

S. Kaden, O. Dietrich,
S. Theobald (Hrsg.)

KLIMZUG 

Wassermanagement im Klimawandel

Möglichkeiten und Grenzen
von Anpassungsmaßnahmen

Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten / Band 3



Stefan Kaden, Ottfried Dietrich, Stephan Theobald (Hrsg.)

Wassermanagement im Klimawandel

Möglichkeiten und Grenzen von Anpassungsmaßnahmen

ISBN 978-3-86581-480-7

524 Seiten, 16,5 x 23,5 cm, 44,95 Euro

oekom verlag, München 2014

©oekom verlag 2014

www.oekom.de

Stefan Kaden, Michael Schramm

Quantitative Entwicklung von Flachseen in Brandenburg im Klimawandel

Zusammenfassung

Die in dem 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. Im Projekt wurde ein zweistufiger Lösungsweg realisiert: detaillierte Untersuchung von zehn Seen und Untersuchung weiterer zwölf Seen mit statistischen Modellen, abgeleitet aus den Ergebnissen der ersten Stufe.

Die Projektionen beim 2°-Szenario, welches einen Anstieg der Lufttemperaturen um ca. 2 K bis zum Jahr 2053 zur Grundlage hat, zeigen starke Veränderungen in Form der Seefüllungen zum Ende des Untersuchungszeitraums hin. Die klimabedingten Vergrößerungen der Absenkungen sind teilweise erheblich: Die maximalen Absenkungen steigen im extremen Fall von 0,5 Meter im Jahr 2018 bis auf 4,2 Meter im Jahr 2053 an, diejenigen mit zehn Prozent Überschreitungswahrscheinlichkeit von 0,4 Meter bis auf 2,4 Meter. Die dadurch frei gewordenen wasserfreien Seeflächen betragen maximal über 40 Prozent der Fläche bei Vollfüllung.

1 Einleitung

Die Region des Brandenburger Stadiums des Weichselglazials (Brandenburger Mittelmark südlich und westlich von Berlin) gehört zu den niederschlagsärmsten Gebieten in Deutschland. Mit den in den kommenden Jahrzehnten zu erwartenden Klimaänderungen mit Temperaturerhöhungen, Zunahmen der Verdunstung und Veränderungen der innerjährlichen Niederschlagsverteilung dürften gerade in dieser Region auch Änderungen des Füllungsregimes der zahlreichen hier befindlichen Flachseen auftreten. Hupfer & Nixdorf (2011) geben Beispiele für bereits eingetretene klimabedingte Absenkungen von Flachseen.

Im Rahmen des BMBF-Verbundforschungsprojektes INKA BB wurden entsprechende Untersuchungen im TP 22 »Nachhaltige Managementstrategien für glaziale Seen Brandenburgs im Klimawandel« durchgeführt. Für die Untersuchungen zu Flachseen wurden 50 Seen ausgewählt.

Aufbauend auf DHI-WASY (2008) fanden im Jahr 2010 zunächst vertiefte Untersuchungen für den Großen Seddiner See statt. Im Gegensatz zu den meisten anderen Flachseen in Brandenburg 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 Modell für den Seddiner See für die zwölf Jahre 1995–2006 erstellt werden, das die Wasserstände des Sees in diesem Zeitraum befriedigend nachbildete.

Modellgrundlage war das N-A-Modell EGMOD (Glos, 1984), welches mit einer monatlichen Zeitschrittweite arbeitet. Ab Juli 2011 standen vom Potsdamer Institut für Klimafolgenforschung (PIK) für zwei Klimaszenarien Reihen des Niederschlags, der potenziellen Verdunstung und der Lufttemperatur im Zeitraum 2004–2053 für die Einzugsgebiete der oben genannten Seen zur Verfügung, womit das Füllungsregime der Seen simuliert werden konnte.

Aus Aufwandsgründen und mangels Datenverfügbarkeit konnte der N-A-Modell-Ansatz nicht auf alle vorgegebenen 50 Seen der Brandenburger Mittelmark übertragen werden. Davon ausgehend wurde folgender allgemeiner Lösungsweg entwickelt, um für möglichst viele der Flachseen die Auswirkungen eines Klimawandels quantitativ abzuschätzen:

- ◆ Festlegung der Seen, für die Untersuchungen sinnvoll oder überhaupt möglich sind,

- ◆ Anwendung des erarbeiteten Simulationsmodells auf insgesamt zehn Seen, welche über die Brandenburger Mittelmark möglichst 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 Datengrundlage und Methoden

2.1 Auswahl der Seen

Vom Projektpartner Institut für Angewandte Gewässerökologie (IAG) wurden 50 Brandenburger Flachseen für die Untersuchungen vorgegeben. Nicht alle dieser Seen konnten jedoch untersucht werden. Bei sieben Seen fehlen selbst grundlegende Angaben wie Seefläche und Seevolumen, sodass hier keinerlei numerische Rechnungen möglich sind. Acht weitere Seen werden von relativ zu ihrem Volumen abflussreichen Gewässern durchflossen oder besitzen ein sehr großes eigenes oberirdisches Einzugsgebiet (EZG), weshalb selbst bei erheblichen klimabedingten Abflussreduzierungen keine wesentlichen quantitativen Änderungen im Seeregime zu erwarten sind. Als Beispiel sei hier nur der Krimnicksee an der Dahme mit einem EZG von 1,340 km² und einem Seevolumen von nur 1,40 hm³ genannt. Ein Teil der Seen hat weder einen Zufluss noch einen Ausfluss. Ihre Betrachtung würde Untersuchungen der Grundwasserverhältnisse bedingen, die im Rahmen des Projektes nicht vorgesehen waren. Bei fünf Seen liegen weitere Seen in ihrem EZG. Da über eine gemeinsame Regulierung der jeweils zusammenhängenden Seen keinerlei Angaben existieren, müssen auch diese Seen aus den Untersuchungen ausscheiden, z. B. der Schulzensee mit dem Teupitzer See und dem Zemminsee. Zwei davon, nämlich der Kleine und der Große Seddinsee, konnten gemeinsam untersucht werden. Nachfolgend steht *Seddiner See* daher für die Seengruppe Kleiner und Großer Seddiner See.

Somit verblieben 22 Seen für eine weitergehende Untersuchung. Sie wurden in zwei Gruppen eingeteilt. Zehn Seen sind mithilfe von N-A-Modellen detailliert berechnet worden (im Weiteren als *Modell-Seen* bezeichnet). Die zweite Gruppe mit zwölf Seen wurde mittels statistischer Beziehungen behandelt, welche aus den Ergebnissen der ersten Gruppe abgeleitet werden konnten (*»Statistik-Seen«*). Die Modell- und Statistik-Seen sind mit einigen wichtigen Kenngrößen in Tabelle 1 zusammengestellt.

Tabelle 1: Angaben zu den untersuchten Flachseen.

Name des Sees	Typ ^{*)}	Fläche EZG ^{**)} [km ²]	See-fläche [km ²]	Volumen [hm ³]	Max. Tiefe [m]	Mittl. Tiefe [m]
Modell-Seen						
Groß Leuthener See	D	26,20	1,146	2,73	5,92	2,38
Teupitzer See	D+2Z	32,90	4,756	16,63	8,25	3,50
Ziestsee	A	1,95	0,565	2,42	9,32	4,28
Rangsdorfer See	D+Z	54,40	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	14,40	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	50,80	0,534	1,134	8,36	2,12
Mittel	—	24,76	1,711	6,14	7,50	3,06
Statistik-Seen						
Großer Kossenblatter 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
Groß Lienewitzsee	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
^{*)} D: See wird durchflossen, A: zusätzlicher Ausfluss, Z: zusätzlicher Zufluss ^{**)} EZG: Einzugsgebiet des Sees ohne Seefläche.						

Aus einem Vergleich der Seenparameter in Tabelle 1 zeigt sich, dass die Modell-Seen im Schnitt größer und tiefer sind und zudem die größeren EZG besitzen. Trotzdem überstreichen in beiden Gruppen die Seen bezüglich der einzelnen Kenngrößen ein breites Spektrum.

Abbildung 1 gibt einen gedrängten Überblick über die Lage der 22 Seen beider Gruppen. Die Modell-Seen sind mit Angaben zu den jährlichen Mittelwerten der Niederschläge P , der potenziellen Verdunstung PET und der Abflussspenden M_q der jeweils zugehörigen EZG versehen. Zusätzlich wurden die Abflussspenden M_q von benachbarten Pegeln zum Vergleich eingetragen. Diese meteorologischen und hydrologischen Größen beziehen sich auf Verhältnisse ohne Klimaänderungen. Die Statistik-Seen sind nur durch ihre ungefähre Lage und hier abgeschätzte Abflussspenden gekennzeichnet worden. Die Abflussdaten wurden vom Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg bereitgestellt. In der Abbildung sind die Mittelwerte der jeweils verfügbaren langen Reihen dargestellt.

2.2 Meteorologische Daten

Vom Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK) wurden die Zeitreihen des Niederschlags, der potenziellen Verdunstung und der Lufttemperatur für die Szenarien T_0 und T_2 in den Jahren 2004–2053 zur Verfügung gestellt (s. auch Werner, 2014). Dabei führt das T_0 -Szenario das aktuelle Temperaturregime bis zum Jahr 2053 weiter, während das T_2 -Szenario von einer Temperaturerhöhung von zwei Kelvin ausgeht. Insgesamt wurden je Szenario einhundert Realisierungen bereitgestellt. Sie basieren auf dem SRES-Szenario A1B (IPCC, 2000), dem Globalklimamodell ECHAM5/MPI-OM (MPI, 2004) vom Max-Planck-Institut für Meteorologie und wurden mit dem statistischen Regionalisierungsmodell STARS für die Region Berlin-Brandenburg rationalisiert und verfeinert.

Die Daten stehen als Tageswerte für Hydrotope zur Verfügung, in welche Brandenburg untergliedert ist. Für die Hydrotope in den EZG der Seen erfolgte die Berechnung der täglichen Werte von Niederschlag und potenzieller Verdunstung unter Berücksichtigung der Lufttemperatur zwecks Bestimmung der Schneeverlagerung. Danach wurden die täglichen Hydrotop-Werte unter Beachtung ihrer Anteile am EZG zusammengefasst und abschließend die Tageswerte zu Monatswerten aggregiert.

Nach Abschluss der genannten Arbeiten lagen jeweils 100 Reihen monatlicher Werte von Niederschlag und potenzieller Verdunstung für den Zeitraum 2004–

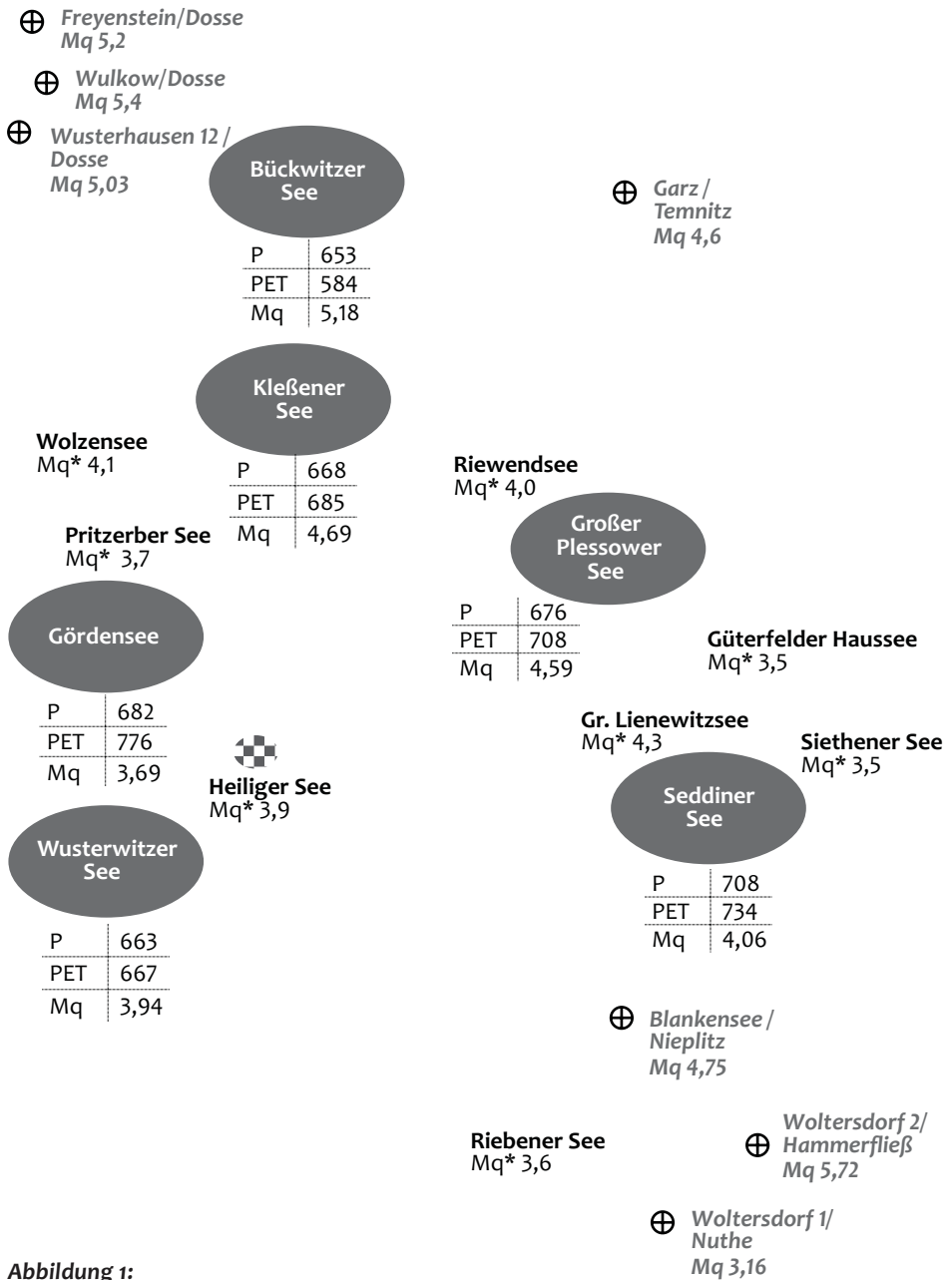

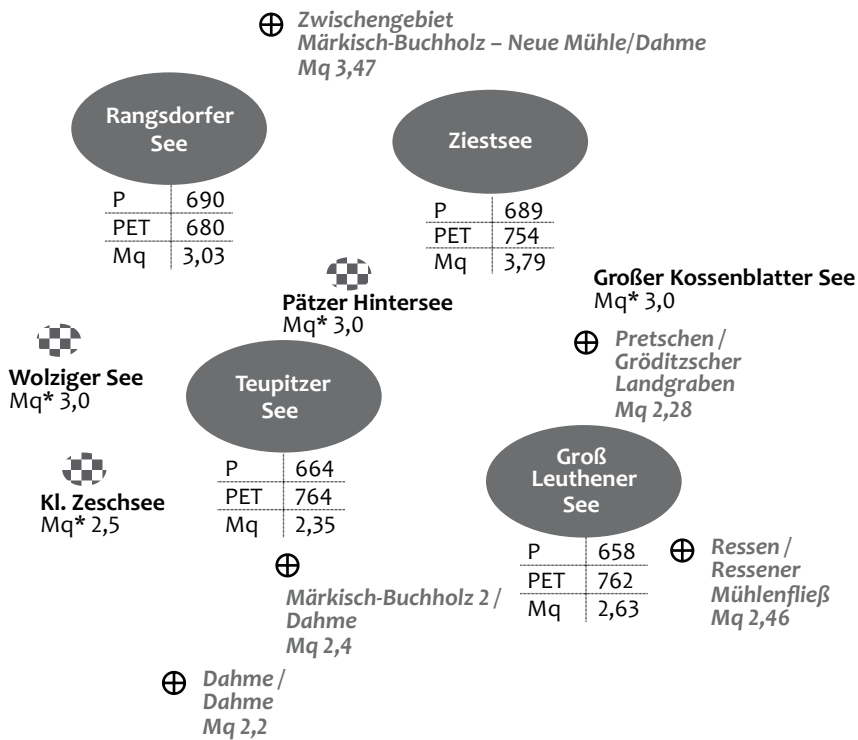


Abbildung 1:
 Übersicht über das Untersuchungsgebiet.

⊕	Pegel / Gewässer
P	Niederschlagsdargebot in mm/a
PET	Potenzielle Verdunstung in mm/a
Mq	Mittlere simulierte Abflussspende in l/(s km ²)
Mq	Mittlere beobachtete Abflussspende in l/(s km ²)
Mq*	abgeschätzte Abflussspende in l/(s km ²)
	Modell-See (mit EGMOD berechnet)
	Statistik-See (mit Regression berechnet)
	Wolzensee

BERLIN



2053 für die beiden Szenarien vor, die in verschiedenen Richtungen analysiert wurden.

Erwartungsgemäß zeigen die über 100 Realisierungen gemittelten jährlichen Niederschläge und potenziellen Verdunstungen sowie deren Differenzen in den Jahren des Zeitraums 2004–2053 beim Szenario T₀ keinen Trend. In Abbildung 2 sind exemplarisch die mittleren Jahressummen von P und PET des EZG vom Seddiner See für Szenario T₂ dargestellt. Mit Blick auf Abbildung 1 sei noch darauf hingewiesen, dass vom Südosten Berlins zum Nordwesten zwar die Niederschläge P keine einheitliche Entwicklung zeigen, die potenzielle Verdunstung PET aber 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 .

2.3 Simulation des natürlichen Wasserdargebots der Seeneinzugsgebiete

Da es für die Mehrzahl der Brandenburger Flachseen keine Angaben zum natürlichen Zufluss gibt, ist man, wie bereits in Abschnitt 1 erwähnt, auf die Nutzung von N-A-Modellen angewiesen, welche Klimagrößen wie den Niederschlag und die potenzielle Verdunstung in das natürliche Dargebot eines EZG transformieren. Im Jahr 2010 konnte für den Seddiner See nachgewiesen werden, dass sich hierbei das N-A-Modell EGMOD eignet. Der Nachweis wurde für die Jahre 1995–2006 erbracht, 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 ein Monat, erwartet damit seine Eingangsgrößen P und PET in derselben Zeiteinheit (vgl. Abschnitt 1) und liefert dann monatliche Abflüsse aus den jeweiligen EZG.

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 EZG. Auf eine Darstellung der Modellparameter wird hier verzichtet.

Die Systemparameter des N-A-Modells EGMOD wurden von bereits modellierten, vergleichbaren EZG übernommen. Mit diesen Parametern wurden die Zuflüsse zu den zehn Seen für die 100 Realisierungen der monatlichen P- und PET-Werte für die Szenarien T₀ und T₂ berechnet. Sie dienten im Anschluss daran der Simulation der Speicherfüllungen der Seen.

Zwecks Einschätzung der Simulationsgüte wurden aus den Zuflussreihen des Szenarios T₀ die zugehörigen langjährigen Jahreszuflussspenden M_q [$l/(s \cdot km^2)$] gebildet und mit den Spenden umliegender Pegel verglichen. Mit Blick auf Abbildung 1 kann man feststellen:

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

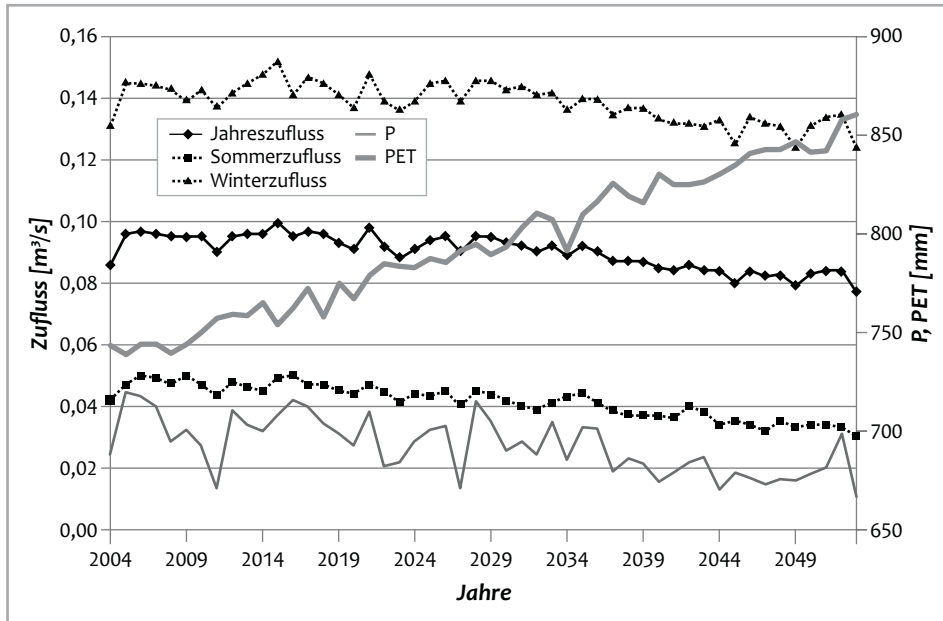


Abbildung 2: Mittlere Jahressummen von P und PET des EZG vom Seddiner See sowie mittlere Zuflüsse zum See beim Szenario T2.

Damit zeichnet sich der in Abschnitt 2.2 vermutete durchgehende Anstieg der Abflusspenden ab, wenn man von SO nach NW rund um Berlin geht, eine Gegebenheit, die sich auch bei den Abflusspegeln zeigt.

Abbildung 2 zeigt die simulierten Zuflüsse zum Seddiner See für das Szenario T2, die erwartungsgemäß in der Zukunft abnehmen.

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

2.4 Simulation der Bewirtschaftung der Modell-Seen

Für die Simulation der Seenbewirtschaftung müssen Angaben zur Konfiguration der Seen und zu ihrer Regulierung existieren, was bei den betrachteten Seen leider in der Regel nur teilweise oder gar nicht der Fall ist. Die verfügbaren Angaben zur Konfiguration sind in Tabelle 2 gegeben.

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

Tabelle 2: Angaben zur Konfiguration der Modell-Seen.

Name des Sees	max. Länge L_{\max} [km]	max. Breite B_{\max} [km]	See- fläche A_{see} [km ²]	See- volumen V_{see} [hm ³]	mittl. Tiefe T_{mit} [m]
Groß 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
Kleßener See	1,48	0,55	0,506	1,25	2,48
Bückwitzer See	1,07	0,48	0,534	1,13	2,12

- ◆ 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.

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 VOL_{bew} bezeichnet, weil nur in diesem Füllungsbereich eine Bewirtschaftung möglich ist. Bei kleineren Füllungen wirken sich nur die Differenzen $P-PET$ auf die aktuelle Seefläche aus, die somit zu Füllungen $<VOL_{\text{bew}}$ führen können.

- ◆ 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. Die monatliche Seeregulierung wurde wie folgt definiert:

- ◆ In jedem Monat ist die Menge

$$V = VOL_{anf} + \text{Zufluss} + (P - PET) \cdot \text{aktuelle Seefläche}$$

verfügbar (VOL_{anf} : Anfangsfüllung).

- ◆ Bei $V < VOL_{bew}$ wird nichts abgegeben.
- ◆ Ist $V > VOL_{bew}$, wird die Menge $\min(QL, V - VOL_{bew})$ 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.

Um die formulierte Seeregulierung sowohl unter den Bedingungen eines unveränderten Klimas (Szenario T_0) als auch bei Klimaänderungen (Szenario T_2) 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 potenziellen Verdunstung und ihrer Differenz bezüglich des Jahres, des Sommers und des Winters,
- ◆ mittlere Zuflüsse im Jahr, im Sommer und im Winter,
- ◆ Seefüllungen für verschiedene Unterschreitungswahrscheinlichkeiten,
- ◆ Seeabsenkungen für verschiedene Überschreitungswahrscheinlichkeiten.

Zum besseren Verständnis der nachfolgenden Darstellungen der Ergebnisse der Simulationsrechnungen seien einige Erläuterungen zur letztgenannten Registrierung angefügt. Während der Simulation wird innerhalb eines jeden Jahres des Zeitraumes 2004–2053 die maximale Seeabsenkung registriert. Wenn die Bewirtschaftung in diesem Zeitraum 100-mal simuliert wird, so gibt es also in jedem der 50 Kalenderjahre im Allgemeinen 100 verschiedene tiefste Absenkungen. Ordnet man diese 100 tiefsten Absenkungen eines bestimmten Jahres der Größe nach an (von der größten zur kleinsten), so erhält man eine maximal aufgetretene Absen-

kung A_{\max} für dieses Kalenderjahr, näherungsweise eine Absenkung A_{10} , die mit zehn Prozent »Wahrscheinlichkeit« überschritten wird, eine Absenkung A_{20} mit 20 Prozent Überschreitungswahrscheinlichkeit (ÜWk) usf. 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.

2.5 Ableitung statistischer Beziehungen für die Statistik-Seen

In Übereinstimmung mit dem oben formulierten Lösungsweg wurden in einem zweiten Schritt für die Statistik-Seen ohne detaillierte Berechnungen Angaben zu ihrem Verhalten bei den vorgegebenen Klimaänderungen ermittelt. Dazu bieten sich in erster Linie statistische Modelle in Form von Multiregressionsmodellen auf der Basis der Ergebnisse bei den Modell-Seen an (Tabelle 5). Hierbei ist zu erklären, welche Größen beeinflussen die zu bestimmenden Anstiege der Absenkungen im Zeitraum 2018–2053. Die wichtigsten Einflussgrößen sind mit Sicherheit der Niederschlag P und die potenzielle Verdunstung PET mit ihren Veränderungen im genannten Zeitfenster. Zu ihrer Bestimmung müssten jedoch die umfangreichen Arbeiten ausgeführt werden, welche in Abschnitt 2.1 beschrieben worden sind, die aber gerade für diese zwölf Seen mithilfe der Multiregressionsmodelle vermieden werden sollten. Im vorliegenden Projekt ist deshalb auf sie verzichtet worden, sodass folgende Einflussgrößen verbleiben:

- ◆ die Fläche AE des EZG des Sees,
- ◆ die (mittlere) Abflussspende Mq oder der zugehörige (mittlere) Abfluss MQ aus dem EZG (bezogen auf To),
- ◆ die mittlere Seetiefe T_{mit} ,
- ◆ die Seefläche A_{see} bei Vollfüllung des Sees,
- ◆ das Seevolumen V_{see} bei Vollfüllung,
- ◆ das bewirtschaftete Seevolumen VOL_{bew} der Lamelle LAM ,
- ◆ der Ausbaugrad β , gebildet aus

$$\beta = \frac{VOL_{\text{bew}}}{MS}$$

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

Die Größe MQ wurde abgeschätzt, weil alle Versuche, auch sie über ein Multiregressionsmodell zu berechnen, wegen zu geringer Modellgenauigkeit gescheitert sind. Ihre Festsetzung erfolgte mit Blick auf die mittleren Abflüsse jeweils benachbarter Pegel. Die angesetzten abgeschätzten Werte sind in Abbildung 1 einzusehen.

Die Tabelle 3 enthält die numerischen Werte der genannten Einflussgrößen der Modell-Seen.

Die statistischen Zusammenhänge zwischen den relativen Zunahmen der Absenkungen der Modell-Seen (Tabelle 7 in Abschnitt 3.1) und diesen Einflussgrößen ergaben sich aus einer Korrelationsanalyse, deren Ergebnisse in Tabelle 4 zusammengestellt worden sind.

Für die Zunahmen der relativen Absenkungen A_{\max} , A_{10} und A_{20} ergeben sich zu berücksichtigende Korrelationen zu den Einflussgrößen MQ , A_{see} , V_{see} und β . Sie lassen sich wie folgt erklären:

Tabelle 3: Einflussgrößen der Modell-Seen.

Name des Sees	AE [km ²]	MQ [m ³ /s]	T _{mit} [m]	A _{see} [km ²]	V _{see} [hm ³]	VOL _{bew} [hm ³]	β [-]
Groß Leuthener See	26,20	0,0690	2,38	1,146	2,73	2,004	0,92
Teupitzer See	32,90	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
Rangsdorfer See	54,40	0,1650	1,66	2,038	3,39	2,470	0,47
Seddiner See	26,82	0,1090	3,04	2,220	6,72	4,913	1,43
Wusterwitzer See	27,69	0,1091	3,38	1,713	5,79	4,240	1,23
Gördensee	8,56	0,0317	1,26	0,408	0,53	0,400	0,40
Plessower See	14,40	0,0661	6,46	3,221	20,80	16,330	7,83
Kleißener See	3,90	0,0183	2,48	0,506	1,25	0,930	1,61
Bückwitzer See	50,80	0,2630	2,12	0,534	1,13	0,843	0,10

Tabelle 4: Korrelationen zwischen den relativen Zunahmen der Absenkungen A und den Einflussgrößen.

	AE	MQ	T _{mit}	A _{see}	V _{see}	VOL _{bew}	β
A _{max}	-0,24	-0,39	0,27	0,47	0,32	0,30	0,54
A ₁₀	-0,07	-0,29	0,19	0,52	0,31	0,29	0,52
A ₂₀	-0,07	-0,27	0,13	0,44	0,24	0,22	0,50
A ₅₀	0,24	0,22	-0,22	0,10	-0,08	-0,10	0,11

- ◆ 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 A_{see} und V_{see} 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 Jahr auch in das Folgejahr übertragen werden und dort erneut zu höheren Absenkungen führen: Die Korrelation ist positiv.

Die Absenkungen A_{50} 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 A_{50} erstellt. Für die drei anderen Absenkungen sind solche Modelle mit den oben genannten vier Einflussgrößen aufgestellt worden, die Regressionskoeffizienten sind in Tabelle 5 gegeben.

Tabelle 5: Regressionskoeffizienten für die relativen Zunahmen der Absenkungen.

rel. Zunahme Absenkung A	Mkk	Einflussgröße				Konstante
		MQ	A_{see}	V_{see}	β	
A_{max}	0,87	-0,5774	0,2517	-0,0527	0,0613	0,1041
A_{10}	0,96	-0,1187	0,1814	-0,0390	0,0438	-0,0425
A_{20}	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. Trotzdem kommt es teilweise zu nicht akzeptierbaren negativen Werten bei der Anwendung der Beziehungen auf die Statistik-Seen.

3 Ergebnisse der Simulationsrechnungen

3.1 Ergebnisse für die Modell-Seen

Bei einer zusammenfassenden Betrachtung der für die Modell-Seen erhaltenen Ergebnisse zeigt sich ein breites Spektrum der klimabedingt zunehmenden Absenkungen. Die Abbildungen 3 und 4 bestätigen auf eindringliche Weise diese Behauptung für den Teupitzer See, den Plessower See, den Seddiner See und den Kleßener See.

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 Szenario T2 noch quasi stationäre Zustände.

Ursachen für die quantitativen Unterschiede im Absenkungsverhalten sind vor allem

- ◆ verschiedene Entwicklungen des Niederschlags und der potenziellen Verdunstung im Untersuchungszeitraum und damit auch des Zuflusses zu den Seen,

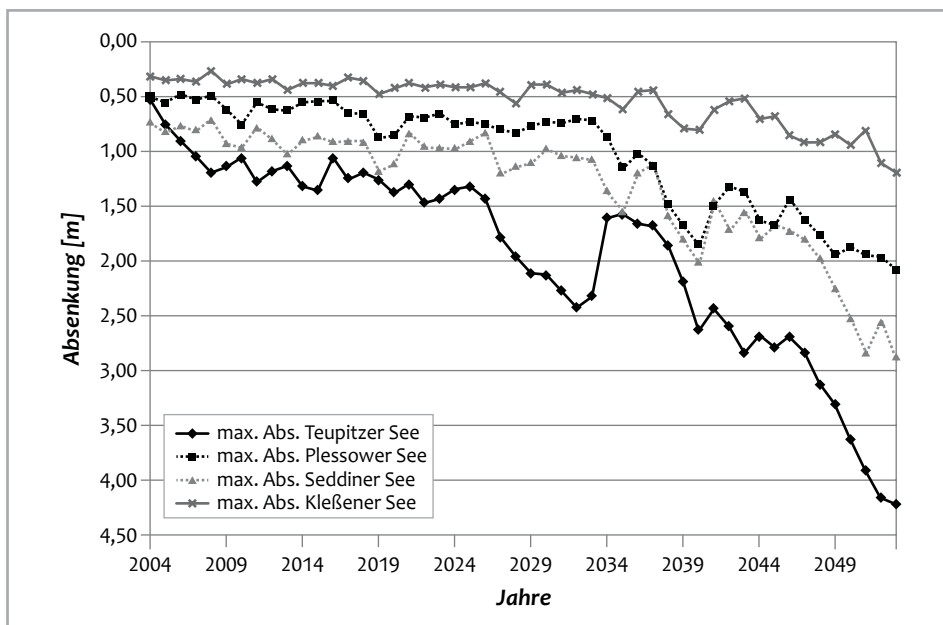


Abbildung 3: Maximale Absenkungen A_{max} von vier Seen, Szenario T2.

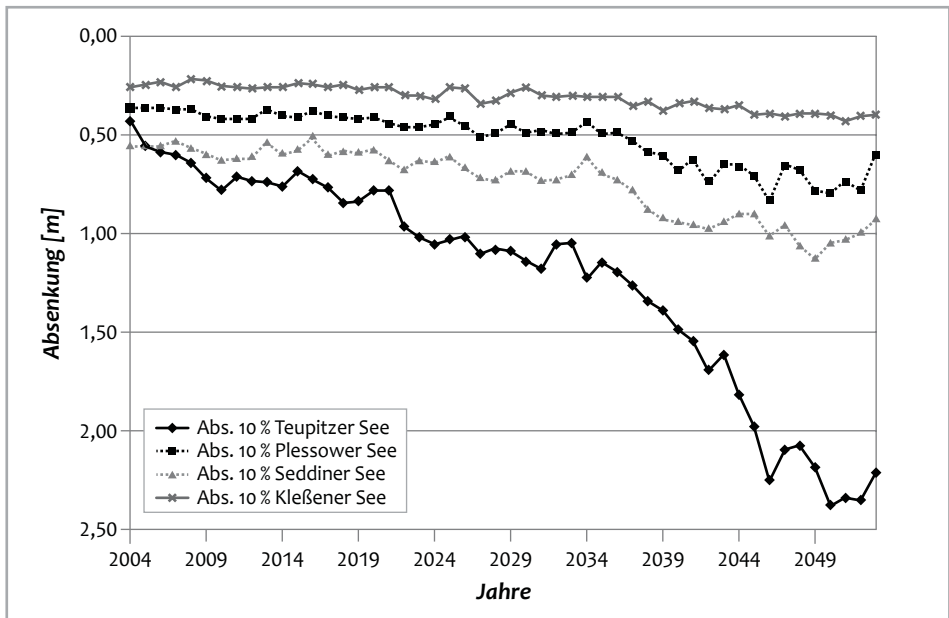


Abbildung 4: Absenkungen A_{10} mit zehn Prozent ÜWk. von vier Seen, Szenario T2.

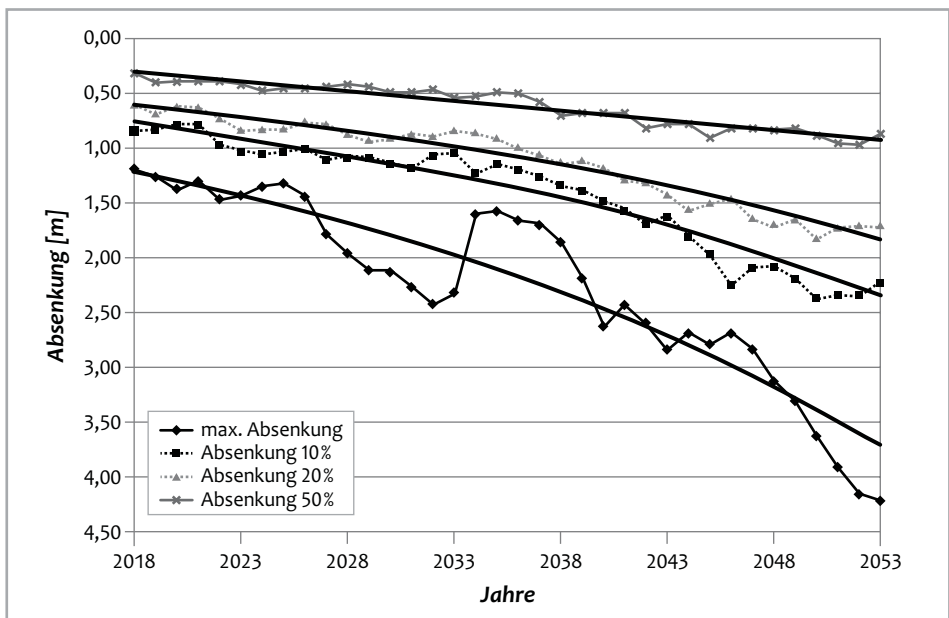


Abbildung 5: Klimabedingte Wasserstandsabsenkungen am Beispiel des Teupitzer Sees, Szenario T2.

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

Name des Sees	maximale Absenkungen		Absenkungen 10% ÜWk		Absenkungen 20% ÜWk		Absenkungen 50% ÜWk	
	2018	2053	2018	2053	2018	2053	2018	2053
Groß Leuthener See	68	124	55	82	49	74	36	56
Teupitzer See	156	420	70	206	51	167	27	84
Ziestsee	120	370	84	234	63	183	31	91
Rangsdorfer See	35	72	24	44	20	36	12	23
Seddiner See	98	272	56	105	48	82	35	56
Wusterwitzer See	33	66	23	36	19	30	11	20
Gördensee	37	62	32	38	27	37	17	29
Plessower See	61	208	46	75	36	58	25	40
Kleßener See	36	103	26	42	23	34	15	24
Bückwitzer See	60	80	54	60	51	63	25	57

Tabelle 7: Zunahme der Absenkungen im Zeitraum 2018–2053.

Name des Sees	Maximale Absenkung		Absenkung 10% ÜWk		Absenkung 20% ÜWk	
	absolut [cm]	relativ zu T _{mit}	absolut [cm]	relativ zu T _{mit}	absolut [cm]	relativ zu T _{mit}
Groß Leuthener See	56	0,235	27	0,113	25	0,105
Teupitzer See	250	0,714	150	0,429	120	0,343
Ziestsee	264	0,617	136	0,318	116	0,271
Rangsdorfer See	37	0,223	20	0,120	16	0,096
Seddiner See	174	0,572	49	0,161	34	0,112
Wusterwitzer See	33	0,098	13	0,038	11	0,032
Gördensee	25	0,198	6	0,048	10	0,079
Plessower See	147	0,228	29	0,045	22	0,034
Kleßener See	67	0,270	16	0,065	11	0,044
Bückwitzer See	20	0,094	6	0,028	12	0,057
Mittel		0,325		0,136		0,117

- ◆ 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 enthält die maximalen Absenkungen A_{\max} sowie die Absenkungen mit 10, 20 und 50 Prozent Überschreitungswahrscheinlichkeit (ÜWk) in den Jahren 2018 und 2053.
- ◆ In Tabelle 7 wurden die absoluten Zunahmen 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 vereinfachten Berechnung der Statistik-Seen (Abschnitt 2.5) benutzt worden.

Bei der Ermittlung der genannten Größen ist zur Vermeidung zufälliger Werte wie in Abbildung 5 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 wurden.

Aus den Tabellen 6 und 7 können für die Modell-Seen die zu erwartenden Absenkungen entnommen werden bei andauernder Gültigkeit

- ◆ der vorausgesetzten Erhöhung der Lufttemperaturen um 2 K bis zum Jahr 2053 und der darauf basierenden Veränderung des Zuflussregimes zu den Seen,
- ◆ der festgesetzten Seenkonfiguration,
- ◆ der ebenso festgelegten Seenbewirtschaftung.

Es darf hier eingefügt werden, dass Änderungen der bewirtschafteten Lamelle LAM und der planmäßigen Abgabe QL um 10–20 Prozent keine gravierenden Folgen auf die in den Tabellen 6 und 7 aufgeführten Werte hat. Die auf die Absenkungen wirkenden, dominierenden Einflüsse sind offensichtlich die sich ändernden Klimagrößen.

3.2 Anwendung der Multiregressionsmodelle auf die Statistik-Seen

Mithilfe der Regressionsbeziehungen aus Tabelle 5 und den Werten der vier Einflussgrößen für die zwölf Statistik-Seen konnten die relativen Absenkungszunahmen A_{\max} , A_{10} und A_{20} auch für diese Seen berechnet werden. Bei der Bereitstel-

lung der Werte der Einflussgrößen wurde wieder auf die vom IAG übergebenen Daten zurückgegriffen. Die Tabelle 8 enthält die ermittelten Ergebnisse.

Die extrem hohen und niedrigen Absenkungsanstiege können nach Abschnitt 2.5 eine Folge der Unzulänglichkeiten der Regressionsbeziehungen sein. Sind sie bei einem bestimmten See als unrealistisch einzuschätzen, sollten sie gegebenenfalls durch die in Tabelle 7 gegebenen 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 entgegengesetzten Fall oder wenn der See nie nennenswert abgesenkt war, dürfen die angegebenen absoluten Absenkungsanstiege näherungsweise als die zu erwartenden Absenkungen angenommen werden.

Tabelle 8: Zunahme der Absenkungen der Statistik-Seen im Zeitraum 2018–2053.

Name des Sees	T_{mit} [cm]	maximale Absenkung		Absenkung 10% ÜWk		Absenkung 20% ÜWk	
		relativ	absolut [cm]	relativ	absolut [cm]	relativ	absolut [cm]
Großer Kossenblatter 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
Güterfelder Haussee	162	0,227	37	0,046	7	0,050	8
Riebener See	118	0,193	23	0,027	3	0,034	4
Groß Lienewitzer 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 sind gesetzt worden.

4 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen an den zehn Brandenburger Flachseen (Modell-Seen) ergaben allgemeingültige Aussagen hinsichtlich des Verhaltens der Seen unter den Bedingungen des Szenarios T₂ 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 Meter im Jahr 2018 bis auf 4,2 Meter im Jahr 2053 an, diejenigen mit zehn Prozent ÜWk von 0,4 Meter bis auf 2,4 Meter. Die dadurch frei gewordenen wasserfreien See­flächen betragen maximal über 40 Prozent 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 wesentlichsten Ergebnisse sind in Tabelle 6 zu finden, wo für die Jahre 2018 und 2053 die maximalen Seeabsenkungen sowie die Absenkungen mit zehn, 20 und 50 Prozent ÜWk eingetragen worden sind. Diese Angaben bildeten die Basis bei der Aufstellung von Multiregressionsmodellen, mit deren Hilfe das Verhalten von weiteren zwölf Statistik-Seen untersucht wurde. Die in Tabelle 8 verzeichneten Zunahmen der Absenkungen von 2018 bis 2053 sind weniger zuverlässig, da die wichtigste Einflussgröße auf diese Absenkungen, nämlich die Veränderung der Klimabilanz (Niederschlag – Verdunstung), nicht zur Verfügung stand.

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 (Tabelle 7). Sie betragen rund 32, 14 bzw. zwölf Prozent der mittleren Seetiefe für die maximalen Absenkungen bzw. für die Absenkungen mit zehn oder 20 Prozent Überschreitungswahrscheinlichkeit.

Die hier dargestellten Untersuchungen basieren auf einem ausgewählten Klimaszenario (T₂). Darüber hinaus musste eine Vielzahl von Annahmen bezüglich der verwendeten Daten der Seen getroffen werden. Dies relativiert die Ergebnisse. Dennoch erhärten die Ergebnisse die eingangs getroffene Aussage einer zukünftig klimabedingt zu erwartenden negativen Entwicklung des Wasserhaushalts der

Brandenburger Flachseen, sie zeigen sich in tieferen Absenkungen der Seen und Abnahmen der Seenflächen. Beides hat Konsequenzen hinsichtlich der Nutzung der Seen, vor allem aber auch hinsichtlich der Entwicklung der Gewässerbeschaffenheit.

In den kommenden Jahrzehnten werden seenspezifische Managementkonzepte zu entwickeln und umzusetzen sein, um den zu erwartenden negativen Trend zu mindern – oder alternativ nicht beherrschbare Seen »aufzugeben«. Als potenzielle Maßnahmen für ein nachhaltiges quantitatives Seenmanagement sind zu nennen:

- ◆ Für Seen mit gesteuertem Auslass eine Optimierung der jährlichen / überjährigen Bewirtschaftung zugunsten des Wasserrückhalts.
- ◆ Für grundwasserbeeinflusste Seen eine Verringerung der Grundwasserentnahmen (z. B. für die Bewässerung von Spargel) im Einzugsgebiet.
- ◆ Wasserüberleitung aus Fremdgebieten mit Wasserüberschuss.
- ◆ Rückführung gereinigter Abwässer.

Alle diese Maßnahmen sind konfliktträchtig – sowohl bezüglich Stakeholdern als auch wasserrechtlich. Es ist zu befürchten, dass solche Maßnahmen erst dann ergriffen werden, wenn der »Leidensdruck« entsprechend groß wird. Die zuständigen Behörden und Einrichtungen sind aber gut beraten, langfristig entsprechende Vorbereitungen zu treffen.

Danksagungen

Wir möchten uns insbesondere bei den Mitarbeitern des Landesamts für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg und des Instituts für Angewandte Gewässerökologie GmbH für die Bereitstellung der Grundlagendaten bedanken. Dasselbe gilt für das Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, das innerhalb des Verbundprojektes die meteorologischen Daten bereitstellte. Die Studien wären nicht möglich gewesen ohne die Finanzierung des Verbundprojektes Innovationsnetzwerk Klimaanpassung Brandenburg Berlin (INKA BB) durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (FKZ: 01LR0803C).

Literatur

- DHI-WASY (2008): Sanierung und Restauration der Seddiner Seenkette – Wasserbilanz. Unveröffentlichtes Gutachten, DHI-WASY/Institut für angewandte Gewässerökologie.
- Glos, E. (1984): Die Einzugsgebietsmodellversion EGMOD für Durchflussberechnungen in Dekaden- bis Monatsschritten. Teilbericht zu Lauterbach, D. u. a.: ASU Spree, 1. Ausbaustufe. Forschungsbericht, Institut für Wasserwirtschaft Berlin.
- Hupfer, M., Nixdorf, B. (2011): Zustand und Entwicklung von Seen in Berlin und Brandenburg. Materialien der Interdisziplinären Arbeitsgruppen Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Diskussionspapier 11, 01/2011, 71 S.
- IPCC (2000): Summary for Policymakers – Emissions Scenarios: A Special Report of IPCC Working Group III. IPCC.
- MPI (2004): The atmospheric general circulation model ECHAM5 – Part 1 – Report No. 349. Hamburg: Max-Planck-Institut für Meteorologie.
- Werner, P. C. (2014): Klimawandel in der Region Berlin-Brandenburg. In: Kaden, S., Dietrich, O., Theobald, S. (Hrsg.): Wassermanagement im Klimawandel – Möglichkeiten und Grenzen von Anpassungsmaßnahmen. München: oekom verlag, im Erscheinen.