

Modellierung von weiteren Bedeckungsgraden zur Folgenabschätzung von schwimmenden Photovoltaikanlagen

Auftraggeber: Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
Institut für Seenforschung
Argenweg 50/1
88085 Langenargen

Auftragsdatum: 31.01.2023

Auftragsnummer: A865

Berichtsnummer: A865-3

Bearbeitung: Dr.-Ing. Ulrich Lang
Dipl.-Ing. Stefan Mirbach

Stuttgart, 06.07.2023



Dr. Ulrich Lang



Stefan Mirbach

INHALT

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	II
TABELLENVERZEICHNIS	VI
1 Einleitung.....	1
2 Szenarienbeschreibung	2
3 Modellergebnisse	3
3.1 Wärmeaustauschprozesse	3
3.2 Wassertemperaturen und Dichteschichtung	3
3.3 Primärproduktion und Folgeeffekte.....	12
3.4 Sauerstoffgehalt	17
3.5 Nährstoffe	21
4 Zusammenfassung	35
LITERATURVERZEICHNIS.....	36

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2.1: Bedeckungsgebiete des Sees in grün bei verschiedenen Bedeckungsgraden	2
Abbildung 3.1: Nettowärmefflüsse ohne FPV und bei den FPV-Szenarien mit verschiedenen Bedeckungsgraden exemplarisch für das Jahr 2017	3
Abbildung 3.2: Berechnete Wassertemperaturen an der Wasseroberfläche des Beispielsees mit einer Wassertiefe von 13 m ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden (oben) sowie Differenz der FPV-Szenarien zur Situation ohne FPV (unten).....	4
Abbildung 3.3: Berechnete Wassertemperaturen an der Wasseroberfläche des Beispielsees mit einer Wassertiefe von 40 m ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden (oben) sowie Differenz der FPV-Szenarien zur Situation ohne FPV (unten).....	5
Abbildung 3.4: Berechnete Wassertemperaturen an der Seesohle in 13 m Wassertiefe des Beispielsees mit einer Wassertiefe von 13 m ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden (oben) sowie Differenz der FPV-Szenarien zur Situation ohne FPV (unten).....	6
Abbildung 3.5: Berechnete Wassertemperaturen an der Seesohle in 40 m Wassertiefe des Beispielsees mit einer Wassertiefe von 40 m ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden (oben) sowie Differenz der FPV-Szenarien zur Situation ohne FPV (unten).....	7
Abbildung 3.6: Wassertiefe der 12 °C-Isotherme bei den Modellszenarien mit und ohne FPV im Beispielsee mit 13 m Wassertiefe.....	8
Abbildung 3.7: Wassertiefe der 12 °C-Isotherme bei den Modellszenarien mit und ohne FPV im Beispielsee mit 40 m Wassertiefe.....	8
Abbildung 3.8: Berechnete Temperaturprofile im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 13 m ohne (a) und mit FPV mit einer Bedeckung von (b) 10 %, (c) 15 %, (d) 25 %, (e) 35 % und (f) 45 % für die Jahre 2017 bis 2021.....	9
Abbildung 3.9: Berechnete Temperaturprofile im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 40 m ohne (a) und mit FPV mit einer Bedeckung von (b) 10 %, (c) 15 %, (d) 25 %, (e) 35 % und (f) 45 % für die Jahre 2017 bis 2021.....	10

Abbildung 3.10: Berechnete Temperaturdifferenzen im Profil zwischen den Modellszenarien ohne und mit FPV bei Bedeckungsgraden von (a) 10 %, (b) 15 %, (c) 25 %, (d) 35 % und (e) 45 % im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 13 m für die Jahre 2017 bis 2021.....	11
Abbildung 3.11: Berechnete Temperaturdifferenzen im Profil zwischen den Modellszenarien ohne und mit FPV bei Bedeckungsgraden von (a) 10 %, (b) 15 %, (c) 25 %, (d) 35 % und (e) 45 % im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 40 m für die Jahre 2017 bis 2021.....	12
Abbildung 3.12: Berechnete Konzentration an Chlorophyll a ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden für die Jahre 2017 und 2018 in den beiden Beispielseen mit a) 13 m Wassertiefe und b) 40 m Wassertiefe	13
Abbildung 3.13: Berechnete, oberflächennahe Konzentration an Chlorophyll a in der Seemitte im Bereich der Bedeckung sowie im östlichen Bereich ohne Bedeckung im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 13 m mit Bedeckungsgraden von a) 10 %, b) 15 %, c) 25 %, d) 35 % und e) 45 %	14
Abbildung 3.14: Berechnete, oberflächennahe Konzentration an Chlorophyll a in der Seemitte im Bereich der Bedeckung sowie im östlichen Bereich ohne Bedeckung im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 40 m mit Bedeckungsgraden von a) 10 %, b) 15 %, c) 25 %, d) 35 % und e) 45 %	15
Abbildung 3.15: Jährliche Nettoprimärproduktion ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Beispielsee mit a) 13 m Wassertiefe und b) 40 m Wassertiefe	16
Abbildung 3.16: Berechnete Secchi-Tiefe ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Beispielsee mit a) 13 m Wassertiefe und b) 40 m Wassertiefe	17
Abbildung 3.17: Berechnete Sauerstoffkonzentrationen im Beispielsee mit 13 m Wassertiefe ohne (a) und mit FPV mit einer Bedeckung von (b) 10 %, (c) 15 %, (d) 25 %, (e) 35 % und (f) 45 % für die Jahre 2017 bis 2021.....	18
Abbildung 3.18: Berechnete Sauerstoffkonzentrationen im Beispielsee mit 40 m Wassertiefe ohne (a) und mit FPV mit einer Bedeckung von (b) 10 %, (c) 15 %, (d) 25 %, (e) 35 % und (f) 45 % für die Jahre 2017 bis 2021.....	19

Abbildung 3.19: Berechnete Differenzen der Sauerstoffkonzentrationen im Profil zwischen den Modellszenarien ohne und mit FPV bei Bedeckungsgraden von (a) 10 %, (b) 15 %, (c) 25 %, (d) 35 % und (e) 45 % im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 13 m für die Jahre 2017 bis 2021	20
Abbildung 3.20: Berechnete Differenzen der Sauerstoffkonzentrationen im Profil zwischen den Modellszenarien ohne und mit FPV bei Bedeckungsgraden von (a) 10 %, (b) 15 %, (c) 25 %, (d) 35 % und (e) 45 % im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 40 m für die Jahre 2017 bis 2021	21
Abbildung 3.21: Berechnete Phosphatphosphorkonzentrationen im Beispielsee mit 13 m Wassertiefe ohne (a) und mit FPV mit einer Bedeckung von (b) 10 %, (c) 15 %, (d) 25 %, (e) 35 % und (f) 45 % für die Jahre 2017 bis 2021	23
Abbildung 3.22: Berechnete Phosphatphosphorkonzentrationen im Beispielsee mit 40 m Wassertiefe ohne (a) und mit FPV mit einer Bedeckung von (b) 10 %, (c) 15 %, (d) 25 %, (e) 35 % und (f) 45 % für die Jahre 2017 bis 2021	24
Abbildung 3.23: Berechnete Differenzen der Phosphatphosphorkonzentrationen im Profil zwischen den Modellszenarien ohne und mit FPV bei Bedeckungsgraden von (a) 10 %, (b) 15 %, (c) 25 %, (d) 35 % und (e) 45 % im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 13 m für die Jahre 2017 bis 2021	25
Abbildung 3.24: Berechnete Differenzen der Phosphatphosphorkonzentrationen im Profil zwischen den Modellszenarien ohne und mit FPV bei Bedeckungsgraden von (a) 10 %, (b) 15 %, (c) 25 %, (d) 35 % und (e) 45 % im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 40 m für die Jahre 2017 bis 2021	26
Abbildung 3.25: Berechnete Nitratstickstoffkonzentrationen im Beispielsee mit 13 m Wassertiefe ohne (a) und mit FPV mit einer Bedeckung von (b) 10 %, (c) 15 %, (d) 25 %, (e) 35 % und (f) 45 % für die Jahre 2017 bis 2021	27
Abbildung 3.26: Berechnete Nitratstickstoffkonzentrationen im Beispielsee mit 40 m Wassertiefe ohne (a) und mit FPV mit einer Bedeckung von (b) 10 %, (c) 15 %, (d) 25 %, (e) 35 % und (f) 45 % für die Jahre 2017 bis 2021	28
Abbildung 3.27: Berechnete Differenzen der Nitratstickstoffkonzentrationen im Profil zwischen den Modellszenarien ohne und mit FPV bei Bedeckungsgraden von (a) 10 %, (b) 15 %, (c) 25 %, (d) 35 %	

und (e) 45 % im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 13 m für die Jahre 2017 bis 2021	29
Abbildung 3.28: Berechnete Differenzen der Nitratstickstoffkonzentrationen im Profil zwischen den Modellszenarien ohne und mit FPV bei Bedeckungsgraden von (a) 10 %, (b) 15 %, (c) 25 %, (d) 35 % und (e) 45 % im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 40 m für die Jahre 2017 bis 2021	30
Abbildung 3.29: Berechnete Ammoniumstickstoffkonzentrationen im Beispielsee mit 13 m Wassertiefe ohne (a) und mit FPV mit einer Bedeckung von (b) 10 %, (c) 15 %, (d) 25 %, (e) 35 % und (f) 45 % für die Jahre 2017 bis 2021	31
Abbildung 3.30: Berechnete Ammoniumstickstoffkonzentrationen im Beispielsee mit 40 m Wassertiefe ohne (a) und mit FPV mit einer Bedeckung von (b) 10 %, (c) 15 %, (d) 25 %, (e) 35 % und (f) 45 % für die Jahre 2017 bis 2021	32
Abbildung 3.31: Berechnete Differenzen der Ammoniumstickstoffkonzentrationen im Profil zwischen den Modellszenarien ohne und mit FPV bei Bedeckungsgraden von (a) 10 %, (b) 15 %, (c) 25 %, (d) 35 % und (e) 45 % im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 13 m für die Jahre 2017 bis 2021	33
Abbildung 3.32: Berechnete Differenzen der Ammoniumstickstoffkonzentrationen im Profil zwischen den Modellszenarien ohne und mit FPV bei Bedeckungsgraden von (a) 10 %, (b) 15 %, (c) 25 %, (d) 35 % und (e) 45 % im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 40 m für die Jahre 2017 bis 2021	34

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 3.1:	Berechnete, jährliche Nettoprimärproduktion im Beispielsee ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden in gC/m ² /a sowie prozentuale Abnahme mit FPV im Vergleich zur Situation ohne FPV	16
Tabelle 3.2:	Berechnete, jährliche Nettoprimärproduktion im auf 40 m eingetieften Beispielsee ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden in gC/m ² /a sowie prozentuale Abnahme mit FPV im Vergleich zur Situation ohne FPV	16

1 Einleitung

Im Auftrag der LUBW wurden im Rahmen einer umfassenden Modellstudie die Auswirkungen schwimmender Photovoltaikanlagen (FPV, von engl.: floating photovoltaik) auf verschiedene Facetten des Ökosystems See untersucht und dokumentiert (Kobus und Partner 2022). Dabei wurde im ersten Schritt der Einfluss der bedeckten Seefläche auf verschiedene meteorologische Größen analysiert. Damit lassen sich die durch die Bedeckung entstehenden Veränderungen im Wärme-, Impuls- und Lichtaustausch zwischen Wasser und Atmosphäre bestimmen. Auf dieser Grundlage wurde im nächsten Schritt mit einem Modellsystem der Einfluss der Bedeckung auf die Durchmischungsprozesse, Wassertemperaturen, Primärproduktion, den Sauerstoffhaushalt und die Nährstoffkreisläufe verschiedener Seen untersucht. Dabei wurden Bedeckungsgrade von 10 % und 45 % der Seefläche betrachtet.

Die Ergebnisse zeigen auf, dass das Ausmaß der Veränderungen vom Grad der bedeckten Seefläche abhängt. Ergänzend zu den bereits betrachteten Bedeckungsgraden von 10 % und 45 % der Seefläche sollen nun mit dem bestehenden Modell weitere Szenarien mit Bedeckungsgraden von 15 %, 25 % und 35 % für den Beispielsee mit einer Wassertiefe von 13 m sowie den auf 40 m eingetieften See untersucht werden. Auf diese Weise entsteht eine nach Bedeckungsgrad fein abgestufte Bandbreite der zu erwartenden Auswirkungen durch den Einsatz von FPV.

Die zusätzlichen Modellberechnungen basieren auf den bereits bestehenden Modellen der Beispielseen mit einer Wassertiefe von 13 m und 40 m. Die Vorgehensweise ist identisch zu den bereits durchgeführten Berechnungen. Daher sei für eine detaillierte Dokumentation des Modellaufbaus auf den oben genannten Vorgängerbericht verwiesen. Im vorliegenden Bericht sind die für die Implementierung der unterschiedlichen Bedeckungsgrade vorgenommenen Änderungen im Modell sowie die Modellergebnisse der unterschiedlichen Bedeckungsgrade dokumentiert.

2 Szenarienbeschreibung

Grundlage der neuen Modellszenarien bilden die bereits bestehenden Modelle für die Beipielseen mit einer maximalen Wassertiefe von 13 m und 40 m. Für die Modellberechnungen wird wie gehabt der Simulationszeitraum vom 01.01.2017 bis zum 01.01.2022 verwendet. Ergänzend zu den bereits gerechneten FPV-Szenarien mit Bedeckungsgraden von 10 % und 45 % werden nun drei weitere Szenarien mit Bedeckungsgraden von 15 %, 25 % und 35 % betrachtet. Die im Modell verwendeten Anfangs- und Randbedingungen bleiben unverändert, mit Ausnahme der bedeckten Seefläche. Abbildung 2.1 zeigt, gemeinsam mit den bereits berechneten Bedeckungsgraden 10 % und 45 %, die bedeckte Seefläche für die neuen Szenarien mit Bedeckungsgraden von 15 %, 25 % und 35 %.

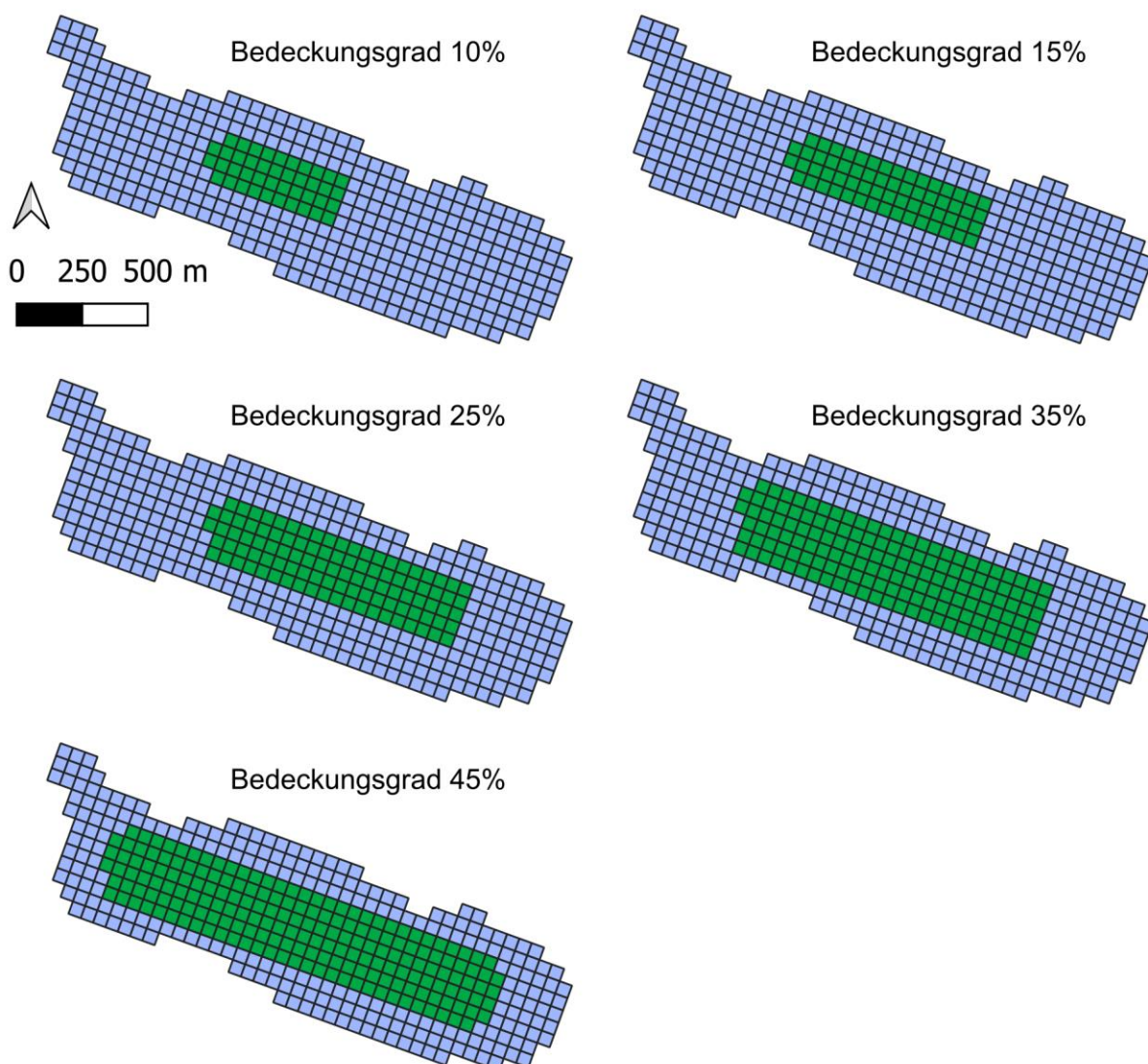


Abbildung 2.1: Bedeckungsgebiete des Sees in grün bei verschiedenen Bedeckungsgraden

3 Modellergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der neuen FPV-Modellszenarien dargestellt und erläutert. Dabei werden die bereits bestehenden Ergebnisse der Szenarien mit Bedeckungsgraden von 10 % und 45 % integriert, damit die Ergebnisse aller berechneten Bedeckungsgrade verglichen werden können.

3.1 Wärmeaustauschprozesse

Die Ergebnisse der Modellszenarien mit 10 % und 45 % Bedeckungsgraden haben bereits aufgezeigt, dass die Veränderungen des Nettowärmeflusses ins Gewässer jahreszeitenabhängig ist. Bei Bedeckung eines Sees mit FPV verringert sich in den Herbst- und Wintermonaten der Wärmeverlust des Sees, während in den Frühjahrs- und Sommermonaten der Wärmeeintrag sinkt. Das Ausmaß der Veränderung ist abhängig von der bedeckten Seefläche. Dies ist gut anhand der Nettowärmeflüsse für die einzelnen Bedeckungsszenarien in Abbildung 3.1 zu erkennen. Die Änderung der Nettowärmeflüsse verläuft linear zum Bedeckungsgrad.

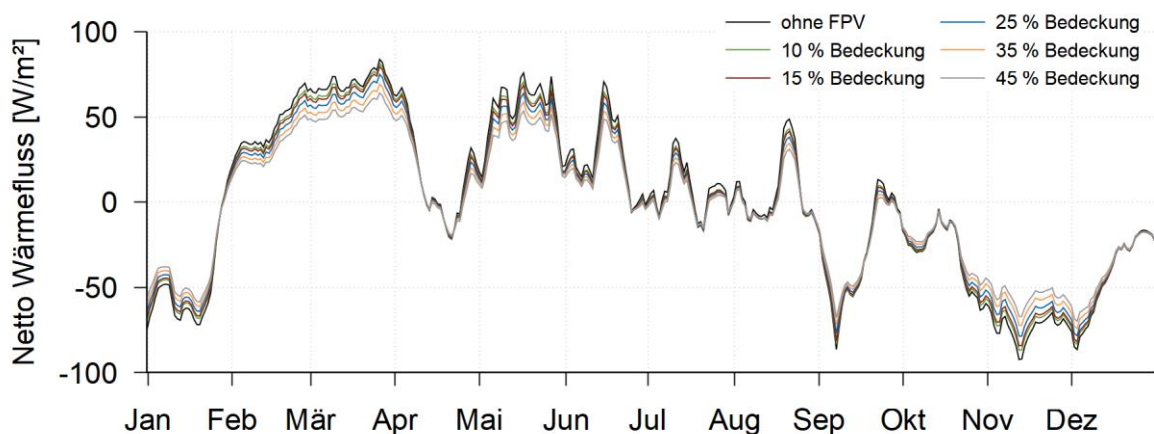


Abbildung 3.1: Nettowärmeflüsse ohne FPV und bei den FPV-Szenarien mit verschiedenen Bedeckungsgraden exemplarisch für das Jahr 2017

3.2 Wassertemperaturen und Dichteschichtung

Die Ergebnisse der Modellszenarien mit Bedeckungsgraden von 10 % und 45 % haben aufgezeigt, dass bei einer Bedeckung mit FPV die Wassertemperaturen im Frühjahr langsamer ansteigen und im Herbst langsamer abnehmen im Vergleich zur Situation ohne Bedeckung. Mit FPV lässt sich also eine Verzögerung der Aufwärmung und Abkühlung des Wasserkörpers beobachten. Abbildung 3.2 und Abbildung 3.3 zeigen für die Beispielseen mit 13 m und 40 m Wassertiefe die berechneten oberflächennahen Wassertemperaturen ohne und mit FPV bei den verschiedenen Bedeckungsgraden sowie die Differenz der FPV-Szenarien zur Situation ohne FPV. Die entstehenden Differenzen sind abhängig vom Bedeckungsgrad. Es zeigt sich eine kontinuierliche Zunahme der Differenzen mit

zunehmendem Bedeckungsgrad. Oberflächennah sind die Unterschiede zwischen den beiden Beispielseen mit verschiedenen Wassertiefen gering, da aufgrund der stabilen Temperaturschichtung im Sommer die Tiefe des Hypolimnions einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Verhältnisse im Eplimnion hat.

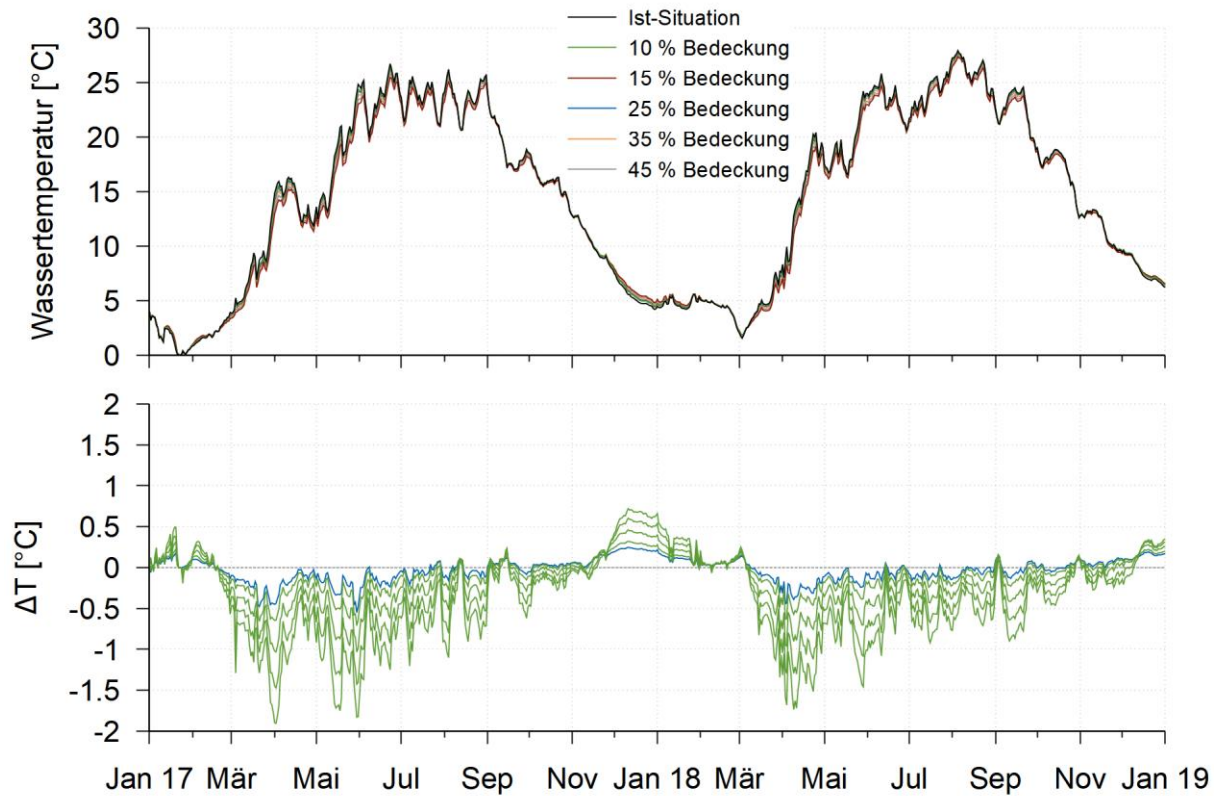


Abbildung 3.2: Berechnete Wassertemperaturen an der Wasseroberfläche des Beispielsees mit einer Wassertiefe von 13 m ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden (oben) sowie Differenz der FPV-Szenarien zur Situation ohne FPV (unten)

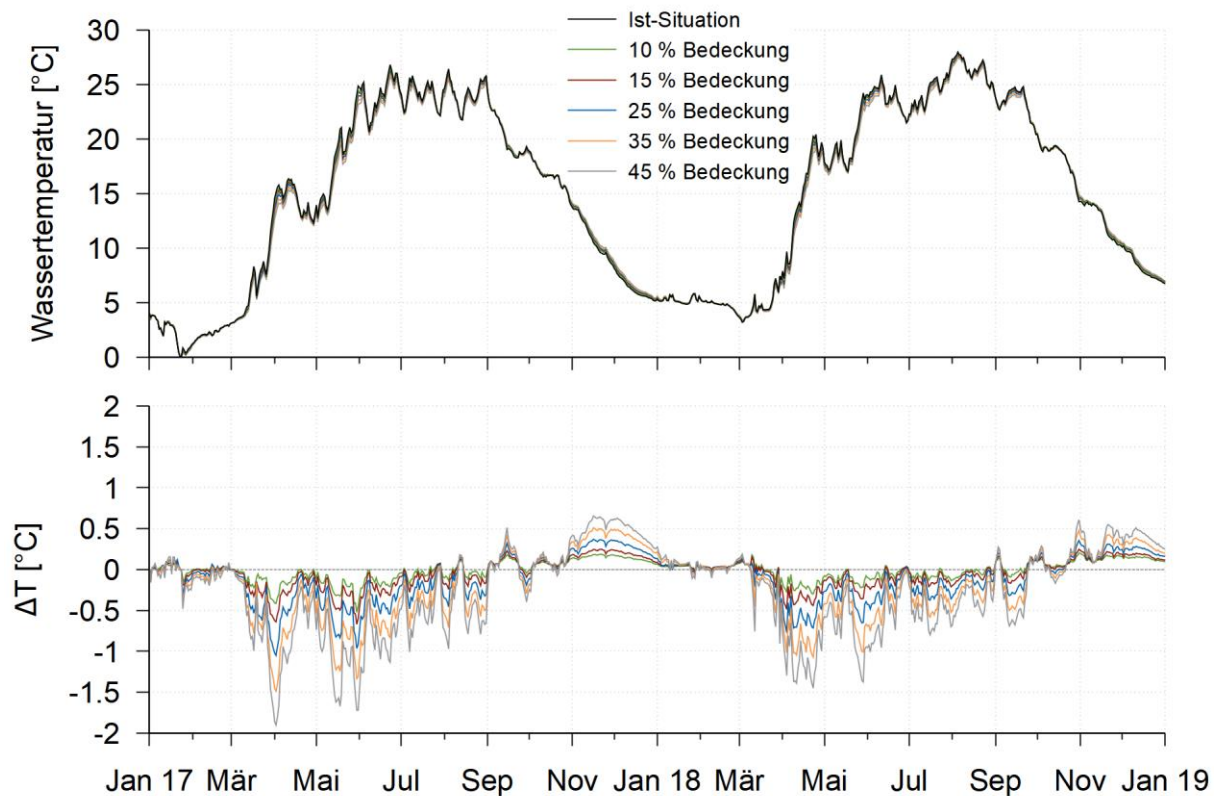


Abbildung 3.3: Berechnete Wassertemperaturen an der Wasseroberfläche des Beispielsees mit einer Wassertiefe von 40 m ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden (oben) sowie Differenz der FPV-Szenarien zur Situation ohne FPV (unten)

Abbildung 3.4 und Abbildung 3.5 zeigen die Wassertemperaturen der verschiedenen Bedeckungsszenarien und deren Differenzen an der Seesohle für die Beispielseen mit einer Wassertiefe von 13 m und 40 m. Bei Abbildung 3.5 für den 40 m tiefen See ist der gesamte Simulationszeitraum von 2017-2021 dargestellt, da sich die Temperaturwerte der Jahre untereinander im Vergleich zum 13 m tiefen See unterscheiden. Mit zunehmendem Bedeckungsgrad verringert sich die Erwärmung des Hypolimnions und die Auflösung der Temperaturschichtung erfolgt später. Außerdem ist die winterliche Abkühlung geringer. Diese Effekte unterscheiden sich im Ausmaß deutlich zwischen den beiden Beispielseen mit verschiedenen Wassertiefen. Beim 40 m tiefen See sind die Temperaturänderungen aufgrund der größeren Pufferwirkung des größeren Hypolimnionvolumens in den ersten Jahren geringer. Mit einem Bedeckungsgrad von 45 % nehmen die Wassertemperaturen an der Seesohle im 13 m tiefen See während der Sommermonate um 1-2 °C ab, beim 40 m tiefen See in den ersten Jahren nur um ca. 0,3-0,5 °C. Beim tieferen See ist allerdings die winterliche Auflösung der Temperaturschichtung noch stärker verzögert. Bei einem Bedeckungsgrad von 45 % tritt im 13 m tiefen See die vollständige vertikale Durchmischung etwa einen halben Monat später ein, beim 40 m tiefen See in den ersten Jahren etwa einen Monat später. Bei entsprechend

milden Wintern kann somit auch die vollständige vertikale Durchmischung des Sees durch die Bedeckung verhindert werden, wie im Winter 2019/2020 der Fall.

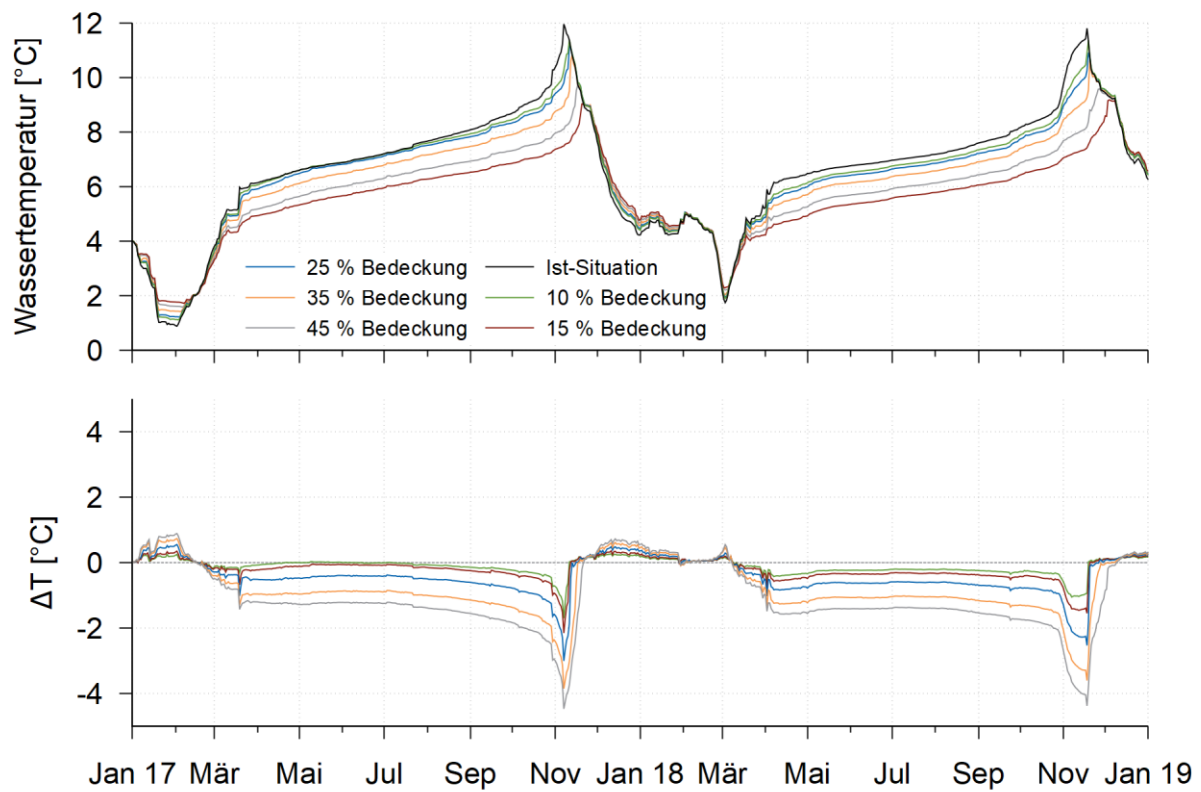


Abbildung 3.4: Berechnete Wassertemperaturen an der Seesohle in 13 m Wassertiefe des Beispielsees mit einer Wassertiefe von 13 m ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden (oben) sowie Differenz der FPV-Szenarien zur Situation ohne FPV (unten)

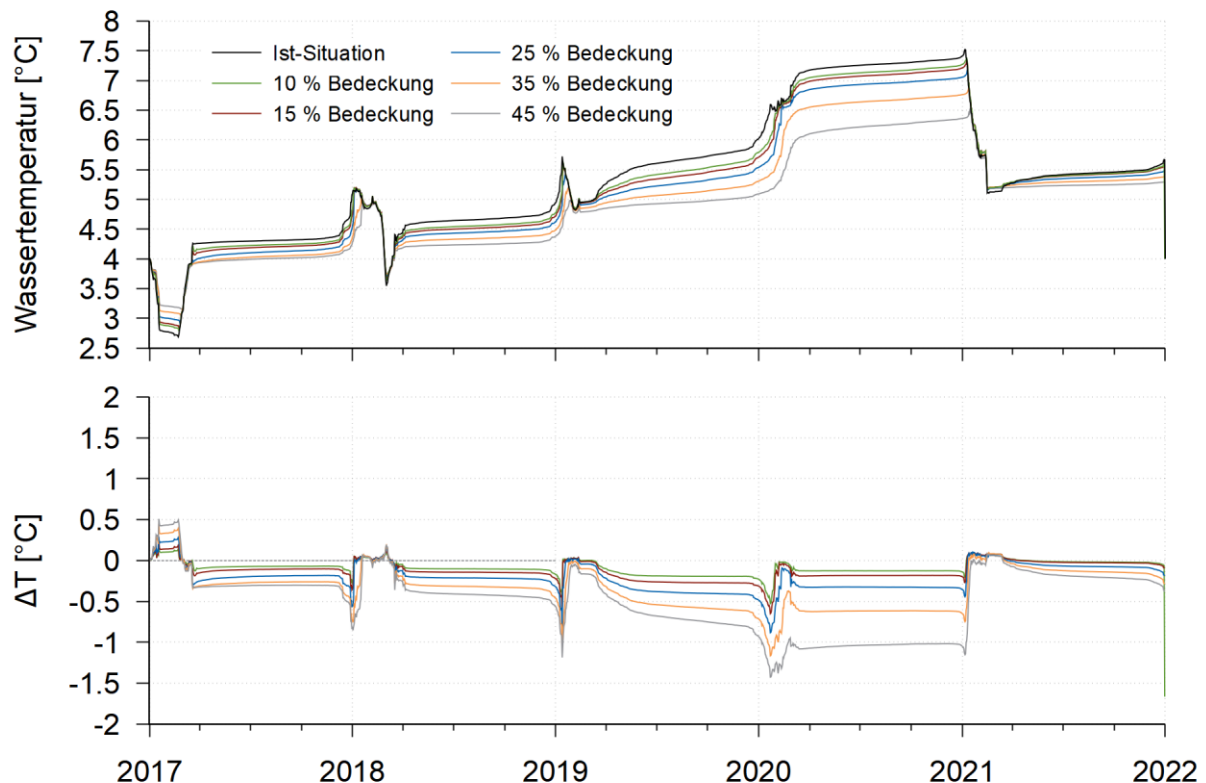


Abbildung 3.5: Berechnete Wassertemperaturen an der Seesohle in 40 m Wassertiefe des Beispielsees mit einer Wassertiefe von 40 m ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden (oben) sowie Differenz der FPV-Szenarien zur Situation ohne FPV (unten)

Mit zunehmendem Bedeckungsgrad verringert sich die Epilimnionmächtigkeit. Dies kann z. B. anhand des Tiefenverlaufs der 12 °C-Isotherme veranschaulicht werden. Abbildung 3.6 und Abbildung 3.7 zeigen diesen Tiefenverlauf für die beiden Beispielseen mit 13 m und 40 m Wassertiefe ohne und mit FPV für die verschiedenen Bedeckungsszenarien in den ersten beiden Jahren des Simulationszeitraums. Dieser Effekt ist im flacheren Beispielsee deutlich größer. Dies liegt vermutlich daran, dass im tieferen See die nicht bedeckten Bereiche ebenfalls Wassertiefen von 20 m oder mehr aufweisen und somit über diese Bereiche ein vertikaler Transfer von Impuls bzw. Turbulenz und Wärme möglich ist. Im 13 m tiefen See verringert sich bei einer Bedeckung von 10 % die Wassertiefe der Isotherme um wenige Zentimeter bis Dezimeter, bei einer Bedeckung von 45 % um bis zu 2 m. Die neu berechneten Szenarien liegen je nach Bedeckungsgrad innerhalb dieser Spanne. Beim 40 m tiefen See betragen die Unterschiede zwischen den Bedeckungsszenarien nur wenige Zentimeter.

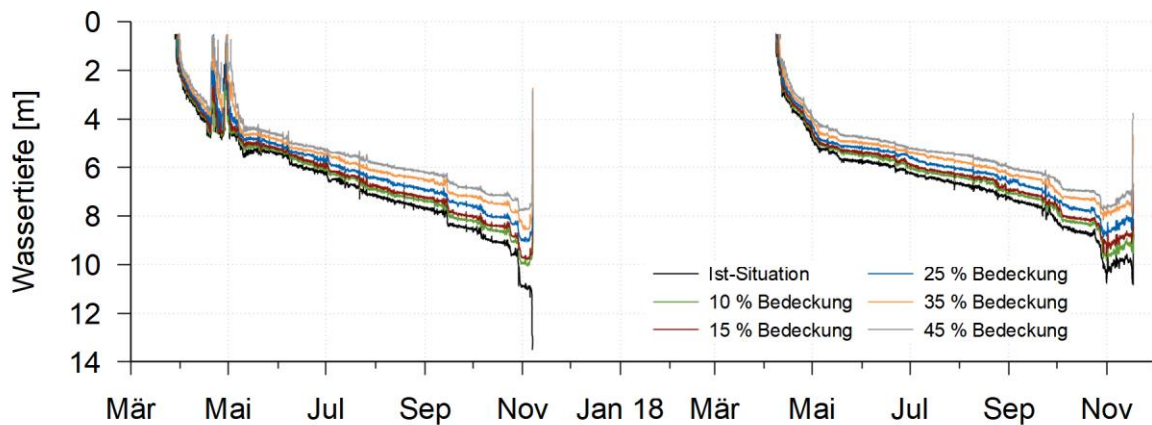


Abbildung 3.6: Wassertiefe der 12 °C-Isotherme bei den Modellszenarien mit und ohne FPV im Beispielsee mit 13 m Wassertiefe

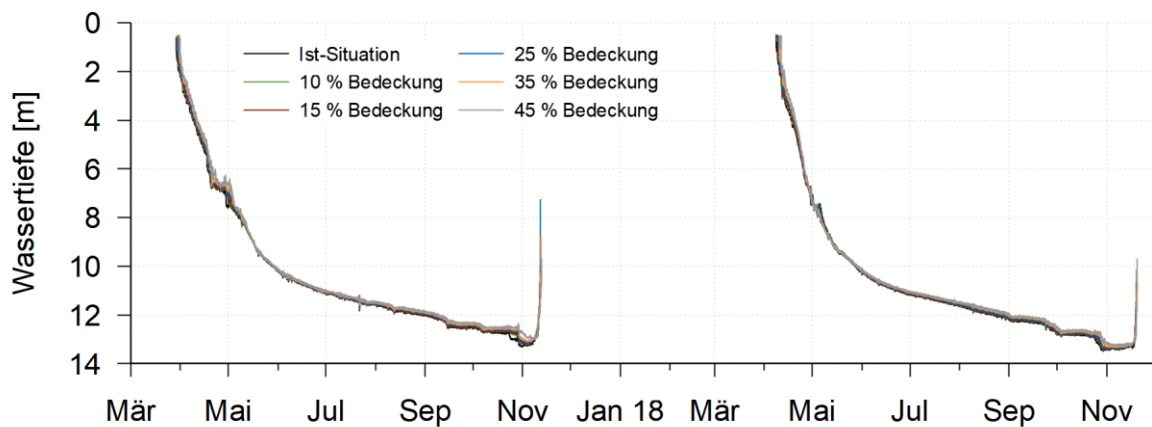


Abbildung 3.7: Wassertiefe der 12 °C-Isotherme bei den Modellszenarien mit und ohne FPV im Beispielsee mit 40 m Wassertiefe

Die gezeigten Auswirkungen können gut anhand der berechneten Temperaturprofile der einzelnen Modellszenarien sowie deren Differenzen zur Situation ohne Bedeckung veranschaulicht werden. Abbildung 3.8 und Abbildung 3.9 zeigen die Profile für die beiden Beispielseen mit Wassertiefen von 13 m und 40 m für die Szenarien ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden. In Abbildung 3.10 und Abbildung 3.11 sind für die beiden Beispielseen mit Wassertiefen von 13 m und 40 m die Differenzen zwischen den Wassertemperaturen der Szenarien ohne und mit FPV für die verschiedenen Bedeckungsgrade dargestellt. Die größten Differenzen treten im Tiefenbereich der Sprungschicht durch die verringerte Mächtigkeit des Epilimnions auf. Gut zu erkennen sind auch der Anstieg der Temperaturen im Herbst und Winter, die verzögerte Erwärmung im Frühjahr und die geringeren Hypolimniontemperaturen. In Abhängigkeit des Bedeckungsgrads steigen die Differenzen an. Während die Differenzen beim 13 m tiefen See von Jahr zu Jahr in etwa vergleichbar sind und sich keine langjährige Entwicklung zeigt, sind

bei den Differenzen im 40 m tiefen See Unterschiede zwischen den Jahren zu erkennen, z. B. durch die unvollständige Durchmischung im Winter 2019/2020.

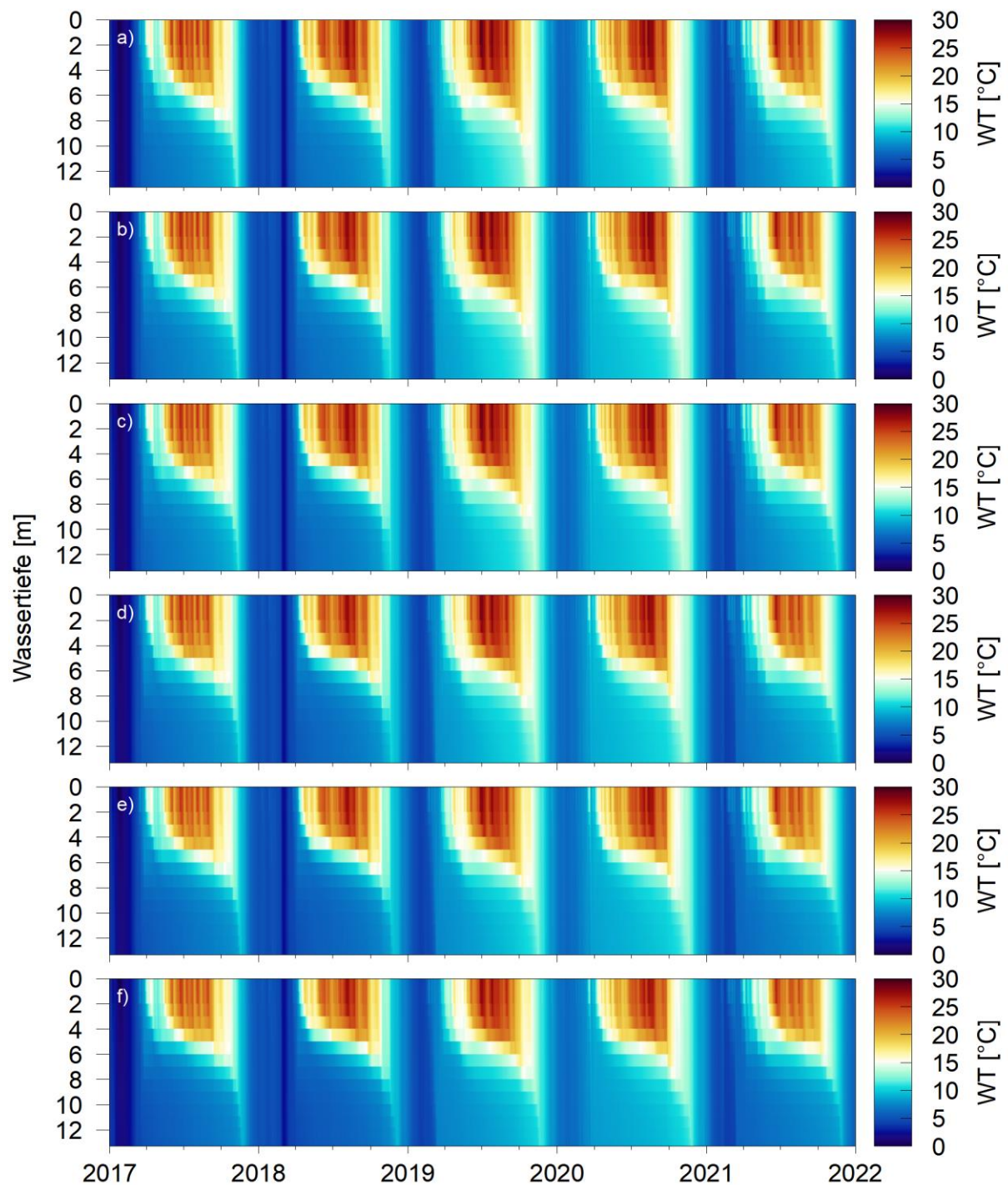


Abbildung 3.8: Berechnete Temperaturprofile im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 13 m ohne (a) und mit FPV mit einer Bedeckung von (b) 10 %, (c) 15 %, (d) 25 %, (e) 35 % und (f) 45 % für die Jahre 2017 bis 2021

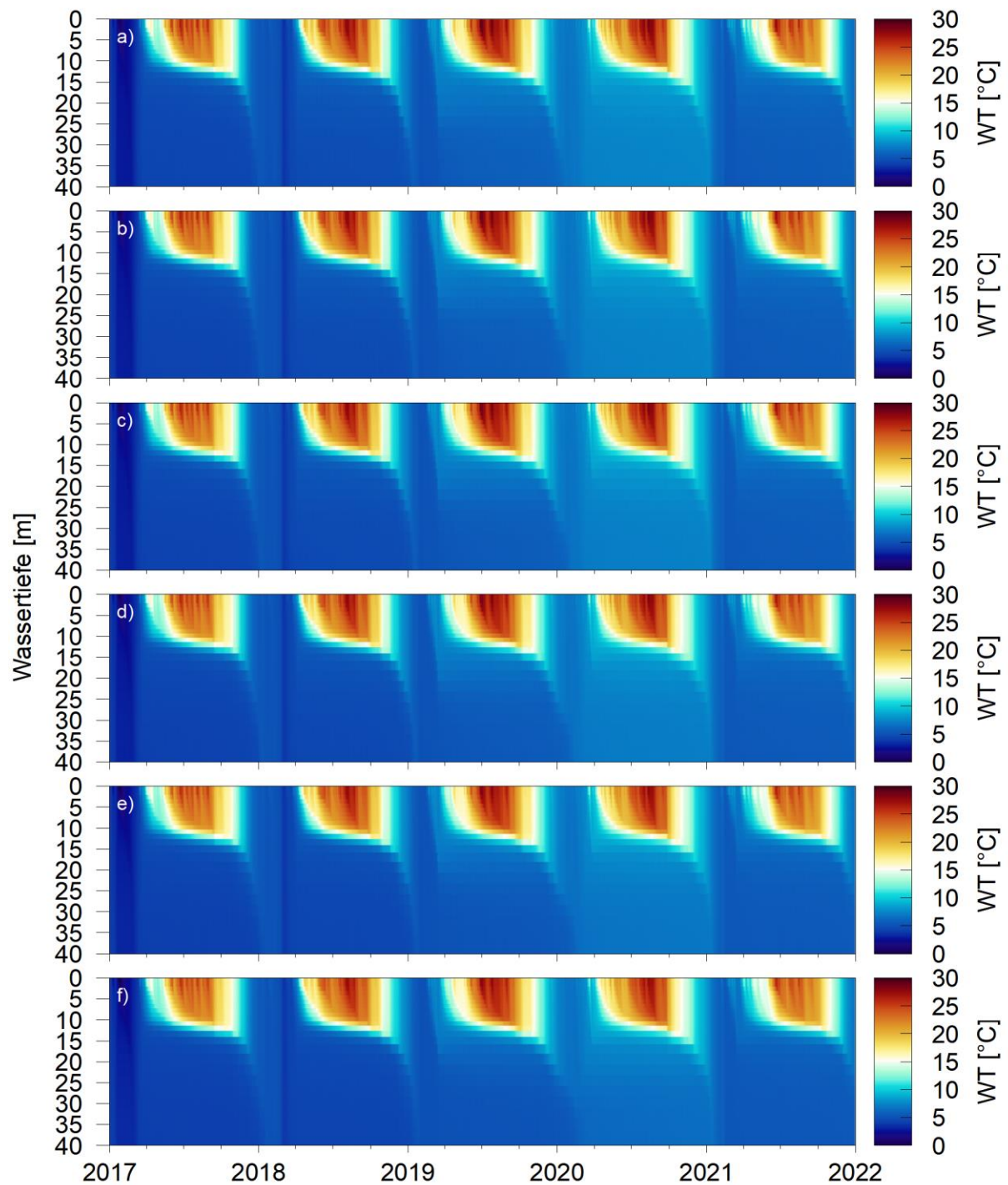


Abbildung 3.9: Berechnete Temperaturprofile im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 40 m ohne (a) und mit FPV mit einer Bedeckung von (b) 10 %, (c) 15 %, (d) 25 %, (e) 35 % und (f) 45 % für die Jahre 2017 bis 2021

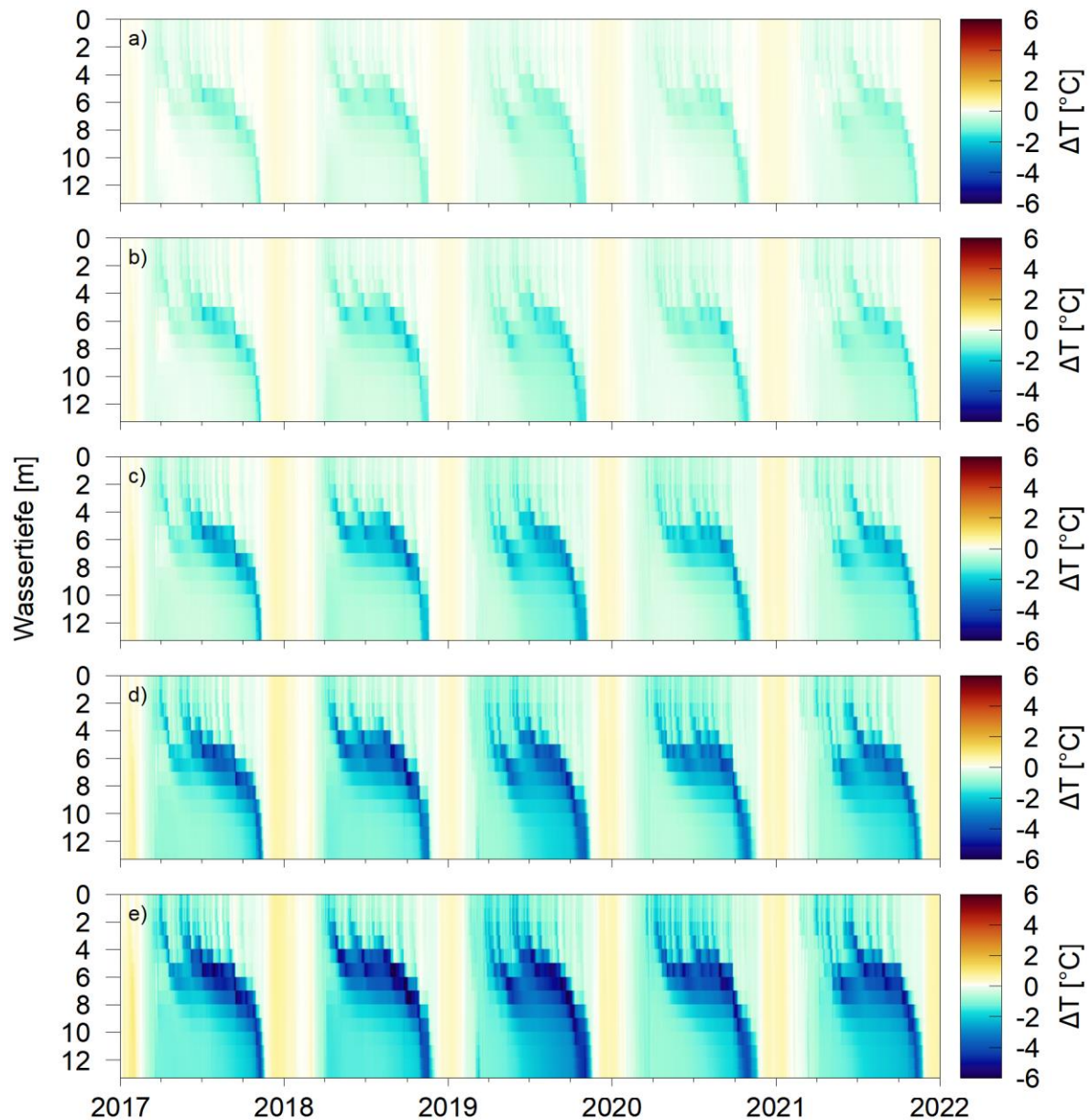


Abbildung 3.10: Berechnete Temperaturdifferenzen im Profil zwischen den Modellszenarien ohne und mit FPV bei Bedeckungsgraden von (a) 10 %, (b) 15 %, (c) 25 %, (d) 35 % und (e) 45 % im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 13 m für die Jahre 2017 bis 2021

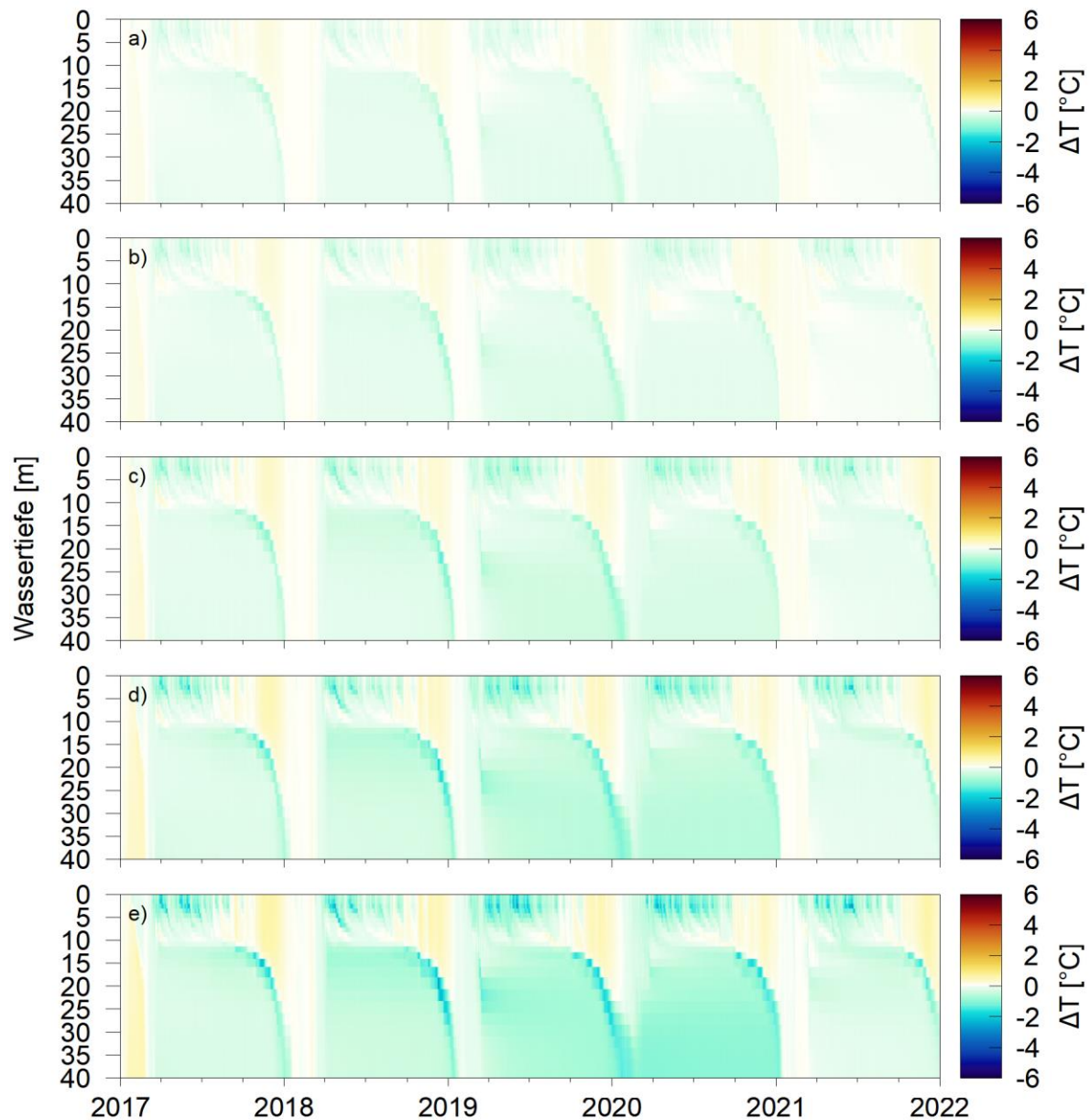


Abbildung 3.11: Berechnete Temperaturdifferenzen im Profil zwischen den Modellszenarien ohne und mit FPV bei Bedeckungsgraden von (a) 10 %, (b) 15 %, (c) 25 %, (d) 35 % und (e) 45 % im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 40 m für die Jahre 2017 bis 2021

3.3 Primärproduktion und Folgeeffekte

Die Primärproduktion nimmt bei einer Bedeckung der Seeoberfläche insbesondere aufgrund der geringeren Lichteinstrahlung ab. Abbildung 3.12 zeigt die berechneten Konzentrationen an Chlorophyll a für die Szenarien ohne und mit FPV mit den verschiedenen Bedeckungsgraden und den beiden unterschiedlich tiefen Beispielseen. Mit zunehmender Bedeckung sinken die Konzentrationen an Chlorophyll a im See ab. Außerdem verzögert sich die Frühjahrsblüte. Im auf 40 m

eingetieften See liegen generell die Konzentrationen in allen Szenarien etwas niedriger, insbesondere im Frühjahr. Ursache sind geringere Nährstoffkonzentrationen im Epilimnion aufgrund der größeren Verdünnungswirkung des Wasserkörpers.

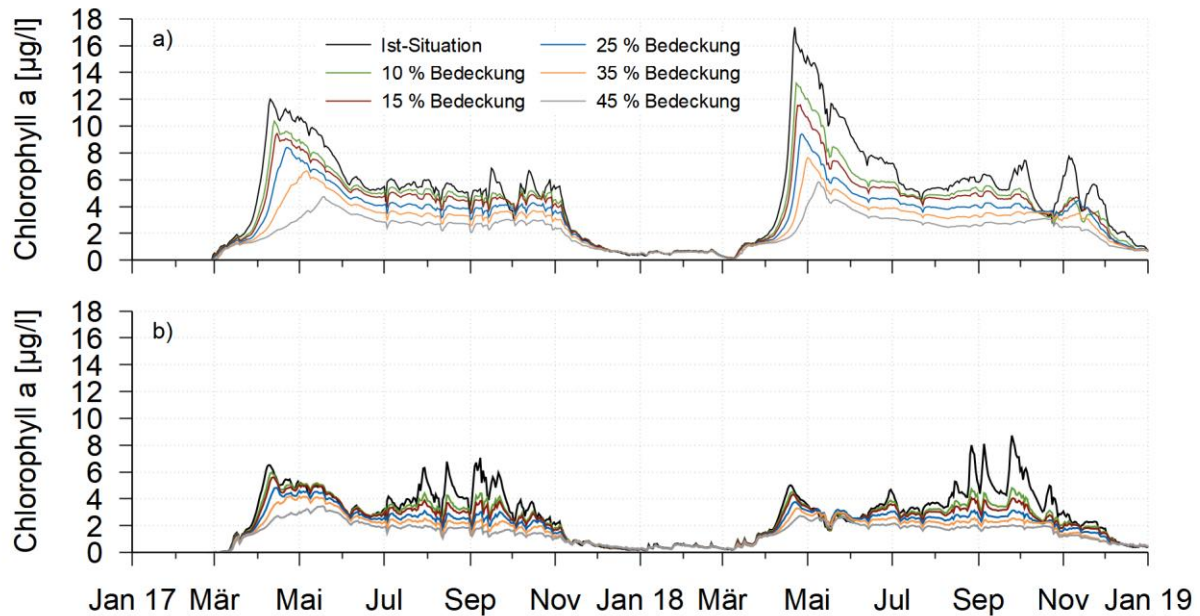


Abbildung 3.12: Berechnete Konzentration an Chlorophyll a ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden für die Jahre 2017 und 2018 in den beiden Beispielseen mit a) 13 m Wassertiefe und b) 40 m Wassertiefe

Wie bereits im Vorgängerbericht gezeigt, entstehen im See aufgrund der Bedeckung räumliche Konzentrationsunterschiede an Chlorophyll a. Abbildung 3.13 und Abbildung 3.14 zeigen für die beiden Beispielseen mit Wassertiefen von 13 m und 40 m bei den verschiedenen Bedeckungsgraden jeweils zwei Zeitreihen mit den oberflächennahen Konzentrationen an Chlorophyll a im bedeckten Bereich in der Seemitte und im östlichen Seeteil ohne Bedeckung. Obwohl im bedeckten Bereich keine Photosynthese auftritt, sind dort in allen Szenarien aufgrund der Verdriftung durch die Seeströmung Algen vorhanden. Mit steigendem Bedeckungsgrad sinkt das Verhältnis zwischen den Konzentrationen im bedeckten und nicht bedeckten Bereich.

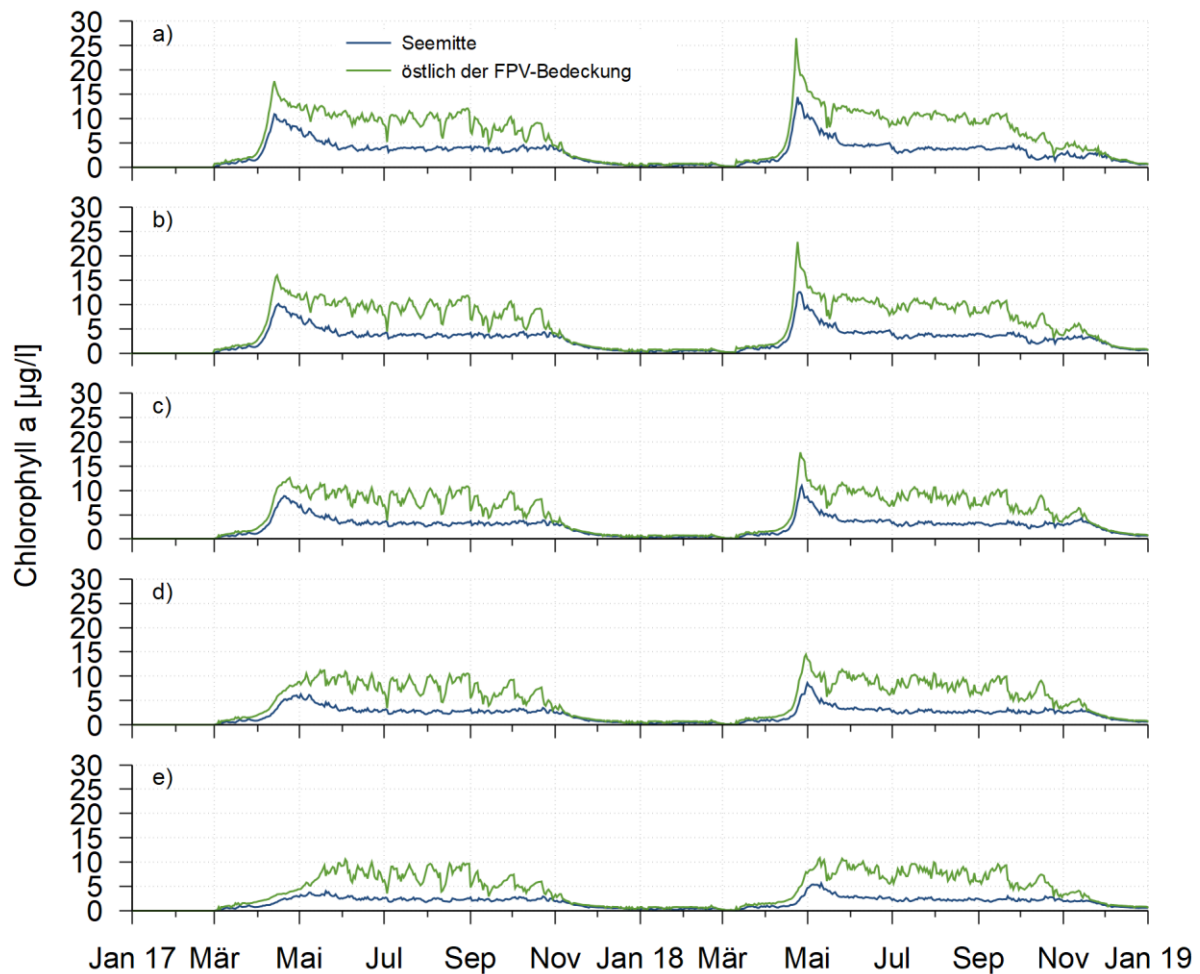


Abbildung 3.13: Berechnete, oberflächennahe Konzentration an Chlorophyll a in der Seemitte im Bereich der Bedeckung sowie im östlichen Bereich ohne Bedeckung im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 13 m mit Bedeckungsgraden von a) 10 %, b) 15 %, c) 25 %, d) 35 % und e) 45 %

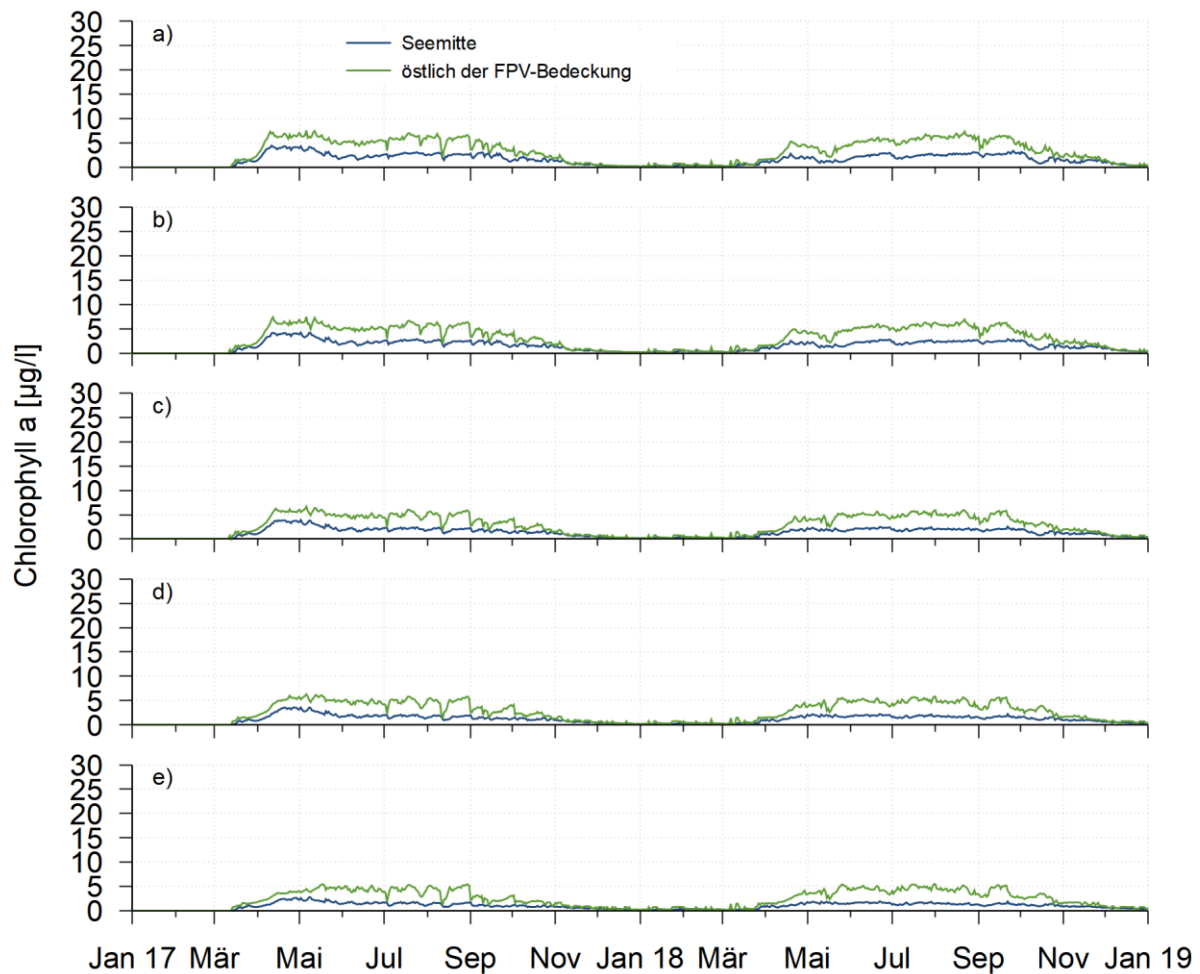


Abbildung 3.14: Berechnete, oberflächennahe Konzentration an Chlorophyll a in der Seemitte im Bereich der Bedeckung sowie im östlichen Bereich ohne Bedeckung im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 40 m mit Bedeckungsgraden von a) 10 %, b) 15 %, c) 25 %, d) 35 % und e) 45 %

Durch die Bedeckung mit FPV wird die Produktivität des Gewässers verringert. Abbildung 3.15 zeigt die berechnete, jährliche Nettoprimärproduktion für die Situation ohne und mit FPV mit verschiedenen Bedeckungsgraden für die beiden unterschiedlich tiefen Beispielseen. Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 listen für den 13 m und 40 m tiefen Beispielsee die dazugehörigen Zahlenwerte mit Angabe der prozentualen Abnahme auf. Bei einer Bedeckung von 10 % liegt die berechnete Abnahme im Bereich 10-20 %, bei einer Bedeckung von 45 % im Größenbereich 50-60 %.

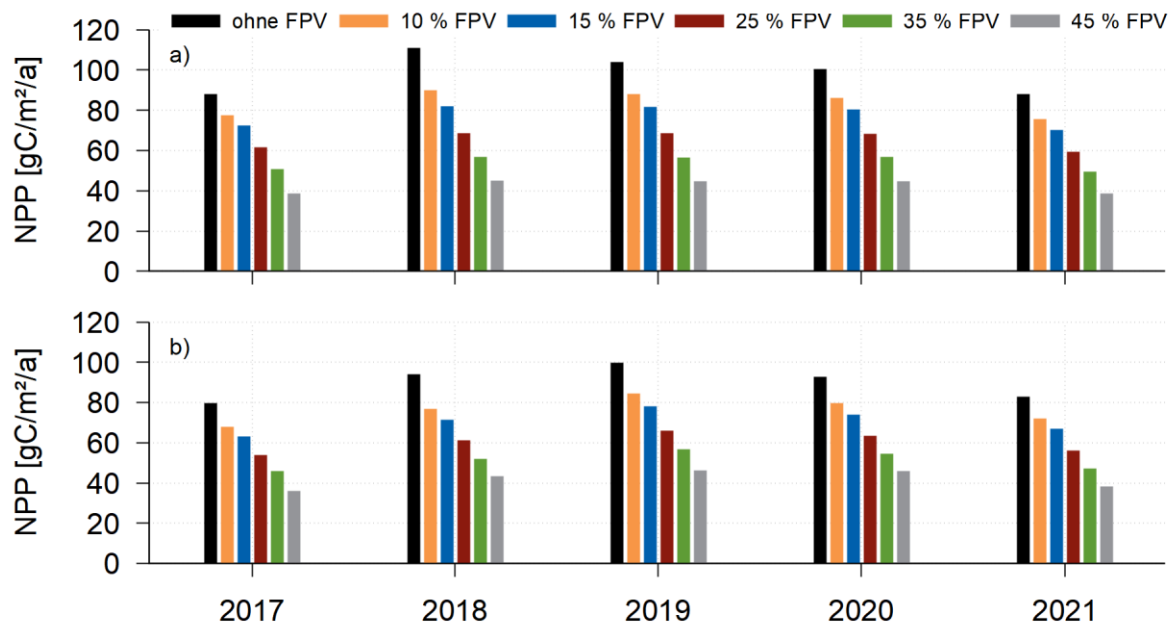


Abbildung 3.15: Jährliche Nettoprimärproduktion ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Beispielsee mit a) 13 m Wassertiefe und b) 40 m Wassertiefe

Tabelle 3.1: Berechnete, jährliche Nettoprimärproduktion im Beispielsee ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden in gC/m²/a sowie prozentuale Abnahme mit FPV im Vergleich zur Situation ohne FPV

Jahr	Ohne FPV	10 % FPV	15 % FPV	25 % FPV	35 % FPV	45 % FPV
2017	87,9	77,5 (-11,9 %)	72,3 (-17,7 %)	61,6 (-29,9 %)	50,7 (-42,3 %)	38,7 (-56,0 %)
2018	111,0	90,0 (-19,0 %)	81,9 (-26,2 %)	68,6 (-38,2 %)	56,9 (-48,7 %)	45,0 (-59,4 %)
2019	104,1	88,0 (-15,5 %)	81,5 (-21,7 %)	68,5 (-34,2 %)	56,6 (-45,6 %)	44,8 (-57,0 %)
2020	100,6	86,0 (-14,5 %)	80,4 (-20,1 %)	68,4 (-32,0 %)	56,7 (-43,6 %)	44,8 (-55,4 %)
2021	88,2	75,5 (-14,3 %)	70,0 (-20,6 %)	59,2 (-32,9 %)	49,6 (-43,8 %)	38,7 (-56,1 %)

Tabelle 3.2: Berechnete, jährliche Nettoprimärproduktion im auf 40 m eingetieften Beispielsee ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden in gC/m²/a sowie prozentuale Abnahme mit FPV im Vergleich zur Situation ohne FPV

Jahr	Ohne FPV	10 % FPV	15 % FPV	25 % FPV	35 % FPV	45 % FPV
2017	79,7	68,0 (-14,7 %)	63,2 (-20,7 %)	54,0 (-32,2 %)	45,9 (-42,4 %)	36,1 (-54,7 %)
2018	94,1	76,7 (-18,5 %)	71,3 (-24,2 %)	61,1 (-35,1 %)	51,9 (-44,8 %)	43,2 (-54,1 %)
2019	99,9	84,5 (-15,4 %)	78,1 (-21,8 %)	66,1 (-33,8 %)	56,7 (-43,2 %)	46,3 (-53,7 %)
2020	92,8	79,7 (-14,2 %)	74,1 (-20,2 %)	63,6 (-31,5 %)	54,6 (-41,2 %)	46,0 (-50,4 %)
2021	82,9	71,9 (-13,3 %)	66,9 (-19,3 %)	56,0 (-32,4 %)	47,2 (-43,1 %)	38,4 (-53,7 %)

Eine verringerte Produktivität eines Gewässers ist mit einer Zunahme der Sichttiefe verbunden. Abbildung 3.16 zeigt die berechneten Secchi-Tiefen für die beiden Beispielseen mit unterschiedlichen Wassertiefen ohne und mit FPV für die verschiedenen Bedeckungsgrade. Der Anstieg der Sichttiefen in den FPV-Szenarien ist auf die geringere Algenkonzentrationen und der damit verringerten Lichtextinktion zurückzuführen. Da die Lichtextinktion von den vorherrschenden Algenarten abhängt, sind diese Ergebnisse als exemplarisch zu betrachten und können je nach See davon abweichen.

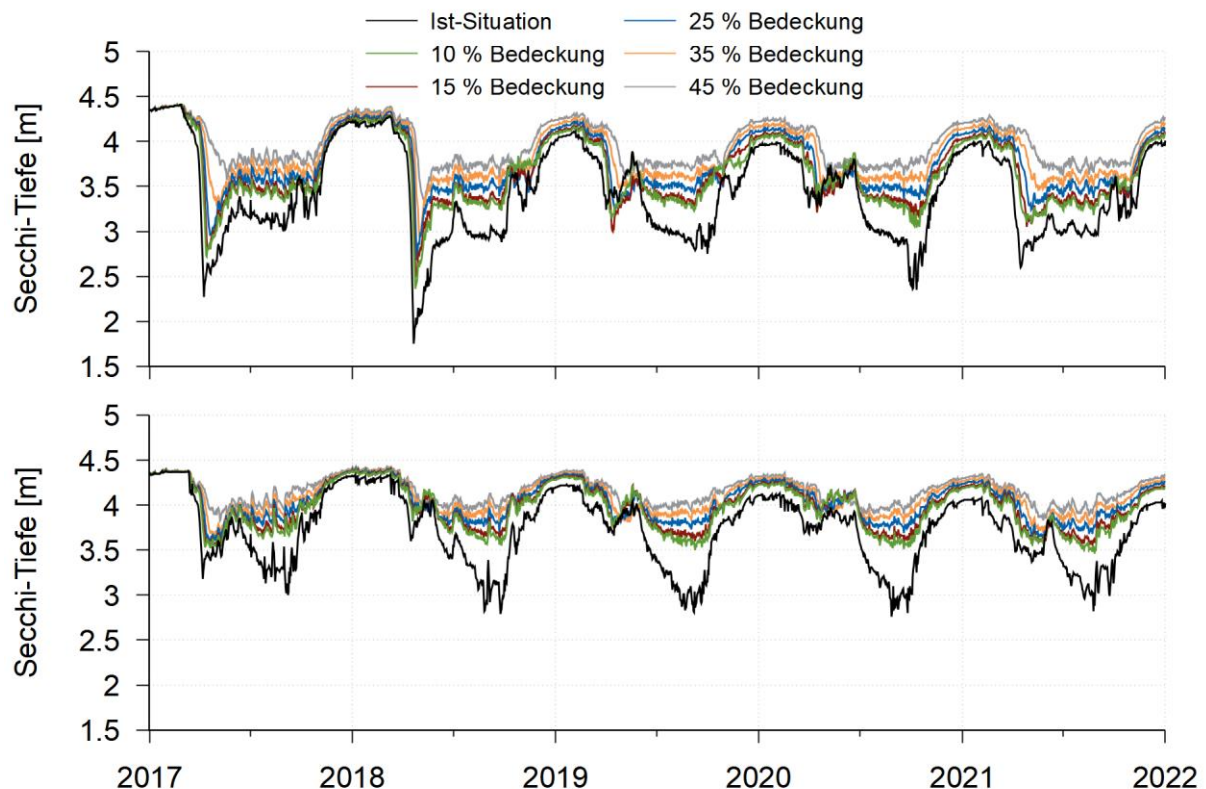


Abbildung 3.16: Berechnete Secchi-Tiefe ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Beispielsee mit a) 13 m Wassertiefe und b) 40 m Wassertiefe

3.4 Sauerstoffgehalt

Veränderungen bei der Primärproduktion beeinflussen die Sauerstoffverhältnisse eines Sees. Abbildung 3.17 und Abbildung 3.18 zeigen die berechneten Sauerstoffkonzentrationen beider Beispielseen mit 13 m und 40 m Wassertiefe für die Szenarien ohne und mit FPV mit den verschiedenen Bedeckungsgraden. In Abbildung 3.19 und Abbildung 3.20 sind für beide Beispielseen die Differenzen zwischen den Sauerstoffkonzentrationen der Szenarien ohne und mit FPV für die verschiedenen Bedeckungsgrade dargestellt. In Abhängigkeit des Bedeckungsgrads nehmen die Unterschiede zu. Die verringerten Konzentrationen im Epilimnion und die

erhöhten im Hypolimnion sind auf die veränderte Primärproduktion zurückzuführen. Die größten Unterschiede entstehen allerdings durch die verlängerte Temperaturschichtung bei Bedeckung mit FPV. Beim 40 m tiefen See sind zudem insbesondere beim Bedeckungsgrad von 45 % die Auswirkungen der unvollständigen Durchmischung im Winter 2019/2020 zu erkennen.

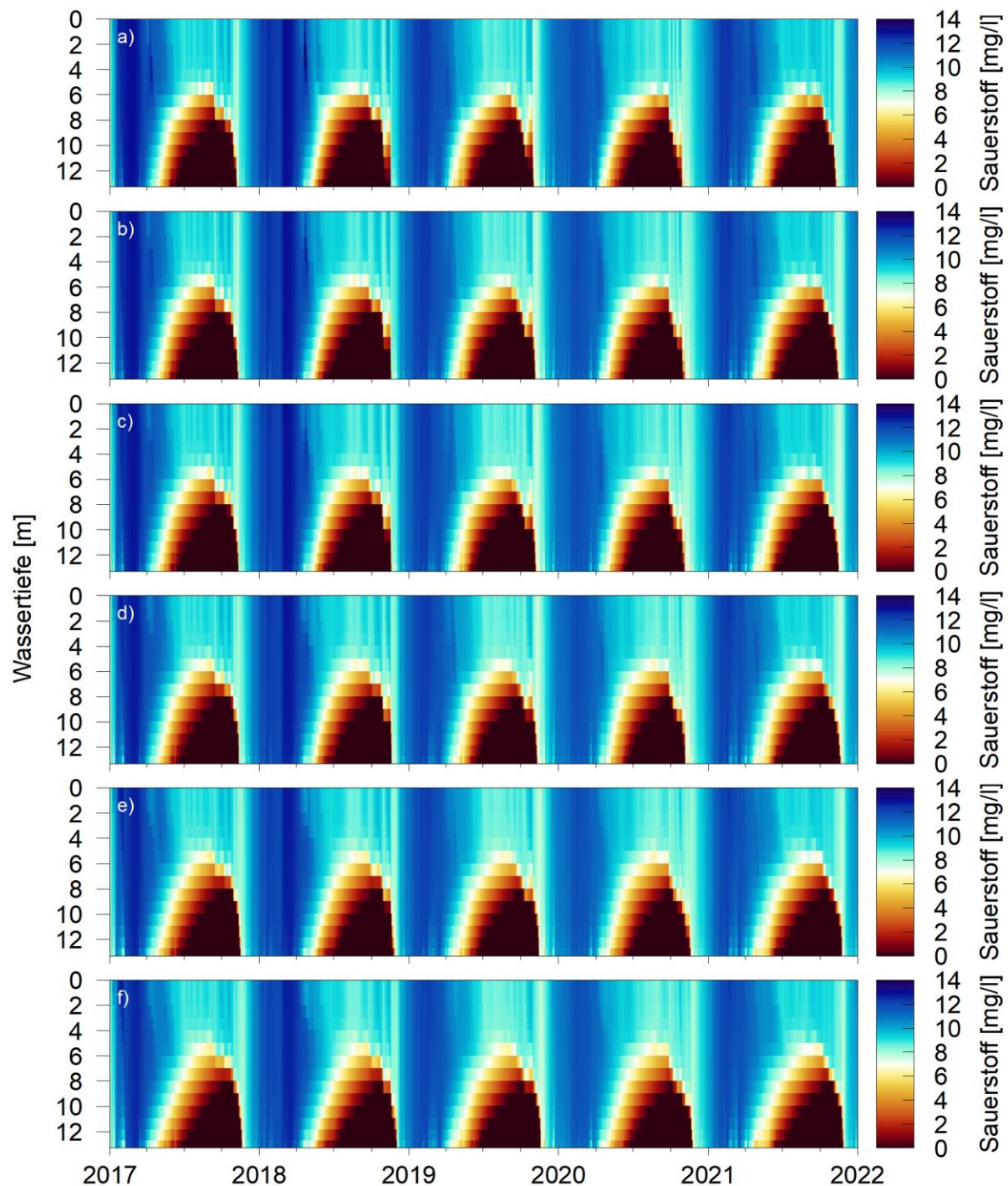


Abbildung 3.17: Berechnete Sauerstoffkonzentrationen im Beispielsee mit 13 m Wassertiefe ohne (a) und mit FPV mit einer Bedeckung von (b) 10 %, (c) 15 %, (d) 25 %, (e) 35 % und (f) 45 % für die Jahre 2017 bis 2021

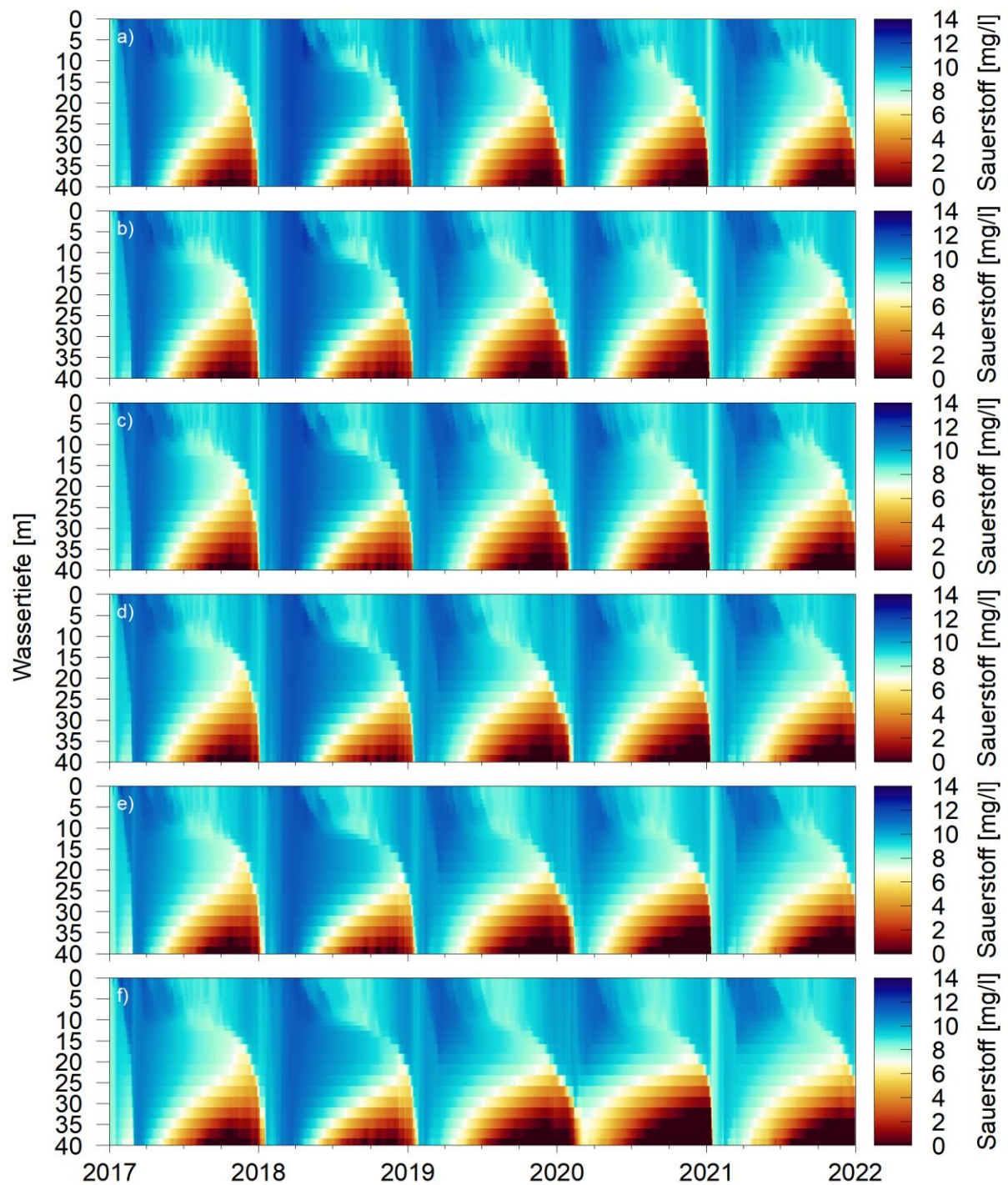


Abbildung 3.18: Berechnete Sauerstoffkonzentrationen im Beispielsee mit 40 m Wassertiefe ohne (a) und mit FPV mit einer Bedeckung von (b) 10 %, (c) 15 %, (d) 25 %, (e) 35 % und (f) 45 % für die Jahre 2017 bis 2021

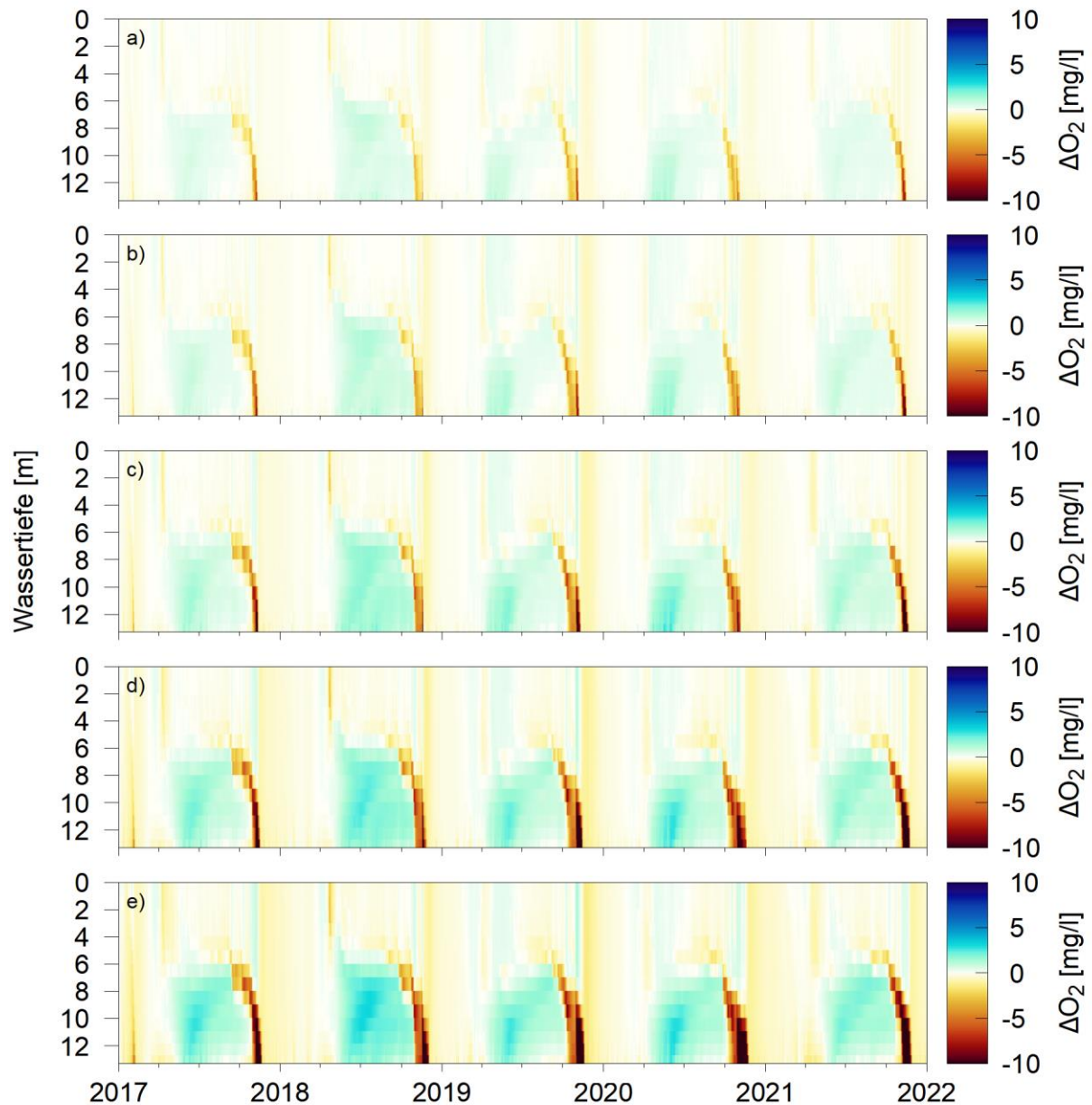


Abbildung 3.19: Berechnete Differenzen der Sauerstoffkonzentrationen im Profil zwischen den Modellszenarien ohne und mit FPV bei Bedeckungsgraden von (a) 10 %, (b) 15 %, (c) 25 %, (d) 35 % und (e) 45 % im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 13 m für die Jahre 2017 bis 2021

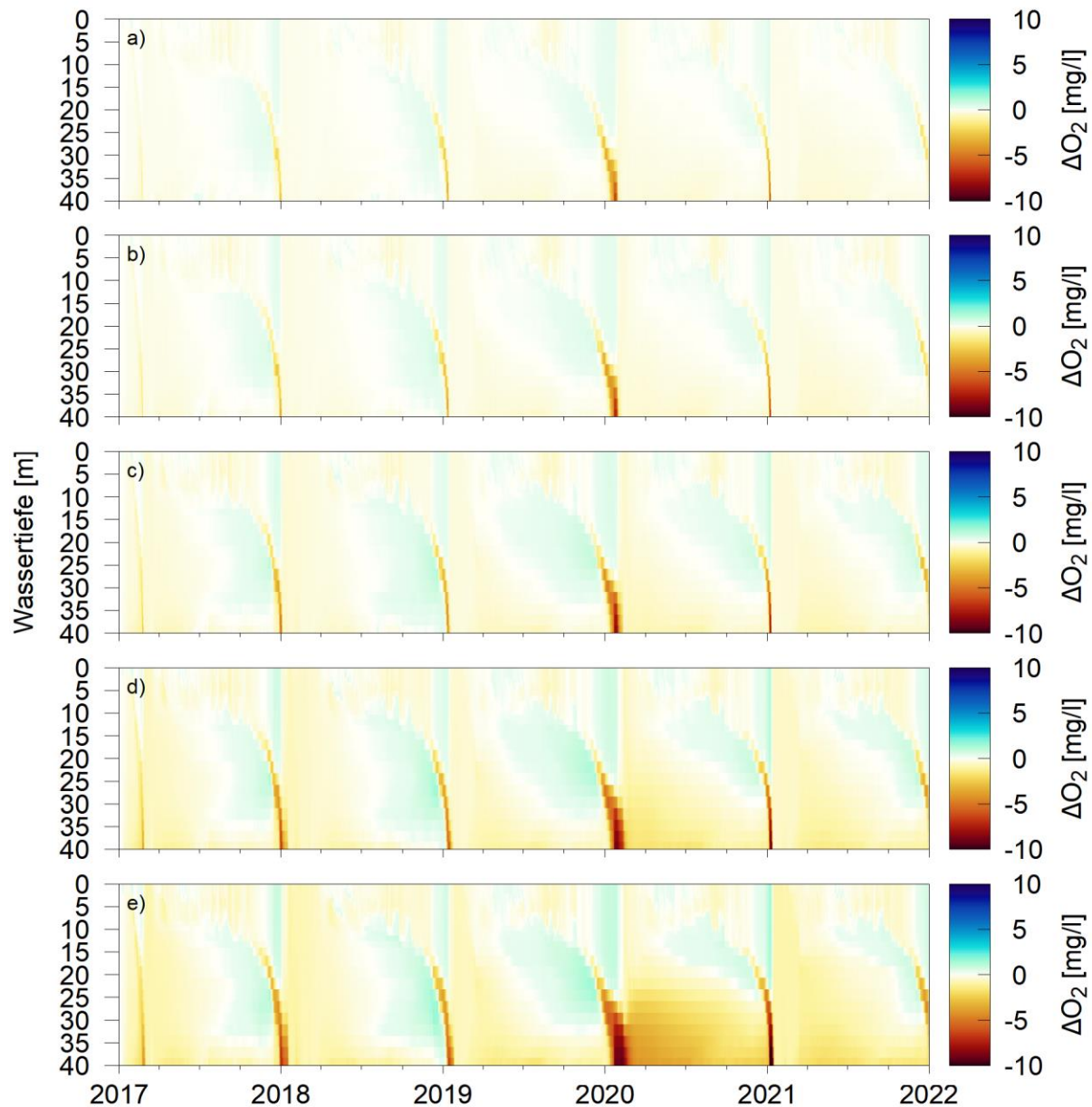


Abbildung 3.20: Berechnete Differenzen der Sauerstoffkonzentrationen im Profil zwischen den Modellszenarien ohne und mit FPV bei Bedeckungsgraden von (a) 10 %, (b) 15 %, (c) 25 %, (d) 35 % und (e) 45 % im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 40 m für die Jahre 2017 bis 2021

3.5 Nährstoffe

Die Einflussfaktoren auf Veränderungen der Nährstoffkonzentrationen durch die Bedeckung mit FPV wurden bereits im Vorgängerbericht umfassend diskutiert. Zu erwartende Veränderungen hängen stark von den jeweiligen Gegebenheiten eines Gewässers ab und können von See zu See stark variieren. Daher sind die

Ergebnisse der Modellszenarien als exemplarisch zu betrachten. Näheres zu den möglichen Variationen in anderen Seen sind dem Vorgängerbericht zu entnehmen. Abbildung 3.21 und Abbildung 3.22 zeigen die berechneten Phosphatphosphorkonzentrationen in den beiden Beispielseen mit 13 m und 40 m Wassertiefe für die Szenarien ohne und mit FPV mit den verschiedenen Bedeckungsgraden. In Abbildung 3.23 und Abbildung 3.24 sind für beide Beispielseen die Differenzen zwischen den Phosphatphosphorkonzentrationen der Szenarien ohne und mit FPV für die verschiedenen Bedeckungsgrade dargestellt. Die mit zunehmendem Bedeckungsgrad abnehmende Primärproduktion führt zu einem geringeren Eintrag von partikulärem Phosphor ins Hypolimnion und Sediment. Die Rücklösungsrate von Phosphor aus dem Sediment ist sauerstoffabhängig. Daher nehmen im Hypolimnion beim 13 m tiefen See die Phosphorkonzentrationen ab, während sie beim 40 m tiefen See zunehmen. Besonders deutlich wird dies beim tiefen See während der Stagnationsperiode im Jahr 2020, da die vertikale Durchmischung im Winter 2019/2020 nur unvollständig stattfand.

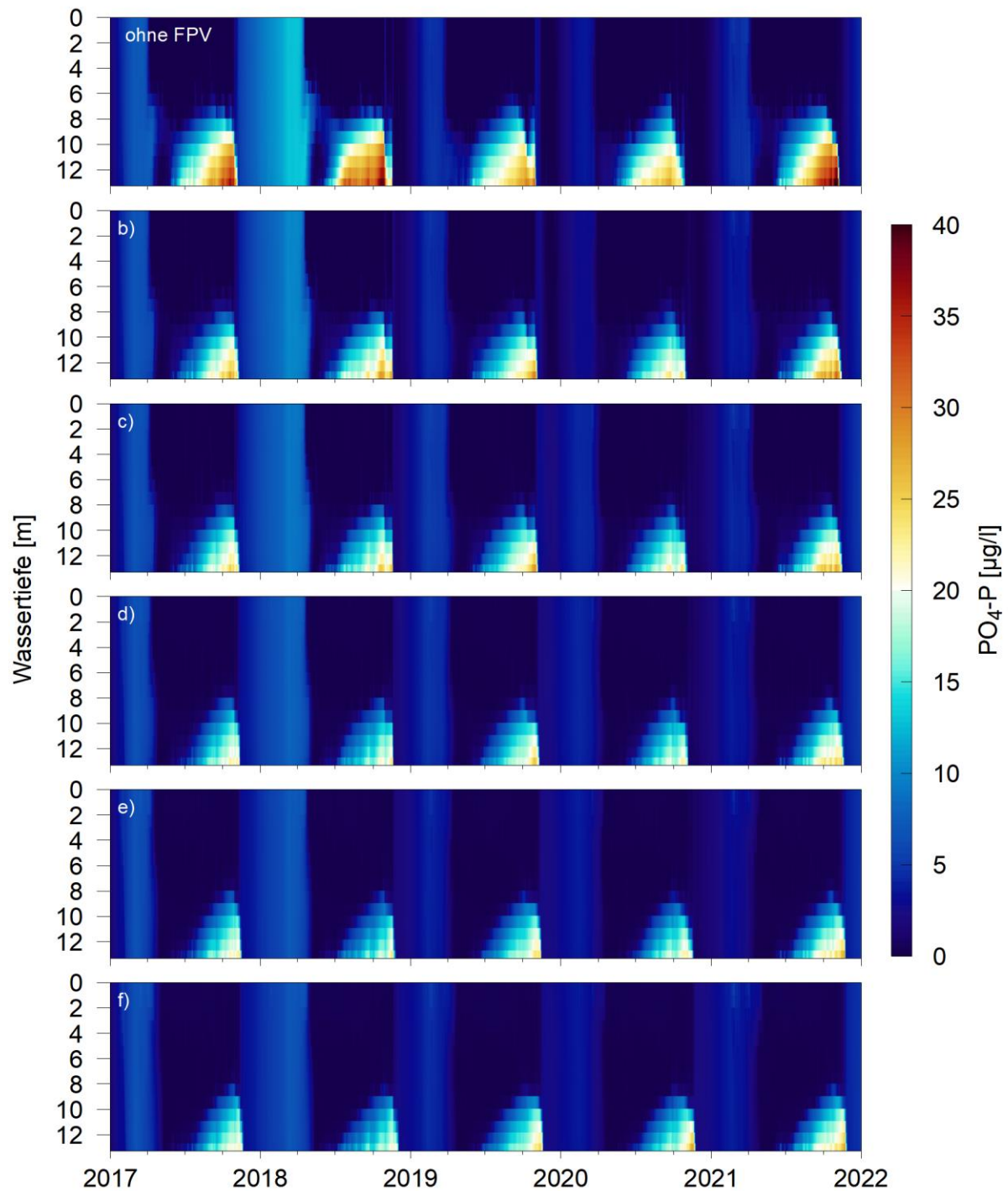


Abbildung 3.21: Berechnete Phosphatphosphorkonzentrationen im Beispielsee mit 13 m Wassertiefe ohne (a) und mit FPV mit einer Bedeckung von (b) 10 %, (c) 15 %, (d) 25 %, (e) 35 % und (f) 45 % für die Jahre 2017 bis 2021

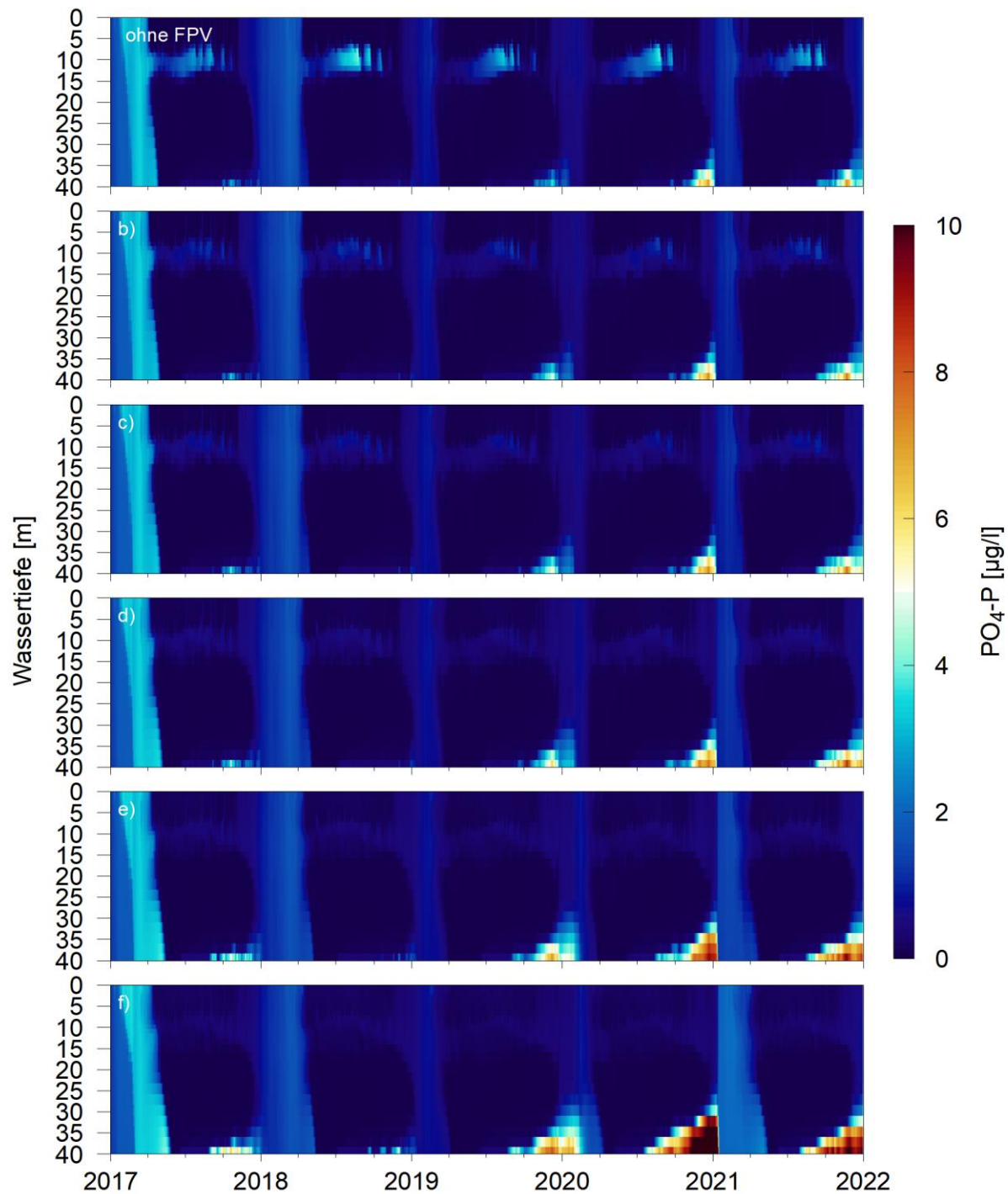


Abbildung 3.22: Berechnete Phosphatphosphorkonzentrationen im Beispielsee mit 40 m Wassertiefe ohne (a) und mit FPV mit einer Bedeckung von (b) 10 %, (c) 15 %, (d) 25 %, (e) 35 % und (f) 45 % für die Jahre 2017 bis 2021

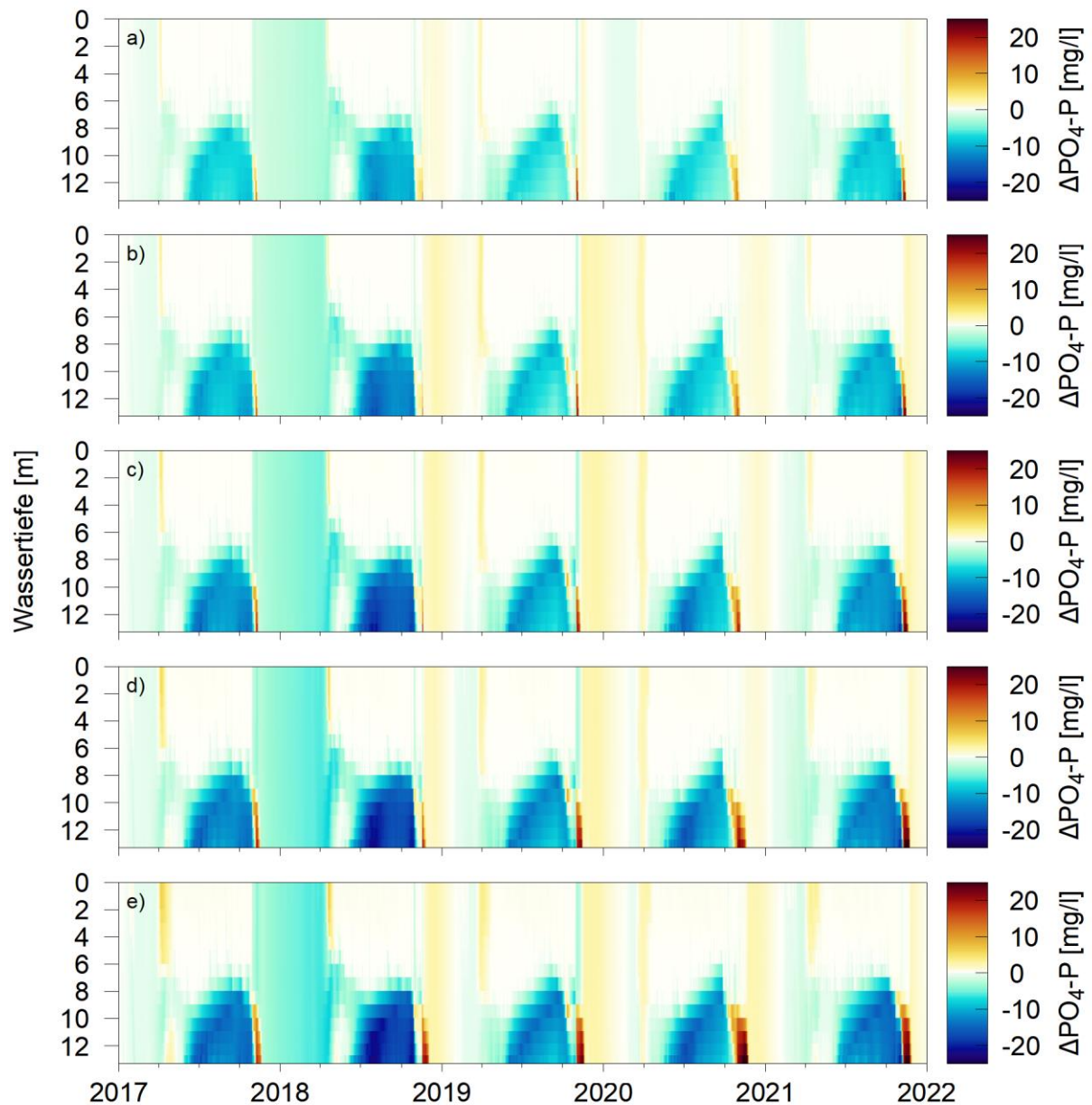


Abbildung 3.23: Berechnete Differenzen der Phosphatphosphorkonzentrationen im Profil zwischen den Modellszenarien ohne und mit FPV bei Bedeckungsgraden von (a) 10 %, (b) 15 %, (c) 25 %, (d) 35 % und (e) 45 % im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 13 m für die Jahre 2017 bis 2021

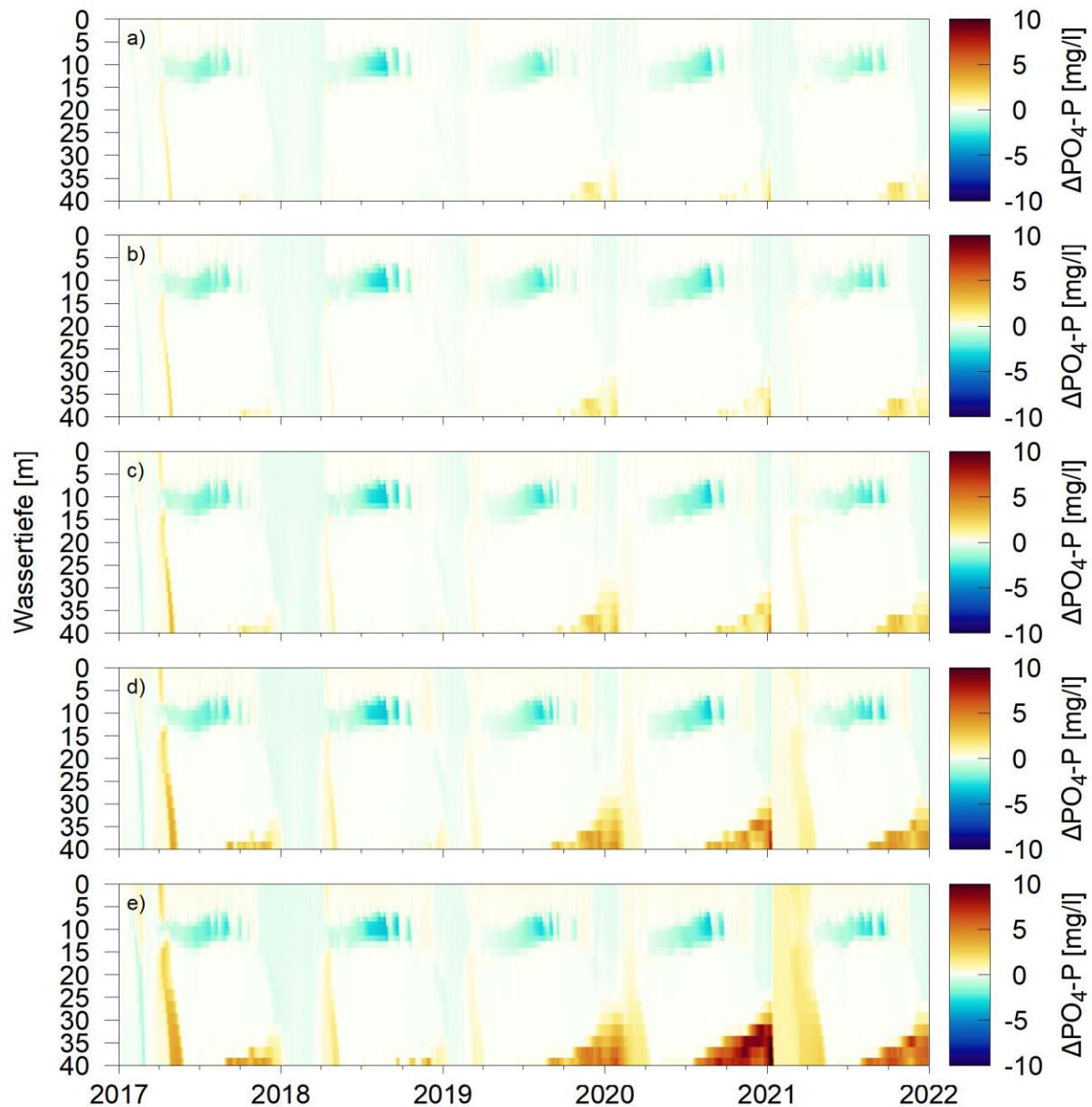


Abbildung 3.24: Berechnete Differenzen der Phosphatphosphorkonzentrationen im Profil zwischen den Modellszenarien ohne und mit FPV bei Bedeckungsgraden von (a) 10 %, (b) 15 %, (c) 25 %, (d) 35 % und (e) 45 % im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 40 m für die Jahre 2017 bis 2021

Analog zu den Abbildungen zum Phosphat zeigen Abbildung 3.25 und Abbildung 3.26 die Ergebnisse für Nitratstickstoff für die beiden Beispielseen mit Wassertiefen von 13 m und 40 m sowie Abbildung 3.27 und Abbildung 3.28 die Differenzen zwischen den Konzentrationen der Szenarien ohne und mit FPV für die verschiedenen Bedeckungsgrade. Mit zunehmendem Bedeckungsgrad steigen im Epilimnion die Konzentrationen aufgrund der geringeren Primärproduktion an. Im Hypolimnion ist wiederum die Abhängigkeit von den Sauerstoffkonzentrationen zu

beobachten. Im 13 m tiefen See nehmen die Konzentrationen aufgrund der höheren Sauerstoffkonzentrationen und der damit verbundenen Nitrifizierung zu, während sie im 40 m tiefen See bei geringeren Sauerstoffkonzentrationen im Vergleich zur Situation ohne Bedeckung abnehmen.

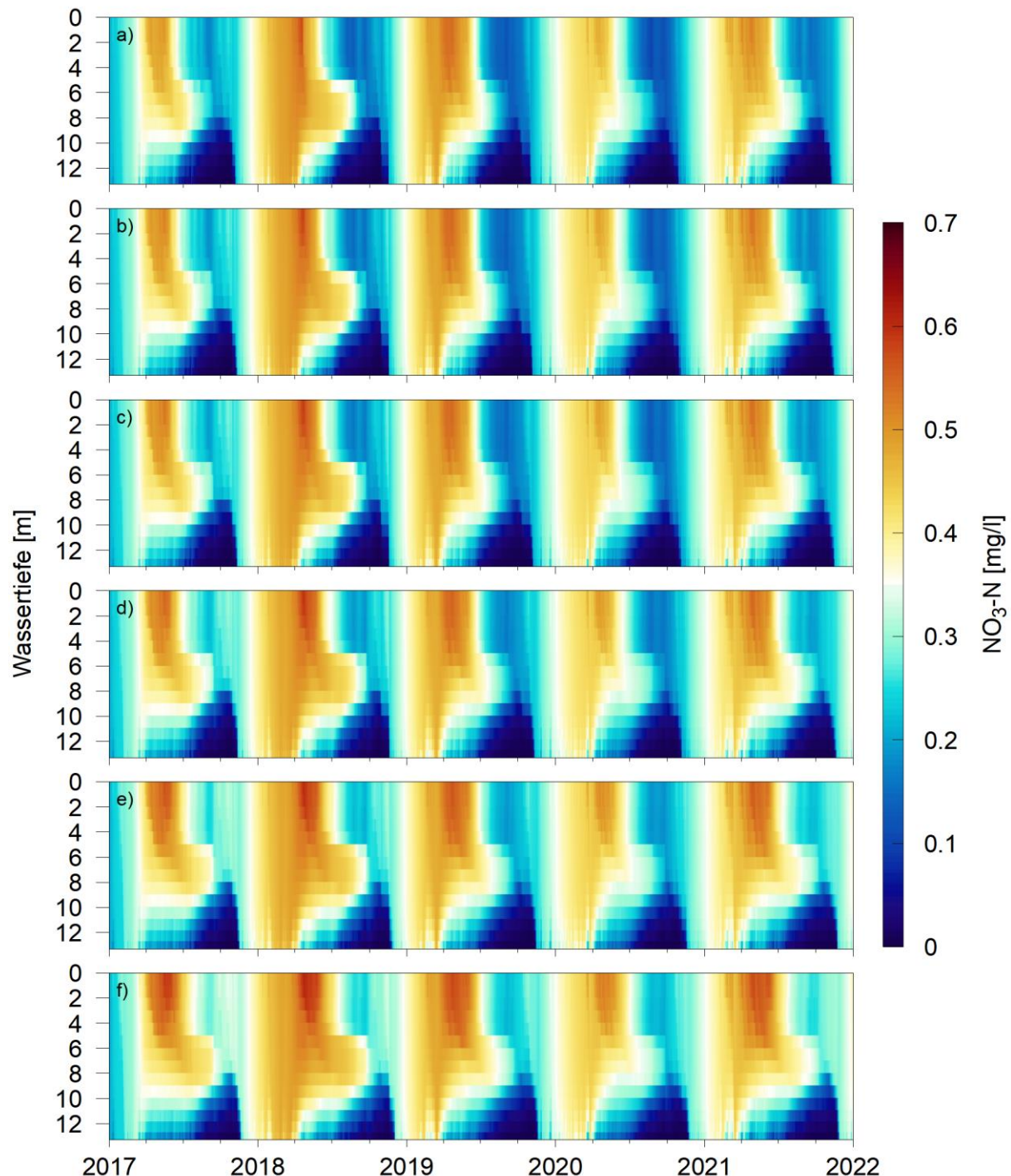


Abbildung 3.25: Berechnete Nitratstickstoffkonzentrationen im Beispielsee mit 13 m Wassertiefe ohne (a) und mit FPV mit einer Bedeckung von (b) 10 %, (c) 15 %, (d) 25 %, (e) 35 % und (f) 45 % für die Jahre 2017 bis 2021

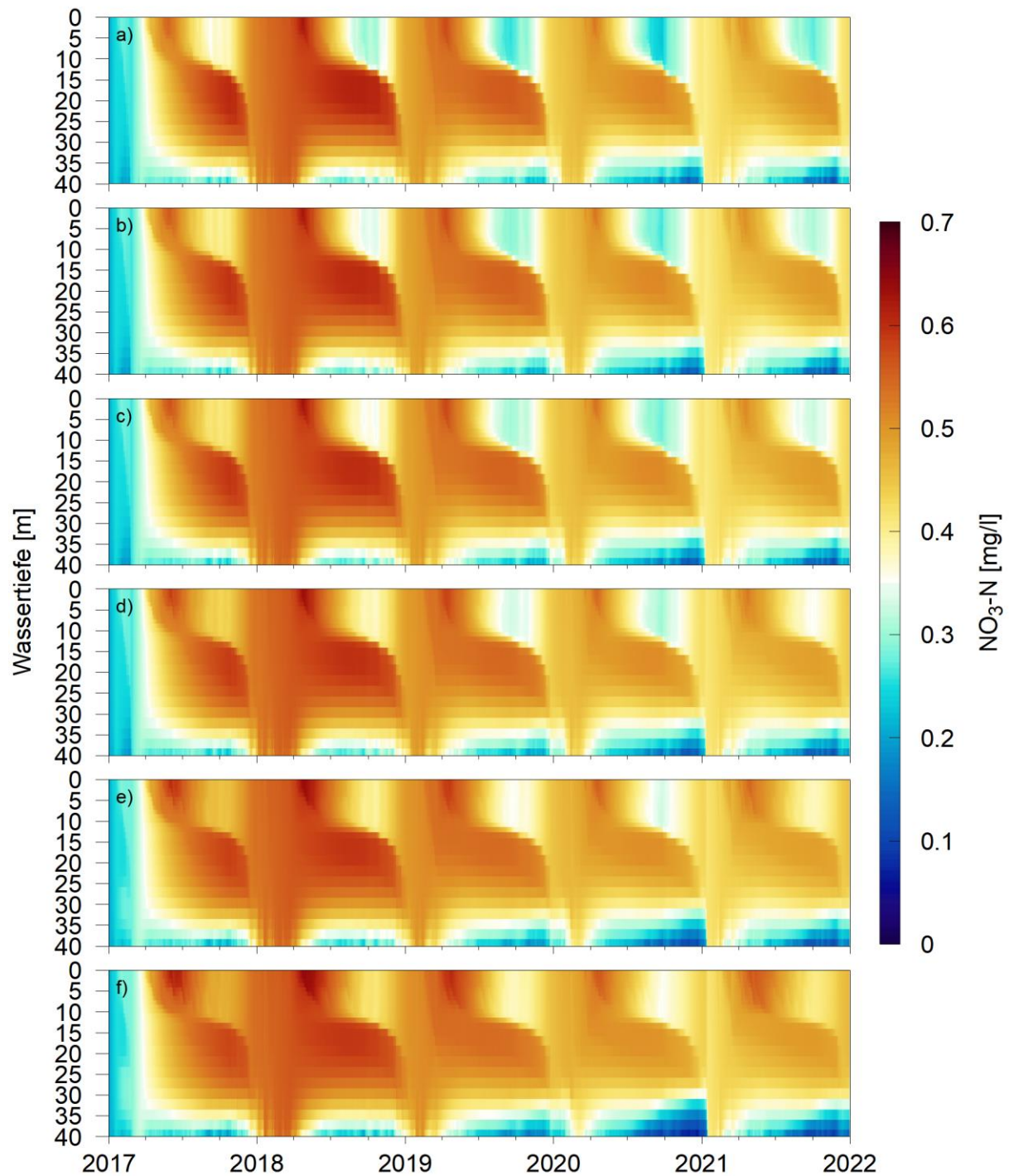


Abbildung 3.26: Berechnete Nitratstickstoffkonzentrationen im Beispielsee mit 40 m Wassertiefe ohne (a) und mit FPV mit einer Bedeckung von (b) 10 %, (c) 15 %, (d) 25 %, (e) 35 % und (f) 45 % für die Jahre 2017 bis 2021

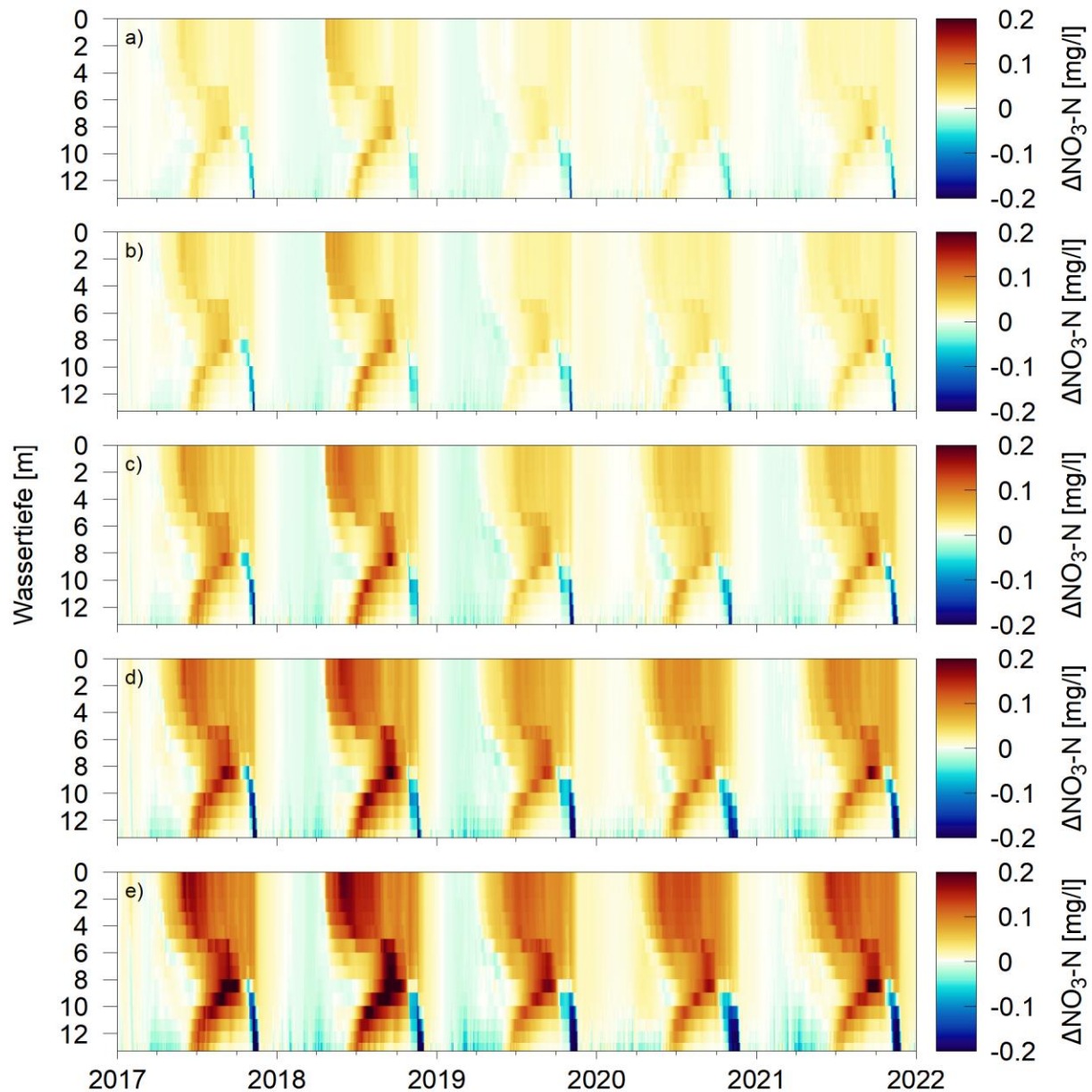


Abbildung 3.27: Berechnete Differenzen der Nitratstickstoffkonzentrationen im Profil zwischen den Modellszenarien ohne und mit FPV bei Bedeckungsgraden von (a) 10 %, (b) 15 %, (c) 25 %, (d) 35 % und (e) 45 % im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 13 m für die Jahre 2017 bis 2021

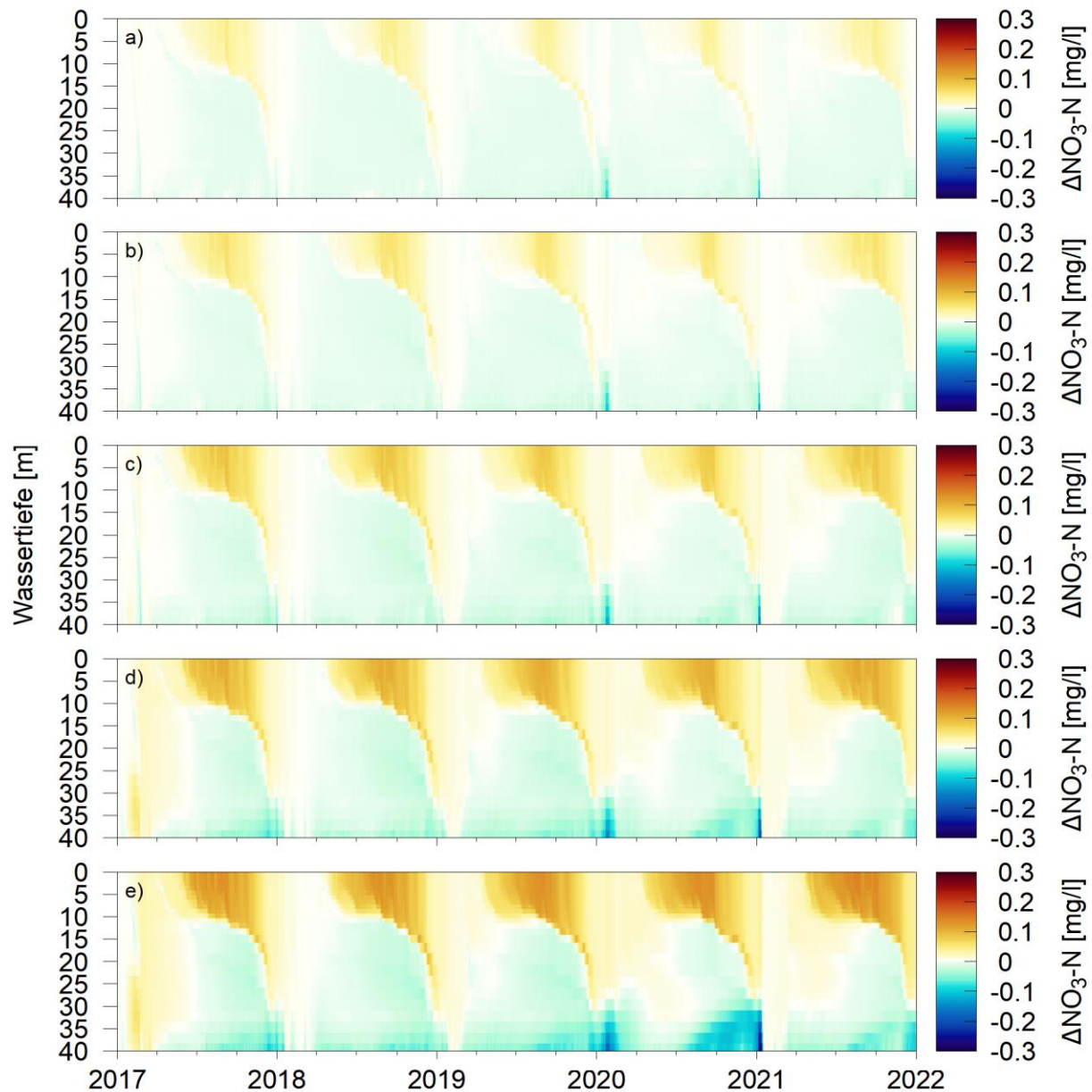


Abbildung 3.28: Berechnete Differenzen der Nitratstickstoffkonzentrationen im Profil zwischen den Modellszenarien ohne und mit FPV bei Bedeckungsgraden von (a) 10 %, (b) 15 %, (c) 25 %, (d) 35 % und (e) 45 % im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 40 m für die Jahre 2017 bis 2021

Analog zu den Abbildungen zum Phosphat und Nitrat zeigen Abbildung 3.29 und Abbildung 3.30 die Ergebnisse für Ammoniumstickstoff für die beiden Beispielseen mit Wassertiefen von 13 m und 40 m sowie Abbildung 3.31 und Abbildung 3.32 die Differenzen zwischen den Konzentrationen der Szenarien ohne und mit FPV für die verschiedenen Bedeckungsgrade. Dabei ist im Hypolimnion die umgekehrte Entwicklung im Vergleich zum Nitratstickstoff zu beobachten. Beim 13 m tiefen See verringern sich im Hypolimnion mit zunehmendem Bedeckungsgrad die

Konzentrationen, da gleichzeitig dort die Sauerstoffkonzentrationen und somit die Nitrifizierung zunehmen. Beim 40 m tiefen See verhält es sich umgekehrt, dort nehmen die Ammoniumkonzentrationen entsprechend zu.

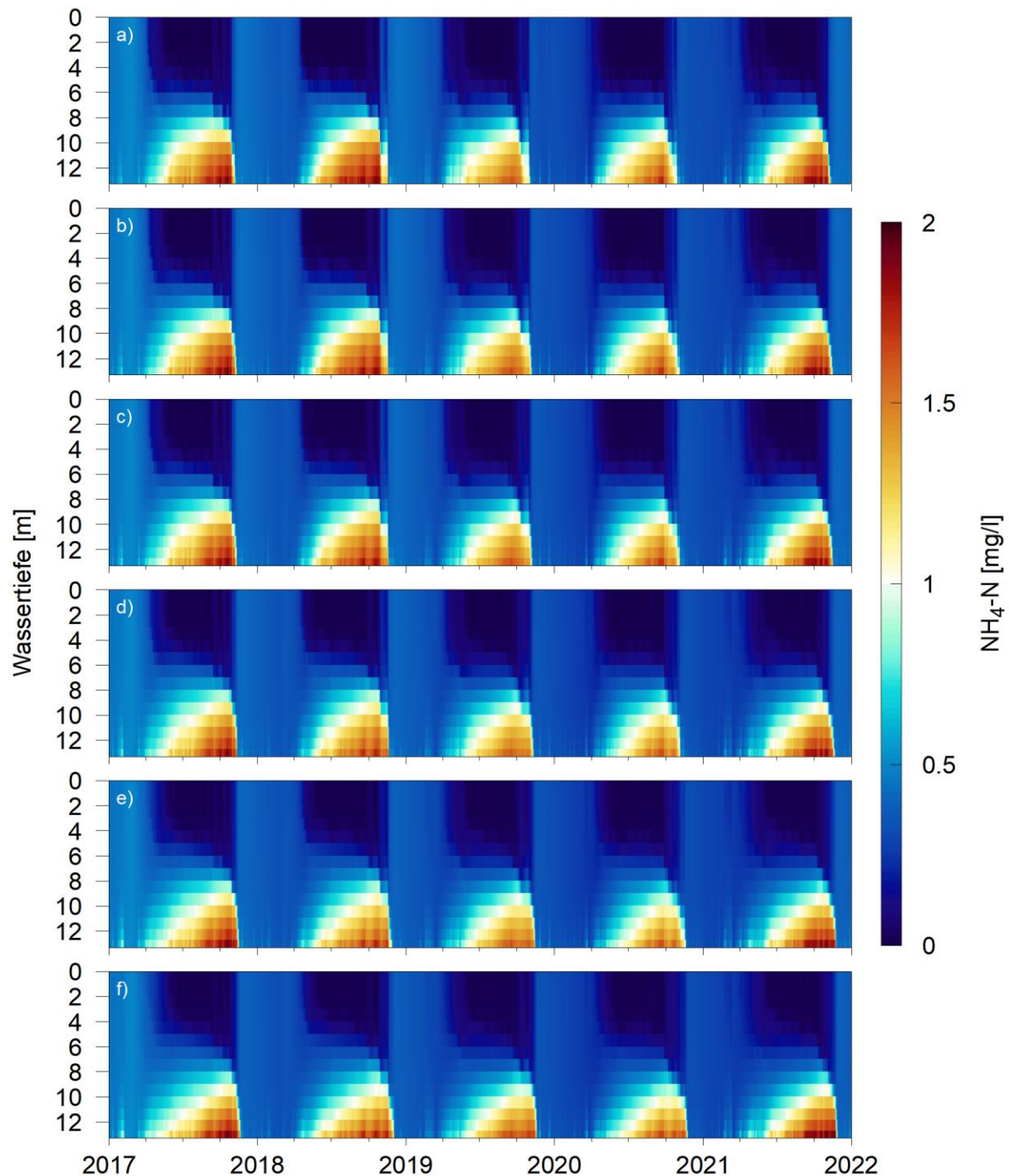


Abbildung 3.29: Berechnete Ammoniumstickstoffkonzentrationen im Beispielsee mit 13 m Wassertiefe ohne (a) und mit FPV mit einer Bedeckung von (b) 10 %, (c) 15 %, (d) 25 %, (e) 35 % und (f) 45 % für die Jahre 2017 bis 2021

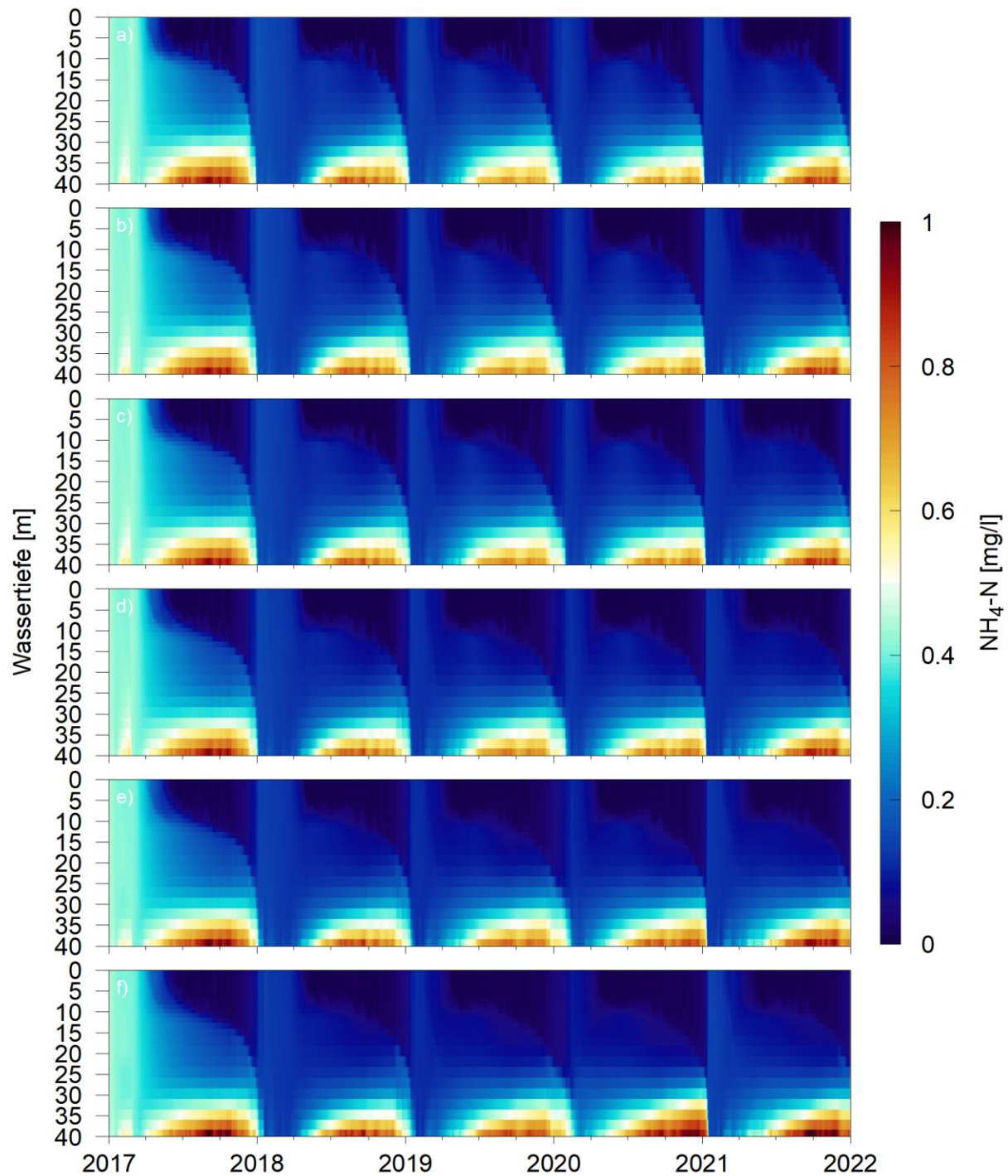


Abbildung 3.30: Berechnete Ammoniumstickstoffkonzentrationen im Beispielsee mit 40 m Wassertiefe ohne (a) und mit FPV mit einer Bedeckung von (b) 10 %, (c) 15 %, (d) 25 %, (e) 35 % und (f) 45 % für die Jahre 2017 bis 2021

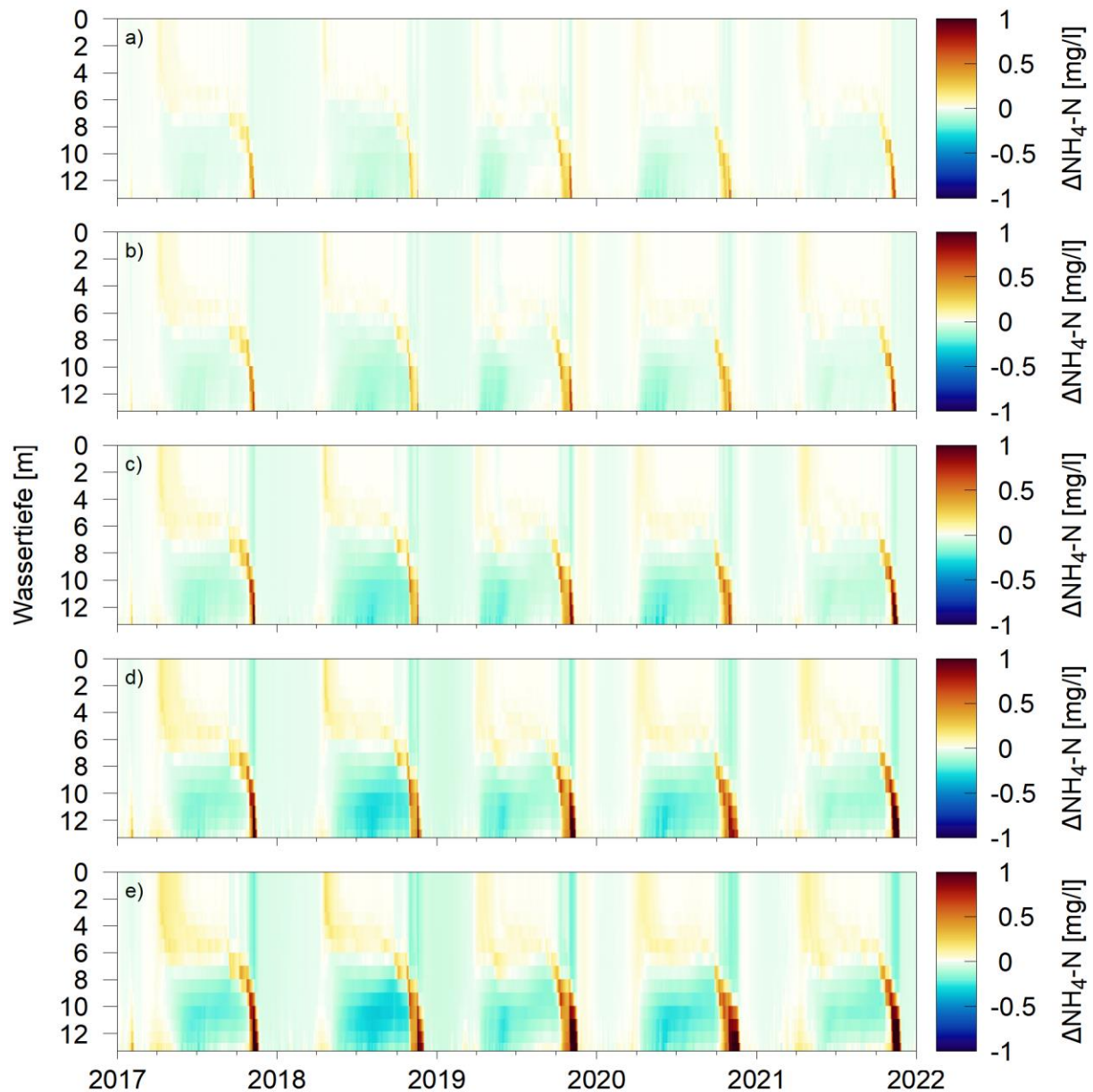


Abbildung 3.31: Berechnete Differenzen der Ammoniumstickstoffkonzentrationen im Profil zwischen den Modellszenarien ohne und mit FPV bei Bedeckungsgraden von (a) 10 %, (b) 15 %, (c) 25 %, (d) 35 % und (e) 45 % im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 13 m für die Jahre 2017 bis 2021

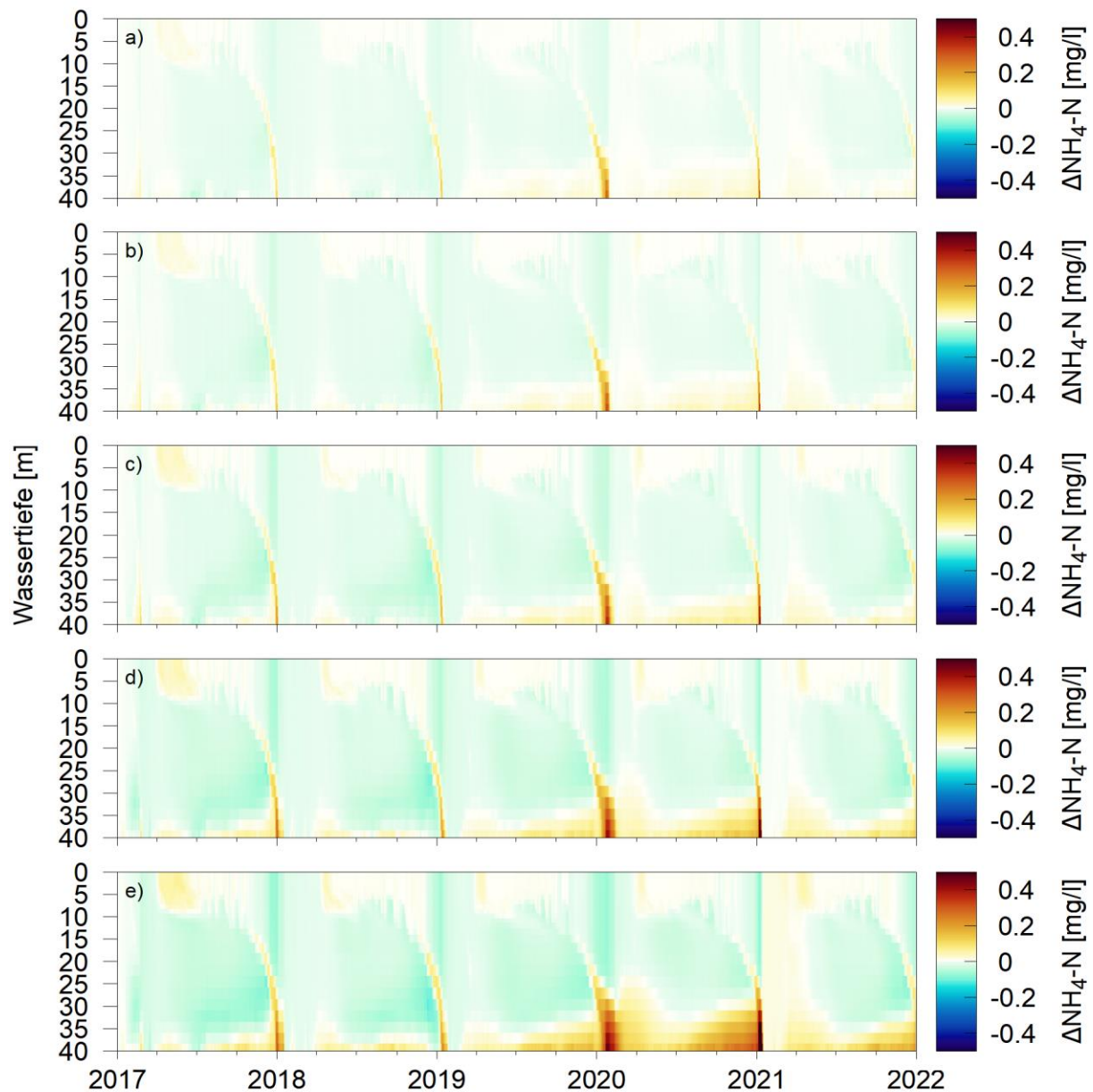


Abbildung 3.32: Berechnete Differenzen der Ammoniumstickstoffkonzentrationen im Profil zwischen den Modellszenarien ohne und mit FPV bei Bedeckungsgraden von (a) 10 %, (b) 15 %, (c) 25 %, (d) 35 % und (e) 45 % im Beispielsee mit einer Wassertiefe von 40 m für die Jahre 2017 bis 2021

4 Zusammenfassung

In Ergänzung zur bereits durchgeführten Modellstudie zu den Auswirkungen von schwimmenden Photovoltaikanlagen (FPV, von engl.: floating photovoltaik) auf Seen (Kobus und Partner 2022) wurden nun mit dem bestehenden Modell für die beiden Beispielseen mit maximalen Wassertiefen von 13 m und 40 m drei weitere Bedeckungsgrade (15 %, 25 % und 35 %) betrachtet. Im Vergleich zu den bereits gerechneten Modellszenarien mit den Bedeckungsgraden von 10 % und 45 % wurde nur die Bedeckung geändert. Simulationszeitraum, Modellkonfiguration, Anfangs- und Randbedingungen wurden beibehalten.

Die Auswertungen des Vorgängerberichts wurden mit den Ergebnissen der neuen Bedeckungsszenarien ergänzt. Der vorliegende Bericht zeigt die Auswirkungen von FPV auf die Wärmeaustauschprozesse, Wassertemperaturen, Durchmischung, Primärproduktion, den Sauerstoffgehalt und die Nährstoffkreisläufe von Seen für alle bereits gerechneten Bedeckungsszenarien. Die Ergebnisse bewegen sich erwartungsgemäß zwischen denen der bereits gerechneten Modellszenarien mit Bedeckungen von 10 % und 45 %. Mit den zusätzlichen Ergebnissen der neuen Bedeckungsszenarien entsteht somit eine fein abgestufte Bandbreite der Auswirkungen der Bedeckung auf die Verhältnisse eines Sees in Abhängigkeit des Bedeckungsgrads.

LITERATURVERZEICHNIS

Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH (2022): Modellierungen zur Folgenabschätzung von schwimmenden Photovoltaikanlagen. Schlussbericht zum Werkvertrag mit der LUBW, Stuttgart, 2022