

Konzeptentwicklung zur modelltechnischen Bestimmung der raumdiskreten Verdunstung von Bergbaufolgeseen unter Berücksichtigung des Umlandes

B. Böhme, F. Stiller, P. Körner, U. Spank, V. Goldberg, U. Moderow

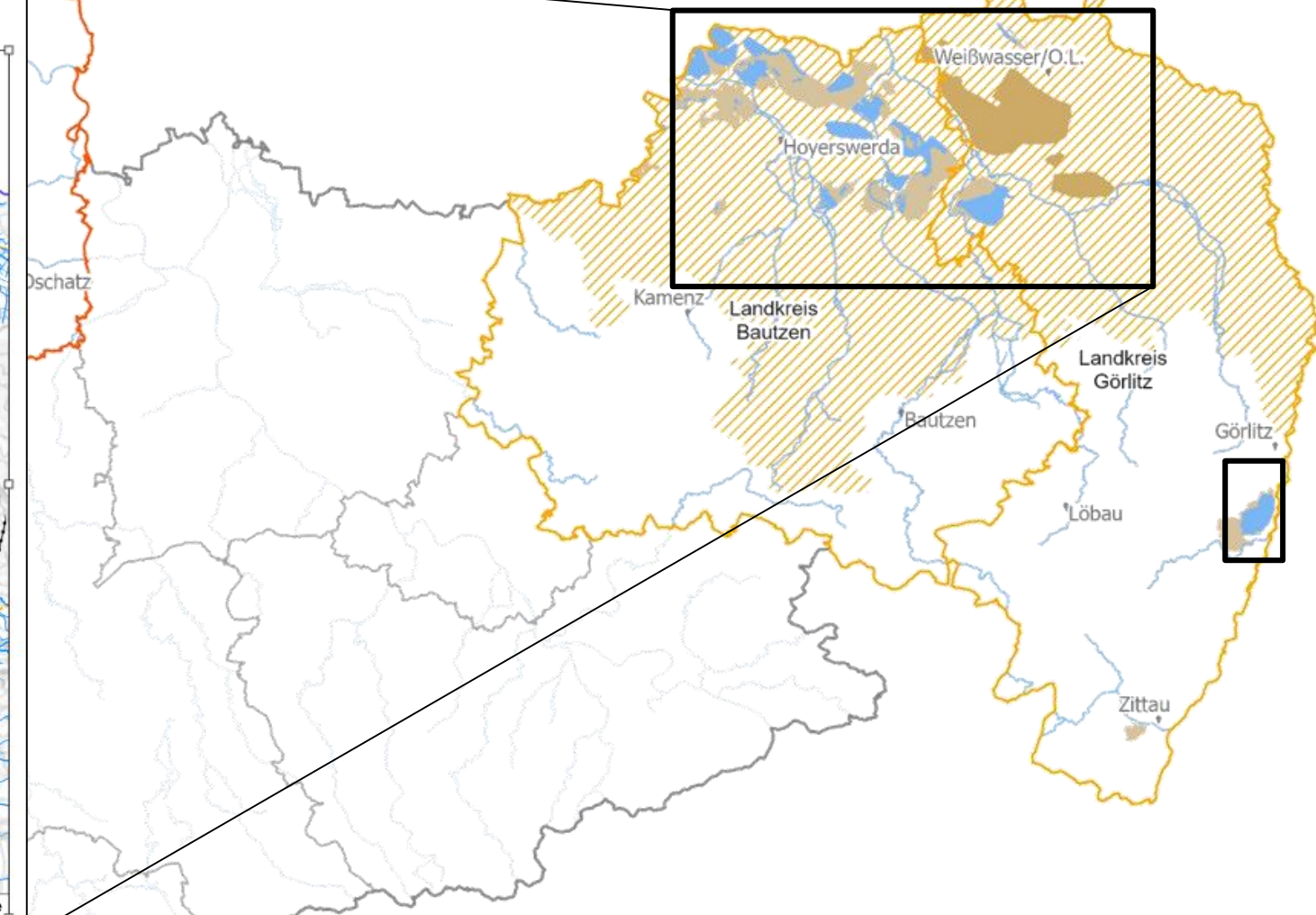
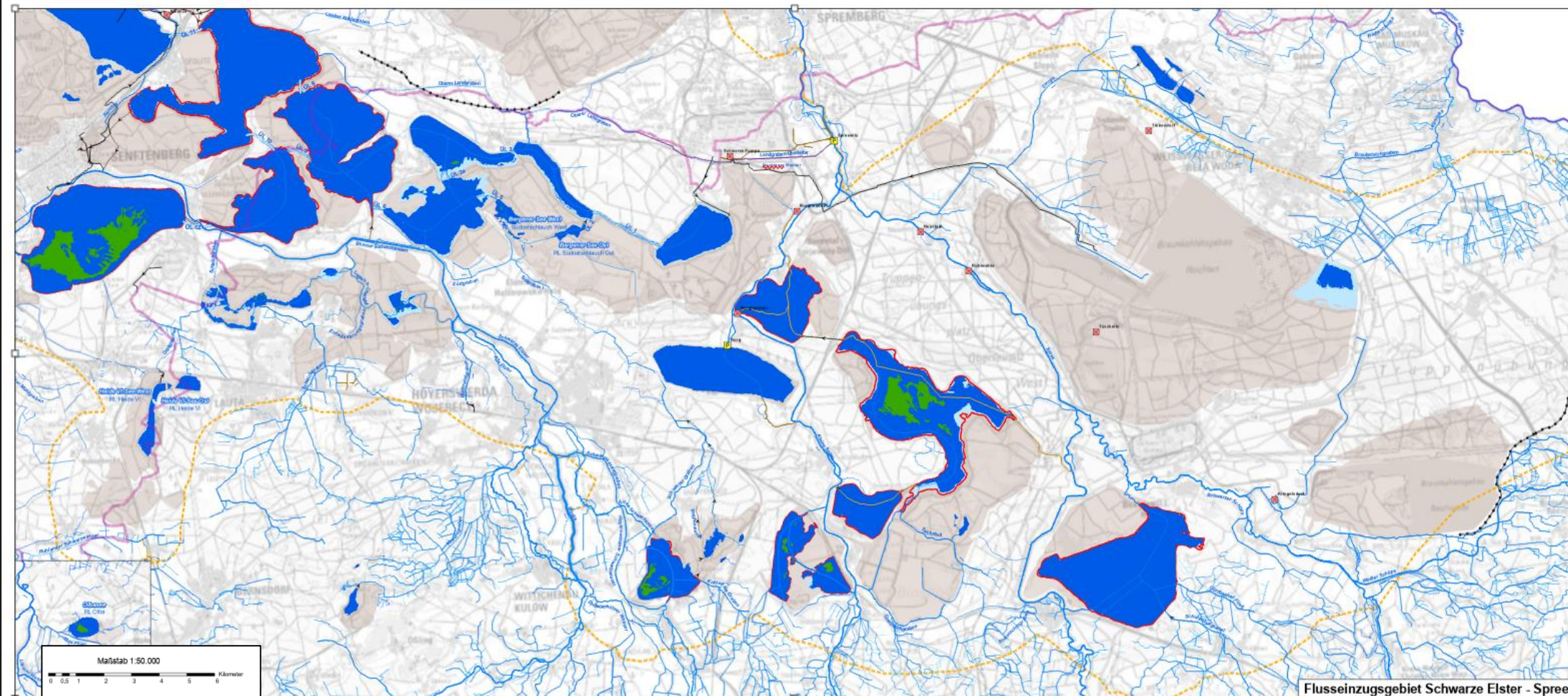


© LfULG

Bergbaufolgeseen im Lausitzer Revier

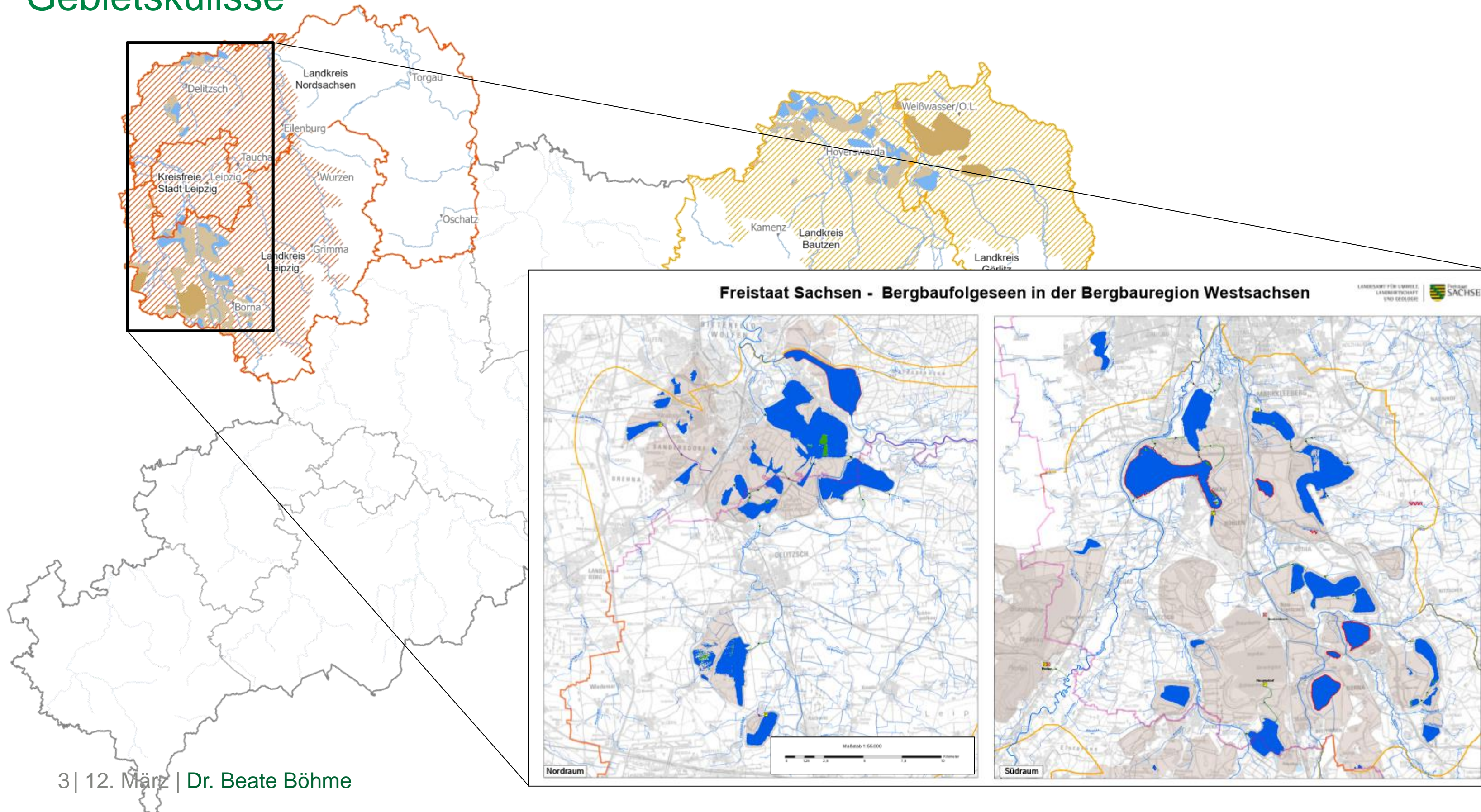
Gebietskulisse

Freistaat Sachsen - Bergbaufolgeseen in der Bergbauregion Ostsachsen



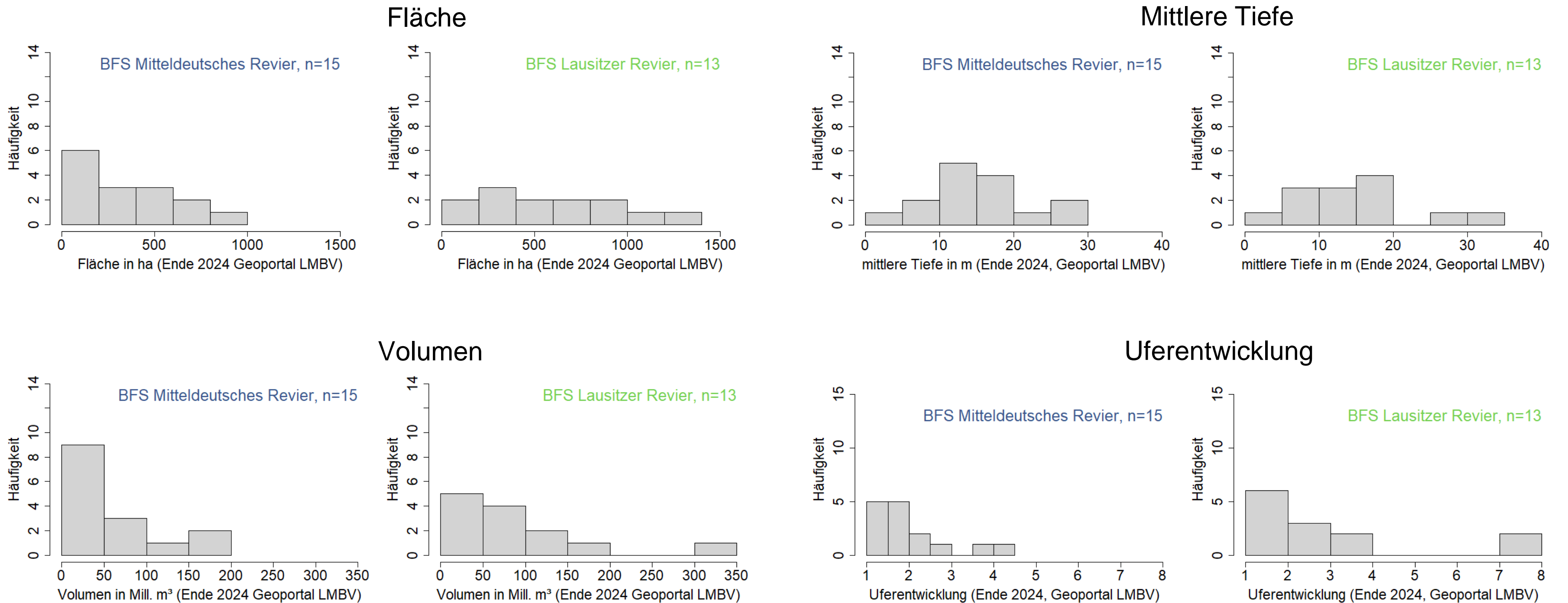
Bergbaufolgeseeen im Mitteldeutschen Revier

Gebietskulisse



Verdunstung von Bergbaufolgeseen

Charakterisierung ausgewählter Bergbaufolgeseen (BFS)



Verdunstung von Bergbaufolgeseen

Motivation der Studie

Monat	Cottbuser Ostsee
	mm
Januar	43
Februar	15
März	28
April	41
Mai	73
Juni	89
Juli	144
August	93
September	87
Oktober	70
November	53
Dezember	19
Jahressumme	756

Monatssummen der für den Cottbuser Ostsee nach DALTON berechneten Gewässerverdunstung im Monitoringjahr 2023. Tabelle 6 in LEAG (2023): Monitoring zur Flutung des Cottbuser Ostsees

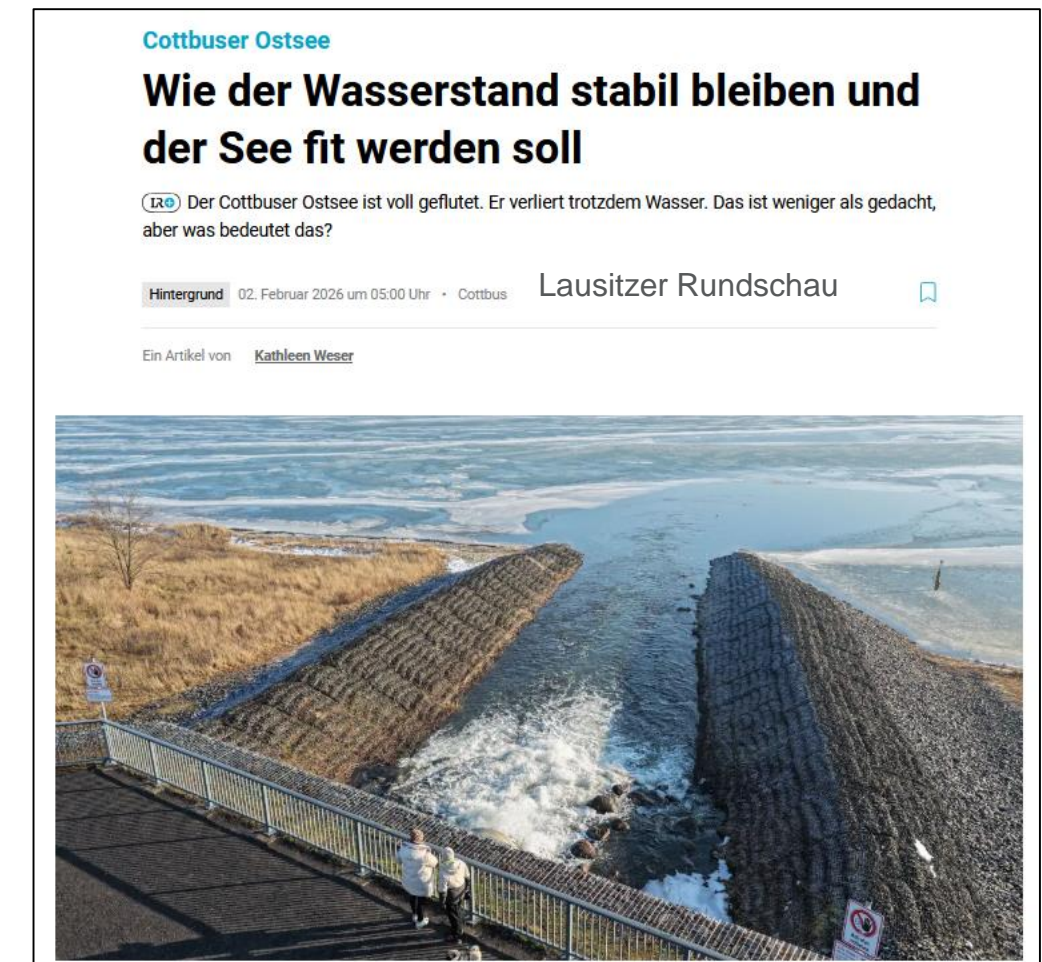
Kennwert	Maßeinheit	LMBV	LEAG	Gesamt
Fläche der BFS	km ²	140	84	224
Langjährige mittlere Gewässerverdunstung (Reihe 1992-2021)	mm/a	-150	-150	-
Verluste durch Gewässerverdunstung	Mio. m ³ /a	-21,0	-12,6	-33,6
	m ³ /s	-0,67	-0,40	-1,07
	l/s/km ²	4,0	4,0	-

Überschlägige Schätzung des mittleren Dargebotsverlustes durch Umwandlung von Landflächen in Seeflächen. Tabelle 16 in UBA (2023): Wasserwirtschaftliche Folgen des Braunkohleausstiegs in der Lausitz

Wie groß ist die Verdunstung von Bergbaufolgeseen?

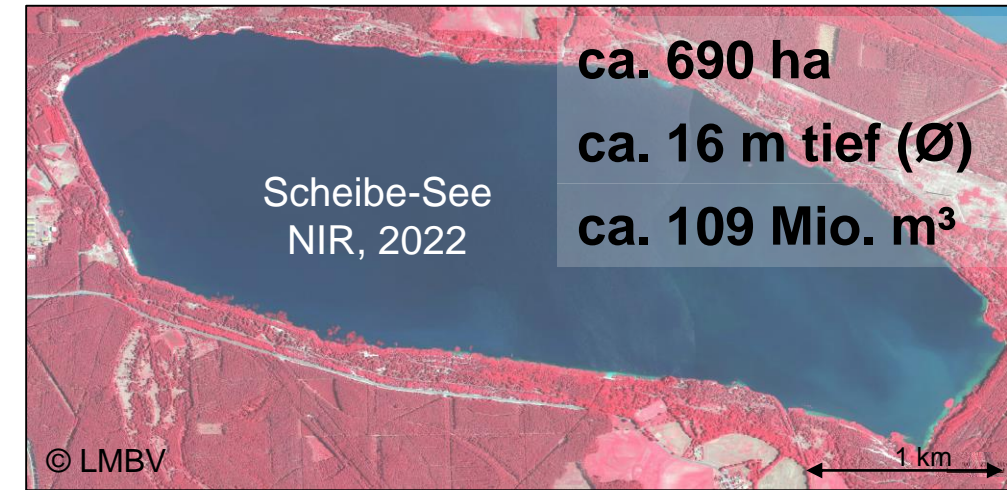
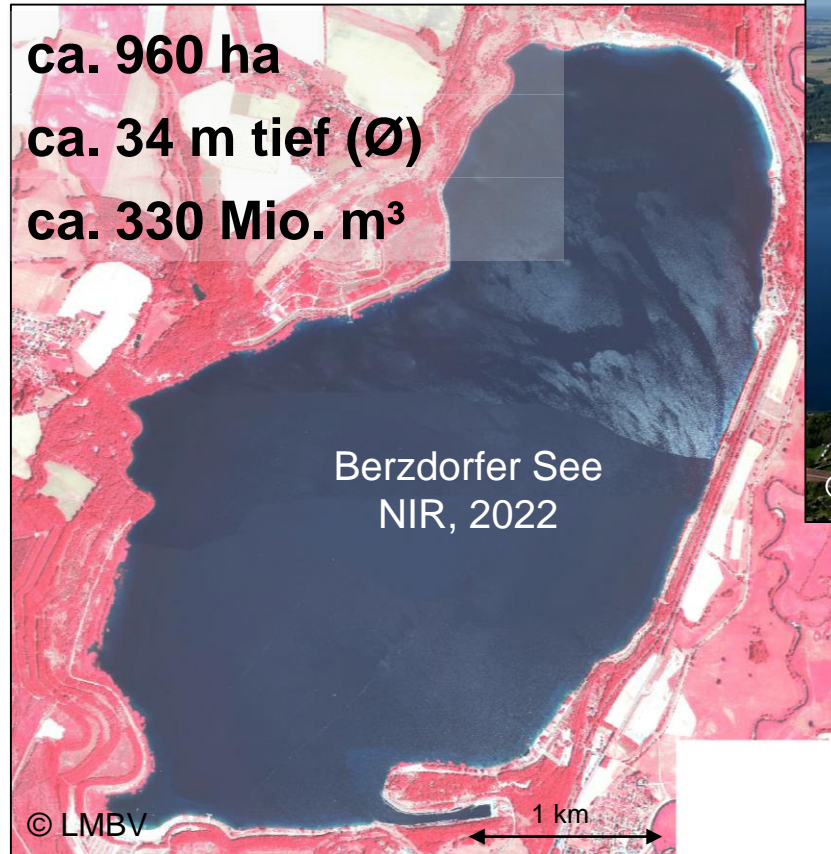
	Mitteldeutsches Revier (gesamt)	Lausitzer Revier (gesamt)
Seefläche Endstand [ha] (LMBV 2025)	10.796	13.174
Verdunstungsmenge unter Annahme einer jährlichen Verdunstung von ca. 850 mm [Mio. m ³ /a]	~ 92	~ 112

Rechnerische Verdunstungsmenge der Bergbaufolgeseen der LMBV

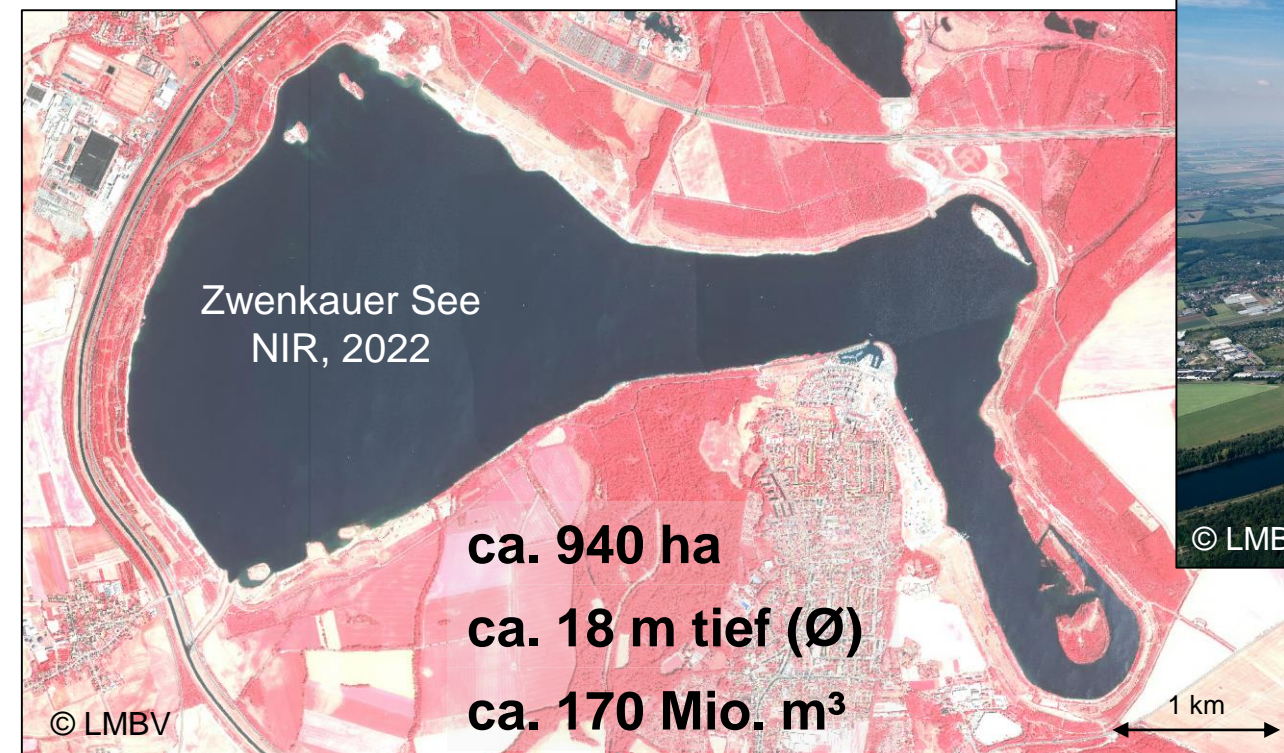


Verdunstung von Bergbaufolgeseeen

Motivation der Studie



Den **einen**
Bergbaufolgesee
gibt es nicht.



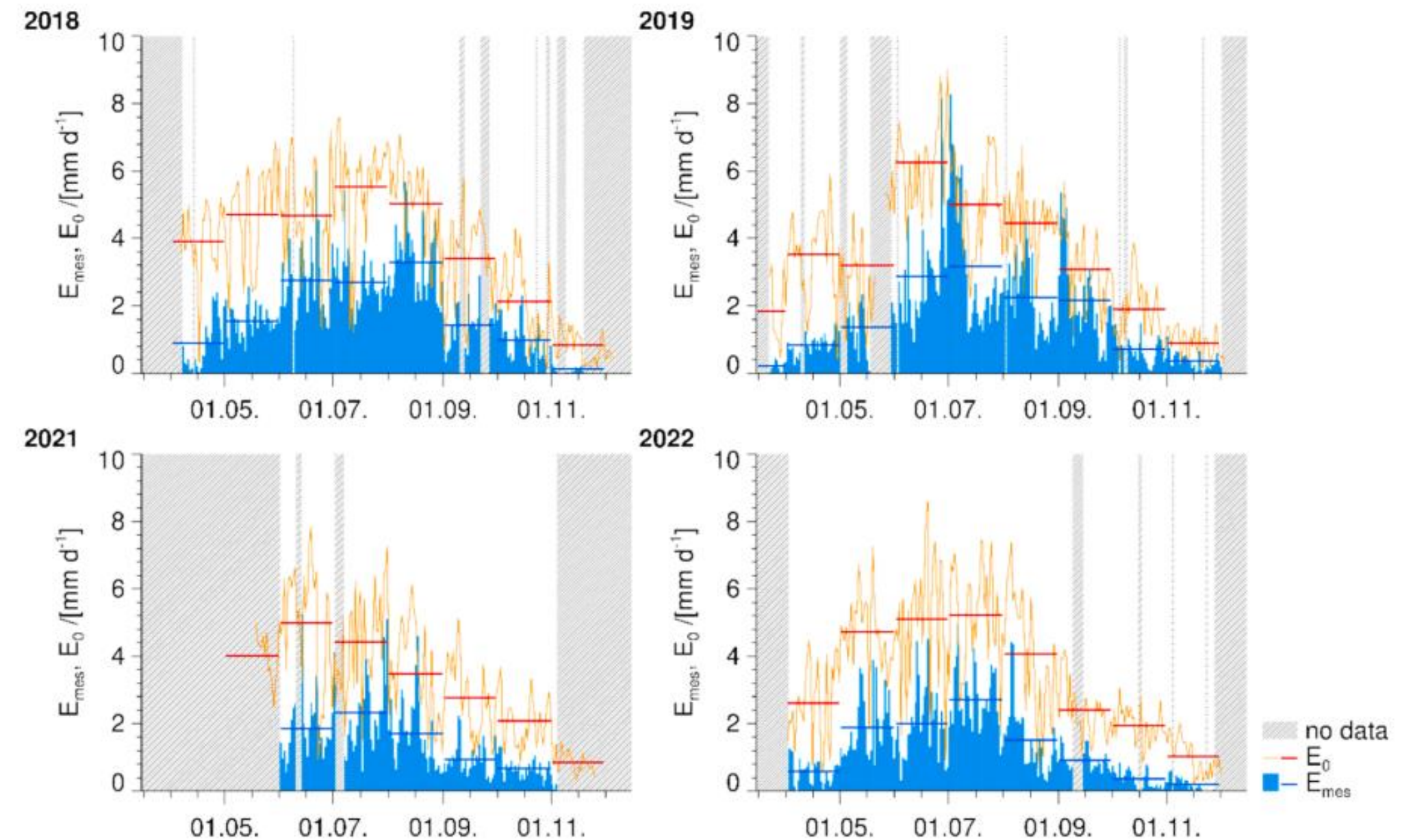
Verdunstung von Bergbaufolgeseen

Motivation der Studie

- Ergebnisse der Forschungsprojekte TREGATA + MEDIWA an Rappbode-Talsperre und Talsperre Bautzen (TU Dresden); Nutzung eines Messfloßes mit Eddy-Covariance-Messsystem
- Verdunstungsraten von Freiwasserbereich kleiner als erwartet und $<$ FAO Grasreferenzverdunstung
- Hypothese:** räumliche Variation der Verdunstungsraten und überprop. Bedeutung der Uferzone für Gesamtverdunstung des Gewässers

$\text{Verdunstung}_{\text{Uferzone}} > \text{Verdunstung}_{\text{Freiwasser}}$

Spank, U. et al. (2025): Rethinking evaporation measurement and modelling from inland waters – A discussion of the challenges to determine the actual values on the example of a shallow lowland reservoir. Journal of Hydrology, Vol. 651, 2025, 132530.



Gemessene Verdunstung über dem Freiwasserbereich der Talsperre Bautzen (blau, E_{mes}) im Vergleich zur FAO-Grasreferenzverdunstung (orange, E_0). Tagessummen (dünne Linien) und Monatsmittel (dicke Linien)

Verdunstung von Bergbaufolgeseen

Zielstellung und Vorgehensweise

- Entwicklung des Konzeptes für Modell bzw. Modellkombination zur **ortskonkreten** Bestimmung der Verdunstung von Bergbaufolgeseen (BFS)
 - Abbildung der Teilbereiche freie Wasserfläche (Pelagial), Uferzone (Litoral) und Umland unter Berücksichtigung
 - der jeweiligen relevanten Prozesse, der zugehörigen Steuergrößen sowie Einflussfaktoren
 - **der Spezifika von Bergbaufolgeseen**
- Beispielhafte Entwicklung des Konzepts anhand eines Pilotgewässers → Gewährleistung der Übertragbarkeit auf andere Seen

Verdunstung von Bergbaufolgeseeen

Ergebnisse: Vergleich von Modellansätzen



Ansätze für das Litoral (Auswahl)

Penman-Monteith Shuttleworth-Wallace

Skalierungen einer Referenzverdunstung

Schwankung Grundwasserstand oder Bodenfeuchte

Advektion von Wärme und trockener Luft aus der Umgebung

Zunehmende Windgeschwindigkeit vs. Abnehmende Größe der am Transport beteiligten Luftwirbel
→ Abnahme der Transportkapazität
→ Abnahme des turbulenten Austauschs

Zunahme der Luftfeuchtigkeit
→ Abnahme des VPD

Zunahme der Durchmischung und Abnahme der Wasseroberflächentemperatur → Abnahme des VPD

▶ **Energetisch wichtigster Treiber: Wärmespeicherung im Wasserkörper!**
→ Nettostrahlung und solare Einstrahlung wirken nur indirekt !!!

$$ET = \frac{1}{L_v} \frac{s (R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e)}{r_a}}{s + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)}$$

ET	Evapotranspiration
L_v	Verdampfungswärme
s	Anstieg der Sättigungsdampfdruckkurve
R_n	Nettostrahlung
G	Bodenwärmestrom
ρ_a	Luftdichte bei konstantem Druck
c_p	spezifische Wärmekapazität von Luft
r_a	aerodynamischer Widerstand
γ	Psychrometerkonstante
r_c	Gesamtoberflächenwiderstand bzw. Bestandeswiderstand

$$E = f(u) (e_s(T_s) - e)$$

E	Evaporation
$f(u)$	Windfunktion
e_s	Sättigungsdampfdruck
T_s	Oberflächentemperatur des Wassers
e	Dampfdruck in der Luft



Ansätze für das Pelagial (Auswahl)

Bulk-Ansätze (inkl. Dalton)

Ansätze angetrieben durch Temperatur, Luftfeuchte, solare Einstrahlung

Energiebilanzansätze

Kombinationsansätze

Skalierung der potent. Verdunstung / von Messwerten

Verdunstung von Bergbaufolgeseen

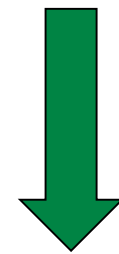
Ergebnisse: Berücksichtigung von Rand- und Grenzschichtaspekten

Prozess	Beschreibung	Wirkung auf das Gewässer
Advektion	Horizontaltransport von Luft mit anderer Temperatur und Feuchte aus der Umgebung auf das Gewässer	Modifikation der Profile von Temperatur und Feuchte, damit Änderung der Verdunstung
Stabilitätseinfluss	Vertikale Temperaturschichtung beeinflusst den vertikalen Austausch	Tag: Dämpfung des Austauschs Nacht: Verstärkung des Austauschs; Effekt am Tage ist wichtiger
Rauigkeits-sprünge	Erzeugung von Turbulenz bei Übergang von der (aerodynamisch) rauen Umgebung auf das glatte Gewässer	Anstieg der Turbulenz auf dem Gewässer um bis zu 50%, Erhöhung der Verdunstung
Einfluss von Windwellen und Gewässertiefe	Windwellen erzeugen eine höhere Rauigkeit des Gewässers in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit. Die Gewässertiefe bestimmt die Energieaufnahme des Wasserspeichers	Verstärkung der Verdunstung, bis 40% bei starkem Wind in Ufernähe
Thermische Zirkulations-systeme, z.B. Land-Seewind	Entstehung eines Seewinds am Tage auf großen Gewässern (Ausdehnung mehrere km), wenn ein großer Temperaturunterschied zum Land (> 5 K) herrscht und der großräumige Wind schwach ist	Anstieg der Feuchte und der Verdunstung auf dem Gewässer um bis zu 100%
Mögliche orographische Effekte	Taleinschnitte, Hänge und Kuppen verstärken den Wind im Vergleich zur Ebene	Anstieg der Verdunstung auf dem Gewässer

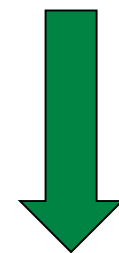
Verdunstung von Bergbaufolgeseen

Ergebnisse: Ableitung des Modellkonzepts

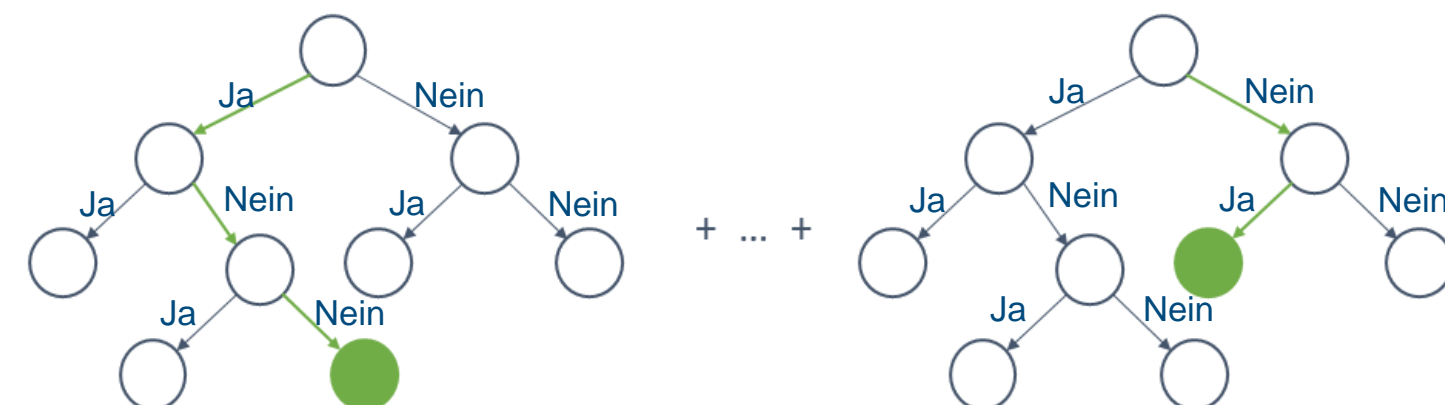
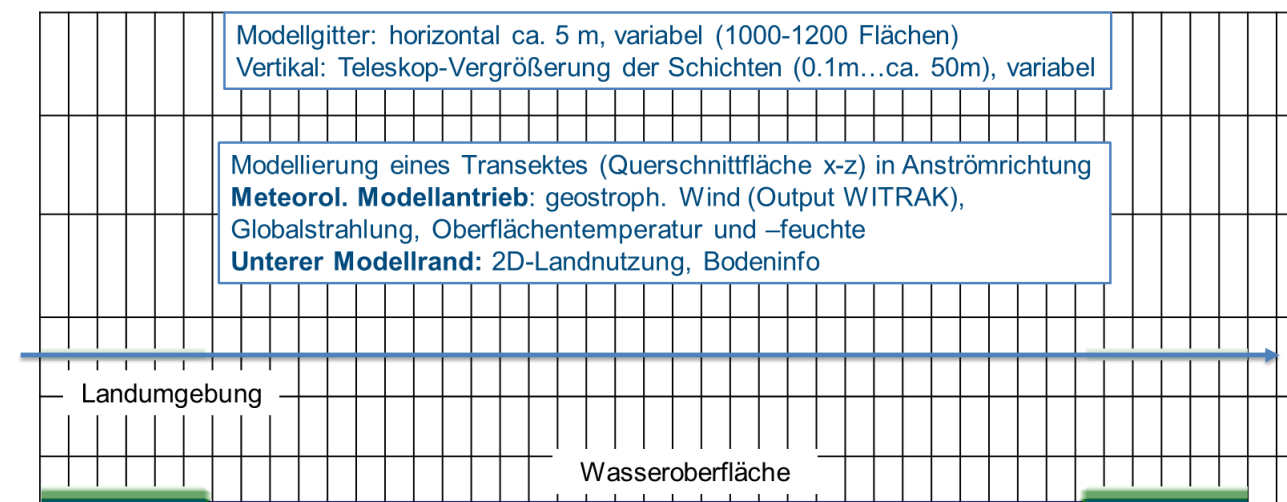
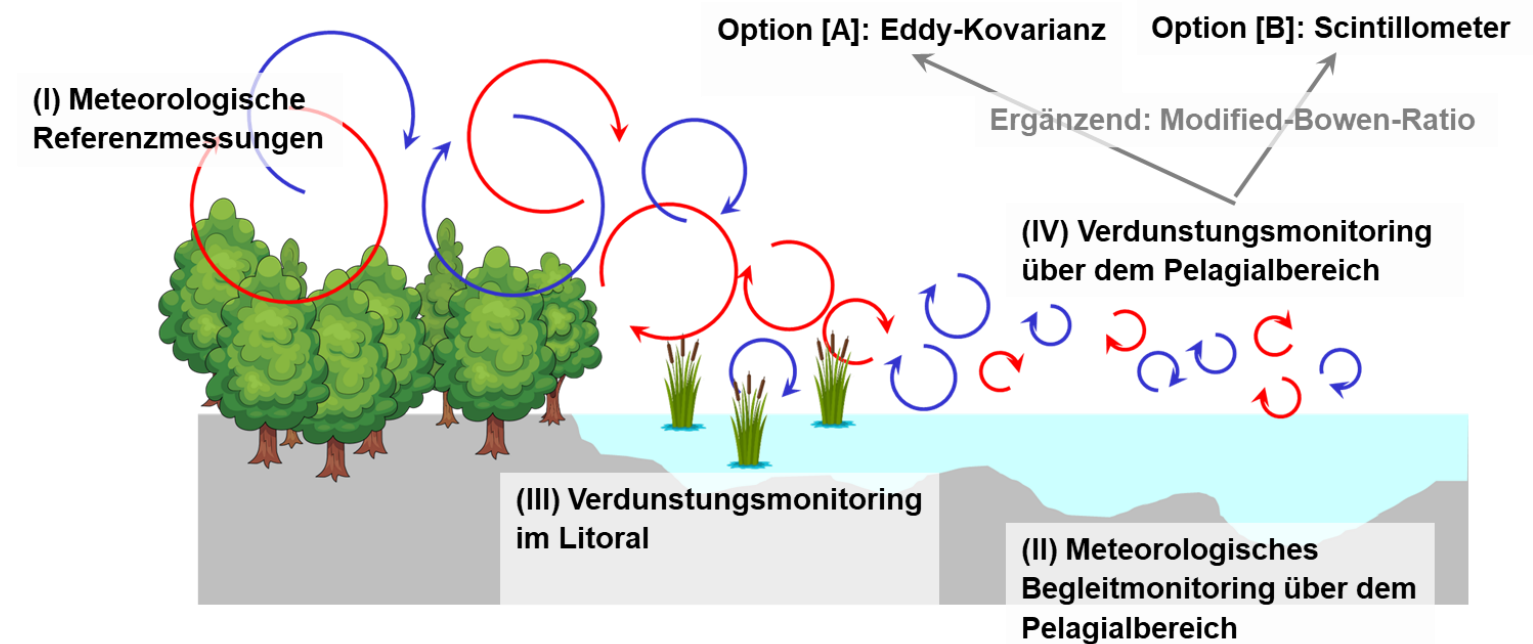
- Messung Verdunstung an einem Querschnitt am Pilotgewässer



- Numerische Modellierung des Querschnittes für das Jahr, ggf. weitere Querschnitte, verschiedene meteorologische Bedingungen: Nutzung des Vegetations-Atmosphärenmodells HIRVAC-2D

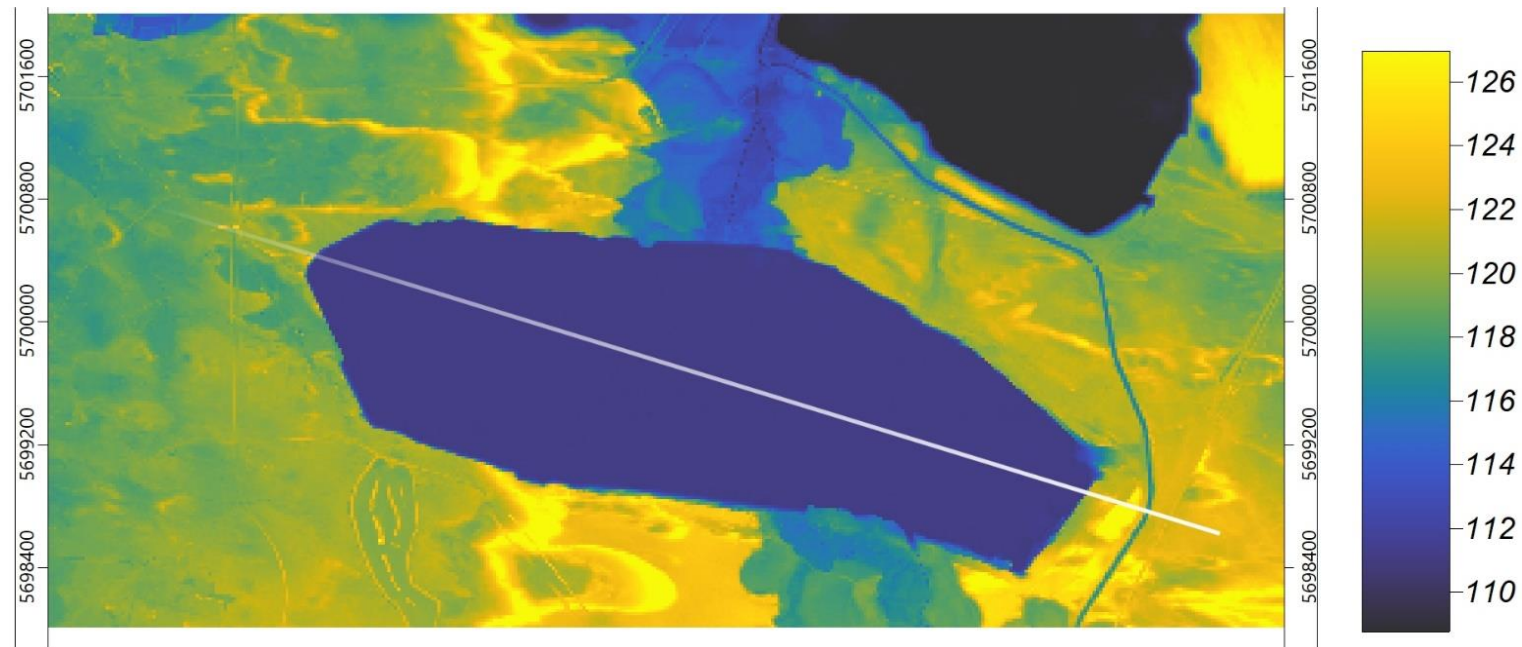


- Maschinelles Lernen mittels Gradient Boosting

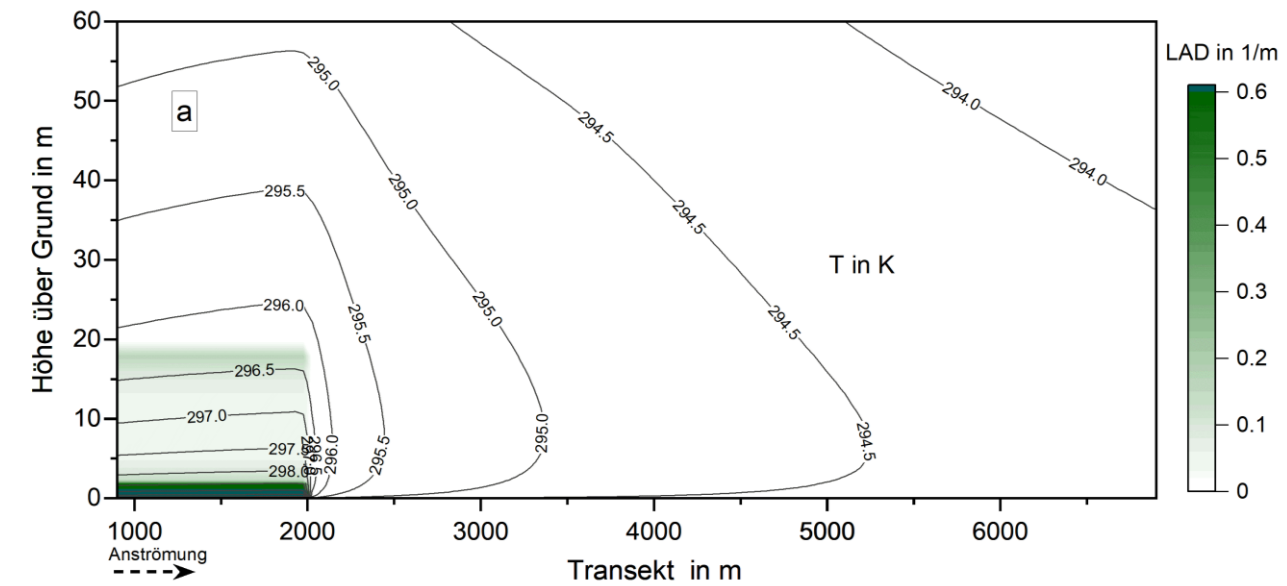


Verdunstung von Bergbaufolgeseeen

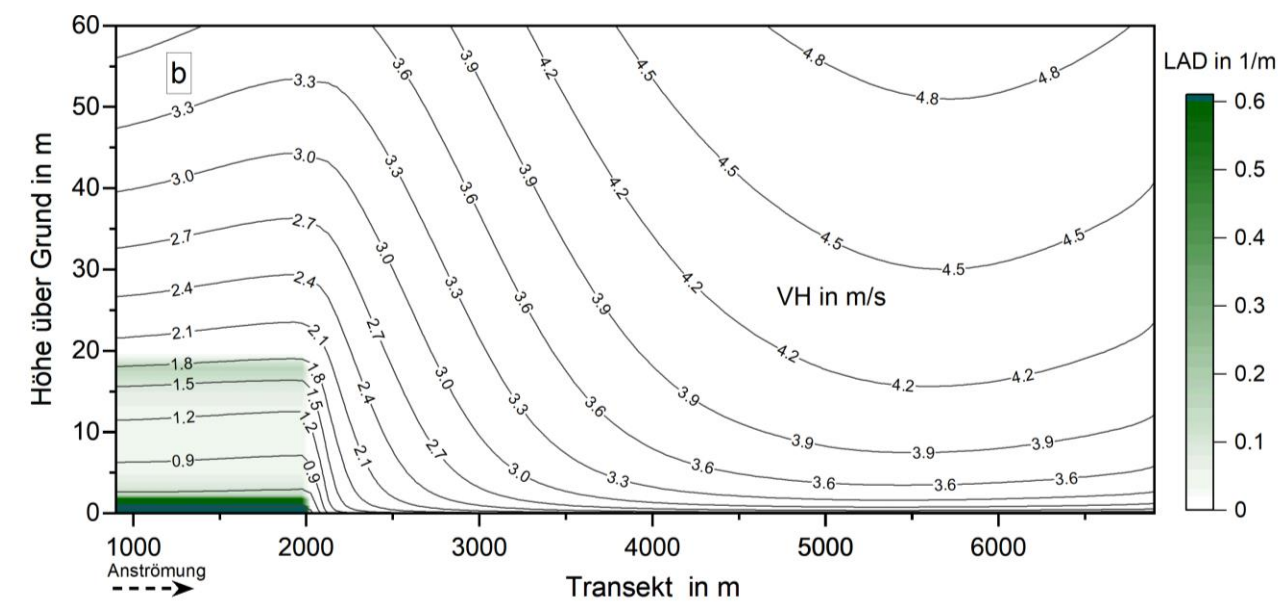
Ergebnisse: Pilotgewässer Scheibe-See



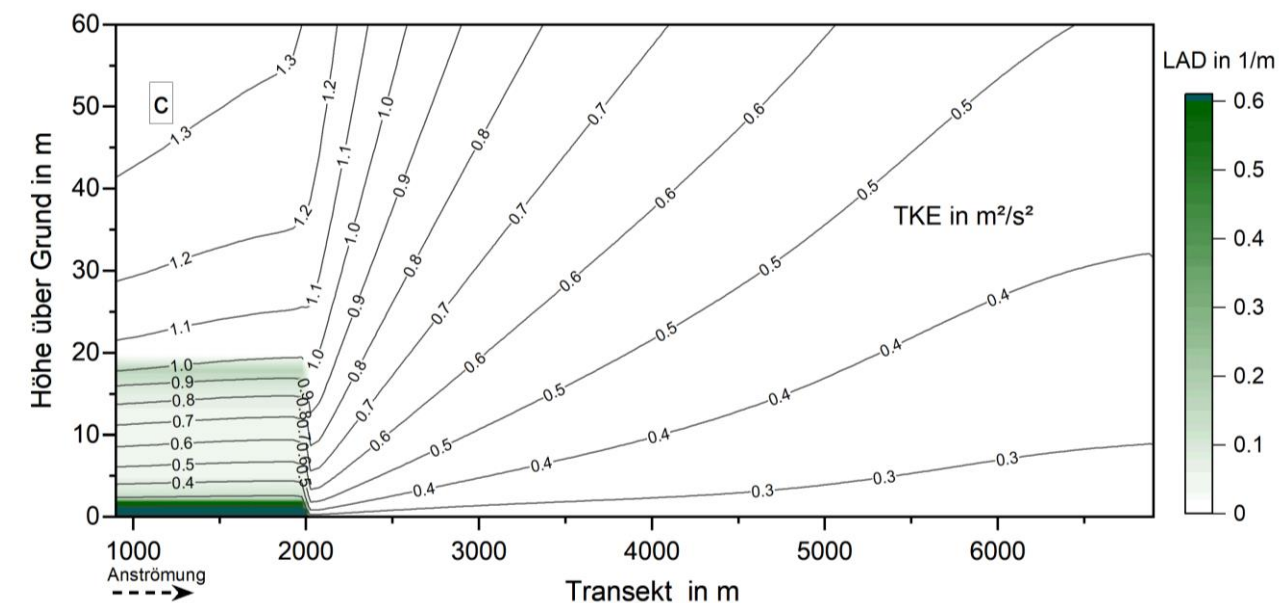
Scheibe-See (DEM20 Sachsen) mit Transekt von 280° nach 100° (West-Ost).



Lufttemperatur entlang des Transektes.
HIRVAC-2D Beispielsimulation



Windgeschwindigkeit entlang des Transektes.
HIRVAC-2D Beispielsimulation



Turbulenzenergie entlang des Transektes.
HIRVAC-2D Beispielsimulation

Verdunstung von Bergbaufolgeseen

Fazit

- Heterogenität von Bergbaufolgeseen
- Unterschiedliche zu koppelnde Modellansätze für Litoral und Pelagial: Penman-Monteith / Shuttleworth-Wallace bzw. Dalton
- Berücksichtigung von Rand- und Grenzschichteffekten
- Ermittlung eines Pilotgewässers
- Messkonzept → numerische Modellierung → maschinelles Lernen

Weiterführende Informationen

Verdunstungsstudie und RegioNet WasserBoden

Abschlussveranstaltung zur Studie

22.04.2026, 09:00 Uhr, online

Anmeldung über

<https://mitdenken.sachsen.de/1062351>



RegioNet WasserBoden

regionet.sachsen.de

RegioNet.Wasser.Boden@ifulg.sachsen.de

