

Verbundprojekt

INKA BB

**Innovationsnetzwerk Klimaanpassung
Region Brandenburg Berlin**

**TP 22: Nachhaltige Managementstrategien
für glaziale Seen Brandenburgs im Klimawandel**

Untersuchungen zum Verhalten von Brandenburger Flachseen bei Klimaänderungen

Prof. Dr. Stefan Kaden und Dr. Michael Schramm

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Aufgabenstellung	5
2	Auswahl der Seen	6
3	Meteorologische Daten	10
3.1	Datenaufbereitung	10
3.2	Analyse der Nullgradszenarien	10
3.3	Analyse der Zweigradszenarien	12
4	Simulation des natürlichen Wasserdargebots der Seeneinzugsgebiete	15
5	Simulation der Seenbewirtschaftung	19
5.1	Formulierung der Bewirtschaftung	19
5.2	Simulationsprogramm	21
6	Diskussion der Ergebnisse der Simulationsrechnungen	22
6.1	Seddiner See	22
6.2	Die vier Seen im Südosten Berlins	24
6.3	Die drei Seen im Westen Berlins	27
6.4	Die beiden Seen im Nordwesten Berlins	29
6.5	Zusammenfassung der Ergebnisse für die zehn Seen	30
7	Berechnung der Absenkungen für die 12 Seen	34
7.1	Ableitung statistischer Beziehungen	34
7.2	Anwendung der Multiregressionsmodelle	36
8	Weiterführende Untersuchungen zum Seddiner See	38
8.1	Verlängerung der Modellrechnung für den Seddiner See bis 2012	38
8.2	Anpassung des Modells Seddiner See an veränderte Bedingungen ab 2011	41
8.3	Grundwasser Aspekte	42
8.4	Neue Simulation 2 grd Szenario für den Seddiner See	43
9	Zusammenfassung	46

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1:	Übersicht über das Untersuchungsgebiet.....	9
Abbildung 3-1:	Jahressummen von P und PET, EZG Seddiner See, 0 grd-Szenario	11
Abbildung 3-2:	Differenz P-PET, EZG Seddiner See, 0 grd-Szenario.....	11
Abbildung 3-3:	Jahressummen von P und PET, EZG Seddiner See, 2 grd-Szenario	13
Abbildung 4-1:	Mittlere Zuflüsse zum Seddiner See, 0 grd-Szenario	17
Abbildung 4-2:	Mittlere Zuflüsse zum Seddiner See, 2 grd-Szenario	18
Abbildung 6-1:	Absenkungen Seddiner See, 0 grd-Szenario	23
Abbildung 6-2:	Absenkungen Seddiner See, 2 grd-Szenario	23
Abbildung 6-3:	Füllungen Seddiner See, 2 grd-Szenario.....	24
Abbildung 6-4:	Absenkungen Gr. Leuthener See, 2 grd-Szenario	25
Abbildung 6-5:	Absenkungen Rangsdorfer See, 2 grd-Szenario.....	25
Abbildung 6-6:	Absenkungen Teupitzer See, 2 grd-Szenario.....	26
Abbildung 6-7:	Absenkungen Ziestsee, 2 grd-Szenario	26
Abbildung 6-8:	Absenkungen Plessower See, 2 grd-Szenario	27
Abbildung 6-9:	Absenkungen Wusterwitzer See, 2 grd-Szenario	28
Abbildung 6-10:	Absenkungen Gördensee, 2 grd-Szenario	28
Abbildung 6-11:	Absenkungen Kleßener See, 2 grd-Szenario	29
Abbildung 6-12:	Absenkungen Bückwitzer See, 2 grd-Szenario.....	30
Abbildung 6-13:	Maximale Absenkungen von vier Seen, 2 grd-Szenario	30
Abbildung 6-14:	Absenkungen mit 10% ÜWk. von vier Seen, 2 grd-Szenario	31
Abbildung 6-15:	Zur Berechnung der Absenkungszunahmen am Beispiel des Teupitzer Sees.....	32
Abbildung 7-1:	Gegenüberstellung „beobachteter“ und berechneter relativer Absenkungsanstiege A10 für die zehn Seen.....	36
Abbildung 8-1:	Zufluss Z zum Seddiner See ab 1998.....	38
Abbildung 8-2:	Niederschlag P und pot. Verdunstung PET im Einzugsgebiet des Sees	39
Abbildung 8-3:	Differenz DIF zwischen Niederschlag und Verdunstung.....	39
Abbildung 8-4:	Berechnete und beobachtete Seefüllungen VOLber und VOLbeo	40
Abbildung 8-5:	Gegenüberstellung der Füllungen mit der Differenz DIF.....	40
Abbildung 8-6:	Berechnete und beobachtete Wasserstände im Seddiner See, ab 2003 keine GW-Entnahme.....	42
Abbildung 8-7:	Grundwasserstand an GWM 37441690 südlich des Seddiner Sees (Daten des LUGV Brandenburg) mit Trendlinie	42
Abbildung 8-8:	Absenkungen Seddiner See, 2 grd Szenario, Variante 0	44
Abbildung 8-9:	Absenkungen Seddiner See, 2 grd Szenario, Variante 1	44
Abbildung 8-10:	Absenkungen Seddiner See, 2 grd Szenario, Variante 2	45
Abbildung 8-11:	Vergleich der Absenkungen des Seddiner Sees mit 50% ÜWk beim 0 grd Szenario und beim 2 grd Szenario mit verschiedenen GW-Abströmungen (Varianten 0, 1, 2)	45

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Angaben zu den zehn detailliert untersuchten Seen	7
Tabelle 2-2:	Angaben zu den zwölf vereinfacht behandelten Seen	8
Tabelle 3-1:	Gegenüberstellung der langjährigen Mittelwerte von beiden Klimagrößen in den Jahren 1951-2006 und 2004-2053 (Angaben in mm)	12
Tabelle 3-2:	Informationen zu den Trends in den Klimareihen der Zweigradszenarien (Angaben in mm)	13
Tabelle 3-3:	Entwicklung der mittleren Jahresniederschläge in mm im Zeitraum 2004-2053	14
Tabelle 4-1:	Die hydrografischen Parameter von EGMOD für die zehn EZG	15
Tabelle 4-2:	Die Systemparameter von EGMOD für die zehn Einzugsgebiete.....	16
Tabelle 5-1:	Angaben zur Konfiguration der Seen.....	19
Tabelle 5-2:	Festlegung der Kenngrößen der Bewirtschaftung	20
Tabelle 6-1:	Absenkungen in den Jahren 2018 und 2053 (Angaben in cm)	32
Tabelle 6-2:	Zunahme der Absenkungen im Zeitraum 2018-2053	33
Tabelle 7-1:	Einflussgrößen der zehn Seen.....	34
Tabelle 7-2:	Korrelationen zwischen den relativen Zunahmen der Absenkungen und den Einflussgrößen (A ist die Abkürzung für Absenkung)	35
Tabelle 7-3:	Regressionskoeffizienten für die relativen Zunahmen der Absenkungen	35
Tabelle 7-4:	Zunahme der Absenkungen der 12 Seen im Zeitraum 2018-2053	37
Tabelle 8-1:	Vergleich von Kenngrößen der Seefüllung 2004 – 2010 und 2011 - 2012	41

Anlagenverzeichnis

Anlage 1:	Daten der untersuchten Seen
-----------	-----------------------------

1 Einleitung und Aufgabenstellung

In der Brandenburger Mittelmark südlich und westlich von Berlin befinden sich zahlreiche Seen, welche durch ihre geringe Tiefe ihre Oberflächenform besonders stark ändern werden, wenn klimatische Schwankungen das natürliche Regime ihrer Zuflüsse verändern. Existieren daher begründete Klimaszenarien für die nahe Zukunft, so ist es wichtig, ihren Einfluss auf die Abflussbildung zu untersuchen, um Angaben über das korrespondierende Füllungsregime der Seen zu erhalten und gegebenenfalls rechtzeitig notwendige Regulierungsmaßnahmen einleiten zu können.

Erste Untersuchungen in dieser Richtung fanden bereits im Rahmen des Teilprojektes 22 im Jahr 2010 am Beispiel des Seddiner Sees statt. Im Gegensatz zu den meisten anderen Flachseen waren hier Beobachtungsreihen des Wasserstandes, Daten zur Bestimmung der Beziehungen zwischen Wasserstand, Füllung und Fläche des Sees sowie zu Wassernutzungen vorhanden. Damit war die Basis für eine Simulation des Seeverhaltens gegeben, wenn zusätzlich Angaben zu Klimagrößen wie Niederschlag und Verdunstung eine Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen ermöglichen. So konnte ein brauchbares Modell für den Seddiner See für die zwölf Jahre 1995-2006 erstellt werden, das die bekannten Wasserstände des Sees in diesem Zeitraum befriedigend nachbildete.

Als dann ab Juli 2011 vom Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung (PIK) für zwei Klimaszenarien Reihen des Niederschlags und der potentiellen Verdunstung im Zeitraum 2004-2053 für die Einzugsgebiete von vier Flachseen bereitgestellt wurden, konnte mit diesem Modell das Füllungsregime der Seen simuliert werden. Als wichtigste Ergebnisse sind extreme Absenkungen der Seen im genannten Zeitraum zu nennen, die infolge von Klimaänderungen auftreten können.

Die Anpassung des Modells an einen See und das zugehörige Einzugsgebiet ist mit einem großen Arbeitsaufwand verbunden, der sich vor allem aus der Bearbeitung der Klimareihen und der statistischen Auswertung seiner Ergebnisse ergibt. Es war deshalb von vornherein klar, dass das Modell im Rahmen der beabsichtigten Untersuchungen nicht an alle vorgegebenen 50 Seen der Brandenburger Mittelmark angepasst werden kann. Mit einiger Sicherheit ist zudem anzunehmen, dass sich die klimatischen Verhältnisse im Untersuchungsgebiet nicht gravierend unterscheiden. Es bot sich daher folgender allgemeiner Lösungsweg an, wenn für möglichst viele Seen die Auswirkungen eines Klimawandels zahlenmäßig angegeben werden können:

- Festlegung der Seen aus der Gesamtheit der 50 Seen, für die Untersuchungen sinnvoll oder überhaupt möglich sind
- Anwendung des erarbeiteten Simulationsmodells auf insgesamt zehn Seen, welche über die Brandenburger Mittelmark gleichmäßig verteilt sind
- Statistische Analyse der detaillierten Ergebnisse dieser Modellrechnungen
- Ableitung allgemeiner Beziehungen, mit deren Hilfe Aussagen auch für nicht untersuchte Seen gemacht werden können.

2 Auswahl der Seen

Für die im Projekt INKA BB genannten 50 Seen wurden vom Institut für Angewandte Gewässerökologie (IfAG) Unterlagen übergeben, die auszugsweise in der Anlage 1 enthalten sind. Nicht alle dieser Seen können oder brauchen auch nicht untersucht zu werden.

Bei sieben Seen fehlen selbst die grundlegendsten Angaben wie Seefläche und Seevolumen, so dass hier keinerlei numerische Rechnungen möglich sind. Zu dieser Gruppe gehören

- Bohnenländer See
- Bornstedter See
- Buckower See
- Groß Behnitzer See
- Hohennauener See Ost
- Kleiner Kossenblatter See
- Steckelsdorfer See.

Acht weitere Seen werden von relativ zu ihrem Volumen abflussreichen Gewässern durchflossen oder besitzen ein sehr großes eigenes oberirdisches Einzugsgebiet, dass selbst bei erheblichen klimabedingten Abflussreduzierungen keine wesentlichen quantitativen Änderungen im Seeregime zu erwarten sind. Hier müssen zusammen mit ihren Zuflüssen genannt werden:

- Hohennauener See West – Großer Havelländischer Hauptkanal (GHHK)
- Klostersee bei Lehnin – großes Einzugsgebiet (EZG) von 114 km² bei einem Seevolumen von 0,82 hm³
- Krimnicksee – Dahme (EZG 1340 km², Seevolumen 1,40 hm³)
- Mellensee – Notte (EZG 144 km², Seevolumen 6,67 hm³)
- Netzener See – Emster (EZG 161 km², Seevolumen 2,91 hm³)
- Rietzer See – Emster (EZG 208 km², Seevolumen 3,28 hm³)
- Schampsee – großes EZG von 20 km² und sehr kleines Seevolumen von 0,21 hm³
- Witzker See – GHHK

Bei sechs Seen beziehen sich die vom IfAG angegebenen Einzugsgebietsflächen offenbar nur auf das direkte Seeneinzugsgebiet und erfassen somit nicht das gesamte Zuflussgebiet. Die tatsächlichen Einzugs Grenzen sind unklar. Hierhin gehören:

- Bauernsee bei Dobbrikow
- Gohlitzsee
- Guldensee
- Kolpinsee bei Lehnin
- Schäfersee
- Teufelssee.

Bis auf den Bauernsee besitzen diese Seen weder einen Zufluss noch einen Ausfluss. Ihre Betrachtung würde Untersuchungen der Grundwasserverhältnisse bedingen, die im Rahmen des Projektes zu umfangreich wären.

Bei fünf Seen liegen weitere Seen in ihrem Einzugsgebiet. Da über eine gemeinsame Regulierung der jeweils zusammenhängenden Seen keinerlei Angaben existieren, müssen auch diese Seen aus den Untersuchungen ausscheiden. Die fünf Seen mit ihren Oberliegern sind:

- Gröbener See – Sietener See
- Kähnsdorfer See – Seddiner See
- Schulensee – Teupitzer See und Zemminsee
- Todnitzsee – Pätzer Hintersee

- Zemminsee – Teupitzer See.

Schließlich können der Kleine Plessower See und der Kleine Seddiner See zusammen mit ihren großen Seenachbarn Großer Plessower See und Großer Seddiner See gemeinsam untersucht werden. Vereinfacht wird daher im Folgenden von einem Plessower und einem Seddiner See gesprochen.

Somit verbleiben 22 Seen, für die eine eingehende Berechnung „lohnt“. Sie wurden in zwei Gruppen eingeteilt. Zehn Seen sind mit Hilfe von N-A-Modellen detailliert berechnet worden. Die zweite Gruppe mit zwölf Seen wurde mittels statistischer Beziehungen behandelt, welche aus den Ergebnissen der ersten Gruppe abgeleitet werden konnten.

Die Seen der ersten Gruppe sind mit einigen wichtigen Kenngrößen in Tabelle 2-1 verzeichnet.

Tabelle 2-1: Angaben zu den zehn detailliert untersuchten Seen

Name	Typ	Fläche EZG [km ²]	See-fläche [km ²]	See-Volumen [hm ³]	Maximale Tiefe [m]	Mittlere Tiefe [m]
Groß Leuthener See	D	26,2	1,146	2,73	5,92	2,38
Teupitzer See	D+2Z	32,9	4,756	16,63	8,25	3,50
Ziestsee	A	1,95	0,565	2,42	9,32	4,28
Rangsdorfer See	D+Z	54,4	2,038	3,39	6,29	1,66
Seddiner See	D	26,82	2,220	6,72	7,26	3,04
Wusterwitzer See	D	27,69	1,713	5,79	9,21	3,38
Gördensee	A	8,56	0,408	0,53	2,74	1,26
Plessower See	A	14,4	3,221	20,80	13,37	6,46
Kleißener See	D	3,90	0,506	1,25	4,26	2,48
Bückwitzer See	2Z/A	50,8	0,534	1,134	8,36	2,12
Mittel	-	24,76	1,711	6,14	7,50	3,06

Anmerkungen:

- D See wird durchflossen
- A See hat einen Ausfluss
- Z See hat mehrere Zuflüsse
- See ist abflusslos

EZG Einzugsgebiet des Sees ohne Seefläche.

Tabelle 2-2 enthält die gleichen Kenngrößen zur zweiten Seengruppe.

Tabelle 2-2: Angaben zu den zwölf vereinfacht behandelten Seen

Name	Typ	Fläche EZG [km ²]	Seefläche [km ²]	See-Volumen [hm ³]	Maximale Tiefe [m]	Mittlere Tiefe [m]
Gr. Kossenblatt. See	D+2Z	22,12	1,681	3,46	3,79	2,06
Pätzer Hintersee	D	16,04	2,162	3,30	3,50	1,53
Zeschsee	D	6,28	0,234	0,61	5,60	2,61
Wolziger See	D+Z	41,90	0,500	0,66	2,40	1,33
Siethener See	D	11,39	0,708	1,95	4,42	2,75
Güterfelder Haussee	A	0,84	0,133	0,21	3,26	1,62
Riebener See	D	5,82	0,377	0,44	2,40	1,18
Gr. Lienewitzer See	D+A	6,08	0,142	0,48	5,57	3,37
Heiliger See	A	1,76	0,525	0,76	3,11	1,46
Pritzerber See	D	29,62	1,975	3,74	9,70	1,90
Riewendsee	D+A	71,88	1,018	3,16	6,89	3,11
Wolzensee	D	18,19	0,508	0,73	3,14	1,44
Mittel	-	19,33	0,830	1,62	4,48	2,03

Aus einem Vergleich der Mittel geht hervor, dass die eingehend berechneten Seen im Schnitt größer und tiefer sind und zudem die größeren Einzugsgebiete besitzen. Trotzdem überstreichen in beiden Gruppen die Seen bezüglich der einzelnen Kenngrößen ein breites Spektrum.

Abbildung 2-1 gibt einen gedrängten Überblick über die Lage der 22 Seen beider Gruppen. Die Seen der ersten Gruppe sind mit Angaben zu den jährlichen Mittelwerten der Niederschläge P , der potentiellen Verdunstung PET und der Abflussspende M_q der jeweils zugehörigen Einzugsgebiete versehen. Zusätzlich wurden die Abflussspenden M_q von benachbarten Pegeln zum Vergleich eingetragen. Diese meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen beziehen sich auf Verhältnisse ohne Klimaänderungen. Die Seen der zweiten Gruppe sind nur durch ihre ungefähre Lage und gesetzte Abflussspenden gekennzeichnet worden.

In den folgenden vier Abschnitten werden die Arbeiten vorgestellt, die bei der detaillierten Untersuchung der zehn Seen der ersten Gruppe vorgenommen worden sind und welche wesentlichen Ergebnisse dabei erreicht wurden.

3 Meteorologische Daten

3.1 Datenaufbereitung

Die Anwendung von N-A-Modellen ist mit der Bereitstellung von Reihen meteorologischer Größen verbunden. Im vorliegenden Fall wird das Modell EGMOD mit einem monatlichen Zeitschritt benutzt, das als Eingangsgrößen den Niederschlag und die potentielle Verdunstung benötigt.

Vom PIK wurden deshalb Reihen des Niederschlags, der potentiellen Verdunstung und der Lufttemperatur für zwei Klimaszenarien bereitgestellt: zum einen für die Annahme, dass im Zeitraum 2004-2053 keine Änderungen erfolgen (**Nullgradszenario**), zum anderen für einen linearen Anstieg der Lufttemperaturen um zwei Grad (**Zweiggradszenario**) im selben Zeitraum. Die Daten werden als Tageswerte für sog. Hydrotope geliefert, in welche Brandenburg untergliedert ist. Für jedes EZG eines Sees sind daher die Hydrotope zu benennen, die mit einem bestimmten Anteil zum EZG gehören. Für jedes Szenario wurden 100 Realisierungen des 50-jährigen Zeitraums 2004-2053 in dieser Form übergeben.

Da die vorgesehenen Seeberechnungen auf der Basis monatlicher Zuflüsse erfolgen, müssen nachstehende Operationen an den PIK-Reihen für ein bestimmtes EZG vorgenommen werden:

- Zusammenfassung der jeweils 100 Einzeldateien zu einer Gesamtdatei für das EZG
- Berechnung der täglichen Werte von Niederschlag und potentieller Verdunstung unter Berücksichtigung der Lufttemperatur zwecks Bestimmung der Schneeverlagerung, getrennt für alle Hydrotope des EZG
- Zusammenfassung dieser täglichen Hydrotop-Werte unter Beachtung ihrer Anteile am EZG
- Bildung der monatlichen Summen von Niederschlag P und potentieller Verdunstung PET für das EZG.

Nach Abschluss der genannten Arbeiten liegen dann jeweils 100 Reihen monatlicher Werte für den Zeitraum 2004-2053 für jedes der beiden Szenarien vor.

3.2 Analyse der Nullgradszenarien

Die monatlichen Reihen des Niederschlags und der potentiellen Verdunstung sind in verschiedenen Richtungen analysiert worden. Die Reihen der Nullgradszenarien müssten sowohl den gegenwärtigen als auch den künftigen Klimastand widerspiegeln und daher statistisch gesehen stationär sein. Bei einer Betrachtung der Verhältnisse im EZG des Seddiner Sees bestätigen die Abbildung 3-1 sowie Abbildung 3-2 beispielsweise die Stationarität der Reihen: beide Bilder geben die über die 100 Realisierungen gemittelten jährlichen Niederschläge und Verdunstungen sowie deren Differenzen in den Jahren des Zeitraums 2004-2053 wieder und zeigen keinen Trend (warum das Jahr 2004 etwas herausfällt, ist nicht klar).

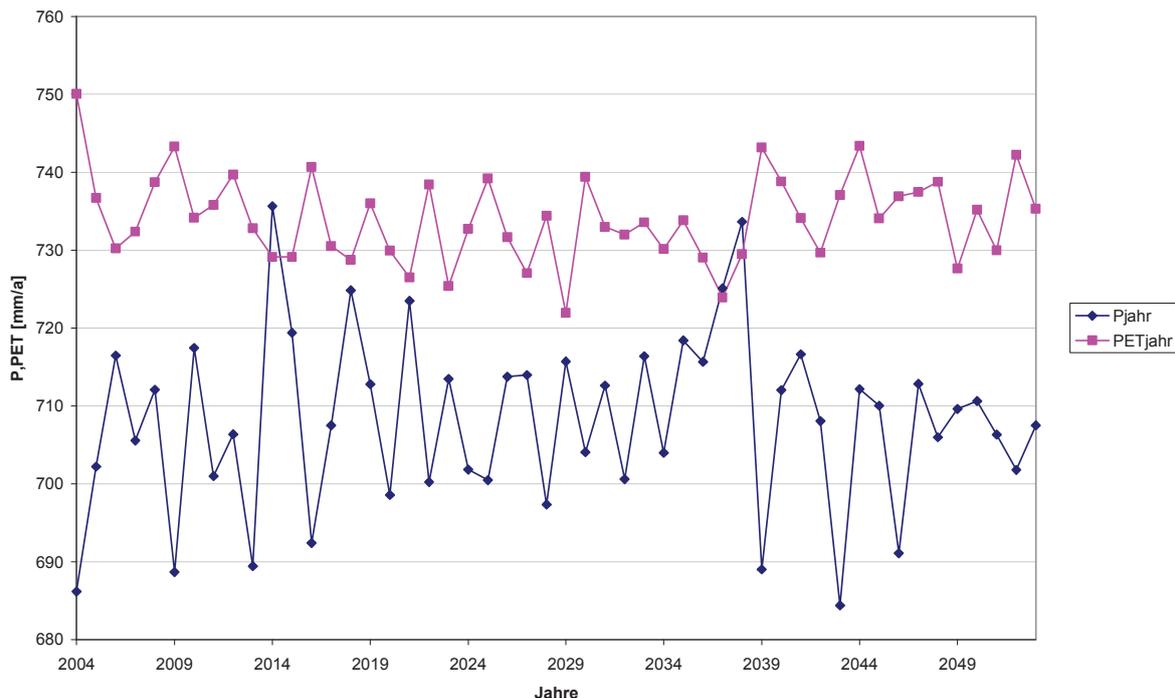


Abbildung 3-1: Jahressummen von P und PET, EZG Seddiner See, 0 grd-Szenario

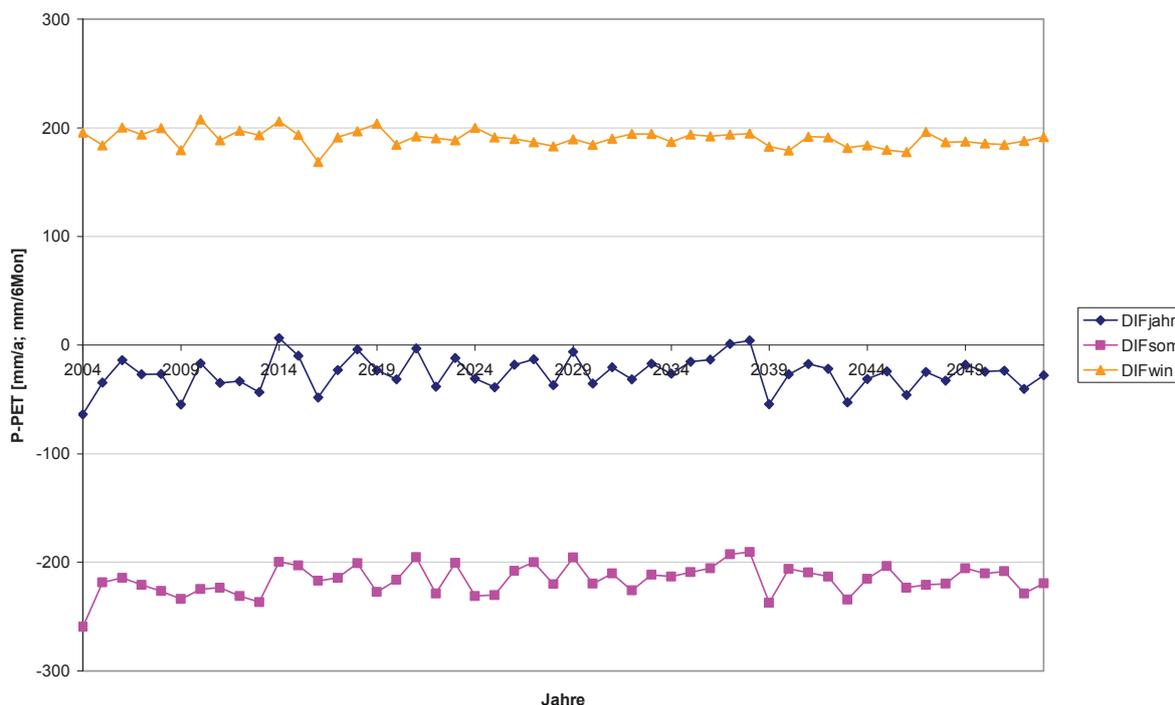


Abbildung 3-2: Differenz P-PET, EZG Seddiner See, 0 grd-Szenario

Die Annahme aber, dass der künftige Zustand ohne Klimaänderungen in etwa den vergangenen Verhältnissen entsprechen müsste, wird durch entsprechende Auswertungen nicht bestätigt. In Tabelle 3-1 sind als Beispiel für vier Seen die langjährigen Mittelwerte der beiden Klimagrößen für die Jahre 1951-2006 denen der Jahre 2004-2053 gegenübergestellt worden. Dabei wurden Reihen für meteorologische Teilgebiete (MTG) genutzt, welche für Bewirtschaftungsuntersuchungen im Havelgebiet für die BfG Koblenz aufgestellt worden waren.

Tabelle 3-1: Gegenüberstellung der langjährigen Mittelwerte von beiden Klimagrößen in den Jahren 1951-2006 und 2004-2053 (Angaben in mm)

MTG	Maßgeblich für den See	1951-2006		EZG vom See	2004-2053		Differenz P	Differenz PET
		P	PET		P	PET		
9	Gr.Leuth.See	610	669	Gr.Leuth.See	658	762	+48	+93
15	Rangsd.See	615	668	Rangsd.See	690	680	+75	+12
23	Seddiner See	604	664	Sedd. See	708	734	+104	+70
28	Bückw.See	628	635	Bückw. See	653	584	+25	-51

Anmerkungen:

P jährliche Niederschlagssumme

PET jährliche potentielle Verdunstungshöhe

Auf Grund der teilweise erheblichen Unterschiede darf nicht erwartet werden, dass Ergebnisse der Seenbewirtschaftung in zurückliegenden Zeiträumen mit denen in den künftigen Zeiten übereinstimmen, selbst wenn dieselben Kenngrößen der Bewirtschaftung verwendet werden (z.B. beim Seddiner See in den beobachteten Jahren 1995-2006).

Die Ursachen für die eigentlich nicht zu erwartenden erheblichen Differenzen sind unbekannt.

Schließlich sei mit Blick auf Abbildung 2-1 noch darauf hingewiesen, dass bei einem Gang vom Südosten Berlins zum Nordwesten zwar die Niederschläge P keine einheitliche Entwicklung zeigen, dafür aber die potentielle Verdunstung PET im Allgemeinen abnimmt. Die für die Abflussbildung verantwortliche Klimadifferenz P-PET bedingt deshalb auf dem betrachteten Weg die zu beobachtende Zunahme der mittleren Abflussspenden M_q .

3.3 Analyse der Zweigradszenarien

Die Zweigradszenarien gehen von der Annahme aus, dass die mittleren Lufttemperaturen im Untersuchungsgebiet von 2004 bis 2053 um zwei Grad, bezogen auf den vorindustriellen Zustand, ansteigen. Damit ist ein Trend in den Reihen der mittleren Jahressummen von Niederschlag P und potentieller Verdunstung PET im genannten Zeitraum zu erwarten. Tatsächlich zeigt sich in Abbildung 3-3 im Fall des Seddiner Sees ein linearer Trend sowohl für P als auch für PET im gesamten Zeitraum. Ein völlig analoges Bild ergibt sich auch für die anderen Seen.

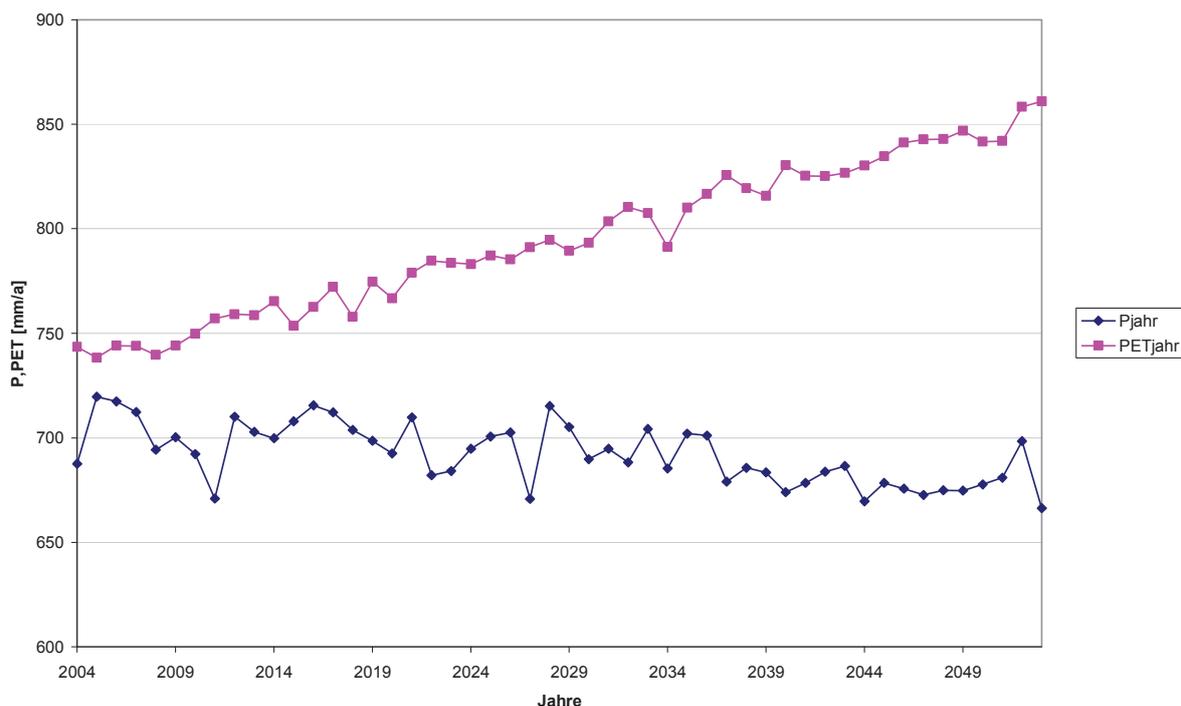


Abbildung 3-3: Jahressummen von P und PET, EZG Seddiner See, 2 grd-Szenario

Weiterhin darf man erwarten, dass der Trend in den ersten Jahren etwa in Höhe der langjährigen Mittelwerte von P und PET der korrespondierenden Größen aus den Nullgradszenarien beginnt. Inwieweit das auch gilt und um welche Höhen sich die Größen P und PET in den 50 Jahren ungefähr verändern, darüber gibt die nachstehende Tabelle 3-2 für vier ausgewählte Seen Auskunft.

Tabelle 3-2: Informationen zu den Trends in den Klimareihen der Zweigradszenarien (Angaben in mm)

EZG des See	Mittel des Nullgradszenarios		Mittelwerte für 2004-2013		Veränderung bis 2044-2053	
	P	PET	P	PET	P	PET
Gr.Leuth.See	658	762	651	777	-24	+101
Rangsd. See	690	680	684	693	-18	+86
Seddin. See	708	734	701	748	-24	+96
Bückw. See	653	584	646	594	-19	+78

Erfreulich ist die Tatsache, dass die Mittelwerte von P und PET aus den Nullgradszenarien sehr gut mit den mittleren Werten zu Beginn des Untersuchungszeitraums übereinstimmen. Die Veränderungen der potentiellen Verdunstung PET verlaufen innerhalb der 50 Jahre weitgehend gleichmäßig. Dagegen setzt die Abnahme des Niederschlags merklich erst nach 2030 ein, wie die Tabelle 3-3 zeigt.

Tabelle 3-3: Entwicklung der mittleren Jahresniederschläge in mm im Zeitraum 2004-2053

EZG des Sees	2004-2013	2014-2023	2024-2033	2034-2043	2044-2053
Gr.Leuth.See	651	648	644	636	627
Rangsd. See	684	684	680	674	666
Seddin. See	701	701	697	686	677
Bückw. See	646	645	643	634	627

4 Simulation des natürlichen Wasserdargebots der Seeneinzugsgebiete

Da es für die Mehrzahl der Brandenburger Flachseen keine Angaben zum natürlichen Zufluss zu den Seen gibt, ist man, wie bereits in Abschnitt 1 erwähnt, auf die Nutzung von N-A-Modellen angewiesen, welche Klimagrößen wie den Niederschlag und die potentielle Verdunstung in das natürliche Dargebot eines Einzugsgebiets transformieren. Im Jahr 2010 konnte für den Seddiner See nachgewiesen werden, dass sich hierbei das N-A-Modell EGMOD eignet, für das ein FORTRAN-Algorithmus zur Verfügung steht. Der Nachweis konnte für die Jahre 1995-2006 erbracht werden, weil in diesen Jahren die Wasserstände des Sees und damit seine zugehörigen Füllungen ebenso bekannt waren wie die Werte von P und PET für das Einzugsgebiet des Sees. Die Parameter des Modells wurden dann so bestimmt, dass die beobachteten und die berechneten Füllungen befriedigend übereinstimmen.

Das Modell EGMOD arbeitet mit dem Zeitschritt 1 Monat, erwartet damit seine Eingangsgrößen P und PET in derselben Zeiteinheit (vgl. Abschn. 3) und liefert dann monatliche Abflüsse aus den jeweiligen Einzugsgebieten.

Das Modell besitzt fünf hydrografische und zehn Systemparameter, wobei die erstgenannten Parameter aus Kartenwerken relativ genau bestimmt werden können. Für die Bestimmung der Systemparameter müssen aus hydrologisch ähnlichen Gebieten wie das jeweilige Untersuchungsgebiet zumindest kurze Beobachtungsreihen des Abflusses vorliegen. Auf dieser Grundlage können dann die Parameter so festgelegt werden, dass die damit berechneten Abflüsse hinreichend gut mit den beobachteten Werten übereinstimmen. Danach überträgt man diese gefundenen Systemparameter auf das betrachtete Einzugsgebiet.

In der nächsten Tabelle 4-1 stehen die ersten drei hydrografischen Parameter der EZG der zehn Seen, die restlichen jeweils zwei sind Null.

Tabelle 4-1: Die hydrografischen Parameter von EGMOD für die zehn EZG

EZG des Sees	AE [km ²]	AF [-]	AN [-]	AW [-]
Gr.Leuthener See	26,2	0,925	0,050	0,025
Teupitzer See	32,9	0,831	0,168	0,001
Ziestsee	1,95	0,980	0,020	0,000
Rangsdorfer See	54,4	0,763	0,235	0,002
Seddiner See	26,82	0,9694	0,0154	0,0152
Wusterwitzer See	27,69	0,663	0,336	0,001
Gördensee	8,56	0,917	0,083	0,000
Plessower See	14,4	0,755	0,235	0,010
Kleißener See	3,90	0,987	0,008	0,005
Bückwitzer See	50,8	0,870	0,129	0,001

Anmerkungen:

AE Fläche des EZG des Sees ohne die Seefläche

AF Fläche der grundwasserfernen Gebiete, bezogen auf AE

AN Fläche der grundwassernahen Gebiete, bezogen auf AE

AF Wasserflächen (ohne die Seefläche), bezogen auf AE.

Die Systemparameter von EGMOD sind von früher bei DHI-WASY bearbeiteten Einzugsgebieten übernommen worden. Sie wurden in Tabelle 4-2 eingetragen.

Tabelle 4-2: Die Systemparameter von EGMOD für die zehn Einzugsgebiete

Seen	Leuth.See Rangsd.S.	Teup.See Ziestsee	Seddiner See	Wust.See Pless. See	Gördens. Kleß. See	Bückwit- zer See
übernommen von	Pegel M.Buchhol- z/obereDa- hme	TG Neue Mühle/unt. Dahme	Pegel Woltersd. 1/Nuthe	Pegel Woltersd. 2/Hammer- fließ	Pegel Wulkow/ Dosse	Pegel Garz/ Temnitz
Parameter						
AFMIN [-]	0,450	0,740	0,849	0,950	0,611	0,200
WMAX [mm]	167	220	310	101	102	150
WNMX [mm]	127	100	67	71	79	15
WSC [mm]	100	160	16	19	75	120
WSGR [mm]	83	220	39	54	63	132
CSF [d]	1	20	12	9	16	16
CSN [d]	22	40	199	113	112	200
CG [d]	3101	1000	3112	908	1160	1160
PAS [-]	2825	5000	3516	2512	4500	4500
COEF [-]	0,103	0,600	0,559	0,612	0,406	0,300

Nach der Festlegung der EGMOD-Parameter konnten die Zuflüsse zu den zehn Seen für die 100 Realisierungen der monatlichen P- und PET-Werte aus Abschnitt 3.1, getrennt für das Null- und das Zweigradszenario, berechnet werden. Sie dienen im Anschluss daran der Simulation der Speicherfüllungen der Seen.

Abbildung 4-1 gibt als Beispiel den Gang der über die 100 Realisierungen gemittelten Zuflüsse zum Seddiner See für die 50 Jahre des Untersuchungszeitraums 2004-2053 im Fall des Nullgradszenarios wieder. Sowohl bezüglich des ganzen Jahres als auch für den Sommer und den Winter fehlen, wie man erwarten muss, jegliche Trends.

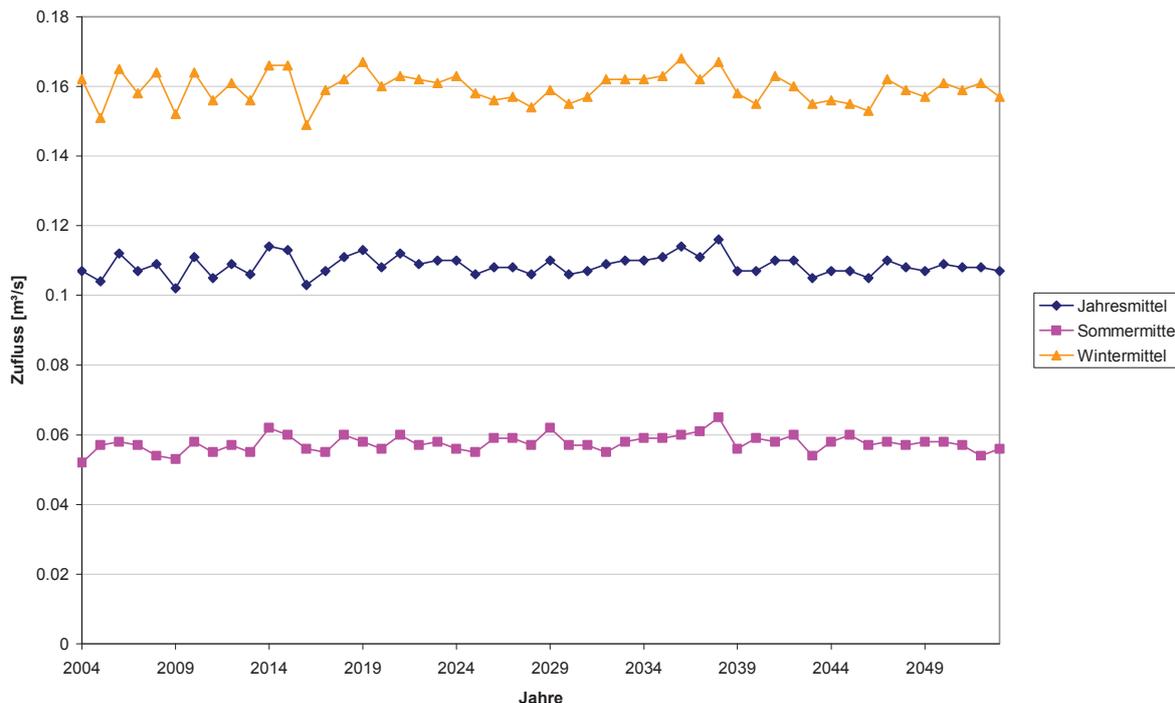


Abbildung 4-1: Mittlere Zuflüsse zum Seddiner See, 0 grd-Szenario

Zwecks Einschätzung der Simulationsgüte wurden aus den Zuflussreihen der Nullgradszenarien die zugehörigen langjährigen Jahreszuflussspenden M_q [l/skm^2] gebildet und mit den Spenden umliegender Pegel verglichen. Mit Blick auf Abbildung 2-1 kann man feststellen:

- Die Zuflussspenden vom Groß Leuthener See bzw. vom Teupitzer See in Höhe von $2,63 l/skm^2$ bzw. $2,35 l/skm^2$ liegen im gleichen Bereich wie die benachbarten Pegel Märkisch-Buchholz 2/Dahme, Ressen und Pretschen mit Werten von $2,28-2,46 l/skm^2$.
- Der weiter nördlich gelegene Ziestsee weist zwar eine größere Spende von $3,79 l/skm^2$ auf, die aber gut mit der Spende des Dahmezwischengebiets zwischen den Pegeln Märkisch-Buchholz 2 und Neue Mühle in Höhe von $3,47 l/skm^2$ harmonisiert.
- Die Spende im Fall des Rangsdorfer Sees liegt bei $3,03 l/skm^2$ und damit zwischen denen der Pegel Märkisch-Buchholz 2 ($2,4 l/skm^2$) und Woltersdorf I ($3,16 l/skm^2$).
- Die Spende des Zuflusses zum Seddiner Sees ist zwar mit $4,06 l/skm^2$ deutlich größer, kann aber durch seine Lage zu den Pegeln Woltersdorf I ($3,16 l/skm^2$) und Blankensee ($4,75 l/skm^2$) begründet werden.
- Dasselbe trifft auf den Wusterwitzer See mit $3,94 l/skm^2$ und den Gördensee mit $3,70 l/skm^2$ zu.
- Das EZG des Plessower Sees mit einem hohen Anteil grundwassernaher Flächen ähnelt dem des Pegels Woltersdorf II, was sich im Vergleich zu den genannten, westlich gelegenen Seen in einer höheren Spende von $4,59 l/skm^2$ ausdrückt.
- Weiter nördlich nehmen die Spenden zu, was sich in den Spenden der Pegel Freyenstein ($5,2 l/skm^2$), Wusterhausen 12 ($5,03 l/skm^2$) und Garz ($4,6 l/skm^2$) widerspiegelt. In diesen Bereich passen gut die Spenden von $4,69$ und von $5,18 l/skm^2$ der EZG vom Kleßener See und vor allem vom Bückwitzer See hinein. Bei letztgenanntem See spielt offenbar die sehr geringe potentielle Verdunstung eine Rolle, die mit $584 mm/a$ deutlich unter den Werten aller anderen Seen liegt.

Damit zeichnet sich der in Abschnitt 3.3 vermutete durchgehende Anstieg der Spenden ab, wenn man von SO nach NW rund um Berlin geht, ein Vorgang, der sich auch bei den Pegeln vollzieht.

Ein anderes Bild ergibt sich selbstverständlich, wenn das Zweigradszenario betrachtet wird. In Abbildung 4-2 wird das deutlich: bis etwa zum Jahr 2018 ist ein geringer fallender Trend der Zuflüsse zum Seddiner See zu erkennen, der sich danach deutlich verstärkt. Das ist die Folge des oben erwähnten zwar gleichmäßigen Anstiegs der potentiellen Verdunstung PET über dem gesamten Zeitraum, aber der erst später einsetzenden stärkeren Abnahme des Niederschlags P.

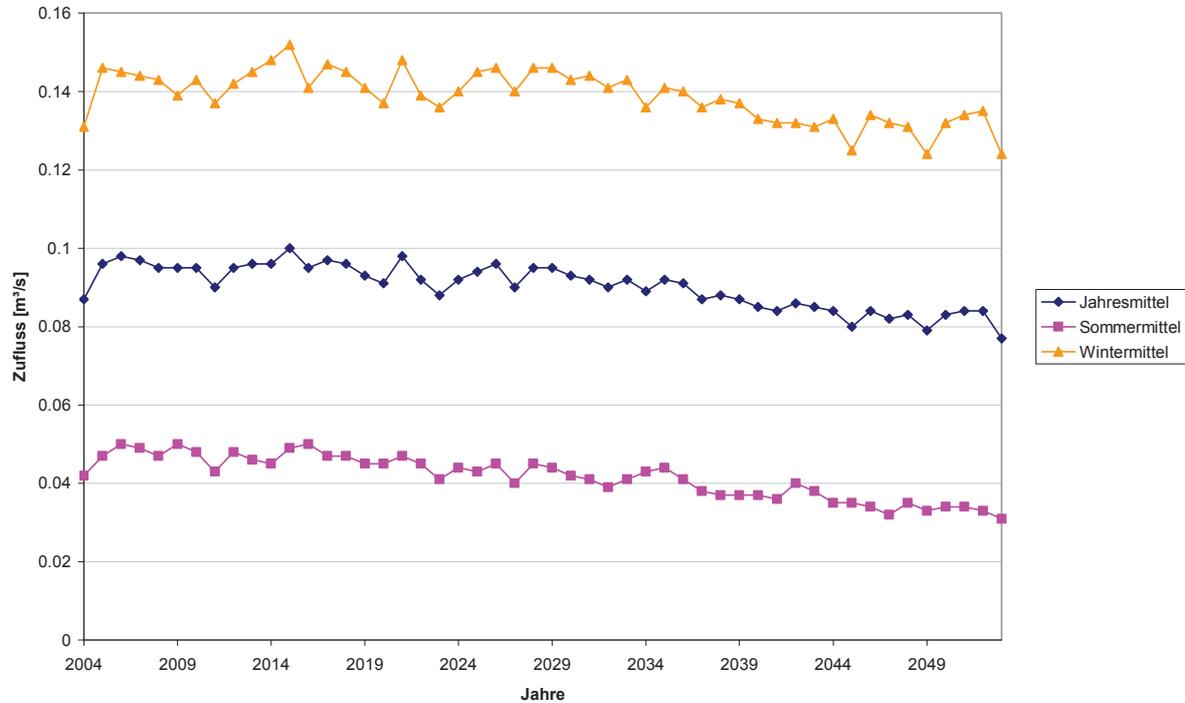


Abbildung 4-2: Mittlere Zuflüsse zum Seddiner See, 2 grad-Szenario

Für die anderen Seen zeigen sich völlig analoge Verhältnisse, was nach den Angaben in den Tabellen auch erwartet werden konnte.

5 Simulation der Seenbewirtschaftung

5.1 Formulierung der Bewirtschaftung

Als Ziel der vorgenommenen Untersuchungen wurde in Abschnitt 1 das Studium des Verhaltens der brandenburgischen Seen unter sich verändernden klimatischen Bedingungen genannt. Nach der Vorlage der beschriebenen Zuflussreihen zu den Seen konnte nunmehr diese Aufgabe angegangen werden.

Zur Lösung dieser Aufgabe müssen Angaben zur Konfiguration der Seen und zu ihrer Regulierung existieren, was leider in der Regel nur teilweise oder gar nicht der Fall ist. Die meisten Angaben zur Konfiguration konnten der Datei entnommen werden, die vom IfAG (vgl. Anlage 1) bereitgestellt worden war. Die daraus verwendeten Daten sind in der folgenden Tabelle 5-1 verzeichnet.

Tabelle 5-1: Angaben zur Konfiguration der Seen

Größe	max. Länge L _{max}	max. Breite B _{max}	Seefläche A _{see}	Seevolum. V _{see}	mittl. Tiefe T _{mit}
Maßeinheit	km	km	km ²	hm ³	m
Name des Sees					
Gr. Leuthener See	1,93	1,31	1,146	2,73	2,38
Teupitzer See	3,38	1,79	4,756	16,63	3,50
Ziestsee	1,16	0,68	0,565	2,42	4,28
Rangsdorfer See	2,24	1,64	2,038	3,39	1,66
Seddiner See	3,90	1,07	2,220	6,72	3,04
Wusterwitzer See	2,06	1,67	1,713	5,79	3,38
Gördensee	1,29	0,55	0,408	0,53	1,26
Plessower See	5,11	1,60	3,221	20,80	6,46
Kleißener See	1,48	0,55	0,506	1,25	2,48
Bückwitzer See	1,07	0,48	0,534	1,13	2,12

Da weitere Angaben zur Gestalt der Seen wie beispielsweise eine Flächen-Volumen-Kurve meist fehlen, wurden weitere Annahmen zu einer vereinheitlichten und vereinfachten Seenbewirtschaftung getroffen:

- Der Seekörper wird als eine auf der Spitze stehende rechteckige Pyramide angesehen.
- Deren Kantenlängen L und B werden so bestimmt, dass die bekannte Seefläche A_{see} bewahrt wird.
- Die Höhe h der Pyramide wird so bestimmt, dass das Seevolumen V_{see} erhalten bleibt.

Damit gilt:

$$L = x \cdot L_{\max}, \quad B = x \cdot B_{\max} \quad \text{mit} \quad x = (A_{\text{see}} / (L_{\max} \cdot B_{\max}))^{0,5}$$

$$h = 3 \cdot V_{\text{see}} / (L \cdot B)$$

Wenn die Absenkung t von der oben liegenden Grundfläche der Pyramide aus gezählt wird, dann gilt für das (gefüllte) Volumen V_t :

$$V_t = \frac{1}{3} \cdot L \cdot B \cdot (h-t)^3 / h^2, \quad 0 \leq t \leq h$$

Da für die bisher untersuchten Seen keinerlei Angaben zu einer Bewirtschaftung vorlagen, wurden auch dazu Annahmen gemacht:

- Es wird eine obere Lamelle LAM [m] festgelegt und eine planmäßige Abgabe QL vorgesehen, wenn sich die aktuelle Füllung in dieser Lamelle befindet. Das Volumen der Lamelle wird mit VOLbew bezeichnet, weil nur in diesem Füllungsbereich eine Bewirtschaftung möglich ist. Bei kleineren Füllungen wirkt sich nur die Differenz P-PET auf die aktuelle Seefläche aus, die somit zu Füllungen $< VOL_{\text{bew}}$ führen kann.
- Es kann eine Grundwasserabströmung GW_{abstr} berücksichtigt werden, die unabhängig vom Füllungsstand des Sees erfolgt. Beim Seddiner See wurden 25 l/s angesetzt.

Die konkrete Festlegung der genannten Größen orientierte sich am Seddiner See, weil nur dort eine Zeitreihe für die Füllungen existierte. Tabelle 5-2 enthält die Werte für die zehn Seen.

Tabelle 5-2: Festlegung der Kenngrößen der Bewirtschaftung

Größe	LAM	LAM/Tmit	QL	QL/MQ	VOLbew
Maßeinheit	m	-	l/s	-	hm ³
Name des Sees					
Gr. Leuthener See	0,70	0,294	15	0,217	2,004
Teupitzer See	1,00	0,286	16	0,207	12,313
Ziestsee	1,00	0,234	1,5	0,203	1,898
Rangsdorfer See	0,50	0,301	40	0,242	2,470
Seddiner See	0,90	0,296	20	0,184	4,913
Wusterwitzer See	1,00	0,296	22	0,202	4,240
Gördensee	0,35	0,278	7	0,221	0,400
Plessower See	1,50	0,232	15	0,227	16,330
Kleißener See	0,70	0,282	4	0,219	0,930
Bückwitzer See	0,60	0,283	50	0,190	0,843

Die Lamelle LAM beim Seddiner See ergab sich annähernd aus der Zeitreihe der Füllungen, bei den anderen Seen ist LAM so festgelegt worden, dass der Quotient LAM/Tmit ungefähr dem Seddiner Wert entspricht. Die planmäßige Abgabe QL aus dem Seddiner See ist ebenfalls aus früheren Rechnungen übernommen worden. Die Werte für die anderen Seen wurden entsprechend den mittleren Zuflüssen variiert. Es besteht weiter die Möglichkeit, die NN-Höhe des Sees zu berücksichtigen.

Die monatliche Seeregulierung wurde für die durchzuführenden Rechnungen wie folgt definiert:

- In jedem Monat ist die Menge $V = VOLanf + Zufluss + (P-PET) \cdot \text{aktuelle Seefläche}$ verfügbar (VOLanf: Anfangsfüllung)
- Bei $V < VOLbew$ wird nichts abgegeben.
- Ist $V > VOLbew$, wird die Menge $\min(QL, V - VOLbew)$ abgelassen.
- Ist trotz der Abgabe die sich ergebende Füllung $> V_{see}$, so wird die Abgabe um den Überlauf aufgehört, der See ist am Monatsende voll.

5.2 Simulationsprogramm

Um die formulierte Seeregulierung sowohl unter den Bedingungen eines unveränderten Klimas (Nullgradszenario) als auch bei Klimaänderungen (Zweigradszenario) nachbilden zu können, wurde ein FORTRAN-Programm aufgestellt, das die Simulation bei gleichzeitiger Registrierung interessierender Ereignisse ermöglicht (Anwendung der Monte-Carlo-Technik). Neben einer monatsweisen Abspeicherung solcher Größen wie Zufluss oder Seefüllung werden weitere Größen berechnet und am Ende der Simulation statistisch ausgewertet:

- Mittlere Summen des Niederschlags, der potentiellen Verdunstung und ihrer Differenz bzgl. des Jahres, des Sommers und des Winters
- Mittlere Zuflüsse im Jahr, im Sommer und im Winter
- Seefüllungen für verschiedene Unterschreitungswahrscheinlichkeiten
- Seeabsenkungen für verschiedene Überschreitungswahrscheinlichkeiten.

Alle Registrierungen erfolgen getrennt für jedes Jahr des Zeitraums 2004-2053. Damit können Trends in den genannten Reihen erkannt und in ihrer Größe eingeschätzt werden. Hinsichtlich der meteorologischen Prozesse wurde davon schon in den Abschnitten 3.2 und 3.3 Gebrauch gemacht.

Das Programm wurde für jeden See zweimal angewendet: einmal lief es über die 100 Realisierungen des Nullgradszenarios, zum anderen über die 100 Realisierungen des Zweigradszenarios. Durch einen Vergleich der Ergebnisse können die Auswirkungen der Klimaänderungen eingeschätzt werden.

6 Diskussion der Ergebnisse der Simulationsrechnungen

In diesem Abschnitt wird versucht, die Auswirkungen des jeweils angenommenen Klimaregimes zu charakterisieren. Zunächst erfolgt eine Beschreibung der Ergebnisse für jeden der zehn Seen, bevor daraus allgemeingültige Beziehungen für die zwölf weiteren Seen abgeleitet werden.

Die Beschreibung konzentriert sich auf die Darstellung der Entwicklung der Seeabsenkungen im Untersuchungszeitraum. Dafür wurde im o.g. Simulationsprogramm in jedem Kalenderjahr einer der 100 Realisierungen die tiefste Absenkung registriert. Nach dem Ende einer Simulationsrechnung für einen See lagen damit für jedes Jahr des Zeitraums 2004-2053 insgesamt 100 tiefste Absenkungen zahlenmäßig vor. Werden diese 100 Werte der Größe nach geordnet, können danach

- die maximale Absenkung angegeben werden, die überhaupt in einem bestimmten Kalenderjahr aufgetreten ist sowie
- die tiefsten Absenkungen berechnet werden, welche mit 10, 20, 50 und 90% Überschreitungswahrscheinlichkeit (ÜWk.) zu erwarten sind.

Dasselbe kann selbstverständlich auch mit den registrierten Seefüllungen gemacht werden, wobei sich hier das Interesse auf die kleinsten Füllungen konzentriert. Wegen des großen Umfangs wird die entsprechende Darstellung im vorliegenden Bericht nur für den Seddiner See (Abbildung 6-3) gegeben.

6.1 Seddiner See

Als erster See soll der Seddiner See etwas ausführlicher betrachtet werden, weil er datenmäßig am besten unterlegt ist. Die Abbildung 6-1 und Abbildung 6-2 zeigen den Gang der Absenkungen des Seddiner Sees über den Untersuchungszeitraum 2004-2053, zum einen beim Nullgrad-, zum anderen beim Zweigradszenario.

Unter der Bedingung eines stationären Klimas ist ein trendfreier Verlauf der Absenkungen zu erwarten. In Abbildung 6-1 lässt sich dagegen ein leichter Anstieg der Absenkungen bei kleinen Überschreitungswahrscheinlichkeiten in den letzten 15 Jahren erkennen, der sich nur schwer aus dem entsprechenden Gang der mittleren Zuflüsse erklären lässt. Da diese Erscheinung bei allen zehn Seen in ähnlicher Form auftritt, wird auf das Nullgradszenario bei

der Ergebnisdiskussion im Weiteren nicht mehr eingegangen.

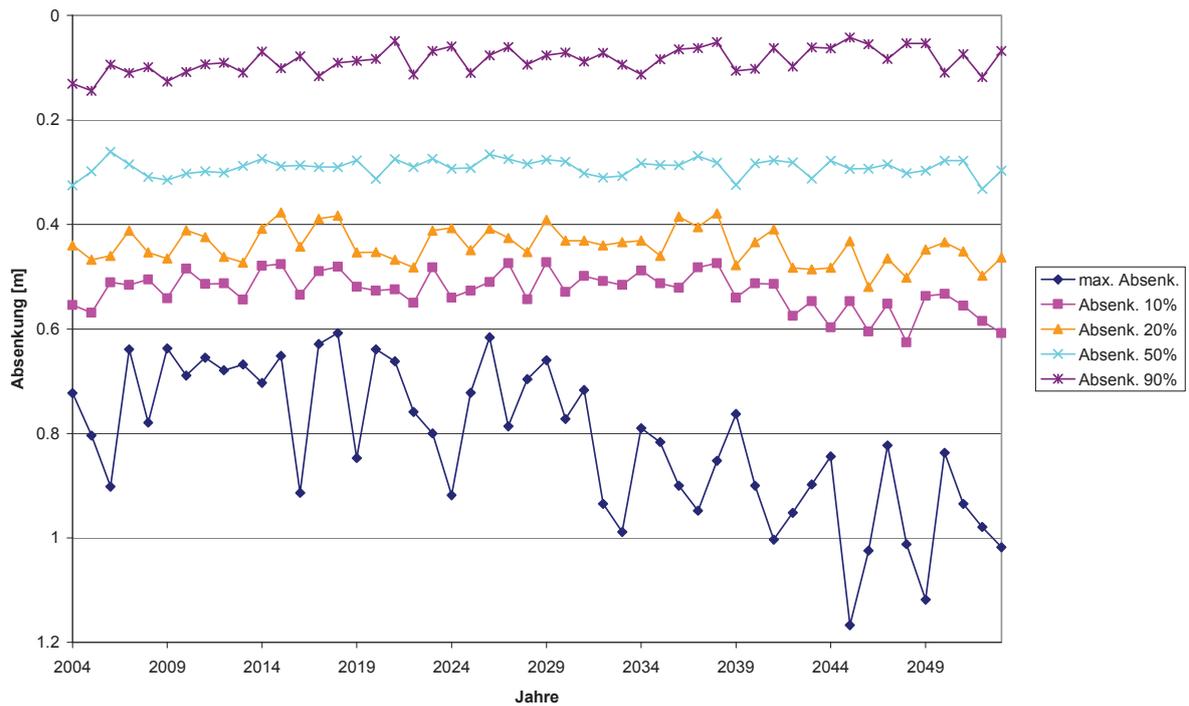


Abbildung 6-1: Absenkungen Seddiner See, 0 grd-Szenario

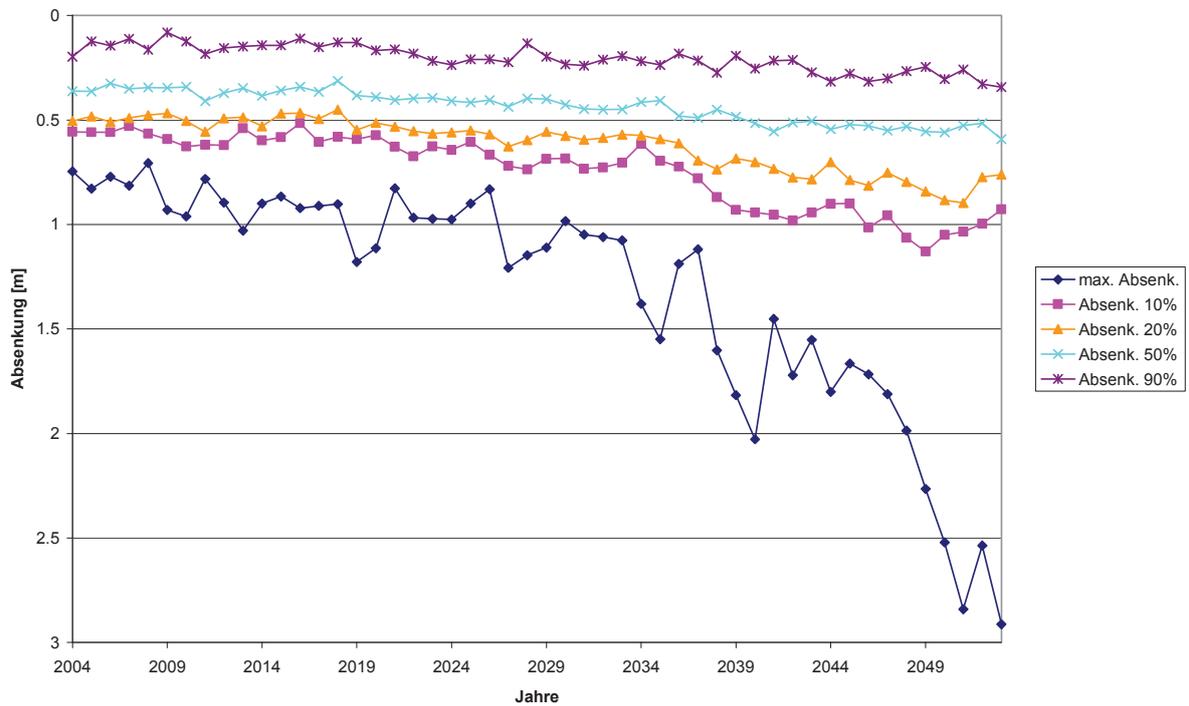


Abbildung 6-2: Absenkungen Seddiner See, 2 grd-Szenario

Die Absenkungen beim Zweigradszenario beginnen ungefähr ab dem Jahr 2018 langsam anzusteigen und nehmen ab dem Jahr 2033 beträchtliche Ausmaße an: so steigen die maximalen Absenkungen von 0,7 m in den ersten Jahren bis auf fast 3 m an, wodurch sich die Seefläche um ungefähr ein Drittel reduziert! Selbst bei einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 10% verdoppeln sich noch die Absenkungen im Laufe der 50 Jahre. Bei den größeren Überschreitungswahrscheinlichkeiten verkleinern sich die Auswirkungen der angenom-

menen Klimaänderung naturgemäß, bleiben aber immer noch klar sichtbar. Der Gang der Absenkungen widerspiegelt sich noch deutlicher im Gang der Füllungen des Seddiner Sees (Abbildung 6-3), hier gehen die minimalen Füllungen von ca. 5,2 hm³ in den ersten Jahren fast bis auf 2 hm³ zurück.

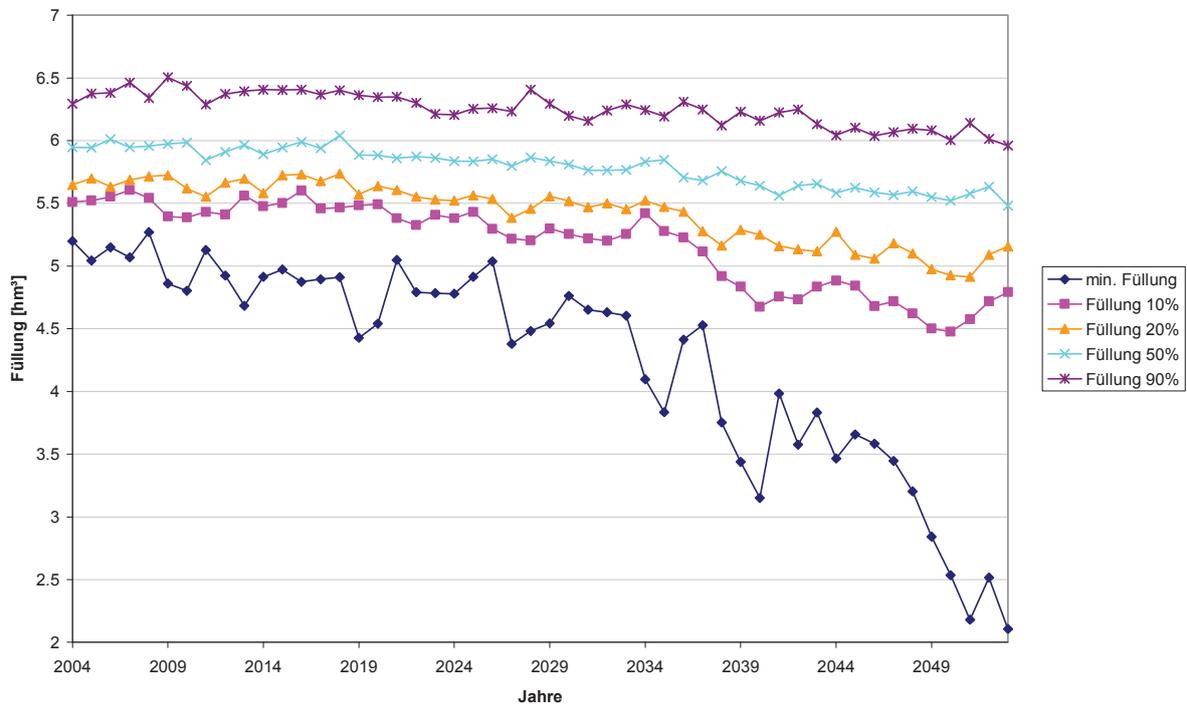


Abbildung 6-3: Füllungen Seddiner See, 2 grad-Szenario

6.2 Die vier Seen im Südosten Berlins

Hierhin gehören der Groß Leuthener See, der Rangsdorfer See, der Teupitzer See und der Ziestsee. Die beiden erstgenannten Seen sind dabei die eindeutig flacheren Seen, der Teupitzer See ist der klar größte von ihnen.

Ein zum Seddiner See völlig analoges Bild ergibt sich für den Groß Leuthener See. So bleiben die kräftigen Entleerungen bei Klimaänderungen, wenn auch etwas abgeschwächt, erhalten: die maximalen Absenkungen verdoppeln sich fast wieder bis zum Ende des Untersuchungszeitraums, was ungefähr eine Verkleinerung der Seefläche um 10% bedeutet (Abbildung 6-4).

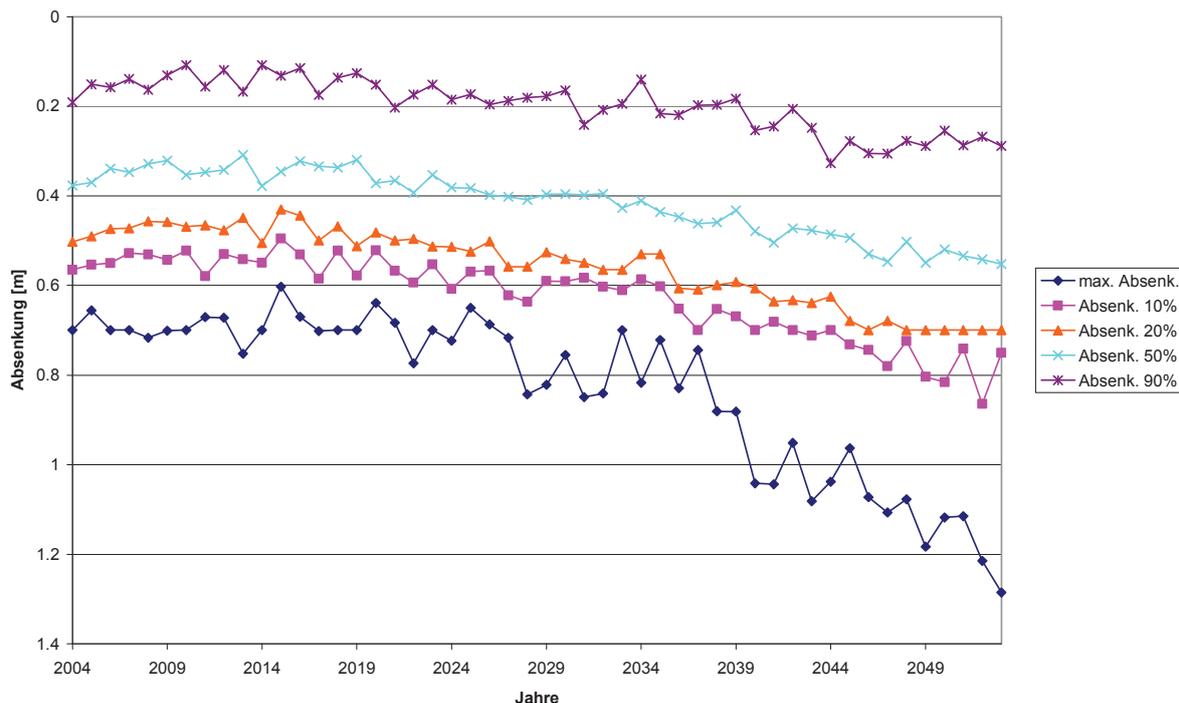


Abbildung 6-4: Absenkungen Gr. Leuthener See, 2 grad-Szenario

Mit Blick auf Abbildung 6-5 gilt das eben Gesagte ebenfalls für den Rangsdorfer See.

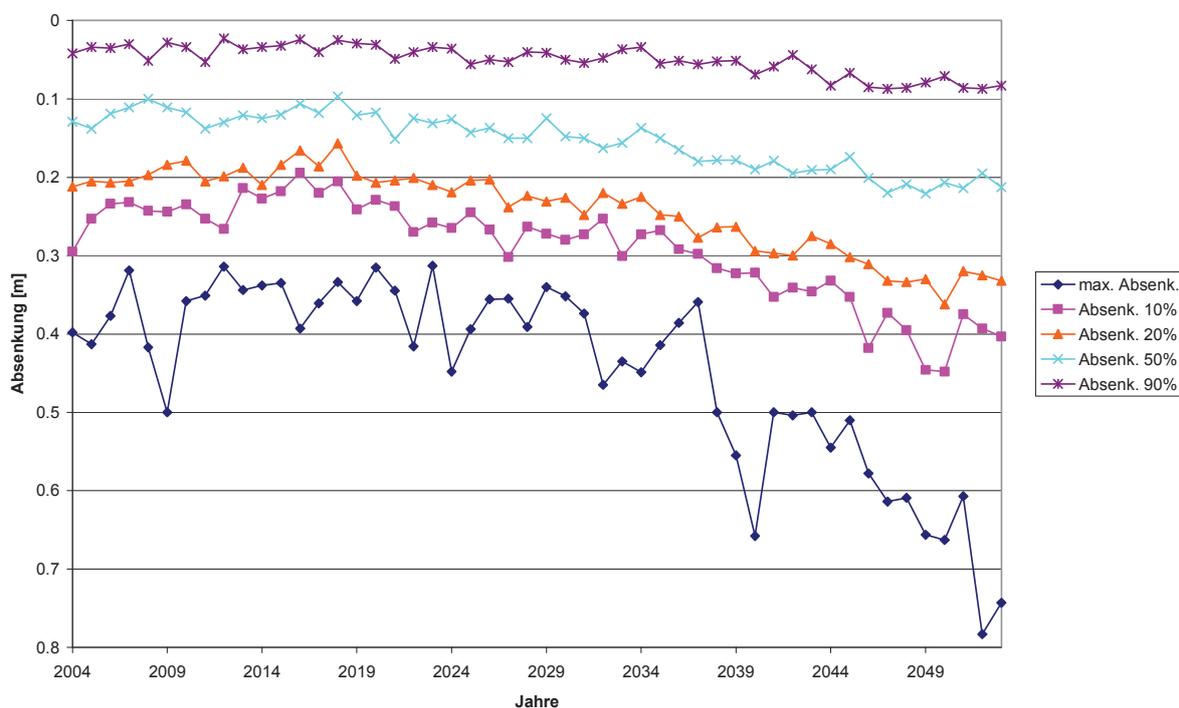


Abbildung 6-5: Absenkungen Rangsdorfer See, 2 grad-Szenario

Bei dem viel größeren Teupitzer See verläuft die Entwicklung der Absenkungen wesentlich ausgeprägter (Abbildung 6-6): die maximalen Absenkungen von 0,5 m zu Beginn des Untersuchungszeitraums vergrößern sich bis zu dessen Ende auf über 4,2 m, was einer Verkleinerung der Seefläche um ca. 36 % entspricht! Selbst die Absenkungen mit 10% ÜWk. erhöhen sich von 0,4 m auf 2,4 m.

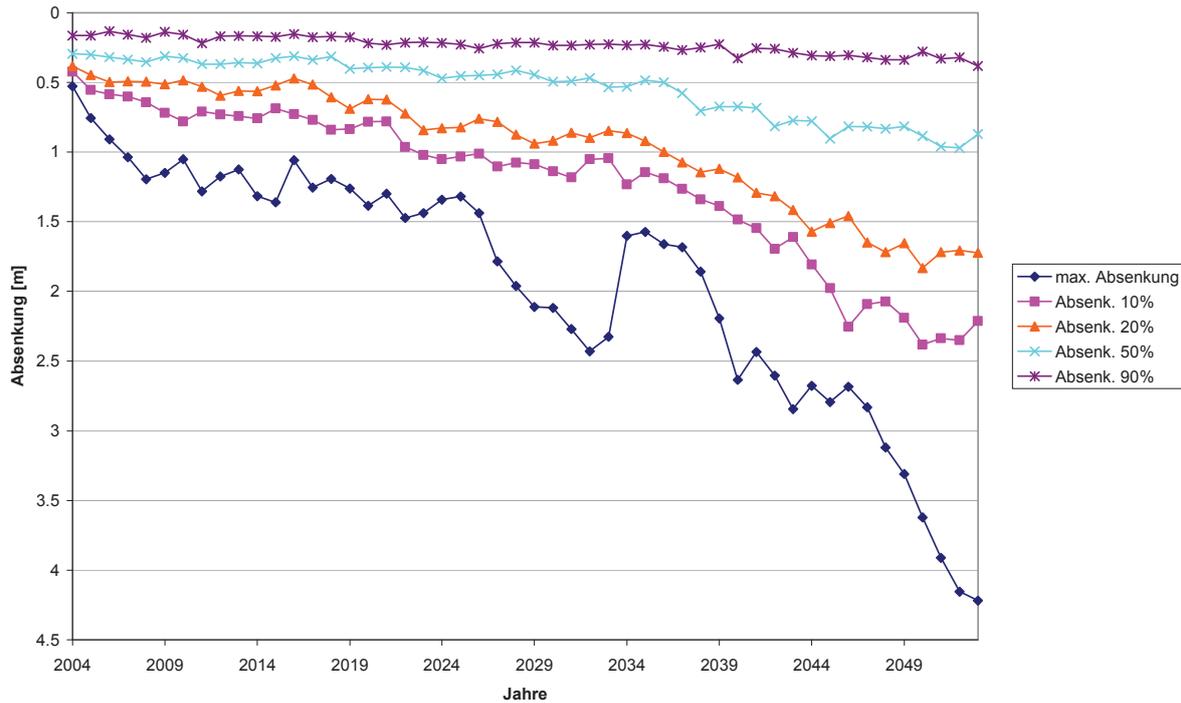


Abbildung 6-6: Absenkungen Teupitzer See, 2 grad-Szenario

Vergleichbare Verhältnisse zeigen sich beim Ziestsee, der zwar viel kleiner als der Teupitzer See ist, aber dessen maximale Tiefe sogar noch größer ausfällt. Hier steigen die maximalen Absenkungen wieder von etwa 0,5 m auf 4,2 m, was jetzt einer um 45 % verringerten See- fläche gegenüber der Vollfüllung entspricht. Aber auch bei Überschreitungswahrscheinlichkeiten von 10 bzw. 20% vervielfachen bzw. vervierfachen sich die Absenkungen im Laufe der 50 Jahre (Abbildung 6-7).

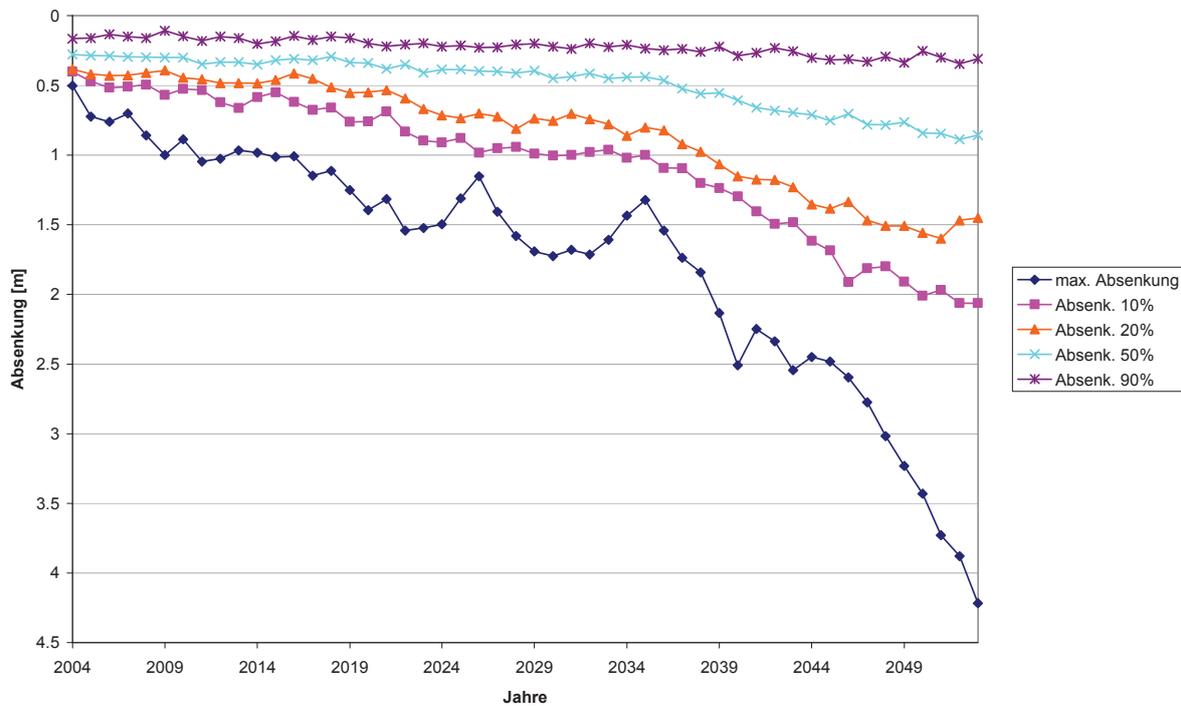


Abbildung 6-7: Absenkungen Ziestsee, 2 grad-Szenario

6.3 Die drei Seen im Westen Berlins

Im Westen Berlins liegen der Plessower See, der Wusterwitzer See und der Gördensee. In dieser Reihenfolge nehmen auch ihre Größen deutlich ab. Sie zeichnen sich gegenüber den bisher betrachteten Seen durch eine geringere Auswirkung der Klimaänderungen auf ihr Füllungsregime aus.

Das trifft schon auf den Plessower See als größtem der drei Seen zu (Abbildung 6-8). Zwar wachsen noch die maximalen Absenkungen von 0,5 m auf rd. 2 m an, doch die Entwicklung der Absenkungen mit 10 bzw. 20% ÜWk. verlaufen sehr flach: es erfolgt nur ein Anstieg von ca. 0,4 m auf 0,75 bzw. 0,6 m.

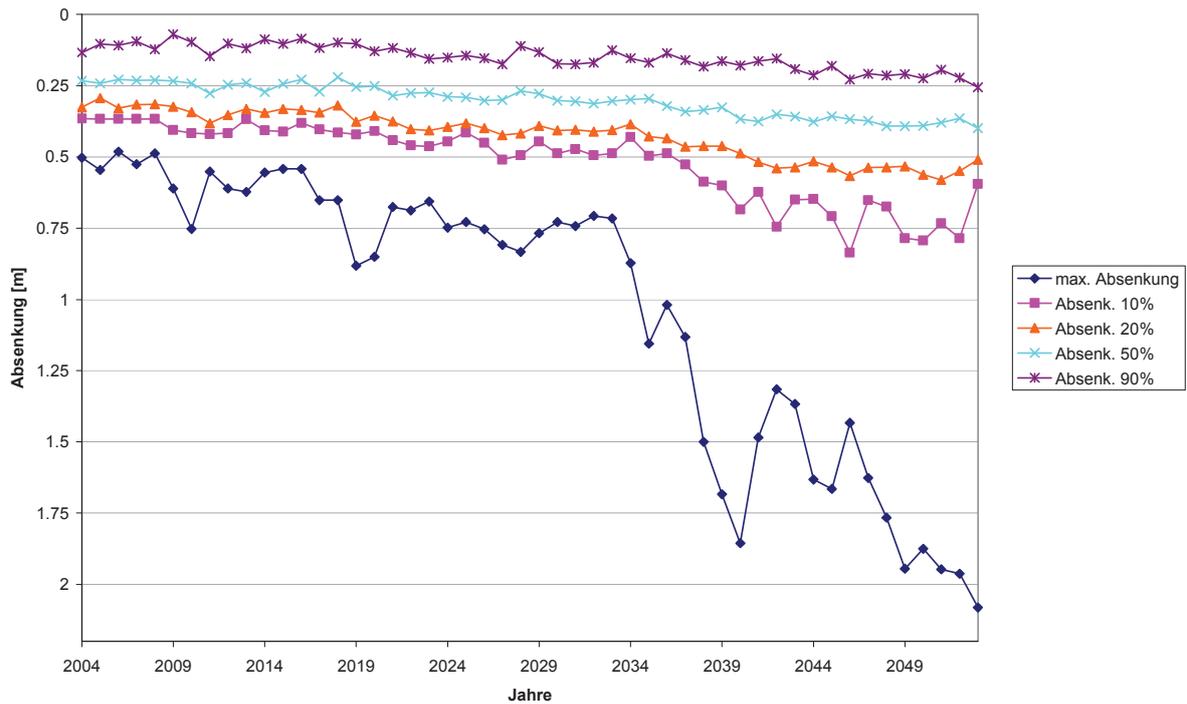


Abbildung 6-8: Absenkungen Plessower See, 2 grad-Szenario

Eine sehr ähnliche Entwicklung zeigen die Absenkungen des Wusterwitzer Sees. Bemerkenswert ist hier nur der unstete Verlauf der maximalen Absenkungen (Abbildung 6-9)

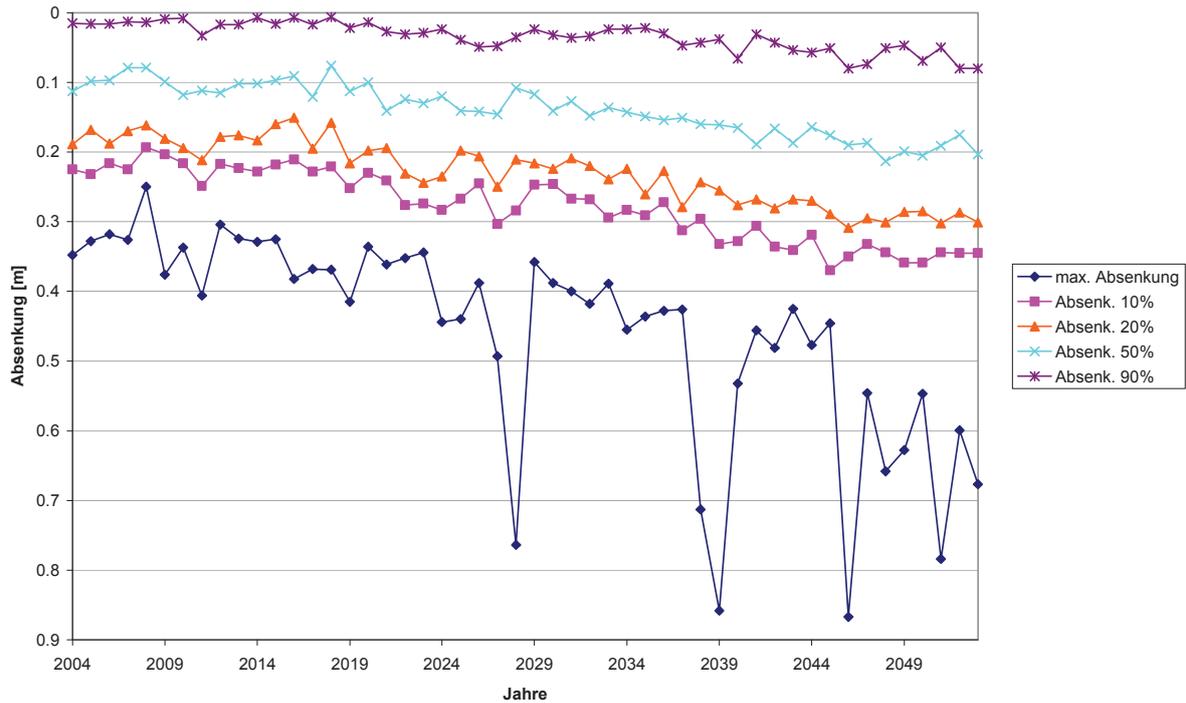


Abbildung 6-9: Absenkungen Wusterwitzer See, 2 grad-Szenario

Noch geringere Klimaauswirkungen zeigt das Abbildung 6-10 für den Gördensee. Bis auf die maximalen Absenkungen liegen die Anstiege der Absenkungen verschiedener ÜWk. bei nur 10 cm über dem Zeitraum von 50 Jahren. Oft einschränkend wirkt bei der Seeregulierung die Größe der bewirtschaftbaren Lamelle in Höhe von 35 cm.

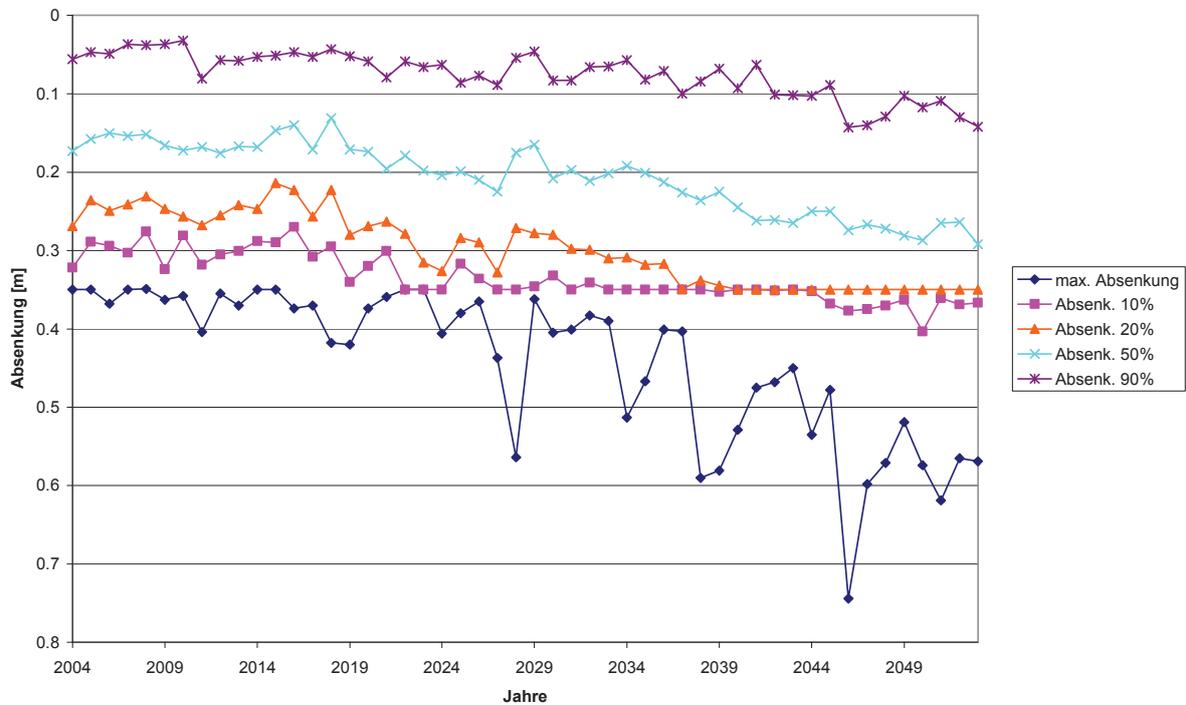


Abbildung 6-10: Absenkungen Gördensee, 2 grad-Szenario

6.4 Die beiden Seen im Nordwesten Berlins

Am nördlichsten von den zehn ausführlich untersuchten Seen liegen der Kleßener See und der Bückwitzer See. Von ihrer Konfiguration her sind sie sich sehr ähnlich (Tabelle 5-1), lediglich der mittlere Zufluss ist zum Bückwitzer See wesentlich größer.

Mit Blick auf Abbildung 6-11 setzt der Kleßener See den Trend zu geringeren Klimaauswirkungen fort, wenn man die Seen in Ost-West-Richtung betrachtet. Abgesehen von den maximalen Absenkungen, die allerdings erst in den letzten Jahren des Zeitraums 2004-2053 größere Werte bis 1,2 m annehmen, wachsen die Absenkungen mit ÜWk. ab 10% aufwärts nur noch im Bereich bis zu 10 cm.

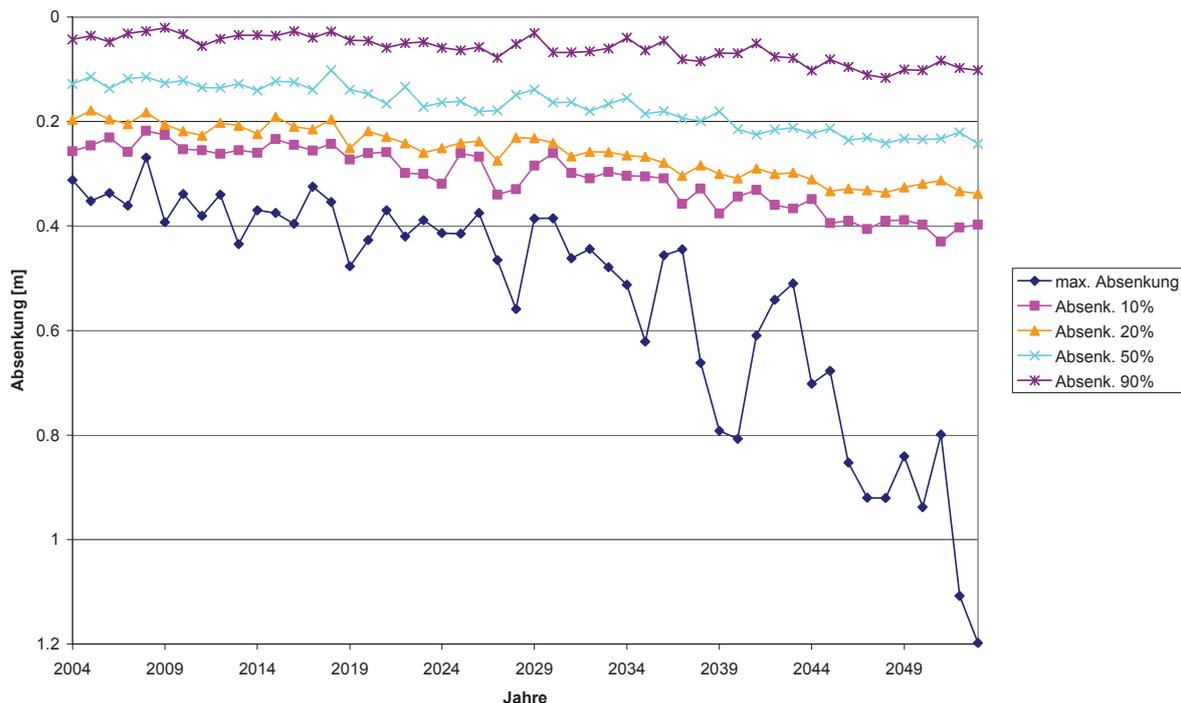


Abbildung 6-11: Absenkungen Kleßener See, 2 grad-Szenario

Ein ungewohntes Bild bietet der Bückwitzer See, der im Vergleich zu seinem kleinen Stauraum (Abbildung 2-1, Tabelle 5-1 und Tabelle 5-2) einen hohen Zufluss besitzt. Das führt gemäß Abbildung 6-12 dazu, dass die maximalen Absenkungen bei dem Zweigradszenario erst in den letzten zehn Jahren den Wert von 0,6 m und damit die bewirtschaftbare Lamelle überschreiten. Die Absenkungen mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von 10% oder 20% werden sogar nie größer als 0,6 m. Schließlich werden die 90 %-Absenkungen überhaupt erst in den letzten Jahren mal größer als Null.

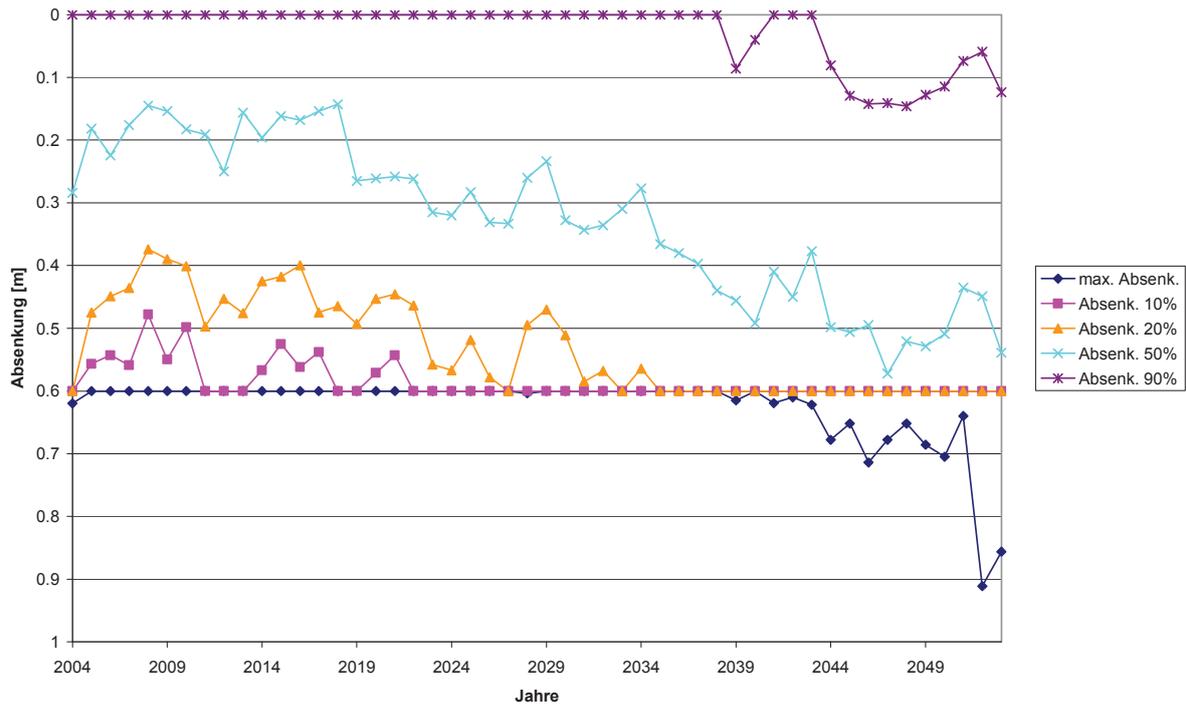


Abbildung 6-12: Absenkungen Bückwitzer See, 2 grd-Szenario

6.5 Zusammenfassung der Ergebnisse für die zehn Seen

Bei einer zusammenfassenden Betrachtung der für die zehn Seen erhaltenen Ergebnisse zeigt sich ein breites Spektrum der klimabedingten Absenkungen. Abbildung 6-13 und Abbildung 6-14 bestätigen auf eindringliche Weise diese Behauptung.

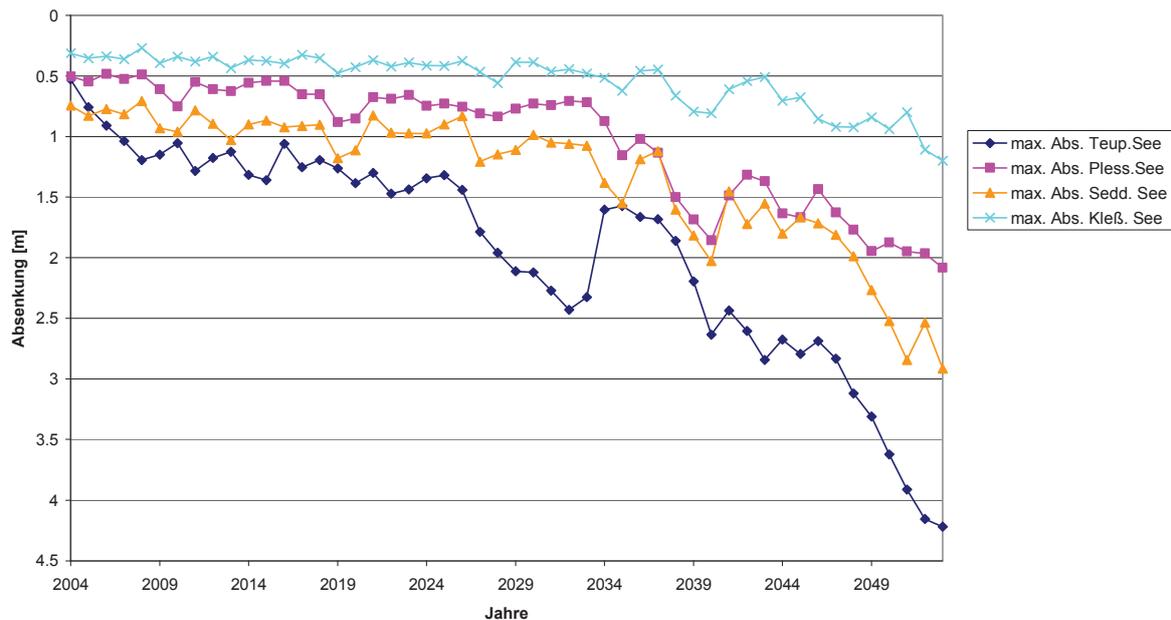


Abbildung 6-13: Maximale Absenkungen von vier Seen, 2 grd-Szenario

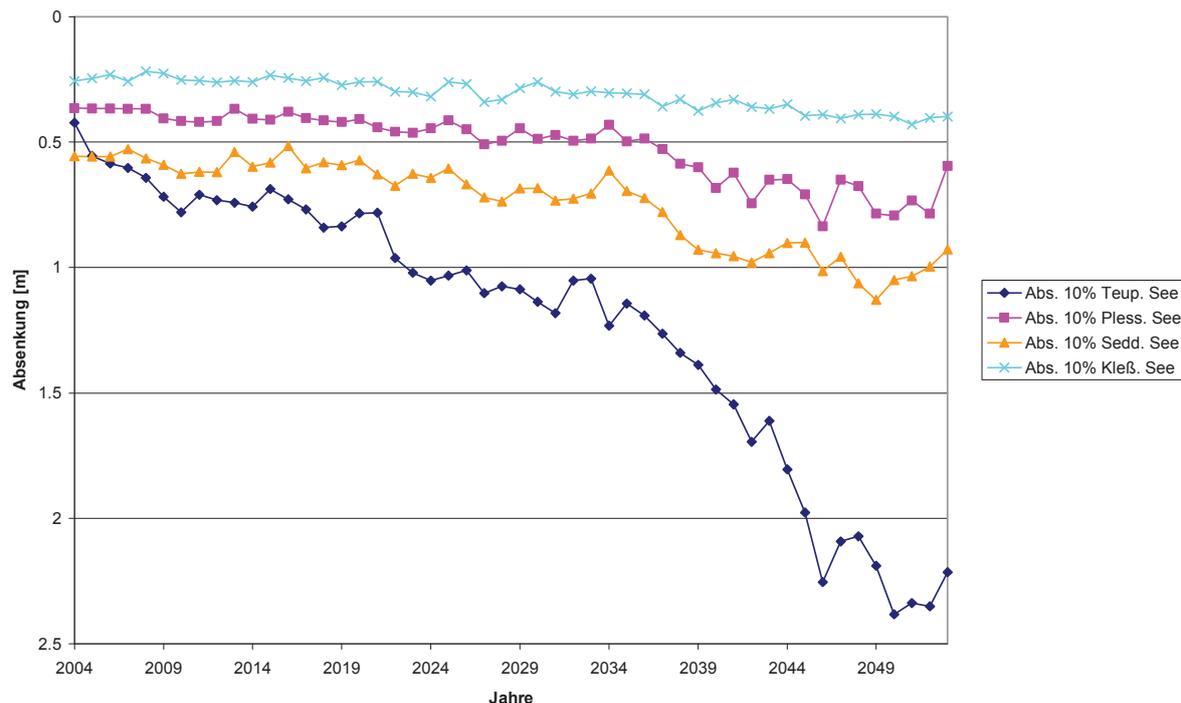


Abbildung 6-14: Absenkungen mit 10% ÜWk. von vier Seen, 2 grd-Szenario

Trotz der quantitativen Unterschiede sind bei allen zehn Seen bis etwa 2018 keine nennenswerten Veränderungen des Absenkungsverhaltens zu erkennen, erst danach beginnen in wachsendem Maße die Absenkungen zuzunehmen. Anders ausgedrückt, bis zu diesem Jahr herrschen beim Zweigradszenario noch stationäre Zustände, eine Feststellung, die sich bis zur Gegenwart mit der Realität verträgt.

Ursachen für die quantitativen Unterschiede sind vor allem

- verschiedene Entwicklungen des Niederschlags und der potentiellen Verdunstung im Untersuchungszeitraum und damit auch des Zuflusses zu den Seen
- unterschiedliche Verhältnisse zwischen dem Zufluss und dem Seevolumen, ausdrückbar im Ausbaugrad β , der in der Speicherwirtschaft oft benutzten Kenngröße für die Speicherfähigkeit.

Die wesentlichen Ergebnisse werden in zwei Tabellen zusammengefasst:

- Tabelle 6-1 enthält die maximalen Absenkungen sowie die Absenkungen mit 10, 20 und 50% Überschreitungswahrscheinlichkeit (ÜWk.) in den Jahren 2018 und 2053.
- Tabelle 6-2 wurden die absoluten Anstiege der Absenkungen zwischen 2018 und 2053 sowie die zugehörigen relativen, auf die mittlere Seetiefe T_{mit} bezogenen Werte eingetragen. Diese Zunahmen der Absenkungen sind bei der anschließenden vereinfachten Berechnung der zweiten Gruppe von 12 Seen benutzt worden. In Tabelle 6-2 ist auf den Eintrag von 50% ÜWk. verzichtet worden, weil diese Absenkungen nicht weiter verwendet wurden.

Bei der Ermittlung der genannten Größen ist zur Vermeidung zufälliger Werte wie in Abbildung 6-15 vorgegangen worden. Den verschiedenen Absenkungslinien wurde eine lineare oder nichtlineare Trendkurve angepasst, deren Höhe in den Jahren 2053 und 2018 abgenommen und daraus die interessierenden Differenzen gebildet.

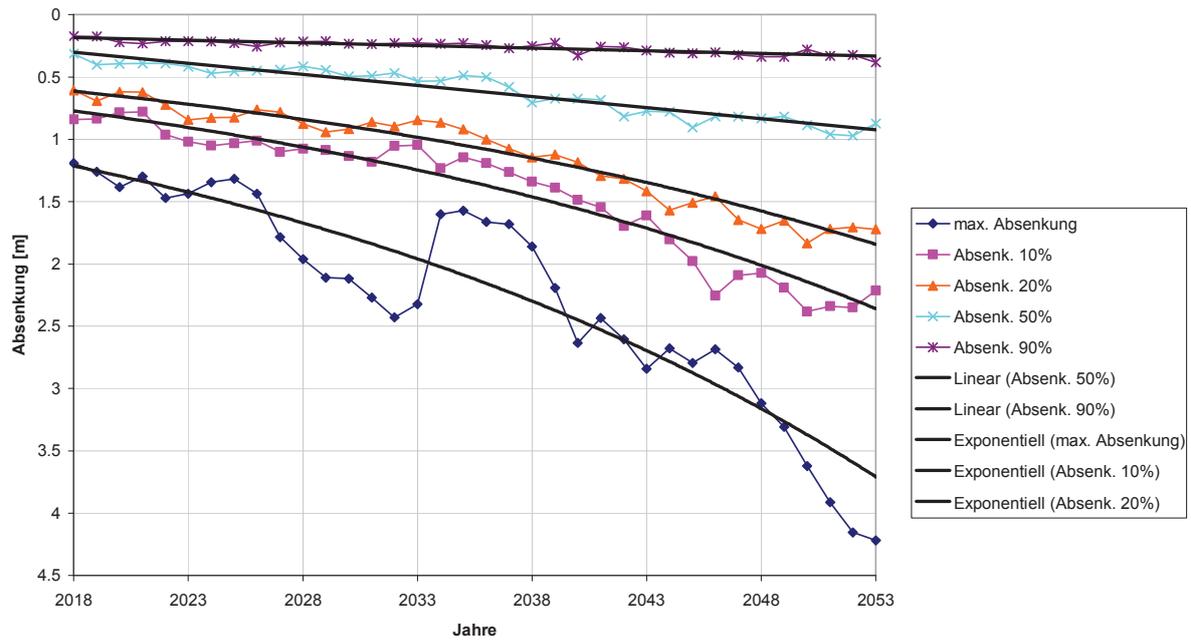


Abbildung 6-15: Zur Berechnung der Absenkungszunahmen am Beispiel des Teupitzer Sees

Tabelle 6-1: Absenkungen in den Jahren 2018 und 2053 (Angaben in cm)

See	maximale Absenkungen		Absenkungen 10% ÜWk.		Absenkungen 20% ÜWk.		Absenkungen 50% ÜWk.	
	2018	2053	2018	2053	2018	2053	2018	2053
Leuth.See	68	124	55	82	49	74	36	56
Teup.See	156	420	70	206	51	167	27	84
Ziestsee	120	370	84	234	63	183	31	91
Rangsd. S.	35	72	24	44	20	36	12	23
Sedd. See	98	272	56	105	48	82	35	56
Wusterw.S.	33	66	23	36	19	30	11	20
Gördensee	37	62	32	38	27	37	17	29
Pless. See	61	208	46	75	36	58	25	40
Kleß. See	36	103	26	42	23	34	15	24
Bückw. S.	60	80	54	60	51	63	25	57

Tabelle 6-2: Zunahme der Absenkungen im Zeitraum 2018-2053

See	maximale Absenkung		Absenkung 10% ÜWk		Absenkung 20% ÜWk	
	absolut [cm]	relativ zu Tmit	absolut [cm]	relativ zu Tmit	absolut [cm]	relativ zu Tmit
Leuth.See	56	0,235	27	0,113	25	0,105
Teup.See	250	0,714	150	0,429	120	0,343
Ziestsee	264	0,617	136	0,318	116	0,271
Rangsd. S.	37	0,223	20	0,120	16	0,096
Sedd. See	174	0,572	49	0,161	34	0,112
Wusterw.S.	33	0,098	13	0,038	11	0,032
Gördensee	25	0,198	6	0,048	10	0,079
Pless. See	147	0,228	29	0,045	22	0,034
Kleiß. See	67	0,270	16	0,065	11	0,044
Bückw. S.	20	0,094	6	0,028	12	0,057
Mittel		0,325		0,136		0,117

Aus Tabelle 6-1 und Tabelle 6-2 können für die zehn Seen die zu erwartenden Absenkungen entnommen werden bei andauernder Gültigkeit

- der vorausgesetzten Erhöhung der Lufttemperaturen um 2 grad K bis zum Jahr 2053 und der darauf basierenden Veränderung des Zuflussregimes zu den Seen
- der festgesetzten Seenkonfiguration (Tabelle 5-1)
- der ebenso festgelegten Seenbewirtschaftung (Tabelle 5-2).

Es darf hier eingefügt werden, dass Änderungen der bewirtschafteten Lamelle LAM und der planmäßigen Abgabe QL um 10-20% keine gravierenden Folgen auf die Tabelle 6-1 und Tabelle 6-2 aufgeführten Werte hat. Die auf die Absenkungen wirkenden, dominierenden Einflüsse sind offensichtlich die sich ändernden Klimagrößen.

7 Berechnung der Absenkungen für die 12 Seen

7.1 Ableitung statistischer Beziehungen

In Übereinstimmung mit dem in den Abschnitten 1 und 2 formulierten Lösungsweg sollen in einem zweiten Schritt für 12 weitere Seen ohne detaillierte Berechnungen Angaben zu ihrem Verhalten bei den vorgegebenen Klimaänderungen gemacht werden. Dazu bieten sich in erster Linie statistische Modelle in Form von Multiregressionsmodellen auf der Basis der Tabelle 6-2 an. Hieran schließt sich die Frage an, welche Größen beeinflussen die zu bestimmenden Anstiege der Absenkungen im Zeitraum 2018-2053. Die wichtigsten Einflussgrößen sind mit Sicherheit der Niederschlag P und die potentielle Verdunstung PET mit ihren Veränderungen im genannten Zeitfenster. Zu ihrer Bestimmung müssten jedoch die umfangreichen Arbeiten ausgeführt werden, die in Abschnitt 3.1 beschrieben wurden, die aber gerade für diese 12 Seen mit Hilfe der Multiregressionsmodelle vermieden werden sollten. Im vorliegenden Projekt ist darauf verzichtet worden, so dass folgende Einflussgrößen verbleiben:

- die Fläche **AE** des EZG des Sees
- die (mittlere) Abflusspende M_q oder der zugehörige (mittlere) Abfluss **MQ** aus dem EZG (berechnet aus dem Nullgradszenario)
- die mittlere Seetiefe **Tmit**
- die Seefläche **Asee** bei Vollfüllung des Sees
- das Seevolumen **Vsee** bei Vollfüllung
- das bewirtschaftete Seevolumen **VOLbew** der Lamelle LAM
- der Ausbaugrad β , gebildet aus

$$\beta = \text{VOLbew} / \text{MS}$$

mit MS als mittlerem jährlichen Zuflussvolumen ($\text{MS} = \text{MQ} \cdot 31,536 \cdot 10^6 \text{ s}$).

Die folgende Tabelle 7-1 enthält die Werte der genannten Einflussgrößen der zehn Seen.

Tabelle 7-1: Einflussgrößen der zehn Seen

See	AE	MQ	Tmit	Asee	Vsee	VOLbew	β
	[km ²]	[m ³ /s]	[m]	[km ²]	[hm ³]	[hm ³]	[-]
Leuth. See	26,2	0,069	2,38	1,146	2,73	2,004	0,92
Teup. See	32,9	0,0773	3,50	4,756	16,63	12,313	5,05
Ziestsee	1,95	0,0074	4,28	0,565	2,42	1,898	8,13
Rangsd. S.	54,4	0,165	1,66	2,038	3,39	2,47	0,47
Sedd. See	26,82	0,109	3,04	2,220	6,72	4,913	1,43
Wusterw. S.	27,69	0,1091	3,38	1,713	5,79	4,24	1,23
Gördensee	8,56	0,0317	1,26	0,408	0,53	0,40	0,40
Pless. See	14,4	0,0661	6,46	3,221	20,80	16,33	7,83
Kleiß. See	3,9	0,0183	2,48	0,506	1,25	0,93	1,61
Bückw. S.	50,8	0,263	2,12	0,534	1,13	0,843	0,10

Die statistischen Zusammenhänge zwischen den relativen Zunahmen der Absenkungen aus Tabelle 6-2 (zusätzlich noch diejenigen mit 50% ÜWk.) und diesen Einflussgrößen ergaben sich aus einer Korrelationsanalyse, deren Ergebnisse in Tabelle 7-2 zusammengestellt worden sind.

Tabelle 7-2: Korrelationen zwischen den relativen Zunahmen der Absenkungen und den Einflussgrößen (A ist die Abkürzung für Absenkung)

	AE	MQ	Tmit	Asee	Vsee	VOLbew	β
Amax	-0,24	-0,39	0,27	0,47	0,32	0,30	0,54
A10	-0,07	-0,29	0,19	0,52	0,31	0,29	0,52
A20	-0,07	-0,27	0,13	0,44	0,24	0,22	0,50
A50	0,24	0,22	-0,22	0,10	-0,08	-0,10	0,11

Für die Zunahmen der relativen Absenkungen Amax, A10 und A20 ergeben sich zu berücksichtigende Korrelationen zu den Einflussgrößen MQ, Asee, Vsee und β . Sie lassen sich erklären:

- Je größer der Zufluss MQ zu einem See, desto kleiner werden die Zunahmen der Absenkungen ausfallen: die Korrelation wird negativ.
- Je größer ein See ist, also je größer Asee und Vsee sind, desto mehr führen Abnahmen der Klimadifferenz P-PET zu größeren Absenkungen: die Korrelation ist positiv.
- Je größer der Ausbaugrad β ist, können größere Absenkungen in einem bestimmten Jahr auch in das Folgejahr übertragen werden und dort erneut zu höheren Absenkungen führen: die Korrelation ist positiv.

Die Korrelationen zu VOLbew sind deutlich geringer als zu β und sollen, weil VOLbew die Größe von β beeinflusst, nicht beachtet werden.

Die Absenkungen A50 besitzen offenbar so geringe Bindungen an die Einflussgrößen, dass die Korrelationen nicht nur viel kleiner ausfallen, sondern sogar das Vorzeichen ändern und damit das eben Gesagte negieren. Aus diesem Grunde wurden auch keine Multiregressionsmodelle für A50 erstellt. Für die drei anderen Absenkungen sind solche Modelle mit den o.g. vier Einflussgrößen aufgestellt worden, die Regressionskoeffizienten sind in Tabelle 7-3 eingetragen worden.

Tabelle 7-3: Regressionskoeffizienten für die relativen Zunahmen der Absenkungen

rel. Zunahme Absenkung	Mkk	Einflussgröße				Konstante
		MQ	Asee	Vsee	β	
Amax	0,87	-0,5774	0,2517	-0,0527	0,0613	0,1041
A10	0,96	-0,1187	0,1814	-0,0390	0,0438	-0,0425
A20	0,92	-0,0333	0,1368	-0,0310	0,0358	-0,0206

Die multiplen Korrelationskoeffizienten Mkk zeigen eine hohe Bindung zwischen den relativen Zunahmen der Absenkungen und der Gesamtheit der Einflussgrößen an, was auch grafisch in Abbildung 7-1 zu sehen ist. Hier wurden die „beobachteten“ Absenkungsanstiege A10 der Tabelle 6-2 für die zehn Seen den mit Hilfe der Regressionsbeziehungen berechneten Werten A10 gegenübergestellt. Trotz der hohen Mkk kommt es dabei zu nicht akzeptierbaren negativen Werten, was zu Problemen bei ihrer Anwendung auf die 12 Seen führen kann (Abschnitt 7.2).

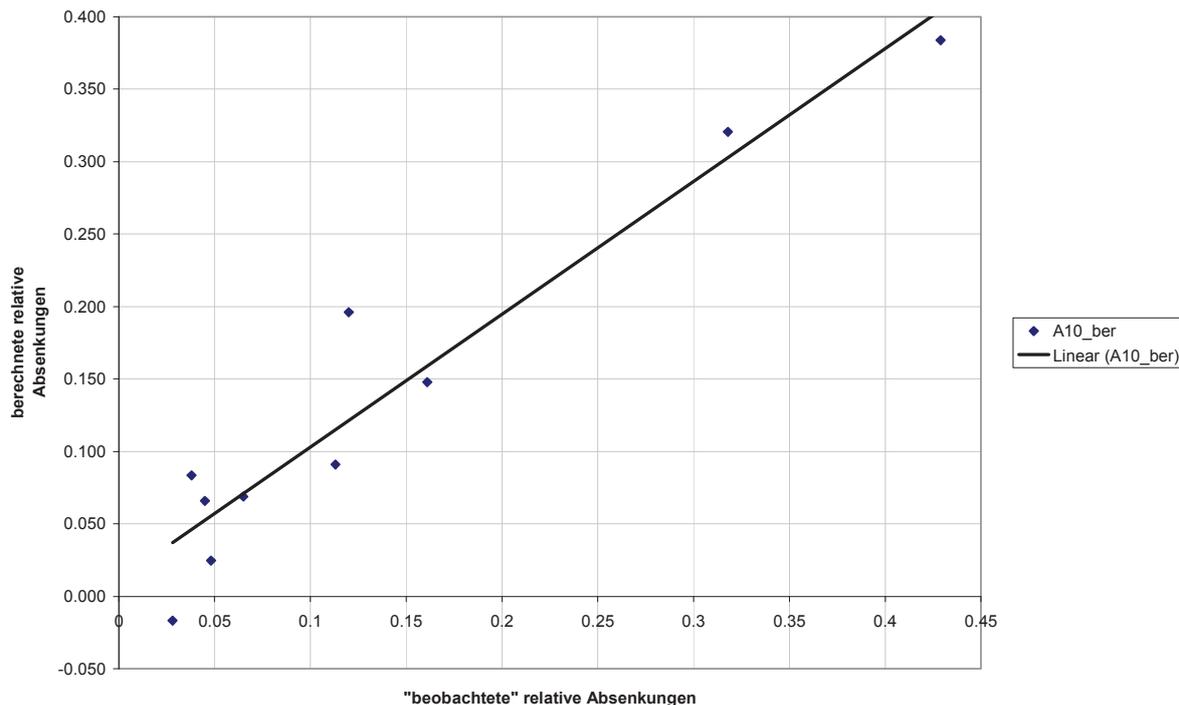


Abbildung 7-1: Gegenüberstellung „beobachteter“ und berechneter relativer Absenkungsanstiege A10 für die zehn Seen

7.2 Anwendung der Multiregressionsmodelle

Vor der Anwendung der Multiregressionsmodelle auf die 12 Seen sind die zugehörigen Einflussgrößen MQ, Asee, Vsee und β bereitzustellen oder zu berechnen. Dazu können die vom IfAG übergebenen Daten genutzt werden, die teilweise in der Anlage 1 enthalten sind. Die Größen Asee und Vsee lassen sich daraus direkt entnehmen, die beiden anderen Größen müssen nach Möglichkeit aus anderen Daten ermittelt werden.

Wenn bei der Berechnung des mittleren Abflusses MQ die aufwendige Anwendung von N-A-Modellen (wie bei den zehn Seen) vermieden werden soll, liegt wieder der Einsatz von Multiregressionsmodellen nahe, die von bekannten Größen ausgehen. Neben der bekannten Einzugsgebietsfläche AE bieten sich mit Blick auf die Anlage 1 dazu die Anteile von Acker, Grasland und Wald an der Einzugsgebietsfläche an. Obwohl auch hier die multiplen Korrelationskoeffizienten Werte bis 0,97 annahmen, ergab die Anwendung der Regressionsbeziehungen auf die 12 Seen zum Teil unsinnige Werte. Es verblieb nur der Weg einer sinnvollen Setzung unter Beachtung der Abflussspenden der jeweils benachbarten Pegel und der detailliert berechneten Seen. Die angenommenen Werte sind in Abbildung 2-1 einzusehen.

Der noch fehlende Ausbaugrad β wurde wie in Abschnitt 5.1 aus den Größen Lmax, Bmax, Asee, Vsee (Anlage 1) sowie aus den gesetzten MQ ermittelt.

Nach Berechnung der jeweils vier Einflussgrößen für die 12 Seen konnten die relativen Absenkungszunahmen Amax, A10 und A20 mit Hilfe der Regressionsbeziehungen aus Tabelle 14 bestimmt werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7-4 eingetragen worden.

Tabelle 7-4: Zunahme der Absenkungen der 12 Seen im Zeitraum 2018-2053

See	Tmit	maximale Absenkung		Absenkung 10% ÜWk.		Absenkung 20% ÜWk.	
	[cm]	relativ	absolut [cm]	relativ	absolut [cm]	relativ	absolut [cm]
Gr. Kossenbl. See	206	0,381	78	0,173	36	0,143	29
Pätzer Hintersee	153	0,544	83	0,285	44	0,228	35
Zeschsee	261	0,176	46	0,013	3	0,024	6
Wolziger See	133	0,130	17	0,013	2	0,028	4
Siethener See	275	0,226	62	0,054	15	0,055	15
Güterfld. Haussee	162	0,227	37	0,046	7	0,050	8
Riebener See	118	0,193	23	0,027	3	0,034	4
Gr. Lienewitz. See	337	0,126	42	-0,020	0	-0,002	0
Heiliger See	146	0,348	51	0,133	19	0,118	17
Pritzerber See	190	0,389	74	0,191	36	0,158	30
Riewendsee	311	0,043	13	-0,004	0	0,020	6
Wolzensee	144	0,164	24	0,022	3	0,032	5

Anmerkung: Die kursiv gedruckten Nullwerte entstanden durch eine willkürliche Aufhöhung.

Die extrem hohen und niedrigen Absenkungsanstiege können nach Abschnitt 7.1 eine Folge der Unzulänglichkeiten der Regressionsbeziehungen sein. Sind sie bei einem bestimmten See als unrealistisch einzuschätzen, sollten sie ggf. durch die in Tabelle 6-2 eingetragenen Mittelwerte der relativen Absenkungsanstiege ersetzt werden.

Zur praktischen Verwendung dieser Absenkungszunahmen ist anzumerken:

- Sind bei einem dieser Seen aus der Vergangenheit maximale Absenkungen oder größere Absenkungen in den letzten zehn oder fünf Jahren bekannt, so können die in der Tabelle aufgeführten absoluten Zunahmen der Absenkungen hierzu addiert werden.
- Im entgegen gesetzten Fall oder wenn der See nie nennenswert abgesenkt war, dürfen die angegebenen absoluten Absenkungsanstiege näherungsweise als die zu erwartenden Absenkungen angenommen werden.

Im Abschnitt 2 sind mehrere Seen genannt worden, welche wegen des Fehlens selbst grundlegender Daten wie Fläche, Volumen oder Tiefe aus den weiteren Untersuchungen ausgesondert werden mussten. Lassen sich derartige Daten künftig beschaffen, können für diese Seen die Regressionsbeziehungen aus Tabelle 7-3 selbstverständlich auch verwendet werden.

8 Weiterführende Untersuchungen zum Seddiner See

Ab ca. 2003 bis 2009, zu Beginn des Projektes INKA BB, war der Seddiner See durch niedrige Wasserstände gekennzeichnet. Dies wurde entsprechend in den bisherigen Modellrechnungen erfasst. Ab 2010 zeigte sich aber ein überraschender, starker Anstieg des Seewasserspiegels (vgl. Mietz & Hartwich, 2014¹). Mit dem Ziel einer Plausibilisierung der bisherigen Ergebnisse, speziell auch für die Projektion der Seewasserstände im Klimawandel, wurden nachfolgend dokumentierte ergänzende Untersuchungen durchgeführt.

8.1 Verlängerung der Modellrechnung für den Seddiner See bis 2012

Den Analysen lagen die Jahre 2004-2012 zugrunde, weil bereits 2010 festgestellt werden konnte, dass ab 2004 die berechneten Verhältnisse am Seddiner See einigermaßen befriedigend mit den beobachteten übereinstimmten. Die Ergebnisse sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

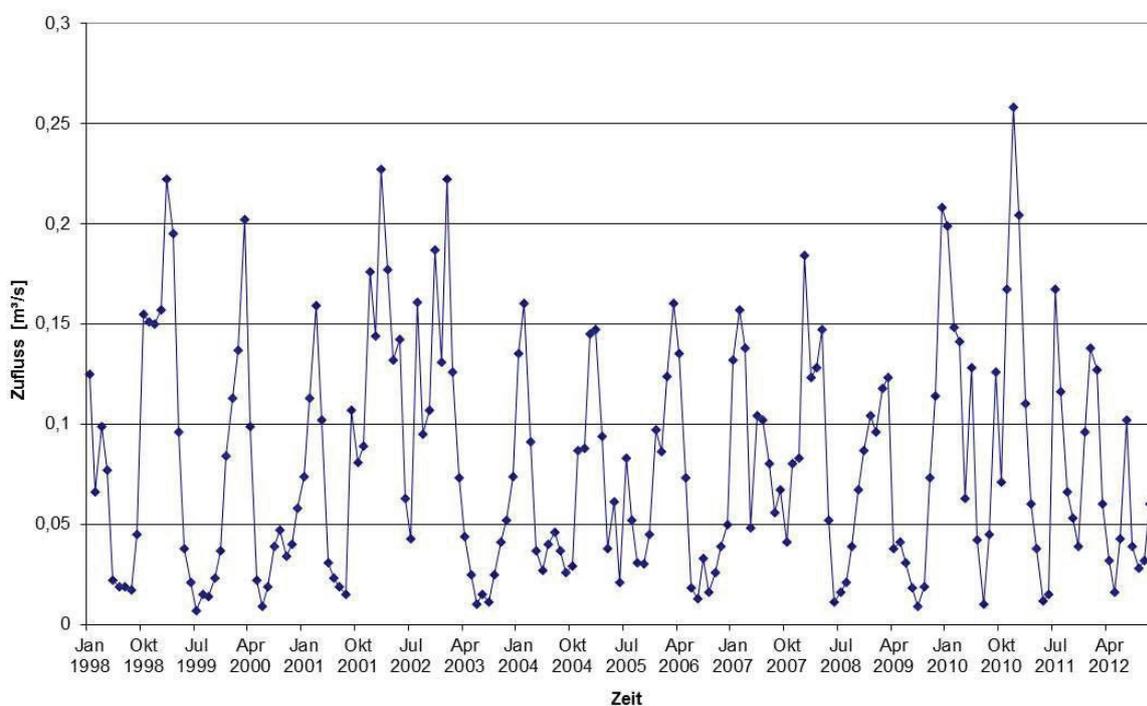


Abbildung 8-1: Zufluss Z zum Seddiner See ab 1998

¹ Mietz, O und Hartwich, Melanie (2014): Hydrologische und limnologische Langzeituntersuchungen am Seddiner See. In: Kaden, S., Dietrich O. und Theobald S. (Herausgeber): Wassermanagement im Klimawandel. Oekom Verlag München, S. 389 – 407

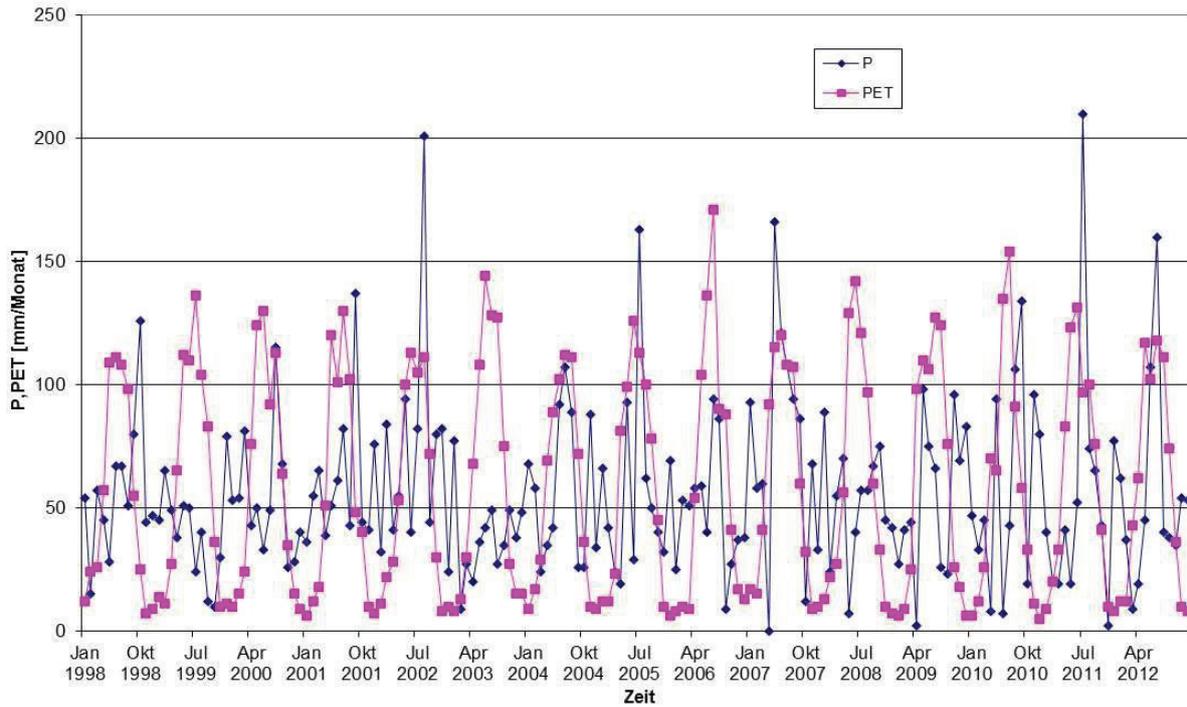


Abbildung 8-2: Niederschlag P und pot. Verdunstung PET im Einzugsgebiet des Sees

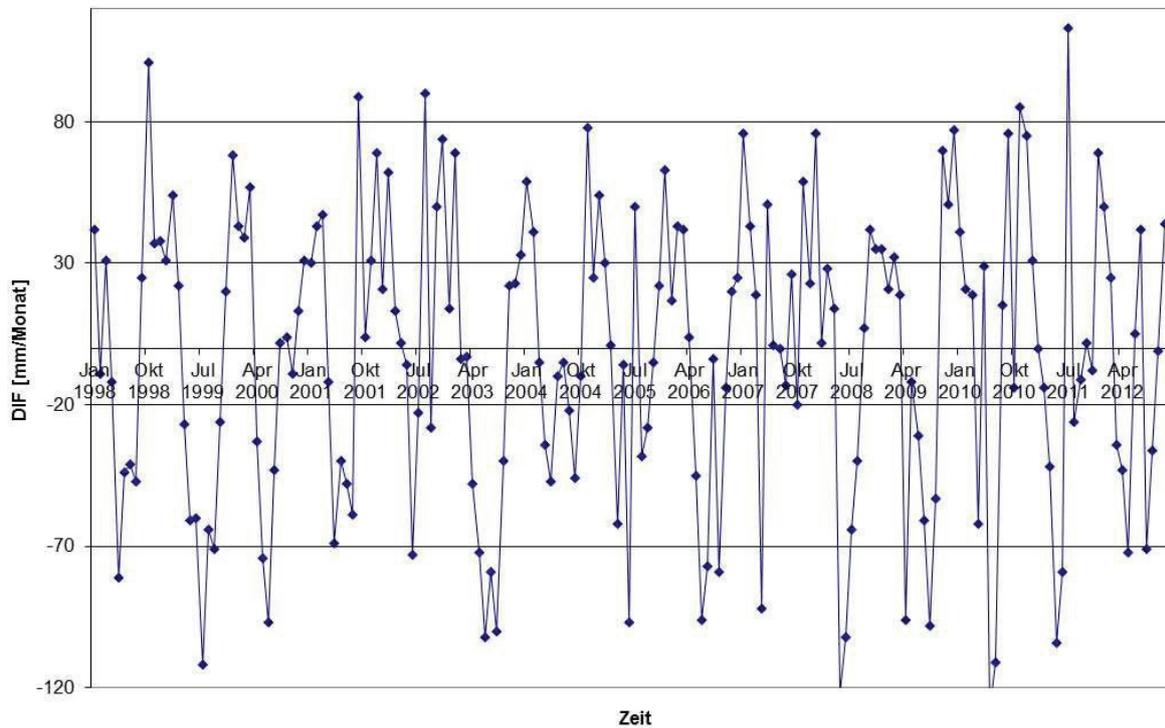


Abbildung 8-3: Differenz DIF zwischen Niederschlag und Verdunstung

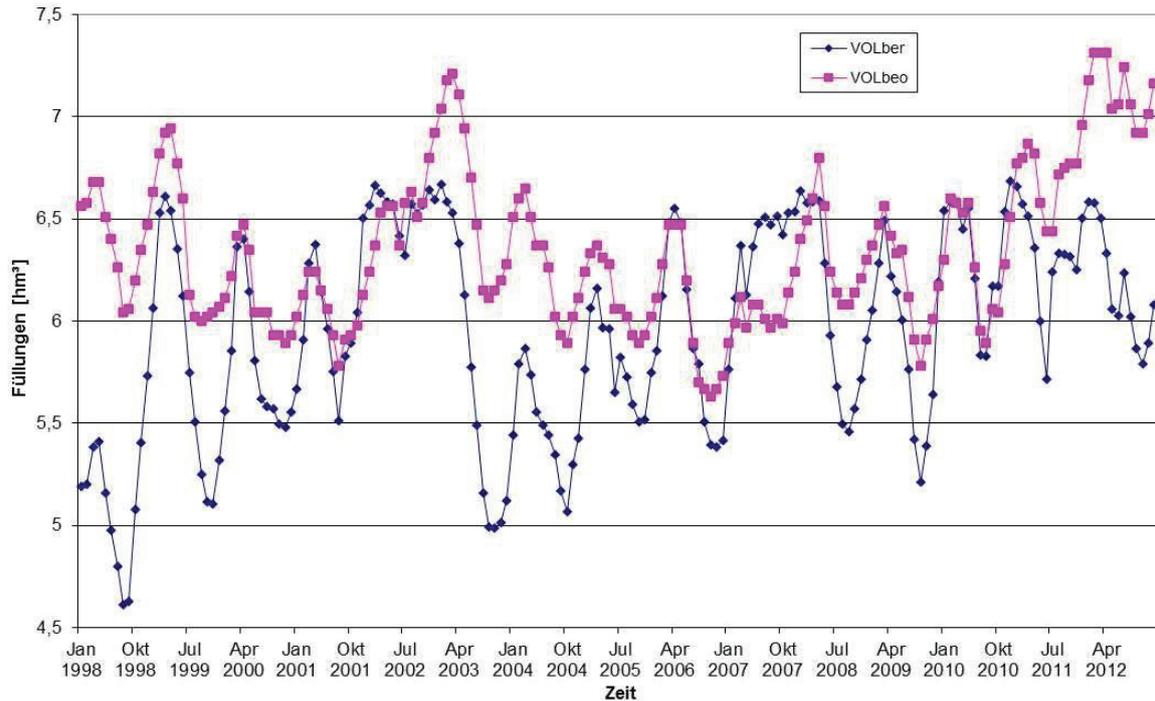


Abbildung 8-4: Berechnete und beobachtete Seefüllungen VOLber und VOLbeo

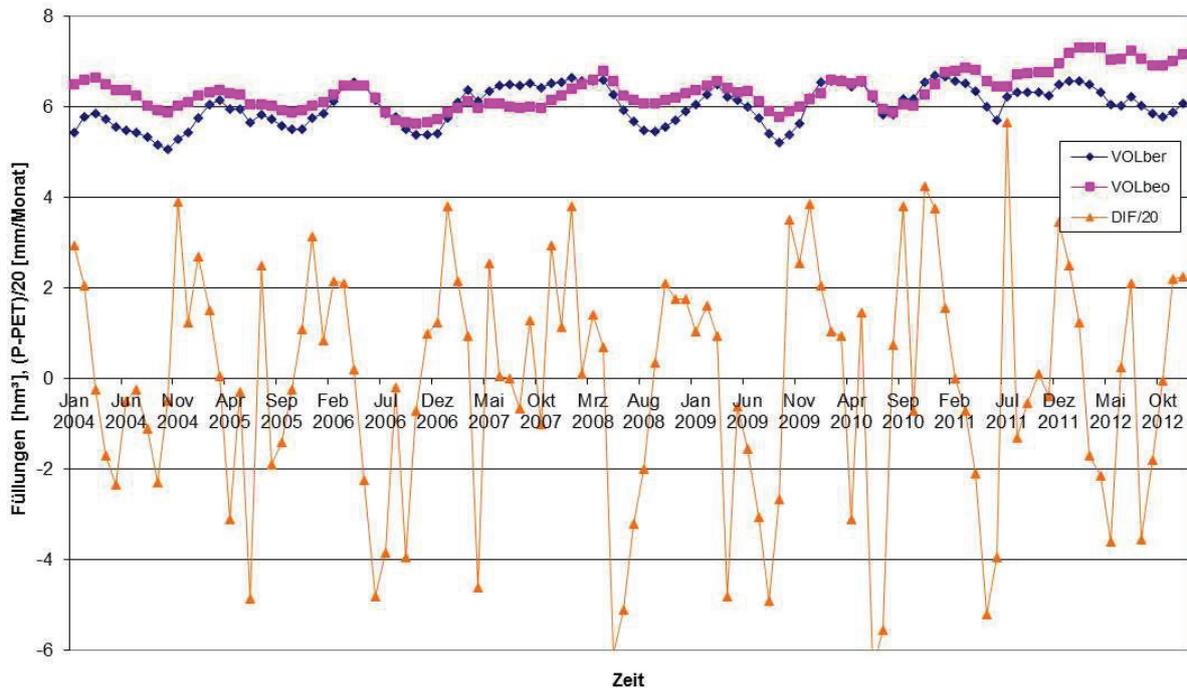


Abbildung 8-5: Gegenüberstellung der Füllungen mit der Differenz DIF

In Abbildung 8-4 zeigt sich, wie in den beiden letzten Jahren 2011 und 2012 die beobachteten Füllungen zunehmend größer werden als die vom Modell berechneten. Welche Ursachen können das bewirken? Dazu wurde das Verhalten der wesentlichen Einflussgrößen untersucht. In der folgenden Tabelle 8-1 sind die Mittelwerte dieser Größen und der Seefüllungen in den Zeiträumen 2004-2010 und 2011-2012 gegenübergestellt.

Tabelle 8-1: Vergleich von Kenngrößen der Seefüllung 2004 – 2010 und 2011 - 2012

Größe	Maßeinheit	2004-2010	2011-2012
Niederschlag P	mm/Mon.	57,7	55,0
Pot. Verdunstung PET	mm/Mon.	58,9	59,8
Differenz DIF= P-PET	mm/Mon.	-1,3	-4,8
Zufluss	m ³ /s	0,081	0,073
berechnete Füllung VOLber	hm ³	5,97	6,24
beobachtete Füllung VOLbeo	hm ³	6,18	6,93

Hieraus ergibt sich, dass alle Größen keine nennenswerten Unterschiede aufweisen mit Ausnahme der **beobachteten Füllungen**, die sich 2011-2012 stark erhöht haben. Da sich die natürlichen Einflüsse kaum ändern und eher leicht abnehmen (siehe DIF und Zufluss), müssen die Ursachen für die erhöhten Seefüllungen in einer veränderten Bewirtschaftung oder anderen externen Einflussgrößen zu suchen sein.

Zusammengefasst: das bisherige Wasserhaushaltsmodell des Seddiner Sees spiegelt den Füllungsanstieg 2011 – 2012 nicht wider. Es muss daher geprüft werden, ob die integrierten Bewirtschaftungsannahmen sich in den letzten beiden Jahren tatsächlich geändert haben oder ob die Abweichungen zufälliger Natur sind, wie sie ähnlich in den Jahren 2002 und 2003 auch schon aufgetreten sind. Das heißt, es war u. a. zu klären, ob

- Sich die Einflüsse geändert haben, z.B. durch Veränderung von GW-Entnahmen
- jetzt auch deutlich höhere Füllungen als 6,5 hm³ wieder zugelassen sind, wie es in den Jahren 1995-1997 zu beobachten war

8.2 Anpassung des Modells Seddiner See an veränderte Bedingungen ab 2011

Wie oben gezeigt, lässt sich der Anstieg des Seewasserspiegels ab 2011 nicht durch klimatische Veränderungen erklären.

Das Modell wurde zunächst durch Veränderung der Bewirtschaftung (für die kaum Daten verfügbar sind) modifiziert. Das Stauziel wurde für die Jahre 2011 und 2012 von 6,5 hm³ auf 6,8 bzw. 7,3 hm³ angehoben.

Die neuen Stauziele entsprechen Stauhöhen von 38,89 bzw. 39,10 mNN. Das ist insofern interessant, als dass im Jahr 2013 in den Monaten April-Juli es zu gemessenen Abflüssen ab einer Stauhöhe von 39,20 mNN gekommen ist, angeblich erstmals seit 1995 (mündliche Mitteilung IaG GmbH Seddin).

Die Grundwasserentnahmen (bisher 0,0256 m³/s in den Monaten April – Juni) wurden ab 2003 auf null gesetzt. Dies basiert auf der Annahme, dass eventuelle Entnahmen aus einem tieferen Grundwasserleiter erfolgen – mit geringer Rückwirkung auf den See. Auch hier standen kaum Daten zur Verfügung.

Die nachfolgende Abbildung 8-6 zeigte die Modellergebnisse im Vergleich zu den beobachteten Werten für den Seewasserspiegel. Die Modellanpassung ist ohne Zweifel gut.

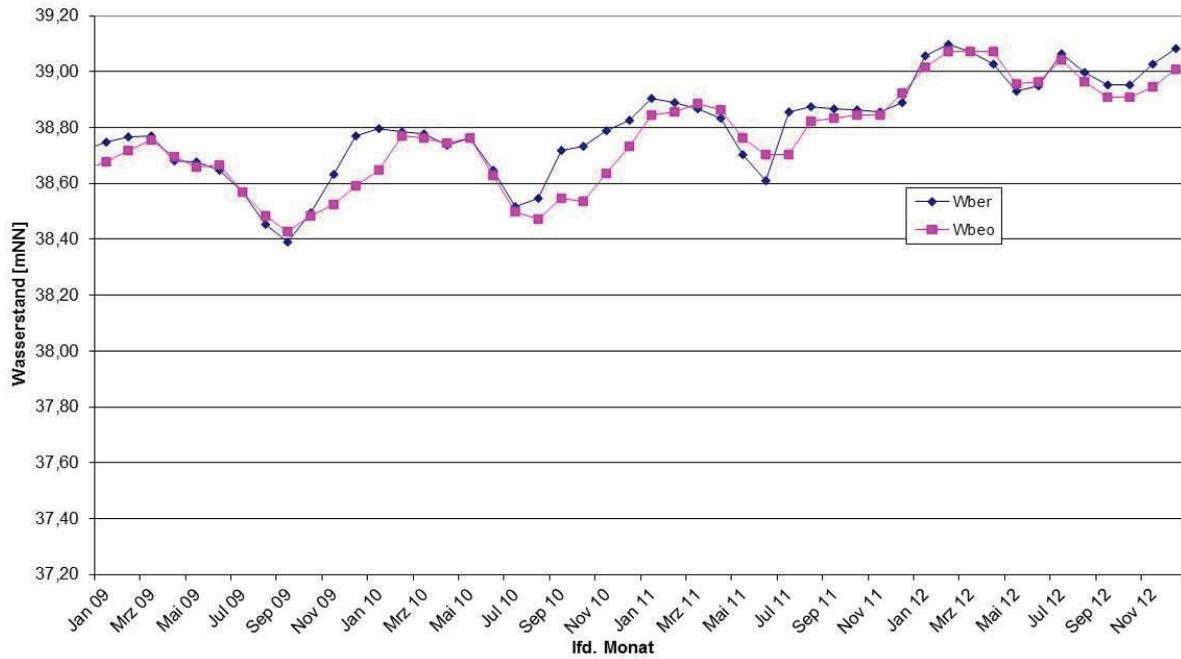


Abbildung 8-6: Berechnete und beobachtete Wasserstände im Seddiner See, ab 2003 keine GW-Entnahme

8.3 Grundwasser Aspekte

Beim Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz wurden Daten von Grundwassermessstellen im Umfeld des Sees angefordert. Nur eine Messstelle (GWM 37441690) lag im weiteren Abstrom des Sees (ca. 5 km). In der folgenden Abbildung sind Messdaten ab 2002 dargestellt.

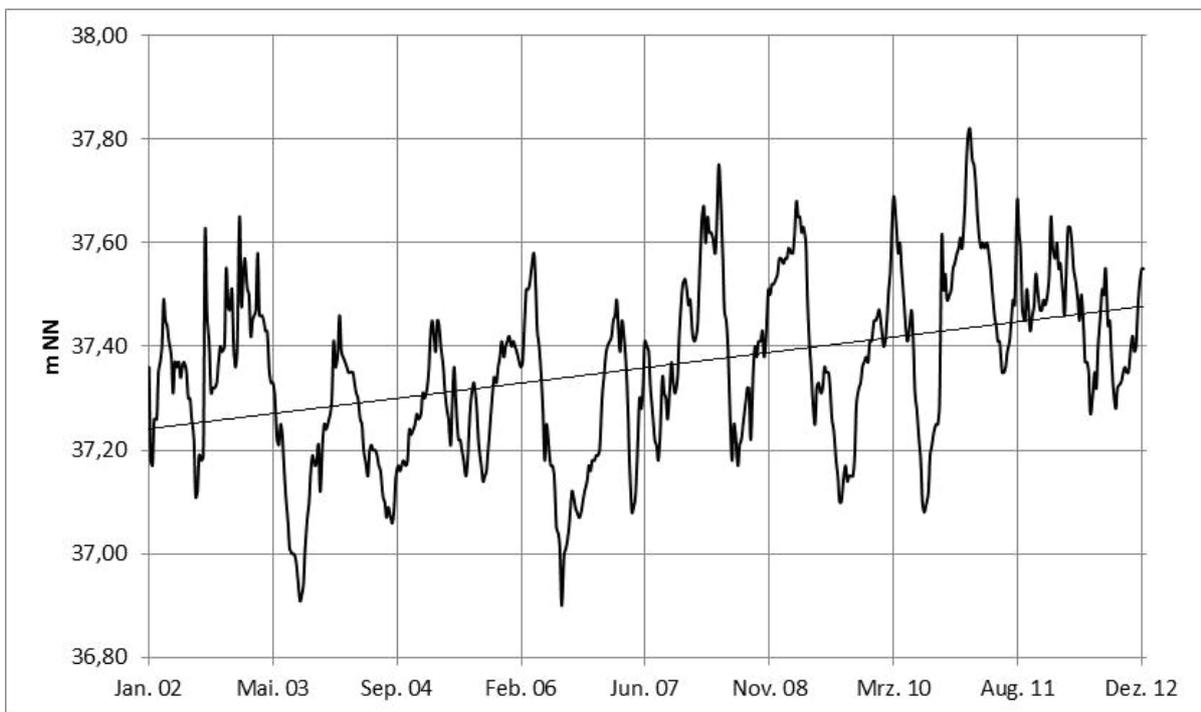


Abbildung 8-7: Grundwasserstand an GWM 37441690 südlich des Seddiner Sees (Daten des LUGV Brandenburg) mit Trendlinie

Es ist ein Anstieg der Grundwasserstände zu verzeichnen, der aber nicht den starken Anstieg des Wasserspiegels im Seddiner See erklärt. Besonders hingewiesen wurde seitens des LUGV auf den Zeitraum Januar 2011 mit einer ausgeprägten Schneeschmelze und dementsprechend stärker ansteigendem Grundwasserstand.

Eine weitere mögliche Rolle auf die Grundwasserstände im Abstrom des Seddiner Sees spielt die teilweise erhebliche Grundwasserentnahme zur Spargelbewässerung. Zeitabhängige Daten waren nicht verfügbar. Wesentlich ist aber folgende Aussage (mündlich, laG GmbH): die Bewässerung erfolgt i.d.R. ab Ende Juni bis August (Wachstumsphase nach Ernte). In Jahren mit starken Sommerniederschlägen (wie 2011 und 2012) wird kaum bewässert.

8.4 Neue Simulation 2 grd Szenario für den Seddiner See

Ausgehend von obigen Befunden erfolgte eine erneute Simulation des Seddiner Sees für das Klimaszenario 2 grd in Varianten. Für diese Simulationen wurden folgende Annahmen getroffen:

- Stauziel bei 38,8 mNN
- Mindestabgabe aus dem Seddiner See von 0,02 m³/s

- Variante 0: Annahme einer minimalen Grundwasserabströmung ganzjährig von 0,005 m³/s
- Variante 1: Annahme einer Grundwasserabströmung von ganzjährig 0,05 m³/s
- Variante 2: Annahme einer um 0,05 m³/s erhöhten Grundwasserabströmung in den Monaten Juni bis September, wenn der Niederschlag in diesen Monaten kleiner 50 mm ausfällt (erhöhter Wasserbedarf für Spargelanbau).

Simuliert wurde jeweils der Projektionszeitraum bis 2053.

Die Ergebnisse sind für die Wasserstandsentwicklung im Seddiner See in den folgenden Abbildungen dargestellt.

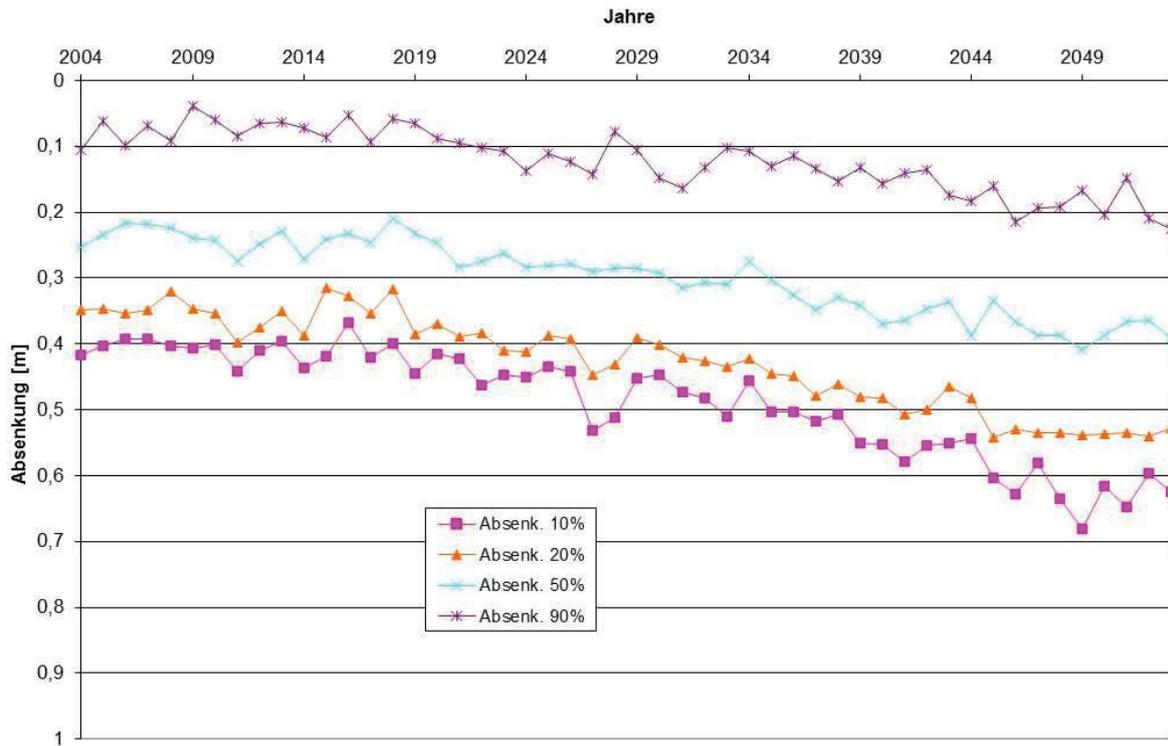


Abbildung 8-8: Absenkungen Seddiner See, 2 grad Szenario, Variante 0

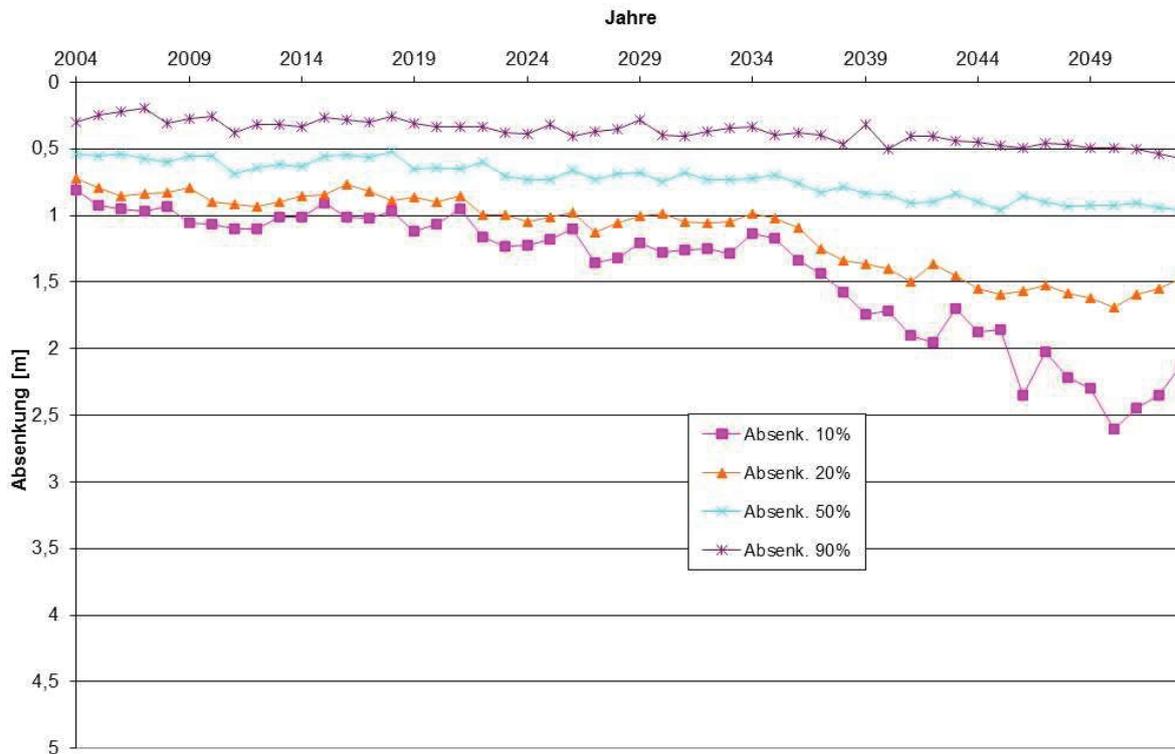


Abbildung 8-9: Absenkungen Seddiner See, 2 grad Szenario, Variante 1

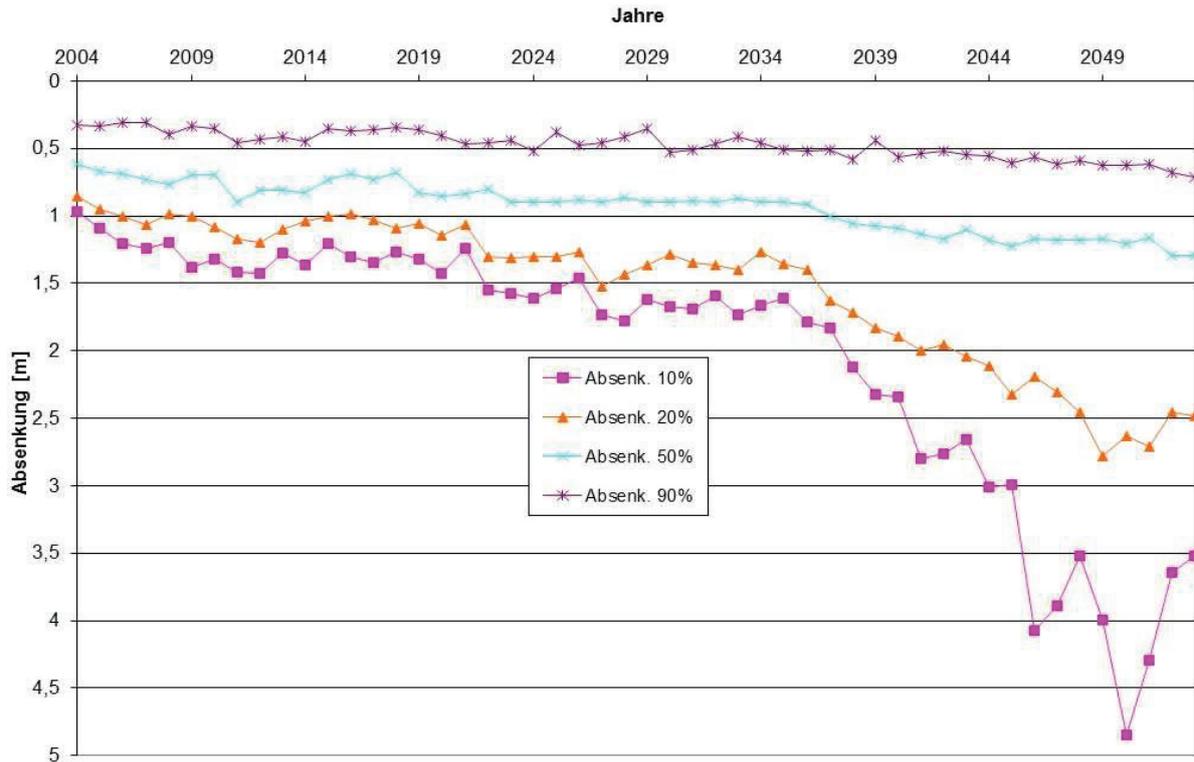


Abbildung 8-10: Absenkungen Seddiner See, 2 grad Szenario, Variante 2

In der folgenden Abbildung 8-11 sind die Ergebnisse der Varianten V0 bis V2 denen der Varianten 0 (0 grd. Szenario) und 2 (2 grad Szenario) des bisherigen Modells gegenübergestellt.

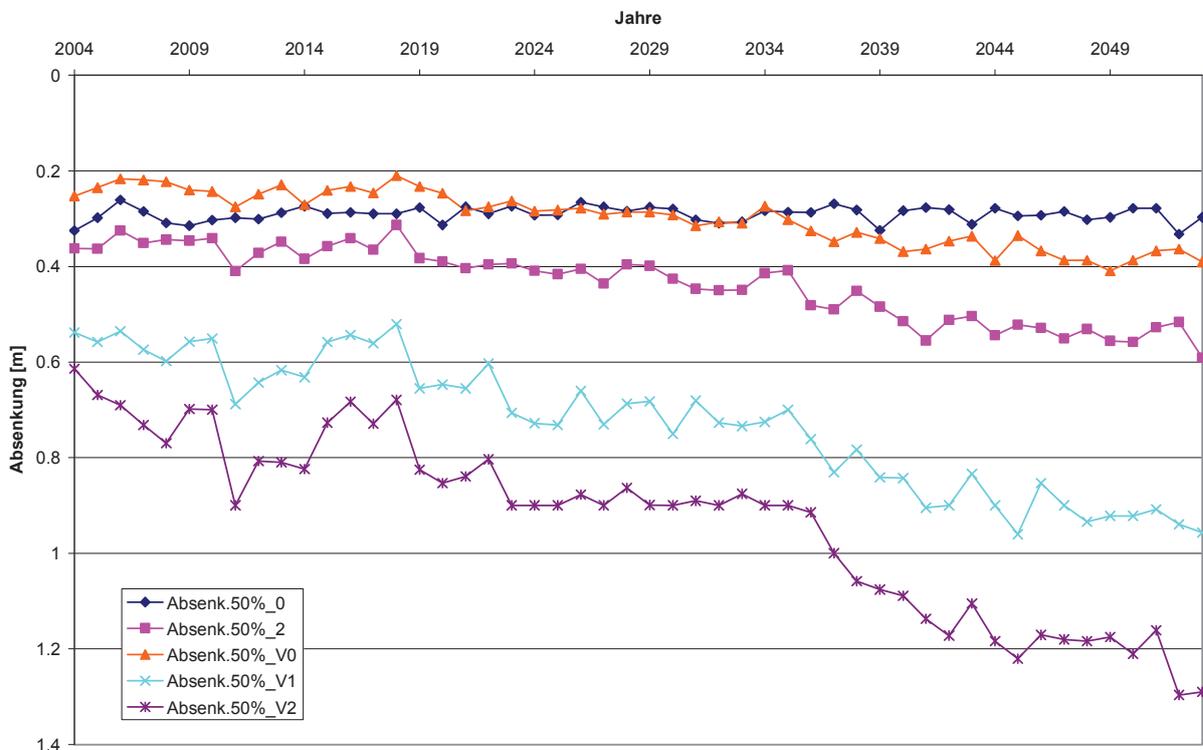


Abbildung 8-11: Vergleich der Absenkungen des Seddiner Sees mit 50% ÜWk beim 0 grad Szenario und beim 2 grad Szenario mit verschiedenen GW-Abströmungen (Varianten 0, 1, 2)

9 Zusammenfassung

Die im Projekt geplanten Untersuchungen sollten Aussagen liefern, wie sich Klimaänderungen auf das Füllungsregime der in Brandenburg gelegenen Flachseen auswirken. Wesentliche Voraussetzung hierfür war die Bereitstellung von Reihen meteorologischer Größen durch das Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung für zwei Klimaszenarien im Zeitraum 2004-2053. Damit war der Weg frei für die Anwendung von Simulationsmodellen: zum einen für den Einsatz von Niederschlag-Abfluss-Modellen zur Transformation der Klimagrößen in den Abfluss, zum anderen für die Nachbildung der Speicherprozesse in den Seen. Dazu wurden das N-A-Modell EGMOD und die Monte-Carlo-Methode, bekannt aus der Langfristbewirtschaftung von Flussgebieten, herangezogen. Beide Herangehensweisen sind mit einem hohen Arbeitsaufwand verbunden, der im Projekt zu einem zweistufigen Lösungsweg führte: detaillierte Untersuchung von zehn Seen und Untersuchung weiterer 12 Seen mit statistischen Modellen, abgeleitet aus den Ergebnissen der ersten Stufe.

Beide Modelle wurden zunächst ausführlich am Beispiel des Seddiner Sees hinsichtlich ihrer Eignung getestet, da für ihn die meisten Unterlagen vorlagen. Für das Nullgradszenario, welches eine Stationarität des Klimas annimmt, konnte ein weitgehend konstantes Füllungsregime nachgewiesen werden. Dagegen zeigte das Regime beim Zweigradszenario, welches einen Anstieg der Lufttemperaturen um 2 grad K bis zum Jahr 2053 zur Grundlage hat, starke Veränderungen in Form wachsender Absenkungen der Seefüllungen zum Ende des Untersuchungszeitraums hin. Bei beiden Anwendungen konnten die Vorzüge von Simulationsmodellen überzeugen, da sie eine Vielfalt von Ergebnissen gestatten und statistische Analysen ermöglichen.

Die Untersuchungen an den insgesamt zehn Flachseen ergaben allgemeingültige Aussagen hinsichtlich des Verhaltens der Seen unter den Bedingungen des Zweigradszenarios im Zeitraum 2004-2053:

- **Bis zum Jahr 2018 kann von einer Stationarität des Füllungsregimes gesprochen werden**, erst danach sind größere und mit der Zeit wachsende Absenkungen zu verzeichnen.
- Die klimabedingten Vergrößerungen der Absenkungen sind teilweise erheblich: die maximalen Absenkungen steigen im extremen Fall von 0,5 m im Jahr 2018 bis auf 4,2 m im Jahr 2053 an, diejenigen mit 10% ÜWk. von 0,4 m bis auf 2,4 m. Die wasserfreien Seeflächen betragen maximal über 40% der Fläche bei Vollfüllung.
- **Diese Klimafolgen sind am größten in den Seen im Südosten Berlins und nehmen zum Nordwesten ab.**
- **Die Zunahme der Absenkungen ist am stärksten für Seen, welche im Vergleich zum Zufluss ein großes Volumen besitzen.**

Die Ergebnisse für die 10 Seen bildeten die Basis bei der Aufstellung von Multiregressionsmodellen, mit deren Hilfe das Verhalten von weiteren 12 Seen untersucht wurde. Die berechneten Zunahmen der Absenkungen von 2018 bis 2053 sind hier weniger zuverlässig.

Für eine sehr einfache Einschätzung der Entwicklung der Absenkungen in den Seen, welche nicht von großen Gewässern durchflossen werden, können die durchschnittlichen, auf die mittlere Seetiefe bezogenen Anstiege der Absenkungen dienen. Sie betragen rd. 32, 14 bzw. 12% der mittleren Seetiefe für die maximalen Absenkungen bzw. für die Absenkungen mit 10 oder 20% Überschreitungswahrscheinlichkeit.

Die weiterführenden Untersuchungen (Abschnitt 8) haben die starke Abhängigkeit der projizierten Absenkungen im Seddiner See von den angenommenen Grundwasserabströmen aus dem See gezeigt. Dies wäre ein interessantes Feld für weitere Untersuchungen. Dabei müsste z. B. die Abhängigkeit des Grundwasserabstroms vom Seewasserstand einbezogen werden. Eine verbesserte Datenlage bzgl. Grundwasserständen und Grundwasserentnahmen im Umfeld des Sees wären hierfür unabdinglich.

Anlage 1: Daten der untersuchten Seen

See	mittlere Tiefe [m]	See-fläche [km ²]	See-volumen [hm ³]	Art der Gewässer-anbindung	Acker-anteil [%]	Gras-landanteil [%]	Wald-anteil [%]
Bauernsee b. Dobbrikow	1,65	0,101	0,17	D	16,9	13,4	63,5
Bohnenländer See nw Bran- denburg		0,169		-	22,8	13,3	53,4
Bornstedter See		0,033		A	6,6	25,7	25,9
Buckower See b. Buckow		0,144		D	6,1	17,9	66,9
Bückwitzer See	2,12	0,534	1,13	2Z/A	58,8	17,3	1,3
Gohlitzsee b. Lehnin	2,15	0,377	0,81	-	15,9	11,3	58,2
Gördensee b. Brandenburg	1,26	0,421	0,53	A	0,2	10,5	69,3
Gröbener See	1,52	0,405	0,61	D+A	14,6	10,4	28,1
Groß Behnitzer See		0,204		D	56,2	1,6	31,3
Groß Leuthener See	2,38	1,146	2,73	D	15,3	9,1	27,2
Güldensee	1,40	0,221	0,31	-		10,7	65,4
Güterfelder Haussee	1,62	0,133	0,21	A	14,6	20,6	35,0
Heiliger See b. Kirchmöser	1,46	0,525	0,76	A		11,8	15,1
Hohennauener See, Ost				5Z/A	17,3	6,0	41,7
Hohennauener See, West	3,43	3,622	12,44	D			
Kähnsdorfer See	1,04	0,260	0,27	D	34,1	11,5	40,7
Kleißener See	2,48	0,506	1,25	D	35,6	1,3	33,3
Klostersee b. Lehnin	1,67	0,489	0,82	D	6,2	4,1	57,4
Kolpinsee b. Lehnin	4,31	0,306	1,32	-			
Kossenblatter See, Gr.	2,06	1,681	3,46	D+2Z	31,2	7,8	26,6
Kossenblatter See, Kl.		0,389		D	17,8	10,3	55,2
Krimnicksee; Dahme	2,72	0,515	1,40	D	4,1	14,2	35,6
Lienewitzsee, Gr.	3,37	0,142	0,48	D+A	0,1	1,5	90,1
Mellensee b. Mellensee	2,99	2,233	6,67	D+3Z	9,3	6,1	13,1
Netzener See	2,97	0,979	2,91	D+2Z	7,3	8,0	28,3
Pätzer Hintersee		2,162		D	0,6	10,6	64,0
Plessower See, Gr.	6,46	3,221	20,80	A	10,6	18,5	12,5
Plessower See, Kl.	0,95	0,148	0,14	-			
Pritzerber See	1,90	1,975	3,74	D	38,2	24,0	12,1

Rangsdorfer See	1,66	2,038	3,39	D+A	9,0	1,6	22,8
Riebener See	1,18	0,377	0,44	D	9,1	28,4	17,9
Rietzer See b. Netzen	1,06	3,083	3,28	D+Z	24,0	12,8	17,5
Riewendsee	3,11	1,018	3,16	D+A	31,4	11,5	44,0
Schäfersee nw Freidorf	1,82	0,068	0,12	-	7,3	24,3	32,6
Schampsee	2,84	0,074	0,21	D	9,7	6,6	54,4
Schulzensee b. Groß Köris	1,48	0,121	0,18	D	0,5	21,3	33,8
Seddiner See, Gr.	3,04	2,176	6,62	D	20,7	3,0	48,9
Seddiner See, Kl.	2,18	0,044	0,10	-			
Siethener See	2,75	0,708	1,95	D	33,1	2,5	32,3
Steckelsdorfer See		0,219		D	12,1	10,8	61,1
Teufelssee b. Seddin	2,08	0,044	0,09	-	7,1	26,6	53,0
Teupitzer See	3,50	4,756	16,63	D+2Z	0,1	11,0	33,0
Todnitzsee	2,34	0,375	0,88	D	6,6	26,3	31,6
Witzker See	1,62	0,612	0,99	Z/2A	0,8	23,6	42,7
Wolzensee	1,44	0,508	0,73	D	15,9	7,9	64,0
Wolziger See b. Wünsdorf	1,33	0,500	0,66	D+Z	1,4	13,2	67,4
Wusterwitzer See, Gr.; Havel	3,38	1,713	5,79	D	20,6	21,4	18,0
Zemminsee	1,36	0,448	0,61	D+Z		3,2	44,2
Zeschsee, Kl.	2,61	0,234	0,61	D	27,1	13,8	44,9
Ziestsee b. Bindow	4,28	0,565	2,42	A	7,8	3,0	55,5