarkeit und Anwendungsbreite eines solchen Modells.

Deshalb wird nachfolgend einerseits die Übertragung von ausgewählten, spezifisch für das WBalMo-Ländermodell bereits erfolgten oder geplanten Modellbausteinen in die Benutzeroberfläche vorgeschlagen. Zugleich könnte die Integration von Modellbausteinen als externes Modul vereinfacht werden. In diesem Zuge könnte auch umgekehrt die Integration in andere Softwaresysteme bei Bedarf erweitert werden, z. B. in Softwaresysteme zur Entscheidungsunterstützung.

Andererseits wäre mit den gestiegenen Anforderungen an die Analyse von Klimawandel und Niedrigwassersituationen auch eine rechentechnisch effizientere Simulation von Nutzen, um die statistische Genauigkeit von Risikoanalysen extremer Ereignisse zu erhöhen, ohne die Handhabbarkeit der Modelle zu verringern (vgl. Abschnitt 1.4.2.4, Auswertung der Ergebnisse der Klimamethodik Ländermodell).

## **2.3.1 Klimakomponente WBalMo-Ländermodell: Pflichtenheft**

### **2.3.1.1 Zielstellung und Vorgehensweise**

In Abschnitt 1.4.2, Bilanzierungstaugliche Lösung für klimarelevante Aspekte im WBalMo-Ländermodell, wurde das Vorgehen zur Integration von Klimaszenarien in das WBalMo-Ländermodell beschrieben. Die dort gesetzten Rahmenbedingungen schließen eine Anpassung der Software aus. In Abgrenzung davon werden hier Erweiterungen der Software beschrieben, die für die effiziente Simulation und Bewertung von (Klima-)Szenarien des Wasserdargebotes, der Wassernutzung und -bewirtschaftung sinnvoll sind. Grundsätzlich ist die wasserwirtschaftliche Bewertung von Klimaprojektionen auch nur mit der in Abschnitt 1.4.2 beschriebenen Lösung möglich. Die hier beschriebenen Erweiterungen setzen das dort beschriebene Vorgehen voraus.

Die DIN 69901-5, Begriffe im Projektmanagement, definiert ein Pflichtenheft als „vom Auftragnehmer erarbeitete Realisierungsvorgaben aufgrund der Umsetzung des vom Auftraggeber vorgegebenen Lastenhefts“. Ein Lastenheft liegt nicht vor, es wird aber als für

die gestellte Aufgabe als zielführend angenommen, beide Aspekte, Anforderungsspezifikation (Lastenheft) und Implementierungsspezifikation (Pflichtenheft), hier zu erarbeiten. Damit liegt die Grundlage einerseits für eine begründete Entscheidung für oder gegen Erweiterungen und andererseits für eine Ausschreibung vor. Zugleich wird in der Implementierungsspezifikation auf weitergehende Aspekte wie der Architekturspezifikation, der Spezifikation der Teilsysteme und der Testfallspezifikation verzichtet. Diese sollten Teile einer Ausschreibung werden.

### **2.3.1.2 Anforderungsspezifikation**

In Abschnitt 1.4.2.4, Auswertung der Ergebnisse nach der Klimamethodik Ländermodell, wurde dargestellt, welcher Nutzen sich für die Analyse von ausgeprägten bis extremen Niedrigwassersituationen aus einer deutlich höheren Anzahl von Realisierungen ergibt. Die Effizienz der dort beschriebenen Vorgehensweise kann durch Änderungen in der Software deutlich verbessert werden. Dies trifft vor allem auf vergleichende, iterative Analysen des Modells zu, z. B. für Bewirtschaftungsoptionen. Dafür müsste die WBalMo Software geeignete Methoden bereitstellen.

#### **Analyse der Änderungssignale bei Klimaprojektionen**

Eingangsdaten und Ergebnisse des WBalMo-Ländermodells müssen einem speziellen Pre- und Postprocessing unterzogen werden, um in den Stationarität erfordernden statistischen Analysen einen eindeutigen zeitlichen Zusammenhang zwischen Änderungssignal des Klimas und Änderung der Bewirtschaftungsergebnisse im Flussgebiet herstellen zu können (vgl. 1.4.2, Bilanzierungstaugliche Lösung für klimarelevante Aspekte im WBalMo-Ländermodell). Der Aufwand für diese Datenbearbeitung und die Sicherung ihrer Validität könnte reduziert werden, wenn WBalMo das Herauslösen von gewählten Zeitabschnitten „auf Knopfdruck“ realisieren würde. Damit sollen alle Daten, die periodenbezogen vorliegen, für den gewählten Zeitabschnitt gelten. Eine solche Funktionalität bietet die Software bereits, diese könnte aber funktional erweitert, um die Effizienz des Herauslösens von Perioden zu verbessern.

### **2.3.1.3 Implementierungsspezifikation**

#### **Bewertung ausgeprägter Niedrigwassersituationen**

Das WBalMo-Ländermodell benötigt für 100 Realisierungen ca. 6 Stunden Simulationszeit, wenn alle Module, einschließlich aller Registrierungen, aktiviert sind. Die Effizienz der Simulation ist gegenwärtig fast ausschließlich durch die Taktung des Prozessors bestimmt. Dies geht auf das in WBalMo implementierte sequenzielle Prinzip zurück, d. h., da alle wasserwirtschaftlich funktionalen Programmteile nacheinander ablaufen, können via Betriebssystem verfügbare Parallelisierungsoptionen an dieser Stelle nicht genutzt werden. Der sequenzielle Ablauf vieler Aspekte der wasserwirtschaftlichen Bilanzierung ist zwangsläufig notwendig. Ein grundlegendes Beispiel ist, dass Dargebotsdaten und Nutzerdaten erst vollständig vorliegen müssen, bevor die Bilanzierung beginnen kann. Demgegenüber könnten Dargebotsdaten und Nutzerdaten parallel geladen werden. Die Bilanzierungsroutine muss nur in der Lage sein zu „wissen“, dass beide Datenarten vollständig vorliegen, z. B., indem jede der beiden Routinen ein Signal „Fertig!“ bereitstellt.

Offensichtlich müssen in einem ersten Schritt die Routinen identifiziert werden, deren parallele Abarbeitung die, über einen Simulationslauf kumuliert, optimale Zeitersparnis im Verhältnis



zum Migrationsaufwand der Software und ggfs. der Modelle aufweisen. Da das methodische Prinzip der WBalMo Software auf der Monte-Carlo-Methode beruht, kann vereinfacht dieser erste Schritt mit dem Offensichtlichen abgeschlossen werden: Jede Realisierung sollte parallel zu anderen gestartet werden können. Dann können Realisierungen sowohl auf mehrere Prozessoren verteilt werden als auch auf den einzelnen Prozessoren mehrfach ablaufen. Dies würde eine Zeitersparnis auf einem isolierten PC in Abhängigkeit von der Anzahl der Prozessorkerne ergeben, in Computerclustern sind weitere deutliche Effizienzsteigerungen möglich.

Die softwareseitige Umsetzung soll auf der „OpenMI Wrapper“-Komponente beruhen. Als Wrapper werden in der Programmierung Komponenten bezeichnet, die als Adapter zwischen verschiedenartigen Softwareteilen dienen. Die im OpenMI Wrapper implementierten Methoden waren eine in WBalMo 4.0 implementierte Schnittstelle, die zum Zeitpunkt der Entwicklung als europäischer Standard für die Modellkopplung galt. Da er diese Bedeutung nicht annähernd erreicht hat, ist er aus WBalMo 4.1 wieder entfernt worden. Allerdings wird für die Interaktionen von WBalMo-Komponenten untereinander, z. B. der Benutzeroberfläche mit Bilanzierungsalgorithmen des WBalMo-Kerns, ebenfalls der OpenMI Wrapper genutzt. Gegenwärtig werden Methoden wie „Ausführung eines Zeitschritts“, „Schreibe Ergebnisse“, „Pfad der Modelldatei“ durch den Wrapper bereitgestellt. Die Methoden des Wrappers müssen nun so weit erweitert werden, dass die Funktion „Starte eine Realisierung“ zur Verfügung steht. Die vier zentralen Aufgaben dafür sind:

- Isolierung der Routinen für die Initialisierung des Modells und für das Postprocessing der Ergebnisse aller Realisierungen (z. B. der Registrierungen Typ 1 bis 5),
- Modularisierung und Generalisierung der Teilsysteme einer Realisierung (Initialisieren der Eingangsdaten zu Beginn der Realisierung sowie selektiv an Perioden- und Zeitschrittgrenzen, Aufruf der Bilanzierung aus dem WBalMo-Kern, Aufbereiten von Ergebnissen der Zeitschritte),
- Identifizierung und Beseitigung von Redundanzen und Konflikten zu Parametern der Modelldatei (z. B. Anzahl der Realisierungen),
- Ableitung von Richtlinien für DYN-Elemente, deren Berücksichtigung Voraussetzung für die Parallelisierung der Realisierungen ist.

Bei der Implementierung sind Konsequenzen für das WBalMo-Ländermodell zu beachten, für dessen Bedürfnisse diese Implementierung erfolgt. Hier sind zwei Punkte wesentlich:

Im Unterschied zu statistischen Mittelfristprognosen (Quartal, Halbjahr) dürfen für Langfristprognosen zu Beginn des Prognosezeitraumes nicht stets die gleichen wasserwirtschaftlichen Anfangsbedingungen gesetzt werden. Gegenwärtig wird im WBalMo-Ländermodell diese Voraussetzung dadurch erfüllt, dass der zufällige Endzustand einer Realisierung als Anfangszustand der nächsten Realisierung benutzt wird. Dieses Vorgehen entfällt bei Parallelisierung, stattdessen kann hier als methodisch sinnvolle, auf das konkrete Flussgebietsmodell zugeschnittene Lösung die Simulation eines dem Prognosezeitraum vorgelagerten Zeitabschnitts dienen. Der Endzustand dieses Zeitabschnitts ist der Anfangszustand des Prognosezeitraums. Sein zufälliger Charakter wird durch die fortlaufende Simulation der Dargebotsdaten sichergestellt.

Darüber hinaus sind die Konsequenzen für die Einbindung von WBalMo in GRMSTEU zu beachten, da die Methoden des OpenMI Wrappers auch für das Zusammenspiel mit dem GRMSTEU der Flutungszentrale Lausitz genutzt werden.

### **Analyse der Änderungssignale bei Klimaprojektionen**

Das WBalMo-Ländermodell weist die in Abbildung 26 gezeigte Zeitstruktur auf. Sie dient der Strukturierung der zeitvariablen Eingangsdaten und Ergebnisse. Für die Perioden wird von einer annähernden statistischen Stationarität ausgegangen. Der „Normalfall“ einer Anwendung des WBalMo-Ländermodells besteht in der kontinuierlichen Simulation aller Realisierungen über den so strukturierten Prognosezeitraum. Häufig interessiert aber nur ein ganz bestimmter Zustand des wasserwirtschaftlichen Systems, z. B. die Betriebsbereitschaft neuer Speicher, der Flutungsabschluss von Bergbaufolgeseen oder der Grad des Grundwasserwiederanstiegs.

Periode	Beginn	Ende
1	2003	2007
2	2008	2012
3	2013	2017
4	2018	2022
5	2023	2027
6	2028	2032
7	2033	2037
8	2038	2042
9	2043	2047
10	2048	2052
11	2053	2057
12	2058	2062
13	2063	2067
14	2068	2072
15	2073	2077
16	2078	2082
17	2083	2087
18	2088	2092
19	2093	2097
20	2098	2102

Abbildung 26: Zeitstruktur des WBalMo-Ländermodells

Für das über den Prognosezeitraum ansteigende Änderungssignal von Klimaprojektionen gilt dies in ähnlicher Weise, z. B. für die „nahe Zukunft“ 2021-2050. Der Aufwand zur Herstellung eines meteorologischen und hydrologischen Eingangssatzens, der dieses Änderungssignal kontinuierlich enthält, würde gesenkt werden, wenn stattdessen diese Daten nur den interessierenden Zeitabschnitt enthalten müssten, der dann als statistisch stationär angesehen wird.

Voraussetzung dafür ist, dass auch das wasserwirtschaftliche Modell nur für diesen Zeitabschnitt vorliegt. Damit wäre es erforderlich, aus dem WBalMo-Ländermodell ausgewählte Perioden „herauszuschneiden“ und ihnen eine neue Zeitstruktur zu geben. Eine

solche Funktionalität bietet die Software bereits, die folgenden Vorschläge würden die Effizienz des Herauslösens von Perioden aber verbessern.

Die Definition der neuen Zeitstruktur sollte erlauben, dass sie aus einer oder aus mehreren Perioden bestehen darf - auch mehr als das ursprüngliche Modell enthält. Der Anwender erhält die Möglichkeit, dieser neuen Struktur Daten aus einer oder mehreren Perioden zuzuweisen. Werden einer Periode Daten aus mehreren Perioden des Originalmodells zugewiesen, kann entweder zwischen Mittelwertbildung, Minimum oder Maximum der Originaldaten gewählt werden oder die Daten werden entsprechend der neuen Struktur aus der alten zugewiesen. Dafür muss die alte Struktur mindestens den Zeitraum der neuen Perioden überdecken. Bei dieser Option würde erneut ein instationäres Modell entstehen.

Wenn die in Abschnitt 2.3.3, Erweiterung von Modellelementen um typische Parameter, beschriebenen Arbeiten umgesetzt würden, könnte auch die Option geschaffen werden, dass hinterlegte dynamische Daten wie die Betriebsbereitschaft eines Speichers oder das Flutungsende eines Bergbaufolgesees bei der Konvertierung der Zeitstruktur auf gewünschte Werte gesetzt werden. Anderenfalls müssen diese Anpassungen für eine Szenariobildung in den DYN-Elementen erfolgen.

## **2.3.2 Integration in/ von externe/n Modelle/n**

### **Integration von externen Modellen**

Die in den vorangegangenen Abschnitten geschilderte Dynamik der wasserwirtschaftlichen Systeme in den Gebieten der Spree, Schwarzen Elster und Lausitzer Neiße wird in der Regel über entsprechende Variation der Eingangsdaten über die Zeitstruktur des Prognosezeitraumes im WBalMo-Ländermodell umgesetzt. Dies ist auf diesem Weg näherungsweise möglich, wenn die Zeitpunkte der Änderung Teil der wasserwirtschaftlichen Prognose sind, z. B. die Veränderungen der Abflussbildung durch die Vorflutwirksamkeit von Bergbaufolgeseen nach Flutungsende. Darüber hinaus müssen diese Zeitstrukturen auch in Daten enthalten sein, die durch Modelle erzeugt werden, z. B. ebenfalls die Änderungen der Abflussbildung durch Veränderung der Grundwasserabsenkung. Die Beispiele zeigen, dass diese Problematik überwiegend für die Simulation des unbeeinflussten Durchflusses in den Vorflutern relevant ist. Im WBalMo-Ländermodell wird dies mit einem im Quellcode vorliegenden, konzeptionellen Niederschlag-Abfluss-Modell realisiert, dessen Parametersätze entsprechend der Zeitstruktur gewechselt werden. Dieser Wechsel erfolgt in Übereinstimmung mit der Zeitstruktur des WBalMo-Ländermodells. Nachfolgend werden technische Voraussetzungen beschrieben, um einen dynamischen Wechsel zu prognostizierten Zeitpunkten unabhängig von der Zeitstruktur realisieren zu können.

Für einen solchen dynamischen Wechsel müssten Daten über eine standardisierte Schnittstelle innerhalb eines DYN-Elementes oder über ein Modellobjekt „Datenaustausch“ zu einem beliebigen Zeitpunkt der Bilanzierung an eine externe Software übergeben werden oder/ und von ihr empfangen werden. Damit ließe sich z. B. an eine beliebige Software, die natürliche Durchflüsse erzeugen kann, die Information über den Anteil abflussloser Teilgebiete oder die Änderung der Vorflutstruktur nach Flutungsende eines Bergbaufolgesees übergeben. Dies ist nur dann sinnvoll, wenn umgekehrt auch die Modelle während der Laufzeit des WBalMo-Ländermodells ihre Ergebnisse an das Modell übergeben können. Deshalb muss diese Schnittstelle bidirektional funktionieren.

Eine solche Integration kann nur für solche Modelle erfolgen, die hinsichtlich Zeitschritt unterhalb des Monats und hinsichtlich der Rechenzeit für diesen Zeitschritt mindestens so schnell wie das WBalMo sind. Bei Realisierung der Klimakomponente (siehe insbesondere Abschnitt 2.3.1.3, Implementierungsspezifikation) kommt hinzu, dass diese Modelle in beliebig vielen Instanzen laufen können und seinerseits über die Möglichkeit verfügen müssen, Daten über eine Schnittstelle auszutauschen. Diese Forderungen können in der Regel durch detaillierte Grundwassermodelle nicht erfüllt werden. Für sie kommen die in Abschnitt 1.1.2, Wechselwirkung zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser, beschriebenen, für das WBalMo-Ländermodell entwickelten und erprobten Verfahren zum Einsatz.

### **Integration in externe Softwaresysteme**

Als Beispiel für die bestehenden Fähigkeiten des WBalMo zur Integration in externe Software ist das GRMSTEU und das WBalMo-Ländermodell zu nennen. Perspektivisch können weitere Funktionen, auch in Zusammenhang mit der Realisierung von Erweiterungen aus Abschnitt 2.3.1.3, Implementierungsspezifikation, für externe Software zur Verfügung stehen. Damit könnte der Austausch von Eingangsdaten und Ergebnisdaten, Parametern zur Konfiguration von Szenarien u. ä. erfolgen. Diese Möglichkeit ist für die Einbindung in ein funktional deutlich erweitertes GRMSTEU und auch in flussgebietsweite, softwarebasierte Entscheidungsunterstützungssysteme von Interesse, die z. B. die Anbindung an zentrale Datenbanken, die Szenariverwaltung und Visualisierung von Ergebnissen für verschiedene Nutzergruppen übernehmen. Durch die geeignete Auswahl an Softwaretechnologien kann der Zugriff z. B. auf Eingangsdaten und Ergebnisdaten wie auch die Durchführung von Simulationen des WBalMo-Ländermodells app- oder browserbasiert unabhängig von Hardware und Betriebssystem gesteuert werden. Für die Bereitstellung des WBalMo-Ländermodells in diesem Kontext auf leistungsfähigen Serversystemen wäre auch die Lizenzierung anzupassen (vgl. Abschnitt 2.4).

### **2.3.3 Erweiterung von Modellelementen um typische Parameter**

In der Einführung des Abschnitts 2.3 wurde dargestellt, dass das WBalMo-Ländermodell in den mehr als 25 Jahren Entwicklungszeit einen Stand erreicht hat, in dem Analyse, Anpassung, Szenariobildung und Auswertung des Modells in Bezug auf die abgebildete Wasserbewirtschaftung nur noch zum geringen Teil über die Benutzeroberfläche und zum größeren Teil über die DYN-Elemente erfolgt. Um die Nachvollziehbarkeit und Anwendungsbreite des WBalMo-Ländermodells zu verbessern, könnte ein Teil der Daten des WBalMo-Ländermodells aus den DYN-Elementen in die Benutzeroberfläche verschoben werden. Zugleich ist es damit erforderlich, die WBalMo Software, bis hin zum WBalMo-Kern, um die daran geknüpften Funktionen zu erweitern.

Folgende Funktionen und Parameter würden den Umfang der DYN-Elemente reduzieren:

1. **Modellelement Speicher:** Erweiterung um den Parameter Volumen, unterteilt nach Totraum, Reserveraum und Betriebsraum. Damit verbunden ist die Erweiterung um die zugehörige Wasserstand-Fläche-Volumen-Beziehung (WAV). Damit kann der gerade für Bergbauspeicher mögliche Wasserstandsabfall unterhalb des tiefsten Absenkziels (Betriebsraum ist Null) dargestellt und das Wiedereinstauen in den

Betriebsraum bilanzrichtig modelliert werden. Darüber hinaus findet die WAV bei der Berechnung der aktuellen Verdunstung Anwendung.

Weitere Parameter, die im WBalMo-Ländermodell Anwendung finden sind: die Leistungskurven des Zu- und Ableiters, der Parameter „Betriebsbereitschaft“ sowie die Grundwasserbilanz (Verlust, Zusickerung).

2. **Modellelement Speicherabgabe:** Formulierung von Abhängigkeiten zu einer oder mehreren beliebigen Zustandsvariablen (z. B. wasserstandsabhängige Kapazität des Ableiters, Zeitpunkt). Diese Funktionen werden ebenfalls gegenwärtig durch DYN-Elemente des WBalMo-Ländermodells realisiert.
3. **Modellelement Restsee:** Es kann durch Modifikation des Modellelementes Speicher abgeleitet werden. Es weist zusätzlich die Parameter Flutungsbeginn und Flutungsende auf. Diese Daten und ihre Funktionen werden ebenfalls gegenwärtig durch DYN-Elemente des WBalMo-Ländermodells realisiert.
4. **Modellelement Teichwirtschaft:** Dieses Modellelement stellt eine Modifikation des Modellelements Nutzer dar. Es muss zusätzlich die Fläche beinhalten. Ggfs. kann die Detaillierung auf den Einzelteich mit seiner Geometrie und der typischen Bewirtschaftung hinterlegbar sein.
5. **Modellelement Staubereich:** Dieses Modellelement stellt eine Modifikation des Modellelements Nutzer dar. Damit einher geht die Implementierung des Bilanzalgorithmus für die Staubewirtschaftung WABI. Dafür muss dieses Modellelement eine WAV, eine tabellarische Abhängigkeit zwischen Grundwasserflurabstand und Verdunstung, Porosität, und monatliche Stauziele beinhalten.
6. **Modellelement Sulfatmission:** Dieses Modellelement stellt eine Modifikation des Modellelements Nutzer dar. Es enthält neben dem Volumenstrom die Sulfatkonzentration.
7. **Modellelement Immissionsrichtwert:** Dieses Modellelement stellt eine Modifikation des Modellelements Bilanzprofil dar. Es wird um die erforderliche Sulfatkonzentration erweitert.

Die Parameter dieser Modellelemente sollten in geeigneten Reportlisten dokumentierbar sein (vgl. Abschnitt 2.1.4).

Die Wirksamkeit dieser Erweiterungen stellt sich erst durch eine entsprechende Migration des WBalMo-Ländermodells ein.

## 2.4 Anpassungsbedarf - Nutzung, Unterhaltung und Weiterentwicklung

Die Konzeption eines langfristigen Betreibermodells soll sich an Umfang und Nutzen der als erforderlich erachteten Weiterentwicklung der WBalMo Software orientieren. Die in den Abschnitten 2.3.1 bis 2.3.3 beschriebenen Weiterentwicklungen resultieren aus den Erfahrungen der Anwendung des WBalMo-Ländermodells. Der Bedarf leitet sich aus der herausragenden Komplexität und dem Umfang dieses Modells ab und ist auf seine Bedürfnisse zugeschnitten, womit ein signifikanter Nutzen der erweiterten Software exklusiv für die Anwender in den Flussgebieten der Spree, Schwarzen Elstern und Lausitzer Neiße zu erwarten ist.

Zugleich kann einleitend festgestellt werden, dass alternative Vorgehensweisen möglich sind, vgl. hierzu die Vorschläge zum WBalMo-Ländermodell in Abschnitt 1.4, Anpassungsbedarf – Funktionen. Die jahrzehntelange Anwendung des WBalMo einschließlich der aktuellen Versionen 4.x zeigt, dass es sich um eine robuste, valide und leistungsfähige Software handelt.

Unter diesen Randbedingungen erscheint es angemessen, die Weiterentwicklung der WBalMo Software auf die Anwender des WBalMo-Ländermodells zu erweitern. Diese Option würde einschließen, dass DHI WASY als Besitzer der Software WBalMo mit der AG Flussgebietsbewirtschaftung Spree / Schwarze Elster oder einer von ihr beauftragten Institution die weitere Nutzung, Weitergabe und Weiterentwicklung regelt. Denkbar wäre hier eine Vereinbarung, nach der DHI WASY den Quellcode der WBalMo Software gegenüber der AG Flussgebietsbewirtschaftung offenlegt und sie mit einer dauerhaft kostenfreien Lizenz für den Einsatz der Software ausstattet. Für die Weiterentwicklung sollte festgelegt werden, unter welchen Bedingungen, z. B. der Eingrenzung des Zwecks durch eine Leistungsbeschreibung, die Weitergabe des Quellcodes an Dritte möglich ist. Die praktische Realisierung der Weiterentwicklung könnte beispielsweise mittels des aktuellen, auf dem Quellcodeverwaltungssystem Subversion (SVN) basierenden Repository der DHI WASY erfolgen.

Mit der Umsetzung eines solchen Betreibermodells müsste eine Entwicklungsgemeinschaft WBalMo beauftragt werden. Ihre Zusammensetzung würde auf Vorschlag des Anwenderkreises WBalMo-Ländermodell durch die AG Flussgebietsbewirtschaftung bestätigt. Aufgrund der fachlichen Vielfalt der für die Entwicklung wesentlichen Aspekte sollte neben den erfahrenen Vertretern des Anwenderkreises WBalMo-Ländermodell auch eine interessierte Universität teilnehmen, deren Fachlehrstühle einerseits mit Monte-Carlo-Methoden und Wasserbewirtschaftung befasst sowie andererseits grundlegend mit Softwareentwicklung vertraut sind.

Die Entwicklungsgemeinschaft WBalMo könnte im Weiteren alle Details einer Vereinbarung abstimmen und den Prozess der Nutzung, Unterhaltung und Weiterentwicklung verantwortlich begleiten.

### 3 Quellenverzeichnis

- AG FGB. (2019). *Grundsätze für die länderübergreifende Bewirtschaftung der Flussgebiete Spree, Schwarze Elster und Lausitzer Neiße*. November 2019: AG Flussgebietsbewirtschaftung Spree-Schwarze Elster.
- BfG. (2013). *BfG-Bericht. Wasserwirtschaftliche Verhältnisse des Projektes 17 für den Bereich des WNA Berlin. 6. Fassung, 2. Teilbericht*. Koblenz/Dresden: DHI-WASY GmbH und Bundesanstalt für Gewässerkunde.
- DHI. (2020). *MIKE 1D. DHI Simulation Engine for 1D river and urban modelling. Reference Manual*. DHI.
- DHI WASY. (2001). *Benutzerhandbuch zu SIKO/SIMO, Version 3.1, Programm zur stochastischen Simulation*. Dresden: WASY Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH.
- DHI WASY. (2013a). - *Rahmenbetriebsplan Nochten – Quantitative Prognose und Bewertung Oberflächenwasser. Bericht*. Dresden: DHI-WASY GmbH.
- DHI WASY. (2013b). *Komplexgutachten zur Bewirtschaftung des Cottbuser Sees und der dafür erforderlichen Wasserbauwerke sowie des Anstiegs von Seewasser- und Grundwasserspiegel. ABSCHLUSSBERICHT*. Berlin, Dresden. DHI WASY GmbH im Auftrag der Vattenfall AG.
- DHI WASY. (2015). *Studie zur Prüfung der Machbarkeit eines geohydraulischen Großraummodells Lausitz*. Berlin. Im Auftrag der Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH. Vorgestellt von Katja Eulitz und Michael Kaltfen.
- DHI WASY. (2017). *Erstellung des Sulfatprognosemodells Spree. Abschlussbericht*. Berlin, <https://lbgr.brandenburg.de/cms/detail.php/bb1.c.543589.de>: DHI WASY GmbH. Im Auftrag des Landesamtes für Bergbau, Geologie und Rohstoffe des Landes Brandenburg, kofinanziert durch die Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Umwelt des Landes Berlin und das Landesamt für Umwelt des Landes Brandenburg.
- DHI WASY. (2019). *Ergänzender Untersuchungsbedarf zur Machbarkeitsstudie zur Nutzung der Tagebaurestseen im Gebiet der Schwarzen Elster für den Hochwasserrückhalt – Teil: Niedrigwasserbewirtschaftung*. Berlin, Cottbus. Im Auftrag des Landesamtes für Umwelt Brandenburg.
- DHI WASY. (2019a). *Ermittlung von Zielwerten für die Spree für den Parameter Sulfat als Grundlage für einen Bewirtschaftungserlass zum Umgang mit bergbaubedingten stofflichen Oberflächengewässerbelastungen. Gesamtbericht*. Berlin, Oktober 2019. <https://mluk.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/Endbericht-Sulfatprognosemodell-Spree.pdf>: Im Auftrag des Landesamtes für Umwelt Brandenburg, kofinanziert durch die Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin sowie das Ministerium für Wirtschaft und Energie des Landes Brandenburg.
- DHI WASY. (2019b). *WBaIMo 4.1 Benutzerhandbuch*. Berlin: DHI WASY GmbH.
- DHI WASY. (2021). *Bedarf an Zuschusswasser aus den sächsischen Talsperren im Spreegebiet unter Berücksichtigung des Betriebs des WSS Lohsa II und des SB Bärwalde*. Berlin. Im Auftrag der Landestalsperrenverwaltung Sachsen.



- DHI-WASY. (2009). *Flutungssteuerungsmodell Spree/Schwarze Elster. 12. Bearbeitungsetappe 2009. Schlussbericht*. DHI-WASY GmbH im Auftrag der Lausitzer und Mitteldeutschen Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH.
- Dornier GmbH. (1993). *Ökologischer Sanierungs- und Entwicklungsplan Niederlausitz*. Friedrichshafen.
- EG Klima. (03.11.2020). *1. Beratung der Expertengruppe "Klima/ Klimawandel"*. Cottbus: Landesamt für Umwelt.
- EG Klima. (10.05.2021). *2. Sitzung der Expertengruppe "Klima/ Klimawandel"*. Cottbus, Landesamt für Umwelt.
- Glos, E. (1984). Die Einzugsgebietsmodellversion EGMO-D für Durchflussberechnungen in Dekaden- bis Monatsschritten. *Teilbericht zu Lauterbach, D. u.a. ASU Spree, 1. Ausbaustufe. Forschungsbericht. Institut für Wasserwirtschaft*.
- GUB. (2017). *Geohydraulische Untersuchungen für die Studien zur Nutzung Tagebaurestseen Schwarze Elster zwischen Hoyerswerda (SN) und Senftenberg (BB) für den Hochwasserrückhalt (Projekt des NHWSP), Zwischenbericht Aufgabenkomplex A, Hydrogeologisches Großraummodell E*. Potsdam: G.U.B. Ingenieur AG (Büro Freiberg) im Auftrag des Landesamtes für Umwelt Brandenburg.
- Hoth, N., Rascher, J., Thom, A., Geißler, M., & Koch, C. (2019). *Erstellungskonzept für ein Großraummodell der Lausitz - Abschlussbericht -*. Dresden. Im Auftrag des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, VITA - MIN.
- IWB. (2014). *Gutachten zur Entwicklung der Wasserbeschaffenheit in den Tagebauseen Dreiwelbern, Lohsa II und Burghammer (Speichersystem Lohsa II)*. Dresden: Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann. Im Auftrag der LMBV.
- Jahnke, P., Glos, E., & Krippendorf, H. (1984). *Das LBM Obere Spree bis Pegel Leibsch für den Zeitraum 1986 bis 2010*. Teilbericht zu Lauterbach, D. et al.: ASU Spree, 1. Ausbaustufe. Forschungsbericht Institut für Wasserwirtschaft Berlin.
- Kaden, S., Schramm, M., Fröhlich, K., & Pietschmann, I. (1993). *Ökologischer Sanierungs- und Entwicklungsplan Niederlausitz. Teilbericht zu wasserwirtschaftlichen Untersuchungen*. Im Auftrag der Dornier GmbH Friedrichshafen.
- Kaltfofen, M., Koch, H., & Schramm, M. (2011). Bewirtschaftete Abflüsse im Elbegebiet. In F. Wechsung, H. Koch, & P. Gräfe, *Elbe-Atlas des globalen Wandels*. Berlin: Weißensee Verlag.
- MIKE Powered by DHI. (2021). Von <https://www.mikepoweredbydhi.com/download/mike-by-dhi-tools/waterresourcestools/wbalmo> abgerufen
- ReKIS. (2020). *Regionale Klima-Informationssystem*. Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), Landesamt für Umweltschutz Sachsen-Anhalt (LAU), Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz, Institut für Meteorologie TU Dresden.
- Schramm, M., Glos, E., & Jahnke, P. (1984). *Abflußsimulation für das Flußgebiet der Oberen Spree*. Teilbericht zu Lauterbach, D. et al.: ASU Spree, 1. Ausbaustufe. Forschungsbericht Institut für Wasserwirtschaft Berlin.
- Struve, Ehlert, Pfannschmidt, Heyner, Franke, Kronenberg, & Eichhorn. (März 2020). *Mitteldeutsches Kernensemble zur Auswertung regionaler Klimamodelldaten – Dokumentation – Version 1.0*. Halle (Saale).

WASY. (1993). *Verifizierung des GRMDYN Spree an Hand der Nutzungsverhältnisse der Jahre 1988 – 1992*. WASY GmbH im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Naturschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg.

WASY et al. (1998). *„Nutzungskonzept Cottbuser See. Gutachten zur Notwendigkeit und zu Auswirkungen einer speicherwirtschaftlichen Nachnutzung*. Berlin.

Watermark Numerical Computing. (2010). *PEST - Model-Independent Parameter Estimation. User Manual*. 5th Edition.