

Methodenentwicklung zur Wasserhaushaltsanalyse und
Wasserhaushaltsplanung für die Bergbauregion Ostsachsen

Erstellungskonzept für ein Großraummodell der Lausitz - Abschlussbericht -

Auftragnehmer:

*GEO*montan Gesellschaft für angewandte Geologie mbH Freiberg

IBGW Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH Leipzig

GFI Grundwasser-Consulting-Institut GmbH Dresden

TU Bergakademie Freiberg, Institut für Bergbau & Spezialtiefbau Freiberg

BAH Büro für Angewandte Hydrologie Berlin



Autoren: Hoth, Nils; Rascher, Jochen; Thom, Alexander; Geißler, Marion; Koch, Christian;
Pfützner, Bernd; Kacirek, Andreas; Berrios, Danilo; Mey, Silke; Bilek, Felix; Farfan,
David; Mansel, Holger

Auftraggeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Koordination: Kuhn, Karin; Lünich, Kathleen

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



Freistaat
SACHSEN

Bearbeitungszeitraum: 05/2018 – 05/2019

Gefördert durch den europäischen Fonds für Regionalentwicklung



Europäische Union. Europäischer
Fonds für regionale Entwicklung.
Evropská unie. Evropský fond pro
regionální rozvoj.



Ahoj sousede. Hallo Nachbar.
Interreg V A / 2014–2020

INHALTSVERZEICHNIS

INHALTSVERZEICHNIS		2
ABBILDUNGSVERZEICHNIS		6
TABELLENVERZEICHNIS		10
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS		11
A	<u>EINFÜHRUNG - GRUNDLEGENDE VORBEMERKUNGEN</u>	12
A1	AUFGABEN- UND ZIELSTELLUNG	12
A2	METHODISCHES VORGEHEN/ AUFBAU ABSCHLUSSBERICHT	14
B	<u>KONZEPT UND AUFBAU GROßRAUMMODELL LAUSITZ</u>	16
B1	ABGRENZUNG MODELLGEBIET: ÄUßERE/INNERE RANDBEDINGUNGEN UND DISKRETISIERUNG	16
B1.1	BERANDUNG GRM LAUSITZ - ÄUßERE RANDBEDINGUNGEN	16
B1.1.1	GRUNDAUSSAGEN ZUM ÄUßEREN RAND GRM LAUSITZ	16
B1.1.2	SONDERBEREICHE AM RAND UND DEREN HANDHABUNG	20
B1.1.3	MÖGLICHE ABGRENZUNG VON TEILMODELLEN	22
B1.2	VERTIKALE BERANDUNG GRM LAUSITZ	23
B1.3	INNERE RANDBEDINGUNGEN GRM LAUSITZ	24
B1.4	DISKRETISIERUNG GRM LAUSITZ	25
B2	GEOLOGISCH-HYDROGEOLOGISCHES 3D-STRUKTURMODELL: VORGEHEN BEIM AUFBAU DES NUMERISCHEN MODELLS	26
B2.1	GRUNDLEGENDE AUSSAGEN ZUR HYDROGEOLOGISCHEN GLIEDERUNG	26
B2.2	ANMERKUNGEN ZU VERWENDBAREN DATENQUELLEN	26
B2.3	BEWERTUNG DER HYDROGEOLOGISCHEN UNTERGLIEDERUNG BESTEHENDER REGIONALMODELLE	27
B2.4	SCHLUSSFOLGERUNGEN ZUR GLIEDERUNG FÜR DEN AUFBAU DES GRM LAUSITZ	28
B3	GEKOPPELTE MENGEN- UND GÜTEMODELLIERUNG FÜR DAS BERGBAUBEEINFLUSSTE UNTERSUCHUNGSGBIET	32
B3.1	GRUNDLEGENDE ZIELSETZUNG EINER GROßRAUMMODELLIERUNG	32
B3.2	STRÖMUNGSMODELLIERUNG GRUNDWASSER	33
B3.3	MODELLIERUNG BODENWASSERHAUSHALT	35
B3.3.1	GRUNDLEGENDE AUSSAGEN ZUM BODENWASSERHAUSHALTSMODELL	35
B3.3.2	WAHL DER ARCEGMO-MODULE UND BETRIEBSWEISE IM GRM LAUSITZ	36
B3.3.3	KALIBRIERUNG DES BODENWASSERHAUSHALTSMODELLS	37
B3.3.4	NOTWENDIGE WEITERENTWICKLUNGEN/DATENDEFIZITE	38

B3.4	MODELLIERUNG STOFFTRANSPORT GRUNDWASSER	38
B3.5	MODELLIERUNG STOFFTRANSPORT FLIESSGEWÄSSER	40
B4	DATENANFORDERUNGEN – RECHERCHE DATENVERFÜGBARKEIT	42
B4.1	GEOLOGISCHE DATEN – BASIS FÜR HYDROGEOLOGISCHES 3D-MODELL	42
B4.1.1	DATENANFORDERUNGEN	42
B4.1.2	DATENRECHERCHE	42
B4.1.3	EINSCHÄTZUNG DER DATENBASIS	43
B4.2	HYDROGEOLOGISCHE PARAMETRISIERUNG	45
B4.2.1	DATENANFORDERUNGEN	45
B4.2.2	DATENRECHERCHE	46
B4.2.3	EINSCHÄTZUNG DER DATENBASIS	46
B4.3	DATEN FÜR ÄUßERE RANDBEDINGUNGEN	47
B4.3.1	DATENANFORDERUNGEN	47
B4.3.2	DATENRECHERCHE	47
B4.3.3	EINSCHÄTZUNG DER DATENBASIS	48
B4.4	GEOCHEMISCHE DATEN ALS BASIS FÜR DIE RÄUMLICHE CHARAKTERISIERUNG DER KIPPENBESCHAFFENHEIT	48
B4.4.1	DATENANFORDERUNGEN	48
B4.4.2	DATENRECHERCHE	49
B4.4.3	EINSCHÄTZUNG DER DATENBASIS	50
B4.5	DATEN HYDROCHEMISCHE BESCHAFFENHEIT GRUNDWASSER	51
B4.5.1	DATENANFORDERUNGEN	51
B4.5.2	DATENRECHERCHE	51
B4.5.3	EINSCHÄTZUNG DER DATENBASIS	52
B4.6	DATEN OBERFLÄCHENGEWÄSSER	52
B4.6.1	DATENANFORDERUNGEN FLIEßGEWÄSSER	52
B4.6.2	DATENANFORDERUNGEN STANDGEWÄSSER	53
B4.6.3	DATENRECHERCHE FLIEßGEWÄSSER	54
B4.6.4	DATENRECHERCHE STANDGEWÄSSER	55
B4.6.5	EINSCHÄTZUNG DER DATENBASIS OBERFLÄCHENGEWÄSSER	55
B4.7	DATEN FÜR BODENWASSERHAUSHALTSMODELL	56
B4.7.1	GENERELLE DATENANFORDERUNGEN	56
B4.7.2	ANFORDERUNGEN AN EINE GEKOPPELTE MODELLIERUNG	57
B4.7.3	DATENRECHERCHE	58
B4.7.4	EINSCHÄTZUNG DER DATENBASIS – VORGEHEN BEIM AUFBAU GRM LAUSITZ	65
B5	VERGLEICH SIMULATIONSPROGRAMME	66
B5.1	GRUNDCHARAKTERISTIK MODFLOW	67
B5.2	GRUNDCHARAKTERISTIK FEFLOW	69
B5.3	GRUNDCHARAKTERISTIK PCGEOFIM	70
B5.4	KOPPLUNG DER BETRACHTETEN GW-MODELLIERUNGS SOFTWARE ZU ARCEGMO	72
B5.5	ABLEITUNG BEWERTUNGSMATRIX FÜR GW-MODELLIERUNGS SOFTWARE	73

C	TESTMODELLIERUNG	76
C1	WAHL TESTGEBIET	76
C1.1	ANFORDERUNGEN AN DAS TESTGEBIET	76
C1.2	AUSWAHL TESTGEBIET	76
C2	GRUNDLEGENDES VORGEHEN BEI DER TESTMODELLIERUNG	80
C2.1	ZIELSTELLUNG TESTMODELLIERUNG	80
C2.2	ARBEITSSCHRITTE TESTMODELLIERUNG	81
C2.2.1	GEOLOGISCHES MODELL - DATENAUSWAHL BOHRUNGEN	81
C2.2.2	ERSTELLUNG HYDROGEOLOGISCHES 3D-STRUKTURMODELL – ÜBERFÜHRUNG IN DAS NUMERISCHE MODELL	82
C2.2.3	VORGEHEN FÜR INNERE SONDERBEREICHE	82
C2.2.4	VORGEHEN BEI FESTLEGUNG ÄUßERE UND INNERE RANDBEDINGUNGEN	86
C2.2.5	VORGEHEN AUFBAU BODENWASSERHAUSHALTSMODELL	87
C2.2.6	FESTLEGUNG DER ZU BERÜCKSICHTIGENDEN GWN FÜR UNGEKOPPELTE MODELLE	87
C3	VORGEHEN BEIM AUFBAU DES GRUNDWASSERMODELLS FÜR DIE TESTMODELLIERUNG	87
C3.1	ERSTELLUNG HYDROGEOLOGISCHES 3D-STRUKTURMODELL	87
C3.1.1	(HYDRO)GEOLOGISCHE MODELLIERUNG	87
C3.1.2	ERSTELLUNG HYDROGEOLOGISCHES 3D-STRUKTURMODELL – ÜBERFÜHRUNG IN NUMERISCHES MODELL	90
C3.2	ABBILDUNG VON GLAZIGENEN RINNEN / STÖRUNGSBEREICHEN UND KIPPENAREALEN	91
C3.3	FESTLEGUNG ÄUßERE RANDBEDINGUNGEN	92
C3.4	INNERE RANDBEDINGUNGEN - OBERFLÄCHEN- UND FLIEßGEWÄSSER	92
C3.5	ABBILDUNG GRUNDWASSERNEUBILDUNG IM UNGEKOPPELTEN TESTMODELL	96
C3.6	ABBILDUNG DER METEOROLOGISCHEN RANDBEDINGUNGEN IM UNGEKOPPELTEN TESTMODELL	97
C4	VORGEHEN UND FESTLEGUNGEN BEIM AUFBAU DES BODENWASSERHAUSHALTSMODELLS	98
C4.1	LANDNUTZUNG	98
C4.2	BODENINFORMATIONEN	99
C4.3	FLIEßGEWÄSSER	99
C4.4	GRUNDWASSERFLURABSTAND	100
C4.5	UMSTELLUNG DER DISKRETISIERUNG FÜR DIE GEKOPPELTE MODELLIERUNG	101
C5	VERGLEICH DER ÜBERFÜHRTEN 3D-STRUKTURMODELLE BEI UNTERSCHIEDLICHER SOFTWARE	102
C6	ERKENNTNISSE AUS DER TESTMODELLIERUNG BEZÜGLICH DER GRUNDWASSERMODELLIERUNGS-SOFTWARE	104
C6.1	ERGEBNISSE MODFLOW	104
C6.2	ERGEBNISSE FEFLOW	105
C6.3	ERGEBNISSE PCGEOFIM	106
C6.4	FOKUSSIERUNG DER BEWERTUNGSMATRIX	108
C7	ERGEBNISVERGLEICH ZUR STRÖMUNGSMODELLIERUNG FÜR EINZELNE MODELLE	109

C7.1	ERLÄUTERUNGEN ZUM VERGLEICH	109
C7.2	VERGLEICH ISOHYPSENPLÄNE	110
C7.3	VERGLEICH GANGLINIEN	113
C8	ERGEBNISDARSTELLUNG ZU DEN GEKOPPELTEN MODELLEN (PCGEOFIM – ARCEGMO)	117
C8.1	KURZERLÄUTERUNG MODELLVORGEHEN – BEWERTUNGSVORGEHEN	117
C8.2	ERGEBNISDARSTELLUNG GEKOPPELTE MODELLIERUNG	119
C8.3	ERGEBNISDARSTELLUNG ZUM ASPEKT OBERFLÄCHENWASSERGANG	120
C8.4	ERGEBNISDARSTELLUNG ZUM ASPEKT GRUNDWASSERGANG	121
C8.5	ERGEBNISDARSTELLUNG ZUM ASPEKT GRUNDWASSERNEUBILDUNG	123
C8.6	ERGEBNISDARSTELLUNG ZUM ASPEKT BILANZAUSWERTUNG	125
C8.7	ZUSAMMENFASSENDER HAUPTAUSSAGEN ZUR GEKOPPELTEN MODELLIERUNG	126
D	SCHLUSSFOLGERUNGEN ZUM AUFBAU DES GRM LAUSITZ	127
D1	HAUPTAUSSAGEN ZUM GENERELLEN KONZEPT GRML-AUFBAU	127
D2	HAUPTAUSSAGEN ZUM BODENWASSERHAUSHALTSMODELL UND ZUR WASSERHAUSHALTSANALYSE	129
D2.1	HAUPTAUSSAGEN ZUM BODENWASSERHAUSHALTSMODELL	129
D2.2	HAUPTAUSSAGEN ZUR GEKOPPELTEN MODELLIERUNG BWH-GW-MODELL	130
D3	HAUPTAUSSAGEN UNTER BEACHTUNG DER TESTMODELLIERUNG	131
D4	HAUPTAUSSAGEN ZUR TRANSPORTMODELLIERUNG MIT DEM GRM LAUSITZ	133
D5	HAUPTAUSSAGEN ZUR DATENVERFÜGBARKEIT	134
D5.1	GRUNDWASSERMODELLEDATEN	134
D5.2	DATEN ABBILDUNG DER OBERFLÄCHENGEWÄSSER	134
D5.3	DATEN BODENWASSERHAUSHALTSMODELL	134
D6	VARIANTENBETRACHTUNG ZUM BETRIEB DES GRM LAUSITZ	135
D6.1	BETRIEBSKONZEPT DER BESTEHENDEN REGIONALMODELLE	135
D6.2	VARIANTEN ZUM BETRIEB GRM LAUSITZ UND AKTUALISIERUNG ETC.	135
D7	AUFWANDS- UND KOSTENABSCHÄTZUNG FÜR AUFBAU UND BETRIEB GRM LAUSITZ	138
D7.1	METHODIK DER AUFWANDS- UND KOSTENABSCHÄTZUNG	138
D7.2	AUFBAU GRM LAUSITZ - ABGELEITETE TEILARBEITSBLÖCKE ZUR KOSTENABSCHÄTZUNG	139
D7.3	ZUSAMMENFÜHRUNG KOSTENABSCHÄTZUNG – AUFBAU- UND BETRIEBSPHASE	141
E	KURZZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT	144
	LITERATURVERZEICHNIS	I

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

- Abbildung A1-1: Überblick zum Niederlausitzer Braunkohlenrevier (aus PFLUG et al. 1998, ergänzt)
- Abbildung B1-1: Verbreitung des 2. Miozänen Flözkomplexes, die Lage von aktiven und Sanierungstagebauen sowie das System der glazigenen Erosionsrinnen im Niederlausitzer Braunkohlerevier (aus NOWEL et al. 1994)
- Abbildung B1-2: Lage der Regionalmodelle nach LMBV und Vattenfall/LEAG (aus EULITZ & KALTOFEN 2015), ergänzt durch eine Flächenumrandungslinie aller Regionalmodelle (rot)
- Abbildung B1-3: Tertiärverbreitung, bergbaulich bedingter Grundwasserabsenkungstrichter und Zusammenschau der bestehenden Regionalmodelle
- Abbildung B1-4: Schematischer Schnitt zur Verdeutlichung des nach Süden auskeilenden Tertiärs mit prinzipiellem Hinweis auf die hydrogeologisch wichtigen quartären Erosionsrinnen, die teilweise bis auf die Prätertiär-Oberfläche hinunter reichen
- Abbildung B1-5: Lage von Sonderbereichen und sonstiger geologischer Strukturen, die im GRM Lausitz zu berücksichtigen sind
- Abbildung B1-6: Verteilung der Datenbestände zu vorhandenen Bohrungen bei LfJULG und LEAG, mit Lage eines möglichen Trennkorridders für das GRML
- Abbildung B1-7: Generalisierte Verbreitungslinien (Ausstreichen nach Süden) der tertiären GWL 5 bis 9 (nach LKT50 1987, 2016)
- Abbildung B2-1: Vorkommen und Lagerungsverhältnisse der Schichten im Niederlausitzer Braunkohlenrevier auf brandenburgischem und sächsischem Territorium (links) und die für das GRM Lausitz wesentlichen GW-Leiter/-Stauer sowie zu berücksichtigende Lagerungsverhältnisse (rechts)
- Abbildung B3-1: Das PSCN-Modul im Rahmen des hydrologischen Einzugsgebietsmodells ArcEGMO – Überblick über die simulierten Teilprozesse
- Abbildung B3-2: Prinzipielle Vorgehensweise und Einsatz verschiedener Modellwerkzeuge für den Aufbau und die Parametrisierung eines großräumigen Stofftransportmodells
- Abbildung B3-3: Grundstruktur des Sulfatprognosemodells WBalMo in Bezug auf das Sulfateintragsmodul SE (aus KALTOFEN 2017)
- Abbildung B4-1: Verteilung der Datenbestände zu verschlüsselten Bohrungen bei LfJULG und LEAG, mit Kennzeichnung von Gebieten mit derzeit hochqualitativ verschlüsselten Bohrungen
- Abbildung B4-2: Verteilung der GW-Messstellen im Untersuchungsgebiet
- Abbildung B4-3: Verteilung der geochemisch untersuchten Vorfeldbohrungen im Betrachtungsgebiet mit dem Bereich der bergbaulichen Beeinflussung
- Abbildung B4-4: Verteilung der Grundwassergütemessstellen im Bereich GRM Lausitz
- Abbildung B4-5: Aggregations-Schema von ArcEGMO: Erzeugung von Hydrotopen durch Verschneidung der Basiskarten (links) und Erstellen des finalen Raum-modells durch Zuordnung dieser Hydrotopen zu den Teileinzugsgebieten des Untersuchungsraumes (rechts)

- Abbildung B4-6: Ausdehnung des Bodenwasserhaushaltsmodell mit Vergleich zum berg-baulich beeinflussten Modellgebietes der LMBV („Lausitzer Löwe“, Stand 1990)
- Abbildung B4-7: Verwendete Bodeninformationen im Brandenburg-Modell
- Abbildung B4-8: Verwendete Landnutzung im Brandenburg-Modell
- Abbildung B4-9: Abbildung der Restseekette im Brandenburg-Modell
- Abbildung C1-1: Bereich des Testmodells (Strömungsmodell)
- Abbildung C1-2: Bereich des Testmodells (Bodenwasserhaushaltsmodell)
- Abbildung C2-1: Datenlage der Bohrungsverteilung im Testgebiet mit Darstellung der Auswahl an Bohrungen für die Testmodellierung
- Abbildung C2-2: Lage glazigener Störungsbereiche im Testgebiet (aus KÜHNER 2017)
- Abbildung C2-3: Profilschnitt durch einen Teil mit glazigenen Störungsbereichen – Bereich des ehemaligen Tgb. Bärwalde im Testgebiet (aus KÜHNER 2017)
- Abbildung C2-4: Bereich des Testgebietes – Lage von quartären Rinnen und Tagebaubereichen (mit resultierenden Kippen und Bergbaufolgeseen)
- Abbildung C2-5: Mittlere jährliche Grundwasserneubildung, berechnet mit ArcEGMO
- Abbildung C3-1: Verbreitung der tertiären Horizontkörper im Liegenden des Quartärs
- Abbildung C3-2: Schematische Darstellung der Anbindung des Rinnenkörpers an die GWL der ungestörten Feldesteile
- Abbildung C3-3: Schnitt durch das Strukturmodell (am Rechtswert GK 5469499) mit Ankopplung der Rinnen und glazigenen Störkörper im Tertiär sowie der Position von Kippe und See Bärwalde
- Abbildung C3-4: Zeitliche Entwicklung an ausgewählten Punkten der äußeren Randbedingungen
- Abbildung C3-5: Äußere und innere Randbedingungen im Testgebiet
- Abbildung C3-6: Flächeninformation der 18 GWN-Klassen aus ArcEGMO, die auf die Modellgitter übertragen wurden
- Abbildung C3-7: Zeitreihen (Stufenfunktion) zur Definition der GWN sowie der Zehrung von Wasserflächen
- Abbildung C3-8: links: Untergliederung des Modellgebietes in GWN-Klassen; rechts: Mittlere Jahres- und Halbjahressummen der Grundwasserneubildung
- Abbildung C3-9: Räumlich und zeitlich variable Grundwasserneubildung im halbjährlichen Gang für die 18, das Gesamtgebiet überdeckende GWN-Zonen
- Abbildung C3-10: Tagebaurestseebilanzierung (korrigierter Niederschlag der Station Boxberg und potentielle Verdunstung im halbjährlichen Gang)
- Abbildung C3-11: Tagebaurestseebilanzierung (gewässertiefenabhängige Gewässerverdunstung im halbjährlichen Gang)
- Abbildung C4-1: Datengrundlage der Landnutzung im Testmodellgebiet (CIR-Daten für Sachsen, ergänzt durch Bergbaufolgenutzungsdaten für den Tagebaubereich Nochten/Reichwalde der LEAG)

- Abbildung C4-2: Bergbaufolgenutzung der Tagebaue Lohsa (links) und Bärwalde (rechts)
- Abbildung C4-3: Räumliche Diskretisierung des sächsischen (hellblau) und des Brandenburger Fließgewässernetzes (dunkelblau) im Vergleich zu den im Grundwassermodell integrierten Fließgewässern
- Abbildung C4-4: Grundwasserflurabstand
- Abbildung C4-5: Veränderte Diskretisierung im gekoppelten Modellbereich am Beispiel der Landnutzung
- Abbildung C5-1: Testgebiet MODFLOW-Modellierung – exemplarischer Profilschnitt (überhöht) mit k_f -Wertverteilung
- Abbildung C5-2: Testgebiet PCGEOFIM-Modellierung – exemplarischer Profilschnitt (überhöht) mit k_f -Wertverteilung
- Abbildung C5-3: Testgebiet FEFLOW-Modellierung – exemplarischer Profilschnitt (überhöht) mit k_f -Wertverteilung
- Abbildung C7-1: Festgelegte Berechnungsphasen im Testmodell
- Abbildung C7-2: MODFLOW Berechnungsergebnisse, Hydroisohypsen, 01.01.2020
- Abbildung C7-3: PCGEOFIM Berechnungsergebnisse, Hydroisohypsen, 01.01.2020
- Abbildung C7-4: MODFLOW Berechnungsergebnisse, Hydroisohypsen, 01.01.2025
- Abbildung C7-5: PCGEOFIM Berechnungsergebnisse, Hydroisohypsen, 01.01.2025
- Abbildung C7-6: Lage der virtuellen Messstellen zum Vergleich der Berechnungsergebnisse
- Abbildung C7-7: Vergleich der WST-Entwicklung im Bärwalder See
- Abbildung C7-8: Vergleich des berechneten Durchflusses an der Spree (MST LPSpree02)
- Abbildung C7-9: Vergleich des berechneten GW-Standes an der MST P01
- Abbildung C7-10: Vergleich des berechneten GW-Standes an der MST P05
- Abbildung C7-11: Vergleich des berechneten GW-Standes an der MST P14
- Abbildung C8-1: Momentaufnahme der laufenden gekoppelten Berechnung für einen Berechnungszeitschritt (links: Ausschriften von ArcEGMO & Kopplungsroutine; rechts: Ausschrift PCGEOFIM)
- Abbildung C8-2: Interaktion zwischen Bodenwasserhaushalts- und Grundwassermodell
- Abbildung C8-3: Grid-Typen im Testmodell
- Abbildung C8-4: Lage der fiktiven Grund- und Oberflächenwassermessstellen für die Ergebnisauswertung
- Abbildung C8-5: Berechneter Durchfluss (Tagesgang) der Hauptsprees vor Einmündung von Schwarzem Schöps (Vergleich gekoppelte/ungekoppelte Berechnung)
- Abbildung C8-6: Berechneter Grundwasserstand (Tagesgang) am Modellpegel P01_3 (Vergleich gekoppelte/ungekoppelte Berechnung)
- Abbildung C8-7: Berechneter Grundwasserstand (Tagesgang) am Modellpegel P14_3 (Vergleich gekoppelte/ungekoppelte Berechnung)

- Abbildung C8-8: *Berechnete(r) Grundwasserneubildung bzw. Grundwasserstand (Monatsgang) am Modellpegel P05_3 (Vergleich gekoppelte/ungekoppelte Berechnung)*
- Abbildung C8-9: *Entwicklung des Flurabstandes und der Grundwasserneubildung bei Entstehung einer Wasserfläche*
- Abbildung C8-10: *Entwicklung eines Standortes von grundwasserfern zu grundwassernah*
- Abbildung C8-11: *Wechsel zwischen grundwasserfernen und grundwassernahen Verhältnissen*
- Abbildung C8-12: *Monatsmittelwerte des Durchflusses am Pegel Sprey*
- Abbildung D7-1: *Phasen des Modellaufbaus und -betriebs; Kostenblöcke und Betreiberstruktur als Grundlage für die Kostenkalkulation*

TABELLENVERZEICHNIS

<i>Tabelle B1-1:</i>	<i>Abschätzung der Zellen für den Modellraum GRM Lausitz</i>
<i>Tabelle B2-1:</i>	<i>Strukturmodelle/Schichteinheiten für die vorhandenen Regionalmodelle (Darstellung auf der Basis von Aussagen in EULITZ & KALTOFEN 2015)</i>
<i>Tabelle B2-2:</i>	<i>Strukturmodelle/Schichteinheiten für die hoch aufgelösten Regionalmodelle (Darstellung auf der Basis von Aussagen in EULITZ & KALTOFEN 2015)</i>
<i>Tabelle B2-3:</i>	<i>Vorgeschlagene quartäre und tertiäre Schichtgliederung für das GRM Lausitz</i>
<i>Tabelle B4-1:</i>	<i>Benötigte Fließgewässerinformationen</i>
<i>Tabelle B4-2:</i>	<i>Benötigte Standgewässerinformationen</i>
<i>Tabelle B4-3:</i>	<i>Datenquellen Fließgewässer</i>
<i>Tabelle B4-4:</i>	<i>Datenquellen Standgewässer</i>
<i>Tabelle B4-5:</i>	<i>Geodaten im Brandenburg-Modell für den Modellbereich Brandenburg</i>
<i>Tabelle B4-6:</i>	<i>Verwendete Geodaten im Wasserhaushaltsmodell Sachsen</i>
<i>Tabelle B4-7:</i>	<i>Verfügbare Datengrundlagen für die bergbaugeprägten Gebiete</i>
<i>Tabelle B5-1:</i>	<i>Bewertungsmatrix für die Evaluierung der GW-Modellierungssoftware nach Umsetzung/Bedienbarkeit</i>
<i>Tabelle C3-1:</i>	<i>Zusammenstellung der Modellschichten des Testgebietes - geologisches Modell sowie resultierendes hydrogeologisches 3D-Strukturmodell mit Zuordnung der kf-Werte</i>
<i>Tabelle C3-2:</i>	<i>Fließgewässersegmente und deren Definition</i>
<i>Tabelle C6-1:</i>	<i>Fokussierte Bewertungsmatrix für die zukünftige Evaluierung der GW-Modellierungssoftware nach der durchgeführten Testmodellierung</i>
<i>Tabelle D7-1:</i>	<i>Aufwands- und Kostenkalkulation für den Aufbau eines GRM Lausitz (Nettokosten) – aktualisiert nach Testmodellierung</i>
<i>Tabelle D7-2:</i>	<i>Abgeschätzte und bilanzierte Nettokosten für verschiedene Aktualisierungsaufgaben im nachfolgenden Betrieb des GRM Lausitz</i>

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AP	Arbeitspaket (zur Realisierung der Aufgabenstellung)
AS	Arbeitsschritt (zur Realisierung der Aufgabenstellung)
ArcEGMO	öko-hydrologisches Modellierungssystem zur räumlich-zeitlichen Simulation des Gebietswasserhaushaltes und des Abflussregimes
BWHM	Bodenwasserhaushaltsmodell
BGR	Bundesanstalt für Geologie und Rohstoffe, Hannover
FEFLOW	Simulationsprogramm zur Berechnung von Grundwasserströmungen und den Transport von löslichen Stoffen
HA	Hauptaspekt (bei der Themenbearbeitung)
GK200	Geologische Karte im Maßstab 1.200.000
GRM(L)	Großraummodell(Lausitz)
GW	Grundwasser
GWN	Grundwasserneubildung
GWM	Grundwassermodell
GWL	Grundwasserleiter
LBGR	Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg, Cottbus
LEAG	Lausitz Energie Bergbau AG, Cottbus
LfU	Landesamt für Umwelt Brandenburg, Potsdam
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden
LKQ50	Lithofazieskarten Quartär im Maßstab 1:50.000
LKT50	Lithofazieskarten Tertiär im Maßstab 1:50.000
LKT200	Lithofazieskarten Tertiär im Maßstab 1:200.000
LMBV	Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH, Senftenberg
2. MFK	2. Miozäner Flözkomplex (2. Lausitzer Flözhorizont, 2. Lausitzer Flöz)
MGWL	Modellgrundwasserleiter
MODFLOW	Simulationsprogramm zur Berechnung von Grundwasserströmungen und den Transport von löslichen Stoffen
PCGEOFIM	Simulationsprogramm zur Berechnung von Grundwasserströmungen und den Transport von löslichen Stoffen
PSCN	Modul von ArcEGMO
RB	Randbedingung(en)(für die Modellierung)
Tgb.	(Braunkohlen-)Tagebau
Vattenfall	Vattenfall Europe Mining AG, Cottbus

A EINFÜHRUNG - GRUNDLEGENDE VORBEMERKUNGEN

A1 AUFGABEN- UND ZIELSTELLUNG

Die **Aufgabenstellung** des Auftraggebers Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) Sachsen vom 20.10.2017 zum Projekt der Konzepterstellung für ein Großraummodell des Niederlausitzer Braunkohlenreviers (GRML) fasst die generelle Zielrichtung wie folgt zusammen:

„...Im Rahmen von Planfeststellungs- und Genehmigungsverfahren ist die großräumige und langzeitige Entwicklung des Bergbaueinflusses zu berücksichtigen und Maßnahmen zur Verbesserung der Gewässergüte darzustellen und zu beachten. Grundwassermodelle zu Wasserstand/Wassermengen sowie Stofffrachten sind dabei wesentliche Basis und dienen entscheidend der Plausibilisierung von fachlichen Aussagen.“

Mit dem stetig fortschreitenden Grundwasserwiederanstieg im Niederlausitzer Braunkohlenrevier (Abb. A1-1) wurde in den letzten Jahrzehnten immer deutlicher, dass eine Betrachtung nur einzelner Tagebaue bzw. Teilbereiche des Reviers ohne einheitlichen bzw. vergleichbaren geohydraulischen Bezug auf Strömungs- und vor allem Transportprozesse nur ungenügend die Wechselwirkungen zu anderen Revierteilbereichen berücksichtigen können.

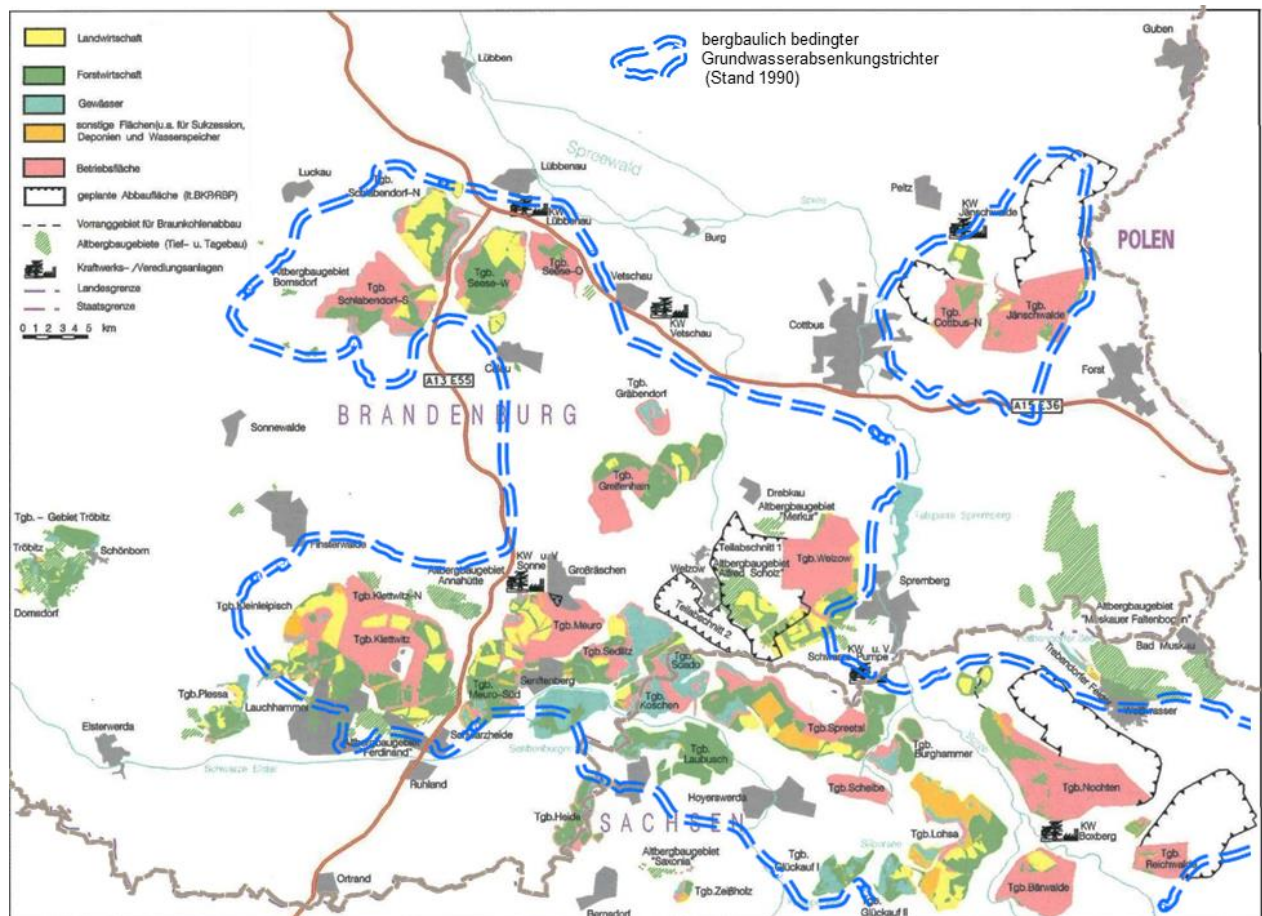


Abbildung A1-1: Überblick zum Niederlausitzer Braunkohlenrevier (aus PFLUG et al. 1998, ergänzt)

Vor allem für die großräumige Betrachtung des Stofftransportes der aus dem bergbaulichen Einfluss resultierenden Stoffkomponenten (Sulfat, Eisen), aber auch für hydraulisch, wasserhaushaltliche Betrachtungen für das Gesamtrevier, ist ein revierweites Großraummodell notwendig.

Mit der Studie von EULITZ & KALTOFEN (2015) erfolgte eine Überprüfung der generellen Machbarkeit eines GRM Lausitz. Es wurden die existierenden 11 Regionalmodelle von LMBV und LEAG (damals noch Vattenfall) auf ihre Verwendbarkeit für die oben benannte Hauptzielstellung bewertet. Die Studie stellt fest, dass diese Regionalmodelle eine sehr unterschiedliche, vertikale hydrogeologische Untergliederung und damit Detailliertheit besitzen. Generell kamen EULITZ & KALTOFEN (2015) zum Schluss, dass die Zusammenführung dieser Regionalmodelle nicht geeignet ist, großräumige, detaillierte Aussagen zur hydraulischen Entwicklung, aber damit vor allem auch zu Prognosen der langfristigen Stofftransport-Entwicklung zu liefern. Es wurde diesbezüglich die Notwendigkeit und prinzipielle Machbarkeit eines GRM Lausitz herausgestellt. Aus Sicht der Autoren des vorliegenden Berichts gilt das auch heute noch, obwohl durch die LMBV einzelne Regionalmodelle seit 2015 verfeinert und auch heute noch unterschiedlich detailliert qualifizieren werden.

Der hier vorliegende Abschlussbericht zum Konzept des Aufbaus eines solchen GRM für das Niederlausitzer Braunkohlerevier liefert das methodische Vorgehen und die Bewertung der datenseitigen Grundlagen für die detaillierte Untersetzung eines solchen GRM-Aufbaus inkl. einer Abschätzung der dafür notwendigen Aufbau- und Betriebskosten.

Folgende generelle Arbeitspunkte waren in der LfULG-Aufgabenstellung zu dieser Studie benannt, die in der Konzepterstellung zu berücksichtigen sind:

- Aussagen zur Abgrenzung des Modellgebietes,
- Benennung der Datenanforderungen und Recherche zum verfügbaren Datenbestand,
- Vorgehen zum Aufbau des hydrogeologischen 3D-Strukturmodells als die wesentliche Basis des GRM Lausitz,
- Vorgehen zur Diskretisierung und Festlegung (einheitlicher) Randbedingungen,
- Detaillierte Abbildung der oberen Randbedingung des Strömungs- und Transportmodells mit Hilfe eines Bodenwasserhaushaltsmodells sowie Aussagen zur dessen Ankopplung,
- Vergleich/Test der benannten Simulationsprogramme zur GRM-Modellierung in einem Pilotgebiet,
- Aussagen zur generellen Modellierung des Stofftransportes im Grundwasser und damit verbundene Auswirkungen auf die Fließgewässer,
- Vorgehen zur Kalibrierung/Validierung des Strömungsmodells sowie des Bodenwasserhaushaltsmodells,
- Erstellung einer Kostenschätzung und eines Betriebskonzeptes für das GRM Lausitz.

Die Themenbearbeitung erfolgte mit Werkvertrag des LfULG vom 28.03.2017 im Zeitraum 05/2018 bis 05/2019 durch ein Bearbeitungsteam unter Federführung der Firma *GEOMONTAN* GmbH Freiberg in Arbeitsgemeinschaft mit GFI *Grundwasser-Consulting-Institut GmbH Dresden* und IBGW *Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH Leipzig* unter maßgeblicher Einbeziehung der TU Bergakademie Freiberg *Institut für Bergbau & Spezialtiefbau* sowie unter Mitwirkung von BAH *Büro für Angewandte Hydrologie Berlin*.

Das Projekt Großraummodell (GRM) Lausitz verfolgt die **Zielstellung**:

- Revierweite Güteprognosen für bergbautypische Wasserinhaltsstoffe, auf Basis eines vereinheitlichten, aktuellen 3D hydrogeologischen Strukturmodells und damit der großräumigen Grundwasserströmungsverhältnisse auszuweisen. Hierbei wird die Kopplung zu den maßgeblich betroffenen Oberflächengewässern mit berücksichtigt.
- Hydraulische Randbedingungen für die weiter bestehenden Regionalmodelle und für künftige Lupenbetrachtungen, auf fachlich einheitlicher Grundlage auszuweisen und bereitzustellen.
- Wasserbilanzen, auch bezüglich potentieller Trocken- und Feuchtperioden inkl. möglicher klimatischer Veränderungen, zu ermitteln.
- Somit die Sinnfälligkeit, Verhältnismäßigkeit und Nachhaltigkeit von kurz-, mittel- und langfristigen Maßnahmen hinsichtlich ihrer großräumigen Wirkung auszuweisen und zu bewerten.
- Damit modellgestützte Aussagen für die Ableitung und Begründung von Zielen und Abweichungen für Grundwasser- und Oberflächenwasserkörper gemäß der EU-WRRL abzuleiten.

Mit dem vorliegenden Abschlussbericht werden die notwendigen Schritte zum Aufbau eines GRM Lausitz konzipiert, die dafür notwendige Datenverfügbarkeit geprüft und bewertet sowie der sich daraus ergebende Arbeits- und Kostenaufwand abgeschätzt.

A2 METHODISCHES VORGEHEN/ AUFBAU ABSCHLUSSBERICHT

Für das Projekt sehr zielführend, initiiert durch den Auftraggeber, wurden die wesentlichen Behörden/Institutionen/Firmen mit Bezug zum montanen Modellgebiet in die Bearbeitung einbezogen. Es erfolgten diesbezüglich detaillierte Datenabfragen und umfangreiche fachliche Diskussionen zum Datenbestand eben nicht nur mit dem Auftraggeber LfULG Sachsen selbst, sondern vor allem auch mit den zuständigen Landesämtern von Brandenburg (LBGR, LfU) und den beiden Bergbaubetreibenden LMBV (Sanierungsbergbau) und LEAG (aktiver Braunkohlenbergbau).

Generell muss bewusst bleiben, dass es in einem solchen Konzeptprojekt für ein GRM Lausitz nicht darum gehen kann, alle verschiedenen Datenpools (und -arten) im Detail für die gesamten Datenumfänge auszuwerten. Vielmehr kann es nur Ziel sein, einen generalisierten Blick auf diese verschiedenen Daten zu erhalten. Dies heißt, dass Aussagen zu ihrer prinzipiellen Verwendbarkeit, zur Reihenfolge der Anwendung und vor allem auch zum Niveau der notwendigen Erfassungs- und Aufbereitungsarbeiten, für eine Verwendung beim zukünftigen Aufbau eines GRM Lausitz, abzuleiten waren.

Inhaltlich sei zum Abschlussbericht und der Dokumentation des methodischen Vorgehens bei der Studiererstellung darauf verwiesen, dass nach dem einführenden Kap. A (Aufgaben- und Zielstellung), im Hauptkapitel B zunächst in den Teilkapiteln B1 bis B3 die notwendigen Grundlagen (Abgrenzung/Diskretisierung Modellgebiet - B1; hydrogeologische Untergliederung - B2; Vorgehen Wassermengen-/Wassergütemodellierung - B3) behandelt wurden. Danach erfolgt in Kap. B4 die detaillierte Benennung von Datenanforderungen mit den Ergebnissen zur Datenverfügbarkeit für die einzelnen, bereits oben benannten Datenarten. Im

Teilkapitel B5 wird auf die aufgabenspezifische Charakteristik der in Erwägung gezogenen Simulations-Software-Produkte (MODFLOW, FEFLOW, PCGEOFIM) eingegangen.

Im Kap. C wird zunächst die Auswahl eines Teilgebietes zur Testmodellierung erläutert. Diese Testmodellierung erfolgt, um die erarbeitete Methodik zum Aufbau eines GRM Lausitz in einem Gebiet, das weitgehend alle für das GRML-Modellgebiet zu erwartenden geologischen, hydrogeologischen und bergbaulichen Rahmenbedingungen enthält zu testen. Die wesentlichen Ergebnisse und Aussagen der Testmodellierung selbst („halbsynthetisches Modell“) werden nachfolgend dargelegt. Es werden diesbezüglich Schlussfolgerungen für die Anpassung der Methodik mit Blick auf die Notwendigkeiten hinsichtlich des überregionalen Aufbaus des GRM Lausitz abgeleitet.

Kap. D liefert abschließend eine detaillierte Auflistung aller Rahmenbedingungen und notwendiger Arbeitsschritte, auf deren Basis der mögliche Aufbau und Betrieb eines GRM Lausitz in der Zukunft beruhen müsste (D1-D5). Im Kap. D6 werden Varianten von Betreibermodellen unter Beachtung der Zielstellung eines GRM Lausitz beschrieben und diskutiert. Im Kap. D7 erfolgt eine Abschätzung der Kosten für einen möglichen Aufbau und Betrieb des GRM Lausitz.

Letztendlich erfolgt in Kap. E eine generelle Kurzzusammenfassung und es wird ein Fazit aller wichtigen Aspekte für die Erstellung und den Betrieb eines GRM Lausitz gezogen.

B KONZEPT UND AUFBAU GROßRAUMMODELL LAUSITZ

In Abstimmung mit dem Auftraggeber / Projektbeirat wird von der in der LfULG-Leistungsbeschreibung vorgegeben Bearbeitungsreihenfolge der Arbeitspakete AP 1 – 10 hier in der Berichtsdarstellung abgewichen. Es wird die bei einem potentiellen Aufbau eines GRM Lausitz notwendige Bearbeitungsreihenfolge für die Kapiteluntergliederung genutzt: Kap. B1 steht vor allem in Bezug zu AP2/ AP4 (Abgrenzung Modellgebiet/Randbedingungen); Kap. B2 zu AP5 (hydrogeologisches 3D-Strukturmodell); Kap. B3 zu AP6 bis AP9 (obere RB (BWHM)-Ankopplung an 3D-Strömungsmodell und Stofftransportmodellierung); Kap. B4 zu den Datenanforderungen und -verfügbarkeiten (AP3); Kap. B5 zu AP1 (Vergleich Modellierungssoftware); Kap. C1 zu AP10 (Auswahl des Pilotgebietes für die Testmodellierung).

B1 ABGRENZUNG MODELLGEBIET: ÄUßERE/INNERE RANDBEDINGUNGEN UND DISKRETISIERUNG

B1.1 BERANDUNG GRM LAUSITZ - ÄUßERE RANDBEDINGUNGEN

B1.1.1 GRUNDAUSSAGEN ZUM ÄUßEREN RAND GRM LAUSITZ

Abb. B1-1 weist eine geologisch-bergbauliche Übersicht zum Niederlausitzer Braunkohlenrevier aus.

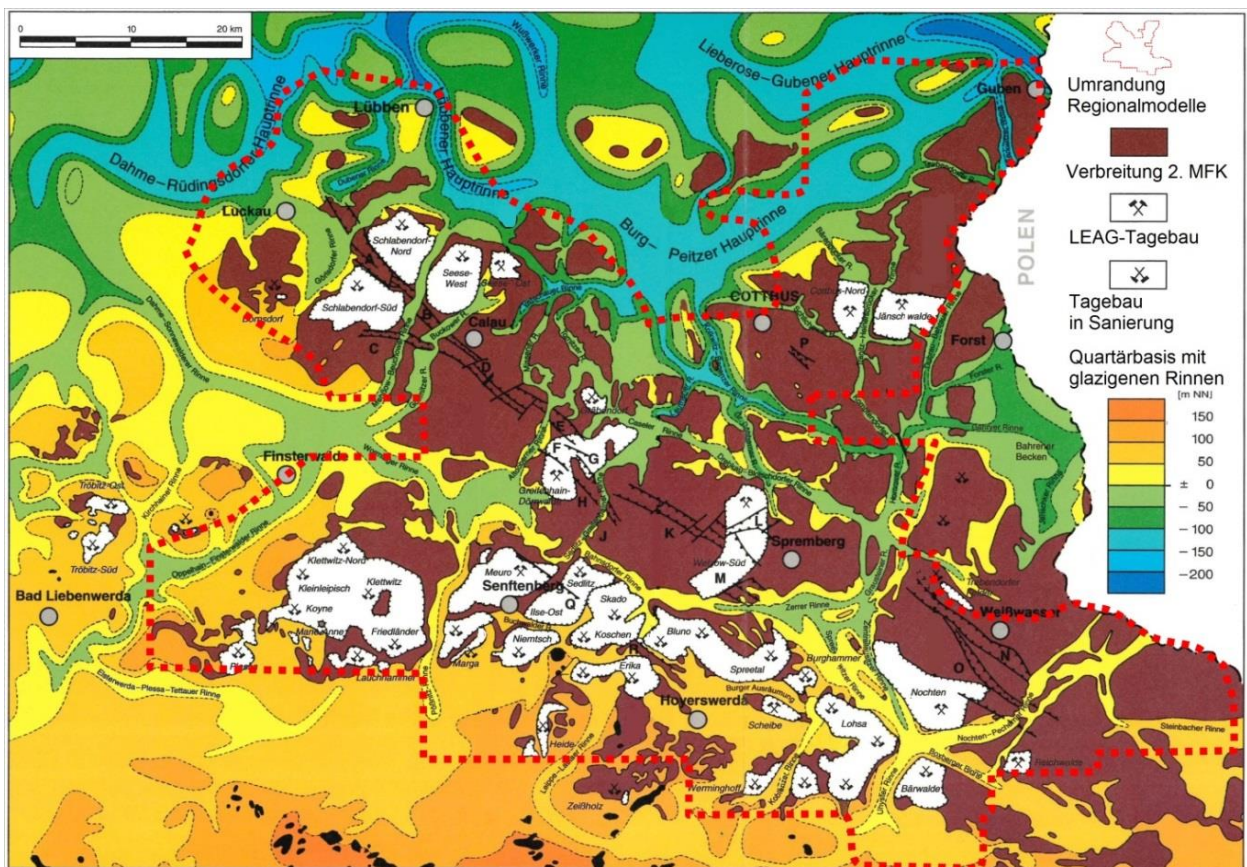


Abbildung B1-1: Verbreitung des 2. Miozänen Flözkomplexes, die Lage von aktiven und Sanierungstagebauen sowie das System der glazigenen Erosionsrinnen im Niederlausitzer Braunkohlerevier (aus NOWEL et al. 1994)

Dargestellt ist die Verbreitung des wirtschaftlichen Hauptbauhorizontes (2. MFK: 2. Miozäner Flözkomplex) sowie die Lage von aktiven Gewinnungstagebauen der LEAG und von Sanierungstagebauen der LMBV. Außerdem ist das System der glazigenen Erosionsrinnen, die die Kohlenfelder definieren/ begrenzen und für die hydrogeologische Modellierung von wesentlicher Bedeutung sind, angegeben.

Die zusammenfassende Umrandungslinie der derzeit betriebenen GW-Regionalmodelle resultiert aus dem bergbaubeeinflussten Gebiet und fällt zu einem großen Teil mit der Flözverbreitung des 2. MFK zusammen. Diese Ausdehnung ist natürlich auch für ein aufzubauendes Großraummodell von wesentlicher Bedeutung; dabei sind jedoch auch weitere Aspekte zu berücksichtigen. Die nachfolgenden Aussagen zum Modellrand beziehen sich auf den Grundwasserteil. Aussagen zum Bodenwasserhaushaltsmodell finden sich im Kap. B4.7.

In Bezug auf die Festlegung des äußeren Modellrandes lassen sich zunächst die folgenden vier Hauptaussagen A-D treffen:

- A) Zuerst ist das Aussagegebiet zu definieren, in dem Aussagen zur letztendlichen Transportbetrachtung – und damit auch zur Grundwasserströmung - getroffen werden sollen.
- B) Das Modellgebiet muss somit bezüglich seiner Ränder soweit nach außen gelegt werden, dass durch Geschehen im Aussagegebiet diese Ränder, also die zu wählenden Randbedingungen (RB), nicht (wesentlich) hydraulisch beeinflusst werden. Dies ist für verschiedene, eventuell zu betrachtende Modellvarianten sicherzustellen.
- C) Es ist die „harte“, belastbare Definition dieser Ränder zu bevorzugen. Darunter ist z. B. zu verstehen, dass eine Randdefinition besser auf RB 1. Art (Festpotentiale - zeitvariant), basierend auf real gemessenen Grundwasserständen (Messstellen) beruhen sollte, als auf festgelegten, geschlossenen Rändern (mit $Q=0$), die auf z. B. aus älteren Kartenwerken abgeleiteten Randstromlinien basieren.
- D) In Bezug auf eventuell komplizierte „Sondergebiete“ am potentiellen Modellrand ist eine Abwägung durchzuführen, wie bedeutend diese Modellgebiete und somit Modellaussagen in diesen Bereichen im Gesamtkontext sind. Es ist abzuklären, welche Möglichkeiten eines sequentiellen Modellaufbaus gegeben sind und ob somit diese Gebiete, erst später bei Bedarf, in die Modellierung mit einbezogen werden können.

Bezüglich dieser getroffenen Aussagen A) – D) ist weiterhin festzuhalten, dass die für GW-Modelle typische Wahl von großen Oberflächengewässern (vor allem Flüsse) als äußere Randbedingung die Aussagefähigkeit in Bezug auf die Wasser- und Stoffbilanz für eben diese Oberflächengewässer stark einschränken.

Die nachfolgende Abb. B1-2 weist den Blick auf die Lage der bestehenden GW-Regionalmodelle (in Verantwortlichkeit von LMBV und LEAG) aus. In dieser Graphik ist eine formale Flächenumrandung aller derzeit betriebenen Regionalmodelle (rote Linie) eingetragen, die zur besseren räumlichen Orientierung in den nachfolgenden Übersichtskarten übernommen wurde.

Die in EULITZ & KALTOFEN (2015) dargestellten Modellgrundlagen für die 11 bestehenden Regionalmodelle werden weiterführend in Kap. B2.3 charakterisiert und in Bezug auf ihre hydrogeologische Untergliederung und somit auch Passfähigkeit diskutiert.

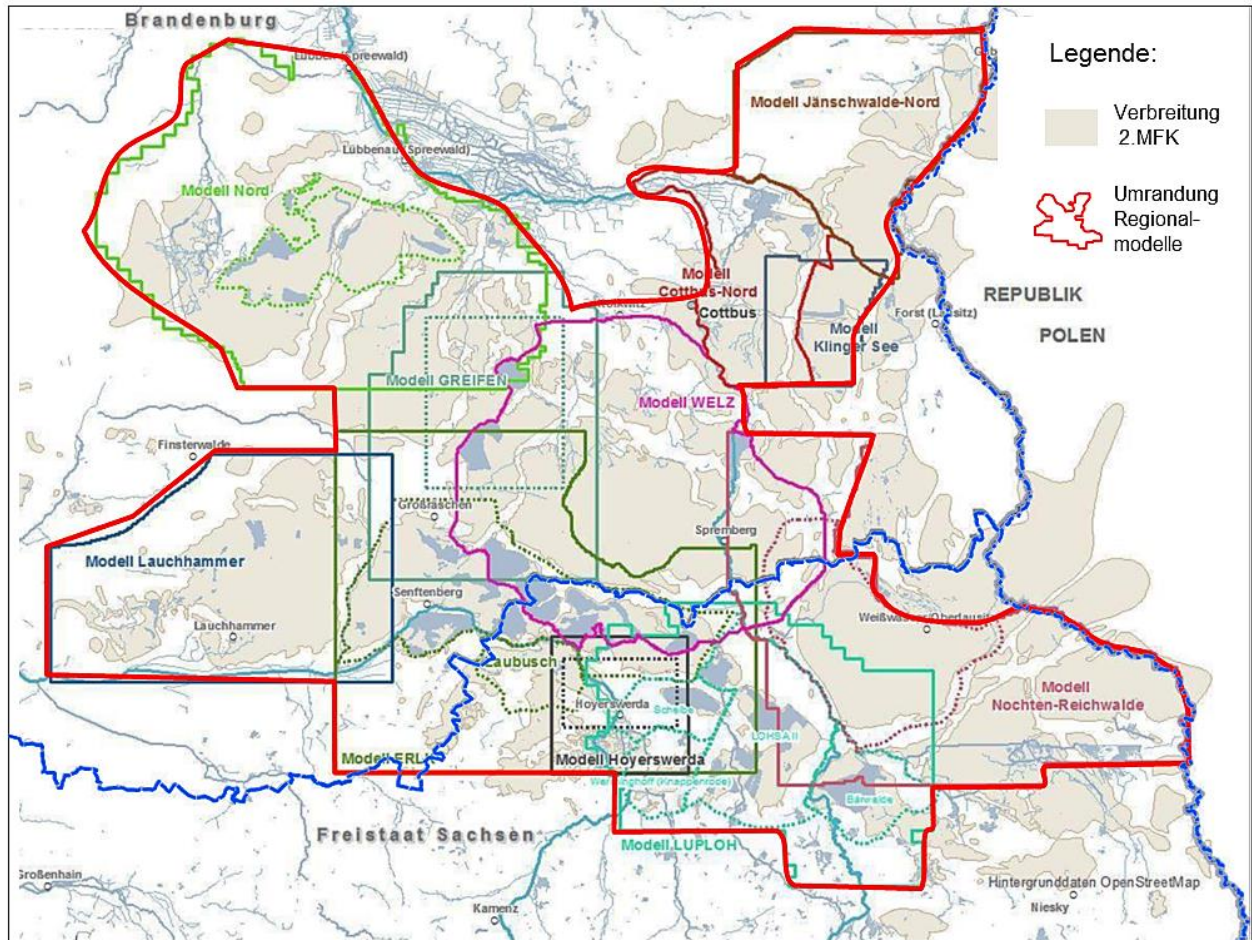


Abbildung B1-2: Lage der Regionalmodelle nach LMBV und Vattenfall/LEAG (aus EULITZ & KALTOFEN 2015), ergänzt durch eine Flächenumrandungslinie aller Regionalmodelle (rot)

An dieser Stelle soll auf einige Besonderheiten hinsichtlich der gewählten Lage der Ränder und der Randbedingungsbelegung der bestehenden Regionalmodelle eingegangen werden. So wird für den südlichen Rand deutlich, dass dieser - West-Ost verlaufend - mit der Festlegung einer Randbedingung 2. Art mit $Q=0$ (geschlossener Rand ohne Zu- und Abfluss) gewählt worden ist. Es ergibt sich daraus, diesen Sachverhalt in Bezug auf dessen Sinnhaftigkeit für die vorliegende Bearbeitung näher zu überprüfen.

Bezüglich der oben getroffenen Aussage zu den Vorflutern als Randbedingung sind folgende konkrete Dinge festzuhalten:

- Die Randbedingung „Neiße“ am östlichen Rand ist verständlich und durch die Funktion als Staatsgrenze zu Polen vorgegeben. Dies bedeutet aber auch, dass bei Wahl als Randbedingung keine volle Bilanzfähigkeit für diesen Fluss gegeben ist. Gleiches ist der Fall, wenn die Schwarze Elster im südwestlichen Bereich als äußere Randbedingung gewählt wird. Die Sinnhaftigkeit dieses Vorgehens ist, abwägend, weiter zu diskutieren.
- Als Sondergebiete am potentiellen Rand eines GRM treten vor allem zwei Gebiete in den Blick. Dies ist zum einen, der Bereich des Oberspreewaldes, mit dem südlich davon gelegenen tiefen quartären Ausräumungsbereich (Burgk-Peitzer Hauptrinne, vgl. Kap. B1.1.2), zum anderen der Bereich des Muskauer Faltenbogens.

- Für beide benannten Sondergebiete ist zu sagen, dass sie als sehr komplizierte hydrologische bzw. hydrogeologische Teilgebiete zu verstehen sind. Ihre Einbeziehung in das Modellgebiet würde somit für einen deutlich überproportionalen Mehraufwand in Bezug auf den Modellaufbau und vor allem die Modellkalibrierung (vermutlich auch beim Modellbetrieb) sorgen. Zur genaueren Analyse, zu diesen Sondergebieten und wie mit diesen verfahren werden sollte, sei auf das nachfolgende Kap. B1.1.2 verwiesen.

An dieser Stelle soll jetzt weiter der Aspekt der im Süden, im Zusammenspiel der Regionalmodelle ersichtliche Südgrenze (als geschlossener Rand, $Q=0$) näher betrachtet werden. Dazu ist in Abb. B1-3 die Tertiärverbreitung, im Vergleich zum Rand der Gesamtheit der Regionalmodelle dargestellt.

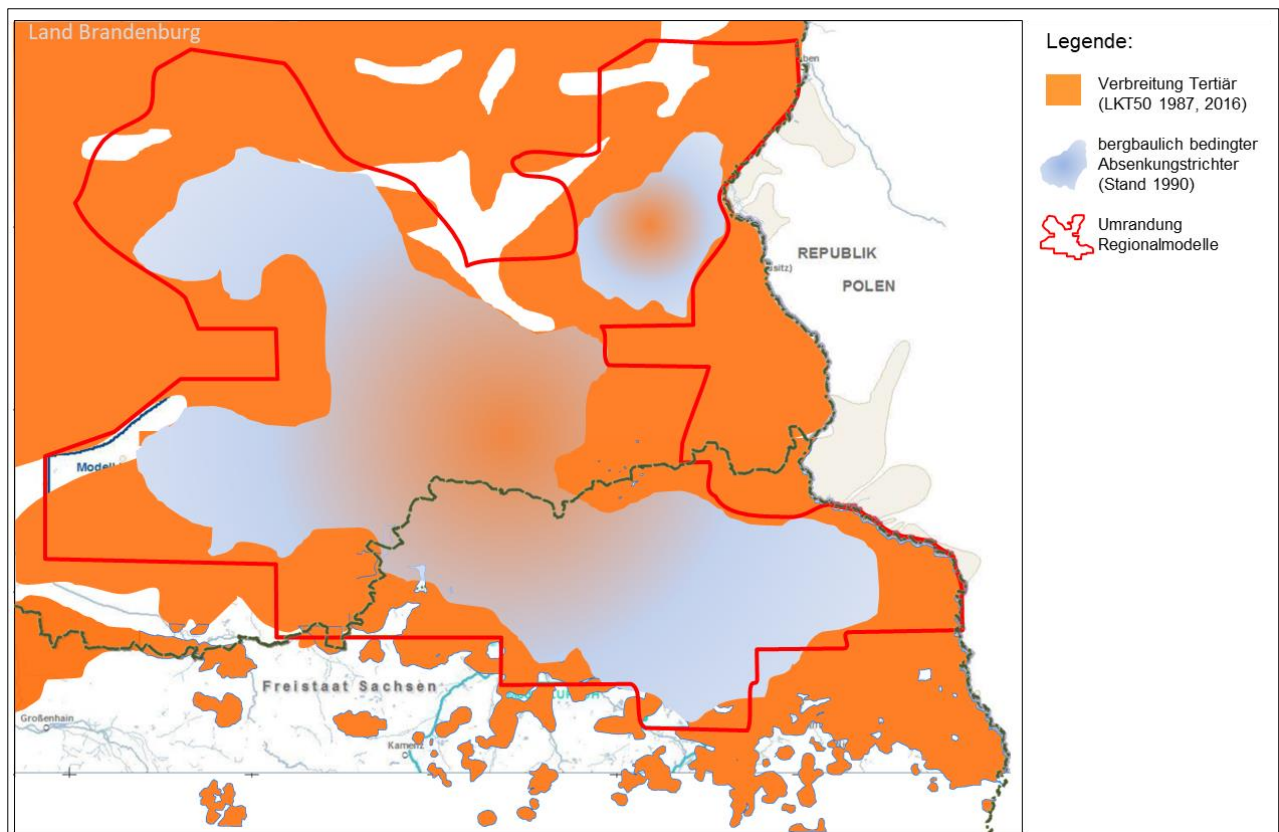


Abbildung B1-3: Tertiärverbreitung, bergbaulich bedingter Grundwasserabsenkungstrichter und Zusammenschau der bestehenden Regionalmodelle

Es wird deutlich dass die Grenze der Regionalmodell-Umrandung oft der Tertiärverbreitung nach Süden sehr nahe kommt. Die gewählten Grenzen der Regionalmodelle entsprechen in etwa der Absenkungsgrenze gegenüber dem vorbergbaulichen Zustand von ca. 1-2 m.

Es ist jedoch besser, den zu wählenden Südrand durch einen Polygonzug konkreter Wasserstands-Messstellen und ihrer Daten klar zu definieren. Dies vor allem auch vor dem Hintergrund klimatischer Veränderungen und zum Teil deutlich schwankender (sinkender) überregionaler Grundwasserstände. Somit ist unserem Verständnis nach festzuhalten, dass nicht generell die Randlinien bergbaulicher Beeinflussung (Grundwasser-Absenkungsgeschehen) oder die Tertiärverbreitung als Grenze herangezogen werden sollte.

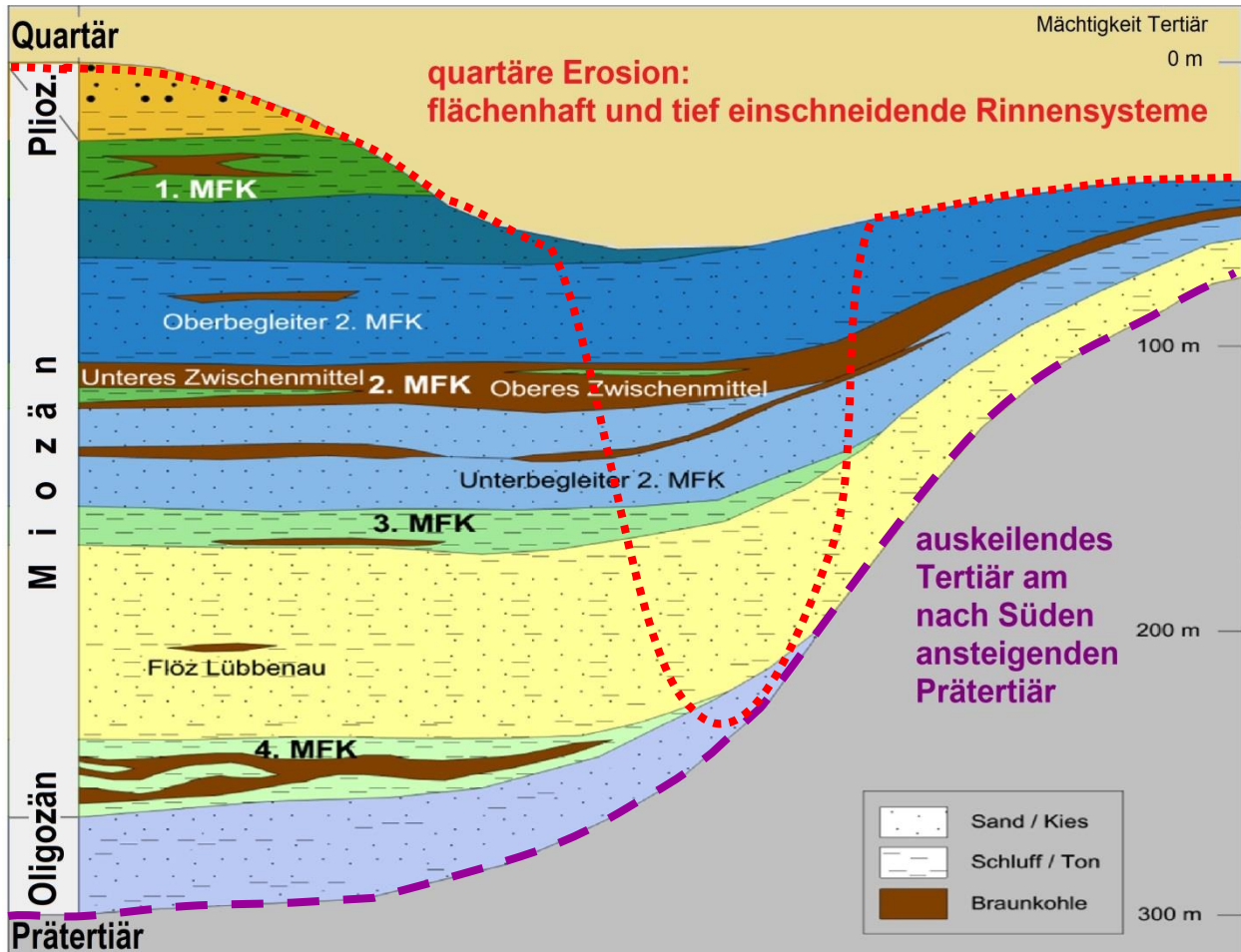


Abbildung B1-4: Schematischer Schnitt zur Veranschaulichung des nach Süden auskeilenden Tertiärs mit prinzipiellem Hinweis auf die hydrogeologisch wichtigen quartären Erosionsrinnen, die teilweise bis auf die Prätertiär-Oberfläche hinunter reichen

Abb. B1-4 verdeutlicht weiterhin, als prinzipieller Schnitt, das Ausstreichen des Tertiärschichtenpaketes nach Süden. Dabei wird der Übergang südlich der Tertiärgrenze angedeutet, bei dem dann nur noch quartäre Schichten auf dem prätertiären Festgesteinskörper (mit Verwitterungsdecke) aufliegen.

B1.1.2 SONDERBEREICHE AM RAND UND DEREN HANDHABUNG

Wie bereits in Kap. B1.1.1 diskutiert, liegen am Rand (aber auch innerhalb) des zu betrachtenden Modellgebietes Bereiche, die infolge glazigener Prozesse komplizierte geologische Lagerungsverhältnisse aufweisen (vgl. Abb. B1-5):

a) Sonderbereich **Muskauer Faltenbogen:**

- Glazitektonisch während des Elster-Glazials angelegte und Saale-kaltzeitlich überprägte, hufeisenförmige Stauchendmoräne auf sächsischem, brandenburgischem und polnischem Territorium (KUPETZ & KUPETZ 2009; KÜHNER 2017).
- Aufschuppung der tertiären Schichtenfolge bis einschließlich der Liegendsedimente des 2. Miozänen Flözkomplexes in mehreren Faltensträngen führte zu komplizierten hydrogeologischen Lagerungsverhältnissen.

b) Sonderbereich **(Ober)Spreewald:**

- Abschnitt der bis 200 Meter tief eingeschnittenen, glazigenen Burg-Peitzer Hauptrinne im Bereich des heutigen (Ober)Spreewaldes (Teil des Baruther Urstromtals) mit vollständiger Erosion der tertiären Schichtenfolge.
- Die Rinne ist teilweise mit bindigen Sedimenten plombiert; es bestehen jedoch teilweise auch hydraulische Verbindungen zwischen den permeablen Bereichen der quartären Rinnenfüllung und den angeschnittenen tertiären Grundwasserleitern.

Die beiden benannten Sonderbereiche sollen, durch Wahl der generellen äußeren Randbedingungen einbezogen werden, jedoch durch weitere innere Randbedingungen zunächst abgegrenzt werden. Dieses Vorgehen ermöglicht, eine zukünftige potentielle Einbeziehung der Sonderbereiche in die Modellierung vorzunehmen. Zunächst werden jedoch diese beiden Bereiche „inaktiv“ gesetzt und die Modellierung erfolgt nur bis zu den oben erwähnten, gleichfalls noch festzulegenden inneren Randbedingungen.

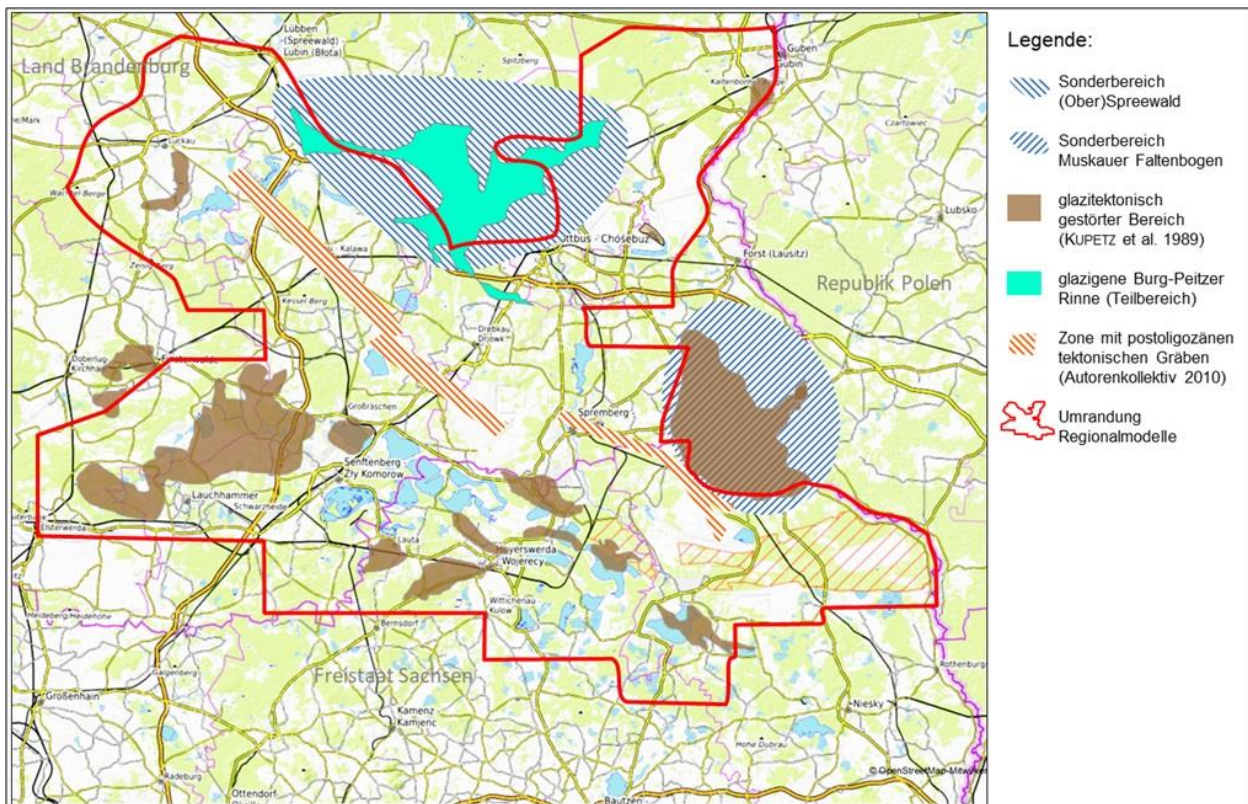


Abbildung B1-5: Lage von Sonderbereichen und sonstiger geologischer Strukturen, die im GRM Lausitz zu berücksichtigen sind

Innerhalb des bergbaubeeinflussten Niederlausitzer Braunkohlenrevieres existieren weiterhin einige glazitektonisch gestörte Bereiche (Abb. B1-5). Diese müssen modelltechnisch im hydrogeologischen Strukturmodell berücksichtigt werden. Detaillierte geologische Aussagen zu diesen Gebieten finden sich in KUPETZ et al. (1989) und KÜHNER (2017).

Diese Bereiche müssen zuerst geologisch-hydrogeologisch geprüft werden, inwiefern hydraulische Beziehungen der gestörten Bereiche zu den liegenden tertiären Grundwasserleitern bestehen. Im Ergebnis muss entschieden werden, ob diese Bereiche als „Störbereiche“ geologisch ausgehalten und hydrogeologisch entsprechend parametrisiert werden (vgl. Kap. C3.2).

Weiterhin befinden sich im potentiellen Modellgebiet postoligozäne tektonische Gräben, in denen die Grundwasserleiter/-stauer teilweise mit hohen Beträgen gegenüber der normalen Höhe versetzt sind. In solchen Fällen ist ebenfalls zu prüfen, in welchem Maß dies im Strukturmodell mit einer entsprechenden Parametrisierung erfasst werden kann (vgl. Kap. C3).

B1.1.3 MÖGLICHE ABGRENZUNG VON TEILMODELLEN

Auf Grund der komplexen geo- und hydrogeologischen Verhältnisse und der unterschiedlichen Datendichte (vgl. auch Kap. B4) im Bereich des geplanten GRM Lausitz war auch zu prüfen, ob eine Teilung des Gesamtgebietes in zwei oder mehrere Teilmodelle zielführend sei. Nach intensiver Diskussion und Bewertung der Datenlage ergibt sich, dass eine Zerlegung in zwei Teilmodelle nur durch Trennung im Bereich des Baruther Urstromtals denkbar ist (vgl. Abb. B1-6). Dies würde zu einem „kleinen Teilmodell“ im Nordosten (Bereich Jänschwalde/ Cottbus) und einem großen „Hauptteilmodell“ aller anderen Bereiche führen.

Insgesamt ist die Teilung in zwei Teilmodelle allerdings nicht zielführend, da dann wiederum die Frage der Interaktion beider Modelle zueinander steht (Abgleich Randbedingungen etc.). Es ginge also wieder um Fragen zu Aussagen für den Grenzbereich beider Modelle. Einziger Vorteil der sich abzeichnen würde, dass das kleinere „Nordost-Teilmodell“ eventuell eher aus den bestehenden Regionalmodellen ableitbar wäre.

Generell steht eine Modellteilung der Grundidee entgegen, für den Gesamtbetrachtungsbereich Aussagen zum Stofftransport zu erhalten. Es müsste großer Aufwand in den Abgleich der Schnittstellen gelegt werden. Eine solche Modellteilung eines GRM Lausitz wird generell nicht als zielführend erachtet.

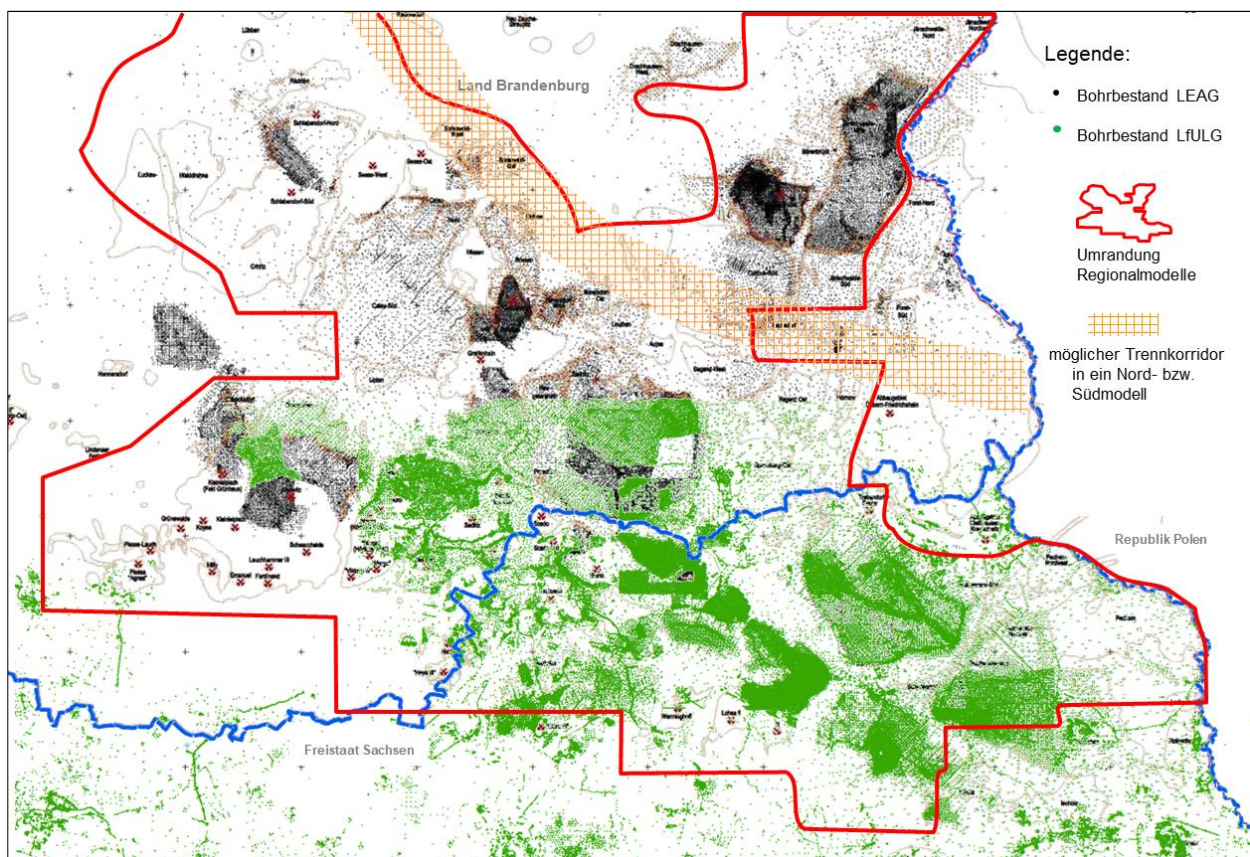


Abbildung B1-6: Verteilung der Datenbestände zu vorhandenen Bohrungen bei LfULG und LEAG, mit Lage eines möglichen Trennkorridders für das GRML

B1.2 VERTIKALE BERANDUNG GRM LAUSITZ

Mit dem im Projektteam vorhandenen Vorwissen war klar, dass die tertiären Grundwasserleiter bis zum GWL 6 auf Grund der großen Anzahl an Erkundungsbohrungen, die in den verschiedenen Erkundungsetappen bis in dieses Niveau abgeteuft wurden, gut aushaltbar sind.

Die erste Sichtweise, an der Liegendgrenze des GWL 6 das GRM Lausitz vertikal zu beranden, wird noch gestützt durch die Annahme, dass in den darunter liegenden Tertiäreinheiten nahezu keine Untersuchungen zu den hydraulischen Parametern dieser Einheiten erfolgten. Die hier im Projekt durchgeführten Recherchen bestätigten genau diese Sichtweise und diese beiden Aussagen. Für die GWL 7 bis 9 liegen wesentlich weniger Aufschlüsse vor, aber vor allem nahezu keine hydrogeologischen Parametrisierungen.

Die Recherchen ergaben jedoch auch, dass zum Teil diese tieferen tertiären Grundwasserleiter in Regionalmodellen mit enthalten sind (z. B. LEAG – Raum Nochten/ Reichwalde), da sie zum Verständnis einiger hydraulischer Phänomene wichtig sind. Bewusst bleiben muss dabei aber auch, selbst wenn diese GWL 7 bis 9 deutlich unter dem Bereich des abgebauten 2. Miozänen Flözkomplexes liegen, dass sie gerade auch über tief eingeschnittene quartäre Rinnen für die hydraulische Kommunikation relevant sein können.

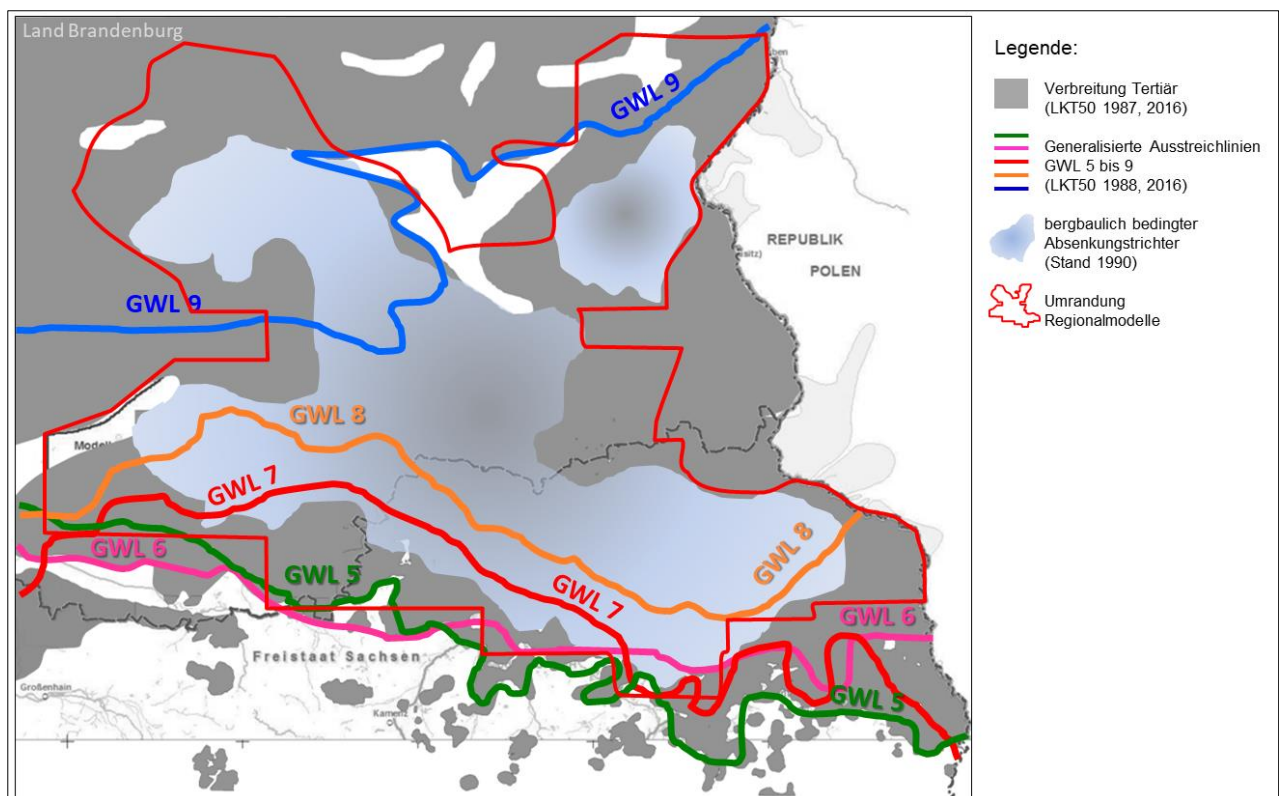


Abbildung B1-7: Generalisierte Verbreitungslinien (Ausstreichen nach Süden) der tertiären GWL 5 bis 9 (nach LKT50 1987, 2016)

Zur Kontrolle dieser These wurden aus den im Bearbeitungsteam vorhandenen Informationen Verbreitungslinien für diese GWL abgeleitet, um deren flächenhafte Bedeutung für das Niederlausitzer Revier einschätzen zu können. Abb. B1-7 weist diese GWL-Verbreitungslinien aus: Für GWL 5 und 6 wird deutlich, dass diese de facto mehr oder weniger die südliche Tertiärverbreitung mit markieren. Jedoch auch die GWL 7 und 8 sind weit nach Süden

verbreitet. Lediglich der GWL 9 ist nur im nördlichen Teil des Untersuchungsgebiets von Relevanz.

In Anbetracht des Widerstreits zwischen „guter Datenlage“ bis zur Liegendgrenze des GWL 6, aber eventueller hydraulischer Bedeutung der darunter liegenden tertiären GWL 7 bis 9 (zumindest lokal) muss folgendes Vorgehen zur vertikalen Berandung favorisiert werden:

- Es wird die, wenn auch mit weniger Bohrungen, klar dokumentierte Prätertiäroberkante als Modellunterkante gewählt.
- Somit ist der Bereich der liegenden GWL 7 bis 9 im Modell enthalten.
- Die Berücksichtigung dieser Einheiten erfolgt jedoch so, dass sie schematisiert einbezogen werden: Entweder mit einer oder zwei Modellschichten, um in Modell-Teilbereichen hydraulische Phänomene erklären zu können. Aufgrund der zu erwartenden sehr geringen Datendichte zur hydraulischen Parametrisierung ist diese schematische Einbeziehung gerechtfertigt.
- Diese tiefer liegenden Schichten der GWL 7 bis 9 dienen somit als „numerisch-hydraulisches Puffersystem, das im Modell zumeist nur hydraulisch wirksam wird, wenn es über eine Störung bzw. ein Rinnensystem zur Kopplung mit darüber liegenden Grundwasserleitern kommt“.

Als untere vertikale Berandung des GRM Lausitz soll also die Prätertiärfläche dienen. Der stratigraphische Bereich mit sehr guter Kenntnis zu den geologischen Lagerungsverhältnissen und den hydrogeologisch-geochemischen Eigenschaften der Schichten, d. h. vom Quartär bis zum tertiären GWL 6, ist komplett zu modellieren.

B1.3 INNERE RANDBEDINGUNGEN GRM LAUSITZ

Innere Randbedingungen sind solche, die unabhängig vom äußeren Modellrand die Grundwasserdynamik oder -beschaffenheit durch Potentiale (Wasserstand, Konzentration) oder Ströme (Durchfluss/Massenstrom) im Innenbereich des Modells beeinflussen.

Wesentliche innere Randbedingungen sind:

- Vorfluter,
- Standgewässer, speziell wenn sie wasserstandsgesteuert sind (Überläufe),
- Wasserentnahmen/-einleitungen,
- Versickerungen an der Geländeoberkante,
- Stoffquellen oder -senken,
- Technologische Randbedingungen des Bergbaus (Brunnen, Drainagen, Dichtwände, Sanierungselemente usw.).

Innere Randbedingungen müssen räumlich und zeitlich hinreichend genau bekannt sein und mathematisch definiert werden können.

Dies bedingt speziell bei den Gewässern sowohl eine markscheiderische Einmessung, eine geotechnische Anschlussvermessung zur Ermittlung der Kopplung zwischen Grund- und Oberflächenwasser sowie aus dem Monitoring (Wasserstand, Wassermenge, Wasserqualität) ableitbare zeitabhängige Randwerte.

In Bergbaugebieten sind in der Regel auch Veränderungen der Randbedingungen im Zuge des Bergbaufortschritts (Feld- und Randriegel, Dichtwände u. a. m.) und besonders wäh-

rend und nach der Sanierung zu erwarten. Hierfür sind epignostisch (Kalibrierungsphase) hinreichend genaue Unterlagen auszuwerten, modelltechnisch umzusetzen sowie speziell für die Prognose belastbare Annahmen zwischen den fachlich Beteiligten abzustimmen und durch den Modellierer mathematisch zu definieren.

Die bestehenden Regionalmodelle in der Lausitz (vgl. Kap. B2.3) werden langjährig aktiv betrieben und durch Fortschreibung ständig gemäß den Anforderungen des jeweiligen Betreibers aktuell gehalten. Es ist davon auszugehen, dass die inneren Randbedingungen, vor allem die bergbautechnologischen, den aktuellen Stand repräsentieren. Die Randbedingungen sind gemäß dem derzeit verwendeten mathematischen Modell codiert. Generell ist die spätere Überführung in ein GRM Lausitz zu prüfen und zielführend. Insofern wäre auch zu bewerten, inwieweit deshalb die Verwendung der gleichen GW-Modellierungssoftware einen Vorteil (Aufwandsersparnis) darstellt. Bei Verwendung eines anderen Simulators muss entweder auf die originären Basisdaten zurückgegriffen werden oder eine programmtechnische Überführung durch eine noch zu entwickelnde Softwarelösung umgesetzt werden.

B1.4 DISKRETISIERUNG GRM LAUSITZ

(1) Horizontale Modelldiskretisierung

Die horizontale Diskretisierung der Grundraaster der in der Lausitz eingesetzten Grundwasser-Strömungsmodelle reicht von 1.000 x 1.000 m (LMBV Modelle LUPLOH und NORD) bis 100 x 100 m (LEAG Modelle Jänschwalde-Nord und Welzow). In den Aussagegebieten der jeweiligen Modelle wird die Diskretisierung feiner und liegt unterhalb 250 x 250 m.

Vorrangig werden die Lausitzer Regionalmodelle, wenn sie qualifiziert umgebaut worden sind, horizontal mit Gitterweiten von 100 m bis 125 m aufgelöst. In Detailgebieten werden noch feinere Gitter, die bei ca. 50 m oder niedriger liegen, benutzt. EULITZ & KALTOFEN (2015) geben für die Berechnung der Interaktion zwischen Grund- und Oberflächenwasser in den Regionalmodellen an, dass eine horizontale Modellauflösung von $\leq 125 \times 125$ m mindestens vorliegen sollte.

Für das GRM Lausitz wird derzeit eine horizontale Diskretisierung von ca. 200 x 200 m empfohlen. Die Festlegung der horizontalen Diskretisierung wird mit dem Ziel der Stofftransportmodellierung auch von der Verfügbarkeit bohrlochgeologischer, physikalischer und geochemischer Primärdaten wie k_f -Werten, Kolmationskoeffizienten, Speicherkoeffizienten sowie Pyrit-, TOC- und Calcit-Konzentrationen abhängen.

(2) Vertikale Modelldiskretisierung

Die Regionalmodelle haben aktuell teilweise nur 2 Modellgrundwasserleiter (z. B. Modelle LUPLOH und NORD). Andere Modelle (Bereiche Lauchhammer, Hoyerswerda, Cottbus-Nord oder Jänschwalde-Nord) werden als 3D-Modelle mit 8 bis 20 Modellschichten betrieben. Nach erster Sichtung der geologischen Daten wird von einer vertikalen Diskretisierung des GRM Lausitz von ca. 20 Modellschichten (vgl. Kap. B2.4).

(3) Einschätzung der numerischen Umsetzbarkeit

Wird in dem Modellbereich, der je nach Festlegung der äußeren Randbedingungen einen Modellraum von ca. 110 x 100 km abbildet, ein horizontales Raster von 200 x 200 m bis 500 x 500 m und eine vertikale Auflösung von 18 bis 25 Modellschichten angenommen, so hat das GW-Strömungsmodell zwischen 1,12 Mio. und ca. 7,0 Mio. Zellen (Tab. B1-1).

Bei der Testmodellierung hat sich die gewählte Diskretisierung von 200 x 200 m unter geologischen und modellrechnerischen Aspekten bewährt. Eine endgültige Entscheidung wird vom Auftraggeber abhängen und erst nach vollständiger Erarbeitung aller Primärdaten und der Formulierung des Modellziels möglich sein. Generell kann die Anzahl der ausgewiesenen Zellen mit allen verfügbaren Softwarelösungen bei relevanten Computereigenschaften bearbeitet werden.

Tabelle B1-1: Abschätzung der Zellen für den Modellraum GRM Lausitz

Modellgitter	Zellen in X-Richtung	Zellen in Y-Richtung	Anzahl Modellschichten	Anzahl Zellen Modellraum	2/3 aktive Zellen
200 x 200 m	552	504	25	6.955.200	4.636.800
250 x 250 m	442	403	18	3.206.268	2.137.512
500 x 500 m	221	202	25	1.116.050	744.033

B2 GEOLOGISCH-HYDROGEOLOGISCHES 3D-STRUKTURMODELL: VORGEHEN BEIM AUFBAU DES NUMERISCHEN MODELLS

B2.1 GRUNDLEGENDE AUSSAGEN ZUR HYDROGEOLOGISCHEN GLIEDERUNG

Für den Aufbau eines, das gesamte Niederlausitzer Braunkohlenrevier überstreichendes GRM, gelten folgende Prämissen hinsichtlich der Anforderungen an das hydrogeologische Strukturmodell:

- Alle im Strukturmodell genutzten geologischen Schichten (Grundwasserleiter, Grundwassergeringleiter und -stauer) müssen innerhalb ihres Verbreitungsgebietes über das gesamte Modellgebiet stratigraphisch korrelierbar sein. Für die schon vorhandenen Regionalmodelle ist dies aufgrund der kleineren Gültigkeitsflächen nicht in dieser Konsequenz erforderlich.
- Die hydrogeologischen Gliederungen der schon vorhandenen, höher aufgelösten Regionalmodelle sollte sich so gut als möglich in den Einheiten des GRM Lausitz wiederfinden.
- Das Strukturmodell muss die vielfältigen hydraulischen Bedingungen im Modellgebiet widerspiegeln, insbesondere die Verbindungen von quartären Grundwasserleitern in den glazigenen Rinnenstrukturen mit den tertiären, stratiform weitverbreiteten Grundwasserleitern (Abb. B2-1). Ebenfalls gilt es, die überregionale „Aufspaltung“ von Grundwasserleitern infolge der Flözgliederung des 2. Miozänen Flözkomplexes (2. MFK) in bis zu drei Flözbänke/Einzelflöze sowie die faziellen Übergänge von stratigraphisch gleichen Schichten von grundwasserleitenden zu -stauenden Eigenschaften abzubilden.
- Aus der Genese der quartären und tertiären Grundwasserleiter (terrestrisch bis paralinisch und flachmarin) ergeben sich deutliche Unterschiede hydrogeologischer Eigenschaften. Dies gilt weiterhin insbesondere auch hinsichtlich der Geochemie der Substrate bzw. der Beschaffenheit resultierender Wässer (vgl. Kap. B2.4).

B2.2 ANMERKUNGEN ZU VERWENDBAREN DATENQUELLEN

Zum Aufbau des hydrogeologisch-stratigraphischen 3D Strukturmodells des GRM Lausitz stehen mehrere Datenbestände hinsichtlich geologischer, hydrogeologischer und geochemischer Informationen zur Verfügung:

- Daten für den sächsischen Modellbereich aus dem LfULG.

- Daten für den brandenburgischen Modellbereich aus dem LBGR, des LfU
- Daten aus dem Fundus der beiden Bergbauunternehmen LMBV (Sanierungsbergbau) und LEAG (Aktivbergbau).

Die geologischen und hydrogeologisch-geochemischen notwendigen Daten zum Aufbau des GRML-Strukturmodells werden detailliert in Kap. B4 besprochen. Es wird diesbezüglich dort auch eingeschätzt, ob die Datenbasis für den Aufbau des Strukturmodells jeweils ausreichend ist und welcher Arbeitsaufwand zum Erreichen konsistenter Datensätze notwendig sein wird.

B2.3 BEWERTUNG DER HYDROGEOLOGISCHEN UNTERGLIEDERUNG BESTEHENDER REGIONALMODELLE

Derzeit existieren im Lausitzer Braunkohlenrevier 11 Regionalmodelle, unter Verantwortung von LMBV und LEAG. Diese überlappen sich teilweise deutlich (vgl. Abb. B1-1) und weisen eine unterschiedliche vertikale Differenzierung auf. Die differenzierte Charakterisierung der in den jeweiligen Regionalmodellen verwendeten hydrogeologisch-stratigraphischen Gliederung geht aus Tab. B2-1 hervor.

Tabelle B2-1: Strukturmodelle/Schichteinheiten für die vorhandenen Regionalmodelle (Darstellung auf der Basis von Aussagen in EULITZ & KALTOFEN 2015)

Quelle (Betreiber)		LMBV	LEAG	LMBV	LMBV	LEAG	LEAG	LMBV	LMBV	LMBV	LMBV	LEAG
		SAM NORD	Jänschwalde-Nord	HGM Lauchhammer	SAM GREIFEN	SAM WELZOW	Cottbus-Nord	SAM Klinger See	HGM Erweiterte Restlochkette	SAM Hoyerswerda	SAM LUPLOH	Nochten-Reichwalde
Gebiet									nur Meuro I			
Schicht-einheit	Stratigraphie	Strukturmodell	Strukturmodell	Strukturmodell	Strukturmodell	Strukturmodell	Strukturmodell	Strukturmodell	Strukturmodell	Strukturmodell	Strukturmodell	Strukturmodell
1	Auffüllung / (Kippe)	1	1	1	1			1	1		1	
2	GWL 100		3, 5, 7, 9 + 11	2			1 (Teil a und b)	1	2	1 bis 6		1
3	quartäre Tone/Schluffe		2, 4, 6, 8 + 10	3					3	7		
4	GWL 200			4		1	2		4			1
5	Flaschenton / Hangendschluff											Stauer
6	1. Lausitzer Flöz (MF1)			5		2			5			2
7	Liegendschluff											
8	GWL 300		12	6	1	3 + 4			6			2
9	Oberbegleiter 2.LF (Schluff / Kohle)		13	7					7			Stauer
10	GWL 400a	1	14	8	1	5	3	1	8		1	3
11	GWL 400u								9			
12	Hangendschluff											Stauer
13	2. Lausitzer Flöz (MF2)			9			4		10	8		4
14	Liegendschluff		15									Stauer
15	GWL 450	2		10	2		6		5			
16	Flöz 2 Bank 3			11					6			
17	GWL 500	2	16	12	2	7	7	2	13	9	2	5
18	Unterbegleiter 2.LF		17	13					14	10		Stauer
19	GWL 600a		18						15			
20	GWL 600m	2		14	2	8		3	16	11	2	6
21	GWL 600u		19						17			
22	Liegendes									12		Stauer
23	GWL 700 / 800		20									7

Darunter sind hydrogeologisch wenig differenzierte Zweischicht- bzw. Dreischichtmodelle (Tab. B2-1). Stratigraphisch deutlich detaillierter aufgelöst sind die Regionalmodelle im Bereich Jänschwalde, Cottbus-Nord, Welzow und Nochten-Reichwalde der LEAG sowie die LMBV-Modelle von Lauchhammer, Erweiterte Restlochkette und Hoyerswerda (vgl. umseitige Tab. B2-2).

Nach Angaben der LMBV werden derzeit sämtliche Modelle, speziell aber die stratigraphisch geringer aufgelösten Zwei- bzw. Dreischichtmodelle (SAM Nord, SAM Greifen, SAM LUPLOH etc.), hydrogeologisch verfeinert und qualifiziert.

Tabelle B2-2: Strukturmodelle/Schichteinheiten für die hoch aufgelösten Regionalmodelle (Darstellung auf der Basis von Aussagen in EULITZ & KALTOFEN 2015)

Quelle (Betreiber)		LEAG	LMBV	LEAG	LEAG	LMBV	LMBV	LEAG		
		Jänschwalde-Nord	HGM Lauchhammer	SAM WELZOW	Cottbus-Nord	HGM Erweiterte Restlochketten	SAM Hoyerswerda	Nochten-Reichwalde		
Gebiet						nur Meuro I				
Schicht-einheit	Stratigraphie	Strukturmodell	Strukturmodell	Strukturmodell	Strukturmodell	Strukturmodell	Strukturmodell	Strukturmodell		
1	Auffüllung / (Kippe)	1	1			1				
2	GWL 100	3, 5, 7, 9 + 11	2		1 (Teil a und b)	2	1 bis 6	1		
3	quartäre Tone/Schluffe	2, 4, 6, 8 + 10	3			3	7			
4	GWL 200		4	1	2	4		1		
5	Flaschenton / Hangendschluff							Stauer		
6	1. Lausitzer Flöz (MF1)		5	2		5		2		
7	Liegendschluff									
8	GWL 300	12	6	3 + 4		6		2		
9	Oberbegleiter 2.LF (Schluff / Kohle)	13	7			7		Stauer		
10	GWL 400o	14	8	5	3	8		3		
11	GWL 400u					9				
12	Hangendschluff							Stauer		
13	2. Lausitzer Flöz (MF2)	15	9	6	4	10	8	4		
14	Liegendschluff									Stauer
15	GWL 450		10		5			11		
16	Flöz 2 Bank 3		11		6			12		
17	GWL 500		16		12			7	7	13
18	Unterbegleiter 2.LF	17	13			14	10	Stauer		
19	GWL 600o	18				15				
20	GWL 600m	19	14	8		16	11	6		
21	GWL 600u					17				
22	Liegendes									12
23	GWL 700 / 800	20						7		

In den Tabellen B2-1 und B2-2 sind die in den Regionalmodellen abgebildeten und modellierten stratigraphischen Schichteinheiten zusammengestellt. Aus den starken Unterschieden hinsichtlich der Berücksichtigung der geologisch stratigraphischen Schichteinheiten in den jeweiligen Regionalmodellen ist klar ersichtlich, dass es nicht möglich ist:

- aus den Regionalmodellen ein revierweites Großraummodell zu erstellen und
- umgekehrt alle Regionalmodelle als Lupen im Großraummodell zu integrieren.

Es steht außer Frage, dass die Regionalmodelle - besonders wenn sie zukünftig inhaltlich qualifiziert sind - auch zukünftig für spezifische betriebliche Fragestellungen der Firmen weiter relevant sind.

B2.4 SCHLUSSFOLGERUNGEN ZUR GLIEDERUNG FÜR DEN AUFBAU DES GRM LAUSITZ

Das hydrogeologische Strukturmodell für das GRM Lausitz muss alle für das gesamte Modellgebiet relevanten tertiären und quartären Grundwasserleiter erfassen sowie den in Kap. B2.1 dargestellten Prämissen genügen. Dazu gibt Abb. B2-1 einen zusammenfassenden Überblick.

Die tertiären Grundwasserleiter (vgl. Abb. B2-1) sind i. d. R. mehr oder weniger großflächig verbreitet. Die Verbreitungsflächen der einzelnen Horizonte sind aus der Braunkohlenerkundung und den daraus abgeleiteten überregionalen Kartenwerken (Lithofazieskarten Tertiär 1:50.000: GEISSLER et al. 1988, ESCHER et al. 2016.) für das gesamte Lausitzer Braunkohlerevier bekannt.

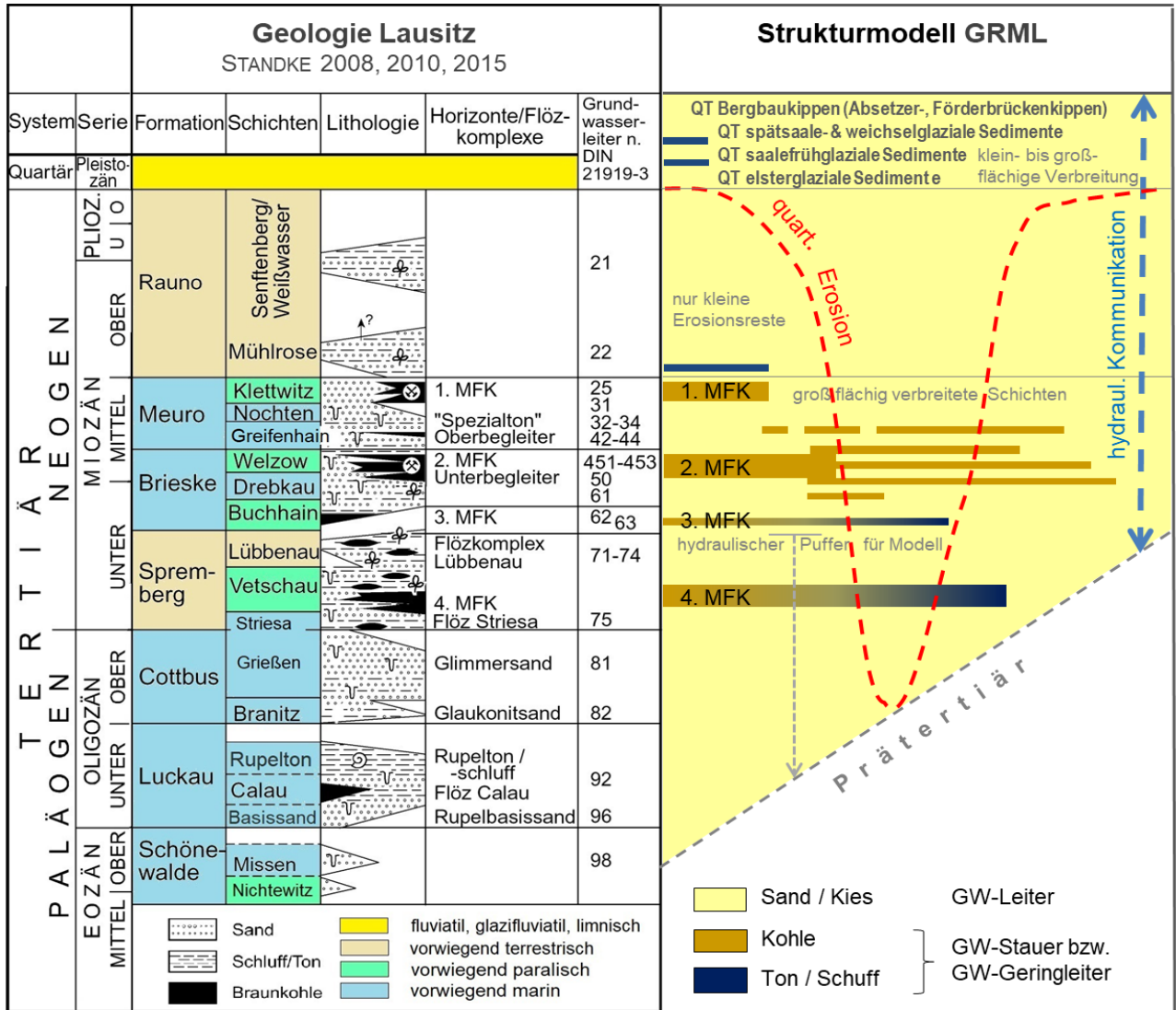


Abbildung B2-1: Vorkommen und Lagerungsverhältnisse der Schichten im Niederlausitzer Braunkohlenrevier auf brandenburgischem und sächsischem Territorium (links) und die für das GRM Lausitz wesentlichen GW-Leiter/-Stauer sowie zu berücksichtigende großräumige Lagerungsverhältnisse (rechts)

Eine detailliertere Aufgliederung in GW-Leiter/-Stauer ist für die revierweite Modellierung insbesondere im Bereich des aufgespaltenen 2. MFK (Zwischenmittel sowie Einzelflöze/Flözbänke) zu sehen (Abb. B2-1). Diese Situation, wie beispielsweise die Abspaltung des MFK 2-Unterbegleiters und Einschub des GWL 5 in den Flözkörper, wurde auch bei der Testmodellierung im Raum Bärwalde (Kap. C3.1) geprüft.

Da als vertikale Berandung die Prätertiäroberfläche genutzt werden sollte und die Schichtenfolge speziell bis zum GWL 6 geologisch und hydrogeologisch sehr gut untersucht ist, bildet das Schichtpaket der Grundwasserleiter 7 bis 9 einen hydraulischen Puffer bis zur vertikalen Berandung (vgl. Kap. B1.2).

Hingewiesen werden muss an dieser Stelle auch auf teils extreme, grabenartige Schichtversätze der tertiären Schichtenfolge, wie beispielsweise in den LEAG-Kohlenfeldern Welzow und Nochten (Abb. B1-5), die bei der Strömungs- und Transportmodellierung entsprechend zu beachten sind (vgl. Kap. B1.1.2).

Die hydrogeologische Gliederung der quartären Schichten sollte zumindest folgende Aspekte berücksichtigen (Einheiten umfassen):

- Eine nahezu über das gesamte Lausitzer Braunkohlenrevier verfolgbare Gliederung der quartären Schichtenfolge folgt der Untergliederung in elsterglaziale Sedimente (vorwiegend Rinnenfüllungen), saalefrühglaziale Ablagerungen (sog. Tranitzer Fluvialit) und in die spätsaale- und weichselglazialen Sedimente (freundl. Hinweis R. Kühner, LEAG). Über die regional differenzierte Abgrenzung dieser Schichtpakete durch grundwasserstauende Horizonte muss vor dem eigentlichen Aufbau des Großraummodells durch geologische Detailbetrachtungen entschieden werden. Des Weiteren ist zu diesem Zeitpunkt auch eine ggf. weitere Aufgliederung des spät- und weichselkaltzeitlichen Schichtpaketes festzulegen.
- Eine hydrogeologisch separate Behandlung erfordern die glazigen/glazitektonisch beanspruchten Bereiche innerhalb des Modellgebietes („Sondergebiete“), wie z. B. die Stauendmoräne von Zeissholz (vgl. Abb. B1-5). Dort ist zu prüfen, ob hydraulische Verbindungen zum unterlagernden Tertiär vorhanden sind. Ist das nicht der Fall, sind sie als Störkörper zu parametrisieren (vgl. Kap. C3.2).
- Die glazigenen Rinnen (vgl. Abb. B1-5) sind zunächst auszuhalten. Ihre genaue Abbildung erfolgt dann über die horizontal und vertikal aufgelöste Parametrisierung. Für Bereiche mit wenigen geologischen und hydrogeologischen Informationen muss diese Parametrisierung nach der geologischen Genesevorstellung erfolgen. Diesbezüglich sind eisrandparallele (\pm W-O-streichende) Rinnen i. d. R. durch bindige Zwischenschichten wenigstens teilweise plombiert. Die mehr oder weniger N-S-streichenden Rinnen, stellen ehemals unter dem Gletschereis befindliche Abflussbahnen dar und weisen deshalb i. d. R. relativ gute Wasserwegsamkeiten auf. In jedem Fall ist dies, sofern genauere Informationen vorliegen, anhand von hydrogeologischen Daten für jede Rinnenstruktur im Einzelnen zu präzisieren.
- Die Kippenkörper sind natürlich separat auszuhalten und mit einer gesonderten Abbildungsidee in das GRM einzubeziehen. Für die Förderbrückentagebauten wird zumindest eine vertikale Untergliederung nach Abraumförderbrücken- (AFB) und Absetzerkippen (AS) berücksichtigt. Die eigentliche Abbildung der Kippenkörper erfolgt durch die Parametrisierung. Da generell die relevanten (überbaggerten) Schichten (Layer) des gewachsenen Gebirges im „Modell-Kippenkörper“ weiterzuführen sind, besteht bei vorhandenem Datenpool die Möglichkeit einer detaillierten Berücksichtigung von Teilstrukturen der jeweiligen Kippenkörpern (z. B. Verwitterungszonen in AFB-/ AS-Kippe).

Insgesamt ergeben sich konzeptionell für das GRM Lausitz, nach derzeitigem Stand, \pm 20 Modellschichten (vgl. Tab. B2-3). In dieser Untergliederung enthalten sind neben den einzelnen lithologischen Schichtpaketen (1 bis 18) auch einige, aus stratigraphisch unterschiedlichen Bereichen zusammengesetzte Körper - Kippenkörper, quartäre Rinnen, tertiäre Störkörper = glazigen gestörte Lagerungsverhältnisse und die stratigraphisch ältesten, bergbaulich nicht beeinflussten Tertiäreinheiten - die im GRM zusätzlich differenziert parametrisiert werden können. Für gewisse Bereiche sind, wenn nötig, die quartären Schichten weiter (z. B. in rollig und bindig) zu untergliedern.

Tabelle B2-3: Vorgeschlagene quartäre und tertiäre Schichtgliederung für das GRM Lausitz

Stratigraphische Gliederung Lausitz (Stand 2019)				Mögliche Schichtgliederung für das GRM Lausitz							
System	Serie	Einheit bzw. Formation	Untereinheit bzw. Subformation	Bezeichnung	weitere Teilung bzw. Zusammenfassung	Inhalt	Eigenschaft				
Quartär	Holozän			Kippenkörper		Material aus Quartär und Tertiär	weiter differenziert				
	Ober-Pleistozän	Weichsel-Kaltzeit		1		formell in: 1a (rollig) & 1b (bindig)	Ablagerungen aus Holozän sowie Weichsel- und Saale-Kaltzeit	GWL/Stauer bzw. weiter differenziert			
		Eem-Warmzeit									
	Mittel-Pleistozän	Saale-Komplex			2		sog. Tranitz-Fluviatil	GWL			
			Holstein-Komplex								
			Elster-Komplex								
Cromer-Komplex											
Unter-Pleistozän			3	über Rinne Rinne	formell in: 3a (rollig) & 3b (bindig)	Ablagerungen aus Saale- und Elster-Kaltzeit (lokal auch "Prä-Elster-Schotter" der alten Elbeläufe)	GWL/Stauer bzw. weiter differenziert				
Tertiär	Pliozän	Rauno-Formation	Weißwasser-Subfm.	4	Störkörper	GWL 2 (22) & Flaschenton	GWL/Stauer				
	Ober-Miozän		Mühlrose-Subfm.								
	Mittel-Miozän		Meuro-Formation	Klettwitz-Subfm.	5		1. MFK & GWL 2 (253/254)	Stauer/GWL			
				Nochten-Subfm.	6		GWL 3 (3231)	GWL			
				Greifenhain-Subfm.	7		OB 2. MFK	Stauer			
					8		GWL 4 (4341)	GWL			
				Brieske-Formation	Welzow-Subfm.	9		2. MFK	Stauer		
					Drebkau-Subfm.	10		GWL 5 (50)	GWL		
			11				UB 2. MFK	Stauer			
			12			GWL 6 (611/612)	GWL				
			Buchhain-Subfm.		13		Schluff-Leithorizont	Stauer			
					14		13a (bindig)	GWL 6 (6362)	GWL		
			Spremberg-Formation	Lübbenau-Subfm.	15		3. MFK	Stauer			
					16		16a (GWL 7)	GWL 7 (73)	GWL		
					17		Mittl. Schluffh./Flöz Lübbenau	Stauer			
					18		GWL 7 (74)	GWL			
					Vetschau-Subfm.	Puffer				4. MFK, GWL 8, Flöz Calau & GWL 9	weiter differenziert
					Striesa-Subfm.						
			Ober-Oligozän	Cottbus-Formation	Grießen-Subfm.	Puffer					
			Unter-Oligozän	Böhlen-Formation	Branitz-Subfm.						
Zinnitz-Subfm.											
Calau-Subfm.											
Ober-Eozän	Borna-Formation	Stoßdorf-Subfm.									
Prätertiär											

Aus hydrochemischer bzw. geochemischer Sicht sind im Quartär die kalkhaltigen Moränengebiete und im Tertiär die besonders schwefelhaltigen flachmarinen Sedimente, also insbesondere die von der montanen Grundwasserabsenkung betroffenen oligozänen und mittel-miozänen Grundwasserleiter 3 bis 6 zu nennen und im Strukturmodell zu beachten. Die höheren Aciditätspotentiale der marinen GWL 8 und 9 sind demgegenüber für die Modellierung uninteressant, da diese Grundwasserleiter nie entwässert und damit nie belüftet wurden.

Die Fläche des GRM Lausitz (Strömungsmodellteil) wird sich an der Umrandung der vorhandenen Regionalmodelle zuzüglich der Sonderbereiche Muskauer Faltenbogen und (Ober)Spreewald, aber auch in Abhängigkeit von den Festlegungen der hydrogeologischen Randbedingungen orientieren.

Die abschließende Aufstellung eines detaillierten geologischen Modells für ein GRM Lausitz, unter Berücksichtigung der geologisch-hydrogeologischen Lagerungsverhältnisse und der rechentechnischen Möglichkeiten (darstellbare GW-Leiter/-Stauer, Modellfläche und Diskretisierung), muss einer der ersten Bearbeitungsschritte beim GRML-Aufbau sein. Dazu ist bzgl. der tertiären Schichten insbesondere das im LfULG und bei LEAG datenseitig und personell vorhandene Fachwissen einzubeziehen. Hinsichtlich der quartären Schichtenfolge sehen die Gutachter ein Mitwirken von Herrn Ralf Kühner (LEAG) als ausgewiesenen Experten für das Lausitzer Quartär als unerlässlich an.

B3 GEKOPPELTE MENGEN- UND GÜTEMODELLIERUNG FÜR DAS BERGBAUBEEINFLUSSTE UNTERSUCHUNGSGEBIET

B3.1 GRUNDLEGENDE ZIELSETZUNG EINER GROßBRAUMMODELLIERUNG

Ein zukünftiges Großraummodell Lausitz verfolgt als wesentliche Hauptzielrichtung die langfristige Prognose der zeitlichen Entwicklung der Grundwasser- und Oberflächenwasserbeschaffenheiten im Modellgebiet. Diesbezüglich bedarf es, als wesentlicher Basis, einer detaillierten, auf den aktualisierten Daten/Parametern beruhenden Strömungsmodellierung im festgelegten Modellgebiet (vgl. Kap. B1.1).

Es ist nicht Ziel, die detaillierteren Regionalmodelle der Bergbaubetreibenden LMBV und LEAG zu ersetzen, da diese zumeist zur Beantwortung lokaler, technischer Fragen benutzt werden. Das Großraummodell ist so aufzubauen, dass es bestmöglich von den Erkenntnissen der aktualisierten, detaillierten Regionalmodelle profitiert. Im zukünftigen Zusammenspiel zwischen GRM Lausitz und Regionalmodellen ist auch der Vorteil zu sehen, dass das GRM Lausitz den verschiedenen, sich überlappenden Regionalmodellen abgestimmte, „äußere“ Randbedingungen liefern kann. Dies gilt gerade dort, wo die Regionalmodelle auf geschlossene äußere RB ($Q = 0$) zurückgreifen. Weiterhin ist das GRM Lausitz das einzige Tool, welches überregionale Aussagen für das gesamte Lausitzer Revier liefern kann.

Eine direkte Einbindung aller Regionalmodelle in das Großraummodell, im Sinne sogenannter Lupen, ist sowohl methodisch, als auch modelltechnisch nicht durchführbar. Dies vor allem, weil die modelltechnische Untergliederung der einzelnen Regionalmodelle stark variiert. Es ist jedoch zu empfehlen, zukünftig weiter zu prüfen, wie das Großraummodell geometrisch (horizontal und vertikal) so strukturiert werden kann, dass nach Aktualisierung bzw. stratigraphischer Verfeinerung der Regionalmodelle, eine Lupeneinbindung später potentiell möglich wäre.

Die Notwendigkeit, dass das Modellgebiet alle bergbaulich beeinflussten Gebiete enthält, wurde bereits in Kap. B1.1 eingehend erläutert. Die zukünftigen Modellgrenzen des GRM Lausitz sind typisch so zu wählen, dass die äußeren Modellränder vom Modellgeschehen innerhalb des Modells (Hydraulik und Transport) nicht beeinflusst werden. Die konkrete Festlegung dieser Modellgrenzen ist als einer der ersten Arbeitsschritte beim realen Aufbau des GRM Lausitz durchzuführen. Hierbei ist die Festlegung mit den konkreten Anforderungen des Auftraggebers zum Modellgebiet verknüpft. Dabei sind auch die Aussagen zur Vermeidung von RB 2. Art ($Q=0$) aus Kap. B1.1 zu beachten.

B3.2 STRÖMUNGSMODELLIERUNG GRUNDWASSER

Das gekoppelte Grundwasser-/Bodenwasserhaushaltsmodell (Wasserhaushaltsmodell) dient zum einen zur Klärung der Grundwasserströmungsverhältnisse im bergbaubeeinflussten Gebiet der Lausitz. Aufbauend auf diesem Strömungsmodell erfolgt dann die Stofftransportmodellierung für bergbautypische Wasserinhaltsstoffe. Dabei ergeben sich die Auswirkungen auf die Oberflächengewässer (sowohl hydraulisch als auch stofflich).

Dafür sind die Informationen über die hydraulische Interaktion zwischen den Grundwasserleitern und den Vorflutern, dem Boden und der zeitabhängigen Zu- bzw. Abflüsse im Untersuchungsgebiet nötig.

Der Modellaufbau sollte in den nachfolgend dargestellten Schritten erfolgen.

(1) Festlegung der Modellgrenzen

Zur Abgrenzung des Modellraums sind weitgehend unabhängige äußere Randbedingungen zu definieren. An den Modellrändern können über das Grund- und Oberflächenwasser Austauschprozesse mit den angrenzenden Gebieten erfolgen, gerade weil ober- und unterirdische Einzugsgebiete in Bergbaugebieten meist nicht identisch sind.

Die Wahl der Modellränder ist daher so zu definieren, dass eine Beeinflussung durch im Innern des Modells stattfindende Prozesse nahezu ausgeschlossen werden kann. Die Ränder werden im Allgemeinen so gewählt, dass sich einfache Randbedingungen formulieren lassen, die bereits bekannt sind oder messtechnisch ermittelt werden können. In der Regel eignen sich Fließ- oder Standgewässer, geologische Barrieren oder definierte Wasserstände (GW-Messstellen, Randstromlinien) dazu (vgl. Kap. B1.1 und B3.1).

Die Festlegung der Ränder des Grundwassermodells und damit die Größe des Modellraums müssen auf Basis der Grundwassergleichen des Haupthangendgrundwasserleiters zu einem geeigneten Zeitpunkt erarbeitet werden. Die konkrete Konzeption zur Berandung des Grundwassermodells für das GRM Lausitz wurde bereits in Kap. B1.1 erläutert.

(2) Aufbau des hydrogeologischen Strukturmodells

Basis für die numerische Berechnung der Grundwasserströmung ist die hydrogeologische Strukturmodellbildung, auf der Grundlage der Interpretation der geologischen Schichten innerhalb des betrachteten Modellgebietes. Die hydrogeologisch relevanten Einheiten werden nach Tiefe, Abfolge und Ausdehnung unterteilt und generalisiert in einem hydrogeologischen Strukturmodell, im 3D-Raum verwendet. Die horizontale Ausdehnung des Strukturmodells resultiert aus der erwähnten Berandung des Modellgebietes. Der vertikale Aufbau basiert dann auf dem gewählten hydrogeologisch-stratigraphischen Normalprofil.

(3) Definition der hydraulischen Randbedingungen

Die Festlegung der Randbedingungen erfolgt entsprechend den hydrologischen und hydrogeologischen Verhältnissen. Hierbei können beispielsweise Einzugsgebietsgrenzen, Verbreitungsgrenzen, Vorfluter etc. als natürliche Randbedingung herangezogen werden.

Grundsätzlich sollten die äußeren Randbedingungen soweit vom Aussagegebiet entfernt definiert werden, dass es zu keiner (maßgeblichen) Beeinflussung der Randbedingungen durch modellinnere Prozesse kommt. Andererseits wird durch Berücksichtigung relevanter innerer Randbedingungen eine entsprechende Modellgenauigkeit im Aussagegebiet sichergestellt.

(4) Räumliche und zeitliche Diskretisierung

Die Darstellung der zeitlich variablen Auswirkungen der sich verändernden bergbaulichen Beeinflussungen und der Interaktion zwischen Aquifer und Vorfluter im Untersuchungsgebiet bedingen ein instationäres Grundwassermodell. Es werden verschiedene Berechnungsphasen durchlaufen, welche durch unterschiedliche Zustände charakterisiert sind: Einschwingphase auf Grund unscharfer Anfangsbedingungen, Kalibrierungsphase, Verifizierungsphase und Prognose bis zum stationären Endzustand.

Für die numerische Berechnung ist es erforderlich, den zu untersuchenden Modellraum in einzelne Bilanzelemente zu zerlegen. Über das Modellgebiet wird dazu ein horizontal-ebenes Raster gelegt. Die horizontale Diskretisierung des Modells sollte ein Kompromiss aus Abbildegenauigkeit, Datenverfügbarkeit (Parametrisierung), numerischer Stabilität und Performanz der Simulation sein.

Die vertikale Modellstruktur orientiert sich an der lithofaziellen Gliederung des Gebietes. Die vertikalen Gliederungsebenen werden im Folgenden mit „Modellgrundwasserleiter“ (MGWL) bezeichnet, gleichgültig ob es sich um einen Grundwasserleiter im klassischen Sinn, einen hydrogeologisch zusammengefassten Grundwasserleiterkomplex oder einen sogenannten Grundwassergeringleiter oder -stauer handelt. Die hydraulischen Unterschiede der jeweiligen MGWL werden durch ihre Parametrisierung definiert. Die vertikale Kopplung zwischen den MGWL ergibt sich aufgrund der Bedingung, dass die Liegendhöhe eines MGWL gleich der Hangendhöhe eines (tiefer) folgenden MGWL ist.

(5) Aufbau des Parametermodells

Das Parametermodell beschreibt die geohydraulischen Eigenschaften der Bilanzelemente des geometrischen Modells und beruht auf den Gebietserfahrungen und labor- und/ oder feldtechnisch ermittelten geohydraulischen Eigenschaften des Untergrundes (wesentlich k_f -Werte, effektive Porositäten).

(6) Modellkalibrierung

Der Prozess der Modellkalibrierung dient der bestmöglichen Anpassung des Modells im Epignosezeitraum an die gemessene Grundwasserdynamik, durch Verifizierung der hydrogeologischen Parameter und deren Verteilung. Dabei sollen bestimmte Systemeigenschaften und Prozesse des realen Systems mit dem Grundwassermodell hinreichend genau abgebildet werden. Dies bedeutet, dass die simulierten Ergebnisse mit den gemessenen Werten von Wasserstand, Wassermenge und Wasserbeschaffenheit in eine bestmögliche Übereinstimmung in Raum und Zeit gebracht werden.

Die Kalibrierung erfolgt durch schrittweise systematische Änderung der Eingangsparameter in fachtechnisch sinnvollen und zulässigen Grenzen sowie bei Bedarf auch der Verifizierung der vorab ermittelten Rand- und Anfangsbedingung. Die Grundwasserneubildung wird dabei vorzugsweise außen vor gelassen, da diese auf Basis eines anerkannten Prozessmodells (Bodenwasserhaushaltsmodell) ermittelt wird (vgl. Kap. B3.3). Zur Optimierung der Anzahl der anzupassenden Parameter wird der gesamte Modellraum unter hydrogeologischen Gesichtspunkten in Bereiche ähnlicher Eigenschaften (Rayons) eingeteilt.

Geringe Abweichungen zwischen den gemessenen und den berechneten Piezometerhöhen sowie Volumenströmen zeigen eine hohe Modellgüte an. Nach der Beurteilung der Modell-

abweichungen werden die Eingangsparameter, Rand- und Anfangsbedingung etc. in definierten Intervallen systematisch variiert.

Zielstellung der Modellanpassung ist es, möglichst geringe Abweichungen der gemessenen Zustände (Wasserstände, Volumenströme) zu erlangen. Neben der statistischen Ermittlung der Modellgüte kommen dann auch weitere Methoden zur Anwendung:

- Ganglinienauswertung,
- Vergleich der Grundwasserströmungsverhältnisse verschiedener Zeitzustände,
- Räumliche und zeitliche Bilanzierung einzelner hydraulischer Randbedingungen sowie die Plausibilitätsprüfung des Gebietswasserhaushaltes.

B3.3 MODELLIERUNG BODENWASSERHAUSHALT

B3.3.1 GRUNDLEGENDE AUSSAGEN ZUM BODENWASSERHAUSHALTSMODELL

Für die Modellierung des Bodenwasserhaushaltes ist die Nutzung des öko-hydrologischen Modellierungssystems ArcEGMO® (PFÜTZNER 2002, BECKER et al. 2002) vorgesehen. ArcEGMO wird für verschiedene wasserwirtschaftliche, aber auch landesplanerische Fragestellungen landesweit in Sachsen, Sachsen-Anhalt und Brandenburg eingesetzt. Detaillierte Informationen zu diesem Programmsystem sind unter www.ArcEGMO.de zu finden.

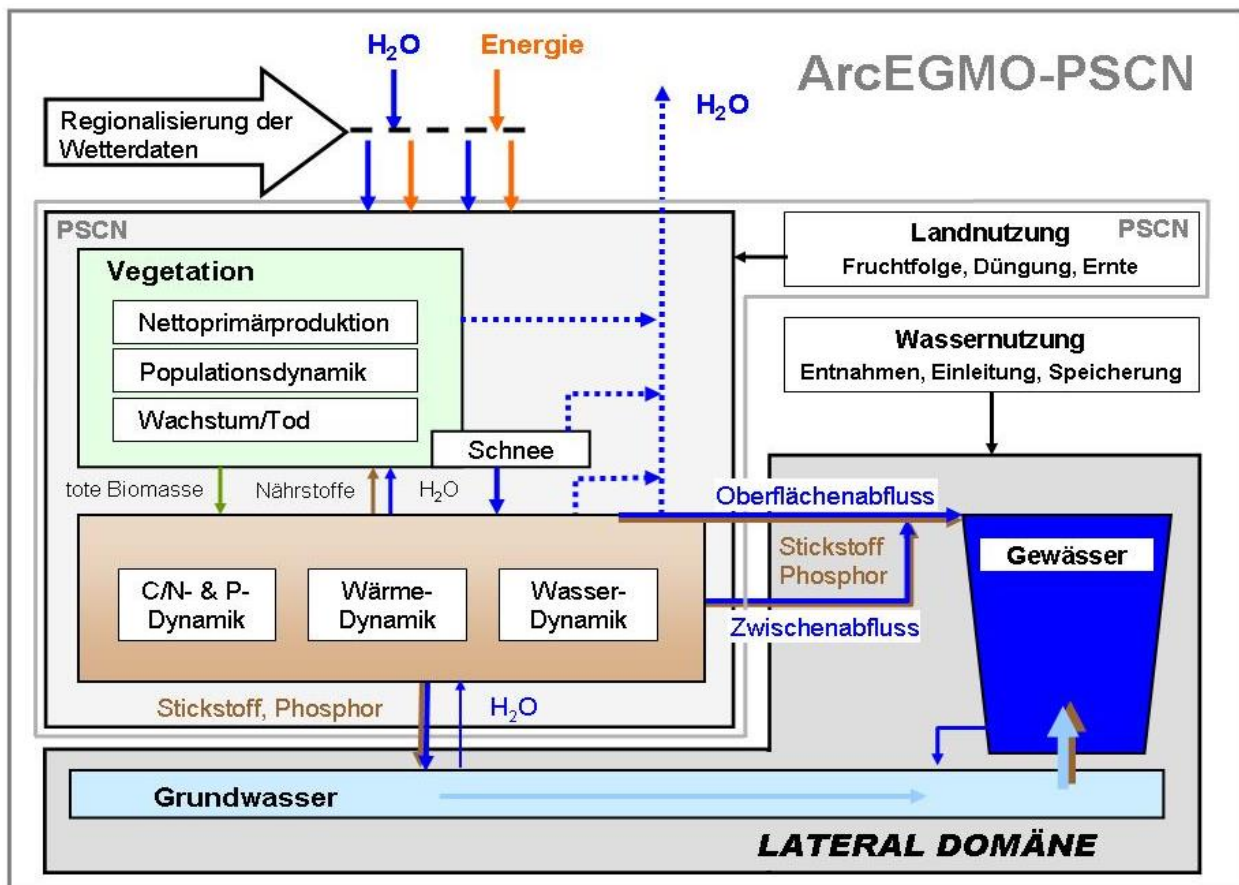


Abbildung B3-1: Das PSCN-Modul im Rahmen des hydrologischen Einzugsgebietsmodells ArcEGMO – Überblick über die simulierten Teilprozesse

Im Großraummodell Lausitz ist ArcEGMO-PSCN in erster Linie für die Simulation des Bodenwasserhaushaltes und damit für die fundierte Erfassung der räumlich und zeitlich differenzierten Grundwasserneubildung (als wesentliche, obere Randbedingung für die Modellierung der Grundwasserströmungsverhältnisse) vorgesehen. Wie vorstehende Abb. B3-1 verdeutlicht, dienen zwei wesentliche Komponenten zur Beschreibung der Vegetation und des Bodens.

Das Vegetationsmodell enthält dabei Wachstumsansätze für forst- und landwirtschaftlich genutzte Flächen. Die Vegetationsdynamik wird in Abhängigkeit vom Landnutzungstyp simuliert.

Genutzt werden können je nach Problemstellung und Datenverfügbarkeit „gesteuerte Modelle“ und „Feedback-Modelle“. Für landesweite Wasserhaushaltssimulationen und stationäre Randbedingungen bzw. für bekannte Vegetationsverläufe, haben sich „gesteuerte Modelle“ bewährt, bei denen über Zeitfunktionen die Entwicklung phänologischer Kennwerte vorgegeben wird. Ändern sich jedoch wesentliche Randbedingungen wie das Klima oder die Grundwasserflurabstände, muss die Dynamik der Vegetationsdecke explizit in Abhängigkeit von der Witterung und den übrigen Standortbedingungen simuliert werden. Neben dem Waldwachstumsmodell 4C (SUCKOW et al., 2001) hat sich VEGEN als generisches Wachstumsmodell auf der Basis Wärmesummenansatzes zur Simulation der phänologischen Entwicklung bewährt (vereinfachtes EPIC-Wachstumsmodells nach WILLIAMS et al. 1989).

Die Modellierung der Bodenprozesse erfolgt unter Berücksichtigung der horizontalen Schichtung des Bodens bis hinunter zum Ausgangssubstrat. Dabei werden bei grundwasserbeeinflussten Standorten auch temporär gesättigte Bodenschichten einbezogen.

B3.3.2 WAHL DER ARCEGMO-MODULE UND BETRIEBSWEISE IM GRM LAUSITZ

Bergbaugeprägte Regionen sind Landschaften im Wandel. Der aktive Bergbau ist verbunden mit großräumigen Grundwasserabsenkungen, die zu einem Wegfall von Feuchtflächen und einer reduzierten Gebietsverdunstung führen. In den Einleitgewässern ist die Wasserführung stark erhöht, verbunden mit einem lokalen Grundwasseranstieg in den Auenbereichen dieser Gewässer. Der nachbergbauliche Grundwasserwiederanstieg führt zu Vernässungsercheinungen. Feuchtgebiete entstehen wieder, Restlöcher werden zu Seen und Kippen werden bewaldet. Dies alles führt zu massiven Änderungen im Gebietswasserhaushalt.

Deshalb ist in bergbaugeprägten Regionen die Betrachtung mittlerer Zustände nicht zielführend. Es ist eine instationäre Abbildung erforderlich, mit physikalisch fundierten Modellansätzen und unter der Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Oberflächen- und Grundwasser.

ArcEGMO-PSCN hat sich für diese Fragestellungen in einer Reihe von Projekten im Mitteldeutschen Braunkohlenrevier bewährt. Das Modell kann räumlich genestet in unterschiedlicher Komplexität betrieben werden. Für die bergbaulich wenig beeinflussten Außenbereiche des Untersuchungsgebietes ist es ausreichend, wenn sie mit einfachen, d. h. gesteuerten Vegetationsansätzen erfasst werden. Für die unmittelbar bergbaugeprägten Flächen ist es dagegen notwendig, die sehr zeitvariabel wirkenden Vegetationseinflüsse auf den Bodenwasserhaushalt mit dem VEGEN-Modell zu beschreiben.

ArcEGMO-PSCN kann als reines Wasserhaushaltsmodell angewendet werden und sich auf die Beschreibung der wechselfeuchten Bodenzone beschränken. Für das Großraummodell ist es aber sinnvoll, wenn mittels ArcEGMO ein komplexes Flussgebietsmodell aufgebaut wird. Mit diesem werden neben den hydrometeorologischen Prozessen (räumliche Interpolation

der meteorologischen Eingangsgrößen, Berechnung der potenziellen Verdunstung, Modellierung der Schneeschmelze) und den Prozessen in der Bodenzone (Infiltration, Perkolation, Verdunstung) auch die Abflusskonzentrationsprozesse im Grundwasser, auf der Bodenoberfläche und im Gewässernetz beschrieben. Damit werden letztlich alle hydrologisch und wasserwirtschaftlich relevanten Prozesse und damit der gesamte Wasserhaushalt in einem Flussgebiet erfasst.

Dieses Flussgebietsmodell kann dann anhand von Oberflächenwasserpegeln validiert werden. Es kann allein betrieben werden, wobei dann in Kauf genommen werden muss, dass die Grundwasserströmung und die im Bergbaubereich wichtigen Wechselwirkungen zwischen Oberflächen- und Grundwasser nur vereinfacht berücksichtigt sind. Im Rahmen des zu erstellenden Großraummodells wird das Flussgebietsmodell gekoppelt und damit ständig datenaustauschend mit dem Grundwasserströmungsmodell betrieben. Durch die Kopplung liefert ArcEGMO räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Grundwasserneubildungsraten, und bei Bedarf Wasserstände im Gewässer, als Randbedingung für das instationäre Grundwasserströmungsmodell. ArcEGMO wiederum erhält vom Grundwassermodell räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Grundwasserstände als wesentliche Randbedingung für das Bodenwasserhaushaltsmodell und grundwasserbürtige Zuflüsse ins Gewässersystem. Der Datenaustausch zwischen beiden Modellen erfolgt in Tagesschritten, so dass unmittelbare Wechselwirkungen zwischen Oberflächen- und Grundwasser genügend genau berücksichtigt werden.

Diese Wechselwirkungen werden von ArcEGMO abgebildet, sofern die Rechnungen gekoppelt an ein Grundwassermodell erfolgen. Die Berücksichtigung dieser Wechselwirkungen führt meist zu dämpfenden Effekten im Vergleich zu ungekoppelten Modellrechnungen. Wenn z. B. in langanhaltenden Trockenperioden die Grundwasserstände so weit absinken, dass die Pflanzenwurzeln nicht mehr vom Grundwasser zehren und demzufolge nicht mehr potenziell verdunstet wird, wird das weitere Absinken des Grundwassers gedämpft.

In ungekoppelten Modellrechnungen wird in solchen Fällen oft die Verdunstung über- und die Grundwasserneubildung unterschätzt. Ähnliche Effekte ergeben sich beim Grundwasserwiederanstieg, der auf Grund der zunehmenden Verdunstung gedämpft wird, wenn oberflächennahe Bereiche erreicht werden.

ArcEGMO kann für das GRM unabhängig vom Grundwassermodell aufgebaut und betrieben und erst für spätere Modellrechnungen mit dem Grundwassermodell gekoppelt werden.

Die Ergebnisse der gekoppelten Modellierungen führen zu fundiert ermittelten Grundwasserzuflüssen ins Gewässersystem, die wiederum in die jeweiligen Landesmodelle eingespeist werden können und diese Landesmodelle somit weiter qualifizieren.

B3.3.3 KALIBRIERUNG DES BODENWASSERHAUSHALTSMODELLS

Eine direkte Prüfung bzw. Kalibrierung der modellierten Grundwasserneubildung anhand von Messwerten ist nur für Lysimeter möglich. Diese Prüfung erfolgte in den letzten Jahren in verschiedenen Bearbeitungen für verschiedene Lysimeter, z.B. von Brandis.

Für großräumige Modellgebiete ist die Kalibrierung der Grundwasserneubildung nur indirekt über die für das Modellgebiet berechneten Abflüsse im Vergleich mit den gemessenen Abflussmengen (d.h. der Abflussdifferenz zwischen Gebietseinlass und Gebietsauslass) möglich. Aus diesem Grund wird das Modellgebiet für das Oberflächenmodell (weiterführend siehe Kapitel C8.6) gegenüber dem Grundwassermodell erweitert.

Durch die Kopplung mit einem Grundwassermodell können zusätzlich die Grundwasserstände zur Kalibrierung herangezogen werden, da die modellierten Sickerwassermengen die berechneten Grundwasserstände direkt beeinflussen. In beiden Fällen wird sowohl räumlich, als auch zeitlich nach den bestmöglichen Übereinstimmungen der gemessenen und modellierten Ganglinien gesucht. Zusätzlich wird eine Plausibilitätsprüfung des Gebietswasserhaushaltes anhand der räumlichen und zeitlichen Verteilung der einzelnen Wasserhaushaltsgrößen durchgeführt.

B3.3.4 NOTWENDIGE WEITERENTWICKLUNGEN/DATENDEFIZITE

Für die Erfassung der in Bergbaugebieten zeitlich und räumlich sehr veränderlichen Randbedingungen wie Oberflächenmorphologie, Bodenverhältnisse, Oberflächenbedeckung/ Vegetation sind prinzipiell zwei unterschiedliche Verfahrensweisen möglich:

- 1) Unterteilung des Betrachtungszeitraumes in quasistationäre Teilzeiträume und Simulation dieser Zeitscheiben.
- 2) Abbildung der zeitlichen und räumlichen Änderungen der Randbedingungen über Funktionen und Simulation des gesamten Betrachtungszeitraumes.

Die zuerst genannte Verfahrensweise hat sich in einer Vielzahl von Modellen von WBALMO bewährt und kann problemlos auch für ArcEGMO genutzt werden.

Die Modellierung zeitlich veränderlicher Randbedingungen oder deren Vorgabe durch Zeitfunktionen ist in ArcEGMO für die Vegetation möglich.

Für die kontinuierliche Abbildung von Änderungen in den Bodenverhältnissen und in der Oberflächenmorphologie müssen neue Programmlösungen geschaffen werden, sofern dies als erforderlich angesehen wird.

B3.4 MODELLIERUNG STOFFTRANSPORT GRUNDWASSER

Nachfolgende Abb. B3-2 stellt das prinzipielle Vorgehen und den Einsatz verschiedener Modellwerkzeuge für den Aufbau und die Parametrisierung eines großräumigen Stofftransportmodells dar. Basis der Transportmodellierung ist dabei natürlich immer das in Kap. B3.2 prinzipiell beschriebene Grundwasserströmungsmodell. Die Berechnung des Einzelstoff- oder Mehrkomponenten-Stofftransportes ist dabei unabhängig vom letztlich gewählten Modellcode, der für die Grundwasserströmung verwendet wird.

Grundlage des Stofftransportmodells sind neben dem Strömungszustand die recherchierten Daten der geochemischen Charakteristik der verschiedenen ausgehaltenen geologischen Schichten. Zum einen sind die geochemischen Verhältnisse für den vorbergbaulichen Zustand zu charakterisieren, zum anderen vor allem auch der Istzustand in Bezug auf die hydrogeochemischen Verhältnisse in den Grundwasserleitern und den Kippenkörpern. Die vorbergbaulich, geochemischen Verhältnisse sind durch die ortskonkreten Daten charakterisiert, die vor der Überbaggerung erhoben worden.

Weiterhin erfolgt eine Abschätzung des Umsatzes des initialen Sulfidgehaltes in Abhängigkeit des teufenabhängigen Sauerstoffzutrittes (Teufe der Grundwasserabsenkung) und des Umfanges der Bergbautätigkeit. Ziel ist es insgesamt, die Zusammensetzung der Bergbauwässer und relevanter Sekundärmineralpools in den Kippen (z. B. Gips), vor allem auch für die Kippen zu definieren.

Die Umsatzberechnung durch Sauerstoffzutritt kann durch Programme wie PYROX (WUNDERLY et al. 1996) oder DARIS (diffusion and reactions in soils, KOWAL 2019) erfolgen. Die Folgereaktionen der Sulfidverwitterung müssen dann mit einer hydrogeochemischen Software, wie z. B. PHREEQC oder MINTEQA berechnen werden. Diese vor der eigentlichen Prognoseberechnung durchzuführenden Berechnungen dienen der Definition der stofflichen Anfangsbedingungen des Stofftransportmodells (Wasserbeschaffenheit und Stoffinventar relevanter Festphasen).

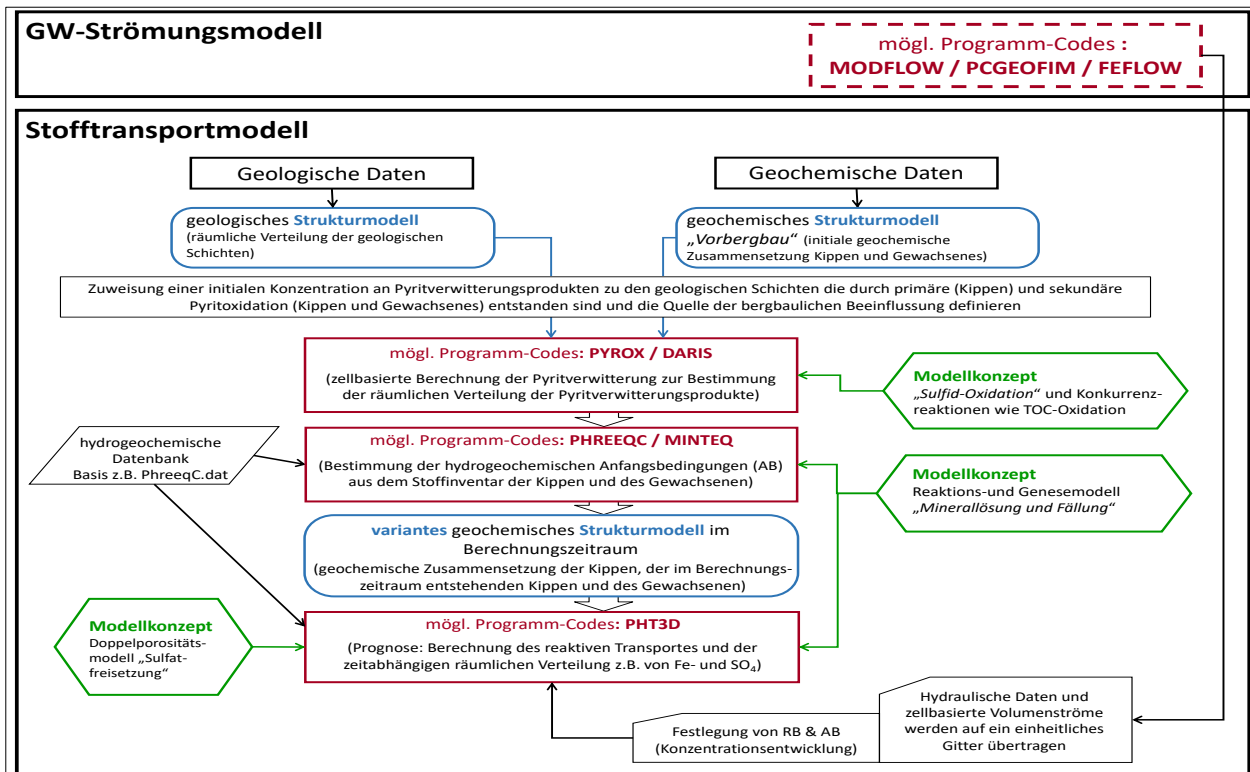


Abbildung B3-2: Prinzipielle Vorgehensweise und Einsatz verschiedener Modellwerkzeuge für den Aufbau und die Parametrisierung eines großräumigen Stofftransportmodells

Die Berechnung des Stofftransportes kann je nach Fragestellung nicht-reaktiv oder reaktiv als Einzelstoff- oder Mehrstoff-System erfolgen. Für ein Modell der Größe des GRM Lausitz sollte in einem ersten Schritt eine konservative (nicht-reaktive) Modellierung erfolgen. Anschließend kann ein reaktives Modellkonzept schrittweise integriert werden. Generell steigt mit der Erhöhung der Komplexität des geochemischen Modells auch der Rechenaufwand.

Der Stofftransport eines Einzelstoffs, z. B. Sulfat, kann abgebildet werden, indem Stoffquellen bzw. Stoffsenken z. B. durch einen Dual-porosity-Ansatz oder Sorptionsisotherme definiert werden.

Für den reaktiven Mehrkomponenten-Stofftransport besitzen alle drei Grundwasser-Programmcodes (FEFLOW; PCGEOFIM, MODFLOW) Kopplungen zu PHREEQC. Für MODFLOW/MT3DMS ist dies z. B. PHT3 (PROMMER 2002).

B3.5 MODELLIERUNG STOFFTRANSPORT FLIESSGEWÄSSER

In Bezug auf das Bodenwasserhaushaltsmodell besteht das Modul PSCN (Plant-Soil-Carbon-Nitrogen Model) aus einem Bodenfeuchtemodell, einem Bodenwärmemodell, einem Kohlenstoff-/Stickstoffmodell und einem Phosphormodell. Es beschreibt neben der Wasserdynamik auch den Phosphor-, Kohlen- und Stickstoffhaushalt, wobei der Stoffhaushalt vor allem im Hinblick auf die fundierte Erfassung des Systems „Vegetation - Boden“ ausgerichtet ist. Das Nährstoffangebot wird dabei als Randbedingung für die Vegetationsentwicklung betrachtet.

Die Simulation der Bodenwärmedynamik basiert auf der numerischen Lösung der vereinfachten eindimensionalen Wärmeleitungsgleichung für veränderliche Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit. Der Beitrag des Bodeneises an der Wärmeleitung und der Phasenübergang der Bodenflüssigkeit werden nicht betrachtet.

Die für das zu erstellende Großraummodell relevante Stoffproblematik (Eisen, Sulfat) wird im Bodenwasserhaushaltsmodell von ArcEGMO bisher nicht betrachtet. Insbesondere die Eisentransport- und -reaktionsprozesse sind kompliziert und die Implementierung der Prozesse zu aufwendig, um das ArcEGMO-Modell dahingehend zu qualifizieren. Daher ist es effizienter und zielführender, eine Kopplung zu einem externen Stofftransportmodell herzustellen.

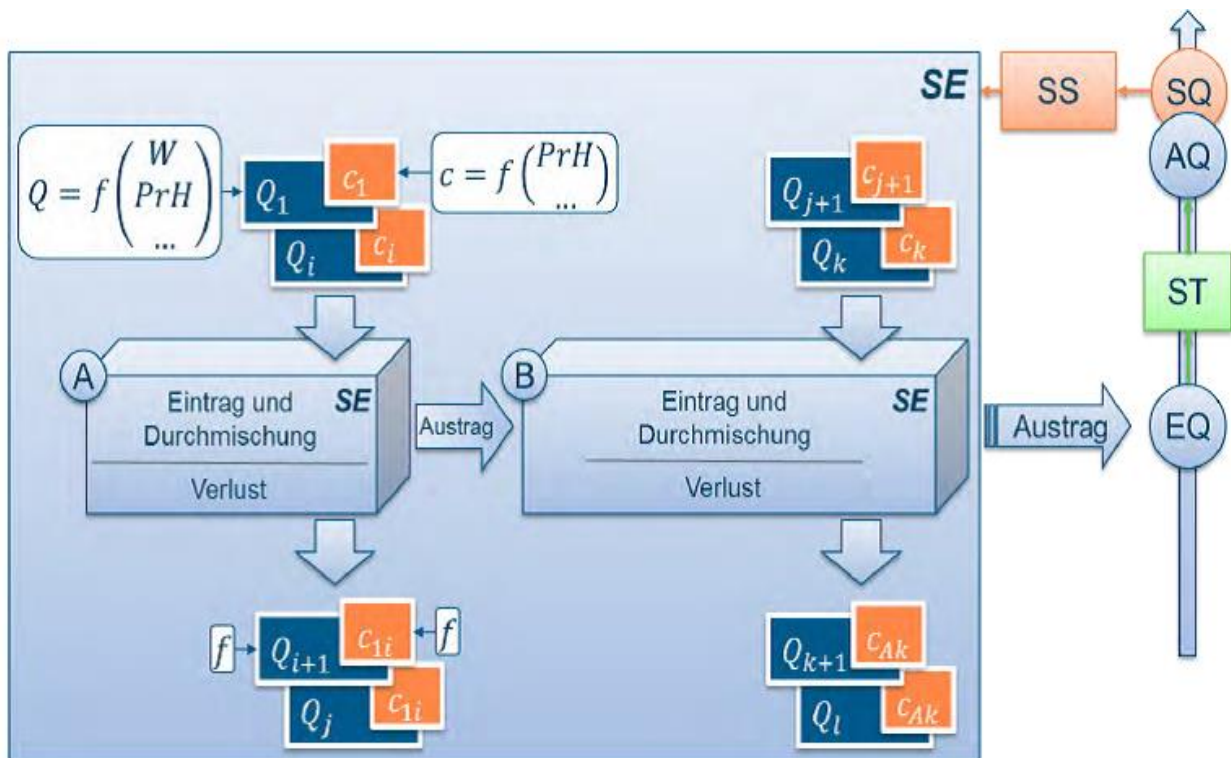


Abbildung B3-3: Grundstruktur des Sulfatprognosemodells WBalMo in Bezug auf das Sulfateintragsmodul SE (aus KALTOFEN 2017)

Im Lausitzer Revier wurde für die Spree als wesentlichem Vorfluter ein Sulfatprognosemodell durch KALTOFEN (2017) erstellt. Dieses Sulfatprognosemodell besteht aus unterschiedlichen Modulen, die aus Abb. B3-3 ersichtlich sind.

KALTOFEN (2017) ist diesbezüglich Folgendes zu entnehmen: „Das Sulfateintragsmodul SE quantifiziert die Sulfateinträge in ein Fließgewässer am Emissionsquerschnitt EQ. Durch ein Sulfattranslationsmodul ST wird das Sulfatsignal durch zeitliche Verzögerung und Verluste in den Fließ- und Standgewässern so verändert, dass die Summe der Emissionen am Aussagequerschnitt AQ wiedergegeben wird. Ausgewählte Aussagequerschnitte sind als Steuerquerschnitte SQ vorgesehen.“ Die weitere Vorgehensweise ist dann KALTOFEN (2017) im Detail zu entnehmen.

Das natürliche Wasserdargebot wird innerhalb des Modellkomplexes mit einem Niederschlag-Abfluss-Modell verknüpft. Allerdings fehlt in dieser Modellstruktur die Ankopplung zu einem Grundwasserströmungsmodell, um die Interaktionen zwischen Grund- und Oberflächenwasser abzubilden.

Somit ergäbe sich zukünftig die Möglichkeit Ergebnisse des GRML zu Grundwasserständen, zur Grundwasserneubildung und dem Grundwassersulfattransport als Eingangsgrößen im WBalMo zu verwerten. Mit diesem Ansatz könnten die Sulfatfrachten in den Fließgewässern fundierter simuliert werden. Eine Erweiterung für den Stofftransport von Eisen wäre noch zu untersuchen.

Es ist zu beachten, dass die hier aufgezeigte potentielle Verknüpfung zu einem Stofftransportmodell im Fließgewässer (wie WBalMo) nicht Bestandteil der Kostenbilanzierung in Kap. D7 ist.

B4 DATENANFORDERUNGEN – RECHERCHE DATENVERFÜGBARKEIT

Um das GRM Lausitz als solches zu erstellen, bedarf es diverser Eingangsparameter bzw. -daten. Das betrifft neben den Ausgangsdaten für das übergeordnete strukturgeologische Modell auch Daten und Messreihen zur Hydrogeologie, Geochemie, Grundwasser- und Oberflächenwasserbeschaffenheit sowie zu den äußeren Randbedingungen des künftigen Großraummodells.

Diesbezüglich wurde eine Datenabfrage bei den Geologischen Landesämtern in Sachsen und Brandenburg sowie bei den Bergbautreibenden LMBV und LEAG gestellt. Im Folgenden wird - gegliedert nach einzelnen Modellteilaspekten - dargelegt, welche Datenanforderungen generell für die Erstellung des GRM Lausitz gestellt werden müssen und welche Sachlage sich hinsichtlich der Datenbasis mit momentanem Stand zur Datenrecherche ergeben haben.

B4.1 GEOLOGISCHE DATEN – BASIS FÜR HYDROGEOLOGISCHES 3D-MODELL

B4.1.1 DATENANFORDERUNGEN

Für die Erstellung des hydrogeologisch-stratigraphischen 3D-Modells werden flächendeckend über das gesamte Gebiet möglichst tiefreichende, stratigraphisch eingestufte Bohrungen benötigt, die dann entsprechend des festzulegenden endgültigen Normalprofils des Modells (der Schichten des Strukturmodells) zu verschlüsseln sind.

Für die räumliche Vernetzung sind zudem geologische Schnitte und Verbreitungskarten einzubeziehen. Schon verfügbare 3D-Modellkörper/-Modelle, wie die des LfULG, werden natürlich in die Modellbildung einbezogen. Es ist bei diesen 3D-Modellkörpern jedoch zu bedenken, dass sie nur für ca. 1/3 des potentiellen Modellraums vorliegen werden und dort nur die jüngsten Teile der tertiären Schichtenfolge auftreten. Das Konzept bezieht sich aber auf das gesamte Niederlausitzer Braunkohlenrevier, mit sämtlichen montan relevanten tertiären Schichten. Es muss also um eine konsistente stratigraphische Gliederung des hydrogeologischen Strukturmodells gehen, die den Aufbau für den Gesamttraum im Blick hat. Damit ist ganz klar, dass dies nicht allein unter Verwendung hydrogeologischer 3D-Körper für einen Teilbereich erfolgen kann. Die Hauptaufgabe besteht darin, auf Basis einer konsistenten Projektmodelldatenbank, mit ausgewählten und qualifizierten Bohrungen des Gesamtgebietes, auf sächsischem und brandenburgischem Territorium die Basis für das GRM Lausitz zu erarbeiten.

B4.1.2 DATENRECHERCHE

Die Recherche in den einzelnen Institutionen ergab folgendes Bild:

- Für den sächsischen Anteil der Lausitz (hineinreichend bis in den Raum Südbrandenburg) existieren im LfULG reichlich 100.000 Bohrungen (Flach- und Tiefbohrungen, vgl. <https://www.rohstoffdaten.sachsen.d/suche>) mit Stamm- und Schichtdaten digital verfügbar. Diese auch mit aktueller stratigraphischer Verschlüsselung.
- Zudem existieren für die Region ca. 30 geologische Schnitte, mehrere Verbreitungskarten (LKQ50, LKT50, GK200, LKT200) sowie drei 3D-Modelle (teilweise nur randlich angeschnitten), die ebenfalls in unterschiedlicher Qualität digital verfügbar sind.
- Des Weiteren ist aktuell ein geologisch-hydrogeologisches 3D-Strukturmodell, im Rahmen der hydrogeologischen 3D-Landeskartierung (HyK50/ Geothermieatlas) für den gesamten Bereich der sächsischen Lausitz in Bearbeitung. Im Ergebnis liefert

dieses Hyk-Projekt (Fertigstellung voraussichtlich nach 2020) rasterbasierte (25 m) 3D-Verbreitungsgrenzen geologischer Körper, auf der Grundlage aller verfügbaren plausiblen Aufschlüsse und einer sachsenweit einheitlichen stratigraphischen Nomenklatur, als volumetrisches Raummodell. Der blattschnittfreie Datensatz wird im LfULG von der geologischen 3D-Modelliersoftware unabhängig, unter ORACLE gespeichert und kann visualisiert und extrahiert werden.

Insgesamt ist jedoch auch festzuhalten, wie schon angemerkt, dass die hier erwähnten Bereiche allerdings nur ca. 1/3 der potentiellen Modellfläche des GRM Lausitz abdecken.

- Weiterhin sind im LfULG in teils digitaler, teils analoger Form Berichte zu den Verbreitungskarten, 3D-Modellen sowie zu Erkundungs- und Forschungsprojekten im Bereich Lausitz vorhanden.
- Eine Anfrage zur Datenlage bei der Landesdirektion Sachsen (LDS) ergab, dass dort keine eigenen geologischen Daten bzw. Berichte verfügbar sind. Es wurde in erster Linie auf das LfULG sowie für einzelne Berichte auf LMBV und LEAG verwiesen.
- Bei der LEAG erfolgt die Datenhaltung bezüglich der Bohrungen im „Komplex-Speicher-Geotechnik“ (KSG). Dieser enthält momentan etwas mehr als 100.000 Bohrungen, unterschiedlich detailliert bearbeitet und mit unterschiedlichen Endteufen. Es handelt sich um Bohrprofile mit überwiegend flächendeckend guter, untereinander abgestimmter stratigraphischer Verschlüsselung für Bereiche im Westen und Nordosten (alles Brandenburg). Im Süden (vor allem sächsischer Teil) sind die Bohrungen noch weniger stratigraphisch abgestimmt, bis hin zu Bohrungen ohne genauere Ansprache.
- Auch bei LBGR und LMBV sind mehrere Tausend von Bohrungsdaten zu finden. Diese sind jedoch nur teilweise, höchstens zu einem Drittel, in digitaler Form verfügbar. Weiterhin sind sie zumeist nicht auf aktuellem geologisch-stratigraphischen Bearbeitungsstand.

B4.1.3 EINSCHÄTZUNG DER DATENBASIS

Im Gebiet des künftigen GRM Lausitz ist eine gute Abdeckung mit stratigraphisch nach aktuellem geologischen Kenntnisstand verschlüsselten Bohrprofilen für die Erstellung des Strukturmodells vorhanden. Diesbezüglich ist in einem ersten Schritt auf die Bohrungsdatenbeständen des LfULG Sachsen sowie der LEAG zurückzugreifen (vgl. ± Gebiete mit hochqualitativen Bohrungen in Abb. B4-1). Ein besonderer Vorteil dieser beiden Datenbestände besteht darin, dass sie im Tertiär weitgehend nach den gleichen stratigraphischen Prinzipien verschlüsselt und aktuell gehalten vorliegen.

Bezüglich der quartären Schichtenfolge auf brandenburgischem Territorium ist noch eine durchgehende Stratifizierung nach aktuellem Kenntnisstand (u. a. KÜHNER 2010, 2017) offen. Für nahezu das gesamte potentielle Modellgebiet existiert allerdings bei LEAG eine hochaufgelöste Quartärbasiskarte als Netzpunktkarte, die ein detailliertes Abbild der glazigenen Rinnenstrukturen liefern kann (freundl. Hinweis R. Kühner, LEAG).

Zudem steht in Aussicht, dass zum Zeitpunkt der eigentlichen Erstellung des GRM Lausitz auch die Informationen und 3D-Modelle der HyK50 Lausitz in Sachsen zur Verfügung stehen werden. In jedem Fall muss aber bewusst bleiben, dass bei allen beiden Datenpools, trotz der generell günstigen Datensituation, eine „bewertende Aufbereitung“ - d. h. die Erzeu-

gung eines projektbezogenen, geologisch konsistenten Bohrdatenbestandes über die gesamte GRML- Fläche - notwendige Voraussetzung für den Aufbau des GRM Lausitz ist.

In Bezug auf die oben angesprochenen 3D-Modelle des LfULG für den sächsischen Teil des Modellgebietes (hydrogeologische Körper) ist festzuhalten, dass die bereits überbagerten Bereiche in den Tagebaufeldern á priori dabei nicht mit modelliert werden. Dies ist aber gerade mit Blick auf die „Vorfeldgeologie“ unbedingt mit zu berücksichtigen: Zum einen, weil die „Vorfeldgeologie-Modelle“ entscheidend für die Kippeninventarisierung sind, zum anderen ja gerade für diese Bereiche ein detaillierter Datenbestand (in Bezug auf die wichtigen bergbaubeeinflussten Bereiche) vorhanden ist. Weiterhin sind diese Areale auch in Hinsicht auf hydraulische Modellaussagen (Wasserstände) zum „vorbergbaulichen Zustand“ wesentlich.

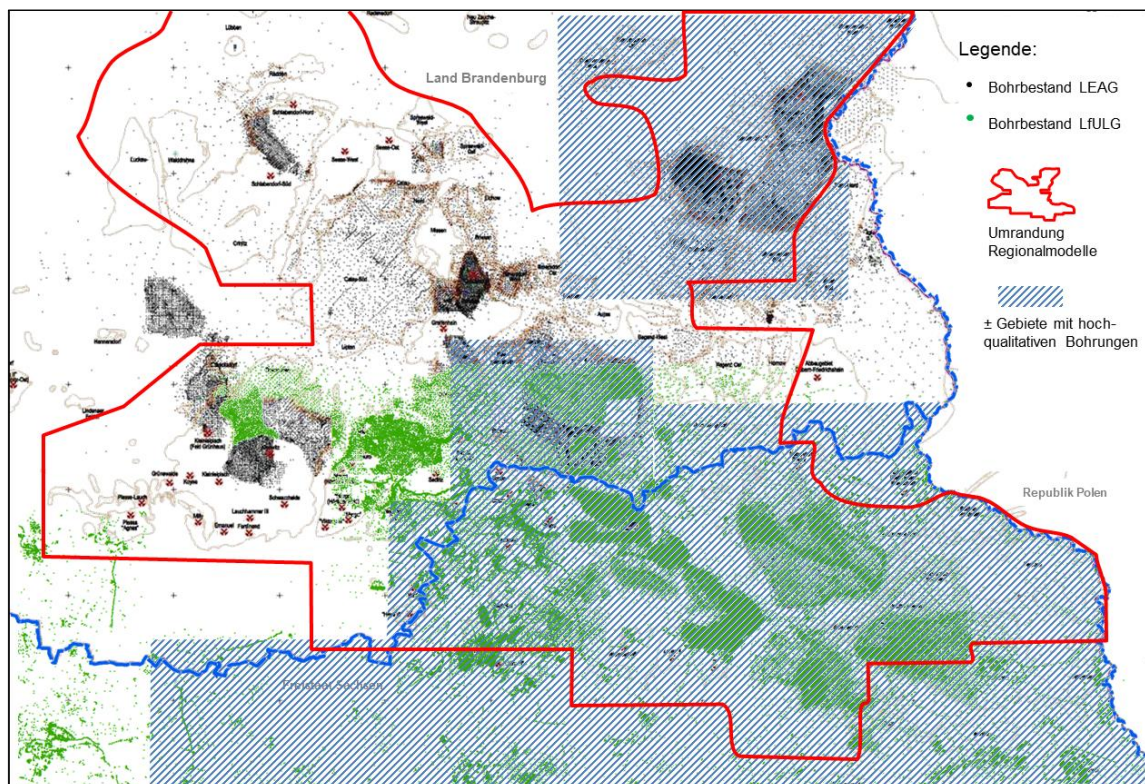


Abbildung B4-1: Verteilung der Datenbestände zu verschlüsselten Bohrungen bei LfULG und LEAG, mit Kennzeichnung von Gebieten mit derzeit hochqualitativ verschlüsselten Bohrungen

Es ist, gerade in Anbetracht der oben getroffenen Aussage klar, dass es um eine Zusammenführung und Abgleich mit den Bohrungsdaten aus den übrigen 2/3 Fläche des Modellraums geht. Dies bedeutet auch, dass es zur teilweisen Zusammenführung von geologisch-hydrogeologischen Einheiten aus der feinaufgelösten sächsischen Gliederung, im Interesse eines modellschichtmäßig und numerisch handhabbaren überregionalen hydrogeologischen Strukturmodells, kommen muss. In diesem Kontext ist positiv zu vermerken, dass - dank der Mitarbeit der damaligen Abteilung Geologie/Referat: geologische Kartierung an der DIN Bergmännisches Risswerk 2001 - die geologisch-stratigraphische Untergliederung des sächsischen und brandenburgischen Tertiärs sehr gut aufeinander abgestimmt sind. Dennoch ist natürlich nicht von einer vollständig identischen Untergliederung auszugehen.

Für die Gebiete ohne ausreichende Bohrungsbelegung muss danach in einem zweiten, arbeitsintensiveren Schritt auf weitere Bohrungen, mit unterschiedlicher Qualität im Datenbestand von LBGR Brandenburg und LMBV zurückgegriffen werden.

Einzubinden sind bei der Auswahl der Modellbohrungen insbesondere die bei der Erstellung der LKT50 Lausitz (2016) genutzten Bohrungen sowie solche, welche auch als Messstellen für die Randbedingungen, die Wassergüte sowie Grundwasserstände dienen (vgl. Kap. B4.2 bis B4.5). Für das derzeit im Aufbau befindliche geologisch-hydrogeologische 3D-Strukturmodell der sächsischen Lausitz werden diese Datensätze bereits mitgeführt.

B4.2 HYDROGEOLOGISCHE PARAMETRISIERUNG

B4.2.1 DATENANFORDERUNGEN

Ganz wesentlich für das generelle Ziel des GRM Lausitz, die Stofftransportmodellierung für den gesamten bergbaulich beeinflussten Bereich der Niederlausitz durchzuführen, ist die räumlich differenzierte hydrogeologische Parametrisierung des Modellgebietes. Dies deshalb, weil die advective Ausbreitung der bergbaulich überprägten Grundwässer wesentlich durch diese Parameterwahl determiniert ist. Wichtig ist es somit vor allem, die hydraulischen Durchlässigkeitsbeiwerte (k_f -Werte) sowie die effektiven und totalen Porositäten (n_{eff} , n_{tot}) der einzelnen hydrogeologischen Einheiten, in ihrer räumlichen Verteilung zu parameterisieren.

Diesbezüglich kann festgestellt werden, dass folgende generelle Datenquellen dafür relevant sind: Abgeleitete Daten aus Pumpversuchen, Informationen aus Körnungsuntersuchungen, gemessene Daten an durchgeführten Labor-Durchströmungsversuchen und Daten, die aus vorangegangenen Grundwassermodellierungen resultieren, auf Basis dabei durchgeführter Modellkalibrationen. Alle diese vier prinzipiellen Datenquellen weisen typische, systematische Fehleraspekte auf, die zu beachten sind:

- A) Pumpversuche - eventuell fehlerhafte Auswertung (Durchführung) - z. B. zu kurze Pumpzeiten, keine Berücksichtigung von Randbedingungen etc.
- B) Auswertung Körnungsuntersuchungen - z. B. Verlust von Feinkorn beim Bohrprozess, Agglomeratbildung aus Feinkorn bei Siebung nicht richtig unterbunden - beide Bsp. würden zur Überschätzung der Durchlässigkeit führen.
- C) Labor-Durchströmungsversuche - Daten liegen vermutlich nur sehr begrenzt vor. Frage der Repräsentanz des Materials, Randläufigkeiten in den Kernhaltern etc.
- D) Verwendung kalibrierter Daten anderer Modelle - Dies bezieht sich natürlich vor allem auf die Parametrisierung der Regionalmodelle. Die in diesen Modellen liegende Erfahrung, bei erfolgreicher Kalibrierung, sollte genutzt werden. Jedoch muss dafür die Detailliertheit (und vertikale, horizontale Auflösung) beider Modelle vergleichbar sein.

Wesentlich bei der Datenrecherche war, herauszustellen, wo digital verfügbare Datenpools vorhanden sind. Dies im Gegensatz zu papiergebundenen Daten, die erst noch digital erfasst werden müssen.

In Bezug auf die oben aufgeführten, prinzipiell möglichen systematischen Fehler der verschiedenen Datenpools muss dennoch bewusst bleiben, dass im Rahmen des GRM-Aufbaues keine vollständige Überprüfung der hydrogeologischen Parameter, in Bezug auf ihre Ausgangsdaten erfolgen kann. Jedoch ist dies stichprobenhaft zu kontrollieren. Eventuell bieten sich dafür, begleitend zum eigentlichen Modellaufbau auch studentische Qualifikationsarbeiten an.

B4.2.2 DATENRECHERCHE

Die durchgeführte Datenrecherche ergab, dass die wesentlichen, weil auch digital verfügbaren Datenspeicher für diese Aufgabe, die des LfULG Sachsen und der LEAG sind. Hierbei ist weiterführend zu vermerken, dass diese beiden Datenpools, wie schon für die geologischen Daten vermerkt, sich sehr gut ergänzen. Natürlich bedarf es dann einer weiteren Verdichtung in den wohl zumeist Brandenburger Bereichen, die nicht durch die LEAG-Daten definiert werden können (siehe unten).

Bezüglich des LfULG-Datenpools wird hierbei die Hauptaufgabe darin bestehen, anhand der zum Teil notwendigen Zusammenführung von geologisch/hydrogeologischen Schichten (vgl. Kap. B4.1), auch eine Überführung der hydrogeologischen Parameter abzuleiten. Außerdem ist anzumerken, dass durchaus noch nicht sämtliche Daten in digitaler Form vorliegen, sondern erst aus Ergebnisberichten der Braunkohlenerkundung etc. händisch recherchiert werden müssen.

In Bezug auf den LEAG-Datenpool ist zu vermerken, dass eine Verknüpfung der geologisch, hydrogeologischen Bohrungsdaten zu den hydrogeologischen Parametern über den „Komplex-Speicher Geotechnik“ besteht. Jedoch kann erst in der eigentlichen Bearbeitung (dem eigentlichen Aufbau des GRM Lausitz) geklärt werden, für welche Bereiche die hydrogeologischen Parameter zum Teil doch nicht vollständig digital aufbereitet vorliegen, sondern z. B. nur als pdf-Dateien.

In Bezug auf die Daten, die beim LBGR Brandenburg zur hydrogeologischen Parametrisierung vorhanden sind, ist deutlich festzuhalten, dass diese nicht digital aufbereitet vorliegen. Sie sind in Papierform den typischen Bohrarchivakten zu entnehmen. Diesbezüglich ist klar, dass diese Daten nur zur Verdichtung der oben benannten digitalen Datenpools verwendet werden können. Dies für Bereiche, in denen diese digitalen Datenpools Lücken aufweisen.

Inwieweit der bohrungstragende Datenpool der LMBV eine Erweiterung zum LfULG-/LEAG-Datenpool darstellt, auch gegenüber den „papierverfügbaren“ Daten aus den Bohrarchivakten des LBGR Brandenburg, konnte bis jetzt nicht abschließend geklärt werden. Es wird nicht davon ausgegangen, dass dies in Größenordnung der Fall ist. In jedem Fall muss beim Aufbau des GRM Lausitz abschließend eine Überprüfung in Bezug auf diesen LMBV-Datenpool erfolgen.

Bei der Recherche wurde vom LBGR Brandenburg darauf verwiesen, dass gerade für Bereiche, die schlecht durch die Braunkohlenerkundung abgedeckt sind, der vorhandene HYRA-Datenspeicher und generell Untersuchungen zur Ausweisungen von z.B. Schutzzonen an Trinkwasserfassungen relevant sind. Es ist zu vermerken dass, wenn diese Untersuchungen ab der 1990er Jahre im Auftrag der Wasserwerke erfolgten, es einer Genehmigung zur Verwendung der Daten durch die Wasserwerkseigentümer bedarf.

Wie in Kap. B4.2.1 unter D) vermerkt, ist es natürlich zielführend, wesentliche Charakteristika der Regionalmodelle in die Parametrisierung des GRM Lausitz mit einzubeziehen. Dies kann sich natürlich nur auf die differenziert aufgebauten Regionalmodelle beziehen. Besondere Bedeutung erlangt dieser Datenpool auch zum Vergleich zu den aus den anderen Datenpools abgeleiteten räumlichen Verteilungen.

B4.2.3 EINSCHÄTZUNG DER DATENBASIS

Es ist einzuschätzen, dass eine Datenbasis für die Belegung des GRM Lausitz mit hydrogeologischen Parametern vorhanden ist. Zuerst sind zur Parametrisierung die Datenbestände

von LfULG Sachsen und von LEAG (unter Voraussetzung der Zustimmung) zu verwenden. Diese ergänzen sich räumlich sehr gut. Nachfolgend ist die dabei entstandene Datenbelegung durch Daten aus dem LMBV-Datenpool und dem LBGR Bohrarchiv zu verdichten.

In jedem Fall muss bewusst bleiben, dass es bei allen Datenpools einer „bewertenden Aufbereitung“, vor endgültiger Verwendung bedarf. Dabei stellt sich bei den digitalen Datenpools vor allem die Frage der Repräsentanz und der Zusammenführung von Einzeldaten. Dies gilt vor allem auch für die Parametrisierung der hydrogeologischen Einheiten. Für die „papierverfügbaren“ Daten muss natürlich erst die digitale Erfassung erfolgen.

Insgesamt sind für alle erfassten Parameter-Daten räumliche Überprüfungen der Datenkonsistenz in den verschiedenen ausgehaltenen hydrogeologischen Einheiten durchzuführen. Zielführend dafür wäre z. B. eine Überprüfung der d_{10} und d_{60} -Werte aus den Körnungsuntersuchungen in den verschiedenen Einheiten. Das LfULG verfügt dabei über ein Programm zur Auswertung von Korngrößenanalysen, das direkt auf die Struktur der Geologischen Datenbank aufsetzt.

B4.3 DATEN FÜR ÄUßERE RANDBEDINGUNGEN

B4.3.1 DATENANFORDERUNGEN

In Kap. B1.1.1 wurden Grundaussagen getroffen, welche wesentlichen Dinge bei der Wahl und detaillierten Definition des Randes/der Randbedingungen zu beachten sind. Daraus abgeleitet und vereinfacht zusammengefasst wird für das GRM möglichst die Definition „harter Randbedingungen“ angestrebt. Dies heißt, Polygonzüge - basierend auf Grundwassermessstellen und ihren Wasserstands-Ganglinien - und nicht die Wahl geschlossener Ränder, wenn dies nicht zwingend notwendig ist. Gleichfalls sollten die Ränder so definiert werden, dass wesentliche Vorfluterabschnitte voll bilanzierbar sind, also somit nicht als Randbedingungen benutzt werden können. Aus diesen Anforderungen leitet sich ab, dass die Recherche vor allem aufzeigen musste, welcher Datenpool an GW-Messstellen mit langfristigen Messreihen vorhanden ist.

B4.3.2 DATENRECHERCHE

Wie in Kap. B4.3.1 herausgestellt, erfolgte die Datenrecherche zu Grundwassermessstellen mit langfristigen Messreihen. Aktuelle Präzisierungen dazu liegen mittlerweile mit dem LfULG-Projekt „Evaluierung Grundwassermonitoring“ vor.

Die Zusammenschau der Messstellen im Untersuchungsgebiet aus verschiedenen Datenpools geht aus nachstehender Abb. B4-2 hervor. In Bezug auf mögliche GRM-Modellränder ist herauszustellen, dass am Beispiel des Südrandes (Datenbestand LfULG Sachsen) ein Netz aus relevanten Messstellen zur Ableitung eines Randpolygonzuges möglich ist. Dies gilt auch in ähnlicher Art für den Nordbereich. Im Einzelnen ergeben sich auch Bereiche für die eine Verdichtung von GW-Messstellen notwendig ist. Gleichfalls ist bei der eigentlichen Bearbeitung dann genau festzulegen, für welche GW-Leiter diese Verdichtungsnotwendigkeiten sich ergeben.

Anzumerken ist auch, dass im Zuge der hier durchgeführten Recherche keine Tiefenprüfung bzw. detaillierte Kontrolle der tatsächlichen Verwendbarkeit der in Abb. B4-2 dargestellten Messstellen erfolgt ist. Die Messstellen unterliegen, insbesondere in Bereichen mit aktivem Bergbau, einer jährlichen Veränderung. Dies erfordert eine zum eigentlichen Modellaufbau des GRML zeitnahe Überprüfung bzw. erneute Kontrolle der hier dargestellten Verhältnisse.

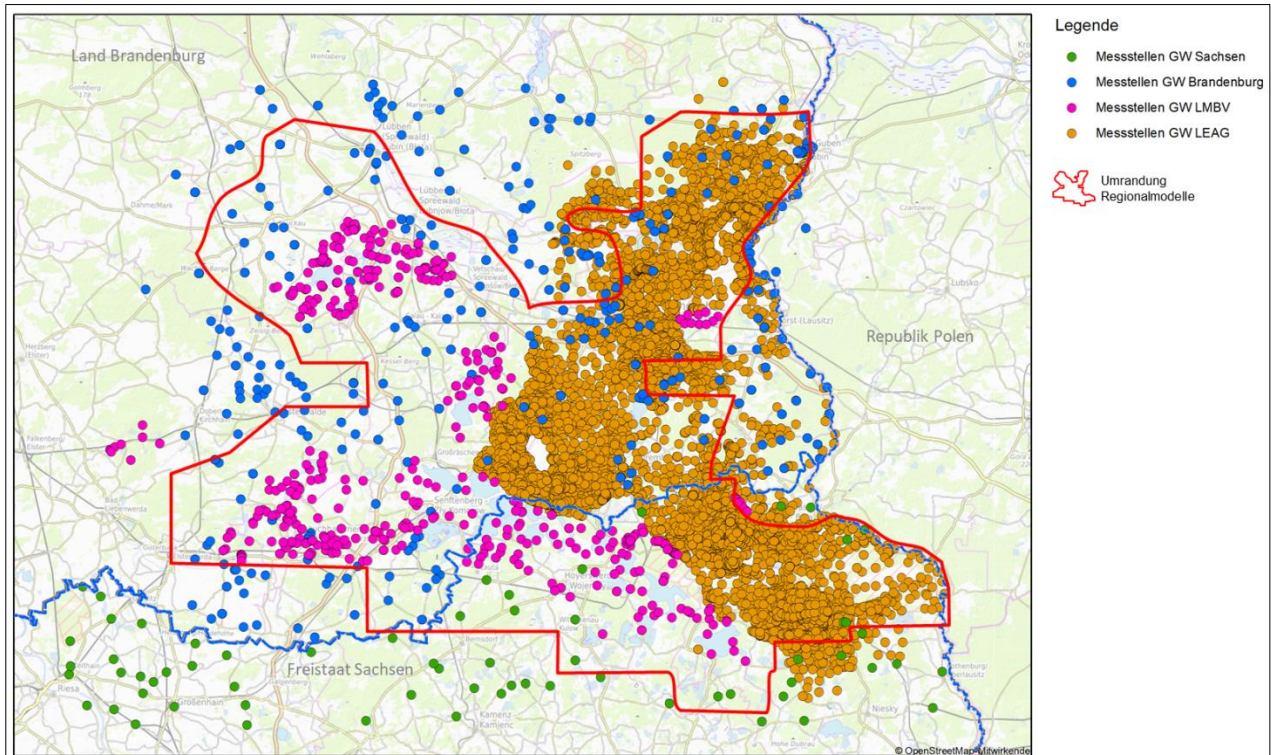


Abbildung B4-2: Verteilung der GW-Messtellen im Untersuchungsgebiet

B4.3.3 EINSCHÄTZUNG DER DATENBASIS

Die Datenrecherche zeigt, dass die in Kap. B4.3.2 zusammengefassten Anforderungen, die vor allem auf die Benutzung von zeitveränderlichen Randbedingungen 1. Art, auf Basis eines Polygonzuges langjährig gemessener Grundwasserstandsmesstellen abzielen, erfüllbar sind.

Somit ist die Festlegung „harter“ Randbedingungen für das GRM Lausitz gewährleistet. Im Detail sind beim GRM-Aufbau, in einem der ersten Schritte, ganz konkret die Daten der für den Rand wesentlichen Messtellen zu bewerten, um dann konkret die Messtellen für den Rand-Polygonzug auszuwählen. Dies muss verknüpft mit der endgültigen Festlegung der Untergliederung des generellen hydrogeologischen Strukturmodells erfolgen.

Es ist diesbezüglich auch festzuhalten, dass zuerst eine klare Aussage von einem potentiellen Auftraggeber des Aufbaus eines GRM Lausitz zu treffen ist, hinsichtlich A) Aussagegebiet und B) welche Vorfluterbereiche sollen vollbilanzmäßig erfasst werden und stehen somit nicht zur Randbedingungsfestlegung zur Verfügung!

B4.4 GEOCHEMISCHE DATEN ALS BASIS FÜR DIE RÄUMLICHE CHARAKTERISIERUNG DER KIPPENBESCHAFFENHEIT

B4.4.1 DATENANFORDERUNGEN

Ein wesentlicher Punkt in Bezug auf die Stofftransportmodellierung ist es, die großen inneren Stoff-Quellterme im Untersuchungsgebiet, die verschiedenen Braunkohleabraumkippen, genauer zu charakterisieren. Zwar lässt sich eine Typisierung der Kippenwässer mittels der verfügbaren Kippenwasseranalysen durchführen, aber bereits um diese einordnen zu können, ist eine vergleichende Inventarisierung dieser Kippenkörper notwendig.

Um diese Kippeninventarisierung, auch Vorfeld-Bilanzierung genannt (HOTH 2004), durchführen zu können, sind Daten zur geochemischen Beschaffenheit der zur Verkippung gelangten Abraummaterialien ganz entscheidend. Nach Zuordnung der Daten der Einzelproben zu den relevanten geologischen Auswerteeinheiten wird für diese verschiedenen Auswerteeinheiten die Verteilung der wesentlichen Stoffparameter überprüft. Es sind im Endeffekt Flächentrends in diesen Auswerteeinheiten auszuweisen. Bei potentiell eher ungerichteter Verteilung der Gehalte sind demgegenüber geeignete Mittelwerte herauszustellen.

Wesentlich sind diesbezüglich vor allem die Schwefel- und die Karbonat-Gehalte. Weiterhin ist eine genauere Kennzeichnung der Körnungsverhältnisse sowie der Gehalte an organischem Kohlenstoff (TOC) und der Kationenaustauschkapazität (KAK) möglich.

Diesbezüglich die entscheidende Datenquelle, hinsichtlich der Abraummaterialien der verschiedenen Kohlefelder sind die Bodengeologischen Vorfeldgutachten aus den zumeist 1970er und 1980er Jahren. Das Ziel dieser Untersuchungen bestand in der Kennzeichnung der Rekultivierungsfreundlichkeit bzw. -feindlichkeit der einzelnen geologischen Einheiten. WÜNSCHE (1974) zeigt umfassend die Grundidee und Vorgehensweise für diese Analysen auf. Neben den oben benannten Parametern ist auch die in diesen Untersuchungen bestimmte hydrolytische Acidität mit heranzuziehen. Sie kennzeichnet (eher) die potentielle Verwitterbarkeit der jeweiligen Materialien (genauere Erläuterungen dazu vgl. HOTH 2004).

Nach Interpretation in den einzelnen Auswerteeinheiten erfolgt dann eine Verschneidung des erhaltenen geochemischen Modells mit dem geologischen Modell des GRM. Diese Auswertung erfolgt für die überbaggerten Bereiche und führt somit zur Kippeninventarisierung. Man erhält damit flächendifferenzierte Mischbeschaffenheiten für die einzelnen Kippenbereiche. Dabei werden wesentliche Grundzüge der vor Ort angewandten Verkippungstechnologie mit berücksichtigt. Dies heißt z. B., welche Abraumschichten wurden in eine Abraumförderbrücken(AFB)-Kippe und welche in eine Absetzer(AS)-Kippe verstürzt. Es ergeben sich typische Verteilungsmuster in den einzelnen Kippenkörpern.

Für den nördlichen Bereich des Niederlausitzer Raums ist auf die Bilanzierungen in der Dissertation HOTH (2004) hinzuweisen. Für die anderen Kippenbereiche mit größtenteils LMBV-Zuständigkeit sind die Arbeiten von GFI mbH Dresden mit der Dissertation von GRAUPNER (2008) zu nennen. Weiterhin erfolgten für die LEAG-Bereiche verschiedene Arbeiten durch die Firma IWB Institut für Wasser und Boden Dr. Uhlmann .

B4.4.2 DATENRECHERCHE

Wie in Kap. B4.4.1 schon ausgeführt, sind als die wesentlichen Datenquellen die Untersuchungen der Bodengeologischen Vorfeldgutachten anzusehen. Die Herausarbeitung der Einzeldaten aus den alten Berichten in den verschiedenen Archiven erfolgte durch die in Kap. B4.4.1 erwähnten Dissertationen. Dabei wurde auch die digitale Erfassung eines Großteils dieser Proben vorgenommen.

In den geführten Recherchegesprächen mit LEAG und LMBV kam zum Ausdruck, das zum Teil auch weiterführend untersuchte „Neu-Bohrungen“ oder geochemisch untersuchte Tagebauprofil-Proben vorliegen. Dennoch ist festzuhalten, dass der wesentliche Datenpool aus den erwähnten untersuchten Bohrungen der Bodengeologischen Vorfeldgutachten besteht.

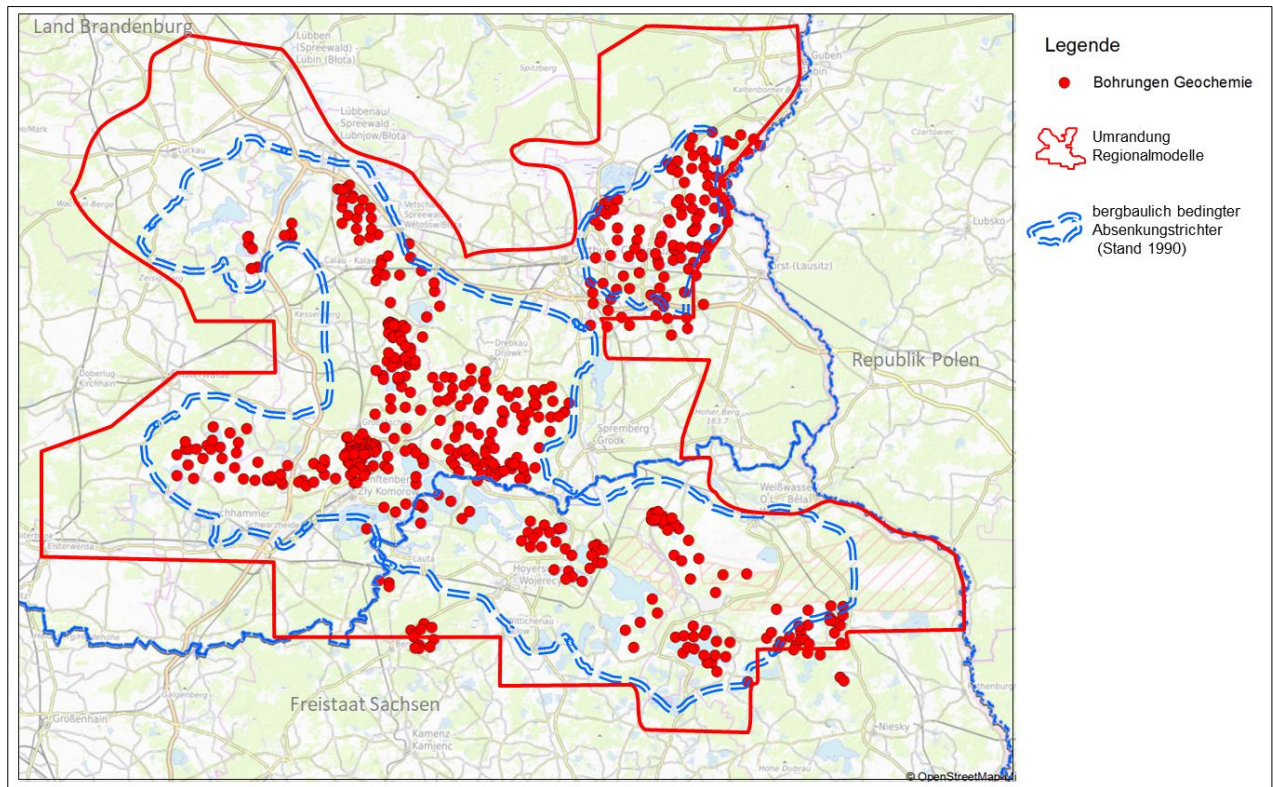


Abbildung B4-3: Verteilung der geochemisch untersuchten Vorfeldbohrungen im Betrachtungsgebiet mit dem Bereich der bergbaulichen Beeinflussung

Abb. B4-3 weist die Lage dieser bereits von GFI in Projekten für die LMBV bzw. von HOTH (2004) und TU Bergakademie Freiberg für den Niederlausitzer Nordraum erfassten Bohrungen aus. Es wird die große Anzahl solcher Bohrungen ersichtlich. Auch wenn nicht alle diese Bohrungen vollständig für das ganze Abraumprofil geochemisch und bodenphysikalisch untersucht wurden, ist dennoch dieser Datenpool beeindruckend. Seine Bedeutung liegt vor allem in der Vergleichbarkeit der Einzeldaten, da über mehrere Jahrzehnte hinweg de facto das genau gleiche Untersuchungsvorgehen angewandt wurde.

B4.4.3 EINSCHÄTZUNG DER DATENBASIS

Es ist einzuschätzen, dass eine sehr gute Datenbasis vorliegt. Der weitere Vorteil ist, dass durch Arbeiten von GFI mbH Dresden und TU Bergakademie Freiberg diese Alt-Papierdaten bereits zu größerem Teil digital erfasst und bewertet vorliegen.

Bei Beginn einer GRM-Bearbeitung sind diese Einzelproben noch einmal dem im GRM Lausitz gebildeten geologischen Modell zuzuordnen, um dann die beschriebene Verschneidung (Vorfeldbilanzierung) durchzuführen. Es ist begleitend die wesentliche Charakteristik der Verkipfungstechnologie für die verschiedenen Kippenkörper zu recherchieren und mit einzubeziehen. Nach dieser räumlichen Inventarisierung der Kippenkörper kann dann der Vergleich/ Abgleich zu den vorliegenden Kippenwasserbeschaffenheitsdaten erfolgen (siehe Kap. B4.5). Wie vom Projektteam im Projekt „Sulfattransportmodellierung im Südraum Leipzig“ (HOTH et al. 2014) erfolgreich praktiziert, resultiert dann daraus die abschließende Festlegung der Anfangsbedingungen für die Kippenwasserbeschaffenheiten im 3D-Stofftransportmodell. Dabei wurde diese verknüpft mit der Einschätzung zu den wesentlichen Stoffspeichern in den Kippenkörpern als gebildete Sekundärminerale (vor allem Gips).

B4.5 DATEN HYDROCHEMISCHE BESCHAFFENHEIT GRUNDWASSER

B4.5.1 DATENANFORDERUNGEN

Die hydrochemische Beschaffenheit der Grundwässer ist die wesentliche Datenquelle, um differenziert für die verschiedenen GWL den hydrogeochemischen Zustand zu charakterisieren und somit auch Festlegungen für den Anfangszustand der Stofftransportmodellierung zu treffen (siehe bereits Kap. B4.4).

Mit diesen Beschaffenheitsdaten werden also folgende Punkte der Stofftransportmodellierung untersetzt:

- Ableitung und Validierung eines geochemischen Modellkonzeptes zur Beschreibung der Interaktion zwischen Porengrundwasserleiter und der Feststoffmatrix. Wie bereits in Kap. B4.4 ausgeführt, lässt sich nur aus der hydrochemischen Beschaffenheit der Grundwässer die Mineralphase Gips als dominanter Sulfat-Feststoffspeicher begründen und quantifizieren. Weiterhin lassen sich auch nur aus der hydrochemischen Beschaffenheit die zugehörigen systembeschreibenden Pufferreaktionen, wie die Carbonatlösung, nachvollziehen. Die solchermaßen abgeleiteten Feststoffspeicher sind wiederum wesentliche Anfangs- und Randbedingungen für das Stoffaustragsmodell.
- Vergleich von Berechnungsergebnissen mit Messwerten in den jeweiligen Modellgrundwasserleitern, zur Prüfung der Modellgüte.
- Plausibilitätsprüfung der Berechnungsergebnisse durch Trendanalysen.

Prinzipiell sind mit den Wasserbeschaffenheiten des Grundwassers alleine keine quantitativen Aussagen über wesentliche Stoffinventargrößen des bergbaulichen Einflusses möglich (z. B. Quantifizierung des sekundär gebildeten „Gipspools“). Dazu sind die Daten vorher in hydrogeochemische Modellierungen (PHREEQC) einzubinden. Insgesamt ist der erfolgreich praktizierte Vorgehensweise im Projekt „Sulfatprognose Südraum Leipzig“ in HOTH et al. [2014] zu folgen.

Soll mit dem Stofftransportmodell eine Aussage über den Zeitraum der bergbaulichen Beeinflussung getroffen werden, ist die Quelle, also das gesamte verfügbare Stoffinventar (z. B. für Sulfat und Eisen), zu berechnen und im Stofftransportmodell als Quelle zu berücksichtigen.

Mit der Definition des Stoffinventars wird es möglich, den erwarteten, räumlich differenzierten Sulfat- und Eisenaustrag aus den Tagebaukippen und dem Gewachsenen im gesamten Untersuchungsgebiet zu modellieren. Dies schließt auch die Frachtbetrachtung, zu Fließgewässern und Seen im festgelegten Prognosezeitraum ein.

B4.5.2 DATENRECHERCHE

Für den Bereich des zukünftigen GRM Lausitz konnten konkrete Grundwasser-Gütemessstellen sowohl bei den Landesämtern von Sachsen und Brandenburg, als auch bei LMBV und LEAG recherchiert werden. Zusammengeführt sind diese Messstellen in nachfolgender Abb. B4-4 dargestellt.

Die Messreihen der einzelnen Gütepegel umfassen recht unterschiedliche Zeitreihen, beinhalten jedoch sehr umfangreiche Messparameter. Somit ist eine gute Datenbasis gegeben, die auch für die Zukunft Messwerte im gesamten Modellgebiet liefern wird. Natürlich sind die Messstellen nicht gleichmäßig über die Fläche verteilt. Es ergibt sich eine verständliche Konzentration von Messstellen um die Abbaubereiche. Aussagen zu einer zielführenden Ver-

modellspezifische Unterschiede im Anforderungsprofil, welche die nachstehende Tab. B4-1 aufzeigt.

Wesentliche Grundvoraussetzung für die Realisierung der Modellkopplung ist, dass beiden Modellen die gleiche Fließgewässernetzgeometrie zugrunde liegt. Im Bodenwasserhaushaltsmodell wird ein Fließgewässernetz für die modellseitige Beschreibung der Abflusskonzentration im Gerinne benötigt. Darüber hinaus sind Informationen zur Gewässerprofilgeometrie im Quer- und Längsschnitt erforderlich, um das Abflussverhalten im Fließgewässer zu simulieren. Für die Modellierung der Fließgewässerspeisung aus deren Einzugsgebieten werden außerdem geometrische Informationen zu den oberirdischen Einzugsgebieten benötigt.

Tabelle B4-1: Benötigte Fließgewässerinformationen

Attribut/Datenart	GWM	BWHM
Lageinformation	x	x
Profilinformationen	x	x
Topologische Konsistenz	x	x
Hydraulische Durchlässigkeit der Gewässersohle/Mächtigkeit Kolmationsschicht	x	
W-Q-Beziehungen	x	
Abflussmessungen	x	x
Oberirdisches Einzugsgebiet		x

Im Grundwassermodell werden zusätzlich Aussagen zur Mächtigkeit der Kolmationszone sowie deren hydraulischer Durchlässigkeit benötigt, um die Austauschraten von Grund- und Oberflächenwasser ermitteln zu können. Weiterhin werden für einzelne Fließgewässerabschnitte Durchfluss-Wasserstandsbeziehungen benötigt, um die Wasserstände bzw. Durchflüsse im Fließgewässer korrekt ermitteln zu können.

Anforderungen an die Fließgewässergeometrie sind:

- topologische Konsistenz, d. h. Fließrichtung und -beziehungen müssen erkennbar sein.
- Fließgewässervermessung mit Profilinformatio (Sohlhöhe, Sohlbreite, Profiltiefe, Profiloberkantenbreite, Sohlneigung, Sohlrauhigkeit, hydraulische Durchlässigkeit der Gewässersohle).

Sind keine Profilinformatio verfügbar, können die Höheninformatio näherungsweise aus einem hoch aufgelösten digitalen Geländemodell gewonnen werden. Angaben zu Sohlbreite bzw. Profiloberkantenbreite können durch Vermessung von Orthophotos abgeschätzt werden.

Anforderungen an die Einzugsgebietsgeometrie sind geschlossene Polygone.

Sind keine Informatio zu oberirdischen Einzugsgebieten vorhanden, können diese durch Auswertung eines digitalen Geländemodells gewonnen werden. Von Belang könnte diese Methode für die Abbildung des Bergbaufolgezustandes sein, welcher durch eine veränderte Vorflutsituation sowie veränderte geomorphologische Verhältnisse geprägt sein kann. Bedingung wären die Kenntnis davon, welche Fließgewässer zukünftig die Vorflutfunktion erfüllen werden, wo sich diese befinden und welches Höhenniveau die Geländeoberkante zukünftig aufweisen wird.

B4.6.2 DATENANFORDERUNGEN STANDGEWÄSSER

Standgewässer werden im Bodenwasserhaushaltsmodell über die Landnutzung definiert und bilanziert. Die wesentliche Informatio, die benötigt wird, ist die Flächenausdehnung der

Gewässer (Tab. B4-2). Über einen vereinfachten Verdunstungsansatz kann die Verdunstung von der freien Wasserfläche somit bei der Aufstellung der Gebietsbilanz berücksichtigt werden. Sofern das Bodenwasserhaushaltsmodell wie vorgeschlagen im Rahmen eines Flussgebietsmodells läuft, werden die Standgewässer ähnlich wie im Grundwassermodell über Speichereinhaltslinien und W-Q-Beziehungen erfasst.

Im Grundwassermodell sollte für eine korrekte Bilanzierung der Standgewässer die Gewässerverdunstung tiefenabhängig vorgegeben werden. Diese kann auf Grundlage frei verfügbarer Klimadaten mit dafür vorgesehenen Berechnungsverfahren bestimmt werden. Außerdem werden morphologische Informationen der Gewässerhohlkörper benötigt, um daraus Flächen-Volumen-Wasserstandsbeziehungen abzuleiten. Daraus werden Wasserstände, in Abhängigkeit vom Füllvolumen berechnet.

Das oberirdische Einzugsgebiet im Grundwassermodell sollte bis zur unmittelbaren Oberkante des Böschungssystems der Gewässerhohlform reichen. Über einen vereinfachten Berechnungsansatz kann somit der Landoberflächenabfluss im Böschungsbereich berücksichtigt werden. Im Bodenwasserhaushaltsmodell hingegen muss das gesamte oberirdische Einzugsgebiet betrachtet werden, da eine detaillierte Simulation der Oberflächenabflussbildung innerhalb des Einzugsgebietes erfolgt.

Tabelle B4-2: Benötigte Standgewässerinformationen

Attribut/Datenart	BWHM	GWM
Flächengröße	x	
Morphometrische Informationen (Wasserstands-Volumen-Flächenbeziehung)		x
Oberirdisches Einzugsgebiet	x	x
Gewässerverdunstung	x	x
Gewässersohle – Kolmation		x

B4.6.3 DATENRECHERCHE FLIEßGEWÄSSER

Für die Modellierung der Fließgewässer sind die in Tab. B4-3 benannten Datenarten und -quellen wesentlich. Die Beschaffung flächendeckender geometrischer Informationen ist in der Regel unproblematisch und kostenfrei. Bei den Gewässerprofil- und Beschaffenheitsdaten sowie bei den vorliegenden Abflussmessungen ist im Zuge der Bearbeitung im Detail zu prüfen, ob diese für die gewünschten Aussagen ausreichend sind. Wenn dies nicht der Fall sein sollte, müsste die Datenbasis nachverdichtet werden, gegebenenfalls auch durch Eigenhebungen (Stichtagsmessungen, Profilvermessungen etc.).

Insgesamt liegen aus den bestehenden Landesmodellen Daten vor (vgl. Kap. B4.7.3). Diese sind vor allem für die überbaggerten Bereiche zu qualifizieren.

Tabelle B4-3: Datenquellen Fließgewässer

Datenart	Datenquellen		
	Bergbaulich überprägter Raum	Bergbaulich nicht überprägter Raum	
		Sachsen	Brandenburg
Oberirdische Einzugsgebiete	LEAG, LMBV	Wasserhaushaltsportal, LfULG	Landesmodell- Brandenburg, LfU
Gewässernetz	LEAG, LMBV	Gewässerstrukturkartierung 2016 (LfULG), LTV	Gewässerzustandsbewertung (LfU)

Datenart	Datenquellen		
	Bergbaulich überprägter Raum	Bergbaulich nicht überprägter Raum	
		Sachsen	Brandenburg
Beschaffenheit	LEAG, LMBV	Gewässergütedaten LfULG	Gewässergütedaten LfU
Abflussmessung	LEAG, LMBV	LfULG	LfU

B4.6.4 DATENRECHERCHE STANDGEWÄSSER

Geometrische Informationen zu Standgewässern können kostenfrei bezogen werden. Die zur Verfügung stehenden Daten für Standgewässer sind in Tab. B4-4 ausgewiesen. Daten zur Bergbaufolgesituation sind aus Planungsunterlagen von LMBV und LEAG zu entnehmen. Gewässerlotungen liegen ebenfalls in der Regel vor. Die benötigten meteorologischen Messgrößen für die Berechnung der Gewässerverdunstung sind zumeist frei verfügbar.

Die Gewässerverdunstung wird mittels eines vereinfachten Kombinationsverfahrens nach RICHTER (1984) im DVWK-Merkblatt 238/1996 berechnet.

Tabelle B4-4: Datenquellen Standgewässer

Datenart	Datenquellen		
	Bergbaulich überprägter Raum	Bergbaulich nicht überprägter Raum	
		Sachsen	Brandenburg
Standgewässergeometrie	LEAG, LMBV	CIR- Biotoptypen- und Landnutzungskartierungen der Jahre 1993, 2005 (LfULG), Gewässerstrukturkartierung 2016 (LfULG), LTV	Landesmodell- Brandenburg, CIR- Biotoptypen- und Landnutzungskartierungen der Jahre 1993, 2009 (LfU)
Morphometrische Daten	Gewässerlotungen, Risswerke (LEAG, LMBV)	LTV für Talsperren	
Einzugsgebiet	Vermessungsdaten aus Befliegungen (LEAG, LMBV)	DGM (Landesvermessung)	DGM (Landesvermessung)
Gewässerverdunstung	Meteorologische Messdaten (LEAG, LMBV)	Berechnet aus Meteorologische Messdaten (DWD)	Berechnet aus Meteorologische Messdaten (DWD)

B4.6.5 EINSCHÄTZUNG DER DATENBASIS OBERFLÄCHENGEWÄSSER

Für die Bereitstellung der benötigten Informationen zu den Oberflächengewässern stehen verschiedene Quellen zur Verfügung (Tab. B4-3, B4-4). Die Datenlage ist als gut bis sehr gut zu beurteilen. Bei einem möglichen GRM-Aufbau müsste geprüft werden, ob die benötigten Informationen - neben den öffentlich zugänglichen Quellen - auch aus unveröffentlichten Auftragsarbeiten der genannten Institutionen in bereits weiter aufgearbeiteter Form bezogen und benutzt werden können. Weiterhin ist ebenfalls zu prüfen, ob Sekundärinformationen der Regionalmodelle verwendet werden können.

Für die relevanten Gewässer stehen Daten in ausreichendem Umfang für die Einbindung in die GW-Strömungsmodelle zur Verfügung. Das betrifft die morphometrischen Informationen und die daraus abgeleiteten Wasserstands-Volumen-Flächenbeziehungen. Auch die Daten zu den oberirdischen Einzugsgebieten der Seen zur Bestimmung des „surface-runoff“ sind aus

den Oberflächen-Abflussmodellen verfügbar. Meteorologische Datenreihen für die Niederschläge können aus Messwerten abgeleitet werden. Bezugsquellen sind mit den DWD-Stationen in der Lausitz verfügbar. In Sachsen erfolgte die Aufbereitung der Daten im System REKIS. Die Gewässerverdunstung kann aus den Klimadaten berechnet werden (DWA-M 504-1, DVWK 1996) oder ist Ergebnis der gekoppelten Modellierung (siehe ArcEGMO).

Flächendeckende Daten zur Charakterisierung der Gewässersohle (Kolmationschicht) stehen nur für wenige Tagebaufolgeseen und Fließgewässerabschnitte zur Verfügung. Wenn eine Erhebung von Daten erfolgte, dann häufig im Zusammenhang mit wissenschaftlichen Untersuchungen. Zielführender wird es sein die Bestimmung der Parameter, die die Interaktion zwischen den Fließgewässern und dem Grundwasserleitern beschreibt, aus einer ersten Modellkalibrierung abzuschätzen.

B4.7 DATEN FÜR BODENWASSERHAUSHALTSMODELL

B4.7.1 GENERELLE DATENANFORDERUNGEN

Für den Aufbau des Bodenwasserhaushaltsmodells (BWHM) werden folgende Daten zur Beschreibung der hydrologisch relevanten Eigenschaften des Untersuchungsraumes benötigt:

- Oberirdische Einzugsgebiete,
- Gewässernetz,
- DGM (Höhenlage, Gefälle, Aspekt),
- Bodendaten (Pedologie),
- Versiegelung, Anschlussgrad und Art der Kanalisation,
- Vegetationsbestand (benötigte Kennwerte abhängig vom gewählten Vegetationsmodell).
- Melioration / Drainagen in den nicht bergbaulich geprägten Randbereichen,
- Grundwasserflurabstand (sofern Teilbereiche des GRM nicht gekoppelt modelliert werden sollen, ansonsten wird der GW-Flurabstand aus dem GW-Modell bereitgestellt).

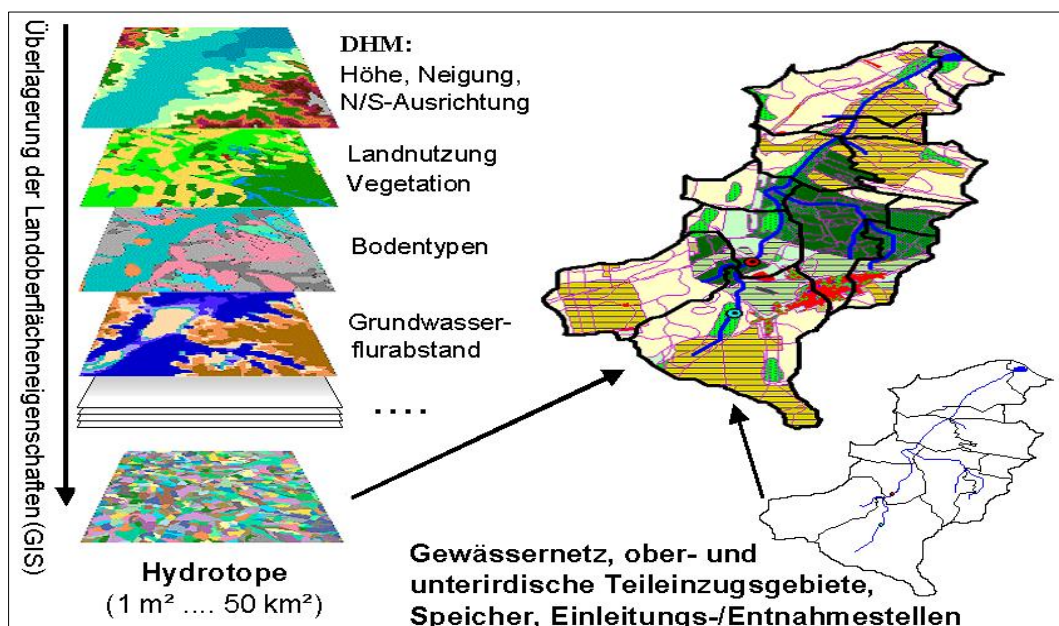


Abbildung B4-5: Aggregations-Schema von ArcEGMO: Erzeugung von Hydrotopen durch Verschneidung der Basiskarten (links) und Erstellen des finalen Raummodells durch Zuordnung dieser Hydrotoppe zu den Teileinzugsgebieten des Untersuchungsraumes (rechts)

Aus diesen Basisdaten werden entsprechend des Aggregationsschemas von ArcEGMO (BECKER et al. 2002, PFÜTZNER 2002) Hydrotope bzw. Elementarflächen als Modellgeometrien des Bodenwasserhaushaltsmodells gebildet (Abb. B4-5), die sich meist als unregelmäßige Polygone ergeben.

In der Regel werden wesentliche Einflussgrößen, wie die Oberflächenmorphologie, die Bodeneigenschaften und die Verteilung der Landnutzung im Untersuchungsgebiet, als zeitlich unveränderlich (stationär) angesetzt.

Weitere Größen, wie die Vegetationsbedeckung oder die Grundwasserflurabstände, werden je nach Zielstellung der Modellierung und Verfügbarkeit entsprechender Informationen benötigt:

- ebenfalls stationär mit zeitlich nicht veränderlichen Kennwerten oder
- über die Vorgabe einer zeitlichen Entwicklung als externe Randbedingung (z. B. Jahresgänge als Zeitfunktion) oder
- instationär deterministisch simuliert über physikalisch fundierte Modellansätze (Vegetationsmodelle, Grundwassermodelle).

Die zeitlich veränderlichen Randbedingungen für das hydrologische Regime eines Gebietes und damit für dessen Bodenwasserhaushalt werden für die Modellierung als Zeitreihen benötigt. Im Einzelnen sind dies:

- Meteorologische Zeitreihen (Niederschlag, Lufttemperatur, Strahlung/ Sonnenscheindauer, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit) als Tageswerte in hinreichender räumlicher Auflösung für einen hinreichend langen Zeitraum,
- Abflussdaten an Oberflächenwasserpegeln, als Tageswerte in hinreichender räumlicher Auflösung für einen hinreichend langen Zeitraum für die Modellkalibrierung und die Validierung der im Rahmen der gekoppelten Oberflächen-Grundwasser-Modellierung ermittelten Gebietswasserbilanzen,
- Wassernutzungen (Entnahmen, Einleitungen, Überleitungen) in möglichst hoher zeitlicher Auflösung (Mittelwerte für Jahresperioden) als Quellen und Senken im Rahmen der Gebietswasserbilanzierung.

Eine ausführliche Beschreibung der benötigten Daten ist Bestandteil der ArcEGMO-PSCN-Dokumentation.

B4.7.2 ANFORDERUNGEN AN EINE GEKOPPELTE MODELLIERUNG

Für den Datenaustausch zwischen Grund- und Oberflächenwassermodell, im Rahmen der gekoppelten Modellierung, ist eine Angleichung der Modellgeometrien beider Modelle notwendig. Da Grundwassermodelle zumeist nicht auf Basis unregelmäßiger Polygone arbeiten, übernimmt das Bodenwasserhaushaltsmodell die Geometrien des Grundwassermodells. Damit verbunden ist eine Übertragung der Daten des Bodenwasserhaushaltsmodells auf die Geometrien des Grundwassermodells.

Ein weiterer Abgleich der Modellgeometrien ist bei den Gewässerdaten notwendig. Es ist z. B. erforderlich, dass je Modellgeometrie des Grundwassermodells maximal ein Gewässerstrang zugeordnet werden kann. Dies erfordert in Gebieten mit sehr hoher Gewässerdichte eine sehr feine Auflösung des Grundwassermodells oder eine Ausdünnung des Gewässernetzes.

B4.7.3 DATENRECHERCHE

Aufgrund der Erfahrungen bei der Erstellung von Bodenwasserhaushaltsmodellen für eine gekoppelte Modellierung, und um eine gewisse Passfähigkeit zu den existierenden landesweiten Modellen in Brandenburg und Sachsen zu gewährleisten, werden im Folgenden die verwendeten Datengrundlagen für das Landesmodell des LfU Brandenburg, das Wasserhaushaltsportal beim LfULG Sachsen sowie verfügbare Datengrundlagen für die bergbauprägen Gebiete beschrieben. Anschließend wird eine Empfehlung für die für das GRM Lausitz zu verwendenden Daten abgeleitet.

(1) Landesweites Niederschlag-Abfluss-Modell Brandenburg

Zielgröße für das Brandenburg-Modell (Abb. B4-6) ist nicht der Bodenwasserhaushalt, sondern der Gewässerabfluss. Als Modell wurde der EGMO-Ansatz und nicht das für das GRML empfohlene PSCN-Modell verwendet. Ursprünglich sollte das Brandenburg-Modell auf die Landesfläche begrenzt werden und Bergbauggebiete sollten nicht modelliert werden.

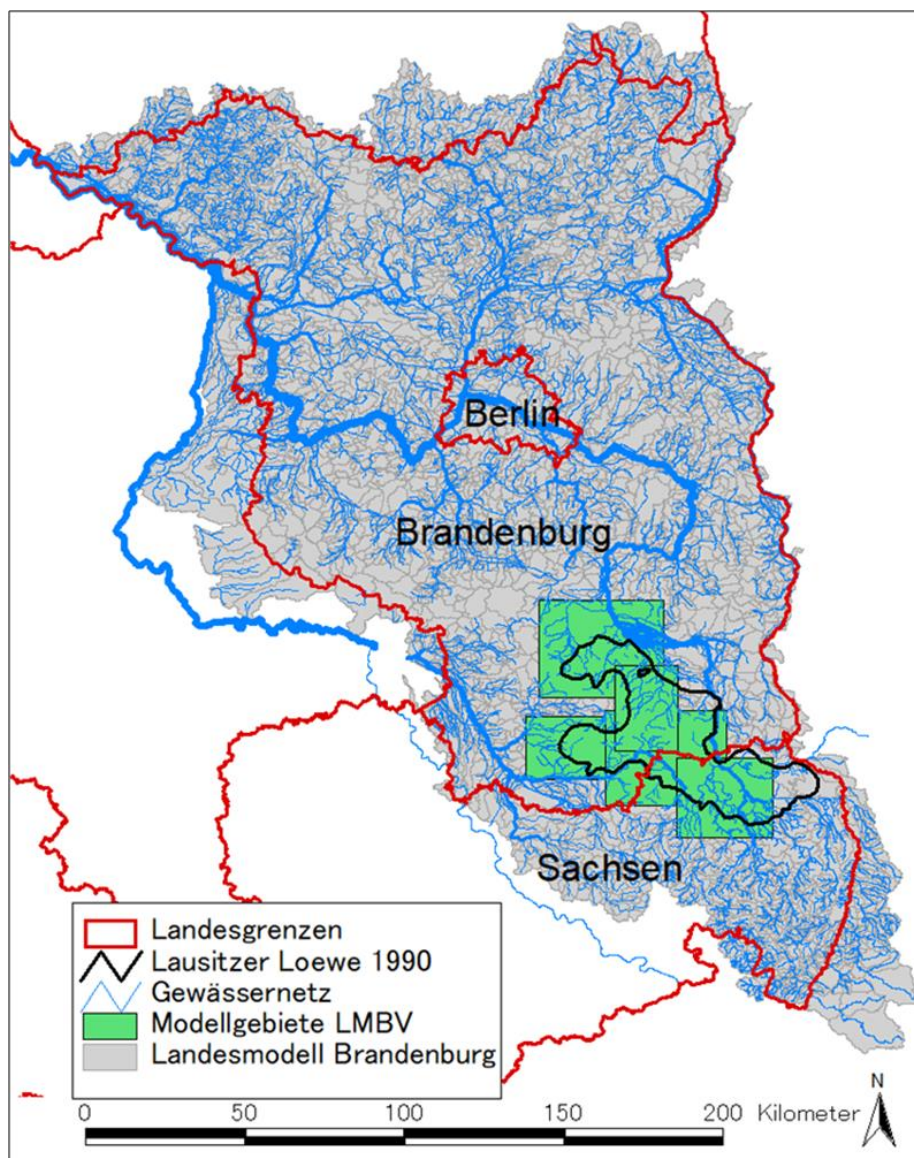


Abbildung B4-6: Ausdehnung des Bodenwasserhaushaltsmodell mit Vergleich zum bergbaulich beeinflussten Modellgebietes der LMBV („Lausitzer Löwe“, Stand 1990)

Damit wäre aber die Erstellung von Gebietswasserbilanzen insbesondere im südlichen Brandenburg kaum möglich, so dass die vollständigen Einzugsgebiete von Schwarzer Elster, Spree und Lausitzer Neiße in die Modellierung einbezogen wurden. Wie vorstehende Abbildung B4-6 zeigt, liegt das Modellgebiet für das GRM innerhalb des Landesmodells Brandenburg.

Anzumerken ist allerdings, dass für die außerhalb Brandenburgs liegenden Gebiete, wie auch für die Bergbauflächen generell in den letzten Jahren keine Aktualisierungen der verwendeten Grundlagendaten erfolgte.

So sind im derzeitigen Brandenburg-Modell das Gewässernetz gewnet25 (Version 4.1; Stand: 2015), die Seen (Version 4.1 Stand: 2016) und die oberirdische Einzugsgebiete ezg25 (Version 4.0; Stand: 2014) weitgehend auf dem aktuellen Stand der LfU-Datenbasis. Demgegenüber sind diese Daten für die sächsischen Gebietsteile (bis auf das Einzugsgebiet der Lausitzer Neiße im Rahmen des Projektes NEYMO) seit ca. 10 Jahren nicht mehr erneuert worden.

Abb. B4-7 zeigt weiterhin die verwendeten Bodeninformationen im Brandenburg-Modell. Für die Landesfläche Brandenburgs wurde die BÜK300 genutzt, die nach wie vor die fundierteste Bodenkarte für landesweite Betrachtungen in Brandenburg ist.

Für sächsische Anteile wurde das beim Aufbau des Brandenburg-Modells 2004 verfügbare Blatt der BÜK200 genutzt und ansonsten auf die BÜK1000 zurückgegriffen. Die BÜK1000 wurde auch immer dann verwendet, wenn Flächen in der BÜK300 oder BÜK200 nicht parametrisierbar waren. Dies betraf Siedlungsflächen und devastierte, also bergbaugeprägte Flächen.

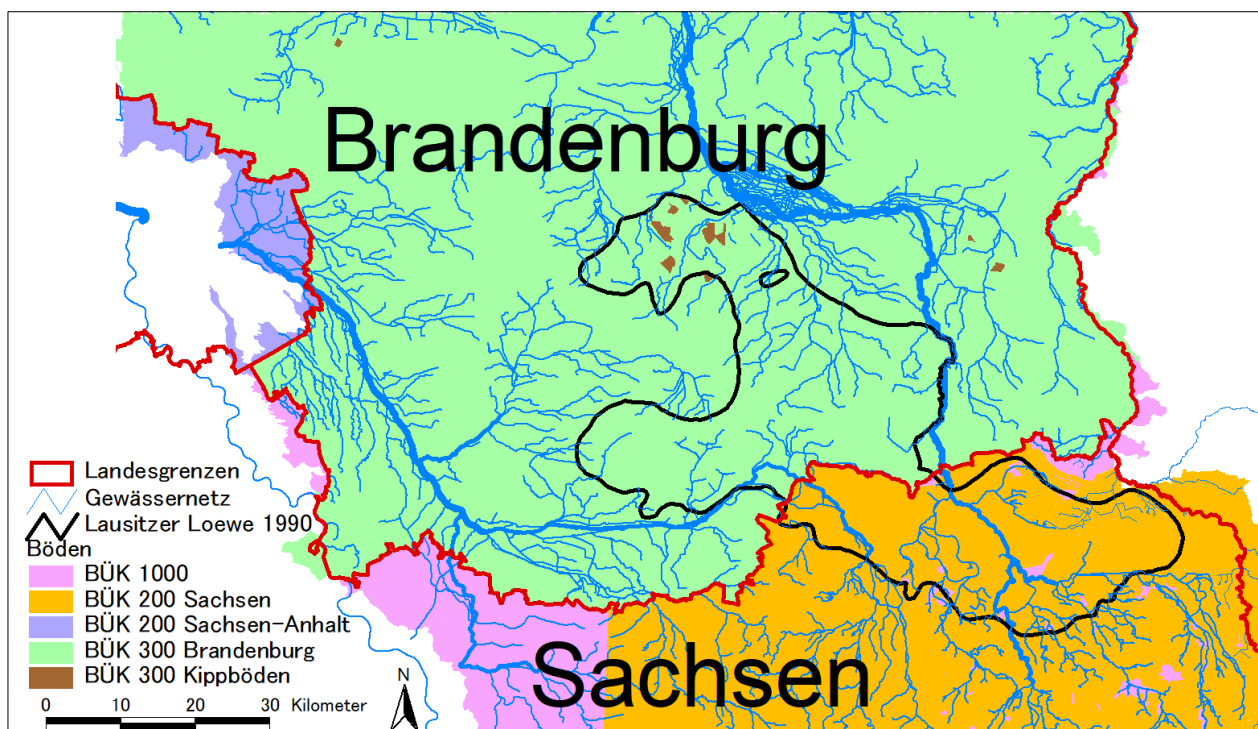


Abbildung B4-7: Verwendete Bodeninformationen im Brandenburg-Modell

Zur Charakterisierung der Landnutzung (Abb. B4-8) wurden in Brandenburg und für die sächsischen Gebietsteile einheitlich die Color-Infrarot-(CIR)-Biotoptypen- und Landnutzungskartierung verwendet. In nachfolgender Abb. B4-8 schwarz gekennzeichnet sind devastierte, d. h. bergbaue geprägte Flächen, aus denen mittlerweile teilweise Wasserflächen bzw. Restseen geworden sind.

Für den Aufbau des GRM Lausitz ist somit auch vorzugeben, welchen Gebietszustand bzw. welche -zustände das Bodenwasserhaushaltsmodell abbilden soll.

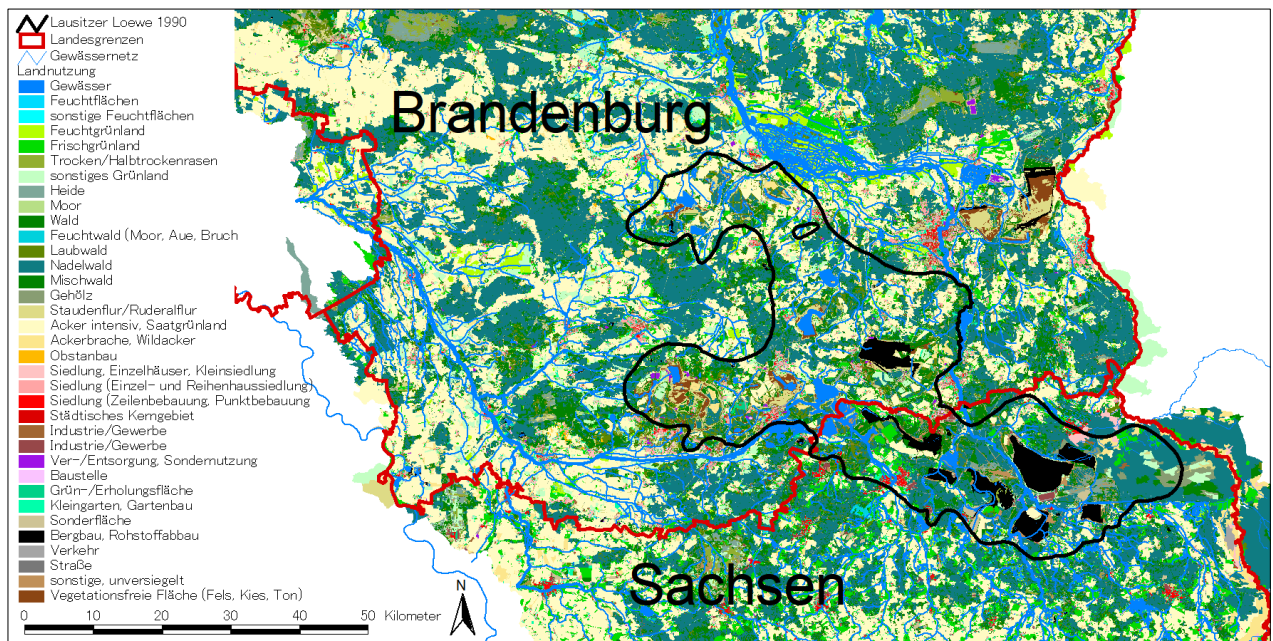


Abbildung B4-8: Verwendete Landnutzung im Brandenburg-Modell

Als Klimadaten wurden die REGNIE-Daten des DWD in einer Auflösung von 1 x 1 km und einer zeitlichen Auflösung von Tageswerten genutzt. Für die weiteren Klimagrößen wie Lufttemperatur, Luftfeuchte und Globalstrahlung/Sonnenscheindauer wurden Tageswerte von den im Modellgebiet verfügbaren Klimastationen des DWD genutzt.

Im Brandenburg-Modell kann der Zeitraum von 1951 bis 2015 gerechnet werden, allerdings ohne die insbesondere in den bergbaue geprägten Bereichen stattfindenden Entwicklungen, während eines Simulationslaufes, berücksichtigen zu können. Letztlich ist es (derzeit) nur möglich, Szenario-Analysen durchzuführen, die Auskunft darüber geben, welche Gebietshydrologie sich eingestellt hätte, wenn über den kompletten Simulationszeitraum die vorgegebene Landnutzung gegeben wäre.

Ähnliches gilt für die Oberflächenwasserkörper, für die ebenfalls vorzugeben ist, für welchen Gebietszustand - und damit oft verbunden, welche Bewirtschaftung - sie ins Modell einzu binden sind. Nachfolgende Abb. B4-9 zeigt die Einbindung der Restseekette ins Landesmodell Brandenburg. Für die Einbindung benötigt werden Steuerregeln, die Speicherinhaltslinie und die Schlüsselkurve.

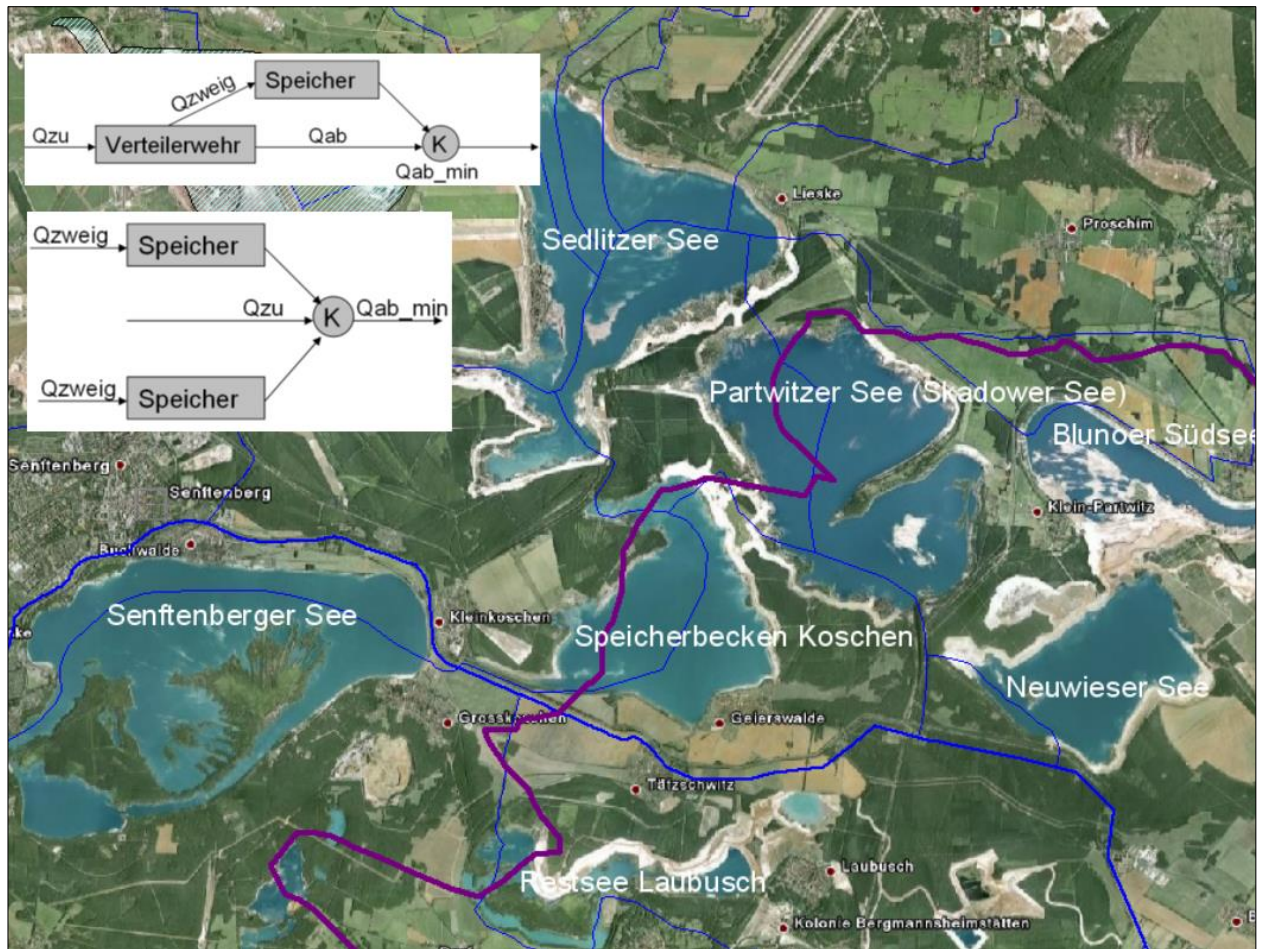


Abbildung B4-9: Einbezug der Restseekette im Brandenburg-Modell

Die Tab.B4-5 gibt eine Übersicht über die in Brandenburg-Modell für die Landesfläche genutzten Datengrundlagen.

Tabelle B4-5: Geodaten im Brandenburg-Modell für den Modellbereich Brandenburg

Information	GIS-Kartenmaterial	Format
Boden	BÜK300 (LBGR) Stand 2011	Vektordaten
Landnutzung	Biotop- und Landnutzungskartierung im Land Brandenburg (BTLN) 2009"; Bereitstellung durch LfU Brandenburg	Vektordaten
Versiegelung, Anschlussgrad und Art der Kanalisation	ATKIS-Daten 2010-Objektart Plätze/Gebäude/Straßen (nach Bethwell 2008)	Vektordaten Rasterdaten
Fließgewässernetz	Gewässernetz gewnet25 (Version 4.1; Stand: 2015)	Vektordaten
Teileinzugsgebiete	Oberirdische Einzugsgebiete ezg25 (Version 4.0; Stand: 2014),	Vektordaten
DGM	ATKIS, DGM1 und DGM10, Stand 2015	Rasterdaten
Grundwasserflurabstände	Spezialkarte des LfU	Vektordaten

(2) Wasserhaushaltsmodell Sachsen

Für den sächsischen Raum wurde im Rahmen des KLIWES-Projektes durch die TU Dresden im Auftrag des LfULG, ein Wasserhaushaltsmodell unter Nutzung von ArcEGMO-PSCN auf-

gebaut. Mit diesem Modell können flächendifferenziert verschiedene Wasserhaushaltsgrößen in täglicher Auflösung berechnet werden, die dann im Wasserhaushaltsportal (WHP) Sachsen räumlich und zeitlich aggregiert abrufbar sind.

Bis auf maßgebliche Teile der bergbaugeprägten Lausitz und den Elbeschlauch liegt dieses Modell landesweit vor.

Die Geodatenbasis setzt sich aus Informationen zu Boden, Landnutzung und Hydrogeologie, dem Fließgewässernetz und den Teileinzugsgebieten sowie einem Digitalen Geländemodell zusammen. Die verwendeten GIS Daten sind in Tab. B4-6 dargestellt.

Tabelle B4-6: Verwendete Geodaten im Wasserhaushaltsmodell Sachsen

Information	GIS-Kartenmaterial	Format
Geologie	Hydrogeologische Übersichtskarte Sachsen HÜK200, Vektordatensatz	Vektordaten
Boden	Bodenkonzeptkarte BKkonz	Vektordaten
Landnutzung	Amtliches, kartografisches Informationssystem ATKIS-DLM DTK10	Rasterdaten
Fließgewässernetz	Fließgewässernetz Freistaat Sachsen	Vektordaten
Teileinzugsgebiete	EzgSN04205, TEZG Struktur mit Gewässerkennzahlen nach LAWA (1993)	Vektordaten
DGM	Digitale Reliefanalyse Sachsen DGM25, 20 x 20 m, Höhengenaugigkeit: 0,2m	Rasterdaten

Der Grundwasserflurabstand wurde aus den Bodendaten (BKkonz und Sächsischer Bodenatlas des LfULG 2007), der Hydrogeologischen Spezialkarte Hyk50 (LfULG, 2004) und den für den Lockergesteinsbereich Sachsen vorliegenden Hydroisohypsen ermittelt.

Räumliche Informationen zur Stadtentwässerung (Versiegelungsgrad, Kanalisationstyp und Anschlussgrad) werden im WHP nach GLÖCKNER & RÜSTER (2010) aus vorliegenden Stadtstrukturtypenkartierungen hergeleitet.

Meliorationseigenschaften sowie potentiell drainagebedürftige Flächen wurden von MÖLLER et al. (2009) und STEININGER et al. (2013) ermittelt. Für die Modellierung wurden Drainagen nur auf Acker- und Grünlandflächen zugelassen (SCHWARZE et al., 2016).

Talsperren und Speicher über 1 Mio. Kubikmeter Volumen werden im WHP ebenso berücksichtigt. Für die Analyse des Ist- Zustandes werden die gemessenen Abgaben im Wasserhaushaltsmodell zur Berechnung verwendet, für Projektionen entspricht der Zufluss zur Talsperre dem Abfluss.

Die Klimadaten wurden für die Berechnung in räumlicher Auflösung von mindestens 1 x 1 km und in zeitlicher Auflösung von Tagesschritten genutzt (Schwarze et al. 2014). Dazu zählen nach Richter (1995) korrigierter Niederschlag, der Nebelniederschlag in Gebieten, die höher als 400 m NHN liegen, die maximale, mittlere und minimale Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung. Die für den Zeitraum von 1961 bis 2010 vorliegende Datenbasis wurde aus Stationsdaten erstellt, die nach einer im Rahmen des KliWES-Projekts (TU Dresden, Professur für Hydrologie) erarbeiteten Methode gerastert wurden.

(3) Bergbaugeprägte Gebiete

Die bergbaugeprägten Bereiche der Lausitz sind in den beiden Landesmodellen nur im Randstreifen von ca. 5 km (Sachsen) oder nur sehr vereinfacht (Brandenburg) erfasst. Allerdings wurde für den Leipziger Raum im Jahr 2018 eine gekoppelte Grundwasser-Bodenwasserhaushaltsmodellierung durchgeführt.

Für eine Untersetzung sind jedoch fundierte Datengrundlagen bei LfULG, der LMBV und der LEAG vorhanden. Für die Tagebaubereiche Nochten, Jänschwalde und Lauchhammer liegen die Daten für ein BWHM bereits aufbereitet vor.

Anders als bei den bisherigen landesweiten Datengrundlagen ist der Zeitbezug hier wesentlich stärker zu beachten, weil Änderungen im Typ der Landnutzung, der Bodenverhältnisse, der Oberflächenmorphologie, der Grundwasserverhältnisse und im Gewässersystem dynamischer und kleinräumiger erfolgen.

Für die Datenerfassung und Aufbereitung sind Vorgaben erforderlich, welchen Zustand bzw. Zeitpunkt die Daten repräsentieren sollen. Daraus ergeben sich dann für unterschiedliche Bereiche u.U. auch unterschiedliche Datenquellen.

Die Dynamik der Bergbauggebiete kann durch die Erfassung charakteristischer Systemzustände vereinfacht abgebildet werden, wobei die folgenden vier vorgeschlagen werden:

- Vorbergbaulicher Zustand bzw. Ausgangszustand,
- Devastierung im Rahmen des aktiven Bergbaus,
- Oberflächenkonturierung und Wiederbepflanzung im Rahmen der Rekultivierung und
- Bergbaufolgezustand (Endzustand).

In der bisherigen Modellierungspraxis wird dabei so verfahren, dass für diese vier Zustände jeweils die Grundwasserneubildung flächendifferenziert berechnet wird und im Grundwassermodell in Abhängigkeit vom Tagebaufortschritt und der Verkippungstechnologie zeitdynamisch vorgegeben wird.

Mit Stützung auf die vorhandene Datenbasis wird mittels einer geeigneten Parametrisierung ein plausibles Bild des Wasserhaushaltes der unterschiedlichen Phasen des Bergbaus gezeichnet. Wesentliche Rolle spielt die modellseitige Erfassung der Landnutzung sowie der bodenphysikalischen Eigenschaften. Die Erfassung der Landnutzungsverhältnisse bzw. der Bodenbedeckung durch Bewuchs lässt sich mit relativ großer Sicherheit für die unterschiedlichen Systemzustände vornehmen. Über landnutzungsartspezifische Parameter wie z. B. Bodenbedeckungsgrad, Rauigkeit sowie weitere pflanzenphysiologisch bestimmte Parameter wie Interzeptionspeicherkapazität, Blattflächenindex und Durchwurzelung lassen sich unterschiedliche Bodenbedeckungsarten sowie auch Entwicklungsstadien von Waldbeständen erfassen. Dazu bietet ArcEGMO eine Vielzahl von Parametersätzen.

Weitaus schwieriger gestalten sich die Erfassung der Bodenverhältnisse und deren Parametrisierung. Im Zuge der Devastierung geht durch den fortschreitenden Tagebau die natürliche Bodenstruktur verloren. Im nachbergbaulichen Zustand finden anthropogen umgelagerte Böden Verbreitung, deren Kornzusammensetzung und bodenphysikalische Eigenschaften durch die bodenkundliche Kippenkartierung charakterisiert sind. Für die modellhafte Beschreibung des nachbergbaulichen Zustandes müssen meist begründete Annahmen getroffen werden.

Diese Annahmen stützen sich auf vorhandene Bodenkartierungen auf bereits verkippten Arealen im jeweiligen Untersuchungsraum und deren Inter- bzw. Extrapolation auf nicht kartierte Bereiche. Bodengeologische Kartierungsberichte zu Kippenarealen existieren auch für die meisten anderen Tagebaubereiche, sie sind für das sächsische Gebiet als sog. Kippbodenkarten im Maßstab 1:10.000 (KBK10) im Bereich Geologie des LfULG digital verfügbar. Digitale Kippbodendaten liegen auch bei der LMBV vor. In beiden Fällen überstreichen die kartierten Bereiche i. d. R. jedoch nur Teilbereiche der Kippenareale. Mangelt es an Kippsubstratkartierungen ist die Grundannahme in der Regel folgende, dass für die Rekultivierung das zwischengelagerte Bodensubstrat verwendet wird, welches am Rekultivierungsstandort Verbreitung fand, bevor er durch den Tagebau devastiert wurde. Da die natürliche Schichtung des Bodens durch den Umlagerungsprozess gestört ist, wird für den Bergbaufolgezustand ein Einschichtbodenprofil bestehend aus der Hauptbodenart des natürlichen vorbergbaulichen Bodens angenommen.

Im Folgenden werden wesentliche Datengrundlagen mit Bezugnahme auf die zu beschreibenden vier vorgeschlagenen Systemzustände für einzelne Tagebaubereiche innerhalb des angestrebten Großraummodells Lausitz aufgeführt.

(4) Vorbergbaulicher Zustand bzw. Ausgangszustand

Für die Erfassung des vorbergbaulichen Landnutzungszustandes (Ausgangszustand für den Modellstart) eignen sich historische Landnutzungskartierungen bzw. Luftbildaufnahmen. Eine geeignete Datengrundlage bildet die Biotoptypen- und Landnutzungskartierung aus dem Jahr 1993, welche für Sachsen und Brandenburg vorliegt. In Ergänzung können historische Orthophotos, welche bei den bergbaubetriebenden Unternehmen vorliegen genutzt werden, um Informationen zur Bodenbedeckungsart zu gewinnen.

Vorbergbauliche Bodeninformationen können weiterhin aus den folgenden amtlichen Bodendaten gewonnen werden, wobei im Einzelfall zu prüfen ist, in welchen Bereichen sich welche Datenquellen eignen:

- Daten der Reichsbodenschätzung.
- Bodenübersichtskarte 1: 50.000 (LfULG Sachsen).
- Bodenübersichtskarte 1: 300.000 (LfU Brandenburg).
- Bodenübersichtskarte 1: 200.000 (BGR).

In den meisten Fällen sind vom Bergbau devastierte Bereiche in den Bodenübersichtskarten nicht kartiert. Jedoch liegen für überbagerte und danach wieder rekultivierte Bereiche nach ca. 1960 zumeist Bodenkippenkartierungen vor. Diese sind im Bereich von Sachsen mittlerweile über das LfULG mehr oder weniger flächendeckend, auch digital im LfULG selbst, verfügbar. Ebenfalls liefern historische topographische und geologische Karten Informationen zu vorbergbaulich, geomorphologisch, hydrographischen Verhältnissen. Historische geologische Karten zur Quartärverbreitung liefern ebenfalls Anhaltspunkte für die Zusammensetzung des Bodensubstrats und erlauben Rückschlüsse auf Bodenarten.

(5) Devastierung im Rahmen des aktiven Bergbaus (Istzustand)

Der aktive Bergbau ist geprägt durch ausgedehnte vegetationsarme bzw. -freie Flächen, die im Zusammenhang mit der Vorfeldberäumung und der Abbautätigkeit geschaffen werden. Die Rodung großer Waldbestände bedingt eine gravierend andere Wasserhaushaltssituation. Die Grundwasserneubildung ist dann auf diesen vegetationsfreien Arealen deutlich begünstigt und erhält als Bilanzgröße besonderes Gewicht.

Im Rahmen der Bodenwasserhaushaltsmodellierung kann der Istzustand bzw. die Phase der Devastierung sehr gut über Orthophotos erfasst werden, die regelmäßig durch die LEAG und die LMBV in Auftrag gegeben werden. Unterschiedliche Momentaufnahmen der aktiven Bergbauphase liefern darüber hinaus die Biotoptypen- und Landnutzungskartierungen von Sachsen aus dem Jahr 2005 und für Brandenburg aus dem Jahr 2009.

(6) Oberflächenkonturierung und Wiederbepflanzung im Rahmen der Bergbausanierung

Dieser Zustand beschreibt ein Stadium zwischen der Devastierung und dem Bergbaufolgezustand. Unentbehrlich sind Informationen zur geplanten Bergbaufolgenutzung. Für den Großraum Jänschwalde liefern z. B. derartige Informationen verfahrensführende Unterlagen zum Braunkohlenplan Jänschwalde und Jänschwalde-Nord sowie über den Braunkohleplan Tagebau Cottbus-Nord.

Ebenfalls für die übrigen Tagebaue innerhalb des geplanten Großraummodell-Lausitz-Gebietes existieren derartige Unterlagen zur Bergbaufolgenutzung. Diese liefern Hinweise über die angestrebte zukünftige Landnutzung. Waldflächen nehmen eine Sonderrolle ein, da aufwachsende Waldbestände eine langsame Dynamik besitzen und eine langwierige Veränderung des Wasserhaushaltes bewirken. Die Erfassung von Zwischenstadien wie Aufforstungsbereiche oder Dickungen ist deshalb für Aussagen zur mittelfristigen Entwicklung des Gebietswasserhaushaltes von besonderem Interesse. Wissenschaftlich begründete Parametersätze für die Beschreibung der unterschiedlichen Waldentwicklungsstadien sind in ArcEGMO standardmäßig enthalten.

(7) Bergbaufolgezustand (Endzustand)

Für langfristige perspektivische Aussagen zum Gebietswasserhaushalt und den Grundwasserverhältnissen ist der Bergbaufolgezustand in seiner endgültigen Ausprägung, gemäß den vorhandenen Bergbaufolgenutzungsplanungen entscheidend. Dies gilt ebenfalls Informationen zu Flusslaufrückverlegungen, die Entstehung von Tagebaurestseen sowie Ableitern gehen aus den Planungsunterlagen hervor.

B4.7.4 EINSCHÄTZUNG DER DATENBASIS – VORGEHEN BEIM AUFBAU GRM LAUSITZ

Für den Aufbau des GRM Lausitz bietet es sich an, die Datenbasis des Brandenburg-Modells als Grundlage zu verwenden, um ein erstes, rechenfähiges Basismodell aufzubauen.

Tabelle B4-7: Verfügbare Datengrundlagen für die bergbaugeprägten Gebiete

Information	Datenquelle
Gewässernetz und oberirdische Einzugsgebiete	Planungsgrundlagen (LEAG, LMBV)
DGM1	Laserscan, Bergbaufolgenutzungskonzepte (LEAG, LMBV)
Bodendaten (Pedologie)	KSK 10 (LfULG Sachsen), Kippsubstratkartierungen (LEAG, LMBV)
Versiegelung	Luftbilder, ATKIS
Landnutzung, Vegetationsbestand	Orthophotos zur Ableitung zeitbezogener Zustände, Bergbaufolgenutzungskonzepte (LEAG, LMBV)
Grundwasserflurabstand	Sim. GW-Modell

Im Brandenburg-Modell ist der Bereich des GRM hinsichtlich der hydrologisch relevanten GEO-Daten, der Klimadaten (REGNIE und weitere Klimadaten bis 2015), der hydrologischen Daten (Oberflächenwasserpegel) und der wasserwirtschaftlichen Daten (wasserbauliche Anlagen inkl. ihrer Steuerregeln und Kennwerte wie W-Q-Beziehung und Speicherinhaltslinie) abgedeckt.

Dieses Basismodell wird dann sukzessive untersetzt mit den in Tab. B4-6 aufgeführten Daten für den sächsischen Bereich des GRM Lausitz und mit den in Tab. B4-7 aufgeführten Daten für die bergbaugeprägten Teile innerhalb der Großraummodellfläche.

Hinsichtlich der Landnutzung und der Vegetationsbedeckung wird empfohlen, die CIR-Daten aus dem Brandenburg-Modell auch für den sächsischen Bereich beizubehalten - also nicht die ATKIS-Daten - zu nutzen.

Unabhängig davon, inwieweit Teile der Landesmodelle verwendet werden können, fallen beim Aufbau des GRM folgende Arbeitsblöcke an:

- Datenprüfung, gegebenenfalls Transformation der Geo-Daten auf ein einheitliches Koordinatensystem, gegebenenfalls Bereinigung der Daten,
- Zusammenfassung hydrologisch sehr ähnlicher Eigenschaftsklassen,
- Geometrische und inhaltliche Zusammenführung der drei Teildatenbestände (Sachsen, Brandenburg, bergbaugeprägt). Diese Zusammenführung beinhaltet zum einen Anpassungen der Geometrien in den Bereichen, in denen die Teildatenbestände aneinandergrenzen. Zum anderen sind die Datenbestände soweit als möglich zu homogenisieren. Darunter ist zu verstehen, dass unterschiedliche Bezeichnungen für gleiche Inhalte angeglichen werden. Damit soll verhindert werden, dass inhaltlich nicht notwendige Differenzierungen die Klassenanzahl für ein Attribut erhöhen und damit den numerischen Simulationsaufwand vergrößern.

Im Ergebnis dieser Arbeitsschritte entsteht ein Modell, das als Komponenten Elementarflächen bzw. Hydrotope, Teileinzugsgebiete und Gewässer als (unregelmäßige) Vektordaten beinhaltet.

Für die vorgesehene Kopplung mit einem Grundwassermodell sind die im Kap. B4.7.2 genannten Voraussetzungen zu schaffen. Für die Kopplung mit PCGEOFIM oder MODFLOW wären die Informationen der Vektordaten auf die Rasterzellen der Grundwassermodelle zu übertragen.

B5 VERGLEICH SIMULATIONSPROGRAMME

Im Rahmen des AP 1 sollten verschiedene Softwarepakete zur Grundwassermodellierung getestet und verglichen werden. Dabei wird vor allem auf bekannte und etablierte Programme Bezug genommen, die besonders geeignet zur Beschreibung bergbaurelevanter Prozesse und Parameter/ Randbedingungen und die Erstellung von Großraummodellen sind. Darunter sind die Grundwassersimulationsprogramme MODFLOW, FEFLOW und PCGEOFIM zu verstehen, mit denen auch bereits Regionalmodelle im Lausitzer Revier betrieben werden. Die Vorüberlegungen zu weiteren Simulationsprogrammen ergaben, dass diese nur dann in die Testung einzubeziehen sind, wenn sie wesentliche Vorteile in Bezug auf Teile der Prozessabbildung liefern. Daraus resultierend wurden die Programme OPENGeoSys (z.B. KOLDITZ ET AL. [2016]) und PHAST (PARKHURST ET AL. [2010]) näher in Erwägung gezogen. OPENGeoSys, betrieben und entwickelt vom UFZ in Leipzig, bietet die Möglichkeit der Einbe-

ziehung eines 2-Fluidphasensystems und gleichzeitig die Betrachtung von geomechanischen Aspekten und hydrogeochemischen Reaktionen. PHAST, entwickelt vom USGS, verknüpft die Anwendung vom freien Rechenbaustein MODFLOW (mittels dem GUI MODEL MUSE) mit PHREEQC, dem Standard der hydrogeochemischen Reaktionsbetrachtungen. Somit bieten beide Programmcodes deutliche Vorteile durch ihre komplexere Modellabbildung und dadurch, dass sie gleichfalls Open Software darstellen.

Die detaillierte Betrachtung offenbart jedoch, dass sich zum jetzigen Zeitpunkt mit diesen beiden Codes Großraummodelle nicht praktikabel simulieren lassen. Dies deshalb, da zum einen die relevanten, komplexen Randbedingungsabbildungen nicht erfolgen können, zum anderen die Modelle a priori nicht für solch großräumige Modellansätze ausgelegt sind. Der Blickwinkel dieser Modelle ist eher das generelle Prozessverständnis. Weiterhin liegt natürlich keine Kopplung zu Bodenwasserhaushaltsmodellen und speziell zu ArcEGMO vor. Daraus abgeleitet wurden nur die drei oben genannten numerischen Grundwassersimulationsprogramme MODFLOW, FEFLOW und PCGEOFIM zum weiteren Vergleich herangezogen. Sie werden nachfolgend kurz charakterisiert. Eine vergleichende Bewertung ergibt sich nach der Testmodellierung im Gebiet um Bärwalde (vgl. Kap. C6).

B5.1 GRUNDCHARAKTERISTIK MODFLOW

Das Programm MODFLOW wurde von McDONALD & HARBAUGH (1988) vom U.S. Geological Survey entwickelt. Es ist ein Finite-Differenzen-Modell (FD-Modell) zur Berechnung der dreidimensionalen gesättigten Grundwasserströmung. Alle Modellparameter und Randbedingungen, von der Diskretisierung bis zur Position von Filterbrunnen, sind in separaten Modulen (packages) definiert. Der modulare Aufbau und die Flexibilität neue Module zu programmieren und in das Modell zu integrieren, erlauben einen weiten Einsatzbereich. Der Quellcode des Programms ist „free public domain“, kann also eingesehen und erweitert werden.

Da der Quellcode frei verfügbar ist, wurden in der Vergangenheit unterschiedliche Varianten aus dem MODFLOW-Kern entwickelt. So stehen dem Anwender neben MODFLOW-2005 auch MODFLOW-USG, MODFLOW-LGR, MODFLOW-NWT oder MODFLOW-CDSS zur Verfügung. Die Auswahl ist anwendungs- bzw. aufgabenspezifisch zu treffen.

Die letzte Veröffentlichung des eigentlichen Programm-Codes („core version“) ist die jüngste Version MODFLOW 6 (v6.0.3, 09.08.2018) und erweitert den FD-Ansatz zum CVFD („generalized control-volume finite-difference (CVFD)“). Sie kann, wie auch FEFLOW, unstrukturierte Gitter als Grundlage für die Grundwasserströmung verwenden. Der CVFD-Ansatz wurde bereits für die Version MODFLOW-USG entwickelt. MODFLOW 6 fasst die bestehenden Modellvarianten MODFLOW-NWT und MODFLOW-USG zusammen und erlaubt damit die Abbildung komplexer Modellgebiete, wie sie auch für das GRM Lausitz zu erwarten sind.

Für die Bedienung von MODFLOW, also für die Bearbeitung und Kontrolle der Input-Daten und die Visualisierung von Berechnungsergebnissen stehen verschiedene kommerzielle und nicht kommerzielle Graphical User Interfaces (GUI) zur Verfügung. GUI sind unter anderem Groundwater Vistas, Visual MODFLOW, Processing Modflow, Groundwater modelling system (GMS), Argus ONE, Freewat, ModelMuse / ModelViewer oder Processing Modflow (PMWIN).

Details zu den in MODFLOW integrierten Modulen (packages) enthalten die Dokumentationen zu MODFLOW-2005 (HARBAUGH 2005) oder MODFLOW 6 (LANGEVIN et al. 2017).

Montanhydrologische Randbedingungen

Für die Definition von Randbedingungen stehen in MODFLOW unterschiedliche Programm-Module zur Verfügung. Alle Randbedingungen die für montanhydrologische Fragestellungen von Bedeutung sind, können in MODFLOW definiert werden. Als Beispiele sind hierbei die Implementierung von Brunnen (well package) zur Abbildung der Tagebauentwässerung, die entstehenden Restseen (lake package) zur Darstellung der Hohlraumfüllung oder die Fließgewässer (river package) zu nennen, in die das Grundwasser entwässert oder von dem es gespeist wird. Für das GRM Lausitz ist weiterhin die Integration der Kippenherstellung und die Kippengenesse von Bedeutung. Dafür wurde das MODFLOW-Modul TMP (Time-varying material properties) entwickelt. Dieses ist aktuell nur in der kommerziellen Version MODFLOW-SURFACT v4 erhältlich. Das Modul ermöglicht die Abbildung von zeitlich veränderlichen Materialeigenschaften, wie sie in der Lausitz durch die Umlagerung des Deckgebirges und die Herstellung der Kippen durch den aktiven Tagebau erzeugt werden.

Numerik

In MODFLOW stehen für die Lösung des Differentialgleichungssystems unterschiedliche Algorithmen zur Verfügung. Als wichtigste Gleichungslöser sind PCG (Preconditioned Conjugate Gradient), PCGN (Preconditioned Conjugate Gradient Solver with Improved Nonlinear Control), GMG (Geometric Multigrid), SIP (Strongly Implicit Procedure), DE4 (Direct Solver) und NWT (Newton Solver) zu nennen. Die Wahl des Gleichungslösers (solver) und seine Parametrisierung sind dabei von der Modellkomplexität und den verwendeten Modulen abhängig.

Im Testmodell wurde MODFLOW-NWT eingesetzt, weil die starken Gradienten im Bereich der Grundwasserabsenkung durch den zu simulierenden Tagebaubetrieb zum Trockenfallen (wetting/ drying) von Zellen führt und MODFLOW-NWT für diese Anwendungsfälle einen Lösungsansatz darstellt.

Datenbasis

Aufgrund der weltweiten Verbreitung von MODFLOW existiert eine Vielzahl von geologischen Modellen (z. B. GMS, LEAPFROG, GOCAD), die eine Schnittstelle zu MODFLOW haben und damit den Arbeitsablauf vom geologischen Modell zum hydrogeologischen Modell stark vereinfachen. Diese Aussage gilt auch für die hydrologischen und hydraulischen Inputdaten, die in QGIS/FREEWAT oder ARCGIS erfasst, bearbeitet und in ein MODFLOW-fähiges Format exportiert werden können.

Die Herausforderung bei der Bearbeitung des GRM Lausitz wird die Datenerfassung, Datenerhaltung und Datenübertragung sein. Die Anforderungen hierfür sind nicht durch das Modellwerkzeug selbst limitiert, da für MODFLOW unterschiedliche Programme (GUI) zur Verfügung stehen, die für die Input- und Output-Dateien sowohl ASCII als auch binäre Formate verwenden. Eine Übertragung von Teildaten aus den bestehenden Regionalmodellen ist möglich, da jedes Modell mit einem strukturierten Gitter (Finite Differenzen oder Finite Volumen) auch einen strukturierten Input voraussetzt.

Modellkalibrierung

Die Kalibrierung des Grundwassermodells als Bestandteil des GRM Lausitz unter Verwendung von MODFLOW kann auch automatisch erfolgen. Für die automatische Parameteridentifikation stehen die Programme PEST++ und UCODE zur Verfügung. Mit beiden Programmen können Parameter wie der k_f -Wert, Porosität oder Speicherkoeffizient in definierten

Grenzen variiert werden, um eine Verbesserung des Modellergebnisses (Vergleich Berechnung / Messwert) zu erreichen. Beide Programme sind sehr gut dokumentiert, was die Verwendung der komplexen mathematischen Algorithmen bei der inversen Modellierung zur Parameteridentifikation erleichtert.

B5.2 GRUNDCHARAKTERISTIK FEFLOW

Das Programm FEFLOW wurde erstmals von Hans-Jörg G. Diersch 1979 eingeführt. Es ist weit verbreitet und verwendet die Finite-Elemente-Methode zur Modellierung der Grundwasserströmungsgleichung. Mit FEFLOW kann der Strömungsprozess sowohl wassergesättigt, als auch ungesättigt berechnet werden. Weiterhin ist auch der Massen- und Wärmetransport, einschließlich von Flüssigkeitsdichteeffekten und chemischer Kinetik für Mehrkomponentenreaktionssysteme modellierbar. Eingesetzt wird die Software für die Analyse, Planung und das Management von Wasserressourcen sowie für geothermische und umwelttechnische Fragestellungen in Bezug auf Grund- und Oberflächenwasser. Die Software wird häufig aktualisiert. Die jüngste Version von FEFLOW ist die V.7.1 -64 Bit (Dezember 2018).

Die Entwicklungs- und Vertriebsfirma DHI-WASY GmbH beschreibt die Software FEFLOW in ihrem Handbuch als flexibles Modellierungssystem für hydrologische und hydrogeologische Prozesse, das viele Werkzeuge für Pre- und Postprocessing enthält. Es werden Hauptprozesse des hydrogeologischen Kreislaufs abgebildet, wobei dies, je nach Aufgabenstellung, in verschiedenen räumlichen Auflösungen möglich ist, zum Teil aber auch Add-ons zur Normalvariante der Modellierungssoftware erfordert (vgl. Kap. C6.2).

Montanhydrologische Randbedingungen

Für die Definition von Randbedingungen stehen in FEFLOW unterschiedliche Interfaces zur Verfügung. Alle Randbedingungen, die für montanhydrologische Fragestellungen von Bedeutung sind, können in FEFLOW für das gesamte Modell ausgewiesen werden. Wasserstandsmessungen aus Brunnen (wells), die sich über mehrere Layer (multilayer-wells) strecken, werden in FEFLOW mittels Interfaces dargestellt. Ebenfalls können alle Flächendaten, wie die entstehenden Restseen, Tagebaue und Entwässerungsdaten von aktiven Tagebauen, zeitdifferenziert betrachtet werden. Für das GRM Lausitz ist prinzipiell der Import von thematischen Karten zur Grundwasserdynamik (z. B. Grundwasserflurabstand), sowie der Import von Stützstellen für die Modellierung der Grundwasseroberfläche, über programminterne Tools auszuführen. Die Parametrisierung von Stauern, Grundwasserhemmern, sowie Grundwasserleitern erfolgt ebenso über die Verknüpfung oder über Abfragen von Datenbanken.

Numerik

Als Grundlage zur Beschreibung der gesättigten Grundwasserströmung dient wie üblich das Darcy-Gesetz. Zusammen mit der Kontinuitätsbedingung ergibt sich damit eine Differentialgleichung zur Berechnung der Grundwasserströmung. Wichtige Parameter in dieser Gleichung sind die hydraulische Durchlässigkeit und der Speicherkoeffizient.

Für die Beschreibung des ungesättigten Zustands wird der Begriff Standrohrspiegelhöhe um das Matrixpotential erweitert. Die entsprechende Erweiterung des Darcy-Gesetzes für den ungesättigten Zustand führt schließlich zur Richards-Gleichung, mit der sich die Bewegung des Wassers im ungesättigten porösen Medium mathematisch beschreiben lässt. Auch die

Bodenparameter in dieser Richards-Gleichung sind abhängig vom Matrixpotential und damit vom Wassergehalt des Bodens.

Sowohl die Gleichung der Grundwasserströmung als auch die Richards-Gleichung sind partielle Differentialgleichungen, deren analytische Lösung nur für Sonderfälle gelingt. Das Grundwasserströmungsprogramm FEFLOW löst die Grundwasserströmungsgleichung oder die Richards-Gleichung nach der Methode der finiten Elemente und stellt damit eine Möglichkeit dar, auch komplexere Fragestellungen der Bewegung des Wassers im Untergrund zu simulieren. Weiterhin stellt FEFLOW eine große Auswahl von Werkzeugen und Methoden zur Diskretisierung des Modellgebietes, zur Interpolation der eingegebenen Daten und zur Lösung der Gleichungssysteme zur Verfügung.

Datenbasis

FEFLOW ist in der Lage, unterschiedliche Sachdaten, Geometrien und Parameter verschiedener Formatierungen zu importieren. Zu den Geometrien zählen Punkte, Linien und Flächen, aber keine Solids (Körper).

Zunächst wird das Finite-Elemente-Netz in FEFLOW erzeugt. Danach werden die Geometriedaten und anschließend die zugehörigen Sachdaten importiert. Die Sachdaten sind als ASCII, Shapefile, CAD (dxf) oder aus einem Datenbankverwaltungssystem über eine Import-Schnittstelle zu verknüpfen. Weiterhin können alle flächenbezogenen Daten, z. B. Wasserstandsmessungen, Restlöcher Seen und aktuelle Wasserstände von aktiven Tagebauen zu den jeweiligen Schichten zugeordnet werden. Brunnenentnahmen werden punktförmig, Druckhöhen und Leakagekoeffizienten von Oberflächengewässern sowie laterale Zu- und Abflüsse linienförmig verwaltet.

Die Ausbreitung der Nutzungsarten innerhalb eines Modells ist zuerst als Polygon einzuzeichnen und deren Randbedingungen sowie Verbreitungen über programminterne Masken 3-dimensional zu konstruieren.

Karten zu Hydroisohypsen, Grundwasserflurabstandskarten sowie Karten von Grundwassermessstellen sind als Shapefiles zu importieren. Die Geometrien und Parameter werden bei der Modellierung eines Untersuchungsgebietes als Projektdaten gehalten.

Die Modellergebnisse können auf verschiedene Arten exportiert und dargestellt werden.

Modellkalibrierung

Die Kalibrierung des GRM Lausitz unter Verwendung von FEFLOW kann sowohl manuell als auch automatisch erfolgen. Für die automatische Parameterschätzung steht das branchenübliche Softwarepaket FePEST zur Verfügung. FePEST wurde von John Doherty entwickelt und wird für die Unsicherheitsanalyse numerischer Modelle genutzt. FePEST ist die grafische Benutzeroberfläche und deckt die wesentlichen PEST-Methoden für die automatische Kalibrierung und Optimierung von FEFLOW-Modellen ab.

B5.3 GRUNDCHARAKTERISTIK PCGEOFIM

PCGEOFIM ist speziell für die Anforderungen der bergbaulichen und nachbergbaulichen Wasserwirtschaft entwickelt worden. PCGEOFIM verwendet die Finite-Volumen-Methode zur Berechnung der Grundwasserdynamik. Dieser Ansatz ermöglicht sowohl global, als auch lokal bilanztreue Ergebnisse, d. h. Zu- und Abflüsse werden für jedes Volumenelement erfasst

und in den Ergebnissen ausgewiesen. Zudem ist die Berechnung von gespannten und ungespannten Grundwasserverhältnissen möglich. Geologische Formationen wie Rinnen, Störungen oder Grundwasserstauer können im hydrogeologischen Strukturmodell ortsdiskret abgebildet werden.

Montanhydrologische Randbedingungen

Neben den üblichen Randbedingungen verfügt PCGEOFIM speziell für die Montanhydrologie implementierte Randbedingungen zur Tagebauentwässerung, Brunnengalerien und Brunnengruppen sowie Horizontalfilterbrunnen. Die Einbindung von Restseen in ihrer Hohlform, die Anbindung an Vorfluter und Ableiter erlauben die Simulation verschiedener Flutungsszenarien, die auch zeitlich gestaffelt ablaufen können. Die zeitliche Veränderung der Geländetopographie infolge bergmännischer Abtragung und Umlagerung des Kohledeckgebirges sowie Änderungen an den hydrogeologischen Eigenschaften der Grundwasserleiter, als Folge von Sanierungsmaßnahmen und Setzungen können durch die Programmoption der zeitabhängigen Parameter innerhalb eines Modells abgebildet werden.

Numerik

Der in PCGEOFIM implementierte Gleichungslöser ist ein vorkonditioniertes, konjugiertes Gradientenverfahren. Es ist in der Lage, auch sehr große Gleichungssysteme zu lösen, wobei die maximale Größe nur durch die verfügbaren Hardwareressourcen begrenzt ist. Der eingesetzte hochoptimierende Compiler für die Programmerstellung erhöht durch automatisches Vektorisieren von Berechnungsabläufen die Effizienz und reduziert damit die Berechnungszeiten.

Datenbasis

Die große Mehrzahl existierender und aktuell betriebener Grundwassermodelle im Lausitzer Tagebaurevier wird mit dem Programm PCGEOFIM simuliert. Somit stünde die Möglichkeit bereit, gerade Daten zu inneren Randbedingungen teilweise in das GRM Lausitz einfach übernehmen zu können. Generell ist jedoch für das überregionale Gebiet des GRM eine Datenerkundung und -aufbereitung erforderlich. Mit Einschränkungen können (hydrogeologische) Daten auch aus den bestehenden Teilmodellen extrapoliert und in das übergeordnete Modell übertragen werden.

Im Hinblick auf die Anforderungen eines überregionalen GRM sind auch die Ansprüche an Speicherplatz und die Leistungsfähigkeit der Datenhaltung zu berücksichtigen. Die Modelleingangsdaten für PCGEOFIM sind auch für die hydrogeologischen Daten bis ca. 200 GB problemlos handhabbar. Daten für Randbedingungen, Klimazeitreihen und Messstellen kommen ergänzend hinzu. Ergebnisdaten sind in ihrer Größe nicht beschränkt und können aufgrund des Binärformats mit maximaler Geschwindigkeit ausgegeben werden.

Modellkalibrierung

Es ist eine automatische Parameteridentifikation anhand von Messwerten möglich. Das Modellgebiet wird dafür in Zonen verschiedener hydraulischer Parameter (k_f -Wert, Porosität oder Speicherkoeffizient) unterteilt. Der Wert jeder Zone wird als Faktor für den zugehörigen hydraulischen Parameter bei der Simulation verwendet und dient als Fittingparameter bei der Parameteridentifikation. Dadurch sinkt die Zahl der zu identifizierenden Parameter. Dies reduziert die Anzahl notwendiger Rechenläufe für das Gauß-Newton-Verfahren.

B5.4 KOPPLUNG DER BETRACHTETEN GW-MODELLIERUNGSSOFTWARE ZU ARCEGMO

Die Kopplung zum Bodenwasserhaushaltsmodell (ArcEGMO) ist prinzipiell für alle drei Grundwassersimulationsprogramme gegeben. Die Arbeitsweise eines solchen Modellverbundes wird in Kapitel C8 am Beispiel ArcEGMO – PCGEOFIM ausführlich beschrieben. Die Kopplungen mit FEFLOW und MODFLOW arbeiten analog. In allen Kopplungen werden Daten Zeitschritt für Zeitschritt, d.h. täglich, in beide Richtungen ausgetauscht, so dass Wechselwirkungen z.B. zwischen Grundwasserstand und Bodenwasserhaushalt realitätsnah berücksichtigt werden. Der Datenaustausch wird über eine GIS-Schnittstelle organisiert, in der die räumlichen Relationen zwischen den Geometrien beider Modelle abgebildet sind.

Programmtechnische Realisierung

Programmtechnisch besteht die jeweilige Kopplungssoftware aus zwei Komponenten. Zum einen sind das Routinen, die in ArcEGMO die Austauschgrößen für das GW-Modell bereitstellen und von diesem übernehmen. Eine analoge Programmkomponente existiert für jedes der GW-Modelle.

Der Datenaustausch selbst erfolgt in allen Kopplungen nicht dateibasiert, sondern wesentlich effektiver über gemeinsam genutzte Hauptspeicherbereiche (shared memory).

In den Kopplungen mit PCGEOFIM und MODFLOW übernimmt ArcEGMO die Steuerung, ist also master und ruft in definierten Zeitabständen Funktionen in PCGEOFIM bzw. MODFLOW auf. Beide GW-Modelle arbeiten als executables. Die Kopplung mit MODFLOW bezieht sich auf den Prä-/ Postprozessor CADSHELL von IHU Nordhausen.

In der Kopplung mit FEFLOW erfolgt die Steuerung durch FEFLOW. ArcEGMO ist slave und wird als DLL (dynamic link library) in FEFLOW integriert.

Austauschgrößen

In allen zu betrachtenden Modellkopplungen liefert ArcEGMO die Grundwasserneubildung bzw. -zehrung an das GW-Modell und erhält als Rückgabegröße den Grundwasserstand bzw. -flurabstand.

Damit ist über alle drei Modellverbünde eine fundierte Abbildung der Wechselwirkungen zwischen Grundwasser und Bodenwasser möglich, die entscheidend ist für die korrekte Erfassung des Gebietswasserhaushaltes in Regionen, die bergbaubedingt durch großräumige Grundwasserabsenkungen und -wiederanstiegsprozesse gekennzeichnet sind.

In den Kopplungen mit PCGEOFIM und MODFLOW liefert ArcEGMO zusätzlich den Direktzufluss zum Gewässer und übernimmt vom Grundwassermodell die grundwasserbürtigen Zuflüsse zum Gewässer. Mit diesem Austausch der Zuflüsse zum Gewässer wird erreicht, dass in beiden Modellen (ArcEGMO und GW-Modell) der Gewässerabfluss simuliert werden kann und damit zusätzliche Validierungsmöglichkeiten für die Modellergebnisse bestehen.

Für die Kopplung mit FEFLOW liefert ArcEGMO die zeitlich variablen Wasserstände im Gewässer als Randbedingung für die Grundwasserströmungssimulation und übernimmt von FEFLOW wiederum die grundwasserbürtigen Zuflüsse zum Gewässer.

Lizenzlage

Es ist zu beachten, dass auf Grund der Lizenzlage zum jetzigen Zeitpunkt die Kopplungssoftware nur von den Lizenz Eigentümern bzw. Entwicklern genutzt werden kann. Die Lizenzrechte für die ArcEGMO-seitigen Kopplungen liegen beim BAH Berlin. Für die grundwasser-

seitigen Kopplungskomponenten sind die Rechte für PCGEOFIM beim IBGW Leipzig und für MODFLOW bei IHU Nordhausen. Für die Kopplung mit FEFLOW existieren zwei Versionen. Eine Basisversion wurde von DHI-WASY entwickelt und bildet den Austausch von Grundwasserneubildung und Grundwasserstand ab. Eine weitere Version wurde vom BAH Berlin entwickelt und erfasst neben dem Austausch von Grundwasserneubildung und Grundwasserstand auch den Austausch von Wasserständen und Grundwasserzuflüssen in die Oberflächengewässer.

B5.5 ABLEITUNG BEWERTUNGSMATRIX FÜR GW-MODELLIERUNGSSOFTWARE

Wie in Kap. B5 einleitend vermerkt, sollen verschiedene Softwarepakete zur Grundwassermodellierung getestet und verglichen werden. Dabei wurde auf bekannte und etablierte Programme Bezug genommen, welche sowohl kommerzieller Natur, als auch kostenfrei verfügbar sind. Die Bewertung sollte hinsichtlich unterschiedlicher Aspekte und Leistungsmerkmale erfolgen. Es wird diesbezüglich hier jetzt eine generelle Bewertungsmatrix hergeleitet, die nachfolgend in der Phase der Testmodellierung eventuell zu präzisieren und/ oder einzugrenzen ist. Insgesamt muss der Fokus vor allem auf der Eignung der Software zur Beschreibung bergbaurelevanter Prozesse und Parameter liegen. Weiterhin ist natürlich die generelle Möglichkeit zur Handhabung von wirklichen Großraummodellen ebenfalls ein wichtiges Kriterium. Einen weiteren, im Folgenden nicht näher aufgegriffenen Bewertungspunkt stellte die Kopplung von externen Programmen, zur Modellierung des Bodenwasserhaushaltes dar.

Somit wurde im Zuge der Bearbeitung der Programmvergleiche die nachfolgende Tab. B5-1 als Bewertungsmatrix abgeleitet und angefertigt. Ziel war die übersichtliche, erfassbare Evaluierung der betrachteten Programmsysteme hinsichtlich ihrer Eignung zur Umsetzung von GW-Großraummodellen in Bergbauregionen. Anhand von definierten Bewertungskriterien sollte für jede Software ermittelt werden, inwiefern ein Kriterium erfüllt ist und wie es programmspezifisch umgesetzt wird (vgl. Tab. B5-1, Spalte „Erläuterung“). Wird ein Kriterium besonders komfortabel umgesetzt bzw. ist ein Feature komfortabel zu bedienen, sollte das zusätzlich kenntlich gemacht werden. Auf eine Qualifizierung/ Präzisierung der Bewertungsmatrix nach der erfolgten Testmodellierung wird in Kap. C6.4 näher eingegangen.

Im Folgenden werden die in vier Bereiche unterteilten Kriterien (vgl. nachfolgende Tab. B5-1) näher untersetzt:

Insbesondere im ersten Komplex „Preprocessing/Parametrisierung/Spezielle Randbedingungen“ finden sich für die Umsetzung von GW-Großraummodellen in bergbaulichen Regionen entscheidende Kriterien. Dies sind vor allem die Folgenden:

- *Parametermodell*: Die Unterpunkte „*Räumliche Diskretisierung*“ und „*Adaption an Ränder, Randbedingungen und geologische Formationen*“ dienen der Bewertung nach geometrischen Kriterien, inwiefern also das Modell räumlich aufgelöst auf Gebietspezifika eingehen kann.
- *Hydrogeologisches Strukturmodell*: Hier wird auf die Fähigkeit des Programms eingegangen, inwiefern geologische Sonderstrukturen wie Rinnen, Stauer und Störungen abgebildet werden können. Dazu kann bewertet werden, ob und wie der Tagebaufortschritt sowie die Restlochentstehung im Programm umgesetzt werden. Hierbei ist für die Bewertung entscheidend, wie die Abbildung zeitlicher Änderungen hydraulischer Eigenschaften von GWL und damit der Parameterfelder erfolgt. Darunter ist als we-

sentlichster Aspekt der Übergang des Gewachsenen GWL-Materials zu Kippmaterial zu verstehen, aber auch Sanierungsmaßnahmen, bodenmechanische Verdichtung, Landnutzung etc. .

- Im Punkt *Allgemeine Randbedingungen* wird die Einbindung von Tagebauentwässerung und variabler sowie konstanter Grundwasserneubildung (auch in Abhängigkeit von Niederschlag, Verdunstung und Landnutzung) bewertet.
- *Fließgewässer*: Hier werden die modelltechnische Abbildung (Definition und Charakterisierung) von Fließgewässern sowie deren Kopplung zum Grundwasser, aber auch die Umsetzung von Fließgewässersystemen/Hierarchie bewertet. Ein wichtiger Punkt ist hierbei auch die Betrachtung der Bilanzierung der Fließgewässer.
- *Standgewässer*: Ähnlich verhält es sich mit den Standgewässern. Diese können auch nach Umsetzung im Modell und der Möglichkeit ihrer Charakterisierung bewertet werden. Auch hier ist die Kopplung zum GW und ihre Bilanzierung zu betrachten. Des Weiteren spielen die nachbergbaulichen Prozesse der Flutung (Steuerungsvarianten, Zeitabhängigkeit, Leerlaufen) eine entscheidende Rolle in der Bewertung der unterschiedlichen Softwaresysteme.

In einem zweiten Komplex können die Programmsysteme nach ihrer Numerik (Gleichungslöser/Genauigkeit der Lösung, Performance des Gleichungslösers, Bilanztreue), der Zeitdiskretisierung (Zeitschrittweitensteuerung, Flexibilität bei der Speicherung der Modellergebnisse) sowie nach der Parameteridentifikation und Modellkalibrierung (Methodik bei automatischer und manueller Modellkalibrierung) bewertet werden. Ein Hauptaugenmerk bei der Bewertung sollte hier bei den jeweiligen methodischen Ansätze in den Programmen liegen.

Der dritte Komplex beinhaltet Kriterien zum Postprocessing sowie zur Datenhaltung. Dabei können die Datenausgabe, die grafische Ausgabe/Aufbereitung, Bilanzierung, Statistik, Datenformate sowie die Datenbearbeitung bewertet werden. Diese Kriterien werden von den zu vergleichenden Programmsystemen unterschiedlich umgesetzt, woraus sich die Wichtigkeit der Erläuterungsspalte zur Bewertung herausstellt.

Der vierte Komplex umfasst allgemeine Kriterien. Diese sind allerdings, wie die *Eignung für Großraummodelle* (Umgang mit großen Datenmengen, Verwaltung) auch von entscheidender Bedeutung. Hierbei ist auch zu bewerten, ob Daten mehrerer oder ganze Teilmodelle in ein großes Gesamtmodell überführt werden können, und mit welchem Aufwand. Ebenso ist der Punkt *Kosten* (Lizenzkosten usw.) aufgeführt, aber auch *Weiterentwicklung der Software, Implementierung von Kundenwünschen, Anwendersupport, Weiterbildung/Schulung, Dokumentation und Anwendung* können bewertet werden.

Die hier vorgestellte Bewertungsmatrix dient der Möglichkeit einer vergleichenden Evaluierung von GW-Modellierungsprogrammen vor dem Hintergrund der Großraummodellierung in Bergbauregionen (der Lausitz). Die Bewertungskriterien wurden so gewählt und formuliert, dass unterschiedliche Softwaresysteme in ihrem Ergebnis vergleichbar werden. Des Weiteren obliegt die Bewertung der jeweiligen Software einer fachkompetenten und mit der Software vertrauten Person. Es wird daher, selbst bei angestrebter Objektivität, dennoch am Ende ein subjektives Ergebnis vorliegen. Die Bewertungskriterien wurden zwar in Absprache mit dem Auftraggeber und unter den Projektpartnern formuliert, sie können aber natürlich keinen Anspruch auf Vollständigkeit oder vollkommene Objektivität erheben. Die Bewertungsmatrix ist in ihrem Ergebnis daher auf jeden Fall lediglich als Instrument zur Entscheidungsfindung zu verstehen.

Tabelle B5-1: Bewertungsmatrix für die Evaluierung der GW-Modellierungssoftware nach Umsetzung/Bedienbarkeit

	Merkmal/Eigenschaft	Erläuterung
Preprocessing/ Parametrisierung/ Spezielle Randbedingungen	Parametermodell	
	Räumliche Diskretisierung	FEM, FDM, FVM
	Adaption an Ränder, Randbedingungen und geologische Formationen	flexibel durch Lupen und lok. Netzverfeinerung
	Hydrogeologisches Strukturmodell	
	Abbildung von Rinnen	umsetzbar; MGWL muss durchgängig sein, um Fließen zu ermöglichen; Mächtigkeit ist der Rinnenstruktur anzupassen
	Abbildung von Stauern	Leakage oder 3D-Modell mit entsprechenden kf-Werten
	Abbildung von Störungen	Vorgabe von Faktoren in max. 3 Dimensionen zur Reduktion des Leitwerts zwischen benachbarten Elementen
	Abbildung von Abtrag und Verkipfung (Tagebaufortschritt, Restlochenstehung)	zeitliche Änderungen der Geometrie über Option zeitabh. Parameter möglich
	Abbildung zeitlicher Änderung hydraulischer Eigenschaften von GWL (z.B. durch Verkipfung, Sanierungsmaßnahmen, bodenmechanische Verdichtung, Landnutzung)	zeitliche Änderung hydraulischer Eigenschaften über Option zeitabh. Parameter möglich
	Einbindung externer Software (Unterstützung bei Aufbau und Visualisierung)	Verwendung von GMS und automatische Überführung in Geofim-Struktur mittels Schnittstelle; Einbindung der Parameterdateien in ein GIS; Verwendung spezieller Schnittstellen für ArcGIS
	Allgemeine Randbedingungen	
	Entwässerung von Tagebaubereichen	Abbildung über RB 1. Art (kein Zustrom zulässig); Vorgabe über Start Entwässerung, Entwässerungsziel und -ende; Ausweisung der Menge
	Grundwasserneubildung (Niederschlag, Verdunstung, Landnutzung)	konstant, zeitvariabel, flurabstandsabhängig, auch Kombination, klassen- oder elementspezifisch möglich
	Fließgewässer	
	Modelltechnische Abbildung (Definition und Charakterisierung)	Definition einzelner Flussabschnitte über gekoppelte GW-Elemente; Charakterisierung über Gerinnegeometrie (Schlüsselkurve)
	Kopplung zum Grundwasser und Bilanzierung	Austausch zum GW als 3. Art; Abfluss im Flussabschnitt über Gerinne; Ein- und Ausspeisung GW möglich
	Abbildung von Fließgewässersystemen/Hierarchie	(zeitabhängige) Kopplung von Fließgewässern; Hierarchie durch Reihenfolge in Stammdaten
	Standgewässer	
	Modelltechnische Abbildung (Definition und Charakterisierung)	Definition über gekoppelte GW-Elemente; Charakterisierung über Vermessungsdaten der Hohlform und Wasserstands-Flächenbeziehung
	Kopplung zum GW/Bilanzierung	Austausch zum GW als 3. Art; Berücksichtigung von Verdunstung, Niederschlag und oberirdischem Zufluss; Ein- und Ausspeisung GW möglich
Abbildung der Flutung (Möglichkeiten, Steuerung, Zeitabhängigkeit, Leerlaufen)	Flutung über freien Aufgang mit oder ohne zusätzlicher Mengeneinspeisung, h-Steuerung; zeitabhängiges Umschalten zwischen Flutungsszenarien möglich; Flutung über Fließgewässer (Ableiter); Berücksichtigung des Leerlaufens von Elementen und deren Auswirkung auf Standgewässer	
Numerik/ Kalibrierung	Numerik	
	Auswahl Gleichungslöser/Genauigkeit der Lösung	Vorkonditioniertes bi-konjugiertes Gradientenverfahren (iterativ); Genauigkeit nutzerdefiniert
	Performance des Gleichungslösers	Lösung von Systemen mit mehreren Mio. Unbekannten möglich
	Bilanztreue des numerischen Lösungsverfahrens	individuelle Bilanzierung jedes GW-Elements
	Zeitdiskretisierung	
	Zeitschrittweitensteuerung	automatische Steuerung; Grenzen z.B. durch Randbedingungen und zeitabh. Parameter
	Speicherung Modellergebnisse	beliebig viele Speicherpunkte möglich
	Parameteridentifikation und Modellkalibrierung	
	Methodik bei automatischer Parameteridentifikation	automatische Parameteridentifikation über Gauß-Newton-Verfahren; Zonierung des Modellgebietes für hydraulische Parameter und Identifikation der Zonenparameter; Durchführung bis Minimum der quadratischen Summenabweichung vorliegt
	Methodik bei manueller Modellkalibrierung	visuelle Auswertung von Messstellenganglinien, Durchflüssen an Flussabschnitten, ortsbezogene Darstellung von Abweichungen an Messstellen mit nutzerdefinierter Abstufung; optional: Zonierung des Modellgebiets Anpassung der Zonenwerte (kf, ne, s0 usw.)
Postprocessing/ Datenhaltung	Postprocessing	
	Datenausgabe (h, Q, Fließgeschwindigkeit, Konzentrationen)	Ausgabe von Ganglinien während der Berechnung; Massenverarbeitung im Batch
	grafische Ausgabe /Aufbereitung (Gleichen, Potentiale)	Erstellung von Plänen während der Berechnung
	Bilanzierung Mengenströmung (z. B. Bilanzen von Modellbereichen)	Nutzerdefinierte Bilanzgebiete, limnologische Bilanzen für Standgewässer
	Statistik zur Modellgüte	Ausgabe des RMSE zwischen Messwerten und Ergebnissen (h- und Q-Messstellen)
	Datenhaltung	
	Datenformat Input (Spezifikation, Beschränkungen)	Binärdaten; Spezifikation offen; dbf-Format; Grenze bei 2 GB pro Eingabedatei
Datenformat Output (Spezifikation, Beschränkungen)	Binärdaten; proprietär; Größe ist durch Rechnerressourcen begrenzt	
Bearbeitung von Modell- und Ergebnisdaten	direktes Einbindung von dbf in GIS und Office möglich; Umwandlung in ASCII	
Allgemeines	Anwenderfreundlichkeit der Benutzeroberfläche	Aufbereitung von Modelleingangsdaten über GUI (Verschneiden usw.); Modellauswertung und Planerstellung über GUI möglich; Anbindung zu GIS und CAD für weitere Bearbeitungen und Auftraggeber-spezifische Auslieferungen
	Eignung für Großraummodelle (Umgang mit großen Datenmengen, Verwaltung)	schneller Datentransfer durch Binärdaten; durch Aufsplitten in Lupen und strukturierte Abfragen einfache Verwaltung; Datenmengen im GB-Bereich möglich; Speicherplatzersparnis bei Archivierung durch gute Kompressibilität
	Kosten (Lizenzkosten, Wartungsvertrag, sonstige Kosten)	Lizenzkosten und optional Wartungsvertrag
	Weiterentwicklung der Software	permanente Weiterentwicklung im Rahmen der täglichen Anwendung sowie durch Forschungsvorhaben
	Implementierung von Kundenwünschen	je nach Aufwand durch Wartungsvertrag oder individueller Entwicklungsauftrag
	Anwendersupport	kostenfreier Support und Updates bei aktivem Wartungsvertrag
	Weiterbildung/Schulung	Schulung auf Anforderung; regelmäßig firmeninterne Anwenderschulungen
	Programmdokumentation	mehrere Dokumentationsteile, frei auf Firmenwebseite verfügbar
	Verbreitung und Anwendung	weite Verbreitung in den Tagebaurevieren Mitteldeutschlands und der Lausitz

C TESTMODELLIERUNG

C1 WAHL TESTGEBIET

C1.1 ANFORDERUNGEN AN DAS TESTGEBIET

Die Anforderungen der Aufgabenstellung (AST) an das zu wählende Testgebiet waren umfangreich. Das in Sachsen liegende Testgebiet sollte umfassend die wesentlichen, typischen hydraulischen Besonderheiten der zu betrachtenden Braunkohlebergbaugebiete enthalten. Darunter sind Sanierungstagebaue mit den zugehörigen, in Flutung befindlichen Restseen, Zu- und Ableiter sowie Aktivtagebaue mit ihrer Wasserhebung und zugehörigen sich entwickelnden Kippenkörpern und weiterhin sich verändernde Fließgewässer etc. zu verstehen. Gleichzeitig wurde benannt, dass die Datengrundlage für die Modelle größtenteils direkt vorliegen sollte und der Modellaufbau ohne wesentliche Datenrecherche erfolgen kann.

Die in der AST geforderte Überprüfung einer Lupenimplementierung von bestehenden Regionalmodellen in das auszuhaltende Testgebiet ist nach den im Kap. B getroffenen Aussagen nicht mehr relevant und wurde deshalb nicht einbezogen. Dies begründet sich damit, dass herausgestellt wurde, dass die derzeitigen Regionalmodelle sich zum Teil stark in ihrem hydrogeologischen Strukturaufbau und vor allem dessen Detailliertheit unterscheiden. Somit ist keine generelle Lupenimplementierung im späteren GRML möglich, sondern dies könnte nur langfristig im Einzelfall entschieden werden. Damit ist eine generelle Einbeziehung von Regionalmodellennicht zielführend. Weiterhin gehört der Gesamtumfang der Modelldaten der Regionalmodelle den Bergbaufirmen und denen von Ihnen beauftragten, Modell betreibenden Ingenieurbüros. So dass die Einbeziehung ins Testmodell auch, in Bezug auf oben erwähnte Aspekte (Datengrundlage liegt direkt vor etc.) nicht erfolgen konnte.

Abgeleitet aus diesen Ausführungen, war ein Gebiet zu wählen, welches einen großen Anteil der benannten Anforderungen erfüllt.

Ebenfalls ist herauszustellen, dass die Hauptfrage/-aufgabe der Testmodellierung darin besteht, die prinzipielle Vorgehensweise des Aufbaus eines GRML und der damit verbundenen Erstmodellierung zu testen. Also dass es nicht Ziel dieser Testmodellierung war, im lokalen Bereich hydraulische Aussagen, -Situationen im Detail zu überprüfen, Detailmodellierungsergebnisse zu bewerten etc. .

C1.2 AUSWAHL TESTGEBIET

Die Auswahl des Modellgebietes, das als Basis für den Vergleich der Programme MODFLOW, PCGEOFIM und FEFLOW festgelegt wurde, erfolgte mit einem Fokus auf die bergbauliche Wasserwirtschaft und denen in Kap C1.1 benannten Anforderungen.

Folgende konkrete Aspekte beeinflussen das Strömungsfeld in bergbaulich geprägten Gebieten:

Geologie

- Kippe (gesättigt / ungesättigt),
- Gewachsenes (gesättigt / ungesättigt),

- Rinnenstruktur im Modellgebiet,
- Ableitung eines reduzierten Normalprofils aus den geologischen Daten und Übertragung auf das hydrogeologische Strukturmodell.

Bergbau

- Aktiver Tagebau mit Änderung von Materialeigenschaften bei der Umlagerung von Sedimenten bei Kippenherstellung (zeitlich variierende Materialeigenschaften),
- Sanierungsbergbau.

Oberflächengewässer

- Fließgewässer mit und ohne Ankopplung an GW-Leiter bzw. Wiederankopplung der Fließgewässer in der Phase des GW-Wiederanstiegs,
- Fließgewässerabschnitt mit und ohne Sohldichtung sowie einer zeitlich variablen Sohldichtung (Rückbau von Sohldichtungen in fließgewässerabschnitten),
- See mit Flutungsphase durch Eintrag von Flusswasser (Wasserbilanz),
- Steuerung der Wasserspiegellagen in Seen in Abhängigkeit von geotechnischen Sicherungs- oder Baumaßnahmen, klimatischen Bedingungen (Nass-/Trockenjahre), bedarfsgerechte Steuerung in Abhängigkeit von Nutzungsverträgen oder Nutzungszwängen.

Wasserhaushalt

- Grundwasserneubildung (Änderung durch Flächenbewirtschaftung),
- Evaporation von Wasserflächen,
- Niederschlag auf das Modellgebiet,
- GW-Absenkung und Wiederanstieg (wetting/drying),
- Bilanzgebiete Seen,
- Bilanzgebiete Fließgewässerabschnitte.

Alle Anforderungen zusammenfassend, wurde der Bereich um den Bärwalder See als Teilmodell zum Vergleich der Strömungsmodellierungswerkzeuge ausgesucht, weil der Bereich:

- des ehemaligen Tagebaus Bärwalde (mit Flutung Restsee) sowie die aktiven Tagebaue Nochten und Reichwalde im Modellgebiet enthalten sind,
- die Verbindung zwischen Sanierungsbergbau und aktivem Bergbau gegeben ist,
- der Einfluss von aktivem Tagebau und Sanierungsbergbau auf Oberflächengewässer (Fließgewässer: Schwarzer Schöps, Spree, See: Bärwalder See) beinhaltet ist,
- die starke Ankopplung der Fließgewässer abbildet, die in der Lausitz eine zentrale Problematik innerhalb von GW-Strömungsmodellen darstellt,

- die zeitlich variablen Randbedingungen nicht nur für die Kippenherstellung enthält, sondern auch die Änderung der Fließgewässerkolmation im Bereich der Spree,
- das Gebiet Kippen und quartäre Rinnenstrukturen, als Sonderkörper enthält. Dies wird, wie sich beim konkreten Aufbau ergab, noch untersetzt von glazigenen Störungsbereichen (vgl. Kap. C2.2.3)
- die Betrachtung des bergbaulichen Einflusses auf folgende Schutzgüter enthält:
 - dem Bärwalder See,
 - der Rohwasserfassung zur Trinkwasserherstellung im Bereich der Ortslage Bärwalde,
 - die Fließgewässer Spree und Schwarzer Schöps.
- auf sächsischem Gebiet liegt.

Das 15 x 12 km große Testmodellgebiet ist aus Abb. C1-1 ersichtlich. Das gewählte Grid beträgt $dx = dy = 200$ m. Die kartographischen Darstellungen werden in dem für Sachsen seit 2015 gültigen geografischen Referenzsystem ETRS_1989_UTM_Zone_33N erstellt.

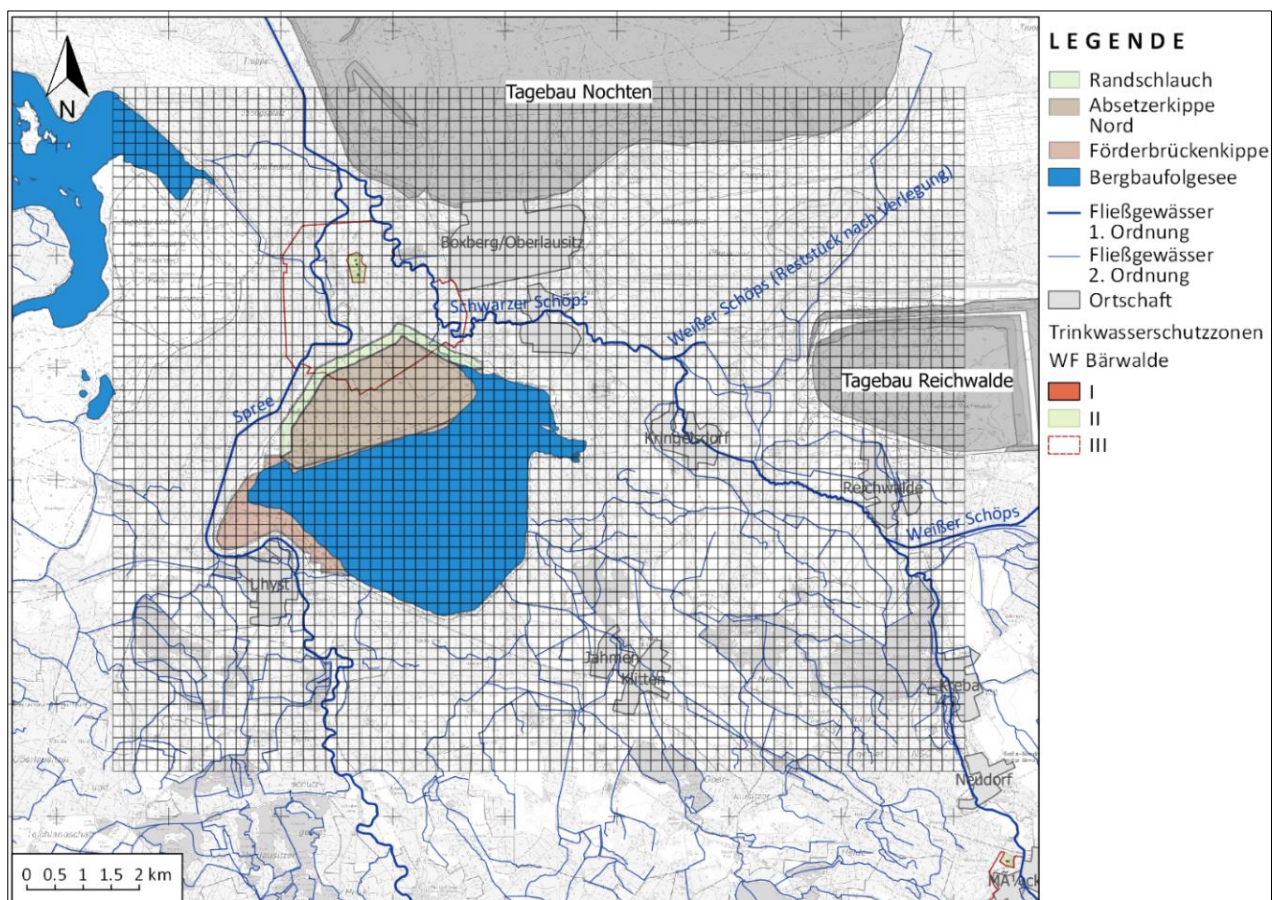


Abbildung C1-1: Bereich des Testmodells (Strömungsmodell)

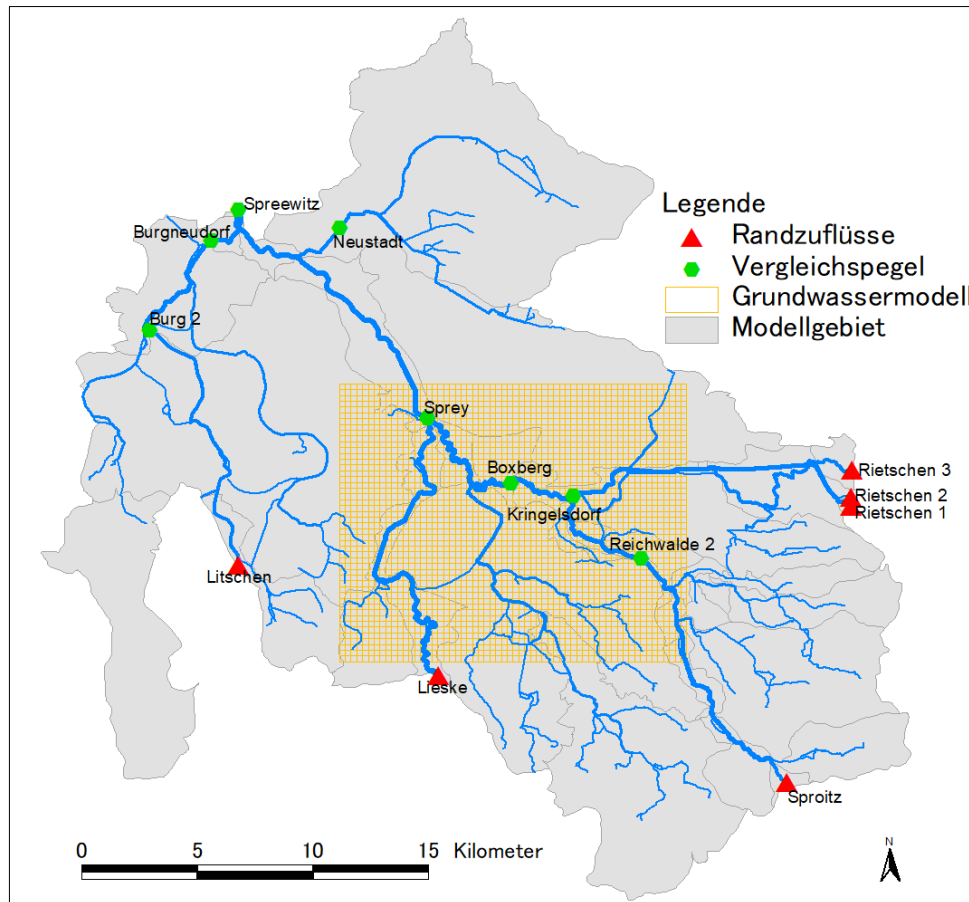


Abbildung C1-2: Testmodellbereich für die Bodenwasserhaushaltsmodellierung (mit Gitterstruktur des Grundwasser-Testmodells)

Das Modellgebiet für das Testmodell zum Bodenwasserhaushalt muss größer gewählt werden. Dies ist notwendig, um neben den Validierungsmöglichkeiten des Grundwassermodells (Grundwasserstandsmessstellen) auch die Niederschlag Abfluss-Beziehung anhand von gebietsinternen Oberflächenwasserpegeln zur zusätzlichen Prüfung der Modellgüte zu nutzen (Abb. C1-2). Um die daraus resultierende, belastbare Gebietswasserbilanz erstellen zu können, sind die BWH-Modellgebietsgrenzen so gewählt worden, dass externe Zuflüsse an den Modellgrenzen mittels Grenzpegelganglinien berücksichtigt werden. Somit müssen die Quellgebiete nicht mit modelliert werden. Das in Abb. C1-2 dargestellte BWHM-Modellgebiet im Testgebiet Bärwalde berücksichtigt somit das Einzugsgebiet der Spree.

Es ist zur Wahl des Testmodellgebietes zusammenzufassen, dass im Bereich Bärwalde die Programmcodes auf ihre generelle Eignung sehr gut zu prüfen sind. Es wird ausweisbar sein, wo Schwierigkeiten in der Bearbeitung des GRM Lausitz auftreten können und wie diese behoben werden sollten.

Eine Kalibrierung der einzelnen Modelle an Felddaten war nicht Ziel der Testmodellierung, da es nicht darum geht, das Gebiet hydrogeologisch „richtig“ zu modellieren, sondern die vorgeschlagene Methodik zum Aufbau und Betrieb eines GRM Lausitz zu testen. Einige Randbedingungen wurden deshalb nur in einem vereinfachten Ansatz in die Modelle integriert. Die Modelle sind deshalb als „halb-synthetisch“ zu verstehen. Die notwendigen Aussagen zur Umsetzbarkeit im GRM Lausitz sind jedoch auch aus diesem halb-synthetischen Modell ableitbar.

C2 GRUNDLEGENDES VORGEHEN BEI DER TESTMODELLIERUNG

C2.1 ZIELSTELLUNG TESTMODELLIERUNG

Wie in Kap. C1.1 schon ausgeführt, ist es Hauptziel der Testmodellierung, die generelle Umsetzbarkeit eines GRML-Aufbaus zu prüfen. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf der Überprüfung des konzeptionellen Vorgehens.

Bei Verwendung eines ganz konkreten Modellgebietes agiert man immer im Bereich konkreter, lokaler Fragestellungen. Diesbezüglich wurde sich entschieden das Modellgebiet zwar an einen realen Bereich stark anzulehnen, aber dennoch mit einem teilweise halb-synthetischen Modell zu arbeiten. Dies heißt z. B. Abstraktionen im hydrogeologischen 3D-Strukturmodell, in Bezug auf die Einteilung im Quartär und bei der Parametrisierung von Kippenkörpern und Rinnen vorzunehmen. Weiterhin nur wesentliche Fließgewässer und nicht die Vielzahl kleiner Fließ- und Standgewässer zu berücksichtigen. Ziel der gekoppelten Modellierung mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell ist es, das generelle Zusammenspiel von Grundwasser, Oberflächengewässern und Bodenwasserhaushalt zu überprüfen. Denn diese Verkopplung ist für die Wasserhaushaltsanalyse in den Bergbauregionen essentiell.

Gleiches gilt z. T. auch für Zeitfunktionen von äußeren und inneren Randbedingungen, die vereinfacht anzusetzen waren. Dieses generelle Vorgehen war auch in Anbetracht der zur Verfügung stehenden Bearbeitungszeit zielführend.

Letztendlich bestand das Gesamtziel der Testmodellierung darin, Antworten auf folgende Hauptfragen zu bekommen: Ist das Konzept zum GRML-Aufbau umsetzbar? Welche wichtigen Erkenntnisse zu Anpassungsnotwendigkeiten des Konzepts ergeben sich aus der erfolgten Testmodellierung?

Es sei nochmal erwähnt, dass es nicht darum geht, detailliert lokale Fragestellungen im Gebiet nachzuvollziehen. Vielmehr ist die Überprüfung des Umgangs mit inneren und äußeren Randbedingungen und wesentlichen hydraulischen Strukturen (z. B. sich füllende Restseerkörper) und ihrer Spezifika entscheidend. Es sind die sich ergebenden Besonderheiten, auch beim Aufbau des hydrogeologischen 3D-Strukturmodell zu dokumentieren. Hierbei sind auch Besonderheiten herauszustellen, die sich für die angewendeten Software-Programme ergeben. Hier ist das Augenmerk hauptsächlich auf die Spezifika von typischen Aspekten zu hydraulischen Randbedingungen in den Braunkohlenbergbau-Folgegebieten zu legen.

Der Vergleich der Software-Programme zueinander kann bei der Testmodellierung nur mittels einer zum Bodenwasserhaushaltsmodell nicht-echtgekoppelte Modellierung erfolgen. Das heißt, es werden durch das Bodenwasserhaushaltsmodell Zeitfunktionen der GWN errechnet, die dann in die ungekoppelten GW-Modelle als obere RB 2. Art einfließen.

Die Testung des echt gekoppelten Vorgehens mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell ArcEGMO (online-Kopplung) ist nur mit der Kopplung zur Grundwassermodellierungssoftware PCGEOFIM möglich. Dies hat Lizenz-Gründe (wie schon in Kap. B5 ausgeführt), da die Kopplung des Bodenwasserhaushaltsmodells ArcEGMO mit den drei Grundwasser-Softwarepaketen nicht frei verfügbar ist. Die Rechte zur Kopplung von Seiten des Bodenwasserhaushaltsmodells liegen bei BAH, die Rechte von Seiten der Grundwassermodelle jedoch bei den unterschiedlichen Firmen - bei FEFLOW DHI-WASY, bei MODFLOW ist nur die Kopplung zur MODFLOW-Version – Cadshell (IHU Nordhausen) bekannt und hier im Bearbeiterteam für PCGOFIM – bei IBGW Leipzig.

C.2 ARBEITSSCHRITTE TESTMODELLIERUNG

C.2.1 GEOLOGISCHES MODELL - DATENAUSWAHL BOHRUNGEN

Im Zeitraum der Bearbeitung der Testmodellierung standen für das Testgebiet noch keine digitalen 3D-Daten bzw. vollständig mit dem aktuellen stratigraphischen Normalprofil verschlüsselte Bohrung aus der HyK50-Modellierung im LfULG zur Verfügung. Anstelle der Nutzung dieser voraussichtlich ab dem Jahr 2020 verfügbaren Daten wurde, abgestimmt mit dem Auftraggeber, auf den in der UHYDRO-Datenbank des LfULG verfügbaren Datenpool an Bohrungen zurückgegriffen. Die entsprechenden Datensätze von Kopf-, Schicht- und Sachdaten wurden für den räumlichen Ausschnitt des Testmodells abgefragt und vom LfULG mit Stand 01/2019 übergeben.

Der insgesamt ca. 17.000 Bohrungen mit elektronisch verschlüsseltem Schichtenverzeichnis umfassende Datensatz wurde für die Verwendung hinsichtlich der Testmodellierung geprüft. Dabei schließen ca. 14.000 Bohrungen auch die Schichten bis zum Tertiär bzw. Prätertiär auf (siehe Abb. C2-1). Aus diesen wurden gezielt Bohrungen ausgewählt. Dabei wurde auf eine möglichst homogene Verteilung der Bohrungen in der Fläche geachtet.

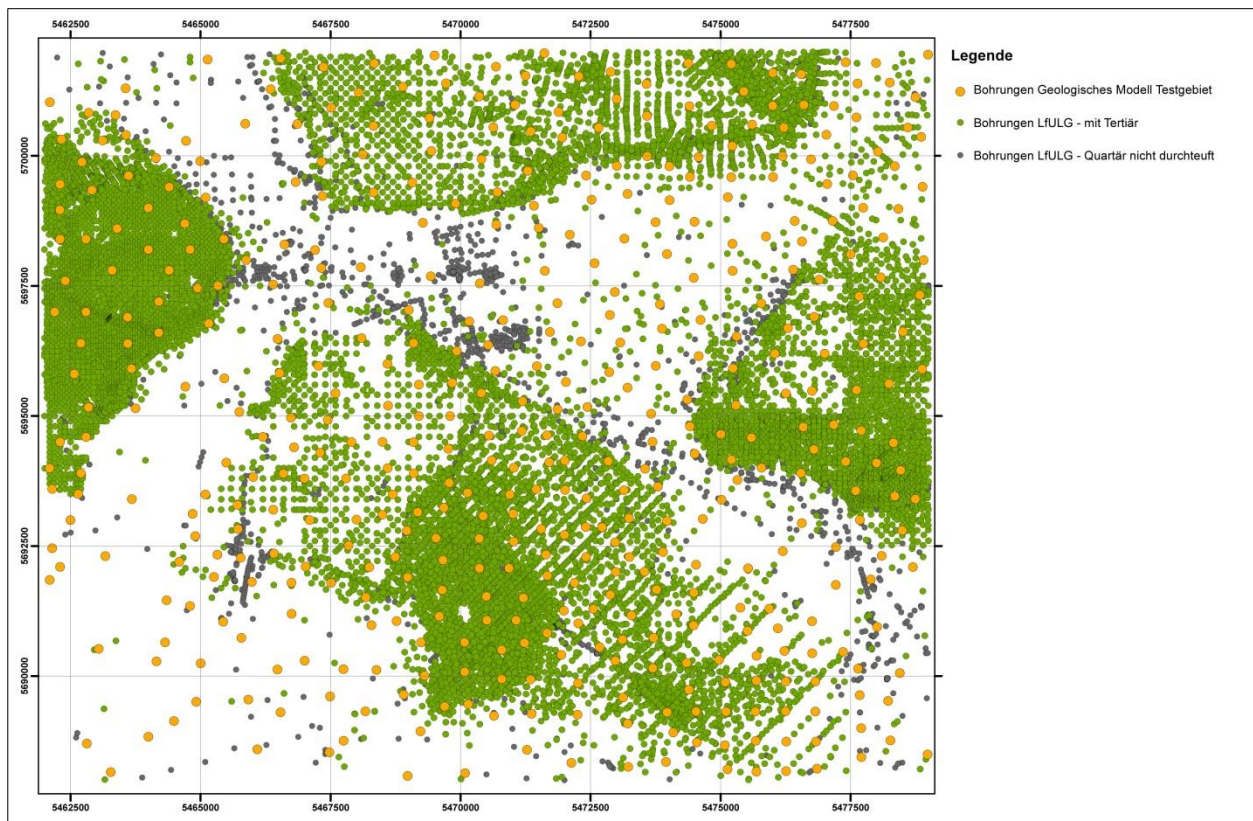


Abbildung C2-1: Datenlage der Bohrungsverteilung im Testgebiet mit Darstellung der Auswahl an Bohrungen für die Testmodellierung

Als wesentliche Grundlage dienen dabei die meist tieferreichenden Bohrungen der LKT50 Lausitz, welche schon mit einer aktuellen horizontweisen Verschlüsselung hinsichtlich Tertiär vorliegen. Die zusammengestellten insgesamt 481 Bohrungen im Testgebiet (siehe Abb. C2-1) wurden dann entsprechend der für die geologische Modellierung festgelegten stratigraphischen Untergliederung (vgl. Kap. C3.1) eingestuft. Dabei wurde insbesondere für das Quartär auf eine weniger komplexe Unterteilung, im Sinne eines „halb-synthetischen“ Modells zurückgegriffen.

C2.2.2 ERSTELLUNG HYDROGEOLOGISCHES 3D-STRUKTURMODELL – ÜBERFÜHRUNG IN DAS NUMERISCHE MODELL

Die Basis für die Erstellung des hydrogeologischen 3D-Strukturmodells lieferte die geologische Modellierung und deren Umsetzung in ein nach hydrogeologischen Aspekt in Schichten untergliedertes Modell (vgl. Kap. C3.1). Das ganze geschah mittels der Umsetzung der in einer Datenbank verschlüsselten ausgewählten Bohrungen im Testgebiet (siehe Kap. C2.2.1).

Nachfolgend wurde das konkrete hydrogeologische Modell für alle drei GW-Modellierungsprogramme mit dem Programmsystem GMS (Groundwater Modeling System) von AQUAVE-OTM erzeugt. Das Programmsystem GMS bietet die Möglichkeit, geologische sowie hydrogeologische Daten zu dreidimensionalen Struktur-, Parameter- und Strömungsmodellen zu entwickeln.

Das erhaltene 3D-Strukturmodell wurde mit Kippen- und See-Bereichen ergänzt. Auch erfolgte für die inneren Sonderbereiche (quartäre Rinnen und glazigene Störungsbereiche) eine Ankopplung an die entsprechenden hydrogeologisch relevanten Modellschichten.

Unter Ergänzung der Parametrisierung (k_f -Werte usw.) wurde somit die Grundlage für die Grundwasser-Modellierung für die einzelnen Software-Programme erstellt.

C2.2.3 VORGEHEN FÜR INNERE SONDERBEREICHE

Besondere Bedeutung besitzt auch die Festlegung zur Vorgehensweise für speziell zu handhabende „innere Sonderbereiche“. Hierunter sind vor allem folgende drei Arten spezieller „hydrogeologischer Körper“ zu verstehen: die entstanden/ noch entstehenden Kippenkörper, quartäre Rinnenstrukturen und glazigene Störungsbereiche. Da sich bei der Testmodellerstellung zur Handhabung dieser Körper eine umfangreiche Diskussion, mit wesentlichen Erkenntnissen ergab, wird dieses Vorgehen und generelle Aussagen zum Umgang damit, hier umfassend dargestellt.

Vorzustellen ist, dass für alle diese drei Arten von Sonderbereichen eine ähnliche generelle Vorgehensweise zu wählen ist:

- Sie sind strukturell in ihrer Spezifik zu verstehen und abzubilden. Dabei erfolgt ihre grundlegende Abbildung über ihre Parametrisierung und nicht als, im konzeptionellen hydrogeologischen Modell ausgewiesene, einzelne Einheit (Schichtglieder). Dies ist zielführend, weil sie „Ersetzungen“ anderer Schichtglieder darstellen.
- Diese Handhabung entspricht auch exakt der geologischen bzw. technischen Situation. Denn pleistozäne Rinnen stellen eine Aufarbeitung der vorher vorhandenen Abfolge von GWL und Stauern dar. Die Bereiche wurden durch eine Rinnenfüllung ersetzt. Gleiches gilt auf technischem Weg für Kippenmaterialien, gegenüber den Vorfeldverhältnissen. Somit wird für beide Bereiche die Umwandlung der „betroffenen Körper“ durch neue Parameterisierungen abgebildet.
- Entscheidend ist, dass dieses beschriebene Vorgehen in den vorher für diese Sondergebiete ausgehaltenen Verbreitungsgrenzen erfolgt. Innerhalb dieser Rinnen-, Kippenbereiche bzw. glazigenen Störungsbereichen kann, bei detaillierter Datenlage, eine sehr differenzierte Parametrisierung erfolgen.

Für die Kippenkörper ist aus anderem Blickwinkel, dem Wissen um ihren generellen, strukturellen Aufbau Folgendes festzuhalten:

- Die Berücksichtigung der **entstandenen Kippenkörper** ist vom hydraulischen und hydrogeochemischen Aspekt zu betrachten. Wie in den Großraummodellen im Mitteldeutschen Revier (und auch in Lausitzer Regionalmodellen) gehandhabt, bietet sich diesbezüglich oft eine grundlegende vertikale Zweiteilung an. Dies gilt insbesondere für AFB-Tagebaue, in denen oft eine Unterscheidung in die AFB-Kippe und die darüberliegende Absetzerkippe (ASK) zielführend ist.
- Hydrogeochemisch ist es natürlich sinnvoll, auch noch Verwitterungszonen in der vertikalen Teilung, wohlgermerkt im Hangenden beider Teilkippenkörper (AFBK und ASK) auszuhalten. Siehe insgesamt zu diesem Vorgehen und den Prozessen z. B. HOTH (2004).
- In der oben beschriebenen Vorgehensweise, dass alle Schichten des Grundmodells auch in den Kippen fortgeführt werden, ist diese Mindestberücksichtigung von vier verschiedenen „Quasi-Kippenschichten“ überhaupt kein Problem. Es ist auch eine deutlich weitere vertikal differenzierte Berücksichtigung möglich. Dies wird jedoch oft an der konkreten Datenlage scheitern. Stehen keine differenzierteren Daten zur Verfügung, dann werden die verschiedenen Schichten innerhalb des Bereichs der Kippenkörper gleich parametrisiert.

Es ist abschließend zur Einbeziehung der Rinnen und Kippenkörper anzumerken:

Im späteren aufzubauenden GRML muss es darum gehen, über die Parametrisierung bekannte Trends in den Körnungsverhältnisse (wesentliche feinkörnige bzw. grobkörnige Bereiche) abzubilden. Ziel der Parametrisierung kann es nicht sein, homogene Rinnenfüllung bzw. Kippenparametrisierungen im Modell zu haben.

Die gleiche Aussage gilt auch für die stratiformer gelagerten, gewachsenen Bereiche in den Feldesteilen (Tertiär und Quartär). Hier sollten wesentliche, großräumige Trends, die aus den generellen Ansprachen der erbohrten Einheiten bzw. k_f -Wertbestimmungen bekannt sind, in Trends der Parametrisierung einfließen. Auf keinen Fall sollten die Einheiten nur mit gleichen k_f -Werten für die gesamten Einheiten belegt werden und die Spezifizierung dann nur über Parameteranpassung im Modell erfolgen. Stattdessen ist die Parameteranpassung später auf die differenzierte Parameterzonierung (Ansprache orientierter Zonen) aufzusetzen.

Nachfolgend sollen jetzt noch einmal die Erkenntnisse aus der Testmodellerstellung zu den glazigenen Störungsbereichen zusammengeführt werden:

Die aus KÜHNER (2017) entnommene Abb. C2-2 weist aus, dass im Testgebiet größere Bereiche, als vor der Testmodellerstellung erwartet, solche **glazigenen Störungsbereiche** darstellen. In Abb. C2-3 wird dies durch den ebenfalls aus KÜHNER (2017) entnommenen Profilschnitt untermauert. Darauf aufbauend ist, hinausgehend über die Testmodellierung, für das GRML insgesamt festzuhalten:

- Solche glazigen gestörten Bereiche sind als Sonderbereiche vom „normalen Modellgebiet“ zu unterscheiden. Es ist weiterführend auszuweisen, ob es sich um A) vollständige Störungen der Lagerungsverhältnisse handelt, die bis in das Quartär keiner stratiform verfolgbarer Idee von Grundwasserleitern gehorchen oder B) ob diese Störungen sich vor allem „nur“ auf das Tertiär beziehen.
- Es ist generell anzumerken, dass Daten von GW-Standsmessstellen, die sich lokal in diesen „aufgeschuppten Bereichen“ befinden, nur nach Überprüfung zur interpolierenden Darstellung von Hydroisohypsenplänen herangezogen werden können!

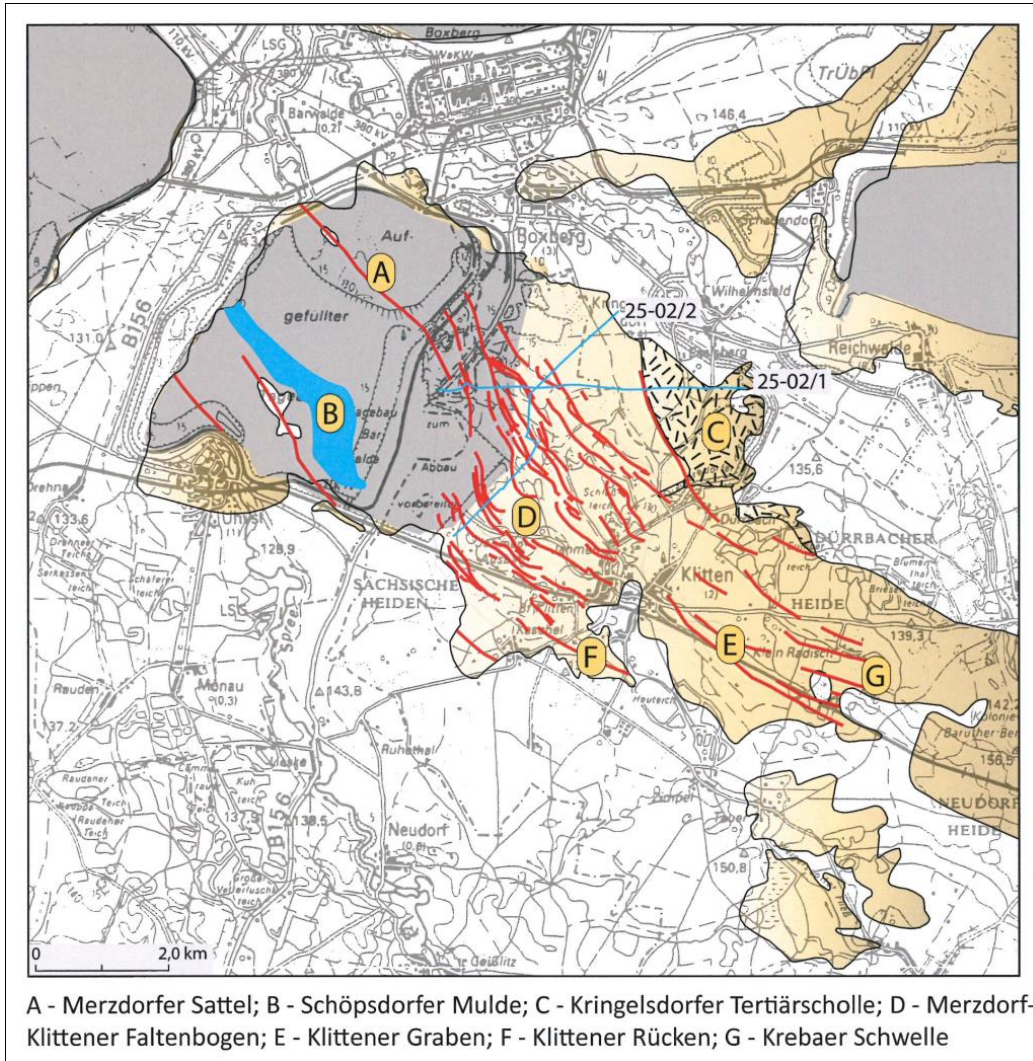


Abbildung C2-2: Lage glaziger Störungsbereiche im Testgebiet (aus KÜHNER 2017)

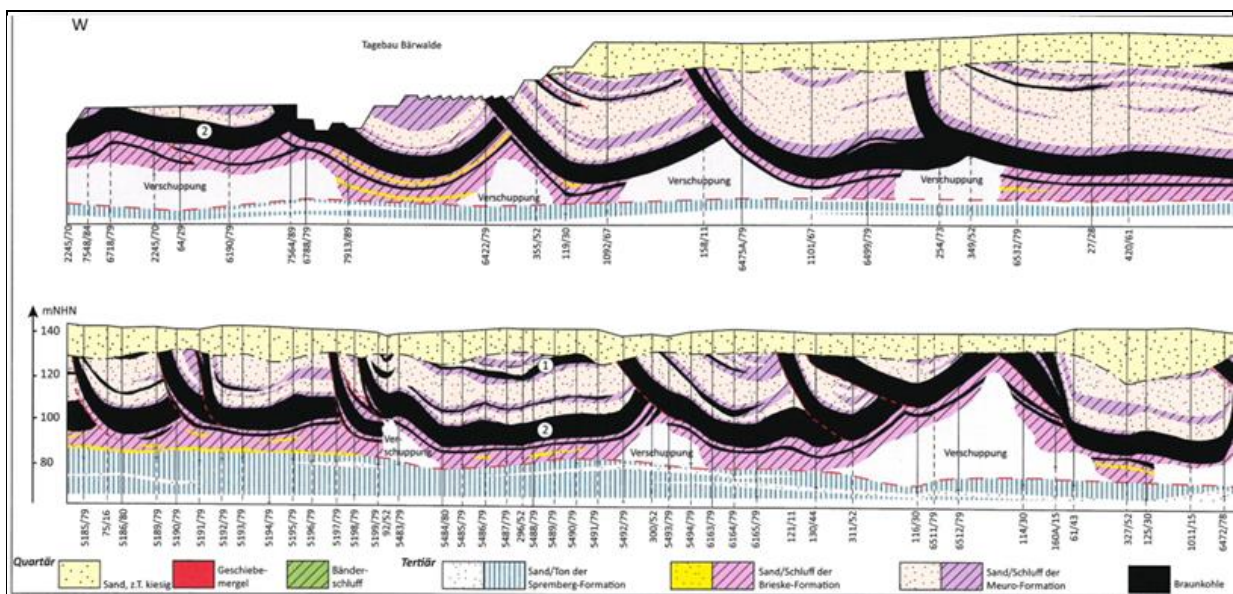


Abbildung C2-3: Profilschnitt durch Gebiet mit glazigenen Störungsbereichen – Bereich des ehemaligen Tgb. Bärwalde im Testgebiet (aus KÜHNER 2017)

- Im Fall A) ist davon auszugehen, dass überhaupt keine einfach interpolierbare hydrogeologisch-hydraulische Situation vorliegt. Im oben benannten Fall B) muss zuerst überprüft werden, im lokalen/regionalen Maßstab, ob und wie die einzelnen Bereiche (Messstellen) miteinander, hydraulisch sinnvoll kommunizieren oder nicht. Im Idealfall sind die Messstellen im Fall B) hydraulisch über das Quartär gekoppelt und somit zueinander „in Beziehung zu setzen“. Dies muss jedoch erst mit vorhergehender genauer Zuordnung der Messstellen und ihrer verfilterten Bereiche zu den einzelnen GWL überprüft werden.
- Zusammenfassend zu diesen Aussagen, sind in allen Lageplan-Darstellungen bei einem späteren GRML-Aufbau und zugehörigen Ergebnisdarstellungen diese Gebiete glazigener Störungen, klar als Sonderbereiche zu kennzeichnen.
- Durch die gewonnenen Erkenntnisse wird auch bewusst, dass der Umgang mit den inneren Sondergebieten gezielter Beachtung beim Aufbau des GRML bedarf. Aus diesem Fakt resultiert auch eine angepasste Aufwandsbilanzierung (vgl. Kap. D7).

Aus Abb. C2-4 ist dann eine Zusammenführung der Sonderbereiche innerhalb des Testgebietes ersichtlich. Es wird deutlich, dass mit dem gewählten Testgebiet nicht nur die Spezifika von Braunkohlenbergbaugebieten (aktive Tagebaue, Sanierungstagebaue – Restseen, Kippenkörper, Fließgewässer, weitere Standgewässer) sehr gut abgebildet sind, sondern dass zusätzlich ein sehr großer Teil des Testgebietes durch innere Sonderbereiche gekennzeichnet ist. Im Testmodell selbst erfolgte eine einfache Handhabung der Sonderbereiche, da keine Datenbasis für eine differenzierte Parameterisierung, in Bezug auf die in der AST genannten und durch die Zeitrestriktionen vorgegebenen Bedingungen, vorhanden war.

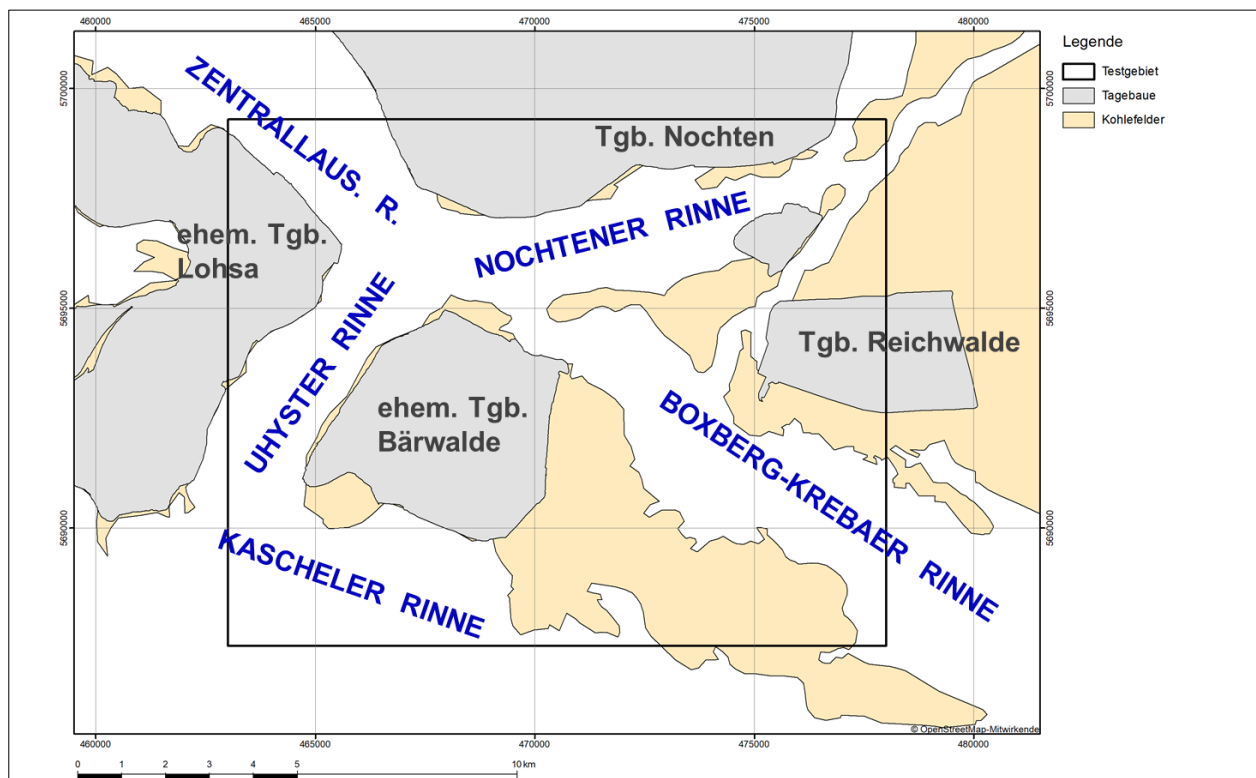


Abbildung C2-4: Bereich des Testgebietes – Lage von quartären Rinnen und Tagebaubereichen (mit resultierenden Kippen und Bergbaufolgesen)

C2.2.4 VORGEHEN BEI FESTLEGUNG ÄUßERE UND INNERE RANDBEDINGUNGEN

Die Randbedingungen des Testgebietes wurden in Anlehnung an Realdaten abgeleitet und mit dem Fokus auf die Bandbreite möglicher Randbedingungen für das GRM Lausitz im Testmodell definiert. Für die Modellränder werden RB 1. und 2. Art. angesetzt, wobei der Ost- und Nordrand durch die Entwässerungsmaßnahmen des Tagebaus Reichwalde zeitlich variabel ist und in Form von einzelnen Zeitreihen in jeder Zelle definiert wird. Gleiches gilt für den Nordrand und den im Nordwesten des Modellgebiets liegenden Bergbaufolge-Speichersee Lohsa II. Der Westrand wird als RB 2. Art (no-flow, $Q=0$) und der Südrand als RB 1. Art mit einem konstanten Potential definiert.

Innere Randbedingungen sind durch den Bärwalder See, die Vorfluter, die Grundwasserneubildung (Kap. C2.2.5) und die Förderbrunnen der real existierenden Wasserfassung Bärwalde definiert. Dabei wurde als wesentlicher Modellierungsstartpunkt der Beginn der Flutung von Bärwalde im Jahr 2000 betrachtet und festgelegt. Diesbezüglich erfolgte bei der Modellierung auch eine Übertragung der verfügbaren Klimadatenzeitreihe von 1991-2015 auf 2000-2025, um einen instationären Anstieg des Sees abzubilden. Nach diesen ersten 25 Jahren wird dann 25 Jahre mit stationärem Endwasserstand und mittlerer GWN weiter gerechnet. Die zeitliche Verschiebung der Klimadaten ist in Bezug auf den halbsynthetischen Modellansatz zu sehen (vgl. Kap. C2.1).

Das Fließgewässernetz im Modellraum ist komplex. Dem halb-synthetischen Ansatz folgend, wurde der Fokus in der Bearbeitung auf die Vorfluter Spree und Schwarzer Schöps gelegt. Die Interaktion von Fließgewässern und See wurde durch die Flutung des Bärwalder Sees mit Wasser der Spree über einen Zuleiter und die Ableitung von Wasser aus dem See in den Schwarzen Schöps realisiert. Der Ableiter wurde so definiert, dass ab einem Wasserstand (WST) im See von 124 m NHN, Wasser aus dem See abgeführt wird.

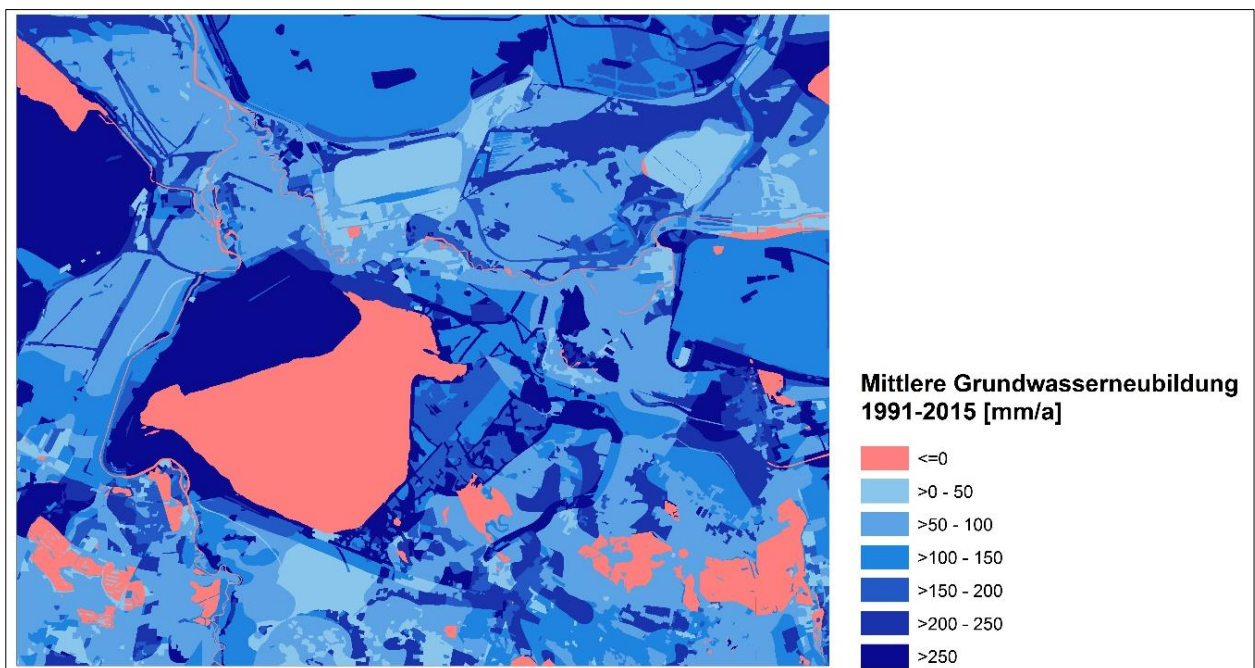


Abbildung C2-5: Mittlere jährliche Grundwasserneubildung im Bereich des Grundwasser-Testmodells, berechnet mit ArcEGMO

C2.2.5 VORGEHEN AUFBAU BODENWASSERHAUSHALTSMODELL

Für den Aufbau des Bodenwasserhaushaltsmodells werden die unter Kap. B4.7 aufgeführten hydrologisch relevanten Eigenschaften zur Beschreibung des Untersuchungsraumes benötigt. Da sich der in Kap. C1.2 festgelegte Bereich im Landesmodell Brandenburg (siehe Kap. B4.7.3) befindet, konnte dieser Bereich aus der Datenbasis dieses Brandenburger Modells ausgeschnitten und teilweise mit weiteren Informationen unteretzt werden. Das so erstellte Datenmodell wird im Kap. C4 genauer erläutert.

C2.2.6 FESTLEGUNG DER ZU BERÜCKSICHTIGENDEN GWN FÜR UNGEKOPPELTE MODELLE

Grundlage für die Vorgabe der oberen Randbedingung „Grundwasserneubildung“ in den Grundwasserströmungsmodellen bildete eine Bodenwasserhaushaltsmodellierung mit ArcEGMO. Als Ergebnis dieser Modellierung zeigt Abb. C2-5 die räumliche Verteilung der berechneten mittleren jährlichen Grundwasserneubildung für den Zeitraum 1991-2015. Die Berechnung erfolgte zeitvariabel unter Zugrundelegung eines mittleren Grundwasserflurabstandes.

Um die Grundwasserneubildung in allen Grundwasserströmungsmodellen gleichermaßen berücksichtigen zu können, sollte ein möglichst einfacher und pragmatischer Weg gefunden werden, um sicher zu stellen, dass die Umsetzbarkeit in den unterschiedlichen GW-Modellierungsprogrammen gewährleistet ist. Maßgabe war, die Grundwasserneubildung sowohl räumlich als auch zeitlich variabel zu erfassen. Außerdem musste vereinfachend, für diese Vorgehensweise mit nicht echt-gekoppelten Modellen, ein unveränderlicher Grundwasserflurabstand angenommen werden.

Neben der Modelleingangsgröße Grundwasserneubildung waren auch die meteorologischen Randbedingungen für die Bilanzierung des Tagbaurestsees in den Grundwasserströmungsmodellen zu berücksichtigen.

C3 VORGEHEN BEIM AUFBAU DES GRUNDWASSERMODELLS FÜR DIE TESTMODELLIERUNG

C3.1 ERSTELLUNG HYDROGEOLOGISCHES 3D-STRUKTURMODELL

C3.1.1 (HYDRO)GEOLOGISCHE MODELLIERUNG

Für die Erstellung des geologischen Modells wurde aus dem vom LfULG übergebenen aktuellen Bohrungs-Datensatz eine Auswahl an 481 Bohrungen verwendet (vgl. Kap. C2.2.1), die größtenteils bereits im Zuge der Bearbeitung LKT50 Lausitz für den Bereich Tertiär aktuell stratifiziert wurden. Diese Stratifizierung in einzelne tertiäre Horizonte erfolgte damals händisch mittels eines umfangreichen Schnittmodells mit Schnitten in N-S- und W-E-Richtung.

Für den Aufbau des hydrogeologischen Strukturmodells war es entscheidend, dass die Grenzen zwischen den einzelnen Horizontkörpern nicht nur definierten stratigraphischen Einheiten, sondern vorrangig hydrologischen/hydraulischen Einheiten (Grundwasserstauer/Grundwasserleiter) entsprechen. Die 481 Bohrungen mussten dahingehend nochmals neu verschlüsselt werden. Dabei dienten die Grenzen aus der Konstruktion für die LKT50 Lausitz als hilfreiche Orientierung für die Untergliederung in nun zu definierende Horizontkörper.

Bei der geologischen Modellerstellung wurde zunächst grundlegend zwischen Quartär und Tertiär unterschieden. Das Tertiär wurde dann bis zur Prätertiäroberkante betrachtet und in 15 hydrogeologisch relevante Einheiten zzgl. „Pufferschichten“ unterteilt (vgl. Tab. C3-1).

Im Zuge der weiteren Bearbeitung für die Übernahme bzw. die Erstellung des Strukturmodells wurden die Tertiärschichten teilweise zusammengefasst und letztendlich auf 11 Schichten reduziert. Das Quartär wurde in 3 hydraulische Einheiten sowie den Rinnenkörper aufgeschlüsselt. Die endgültige Untergliederung in geologische Modellschichten sowie die daraus erstellten Strukturmodellsschichten sind in Tab. C3-1 übersichtswise zusammengestellt.

Konkret wurde das geologische 3D-Modells mit ArcGIS mit folgendem Ablauf erstellt:

Als Ausgang für die Berechnung wurden für alle betrachteten Horizontkörper die Liegendteufen und die Mächtigkeiten der einzelnen Körper für jede Bohrung ermittelt. Für das Modell wurden Rasterkarten in Form von GRIDs erstellt. Diese hatten eine Zellengröße von 200 x 200 m. Es wurden jeweils die Liegendteufen, die Mächtigkeiten und die Hangendteufen für die einzelnen Einheiten in Form von GRIDs generiert. Dabei wurde in ArcGIS das Werkzeug "Topo zu Raster" genutzt, dessen Interpolationsmethode speziell für die Erstellung digitaler Höhenmodelle entwickelt wurde. Die Interpolation erfolgte dabei mithilfe der Methode der iterativen finiten Differenzen. Die Berechnung der einzelnen Modellschichten erfolgte vom Hangenden zum Liegenden. Es wurden für jeden Horizont jeweils zunächst die Liegendhöhen aus den Bohrungsdaten berechnet. Anschließend erfolgte der Verschnitt mit den darüber liegenden Horizonten, um die Mächtigkeitskarten bzw. daraus wiederum die Hangendkarten zu generieren. War einer der Horizontkörper an einer Bohrung nicht verbreitet, wurde für die Berechnung der Liegendhöhe an dieser Stelle der Wert der Liegendhöhe der hangenden Schicht zzgl. Puffer verwendet, um beim anschließenden Verschnitt mit der Hangendschicht eine Lücke zu generieren.

Für das Quartär wurde als Hangendfläche eine Oberkante aus den Ansatzhöhen der Bohrungen berechnet, um eine flächendeckende Bezugshöhe für alle Bohrungen zu erhalten. Je nach Bohrungsalter könnte es sonst zwischen bestehenden DGMs und der Ansatzhöhe zu Abweichungen kommen, bzw. führt ein Verschnitt der Horizontkarten mit zu hochauflösenden DGMs zu Unebenheiten in den Oberflächen, die sich mit der bestehenden Bohrungsdichte nicht abbilden lassen.

Aus der Bearbeitung der LKT50 Lausitz liegt ein relativ aktueller Stand bezüglich Liegendbasis des Quartärs vor. Allerdings konnte, da momentan aus der Bearbeitung HyK50 Lausitz noch keine aktuellen Einstufungen für das Quartär verfügbar sind, bei der weiteren Unterteilung des Quartärs leider nur auf die teils recht alte, ursprüngliche stratigraphische Untergliederung zurückgegriffen werden.

Eine Einteilung des Quartärs anhand der in der LfULG-Datenbank teilweise vorhandenen DSE-Schlüsseln war aufgrund deren Inkonsistenz kurzfristig nicht möglich. In Abstimmung mit allen Projektbeteiligten wurde das Quartär für das Strukturmodell im Testgebiet in 4 hydraulische Einheiten, Q1 bis Q3 und die Rinnenkörper, im Sinne des „halb-synthetischen“ Modellansatzes gegliedert (vgl. Tab. C3-1).

Zur Ermittlung der Verbreitung der Rinnenstrukturen wurden die tertiären, stratigraphischen Einheiten unterhalb des Quartärs betrachtet. Es wurde von der Annahme ausgegangen: Lagert das Quartär auf dem Tertiär auf, so schließen sich jüngere tertiäre Einheiten an das Quartär an. Hat sich eine Rinnenstruktur tiefer in das Tertiär eingeschnitten, so unterlagern ältere tertiäre Einheiten das Quartär. Aus dieser Annahme ergab sich Abb. C3-1.

Die tertiären hydraulischen Einheiten wurden dazu fortlaufend von 1-15 nummeriert. Die Pufferbereiche sowie das Prätertiär sind als eine Einheit verschlüsselt. Aus dieser numerischen Verschlüsselung wurde eine Karte generiert. Je kleiner die Werte (grün), um so jün-

ger der Horizont der das Quartär unterlagert. Hohe Zahlen (rot) zeigen ältere Einheiten im Liegenden der quartären Schichten.

Die Rinnen zeichnen sich mit dieser Methode deutlich ab. Im Süden des Untersuchungsgebietes befindet sich eine Hochfläche des Prätertiärs. Das Quartär lagert dort direkt dem Prätertiär auf. Diese Bereiche wurden nicht in die Rinnenstruktur einbezogen.

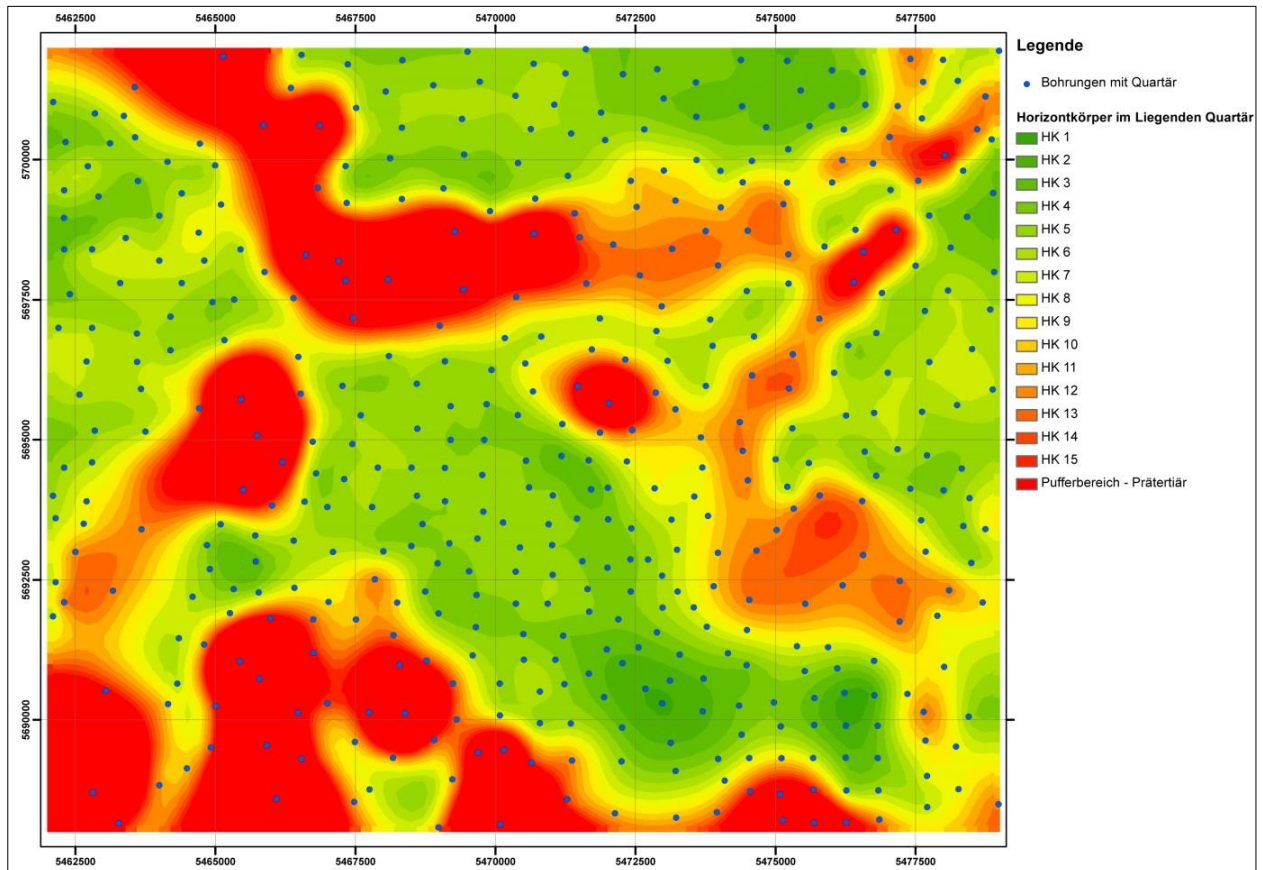


Abbildung C3-1: Verbreitung der tertiären Horizontkörper im Liegenden des Quartärs

Die Rinnenstrukturen ließen sich auf diese Weise sehr gut aushalten und die Bohrungen außerhalb der Rinnenstruktur identifizieren. Anschließend wurde mit allen Bohrungen außerhalb der Rinnenstrukturen die Quartärbasis flächendeckend berechnet. Vereinzelt zeigten sich an den Rändern der Rinnenstrukturen noch einzelne „Löcher“ bzw. deutliche Senken, deren Bohrungen nachträglich händisch aus dem Rinnenbereich ausgeschlossen wurden.

Im Resultat entstand die Quartärbasis ohne Rinnenstrukturen (Liegendbasis Q3). Quartäre Sedimente unterhalb dieser Basis wurden den Rinnenfüllungen zugeordnet.

Das verbleibende Quartär ohne die Rinnenkörper wurde in 3 Schichten unterteilt: zwei grundwasserleitende Einheiten (Q1 und Q3) und einen trennenden, grundwasserstauenden Horizont (Q2). Zur Abtrennung wurden die quartären Sedimente in einzelne bindige und rollige Schichten untergliedert. Um keine zu detaillierte Aufschlüsselung zu erhalten, wurden Schichten < 50 cm nicht berücksichtigt, sondern der angrenzenden Schicht zugeschlagen. Von allen bindigen Horizonten wurde Liegendhöhe und Mächtigkeit berechnet. Anschließend wurden alle Bohrungen mit bindigen Lagen mittels ArcGIS in der Fläche abgebildet. Bohrungen mit nur einem bindigen Horizont wurden als Referenzhöhe für den Horizont Q2 angenommen. Bei Bohrungen mit mehreren bindigen Lagen wurden die Schichten ausgewählt,

die in Mächtigkeit und Höhenlage zu den übrigen Bohrungen passten, um eine möglichst aushaltende und ebene Stauerschicht Q2 zu erhalten. Der daraus resultierende Horizontkörper Q2 diene als trennender Stauer für den Quartärkörper. Die Liegendhöhe als auch die Mächtigkeiten der Schichten Q2 wurden in Form von GRIDs generiert. Die beiden grundwasserleitenden Horizonte Q1 und Q3 wurden anschließend rechnerisch ermittelt. Nachfolgend wurde für den Horizontkörper Q2 an den einzelnen verwendeten Bohrungen geprüft, in welchen Regionen keine bzw. sehr geringmächtige bindige Schichten existieren. Für diese Bereiche des Ausstreichens bzw. nicht Vorhandenseins von quartären Stauschichten ergibt sich eine hydraulisch bedeutsame Verbindung der GWL (sog. Fenster), welche durch entsprechende Parametrisierung (k_f -Werte) im Testmodell berücksichtigt wurde.

Die Daten (GRIDs) der aufgeschlüsselten Horizontkörper für das Quartär (Q1-Q3 und Rinnekörper), 15 Horizontkörper für das Tertiär (inkl. einzelner Zusammenfassungen) sowie den Puffer und die Hangendfläche Prätertiär wurden als Grundlage für den Aufbau des Strukturmodells genutzt. Separat als Horizonte bzw. Körper ausgehalten wurden dabei auch stark tektonisch gestörte Bereiche mit undifferenzierbarem Tertiär (Störkörper). Hingegen wurden rezente Kippenkörper bzw. Hohlräume (mit und ohne Wasserfüllung) nicht separat ausgewiesen, sondern der vorbergbauliche Zustand im geologischen Modell abgebildet.

C3.1.2 ERSTELLUNG HYDROGEOLOGISCHES 3D-STRUKTURMODELL – ÜBERFÜHRUNG IN NUMERISCHES MODELL

Die Erstellung des 3D-Strukturmodells erfolgte auf Grundlage des Geologischen Modells, welches zuvor unter hydrogeologischem Aspekt in einzelnen Schichten zusammengefasst wurde (vgl. Tab. C3-1). Außerdem wurde zum Liegenden hin eine Limitierung des Strukturmodells vorgenommen.

Tabelle C3-1: Zusammenstellung der Modellschichten des Testgebietes - geologisches Modell sowie resultierendes hydrogeologisches 3D-Strukturmodell mit Zuordnung der k_f -Werte

Stratigraphische Gliederung Lausitz (GEOmontan / UULG, Stand 2019)				Modell-Gliederungen									
	Serie	Formation	Subformation Lausitz	(Hydro-)Geologisches Modell Testgebiet	Layer-Nr. Geologie	3D-Strukturmodell Testgebiet	Bezeichnung	Layer-Nr. Modell	Art	k_f -Wert [m/s]			
Quartär				TGMS Q1	Q1	TGMS 1	oberer GWL Q	1	GWL	8,00E-04			
				TGMS Q2	Q2	TGMS 2	Stauer Q	2	Stauer	1,00E-07			
				TGMS Q3	Q3	TGMS 3	unterer GWL Q	3	GWL	4,00E-04			
				TGMS QRinne	QRinne	TGMS Rinne	Rinne Q	separat ausgehalten	separat ausgehalten	1,00E-05			
				TGMS X	X	TGMS X (Störkörper)	Störkörper T	separat ausgehalten	separat ausgehalten	1,00E-08			
			im Geologischen Modell nicht dargestellt	nv	TGMS K (Kippenkörper)	Kippenkörper Q/T	separat ausgehalten	separat ausgehalten	1,00E-05				
Tertiär	Pliozän	Rauno-Formation	Weißwasser-Subfm.	TGMS 1 --- (GWL 2, 22 & Flaschenton)	1	TGMS 4	GWL 2 (22, 253/254) + Flaschenton + 1. MFK + GWL 3 (3231)	4	GWL/Stauer	6,00E-05			
	Ober-Miozän		Müritze-Subfm.										
			Kletwitz-Subfm.	TGMS 2 --- (1. MFK & GWL 253/254)	2			1a	TGMS 4	GWL 2 (22, 253/254) + Flaschenton + 1. MFK + GWL 3 (3231)	4	GWL/Stauer	6,00E-05
			Nochten-Subfm.	TGMS 3 --- (GWL 3, 3231)	3								
			Meuro-Formation	Greifenhain-Subfm.	TGMS 4 --- (OB 2. MFK)			4	TGMS 5	OB 2. MFK	5	Stauer	1,00E-07
				TGMS 5 --- (GWL 4, 4341)	5			TGMS 6	GWL 4 (4341)	6	GWL	1,50E-04	
				TGMS 6 --- (2. MFK)	6			TGMS 7	2. MFK	7	Stauer	1,00E-07	
				TGMS 7 --- (GWL 5, 50)	7			TGMS 8	GWL 5 (50)	8	GWL	1,20E-04	
				TGMS 8 --- (UB 2. MFK)	8			TGMS 9	UB 2. MFK	9	Stauer	1,00E-07	
			Brieske-Formation	TGMS 9 --- (GWL 6, 611/612)	9			TGMS 10	GWL 6 (611/612)	10	GWL	1,00E-04	
				TGMS 10 --- (Schluff-Leithorizont)	10			10a	TGMS 11	Schluff-Leithorizont + GWL 6 (6362) + 3. MFK	11	Stauer/GWL	1,00E-07
			Buchhain-Subfm.	TGMS 11 --- (GWL 6, 6362)	11								
				TGMS 12 --- (3. MFK)	12								
				TGMS 13 --- (GWL 7, 73)	13			im Strukturmodell nicht dargestellt	nv	nv	nv	nv	
			Spremburg-Formation	Löbberau-Subfm.	TGMS 14 --- (Mittl. Schluff-/Flöz Löbberau)								14
			TGMS 15 --- (GWL 7, 74)	15									
			Vetschau-Subfm.	TGMS Puffer	Puffer								
			Striesa-Subfm.										
			Grießen-Subfm.										
		Ober-Oligozän	Cottbus-Formation										
			Brandz-Subfm.										
Prätertiär													

C3.2 ABBILDUNG VON GLAZIGENEN RINNEN / STÖRUNGSBEREICHEN UND KIPPENAREALEN

Die in Kap. C2.2.2 umfangreich diskutierten „inneren Sonderbereiche“ (Rinnensysteme, Kippenkörper, glazigene Störungen) können einen wesentlichen Einfluss auf das Grundwassergeschehen haben. Beispielsweise können Grundwasserleiterverbreitungen über Rinnen entkoppelt/ gestört sein, aber über die Rinnen können jedoch auch sonst getrennte GWL kommunizieren. Auch in Kippen kann es zu hydraulischen Kopplungen von eigentlich getrennten Grundwasserstockwerken kommen.

Diese Sonderbereiche werden im geologischen Strukturmodell als eine eigenständige hydrogeologische Einheit ausgehalten. Zur Nachbildung der horizontalen Grundwasserströmung im Übergangsbereich dieser Sonderbereiche empfiehlt es sich daher diese im geologischen Strukturmodell durch Weiterführung der angrenzenden Grundwasserleiter zu gewährleisten. Dies bedeutet, die angrenzenden grundwasserleitenden Schichten werden über die Sonderbereiche hinweg weitergeführt. Abb. C3-2 weist diese Anbindung der Rinnenkörper schematisch aus. Dies wird dann in Abb. C3-3 untersetzt mit einem konkreten Profilschnitt, der auch den Umgang mit den Kippen- und Störkörpern ausweist.

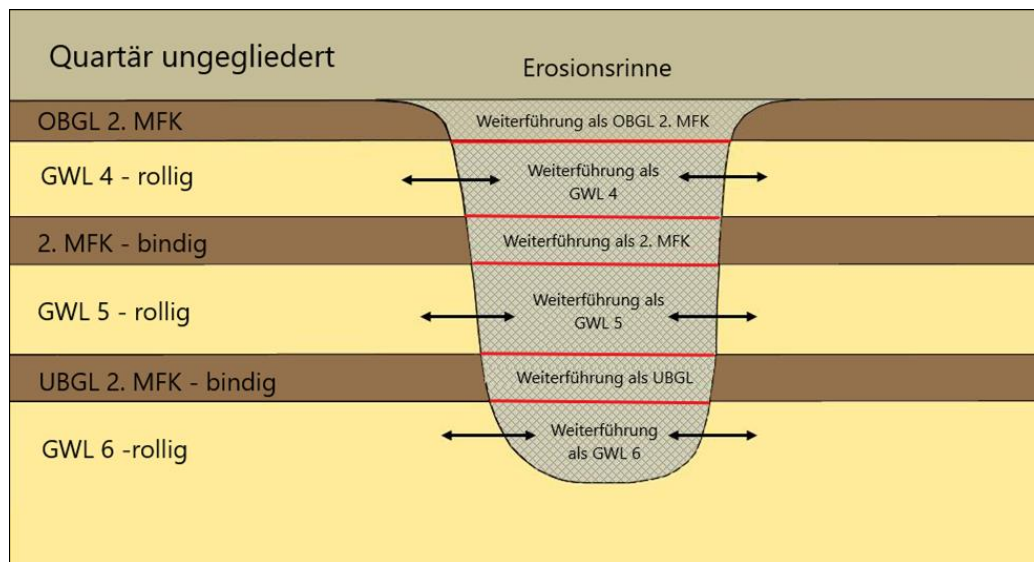


Abbildung C3-2: Schematische Darstellung der Anbindung des Rinnenkörpers an die GWL der ungestörten Feldesteile

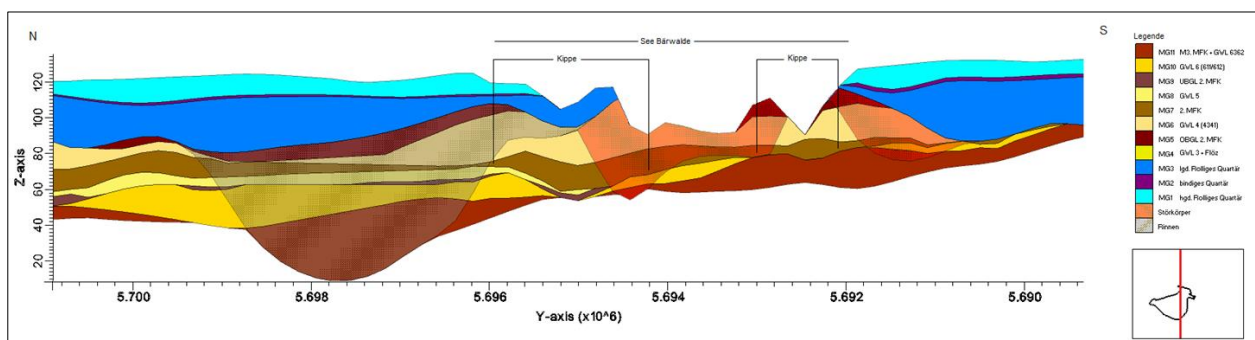


Abbildung C3-3: Schnitt durch das Strukturmodell (beispielhaft am Rechtswert GK 5469499) mit Ankopplung der Rinnen und der glazigenen Störkörper im Tertiär sowie der Position von Kippenbereichen und dem Bergbaufolgesee Bärwalde

C3.3 FESTLEGUNG ÄUßERE RANDBEDINGUNGEN

Die äußeren Randbedingungen des Testmodells wurden in Anlehnung an Realdaten aus dem Testgebiet abgeleitet und mit dem Fokus auf die Bandbreite möglicher Randbedingungen für das GRM-Lausitz definiert.

Der Westrand des Modells wurde als RB 2. Art (no flow, $Q=0$) definiert. Am Südrand erfolgte die Implementierung einer RB 1. Art (Grundwasserzustrom) mit einem konstanten Wasserstand H von 136,0 m NHN. Beide Randbedingungen lassen sich aus der Analyse von Hydroisohypsenplänen über einen Zeitraum von mindestens 10 Jahren ableiten.

Am Ost- und Nordrand des Modells beeinflusst die Entwässerung der Tagebaue Reichwalde und Nochten das Strömungsfeld im Abstrom des Bärwalder Sees. An beiden Rändern wurde deshalb eine zeitlich variante Randbedingung 1. Art definiert ($H = f(t)$). Gleiches gilt für die Entwicklung des Wasserstandes im Speichersee Lohsa II. Es wird im Testmodell vereinfacht angenommen, dass der Wasserstand (WST) im RL Lohsa II bis 2016 ansteigt und danach auf einem Niveau von 116,4 m NHN verbleibt.

Als Beispiel für die Variabilität der Wasserstandsentwicklung in den Randbedingungen zeigt Abb. C3-4 den zeitlichen Verlauf der festgelegten Wasserstände im Norden, Süden und Osten sowie für den Speicher Lohsa auf.

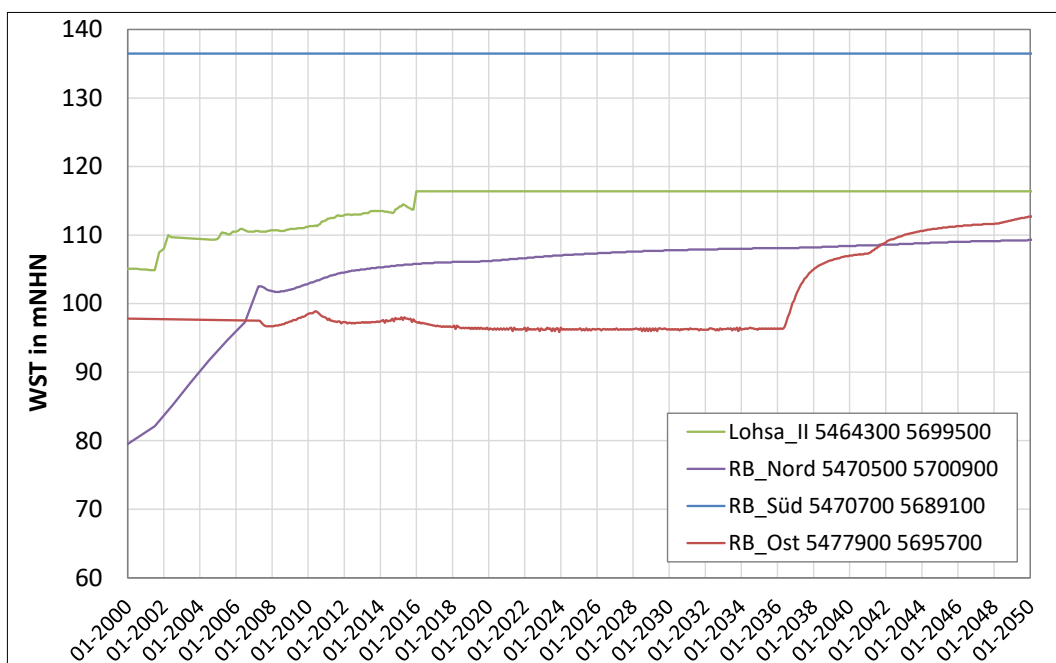


Abbildung C3-4: Zeitliche Entwicklung der äußeren Randbedingungen im Testmodell (an beispielhaft ausgewählten Punkten)

C3.4 INNERE RANDBEDINGUNGEN - OBERFLÄCHEN- UND FLIEßGEWÄSSER

Als innere Randbedingungen sind exemplarisch für die Oberflächengewässer im Testmodell die beiden Hauptvorfluter im Modellgebiet, die Spree und der Schwarze Schöps, sowie der Bärwalder See enthalten. Auch ein Zuleiter von der Spree zum Bärwalder See und ein Ableiter vom Bärwalder See in den Schwarzen Schöps sind im Modell enthalten. Damit werden die Interaktionsmöglichkeiten von Fließgewässern und Seen in den Modellen getestet.

Weiterhin sind die Entnahmebrunnen der Wasserfassung Bärwalde im Abstrom des Bärwalder Sees, als Beispiel für die lokale Entnahme von Wasser aus dem Grundwasserleiter im Modell implementiert. Die Grundwasserneubildung wurde in den ungekoppelten Modellen so gehandhabt, dass von Seiten des BWHM eine zusammenfassende, zeitvariante Vorgabe von 18 GWN-Klassen erfolgte. Die Daten wurden vom Wasserhaushaltsmodell ArcEGMO als Flächeninformation übernommen und auf das jeweilige Modellgitter übertragen. Eine Berechnung der ungesättigten Strömung, wie sie z. B. mit dem UZF-Modul in MODFLOW bzw. auch mit FEFLOW möglich ist, wurde deshalb im Testmodell nicht berücksichtigt.

Für den Bärwalder See als Randbedingung wurde die vereinfachte und auf einem Raster von 100 x 100 m interpolierte Morphometrie mit einem DGM definiert. Der See hat ausgedehnte Flachwasserbereiche und einen tiefen, für Bergbaufolgeseen typischen Randschlauch. Die Interaktion zwischen See und Grundwasserleiter wurde mit einer Kolmationsschicht, mit hydraulischer Leitfähigkeit von k_f -Wert = 10^{-5} m/s, bei einer Schichtmächtigkeit von 1 m exemplarisch beschrieben. Der Anfangswasserstand des Sees beträgt 80 m NHN. Der See war mit dem Zuleiter (ZuL) und dem Ableiter (AbL) gekoppelt, um die Flutung und die Ableitung in den Schwarzen Schöps bei einem WST von 124 m NHN abzubilden. Niederschlag und Evaporation waren nicht separat zu definieren, weil die GWN (bzw. Zehrung) als RB durch das Bodenwasserhaushaltsmodell ArcEGMO definiert war.

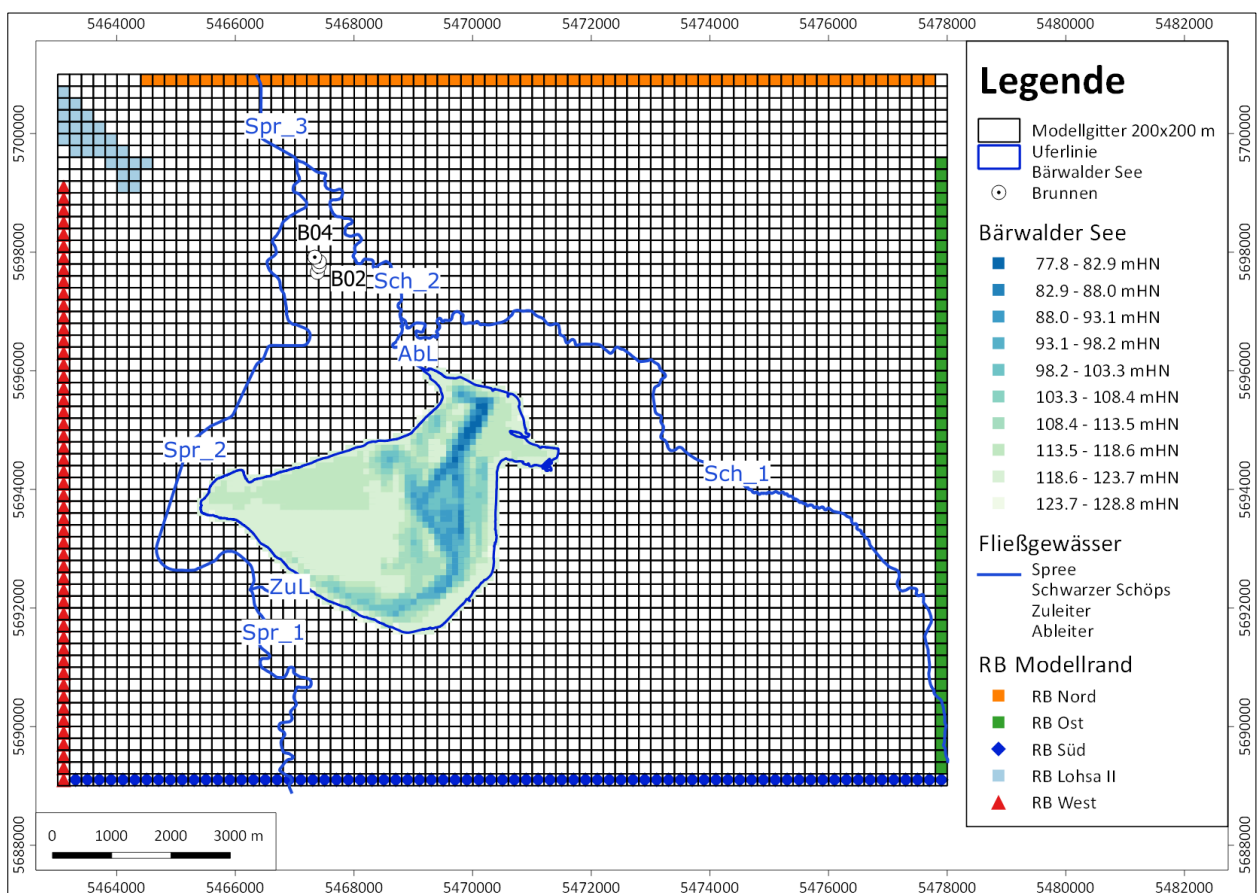


Abbildung C3-5: Äußere und innere Randbedingungen für das Grundwassermodell im Testgebiet

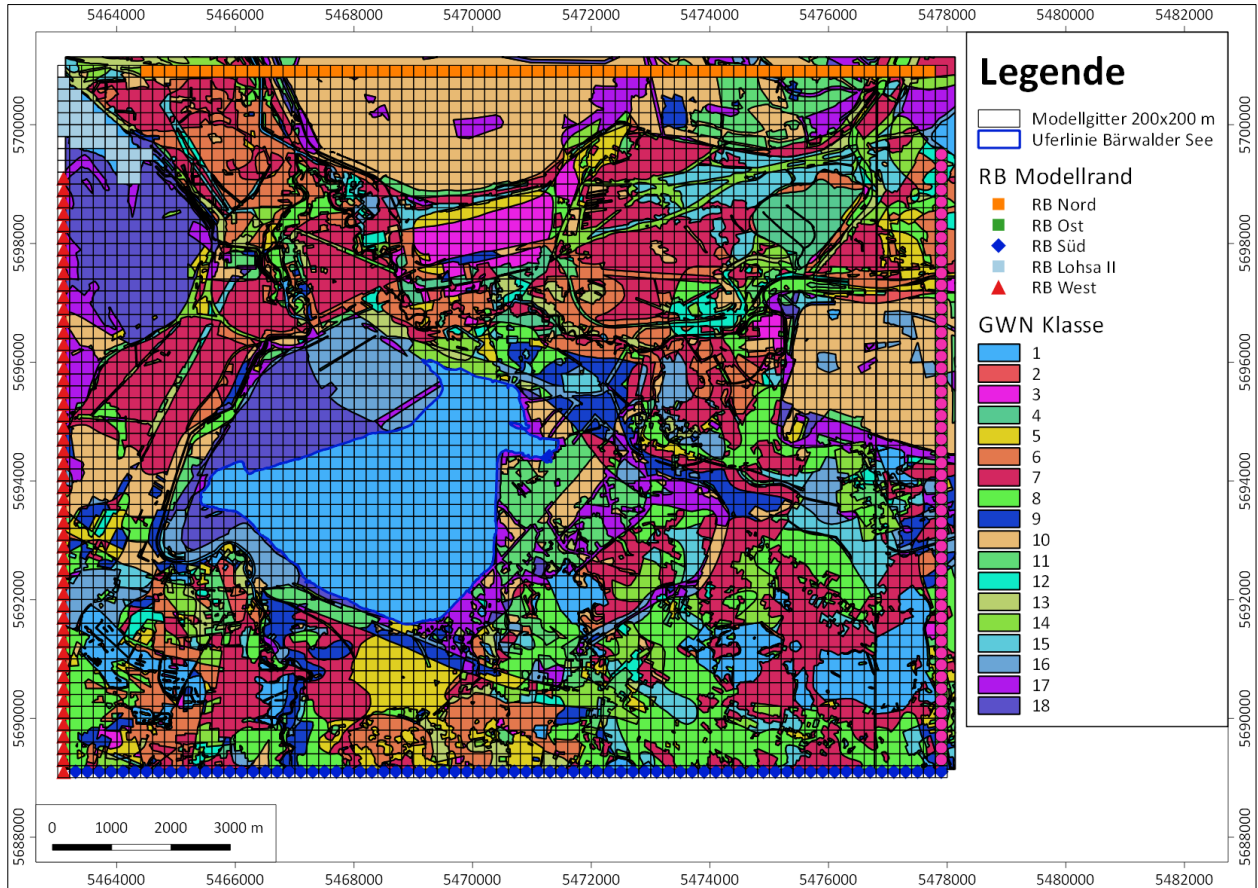


Abbildung C3-6: Flächeninformation der 18 GWN-Klassen aus ArcEGMO, die auf die Modellgitter übertragen wurden

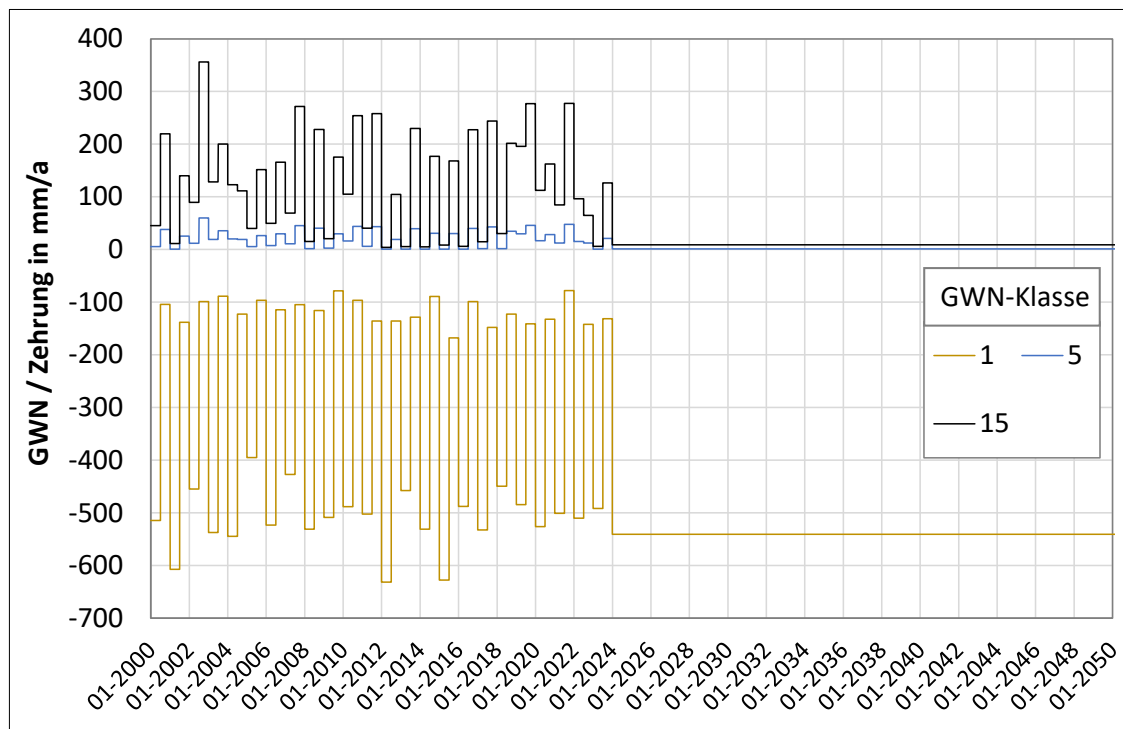


Abbildung C3-7: Zeitreihen (Stufenfunktion) zur Definition der GWN sowie der Zehrung von Wasserflächen

Die Fließgewässer wurden in Segmente eingeteilt. Die Einteilung erfolgte nur grob, um die generelle Definition der RB zu demonstrieren. Für den Verlauf der Spree wurden 3 Segmente (Spr_1 bis Spr_3 in Abb. C3-5) definiert. Am Südrand des Modellgebietes fließt die Spree mit einem Volumenstrom Q von 80,4 m³/min (= 1,34 m³/s) in das Modellgebiet (oberstromiger Modellrand). Die Breite der vereinfacht als Rechteckgerinne definierten Spree wurde für den gesamten Flussverlauf mit 10 m festgelegt. Im GRM Lausitz müssen die Querschnitte der Vorfluter aus den verfügbaren Vermessungsdaten generiert werden.

Der Schwarze Schöps wurde mit 2 Segmenten (Sch_1 bis Sch_2 Abb. C3-5) beschrieben. Am oberstromigen Modellrand wurde ein Volumenstrom von 20,1 m³/min (= 0,355 m³/s) bei einer Gerinnebreite von 5 m festgelegt. Dieser wurde im gesamten Verlauf konstant gehalten. Auch der Zuleiter und der Ableiter wurden mit einer Gerinnebreite von 5 m in das Modell integriert.

Zur Abbildung der Fließgewässer als Gerinne wurden weiterhin auch die Manning-Strickler-Beiwerte (k_{st}), die k_f -Wert der Gerinnesohle (k_{fG}) und deren Mächtigkeit (M_G), die Sohlhöhe am Beginn ($S_{G,Beg}$) und am Ende des Segments ($S_{G,End}$), die genannte Gerinnebreite am Beginn ($B_{G,Beg}$) und am Ende des Segments ($B_{G,End}$) definiert. Die in das Modell eingeflossen Werte fasst Tab. C3-2 zusammen.

Um eine realistische Flutungssituation im Modell zu testen, wurde der Zuleiter (ZuL) zum Bärwalder See so definiert, dass aus dem Volumenstrom der Spree (Spr_1) 5 m³/min (0,083 m³/s) entnommen und in den See geleitet werden. Der Ableiter (AbL) aus dem Bärwalder See wurde so definiert, dass erst ab einem WST im See von 124 mNHN (Sohlhöhe des Gerinnes) Wasser in den Schwarzen Schöps (Sch_2) abgeführt wird.

Tabelle C3-2: Fließgewässersegmente und deren Parametrisierung

Name	Q in m ³ /s	k_{st} in m ^{1/3} /s	k_{fG} in m/s	M_G in m	$S_{G,Beg}$ in m	$S_{G,End}$ in m	$B_{G,Beg}$ in m	$B_{G,End}$ in m
Sch_1	0,33	70	0,0001	1	148,4	132,1	5	5
Sch_2	0	70	0,0001	1	148,4	132,1	5	5
Spr_1	0,83	70	0,0001	1	135,6	129,8	10	10
Spr_2	0	70	0,0001	1	135,6	129,8	10	10
Spr_3	0	70	0,0001	1	132,3	129,2	10	10
AbL	0	70	1,00E-06	1	134,0	123,9	5	5
ZuL	0,083	70	1,00E-06	1	123,8	120	5	5

Q – am Anfang des Segments (im Bereich des Modellrandes)
 k_{st} – Manning-Strickler-Beiwert
 k_{fG} – k_f -Wert der Gerinnesohle
 M_G – Mächtigkeit Gerinnesohle
 $S_{G,Beg}$ – Sohlhöhe am Beginn des Segments
 $S_{G,End}$ – Sohlhöhe am Ende des Segments
 $B_{G,Beg}$ – Gerinnebreite am Beginn des Segments
 $B_{G,End}$ – Gerinnebreite am Ende des Segments

Die Brunnenstandorte im Modellgebiet entsprechen den realen Brunnenpositionen der Wasserfassung Bärwalde. Insgesamt wurde eine Förderrate von 2000 m³/d auf die 4 Brunnen (B01 bis B04 in Abb. C3-5). Die Filterunterkante dieser Brunnen wurde bei 85 m NHN festgelegt. Alle Brunnen waren einheitlich bis zur GOK verfiltert und haben einen Durchmesser von 0,3 m.

C3.5 ABBILDUNG GRUNDWASSERNEUBILDUNG IM UNGEKOPPELTEN TESTMODELL

Auf Grundlage der in Kap. C2.2.5 dargestellten Berechnungsergebnisse der Grundwasserneubildung wurde eine Klassifizierung in 18 Teilklassen mit ähnlicher Grundwasserneubildung vorgenommen (vgl. Abb. C3-8).

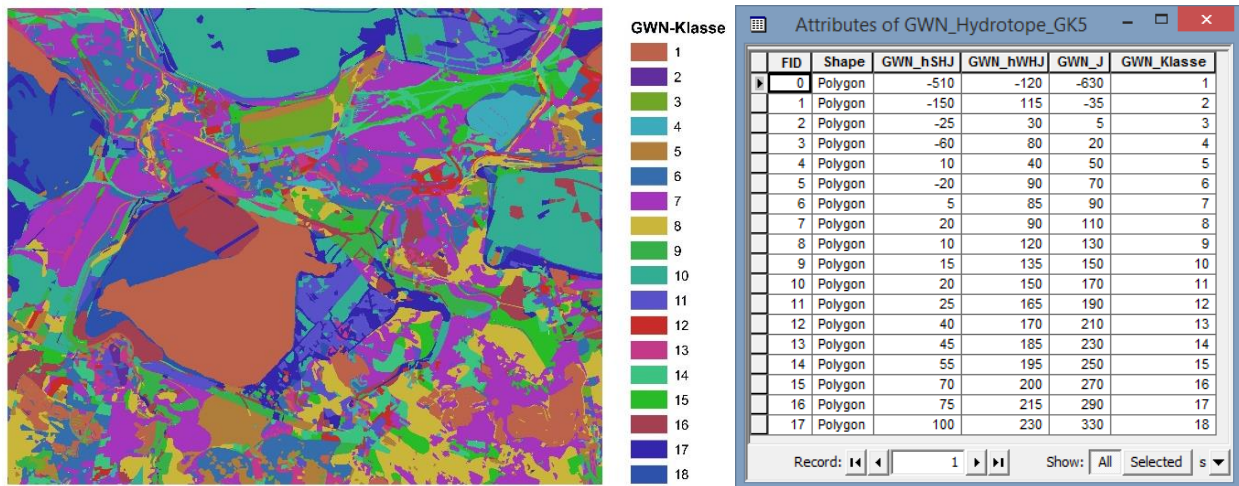


Abbildung C3-8: links: Untergliederung des Modellgebietes in GWN-Klassen; rechts: Mittlere Jahres- und Halbjahressummen der Grundwasserneubildung

Für jede dieser GWN-Klassen erfolgte eine Aggregation der berechneten Tageswerte der Grundwasserneubildung zu Halbjahressummen der hydrologischen Sommer- und Winterhalbjahre im Zeitraum 1991-2015. Auf diese Art ist es mit hinreichender Genauigkeit möglich, den typischen innerjährlichen Verlauf der Grundwasserneubildung zu simulieren. Im Ergebnis dieser Datenaggregation entstanden für die 18 über das Gebiet verteilten GWN-Klassen, Zeitreihen in Halbjahresschritten, aus denen die obere Randbedingungen für die drei Grundwasserströmungsmodelle erzeugt wurden (vgl. Abb. C3-9).

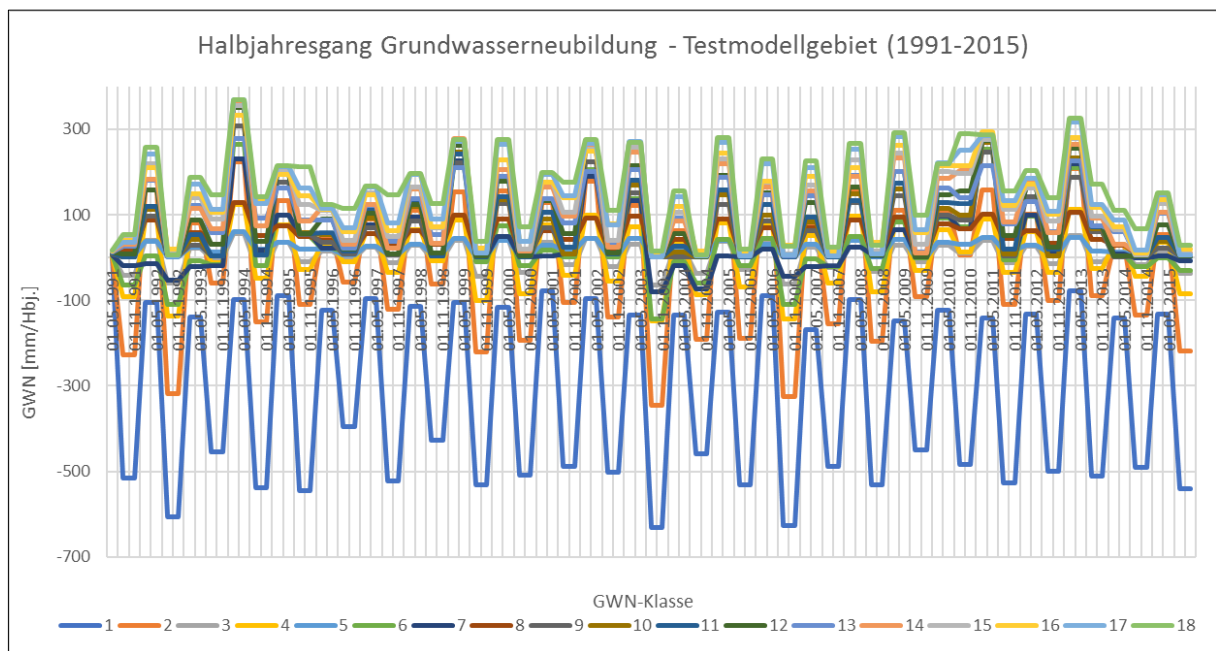


Abbildung C3-9: Räumlich und zeitlich variable Grundwasserneubildung im halbjährlichen Gang für die 18, das Gesamtgebiet überdeckende GWN-Klassen

C3.6 ABBILDUNG DER METEOROLOGISCHEN RANDBEDINGUNGEN IM UNGEKOPPELTEN TESTMODELL

Die modellseitige Erfassung von Niederschlag und Verdunstung über freien Wasseroberflächen wurde durch korrigierte Niederschläge, potentielle Verdunstung sowie tiefenabhängige Gewässerverdunstung berücksichtigt. Deren Vorgabe ist für die Standgewässerbilanzierung notwendig. Alle drei Größen wurden analog zum Vorgehen bei der Grundwasserneubildung ebenfalls zu Halbjahressummen im Zeitraum 1991-2015 aggregiert. Die Niederschlagsausgangsdaten sind unkorrigierte Messdaten der Station Boxberg (DWD). Die Daten wurden mittels des Verfahrens nach Richter korrigiert. Die potentielle Verdunstung wurde auf Grundlage meteorologischer Messgrößen der DWD-Station Cottbus nach dem Turc-Ivanov-Verfahren berechnet. Die Werte zur Gewässerverdunstung für die Gewässertiefen 2 m, 5 m und 15 m stammen aus einem DWD-Gutachten, welche um eigene Berechnungen ergänzt wurde. Als Berechnungsverfahren kam das vereinfachte Kombinationsverfahren nach Richter gemäß DVWK-Merkblatt 238/1996 zum Einsatz.

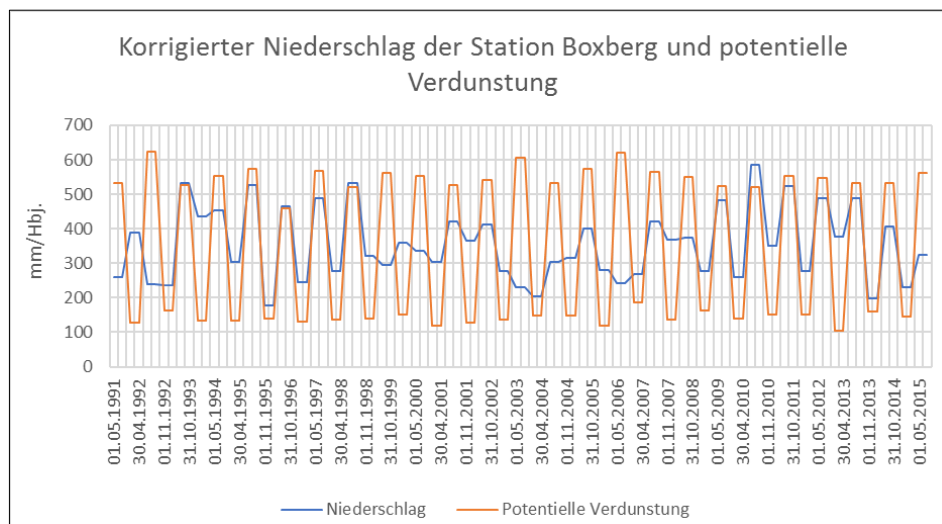


Abbildung C3-10: Klimatische Wasserbilanz für Tagebaurestsee (korrigierter Niederschlag der Station Boxberg und potentielle Verdunstung im halbjährlichen Gang)

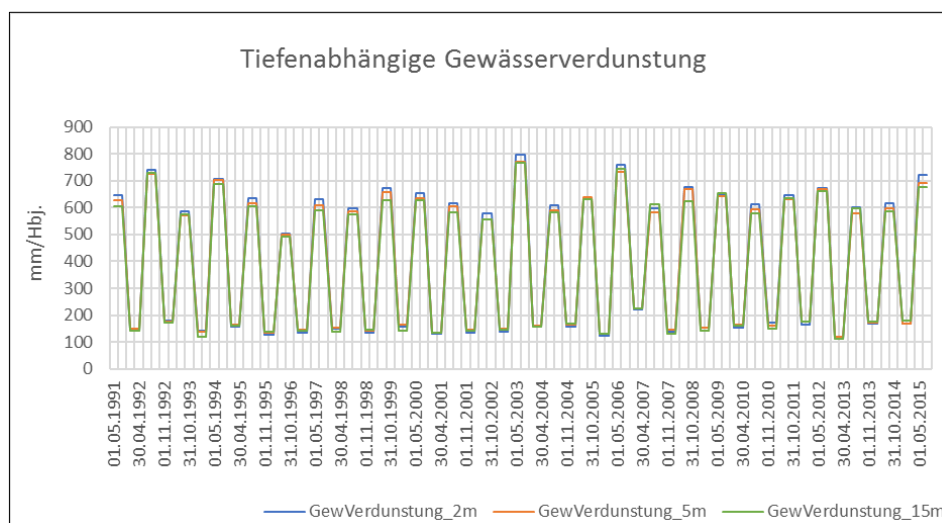


Abbildung C3-11: Klimatische Wasserbilanz für Tagebaurestsee (gewässertiefenabhängige Gewässerverdunstung im halbjährlichen Gang)

C4 VORGEHEN UND FESTLEGUNGEN BEIM AUFBAU DES BODENWASSERHAUSHALTSMODELLS

Für das Bodenwasserhaushaltsmodell wurden die Daten weitestgehend aus dem Brandenburg-Modell übernommen. Die Niederschläge werden über REGNIE-Daten im 1 km² Raster eingelesen. Für die Oberflächenmorphologie wurde das DGM10 und SRTM verwendet, während das Sohlgefälle von Gewässerabschnitten aus dem DGM1 abgeleitet wurde. Die Bodendaten wurden aus der BÜK300 für Brandenburg und aus der BÜK200 für Sachsen bezogen. Für die Klassifizierung der Landnutzung wurden CIR Daten ausgewertet. Das ausgeschnittene Brandenburg-Modell wurde teilweise durch zusätzliche Datengrundlagen weiter präzisiert. Das dazu angewandte Vorgehen wird in den folgenden Unterkapiteln beschrieben.

C4.1 LANDNUTZUNG

Die Datengrundlage für die Landnutzung im Testmodell bilden CIR-Daten der Biotoptypen- und Landnutzungskartierung von Sachsen aus dem Jahr 1993¹. Die bergbauüberprägten Bereiche der Tagebaue Nochten/Reichwalde, werden im Bergbaufolgezustand beschrieben. Datengrundlage für die Bergbaufolgenutzung sind Planungsstände der LEAG².

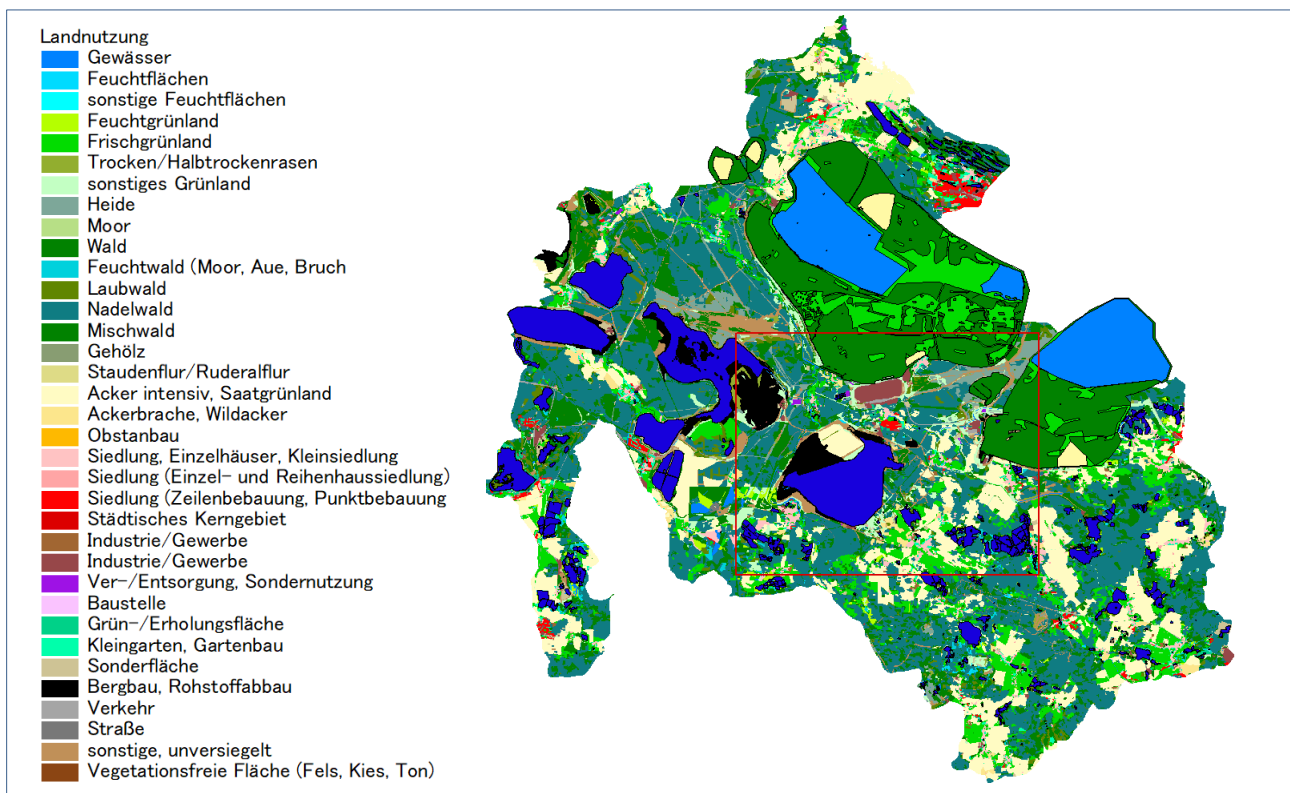


Abbildung C4-1: Datengrundlage der Landnutzung im Testmodellgebiet (CIR-Daten für Sachsen, ergänzt durch Bergbaufolgenutzungsdaten für den Tagebaubereich Nochten/Reichwalde der LEAG)

Die Originär-Flächendaten werden GIS-gestützt zu einem Landnutzungsthema zusammengeführt (vgl. Abb. C4-1). Zusätzlich wurden die Standgewässer des LfULG (Stand Dezember

¹ LfULG (1993): CIR - Biotoptypen und Landnutzungskartierung Sachsen. – Dresden

² Lausitz Energie Bergbau AG (2017): Bereitstellung digitaler Informationen zur Bergbaufolgelandschaft für den Tagebaubereich Nochten/Reichwalde. – Cottbus

2018) mit dem Landnutzungsthema verschnitten und in die Datenbasis übernommen (dunkelblaue Flächen).

Für die Tagebaue Lohsa³ und Bärwalde⁴ liegen Sanierungsrahmenpläne vom Regionalen Planungsverband vor (Abb. C4-2). Diese liegen in nicht digitalisierter Form vor und sind noch nicht im Testmodell berücksichtigt, da dies für den Nachweis der Funktionsfähigkeit des Modells nicht notwendig war.

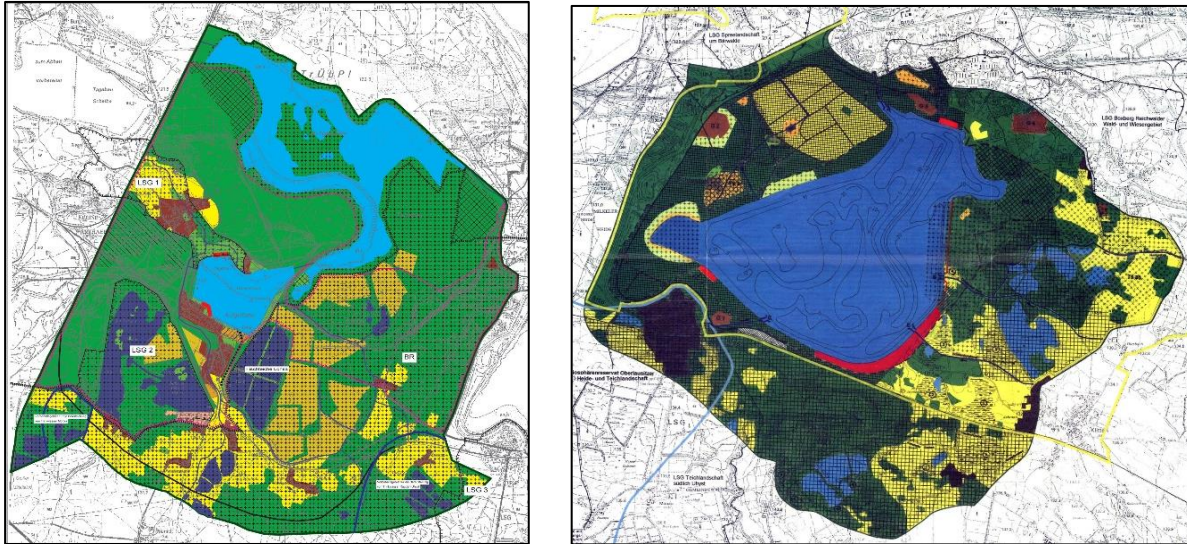


Abbildung C4-2: Bergbaufolgenutzung der Tagebaue Lohsa (links) und Bärwalde (rechts)

C4.2 BODENINFORMATIONEN

Datengrundlage für die Beschreibung der in den Bergbauarealen verbreiteten Böden ist einerseits die Bodenkonzeptkarte des Freistaates Sachsen⁵. Diese enthält stark generalisierte Informationen zu den Böden in Kippengebieten. Die Bodenkonzeptkarte besitzt im Betrachtungsraum eine etwas höhere räumliche Differenzierung als die Bodenkarte 1: 50000, weshalb dieser der Vorzug gewährt wird. Für den Tagebaubereich Nochten/Reichwalde können die Bodendaten teilweise durch Detailinformationen aus durchgeführten Kippsubstatkartierungen⁶ Dritter präzisiert werden. Laut Auskunft des LfULG wird voraussichtlich gegen Ende des Jahres 2019 eine überarbeitete Fassung der Bodenkarte 1:50.000 vorliegen, welche auch in den vom Bergbau betroffenen Arealen eine höhere Informationsdichte aufweisen wird.

C4.3 FLIEßGEWÄSSER

Für das Fließgewässernetz standen zwei Datenbasen zur Verfügung. Das im Landesmodell Brandenburg verwendete Gewässernetz⁷ und das sächsische Fließgewässernetz⁸. Letzteres

³ Regionaler Planungsverband Oberlausitz-Niederschlesien (2000): Braunkohlenplan als Sanierungsrahmenplan für den stillgelegten Tagebau Lohsa. – Bautzen

⁴ Regionaler Planungsverband Oberlausitz-Niederschlesien (1998): Braunkohlenplan als Sanierungsrahmenplan für den stillgelegten Tagebau Bärwalde. – Bautzen

⁵ LfULG (2004): Bodenkonzeptkarte 1: 25000. – Freiberg

⁶ C&E GmbH (2004-2017): Bodengeologische Kartierungsberichte. Tagebau Nochten. – Berlin

⁷ Fließgewässernetz Brandenburg digitalen Gewässernetz DLM 25W

ist räumlich sehr viel detaillierter. Im Grundwassermodell ist allerdings lediglich der Verlauf der Spree und der Schwarzen Schöps als Fließgewässer im Modell integriert (Abb. C4-3). Daher ist die Differenziertheit des Brandenburger Fließgewässers ausreichend und wurde deshalb im halb-synthetischen Testmodell nicht weiter untersetzt.

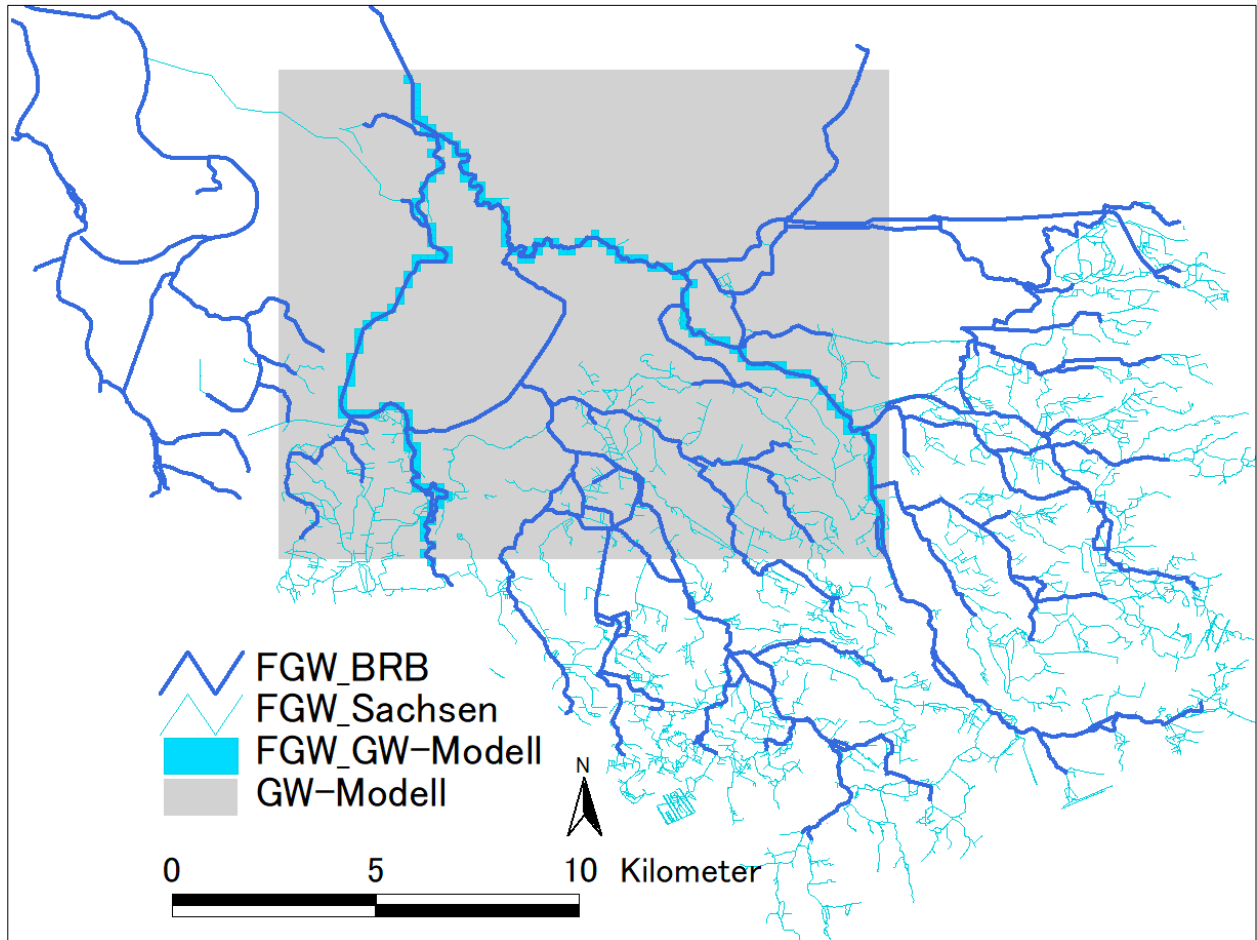


Abbildung C4-3: Räumliche Diskretisierung des sächsischen (hellblau) und des Brandenburger Fließgewässernetzes (dunkelblau) im Vergleich zu den im Grundwassermodell integrierten Fließgewässern

C4.4 GRUNDWASSERFLURABSTAND

Der Grundwasserflurabstand wurde, zur besseren Vergleichbarkeit des ungekoppelten Modells mit dem gekoppelten Modell, aus einer Stichtagsmessung vom LfULG übernommen, die auch als Startbedingung für die gekoppelte Modellierung herangezogen wurde. Die Seen, für die das Grundwasser über Flur steht, werden in Abb. C4-4 als rote Flächen gekennzeichnet. Grundwassernahe Flächen sind vor allem im Südosten des Modellgebietes zu finden. Andere Bereiche sind oft als grundwasserfern einzustufen.

⁸ Sächsisches Fließgewässernetz des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Stand Dezember 2018

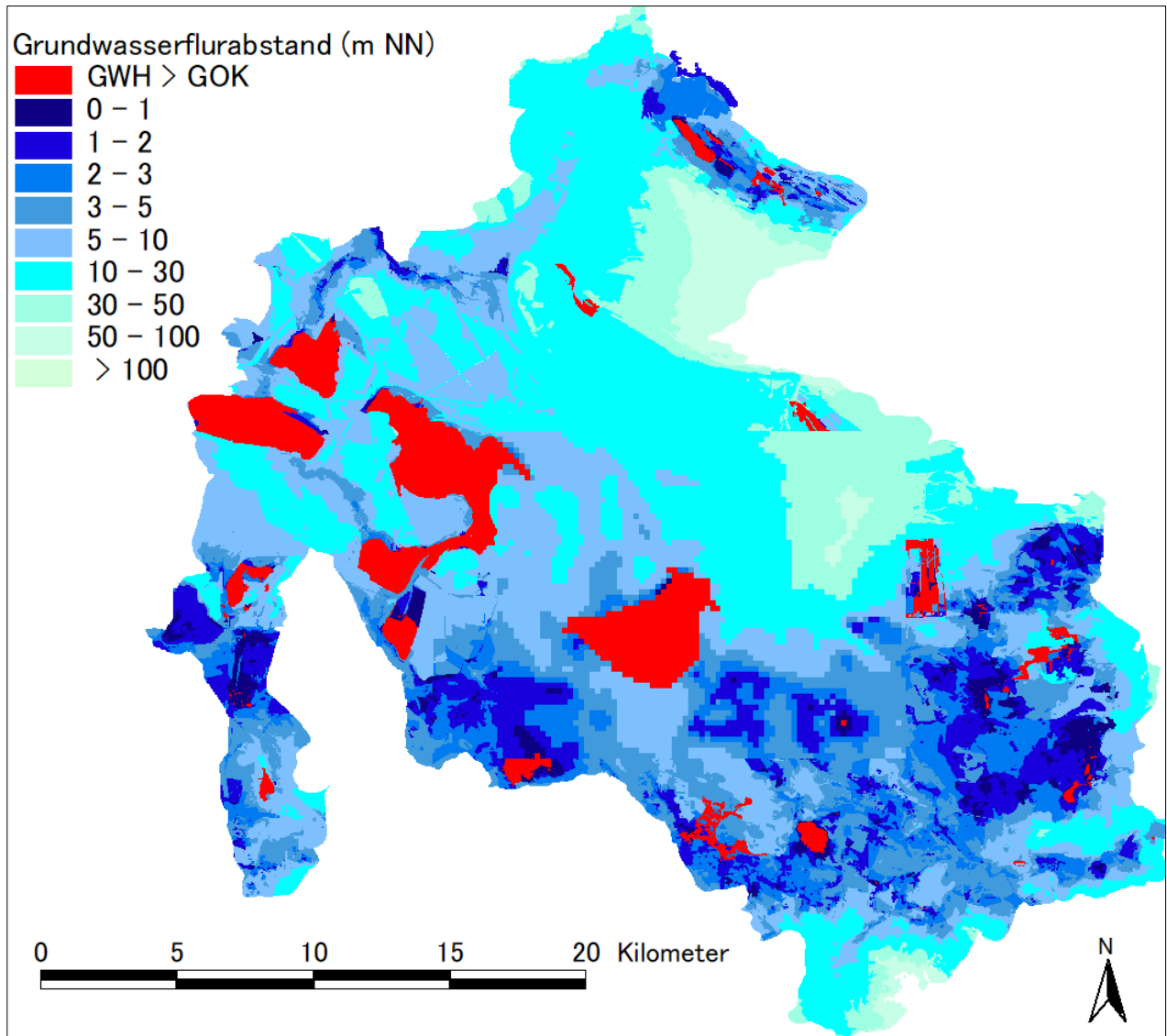


Abbildung C4-4: Verteilung der Grundwasserflurabstände im Testmodellgebiet

C4.5 UMSTELLUNG DER DISKRETISIERUNG FÜR DIE GEKOPPELTE MODELLIERUNG

Im eigentlichen Kopplungsbereich müssen sowohl das Bodenwasserhaushaltsmodell, als auch das GW-Modell die gleiche räumliche Diskretisierung aufweisen. Daher wurden die Polygonflächen, wie sie für ArcEGMO typisch sind, auf Rasterflächen (200 x 200 m) umgestellt (nachfolgende Abb. C4-5). Numerische Werte wurden flächengewichtet gemittelt, während bei nominalen Daten die jeweils größte Ausprägung der jeweiligen Rasterfläche verwendet wurde.

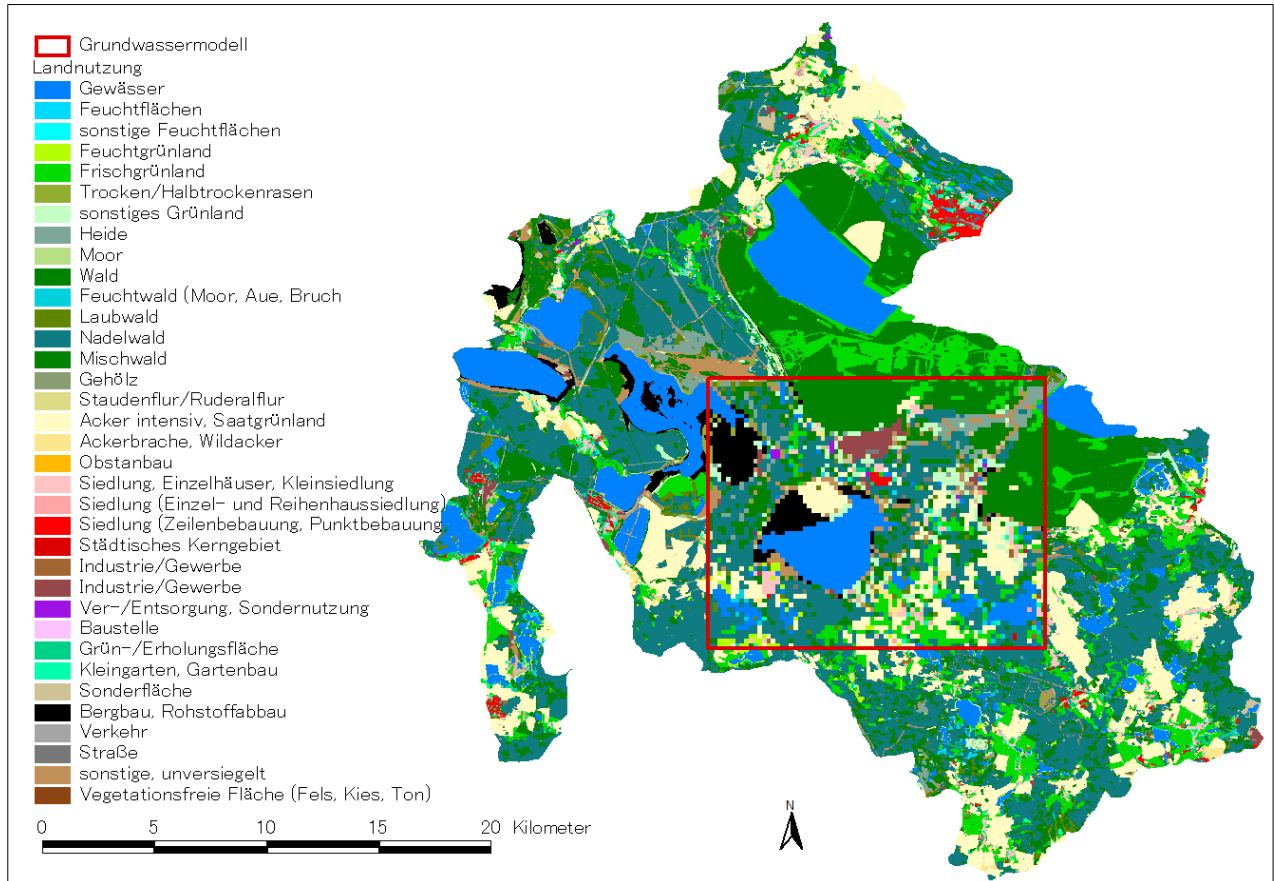


Abbildung C4-5: Veränderte Diskretisierung im gekoppelten Modellbereich am Beispiel der Landnutzung

C5 VERGLEICH DER ÜBERFÜHRTEN 3D-STRUKTURMODELLE BEI UNTERSCHIEDLICHER SOFTWARE

Nachfolgend wird die Überführung der hydrogeologischen 3D-Strukturmodelle in die jeweiligen Modellierungssoftware exemplarisch aufgezeigt. Hierbei geht es nicht um den absoluten Vergleich, sondern es soll auch die Komplexität des ausgewählten Testmodellbereichs herausgestellt werden.

Um eine Vergleichbarkeit der drei Modellansätze in Bezug auf die Testmodellierung zu wahren, wurde entschieden, in FEFLOW ebenfalls die 200 m Gitterstruktur zu überprüfen. Dies ist prinzipiell möglich. Natürlich liegen die Vorteile des FEM-Codes eher auf unregelmäßigen, in Bereichen wesentlicher hydraulischer Änderungen stärker verfeinerten Netzen. Während der Modellierung stellte sich heraus, dass der gewählte Weg zur Vergleichbarkeit zu den Finite Differenzen Codes unvorteilhaft ist, weil es an spitzwinkligen Dreiecken, zur Abbildung von rechteckigen Elementen, zu größeren numerischen Problemen kommt, die längere Rechenzeiten auf Grund größerer Iterationszahlen zur Folge haben. Nach dem gewählten Vorgehen war dies aber nicht mehr zu ändern. Dieses Vorgehen hat aber keinen Einfluss auf die generellen Aussagen, die sich aus der Testmodellierung in Bezug auf FEFLOW ergeben.

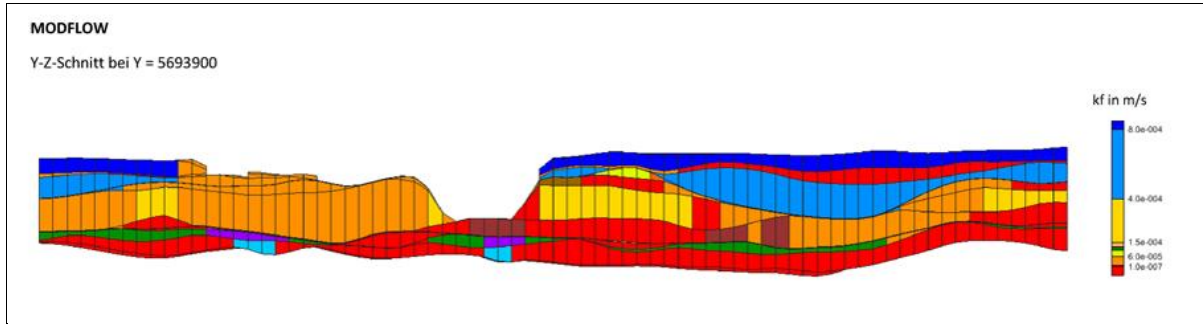


Abbildung C5-1: Testgebiet MODFLOW-Modellierung – exemplarischer Profilschnitt (überhöht) mit k_f -Wertverteilung

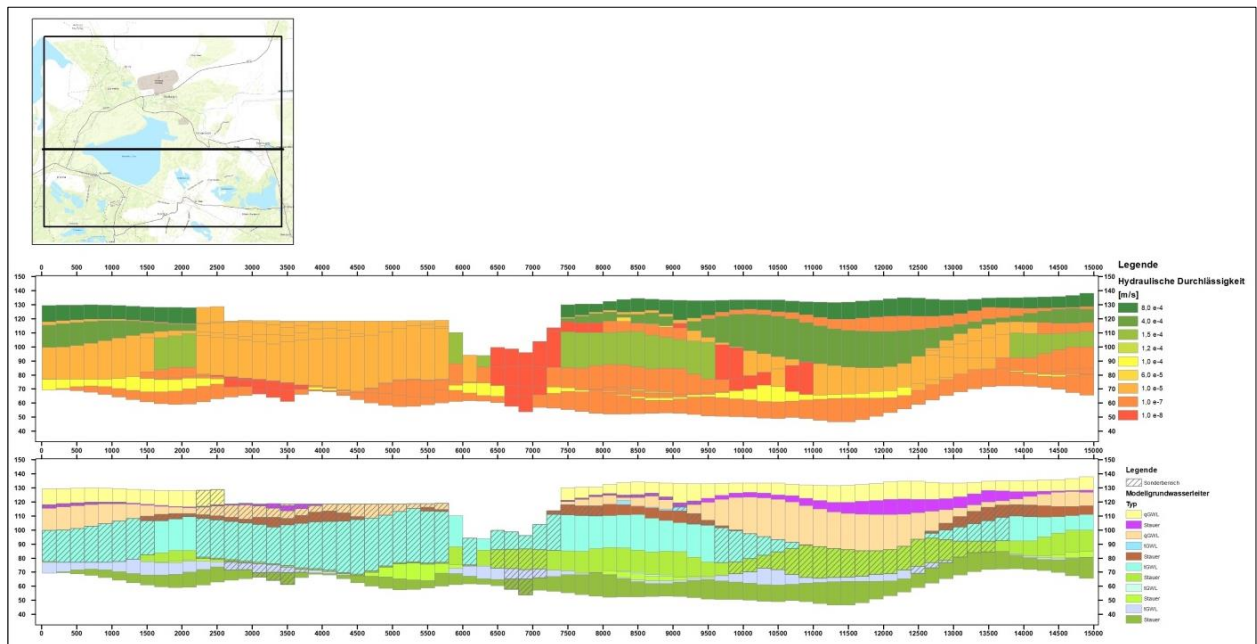


Abbildung C5-2: Testgebiet PCGEOFIM-Modellierung – exemplarischer Profilschnitt (überhöht) mit k_f -Wertverteilung

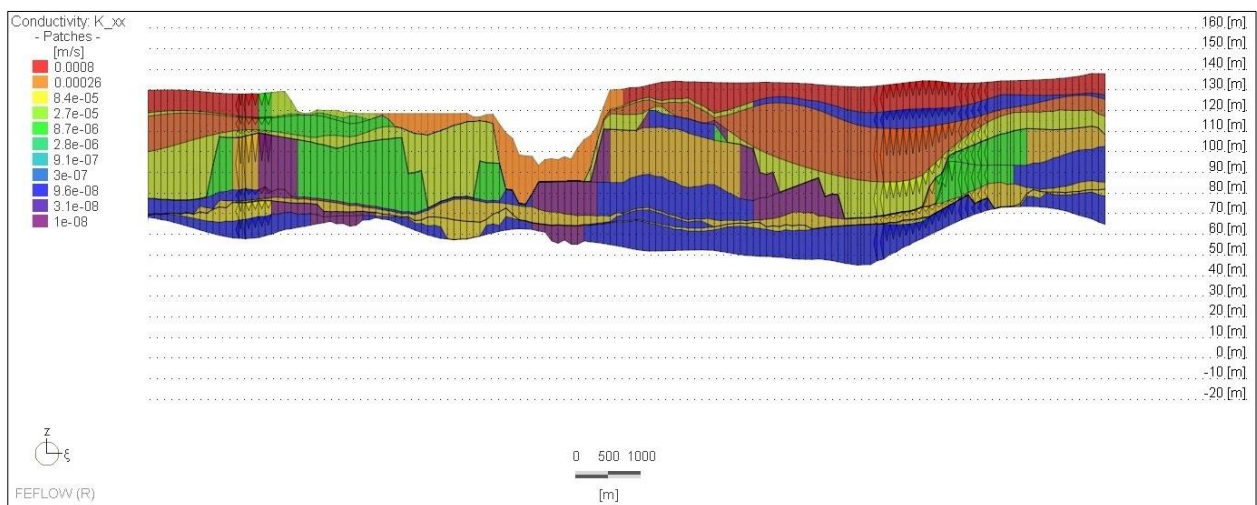


Abbildung C5-3: Testgebiet FEFLOW-Modellierung – exemplarischer Profilschnitt (überhöht) mit k_f -Wertverteilung

C6 ERKENNTNISSE AUS DER TESTMODELLIERUNG BEZÜGLICH DER GRUNDWASSERMODELLIERUNGS-SOFTWARE

Mit dem Aufbau und dem Betrieb der GW-Strömungs-Testmodelle sollte ein Vergleich zwischen den Programmpaketen PCGEOFIM, FEFLOW und MODFLOW möglich werden. Der Vergleich konzentrierte sich insbesondere auf die Handhabung von Daten und die Bearbeitbarkeit bergbauspezifischer Fragestellungen.

C6.1 ERGEBNISSE MODFLOW

Die MODFLOW-Inputdateien für das Testmodell wurden mit QGIS (2.18) und dem Softwaresystem GMS von AQUAVEO™ erzeugt. Bei der Übertragung auf das GRM Lausitz kann die Änderung der Inputdaten auch direkt über eine Datenbank oder HDF/netCDF-Dateien erfolgen. Aufgrund der umfangreichen Datenhaltung sollten die Input-Dateien für das GRM direkt aus einer Datenbank erzeugt werden können.

Für die Definition der Randbedingungen wurden im Testmodell folgende MODFLOW-Module verwendet: MNW (Multi-Node Well), GHB (General-Head Boundary), CHD (Time-Variant Specified-Head), LAK (Lake), SFR (Stream-Flow Routing), RCH (Recharge).

Für die Berechnung der Grundwasserströmung wurden zwei MODFLOW-Versionen getestet. Zum einen MODFLOW-2005-LPF (Layer-Property Flow package) mit dem PCG2-Solver und MODFLOW-NWT mit UPW (Upstream Weighting package). Durch die starken hydraulischen Gradienten im Modellgebiet konnte mit MODFLOW 2005 keine Lösung erzeugt werden. Mit MODFLOW-NWT hingegen waren die Berechnungen erfolgreich, d.h. Konvergenz konnte erreicht werden. Dabei war die Rechenzeit stark von den festgelegten Konvergenzkriterien des NWT-Solvers abhängig.

Bei Verwendung von MODFLOW zum Aufbau und Betrieb des GRML ist die Version MODFLOW-NWT mit dem UWP-Solver, auf Basis von MODFLOW 6 zu nutzen. Grund für diese Empfehlung sind die abzubildenden starken Schwankungen des GW-Standes im Modellgebiet, besonders im Bereich des aktiven Bergbaus.

Auch die Betrachtung der Fließgewässer in Bezug auf Hoch- und Niedrigwasserereignisse kann mit MODFLOW erfolgen. Eine Prüfung, ob eine Kopplung mit einem surface-runoff-Modell oder die Beschreibung der ungesättigten Zone mit dem MODFLOW-Modul UZF (Unsaturated-Zone Flow package) notwendig ist, erfolgte im Testmodell nicht. Generell besteht in MODFLOW die Möglichkeit dazu.

Zur Abbildung der Kippen bei ihrer Entstehung und Genese ist insbesondere die zeitlich variable Änderung der Materialeigenschaften (z. B. k_f -Wert bei Um- / Ablagerung der Sedimente bei der Kippenherstellung) zu betrachten. Hierbei muss das TMP-Modul (Time-varying Material Property) von Waterloo Hydrogeologic genutzt werden. Das TMP-Modul ist nur im Paket mit der Version MODFLOW-SURFACT v4.0 (frühere Versionen funktionieren nicht) verfügbar. MODFLOW-SURFACT v4.0 muss mit dem GUI Visual MODFLOW Pro betrieben werden. Dieses TMP-Modul war zur Bearbeitung des Testmodelles im Bearbeitungsteam nicht verfügbar.

Bei der Bearbeitung des GRM Lausitz werden die marktverfügbaren GUIs (Eingabemasken) nicht die notwendige Kapazität zum Handling der erwartbaren großen Datenmengen liefern. Es wird deshalb notwendig werden, Werkzeuge zu nutzen, die

- a) die Input-Dateien direkt aus dem Datenmanagementsystem heraus aufbauen und
- b) die Modellergebnisse in visualisierbarer oder digitaler Form aus den umfangreichen Output-Dateien generieren.

Nach dem Aufbau und dem Betrieb des Testmodells mit MODFLOW kann das Programmsystem, unter Beachtung der gegebenen Hinweise, für die Bearbeitung des GRM Lausitz empfohlen werden.

C6.2 ERGEBNISSE FEFLOW

Die entscheidenden Erkenntnisse zu FEFLOW-Besonderheiten aus der Testmodellerstellung und der Testmodellierung sind letztendlich folgende:

In der dem Projektteam zur Verfügung stehenden Normallizenz von FEFLOW (Version 7.1) sind einige für die Großraummodellierung notwendigen Features, zur Abbildung von Randbedingungen und hydraulischen Spezialkörpern, nicht enthalten. Dies gilt für die Handhabung der genauen, wasserbilanzierenden Abbildung von sich füllenden Restseestrukturen und der wasserbilanzierenden Abbildung von Fließgewässern. Dies heißt nicht, dass dies prinzipiell mit FEFLOW nicht möglich ist. Es bedarf jedoch dazu Add-ons bzw. Verkopplungen mit anderen Programmsystemen, z. B. MIKE-SHE. Diese Fragestellung der genauen Abbildung von z. B. Restseefüllung und der Veränderung von Parametern für Vorfeldbereiche, die zu Kippen werden, ist im Programmsystem MODFLOW genauso gegeben. Dies ist nur mit speziellen Modulen realisierbar (vgl. Kap. C6.1).

Gleiches gilt weiterführend auch für die genaue Abbildung der Grundwasserneubildung (GWN) als obere RB des GW-Modells. FEFLOW bietet de facto drei Levels der Berücksichtigung der GWN. Wie schon in Kap. B5 ausgeführt, ist das anspruchsvollste Niveau, die Verkopplung mit dem Bodenwasserhaushalt mittels des Programms ArcEGMO. Dies ist in FEFLOW prinzipiell möglich (das Kopplungsvorgehen ist vergleichbar, der hier im Projekt testbaren Kopplung zu PCGEOFIM). Allerdings ist diese Kopplung in keiner der öffentlich zugänglichen FEFLOW-Versionen enthalten, sondern kann nur von DHI-WASY „inhouse“ genutzt werden. Ein zweites, ebenfalls komplexes Vorgehen zur GWN-Abbildung ist die Berücksichtigung einer wasserteilgesättigten Strömung mittels der Richards-Gleichung. Dies heißt also, es wird ein wassersättigungsabhängiger Strömungsprozess modelliert, der allerdings nicht eine echte 2-Fluidphasen Betrachtung beinhaltet (ohne Gasphase, „nur“ wassersättigungsabhängige Durchlässigkeiten). Hierbei sind dann natürlich weitere Parametrisierungen notwendig, die es ermöglichen, den wassersättigungsabhängigen Wasserfluss zu beschreiben. Es war klar, dass dieser GWN-Ansatz nicht im Testmodell überprüft/berücksichtigt werden sollte. Es ging also darum, die GWN über das dritte, einfachste Level der GWN-Berücksichtigung abzubilden. Dazu wird die GWN, als RB 2. Art (gegebenenfalls zeitvariant) berücksichtigt. Es wurden somit die vom BWHM in GWN-Klassen bereitgestellte GWN-Raten, als zeitvariante RB 2. Art berücksichtigt. In Bezug auf die konkrete, praktische Handhabung von Zeitsteuerungen von Randbedingungen sei auf die generellen Aussagen hier weiter unten im Teilkapitel verwiesen.

Als generelle Charakteristik ist, zumindest für FEFLOW-Nutzer die nicht über den Zugang zum Quellcode verfügen, festzuhalten, dass der Modellaufbau und damit auch die Überarbeitung von Parametrisierungen, RB-Festlegungen und –Detaildaten sehr stark Tool- und damit Grafik-orientiert sind. Dies erfordert jedoch, bei einem langfristigen GRM-Aufbau nicht hinderlich, ein vorheriges, detailliertes Konzept zum Super-Meshaufbau, welches auch schon Spezifika zu RB etc. konzeptionell beinhalten muss. Dies gilt nicht nur wegen der Grid-

Generierung. Ein bedeutender Nachteil besteht darin, dass dem „FELOW-Normal-Nutzer“ kein einfacher Zugang zur im Modell dahinter liegenden „Datenmatrix“ gegeben ist. Dies wirkt sich besonders negativ aus, bei der Fehlersuche in Daten und beim Umbau in Modellvarianten. So interessant die stark grafisch orientierte Modellhandhabung für Einzelbereiche ist, so anfällig ist sie aber auch für Detailfehler (nicht mit markierte, zu viel markierte Netzknoten etc.).

Weiterhin ist auf die im Testmodell genutzte Zeitsteuerung von Randbedingungen einzugehen. Diese Zeitsteuerung von Randbedingungen erfolgt über *.pow-Dateien. Hier ergaben sich bei der Modellierung Probleme, dass aus dem Normalnutzer unerklärlichen Gründen, die darin enthaltenen Datenreihen teilweise nicht vollständig berücksichtigt werden. Immer wieder erfolgten Kontrollen der internen Formate dieser Dateien. Dies brachte jedoch keine Aufklärung. Ein interner Datenformatfehler liegt natürlich nahe. Dieser ist jedoch ohne Quellcode-Zugang zum Debugging nicht einfach zu finden. Diesbezüglich ist anzumerken, dass für eine Vielzahl solch detaillierter Fragestellungen aus Manual, Online-Hilfe und auch Support-Hotline, verständlicherweise im Sinne der Komplexität, keine Problemlösung zu erwarten ist. Gerade in Bezug auf diese Probleme lässt sich verallgemeinernd zusammenfassen, sollte das Programmsystem FEFLOW zum GRML-Modellierung genutzt werden, bedarf es Zugang des Bearbeiter-Teams zum Quellcode (oder Regelungen dazu), um z. B. zeitnah Fehler im Modell finden und dann beheben zu können.

Insgesamt sind die wesentlichen Erkenntnisse zu Besonderheiten bei der FEFLOW-Nutzung nach der Testmodellierung in folgenden Aussagen noch einmal kurz zusammenzufassen:

- Kopplung zu ArcEGMO (nur „in-house“), wasserbilanzierende Abbildung von Restseen, Fließgewässer (nicht in FEFLOW-Grundvariante, sondern Add-ons bzw. Verkopplung zu anderer Software – z. B. MIKE-SHE notwendig)
- Kein echter „Datenbank“-Zugriff zu wesentlichen Modelldaten im Modell (umständlich, zeitaufwendig für Fehlersuche und Modellvariantenanpassungen)
- Beispiel der Handhabung und Fehlersuche in Zeitsteuerungsdateien – Quellcodezugriff zum Debugging ist unbedingt angeraten.

Dies führt zur allgemeinen GRML-Aussage, dass es zum einen einer fachspezifischen Beschreibung bedarf und das in Bezug auf FEFLOW es naheliegend ist, dass adäquat zu den aufgezeigten Problemen nur DHI-WASY dies umsetzen kann oder ein potentielles Modelliererteam zeigen muss (im Angebot), wie die aufgezeigten Aspekte durch vertragliche Regelungen abgesichert sind.

C6.3 ERGEBNISSE PCGEOFIM

PCGEOFIM wird für die modelltechnische Begleitung montanhydrologischer Fragestellungen im Rahmen des aktiven Bergbaus, wie auch der Sanierungstagebaue im Mitteldeutschen und Lausitzer Revier angewendet. Als mathematisches Modell wird die Finite-Volumen-Methode genutzt. Diese zeichnet sich durch Bilanztreue und eine flexible Gitterstruktur aus. Durch diesen Algorithmus ist es möglich, hochdynamische Grundwasserzustände, wie bspw. der Grundwasserwiederanstieg in ehemaligen Tagebaubereichen, modelltechnisch erfassen und numerisch stabil simulieren zu können.

Die Datenverarbeitung erfolgt über eine GIS-Schnittstelle (QGIS, ArcGIS) sowie direkt über die Eingangsdateien. Hierbei ermöglicht die dateibasierte Datenbankstruktur der Eingangsdaten eine flexible und effiziente Bearbeitung der Parameterdateien. Im Hinblick auf die

Anforderungen eines überregionalen Großraummodells (GRM) sind auch die Ansprüche an Speicherplatz und die Leistungsfähigkeit der Datenhaltung zu berücksichtigen. Die Modelleingangsdaten für PCGEOFIM können allein für die hydrogeologischen Daten ca. 200 GB umfassen. Daten für Randbedingungen, Klimazeitreihen und Messstellen kommen ergänzend hinzu. Die Ergebnisdaten sind in ihrer Größe unbeschränkt und können im ASCII- und Binärformat ausgegeben werden.

Das hydrogeologische Strukturmodell kann ohne Einschränkung in das PCGEOFIM-Parametermodell überführt werden. Unter Nutzung des Softwaresystems GMS von AQUAVEO™ werden die Modelleingangsdaten zur Beschreibung des Strukturmodells erzeugt. Für jedes aus der Modelldiskretisierung entstandene finite Volumenelement werden dabei der Schwerpunkt, die Abmessungen (Unterkante, Mächtigkeit, Länge in x- und y-Richtung) ortsbezogen aus dem hydrogeologischen Strukturmodell übernommen. Die Parametrisierung der geohydraulischen Eigenschaften erfolgt GIS-gestützt in den Modelleingangsdaten und nicht im hydrogeologischen Strukturmodell.

Das Programmsystem PCGEOFIM ermöglicht die Berücksichtigung zeitabhängiger Parameter. Hierbei können Tagebauentwicklungen durch das Schütten von Kippen, Dichtwände, Änderung der hydraulischen Eigenschaften der Modellgrundwasserleiter oder Landnutzungsänderungen zeitabhängig simuliert werden. Im Testmodell wurden diese Features, in Abstimmung zu den anderen GW-Softwaremodellen, da sie in den vorliegenden Versionen dies nicht berücksichtigen konnten, nicht benutzt.

In PCGEOFIM kommen neben den klassischen Randbedingungen RB: 1., 2. und 3. Art auch die speziell für montanhydrologische Fragestellungen entwickelten gekoppelten Randbedingungen See und Fluss zur Anwendung. Diese speziellen Randbedingungen können die Wechselwirkungen zwischen Oberflächen- bzw. Fließgewässern und Grundwasser abbilden.

Mit der Seerandbedingung wird in PCGEOFIM auf Basis einer hohlformspezifischen Wasserstand-Volumen-Kennlinie die hydraulische Interaktion zwischen Grundwasser und Standgewässern (Seen, Restlöcher) berechnet. Zusätzlich können klimatische Einflussfaktoren wie oberirdischer Zufluss und wasserstandsabhängige Zehrung, Wasserein- und -abfuhr, Kopplung mit Fließgewässern und Brunnen vorgegeben werden.

Die Flussrandbedingung beschreibt durch Vorgabe von Durchflussganglinien, in Abhängigkeit des Gerinnes (explizit vorzugeben) die hydraulische Interaktion zwischen Fließgewässer und Grundwasser. Zusätzlich können durch Kopplung mit einem Bodenwasserhaushaltsmodell (BWHM) die Hoch- und Niedrigwasserereignisse in Fließgewässern betrachtet werden.

Grundsätzlich bietet PCGEOFIM die Möglichkeit einer Kopplung mit dem bereits vielfach benannten Bodenwasserhaushalts-Modellierungssystem ArcEGMO. Dieses Verfahren bietet größtmögliche Flexibilität in der Berücksichtigung von Landnutzungsänderungen oder alternativen Landnutzungsszenarien sowie verschiedenen meteorologischen Bezugsreihen.

Im ungekoppelten Testmodell erfolgte die Vorgabe der Grundwasserneubildung aus Gründen der Vergleichbarkeit zwischen den GW-Modellen nur ortsdiskret, flurabstands- und zeitabhängig. Somit kann das Schwankungsverhalten der Grund- und Seewasserstände unter verschiedenen klimatischen Bedingungen in diesen ungekoppelten Modellansätzen nur näherungsweise abgebildet werden.

C6.4 FOKUSSIERUNG DER BEWERTUNGSMATRIX

In Kap. B5.4 wurde eine umfassende Bewertungsmatrix für den Vergleich von unterschiedlichen GW-Strömungssoftware-Paketen abgeleitet. Die Testmodellierung hat jetzt eine klare Fokussierung in diesem Bezug erbracht: Von entscheidender Bedeutung ist die Art der Umsetzung konkreter Aspekte, die typische für die großräumige Braunkohlenbergbaufolgelandschaft sind. Diesbezüglich weist Tab. C6-1 eine stark eingekürzte, fokussierte Bewertungsmatrix aus. Aus der darin aufzufindenden Unterteilung in „Parametermodell“ / „Signalmodell“ / „Postprocessing“ und „Numerik“ seien vor allem noch einmal die folgenden Teilaspekte in ihrer Bedeutung herausgehoben:

Im „Parametermodell“ – die zeitabhängige Strukturänderung – also wie die Veränderung der Parameterfelder in Bezug auf Überbaggerung von gewachsenen Bereichen und Erzeugung von Kippenkörpern in den Programmen gehandhabt wird.

Im „Signalmodell“ vor allem, wie mit der Abbildung der Kopplung zu Seen und Fließgewässern verfahren wird (echt gekoppelte See-, Flußrandbedingungen) und die Abbildung/ der Umgang mit weiteren typischen montanhydrologischen Randbedingungen. Die zeitlich und örtlich differenzierte Abbildung der GWN ist verknüpft zu sehen mit der Einschätzung zur Bewertung der Kopplung zum Bodenwasserhaushaltsmodell.

Auch in den Rubriken „Postprocessing“ und „Numerik“ seien die Aspekte der Datenausgabe und das konkrete Vorgehen bei der Kopplung zum Bodenwasserhaushaltsmodell sowie perspektivisch auch zu einem „reaktiven Stofftransport“ = Kopplung des Programms zu PHREEQC herausgestellt.

Tabelle C6-1: Fokussierte Bewertungsmatrix für die zukünftige Evaluierung der GW-Modellierungssoftware nach der durchgeführten Testmodellierung

	Merkmal/Eigenschaft
Parametermodell	Räumliche Diskretisierung
	Netzflexibilität (Verfeinerung)
	Hydrogeologisches Strukturmodell
	Zeitabhängige Strukturänderung
Signalmodell	Allgemeine Randbedingung 1., 2., 3. Art
	Gekoppelte Randbedingung (See, Fluss)
	Montanhydrologische Randbedingungen
	GW-Neubildung
Postprocessing	Definition von Ausgabezeitpunkten
	Datenausgabe (h, Q, Fließgeschwindigkeit, Transport)
	Grafische Ausgabe und Aufbereitung
	Bilanzierung
	Statistik / zeitabhängige Statistik
Numerik	Performance (Stabilität, zeitliche Diskretisierung)
	Kopplung (Stofftransport / BWHM)
	Parameteridentifikation / Kalibrierung

C7 ERGEBNISVERGLEICH ZUR STRÖMUNGSMODELLIERUNG FÜR EINZELNE MODELLE

C7.1 ERLÄUTERUNGEN ZUM VERGLEICH

Das dem Testmodell zugrundeliegende hydrogeologische Strukturmodell wurde, wie bereits erwähnt, mit einem Grundraster von 200 x 200 m in allen drei Testmodellen abgebildet. Alle Modelle berücksichtigen 11 Modellschichten. Aufgrund der Programmspezifika erfolgte die Umsetzung des hydrogeologischen Strukturmodells im jeweiligen Programmsystem schichtenbasiert (FEFLOW, PCGEOFIM) oder rasterbasiert (MODFLOW). Der nachfolgende Vergleich von Modellergebnissen soll im Detail zwischen den Programmen MODFLOW und PCGEOFIM erfolgen. Dies begründet sich daher, dass mit FEFLOW, wie in Kap. C6.2 erläutert, in der zur Verfügung stehenden Programm-Grundvariante, nicht die wasserbilanzierende Füllung des Restsees abgebildet werden kann, wie in den beiden anderen Modellen. Da deshalb der Restsee Bärwalde als RB 1. Art, mit einer vorgegebenen Wasserstandsentwicklung gehandhabt werden musste, soll hier auf die Darstellung der FEFLOW-Teilergebnisse verzichtet werden.

Im schichtenbasierten Ansatz repräsentiert jede Modellschicht eine hydrogeologisch-stratigraphische Einheit. Somit können Verbreitungslücken direkt im Parametermodell berücksichtigt werden. Der rasterbasierte Modellansatz folgt den Anforderungen des Finite-Differenzen-Verfahrens. Hydrogeologisch-stratigraphische Einheiten können durch eine oder mehrere Modellschichten repräsentiert werden. Diese Vorgehensweise war in MODFLOW notwendig um die Verbreitungslücken über die Zuordnung von Parameterwerten eines Modellelements abzubilden.

Jedes der drei Testmodelle durchläuft 3 Berechnungsphasen (Abb. C7-1), welche durch unterschiedliche Zustände charakterisiert sind. Die Einschwingphase dient der modellinternen Anpassung der Anfangsbedingung. In der Epignose berechnet das Testmodell für einen Zeitraum 2002-2025 die instationären Grundwasserströmungsverhältnisse durch Flutung des Bärwalder Sees, unter Berücksichtigung einer ortstypischen zeitabhängigen Grundwasserneubildung (entnommen aus dem BWHMI). In der Prognose erfolgt die Berechnung stationärer Grundwasserströmungsverhältnisse unter mittleren klimatischen Verhältnissen. Die Zeitschrittlänge wurde in allen Modellierungssystemen auf einen Monat festgelegt.

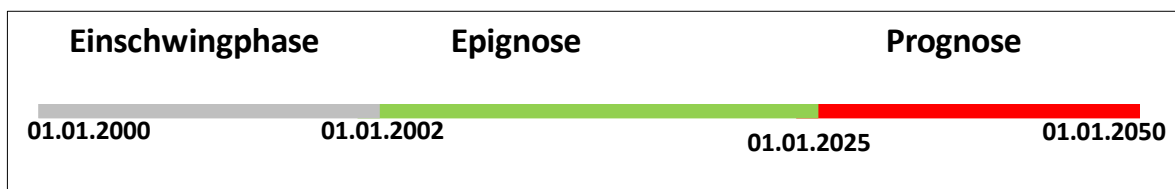


Abbildung C7-1: Festgelegte Berechnungsphasen in den Testmodellen

An den Modellrändern wird durch die Definition der äußeren Randbedingungen in allen Modellen eine Vergleichbarkeit gewährleistet. Dabei wurde darauf geachtet, dass keine Beeinflussung der inneren Randbedingungen durch die Modellränder besteht. Die Vorgabe der inneren Randbedingung „Bärwalder See“, der Fließgewässer „Spree“ und „Schwarzer Schöps“ sowie der „Brunnen“, als auch deren Implementierung und Parametrisierung erfolgte mit den jeweiligen programspezifischen Randbedingungstypen.

C7.2 VERGLEICH ISOHYPSENPLÄNE

Die folgenden Abbildungen C7-2 bis C7-5 vergleichen die berechneten Grundwassergleichen für die Jahresscheiben 2020 und 2025. Dargestellt werden die Grundwassergleichen des unteren quartären Grundwasserstockwerks (Modellschicht 3).

Die generelle Grundwasserfließrichtung verläuft von Süden nach Norden/Nordosten. Innerhalb des Modellgebietes wirken der Bärwalder See sowie die Hauptvorfluter Spree und Schwarzer Schöps abschnittsweise effluent oder influent. Im Norden und Osten des Modellgebietes werden die Grundwasserstände durch die bergbauliche Wasserhaltung der Tagebaue Nochten und Reichwalde reguliert.

Die Wirkung der äußeren Randbedingungen auf die Dynamik der berechneten Grundwasserströmung wird in beiden Modellen vergleichbar abgebildet. Auch die Wirkung der Vorflut (innere Randbedingungen) ist bei beiden Modellansätzen vergleichbar.

Im Bereich der Fließgewässer zeigen sich die Gemeinsamkeiten im Wechsel zwischen ex- oder infiltrierenden Fließverhältnissen. Lokale Unterschiede in der Ausprägung der berechneten Grundwasserstände sind auf die modellspezifische Umsetzung der Flussrandbedingung zurückzuführen. Entsprechend der Datenverfügbarkeit besteht die Möglichkeit in beiden Programmsystemen das Gerinne sowohl elementbezogen, als auch flussabschnittsbezogen zu charakterisieren. Die Umsetzung und somit die Abbildegenauigkeit unterliegt maßgeblich der Datenverfügbarkeit. Generell kann festgestellt werden, dass PCGEOFIM und MODFLOW Fließgewässer mit dem notwendigen Detailgrad abbilden können.

Die Berechnungsergebnisse zur Wasserstands (WST)-Entwicklung im Bärwalder See sind im Betrachtungszeitraum sehr ähnlich, obwohl die Randbedingung zur Abbildung des Sees in PCGEOFIM und MODFLOW unterschiedlich gehandhabt werden.

Lokale Unterschiede in den Grundwassergleichen (Abb. C7-2 bis C7-5) sind auf die modelltechnische Umsetzung der GWN und die Unterschiede in der Übertragung des geologischen Strukturmodells auf das jeweilige Berechnungsgitter zurückzuführen.

Die oberirdische Randbedingung (GWN) kann flurabstandsabhängig auf den obersten GWL oder direkt auf die Grundwasseroberfläche gesetzt werden. Weiterhin sollte bei der Übertragung der GWN aus dem Bodenwasserhaushaltsmodell festgelegt werden, wie die stark differenzierte Flächeninformation aus dem Bodenwasserhaushaltsmodell auf das GW-Strömungsmodell übertragen wird. So wäre beispielsweise festzulegen, dass ein flächengewichteter Mittelwert als Zellwert auf das Modellraster zu übertragen ist.

Die berechneten Grundwasserströmungsverhältnisse beider Berechnungsverfahren zeigen jedoch keine signifikanten Unterschiede, auch wenn lokal unterschiedliche Wasserstände das Ergebnis der jeweiligen Berechnung sind. Die Ergebnisse der Modelle sind plausibel und lassen den Schluss zu, dass die Modellsysteme auch für das GRM Lausitz eingesetzt werden können.

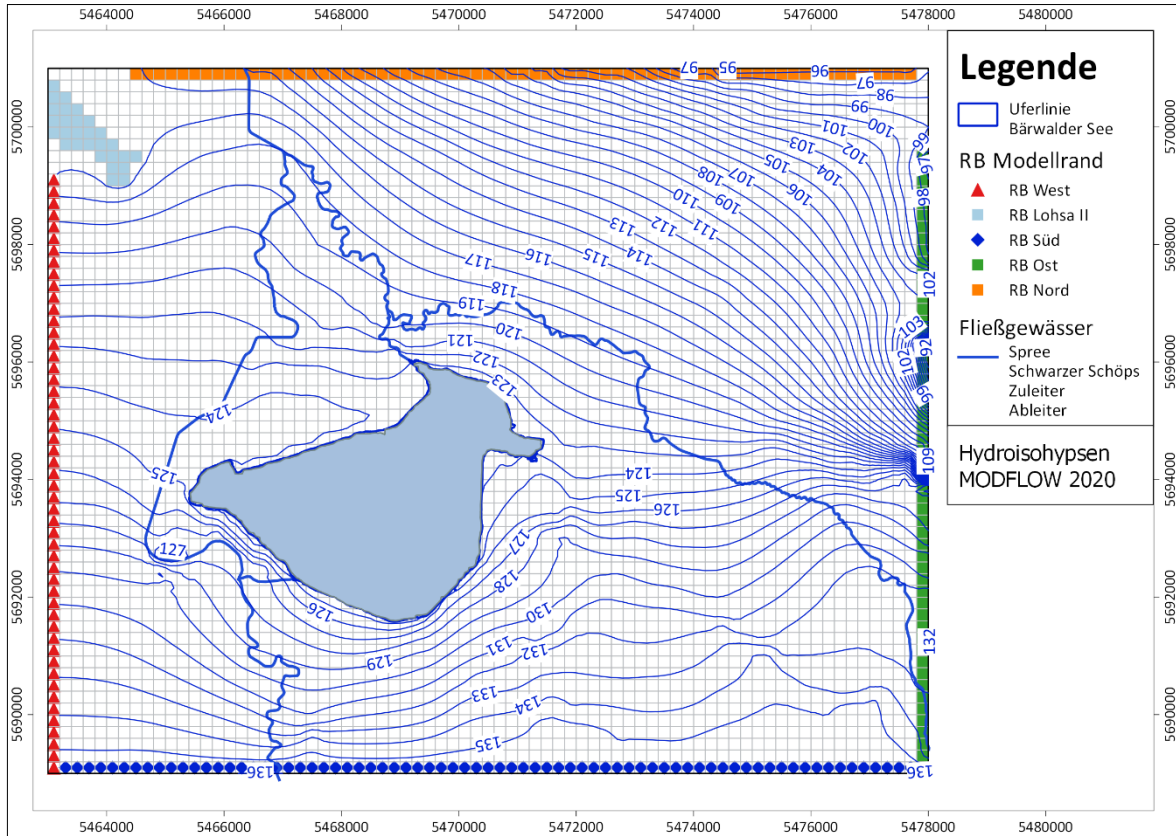


Abbildung C7-2: MODFLOW Berechnungsergebnisse, Hydroisohypsen, 01.01.2020

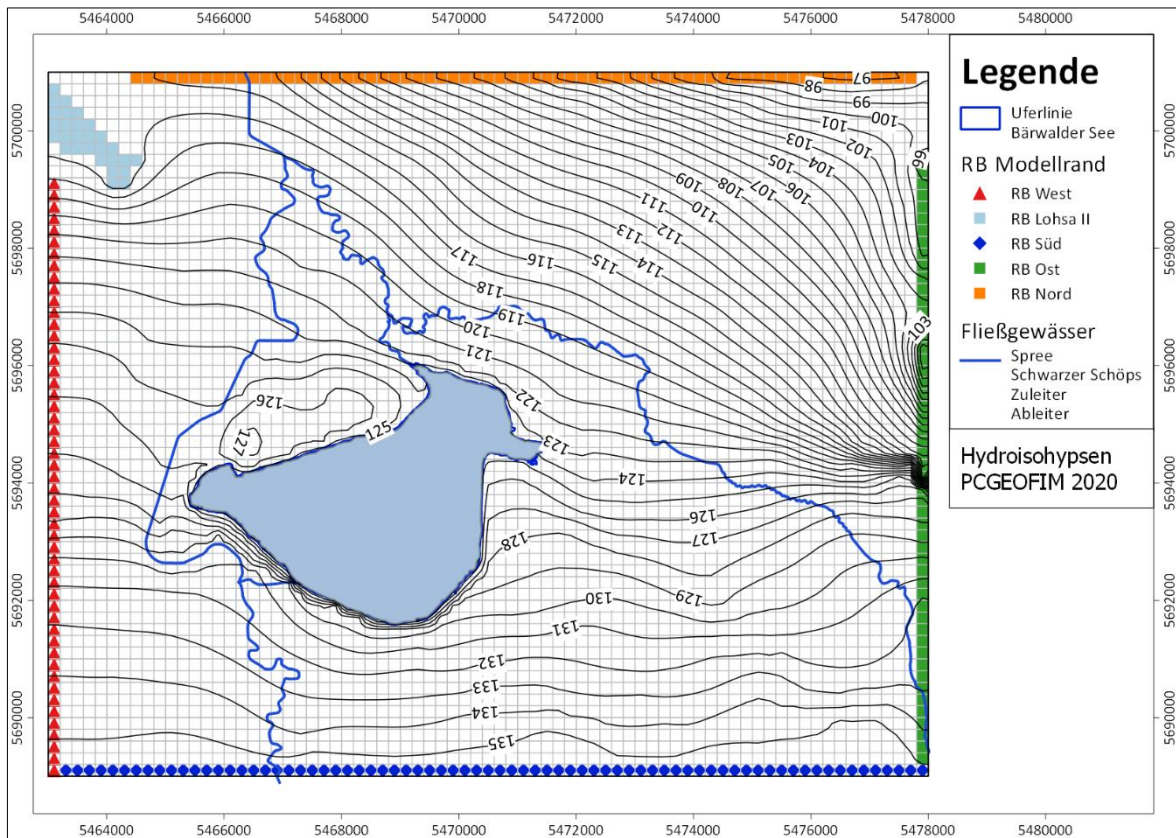


Abbildung C7-3: PCGEOFIM Berechnungsergebnisse, Hydroisohypsen, 01.01.2020

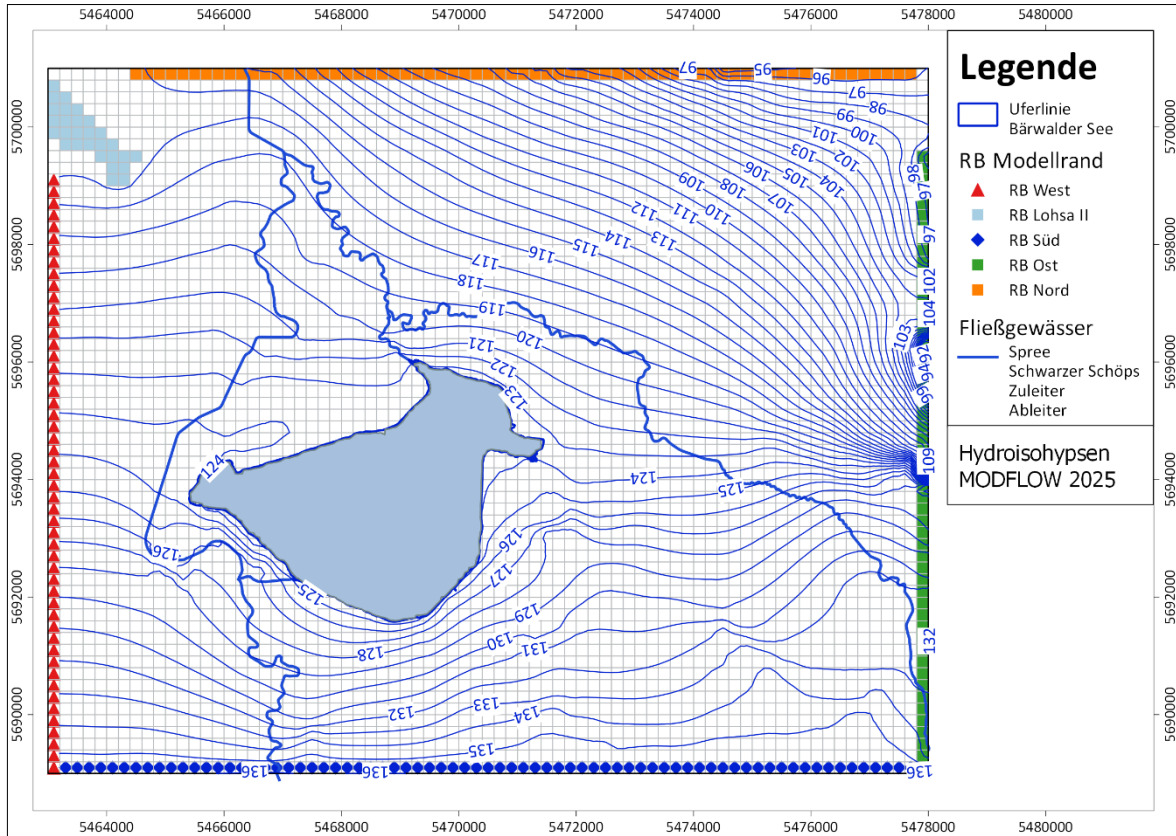


Abbildung C7-4: MODFLOW Berechnungsergebnisse, Hydroisohypsen, 01.01.2025

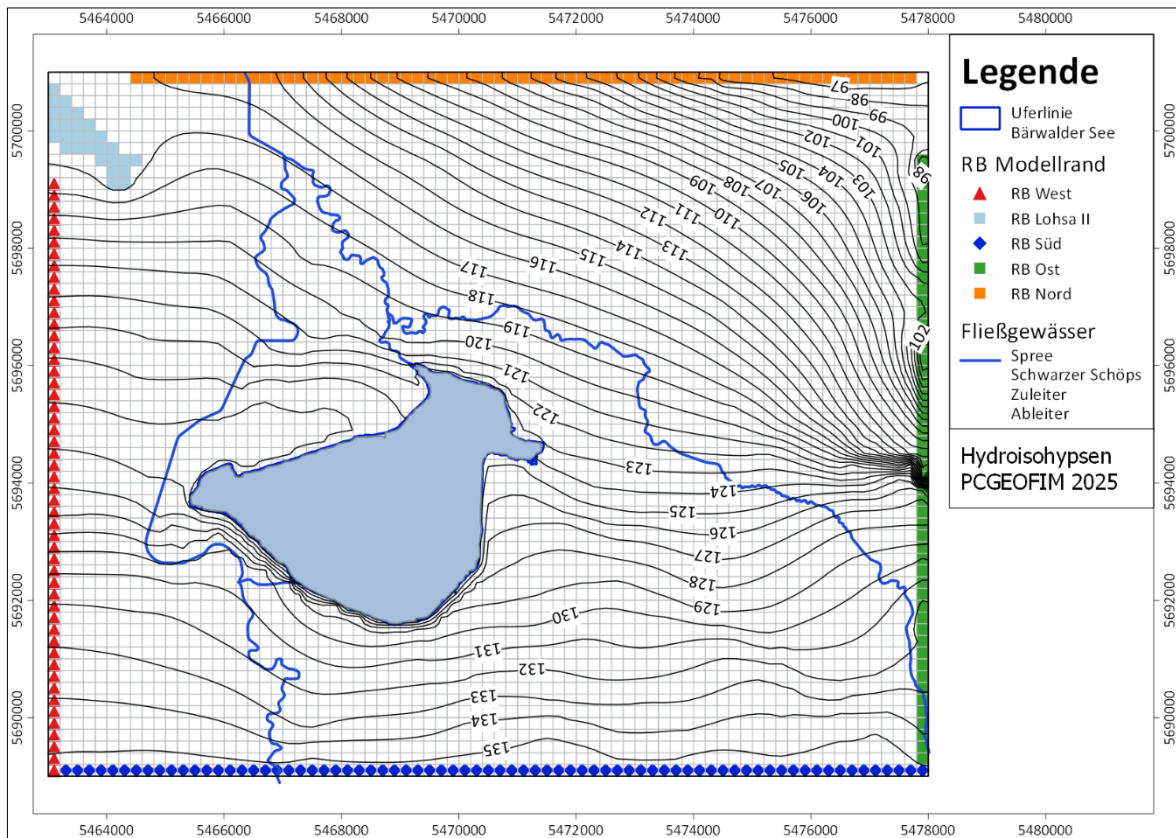


Abbildung C7-5: PCGEOFIM Berechnungsergebnisse, Hydroisohypsen, 01.01.2025

C7.3 VERGLEICH GANGLINIEN

Die folgenden Darstellungen vergleichen die berechneten Wasserstandsentwicklungen an ausgewählten, virtuellen Grundwassermessstellen (P01, P05, P14). Weiterhin wird die Seewasserstandsentwicklung im Bärwalder See (LPBaerwalde) sowie der berechnete Durchfluss in einem Randbedingungelement der Spree (LPSpree02) verglichen. Eine Übersicht zur Lage dieser gewählten Vergleichsmesspunkte zeigt nachfolgende Abb. C7-6.

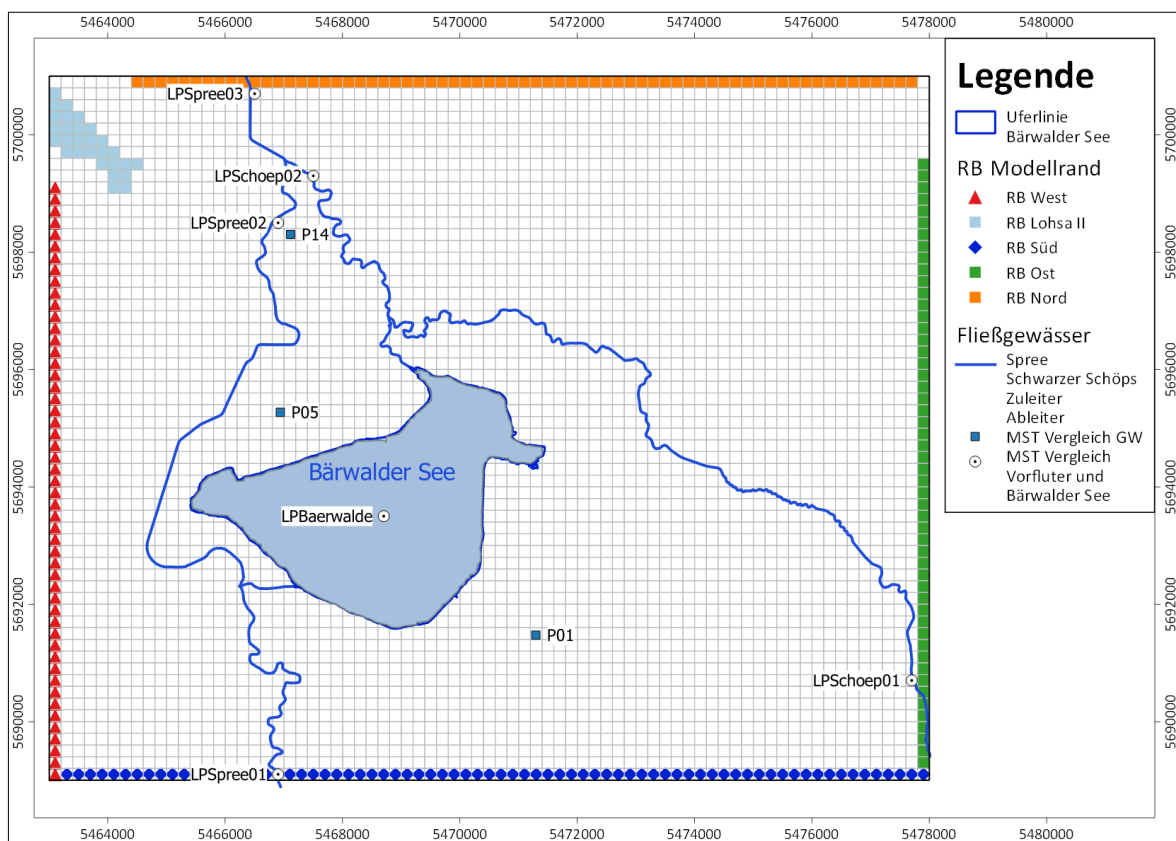


Abbildung C7-6: Lage der virtuellen Messstellen zum Vergleich der Berechnungsergebnisse

Die berechnete Seewasserstandentwicklung (siehe Abb. C7-7) zeigt einen nahezu identischen Verlauf beider Modellergebnisse. Unterschiede ergeben sich durch die Umsetzung der klimatischen Einflussfaktoren (oberirdisches Einzugsgebiet, Zehrung etc.) in den Modellen. In PCGEOFIM wird die Zehrung explizit, auf Basis von Klimawerten der Seerandbedingung, berücksichtigt. Diese Vorgabe verursacht ein differenzierteres Schwankungsverhalten der Seewasserstände.

Auch in MODFLOW werden die klimatischen Einflussfaktoren explizit als Zeitreihe definiert und so im Modell berücksichtigt. Geringe Unterschiede gibt es in der Implementierung der WST-Volumen- und -Flächen-Beziehung. Diese wurde aus der Diskretisierung des Modells berechnet und nicht, wie in PCGEOFIM, als Funktion vorgegeben.

Seit der MODFLOW-2005-Version 1.12.00 kann im Modul LAK (lake package) auch eine WST-Volumen-Beziehung vorgegeben werden. Da die Ergebnisse bei einer Diskretisierung von 200 x 200 m des GW-Modells und damit auch des Sees vergleichbare Ergebnisse liefern, wurde auf die Anpassung des MODFLOW-Modells verzichtet.

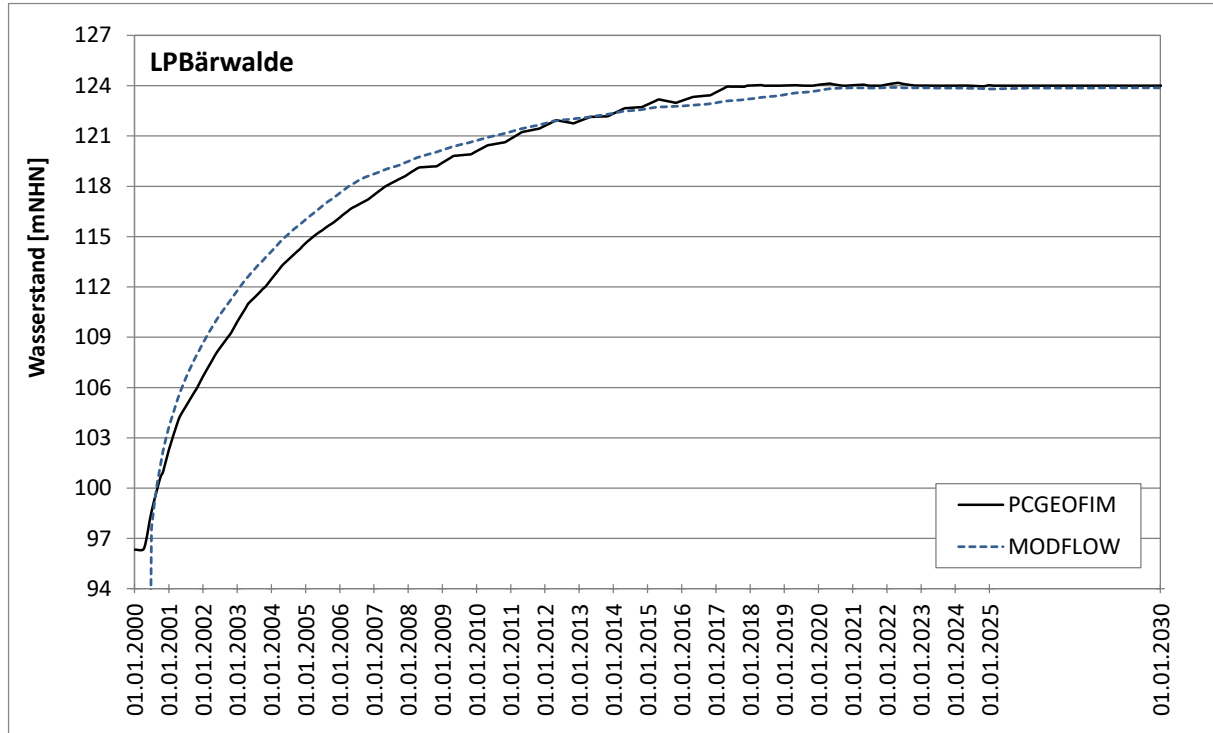


Abbildung C7-7: Vergleich der WST-Entwicklung im Bärwalder See

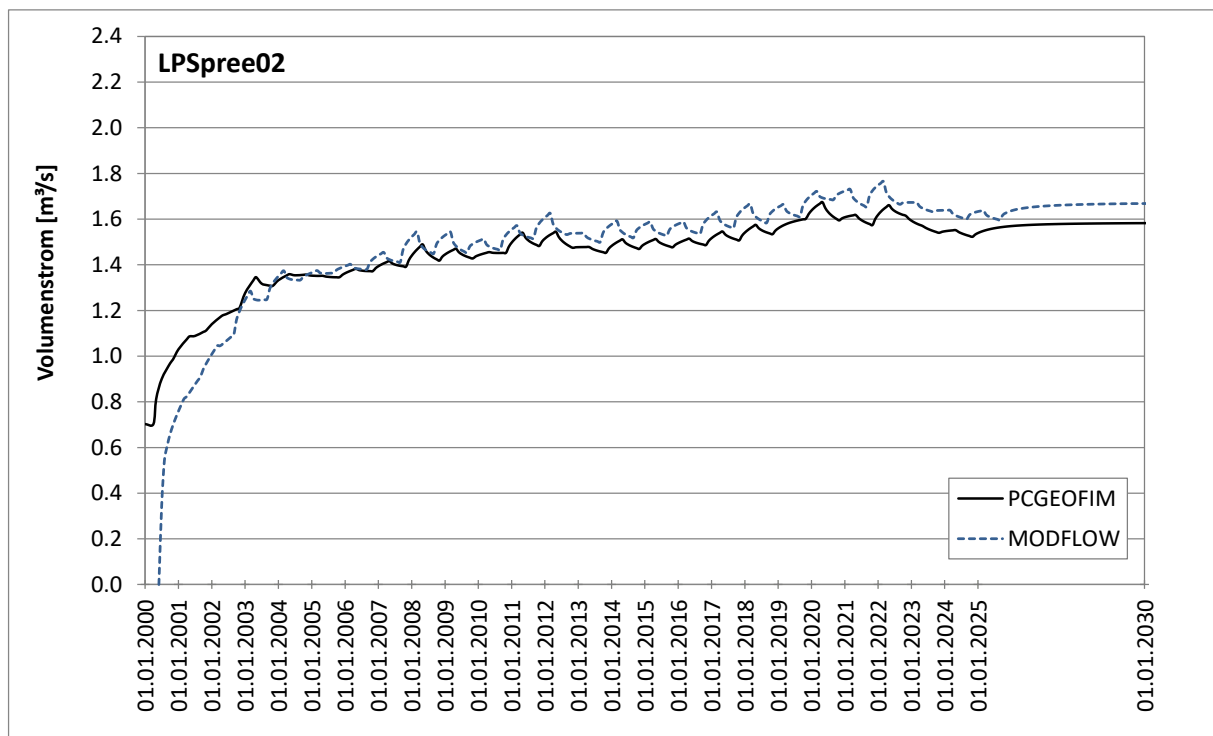


Abbildung C7-8: Vergleich des berechneten Durchflusses an der Spree (MST LPSpree02)

Abb. C7-8 zeigt den Volumenstrom, der mit den beiden Modellen an der virtuellen Messstelle (MST) LPSpree02 berechnet wurde. Generell sind die Volumenströme vergleichbar. Ein wesentlicher Unterschied zeigt sich in der Schwankungsbreite der Berechnungsergebnisse, die im MODFLOW-Modell stärker als im PCGEOFIM-Modell sind. Die Unterschiede resultieren aus den abweichenden GW-Ständen und der Implementierung der RB, die zur Berechnung

des Volumenstromes vom GW-Leiter in den Fließgewässerabschnitt genutzt wird. Detaillierte Untersuchungen zu den Unterschieden der Implementierung der RB waren für den Modellvergleich nicht notwendig.

Die nachfolgenden Abbildungen C7-9 bis C7-11 zeigen den Vergleich der GW-Standsentwicklung an den virtuellen GW-Messstelle. Die Messstellen wurden so gewählt, dass die Unterschiede der vertikalen Diskretisierung (schichtbasiert vs. gitterbasiert) möglichst nicht zum Tragen kommen.

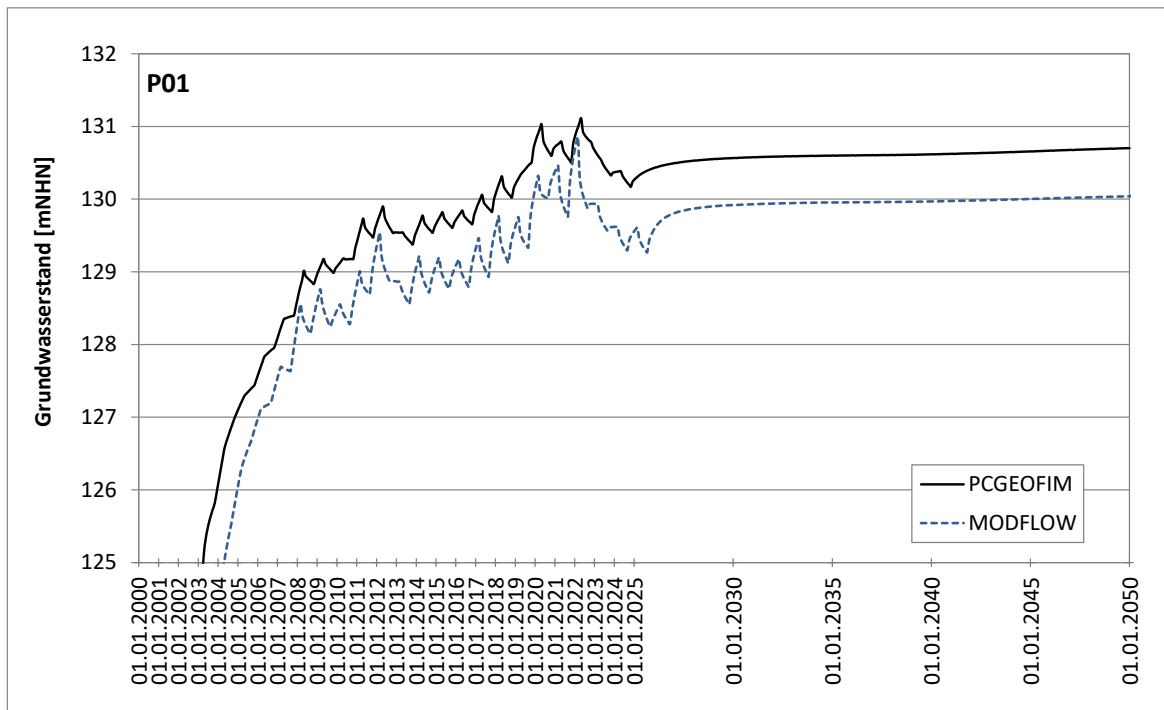


Abbildung C7-9: Vergleich des berechneten GW-Standes an der Messstelle P01

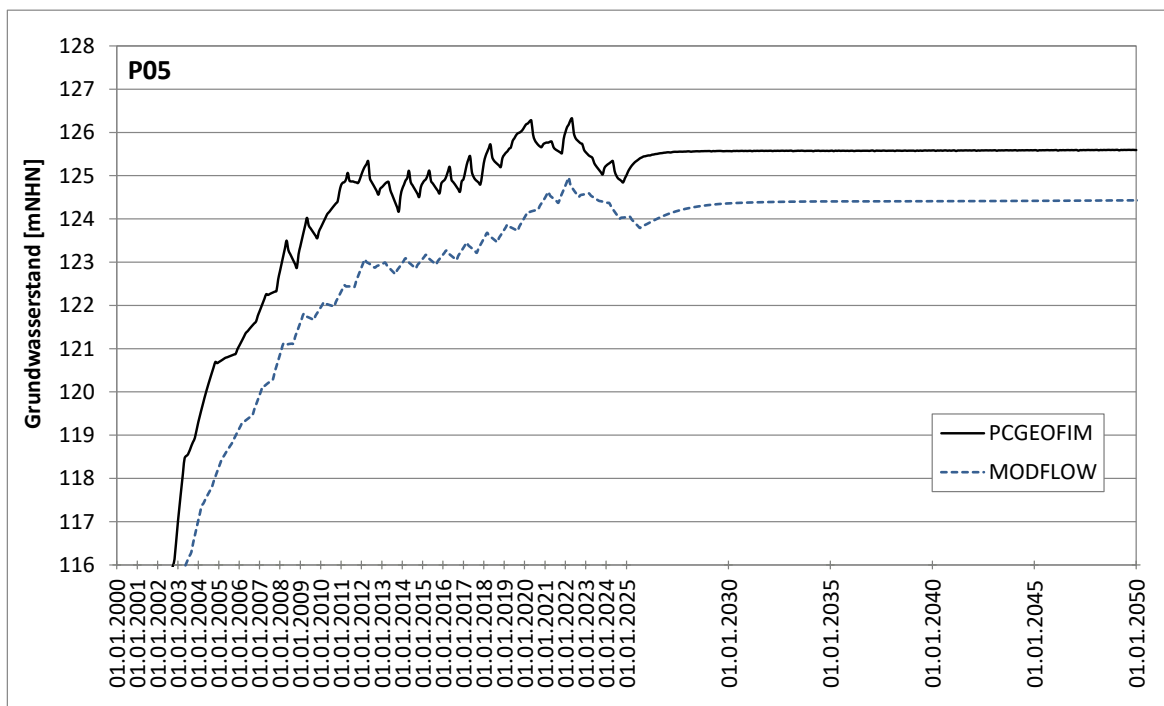


Abbildung C7-10: Vergleich des berechneten GW-Standes an der Messstelle P05

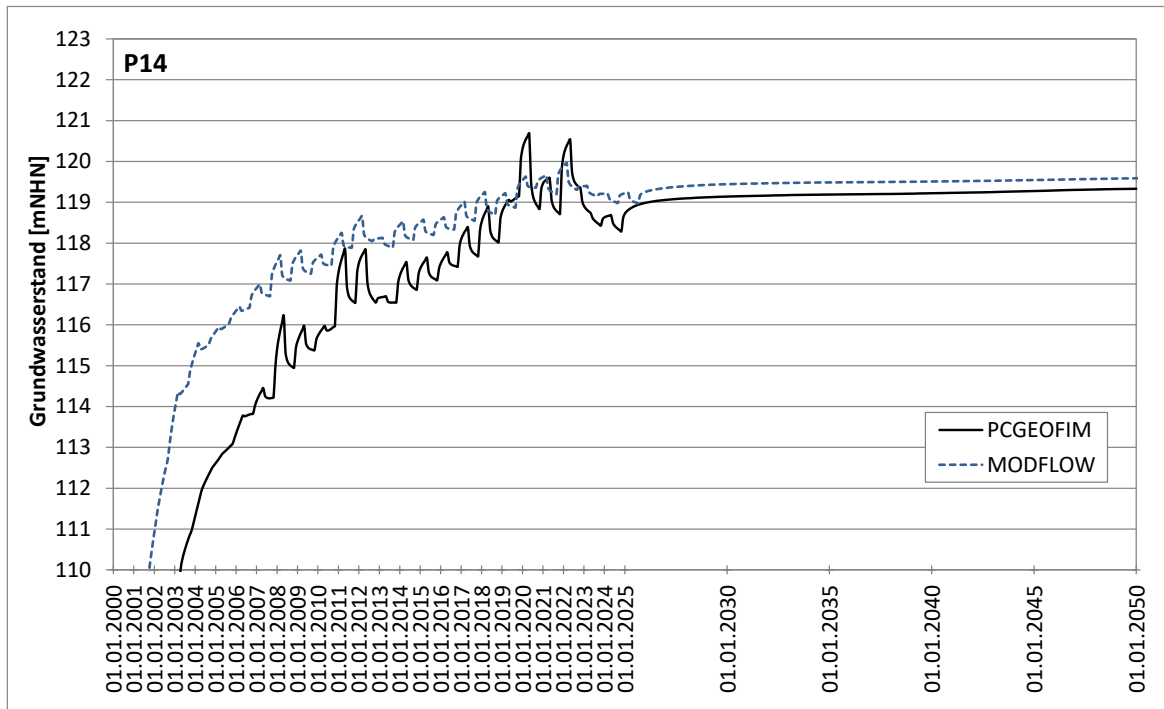


Abbildung C7-11: Vergleich des berechneten GW-Standes an der Messstelle P14

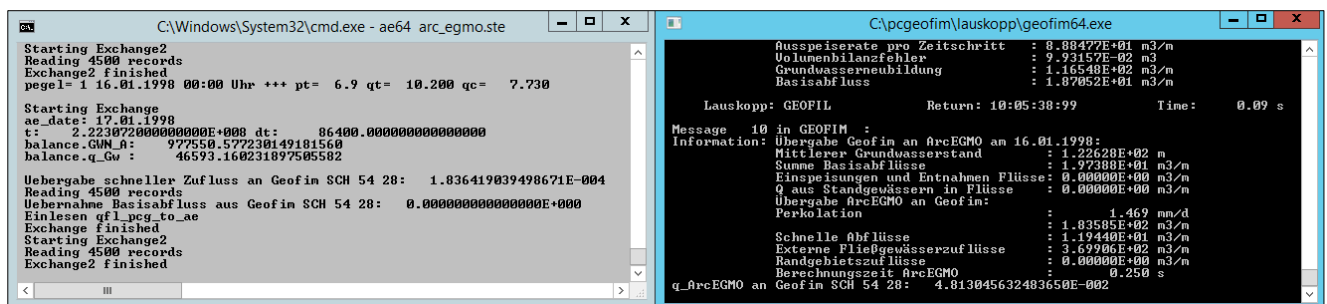
Der Vergleich zeigt, dass eine generelle Übereinstimmung in den Modellergebnissen besteht. Unterschiede waren durch die im Detail variierenden Modellansätze zu erwarten und sind somit erklärbar. Das gilt auch für die Implementierung der GWN, die z. B. im MODFLOW-Modell an der MST P01 (Abb. C7-9) in deutlicheren Schwankungen im GW-Stand resultiert.

C8 ERGEBNISDARSTELLUNG ZU DEN GEKOPPELTEN MODELLEN (PCGEOFIM – ARCEGMO)

C8.1 KURZERLÄUTERUNG MODELLVORGEHEN – BEWERTUNGSVORGEHEN

Die beiden mathematischen Modelle des Grundwassermodells (PCGEOFIM) und des Bodenwasserhaushaltsmodells (ArcEGMO) rechnen für ihr jeweiliges Modellgebiet und tauschen für den gemeinsamen Modellraum die relevanten Daten aus. Im Programm ArcEGMO werden die Grundwasserneubildung und die schnellen Zuflusskomponenten (oberirdischer und hypodermischer Abfluss) zu den Vorflutern berechnet. Im Grundwassermodell werden die Grundwasserstände und die Ex-/Infiltration der Flüsse bestimmt. Die Werte werden innerhalb des Kopplungszeitschrittes von einem Tag gegenseitig ausgetauscht. Die Bodenzone wird teilweise von beiden Programmen abgebildet, um die gegenseitigen Beeinflussungen bei flurnahen Grundwasserständen berücksichtigen zu können.

Die folgende Abb. C8-1 zeigt eine Momentaufnahme aus der laufenden gekoppelten Berechnung. Sie dokumentiert die Kommunikation bzw. den Datenaustausch zwischen beiden Modellen für einen Berechnungszeitschritt.



```

C:\Windows\System32\cmd.exe - ae64 arc_egmo.ste
Starting Exchange2
Reading 4500 records
Exchange2 finished
pegl= 1 16.01.1998 00:00 Uhr +++ pt= 6.9 qt= 10.200 qc= 7.730

Starting Exchange
ae_date: 17.01.1998
t: 2.223072000000000E+000 dt: 86400.0000000000000000
balance_GW_A: 977550.577236149181560
balance_q_Gw : 46593.160231897505582

Übergabe schneller Zufluss an Geofim SCH 54 28: 1.836419039498671E-004
Reading 4500 records
Übernahme Basisabfluss aus Geofim SCH 54 28: 0.000000000000000E+000
Einlesen qfl_pcg_to_ae
Exchange finished
Starting Exchange2
Reading 4500 records
Exchange2 finished

C:\pcgeofim\lauskopp\geofim64.exe
Auspeiserate pro Zeitschritt : 8.88477E+01 m3/m
Volumenbilanzfehler : 9.93157E-02 m3
Grundwasserneubildung : 1.16548E+02 m3/m
Basisabfluss : 1.87052E+01 m3/m

Lauskopp: GEOFIL Return: 10:05:38:99 Time: 0.09 s
Message 10 in GEOFIM :
Information: Übergabe Geofim an ArcEGMO am 16.01.1998:
Mittlerer Grundwasserstand : 1.22628E+02 m
Summe Basisabflüsse : 1.97388E+01 m3/m
Einspeisungen und Entnahmen Flüsse : 0.00000E+00 m3/m
Q aus Standgebässern in Flüsse : 0.00000E+00 m3/m
Übergabe ArcEGMO an Geofim:
Perkolations : 1.469 mm/d
Schnelle Abflüsse : 1.03505E+02 m3/m
Externe Fließgewässerzuzflüsse : 1.19440E+01 m3/m
Randgebietszuzflüsse : 3.69906E+02 m3/m
Berechnungszeit ArcEGMO : 0.250 s
q_ArcEGMO an Geofim SCH 54 28: 4.813045632483650E-002
  
```

Abbildung C8-1: Momentaufnahme der laufenden gekoppelten Berechnung für einen Berechnungszeitschritt (links: Ausschriften von ArcEGMO & Kopplungsroutine; rechts: Ausschrift PCGEOFIM)

Das Grundwassermodell (PCGEOFIM) übergibt den aktuellen, berechneten Grundwasserstand an das Bodenwasserhaushaltsmodell (ArcEGMO). Es wird hier jeweils der oberste freie Grundwasserstand übergeben. ArcEGMO nutzt diesen Grundwasserstand, um damit die Verdunstung und die Sickerwasserraten für den nächsten Zeitschritt zu ermitteln. In diesem Zusammenhang wird auch die potenzielle Wasseraufnahmekapazität des Bodens bei flurnahen Grundwasserhältnissen berücksichtigt. So wird z. B. bei flurgleichen Grundwasserständen auch in Zeiträumen mit positiver Wasserbilanz keine Grundwasserneubildung übergeben, sondern über den Muldenspeicher (Modellteil ArcEGMO) eine Zeitverzögerung bzw. eine Umwandlung in Oberflächenlandabfluss berechnet. Ansonsten wird die Versickerung aus der durchwurzelten Bodenzone an das Grundwassermodell übergeben. In PCGEOFIM wird dieser Volumenstrom direkt dem Grundwasser als Neubildung zugeführt.

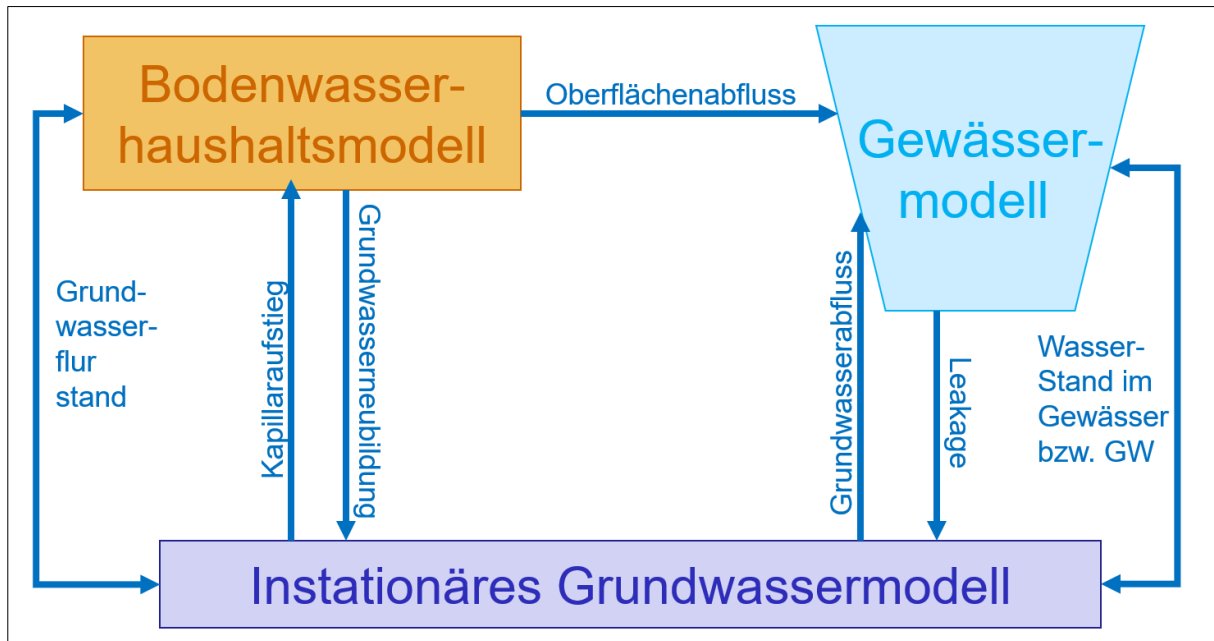


Abbildung C8-2: Interaktion zwischen Bodenwasserhaushalts- und Grundwassermodell

Die Berechnungsergebnisse des jeweils anderen Modells beeinflussen somit den Kopplungspartner und führen zu einer Rückkopplung. So bewirken hohe Neubildungsraten einen Anstieg des Grundwasserstandes. Steigt das Grundwasserflurnah an, steigt die Verdunstung, da mehr Grundwasser für die Verdunstung zur Verfügung steht. Damit wird die Neubildung nachfolgend geringer, was wiederum zu einer Verringerung des Anstieges des Grundwasserstandes führt. Ebenfalls ausgetauscht werden die Komponenten der Abflüsse der Oberflächengewässer. Die in ArcEGMO errechneten schnellen Direktabflussanteile werden an PCGEOFIM übergeben. Umgekehrt werden die langsamen Basisabflussanteile von PCGEOFIM bestimmt und an ArcEGMO übermittelt. Die verschiedenen Austauschpfade dieser Kopplung zeigt die voranstehende Abb. C8-2.

Die Modellgebiete müssen bei der Modellkopplung nicht deckungsgleich sein. Wie in Kap. C1.2 ausgewiesen ist das Bodenwasserhaushaltsmodell (typischerweise) größer. In den nicht gekoppelten Teilbereichen erfolgt die Berechnung der Austauschgrößen intern in den Modellen mit den dafür bei ungekoppelten Rechnungen verfügbaren Verfahren. Im ungekoppelten Modellteil ArcEGMO wird die Berechnung der Grundwasserneubildung instationär (zeitlich veränderliche Randbedingungen, wie Meteorologie und Vegetationsentwicklung) und mit zeitlich variablen, nach einem vereinfachten Verfahren (Speicheransatz) berechneten Grundwasser(flurab)ständen durchgeführt.

Die Interaktion zwischen den beiden Modellen wird über verschiedene Kopplungstypen gesteuert, die den Modellen mitteilen, ob es sich um ungekoppelte oder gekoppelte Modellflächen handelt. Bei den gekoppelten Flächen wird zusätzlich unterschieden, ob es sich um einfache Bodenzellen handelt, oder ob eine Kopplung zum Fließgewässer oder Standgewässer erfolgt. Zur Übergabe der Durchflüsse am Übergang vom ungekoppelten zum gekoppelten Modell werden ebenfalls Kopplungstypen definiert. Wasserflächen werden in der gekoppelten Modellierung nicht anhand der Landnutzung definiert, sondern anhand der aktuellen Grundwasserstände. Übersteigt der Grundwasserstand das Gelände ($GWH > GOK$), so wird die Fläche als Wasserfläche interpretiert. Sinkt der Grundwasserstand wieder, wird aus der Wasserfläche erneut eine wasserfreie Modellfläche. Die Zuordnung der Grid-Typen ist in nachfolgender Abb. C8-3 dargestellt.

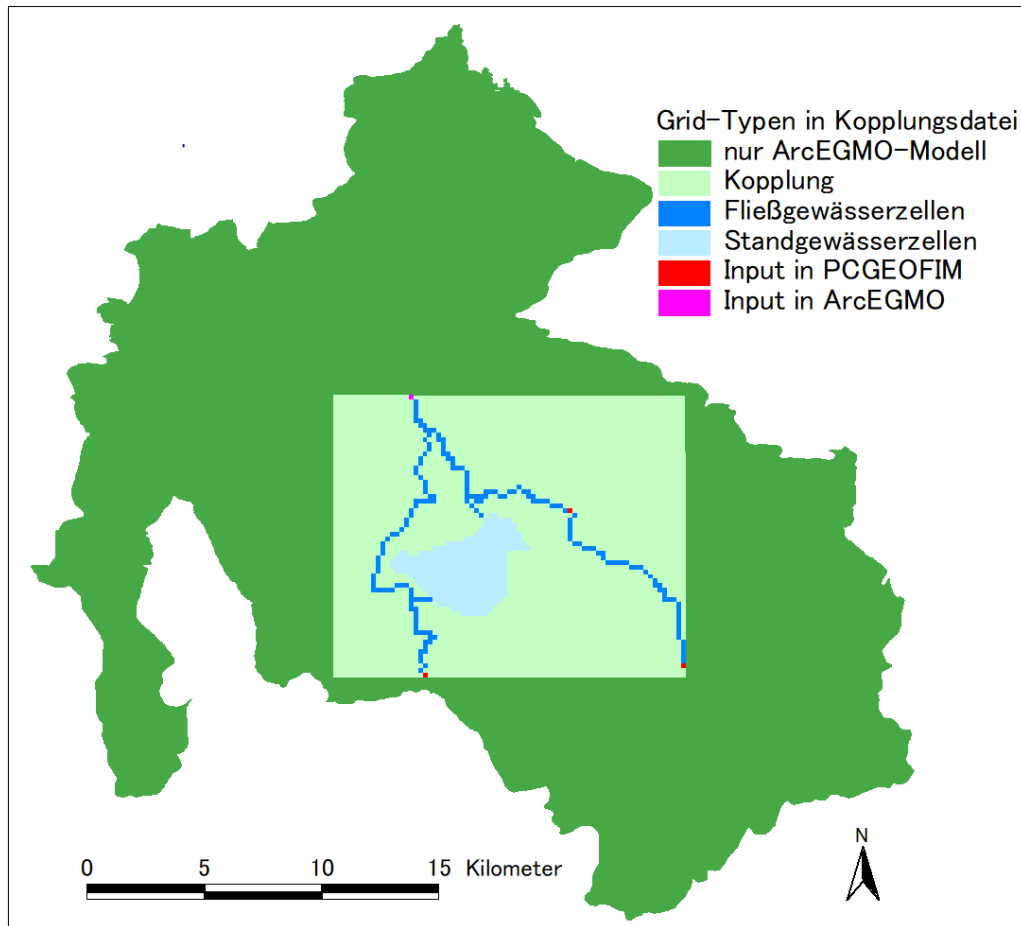


Abbildung C8-3: Grid-Typen im Testmodell

C8.2 ERGEBNISDARSTELLUNG GEKOPPELTE MODELLIERUNG

Die Ergebnisse der gekoppelten Modellierung werden im Folgenden denen der ungekoppelten Grundwassermodellierung (vgl. Kap. C7) gegenübergestellt, wobei der Vergleich hier ausschließlich für das PCGEOFIM-Grundwasserströmungsmodell erfolgt. Die Ergebnisdarstellung der ungekoppelten Modellierung erfolgte unter Annahme zeitvariabler Grundwasserneubildung. Grundlage für die Ermittlung der Grundwasserneubildung bildet in beiden Verfahrensweisen das ArcEGMO-Bodenwasserhaushaltsmodell.

Um eine Vergleichbarkeit herstellen zu können, mussten im ungekoppelten PCGEOFIM-Modell z. T. abweichende Modelleinstellungen gegenüber dem Modellvergleich in der Strömungsmodellierung (Kap. C7) vorgenommen werden. Der allgemeine Randbedingungsansatz zur Abbildung der Tagebauspezifika bleibt dabei aber erhalten. Geringfügige Abweichungen zwischen der Ausprägung der berechneten Ganglinien in Kap. C7.3 und C8.4 sind daher jedoch möglich.

Exemplarisch erfolgt in den folgenden Kapiteln die Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse des Durchflusses an einem Fließgewässerquerschnitt der Spree sowie an den drei fiktiven Grundwasserpegeln P01_3, P05_3 sowie P14_3, welche auch für den Grundwassermodellvergleich herangezogen wurden. Die Lage der Auswertebereiche ist Abbildung C8-4 zu entnehmen. Außerdem erfolgt eine Darstellung der Unterschiede in der Berechnung der Grundwasserneubildung.

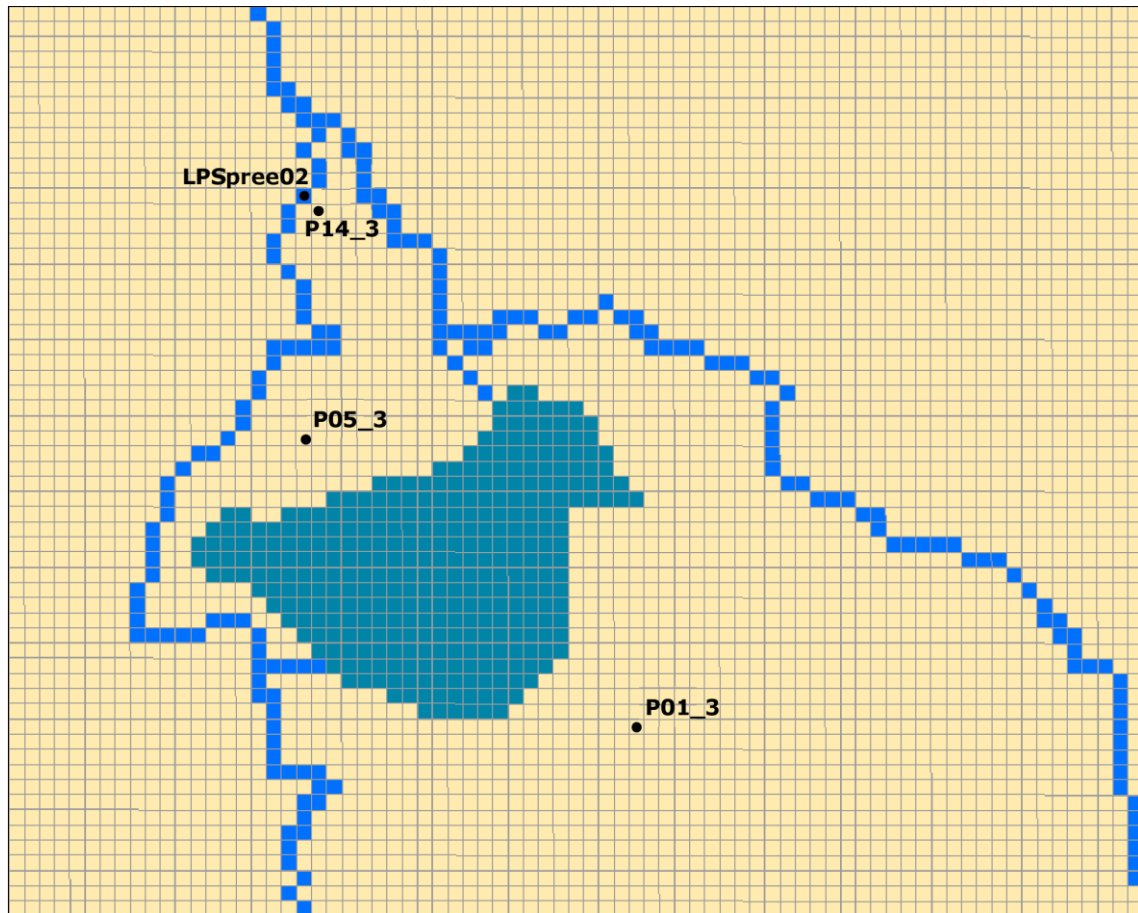


Abbildung C8-4: Lage der fiktiven Grund- und Oberflächenwassermessstellen für den Ergebnisvergleich

C8.3 ERGEBNISDARSTELLUNG ZUM ASPEKT OBERFLÄCHENWASSERGANG

Die folgenden Gangliniendarstellungen des Durchflusses zeigen die Berechnungsergebnisse des Grundwasserströmungsmodells für den fiktiven Oberflächenwasserpegel der Spree „LP Spree 02“ vor dem Zusammenfluss mit dem Schwarzen Schöps. Dargestellt sind sowohl die Ganglinien der ungekoppelten Modellierung, unter Annahme zeitvariabler Grundwasserneubildung im Halbjahresgang (vgl. Abb. C8-5; unterbrochene rote Ganglinie), als auch der gekoppelten Modellierung (schwarze Ganglinie). In allen Fällen wurde ein einheitlicher mittlerer Randzufluss der Spree und des Schöps angenommen. Im Falle der ungekoppelten Modellierung wurde die zeitvariable GWN im Vorfeld mit ArcEGMO für mittlere Grundwasserflurabstandsverhältnisse berechnet. Die Annahme zeitvariabler Grundwasserneubildung führt zu Schwankungen des Grundwasserstandes im Modellgebiet und zu veränderlichen Zutritten/Verlusten zum bzw. aus dem Fließgewässer. Es wird ausschließlich die grundwasserbürtige Abflusskomponente in ihrem zeitlichen Schwankungsverhalten betrachtet. Im Falle der gekoppelten Modellierung erfolgt zusätzlich die Einbeziehung der schnellen Abflusskomponenten, welche vom Bodenwasserhaushaltsmodell an das Grundwassermodell übergeben werden. Der Abfluss steigt dadurch im Fließgewässer allgemein an und Abflussspitzen bzw. Hochwasserwellen werden vom Modell wiedergegeben. Bei einer gekoppelten Modellierung können grundwasserbürtige und schnelle Abflusskomponenten gleichermaßen betrachtet, und die Abflussdynamik eines Fließgewässers vollumfänglich abgebildet werden.

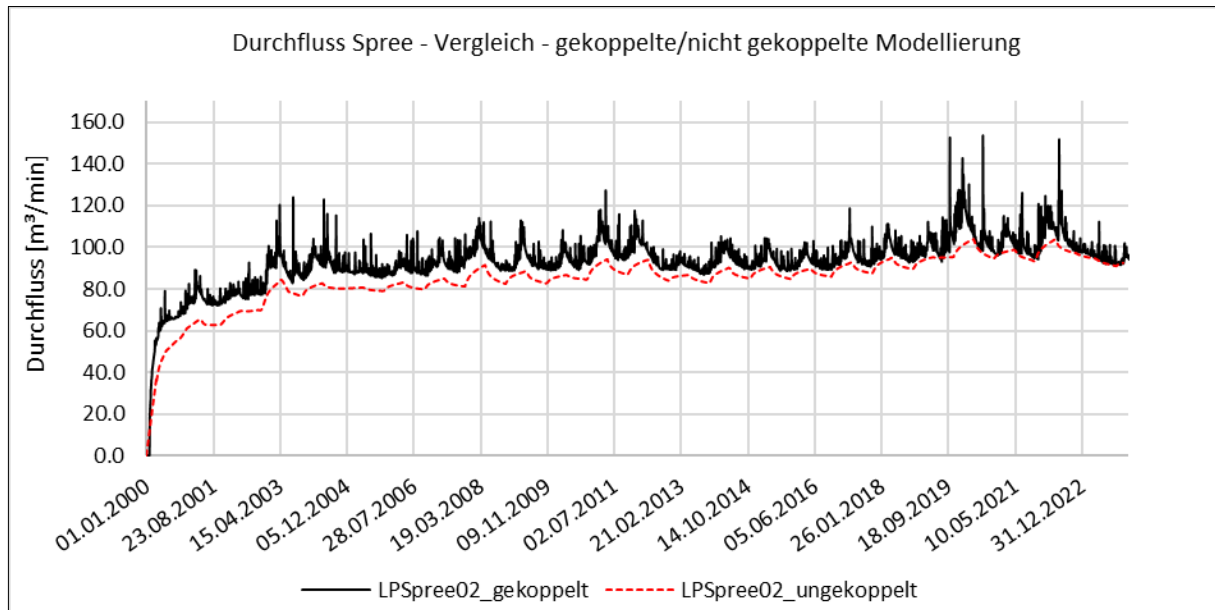


Abbildung C8-5: Berechneter Durchfluss (Tagesgang) der Hauptsprees vor Einmündung von Schwarzem Schöpf (Vergleich gekoppelte/ungekoppelte Berechnung)

C8.4 ERGEBNISDARSTELLUNG ZUM ASPEKT GRUNDWASSERANGANG

Für die Ergebnisdarstellung der berechneten Grundwasserstände wurden drei Standorte gewählt, welche sich außerhalb der Beeinflussung durch die Modellränder befinden (vgl. Abb. C8-4). Die Pegel P01_3 und P05_3 befinden sich jeweils an Standorten, welche zunächst durch Grundwasserferne gekennzeichnet sind und sich durch die Tagebaurestlochflutung und ansteigendes Grundwasser im Umfeld des Restlochs zu Standorten mit deutlichem Grundwassereinfluss wandeln. Das witterungsbeeinflusste Grundwasserschwankungsverhalten wird bei der Modellkopplung in verbessertem Maße wiedergegeben, als im ungekoppelten Verfahren (vgl. Abbildungen C8-6 und C8-8).

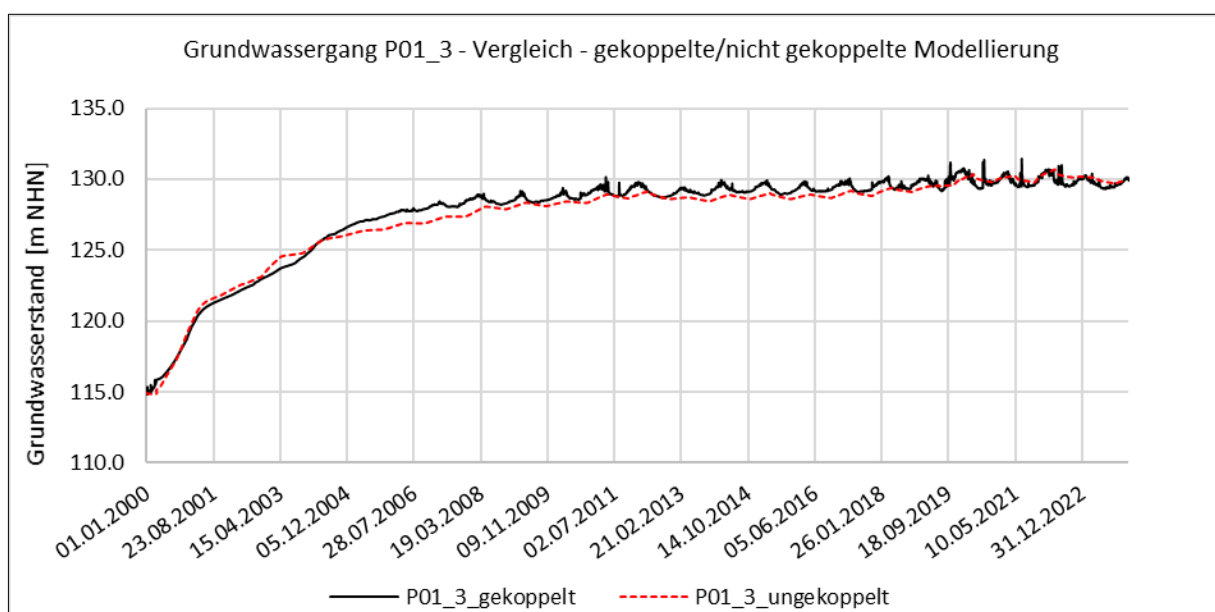


Abbildung C8-6: Berechneter Grundwasserstand (Tagesgang) am Modellpegel P01_3 (Vergleich gekoppelte/ungekoppelte Berechnung)

Der Pegel P14_3 befindet sich hingegen an einem flurfernen Standort mit Grundwasserständen unterhalb der verdunstungsbeeinflussten Bodenzone. Deshalb wird nur ein stark gedämpfter Einfluss auf den Grundwassergang sichtbar (vgl. Abb. C8-7).

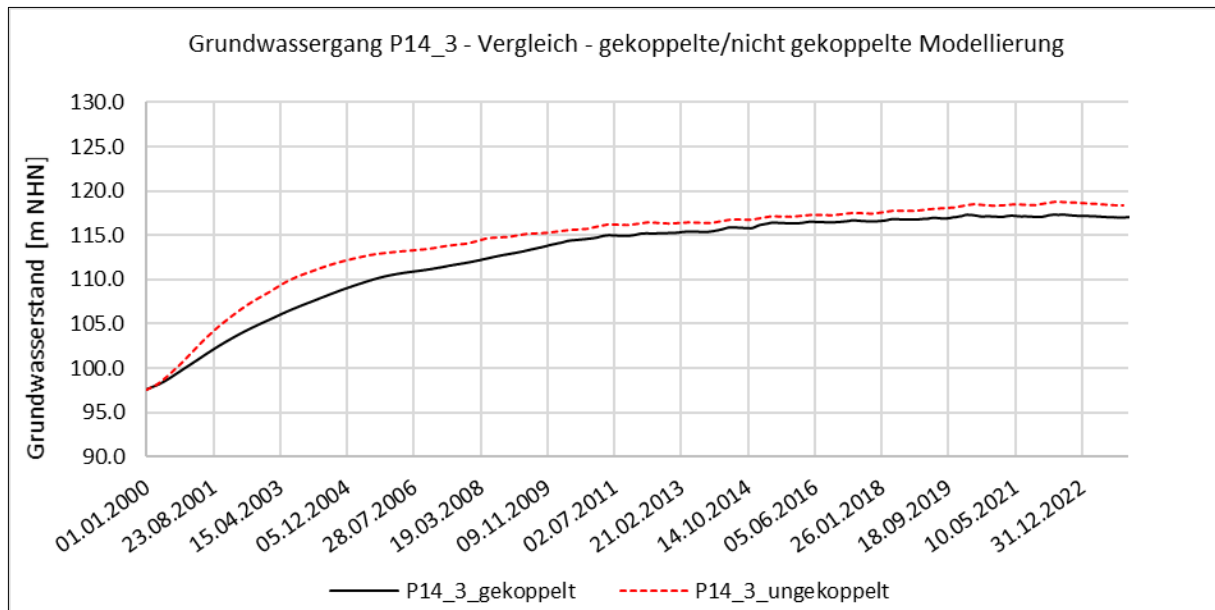


Abbildung C8-7: Berechneter Grundwasserstand (Tagesgang) am Modellpegel P14_3 (Vergleich gekoppelte/ungekoppelte Berechnung)

Der Vergleich des berechneten Grundwasserganges am Pegel P05_3 (Abb. C8-8) veranschaulicht die Bedeutung des Einflusses des Grundwasserflurabstandes auf die Verdunstung und damit die Grundwasserneubildung und die langfristige Entwicklung des Grundwasserstandes sowie deren gegenseitige Beeinflussung.

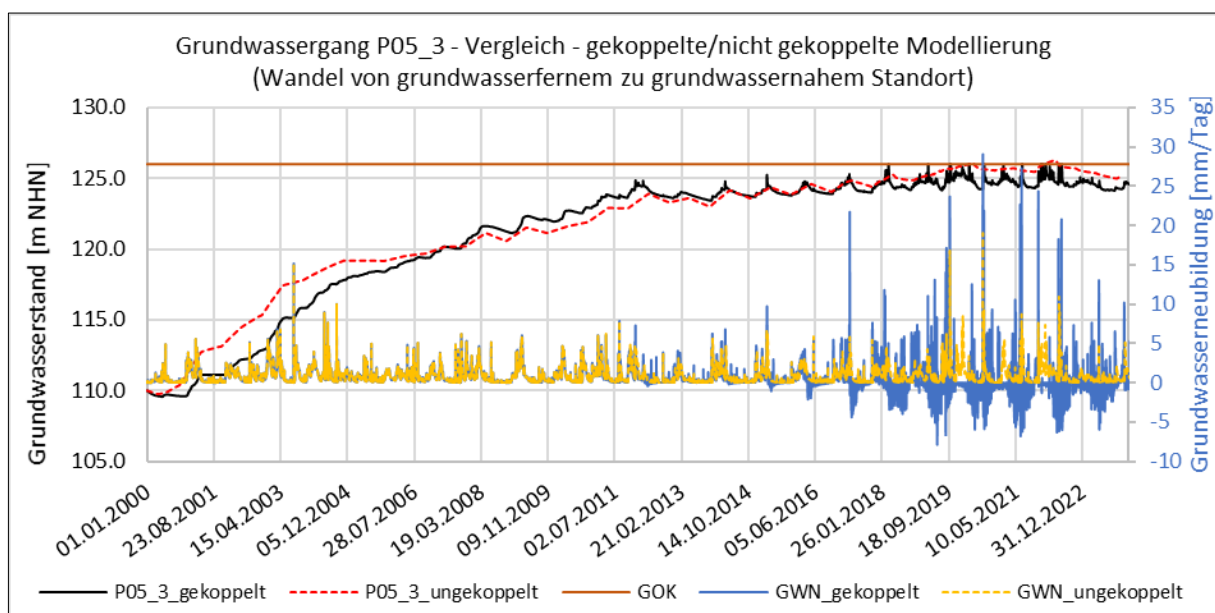


Abbildung C8-8: Berechnete(r) Grundwasserneubildung bzw. Grundwasserstand (Monatsgang) am Modellpegel P05_3 (Vergleich gekoppelte/ungekoppelte Berechnung)

Im gekoppelten Ansatz erfolgt der Anstieg des Grundwassers ab 2006 in höherem Maße als beim ungekoppelten Verfahren bis zu dem Punkt, an dem der Grundwasserspiegel die verdunstungsbeeinflusste Zone erreicht. Ab diesem Punkt sinkt das Grundwasserniveau unter das Niveau der ungekoppelten Simulation, da aufgrund der erhöhten Verdunstung die Grundwasserneubildung sinkt und Zehrung aus dem Grundwasservorrat erfolgt (vgl. Abb. C8-8; blaue Ganglinie). Im ungekoppelten Verfahren, kann dies durch die starre Vorgabe der GWN, unabhängig vom Grundwasserflurabstand, nicht berücksichtigt werden (vgl. Abb. C8-8; gelbe Ganglinie). Der Grundwasserstand wird am Beispielstandort im ungekoppelten Ansatz folglich in der Größenordnung von etwa einem Meter überschätzt.

Insgesamt wird bei der Modellkopplung die Grundwasserneubildung standortgetreuer wiedergegeben, als bei einer auf Aggregierung und Generalisierung basierenden starren Vorgabe der Grundwasserneubildung unabhängig vom Grundwasserflurabstand, wie es beim ungekoppelten Ansatz der Fall ist. Die beiden verschiedenen Herangehensweisen in der Übergabe der Grundwasserneubildung können in der Berechnung zu abweichenden Grundwasserständen führen. Es lässt sich schlussfolgern, dass Bereiche, die von Grundwasserwiederanstieg geprägt sind im gekoppelten Verfahren in detaillierter beschrieben werden können. Darüber hinaus ist festzustellen, dass beim gekoppelten Ansatz die Grundwasserdynamik in ihrem Umfang ebenfalls besser erfasst wird.

C8.5 ERGEBNISDARSTELLUNG ZUM ASPEKT GRUNDWASSERNEUBILDUNG

Die gekoppelte Modellierung zeichnet sich durch die Interaktion zwischen den Ergebnisgrößen des Grundwassermodells und des Bodenwasserhaushaltsmodells aus. Die Grundwasserneubildungen sind abhängig von den Flurabständen, die sich in der Modellkopplung mit dem Grundwassermodell mit jedem Berechnungszeitschritt (Tag) ändern können.

Die Interaktion der Flurabstände und der Grundwasserneubildung soll nachfolgend anhand von Beispielen untersetzt werden. Eine der Beispielflächen liegt im Bereich des Bärwalder Sees (Abb. C8-9). Hier beträgt der Flurabstand zum Beginn der Modellierung 40 m. Der Flurabstand verringert sich bis zu dem Zeitpunkt, an dem der Grundwasserstand die Geländekante überschreitet und sich eine temporäre Wasserfläche ausbildet. Zwischen 2002 und 2005 besteht ein Übergangsbereich zwischen flurfernen Verhältnissen und komplett gesättigten Verhältnissen einer Wasserfläche. Zum Beginn von 2002 ist der Flurabstand so gering geworden, dass grundwassernahe Verhältnisse vorherrschen, sich aber noch kein Gewässer ausgebildet hat. Das zeigt auch die Grundwasserneubildung, die nicht mehr wie zuvor nur positive Werte umfasst, sondern auch in den negativen Bereich absinkt, also Zehrungen ausweist. Durch die Zehrungen sinkt der Grundwasserstand im Sommer wieder leicht ab und der Flurabstand steigt wieder etwas an. Im darauffolgenden Winterhalbjahr kommt es wieder zu Grundwasserneubildungen, woraufhin der Grundwasserflurabstand erneut sinkt. Schließlich ist aber der Grundwasserstand so hoch, dass ein dauerhafter See entsteht. Bei der Modellkopplung wird ArcEGMO-seitig die Ausweisung der Wasserhaushaltsgrößen für Wasserflächen deaktiviert, so dass die Grundwasserneubildung ab Ende 2005 mit Null ausgewiesen wird. Damit wird eine Doppelbilanzierung verhindert, da die Gewässerverdunstung (Zehrung) ja im PCGEOFIM-Teil berechnet wird.

einflusste Bodenzone erreicht, setzt im Sommer die Zehrung (negative Grundwasserneubildung) ein, die den Flurabstand wieder ansteigen lässt.

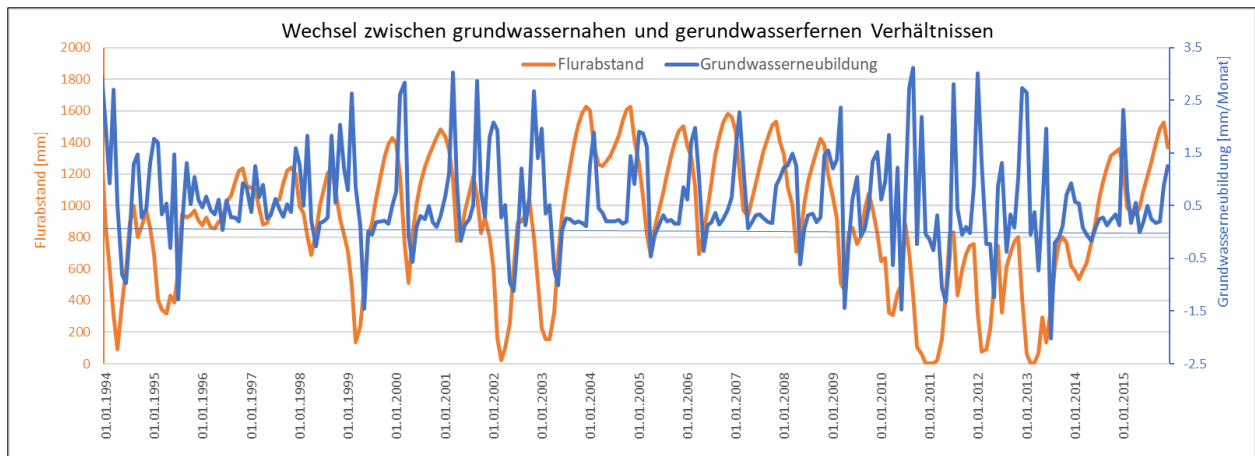


Abbildung C8-11: Wechsel zwischen grundwasserfernen und grundwassernahen Verhältnissen

Ebenso kann mit dem gekoppelten Modell auch ein ständiger Wechsel zwischen grundwasserfernen und grundwassernahen Verhältnissen abgebildet werden. Die Abb. C8-11 zeigt, dass einer hohen Grundwasserneubildung immer ein starker Anstieg der Grundwasserstände bzw. eine Reduzierung des Flurabstandes folgt. Dies führt dann im darauffolgenden Sommer zum Einsetzen einer Zehrung. Je stärker die Zehrung, desto schneller steigen die Flurabstände wieder an und der Standort wird wieder grundwasserfern. Diese schnelle Reaktion und gegenseitige Beeinflussung lässt sich in einer offline-Kopplung mit monatlichen Austauschgrößen nicht abbilden. Im ungekoppelten Modell würde diese Fläche durchgängig grundwasserfern bleiben.

C8.6 ERGEBNISDARSTELLUNG ZUM ASPEKT BILANZAUSWERTUNG

Die Güte der Modellierung lässt sich auch am Vergleich der berechneten Abflüsse mit den an den Pegeln gemessenen Abflüssen bewerten. Dazu war es notwendig, das Gebiet so weit zu vergrößern, dass das Modellgebiet das Bilanzgebiet zwischen bekannten Pegeln umfasst. Das gekoppelte Modell liegt in dem Bilanzgebiet des Pegel Sprey. Der mittlere Abfluss am Pegel Sprey beträgt $9,36 \text{ m}^3/\text{s}$ für den Betrachtungszeitraum von 1991–2010. Der mittlere Abfluss der gekoppelten Modellierung liegen bei $8 \text{ m}^3/\text{s}$ und die der ungekoppelten bei $8,9 \text{ m}^3/\text{s}$.

Daraus könnte man schlussfolgern, dass das ungekoppelte Modell besser in der Lage ist, den Durchfluss und die Gebietswasserbilanz abzubilden, als das gekoppelte Modell. Anhand der Ganglinie wird aber deutlich, dass der gemessene Abfluss einem Trend unterliegt und in der Zeit vor 2000 höher war als nach 2000. Das Abflussregime hat sich also mit der Zeit verändert. Das ist auf den Wandel der Landschaft von einer Bergbaulandschaft zu einer Bergbaufolgelandschaft zurückzuführen. Der geringere mittlere Abfluss wie ihn das gekoppelte Modell ermittelt, ist für die Zeit nach 2000 repräsentativ. Anhand der Ganglinie wird sogar deutlich, dass das gekoppelte Modell den gemessenen Abfluss teilweise noch etwas überschätzt (nachfolgende Abb. C8-12).

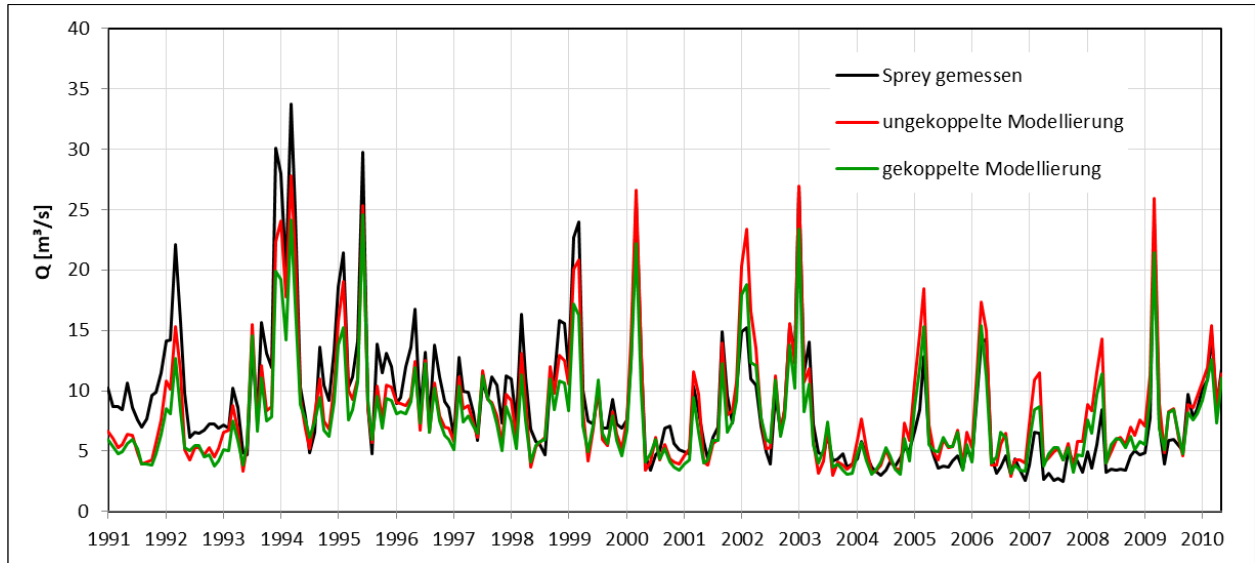


Abbildung C8-12: Monatsmittelwerte des Durchflusses am Pegel Sprey

C8.7 ZUSAMMENFASSEND E HAUPTAUSSAGEN ZUR GEKOPPELTEN MODELLIERUNG

Die gekoppelte Modellierung ermöglicht die Abbildung instationärer Zustände und bildet die Wechselwirkungen zwischen Boden- und Grundwasser realitätsnah ab. Durch die echte Kopplung beider Modelle werden die Übergabegrößen des jeweils anderen Modells direkt beeinflusst. Damit ist die Abbildung einer Dynamik wie z. B. bei einem Wandel von Landschaften mit sich verändernden Zuständen (grundwasserfern zu grundwassernah) möglich.

Die Fließgewässer werden in beiden Modellen unabhängig voneinander gerechnet. Die Oberflächengewässer in ArcEGMO werden vom grundwasserbürtigen Zustrom aus PCGEOFIM gespeist. Das Gewässer in PCGEOFIM bekommt die schnellen Abflusskomponenten (Oberflächenabfluss) von ArcEGMO übergeben. Zwischen diesen beiden Gewässermodellen besteht im Testmodell keine Interaktion. Eine Kopplung über die Wasserstände wäre ebenfalls möglich, ist aber aufgrund nicht vorhandener Eingangsdaten zu den Gewässergeometrien, die zur Berechnung von Fließgewässerwasserständen nötig sind, im Testmodell nicht umgesetzt worden.

D SCHLUSSFOLGERUNGEN ZUM AUFBAU DES GRM LAUSITZ

Nachfolgend werden die wesentlichen Schlussfolgerungen, die sich aus der hier vorliegenden Konzepterstellung zum GRML-Aufbau ergeben, zusammengefasst. Hierbei orientiert sich die Untergliederung an den fachlichen Hauptaspekten. Dabei werden die einzelnen Aussagen zum Teil bewusst theseartig formuliert. Es wird auch versucht, konkrete Antworten auf die in Kap. A2 aufgeworfenen Fragen und Aspekte zu geben.

D1 HAUPTAUSSAGEN ZUM GENERELLEN KONZEPT GRML-AUFBAU

Es sei vorangestellt, dass sich generell die Aussage aus EULITZ & KALTOFEN (2015) bestätigt, dass aus den vorhandenen, sich zum Teil deutlich überlappenden Regionalmodellen kein GRM Lausitz erstellt werden kann. Dies beruht auf den starken Unterschieden dieser einzelnen Modelle und ist klar in Kap. B2 herausgearbeitet worden.

Die in Kap. A benannten Hauptzielstellungen eines GRM Lausitz, großräumige hydraulische Aussagen für das Gesamtrevier und Gesamtwasserbilanzaussagen zu treffen sowie aufbauend darauf eine Transportmodellierung zum Stofftransport bergbaubürtiger Stoffe durchzuführen, sind nach modernem Stand nur durch Aufbau eines GRML, welches der hier vorliegenden Konzeption folgt, erreichbar.

Jedoch sei unbedingt betont, dass die Regionalmodelle ihre Bedeutung, gerade nach erfolgreicher Aktualisierung, für ortskonkrete geohydraulische Fragestellungen/Maßnahmen des Sanierungs- und Aktivbergbaus selbst besitzen. Diese Regionalmodelle sollen und können nicht durch ein GRM Lausitz abgelöst werden. Dies hat auch mit der Detailliertheit, die ein GRM überhaupt aufweisen kann zu tun. Es ist jedoch auch zu sagen, dass eine Transportmodellierung, die auf einer Zusammenführung der Wasserflüsse, aus völlig unterschiedlich differenzierten, sich überlappenden Strömungsmodellen (vgl. Kap. B2.3) beruht (Sulfatprognose Lausitz), unbedingt einer Qualifizierung bedarf. Dies hat nichts mit der Qualität des Transportmodellierungsansatzes selbst zu tun, sondern mit der Abbildung des Strömungsraums, auf dem diese Transportmodellierung beruht.

Zum Modellaufbau: Ohne Kap. D5 vorzugreifen, die Datenlage zum Modellaufbau ist beispielhaft gut, auch wenn es wesentlicher Arbeit bedarf, aus den umfangreichen Datenpools die wesentlichen Daten zu extrahieren und vor allem konsistent zueinander in den abgestimmten, eigentlichen Datenpool für den GRM-Aufbau zu überführen. Hierbei ist weiterhin herauszustellen, dass die wesentlichen Datenbestände für den Aufbau des hydrogeologischen 3D Sturkturmodells, die des LfULG und die der LEAG sind. Das von einer sehr guten Vergleichbarkeit der verwendeten Stratifizierung in diesen Datenpools auszugehen ist, ist in Kap. B2 aufgezeigt und hergeleitet worden, auf welchen positiven Aspekten der Zusammenarbeit dies beruht.

Der entscheidende Punkt im GRM-Aufbau wird sein, eine praktikable, auf die wesentlichen zur Verfügung stehenden Datenpools abgestimmte, hydrogeologische 3D-Strukturgliederung festzulegen. In deren Bezug sind dann alle relevanten Daten in die zum eigentlichen Aufbau verwendete Datenbank zu überführen. Diesbezüglich muss es zum einen zu Abstraktionen, Zusammenführungen von feinstratigraphischen Gliederungen kommen. Zum anderen wird damit auch bewusst, dass hydrogeologische Körper die aus Modellierungen von LfULG auf sächsischem Gebiet resultieren, nicht einfach in ein solches Modell („auf Knopf-

druck“) integriert werden können. Es braucht ein konsistentes Modell für das Gesamtgebiet, von dem nur ca. 1/3 auf sächsischem Gebiet liegt.

Bei der eigentlichen Überführung des geologischen Modells, über das hydrogeologische 3D-Strukturmodell, in das letztendliche numerische Modell der genutzten Software zur GRM-Modellierung spielt die Toolwahl zur Umsetzung dieser Aufgabe und die Datenbankhaltung der Daten eine wesentliche Rolle. Aber noch wesentlicher ist die hier ausgeführte Generalidee der Abstraktion und der daraus resultierenden Vorgehensweise zur Bearbeitung der Daten. Somit ist als Hauptarbeit die abgestimmte, konsistente Zusammenführung, bezüglich der zu verwendenden hydrogeologisch-stratigraphischen Gliederung dieser Datenpools zu sehen.

In Bezug auf die zu verwendende Untergliederung im Gesamttraum ist für die tertiären Schichtglieder die wesentliche Vorarbeit durch das Konzept hier bereits erfolgt. Für die quartären Schichtglieder zeigt sich eine deutlich komplexere Situation. Es wurden zu einer überregional verwendbaren Quartärgliederung für das GRM Lausitz Gespräche mit einem wesentlichen Experten auf diesem Feld - Herrn Ralf Kühner (LEAG) - geführt. Es bedarf, beginnend in einem GRML-Aufbauprojekt, fortgeführter Diskussion dazu, nach konkreter Detailsichtung der Grunddaten. An dieser Stelle sei eingeflochten, dass wesentliche Fachleute außerhalb der Landesämter zu benennen sind, die in diese Modellbildung einbezogen werden sollten. Dies sind speziell Ralf Kühner (Experte Quartärgliederung) und Peter Süßmilch (wesentliche Person von LAUBAG bis LEAG zur stratigraphischen Abstimmung des LEAG-Datenpools aus den einzelnen Kohlenfeldern zueinander).

Die Modellberandung soll, im Gegensatz zu Teilbereichen der bestehenden Regionalmodelle, möglichst an allen Rändern auf harten Messdaten beruhen. Dort wo keine typischen äußeren Randbedingungen 1. Art oder 3. Art vorliegen, sollen möglichst RB 2. Art - „No-Flow ($Q=0$)“ vermieden werden. Dies deshalb, weil diese ja oft auf Annahmen nicht erfolgter Beeinflussung/ Veränderung beruhen müssen, die zum Teil unsicher sind.

Es ist als klarer Vorteil zu sehen, dass aus einem GRM Lausitz heraus den unterschiedlichen Regionalmodellen konsistente, für die jeweils betroffenen Regionalmodelle gleichlautende RB-Daten zur Verfügung stehen würden. Selbstverständlich gilt das nur für Bereiche, wo sonst in den Regionalmodellen mit „No-Flow“- Randbedingungen ($Q=0$) gearbeitet wird. Liegen harte RB (z. B. Seen etc.) vor, dann sind diese auch im GRM Lausitz Bestandteil.

Zu den aufgezeigten Sonderbereichen am äußeren Rand (vgl. Kap. B1) ist eine klare Vorgehensweise ausgewiesen: Diese Gebiete (Muskauer Faltenbogen, Oberer Spreewald) werden ins generelle Modellgebiet eingebunden. Jedoch im ersten Detailaufbau des Modells (detailliertes hydrogeol. Schichtmodell, Parametrisierung) inaktiv gesetzt. Dieses Vorgehen ist zielführend, weil es eine potentielle, spätere Einbeziehung zur Modellierung dieser Sonderbereiche offen lässt, spart diese komplizierten Körper aber im ersten detaillierten Modellaufbau aus. Diesbezüglich ist auch die in Kap. D7 ausgewiesene Aufwands- und damit Kostenbilanzierung zu verstehen. Diese bezieht nicht den Modellaufbau dieser beiden benannten äußeren Sondergebiete am Rand mit ein.

Die Testmodellierung hat aufgezeigt, dass zu erwarten ist, dass die Datenlage zur Parametrisierung (digital aufbereitet k_f -Werte) im Datenpool des LfULG deutlich schlechter ist, als vorher erwartet. Deshalb wurde der zugehörige Teil der Aufwandsabschätzung (siehe Kap. D7) gegenüber dem Zwischenbericht überarbeitet. Gleiches gilt in Bezug auf die Bedeutung

der Einbeziehung der „inneren Sonderbereiche“ (Rinnen, Kippen, glazigene Störungsbereiche). Durch die Testmodellierung wurde die Bedeutung dieser Bereiche unterstrichen.

Die Aussage, wie wesentlich die genaue Handhabung der relevanten und für Bergbaufolgegebiete (wie das Lausitzer Braunkohlenrevier) typischen Randbedingungen im Modell ist, hat sich noch einmal durch die Testmodellierung untermauert. Weitere Aussagen dazu finden sich in Kap. D3.

In Bezug auf das hydrogeologische 3D-Strukturmodell sei noch einmal zusammengefasst: Die konsistente Generalstruktur, mit Blick auf ihre Umsetzbarkeit an Hand der zur Verfügung stehenden Datenpools ist der wichtige Anfangspunkt. Dabei sollte bewusst bleiben, dass für den Strömungsprozess die wesentliche Parametrisierung entscheidend ist. Im Klartext: Es kommt nicht auf geringfügig abweichende Mächtigkeiten im verwendeten 3D-Strukturmodell an, sondern auf die Parametrisierung, also Belastbarkeit des Wissens um die k_f -Werte. Denn die Transmissivität (bzw. Transmissibilität) definiert sich als $T = k_f \cdot M$ – mit dem k_f -Wert als logarithmische Größe.

D2 HAUPTAUSSAGEN ZUM BODENWASSERHAUSHALTSMODELL UND ZUR WASSERHAUSHALTSANALYSE

Wie der Titel der Konzepterstellung ausweist, ist die Erstellung eines GRML auf die Wasserhaushaltsanalyse ausgerichtet. Somit liegt ein klares Augenmerk auf der verknüpften Betrachtung vom Grundwassersystem mit dem Oberflächenwassersystem. Dies ist in Bezug auf die EU-WRR (Grund- und Oberflächenwasserkörper) vollkommen zielführend und verständlich. Wesentliches Bindeglied zwischen beiden ist dabei der Bodenwasserhaushalt. Die Hauptaussagen zur komplexen Abbildung der oberen Randbedingung des GW-Modells, die der Bodenwasserhaushalt darstellt, werden nachfolgend zusammengefasst.

D2.1 HAUPTAUSSAGEN ZUM BODENWASSERHAUSHALTSMODELL

Das hier eingesetzte Bodenwasserhaushaltsmodell ArcEGMO-PSCN hat sich für Fragestellungen in bergbaugeprägten Regionen in einer Reihe von Projekten im Leipziger Revier bewährt. Das Modell kann räumlich genestet, in unterschiedlicher Komplexität betrieben werden. Für die bergbaulich wenig beeinflussten Außenbereiche des Untersuchungsgebietes ist es ausreichend, wenn sie mit einfachen, d. h. gesteuerten Vegetationsansätzen erfasst werden. Für die unmittelbar bergbaugeprägten Flächen ist es dagegen sinnvoll, eine Modellkopplung einzusetzen.

Die in ArcEGMO-PSCN genutzten Berechnungsansätze sind konzeptioneller Natur und erlauben damit eine effektive Modellierung größerer Flächen (Regionen) und langer Betrachtungszeiträume (vor- bis nachbergbaulich) bei kalkulierbaren Rechenzeiten. Demgegenüber ist die komplexe Abbildung der GW-Neubildung mittels Richards-Gleichung (wasserungesättigte Strömung mit wassersättigungsabhängiger Durchlässigkeit) oftmals numerischen Instabilitäten unterworfen, die in Großraummodellen nicht handhabbar sind.

Da Bergbauregionen Landschaften im Wandel sind, muss eine Berücksichtigung sich verändernder Boden- und Landnutzungsdaten über längere Zeiträume erfolgen.

D2.2 HAUPTAUSSAGEN ZUR GEKOPPELTEN MODELLIERUNG BWH-GW-MODELL

Im Rahmen des Testmodellbaus konnte die Kopplung zwischen den Modellierungssystemen PCGEOFIM und ArcEGMO bzw. zwischen Grundwassermodell und Bodenwasserhaushaltsmodell mit Erfolg realisiert werden. Zielstellung der Modellkopplung war die verbesserte Abbildung der gegenseitigen Wechselwirkung von Grundwasserdynamik und Bodenwasserhaushalt.

Klare Vorteile bietet die gekoppelte Modellierung vor allem in Bergbaugebieten, in denen aufgrund des Grundwasserwiederanstiegs nach Einstellung der Bergbautätigkeiten mit langfristigen Veränderungen der Grundwasserverhältnisse insbesondere der Grundwasserflurabstände zu rechnen ist. Ebenso bietet Sie Vorteile in der Abbildung der Prozessdynamik in Flussauen, indem die Interaktion zwischen Oberflächenwasser, Grundwasser und Atmosphäre in verbessertem Maße berücksichtigt wird. Zusammenfassend sind nachfolgend die Vor- und Nachteile der gekoppelten bzw. ungekoppelten Modellierung aufgeführt.

Nachteile einer **ungekoppelten Modellierung** sind:

- Veränderliche Grundwasserflurabstände werden nicht betrachtet.
- Schnelle Abflusskomponenten werden im Grundwassermodell nicht berücksichtigt.
- Extreme Durchflusssituationen können in ihrer Wechselwirkung nicht erfasst werden.
- Überschätzung oder Unterschätzung berechneter Grundwasserstände in vom Grundwasserwiederanstieg betroffenen Gebieten bzw. an grundwassernahen Standorten mit periodischen Wasserspiegelschwankungen sind möglich.

Die **gekoppelte Modellierung** von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserdynamik hat gegenüber der nicht gekoppelten Modellierung folgende **Vorteile**:

- Standorttreue Berücksichtigung der Grundwasserneubildung in Abhängigkeit der örtlich variablen Gebietseigenschaften (Boden, Landnutzung, geomorphologische Gegebenheiten, örtlicher Grundwasserflurabstand),
- Realistischere Prozessabbildung in bergbaulich überprägten Bereichen, welche von Grundwasserwiederanstieg gekennzeichnet sind, wobei die langfristige zeitliche Veränderung des Grundwasserflurabstandes berücksichtigt wird,
- Realistischere Prozessabbildung in Flussniederungsgebieten, welche periodischen Schwankungen des Grundwasserflurabstandes unterliegen sowie durch das Abflussgeschehen in den Vorflutern beeinflusst sind,
- Betrachtung von hydrologischen Extremereignissen, insbesondere Hochwassersituationen in Oberflächengewässern sowie im Grundwasser einschließlich deren Wechselwirkungen.

D3 HAUPTAUSSAGEN UNTER BEACHTUNG DER TESTMODELLIERUNG

Die Testmodellierung hat insgesamt aufgezeigt, dass die konzeptionelle Vorgehensweise zur GRM-Erstellung umsetzbar ist.

Präzisierungen ergaben sich zum einen vor allem in Bezug auf die Abbildung/ Handhabung innerer Sonderbereiche, zum anderen bezüglich auszuweisender Anforderungen an die zur Großraummodellierung einzusetzende Software für die Grundwassermodellierung.

Unter den benannten „inneren Sondergebieten“ sind quartäre Rinnen, Kippenkörper und glazigene Störungsbereiche zu verstehen. Es wurde zum einen aufgezeigt:

- a) wie mit diesen umzugehen ist und
- b) herausgestellt, dass in der Aufwandsbilanzierung zum Aufbau des GRML (Kap. D7) ein neuer Unterarbeitspunkt zu diesem Aspekt (gegenüber der Konzeptdarstellung im Zwischenbericht) einzuführen ist.

Der notwendige Umgang mit diesen Sonderbereichen beim GRML-Aufbau lässt sich wie folgt zusammenfassen: Rinnen und Kippen sind nicht als eigene hydrogeologische Schichten zu handhaben, sondern sie werden als Sondergebiete, mit Verbreitungsgrenzen ausgehalten und dann einbezogen. Dies heißt, ihre Berücksichtigung erfolgt durch die ihnen entsprechende, differenzierte Parametrisierung (vor allem k_f -Werte). Die Schichten der gewachsenen Bereiche werden jedoch in den Rinnen und Kippen einfach weitergeführt. Dann allerdings in diesen Bereichen, entsprechend den begründeten, vertikal und horizontal aufgelösten, variierenden Verhältnissen parametrisiert (bei vorhandener Datenbasis).

Diese Art der Berücksichtigung, gerade von quartären Rinnen und von Kippen, entspricht auch dem wirklichen „geologisch – technischen Werdegang“. Die ursprünglich vorhandenen geologischen Körper (Schichtfolge von GWL und Stauern/ Geringleitern) wird durch eine Rinnenfüllung (geologisch) bzw. durch Kippenkörper (technisch) ersetzt.

Zum anderen Punkt „Aspekte zur einzusetzenden GW-Modellierungssoftware“ ergaben sich wichtige Erkenntnisse zur konkreten Abbildung von wesentlichen bergbautypischen, inneren hydraulischen Randbedingungen, der im Großraummodell notwendigen Handhabung von großen Datenmengen und damit verbunden, des Zugangs des Modellierer-Teams zum jeweiligen Programm-Code:

Wichtiger Punkt im Modell ist die wasserbilanzierende Berücksichtigung von sich füllenden Restseestrukturen und die wasserbilanzierende Abbildung von Fließgewässern. Es ergab sich, dass dies z. B. in FEFLOW, in der Programm-Grundversion, nicht möglich ist. Dies gilt übrigens auch für die MODFLOW-Grundversionen. Dies heißt nicht, dass diese wasserbilanzierende Einbeziehung von Restseestrukturen mit den Programmsystemen FEFLOW und MODFLOW prinzipiell nicht erfolgen kann. Es bedarf allerdings dazu relevanter Add-ons/ Programmerweiterungen, gegenüber den Programmgrundversionen. Im Projektteam lag eine solche Programmerweiterung für FEFLOW nicht vor. Für MODFLOW lag diese, in Bezug auf die wasserbilanzierende Handhabung von Restseestrukturen im Projektteam vor. In Bezug auf zeitliche Parameteränderungen durch Kippenentwicklung jedoch nicht.

Welche Hauptschlussfolgerung ist aus dem Beschriebenen zu ziehen?

Bei einer potentiellen Ausschreibung der Arbeiten zum Aufbau eines GRML muss unbedingt eine funktionale Ausschreibung erfolgen!

Was ist darunter zu verstehen?

Entscheidende Bedeutung besitzt die Vorgehensweise bei der Erstellung des hydrogeologischen 3D-Strukturmodells (siehe dazu Kap. D1), vor allem aber auch die konkrete modelltechnische, numerische Umsetzung der wesentlichen Randbedingungen und prägender hydraulischer Körper der Braunkohlenbergbaugebiete. Dies sind vor allem A) die Handhabung der sich über den Modellierungszeitraum ändernden GW-Körper = Übergang Vorfeld (mit GWL/Stauer-System) in Kippenkörper. Das heißt, die daraus resultierende zeitliche Veränderung der Parameterbelegung für diese Bereiche.

Und weiterhin B) die Wasserbilanzierung von sich füllenden Oberflächenstandgewässern, wie Tagebaufolgeseen. Deren modelltechnische Abbildung darf nicht in Bezug auf eine RB 3. Art oder 1. Art erfolgen, sondern es ist eine genau definierte Hohlform vorgegeben, deren Füllung sich aus dem Ergebnis der Modellierung ergibt und gleichzeitig daraus eine zeitvariable Abbildung der Wasserstandshöhe im entstehenden See, als Randbedingung für den GWL resultiert/berechnet wird.

Es kann zusammengefasst werden, dass in Bezug auf die genannten GW-Modellierungs-Software-Pakete, außer bei PCGEOFIM, die allgemeine Benennung des Programm-Codes (also FEFLOW bzw. MODFLOW) nicht die Frage beantwortet, ob die oben genannten Anforderungen zur Kippenentwicklung und wasserbilanzierenden Restseeabbildung im Modell berücksichtigt werden können. Es ist eher die Frage, durch welche „Add-ons“/Modellverknüpfungen die dazu nicht in der Lage seienden Grundvarianten dieser Programme in diese Richtung qualifiziert werden. Deshalb ist die oben erläuterte fachspezifische, funktionale Ausschreibung unbedingt notwendig. Die klare Darstellung des Umgangs/ der konkreten numerischen Abbildung in den abzugebenden Angeboten gibt dann dem Ausschreibenden die Möglichkeit der Bewertung: A) die Sinnhaftigkeit des Vorgehens einzuschätzen und B) auch einzuschätzen wie praxistauglich das Vorgehen für eine Großraummodellierung ist. Weiterhin C) welche konkreten Erfahrungen diesbezüglich durch den Anbietenden, gerade in Bezug auf die benannten Bergbauspezifika des Lausitzer Reviers vorliegen.

Ebenfalls hat das Testmodellierungsvorgehen aufgezeigt, dass neben der Erfahrung zum Aufbau und Betrieb von großräumigen Modellen auch der Direktzugang des Bearbeiterteams zum Programm-Code ein entscheidender Aspekt ist.

Unweigerlich tauchen in großen Modellen Problemfälle von Fehlabbildungen in Randbedingungen, Parameterdateneingaben etc. auf. Dabei sind vereinfacht zwei Fehlerarten zu unterscheiden: echte Datenfehler und Datenformatfehler (verknüpft mit eventuellen Syntax-Problemen). Eigentliche Datenfehler lassen sich natürlich einfacher finden. Hierbei ist auf jeden Fall darauf hinzuweisen, dass eine Datenbank-artige, dem Nutzer sofort zugängliche Datenhaltung, im Programm selbst, von großem Vorteil ist.

Die sehr stark Tool- und Grafik-orientierte Eingabe und vor allem das Änderungsvorgehen ist im Einzelfall, für Teilbereiche sehr gut haptisch verständlich. Für den Umgang mit großen Datenmengen, gerade auch bei konzeptionellen Änderungen von Modellvarianten ist dies aber ein klarer Nachteil! Dieses Vorgehen ist wesentlich unübersichtlicher und zeitaufwendiger. Als Beispiel sei darauf verwiesen, dass z. B. für FEFLOW-Normalnutzer eine Kontrolle der eingegebenen Daten (Datenstrukturen) immer nur durch Export von Einzeldateien erfolgen kann. Dies ist ein klarer Nachteil.

Deshalb ist es von wesentlichem Vorteil, gerade in Bezug auf Datenformatfehler und numerische Probleme etc., wenn das Modelliererteam Code-Zugriff besitzt. Gerade bei oben benannten spezifischen Problemen, ist ein Debugging der auftretenden Fehler, numerischen Probleme, oftmals unerlässlich, um die konkreten Probleme wirklich zu verstehen und damit zu lösen. An einem solchen Punkt ist eine Problemlösung über die Programm-Manuals, die Hilfsfunktionen der Programme, aber auch über Support-Hotlines nicht zu erwarten.

D4 HAUPTAUSSAGEN ZUR TRANSPORTMODELLIERUNG MIT DEM GRM LAUSITZ

Eine wesentliche Zielstellung des GRM ist die Lieferung von Aussagen zum Stoffaustrag aus dem Untergrund in die Oberflächengewässer. Deshalb soll das GRML zur Berechnung von Stofftransport nutzbar sein. Generell muss hier zwischen dem nicht-reaktiven Einzelstofftransport und dem reaktiven Mehrstofftransport unterschieden werden.

In allen Programmsystemen stehen direkt Möglichkeiten zur Verfügung, Retardation von Einzelstoffen oder nicht reaktiven Stoffgemischen beispielsweise über Isothermenkonzepte oder durch die Charakterisierung von Zerfallsprozessen zu implementieren. Auch Mischungsprozesse mehrerer Stoffe aus verschiedenen Quellen sind abbildbar. MODFLOW bietet auch die Möglichkeit zur Definition eines „immobilen Porenraumes“ als Speichermedium.

Die Abbildung von reaktivem Mehrstofftransport ist mit den Programmsystemen MODFLOW und PCGEOFIM ebenfalls möglich, wobei es hierfür jedoch erforderlich ist, auf die Berechnung der hydraulischen Strömung eine nachgeschaltete Stofftransportmodellierung aufzusetzen. Dies kann beispielsweise mit dem Programmwerkzeug PHT3D erfolgen. Folgende Einschränkungen sind hierbei zu beachten:

1. Die Abbildung von Lupen oder die Berechnung in unregelmäßigen Gittern ist bisher nicht möglich und erfordert eine Transformation der hydraulisch berechneten Strömungsvektoren für alle Zeitschritte.
2. Die Bereitstellung der Strömungsvektoren für alle Zeitschritte für das gesamte Modellgebiet (oder auch ein Teilmodellgebiet) erfordert die Speicherung einer im Vergleich zur hydraulischen Berechnung ungleich größeren Datenmenge; Entsprechende Speicher müssen vorgehalten werden. Nicht in der Rechenzeit für den reaktiven Transport sondern hierin wird die eigentliche Limitation gesehen.
3. Der reaktive dreidimensionale Stofftransport bedarf nach bisheriger Erfahrung für die Stabilität der Berechnung eines vertikal homogenen Gitters, welches ebenfalls mit einer Gittertransformation herstellbar ist. Dies führt jedoch zur Einschränkungen bei der Genauigkeit der Abbildung der geologischen Strukturen.
4. Zusammenfassend kann ausgesagt werden, dass für die Berücksichtigung eines reaktiven Stofftransportes weiterer Entwicklungsbedarf besteht.

Generell ist daher die Einstoff-Transportmodellierung (wobei hier der sich relativ konservativ verhaltende Stoff Sulfat im Fokus der Betrachtung stehen sollte) als **erster Schritt** zur Bestimmung von Stoffausträgen aus dem Grundwasser in die Oberflächengewässer anzusehen und sollte in einer ersten Entwicklungsstufe im Fokus stehen.

Es wird weiterhin vorgeschlagen, in einem **zweiten Schritt** die Abbildung des Eisentransportes (als ein die Acidität des Grundwassers charakterisierender Stoff) in Form eines retardierten Stoffes zu betrachten: Dabei sollte jedoch eine gründliche Bewertung der Tragweite der damit erreichbaren Aussagen erfolgen (Realitätsnähe der Abbildung).

In einem **dritten Schritt** wird empfohlen, für Teilbereiche des Modells einen vollständigen reaktiven Transport zu implementieren die hierfür notwendigen tatsächlichen rechentechnischen Erfordernisse abzuklären und mit dem Gewinn an Aussageschärfe abzugleichen.

D5 HAUPTAUSSAGEN ZUR DATENVERFÜGBARKEIT

D5.1 GRUNDWASSERMODELLEN DATEN

Hinsichtlich der Bohrungen ist im Gebiet des künftigen GRM Lausitz eine gute Abdeckung mit stratigraphisch, nach aktuellem geologischen Kenntnisstand verschlüsselten Bohrprofilen, für die Erstellung des Strukturmodells in digitaler Form, vornehmlich bei LfULG und LEAG vorhanden. Ein besonderer Vorteil dieser beiden Datenbestände ist, dass sie weitgehend nach den gleichen stratigraphischen Prinzipien verschlüsselt und aktuell gehalten vorliegen. Außerhalb dieser Bereiche kann mit Bohrungen der LMBV und des LBGR verdichtet werden. Diese Bohrbestände sind jedoch oftmals noch stratigraphisch zu qualifizieren. Für Sachsen, ca. 1/3 der potentiellen GRM-Fläche, ist aktuell ein digitales 3D-Modell aus der Bearbeitung der HyK50-Blätter der Lausitz in Vorbereitung. In teils digitaler, teils analoger Form sind im LfULG auch weiterhin Berichte zu Schicht-Verbreitungskarten, 3D-Modellen sowie zu Erkundungs- und Forschungsprojekten im Bereich Lausitz vorhanden.

Es ist einzuschätzen, dass eine Datenbasis für die Belegung des GRM Lausitz mit hydrogeologischen (hydraulischen und geochemischen) Parametern vorhanden ist. Zuerst sind zur Parametrisierung die Datenbestände von LfULG Sachsen und von LEAG (unter Voraussetzung der Zustimmung) zu verwenden. Diese ergänzen sich räumlich sehr gut. Nachfolgend ist die dabei entstandene Datenbelegung durch Daten aus dem LBGR Bohrchiv zu verdichten.

In jedem Fall muss bewusst bleiben, dass es bei allen Datenpools einer „bewertenden Aufbereitung“, vor endgültiger Verwendung bedarf. Wie die Testmodellierung aufzeigte, besteht größerer Bedarf, als vorher vermutet, analoge Daten für die hydraulische Parametrisierung aufzubereiten. Es liegen relativ wenige digitale Daten dazu vor.

D5.2 DATEN ABBILDUNG DER OBERFLÄCHENGEWÄSSER

Für die relevanten Gewässer stehen umfangreiche Daten für die Einbindung in die GW-Strömungsmodelle zur Verfügung (morphometrische Informationen, abgeleiteten Wasserstands-Volumen-Flächenbeziehungen). Auch zu den oberirdischen Einzugsgebieten der Seen (Bestimmung „surface-runoff“) sind Daten aus den Oberflächen-Abflussmodellen verfügbar.

Meteorologische Datenreihen für die Niederschläge können aus Messwerten der Lausitzer DWD-Stationen abgeleitet werden, oder sie stehen für Sachsen als geprüfter und validierter Datensatz im System ReKiS zur Verfügung. Die Gewässerverdunstung berechnet sich aus Klimadaten (DWA-M 504-1, DVWK 1996) oder ist Ergebnis der gekoppelten Modellierung.

D5.3 DATEN BODENWASSERHAUSHALTSMODELL

Wie im Kap. C4 erläutert, liegen die benötigten Daten weitestgehend vor. Allerdings bedarf es Aufwand zur passfähigen Aufbereitung (z. B. Digitalisierung von Planzuständen, Aufbereitung neue Bodenkarte, etc.). Die detaillierteren sächsischen Gewässer müssten ebenfalls

aufbereitet werden. Eventuell können aber auch die etwas weniger detaillierten Brandenburger Gewässer verwendet werden, die bereits aufbereitet zur Verfügung stehen und im Vergleich zu den im Grundwassermodell angesetzten Gewässern und der Rastergröße immer noch sehr differenziert vorliegen (vergl. Kap. C4.3).

Der höchste Bearbeitungsaufwand besteht darin, die Region als „Landschaft im Wandel“ zu beschreiben. Dieser Übergang - vorbergbaulicher Zustand; aktiver Bergbau; Bergbaufolgelandschaft wird über verschiedene Landnutzungszustände im Modell abgebildet. Damit verbindet sich ein hoher Rechercheaufwand.

D6 VARIANTENBETRACHTUNG ZUM BETRIEB DES GRM LAUSITZ

Zunächst soll der Status quo des Betriebs der bestehenden Lausitzer Regionalmodelle dargestellt werden, um nachfolgend denkbare Varianten zum Betrieb eines GRM Lausitz aufzuzeigen. Anschließend werden auch Aspekte zur Nutzung der Dienste des Zentrums für Informationsdienste und Hochleistungsrechnen (ZIH) der TU Dresden für ein solches GRM Lausitz kurz diskutiert.

D6.1 BETRIEBSKONZEPT DER BESTEHENDEN REGIONALMODELLE

Die beiden Betreiber der derzeitigen separaten Regionalmodelle, LMBV und LEAG, arbeiten vorrangig auf Abteilungsleiterenebene Geotechnik in strategischer Sicht und auf Fachbearbeiterebene hinsichtlich konkreter Aufgaben zusammen. Begleitet wird dies durch die Landesbergämter Sachsen und Brandenburg sowie die Landesdirektion Sachsen und die zuständigen Behörden Brandenburgs durch Vorgabe und Kontrolle von Nebenbestimmungen (z. B. Jahresberichte usw.). Die Bearbeitungen werden weiterhin durch anerkannte Sachverständige für Geotechnik und Montanhydrologie begleitet. Beide Firmen haben dazu innerbetriebliche Richtlinien, die sich an der Richtlinie Geotechnik und der Einstufung von Hydrogeologischen Berechnungen in Einschätzungen und Nachweise orientieren.

Beide Unternehmen fungieren entweder allein als Auftraggeber und auf eigene Rechnung bzw. gemeinsam oder durch Refinanzierung eines Dritten mit berechtigtem Interesse. Es ist festgelegt, dass jeweils der andere Partner die neuen Inhalte des Modells und die Modellergebnisse verwenden darf. Fachlich beteiligte Dritte lassen auf Grund von Datenaustauschvereinbarungen eigene Bearbeitungen auf eigene Rechnung durchführen, haben sich aber zu verpflichten, die neuen Inhalte und Ergebnisse kostenfrei im Modell zu belassen.

D6.2 VARIANTEN ZUM BETRIEB GRM LAUSITZ UND AKTUALISIERUNG ETC.

Unter Berücksichtigung der Erfahrungen aus den Regionalmodellen und zum Hydrogeologischen Großraummodell Leipzig-Süd im Mitteldeutschen Revier sind folgende Varianten des Betriebs eines GRM Lausitz vorstellbar:

Variante A

Gesamtauftraggeber ist die LMBV und refinanziert sich über die LEAG, auf Basis eines bilateralen Vertrages, der die einzelnen Anteile regelt. Die Länder Sachsen und Brandenburg wirken beratend mit. Eine mögliche Mitfinanzierung ist zu verhandeln.

Variante B

Gesamtauftraggeber ist die LEAG und refinanziert sich über die LMBV, auf Basis eines bilateralen Vertrages, der die einzelnen Anteile regelt. Die Länder Sachsen und Brandenburg wirken beratend mit. Eine mögliche Mitfinanzierung ist zu verhandeln.

Variante C

Gesamtauftraggeber sind gleichlautend die LMBV und die LEAG auf Basis eines bilateralen Vertrages, der die einzelnen Anteile regelt. Die Länder Sachsen und Brandenburg wirken beratend mit. Eine Mitfinanzierung ist zu verhandeln.

Variante D

Gesamtauftraggeber sind die Länder Sachsen und Brandenburg auf Basis eines Ländervertrages, der die einzelnen Anteile regelt. Die Finanzierung erfolgt aus den Landeshaushalten und/oder durch Refinanzierung über die LMBV und die LEAG auf Basis öffentlicher Verträge.

Die Partner, gemäß gewählter Variante, sind Eigner des Modells und bestimmen ein Modelliererteam, welches geschäftsbesorgend und auf Rechnung für sie tätig wird. Dies kann sowohl für den Aufbau und die Erstberechnung zum einen sowie für die Folgebearbeitungen zum anderen das gleiche Unternehmen oder ein Folgeunternehmen sein.

Unabhängig von der Variante werden folgende Bearbeitungsstufen für hydrogeologische Berechnungen unterschieden:

Haupt-Update:	ca. alle 6 Jahre mit grundsätzlicher flächenhafter Aktualisierung
Neben-Update:	ca. alle 2 Jahre - vorrangig Randbedingungenanpassungen in Schwerpunktgebieten
Jahresberichte:	jährlich mit Modellvergleich gemessene zu berechnete Wasserstände, Ausweisen der Güte der Kalibrierung
Variantenrechnung:	zur Entscheidungsfindung bei Bedarf
Sonderaufgaben:	je nach Aufgabenstellung (z. B. detaillierte Güteprognosen)

Es wird immer eine gültige Modellversion für einen Zeitraum festgeschrieben. Dies ist dann z. B. GRM-L2020, als Grundlage aller weiteren Modellierungsarbeiten. Eine Aktualisierung auf die neue Modell-Version wird zwischen den Auftraggebern und dem Modellierer gemeinsam, nach Erörterung festgelegt.

Separate Auskopplungen von digitalen Daten aus dem Modell für Dritte sind vertraglich, unter Wahrung der Haftung und des Datenschutzes, zu regeln.

In den benannten Varianten A bis C bekommen die Landesbehörden auf Anforderung digitale Auskopplungen in Form von GIS-Projekten, deren Inhalte abgestimmt wurden, zu Prüfungszwecken zur Verfügung gestellt. Soll auch turnusmäßig die Übergabe lauffähiger Modelldaten erfolgen ist dies vertraglich, nach den bereits genannten Grundsätzen, zu regeln. Dies beinhaltet nicht die Übergabe des verwendeten Modellierungswerkzeuges als Software.

Im Zuge des Projektes wurde die Möglichkeit der Nutzung des Hochleistungsrechners der TU Dresden (ZIH), als Alternative des Vorhaltens eines projektgebundenen Modellservers vor-geprüft. Hierzu ist Folgendes zusammenzufassen:

Das ZIH betreibt aktuell einen Hochleistungsrechner-/Speicherkomplex mit ca. 47.000 CPU-Kernen (HRSK-II, HPC-Plattform) und insgesamt 1,5 PetaFLOPS Rechenleistung, der auch von TU-Externen verwendet werden kann. Weiterhin bietet das ZIH den Anwendern der HPC-Plattform auch diverse IT-Dienstleistungen an, darunter auch das Bereitstellen von Gruppen- und Projektlaufwerken mit entsprechendem Speicherplatz. Gleichzeitig erfolgt auch ein Backupdienst der darauf abgelegten Daten. Die Anbindung des ZIH bzw. der HPC-Plattform an das Internet erfolgt über das Deutsche Forschungsnetz und ist mit einer Anschlusskapazität von 2 x 100 GBit/s sehr leistungsfähig. Unter diesen Voraussetzungen kann das Datenhosting grundsätzlich durch das ZIH erfolgen. Anwenderseitig kann durch den Einsatz von synchron geschalteten Glasfaserleitungen ebenfalls eine leistungsfähige Datenanbindung sichergestellt werden, um die Modelleingangs- und Ergebnisdaten effizient bearbeiten zu können.

Es lässt sich also zusammenfassen, dass diese Variante des Hostings des Rechenmodells gangbar ist. Dies zumal vom Auftraggeber (LfULG) auf bestehende Nutzungsvereinbarung mit der TUDD, dem ZIH, verwiesen wurde. Die genauen Kosten für dieses Hosting, incl. Datenbackup etc. sind zum jetzigen Zeitpunkt nicht abschätzbar, da dazu eine genaue Aufgabenstellung für das GRM Lausitz vorliegen muss.

D7 AUFWANDS- UND KOSTENABSCHÄTZUNG FÜR AUFBAU UND BETRIEB GRM LAUSITZ

D7.1 METHODIK DER AUFWANDS- UND KOSTENABSCHÄTZUNG

Die Kostenabschätzung erfolgt hier, indem zuerst die Teilarbeitsblöcke für die generell notwendigen Arbeiten abgeleitet werden. Hierbei wird eine Untersetzung dieser gebildeten Teilarbeitsblöcke durch wesentliche Arbeitspunkte vorgenommen.

Für diese Arbeitspunkte wird dann der Arbeitsaufwand in PersonenMonaten (PM) eingeschätzt. Nachfolgend wird eine Mischkalkulation (Projektleiter/Ingenieur/Techniker) der Personalkosten von netto 70 €/h = Netto 11.200 €/Monat, zuzüglich 5% Nebenkosten (Rechentechnik, Verbrauchsmaterial, Reisekosten etc.) verwendet.

Aus den summierten Personenmonaten ergibt sich somit dann die abgeschätzte Gesamtsumme zum Aufbau und Erstsimulation mit dem GRM Lausitz. Die betrachteten Blöcke und ihre Beziehung zueinander sind schematisch in Abb. D7-1 dargestellt.

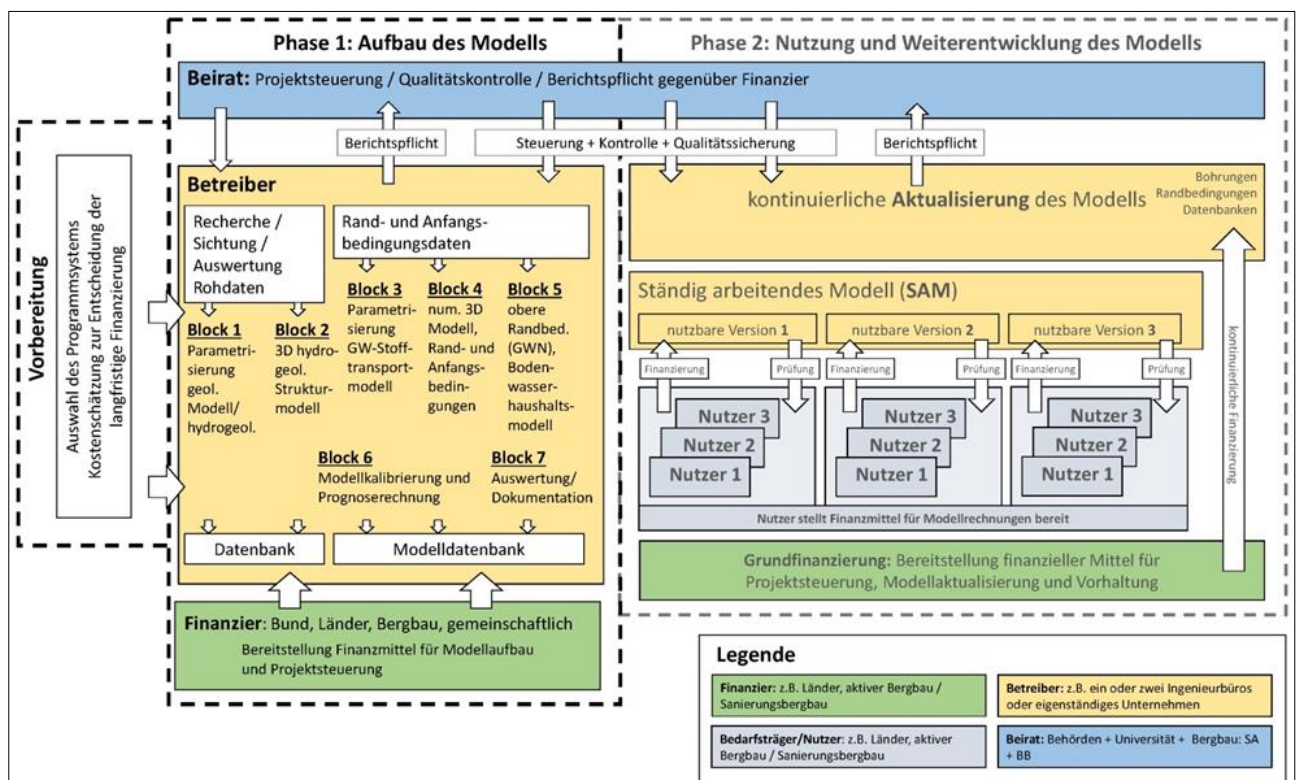


Abbildung D7-1: Phasen des Modellaufbaus und -betriebs; Kostenblöcke und Betreiberstruktur als Grundlage für die Kostenkalkulation

Im nachfolgenden Kap. D7.2 werden also jetzt die einzelnen Arbeitsblöcke zur Kostenabschätzung hergeleitet. In Kap. D7.3 findet sich dann die gesamte Kostenabschätzung, sowohl für den Aufbau und die Erstmodellierung mit dem GRML, als auch die Abschätzung der Kosten für den weiteren, permanenten Betrieb des GRM Lausitz.

D7.2 AUFBAU GRM LAUSITZ - ABGELEITETE TEILARBEITSBLÖCKE ZUR KOSTENABSCHÄTZUNG

In Zusammenführung aller getroffenen Aussagen ergeben sich folgende Teilarbeitsblöcke. Es werden dabei auch die jeweils notwendigen Arbeiten ausgeführt:

Block 1: Recherche/Datenaufbereitung zum geologischen/hydrogeologischen 3D-Modell

- Aufbereitung geologischer Daten aus den verschiedenen Datenpools (Bohrungsauswahl, -stratifizierung u. a .m.) - Überführung in die Projektdatenbank,
- Berücksichtigung der für das sächsische Gebiet bereits vorliegenden „geologisch durchgearbeiteten Bohrungen“ und darauf basierende 3D-Modellkörper des LfULG Sachsens,
- Auf Basis der Auswertung dieser geologischen Daten - abschließende Festlegung der zu verwendenden hydrogeologischen Gliederung des Modells, mit Hauptaugenmerk auf der noch festzulegenden Teilgliederung im Quartär.
- Diese Festlegung der „hydrogeologischen Modellgliederung“ ist Grundlage für die notwendigen Umschlüsselungen, die für die Bohrungsdaten der einzelnen Datenpools eventuell erfolgen müssen, um sie gemeinsam im Sinne eines abgestimmten Modellaufbaus für das Gesamtmodellgebiet nutzen zu können,
- Zusammenführung und Übernahme der Daten zur hydrogeologischen Modell-Parameterisierung (mit Überprüfung), basierend auf den Datenpools von LfULG, LEAG (aufgearbeiteter Stand und digital vorliegend). Weitere Datenpools von LBGR und LMBV – Sichtung, digitale Datenerfassung, weiterhin Teilübernahme aus Regionalmodellen.
- Die Testmodellierung ergab, dass in Bezug auf die hydrogeologische Parameterisierung ein größerer Aufwand in Bezug auf Aufbereitung von analogen oder nicht sofort digital verwendbarer Daten zu sehen ist.
- Gesonderte Bearbeitung der „inneren Sonderbereiche“ (Kippen, Rinnen, glazigene Störungsbereiche).
- Konkrete Festlegung der äußeren Randbedingungen (nach klarer Festlegung des Aussagebereichs durch den zukünftigen Auftraggeber des GRM Lausitz). Hierbei Überprüfung der potentiellen Daten für diese äußeren Randbedingungen (z. B. konkrete Bewertung der Messstellen für die Randdefinition, in Bezug auf Wasserstandsverlauf - incl. Repräsentanz, Verfilterung etc.).

Block 2: Aufbau des hydrogeologischen 3D-Strukturmodells

- Überführung des hydrogeologischen 3D-Strukturmodells in das konkrete numerische Modell in der benutzten Modellierungssoftware.
- Dazu abgleichende Verschneidung der überprüften, überarbeiteten hydrogeol. Daten aus den einzelnen Datenpools in Block 1, zur Erstellung des eigentlichen Modells. Dies ist als iterativer Prozess zu verstehen.
- Hydrogeologische Parameterisierung - Verschneidung der in Block 1 in der Projektdatenbank überführten Daten, zur Parameterisierung zu einem konsistenten, abgestimmten Parametermodell für die einzelnen Modellschichten.

Block 3: Parametrisierung des (GW-)Transportmodells

- Entscheidend ist es den hydrogeochemischen Grund-Istzustand, räumlich differenziert zu erfassen. Wie im Projekt „Sulfattransportprognose im Südraum Leipzig“ (HOTH et al. 2014) vom Projektteam erfolgreich praktiziert, sind diesbezüglich vor allem zwei Hauptkomponenten zu bearbeiten:
 - A) die differenzierte Charakterisierung der Grundwasserbeschaffenheiten,
 - B) die flächendifferenzierte Kippenkörperinventarisierung durch Vorfeldbilanzierung (grundlegende Geochemie der verkippten Materialien),
- Aus diesen beiden Punkten heraus werden abgestimmte Datensätze zur Kennzeichnung dieser inneren wesentlichen Stofftransport-Randbedingung sowie der Stofftransport-Anfangsbedingungen in das Modell überführt.

Block 4: Rand- und Anfangsbedingungen

- Konkrete Aufbau der äußeren Strömungs-Randbedingungen im Modell,
- Einbinden der umfangreichen inneren Strömungs-Randbedingungen, in Abhängigkeit vom Überprüfungsergebnis auch eine (Teil)Übernahme aus den Regionalmodellen,
- Konkrete Festlegung der Stofftransport-RB für den äußeren Rand,
- Festlegung inneren Stofftransport-Randbedingung (Bedeutung der Kippen als Quellterme), in Verbindung mit den Arbeiten in Block 3
- Gleichzeitig systematische Analyse der Grundwasserbeschaffenheiten (wie oben).

Block 5: Bodenwasserhaushaltsmodell - als differenzierte obere GW-Randbedingung

- Überführung der notwendigen Datenpools in das BWHM,
- Aufbau einer Grundvariante – mit vereinfachter Bereitstellung der flächendifferenzierten Zeitfunktion der Grundwasserneubildung für die nicht gekoppelten Bereiche,
- Nachfolgender Aufbau des vollumfänglich gekoppelten BWHM.

Block 6: Testmodellierungen und abschließende Erstmodellierung mit dem GRM Lausitz

- Schrittweise Testmodellierungen – mit iterativer Fehlerbehebung und somit vermutlich auch Rückkopplung zu den in den Blöcken 2-5 eingespeisten Daten,
- Abschließende Erstmodellierung – als Abschluss der Aufbauphase des GRM Lausitz.

Zu den benannten sechs fachlichen Teilarbeitsblöcken kommt ein weiterer siebenter Block hinzu, der die für ein so umfangreiches Projekt notwendige Gesamtauswertung, Projektkoordination, inklusive Kommunikation mit dem Projektbeirat umfasst. Dieser beinhaltet auch die umfangreiche Berichtslegung und Dokumentation während der Bearbeitung und zum Abschluss eines solchen GRML-Aufbaus.

D7.3 ZUSAMMENFÜHRUNG KOSTENABSCHÄTZUNG – AUFBAU- UND BETRIEBSPHASE

In nachfolgender Tab. D7-1 ist die generelle Kostenabschätzung für den Aufbau und die Erstmodellierung des GRML zusammengefasst. Hierbei sind die detailliert untersetzten Arbeitsaufgaben in Arbeitspakete überführt. Die in Kap. D7.2 benannten Teilarbeitsblöcke finden sich also in dieser Tabelle als Blöcke 1 bis 7 wieder.

Die Aufwands- und Kostenabschätzung wurde auf der Grundlage der in diesem Projekt dargestellten methodischen Vorgehensweise und der diesbezüglich recherchierten Datenlage durchgeführt. Es sind dabei Erfahrungswerte der Autoren hinsichtlich des Aufwandes aus der Bearbeitung von anderen hydrogeologischen Modellen eingeflossen.

Aus den Erfahrungen bei der Testmodellierung ergab sich ein etwas erhöhter Arbeitsaufwand gegenüber der Aufwands- und Kostenkalkulation im Zwischenbericht (31.10. 2018). Für den Aufbau und die Erstmodellierung des GRM Lausitz ergibt sich somit zusammenfassend ein abgeschätzter Nettobetrag von rund 2,98 Mio. Euro (Details siehe Tab. D7-1). Dabei versteht sich diese Kostenbilanzierung ohne die detaillierte Einbeziehung der in Kap. B1.1.2 ausgewiesenen Sonderbereiche am Modellrand (Oberspreewald und Muskauer Faltenbogen) sowie in Bezug auf eine nicht-reaktive Transportmodellierung bzgl. Sulfat.

Tabelle D7-1: Aufwands- und Kostenkalkulation für den Aufbau eines GRM Lausitz (Nettokosten) – aktualisiert nach Testmodellierung

Arbeitsblöcke zur Abschätzung der Kosten		absoluter Arbeitsaufwand [PM]	% Anteil an Gesamtaufbau	Kosten (incl. 5% NK)
Block 1 - Endrecherche/ Datenaufbereitung - geol. Modell/ hydrogeol. Parameterisierung			23.7	705,600.00 €
AP1.1	Übernahme/ Kontrolle geol. Daten aus aufgearbeiteten Datenspeichern (LfULG, LEAG)	7		
AP1.2	Übernahme/ Kontrolle geol. Daten zur Verdichtung unaufbereitete Datenspeicher (LMBV, LBGR)	13		
AP1.3	Überprüfung/ Notwendigkeit Teilübernahme Daten aus qualifizierten Regionalmodellen	6		
AP1.4	Bearbeitung für "innere Sonderbereiche" (Kippen, Rinnen, glazigene Störungsbereiche)	6		
AP1.5	Abschließende Festlegung Hydrogeol. Gliederung Modell	4		
AP1.6	Überprüfung Daten für äußere Randbedingungen - Festlegung äußerer Rand	4		
AP1.7	Übernahme/ Kontrolle hydrogeol. Parameter aus aufgearbeiteten Datenspeichern (LfULG, LEAG)	6		
AP1.8	Hydrogeol. Parameter unaufbereitete Datenspeichern zur Verdichtung - Digitalerfassung	14		
Block 2 - Konkreter Aufbau des 3D hydrogeol. Strukturmodells			22.5	670,320.00 €
AP2.1	Umschlüsselung einzubeziehende Bhr. in Bezug auf hydrogeol. Gliederung aus AP 1.5	18		
AP2.2	Zusammenführung umgeschlüsselter Bhr. aus AP 2.1 zum eigentlichen Modell	14		
AP2.3	Überprüfung/ Abgleich erstelltes Modell gegenüber qualifizierten Regionalmodellen	9		
AP2.4	Hydrogeologische Parameterisierung - Konsistente Verschneidung der Daten aus AP 1.7/ 1.8	16		
Block 3 - Parameterisierung des GW-Stofftransportmodells			11.5	341,040.00 €
AP3.1	Räumlich differenzierte Kippenkörpercharakterisierung durch Vorfeldbilanzierung (Inventarisierung)	10		
AP3.2	Zusammenführung Grundwasserbeschaffenheiten - Differenzierte Charakterisierung	8		
AP3.3	Ausweisung Verwitterungseinfluss Absenkungstrichter - unverritzte GWL	8		
AP3.4	Überlegungen zur Abbildung einfacher Wechselwirkungen transportierter Spezies	3		
Block 4 - Überführung in numerisches Modell - Teilmodelle Hydrogeologie/ Rand- und Anfangsbedingungen			11.9	352,800.00 €
AP4.1	Überführung hydrogeologisches Modell	12		
AP4.2	Überführung hydrogeologisches Parameter-Modell	12		
AP4.3	Überführung Rand- und Anfangsbedingungen	6		
Block 5 - Ermittlung obere Randbedingung = GWN - Bodenwasserhaushaltsmodell			8.3	246,960.00 €
AP5.1	Zusammenführung Daten aus Landes-Datenpools	8		
AP5.2	Konzeptionelles Modell und Datenbelegung für Kippenbereiche	5		
AP5.3	Umsetzung GWN als oberer Rand für GW-Modell	8		
Block 6 - Modellkalibrierung und Prognoserechnung GRM			15.0	446,880.00 €
AP6.1	Kalibrierung Strömungsmodell	10		
AP6.2	Iterative Fehlerbehebung - auch mit Rückkopplung zu Block 2 bis 5	8		
AP6.3	Nachweis Modellgüte/ Prognoserechnung GW-Dynamik	10		
AP6.4	Prognoserechnung Transportmodell	10		
Block 7 - Gesamtauswertung/ Projektkoordination/ Berichtslegung - Dokumentation			7.1	211,680.00 €
AP7.1	Gesamtauswertung - Weiteres Vorgehen für Routinebetrieb GRM	5		
AP7.2	Projektkoordination - Kommunikation mit Projektbeirat	6		
AP7.3	Abschlussbericht / Zwischenberichte (incl. umfangreicher Dokumentation)	7		
Summen		253	100	2,975,280.00 €

Für die Abschätzung der nachfolgenden Betriebskosten des Großraummodells, mit notwendigen Aktualisierungen, kann auf die Erfahrungen in Bezug auf die beiden Hydrogeologischen Großraummodelle Leipzig-Süd und Leipzig-Nord zurückgegriffen werden. Diesbezüglich sind in Tab. D7-2 Größenordnungen der Kosten, in Abhängigkeit der verschiedenen Arbeiten (Haupt-Update, Jahresberichte) etc. aufgeführt (vgl. auch Kap. D6.2). Bilanziert man die Kosten genauer mit der in Kap. D7.1 benannten Mischkalkulation (11.200 €/Monat + 5 % NK) kommt man zu ähnlichen, etwas spezifischeren Werten. Diese beiden jeweiligen Werte sind in Tab. D7.2 aufgeführt.

Tabelle D7-2: Abgeschätzte und bilanzierte Nettokosten für verschiedene Aktualisierungsaufgaben im nachfolgenden Betrieb des GRM Lausitz

Position	Zeitdauer (Bearbeiter)	Erfahrungswert/bilanzierte Kosten
Haupt-Update	12 Monate (1,5 Pers.)	200 T€ / 212 T€
Neben-Update	3 Monate (1,5 Pers.)	50 T€ / 53 T€
Jahresberichte	3 Monate (1,25 Pers.)	40 T€ / 44 T€
Variantenrechnung	2 Monate (1 Pers.)	25 T€ / 24 T€
Sonderaufgaben	nur auf Basis einer Aufgabenstellung kalkulierbar	

Weiterhin sind beim Betrieb des GRM Lausitz die folgenden weiteren Kostenpositionen zu berücksichtigen (Angaben netto):

- Hardwarekosten für einen leistungsfähigen Modellserver (alle 5 Jahre) -- ca. 20 T€
- Bereitstellungskosten für einen Hostanbieter für das Datenhosting -- ca. 1.000 €/a
- Kosten bei den Unternehmen LEAG und LMBV für Mitwirkungsleistungen (Option)
- Kosten von Landesbehörden für Datenbereitstellungen (z. B. DWD) (Option)
- Kosten von Rechenzentren z. B. der TU Dresden (z. Zt. nicht kalkulierbar)

E KURZZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT

Für die Konzepterstellung zum Aufbau eines GRM Lausitz wurde zunächst die Datenlage geprüft. Dazu erfolgten Recherchen unter anderem nach geologischen, hydrogeologischen und (hydro)geochemischen Daten bei den Bergbauunternehmen LMBV und LEAG sowie bei den Behörden in Sachsen (LfULG, LDS) und Brandenburg (LBGR, LfU). Es konnte dabei festgestellt und nachgewiesen werden, dass alle Grundvoraussetzungen für den Aufbau eines GRM Lausitz vorhanden sind. Dies gilt insbesondere in Bezug auf Daten zum geologisch-hydrogeologischen 3D-Strukturmodell, zum Monitoring, zur Grundwasserbeschaffenheit, aber auch für Spezialdaten, wie die geochemische Beschaffenheit der Abraummateriale zur Inventarisierung der Kippenkörper, u. a. m. Im Vergleich zu anderen Bergbaugebieten in Deutschland, aber vor allem auch in der EU ist die Datenlage als sehr gut anzusehen.

Die Datengrundlagen wurden umfangreich bewertet und notwendige Elemente des Vorgehens konzipiert. Es ergaben sich dabei folgende wesentlichen Aussagen:

- Die Berandung des GRM ist - nach abschließender Festlegung des Aussagegebietes - an langfristig gemessene Grundwassermessstellen oder geologisch bzw. hydrologisch begründete stabile Ränder, die nicht als bergbaulich beeinflusst gelten, anzuhängen. Für die am Rand liegenden hydraulisch, (hydro-)geologisch, hydrochemisch und hydrologisch äußerst komplexen Sondergebiete „Oberer Spreewald“ und „Muskauer Faltenbogen“ wird vorgeschlagen, diese bei der Festlegung des äußeren Modellrandes einzubeziehen, jedoch im ersten Schritt nicht mit zu modellieren. Diese Gebiete werden also „inaktiv“ gesetzt, können aber bei Bedarf später parametrisiert und somit einbezogen/modelliert werden. Die potentielle Modelleinbeziehung dieser Teilbereiche der Sondergebiete ist nicht in die Kostenkalkulation einbezogen worden.
- Das hydrogeologische 3D-Strukturmodell, als wesentliche Basis für das GRM Lausitz, ist zielführend aus den zugehörigen - in ersten Zügen schon abgestimmten - geologischen Datenbeständen von LfULG Sachsen und LEAG (umfasst auch LMBV-Teilbereiche) aufzubauen. Neben dem geologisch-stratigraphischen Bohrungsabgleich im gesamten GRML-Gebiet zur Erzeugung eines konsistenten Projektbohrbestandes muss für einzelne Bereiche nachfolgend eine Verdichtung an Hand von zum Teil nur analog vorliegender Bohrungsdaten von LBGR und LMBV erfolgen.
- Wesentliche Daten zur Inventarisierung der Kippenkörper - als bedeutende Stoffmobilisierungsquellen - stammen, in Bezug auf die Abraumbeschaffenheiten, aus den 1960er bis 1980er Jahren. Diese Primärdaten wurden durch frühere Arbeiten des Projektteams (TU BAF, GFI) bereits elektronisch erfasst und liegen teilaufbereitet vor.
- Die hydrochemischen Daten zur Beschaffenheitscharakterisierung liegen, für den zentralen Hauptaussagebereich des GRM Lausitz, umfangreich durch die Untersuchungen/Analysenprogramme von LMBV und LEAG vor. In den Randbereichen wird dies ersetzt durch die Landesmessnetze von Sachsen und Brandenburg.
- Durch Abbildung der Grundwasserneubildung mittels Bodenwasserhaushaltsmodell, als obere Randbedingung für das Grundwassermodell, ist auch die Berücksichtigung von Extremsituationen möglich. Der wesentliche Datenbestand dafür liegt durch die Landesmodelle von Brandenburg und Sachsen vor. Für die bergbaulich geprägten, überbaggerten Bereiche sind die spezifischen Daten (Kippsubstratkartierung und Rekultivie-

rungspläne) einzubeziehen. In Sachsen liegen diese umfassend digital aufgearbeitet vor. Für Brandenburg ist auf Daten von LMBV und LEAG zurückzugreifen.

Trotz der sehr guten Datenlage muss bewusst bleiben, dass eine umfangreiche Bearbeitung notwendig ist, um die verschiedenen Datenbestände zum Modellaufbau aufeinander abzustimmen. Diesen konsistenten Datenpool über das gesamte Niederlausitzer Braunkohlenrevier zu erzeugen, ist für den GRML-Aufbau zwingend notwendig. Hierbei bedarf es für die verschiedenen Datenarten unterschiedlich intensiver Anpassungs- und Abstimmungsarbeiten.

Als Fazit zum Aufbau eines GRM Lausitz ist Folgendes festzuhalten:

- Die elf hydrogeologischen Regionalmodelle im aktiven und sanierenden Braunkohlenbergbau der sächsisch-brandenburgischen Lausitz besitzen weiterhin Bedeutung für bergbauspezifische geohydraulische Fragestellungen.
- Zu einer revierübergreifenden Strömungs- und Stofftransportmodellierung, die auf einer gekoppelten Grund-/Oberflächenwasser-Strömungsmodellierung beruhen muss, sind die Regionalmodelle nicht in der Lage. Auf Grund ihres nicht zueinander konsistenten hydrogeologischen/hydraulischen Aufbaus ist ein GRM Lausitz auch nicht durch Zusammenführen dieser Regionalmodelle möglich.
- Das GRM Lausitz muss neu, aus den recherchierten und umfangreich zur Verfügung stehenden Daten erstellt werden. Eine Teilübernahme von inneren Randbedingungen und Parametrisierungen aus den qualifizierten Regionalmodellen wäre zielführend und ist zu prüfen.

Ein positiver Rückkopplungseffekt eines GRML-Aufbaus hin zu den Regionalmodellen ist, dass ein GRM begründete, konsistente Randbedingungsansagen für alle regionalen Teilmodelle liefern würde. Dies bezieht sich auf die Ränder, die derzeit in den Regionalmodellen durch RB 2. Art ($Q=0$), „No-Flow“-Randbedingungen, definiert sind. Damit würden die Regionalmodelle für diese Randbereiche deutlich besser aufeinander abgestimmt sein.

Die geologische und hydrogeologische Datenlage zum Aufbau eines solchen GRM Lausitz ist als sehr gut zu bezeichnen. Dennoch sind eine Aufarbeitung und Abstimmung der benutzten Daten untereinander notwendig. Die Daten der verschiedenen Datenpools (LfULG, LEAG, LMBV und LBGR) sind in einen konsistenten, für den GRM-Aufbau nutzbaren Datenbestand zu überführen.

Die Testmodellierung hat insgesamt aufgezeigt dass die konzeptionelle Vorgehensweise zur GRML-Erstellung umsetzbar ist. Präzisierungen ergaben sich diesbezüglich vor allem in Bezug auf die Abbildung/Handhabung innerer Sonderbereiche und zum anderen bezüglich auszuweisender Anforderungen an die zur Großraummodellierung einzusetzende Software für die Grundwassermodellierung. Dies gilt besonders für die konkrete Handhabung von Randbedingungen und wesentlichen hydraulischen Körpern und weiterhin für die ebenfalls benannten inneren Sonderbereiche (Rinnen, Kippen, glazigene Störungsbereiche). Diesbezüglich bedarf es bei einer Ausschreibung des GRML-Aufbaus unbedingt einer fachspezifisch, funktionalen Ausschreibung. Weitere sich aus der Testmodellierung ergebende Anforderungen wie Code-Zugang, Datenhaltung und langjährige Erfahrung mit bergbaugesprägten Großraummodellen sind in Kap. D3 formuliert.

Die Datenaufbereitung, zusammen mit allen Schritten bis zur eigentlichen Erstellung des 3D-numerischen Modells, stellen den wesentlichen Teil des Aufwandes und somit der Kosten beim GRM-Aufbau dar. Die Kosten werden für einen Modellaufbau innerhalb von drei Jahren (inklusive der Erstmodellierung), auf der Basis der Bewertung der Datenlage und davon abgeleiteter Arbeitsaufwände, für das GRM Lausitz auf rund 2,98 Mio. Euro netto abgeschätzt (siehe dazu die detaillierte Aufwands- und Kostenabschätzung: Tab. D7-1).

Die im Nachgang zum Aufbau des GRM Lausitz anfallenden Betriebskosten sind natürlich von den zu bearbeitenden Aufgaben abhängig. Sie wurden in generalisierter Art ebenfalls in Kap. D7.3 abgeschätzt und sind dort in Tab. D7.2 aufgeführt.

LITERATURVERZEICHNIS

- APPELO, T. & ROLLE, M. (2010): PHT3D: A Reactive Multicomponent Transport Model for Saturated Porous Media. - Ground water. 48. 627-32. 10.1111/j.1745-6584.2010. 00732.x.
- ROLLE, M. (2010): PHT3D: A Reactive Multicomponent Transport Model for Saturated Porous Media. Ground water. 48. 627-32. 10.1111/j.1745-6584.2010.00732.x.
- AUTORENKOLLEKTIV (2010): Die geologische Entwicklung der Lausitz. - Vattenfall Europe Mining AG (Hrsg.): 193 S.; Cottbus.
- BECKER, A., KLÖCKING, B., LAHMER, W., PFÜTZNER, B. (2002): The Hydrological Modelling System ArcEGMO. - In: Mathematical Models of Large Watershed Hydrology (Eds.: SINGH, V.P., FREVERT, D.K.). Water Resources Publications, Littleton/Colorado, 321-384. ISBN 1-887201-34.
- BETHWELL, C. (2008): Vorgehensweise zur Ermittlung der Versiegelung für das Land Brandenburg. - Praktikumsbericht LUA Brandenburg.
- BERNHOFER, C.; FRANKE, J., KURBJUHN, C., HUPE, F. (2009): Ableitung von Rasterdaten aus gemessenen und projizierten Klimazeitreihen für den Freistaat Sachsen. - unveröff. Abschlussbericht zum Forschungs- und Entwicklungsvorhaben des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (AZ: 24-8802.26/22/1),95 S.
- CHIANG, W. H. (2005): D-Groundwater Modeling with PMWIN - A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Transport Processes. - 2nd ed., Springer NY, Heidelberg, London.
- DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. - Merkblätter zur Wasserwirtschaft 238/1996.
- DWA-M 504-1 (2018): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen - Teil 1: Grundlagen, experimentelle Bestimmung der Landverdunstung, Gewässerverdunstung - Juli 2018.
- EULITZ, K., KALTOFEN, M. (2015): Studie zur Prüfung der Machbarkeit eines geohydraulischen Großraummodells Lausitz. - DHI-Wasy GmbH Berlin, i. A. LMBV mbH Senftenberg, 90 S., 32 Abb., 24 Tab., 2 Anh., Berlin.
- GLUGLA, G., 1969. Berechnungsverfahren zur Ermittlung des aktuellen Wassergehaltes und Gravitationswasserabflusses im Boden. - Albrecht-Thaer-Archiv, 13, 371-376.
- GLÖCKNER, C., RÜSTER, A. (2010): Entwicklung einer Strategie zur Parametrisierung hydrologischer Prozesse in urbanen Räumen auf unterschiedlichen Skalenbereichen. - Institut für Hydrologie und Meteorologie, TU Dresden, Diplomarbeit.
- GRAUPNER, B. (2008): Beitrag zur Prognose der Grundwasserbeschaffenheit im Lausitzer Bergbaurevier auf der Grundlage eines großräumigen prozessorientierten Geoinformationssysteme. - Proceedings DGFZ e.V., Heft 35, Dresden.

- HARBAUGH, A.W. (2005): MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular ground-water model-the Ground-Water Flow Process. - U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16.
- HOTH, N. (2004): Modellgestützte Untersuchungen zur Grundwassergüteentwicklung in Braunkohleabraumkippen und deren Abstrom unter Berücksichtigung natürlicher Rückhalt- und Abbauprozesse. - Schriftenreihe für Geowissenschaften, 15: 1-214. Berlin.
- HOTH, N., WALTHER, A., SIMON, A., USSATH, M., WEBER, KOCH, C., BILEK, F., GEIBLER, M., RASCHER, J., BÜTTCHER, H., CERANSKI, H., HEILAND, K., MANSEL, H. (2014): Sulfatprognose für die bergbaubeeinflussten Bereiche der Grundwasserkörper SAL GW 059 und SAL GW 051 im Südraum Leipzig. - Studie i. A. LMBV/MIBRAG, 1-166, Freiberg.
- KALTOFEN, M. (2017): Erstellung des Sulfatprognosemodells Spree. - Abschlussbericht, DHI-WASY GmbH, i. A. Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg.
- KINZELBACH, W., RAUSCH, R. (1995): Grundwassermodellierung. Eine Einführung mit Übungen. - Gebrüder Borntraeger, Berlin, Stuttgart.
- KOITZSCH, R. (1977): Schätzung der Bodenfeuchte aus meteorologischen Daten, Boden- und Pflanzenparametern mit einem Mehrschichtenmodell. - Zeitschrift für Meteorologie, 27/5, 302-306.
- KOLDITZ, O., GÖRKE, U.-J., SHAO, H., WANG, W., BAUER, S. (2016): Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical Processes in Fractured Porous Media: Modelling and Benchmarking – Benchmarking Initiatives. - Springer Verlag.
- KOWAL, L. (2019): Weiterentwicklung und Anwendung des Modellcodes DARIS zur Berechnung des Pyritumsatzes in stratifizierten Sedimenten unter Beachtung von Konkurrenzreaktionen wie der Oxidation organischen Materials. – Masterarbeit, TU Dresden.
- KÜHNER, R. (2010): Quartär. - In: AUTORENKOLLEKTIV (2010): Die geologische Entwicklung der Lausitz. - Vattenfall Europe Mining AG (Hrsg.): 95-134; Cottbus.
- KÜHNER, R. (2017): Atlas der pleistozänen Störungen im Niederlausitzer Braunkohlenrevier. - Lausitz Energie Bergbau AG [Hrsg.], 59 S., Cottbus.
- KUPETZ, M., SCHUBERT, G., SEIFERT, A., WOLF, L. (1989): Quartärbasis, pleistozäne Rinnen und Beispiele glazitektonischer Lagerungsstörungen im Niederlausitzer Braunkohlengebiet. - Geoprofil, 1: 2-17, Freiberg.
- KUPETZ, A. & KUPETZ, M. (Hrsg.) (2009): Wanderungen in die Erdgeschichte (24). Der Muskauer Faltenbogen. - Verlag Dr. Friedrich Pfeil: 224 S.; München.
- LANGEVIN, C.D., HUGHES, J.D., BANTA, E.R., NISWONGER, R.G., PANDAY, SORAB, AND PROVOST, A.M. (2017): Documentation for the MODFLOW 6 Groundwater Flow Model - U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A55, 197 p., <https://doi.org/10.3133/tm6A55>.
- LAWA (1993): Richtlinie für die Gebietsbezeichnung und Verschlüsselung der Fließgewässer. - LAWA-Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser.
- LKT50 (1987): Lithofazieskarten Tertiär i. M. 1:50.000. - in GEIBLER, E., SUHR, P., STANDKE, G., ALEXOWSKY, W., SCHUBERT, G., WOLF, L., KUPETZ, M., RASCHER, J., RUDOLPH, G., REIN-

- HARDT, P. (1987): Lagerstättengeologische Forschung Braunkohle: Geologisches Modell der Lausitz. – unveröff. Ber.: 256 S., VEB GFE Freiberg.
- LKT50 (2016): Lithofazieskarten Tertiär i. M. 1.50.000. - in: ESCHER, D., GERSCHEL, H., GEIBLER, M., HARTMANN, A., RASCHER, J., RASCHER, M., RICHTER, L., WITTEW, S., PFEIFFER, N., BLUMENSTENGEL, H. (2016): Geologische Erarbeitung digitaler Horizontkarten Tertiär Lausitz 1 : 50 000. - **GEO**montan GmbH, i. A. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Abteilung Geologie (Hrsg.); Freiberg.
- LfULG (2004): Hydrogeologische Spezialkarte 1:50.000. - Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- LfULG (2007): BSA - Bodenatlas des Freistaates Sachsen. - Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- LfULG (2009): Regionalisierte Klimadaten für ganz Sachsen. - <http://www.smul.sachsen.de/lfulg/18797.htm>, <https://141.30.160.222/RaKliDa>.
- MCDONALD, M. G., A. W. HARBAUGH (1988): MODFLOW, A modular three-dimensional finite difference ground-water flow model. - U. S. Geological Survey, Open-file report 83-875.
- NOWEL, W., BÖNISCH, R., SCHNEIDER, W., SCHULZE, H. (1994): Geologie des Lausitzer Braunkohlenreviers. - Lausitzer Braunkohle Aktiengesellschaft, 102 S., Senftenberg.
- PARKHURST, D. L., KIPP, K.L., CHARLTON, S. R. (2010): PHAST version 2 - A program for simulating groundwater flow, solute transport, and multicomponent geochemical reactions. - USGS-report 6-A35.
- PFLUG, W. (1998): Braunkohlentagebau und Rekultivierung. Landschaftsökologie. Folgenutzung. Naturschutz. - Springer Verlag, 572 S., Berlin-Heidelberg-New York.
- PFÜTZNER, B. (ed.) (2002): Modelldokumentation ArcEGMO. - Online 2002. - ISBN 3-00-011190-5, <http://www.arcegmo.de>.
- PROMMER, H. (2002): A reactive multicomponent transport model for saturated porous media. - User Manual, www.pht3d.org
- RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. – Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach am Main, Nr. 194.
- STANDKE, G. (2008): Tertiär. - in: PÄLCHEN, W., WALTER, H. (Hrsg.): Geologie von Sachsen. - E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung Nägele u. Obermiller: 358-419; Stuttgart.
- STANDKE, G. (2010): Tertiär: Regionalgeologischer Überblick, Kenntnisstandsentwicklung, Stratigraphie und Schichtenfolge. - in: AUTORENKOLLEKTIV. (2010): Die geologische Entwicklung der Lausitz. - Vattenfall Europe Mining AG (Hrsg.): 41-75; Cottbus.
- STANDKE, G. (2015): Tertiär. - in: STACKEBRANDT, W., FRANKE, D. (Hrsg.): Geologie von Brandenburg. - E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung: 259-323; Stuttgart.

- SUCKOW, F., BADECK, F-W., LASCH, P., SCHABER, J.(2001): Nutzung von Level-II-Beobachtungen für Test und Anwendungen des Sukzessionsmodells FORESEE. - Beitr. Forstwirtschaft u. Landschaftsökologie, 35, 84-87.
- SCHWARZE, R., HAUFFE, C., BALDY, A., WINKLER, P., DRÖGE, W., WAGNER, M., & RÖHM, P. (2014): Klimawandel und Wasserhaushalt in Sachsen. - Schriftenreihe des LfULG, (32), 112 S., Dresden.
- SCHWARZE, R., DRÖGE, W., WAGNER, M., SPITZER, S., MALESKA, V., KUHN, K. (2016): Untersuchung möglicher Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt in Sachsen - Lösungsansatz, Analyse Ist-Zustand, Daten-und Parametermodell, Modelltest. - Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 60(1), S. 38-56.
- WILLIAMS, J. R., JONES, C. A., KINIRY, J.R., SPANEL, D.A. (1989): The EPIC crop growth model. - Transactions of the ASAE 32, 497-511.
- WUNDERLY, D., BLOWES, M & W., FRIND, D., EMIL & PTACEK, CAROL. (1996): Sulfide mineral oxidation and subsequent reactive transport of oxidation products in mine tailings impoundments: A numerical model. Water Resources Research - WATER RESOUR RES. 32. 3173-3188. 10.1029/96WR02105
- WÜNSCHE, M. (1974): Die bodenphysikalischen, -chemischen und mineralogischen Eigenschaften der Abraumschichten und ihre Eignung für die Wiederurbarmachung im Braunkohlenrevier südlich von Leipzig. - Unveröff. Forschungsbericht, VEB GFE Halle, BT Freiberg: 1-192, Freiberg.