



Bericht

Vorhaben	Umverlegung der Pleiße im Bereich des ehemaligen Tagebaus Witznitz II zur Sedimentation von Eisenhydroxidschlämmen
Gegenstand	Instationäre Modellierung der Strömungsverhältnisse im Kahnsdorfer See bei Einleitung von Fe-reichem Pleißewasser zur Untersuchung der Fe-Verteilung im See innerhalb eines Jahresganges
Auftraggeber	iKD Ingenieur-Consult GmbH Zur Wetterwarte 50, Haus 337/G 01109 Dresden
Verfasser	GIP Grundwasser-Ingenieurbau-Planung GmbH Dresden Meraner Straße 10 01217 Dresden - Dr.-Ing. U. Uhlig - Dr.-Ing. Ch. Koch
Datum	12.12.2017, Überarbeitung 21.03.2018

Dr.-Ing. Th. Luckner
Geschäftsführer

Dr.-Ing. U. Uhlig
Geschäftsführer

Anschrift:
GIP Grundwasser-Ingenieurbau-Planung GmbH
Dresden
im Grundwasser-Zentrum Dresden
Meraner Straße 10
01217 Dresden

www.GIP-Dresden.de / Info@GIP-Dresden.de

Kontakt:
Tel.: 0351 - 40 50 630
Fax.: 0351 - 40 50 639
Bankverbindung:
Deutsche Kreditbank AG
Konto-Nr.: 1020015259, BLZ: 12030000
IBAN: DE87 1203 0000 1020 0152 59
BIC: BYLADEM1001

Handelsregister:
Amtsgericht Dresden
HRB 28040
USt-IdNr.:
DE 267102338
Geschäftsführer:
Dr.-Ing. habil. Thomas Luckner
Dr.-Ing. Uli Uhlig

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
Anlagenverzeichnis	4
Unterlagen / Literatur	4
Abkürzungsverzeichnis	7
1 Hintergrund, Ziel- und Fragestellungen	9
2 Beschaffung und Aufbereitung meteorologischer Daten	10
2.1 Wetterstationen	10
2.2 Datenübertragung auf die Wasserfläche des Kahnsdorfer Sees (Modellgebiet).....	11
2.2.1 Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Luftdruck	12
2.2.2 Niederschlag.....	15
2.2.3 Windgeschwindigkeit und Windrichtung	17
2.2.4 Globalstrahlung	20
2.3 Datenkorrektur	21
2.3.1 Allgemeines	21
2.3.2 Datenkorrektur der gemessenen Windgeschwindigkeiten.....	21
2.3.3 Fehlwerte in der Messreihe.....	22
3 Modellaufbau und Modellkalibrierung	23
3.1 Randbedingungen des 3D-Seemodells.....	23
3.1.1 Morphologische Randbedingungen	23
3.1.2 GW-Zustrom und GW-Abstrom sowie GW-Beschaffenheit	25
3.1.3 Klimadaten zur Festlegung der meteorologischen Randbedingungen	27
3.1.4 Vertikale Temperaturprofile des Kahnsdorfer Sees.....	28
3.2 Verwendete Programme	28
3.3 Horizontale und vertikale Diskretisierung des Modellraumes	30
3.4 Kopplung von Wasserkörper und Atmosphäre.....	33
3.5 Modellzeitraum und Modellkalibrierung	34
3.5.1 Albedo	36
3.5.2 Windgeschwindigkeit (Windfaktor)	37
3.5.3 Extinktionskoeffizient	37
3.5.4 Kombination der Parameter zur Modellkalibrierung.....	38
3.5.5 Anstieg des Wasserspiegels und Mixis des Sees nach der Kalibrierung.....	39

3.6	Spezifische Randbedingungen für die Einleitung von Pleißewasser in den Kahnsdorfer See.....	41
3.6.1	Fe-Konzentration des Pleißewassers.....	41
3.6.2	Mittlere Sedimentationsgeschwindigkeit der Fe-Partikel	43
3.6.3	Temperatur des Pleißewassers im Jahresgang	44
3.6.4	Eintragspunkte, Eintragsimpuls und Entnahme.....	45
4	Szenarien.....	47
5	Ergebnisse der Berechnung	47
5.1	Visualisierung der Ergebnisse	47
5.2	Geschwindigkeitsvektoren und die Fe_{ges} -Verteilung im Bereich der Wasseroberfläche (XY-Ebene)	48
5.3	Entwicklung der Fe-Konzentration im Kahnsdorfer See	51
5.4	Entwicklung der Fe-Konzentration am Entnahmepunkt am Nordufer	52
6	Zusammenfassung der Ergebnisse	54

Anlagenverzeichnis

- Anlage 1. Entwicklung der Fe_{ges} -Konz. im YZ-Schnitt zu den in Abschnitt 4.1 definierten Zeitpunkten für die Szenarien S01 und S04

Unterlagen / Literatur

- BAUMGARTNER, A. & LIEBSCHER, H.-J. (1996): Lehrbuch der Hydrologie, Band 1 - Allgemeine Hydrologie - Quantitative Hydrologie. Gebrüder Borntraeger Berlin, Stuttgart, 694 S.
- BGD ECOSAX (2017). Limnologisches Prognosegutachten für die Tagebauseen Hainer See mit Teilbereich Haubitz sowie Kahnsdorfer See im Tagebauterritorium Witznitz. Bericht. 29.09.2017
- COLE, T. M., WELLS, S.W (2008). A Two-dimensional, Laterally Averaged, Hydrodynamic and Water Quality Model, Version 3.6. User Manual. U.S Army Corps of Engineers, August 2008
- COOKE, G.D., WELCH, E.B., PETERSON, S.A., NEWROTH, P.R. (1993). Restoration and management of lakes and reservoirs. 2nd edition. Lewis Publishers, CRC Press, Boca Raton. no. of pages: 548. ISBN 0 87371 397 4
- DWD (2015a). Globalstrahlung in der Bundesrepublik Deutschland – Mittlere Monatssummen, Zeitraum Januar 1981 bis 2000. Maßstab 1:3'750'000 unter https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/lstrahlungskarten_mi.html#buehneTop (abgerufen am 16.12.2015)
- DWD (2015b). Verfügbarkeit und Qualität flächenbezogener Klimadaten, Gerhard Müller-Westermeier, Deutscher Wetterdienst, Abteilung Klimaüberwachung, <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimakartendeutschland/detailbeschreibung.html> (abgerufen am 16.12.2015)
- DWD (2017). Webseite des Deutschen Wetterdienstes. Detailbeschreibung - Verfügbarkeit und Qualität flächenbezogener Klimadaten. Verfasser: Gerhard Müller-Westermeier, Deutscher Wetterdienst, Abteilung Klimaüberwachung. <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimakartendeutschland/detailbeschreibung.html> (abgerufen am 04.12.2017)
- GIP (2017a). Quantifizierung des Absetzverhaltens von Eisenhydroxiden nach Einleitung von Wasser aus der Pleiße in den Kahnsdorfer See. Bericht. 13.06.2017
- GIP (2017b). Weiterführende Quantifizierung des Absetzverhaltens von Eisenhydroxiden nach Einleitung von Wasser aus der Pleiße in den Kahnsdorfer See. Bericht. 28.12.2017
- IBGW (2006). Hydrogeologisches Großraummodell Süd - HGMS 2006, Überarbeitung 2015
- IBGW (2015). Zuarbeit limnologischer Bilanzen auf der Grundlage HGMS 2006 - Modell HGMSAGLW. Ingenieurbüro für Grundwasser GmbH. Bericht. 08.10.2015

- iKD (2017). Umverlegung der Pleiße im Bereich des ehemaligen Tagebaus Witznitz II zur Sedimentation von EHS; Grundlagenermittlung; vom 13. April 2017 ergänzt am 3 August 2017
- KASPAR, F.; MÜLLER-WESTERMEIER, G.; PENDA, E.; MÄCHEL, H.; ZIMMERMANN, K.; KAISER-WEISS, A.; DEUTSCHLÄNDER, T. (2013). Monitoring of climate change in Germany – data, products and services of Germany`s National Climate Data Centre. Adv. Sci. Res., 10, doi:10.5194/asr-10-99-2013, 99–106.
- KRISTINA B. KATSAROS, LYNN A. MCMURDIE, RICHARD J. LIND AND JOHN E. DEVAULT (1985). Albedo of a Water Surface, Spectral Variation, Effects of Atmospheric Transmittance, Sun Angle and Wind Speed. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 90, NO. C4, PAGES 7313-7321, JULY 20, 1985
- LAWA (1998). Ländergemeinschaft Wasser. Gewässerbewertung stehende Gewässer.
- LMBV (2008). Wandlung und Perspektiven. Heft 08.
- MARETEC (2009). Coupling Water-Atmosphere User Manual, URL: http://www.mohid.com/wiki/index.php?title=Coupling_Water-Atmosphere_User_Manual.(14.08.2009)
- NEWTON, B.J. (JARRELL, W.M. (1999). A procedure to estimate the response of aquatic systems to changes in phosphorus and nitrogen inputs. National Water and Climate Centre, USDA.
- NIXDORF, B., HEMM, M., HOFFMANN, A., RICHTER, P. (2004). Zustand und Entwicklung der wichtigsten Seen Deutschlands Umweltbundesamt. Berlin
- NIXDORF, B., HEMM, M., SCHLUNDT, A., KAPFER, M., KRUMBECK, H. (2000). Braunkohletagebau-seen in Deutschland. Gegenwärtiger Kenntnisstand über wasserwirtschaftliche Belange von Tagebaurestlöchern. Abschlussbericht F&E Vorhaben FKZ 29822240
- NOWAK und SVARDAL (1989): Nitrifikation und Denitrifikation. In: Institut für Wassergüte und Landschaftswasserbau der Technischen Universität Wien (Hrsg.): Fortbildungskurs Biologische Abwasserreinigung Bd. 81, 1989, S. F–1 bis F–54
- NYHUIS, G. (1985). Beitrag zu den Möglichkeiten der Abwasserreinigung bei Abwässern mit erhöhten Stickstoffkonzentrationen. 1985 (Heft 61)
- OKE, T. R. (1987). Boundary layer climates. – 2nd edition
- OSGOOD, R.A. (1988). Lake mixis and internal phosphorus dynamics. Arch. Hydrobiol. 113(4):629-638
- SUCHANEK, T.H., EAGLES-SMITH, C.A., HARNER, E.J. (2008). Is Clear Lake Methylmercury Distribution Decoupled from Bulk Mercury Loading?. Ecological Applications, 18(8). Supplement, pp. A107–A127.
- UNESCO 1983. Algorithms for computation of fundamental properties of seawater. Unesco technical papers in science.
- UNESCO 2010. The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties.

- WAGNER, H., CARSTENSEN, D., KORZERKE, S. (2000). Gutachterliche Stellungnahme zur statistischen Auswertung der Windmessungen im Raum Dreiweibern und Senftenberg als Referenzwerte für Analogieschlüsse zur Wellenbelastung der Tagebaurestlöcher der Niederlausitz. Gutachten, TU Dresden, Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik, Auftraggeber: LMBV
- WILLIAMS, D.T.; DRUMMOND, G.R.; FORD, D.E.; ROBEY, D.L. (1980). Determination of Light Extinction Coefficients in Lakes and Reservoirs". Surface Water Impoundments. Proceedings of the Symposium on Surface Water Impoundments. American Society of Civil Engineers. H.G. Stefan.

Abkürzungsverzeichnis

Alb	Albedo
A_{See}	Wasserfläche
B_{eff}	effektive Breite
D	Windrichtung
d	Verschiebungshöhe
D_a	effektive Achsenlänge
DWD	Deutscher Wetterdienst
E	Schichtdicke Epilimnion
EHF	Eisenhydroxidflocken
F	Windgeschwindigkeit
Fe	Eisen
FG	Globalstrahlung
F_{Grad}	Tiefengradient
GOK	Geländeoberkante
GW	Grundwasser
h	Bestandshöhe
K	Karman-Konstante
L_{eff}	effektive Länge
LT	Lufttemperatur
MHM	Montanhydrologisches Monitoring der LMBV
MST	Messstelle
OA	Oberflächenabfluss
OI	Osgood-Index
P0	Luftdruck in Stationshöhe
Q	Volumenstrom / Durchfluss
R1	Niederschlagshöhe
R^2	Bestimmtheitsmaß
RF	relative Luftfeuchte
RL	Restloch
SD	Sonnenscheindauer
ST_{Ref}	Referenz-Sichttiefe
T	Temperatur in Grad Celsius °C
T_K	Temperatur in Kelvin
TT	Lufttemperatur
u^*	gemessenen Windgeschwindigkeit
u_z	die Windgeschwindigkeit in der Bezugsmesshöhe
Vol	Volumen
WF	Windfaktor
WK	Wasserkörper

WST	Wasserstand
z_0	Rauhigkeitslänge
z_{epi}	theoretische Epilimniontiefe
z_m	mittlere Tiefe des Gewässers
z_{max}	maximale Wassertiefe
λ_{LW}	Extinktionskoeffizient langwellige Strahlung
λ_{SW}	Extinktionskoeffizient kurzwellige Strahlung

1 Hintergrund, Ziel- und Fragestellungen

Nach der Einstellung der bergbaubedingten Wasserhaltungen zur Grundwasserabsenkung im Bereich der ehemaligen Braunkohlentagebaue steigt das Grundwasser großräumig wieder an und es stellen sich langfristig natürliche Grundwasserströmungsverhältnisse ein. Der Grundwasserspiegel ist nunmehr soweit angestiegen, dass es aufgrund der hydraulischen Kopplung des Grundwassers mit den oberirdischen Gewässern zu einer Exfiltration von saurem, eisen- und sulfatbelastetem Kippengrundwasser in die Pleiße kommt. Dies führt zu erhöhten Eisenkonzentrationen in der Pleiße und damit zu einer sichtbaren Braunfärbung des Gewässers. Durch umfangreiche Messungen im Oberflächengewässer wurde nachgewiesen, dass der Haupteiseneintrag in die Pleiße im Fließgewässerabschnitt zwischen der Wyhramündung und Neukieritsch stattfindet, in dem die Pleiße in den 1960er Jahren direkt über die Kippe und entlang der Kippe des Tagebaus Witznitz II verlegt wurde.

Die Stofffrachten in der Pleiße führen neben der Verfärbung über lange Fließwege und der damit verbundenen negativen Beeinflussung der touristischen Nutzung der Gewässer auch zu einer Schädigung der aquatischen Lebensgemeinschaften von Fischen, Makrozoobenthos und Makrophyten.

Basierend auf einer Studie zur „Untersuchung von Sedimentationsräumen im Fließgewässer bzw. im Nebenschluss einschließlich Untersuchungen zur Verwertung von Eisenhydroxidschlämmen“ wird die Umverlegung der Pleiße im Bereich des ehemaligen Tagebaus Witznitz II zur Sedimentation von Eisenhydroxidschlämmen untersucht.

Im Rahmen des Projektes erfolgten bisher eine stationäre 3D-Modellierung zur Quantifizierung des Absetzverhaltens im Kahnsdorfer See sowie Untersuchungen zur Quantifizierung des Absetzverhaltens von Eisenhydroxiden nach Einleitung von Wasser aus der Pleiße in den Kahnsdorfer See. Dabei wurden für Fe-Konzentrationen im Bereich des Kippenwasserzutrittes von 1 - 5 mg/L Sedimentationsgeschwindigkeiten zwischen 0,3 und 0,8 cm/h ermittelt. Die Ergebnisse sind in GIP 2017a und GIP 2017b dokumentiert.

Durch den Jahresgang der Wasserbeschaffenheit des Vorfluters, die schwankenden Abflüsse sowie den beabsichtigten Mischprozess im Kahnsdorfer See kann das Absetzverhalten variieren. Die Fe-Verteilung außerhalb des direkten Wirkungsbereiches des Eintrages (Impuls) wird maßgeblich von den Eigenschaften des Wasserkörpers und der Strömungsverhältnisse beeinflusst. So hat beispielsweise die solare Strahlung direkte Auswirkungen auf die Temperatur und diese wiederum auf die Dichte des Wassers. Dies kann einerseits Dichteströmungen und andererseits stabile Schichtungen verursachen, welche sich wiederum auf die Fe-Verteilung auswirken. Auch windinduzierte Strömungen im Wasserkörper wirken auf die Fe-Verteilung.

Im Rahmen einer instationären 3D-Modellierung sollte daher das Absetzverhalten von Eisenhydroxiden nach Einleitung von Wasser aus der Pleiße in den Kahnsdorfer See exemplarisch für das Jahr 2016 berechnet werden. Unter dem Einfluss meteorologischer Größen eines kompletten Jahresganges (2016) sollten dazu die seeinternen Strömungsverhältnisse berechnet werden. Mit dem vorliegenden Bericht werden diese Arbeiten dokumentiert.

2 Beschaffung und Aufbereitung meteorologischer Daten

2.1 Wetterstationen

Mit den vorstehend genannten meteorologischen Größen wurden die meteorologischen Randbedingungen des Seemodells festgelegt. Zu deren Festlegung wurden die Klimadaten der Stationen des Deutschen Wetterdienstes DWD im Bereich des Kahnsdorfer Sees ausgewertet. Abb. 1 zeigt die Lage der Messstationen, die im Umkreis von bis ca. 50 km um den Kahnsdorfer See Klimadaten erfassen.

Die Messdaten liegen als gemittelte Stundenwerte vor. Informationen zu den verwendeten Messgeräten sind nur teilweise vorhanden. Die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung werden an den Stationen Leipzig-Holzhausen und Oschatz in 12 m Höhe und an den Stationen Leipzig/Halle und Osterfeld in 10 m Höhe über dem Bodenniveau gemessen.

Die Daten des DWD wurden in mehreren Schritten auf ihre Qualität geprüft. Die DWD-Daten von 2013 bis 2016 sind bereits qualitätsgeprüft (KASPAR ET AL. 2013).

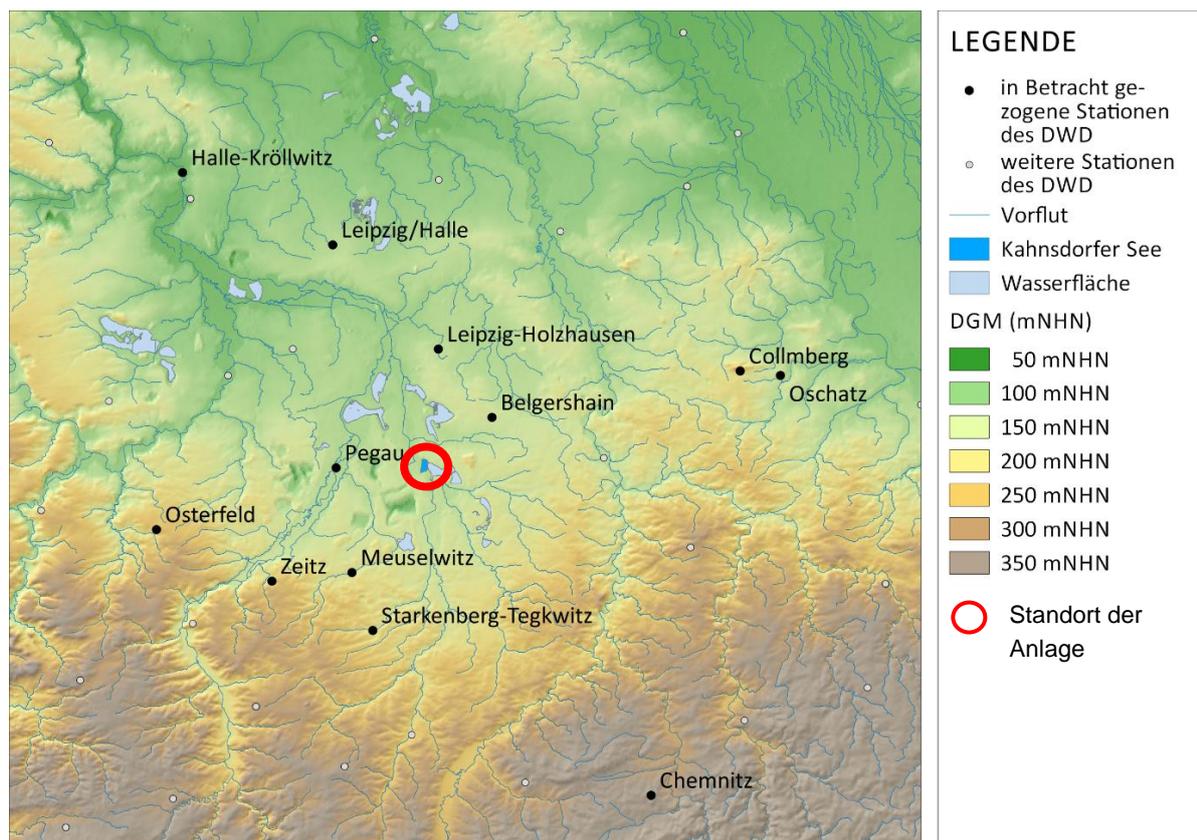


Abb. 1: Lage der DWD-Stationen im Umfeld des Kahnsdorfer Sees

Für die Auswertung liegen Datenreihen der in Tab. 1 aufgelisteten Stationen mit den zugeordneten Messgrößen vor.

Tab. 1: In die Datenauswertung einbezogene Wetterstationen

Stationsname	Stations-ID	Höhe (m NHN)	Entfernung zum Kahnsdorfer See (km)	Messgrößen
Chemnitz	00853	418	53	FG
Halle-Kröllwitz	01957	93	50	FG
Leipzig-Holzhausen	02928	138	16	TT, RF, F, D, R1, FG
Leipzig/Halle	02932	131	32	F, D
Meuselwitz	03279	173	17	R1
Oschatz	03811	150	48	F, D
Starkenbergtegkwitz	04997	193	23	TT, RF
Zeitz	05750	170	25	TT, RF
Belgershain	07323	150	11	R1
Pegau	13688	128	11	R1

TT Lufttemperatur, RF relative Luftfeuchte, P0 Luftdruck in Stationshöhe, F Windgeschwindigkeit, D Windrichtung, R1 Niederschlagshöhe, FG Globalstrahlung¹

Die Stationen liegen im maximalen Umkreis von 53 km um den Kahnsdorfer See (siehe Abb. 1) und weichen circa -33 bis +292 m NHN vom Wasserspiegel des Kahnsdorfer Sees (126,5 m NHN) ab.

2.2 Datenübertragung auf die Wasserfläche des Kahnsdorfer Sees (Modellgebiet)

Direkt am Kahnsdorfer See wurden die notwendigen meteorologischen Größen nicht gemessen. Stattdessen wurden die Daten der in Tab. 1 aufgeführten und in Abb. 1 dargestellten DWD-Stationen ausgewertet.

Nachfolgend wurde für jede meteorologische Größe geprüft, welche DWD-Messreihe auf den Kahnsdorfer See übertragen werden kann. Ziel war die Generierung eines Datensatzes für den Kahnsdorfer See aus den Messreihen der umliegenden DWD-Stationen.

Die für den Kahnsdorfer See geeignete DWD-Messreihen wurde nach dem Thiessen-Polygon-Verfahren ausgewählt. Bei dem gewählten Verfahren werden die verschiedenen Stationen durch Hilfslinien miteinander verbunden. Der jeweilige Mittelpunkt dieser Hilfslinien bildet die Stützstellen für die Konstruktion von Polygonen als Grenzen für die räumliche Zuordnung der Messwerte der verschiedenen Stationen. Die für den Kahnsdorfer See geeignete DWD-Messreihe entspricht dem der Station zugeordneten Polygon, in welchem sich der Kahnsdorfer See befindet.

¹ Die Bezeichnungen und Abkürzungen wurden aus den Datensätzen des DWD übernommen.

Die Wahl einer geeigneten Messstation zur Übertragung von Messwerten auf die Bedingungen des Kahnsdorfer Sees wird dabei prinzipiell für meteorologische Größen die in engem Zusammenhang stehen:

- Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Luftdruck
- Niederschlag
- Windgeschwindigkeit und Windrichtung
- Globalstrahlung

gesondert durchgeführt.

2.2.1 Lufttemperatur, relative Luftfeuchte und Luftdruck

Für die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchte stehen Messergebnisse von 3 Stationen zur Verfügung (siehe Tab. 2).

Tab. 2: Lufttemperatur von 01.01.2013 bis 30.08.2017 in °C und Fehlwerte (Stundenwerte) bei der Erfassung der Lufttemperatur

Station	Mittel (°C)	Min (°C)	Max (°C)	Spanne (K)	Fehlwerte (-)	Fehlwerte (%)
Leipzig-Holzhausen	10,5	-17,4	36,4	53,8	84	0,2%
Starkenber-Tegkwitz	9,9	-18,5	35,6	54,1	30	0,1%
Zeit	10,1	-11,1	35,8	46,9	240	0,6%

Bezogen auf den Betrachtungszeitraum von Januar 2013 bis August 2017 weist die Station Leipzig-Holzhausen die höchste und die Station Starkenberg-Tegkwitz die niedrigste Durchschnittstemperatur auf. Die höchste Temperatur (36,4°C) wurde am 04.07.2015 an der Station Leipzig-Holzhausen gemessen und die niedrigste (-11,1°C) am 24.03.2013 an der Station Zeit. Die Station Starkenberg-Tegkwitz hat die größte Wertespanne (54,1 Kelvin) und die Station Zeit die geringste Wertespanne (46,9 Kelvin). Die Lufttemperatur der drei in Betracht gezogenen Stationen unterscheidet sich am stärksten zwischen den Minimumwerten (7,4 Kelvin). Die Temperaturdifferenz zwischen den Maximal- (0,8 Kelvin) und Mittelwerten (1,0 Kelvin) ist dagegen nicht signifikant.

Die Thiessen-Polygone für die Übertragung der Lufttemperatur in Frage kommenden Stationen des DWD im Umfeld des Kahnsdorfer Sees sind in Abb. 2 dargestellt.

Nach dem Thiessen-Polygon-Verfahren wurde der Kahnsdorfer See dem Thiessen-Polygon der Station Leipzig-Holzhausen zugeordnet, weshalb die Lufttemperatur der Station Leipzig-Holzhausen als Randbedingung in das 3D-Modell des Kahnsdorfer See Eingang fand. Die 0,2 % Fehlwerte in der Messreihe der Station Leipzig-Holzhausen wurden durch Werte der Station Zeit aufgefüllt.

Die Auswertung der relativen Luftfeuchte ist in Tab. 3 zusammengefasst.

Tab. 3: relative Luftfeuchtigkeit von 01.01.2013 bis 30.08.2017 in % und Fehlwerte (Stundenwerte) bei der Erfassung der relativen Luftfeuchtigkeit

Station	Mittel (%)	Min (%)	Max (%)	Spanne (%)	Fehlwerte (-)	Fehlwerte (%)
Leipzig-Holzhausen	76,4	16,0	100,0	84,0	88	0,2%
Starkenberg-Tegkwitz	79,1	14,0	100,0	86,0	30	0,1%
Zeitz	77,1	16,0	100,0	84,0	240	0,6%

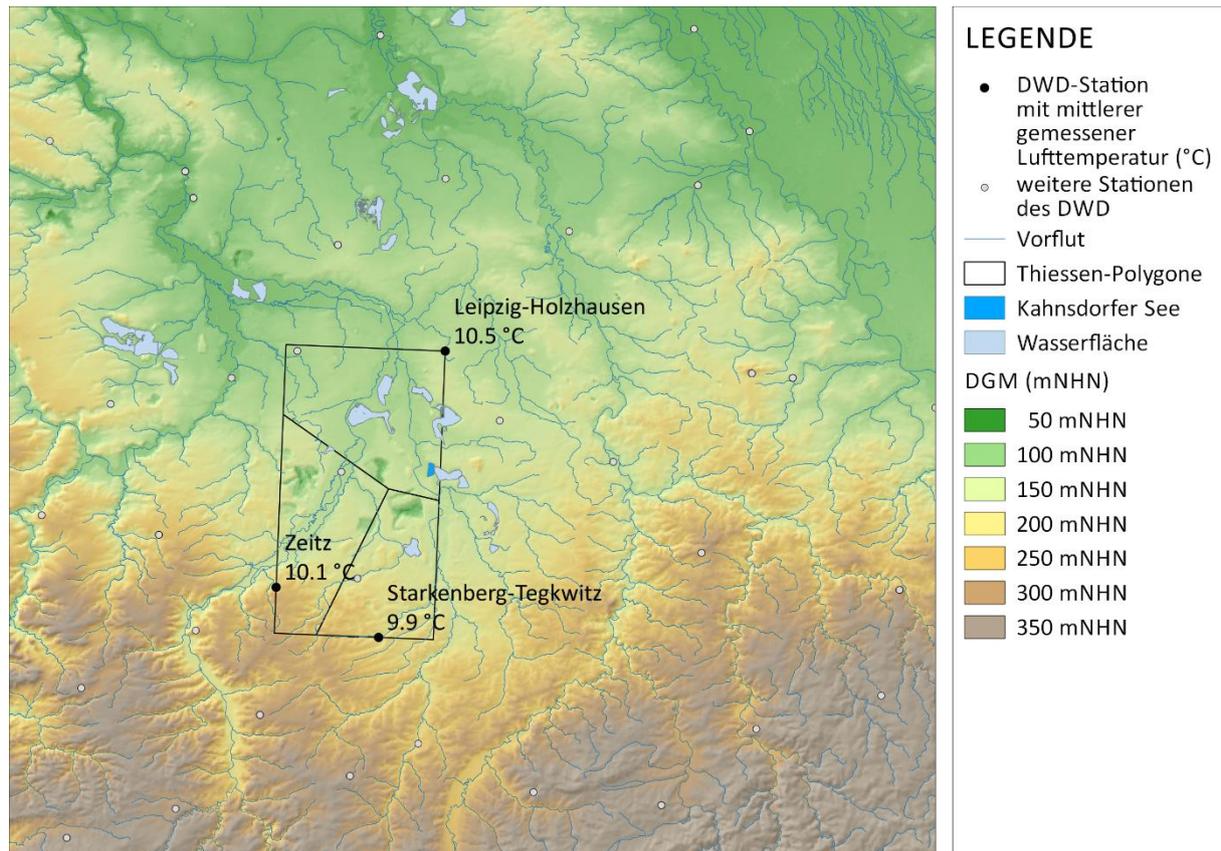


Abb. 2: Thiessen-Polygone der Stationen mit Messreihen der Lufttemperatur und relativen Luftfeuchte im Umfeld des Kahnsdorfer Sees

Die relative Luftfeuchte wird kombiniert mit der Lufttemperatur von der Station Leipzig-Holzhausen übernommen und die Fehlwerte durch Werte der Station Zeitz aufgefüllt. Die Auswertung des Luftdrucks in Stationshöhe ist in Tab. 4 zusammengefasst.

Tab. 4: Luftdruck in Stationshöhe von 01.01.2013 bis 30.08.2017 in hPa und Fehlerte (Stundenwerte) bei der Erfassung des Luftdrucks

Station	Mittel (hPa)	Min (hPa)	Max (hPa)	Spanne (hPa)	Fehlerte (-)
Leipzig-Holzhausen	1000	956	1026	70	0

Der Luftdruck in Stationshöhe wurde vollständig von der Station Leipzig-Holzhausen übernommen, da er eine vergleichbare geodätische Höhe aufweist. Abb. 3 bis Abb. 5 zeigen die für den Kahnsdorfer See generierten Randbedingungen Lufttemperatur (Abb. 3), relative Luftfeuchte (Abb. 4) und Luftdruck in Stationshöhe (Abb. 5).

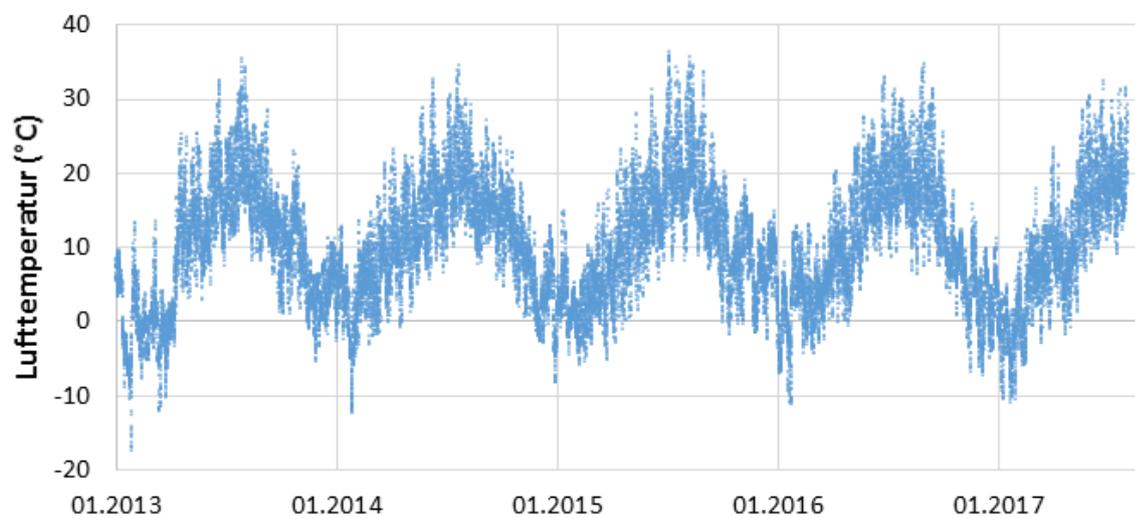


Abb. 3: Randbedingung Lufttemperatur am Kahnsdorfer See, generiert aus den Messreihen der DWD-Stationen Leipzig-Holzhausen und Zeit

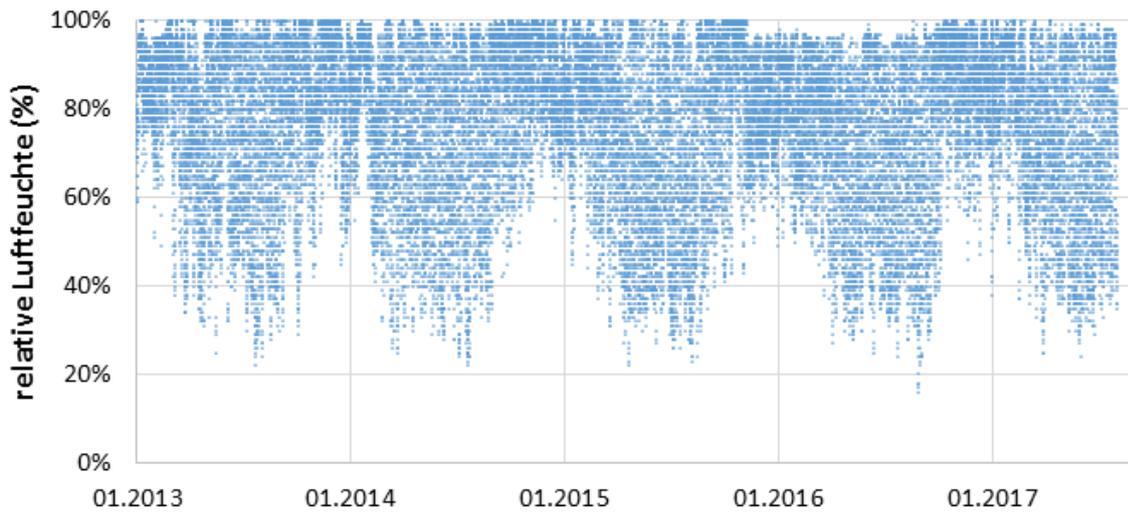


Abb. 4: Randbedingung relative Luftfeuchte am Kahnsdorfer See, generiert aus den Messreihen der DWD-Stationen Leipzig-Holzhausen und Zeitz

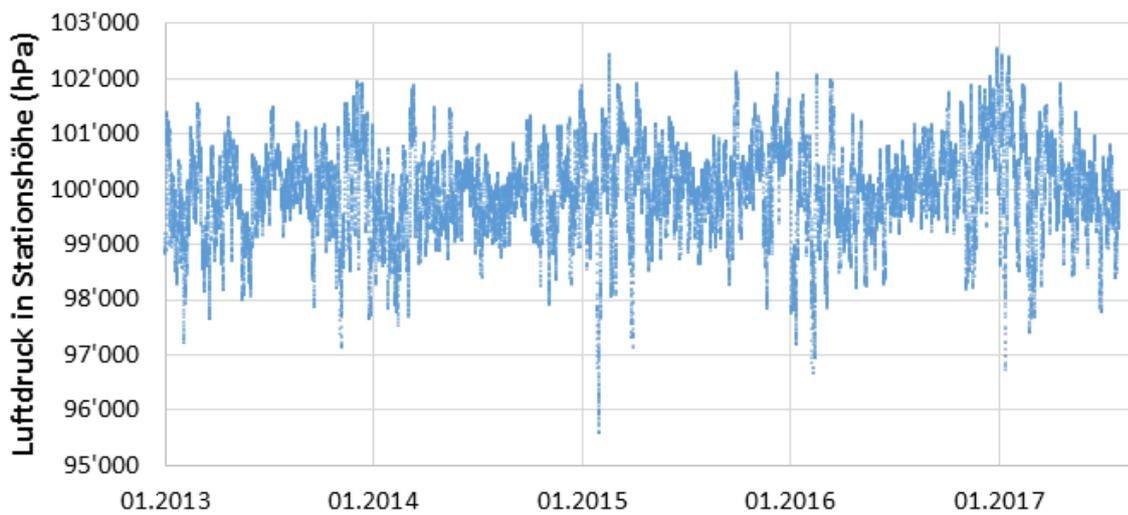


Abb. 5: Randbedingung Luftdruck in Stationshöhe am Kahnsdorfer See, generiert aus der Messreihe der DWD-Stationen Leipzig-Holzhausen

2.2.2 Niederschlag

Die Niederschlagshöhe wird an 4 Stationen gemessen (siehe Tab. 5). Die Niederschlagssummen sind in Tab. 5 zusammengefasst.

Tab. 5: Niederschlagshöhe von 01.01.2013 bis 30.08.2017 in mm und Fehlwerte (Stundenwerte) bei der Erfassung der Niederschlagshöhe

Station	Summe* (mm)	Min (mm)	Max (mm)	Fehlwerte (-)	Fehlwerte (%)
Leipzig-Holzhausen	582	0	59,9	29	0,1%
Meuselwitz	559	0	30,3	390	1,0%
Belgershain	592	0	27,3	282	0,7%
Pegau	556	0	25,7	31	0,1%

*mittlere jährliche Summe von 2013 bis 2016

Die Thiessen-Polygone der für die Übertragung der Niederschlagshöhe in Frage kommenden Stationen des DWD im Umfeld des Kahnsdorfer Sees sind in Abb. 6 dargestellt.

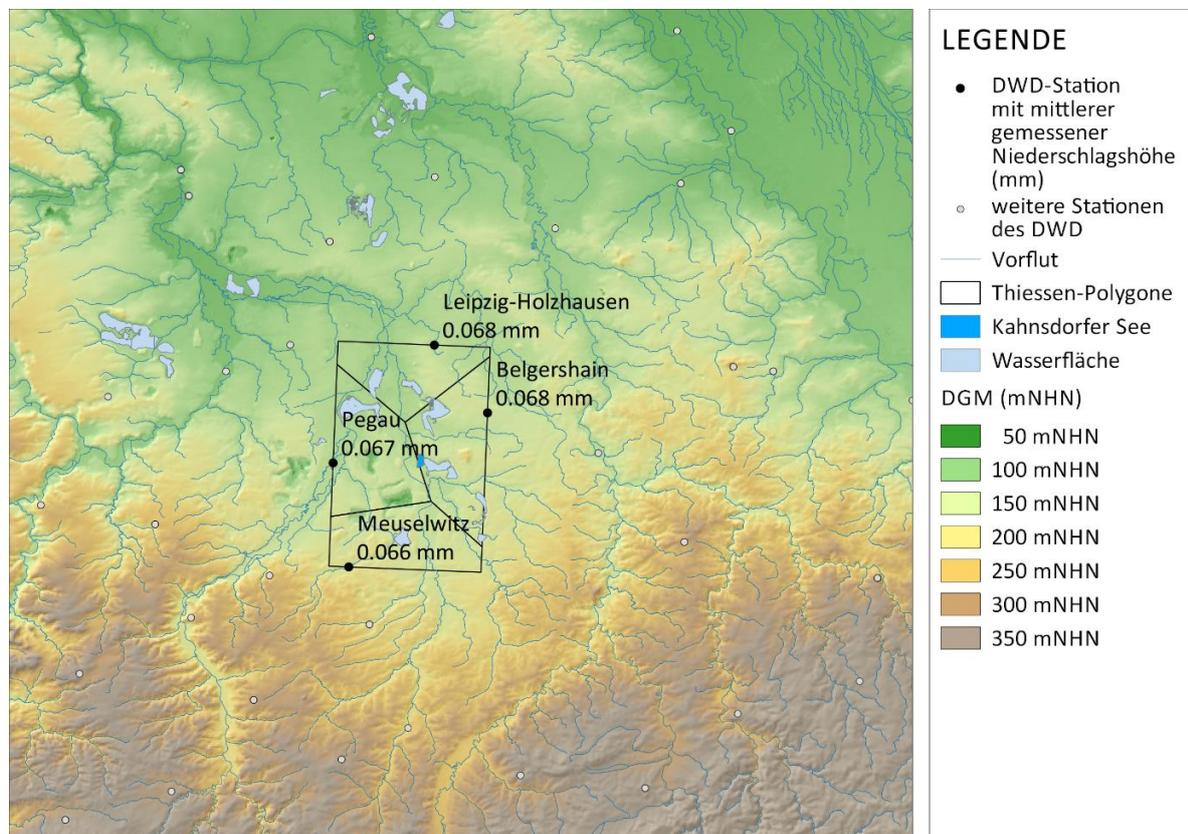


Abb. 6: Thiessen-Polygone der Stationen mit Messreihen der Niederschlagshöhe im Umfeld des Kahnsdorfer Sees

Die Abb. 7 zeigt die generierte Niederschlagshöhe für den Kahnsdorfer See.

Das Thiessen-Polygon-Verfahren ergab, dass der Kahnsdorfer See sowohl der Station Pegau als auch der Station Belgershain zugeordnet werden kann. Als Randbedingung für das 3D-

Seemodell wurde die Messreihe der Niederschlagshöhe der Station Pegau verwendet. Die 0,1 % Fehlwerte in der Messreihe der Station Pegau wurden durch Daten der Station Belgershain ausgeglichen.

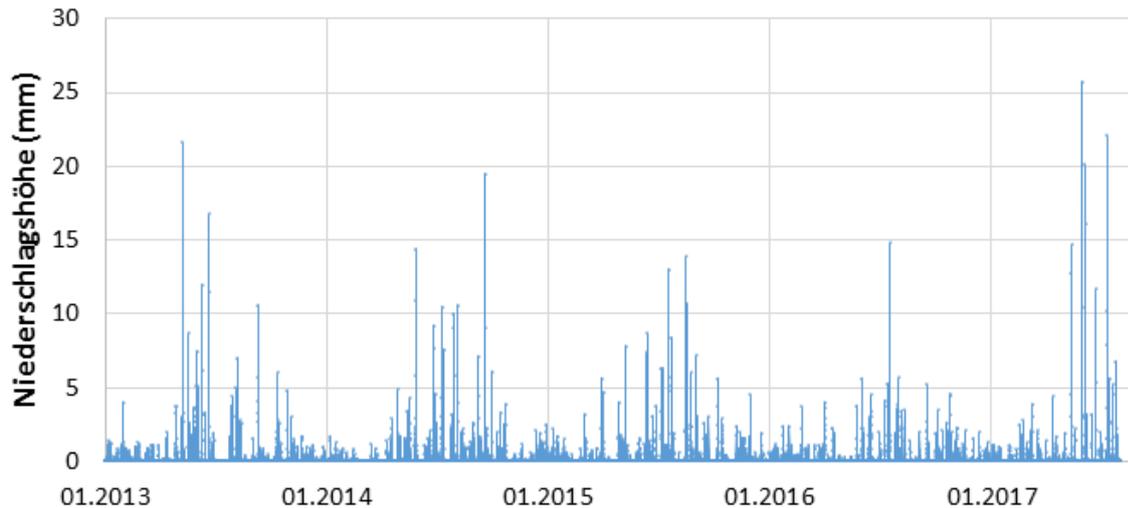


Abb. 7: Randbedingung Niederschlagshöhe am Kahnsdorfer See, generiert aus den Messreihen der DWD-Stationen Pegau und Belgershain

2.2.3 Windgeschwindigkeit und Windrichtung

Die gemessene Windrichtung und Windgeschwindigkeit liegt für 4 Stationen im Umfeld des Kahnsdorfer Sees vor. Die statistischen Kennwerte der Messreihen sind in Tab. 6 aufgeführt.

Tab. 6: Windgeschwindigkeit von 01.01.2013 bis 30.08.2017 in m/s umgerechnet auf 10 m Höhe über der Wasserfläche und Fehlwerte (Stundenwerte) der Datenerfassung

Station	Mittel (m/s)	Min (m/s)	Max (m/s)	Spanne (m/s)	Fehlwerte (-)	Fehlwerte (%)
Leipzig-Holzhausen	3,3	0,1	13,8	13,7	89	0,2%
Leipzig/Halle	4,9	0,0	22,9	22,9	3	0,0%
Oschatz	4,9	0,4	22,9	22,5	48	0,1%
Osterfeld	3,9	0,3	20,1	19,8	273	0,7%

Abb. 8 zeigt die Thiessen-Polygone der Stationen im Umfeld des Kahnsdorfer Sees, an welchen die Windgeschwindigkeit und Windrichtung gemessen werden.

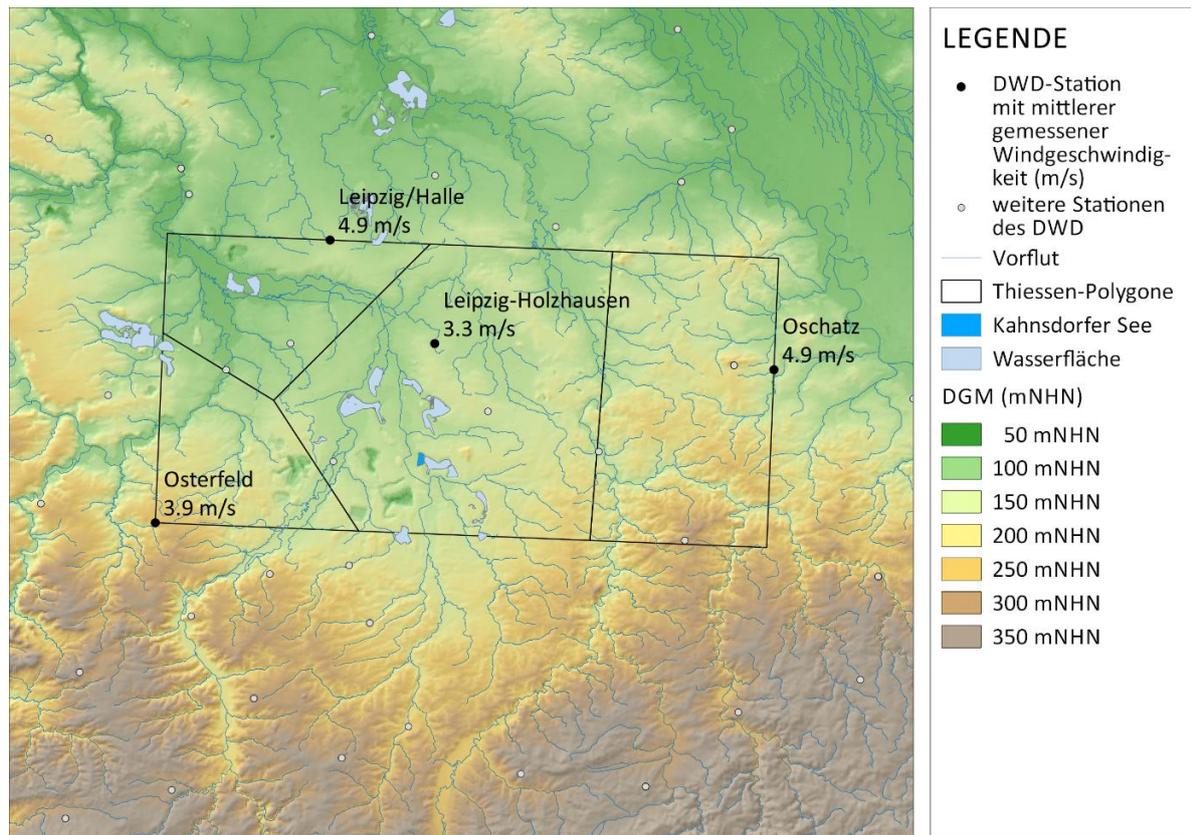


Abb. 8: Thiessen-Polygone der Stationen mit Messreihen der Windgeschwindigkeit und Windrichtung im Umfeld des Kahnsdorfer Sees

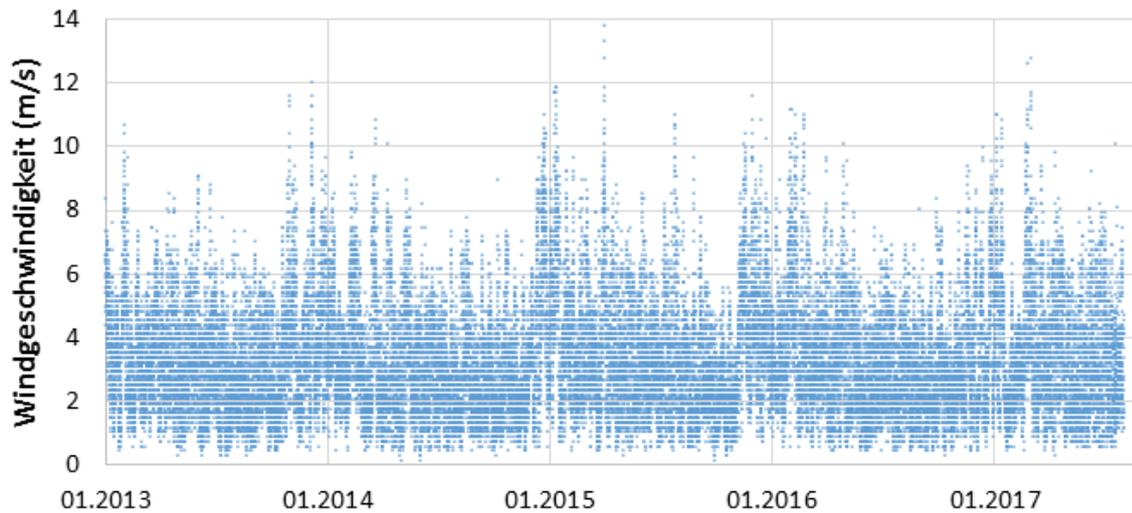


Abb. 9: Randbedingung Windgeschwindigkeit am Kahnsdorfer See, generiert aus den Messreihen der DWD-Stationen Leipzig-Holzhausen und Osterfeld, umgerechnet auf 10 m Höhe über Wasserfläche

Das Thiessen-Polygon-Verfahren ergab, dass die Windgeschwindigkeit der Station Leipzig-Holzhausen auf den Kahnsdorfer See übertragen werden kann. Hierfür wurde die Windgeschwindigkeit von 12 m Höhe auf 10 m Höhe über Freifläche umgerechnet und mit dem von WAGNER ET AL. (2000) empfohlenen Korrekturfaktor von 1,25 von Land- auf Wasserflächen übertragen. Die 0,2 % Fehlwerte in der Messreihe der Station Leipzig-Holzhausen wurden durch Werte der Station Osterfeld aufgefüllt.

Da die Windrichtung kombiniert mit der Windgeschwindigkeit übertragen wird (siehe Abb. 10) wurde die Windrichtung von der Station Leipzig-Holzhausen bzw. der Station Osterfeld übernommen.

Abb. 9 zeigt die für den Kahnsdorfer See generierte Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe über der Wasserfläche.

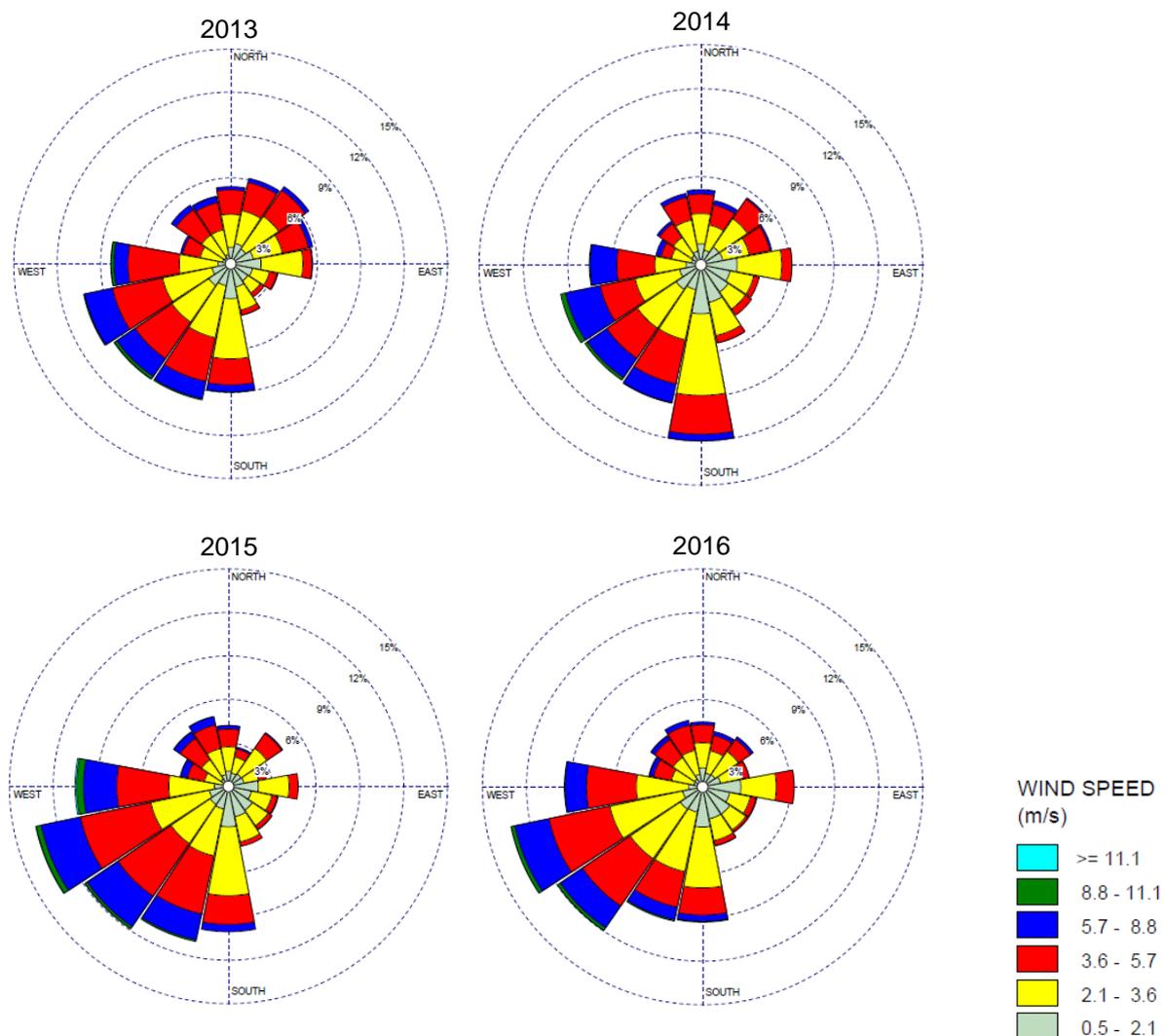


Abb. 10: Randbedingung Windrichtung am Kahnsdorfer See, dargestellt in Windrosen für die Jahre 2013 bis 2016, generiert aus den Messreihen der DWD-Stationen Leipzig-Holzhausen und Osterfeld

Die generierte Zeitreihe der Windrichtung wird in Abb. 10 pro Jahr mit einer Windrose veranschaulicht. Die Windrose zeigt die Windrichtung und die Windgeschwindigkeit. Die Häufigkeit wird durch die Länge des Segments angegeben.

2.2.4 Globalstrahlung

Die Globalstrahlung wurde im Umfeld des Kahnsdorfer Sees an 3 Stationen gemessen. Die statistischen Kennwerte der Messreihen sowie Fehlwerte in den Messreihen sind in Tab. 7 angegeben.

Tab. 7: Globalstrahlung von 01.01.2013 bis 30.08.2017 in kW/m² bzw. W/m² und Fehlwerte (Stundenwerte) bei der Erfassung der Globalstrahlung

Station	Summe (kW/m ²)	Min (W/m ²)	Max (W/m ²)	Fehlwerte (-)	Fehlwerte (%)
Chemnitz	1094*	0	967	742	1,8%
Halle-Kröllwitz	985**	0	906	24090	58,9%
Leipzig-Holzhausen	778*	0	975	11700	28,6%

* mittlere jährliche Summe von 2013 bis 2016
 ** mittlere jährliche Summe von 2013 bis 2014

Die Station Chemnitz ist von den drei in Frage kommenden Klimastationen am weitesten vom Kahnsdorfer See entfernt. Die an der Station Chemnitz gemessene Globalstrahlung wird dennoch für den Kahnsdorfer See angewandt, da die Messreihen der beiden übrigen Stationen (Station Halle-Kröllwitz und Leipzig-Holzhausen) sehr viele Fehlwerte, insbesondere im Kalibrierungszeitraum von 2014 bis 2016 aufweisen.

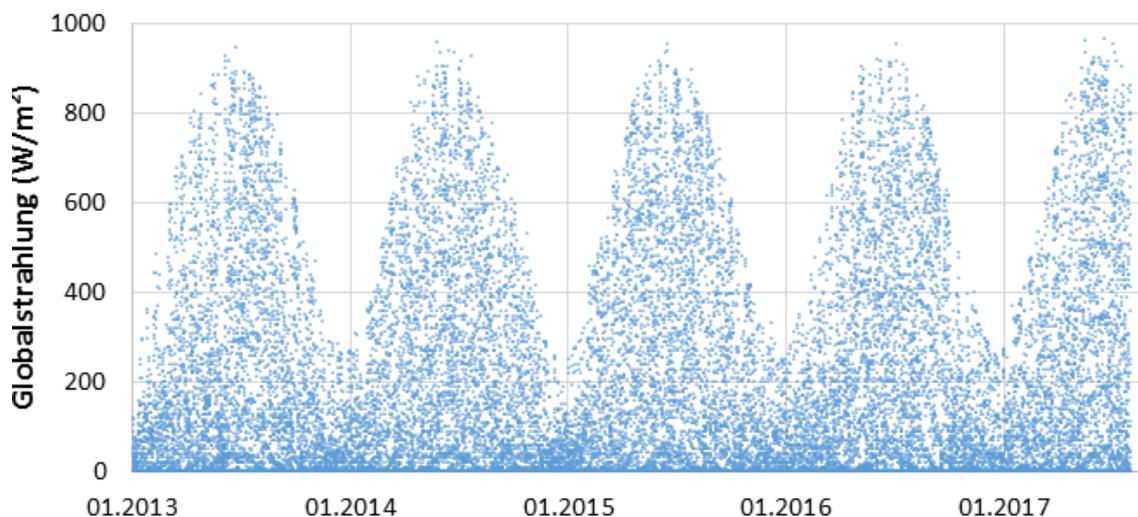


Abb. 11: Randbedingung Globalstrahlung am Kahnsdorfer See, generiert aus den Messreihen der DWD-Stationen Chemnitz, Leipzig-Holzhausen und Halle-Kröllwitz

Die relativ wenigen Fehlwerte in der Messreihe der Station Chemnitz wurden durch Messwertergebnisse der Stationen Halle-Kröllwitz und Leipzig-Holzhausen aufgefüllt, um eine vollständige Messreihe für den Kahnsdorfer See zu generieren.

Die für den Kahnsdorfer generierte Globalstrahlung ist in Abb. 11 dargestellt. Die Globalstrahlung variiert mit der Tages- und Jahreszeit. Die jahreszeitliche Schwankung ist sehr gut in Abb. 11 zu sehen.

2.3 Datenkorrektur

2.3.1 Allgemeines

Die Rohdaten liegen für alle Wetterstationen vollständig und konsistent vor. Wie bei KASPAR ET AL. (2013) angegeben, wurden die DWD-Daten nicht auf Homogenität geprüft. Der DWD beschreibt eine homogene Messreihe als eine "ungestörte, nur vom Klima beeinflusste Messreihe" (DWD 2015b). Weiterhin wird vom DWD empfohlen, dass "[...] die Messreihen [...] relativ häufig durch Veränderungen in der Umgebung der Stationen sowie durch Stationsverlegungen gestört sind [...]" und aus diesem Grund „[...] vor der Nutzung der Daten eine Homogenitätsprüfung und ggf. Homogenisierung oder eine Reduktion homogener Teilzeitreihen auf den Referenzzeitraum erforderlich [...]" (DWD 2015b) ist. Eine Homogenisierung der Daten konnte in der Bearbeitung nicht erfolgen, da keine Informationen zur Änderung der Messwerterfassung vorlagen. Da die verwendeten Zeitreihen von 2013 bis 2017 im Vergleich zu den Datenaufzeichnungen einen relativ kurzen Zeitraum wiedergeben, ist der resultierende Fehler als gering einzustufen.

Die verwendeten Niederschlagsdaten des DWD enthalten keine Korrektur des Verdunstungsfehlers.

2.3.2 Datenkorrektur der gemessenen Windgeschwindigkeiten

An der Station Leipzig-Holzhausen und Oschatz werden die Windgeschwindigkeiten und die Windrichtung 12 m über Freifläche gemessen. An den Stationen Leipzig/Halle und Osterfeld erfolgt die Messung in 10 m Höhe. Um die gemessene Windgeschwindigkeit aller Stationen vergleichen zu können, wurde diese, wenn nicht bereits vorhanden, auf die Bezugsmesshöhe von 10 m über Freifläche umgerechnet.

Die Windgeschwindigkeit steigt logarithmisch mit der Höhe über dem Boden oder der Wasseroberfläche. Der Rauigkeitseinfluss der überstrichenen Oberfläche führt zu einer Nullpunktverschiebung des logarithmischen Windprofils um die Verschiebungshöhe d und die Rauigkeitslänge z_0 (siehe Abb. 12).

Die Übertragung der Winddaten des DWD auf die Höhe 0 m (Seeoberfläche) erfolgte programmintern nach Gleichung 1.

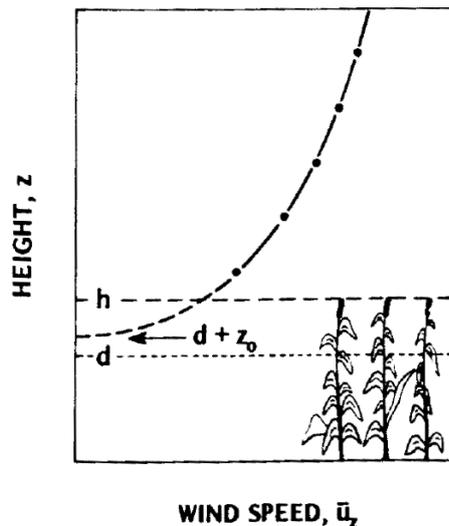


Abb. 12: Logarithmisches Windprofil über Vegetation und Bebauung mit der Bestandshöhe h , der Verschiebungshöhe d und der Rauigkeitslänge z_0 (OKE 1987)

Bei neutraler Schichtung der Atmosphäre ergibt sich nach OKE (1987) die Windgeschwindigkeit in Bezugsmesshöhe u_z aus dem logarithmischen Windprofil über Vegetation und Bebauung nach Gl. 1 mit der gemessenen Windgeschwindigkeit u_* , der von Karman-Konstante K von 0,4, der Rauigkeitslänge z_0 über Wasser von 0,0002 und der Verschiebungshöhe d über Wasser von Null (OKE 1987).

$$u_z = u_* / K \cdot \ln(z - d / z_0) \quad \text{Gl. 1}$$

An den Stationen Leipzig-Holzhausen und Oschatz wird die Windgeschwindigkeit in 12 m Höhe über Grund gemessen. Mit der Messhöhenverschiebung ist die Rauigkeit des Geländes im Umfeld der Station berücksichtigt worden, so dass die gemessenen Windgeschwindigkeiten der Station Leipzig-Holzhausen und Oschatz mit anderen Stationen vergleichbar sind.

2.3.3 Fehlwerte in der Messreihe

Für eine Messreihenübertragung wird eine komplette lückenlose Datenreihe benötigt. Ist die Anzahl der Fehlwerte in den Messwerten hoch, insbesondere im für die Kalibrierung des Seemodells verwendeten Zeitraum von 2014 bis 2016, kann die Messreihe nicht für eine Übertragung verwendet werden.

3 Modellaufbau und Modellkalibrierung

3.1 Randbedingungen des 3D-Seemodells

3.1.1 Morphologische Randbedingungen

Zur Erstellung eines digitalen Höhenmodells (siehe Abb. 13) der topographischen Gestalt des Kahnsdorfer Sees lagen als Bathymetrie Lotungsdaten der LMBV vor. Die hoch aufgelösten Daten der Lotung (1x1 m Grid) wurden auf eine 5x5m Grid interpoliert. Abb. 13 zeigt das digitale Höhenmodell, welches für das 3D-Seemodell verwendet wurde.

Die maximale Wassertiefe des Sees im südlichen Teil des Beckens beträgt 43,3 m, wenn ein Wasserstand von 126,5 m NHN angenommen wird.

Die Bathymetrie des Kahnsdorfer Sees ist typisch für ein Tagebaurestloch. Der technologiebedingte Randschlauch ist in der Beckenstruktur deutlich zu erkennen (Abb. 13).

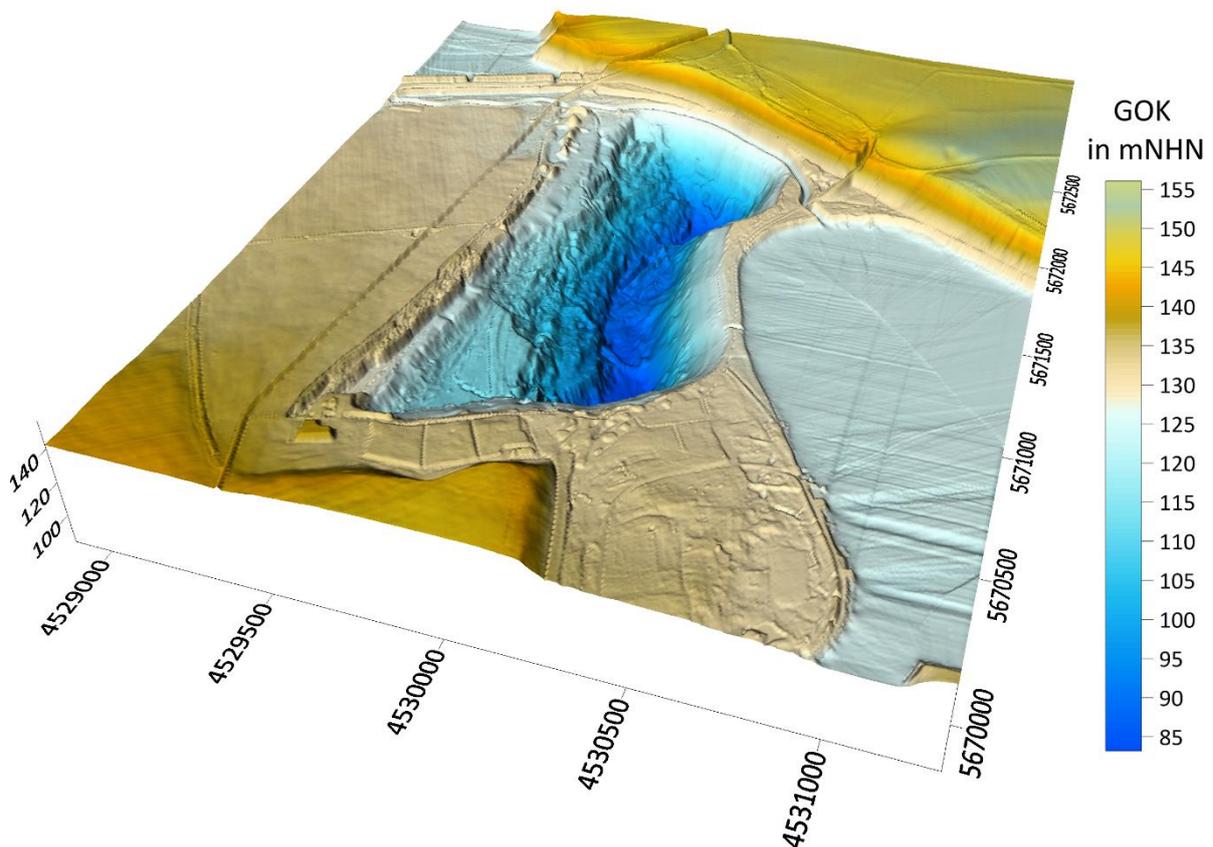


Abb. 13: digitales Höhenmodell des Kahnsdorfer Sees und des umliegenden Geländes

Die Wasserfläche erstreckt sich von Nord nach Süd über eine Länge von ca. 1700 m (L_{eff}) und von Ost nach West von ca. 860 m (B_{eff}).

Welchem Mixistyp der Kahnsdorfer See zuzuordnen ist, kann anhand des Osgood-Indexes OI (Gl. 3, COOKE 1993, NEWTON 1999) oder des Tiefengradient F_{Grad} (Gl. 4, NIXDORF 2004, LAWA 1998) ermittelt werden.

Der Osgood-Indexes OI (OSGOOD 1988) wird mit der mittleren Wassertiefe z_m und der See- fläche ermittelt.

$$z_m = \frac{V}{A} \quad \text{Gl. 2}$$

V – Seevolumen in m^3 , A – Wasserfläche in m^2

$$OI = \frac{z_m}{\sqrt{A}} \quad \text{Gl. 3}$$

A – Seefläche in km^2

Nach OSGOOD (1988) sind Gewässer mit einem Osgood-Index $OI < 6,0$ bis $7,0$ nicht oder sehr schwach geschichtet und können auch in der Sommerstagnationsphase Vollzirkulationen aufweisen. Bei sehr kleinen OI -Werten von $< 3,0$ - $4,0$ bestehen Schichtungen meist nur wenige Tage. Die Seen sind polymiktisch (SUCHANEK 2008). Seen mit einem OI -Wert > 8 sind tendenziell stabiler geschichtet (COOKE 1993).

Für den Kahnsdorfer See beträgt der OI 15,9 (vgl. Tab. 8). Die Werte liegen in einem Bereich der nach OSGOOD (1988) geschichtete Verhältnisse ableiten lässt. Anhand der vorliegenden vertikalen Temperaturprofile kann der Zusammenhang bestätigt werden.

Ebenso wie der Osgood-Index, lässt auch der Tiefengradient F_{Grad} (Gl. 4) eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit windinduzierter Volldurchmischungen in den Sommerphasen zu (NIXDORF 2004). In dessen Berechnung gehen die maximale Gewässertiefe z_{max} sowie die effektive Länge L_{eff} und Breite B_{eff} des Sees ein.

$$F_{\text{Grad}} = \frac{z_{\text{max}}}{4,785 \cdot (L_{\text{eff}} + B_{\text{eff}})^{0,28}} \quad \text{Gl. 4}$$

Zur Bestimmung des Mixistyps gelten Gewässer mit einem Tiefengradienten $< 1,5$ als instabil geschichtet und Werte $> 1,5$ beschreiben stabile Temperaturschichtungen während der Stagnationsphase (NIXDORF 2004).

Der berechnete Tiefengradient F_{Grad} für das Kahnsdorfer See liegt bei 7,0 (Tab. 8). Der Tiefengradient lässt auf eine stabile Schichtung des Wasserkörpers in der Sommerstagnation schließen und bestätigt die Aussagen, die aus dem OI ableitbar sind.

Tab. 8: Morphometrische Daten des Kahnsdorfer Sees

Parameter		Wert	Einheit
Planfestgestellter Endwasserstand	WST	126,5	m NHN
Volumen zum Endwasserstand	Vol	22,1	Mio. m ³
Wasserfläche	A _{See}	1247889	m ²
mittlere Tiefe des Gewässers	$z_m = V_{\text{See}} / A_{\text{See}}$	17,7	m
maximale Wassertiefe	Z _{max}	43,3	m
effektive Länge	L _{eff}	1700	m
effektive Breite	B _{eff}	860	m
effektive Achsenlänge	$D_a = (L_{\text{eff}} + B_{\text{eff}}) / 2$	1280	m
theoretische Epilimniontiefe	$z_{\text{epi}} = 5,81 (D)^{0,28}$	6,2	m
Schichtdicke Epilimnion	$E = 4,6 (D_a)^{0,41}$	5,1	m
Tiefengradient F _{Grad}	$F_{\text{Grad}} = z_{\text{max}} / (4,785 (L_{\text{eff}} + B_{\text{eff}})^{0,28})$	7,0	-
Osgood-Index (OI)	$OI = z_m / \sqrt{A}$	15,9	
Referenz-Sichttiefe	$ST_{\text{Ref}} = 0,265 \cdot z_m + 0,425 \cdot F + 0,398$	8,1	m

3.1.2 GW-Zustrom und GW-Abstrom sowie GW-Beschaffenheit

Als Randbedingung des Seemodells wurden die GW-Zuströme und -Abströme aus den Berechnungen der IBGW (2015) übernommen. Eine detaillierte Darstellung der Daten enthält IBGW (2015) sowie das limnologische Gutachten BGD ECOSAX (2017). Die Bilanzgebiete wurden ebenfalls auf das Seemodell übertragen. Ihre räumliche Verbreitung zeigt Abb. 14.

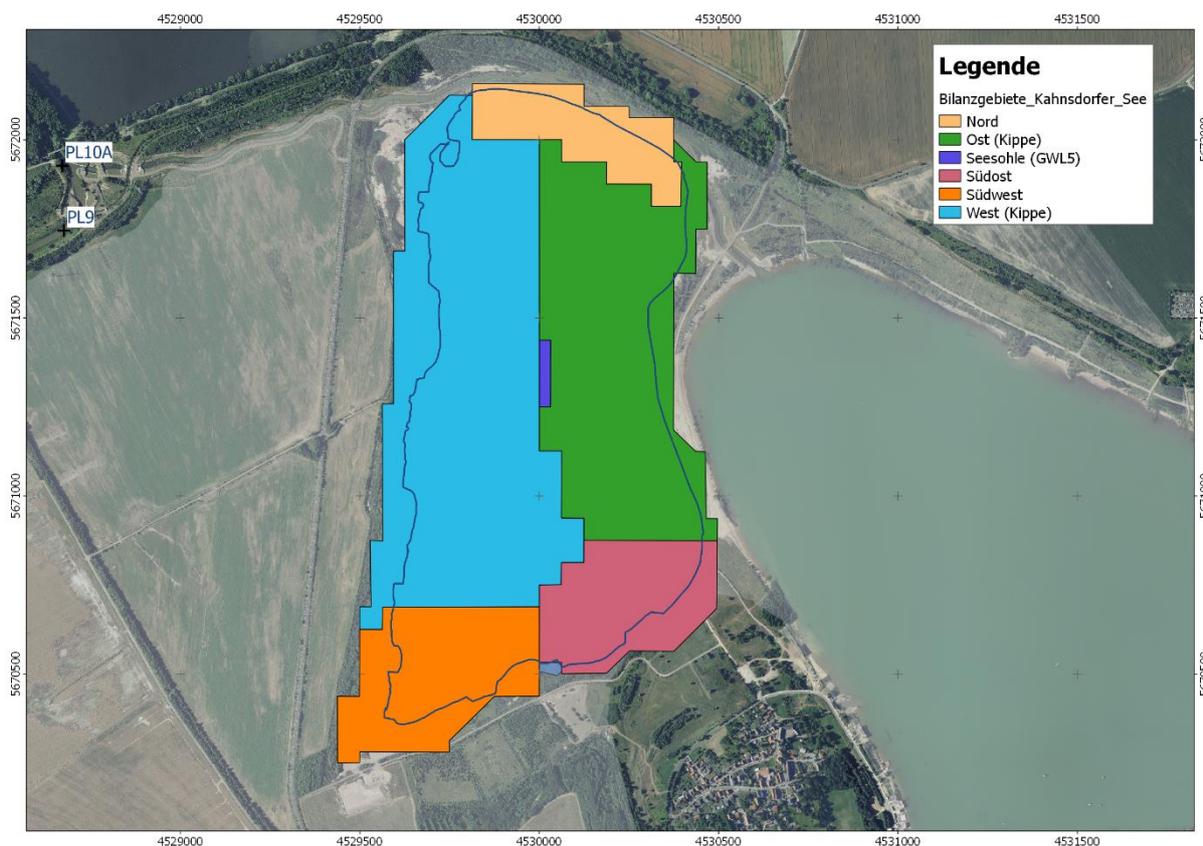


Abb. 14: Bilanzgebiete für die Zuordnung der GW-Zuströme und GW-Abströme

Der in IBGW (2015) ausgewiesene Abfluss in den Hainer See und der Zufluss aus dem Heidegraben wurden ebenfalls auf das Seemodell übertragen.

In dem GW-Modell (IBGW 2015) werden auch Zeitreihen für die Evaporation von der Seefläche und Niederschläge ausgewiesen. Grundlage für die vorliegenden Berechnungen sind jedoch die Messwerte des DWD, vorliegend als Stundenwerte. Die Evaporation wird mit den Messwerten des DWD auf Grundlage der Wärmebilanz des Sees berechnet.

Die mittleren GW-Zuflüsse, deren Anteil am gesamten GW-Zustrom in den Kahnsdorfer See sowie die mittlere Fe-Konz. fasst Tab. 9 zusammen. Die Daten wurden aus BGD ECOSAX (2017) und IBGW (2015) entnommen.

Die GW-Volumenströme werden dem Seemodell in den Polygonen der Bilanzgebiete, die Abb. 14 zeigt, in der Zelle zugegeben, die über dem Seesediment liegt (bottom cell).

Tab. 9: Fe-Konz. der GW-Zuströme

Nr	Bilanzgebiet	GWL	Anteil an GW	Q_Zu_Mittel	Fe-Konz.
			%	m ³ /min	mg/L
1	Nord	2.6/2.7	47	0,1056	0,4
2		3.0	0	0,0000	2,0
3	West	Kippe	21	0,0538	164
4	Südwest	Kippe	20	0,0503	2000
5	Südost	1.5	4	0,0069	14,0
6		2.6/2.7	6	0,0094	46,8
7		3.0	0	0,0002	170
8		Kippe	0	0,0014	2000
9	Ost	Kippe	1	0,0019	25
10	Seesohle	5.0	0	0,0000	1,7

Der Zustrom über den Oberflächenabfluss (OA) wird in BGD ECOSAX (2017) mit einem mittleren Volumenstrom von 0,3 m³/min angegeben. Die Fe-Konz. des OA sind mit 0,57 mg/L gering. Mit dem OA-Volumenstrom wird im Seemodell die gesamte Wasserfläche beaufschlagt.

3.1.3 Klimadaten zur Festlegung der meteorologischen Randbedingungen

Für das 3D-Seemodell wurden im Zuge der Datenermittlung die meteorologischen Daten mit hoher Auflösung (Stundenwerte) recherchiert. Als Quelle wurden dabei die Datenaufzeichnungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) genutzt (siehe Abschnitt 2).

Mit den Klimadaten wurden die Modellrandbedingungen festgelegt. Folgende Parameter gingen in die Berechnung ein:

- Lufttemperatur,
- relative Luftfeuchte,
- Luftdruck in Stationshöhe,
- Niederschlagshöhe,
- Windgeschwindigkeit,
- Windrichtung und
- Globalstrahlung.

Die meteorologischen Daten wurden vor ihrer Verwendung auf Vollständigkeit und Konsistenz geprüft und für die Verwendung im Modell aufbereitet.

3.1.4 Vertikale Temperaturprofile des Kahnsdorfer Sees

Die gemessenen Epilimnionstiefen liegen im Bereich von 3,9 bis 10 m (siehe Abb. 15). Im stationären Modell wird eine Schichtung mit einer Wassertiefe von 7 m angenommen. Im instationären Modell wird die Schichtung auf der Grundlage des Wärmeaustausches mit der Atmosphäre berechnet (siehe Abschnitt 3.5).

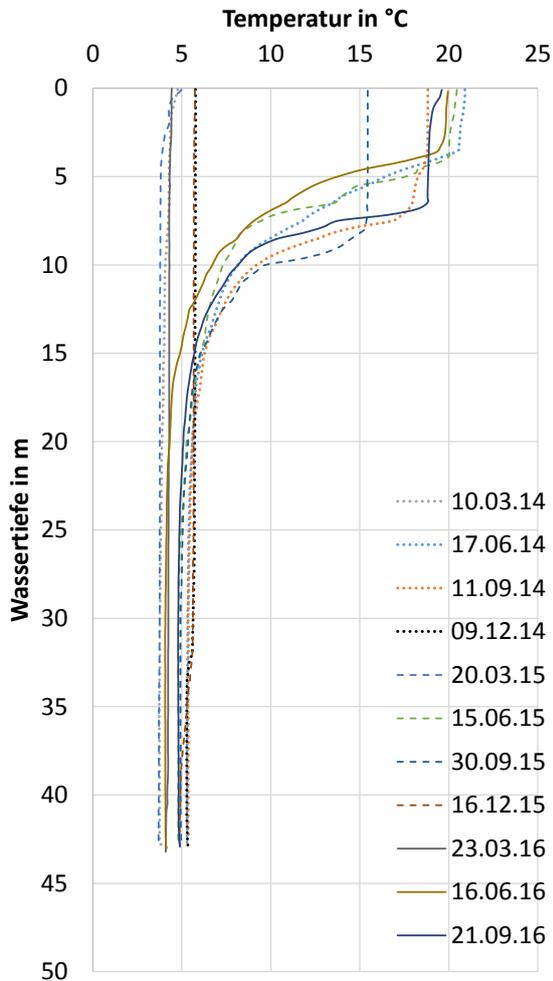


Abb. 15: Temperaturprofile der MST RWS1 von 2014 bis 2016

Der Eintrag von Grundwasser in den See und dessen Wirkung auf die Schichtung und die Fe-Konzentration wird im stationären Modell (nur zur Kalibrierung verwendet) vernachlässigt und ist in das instationäre Modell integriert. Dem Grundwasser wurde dabei eine konstante Temperatur von 10°C zugewiesen.

3.2 Verwendete Programme

Zur numerischen Modellierung wurde das Programm „MOHID-Water Modelling System“ verwendet. Es handelt sich um ein vom MARETEC (Marine and Environmental Technology Research Center) in FORTRAN entwickeltes 3D-Oberflächenwassermodellierungssystem. Das

MARETEC gehört zur Technischen Universität Lissabon. Das Programm MOHID ist durch die Verfügbarkeit des Quellcodes sehr gut dokumentiert.

Das MOHID-System besteht aus verschiedenen hierarchisch angeordneten Teilmodulen. Dabei bilden die ausführbaren Module "SOIL, LAND und WATER" die oberste Ebene. Das Modul MOHID Soil dient zur Modellierung von Wasserströmungen in porösen Medien und das Modul MOHID Land zur Simulation von Flusssystemen. MOHID-Water simuliert auf Basis der finiten Volumen Methode Strömungsvorgänge in Seen, Ozeanen und Flussmündungen. Über grafische Benutzeroberflächen ist es mit der Software möglich, im Preprocessing Gitter und ein digitales Höhenmodell auf Basis der Bathymetrie des Untersuchungsgebietes zu generieren, die Berechnung des Modells durchzuführen und im Postprocessing die berechneten Ergebnisse darzustellen.

Die visuelle Darstellung der Simulationsergebnisse kann unmittelbar in MOHID-Water oder mit einem GIS-Programm erfolgen. Am GFI wurden für den Zugriff auf die von MOHID erstellten Ergebnisdateien im hdf5-Format Programme entwickelt, die die Visualisierung der Modellergebnisse vereinfachen und die Berechnung spezielle Parameter, wie z. B. der RICHARDS-Zahl oder die Umrechnung von Einheiten (z. B. PSU in $\mu\text{S}/\text{cm}$ oder von $\text{mg}_{\text{CaCO}_3}/\text{L}$ in mmol/L) automatisch durchführen.

Als Datenausgabeformate sind in *.txt, *.dat und *.hdf5 verfügbar. Der modulare Aufbau von MOHID gestattet die Definition von Rand- und Anfangsbedingungen in Skriptdateien, die für die verwendeten Module zu entwickeln sind. Mit MOHID ist es möglich ein-, zwei- und dreidimensionale Modelle zu erstellen.

Die Bearbeitung des Seemodells erfolgte mit dem Modul MOHID-Water. Die in diesem Modul wirksamen Zusammenhänge und Untermodule sind in Abb. 16 schematisch dargestellt. MOHID berücksichtigt dabei neben dem Energieaustausch zwischen Wasserkörper und Atmosphäre durch Strahlung, Windeinfluss, Niederschlag, Verdunstung auch Zu- und Abflüsse aus Grund- und Oberflächenwasser.

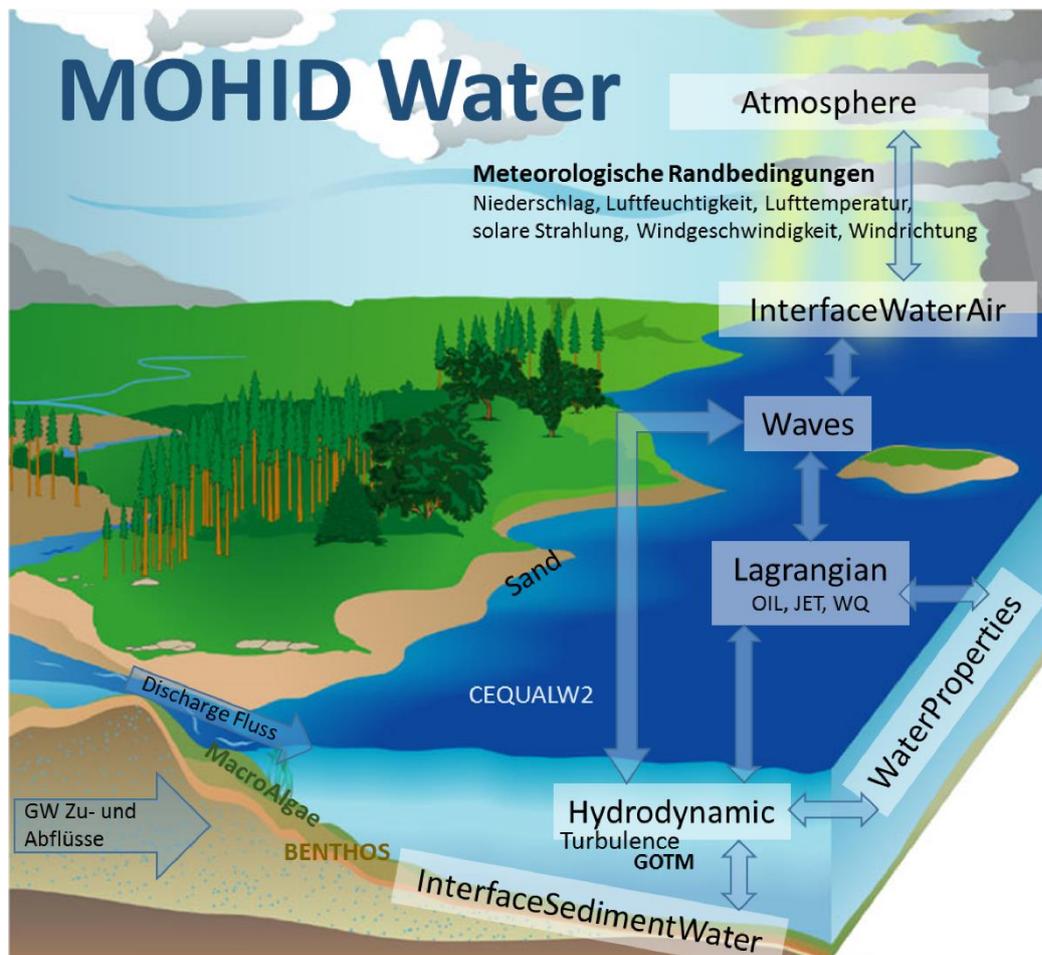


Abb. 16: Schema der im Programm berücksichtigten Zusammenhänge und Module

3.3 Horizontale und vertikale Diskretisierung des Modellraumes

Für die horizontale Diskretisierung des Wasserkörpers wurden mehrere Gitter erzeugt und getestet. Die Zellausdehnung in X- und Y-Richtung der Gitter wurde von dabei 5 m x 5 m bis 250 m x 250 m variiert.

Den Vergleich der Wasserstand-Volumen-Beziehung zwischen den getesteten Gittern und dem HGMS-2006 (siehe IBGW (2006)) verwendeten Beziehung zeigt Abb. 17. Die Gitter zeigen generell nur geringe Abweichungen.

Bei Verwendung einer Zellgröße von 250 m wird die WST-Vol-Beziehung der LMBV deutlich überschätzt. Die anderen Gitter unterschätzen die LMBV WST-Vol-Beziehung geringfügig. Werden die Bathymetrie-Daten der LMBV zugrunde gelegt, ergibt sich eine Volumenabweichung für alle Gitter von < 4 %.

Die Kalibrierung des Modells wurde mit einem 100 m x 100 m Gitter durchgeführt, da die erreichte Genauigkeit hierfür als genügend angesehen wird. Allen Berechnungen zum Fe-

Eintrag des Pleißewassers in den Kahnsdorfer See wurde ein 50 m x 50 m Gitter zugrunde gelegt.

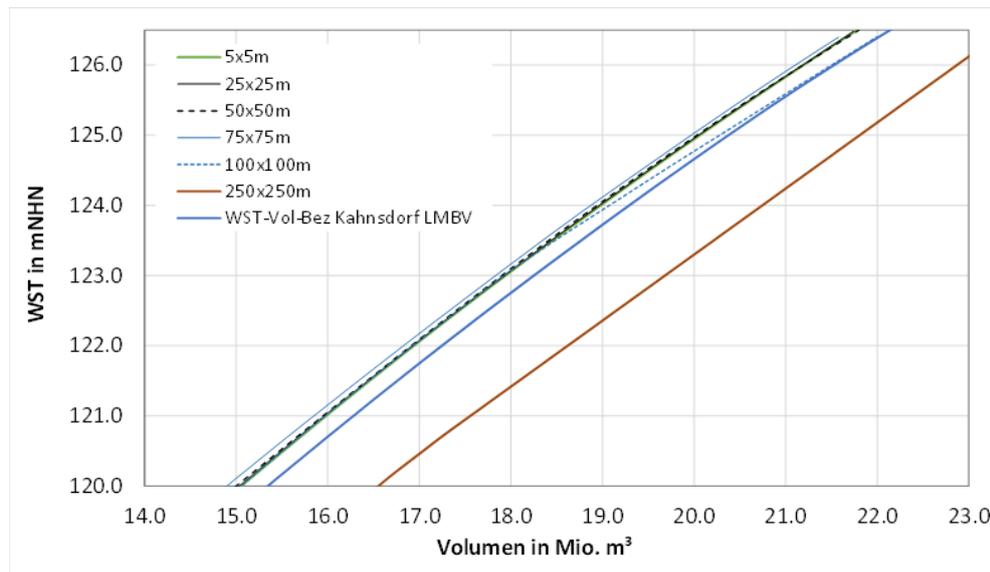


Abb. 17: Wasserstand-Volumen-Beziehungen bei variierender horizontaler Gitterweite

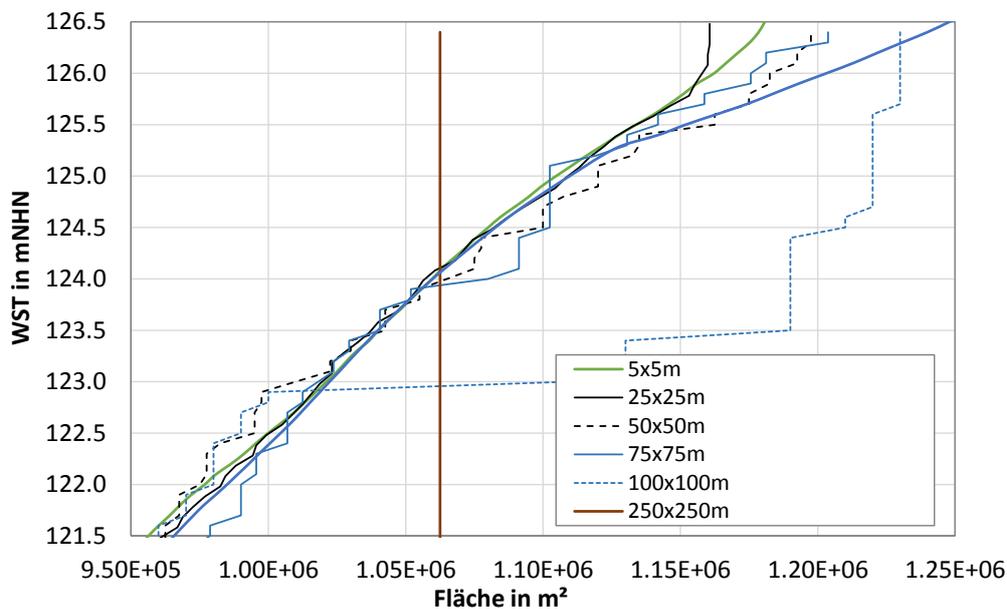


Abb. 18: Wasserstand-Seeflächen-Beziehungen bei variierender horizontaler Gitterweite im Vergleich zum HGMS 2006 (siehe IBGW (2006))

Zur vertikalen Diskretisierung wurde der Modellraum in 43 Schichten mit Schichtdicken zwischen 0,5 und 1 m unterteilt.

Abb. 19 zeigt die horizontale Diskretisierung mit den Wassertiefen und die Schnittachsen in XZ und YZ-Richtung, die später für die Ergebnisdarstellung gewählt wurden.

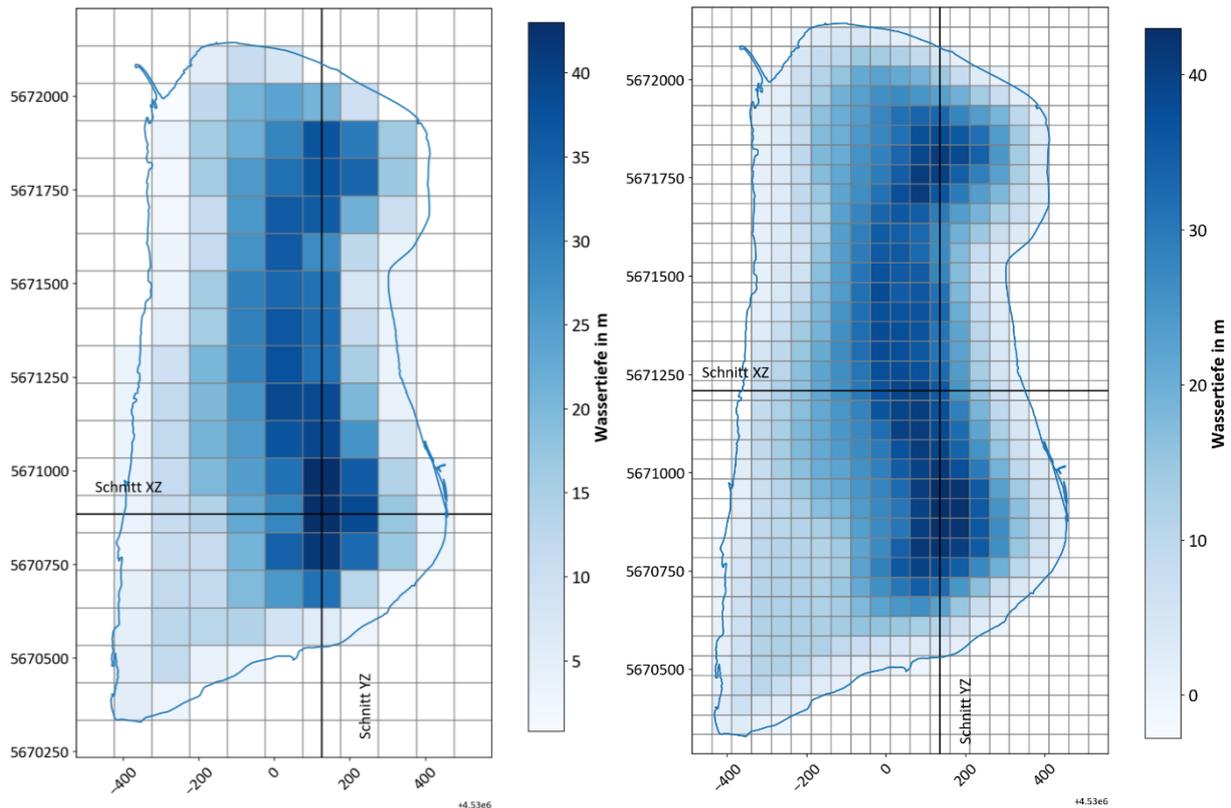


Abb. 19: Horizontale Diskretisierung des 100 m x 100 m Grid (links) und 50 m x 50 m Grids (rechts) mit Uferlinie und den vertikalen Schnitten entlang der X-Achse (A-A' bzw. Schnitt XZ) sowie der Y-Achse (B-B' bzw. Schnitt YZ)

Das vertikale Gitter am XZ-Schnitt aus Abb. 19 zeigt Abb. 20. Den YZ-Schnitt durch das Gewässer stellt Abb. 21 dar.

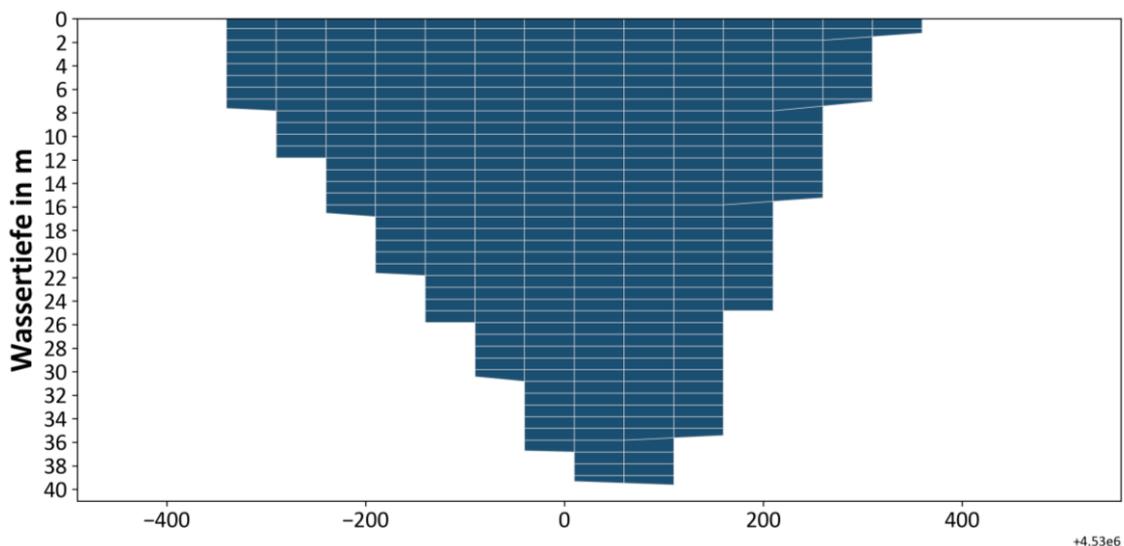


Abb. 20: Vertikale Diskretisierung des 50 m x 50 m Grids (XZ-Schnitt), die Z-Achse wird stark überhöht dargestellt

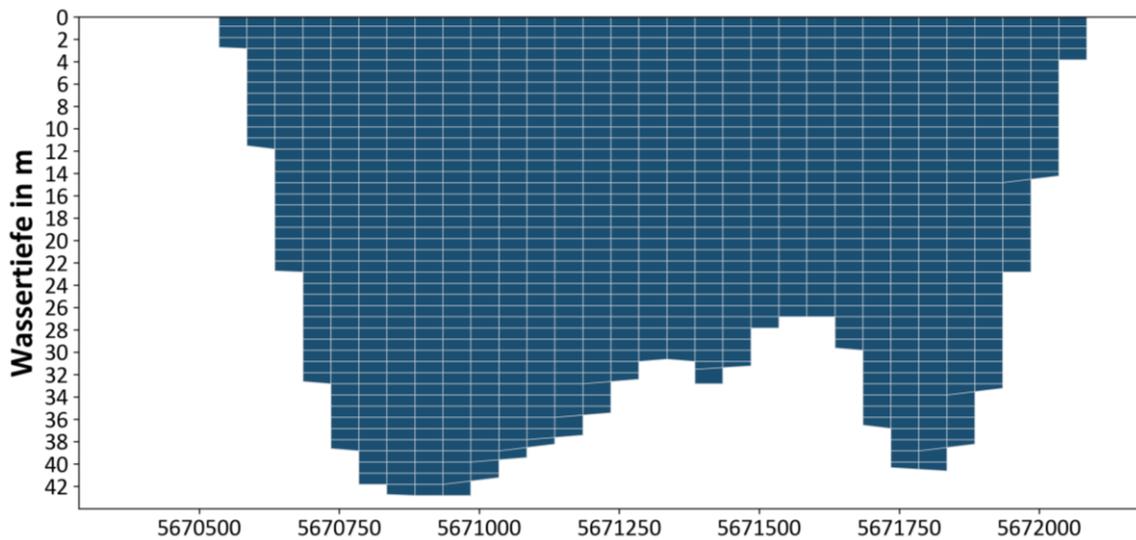


Abb. 21: Vertikale Diskretisierung des 50 m x 50 m Grids (YZ-Schnitt), die Z-Achse wird stark überhöht dargestellt

3.4 Kopplung von Wasserkörper und Atmosphäre

Das Seemodell beschreibt ein offenes System, in welchem Grundwasser dem See zu und von diesem abströmen kann. Weiterhin werden in die Massenbilanz die Niederschläge und die Verdunstung einbezogen. Die Verdunstung wird über die Wärmebilanz des Sees berechnet. Dadurch wird es möglich, den durch diese Bilanzgrößen veränderlichen Wasserstand abzubilden.

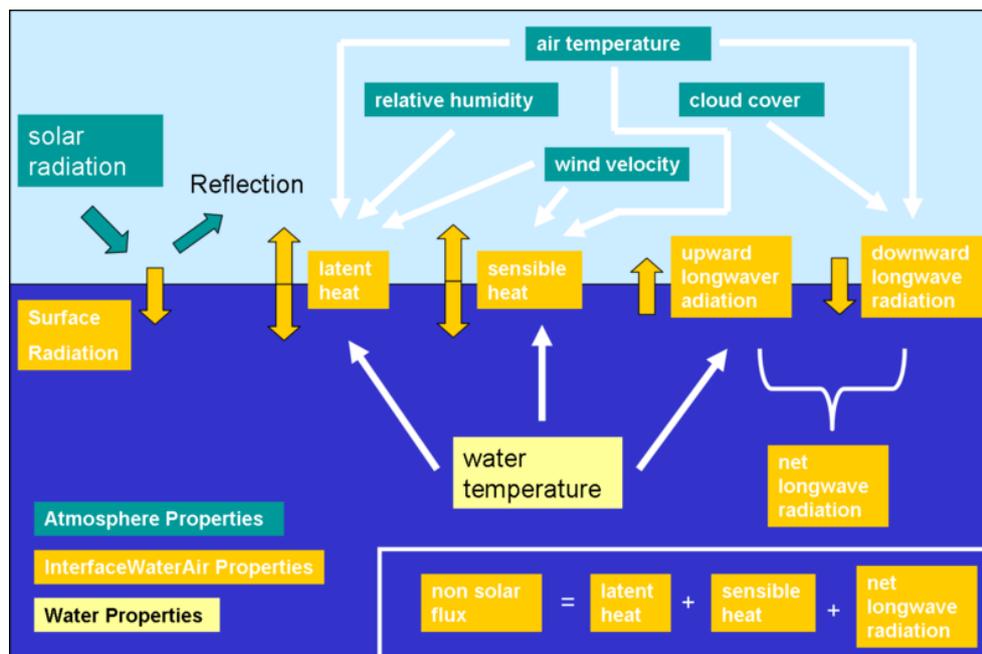


Abb. 22: Schema der Kopplung Wasserkörper-Atmosphäre im Seemodell (MARETEC 2009)

Ein Energieaustausch mit der Atmosphäre ist vollständig im Modell implementiert. Ein Austausch von Energie über den Gewässerboden bleibt im Modell unberücksichtigt.

Die Interaktionen der auf den Energiehaushalt des Wasserkörpers wirkenden Parameter im Seemodell sind in Abb. 22 schematisch dargestellt. Das Rückstrahlvermögen des Wasserkörpers (Albedo) in Oberflächengewässern wird in der Literatur (BAUMGARTNER, A. & LIEBSCHER, H.-J. 1996 bzw. KRISTINA B. KATSAROS, ET. AL. 1985) mit 5 ... 15 % angegeben. In der vorliegenden Modellierung wurde dementsprechend ein über das Jahr gleichbleibender Albedo von 5 % als Durchschnittswert festgelegt. Dichteströmungen und Turbulenzen werden mit dem Turbulenzmodell GOTM (Global Ocean Turbulence Model) berechnet.

3.5 Modellzeitraum und Modellkalibrierung

Das instationäre Modell wurde entsprechend der Aufgabenstellung für den Verlauf des Jahres 2016 parametrisiert. Für die Kalibrierung erfolgte eine Erweiterung des Zeitraums von 2014 bis 2016.

Die Güte der Kalibrierung des Modells sichert die Qualität der Modellaussagen im Rahmen der Prognoseberechnungen und die Plausibilität des gesamten Modells. Die Kalibrierung des Seemodells erfolgte anhand von Messdaten (vertikale Temperaturprofile des LMBV-MHM, Wasserstandsentwicklung). Der Einfluss der Randbedingungen auf die Berechnungsergebnisse wird in einer Sensitivitätsanalyse dokumentiert.

Gemessene Extinktionskoeffizienten waren für den Kahnsdorfer See nicht bekannt. Der Extinktionskoeffizient kann aber aus der Sichttiefe (MHM Datensatz) abgeschätzt werden (WILLIAMS ET AL. 1980, Gl. 5).

$$\lambda = 1,11 \cdot Z_s^{-0,73}$$

Gl. 5

In Gl. 5 ist λ der Extinktionskoeffizient in m^{-1} und Z_s die Sichttiefe in m, die mit einer Secchi-Scheibe bestimmt wurde. Die am Kahnsdorfer See gemessenen Sichttiefen und die daraus berechneten Extinktionskoeffizienten stellt Abb. 23 dar. Werden Sichttiefen im Bereich von 1,2 m bis 8,8 m angenommen, liegt die λ zwischen 0,23 und 0,97. Der Schwankungsbereich ist sehr groß.

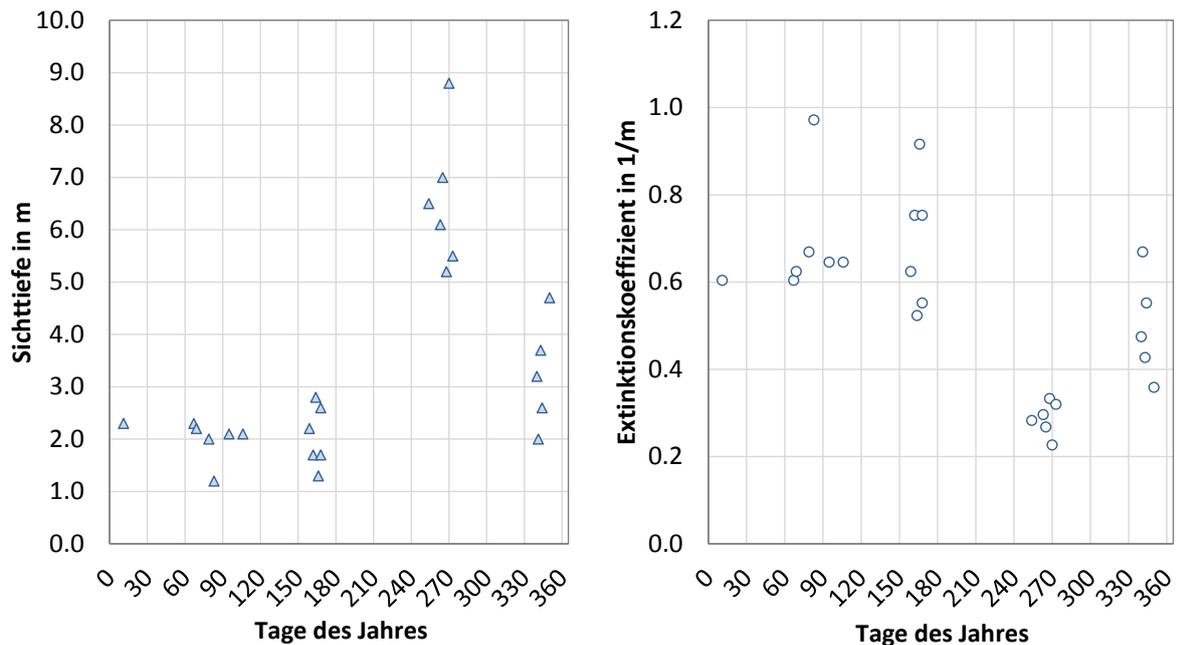


Abb. 23: Sichttiefen (MHM) und berechnete Extinktionskoeffizienten der MST RWS1

Folgende Parameter wurden bei der Modellkalibrierung systematisch variiert:

- Albedo,
- Windgeschwindigkeit (Windfaktor),
- Extinktionskoeffizient.

In Tab. 10 ist die Variation o.g. Parameter den verschiedenen Kalibrierungsläufen zugeordnet.

Tab. 10: Szenarien der Modellkalibrierung

Kalibrierungslauf-Nr.*	λ_{LW}	λ_{SW}	Alb	WF
1	0,65	0,02	0,05	1,0
2	0,65	0,02	0,05	0,8
3	0,65	0,02	0,05	1,2
4	0,10	0,02	0,05	1,0
5	0,30	0,02	0,05	1,0
6	0,50	0,02	0,05	1,0
7	0,80	0,02	0,05	1,0
8	0,95	0,02	0,05	1,0
9	0,65	0,02	0,00	1,0
10	0,65	0,02	0,10	1,0
11	0,65	0,02	0,15	1,0
12	0,65	0,05	0,05	1,0
13	0,65	0,10	0,05	1,0
14	0,65	0,30	0,05	1,0
15	0,80	0,10	0,05	0,8
16	0,80	0,10	0,05	0,9

Die Sensitivität der Parameter Chlorophyll und abfiltrierbare Stoffe, welche wiederum Einfluss auf die Extinktion haben, wurde in Verbindung mit der Kalibrierung des Modells ebenfalls geprüft. Die Variation dieser Parameter hat in dem Betrachtungsbereich keinen nennenswerten Einfluss auf vertikalen Temperaturprofile gezeigt. Auf die Darstellung dieser Kalibrierungsläufe wird deshalb verzichtet.

3.5.1 Albedo

Durch die Variation des Albedos (Vgl. der Modelle 1, 9, 10 und 11), also der Reflexion der Globalstrahlung an der Wasseroberfläche, wird der Wärmehaushalt des Sees beeinflusst. Abb. 24 zeigt die Ergebnisse der Variation des Albedos im Bereich von 0,0 bis 0,15 für verschiedene Messzeitpunkte.

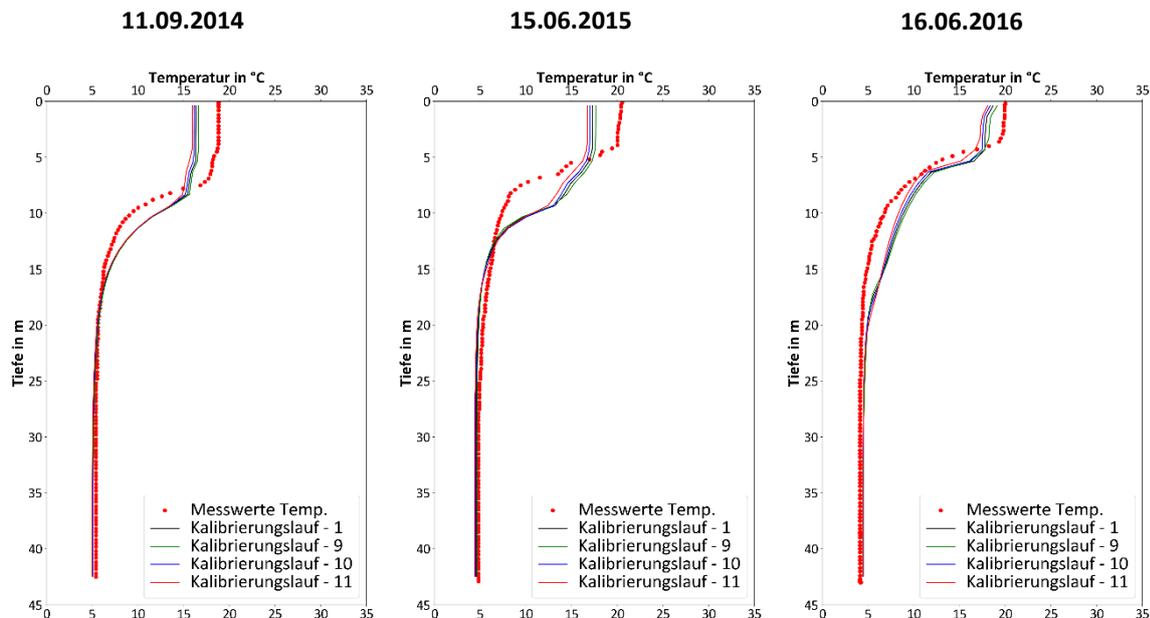


Abb. 24: Einfluss des Albedos auf die vertikale Temperaturverteilung und Vergleich mit Messdaten der MST RWS1² für die Kalibrierungsläufe 1, 9, 10 und 11

Mit steigender Rückstrahlung von der Wasseroberfläche wird die Wassertemperatur im Epilimnion geringer. Die Sprungschicht verschiebt sich in Richtung Wasseroberfläche.

² Lage der Messstelle (MST) in Abb. 34 dargestellt

3.5.2 Windgeschwindigkeit (Windfaktor)

Die Windgeschwindigkeit wurde im Bereich von 0,8 bis 1,2 m/s variiert, was deutliche Auswirkungen auf die vertikalen Temperaturprofile hat. Den Vergleich der Messwerte mit den Berechnungsergebnissen zeigt Abb. 25.

Mit der Erhöhung der an der Seeoberfläche angreifenden Scherkraft und der damit in den oberen Schichten induzierten Strömung wird die Sprungschicht in tiefere Bereiche des Sees verlagert. Wird die Windgeschwindigkeit auf das 1,2-fache erhöht, erhöht sich auch die Schichtmächtigkeit des Epilimnions um mehrere Meter.

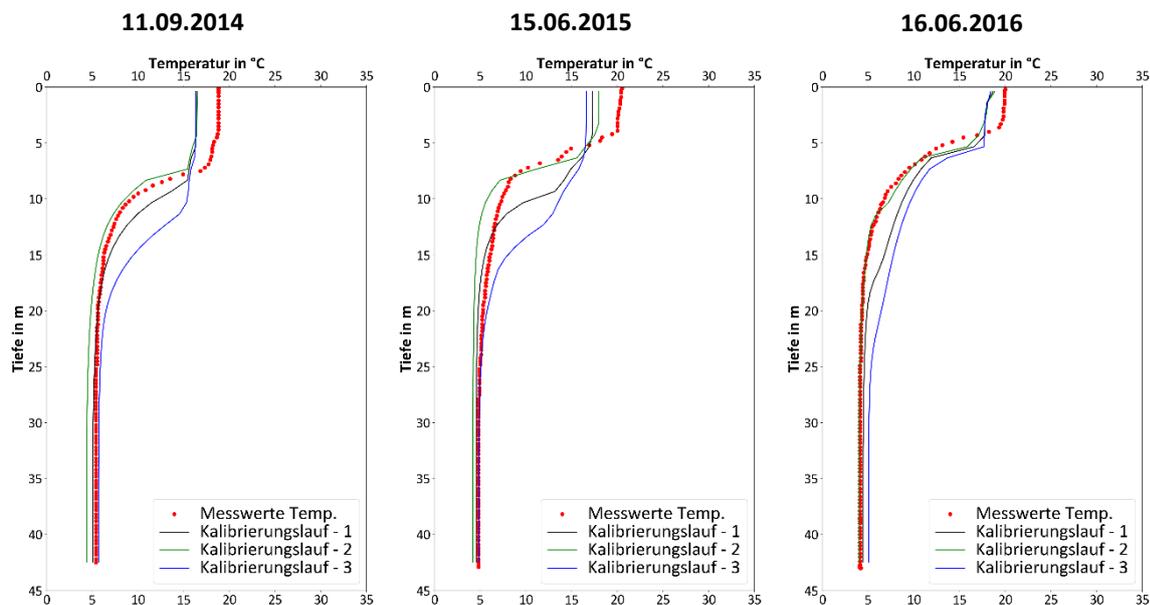


Abb. 25: Einfluss der angreifenden Windkraft auf die vertikale Temperaturverteilung und Vergleich mit Messdaten der MST RWS1³

3.5.3 Extinktionskoeffizient

In Abb. 26 wird der Einfluss der Extinktionskoeffizienten auf die Ausbildung der thermischen Schichtung des Kahnsdorfer Sees dargestellt. Werden die ausgewählten Modelle miteinander verglichen, kann eingeschätzt werden, dass die Verringerung von λ_{LW} in einer Erwärmung der tieferen Bereiche des Wasserkörpers resultiert. Die solare Strahlung kann bei kleineren Extinktionskoeffizienten tiefer in den Wasserkörper vordringen. Da die Strahlungsenergie in den tieferen Wasserschichten zu einer Erwärmung führt, die Gesamtstrahlung in dem

³ Lage der Messstelle (MST) in Abb. 34 dargestellt

Vergleich aber konstant ist, werden die oberen Schichten des Wasserkörpers weniger stark erwärmt. Die Wassertemperatur ist im Epilimnion deshalb geringer.

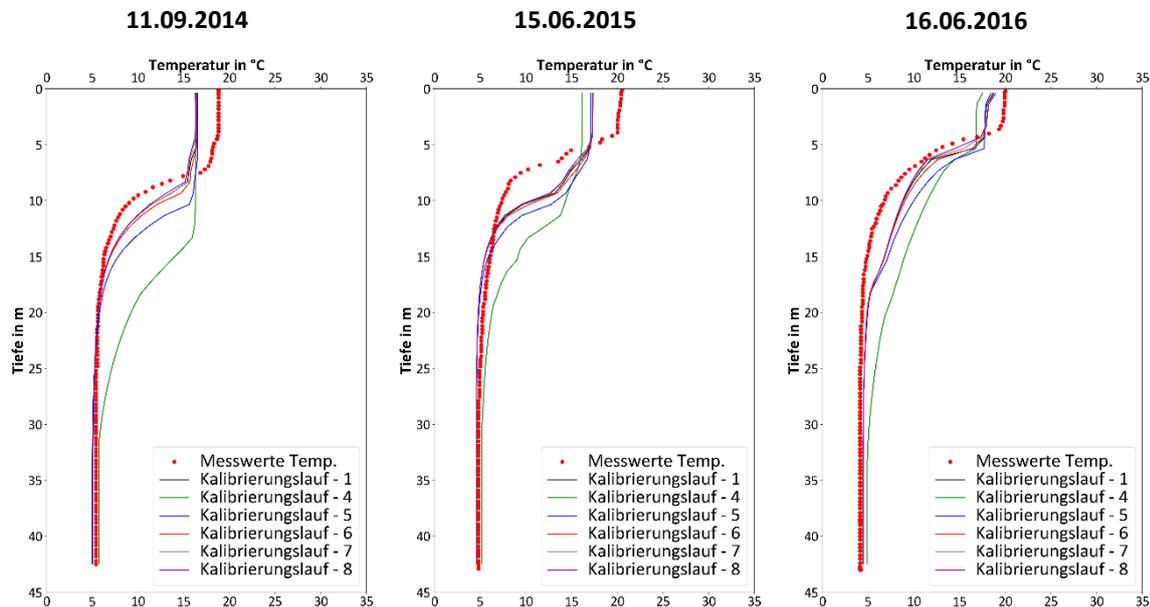


Abb. 26: Einfluss der Extinktionskoeffizienten und Vergleich mit Messdaten der MST RWS1⁴

3.5.4 Kombination der Parameter zur Modellkalibrierung

Für die Modellkalibrierung erfolgte die Kombination der vorstehend beschriebenen Parameter (λ_{LW} , λ_{SW} , Albedo, Windfaktor). Die Ergebnisse sind in Abb. 27 dargestellt.

Im Ergebnis der Kalibrierung wurden den Berechnungen folgende Parameter:

- $\lambda_{LW} = 0,80$ und
- $\lambda_{SW} = 0,10$
- Albedo = 0,05
- Windfaktor = 0,8

zugrunde gelegt, da mit diesen Parametern die beste Abbildung der vertikalen Temperaturprofile erreicht werden konnte. Diese entsprechen dem Kalibrierungslauf 15. Der Albedo von 5 % als Durchschnittswert wurde nach Literaturangaben gewählt (siehe Abschnitt 3.4).

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass die langwellige Strahlung λ_{LW} die Tiefenlage der Sprungschicht im Zusammenwirken mit den aufgezeichneten Windereignissen wesentlich beeinflusst.

⁴ Lage der Messstelle (MST) in Abb. 34 dargestellt

Mit der Modellkalibrierung wurde die Grundlage geschaffen, die Wirkung des Eintrags von Wasser aus der Pleiße auf den Wasserkörper und die Ausleitkonzentration zu beschreiben. Besonders die Lage des Metalimnions ist bei der Abschätzung der Auswirkung des Eintrages auf die Seewasserqualität wichtig, da abhängig von der Größe des Epilimnions und der Stabilität der Schichtung die Verweilzeit des Wassers und damit die Fe_{ges} -Ausbreitung im See beeinflusst wird.

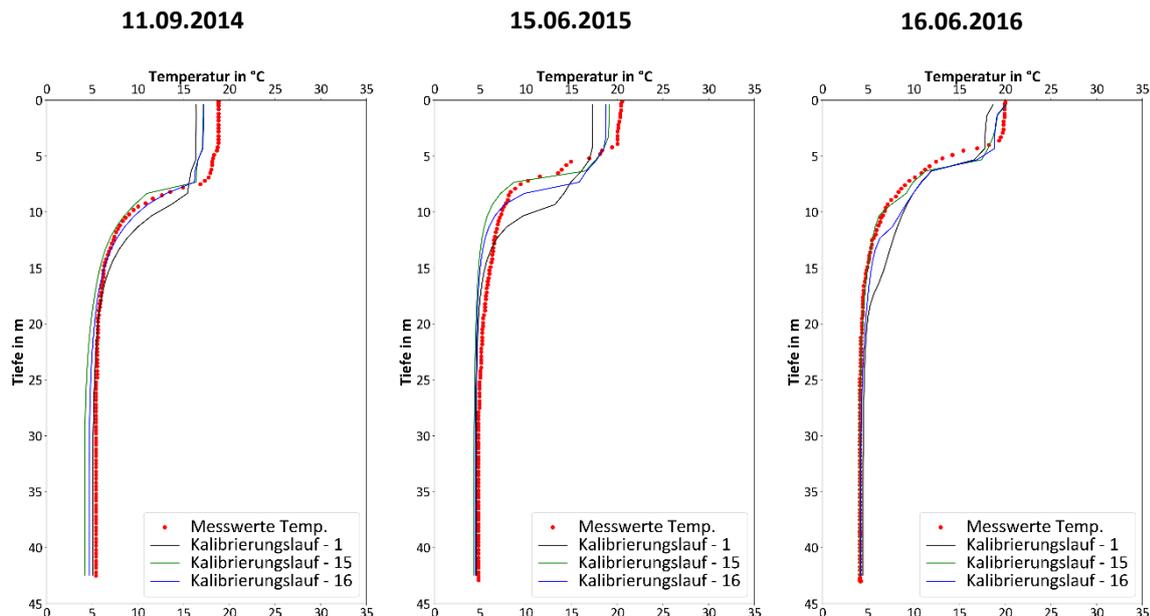


Abb. 27: Temperaturprofile bei der Kombination von λ_{LW} , λ_{SW} , Albedo und Windfaktor⁵

3.5.5 Anstieg des Wasserspiegels und Mixis des Sees nach der Kalibrierung

Abb. 28 zeigt den gemessenen sowie den berechneten Verlauf der WST-Entwicklung mit dem kalibrierten Modell. Die Abweichungen liegen im Bereich weniger cm.

⁵ Lage der Messstelle (MST) in Abb. 34 dargestellt

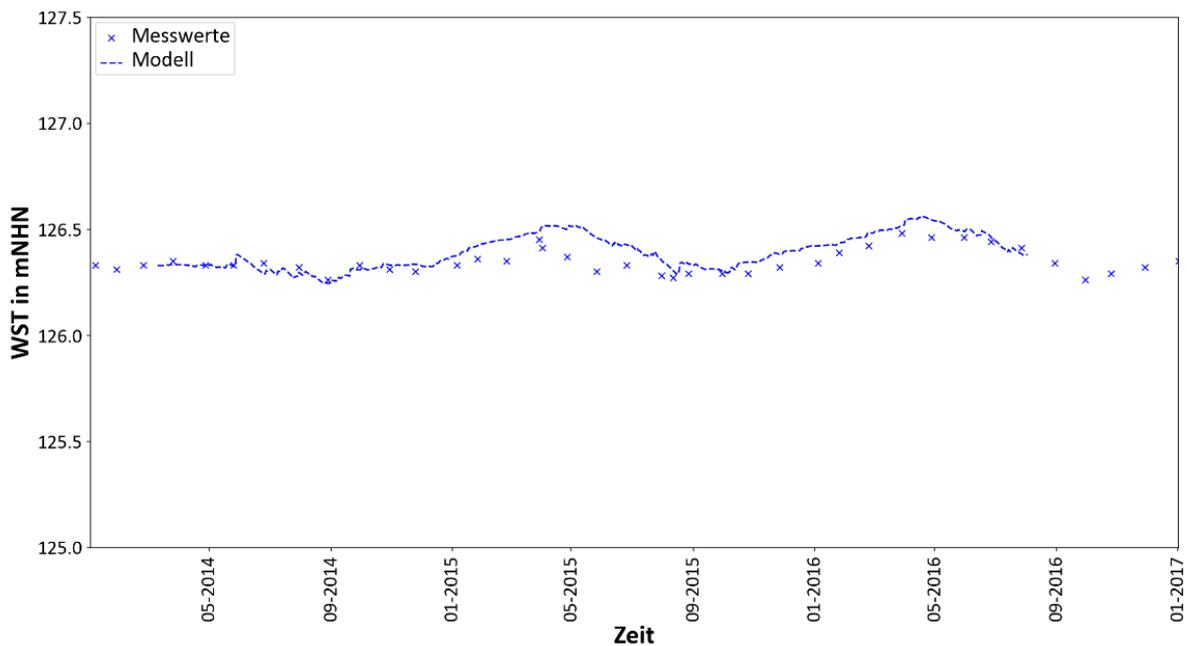


Abb. 28: Vergleich der berechneten und der gemessenen WST-Entwicklung

In Abschnitt 3.1.1 wurde mithilfe des Osgood-Index (OI) eingeschätzt, dass der Kahnsdorfer See dimiktisch ist und durch Vollzirkulationen im Frühjahr und im Herbst geprägt wird. Die Ergebnisse der Modellrechnungen zeigen für 2016 im Winter eine gering ausgeprägte Schichtung. Demnach sind in Abhängigkeit der Witterung monomiktische Verhältnisse möglich. Die Abb. 29 und Abb. 30 zeigen den mit dem kalibrierten Modell berechneten Jahresverlauf der vertikalen Verteilung der Temperatur im Wasserkörper für das Jahr 2014, 2015 und 2016. Die jährlichen Variationen sind gering. Unterschiede zeigen sich vor allem bei der Temperatur des Epilimnions.

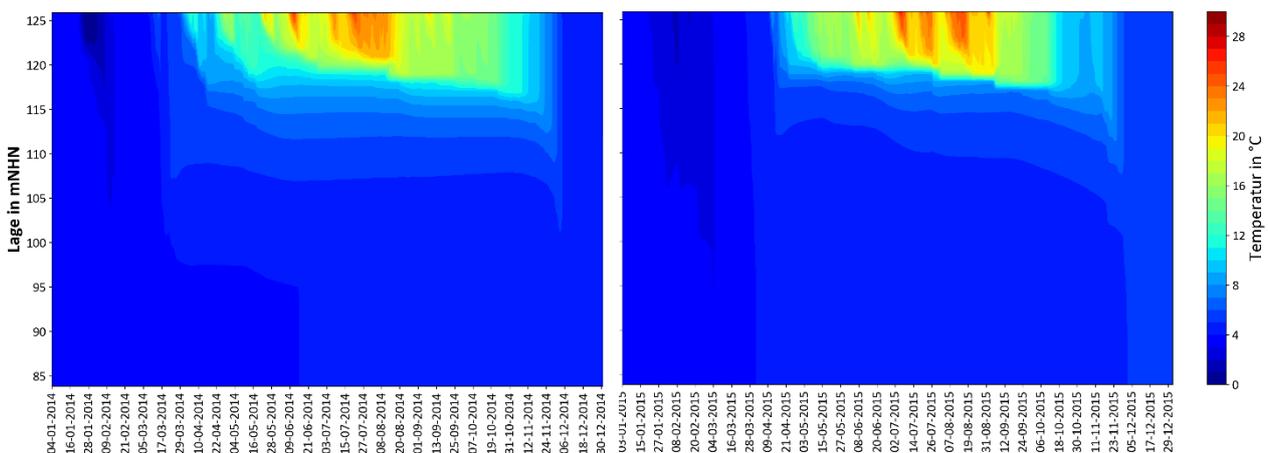


Abb. 29: Vertikale Temperaturprofile des Jahres 2014 (links) und 2015 (rechts)

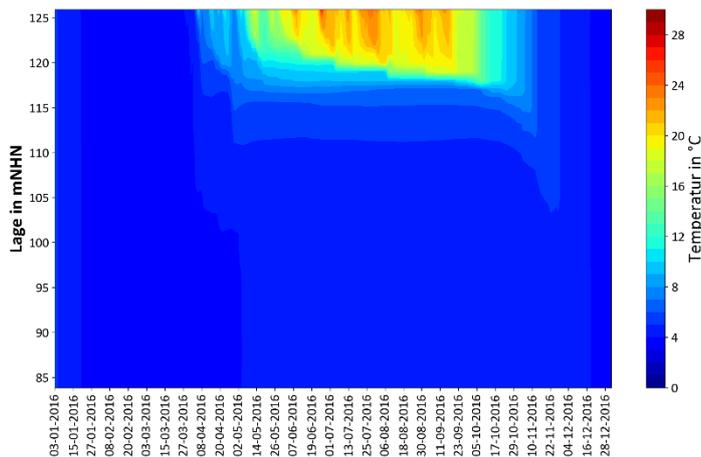


Abb. 30: Vertikale Temperaturprofile des Jahres 2016

3.6 Spezifische Randbedingungen für die Einleitung von Pleißewasser in den Kahnsdorfer See

3.6.1 Fe-Konzentration des Pleißewassers

Für die Betrachtung des Jahresganges war die Berechnung einer mittleren, jeweils vom Durchfluss abhängigen Fe_{ges} -Konz. des Pleißewassers erforderlich. Die Messwerte der Fe_{ges} -Konz. wurden dafür den Durchflüssen der Pleiße gegenübergestellt. Es zeigte sich, dass die Fe_{ges} -Konz. mit hinreichender Genauigkeit durchflussabhängig berechnet werden kann. Die Abb. 32 zeigt die Messwerte und die aus den Messwerten abgeleitete Funktion zur Berechnung der Fe_{ges} -Konz. aus dem Durchfluss.

Das Bestimmtheitsmaß R^2 , welches die Güte der Regression anzeigt, ist mit einem Wert von 0,751 als genügend gut für die Berechnung einzuschätzen.

Die aus den mittleren Tageswerten der Pleißedurchflüsse berechneten Fe_{ges} -Konz. für das Jahr 2016 zeigt Abb. 31. Die Abflüsse schwanken im Jahresverlauf des Betrachtungszeitraumes zwischen 2,2 und 10,0 m^3/s . Die Einleitung in den Kahnsdorfer See ist auf Abflüsse von 10 m^3/s begrenzt. In den Kahnsdorfer See werden damit Eisenkonzentrationen von 1,5 $\text{mg}_{\text{Fe}_{\text{ges}}}/\text{L}$ (bei hohen Abflüssen) und 4,5 $\text{mg}_{\text{Fe}_{\text{ges}}}/\text{L}$ (bei geringen Abflüssen) eingetragen.

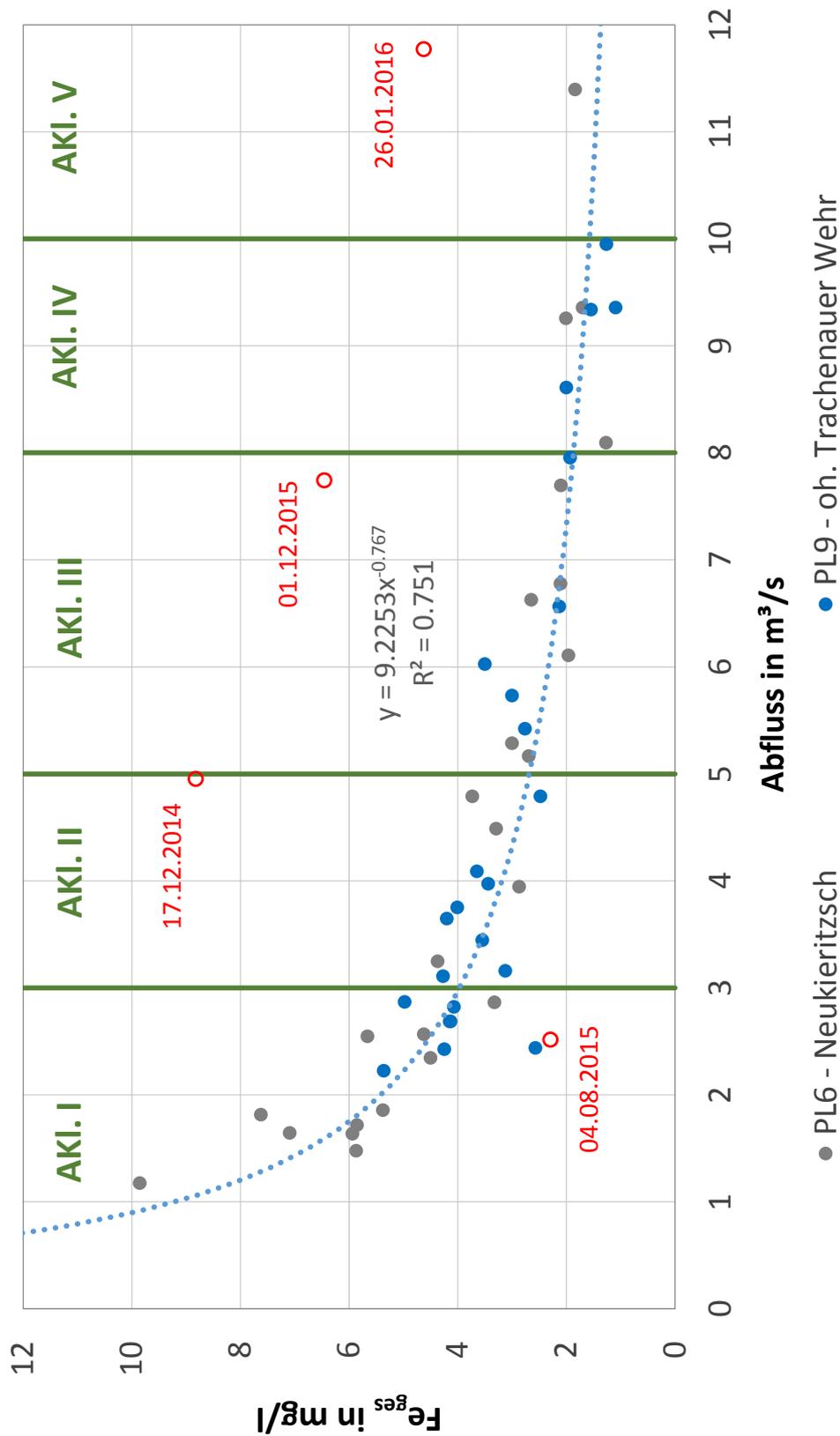


Abb. 31: Fe_{ges}-Konz. in Abhängigkeit des Durchflusses in der Pleiße (Daten von 2014 bis 2017)

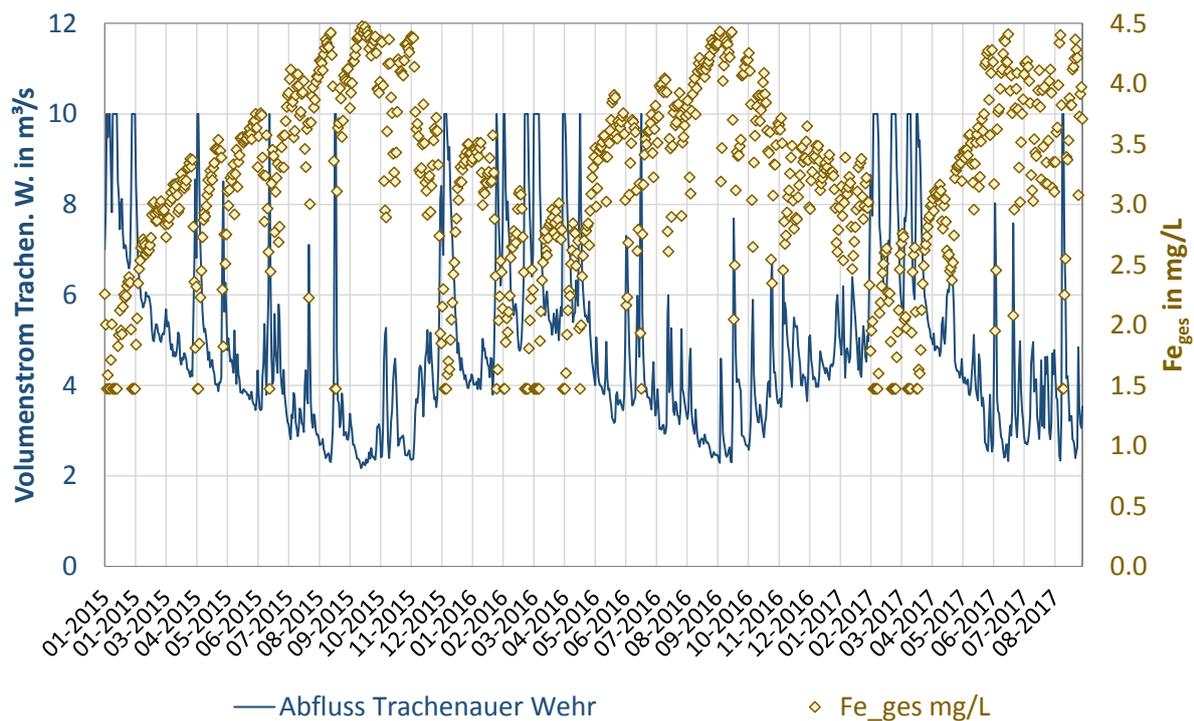


Abb. 32: Mittlere Tageswerte der Pleißedurchflüsse und berechnete Fe_{ges}-Konz.⁶

Insgesamt werden mit den genannten Randbedingungen im Jahr 2016 mit dem Pleißewasser 876 t_{Fe} in den Kahnsdorfer See eingetragen. Mit dem Grundwasser (siehe Kap. 3.1.2) ist der Fe-Eintrag deutlich geringer. Er liegt jährlich bei etwa 59 t_{Fe}.

3.6.2 Mittlere Sedimentationsgeschwindigkeit der Fe-Partikel

Die Sedimentationsgeschwindigkeit der Fe-Partikel wird wesentlich durch die Wasserbeschaffenheit (pH-Wert, Temperatur, Eisengehalt, Grad der Oxidation, andere Wasserinhaltsstoffe) beeinflusst. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Projektes Sedimentationsuntersuchungen durchgeführt. Diese sind in GIP (2017a) und GIP (2017b) dokumentiert. Durch den Jahresgang der Wasserbeschaffenheit des Vorfluters, die jahreszeitlich schwankenden Durchflüsse und den beabsichtigten Mischprozess im Kahnsdorfer See kann das Absetzverhalten in weiten Grenzen schwanken.

Die gemessenen Startkonzentrationen für den Parameter Fe_{ges} lagen in den Versuchen in einem Bereich von 1,0 bis 5,0 mg/L und sind mit den mittleren Konzentrationen die in Kap. 3.6.1 abgeleitet wurden vergleichbar.

⁶ Durch die Begrenzung des Volumenstromes auf max. 10 m³/s wird die berechnete minimale Fe_{ges}-Konz. auf 1,5 mg/L limitiert.

Für diese Fe_{ges} -Konzentrationen wurde in GIP (2017b) eine Sedimentationsgeschwindigkeit von 0,30 cm/h bis 0,80 cm/h bestimmt.

Für die Berechnung der Fe-Verteilung im Kahnsdorfer See wird eine mittlere Sedimentationsgeschwindigkeit der Fe-Partikel von 0,6 cm/h (Basisszenario) angesetzt.

3.6.3 Temperatur des Pleißewassers im Jahresgang

Aufgrund der relativ hohen Eintragsvolumenströme in den See kann der Eintrag des Pleißewassers die Schichtung des Gewässers beeinflussen und auf die vertikale Ausdehnung des Epilimnions Einfluss nehmen.

Für den Eintrag war deshalb als Randbedingung auch die Wassertemperatur des Pleißewassers festzulegen. Die Festlegung erfolgte auf Basis der Messwerte, die durch die LMBV zur Verfügung gestellt wurden. Die Auswertung der Daten von 2012 bis 2016 zeigte einen sinusähnlichen Jahresverlauf der Temperaturentwicklung in der Pleiße. Wie Abb. 33 zeigt, kann mit der aus den Messwerten abgeleiteten Funktion die Wassertemperatur der Pleiße im Jahresgang genau genug wiedergegeben werden.

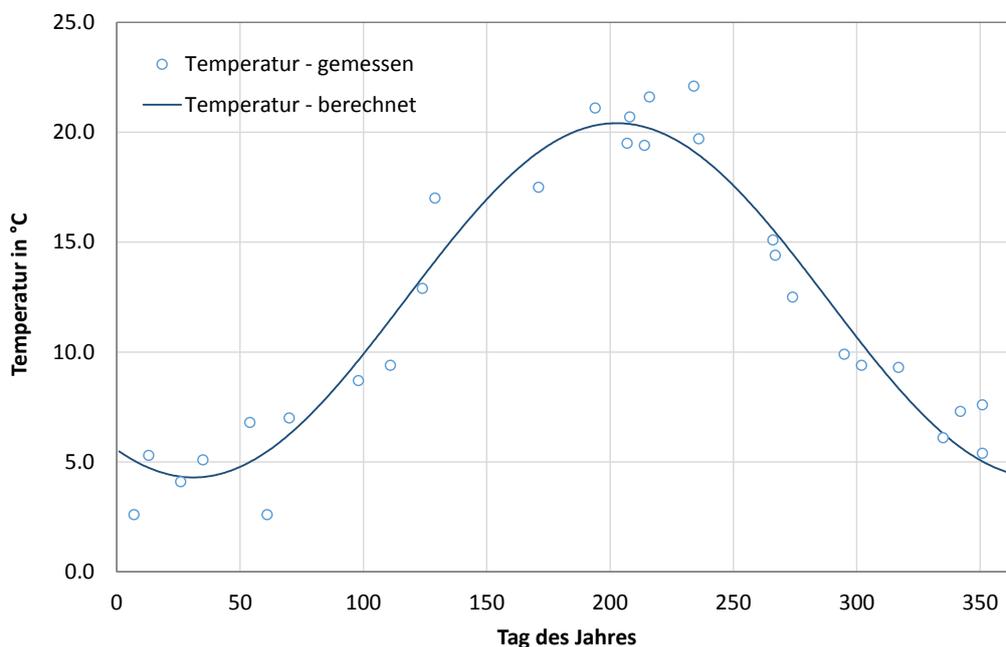


Abb. 33: Temperaturentwicklung der Pleiße an der PL9

3.6.4 Eintragspunkte, Eintragsimpuls und Entnahme

Die Position des Eintrags wurde von dem Planungsbüro für die Überleitung (iKD) vorgegeben und liegt am Westufer des Kahnsdorfer Sees. Die Entnahme ist als Wehrüberfall im Bereich des Nordufers geplant und wurde so in das Modell integriert. Beide Punkte sind in Abb. 34 dargestellt.

Da mit dem aktuellen Planungsstand noch keine Details zum Wehrüberfall am Entnahmepunkt vorlagen, erfolgte eine Abschätzung der Wehrbreite und des Überfallkoeffizienten in Anlehnung an die Konstruktion des Trachenauer Wehrs. Der Ablauf aus dem Kahnsdorfer See wurde als Wehr mit einer Breite von 8,0 m und einem Überfallkoeffizienten von 0,65 im Modell abgebildet.

Der Eintragsimpuls in den See wurde volumenstromabhängig in das Modell integriert. Die Strömungsgeschwindigkeiten bei Volumenströmen von 3 m³/s, 6 m³/s und 10 m³/s wurden von iKD, auf Basis einer 2D-Modellierung des Überleiters von der Pleiße zum Kahnsdorfer See (siehe iKD 2017), vorgegeben. Den linearen Zusammenhang zwischen dem Volumenstrom in der Pleiße und der Eintragsgeschwindigkeit in den Kahnsdorfer See zeigt Abb. 35.



Abb. 34: Position des Eintrags von Pleißewasser und der Entnahme, Kennzeichnung der Referenzmessstelle RWS1 zur Kalibrierung des Seemodells

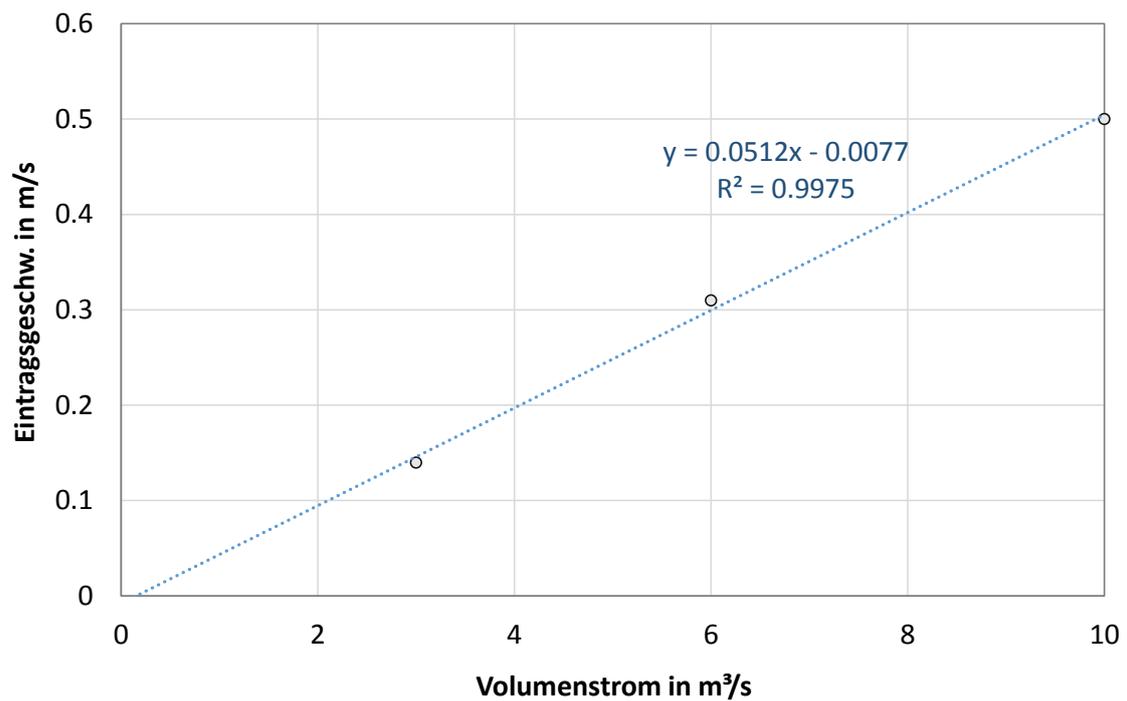


Abb. 35: Linearer Zusammenhang zwischen dem Volumenstrom in der Pleiße und der Eintragungsgeschwindigkeit in den Kahnsdorfer See (Basis ist eine Berechnung von iKD 2017)

4 Szenarien

Um die Sensitivität der Sedimentationsgeschwindigkeit zu untersuchen, wurde ergänzend zu der in Abschnitt 3.6.2 festgelegten mittleren Sedimentationsgeschwindigkeit von 0,6 cm/h ein zweites Szenario mit einer nur geringfügig erhöhten Sedimentationsgeschwindigkeit von 1,8 cm/h gerechnet. Diese Sedimentationsgeschwindigkeit wurde gem. GIP (2017b) für hohe Eisenkonzentration von $> 20 \text{ mg}_{\text{Fe}_{\text{ges}}}/\text{L}$ nachgewiesen.

Durch den Einsatz von Flockungsmittel (Kalk) ggf. in Ergänzung von Flockungshilfsmitteln vor der Einleitung in den Kahnsdorfer See werden deutlich höhere Sedimentationsgeschwindigkeiten erreicht.

Tab. 11: Szenarien zur Betrachtung der Fe_{ges} -Verteilung im Kahnsdorfer See

Szenarien	Sedimentationsgeschwindigkeit in cm/h	Beschreibung
S01	0,60	Basisvariante, abgeleitet aus GIP (2017b) für eine Konzentration von 1 bis $5 \text{ mg}_{\text{Fe}_{\text{ges}}}/\text{L}$
S04	1,80	Variante mit mäßig erhöhter Sedimentationsgeschwindigkeit

Zur Plausibilitätsprüfung erfolgte die Berechnung weiterer Szenarien, die nicht dargestellt werden. Die interne Modellnummerierung wurde beibehalten.

5 Ergebnisse der Berechnung

5.1 Visualisierung der Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse visualisiert und diskutiert. Die Diskussion basiert auf dem Vergleich der berechneten Szenarien (Kap. 4). In der Diskussion der Ergebnisse wird auf:

- die berechneten Geschwindigkeitsvektoren und die Fe_{ges} -Verteilung im Bereich der Wasseroberfläche (XY-Ebene, Abb. 36 und Anlage 1),
- die Entwicklung der Fe_{ges} -Konz. im vertikalen Schnitt (XZ-Ebene in Abb. 37; YZ-Ebene in Anlage 1) und
- die Entwicklung der mittleren Wasserbeschaffenheit an der Entnahmestelle (Kap. 5.4)

eingegangen.

Die Betrachtungszeitpunkte für die Visualisierung der Berechnungsergebnisse listet Tab. 12 auf. Die Auswahl erfolgt in Abhängigkeit von der Gewässerstratifikation.

Tab. 12: Vergleichszeitpunkte zur Betrachtung der Fe_{ges} -Verteilung im Kahnsdorfer See beim Eintrag von Pleißewasser (siehe Abb. 36 und Abb. 37)

Zeitpunkt im Modell	Begründung
01.01.2016	angenommener Beginn der Überleitung von Pleißewassers in den Kahnsdorfer See
01.02.2016	Ergebnisse nach einem Monat während der Vollzirkulation
01.05.2016	Beginn der Ausbildung des Epilimnions
01.08.2016	während thermischen Schichtung des Gewässers
20.11.2016	nach Auflösung der thermischen Gewässerstratifikation

Für die Visualisierung wurde eine Farbskala von 0,0 bis 4,5 $mg_{Fe_{ges}}/L$ gewählt, die die Konzentrationen bis zur Fe-Sichtbarkeitsschwelle von ca. 2,0 mg/L (blau) von den Konzentrationen über 2,0 $mg_{Fe_{ges}}/L$ (braun) abgrenzt.

Für alle Szenarien wurden die Ergebnisse in einer Videodatei zusammengefügt. Die Dateien sind auf dem beiliegenden Datenträger enthalten.

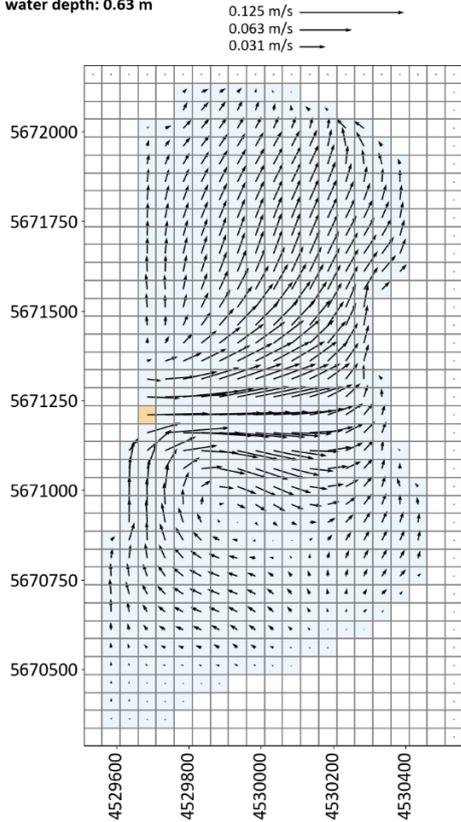
5.2 Geschwindigkeitsvektoren und die Fe_{ges} -Verteilung im Bereich der Wasseroberfläche (XY-Ebene)

Abb. 36 stellt die Berechnungsergebnisse von S01 und S04 (Abbildung über 2 Seiten) in der XY-Ebene für die Modellschicht gegenüber, die die Grenze zur Atmosphäre bildet. Die Abbildungen zeigen damit die visuell wahrnehmbare Wirkung des Fe-Eintrages für die Zeitschritte, die in Abschnitt 5.1 aufgeführt sind. Neben den Fe_{ges} -Konz. sind auch die windinduzierten Strömungsvektoren dargestellt, welche die Verteilung des Fe im Kahnsdorfer See beeinflussen.

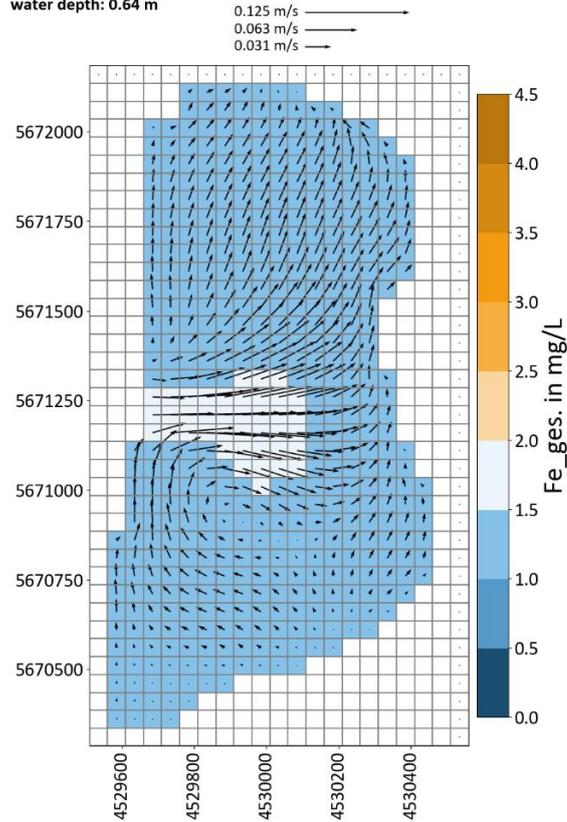
Der Eintragungspunkt am Westufer des Kahnsdorfer Sees ist in den Berechnungsergebnissen als Punkt der höchsten Konzentration gut zu erkennen. Im Nahbereich des Eintrages und abhängig von dessen Konz. ist mit einer Fe_{ges} -Konz. zu rechnen, die über 2 mg/L liegt und damit visuell wahrnehmbar ist.

Die windinduzierte Strömung sorgt für die horizontale Verlagerung des Fe im See. Die Überlagerung von Sedimentationsgeschwindigkeit der Fe-Partikel und der seeinternen Strömung resultiert in der Fe-Konz. des Seewassers. Nach dem Anfangseffekt zu Beginn der Überleitung von eisenhaltigem Pleißewasser in den Kahnsdorfer See innerhalb des ersten Monats wird dabei deutlich, dass beim Szenario S01 häufig eine Überschreitung der Sichtbarkeitsschwelle, sowohl großflächig im See als auch im Bereich des Auslaufs, auftritt. Der Vergleich von S01 und S04 zeigt, dass bereits eine geringfügige Erhöhung der Sedimentationsgeschwindigkeit einen deutlich positiven Effekt auf die Fe-Abscheidung im See hat. Gleiches trifft für die visuelle Wahrnehmung des Fe-Eintrages zu.

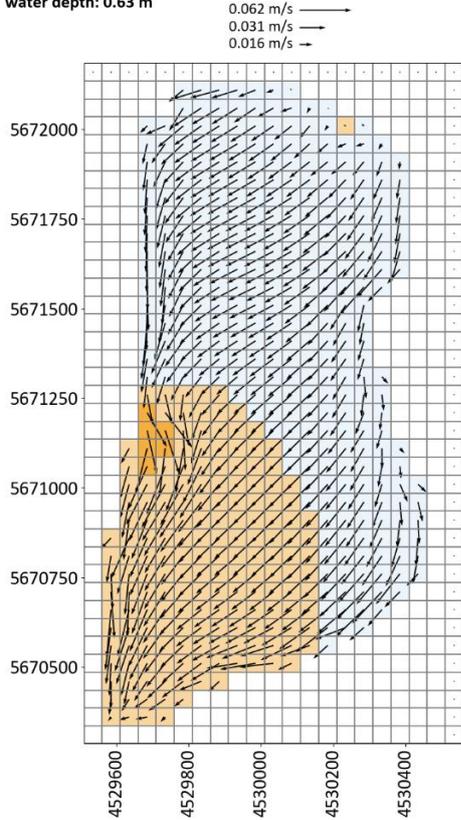
S 1
velocity_vectors - layer : 43 - time_step : 2016_02_01
water depth: 0.63 m



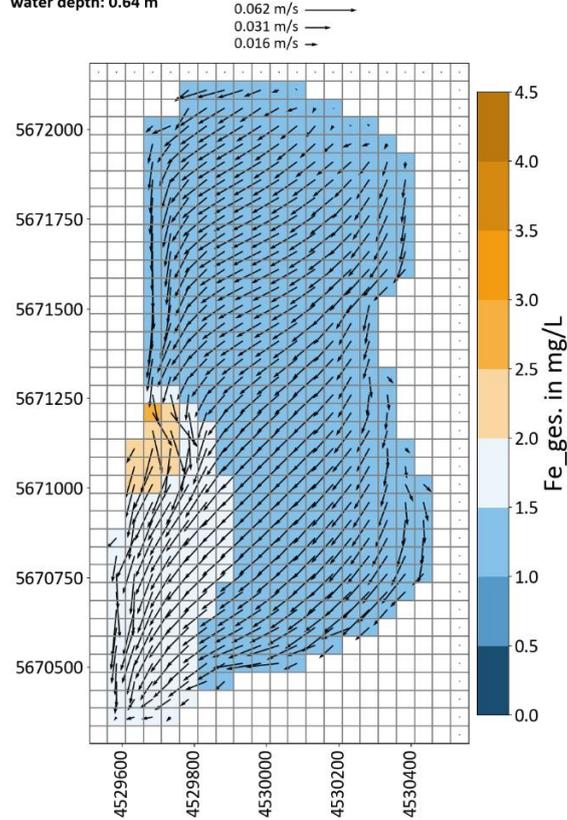
S 4
velocity_vectors - layer : 43 - time_step : 2016_02_01
water depth: 0.64 m



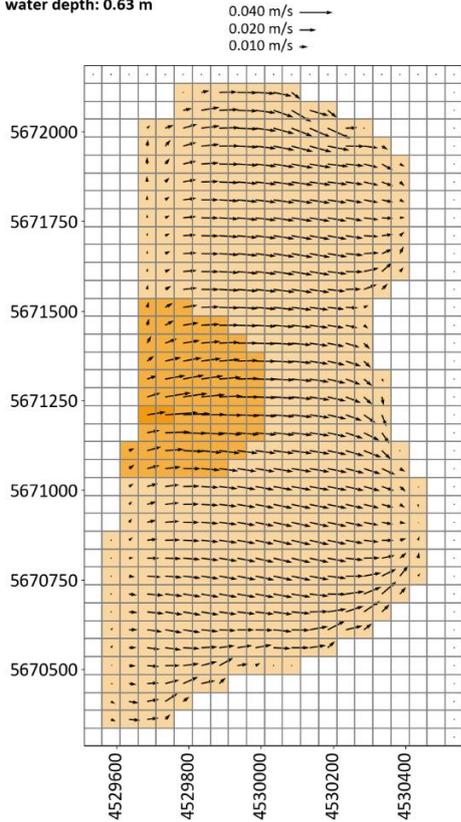
S 1
velocity_vectors - layer : 43 - time_step : 2016_05_01
water depth: 0.63 m



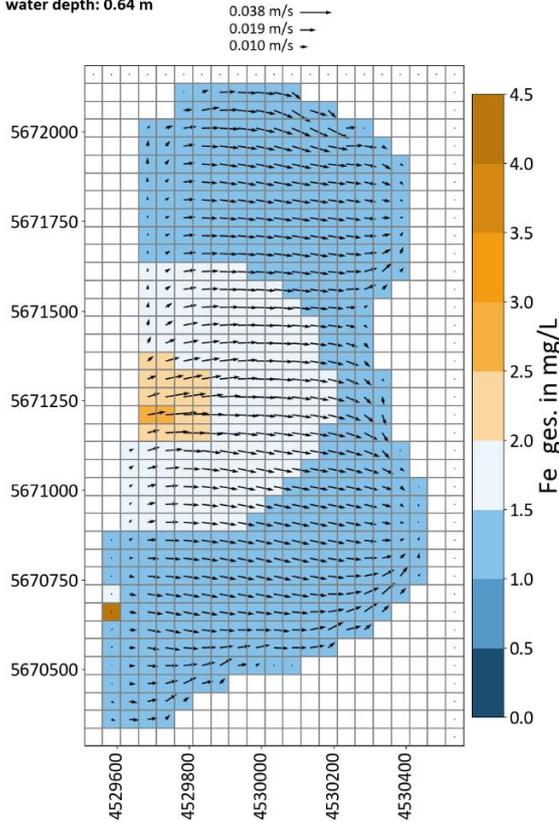
S 4
velocity_vectors - layer : 43 - time_step : 2016_05_01
water depth: 0.64 m



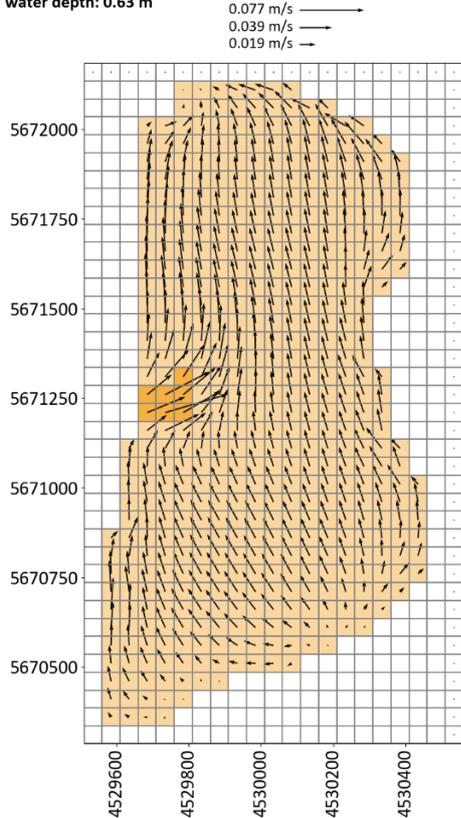
S 1
velocity_vectors - layer : 43 - time_step : 2016_08_01
water depth: 0.63 m



S 4
velocity_vectors - layer : 43 - time_step : 2016_08_01
water depth: 0.64 m



S 1
velocity_vectors - layer : 43 - time_step : 2016_11_20
water depth: 0.63 m



S 4
velocity_vectors - layer : 43 - time_step : 2016_11_20
water depth: 0.64 m

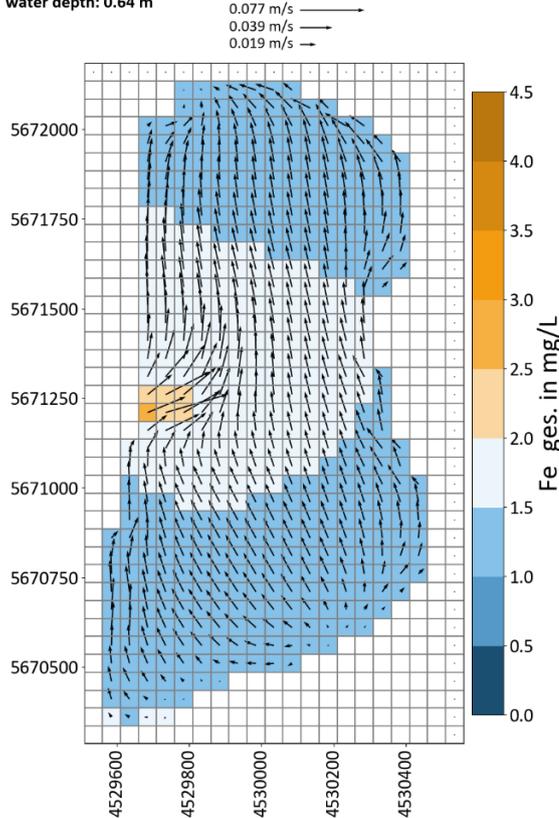


Abb. 36: Entwicklung der Fe_{ges}-Konz. im Bereich der Wasseroberfläche (XY-Ebene)

5.3 Entwicklung der Fe-Konzentration im Kahnsdorfer See

Abb. 37 zeigt die Entwicklung der Fe_{ges} -Konz. im XZ-Schnitt zu den in Abschnitt 5.1 definierten Zeitpunkten für die Szenarien S01 und S04.

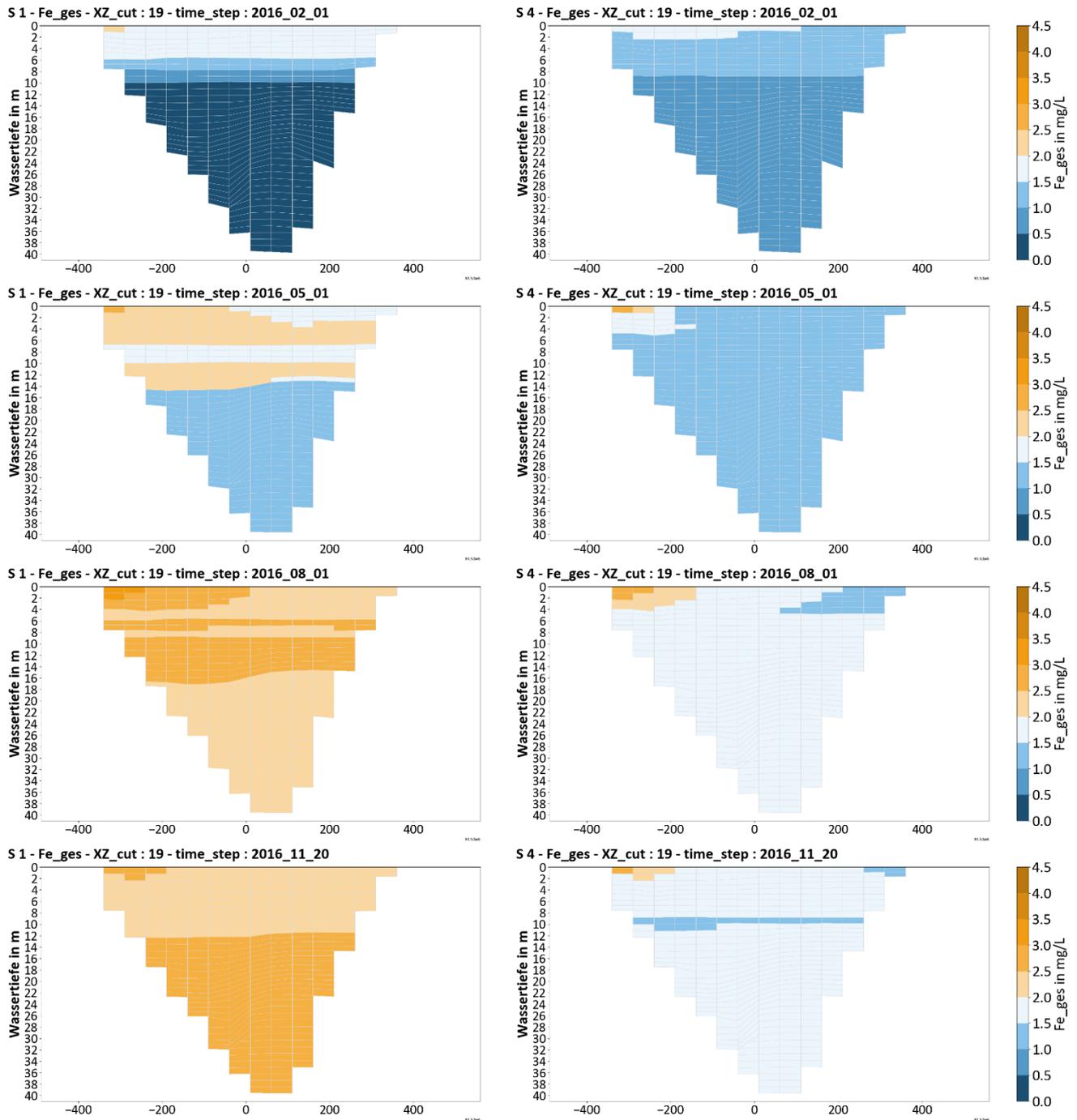


Abb. 37: Entwicklung der Fe_{ges} -Konz. im XZ-Schnitt zu den in Abschnitt 4 definierten Zeitpunkten, Vergleich der Szenarien S01 (links) und S04 (rechts)

Die Ergebnisse zeigen bereits bei einer Erhöhung der Sedimentationsgeschwindigkeit der Fe-Partikel von 0,6 cm/h auf 1,8 cm/h eine wirksame Sedimentation der eingeleiteten Eisenpartikel und damit auch in der Vertikalen signifikant niedrigere Konzentrationen. Während im Szenario S01 nach ca. 4 Wochen durch den Fe-Eintrag Konzentrationserhöhungen in den obersten 10 m des Sees über 2,0 mg/L auftreten, bleiben in Szenario S04 die Fe-Konzentrationen unter 2,0 mg/L. Mit einer erhöhten Sedimentationsgeschwindigkeit verringert sich auch der visuell wahrnehmbare Bereich im Nahfeld des Eintragspunktes.

Durch die thermische Schichtung in den Sommermonaten wird dieser Trend verstärkt. Die Fe-Konzentrationserhöhung ist während dieser Zeit vor allem im Epilimnion zu beobachten.

5.4 Entwicklung der Fe-Konzentration am Entnahmepunkt am Nordufer

Der zeitliche Verlauf der Fe_{ges} -Konz. im Zu- und Ablauf des Kahnsdorfer Sees sowie der jeweilige Volumenstrom ist in Abb. 38 dargestellt.

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass bei der im Labor bestimmten Sedimentationsgeschwindigkeit der Fe-Partikel von 0,6 cm/h eine Konzentration am Entnahmepunkt von 1,8 mg/L an den meisten Tagen im Jahr überschritten wird.

Bereits eine Erhöhung der Sedimentationsgeschwindigkeit auf 1,8 cm/h erhöht die Fe-Abscheidung im Kahnsdorfer See und senkt Ausleitkonzentration unter 1,8 mg/L.

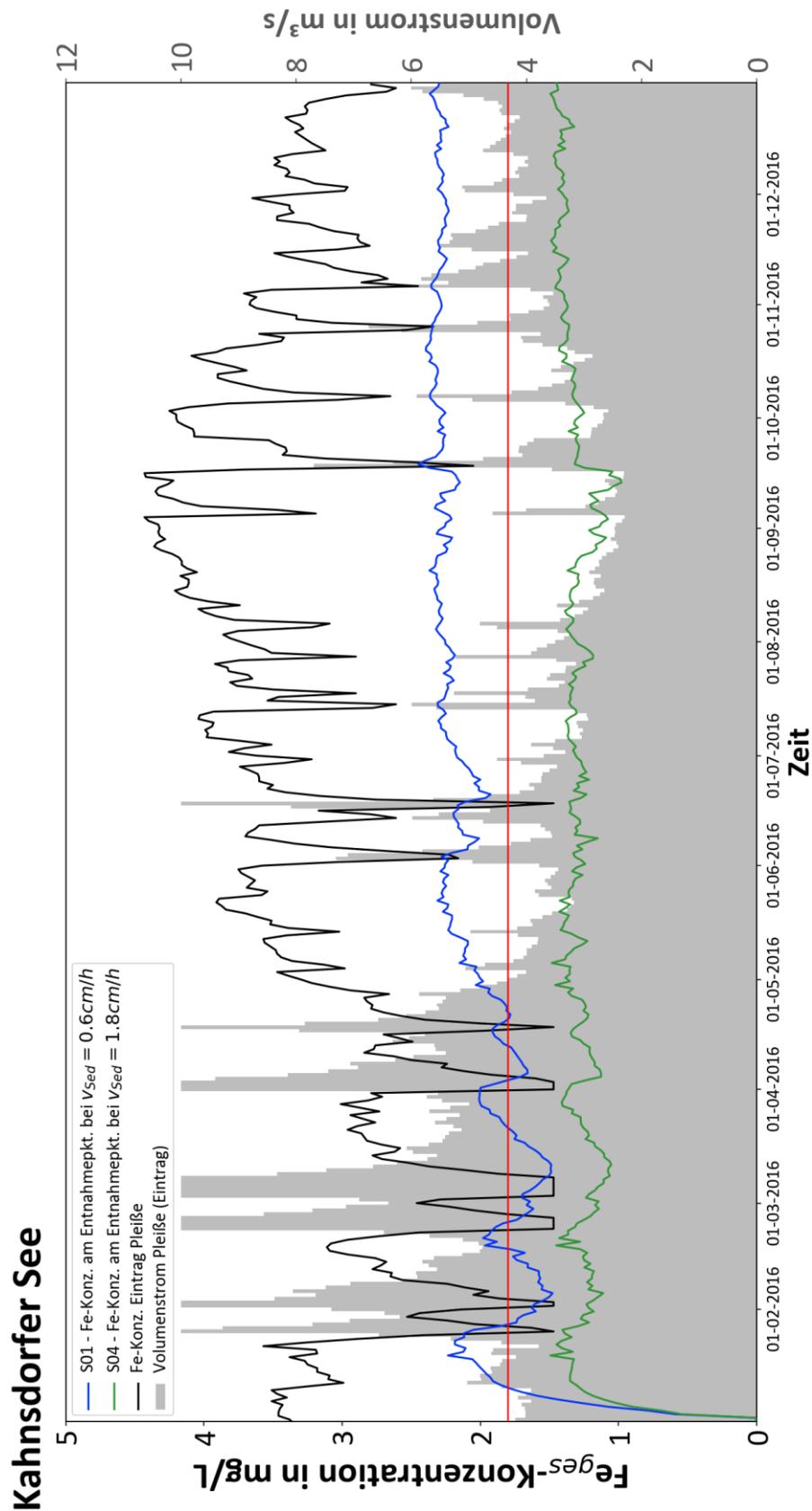


Abb. 38: Zeitlicher Verlauf der Fe_{ges} -Konzentration im Zu- und Ablauf des Kahnsdorfer Sees bei variierenden Sedimentationsgeschwindigkeiten

6 Zusammenfassung der Ergebnisse

Mit der vorliegenden Modellierung wurde nachgewiesen, dass eine Minderung der Eisenfracht in der Pleiße durch die Einleitung der Pleiße in den Kahnsdorfer See erfolgt.

Der Grad der Eisen-Abscheidung im See und die mit dieser Maßnahme erzielten Eisenkonzentrationen des Ausleitungswassers hängen wesentlich von der Sedimentationsgeschwindigkeiten der Fe-Partikel ab.

Aus diesem Grund wurden Untersuchungen zur Ermittlung der Sedimentationsgeschwindigkeiten im Pleißewasser durchgeführt. Dabei wurden bei Eisenkonzentrationen im Bereich von 1,0 bis 5,0 mg/L Sedimentationsgeschwindigkeiten von 0,30 cm/h bis 0,80 cm/h ermittelt.

Wird eine mittlere Sedimentationsgeschwindigkeit von 0,6 cm/h angenommen, ist eine mittlere Eisenkonzentration des Ausleitungswassers < 2,5 mg/L zu erwarten. Der Kahnsdorfer See wird ganzjährig und flächendeckend braun sein. Das erstrebte Ziel einer mittleren Eisenkonzentrationen im Auslauf des Sees von 1,8 mg/L wird somit nicht erreicht. Die Sichtbarkeitsschwelle für Eisen wird regelmäßig überschritten.

Bereits bei einer geringfügig erhöhten Sedimentationsgeschwindigkeit von 1,8 cm/h (Faktor 2,5), z. B. durch Dosierung von Flockungsmitteln (Kalk) ggf. ergänzt durch die Zugabe eines Flockungshilfsmittels, sind im Auslauf des Sees mittlere Eisenkonzentrationen < 1,8 mg/L und damit unter dem gemäß Oberflächenwasserverordnung festgelegten Orientierungswert im Ableitungswasser zu erwarten. Eine Erhöhung der Abscheiderate ist damit bei moderatem technischen Aufwand möglich.

Anlagen

Anlage 1 Entwicklung der Fe_{ges} -Konz. im YZ-Schnitt zu den in Abschnitt 4.1 definierten Zeitpunkten für die Szenarien S01 und S04

