INGENIEURBÜRO für GRUNDWASSER GmbH

Mitglied im Verband beratender Ingenieure (VBI)
04229 Leipzig, Nonnenstraße 9

Berechnungen zum Wasserhaushalt im Südraum Leipzig unter dem Ansatz einer regionalen Klimaprojektion

Auftraggeber:	**Mitteldeutsche Braunkohlengesellschaft mbH** Glück-Auf-Straße 1 06711 Zeitz
Auftrag vom:	12.04.2012
Auftrags-Nr. Auftraggeber:	4510238369
IBGW-Projekt-Nr.:	0031/2012
Auftragnehmer:	Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH Nonnenstraße 9 04229 Leipzig
Bearbeiter:	Dipl.-Geogr. A. Kacirek (federführend) Dipl.-Ing. R. Rakete Dipl.-Ing. M. Geisler

Leipzig, 13.09.2012

Dr.-Ing. H. Mansel
Geschäftsführer

Inhaltsverzeichnis

1 ANLAGEN, ABBILDUNGEN UND TABELLEN 2

1.1 ANLAGEN 2
1.2 ABBILDUNGEN 4
1.3 TABELLEN 6

2 QUELLENVERZEICHNIS 7

3 VERANLASSUNG UND AUFGABENSTELLUNG 9

4 MODELLGRUNDLAGEN UND RANDBEDINGUNGSANSATZ 10

4.1 MODELLGRUNDLAGEN 10
4.2 KLIMATISCHE RANDBEDINGUNGEN 12
4.3 RANDBEDINGUNG GRUNDWASSERNEUBILDUNG 16
4.4 AKTUALISIERUNG DER LANDNUTZUNGSINFORMATIONEN 19
4.5 AKTUALISIERUNG DER RANDBEDINGUNG FLIEßGEWÄSSER 23

5 BERECHNUNGSERGEBNISSE 28

5.1 BODENWASSERHAUSHALT 28
5.2 GRUNDWASSERHAUSHALT 34
5.2.1 Grundwasserneubildung 34
5.2.2 Grundwasservorrat 34
5.2.3 Hydroisohypsen 36
5.2.4 Hydrodifferenzen 37
5.2.5 Grundwasserflurabstand 38
5.3 OBERFLÄCHENWASSERHAUSHALT 41
5.3.1 Restlochwasserstände und Überschusswassermengen 41
5.3.2 Fließgewässerdurchflüsse 45

6 ZUSAMMENFASSUNG UND EMPFEHLUNGEN 49

1 Anlagen, Abbildungen und Tabellen

1.1 Anlagen

Anl.-Nr.	Anlage	Art
Berechnungsergebnisse		
1 Referenzzustand zum 01.01.2050		
1.1	Grundwasserflurabstand GWL 1.4 bis 3.0	Karte 1: 55 000
1.2	Hydroisohypsen GWL 1.4 bis 3.0	Karte 1: 55 000
2 Referenzzustand zum 01.01.2100		
2.1	Mittlere Grundwasserneubildung im Bezugszeitraum 1961 bis 1990	Karte 1: 55 000
2.2	Grundwasserflurabstand GWL 1.4 bis 3.0	Karte 1: 55 000
2.3	Hydroisohypsen GWL 1.4 bis 3.0	Karte 1: 55 000
3 Emissionsszenario A1B – Zustand zum 01.01.2050		
3.1	Grundwasserflurabstand GWL 1.4 bis 3.0	Karte 1: 55 000
3.2	Hydrodifferenzen (Abweichung zum Referenzzustand)	Karte 1: 55 000
3.3	Hydroisohypsen GWL 1.4 bis 3.0	Karte 1: 55 000
4 Emissionsszenario A1B – Zustand zum 01.01.2100		
4.1	Mittlere Grundwasserneubildung im Bezugszeitraum 2010 bis 2100	Karte 1: 55 000
4.2	Grundwasserflurabstand GWL 1.4 bis 3.0	Karte 1: 55 000
4.3	Hydrodifferenzen (Abweichung zum Referenzzustand)	Karte 1: 55 000
4.4	Hydroisohypsen GWL 1.4 bis 3.0	Karte 1: 55 000
5 Limnologische Bilanzen ausgewählter Restlöcher		
5.1	Limnologische Bilanzen – Bockwitzer See	Diagramme
5.2	Limnologische Bilanzen – Cospudener See	Diagramme
5.3	Limnologische Bilanzen – Groitzscher See	Diagramme
5.4	Limnologische Bilanzen – Großstolpener See	Diagramme
5.5	Limnologische Bilanzen – Restlochkomplex Hainer See	Diagramme
5.6	Limnologische Bilanzen – Restlochkomplex Haselbacher See	Diagramme
5.7	Limnologische Bilanzen – Kahnsdorfer See	Diagramme
5.8	Limnologische Bilanzen – Markkleeberger See	Diagramme
5.9	Limnologische Bilanzen – Pereser See	Diagramme
5.10	Limnologische Bilanzen – Speicher Borna	Diagramme

5.11	Limnologische Bilanzen – Speicher Witznitz	Diagramme
5.12	Limnologische Bilanzen – Störmthaler See	Diagramme
5.13	Limnologische Bilanzen – Werbener See	Diagramme
5.14	Limnologische Bilanzen – Zwenkauer See	Diagramme
5.15	Restlochwasserstände und Überschusswassermengen im Vergleich	Tabelle
6 Durchflüsse ausgewählter Fließgewässer		
6.1	Durchfluss – Eula (Pegel Kesselshain)	Diagramm
6.2	Durchfluss – Floßgraben (oberhalb Mündung in die Pleiße)	Diagramm
6.3	Durchfluss – Gösel (oberhalb Mündung in die Pleiße)	Diagramm
6.4	Durchfluss – Pleiße (Pegel Regis-Serbitz)	Diagramm
6.5	Durchfluss – Pleiße (Pegel Böhlen)	Diagramm
6.6	Durchfluss – Pleiße (oberhalb Mündung in die Weiße Elster)	Diagramm
6.7	Durchfluss – Schnauder (oberhalb Mündung in die Weiße Elster)	Diagramm
6.8	Durchfluss – Wyhra (Pegel Streitwald)	Diagramm
6.9	Durchfluss – Wyhra (Pegel Borna)	Diagramm
6.10	Fließgewässerdurchflüsse im Vergleich	Tabelle

1.2 Abbildungen

ABB. 4.1: MODELLGRUNDLAGEN UND STANDORTE DER NIEDERSCHLAGS- UND KLIMASTATIONEN 10

ABB. 4.2: MITTELWERTE DER KORRIGIERTEN JÄHRLICHEN NIEDERSCHLAGSSUMMEN DER STATIONEN HOLZHAUSEN, RÖTHA UND WINDISCHLEUBA SOWIE DER POTENTIELLEN VERDUNSTUNG DER STATIONEN HOLZHAUSEN UND GERA-LEUMNITZ (BEZUGSZEITRAUM 1961-2100) 14

ABB. 4.3: GEWÄSSERTIEFENABHÄNGIGE MONATLICHE GEWÄSSERVERDUNSTUNG UND POTENTIELLE LANDVERDUNSTUNG IM MITTLEREN INNERJÄHRLICHEN GANG, BASIEREND AUF METEOROLOGISCHEN GUTACHTEN DES DEUTSCHEN WETTERDIENSTES FÜR DIE ZEITREIHEN 1961-1990 SOWIE 1981-2000 [4], [5] 15

ABB. 4.4: FUNKTIONALE BESCHREIBUNG DES ZUSAMMENHANGS VON GRUNDWASSERFLURABSTAND UND GRUNDWASSERNEUBILDUNG IN PCGEOFIM 17

ABB. 4.5: BILDUNG VON GRUNDWASSERNEUBILDUNGSKLASSEN 18

ABB. 4.6: BERÜCKSICHTIGUNG DER WALDMEHRUNG IM BWHM 21

ABB. 4.7: WASSERBILANZ EINES STANDORTES MIT AUFWACHSENDEM LAUBWALD AUF DER KIPPE KAHNSDORF MIT GRUNDWASSEREINFLUSS 22

ABB. 4.8: ÜBERSICHT ÜBER DIE ANGEPASSTEN MODELLRANDZUFLÜSSE SOWIE PEGEL BZW. FIKTIVE MODELLPEGEL, FÜR DIE EINE DURCHFLUSSAUSWERTUNG IM ERGEBNISTEIL ERFOLGTE 23

ABB. 4.9: REGRESSIONSANALYSE DES BISHER AM MODELLRAND DES REFERENZMODELLS ANGESETZTEN DURCHFLUSSES DER PLEIßE SOWIE DER MITTELS DES BWHM IM OBEREN TEIL DES PLEIßEEINZUGSGEBIETES BERECHNETEN GRUNDWASSERNEUBILDUNG (ZEITRAUM 1990-2007). DIE DURCHFLUSSWERTE BASIEREN AUF MESSWERTEN DES PEGELS REGIS/SERBITZ. 24

ABB. 4.10: GEMESSENER UND GESCHÄTZTER DURCHFLUSS DER PLEIßE AM MODELLRAND DES HGMS IM ZEITRAUM 1990-2007 25

ABB. 4.11: GESCHÄTZTER DURCHFLUSS DER PLEIßE AM MODELLRAND IM PROJEKTIONSZEITRAUM 2010-2100 AUF GRUNDLAGE DER ERMITTELTEN REGRESSIONSBEZIEHUNG 25

ABB. 5.1: MITTLERE JÄHRLICHE NIEDERSCHLAGSHÖHE IN TEILEN DES BEARBEITUNGSGEBIETES FÜR DEN REFERENZZUSTAND (BEZUGSZEITRAUM: 1961-1990) SOWIE DAS EMISSIONSSZENARIO A1B (BEZUGSZEITRAUM (2010-2100) 30

ABB. 5.2: MITTLERE JÄHRLICHE REALE VERDUNSTUNG IN TEILEN DES BEARBEITUNGSGEBIETES FÜR DEN REFERENZZUSTAND (BEZUGSZEITRAUM: 1961-1990) SOWIE DAS EMISSIONSSZENARIO A1B (BEZUGSZEITRAUM (2010-2100) 32

ABB. 5.3: MITTLERE JÄHRLICHE GRUNDWASSERNEUBILDUNG IN TEILEN DES BEARBEITUNGSGEBIETES FÜR DEN REFERENZZUSTAND (BEZUGSZEITRAUM: 1961-1990) SOWIE DAS EMISSIONSSZENARIO A1B (BEZUGSZEITRAUM (2010-2100) 33

ABB. 5.4: ENTWICKLUNG DES GRUNDWASSERVORRATES SOWIE DER GRUNDWASSERNEUBILDUNG IN REFERENZ- UND EMISSIONSSZENARIO A1B IM SÜDRAUM LEIPZIG FÜR DAS GESAMTE MODELLGEBIET DES HGMS (ZEITRAUM 1995-2100) 35

ABB. 5.5: WASSERSTANDS- UND ÜBERSCHUSSWASSERMENGENENTWICKLUNG DES COSPUDENER SEES IM REFERENZZUSTAND UND EMISSIONSSZENARIO A1B (JAHRESMITTELWERTE) 43

ABB. 5.6: WASSERSTANDS- UND ÜBERSCHUSSWASSERMENGENENTWICKLUNG DES HASELBACHER SEES IM REFERENZZUSTAND UND EMISSIONSSZENARIO A1B (JAHRESMITTELWERTE) 44

ABB. 5.8: DURCHFLUSS DER PLEIßE AM PEGEL REGIS-SERBITZ IM REFERENZZUSTAND SOWIE IM EMISSIONSSZENARIO A1B 46

ABB. 5.9 AUSZUG DER SCHLÜSSELKURVE DER PLEIßE AM PEGEL REGIS-SERBITZ 47

ABB. 5.10: DURCHFLUSS DER PLEIßE AM PEGEL BÖHLEN IM REFERENZZUSTAND SOWIE IM EMISSIONSSZENARIO A1B 48

1.3 Tabellen

TAB. 4.1: EINLEITMENGEN AUSGEWÄHLTER GEWÄSSERNUTZER IN DIE PLEIßE 27

TAB. 5.1: MITTLERE JÄHRLICHE BILANZGRÖßEN DES WASSERHAUSHALTS FÜR DEN REFERENZZUSTAND (BEZUGSZEITRAUM: 1961-1990) SOWIE DAS EMISSIONSSZENARIO A1B (BEZUGSZEITRAUM: 2010-2100) 31

TAB. 5.2: CHARAKTERISTIKA DES COSPUDENER SOWIE DES HASELBACHER SEES 42

2 Quellenverzeichnis

[1] Büro für Angewandte Hydrologie (2006): Aufbau eines Bodenwasserhaushaltsmodells für den Sanierungsbereich Westsachsen-Thüringen. Teil 2: Berechnung des Bodenwasserhaushalts mit ArcEGMO. Zwischenbericht. – Berlin.

[2] Chmieleski, Stephan (2004): Untersuchung zu möglichen Veränderungen im Abflusskomponentenregime der Unteren Pleiße – Vergleich der Pegel Regis-Serbitz und Böhlen. Diplomarbeit (unveröffentlicht). Universität Leipzig. Fakultät für Physik und Geowissenschaften. – Leipzig.

[3] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (ATV-DVWK) (2002): Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden. Merkblatt M 504. – Hennef.

[4] Deutscher Wetterdienst (1997): Hydrometeorologische Bewertung der Niederschlags- und Verdunstungshöhen im Raum der Bergbaufolgelandschaft südlich von Leipzig. Amtliches Gutachten. – Berlin.

[5] Deutscher Wetterdienst (2001): Bereitstellung und hydrometeorologische Bewertung von Niederschlags- und Verdunstungshöhen für den Großraum Tagebau Borna. Amtliches Gutachten. – Berlin.

[6] Glugla, G., Fürtig, G. (1997): Dokumentation zur Anwendung des Rechenprogramms ABIMO / Berechnung langjähriger Mittelwerte des Wasserhaushaltes für den Lockergesteinsbereich. – Berlin.

[7] Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH (2005): Aufbau eines Bodenwasserhaushaltsmodells für den Sanierungsbereich Westsachsen/Thüringen. Teil 1. Teil 1 & 2. – Leipzig.

[8] Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH (2006): Präzisierungen zum Hydrogeologischen Großraummodell Süd – Modell HGMS 2006. – Leipzig.

[9] Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH (2007): Aufbau eines Bodenwasserhaushaltsmodells für den Bereich des Tagebaus „Vereinigtes Schleenhain“. Teil 1 & 2. – Leipzig.

[10] Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH (2010): PCGEOFIM–Anwenderdokumentation. – Leipzig.

[11] Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH (2011): Aufbau eines Bodenwasserhaushaltsmodells für den Bereich des Tagebaus Profen sowie das westliche Einzugsgebiet der Weißen Elster. – Leipzig.

[12] Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann (2011): Vorplanung einer Bewirtschaftungs- und Steuerzentrale bezüglich Sulfatlast für die untere Pleiße. Abschlussbericht – Dresden.

[13] Mellentin, U. (1999): Bericht zur Ganglinienseparation an Oberflächenwassermessstellen der Parthe und des Schnellbachs(unveröffentlicht). – Brandis.

[14] Pfützner, Bernd (2002): Beschreibung von ArcEgmo, Offizielle Homepage des Modellierungssystems ArcEGMO, http://www.arcegmo.de. – Berlin.

[15] Regionaler Planungsverband Westsachsen – Regionale Planungsstelle (2012): Bereitstellung von digitalen Waldmehrungsdaten. – Leipzig.

[16] Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2012): Bereitstellung meteorologischer Daten basierend auf einer Klimaprojektion unter Annahme des Emissionsszenarios A1B in der Realisierung 66. Regionales Klimainformationssystem für Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen (ReKIS). – Dresden.

[17] Schachtschabel, P.; Scheffer, F. u.a. (2002): Lehrbuch der Bodenkunde. 15. Aufl. – Heidelberg-Berlin.

3 Veranlassung und Aufgabenstellung

Ausgehend von den Ergebnissen und Handlungsempfehlungen der abgeschlossenen Projektphase KlimaMORO Westsachsen, resultiert ein fortführender Untersuchungsbedarf bezüglich der Entwicklung des Gebietswasserhaushaltes für den Südraum Leipzig, insbesondere die Bergbaufolgelandschaft. Vor diesem Hintergrund und aus den im Modellvorhaben der Raumordnung (MORO – Raumentwicklungsstrategien zum Klimawandel) verankerten Zielen zur Entwicklung regionaler Klimaschutz- und Klimaanpassungsstrategien ergab sich die Notwendigkeit, einer modellgestützten Überprüfung und Anpassung regionalplanerischer Ausweisungen, im Kontext klimatisch induzierter Veränderungen von wasserhaushaltlichen Rahmenbedingungen.

Die IBGW GmbH wurde deshalb am 12.04.2012 von der Mitteldeutschen Braunkohlengesellschaft mbH sowie der Regionalen Planungsstelle Westsachsen beauftragt, eine Abschätzung der zukünftigen Wasserhaushaltsentwicklung in der Bergbaufolgelandschaft im Südraum von Leipzig unter dem Ansatz einer regionalen Klimaprojektion vorzunehmen.

Im Fokus steht die Ermittlung möglicher Auswirkungen auf regionalplanerische Entwicklungsziele mit wasserwirtschaftlichem Bezug als Grundlage von Empfehlungen für den Umgang mit den sich verändernden klimatischen Randbedingungen.

Konkret bestand die Aufgabe darin, für jeweils zwei Auswertezeitpunkte (Mitte und Ende des Jahrhunderts)

- die Grundwasserneubildung,
- das Strömungsbild in den Hauptgrundwasserleitern über Flöz 4 (Isohypsendarstellung im 1 m-Intervall),
- den Grundwasserflurabstand (Isoflächendarstellung) und
- die Differenzen des Grundwasserstandes zwischen dem mittleren Referenzzustand und dem Emissionsszenario A1B (Hydrodifferenzen)

für das Bearbeitungsgebiet darzustellen.

Darüber hinaus sollten für ausgewählte Restlöcher die langfristige Entwicklung und das Schwankungsverhalten der Wasserstände und der Überschusswassermengen sowie für ausgewählte Fließgewässer an festgelegten Querschnitten die Durchflusscharakteristik aufgezeigt werden.

4 Modellgrundlagen und Randbedingungsansatz

4.1 Modellgrundlagen

Die Berechnungen wurden als kombinierte Simulation des Boden-, Oberflächen und Grundwasserhaushaltes durchgeführt, wobei folgende kalibrierte sowie verifizierte Modelle in den aktuellen Versionen zum Einsatz kamen (vgl. Abb. 4.1):

- Hydrogeologisches Großraummodell (HGMS®), 2006 **(Referenzmodell)**
- Bodenwasserhaushaltsmodell (BWHM) der LMBV mbH für den Sanierungsbereich Westsachsen/Thüringen, 2005
- Bodenwasserhaushaltsmodell (BWHM) der MIBRAG mbH für den Bereich des Tagebaus „Vereinigtes Schleenhain“, 2007
- Bodenwasserhaushaltsmodell (BWHM) der MIBRAG mbH für die Bereiche des Tagebaus Profen sowie das westliche Einzugsgebiet der Weißen Elster, 2011

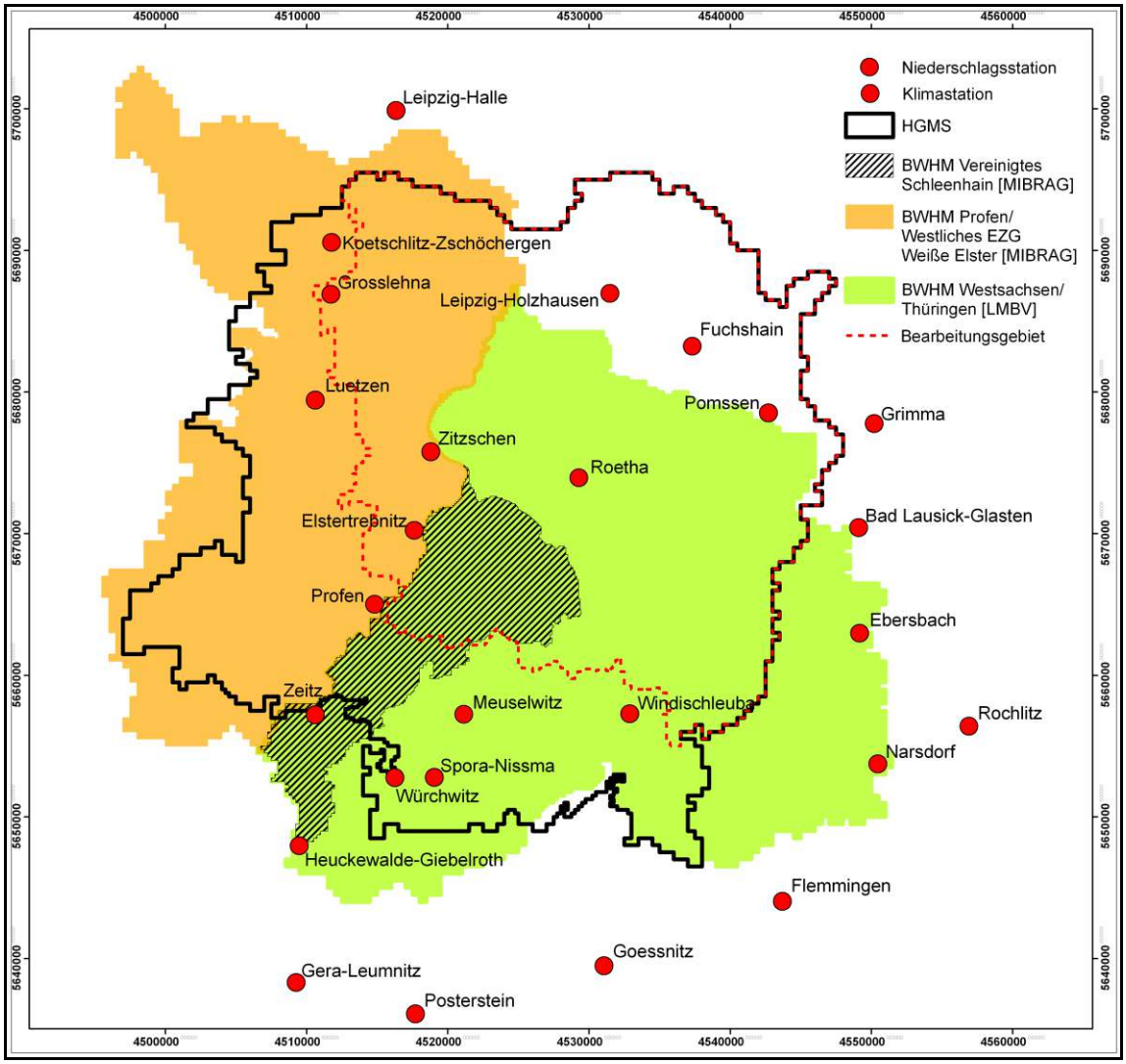

Abb. 4.1: Modellgrundlagen und Standorte der Niederschlags- und Klimastationen

Die Modelle decken das Bearbeitungsgebiet nahezu vollständig ab. Durch die ständige Weiterentwicklung und Verifizierung der Modelle, können die Gebietsverhältnisse auf Basis der klimatischen Normalwertperioden sehr gut nachgebildet werden. Das eigentliche Bearbeitungsgebiet wird im Westen und Süden durch die Landesgrenze Sachsen und im Norden und Osten durch den Modellrand des HGMS markiert.

Bodenwasserhaushaltsmodelle

Die genannten Bodenwasserhaushaltsmodelle basieren auf dem hydrologischen Modellierungssystem ArcEGMO [14], welches vom Büro für Angewandte Hydrologie entwickelt und vertrieben wird. Die BWHM dienen vornehmlich der räumlich hochaufgelösten Berechnung der mittleren sowie zeitvariablen Grundwasserneubildung, welche als obere Randbedingung für die Modellierung des Grundwasserhaushaltes benötigt wird. Darüber hinaus ist die Berechnung weiterer Bilanzgrößen des Gebietswasserhaushaltes möglich. Bei der Modellierung des Bodenwasserhaushaltes werden alle wesentlichen Charakteristika eines hydrologischen Systems zur Beschreibung der Abflussbildungsprozesse berücksichtigt. Sowohl die Modellparametrisierung als auch die Ergebnisausgabe erfolgt dabei GIS-gestützt. Somit ist die räumliche Verortung von allen Modelleingangsinformationen als auch der Ergebnisgrößen jederzeit möglich. Im Folgenden werden die wichtigsten Charakteristika und die durch sie beschriebenen Prozesse genannt. Die Ausführungen erheben dabei keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Geländemorphologische Merkmale

- Geländehöhe (Ableitung von oberirdischen Einzugsgebieten)
- Hangneigung (Beschreibung der Oberflächen- und Zwischenabflussbildung sowie Muldenspeicherung)
- Hangausrichtung (Ermittlung der potentiellen Verdunstung)

Bodentypenverbreitung

- Bodenart (Kapillaraufstieg, Evaporation)
- gesättigte hydraulische Leitfähigkeit (Infiltrationsrate, Abflussbildung)
- Feldkapazität (Wasserspeicher- und -nachliefervermögen)

Klimatische Verhältnisse

- Niederschlag (Abflussbildung)
- Temperatur, Strahlungsgrößen, Luftfeuchte (Ermittlung der potentiellen und realen Verdunstung)

Landnutzung

- Vegetationsart (Bodenwasserspeicherausschöpfung, Interzeption, Transpiration)
- Versiegelungs- und Kanalisationsanschlussgrad (Bildung schneller Abflusskomponenten)

Gewässersystem, bestehend aus Fließgewässernetz und Fließgewässervorländern

- Fließgewässerquerschnitt, -sohlneigung, -rauhigkeit (Beschreibung der Abflusskonzentration, und -retention)

Hydrogeologisches Großraummodell Süd (HGMS)

Grundlage der Berechnung der grundwasserseitigen Bilanz ist das Hydrogeologische Großraummodell Süd (HGMS) in seiner Fassung von 2006 [8]. Mit dieser Fassung liegt ein gesamträumlich kalibriertes und verifiziertes Modell vor, welches sich als Referenzmodell für die vergleichende Darstellung des Referenzzustandes sowie des Vergleichszustandes eignet.

Das Hydrogeologische Großraummodell Süd ist ein Grundwasserströmungs- und -bilanzierungsmodell welches die geologische Struktur des Leipziger Südraums mit seinen komplizierten Lagerungsverhältnissen nach dem derzeitigen Stand der Wissenschaft und Erkundung, erfasst, wobei ausschließlich die für die Beschreibung der hydraulischen Prozesse relevanten Lockergesteinsschichten berücksichtigt werden.

Grundlage des HGMS ist das durch die IBGW GmbH entwickelte Programmsystem PCGEO-FIM [9], welches auf der Finite-Volumen-Methode basiert. Dabei wird das gesamte, vom Modell beschriebene Gebiet, horizontal wie vertikal in Kontrollvolumen untergliedert. Innerhalb der Kontrollvolumen erfolgt eine physikalisch begründete Berechnung des Volumenstroms nach Darcy in porösen Medien unter Berücksichtigung der Kontinuitätsbedingung mit allen Elementzu- und -abströmen, wobei eine bilanztreue Berechnung der Vorratsänderung in den Finite-Volumen-Elementen möglich ist. Es können sämtliche, auch zeitveränderliche Randbedingungen mit bergbaulichem Bezug in die Modellierung einbezogen werden. Insbesondere die modellseitige Abbildung der Wechselwirkung von Oberflächen- und Grundwasser ermöglicht die Modellierung der Tagebaurestlochflutung sowie der grundwasserbürtigen Fließgewässerabflüsse im Modellgebiet.

Das horizontal-ebene Grundraster des HGMS besteht aus 500 x 500m Zellen, welches in den zentralen, vom Grundwasserwiederanstieg betroffenen Bereichen der ehemaligen bzw. aktiven Bergbaureviere durch so genannte Lupen verfeinert wird.

4.2 Klimatische Randbedingungen

Als Referenzzustand wurden die Berechnungsergebnisse des HGMS 2006 unter Annahme sich zukünftig nicht verändernder klimatischer Randbedingungen bis zum Erreichen des stationären Strömungszustandes herangezogen. Grundlage der Berechnungen ist die für die wasserwirtschaftliche Planungspraxis relevante meteorologische Normalwertperiode 1961-1990. Für die Restlochbilanzierung wurden im Referenzmodell ebenfalls langjährige Mittelwerte des Niederschlags, der potentiellen Verdunstung sowie der Gewässerverdunstung

dieser Zeitreihe angenommen. Diese entstammen zwei für den Südraum Leipzig angefertigten Klimagutachten des DWD [4][5].

Die Modellierung des Prognosezustandes wurde mit einer durch das LfULG bereitgestellten regionalen Klimaprojektion basierend auf dem aktuellen Regionalisierungsansatz WETTREG 2010 für den Projektionszeitraum 2010-2100 durchgeführt. Für die Berechnungen wurden Daten der folgenden Klimaprojektion verwendet:

- Emissionsszenario A1B – ausgewogene Projektion in der Realisierung 66 [16]

Die Projektionsdaten standen für insgesamt 26 Klima- bzw. Niederschlagsstationen in täglicher Auflösung zur Verfügung. Abb. 1 vermittelt das räumliche Verteilungsmuster der Stationsstandorte. Die Berechnung der potentiellen Verdunstung erfolgte nach den für Mitteldeutsche Verhältnisse sehr gut geeigneten Verfahren von Turc bzw. Ivanov. Hierfür standen drei Klimastationen mit Daten zu relativer Luftfeuchte, Globalstrahlung und Tagesmitteltemperatur zur Verfügung.

Die Restlochbilanzierung wird in PCGEOFIM unter Beachtung aller Restlochzu- und -abströme, sowohl über die Grundwasserpassage als auch über oberirdische Zu- und Abflüsse, Niederschlag auf die Wasserfläche und die Gewässerverdunstung vorgenommen. Damit ist es möglich, die Restlochflutung bis zum Erreichen der Endwasserstände zu simulieren. Die Höhe des oberirdischen Abflusses, der auf den noch nicht gefluteten Landflächen eines Restloches gebildet wird und dem Standgewässer zufließt wird modellintern in Abhängigkeit der Niederschlagshöhe und des Wasserstandes, welcher beim Anstieg die abflussbildende Landfläche entsprechend reduziert, berechnet.

Die Vorgabe der meteorologischen Größen im HGMS zur Bilanzierung der Standgewässer erfolgt global, d.h. ohne räumliche Differenzierung innerhalb des Modellgebietes, weshalb deren räumliche Verteilung zunächst analysiert und eine gerichtete Mittelwertbildung dieser durchgeführt wurde, wie nachfolgend beschrieben wird.

Hinsichtlich der Niederschlagshöhen weist das Bearbeitungsgebiet einen SO-NW gerichteten Gradienten auf. Im Südosten beträgt die mittlere jährliche Niederschlagshöhe im Projektionszeitraum 2010-2100 etwa 680 mm, nach Nordwesten hin verringern sich die Niederschläge auf etwa 560 mm/a. Aus diesem Grund wurden die Stationen Holzhausen im Norden, Rötha im Zentrum und Windischleuba im Süden, welche in etwa den Verlauf des nordsüdwärts gerichteten Standgewässerbandes nehmen, einbezogen und durch Mittelwertbildung der Niederschläge die Modelleingangsdatei der monatlichen Niederschlagssummen erstellt.

Abbildung 4.2 zeigt den Gang der im Modell angesetzten mittleren Niederschlagshöhen sowie der mittleren potentiellen Verdunstungshöhen als Jahressummen über den gesamten Projektionszeitraum 1961-2100. Beide Ganglinien zeigen die Charakteristik des Emissionsszenarios A1B stellvertretend für das Gesamtgebiet. Ab dem Jahr 2010 ist bei Betrachtung der gleitenden Mittelwerte eine kontinuierliche Zunahme der potentiellen Verdunstung als

Resultat der Temperaturerhöhung von etwa 600 mm/a auf ca. 750 mm/a im Jahr 2080 zu verzeichnen. Gleichzeitig verringern sich die Niederschläge ausgehend von 2010 von etwa 620 mm/a auf ca. 450 mm/a zum Zeitpunkt 2085. Ab 2080 etwa gibt es einen umgekehrten Trend mit einer gewissen Entspannung für den Wasserhaushalt der Region. Die beschriebene Charakteristik dieser klimatischen Reihe spiegelt sich entsprechend auch in den Berechnungsergebnissen wider.

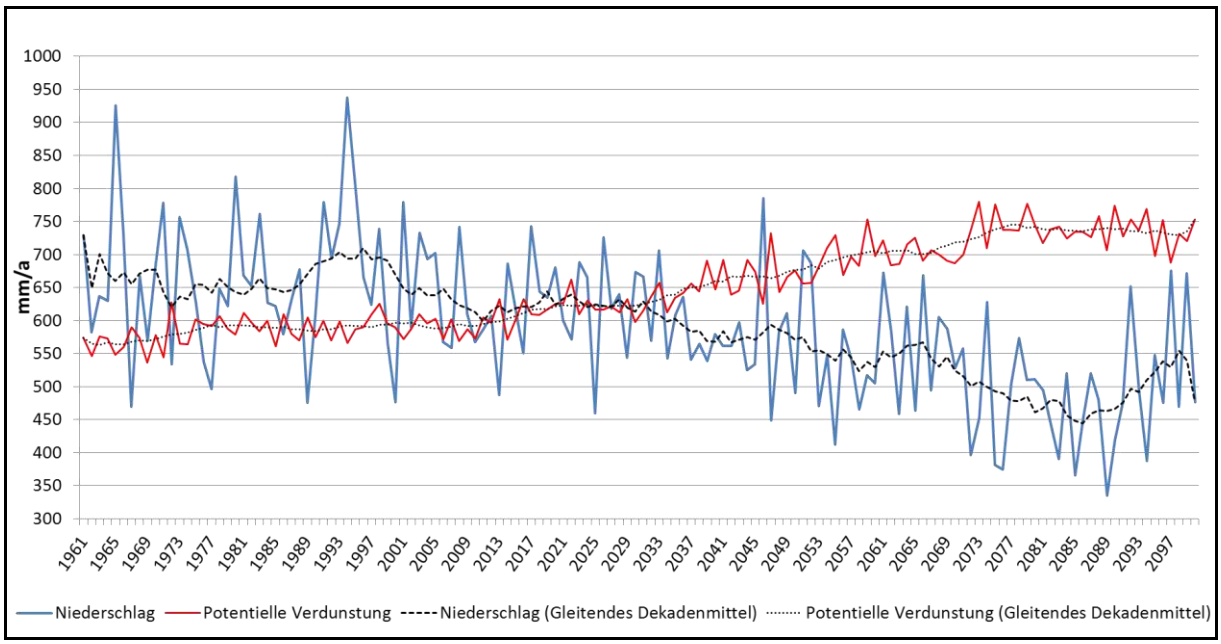

Abb. 4.2: Mittelwerte der korrigierten jährlichen Niederschlagssummen der Stationen Holzhausen, Rötha und Windischleuba sowie der potentiellen Verdunstung der Stationen Holzhausen und Gera-Leumnitz (Bezugszeitraum 1961-2100)

Für die Ermittlung der gewässertiefenabhängigen Gewässerverdunstung wird die monatliche potentielle Landverdunstung als Bezugsgröße benötigt, da die Gewässerverdunstung von ihr abhängt. Die potentielle Verdunstung weist im Gegensatz zum Niederschlag ein N-S gerichtetes Gefälle auf, wobei sich die Verdunstungshöhen im langjährigen Mittel von etwa 950 mm/a im Norden auf etwa 750 mm/a im Süden reduzieren. Folglich wurden die Klimastationen Holzhausen im Norden und Gera-Leumnitz im Süden zur Mittelwertbildung der potentiellen Verdunstung herangezogen, um der räumlichen Verteilung der klimatischen Größen im Bearbeitungsgebiet Rechnung zu tragen und für alle Standgewässer im Modellgebiet weitgehend ausgewogene Randbedingungen zu schaffen.

Diese Datenreihe der monatlichen potentiellen Verdunstung wurde benötigt um aus ihr Zeitreihen der gewässertiefenabhängigen Gewässerverdunstung abzuleiten. Die Gewässerverdunstung hängt maßgeblich von der Gewässertiefe und dem Energiedargebot der Atmosphäre ab, welches in der potentiellen Verdunstung zum Ausdruck kommt. In PCGEOFIM wird die monatliche Gewässerverdunstung als Funktion der Gewässertiefe für Tiefen von

2 m, 4 m, 10 m und 15 m vorgegeben. Die aktuelle Verdunstungshöhe zum Berechnungszeitschritt wird je nach Füllstand eines Restloches durch lineare Interpolation ermittelt.

Diese Abhängigkeit von der Gewässertiefe zeigt einen charakteristischen mittleren Jahresgang, der in Abbildung 3 dargestellt ist. Demnach weisen flachere Seen im Frühjahr und Sommer höhere Verdunstungsverluste auf als tiefere Seen, weil sie sich schneller erwärmen als die tiefen Gewässer. Im Spätsommer bzw. Frühherbst mit Abnahme der Lufttemperaturen kommt es zu einem Angleichen der Verdunstungshöhen flacher und tiefer Gewässer mit anschließender Umkehr dieses Verhältnisses, d.h. die tieferen Seen verdunsten bis in die Wintermonate hinein stärker als die flacheren Seen. Dieser Umstand ist der Tatsache geschuldet, dass sich die flachen Gewässer schneller abkühlen und die tiefen Gewässer hingegen länger die im Sommer aufgenommene Wärmeenergie speichern und zeitverzögert abgeben, bis im Januar bzw. Februar erneut ein Angleichen erfolgt mit anschließender Wiederumkehr der Verhältnisse.

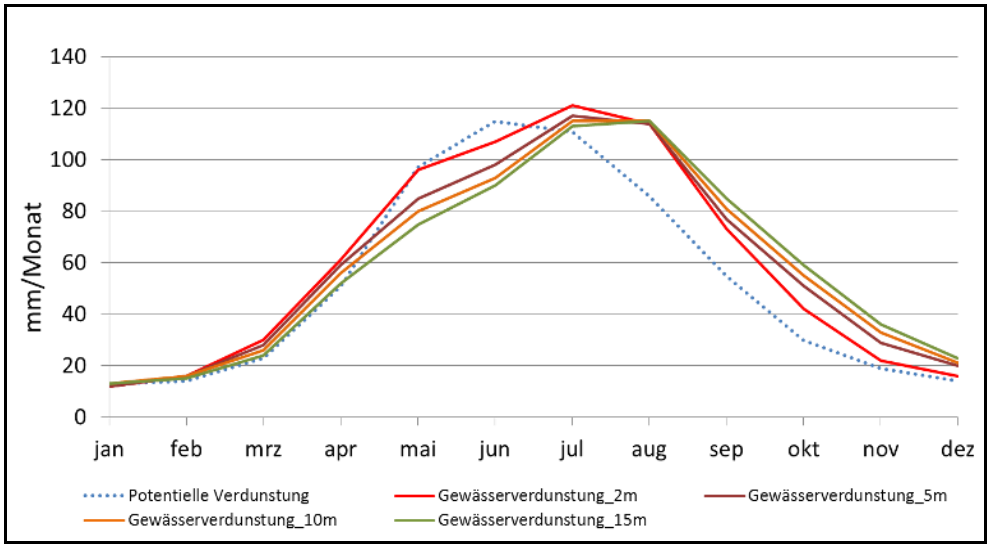

Abb. 4.3: gewässertiefenabhängige monatliche Gewässerverdunstung und potentielle Landverdunstung im mittleren innerjährlichen Gang, basierend auf meteorologischen Gutachten des Deutschen Wetterdienstes für die Zeitreihen 1961-1990 sowie 1981-2000 [4], [5]

Die in Abbildung 4.3 dargestellten Zusammenhänge basieren auf zwei Klimagutachten, die vom Deutschen Wetterdienst im Auftrag der IBGW GmbH für den Südraum Leipzig angefertigt wurden [4][5]. Die Gutachten wurden für die Zeitreihen 1961-1990 und 1981-2000 erstellt. Aus beiden Gutachten wurden mittlere Abhängigkeiten der Gewässerverdunstung von der potentiellen Landverdunstung ermittelt. Beschrieben wird der Zusammenhang über Faktoren, die als monatliche Auf- bzw. Abschläge auf die Projektionszeitreihe der potentiellen Verdunstung angewendet wurden. Im Ergebnis dieses Prozesses entstand eine Modelleingangsdatei mit Projektionszeitreihen der Gewässerverdunstung für verschiedene Gewässer-

tiefen, mit der sowohl die langfristigen klimatischen Tendenzen als auch die beschriebene innerjährliche Charakteristik sehr gut widergespiegelt wird.

4.3 Randbedingung Grundwasserneubildung

Eine Teilgröße der Bodenwasserhaushaltsbilanz ist die Grundwasserneubildung. Einen sehr hohen Stellenwert für die sichere Bestimmung der Grundwasserneubildung besitzt die korrekte Ermittlung der Verdunstung. Sie hat einen Anteil an der Wasserhaushaltsbilanz von 65 % bis 75 %, die Grundwasserneubildung hingegen nur einen Anteil von im Mittel 10 % bis 15 %. Da sich eine fehlerhafte Bestimmung von Niederschlag und Verdunstung auf die kleine Differenzgröße der Grundwasserneubildung verstärkt auswirkt ist der Aufbereitung der meteorologischen Eingangsgrößen besondere Bedeutung beizumessen.

Die Berechnungen des Referenzzustandes erfolgten mit mittlerer langjähriger Grundwasserneubildung welche auf Grundlage der meteorologischen Normalwertperiode 1961-1990 mit dem **A**bfluss**BI**ldungs**MO**dell (ABIMO) [6] der Bundesanstalt für Gewässerkunde ermittelt wurde. Dies ist ein vereinfachtes Verfahren zur räumlich differenzierten Berechnung mittlerer langjähriger Bilanzgrößen des Wasserhaushaltes im Lockergesteinsbereich auf Grundlage vergleichsweise geringer, allgemeinverfügbarer Eingangsdaten.

Da eine zeitvariable dynamische Simulation des Wasserhaushaltes mit ABIMO nicht möglich ist, kam dieses für die vorliegende Fragestellung nicht in Frage. Anliegen der durchgeführten Berechnungen unter Ansatz der Klimaprojektion war eine Abbildung des Schwankungsverhaltens ausgewählter Bilanzgrößen des Wasserhaushalts. Deshalb kam das bereits erwähnte hydrologische Modellierungssystem ArcEGMO zur Anwendung, welches das ABIMO-Verfahren bereits vor einigen Jahren im IBGW abgelöst hat. Mit ArcEGMO ist es möglich auf Grundlage langjähriger meteorologischer Reihen den Gebietswasserhaushalt zeitdynamisch zu bilanzieren.

Mit den Bodenwasserhaushaltsmodellen (BWHM) wurde daher zunächst auf Grundlage der Klimaprojektion für den Zeitraum 2010 bis 2100 die grundwasserflurabstandsabhängige zeitvariable monatliche Grundwasserneubildung berechnet und als obere Randbedingung an das Grundwasserströmungsmodell übergeben. Dabei wurde wie folgt vorgegangen:

PCGEOFIM ermöglicht die optionale Vorgabe der zeitvariablen Grundwasserneubildung als lineare Funktion des Grundwasserflurabstandes, da dieser die Grundwasserneubildung erheblich beeinflusst. Abb. 4.4 verdeutlicht diesen Zusammenhang anhand einer solchen Linearfunktion.

Mittels der Bodenwasserhaushaltsmodelle wurde für flurnahe und flurferne Grundwasserverhältnisse jeweils ein Berechnungsdurchlauf durchgeführt.

Dabei wurde im gesamten Modellgebiet jeweils ein gleicher Grundwasserflurabstand (0,5m bzw. 4m) angenommen, bei sonst unveränderter Parametrisierung des Modells. Im Ergebnis dieses Verfahrens erhält man für jedes der ca. 90 000 Rasterelemente eine Linearfunktion.

Somit kann zu jedem Berechnungszeitschritt für jeden möglichen Grundwasserflurabstand die entsprechende Grundwasserneubildung an jedem beliebigen Ort im Modellgebiet auf Grundlage der Berechnungsergebnisse der BWHM ermittelt werden.

Da die Bereitstellung dieser Funktionen für alle 90 000 Raumelemente und den langen betrachteten Zeitraum hinsichtlich des Datenumfangs nicht handhabbar gewesen wäre, wurde das Modellgebiet in ca. 400 Grundwasserneubildungsklassen unterteilt. Abbildung 4.5 soll eine Vorstellung der Verfahrensweise vermitteln.

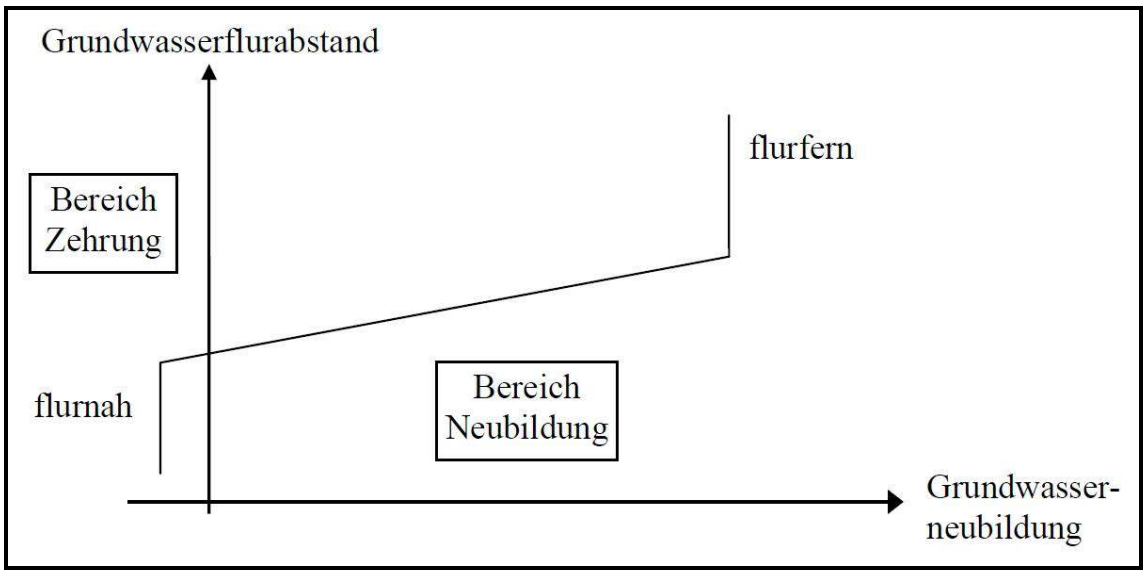

Abb. 4.4: funktionale Beschreibung des Zusammenhangs von Grundwasserflurabstand und Grundwasserneubildung in PCGEOFIM

Eine Grundwasserneubildungsklasse wurde zu Anschauungszwecken rot hervorgehoben. Diese Klassenbildung entspricht einer Gliederung des Modellgebietes in Hydrotope und damit in hydrologisch ähnlich reagierende Teilflächen, wobei sich die Grundwasserneubildung innerhalb eines Hydrotops nur unwesentlich unterscheidet. Die Bildung der Grundwasserneubildungsklassen erfolgte GIS-gestützt unter Berücksichtigung aller hydrologisch relevanten Gebietseigenschaften, wie Bodentypverbreitung, Landnutzung, Hangneigung, Flächenversiegelungsgrad, Niederschlagsverteilung, mittlerer Grundwasserflurabstand u.a. Aus jeder dieser Klassen wurde ein stellvertretendes Rasterelement ausgewählt (schwarz markierte Bereiche in Abb. 4.5), für welches die monatliche flurabstandsabhängige Grundwasserneubildung für den Zeitraum 2010-2100 mittels der BWHM berechnet und als Funktion an das HGMS übergeben wurde.

Da die zur Verfügung stehenden Bodenwasserhaushaltsmodelle nicht flächendeckend für das gesamte Bearbeitungsgebiet zur Ermittlung der Grundwasserneubildung vorlagen (vgl. Abb. 4.1) wurde ein praktikabler Ansatz gewählt, mit dem auf Grundlage der zur Verfügung

stehenden Informationen für das verbleibende Areal im Nordosten des Bearbeitungsgebietes dennoch die Grundwasserneubildung bereitgestellt werden konnte. Unter Beachtung der o.g. für die Grundwasserneubildungsklassenbildung herangezogenen Kriterien erfolgte eine GIS-gestützte Flächenübertragung der am nordöstlichen Modellrand des BWHM konzentrierten Grundwasserneubildungklassen auf das nicht vom Modell abgedeckte Gebiet. Der räumlichen Verteilung wichtiger Kriterien wie Bodentypen, Niederschlagshöhen sowie Landnutzungsarten konnte dabei überwiegend Rechnung getragen werden. Die Übertragung der Landnutzungsarten erfolgte darüber hinaus unter Zuhilfenahme frei verfügbarer Satellite- bzw. Luftbildaufnahmen des Dienstes Google Earth.

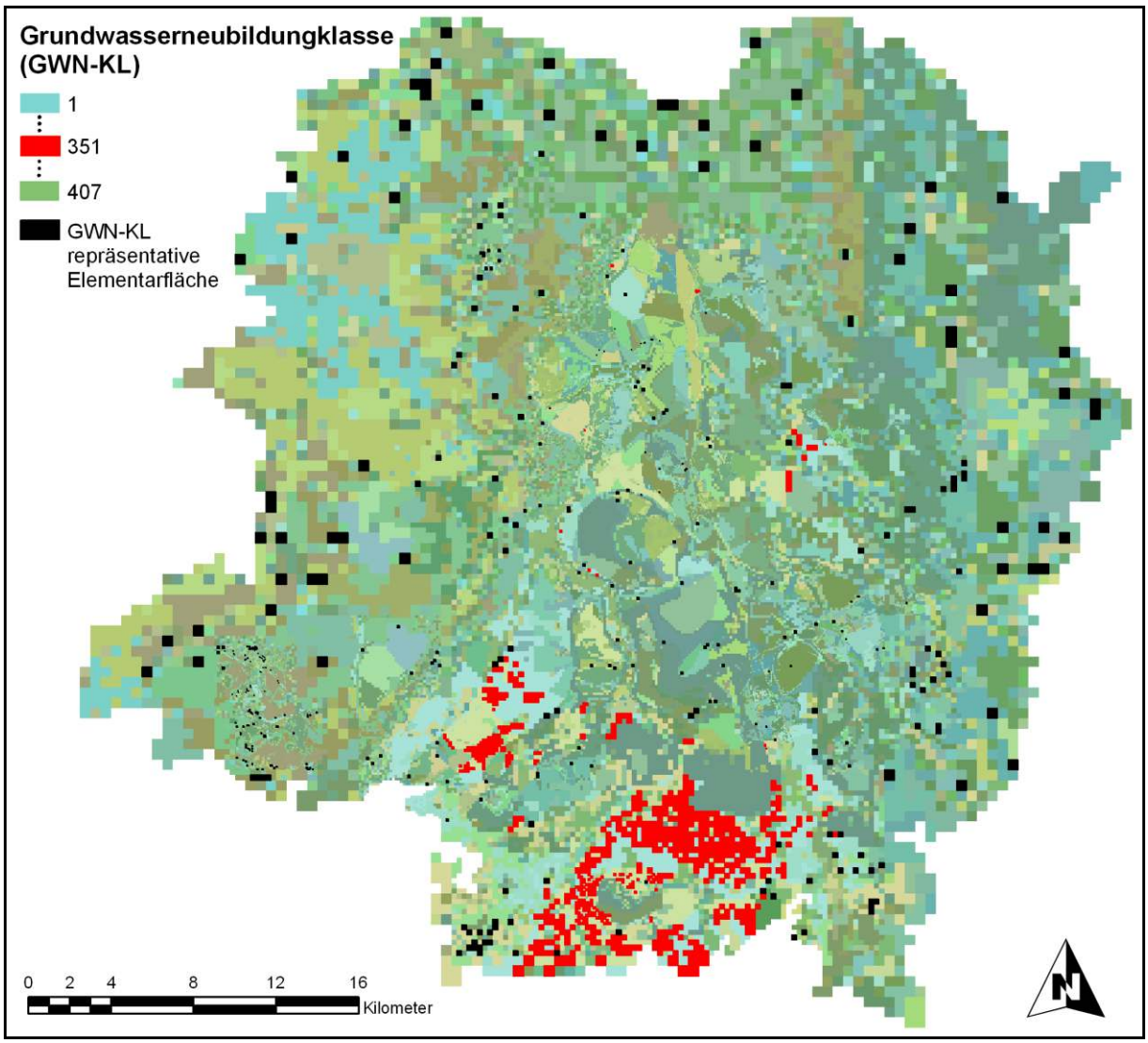

Abb. 4.5: Bildung von Grundwasserneubildungsklassen

4.4 Aktualisierung der Landnutzungsinformationen

Die den BWHM zugrundeliegenden Landnutzungsinformationen besitzen einen unterschiedlichen Aktualitätstand, weil die BWHM verschiedene zeitliche Entwicklungsstufen aufweisen. In der Regel wurden für alle unbesiedelten Areale die zum Zeitpunkt des jeweiligen Modellaufbaus aktuellen CIR-Daten herangezogen. In besiedelten Bereichen wurden diese durch Landesvermessungsdaten, zur Ermittlung der Flächenversiegelungsgrade präzisiert.

Da im KlimaMORO-Projekt sehr lange Zeiträume betrachtet werden sollten auch Areale in die Modellierung einbezogen werden, die entsprechend den Ausweisungen des Regionalen Planungsverbandes Westsachsen einer zukünftigen forstwirtschaftlichen bzw. Waldnutzung unterliegen. Aus diesem Grund wurden die bereits vorliegenden Landnutzungsinformationen um aktuelle Waldmehrungsdaten ergänzt [15]. Die Vorstellung seitens des Auftraggebers bestand darin, dass ab dem Jahre 2050 mit einer forstwirtschaftlichen Nutzung in den gekennzeichneten Arealen zu rechnen und dies in der Modellierung zu berücksichtigen ist. Diese Vorgabe wurde entsprechend aufgegriffen und im Modell umgesetzt. Da jedoch die Annahme eines abrupten Wechsels in der Landnutzungsstruktur ab 2050 im Sinne einer statischen Landnutzung wenig sinnvoll erschien, wurde in Erwägung erzogen einen dynamischen Ansatz zu verfolgen, der es ermöglicht das Waldwachstum und die sich langfristig ergebende Beeinflussung des Wasserhaushaltes von Waldstandorten modellseitig abzubilden.

Innerhalb der Modellumgebung von ArcEGMO, welche modular aufgebaut ist, besteht prinzipiell die Möglichkeit der Kopplung mit Pflanzenwachstumsmodellen, wie beispielsweise VEGEN oder FORESEE (4C) [14]. Diese sind in der Lage die Wechselwirkung von atmo-, bio- und pedosphärischen Prozessen zu simulieren. Das Pflanzenwachstum begünstigende oder limitierende Standortfaktoren werden in diesen Ansätzen je nach Modell mehr oder weniger berücksichtigt. Allerdings erfordern diese Modelle sehr viele Eingangsdaten, die nicht allgemein und flächendeckend verfügbar sind, weshalb deren Einsatz für großräumige Betrachtungen wenig sinnvoll erscheint.

Einen Kompromiss zwischen statischem, unveränderlichem Landnutzungsmodell und Pflanzenwachstumsmodell stellt ein vereinfachter dynamischer Modellansatz dar, der es ermöglicht, Pflanzenwachstum durch die Vorgabe von Zeitfunktionen ausgewählter pflanzenphysiologischer Parameter, wie der Wurzelentwicklung oder des Blattflächenindexes entweder im innerjährlichen Gang (z.B. bei Ackerkulturen) oder im langjährigen Gang (z.B. bei Waldbeständen) modellseitig abzubilden. Dieses dynamische Landnutzungsmodell wurde für die Umsetzung der Waldmehrungsflächen im BWHM der vorliegenden Bearbeitung eingesetzt.

Da das Wurzelwachstum baumartspezifisch ist und zudem von vielfältigen Standortfaktoren, wie dem Grundwasserflurabstand, der Nährstoffverfügbarkeit, der Gründigkeit und allgemein von der Durchwurzelbarkeit eines Bodens abhängig ist, waren keine allgemeingültigen Erfahrungswerte für mittlere Wurzelwachstumsraten zu beschaffen. Deshalb mussten stark verallgemeinernde und plausibel erscheinende Annahmen getroffen werden. Das Wald-

wachstum wird dabei vereinfacht über das allmähliche ungestörte Tiefenwachstum der Wurzeln simuliert, dies allerdings unabhängig von den Standortfaktoren, die das Wurzelwachstum unter realen Bedingungen stark hemmen oder begünstigen können.

Über die Wurzeltiefe wird maßgeblich das ausschöpfbare Bodenwasservolumen definiert, welches zur Deckung des potentiellen Verdunstungsbedarfs der Atmosphäre dem Boden entzogen wird. Der Blattflächenindex, als Quotient von Blattflächensumme und überdeckter Grundfläche, bestimmt die Interzeptionsspeicherkapazität. Sie ist als die maximale Wassermenge definiert, die vom Blattwerk zurückgehalten werden kann und folglich nicht die Bodenoberfläche erreicht. Dieses Wasser verdunstet und trägt somit nicht zur Abflussbildung bei.

Die den BWHM bisher zugrundeliegenden Landnutzungsdaten beinhalteten in den durch die aktuellen Waldmehrungsdaten ausgewiesenen Bereichen bereits zum Teil Wald- bzw. Sukzessionsflächen. Die neu hinzugekommenen Waldmehrungsinformationen wurden in der Datenbasis entsprechend ergänzt. Eine exakte räumliche und zeitliche Vorhersage für zukünftige Flächennutzungen ist nur erschwert möglich. Vermutlich wird die Aufforstung in den Waldmehrungsgebieten in verschiedenen zeitlichen Etappen erfolgen und lokal von Schirm- oder Kahlschlag, Wiederaufforstung, Waldumbau etc. begleitet sein. Aus diesem Grund wurde ein ausgewogener Ansatz bei der modellseitigen Umsetzung der Waldmehrung gewählt, wobei bereits vollentwickelte Waldbestände neben Aufforstungen zu verschiedenen Zeitpunkten als auch Ruderalflächen nebeneinander existieren. Die Umsetzung des gewählten forstlichen Landnutzungsmixes ist in Abbildung 4.6 dargestellt.

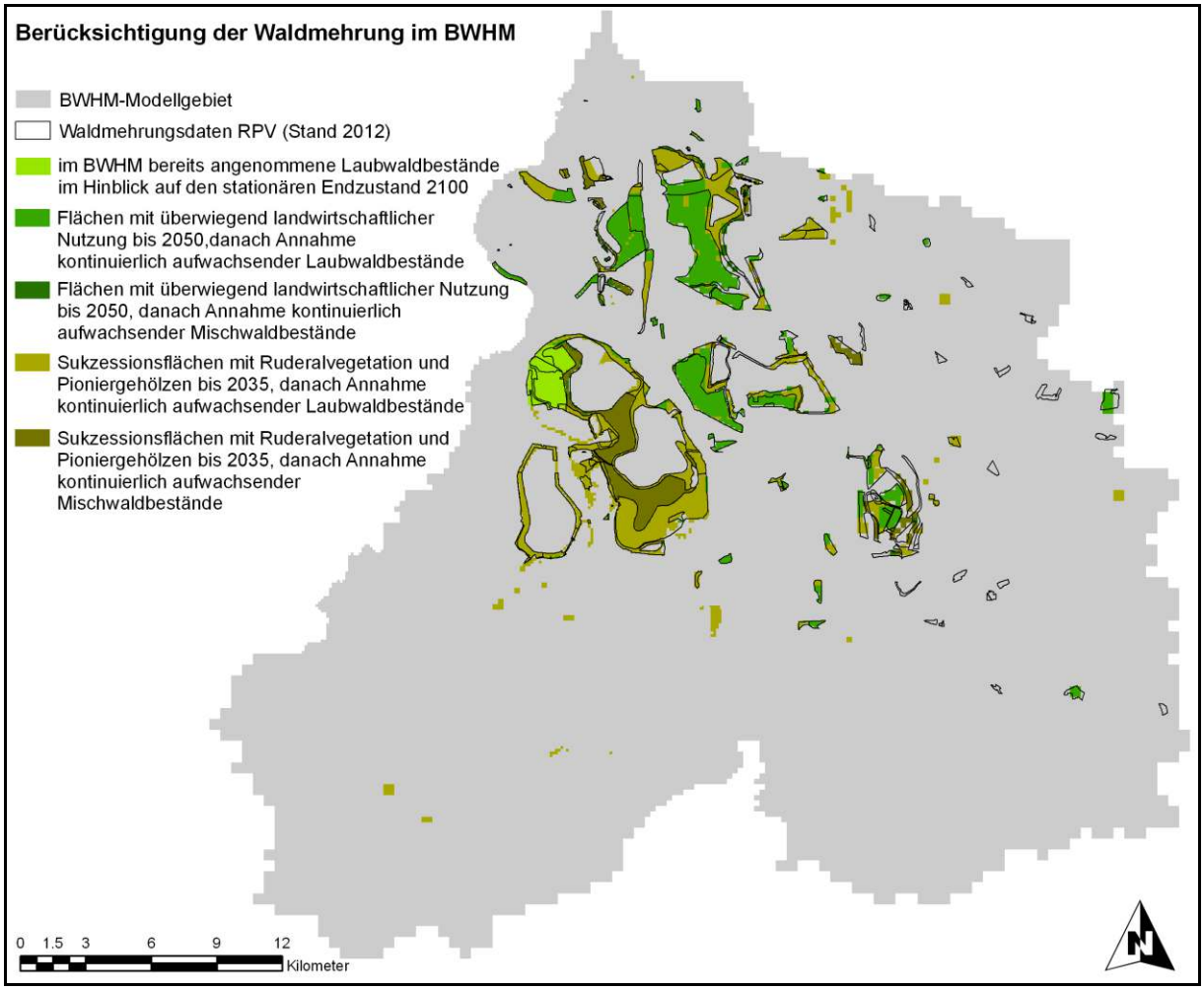

Abb. 4.6: Berücksichtigung der Waldmehrung im BWHM

Abbildung 4.7 zeigt exemplarisch die monatliche und mittlere jährliche Wasserbilanz eines Standortes im Bereich der Kippe Kahnsdorf mit der beschriebenen modellhaften Umsetzung eines aufwachsenden Laubwaldes ab dem Jahr 2050. Bei dem Boden handelt es sich um ein Kippsubstrat, bestehend aus schwach humosem mittel-sandigem Lehm mit geringem Grundwassereinfluss, bei einem mittleren Flurabstand von 3 m. Aufgrund des angenommenen stetigen Wachstums des Waldbestandes kommt die Grundwasserneubildung etwa 2070 nahezu zum Erliegen und reduziert sich von im Mittel 60 mm/a auf etwa -14 mm/a in dem Zeitraum nach 2070. Der Waldstandort im Beispiel wandelt sich aufgrund des Grundwassereinflusses in ein Zehrgebiet mit negativer Wasserbilanz. Die erhöhte Bodenwasserausschöpfung infolge der tiefer vordringenden Wurzeln in Verbindung mit gesteigertem Kapillaraufstieg aus dem Grundwasser sowie die erhöhte Transpiration erklären die periodische Schwingung der Ganglinie mit negativer Grundwasserneubildung vor allem in den Sommermonaten.

In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass die Modellierung von Waldbeständen nur stark idealisiert erfolgen kann. Die komplizierten Ursache-Wirkungs-Beziehungen

zwischen Wäldern und Wasserhaushalt hängen stark von den Eigenschaften eines Waldbestandes, wie der Baumartzusammensetzung, dem Baumalter, der Bestandes- und Kronendichte, dem Vorhandensein einer Strauch- oder Krautschicht sowie den Standorteigenschaften ab und können in ihrer Komplexität kaum modellseitig erfasst werden (vgl. DVWK 2002 [3]).

Das beschriebene Beispiel des Wasserhaushaltes eines Waldstandortes ist daher nur als Ergebnis einer Modellabstraktion zu sehen und muss keine Allgemeingültigkeit besitzen. Im Allgemeinen besitzen Wälder durchaus positive Wirkungen auf den Gebietswasserhaushalt und das Mikroklima. In der Pflanzenmasse sowie der wechselfeuchten Bodenschicht werden große Wassermengen gespeichert und in Waldbeständen weisen die Lufttemperaturen im Vergleich zur umgebenden Lufttemperatur einen geglätteten Gang auf. Dies führt u.a. dazu, das beispielsweise der Schneetauprozess in Wäldern langsamer abläuft, was die Infiltration und somit den Wasserrückhalt in Waldökosystemen begünstigt (vgl. DVWK 2002 [3]).

Die klimatische Entwicklung im Emissionsszenario A1B mit langfristig abnehmenden Niederschlägen und zunehmender potentieller Verdunstung wirkt diesen ausgleichenden Wirkungen des Waldes jedoch entgegen und führt unter bestimmten Standortverhältnissen zu den im Beispiel beschriebenen Verhältnissen.

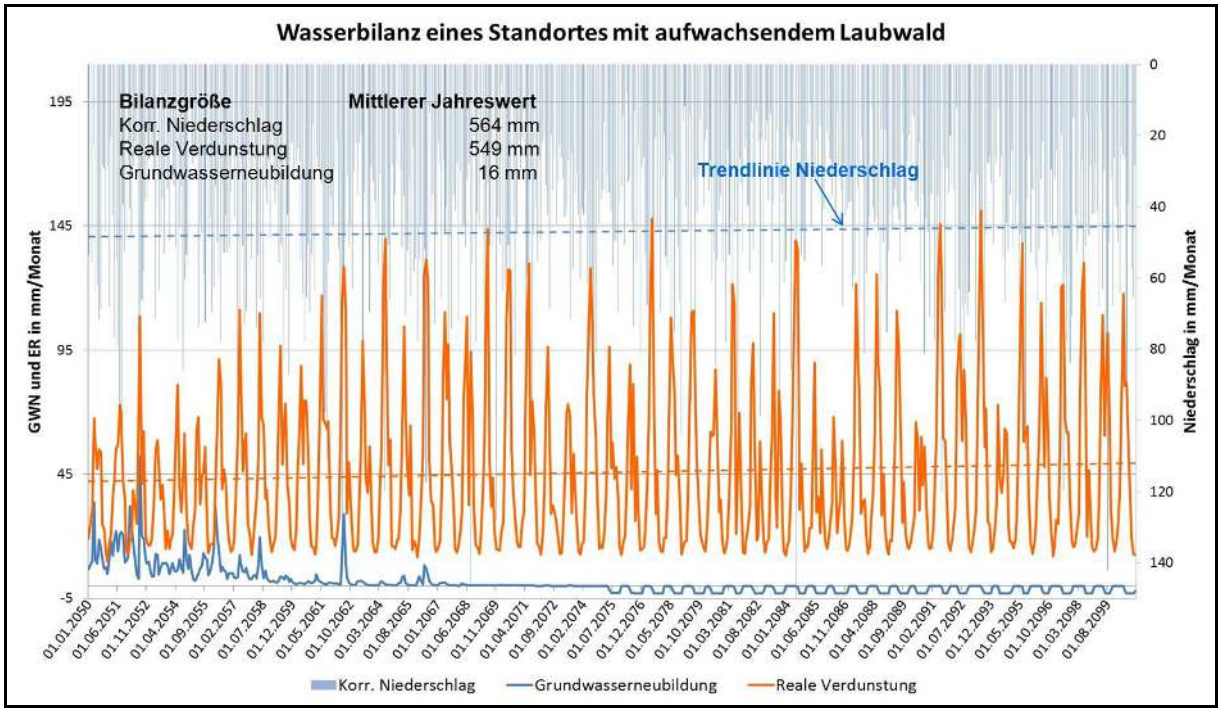

Abb. 4.7: Wasserbilanz eines Standortes mit aufwachsendem Laubwald auf der Kippe Kahnsdorf mit Grundwassereinfluss

4.5 Aktualisierung der Randbedingung Fließgewässer

Aus Gründen der Bilanztreue musste ein Lösungsansatz gefunden werden, wie mit den Modellrandzuflüssen durch die Fließgewässer umzugehen ist, deren obere Einzugsgebiete nicht vollständig von den Wasserhaushaltsmodellen erfasst werden. Aufgrund der sich ändernden klimatischen Verhältnisse ist davon auszugehen, dass dies auch Auswirkungen auf die Wasserführung der Fließgewässer haben wird. Eine Quantifizierung der Durchflussänderungen in den unbeobachteten Gebieten ist jedoch nur erschwert möglich. Für die in Abbildung 4.8 dargestellten Modelleintrittspunkte der Fließgewässer wurde deshalb ein pragmatischer Ansatz verfolgt, die langfristigen klimatischen Einflüsse auf die Fließgewässerdurchflüsse berücksichtigen zu können.

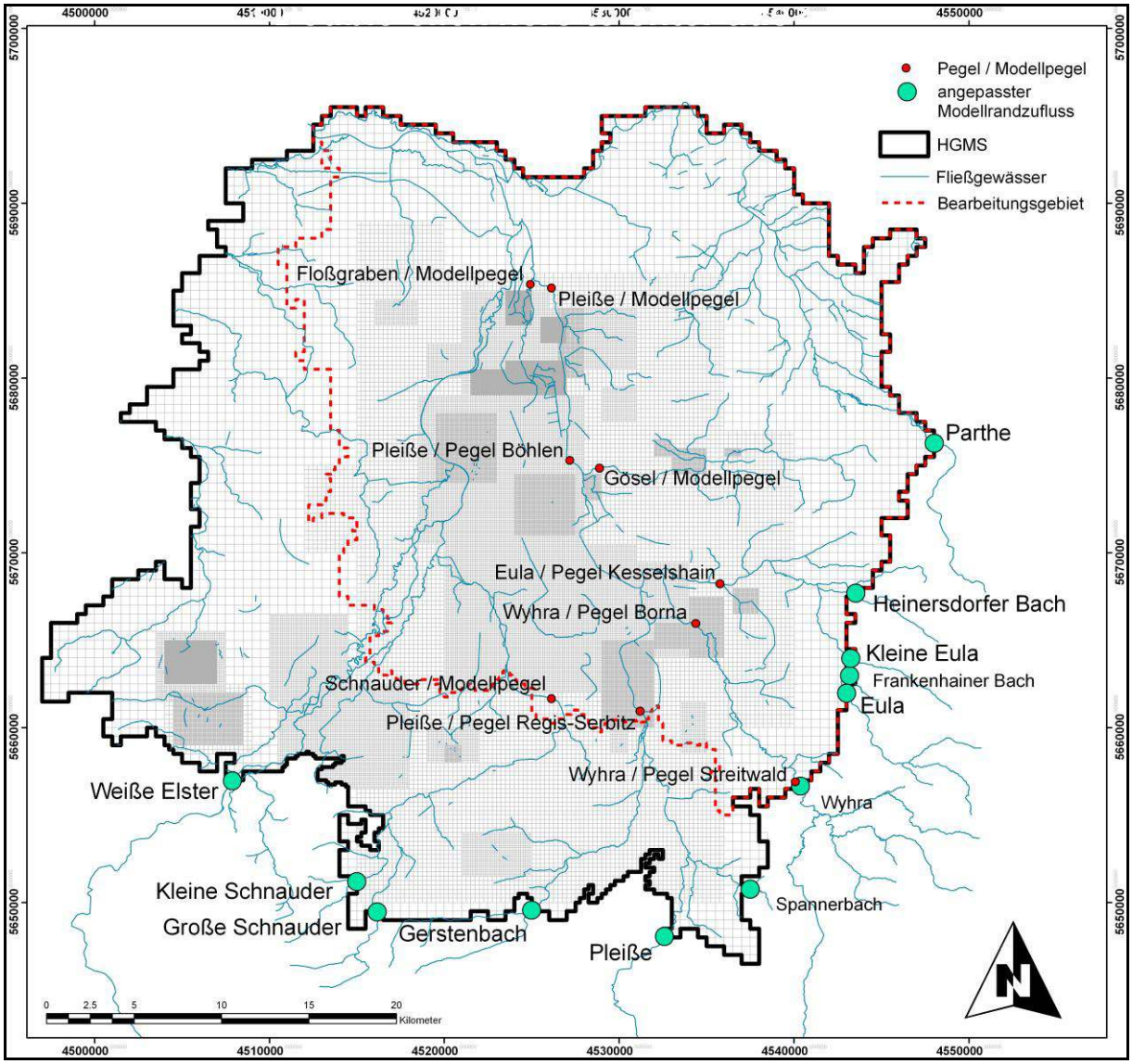

Abb. 4.8: Übersicht über die angepassten Modellrandzuflüsse sowie Pegel bzw. fiktive Modellpegel, für die eine Durchflussauswertung im Ergebnisteil erfolgte.

Da die Grundlast in einem Fließgewässer maßgeblich durch den Basisabfluss gespeist wird und dieser wiederum vom Grundwasservorrat und im Prozessgeschehen zeitlich noch vorgeschaltet der Grundwasserneubildung abhängt, wurde versucht über eine Korrelations- und Regressionsanalyse diese Abhängigkeit nachzuweisen und diese für die vorliegende Problemstellung zu nutzen. Am Beispiel der Pleiße soll die Vorgehensweise im Folgenden beschrieben werden.

Mit dem BWHM wurde zunächst im Modellrandbereich, im oberen Einzugsgebiet der Pleiße die monatliche Grundwasserneubildung berechnet. Diese wurde in Beziehung zu den bisher im HGMS angesetzten Randzuflüssen der Pleiße gesetzt (vgl. Abb. 4.9). Diese Durchflussreihe basiert auf einer Messreihe des Pegels Regis/Serbitz. Da sich dieser Pegel in einer Entfernung von etwa 10 km vom Modellrand befindet, sind die Modellrandzuflüsse zum Zeitpunkt des Aufbaus des HGMS vom damaligen Modellbearbeiter entsprechend nach hydrologischen Gesichtspunkten unter Wahrung der gemessenen Durchflussdynamik reduziert worden.

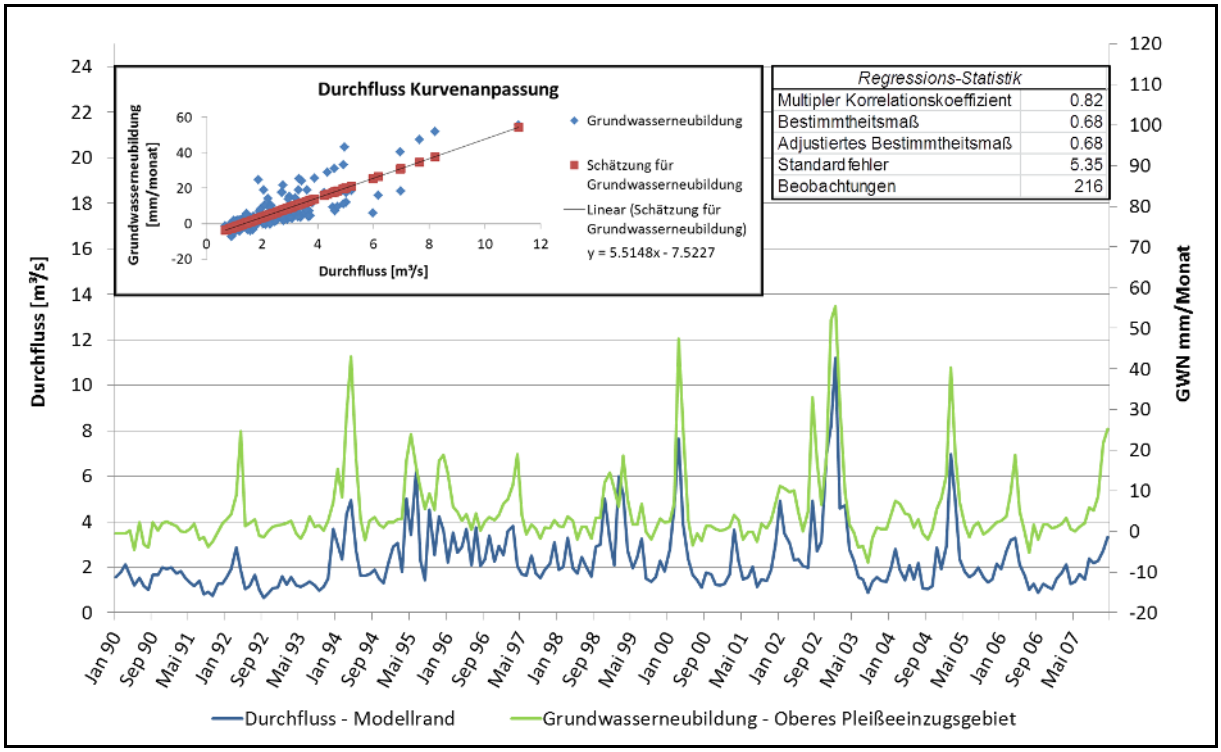

Abb. 4.9: Regressionsanalyse des bisher am Modellrand des Referenzmodells angesetzten Durchflusses der Pleiße sowie der mittels des BWHM im oberen Teil des Pleißeeinzugsgebietes berechneten Grundwasserneubildung (Zeitraum 1990-2007). Die Durchflusswerte basieren auf Messwerten des Pegels Regis/Serbitz.

Abbildung 4.9 zeigt den zeitlichen Verlauf der Grundwasserneubildung und der Pleißedurchflüsse im Zeitraum 1990-2007, wobei bereits rein visuell ein deutlicher Zusammenhang zwischen beiden festzustellen ist. Ein Korrelationskoeffizient von 0,82 belegt diese Abhängigkeit

der Wasserführung in der Pleiße von der in Teilen ihres Einzugsgebietes berechneten Grundwasserneubildung. Mittels der Regressionsanalyse wurde die Art dieses Zusammenhangs bestimmt, welcher sich mit einer linearen Funktion beschreiben lässt.

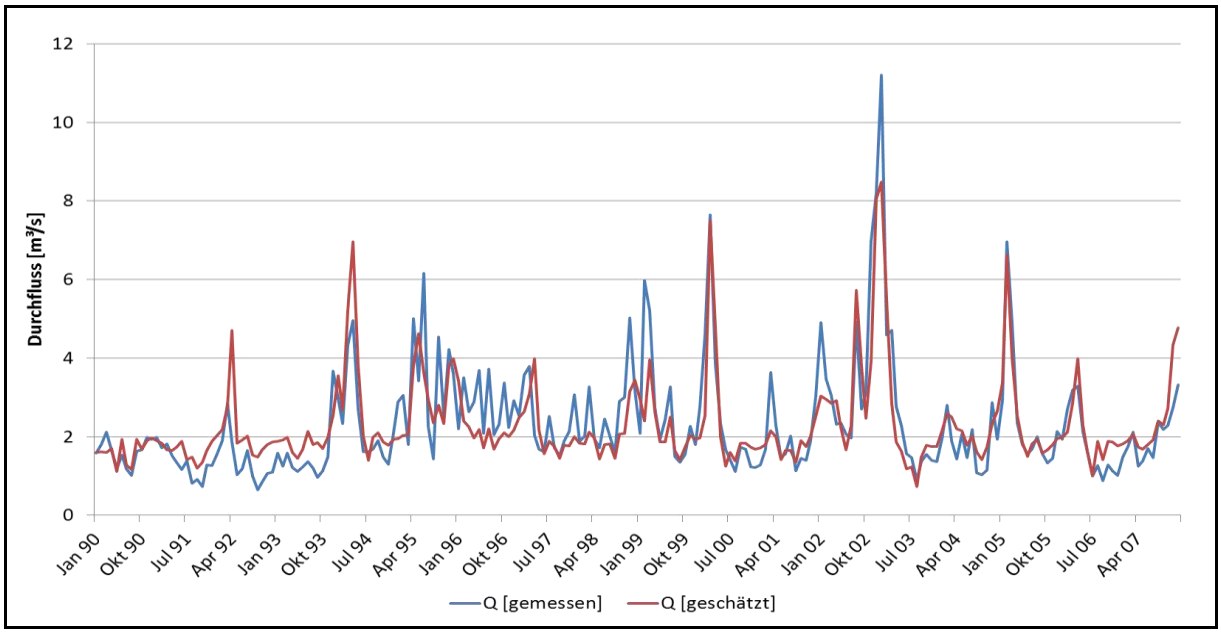

Abb. 4.10: Gemessener und geschätzter Durchfluss der Pleiße am Modellrand des HGMS im Zeitraum 1990-2007

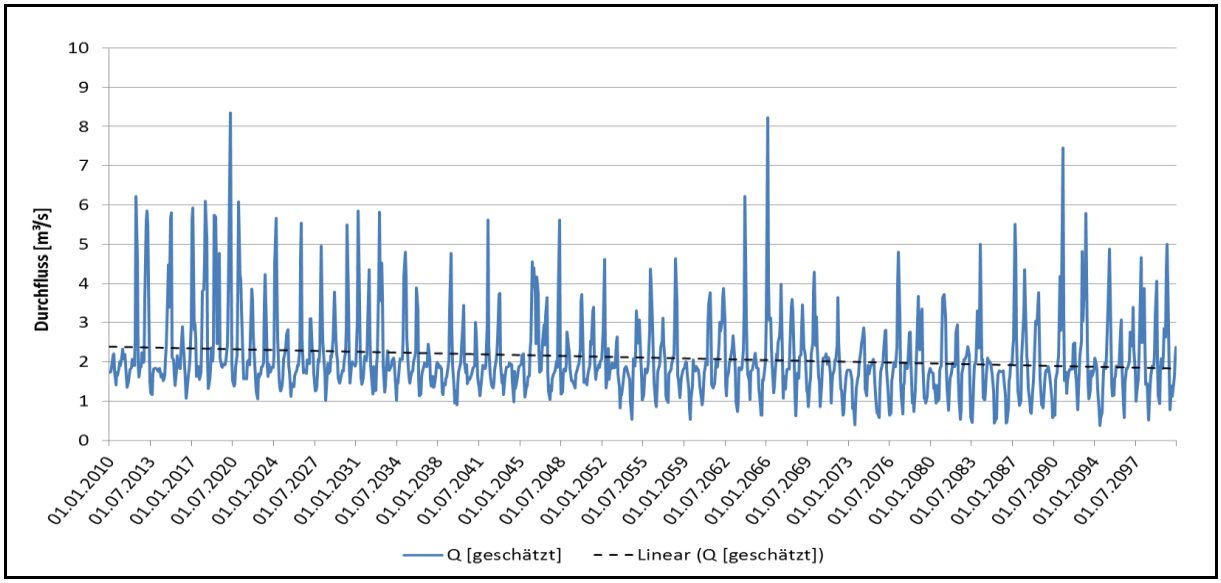

Abb. 4.11: Geschätzter Durchfluss der Pleiße am Modellrand im Projektionszeitraum 2010-2100 auf Grundlage der ermittelten Regressionsbeziehung

Die ermittelte Schätzfunktion wurde zunächst zur Kontrolle auf die Zeitreihe der berechneten Grundwasserneubildung angewendet, um daraus eine Durchflussreihe der Pleiße zu er-

mitteln. Das Ergebnis in Abbildung 4.10 zeigt eine recht gute Übereinstimmung von gemessenem und geschätztem Durchfluss mit einem ähnlichen Schwankungsverhalten, wobei die Über- bzw. Unterschätzung extremer Durchflussereignisse in einem ausgewogenen Verhältnis stehen, so dass beide Reihen einen ähnlichen MQ aufweisen.

Im nächsten Schritt wurde mittels der im Rahmen der Regressionsanalyse abgeleiteten Schätzfunktion basierend auf der mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell berechneten Grundwasserneubildung im Projektionszeitraum 2010-2100 der Durchfluss für die Pleiße ermittelt. Im Endergebnis der beschriebenen Verfahrensweise entstand eine synthetische auf statistischen Zusammenhängen beruhende Durchflussreihe für die Pleiße (vgl. Abb. 4.11). Analog zur Pleiße wurde auch mit den Modellrandzuflüssen der übrigen Vorfluter umgegangen (vgl. auch Abb. 4.8). Die mit der beschriebenen Methode ermittelten Durchflussreihen konnten letztendlich als Randzuflüsse im HGMS angesetzt werden. Sie spiegeln den langfristigen Trend der zugrunde liegenden Klimareihe sowie das klimatisch bedingte Schwankungsverhalten sehr gut wieder.

Einschränkend muss erwähnt werden, dass eine mögliche Autokorrelation der Datenreihen der Modellrandzuflüsse durch weitere Einflussgrößen vernachlässigt wurde. Am Beispiel des Pegels Regis-Serbitz der Pleiße sei die anthropogene Beeinflussung durch die Stauhaltung der Talsperre Windischleuba wenige Kilometer oberhalb des Pegels genannt. Diese verfälscht die natürliche Abflussdynamik der Pleiße. Im Hochwasserfall kann die Teilrückhaltung von Wasser im Stausee eine Abflachung der Abflusspitzen bewirken, welches zeitverzögert über einen Ablauf der Pleiße wieder zugeführt wird und dann zu einer künstlichen Aufhöhung der Abflüsse führt. Des Weiteren muss erwähnt werden, dass bei der beschriebenen Verfahrensweise unterstellt wird, dass die am Modellrand ermittelte Grundwasserneubildung auf die sich außerhalb des BWHM befindlichen unbeobachteten obere Einzugsgebiete der dem Modellraum zufließenden Fließgewässer übertragbar ist und somit für die Erklärung der Pegelbeobachtungen herangezogen werden kann. Aus Ermangelung an weitreichenderen Informationen und Methoden mussten diese Unsicherheiten in Kauf genommen werden.

Hinsichtlich bestehender Nutzungseinflüsse einschließlich ihrer zeitlichen Veränderungen (z.B. größere industrielle Wasserentnahmen und -einleitungen, Überleitungen aus Nachbareinzugsgebieten) wurde ein Abgleich mit den aktuell im Modell umgesetzten Randbedingungen vorgenommen. Vorgaben der Regionalen Planungsstelle wurden hierbei berücksichtigt. Als größte Gewässernutzer der Pleiße wurden die Kläranlage Markkleeberg, die Aufbereitungsanlage Borna-West, die Grubenwasserreinigungsanlage Neukieritzsch, die DOW Olefinverbund GmbH Böhlen sowie das Kraftwerk Lippendorf bei der Aktualisierung des Randbedingungsansatzes berücksichtigt.

Gewässernutzer bzw. -bewirtschaftung	**Gewässer**	**Einleitmenge in m³/min**	**Zeitraum**
Kläranlage Markkleeberg	Floßgraben	3,12	1995 - 2200
Aufbereitungsanlage Borna-West	Pleiße	0,6	2005 - 2200
Grubenwasserreinigungsanlage Neukieritzsch (MIBRAG)	Pleiße	53,52	2010 - 2015
		37,86	2015 - 2050
DOW Olefinverbund GmbH Böhlen	Pleiße	12	2000 - 2070
Kraftwerk Lippendorf (Vattenfall)	Pleiße	12	1999 - 2000
		9	2000 - 2043
Muldeüberleitung zur Brauchwasserbereitstellung für das Industriegebiet Böhlen	Steingrundbach	59,9	1995 - 2043
		41,9	2043 - 2070

Tab. 4.1: Einleitmengen ausgewählter Gewässernutzer in die Pleiße

Die in Tabelle 4.1 aufgeführten Einleitmengen der Gewässernutzer entstammen einer Vorplanung des Instituts für Wasser und Boden zur Sulfatlaststeuerung der unteren Pleiße, welches die Daten bei den Betreibern recherchiert hat [12]. Diese wurden als Randbedingungen in das HGMS übernommen oder waren zum Teil so schon umgesetzt. Hinsichtlich der Muldeüberleitung wurde angenommen, dass mit der Einstellung des Kraftwerkes Lippendorf ab 2043 weniger Brauchwasser bereitgestellt werden muss. Mit der fiktiven Annahme, dass ab 2070 auch DOW nicht mehr am Standort bestehen wird, wurde die Muldeüberleitung im Modell ab diesem Zeitpunkt entsprechend ganz eingestellt.

5 Berechnungsergebnisse

Die Darstellung und Auswertung der Berechnungsergebnisse erfolgt in zwei Teilen. Im ersten Teil werden die Berechnungsergebnisse aus den Modellbetrachtungen zum Bodenwasserhaushalt vorgestellt, wobei auf die Wasserhaushaltsbilanzgrößen Verdunstung und Grundwasserneubildung detaillierter eingegangen wird, da diese wesentliche Voraussetzungen für die anschließenden grundwasserseitigen Betrachtungen sind.

Im zweiten Teil werden die Ergebnisse zum Grund- sowie Oberflächenwasserhaushalt vorgestellt. Im Mittelpunkt stehen dabei die Entwicklung des Gesamtgrundwasservorrates unter Beachtung der gesetzten klimatischen Rahmenbedingungen, die Beschreibung des Grundwasserströmungsbildes in Hydroisohypsenplänen, die Darstellung der Grundwasserstandsdifferenzen zwischen Referenzzustand und Emissionsszenario A1B in Hydrodifferenzenplänen sowie der Grundwasserflurabstände für jeweils zwei Auswertezeitpunkte Mitte und Ende des Jahrhunderts. Außerdem erfolgt für ausgewählte Restlöcher eine Beschreibung der Entwicklung der Wasserstände mit den zu erwartenden Überschusswassermengen sowie der Durchflüsse ausgewählter Fließgewässer.

Diese thematische Trennung ist bedingt durch die unterschiedlichen Modellansätze die für die vorliegende Fragestellung zum Einsatz kamen. Dies sind einerseits ArcEGMO mit seinen konzeptionellen Ansätzen zur Beschreibung des zweidimensionalen Wasserumsatzes in Bio- und Pedosphäre und andererseits PCGEOFIM mit seiner mathematisch-physikalisch begründeten dreidimensionalen Beschreibung des Wassertransportes in der Lithosphäre sowie im Grenzbereich zur Hydrosphäre.

5.1 Bodenwasserhaushalt

Die Berechnungsergebnisse aus der Modellierung des Bodenwasserhaushalts können nur für einen Teilbereich des Projektgebietes dargelegt werden, da die BWHM nicht flächendeckend vorliegen (vgl. Abb. 4.1).

Die Ergebnisse sollen die rein klimatisch bedingten Effekte auf die Bilanzgrößen des Wasserhaushaltes sowohl hinsichtlich ihrer langjährigen Mittelwerte als auch ihrer räumlichen Variabilität im großräumlichen Zusammenhang verdeutlichen. Für die Modellierung beider Systemzustände wurden die gleichen mittleren Grundwasserflurabstände auf Grundlage der bereits mehrfach genannten meteorologischen Reihe 1961-1990 angenommen. Dies bedeutet allerdings keine Einschränkung hinsichtlich der verfolgten Zielstellung des Aufzeigens großräumlicher Entwicklungstendenzen. Die exakte Ermittlung der Grundwasserneubildung, unter Berücksichtigung der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Grundwasserflurabstände, als Randbedingung für das Grundwasserhaushaltsmodell erfolgt im Rahmen der Grundwasserhaushaltsmodellierung und ist Gegenstand der Abschnitte 3.3 und 4.2.1.

Bei der Bilanzierung und Ermittlung der mittleren Wasserhaushaltsgrößen wurden die Standgewässer nicht einbezogen, da diese die Bilanz verzerren würden. Gewässerflächen nehmen im Gebietswasserhaushalt eine Sonderstellung ein. In diesen Bereichen steht ganzjährig Wasser zur Deckung des Verdunstungsbedarfs der Atmosphäre zur Verfügung, bei einem fehlenden Verdunstungswiderstand, wie ihn Böden entgegensetzen. Aus diesem Grund liegt die Gewässerverdunstung 10 bis 30 % über der potentiellen Verdunstung von Landflächen. Die extrem hohe Grundwasserzehrung sowie die sehr hohen Oberflächenabflüsse, die von ArcEGMO für freie Wasserflächen berechnet werden, resultieren aus der Modellannahme, dass Wasserflächen generell an die Vorflut angebunden sind. Das Modell übergibt demnach den auf die Wasserfläche fallenden Niederschlag abzüglich der im Zeitschritt berechneten Gewässerverdunstung direkt an die Vorflut und wird somit als Oberflächenabfluss bilanziert. Eine Speicherung im Standgewässer sowie die Uferfiltration werden bei dem gewählten Modellansatz nicht berücksichtigt.

Da die detaillierte Modellierung und Bilanzierung der Standgewässer im Grundwasserhaushaltsmodell erfolgt, verliert dieser Umstand jedoch an Bedeutung.

In Abbildung 5.2 ist die räumliche Verteilung der Realen Verdunstung im Projektgebiet dargestellt. Als Bereiche mit sehr hoher Evapotranspiration sind vornehmlich Gewässerflächen bzw. Flussniederungen und generell Areale mit flurnahen Grundwasserständen auszumachen. Diese entsprechen größtenteils den in Abb. 5.3 hellrot eingefärbten Flächen. Dabei handelt es sich um sog. Zehrflächen des Gebietswasserhaushaltes, da von ihnen eine größere Wassermenge durch Verdunstung entzogen wird als durch Niederschläge zugeführt werden kann.

Die Gegenüberstellung der mittleren Bilanzgrößen des Referenz- und des Projektionszeitraums in Tabelle 5.1 offenbart die zum Teil drastischen Gegensätze. Die mittleren Niederschlagshöhen differieren in dem betrachteten Teilgebiet des Untersuchungsraumes geringfügig. Einen Vergleich der räumlichen Verteilung der Niederschlagshöhen zeigt Abbildung 5.1. Die mittlere potentielle Verdunstung im Emissionsszenario übersteigt die des Referenzzustandes um etwa 25 %. Dieser enorme Anstieg resultiert aus der prognostizierten Erwärmung der Erdatmosphäre. Für die klimatische Wasserbilanz als Differenz von Niederschlag und potentieller Verdunstung bedeutet dies für den Projektionszustand, dass sie mit -235 mm/a deutlich negativer ausfällt als für den Referenzzustand und damit das Wasserangebot im Bearbeitungsgebiet geringer ist.

Bemerkenswert ist, dass die Differenz der mittleren realen Verdunstungshöhe nicht annähernd so groß ist. Sie liegt im Emissionsszenario gerade einmal 7 % höher. Bei Betrachtung der flächenmäßigen Verteilung der realen Verdunstung fällt in diesem Zusammenhang auf, dass die größten Unterschiede nahezu ausschließlich an grundwassernahen Standorten, wie ausgedehnten Flussauen und Bergbaukippen bzw. bei den Standgewässern zu finden sind.

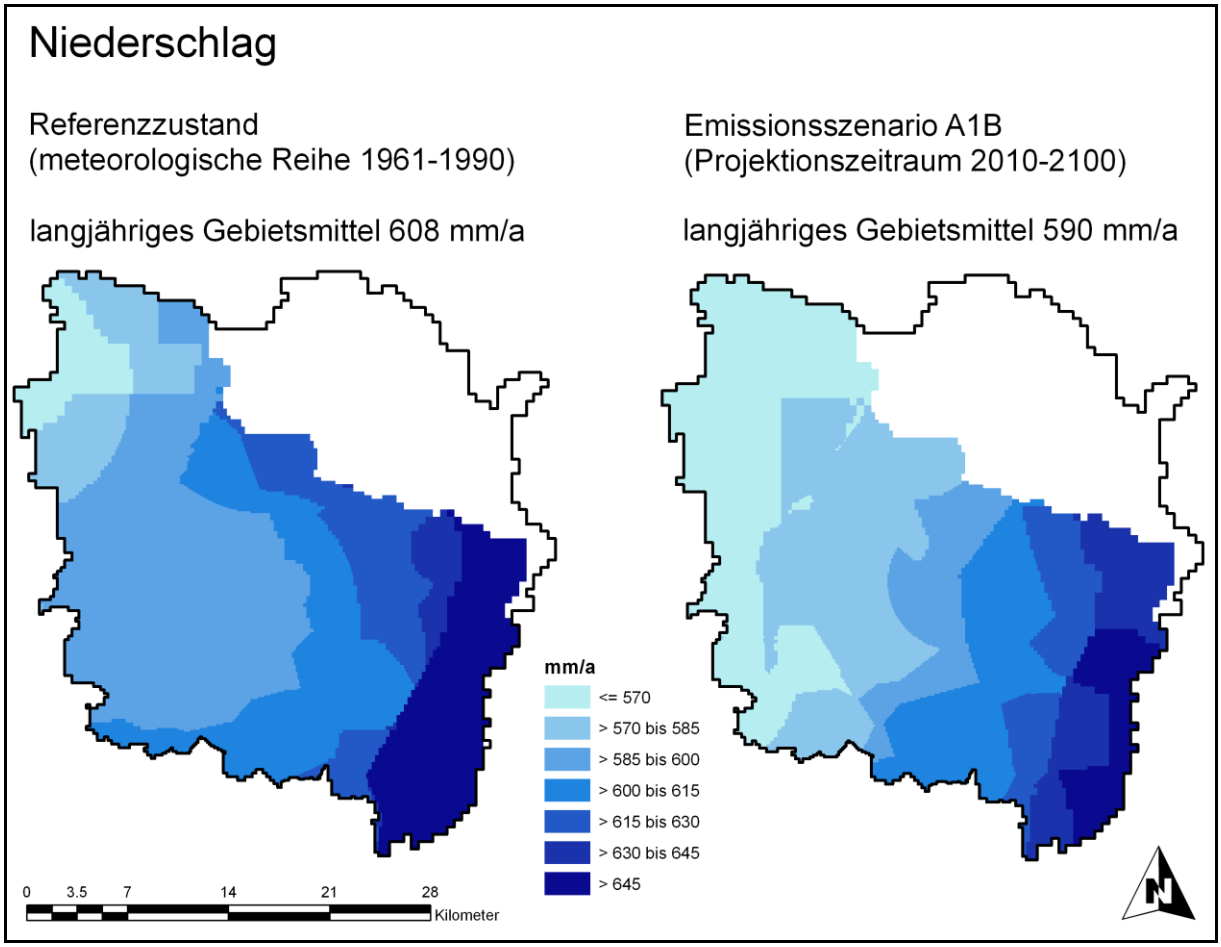

Abb. 5.1: Mittlere jährliche Niederschlagshöhe in Teilen des Bearbeitungsgebietes für den Referenzzustand (Bezugszeitraum: 1961-1990) sowie das Emissionsszenario A1B (Bezugszeitraum (2010-2100)

Die grundwasserferneren Gebiete, vor allem im östlichen bzw. südöstlichen Teil des Bearbeitungsgebietes weisen relativ geringe Unterschiede auf.

Die geringfügig höhere Reale Verdunstung im Emissionsszenario A1B in Gebieten mit großem Grundwasserflurabstand trotz der deutlich erhöhten potentiellen Verdunstung hat ihre Ursache in der fehlenden Wasserverfügbarkeit des Bodens. Zur Deckung des potentiellen Verdunstungsanspruchs der Atmosphäre steht nicht genügend Wasser zur Verfügung. Aus diesem Grund bleibt die Reale Verdunstung deutlich hinter der Potentiellen zurück.

Anders sieht es in den Flussniederungen oder den Vernässungsflächen der Bergbaukippen und bei den Standgewässern aus. Dort wo sich offene Wasserflächen befinden oder das Grundwasser erdoberflächennah ansteht, steht ausreichend Wasser für die potentielle Verdunstung zur Verfügung. Unter diesen Gegebenheiten entspricht die Reale Verdunstung der potentiellen. Die Gewässerverdunstung übersteigt die potentielle Verdunstung sogar. Durch den enormen Anstieg der potentiellen Verdunstung unter Annahme der Klimaprojektion, sind dort die Differenzen entsprechend am größten. Besonders deutlich prägen sich im Emissionsszenario A1B auch die im Bereich der Bergbaukippen lokalisierten Waldmehrungsareale

durch (vgl. auch Abb. 4.6). Da Bäume mit ihren tief- und weitreichenden Wurzeln große Bodenwasservolumina ausschöpfen können und viele Kippenstandorte unter Grundwassereinfluss stehen, sind die Waldbestände von vergleichsweise hoher Verdunstung gekennzeichnet (vgl. auch Abb. 4.7). Die Konsequenz der erhöhten Verdunstung und der Abnahme der Niederschläge ist eine stark verringerte Grundwasserneubildung. Flächen, die im Emissionsszenario A1B höhere reale Verdunstungsraten als im Referenzzustand aufweisen, sind somit zugleich Flächen, auf denen es zu einer geringeren Grundwasserneubildung, bis hin zu einer Zehrung kommt (vgl. Abb. 5.3). Der Anteil an Zehrflächen ist im Projektionszeitraum insgesamt größer als im Referenzzeitraum.

Bilanzgröße [mm/a]	**Referenzzustand**	**Emissionsszenario A1B**
Niederschlag	608	590
Potentielle Verdunstung	656	825
Reale Verdunstung	502	538
Oberflächenabfluss	6	3
Kanalisationsabfluss	13	11
Hypodermischer Abfluss	2	1
Grundwasserneubildung	85	37
Klimatische Wasserbilanz	*-48*	*-235*

Tab. 5.1: Mittlere jährliche Bilanzgrößen des Wasserhaushalts für den Referenzzustand (Bezugszeitraum: 1961-1990) sowie das Emissionsszenario A1B (Bezugszeitraum: 2010-2100)

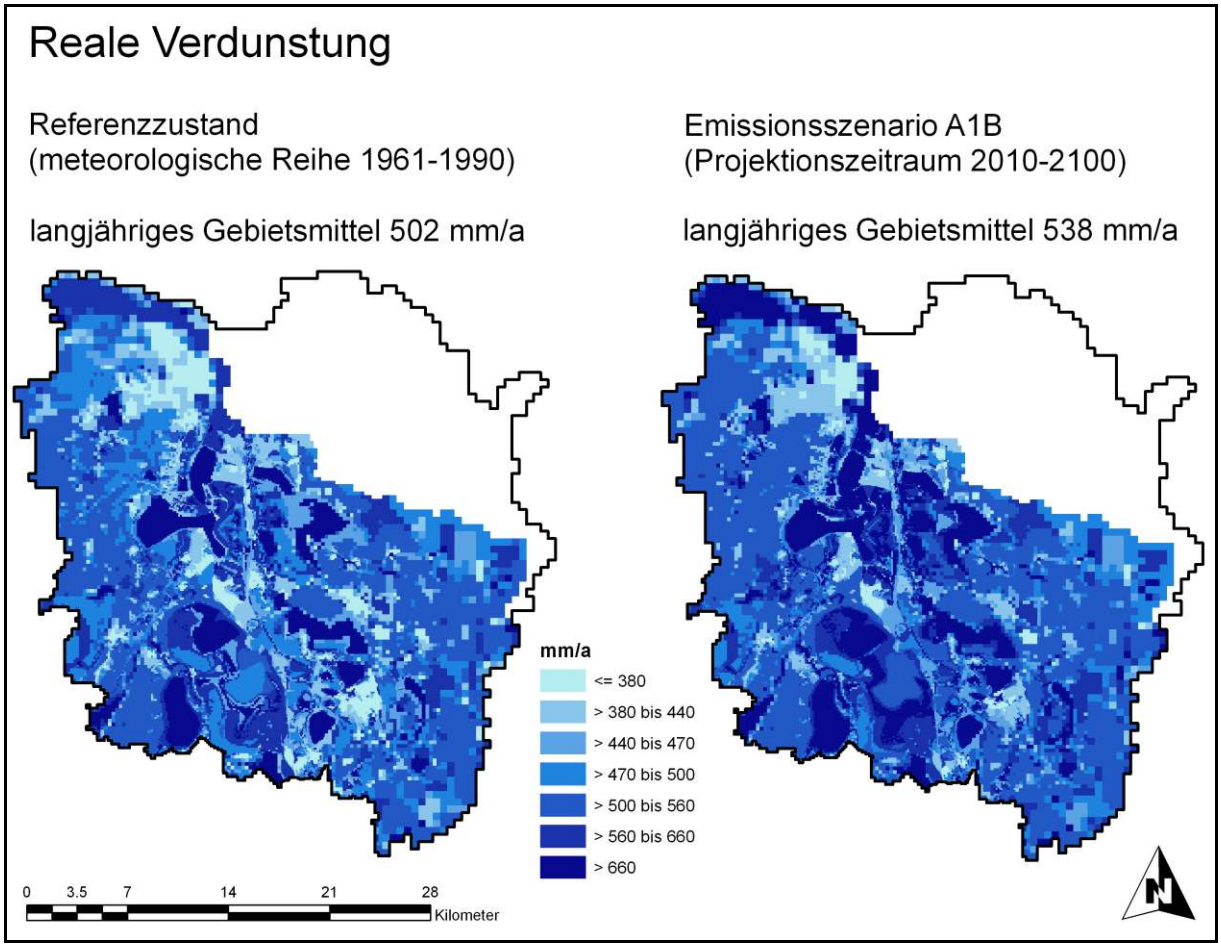

Abb. 5.2: Mittlere jährliche Reale Verdunstung in Teilen des Bearbeitungsgebietes für den Referenzzustand (Bezugszeitraum: 1961-1990) sowie das Emissionsszenario A1B (Bezugszeitraum (2010-2100)

Beachtenswert hinsichtlich der räumlichen Verteilung der Grundwasserneubildung in beiden Systemzuständen sind die großen Differenzen zwischen dem Ost- und Westteil des Bearbeitungsgebietes wohingegen diese hinsichtlich der Realen Verdunstung nicht so deutlich sind. Die geringen Grundwasserneubildungshöhen im westlichen Elstereinzugsgebiet sind demnach weniger einer erhöhten Evapotranspiration geschuldet, vielmehr sind es die guten Retentionseigenschaften der dort verbreiteten, tief entwickelten Schwarzerden, die hohe nutzbare Feldkapazitäten aufweisen und damit große Wassermengen pflanzenverfügbar speichern. Die hohen Mittel- und Grobporenanteile führen darüber hinaus zu einer besseren Durchlüftung und Durchwurzelbarkeit bis in relativ große Tiefen (vgl. Scheffer & Schachtschabel 2002 [17]). Die begünstigte Bodenwasserausschöpfung für Pflanzen führt zu stark verminderter Grundwasserneubildung und erhöhter Verdunstung, wobei die Verdunstung aufgrund der begrenzten Wasserverfügbarkeit vergleichsweise gering erhöht ist. Das begrenzte Wasserdargebot resultiert nicht zuletzt aus dem Umstand, dass die mittlere Niederschlagshöhe sowohl im Projektionszeitraum als auch im Referenzzeitraum im Nordwesten des Gebietes etwa 100 mm niedriger ist als im Südwesten.

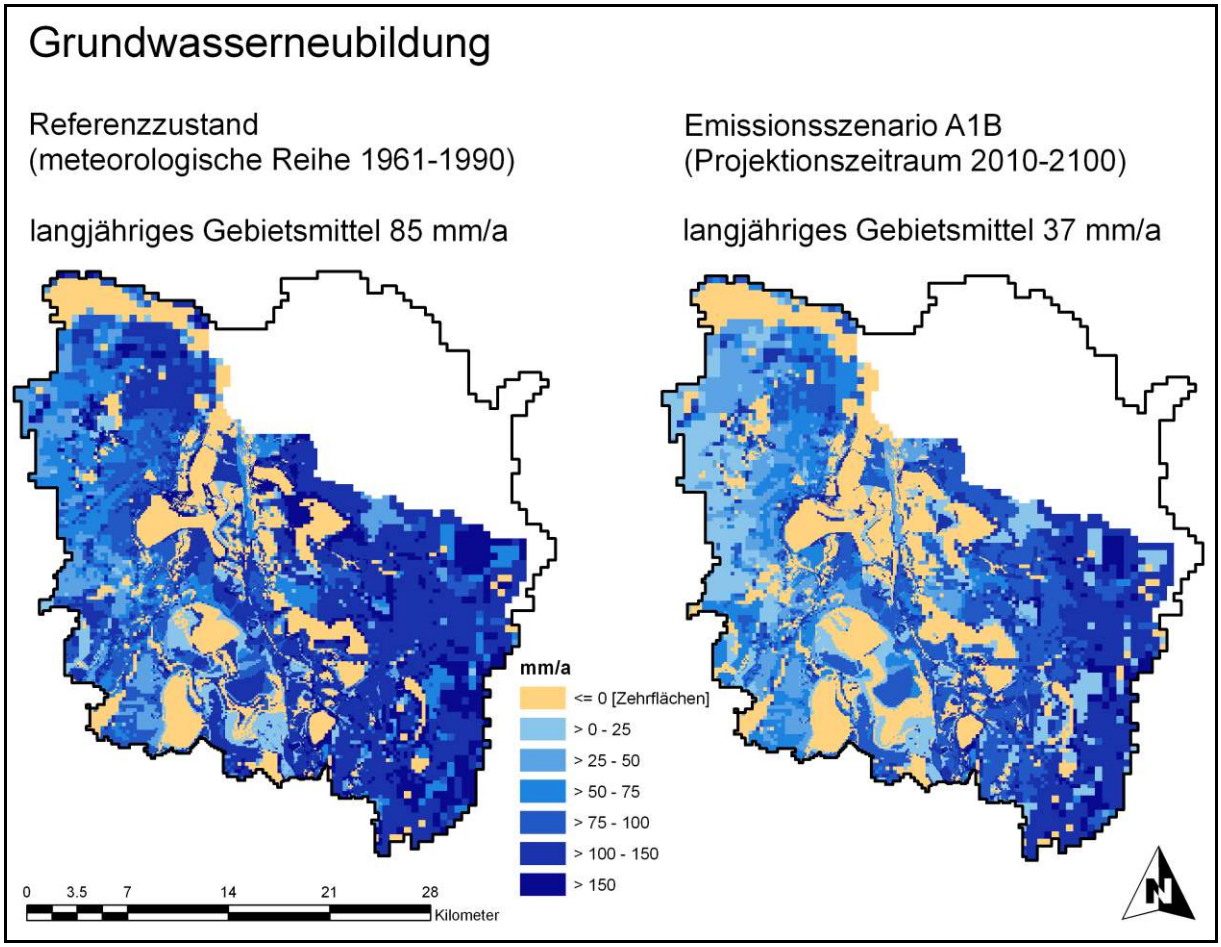

Abb. 5.3: Mittlere jährliche Grundwasserneubildung in Teilen des Bearbeitungsgebietes für den Referenzzustand (Bezugszeitraum: 1961-1990) sowie das Emissionsszenario A1B (Bezugszeitraum (2010-2100)

5.2 Grundwasserhaushalt

Zum Verständnis der im Ergebnisteil präsentierten Diagramme und Grafiken sei erwähnt, dass der Berechnungsbeginn sowohl des Referenzmodells als auch des Projektionsmodells das Jahr 1995 ist. Bis 2010 rechnen beide Modelle mit identischen Randbedingungen, ab diesem Zeitpunkt bis zum Berechnungsende im Jahr 2100 gelten im Projektionsmodell veränderte klimatische Randbedingungen.

5.2.1 Grundwasserneubildung

Im Folgenden werden die Berechnungsergebnisse der Grundwasserneubildung aus dem Grundwasserhaushaltsmodell diskutiert. Im Gegensatz zur Ermittlung der Grundwasserneubildung mit den Bodenwasserhaushaltsmodellen unter Annahme mittlerer Grundwasserflurabstände wurde im Zuge der Grundwasserhaushaltsmodellierung der räumlich und zeitlich variable Grundwasserflurabstand berücksichtigt, der bedeutenden Einfluss auf die Grundwasserneubildung hat. Diese Abhängigkeit beider Größen wird dabei gemäß den Ausführungen in Abschnitt 3.3 mittels Linearfunktionen beschrieben. Die auf diese Weise ermittelte Grundwasserneubildung ist für die Grundwasserhaushaltsbilanzierung die verbindliche Eingangsgröße. In ihrer Grundaussage und den langjährigen Mittelwerten unterscheiden sich die Ergebnisse aus den Bodenwasserhaushaltsmodellen und dem Grundwassermodell nur wenig, im innerjährlichen Schwankungsverhalten und ihrem langfristigen zeitlichen Verlauf jedoch deutlicher. Für eine ausführliche Beschreibung der Charakteristik der räumlichen Verteilung der Grundwasserneubildung wird deshalb auf den Abschnitt 4.1 verwiesen. Die Anlagen 2.1 und 4.1 enthalten Kartendarstellungen der im Rahmen der Grundwasserhaushaltsmodellierung ermittelten flurabstandsabhängigen mittleren Grundwasserneubildung im Zeitraum 2010 bis 2100. Zur Bewertung dieser Darstellungen sei nochmals auf die unterschiedlichen methodischen Ansätze zur Berechnung der Grundwasserneubildung für den Referenz- und den Projektionszustand hingewiesen (vgl. auch Abschnitt 3.3). Da die Ermittlung der Grundwasserneubildung für den Referenzzustand aufgrund der langjährigen Entwicklungszeit des HGMS z.T. in unterschiedlichen Entwicklungs- und Präzisierungsstufen erfolgte, sind in den Kartendarstellungen Bereiche auszumachen, in denen sich die geometrische Modellstruktur in Form der Modellupen durchpaust.

5.2.2 Grundwasservorrat

Abbildung 5.4 zeigt den Vergleich der langfristigen Entwicklung des Grundwasservorrates sowie der Grundwasserneubildung zwischen dem Referenzszenario und dem Emissionsszenario A1B. Die Graphen stellen den zeitlichen Verlauf im Simulationszeitraum von 1995-2100 für das Gesamtgebiet des HGMS (vgl. Abb. 4.1) dar. Die Berechnungen des Referenzszenarios basieren auf langjährigen Mittelwerten der Grundwasserneubildung, die des Projektionssze-

narios auf einer monatlichen Grundwasserneubildung, womit eine Darstellung des Schwankungsverhaltens möglich wird. Die Zunahme des Grundwasservorrates in beiden Szenarios ist auf den allgemeinen Grundwasserwiederanstieg infolge der Einstellung der Bergbautätigkeiten und der großflächigen Entwässerung zurückzuführen. Bei Annahme sich ändernder klimatischer Randbedingungen gemäß dem Emissionsszenario A1B wird diese allgemeine Zunahme des Grundwasservorrates allerdings abgeschwächt. Mitte des Jahrhunderts beträgt das sich daraus ergebende Defizit ca. 450 Mio. m³. Am Ende des Jahrhunderts erhöht sich das Defizit auf etwa 600 Mio. m³. Dies entspricht einer Verringerung des Grundwasservorrates um ca. 7 %. In engem Zusammenhang mit dieser Entwicklung steht die Grundwasserneubildung. Diese verringert sich im langjährigen Mittel von ca. 95 mm/a (4,9 m³/s) auf etwa 35 mm/a (1,8 m³/s). Das entspricht einer Reduktion um 63 %.

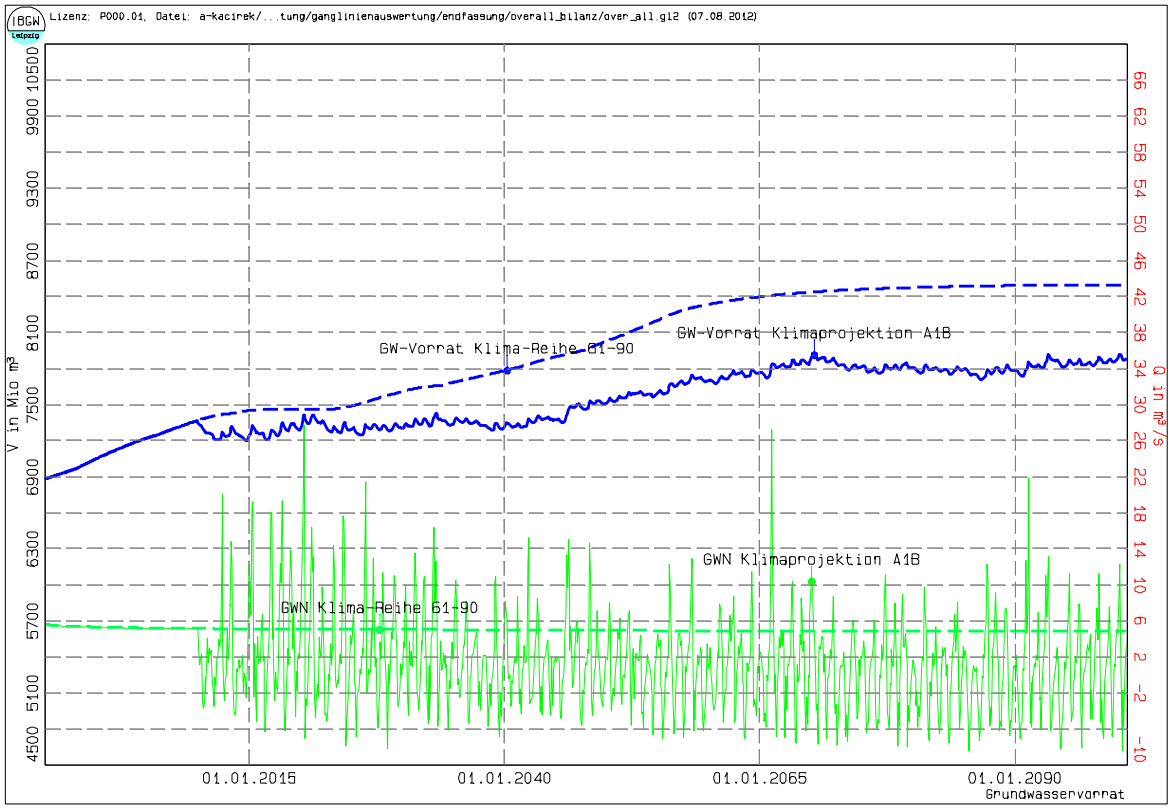

Abb. 5.4: Entwicklung des Grundwasservorrates sowie der Grundwasserneubildung in Referenz- und Emissionsszenario A1B im Südraum Leipzig für das gesamte Modellgebiet des HGMS (Zeitraum 1995-2100)

Im Referenzzustand, bei mittlerer Grundwasserneubildung, herrschen zum Zeitpunkt 2100 weitgehend stationäre Strömungsverhältnisse. Die Berechnungen auf Grundlage des Emissionsszenarios A1B lassen bereits ab 2070 einen quasistationären Strömungszustand erkennen, der dadurch gekennzeichnet ist, dass keine signifikante Zunahme des Grundwasservorrats mehr stattfindet. Vielmehr unterliegt dieser klimatisch bedingten Schwankungen.

5.2.3 Hydroisohypsen

Die Hydroisohypsendarstellungen in den Anlagen 1.2, 2.3, 3.3 u. 4.4 geben Aufschluss über das Grundwasserniveau und die -fließrichtung. Der geologische Untergrund im Südraum Leipzig ist durch sehr heterogene Lagerungsverhältnisse gekennzeichnet. Im Zuge mehrfacher Sedimentations- und Erosionszyklen bildete sich ein Grundwasserleiterstockwerk mit häufigen und kleinräumigen Wechseln tertiärer und quartärer Grundwasserleiter heraus, die durch Stauhorizonte getrennt oder zum Teil hydraulisch gekoppelt sein können. An den Grenzen und Übergängen sich überlagernder Grundwasserleiterkomplexe treten häufig beträchtliche Unterschiede im Grundwasserniveau auf. Aus diesem Grund sind flächendeckende Grundwassergleichenpläne für den Südraum Leipzig nur erschwert zu konstruieren. An den Grenzübergängen durchgeführte Interpolationen können zu Unlesbarkeit und Fehlinterpretationen führen. Aus diesem Grund erfolgte die Darstellung der Grundwassergleichen im Sinne einer Überschau für den jeweils obersten Grundwasserleiterkomplex, ohne eine Interpolation über die Verbreitungsgrenzen hinweg vorgenommen zu haben. Zur Unterscheidung der Grundwasserleiterkomplexe wurden verschiedene Farben zugewiesen. Zusätzlich erfolgte eine Untergliederung nach ihrem Alter in tertiäre und quartäre Grundwasserleiter. In Überlagerungsbereichen von Grundwasserleiterstockwerken können aus o.g. Gründen Sprünge im Grundwasserniveau auftreten. Daneben sind lokal Linienscharungen zu beobachten, die vor allem als Maßstabsproblem zu deuten sind. Das geforderte Höhenlinienintervall von 1 m erscheint für kleinmaßstäbige, großräumliche Betrachtungen, wie im vorliegenden Fall, eher ungeeignet. In Bereichen mit großen Niveauunterschieden können hohe Liniendichten auftreten, die ab einem bestimmten Maßstab nur noch schwer zu unterscheiden sind. Daher wurde für die Darstellungen ein Intervall von 2 m gewählt. Linienscharungen treten außerdem bei einzelnen Modellelementen auf, die lokal, kleinräumige, im Niveau höherliegende Grundwasserleitervorkommen (z.B. Sandlinsen) beschreiben, welche zum Auswertezeitpunkt nicht wasserführend sind. Dies kann bei der Isohypsen-interpolation der Berechnungsergebnisse zu Fehlern führen. Um die Lesbarkeit zu gewährleisten, wurde daher zusätzlich eine manuelle Generalisierung bzw. Ausdünnung vorgenommen.

5.2.4 Hydrodifferenzen

Zur räumlichen Darstellung der Veränderung der Grundwasserstände zu unterschiedlichen Zeitpunkten oder Systemzuständen eignen sich Hydrodifferenzendarstellungen. Daher wurde zu zwei Auswertezeitpunkten, 01.01.2050 und 01.01.2100, jeweils die Differenz zwischen dem Grundwasserstand des mittleren Referenzzustandes und dem des Emissionsszenarios A1B gebildet (vgl. Anl. 3.2 u. 4.3).

Bereits zum Auswertezeitpunkt 01.01.2050 offenbaren die Hydrodifferenzen eine nahezu gesamträumliche Unterschreitung des Referenzgrundwasserstandes. Die größten Unterschreitungsbeträge von 2 bis über 3 m sind in den prädestinierten Grundwasserneubildungsgebieten, den grundwasserfernen Hochlagen zwischen den Flussniederungen zu verzeichnen, wobei die drastische Reduktion der Grundwasserneubildung Erklärung für die großen Differenzen liefert. Die Niederungsgebiete entlang der Vorfluter weisen vergleichsweise geringe Unterschreitungen bis maximal 0,5 m auf. Ursächlich hierfür sind die Fließgewässer, die das Grundwasserregime in den Auen maßgeblich prägen und als relativ stabile Randbedingungen wirken. Zwar reduzieren sich unter dem klimatischen Einfluss die Durchflüsse der Fließgewässer bis zum Jahr 2100 geringfügig. Jedoch erfolgt eine nachhaltige Speisung der Fließgewässer aus dem sich im hydrologischen System befindlichen Grundwasservorrat. Auf die mittleren Wasserstände in den Gewässern und die unmittelbar angrenzenden Grundwasserstände hat dies daher nicht so starke Auswirkungen wie in den Bereichen jenseits der Auen.

Zum Auswertezeitpunkt 01.01.2100 zeigen sich in den grundwasserfernen Hochlagen größere zusammenhängende Areale mit Unterschreitungen des Referenzgrundwasserstandes von >3 m als im Januar 2050. Ebenso ist eine Zunahme der Differenzen auf den Kippenarealen im Zentrum und Süden des Bearbeitungsgebietes zu verzeichnen. Erklärung hierfür ist eine im Vergleich zum Referenzzustand veränderte Landnutzung. In den betreffenden Bereichen wurde ab den Jahren 2035 bzw. 2050 die von der Regionalen Planungsstelle ausgewiesene Waldmehrung berücksichtigt, wobei im Modell ein ungestörtes Waldwachstum angenommen wurde. Im Jahr 2050, im Aufwuchsstadium, sind die Auswirkungen auf den lokalen Wasserhaushalt nur schwach ausgeprägt, wohingegen im Jahr 2100 die voll entwickelten Waldbestände mit ihrer erhöhten Transpirationsleistung den Wasserhaushalt stärker beeinflussen. Um diesen Zusammenhang zu verdeutlichen wurden die Waldmehrungsareale in den Hydrodifferenzenplänen mit ausgewiesen.

Bemerkenswert sind außerdem lokale Überschreitungen des Referenzgrundwasserstandes vor allem in den Flussniederungen. Diese Beobachtung ist damit zu erklären, dass die Hydrodifferenzenbildung sowie der Vergleich zwischen beiden Systemzuständen generell zu den beiden genannten Stichtagen erfolgt und keine mittleren Zustände verglichen werden. Hier wirkt sich der Umstand aus, dass den Berechnungsergebnissen für den Referenzzustand langjährige Mittelwerte der Grundwasserneubildung und zum Teil einzelner Randzuflüsse

zugrunde liegen, wohingegen bei den Berechnungsergebnissen des Emissionsszenarios A1B zeitvariable Modelleingangsgrößen die Grundlage bilden, was Maßgabe war, um das Schwankungsverhalten im Projektionszeitraum abbilden zu können. Solche lokalen Phänomene sind Ausdruck dieses Schwankungsverhaltens, wobei es vorkommen kann, dass zu bestimmten Zeitpunkten Extrema in der Grundwasserneubildung bzw. den Fließgewässerdurchflüssen die Ursache für eine Überschreitung des Referenzgrundwasserstandes sind. Die Flussniederungen sind dabei stärker von solchen Extrema betroffen als die in weiterer Entfernung liegenden Bereiche, da die sich in direkter Kopplung mit den Fließgewässern befindlichen meist frühweichselzeitlichen bis holozänen Flussschotter der obersten Grundwasserleiter 1.1 bzw. 1.0 bei Durchflussaufhöhungen schnell reagieren können. Effekte der Uferspeicherung mit einer zeitverzögerten Uferexfiltration können diese Phänomene noch verstärken. Die Annahme, dass diese Verhältnisse persistent sind, wäre allerdings eine Fehlinterpretation. Bei Betrachtung der Entwicklung des Gesamtgrundwasservorrates (vgl. Abb. 5.4) und der Fließgewässerdurchflüsse (vgl. Abschnitt 5.3.2) wird die Grundtendenz deutlich, nämlich, dass im Mittel nicht die Grundwasserstände des Referenzzustandes erreicht werden.

Daneben sind sehr kleinräumig begrenzte bis gerundete Bereiche mit Überschreitungen des Referenzgrundwasserstandes, beispielsweise westlich des Groitzscher Sees bzw. im Südosten des Bearbeitungsgebietes zu identifizieren, die unplausibel erscheinen. Dies sind zum Teil einzelne Modellelemente, die lokal, kleinräumige, im Niveau höherliegende Grundwasserleitervorkommen (z.B. Sandlinsen) beschreiben, die zum Auswertezeitpunkt nicht wasserführend sind, was bei der Flächeninterpolation der Berechnungsergebnisse zu Fehlern führen kann und Zeugnis der komplizierten Wechsellagerungen im Südraum Leipzig ist.

5.2.5 Grundwasserflurabstand

Der Grundwasserflurabstand wurde aus der Differenz von Geländeoberkante und berechneter Grundwasseroberfläche bzw. -druckfläche gebildet, wobei der jeweils lokal anstehende oberste Grundwasserleiter berücksichtigt wurde. In die Betrachtung einbezogen wurden die Grundwasserleiter 1.4 bis 3.0. Bei der Bewertung der Grundwasserflurabstände ist generell zu beachten, dass diese nur unter den angenommenen Randbedingungen Gültigkeit besitzen. Bei sich ändernder Landnutzung, Wasserbewirtschaftung oder Veränderungen der Geländemorphologie durch anthropogene Erdmassenverlagerungen oder Erdmassensetzung können sich lokal abweichende Grundwasserflurabstände einstellen.

In Bereichen, die unter Modellbedingungen als potentielle Vernässungsflächen ausgewiesen werden, kann es unter Umständen sein, dass diese unter Realbedingungen nicht vernässt sind. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn in Geländesenken mächtige bindige Deckschichten den obersten Grundwasserleiter überdecken, die dem hydraulischen Druck standhalten und kein Grundwasser an die Erdoberfläche lassen. Im geschilderten Fall ist die Ausprägung

der Deckschichten maßgebend für den Grundwasserflurabstand. Da ein Modell kaum vermag die kleinräumig wechselnden geologischen Lagerungsverhältnisse in ihrer Heterogenität und Komplexität, wie sie für den Leipziger Südraum typisch sind, komplett zu erfassen, kann dies zu Unschärfen in der Modellaussage führen. In den entsprechenden Arealen, in denen vom Modell Vernässungsflächen angenommen werden, sind die berechneten Grundwasserhöhen dann entsprechend als Druckhöhen zu deuten. Unter Realbedingungen würden unter den beschriebenen Umständen dieserorts gespannte Verhältnisse herrschen, was bei Durchteufung der Deckschichten bzw. Minderung ihrer Mächtigkeit mit anschließendem hydraulischen Grundbruch, beispielsweise im Zuge von Baumaßnahmen zu tatsächlichen Vernässungserscheinungen führen würde (vgl. IBGW 2006 [8]).

Als Bereiche mit vergleichsweise geringen Grundwasserflurabständen sind vorrangig die Flussniederungen sowie die bergbaulich geschaffenen Kippenareale zu identifizieren (vgl. Anl. 1.1, 2.2, 3.1 u. 4.2). Die Kippen sind einerseits durch ihre strukturelle Beschaffenheit und andererseits durch nachträgliche langfristige Setzungserscheinungen besonders vernässungsgefährdet. Bindige Deckschichten fehlen. Massendefizite bzw. -verlagerungen als Folge der Bergbautätigkeiten können zudem mancherorts die Neigung zu Vernässungserscheinungen noch verstärken, nämlich wenn die neu geschaffene Geländeoberfläche unterhalb der vorbergbaulichen Geländeoberkante liegt und das Grundwasser unter stationären Verhältnissen folglich über Flur ansteht.

Die Darstellung der Grundwasserflurabstände erfolgte ebenfalls für die beiden Auswertezeitpunkte 01.01.2050 sowie 01.01.2100. Im Vergleich der beiden Systemzustände im Januar 2050 lässt sich allgemein aussagen, dass es in den Flussauen die geringsten Unterschiede zwischen den Grundwasserflurabständen gibt. Die bereits beschriebene ausgleichende Wirkung der Fließgewässerwasserstände prägt in diesen Bereichen die Grundwasserverhältnisse entscheidend und hält trotz der sich ändernden klimatischen Verhältnisse die Grundwasserstände auf einem relativ stabilen Niveau. Mit zunehmender Entfernung von den Niederungen und damit vom Einflussbereich der Vorfluter werden die Grundwasserflurabstände im Emissionsszenario A1B im Vergleich zu denen des Referenzzustandes größer.

Ausnahmen stellen kanalisierte, mit einem künstlichen Gewässerbett ausgestattete Fließgewässerabschnitte, wie dies u.a. bei der Weißen Elster der Fall ist dar. In solchen Gewässerabschnitten besteht nahezu keine hydraulische Kopplung zum angrenzenden Grundwasserleiter. In dem Bereich westlich des Zwenkauer Sees fallen die Effekte der ausbleibenden Uferfiltration und damit der ausgleichenden Wirkung der Weißen Elster im Umkreis des betreffenden Flussabschnittes besonders auf. In beiden Szenarien weisen die Grundwasserflurabstände dort deshalb größere Beträge auf als in den nördlich bzw. südlich angrenzenden Auengürteln der Weißen Elster. Im Vergleich zwischen Emissionsszenario und Referenzzustand ergeben sich somit auch vergleichsweise größere Differenzen, da hier der Einfluss der sich verringerten Grundwasserneubildung überwiegt und der des Wasserstandes in der Weißen Elster zurücktritt.

Die Situation auf den zu Vernässung neigenden Kippenstandorten stellt sich in den Berechnungsergebnissen unter Annahme der Klimaprojektion deutlich anders dar als im Referenzzustand. Aufgrund der größeren Grundwasserflurabstände besteht nur örtlich Vernässungspotential. Vor allem auf den ausgedehnten Arealen der Kippen Zwenkau, Böhlen, Espenhain und Witznitz treten die Unterschiede deutlich hervor.

Eine Gegenüberstellung der beiden Auswertezeitpunkte 2050 und 2100 zeigt sowohl in den Referenzzuständen als auch in den Projektionszuständen im Januar 2100 gebietsweise geringere Grundwasserflurabstände als 2050.

In den Referenzzuständen beschränkt sich die Verringerung der Grundwasserflurabstände vornehmlich auf die vom Grundwasserwiederanstieg betroffenen Bergbauareale.

Eine Sonderrolle nehmen die vom aktiven Bergbau betroffenen Areale des Tagebaus „Vereinigtes Schleenhain“ ein, da in den entsprechenden Bereichen mit zeitveränderlichen Parametern gerechnet wurde. Da heißt, dass der Tagebaufortschritt einschließlich der damit verbundenen Erdmassenverlagerungen im HGMS simuliert wurde. Zu den nachbergbaulichen Grundwasserverhältnissen lassen sich nur erschwert Aussagen treffen, da eine exakte Vorhersage der Erdmassenbewegungen und Reliefformungsprozesse, welche maßgeblich für den Grundwasserflurabstand sind, kaum möglich ist. Die in diesen Bereichen ausgewiesenen Vernässungsflächen sind demnach mit großen Unsicherheiten behaftet und vor diesem Hintergrund zu bewerten.

Bei Betrachtung der Projektionszustände fallen neben der dem Grundwasserwiederanstieg zuzuschreibenden Verringerung der Grundwasserflurabstände bis zum Jahr 2100 auch außerhalb der Bergbaugebiete zum Zeitpunkt 2100 geringere Grundwasserflurabstände als 2050 auf. Die Differenzen sind dort allerdings vergleichsweise gering. Eine Interpretation dieser Beobachtungen ist differenziert zu führen. Während in den Bergbaubereichen bzw. der Bergbaufolgelandschaft im Zuge des Grundwasserwiederanstiegs tatsächlich langfristig mit sich verringernden Grundwasserflurabständen zu rechnen ist, handelt es sich bei den beobachtbaren Differenzen der umliegenden Gebiete nur um kurzfristige meteorologisch bedingte Phänomene, aufgrund der modellseitigen Berücksichtigung der meteorologischen Variabilität. Besonders deutlich wird dies, bei genauerer Betrachtung der meteorologischen Vorgeschichte. So beträgt beispielsweise die Niederschlagssumme an der Station Windischleuba im Jahr 2049 relativ geringe 609 mm, wohingegen im Jahr 2099 eine Jahressumme in Höhe von 722 mm zu verzeichnen ist mit entsprechend höherer Grundwasserneubildung und Wasserführung der Fließgewässer (vgl. auch Abb. 4.2).

Im gesamten Modellgebiet des HGMS beträgt das Gebietsmittel der Grundwasserneubildung im Jahr 2049 lediglich 6,5 mm (0,33 m^3/s). Im Jahr 2099 beträgt dieses hingegen 22,7 mm (1,2 m^3/s) (vgl. auch Abb. 5.4).

Besonders hohe Differenzen der Grundwasserflurabstände sind im Projektionszustand im Januar 2100 für die Kippen festzustellen, wobei in großen Teilen der Kippenareale flurferne

(> 5 m) Grundwasserverhältnisse vorherrschen. Diese hohen Differenzen sind sowohl im Vergleich zum zeitgleichen Referenzzustand als auch zu den unterschiedlichen Systemzuständen im Januar 2050 zu konstatieren. Hierbei handelt es sich wiederum um langfristige Effekte auf den Wasserhaushalt und die Grundwasserstände der betreffenden Bereiche, hervorgerufen durch die bereits beschriebenen im Modell berücksichtigten Landnutzungsänderungen, in Form der Waldmehrung, die vorrangig auf den Kippenstandorten vorgesehen ist.

5.3 Oberflächenwasserhaushalt

Die Darstellungen der Berechnungsergebnisse zum Oberflächenwasserhaushalt gliedern sich in die beiden Komplexe Restlochwasserhaushalt und Fließgewässerdurchflüsse. Die Gewässerbilanzierung wurde unter Einbeziehung aller wesentlichen Randbedingungen sowie der Gewässer-Grundwasserleiter-Kopplung durchgeführt.

5.3.1 Restlochwasserstände und Überschusswassermengen

Die langfristige zeitliche Entwicklung der Restlochwasserstände sowie der Überschusswassermengen in ihrem monatlichen und jährlichen Schwankungsverhalten sind ausführlich in den Diagrammdarstellungen der Anlagen 5.1 bis 5.14 dokumentiert. Da beide Größen nicht selbsterklärend sind wurden in Ergänzung dazu alle wesentlichen Speisungs- und Zehrgrößen in separaten Diagrammen dargestellt. Aus Gründen der besseren Les- und Vergleichbarkeit wurden die Bilanzgrößen als Jahresmittelwerte dargestellt. Langfristige Trends lassen sich somit eindeutiger erkennen. Zur besseren Einschätzung der zu erwartenden Überschusswassermengen wurden für ausgewählte Restlöcher, aus denen nennenswerte Überschusswasserabgaben erfolgen Unterschreitungsdauerlinien erstellt.

Grundsätzlich lässt sich erwartungsgemäß die klimatische Abhängigkeit der Wasserstände und der daraus resultierenden Überschusswassermengen für alle Restlöcher gleichermaßen belegen. Die Limnologischen Bilanzen nahezu aller Restseen zeigen eine Reduktion der Speisungsgrößen. Die Niederschläge über der Gewässerfläche sowie die damit eng im Zusammenhang stehenden Landoberflächenzuflüsse aus den unmittelbaren Einzugsgebieten der Restlöcher nehmen tendenziell ab. Auch der Netto-Grundwasserzustrom, der sich aus der Differenz von Grundwasserzustrom und -abstrom ergibt, verringert sich im Vergleich zum Referenzzustand. Die Gewässerverdunstung als Zehrgröße nimmt stattdessen in der Tendenz zu.

Alle Restlöcher weisen hinsichtlich der zeitlichen Wiederkehr der Schwankungen der genannten Größen ein ähnliches Verhalten auf. Jedoch unterscheiden sich die Schwankungsweiten einiger Restlöcher sehr deutlich. Die Schwankungsweiten werden dabei maßgeblich

durch die strukturellen bzw. morphologischen Eigenschaften der Standgewässer geprägt. Daneben spielen auch das Flutungsregime sowie die hydrogeologischen Verhältnisse eine wichtige Rolle. Für eine ausführliche Beschreibung der Flutungsregimes aller Restlöcher wird auf die Dokumentation zum HGMS 2006 [8] verwiesen. Exemplarisch sollen daher im Folgenden die Bilanzen zweier strukturell unterschiedlicher Restlöcher, nämlich die des Cospudener sowie des Haselbacher Sees detaillierter beschrieben werden. Wesentliche Kennwerte der beiden Gewässer sind in Tabelle 5.2 zusammengetragen.

Restloch	**Fläche [ha]**	**Volumen [Mio. m³]**	**Mittlere Tiefe [m]**
Cospudener See	436	109	25
Haselbacher See	335	25	7,5

Tab. 5.2: Charakteristika des Cospudener sowie des Haselbacher Sees

Der Haselbacher See besitzt eine etwas kleinere Flächenausdehnung als der Cospudener See, bei einer deutlich geringeren mittleren Gewässertiefe. Sein Wasservolumen beträgt folglich nur ein Viertel dessen des Cospudener Sees. Er verfügt daher über ein vermindertes Retentions- und Ausgleichsvermögen, was drastischere Auswirkungen auf die Schwankungen seines Wasserstandes infolge des klimatischen Einflusses hat.

Die Entwicklungen von Niederschlag und potentieller Verdunstung im Emissionsszenario A1B (vgl. auch Abb. 4.2) prägen den zeitlichen Verlauf der Wasserstände in den Restlöchern entscheidend. Der Wasserstand im Cospudener See ist bis etwa 2035 relativ stabil, mit temporären Unterschreitungen des für den Referenzzustand prognostizierten mittleren Endwasserstandes von 110 m ü. NHN (vgl. Abb. 5.5).

Ab 2035 bis ca. 2070 werden die Unterschreitungshäufigkeiten und -dauern größer. Bedingt durch eine drastische Reduktion der Niederschläge und den deutlichen Anstieg der potentiellen Verdunstung erreicht der Wasserstand im Zeitraum 2070 bis 2090 mehrfach ein sehr niedriges Niveau, mit mittleren jährlichen Differenzen von bis zu 20 cm unterhalb des Referenzwasserstandes, bei Betrachtung der Monatswerte (vgl. Anl. 5.2) deutlich darunter. Innerhalb dieses Zeitraums gibt es einzelne Jahre, in denen der Zielwasserstand nicht oder nur temporär erreicht wird, weshalb in diesen Jahren die Überschusswasserabgabe nahezu gänzlich ausbleibt. Zum Ende des Jahrhunderts lassen sich eine Zunahme des Wasserstandes sowie der Überschusswassermengen feststellen, hervorgerufen durch eine Trendwende in der Entwicklung von Niederschlag und potentieller Verdunstung, die eine gewisse Entspannung des Gebietswasserhaushaltes bewirkt.

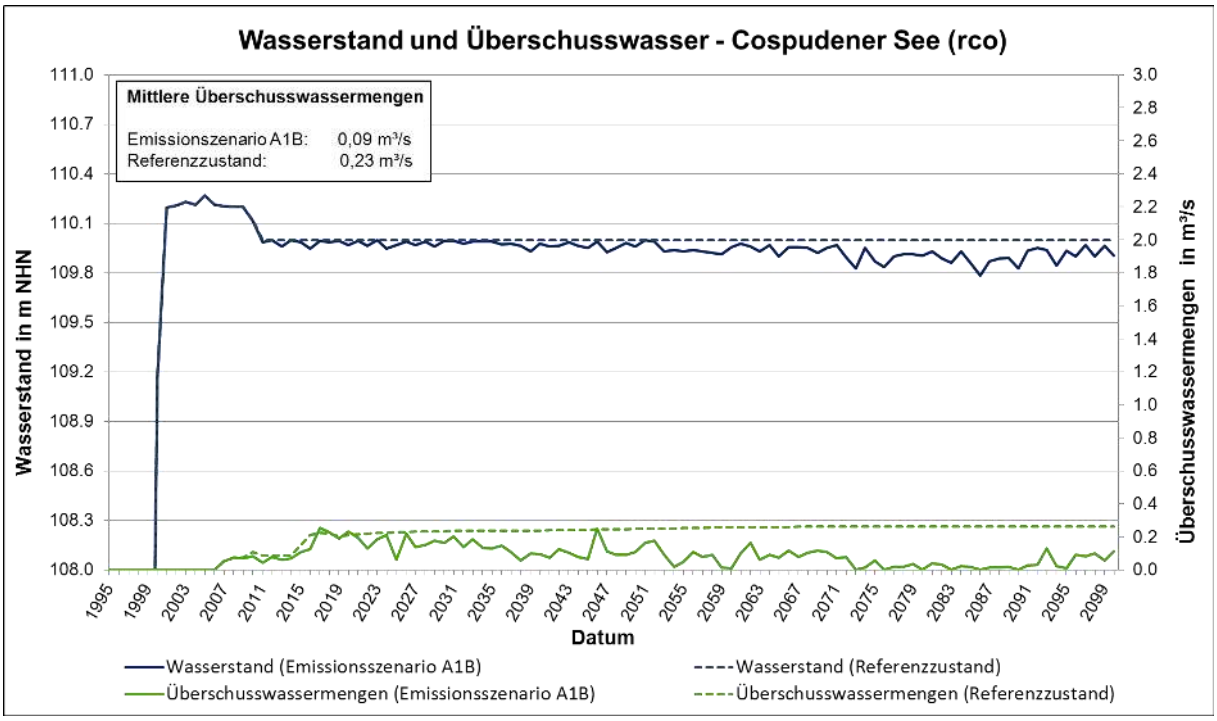

Abb. 5.5: Wasserstands- und Überschusswassermengenentwicklung des Cospudener Sees im Referenzzustand und Emissionsszenario A1B (Jahresmittelwerte)

Um Fehldeutungen der Diagramme zu vermeiden sei angemerkt, dass die scheinbar ständige Unterschreitung des Referenzwasserstandes lediglich Resultat der Mittelwertbildung ist. Diese suggeriert, dass der Referenzwasserstand zu keinem Zeitpunkt erreicht wird, und demnach im Emissionsszenario kein Überschusswasser anfällt. Tatsächlich gibt es im innerjährlichen Gang sehr wohl Monate, in denen der Zielwasserstand von 110 m ü. NHN erreicht wird und Überschusswasserabgaben erfolgen (vgl. Abb. 5.5 sowie Anl. 5.2). Betrachtet man den Gesamtzeitraum 2007-2100 beträgt die mittlere jährliche Überschusswasserabgabe im Emissionsszenario A1B 0,09 m³/s. Dies entspricht ungefähr der Hälfte der Menge, die für den Referenzzustand ermittelt wurde, nämlich 0,23 m³/s. Qualitativ lässt sich diese Mengenangabe durch die Unterschreitungsdauerlinie der Überschusswasserabgaben untermauern, die aussagt, dass im betrachteten Zeitraum von 93 Jahren in über der Hälfte der Zeit (55 %) kein Überschusswasser aus dem Cospudener See abgegeben wird, da sein Wasserstand unterhalb der Zielmarke von 110 m ü. NHN bleibt (vgl. Anl. 5.2).

Im Vergleich zum Cospudener See sind für den Haselbacher See aufgrund seiner geringeren Fläche und Tiefe und folglich seines kleineren Wasservolumens drastischere Auswirkungen auf seinen Wasserstand infolge des sich einstellenden Wasserdefizits zu erwarten. Überlagert werden die klimatischen Effekte durch Bewirtschaftungsmaßnahmen. Der Haselbacher See weist die Besonderheit auf, dass er sich bis etwa 2045 im Einflussbereich großflächiger Grundwasserabsenkung befindet, bedingt durch den aktiven Bergbau im Tagebau „Vereinigtes Schleenhain“. Demnach könnte er seinen Zielwasserstand von 151 m ü. NHN im Eigen-

aufgang erst stark zeitverzögert nach Einstellung der Bergbautätigkeiten erreichen, weshalb er zwischenzeitlich durch Fremdwasser in Form von Sümpfungswassereinleitungen aus dem Tagebau „Vereinigtes Schleenhain“ gespeist wird. Ab 2045 kann diese Fremdspeisung nicht mehr aufrecht erhalten werden, da der Braunkohleabbau dann eingestellt sein wird. Im Referenzzustand bewirkt dieser Umstand ein Absinken des Wasserstandes um ca. 80 cm (vgl. Abb. 5.6).

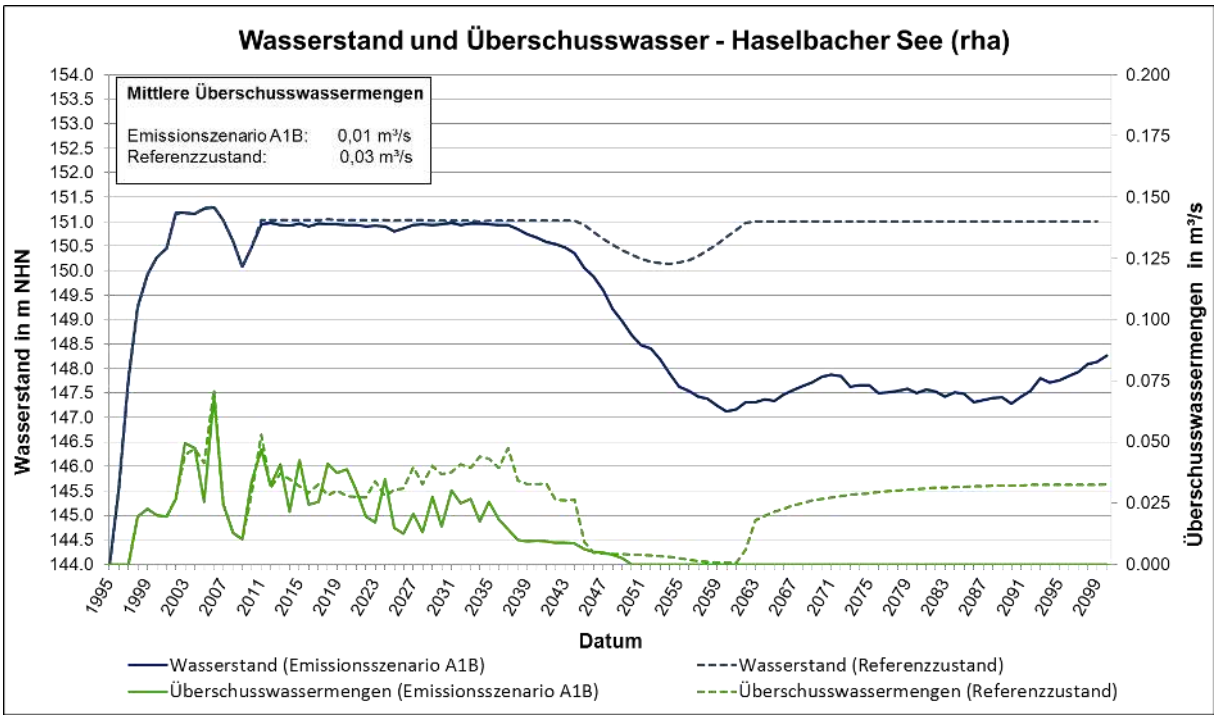

Abb. 5.6: Wasserstands- und Überschusswassermengenentwicklung des Haselbacher Sees im Referenzzustand und Emissionsszenario A1B (Jahresmittelwerte)

Erst ab dem Jahr 2055 setzt der Eigenaufgang des Sees ein, infolge des sich langsam einstellenden Strömungsgleichgewichts und der zunehmenden Speisung des Restloches durch Grundwasser. Bis zum Jahr 2060 ist der Anstieg des Wasserstandes abgeschlossen und der Endwasserstand von 151m ü. NHN wieder erreicht.

Bei Annahme des Emissionsszenarios A1B bewirkt die Einstellung der Wasserhaltung im Tagebau „Vereinigtes Schleenhain“ zunächst ein Absinken des Seewasserspiegels um ca. 3-4 m. Eine Kompensation aus dem Grundwasservorrat ist nicht in dem Maße möglich wie es im Referenzzustand der Fall ist. Die Speisung des Restloches über die Grundwasserpassage sowie durch Niederschlagseinträge und Landoberflächenabfluss findet auch in den Folgedekaden nur in verringertem Maße statt. Der Grundwasserzustrom zum Restloch erfolgt primär über die oberen Kippengrundwasserleiter, vornehmlich aus südwestlicher bis westlicher Richtung. Dieser nimmt zwar zu, pegelt sich aber lediglich bei ca. 0,017 m³/s ein, was in etwa der Hälfte des Grundwasserzustroms im Referenzzustand entspricht (vgl. Anl. 5.6). Der ge-

plante Endwasserstand von 151 m ü. NHN wird im Eigenaufgang folglich nicht erreicht, weshalb keine Überschusswasserabgabe erfolgt. Getragen durch den gedämpften Grundwasserwiederanstieg steigt der Restlochwasserstand nur allmählich und stellt sich bedingt durch die Trockenperiode 2070-2090 bei einem Niveau von ca. 148,3 m ü. NHN ein. Erst mit der einsetzenden wasserhaushaltlichen Entspannung in der letzten Dekade des 21. Jahrhunderts zeigt sich ab dem Jahr 2090 ein signifikanter Anstieg des Wasserspiegels auf bis zu 149 m ü. NHN.

5.3.2 Fließgewässerdurchflüsse

Die Fließgewässerdurchflüsse im Emissionsszenario A1B wurden für die in Abb. 4.8 dargestellten Pegel bzw. fiktiven Modellpegel ausgewählter Fließgewässer ermittelt und analog zu den Restlochbilanzen als Jahresmittelwerte den mittleren Referenzdurchflüssen gegenübergestellt. Darüber hinaus ist auch der monatliche Abflussgang im Emissionsszenario A1B in Diagrammform dargestellt (vgl. Anl. 6.1 bis 6.9). Die an den Auswertepegeln registrierten Durchflüsse sind als das Resultat der angesetzten Randzuflüsse, basierend auf Durchflussmesswerten sowie der simulierten grundwasserbürtigen Abflüsse in den durch die Modelle erfassten Einzugsgebieten und der Bewirtschaftungsmaßnahmen zu verstehen. Die Fließgewässerrandzuflüsse repräsentieren die in den vom Modell nicht erfassten oberen Einzugsgebieten integral ermittelten Gebietsabflüsse, wobei schneller Direktabfluss (Landoberflächen- und Kanalisationsabfluss), zeitverzögerter Direktabfluss (bodeninnerer Lateralabfluss) und langsamer Basisabfluss (Grundwasserabfluss) gleichermaßen Berücksichtigung finden. Die Berechnungen mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell ergeben für das Untersuchungsgebiet einen gebietstypischen Anteil des Direktabflusses am Gesamtabfluss von etwa 20 % (vgl. auch Tab. 5.1). Dieser Wert wird gesichert durch Untersuchungen von Mellentin (1999) [13] und Chmieleski (2004) [2], die für die Abflusskomponentenregimes der Parthe am Pegel Thekla sowie der Pleiße am Pegel Böhlen mittels Ganglinienseparation nach dem DIFGA-Verfahren Direktabflussanteile von 23% bzw. 22% ermittelten.

Im Modellgebiet selbst werden bei der Simulation der Fließgewässerabflüsse die Direktabflusskomponenten vernachlässigt, da mit dem Hydrogeologischen Großraummodell Süd lediglich die grundwasserseitige Fließgewässerspeisung aus den vorrangig quartären Lockergesteinsschichten abgebildet werden kann. Daraus ergibt sich eine Unterschätzung der simulierten Fließgewässerabflüsse, die jedoch nur gering ist, da wie bereits erwähnt am Modellrand Abflussmesswerte aus den oberen Einzugsgebieten angesetzt wurden, welche deren Direktabflussspende berücksichtigen. Des Weiteren ist anzumerken, dass die für das Untersuchungsgebiet errechneten Direktabflüsse zum überwiegenden Teil aus dem Kanalisationsabfluss der versiegelten Siedlungsbereiche gebildet werden (vgl. auch Tab. 5.1). Der Ballungsraum Leipzig, der zum Teil mit erfasst ist, wirkt damit verzerrend auf die Gebietsbilanz,

welche hinsichtlich ihrer Abflussanteile nicht unbedingt repräsentativ für die südlich gelegenen oberen eher ländlich geprägten Fließgewässereinzugsgebiete sein muss.

Im Falle des Pegels Regis-Serbitz, dessen Einzugsgebiet zu ca. ¾ außerhalb des Modellgebietes liegt, beträgt der Fehler infolge des vernachlässigten Direktabflusses daher schätzungsweise weniger als 5 %. Am Pegel Böhlen ist der Fehler mit annähernd 5-10 % etwas größer zu bewerten, da beträchtlichere Einzugsgebietsteile innerhalb des Modellgebietes liegen. Da das Abflussgeschehen im Tiefland maßgeblich durch den Basisabfluss dominiert wird, sind Aussagen zur langfristigen mittleren Abflusscharakteristik eines Fließgewässers, wie sie für die Aufgabenstellung erforderlich sind dennoch möglich.

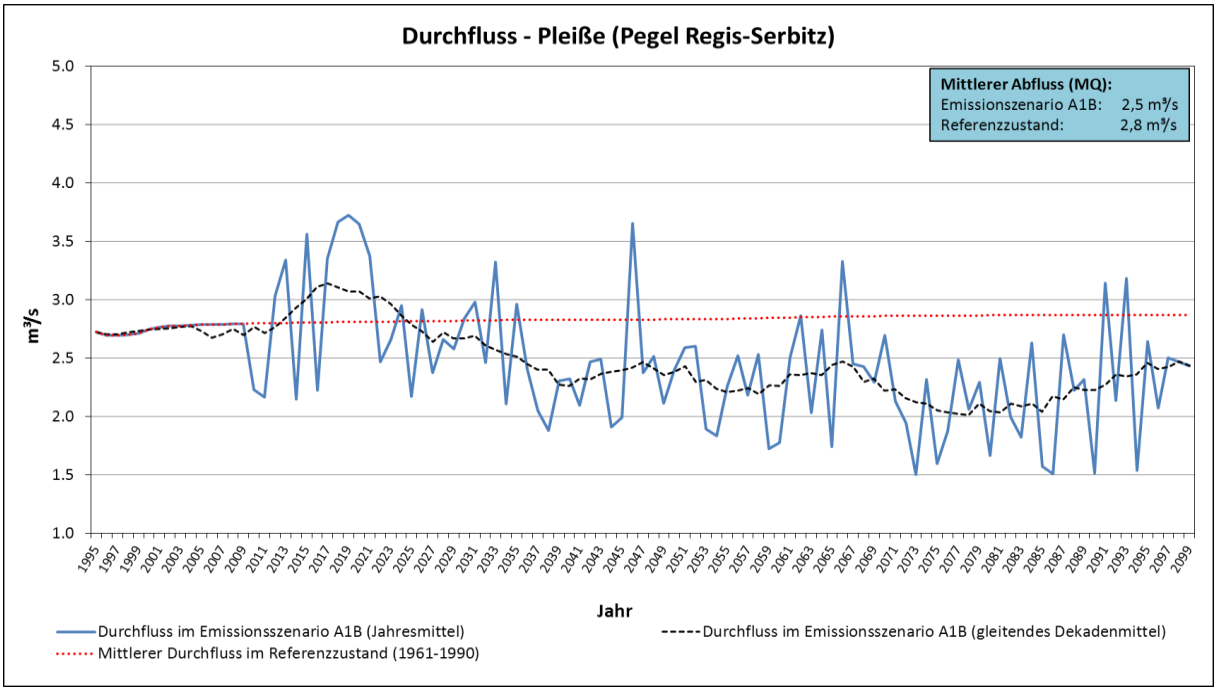

Abb. 5.8: Durchfluss der Pleiße am Pegel Regis-Serbitz im Referenzzustand sowie im Emissionsszenario A1B

Für die Auswertung kurzfristiger Durchflussspitzen infolge von Starkniederschlagsereignissen oder die Untersuchung der Abflussverhältnisse in Gebirgslagen wäre den Direktabflusskomponenten eine deutlich größere Bedeutung beizumessen, wobei der Einsatz anderer Modellansätze als der verwendeten zu erwägen wäre.

Am Beispiel der Pleiße sollen die unter Annahme der Klimaprojektion zu erwartenden Durchflussänderungen an zwei Fließgewässerquerschnitten im südlichen und nördlichen Teil des Bearbeitungsgebietes diskutiert werden.

Der Abflussgang am Pegel Regis-Serbitz in Abbildung 5.8 spiegelt die klimatische Entwicklung im Projektionszeitraum erwartungsgemäß sehr gut wider. Der Pegel ist mit Ausnahme der

Stauhaltung durch die Talsperre Windischleuba wenige Kilometer oberhalb seiner Position weitgehend anthropogen unbeeinflusst.

Der mittlere Durchfluss im Referenzzustand beträgt 2,8 m³/s und weist im zeitlichen Verlauf eine leicht steigende Tendenz auf, die auf den allgemeinen Grundwasserwiederanstieg zurückzuführen ist. Der Durchfluss im Emissionsszenario A1B folgt, als Ergebnis der in seinem Einzugsgebiet stattfindenden Niederschlagstransformation weitgehend dem Trend der Niederschlagsentwicklung. Er erreicht im Dekadenmittel mit 3,1 m³/s sein Maximum im Zeitraum 2010-2020, der mit 625 mm/a vergleichsweise niederschlagsreich ist und nimmt dann kontinuierlich ab. Der Zeitraum 2070-2090 weist mit etwa 2,1 m³/s die geringsten Durchflüsse auf, was zugleich der Zeitraum mit den geringsten Niederschlägen, zwischen 450 und 500 mm/a im Dekadenmittel, ist. Der langjährige mittlere Durchfluss im Emissionsszenario A1B beträgt 2,5 m³/s, woraus sich eine Differenz zum Referenzdurchfluss in Höhe von 0,3 m³/s ergibt.

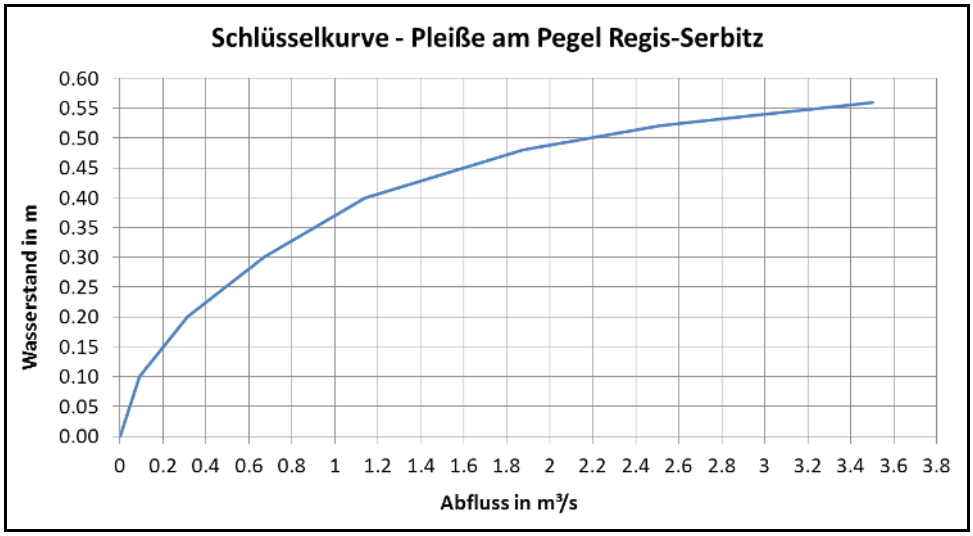

Abb. 5.9 Auszug der Schlüsselkurve der Pleiße am Pegel Regis-Serbitz

Allgemein hat die Durchflussminderung eine geringfügige Absenkung der Wasserstände in den Fließgewässern zur Folge. Anhand der Schlüsselkurve der Pleiße am Pegel Regis-Serbitz soll der Zusammenhang zwischen Durchfluss und Wasserstand exemplarisch aufgezeigt werden. Danach lässt sich für die mittlere Durchflussdifferenz der Pleiße von 0,3 m³/s eine Verringerung des Wasserstandes um 2-3 cm im Mittel feststellen (vgl. Abb. 5.9).

Für den Durchfluss des Pegels Böhlen (vgl. auch Abb. 4.8) ergibt sich tendenziell ein ähnliches Bild, nur dass es zu Überlagerungseffekten von klimatischen und anthropogenen Einflussfaktoren kommt, die sich entsprechend verstärkend oder abschwächend auf den Abflussgang durchprägen. Um eine leichtere Interpretation zu ermöglichen sind in Abbildung 5.10 markante Änderungen des Durchflusses der Pleiße mit Kommentaren zur Gewässerbewirtschaftung versehen.

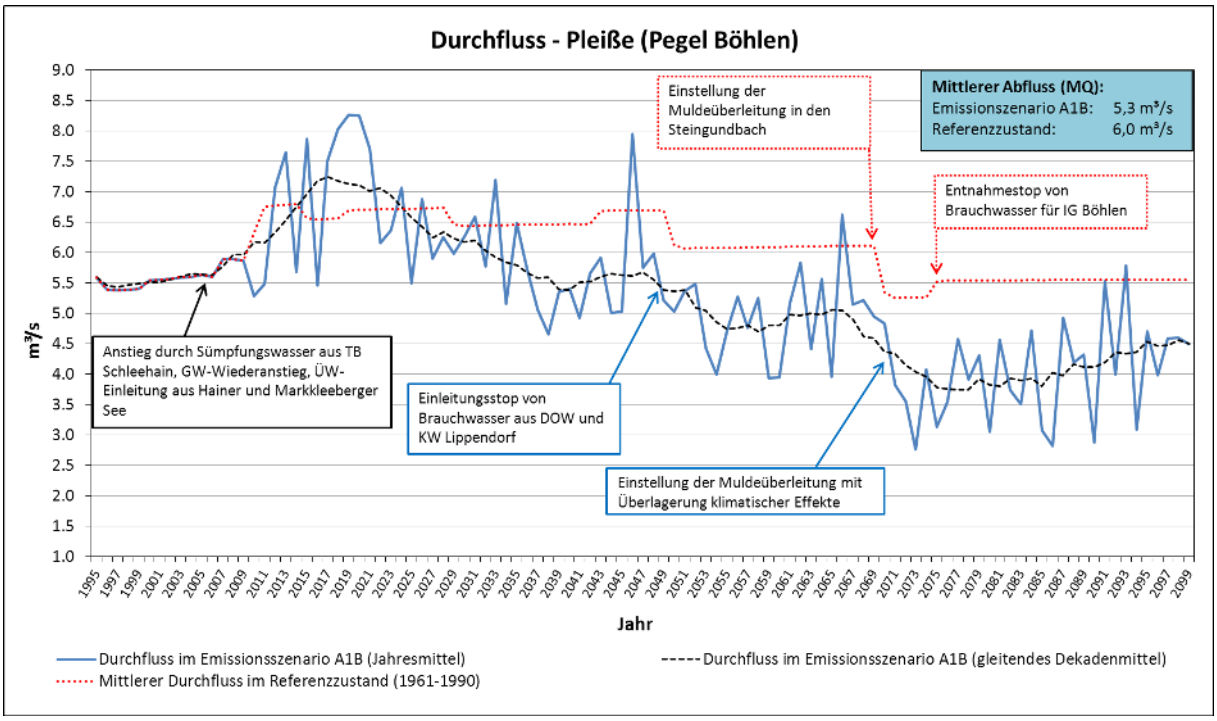

Abb. 5.10: Durchfluss der Pleiße am Pegel Böhlen im Referenzzustand sowie im Emissionsszenario A1B

Bedingt durch die Speisung aus dem eigenen Einzugsgebiet und die Zuflüsse von Eula und Wyhra beträgt der Mittlere Abfluss im Simulationszeitraum 6,0 m³/s. Bei Zugrundelegung des Emissionsszenarios A1B ist ein mittlerer Abfluss in Höhe von 5,3 m³/s zu erwarten.

6 Zusammenfassung und Empfehlungen

Für den Südraum Leipzig wurde unter Zugrundelegung einer Klimaprojektion basierend auf dem regionalen Klimamodell WETTREG 2010 für das Emissionsszenario A1B eine Abschätzung der zukünftigen Wasserhaushaltsentwicklung bis zum Jahr 2100 vorgenommen. Zielstellung war das Aufzeigen großräumiger möglicher Entwicklungstendenzen und Schwankungsbreiten ausgewählter Bilanzgrößen des Wasserhaushaltes. Kleinräumige, lokale und zeitpunktuelle Aussagen sollten in Anbetracht des gewählten Untersuchungsmaßstabes sowie der Unsicherheiten, die einer solchen Klimaprojektion anhaften, nicht im Vordergrund stehen.

Die vorgestellten Ergebnisse weisen eine bilanzseitig plausible Nachbildung der Grundwasserdynamik sowie des Bodenwasserhaushaltes auf. Sie besitzen jedoch nur unter dem Vorbehalt Gültigkeit, dass sich keine Randbedingungen in den Modellen ändern. Abweichende Entwicklungen im Klimageschehen, eine veränderte Landnutzungsstruktur sowie sich ändernde Gewässerbewirtschaftungsmaßnahmen u.a. können zu abweichenden Berechnungsergebnissen führen. Die Ergebnisse stellen also vielmehr eine von vielen möglichen Entwicklungsrichtungen bei Annahme bestimmter unveränderlicher Randbedingungen auf. Dieser Umstand muss bei der Interpretation und Bewertung der Ergebnisse zwingend berücksichtigt werden.

Unter Annahme des Emissionsszenarios A1B zeigen die Ergebnisse der Modellberechnungen insgesamt eine Verschärfung der Wasserhaushaltssituation. Ursächlich sind einerseits rückläufige Niederschläge und andererseits die fortschreitende Erderwärmung bis zum Jahr 2100. Diese Erwärmung äußert sich in einer beträchtlichen Zunahme der Verdunstungshöhe mit entsprechend gesteigerter Gebietswasserzehrung sowie einer verringerten Grundwasserneubildung. Dies hat im Allgemeinen sinkende Grundwasserstände und einen defizitären Grundwasserzustrom zu den bergbaulichen Hohlformen zur Folge. Daraus resultieren die temporäre bzw. dauerhafte Unterschreitung der geplanten Endwasserstände sowie die Dezimierung bzw. das gänzliche Ausbleiben von Überschusswassermengen. Von den sinkenden Grundwasserständen ist auch die Wasserführung in den Fließgewässern betroffen, was sich in abnehmenden Durchflussmengen äußert.

Die Ergebnisse sind vor dem Hintergrund der Zielstellung der vorliegenden Untersuchung sowie der genannten Unsicherheiten zu bewerten.

Zum Aufzeigen von möglichen Entwicklungstrends des Wasserhaushaltes sowie dem Ableiten von regionalplanerischen Maßnahmen und Gestaltungsspielräumen ist das Werkzeug der prognostischen Modellierung sehr gut geeignet. Die gewonnenen Erkenntnisse liefern aus regionalplanerischer Sicht insbesondere Hinweise darauf:

- wo in Zukunft die touristische Gewässerentwicklung aufgrund einer fehlenden Gewährleistung der Passierbarkeit von Wasserwegen nur eingeschränkt möglich sein wird,

- in welchen Arealen ökologisch vertretbare Mindestgewässerabflüsse nicht eingehalten werden können,
- wo grundwasserabhängige Landschaftsbereiche und Lebensräume gefährdet sind,
- welche Bereiche als Vorranggebiete für Natur und Landschaft ausgewiesen werden sollten,
- wie Vorsorge- oder Nachsorgemaßnahmen für die exemplarisch genannten Belange auszugestalten sind.

Aus Sicht der Bergbausanierung und der wasserwirtschaftlichen Planung können die im Rahmen dieser Untersuchung gewonnenen Ergebnisse Hinweise darauf geben:

- in wieweit die bisherigen Planungskonzepte, die im Wesentlichen auf wissenschaftlichen Erkenntnissen der vergangenen Jahre bzw. Jahrzehnte beruhen, in denen sich ändernde klimatische Rahmenbedingungen nur eine untergeordnete Rolle spielten, überdacht werden müssen,
- in welchen Bereichen sich Notwendigkeiten für wasserbauliche Maßnahmen ergeben und
- wie diese dimensioniert sein müssen.

Hierbei könnte sich die Entwicklung eines modelltechnisch gestützten Entscheidungshilfesystems in Form einer Variantenmatrix als hilfreich erweisen. Die durchgeführte Untersuchung der zukünftigen Entwicklung des Gebietswasserhaushaltes könnte in ihrem Aussagegehalt zusätzlich gestützt und erweitert werden, indem alternative Randbedingungen bei der Modellierung berücksichtigt werden. So könnten beispielsweise verschiedene Landnutzungsszenarien bzw. andere mögliche klimatische Entwicklungen in die weiterführenden Betrachtungen einbezogen werden, um die Handlungsspektren und Maßnahmenkataloge zu erweitern. Mit den Hydrogeologischen Großraummodellen des Leipziger Nord- (HGMN) und Südraums (HGMS) sowie den bestehenden kongruenten Bodenwasserhaushaltsmodellen wären die Voraussetzungen dafür geschaffen.