Verdunstung von Bergbaufolgeseen

Entwicklung eines Modellkonzepts zur Quantifizierung

1 Einführung

Die genaue Quantifizierung der Verdunstung über den Wasserflächen der bereits fertiggestellten, in Flutung befindlichen bzw. geplanten Bergbaufolgeseen ist essentiell für die Bewirtschaftung der verfügbaren bzw. durch Überleitungen bereitgestellten Wasserressourcen in den Bergbaufolgelandschaften des Lausitzer Reviers (LR) und des Mitteldeutschen Reviers (MR). Die künstlich geschaffenen, teilweise sehr großen Gewässer mit Flächen von mehreren hundert Hektar beeinflussen nicht nur während der Flutungsphase den regionalen und bisweilen auch überregionalen Wasserhaushalt. Sie haben auch während ihrer weiteren dauerhaften Existenz Einfluss auf das lokale und mesoskalige hydrologische Regime. Dieser Einfluss ergibt sich z. B. durch die Gestaltung der Bergbaufolgeseen als Speicherbecken und die Nutzung des zwischengespeicherten Wassers zur Niedrigwasseraufhöhung in den Vorflutern, wie sie während der Trockenzeiten der letzten Jahre immer bedeutsamer geworden ist. In beiden Braunkohlerevieren beträgt der Niederschlag im langjährigen Mittel (1961–2023) nur knapp 600 Millimeter pro Jahr und liegt damit im unteren Bereich der sachsenweiten Niederschlagssummen. Gleichzeitig ist die potentielle Verdunstung mit über 600 Millimetern pro Jahr im selben Zeitraum sehr hoch, woraus sich im Mittel eine negative klimatische Wasserbilanz ergibt. Dies untersetzt die Notwendigkeit einer nachhaltigen Bewirtschaftung der vorhandenen Wasserressourcen.

2 Untersuchungsgegenstand

Bergbaufolgeseen sind Standgewässer, die durch eine spezifische, montan geprägte Genese entstanden sind. Im engeren Kontext dieses Projektes werden mit dem Begriff «Bergbaufolgeseen» kleine und große Seen bezeichnet, die sich auf den Flächen ehemaliger Braunkohletagebaue befinden. Diese Seen sind zumeist gezielt und hydrologisch geplant, durch Flutung mit Oberflächenwasser bzw. durch den Wiederanstieg von Grundwasser in den durch den Tagebau erzeugten Hohlformen (Tagebaurestlöcher) nach der Einstellung der bergbaulichen Sümpfungsmaßnahmen entstanden. Meist unterliegen sie einer gezielten wasserwirtschaftlichen Steuerung und Kontrolle.



Abbildung 1: Bärwalder See mit Blick auf das Kraftwerk Boxberg im Lausitzer Revier (Foto: LfULG/Kathleen Lünich, 2026)

Bergbaufolgeseen unterscheiden sich von natürlichen Gewässern insbesondere durch ihre vergleichsweise kurze Entstehungsgeschichte. Entsprechend ist die biologische und ökologische Sukzession der Seen einschließlich der Entwicklung der Ufervegetation aber auch des Umlandes häufig nicht abgeschlossen und befindet sich in einer dynamischen Entwicklung. Die hydrochemischen Eigenschaften der Bergbaufolgeseen sind oft direkt von der vorherigen bergbaulichen Nutzung der Fläche geprägt. Ebenso weisen die mit dem See verbundenen Grund– und Oberflächengewässer typischerweise eine montan geprägte Beeinflussung auf.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Seeflächen im Lausitzer Revier und im Mitteldeutschen Revier nach Flutungsende.

Tabelle 1: Seeflächen im Endstand im Lausitzer Revier (LR) und im Mitteldeutschen Revier (MR) (LMBV, 2026; MIBRAG, 2021; Uhlmann et al., 2023)

Revier	Seeflächen im Endstand
LR	ca. 13.000 ha Seen der LMBV[1]; zzgl. ca. 8.400 ha durch die Flutung der Tagebaue der LEAG
MR	ca. 11.000 ha Seen der LMBV[2]; zzgl. ca. 3.700 ha durch die Flutung der Tagebaue der MIBRAG

3 Veranlassung der Studie

Die Studie baut auf Messungen und Analysen sowie physikalisch basierten theoretischen Überlegungen, die im Rahmen der DFG-geförderten Forschungsprojekte »TREGATA« und »MEDIWA« durchgeführt wurden sowie auf umfangreichen Recherchearbeiten auf. Deren Ergebnisse zeigen, dass die gegenwärtig gebräuchlichen Ansätze und Modelle zur Abschätzung und Quantifizierung der über Wasserflächen auftretenden Verdunstungsverluste nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen führen. Tendenziell unterschätzen diese Ansätze massiv die Verdunstung kleiner Wasserflächen. Im Gegensatz dazu führt ihre Anwendung auf große Gewässer, wie den in diesem Projekt adressierten Bergbaufolgeseen, zu unrealistisch hohen Approximationen. Ein besonderer Aspekt ist dabei, dass die bislang genutzten und von Fachgremien vorgeschlagenen Modellansätze die energetische und aerodynamische Interaktion der Wasserfläche mit umgebenden terrestrischen und semiterrestrischen Flächen nur unzureichend berücksichtigen und daher wichtige verdunstungssteuernde physikalische Prozesse vernachlässigt werden.

Die vorhandenen Berechnungsansätze eignen sich nicht, um die räumliche Variation und Heterogenität der Verdunstung über den Bergbaufolgeseen zu beschreiben und hierbei eine Unterscheidung des Verdunstungsanteils der pflanzenbewachsenen Uferzone (Litoral) und der Freiwasserzone (Pelagial) vorzunehmen. Effekte, die aus landschaftsbaulicher Umgestaltung, Veränderungen der Gewässergeometrie und –struktur sowie aus Eingriffen in die Ufervegetation resultieren, können bislang nicht in plausibler und belastbarer Weise abgeschätzt und entsprechend planerisch beachtet werden.

4 Fragestellung

Ziel war die Entwicklung eines Konzepts zur raumdiskreten Modellierung der Verdunstung von Bergbaufolgeseen, das sowohl aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse als auch praktische Aspekte im Sinne von Datenverfügbarkeit be-

[1] bezogen auf den mittleren Endstand

[2] bezogen auf den unteren Endwasserstand

rücksichtigt sowie den Anforderungen und Bedürfnissen der wasserwirtschaftlichen Planung Rechnung trägt.

Für die Bearbeitung der Fragestellung wurde durch das LfULG das Institut für Angewandte Meteorologie und Klimatologie (iamk GmbH) beauftragt, das die Studie gemeinsam mit der TU Bergakademie Freiberg sowie mit der TU Dresden bearbeitete. Neben dem LfULG wurde die Durchführung außerdem durch die LMBV, LEAG und LTV fachlich begleitet.

5 Methodik

Im Rahmen der Studie wurden aufbauend auf einer umfassenden Literatur– und Methodenübersicht bestehende Modellansätze zur Bestimmung der Verdunstung über dem Pelagial sowie für das Litoral systematisch aufgearbeitet und bewertet.

Die am besten geeigneten Ansätze wurden in einem Modellkonzept zusammengeführt, welches an einem Pilotgewässer angewandt und getestet werden kann. Für das Pilotgewässer wurde ein hydro–meteorologisches Messkonzept entwickelt. Dieses zielt darauf ab, die Eingangsgrößen für die Berechnung der Gewässerverdunstung zu ermitteln und die Gewässerverdunstung für die Modellkalibrierung und –validierung messtechnisch zu erfassen.

Für die Wahl des Pilotgewässers wurden insgesamt 21 Bergbaufolgeseen bewertet (13 im MR und 8 im LR). Es wurden Kriterien erarbeitet und zur Bewertung herangezogen, die potentielle Einflussfaktoren auf die Gewässerverdunstung und die Zugänglichkeit für die Errichtung und den Betrieb von Messeinrichtungen umfassen. Mit Hilfe eines Punktesystems wurde eine Bewertung der Seen vorgenommen.

Die Umsetzung des Mess– und Modellkonzeptes waren nicht Gegenstand des Projektes.

Bearbeitungsschritte im Projekt

- Grundlagenbetrachtung (Prozessgrundlagen, raumdiskrete Modellierung, modelltechnische Ansätze)
- Entwicklung des Modellkonzeptes für die gewählte Vorzugsvariante, Erstellung des Messkonzeptes
- Übertragung auf ein Pilotgewässer

6 Ergebnisse

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die verdunstungssteuernden physikalischen Prozesse über Bergbaufolgeseen völlig identisch sind mit den physikalischen Prozessen, die über natürlichen Gewässern auftreten.

Die umfangreichen Recherchearbeiten zeigten, dass sich die Komplexität der Verdunstung über Bergbaufolgeseen aus der vielfältigen Kopplung von Strahlungs–, Energie– und Wasserbilanz auf verschiedenen Raum– und Zeitskalen sowie aus den spezifischen Bedingungen der Seen und ihrer umgebenden Landschaften ergibt. Hinzu kommen atmosphärische Randeffekte, wie die Wirkung von Advektion, die Stabilität atmosphärischer Schichten, Rauigkeitssprünge am Gewässerrand ebenso wie die Rauigkeitsänderung durch Windwellen und der Einfluss der Topographie der Umgebung. Hervorzuheben ist zudem die Rolle des Windes, der Einfluss auf die Durchmischung des Gewässers und den Seegang hat. Ebenso beeinflusst er die Stärke der horizontalen Advektion, die Turbulenz in der Atmosphäre, deren Durchmischung sowie den Austausch mit höheren Luftschichten.

Insgesamt bewirken Wärmespeichereffekte, dass die Gewässerverdunstung im Tages– und Jahresverlauf gegenüber Landflächen zeitlich verzögert und in ihrem Ausmaß gedämpft ist. Der sensible Wärmestrom kann als zusätzliche Energiequelle für die Verdunstung fungieren,

wenn das Gewässer kälter ist als seine Umgebung.

Für eine raumdiskrete Modellierung der Seeverdunstung ist die Unterscheidung von Modellkonzepten für die freie Wasserfläche und für das Litoral erforderlich.

Bulk-Ansätze, welche auch als Stoff– oder Massen-Transfermodelle bezeichnet werden, sind nach Einschätzung der Autoren die einzigen Ansätze, die sich tatsächlich zur Modellierung der Verdunstung über **offenen, ausgedehnten Wasserflächen** eignen (Tabelle 2). Der Ansatz nach Dalton lässt sich dieser Gruppe zuordnen und wird häufig angewandt, um Tageswerte der Verdunstung zu erhalten.

Die zu entwickelnde Methode zur Ermittlung der Verdunstung der **Vegetationsbestände** soll sowohl die Bestimmung für die Makrophytenbestände des Litorals als auch der terrestrischen Ufervegetation ermöglichen. Dies ist sowohl mit den Ansätzen von Penman-Monteith als auch von Shuttleworth und Wallace möglich.

Für die Bestimmung einer realistischen Verdunstung über beiden räumlichen Bereichen ist eine Anpassung der Parametrisierung der genannten Verdunstungsansätze notwendig. Hierbei sind Einflüsse am Gewässerrand sowie die aerodynamische Kopplung mit der Gewässerumgebung zu beachten.

Tabelle 2: Geeignete Modellansätze zur Verdunstungsbestimmung für die offene Wasserfläche und das Litoral

Räumlicher Bereich	Ansatz	Beschreibung
offene Wasserfläche	Bulk-Ansätze (inklusive Dalton)	Berechnung der Verdunstung als Funktion der Windgeschwindigkeit und des Wasserdampfdefizits, als Differenz zwischen Sättigungsdampfdruck bei Wasseroberflächentemperatur und tatsächlichem Dampfdruck der Luft
Litoral	Penman-Monteith	Berechnung der Verdunstung über eine Synthese aus Energiebilanz und Massentransfer für einen einschichtigen Bestand
	Shuttleworth und Wallace	Erweiterung von Penman-Monteith für lichte Bestände

Der Scheibe-See bei Hoyerswerda (Abbildung 2) wurde anhand der Kriterien-gestützten Bewertung (siehe Kapitel 5) als geeignetes Pilotgewässer für die praktische Erprobung des im Folgenden beschriebenen Modellkonzeptes identifiziert.



Abbildung 2: Scheibe-See im Lausitzer Revier (Foto: LMBV/Steffen Rasche, 2025)

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Konzept basiert auf einer modularen Modellkette, die verschiedene Methoden miteinander kombiniert.

Zusammenfassung der Modellkette

1. integrale Feldmessungen (z. B. Scintillometer bzw. EC-System) an einem Pilotgewässer
2. physikalisch-numerisches 2D-Querschnittsmodell für das Jahr; ggf. weitere Querschnitte, verschiedene meteorologische Bedingungen; Nutzung des Vegetations-Atmosphärenmodells HIRVAC-2D
3. Anwendung des kalibrierten 2D-Modells auf unbeobachtete Querschnitte (und Seen)
4. maschinelles Lernmodell (Gradient-Boosting), das aus den modellierten und gemessenen Ergebnissen eine übertragbare, räumlich hochaufgelöste Schätzung der Verdunstung generiert

Den Ausgangspunkt bildet die messtechnische Erfassung der Verdunstung mittels Eddy-Kovarianz-Messsystem (EC) oder Scintillometer-Messungen sowie das flächenrepräsentative Monitoring der verdunstungssteuernden meteorologischen und limno-physikalischen Umweltgrößen im Pelagialbereich, in der Litoralzone sowie im Gewässerumfeld.

Diese Messdaten dienen dann als Grundlage für eine physikalisch-numerische 2D-Modellierung mit dem zweidimensionalen Vegetations-Atmosphärenmodell HIRVAC-2D (Abbildung 3).

Mithilfe von HIRVAC-2D werden für eine repräsentative Anzahl von Querschnitten und Witterungszuständen Simulationen durchgeführt, um den Effekt der Advektion, welche horizontale Wärme–/ Feuchte-Transportprozesse beschreibt, auf die Verdunstung zu berücksichtigen. Dabei hat auch die Simulation des turbulenten Austauschs der Umgebung mit dem Gewässer infolge sprunghafter Änderung der Oberflächenrauigkeit einen Einfluss auf die Gewässerverdunstung.

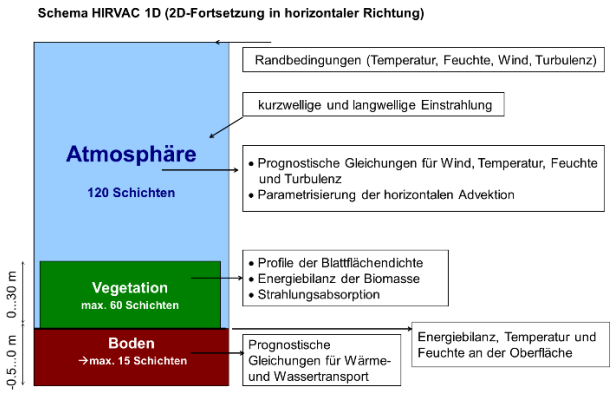


Abbildung 3: Struktur des Modells HIRVAC-1D. In HIRVAC-2D setzt sich das Schema in Horizontalrichtung für jeden Gitterpunkt fort (Körner et al., 2026)

Durch Inklusion von Informationen zur Landnutzung, zu Vegetationstypen (Wald, Schilf, Busch, Gras, u. a.) sowie zu Wasseroberflächentemperatur und Oberflächenrauigkeit über Wasser, können mit HIRVAC-2D realistische zwei-dimensionale meteorologische Felder als Input für die Verdunstungsmodelle über dem Gewässer (Tabelle 2) erzeugt werden.

In Abbildung 4 wird exemplarisch dargestellt, wie mittels HIRVAC-2D für einen Satz variabler meteorologischer Anfangsbedingungen Längs-Höhen (x-z)-Querschnitte für repräsentative Transekte am Scheibe-See simuliert wurden. Im Beispiel wird der Horizontalwind entlang des Transektes dargestellt.

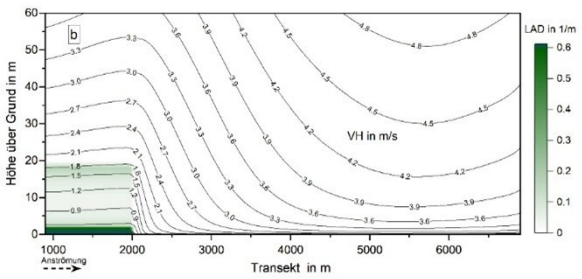


Abbildung 4: HIRVAC-2D Beispielsimulation für den Horizontalwind entlang des Transektes (West–Ost) über den Scheibe-See. Darstellung mit der Software Origin Pro (Körner et al., 2026)

Durch die räumliche Auflösung im Meterbereich (horizontal) bzw. Dezimeterbereich (vertikal) können die Landnutzungsinformationen im Randbereich des Gewässers räumlich detailliert aufgelöst werden. Im Modellkonzept werden die Modellergebnisse in Stundenwerten ausgegeben, um bei Jahresanalysen auch typische Tagesgänge abbilden zu können.

Abschließend kommt ein maschinelles Lernverfahren, konkret Gradient Boosting, zum Einsatz, um die gewonnenen Erkenntnisse aus den HIRVAC-2D Simulationen räumlich und zeitlich zu skalieren und auf unbeobachtete Bereiche zu übertragen. Die Modellmatrix umfasst hierbei ein breites Spektrum an Prädiktoren. Neben hochaufgelösten meteorologischen Zeitreihen (u. a. Strahlung, Wind, Feuchte) werden topographische Merkmale aus Digitalen Gelände- und Oberflächenmodellen (DGM/DOM) extrahiert. Ergänzt werden diese Daten durch spezifische Standortmerkmale, zu denen unter anderem die Entfernung zum Ufer, die Wassertiefe, die Rauhigkeitslänge sowie das Uferprofil zählen. Auch die Landnutzung und Bodenbedeckung im Umfeld der Rasterzellen, beispielsweise Ackerflächen, urbane Räume oder Schilfbestände, spielen hierbei eine entscheidende Rolle. In diesem Zusammenhang sind Vegetationsindikatoren von besonderer Bedeutung: Mithilfe von Fernerkundungsprodukten lassen sich die Fläche sowie die Bedeckungsdichte von Schilfgürteln ableiten und als Prädiktoren integrieren.

Ein zentraler Aspekt ist die Validierungsstrategie, welche die räumliche und zeitliche Autokorrelation der Daten berücksichtigt.

In der finalen Phase der Modellkette erfolgt die Anwendung des Modells auf ein 10x10 Meter Berechnungsraster der gesamten Seefläche. Um die mit stochastischen Einzelschätzungen verbundene Unsicherheit zu minimieren, sieht das Konzept eine räumliche und zeitliche Aggregation der Ergebnisse vor.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die ausgearbeitete Modellkette ist prinzipiell auf alle Bergbaufolgeseen im Lausitzer und Mitteldeutschen Revier übertragbar, wobei eine standortspezifische Validierung und gegebenenfalls eine Anpassung der Parametrisierungen erforderlich bleibt.

Wir empfehlen die Umsetzung des Gesamtkonzepts an einem Pilotgewässer. Die Ergebnisse aus den Intensivmessungen und der Modellierung liefern die Datenbasis für die Verallgemeinerung und Übertragung der Gewässerverdunstung auf Bergbaufolgeseen mit ähnlicher Umgebungsstruktur wie das Pilotgewässer, basierend auf den Machine Learning Ansätzen. Für die Übertragung der Verdunstung auf Bergbaufolgeseen im Zielgebiet, mit davon deutlich abweichender Uferform und Umgebungscharakteristik, ist gegebenenfalls die Anwendung des Modell– und Messkonzepts auf weitere repräsentative Pilotgewässer erforderlich.

Fazit

Zusammenfassend leistet das Konzept einen wesentlichen Beitrag zur Optimierung der Wasserhaushaltsbilanzierung in den Bergbaufolgeregionen und bietet eine fundierte Basis, um den Herausforderungen des Klima– und Strukturwandels zu begegnen.

Literatur

BÖHME, B. STILLER, F., KÖRNER, P.; SPANK, U.; GOLDBERG, V.; MODEROW, U. (2026): Konzeptentwicklung zur modelltechnischen Bestimmung der raumdiskreten Verdunstung von Bergbaufolgeseen unter Berücksichtigung des Umlandes. Wasserbauliche Mitteilungen, Heft 75. Dresdner Wasserbaukolloquium 2026: Wasserbau zwischen Technik und Natur: Multifunktionale Lösungen für die Zukunft.

KÖRNER, P.; MODEROW, U.; SPANK, U.; GOLDBERG, V. (2026): Konzeptentwicklung zur modelltechnischen Bestimmung der raumdiskreten Verdunstung von Bergbaufolgeseen unter Berücksichtigung des Umlandes. Iamk GmbH, TU Bergakademie Freiberg, TU Dresden, im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie. Schriftenreihe des LfULG, Heft 9/2026. Dresden: LfULG. https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/51055

LMBV (2026): Wasserwirtschaftlicher Jahresbericht der LMBV für den Zeitraum 01.01.2025–31.12.2025. Senftenberg: Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft.

MIBRAG (2021). Revierplanung der MIBRAG GmbH (unveröffentlicht). MIBRAG.

UHLMANN, W., ZIMMERMANN, K., KALTOFEN, M., GERSTGRASER, M., GROSSER, F., & SCHÜTZEL, C. (2023). Wasserwirtschaftliche Folgen des Braunkohleausstiegs in der Lausitz. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Autor: Beate Böhme, Felix Stiller; Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
Kontakt: Abteilung 4; Referat 45; Telefon: 0351 8928 4500; E-Mail: kristina.rieth@lfulg.sachsen.de; Redaktionsschluss: 28.10.2026: www.lfulg.sachsen.de

Hinweis: Die Inhalte dieses Fachbeitrags entstammen maßgeblich den Publikationen von Körner et al. (2026) sowie Böhme et al. (2026).