

Wasserhaushalt FFH-Gebiet „Pastlingsee“

Gutachterliche Bewertung

28.06.2018

Auftraggeber: Landesamt für Bergbau, Geologie und Rohstoffe Brandenburg
Inselstraße 26
03046 Cottbus

Auftragnehmer: gerstgraser Ingenieurbüro für Renaturierung
An der Pastoa 13
03042 Cottbus
Tel.: 0355 / 4838 90
Fax.: 0355 / 4838 920
Email: info@gerstgraser.de
Internet: www.gerstgraser.de

Projektleiter:

Dr. Christoph Gerstgraser

INHALTSVERZEICHNIS

1	VERANLASSUNG	6
2	AUFGABENSTELLUNG	7
3	DATENGRUNDLAGEN	8
4	METHODIK	9
5	BESCHREIBUNG DES UNTERSUCHUNGSGEBIETES.....	10
5.1	Geographische Lage und Morphologie.....	10
5.2	Landnutzung	11
5.3	Geologie / Hydrogeologie.....	11
6	ENTWICKLUNG DER GRUND- UND SEEWASSERSTÄNDE	14
7	KLIMATISCHE ENTWICKLUNG IM UNTERSUCHUNGSGEBIET	17
8	WASSERHAUSHALTSBILANZ.....	22
8.1	Niederschlag	22
8.2	Gewässerverdunstung	24
8.2.1	Berechnung nach dem Dalton-Verfahren	25
8.2.2	Berechnung nach RICHTER 1997.....	29
8.2.3	Gegenüberstellung Gewässerverdunstung.....	30
8.3	Versickerung	31
8.4	Weitere Ab- bzw. Zuflusskomponenten	34
9	GRUNDWASSERMODELLIERUNG.....	35
9.1	Modellaufbau.....	35
9.1.1	Abgrenzung des Modellraumes und Festlegung des Modellrasters.....	35
9.1.2	Geologisches Strukturmodell.....	36
9.1.3	Parametrisierung.....	37
9.1.4	Randbedingungen.....	39
9.1.5	Abbildung des Sees	40
9.1.6	Grundwasserneubildung	41
9.2	Modellkalibrierung und Validierung (IST-Zustand).....	47
9.3	Sensitivitätsanalyse.....	52

10	ERGEBNISSE IST-ZUSTAND	53
11	MODELLSZENARIEN BERGBAUUNBEEINFLUSSTER ZUSTAND	55
11.1	Abbildung des bergbauunbeeinflussten Zustandes	55
11.2	Ergebnisse Modellszenarien	57
12	ZUSAMMENFASSUNG	59
13	LITERATUR.....	61

PLANVERZEICHNIS

Plan 1	Übersichtslageplan Modellgebiet und Aufschlussdaten/Messstellen	M 1 : 5.000
Plan 2	Mächtigkeit Torf und Seetiefe.....	M 1 : 5.000
Plan 3	Mächtigkeit Mudde.....	M 1 : 5.000
Plan 4	Mächtigkeit Basisschluff.....	M 1 : 5.000
Plan 5	Mächtigkeit Zwischengrundwasserleiter.....	M 1 : 5.000
Plan 6	Mächtigkeit Geschiebemergel.....	M 1 : 5.000
Plan 7	Mächtigkeit Haupthangendgrundwasserleiter.....	M 1 : 5.000
Plan 8	Geländeoberkante Modell.....	M 1 : 5.000
Plan 9	Basiskarte Torf Modell.....	M 1 : 5.000
Plan 10	Basiskarte Mudde Modell.....	M 1 : 5.000
Plan 11	Basiskarte Basisschluff Modell.....	M 1 : 5.000
Plan 12	Basiskarte Sand ZGWL Modell.....	M 1 : 5.000
Plan 13	Basiskarte Geschiebemergel Modell.....	M 1 : 5.000
Plan 14	Übersichtslageplan Modellgebiet N-A-Modell.....	M 1 : 7.500
Plan 15	Grundwassergleichen Haupthangend-GWL Sep. 2000 (modelliert)	M 1 : 5.000
Plan 16	Grundwassergleichen Haupthangend-GWL Sep. 2005 (modelliert)	M 1 : 5.000
Plan 17	Grundwassergleichen Haupthangend-GWL Sep. 2010 (modelliert)	M 1 : 5.000
Plan 18	Grundwassergleichen Haupthangend-GWL Sep. 2015 (modelliert)	M 1 : 5.000

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

BTU	Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg
DGM	Digitales Geländemodell
DWD	Deutscher Wetterdienst
FFH	Fauna-Flora-Habitat
GFI	Grundwasser-Consulting-Institut GmbH Dresden
gIR	gerstgraser Ingenieurbüro für Renaturierung
GIS	Geoinformationssystem
GMB	Gesellschaft für Montan- und Bautechnik mbH
GWL	Grundwasserleiter
GWM	Grundwassermessstelle
HGWL	Haupthangendgrundwasserleiter
KWB	klimatische Wasserbilanz
LAUBAG	Lausitzer Braunkohle AG
LKQ	Lithofazieskarte Quartär
LP	Lattenpegel
LfU	Landesamt für Umwelt Brandenburg
m NHN	Meter über Normalhöhennull
NS	Nash-Sutcliffe Effizienz
NSG	Naturschutzgebiet
OEZG	oberirdisches Einzugsgebiet
TG	Teilgebiet
ZGWL	Zwischengrundwasserleiter

1 Veranlassung

Bei dem Pastlingsee handelt es sich um einen eiszeitlichen abflusslosen Toteissee, der in seinem relativ abgetrennten West-Becken bereits verlandet und vermoort ist. Sowohl das besonders wertvolle Pastlingmoor mit seinem alten Moorkiefernwald als auch der Pastlingsee wurden im Jahr 2000 als FFH-Gebiet gemeldet und 2003 als NSG-Gebiet ausgewiesen.

Pastlingsee und -moor liegen im Bereich der Grundwasserabsenkung des Haupthangendgrundwasserleiters durch den Braunkohletagebau Jänschwalde. Die Erlaubnis für diese Grundwasserabsenkung erhielt der damalige Tagebaubetreiber LAUBAG am 04.04.1996 durch das Oberbergamt des Landes Brandenburg. Mit der wasserrechtlichen Erlaubnis wurde dem Betreiber zudem ein Monitoringprogramm mit dem Ziel aufgegeben, nachteilige Auswirkungen der Grundwasserabsenkung auf das Feuchtgebiet frühzeitig zu erkennen und dadurch rechtzeitig Maßnahmen zum Schutz ergreifen zu können. Mit dem Beginn eines kontinuierlichen hydrologischen Monitorings im Jahr 1997 liegen Daten vor, die eine stete Abnahme der Wasserstände in See und Moor und eine zunehmende Austrocknung des Moores vom Rande her aufzeigen. Für die Ursachen dieser Entwicklung werden von verschiedenen Seiten sowohl die Grundwasserabsenkung durch den Braunkohlenbergbau als auch klimatische Veränderungen und Änderungen der Landnutzung im Einzugsgebiet sowie die Seennutzung als Angel- und Badegewässer verantwortlich gemacht.

Die Entwicklungen der beobachteten Wasserstände wurden laufend bewertet und auf Basis des aktuellen Wissensstandes vorwiegend der hohen Verdunstung vom See und vom Moor zugeschrieben. Ein bergbaulicher Einfluss war nicht nachweisbar. Ab Oktober 2015 wurde der Wasserstand im Pastlingsee durch Wassereinleitung angehoben. Im Jahr 2016 wurde im Auftrag der LEAG die Verdunstung direkt vom Pastlingsee gemessen. Diese zusätzlichen Messungen, die fortgeschriebenen Datenreihen, die Weiterentwicklungen des Grundwasserströmungsmodells usw. fanden Eingang in eine Neubewertung.

Im Rahmen des vorliegenden Gutachtens erfolgt somit eine verbesserte Ermittlung der Anteile der Wasserbilanz. Auf der Basis von Szenarien wird untersucht, welche Anteile am Wasserpiegelmrückgang auf natürliche Prozesse bzw. auf die bergbauliche Grundwasserabsenkung zurückzuführen sind.

2 Aufgabenstellung

Im vorliegenden Gutachten werden die Ursachen, die den Wasserschwind im Pastlingsee zur Folge haben, untersucht. Dabei wird ermittelt, welche Anteile am Wasserspiegelrückgang auf natürliche Prozesse und auf anthropogene Beeinflussung durch die bergbauliche Beeinflussung zurückzuführen sind. Die jeweiligen Anteile am Wasserstandsrückgang des Pastlingsees werden quantifiziert. Das zu untersuchende Gebiet berücksichtigt den Pastlingsee mit seinem ober- und unterirdischen Einzugsgebiet.

Die gutachterliche Bewertung der Wasserstandsentwicklung im Pastlingsee erfolgt unter Berücksichtigung der klimatischen Gegebenheiten. Hierfür werden die Daten verschiedener Klimagrößen umliegender Wetterstationen recherchiert und im Hinblick auf mögliche Trends untersucht. Zusätzlich erfolgt unter Verwendung der meteorologischen Daten die Berechnung der Gewässerverdunstung als maßgebende Einflussgröße auf den Wasserhaushalt. Hierbei werden verschiedene Berechnungsansätze gegenübergestellt. Aus der berechneten Gewässerverdunstung und dem klimatischen Input (Niederschlag) wird für den Untersuchungszeitraum ab 1997 eine Wasserhaushaltsbilanz auf Grundlage der Wasserstandsentwicklung im Pastlingsee aufgestellt. Unter anderem wird das bestehende Wasserdefizit ermittelt und die Größenordnung der Versickerungsverluste abgeschätzt.

Neben den klimatischen Betrachtungen wird ein bereits vorhandenes Grundwassermodell unter Berücksichtigung neu erhobener Daten bzw. längerer Zeitreihen überarbeitet und neu kalibriert. Ziel ist es, die beobachteten Wasserstände vor dem Hintergrund einer zunehmenden bergbaulichen Grundwasserabsenkung möglichst genau abzubilden.

Ausgehend vom kalibrierten und validierten Grundwassermodell wird die Wasserstandsentwicklung im See ohne Bergbaueinfluss simuliert. Dieser wird anhand gemessener Ganglinien von geeigneten Referenzmessstellen außerhalb der tagebaubedingten Grundwasserabsenkung abgeleitet und in verschiedenen Modellszenarien als Randbedingung hinterlegt. Durch den Vergleich des modellierten Seewasserstandes im kalibrierten Modell mit den Ergebnissen der Modellszenarien wird ein bergbaubedingtes Wasserdefizit prognostiziert.

3 Datengrundlagen

Für die Erstellung des Gutachtens wurden umfangreiche Datengrundlagen herangezogen. Die wesentlichsten Daten sind nachfolgend aufgelistet.

GIS-Daten und Kartenmaterial

- /1/ Digitales Geländemodell (DGM) für das oberirdische Einzugsgebiet des FFH-Gebietes Pastlingsee, Stand: 2013, Auflösung 1 m, Quelle: LEAG
- /2/ georeferenziertes Luftbild Bereich Jänschwalde-Nord, Stand: 2010, Quelle: LEAG
- /3/ Bestandsvermessung / Lotung Pastlingsee, Stand 2016, Quelle LfU
- /4/ Übersichtskarte zu dem Feuchtgebiet Pastlingsee, Erkundungsprogramm der Schutzgebiete „Nord“, Quelle: GMB GmbH 2000
- /5/ Thematische geologische Karte zu dem Feuchtgebiet Pastlingsee, Erkundungsprogramm der Schutzgebiete „Nord“, Quelle: GMB GmbH 2000
- /6/ Bodenübersichtskarte: Böden im NSG Pastlingsee, Planung Monitoring NSG Pastlingsee, Quelle: Büro für Bodenschutz & Landschaftsplanung Pfaff 2002
- /7/ „Lithofazieskarte Quartär“ (LKQ), Blatt Guben, Nr. 2270, M 1:50.000, 1982, Blatt Forst, Nr. 2370, M 1:50.000, Stand: 1984
- /8/ Kartierergebnisse Biomonitoring Moore, Vegetationsformen Pastlingmoor, Stand 2012, Quelle: NagolaRe

Mess- und Datenreihen:

- /9/ Digitaler Datensatz zu Stamm- und Messdaten der Grundwassermessstellen bzw. Lattenpegel im Einzugsgebiet Pastlingsee, Quelle: LEAG
- /10/ Meteorologische Daten der Stationen Friedrichshof / Laßzinswiesen und Pastlingmoor, Tageswerte für Temperatur, Niederschlag, Globalstrahlung, Luftfeuchtigkeit, potentielle Verdunstung für unterschiedliche Zeiträume, Quelle: BTU
- /11/ Meteorologische Daten der Stationen Pinnow und Cottbus, Tageswerte für Temperatur und Niederschlag für unterschiedliche Zeiträume, Quelle: DWD
- /12/ Berechnete Gewässerverdunstung eines 1m tiefen Sees nördlich Cottbus, Tageswerte von 1951 bis 2015, Quelle: DWD
- /13/ Ergebnisse der Gewässerverdunstungsmessung Pastlingsee, Tageswerte für den Zeitraum 20.07.2016 bis 02.11.2016, Quelle: GFI
- /14/ Digitaler Datensatz zu Stamm- und Messdaten von Grundwassermessstellen des LfU, Quelle: LfU

4 Methodik

Bereits im Zeitraum 2010 bis 2012 wurde der Wasserhaushalt des FFH-Gebietes „Pastlingsee“ im Rahmen einer Studie (gIR 2012) untersucht. Neben einer Analyse von Ganglinienverläufen unterschiedlicher Grundwassermessstellen bzw. Lattenpegel wurden im Rahmen dieser Studie ein Grundwassermodell und ein Niederschlags-Abfluss-Modell (N-A-Modell) aufgebaut. Ziel war es, die Wechselwirkungen zwischen Oberflächengewässer, Torfgrundwasserleiter und bergbaubeeinflusstem Haupthangendgrundwasserleiter modellhaft abzubilden.

Im vorliegenden Gutachten wird schwerpunktmäßig der Wasserhaushalt des Pastlingsees betrachtet. Hauptaugenmerk liegt hier vor allem auf den Verlustgrößen Verdunstung und Versickerung. Untersucht wird deren zeitliche Veränderung sowohl vor dem Hintergrund klimatischer Veränderungen als auch unter Berücksichtigung einer zunehmenden bergbaulichen Entwässerung des Haupthangendgrundwasserleiters. Der Untersuchungszeitraum erstreckt sich von Oktober 1997 bis September 2015 bzw. Dezember 2016.

Für die Wasserhaushaltsbilanzierung des Pastlingsees ist die Kenntnis der Gewässerverdunstung unumgänglich. Diese wird unter Verwendung von verfügbaren Messreihen nahe gelegener Wetterstationen berechnet /10/ bzw. anhand von vorhandenen Datensätzen /12/ ausgewiesen. Hierbei werden verschiedene Verfahren angewendet und gegenübergestellt. Die aus der Gewässerverdunstung berechnete Klimatische Wasserbilanz wird anschließend mit den Ganglinienverläufen verschiedener Messpegel im Untersuchungsgebiet verglichen /9/. Die Versickerungsverluste können dann aus der Differenz zwischen kumulierter Klimatischer Wasserbilanz und Wasserstandsentwicklung im Feuchtgebiet abgeleitet werden.

Neben einer rein rechnerischen Wasserhaushaltsbilanzierung wird im Rahmen dieses Gutachtens auf die bereits entwickelten Modelle zurückgegriffen. Während das N-A-Modell lediglich zur Berechnung der Grundwasserneubildung außerhalb des Feuchtgebietes verwendet wird, wird mittels Grundwassermodell die Wasserstandsentwicklung im Pastlingsee und Pastlingmoor vor dem Hintergrund sinkender Druckhöhen im Haupthangendgrundwasserleiter berechnet. Hierfür erfolgten eine Aktualisierung des Grundwassermodells und eine Anpassung an die aktuell verfügbaren Daten /1/ und /3/. Modellparameter und Randbedingungen wurden im Rahmen von Projektbesprechungen mit dem LfU und dem LBGR abgestimmt.

Nach der Ausdehnung des Modellzeitraumes auf die Periode Oktober 1997 bis Dezember 2016 erfolgt eine umfassende Kalibrierungs- und Validierungsphase. Ziel ist es, die beobachteten Wasserstände vor allem im See vor dem Hintergrund eines bergbaubeeinflussten Haupthangendgrundwasserleiters im Grundwassermodell abzubilden. Zur Ermittlung des tagesbaubedingten Verlustanteils werden anschließend Modellszenarien betrachtet, in denen eine bergbaulich unbeeinflusste Druckhöhenentwicklung im Haupthangendgrundwasserleiter angenommen wird. Dies erfolgt unter Verwendung unbeeinflusster Ganglinien geeigneter Referenzmessstellen /14/, die sich außerhalb der bergbaulichen Grundwasserabsenkung befinden. Durch den Vergleich der berechneten Wasserstände mit und ohne Entwässerung des Haupthangendgrundwasserleiters wird dann der bergbaubedingte Anteil am Wasserverlust ausgewiesen.

5 Beschreibung des Untersuchungsgebietes

Die nachfolgende Beschreibung des Untersuchungsgebietes bezieht sich auf das etwa 70 ha große FFH-Gebiet „Pastlingsee“ (Abbildung 1). In diesem Kapitel werden die Punkte geographische Lage, Morphologie, Landnutzung, Geologie bzw. Hydrogeologie beschrieben. Ausführungen zur klimatischen Entwicklung bzw. zur Entwicklung der Wasserstände folgen in separaten Kapiteln.

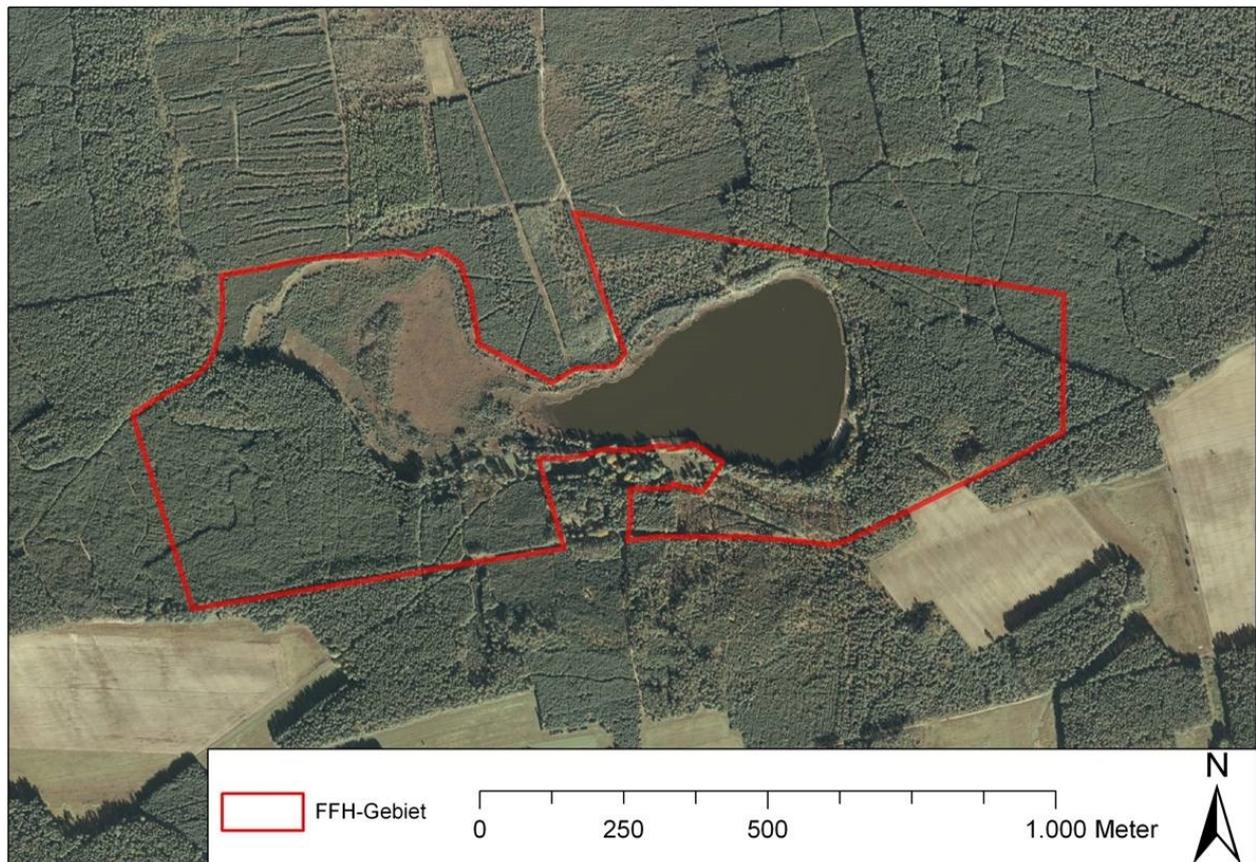


Abbildung 1: Luftbildaufnahme des FFH-Gebietes „Pastlingsee“, 2007 (Quelle Luftbild: LEAG)

5.1 Geographische Lage und Morphologie

Das FFH-Gebiet „Pastlingsee“ befindet sich im östlichen Teil des Ostbrandenburgischen Heide- und Seengebietes und kann somit dem weichselzeitlichen Jungmoränengebiet zugeordnet werden. Das charakteristische Landschaftsbild wurde durch das weichselzeitliche Eis des Inlandgletschers und seiner Schmelzwässer geprägt.

Der Pastlingsee und das Pastlingmoor bilden eine längliche, kesselförmige Beckenstruktur mit einer Ost-West Ausdehnung von etwa 1.000 m und einer maximalen Nord-Süd Ausdehnung von ca. 350 m. Im mittleren Teil, dem Übergangsbereich zwischen Moor- und Seekörper, beträgt die Entfernung zwischen Süd- und Nordufer infolge einer Verengung etwa 120 m.

Das im westlichen Teil des Betrachtungsgebietes befindliche Moor hat eine Fläche von etwa 13,7 ha (PFAFF 2002). Der namensgebende See schließt sich östlich an das Moor an und hat eine freie Fläche von ca. 11 ha. Das Nordwest- und das Südufer des Sees werden im Über-

gangsbereich zum Moor durch vertorfte Verlandungszonen begleitet (PFAFF 2002). Der See verfügt über ein Binneneinzugsgebiet und besitzt weder einen oberirdischen Zufluss noch einen Abfluss.

Der Pastlingsee und das angrenzende Pastlingmoor liegen in einer flachen, sich von West nach Ost erstreckenden Senke. Die mittlere Höhenlage des Moorkörpers beträgt laut DGM aus dem Jahr 2013 etwa + 62,5 m NHN, wobei der zentrale Teil relativ eben verläuft und nicht aufgewölbt ist. Die umgebenden Hänge sind mittel bis stark geneigt und weisen vor allem im südlichen bis südöstlichen Uferbereich rezent erhaltene Einkerbungen ehemaliger Zuflüsse auf. Unmittelbar südlich des Sees befindet sich ein West-Ost streichender Höhenzug mit einer maximalen Höhe von + 93,8 m NHN. Im Bereich des West-, Nord-, und Ostufers werden im Mittel nur Höhen um +70 m NHN erreicht. Unter Verwendung des DGM wurde für das Feuchtgebiet ein oberirdisches Einzugsgebiet von etwa 125,5 ha abgegrenzt.

5.2 Landnutzung

Das FFH-Gebiet „Pastlingsee“ hat eine Fläche von etwa 70 ha. Anteilig nimmt der See eine Fläche von etwa 16 %, und das Pastlingmoor von etwa 20 % ein. Die restlichen 64 % der FFH-Fläche (etwa 45 ha) werden zum größten Teil forstwirtschaftlich genutzt und sind durch Nadelwälder dominiert.

Wie das Luftbild zeigt (Abbildung 1), sind vor allem im östlichen und westlichen Teil des FFH-Gebietes dichte Kiefernwälder verbreitet. Das Ostufer des Sees zeichnet sich entlang eines schmalen Streifens durch Laub- bzw. Mischwald aus. Im südlichen Uferbereich sind die Mischwälder zum Teil deutlich aufgelichtet. Weitere Nutzungsarten wie Grünland, Wege, Offen- und Ackerflächen sind untergeordnet verbreitet und beanspruchen nur einen geringen Flächenanteil.

Durch die Verordnung zum NSG „Pastlingsee“ sind zusätzliche Nutzungsarten verboten bzw. nur eingeschränkt möglich. Als zulässig gelten weiterhin eine Erholung- und Freizeitnutzung sowie der Angelsport an drei dafür vorgesehenen Bade- und Angelstellen am Südost- und Ostufer des Sees. Die Nutzung des Pastlingsees als Badegewässer hat in den letzten Jahren an Bedeutung verloren und ist aktuell als mäßig bis gering einzuschätzen.

5.3 Geologie / Hydrogeologie

Bei den oberflächennahen Bildungen im Bereich des FFH-Gebietes handelt es sich zum größten Teil um weichselzeitliche Ablagerungen. Die oberflächennahen, geologischen Strukturen der Sedimente sind durch Bohrungen und geophysikalische Methoden (Georadar) gut erkundet (GMB 2000/01). Im Ergebnis dieser Erkundungen wurden unter anderem mehrere geologische Schnitte erarbeitet, welche die Kesselstruktur des Feuchtgebietes beschreiben. Ein exemplarischer Auszug eines solchen Schnittes enthält die Abbildung 2. Dargestellt sind hier die Schichtgrenzen der verschiedenen mineralischen Sedimente bzw. der organischen Bildungen, die anhand von Bohraufschlüssen bzw. Reflexionsmessungen aus Radargrammen (GMB 2000/01) abgeleitet wurden.

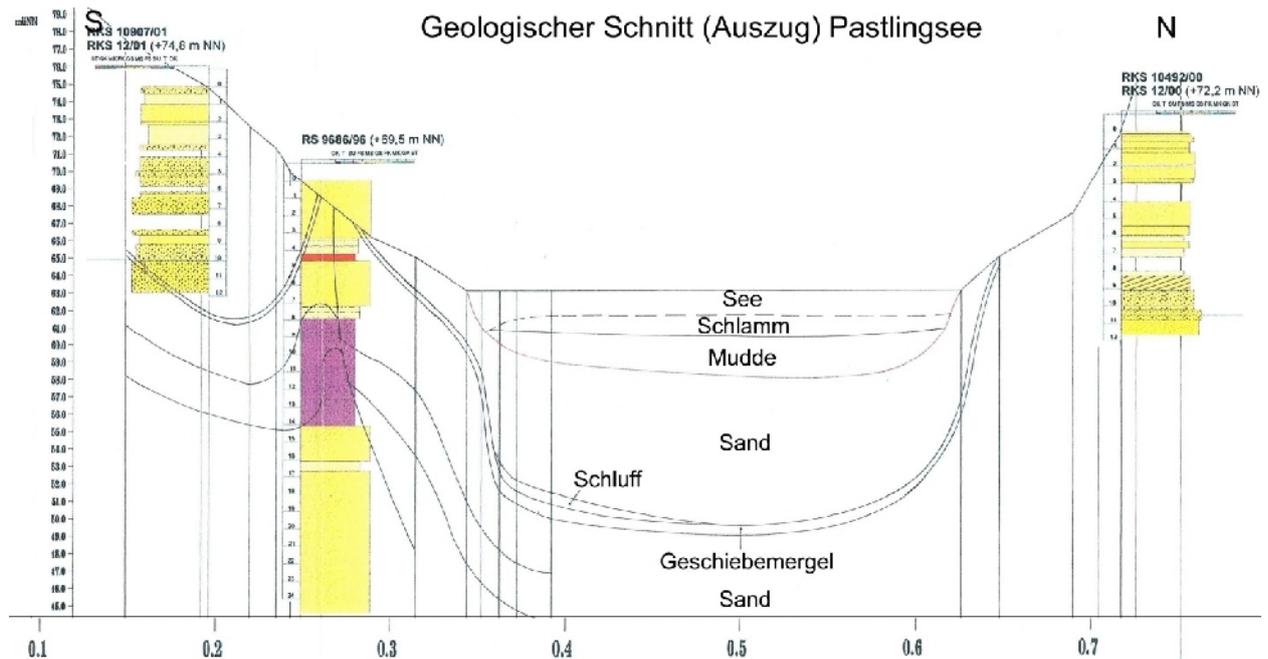


Abbildung 2: Auszug eines geologischen Schnittes durch den Pastlingsee (GMB 2001, verändert durch gIR)

Um die komplexe Hydrologie des FFH-Gebietes vollständig zu erfassen, müssen mehrere, räumlich abgrenzbare, hydrologische Einheiten und ihre Wechselwirkungen untereinander betrachtet werden. Neben dem als Restsee aufzufassenden Pastlingsee ist der Torfkörper als separate hydrologische Einheit anzusehen. Zusätzlich sind im Betrachtungsgebiet verschiedene Grundwasserleiter ausgebildet. Als Grundwasserleiter werden gut wasserleitende, mineralische oder organische Ablagerungen verstanden, deren hydraulischer Kontakt untereinander durch gering wasserdurchlässige Schichten gehemmt ist und die unterschiedliche Entwicklungen in ihrer Druckhöhe aufweisen. Aufgrund der glazialen Entstehung und ihrer unterschiedlichen Ablagerungsprodukte ist von zwei mineralischen Grundwasserleitern auszugehen. Die Verbreitung der einzelnen Grundwasserleiter und die schematisch dargestellte Druckhöhen sind in der Abbildung 3 enthalten.

Der untere Grundwasserleiter, auch Haupthangendgrundwasserleiter (HGWL), besteht zum größten Teil aus saalezeitlichen Schmelzwassersanden mit einem Korngrößenspektrum von Fein- bis Mittelsanden. Er erreicht Mächtigkeiten bis zu 60 m und ist regional weit verbreitet. Im Hangenden des HGWL ist eine weichselzeitliche Grundmoräne ausgebildet. Aufgrund ihres Schluffanteils wirkt diese Ablagerung hydraulisch hemmend auf mögliche Wechselwirkungen (GMB 2001). Diese hemmende Wirkung wird durch einen im Hangenden lokal ausgebildeten Beckenschluff unterstützt. Die stauende Gesamtwirkung beider Horizonte hängt nicht zuletzt von ihrer räumlichen Verbreitung ab.

Über der Grundmoränenablagerung folgen die weichselzeitlichen Schmelzwassersande. Diese bilden einen lokal ausgeprägten Zwischengrundwasserleiter (ZGWL) im Mittelsandbereich aus. Die Mächtigkeit des ZGWL schwankt zwischen 3 bis 4 m, er nimmt von Westen nach Osten zu und besteht vorwiegend aus Mittelsand. Begrenzt wird der Zwischengrundwasserleiter durch einen Basisschluff, gefolgt von abgelagerten Mudden. Mit einer Gesamtmächtigkeiten bis 10 m

besitzen beide Horizonte grundwasserstauende Eigenschaften, die in Abhängigkeit von Verbreitung und Lagerungsdichte variiert.

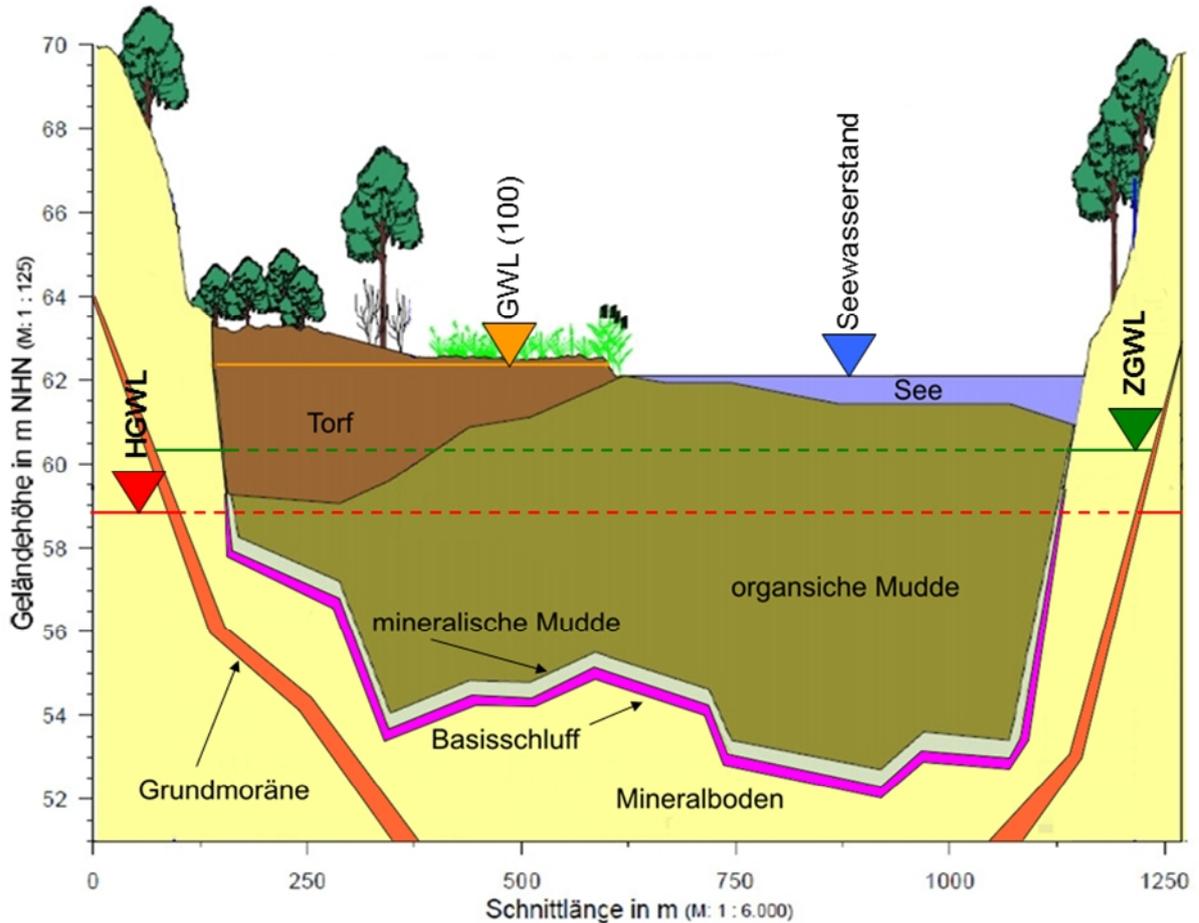


Abbildung 3: Schematischer Profilschnitt durch den Pastlingsee und die verbreiteten Grundwasserleiter mit Druckhöhen (Quelle: LEAG, verändert)

Den oberen Grundwasserleiter bildet der Torfkörper im verlandeten Teil des Pastlingsees. Durchschnittlich hat er eine Mächtigkeit von etwa 2 m. Seine Verbreitung übersteigt dabei die der Mude. Vor allem in den Uferbereichen ist der Torf über die Mudeverbreitung hinausgewachsen und liegt hier direkt auf den Sanden des Zwischengrundwasserleiters. Analog zur Mude, beeinflusst die Lagerungsdichte des Torfes sein Porenvolumen und damit die hydraulische Leitfähigkeit. Darüber hinaus bestimmen auch die Zusammensetzung und der Zersetzungsgrad die hydraulischen Eigenschaften des Torfes. Es ist davon auszugehen, dass der durchflusswirksame Porenraum mit zunehmendem Zersetzungsgrad abnimmt.

6 Entwicklung der Grund- und Seewasserstände

Nachfolgend wird die Druckhöhenentwicklung in den einzelnen Grundwasserkörpern bzw. die Entwicklung des Seewasserstandes anhand von Ganglinien beschrieben. Der Ganglinienverlauf der verschiedenen hydrologischen Einheiten ist für den Zeitraum Oktober 1997 bis Dezember 2016 in der Abbildung 4 dargestellt. Für den regional verbreiteten Haupthangendgrundwasserleiter werden die Ganglinien der Grundwassermessstellen (GWM) 19056 und 19057 betrachtet. Die Veränderungen im Zwischengrundwasserleiter sind durch die Ganglinienentwicklung der Messstelle GWM 19058 erfasst. Zur Beschreibung des Torfgrundwasserleiters liegt die Ganglinie der Messstelle GWM 19066 vor. Für den Pastlingsee werden die Messwerte des Lattenpegels 19068 herangezogen. Die Lage aller Messstellen sind im Plan 1 dargestellt.

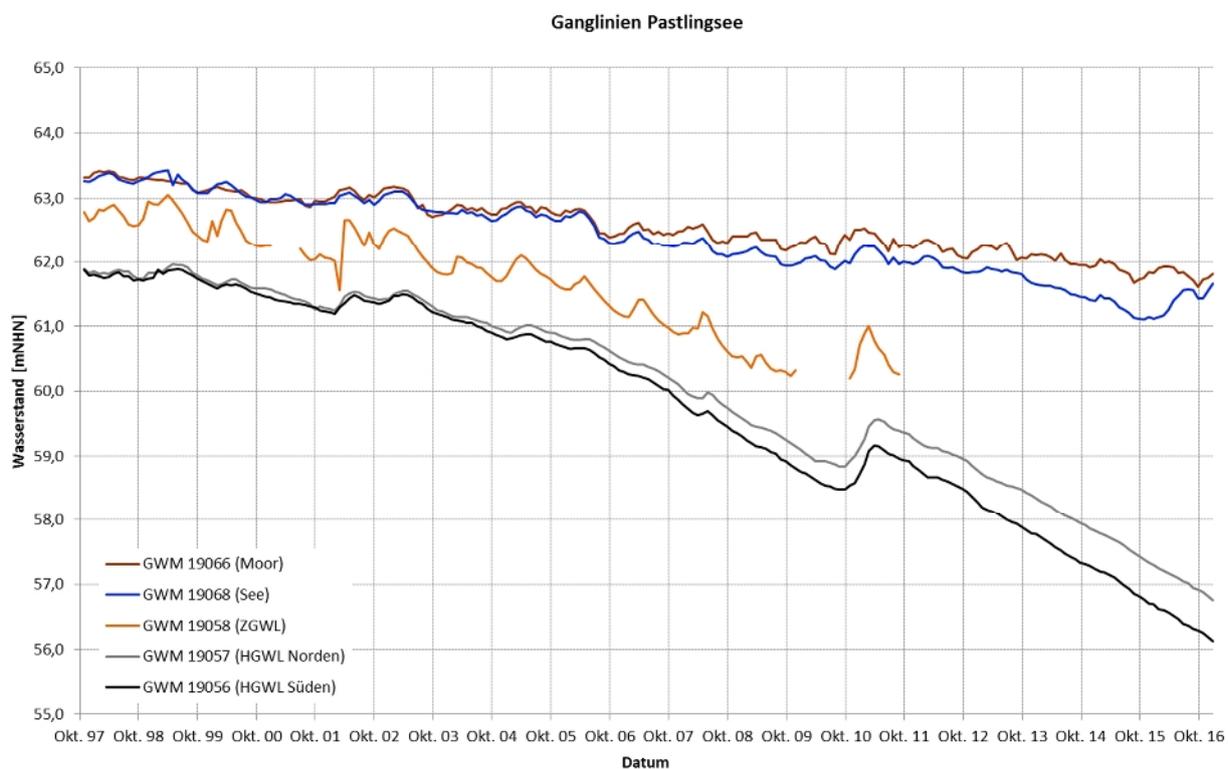


Abbildung 4: Entwicklung der Wasserstände in den verschiedenen hydrologischen Einheiten im Zeitraum Oktober 1997 bis Dezember 2016

Der Ganglinienvergleich zeigt, dass sich die verschiedenen hydrologischen Einheiten sowohl im Druckhöheniveau als auch im Trendverhalten unterscheiden. Die niedrigsten Druckhöhen weisen die Ganglinien des Haupthangendgrundwasserleiters auf. Sie setzten im Oktober 1997 bei etwa + 61,8 m NHN ein und weisen nahezu im gesamten Betrachtungszeitraum einen anhaltenden Abwärtstrend auf. Ein lokales Minimum wurde im August 2010 gemessen. Bedingt durch ein erhöhtes Wasserdargebot stieg der Wasserstand bis ins Frühjahr 2011 um etwa 0,70 m an und setzte anschließend den vorher beobachteten Abwärtstrend fort.

Etwa seit 2006 ist eine Beeinflussung der Druckhöhen des HGWL im Bereich des Untersuchungsraumes / FFH-Gebietes durch die bergbauliche Grundwasserhaltung des Tagebaus Jänschwalde feststellbar. Dies führt zum einen zu einer stärkeren Druckhöhenabnahme, zum anderen zu einer Drehung der Grundwasserfließrichtung von NW-SO auf N-S. Dementspre-

chend nimmt der Grundwasserstand an der südlich gelegen GWM 19056 nach 2007 stärker ab. Ende 2016 ist ein Druckhöhenunterschied zwischen der nördlichen GWM 19057 und der südlichen GWM 19056 von etwa 0,6 m zu verzeichnen. Im Betrachtungszeitraum 1997 bis 2006 beträgt die mittlere jährliche Druckhöhenabnahme etwa 0,20 m/a. Nach 2007 fielen die Grundwasserstände im HGWL durchschnittlich um etwa 0,4 m/a.

Die Ganglinie der GWM 19058 (orange) beschreibt die Druckverhältnisse im lokal verbreiteten Zwischengrundwasserleiter (ZGWL). Sie setzt im Oktober 1997 mit einem Wasserstand von etwa + 62,6 m NHN ein und liegt damit ca. 0,8 m über dem Niveau des Haupthangendgrundwasserleiters. Auffällig im Ganglinienverlauf sind deutliche, innerjährliche Schwankungen mit Amplituden von bis zu 0,4 m. Der Jahreshöchstwert wird dabei in der Regel in der ersten Jahreshälfte erreicht. Diese deutlichen Schwankungen führen dazu, dass der Wasserstand im lokalen Grundwasserleiter zeitweise mehr als einen Meter oberhalb des regionalen HGWL liegt.

Analog zum Haupthangendgrundwasserleiter werden auch im Zwischengrundwasserleiter die innerjährlichen Schwankungen von einem langjährigen Trend überlagert. Im Beobachtungszeitraum sank die Druckhöhe von ca. + 62,7 m NHN auf etwa + 60,2 m NHN. Daraus ergibt sich eine mittlere jährliche Abnahme von ca. 0,2 m. Da die jährliche Druckhöhenabnahme im Vergleich mit dem Haupthangendgrundwasserleiter etwas kleiner ist, wächst der Höhenunterschied von Haupthangend- zu Zwischengrundwasserleiter stetig. Seit September 2011 konnten an der GWM 19058 keine Wasserstände mehr erhoben werden, da der Pegel trocken gefallen ist.

Die braune Linie in der Abbildung 4 zeigt die Wasserstandsentwicklung im Moorkörper innerhalb des Beobachtungszeitraumes (GWM 19066). Von den vorhandenen Grundwasserleitern weist der Torfgrundwasserleiter den höchsten Wasserstand auf. Im Oktober 1997 lag der Moorwasserstand bei ca. + 63,3 m NHN und damit etwa 0,5 m über dem Niveau des ZGWL und ca. 1,5 m über dem des HGWL. Die innerjährlichen Schwankungen des Torfgrundwasserleiters liegen bei 0,2 bis 0,3 m, wobei ihr Maximum meist im Frühjahr auftritt.

Auch der Wasserstand im Torfgrundwasserleiter (braune Linie) weist einen langjährigen Trend auf. Allerdings ist dieser nicht so stark ausgeprägt wie bei den unterlagernden Grundwasserleitern. Im Beobachtungszeitraum Oktober 1997 bis 2016 sankt der Wasserstand von etwa + 63,3 m NHN um 1,5 m auf etwa + 61,8 m NHN. Dies entspricht einer Abnahme von weniger als 0,1 m/a. Im Gegensatz zum Haupthangendgrundwasserleiter bzw. zum Zwischengrundwasserleiter ist das beobachtete Trendverhalten zeitlich weitestgehend konstant. Dadurch hat sich im Laufe der Zeit die Druckhöhendifferenz zum Zwischen- bzw. Haupthangendgrundwasserleiter erhöht. Ende 2016 befand sich der Moorwasserstand etwa 5 m über dem Niveau des HGWL.

Ähnlich der Druckhöhenänderung im Moor weist auch die Ganglinie des Pastlingsees (blaue Linie) deutliche innerjährliche Schwankungen auf. Die Wasserstände steigen in der Regel im Frühjahr um 0,1 bis 0,2 m an und fallen in den Sommermonaten auf einen Tiefststand. Neben dem innerjährlichen Zyklus weist die Ganglinie einen langjährigen Trend auf. Ausgehend von einem anfänglichen Wasserstand von etwa + 63,4 m NHN sank der Wasserstand bis Oktober 2015 um 2,3 m auf einen Wert von + 61,1 m NHN. Zu diesem Zeitpunkt war der See so flach, dass große Areale trocken fielen und der Seegrund zum Vorschein kam. Seit Oktober 2015 wird

der Seewasserstand durch die Einleitung von Zuschusswasser stabilisiert. Ende 2016 stellte sich ein Wasserstand von + 61,7 m NHN ein.

Etwa bis zum Jahr 2003 verlaufen die Ganglinien von Torfgrundwasserleiter und See auf einem vergleichbaren Niveau. Infolge von Trockenjahren (vgl. Kapitel 7) sank der Seewasserstand stärker ab und es bildete sich ein zunehmender Druckhöhenunterschied zwischen See und Moor aus. Nach 2009 verläuft die Ganglinie des Seewasserspiegels etwa 0,3 m unter dem Druckniveau im Torfgrundwasserleiter. Seit 2013 weist der Seewasserstand einen deutlichen Abwärtstrend auf, der im Sommer 2015 zum Trockenfallen großer Areale führte. Zu diesem Zeitpunkt lag der Moorwasserstand ca. 0,6 m höher.

7 Klimatische Entwicklung im Untersuchungsgebiet

Das FFH-Gebiet Pastlingsee ist dem Klimagebiet „Südostbrandenburg“ zuzuordnen. Dieses wiederum zählt zum Großklimagebiet „stärker kontinental beeinflusstes Binnentiefeland“. Das Klima Südostbrandenburgs ist durch vergleichsweise kalte Winter, heiße Sommer und geringe Niederschlagshöhen gekennzeichnet. Langjährige Wetteraufzeichnungen stehen von der etwa 20 km südwestlich des Pastlingsees gelegenen meteorologischen Station Cottbus der DWD zur Verfügung. Die Daten reichen bis in die 1950er Jahre zurück. Für die klimatologische Normalperiode der Kalenderjahre 1981-2010 ergibt sich eine mittlere korrigierte Niederschlagsmenge von 645 mm pro Jahr. Das Jahresmittel der Lufttemperatur beträgt für diesen Zeitraum 9,6 °C, wobei der kontinentale Einfluss große Temperaturunterschiede zwischen dem Jahresmaximum und dem Jahresminimum verursacht.

Die Entwicklungen der Jahresmitteltemperaturen und der Niederschlagsmengen der letzten 60 Jahre sind in der Abbildung 5 dargestellt. Um langjährige Trends besser erkennen zu können, ist der gleitende Mittelwert über einen Zeitraum von 5 Jahren dargestellt.

Der Verlauf der Temperaturkurve zeigt, dass es seit Anfang der 1990er Jahre einen deutlichen Anstieg gibt. Während die Jahresmitteltemperatur vor 1990 bei etwa 8,9 °C lag, ergibt sich für den Zeitraum nach 1990 ein Mittelwert von 9,9 °C. Vor allem ab den 2000er Jahren häufen sich die Jahre mit Durchschnittstemperaturen über 10 °C. Im Gegensatz dazu zeichnet sich bei der jährlichen Niederschlagshöhe kein deutlicher Trend ab.

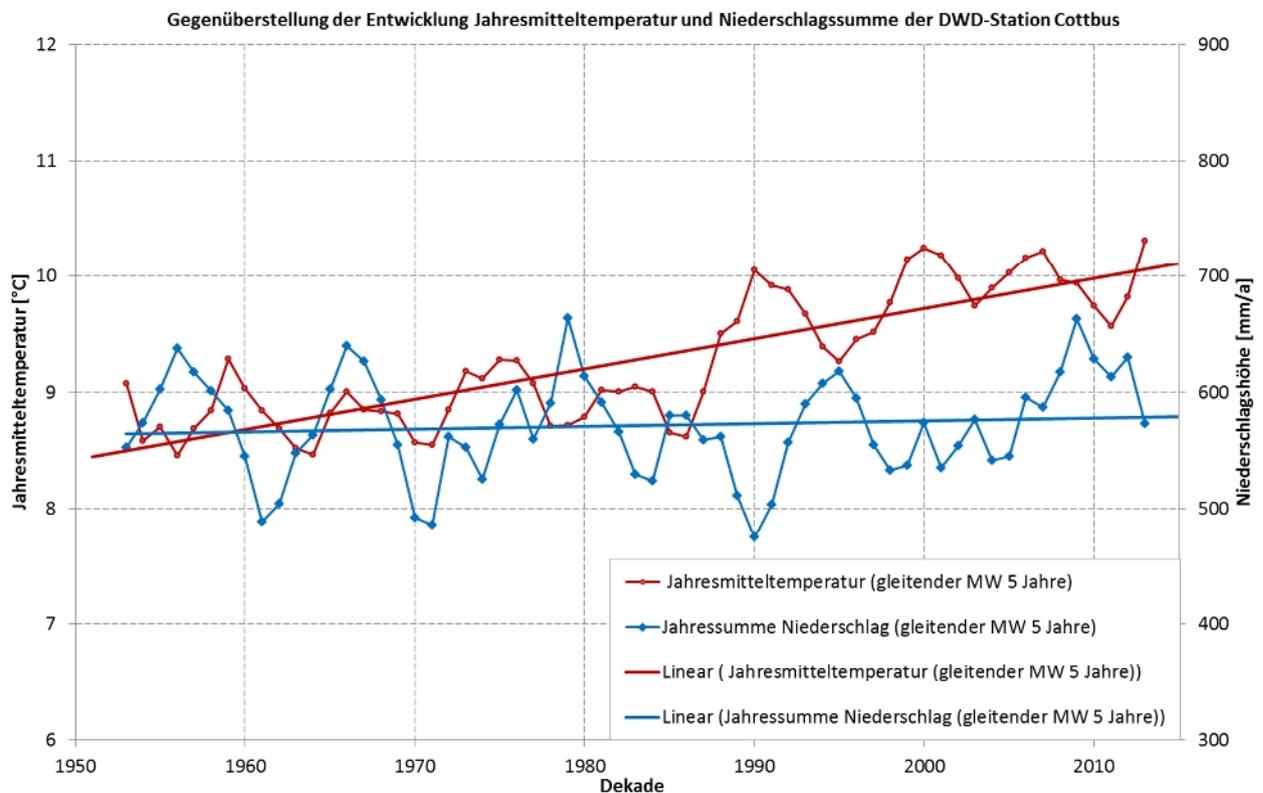


Abbildung 5: Entwicklung von Temperatur und Niederschlag seit den 1950er Jahren (Quelle Daten: DWD, Station Cottbus)

In den beiden Diagrammen der Abbildung 6 wird zwischen dem hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai – Okt.) und Winterhalbjahr (Nov. – Apr.) unterschieden. Das Diagramm auf der linken Seite zeigt die Entwicklung der Mitteltemperaturen. Demnach weisen die Wintermonate eine stärkere Erwärmung auf als die Sommermonate. Im rechten Diagramm sind die Niederschlagssummen dargestellt. Während die Regenmengen der Sommerhalbjahre leicht rückläufig sind, haben die Niederschläge in den Wintermonaten zugenommen.

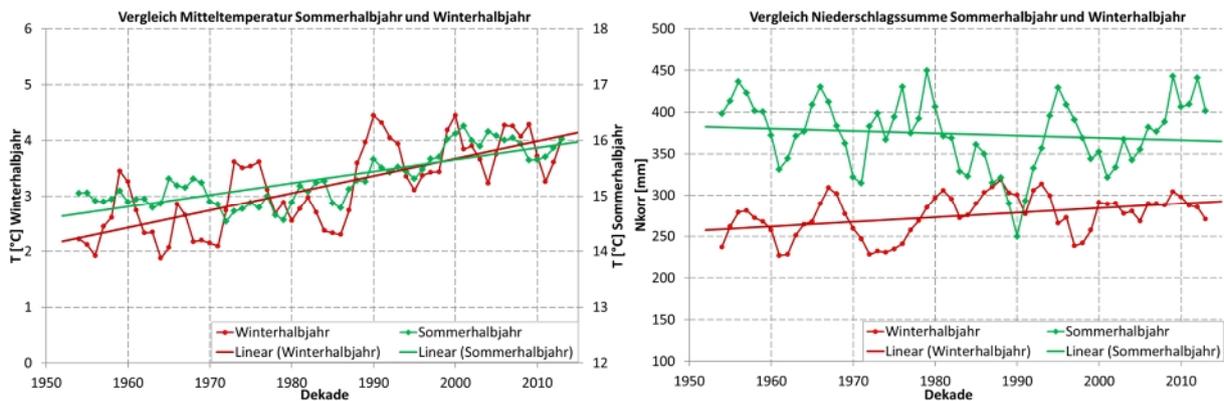


Abbildung 6: Entwicklung von Temperatur und Niederschlag in den Sommer- bzw. Winterhalbjahren seit den 1950er Jahren (Quelle Daten: DWD, Station Cottbus)

Die zeitliche Verteilung einzelner Starkregenereignisse seit 1950 ist in der Abbildung 7 dargestellt. Hier steht jeder rote Balken für ein Niederschlagsereignis mit einer Regenmenge größer 44 mm/d. Dies entspricht laut KOSTRA-DWD 2010R für die Region Cottbus einem 24 stündigen Niederschlagsereignis mit einem Wiederkehrintervall von zwei Jahren. Derartige Ereignisse wurden im Zeitraum 1950 bis 2015 insgesamt 25 Mal erfasst. Die Lage der roten Balken im Diagramm der Abbildung 7 zeigt, dass die Starkregenereignisse ungleichmäßig verteilt sind. So treten in den ersten 20 Jahren bis 1970 insgesamt 11 Starkregenereignisse auf. In den darauffolgenden 20 Jahren werden hingegen nur 4 Ereignisse registriert. Eine erneute Häufung ist dann mit Beginn der 2000er Jahre erkennbar. Ein eindeutiger Trend über den gesamten Beobachtungszeitraum zeichnet sich hingegen nicht ab.



Abbildung 7: Verteilung von Starkregenereignissen seit 1950 (Quelle Daten: DWD, Station Cottbus)

Für die Beschreibung der Witterungsverhältnisse im Umfeld des FFH-Gebietes „Pastlingsee“ werden die Aufzeichnungen der Wetterstation Friedrichshof in den Lasszinswiesen herangezogen. Die Station befindet sich etwa 6 km südwestlich des FFH-Gebietes und wird seit Herbst

1997 durch den Lehrstuhl für Hydrologie und Wasserwirtschaft der BTU Cottbus-Senftenberg betrieben.

In der Tabelle 1 sind einige Daten der hydrologischen Jahre 1998 bis 2016 zusammengefasst. Demnach liegt die mittlere korrigierte Niederschlagsmenge (vgl. Kapitel 8.1) an der Station Friedrichshof im Betrachtungszeitraum der hydrologischen Jahre 1998 bis 2016 bei 645 mm pro Jahr. Für den gleichen Zeitraum ergibt sich eine mittlere Jahrestemperatur von 9,7 °C.

Darüber hinaus enthält die Tabelle 1 die berechnete Klimatische Wasserbilanz (KWB). Diese ergibt sich aus der Differenz der Niederschlagshöhe und der potentiellen Verdunstung, hier die Gras-Referenzverdunstung, nach folgender Formel (Gl. 1):

$$\text{Gl. 1} \quad \text{KWB} = N_{\text{korr}} - \text{ET}_{\text{pot}}$$

mit:	KWB	Klimatische Wasserbilanz
	N_{korr}	korrigierte Niederschlagshöhe
	ET_{pot}	potentielle Evapotranspiration

Die KWB gibt an, wie feucht bzw. trocken ein hydrologisches Jahr war, wobei positive Werte auf einen Wasserüberschuss hindeuten und negative Werte auf einen Wassermangel. Neben dem Niederschlag hängt die KWB von der potentiellen Verdunstung ab. Erfahrungsgemäß ergeben sich aus der hier verwendeten Gras-Referenzverdunstung tendenziell zu geringe Verdunstungshöhen, um das beobachtete Trendverhalten vieler Oberflächengewässer- bzw. Grundwasserganglinien zu beschreiben.

Ältere wasserhaushaltliche Betrachtungen haben gezeigt (LUA 2000), dass der Verdunstungsanteil der Klimatischen Wasserbilanz um 10 % erhöht werden sollte, um repräsentative Werte zu erhalten. Dies wurde bereits in der Tabelle 1 berücksichtigt. Überdurchschnittlich feuchte Jahre sind in der Tabelle blau markiert, trockene Jahre sind rot kenntlich gemacht. Im Betrachtungszeitraum 1998 bis 2016 fallen vor allem die Jahre 2003 und 2006 durch deutlich negative Wasserbilanzen auf. Überdurchschnittlich feucht fielen hingegen die hydrologischen Jahre 1998 und 2010 aus. Darüber hinaus zeigt sich, dass die Anzahl der feuchten Jahre seit 2010 zugenommen hat. Im Mittel zeichnen sich die Jahre 1998 bis 2016 durch eine negative klimatische Wasserbilanz von ungefähr - 26 mm/a aus.

Tabelle 1: Wetterdaten der Station Friedrichshof für die hydrologischen Jahre 1998 bis 2016 (Quelle Daten: BTU Cottbus-Senftenberg)

hydrologisches Jahr	$N_{\text{korrigiert}}$ [mm/a]	T_{mittel} [°C]	E_{pot} (Grasref.) [mm/a]	KWB 110% E_{pot} [mm/a]
1998	752,2	9,8	555,1	141,7
1999	533,8	9,5	573,9	-97,5
2000	591,3	10,1	581,8	-48,7
2001	572,3	9,7	523,8	-3,9
2002	686,8	9,8	605,6	20,6
2003	463,8	8,7	652,6	-254,1
2004	584,6	9,3	610,4	-86,8
2005	694,3	9,4	624,2	7,7
2006	426,8	9,4	659,1	-298,2
2007	731,2	11,0	656,7	8,8
2008	747,1	10,0	648,4	33,9
2009	590,1	9,4	629,7	-102,6
2010	784,7	8,7	600,4	124,3
2011	794,0	9,5	633,3	97,4
2012	590,4	9,8	627,0	-99,3
2013	641,4	9,2	571,0	13,3
2014	747,3	10,9	590,0	98,3
2015	548,0	10,4	598,0	-109,8
2016	758,5	10,8	629,0	66,6
Mittelwert	644,1	9,7	608,9	-25,7

In der Abbildung 8 ist die KWB ebenfalls mit einer Gras-Referenzverdunstung von 110 % berücksichtigt. Unterschieden wird hierbei zwischen dem Winterhalbjahr (dunkelgrüne Balken) und Sommerhalbjahr (hellgrüne Balken). Die Jahressumme ist in orange dargestellt. Es zeigt sich, dass die größten Verluste vor allem auf die hohen Verdunstungswerte in den Sommermonaten zurückzuführen sind. Die Wintermonate sind hingegen in der Regel durch einen Niederschlagsüberschuss geprägt.

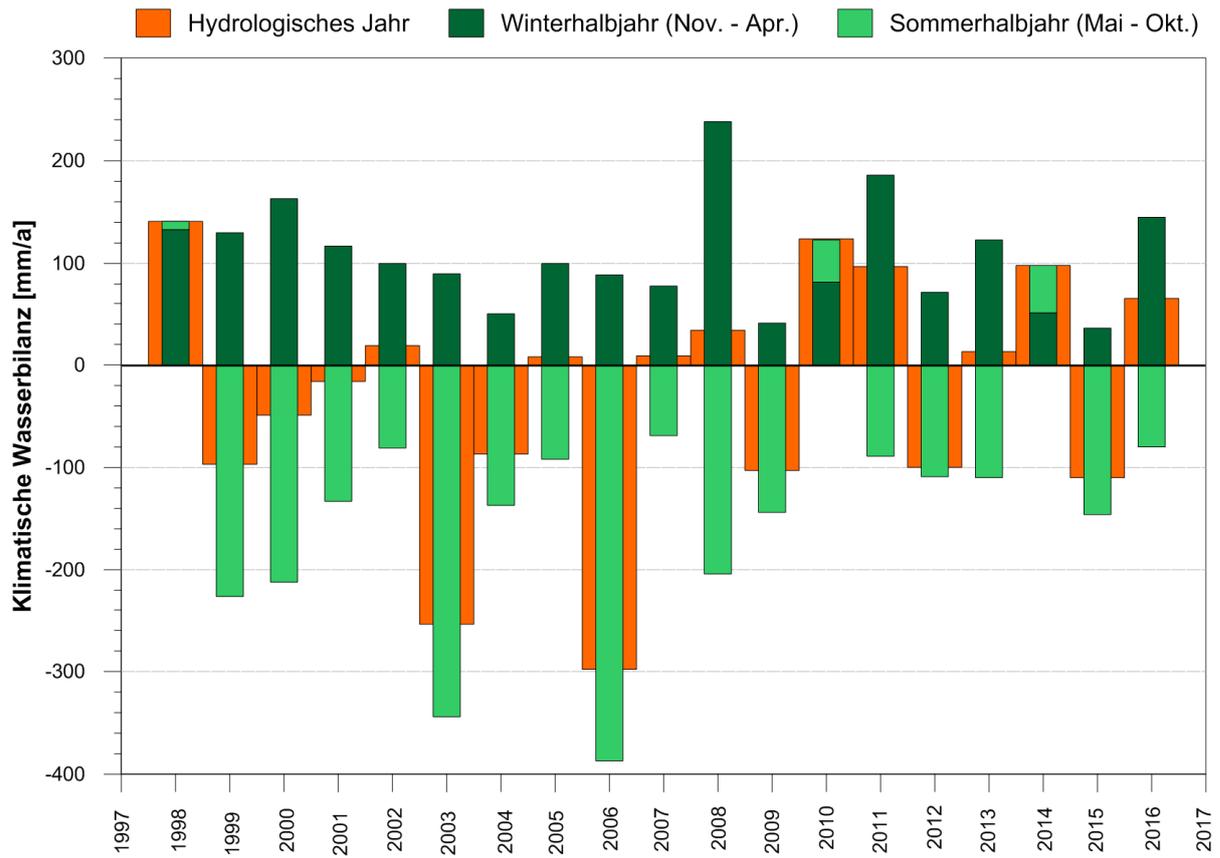


Abbildung 8: Klimatische Wasserbilanz für das hydrologische Jahr (orange), das Winterhalbjahr (dunkelgrün) sowie das Sommerhalbjahr (hellgrün) im Zeitraum 1998 bis 2016 für die Klimastation Friedrichshof in den Lasszinswiesen (Quelle: BTU-Cottbus-Senftenberg)

8 Wasserhaushaltsbilanz

Für die Bilanzierung des Seewasserhaushaltes wird die allgemeine Wasserhaushaltsgleichung herangezogen. Diese lautet wie folgt (Gl. 2):

$$\text{Gl. 2} \quad \Delta S = N - ET - A$$

mit:	ΔS	Änderung Speicherinhalt / Wasserstand
	N	Niederschlag
	ET	Evapotranspiration (Gewässerverdunstung bezogen auf einen See)
	A	Abfluss (hier Versickerung)

Durch die Wasserstandsmessungen ist ΔS bekannt. Die Verlustgröße Evapotranspiration, speziell die Verdunstung von der Gewässeroberfläche, muss nach gängigen Verfahren anhand messbarer Größen hergeleitet werden. Der Abfluss aus dem Gebiet entspricht hier der Versickerung. Diese kann nach Umstellung der Gl. 2 als Restglied abgeschätzt werden.

8.1 Niederschlag

Da der Pastlingsee keine Speisung durch andere oberirdische Gewässer erfährt, wird der Niederschlag als einzige Eingangsgröße angesehen. Die Ergebnisse einer N-A-Modellierung (vgl. Kapitel 8.4) haben gezeigt, dass aus dem oberirdischen Einzugsgebiet lediglich infolge von Starkregenereignissen mit einem oberirdischen Abfluss zu rechnen ist. Da dieser kaum zu quantifizieren ist und in der Gesamtbilanz eine untergeordnete Rolle spielt, wird er bei den weiteren Betrachtungen vernachlässigt.

Die Bestimmung der Wasserhaushaltsgröße Niederschlag (N) erfolgt durch direkte Messung an entsprechenden Wetterstationen. Im Umfeld des FFH-Gebietes „Pastlingsee“ stehen mehrere Messstationen zur Verfügung. Darüber hinaus werden seit September 2013 die Niederschlagshöhen direkt im Pastlingmoor erfasst.

Wie jede Messgröße unterliegt auch die Bestimmung der Niederschlagshöhe gewissen Messfehlern. In Abhängigkeit vom Messverfahren und Standort treten Messunsicherheiten z.B. durch die Einflüsse von Wind und Verdunstung auf. Aufgrund dessen wird in der Regel eine um 10 % geringere Niederschlagshöhe gemessen, als tatsächlich gefallen ist (BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (HG.) 2000). Dieser Umstand macht eine nachträgliche Korrektur der Messwerte erforderlich. Die so korrigierten Messwerte werden dann als korrigierter Niederschlag bezeichnet. Laut Hydrologischem Atlas von Deutschland (HAD, BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (HG.) 2000) liegen die durchschnittlichen korrigierten Niederschlagshöhen im Bereich des Untersuchungsgebietes bei 600 bis 700 mm/a. Langjährige Mittelwerte umliegender Wetterstationen sind in der Tabelle 2 zusammengetragen.

Tabelle 2: Zusammenstellung langjähriger Mittelwerte der Niederschlagshöhe an verschiedenen Standorten und für unterschiedliche Zeiträume

Standort Messstation	Entfernung zum FFH-Gebiet [km]	Periode	Quelle	langjähriger Mittelwert [mm/a]	
				unkorrigiert	korrigiert
Guben	11	1981-2010	DWD	576	-
Pinnow	8	1981-2010	DWD	624	680*
Tauer	7	1981-2010	DWD	625	-
Lasszinswiesen	6	1998-2016	BTU	572	645

* nachträgliche Korrektur nach RICHTER (1995) auf Grundlage von Tageswerten, für Niederschlag Station Pinnow und Temperatur Station Cottbus

Die langjährigen mittleren Niederschlagshöhen der Tabelle 2 verdeutlichen die räumliche Variabilität des Niederschlags. Für die Wasserhaushaltsbilanzierung ist eine Datenreihe zu wählen, deren Messwerte am besten mit den Niederschlägen im FFH-Gebiet korrelieren. Da der Bilanzierungszeitraum mit der regelmäßigen Wasserstandserhebung im Pastlingsee im Oktober 1997 beginnt, sind die Aufzeichnungen der 2013 auf dem Pastlingmoor errichteten Wetterstation deutlich zu kurz. Diese Daten werden jedoch dazu verwendet, eine geeignete Messstation mit ausreichend langer Datenreihe auszuwählen. Entsprechende Korrelationen sind in der Abbildung 9 enthalten.

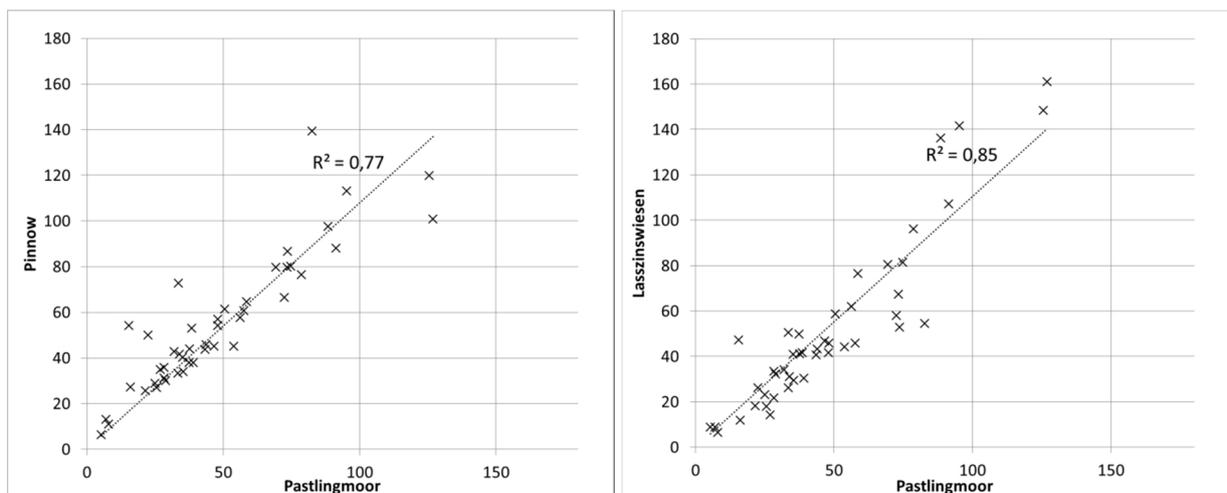


Abbildung 9: Vergleich der Niederschlagsdaten (Tageswerte) der Stationen Pinnow (DWD) und Lasszinswiesen (BTU) mit den Daten der Station Pastlingmoor (BTU)

Die Abbildung 9 zeigt, dass die Niederschlagsdaten der Station Lasszinswiesen am besten mit den Werten der Station Pastlingmoor korrelieren. Das Bestimmtheitsmaß liegt bei 0,85 und der Korrelationskoeffizienten bei 0,92. Dementsprechend werden für die nachfolgenden Betrachtungen die Niederschlagsdaten der Station Lasszinswiesen herangezogen.

Aufgrund von unvollständigen Datenreihen bzw. zu großer Entfernung zum Untersuchungsgebiet wurden die Messstationen Tauer und Guben hier nicht weiter betrachtet.

8.2 Gewässerverdunstung

Bezogen auf den Wasserhaushalt des FFH-Gebietes stellt die Verdunstung (ET) eine zehrende Größe dar. Da eine direkte Messung der Verdunstungshöhe mit großem Aufwand verbunden ist, wird diese in der Regel anhand anderer, messbarer Parameter berechnet. Hierfür gibt es eine Vielzahl von Ansätzen. Generell ist zwischen der realen (ET_{real}) und der potentiellen Verdunstung (ET_{pot}) zu unterscheiden. Die Unterschiede zwischen ET_{pot} und ET_{real} resultieren aus dem für die Verdunstung zur Verfügung stehenden Wasserdargebot. Mit abnehmender Wasserverfügbarkeit sinkt die tatsächliche Verdunstungshöhe und strebt gegen Null. Die potenzielle Verdunstung bleibt aufgrund ihres theoretischen Charakters hingegen hoch. Dies führt zum Teil zu erheblichen Diskrepanzen zwischen der realen und der potenziellen Verdunstungshöhe. Für das Untersuchungsgebiet wird im Hydrologischen Atlas von Deutschland (2000) eine mittlere jährliche reale Verdunstungshöhe von 575 mm/a bis 600 mm/a angegeben. Die potentielle Verdunstung, hier die Gras-Referenzverdunstung, ist mit Werten von etwa 650 mm/a angegeben.

Aufgrund der permanenten Wasserverfügbarkeit über Gewässerflächen, wird die berechnete potentielle Verdunstungshöhe oftmals mit der realen Verdunstung von Wasserflächen gleichgesetzt. Je nach Berechnungsansatz ergeben sich daraus erhebliche Unterschiede bei den Verdunstungsverlusten bzw. der daraus berechneten Klimatischen Wasserbilanz. Dies wird mit Hilfe der Abbildung 10 verdeutlicht. Dargestellt sind Ganglinien kumulierter KWB mit unterschiedlichen Verdunstungen für den Zeitraum Oktober 1997 bis Dezember 2016.

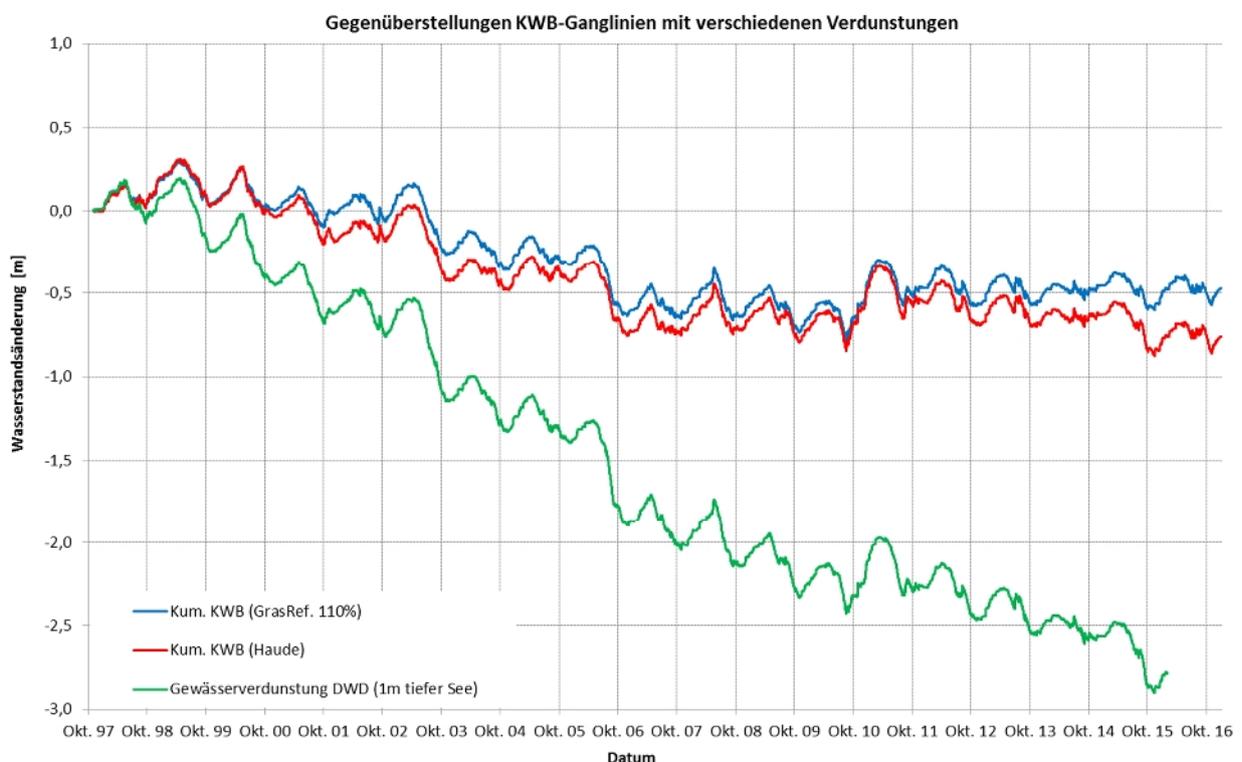


Abbildung 10: Vergleich von kumulierten KWB-Ganglinien unter Verwendung unterschiedlicher Verdunstungen (Datenquelle: BTU, DWD)

Die obere blaue Ganglinie in der Abbildung 10 resultiert aus der berechneten Gras-Referenzverdunstung auf Grundlage der Daten der Wetterstation in den Lasszinswiesen. Inner-

halb des Betrachtungszeitraumes von etwa 19 Jahren sinkt die Ganglinie kontinuierlich ab und endet im Dezember 2016 bei einem Wert von etwa -0,5 m. Unter Verwendung eines weiteren Ansatzes zur Berechnung der potentiellen Verdunstung (nach HAUDE (1955), rote Linie) ergibt sich für den gleichen Zeitraum ein Defizit von etwa -0,8 m. Deutlich größer ist die klimatisch bedingte Zehrung unter Verwendung einer vom DWD berechneten Gewässerverdunstung für einen 1 m tiefen See in Ostbrandenburg. Innerhalb des Betrachtungszeitraumes sinkt der Wasserstand um ca. -2,8 m. Die hier verwendete Datenreihe erstreckt sich bis zum 31.12.2015.

Auf Grundlage der in Abbildung 10 dargestellten Ganglinien ergeben sich die in der Tabelle 3 aufgeführten mittleren jährlichen Verdunstungshöhen. Es ist davon auszugehen, dass die üblichen Ansätze zur Berechnung der potentiellen Verdunstung die tatsächlichen Verdunstungsverluste von Gewässerflächen unterschätzen. Verglichen mit der jährlichen mittleren Niederschlagshöhe von etwa 645 mm/a (vgl. Kapitel 8.1), ist die Höhe der angenommenen Gewässerverdunstung allerdings entscheidend dafür, ob die Wasserhaushaltsbilanz innerhalb eines bestimmten Betrachtungszeitraumes positiv oder negativ ausfällt.

Tabelle 3: Vergleich der mittleren jährlichen Verdunstungshöhen in Abhängigkeit vom Berechnungsansatz

Berechnungsansatz potentielle Verdunstung	Datenquelle	Periode	mittlere jährliche Verdunstungshöhe [mm/a]
Gras-Referenz	Station Lasszinswiesen	1997-2016	664
Haude	Station Lasszinswiesen	1997-2016	685
Gewässerverdunstung	Modell DWD	1997-2015	780

Aus den in Tabelle 3 aufgeführten Unsicherheiten ergibt sich die Notwendigkeit, die Verdunstungshöhe von Wasserflächen zu berechnen. Hierfür stehen mehrere Ansätze zur Verfügung, die beispielsweise in dem DVWK-Merkblatt 238/1996 beschrieben werden. Nachfolgend werden zwei Berechnungsansätze beschrieben und gegenübergestellt. Darüber hinaus erfolgt ein Vergleich der Berechnungsergebnisse mit gemessenen Verdunstungsdaten, die im Zuge einer Studie (GFI 2017) erhoben wurden.

8.2.1 Berechnung nach dem Dalton-Verfahren

Beim Dalton-Verfahren handelt es sich um ein empirisch-statistisches Berechnungsverfahren, welches unter anderem die Windgeschwindigkeit, die Luftfeuchte und die Temperatur der Wasseroberfläche berücksichtigt. Demnach kann die Verdunstung von einer Wasserfläche (ET_{GW}) wie folgt berechnet werden:

$$\text{Gl. 3} \quad ET_{GW} = f(v) * (e_s(T_{W0}) - e)$$

mit: $f(v)$ Windfunktion der Windgeschwindigkeit v
 $e_s(T_{W0})$ Sättigungsdampfdruck bei Temperatur der Wasseroberfläche (T_{W0})
 e Dampfdruck der Luft

Die Windfunktion kann für die mittlere Windgeschwindigkeit eines Tages wie folgt berechnet werden:

$$\text{Gl. 4} \quad f(v) = a + b * v^c$$

Wobei es sich bei a, b und c um Koeffizienten handelt, die von verschiedenen Autoren für unterschiedliche Fragestellungen ermittelt wurden. Für die hier betrachteten Seen werden die Werte gemäß RICHTER (1977) für norddeutsche Seen mit a = 0,16, b = 0,20 und c = 0,5 verwendet.

Die Berechnung des Sättigungsdampfdruckes über der Wasseroberfläche erfolgt nach der nach SONNTAG (1994) angepassten Magnus-Formel unter Verwendung der Wasseroberflächentemperatur:

$$\text{Gl. 5} \quad e_s(T_{W_0}) = 6,11 * e^{\frac{17,62 * T_{W_0}}{243,12 + T_{W_0}}}$$

Bei negativen Gewässertemperaturen erfolgt die Berechnung des Sättigungsdampfdruckes über Eis mit angepasstem Exponent wie folgt:

$$\text{Gl. 6} \quad e_s(T_{W_0}) = 6,11 * e^{\frac{22,46 * T_{W_0}}{272,62 + T_{W_0}}}$$

Der Dampfdruck der Luft berechnet sich analog zum Sättigungsdampfdruck Gl. 5 unter Verwendung der Lufttemperatur T_{Luft} und der relativen Luftfeuchte U:

$$\text{Gl. 7} \quad e = 6,11 * e^{\frac{17,62 * T_{Luft}}{243,12 + T_{Luft}}} * \frac{U}{100}$$

Neben der Windgeschwindigkeit, der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit wird gemäß Gl. 3 die Temperatur der Wasseroberfläche der Seen benötigt. Da hierfür keine Messreihen zur Verfügung stehen, kann diese nach folgender Gleichung abgeschätzt werden:

$$\text{Gl. 8} \quad T_{W_0} = p * T^* + q$$

Wobei es sich bei p und q um Koeffizienten handelt, die zur Berechnung von Tageswerten geeignet sind. Für Seen bis 3 m ergeben sich die Werte p = 1,12 und q = 0,82. Bei T* handelt es sich um eine mittlere Lufttemperatur, die sich in Abhängigkeit von der Gewässertiefe aus der Temperatursumme T von n vorausgesehenen Tagen wie folgt berechnet:

$$\text{Gl. 9} \quad T^* = \frac{1}{n+m} \sum_1^{n+m} T$$

Die Anzahl der zu berücksichtigenden Tage m ergibt sich aus der mittleren Gewässertiefe z über folgenden Zusammenhang:

$$\text{Gl. 10} \quad m = 1,04 * z + 4,0$$

Die Gl. 10 ist nur für die eisfreie Zeit April bis Dezember gültig. Für die Wintermonate wurde die Temperatur pauschal über einen Zeitraum von 40 Tagen gemittelt.

Eine Überprüfung der Gleichungen zur Berechnung der Wasseroberflächentemperatur kann anhand der gemessenen Daten am Pastlingsee erfolgen. Im Zuge der GFI-Studie (GFI 2017) wurden unter anderem die Wasseroberflächentemperaturen gemessen. Ein entsprechender Vergleich erfolgt in der Abbildung 11. Dargestellt sind die Ganglinien der gemessenen und berechneten Wasseroberflächentemperaturen. Es zeigt sich, dass mit dem oben beschriebenen Ansatz und unter Verwendung der Wetterdaten der Station Lasszinswiesen eine gute Anpassung der berechneten Wasseroberflächentemperaturen an die Messreihe gelingt. Der Korrelationskoeffizient liegt bei 0,97.

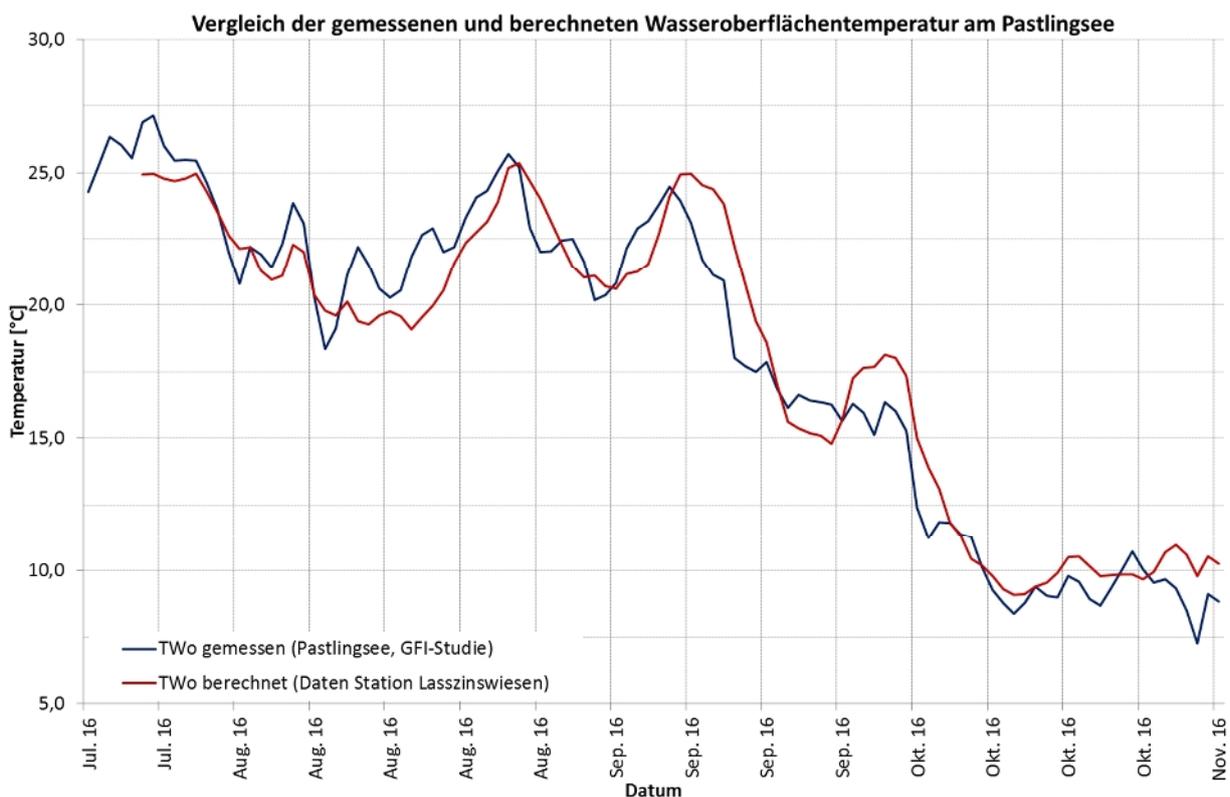


Abbildung 11: Vergleich der gemessenen und der berechneten Wasseroberflächentemperatur am Beispiel Pastlingsee

Für die Berechnung der Gewässerverdunstung werden die Daten der Wetterstation Lasszinswiesen herangezogen, da diese für einen ausreichend langen Zeitraum vorliegen. Obwohl die Wetterstation nur wenige Kilometer vom Untersuchungsgebiet entfernt liegt, können sich vor allem bei der Windgeschwindigkeit lokale Unterschiede ergeben. Dies wird in den Diagrammen der Abbildung 12 deutlich. Im linken Diagramm werden die gemessenen Windgeschwindigkei-

ten der Wetterstation Lasszinswiesen mit den während der Verdunstungsmessung erhobenen Daten verglichen. Es zeigt sich, dass zumindest im Vergleichszeitraum Juli – Oktober 2016 generell höhere Windgeschwindigkeiten an der Station Lasszinswiesen gemessen wurden. Die Werte der Lasszinswiesen liegen im Mittel bei 1,7 m/s. Beim Pastlingsee ergeben sich für den gleichen Zeitraum durchschnittliche Geschwindigkeiten von etwa 1,1 m/s.

Noch deutlicher werden die kleinräumigen Unterschiede im rechten Diagramm der Abbildung 12. Hier werden die Daten vom Pastlingsee mit den Daten der Wetterstation Pastlingmoor verglichen. Obwohl beide Messstandorte nur wenige 100 m voneinander entfernt liegen, fallen die Werte auf dem Moor aufgrund einer windgeschützteren Lage viel niedriger aus. Im Mittel liegen die Werte bei 0,5 m/s und damit deutlich unter den Windgeschwindigkeiten der Station Lasszinswiesen.

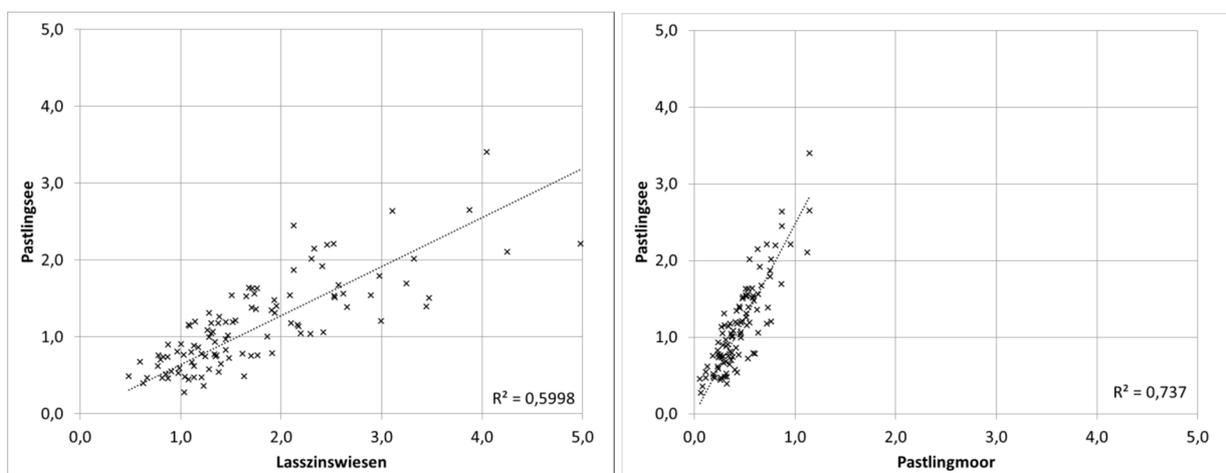


Abbildung 12: Vergleich der Windgeschwindigkeiten (Tageswerte) der Stationen Lasszinswiesen (BTU) und Pastlingmoor (BTU) mit den Daten vom Pastlingsee (GFI)

Die Abbildung 12 verdeutlicht, dass die an der Station Lasszinswiesen gemessenen Werte die tatsächlichen Windgeschwindigkeiten über der Seefläche überschätzen, jedoch die beste zur Verfügung stehende Datengrundlage bilden. Es ist davon auszugehen, dass die berechnete Gewässerverdunstung unter Verwendung der Winddaten Lasszinswiesen tendenziell zu hohe Werte liefert. Für den Zeitraum 1998 bis 2016 ergibt sich eine mittlere jährliche Gewässerverdunstungshöhe von 745 mm/a. Dieser Wert ist zwischen den Ergebnissen des DWD-Modells und der berechneten potentiellen Verdunstung nach HAUDE (1955) einzuordnen (vgl. Tabelle 3).

8.2.2 Berechnung nach RICHTER 1997

Eine weitere Möglichkeit zur Berechnung der Gewässerverdunstung bietet das Verfahren nach RICHTER (1997). Dieses Verfahren beruht auf einer empirischen Anpassung an gemessene Verdunstungshöhen. Für die Berechnung von Monatssummen wird folgende Beziehung angegeben:

$$\text{Gl. 11} \quad ET_{\text{GW}} = (0,337 * (e_s(T_{\text{Wo}}) - e) + 0,00057 * R_G - 0,036) * n$$

mit:	$e_s(T_{\text{Wo}})$	Sättigungsdampfdruck bei Temperatur der Wasseroberfläche (T_{Wo})
	e	Dampfdruck der Luft
	R_G	mittlere Globalstrahlung [$\text{J}/\text{cm}^2 \cdot \text{d}$]
	n	Anzahl der Tage im Bezugszeitraum

Analog zum Dalton-Verfahren sind für das Verfahren nach RICHTER (1997) der Sättigungsdampfdruck und der Dampfdruck der Luft gemäß den Gleichungen Gl. 6 Gl. 7 zu berechnen. Voraussetzung hierfür ist ebenfalls die Kenntnis der Wasseroberflächentemperatur (Gl. 8). Abweichend vom Dalton-Verfahren ist als weitere Klimagröße nicht die Windgeschwindigkeit, sondern die über einen bestimmten Zeitraum gemittelte Globalstrahlung zu berücksichtigen. Dieser Parameter unterliegt deutlich geringeren räumlichen Schwankungen und kann daher besser auf andere Untersuchungsgebiete übertragen werden. Dies spiegelt sich auch in der Abbildung 13 wider. Hier sind die Globalstrahlungswerte der Stationen Lasszinswiesen und Pastlingmoor gegeneinander aufgetragen. Die dargestellte Regressionsgerade verläuft mit einem hohen Bestimmtheitsmaß nahezu deckungsgleich mit der gedachten Geraden $x = y$.

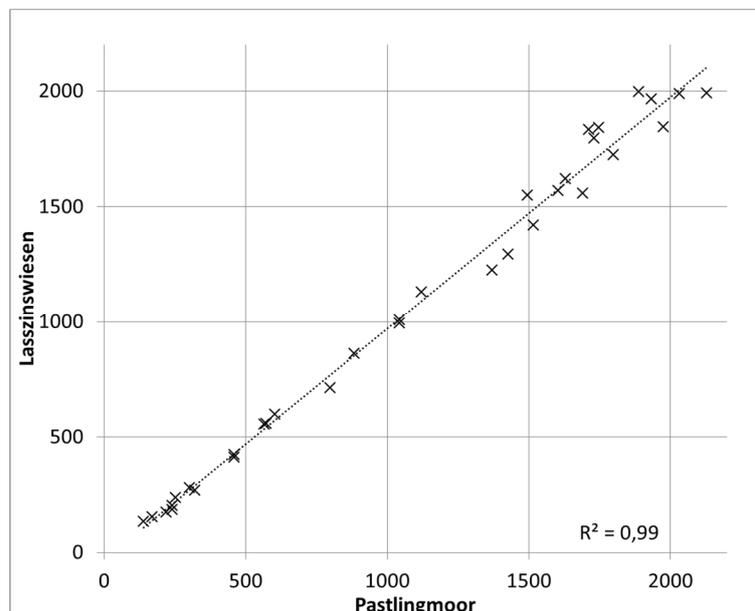


Abbildung 13: Vergleich der mittleren Globalstrahlung (Monatswerte) der Stationen Lasszinswiesen und Pastlingmoor (Datenquelle: BTU)

Mit dem Verfahren nach RICHTER (1997) und unter Verwendung der Daten der Station Lasszinswiesen ergibt sich für den Zeitraum 1998 bis 2016 eine mittlere jährliche Gewässerverdunstung

tungshöhe von 788 mm/a. Dieser Wert liegt deutlich über dem Dalton-Mittelwert und ist mit der Gewässerverdunstung des DWD-Modells vergleichbar.

8.2.3 Gegenüberstellung Gewässerverdunstung

Die verschiedenen Berechnungsansätze zur Abschätzung der Gewässerverdunstung liefern unterschiedliche Ergebnisse, die sich, bezogen auf die mittlere jährliche Gewässerverdunstungshöhe, um etwa 6 % unterscheiden. Verwendet man die unterschiedlichen Verdunstungshöhen zur Berechnung einer kumulierten Klimatischen Wasserbilanz, so ergeben sich für den Betrachtungszeitraum Oktober 1997 bis Dezember 2015 erhebliche Unterschiede. Dies zeigt sich im Ganglinienvergleich der Abbildung 14. Während die kumulierte KWB (ET_{GW} DALTON) am Ende des Betrachtungszeitraumes ein Defizit von etwa -2,0 m aufweist, liegen die übrigen Ganglinien kum KWB (ET_{GW} RICHTER) und kum KWB (ET_{GW} DWD) etwa 0,8 m tiefer. Dies verdeutlicht die zum Teil erheblichen Unterschiede zwischen den verschiedenen Berechnungsansätzen.

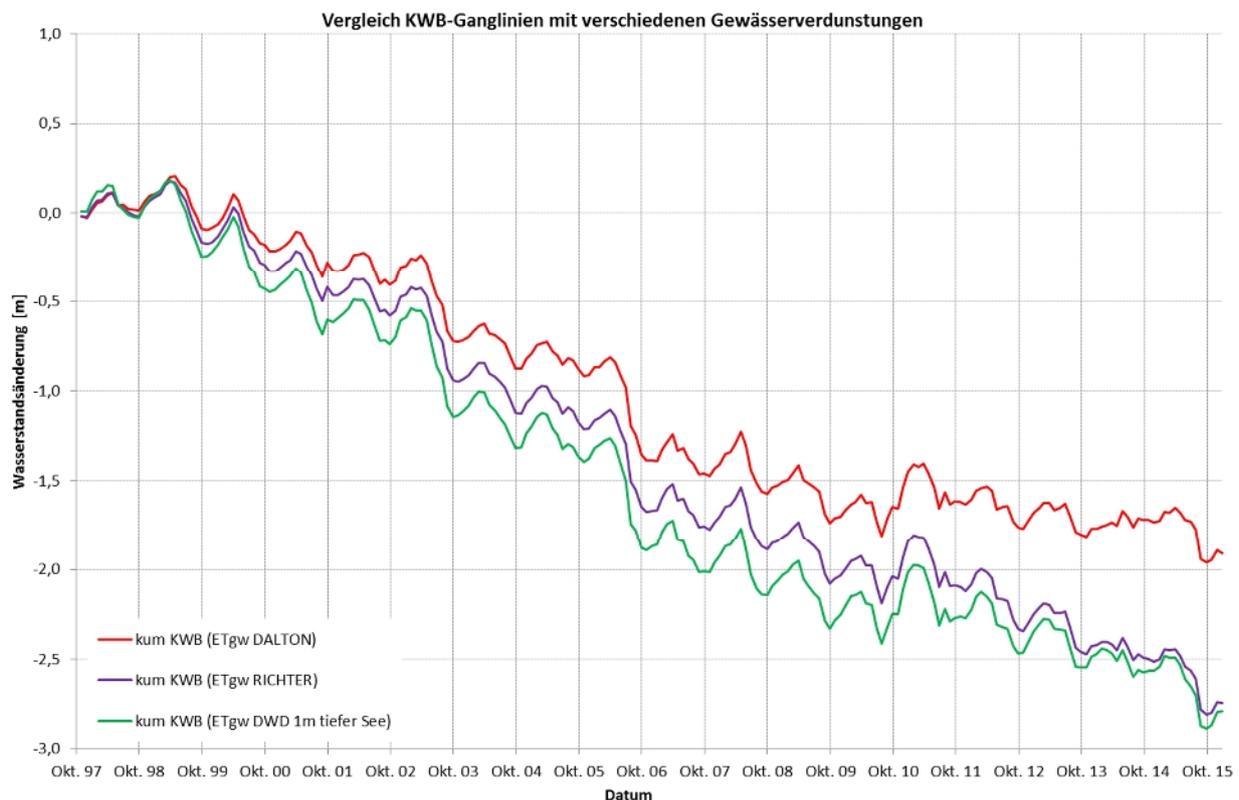


Abbildung 14: Vergleich der kumulierten Klimatischen Wasserbilanz unter Verwendung verschiedener Gewässerverdunstungen für den Zeitraum Oktober 1997 bis Dezember 2015

Die Wahl des Ansatzes zur Berechnung der Gewässerverdunstung wirkt sich maßgeblich auf die Verdunstungshöhen aus. Einen Anhaltspunkt darauf, welches Berechnungsverfahren die tatsächlichen Verdunstungshöhen am besten widerspiegelt, liefert die Studie „Messung der Verdunstung des Pastlingsees“ (GFI 2017). Im Rahmen dieser Studie wurde die Gewässerverdunstung des Pastlingsees im Zeitraum Juli bis Oktober 2016 gemessen und die so ermittelten Verdunstungshöhen mit verschiedenen Berechnungsansätzen verglichen. Im Ergebnis zeigte

sich, dass die Messergebnisse am besten mit dem Berechnungsansatz nach Dalton wiedergegeben werden.

Ein Vergleich der verschiedenen berechneten Gewässerverdunstungen unter Verwendung der Wetterdaten der Station Lasszinswiesen mit den Messwerten der GFI-Studie (GFI 2017) erfolgt in der Tabelle 4. Demnach werden die Messwerte zumindest für den hier betrachteten Zeitraum sowohl mit dem Dalton-Verfahren als auch mit dem Verfahren nach RICHTER (1997) um etwa 10 bis 15 % überschätzt. Es zeigt sich, dass die Berechnung der Gewässerverdunstung nach wie vor mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist. Dies ist in erster Linie auf die Datenprojektion umliegender Wetterstationen auf das Untersuchungsgebiet zurückzuführen. Durch diese räumliche Verschiebung ergeben sich zum Teil erhebliche Abweichungen der verwendeten Eingangsdaten zu den realen Bedingungen vor Ort (vgl. z.B. Abbildung 12).

Tabelle 4: Vergleich der gemessenen Gewässerverdunstung (GFI 2017) mit verschiedenen berechneten Verdunstungshöhen

Monat	Messwerte ET_{GW} GFI [mm]	ET_{GW} DALTON			ET_{gw} RICHTER (1997)		
		100%	90%	85%	100%	90%	85%
ab 20. Jul 16	52,9	49,4	44,5	42,0	50,4	45,4	42,8
Aug 16	118,6	119,97	108,0	101,98	123,10	110,8	104,6
Sep 16	88,9	114,46	103,0	97,29	115,00	103,5	97,8
Okt 16	21,3	40,06	36,1	34,05	38,00	34,2	32,3
Summe:	281,6	323,9	291,5	275,3	326,5	293,9	277,5

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der GFI-Studie wurde sich im Rahmen von Projektbesprechungen mit dem LfU und dem LBGR darauf verständigt, dass für die nachfolgenden Untersuchungen die nach dem Dalton-Verfahren berechnete Gewässerverdunstung verwendet wird.

8.3 Versickerung

Der Ganglinienvergleich in Kapitel 6 zeigt, dass der Seewasserstand permanent über der Druckhöhe im Haupthangendgrundwasser liegt. Daher ist davon auszugehen, dass Wasser aus dem See in Richtung des HGWL versickert.

Wie eingangs beschrieben kann die Versickerung als Restglied der Wasserhaushaltsbilanz berechnet werden. Dies setzt die Kenntnis über die Änderung des Seespeicherinhaltes sowie den klimatischen In- und Output voraus. In der Abbildung 15 ist die relative Wasserstandsentwicklung im Pastlingsee (blaue Ganglinie) für den Zeitraum Oktober 1997 bis Dezember 2015 dargestellt. Darüber hinaus sind weitere berechnete Ganglinien bzw. Bilanzmodelle enthalten, die aus einer kumulierten Klimatischen Wasserbilanz und einem angenommenen Verdunstungsanteil resultieren. Ziel ist es, die Ganglinien der Bilanzmodelle durch die Anpassung von Verdunstung und Versickerung an die relative Wasserstandsentwicklung im Pastlingsee anzugleichen.

Die schwarze Ganglinie in der Abbildung 15 resultiert aus der kumulierten KWB der nach dem Dalton-Verfahren berechneten Gewässerverdunstung ohne unterirdischen Abfluss (Versicke-

rung). Es zeigt sich, dass die Ganglinie in den ersten vier Jahren des Betrachtungszeitraumes der Seentwicklung entspricht, nach 2001 jedoch deutlich schneller fällt als der Seewasserstand. Es ist davon auszugehen, dass die hier verwendete Gewässerverdunstung langfristig zu hohe Werte liefert und der Verdunstungsanteil reduziert werden muss, um eine bessere Anpassung an die Seewasserstandsentwicklung zu erzielen.

Die grauen Ganglinien ergeben sich ebenfalls aus der kumulierten KWB ohne Versickerung und mit auf 90 % bzw. 85 % verringertem Verdunstungsanteil. Beide Ganglinien verlaufen im gesamten Betrachtungszeitraum deutlich über der Seeganglinie. Ende 2015 ergeben sich hier Abweichungen zum Seewasserstand von + 1,5 m bzw. + 2,0 m. Dementsprechend gelingt eine Anpassung an den Seewasserstand nur durch die Ergänzung eines Versickerungsanteils, da die beobachteten Wasserstandsänderungen nicht ausschließlich auf die Verluste durch die Gewässerverdunstung zurückzuführen sind.

Durch die Verwendung einer zeitlich variabel gestaltet und schrittweise erhöhten Versickerung kann eine deutlich bessere Anpassung an die Seeganglinie erfolgen und die maximalen Abweichungen zur Seeganglinie auf etwa 0,2 m reduziert werden (siehe Abbildung 15). Je nach Verdunstungsanteil ergeben sich Versickerungsraten von etwa 11 m³/d bis 74 m³/d für 90 % E_{gw}-DALTON bzw. etwa 21 m³/d bis 85 m³/d für 85 % E_{gw}-DALTON.

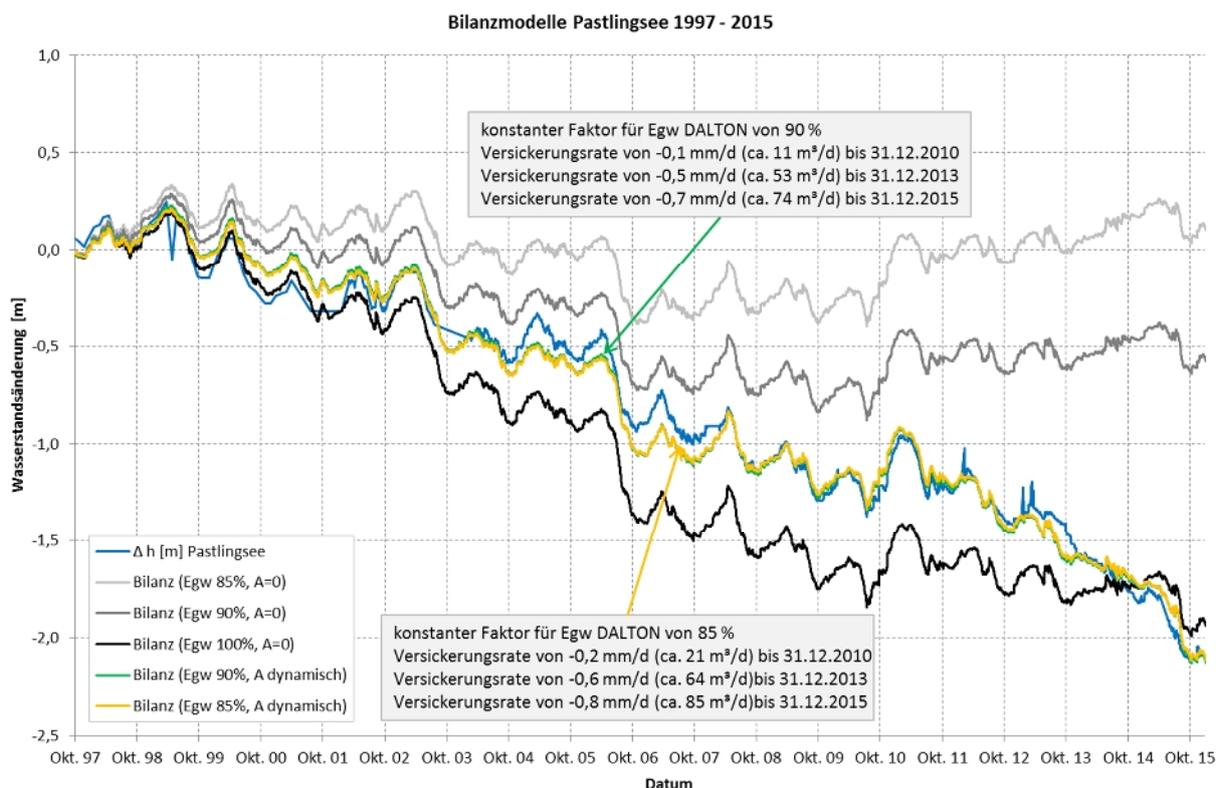


Abbildung 15: Bilanzmodelle für den Wasserhaushalt des Pastlingsees für den Zeitraum Oktober 1997 bis Dezember 2015

Die hier beschriebenen Bilanzmodelle bieten einen ersten einfachen Ansatz zur Abschätzung der Verlustgrößen Gewässerverdunstung und Versickerung. Hierbei handelt es sich allerdings um stark vereinfachte Annahmen. So werden beispielsweise die Seegeometrie und deren Ver-

änderungen wie abnehmende Seetiefe oder Seefläche nicht berücksichtigt. Auch Wechselwirkungen zu umliegenden Grundwasserkörpern finden bei diesem Ansatz keine Berücksichtigung. Darüber hinaus verdeutlichen die Ganglinien in Abbildung 15, dass eine Anpassung mehrerer Bilanzmodelle mit unterschiedlichen Verdunstungshöhen und Versickerungsverlusten an die Seeganglinie gelingt.

Erst die im Jahr 2016 durchgeführte Verdunstungsmessung lieferte eine Datengrundlage, welche diese Freiheitsgrade verringert und eine bessere Berechnung der Versickerungsverluste ermöglicht. Dies erfolgt unter Berücksichtigung der Gewässergeometrie und der geologischen Untergrundstrukturen mit einem dreidimensionalen Grundwassermodell (siehe Kapitel 10).

8.4 Weitere Ab- bzw. Zuflusskomponenten

Beim Pastlingsee handelt es sich um einen zu- bzw. abflusslosen See in Kessellage. Abgesehen von der seit Oktober 2015 laufenden Stützwassereinleitung sind keine weiteren Einleitungen oder Entnahmen bekannt.

In den Flurstückskarten ist ein Grabenflurstück ausgewiesen. Der betreffende Graben wurde augenscheinlich zur Entwässerung eines höher gelegenen Wiesenareals angelegt und mündete aus östlicher Richtung kommend in den Pastlingsee. Über die Wasserzuführung in den See über diesen Graben ist nichts bekannt. Der Oberlauf des Grabens ist aktuell vorhanden und führt in Zeiten mit hohem Wasserdargebot Wasser.

Relevant für den Wasserhaushalt des Feuchtgebietes können potentiell mögliche Zuflüsse aus dem oberirdischen Einzugsgebiet werden. Vor allem Oberflächenabfluss, der dem Feuchtgebiet direkt zufließt, kann sich unmittelbar auf den Wasserhaushalt des Feuchtgebietes auswirken. Ein für das Untersuchungsgebiet erstelltes Niederschlags-Abfluss-Modell (gIR 2012) hat gezeigt, dass derartige Ereignisse nur sehr selten auftreten und daher eine eher untergeordnete Rolle am Gesamtwasserhaushalt spielen. Im Niederschlags-Abfluss-Modell zeigt sich, dass das Infiltrationsvermögen des sandigen Untergrundes in der Regel ausreicht, um das anfallende Niederschlagswasser aufzunehmen und zu versickern. Damit gelangt es direkt in den Haupt-hangendgrundwasserleiter und kommt nicht im Feuchtgebiet an. Erst ab einem ca. 50 jährigen Starkregenereignis ist von signifikanten Oberflächenabflüssen auszugehen, die dann den See oder das Moor speisen.

Aufgrund ihres seltenen Auftretens werden weitere Zuflusskomponenten vernachlässigt, da diese für den Seewasserhaushalt nicht als relevant angesehen werden.

9 Grundwassermodellierung

Mit Hilfe der Grundwassermodellierung werden vorerst die beobachteten Druckhöhen bzw. Wasserstände simuliert. Anschließend wird das Modell dazu verwendet, für zwei Modellszenarien den Einfluss der bergbaulichen Entwässerung des Haupthangendgrundwasserleiters auf die Versickerungsverluste und damit einhergehend die Wasserstandsentwicklung im Pastlingsee zu simulieren.

9.1 Modellaufbau

Für dieses Gutachten wurde auf ein bereits vorhandenes Grundwassermodell zurückgegriffen, welches im Rahmen einer Studie (gIR 2012) im Auftrag der Vattenfall Europe Mining AG erstellt wurde. Dieses Modell wurde für die aktuellen Fragestellungen angepasst und unter Berücksichtigung gegenwärtig verfügbarer Daten aktualisiert. Die Modellanpassung erfolgte in Abstimmung mit LBGR und dem LfU. Nachfolgend werden die Modellannahmen beschrieben. Die Modellierung erfolgt unter Verwendung der Software FEFLOW® 7.1 der Firma DHI-Wasy.

9.1.1 Abgrenzung des Modellraumes und Festlegung des Modellrasters

Die Abgrenzung des Modellraumes blieb gegenüber dem Ursprungsmodell von 2012 unverändert und orientiert sich an der Ausdehnung der See- bzw. der Moorfläche. Darüber hinaus wurde darauf geachtet, dass ein ausreichend großer Abstand zum Rand des Feuchtgebietes gewährleistet ist. Insgesamt deckt das Modellgebiet eine Fläche von etwa 61 ha ab. Es hat eine Ost-West-Ausdehnung von etwa 1.250 m, die Nord-Süd-Ausdehnung beläuft sich auf ca. 540 m.

Die räumliche horizontale Modellauflösung erfolgt im FEFLOW® durch das Aufsetzen eines Finite-Elemente-Netzes, welches aus Modellknoten und Modellelementen besteht. Sämtliche modellinternen Informationen, inklusive der Berechnungsergebnisse, konzentrieren sich auf die Modellknoten. Die Übertragung in die Fläche erfolgt über Interpolation. Die Auflösung, d.h. die Menge der Knoten pro Fläche ist frei wählbar. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die Anzahl der Knoten die Berechnungszeit und die Anforderungen an die Rechnerkapazität nicht ins Unermessliche steigen lassen. Jedoch ist zu gewährleisten, dass das Modell stabil rechnet und hinreichend genaue Ergebnisse liefert.

Für das 61 ha große Modellgebiet wurde in mehreren Schritten mittels des Triangle-Netzgenerators ein Finite-Elemente-Netz erstellt. Dies führte in einem ersten Schritt zu einer Elementgröße von ca. 20 bis 90 m² bei Knotenpunktabständen von maximal 20 m. In einem weiteren Schritt wurde das Netz innerhalb von See- und Moorfläche auf Elementgrößen mit 20 bis 40 m² und Knotenpunktabständen von maximal 10 m verdichtet. Eine zusätzliche Netzverfeinerung erfolgt im Übergangsbereich zum umgebenen Sandkörper. Hier wurden Elementgrößen zwischen 10 bis 15 m² realisiert. Insgesamt besteht das Modellraster aus 11.070 Knotenpunkten bei 21.928 Modellelementen.

Die Ausdehnung des Modellgebietes sowie dessen Berechnungsnetz sind in der Abbildung 16 dargestellt.

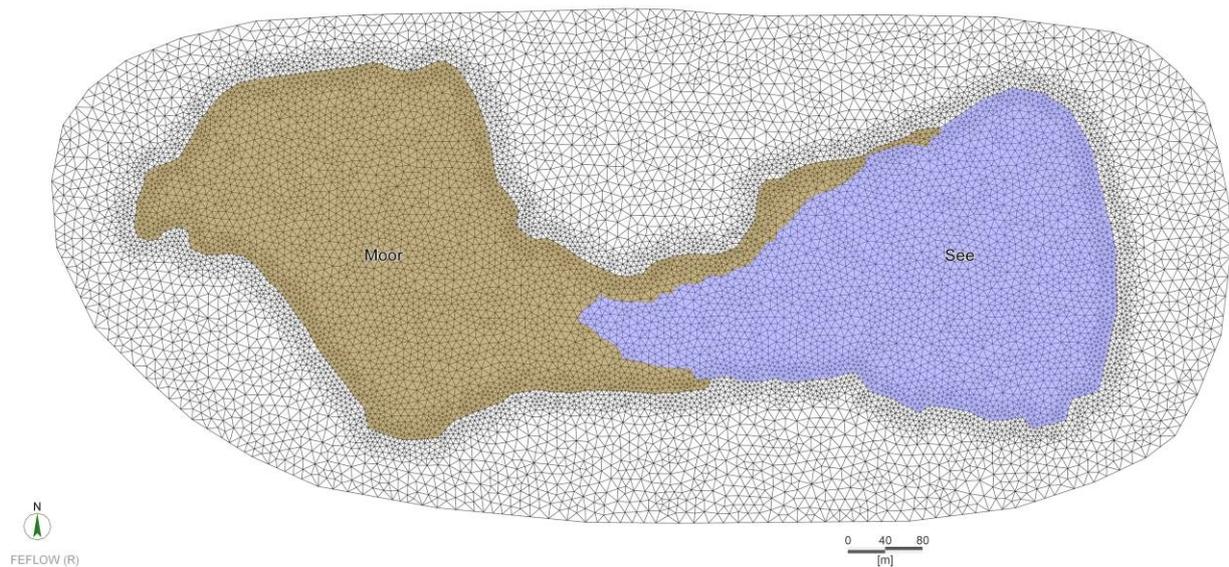


Abbildung 16: Abgrenzung des Modellraumes und Modellraster für das Grundwassermodell Pastlingsee

9.1.2 Geologisches Strukturmodell

Das geologische Strukturmodell berücksichtigt im Wesentlichen sechs geologische Schichten. Ihre Geometrie, Verbreitung und Mächtigkeit wurde gegenüber dem Ausgangsmodell beibehalten und anhand der zur Verfügung stehenden Detailerkundungen GMB (2000, 2001), PFAFF (2002) sowie der Lithofazieskarte Quartär (LKQ) ausgewiesen. Allerdings erfolgte im Zuge der Modellanpassungen eine deutliche Erhöhung der vertikalen Auflösung. Hierfür wurden die geologischen Schichten durch weitere Zwischenschichten unterteilt. Während das Ausgangsmodell von 2012 über sechs Modellschichten (Layer) verfügt, die den geologischen Horizonten gleichzusetzen sind, wurde die Anzahl der Modellschichten im aktuellen Modell auf 50 erhöht. Dies ist notwendig, um den Übergangsbereich zwischen gesättigter und ungesättigter Bodenzone deutlich schärfer abbilden zu können. In der Abbildung 17 ist ein Ausschnitt des Strukturmodells vor (links) und nach (rechts) der Erhöhung der vertikalen Auflösung dargestellt. Die Nummerierung der Schichten im linken Bild entspricht den geologischen Schichten in Tabelle 5.

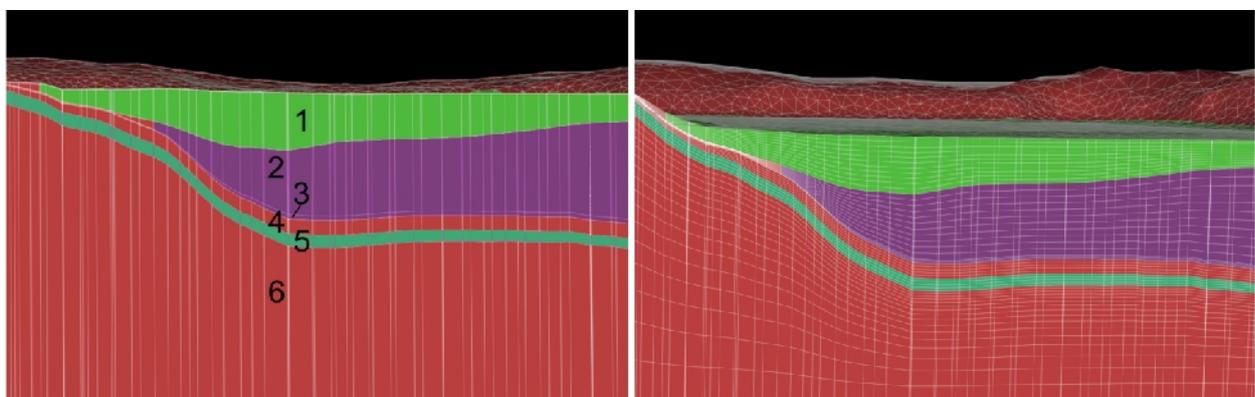


Abbildung 17: Erhöhung der vertikalen Auflösung von sechs Layern im Ausgangsmodell (links) auf 50 Layer im überarbeiteten Modell (rechts)

Eine Zuordnung der Modellschichten zu den verschiedenen geologischen Horizonten erfolgt in der Tabelle 5. Darüber hinaus enthält die Tabelle 5 Angaben zu den maximalen Schichtmächtigkeiten sowie eine Unterteilung in Grundwasserleiter und Grundwasserstauer. Die Mächtigkeiten der verschiedenen Modellschichten und deren räumliche Verteilung sind detailliert in Plan 2 bis Plan 7 dargestellt. Entsprechende Basiskarte sind der Anlage Plan 8 bis Plan 13 zu entnehmen.

Tabelle 5: Aufbau Hydrogeologisches Strukturmodell

Geologische Schicht	Sediment	Modellschicht (Layer)	Anzahl Layer pro geol. Schicht	maximale Mächtigkeit [m]	Bedeutung
1	Torf (lokaler Grundwasserleiter)	Layer 1 - 11	11	4,3	Grundwasserleiter
2	Mudde (Lebermudde und Detritusmudde)	Layer 12 - 22	11	9,5	Grundwasserstauer
3	Basisschluff und Basismudden	Layer 23 - 25	3	0,3	Grundwasserstauer
4	Sandkörper (ZwischenGWL)	Layer 26 - 30	5	4,0	Grundwasserleiter
5	Geschiebemergel der Weichselkaltzeit	Layer 31 - 34	4	1,0	Grundwasserstauer
6	Schmelzwassersande (HaupthangendGWL)	Layer 35 - 50	16	31,6	Grundwasserleiter

Während sich die Modelloberfläche des Strukturmodelles aus dem digitalen Geländemodell bzw. der Seevermessung ergibt (siehe Kapitel 9.1.5), wurde die Modellbasis auf eine einheitliche Höhe von 45 m NHN gesetzt. Insgesamt besteht das Strukturmodell aus etwa 565.000 Modellknoten und 1,1 Mio. Modellelementen.

9.1.3 Parametrisierung

Die hydraulischen Eigenschaften der geologischen Schichten werden im Grundwassermodell durch die Parameter Durchlässigkeitsbeiwert (k_f -Wert) bzw. hydraulische Leitfähigkeit und Porosität beschrieben. Da für die Modellierung ein ungesättigter Modellansatz gewählt wurde, ist bei der Porosität das Gesamtporenvolumen anzusetzen. Darüber hinaus handelt es sich beim k_f -Wert um die maximale hydraulische Leitfähigkeit bei vollständiger Sättigung des Porenraumes. In der Tabelle 6 sind die verwendeten Parameter dargestellt. Hierbei handelt es sich bereits um die im Rahmen der Modellkalibrierung (siehe Kapitel 9.2) optimierten Werte. Diese orientieren sich an den zur Verfügung stehenden Erkundungsergebnissen (PFAFF, 2001) bzw. wurden der Literatur (z.B. HÖLTING, COLDEWEY 2009, BODEN AG 2005) entnommen. Die in der Tabelle 6 enthaltenen Werte weichen zum Teil vom Ausgangsmodell 2012 ab.

Mit Hilfe des Grundwassermodells werden die Druckhöhen bzw. Wasserstände des lokal ausgebildeten Feuchtgebietes (Moor und See) über dem Haupthangendgrundwasserleiter abgebildet. Es ist davon auszugehen, dass die Grundwasserstände im Haupthangendgrundwasserleiter in einigen Bereichen unter das Höhenniveau der grundwasserstauenden Schichten fallen. Dies hat zur Folge, dass Bereiche unter den stauenden Horizonten nicht mehr vollständig mit

Wasser gesättigt sind, was zu einer Abnahme des durchflusswirksamen Porenraumes führt und eine Minderung der hydraulischen Leitfähigkeit mit sich bringt. Um derartige Verhältnisse modellhaft zu beschreiben, wird in FEFLOW® ein ungesättigter Modellansatz gewählt, der die Berechnung einer relativen hydraulischen Leitfähigkeit (K_r) in Abhängigkeit vom Grad der Wassersättigung ermöglicht. FEFLOW® bietet mehrere Möglichkeiten, ungesättigte Strömungsverhältnisse zu berücksichtigen. Im Pastlingsee-Modell wurde der so genannte Spline-Ansatz gewählt, da dieser die plausibelsten Modellergebnisse liefert und das Modell am stabilsten rechnet.

Tabelle 6: hydraulische Parameter der geologischen Schichten im Grundwassermodell

Bezeichnung der Geologischen Schicht	Durchlässigkeitsbeiwert k_f		Porosität []
	x,y [m/s]	z [m/s]	
Torf (lokaler Grundwasserleiter)	$5,0 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-7}$	0,95
Mudde (Lebermudde und Detritusmudde)	$1,0 \times 10^{-7} / 6,0 \times 10^{-7}$	$1,0 \times 10^{-8} / 6,0 \times 10^{-8}$	0,95
Basisschluff und Basismudden	$1,1 \times 10^{-7} / 6,0 \times 10^{-7}$	$1,1 \times 10^{-8} / 6,0 \times 10^{-8}$	0,40
Sandkörper (Zwischen-GWL)	$5,0 \times 10^{-5}$	$5,0 \times 10^{-6}$	0,35
Geschieblemergel der Weichselkaltzeit	$2,0 \times 10^{-6}$	$2,0 \times 10^{-7}$	0,40
Schmelzwassersande (Haupthängend-GWL)	$5,0 \times 10^{-5}$	$5,0 \times 10^{-6}$	0,35

Wie bereits angedeutet, wird beim ungesättigten Modellansatz der Sättigungsgrad an jedem Knotenpunkt im Modell berechnet und die daraus resultierende ungesättigte Leitfähigkeit ermittelt. Bei dem hier gewählten Spline-Ansatz werden sowohl die dafür nötigen Saugspannungskurven bzw. der Zusammenhang zwischen Sättigung und hydraulischer Leitfähigkeit vorgegeben. Entsprechende Kurven sind in den Diagrammen der Abbildung 18 dargestellt.

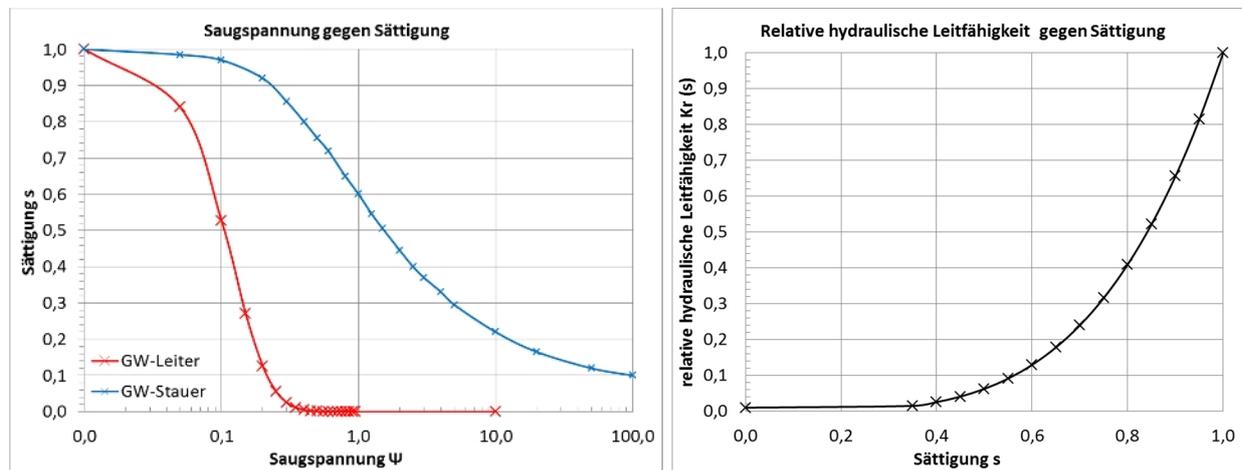


Abbildung 18: Spline-Kurven im Grundwassermodell zur Beschreibung der ungesättigten Leitfähigkeit

Im linken Diagramm der Abbildung 18 sind zwei verschiedene Saugspannungskurven dargestellt. Diese beschreiben die Abnahme des Wassergehaltes bei zunehmender Saugspannung sowohl für rollige Sedimente (GW-Leiter, rot) als auch für bindige Substrate (GW-Stauer, blau). Eine entsprechende Zuordnung erfolgt für die verschiedenen geologischen Schichten im Grundwassermodell (vgl. Tabelle 5).

Im rechten Diagramm der Abbildung 18 ist der im Modell hinterlegte Zusammenhang zwischen der Sättigung und der hydraulischen Leitfähigkeit dargestellt. Dieser gilt für alle Schichten im Modell.

9.1.4 Randbedingungen

Der Rand des Pastlingsee-Modells ist partiell mit einer Randbedingung der 1. Art (Festpotential) versehen. Die auch als Dirichlet-Bedingung bezeichnete Randbedingung gibt eine definierte Druckhöhe vor. Diese kann zeitlich konstant sein oder mit Hilfe einer hinterlegten Ganglinie variabel gestaltet werden. Letzteres findet Anwendung beim vorliegenden Pastlingsee-Modell.

In der Abbildung 19 sind die für den Modellrand vorgegebenen Grundwasserstände dargestellt. Dadurch wird die Wasserstandsentwicklung im Haupthangendgrundwasserleiter inklusive der bergbaulichen Grundwasserabsenkung im Modell umgesetzt. Die Ganglinien orientieren sich an drei im Modellgebiet befindlichen Grundwassermessstellen (Plan 1). Durch die räumliche Zuordnung der Ganglinien zu bestimmten Abschnitten des Modellrandes (vgl. Abbildung 19) wird gewährleistet, dass das Grundwassergefälle im Haupthangendgrundwasserleiter im Modell abgebildet wird. Dies kann anhand eines Vergleiches der modellierten und gemessenen Grundwasserstände überprüft werden (siehe Kapitel 9.2, Abbildung 30).

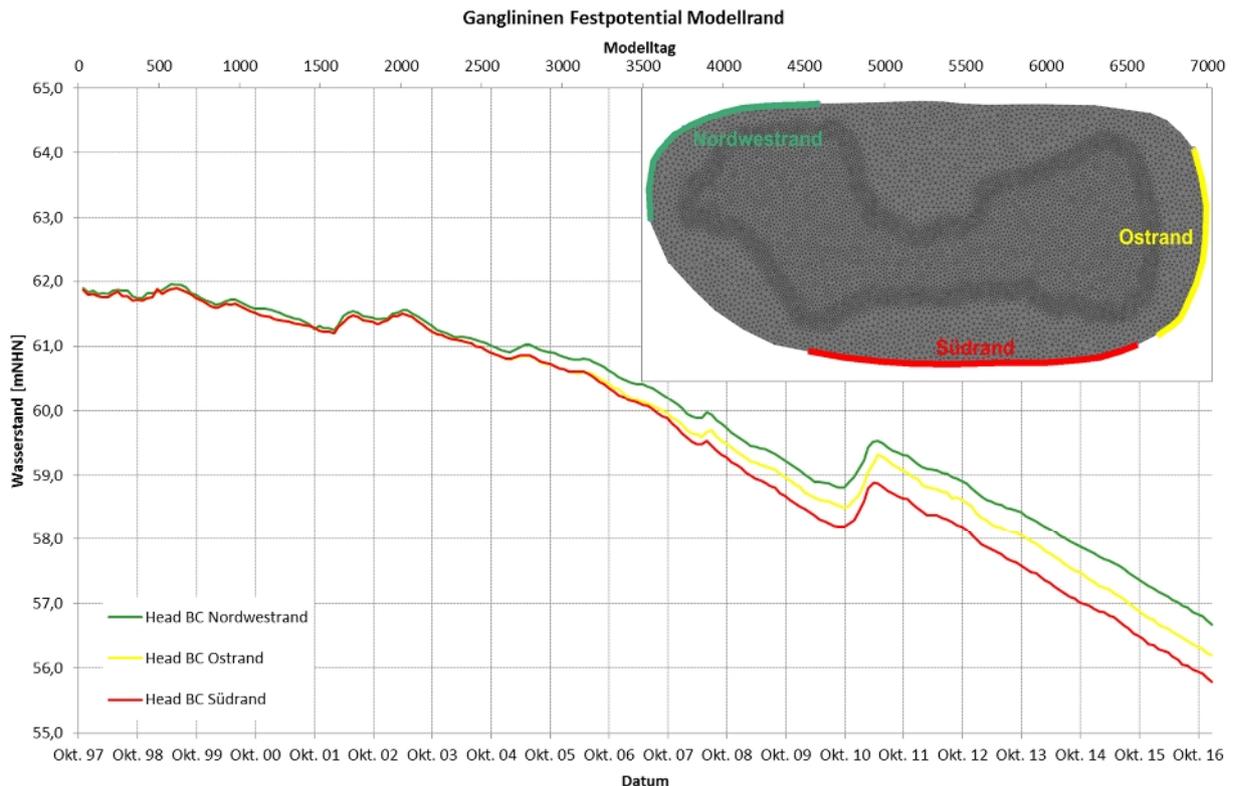


Abbildung 19: Ganglinien der vorgegebenen Festpotentiale im Grundwassermodell Pastlingsee

9.1.5 Abbildung des Sees

Die Abbildung des Seekörpers im Grundwassermodell erfolgt über die FEFLOW-Erweiterung IfmLake Plug-In. Ifm steht hier für Interfacemanager. Hierbei handelt es sich um eine Software-schnittstelle, die das Hinzuladen von so genannten Plug-Ins ermöglicht.

Das IfmLake Plug-In bietet die Möglichkeit, Oberflächengewässer im Grundwassermodell abzubilden. Dies erfolgt über eine angepasste Randbedingung der 3. Art (Cauchy-Randbedingung oder Transferrandbedingung). Transferrandbedingungen werden genutzt, um die Wechselwirkungen zwischen Grundwasserkörper und Oberflächengewässer im Modell abzubilden. Die Transferrandbedingung ermöglicht die Berechnung eines Grundwasserzu- oder abstromes in einen Vorfluter oder See unter Berücksichtigung der Gewässergeometrie und der Grundwasserdruckhöhe. Eine Kurzbeschreibung der Funktionsweise des IfmLake Plug-Ins erfolgt in der schematischen Darstellung der Abbildung 20.

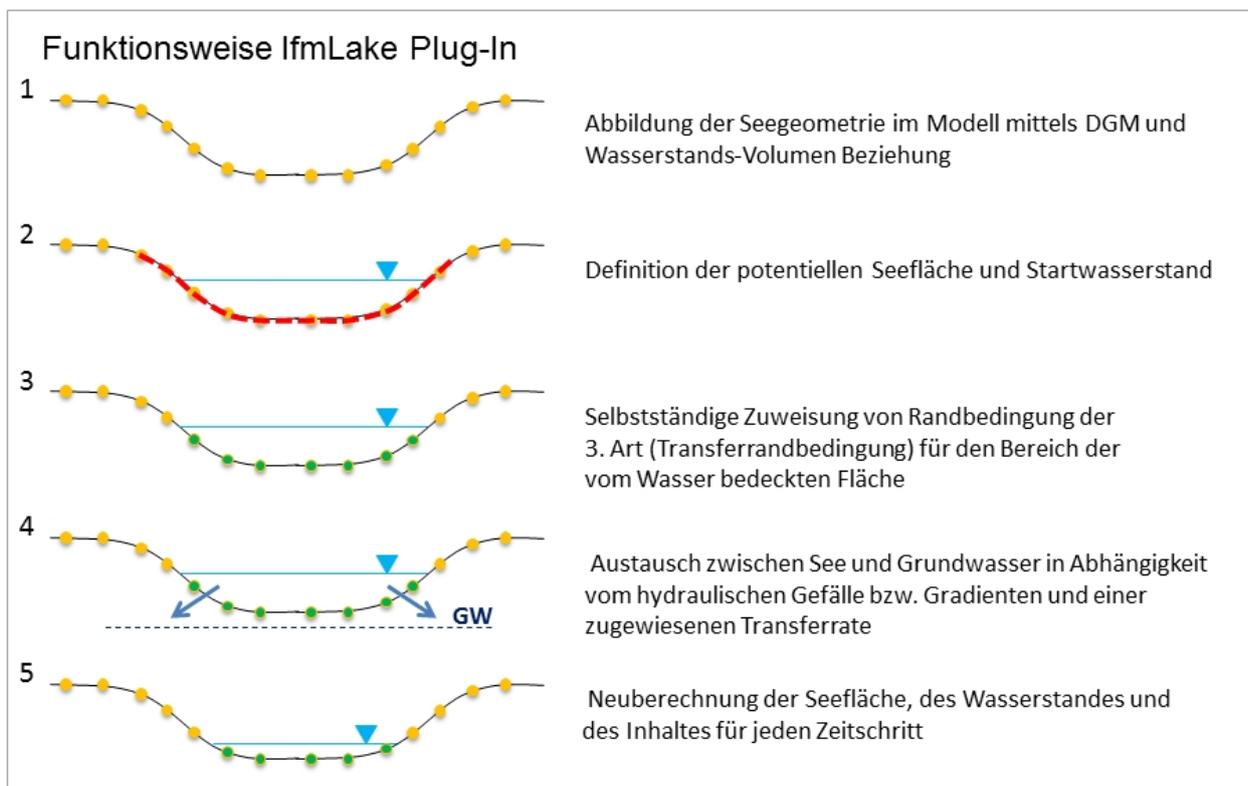


Abbildung 20: Schematische Darstellung der Funktionsweise des IfmLake Plug-In

Voraussetzung für die Anwendung des IfmLake Plug-Ins ist die Abbildung der Seehohlform im Modell (Abbildung 20, Schritt 1). Im Pastlingsee-Modell wurde hierfür auf die Daten der Seevermessung vom Dezember 2016 zurückgegriffen. Aus den Vermessungspunkten wurde ein Höhenmodell des Seebodens erstellt und dieses mit dem DGM von 2013 verschnitten. Das neu entstandene DGM bildet die Oberfläche des Grundwassermodells.

Im nächsten Schritt 2 wurde die potentielle Seefläche definiert. Hierfür wurden alle Knotenpunkte der Modelloberfläche dem See zugeordnet, die eine Höhenlage kleiner + 63,5 m NHN unterschreiten. Darüber hinaus wurde ein Startwasserstand von + 63,3 m NHN definiert (Abbildung 20 Schritt 3). Dies entspricht dem Seewasserstand vom Oktober 1997. Weitere Eingangsdaten

für das IfmLake Plug-In sind Angaben zur Klimatischen Wasserbilanz der Seeflächen (siehe Kapitel 9.1.6) sowie eine Wasserstand-Inhalt-Beziehung gemäß Abbildung 21. Diese wurde anhand des neu erstellten DGM abgeleitet. Darüber hinaus ist eine Transferrate zu definieren, die den Austausch zwischen See und Grundwasserkörper steuert. Die Höhe der Transferrate wurde im Rahmen der Modellkalibrierung variiert (siehe Kapitel 9.2).

Das IfmLake Plug-In berechnet den Austausch zwischen See und Grundwasser in Abhängigkeit vom hydraulischen Gradienten (Abbildung 20, Schritt 4). Im Ergebnis erfolgt ein Volumenstrom in Richtung des niedrigeren Druckniveaus. Damit einhergehend wird für jeden Zeitschritt die Ausdehnung der Seefläche neu berechnet und die Zuweisung der IfmLake-Randbedingung auf die Modellknoten beschränkt oder ausgedehnt, die innerhalb der berechneten Seefläche liegen (Abbildung 20, Schritt 5). Dadurch kann die Veränderung der Geometrie, die aus einem Zuwachs oder einer Abnahme des Seeinhaltes resultiert, realitätsnah im Modell abgebildet werden.

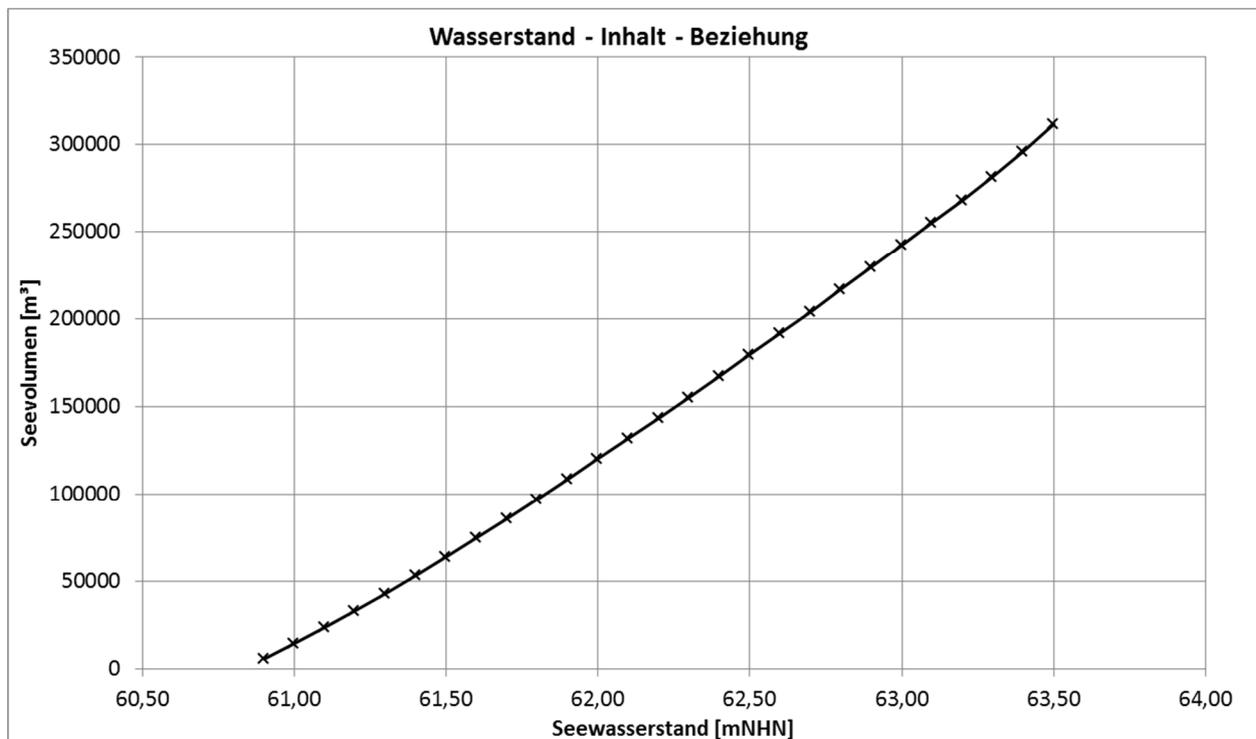


Abbildung 21: Abgeleitete Wasserstand-Inhalt-Beziehung für den Seekörper im Grundwassermodell

9.1.6 Grundwasserneubildung

Die Grundwasserneubildung kann in FEFLOW® flächendifferenziert mittels Zeitreihen vorgegeben werden. Im Programm wird dieser Parameter als „In / outflow on top / bottom“ bezeichnet. Durch die Vergabe von negativen Werten kann über diesen Parameter beispielsweise die erhöhte Grundwasserzehrung in Bereichen flurnaher Grundwasserstände bei Trockenphasen berücksichtigt werden.

Für das Pastlingsee-Modell ist davon auszugehen, dass sich die Neubildungsraten bzw. die Verdunstungshöhen von See und Moor unterscheiden. Auch die Waldflächen außerhalb des

Feuchtgebietes weisen aufgrund der deutlich höheren Flurabstände und der damit einhergehenden eingeschränkten Wasserverfügbarkeit andere Neubildungsraten auf. Aus diesem Grund bekommen die Seefläche, die Moorfläche und die Waldfläche im Pastlingsee-Modell jeweils eine eigene Ganglinie der Neubildung zugewiesen (siehe Abbildung 22).

Die Berechnungsansätze zur Abschätzung der unterschiedlichen Neubildungsraten auf den unterschiedlichen Neubildungsflächen werden nachfolgend beschrieben.

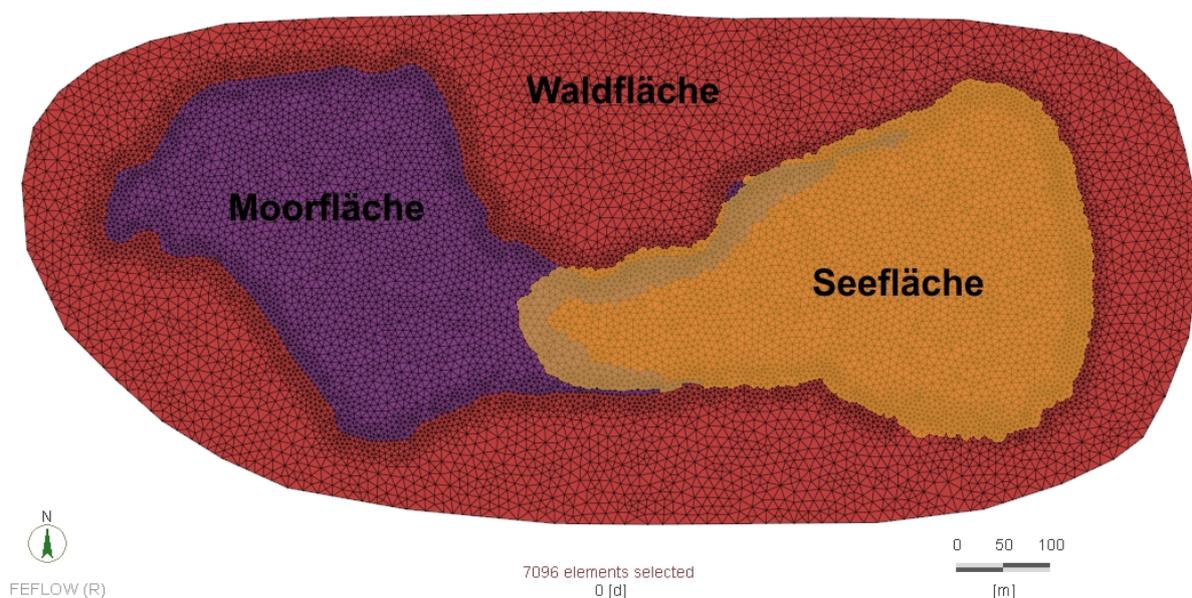


Abbildung 22: Unterscheidung von Neubildungsflächen im Pastlingsee-Modell

Seefläche:

Die Zeitreihe der Grundwasserneubildung im Bereich der Seefläche berechnet sich aus der Klimatischen Wasserbilanz gemäß Gleichung Gl. 1, wobei die Niederschlagsdaten der Station Lasszinswiesen und die nach dem Dalton-Verfahren berechnete Gewässerverdunstung verwendet werden. Im Zuge der Modellkalibrierung wurde deutlich, dass die berechnete Gewässerverdunstung in reduzierter Form die Seewasserstände am besten widerspiegelt (siehe Kapitel 9.2).

Aufgrund einer sich verändernden Seegeometrie ist es notwendig, dass die Neubildungsfläche an die aktuelle Seeausdehnung angepasst wird. Dies wird durch das IfmLake Plug-In gewährleistet, indem zu jedem Zeitschritt die Größe der Gewässerfläche berechnet und die Neubildungsfläche entsprechend angepasst wird. Trocken gefallene Areale bekommen automatisch die Neubildungszeitreihe der angrenzenden Fläche zugewiesen.

Moorfläche:

Die Zeitreihe der Grundwasserneubildung auf der Moorfläche resultiert analog zum See aus der Klimatischen Wasserbilanz gemäß Gleichung Gl. 1. Neben den Niederschlagsdaten der Station Lasszinswiesen wird als potentielle Evapotranspiration die Gras-Referenzverdunstung herangezogen. Diese beschreibt die potentielle Verdunstungshöhe einer Landfläche bei niedrigem Bewuchs und permanenter Wasserverfügbarkeit. Es wird davon ausgegangen, dass vergleichbare Verhältnisse im Bereich der Moorfläche vorzufinden sind. Die Gras-Referenzverdunstung

wird aus den Wetterdaten der Station Lasszinswiesen ermittelt und als Datensatz in Form von Tageswerten durch die BTU Cottbus-Senftenberg zur Verfügung gestellt.

Aufgrund einer deutlichen Zunahme des Kiefernwaldanteils auf der Moorfläche ist davon auszugehen, dass sich mit der Zeit eine Änderung des pflanzenbedingten Verdunstungsanteils vollzogen hat. Dies wirkt sich wiederum auf die maximale Verdunstungshöhe der Moorfläche aus. Die Zunahme der Waldfläche ist durch entsprechende Kartierungen der Vegetationsformen dokumentiert (Abbildung 23).

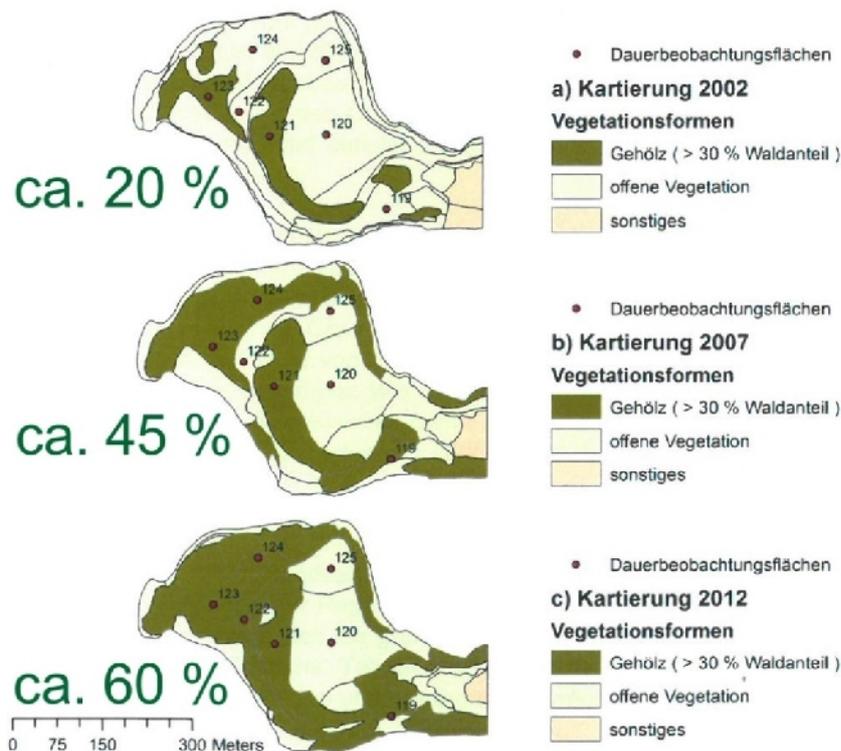


Abbildung 23: Entwicklung des Waldanteils (Kiefernwald) auf der Moorfläche (Kartierungsergebnisse: Nagolare 2012)

Um die Zunahme des Waldanteils und die damit einhergehende Änderung der maximalen Verdunstungshöhe zu berücksichtigen, wird die Gras-Referenzverdunstung mit einem landnutzungsabhängigen Standortparameter multipliziert (BFG 2003). Hierbei handelt es sich um einen Faktor f , der entsprechend der Abbildung 24 von Art und Alter des Waldes sowie der Bodenart abzuleiten ist.

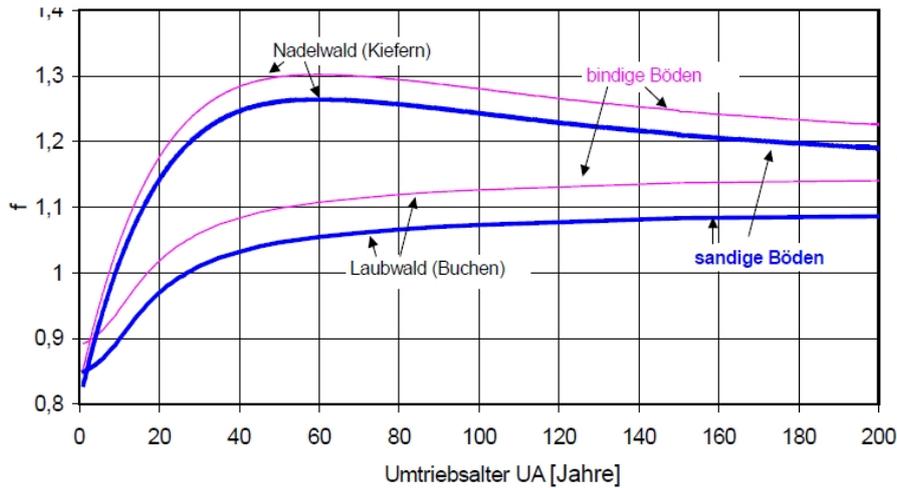


Abbildung 24: Landnutzungsabhängiger Standortparameter f für Nadel- und Laubwald auf verschiedenen Böden in Abhängigkeit vom Umtriebsalter (Abbildung aus BFG (2003))

Auf Grundlage der in Abbildung 24 dargestellten Beziehung wurden die in der Tabelle 7 aufgeführten Faktoren für unterschiedliche Geltungszeiträume abgeleitet. Durch die Definition von Geltungszeiträumen soll die Waldentwicklung von der Freifläche über Aufwuchs- bis Jungwuchsphase erfasst werden. Die Flächenanteile ergeben sich dabei aus den Kartierungsergebnissen (vgl. Abbildung 23). Im Ergebnis ist beispielsweise für die Jahre ab 2010 von einer etwa 7,5 % höheren Gras-Referenzverdunstung auszugehen, die auf den Aufwuchs des Waldes auf der Moorfläche zurückzuführen ist.

Tabelle 7: Zeitliche Änderung des landnutzungsabhängigen Standortparameters f unter Berücksichtigung eines zunehmenden Waldaufwuchses auf der Moorfläche

Geltungszeitraum	Anteil Freifläche	Faktor f Freifläche	Anteil Altbestand	Faktor f Altbestand	Anteil Aufwuchs	Faktor f Aufwuchs	Anteil Jungwuchs	Faktor f Jungwuchs	f gesamt
1997 - 2004	0,80	1,00	0,20	1,255	0,00	0,935	0,00	1,133	1,051
2005 - 2009	0,55	1,00	0,20	1,255	0,25	0,935	0,00	1,133	1,035
ab 2010	0,40	1,00	0,20	1,255	0,15	0,935	0,25	1,133	1,075

Waldfläche (Umland):

Im Gegensatz zum See und zur Moorfläche ist im Umfeld des Feuchtgebietes von einem deutlichen Unterschied zwischen potentieller und realer Verdunstungshöhe auszugehen. Dies ist in erster Linie auf die höheren Grundwasserflurabstände und die daraus resultierende verringerte pflanzenverfügbare Wassermenge zurückzuführen. Dementsprechend kann für diese Areale die Berechnung der Grundwasserneubildung nicht unter Verwendung von Gleichung Gl. 1 erfolgen.

Für die Berechnung der Grundwasserneubildung im Bereich der Waldflächen außerhalb des Feuchtgebietes wurde auf ein bereits vorhandenes Niederschlags-Abfluss-Modell zurückgegriffen (gIR 2012). Das N-A-Modell wurde mit der GIS gestützten Software NASIM 3.8.0 der Firma Hydrotec erstellt. NASIM steht für Niederschlags- Abfluss- Simulations- Modell und ermöglicht die Simulationen von verschiedenen Wasserhaushaltsgrößen unter Berücksichtigung der Witte-

zung, der Landnutzung und den Bodenverhältnissen. Im N-A-Modell wurde das oberirdische Einzugsgebiet (OEZG) des Pastlingsees / -moors betrachtet, welches auf Grundlage des DGM abgegrenzt wurde. Es weist eine Fläche von etwa 125,5 ha auf und deckt das Gebiet des Grundwassermodells vollständig ab (vgl. Plan 14).

Für die N-A-Modellierung wurde das OEZG in so genannte Teilgebiete eingeteilt. Darüber hinaus wurden verschiedener Datengrundlagen wie Bodenverhältnisse und Landnutzungstypen berücksichtigt. Die Ausweisung der Böden und ihrer Verbreitung erfolgte unter Verwendung verschiedener Kartenwerke. Die unterschiedlichen Landnutzungstypen im Betrachtungsgebiet wurden mit Hilfe aktueller Luftbilder abgegrenzt. Alle Flächeninformationen wurden dann zu so genannten Elementarflächen (Hydrotopen) verschnitten (Plan 14) und mit diversen Parametern wie Interzeptionsspeicher, Wurzeltiefe, hydraulische Leitfähigkeit, Porenvolumen nutzbare Feldkapazität usw. versehen.

Die Ausdehnung des OEZG sowie die Teilgebiete mit den verschiedenen Landnutzungsclassen sind in der Abbildung 25 dargestellt. Darüber hinaus enthält die Abbildung 25 zum Vergleich die Lage und Ausdehnung des Grundwassermodells.

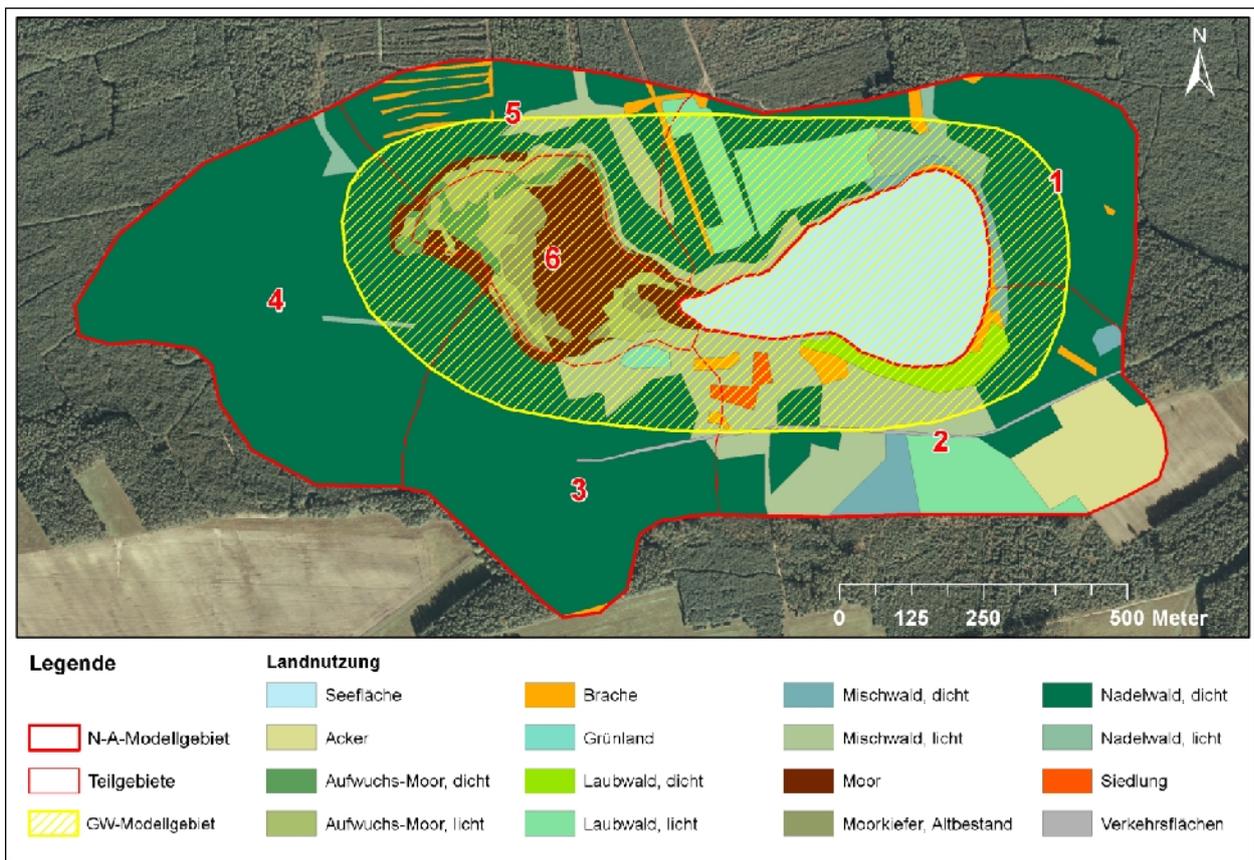


Abbildung 25: Teilgebiete und Landnutzungsclassen innerhalb des oberirdischen Einzugsgebietes im N-A-Modell Pastlingsee

Neben den Elementarflächen und deren spezifischen Parametern erforderte die Erstellung des Wasserhaushaltsmodells die Implementierung von Klima- bzw. Witterungsdaten in das Simulationsprogramm. Benötigt wurden Zeitreihen für Niederschlag, Tagesmitteltemperatur und Verdunstung. Als Grundlage standen die meteorologischen Daten der Wetterstation Lasszinswie-

sen in Form von Tageswerten für den Simulationszeitraum von Oktober 1997 bis Dezember 2016 zur Verfügung. Verwendung fanden die Tagesmitteltemperatur sowie die korrigierte Niederschlagsmenge. Als potentielle Verdunstung wurde die Gras-Referenzverdunstung angesetzt. Die Simulation erfolgt mit kontinuierlichen Zeitschritten in Tageswertaufösung.

Neben verschiedenen Wasserhaushaltsgrößen wie reale Verdunstung, oberirdischer oder hypodermischer Abfluss wird in NASIM unter anderem die Größe „Bodenexfiltration“ berechnet. Diese berücksichtigt die Wassermenge, welche die ungesättigte Bodenzone durchsickert und den Grundwasserkörper speist. Bezogen auf das Grundwassermodell ist die Bodenexfiltration mit der Grundwasserneubildung gleichzusetzen. Ein entsprechendes Modellergebnis ist in der Abbildung 26 dargestellt. Hierbei handelt es sich Monatssummen, gemittelt über die Teilgebiete 1 bis 5 (vgl. Abbildung 25).

Als langjähriger Mittelwert ergibt sich für die Waldflächen außerhalb des Feuchtgebietes im Zeitraum Oktober 1997 bis Dezember 2016 eine Neubildungsrate von etwa 62 mm/a.

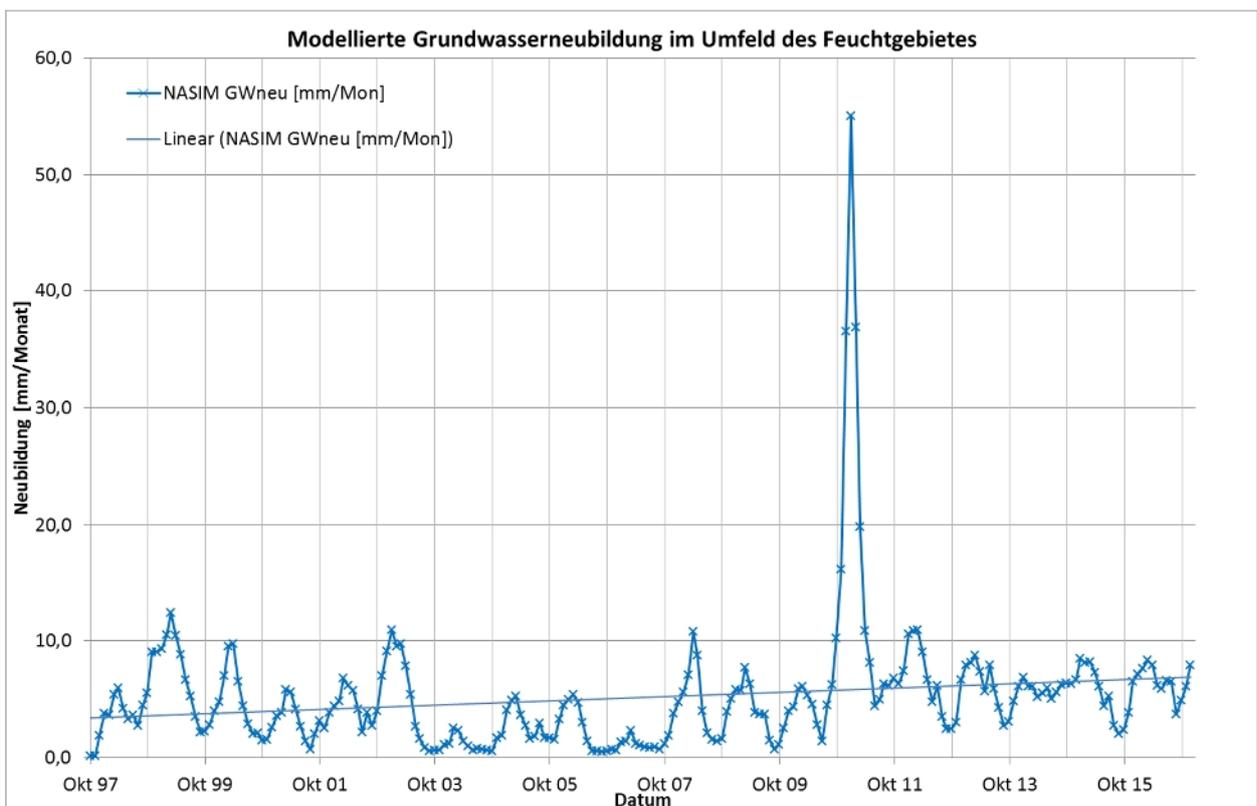


Abbildung 26: Modellierte Grundwasserneubildung für die Waldflächen außerhalb des Feuchtgebietes mit Trendentwicklung

9.2 Modellkalibrierung und Validierung (IST-Zustand)

Die Modellkalibrierung erfolgt anhand von Ganglinienvergleichen für den Haupthangendgrundwasserleiter, den Zwischengrundwasserleiter, den Torfkörper und den See wobei der Schwerpunkt vor allem auf der Abbildung der Wasserstandsentwicklung des Pastlingsees liegt. Der Kalibrierzeitraum erstreckt sich vom 01.10.1997 bis zum 30.09.2015. Dies entspricht genau 18 Jahre bzw. 6574 Modelltage. Die maximale zeitliche Auflösung beträgt einen Monat. Die für die Modellkalibrierung herangezogenen Messstellen sind in der Abbildung 27 dargestellt.

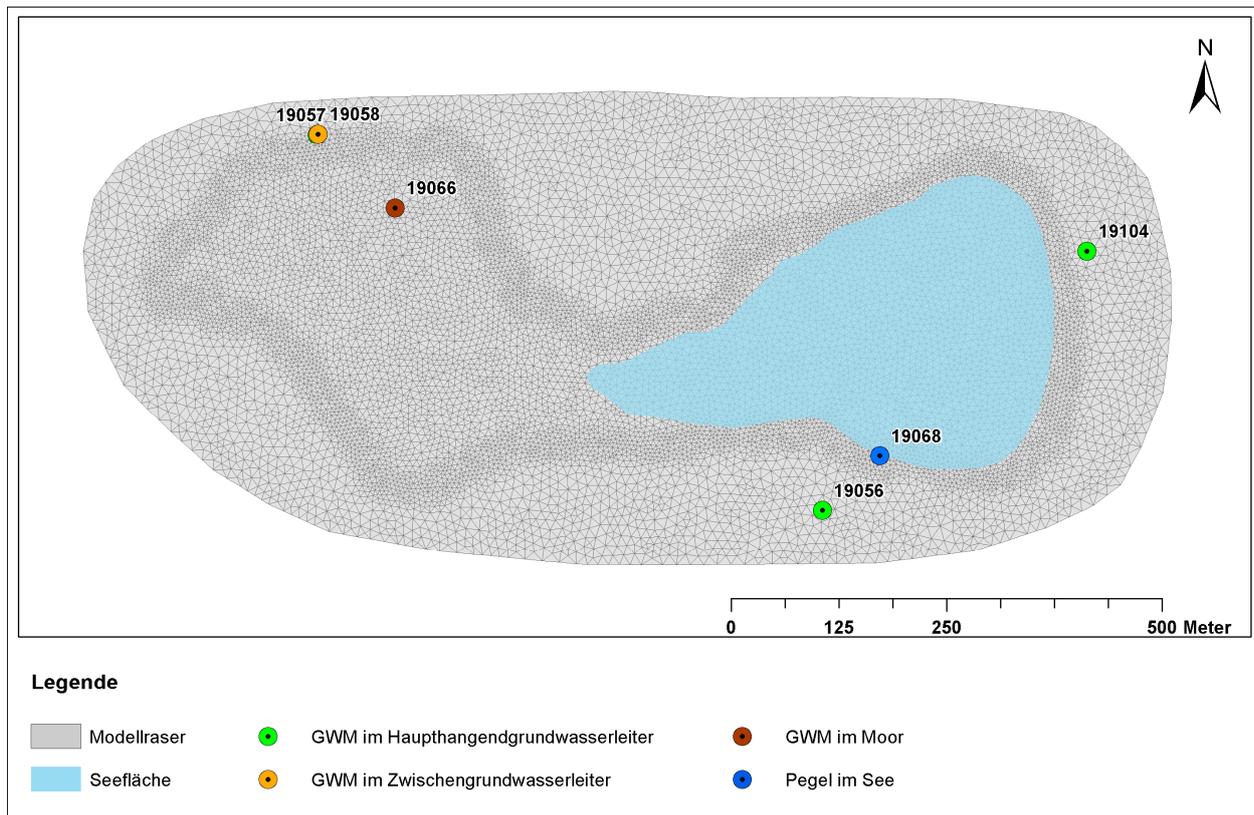


Abbildung 27: Für die Modellkalibrierung verwendeten Vergleichsmessstellen

Im Rahmen der Kalibrierung wurden die modellierten Wasserstände an die gemessenen Ganglinien der in Abbildung 27 bzw. Plan 1 dargestellten Messstellen angepasst. Um den Seewasserstand abzubilden, erfolgte die Anpassung der Durchlässigkeit des Seeuntergrundes sowie des Verdunstungsanteils von der Gewässeroberfläche. Entsprechend den Messergebnissen der GFI-Studie (siehe Tabelle 4) wurde eine Reduzierung der Gewässerverdunstung auf 85 % der DALTON-Werte umgesetzt.

Die Durchlässigkeit des Seeuntergrundes hängt zum einen vom Durchlässigkeitsbeiwert (k_f -Wert) der Mudde (vgl. Tabelle 6), zum anderen von der definierten Transferrate im Bereich der Seefläche ab. Die Notwendigkeit dieses Parameters resultiert aus der Verwendung des IfmLake Plug-Ins (siehe Kapitel 9.1.5).

Während der Anpassung der Modellwerte an die Seeganglinie wurde deutlich, dass die bestmöglichen Ergebnisse unter der Annahme eines höher durchlässigen Bereiches im Seegrund erzielt werden. Dieses hydraulische „Fenster“ ist durch einen höheren Durchlässigkeitsbeiwert

und durch eine größere Transferrate charakterisiert. So ergibt sich für die Mudde innerhalb des Fensters ein Durchlässigkeitsbeiwert von $6 \cdot 10^{-7}$ m/s (X-Y-Richtung) bzw. $6 \cdot 10^{-8}$ m/s (Z-Richtung). Die umliegende Mudde ist mit k_f -Werten von $1 \cdot 10^{-7}$ m/s bzw. $1 \cdot 10^{-8}$ m/s deutlich undurchlässiger. Ein ähnliches Verhältnis ergibt sich für die Transferrate mit einem Wert 100 d^{-1} innerhalb bzw. einem Wert von 20 d^{-1} außerhalb des hydraulischen Fensters. Die Form bzw. die Ausdehnung der höher durchlässigeren Zone ist in der Abbildung 28 dargestellt. Sie orientiert sich in erster Linie an den tieferen Bereichen des Sees mit gleichzeitig geringer Muddemächtigkeit.

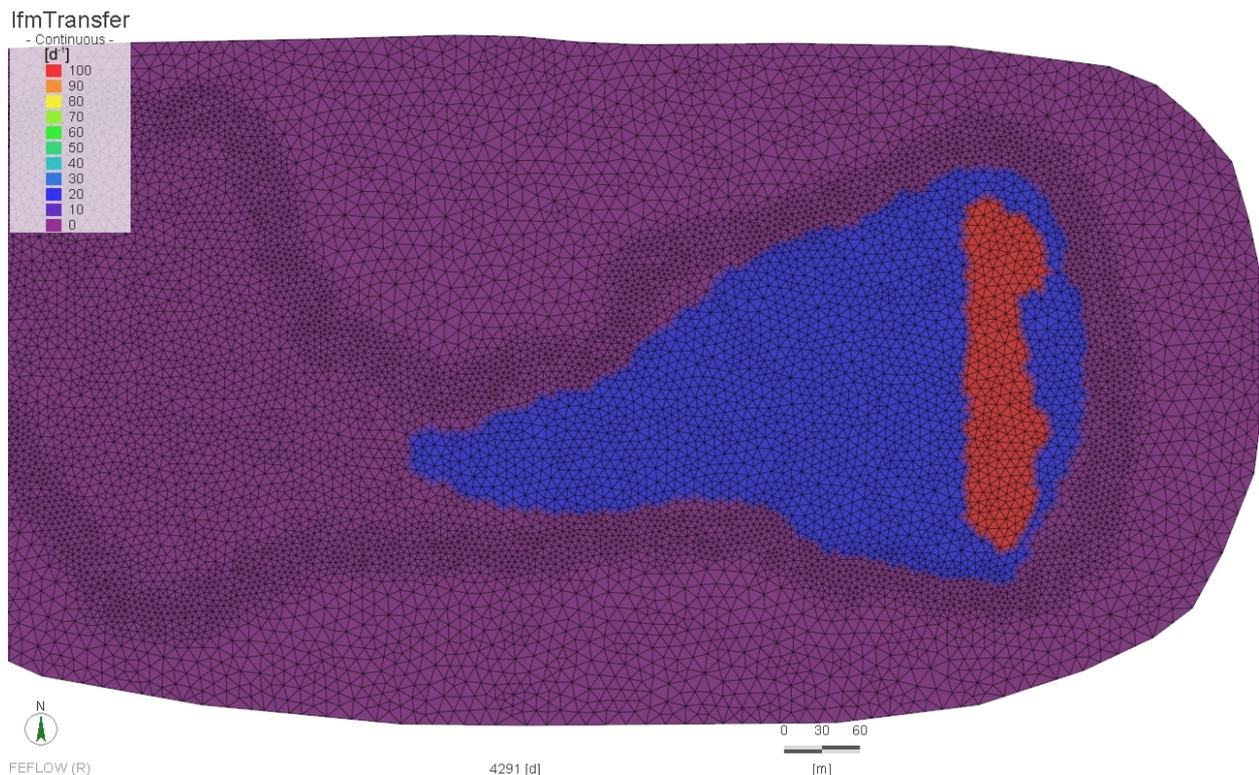


Abbildung 28: Durchlässigkeit des Seeuntergrundes (Transferraten [d^{-1}]) in blau mit Bereichen (hydraulisches Fenster) höherer Durchlässigkeit in rot

Wie der Ganglinienvergleich in der Abbildung 29 zeigt, gelingt unter Berücksichtigung der oben aufgeführten Modellanpassungen bzw. unter Verwendung der in Kapitel 9.1.3 aufgeführten Parameter die Nachbildung der Seewasserstandsentwicklung im Modell. Dies betrifft sowohl den langjährigen Trend als auch die innerjährlichen Amplituden. Zufriedenstellende Ergebnisse werden auch bei der Modellierung der Druckhöhenentwicklung im Moorkörper erzielt.

Die modellierten Wasserstände im Zwischengrundwasserleiter liegen konstant etwa 0,6 m unter der Messreihe. Der langjährige Trend und die innerjährlichen Schwankungen entsprechen weitestgehend den Beobachtungen (Abbildung 29). Aufgrund der Unsicherheiten bezüglich der Verbreitung und Geometrie des ZGWL wurde eine exaktere Anpassung des Druckhöheniveaus im Modell aus zeitlichen Gründen nicht weiter verfolgt.

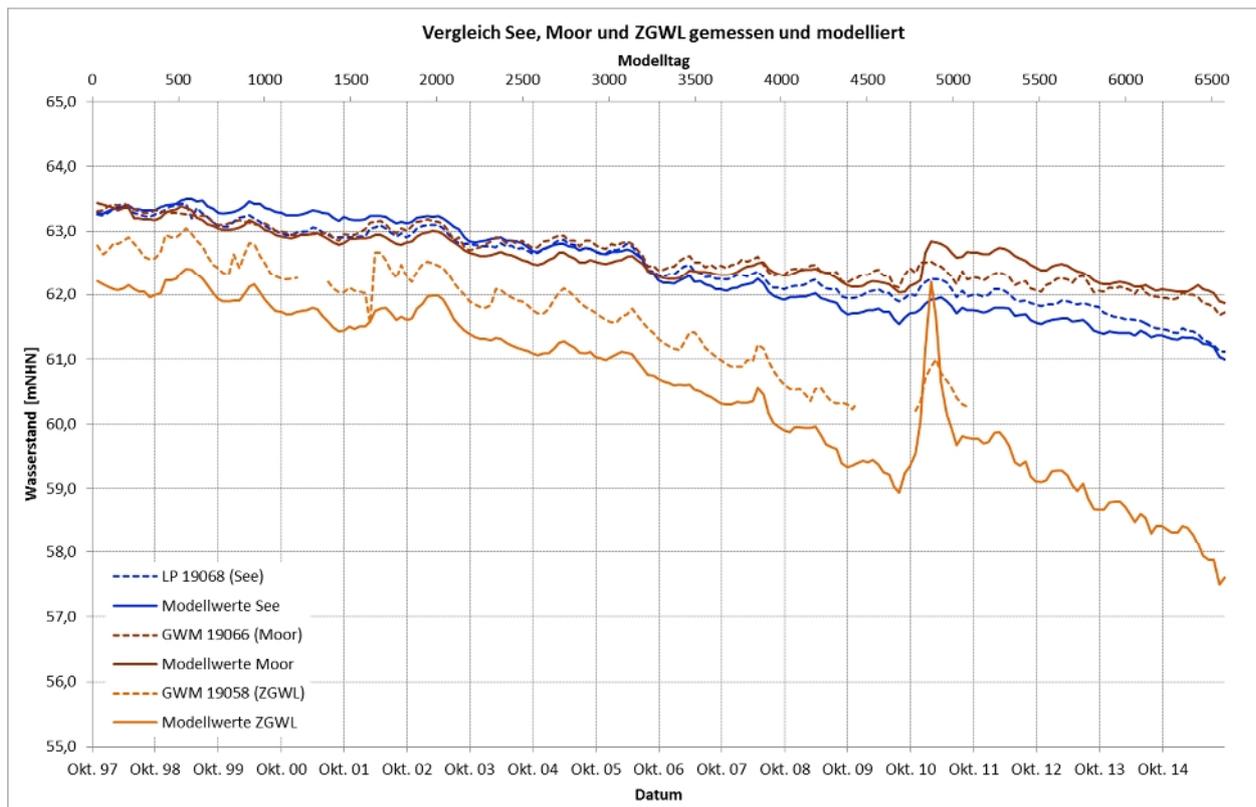


Abbildung 29: Vergleich der gemessenen und modellierten Druckhöhen bzw. Wasserstände im See, Moor und Zwischengrundwasserleiter für den Kalibrierzeitraum 01.10.1997 bis zum 30.09.2015

Neben einem direkten Ganglinienvergleich kann die Modellgüte mittels der so genannten Nash-Sutcliffe Effizienz (NS) beschrieben werden. Die berechnet sich wie folgt (Gl. 12):

$$\text{Gl. 12:} \quad \text{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (h_o(t_i) - h_M(t_i))^2}{\sum_{i=1}^n (h_o(t_i) - \bar{h}_o(t_i))^2}$$

mit	$h_o(t_i)$	beobachteter Wasserstand
	$h_M(t_i)$	modellierter Wasserstand
	$\bar{h}_o(t_i)$	Mittelwert des beobachteten Wasserstandes
	n	Anzahl der Werte

Die Nash-Sutcliffe Effizienz vergleicht den Mittelwert der gemessenen Zeitreihe mit den modellierten Werten und kann Werte zwischen $-\infty$ und 1 annehmen. Ist die NS- Effizienz kleiner 0, bilden die modellierten Werte die gemessenen Werte schlechter ab als deren Mittelwert. Liegt die NS- Effizienz bei 0, beschreiben die Modellwerte die Messreihe genau so gut wie deren Mittelwert. Nährt sich die NS- Effizienz dem Wert 1, werden die Messwerte mit hoher Genauigkeit im Modell wiedergegeben. Eine Auflistung der Nash-Sutcliffe Effizienz sowie weiterer statistischer Kenngrößen für die Bewertung der Modellgüte erfolgt in der Tabelle 8. Die hohen NS-Werte sowie die Korrelationskoeffizienten verdeutlichen die gute Anpassung der Modellwerte an die Messwerte sowohl für den See als auch für das Moor.

Tabelle 8: Statische Kenngrößen resultierend aus dem Vergleich Messwerte und Modellwerte für den Kalibrierzeitraum 01.10.1997 bis 30.09.2015

Parameter	Pastlingsee	Pastlingmoor
Nash-Sutcliffe Effizienz [-]	0,88	0,82
Korrelationskoeffizient [-]	0,99	0,91
Bestimmtheitsmaß [-]	0,97	0,83
mittlere Abweichung [m]	0,04	0,03
maximale Abweichung [m]	0,39	0,44

Die modellierte Wasserstandsentwicklung im Haupthangendgrundwasserleiter wird durch die definierten Randbedingungen vorgegeben (vgl. Kapitel 9.1.4). Wie die Abbildung 30 zeigt, liegen die Modellwerte nahezu deckungsgleich auf den Ganglinien der entsprechenden Grundwassermessstellen. Flächendeckende Gleichenpläne für die Modellzustände September 2000, September 2005, September 2010 und September 2015 sind in der Anlage Plan 15 bis Plan 18 enthalten.

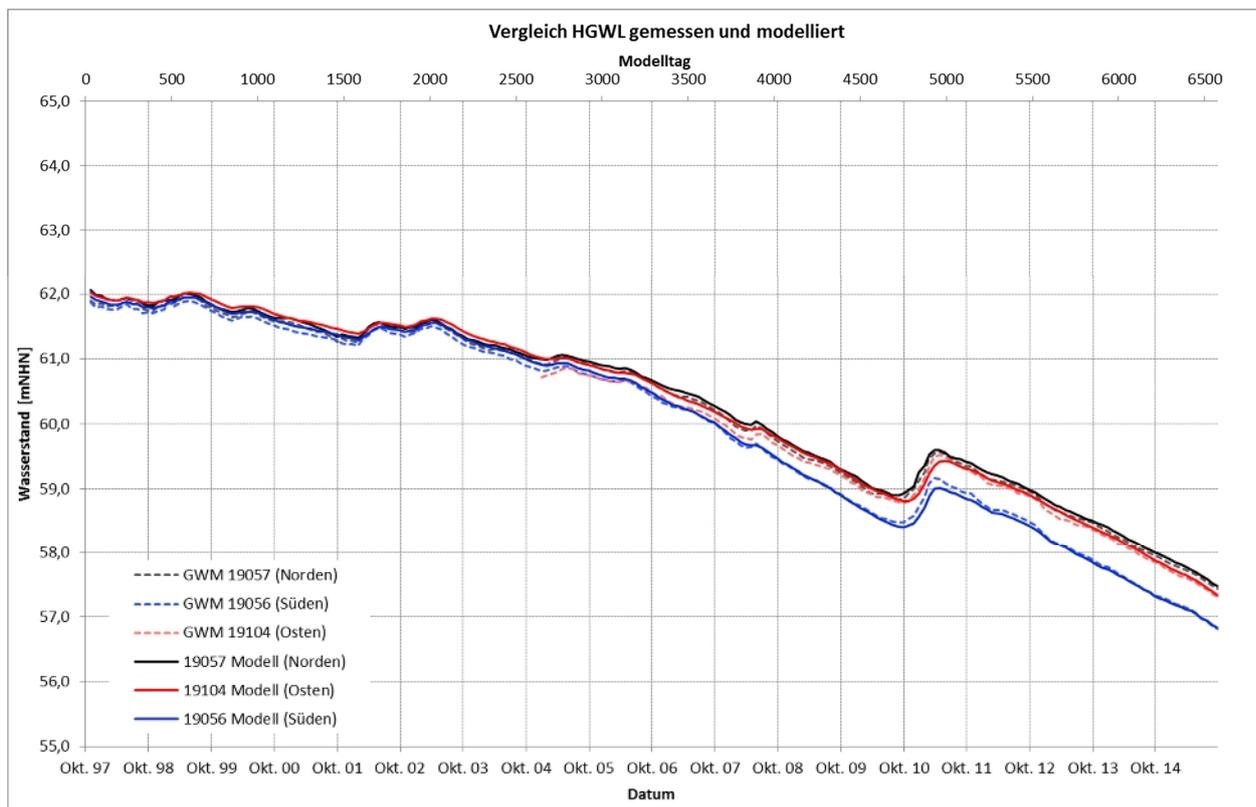


Abbildung 30: Vergleich der gemessenen und modellierten Druckhöhen im Haupthangendgrundwasserleiter für den Kalibrierzeitraum 01.10.1997 bis zum 30.09.2015

Für die Validierung wurde der Modellzeitraum um 15 Monate bis Ende Dezember 2016 verlängert. Für diesen Zeitraum wurde im Modell eine Speisung des Seekörpers entsprechend der Stützwassereinleitung ab Oktober 2015 hinterlegt. Die angenommenen Zuschusswassermengen resultieren aus dem Monitoring zur Einleitmenge, welches vom Gewässerverband Spree-Neiße durchgeführt wird. Die im Modell hinterlegte Ganglinie der Einleitmenge ist in der Abbildung 31 dargestellt.

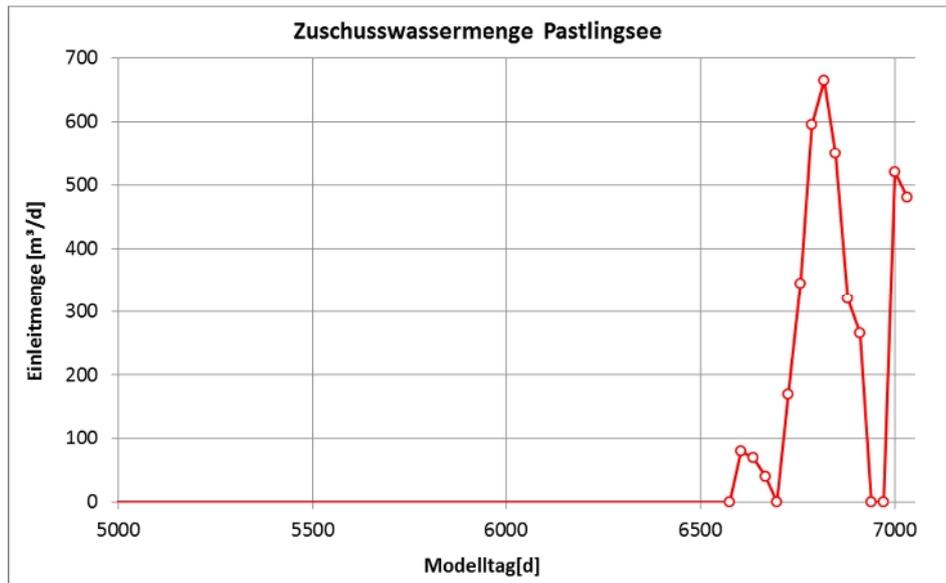


Abbildung 31: Zuschusswassermenge für den Pastlingsee für den Zeitraum Oktober 2015 bis Dezember 2016

Die modellierte Wasserstandsentwicklung im Pastlingsee für den Zeitraum bis Ende 2016 ist in der Abbildung 32 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Anhebung des Wasserspiegels mit Beginn der Zuschusswassereinleitung im Modell wiedergegeben wird. Der Anstieg der NS-Effizienz auf einen Wert von 0,9 verdeutlicht die hohe Modellgüte.

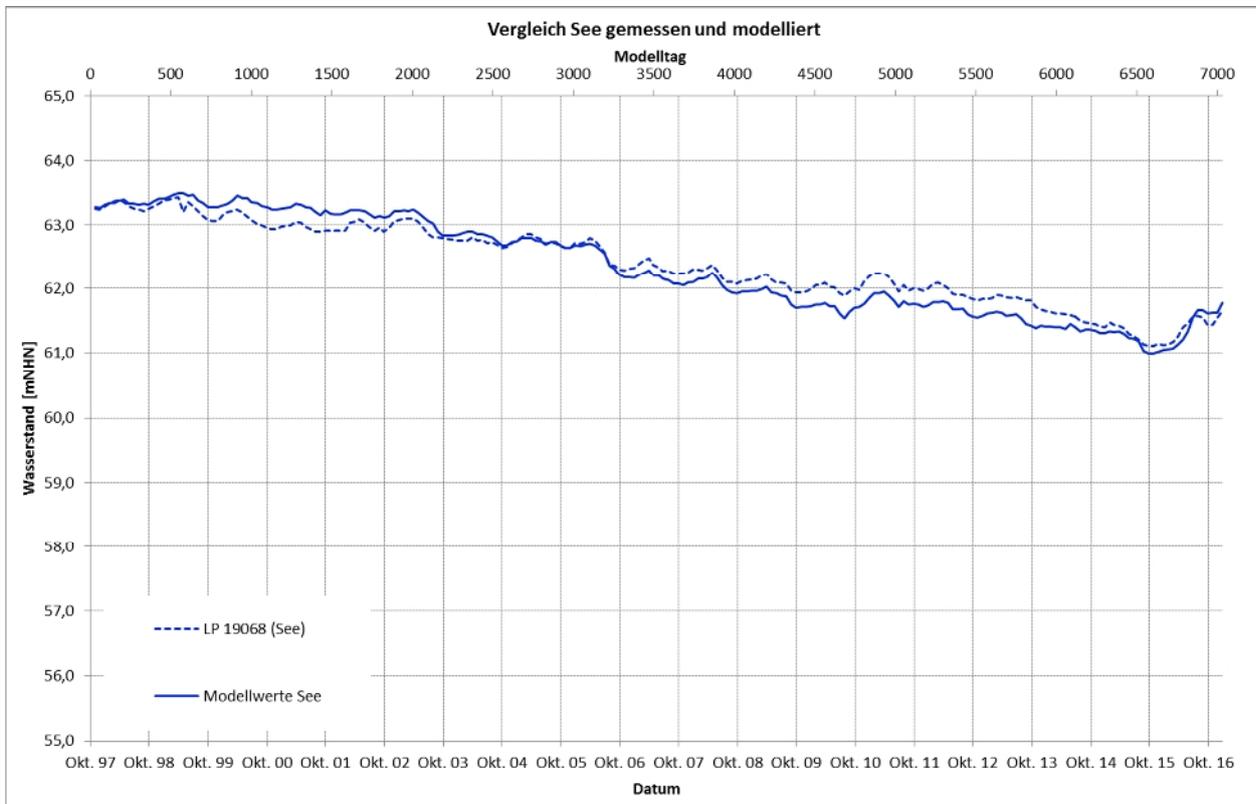


Abbildung 32: Vergleich der gemessenen und modellierten Wasserstände im See für den Zeitraum 01.10.1997 bis zum 31.12.2016

9.3 Sensitivitätsanalyse

Wie bereits beschrieben, hängen die modellierten Seewasserstände maßgeblich von der angenommenen Verdunstungshöhe und der Durchlässigkeit des Seeuntergrundes ab. Im kalibrierten Modell des Ist-Zustandes wurden die Verdunstungsverluste auf 85 % der berechneten Gewässerverdunstungshöhen nach DALTON reduziert. Welchen Einfluss die Änderung der Verdunstung auf die modellierten Seewasserstände hat, verdeutlicht die Abbildung 33.

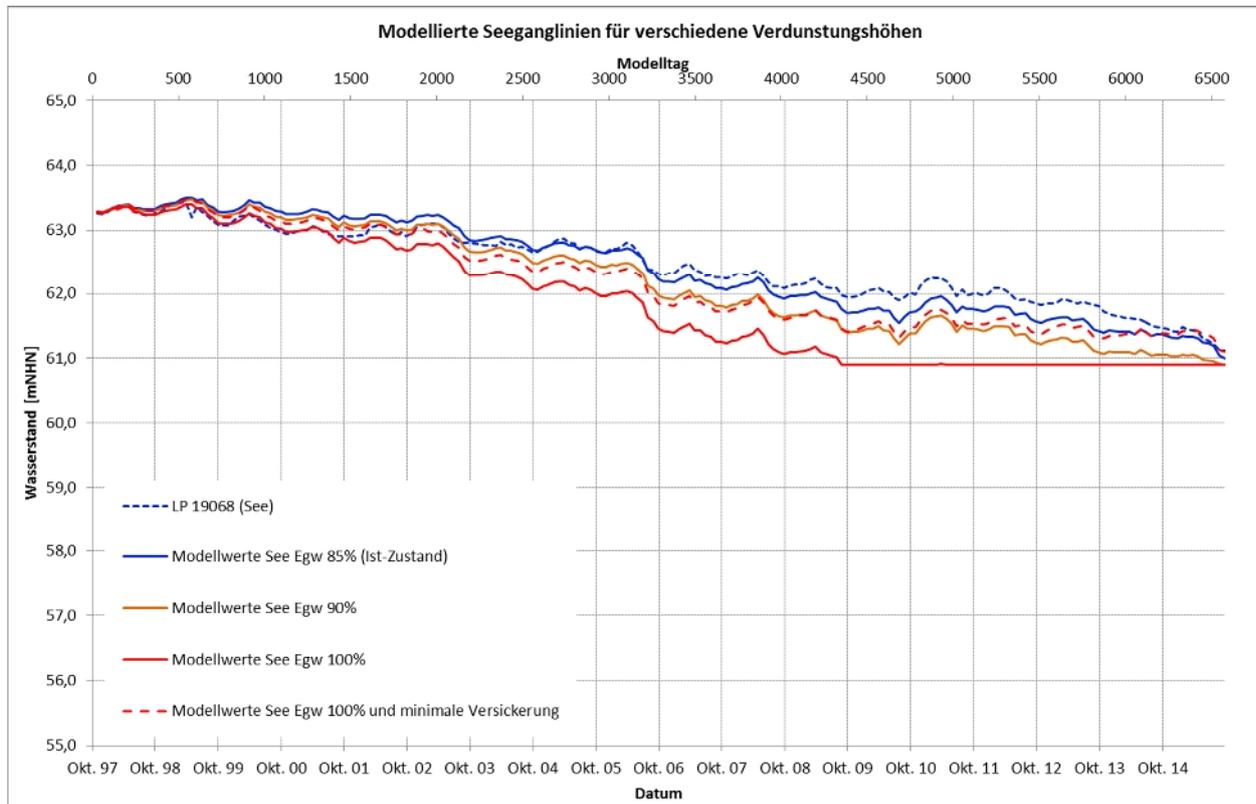


Abbildung 33: Modellierter Wasserstandsentwicklung im See für verschiedene Gewässerverdunstungen

Die Abbildung 33 zeigt, dass eine Erhöhung der Gewässerverdunstung von 85 % auf 90 % (orange Ganglinie) eine zusätzliche Abweichung der Modellwerte von den Messwerten von bis zu 0,3 m verursacht. Im Ergebnis sinkt die NS- Effizienz von 0,88 auf 0,57. Geht man gar von 100 % der berechneten DALTON-Werte aus (rote durchgezogene Ganglinie), fällt der See im Modell ab dem Jahr 2009 trocken. Die Reduzierung der Durchlässigkeit des Seeuntergrundes und damit der Versickerungsverluste führt zwar zu einer Anhebung der modellierten Wasserständen (rote gestrichelte Linie), jedoch wird das Niveau des kalibrierten Modells nicht erreicht.

Im Validierungszeitraum (hier nicht dargestellt) zeigt sich darüber hinaus, dass eine Reduzierung der Versickerungsverluste die modellierten Seewasserstände während der Phase der Zuschusswassereinleitung deutlich über das Niveau der beobachteten Werte ansteigen lässt. Demnach führen verringerte Transferraten zu einer Verschlechterung der Modellgüte.

Es zeigt sich, dass mit den in Kapitel 9.2 beschriebenen Annahmen die höchste Modellgüte sowohl für den Kalibrierungszeitraum als auch für den Validierungszeitraum realisiert wird.

10 Ergebnisse Ist-Zustand

Im Ist-Zustandsmodell werden die Wasserstände von See, Torf- und Zwischengrundwasserleiter für den Zeitraum 01.10.1997 bis 30.09.2015 berechnet. Der Vergleich der simulierten Ganglinien mit den gemessenen Werten ist in der Abbildung 29 dargestellt und wurden bereits im Kapitel 9.2 behandelt. Nachfolgend liegt der Schwerpunkt auf der Beschreibung des Seewasserhaushaltes und dessen Entwicklung innerhalb des Modellzeitraumes.

Das IfmLake Plug-In bietet die Möglichkeit, verschiedene Wasserhaushaltsgrößen eines Seekörpers zu berechnen. Neben dem Seewasserstand werden beispielsweise das Seevolumen, die Seeausdehnung, der witterungsbedingte Input / Output sowie der Grundwasserzu- bzw. Abstrom für jeden Zeitschritt berechnet. Die zeitliche Entwicklung ausgewählter Berechnungsergebnisse ist in der Abbildung 34 dargestellt.

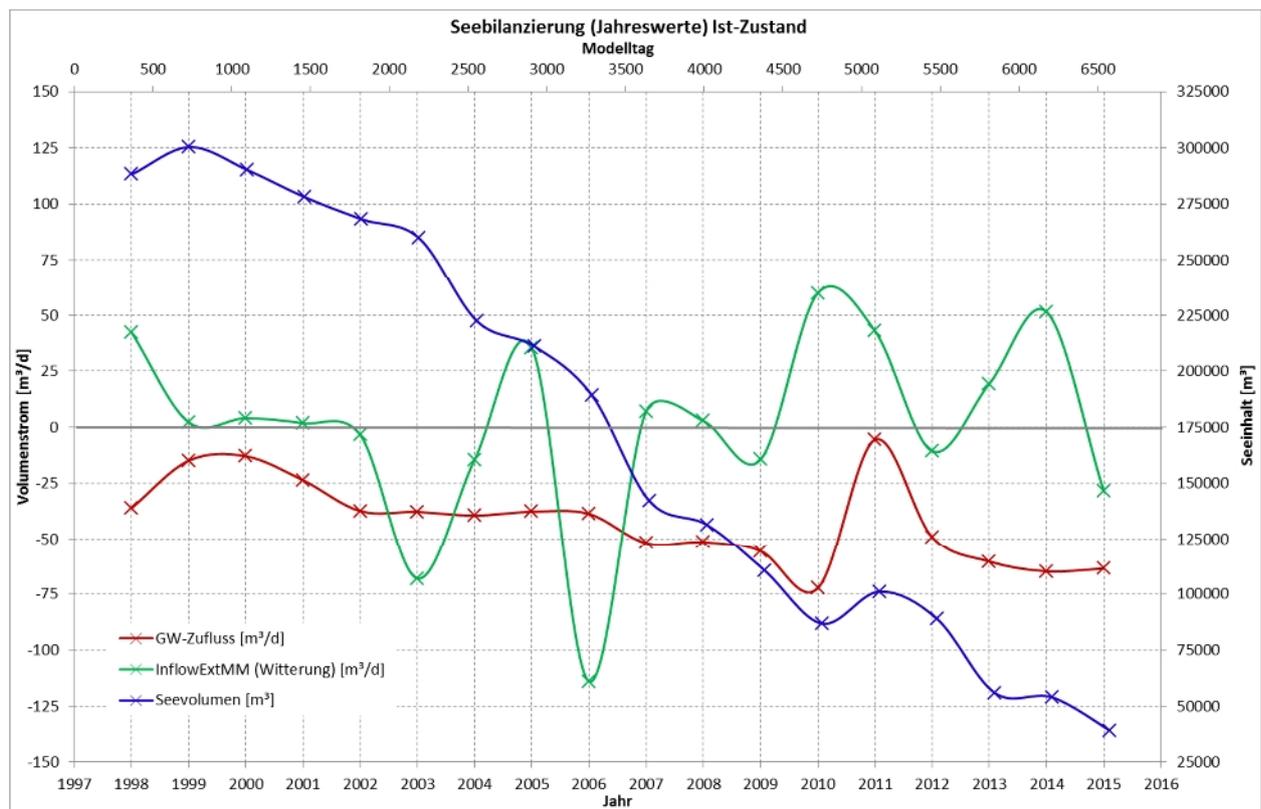


Abbildung 34: Zeitliche Entwicklung des Seevolumens (blau), des witterungsbedingten Inputs (grün) und des GW-Zuflusses (rot) im Pastlingsee

Die blaue Linie im Diagramm der Abbildung 34 zeigt die Entwicklung des Seeinhaltes. Aufgetragen sind die jeweils am Jahresende aufgetretenen Volumina. Sie bezieht sich auf die rechte Y-Achse und ist in m³ angegeben. Es zeigt sich, dass das Volumen bis 2015 permanent abnimmt und von etwa 300.000 m³ im Jahr 1999 auf weniger als 50.000 m³ Ende 2015 sinkt. Über den gesamten Betrachtungszeitraum ergibt sich daraus eine jährliche Abnahme von etwa 17.000 m³/a bzw. knapp 50 m³/d.

Diese Entwicklung ist zum Teil auf die Witterungsverhältnisse der letzten Jahre zurückzuführen (grüne Ganglinie). So ergeben sich für die extremen Trockenjahre 2003 und 2006 Verduns-

tungsverluste von etwa 70 m³/d bzw. 110 m³/d im Jahresmittel. Ein deutlicher niederschlagsbedingter Zufluss von über 50 m³/d ergibt sich hingegen im Mittel für die Jahre 2010 und 2014.

Die Wechselwirkungen zwischen Seekörper und Grundwasserkörper werden durch die rote Ganglinie in der Abbildung 34 beschrieben. Diese weist im gesamten Betrachtungszeitraum negative Werte auf, was eine permanente Versickerung von Seewasser in den Untergrund bedeutet. Analog zur Entwicklung des Seeinhaltes weist die Ganglinie des GW-Zuflusses ein erkennbares Trendverhalten auf, welches durch eine Zunahme der Versickerungsverluste gekennzeichnet ist. Innerhalb der ersten 10 Jahre ergibt sich eine mittlere Versickerung von etwa 30 m³/d. Aufgrund der Absenkung im Hauptangendgrundwasserleiter (vgl. Abbildung 30) hat sich dieser Wert seit 2012 auf durchschnittlich ca. 60 m³/d verdoppelt.

11 Modellszenarien bergbauunbeeinflusster Zustand

Die Ausweisung einer Bergbaubeeinflussung auf die Wasserstandsentwicklung des Pastlingsees erfolgt anhand des Vergleiches von Modellergebnissen für den Ist-Zustand und Modellszenarien, die einen bergbauunbeeinflussten Zustand abbilden. Die Herleitung dieser Modellszenarien und deren Ergebnisse werden nachfolgend beschrieben.

11.1 Abbildung des bergbauunbeeinflussten Zustandes

Die Druckhöhenentwicklung im Haupthangend-GWL wird im Modell mit Hilfe entsprechender Randbedingungen beschrieben (vgl. Kapitel 9.1.4). Im Ist-Zustandsmodell wird der Bergbaueinfluss durch real gemessene Ganglinien nahe gelegener Grundwassermessstellen vorgegeben. Für bergbauunbeeinflusste Szenarien muss vorgegeben werden, wie sich die Grundwasserstände am Modellrand ohne Tagebaueinfluss entwickelt hätten. Zur Ableitung derartiger unbeeinflusster Wasserstandsganglinien wurden Grundwassermessstellen herangezogen, die außerhalb der bergbaubeeinflussten Grundwasserabsenkung liegen. Zunächst war die Eignung von Messstellen zu prüfen. Hierfür wurden folgende Kriterien berücksichtigt:

- Lage außerhalb der bergbaubeeinflussten Grundwasserabsenkung
- Datenaufzeichnung an den Grundwassermessstellen seit etwa 1998
- Datendichte mindestens ein Messwert pro Monat
- Datenreihe weitestgehend ohne größere Lücken
- Vergleichbare hydrogeologische Verhältnisse
- Hohe Korrelation mit der GWM 19057 Pastlingsee bis zum einsetzenden Bergbaueinfluss ab 2006

Im Rahmen der Prüfung auf Eignung wurden die Monatsmittelwerte der GWM 19057 Pastlingsee gegen die Monatsmittelwerte der potentiellen Referenzmessstelle aufgetragen. Ziel war es, Messstellen mit einer möglichst hohen Korrelation zur GWM 19057 Pastlingsee zu finden. Verglichen wurde der bergbauunbeeinflusste Zeitraum 1997 bis Ende 2006. Um die Korrelation auf ein Maximum zu erhöhen, wurden die Monatsmittelwerte zeitlich gegeneinander verschoben. Dadurch kann beispielsweise ein verzögertes Reagieren einer Grundwassermessstelle auf ein Niederschlagsereignis kompensiert werden.

Im Ergebnis der Prüfung wurden in Abstimmung mit dem LBGR und dem LfU zwei Messstellen identifiziert, die als Referenzmessstellen die beste Eignung aufweisen. Hierbei handelt es sich um die im landesweiten Basismessnetz des LfU enthaltenen GWM 40536003 Groß Drewitz sowie die GWM 40536004 Lübbinchen. Ein Vergleich ihrer Monatsmittelwerte mit den Werten der GWM 19057 Pastlingsee ist in den Diagrammen der Abbildung 35 dargestellt. Für beide Referenzmessstellen ergibt sich eine hohe Korrelation zu den Messwerten der Vergleichsmessstelle von über 0,9. Um dies zu ermöglichen, wurden die Monatsmittelwerte der GWM 40536003 Groß Drewitz verglichen mit denen der GWM 19057 Pastlingsee um zwei Monate nach hinten verschoben. Bei der GWM 40536004 Lübbinchen erfolgte eine Verschiebung um einen Monat nach vorn.

Die in der Abbildung 35 dargestellten linearen Funktionsgleichungen beschreiben den Zusammenhang zwischen den Referenzmessstellen und der GWM 19057 Pastlingsee für den berg-

bauunbeeinflussten Zeitraum vor 2006. Diese Gleichungen wurden dazu verwendet, um „synthetische“ Ganglinien ohne Bergbaueinfluss für den Zeitraum ab 2006 bis 2015 zu erzeugen.

In den Szenarien des bergbauunbeeinflussten Zustandes wird postuliert, dass sich die Druckhöhe im Haupthangend-GWL im Bereich des Pastlingsees ohne Bergbaueinfluss analog zu den Referenzmessstellen entwickelt hätte. Die anhand der Referenzpegel abgeleiteten unbeeinflussten Ganglinien sind in der Abbildung 36 dargestellt. Demnach würde das Druckniveau je nach Referenzpegel Ende 2015 etwa 2,7 m für die GWM 40536004 Lübbinchen bzw. 3,5 m für die GWM 40536003 Groß Drewitz über dem beobachteten bergbaubeeinflussten Wasserstand liegen.

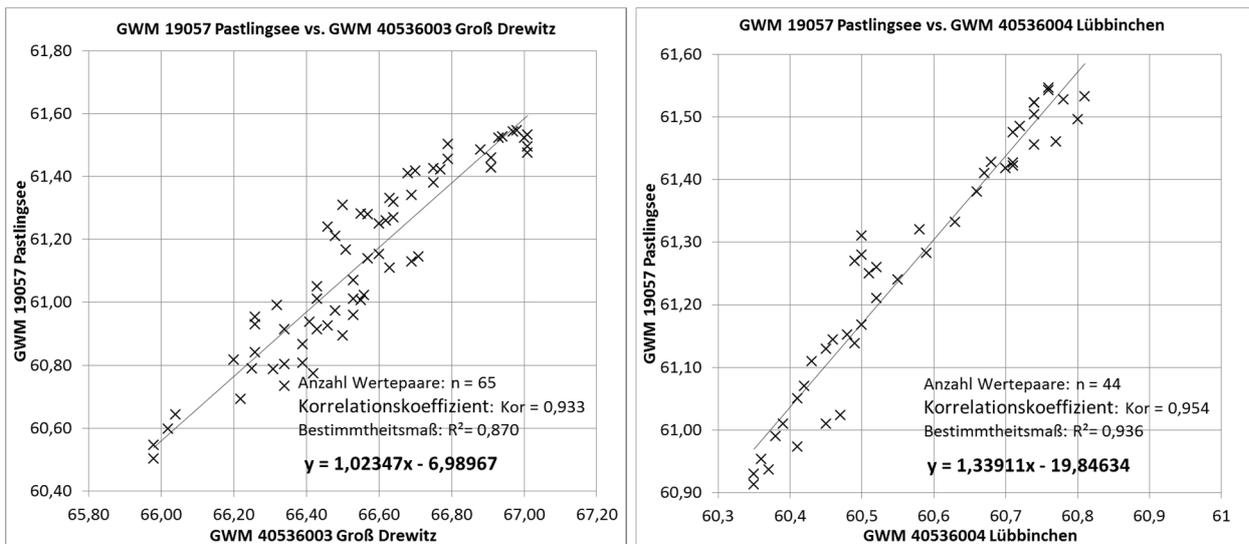


Abbildung 35: Zusammenhang zwischen den Messwerten der GWM 19057 Pastlingsee und den Referenzmessstellen Groß Drewitz und Lübbinchen für Monatsmittelwerte im Zeitraum 1997 bis 2006

Trotz der einheitlichen Auswahlkriterien zeigen die anhand der Referenzmessstellen hergeleiteten Ganglinien in Abbildung 36 Abweichungen bei der potentiellen Entwicklung im Haupthangend-GWL. Diese sind auf Unterschiede in der räumlichen Lage und den geologischen Gegebenheiten der verschiedenen Referenzpegel zurückzuführen. Die sich bis Ende September 2015 einstellende Abweichung von etwa 0,8 m zwischen den angepassten Referenzganglinien Groß Drewitz und Lübbinchen verdeutlicht, dass bei der Herleitung einer bergbauunbeeinflussten Druckhöhenentwicklung im HGWL methodische Unsicherheiten bestehen.

Aus diesem Grund werden nachfolgend zwei Modellszenarien betrachtet, die sich in der Annahme der Druckhöhenentwicklung im HGWL unterscheiden. Das Szenario GD mit der Referenzmessstelle Groß Drewitz und das Szenario Lb mit der Referenzmessstelle Lübbinchen.

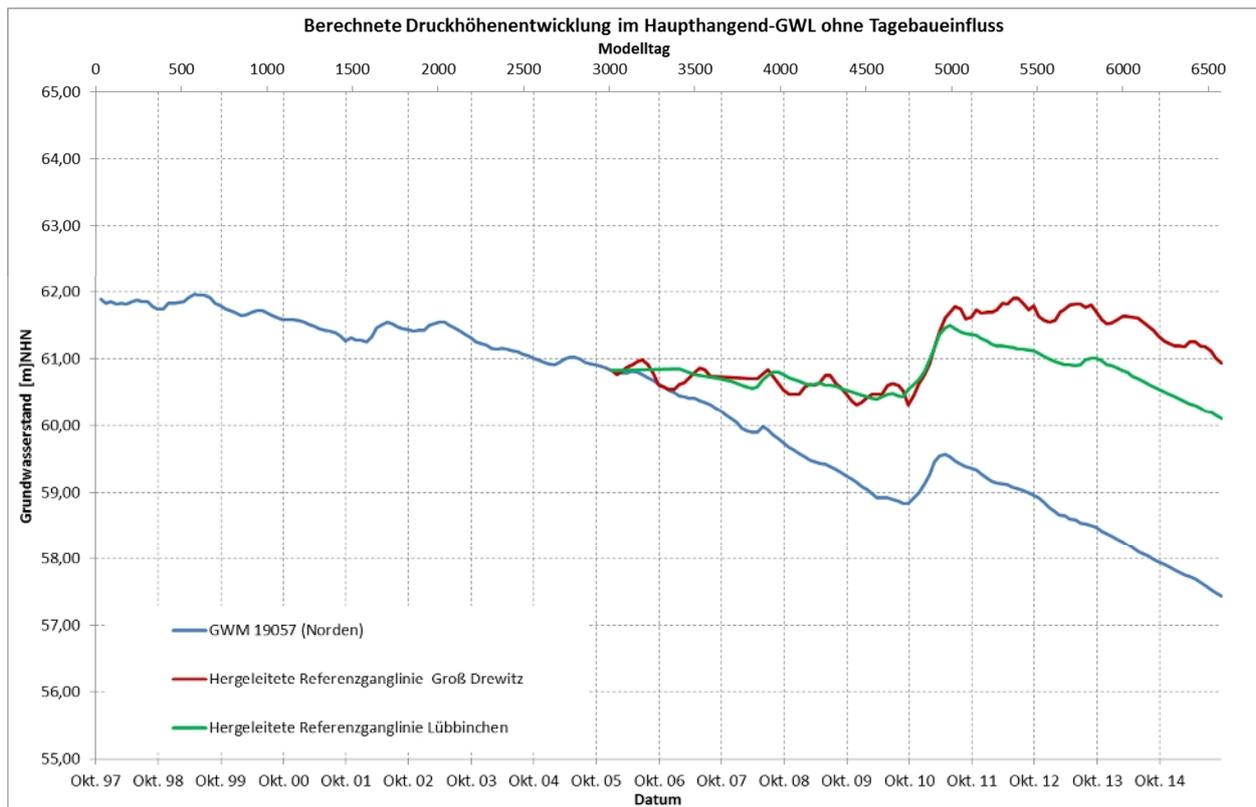


Abbildung 36: Hergelietete Ganglinien anhand der Referenzmessstellen zur Abbildung einer bergbauunbeeinflussten Druckhöhenentwicklung im Haupthangend-GWL

11.2 Ergebnisse Modellszenarien

Ersetzt man die bergbaubeeinflusste Druckhöhenentwicklung im Haupthangend-GWL des Ist-Zustandsmodells durch die künstlich erzeugten Ganglinien ohne Bergbaueinfluss, ergeben sich in den Modellszenarien Seewasserstände, die vom Ist-Zustand abweichen. Eine entsprechende Gegenüberstellung erfolgt in der Abbildung 37. Dargestellt sind die modellierten Seeganglinien des Ist-Zustandes sowie die Seewasserstände der Modellszenarien für den Zeitraum Oktober 1997 bis September 2015.

Die Abbildung 37 zeigt, dass die Seewasserstände beider Szenarien etwa ab Ende 2009 eine vom Ist-Zustandsmodell abweichende Entwicklung aufweisen. Entsprechend den höheren Druckniveaus im Haupthangend-GWL ergeben sich im Zeitraum Oktober 2009 bis September 2015 höhere Seewasserstände in beiden Szenarien. So liegt der See im Szenario Lb Ende September 2015 mit einem Wasserstand von + 62,0 m NHN etwa 1,0 m über dem Modellwert des Ist-Zustandes. Für das Szenario GD ergibt sich ein Seewasserstand von + 62,2 m NHN bzw. eine Differenz zum Ist-Zustand von annähernd 1,2 m. Im Mittel resultiert daraus eine jährliche tagebaubedingte Seewasserstandsabnahme von etwa 0,17 bis 0,20 m.

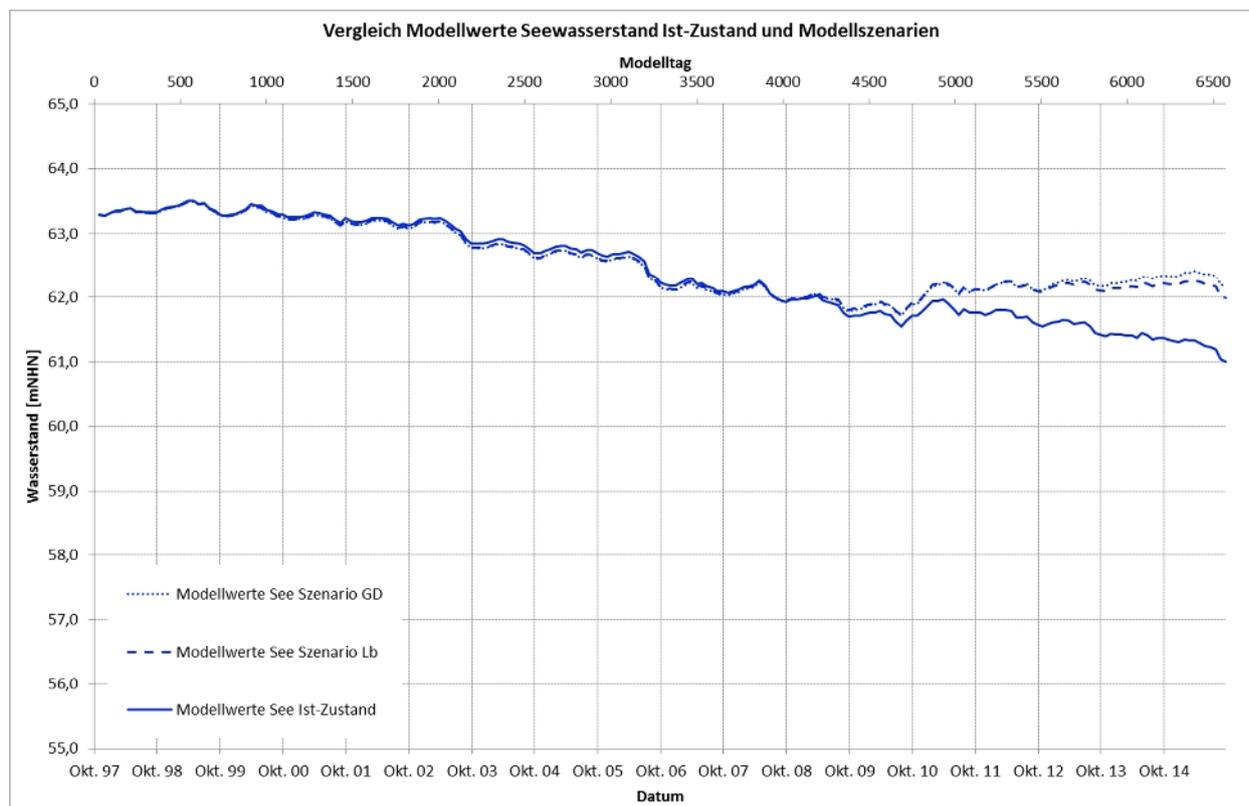


Abbildung 37: Modellierter Wasserstandsentswicklung im Pastlingsee im Zeitraum 01.10.1997 bis 30.09.2015 mit und ohne Tagebaueinfluss

In der Tabelle 9 werden die modellierten Seewasserstände des Ist-Zustandsmodells mit den Ergebnissen der Modellszenarien jahresweise gegenübergestellt. Ausgehend von einem anfänglichen Seewasserstand von + 63,3 m NHN im Oktober 1997 und den modellierten Seewasserständen Ende September 2015 ergibt sich je nach Szenario ein anteiliger Bergbaueinfluss von 43 bis 51 %. Die beobachtete Entwicklung im Pastlingsee ist auf eine bergbaubedingte Zunahme der Versickerungsverluste aus dem Seekörper in Richtung Haupthangend-GWL zurückzuführen.

Tabelle 9: Abweichung des modellierten Seewasserstandes der Szenarien vom Ist-Zustandsmodell und Ausweisung des Bergbauanteils

Vergleichsjahr	Modellierter Seewasserstand Ist-Zustandsmodell [m]NHN	Modellierter Seewasserstand Szenario Lübbinchen [m]NHN	Modellierter Seewasserstand Szenario Groß Drewitz [m]NHN	Δh [m] bezogen auf modellierten Ist-Zustand		Anteil [%] an Wasserspiegelabnahme (Bergbaueinfluss)	
				Lübbinchen	Groß Drewitz	Lübbinchen	Groß Drewitz
1997	63,30	63,3	63,3	0,0	0,0	0	0
2009	61,70	61,8	61,8	-0,1	-0,1	6	5
2010	61,71	61,9	61,9	-0,2	-0,2	13	11
2011	61,77	62,1	62,1	-0,3	-0,3	23	22
2012	61,57	62,1	62,1	-0,5	-0,5	29	31
2013	61,42	62,1	62,2	-0,7	-0,8	36	40
2014	61,37	62,2	62,4	-0,8	-1,0	44	51
2015	61,00	62,0	62,2	-1,0	-1,2	43	51

12 Zusammenfassung

Im vorliegenden Gutachten wird der Wasserhaushalt des FFH-Gebietes „Pastlingsee“ bewertet. Bei dem Pastlingsee handelt es sich um einen eiszeitlich angelegten abflusslosen Toteissee, der in seinem relativ abgetrennten West-Becken bereits verlandet und vermoort ist. Sowohl der See als auch das Moor sind seit Beginn der regelmäßigen Datenaufzeichnung durch eine permanente Wasserstandsabnahme gekennzeichnet. So sank der Wasserstand im Moor im Zeitraum 1997 bis Ende 2016 um etwa 1,5 m. Im gleichen Zeitraum nahm der Seewasserstand um über 2,3 m ab, was im Hochsommer 2015 im nahezu vollständigen Austrocknen des Sees gipfelte. Seit Oktober 2015 wird der Seewasserstand durch die Einleitung von Zuschusswasser gestützt.

Die Auswertung von Ganglinien hat gezeigt, dass die Wasserstände in See und Moor permanent über der Druckhöhe des umgebenen Haupthangendgrundwasserleiters liegen. Demnach ist ein Abstrom aus dem Feuchtgebiet in Richtung Grundwasserkörper zu vermuten. Dieser hängt von der Durchlässigkeit des Seeuntergrundes und dem Wasserstandsgradienten zwischen Feuchtgebiet und Haupthangendgrundwasserleiter ab. Innerhalb des Betrachtungszeitraumes 1997 bis 2016 sank dieser um über 5,0 m ab.

Neben den Grundwasserverhältnissen im Umfeld des Feuchtgebietes sind witterungsabhängige Einflussgrößen wie Niederschlag und Verdunstung zu berücksichtigen. Die Analysen langjähriger Wetterdaten der Station Cottbus haben gezeigt, dass die Durchschnittstemperaturen seit den 1990er einen deutlichen Aufwärtstrend aufzeigen. Damit einhergehend ist von einer Zunahme der Verdunstungsverluste auszugehen. Im Gegensatz dazu verharren die mittleren jährlichen Niederschlagsmengen auf einem weitestgehend konstanten Niveau, was in Summe eine Verringerung des klimatischen Inputs bedeutet und zu einem angespannten Wasserhaushalt führt.

Im Zuge der Untersuchungen wurde deutlich, dass die Verdunstungsverluste von der See- und Moorfläche neben der Versickerung die zweite maßgebende Zehrgröße beim Wasserhaushalt des Feuchtgebietes darstellen. Um diese zu quantifizieren, wurden verschiedene Datenquellen und Berechnungsverfahren herangezogen, die zum Teil deutlich unterschiedliche Ergebnisse lieferten. Je nach verwendeter Datengrundlage und verwendetem Berechnungsverfahren ergaben sich mittlere jährliche Verdunstungshöhen von Gewässerflächen von 745 bis 790 mm/a. Damit ließen sich die beobachteten Verluste im Pastlingsee erklären. Erst die Verdunstungsmessungen vom Sommer 2016 haben dann gezeigt, dass die gängigen Berechnungsverfahren die tatsächlichen Verdunstungshöhen um etwa 10-15 % überschätzen.

Überschlägige Bilanzierungen des Seewasserhaushaltes verdeutlichen, dass die berechneten und nachträglich reduzierten Verdunstungsverluste in Kombination mit einer zunehmenden Versickerung eine qualifizierte Abbildung der Seeganglinie ermöglichen. Je nach angenommener Verdunstungshöhe werden Versickerungsraten von mindestens 11 m³/d bis maximal 85 m³/d notwendig, um die beobachtete Wasserstandsentwicklung im Pastlingsee zu erklären.

Eine Quantifizierung des Seewasserhaushaltes gelingt mit Hilfe eines dreidimensionalen Grundwassermodells. Dieses wurde bereits 2012 im Auftrag der Vattenfall Europe Mining AG erstellt und im Zuge der aktuellen Untersuchung grundlegend überarbeitet. Unter anderem er-

folgte die Ausdehnung des Modellzeitraumes auf 18 Jahre sowie die Erhöhung der vertikalen Auflösung. Darüber hinaus wurden die Modellrandbedingungen grundlegend überarbeitet und um das so genannte lfmLake Plug-In erweitert, was die Abbildung eines Oberflächengewässers im Grundwassermodell ermöglicht. Darüber hinaus wurden die im Modell hinterlegten Wetterzeitreihen aktualisiert und an den gegenwärtigen Kenntnisstand angepasst.

Bei der Kalibrierung des Grundwassermodells wurde deutlich, dass die beste Anpassung der Modellergebnisse an die gemessenen Seewasserstände mit einer um 15 % reduzierten Gewässerverdunstung, berechnet nach dem Dalton-Verfahren, gelingt. Darüber hinaus zeigte sich, dass die Durchlässigkeit des Seeuntergrundes räumlich heterogen gestaltet werden muss, um die Modellgüte vor allem für den Validierungszeitraum zu erhöhen.

Ausgehend vom kalibrierten Grundwassermodell wurden Modellszenarien betrachtet, die von einer bergbauunbeeinflussten Druckhöhenentwicklung im Haupthangendgrundwasserleiter ausgehen. Ihre Herleitung erfolgte anhand von Ganglinien unbeeinflusster Grundwassermessstellen, die auf den Modellrand übertragen wurden. Als geeignet wurden zwei Grundwassermessstellen identifiziert, die außerhalb der bergbaulichen Grundwasserabsenkung liegen und eine geeignete Messreihe aufweisen.

Durch den Vergleich des modellierten Seewasserstandes des kalibrierten Ist-Zustandsmodell mit den Modellszenarien wurde die bergbaubedingte Wasserstandsabnahme des Pastlingsees berechnet. Im Ergebnis zeichnet sich ab Ende 2009 eine vom Ist-Zustandsmodell abweichende Seewasserstandsentwicklung ab, die je nach Szenario im September 2015 Differenzen von 1,0 bis 1,2 m erreicht. Diese Unterschiede zum Ist-Zustandsmodell sind einer bergbaubedingten Zunahme der Versickerungsverluste geschuldet. Ausgehend von einer beobachteten Wasserstandsabnahme im Pastlingsee von 2,3 m ergibt sich bis Ende September 2015 ein Bergbauanteil von ungefähr 43 bis 51 %.

13 Literatur

BFG (2003): BAGLUVA – Wasserhaushaltsverfahren zur Berechnung vieljähriger Mittelwerte der tatsächlichen Verdunstung und des Gesamtabflusses, 2003, Koblenz.

BODEN AG (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Aufl., Schweizerbart, Stuttgart

BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (HG.) (2000): Hydrologischer Atlas von Deutschland, Bonn

DVWK-Merkblatt 238/1996 (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen, Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn

GFI Grundwasser-Consulting-Institut GmbH Dresden (2017): Messung der Verdunstung des Pastlingsees, Abschlussbericht, Dresden

GIR Ingenieurbüro für Renaturierung (2012): Wasserhaushaltsmodellierung FFH-Gebiet „Pastlingsee“, Studie zur Entwicklung der Grundwasserverhältnisse vor dem Hintergrund zunehmender bergbaulicher Grundwasserabsenkung, Cottbus

GMB GmbH (2000): Ergebnisbericht Geophysikalisch-geologische Komplexstudie zum Erhalt von Feuchtgebieten im Schutzgebiet „Nord“ des Einzugsgebietes Tagebau Jänschwalde Calpenzmoor, Hasenluch, Pastlingsee, Senftenberg

GMB GmbH (2001): Ergebnisbericht der 2. Erkundungsetappe Geophysikalisch-geologische Komplexstudie zum Erhalt von Feuchtgebieten im Schutzgebiet „Nord“ des Einzugsgebietes Tagebau Jänschwalde Calpenzmoor, Hasenluch, Pastlingsee, Senftenberg

HAUDE, W. (1955): Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise. Mitt. DWD Nr.11

HÖLTING, B.; COLDEWEY, W. (2009): Hydrogeologie – Einführung in die allgemeine und angewandte Hydrogeologie; 90 Tabellen. 7. Aufl., Spektrum Akad. Verl., Heidelberg

LUA (2000): Flächendeckende Modellierung von Wasserhaushaltsgrößen für das Land Brandenburg, Landesumweltamt Brandenburg, Studie und Tagungsberichte, Band 27

PFAFF Büro für Bodenschutz & Landschaftsplanung (2001): Ermittlung von bodenphysikalischen und bodenchemischen Parametern aus Materialbohrungen von den Feuchtgebieten Calpenzmoor, Pastlingmoor und Grabkoer Seewiesen, Eberswalde

PFAFF Büro für Bodenschutz & Landschaftsplanung (2002): Planung des Monitoring- Programms zu den Auswirkungen der Grundwasserabsenkung im Plangebiet des Tagebaus Jänschwalde auf das Naturschutzgebiet Calpenzmoor und Naturschutzgebiet Pastlingsee, Eberswalde

RICHTER, D. (1977): Zur einheitlichen Berechnung der Wassertemperatur und der Verdunstung von freien Wasserflächen auf statistischer Grundlage, Abh. Meteorologischer Dienst der DDR

RICHTER, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194, 1995, Offenbach a. M.

RICHTER, D. (1997): Das Langzeitverhalten von Niederschlag und Verdunstung und dessen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt des Stechlinseegebietes – Berichte des Deutschen Wetterdienstes 201, 1997, Offenbach a. M.

SONNTAG, D. (1994): Advancements in the field of hygrometry. Meteorol. Zeitschrift N.F.: 51-66