

# Leibniz - Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e.V.

**Integrierte Analyse der Auswirkungen des  
globalen Wandels auf die Umwelt und  
Gesellschaft im Elbegebiet (GLOWA-Elbe)**

Vorhaben 2.3

**Wasserhaushalt und Wassermanagement-  
strategien für die Feuchtgebietsregion  
Spreewald**

*- Schlussbericht zum  
BMBF-Forschungsprojekt -*



Verbundprojekt



Zentrum für Agrarlandschafts-  
Landnutzungsforschung

Die Institution der Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz



## **BMBF-Verbundprojekt**

# **Integrierte Analyse der Auswirkungen des globalen Wandels auf die Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet (GLOWA-Elbe)**



Förderkennzeichen: 07GWK03

Schlussbericht zum Vorhaben 2.3

## **Wasserhaushalt und Wassermanagementstrategien für die Feuchtgebietsregion Spreewald**

### **Vorhabensleitung**

Leibniz - Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung  
(ZALF) e.V.

Institut für Landschaftswasserhaushalt

Prof. Dr. J. Quast

Eberswalder Str. 84

15374 Müncheberg

**Projektlaufzeit: 05/01 – 04/03**

## **Autoren und am Vorhaben beteiligte Personen**

*Dietrich, Ottfried, Dr.-Ing., Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e.V., Institut für Landschaftswasserhaushalt*

*Hentschel, Martina, Dipl.-Hydrologin, WASY Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH*

*Kayser, Matthis, Dr., Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e.V., Institut für Landschaftswasserhaushalt*

*Quast, Joachim, Prof. Dr., Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e.V., Institut für Landschaftswasserhaushalt*

*Redetzky, Michael, Dipl.-Informatiker, WASY Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH*

*Schilling, Christian, Dipl.-Ing., Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e.V., Institut für Landschaftswasserhaushalt*

*Schramm, Michael, Dr., WASY Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH*

*Tauschke, Ralph, Dipl.-Ing., Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung (ZALF) e.V., Institut für Landschaftswasserhaushalt*

## ***Inhaltsverzeichnis***

Teil I: Aufgabenstellung und Rahmenbedingungen.....	13
I-1  Ziel- und Aufgabenstellung.....	13
I-2  Einordnung des Vorhabens 2.3 in das Verbundprojekt GLOWA-Elbe, das Teilprojekt Spree/Havel und das Teilgebietsprojekt Spreewald.....	14
I-3  Kurzbeschreibung des Untersuchungsgebietes Spreewald.....	15
I-4  Voraussetzungen zur Durchführung des Projektes.....	16
I-5  Planung und Ablauf des Projektes.....	16
I-6  Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	17
I-7  Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	18
Teil II: Ergebnisse.....	21
II-1  Erzielte Ergebnisse.....	21
1  Hydrologische Gebietsanalyse.....	21
1.1  Charakterisierung der Standortbedingungen und Datengrundlagen der Wasserhaushaltsmodellierung.....	21
1.1.1  Klima.....	21
1.1.2  Topographie.....	22
1.1.3  Boden.....	22
1.1.4  Landnutzung.....	23
1.1.5  Wasserhaushalt/Wassermanagement.....	24
1.2  Kennzeichnung der systemrelevanten Wasserhaushaltsparameter.....	25
2  Modellkonzept ArcGRM Spreewald und Schnittstellen zu anderen Vorhaben und – projekten in GLOWA-Elbe.....	27
2.1  Wasserhaushalt stauregulierter Niederungsgebiete.....	27
2.1.1  Kenntnisstand.....	27
2.1.2  Modellkonzept ArcGRM Spreewald.....	31
2.1.2.1  Basismodell ArcGRM.....	31
2.1.2.2  Basismodell WABI.....	32
2.1.2.3  Modellanwendungen ArcGRM-WABI.....	34
2.1.3  Weiterentwicklungen des Modellkonzepts.....	35
2.1.3.1  Abbildung flächenbezogener Informationen auf Punktdaten.....	35
2.1.3.2  Flächenwasserspeicher.....	35
2.1.3.3  Geländehöhe-Boden-Landnutzung.....	36
2.1.3.4  Verdunstung.....	36
2.1.3.5  Gewässerverzweigungen.....	37
2.1.3.6  Randzuflüsse.....	38
2.2  Einbindung in Wasserhaushaltsmodellierung Gesamtspree/Elbe.....	38
2.3  Integrationskonzept Teilgebietsprojekt Spreewald.....	39
3  Modellaufbau ArcGRM Spreewald.....	41
3.1  Aufteilung des Untersuchungsgebietes in Staubereiche.....	41
3.1.1  Ausgrenzung der Niederung – Festlegung des Modellgebietes.....	41
3.1.2  Festlegung der Staubereichsgrenzen.....	42
3.1.3  Aufteilung der Randbereiche der Niederung auf die Randstaubereiche.....	43
3.1.4  Randbedingungen für Stauziele.....	43
3.1.5  Fischteiche.....	44
3.2  Strangschema.....	45
3.2.1  Klassifizierung und Reduzierung des im Modell zu berücksichtigenden Gewässersystems.....	45
3.2.2  Festlegung des Strangschemas.....	45
3.2.3  Zuflussaufteilung an Gewässerverzweigungen.....	45

3.2.4	Zuordnung der WABI-Nutzer auf Strangabschnitte .....	46
3.2.5	Zuordnung der Direkteinzugsgebiete und der Simulationsteilgebiete aus ArcGRM GLOWA.....	46
3.2.6	Festlegung der Rangliste.....	47
3.3	Parameterdateien der WABI-Nutzer im ArcGRM Spreewald.....	47
3.3.1	Flächenspeicher.....	47
3.3.2	Geländehöhenverteilung der Elementarflächen.....	48
3.3.3	Stauziele .....	48
3.3.4	Basisdaten Verdunstung.....	49
3.4	Modellkopplung ArcGRM Spreewald – ArcGRM GLOWA .....	49
3.4.1	Übernahme von Datenreihen zum Wasserdargebot.....	49
3.4.2	Direkte Integration von ArcGRM Spreewald in ArcGRM GLOWA.....	50
3.5	Modellvalidierung .....	51
4	Szenarientwicklung .....	51
4.1	Stakeholderintegration .....	51
4.2	Rahmenbedingungen.....	53
4.3	Szenarien mit Beibehaltung des gegenwärtigen Wassermanagements im Niederungsgebiet.....	55
4.4	Moorschutzszenario .....	56
5	Ist-Zustandsszenarien - Auswirkungen veränderter Rahmenbedingungen auf ausgewählte Wasserhaushaltsgrößen .....	57
5.1	Reale Verdunstung .....	57
5.2	Zusatzwasserbedarf .....	58
5.3	Zusatzwasserentnahme.....	58
5.4	Zusatzwasserdefizit .....	59
5.5	Flächenentwässerung .....	60
5.6	Grundwasserstände.....	60
5.7	Gebietsabfluss .....	62
6	Moorschutzszenario - Wirkung veränderter Wasserbewirtschaftung im Niederungsgebiet auf ausgewählte Wasserhaushaltsgrößen .....	63
6.1	Wasserbedarf und -entnahme .....	63
6.2	Gebietswasserspeicheränderung und zusätzlicher Wasserrückhalt.....	64
6.3	Grundwasserstände.....	64
7	Modellkopplung .....	65
8	Entwicklung von Managementstrategien zur Minderung negativer Folgen .....	66
9	Zusammenfassung .....	66
II-2	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	69
II-3	Während der Bearbeitung bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen.....	71
II-4	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen .....	71
	Verwendete Datengrundlagen .....	73
	Literaturverzeichnis.....	74
	Abbildungen .....	81

## ***Verzeichnis der Abbildungen***

- Abb. 1: Verbreitung grundwassernaher Standorte im Tiefland des Elbe-Einzugsgebietes
- Abb. 2: Einordnung des Vorhabens 2.3 in die GLOWA-ELBE Projektstruktur: Phase 1: 2000-2003, das Teilprojekt Spree/Havel und das Teilgebietsprojekt Spreewald
- Abb. 3: Einordnung des Feuchtgebietes Spreewaldes zwischen bergbaubeeinflusstem Einzugsgebiet der Oberen Spree (Speisungsgebiet) und Ballungsraum Berlin (Wasserbedarfsgebiet)
- Abb. 4: Daten- und Informationsaustausch von Vorhaben 2.3 mit anderen Vorhaben (VH) im Teilgebietsprojekt (TGP) Spreewald, im Teilprojekt (TP) Spree/Havel und im Kontext des Verbundprojektes GLOWA-Elbe
- Abb. 5: Biosphärenreservat Spreewald, naturräumlich gegliedert in Oberspreewald (OSW) und Unterspreewald (USW)
- Abb. 6: Räumliche Verteilung klimatischer Kennwerte (P – Niederschlag (korrigiert), TL – Lufttemperatur, ETP – Gras-Referenz-Verdunstung, KWB – klimatische Wasserbilanz (mit P<sub>kor</sub>) im Jahresmittel (Reihe 1961/90) nach HAD (1998)
- Abb. 7: Räumliche Verteilung klimatischer Kennwerte (P – Niederschlag (korrigiert), TL – Lufttemperatur, ETP – Gras-Referenz-Verdunstung, KWB – klimatische Wasserbilanz (mit P<sub>kor</sub>) im Mittel des Sommerhalbjahres (Reihe 1961/90) nach HAD (1998)
- Abb. 8: Monatssummen des korrigierten Niederschlages an den Messstationen Burg (Oberspreewald) und Hartmannsdorf (Unterspreewald) der Reihe 1970/99 nach DWD (2000)
- Abb. 9: Geländehöhen im UG Spreewald
- Abb. 10: Bodenarten im UG Spreewald auf Grundlage der Bodenkarte des Biosphärenreservats Spreewald
- Abb. 11: Flächenanteile der Bodenarten im UG Spreewald, ausgewertet nach unterschiedlichen Teilräumen (Gesamtgebiet Biosphärenreservat, Niederungsgebiet – gesamt, Niederungsgebiet – OSW, Niederungsgebiet - USW)
- Abb. 12: Bodenartenhauptgruppen im UG Spreewald auf der Grundlage BÜK 300 des Landesamtes für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg
- Abb. 13: Flächenanteile der Bodenartenhauptgruppen im UG Spreewald, ausgewertet nach unterschiedlichen Teilräumen (Gesamtgebiet Biosphärenreservat, Niederungsgebiet – gesamt, Niederungsgebiet – OSW, Niederungsgebiet - USW)
- Abb. 14: Hauptlandnutzungsklassen im UG Spreewald
- Abb. 15: Flächenanteile der Landnutzungsklassen im UG Spreewald, ausgewertet nach unterschiedlichen Teilräumen (Gesamtgebiet Biosphärenreservat, Niederungsgebiet – gesamt, Niederungsgebiet – OSW, Niederungsgebiet - USW)
- Abb. 16: Gewässersystem und wasserwirtschaftliche Anlagen im UG Spreewald
- Abb. 17: Jahresgang von Graben- und Grundwasserständen auf einer Untersuchungsfläche im OSW
- Abb. 18: Grundwassertransekt an ausgewählten Stichtagen mit unterschiedlichem Wasserregime (Einordnung s. Abb. 18) auf einer Untersuchungsfläche im OSW
- Abb. 19: Spreewald-Niederung mit Direkteinzugsgebiet und regionalem Grundwasserregime (aus HyKa50, 19..) sowie Teileinzugsgebiete mit den wichtigsten Oberflächenzu- und -abflüssen
- Abb. 20: Prinzipskizze zum Aufbau eines ArcGRM-Modells, schematisierte Darstellung der Elemente eines Flussgebietes mit Wasserbewirtschaftung
- Abb. 21: Prinzipskizze zur elementweisen Berechnung von Grundwasserflurabstand und Verdunstung im Modell WABI
- Abb. 22: Entwässerbares/auffüllbares Porenvolumen (PV) der 5 Bodenartenhauptgruppen bei Grundwasserstandsabsenkung/-auffüllung, bezogen auf GOK (Übernahme aus VH 2.6)

- Abb. 23: Beispiel für die Berechnung der Speicherkennlinie eines Staubereiches als Funktion des Grundwasserstandes (Nullpunkt 3 m unterhalb des tiefsten Geländepunktes frei gewählt)
- Abb. 24: Beispiel für die Berechnung der Geländehöhenverteilung der Elementarflächen (Kombination aus Landnutzung und Bodenartenhauptgruppe) eines Staubereiches
- Abb. 25: Integrationskonzept TPG Spreewald (aus Jahresbericht TGP Spreewald 2002)
- Abb. 26: Ausgrenzung der Spreewaldniederung innerhalb des Biosphärenreservats Spreewald - Modellgebiet ArcGRM Spreewald
- Abb. 27: Unterteilung des Niederungsgebietes Spreewald in Staugürtel
- Abb. 28: Unterteilung des Niederungsgebietes Spreewald in Staubereiche
- Abb. 29: Aufteilung der Simulationsteilgebiete (STG) des OSW und des USW auf die am Rande liegenden Staubereiche
- Abb. 30: Staugürtel- und Vorflutzuordnung der Staubereiche als Grundlage für die Festlegung von Stauzielen
- Abb. 31: Geländehöhenverteilung eines Staubereichs mit Kennzeichnung der Bezugshöhe für Stauziele NN20
- Abb. 32: Im Modell ArcGRM Spreewald direkt berücksichtigte Fließgewässer des UG Spreewald
- Abb. 33: Strangschema ArcGRM Spreewald
- Abb. 34: Reduziertes Fließgewässersystem des Spreewaldes mit regelbehafteten Verteilungsknoten
- Abb. 35: Strangschema ArcGRM Spreewaldes mit regelbehafteten Verteilungsknoten
- Abb. 36: Strangschema ArcGRM Spreewald mit Zuordnung der WABI-Nutzer
- Abb. 37: Strangschema ArcGRM Spreewald mit Zuordnung der Direkteinzugsgebiete, der Simulationsteilgebiete aus ArcGRM GLOWA sowie der Abflussprofile
- Abb. 38: Staubereiche mit Rangzahl
- Abb. 39: Beispiel für die Speicherkennlinie eines Staubereiches als Funktion des Grundwasserstandes (Nullpunkt 3 m unterhalb des tiefsten Geländepunktes frei gewählt)
- Abb. 40: Beispiel für die Geländehöhenverteilung der Elementarflächen (Kombination aus Landnutzung und Bodenartenhauptgruppe) eines Staubereiches
- Abb. 41: Zielgrundwasserstände der Staubereiche, dargestellt am Beispiel des Monats Juli im Referenzszenario
- Abb. 42: Grundwasserflurabstände bei Zielgrundwasserstand, dargestellt am Beispiel des Monats Juli im Referenzszenario
- Abb. 43: Einfluss des Landnutzungstyps auf die Verdunstung, dargestellt am Beispiel eines Torfstandortes (berechnet mit BOWAS, VH 2.6)
- Abb. 44: Einfluss der Bodenart auf die Verdunstung von Grasland (berechnet mit BOWAS, VH 2.6)
- Abb. 45: Vergleich von gemessenen und berechneten Abflusssummen für den Gebietsausgang des Spreewaldes der Reihe 1981/92 (Messdaten Landesumweltamt Brandenburg)
- Abb. 46: Vergleich des Medians der Monatsniederschläge von Referenz- und B2-Basisszenario (B2) in den Zeiträumen 2003/07 und 2048/52
- Abb. 47: Vergleich des Medians der potentiellen Verdunstung von Referenz- und B2-Basisszenario (B2) in den Zeiträumen 2003/07 und 2048/52
- Abb. 48: Vergleich des Medians der klimatischen Wasserbilanz von Referenz- und B2-Basisszenario (B2) in den Zeiträumen 2003/07 und 2048/52
- Abb. 49: Vergleich des Medians der Summe aller Einzugsgebietszuflüsse von Referenz- und B2-Basisszenario (B2) in den Zeiträumen 2003/07 und 2048/52
- Abb. 50: Vergleich des Medians der Summe der Einzugsgebietszuflüsse von Spree, Malxe und Südzufüssen im Referenz- und B2-Basisszenario (B2) in den Zeiträumen 2003/07 und 2048/52
- Abb. 51: Vergleich des Medians der Summe der Randgebietszuflüsse von Oberspreewald (OSW) und Unterspreewald (USW) im Referenz- und B2-Basisszenario (B2) in den Zeiträumen 2003/07 und 2048/52

- Abb. 52: Grundwasserflurabstände bei Zielgrundwasserstand, dargestellt am Beispiel des Monats März im Referenzszenario
- Abb. 53: Lage der Staubereiche mit den Entwicklungszielen Moorregenerierung und Moorerhalt in den Moorschutzszenarien
- Abb. 54: Anhebung der Zielgrundwasserstände im Moorschutzszenario, dargestellt am Beispiel der Grundwasserflurabstände bei Zielgrundwasserstand des Monats März
- Abb. 55: Vergleich des Medians der realen Verdunstung von Referenz- und B2-Basisszenario (B2) in den Zeiträumen 2003/07 und 2048/52 als Gebietsmittel mit Schwankungsbereich des 10. und 90. Perzentils
- Abb. 56: Zusatzwasserbedarf (Gebietsmittel) im Zeitraum 2003 bis 2052 des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario, dargestellt als Jahresgang der 5-Jahresperioden anhand der 20. und 50. Perzentile
- Abb. 57: Anstieg des Zusatzwasserbedarfs (Gebietsmittel) im Monat Juli im Zeitraum 2003 bis 2052 des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario, dargestellt als Perzentile der 5-Jahresperioden
- Abb. 58: Zusatzwasserbedarf (Gebietsmittel) des B2-Basisszenarios in der Periode 2048/52 (P10) im Vergleich zum Referenzszenario und B2-Basisszenario der Periode 2003/07 (P1), dargestellt als Jahresgang der 5-Jahresperioden anhand der 20. und 50. Perzentile
- Abb. 59: Zusatzwasserentnahme (Gebietsmittel) im Zeitraum 2003 bis 2052 des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario, dargestellt als Jahresgang der 5-Jahresperioden anhand der 20. und 50. Perzentile
- Abb. 60: Zusatzwasserentnahme (Gebietsmittel) im Monat Juli im Zeitraum 2003 bis 2052 des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario, dargestellt als Perzentile der 5-Jahresperioden
- Abb. 61: Zusatzwasserentnahme (Gebietsmittel) in der Periode 2048/52 (P10) des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario und B2-Basisszenario der Periode 2003/07 (P1), dargestellt als Jahresgang der 5-Jahresperiode anhand der 50. Perzentile
- Abb. 62: Zusatzwasserdefizit (Gebietsmittel) im Zeitraum 2003 bis 2052 des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario, dargestellt als Jahresgang der 5-Jahresperioden anhand der 20. und 50. Perzentile
- Abb. 63: Zusatzwasserdefizit (Gebietsmittel) im Monat Juli im Zeitraum 2003 bis 2052 des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario, dargestellt als Perzentile der 5-Jahresperioden
- Abb. 64: Zusatzwasserdefizit (Gebietsmittel) in der Periode 2048/52 (P10) des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario und B2-Basisszenario der Periode 2003/07 (P1), dargestellt als Jahresgang der 5-Jahresperiode anhand der 20. und 50. Perzentile
- Abb. 65: Flächenabfluss (Gebietsmittel) im Monat Januar im Zeitraum 2003 bis 2052 des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario, dargestellt als Perzentile der 5-Jahresperioden
- Abb. 66: Flächenabfluss (Gebietsmittel) in der Periode 2048/52 des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario, dargestellt als Jahresgang der 5-Jahresperiode anhand der 20. und 50. Perzentile
- Abb. 67: Unterschreitung der Zielgrundwasserstände (Mittel aller Staubereiche) im Zeitraum 2003 bis 2052 des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario, dargestellt als Jahresgang der 5-Jahresperioden anhand der 80. und 50. Perzentile
- Abb. 68: Unterschreitung der Zielgrundwasserstände (Mittel aller Staubereiche) im Monat Juli im Zeitraum 2003 bis 2052 des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario, dargestellt als Perzentile der 5-Jahresperioden
- Abb. 69: Unterschreitung der Zielgrundwasserstände (Mittel aller Staubereiche) in der Periode 2048/52 (P10) des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario und B2-Basisszenario der Periode 2003/07 (P1), dargestellt als Jahresgang der 5-Jahresperiode anhand der 20. und 50. Perzentile
- Abb. 70: Vergleich der Juli-Grundwasserstände (Differenz der 50. Perzentile) des Referenzszenarios in der Periode 2003/07 und des des B2- Basisszenarios in der Periode 2048/52



- Abb. 71: Vergleich der Juli-Grundwasserstände (Differenz der 50. Perzentile) des B2-Basisszenarios in der Periode 2003/07 und des B2- Basisszenarios in der Periode 2048/52
- Abb. 72: Berechnete Grundwasserflurabstände (50. Perzentil) im März
- Abb. 73: Grundwasserflurabstände (50. Perzentil) des Referenzszenarios im Juli der Periode 2003/07
- Abb. 74: Grundwasserflurabstände (50. Perzentil) des B2-Basisszenarios im Juli der Periode 2003/07
- Abb. 75: Grundwasserflurabstände (50. Perzentil) des B2-Basisszenarios im Juli der Periode 2048/52
- Abb. 76: Gebietsabfluss im Zeitraum 2003 bis 2052 des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario, dargestellt als Jahresgang der 5-Jahresperioden anhand der 50. und 80. Perzentile
- Abb. 77: Differenz zwischen Gebietsabfluss und -zufluss im Zeitraum 2003 bis 2052 des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario, dargestellt als Jahresgang der 5-Jahresperioden anhand der 50. und 80. Perzentile
- Abb. 78: Differenz zwischen Gebietsabfluss und -zufluss im Mai und Juli des Zeitraums 2003 bis 2052 des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario, dargestellt als 50. Perzentile der 5-Jahresperioden
- Abb. 79: Differenz zwischen Gebietsabfluss und -zufluss in der Periode 2048/52 (P10) des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario und B2-Basisszenario der Periode 2003/07 (P1), dargestellt als Jahresgang der 5-Jahresperiode anhand der 20. und 50. Perzentile
- Abb. 80: Zusatzwasserbedarf (Gebietsmittel) in der Periode 2003/07 im Vergleich des B2-Basisszenarios ohne und mit verstärktem Moorschutz, dargestellt als Jahresgang der 5-Jahresperioden anhand der 20. und 50. Perzentile
- Abb. 81: Zusatzwasserentnahme (Gebietsmittel) in der Periode 2003/07 im Vergleich des B2-Basisszenarios ohne und mit verstärktem Moorschutz, dargestellt als Jahresgang der 5-Jahresperioden anhand der 20. und 50. Perzentile
- Abb. 82: Vergleich des Medians der realen Verdunstung von April bis September des B2-Basisszenario ohne und mit verstärktem Moorschutz als Gebietsmittel mit Schwankungsbereich des 10. und 90. Perzentils
- Abb. 83: Grundwassergang eines Staubereichs mit Entwicklungsziel Moorregenerierung im Vergleich des B2-Basisszenarios ohne und mit verstärktem Moorschutz der Periode 2003/07 ( 50. Perzentil)
- Abb. 84: Differenz des Zusatzwasserbedarfs eines Staubereichs mit Entwicklungsziel Moorregenerierung im Vergleich des B2-Basisszenarios ohne und mit verstärktem Moorschutz der Periode 2003/07 (50. Perzentil)
- Abb. 85: Differenz der Zusatzwasserentnahme eines Staubereichs mit Entwicklungsziel Moorregenerierung im Vergleich des B2-Basisszenarios ohne und mit verstärktem Moorschutz der Periode 2003/07 (50. Perzentil)
- Abb. 86: Differenz des Gebietsspeichers zwischen B2-Basisszenario ohne und mit verstärktem Moorschutz der Periode 2003/07 mit Schwankungsbereich des 10. und 90. Perzentils
- Abb. 87: Differenz der Juli-Grundwasserstände (50. Perzentil) des B2-Basisszenarios ohne und mit verstärktem Moorschutz in der Periode 2003/07 (negative Werte – Grundwasseranstieg im Moorschutzszenario)
- Abb. 88: Differenz der Juli-Grundwasserstände (50. Perzentil) der Perioden 2003/07 und 2048/52 des B2-Basisszenarios mit verstärktem Moorschutz (negative Werte – Grundwasseranstieg in P10)
- Abb. 89: Vergleich des Gesamtzuflusses zum UG Spreewald bei Berechnung mit Datenübernahme von ArcGRM GLOWA und bei direkter Modellkopplung mit ArcGRM GLOWA (Referenzszenario, 50. Perzentil aus 10 Realisierungen der Periode 2003/07)
- Abb. 90: Vergleich des Gesamtabflusses aus dem UG Spreewald bei Berechnung mit Datenübernahme von ArcGRM GLOWA und bei direkter Modellkopplung mit ArcGRM GLOWA (Referenzszenario, 50. Perzentil aus 10 Realisierungen der Periode 2003/07)
- Abb. 91: Vergleich der Differenz von Gesamtzufluss und Gesamtabfluss des UG Spreewald ( $Q_{ab} - Q_{zu}$ ) bei Berechnung mit Datenübernahme von ArcGRM GLOWA und bei direkter Modellkopplung mit ArcGRM GLOWA (Referenzszenario, 50. Perzentil aus 10 Realisierungen der Periode 2003/07)

### ***Verzeichnis der Tabellen***

- Tab. 1: Klimatische Kennwerte der Jahresreihe 1961/90 des UG nach HAD (1998) sowie korrigierter Niederschlag für die Stationswerte von Burg (OSW) und Hartmannsdorf (USW) der Jahresreihe 1970/99 nach DWD (2000)
- Tab. 2: Untersuchte Szenarienkombinationen im TGP Spreewald (aus Zwischenbericht TGP Spreewald 2003)
- Tab. 3: Stauziele des Referenzszenarios nach Studie Staugürtelschließung (LUA 2002) und Protokolle Stau-beiräte (vgl. Abb. 31)

### **Abkürzungen**

AG	Arbeitsgemeinschaft
ArcGRM	Wasserbewirtschaftungsmodell
B2	Emissionsszenario des IPCC
BfN	Bundesamt für Naturschutz
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BOWAS	Bodenwasserhaushaltsmodell
BTU Cottbus	Brandenburgische Universität Cottbus
BÜK	Bodenübersichtskarte
DGM	Digitales Geländemodell
DWD	Deutscher Wetterdienst
ETP	Potentielle Verdunstung
GIS	Geographisches Informationssystem
GLOWA	Globaler Wandel des Wasserkreislaufes
GOK	Geländeoberkante
GRM	Großraummodell
GRSP	Gewässerrandstreifenprojekt Spreewald
GRUENLAND	Grünlandertragsmodell
GW <sub>ist</sub>	erreichter Grundwasserstand
GW <sub>soll</sub>	Zielgrundwasserstand
HAD	Hydrologischer Atlas von Deutschland
HYKA50	Hydrogeologisches Kartenwerk
IMA	Integrativer methodischer Ansatz von GLOWA-Elbe
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KWB	Klimatische Wasserbilanz
LAGS	Landesanstalt für Großschutzgebiete
LGRB	Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe
LN	Landnutzung
LUA	Landesumweltamt
LVA	Landesvermessungsamt
MMK	Mittelmaßstäbige landwirtschaftliche Standortkartierung
MODAM	Multi-Objective Decision Support Tool for Agroecosystem Management
MUNR	Ministerium für Umweltschutz, Naturschutz und Raumordnung Brandenburg
ÖKOSYN	Ökosystemmanagement für Niedermoore
OSW	Oberspreewald
P	Niederschlag
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
PV	Entwässerbares Porenvolumen
Q <sub>zu</sub>	Zufluss
Q <sub>ab</sub>	Abfluss
RAUMIS	Regionales Agrar- und Umweltinformationssystem

SILVA	Waldwachstumsmodell
SPEWA	Spreewaldmodell
STG	Simulationsteilgebiet
SVAT	Soil Vegetation Atmosphere Transfer Model
TGP	Teilgebietsprojekt
TK	Topographische Karte
TL	Lufttemperatur
TP	Teilprojekt
TUB	Technische Universität Berlin
UG	Untersuchungsgebiet
USW	Unterspreewald
VEGMOS	Vegetationsentwicklungsmodell
VH	Vorhaben
WABI	Wasserbilanzmodell für grundwasserregulierte Niederungsstandorte
WASY	Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH
WBV	Wasser- und Bodenverband
ZALF	Zentrum für Agrarlandschafts- und Landnutzungsforschung Müncheberg

# **Teil I: Aufgabenstellung und Rahmenbedingungen**

## **I-1 Ziel- und Aufgabenstellung**

Die Untersuchungen zu „Wasserhaushalt und Wassermanagementstrategien für die Feuchtgebietsregion Spreewald“ im Vorhaben (VH) 2.3 wurden im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes „Integrierte Analyse der Auswirkungen des globalen Wandels auf die Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet (GLOWA-Elbe)“ durchgeführt. Entsprechend orientieren sich die Ziel- und Aufgabenstellungen des VH an den Hauptzielstellungen des Verbundprojektes:

- Entwicklung integrierter Strategien zur nachhaltigen Bewältigung von durch den globalen Wandel bedingten Wasserverfügbarkeitsproblemen und Wassernutzungskonflikten und den daraus resultierenden Umwelt- und sozio-ökonomischen Problemen im Elbe-Einzugsgebiet
- Erfassung und Modellierung der komplexen Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen hydrologischem Kreislauf, Klima, Landnutzung und Gesellschaft im Elbe-Einzugsgebiet
- Ableitung von regionalen Zukunftsszenarien
- Anwendung der entwickelten Instrumente im Elbegebiet zum Nachweis ihrer Eignung für die vorausschauende Erkennung und Analyse der sich in Verbindung mit dem Globalen Wandel ergebenden Probleme und Konflikte sowie zur Ableitung von Handlungsstrategien und Maßnahmen zur ihrer Überwindung

Untersetzt für die spezifischen Regionalbedingungen der Feuchtgebietsregion Spreewald, geht es im VH 2.3 um die Klärung der hydrologisch-wasserwirtschaftlichen Möglichkeiten einer nachhaltigen Bestandssicherung des Feuchtgebietes Spreewald mit seinen multifunktionalen sozioökonomischen und ökologischen Potenzen. Im Zusammenhang damit sind insbesondere auch die Wechselwirkungen mit der Landnutzung im Gebiet auszuweisen. Aussagen zu gegebenenfalls gebotenen Landnutzungsänderungen und erforderlichen Restriktionen für die landwirtschaftliche Nutzung der Niedermoore im Interesse der Bestandssicherung der Kernzonen als Feuchtgebiete sind zu treffen. Hierbei sind die Entwicklungsrahmen für den Großraum des bergbaubeeinflussten Gebietes der Oberen Spree – als Zuflussgebiet des Spreewaldes – und des Großraums Berlin – als Region mit Anforderungen an den Abfluss aus dem Spreewald – zu berücksichtigen.

Im Rahmen der Gesamtzielstellung des Verbundvorhabens GLOWA-Elbe und eingeordnet in den Kontext des TP „Spree/Havel“ werden mit dem VH 2.3 die folgenden wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele verfolgt:

- Ökohydrologische Analyse der Wasserhaushaltssituation des Spreewaldes unter klimatischen und bergbaubedingten Veränderungen gebietshydrologischer Zustände als Grundlage für Aussagen zum Erhaltungspotential oder Degradierungsrisiko von Niedermoor-Feuchtgebieten unter vergleichbaren Bedingungen

- Erarbeitung von Grundlagen für Wassermanagementstrategien zur Bestandssicherung von Feuchtgebieten unter Berücksichtigung vorhandener wasserwirtschaftlicher Regulierungseinrichtungen und Steuerstrategien sowie deren realistischer Modifikation
- Bewertung potentieller Erhaltungs- bzw. Rückgangstendenzen des Feuchtgebietscharakters des Spreewaldes anhand von Szenarien des Wandels hydroklimatischer und sozioökonomischer äußerer Bedingungen bei Berücksichtigung innerer (landwirtschaftliche Nutzung, Naturschutz, Tourismus) und äußerer Wechselwirkungen (Wasserdargebot aus dem Einzugsgebiet, Anforderungen an den Abfluss vonseiten des Ballungsraums Berlin)

## **I-2 Einordnung des Vorhabens 2.3 in das Verbundprojekt GLOWA-Elbe, das Teilprojekt Spree/Havel und das Teilgebietsprojekt Spreewald**

Feuchtgebiete sind charakteristische Landschaftselemente im Elbe-Tiefland. Sie nehmen rd. 20 % der Fläche ein (Abb. 1). Ursprünglich waren sie die natürlichen Senken im Wasser- und Stoffkreislauf der Tieflandeinzugsgebiete. Infolge ihrer schrittweisen Entwässerung und In-nutzungnahme während der letzten 250 Jahre haben sie diese Funktion bereits größtenteils verloren. Trotzdem wird ihr Wasserhaushalt nach wie vor durch grundwassernahe Standortbedingungen charakterisiert und durch wasserwirtschaftliche Maßnahmen auf ihn eingewirkt, ist ihre gegenwärtige Nutzung auf diese Besonderheiten des Wasserhaushalts abgestimmt. Der Grad zwischen Erhalt oder Zerstörung eines Feuchtgebietes bzw. einer ressourcenschonenden oder –vernichtenden Nutzung dieser Gebiete ist sehr schmal. Bereits geringfügige Veränderungen im Landschaftswasserhaushalt können hier große Folgen für den zukünftigen Erhalt des Landschaftscharakters haben.

In GLOWA-Elbe wurden Folgen des globalen Wandels auf den Wasserhaushalt, die Ökologie und Nutzung eines Feuchtgebietes im Rahmen einer genesteten Pilotstudie am Spreewald, einem der herausragendsten Feuchtgebiete Deutschlands, untersucht (Abb. 2). Die Klimaänderungsszenarien und veränderte sozio-ökonomische Bedingungen bilden den Entwicklungsrahmen für die Untersuchungen im Spreewald. Innerhalb des TP Spree/Havel ist das TGP Spreewald über den Wasserhaushalt eng mit den TGP Obere Spree und Ballungsraum Berlin verknüpft (s. Abschnitt 2.2). Das bergbaubeeinflusste Teileinzugsgebiet der Oberen Spree ist das Speisungsgebiet des Spreewaldes, der wiederum die Zuflüsse zum Ballungsraum Berlin beeinflusst (Abb. 3 und 4). Eine besonders enge Verknüpfung der VH im TGP Spreewald ist Voraussetzung für das Erreichen der gestellten Ziele. Die Zusammenarbeit betrifft die Entwicklung eines gemeinsamen Modellkonzepts mit eindeutiger Definition der Schnittstellen zwischen den VH, das abgestimmte Vorgehen bei der Integration der Stakeholder und der Entwicklung und Bearbeitung gemeinsamer Szenarien (s. Abschnitt 2.3).

Das TGP Spreewald arbeitet damit in Phase I von GLOWA-Elbe auf der kleinsten Maßstabsebene innerhalb des Verbundprojektes. Einige Folgen des globalen Wandels sind nur hier

ermittelbar, werden bei großmaßstäbigerer Betrachtung gar nicht wahr genommen. Weiterhin wird damit aber auch die regionale Differenziertheit deutlich, mit der Folgen zu erwarten sein können und wie ihnen mit geeigneten Maßnahmen entgegengewirkt werden kann. Die entwickelten Methoden und Ergebnisse sind Voraussetzung, um in Phase II im Gesamtgebiet der Elbe Aussagen zur Betroffenheit der Feuchtgebiete machen zu können, die dann allerdings mit stärker regionalisierten Methoden bearbeitet werden müssen.

### **I-3 Kurzbeschreibung des Untersuchungsgebietes Spreewald**

Der Spreewald, 70 km südöstlich von Berlin gelegen, ist in seiner heutigen Ausdehnung eine rd. 320 km<sup>2</sup> große Niederung, die naturräumlich in den Oberspreewald (OSW) im Baruther Urstromtal und in den Unterspreewald (USW), in einer jüngeren Talabzweigung zum Berliner Urstromtal gelegen, gegliedert ist (Abb. 3 und 5). Die Region gehört mit einem mittleren Jahresniederschlag von 540 mm/a zu den niederschlagsärmsten Gebieten Deutschlands. Bei einer potentiellen Verdunstung von 610 mm/a ist die klimatische Wasserbilanz in der Jahressumme negativ. Der Feuchtestatus des Spreewaldes wird dominiert durch die Spreezuflüsse von oberhalb, die Gebietsniederschläge und -verdunstung sowie die Abflusssituation am Pegel Leibsch unterhalb des Spreewaldes.

Die heutige Gebietsstruktur und das Gebietswasserregime sind gekennzeichnet durch ein dichtes Netz größtenteils kanalisierter Fließe (1.600 km) mit einem System von rd. 600 Wehren und Stauen, die bei ausreichendem Wasserdargebot eine zielstellungsgemäße Regulierung der Wasserstände/Grundwasserstände bis hin zum flächenhaften Überstau ermöglichen.

Naturraum und Landnutzung sind angepasst an die Besonderheiten des Wasserhaushalts mit grundwassernahen Standortverhältnissen und ausreichenden Zuflüssen aus oberhalb gelegenen Einzugsgebieten. Die Stabilität und Weiterentwicklungsmöglichkeiten dieser naturräumlichen und sozioökonomischen Strukturen sind grundsätzlich abhängig von der Erhaltung und Bewirtschaftung des Spreewaldes als Feuchtgebiet. Die Möglichkeiten für den Feuchtgebiets-erhalt werden bestimmt durch die zukünftige Entwicklung des Niederschlagsgeschehens, die Wasserverfügbarkeit aus der von oberhalb einspeisenden Spree und die Entwicklung des gebietlichen Wasserverbrauches über die Verdunstung. Die Zuflussbedingungen werden bereits heute durch das verminderte Dargebot aus den Bergbaufolgelandschaften der Lausitz reduziert. Aufwendige wasserwirtschaftliche Maßnahmen im oberhalb gelegenen Einzugsgebiet helfen die negativen Folgen für das Abflussgeschehen zu mindern, jedoch ist das Feuchtgebiet des Spreewaldes dabei nur einer von vielen Wassernutzern.

Der Spreewald wurde 1991 in die Liste der UNESCO – Biosphärenreservate aufgenommen und damit zusätzlich unter einen besonderen internationalen Schutzstatus gestellt. Ziel ist der Erhalt der in Mitteleuropa einzigartigen Kulturlandschaft. Seit Dezember 2000 wird über eine voraussichtliche Dauer von 12 Jahren das Gewässerrandstreifenprojekt Spreewald (GRPS) vom Bundesamt für Naturschutz gefördert. Erste Ergebnisse aus dem VH 2.3 bilden bereits eine Planungsgrundlage des GRPS.

## **I-4 Voraussetzungen zur Durchführung des Projektes**

Durch das BMBF wurden eine volle Wissenschaftlerstelle für 20 Monate, eine halbe Wissenschaftlerstelle für 36 Monate und eine Technikerstelle für 21 Monate finanziert. Während die volle Wissenschaftlerstelle mit Projektbeginn wie geplant besetzt werden konnte, wurde für die Doktorandenstelle in den ersten 1,5 Jahren kein geeigneter Mitarbeiter gefunden. Es musste daher umdisponiert und Mittel umgewidmet werden. So wurde die volle Stelle, zu deren Aufgabe neben der fachlichen Bearbeitung des VH 2.3 die Koordinierung der Arbeiten im TGP Spreewald gehörte, über die gesamte Laufzeit aus den Projektmitteln finanziert. Die andere Wissenschaftlerstelle konnte nur zeitweise mit geeignetem Personal besetzt werden. Ein Teil der Mittel wurde für einen Werkauftrag an die Fa. WASY vergeben. Hierüber wurden die notwendigen Programmierarbeiten für die Modellerweiterung am ArcGRM Spreewald und die Entwicklung eines Prototyps für die Kopplung von ArcGRM-Modellen abgesichert. Die in der 1. Hälfte der Projektlaufzeit nicht in Anspruch genommenen Mittel wurden an die zentrale Projektkoordinierung von GLOWA-Elbe (PIK-Potsdam) zurück gegeben.

Vom ZALF wurde die Forschungsinfrastruktur (Rechnernetzwerk, GIS-Arbeitsplätze, ArcGRM-Lizenz, Messtechnik, Fahrzeuge) zur Verfügung gestellt.

Weitere wichtige Voraussetzungen für die Projektdurchführung waren:

- Die enge Zusammenarbeit von Hydrologen/Wasserwirtschaftlern, Bodenkundlern, Vegetationsökologen und Sozio-Ökonomen im TGP Spreewald und im TP Spree/Havel
- Die interdisziplinäre Zusammenarbeit in den temporären Querschnittsarbeitsgruppen (z. B. AG Szenarien) von GLOWA-Elbe
- Die enge Kooperation mit den zuständigen Fachbehörden vom Landesumweltamt Brandenburg, den Wasser- und Bodenverbänden, der Biosphärenreservatsleitung Spreewald sowie dem Zweckverband und den zuständigen Planungsbüros des GRSP Spreewald (s. a. Abschnitt I-7)

## **I-5 Planung und Ablauf des Projektes**

Die Projektplanung sah nach Projektantrag folgende Meilensteine vor:

- Abschluss der Aufbereitung der Grunddaten zu Gewässern, hydrotechnischen Anlagen, Boden, Landnutzung, Bebauung, Planungen, Schutzzonenkonzepte (nach 6 Monaten)
- Hydrogeologische Charakterisierung des Direkteinzugsgebietes mit Kennzeichnung/Quantifizierung der direkten Basiszuflüsse (nach 15 Monaten)
- Einteilung des Untersuchungsgebietes (UG) in Einzelnutzer und Ermittlung der hydrologisch-wasserwirtschaftlichen Standortverhältnisse für die Einzelnutzer (nach 21 Monaten)



- Aufbau und Validierung des Modells ArcGRM-WABI-Spreewald (nach 27 Monaten)
- Entwicklung von Szenarien und Durchführung von Szenarioanalysen I zur Ermittlung der Gebietscharakteristika und zur Ableitung von Wassermanagementstrategien im Spreewald (nach 30 Monaten)
- Ausgrenzung sensibler und steuerungsrelevanter Systembereiche und Entwicklung von Steuerstrategien für Zonierungskonzepte (nach 33 Monaten)
- Integration von ArcGRM-WABI-Spreewald in ArcGRM-GLOWA (nach 33 Monaten)
- Entwicklung ganzheitlicher Szenarien II für die Spreewaldregion und Durchführung von Szenarioanalysen II für verschiedene Handlungsoptionen (nach 36 Monaten)

Im Rahmen der Antragsüberarbeitung wurde vor Projektbeginn das Ziel gestellt, bereits nach 1,5 Jahren Bearbeitungszeit das „Wasserbilanz- und Verteilungsmodell Spreewald zur Simulation von Wassermanagementszenarien“ (ArcGRM Spreewald) als Ergebnis bereit zustellen.

Die einzelnen Bearbeitungspunkte wurden im Laufe der Projektbearbeitung alle abgearbeitet. Teilweise wurden Modifizierungen an der ursprünglichen Planungsreihenfolge vorgenommen, die sich aus dem jeweils aktuellen Kenntnisstand, der zunehmend engeren Zusammenarbeit im TGP und der konsequenten Umsetzung des integrativen methodischen Ansatzes (IMA) von GLOWA-Elbe ergaben. So wurde die Szenarientwicklung und die Integration der Stakeholder in die Szenarientwicklung verstärkt in der ersten Bearbeitungsphase vorangetrieben, wodurch die Bearbeitung der Modellentwicklung und des Modellaufbaus terminlich weiter nach hinten verschoben werden musste. Infolge der Probleme bei der Stellenbesetzung kam es vor allem zu zeitlichen Verschiebungen und Rückständen im Terminplan. Dieser konnte erst durch die verstärkte Zusammenarbeit mit VH 2.6 und die Einbeziehung der Fa. WASY in der 2. Bearbeitungshälfte wieder aufgeholt werden. Inklusive einer 2-monatigen kostenneutralen Verlängerung wurden alle geplanten Arbeiten durchgeführt.

## **I-6 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Grundwassernahe Standorte gehören zu den verdunstungsintensivsten Standorten in Mitteleuropa. Erreichen die Pflanzenwurzeln noch die Zone des kapillaren Wasseraufstiegs bzw. die gesättigte Bodenzone, können sie trotz fehlender Niederschläge und Austrocknung des Oberbodens uneingeschränkt hohe Transpirationsraten erzielen. Infolge der klimatischen Veränderungen erwartete Verschiebungen im Niederschlagsgeschehen zwischen Winter- und Sommerhalbjahr und längere Trockenperioden im Sommer führen damit auf diesen Standorten nicht zwangsläufig zu niedrigeren Verdunstungsraten. Bei steigender potentieller Verdunstung ist bei gegebener Wassernachlieferung aus dem Grundwasser auch mit weiter ansteigender Verdunstung zu rechnen. Untersuchungen zeigen, dass die Evapotranspiration der niedermoortypischen Seggen- und Schilfvegetation die Evaporation freier Wasserflächen und die potentielle Gras-Referenzverdunstung noch übersteigen kann (Šmid 1975, Koerselman &

Beltman 1988, Lafleur 1990, Behrendt et al. 1998, Quast & Böhm 1998, Dannowski et al. 1999). Auch bei Grünlandnutzung werden hohe Ertragszahlen nur mit Verdunstungswerten um 500 bis 700 mm in der Vegetationsperiode erreicht (Mundel 1982b).

Weitere wichtige Aspekte im Wasserhaushalt der Feuchtgebiete sind die enge Verbindung mit ihren Einzugsgebieten und die Bedeutung wasserwirtschaftlicher Maßnahmen in Niederung und Einzugsgebiet. Gerade im Elbe-Tiefland, in dem die Feuchtgebiete fast durchgängig für eine landwirtschaftliche Nutzung entwässert wurden, wird der Flächenwasserhaushalt in den Niederungen von Grundwasserregulierungsanlagen bestimmt, die auch die Zuführung von Bewässerungswasser aus dem Einzugsgebiet ermöglichen. Die Schwierigkeiten in der Modellierung des Wasserhaushalts solcher Feuchtgebiete liegen in der Komplexität des Zusammenwirkens von Prozessen, die auf der Ebene des Boden- und Flächenwasserhaushalts dem Einfluss von meteorologischen Faktoren, Grundwasserflurabstand, Bodenart und Vegetation auf Transpiration und Flächenwasserspeicher unterliegen, sowie anthropogener Beeinflussung des Wasserhaushalts durch wasserwirtschaftliche Maßnahmen in der Niederung und im Einzugsgebiet. Die detaillierte Betrachtung des Boden- und Flächenwasserhaushalts mit all ihren Einflussfaktoren erfordert eine räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Betrachtung. Der hierfür notwendige Aufwand ist bei einer einzugsgebietsweiten Betrachtung und auch bei der allgemein verfügbaren Datenbasis nicht leistbar. Die Wirkung der wasserwirtschaftlichen Steuerungshandlungen in der Niederung, die zudem in größeren Zeitschritten vorgenommen werden, sowie die Verbindung zum Einzugsgebiet überprägen ohnehin den reinen Prozessablauf in der Mikroskala, so dass hier eine räumlich und zeitlich gröbere Betrachtung bei einer komplexen Herangehensweise sinnvoll erscheint.

In der internationalen Fachliteratur werden oftmals nur die Einzelprozesse betrachtet. Auch wird deutlich, dass die Probleme bei der Modellierung des Wasserhaushalts von Feuchtgebieten vor allem in der Berechnung der Evapotranspiration bestehen (Spieksma et al. 1997, McKillop et al. 1999). Herkömmliche N/A-Modelle spiegeln diese für grundwassernahe Standorte nur unzureichend wieder. Schon lange ist bekannt, dass Differenzen im Grundwasserflurabstand von 50 cm entscheidend für eine ausreichende Wasserversorgung der Pflanzen sind und zu Unterschieden in der Jahresverdunstung bis zu 200 mm führen können (Mundel 1982a, Dooge 1984). Durch gesonderte Betrachtung der Feuchtgebiete innerhalb der Einzugsgebiete mit speziell angepassten Modellansätzen wird der Wasserhaushalt dieser Gebiete bestimmt (Spieksma & Schouwenaars 1997). Der im VH 2.3 gewählte Modellansatz aus Wasserbewirtschaftungsmodell ArcGRM (WASY 1999) und einem darin integrierten Wasserbilanzmodell WABI (Dietrich et al. 1996) entspricht dieser Herangehensweise und wurde bereits an anderen Niedermoorgebieten erprobt (Dietrich et al. 1999, Schramm et al. 2001, Finke et al. 2002).

## **I-7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Innerhalb des Verbundprojektes fand eine enge vorhabens- und teilprojektsübergreifende Zusammenarbeit mit folgenden Partnern statt:

- **Technische Universität Berlin**, Institut für Ökologie, FG Standortkunde und Bodenschutz, VH 2.6 (Prof. Wessolek, Dr. Schwärzel, Dr. Kayser, M. Lorenz): Übernahme von mittleren Monatswerten der Verdunstung für alle relevanten Boden-Landnutzungsklassen des UG als Funktion des Grundwasserflurabstandes, Übernahme des entwässerbaren/auffüllbaren Porenvolumens für die 5 Bodenartenhauptgruppen des UG, Übergabe des DGM und von Szenarioergebnissen zur Grundwasserstandsentwicklung im UG
- **Technische Universität Berlin**, Institut für Ökologie, FG Ökosystemkunde/Pflanzenökologie, VH 2.7 (Prof. Kowarik, Dr. Heimann, Dr. Bangert, G. Vater): Übernahme von Datengrundlagen zur Landnutzung im UG, Übergabe des DGM und von Szenarioergebnissen zur Grundwasserstandsentwicklung im UG
- **Technische Universität Berlin**, Institut für Landschafts- und Umweltplanung, FG Vergleichende Landschaftsökonomie, VH 2.8 (Prof. Hartje, M. Grossmann, J. Meyerhoff): Gemeinsame Erarbeitung von Ziel-Grundwasserflurabständen für verschiedene Landnutzungstypen, Übergabe des DGM und von Szenarioergebnissen zur Grundwasserstandsentwicklung im UG
- **WASY Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH**, Unterauftrag (Dr. Kaden, Dr. Schramm, M. Redetzky, M. Hentschel): Gemeinsamer Modellaufbau von ArcGRM Spreewald und der Modellkopplung von ArcGRM Spreewald und ArcGRM GLOWA, Durchführung der Programmierarbeiten bei der Modell-erweiterung und Modellkopplung
- **Brandenburgische Technische Universität Cottbus**, Fak. Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik, LS Hydrologie und Wasserwirtschaft (Prof. Grünwald, Dr. Kaltofen, H. Koch): Übernahme von Datenreihen zum Gebietszufluss für verschiedene Szenarien, methodische Diskussion und Mitarbeit bei der Entwicklung der Modellkopplung von ArcGRM Spreewald und ArcGRM GLOWA
- **Bundesanstalt für Gewässerkunde** (Dr. Oppermann, Dr. Finke, C. Rachimow): Methodische Diskussionen der TP - Zusammenarbeit
- **Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung** (Dr. Becker, Dr. Gerstengarbe, Dr. Wechsung, P. Gräfe): Kontrolle des Bearbeitungsstandes durch die Projektleitung/Koordinierungsgruppe und methodische Diskussion zur Umsetzung des IMA im TGP Spreewald, Übernahme der Klimaänderungsszenarien
- **Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH** (Dr. Messner): Zusammenarbeit bei der Entwicklung der Szenarien in der AG Szenarien

Im Rahmen der Datenakquisition, der Stakeholderintegration und der Einbeziehung von Expertenwissen im UG sowie der potentiellen Interessenten und Anwender der Ergebnisse waren folgende Behörden und Büros einbezogen:

- Landesumweltamt Brandenburg, Außenstelle Cottbus

- Leitung des Biosphärenreservats „Spreewald“
- Wasser- und Bodenverbände „Nördlicher Spreewald“ und „Oberland Calau“
- Zweckverband „Gewässerrandstreifenprojekt Spreewald (GRPS)“
- Deutscher Wetterdienst
- Planungsbüro IHC Beeskow

Einige Synergieeffekte mit dem Teilprojekt 4 „Stoffumsatz im Spreewald“ des BMBF-Verbundprojektes „Untersuchungen zur Gewässerbeschaffenheitsentwicklung der Spree“ (ZALF, Institut für Landschaftswasserhaushalt) konnten insbesondere bei der Beschaffung und Aufbereitung der Datengrundlagen genutzt werden.

## Teil II: Ergebnisse

### II-1 Erzielte Ergebnisse

#### 1 Hydrologische Gebietsanalyse

##### 1.1 Charakterisierung der Standortbedingungen und Datengrundlagen der Wasserhaushaltsmodellierung

###### 1.1.1 Klima

Grundlage der klimatischen Charakterisierung des UG sind der Hydrologische Atlas von Deutschland (HAD 1998) mit langjährigen Mittelwerten der Reihe 1961/90 sowie die Niederschlagswerte der Reihe 1970/99 der Messstationen Burg im OSW und Hartmannsdorf im USW (DWD 2000). Entsprechend den langjährigen Mittelwerten gehört der Spreewald zu den niederschlagsärmsten Regionen Deutschlands bei gleichzeitig hohen atmosphärischem Verdunstungsanspruch (Tab. 1). Beides schlägt sich in einer negativen klimatischen Wasserbilanz im langjährigen Mittel nieder, welche im Sommer bei einem Defizit von über 100 mm liegt. Bildung und Erhalt von Feuchtgebieten sind in dieser Region daher grundsätzlich nur bei ausreichend großen Zuflüssen aus oberhalb gelegenen Einzugsgebieten möglich.

Die räumliche Verteilung der Klimawerte zeigt geringe Unterschiede zwischen OSW und USW (Abb. 6 und 7). Die Jahresniederschlägen liegen im USW etwas höher als im OSW, was auf höhere Niederschläge im Winterhalbjahr zurückzuführen ist. Im Sommerhalbjahr herrschen im langjährigen Mittel die gleichen Niederschlagsverhältnisse im gesamten UG. Die Monatssumme der Reihe 1970/99 in Abb. 8 bestätigen diese räumlichen Unterschiede in der Niederschlagscharakteristik.

Tab. 1: Klimatische Kennwerte der Jahresreihe 1961/90 des UG nach HAD (1998) sowie korrigierter Niederschlag für die Stationswerte von Burg (OSW) und Hartmannsdorf (USW) der Jahresreihe 1970/99 nach DWD (2000)

Parameter	Jahr	Winter	Sommer
Niederschlag	540	228	312
Niederschlag (korrigiert)	596	257	339
Lufttemperatur	9,0	2,9	15,0
Gras-Referenz-Verdunstung	608	147	461
Klimatische Wasserbilanz	-67	82	-149
Klimatische Wasserbilanz (korrigiert)	-11	111	-122
Burg	562	232	330
Hartmannsdorf	641	294	347

Die Unterschiede in Durchschnittstemperatur und Gras-Referenz-Verdunstung nach HAD (1998) zwischen OSW und USW sind unbedeutend, so dass die unterschiedlichen Niederschläge auch zu Unterschieden in der klimatische Wasserbilanz führen. Im OSW weist diese

ein Defizit von rd.  $-25$  mm/a im langjährigen Mittel auf und im USW fällt sie mit rd.  $+10$  mm/a schwach positiv aus (Abb. 6 und 7).

Für die Modelluntersuchungen im Projekt wurden Klimaänderungsszenarien aus dem TP 4, VH 4.2 genutzt.

### **1.1.2 Topographie**

Die Niederung des im Baruther Urstromtal gelegenen OSW erstreckt sich über eine Länge von rd. 27,5 km in Ost-West-Richtung und 8 bis 11 km Breite in Nord-Süd-Richtung. Das mittlere Gefälle beträgt rd. 0,03 % von Südosten nach Nordwesten. Die Geländehöhen der Niederung am östlichen Rand bei Schmogrow liegen bei 57 m NN und fallen bis Lübben zum Übergang in den USW auf 49 m NN ab. In nordsüdlicher Richtung ist der OSW nahezu gefällelos. Innerhalb der Niederung sind die Flächen relativ eben. Einige Bereiche sind durch Deiche ausgepoldert (s. Abschnitt 1.1.5). Am Rand der Niederung steigt das Gelände dann um mehrere Meter an, so dass dort der Bereich grundwassernaher Standorte ausstreicht.

Der in einer jüngeren Talabzweigung zum Berliner Urstromtal gelegene USW fällt von 49 m NN bei Lübben bis zum Neuendorfer See auf rd. 44 m NN ab. Das mittlere Gefälle beträgt 0,026 %. Der USW ist in Nord-Süd-Richtung rd. 19 km lang und mit 3 bis 6 km wesentlich schmaler als der OSW. Westlich des USW liegen mit den Krausnicker Bergen die höchsten Erhebungen der Gegend (142 m NN).

Als Datengrundlage der Wasserhaushaltmodellierung sollte zunächst das DGM25 des Landesvermessungsamtes Brandenburg dienen. Es zeigte sich jedoch, dass das DGM25 gerade in der eigentlichen Niederung des Spreewaldes zu ungenau ist. Bei einem Vergleich mit den Wasserständen würden sich zu große Fehler bei der Berechnung der Grundwasserflurabstände ergeben. Auf der Basis der TK 10 (LVA Brandenburg) wurde daher ein neues DGM erstellt (Abb. 9). In der Berechnung des DGM TK10 wurden alle Höhenlinien sowie alle Höhenpunkte, die sich eindeutig in der Fläche befanden, berücksichtigt. Der Höhenbezug wurde auf mNN umgerechnet, um eine einheitliche Grundlage mit den Zielwasserständen der Wasserwirtschaft herzustellen. Die Berechnung des DGM erfolgte über einfache Triangulation und anschließende lineare Interpolation. Die Rastergröße beträgt 25 m x 25 m und stimmt lagemäßig mit dem DGM25 überein.

### **1.1.3 Boden**

Im Spreewald sind Flussaue und große vermoorte Bereiche eng miteinander verflochten. Entsprechend heterogen stellen sich auch die Bodenverhältnisse im UG dar. Die sehr detaillierte Bodenkarte auf der Datengrundlage des Biosphärenreservats Spreewald (Abb. 10) zeigt, dass Gleyböden im Gesamtgebiet dominieren. Auf den grundwassernahen Standorten in der eigentlichen Niederung nehmen Moor, Anmoor und Grundgley über 90 % der Fläche ein (Abb. 11), wobei die Niedermoore vorwiegend im mittleren Bereich des OSW liegen. Die Spreewaldböden sind oftmals durch Staunässe gekennzeichnet. Dieses ist auf die im regionalen

Sprachgebrauch als Klocksichten bezeichneten Horizonte geringer Wasserdurchlässigkeit in wenigen Dezimetern Tiefe zurückzuführen. Sie verhindern nach Niederschlägen das rasche Versickern des Wassers und führen häufig zu oberflächennahen Vernässungen.

Datengrundlage für die Modelluntersuchungen war die Karte der Bodenartenhauptgruppen aus der BÜK 300 des Landesamtes für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg (Abb. 12 und 13). Gegenüber der Bodenkarte des Biosphärenreservats (Abb. 10) reduzieren sich die zu betrachtenden Bodenarten auf 5 Hauptgruppen und ergeben damit im Verschnitt mit den Landnutzungstypen eine noch überschaubare Kombinationsanzahl. Die erforderlichen bodenhydraulischen Parameter für die ausgewiesenen Bodenartenhauptgruppen wurden vom VH 2.6 bereitgestellt.

#### **1.1.4 Landnutzung**

Die dominierende Landnutzung im Spreewaldgebiet ist die Landwirtschaft (Abb. 14). Bezogen auf die Biosphärenreservatsfläche nimmt die landwirtschaftliche Nutzfläche fast 60 %, in der Niederung selbst sogar rd. 70 % der Fläche ein. Auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen wird vorwiegend eine extensive Grünlandnutzung betrieben (ca. 2/3 der landwirtschaftlichen Nutzfläche, Abb. 15).

Der Waldanteil beträgt im OSW rd. 15 % und im USW rd. 30 %. Bei den Baumarten handelt es sich vorwiegend um Erlenbruch-/Erlen-Eschen-Wald im OSW und um Mischwälder im USW.

Der deutlich höhere Gewässerflächenanteil im USW ist auf 4 Teichgruppen der Binnenfischerei mit insgesamt rd. 250 ha Wasserfläche zurückzuführen. Im OSW gibt es zwei einzelne Fischteiche und eine Teichgruppe mit insgesamt rd. 135 ha Wasserfläche. Die Fischteiche werden entsprechend ihrer Bewirtschaftung aus der fließenden Welle von Oktober bis April bespannt.

Die Siedlungen liegen vorwiegend am Rand der Niederung auf höher gelegenem Terrain. Lediglich die Streusiedlung Burg und die beiden Wasserstraßendörfer Leipe und Lehde befinden sich im Niederungsgebiet. Die größte wirtschaftliche Bedeutung haben die Städte Lübben und Lübbenau.

Grundlage der in den Modelluntersuchungen genutzten Landnutzungstypen war die Biotoptypenkartierung des Pflege- und Entwicklungsplans für das Biosphärenreservat Spreewald. Von VH 2.7 wurde ein Übersetzungsschlüssel erarbeitet, um den Kartierschlüssel der Biotoptypenkarte in 7 Hauptlandnutzungsklassen zu übertragen. Polygone gleicher Landnutzungsklasse wurden anschließend zusammengefasst. Flächen kleiner 2.500 m<sup>2</sup> wurden eliminiert, in dem sie jeweils der benachbarten Fläche mit der größten gemeinsamen Kantenlänge zugeordnet wurden. Durch diese Aggregierungsschritte konnte die Anzahl der Polygone von 12.325 auf 4.624 reduziert werden.

### **1.1.5 Wasserhaushalt/Wassermanagement**

Der Wasserhaushalt der Spreewaldniederung wird durch das dichte Fließgewässersystem (rd. 5 km/km<sup>2</sup>) bestimmt (Abb. 16). Die Länge der gesamten Fließe umfasst in der Summe mehr als 1.600 km. In den Wasserständen und im Abflussgeschehen werden die Gewässer und damit auch die Grundwasserverhältnisse in den Niederungsflächen von ca. 600 Staubaauwerken reguliert, die in 13 sogenannten Staugürteln bewirtschaftet werden.

Das bestehende, komplexe hydrotechnische System ist schrittweise im Laufe der letzten Jahrhunderte entstanden. Sein Ausbau erfolgte immer entsprechend den jeweiligen nutzungsbedingten Anforderungen (Krausch, 1994). Besonders umfassende Veränderungen am Gewässersystem gab es von 1926 bis 1936 mit dem Ausbau der Spreewaldfließe zur schadlosen Wasserabführung und Verbesserung des Hochwasserschutzes. Aufgrund des danach tiefen Absinkens der Grundwasserstände bei Mittel- und Niedrigwasser wurde 1936 die Schaffung eines Staugürtelsystems beschlossen, welches auch heute noch die Basis für die Wasserbewirtschaftung bildet (LUA, 1996). Nach dem Ausbau des Nord- und Südumfluters in den 1960er und 1970er Jahren zur weiteren Verbesserung der Hochwassersicherheit lag der Schwerpunkt der Wasserbaumaßnahmen und Wasserbewirtschaftung danach auf der Schaffung der Voraussetzungen für die Intensivierung der landwirtschaftlichen Produktion. Hochwassergeschützte Poldergebiete und Schöpfwerke wurden ausgebaut, großflächige landwirtschaftliche Nutzflächen geschaffen. Mit Veränderung der ökonomischen Rahmenbedingungen für die Landwirtschaft nach 1990 änderte sich auch wieder die Wasserbewirtschaftung im UG. Schöpfwerke, die ausschließlich der Produktionsintensivierung dienten, wurden aus Kostengründen stillgelegt, viele der kleinen Staubaauwerke in den kleineren Fließen werden nicht mehr bzw. nur noch mit minimalem Aufwand bedient. In den zentralen Bereichen des Spreewaldes wurden die Zielwasserstände wieder angehoben, sind Flächen inzwischen wieder aus der Nutzung genommen bzw. werden nur noch extensiv genutzt.

Ein wichtiges Instrument bei der Wasserbewirtschaftung sind die Staubeiräte für OSW und USW. Vertreter des LUA Brandenburg, der WBV und alle betroffenen und interessierten Flächen- und Gewässernutzer treffen sich zweimal jährlich, um Grundsätze der zu praktizierenden Wasserbewirtschaftung im Spreewald (Stauziele, Gewässerunterhaltung, Baumaßnahmen) abzustimmen. Die praktische Umsetzung der Wasserbewirtschaftung erfolgt dann vom LUA und den WBV entsprechend ihren Zuständigkeiten.

Eine besondere Bedeutung kommt der Entwicklung des Wasserhaushalts und der Wasserbewirtschaftung im Einzugsgebiet des Spreewaldes zu. Ohne die Zuflüsse aus diesem konnte sich unter den gegebenen klimatischen Verhältnissen kein Feuchtgebiet entwickeln und kann es auch zukünftig nicht erhalten werden. Der Spreewald wird aus den oberhalb gelegenen Einzugsgebieten der Spree (2.535 km<sup>2</sup>), der Malxe (345 km<sup>2</sup>) und mehreren kleineren Teileinzugsgebieten (1.060 km<sup>2</sup> in der Summe) gespeist. Alle diese Teileinzugsgebiete gehören zum Lausitzer Braunkohlerevier, dessen Wasserhaushalt durch die jahrzehnte lange Kohleförderung geprägt ist. Bis 1990 wurde die Sumpfungswassermenge aus den Tagebauen in die Spree bis auf rd. 33 m<sup>3</sup>/s im Jahresmittel gesteigert, um nach der drastischen Reduzierung der Braunkohleförderung bis zum Jahre 2000 bereits auf unter 15 m<sup>3</sup>/s zurückzugehen (Grüne-



wald, 2001). Gleichzeitig wird heute zusätzlich Wasser zur Flutung der Tagebaurestlöcher benötigt. Damit zeigen sich infolge veränderter wirtschaftlicher Rahmenbedingungen bereits jetzt gravierende Auswirkungen auf den Wasserhaushalt des Feuchtgebietes Spreewald, die sich weiter verändern werden. Herrschte bis Anfang der 1990er Jahre ein anthropogen bedingtes Überangebot an Zusatzwasser, an welches sich das Feuchtgebiet und seine Nutzung angepasst hatten, gibt es bereits heute im Spreewald ein Wassermangelproblem in den Sommermonaten. Durch wasserwirtschaftliche Maßnahmen im Feuchtgebiet (Staugürtelbewirtschaftung) und im Einzugsgebiet (Speicherbewirtschaftung, abgestimmte Restlochflutung) wird versucht das Wasserdargebotsproblem zu mildern.

Grundlage der Modellierungsarbeiten waren Karten zum Gewässersystem und der wasserwirtschaftlichen Anlagen des Landesumweltamtes Brandenburg, des Biosphärenreservates Spreewald und des Planungsbüros des GRSP Spreewald. Diese wurden für die Modellierung des Wasserhaushalts im UG auf das Gewässersystem, welches für die Verteilung der Zuflüsse und Ableitung der Wasserbilanzüberschüsse notwendig ist, reduziert (s. a. Abschnitt 3.2 und Abb. 32).

## 1.2 Kennzeichnung der systemrelevanten Wasserhaushaltsparameter

Die hydrologischen und wasserwirtschaftlichen Besonderheiten im Spreewald:

- Grundwassernahe Standortbedingungen mit kleinflächig differenzierten Böden, wechselnden Grundwasserflurabständen aufgrund des heterogenen Reliefs und unterschiedlicher Landnutzung,
- Zuführung und Verteilung von Zusatzwasser aus dem Einzugsgebiet über das Gewässersystem zur Stabilisierung der Graben- und Grundwasserstände in der Niederung,
- Regulierung der Graben- und Grundwasserstände mit Staubauwerken,
- Steuerung der Einzugsgebietszuflüsse über die Speicherbewirtschaftung im Einzugsgebiet in Abstimmung mit anderen Wassernutzern

erfordern eine differenzierte Einbeziehung hydrologischer Prozesse des Flächenwasserhaushalts und der Wasserbewirtschaftung im Niederungsgebiet sowie der Abflussbildung und Wasserbewirtschaftung im Einzugsgebiet in die Modelluntersuchungen.

Neben dem **Niederschlag** spielt die **reale Verdunstung** auf grundwassernahen Standorten eine entscheidende Rolle. Sie wird maßgeblich vom Verdunstungsanspruch der Atmosphäre, widergespiegelt durch die **potentielle Verdunstung**, dem **Grundwasserflurabstand**, der **Landnutzung** und dem **Boden** beeinflusst. Eine besondere Bedeutung kommt dem Grundwasserflurabstand zu. Wenige Dezimeter Differenz im Grundwasserflurabstand sind für die Pflanzen entscheidend für die Wassernachlieferung aus dem Grundwasser und führen bei gleicher Landnutzung und Bodenart zu Differenzen in der realen Verdunstung im Bereich von 200 mm/a und mehr. Diese Differenzen im Grundwasserflurabstand werden innerhalb der Niederungsflächen bereits aufgrund des heterogenen Reliefs erreicht.

Die **Grundwasserstände** werden von den Wasserständen in den Fließgewässern bestimmt, die über Staubauwerke reguliert werden. Durch das gesamte hydrotechnische System, bestehend aus Fließgewässern mit Stauanlagen für die wechselseitige Grundwasserregulierung, kann die Niederung in **Staubereiche** unterteilt werden. Dabei ist unter einem Staubereich die kleinste in ihrem Grundwasserstand regulierbare Einheit zu verstehen, deren Grundwasserstand relativ unabhängig von benachbarten Staubereichen gesteuert werden kann. Selbstverständlich sind Ober-/Untertagebeziehungen zu beachten und sind auch den Differenzen (Staufstufen) zwischen benachbarten Staubereichen Grenzen gesetzt. Im zentralen Bereich des Spreewaldes sind die größeren Stauanlagen zu Staugürteln zusammengefasst und werden mit einheitlichen **Stauzielen** bewirtschaftet. Dieses führt zu einer kaskadenförmigen Abstufung der Wasserstände in Gefällrichtung. In der praktischen Wasserbewirtschaftung gibt es Zielwasserstände differenziert nach Winter- und Sommerstauziel. Nur in besonderen Situationen wird hiervon abgewichen, ansonsten wird der Regulierungsaufwand auf das minimal Notwendige beschränkt.

Die Grundwasserstände in den Flächen liegen im Winterhalbjahr, der Zeit mit positiver klimatischer Wasserbilanz, geringfügig über den Grabenwasserständen und die Flächen entwässern. Im Sommerhalbjahr bei negativer klimatischer Wasserbilanz sinken die Flächenwasserstände unter die Grabenwasserstände ab und Wasser infiltriert in die Flächen. Eigene Messungen im zentralen Bereich des OSW bestätigen die enge Verbindung von Graben- und Grundwasserständen sowie die Zulässigkeit einer vereinfachenden Annahme horizontaler Grundwasserstände zwischen den Gräben. Nur an wenigen Tagen der zweijährigen Messdauer betrug die Wasserstandsdifferenz zwischen Graben und Flächenmitte in 150 m Entfernung mehr als 20 cm (Abb. 17). Die Differenz zwischen Graben- und Grundwasserstand stellt sich unabhängig vom Wasserregime (Ent- oder Bewässerung) auf den ersten 5 bis 10 m Entfernung vom Graben ein und bleibt dann bis in Flächenmitte (150 m) nahezu konstant (Abb. 18). Die Heterogenität der Geländeoberfläche führt bei der Berechnung der Grundwasserflurabstände zu größeren Schwankungen im Grundwasserflurabstand als die Abweichungen der Grundwasseroberfläche von einer Horizontalen innerhalb eines Staubereiches. Der von den gegenwärtig nutzbaren DGM erfassbaren Heterogenität und Genauigkeit der Geländeoberfläche sind Grenzen gesetzt, die gegenüber der vereinfachenden Annahme einer horizontalen Grundwasseroberfläche innerhalb eines Staubereiches den größeren Kompromiss bei der Berechnung von Grundwasserflurabständen darstellen.

Die **Zuflüsse** zum UG kommen vorwiegend über Oberflächengewässer aus den oberhalb liegenden Teileinzugsgebieten in die Niederung und werden dann über das verzweigte Gewässersystem im Spreewald verteilt. Das Direkteinzugsgebiet des Spreewaldes, aus dem auch ein Grundwasserzustrom in die Niederung fließt, ist relativ klein (Abb. 3). Im Vergleich zum Einzugsgebiet der zufließenden Oberflächengewässer nimmt es mit rd. 390 km<sup>2</sup> nur rd. 10 % des Gesamteinzugsgebietes ein. Teilweise fließt der Direktzufluss auch in kleineren Gräben in die Niederung, hat damit direkten Anschluss an das Gewässersystem und verringert den direkten Grundwasserzufluss weiter. Der reine Grundwasserzufluss versorgt vorzugsweise die am Rande der Niederung gelegenen Bereiche, die ihrerseits an das Gewässernetz angeschlos-

sen sind, so dass der Abfluss von diesen Randbereichen dann in jedem Fall über Oberflächengewässer erfolgt und anderen Staubebenen u. U. als Zufluss dienen kann.

Für den **Abfluss** aus dem Spreewald sind ausschließlich die Spree, der Randkanal, der Dahme-Umflut-Kanal und die Pretschener Spree relevant. Der Grundwasserabstrom ist vernachlässigbar. Abb. 19 zeigt das regionale Grundwasserregime an den Rändern des Spreewaldes. Danach verläuft die Grundwasserströmungsrichtung bis auf die schmale Öffnung entlang der Spree in Richtung Norden (ca. 11 km) immer zum Spreewald hin gerichtet. Auch in dieser schmalen Öffnung nach Norden gibt es wieder Gewässer, die das Wasser aufnehmen, den größeren Fließgewässern zuführen und dann über die 4 genannten Abflüsse abführen.

Der **Flächenspeicher** innerhalb der Niederung ist von Bedeutung, da es sowohl durch die Wasserbewirtschaftung mit Winter- und Sommerstauzielen zu einer gezielten Auffüllung und Entleerung des Speicherinhaltes kommt und auch bei nicht ausreichenden Niederschlägen und Zuflüssen die Flächenspeicher durch die Verdunstung ausgeschöpft werden. Dieser innerjährige Gang des Speicherinhaltes spiegelt das Retentionsvermögen der Niederung wider und wirkt auf den innerjährigen Gang der Grundwasserstände in der Niederung und den Abfluss aus dem Gebiet.

## **2 Modellkonzept ArcGRM Spreewald und Schnittstellen zu anderen Vorhaben und –projekten in GLOWA-Elbe**

### **2.1 Wasserhaushalt stauregulierter Niederungsgebiete**

#### **2.1.1 Kenntnisstand**

Der internationale Kenntnisstand spiegelt die Vielfalt der weltweit vorkommenden Standortbedingungen wider, wobei die durchgeführte Analyse auf Ergebnisse aus den gemäßigten Klimazonen beschränkt wurde. Die Spanne der angewendeten Untersuchungs- und Modellierungsmethoden ist trotzdem sehr breit. In den meisten Beiträgen wird die Bedeutung des Wasserhaushalts als Voraussetzung für die angepasste Ökologie und Landnutzung in den Feuchtgebieten hervorgehoben und die Sensibilität gegenüber Veränderungen im Wasserhaushalt mit Folgen für abiotische und biotische Prozesse betont.

Unterschiede im Wasserhaushalt und entsprechend in der Herangehensweise bei der Bearbeitung gibt es zwischen großen und kleinen, naturnahen und genutzten Feuchtgebieten. Die Bedeutung der einzelnen Wasserhaushaltskomponenten kann für den Wasserhaushalt der Gebiete sehr differenziert ausfallen. In Gebieten mit hohen Niederschlagssummen geht die Bedeutung der Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet zurück. Bei geringen Niederschlägen ist die Existenz der Feuchtgebiete von den Zuflüssen aus Einzugsgebieten abhängig, wird deren Bedeutung entsprechend hervorgehoben und in die Untersuchungen einbezogen (Bedford 1996, Dietrich et al. 1996b, 2001, Drexler et al. 1999a, Okruszko & Byczkowski 2000, Sun et al. 1998, Winter et al. 2001).

Eine besondere Bedeutung kommt der Verdunstung in Feuchtgebieten zu, was sich auch in der Vielzahl an Untersuchungen widerspiegelt (Abteu 1996, Bradley 2002, Jacobs et al.

2002, Kadlec 1999, Kellner 2001, Kim & Verma 1996, Pauliukonis & Schneider 2001, Price 1994, Rushton 1996, Sanchez-Carrillo et al. 2001, Souch et al. 1998, Thompson et al. 1999, Winter et al. 2001). Aufgrund der guten Wasserversorgung erreicht die Feuchtgebietsvegetation Verdunstungswerte, die über der freier Wasserflächen liegen kann. Die Ergebnisse in der Literatur zeigen für die verschiedenen Vegetationsformen jedoch auch sehr differenzierte Verdunstungswerte. In vielen Arbeiten wurden Verdunstungswerte für unterschiedliche Arten zunächst direkt auf den zu untersuchenden Standorten ermittelt, um diese Werte dann für Wasserbilanzuntersuchungen zu nutzen. Eine häufig verwendete Meßmethode sind Lysimeteruntersuchungen. Sie sind oftmals artenbezogen (Abtew 1996, Behrendt et al. 1998, Lott & Hunt 2001, Mao et al. 2002, Mundel 1986a, 1986b, Pauliukonis & Schneider 2001). Die Ergebnisse lassen sich aber nur bedingt auf andere Standortbedingungen übertragen. Probleme bereitet auch der Oaseneffekt, wenn sich die Lysimeter nicht direkt im Feuchtgebiet und im zu untersuchenden Bestand befinden. Von Vorteil ist, dass sich genaue Ursache-Wirkungs-Beziehungen zwischen der Verdunstung und einzelnen Standortparametern, wie Grundwasserflurabstand, Boden oder meteorologischen Größen herstellen lassen (Behrendt et al. 1998, Mundel 1986a, 1986b, 1986c, 1986d).

Anders ist es bei den sehr häufig angewendeten mikrometeorologischen Messungen zur Ermittlung der Verdunstung von Feuchtgebietsstandorten (Bidlake 2000, Burba et al. 1999a, Burba et al. 1999b, Campbell & Williamson 1997, Denhartog et al. 1994, Jacobs et al. 2002b, Kellner 2001, Kim & Verma 1996, Lafleur & Roulet 1992, Phersson & Pettersson 1997, Price 1994, Rouse 1998, Souch et al. 1998, Spiexsma et al. 1997, Thompson et al. 1999, Wessel & Rouse 1993). Sie liefern Werte für einen größeren Standort, der jedoch wenig Heterogenität bzgl. Vegetation, Boden und Grundwasserflurabstand aufweisen sollte. Diese Methoden wurden daher auch vorwiegend in großen, weitgehend naturbelassenen Gebieten Nordamerikas angewendet. Die gemessenen Werte werden oftmals ermittelt, um damit Verdunstungsmodelle für den betreffenden Standort zu kalibrieren und zu validieren. Eine Übertragung auf andere Standorte ist jedoch problematisch. Bei den Verdunstungsmodellen wird überwiegend die Penman-Monteith-Beziehung angewendet (Abtew & Obeysekera 1995, Abtew 1996, Bidlake 2000, Bolster & Saiers 2002, Burba et al. 1999a, Burba et al. 1999b, Campbell & Williamson 1997, Jacobs et al. 2002, Kellner 2001, Kim & Verma 1996, Lafleur & Roulet 1992, Mao et al. 2002, Rouse 1998, Wessel & Rouse 1993). Die ermittelten Werte sind zeitlich hoch aufgelöst, räumlich jedoch nicht differenziert, so dass räumliche Heterogenitäten, die für die genutzten und wasserwirtschaftlich regulierten Niederungsgebiete Mitteleuropas typisch sind, mit dieser Methode nicht berücksichtigt werden können. In einigen Arbeiten wurden daher auch SVAT-Modelle zur Ermittlung des Wasserverbrauchs angewendet, um so besser den Einfluss der Standortparameter Vegetation, Boden und Grundwasserflurabstand berücksichtigen zu können (Arnold et al. 2001, Schwärzel 2000, Wessolek et al. 1985, Wessolek 1989).

Neben den unterschiedlichen, zur Anwendung kommenden Verdunstungsansätzen unterscheiden sich die Untersuchungen auch stark in der Berücksichtigung der anderen Wasserhaushaltskomponenten bei der Wasserbilanzierung. Entsprechend den jeweiligen Standortbedingungen können einzelne Komponenten vernachlässigt werden, andere haben für das jeweilige Feuchtgebiet eine so herausragende Bedeutung, dass sie besonders detailliert betrachtet

werden müssen. In vielen Arbeiten wird der Grundwasserzustrom aus dem Einzugsgebiet in die Modellierung einbezogen. Bei den untersuchten Gebieten handelt es überwiegend um kleinere bzw. naturnahe Feuchtgebiete ohne Grabensysteme. Eingesetzt werden Grundwasserströmungsmodelle, wobei häufig zwischen einem regionalen Grundwassersystem auf der Maßstabebene des Einzugsgebietes und einem lokalen Grundwasserregime im Feuchtgebiet unterschieden wird (Almendinger & Leete 1998, Boeye & Verheyen 1992, Devito et al. 1997, Drexler et al. 1999b, Fraser et al. 2001, Gerla & Matheney 1996, Hunt et al. 1996, Hunt et al. 1999, Reeve et al. 2000, Reeve et al. 2001, Wilsnack et al. 2001, Winter 1999, Winter et al. 2001). Die auf lokaler Ebene im Feuchtgebiet erforderliche Differenziertheit ist auf regionaler Ebene hinsichtlich Aufwand und Effektivität nicht begründbar bzw. leistbar.

In vielen Fällen sind die Grundwasserspeisungsgebiete und regionalen Grundwassersysteme wichtig für die Speisung von Seen und Flüssen, die dann wiederum die lokalen Grundwassersysteme in den Feuchtgebieten mit Wasser versorgen (Reeve et al. 2001, Winter 1999). Einige Arbeiten heben die Bedeutung des Gewässersystems für den Wasserhaushalt und die Wasserbilanz von Feuchtgebieten hervor (Arnold et al. 2001, Boeye & Verheyen 1992, Bradley 2002, Ksiazynski et al. 1995, McKillop et al. 1999, Okruszko & Tyszewski 1995, Restrepo et al. 1998, Spijksma et al. 1996, Walton et al. 1996). Diese Arbeiten befassen sich vorwiegend mit genutzten bzw. ehemals genutzten Feuchtgebieten, was im mitteleuropäischen Raum der gegenwärtigen Situation entspricht.

Der Wasserspeicherkomponente kommt in Untersuchungen im Zusammenhang mit der Renaturierung bzw. Schaffung künstlicher Feuchtgebiete besondere Bedeutung zu (Bradley 2002, Kadlec 1999, McKillop et al. 1999, Price & Maloney 1994, Spijksma & Schouwenaars 1997, Spijksma et al. 1996). Eine Ursache hierfür ist, dass in naturnahen Feuchtgebieten geringere Grundwasserstandsschwankungen auftreten, damit sich der Speicherinhalt des Gebietes weniger ändert und so an Bedeutung für die Wasserbilanzierung verliert.

In einigen Untersuchungen kamen SVAT-Modelle zum Einsatz. Aufgrund der Bedeutung der lateralen Wasserbewegungen in Feuchtgebieten, sei es zwischen Gewässer und Grundwasser oder ausschließlich im Grundwasser, sind für den Einsatz von SVAT-Modellen in Feuchtgebieten Grenzen gesetzt. Durch Kombination der SVAT-Modelle z.B. mit Grundwasserströmungsmodellen wird versucht Abhilfe zu schaffen (Bradley & Gilvear 2000, Mansell et al. 2000, Spijksma et al. 1996).

Abflüsse aus Feuchtgebieten in unterhalb gelegene Gebiete spielen bei Untersuchungen zum Wasserhaushalt der Feuchtgebiete selbst kaum eine Rolle. Sie werden als Restgröße betrachtet und dienen oftmals der Kalibrierung und Validierung der Modelle. Lediglich im Zusammenhang mit Untersuchungen zur Rolle von Mooren im Quellbereich von Flüssen und deren Bedeutung für die Abflussretention bei Hochwasser sind sie die Zielgröße der Modellierungen (McKillop et al. 1999).

Wasserbewirtschaftung spielt in naturnahen Feuchtgebieten keine Rolle. Sie ist ausschließlich in den für die Nutzung entwässerten Gebieten von Bedeutung, wobei sie sich in niederschlagsreichen Regionen ausschließlich auf Fragen der Entwässerung, maximal des Wasserrückhalts beschränkt (Boeye & Verheyen 1992). Fragen der Bewässerung von landwirtschaft-

lich genutzten Niederungsgebieten finden sich ausschließlich in den niederschlagsärmeren Regionen Mittel- und Osteuropas (Ksiazynski et al. 1995, Okruszko & Tyszewski 1995, Quast et al. 1976).

#### Zusammenfassende Wertung:

Die weltweit durchgeführten Untersuchungen zum Wasserhaushalt von Feuchtgebieten zeigen, dass die hydrometeorologischen Größen Niederschlag und Verdunstung für die Wasserbilanz dieser Gebiete die größte Bedeutung haben. Gerade die Verdunstung wird aber durch die Standortparameter Vegetation, Boden, Grundwasserflurabstand maßgeblich beeinflusst. Diesem Umstand wird nicht immer entsprechend Rechnung getragen, was an den konkret vorherrschenden Bedingungen liegen kann. Sind diese Parameter räumlich und zeitlich wenig variabel, was in naturnahen Feuchtgebieten der Fall sein kann, kann für diese Gebiete auch die Abhängigkeit der Verdunstung auf meteorologische Größen beschränkt werden. In den kleinräumigen, hochgradig heterogenen Feuchtgebietsstandorten Deutschlands sollte der Einfluss der wechselnden Standortverhältnisse auf die Verdunstung aber berücksichtigt werden.

In vielen Feuchtgebieten haben die Zuflüsse aus oberhalb gelegenen Einzugsgebieten eine entscheidende Bedeutung für den Wasserhaushalt. Sie nehmen betragsmäßig zwar einen geringeren Anteil an der Wasserbilanz ein als Niederschlag und Verdunstung, sind aber oftmals entscheidend dafür, ob ein Gebiet als Feuchtgebiet angesprochen werden kann. Erst bei entsprechendem Wasserdargebot aus Niederschlag und Zufluss können die Grundwasserstände ganzjährig flurnah bzw. über Gelände gehalten werden und sich eine feuchtgebietstypische Flora und Fauna etablieren. Ob die Zuflüsse über das Grundwasser oder über Oberflächengewässer zugeführt werden ist hierbei sekundär. Grundwasserzuflüsse sind lediglich aufwendiger zu quantifizieren als Oberflächenwasserzuflüsse, für die oftmals Messreihen vorliegen. Die Bedeutung der Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet steigt mit abnehmenden Niederschlägen. Veränderungen, die sich auf den Wasserhaushalt des Einzugsgebietes auswirken, sind häufig auch mit Folgen für das zu versorgende Feuchtgebiet verbunden.

Die Wasserbewegung und -verteilung innerhalb der Feuchtgebiete kann über ein lokales Grundwassersystem, ein Gewässersystem oder als flächenhafte Fließbewegung über der Geländeoberfläche erfolgen. Typisch für genutzte oder ehemals genutzte und daher entwässerte Feuchtgebiete ist die dominierende Rolle des Gewässersystems.

Genutzte Feuchtgebiete sind gegenüber naturnahen Standorten durch größere innerjährliche Grundwasserstandsschwankungen gekennzeichnet. Dieses ist bei der Verdunstungsermittlung zu berücksichtigen und erfordert die Einbeziehung der Speicheränderung in die Wasserbilanzierung.

Methodisch lassen sich einige Schlussfolgerungen für die Vorgehensweise bei der Wasserbilanzierung in Feuchtgebieten ziehen:

- Wenn möglich wird vereinfacht und die für das jeweils zu untersuchende Gebiet unbedeutenden Wasserhaushaltskomponenten werden vernachlässigt.

- Meteorologische Größen (Niederschlag, Verdunstung) werden meistens als räumlich konstant betrachtet.
- Räumlich differenziert werden Grund- und Oberflächenwasser behandelt.
- Innerhalb eines Feuchtgebietes werden Vegetation, Boden, Geländehöhe, Landnutzung als wenig heterogen angesehen.
- Die zeitliche Auflösung reicht von Minuten und Stunden (häufig bei den mikrometeorologischen Ansätzen) bis zu mittleren Jahreswerten (bei planerischen Aufgaben).
- Die Methoden reichen von hochkomplexen Prozessbetrachtungen bis zu einfachen Bilanzansätzen, wobei die Prozessbetrachtungen meistens nur einzelne Prozesse berücksichtigen und die Bilanzansätze versuchen, alle Komponenten der Wasserbilanz abzudecken. Eine komplexe Prozessbetrachtung, die alle Komponenten der Wasserbilanz eines Feuchtgebietes gleichermaßen erfasst, wurde nicht in der Literatur gefunden.
- Die Wasserbewirtschaftung in Feuchtgebieten ist ein spezielles Problem der niederschlagsarmen Regionen Mittel- und Osteuropas. Sie ist in der ehemals intensiven landwirtschaftlichen Nutzung in diesen Gebieten begründet. Hat dort aufgrund der geschaffenen Regulierungssysteme aber Einfluss auf den gesamten Wasserhaushalt des Feuchtgebietes.

## **2.1.2 Modellkonzept ArcGRM Spreewald**

### 2.1.2.1 Basismodell ArcGRM

Das **GroßRaumModell** ArcGRM ist ein Produkt der Fa. WASY (WASY 1999). Es gehört zur Kategorie der Langfristbewirtschaftungsmodelle und dient der Abbildung der hydrologischen Prozesse und der Wasserbewirtschaftung in einem Flussgebiet mit dem Ziel, über Variantenrechnungen eine optimale Wasserbewirtschaftungskonzeption für ein Flussgebiet abzuleiten (SCHRAMM 1995). Als Zeitschritt wird ein Monat verwendet. Das ArcGRM löst das an sich stochastische Problem der Bewirtschaftung eines Flussgebiets über

- eine stochastische Simulation der Eingangsgrößen (Abflüsse, Niederschlag, potentielle Verdunstung) auf der Grundlage einer Monte-Carlo-Simulation,
- eine deterministische Nachbildung der Nutzungsprozesse (Entnahmen und Rückleitungen von Wassernutzern, Überleitungen, usw.),
- eine lagegerechte Bilanzierung von Wasserdargebot und Wasserbedarf unter Einbeziehung von Speichern und
- eine Registrierung interessierender Systemgrößen im Flussgebiet (Defizite bei der Wasserbereitstellung, Speicherabgaben und -füllungen, Abflüsse an ausgewählten Profilen usw.).

Wird die Simulation oft genug wiederholt, wofür eine Vielzahl von Realisierungen der Dargebotsreihen bereitgestellt wird, nähern sich die sich aus der Registrierung ergebenden Häu-

figkeitsverteilungen den gesuchten Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Systemgrößen. Aus ihnen ist dann eine Einschätzung der Effektivität einer gewählten Bewirtschaftungskonzeption möglich.

Im ArcGRM wird das Gewässernetz eines Flussgebietes schematisiert durch Fließgewässer und Bilanzprofile abgebildet (Abb. 20). Das Einzugsgebiet wird in Simulationsteilgebiete unterteilt, deren Abflüsse im Form langer, stochastisch generierter Reihen (Monte-Carlo-Simulation) als Eigendargebot Bilanzprofilen zugeordnet werden. Wassernutzer können an den Bilanzprofilen Wasser entnehmen oder einleiten. Wasserwirtschaftliche Steuerungselemente wie Wasserspeicher (Talsperren, Seen) oder vorzugebende Mindestabflüsse an Bilanzprofilen werden berücksichtigt (WASY 1999).

Das ArcGRM bietet somit die Möglichkeit die Abflüsse und die Wasserbewirtschaftung im Einzugsgebiet eines Feuchtgebietes zu simulieren und die Zuflüsse zu einem Feuchtgebiet bereitzustellen. Es ist standardmäßig nicht in der Lage den Wasserbedarf eines Feuchtgebietes in Abhängigkeit der vorherrschenden Standortverhältnisse, die Wasserverteilung der Zuflüsse oder die Entwicklung der Grundwasserstände im Gebiet zu berechnen. ArcGRM bietet über die „dynamischen Elemente“ aber die Möglichkeit individuelle Algorithmen im Modell abzuarbeiten oder Module zu integrieren, so dass einfache Sub-Modelle auf diese Weise integriert werden können.

#### 2.1.2.2 Basismodell WABI

Das Wasserbilanzmodell WABI wurde vom ZALF Müncheberg, Institut für Landschaftswasserhaushalt, im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes „Ökosystemmanagement für Niedermoore (ÖKOSYN)“ für die Ermittlung der Wasserbilanz grundwasserregulierter Niedermoorstandorte mit Wiedervernässung im nordostdeutschen Tiefland entwickelt (Dietrich et al. 1996a, 1996b). Aufgrund der Besonderheiten des Wasserhaushalts der großen Niedermoorgebiete Nordostdeutschlands konnten eine Reihe von Annahmen getroffen werden, die zur Vereinfachung der zugrunde liegenden Wasserhaushaltsgleichung führten. Aus Untersuchungen zur Grundwasserregulierung in den 1970er und 1980er Jahren ist bekannt:

- Der Wasserhaushalt der großen, grundwasserregulierten Niedermoorgebiete Nordostdeutschlands wird maßgeblich durch das Steuerungsregime der hydrotechnischen Anlagen bestimmt. Eine Betrachtung des Wasserhaushalts ohne Berücksichtigung dieses anthropogenen Eingriffes entspricht nicht den vorherrschenden Bedingungen.
- Der Zufluss von Bewässerungswasser aus dem Einzugsgebiet zum Niedermoorgebiet erfolgt über die Oberflächengewässer.
- Die Aufteilung des Wassers im Niedermoorgebiet wird durch das Regulierungssystem (Gräben, Stauanlagen, Dränsysteme) realisiert.
- Der Wasseraustausch (Be- und Entwässerung) erfolgt vorwiegend zwischen Grabensystem und angrenzenden Niedermoorflächen (Staubereiche).



- Bei einem Zeitintervall von einem Monat kann das gesamte System stationär betrachtet und von einem horizontalen Grundwasserstand in den Staubereichen ausgegangen werden.

WABI arbeitet rasterbasiert, der Zeitschritt ist ein Monat. Es basiert auf ARC/GRID, dem rasterorientierten arbeitenden Tool des GIS ARC/INFO. Als Grundlagen benötigt es ein digitales Geländemodell (DGM), eine Einteilung des Untersuchungsgebietes in Staubereiche, Vorgaben für Stauziele für jeden Staubereich und Monat, Monatssummen für Niederschlag und nutzbaren Gesamtzufluss. Der nutzbare Gesamtzufluss wird dabei nicht in eine ober- und unterirdische Komponente aufgeteilt. Die Einteilung in Staubereiche ergibt sich in der Regel aus dem vorhandenen Regulierungssystem. Bei einem Zeitintervall von einem Monat wird das gesamte System stationär betrachtet. Für jeden Staubereich gilt die vereinfachende Annahme, dass die Grundwasseroberfläche horizontal eben ist. Innerhalb jedes Staubereiches wird auf der Basis von Rasterelementen der Größe des DGM gerechnet. Die Bilanzgrößen werden dann jeweils am Ende des Zeitschrittes zu einer Staubereichssumme zusammengefasst.

Im Modell wird zunächst die Verdunstung jedes Staubereichs ermittelt. Dabei wird für jedes Rasterelement aus dem DGM ( $h_{NN}$ ) und dem horizontalen Grundwasserstand ( $h_{GWA}$ ) der Grundwasserflurabstand berechnet (Abb. 21). Entsprechend der Grundwasserflurabstandsklasse wird eine Monatssumme der Verdunstung aus einer Datenbank zugeordnet. Die Werte in der Datenbank gehen auf Lysimeteruntersuchungen von Grasland auf grundwassernahen Standorten von MUNDEL (1982b) und Ergebnisse von DYCK und PESCHKE (1983) zurück. Um auch Wiedervernässungsszenarien berechnen zu können, muss auch die Verdunstung für Wasserstände über Flur bestimmt werden können. Gerade für niedermoorartige Vegetationsformen gibt es nur wenige Angaben zur Verdunstung (EGGELSMANN 1990, BEHRENDT et al. 1998, DANNOWSKI et al. 1999). Es wurden daher die Werte für freie Wasserflächen flacher Binnenseen in verdunstungsstarken Jahren verwendet (BAUER und KARBAUM 1969). Das Mittel der Verdunstung aller Rasterelemente eines Staubereiches ergibt seine Gesamtverdunstung. Zusammen mit Niederschlag und Zufluss wird mit der Verdunstung eine Wasserbilanz berechnet. Ob sich daraus eine Speicheränderung ergibt, hängt u. a. wieder von der Stauregulierung ab. Ein Defizit führt zur Ausschöpfung des Speichervorrates des jeweiligen Staubereiches, ein Wasserbilanzüberschuss erhöht den Speichervorrat (Speicheränderung). Abfluss entsteht, wenn ein Wasserbilanzüberschuss nicht zu einer Vergrößerung des Speicherinhalts genutzt werden kann. Das ist der Fall, wenn die durch die Staubauwerke vorgegebene Stauhöhe bereits erreicht ist und keine weitere Erhöhung der Stauhöhe durch eine Regulierungshandlung erfolgt. War der Speichervorrat des Staubereiches durch ein vorhergegangenes Wasserbilanzdefizit nicht voll ausgeschöpft oder werden die Zielgrundwasserstände erhöht, wird der Flächenwasserspeicher zunächst bis zur Stauhöhe aufgefüllt und nur der darüber hinausgehende Überschuss bildet den Abfluss. Der sich aufgrund der Wasserbilanz und der Stauhöhenvorgabe ergebende Grundwasserstand wird für jeden Staubereich iterativ berechnet. Der Bodenwasserspeicher wird mit einer konstanten auffüllbaren/ entwässerbaren Porosität von 10 % betrachtet. Grundwasserstand und Abfluss werden für das Ende jeden Zeitschrittes in einer Datenbank abgelegt. Der Grundwasserstand bildet dann wieder den Startwert für die Berechnungen des nächsten Zeitschrittes.

Das WABI-Modell in seiner ursprünglichen Konzeption ermöglichte die Berechnung der Flächenwasserbilanzen von Staubereichen mit Graslandnutzung auf Niedermoor. Für andere Bodenarten und Landnutzungstypen, die im Untersuchungsgebiet Spreewald in unterschiedlichster Kombination auftreten, mussten das Modell und die Verdunstungsdatenbank erweitert werden. Gleiches galt für die Flächenspeicherberechnung, die variabel in Abhängigkeit von Bodenart und Grundwasserflurabstand erfolgen muss.

Die Aufteilung der Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet erfolgte in der GIS-Version manuell, unabhängig vom Bedarf der einzelnen Staubereiche bzw. durch Variantenrechnung muss sich dem tatsächlichen Zustand genähert werden. Durch Integration in ein ArcGRM-Modell kann die Aufteilung der Zuflüsse im Gewässernetz und die Versorgung der Staubereiche mit Wasser aus dem Einzugsgebiet vom ArcGRM übernommen werden.

### 2.1.2.3 Modellanwendungen ArcGRM-WABI

Die Integration des WABI-Modellansatzes in ein GRM- bzw. ArcGRM-Modell wurde bereits für die Niedermoorgebiete Rhinluch (WASY 1997a, Dietrich et al. 1999, Schramm et al. 2001) und Ohre-Drömling (WASY 1997b, Finke et al. 2002) erfolgreich praktiziert. Grundlage der Modellkopplung von ArcGRM und WABI ist, dass jeder Staubereich im Sinne eines WABI-Modells als ein Wassernutzer im ArcGRM betrachtet wird. Damit wird er lagegerecht im Gewässersystem angeordnet und kann Wasser aus diesem entnehmen bzw. in das Gewässer einspeisen. Jetzt musste noch organisiert werden, dass der Wasserbedarf jedes Staubereichs in Abhängigkeit meteorologischer Parameter (Niederschlag, potentielle Verdunstung) und der vorherrschenden Grundwasserflurabstände für jeden Monat ermittelt werden kann und die sich aus der Wasserbilanz ergebende Speicheränderung mit den vorgegebenen Stauzielen u. U. zu einer Grundwasserstandsänderung führt. Die Flächendaten der Staubereiche wurden hierfür in einfache Funktionen überführt, damit sie den punktförmig abgebildeten Wassernutzern im ArcGRM zugeordnet werden konnten. Dabei war es von Vorteil, dass beide Gebiete (Rhinluch, Drömling) relativ homogen sind. So wurden beide Gebiete als reine Niedermoorgebiete mit Graslandnutzung behandelt und die Geländehöhe als einzige in der Fläche variable Größe berücksichtigt. Für die Wasserbilanzierung in einem Staubereich ist nur die Häufigkeitsverteilung der Geländehöhen unabhängig von ihrer Lage von Interesse, wenn Bodenart und Landnutzung als räumlich konstant betrachtet werden. Nach Auswertung der Geländehöhen jedes Staubereichs wurde die Geländehöhe jeweils durch eine Normalverteilung angepasst. Damit können die Anteile der Grundwasserflurabstandsklassen für die Verdunstungsberechnung einfach bestimmt und die Wasserbilanzen der Staubereiche berechnet werden. Die Speicheränderung der Staubereiche lässt sich bei konstant angenommenem entwässerbaren/auffüllbaren Porenvolumen ebenfalls einfach bestimmen.

Das Untersuchungsgebiet Spreewald des GLOWA-Elbe-Projektes zeichnet sich gegenüber den Niedermoorgebieten Rhinluch und Drömling durch eine große Heterogenität der Böden und Nutzung aus. Das Gewässersystem ist in seiner Komplexität nicht mit den o. g. Gebieten vergleichbar. Um den Wasserhaushalt des Spreewaldes mit der beschriebenen Modellkombination abbilden zu können, waren daher eine Reihe von Modellerweiterungen notwendig.

### 2.1.3 Weiterentwicklungen des Modellkonzepts

#### 2.1.3.1 Abbildung flächenbezogener Informationen auf Punktdaten

Die bisher mit der Modellkombination ArcGRM-WABI untersuchten Niederungsgebiete Rhinluch und Drömling wurden in Nutzung, Boden und entwässerbarem/auffüllbarem Porenvolumen als homogen betrachtet. Die Geländehöhe war innerhalb eines Staubereiches die einzige heterogene Größe, was durch eine angepasste Normalverteilungsfunktion vereinfacht wiedergegeben wurde. Alle den Staubereich charakterisierenden Parameter konnten damit relativ einfach punktbezogen betrachtet werden.

Im neu entwickelten Konzept wurden alle flächenbezogenen Informationen in Datenbanken abgelegt. Sie betreffen für jeden Staubereich:

- den Flächenwasserspeicherinhalt in Abhängigkeit des Grundwasserstandes,
- die vorkommenden Kombinationen aus Bodenartenhauptgruppe und Landnutzungstyp mit ihrer Geländehöhenverteilung
- und die Stauziele für jeden Monat
- sowie unabhängig vom Staubereich die Verdunstung jedes vorkommenden Landnutzungstyps als Funktion des Grundwasserflurabstandes und der Bodenartenhauptgruppe.

Die Berechnung der Datenbanken zum Flächenspeicherinhalt und zur Geländehöhenverteilung der Landnutzungs-/Boden-Kombinationen jedes Staubereichs erfolgte im GIS. Die Datenbanken mit den berechneten Häufigkeitsverteilungen der einzelnen Parameter werden dann vom ArcGRM genutzt.

#### 2.1.3.2 Flächenwasserspeicher

Bei den Modellanwendungen auf Niedermoorstandorten wurde beim Flächenwasserspeicher nur zwischen gesättigten, ungesättigten und überstauten Rasterelementen unterschieden. Das entwässerbare/auffüllbare Porenvolumen wurde unabhängig vom Grundwasserflurabstand vereinfacht mit konstant 10 Vol% abgebildet. Dieser Wert ist substratabhängig und wurde für Niedermoor torfe im Bereich von ca. 60 bis 80 cm Grundwasserflurabstand ermittelt. Untersuchungen von Schindler (1983) zeigen, dass sowohl die Bodenart aufgrund des unterschiedlichen Wasserretentionsvermögens als auch der Grundwasserflurabstand aufgrund der unterschiedlichen Mächtigkeit der entwässerten bzw. aufgefüllten Schicht das entwässerbare/auffüllbare Porenvolumen bestimmen.

Im statischen Gleichgewicht kann das entwässerbare/auffüllbare Porenvolumen eines Bodenprofils aus seiner pF-Funktion berechnet werden. Dieses erfolgte für die im Spreewald vorkommenden Bodenarten im VH 2.6 (TUB), so dass für jede Bodenart eine Speicherkennlinie bereitgestellt wurde (Abb. 22).

Die im Vektorformat vorliegende Karte der Bodenartenhauptgruppen wurde in eine Rasterkarte mit 25 m x 25 m Rastergröße passgerecht zum DGM überführt. Aus der Karte der BOGLOWA-Elbe: Vorhaben 2.3: Wasserhaushalt/Wassermanagement Spreewald

denartenhauptgruppen, der Speicherkennlinie für jede Bodenart und dem DGM wurde im GIS für jeden Staubereich eine Speicherkennlinie berechnet (Abb. 23). Der Nullpunkt für die Speicherberechnung wurde jeweils auf 3 m unter dem tiefsten Geländepunkt des Staubereichs gelegt und ein Grundwasserschwankungsbereich von insgesamt 4 m mit der Speicherkennlinie abgedeckt.

#### 2.1.3.3 Geländehöhe-Boden-Landnutzung

Die bisherigen Anwendungen der Modellkombination ArcGRM-WABI im Rhinluch und Drömling zeigten, dass die Geländehöhe in einigen Staubereichen nur ungenügend genau durch eine Normalverteilung abgebildet wird. Sollen weiterhin die unterschiedlichen Kombinationen aus Landnutzungs-kategorie und Bodenartenhauptgruppe als Einflussparameter für die Verdunstung berücksichtigt werden, kann für die Verdunstungsberechnung nicht mehr wie bisher der Staubereich die kleinste homogene Einheit in WABI sein, sondern eine Elementarfläche als Kombination aus Landnutzungs-kategorie und Bodenartenhauptgruppe. Ein Staubereich setzt sich aus mehreren Elementarflächen zusammen. Für jede Elementarfläche eines Staubereichs ist die Häufigkeitsverteilung seiner Geländehöhe mit eindeutigen Bezug zu Staubereich, Landnutzungstyp und Bodenart in einer Datenbank abzulegen.

Die Erstellung der erforderlichen Datenbanken erfolgt im GIS. Zunächst werden Landnutzungstyp, Bodenartenhauptgruppe und Staubereiche miteinander verschnitten. Innerhalb jedes Staubereichs werden die Elementarflächen zu Flächen > 2,5 ha aggregiert. Dabei sind Flächen < 2,5 ha ihren benachbarten Flächen innerhalb des Staubereichs zugeschlagen, so dass die Staubereichsgrenzen unverändert bleiben. Anschließend wird die erzeugte Vektorkarte in das Rasterformat von 25 m x 25 m passgenau zum DGM überführt und das DGM staubereichs-weise sowie elementarflächenbezogen in dm-Schritten ausgewertet (Abb. 24). Da die Verdunstung der Wasserflächen und bebauter Flächen unabhängig von Grundwasserflurabstand und Bodenart betrachtet wird, ist die Geländehöhenverteilung dieser Elementarflächen nicht für die Modellrechnung notwendig, lediglich ihr Flächenanteil am Staubereich wird in der Datenbank mit abgelegt.

#### 2.1.3.4 Verdunstung

Die Verdunstungsdaten der bisherigen Anwendungen mit Grasland auf Niedermoorstandorten basierten auf Lysimeterergebnissen (Mundel 1982b). Die Grundwasserflurabstandsklassen betragen 0,5 m für den Bereich von 0 bis 1,5 m unter Flur. Mit Einführung der Elementarflächen aus Landnutzungs-/Boden-Kombinationen konnten nicht mehr alle im UG möglichen Kombinationen mit Lysimeterdaten abgedeckt werden. Die Grunddaten für die Verdunstung als Funktion von Landnutzungs-/Boden-Kombination und Grundwasserflurabstand wurden daher mit dem SVAT-Modell BOWAS (Wessolek et al. 1987) berechnet. Dieses hat u. a. den Vorteil, dass die benötigten Grunddaten bei Bedarf auch für andere Standorte bereitgestellt werden könnten, wenn die entsprechenden meteorologischen und bodenhydraulischen Parameter vorliegen.

Die Berechnungen wurden im VH 2.6 durchgeführt. Die Grundwasserflurabstandsklassen wurden dabei auf 0,3 m für den Bereich von 0 bis 1,5 m unter Flur und 0,5 m Klassenbreite von 1,5 bis 2,0 m unter Flur geändert. Gerechnet wurde auf Tageswertbasis mit einer Klimareihe für mittlere Verhältnisse. Anschließend wurden die Tageswerte zu Monatssummen zusammengefasst und als Datenbank bereitgestellt.

Das ursprüngliche WABI-Konzept arbeitete ausschließlich mit langjährigen Mittelwerten. Bereits bei den Anwendungen im GRM Rhin und im GRM Drömling wurden die mittleren Verdunstungswerte im Modell an die Schwankungen der potentiellen Verdunstung infolge der generierten Realisierungen angepasst. Dieses erfolgte immer proportional dem Verhältnis von potentieller Verdunstung in der aktuellen Realisierung zum Mittelwert der potentiellen Verdunstung des entsprechenden Monats. Dieses Prinzip wird auch im ArcGRM Spreewald angewendet. Für die Berechnung der mittleren potentiellen Verdunstung wird die in den SVAT-Modellierungen verwendete Klimareihe verwendet.

#### 2.1.3.5 Gewässerverzweigungen

Im Spreewald teilen sich die Zuflüsse aus den Teileinzugsgebieten in der Niederung auf viele Fließgewässer auf und fließen zum Ausgang des Gebietes hin wieder zusammen. Die Aufteilung der Zuflüsse an diesen Gewässerverzweigungen wird durch die Steuerung der Wehranlagen reguliert. Maßgebend für die Steuerung sind die Höhe der Zuflüsse und der Wasserbedarf der unterhalb liegenden, zu versorgenden Flächen und Fließe. Bei hohen Zuflüssen sind Aspekte des Hochwasserschutzes zu beachten, in Niedrigwasserperioden kann es unterschiedliche Prioritäten in der Versorgung der Teilgebiete geben. Es waren daher Regeln zu formulieren, die diese Aspekte entsprechend berücksichtigen und in das Wasserhaushaltsmodell zu integrieren.

Im Strangschema eines ArcGRM-Modells wird grundsätzlich von einer Baumstruktur des Gewässersystems ausgegangen, Gewässerverzweigungen werden durch so genannte Überleitungsnutzer abgebildet. Für diese sind die Abgabemengen festgelegt. Da die Zuflussaufteilung im Spreewaldmodell regelbasiert erfolgen sollte, waren einfache Überleitungsnutzer nicht ausreichend flexibel. Es wurden daher für jeden Verzweigungsknoten separate Regeln aufgestellt und jeweils über ein dynamisches Element in das Modell integriert.

Grundlagen für die Verteilungsregeln waren die Studie zur Staugürtelschließung Spreewald (LUA 2002) und Expertenwissen von Wasserwirtschaftlern aus der Region. Für die Hauptfließgewässer gab es aus der Erfahrung der praktizierten Wasserbewirtschaftung heraus abgeleitete Zieldurchflüsse, die in Kartenunterlagen der Studie zur Staugürtelschließung Spreewald (LUA 2002) für unterschiedliche hydrologische Situationen (Hochwasser bis Niedrigwasser) dargestellt waren. Die Verteilungsknoten, für die hieraus Werte übernommen wurden, werden im weiteren als Prowa-Verteilungsknoten bezeichnet, die anderen als Nicht-Prowa-Verteilungsknoten.

### 2.1.3.6 Randzuflüsse

Die Zuflüsse aus dem Direkteinzugsgebiet des Spreewaldes versorgen vorzugsweise die am Rande der Niederung liegenden Staubereiche. Sie gelangen über den Grundwasserzuström oder über kleine Gräben, welche bereits außerhalb der Niederung Grundwasser aufnehmen, in die Niederung. Die Direkteinzugsgebiete des OSW und USW sind daher in weitere Teileinzugsgebiete zu unterteilen und den am Rande liegenden Staubereichen und kleinen Gewässern zuzuordnen. Diese werden im weiteren als Direkteinzugsgebiete der Staubereiche bezeichnet.

Das auf der Basis der Klimaszenarien im VH 2.2 (BTU Cottbus) berechnete Dargebot liegt für das Spreewaldmodell lediglich als Gesamtsumme für die Direkteinzugsgebiete des OSW und USW vor. Eine direkte Bestimmung für die Direkteinzugsgebiete der Staubereiche ist nicht möglich. Das Gesamtdargebot der Direkteinzugsgebiete wird daher proportional der Flächenanteile der Direkteinzugsgebiete der Staubereiche am Direkteinzugsgebiet aufgeteilt. Im Modell erfolgt dieses und die Zuordnung zu den Staubereichen über ein dynamisches Element.

## 2.2 Einbindung in Wasserhaushaltsmodellierung Gesamtspreee/Elbe

Wie in Abschnitt 1.2 bereits dargestellt wurde, ist der Wasserhaushalt des Spreewaldes eng mit dem Wasserhaushalt seines Einzugsgebietes verbunden. Veränderungen in oberhalb gelegenen Teileinzugsgebieten beeinflussen das Wasserdargebot des UG. Veränderungen im Wasserhaushalt des Spreewaldes wirken auf die Abflüsse in unterhalb gelegene Gebiete, in diesem Fall auf die Zuflüsse der Spree zum Ballungsraum Berlin.

Für das gesamte Einzugsgebiet der Spree wurde die Wasserhaushaltsmodellierung im GLOWA-Elbe-Projekt mit dem Wasserhaushaltsmodell ArcGRM GLOWA, basierend auf dem Wasserbewirtschaftungsmodell der Bundesländer Sachsen, Brandenburg und Berlin ArcGRM Spree/Schwarze Elster, durchgeführt (VH 2.2, BTU Cottbus). Aus dem ArcGRM GLOWA können die Zuflussreihen zum Spreewald auf Dateien ausgegeben und dann als Eingangsreihen für das Spreewaldmodell ArcGRM Spreewald genutzt werden. Damit besteht eine Möglichkeit, Szenarien einheitlich im Einzugsgebiet der Spree und im Spreewald zu definieren und zu untersuchen.

Eine andere Art der Einbindung des Spreewaldes in den Wasserhaushalt des Spree-Einzugsgebietes ist die direkte Kopplung der beiden Modelle. Sie bietet bessere Untersuchungsmöglichkeiten als die indirekte Kopplung über den Datentransfer. Eine derartige Kopplung ist jedoch sehr rechenzeitaufwendig. Eine Beschreibung beider Formen der Modellkopplung erfolgt im Abschnitt 3.4.

Entsprechend des IMA von GLOWA-Elbe werden einheitliche Szenarien zur Klimaentwicklung und zur sozio-ökonomischen Entwicklung für die Untersuchungen im Einzugsgebiet der Spree und im Niederungsgebiet des Spreewaldes genutzt. Damit werden auch Vergleiche mit anderen Teileinzugsgebieten der Elbe möglich.

## 2.3 Integrationskonzept Teilgebietsprojekt Spreewald

Die Umsetzung des einheitlichen methodischen Herangehens in GLOWA-Elbe spiegelt sich auch im integrativen Modellverbund für die ökologischen, wasserwirtschaftlichen und sozio-ökonomischen Untersuchungen im Spreewaldgebiet wider. Eine Besonderheit stellt hierbei jedoch der gewählte ökosystemare Ansatz dar, der verstärkt die Wechselwirkungen zwischen belebter und unbelebter Umwelt sowie dem menschlichen Wirtschaftsraum zum Ausdruck bringt. Den Entwicklungsrahmen für das TGP Spreewald bilden das Klima, die agrarpolitischen Rahmenbedingungen und die Zuflüsse aus den oberhalb des Spreewaldes liegenden Teileinzugsgebieten (Abb. 25). Die notwendigen Abstimmungen mit den teilgebietsübergreifenden VH erfolgten vorrangig über die AG Szenarien und direkt mit VH 2.2 bezüglich der Integration des ArcGRM Spreewald in das ArcGRM Spree/Schwarze Elster.

Die Variablen der regionalen Handlungsoptionen werden exogen mit den Stakeholdern als Szenarien formuliert. Im Untersuchungsgebiet sind es die unterschiedlichen Landnutzungstypen mit ihren differenzierten Ansprüchen an die Grundwasserstände und unterschiedlichem Wasserverbrauch, so dass ein Einfluss auf den Wasserhaushalt des Gesamtgebietes ausgeht. Ein Beispiel hierfür sind die mit dem GRSP Spreewald verbundenen langfristigen Änderungen in der Landnutzung, wie z. B. Flächenstillegung oder Aufforstung, die zu berücksichtigen sind. Direkt mit der Flächennutzung verbunden sind auch Stauziele und Wasserverteilung im Gebiet. Auf die Bewirtschaftung der Flächen wirken sich weiter Restriktionen und Förderprogramme aus.

Kernstück des integrativen Modellverbunds ist das Wasserbewirtschaftungsmodell ArcGRM Spreewald. Dieses selbst kann direkt oder über Datentransfer mit dem Wasserbewirtschaftungsmodell des Einzugsgebietes ArcGRM GLOWA verbunden werden, so dass hier die direkte Kopplung zum Einzugsgebiet gewährleistet ist. Alle benötigten Klimadaten stehen für beide Modelle einheitlich zur Verfügung.

Direkt im ArcGRM Spreewald implementiert ist das Wasserhaushaltsmodell WABI. Grundlage für die Wasserhaushaltsberechnungen mit WABI ist eine Einteilung des Untersuchungsgebietes in Staubereiche. Sie stellen die kleinste im Grundwasserstand regulierbare Flächeneinheit dar und sind gleichzeitig der einheitliche räumliche Bezug für alle anderen VH im TGP Spreewald. Die von WABI benötigten Angaben zur Verdunstung der unterschiedlichen Vegetationsformen in Abhängigkeit von der Bodenartenhauptgruppe und dem Grundwasserflurabstand werden in einer Datenbank bereitgestellt (s. Abschnitt 2.1.3.4). Die Berechnungen hierfür erfolgten mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell BOWAS im VH 2.6 ebenfalls mit den Klimareihen aus VH 4.2.

Die im ArcGRM Spreewald enthaltenen Regeln der Wasserverteilung und die für die WABI-Berechnung erforderlichen Angaben zu den Stauzielen sind regionale Handlungsoptionen und werden über die Szenarien variiert. Das von den anderen VH im TGP Spreewald weiter genutzte Ergebnis aus den Wasserhaushaltsuntersuchungen sind Aussagen zur Entwicklung der Grundwasserstände in den Staubereichen. Diese werden in einer Datenbank abgelegt, auf die dann andere Teilmodelle des Modellverbunds zugreifen können.

Im VH 2.7 wurde das Vegetationsentwicklungsmodell VEGMOS entwickelt. Es berechnet auf der Basis hydrologischer und nutzungsbezogener Daten, die Zustände der Vegetation für die untersuchten Szenarien im Spreewald. Diese fließen dann wiederum in das Grünlandertragsmodell (GRUENLAND) ein.

Mit MODAM wird ein stark differenziertes, komparativ-statisches Betriebsmodell für die Landnutzung, insbesondere die Landwirtschaft aufgebaut. Als Abbildungsebene dienen einzelne Betriebe (sowohl reale als auch typisierte), welchen jeweils Betriebsflächen zugeordnet sind. Neben der Nutzung der Betriebsflächen kann somit ihre Lage im Raum (Entfernung zur Hofstelle und die konkreten Ertragspotentiale) berücksichtigt werden. Die agrarpolitischen Rahmenbedingungen (insbesondere die Preis und Kostenstruktur) liefert das VH 1.3 (RAUMIS). Um die optimale Wasserverteilung zwischen den Staubereichen und den verschiedenen Nutzungsansprüchen zu ermitteln, ist es notwendig die jeweiligen Nutzungskosten (Opportunitätskosten) der Wasserverwendung nach Staubereichen differenziert zu berechnen. Der Flächenbezug dient somit als Bindeglied zwischen räumlichen hydrologischen Prozessen und den ökonomischen Betriebseinheiten.

Der Einfluss veränderter klimatischer und hydrologischer Bedingungen auf die betriebswirtschaftliche Ebene wird über Ertragsmodelle abgebildet. Grünlandertragspotentiale werden in Abhängigkeit von der Nutzung, der Vegetation und der Grundwasserverläufe modelliert. Aus VEGMOS werden Vegetationseinheiten zu Ertragsgruppen zusammengefasst, welche ähnliche Ertragsniveaus und Futterqualitäten aufweisen. Diese werden aus Expertenschätzungen und Tabellenwerken abgeleitet. Mit dem BOWAS Modell wird dann von dem Ertragspotential der relative Ertrag bei verschiedenen Grundwasserverläufen und klimatischen Bedingungen berechnet. Die Ackererträge werden ebenfalls über eine relative, an das BOWAS Modell gekoppelte Ertragsfunktion dargestellt. Die Walderträge werden mit dem Waldwachstum-Simulationsmodell SILVA (TU München) berechnet.

Voraussetzung für das Funktionieren des gesamten Modellverbundes ist eine einheitliche Datengrundlage. Diese wurde auf drei unterschiedlichen Ebenen geschaffen. Es wird unterschieden zwischen Gewässerstruktur, Landschaftsstruktur und Landnutzungsstruktur. Die Gewässerstruktur ist maßgebend für den Aufbau des ArcGRM Spreewald und die Übergabe der Zuflüsse, die Wasserverteilung im Gebiet und die Abgabe der Abflüsse an die Unterlieger sowie die Einhaltung gewässerökologischer Vorgaben wie z. B. Mindestabflüsse in ausgewählten Gewässern. Die Landschaftsstruktur ist Grundlage für die Berechnungen zum Bodenwasser-, Flächenwasser- und Gebietswasserhaushalt, die Vegetationsentwicklung und die Ertragsmodellierung. Die einheitlichen GIS-Daten zur Geländehöhe, zum Boden und zur Landnutzung werden direkt von den einzelnen Modellen verwendet. Der Datenfluss zwischen den Modellen erfolgt nicht durch direkte Kopplung der Modelle, sondern durch Weitergabe von Modellergebnissen über Datenbanken. Diese werden in den einzelnen VH teilweise bereits verdichtet und bewertet. Eine entscheidende Rolle für alle räumlichen Daten spielen die Staubereiche. Sie übernehmen eine Transferfunktion. Durch eine einheitliche Kodierung der Staubereiche können auch die raumbezogenen Daten in einfachen Datenformaten zwischen den VH übergeben werden, ohne dass der räumliche Bezug verloren geht.



Die Realisierung dieses ökosystemaren Modellansatzes, mit welchem Veränderungen im Landschaftswasserhaushalt, in der Boden- und Vegetationsentwicklung sowie der Landnutzung incl. der Agrarpolitik in Wechselwirkung mit den Möglichkeiten der Wasserbewirtschaftung des Feuchtgebietes abgebildet werden, ist die Voraussetzung für eine Bewertung entsprechend Schritt 4 des ökonomischen und ökologischen Bewertungsverfahrens von GLOWA-Elbe. Durch die enge Zusammenarbeit mit dem Zweckverband GRSP Spreewald konnten Ergebnisse des Modellverbundes bereits unmittelbar in die Planungsvorbereitung des GRSP einfließen.

### **3 Modellaufbau ArcGRM Spreewald**

#### **3.1 Aufteilung des Untersuchungsgebietes in Staubereiche**

##### **3.1.1 Ausgrenzung der Niederung – Festlegung des Modellgebietes**

Im TGP Spreewald wurde bei Untersuchungsbeginn die Fläche des Biosphärenreservats als Untersuchungsraum festgelegt. Für dieses Gebiet wurden zunächst alle erforderlichen Datengrundlagen beschaffen, der Standort charakterisiert und die hydrologische Gebietsanalyse durchgeführt. Das Biosphärenreservat Spreewald reicht in seiner Ausdehnung jedoch über das eigentliche Feuchtgebiet des Spreewaldes hinaus, die Auswirkungen des globalen Wandels waren laut Aufgabenstellung auf den Wasserhaushalt eines Feuchtgebietes zu untersuchen und auch das angewendete Wasserhaushaltsmodell WABI ist nur auf grundwassernahen Standorten anwendbar. Das Modellgebiet für das aufzubauende ArcGRM Spreewald wurde daher auf die eigentliche Niederung des Spreewaldes eingegrenzt.

Bei der Eingrenzung der Niederung wurden berücksichtigt:

- die Geländehöhen und Gefälleverhältnisse,
- das vorhandene Gewässersystem,
- die Bodenarten nach MMK und Bodenkarte des Biosphärenreservats,
- die Landnutzung.

Insbesondere die Geländehöhen und Gefälleverhältnisse an den Rändern zeigten eine gute Übereinstimmung mit den Bodenarten. Niederungstypische Bodenarten und Standorttypen stimmten mit niedrigen Geländehöhen überein. Bei Geländeanstieg wechselten die ausgewiesenen Böden zu sandigeren Substraten, woraus auf weniger Grundwassereinfluss geschlossen werden kann, so dass hier die Grenze der Niederung festgelegt wurde. Abbildung 26 zeigt das Modellgebiet mit dem Gewässersystem und den Geländehöhen hinterlegt. Aufgrund der geringen Gefälleverhältnisse und des dichten Gewässersystems sind für dieses Gebiet die Voraussetzungen für die Anwendung des WABI-Modells gegeben und das Modellsystem ArcGRM Spreewald kann hierfür aufgebaut werden.

### 3.1.2 Festlegung der Staubereichsgrenzen

Der Staubereich ist die kleinste im Grundwasserstand regulierbare Einheit eines stauregulierten Niederungsgebietes. Er ergibt sich i. d. R. aus dem Gewässersystem und den Stauanlagen sowie evtl. vorhandenen Dränsystemen und Deichanlagen. In das lokale Grundwasserregime eingreifende Bauwerke, wie z. B. Schüttungen von Bahndämme oder Strassen und Wegen, werden in die Betrachtung einbezogen. Die Unterteilung der Niederung des UG Spreewald in Staubereiche ist Voraussetzung für den Modellaufbau des ArcGRM Spreewald und die Berechnung der Flächenwasserbilanzen mittels WABI. Die Staubereiche bilden darüber hinaus die Elementarflächen für den Datentransfer zwischen den einzelnen VH des TGP Spreewald.

Als digitale Datengrundlagen wurden genutzt:

- Karte der Fließgewässer mit Staubauwerken und Staugürteln (Abb. 16 und 32)
- Bodenkarten des Biosphärenreservats (Abb. 10)
- Karte der Hauptlandnutzungsklassen (Abb. 14)
- Karte der Niederausgrenzung (Abb. 26)
- Rasterkarten der TK 10 (LVA Brandenburg)

In einem ersten Schritt wurde die gesamte Niederung auf Staugürtel aufgeteilt. Für die zentralen Bereiche von OSW und USW wurden die Flächen den vorhandenen 13 Staugürtel zugeteilt. Für die Randbereiche gibt es keine Einteilung im Sinne von Staugürteln. Hier wurde sich an den Hauptvorflutern und –staubauwerken orientiert und deren Einflussbereiche als Staugürtel bezeichnet. Die Sommerpolder im inneren OSW wurden ebenfalls jeweils als separater Staugürtelbereich aus den vorhandenen Staugürteln ausgegliedert, da ihre Stauziele außerhalb der Staugürtelfestlegungen liegen können. Insgesamt ergaben sich so 23 Staugürtel, 16 im OSW und 7 im USW (Abb. 27).

Im zweiten Schritt wurde das gesamte UG in die sich maximal aus den vorhandenen Anlagen ergebenden Staubereiche unterteilt. Es ergaben sich insgesamt 371 Staubereiche. Da viele der noch vorhandenen Staubauwerke heute nicht mehr bedient werden, der Betrieb einiger Schöpfwerke eingestellt ist, innerhalb der Staugürtel möglichst gleiche Stauhöhen eingestellt werden und die Wasserbewirtschaftung heute vorwiegend über die großen Wehranlagen erfolgt, konnte die Anzahl der Staubereiche schrittweise auf 197 reduziert werden (Abb. 28). Hierfür wurde sich mit den zuständigen Wasserbewirtschaftern konsultiert und Befahrungen im Gebiet durchgeführt, um die gegenwärtig praktizierte Wasserbewirtschaftung und neueste wasserbauliche Veränderungen am Regulierungssystem zu erfassen. Neuere Erkenntnisse, die z. B. die Studie zur Staugürtelschließung (LUA 2002) während der GLOWA-Projektbearbeitung lieferte, wurden berücksichtigt, die Planungen im Rahmen des GRSP Spreewald flossen dagegen nicht mehr mit ein. Durch die Reduzierung der Staubereichsanzahl, ergeben sich weiterhin Vereinfachungen am Strangschema des ArcGRM Spreewald und verkürzt sich die Rechenzeit.

Die Staubereichskennzahl setzt sich immer aus der Nummer des Staugürtels und einer Staubereichsnummer zusammen. Diese beginnt in jedem Staugürtel bei 1 und wird dann fortlaufend

fortgeführt. Alle Staubereiche im Staugürtel 16 beginnen z. B. mit der Ziffer 16 gefolgt von der Staubereichsnummer, z. B. 01 (Staubereich 1601).

Bei 7 der 197 Staubereiche handelt es sich um Fischteiche bzw. Teichgruppen. Hieraus ergeben sich einige Besonderheiten bei ihrer Parametrisierung im Modell und der Berücksichtigung ihrer Bewirtschaftungsregeln, worauf in Abschnitt 3.1.5 weiter eingegangen wird.

### **3.1.3 Aufteilung der Randbereiche der Niederung auf die Randstaubereiche**

Dem ArcGRM Spree/Schwarze Elster der Landesbehörden liegt eine Einteilung des Spree-Einzugsgebietes in Teileinzugsgebiete zugrunde. Diese werden im ArcGRM als Simulationsteilgebiete (STG) bezeichnet. Der Spreewald und sein ihn umgebendes Direkteinzugsgebiet entfallen im ArcGRM Spree/Schwarze Elster auf die STG 19 (OSW) und 20 (USW). Aus diesen STG wurde im GLOWA-Elbe-Projekt das Niederungsgebiet des Spreewaldes herausgeschnitten und in 197 Staubereiche unterteilt (Abb. 29). Die noch verbleibende Fläche (grün gekennzeichnet) von STG 19 und 20 wird im ArcGRM Spreewald als Direkteinzugsgebiet der Staubereiche entsprechend Abschnitt 2.1.3.6 behandelt und den am Rande der Niederung liegenden Staubereichen zugeordnet. Grundlage für die Unterteilung war das Hydrogeologische Kartenwerk der DDR (HYKA 50) mit den in Abbildung 19 dargestellten Grundwassergleichen.

Im Bereich des USW reicht das Grundwassereinzugsgebiet östlich der Niederung über die Grenze des STG 20 hinaus, so dass auch Abflüsse aus den westlichen Bereichen des STG 21 zu den Randstaubereichen des USW hinzugerechnet werden. Das westliche Grundwassereinzugsgebiet des USW erstreckt sich bis weit in die Krausnicker Berge. Gräben (Kabelgraben, Bugkgraben) führen dort das Wasser aus kleinen Teileinzugsgebieten der Niederung zu. Wie für alle anderen kleinen Fließgewässer am Niederungsrand wurde nur der Gesamtzufluss betrachtet und nicht zwischen Zufluss von Grund- oder Oberflächenwasser unterschieden.

Eine Besonderheit stellt das Greifenhainer Fließ (STG 12) dar. Im ArcGRM Spree/Schwarze Elster ist es als separates STG ausgewiesen. Der Übergabepiegel (Paulicks Mühle) zum STG 20 liegt aber ca. 5 km in der Niederung. Damit würden alle Staubereiche am Greifenhainer Fließ oberhalb des Pegels ohne Wasserdargebot bleiben. Um dieses zu verhindern, wurde das STG des Greifenhainer Fließ (12) auf die Fläche außerhalb der Spreewaldniederung begrenzt und auf den Priorgraben und das Greifenhainer Fließ aufgeteilt (schraffierte Fläche in Abb. 29).

### **3.1.4 Randbedingungen für Stauziele**

Bei der Festlegung von Stauzielen im UG ist zwischen Staubereichen, die direkt einzelnen Staugürteln zugeordnet werden können und Staubereichen deren Vorflut an die Wasserstände von Staugürteln gekoppelt ist, zu unterscheiden (Abb. 30). Erstere liegen mit Ausnahme der 3 Polder des OSW (Staugürtel 20-22 in Abb. 27) in den zentralen Bereichen von OSW und USW. Diese den Staugürteln zuordenbaren Staubereiche haben innerhalb der Staugürtel mög-

lichst einheitliche Stauziele, die sich an den Festlegungen der Staubeiräte des OSW und USW orientieren. Für die anderen Staubereiche gibt es i. d. R. keine festgelegten Stauziele. Die Stauziele richten sich hier nach der angestrebten Flächennutzung und den Geländehöhen der Staubereiche. Bei angestrebter landwirtschaftlicher Nutzung ist die Befahrbarkeit bzw. Betretbarkeit für Weidenutzung das entscheidende Kriterium, bei naturschutzfachlichen Zielen sind es oft flurnahe Grundwasserstände mit flach überstauten Bereichen während des gesamten Jahres. Für alle Staubereiche gilt aber, dass jeweils immer die Bedingung der Vorflut zu einem Gewässer oder unterhalb liegenden Staubereich eingehalten werden muss.

Bei der Bezugnahme der Stauziele auf die Geländehöhe muss die Heterogenität des Reliefs jedes Staubereichs berücksichtigt werden. In früheren Untersuchungen zur Wiedervernässbarkeit von Niedermooren (Dietrich et al. 1996) im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes ÖKOSYN wurde sich bei fehlenden Stauzielen immer auf die mittlere Geländehöhe eines Staubereichs bezogen. Es zeigte sich aber, dass dieses gerade bei landwirtschaftlich genutzten Flächen zu hohen Grundwasserständen führt, die nicht der praktizierten Grundwasserregulierung entsprechen. Der Landwirt ist bestrebt, einen möglichst großen Teil seiner Fläche mit für ihn optimalen Wasserständen zu nutzen. Zu hohe Wasserstände sind daher für ihn weniger tolerabel als zu tiefe, so dass er sich i. d. R. an den tief gelegenen Flächenanteilen eines Staubereichs bei der Wasserstandregulierung orientiert. Als gute Bezugsgröße für die Stauziele erwies sich daher die Geländehöhe, bei der 20 % der Fläche des Staubereichs tiefer und 80 % darüber liegen. Diese Höhe wird im weiteren als NN20 bezeichnet. Sie kann aus der Summenhäufigkeit der Geländehöhenverteilung jedes Staubereichs ermittelt werden. In Abbildung 31 ist die Geländehöhenverteilung eines Staubereichs beispielhaft dargestellt. NN20 liegt bei 50,56 mNN. 20 % der Fläche des Staubereichs haben ein tiefer und 80 % ein höher liegendes Gelände.

### **3.1.5 Fischteiche**

Innerhalb des UG Spreewald gibt es 7 Fischteichanlagen, die aus mehreren Einzelteichen bestehen können. Bei der Bewirtschaftung der Teiche werden die Einzelteiche umschichtig für unterschiedliche Aufgaben genutzt, so dass sie zu verschiedenen Zeiten im Jahr bespannt bzw. abgelassen werden. Sollte das Modell dieses im Einzelnen berücksichtigen, müsste jeder einzelne Teich als separater Wassernutzer betrachtet werden, was die Anzahl der Wassernutzer und damit auch die Rechenzeit erhöht. Im Vergleich mit der Größe der anderen Wassernutzer (Staubereiche) wäre diese kleinräumige Auflösung ebenfalls nicht gerechtfertigt. Im ArcGRM Spreewald wird jede Teichanlage daher als ein Wassernutzer betrachtet.

In Befragungen der Fischteichbetreiber, durchgeführt vom VH 2.8, wurden die Kenngrößen der Teiche (Größe, Tiefe, Füllstände), Befüllungs- und Entleerungstermine sowie ihr Bewirtschaftungsregime ermittelt. Über spezielle dynamische Elemente „Fischteiche“ können die Befüllungs- und Entleerungstermine im ArcGRM Spreewald berücksichtigt werden. Die Teiche mit ihrer Sohllage wurden im DGM mit eingearbeitet, so dass jede Teichgruppe durch eine entsprechende Speicherkennlinie charakterisiert wird, die das gesamte Teichvolumen beinhaltet.

## **3.2 Strangschema**

### **3.2.1 Klassifizierung und Reduzierung des im Modell zu berücksichtigenden Gewässersystems**

Die Gewässer des UG wurde in mehreren Schritten hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Zuleitung und Verteilung der Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet sowie der Ableitung der Bilanzüberschüsse aus dem Gebiet klassifiziert (Abb. 32). Bei den Zuflüssen kommen der Spree und der Malxe (Großes Fließ) besondere Bedeutung zu. Sie verteilen ihre Zuflüsse im OSW auf viele andere Gewässer, von denen Nordumfluter, Burg-Lübbener-Kanal, Neue Spree und Südumfluter die Hauptgewässer sind. Die Zuflüsse aus den südlichen Teileinzugsgebieten münden direkt in Südumfluter oder Spree. Sie sind ebenfalls als Hauptgewässer klassifiziert, aus denen Wasser für die Bewässerung angrenzender Flächen entnommen werden kann. Die als Vorfluter eingestuften Gewässer dienen im Spreewald immer der wechselseitigen Grundwasserregulierung. Sie dienen also sowohl der Abführung von Überschusswasser, als auch der Zuführung von Bewässerungswasser.

Nachdem fast alle Gewässer bis Lübben am Ausgang des OSW wieder in die Spree gemündet sind, verzweigt sich die Spree unterhalb von Hartmannsdorf im USW erneut. Die wichtigsten Gewässer hier sind Wasserburger Spree, Randkanal, Puhlstrom, Zerniasfließ und Pretschener Spree.

Das Wasser verlässt den Spreewald hauptsächlich über die Spree. Es kann aber auch über den Randkanal und den Dahme-Umflut-Kanal in Richtung Köthener See abfließen oder über die Pretschener Spree und dann wieder unterhalb des Neuendorfer Sees in die Spree einmünden.

### **3.2.2 Festlegung des Strangschemas**

Das Strangschema in Abbildung 33 wurde auf Basis der klassifizierten Gewässer als Modellgrundlage für das ArcGRM Spreewald aufgebaut. Es vereinfacht das komplexe Gewässersystem des UG entsprechend der Bedeutung der Gewässer im Gesamtsystem und der Notwendigkeit, sie im Modell zu berücksichtigen und bildet die Grundlage beim Modellaufbau mit dem Programmsystem ArcGRM.

### **3.2.3 Zuflussaufteilung an Gewässerverzweigungen**

Die in Abschnitt 2.1.3.5 beschriebenen Gewässerverzweigungen kommen an 86 Knoten der im Modell berücksichtigten Gewässer vor (Abb. 34). Für 49 Knoten können Verteilungsregeln auf Grundlage der Studie zur Staugürtelschließung Spreewald (LUA 2002) und von Expertenwissen (Prowa-Verteilungsknoten) aufgestellt werden. Diese Verteilungsknoten befinden sich vorwiegend in den zentralen Bereichen des UG, in denen die Wasserbewirtschaftung im Konsens unterschiedlicher Interessengruppen (Land- und Forstwirtschaft, Fischerei, Tourismus, Naturschutz, Unterlieger des Spreewaldes) durchgeführt wird.

Die Regeln der 37 Nicht-Prowa-Verteilungsknoten richten sich fast ausschließlich nach dem Wasserbedarf der unterhalb liegenden Wassernutzer. Sie befinden sich vorwiegend in den äußeren Bereichen des UG, in denen die zentrale Wasserbewirtschaftung untergeordnet ist und vor allem nur die direkten Flächennutzer die Interessengruppe der Wassernutzer repräsentiert.

In Abbildung 35 sind die Verteilungsknoten im Strangschema dargestellt. Durch ihre Knotennummer ist die zugehörige Gewässerverzweigung im reduzierten Fließgewässersystem (Abb. 34) eindeutig identifizierbar.

### **3.2.4 Zuordnung der WABI-Nutzer auf Strangabschnitte**

Die 197 Staubereiche werden im Strangschema als WABI-Nutzer den Gewässern zugeordnet (Abb. 36). Ihre Kennzahl wird im ArcGRM Spreewald als Dezimalzahl geführt, wobei die Stellen vor dem Dezimalzeichen den Staugürtel kennzeichnen und die Dezimalstellen die jeweils bei 1 beginnende Staubereichsnummer innerhalb jedes Staugürtels.

Die meisten Staubereiche können eindeutig nur einem im Modell abgebildete Gewässer zugeordnet werden, aus dem sie Zusatzwasser entnehmen und in das sie Überschüsse abgeben. In diesem Fall liegt der Nutzer direkt auf dem entsprechenden Gewässerstrang. Werden Staubereiche durch mehrere im Modell abgebildete Gewässer versorgt bzw. geben Wasser in mehrere Gewässer ab, oder Entnahme- und Abgabegewässer sind nicht identisch, sind sie durch sogenannte Überleitungsutzer mit diesen Gewässersträngen verbunden. Dieser Fall tritt besonders in den zentralen Bereichen von OSW und USW auf, wo eindeutige Zuordnungen der Flächen auf einzelne Gewässer aufgrund der hohen Gewässerdichte, quer zum Hauptgefälle verlaufende Gewässer mit wechselnden Fließrichtungen und der geringen Gefälleverhältnisse innerhalb der Staugürtel kaum möglich sind. Im Modell werden die Entnahme- und Abgabeanteile auf die einzelnen Stränge durch vorgegebene Regeln gesteuert.

### **3.2.5 Zuordnung der Direkteinzugsgebiete und der Simulationsteilgebiete aus ArcGRM GLOWA**

Abbildung 37 zeigt die Einordnung der Direkteinzugsgebiete, der Simulationsteilgebiete aus ArcGRM GLOWA sowie der Abflussprofile in das Strangschema. Die Datenreihen der Simulationsteilgebiete können direkt an Bilanzprofilen übernommen werden. Für die Direkteinzugsgebiete werden die Datenreihen der ehemaligen Simulationsteilgebiete 12, 19 und 20 sowie Anteile aus Gebiet 21 genutzt (s. Abschnitt 3.1.3). Ihre Aufteilung erfolgt proportional ihres Flächenanteils am Simulationsteilgebiet in einem speziellen dynamischen Element „Randzufluss“. Die Gebietsabflüsse können an den betreffenden Bilanzprofilen ausgegeben oder statistisch ausgewertet werden.

### **3.2.6 Festlegung der Rangliste**

Für die richtige Abarbeitung der Wasserbilanzierung aller Nutzer im ArcGRM muss jeder Nutzer mit einer Rangzahl versehen sein. Diese steuert die Reihenfolge der Wasserentnahmen aus den Gewässern und Rückleitungen in die Gewässer. Durch sie wird gewährleistet, dass das Prinzip „Oberlieger vor Unterlieger“ bei der Wasserversorgung der an einem Gewässerstrang liegenden Nutzer einhalten wird. Dieses ist notwendig, da es sich bei den WABI-Nutzern um natürliche Wassernutzer handelt, die ihren Bedarf und ihre Wasserentnahme weitgehend selbständig regeln. Aufgrund der direkten Verkopplung von Gewässer und Fläche, entnehmen die Flächen bei Bedarf ständig Wasser aus den Fließen. Ein Unterlieger wird daher immer nur dann Wasser erhalten können, wenn der Oberlieger seinen Bedarf weitgehend gedeckt. Anders ist es bei technischen Systemen, wie bei der Steuerung der Zuflussaufteilung an Gewässerverzweigungen mittels Stauanlagen oder Wasserentnahmen über Pumpenanlagen für die Beregnung. Hier kann das Prinzip „Oberlieger vor Unterlieger“ auch aufgehoben werden.

Die Rangzahlen der Staubereiche der Referenzvariante zeigt Abbildung 38. Die farblich abgestufte Darstellung spiegelt neben der Ober-/Unterlieger-Beziehung die Staugürteleinteilung und die Höhenverhältnisse im UG wider. Die Veränderung der Rangzahlen bei Einhaltung der o. g. Restriktionen bzgl. Ober-/Unterlieger-Beziehungen ist eine Möglichkeit veränderte Wasserbewirtschaftungsstrategien mit dem Modell abzubilden.

## **3.3 Parameterdateien der WABI-Nutzer im ArcGRM Spreewald**

### **3.3.1 Flächenspeicher**

Entsprechend der in Abschnitt 2.1.3.2 beschriebenen Methode wurde für alle 197 Staubereiche die Flächenspeicherkennlinie berechnet und in einer Datenbank abgelegt. Abbildung 39 zeigt beispielhaft die Kennlinie eines ausgewählten Staubereiches mit 138 ha Fläche. Der tiefste Geländepunkt des Staubereiches liegt bei 50,0 mNN. Entsprechend beginnt die Kennlinie bei 47,0 mNN mit 0 mm Speicherinhalt. Wird der Grundwasserstand in diesem Staubeereich z. B. von 47,0 mNN auf 50,0 mNN angehoben, sind hierfür rd. 290 mm bzw. 400.200 m<sup>3</sup> Wasser erforderlich. Bei einer Absenkung von 49,5 mNN auf 49,0 mNN würde sich der Speicherinhalt von 259 mm auf 209 mm verringern, d. h. 50 mm bzw. 69.000 m<sup>3</sup> müssten aus dem Staubeereich entwässern bzw. verdunsten. Die Änderung im Anstieg der Kennlinie bei 50,1 mNN ist auf die zunehmende Überstauung der Fläche bei ansteigenden Wasserständen zurückzuführen. Geringe Wasserstandsänderungen führen hier zu großen Änderungen im Speicherinhalt des Staubereiches. Dieses unterstreicht, wie wichtig die Überstauung von Niederungsflächen ist, sollen sie z. B. zu einem aktiven Wasserrückhalt in der Landschaft in Überschusszeiten genutzt werden.

### 3.3.2 Geländehöhenverteilung der Elementarflächen

Die Verschneidung von Bodenartenhauptgruppe, Landnutzungstyp und Staubeinheit mit anschließender Aggregation der Flächen zu Elementarflächen  $> 2,5$  ha entsprechend der Beschreibung in Abschnitt 2.1.3.3 ergab insgesamt 1258 Elementarflächen für das UG. Für diese wurde das DGM in dm-Schritten ausgewertet. Die so erzeugte Datenbank mit der Geländehöhenverteilung aller Elementarflächen enthält insgesamt 10.347 Datensätze.

Abbildung 40 stellt die Summenhäufigkeiten für die Geländehöhenverteilung der Elementarflächen eines Staubeinheits dar. Bei dem dargestellten Beispiel gibt es 2 Landnutzungstypen (Wald und Offenland) und 2 Bodenartenhauptgruppen (Lehm und Torf). Dieses ergibt in der vorkommenden Kombination 4 Elementarflächen. Die Elementarfläche Wald auf Torf nimmt z. B. mit fast 50 % den größten Flächenanteil mit Geländehöhen zwischen 50,0 mNN und 50,7 mNN ein. Durch Differenzbildung kann der Flächenanteil jeder Elementarfläche für jede Geländehöhe aus der Datenbank abgegriffen werden.

### 3.3.3 Stauziele

Für jeden Staubeinheit wird ein Stauziel für jeden Monat festgelegt. Entsprechend Abschnitt 3.1.4 orientieren sich diese für die zuerst untersuchten Referenzszenarien an den in den Stauarbeiten OSW und USW für die Staugürtelwehre festgelegten Staumarken und für alle anderen Staubeinheiten an der Geländehöhe NN20. Die Übergänge zwischen Höchst- und Tiefststau (Winter- und Sommerstauziel) werden dabei möglichst über 2 Monate ausgedehnt. Damit wird ein zu schnelles Ansteigen bzw. Absinken der Wasserstände vermieden und die entnommenen bzw. entwässerten Wassermengen weisen weniger starke Spitzenwerte aus, gegenüber einer Auffüllung bzw. Entleerung des Flächenspeichers in einem Zeitschritt.

Die Stauziele bieten weiterhin die Möglichkeit unterschiedliche Wasserbewirtschaftungsstrategien für das Niederungsgebiet in Szenarien zu untersuchen. Ein Beispiel wäre die Anhebung der Zielgrundwasserstände im Zusammenhang mit der Renaturierung von Niedermoorflächen.

Abbildung 41 zeigt als Beispiel die Stauziele für den Monat Juli im Referenzszenario. Sie spiegeln das Geländegefälle und die Anpassung der Stauziele durch die kaskadenförmige Abstufung von Südosten nach Nordwesten wider. Durch die vereinfachende Annahme horizontaler Grundwasserstände innerhalb jedes Staubeinheits kommt es in den Staubeinheiten mit stärkerem Geländegefälle zu größeren Differenzen der Grundwasserflurabstände innerhalb der Staubeinheiten und abrupten Übergängen zwischen den Staubeinheiten (Abb. 42). Es wird aber auch deutlich, dass sich diese Problembereiche, in denen es infolge der Modellannahmen zu größeren Abweichungen von den realen Zuständen kommt, auf wenige Staubeinheiten im südöstlichen OSW beschränkt. An den Rändern der Niederung kann es dagegen infolge des ansteigenden Geländes durchaus zu größeren Grundwasserflurabständen kommen.



### **3.3.4 Basisdaten Verdunstung**

Die Abbildungen 43 und 44 zeigen anhand von Beispielen die unterschiedliche Wirkung der Parameter Landnutzung, Bodenart und Grundwasserflurabstand. Die Werte sind der Basisdatenbank Verdunstung entnommen, die mit dem SVAT-Modell BOWAS in VH 2.6 berechnet wurden.

Unterschiede im Grundwasserflurabstand zwischen 0,3 und 2,0 m unter Flur führen z. B. bei Grasland zu Differenzen von rd. 200 mm in der Jahresverdunstung. Besonders bei flurnahen Grundwasserständen unterscheiden sich auch die Nutzungstypen stark voneinander. Bei 0,3 m Grundwasserflurabstand beträgt die Differenz zwischen Acker und Grasland rd. 150 mm/a und gleicht sich dann bis 1,5 m unter Flur auf nahezu identische Werte an. Die Bodenart wirkt sich ebenfalls auf die Verdunstungswerte aus, jedoch weniger deutlich als Grundwasserflurabstand und Landnutzungstyp.

## **3.4 Modellkopplung ArcGRM Spreewald – ArcGRM GLOWA**

### **3.4.1 Übernahme von Datenreihen zum Wasserdargebot**

Der Spreewald wird in dem gegenwärtig in der wasserwirtschaftlichen Praxis der zuständigen Bundesländer angewendeten Modell ArcGRM Spree/Schwarze Elster durch das Black-Box-Modell SPEWA abgebildet. Dieses nimmt eine Durchflussanpassung zwischen den Zuflüssen und dem Abfluss des Spreewaldes vor, die aus Messwerten der 1980er Jahre abgeleitet wurde. SPEWA ist damit aber weder geeignet Aussagen zum Wasserhaushalt des Spreewaldes zu machen, noch kann die Wirkung von Veränderungen im Spreewald auf die Abflüsse nach unterhalb untersucht werden. Auch das im VH 2.2 genutzte ArcGRM GLOWA behandelt den Wasserhaushalt des Spreewaldes in dieser Weise. Es wurde jedoch die Möglichkeit geschaffen, an den Bilanzprofilen, die Zuflusspunkte zum Spreewald repräsentieren, die Durchflüsse auf Dateien ausgegeben und damit als Eingangsreihen für das Spreewaldmodell ArcGRM Spreewald bereit zustellen. Damit besteht die Möglichkeit, Szenarien einheitlich im Einzugsgebiet der Spree und im Spreewald zu definieren und zu untersuchen.

Da beide Modelle auf der selben Basis-Software aufbauen, bietet sich diese als schnell nutzbare Zwischenlösung an. Von den beiden VH 2.2 und 2.3 wurden entsprechende Bilanzprofile als Schnittstellen vereinbart, über die der Datenaustausch zwischen den Modellen erfolgt. Im Einzugsgebietsmodell werden die Daten herausgeschrieben, übergeben und im Niederungsmodell als Zuflussreihe eingelesen. Ungelöst ist hier jedoch die Rückführung der Abflusswerte aus dem Niederungsmodell. Diese können am Gebietsausgang des Spreewaldes zwar auf Datei herausgeschrieben werden, jedoch besteht gegenwärtig keine Möglichkeit, diese Werte wieder in das Einzugsgebietsmodell einzulesen. Somit gibt es bei dieser Art der Modellkopplung nur die Möglichkeit, die Wirkung der Szenarien auf den Wasserhaushalt des Spreewaldes und den Abfluss in unterhalb liegende Gebiete zu untersuchen, aber nicht, welche Auswirkungen veränderte Abflüsse in den unterhalb des Spreewaldes gelegenen Teileinzugsgebieten haben.

Vorteil dieser indirekten Modellkopplung ist, dass nicht alle Szenarien, die für das Einzugsgebiet untersucht werden, auch zwangsläufig im Niederungsgebiet betrachtet werden müssen. Es kann eine Vorauswahl getroffen werden und nur die Szenarien mit relevanten Veränderungen in den Zuflüssen zum Niederungsgebiet müssen auch für dieses untersucht werden.

### **3.4.2 Direkte Integration von ArcGRM Spreewald in ArcGRM GLOWA**

Eine zweite Möglichkeit ArcGRM Spreewald und ArcGRM GLOWA zu koppeln ist die direkte Integration des Niederungsmodells in das Einzugsgebietsmodell. Dieses ist gut möglich, da beide Modelle die gleiche Modellstruktur haben. Die STG sind identisch, lediglich STG 19 und 20 des Einzugsgebietsmodells wurden im Niederungsmodell weiter untersetzt. Sie können damit komplett aus dem Einzugsgebietsmodell herausgelöst und durch das ArcGRM Spreewald ersetzt werden. Programmtechnisch ist der Aufruf des Niederungsmodells durch das Einzugsgebietsmodell an der entsprechenden Stelle seiner Rangliste und die Datenübergabe zwischen beiden Modellen zu organisieren. Sämtliche Zuflüsse zur Niederung werden vom Einzugsgebietsmodell bereitgestellt. Das ArcGRM Spreewald hat als eigene Datenreihen nur noch Niederschlag und potentielle Verdunstung für das UG. Die Abflüsse aus dem Spreewald werden nach Abarbeitung des ArcGRM Spreewald wieder an das ArcGRM GLOWA übergeben.

Als Problem erwies sich die Tatsache, dass das bisherige SPEWA-Modell für den Spreewald im ArcGRM Spree/Schwarze Elster bzw. ArcGRM GLOWA mehrfach an unterschiedlicher Stelle der Rangliste aufgerufen wurde. Aufgrund der Einfachheit des SPEWA-Modells hatte dieses keine spürbaren Auswirkungen auf die Gesamtrechenzeit. Die Rechenzeit des ArcGRM Spreewald als Einzellösung beträgt auf einem 2,4 GHz PC aber schon aber schon rd. 15 min für 50 Jahre mit 100 Realisierungen. Jeder Modellaufruf des ArcGRM Spreewald im ArcGRM GLOWA treibt somit die Gesamtrechenzeit des gekoppelten Modells in die Höhe und würde gerade für die Anwendung in der praktischen Wasserbewirtschaftung auf wenig Akzeptanz stoßen. In Zusammenarbeit mit VH 2.2 wurde daher zunächst das ArcGRM GLOWA überarbeitet, die Anzahl der Modellaufrufe des Spreewaldmodells auf 6 reduziert und die Rangliste angepasst.

Der entwickelte Prototyp einer Modellkopplung besteht aus zwei vollständigen ArcGRM-Modellen. Ein Schalter, der über ein C-Feld gesetzt wird, steuert, ob die Modelle separat oder gekoppelt rechnen sollen. Soll gekoppelt gerechnet werden, muss zunächst das untergeordnete Spreewaldmodell kompiliert und als abarbeitbarer Modellbaustein abgelegt werden. Anschließend wird ArcGRM GLOWA kompiliert und gestartet. Spezielle DYN-Elemente organisieren den Aufruf des ArcGRM Spreewald-Moduls im ArcGRM GLOWA sowie die Datenübergabe/-übernahme. Die gewünschten Modellausgaben sind für jedes Modell separat zu vereinbaren. Für das Spreewaldmodell werden die Ergebnisse erst beim 6. und letzten Modellaufruf herausgeschrieben.

Die entwickelte Modellkopplung stellt gleichzeitig einen Prototyp für die Kopplung von ArcGRM-Modellen dar, wie sie in der 2. Bearbeitungsphase von GLOWA-Elbe zur Anwen-

dung kommen soll. Somit konnten schon wertvolle Erfahrungen gesammelt und Grundlagen für ein erweiteretes Bewirtschaftungsmodell auf Basis eines ArcGRM geschaffen werden.

Ein weiterer Vorteil der direkten Kopplung beider Modelle ist, dass auch die Wirkung von Veränderungen und Maßnahmen im Spreewald auf die Abflüsse unterhalb des Niederungsgebietes analysiert werden kann. Da der Wasserhaushalt der Niederung auch auf jede Zuflussveränderung anders reagiert, kann z. B. die Wirkung einer Speicherabgabe für den Pegel Große Tränke (Berlin) aus einer Talsperre oberhalb des Spreewaldes besser quantifiziert werden. Wie viel Wasser einer abgegebenen Wassermenge unterhalb des Spreewaldes ankommt, hängt maßgeblich vom Ausgangszustand des Wasserhaushalts im Spreewald ab und kann daher ohne diesen zu kennen nur ungenau bestimmt werden.

### **3.5 Modellvalidierung**

Zur Modellvalidierung standen Messwerte für Niederschlag, potentielle Verdunstung sowie Zu- und Abflüssen des Spreewaldes der Jahresreihe 1981/92 zur Verfügung. Mit den meteorologischen Größen und den Zuflussdaten wurde die Vergleichsreihe nachgerechnet und die berechneten und gemessenen Abflusswerte verglichen (Abb. 45). Es ergaben sich ein mittlerer quadratischer Fehler von 0,05 und ein Gütekriterium nach Nash & Sutcliffe (1979) von 0,86.

Die größten Differenzen zwischen gemessenen und berechneten Abflüssen traten bei sehr hohen Abflüssen auf. Besonders beim Sommerhochwasser 1981 wird der hohe Monatsabfluss im August nicht genau wiedergegeben und dafür die Abflüsse im September weit überschätzt. Aufgrund des Modellzeitschritts von einem Monat wird offensichtlich die Speicherauffüllung und Entleerung nicht mit dem tatsächlichen Verlauf übereinstimmend wiedergegeben, so dass es zu diesen zeitlichen Verschiebungen kommt. Dieses bestätigt, dass insbesondere in Hochwassersituationen kürzere Zeitschritte bei der Modellierung verwendet werden müssen, wobei das entwickelte Modellsystem auch nicht für diese Zwecke konzipiert ist.

## **4 Szenarientwicklung**

### **4.1 Stakeholderintegration**

Die Stakeholderintegration bildet entsprechend des IMA einen wichtigen Baustein bei der Erarbeitung von Szenarien zur zukünftigen Entwicklung im UG. Bereits vor Projektbeginn wurden daher erste Kontakte zu den zuständigen Behörden und Institutionen vor Ort aufgenommen und ständig weiterentwickelt. Dieses waren in erster Linie die Leitung des Biosphärenreservats Spreewald, das Landesumweltamt Brandenburg mit der Außenstelle in Cottbus, die betreffenden Wasser- und Bodenverbände, aber auch einzelne Landwirtschaftsbetriebe und forstliche Einrichtungen.

In den ersten Schritten wurden die Projektziele vorgestellt und die Interessenlagen, Probleme und Konfliktbereiche bzgl. des Wasserhaushalts erfragt. Wichtige Planungsunterlagen wie das

Rahmenkonzept zur Wasserbewirtschaftung im Spreewald (LUA 1996), später auch die Studie zur Staugürtelschließung (LUA 2002), der Landschaftsrahmenplan des Biosphärenreservats Spreewald (MUNR 1998), der Pflege- und Entwicklungsplan für das Biosphärenreservat Spreewald (LAGS 1996) oder das GRSP Spreewald (BfN 1999) wurden analysiert und in den Prozess der Szenarienentwicklung einbezogen. Eine besondere Rolle spielte dabei das GRSP, da im Rahmen seiner Bearbeitung bereits alle Interessengruppen des UG innerhalb eines Moderationsverfahrens in Überlegungen zur zukünftigen Gebietsentwicklung einbezogen waren und aktuelle Erhebungen zum Wasserhaushalt und zur Flächennutzung im Gebiet durchgeführt wurden, die im GLOWA-Elbe-Projekt mit genutzt werden konnten. Auf der anderen Seite bestand vonseiten des GRSP großes Interesse an der Nutzung von Ergebnissen aus dem BMBF-Projekt. Auf dieser Grundlage entwickelte sich eine gute Zusammenarbeit zwischen dem TGP Spreewald und den Stakeholdern im UG.

Die wichtigsten Integrationsinstrumente der Wasserbewirtschaftung vor Ort sind die Staubeiräte im OSW und USW. Sie beraten zweimal jährlich und stimmen alle wasserbaulichen Maßnahmen, die Gewässerunterhaltung und die Bewirtschaftung der Staugürtel, sprich die Staumarken für das nächste halbe Jahr, ab. An diesen Beratungen konnten Mitarbeiter des TGP Spreewald immer direkt teilnehmen und so die praktische Wasserbewirtschaftung im UG kennenlernen.

Die Rahmenbedingungen für die Szenarien zur Wirkung des globalen Wandels auf das Feuchtgebiet Spreewald bilden veränderte klimatische Bedingungen sowie die davon und von veränderten ökonomischen Bedingungen im Einzugsgebiet beeinflussten Zuflüsse. Diese wurden in anderen VH von GLOWA-Elbe erarbeitet und den Stakeholdern als Ausgangssituation dargestellt.

Als mögliche Handlungsoptionen zur langfristigen Einflussnahme auf den Wasserhaushalt und Minderung negativer Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasserhaushalt, Ökologie und Wirtschaft wurden in erster Linie wasserwirtschaftliche Optionen identifiziert. Sie betreffen die Steuerung der Zuflussverteilung im Niederungsgebiet, die Höhe der Stauziele in Verbindung mit der Flächennutzung und wasserbauliche Veränderungen am Gewässersystem.

Veränderungen an der Zuflussverteilung bedeuten gegenüber den bestehenden Regelungen immer die Bevor- oder Benachteiligung einzelner Wassernutzer, da das insgesamt verfügbare Wasserdargebot damit nicht verändert werden kann. Es werden lediglich die Prioritäten bei der Wasserversorgung verändert, das Wasser welches bevorzugte Wassernutzer mehr erhalten würden, wird anderen Wassernutzern vorenthalten. Interessenkonflikte sind hiermit vorprogrammiert. Diese Varianten werden in den Szenarien daher auch zunächst nicht als Handlungsalternativen untersucht, was auch für die Einbeziehung geplanter wasserbaulicher Maßnahmen in die Szenarien gilt.

Durch die Erhöhung von Stauzielen kann ein verbesserter Wasserrückhalt im Gebiet betrieben werden. In Perioden mit hohem Wasserdargebot wird der Flächenspeicher aufgefüllt, so dass in Defizitperioden aus diesem gezehrt werden kann. Der erhöhte Wasserrückhalt ist immer eng an die Flächennutzung gekoppelt, werden durch diese doch die zulässigen Höchstwasserstände in den Staubereichen bestimmt. Der Wasserrückhalt im Gebiet wurde in Abstimmung

mit den Stakeholdern als eine vordringlich zu untersuchende Handlungsalternative angesehen, da er auch in den Planungen der Wasserwirtschaft im Rahmen des Landschaftswasserprogramms von Brandenburg als wichtiges Instrument zur Verbesserung des Landschaftswasserhaushalts angesehen wird.

Durch die Flächennutzung kann ebenfalls langfristig Einfluss auf den Wasserverbrauch im UG genommen werden. Aufforstung oder Renaturierung von Niedermoorflächen können z. B. zu einem erhöhten Wasserverbrauch führen (Abb. 43). Die im Landschaftsrahmenplan des Biosphärenreservats (MUNR 1998) vorgeschlagenen Flächenentwicklungen wurden jedoch noch nicht in die ersten Handlungsalternativen aufgenommen, da sie sich im Zusammenhang mit dem GRSP gerade wieder in der Diskussion befinden. Hierzu wären zu einem späteren Zeitpunkt noch einmal Untersuchungen möglich.

Als Abschluss der Szenarientwicklung wurde im Juli 2002 ein gemeinsamer Workshop mit den Stakeholdern im Gebiet durchgeführt. Die gemeinsam entwickelten Szenarien wurden hier vorgestellt, diskutiert und abschließend festgelegt. Es wurde sich darauf geeinigt, im Gebiet zunächst jeweils zwei Szenarien in Kombination mit den Szenarien des Einzugsgebietes (Rahmenbedingungen) zu bearbeiten (Tab. 2). Ein Szenario geht von der gegenwärtig praktizierten Wasserbewirtschaftung und Flächennutzung aus, im zweiten Szenario wird die Nutzung auf den Niedermoorflächen aufgegeben bzw. stark extensiviert und die Zielwasserstände auf diesen Flächen angehoben.

Tab. 2: Untersuchte Szenarienkombinationen im TGP Spreewald (aus Zwischenbericht TGP Spreewald 2003)

<b>Rahmenbedingung Einzugsgebiet</b> <b>Handlungs- alternativen im Feuchtgebiet</b>	<b>Referenzszenario</b>	<b>B2-Basisszenario</b>
<b>Ist-Zustand</b>	Referenzszenario	B2-Basisszenario
<b>Moorschutzszenario</b>	Referenzszenario mit Moorschutz	B2-Basisszenario mit Moorschutz

## 4.2 Rahmenbedingungen

Die Rahmenbedingungen für das UG Spreewald werden durch das Klima (VH 4.2) und die Zuflüsse aus den oberhalb gelegenen Teileinzugsgebieten (VH 2.2) vorgegeben, wobei das Klima auch für die Abflussberechnung in VH 2.2 eine Rahmenbedingung bildet. Innerhalb von GLOWA-Elbe wurde sich daher auf eine einheitliche Bezeichnung und Definition der grundlegenden Szenarien festgelegt. Als Vergleich mit dem Ist-Zustand dient das Referenzszenario. Es geht vom langjährig mittleren Klima der Reihe 1951/2000 ohne Änderungstrend und den vorhandenen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen aus. Für die Wasserbewirtschaftung im Einzugsgebiet der Spree wurde die gemeinsame Planung der Landesbehörden von Sachsen, Brandenburg und Berlin zugrundegelegt. Diese regelt insbesondere die Flutung der Tagebaurestlöcher und Inbetriebnahme neuer Speicher im Einzugsgebiet der Oberen Spree bis zum Jahre 2032.

Im zweiten Rahmenszenario für das UG Spreewald, im folgenden als B2-Basisszenario bezeichnet, wird von einer Änderung des Klimas ausgegangen. Die Temperaturen steigen bis 2050 im Mittel um 1,4 K an. Der Beginn dieser generierten Klimareihe im Jahr 2001 berücksichtigt die wärmere Periode der 1990er Jahre und setzt dort ohne Sprung in den Werten auf, so dass gegenüber dem Durchschnitt 1951/2000 mit anderen Klimawerten begonnen wird. Wie auch für das Referenzszenario wurden vom VH 4.2 für den Zeitraum 2001 bis 2055 für dieses Szenario mit Klimaänderung 100 Realisierungen bereitgestellt, die den stochastischen Charakter des Klimas widerspiegeln. Mit diesen Klimareihen wurden im Einzugsgebiet der Spree die Abflüsse berechnet (VH 2.9). Zusätzlich wurde von einer Änderung der ökonomischen Rahmenbedingungen entsprechend IPCC-Emissionszenario B2 ausgegangen, was Auswirkungen auf die Energiewirtschaft im Einzugsgebiet hat. Die Wasserbewirtschaftung im Einzugsgebiet der Spree wird nach den selben Prinzipien wie im o. g. Referenzszenario betrieben.

Um die Unterschiede in den Rahmenbedingungen, also die Differenzen zwischen Referenz- und B2-Basisszenario darzustellen, werden die übernommenen Klimawerte und die Zuflüsse aus den oberhalb gelegenen Teileinzugsgebieten beider Szenarien ausgewertet und miteinander verglichen. Grundlage sind die aus dem VH 2.2 übernommenen Datenreihen mit Monatswerten zu Niederschlag und potentieller Verdunstung (berechnet nach Turc-Ivanov) für das Spreewaldgebiet und die von ArcGRM GLOWA an den Übergabebilanzprofilen ausgegebenen Durchflüsse, die als Eingangsgrößen im ArcGRM Spreewald verwendet werden.

Die Unterschiede in den Klimawerten werden als Vergleich der Medianwerte der 100 Realisierungen der Fünfjahresperioden 2003/07 des Referenzszenarios, welches den mittleren Verhältnissen des Zeitraums 1951/2000 entspricht, und des B2-Basisszenarios, die das gegenwärtige Klima widerspiegeln, sowie der Periode 2048/52 des B2-Basisszenarios, welche die größte Klimaänderung repräsentiert, gegenübergestellt.

Die Klimaänderung äußert sich für das UG Spreewald in einer Verschiebung der innerjährlichen Niederschlagsverteilung (Abb. 46). Die Winterniederschläge steigen bis 2048/52 leicht an, im Sommerhalbjahr kommt es zu einer Abnahme im Median der 100 Realisierungen gegenüber der Periode 2003/07 beider Szenarien. Dieser Abnahme steht ein Anstieg der potentiellen Verdunstung in den Sommermonaten gegenüber (Abb. 47), wobei die monatliche Zunahme gegenüber dem Referenzszenario etwa doppelt so hoch ist, wie gegenüber dem B2-Basisszenario in Periode 2003/07. Dieses verdeutlicht auch die Unterschiede zwischen dem langjährigem Mittel 1951/2000 und den Klimawerten der letzten Dekade 1990/2000. Niederschlagsabnahme und Anstieg der potentiellen Verdunstung schlägt sich letztendlich in einem vergrößerten klimatischen Wasserbilanzdefizit im Sommerhalbjahr nieder (Abb. 48). Das Defizit nimmt bis 2048/52 im Vergleich mit dem Referenzszenario während der Vegetationsperiode von April bis September um rd. 110 mm, im Vergleich mit dem B2-Basisszenario um rd. 70 mm zu.

In der Summe der Zuflüsse aller Teileinzugsgebiete zum UG wird dieser Trend nicht direkt widerspiegelt (Abb. 49). Hier ist ein Rückgang der Zuflüsse von Dezember bis April gegenüber dem Referenzszenario zu verzeichnen. Die Sommerwerte bleiben im Vergleich von

Periode 2048/52 mit dem Referenzszenario Periode 2003/07 aber relativ stabil, haben nur gegenüber dem B2-Basisszenario der Periode 2003/07 eine geringe Abnahme. Im Winter gibt es innerhalb des B2-Basisszenarios kaum Veränderungen.

Wichtiger als die Summe der Zuflüsse sind für den Wasserhaushalt im UG aber die Entwicklungen im Abflussgeschehen der einzelnen Teileinzugsgebiete, da sie jeweils nur bestimmte Teile des Niederungsgebietes mit Wasser versorgen und ihre Entwicklungen bis 2050 durchaus unterschiedlich verlaufen können, wie Abbildung 50 verdeutlicht. Die Ursachen liegen in dem sich unterschiedlich verändernden Wasserhaushalt der Teileinzugsgebiete und in der betriebenen Wasserbewirtschaftung. So sollen bis 2050 die Flutungen vieler Tagebaurestlöcher bereits abgeschlossen sein. Damit ist das Grundwasserniveau in den Teileinzugsgebieten wieder so weit angestiegen, dass auch diese Gebiete wieder zur Abflussbildung beitragen, kein Wasser mehr aus der Spree in diese Restlöcher geleitet werden muss. Weiterhin werden die geplanten Speichersysteme in der Lausitz zur Stabilisierung der Abflüsse in den Sommermonaten beitragen. Dieses wird beides vorwiegend für die Spree und die Südzuflüsse zutreffen, so dass insbesondere in den Sommermonaten mit keinem weiteren Rückgang der Zuflüsse in diesen Gebieten zu rechnen ist. Anders ist die Situation im Einzugsgebiet der Malxe, welche im UG in das Große Fließ übergeht. Die Abflüsse der Malxe bestehen auch heute noch zu großen Teilen aus Sumpfungswässern aus den aktiven Tagebauen Jänschwalde und Cottbus-Nord. Nach gegenwärtigen Planungen werden diese Tagebaue nach 2030 auslaufen. Damit bleiben dann die Sumpfungswässer aus und zusätzlich müssen die verbleibenden Restlöcher geflutet werden. Die Folge ist die Abnahme der Zuflüsse aus diesem Teileinzugsgebiet, insbesondere in den Sommermonaten (Abb. 50). Die direkten Randzuflüsse zum UG ändern sich im Vergleich von Referenz- und B2-Basisszenario insgesamt ebenfalls, jedoch gibt es keine Unterschiede zwischen den Perioden 2003/07 und 2048/52 innerhalb des B2-Basisszenarios (Abb. 51).

### **4.3 Szenarien mit Beibehaltung des gegenwärtigen Wassermanagements im Niederungsgebiet**

Die beiden Rahmenszenarien werden im UG Spreewald zunächst mit dem Ist-Zustand der Flächennutzung und Wasserbewirtschaftung kombiniert. Sie werden im weiteren als das Referenzszenario und das B2-Basisszenario für das UG Spreewald bezeichnet. Die Stauziele entsprechen in den zentralen Bereichen des Spreewaldes den in den Staubeiräten abgestimmten Staumarken (Tab. 3), in den anderen Staubereichen orientieren sie sich an der Geländehöhe (s. Abschnitt 3.3.3). Die Zielgrundwasserstände und die daraus resultierenden Grundwasserflurabstände bei Einhaltung der Zielgrundwasserstände im Sommerhalbjahr sind in Abb. 41 und 42 dargestellt. Im Vergleich dazu werden im Winterhalbjahr höhere Zielwasserstände angestrebt, die insbesondere in tief liegenden Flächenbereichen auch zu zeitweiligen Überstauungen führen (Abb. 52). Die Verteilung der Zuflüsse erfolgt nach den in Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Regeln. Die Flächennutzung entspricht dem Ist-Zustand.

Tab. 3: Stauziele des Referenzszenarios nach Studie Staugürtelschließung (LUA 2002) und Protokolle Staubeiräte (vgl. Abb. 30)

<b>Staugürtel</b>	<b>Teilregion</b>	<b>Winterstauziel in mNN</b>	<b>Sommerstauziel in mNN</b>
I	OSW	49,00	48,65
II	OSW	49,20	49,10
III	OSW	49,70	49,55
IVa	OSW	50,00	49,85
IV	OSW	50,70	50,40
V	OSW	51,00	50,70
VI	OSW	51,35	51,10
VII	OSW	51,70	51,70
VIII	OSW	52,50	52,40
IX-W62-64	OSW	53,20	53,15
IX-W19	OSW	53,95	53,90
IX-W15	OSW	54,00	53,80
Hartmannsdorf	USW	47,60	47,60
Schlepzig	USW	46,60	46,30
Neu Lübbenau – W205b	USW	45,50	45,30
Neu Lübbenau – W205a	USW	45,30	45,10
Leibsch	USW	44,10	44,10

#### 4.4 Moorschutzszenario

Im Moorschutzszenario soll ein verstärkter Ressourcenschutz auf Flächen mit Niedermoor betrieben werden. In Abstimmung mit den Stakeholdern wurden für die Staubereiche mit überwiegend Niedermooranteil die Entwicklungsziele Moorregenerierung oder Moorerhalt vergeben.

Moorregenerierung soll auf den tiefgründigeren Standorten durchgeführt werden. Die Zielwasserstände liegen auf diesen Flächen bei 0,1 m über Flur im Winter und 0,2 m unter Flur im Sommer. Eine landwirtschaftliche Nutzung wird auf diesen Flächen dann nicht mehr möglich sein. In Frage kommen hierfür Staubereiche im zentralen Bereich des OSW (Abb. 53). Eine weitere Prämisse war, dass die betreffenden Staubereiche aufgrund der engen Wechselbeziehungen zwischen den Staubereichen und der möglichst einheitlichen Wasserbewirtschaftung insgesamt eine kompakte Einheit bilden und nicht einzelne, im Gebiet verstreute Flächen ergeben. Auf das Entwicklungsziel Moorregenerierung entfallen insgesamt ca. 4.000 ha.

Auf den flachgründigen, bereits stärker degradierten Standorten soll das Entwicklungsziel Moorerhalt sein. Die Zielwasserstände liegen auf diesen Flächen im Winter in Geländehöhe



und bei 0,3 m unter Flur im Sommer. Dieses lässt noch eine extensive landwirtschaftliche Nutzung zu. Auch hier galt es, möglichst kompakte Gebiete mit einheitlichem Entwicklungsziel zu bilden. Die geeigneten Flächen befinden sich in den östlichen Bereichen des OSW und nehmen ca. 3.800 ha ein (Abb. 53).

Im USW gibt es keine großflächigen Niedermoorvorkommen mehr, so dass sich hier gegenüber dem Ist-Zustand an den Zielgrundwasserständen nichts ändert. Im Vergleich zu den Grundwasserflurabständen im Ist-Zustand (Abb. 52) kommt es im Winter im OSW zu deutlich ausgedehnteren Überstauungen auf den Flächen mit dem Entwicklungsziel Moorregenerierung (Abb. 54).

## **5 Ist-Zustandsszenarien - Auswirkungen veränderter Rahmenbedingungen auf ausgewählte Wasserhaushaltsgrößen**

### **5.1 Reale Verdunstung**

In Feuchtgebieten führt der Anstieg der potentiellen Verdunstung bei weiterhin gegebener Wassernachlieferung aus dem Grundwasser auch zu einem Anstieg der realen Verdunstung. Abbildung 55 zeigt den Vergleich der Medianwerte von Referenzszenario der Periode 2003/07 mit dem B2-Basisszenario der Perioden 2003/07 und 2048/52 als Gebietsmittel. Bei Verwendung des Referenzszenarios als Bezugsbasis steigen die Monatsmediane der 100 Realisierungen um bis zu 15 mm an. In der Summe der Monate April bis September ergibt sich eine Erhöhung der realen Verdunstung von 56 mm. Das entspricht für das Untersuchungsgebiet einem Volumen von rd. 18 Mio. m<sup>3</sup> an zusätzlicher Verdunstung und dieses trotz teilweise sinkender Grundwasserstände (s. Abschnitt 5.6), wodurch eine noch stärkere Zunahme der realen Verdunstung gemindert wird. Beim Vergleich mit der Periode 2003/07 des B2-Basisszenarios nimmt die reale Verdunstung für das Gesamtgebiet im selben Zeitraum nur um 7 Mio. m<sup>3</sup> zu. Der Unterschied in der Gebietsverdunstung zwischen den beiden Szenarien in der Periode 2003/07 ist mit rd. 11 Mio. m<sup>3</sup> damit größer als die Zunahme der Verdunstung innerhalb des B2-Basisszenarios über den Zeitraum von 50 Jahren. Die Ursache liegt im gegenwärtig schon hohen Niveau der potentiellen Verdunstung gegenüber dem langjährigen Durchschnitt 1951/2000. Dieses wird durch das B2-Basisszenario Periode 2003/07 widergespiegelt, während Referenzszenario mehr den Durchschnitt der letzten 50 Jahre darstellt. Die potentielle Verdunstung beider Szenarien unterscheiden sich in ihren Medianwerten der Monatssummen April bis September in der Periode 2003/07 um rd. 40 mm, während sie innerhalb des B2-Basisszenarios von 2003/07 bis 2048/52 um rd. 35 mm ansteigt. Das langjährige Mittel der zurückliegenden 50 Jahre (Referenzszenario) liegt damit deutlich unter dem Verdunstungsniveau zu Beginn des 21. Jahrhunderts (B2-Basisszenario 2003/07). Die weitere Zunahme der Verdunstung bis 2050 gegenüber dem gegenwärtigen Niveau erscheint so weniger dramatisch, ist aber auch im Zusammenhang mit den sinkenden Grundwasserständen zu sehen (s. Abschnitt 5.6).

## 5.2 Zusatzwasserbedarf

Für einen Staubereich besteht ein Zusatzwasserbedarf, wenn der Niederschlag eines Monats nicht ausreicht, um die Summe aus realer Verdunstung und möglichem Defizit im Flächenwasserspeicher infolge Stauzielunterschreitungen aus dem Vormonat bzw. Stauzielanhebungen im aktuellen Monat auszugleichen. Da infolge veränderter klimatischer Bedingungen nicht nur die reale Verdunstung ansteigt, sondern auch die Niederschläge insbesondere in den Sommermonaten zurückgehen (vgl. Abschnitt 4.2), ist zukünftig mit einem Anstieg des Zusatzwasserbedarfs im UG Spreewald zu rechnen. Abbildung 56 zeigt den mittleren Zusatzwasserbedarf des Gesamtgebietes als Jahrgang für jede 5-Jahresperiode im Vergleich von Referenz- und B2-Basisszenario. Die Medianwerte (50. Perzentil) im B2-Basisszenario spiegeln einen Trend mit zunehmendem Zusatzwasserbedarf in den Sommermonaten wider. In der Periode 2048/52 beträgt die Zunahme im Sommer gegenüber dem Median des Referenzszenarios rd. 30 mm/Monat. In den trockeneren Jahren (20. Perzentil) ist der Zusatzwasserbedarf beider Szenarien in der Periode 2003/07 noch fast gleich groß. Während er im Referenzszenario nahezu unverändert bleibt, steigt er im B2-Basisszenario auf über 100 mm in den Sommermonaten an.

Im Juli jeder Periode erreicht der mittlere Jahrgang des Zusatzwasserbedarfs sein Maximum. Die Juliwerte sind in Abbildung 57 daher noch einmal gesondert dargestellt, um den ansteigenden Trend besser zu veranschaulichen. Die Spanne zwischen dem 10. und 90. Perzentil deckt insgesamt 4 von 5 Jahren ab. Sie wird auch zum Ende des Untersuchungszeitraums hin nicht größer. Das schließt extrem nasse Jahre nicht aus, bestärkt aber auch die Tendenz zu insgesamt trockeneren Sommern mit ansteigendem Zusatzwasserbedarf in den Feuchtgebieten und weniger nassen Jahren.

In Abbildung 58 wird das B2-Basisszenario der Periode 2048/52 mit dem Referenzszenario und dem B2-Basisszenario der Periode 2003/07 verglichen. Es verdeutlicht die generelle Zunahme des Zusatzwasserbedarfs im Mittel der Jahre, aber auch, dass der Zusatzwasserbedarf, der unter Referenzbedingungen in einem von fünf Jahren eintritt, unter veränderten Klimabedingungen in der Periode 2048/52 in jedem zweiten Jahr erreicht wird. Die Anforderungen an die Bereitstellung von ausreichend Zuflusswasser aus den oberhalb gelegenen Teileinzugsgebieten steigt damit erheblich an. In der ersten Periode (2003/07) unterscheiden sich beide Szenarien vor allem in den Monaten April bis Juni. Hier sind es die geringeren Niederschläge (Abb. 46), die den Zusatzwasserbedarf im B2-Basisszenario gegenüber dem Referenzszenario ansteigen lassen.

## 5.3 Zusatzwasserentnahme

Im Untersuchungsgebiet Spreewald wird der Zusatzwasserbedarf der Staubereiche durch Zusatzwasserentnahmen aus den Fließgewässern gedeckt, die aus den Einzugsgebietszuflüssen gespeist werden. Neben dem Bedarf bestimmt das verfügbare Wasserdargebot, wie hoch die Wasserentnahmen aus den Flüssen sind. Die berechneten Werte zeigen eine leichte Zunahme vom Referenzszenario zum B2-Basisszenario (Abb. 59). Dieses ist auf den gestiegenen Zu-

satzwasserbedarf zurückzuführen. Innerhalb des B2-Basisszenarios nehmen die Entnahmen von 2003/07 bis 2048/52 dagegen trotz steigenden Bedarfs (vgl. Abb. 56 und 57) etwas ab. Ursache sind die insgesamt abnehmenden Zuflüsse, die nicht ausreichen, um den Bedarf vollständig zu decken (s. Abb. 49). Die Darstellung in Abbildung 60 verdeutlicht diese Trends und zeigt die Spanne der Zusatzwasserentnahmen in 4 von 5 Jahren.

Der direkte Vergleich der Jahressgänge des B2-Basisszenarios der Periode 2048/52 mit dem Referenzszenario und dem B2-Basisszenario der Periode 2003/07 (Abb. 61) veranschaulicht die insgesamt etwas höheren Zusatzwasserentnahmen im B2-Basisszenario, jedoch innerjährlich unterschiedlich verteilt in den Perioden 2003/07 und 2048/52. Während die Entnahmen in den Frühjahrsmonaten in beiden Perioden sich im Median kaum unterscheiden, gehen sie im Sommer der Periode 2003/07 auf das Niveau des Referenzszenarios zurück, was auf einen geringeren Bedarf zurückzuführen ist (Abb. 58).

In den Abbildungen 59 und 61 wurde im Gegensatz zu den Bedarfsdarstellungen bewusst auf die Darstellung der 20. Perzentile verzichtet. Die Perzentile von Wasserentnahme und –bedarf dürfen bei der Interpretation nicht einfach miteinander verglichen werden, wozu diese Form der Darstellung aber verleiten würde. Ein hoher Bedarf kann bei entsprechend verfügbarem Dargebot auch eine hohe Wasserentnahme zur Folge haben. In der Regel wird gerade dieses notwendigerweise hohe Zusatzwasserdargebot aber dann nicht verfügbar sein, da im Gesamtgebiet einschließlich Einzugsgebiet die selben klimatischen Bedingungen herrschen und folglich auch nur geringe Zuflüsse aus dem Einzugsgebiet in das Feuchtgebiet fließen. In der Folge sind dann oftmals nur geringe Zusatzwasserentnahmen möglich, trotz hohen Bedarfs. Die Form der Ergebnisauswertung über Häufigkeiten ermöglicht aber nicht den direkten Vergleich innerhalb des selben Zeitschrittes und kann daher hier zu Falschinterpretationen führen.

## 5.4 Zusatzwasserdefizit

Reicht die Zusatzwasserentnahme aufgrund zu geringer Gebietszuflüsse nicht aus, den Wasserbedarf aller Staubereiche zu decken, entsteht ein Zusatzwasserdefizit. Beim Zusatzwasserdefizit werden Wasserbedarf und –entnahme wieder direkt im Modell miteinander verglichen, so dass ein Interpretationsproblem entsprechend Abschnitt 5.3 nicht auftritt. Das Zusatzwasserdefizit steigt nach den Modellrechnungen bis 2048/52 von rd. 20 mm im Median des Referenzszenarios auf rd. 45 mm im B2-Basisszenario an (Abb. 62). Die Zunahme des Defizits fällt damit größer aus als die Zunahme des Wasserbedarfs (Abb. 56), obwohl die Wasserentnahmen im Median leicht ansteigen (Abb. 59). Das bedeutet, dass vorwiegend dargebotsschwache Jahre mit hohen Bedarfsforderungen zusammenfallen. Dieses ist völlig normal, erhöht aber die Unsicherheiten in der Bedarfsdeckung und führt in der Folge häufiger zu tiefer absinkenden Grundwasserständen. Abbildung 63 verdeutlicht den Trend und zeigt, dass das Defizit in den trockenen Jahren (10. Perzentil) noch stärker ansteigt als im Mittel.

Bei der Betrachtung der Jahressgänge der Perioden 2003/07 und 2048/52 wird deutlich, dass der Median des B2-Basisszenarios in 2048/52 noch die Werte des 20. Perzentils des Referenzszenarios und des B2-Basisszenarios in 2003/07 übersteigt (Abb. 64). Das bedeutet, dass

das Defizit in der Periode 2048/52 durchschnittlich in jedem zweiten Jahr größer als in einem von 5 Jahren der Periode 2003/07 ausfällt. Auffällig auch die deutlich größere Differenz zwischen 20. und 50. Perzentil beim B2-Basisszenario in Periode 2048/52 gegenüber den entsprechenden Differenzen in Periode 2003/07. In trockenen Jahren überlagern sich also erhöhter Bedarf und niedrigere Zuflüsse noch ungünstiger als bisher.

## 5.5 Flächenentwässerung

Zur Abflussbildung und Entwässerung kommt es bei der Berechnung der Monatswasserbilanzen in den meisten Jahren nur in den Herbst- und Wintermonaten oder bei Stauzielabsenkungen im Frühjahr. Abbildung 65 zeigt stellvertretend die Gebietsmittel der Flächenabflüsse für den Monat Januar, der gemeinsam mit dem Dezember i. d. R. die höchsten Abflusswerte erreicht. Ein Trend zur Abnahme oder zum Anstieg ist nicht erkennbar. Grund sind die relativ stabilen Niederschläge und die geringe Bedeutung der potentiellen Verdunstung für die Wasserbilanz im Winter. Der Einfluss der Niederschlagsform (Regen oder Schnee) kann mit dem Modell nicht berücksichtigt werden und schlägt sich folglich auch nicht in den Ergebnissen nieder.

Die berechneten Szenarien unterscheiden sich nicht im Median der Jahresgänge der Perioden 2003/07 und 2048/52 (Abb. 66). Von Mai bis August kommt es im Durchschnitt der Jahre zu keiner Abflussbildung auf den Niederungsflächen. Bei den feuchteren Jahren treten im April und Mai der Periode 2048/52 etwas höhere Werte als in Periode 2003/07 auf.

## 5.6 Grundwasserstände

Die Folgen eines erhöhten Wasserbedarfs und verminderten Wasserdargebots schlagen sich im Feuchtgebiet in veränderten Grundwasserverhältnissen nieder. Diese beeinflussen in direkter Weise die ökologischen Verhältnisse im Gebiet und die an die Standortverhältnisse angepasste Nutzung. Im Folgenden werden die berechneten Grundwasserstände der Staubereiche zunächst den Zielgrundwasserständen gegenübergestellt und anschließend für ausgewählte Monate die sich ergebenden Grundwasserflurabstände ausgewertet.

Für die Abbildungen 67 bis 69 wurde in jedem Zeitschritt und Staubereich die Differenz aus Ziel- und Ist-Grundwasserstand berechnet ( $GW_{\text{soll}} - GW_{\text{ist}}$ ), daraus staubereichsweise die Perzentile ermittelt und anschließend für die vereinfachte Darstellung als Gebietsmittel zusammengefasst. Die Ergebnisse zeigen, dass das Stauziel bereits unter Referenzbedingungen im Mittel des Gebietes nicht immer eingehalten werden kann. Diese Situation herrscht im Prinzip seit Anfang der 1990er Jahre mit dem drastischen Rückgang der Spreezuflüsse aus dem Gebiet der Oberen Spree vor. So wie das Zusatzwasserdefizit im Referenzszenario bis 2050 relativ konstant bleibt (Abb. 62), ändert sich auch die Zielgrundwasserstandsunterschreitung im Median nicht (Abb. 67). Insbesondere die veränderten klimatischen Bedingungen im B2-Basisszenario führen bis 2050 aber zur Verdopplung der Zielgrundwasserstandsunterschreitung im Median auf über 30 cm in den Sommermonaten der letzten Periode. In den trockenen

Jahren (80. Perzentil) fehlen bis zu 60 cm, um die Zielvorgaben zu erreichen. Bei Zielgrundwasserständen von z. B. 60 cm unter Flur für eine Graslandnutzung bedeutet dieses Grundwasserflurabstände von 120 cm unter Flur, auf den höher gelegenen Flächen sogar noch mehr.

Abbildung 68 unterstreicht den Trend der tiefer absinkenden Grundwasserstände in den Sommermonaten. Die Spannweite zwischen dem 10. und 90. Perzentil vergrößert sich, da der Wassermangel in den trockeneren Jahren besonders ansteigt. Die Unterschiede in den Jahresgängen der Perioden 2003/07 und 2048/52 bestätigen dieses (Abb. 69). Sie zeigen weiterhin, dass es nach trockenen Jahren zunehmend schwieriger wird, die Flächenspeicher aller Staubereiche innerhalb eines Winters wieder wie gewünscht aufzufüllen. Auch in den mittleren Jahren (Median) werden die Zielwasserstände im B2-Basisszenario der Periode 2048/52 noch nicht im Dezember erreicht, was in Periode 2003/07 nahezu der Fall ist.

Die bisher gewählte Form der Ergebnisdarstellung mit gebietlich zusammengefassten Ganglinien und Trendverläufen lassen die generellen Entwicklungsrichtungen für das UG Spreewald erkennen. Sie ermöglichen jedoch keine Darstellung der differenzierten Betroffenheit innerhalb der Niederung, wie sie sich aufgrund der unterschiedlichen Entwicklung der Zuflüsse in den einzelnen Teileinzugsgebieten ergibt (vgl. Abschnitt 4.2) und wofür ArcGRM Spreewald die Möglichkeiten bietet. Um dieses darzustellen, werden die Ergebnisse im Folgenden in Kartenform aufbereitet. Es hat den Nachteil, dass immer nur einzelne ausgewählte Monate abgebildet werden können. Als Beispiel dienen der März für einen Monat mit den höchsten Wasserständen und der Juli mit den tiefsten Absenkungen. Verglichen werden ausschließlich die Medianwerte der Perioden 2003/07 und 2048/52.

Die Abbildungen 70 und 71 zeigen die Differenz der berechneten Grundwasserstände des Referenzszenarios der Periode 2003/07 zum B2-Basisszenarios der Periode 2048/52 bzw. des B2-Basisszenarios der Periode 2003/07 zur Periode 2048/52 für jeden einzelnen Staubereich. Es wird deutlich, dass sich das veränderte Wasserdargebot nicht gleichmäßig im gesamten Niederungsgebiet auf die Grundwasserverhältnisse auswirkt. Die zentralen Spreewaldbereiche, welche vorrangig vom Spreezufluss versorgt werden, sind weniger von sinkenden Grundwasserständen betroffen, als der Versorgungsbereich des Großen Fließes (schraffierte Fläche) oder die Randbereiche mit 25 cm bis 50 cm tieferen Grundwasserständen im Median der Periode 2048/52 gegenüber 2003/07. Die Gründe: Das Große Fließ wird vom Einzugsgebiet der Malxe mit Wasser versorgt. Der Abfluss der Malxe besteht auch heute noch zu einem großen Anteil aus Sumpfungswässern von Tagebauen (vgl. Abschnitt 4.2). Mit Auslaufen dieser Tagebaue nach 2030 und der dann anstehenden Flutung ihrer Restlöcher werden sich die Abflussmengen in der Malxe stark reduzieren, was sich in den von ihr zu versorgenden Teilen der Spreewaldniederung auswirkt, wenn die Wasserverteilung innerhalb der Niederung unverändert bleibt. Bei den Randbereichen ist das Verhältnis von zu versorgender Niederungsfläche zu dargebotsbildender Einzugsgebietsfläche sehr ungünstig, so dass sich eine Verringerung der Sommerabflüsse aus den kleinen Teileinzugsgebieten in einem verstärkten Absinken der Grundwasserstände in den betreffenden Staubereichen der Niederung niederschlägt.

Die Grundwasserflurabstände wurden anhand der berechneten Ist-Grundwasserstände der Staubeiche und der Geländehöhen berechnet. Im März unterscheiden sich die Medianwerte der Szenarien der drei ausgewählten Zeitscheiben nur unwesentlich voneinander, daher wird nur das Referenzszenario dargestellt (Abb. 72). Entsprechend den hohen Stauzielen sind die zentralen Bereiche von OSW und USW teilweise überstaut. Auch im Juli bleiben diese Bereiche die feuchtesten, jedoch mit deutlich trockeneren Bereichen im B2-Basisszenario der Periode 2048/52 (Abb. 73 bis 75). In den Randbereichen mit ansteigendem Gelände fallen hier die Grundwasserstände um mehr als 2 m unter Flur ab.

Bei allen Ergebnisdarstellungen gilt zu beachten, dass von den gegenwärtigen Wasserverteilungsgrundsätzen ausgegangen wurde. Es wurde der Ist-Zustand der Wasserbewirtschaftung mit veränderten klimatischen Rahmenbedingungen und veränderten Zuflüssen aus den Teil-einzugsgebieten kombiniert. Wasserwirtschaftliche Handlungsoptionen wurden noch nicht berücksichtigt.

## 5.7 Gebietsabfluss

Der Gebietsabfluss wird als Summe der vier Hauptabflüsse Spree (Leibsch), Dahme-Umflut-Kanal, Randkanal und Pretschener Spree ausgewertet. Zu berücksichtigen ist, dass die Zuflüsse bei der ungekoppelten Variante aus Datenreihen übernommen wurden und somit keine direkte Beeinflussung der Abflüsse unterhalb des Spreewaldes durch den Bedarf des Unterliegers Berlin erfolgen konnte. Bei gekoppelter Rechnung wäre dieses möglich. Bei nicht gedecktem Wasserbedarf und entsprechend hoher Priorität des Berlin-Zuflusses könnte Wasser aus den Speichern abgegeben werden, welches sich auf die Abflüsse unterhalb des Spreewaldes auswirkt.

Die Jahressgänge des Gesamtabflusses zeigen einen ausgeprägten innerjährlichen Gang mit dem Minimum im Sommer, obwohl die wasserwirtschaftlich überprägten Zuflussreihen diesen nicht unbedingt aufwiesen (Abb. 76). Im Median ändern sich die Abflüsse relativ wenig, da der erhöhte Verbrauch und die nicht ausreichenden Zuflüsse zwangsläufig zur weiteren Ausschöpfung des Gebietswasserspeichers und damit zu tieferen Grundwasserständen führen. Dieses ist aber auch nicht unbegrenzt möglich, so dass die Abflüsse in den trockenen Jahren stärker zurück gehen.

Die Differenz zwischen den Gebietsab- und -zuflüssen unterstreicht den Zehrgebietscharakter des UG im Sommerhalbjahr (Abb. 77). Die Unterschiede zwischen dem 50. und 80. Perzentil sind nur gering. Es bestätigt die stärkere Speicherausschöpfung in den trockeneren Jahren. Weiterhin ist eine Verschiebung des Periodenmaximums erkennbar. Unter Referenzbedingungen liegt das Maximum der Zehrwirkung von Mai bis Juli, im B2-Basisszenario ausschließlich im Mai und Juni (Abb. 78 und 79). Ursache sind die engen Wechselbeziehungen von Wasserbedarf und -angebot sowie Verbrauch aus dem Gebietspeicher bzw. dem Zufluss. Die veränderten Klimabedingungen führen insbesondere im Frühjahr zu einem erhöhten Wasserverbrauch. Zu diesem Zeitpunkt stehen auch noch ausreichend Zuflüsse zur Verfügung, so dass sich die Differenz zwischen Gebietsabfluss und -zufluss (Zehrwirkung) gegen-

über den Referenzbedingungen verstärkt. Im Sommer steigt zwar auch der Bedarf, aber die Zuflüsse können dieses nicht mehr entsprechend kompensieren, die Grundwasserstände sinken stärker ab als im Referenzszenario. Damit vergrößern sich die Grundwasserflurabstände, was wiederum eine Reduzierung der Verdunstung bewirkt und dazu führt, dass die aufgrund der meteorologischen Bedingungen mögliche Zehrwirkung nicht voll ausgeschöpft werden kann.

## **6 Moorschutzszenario - Wirkung veränderter Wasserbewirtschaftung im Niederungsgebiet auf ausgewählte Wasserhaushaltsgrößen**

### **6.1 Wasserbedarf und -entnahme**

Die Wirkungen der veränderten Stauziele im Moorschutzszenario gegenüber dem Ist-Zustand werden am Zusatzwasserbedarf und an der Zusatzwasserentnahme des Gesamtgebietes der Periode 2003/07 des B2-Basissszenarios dargestellt (Abb. 80 und 81). Es zeigt sich, dass der Wasserbedarf aufgrund des Flächenanteils der Moorschutzflächen, geringerer Grundwasserflurabstände und damit leicht ansteigender Verdunstung (Abb. 82) bezogen auf das Gesamtgebiet nur wenig ansteigt. Ursache für die geringe Bedarfszunahme ist, dass die Speicherauffüllungen in erster Linie durch Stauzielanhebungen in den Wintermonaten erfolgen. Hier kann dieses durch Rückhalt der Niederschlagsüberschüsse erfolgen. Bei den Gesamtentnahmen gibt es praktisch keine Änderungen, da das verfügbare Wasser für beide Szenarien identisch ist und in beiden Fällen gleichermaßen ausgeschöpft wird. Innerhalb des Gebietes ändern sich jedoch die Entnahmen der einzelnen Staubereiche, was sich in den Grundwasserständen widerspiegelt (Abb. 87 und 88).

In einzelnen, direkt von den veränderten Stauzielen des Moorschutzszenarios betroffenen Staubereichen, ändern sich Zusatzwasserbedarf und -entnahme dagegen deutlich. Die Abbildungen 83 bis 85 demonstrieren die Wirkung der Stauzielanhebung am Beispiel eines Staubereichs von 410 ha Fläche mit dem Entwicklungsziel Moorregenerierung. Bei Anstieg der Grundwasserstände im Winter um rd. 25 cm und im Sommer um rd. 50 cm (Abb. 83) steigt der Zusatzwasserbedarf des Staubereichs im Median einzelner Monate um mehr als 100.000 m<sup>3</sup>. Da der ausgewählte Staubereich im OSW direkt an der Spree liegt, kann sein gestiegener Wasserbedarf auch weitgehend durch Entnahmen aus der Spree gedeckt werden. Die Folge ist, dass die Wasserentnahmen für andere nachrangige Staubereiche beim insgesamt beschränkten Wasserdargebot des Spreewaldes zurückgehen müssen. Bei der Änderung des Zusatzwasserbedarfs der Staubereiche ist immer das Zusammenspiel von Verdunstungsänderung infolge der veränderten Grundwasserflurabstände und der Speicherauffüllung/-entleerung im Jahresgang zu berücksichtigen. Verschiebungen in der Stauzielabsenkung im April und Mai führen im dargestellten Beispiel hauptsächlich zu den Bedarfs- und Entnahmeänderungen in diesen Monaten (Abb. 84 und 85).

## 6.2 Gebietswasserspeicheränderung und zusätzlicher Wasserrückhalt

Durch die Stauzielanhebungen auf den vom Moorschutzszenario betroffenen Flächen kommt es im Gesamtgebiet zu einer Vergrößerung des Gebietswasserspeichers. Für die Wasserbilanzierung der Staubereiche wird für jeden Zeitschritt der Speicherinhalt über einem gewählten Bezugsniveau berechnet (s. Abschnitt 2.1.3.2). Da das Bezugsniveau entsprechend der Methode frei gewählt wurde, können die absoluten Speicherwerte nicht direkt ausgewertet werden, aber der Vergleich zwischen Ist-Zustandsszenario und Moorschutzszenario ist möglich. Bei Erreichung der Zielgrundwasserstände wird der Gebietswasserspeicher des UG im Moorschutzszenario gegenüber dem Ist-Zustandsszenario um rd. 2 Mio. m<sup>3</sup> vergrößert. Die Zielgrundwasserstände können aufgrund der eingeschränkten Wasserverfügbarkeit jedoch im Sommer nicht eingehalten werden (Abschnitt 5.6). Da die höheren Zielgrundwasserstände des Moorschutzszenarios hiervon stärker betroffen sind als die Zielgrundwasserstände der Ist-Zustandsszenarien, reduziert sich die mögliche Speichervergrößerung im Moorschutzszenario im 50. Perzentil von 2 Mio. m<sup>3</sup> auf rd. 1,2 Mio. m<sup>3</sup> in den Sommermonaten (Abb. 86). In den feuchteren Jahren (10. Perzentil) kann der Gebietswasserspeicher im Moorschutzszenario um rd. 1,7 Mio. m<sup>3</sup> erhöht werden. Im Vergleich zu den Gesamtzuflüssen entspricht dieses weniger als 5 % der Zuflüsse.

Ein tatsächlicher Wasserrückhalt und damit auch der Rückhalt der darin gelösten Stoffe kann nur durch innerjährliche Speicheränderung und ansteigende Verdunstung erreicht werden. In Überschusszeiten (Winter) wird der Gebietswasserspeicher aufgefüllt, in Defizitzeiten (Sommer) kann daraus zusätzlich gezehrt werden. Dieser Effekt steigt beim Moorschutzszenario gegenüber dem Ist-Zustand um rd. 0,8 Mio. m<sup>3</sup> (Median) an. Der Anstieg der berechneten realen Verdunstung liegt bei 1,3 Mio. m<sup>3</sup> (Summe der Medianwerte April bis September). Die verbleibenden 0,5 Mio. m<sup>3</sup> kommen folglich aus zusätzlichen Wasserentnahmen aus den Zuflüssen während dieser Monate und führen auch zu einer weiteren Reduzierung des Gebietsabflusses in unterhalb gelegene Gebiete.

## 6.3 Grundwasserstände

Der Vergleich der Juli-Grundwasserstände von Ist-Zustandsszenario und Moorschutzszenario unter den Rahmenbedingungen der Periode 2003/07 des B2-Basisszenarios zeigt den Grundwasseranstieg auf den am weitesten oberhalb, an den Gebietszuflüssen gelegenen Staubereichen (Abb. 87). Die Höhe des Anstiegs ist maßgeblich von der Erhöhung der Stauziele abhängig. Der gewünschte, für den Moorschutz positive Grundwasseranstieg kann hier erreicht werden. Deutlich werden aber auch die negativen Folgen auf den weiter unterhalb der Vernässungsflächen gelegenen Staubereiche sichtbar. Hier kommt es in der Folge des erhöhten Verbrauchs auf den Moorschutzflächen zur Zunahme der Versorgungsunsicherheiten und tiefer absinkenden Grundwasserständen in den Sommermonaten. Für den nicht dargestellten USW ergeben sich keine Änderungen.

Der Vergleich der Perioden 2003/07 und 2048/52 des B2-Basisszenarios mit Moorschutz lässt keine andere Entwicklung als beim B2-Basisszenario ohne Moorschutz erkennen (Abb. 88).



Hier sind es wieder die Randflächen und der Vorteilsbereich des Großen Fließes, die von absinkenden Grundwasserständen betroffen sind. Die Ursachen wurden in Abschnitt 5.7 bereits diskutiert. Die positive Wirkung des erhöhten Wasserrückhalts kann die Randbereiche nicht beeinflussen und ist im Vergleich zu Wirkungen der klimatischen Veränderungen und der veränderten Zuflüsse gering.

## 7 Modellkopplung

Die Modellkopplung wird an ausgewählten Ergebnissen des Referenzszenarios der Periode 2003/07 und 10 gerechneter Realisierungen diskutiert. Abbildung 89 zeigt im Vergleich der Gesamtzuflüsse in der Vegetationsperiode deutliche Unterschiede zwischen den beiden Vorgehensweisen. Im Fall der Datenübernahme erfolgt im Prinzip keine Beeinflussung der Wasserbewirtschaftung im Einzugsgebiet durch den Spreewald. Anforderungen des unterhalb des Spreewaldes liegenden Bilanzprofils Große Tränke (Übergabeprofile zwischen Brandenburg und Berlin) an Wasserabgaben aus den Speichern im Einzugsgebiet kommen unverändert dort an. Der Spreewald erhält hierdurch zwar auch einen anderen Zufluss, sein Wasserhaushalt ändert sich aber nicht. Dieses entspricht aber nicht den tatsächlichen Verhältnissen. Ein erhöhter Zufluss würde in den meisten Fällen auch die Wasserentnahme durch den Spreewald beeinflussen, es sei denn, sein Bedarf wäre schon vorher vollständig gedeckt, was aber häufig nicht der Fall ist (s. Abschnitt 5.4). Um z. B. den Bedarf von Große Tränke zu decken, muss daher nicht nur die dort fehlende Wassermenge aus den Speichern abgegeben werden, sondern zusätzlich noch der nicht gedeckte Wasserbedarf des Spreewaldes einbezogen werden. Bei der Berechnung mit Modellkopplung wird dieser Effekt berücksichtigt, wodurch es zu insgesamt anderen Zuflusswerten zum Spreewald kommt. Die höheren Zuflüsse führen es dann auch zu höheren Abflüssen aus dem Spreewald (Abb. 90).

Die Auswirkungen auf den Wasserhaushalt des UG veranschaulicht der Vergleich der Differenz von Gebietszufluss und –abfluss (Abb. 91). Die Differenz zeigt, ob das UG zur Abflussbildung beiträgt oder als Zehrgebiet wirkt. Negative Werte verdeutlichen den Zehrcharakter des Niederungsgebietes in den Sommermonaten. Hier fließt weniger aus dem Spreewald ab, als ihm insgesamt zufließt. Die Unterschiede zwischen beiden Berechnungsformen sind gering. Die mit der indirekten Modellkopplung (Datenübergabe) ermittelten Ergebnisse für den Wasserhaushalt des Niederungsgebietes können daher auch vollständig für Aussagen zur Entwicklung des UG genutzt werden.

Problematischer ist die grundsätzliche Wirkung des Niederungsgebietes im Einzugsgebietsmodell zu sehen. Hier werden durch die direkte Kopplung der beiden Modelle ArcGRM GLOWA und ArcGRM Spreewald qualitativ bessere Ergebnisse erzielt. Der entwickelte Prototyp der Modellkopplung löst die technischen Fragen der Modellkopplung, führt insbesondere im ArcGRM GLOWA aber auch noch zu weiteren Fragen bzgl. der Rangzahlen der Nutzer. Diese konnten noch nicht alle im Rahmen des GLOWA-Elbe-Projektes geklärt werden.

## **8 Entwicklung von Managementstrategien zur Minderung negativer Folgen**

In den bisher bearbeiteten Szenarien wurde im Niederungsgebiet der Ist-Zustand und als eine Handlungsoption der verstärkte Schutz der Niedermoorflächen durch Anhebung der Zielgrundwasserstände untersucht. Weitere Handlungsoptionen wie eine Veränderung der Zuflussverteilung im UG oder eine langfristige Änderung der Landnutzung im UG wurden im Rahmen des Projektes nicht mehr bearbeitet. Nach den vorliegenden Ergebnissen wäre dieses aber die notwendige Konsequenz, um Strategien zur Minderung der negativen Wirkungen auf Wasserhaushalt, Ökologie und Wirtschaft zu entwickeln.

Im Teilprojekt Obere Spree (BTU Cottbus) wurden weitere Handlungsoptionen der Wasserbewirtschaftung im Einzugsgebiet betrachtet. Die Wirkung dieser Szenarien auf den Wasserhaushalt des Spreewaldes wurde im TGP Spreewald nicht untersucht. Aus Kapazitätsgründen sollten zunächst auch die weiteren Handlungsoptionen im UG selbst bearbeitet und dann in Abstimmung mit den Bearbeitern des Einzugsgebietes gezielte Handlungsoptionen zur Stabilisierung des Wasserhaushalts im Feuchtgebiet entwickelt und untersucht werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bilden dann die Grundlage für die Entwicklung von Managementstrategien zur Minderung negativer Folgen des globalen Wandels auf den Wasserhaushalt des UG Spreewald.

## **9 Zusammenfassung**

Das Spreewald befindet sich in einer der niederschlagsärmeren Regionen Deutschlands. Aufgrund der geomorphologischen Gegebenheiten im Baruther Urstromtal und der ausreichenden Zuflüsse aus den oberhalb gelegenen Teileinzugsgebieten der Spree konnte hier ein einzigartiges Feuchtgebiet entstehen, welches in seiner jetzigen Form aber erst durch Jahrhunderte langes Wirken des Menschen geformt wurde. Die meisten der über 1.600 km Fließgewässer wurden vom Menschen geschaffen, werden auch heute in ihren Wasserständen und ihrem Abflussgeschehen von Stauanlagen reguliert. Die Zielwasserstände orientieren sich an der Nutzung der Flächen und Fließe bzw. den langfristigen Entwicklungszielen. Um ihre Einhaltung zu sichern, werden bei Bedarf die Zuflüsse aus den oberhalb gelegenen Teileinzugsgebieten über das Gewässersystem in der Niederung verteilt und in Überschusszeiten die Wasserbilanzüberschüsse abgeführt.

Ein gesondertes Problem stellt das anthropogen stark überprägte Einzugsgebiet dar. Jahrzehntlang gab es aufgrund der Braunkohleförderung im Einzugsgebiet der Spree und der damit verbundenen Sümpfungswässer keine Wasserversorgungsprobleme in der Spreewaldniederung. Mit dem gesellschaftlichen und ökonomischen Wandels kam es zum Zusammenbruch der Braunkohleförderung in der Lausitz. Damit fielen die Sümpfungswässer teilweise weg, entstand ein großer zusätzlicher Wasserbedarf für die Flutung der Tagebaurestlöcher. In der Folge leidet der Spreewald bereits heute unter Wassermangel in den Sommermonaten.

Die Auswertung des internationalen Kenntnisstandes verdeutlicht die besonderen Anforderungen an die Modellierung des Wasserhaushalts grundwassernaher Standorte. Entsprechend der breiten Palette der Standortbedingungen gibt es auch unterschiedlichste Herangehensweisen und Schwerpunktsetzungen bei der Untersuchung des Wasserhaushalts von Feuchtgebieten. Eine besondere Bedeutung spielt die Verdunstung und ihre Modellierung bei grundwassernahen Standortverhältnissen sowie die enge Verbindung von Feuchtgebiet und Einzugsgebiet. Die Wasserbewirtschaftung in Feuchtgebieten ist ein spezielles Problem der niederschlagsarmen Regionen Mittel- und Osteuropas. Sie ist auch in der ehemals intensiven landwirtschaftlichen Nutzung in diesen Gebieten begründet und hat aufgrund der dort geschaffenen Regulierungssysteme Einfluss auf den gesamten Wasserhaushalt des Feuchtgebietes.

Als Modellkonzept wurde eine Kombination aus einem Wasserbewirtschaftungsmodell (ArcGRM) und einem Flächenwasserbilanzmodell für grundwassernahe Standorte (WABI) gewählt. Letzteres wurde aufgrund der besonderen Standortanforderungen im UG bzgl. des Flächenwasserspeichers und des Verdunstungsansatzes im Rahmen des Projektes weiterentwickelt. Damit vergrößert sich der Anwendungsbereich beider Modelle erheblich.

Zu anderen Vorhaben im Projektverbund GLOWA-Elbe gibt es enge methodische und inhaltliche Verbindungen. Die gesamte Bearbeitung wurde entsprechend des IMA von GLOWA-Elbe durchgeführt. Die Szenarien der Klimaentwicklung (TP 4) bilden die Grundlage der im Spreewald untersuchten Entwicklungsszenarien und der von VH 2.2 auf der Basis des Modellsystems ArcGRM GLOWA bereitgestellten Zuflüsse aus den Teileinzugsgebieten.

Eine besonders enge Verbindung und Zusammenarbeit gibt es zwischen den VH des TGP Spreewald. Kernstück des integrativen Modellverbunds ist das Wasserbewirtschaftungsmodell ArcGRM Spreewald, über das auch die Integration in die größere Maßstabsebene des Spree/Havel-Gebietes hergestellt wird. ArcGRM Spreewald nutzt zum einen Daten zur Verdunstung (VH 2.6) und zur Landnutzung (VH 2.7) und liefert die von allen anderen Spreewald-Vorhaben benötigten Daten zur Entwicklung der Grundwasserstände in den Entwicklungsszenarien. Der Modellverbund zwischen einzelnen Vorhaben erfolgt dabei nicht durch direkte Kopplung von Modellen, sondern durch Datentransfer. Voraussetzung für das Funktionalisieren eines solchen Modellverbundes ist eine einheitliche Datengrundlage und klar definierte Schnittstellen. Die erforderliche Transferfunktion übernehmen in diesem Fall die Staubereiche.

Das Modellgebiet von ArcGRM Spreewald beschränkt sich auf die Niederung des Spreewaldes. Außerhalb liegende Flächen, die direkt an die Niederung angrenzen und kein eigenes Teileinzugsgebiet bilden, werden als Randflächen definiert und ihr Wasserdargebot aus den Berechnungen von VH 2.9 übernommen. Die Niederung selbst wurde in insgesamt 197 Staubereiche unterteilt, die im Modell als Wassernutzer behandelt werden. Das komplexe Gewässersystem wurde entsprechend der Bedeutung der Gewässer für die Zuflussverteilung und Überschussableitung reduziert und vereinfacht als Strangschema abgebildet. Für jeden Gewässerknoten, an dem es zur Aufteilung des Zuflusses auf zwei oder mehrere Gewässer kommt, wurden Verteilungsregeln als Funktionen des Zuflusses und des Wasserbedarfs unterhalb liegender Nutzer definiert. Jeder Staubereich wird durch Parametersätze zum Flächen-

speicher, zur Geländehöhenverteilung der Elementarflächen und zu den Stauzielen charakterisiert. Diese Arbeiten zur Erstellung der Parametersätze wurden im GIS durchgeführt und die Daten als Datenbanken für das Modell bereitgestellt.

Das Wasserdargebot aus den Teileinzugsgebieten wurde zunächst ebenfalls als Datenreihen von VH 2.2 übernommen. Gemeinsam mit VH 2.9 wurde ein Prototyp für eine direkte Modellkopplung zwischen zwei ArcGRM Modellen entwickelt und mit ArcGRM GLOWA und ArcGRM Spreewald erfolgreich getestet. Damit ist eine bessere Ermittlung der Wirkung des Feuchtgebiets auf die Abflüsse in unterhalb liegende Gebiete möglich. Aus Zeitgründen kam die gekoppelte Version allerdings nicht mehr für die Szenarioanalysen zum Einsatz.

Die Szenarienentwicklung erfolgte in enger Kooperation aller VH des TGP Spreewald und in Abstimmung mit den Stakeholdern vor Ort. So wurden zunächst zwei Szenarien einer möglichen Entwicklung im Spreewald mit zwei unterschiedlichen Rahmenbedingungen kombiniert. Diese vier Szenarien wurden von allen VH im TGP Spreewald bearbeitet und ausgewertet.

Die Ist-Zustandsszenarien zeigen zunächst die Auswirkungen der veränderten Rahmenbedingungen auf einzelne Wasserhaushaltsgrößen. Infolge des Temperaturanstieges und erhöhter potentieller Verdunstung kommt es auch zu einem Anstieg der realen Verdunstung um rd. 7 Mio. m<sup>3</sup> im Zeitraum April bis September von Periode 2003/07 bis 2048/52. Da die Grundwasserstände unter veränderten klimatischen Bedingungen bis 2050 aufgrund des nicht ausreichenden Wasserdargebots aber leicht absinken, fällt dieser Anstieg der realen Verdunstung z. B. geringer aus, als die Differenz zwischen dem langjährigen Mittel der berechneten realen Verdunstung der zurückliegenden 50 Jahre (Referenzszenario 2003/07) und dem gegenwärtigen Niveau (B2-Basiszenario 2003/07) (rd. 11 Mio. m<sup>3</sup>). Die erhöhte reale Verdunstung und leicht abnehmende Sommerniederschläge führen zu einem Anstieg des Zusatzwasserbedarfs von rd. 30 mm/Monat im Median der berechneten 100 Realisierungen. Da das verfügbare Wasserdargebot insgesamt nicht ansteigt, wächst der Median des Zusatzwasserdefizits im Sommer auf rd. 45 mm/Monat bis 2050 an. Damit erhöhen sich die Unsicherheiten in der Bedarfsdeckung und führen in der Folge häufiger zu tiefer absinkenden Grundwasserständen.

Bleibt die Wasserbewirtschaftung und Flächennutzung, wie in den Ist-Zustandsszenarien unterstellt, unverändert, werden die Auswirkungen auf die Grundwasserstände im UG sehr differenziert ausfallen. Die nördlichen und südlichen Bereiche der Niederung sowie die gegenwärtig vorrangig mit Zuflüssen aus dem Einzugsgebiet der Malxe versorgten Bereiche des OSW werden deutlich stärker von absinkenden Grundwasserständen betroffen sein, als die zentralen, vorrangig von der Spree versorgten Bereiche des OSW. Die Ursachen liegen in den unterschiedlichen Entwicklungen der einzelnen Teileinzugsgebiete begründet, die auch zukünftig, wie im Fall der Malxe, stärker von ökonomischen Entwicklungen beeinflusst werden können als von klimatischen Veränderungen. Die differenzierten Auswirkungen innerhalb des Gebietes zeigen weiterhin, dass eine kleinräumigere Betrachtung durchaus sinnvoll ist, zumal dieses die Ebene ist, in der Entwicklungsplanungen für die nächsten Jahrzehnte vonstatten gehen.

Die Anhebung der Stauziele auf den Niedermoorflächen führt im Moorschutzszenario zu einer leichten Zunahme des Wasserverbrauchs auf den betreffenden Flächen. Da das Wasser-GLOWA-Elbe: Vorhaben 2.3: Wasserhaushalt/Wassermanagement Spreewald

dargebot insgesamt unverändert bleibt kommt es zu einer Umverteilung des verfügbaren Zusatzwassers im Gebiet. Die Moorschutzflächen mit höherer Versorgungspriorität als die unterhalb von ihnen liegenden Flächen können ihren erhöhten Bedarf zum einen aus dem auf den Flächen zusätzlich gespeichertem Wasser decken, reduzieren aber auch das Wasserdargebot für die unterhalb liegenden Flächen. Durch die Anhebung der Stauziele steigt der Flächenspeicherinhalt des UG in den Wintermonaten um insgesamt rd. 2 Mio. m<sup>3</sup> an. Im Sommer können die Zielgrundwasserstände nicht gehalten werden und der zusätzliche Speicherinhalt sinkt auf 1,2 Mio. m<sup>3</sup> im Median der 100 berechneten Realisierungen.

Die Anwendung des Prototyps der direkten Modellkopplung von ArcGRM GLOWA und ArcGRM Spreewald zeigt die Vorteile dieser Art der Kopplung bei Untersuchungen zur Wirkung des Feuchtgebietes im Einzugsgebietsmaßstab. Sie sind eine wichtige Vorarbeit für ein elbweites Bewirtschaftungsmodell auf der Basis eines ArcGRM, machen aber auch die Notwendigkeit der Entwicklung aktiver Module für Landschaftselemente mit ausgeprägtem Zehrcharakter, wie es Feuchtgebiete jeder Art unter den klimatischen Bedingungen des nordostdeutschen Elbeeinzugsgebietes sind, deutlich. Andererseits zeigen die Testuntersuchungen die Grenzen der Detailliertheit auf, mit gearbeitet werden kann. Bei der Bearbeitung größerer Flussgebiete muss die Komplexität in den Feuchtgebietsmodulen reduziert werden.

Die bisher für das UG untersuchten Handlungsoptionen zur Minderung negativer Folgen des globalen Wandels reichen noch nicht aus, um daraus schon Handlungsstrategien abzuleiten. Hier sind noch weitere Untersuchungen erforderlich. Mit dem Modell ArcGRM Spreewald wurde das geeignete Werkzeug im Rahmen des VH 2.3 geschaffen. Zu untersuchende Handlungsoptionen wären z. B. die gezielte Veränderung der Landnutzung mit den daran gebundenen Stauzielen, eine Bevorteilung der zentralen Bereiche des Spreewaldes durch Veränderung der Prioritäten in der Verteilung der Zuflüsse, um so diese Bereiche langfristig im Bestand zu sichern, oder eine Wasserbewirtschaftung im Einzugsgebiet mit der bevorzugten Einbeziehung der Speicher für die Versorgung des Feuchtgebietes. Neben den Folgen für den Wasserhaushalt im UG sind die Auswirkungen auf die Ökologie und Wirtschaft des Gebietes zu betrachten und auch die Kosten für die veränderte Wasserbewirtschaftung einzubeziehen. Bei den Handlungsoptionen zum Einzugsgebiet sollte die Version mit der direkten Modellkopplung genutzt werden.

## **II-2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Die im VH 2.3 des GLOWA-Elbe-Projektes erarbeiteten Ergebnisse bilden zunächst die Grundlage für die Untersuchungen zu ökologischen und ökonomischen Fragestellungen in den anderen VH des TGP Spreewald. Mit dem Prototyp der Modellkopplung wurde eine Grundlage für den Aufbau eines ArcGRM Elbe in der Weiterführung des GLOWA-Elbe-Projektes geschaffen.

Die Ergebnisse zum Flächenwasserhaushalt der Niederungsflächen flossen bereits in die Untersuchungen im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes „Untersuchungen zur Gewässerbe-  
GLOWA-Elbe: Vorhaben 2.3: Wasserhaushalt/Wassermanagement Spreewald

schaffenheitsentwicklung der Spree“, TP 4 „Stoffumsatz im Spreewald“ ein. Die Wasserentnahmen und Rückleitungen der Staubereiche sind Grundlage für Berechnungen zu Stoffakkumulationen und Stoffausträgen in der Niederung.

Für Planungen im laufenden GRSP Spreewald wurde das Modell ArcGRM Spreewald vom Zweckverband GRSP angefordert und bereits vom zuständigen Planungsbüro eingesetzt. Das verantwortliche Planungsbüro wurde bei der Einarbeitung und Anwendung unterstützt. Damit ist eine unmittelbare wirtschaftliche Anschlussfähigkeit bereits gegeben. Erst durch die methodischen Entwicklungen aus GLOWA-Elbe wird es teilweise möglich, die Wirkungen der im GRSP geplanten Maßnahmen abzuschätzen. Im Rahmen des GRSP wurde die Datengrundlage des Modells weiter verbessert, indem für große Teile des UG eine Laser-Scan-Befliegung durchgeführt wurde. Das verbesserte Höhenmodell steht dem VH 2.3 ebenfalls zur Verfügung, wurde in die dargestellten Ergebnisse aber noch nicht einbezogen.

Das Modell ArcGRM Spreewald und die erzielten Ergebnisse wurden in einer Arbeitsgruppensitzung der Länderarbeitsgemeinschaft Sachen-Brandenburg-Berlin „Flussgebietsbewirtschaftung Spree - Schwarze Elster“, den Betreibern des ArcGRM Spree/Schwarze Elster (Basismodell des ArcGRM GLOWA), vorgestellt. Im Ergebnis wurde beschlossen, auf der Basis des ArcGRM Spreewald eine vereinfachte Version des Spreewaldmodells zu entwickeln und in das bestehende Planungsmodell zu übernehmen, um dieses zu verbessern. Die Voruntersuchungen hierzu wurden bereits von dem das ArcGRM Spree/Schwarze Elster betreuenden Büro durchgeführt und für 2004 die Umsetzung geplant.

Die Szenarien mit verstärktem Moorschutz im Untersuchungsgebiet Spreewald wurden im besonderen Interesse der Biosphärenreservatsverwaltung Spreewald in die Betrachtungen aufgenommen. Die Ergebnisse werden in den Entscheidungen und bei der Entwicklungsplanung der Behörde einfließen.

Das entwickelte Modell kann weiterhin im Rahmen von Untersuchungen zum Programm Landschaftswasserhaushalt Brandenburg des Landesumweltamtes Brandenburg genutzt werden. Die aufgezeigte Bedeutung der sich ändernden klimatischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen für den Wasserhaushalt des Feuchtgebietes Spreewald sollte auch in den Planungen für andere Gebiete Berücksichtigung finden.

Die Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) bietet weitere gute Voraussetzungen für die Anwendung der Ergebnisse des VH 2.3. So werden in der EU-WRRL Bewirtschaftungspläne für jedes Flussgebiet gefordert, die geeignete Maßnahmen für das Erreichen der Umweltziele beschreiben. Die entwickelte Methodik bietet die Möglichkeiten hierfür. So kann die Wirkung von wasserwirtschaftlichen Maßnahmen im Einzugsgebiet auf das Grundwasserregime im Feuchtgebiet analysiert oder Möglichkeiten zur Wasser- und Stoffretention in der Niederung untersucht werden.

## **II-3 Während der Bearbeitung bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen**

Im Auftrag des Landesumweltamtes Brandenburg wurde eine Studie zur Staugürtelschließung im Spreewald (LUA, 2002) erarbeitet. Große Teile dieser Arbeit standen dem Projekt in Abstimmung mit dem Landesumweltamt dankenswerter Weise schon vor der endgültigen Abnahme der Studie zur Verfügung und konnten so noch in den Modellaufbau einfließen. Inhaltlich betraf es vor allem die Vervollständigung und Aktualisierung der wasserwirtschaftlichen Anlagen, die Entwicklung der Verteilungsregeln und auch die Stauziele für die Staugürtel des UG.

Die Planungen für das GRSP Spreewald liefen teilweise parallel zum BMBF-Projekt und konnten sich durch die gute Zusammenarbeit mit dem Zweckverband des GRSP gut ergänzen. Aktuell erhobene Daten aus dem GRSP standen auch dem TGP Spreewald zur Verfügung, die Szenarien wurden teilweise gemeinsam entwickelt.

## **II-4 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen**

### **Erfolgte Veröffentlichungen:**

Dietrich, O., M. Redetzky & K. Schwärzel (2002): Modelling the water balance of wetlands with drainage/sub-irrigation systems and surface water surplus integrated in watershed management model. Conference on Water Resources and Environment Research, Dresden 2002, Schriftenreihe des Institutes für Abfallwirtschaft und Altlasten, Volume I, Modeling Water Resources Management, S. 382-388.

Dietrich, O. & K. Schwärzel (2002): Untersuchungen zu Auswirkungen des globalen Wandels auf den Wasserhaushalt von Feuchtgebieten am Beispiel des Spreewaldes. Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie, Band 32, Berlin 2002, S. 264.

Grossmann, M., O. Dietrich, U. Bangert, K. Schwärzel, G. Vater, V. Hartje, I. Kowarik, J. Quast & G. Wessolek (2002): Management strategies for regulated wetland ecosystems in the context of global change: case study Spreewald. German programme on Global Change in the Hydrological Cycle (Phase I, 2000 – 2003) Status Report 2002, S. 14-17.

Dietrich, O. & M. Redetzky (2003): WbalMo Spreewald – ein Modell zur Analyse des globalen Wandels auf den Wasserhaushalt eines Feuchtgebietes mit Wasserbewirtschaftung. WASY Aktuell (Firmenschrift), H. 3, Oktober 2003, S. 1-3.

Dietrich, O., J. Quast & M. Redetzky (2003): ArcGRM Spreewald - ein Modell zur Analyse der Wirkungen des globalen Wandels auf den Wasserhaushalt eines Feuchtgebietes mit Wasserbewirtschaftung. Tag der Hydrologie 2003, Freiburg, 20.-21.03.2003, "Klima – Wasser – Flussgebietsmanagement im Lichte der Flut", Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft (im Druck).

Dietrich, O. & J. Quast (2003): Wirkungen des globalen Wandels auf den Wasserhaushalt von Feuchtgebieten – Modelluntersuchungen am Beispiel des Spreewaldes. Fachtagung „Ökohydrologie & Hydrochemie von Mooren und Feuchtgebieten“, Sankelmark 6.-8. April 2003, Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung (im Druck).

### **Geplante Veröffentlichungen:**

Dietrich, O., J. Quast & M. Redetzky: Wirkungen des globalen Wandels auf den Wasserhaushalt von Feuchtgebieten – Untersuchungen mit einem Langfristbewirtschaftungsmodell am Beispiel des Spreewaldes. Publikation zur Fachtagung „Moderne Methoden und Instrumentarien für die Wasserbewirtschaftung und den Hochwasserschutz“, Dresden 3.-4.11.2003.

Dietrich, O. et al.: Vorstellung der Ergebnisse im Rahmen eines geplanten PIK-Reports zu GLOWA-Elbe.

Dietrich, O., M. Redetzky & K. Schwärzel: Vorstellung des Wasserbewirtschaftungsmodells ArcGRM Spreewald und Anwendung für Untersuchungen zum globalen Wandel. Englischsprachige Fachzeitschrift

Dietrich et al.: Vorstellung des integrativen Modellkonzepts des TGP Spreewald und Ergebnisse. Journal of Regional Environmental Change

### **Vorstellung der Ergebnisse in Vorträgen:**

Dietrich, O., M. Redetzky & K. Schwärzel (2002): Modelling the water balance of wetlands with drainage/sub-irrigation systems and surface water surplus integrated in watershed management model. International Conference on Water Resources and Environment Research, Dresden 2002.

Dietrich, O. & K. Schwärzel (2002): Untersuchungen zu Auswirkungen des globalen Wandels auf den Wasserhaushalt von Feuchtgebieten am Beispiel des Spreewaldes. 32. Jahrestagung der Gesellschaft für Ökologie, 16. - 20. September 2002, Cottbus.

Dietrich, O. (2002): Auswirkungen auf den Wasserhaushalt des Spreewaldes und Optionen für das Wassermanagement. GLOWA-Elbe Statuskonferenz Potsdam 04.12.2002.

Dietrich, O. (2003): GLOWA-Elbe Auswirkungen des Globalen Wandels auf Umwelt und Gesellschaft im Elbe-Gebiet - Teilvorhaben (ZALF/LWH): Wasserhaushalt und Wassermanagementstrategien für die Feuchtgebietsregion Spreewald. Vorstellung von GLOWA-Elbe im ZALF-Kollegium 06.01.2003.

Dietrich, O. (2003): Wasser- und Stoffhaushalt von Feuchtgebieten. Vorstellung vor Staatssekretär und Abteilungsleitern MLUR Brandenburg und ZALF-Kollegium 16.01.2003.

Dietrich, O., J. Quast & M. Redetzky (2003): ArcGRM Spreewald - ein Modell zur Analyse der Wirkungen des globalen Wandels auf den Wasserhaushalt eines Feuchtgebietes mit



Wasserbewirtschaftung. Tag der Hydrologie 2003, Freiburg, 20.-21.03.2003, "Klima – Wasser – Flussgebietsmanagement im Lichte der Flut".

Dietrich, O. & J. Quast (2003): Wirkungen des globalen Wandels auf den Wasserhaushalt von Feuchtgebieten – Modelluntersuchungen am Beispiel des Spreewaldes. Fachtagung „Ökohydrologie & Hydrochemie von Mooren und Feuchtgebieten“, Sankelmark 6.-8. April 2003.

Dietrich, O. (2003): Niedermoorschutz im Landschaftswasserhaushalt. Moorschutz in Niedersachsen - Ziele, Ansätze, Handlungsfelder für die Erhaltung der Niedermoore, Schneverdingen, 24. - 25. April 2003.

Dietrich, O. (2003): Vorstellung des ArcGRM Spreewald. Staatliches Umweltfachamt Bautzen, AG Flussgebietsbewirtschaftung Spree - Schwarze Elster, Görlitz 28.05.2003.

Dietrich, O., J. Quast & M. Redetzky (2003): Entwicklung des Wasserhaushalts im Spreewald unter dem Einfluss globaler Veränderungen. Jahrestagung der DBG, Frankfurt/O. 1.-5.9.2003.

Dietrich, O. (2003): Wirkungen des globalen Wandels auf den Landschaftswasserhaushalt am Beispiel des Spreewaldes. Informationsveranstaltung zum ALNUS-Projekt, Neu Zauche 9. Oktober 2003.

Dietrich, O., J. Quast & M. Redetzky: Wirkungen des globalen Wandels auf den Wasserhaushalt von Feuchtgebieten – Untersuchungen mit einem Langfristbewirtschaftungsmodell am Beispiel des Spreewaldes. Publikation zur Fachtagung „Moderne Methoden und Instrumentarien für die Wasserbewirtschaftung und den Hochwasserschutz“, Dresden 3.-4.11.2003.

### **Postervorstellungen:**

Dietrich, O., J. Quast & M. Redetzky (2003): Modelluntersuchungen zur Wirkung des globalen Wandels auf den Wasserhaushalt des Spreewaldes. Ökologietage Brandenburg IV „Landschaftswasserhaushalt und Klimaentwicklung in Brandenburg“, 5.-6. Juni 2003, Potsdam.

### **Verwendete Datengrundlagen**

BfN (2000): Gewässerrandstreifenprojekt Spreewald. Bundesamt für Naturschutz, Bonn.

BMU (1998): Hydrologischer Atlas von Deutschland. Herausgegeben vom Bundesministerium Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

DWD (2000): Niederschlagsmessreihen des Deutschen Wetterdienstes der Stationen Burg (Oberspreewald) und Hartmannsdorf (Unterspreewald) von 1970/99

- Hydrographisches Kartenwerk der DDR (1966): Hydrographisches Kartenwerk der Deutschen Demokratischen Republik, M 1 : 200.000, Forschungsinstitut Hydrometeorologie Berlin.
- HYKA50 (1987): Hydrogeologisches Kartenwerk der DDR 1 : 50.000, Institut für Wasserwirtschaft, Halle.
- LAGS (2001): Bodenkarte des Biosphärenreservats Spreewald. Landesanstalt für Großschutzgebiete Brandenburg.
- LAGS (2001): Gewässerkarte des Biosphärenreservats Spreewald. Landesanstalt für Großschutzgebiete Brandenburg.
- LAGS (1996): Pflege- und Entwicklungsplan für das Biosphärenreservat Spreewald. Landesanstalt für Großschutzgebiete Brandenburg.
- LGRB (2001): Bodenübersichtskarte des Landes Brandenburg, im Maßstab 1 : 300 000 (BÜK 300). Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg.
- LGRB (1998): MMK Brandenburg: Mittelmaßstäbige landwirtschaftliche Kartierung (MMK) im Arc/Info-Format. Landesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg.
- LUA (1999): Moorflächen des Landes Brandenburgs als Arc/Info-Cover. Landesumweltamt Brandenburg.
- LUA (1996): Rahmenkonzept zur Wasserbewirtschaftung im Spreewald. Landesumweltamt Brandenburg, Cottbus, 63 S.
- LUA (2002): Staugürtelschließung Spreewald. Studie im Auftrag des Landesumweltamtes Brandenburg, Cottbus.
- LVA (2000): Digitales Geländemodell DGM 25. Landesvermessungsamt Brandenburg.
- LVA (2001): Digitale Rasterkarten der TK 10. Landesvermessungsamt Brandenburg.
- MUNR (1998): Landschaftsrahmenplan des Biosphärenreservats Spreewald. Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg, Potsdam, 275 S.

## **Literaturverzeichnis**

- Abtew, W. & J. Obeysekera (1995): Lysimeter study of evapotranspiration of cattails and comparison of 3 estimation methods. Transactions of the ASAE, 38: 121-129.
- Abtew, W. (1996): Evapotranspiration measurements and modeling for three wetland systems in south Florida. Water Res. Bull., 32: 465-473.
- Almendinger, J.E. & J.H. Leete (1998): Regional and local hydrogeology of calcareous fens in the Minnesota river Basin, USA. Wetlands, 18: 184-202.
- Arnold, J.G., P.M. Allen & D.S. Morgan (2001): Hydrologic model for design and constructed wetlands. Wetlands, 21: 167-178.

- Bauer, M. und H. Karbaum (1969): Zur Berechnung der Verdunstung flacher Binnenseen ohne örtliche Sondermessungen. *Wasserwirtschaft - Wassertechnik* 19 (1): 23 - 28; Berlin.
- Bedford, B.L. (1996): The need to define hydrologic equivalence at the landscape scale for freshwater wetland mitigation. *Ecological Appl.*, 6: 57-68.
- Behrendt, A., G. Schalitz & D. Hölzel (1998): Nährstoff- und Wasserbilanzen von Niedermoorgrasland in Abhängigkeit vom Grundwasserflurabstand. *Arch. Acker- Pfl. Boden.*, 42: 479-485
- Bidlake, W.R. (2000): Evapotranspiration from a bulrush-dominated wetland in the Klamath Basin, Oregon. *Journal of the American Water Resources Association*, 36: 1309-1320.
- Boeye, D. & R.F. Verheyen (1992): The hydrological balance of a groundwater discharge fen. *J. Hydrol.*, 137: 149-163.
- Bolster, C.H. & J.E.Saiers (2002): Development and evaluation of a mathematical model for surface-water flow within the Shark River Slough of the Florida Everglades. *J. Hydrol.*, 259: 221-235.
- Bradley, C. & D.J. Gilvear (2000): Saturated and unsaturated flow dynamics in a floodplain wetland. *Hydrol. Process.*, 14: 2945- 2958.
- Bradley, C. (2002): Simulation of the annual water table dynamics of a floodplain wetland, Narborough Bog, UK. *J. Hydrol.*, 261: 150-172.
- Burba, G.G., S.B. Verma & J. Kim (1999a): A comparative study of surface energy fluxes of three communities (*Phragmites australis*, *Scirpus acutus*, and open water) in a prairie wetland ecosystem. *Wetlands*, 19: 451-457.
- Burba, G.G., S.B. Verma & J. Kim (1999b): Surface energy fluxes of *Phragmites australis* in a prairie wetland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 94: 31-51.
- Campbell, D.I. & J.L. Williamson (1997): Evaporation from a raised peat bog. *J. Hydrol.*, 193: 142-160.
- Dannowski, R., O. Dietrich & R. Tauschke (1999): Wasserhaushalt einer vernäbten Niedermoorfläche in Nordost-Brandenburg. *Archiv für Naturschutz und Landschaftsforschung*, Vol. 38, S. 251-266.
- Denhartog, G., H.H. Neumann, K.M. King & A.C. Chipanshi (1994): Energy budget measurements using eddy-correlation and bowen-ratio techniques at the kinosheo lake tower site during the northern wetlands study. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 99: 1539-1549.
- Devito, K.J., M.J. Waddington & B.A. Branfireun (1997): Flow reversals in peatlands influenced by local groundwater systems. *Hydrol. Process.*, 11: 103-110.
- Dietrich, O., R. Dannowski & J. Quast (1996): GIS-based water balance analyses for fen wetlands. *Internat. Conf. on Application of Geographic Information Systems in Hydrology and*

- Water Resources Management, HydroGIS '96. 16-19 April, Vienna, Vol. of Poster Papers: 83-90; Vienna.
- Dietrich, O., R. Dannowski, J. Quast & R. Tauschke (1996b): Untersuchungen zum Wasserhaushalt nordostdeutscher Niedermoore. ZALF-Bericht Nr. 25: 59 S.; Müncheberg.
- Dietrich, O., R. Dannowski, M. Schramm & P. Stille (1999): Probleme der Wasserbewirtschaftung eines stauregulierten nordostdeutschen Niedermoors. Wasser & Boden 51 (4): 36-40.
- Dietrich, O., J. Quast, J. Blankenburg & P. Heidt (2001): Hydrologische Gebietsanalysen zur Einschätzung der Vernäßbarkeit. In: Kratz, R. und J. Pfadenhauer: Ökosystemmanagement für Niedermoore: Verfahren und Strategien der Renaturierung nord- und ostdeutscher Niedermoore. Verlag Eugen Ulmer & Co Stuttgart, S.34-52.
- Dooge, J. & E. Kuusisto (1998): Climate and water – a 1998 perspective. Report of the Second Intern. Conf. On Climate and Water, 17.-20. August 1998, Finland, S. 1-16
- Dooge, J. (1975): The water balance of bogs and fens. Hydrology of Marsh-ridden Areas. Proc. of the Minsk Symposium, June 1972, pp. 233-271, IAHS, Paris
- Drexler, J.Z., B.L. Bedford, A. DeGaetano & D.I. Siegel (1999a): Quantification of the water budget and nutrient loading in a small peatland. Journal of the American Water Resources Association, 35: 753-769.
- Drexler, J.Z., B.L. Bedford, R. Scognamiglio & D.I. Siegel (1999b): Fine-scale characteristics of groundwater flow in a peatland. Hydrol. Process., 13: 1341-1359.
- Dyck, S. und G. Peschke (1983): Grundlagen der Hydrologie. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 388 S.
- Eggelsmann, R. (1990): Ökohydrologie und Moorschutz. In: Göttlich, K. (Hrsg.): Moor- und Torfkunde., E. Schweitzerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller) Stuttgart, S. 288-373.
- Finke, W., S. Kaden, A. Hauschild & M. Redetzky (2002): Bewirtschaftungsmodell ArcGRM Drömling und dessen Einbindung in das Bewirtschaftungsmodell Bundeswasserstraßenmodell Projekt 17. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 1: 61-66
- Fraser, C.J.D., N.T. Roulet & M. Lafleur (2001): Groundwater flow patterns in a large peatland. J. Hydrol., 246: 142-154.
- Gerla, P.J. & R.K. Matheney (1996): Seasonal variability and simulation of groundwater flow in a prairie wetland. Hydrol. Process., 10: 903-920.
- Hunt, R.J., D.P. Krabbenhoft & M.P. Anderson (1996): Groundwater inflow measurements in wetland systems. Water Resour. Res., 32(3): 495-507.
- Hunt, R.J., J.F. Walker & D.P. Krabbenhoft (1999): Characterizing hydrology and the importance of ground-water discharge in natural and constructed wetlands. Wetlands, 19: 458-472.

- Jacobs, J.M., D.A. Myers, M.C. Anderson & G.R. Diak (2002a): GOES surface insulation to estimate wetlands evapotranspiration. *J. Hydrol.*, 266: 53-65.
- Jacobs, J.M., S.L. Mergelsberg, A.F. Lopera & D.A. Myers (2002b): Evapotranspiration from a wet prairie wetland under drought conditions: Paynes Prairie Preserve, Florida, USA. *Wetlands*, 22: 374-385.
- Kadlec, J.A. (1993): Effect of depth of flooding on summer water budgets for small diked marshes. *Wetlands*, 13: 1-9.
- Kellner, E. (2001): Surface energy fluxes and control of evapotranspiration from a Swedish Sphagnum mire. *Agricultural and Forest Meteorology*, 101: 101-123.
- Kim, J. & S.B. Verma (1996): Surface exchange of water vapour between an open Sphagnum fen and the atmosphere. *Boundary-Layer Meteorol.*, 79: 243-264.
- Koerselman, W. & B. Beltman (1988): Evapotranspiration from fens in relation to Penman's potential free water evaporation (E<sub>o</sub>) and pan evaporation. *Aquat. Bot.*, 31: 307-320
- Krausch, H.-D.(1994): Burger und Lübbenauer Spreewald – Ergebnisse der landeskundlichen Bestandsaufnahme in den Gebieten von Burg und Lübbenau / L. Grundmann (Hrsg.), Institut für Länderkunde Leipzig – Weimar: Verlag Hermann Böhlhaus Nachfolger, 1994
- Ksiazynski, K. E. Nachlik & J. Kubrak (1995): Modelling of hydrographical network in the Middle Biebrza river basin. *Internat. Symp. „Conservation and Management of Fens“*, 6-10 June, Warsaw, 27-38.
- Lafleur, P.M. & N.T. Roulet (1992): A comparison of evaporation rates from two fens of the Hudson Bay Lowland. *Aquat. Bot.*, 44: 59-69.
- Lafleur, P.M. (1990): Evapotranspiration from sedge-dominated wetland surfaces. *Aquat. Bot.*, 37: 341-353
- Lott, R.B. & R.J. Hunt (2001): Estimating evapotranspiration in natural and constructed wetlands *Wetlands*, 21: 614-628.
- Mansell, R.S., S.A. Bloom & G. Sun (2000): A model for wetland hydrology: Description and validation. *Soil Science*, 165: 384-397.
- Mao, L.M., M.J. Bergman & C.C. Tai (2002): Evapotranspiration measurement and estimation of three wetland environments in the Upper St. Johns River Basin, Florida. *Journal of the American water resources association*, 38: 1271-1285.
- McKillop, R., N. Kouwen & E.D. Soulis (1999): Modeling the rainfall-runoff response of a headwater wetland. *Water Resour. Res.*, 35: 1165-1177.
- Mundel, G. (1982a): Untersuchungen über die Evapotranspiration von Grasland auf Grundwasserstandorten. 1. Mitteilung: Beziehungen zwischen meteorologischen Faktoren und Evapotranspiration. *Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenk.* 26 (8): 507 - 513.

- Mundel, G. (1982b): Untersuchungen über die Evapotranspiration von Grasland auf Grundwasserstandorten. 2. Mitteilung: Beziehungen zwischen Bodenfaktoren und Evapotranspiration. Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkd., 26, H. 8, S. 515-521
- Mundel, G. (1982c): Untersuchungen über die Evapotranspiration von Grasland auf Grundwasserstandorten. 3. Mitteilung: Beziehungen zwischen Stoffproduktion und Evapotranspiration. Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkd., 26, H. 10, S. 629-638
- Mundel, G. (1982d): Untersuchungen über die Evapotranspiration von Grasland auf Grundwasserstandorten. 4. Mitteilung: Verlauf der Verdunstung während der Vegetationszeit. Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkd. 26 (10): 639 - 646.
- Nash, J.E., Sutcliffe, J.V., 1979. River flow forecasting through conceptual models, 1. A discussion of principles. J. Hydrol. 10, 282-290.
- Okruszko, T. & S. Tyszewski (1995): Using an optimization model in the management of water resources in the Middle Biebrza basin. Internat. Symp. „Conservation and Management of Fens“, 6-10 June, Warsaw, S. 50 – 59.
- Okruszko, T. & A. Byszkowski (2000): Establishing water management rules for wetland protection: Bierbrza Wetlands Case. Proceedings of the 11<sup>th</sup> International Peat Congress, Quebec 2000, S. 237-242.
- Pauliukonis, N. & R. Schneider (2001): Temporal patterns in evapotranspiration from lysimeters with three common wetland plant species in the eastern United States. Aquat. Bot., 71: 35-46.
- Phersson, M. & O. Pettersson (1997): Energy and water balances of a bog in central Sweden Nordic Hydrology, 28: 263-272.
- Price, J.S. & D.A. Maloney (1994): Hydrology of a patterned bog-fen complex in southeastern Labrador. Canada. Nordic Hydrol., 25: 313-330.
- Price, J.S. (1994): Evapotranspiration from a lakeshore Typha marsh on Lake Ontario. Aquat. Bot., 48: 261-272.
- Quast, J. & G. Böhm (1998): Die Ermittlung der realen Evapotranspiration von Niedermoorgebieten unter den hydroklimatischen Bedingungen Nordostdeutschlands am Beispiel des Rhinluchs. Klimaforschungsprogramm des BMBF 1994/97. Abschlußveranstaltung am 09./10. 06. 1998 in Mainz. Ergänzungsband. Geesthacht: GKSS.
- QUAST, J. (1995): Wasserhaushalt und Feuchtgebiete in einer Trockenlandschaft – Zustand – Konflikte – Maßnahmen. Z. f. Kulturtechnik und Landentwicklung, 36 (4): 207 - 213.
- Reeve, A.S., J. Warzocha, P.H. Glaser & D.I. Siegel (2001): Regional ground-water flow modeling of the Glacial Lake Agassiz Peatlands, Minnesota. J. Hydrol., 243: 91-100.
- Reeve, A.S., Siegel, D.I. & P.H. Glaser (2000): Simulating vertical flow in large peatlands. J. Hydrol. 227; 207-217.

- Restrepo, J.I., A.M. Montoya & J. Obeysekera (1998): A wetland simulation module for the MODFLOW ground water model. *Ground Water*, 36: 764-770.
- Rouse, W.R (1998): A water balance model for a subarctic sedge fen and its application to climatic change. *Climatic Change*, 38: 207-234.
- Rushton, B. (1996): Hydrologic budget for a freshwater marsh in Florida. *Water Res. Bull.*, 32: 13-21.
- Sanchez-Carrillo, S., M. Alvarez-Cobelas & M. Benitez (2001): A simple method for estimating water loss by transpiration in wetlands. *Hydrol. Sciences*, 46(4): 537-552.
- Schramm, M. (1995): Die Bewirtschaftungsmodelle LBM und GRM und ihre Anwendung für das Spreegebiet. Kolloquium „Wasserbewirtschaftung an Bundeswasserstraßen“, Februar 1994, Mitteilung Nr. 8 der Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz – Berlin: 7 – 19.
- Schramm, M., S. Kaden, O. Dietrich & P. Stille (2001): Modellgestützte Planung eines Flussgebiets. *Wasserwirtschaft – Wassertechnik*. Heft 5, S. 42-47.
- Schwärzel, K. (2000): Dynamik des Wasserhaushalts in Niedermooren. Diss., TU Berlin, Fachbereich Umwelt und Gesellschaft, 114 S.
- Šmid, P. (1975): Evaporation from a reedswamp. *J. Ecol.* 63, S. 299-309
- Souch, C., C.S.B. Grimmond & C.P. Wolfe (1998): Evapotranspiration rates from wetlands with different disturbance histories: Indiana Dunes National Lakeshore. *Wetlands*, 18: 216-229.
- Spieksma, J.F.M. & J.M. Schouwenaars (1997): A simple procedure to model water level fluctuations in partially inundated wetlands. *J. Hydrol.*, 196: 324-335
- Spieksma, J.F.M., E.J. Moors, A.J. Dolman & J.M. Schouwenaars (1997): Modelling evaporation from a drained and rewetted peatland. *J. Hydrol.*, 199: 252-271
- Spieksma, J.F.M., J.M. Schouwenaars & J. Blankenburg (1996): Combined modelling of groundwater table and open water level in raised mires. *Nordic Hydrol.*, 27: 231-246.
- Sun, G., H. Riekerk & N.B. Comerford (1998): Modeling the forest hydrology of wetland-upland ecosystems in Florida. *Journal of the American Water Resources Association*, 34: 827-841.
- Thompson, M.A., D.I. Campbell & R.A. Spronken-Smith (1999): Evaporation from natural and modified raised peat bogs in New Zealand. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95: 85-98.
- Walton, R., R.S. Chapman & J.E. Lewis (1996): Development and application of the wetland dynamic water budget model. *Wetlands*, 16: 347-357.
- WASY (1997a): GRM-Rhin – Wassermengenbilanz Rhin. Untersuchung im Auftrag des Landesumweltamtes Brandenburg. WASY GmbH; Berlin.
- WASY (1997b): Bewirtschaftungsmodell GRM-Drömling. Untersuchung im Auftrag des Regierungspräsidium Magdeburg. WASY GmbH; Berlin.

- WASY (1999): ArcGRM 1.0, Benutzerhandbuch. WASY Gesellschaft für wasserwirtschaftliche Planung und Systemforschung mbH, Berlin, 132 S.
- Wessel, D.A. & W.R. Rouse (1993): Modelling evaporation from wetland tundra. *Boundary-Layer Meteorol.*, 68: 109-130.
- Wilsnack, M.M., D.E. Welter, A.M. Montoya, J.I. Restrepo & J. Obeysekera (2001): Simulating flow in regional wetlands with the modflow wetlands package. *Journal of the American Water Resources Association*, 37: 655-674.
- Winter, T.C. (1999): Relation of streams, lakes, and wetlands to groundwater flow systems. *Hydrogeology Journal*, 7: 28-45.
- Winter, T.C., D.O. Rosenberry, D.C. Buso & D.A. Merk (2001): Water source to four U.S. wetlands: Implications for wetland management. *Wetlands*, 21: 462-473.
- Wessolek, G., M. Renger, O. Strebel & H. Sponagel (1985): Einfluss von Boden und Grundwasserflurabstand auf die jährliche Grundwasserneubildung. *Z. Kulturtechnik und Flurber.*, 26, S. 130-137.
- Wessolek, G., W.H.M. Duynisveld, M. Renger & O. Strebel (1987): Calculation of Biomassproduction of Grassland using a Photo-synthesis-Water Use Simulation Model. *J. Agronomy and Crop Science*, 158, S. 99-106
- Wessolek, G. (1989): Einsatz von Wasserhaushalts- und Photosynthesemodellen in der Ökosystemanalyse. *Schriftenreihe des FB Landschaftsentwicklung der TU Berlin* 61.



## Abbildungen

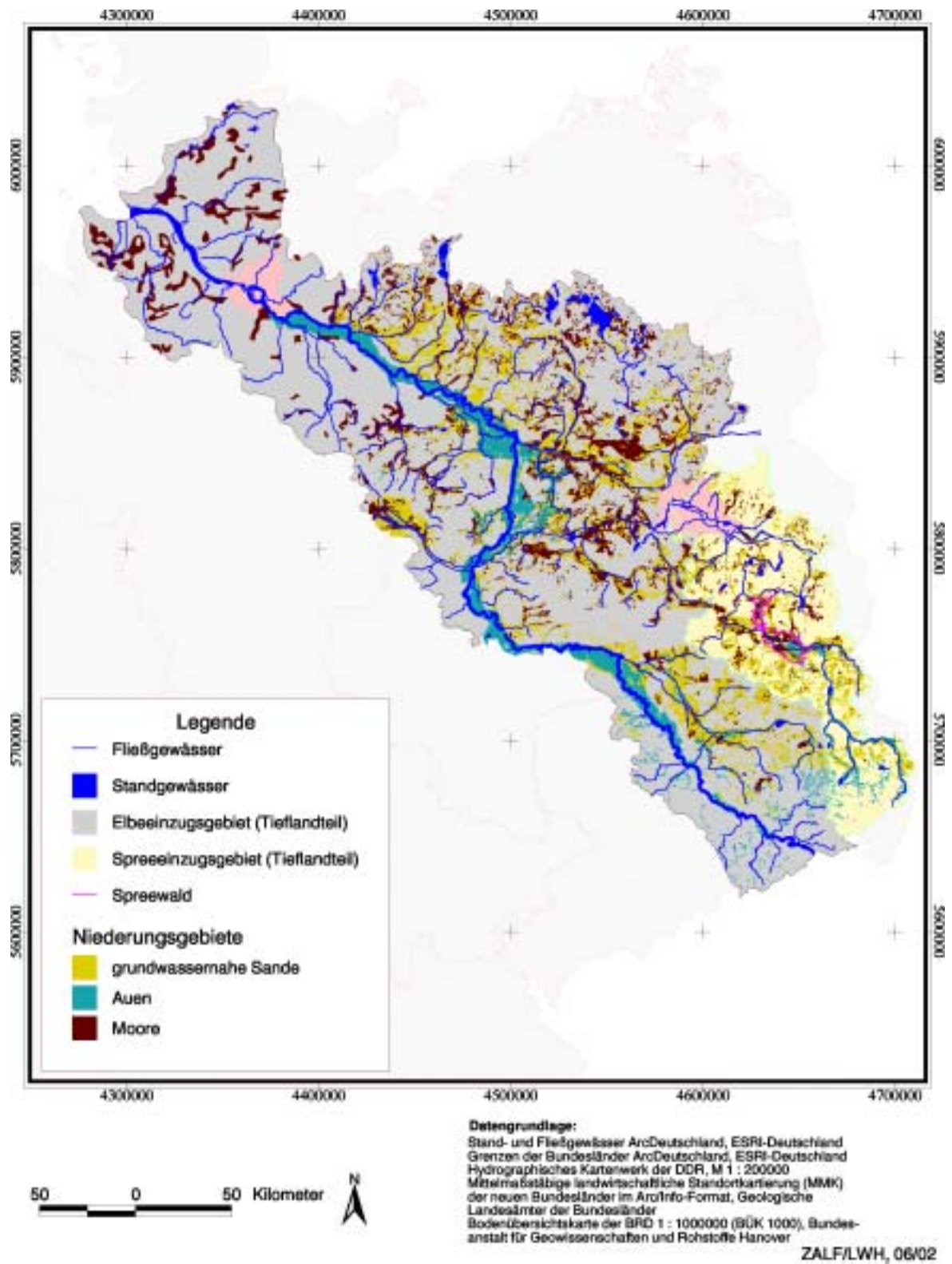


Abb. 1: Verbreitung grundwassernahe Standorte im Tiefland des Elbe-Einzugsgebietes

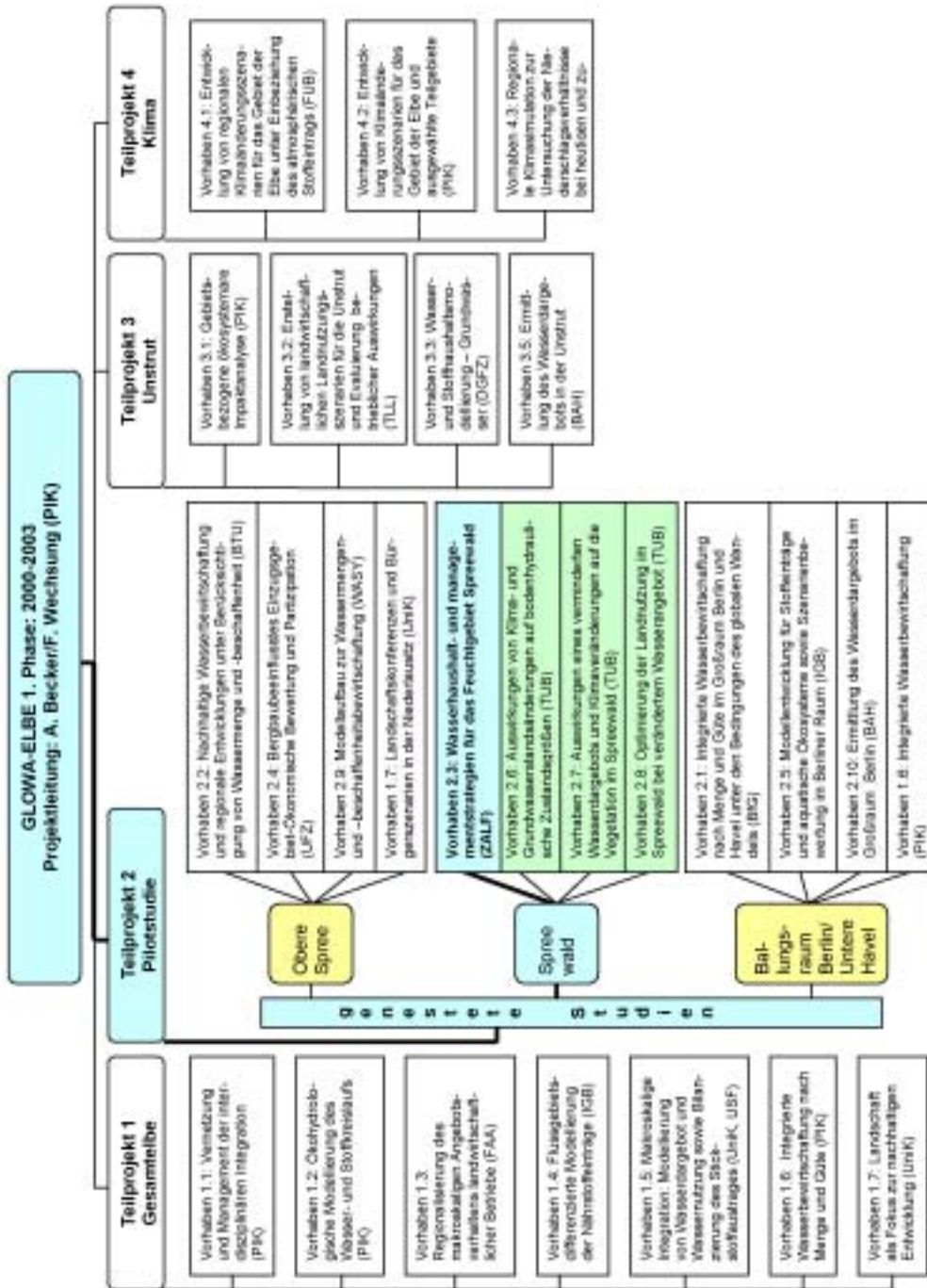


Abb. 2: Einordnung des Vorhabens 2.3 in die GLOWA-ELBE Projektstruktur: Phase 1: 2000-2003, das Teilprojekt Spree/Havel und das Teilgebietsprojekt Spreewald

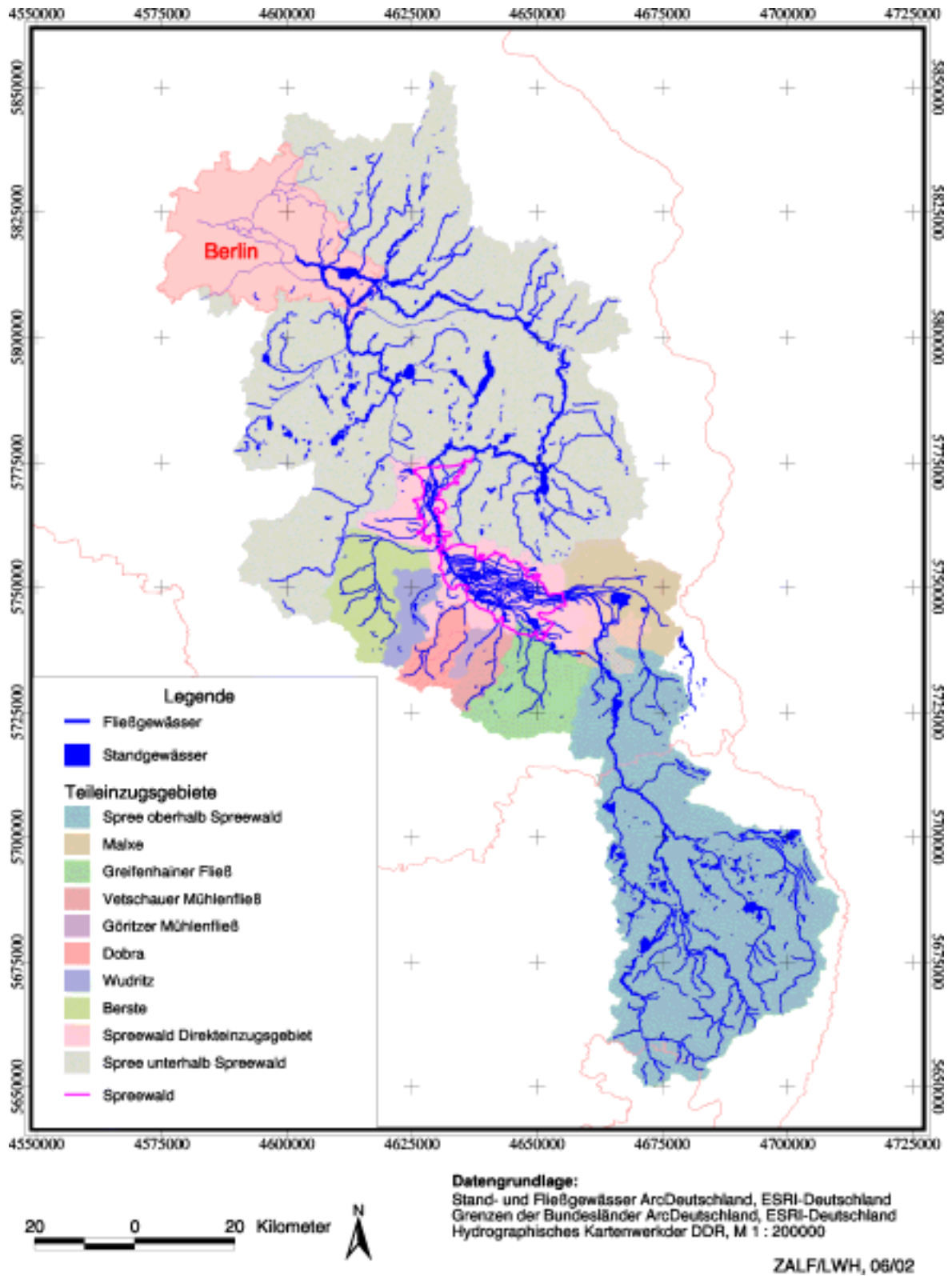


Abb. 3: Einordnung des Feuchtgebietes Spreewaldes zwischen bergbaubeeinflusstem Einzugsgebiet der Oberen Spree (Speisungsgebiet) und Ballungsraum Berlin (Wasserbedarfsgebiet)

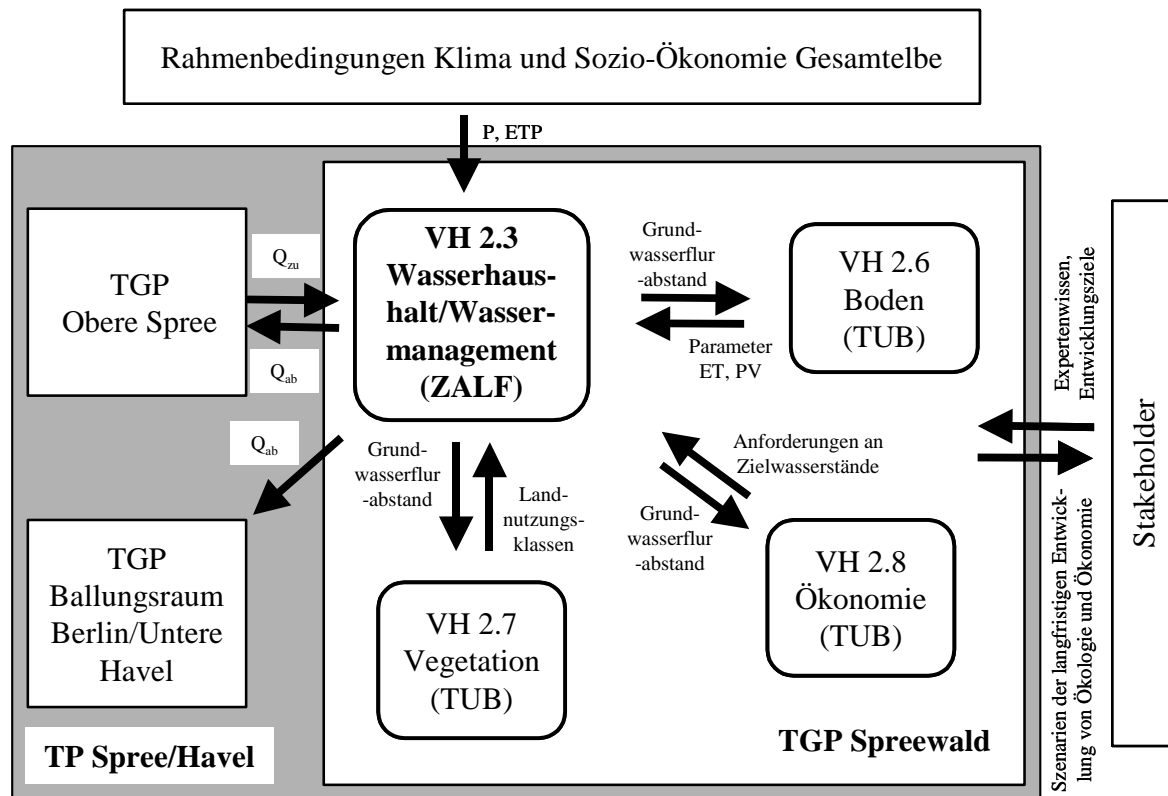


Abb. 4: Daten- und Informationsaustausch von Vorhaben 2.3 mit anderen Vorhaben (VH) im Teilgebietsprojekt (TGP) Spreewald, im Teilprojekt (TP) Spree/Havel und im Kontext des Verbundprojektes GLOWA-Elbe

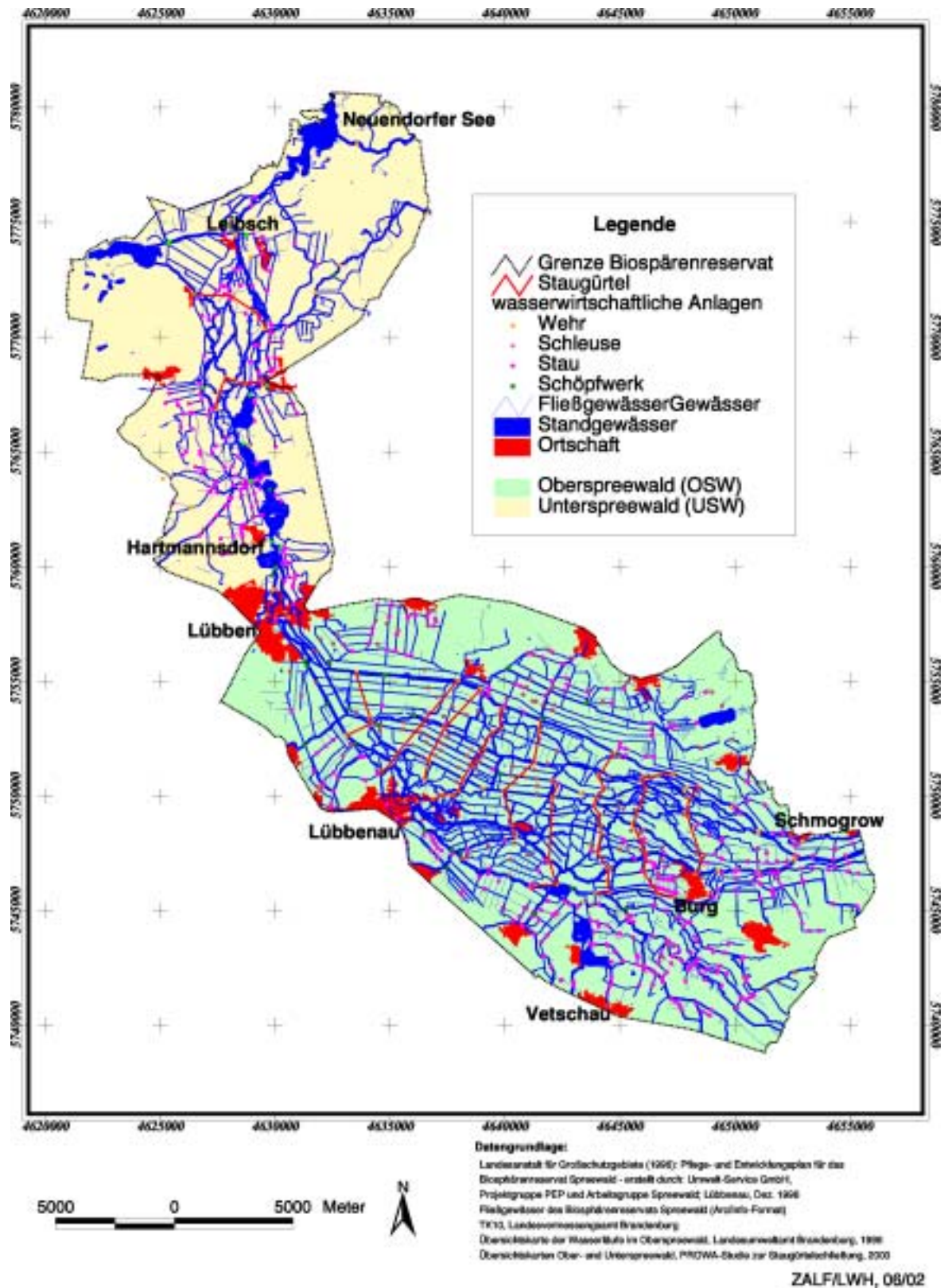


Abb. 5: Biosphärenreservat Spreewald, naturräumlich gegliedert in Oberspreewald (OSW) und Unterspreewald (USW)

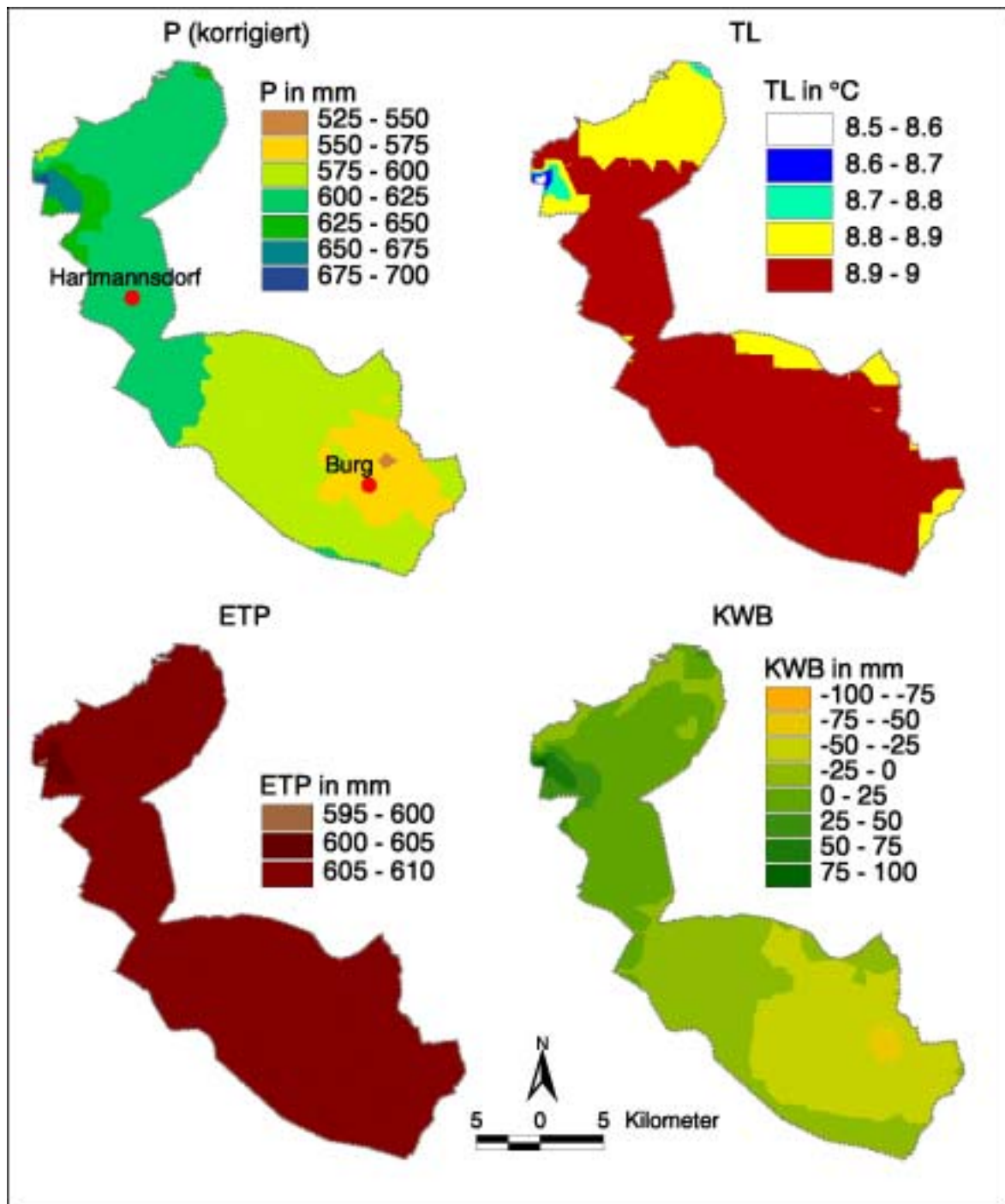


Abb. 6: Räumliche Verteilung klimatischer Kennwerte (P – Niederschlag (korrigiert), TL – Lufttemperatur, ETP – Gras-Referenz-Verdunstung, KWB – klimatische Wasserbilanz (mit P<sub>korrr</sub>) im Jahresmittel (Reihe 1961/90) nach HAD (1998)

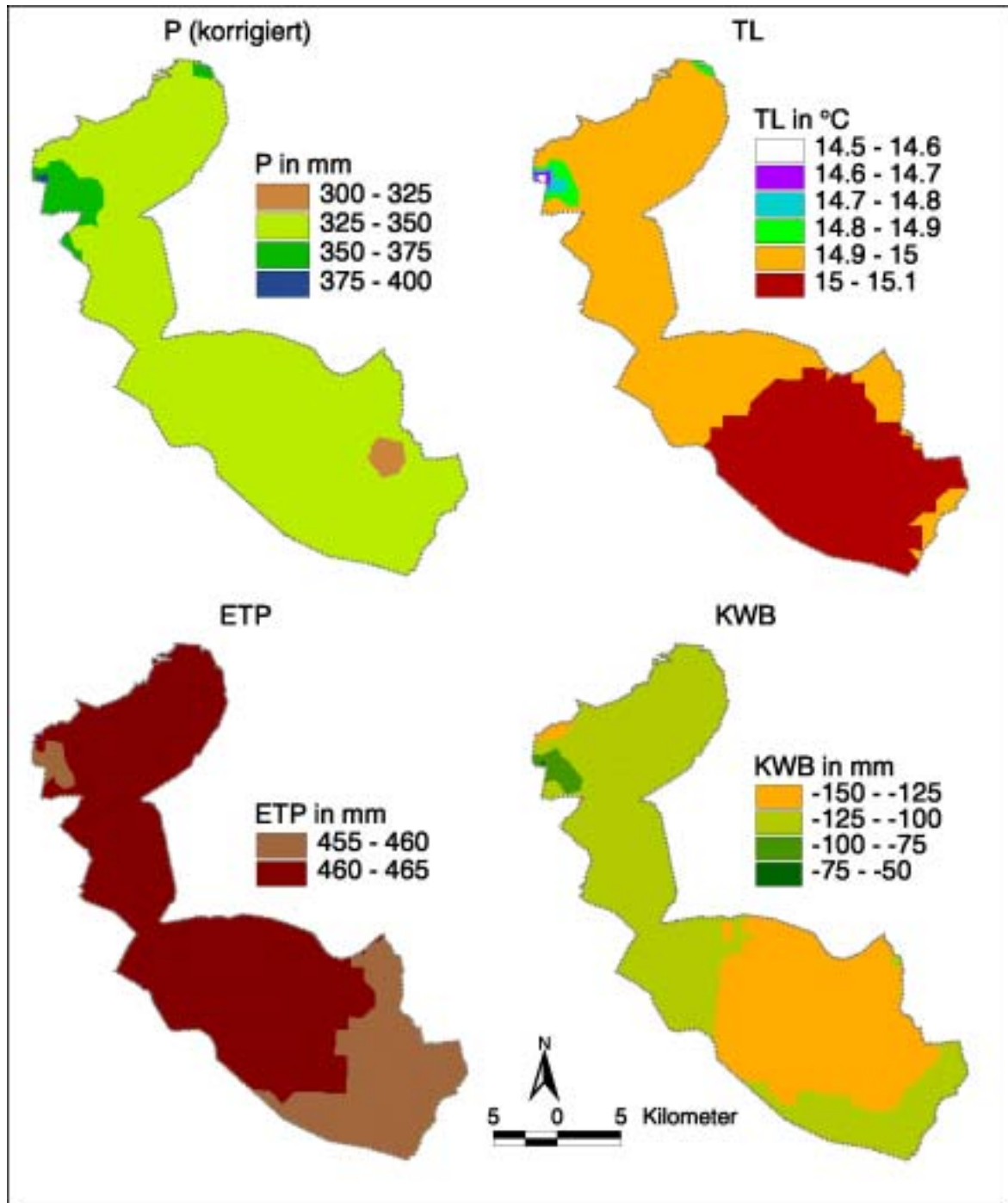


Abb. 7: Räumliche Verteilung klimatischer Kennwerte (P – Niederschlag (korrigiert), TL – Lufttemperatur, ETP – Gras-Referenz-Verdunstung, KWB – klimatische Wasserbilanz (mit P<sub>korrr</sub>) im Mittel des Sommerhalbjahres (Reihe 1961/90) nach HAD (1998)

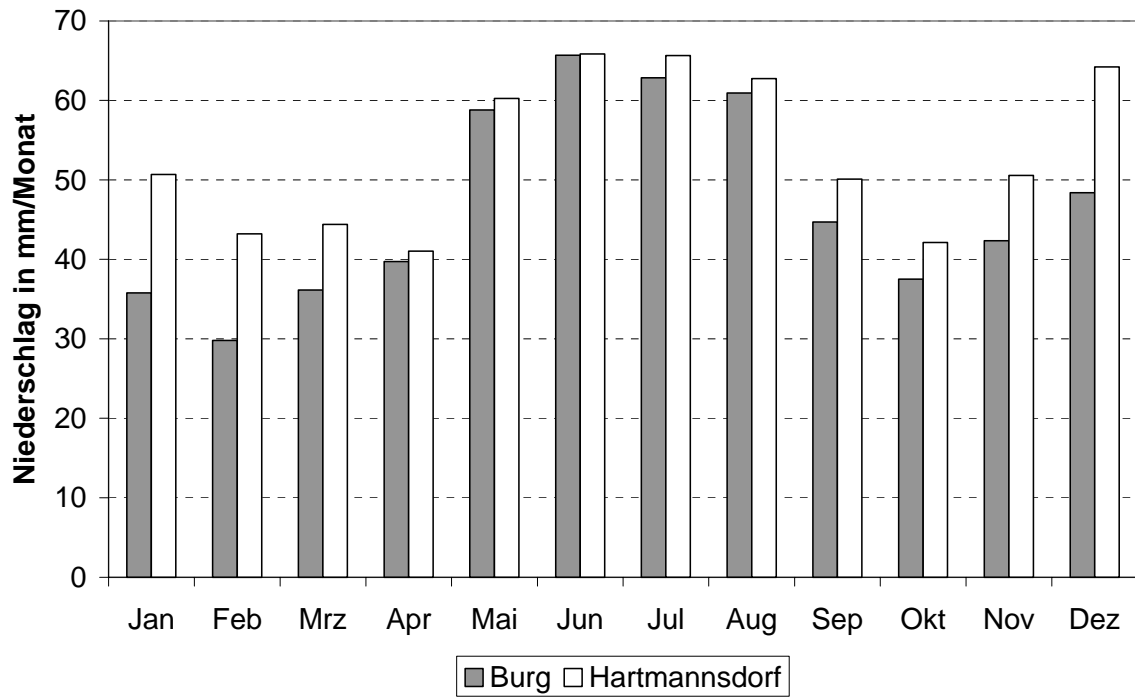


Abb. 8: Monatssummen des korrigierten Niederschlages an den Messstationen Burg (Oberspreewald) und Hartmannsdorf (Unterspreewald) der Reihe 1970/99 nach DWD (2000)



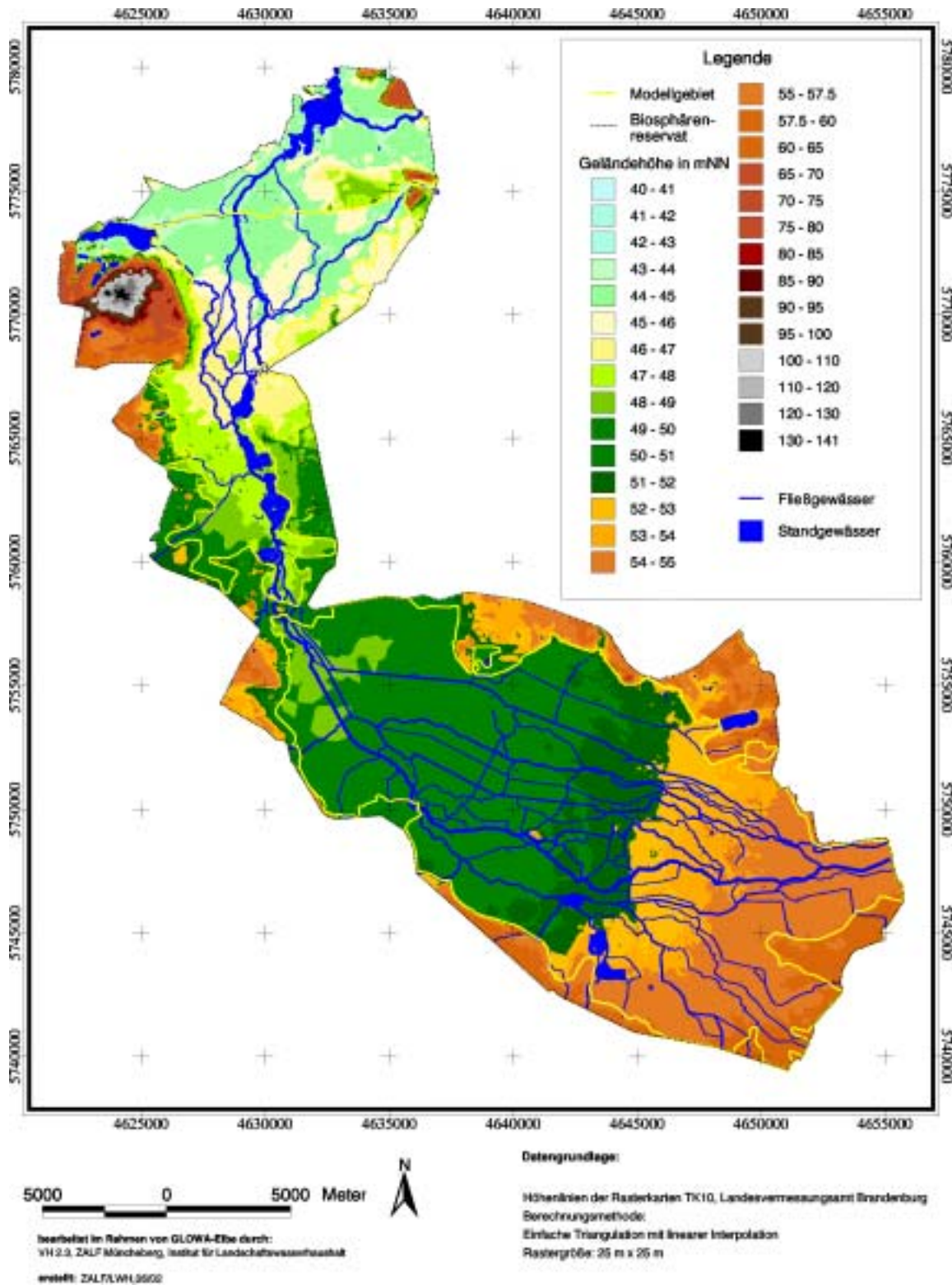


Abb. 9: Geländehöhen im UG Spreewald

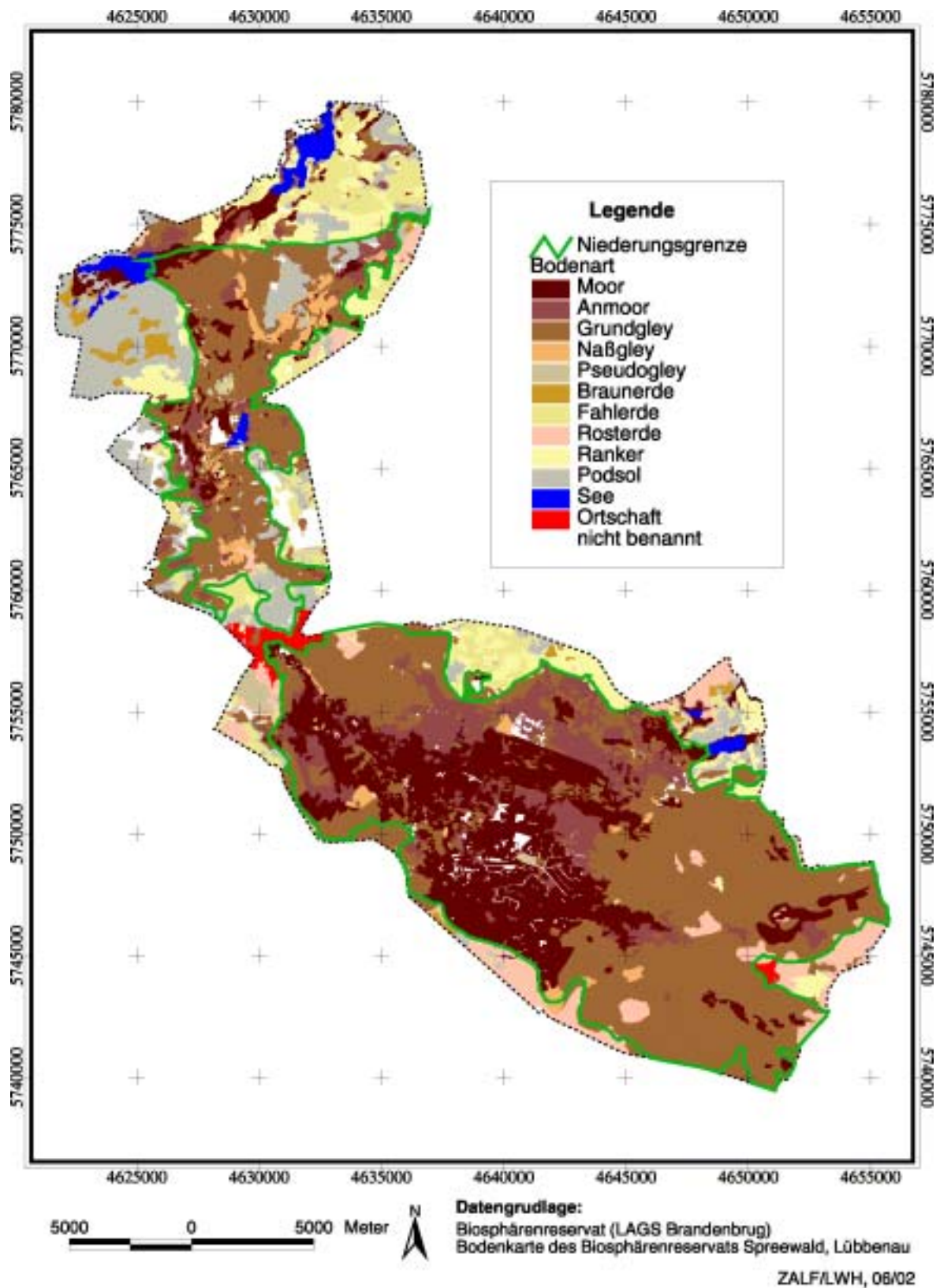


Abb. 10: Bodenarten im UG Spreewald auf Grundlage der Bodenkarte des Biosphärenreservats Spreewald

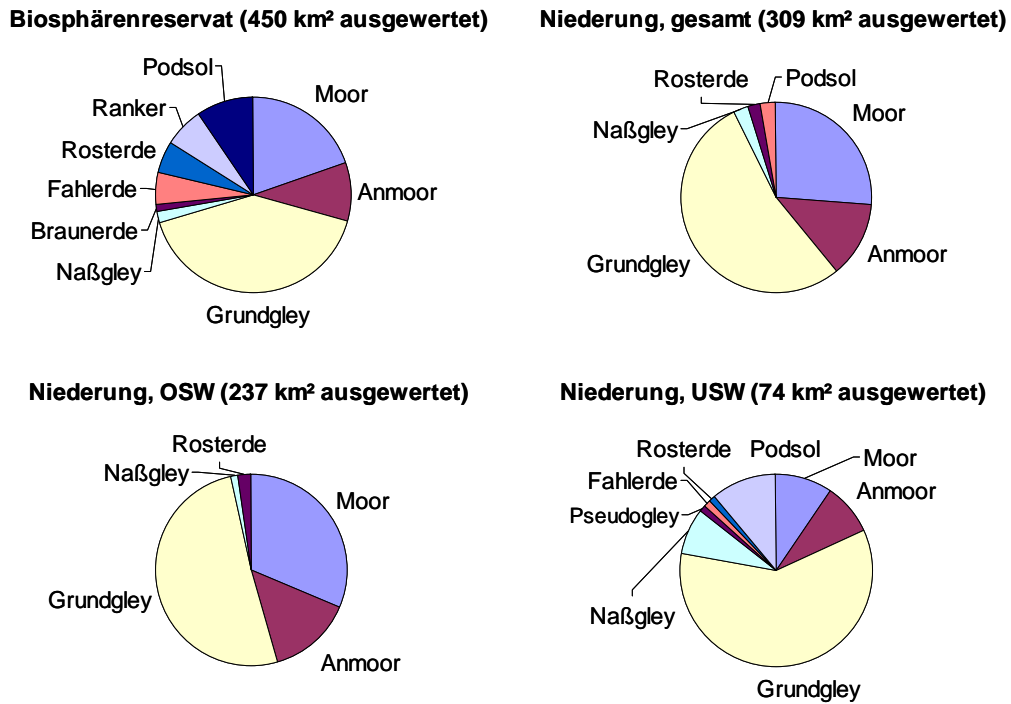


Abb. 11: Flächenanteile der Bodenarten im UG Spreewald, ausgewertet nach unterschiedlichen Teilräumen (Gesamtgebiet Biosphärenreservat, Niederungsgebiet – gesamt, Niederungsgebiet – OSW, Niederungsgebiet - USW)

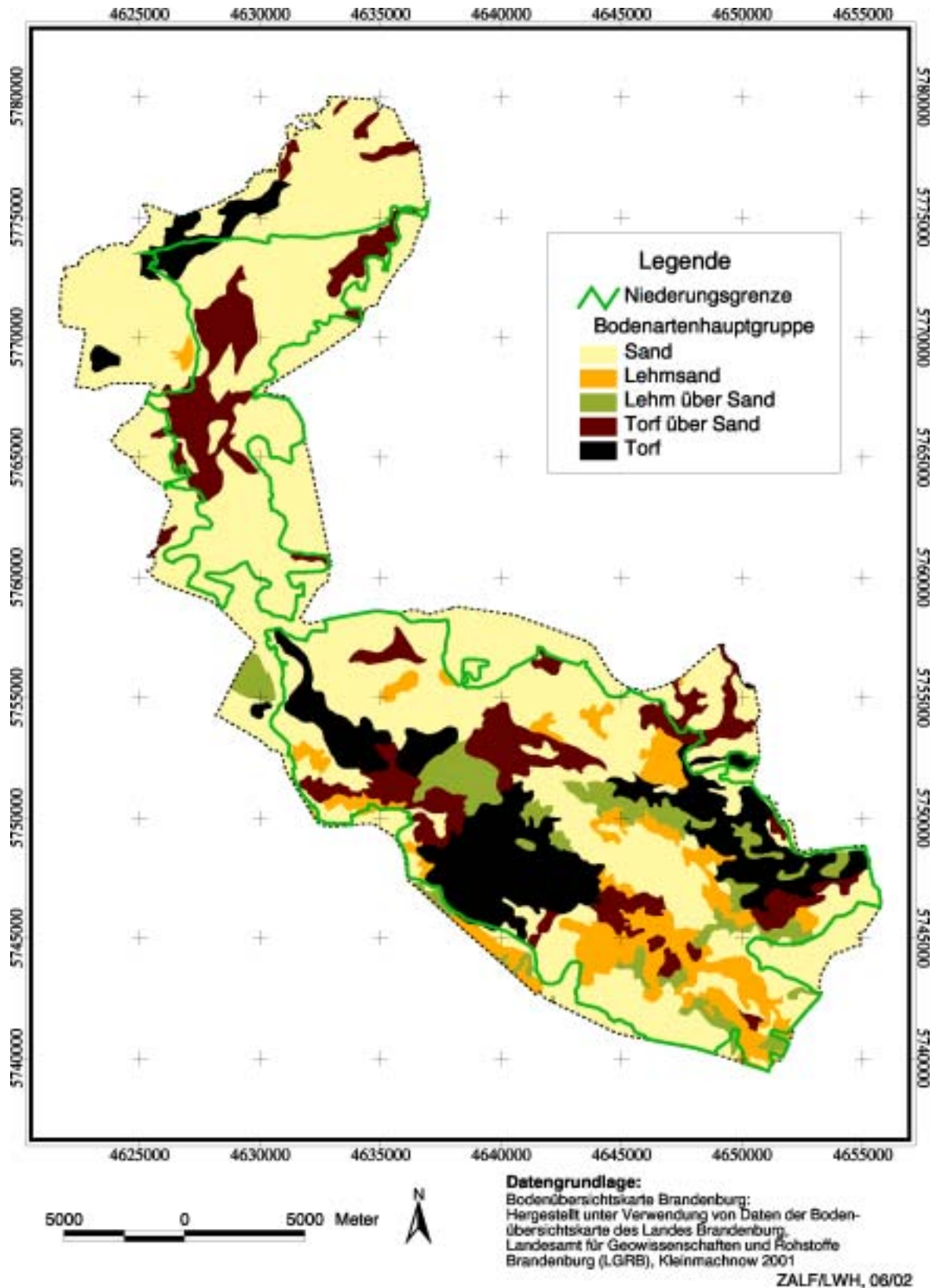
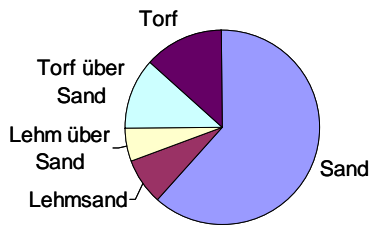
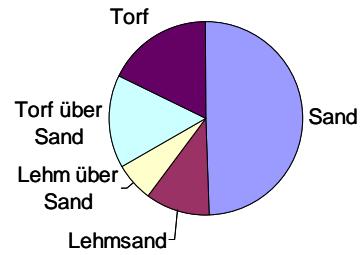


Abb. 12: Bodenartenhauptgruppen im UG Spreewald auf der Grundlage BÜK 300 des Landesamtes für Geowissenschaften und Rohstoffe Brandenburg

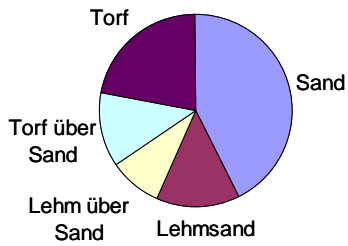
**Biosphärenreservat (475 km<sup>2</sup> ausgewertet)**



**Niederung, gesamt (318 km<sup>2</sup> ausgewertet)**



**Niederung, OSW (242 km<sup>2</sup> ausgewertet)**



**Niederung, USW (76 km<sup>2</sup> ausgewertet)**

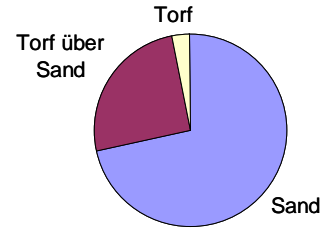


Abb. 13: Flächenanteile der Bodenartenhauptgruppen im UG Spreewald, ausgewertet nach unterschiedlichen Teilräumen (Gesamtgebiet Biosphärenreservat, Niederungsgebiet – gesamt, Niederungsgebiet – OSW, Niederungsgebiet - USW)

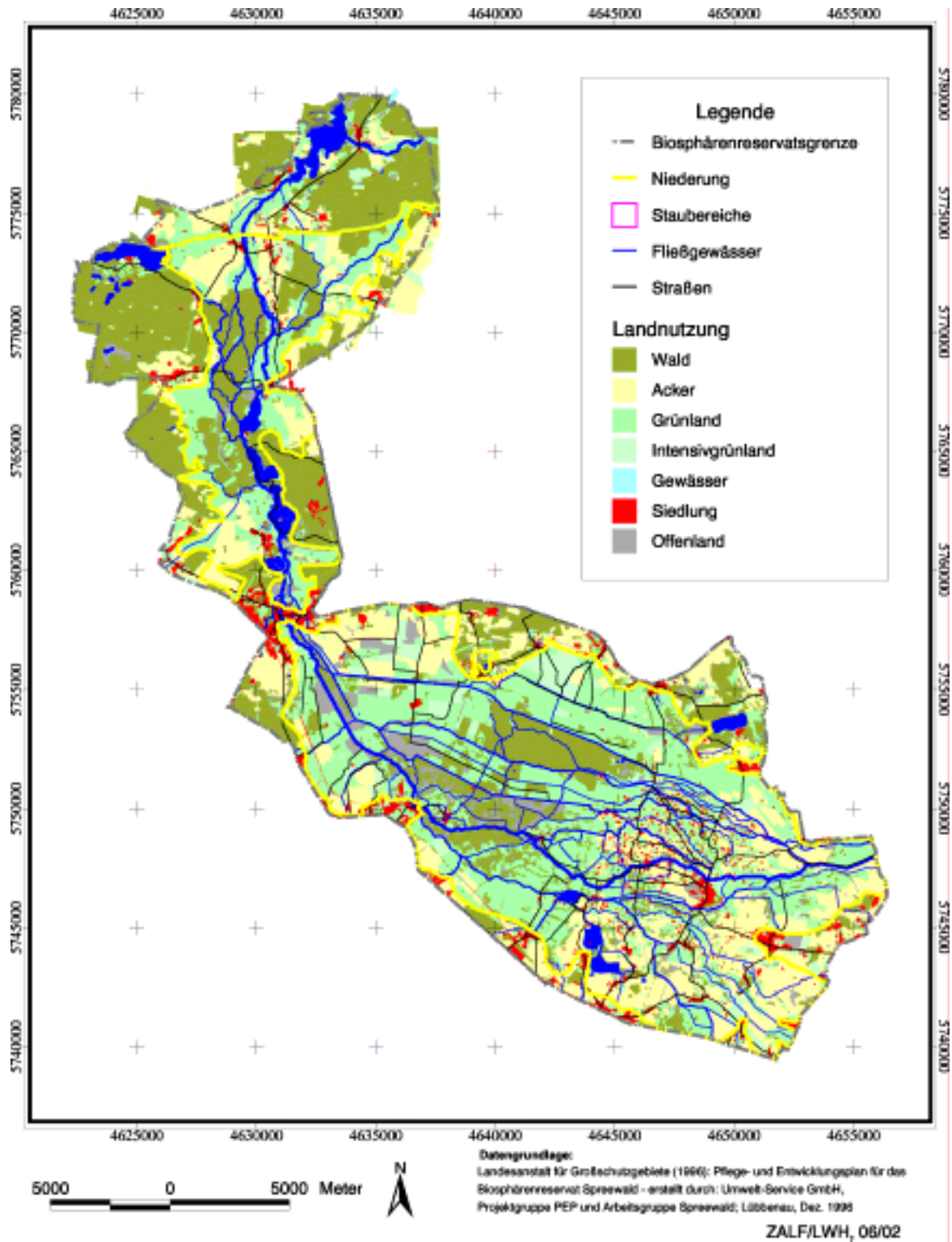
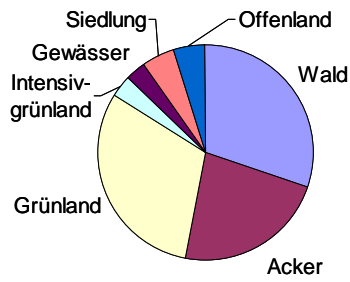
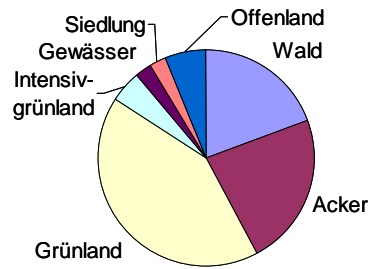


Abb. 14: Hauptlandnutzungsklassen im UG Spreewald

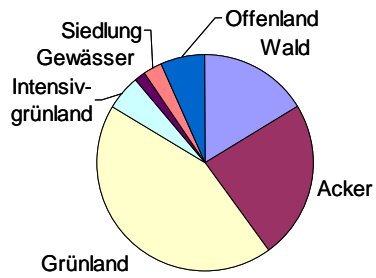
**Biosphärenreservat (489 km<sup>2</sup> ausgewertet)**



**Niederung, gesamt (318 km<sup>2</sup> ausgewertet)**



**Niederung, OSW (242 km<sup>2</sup> ausgewertet)**



**Niederung, USW (76 km<sup>2</sup> ausgewertet)**

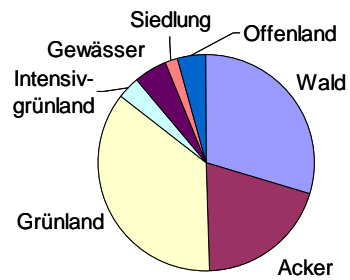


Abb. 15: Flächenanteile der Landnutzungsclassen im UG Spreewald, ausgewertet nach unterschiedlichen Teilräumen (Gesamtgebiet Biosphärenreservat, Niederungsgebiet – gesamt, Niederungsgebiet – OSW, Niederungsgebiet - USW)

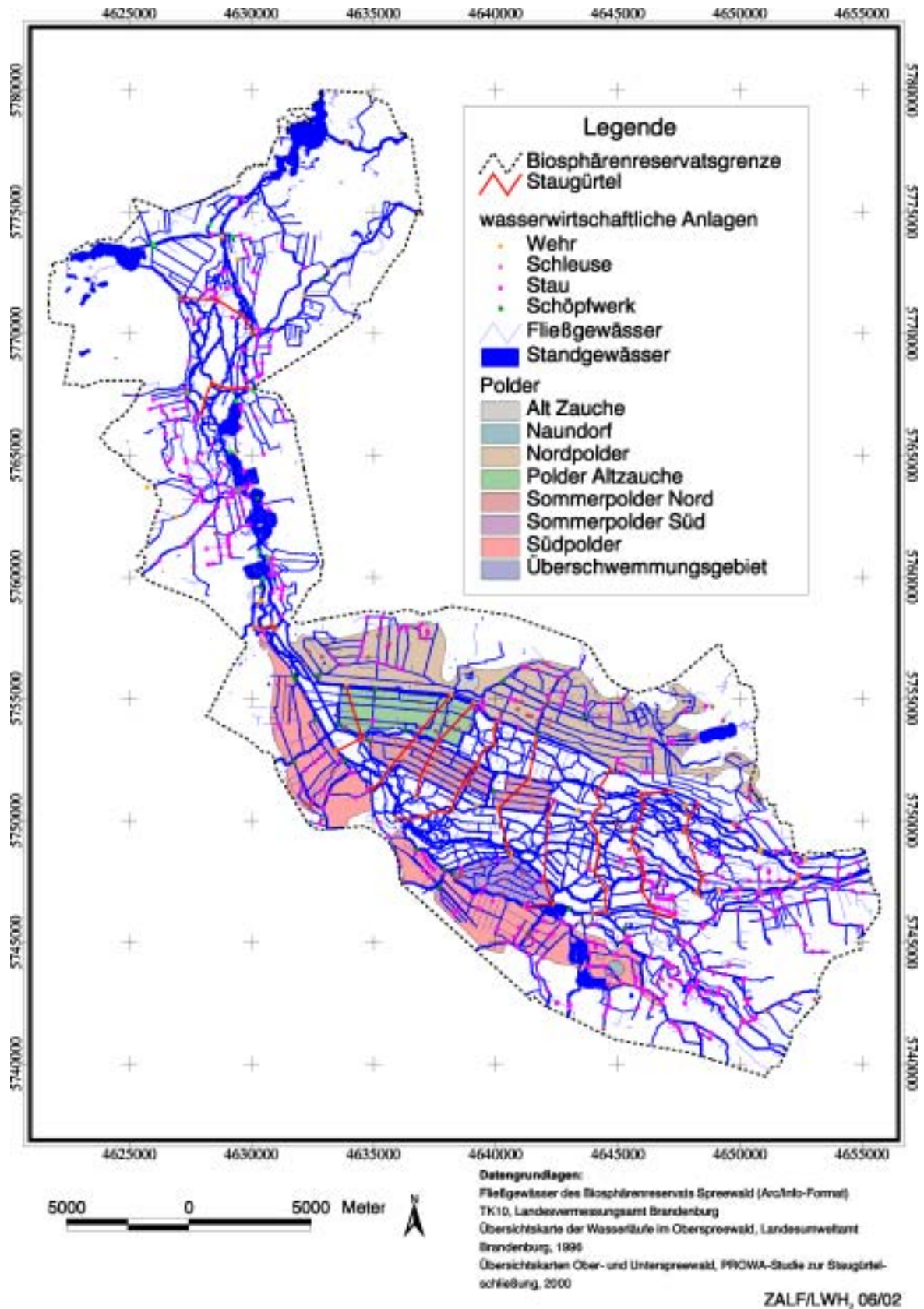


Abb. 16: Gewässersystem und wasserwirtschaftliche Anlagen im UG Spreewald



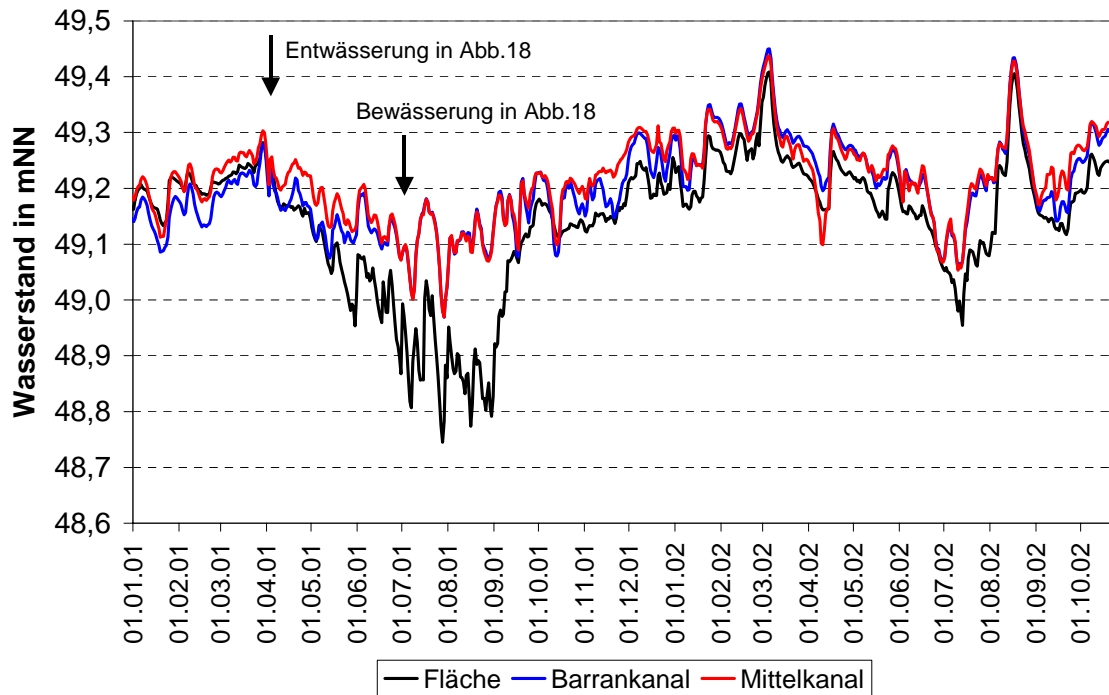


Abb. 17: Jahrgang von Graben- und Grundwasserständen auf einer Untersuchungsfläche im OSW

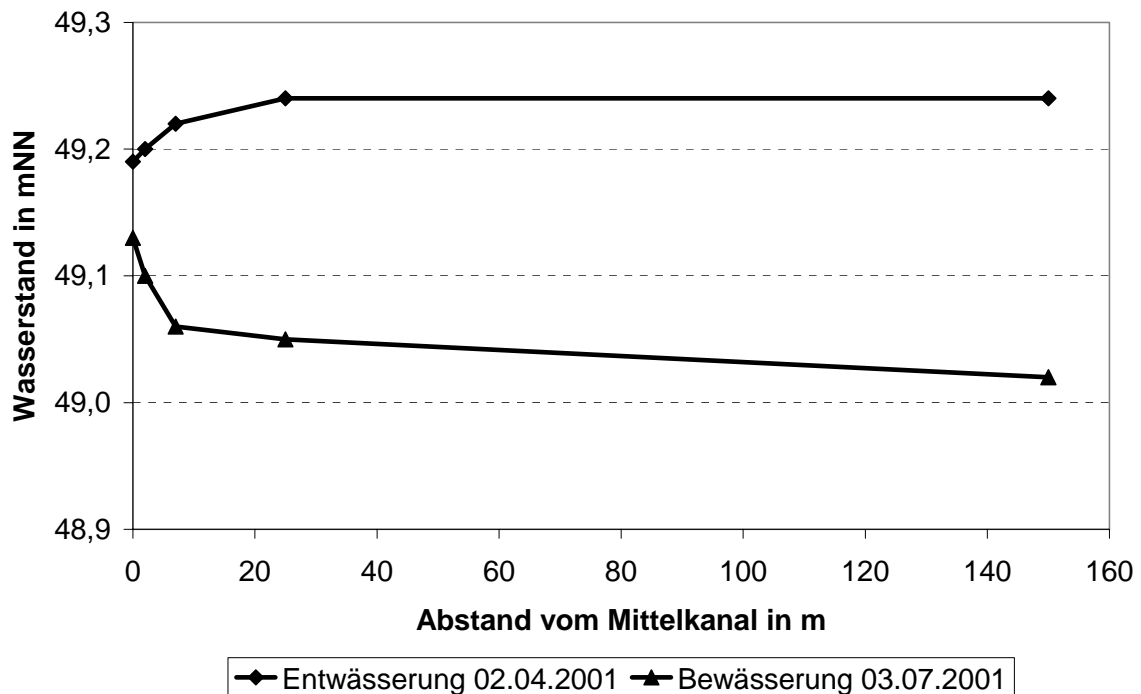


Abb. 18: Grundwassertransekt an ausgewählten Stichtagen mit unterschiedlichem Wasserregime (s. Abb. 18) auf einer Untersuchungsfläche im OSW

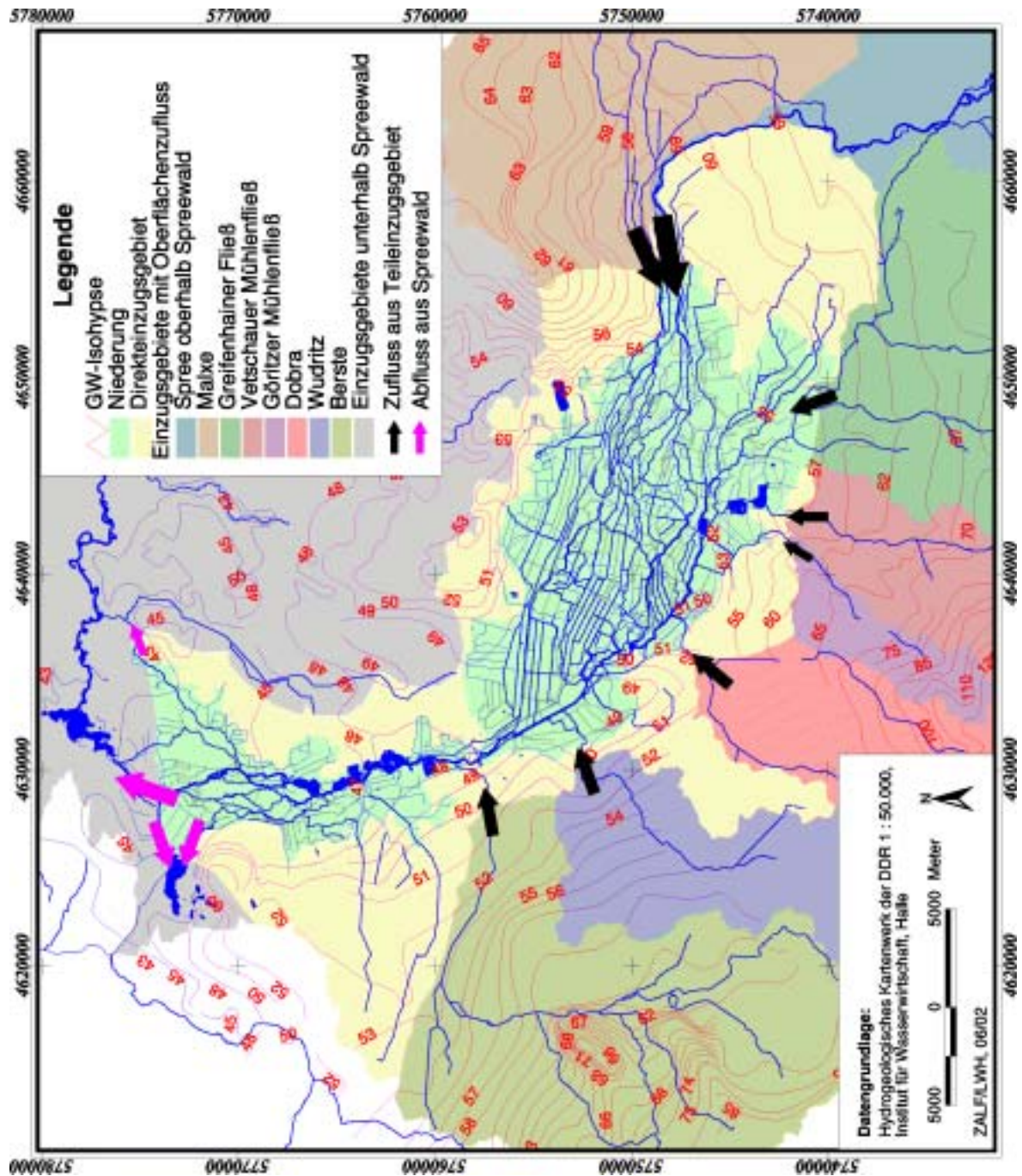


Abb. 19: Spreewald-Niederung mit Direkteinzugsgebiet und regionalem Grundwasserregime (aus HYKA50, 1987) sowie Teileinzugsgebiete mit den wichtigsten Oberflächenzu- und -abflüssen

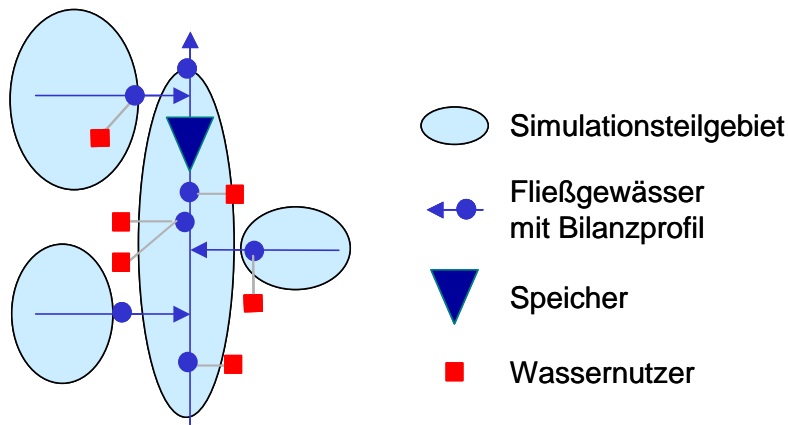


Abb. 20: Prinzipskizze zum Aufbau eines ArcGRM-Modells, schematisierte Darstellung der Elemente eines Flussgebietes mit Wasserbewirtschaftung

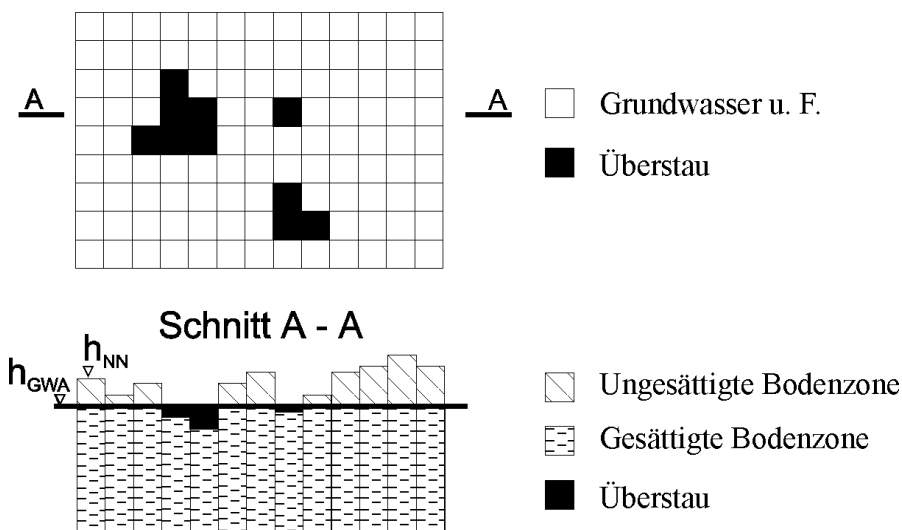


Abb. 21: Prinzipskizze zur elementweisen Berechnung von Grundwasserflurabstand und Verdunstung im Modell WABI

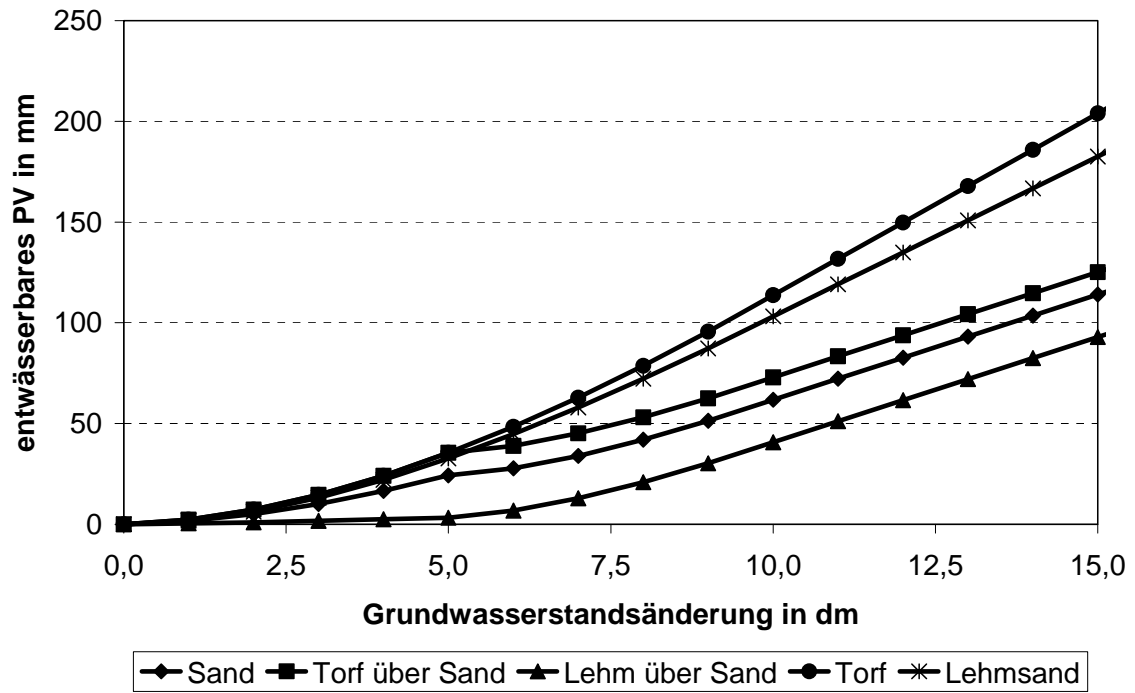


Abb. 22: Entwässerbares/auffüllbares Porenvolumen (PV) der 5 Bodenartenhauptgruppen bei Grundwasserstandsabsenkung/-auffüllung, bezogen auf GOK (Übernahme aus VH 2.6)

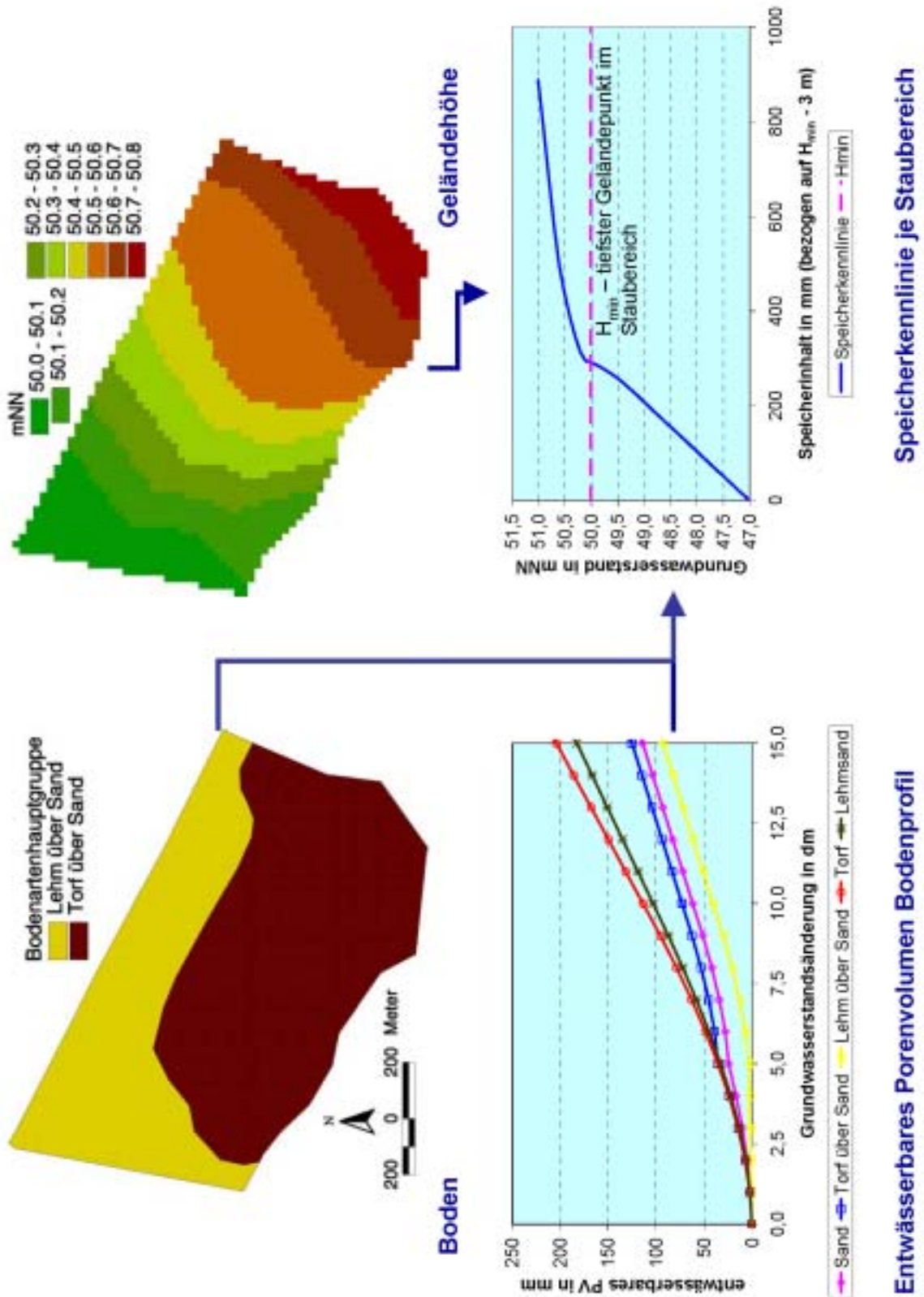


Abb. 23: Beispiel für die Berechnung der Speicherkenntlinie eines Staubereiches als Funktion des Grundwasserstandes (Nullpunkt 3 m unterhalb des tiefsten Geländepunktes frei gewählt)

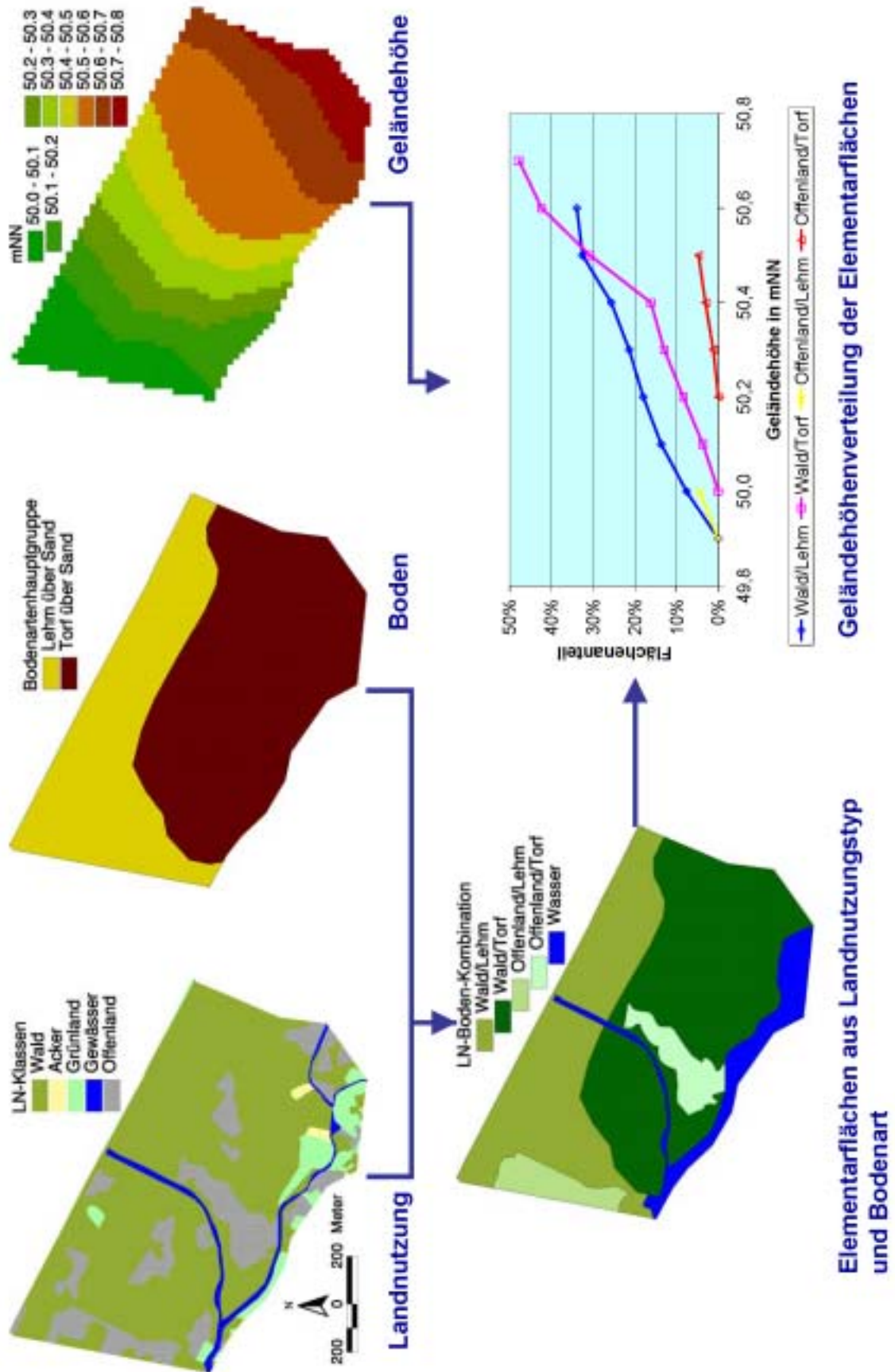


Abb. 24: Beispiel für die Berechnung der Geländehöhenverteilung der Elementarflächen (Kombination aus Landnutzung und Bodenartenhauptgruppe) eines Staubereiches

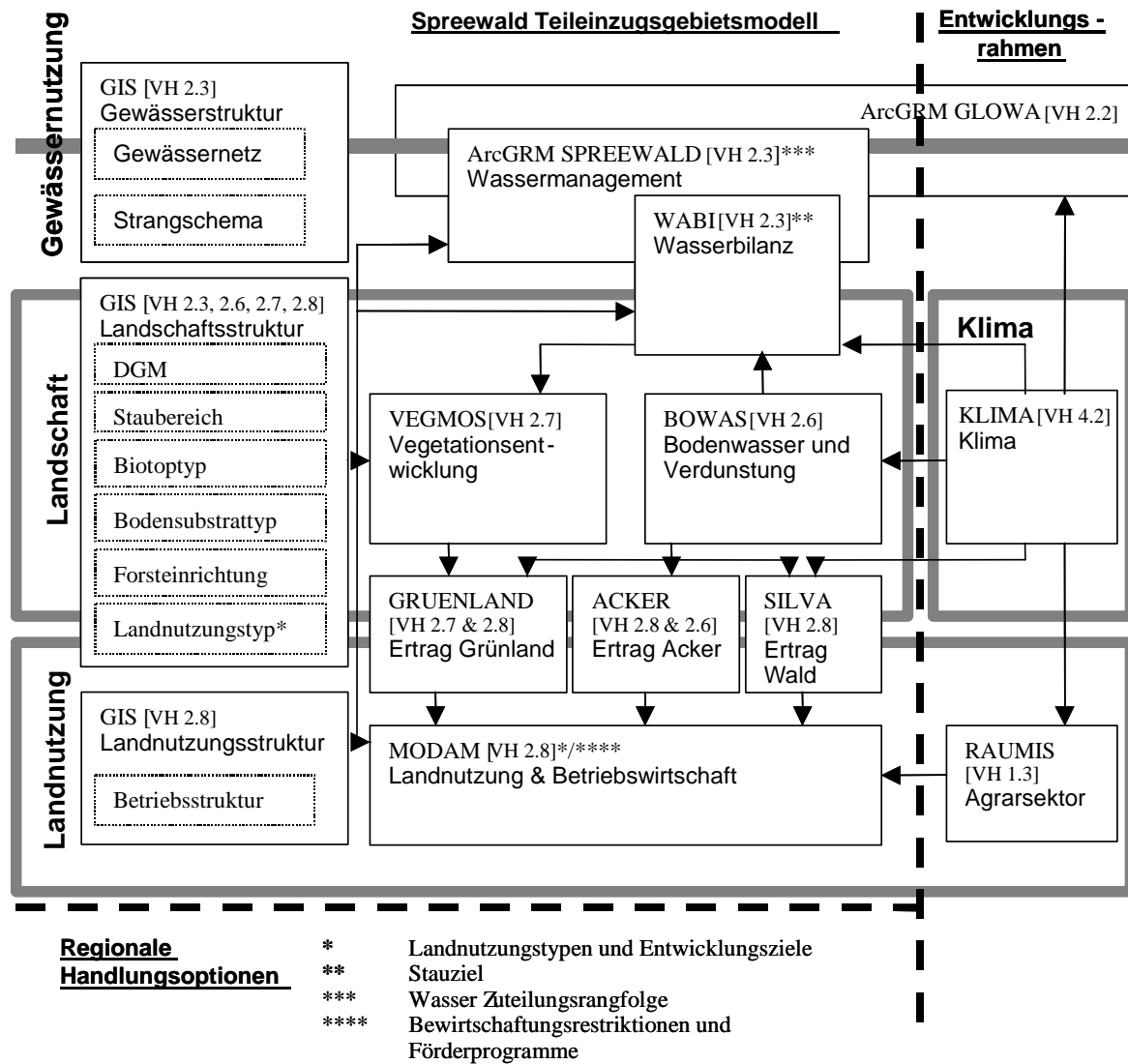


Abb. 25: Integrationskonzept TPG Spreewald (aus Jahresbericht TGP Spreewald 2002)

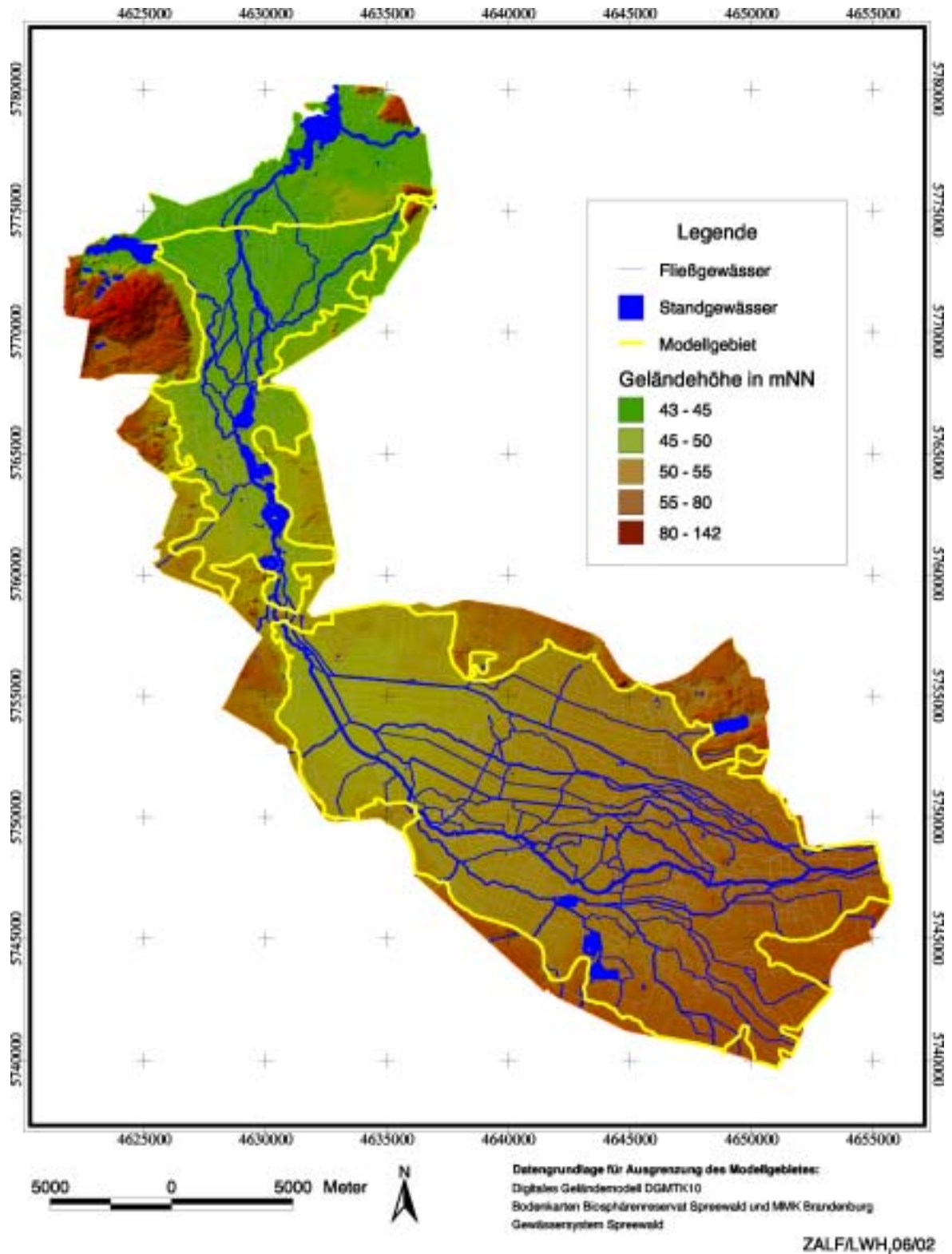


Abb. 26: Ausgrenzung der Spreewaldniederung innerhalb des Biosphärenreservats Spreewald - Modellgebiet ArcGRM Spreewald



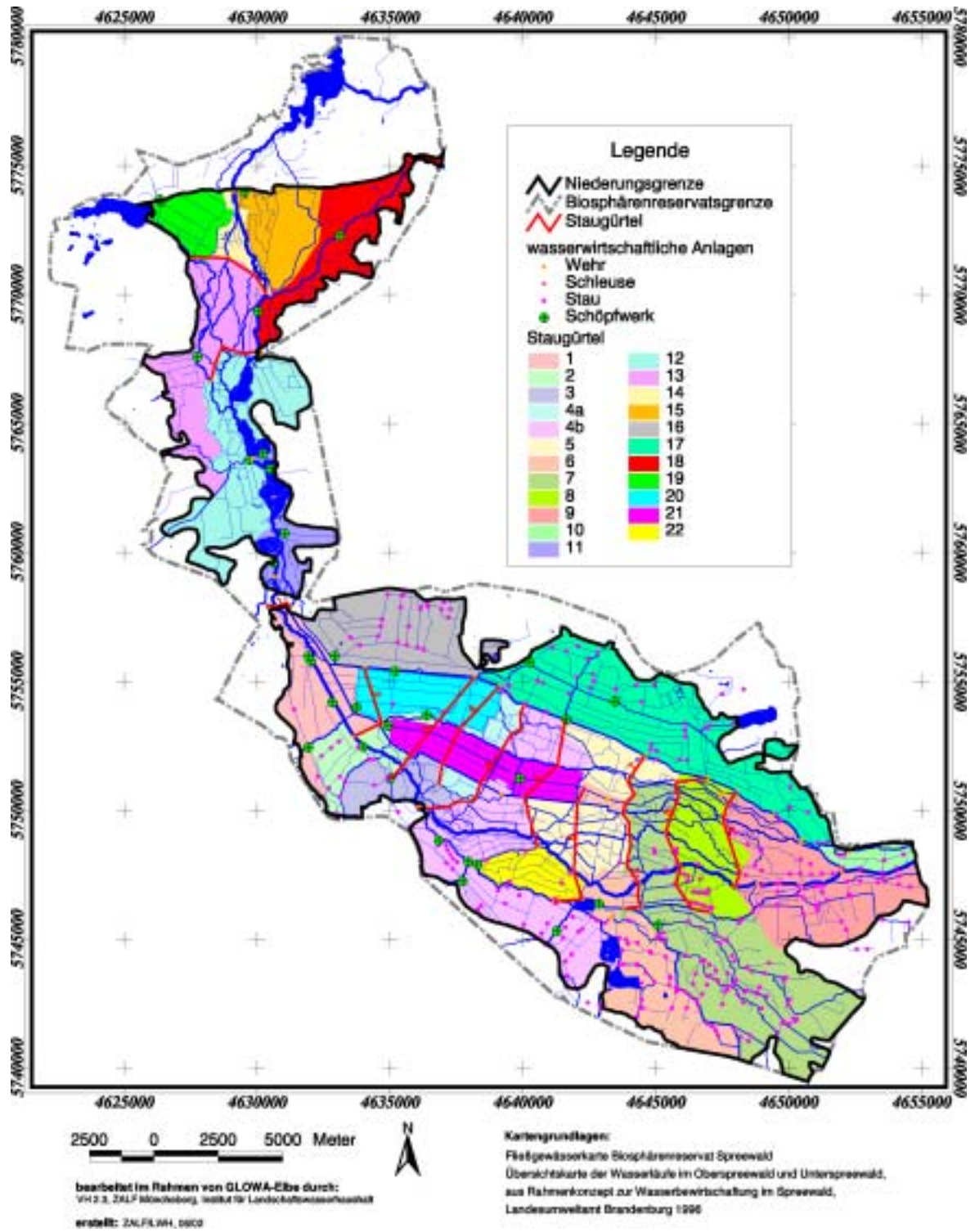


Abb. 27: Unterteilung des Niederungsgebietes Spreewald in Staugürtel

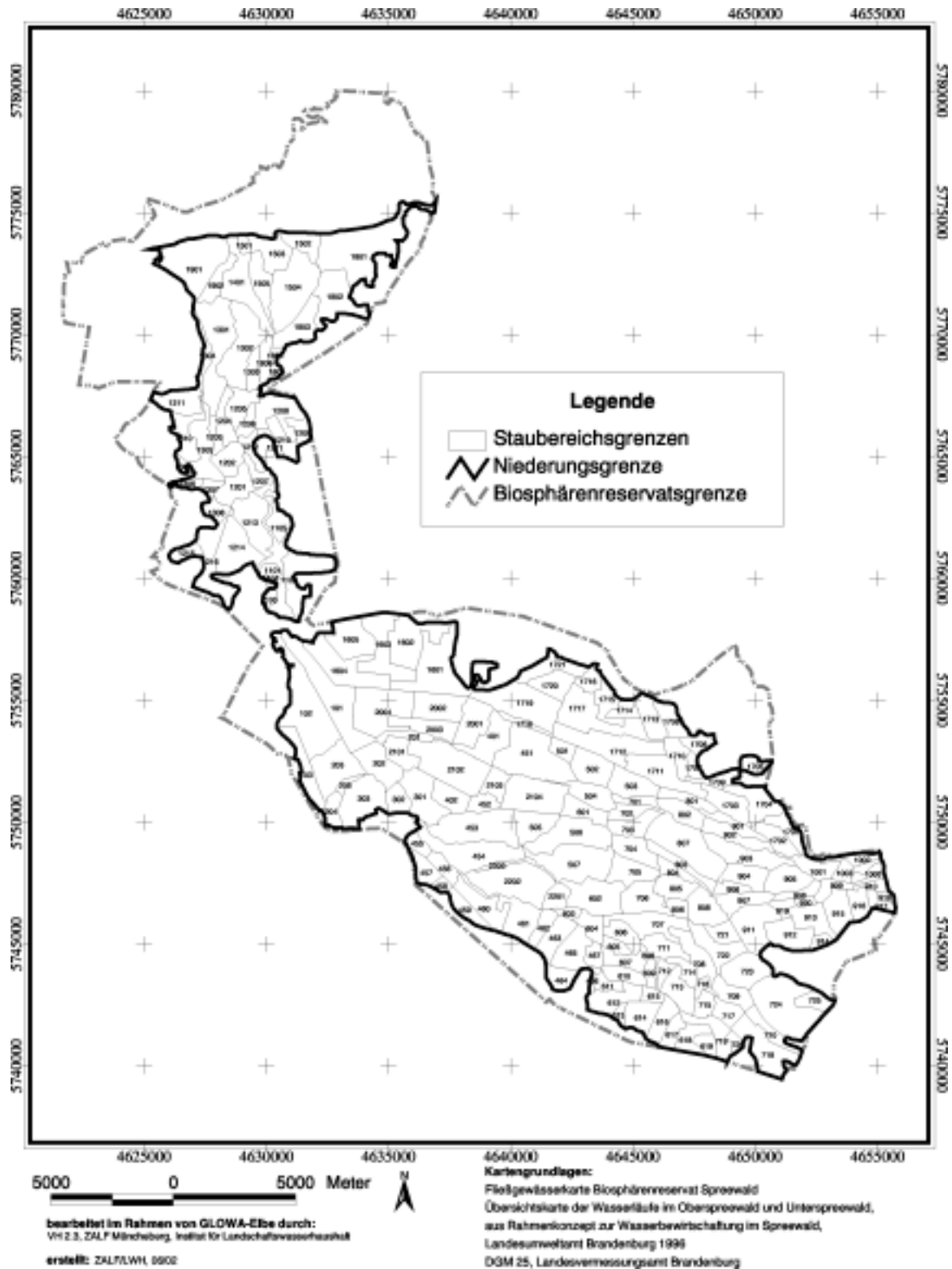


Abb. 28: Unterteilung des Niederungsgebietes Spreewald in Staubereiche

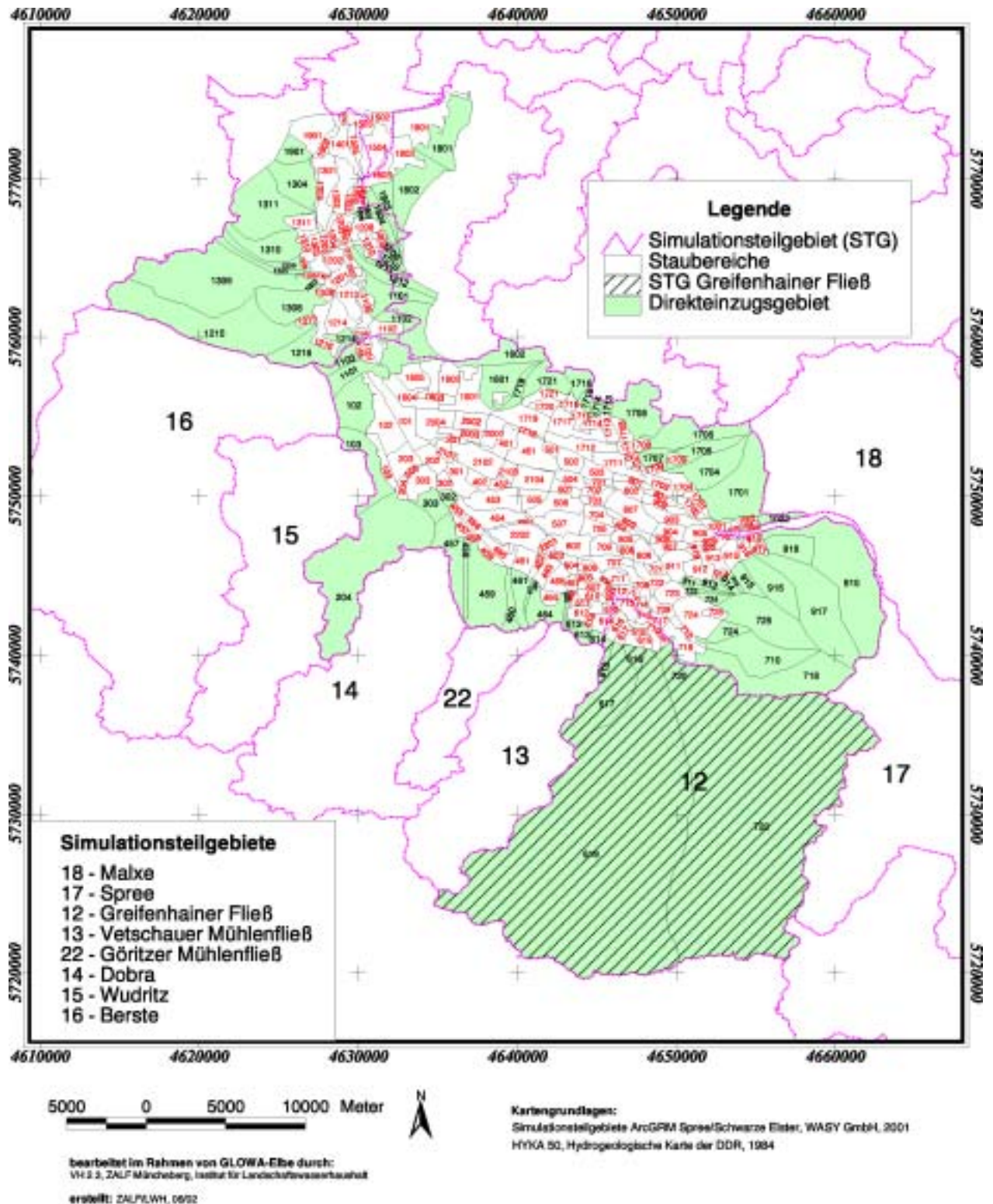


Abb. 29: Aufteilung der Simulationsteilgebiete (STG) des OSW und des USW auf die am Rande liegenden Staubereiche

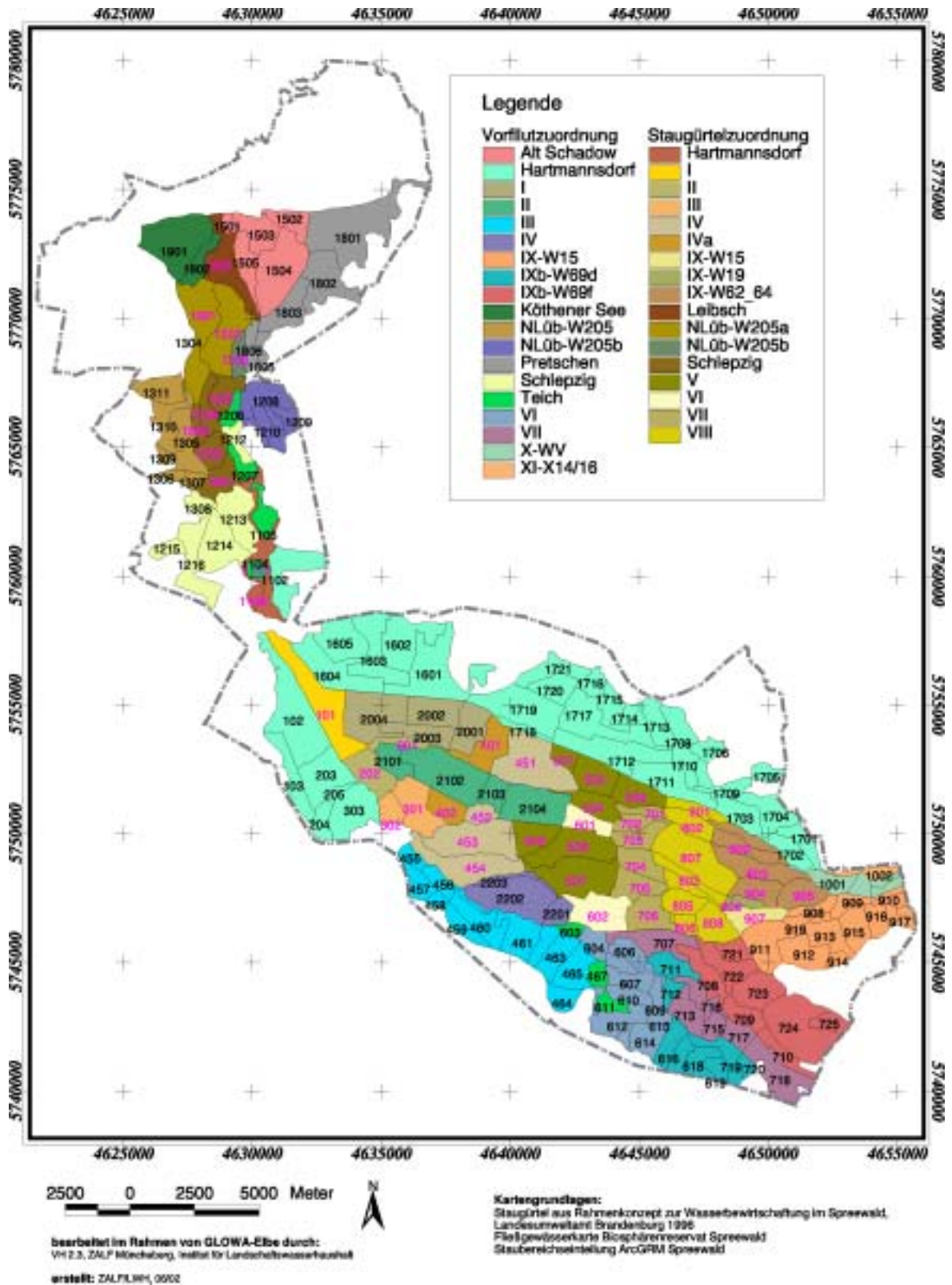


Abb. 30: Staugürtel- und Vorflutzuordnung der Staubereiche als Grundlage für die Festlegung von Stauzonen

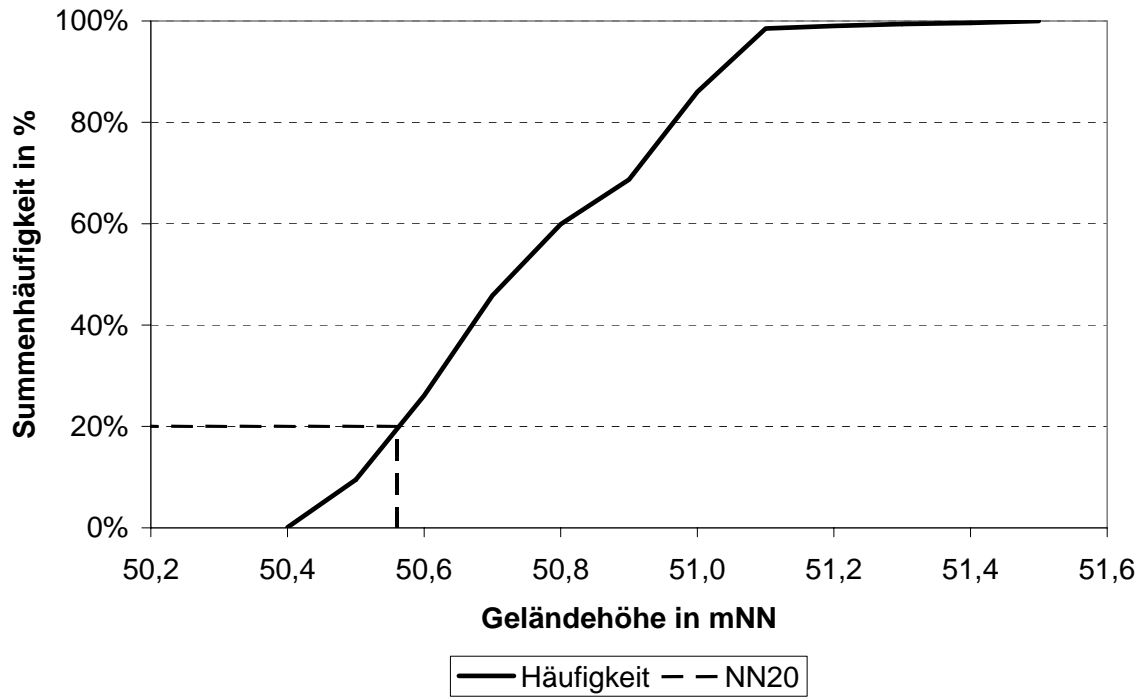


Abb. 31: Geländehöhenverteilung eines Staubereichs mit Kennzeichnung der Bezugshöhe für Stauziele NN20

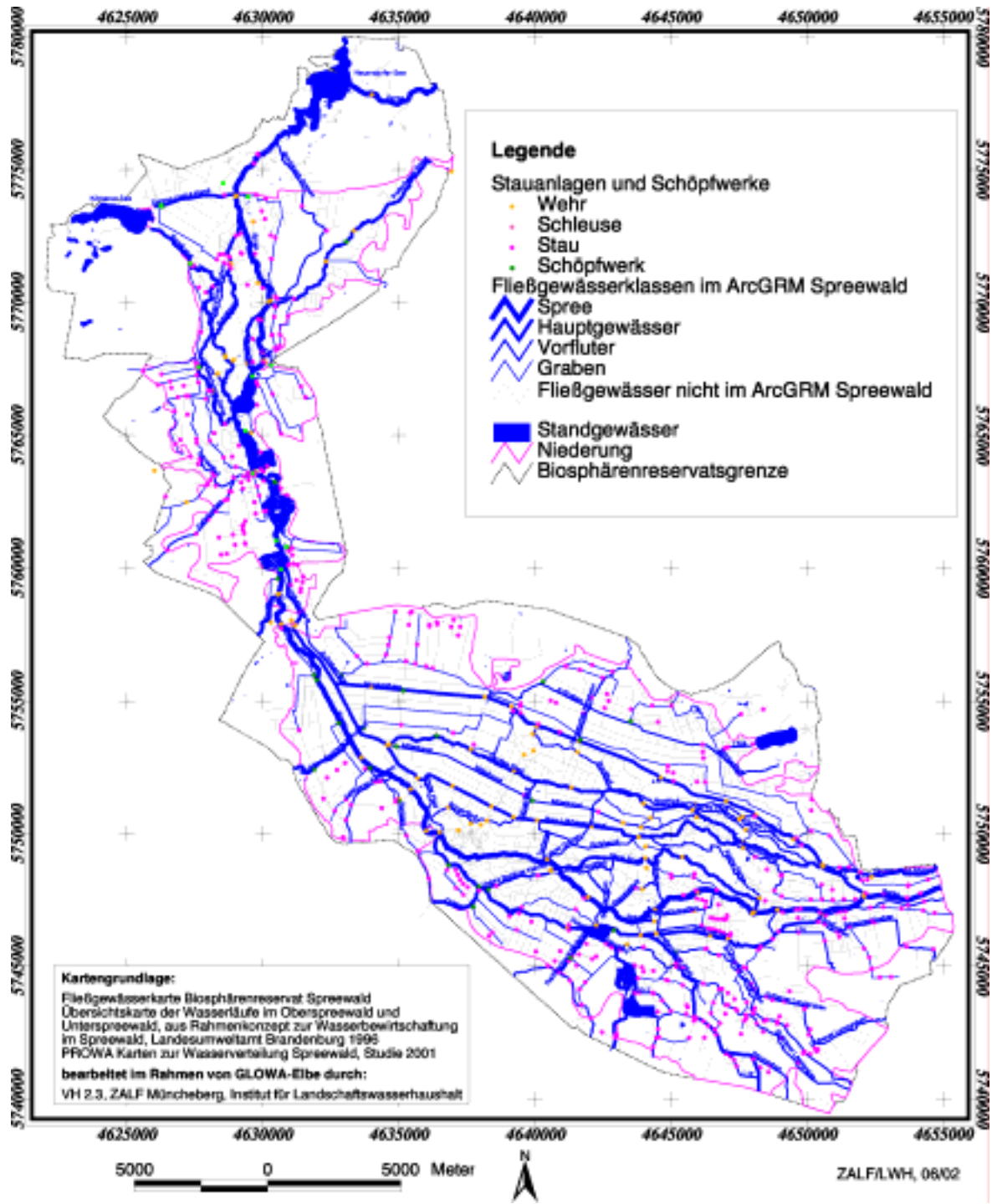


Abb. 32: Im Modell ArcGRM Spreewald direkt berücksichtigte Fließgewässer des UG Spreewald

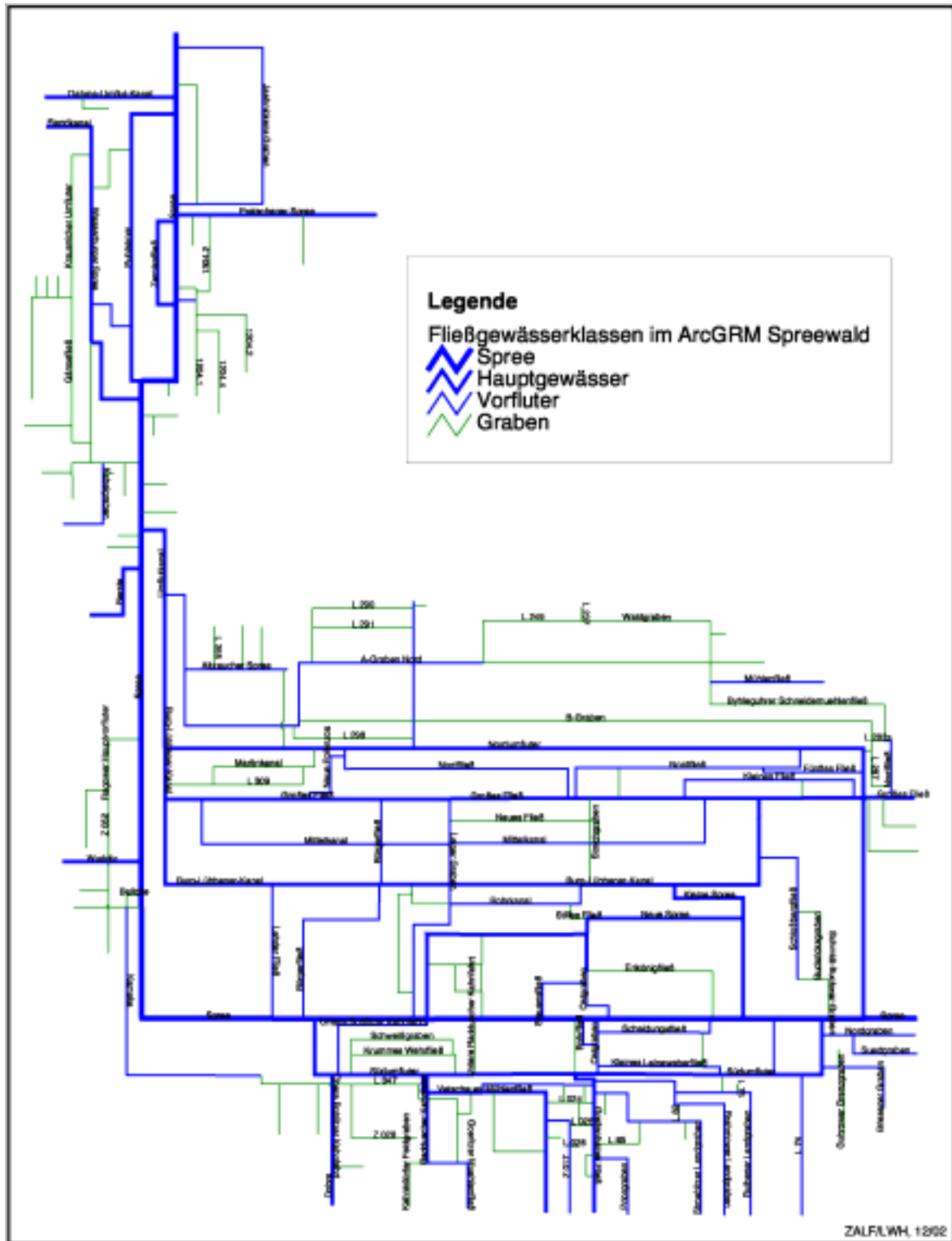


Abb. 33: Strangschema ArcGRM Spreewald

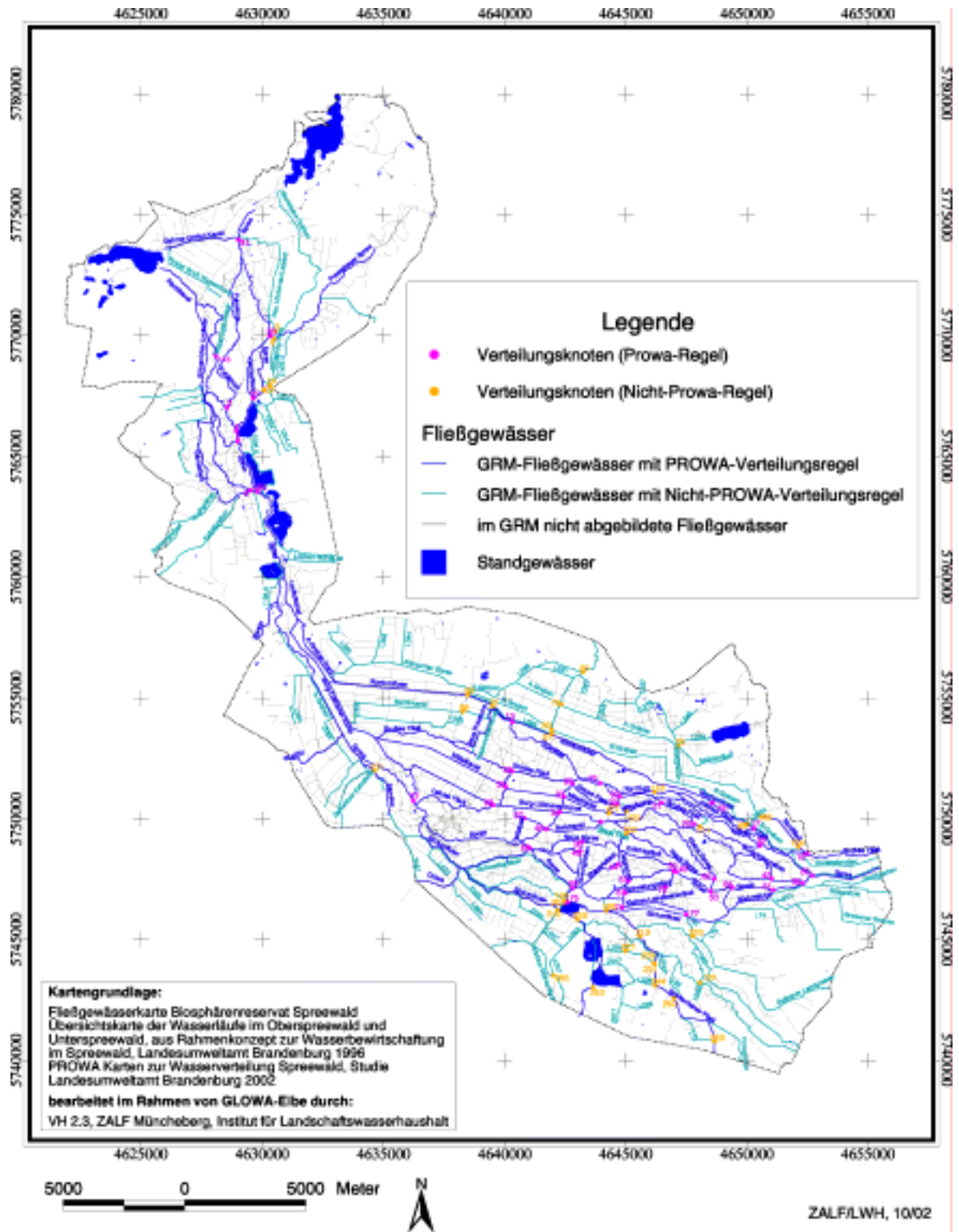


Abb. 34: Reduziertes Fließgewässersystem des Spreewaldes mit regelbehafteten Verteilungsknoten



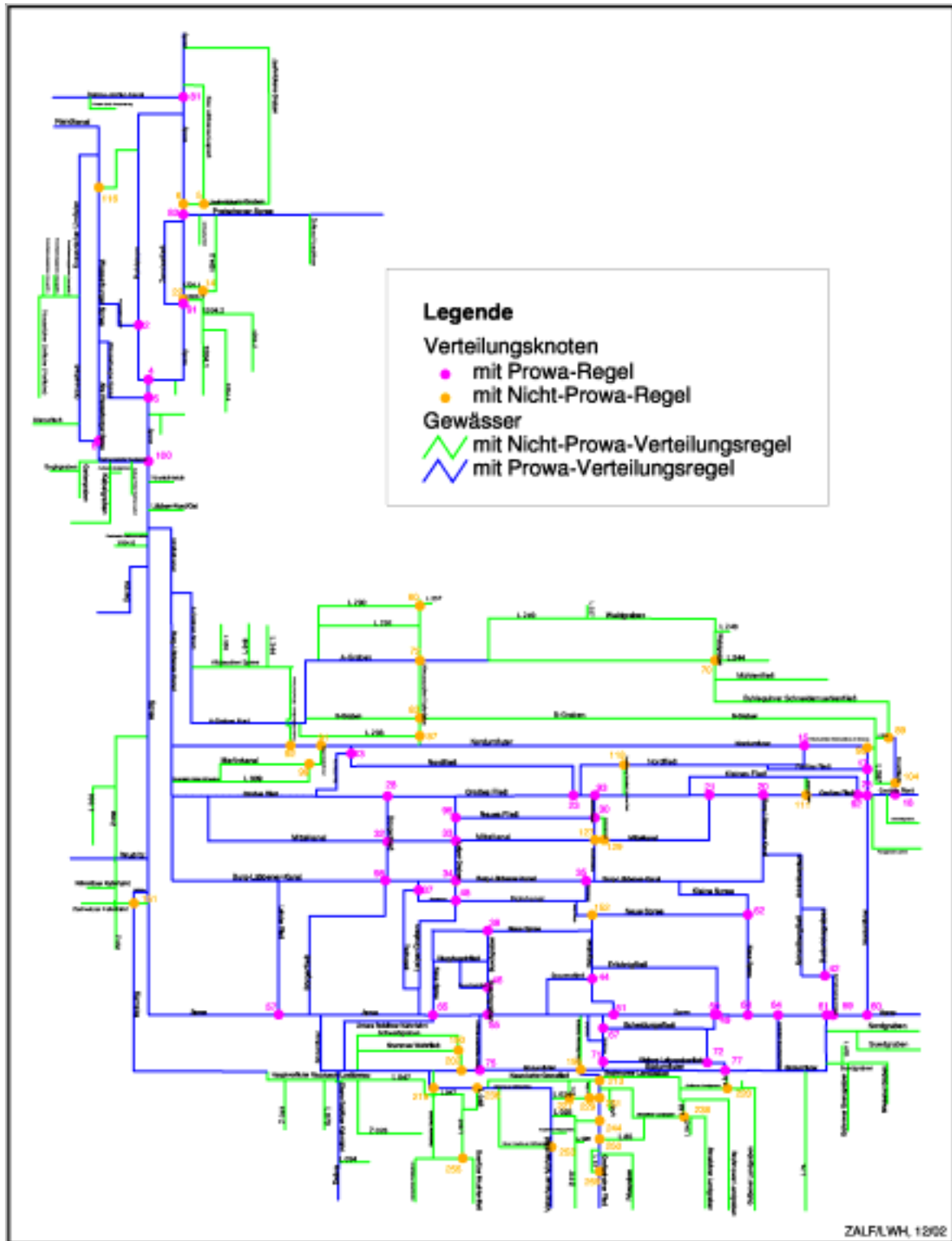


Abb. 35: Strangschema ArcGRM Spreewaldes mit regelbehafteten Verteilungsknoten

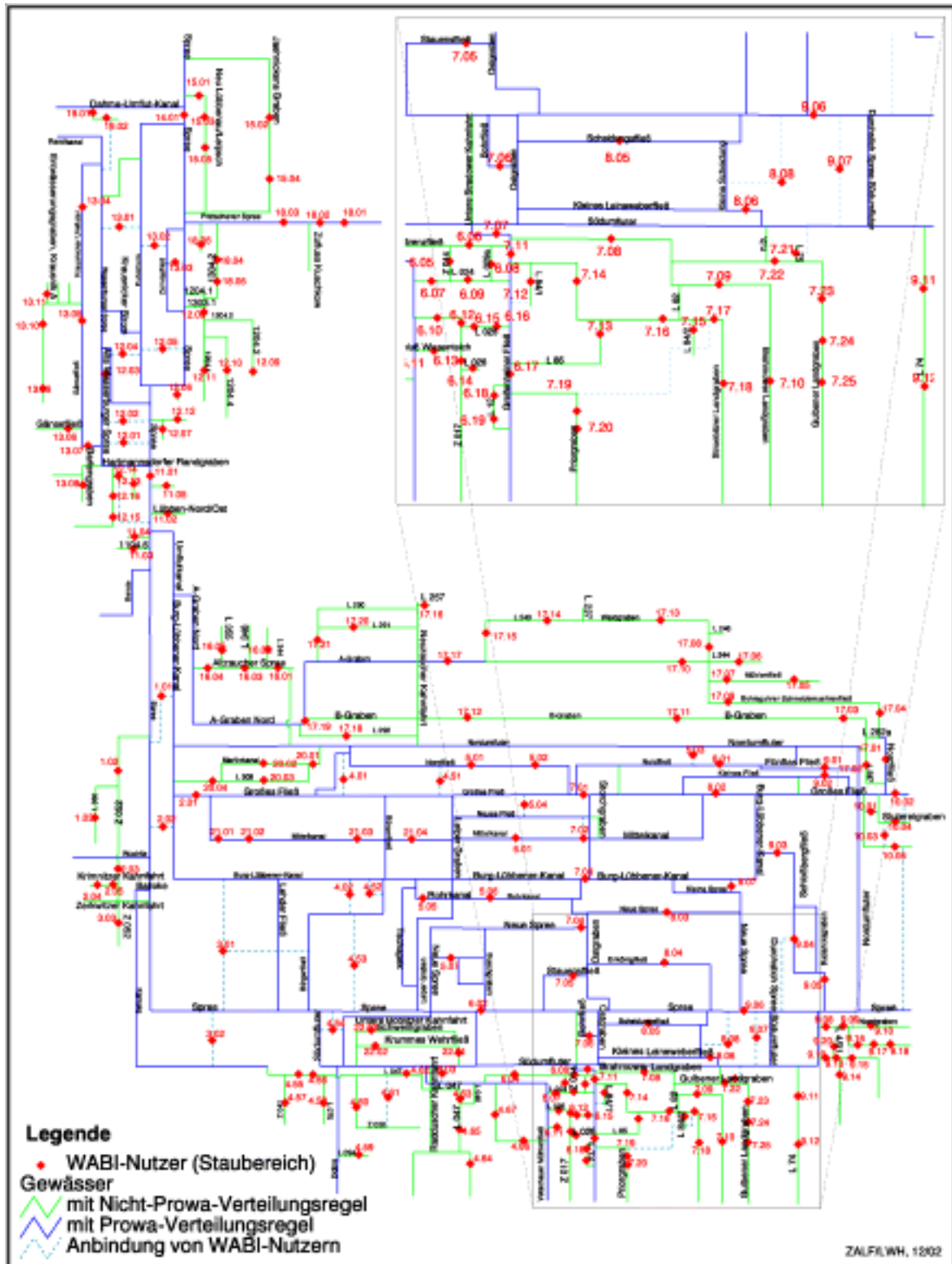


Abb. 36: Strangschema ArcGRM Spreewald mit Zuordnung der WABI-Nutzer



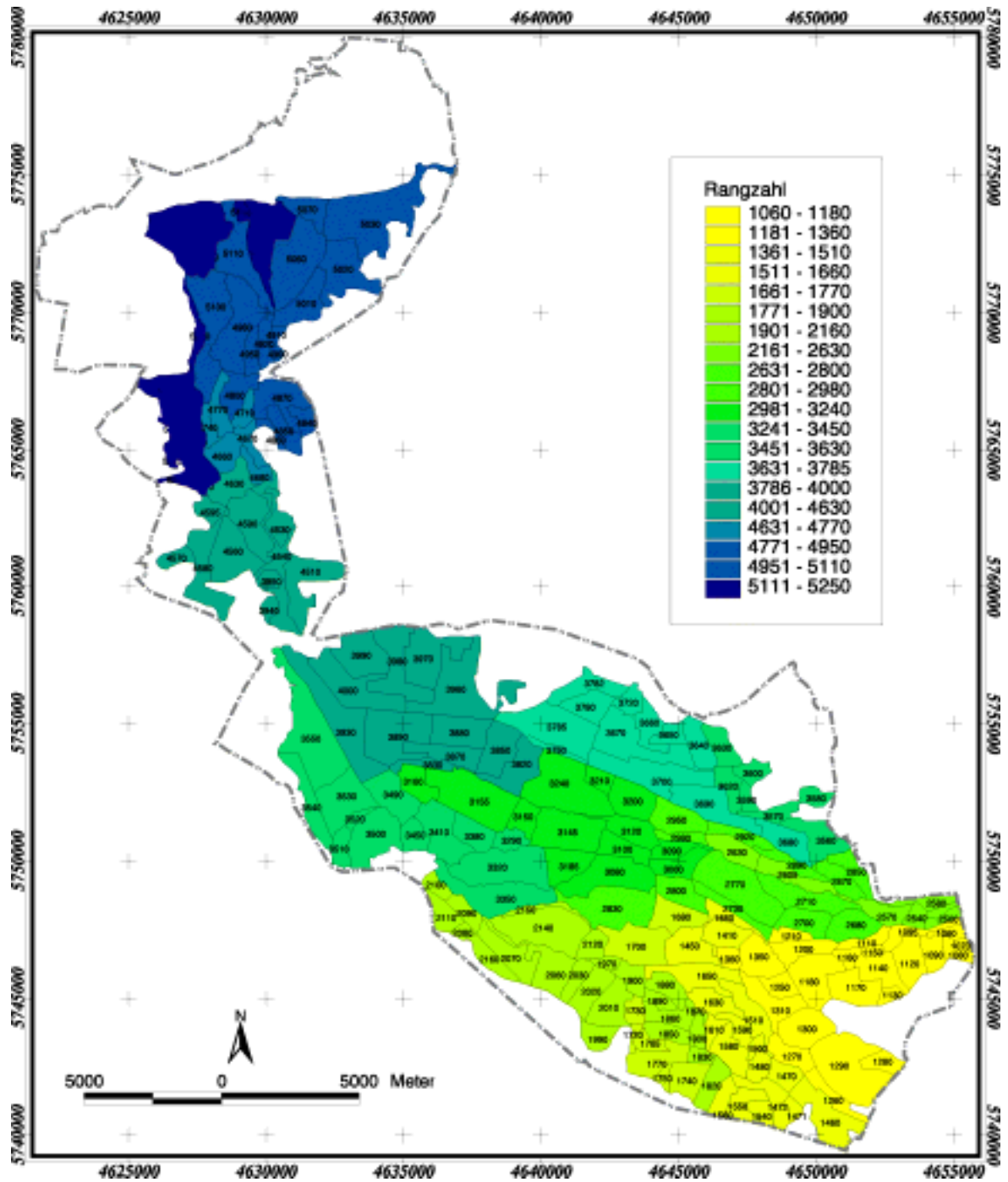


Abb. 38: Staubereiche mit Rangzahl

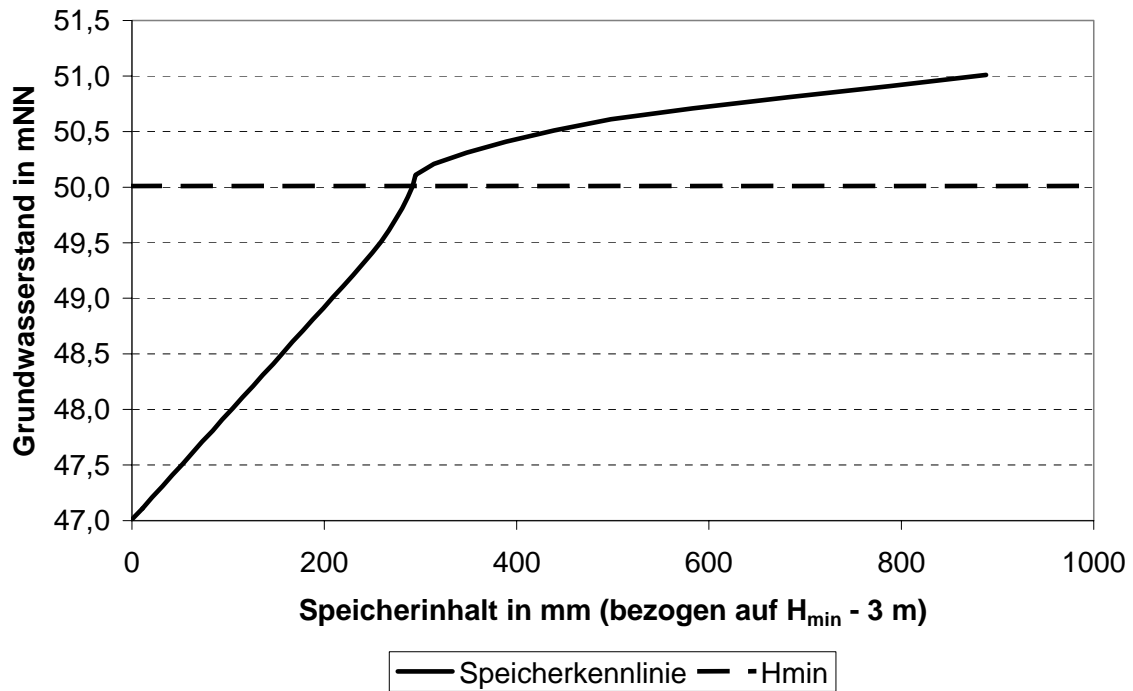


Abb. 39: Beispiel für die Speicherkenlinie eines Staubereiches als Funktion des Grundwasserstandes (Nullpunkt 3 m unterhalb des tiefsten Geländepunktes frei gewählt)

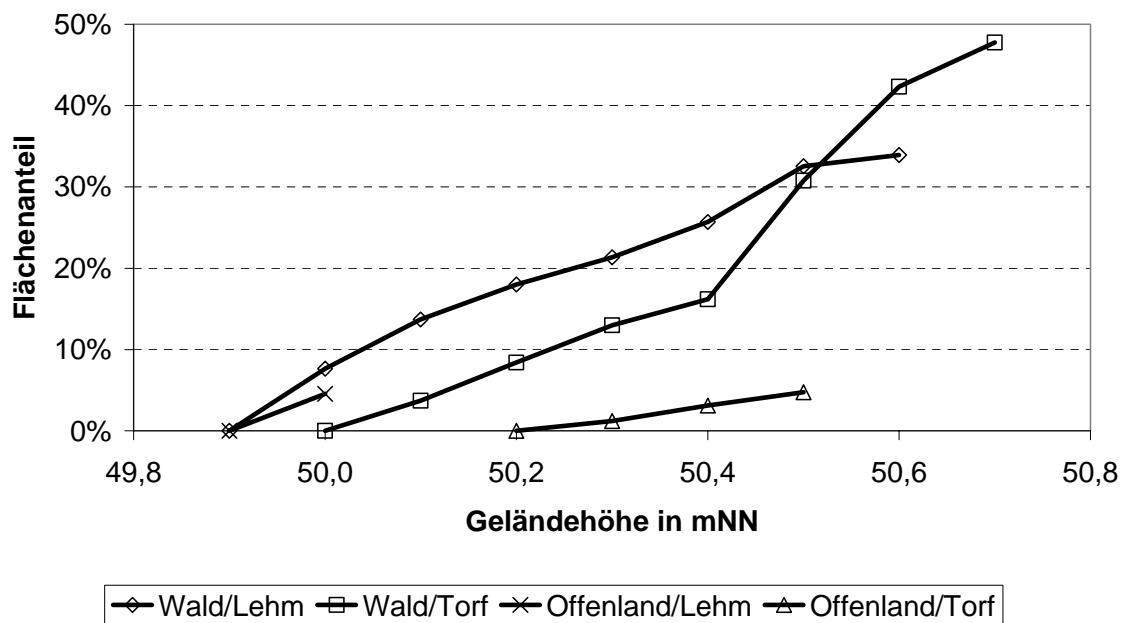


Abb. 40: Beispiel für die Geländehöhenverteilung der Elementarflächen (Kombination aus Landnutzung und Bodenartenhauptgruppe) eines Staubereiches

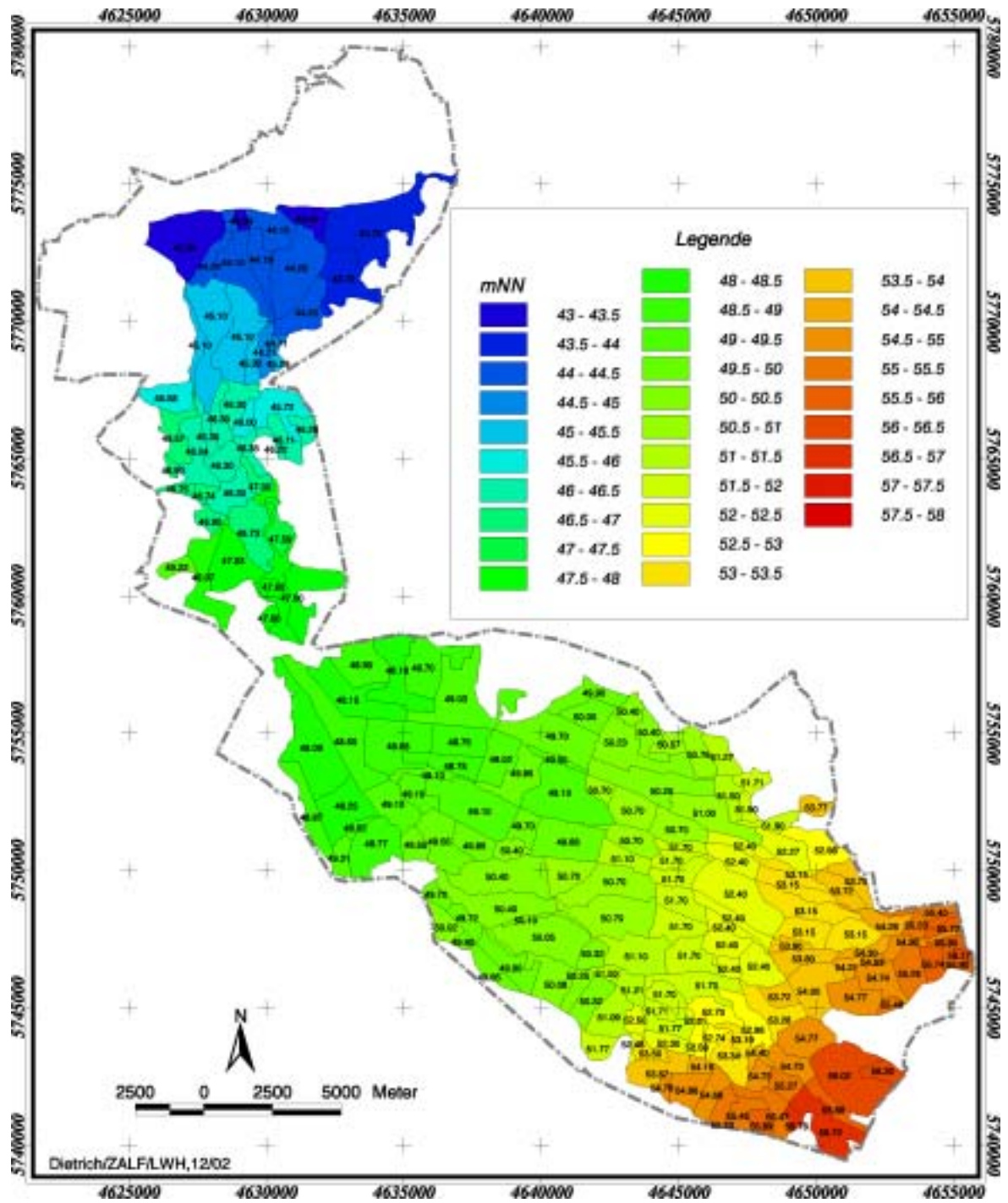


Abb. 41: Zielgrundwasserstände der Staubereiche, dargestellt am Beispiel des Monats Juli im Referenzszenario

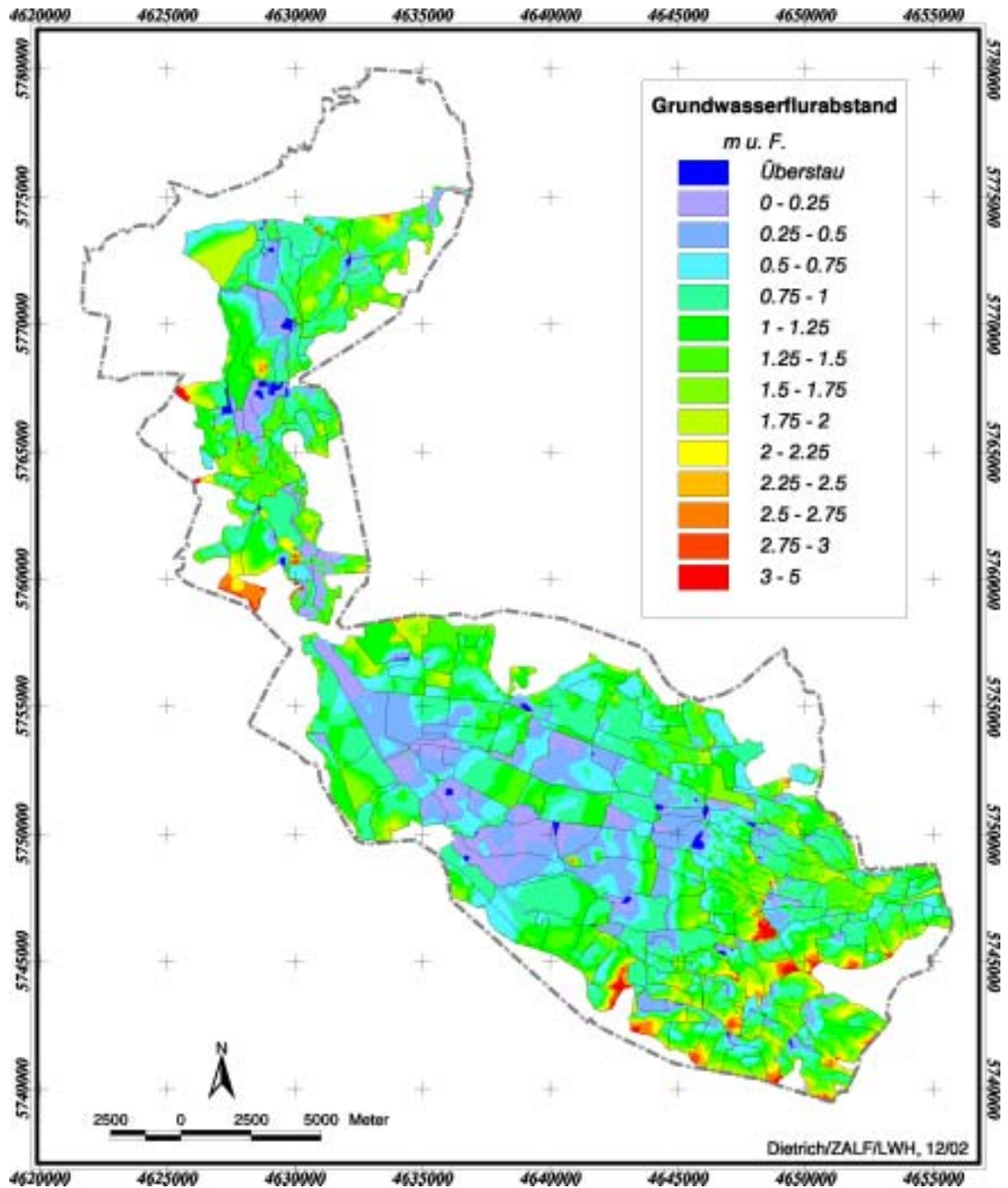


Abb. 42: Grundwasserflurabstände bei Zielgrundwasserstand, dargestellt am Beispiel des Monats Juli im Referenzszenario

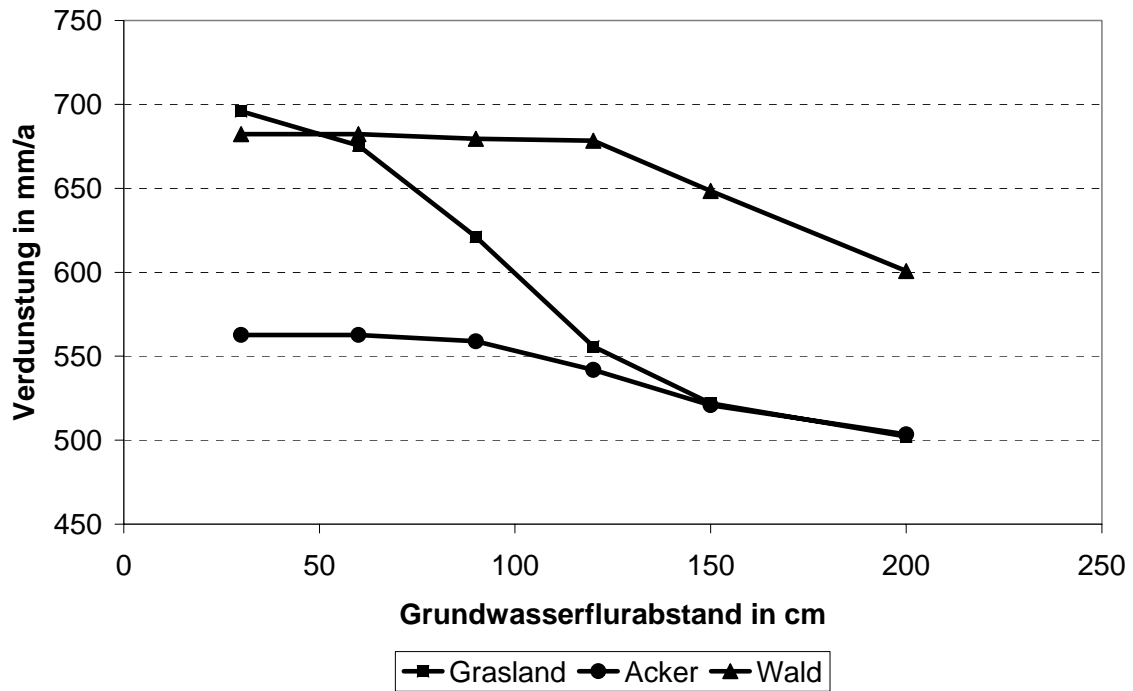


Abb. 43: Einfluss des Landnutzungstyps auf die Verdunstung, dargestellt am Beispiel eines Torfstandortes (berechnet mit BOWAS, VH 2.6)

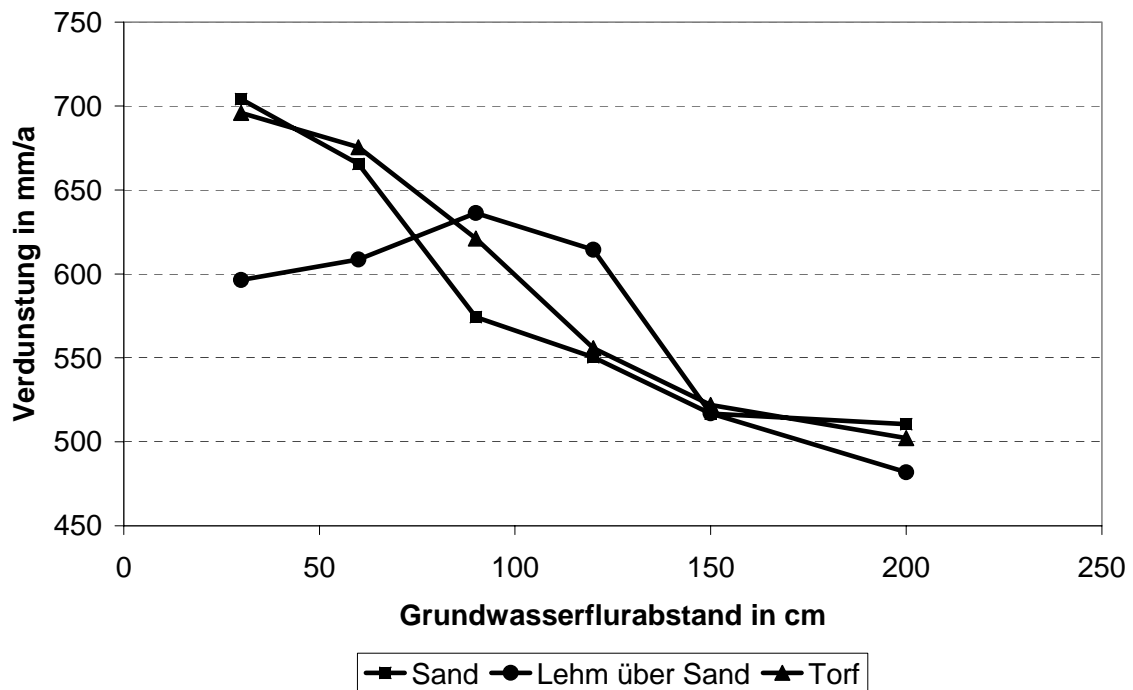


Abb. 44: Einfluss der Bodenart auf die Verdunstung von Grasland (berechnet mit BOWAS, VH 2.6)



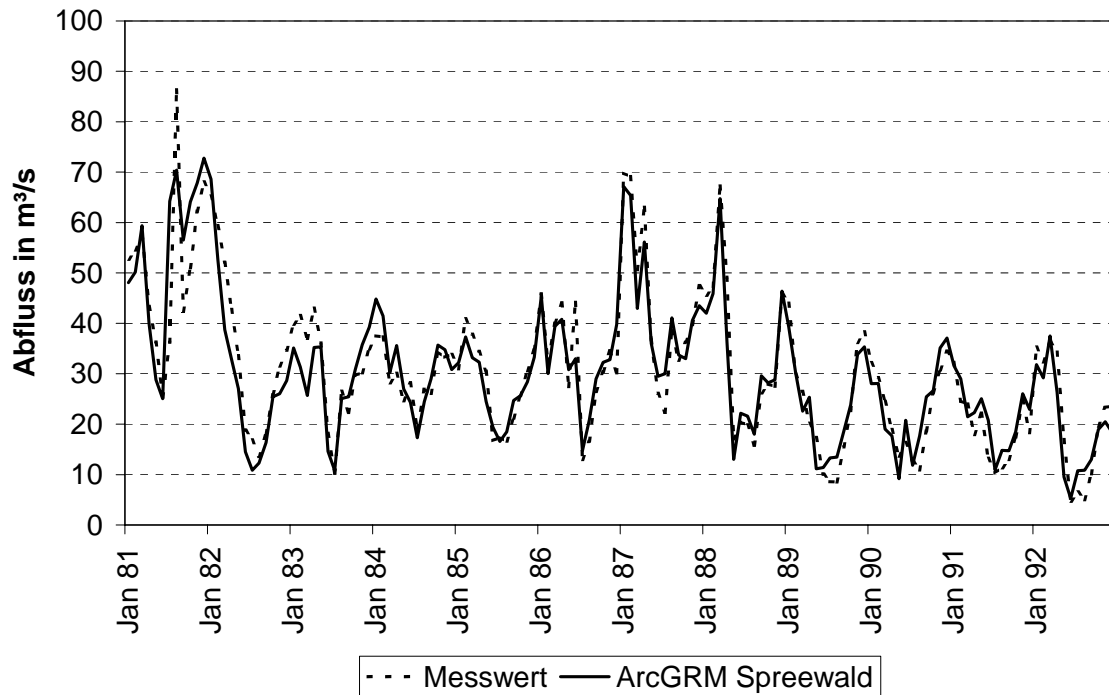


Abb. 45: Vergleich von gemessenen und berechneten Abflusssummen für den Gebietsausgang des Spreewaldes der Reihe 1981/92 (Messdaten Landesumweltamt Brandenburg)

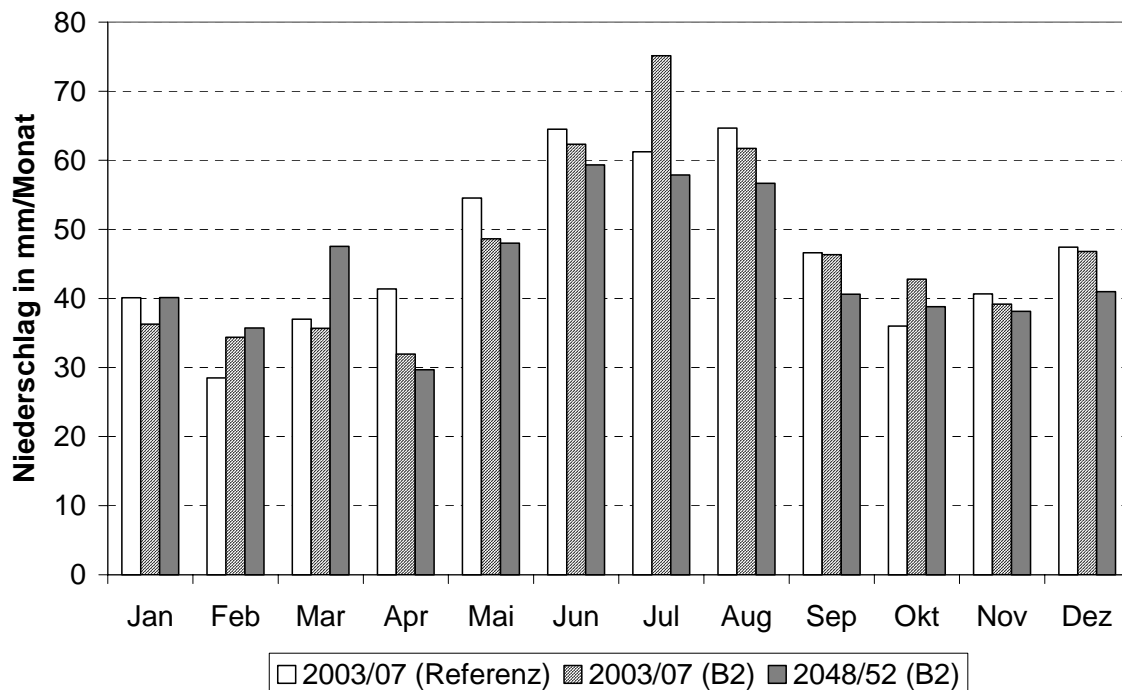


Abb. 46: Vergleich des Medians der Monatsniederschläge von Referenz- und B2-Basisszenario (B2) in den Zeiträumen 2003/07 und 2048/52

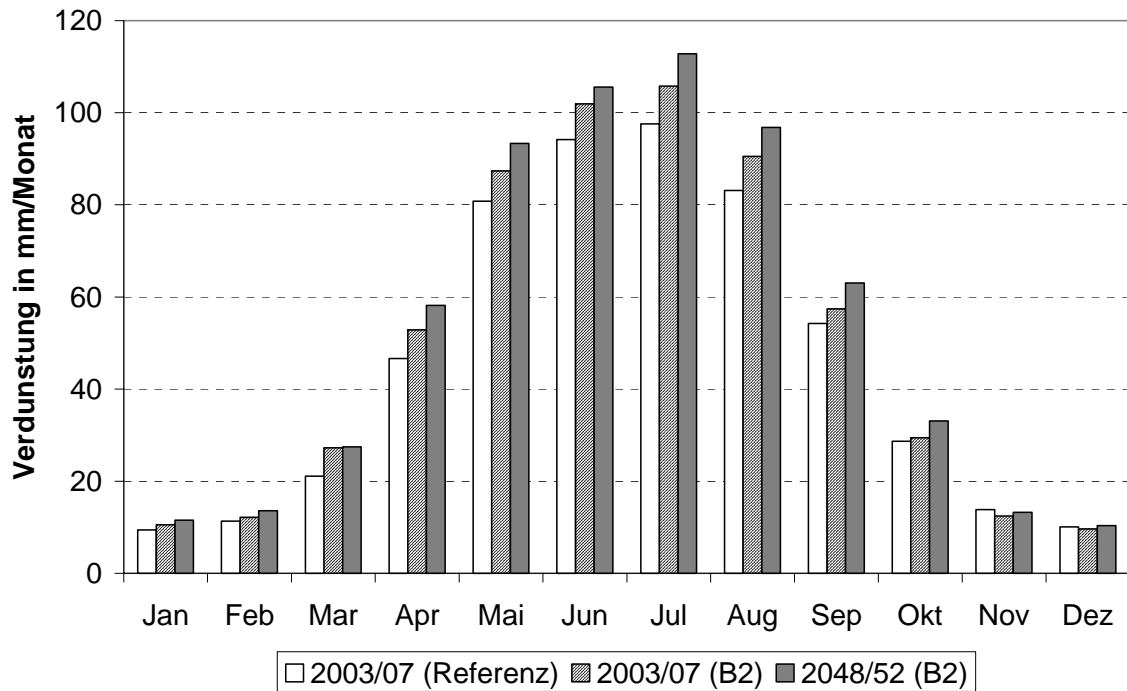


Abb. 47: Vergleich des Medians der potentiellen Verdunstung von Referenz- und B2-Basisszenario (B2) in den Zeiträumen 2003/07 und 2048/52

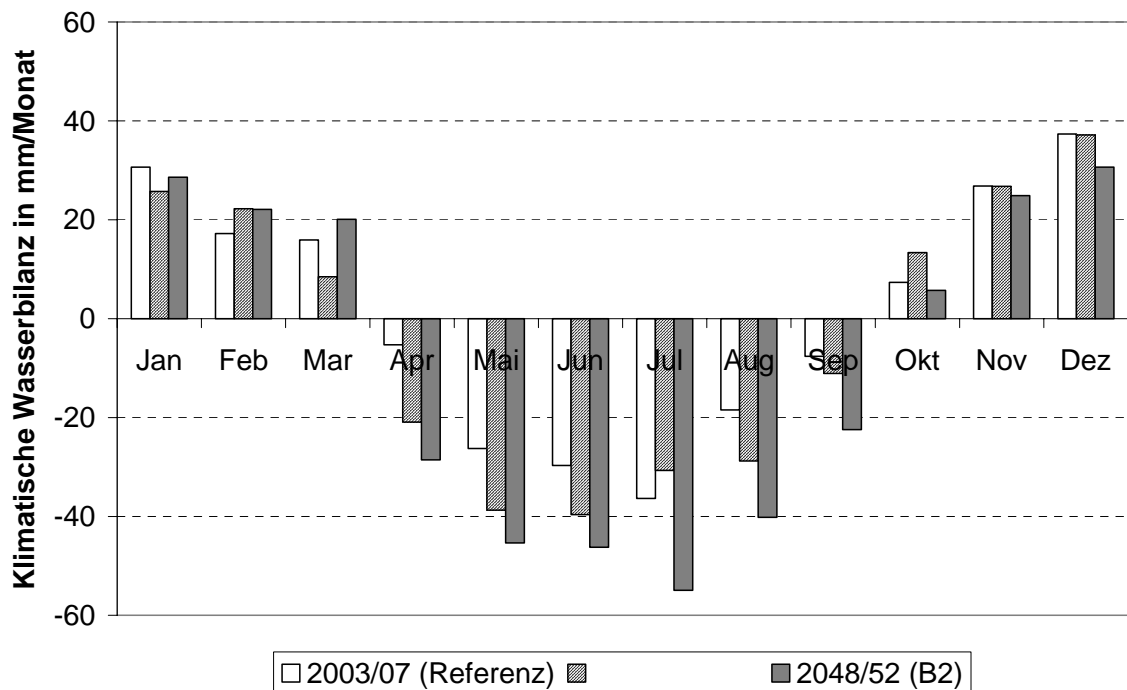


Abb. 48: Vergleich des Medians der klimatischen Wasserbilanz von Referenz- und B2-Basisszenario (B2) in den Zeiträumen 2003/07 und 2048/52

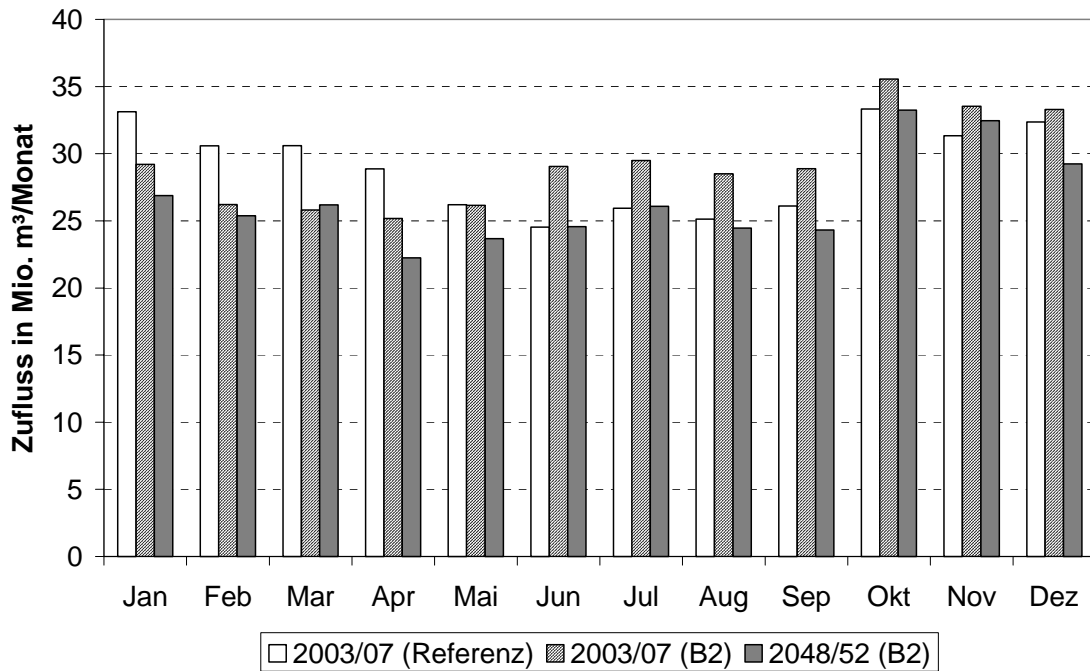


Abb. 49: Vergleich des Medians der Summe aller Einzugsgebietszuflüsse von Referenz- und B2-Basisszenario (B2) in den Zeiträumen 2003/07 und 2048/52

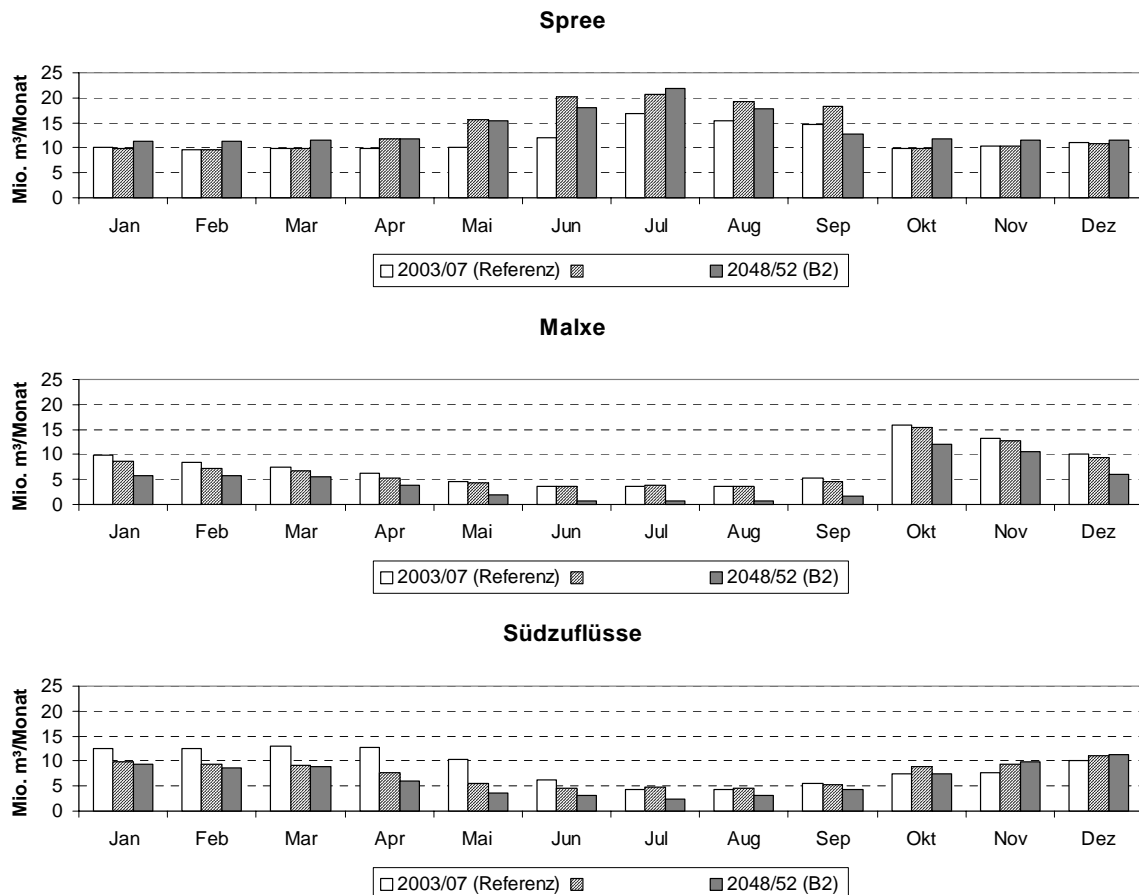
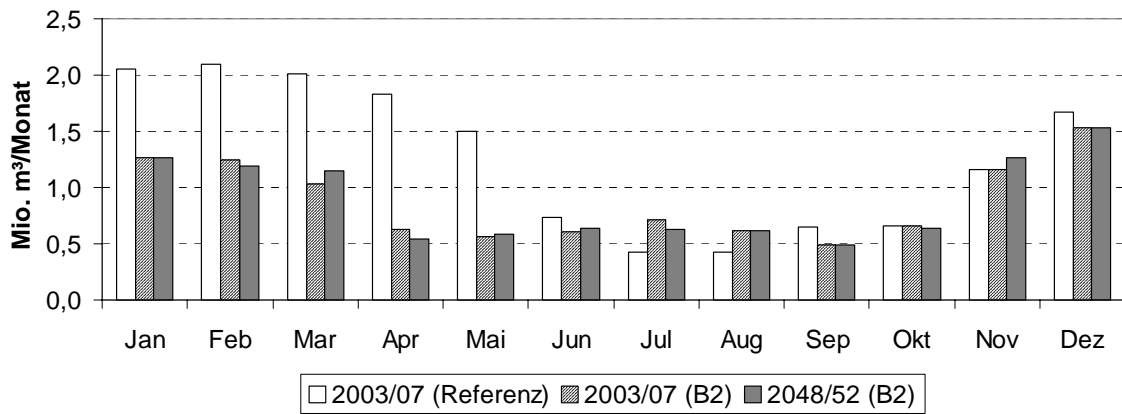


Abb. 50: Vergleich des Medians der Summe der Einzugsgebietszuflüsse von Spree, Malxe und Südzufüssen im Referenz- und B2-Basisszenario (B2) in den Zeiträumen 2003/07 und 2048/52

### Randzufluss OSW



### Randzufluss USW

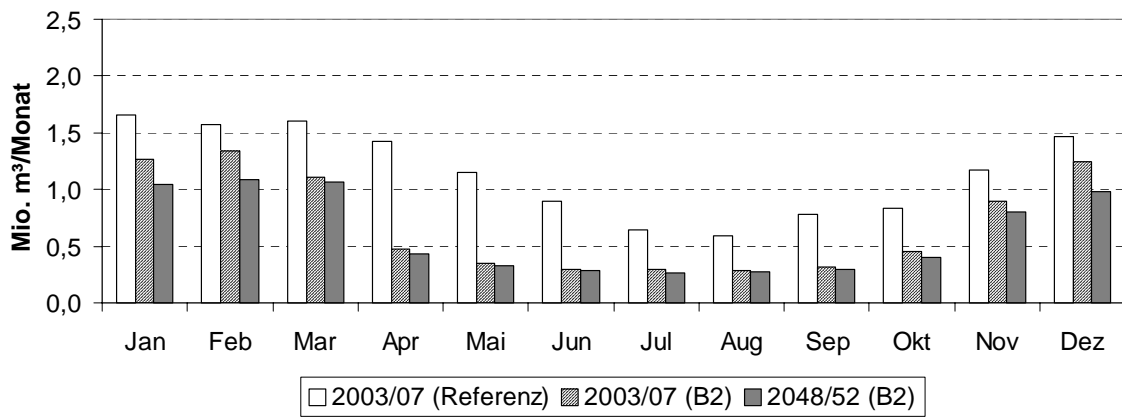


Abb. 51: Vergleich des Medians der Summe der Randgebietszuflüsse von Oberspreewald (OSW) und Unterspreewald (USW) im Referenz- und B2-Basisszenario (B2) in den Zeiträumen 2003/07 und 2048/52

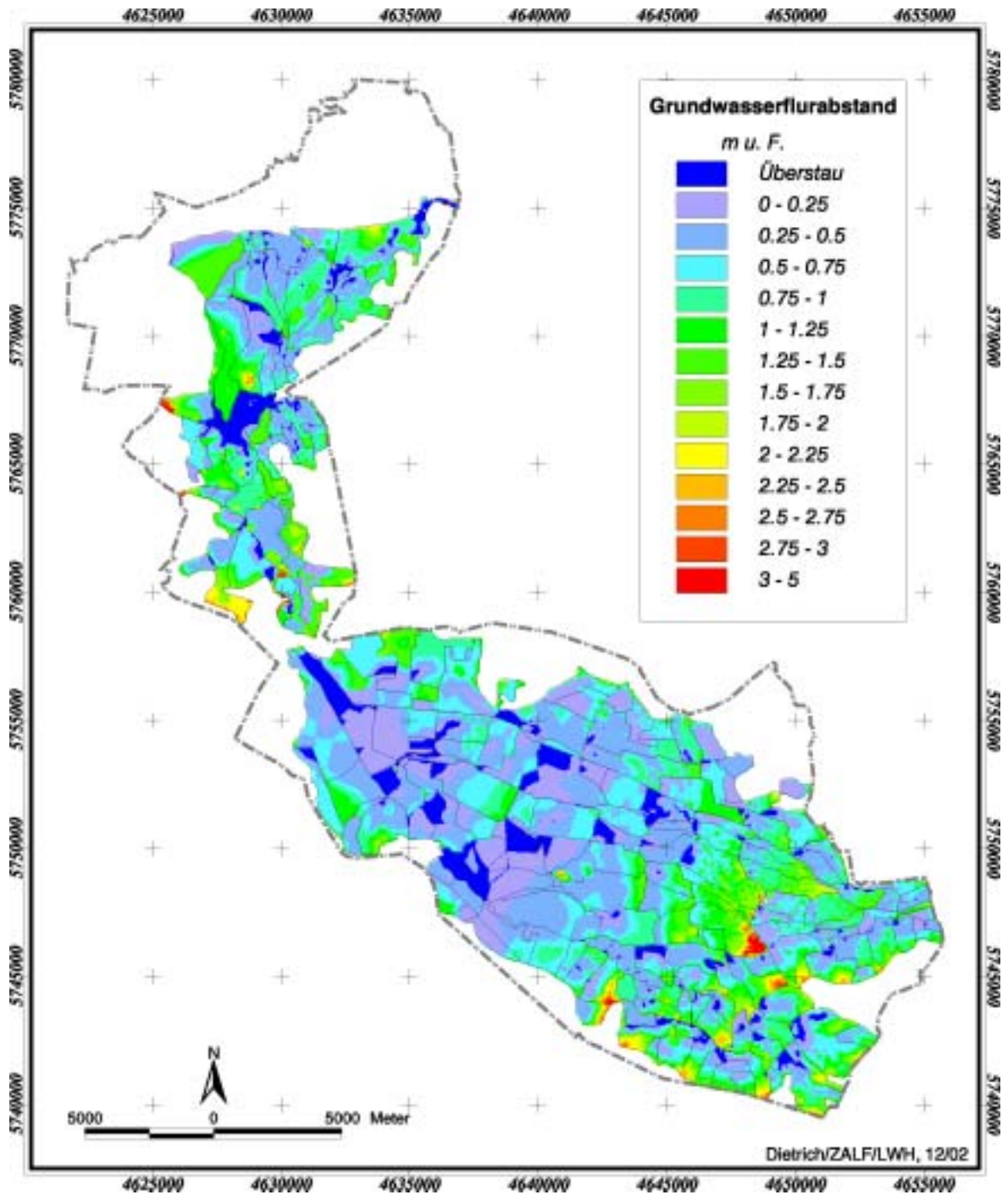


Abb. 52: Grundwasserflurabstände bei Zielgrundwasserstand, dargestellt am Beispiel des Monats März im Referenzszenario

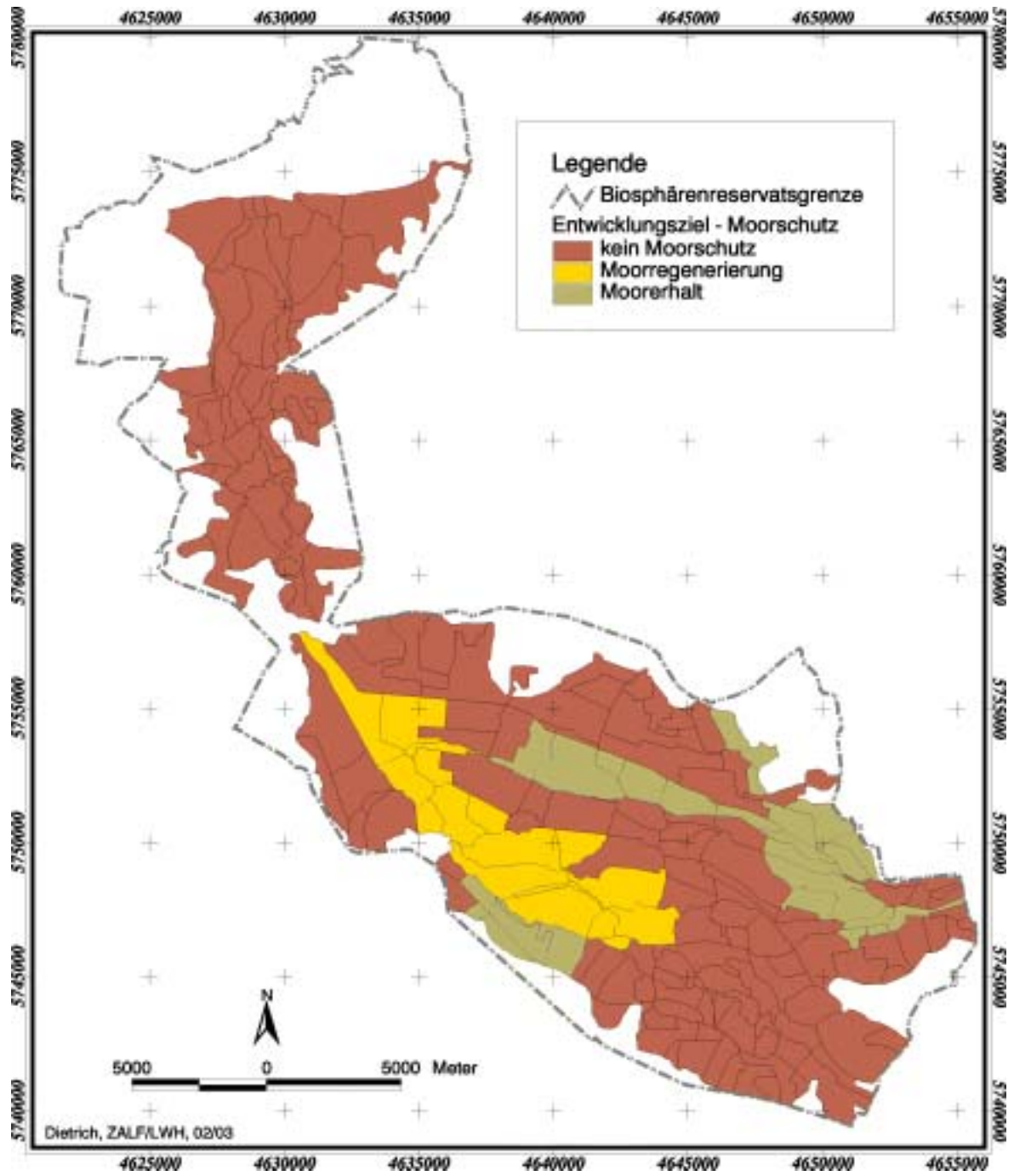


Abb. 53: Lage der Staubereiche mit den Entwicklungszielen Moorregenerierung und Moorerhalt in den Moorschutzszenarien

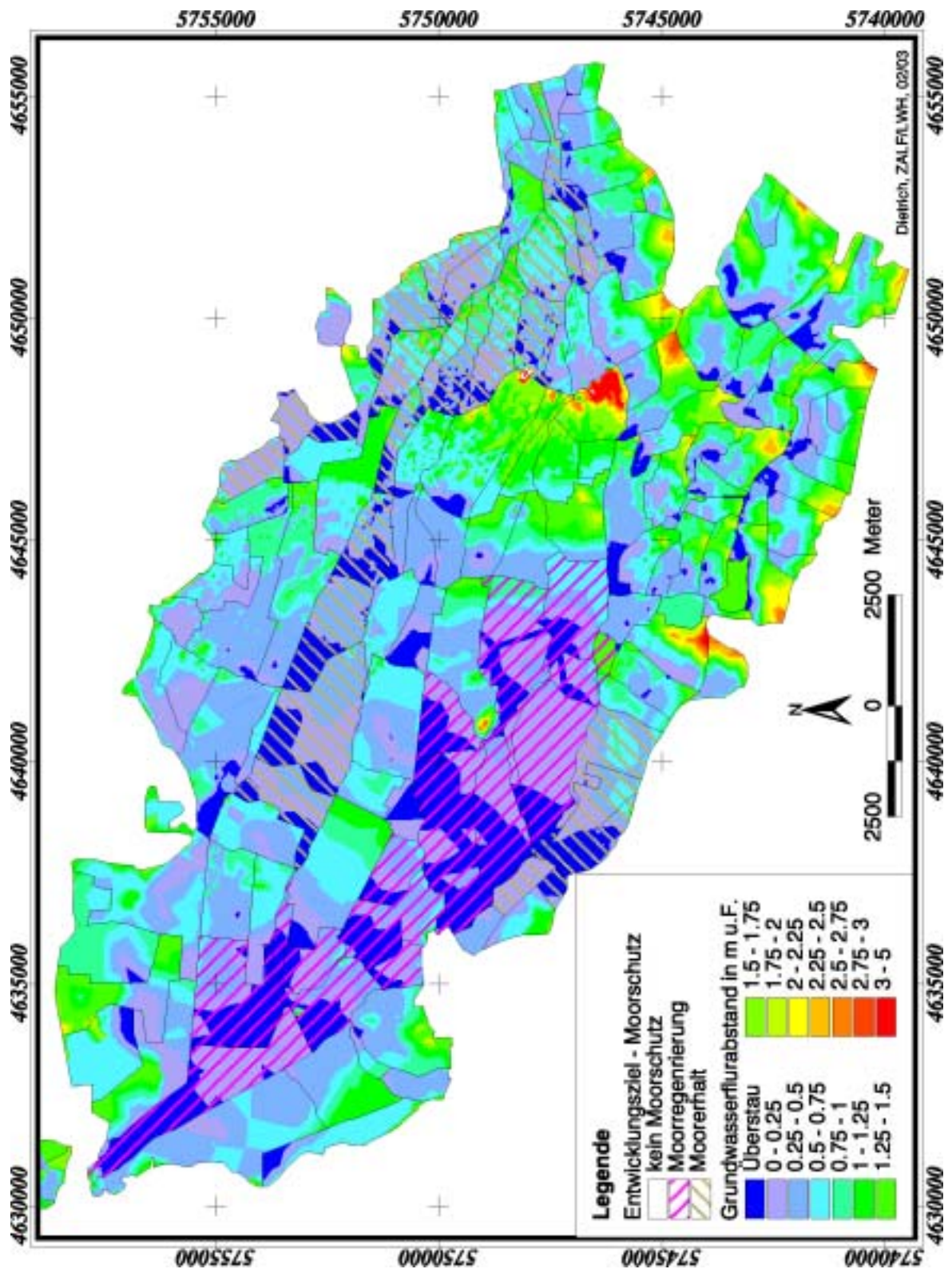


Abb. 54: Anhebung der Zielgrundwasserstände im Moorschutzszenario, dargestellt am Beispiel der Grundwasserflurabstände bei Zielgrundwasserstand des Monats März

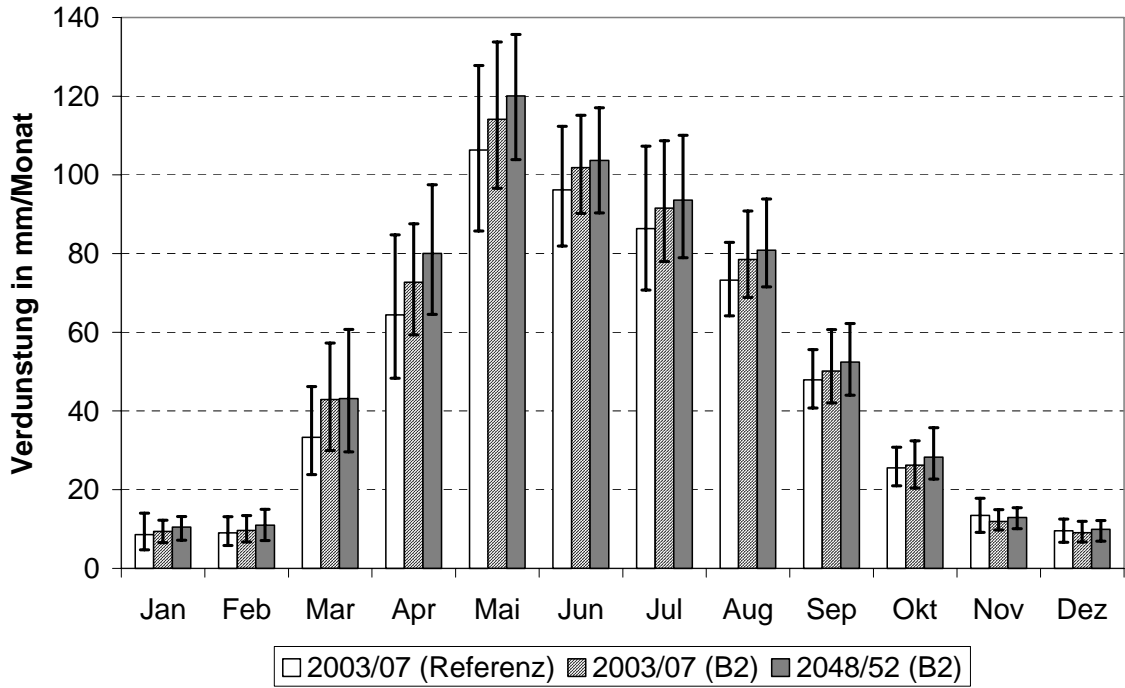


Abb. 55: Vergleich des Medians der realen Verdunstung von Referenz- und B2-Basisszenario (B2) in den Zeiträumen 2003/07 und 2048/52 als Gebietsmittel mit Schwankungsbereich des 10. und 90. Perzentils

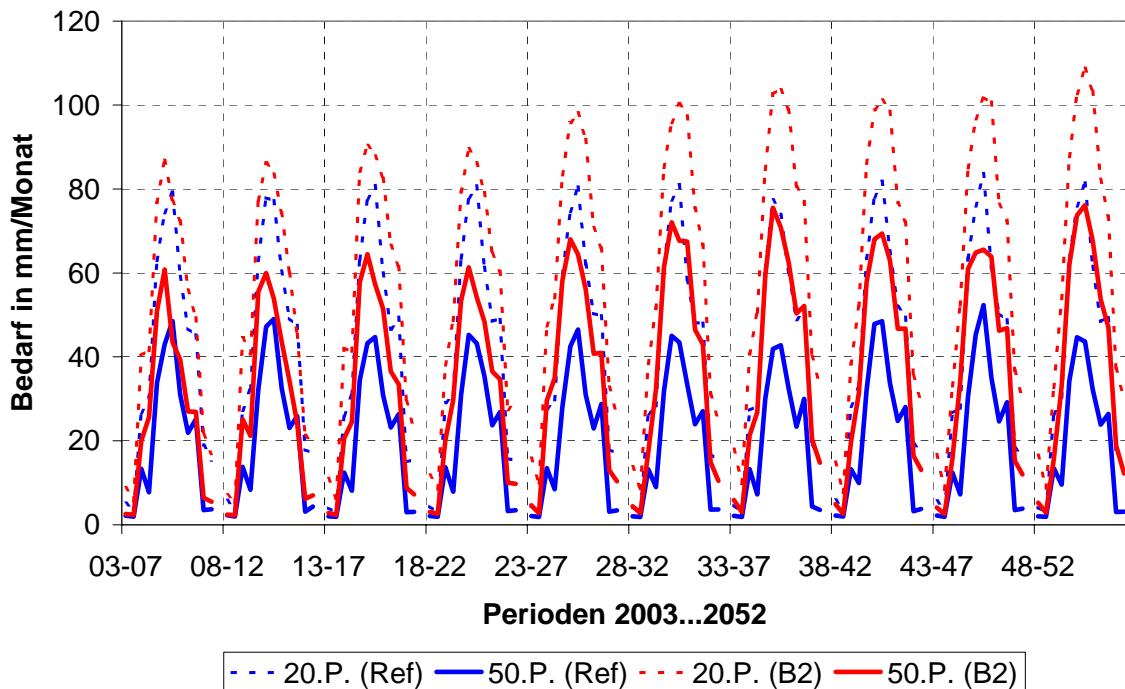


Abb. 56: Zusatzwasserbedarf (Gebietsmittel) im Zeitraum 2003 bis 2052 des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario, dargestellt als Jahrgang der 5-Jahresperioden anhand der 20. und 50. Perzentile



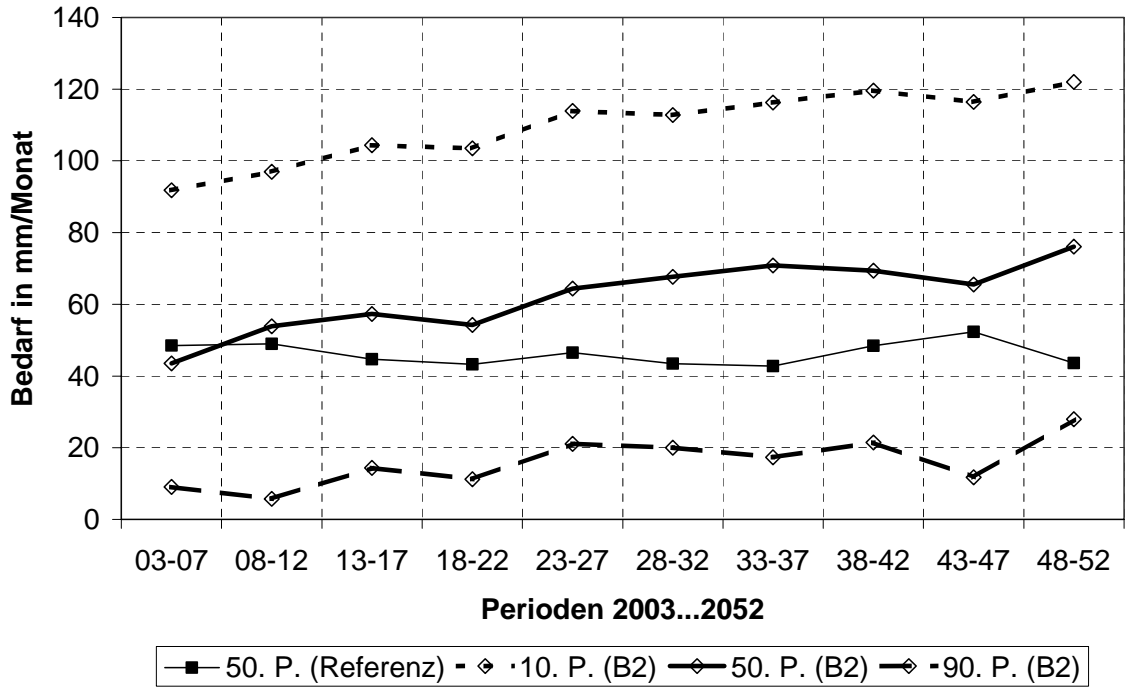


Abb. 57: Anstieg des Zusatzwasserbedarfs (Gebietsmittel) im Monat Juli im Zeitraum 2003 bis 2052 des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario, dargestellt als Perzentile der 5-Jahresperioden

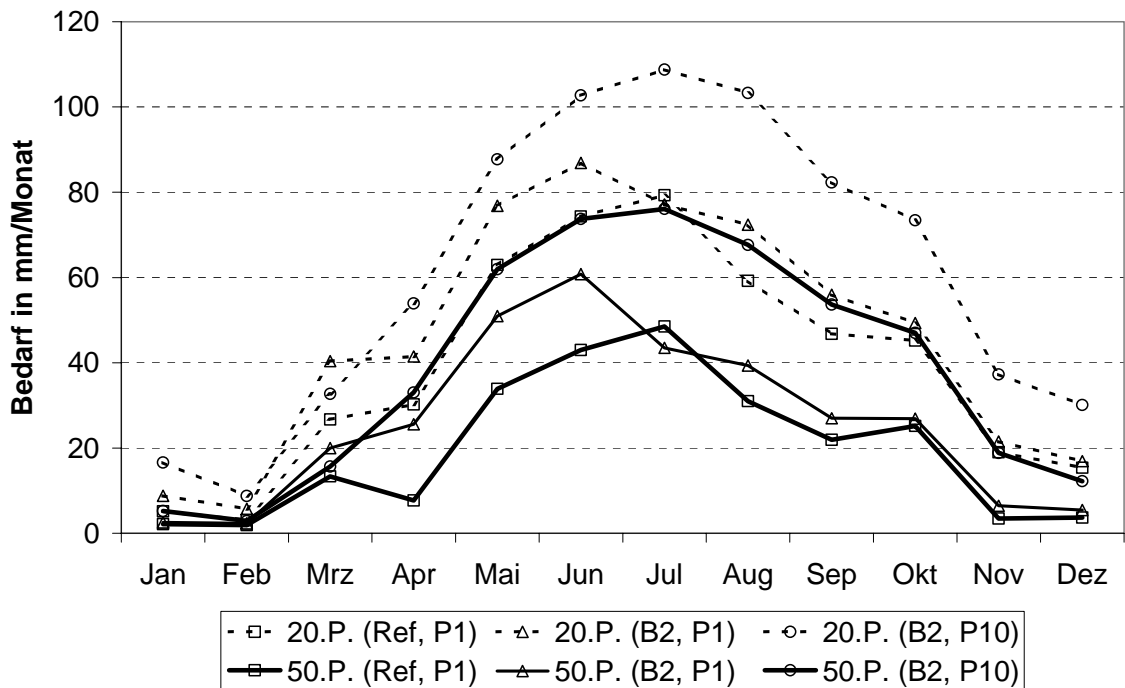


Abb. 58: Zusatzwasserbedarf (Gebietsmittel) des B2-Basisszenarios in der Periode 2048/52 (P10) im Vergleich zum Referenzszenario und B2-Basisszenario der Periode 2003/07 (P1), dargestellt als Jahresgang der 5-Jahresperioden anhand der 20. und 50. Perzentile

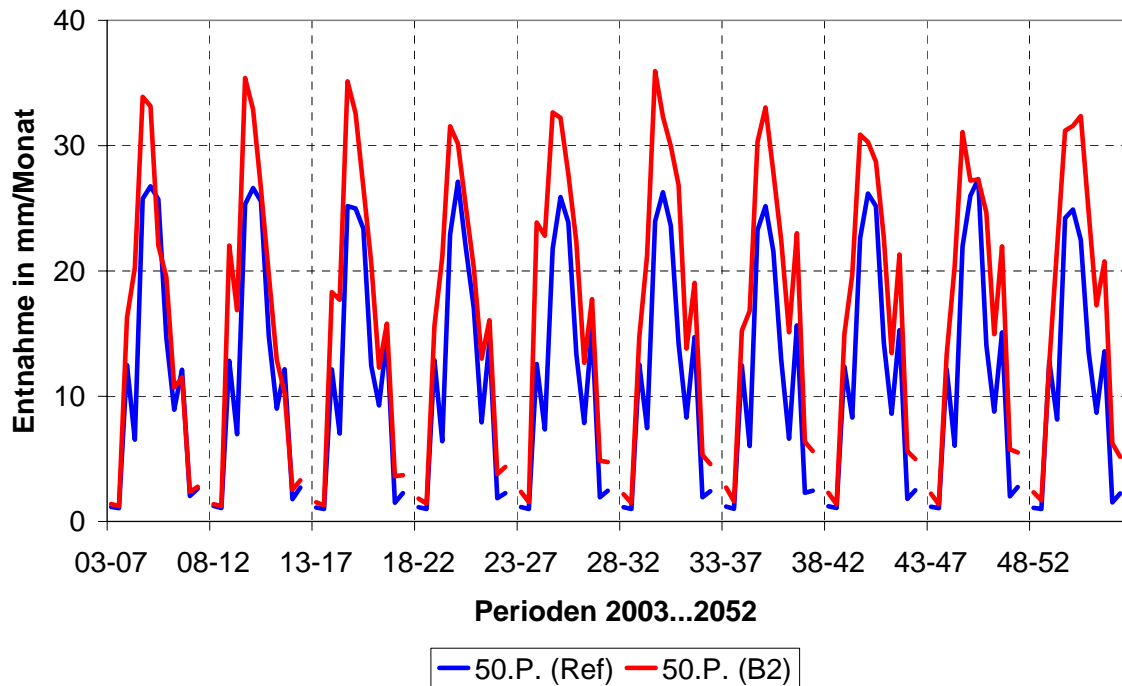


Abb. 59: Zusatzwasserentnahme (Gebietsmittel) im Zeitraum 2003 bis 2052 des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario, dargestellt als Jahrgang der 5-Jahresperioden anhand der 20. und 50. Perzentile

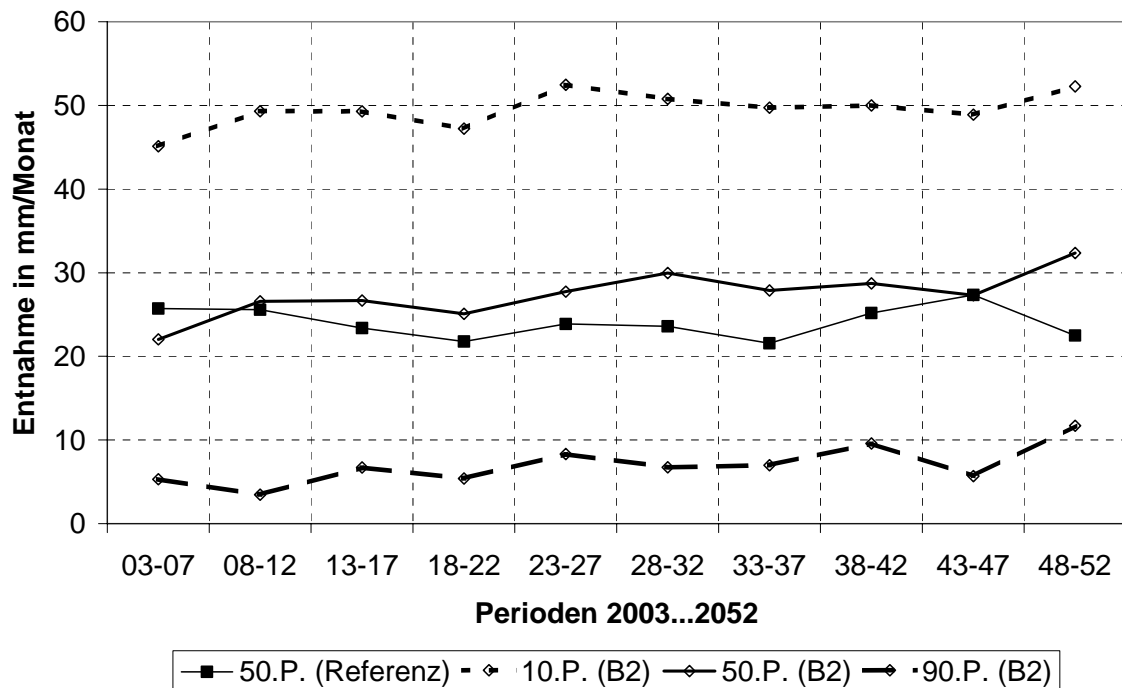


Abb. 60: Zusatzwasserentnahme (Gebietsmittel) im Monat Juli im Zeitraum 2003 bis 2052 des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario, dargestellt als Perzentile der 5-Jahresperioden

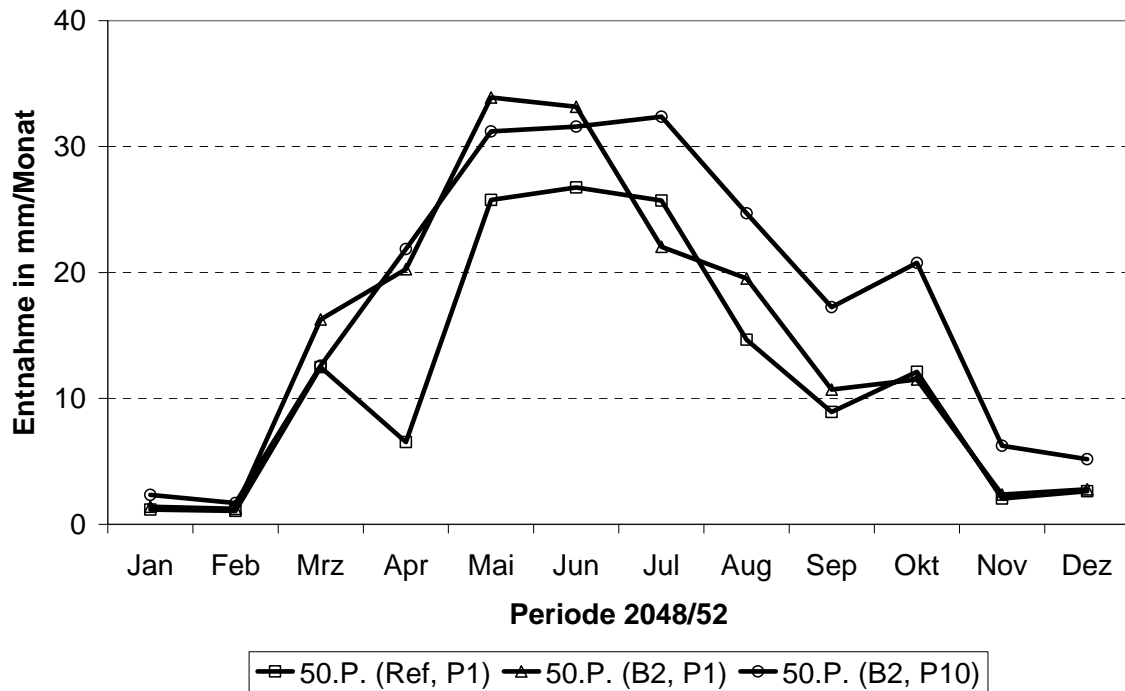


Abb. 61: Zusatzwasserentnahme (Gebietsmittel) in der Periode 2048/52

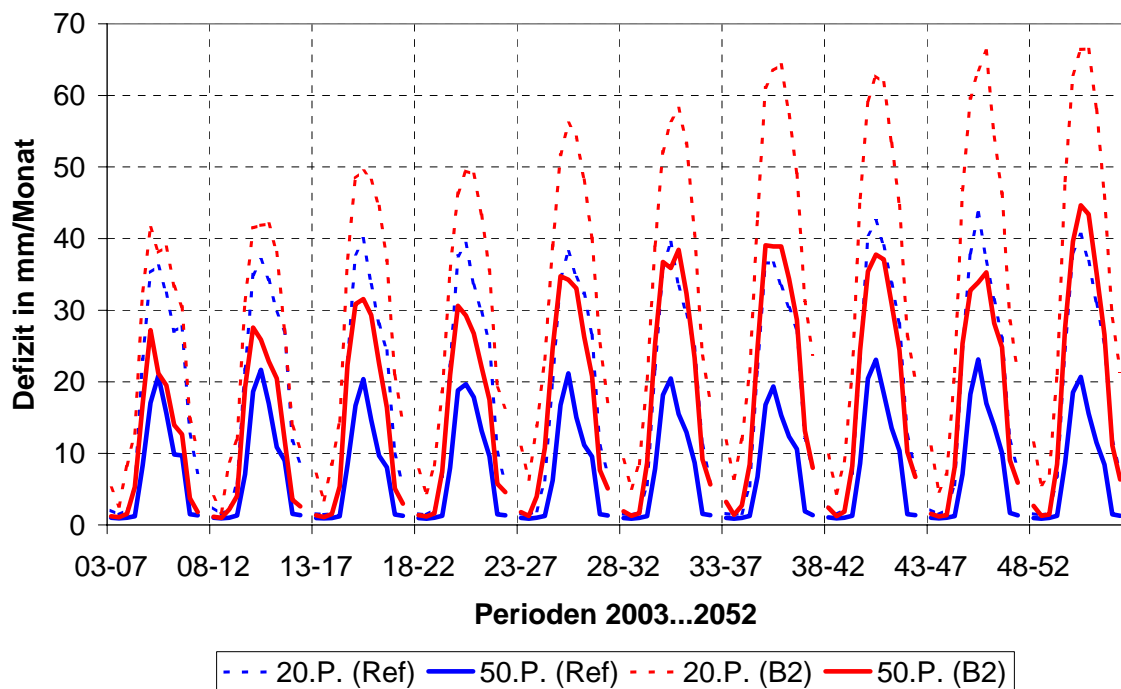


Abb. 62: Zusatzwasserdefizit (Gebietsmittel) im Zeitraum 2003 bis 2052 des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario, dargestellt als Jahrgang der 5-Jahresperioden anhand der 20. und 50. Perzentile

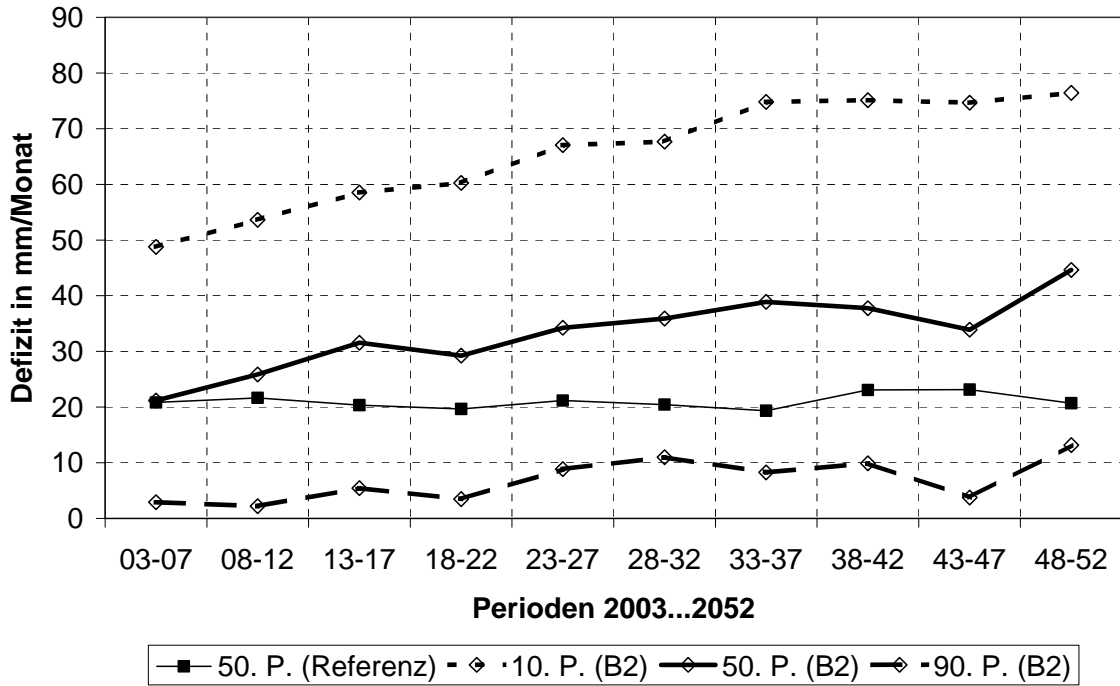


Abb. 63: Zusatzwasserdefizit (Gebietsmittel) im Monat Juli im Zeitraum 2003 bis 2052 des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario, dargestellt als Perzentile der 5-Jahresperioden

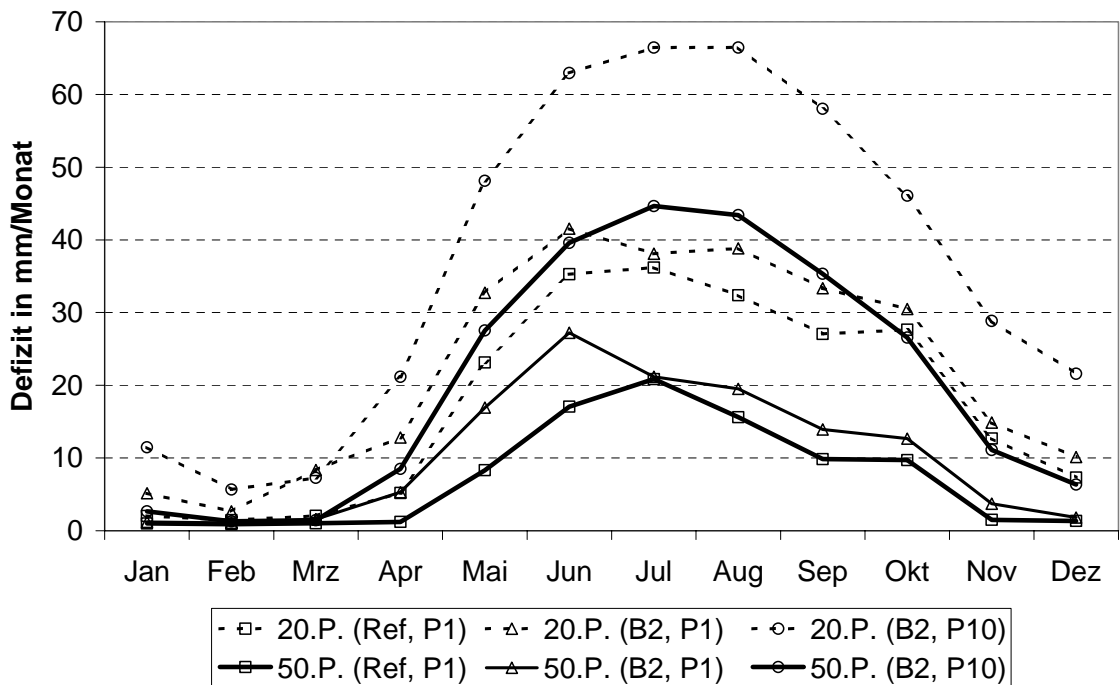


Abb. 64: Zusatzwasserdefizit (Gebietsmittel) in der Periode 2048/52 (P10) des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario und B2-Basisszenario der Periode 2003/07 (P1), dargestellt als Jahressgang der 5-Jahresperiode anhand der 20. und 50. Perzentile

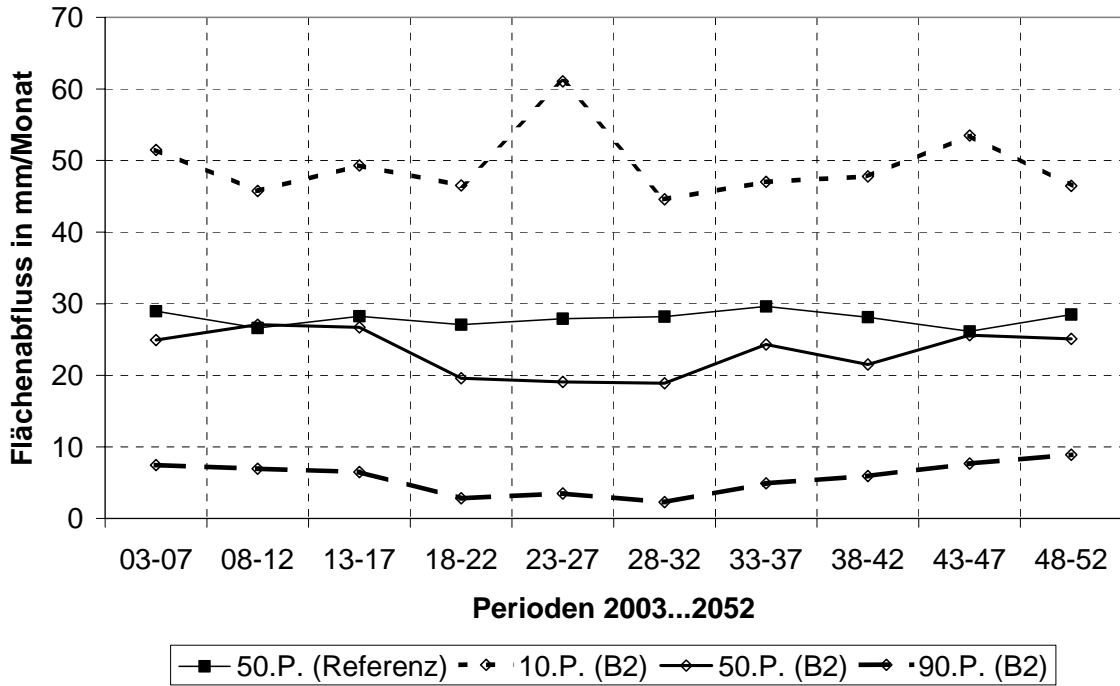


Abb. 65: Zusatzwasserdefizit (Gebietsmittel) in der Periode 2048/52 (P10) des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario und B2-Basisszenario der Periode 2003/07 (P1), dargestellt als Jahrgang der 5-Jahresperiode anhand der 20. und 50. Perzentile

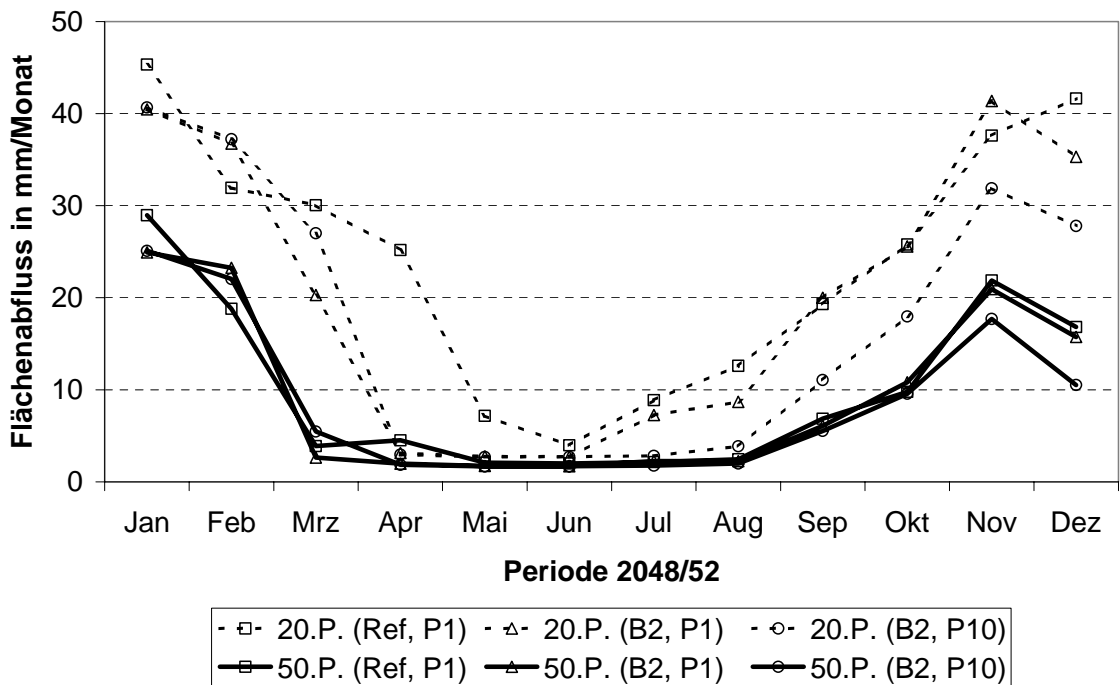


Abb. 66: Flächenabfluss (Gebietsmittel) in der Periode 2048/52 des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario, dargestellt als Jahrgang der 5-Jahresperiode anhand der 20. und 50. Perzentile

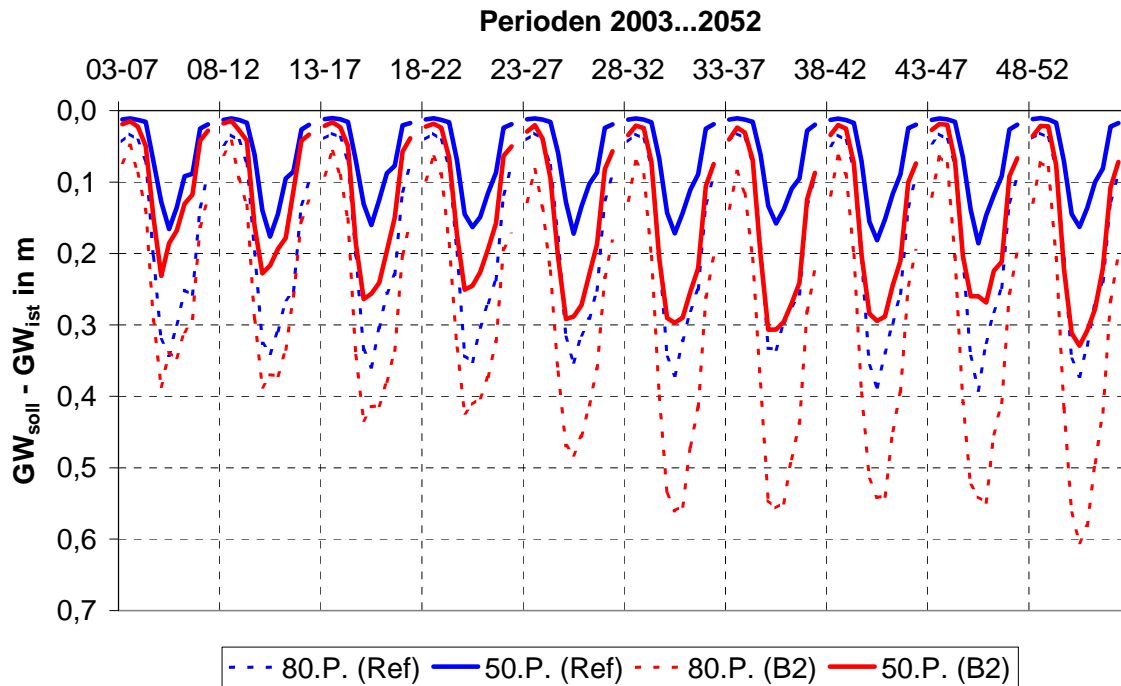


Abb. 67: Unterschreitung der Zielgrundwasserstände (Mittel aller Staubereiche) im Zeitraum 2003 bis 2052 des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario, dargestellt als Jahresgang der 5-Jahresperioden anhand der 80. und 50. Perzentile

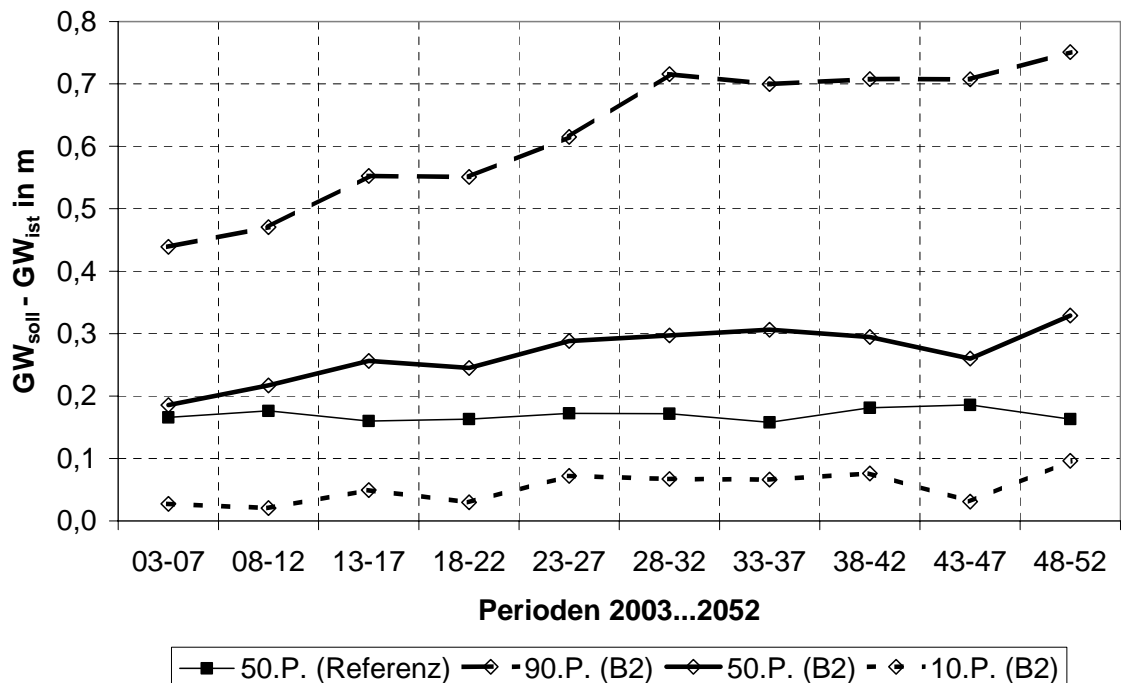


Abb. 68: Unterschreitung der Zielgrundwasserstände (Mittel aller Staubereiche) im Monat Juli im Zeitraum 2003 bis 2052 des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario, dargestellt als Perzentile der 5-Jahresperioden

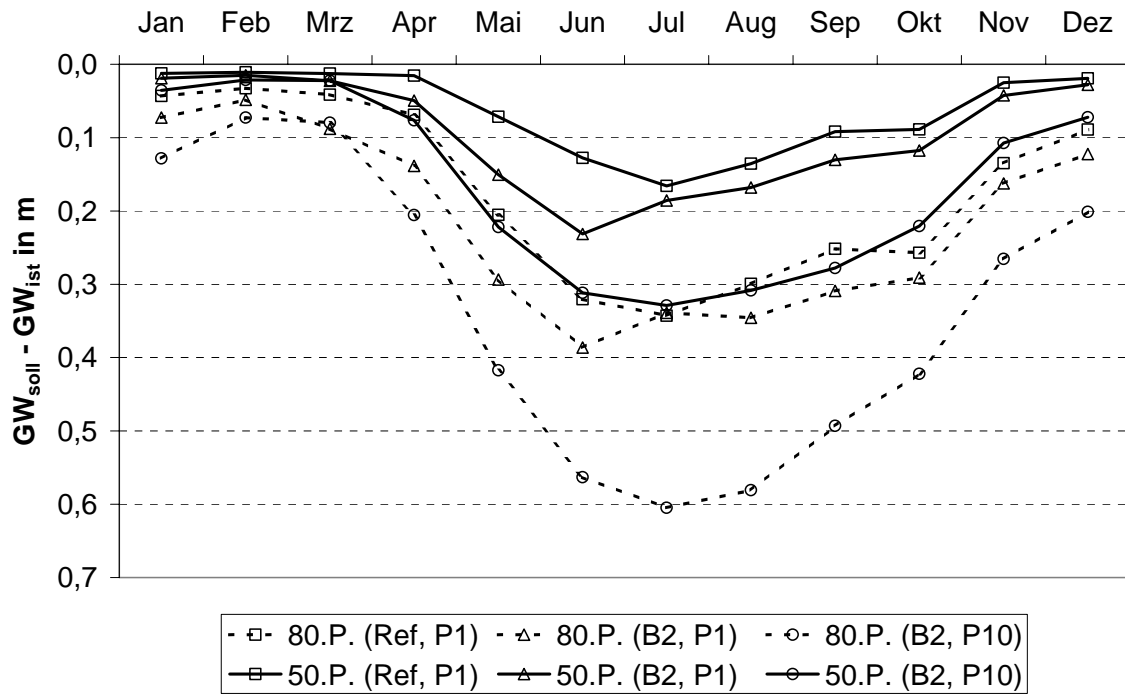


Abb. 69: Unterschreitung der Zielgrundwasserstände (Mittel aller Staubereiche) in der Periode 2048/52 (P10) des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario und B2-Basisszenario der Periode 2003/07 (P1), dargestellt als Jahresgang der 5-Jahresperiode anhand der 20. und 50. Perzentile

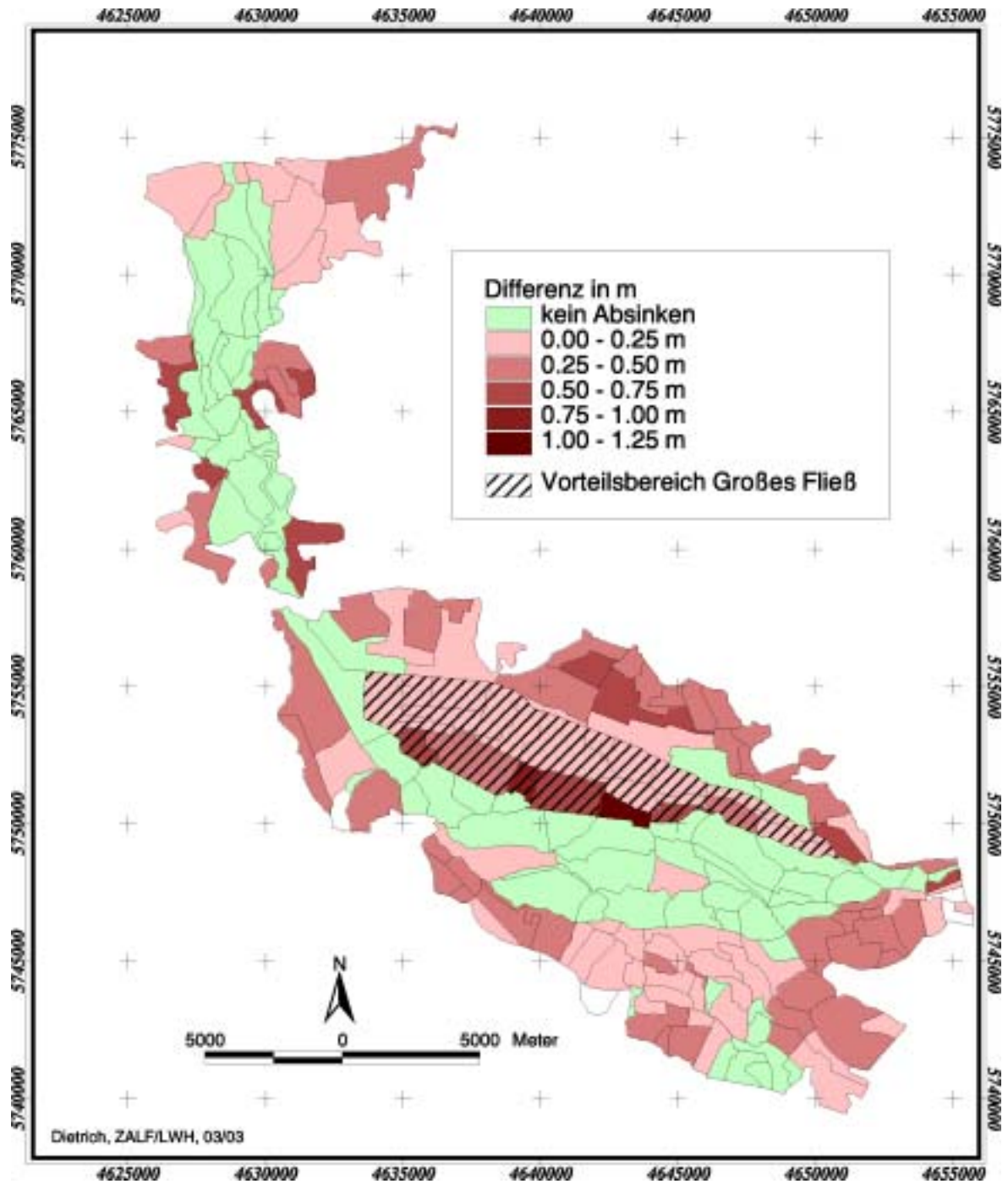


Abb. 70: Vergleich der Juli-Grundwasserstände (Differenz der 50. Perzentile) des Referenzszenarios in der Periode 2003/07 und des B2- Basisszenarios in der Periode 2048/52



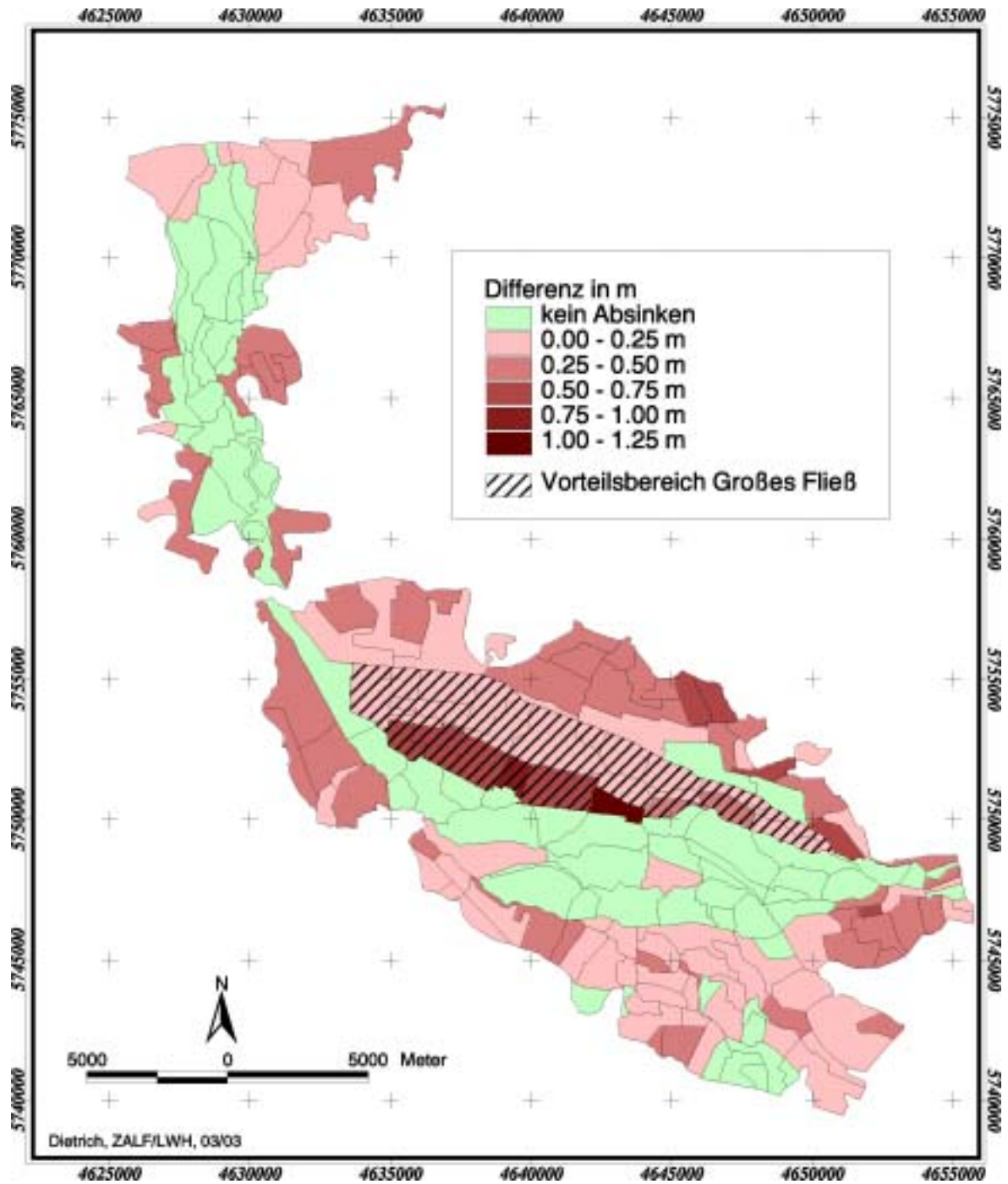


Abb. 71: Vergleich der Juli-Grundwasserstände (Differenz der 50. Perzentile) des B2-Basisszenarios in der Periode 2003/07 und des B2- Basisszenarios in der Periode 2048/52

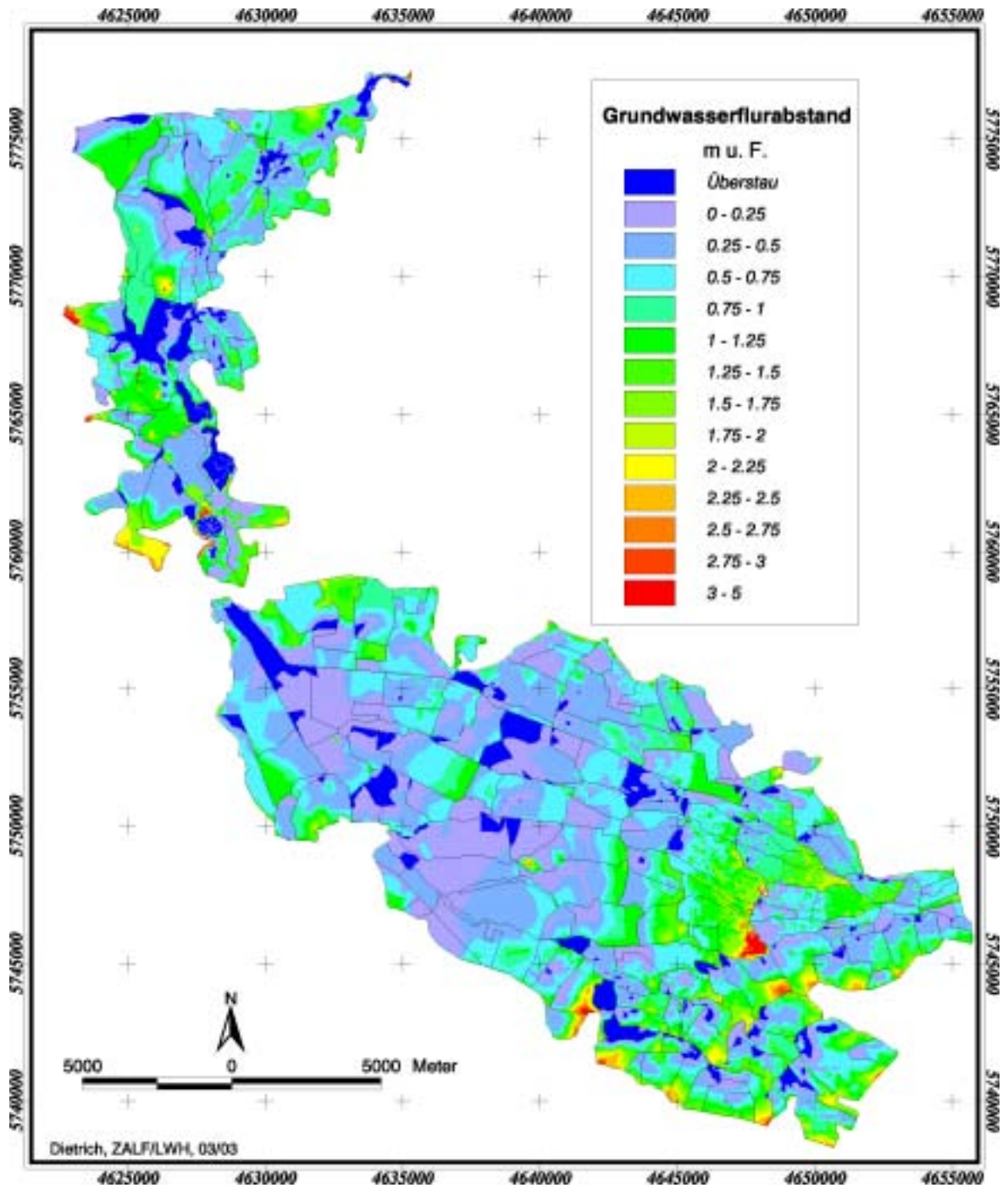


Abb. 72: Berechnete Grundwasserflurabstände (50. Perzentil) im März

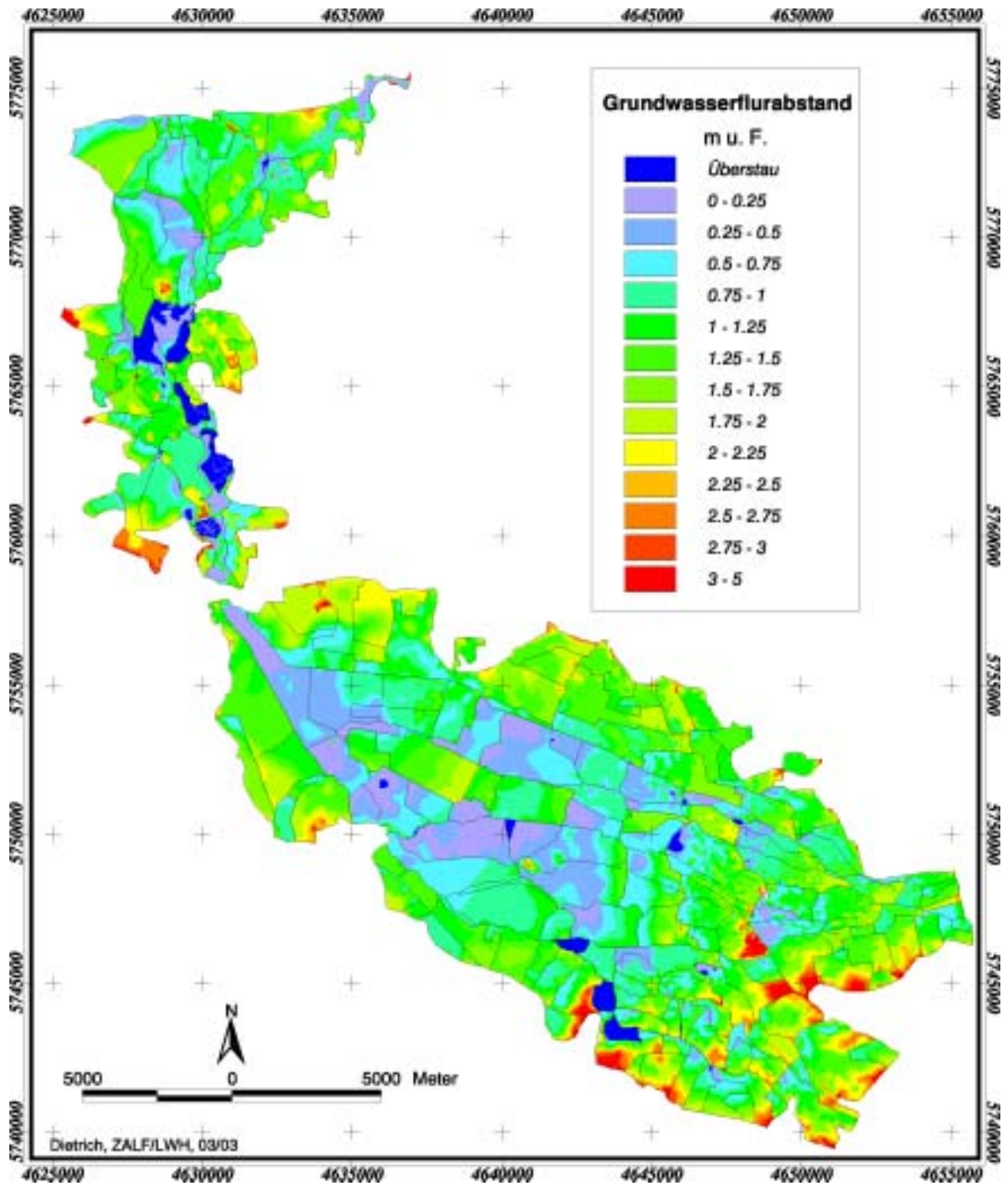


Abb. 73: Grundwasserflurabstände (50. Perzentil) des Referenzszenarios im Juli der Periode 2003/07

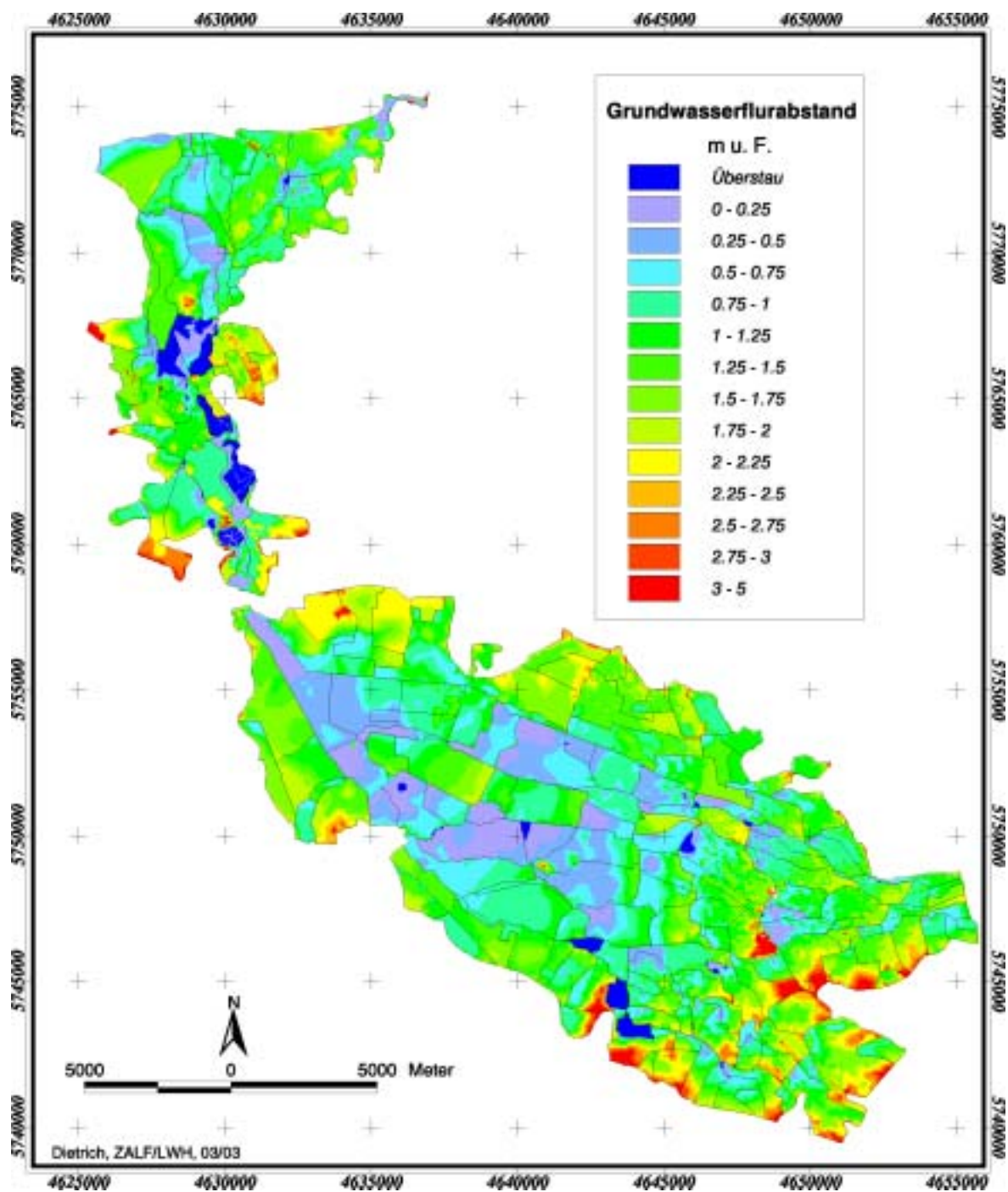


Abb. 74: Grundwasserflurabstände (50. Perzentil) des B2-Basisszenarios im Juli der Periode 2003/07

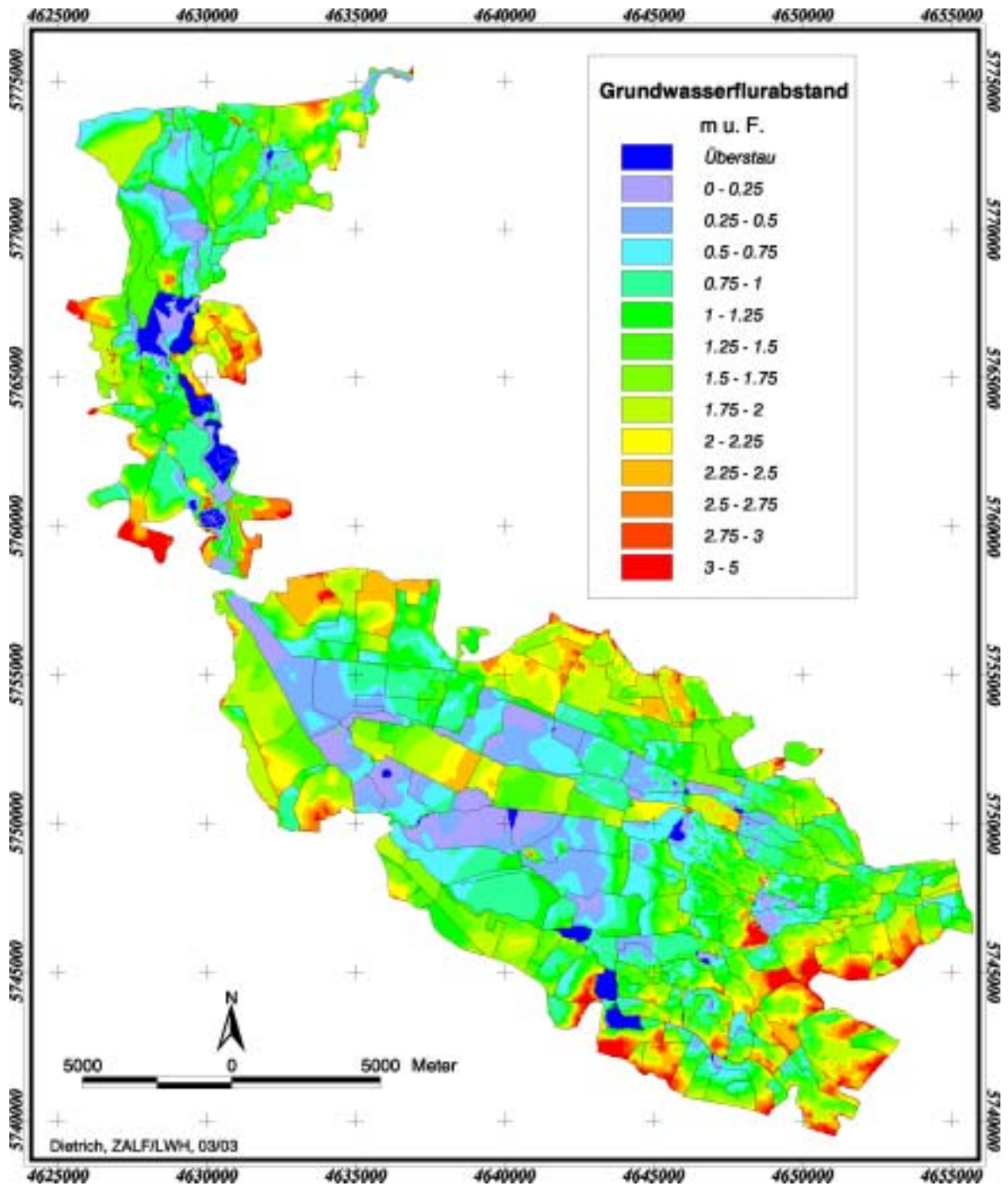


Abb. 75: Grundwasserflurabstände (50. Perzentil) des B2-Basisszenarios im Juli der Periode 2048/52

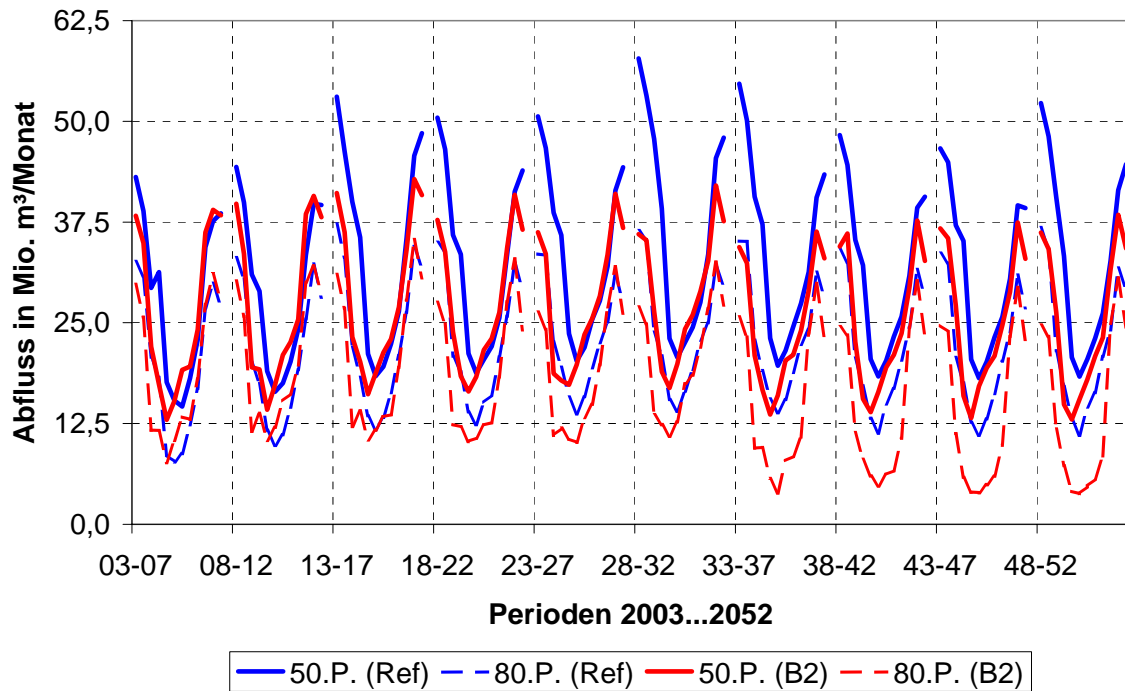


Abb. 76: Gebietsabfluss im Zeitraum 2003 bis 2052 des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario, dargestellt als Jahrgang der 5-Jahresperioden anhand der 50. und 80. Perzentile

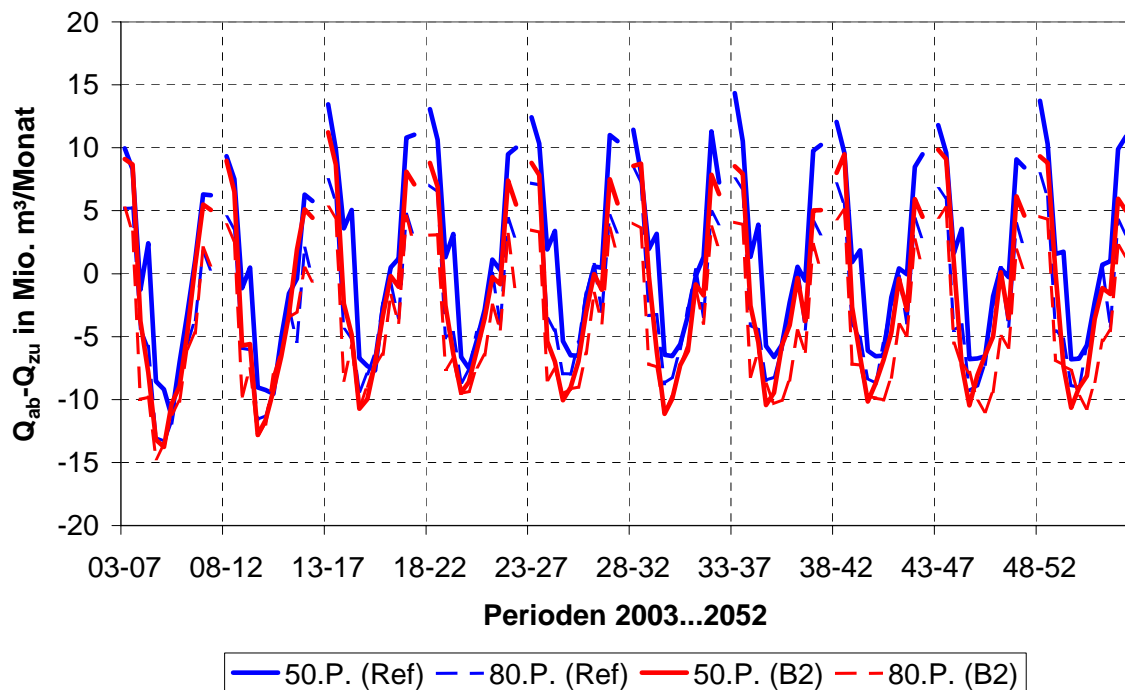


Abb. 77: Differenz zwischen Gebietsabfluss und -zufluss im Zeitraum 2003 bis 2052 des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario, dargestellt als Jahrgang der 5-Jahresperioden anhand der 50. und 80. Perzentile

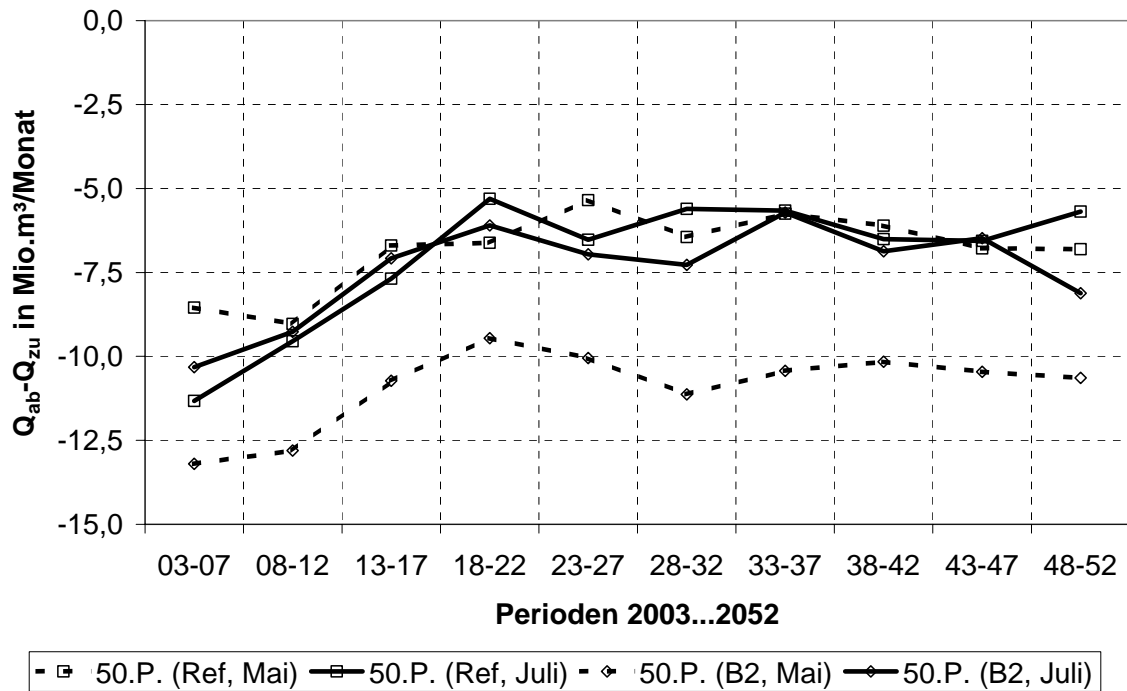


Abb. 78: Differenz zwischen Gebietsabfluss und -zufluss im Mai und Juli des Zeitraums 2003 bis 2052 des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario, dargestellt als 50. Perzentile der 5-Jahresperioden

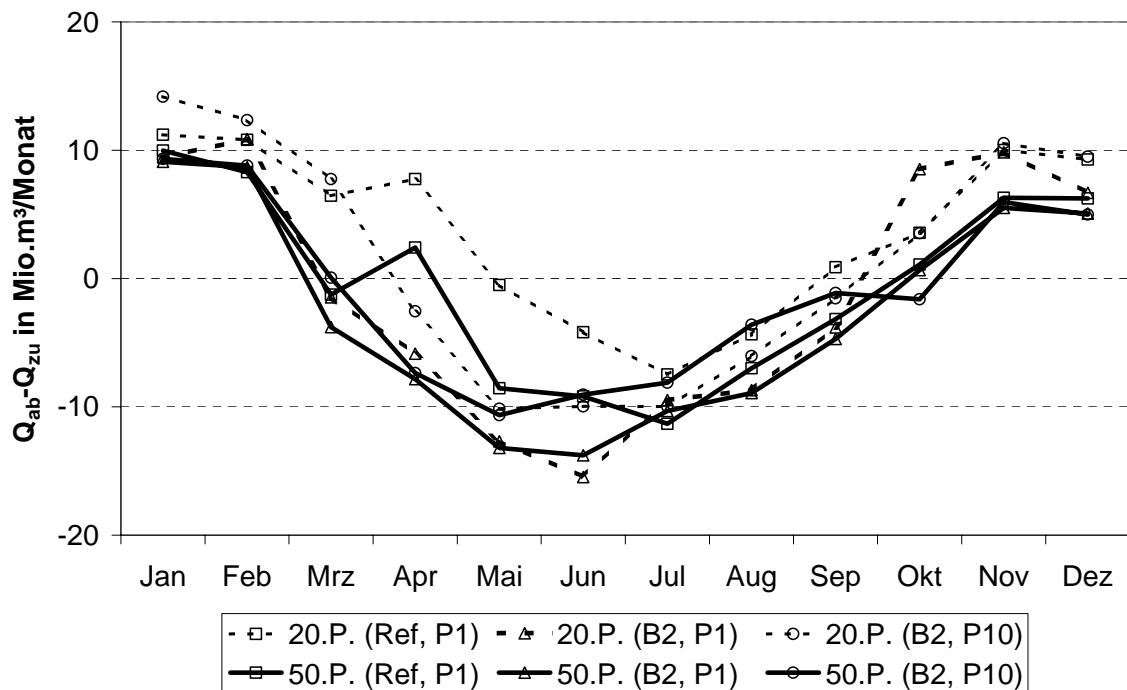


Abb. 79: Differenz zwischen Gebietsabfluss und -zufluss in der Periode 2048/52 (P10) des B2-Basisszenarios im Vergleich zum Referenzszenario und B2-Basisszenario der Periode 2003/07 (P1), dargestellt als Jahrgang der 5-Jahresperiode anhand der 20. und 50. Perzentile

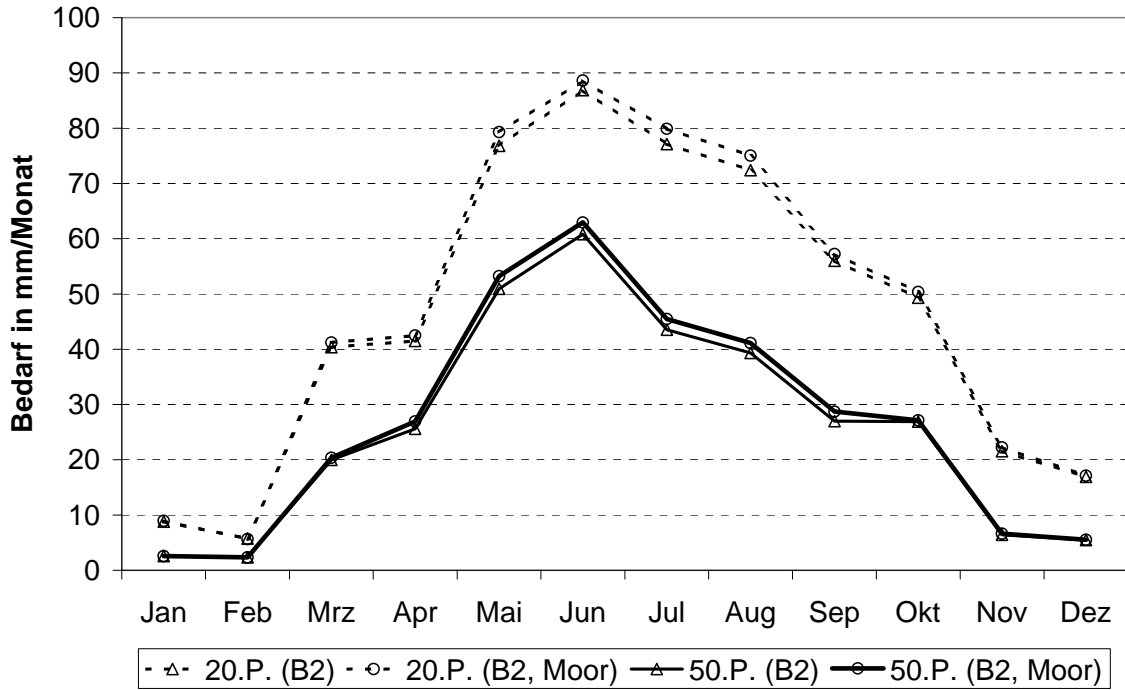


Abb. 80: Zusatzwasserbedarf (Gebietsmittel) in der Periode 2003/07 im Vergleich des B2-Basisszenarios ohne und mit verstärktem Moorschutz, dargestellt als Jahrgang der 5-Jahresperioden anhand der 20. und 50. Perzentile

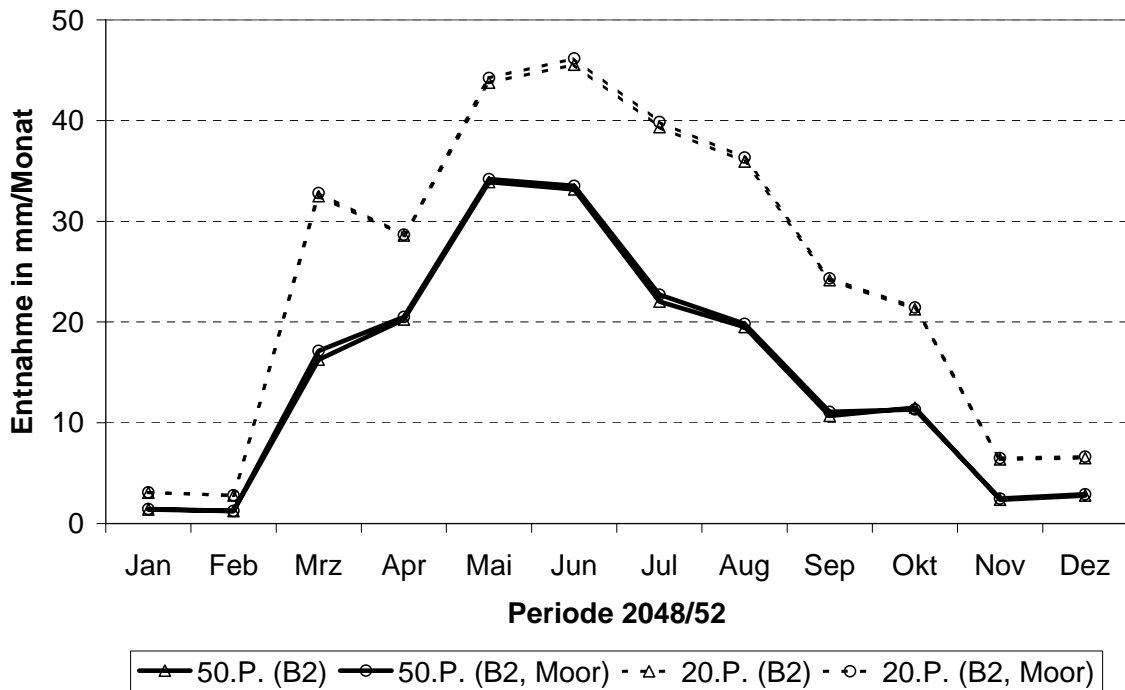


Abb. 81: Zusatzwasserentnahme (Gebietsmittel) in der Periode 2003/07 im Vergleich des B2-Basisszenarios ohne und mit verstärktem Moorschutz, dargestellt als Jahrgang der 5-Jahresperioden anhand der 20. und 50. Perzentile



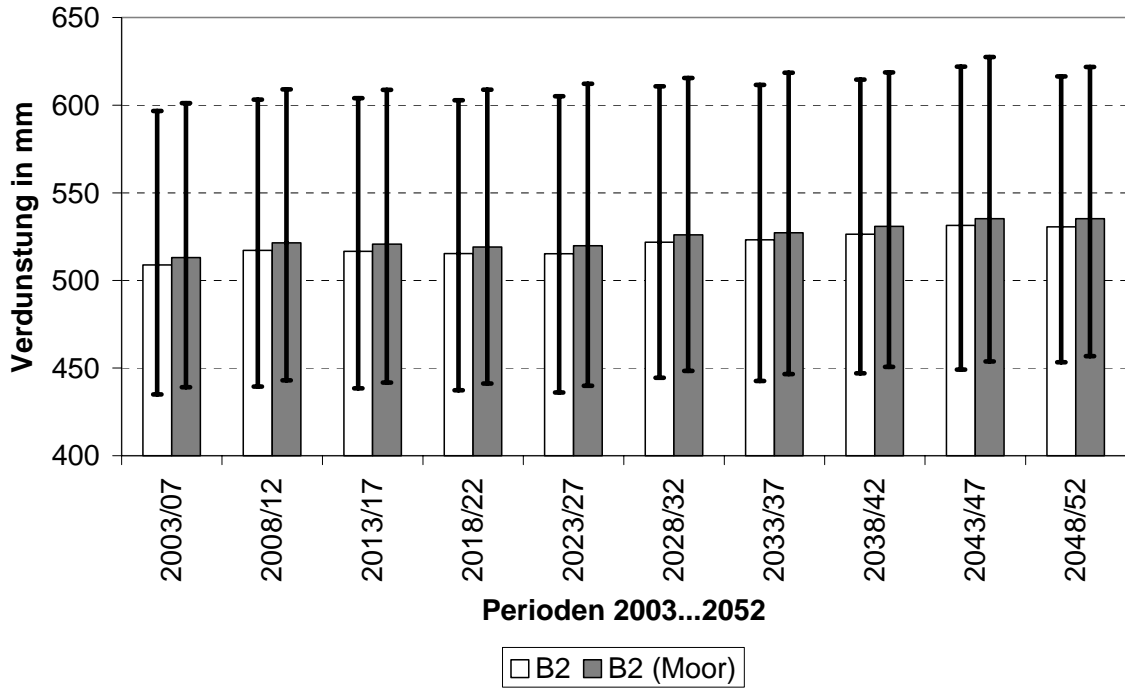


Abb. 82: Vergleich des Medians der realen Verdunstung von April bis September des B2-Basisszenario ohne und mit verstärktem Moorschutz als Gebietsmittel mit Schwankungsbereich des 10. und 90. Perzentils

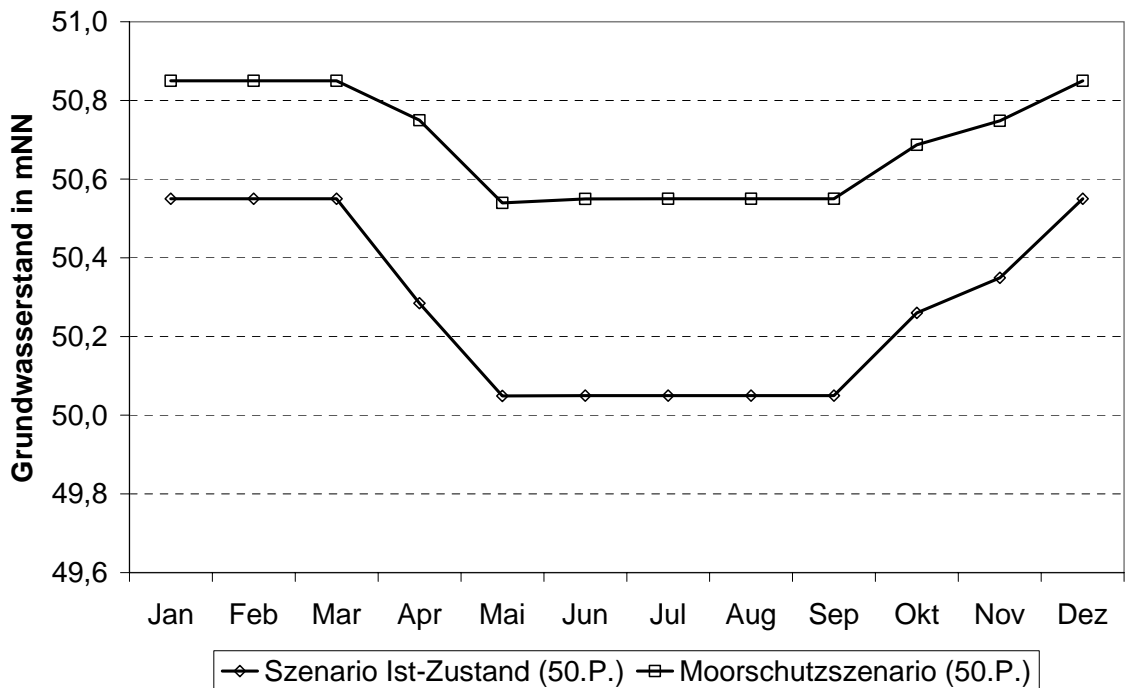


Abb. 83: Grundwassergang eines Staubereichs mit Entwicklungsziel Moorregenerierung im Vergleich des B2-Basisszenarios ohne und mit verstärktem Moorschutz der Periode 2003/07 ( 50. Perzentil)

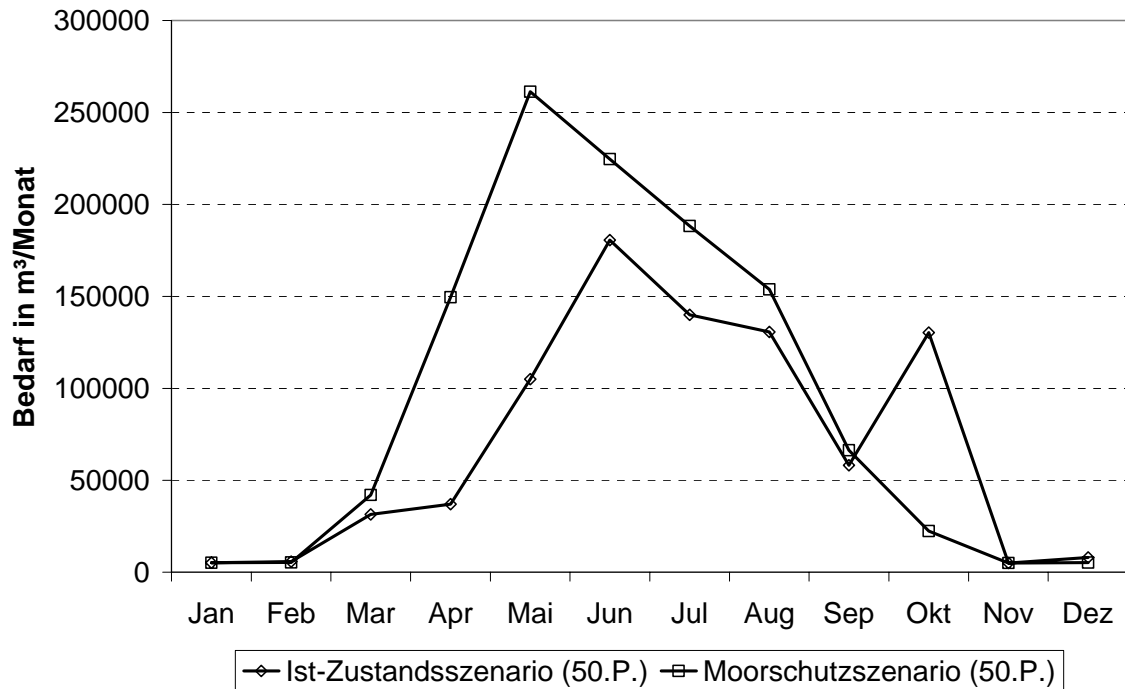


Abb. 84: Differenz des Zusatzwasserbedarfs eines Staubereichs mit Entwicklungsziel Moorregenerierung im Vergleich des B2-Basisszenarios ohne und mit verstärktem Moorschutz der Periode 2003/07 (50. Perzentil)

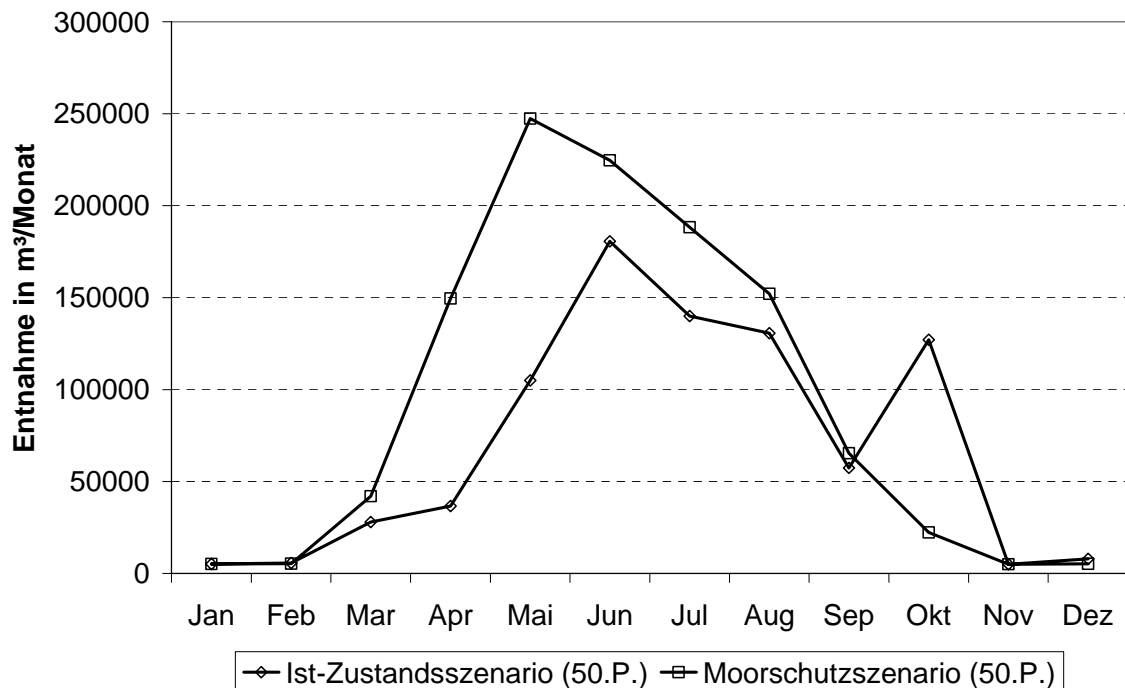


Abb. 85: Differenz der Zusatzwasserentnahme eines Staubereichs mit Entwicklungsziel Moorregenerierung im Vergleich des B2-Basisszenarios ohne und mit verstärktem Moorschutz der Periode 2003/07 (50. Perzentil)

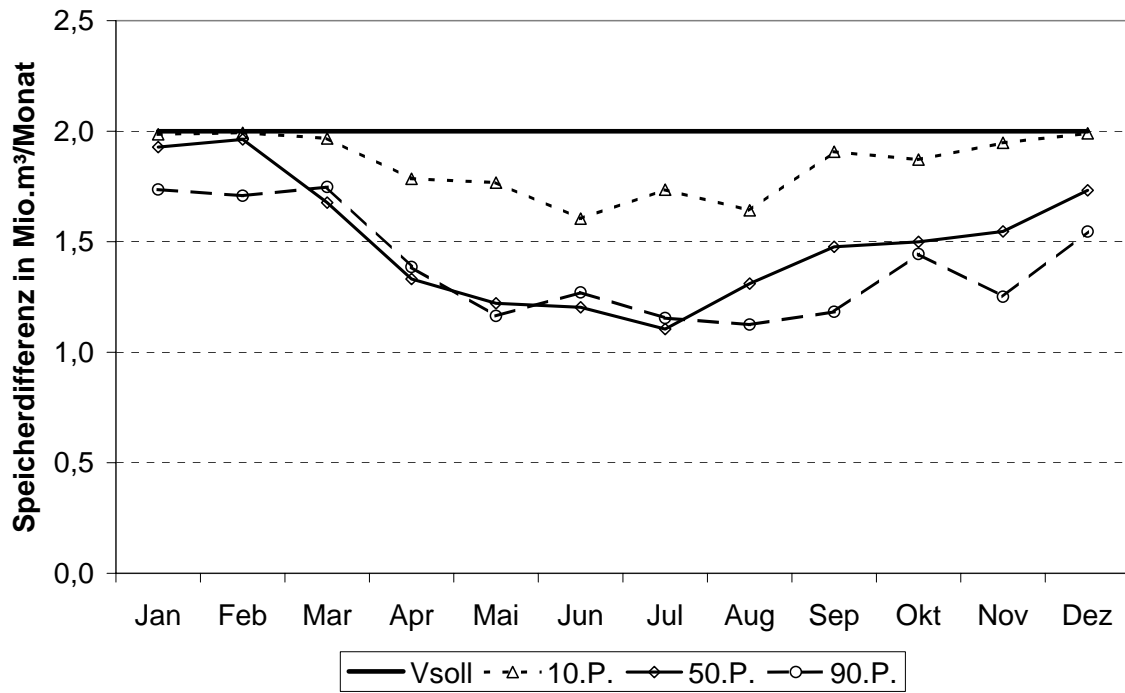


Abb. 86: Differenz des Gebietspeichers zwischen B2-Basisszenario ohne und mit verstärktem Moorschutz der Periode 2003/07 mit Schwankungsbereich des 10. und 90. Perzentils

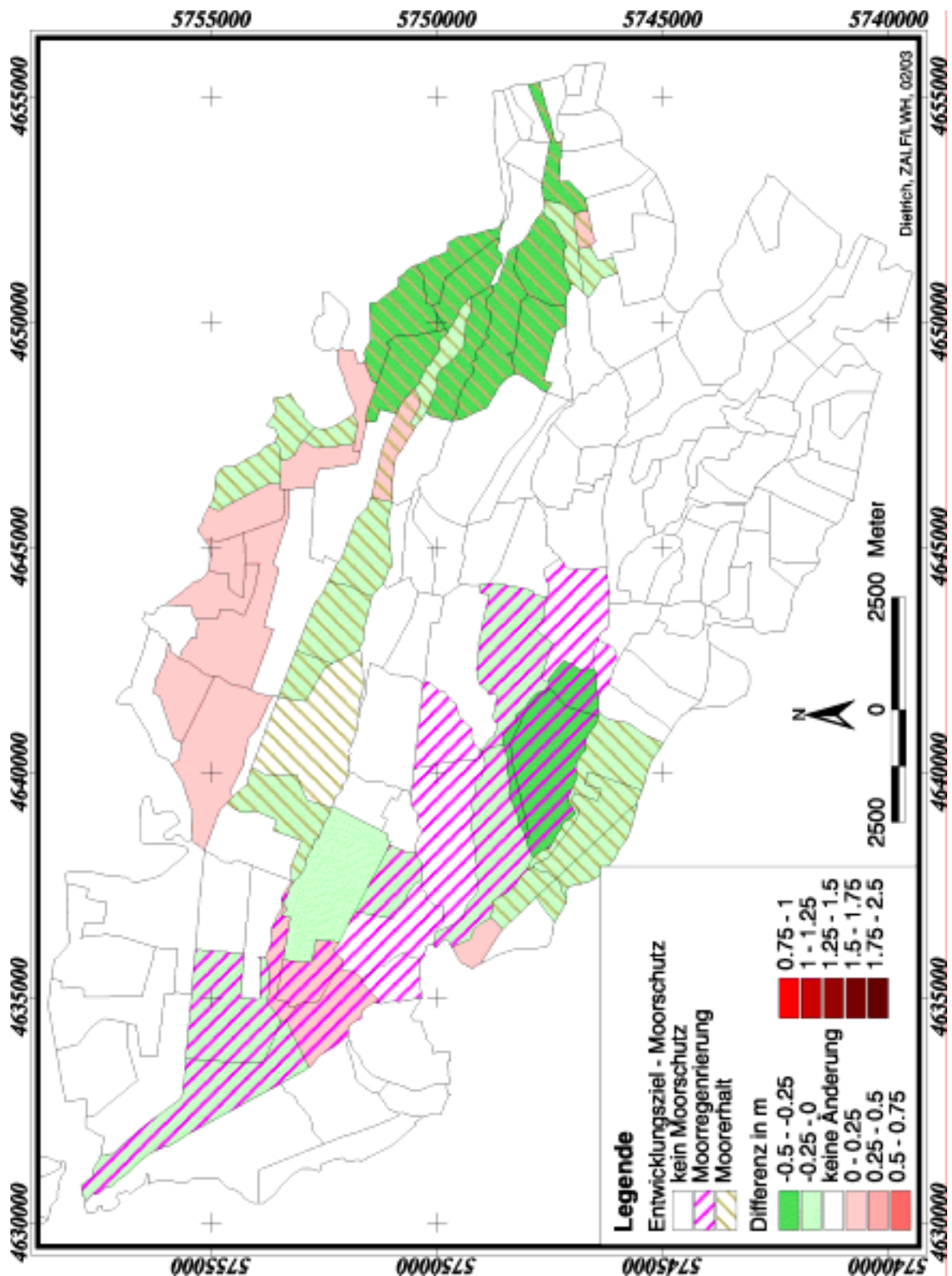


Abb. 87: Differenz der Juli-Grundwasserstände (50. Perzentil) des B2-Basisszenarios ohne und mit verstärktem Moorschutz in der Periode 2003/07 (negative Werte – Grundwasseranstieg im Moorschutzszenario)

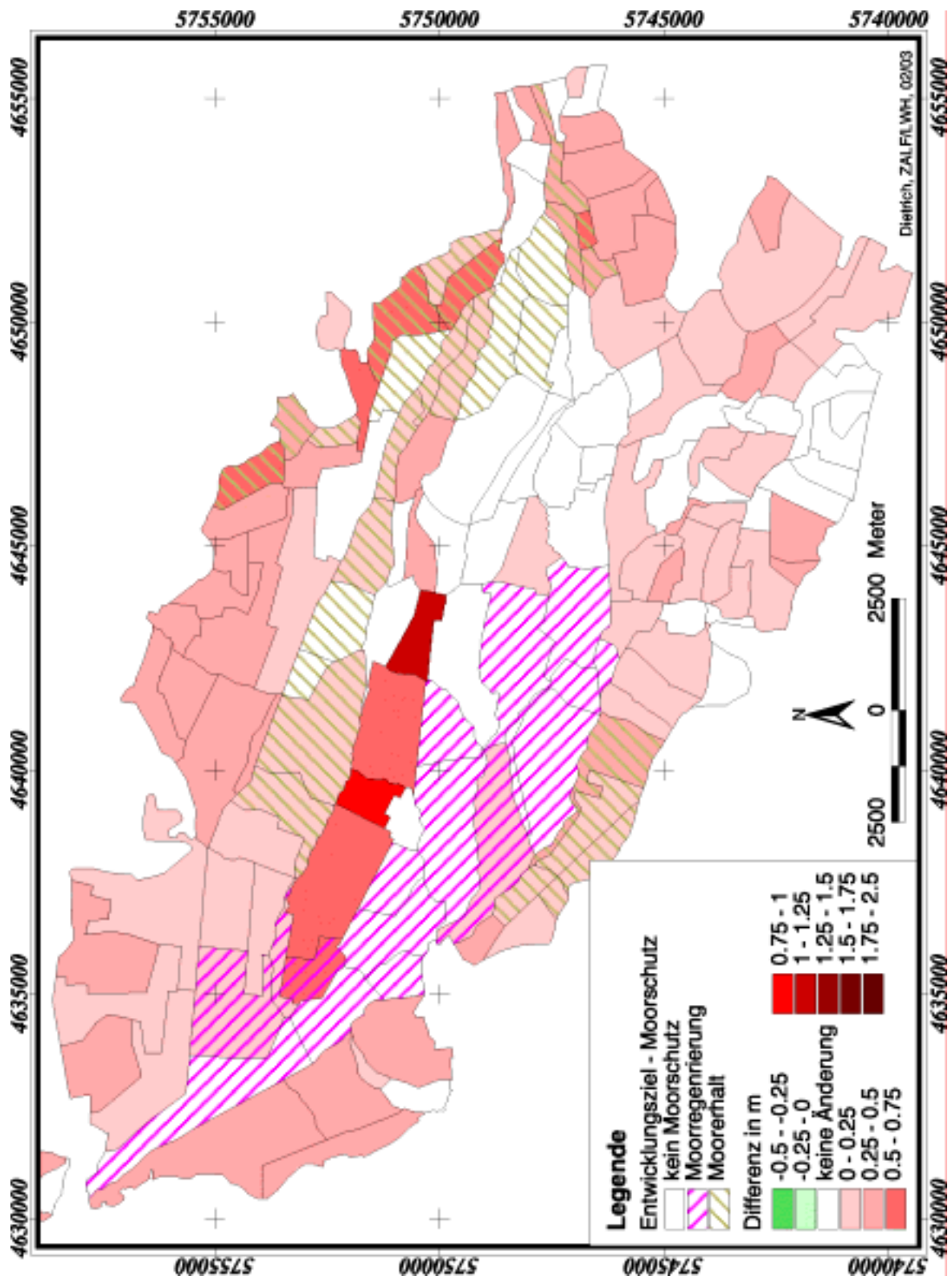


Abb. 88: Differenz der Juli-Grundwasserstände (50. Perzentil) der Perioden 2003/07 und 2048/52 des B2-Basisszenarios mit verstärktem Moorschutz (negative Werte – Grundwasseranstieg in P10)

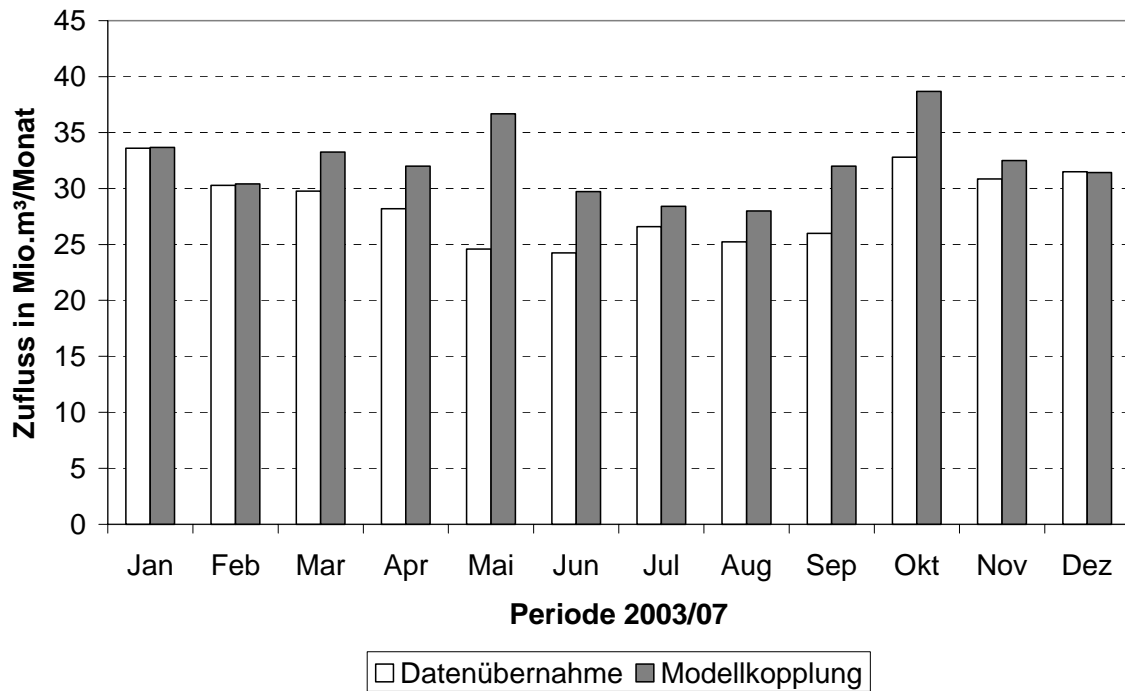


Abb. 89: Vergleich des Gesamtzuflusses zum UG Spreewald bei Berechnung mit Datenübernahme von ArcGRM GLOWA und bei direkter Modellkopplung mit ArcGRM GLOWA (Referenzszenario, 50. Perzentil aus 10 Realisierungen der Periode 2003/07)

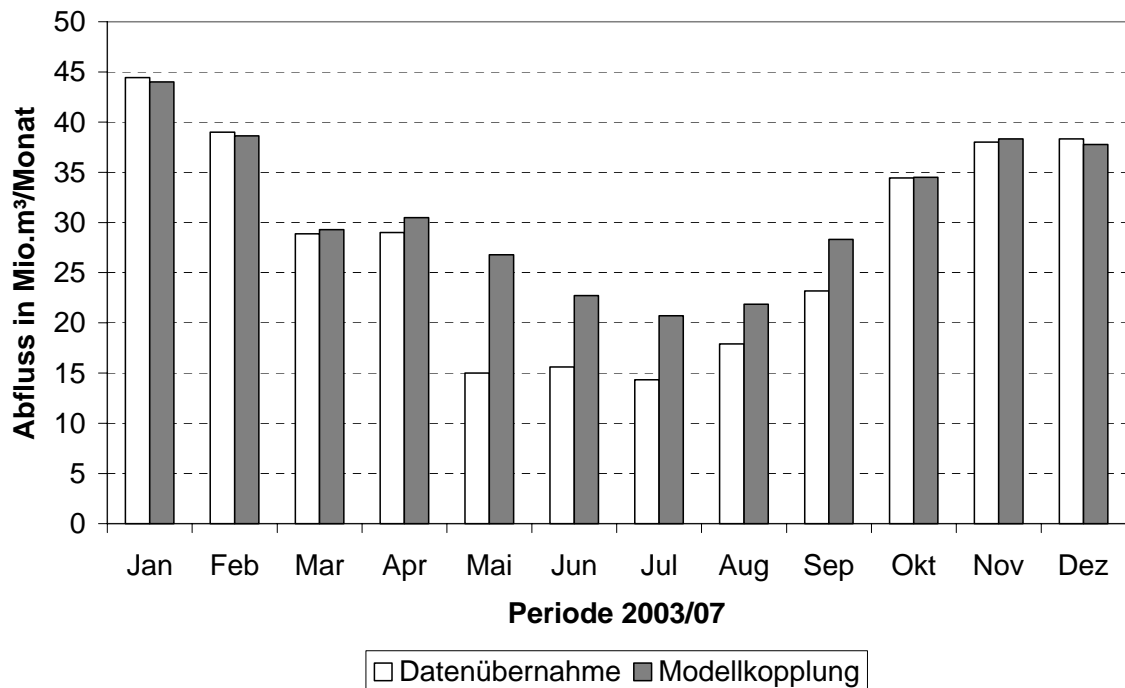


Abb. 90: Vergleich des Gesamtabflusses aus dem UG Spreewald bei Berechnung mit Datenübernahme von ArcGRM GLOWA und bei direkter Modellkopplung mit ArcGRM GLOWA (Referenzszenario, 50. Perzentil aus 10 Realisierungen der Periode 2003/07)

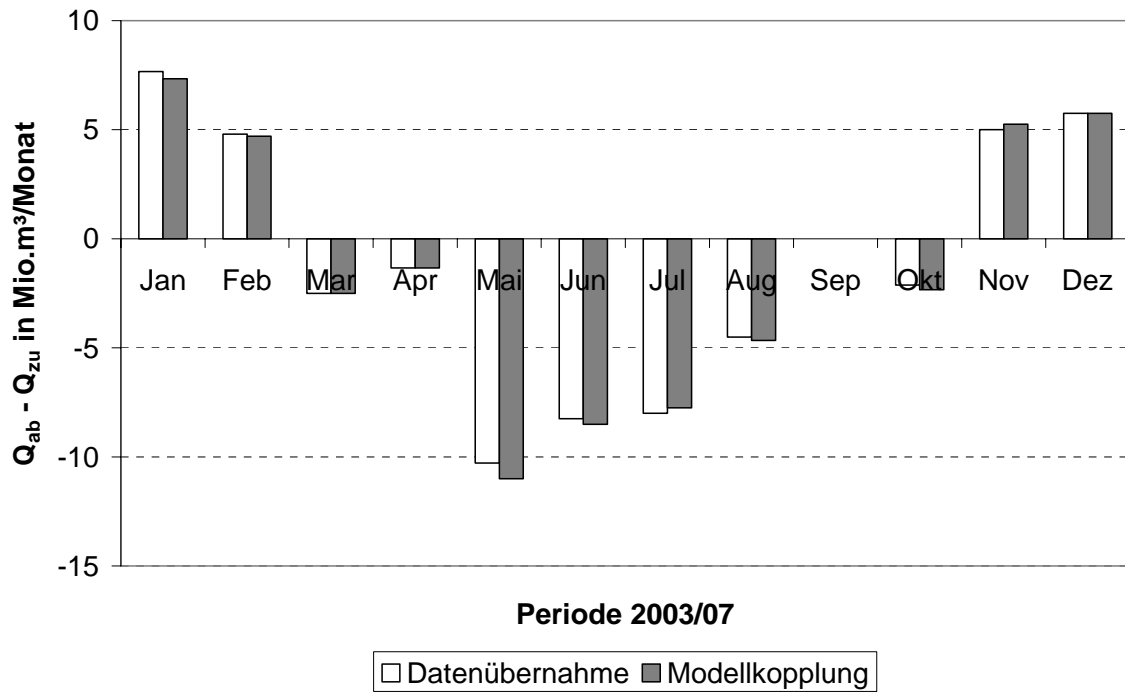


Abb. 91: Vergleich der Differenz von Gesamtzufluss und Gesamtabfluss des UG Spreewald ( $Q_{ab} - Q_{zu}$ ) bei Berechnung mit Datenübernahme von ArcGRM GLOWA und bei direkter Modellkopplung mit ArcGRM GLOWA (Referenzszenario, 50. Perzentil aus 10 Realisierungen der Periode 2003