

Modellierung der Auswirkungen verschiedener Bedeckungsgrade von Floating PV Anlagen auf Flachseen/Teiche

Gesamtbericht

Auftraggeber: Bayerisches Landesamt für Umwelt
Bürgermeister-Ulrich-Str. 160
86179 Augsburg

Auftragsdatum: 29.08.2024

Auftragsnummer: A967

Berichtsnummer: A967-5

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

Stuttgart, 22.08.2025



Dr. Ulrich Lang



Stefan Mirbach

INHALT

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	III
TABELLENVERZEICHNIS	XIII
1 Einleitung.....	1
2 Szenarienbeschreibung und Modellsystem	3
2.1 Modellszenarien	3
2.1.1 Betrachtete Modellseen	3
2.1.2 Simulationszeitraum	4
2.1.3 Szenarien FPV.....	4
2.2 Modellsystem.....	6
2.2.1 Hydrodynamisches Seemodell Delft3D-Flow.....	6
2.2.2 Wasserqualitätsmodell Delft3D-WAQ	6
2.2.3 Modellnetz	12
2.2.4 Anfangsbedingungen.....	15
2.2.5 Randbedingungen	16
3 Ergebnisse Modellszenarien	28
3.1 Modellsee 1: liegende FPV-Module.....	28
3.1.1 Wärmeaustauschprozesse	28
3.1.2 Wassertemperaturen	29
3.1.3 Phytoplankton-Entwicklung und Sichttiefe	34
3.1.4 Primärproduktion Makrophyten.....	40
3.1.5 Sauerstoffgehalt.....	43
3.1.6 Nährstoffe	45
3.2 Modellsee 1: liegende FPV-Module, erhöhter Phosphorgehalt	47
3.2.1 Nährstoffe	48
3.2.2 Phytoplankton-Entwicklung.....	50
3.2.3 Sauerstoffgehalt.....	52
3.3 Modellsee 1: vertikale FPV-Module	53
3.3.1 Wassertemperaturen	53
3.3.2 Phytoplankton-Entwicklung.....	55

3.3.3 Makrophyten-Entwicklung.....	57
3.3.4 Sauerstoffgehalt.....	58
3.3.5 Nährstoffe	59
3.4 Modellsee 2: liegende FPV-Module.....	60
3.4.1 Wassertemperaturen	60
3.4.2 Phytoplankton-Entwicklung und Sichttiefe	63
3.4.3 Sauerstoffgehalt.....	68
3.4.4 Nährstoffe	72
3.5 Modellsee 3: liegende FPV-Module.....	76
3.5.1 Wassertemperaturen	76
3.5.2 Phytoplankton-Entwicklung und Sichttiefe	79
3.5.3 Sauerstoffgehalt.....	84
3.5.4 Nährstoffe	87
3.6 Modellsee 3: liegende FPV-Module, verringerte Durchflussrate.....	91
3.6.1 Wassertemperaturen	91
3.6.2 Phytoplankton-Entwicklung.....	94
3.6.3 Sauerstoffgehalt.....	96
3.6.4 Nährstoffe	100
3.6.5 Treibhausgasemissionen.....	104
4 Zusammenfassung und Bewertung.....	109
4.1 Modellaufstellung.....	109
4.2 Modellseen, Modellannahmen und Szenarien.....	109
4.3 Wichtigste Parameter und deren Modellierungsergebnisse	111
4.4 Szenario mit verringertem Zufluss	114
4.5 Auswirkungen vertikaler FPV-Module.....	117
4.6 Treibhausgasemissionen.....	118
4.7 Zusammenfassende Bewertung.....	119
LITERATURVERZEICHNIS.....	122

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2.1: Im Modell mit Makrophyten bewachsene Flächen (grün) im Modellsee 1 mit Bedeckungsgraden von a) 50 % und b) 100 %	5
Abbildung 2.2: Schematische Übersicht der Datenflüsse des Delft3D-Modellsystems mit dem hydrodynamischen Modell Delft3D-Flow und dem Wasserqualitätsmodell Delft3D-WAQ	7
Abbildung 2.3: Im Wasserqualitätsmodell verwendete Zustandsgrößen	11
Abbildung 2.4: Im Wasserqualitätsmodell verwendeten Prozesse	12
Abbildung 2.5: Schematische Darstellung der Prozesse im See, bei denen Methan entstehen kann	12
Abbildung 2.6: Im Modellsystem für den Modellsee 1 verwendetes Modellnetz mit Zellgrößen von 5 m x 5 m	13
Abbildung 2.7: Im Modellsystem für den Modellsee 2 verwendetes Modellnetz mit Zellgrößen von 5 m x 5 m	14
Abbildung 2.8: Im Modellsystem für den Modellsee 3 verwendetes Modellnetz mit Zellgrößen von 7,5 m x 7,5 m	15
Abbildung 2.9: Aus Messdaten durch Skalierung berechnete Abflussdaten für den Zufluss der Modellseen 1 und 2	17
Abbildung 2.10: Aus den Messdaten durch Skalierung berechnete Abflussdaten für den Zufluss des Modellsees 3	17
Abbildung 2.11: Meteorologische Randbedingungen aus dem Wettermodell COSMO-REA6 des DWD für den Simulationszeitraum 2002 bis 2005 (von oben nach unten: Lufttemperatur, rel. Luftfeuchte, Globalstrahlung, langwellige Strahlung, Windgeschwindigkeit und Windrichtung)	18
Abbildung 2.12: Im Modell verwendete, mit liegenden FPV-Modulen bedeckte Flächen auf den Modellseen 1 und 2 in blau bei Bedeckungsgraden von 15 %, 25 %, 35 %, 45 % und 60 %	21
Abbildung 2.13: Im Modell verwendete, mit liegenden FPV-Modulen bedeckte Flächen auf dem Modellsee 3 in blau bei Bedeckungsgraden von 15 %, 25 %, 35 %, 45 % und 60 %	22
Abbildung 2.14: Schematische Darstellung vertikaler schwimmender PV-Module; Frontalansicht einer Reihe	23
Abbildung 2.15: Schematische Darstellung vertikaler schwimmender PV-Module; Seitenansicht auf mehrere Reihen	23

Abbildung 2.16: Berechnete Globalstrahlung (Tagesmittelwerte) innerhalb und außerhalb der Reihenstrukturen mit vertikalen FPV-Modulen (oben) sowie daraus berechnete Abnahme der Globalstrahlung mit FPV (unten) im Simulationszeitraum der Jahre 2002 bis 2006	25
Abbildung 2.17: Im Modell verwendete, mit vertikalen FPV-Modulen bedeckte Flächen auf dem Modellsee 1 in blau bei Bedeckungsgraden von 35 %, 60 % und 80 %	26
Abbildung 3.1: Wärmeflüsse der einzelnen Wärmeaustauschprozesse und Nettowärmefluss mit (gestrichelte Linien) und ohne (durchgezogene Linien) FPV-Bedeckung exemplarisch für das Jahr 2002; oben: Vergleich ohne und mit FPV auf 15 % der Seefläche; unten: Vergleich ohne und mit FPV auf 60 % der Seefläche	29
Abbildung 3.2: Berechnete Wassertemperaturen an der Wasseroberfläche des Modellsees 1 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden (oben) sowie Differenz der FPV-Szenarien zur Situation ohne FPV (unten)	30
Abbildung 3.3: Berechnete Eisdicke auf dem Modellsee 1 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden	30
Abbildung 3.4: Berechnetes Temperaturprofil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Temperaturdifferenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im tiefsten Bereich des Modellsees 1; weiße Flächen am Grund kennzeichnen Abnahme der Wassertiefe durch Eisbedeckung	31
Abbildung 3.5: Berechnete, oberflächennahe Wassertemperaturen am 30.07.2002 um 12 Uhr ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 1	33
Abbildung 3.6: Berechnete, oberflächennahe Wassertemperaturen im Mittel über die Monate Juni, Juli und August 2002 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 1	34
Abbildung 3.7: Berechnete Konzentrationen an Chlorophyll a ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 1 (seeweite Mittelwerte über 14 Tage)	35
Abbildung 3.8: Berechnete, oberflächennahe Konzentrationen an Chlorophyll a im Mittel über das Jahr 2002 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 1	36

Abbildung 3.9: Berechnete Algenkonzentrationen für die beiden Modellgruppen Diatomeen und übrige Algen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 1 im unbedeckten Bereich nahe dem Auslass	38
Abbildung 3.10: Berechnete jährliche Nettoprimärproduktion ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 1	39
Abbildung 3.11: Berechnete Sichttiefen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 1 nahe dem Auslass	40
Abbildung 3.12: Berechnete Biomasse an Makrophyten bei 100 % Bewuchsfläche ohne FPV (links) sowie mit FPV bei Bedeckungsgraden von 15 % (Mitte) und 60 % (rechts) im Modellsee 1 am 8. Mai 2002	41
Abbildung 3.13: Berechnete mittlere Biomasse an Makrophyten bei 50 % Bewuchsfläche im Modellsee 1 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden	42
Abbildung 3.14: Berechnete mittlere Biomasse an Makrophyten bei 100 % Bewuchsfläche im Modellsee 1 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden	42
Abbildung 3.15: Berechnete Biomasse an Makrophyten an einer nicht mit FPV bedeckten Position im nördlichen Teil des Modellsees 1 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Jahr 2004	43
Abbildung 3.16: Berechnete Sauerstoffkonzentrationen oberflächennah ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 1 im unbedeckten Bereich nahe dem Auslass	44
Abbildung 3.17: Berechnete Sauerstoffkonzentrationen ohne FPV mit dem Referenzmodell sowie mit einer Modellversion ohne Sauerstoffaustausch mit der Atmosphäre in Zeiträumen mit Eisbedeckung im Modellsee 1	45
Abbildung 3.18: Berechnete Konzentrationen an a) Phosphatphosphor, b) Nitratstickstoff, c) Ammoniumstickstoff und d) Silizium ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 1 nahe dem Auslass	46
Abbildung 3.19: Jahresmittelwerte der berechneten Konzentrationen an a) Phosphatphosphor, b) Nitratstickstoff, c) Ammoniumstickstoff und d) Silizium ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 1	47

Abbildung 3.20: Berechnete Konzentrationen an a) Phosphatphosphor, b) Nitratstickstoff, c) Ammoniumstickstoff und d) Silizium ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden und erhöhtem Phosphorgehalt im Modellsee 1 nahe dem Auslass.....	49
Abbildung 3.21: Jahresmittelwerte der berechneten Konzentrationen an a) Phosphatphosphor, b) Nitratstickstoff, c) Ammoniumstickstoff und d) Silizium ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden und erhöhtem Phosphorgehalt im Modellsee 1	50
Abbildung 3.22: Berechnete Konzentrationen an Chlorophyll a ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden und erhöhtem Phosphorgehalt im Modellsee 1 (seeweite Mittelwerte über 14 Tage).....	51
Abbildung 3.23: Berechnete jährliche Nettoprimärproduktion ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden und erhöhtem Phosphorgehalt im Modellsee 1	51
Abbildung 3.24: Berechnete Sauerstoffkonzentrationen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden und erhöhtem Phosphorgehalt im Modellsee 1 nahe dem Auslass.....	52
Abbildung 3.25: Berechnetes Temperaturprofil für die Situation ohne FPV (oben) sowie Profile der Temperaturdifferenzen ohne und mit vertikalen FPV-Modulen bei verschiedenen Bedeckungsgraden im tiefsten Bereich des Modellsees 1; weiße Flächen am Grund kennzeichnen Abnahme der Wassertiefe durch Eisbedeckung	54
Abbildung 3.26: Berechnete Wassertemperaturen an der Wasseroberfläche des Modellsees 1 ohne und mit vertikalen FPV-Modulen bei verschiedenen Bedeckungsgraden (oben) sowie Differenz der FPV-Szenarien zur Situation ohne FPV (unten).....	55
Abbildung 3.27: Berechnete Eisdicke auf dem Modellsee 1 ohne und mit vertikalen FPV-Modulen bei verschiedenen Bedeckungsgraden	55
Abbildung 3.28: Berechneter, seeweiter Mittelwert der Konzentration an Chlorophyll a ohne und mit vertikalen FPV-Modulen bei verschiedenen Bedeckungsgraden im tiefsten Bereich des Modellsees 1	56
Abbildung 3.29: Berechnete jährliche Nettoprimärproduktion ohne und mit vertikalen FPV-Modulen bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 1	56

Abbildung 3.30: Berechnete mittlere Biomasse an Makrophyten bei 100 % Bewuchsfläche im Modellsee 1 ohne und mit vertikalen FPV- Modulen bei verschiedenen Bedeckungsgraden.....	57
Abbildung 3.31: Lichtlimitierungsfunktion für das Makrophytenwachstum im Modellsee 1 ohne und mit vertikalen FPV-Modulen bei verschiedenen Bedeckungsgraden	58
Abbildung 3.32: Berechnete mittlere Biomasse an Makrophyten bei 100 % Bewuchsfläche im Modellsee 1 ohne und mit vertikalen FPV- Modulen bei verschiedenen Bedeckungsgraden und erhöhtem Lichtbedarf der Makrophyten.....	58
Abbildung 3.33: Berechnete Sauerstoffkonzentrationen ohne und mit vertikalen FPV-Modulen bei verschiedenen Bedeckungsgraden (oben) sowie Differenzen der Sauerstoffkonzentrationen zwischen den Szenarien mit und ohne FPV im Modellsee 1 nahe dem Auslass ...	59
Abbildung 3.34: Berechnete Konzentrationen an a) Phosphatphosphor, b) Nitratstickstoff, c) Ammoniumstickstoff und d) Silizium ohne und mit vertikalen FPV-Modulen bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 1 nahe dem Auslass.....	60
Abbildung 3.35: Berechnete Wassertemperaturen an der Wasseroberfläche des Modellsees 2 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden (oben) sowie Differenz der FPV-Szenarien zur Situation ohne FPV (unten).....	61
Abbildung 3.36: Berechnete Wassertemperaturen über Grund des Modellsees 2 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden (oben) sowie Differenz der FPV-Szenarien zur Situation ohne FPV (unten).....	62
Abbildung 3.37: Berechnetes Temperaturprofil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Temperaturdifferenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im tiefsten Bereich des Modellsees 2	63
Abbildung 3.38: Berechnete, oberflächennahe Konzentrationen an Chlorophyll a ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 2	64
Abbildung 3.39: Berechnete Konzentrationen an Chlorophyll a im Profil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Differenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im tiefsten Bereich des Modellsees 2 (horizontale Mittelwerte)	65

Abbildung 3.40: Berechnete Algenkonzentrationen für die beiden Modellgruppen Diatomeen und übrige Algen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 2	66
Abbildung 3.41: Berechnete jährliche Nettoprimärproduktion ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 2	67
Abbildung 3.42: Berechnete Sichttiefen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 2	68
Abbildung 3.43: Berechnete Sauerstoffkonzentrationen a) an der Wasseroberfläche und c) über Grund des Modellsees 2 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden sowie Differenz der FPV-Szenarien zur Situation ohne FPV b) an der Wasseroberfläche und d) über Grund	70
Abbildung 3.44: Berechnete Sauerstoffkonzentrationen im Profil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Differenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden des Modellsees 2 (horizontale Mittelwerte)	71
Abbildung 3.45: Anzahl der Tage pro Jahr mit Sauerstoffkonzentrationen kleiner 2 mg/l über Grund im tiefsten Bereich des Modellsees 2	72
Abbildung 3.46: Berechnete Phosphatphosphorkonzentrationen (ohne Rücklöseprozesse, s. hierzu Modellsee 3) im Profil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Differenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 2 (horizontale Mittelwerte)	73
Abbildung 3.47: Berechnete Nitratstickstoffkonzentrationen im Profil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Differenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 2 (horizontale Mittelwerte)	74
Abbildung 3.48: Berechnete Ammoniumstickstoffkonzentrationen im Profil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Differenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 2 (horizontale Mittelwerte)	75
Abbildung 3.49: Berechnete Siliziumkonzentrationen im Profil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Differenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 2 (horizontale Mittelwerte)	76
Abbildung 3.50: Berechnete Wassertemperaturen an der Wasseroberfläche des Modellsees 3 ohne und mit FPV bei verschiedenen	

Bedeckungsgraden (oben) sowie Differenz der FPV-Szenarien zur Situation ohne FPV (unten)	77
Abbildung 3.51: Berechnete Wassertemperaturen über Grund des Modellsees 3 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden (oben) sowie Differenz der FPV-Szenarien zur Situation ohne FPV (unten)	78
Abbildung 3.52: Berechnetes Temperaturprofil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Temperaturdifferenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im tiefsten Bereich des Modellsees 3	79
Abbildung 3.53: Berechnete, oberflächennahe Konzentrationen an Chlorophyll a ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 3 (seeweite Mittelwerte)	80
Abbildung 3.54: Berechnete Konzentrationen an Chlorophyll a im Profil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Differenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 3 (seeweite horizontale Mittelwerte)	81
Abbildung 3.55: Berechnete Algenkonzentrationen für die beiden Modellgruppen Diatomeen und übrige Algen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 3	82
Abbildung 3.56: Berechnete jährliche Nettoprimärproduktion ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 3	83
Abbildung 3.57: Berechnete Sichttiefen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 3	84
Abbildung 3.58: Berechnete Sauerstoffkonzentrationen a) an der Wasseroberfläche und c) über Grund des Modellsees 3 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden sowie Differenz der FPV-Szenarien zur Situation ohne FPV b) an der Wasseroberfläche und d) über Grund	85
Abbildung 3.59: Berechnete Sauerstoffkonzentrationen im Profil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Differenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 3 (horizontale seeweite Mittelwerte)	86
Abbildung 3.60: Anzahl der Tage pro Jahr mit Sauerstoffkonzentrationen kleiner 2 mg/l über Grund im tiefsten, nicht mit Modulen bedeckten Bereich des Modellsee 3	87
Abbildung 3.61: Berechnete Phosphatphosphorkonzentrationen im Profil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Differenzen ohne und mit	

FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 3 (horizontale seeweite Mittelwerte)	88
Abbildung 3.62: Berechnete Nitratstickstoffkonzentrationen im Profil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Differenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 3 (horizontale seeweite Mittelwerte)	89
Abbildung 3.63: Berechnete Ammoniumstickstoffkonzentrationen im Profil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Differenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 3 (horizontale seeweite Mittelwerte)	90
Abbildung 3.64: Berechnete Siliziumkonzentrationen im Profil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Differenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 3 (horizontale seeweite Mittelwerte)	91
Abbildung 3.65: Berechnete Wassertemperaturen an der Wasseroberfläche (oben) und im Tiefenwasser (unten) des Modellsees 3 für die Referenzszenarien ohne FPV mit unverändertem und auf 25 % reduziertem Durchfluss	92
Abbildung 3.66: Berechnete Wassertemperaturen an der Wasseroberfläche des Modellsees 3 bei auf 25 % verringertem Durchfluss ohne und mit FPV (oben), Temperaturdifferenzen zwischen Szenarien ohne und mit 60 % FPV jeweils mit unverändertem und auf 25 % verringertem Durchfluss (Mitte) und unten Temperaturdifferenzen der beiden dargestellten Verläufe in der Mitte (zwischen den Temperaturänderungen ohne und mit 60 % FPV für die Szenarien mit unverändertem und auf 25 % verringertem Durchfluss)	93
Abbildung 3.67: Berechnete Wassertemperaturen im Tiefenwasser des Modellsees 3 bei auf 25 % verringertem Durchfluss ohne und mit FPV (oben) sowie Temperaturdifferenzen zwischen Szenarien ohne und mit 60 % FPV jeweils mit unverändertem und auf 25 % verringertem Durchfluss (unten)	94
Abbildung 3.68: Berechnete Konzentrationen an Chlorophyll a im Modellsee 3 ohne FPV bei unverändertem und auf 25 % verringertem Durchfluss (oben), ohne und mit 60 % FPV bei jeweils auf 25 % verringertem Durchfluss (Mitte) sowie mit 60 % FPV bei unverändertem und auf 25 % verringertem Durchfluss	95
Abbildung 3.69: Berechnete jährliche Nettoprimärproduktion ohne und mit FPV bei einem Bedeckungsgrad von 60 % im Modellsee 3 für die	

beiden Modellvarianten mit unverändertem und auf 25 % verringertem Durchfluss	96
Abbildung 3.70: Berechnete Sauerstoffkonzentrationen im Profil im tiefsten Bereich des Modellsees 3 für die Referenzszenarien ohne FPV mit unverändertem (oben) und auf 25 % reduziertem Durchfluss (Mitte) sowie Profil der Differenzen beider Szenarien ohne FPV (unten).....	97
Abbildung 3.71: Berechnete Sauerstoffkonzentrationen im Profil im tiefsten Bereich des Modellsees 3 für die Modellszenarien ohne (oben) und mit (Mitte) FPV bei auf 25 % reduziertem Durchfluss sowie Profil der Differenzen beider Szenarien ohne und mit FPV (unten).....	98
Abbildung 3.72: Berechnete, oberflächennahe Sauerstoffkonzentrationen im Modellsee 3 bei auf 25 % verringertem Durchfluss ohne und mit FPV (oben) sowie Sauerstoffdifferenzen zwischen Szenarien ohne und mit 60 % FPV jeweils mit unverändertem und auf 25 % verringertem Durchfluss (unten).....	99
Abbildung 3.73: Berechnete Sauerstoffkonzentrationen im Tiefenwasser des Modellsees 3 bei auf 25 % verringertem Durchfluss ohne und mit FPV (oben) sowie Sauerstoffdifferenzen zwischen Szenarien ohne und mit 60 % FPV jeweils mit unverändertem und auf 25 % verringertem Durchfluss (unten).....	100
Abbildung 3.74: Anzahl der Tage pro Jahr mit Sauerstoffkonzentrationen kleiner 2 mg/l über Grund im tiefsten Bereich des Modellsees 3 für die Modellszenarien ohne und mit FPV bei einem Bedeckungsgrad von 60 % bei unverändertem und auf 25 % verringertem Durchfluss	100
Abbildung 3.75: Differenz der berechneten Konzentrationen an Phosphatphosphor der Szenarien mit unverändertem und verringertem Durchfluss ohne FPV im tiefsten Bereich des Modellsees 3	101
Abbildung 3.76: Berechnete Konzentrationen an Phosphatphosphor im Profil im tiefsten Bereich des Modellsees 3 für die Modellszenarien ohne (oben) und mit (Mitte) FPV bei auf 25 % reduziertem Durchfluss sowie Profil der Differenzen beider Szenarien (unten)	102
Abbildung 3.77: Berechnete Konzentrationen an Nitratstickstoff im Profil im tiefsten Bereich des Modellsees 3 für die Modellszenarien ohne (oben) und mit (Mitte) FPV bei auf 25 % reduziertem Durchfluss sowie Profil der Differenzen beider Szenarien (unten)	103

Abbildung 3.78: Berechnete Konzentrationen an Ammoniumstickstoff im Profil im tiefsten Bereich des Modellsees 3 für die Modellszenarien ohne (oben) und mit (Mitte) FPV bei auf 25 % reduziertem Durchfluss sowie Profil der Differenzen beider Szenarien (unten).....	103
Abbildung 3.79: Berechnete Konzentrationen an gelöstem Methan im Bereich der Wasseroberfläche (oben), berechnete Transferkoeffizienten für den Methanaustausch mit der Atmosphäre (Mitte) und berechneter Fluss an gelöstem Methan in die Atmosphäre (unten) für die Modellszenarien des Modellsees 3 ohne und mit FPV bei einem Bedeckungsgrad von 60 %	105
Abbildung 3.80: Berechnete Menge an partikulärem organischem Kohlenstoff an der Sedimentoberfläche (oben) und Fluss an Methan-Bläschen in die Atmosphäre (unten) für die Modellszenarien des Modellsees 3 ohne und mit FPV bei einem Bedeckungsgrad von 60 % (Mittelwerte über die gesamte Sedimentoberfläche)	106
Abbildung 3.81: Jahresmittelwerte des berechneten Methanflusses aus dem Modellsee 3 in die Atmosphäre für die Modellszenarien ohne und mit FPV bei einem Bedeckungsgrad von 60 %	107
Abbildung 4.1: Einfluss einer FPV-Nutzung auf die Wassertemperatur, Schichtungsstabilität, Primärproduktion und Sauerstoffarmut eines Gewässers in Abhängigkeit des Durchflusses	116

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1:	Übersicht der FPV-Modellszenarien; für alle Szenarien wurden, falls nicht abweichend angegeben, Bedeckungsgrade von 15 %, 25 %, 35 %, 45 % und 60 % betrachtet.....	4
Tabelle 2.2:	Anzahl der vertikalen FPV-Module und damit tatsächlich bedeckter Anteil der Seefläche des Modellsees 1 für die einzelnen Modellszenarien	27
Tabelle 3.1:	Berechnete, jährliche Nettoprimärproduktion in gC/m ² /a im Modellsee 1 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden sowie prozentuale Abnahme mit FPV im Vergleich zur Situation ohne FPV	39
Tabelle 3.2:	Berechnete, jährliche Nettoprimärproduktion in gC/m ² /a im Modellsee 1 bei erhöhtem Phosphorgehalt ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden sowie prozentuale Abnahme mit FPV im Vergleich zur Situation ohne FPV.....	52
Tabelle 3.3:	Berechnete, jährliche Nettoprimärproduktion in gC/m ² /a im Modellsee 2 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden sowie prozentuale Abnahme mit FPV im Vergleich zur Situation ohne FPV	67
Tabelle 3.4:	Berechnete, jährliche Nettoprimärproduktion in gC/m ² /a im Modellsee 3 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden sowie prozentuale Abnahme mit FPV im Vergleich zur Situation ohne FPV	83
Tabelle 3.5:	Jahresmittelwerte der Flüsse an gelöstem Methan und Methan-Bläschen aus dem Modellsee 3 in die Atmosphäre sowie Summe beider Prozesse für die Modellszenarien ohne und mit FPV bei einem Bedeckungsgrad von 60 %	107
Tabelle 4.1:	Übersicht der FPV-Modellszenarien; für alle Szenarien wurden, falls nicht abweichend angegeben, Bedeckungsgrade von 15 %, 25 %, 35 %, 45 % und 60 % betrachtet.....	110
Tabelle 4.2:	Zusammenfassung der Auswirkungen von liegenden FPV-Modulen auf die untersuchten Prozesse in ungeschichteten und geschichteten Flachseen.....	116
Tabelle 4.3:	Bewertung der Auswirkungen einer FPV-Nutzung mit liegenden Modulen auf unterschiedliche Prozesse in geschichteten und ungeschichteten Flachseen mit geringen und hohen Durchflüssen; grün = tendenziell keine negativen Auswirkungen zu erwarten, gelb = signifikante negative Auswirkungen bei	

hohen Bedeckungsgraden (45 % bis 60 %), orange = signifikante negative Auswirkungen bei mittleren bis hohen Bedeckungsgraden (ab 35 %).....	121
---	-----

1 Einleitung

Die Nutzung von schwimmenden Photovoltaikanlagen (FPV, von engl.: floating photovoltaik) auf Flachseen stellt eine interessante Möglichkeit dar, Energie aus regenerativen Quellen zu gewinnen und könnte somit zur Energiewende in Deutschland beitragen. Allerdings sind die Folgen einer derartigen Nutzung insbesondere bei Flachseen noch nicht abschließend bekannt. Dies liegt zum einen daran, dass Pilotstudien an realen Gewässern mit höheren Bedeckungsgraden aufgrund gesetzlicher Vorgaben aktuell nicht realisierbar sind. Zum anderen sind die Auswirkungen von FPV je nach Gewässertypus unterschiedlich, so dass die vorhandenen internationalen Studien die Bandbreite an unterschiedlichen Stillgewässern bislang nicht abdecken. Für die Folgenabschätzung von FPV bieten sich daher computergestützte Modellstudien an, mit denen sich räumlich und zeitlich hochaufgelöst die in Seen ablaufenden physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse nachbilden und analysieren lassen. Im Rahmen der vorliegenden Studie werden für verschiedene Flachseen numerische Modelle aufgebaut und in Rahmen von Szenarienbetrachtungen mit und ohne FPV die dabei entstehenden Veränderungen identifiziert und quantifiziert.

Grundlage für die Untersuchungen bilden zwei reale Gewässer in Bayern, die zwar nicht für FPV in Frage kommen, die aber den im Fokus stehenden Gewässertypus des Flachsees verkörpern und für die zudem eine breit gefächerte Messdatenbasis vorliegt. Letzteres ist eine unerlässliche Voraussetzung für die Anwendung von numerischen Modellen, da anhand der Messwerte die Modelle überprüft werden können und somit sichergestellt wird, dass die relevanten Prozesse nachgebildet werden und das Modell belastbare Ergebnisse liefert. Für beide Gewässer wurden im ersten Teil der Modellstudie Modellsysteme zur Berechnung der Hydrodynamik und Wasserqualität aufgebaut und erfolgreich überprüft. Dies ist in einem eigenen Teilbericht dokumentiert. Somit steht für beide Gewässer ein belastbares Modellsystem zur Verfügung, mit dem die Strömungs-, Temperatur- und Schichtungsverhältnisse sowie die Nährstoffkreisläufe, Primärproduktion und die Sauerstoffverhältnisse nachgebildet werden können.

Im Rahmen der FPV-Modellstudie werden mit den vorliegenden Modellen die Auswirkungen von FPV auf Flachseen intensiv untersucht und analysiert. Hierzu werden im ersten Schritt die meteorologischen Randbedingungen des Modells entsprechend modifiziert, um die Auswirkungen der FPV-Bedeckung auf den Wärmeaustausch zwischen Gewässer und Atmosphäre, den Impulseintrag durch den Wind sowie die Lichtabschattung berücksichtigen zu können. Anschließend werden eine Vielzahl unterschiedlicher Szenarien definiert, mit denen die Auswirkungen von FPV zum einen auf unterschiedliche Flachseen (bezüglich Wassertiefe, Dichteschichtung, Nährstoffgehalt, Makrophyten- bzw. Phytoplanktondominanz) und zum anderen bei unterschiedlichen

Nutzungsintensitäten (Bedeckungsgrade von 15 %, 25 %, 35 %, 45 % und 60 % der Seefläche) betrachtet werden. In diesen Szenarien wird von horizontal oder nahezu horizontal liegenden PV-Modulen ausgegangen, die auf einer nicht-transparenten, schwimmenden Unterkonstruktion befestigt sind. Eine weitere Konstruktionsvariante sind vertikale FPV-Module, die mittels Schwimmkörper und untergetauchtem Stabilisierungsrahmen auf einem Gewässer platziert werden können. Die Auswirkungen dieser Variante sowie die Unterschiede zur liegenden Konstruktion werden in ausgewählten Szenarien mit Bedeckungsgraden von 35 %, 60 % und 80 % ebenfalls beleuchtet. Um sowohl sich über längere Zeiträume entwickelnde bzw. akkumulierende Auswirkungen als auch Variabilität von Jahr zu Jahr untersuchen zu können, wurde ein vierjähriger Simulationszeitraum gewählt. Die Modellergebnisse werden hinsichtlich der Auswirkungen von FPV auf die Wärmeaustauschprozesse, Wassertemperaturen, Schichtungsverhältnisse, Primärproduktion sowie Sauerstoff- und Nährstoffhaushalte in Flachseen detailliert ausgewertet. Zudem wird die Thematik Treibhausgasemissionen mit FPV-Nutzung beleuchtet. Somit wird eine umfassende Bewertungsgrundlage für den Einsatz von FPV in verschiedenen Ausprägungen auf unterschiedlichen Flachseen geschaffen.

2 Szenarienbeschreibung und Modellsystem

Die Auswirkungen schwimmender Photovoltaikanlagen (floating photovoltaik, oder FPV) auf Seen werden mit einem gekoppelten Modellsystem untersucht, bestehend aus numerischen Modellen für die Berechnung der Hydrodynamik und der Wasserqualität. Mit diesen Modellen können die Strömungsverhältnisse, der Wärmehaushalt und die Wasserqualitätsprozesse in Seen dreidimensional und mit hohem Detailgrad berechnet und nachgebildet werden. Für die Studie wurden drei verschiedene Modellseen betrachtet, die dem zu untersuchenden Gewässertypus der Flachseen entsprechen. Die Geometrien dieser Modellseen orientieren sich an zwei realen Gewässern, für die eine umfassende Messdatenbasis vorliegt. Anhand dieser Daten wurden die Modelle aufgebaut, kalibriert und überprüft (kup 2025). Somit ist sichergestellt, dass die Modelle alle relevanten, im Gewässer ablaufenden Prozesse erfassen und somit belastbare Ergebnisse liefern.

Die Ergebnisse des validierten Modells stellen die Referenzsituation ohne FPV dar. Aufbauend darauf werden die Randbedingungen zum Wärme-, Licht- und Impulsaustausch über die Wasseroberfläche entsprechend modifiziert, um den Effekt der FPV nachbilden zu können. Hierbei werden verschiedene Bedeckungsgrade der Wasseroberfläche untersucht. Im Vergleich zur Referenzsituation können so die Auswirkungen der FPV identifiziert, analysiert und quantifiziert werden. Im Folgenden werden die Modellszenarien und das Modellsystem vorgestellt.

2.1 Modellszenarien

2.1.1 Betrachtete Modellseen

Grundlage der FPV-Modellszenarien bilden drei Modellseen vom Typus Flachsee mit unterschiedlichen Eigenschaften:

- Der erste Modellsee (1) weist mit einer Länge von ca. 300 m, einer Breite von ca. 250 m eine annähernd runde Form auf. Die maximale Wassertiefe beträgt 2 m und wird im Westen im Bereich des Auslasses erreicht. Das Gewässer ist eutroph und auch im Sommer ungeschichtet. Die Wasseraustauschzeit ist mit ca. 8 Tagen relativ kurz.
- Für den zweiten Modellsee (2) wurde als Grundlage die Geometrie des ersten Modellsees verwendet und modifiziert. Die Bathymetrie wurde schüsselförmig mit einer maximalen Wassertiefe von 7 m in der Seemitte definiert. Mit dieser Wassertiefe ist in den Sommermonaten mit geschichteten Temperaturverhältnissen zu rechnen. Das Gewässer ist ebenfalls eutroph.
- Der dritte Modellsee (3) weist bei einer Länge von ca. 500 m und einer Breite von ca. 80 m eine langgestreckte Form auf. Der Hauptzufluss befindet sich am nördlichen Ende des Weihers. Bis zum Auslass im Süden steigt die

Wassertiefe kontinuierlich auf maximal 4,7 m an. Das Gewässer ist ebenfalls eutroph. In den Sommermonaten baut sich eine Temperaturschichtung auf, die allerdings aufgrund der geringen Wassertiefe nicht stabil ist. Die Wasseraustauschzeit beträgt wie beim ersten Modellsee ca. 8 Tage.

2.1.2 Simulationszeitraum

Für die Szenarienberechnungen wurde der vierjährige Zeitraum vom 1. Januar 2002 bis zum 1. Januar 2006 gewählt. Für diesen Zeitraum steht für die Modellseen 1 und 3 eine gute Datenbasis zur Verfügung, anhand derer die Modelle überprüft wurden. Somit liegt als Vergleichsgrundlage für die FPV-Szenarien eine verlässliche Nachbildung des Ist-Zustands ohne FPV vor. Der mehrjährige Zeitraum ermöglicht es zudem, eventuell sich über die Jahre akkumulierende Effekte aufzuzeigen.

2.1.3 Szenarien FPV

In verschiedenen Variantenbetrachtungen sollen die Auswirkungen einer FPV-Nutzung auf die Verhältnisse in Seen beleuchtet und quantifiziert werden. Dabei wird in verschiedenen Modellszenarien der Einsatz von liegenden FPV-Modulen bei Bedeckungsgraden von 15 %, 25 %, 35 %, 45 % und 60 % betrachtet. Zusätzlich wird die vertikale FPV-Variante bei Bedeckungsgraden von 35 %, 60 % und 80 % für den Modellsee 1 untersucht. Für alle drei Flachseen werden Szenarien mit Phytoplanktondominanz ohne Makrophyten untersucht. Zusätzlich werden für den Modellsee 1 Szenarien mit Phytoplanktondominanz bei erhöhtem Phosphorgehalt sowie mit Makrophytendominanz ohne Berücksichtigung des Phytoplanktonwachstums berechnet. Für die Makrophytenbetrachtungen werden zwei Szenarien mit Bewuchsflächen von 50 % und 100 % berechnet. Abbildung 2.1 zeigt die bewachsenen Flächen für beide Szenarien. Die Bewuchsflächen für das 50 %-Szenario wurden auf Basis der Wassertiefe berechnet und somit in den flacheren Bereichen des Sees platziert. In weiteren Szenarien wird für den Modellsee 3 der Einfluss der Wasseraustauschrate auf die Auswirkungen einer FPV-Nutzung untersucht. In diesen Szenarien wird die Durchflussrate auf 25 % des in den übrigen Szenarien verwendeten Werts reduziert. Zudem wird in diesen Szenarien der Einfluss der FPV-Bedeckung auf die Treibhausgasemissionen beleuchtet. Tabelle 2.1 fasst die einzelnen Modellvarianten zusammen.

Tabelle 2.1: Übersicht der FPV-Modellszenarien; für alle Szenarien wurden, falls nicht abweichend angegeben, Bedeckungsgrade von 15 %, 25 %, 35 %, 45 % und 60 % betrachtet

Szenario	Modellsee 1	Modellsee 2	Modellsee 3
Algendominanz ohne Makrophyten	x	x	x

Algendominanz ohne Makrophyten, erhöhter Nährstoffgehalt	x	
Algendominanz ohne Makrophyten, verringerte Durchflussrate, mit Betrachtung Treibhausgasemissionen (nur 60 % Bedeckungsgrad)		x
Algendominanz ohne Makrophyten, vertikale FPV-Module (Bedeckungsgrade: 35 %, 60 % und 80 %)	x	
Makrophytenbedeckung 50 % ohne Algen	x	
Makrophytenbedeckung 100 % ohne Algen	x	
Makrophytenbedeckung 100 % ohne Algen, vertikale FPV-Module (Bedeckungsgrade: 35 %, 60 % und 80 %)	x	

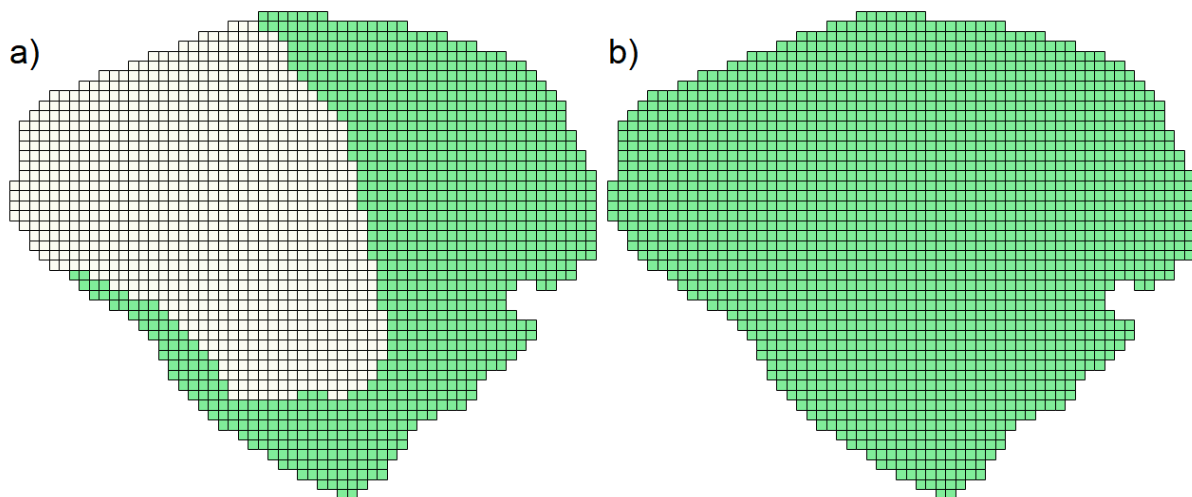


Abbildung 2.1: Im Modell mit Makrophyten bewachsene Flächen (grün) im Modellsee 1 mit Bedeckungsgraden von a) 50 % und b) 100 %

2.2 **Modellsystem**

2.2.1 *Hydrodynamisches Seemodell Delft3D-Flow*

Für die Berechnung der hydrodynamischen Verhältnisse, der Wassertemperaturen und der Wärmebilanz von Seen wird das von Deltares entwickelte Programmsystem Delft3D-Flow verwendet (Deltares 2019a). Delft3D-Flow ermöglicht die Berücksichtigung aller für die Aufgabenstellung relevanten Prozesse, wie Schichtungsentwicklung, thermodynamischer Austausch mit der Atmosphäre, Windeinfluss, Stofftransport sowie Zu- und Abflüsse. Die Ergebnisse des Modells werden als Grundlage für Wasserqualitätsberechnungen mit dem ebenfalls von Deltares entwickelten Modell Delft3D-WAQ verwendet. Die turbulenten Prozesse werden über ein k - ϵ -Modell berücksichtigt. Das numerische Lösungsverfahren basiert auf dem Finite-Differenzenverfahren. Dadurch ergibt sich in horizontaler Richtung ein zeilen- und spaltenorientiertes Modellnetz. In vertikaler Richtung kann ein Z-Layer- oder Sigma-Layer-Ansatz verwendet werden. Beim Z-Layer-Ansatz werden konstante Schichtmächtigkeiten angesetzt. Beim Sigma-Layer-Ansatz folgen die Schichtgrenzen der Seemorphologie, wodurch unterschiedliche Schichtdicken im Modell entstehen. Der Sigma-Layer-Ansatz ist besonders für die Nachbildung von absinkendem Flusswasserfahnen mit Dichteunterschieden zum Seewasser geeignet. Auf der anderen Seite lassen sich damit geschichtete Verhältnisse nur ungenügend abbilden, da die Sprungschicht durch mehrere Modellschichten verläuft und interne Wellenbewegungen nur ungenügend abgebildet werden bzw. zu einer Aufweitung des Epilimnions führen. Der Z-Layer-Ansatz eignet sich dagegen für die anstehenden Fragestellungen und ermöglicht die adäquate Abbildung der saisonal variierenden Temperatur- bzw. Schichtungsverhältnisse.

2.2.2 *Wasserqualitätsmodell Delft3D-WAQ*

Für die Berechnung der Wasserqualitätsprozesse wird das dreidimensionale Wasserqualitätsmodell Delft3D-WAQ verwendet, das mit Delft3D-Flow gekoppelt werden kann und von diesem die Strömungsverhältnisse und Wassertemperaturen erhält. Mit Delft3D-WAQ können die Ökologie, die Wasserqualität sowie der Schwebstoffhaushalt eines Wasserkörpers und des Sediments simuliert werden (Deltares 2019b). Abbildung 2.2 zeigt eine schematische Übersicht des hydrodynamischen Modells Delft3D-Flow sowie des daran gekoppelten Wasserqualitätsmodells Delft3D-WAQ mit den jeweiligen Datenflüssen.

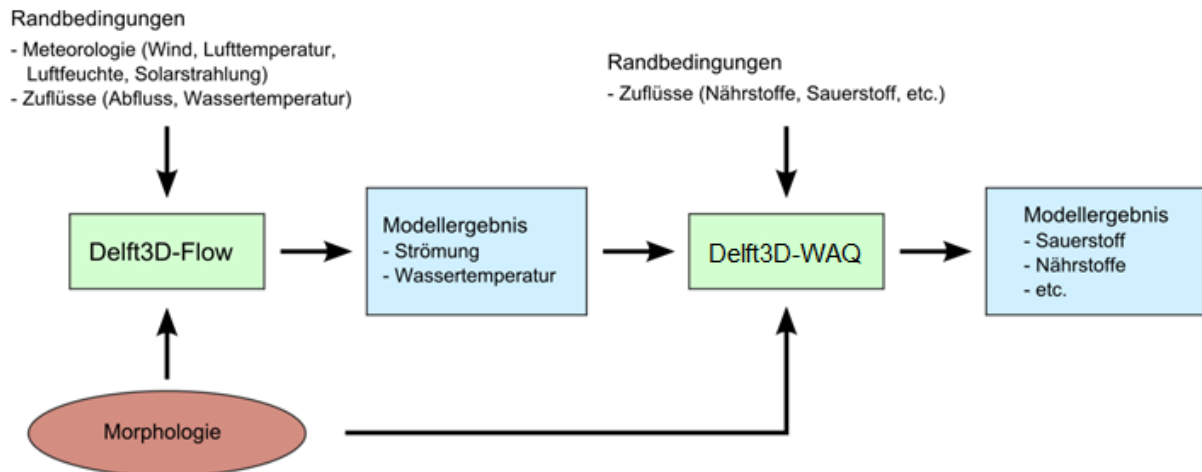


Abbildung 2.2: Schematische Übersicht der Datenflüsse des Delft3D-Modellsystems mit dem hydrodynamischen Modell Delft3D-Flow und dem Wasserqualitätsmodell Delft3D-WAQ

Das Modell Delft3D-WAQ beinhaltet eine umfangreiche Prozessbibliothek, mit deren Hilfe einzelne Substanzen und Prozesse flexibel ausgewählt werden können. Die Substanzen stellen die zu betrachtenden Zustandsgrößen dar (z. B. Nitrat) und die Prozesse die mathematische Beschreibung von Umwandlungsreaktionen (z. B. Nitrifikation). Eine Vielzahl von Substanzen und Prozessen sind in dieser Bibliothek bereits implementiert und verfügbar, weitere können vom Benutzer manuell hinzugefügt und im Modell verwendet werden. Von Kobus und Partner wurden bereits einige Prozessformulierungen für die Bibliothek entwickelt, die insbesondere auf die Nachbildung der Sauerstoffzehrung und des Phosphorhaushalts auf und im Sediment von Seen abzielen.

Im Rahmen verschiedener Modellanwendungen an unterschiedlichen Seen wurde von Kobus und Partner eine Modellkonfiguration mit Zustandsgrößen und Umwandlungsprozessen erarbeitet, mit der die Primärproduktion, der Sauerstoffhaushalt sowie die wichtigsten Nährstoffkreisläufe von Seen nachgebildet werden können. Diese Modellkonfiguration wurde bereits mit Erfolg an verschiedenen Seen mit unterschiedlichen Trophiestufen angewandt und ist momentan auch im Onlinemodell des Informationssystems BodenseeOnline im Einsatz. Diese Modellkonfiguration wird für die anstehende Fragestellung der FPV auf Flachseen für die Nachbildung phytoplanktondominierter Zustände verwendet. Da im Rahmen der FPV-Szenarien auch der Einfluss auf Makrophyten in Flachseen untersucht werden soll, wurde die Modellkonfiguration um die entsprechenden Zustandsgrößen und Prozesse ergänzt. Für diese Betrachtungen wird die Primärproduktion durch Phytoplankton nicht berechnet. Damit wird im Modell der Zustand makrophytendominierter Gewässer nachgebildet. Konkurrenzsituationen zwischen Makrophyten und Phytoplankton werden nicht berücksichtigt. Abbildung 2.3 zeigt die definierten Zustandsgrößen in der Wassersäule und im Sediment,

Abbildung 2.4 die zugehörigen Prozesse. Berücksichtigt werden die Sauerstoffkonzentration, anorganische Nährstoffe (PO_4 , NO_3 , NH_4 , Si), die Primärproduktion, organisches partikuläres ($\text{POX}_{1/2}$) und gelöstes (DOX) Material sowie partikuläres anorganisches Material (IM: Schwebstoffe, SiO_2). Das organische Material wird für die einzelnen Nährstoffe weiter aufgeteilt in POC/DOC (Kohlenstoff), PON/DON (Stickstoff) und POP/DOP (Phosphor). Das Sediment wird durch 2 Schichten repräsentiert. In die obere, erste Schicht gelangt aus der Wassersäule absedimentiertes Material. In die darunter liegende, zweite Schicht gelangen Substanzen aus der ersten Schicht durch Umwandlungsprozesse. Die Zustandsgrößen werden durch die einzelnen Prozesse beeinflusst und umgewandelt:

- **Algen:** Beim Wachstum wird durch Photosynthese Sauerstoff freigesetzt und anorganische Nährstoffe aus der Wassersäule entzogen. Diese werden beim Absterben zu einem kleineren Teil wieder freigesetzt. Der größere Teil der aufgenommenen Nährstoffe wird in Form von partikulärem organischem Material wieder freigesetzt ($\text{POX}_{1/2}$). Kieselalgen, die Silizium aufnehmen, geben dieses in partikulärer Form wieder zurück (SiO_2). Die Algen tragen zu einer Verringerung der Sichttiefe bei, was bei hohem Aufkommen zu einer Selbstabschattung führt. Ziel der Nachbildung der Algen im Modell ist es, die Algenpopulation als Gesamtes nachzubilden. Die Entwicklung einzelner Spezies ist nicht berücksichtigt. Um die speziellen Eigenschaften der Kieselalgen nachbilden zu können (Siliziumaufnahme, größere Sinkgeschwindigkeiten aufgrund Zellhülle aus SiO_2), werden im Modell zwei Algengruppen berücksichtigt: Kieselalgen und alle übrigen Algen. Jede Gruppe besitzt eigene, konfigurierbare Eigenschaften, wie z. B. Nährstoffstöchiometrie, Lichtbedarf, Wachstumsraten, Mortalität und Sinkgeschwindigkeit.
- **Makrophyten:** Im Modell werden submerse Makrophyten mit fester Verwurzelung (Rhizom) im Sediment berechnet. Dabei wird hier vereinfacht angenommen, dass die Pflanzen ihre Nährstoffe vollständig aus dem Sediment ziehen und deren Verfügbarkeit nicht limitiert ist. Das Wachstum der Makrophyten im Modell wird durch die Tageslänge, die Lichtverfügbarkeit und die Wassertemperatur limitiert. Bei der Photosynthese wird Sauerstoff freigesetzt. Bei abnehmenden Licht- und Temperaturverhältnissen im Herbst sterben die Makrophyten ab. Dabei wird die Biomasse in partikuläres organisches Material umgewandelt (POX_1). Konkurrenzphänomene und Wechsel von Bistabilen Zuständen (Makrophytendominanz oder Phytoplanktondominanz je nach veränderten Transparenzbedingungen durch die FPV) können hier nicht abgebildet werden. Auf diese Aspekte wird in der zusammenfassenden Bewertung in Kapitel 4 nochmals eingegangen.
- **Austausch mit der Atmosphäre:** Je nachdem, ob die Sauerstoffkonzentrationen im Wasser über oder unter der

Sättigungskonzentration liegen, wird Sauerstoff an die Atmosphäre abgegeben oder aus der Atmosphäre aufgenommen. Außerdem erfolgt ein geringer, kontinuierlicher Phosphateintrag aufgrund eingetragener Partikel (Staub von Böden und Feldern, Asche, tierische Exkremente, etc.).

- Sichttiefe: Aus allen, die Trübung des Wassers beeinflussenden Substanzen wird eine Sichttiefe berechnet, die die Mächtigkeit der euphotischen Zone bestimmt und somit das Algenwachstum beeinflusst. Die euphotische Zone ist die lichtdurchflutete Schicht, in der Photosynthese möglich ist.
- Löslichkeit von SiO_2 : Das durch Absterben der Kieselalgen freigesetzte, partikuläre SiO_2 wird in der Wassersäule und im Sediment wieder gelöst und steht somit wieder für das Algenwachstum zur Verfügung.
- Nitrifikation: Ammonium wird unter Sauerstoffverbrauch zu Nitrat umgewandelt. Dieser Prozess findet nur statt, wenn Sauerstoff vorhanden ist.
- Mineralisierung: Organisches Material (POX/DOX) wird unter Verbrauch von Sauerstoff mineralisiert. Falls kein Sauerstoff vorhanden ist, wird Nitrat verbraucht (Denitrifikation). Dabei werden anorganische Nährstoffe freigesetzt (PO_4 , NH_4). Da das beim Absterben der Algen freigesetzte, partikuläre Material verschiedene Anteile enthält, die unterschiedlich schnell mineralisiert werden können, werden für POX zwei Klassen mit unterschiedlichen Mineralisationsraten verwendet.
- Sedimentation: Alle partikulären Substanzen sedimentieren je nach definierter Sinkgeschwindigkeit ab.
- Mineralisierung und Rücklösung im Sediment: Absedimentiertes Material wird ebenfalls mineralisiert (Algen, POX) bzw. rückgelöst (SiO_2). Die Mineralisationsraten unterscheiden sich von denjenigen in der Wassersäule. Das Sediment wird im Modell mit 2 Modellschichten berücksichtigt. Die obere Schicht repräsentiert die Sedimentoberfläche. Absinkendes, partikuläres Material wird dieser Schicht zugeordnet. Bei Vorhandensein von Sauerstoff wird dieses Material unter Sauerstoffverbrauch mineralisiert. Die untere Schicht repräsentiert den tieferen, dauerhaft anoxischen Sedimentbereich. In dieser Schicht wird organisches Material anoxisch mineralisiert. Dabei entstehende, reduzierte Substanzen gelangen durch Diffusionsfluss in die oberen Sedimentschichten und beeinflussen so die Verhältnisse in der darüber liegenden Wassersäule. Die anoxische Mineralisierung verwendet je nach Verfügbarkeit verschiedene Elektronenakzeptoren (Nitrat, Mangan- und Eisenverbindungen, Sulfat, Methanogenese). Da mit Ausnahme von Nitrat diese Stoffe nicht explizit im Modell als Zustandsvariablen berücksichtigt sind, werden die daraus bei der Mineralisierung entstehenden, reduzierten Substanzen (zweiwertiges Eisen und Mangan, Schwefelwasserstoff, Methan) als äquivalenter Sauerstoffbedarf bilanziert. Somit sind im Modell auch negative Sauerstoffkonzentrationen möglich, die auf das Vorhandensein

reduzierter, nicht explizit im Modell berücksichtigter Substanzen hinweisen. Während der Gehalt an organischem Material in der oberen Sedimentschicht zeitlich variabel ist und aufgrund der Primärproduktion und dem Absterben der Algen eine starke saisonale Komponente aufweist, ist der Sauerstoffbedarf der unteren Schichten zeitlich quasi konstant und berücksichtigt die langjährige Historie an sedimentiertem organischem Material, das in dieser Schicht über Jahrzehnte abgelagert wurde. Im Modell wird dieser Schicht daher ein konstanter Sauerstoffbedarf zugeordnet. In der Literatur wird für eutrophe Seen oder Seen mit eutropher Historie ein Wert im Bereich von 0,3-0,5 mg O₂/m²/d zugeordnet (Müller et al. 2012). Der im Wasserqualitätsmodell für die Modellsees verwendete Wert wird mit Hilfe vorhandener Messdaten zum gelösten Sauerstoff in der Wassersäule im Rahmen der Modellkalibrierung näher eingegrenzt.

- **Methanogenese:** In ausgewählten Szenarien soll der Einfluss einer FPV-Nutzung auf die Treibhausgasemissionen eines Gewässers untersucht werden. Bei diesen Betrachtungen wird im Wasserqualitätsmodell zusätzlich Methan als Zustandsgröße berücksichtigt. Methan entsteht bei der Mineralisierung von organischem Material im Rahmen der Methanogenese. Diese tritt allerdings nur dann auf, wenn Sauerstoff, Nitrat und Sulfat vollständig gezehrt sind. Die Mineralisierung unter Verbrauch von Sauerstoff und Nitrat ist im Modell bereits implementiert. In den Modellszenarien zur Untersuchung der Treibhausgasemissionen wird dieser Prozess um die Methanogenese erweitert (Abbildung 2.5). Sobald im Modell Sauerstoff und Nitrat vollständig gezehrt sind (Sulfat wird vernachlässigt), läuft die Mineralisierung im Rahmen der Methanogenese weiter. Hierbei wird aus dem organischen Material zu gleichen Teilen Methan und Kohlenstoffdioxid gebildet. Bei der Methanogenese in der Wassersäule wird davon ausgegangen, dass das produzierte Methan im Wasser gelöst wird. Gelöstes Methan wird aufgrund der Übersättigung über die Wasseroberfläche in die Atmosphäre ausgegast. Dieser Prozess erfolgt im Modell analog zum Sauerstoffaustausch mit der Atmosphäre in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit. Die Sättigungskonzentration von Methan in Wasser wird auf null gesetzt. Für im Sediment entstehendes Methan wird eine Ausgasung über aufsteigende Blasen angenommen. Im Modell wird das Sediment durch zwei Schichten repräsentiert. Die obere Schicht stellt die Sedimentoberfläche dar, auf die abgestorbene Biomasse absinkt und dort, je nach Verfügbarkeit in der Wassersäule, unter Zehrung von Sauerstoff oder Nitrat oder im Rahmen der Methanogenese mineralisiert wird. Die untere Sedimentschicht repräsentiert die über Jahre bis Jahrzehnte akkumulierte Biomasse und stellt somit die Historie der Trophieentwicklung eines Gewässers dar. Dieser Bereich wird als dauerhaft anoxisch und nitratfrei angenommen, so dass dort laufend Methan produziert wird. Da die tatsächliche Methanproduktion in den

tiefen Sedimentschichten für die betrachteten Gewässer nicht bekannt ist, und mit und ohne FPV-Bedeckung identisch ist, wird diese Schicht bei der Methanbilanz vernachlässigt. Im Sinne einer Differenzenbetrachtung bei der Methanbilanzierung werden daher nur diejenigen Kompartimente betrachtet, bei denen Unterschiede mit und ohne FPV-Bedeckung zu erwarten sind (Wassersäule und obere Sedimentschicht).

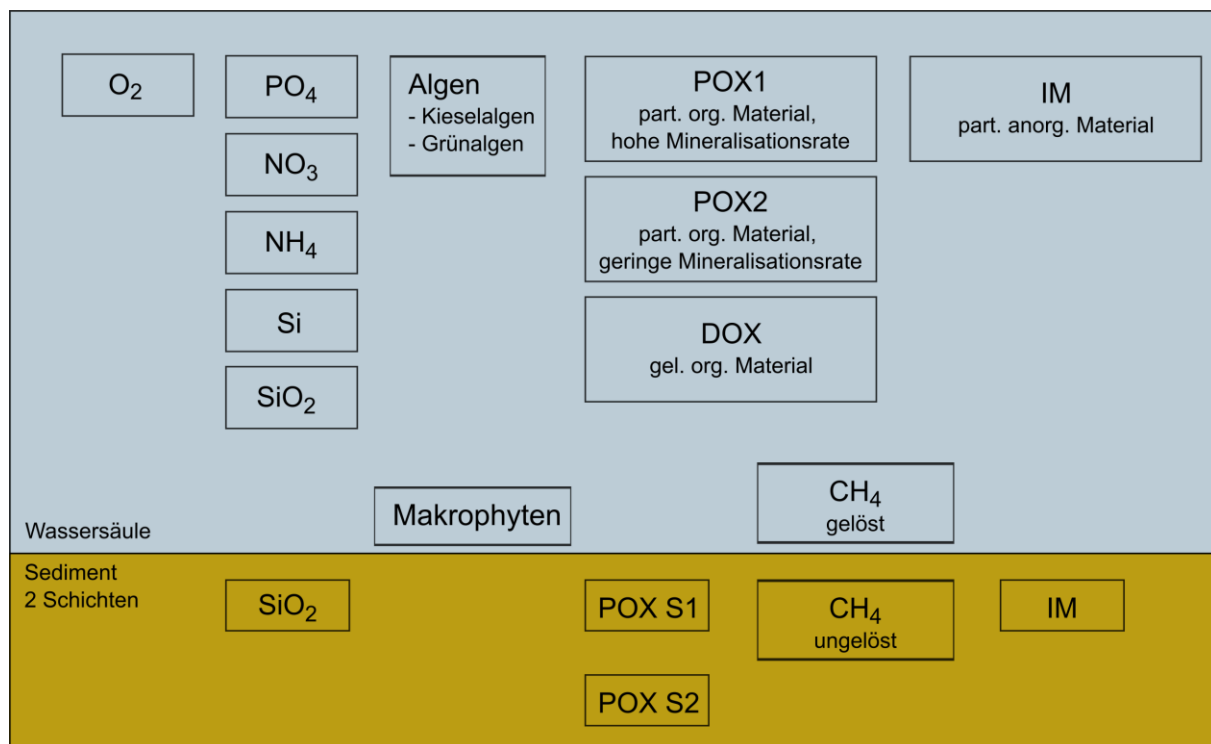


Abbildung 2.3: Im Wasserqualitätsmodell verwendete Zustandsgrößen

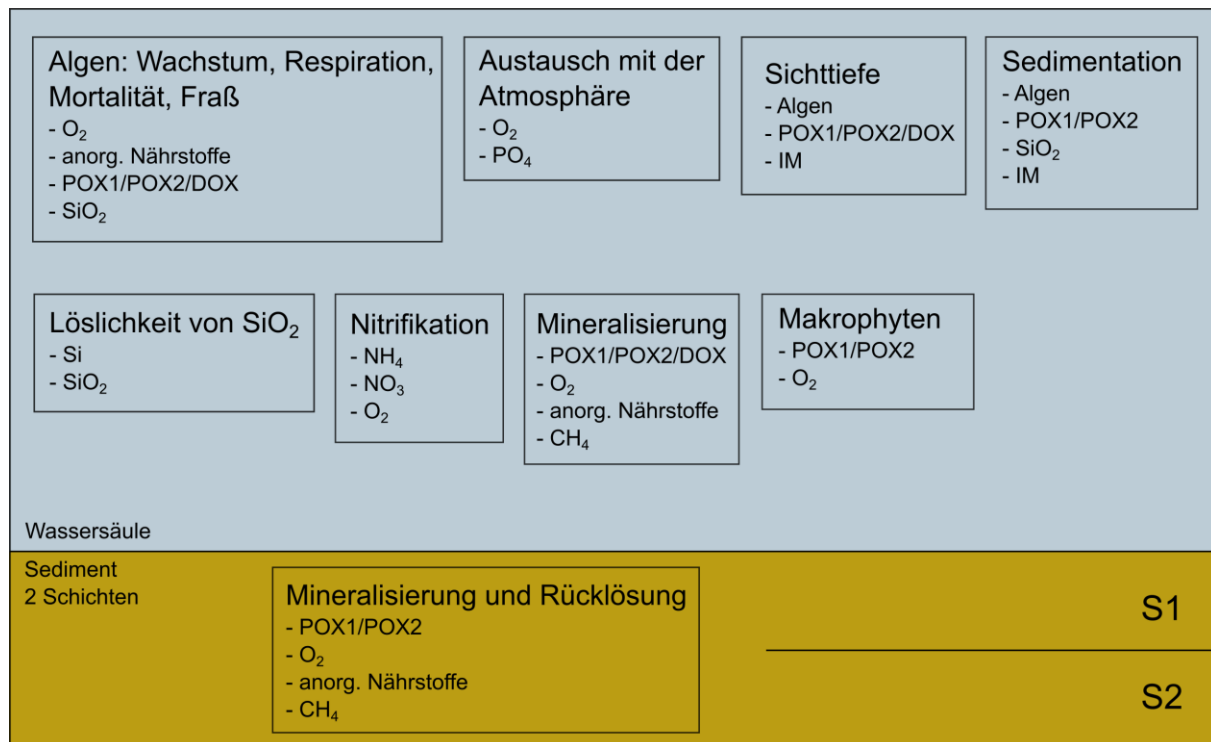


Abbildung 2.4: Im Wasserqualitätsmodell verwendeten Prozesse

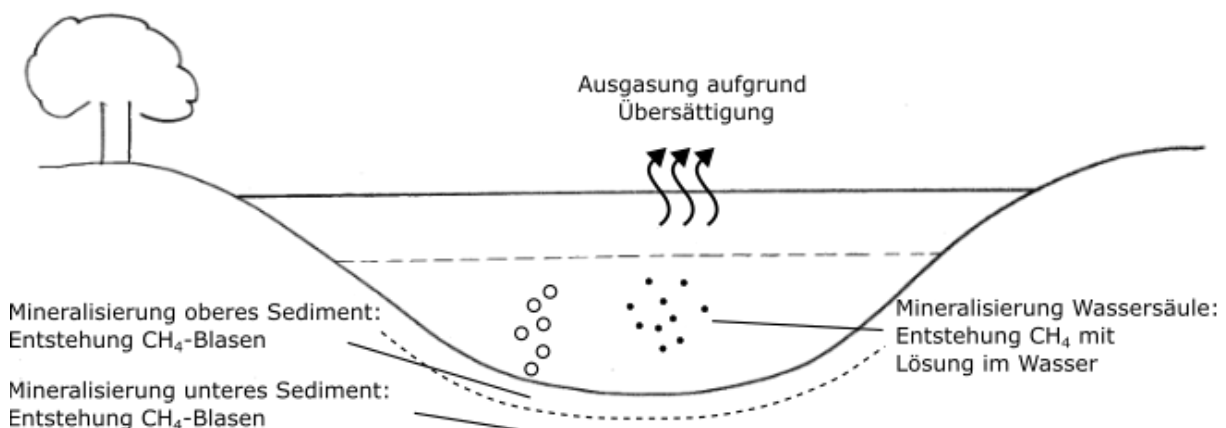


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung der Prozesse im See, bei denen Methan entstehen kann

2.2.3 Modellnetz

Zur Lösung der Strömungsgleichungen im Modell wird die Seefläche in ein zeilen- und spaltenorientiertes Gitter unterteilt. Dieses besteht in vertikaler Richtung aus mehreren Schichten mit konstanter Mächtigkeit. Aufgrund deren unterschiedlichen Seeflächen wurden für die Modellseen unterschiedliche Zellgrößen verwendet. Die Zellgrößen betragen für die Modellseen 1 und 2 jeweils 5 m x 5 m (Abbildung 2.6 bzw. Abbildung 2.7). Für den Modellsee 3 wurden Zellgrößen von 7,5 m x 7,5 m

gewählt (Abbildung 2.8). In vertikaler Richtung wurden für alle drei Gewässer Schichtmächtigkeiten von konstant 0,5 m verwendet.

Wassertiefe [m]

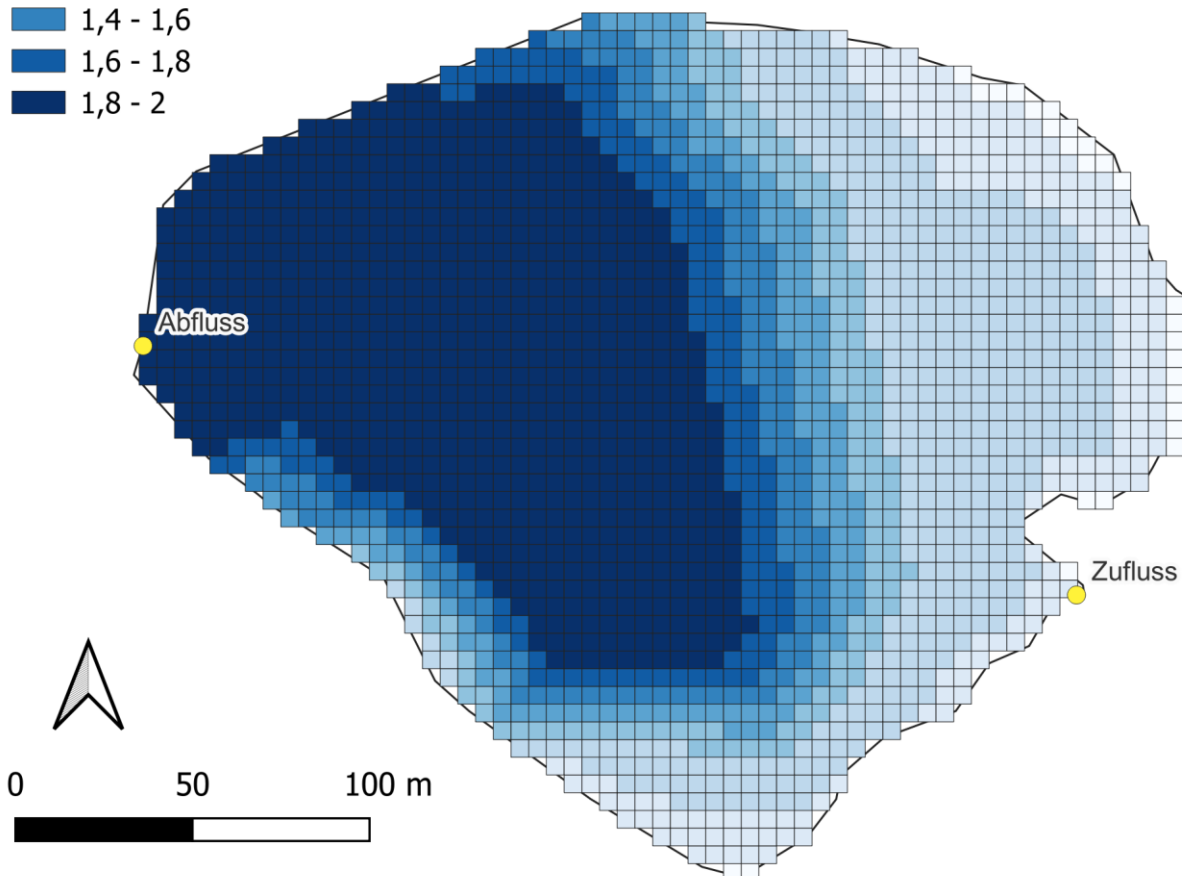
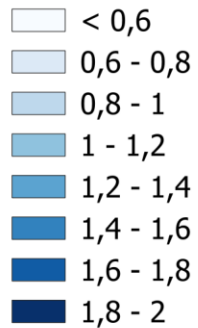


Abbildung 2.6: Im Modellsystem für den Modellsee 1 verwendetes Modellnetz mit Zellgrößen von 5 m x 5 m

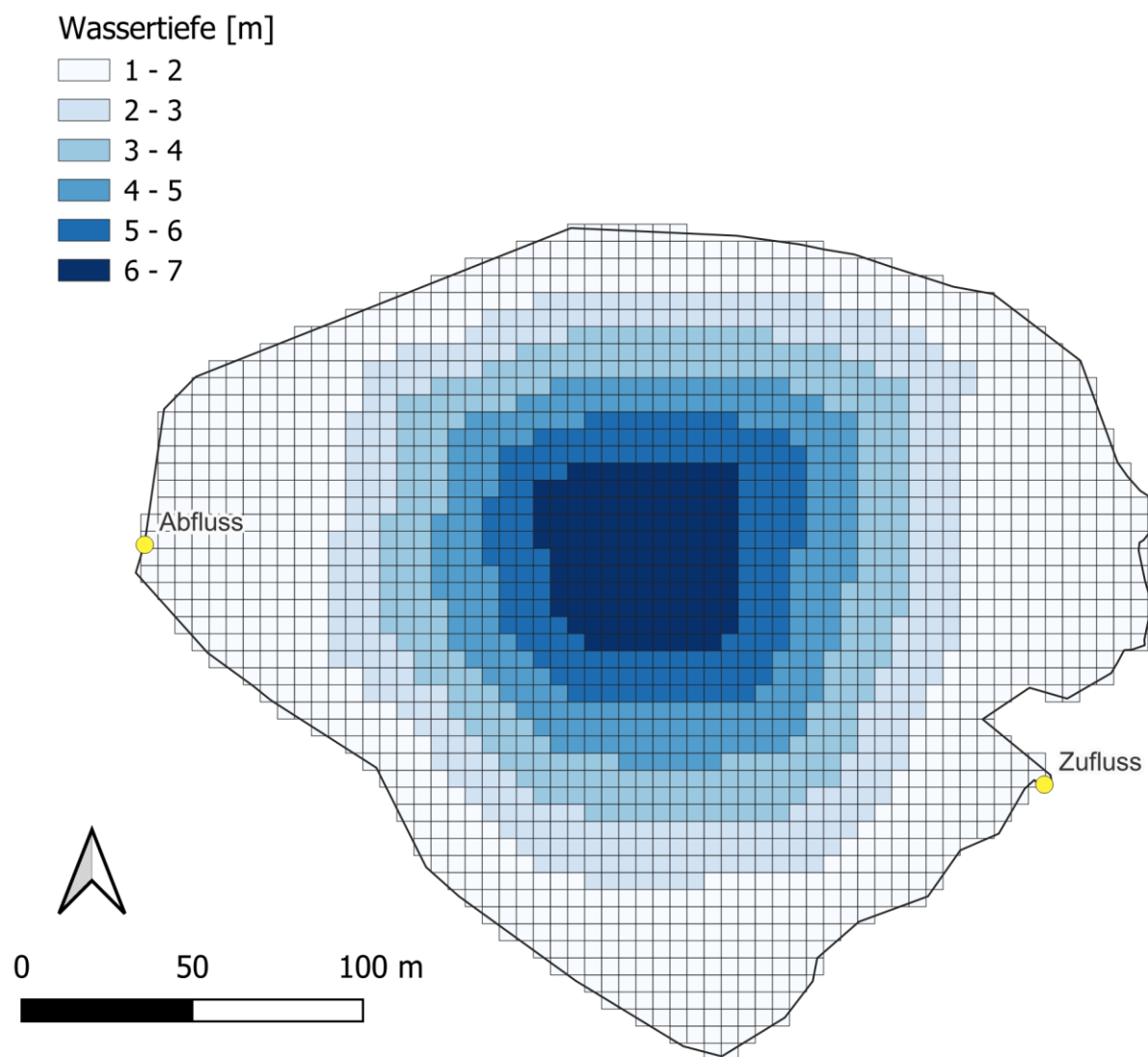


Abbildung 2.7: Im Modellsystem für den Modellsee 2 verwendetes Modellnetz mit Zellgrößen von 5 m x 5 m

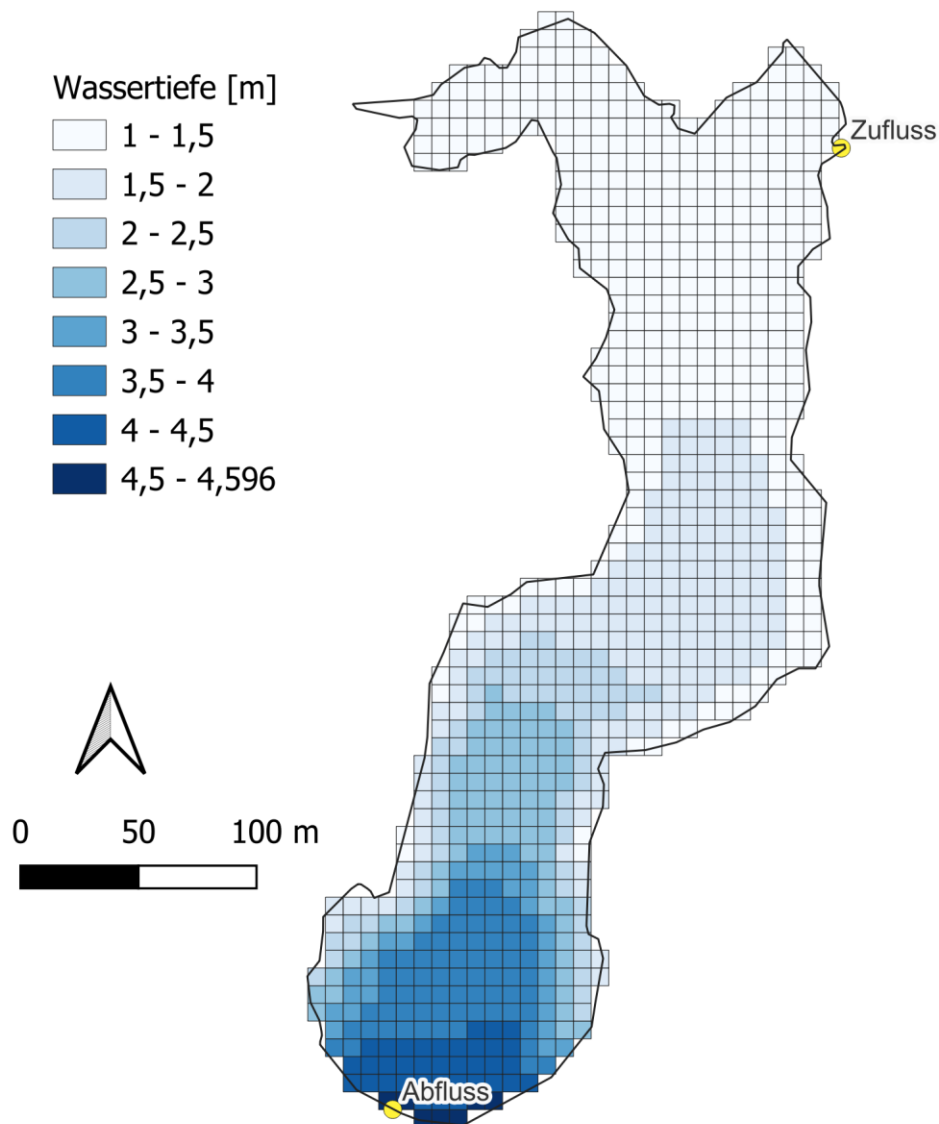


Abbildung 2.8: Im Modellsystem für den Modellsee 3 verwendetes Modellnetz mit Zellgrößen von 7,5 m x 7,5 m

2.2.4 Anfangsbedingungen

Zu Beginn der Simulation am 1. Januar 2002 müssen dem Modell die Startbedingungen für alle zu berechnenden Größen vorgegeben werden. Beim hydrodynamischen Modell sind dies die Strömungsgeschwindigkeiten und Wassertemperaturen. Die Strömungsbedingungen werden beim Start grundsätzlich auf null gesetzt, so dass das Modell eine gewisse „Einschwingdauer“ benötigt. Diese liegt bei wenigen Tagen und ist somit beim hier betrachteten, mehrjährigen Zeitraum nicht relevant. Da für die Wintermonate keine Messdaten vorliegen, wurde zum Modellstart für beide Seen eine homogene Wassertemperatur von 3 °C angenommen. Für die Berechnungsgrößen im Wasserqualitätsmodell wurden

ebenfalls geeignete Annahmen getroffen, die sich möglichst nahe am Gleichgewichtszustand befinden.

2.2.5 Randbedingungen

Antriebsgrößen des Modells sind die Meteorologie sowie Zu- und Abflüsse. Die Meteorologie definiert den Wärmeaustausch mit der Atmosphäre, den Windimpulseintrag über die Wasseroberfläche, den Austausch von Sauerstoff mit der Atmosphäre sowie die für die Primärproduktion zur Verfügung stehende Lichtenergie. Die Zu- und Abflüsse sind insbesondere für die Wasserbilanz, aber auch für den Ein- und Austrag von im Wasser gelösten und partikulären Stoffen von Bedeutung.

Zu- und Abflüsse

Für die Zuflüsse der Flachseen stehen nur sehr wenige Messinformationen zur Verfügung. Um einen realistischen Abflussverlauf über den Simulationszeitraum zu erhalten, wurde daher der gemessene Abflussverlauf eines Fließgewässers im benachbarten Einzugsgebiet als Datengrundlage verwendet. Diese Abflüsse wurden dann entsprechend dem abgeschätzten Mittelwasserabfluss der Zuflüsse der Modellseen skaliert. Abbildung 2.9 und Abbildung 2.10 zeigen die auf diese Weise berechneten Abflusswerte der Zuflüsse der drei Modellseen. Für die für den Modellsee 3 berechneten Szenarien mit verringertem Durchfluss wurden die Abflusswerte auf 25 % der gezeigten Werte reduziert. Für die Wassertemperaturen der Zuflüsse wurden die im ersten Modelldurchlauf berechneten Wassertemperaturen in den Seen als Grundlage verwendet und diese in den Sommermonaten mit einem Skalierungsfaktor abgesenkt. Für die Zuläufe der Modellseen 1 und 2 betragen somit die Maximalwerte im Sommer ca. 23 °C. Vom Zulauf des Modellsees 3 stehen vereinzelte Messdaten zur Wassertemperatur zur Verfügung. Diese weisen darauf hin, dass der Zulauf auch in den Sommermonaten geringe Temperaturen von unter 20 °C aufweist. Daher wurden die Zuflusstemperaturen des Modellsees 3 auf sommerliche Maximalwerte von knapp 20 °C skaliert.

Im Modell wurden für die drei Gewässer für den Auslass dieselben Abflusswerte verwendet wie für den Zufluss. Die Wasserspiegel in den Seen bleiben damit also konstant.

Für die Nährstoffkonzentrationen der Zuläufe stehen ebenfalls keine detaillierten Messinformationen zur Verfügung. Daher wurden die Konzentrationen der im Wasserqualitätsmodell berechneten Größen für die Zuflüsse iterativ durch einen Vergleich mit den in den Flachseen gemessenen Werte im saisonalen Verlauf bestimmt. Die Sauerstoffkonzentrationen der Zuflüsse wurden in Abhängigkeit der Wassertemperaturen auf die jeweiligen Sättigungskonzentrationen gesetzt. Die Algenkonzentration der Zuflüsse wird als vernachlässigbar angenommen.

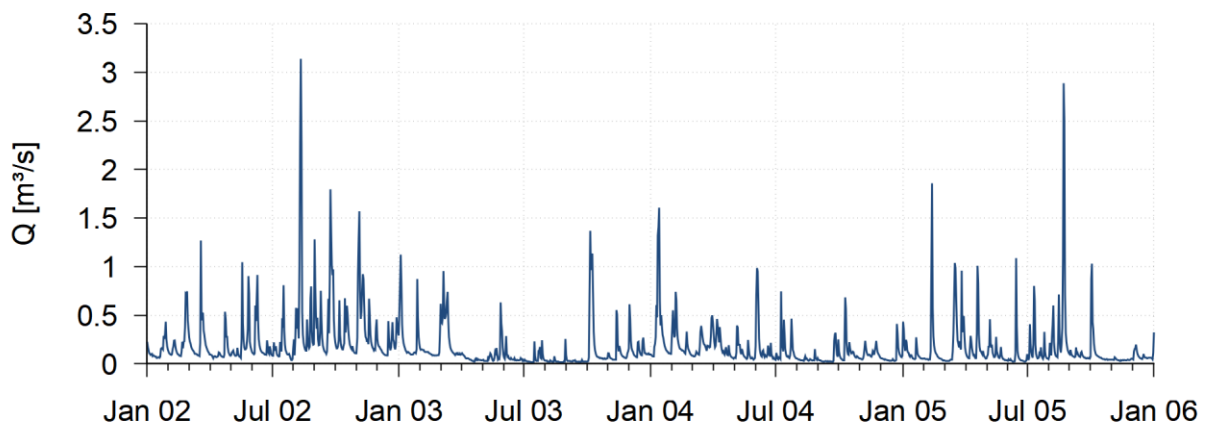


Abbildung 2.9: Aus Messdaten durch Skalierung berechnete Abflussdaten für den Zufluss der Modellseen 1 und 2

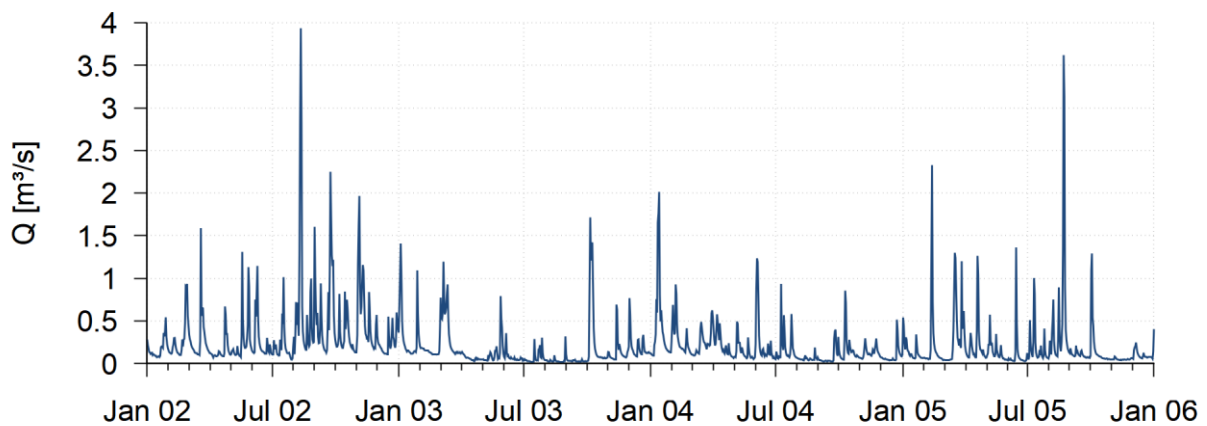


Abbildung 2.10: Aus den Messdaten durch Skalierung berechnete Abflussdaten für den Zufluss des Modellsees 3

Meteorologie

Der Simulationszeitraum wird mit stündlichen Antriebsdaten der Meteorologie betrachtet. Den Modellen werden hierzu entsprechende Zeitreihen der Lufttemperatur, relativen Luftfeuchte, lang- und kurzwelligen Strahlung sowie Windrichtung und -geschwindigkeit vorgegeben. Diese Daten stammen aus den Ergebnissen des Wettermodells COSMO-REA6 des Hans-Ertel-Zentrums für Wetterforschung (HErZ) und des Deutschen Wetterdiensts (Bollmeyer et al. 2015). Abbildung 2.11 zeigt die in den Modellen verwendeten Daten.

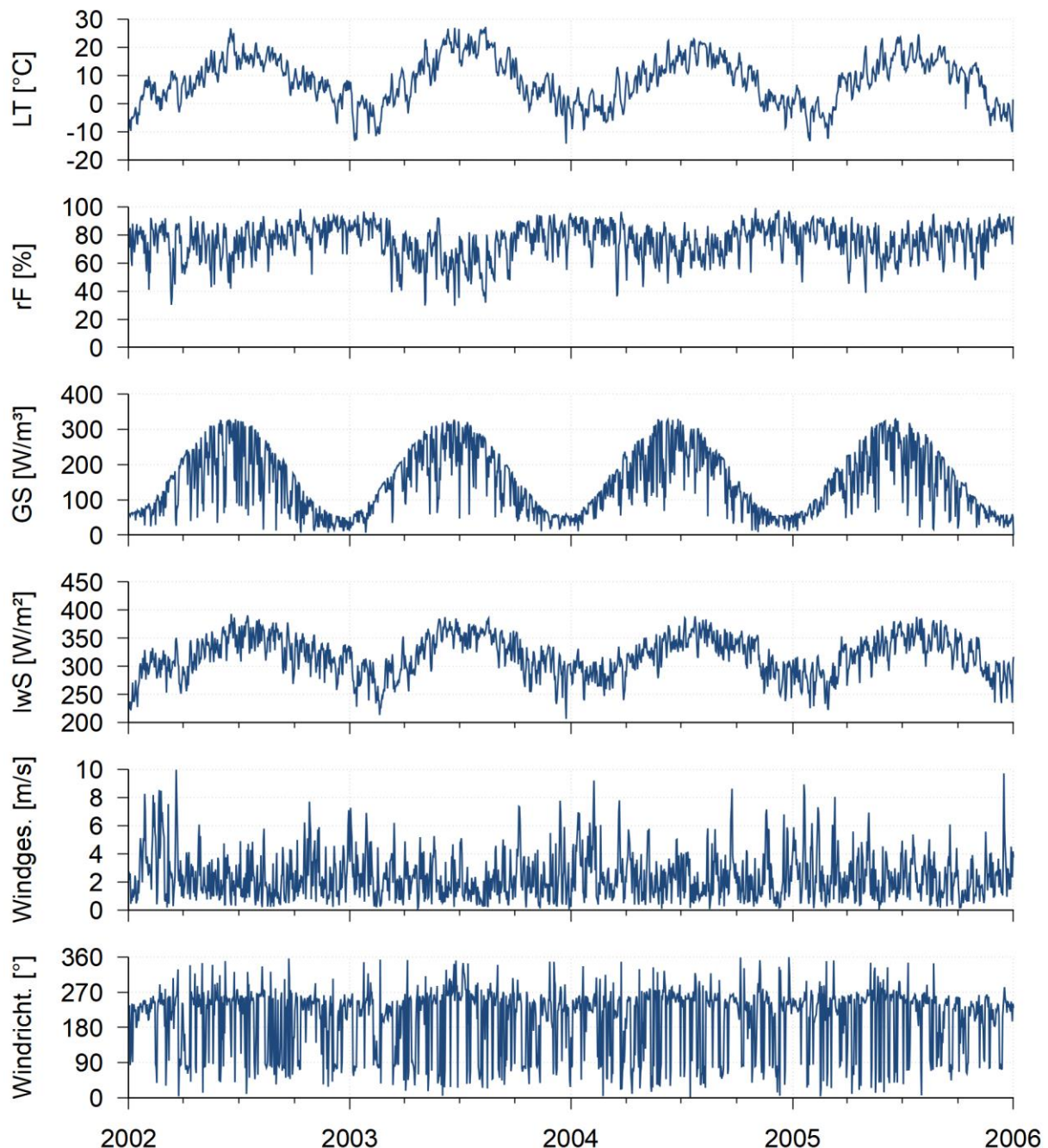


Abbildung 2.11: Meteorologische Randbedingungen aus dem Wettermodell COSMO-REA6 des DWD für den Simulationszeitraum 2002 bis 2005 (von oben nach unten: Lufttemperatur, rel. Luftfeuchte, Globalstrahlung, langwellige Strahlung, Windgeschwindigkeit und Windrichtung)

Liegende FPV-Module

Durch die Bedeckung der Seeoberfläche mit schwimmenden, liegenden Photovoltaikanlagen wird der Licht-, Impuls- und Wärmeaustausch zwischen See und Atmosphäre verändert. Diese Veränderungen werden im Modell über die meteorologischen Randbedingungen berücksichtigt. Da hierfür kaum

Erfahrungswerte vorliegen, wurde ein Konzept für den Einfluss der FPV auf die einzelnen meteorologischen Größen entwickelt und für die Szenarienberechnungen verwendet. Dabei wurden vereinfachte Annahmen getroffen, ohne vertieft auf Anlagenkonstruktionen und -materialien einzugehen. Dieses Konzept wurde auch für die im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg erstellte Modellstudie zu FPV eingesetzt (kup 2022). Die Größen wurden folgendermaßen modifiziert:

- Wind: Da die FPV nach Süden hin ausgerichtet sind, entstehen entsprechende Reihenstrukturen auf dem Gewässer. In südliche bzw. nördliche Richtungen ist daher der Windangriff weitgehend unterbunden. Im Modell wurde die Nord-/Südkomponente des Windes auf 0 m/s gesetzt. In westliche und östliche Richtung hingegen können die Reihen vom Wind durchströmt werden. Die West-/Ostkomponente des Windes wurde daher aufgrund der erhöhten Reibung und Abschattung mit einem Abschwächungsfaktor von 0,5 multipliziert.
- Lufttemperatur: Für die Luft unter den FPV-Strukturen wird angenommen, dass sich deren Temperatur unter windschwachen Verhältnissen den oberflächennahen Wassertemperaturen angleicht, bei windstarken Verhältnissen hingegen den tatsächlichen Lufttemperaturen entspricht. Im Bereich von 0 bis 6 m/s Windgeschwindigkeit (Ost-/Westkomponente) wurde hierzu die Temperatur linear zwischen beiden Temperaturkomponenten interpoliert.
- Relative Luftfeuchte: Ähnlich wie bei der Lufttemperatur wurde für die Luft unter den FPV-Strukturen angenommen, dass sie bei windschwachen Verhältnissen eine relative Luftfeuchte von 100 % und bei windstarken die tatsächliche Luftfeuchte aufweist. Hierzu wurde ebenfalls auf Grundlage der Geschwindigkeit der Ost-/Westwindkomponente linear zwischen 0 und 6 m/s interpoliert.
- Globalstrahlung: Mittels der Photovoltaikanlage wird die Globalstrahlung in elektrische Energie umgewandelt. Da im Bereich der Anlagen die Wasseroberfläche vollständig abgeschattet ist, wird im Modell in diesen Bereich die Globalstrahlung auf 0 W/m² gesetzt.
- Langwellige Einstrahlung: Da die Wasseroberfläche im Bereich der Anlagen vollständig abgeschattet ist, wirkt dort nicht die langwellige Einstrahlung aus der Atmosphäre. Stattdessen ist die Wärmeabstrahlung der über der Wasseroberfläche befindlichen FPV-Strukturen zu berücksichtigen. Diese lässt sich als Wärmeabstrahlung eines schwarzen Körpers über dessen Temperatur berechnen. Für die Temperatur wird die Lufttemperatur mit einem Zuschlag von 5 °C aufgrund der Erwärmung durch Einstrahlung auf die Strukturen verwendet.

Im Modell werden 15 %, 25 %, 35 %, 45 % und 60 % Bedeckung der Seefläche mit FPV betrachtet. Die Anlagen werden im Modell dabei zusammenhängend in der Seemitte implementiert. Abbildung 2.12 und Abbildung 2.13 zeigen die im Modell verwendeten, mit FPV bedeckten Seeflächen der drei Modellseen für die verschiedenen Bedeckungsgrade. Rechtsvorgaben zum Abstand der modellierten PV-Bedeckung vom Ufer (mind. 40 m) wurden für diese theoretischen Szenarien nicht mit einbezogen.

Im Wasserqualitätsmodell fließen die Windgeschwindigkeiten und die Globalstrahlung ein. Die Windgeschwindigkeit wird für die Berechnung des Austauschs von Sauerstoff zwischen Wasser und Atmosphäre verwendet. Aus der Globalstrahlung wird im Modell die photosynthetisch aktive Strahlung berechnet, die im Modell die Grundlage für die Berechnung der Primärproduktion bildet. Für beide Größen wurden für die mit FPV bedeckten Seeflächen die oben beschriebenen Annahmen übernommen. Im Bereich der FPV wird also zum einen der Sauerstoffaustausch zwischen Wasser und Atmosphäre verringert und zum anderen die Photosynthese und damit die Primärproduktion unterbunden.

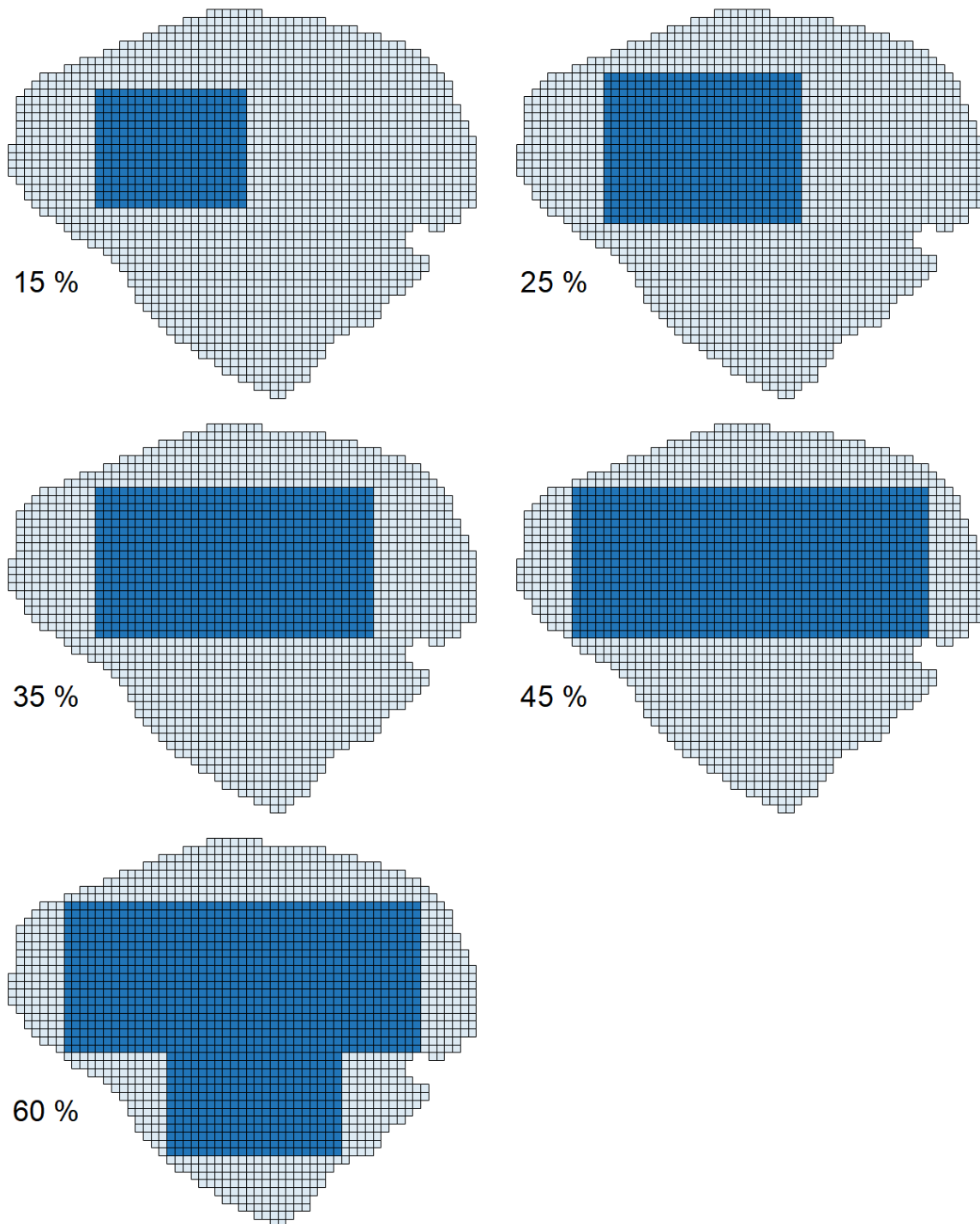


Abbildung 2.12: Im Modell verwendete, mit liegenden FPV-Modulen bedeckte Flächen auf den Modellseen 1 und 2 in blau bei Bedeckungsgraden von 15 %, 25 %, 35 %, 45 % und 60 %

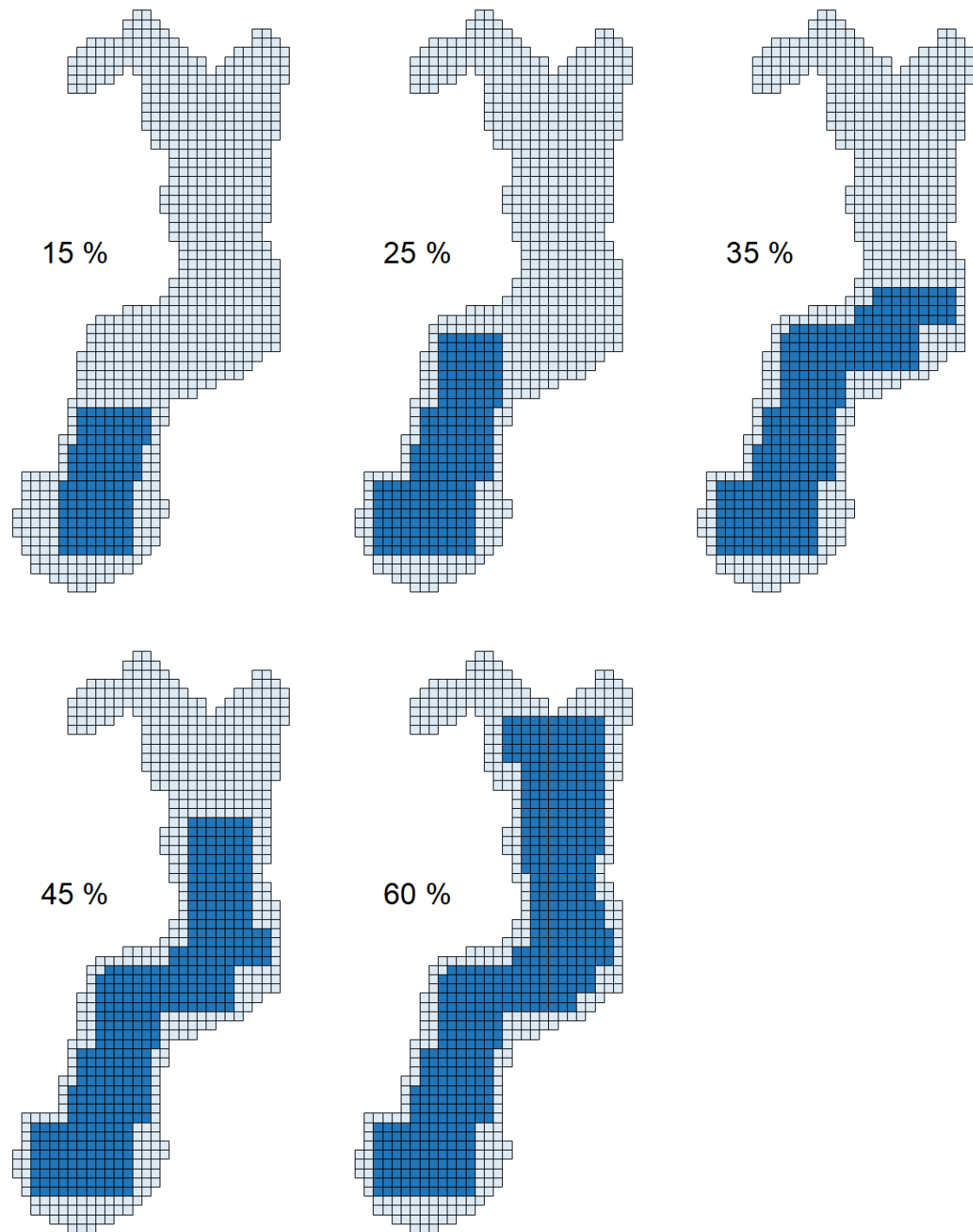


Abbildung 2.13: Im Modell verwendete, mit liegenden FPV-Modulen bedeckte Flächen auf dem Modellsee 3 in blau bei Bedeckungsgraden von 15 %, 25 %, 35 %, 45 % und 60 %

Vertikale FPV-Module

Vertikale FPV-Anlagen bestehen aus einzelnen, bifazialen PV-Modulen, die mit einem Schwimmkörper und einer Rahmenkonstruktion vertikal aufgerichtet im

Gewässer platziert werden. Die Modulflächen werden in Ost-West-Richtung ausgerichtet. Abbildung 2.14 zeigt eine Skizze einer Seitenansicht auf mehrere, in einer Reihe angeordneter Module. Die Abmessungen wurden am Markt befindlichen Modulen nachempfunden, die auf Gewässern in Deutschland bereits im Einsatz sind. Im Modell wurde der Abstand der einzelnen Module in einer Reihe auf 40 cm festgesetzt. Für den Abstand einzelner Reihen zueinander wurde ein Wert von 5 m gewählt (Abbildung 2.15). Damit liegen beide Werte im Sinne einer Worst-Case-Betrachtung hinsichtlich der Abschattung etwas unter den von Herstellern genannten Abständen.

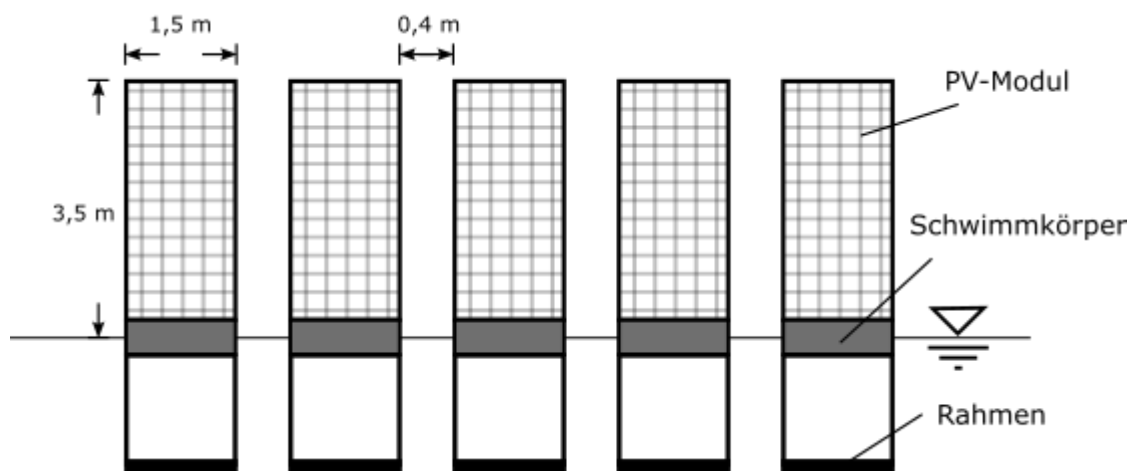


Abbildung 2.14: Schematische Darstellung vertikaler schwimmender PV-Module; Frontalansicht einer Reihe

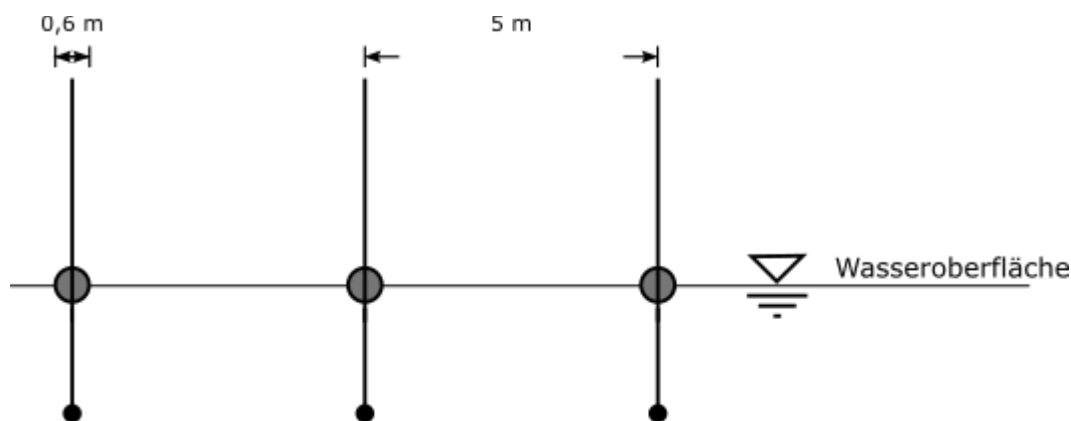


Abbildung 2.15: Schematische Darstellung vertikaler schwimmender PV-Module; Seitenansicht auf mehrere Reihen

Aus Skizzen ist bereits ersichtlich, dass die abgeschattete Fläche im Vergleich zu den liegenden FPV-Modulen mit der vertikalen Variante deutlich geringer ist. Um die Auswirkungen der vertikalen Module auf den Licht-, Impuls- und Wärmeaustausch

zwischen See und Atmosphäre im Modell berechnen zu können, wurde das bestehende, für horizontale Anlagen entwickelte Konzept entsprechend überarbeitet. In den Modellszenarien werden die verwendeten, meteorologischen Randbedingungen folgendermaßen verändert:

- Wind: Die Windabschwächung durch die Module ist aufgrund deren Ausrichtung richtungsabhängig. Die Windkomponente längs zu den Reihen (Nord-Süd-Richtung) wird nicht abgeschwächt. Für die Komponente quer zu den Reihen (West-Ost-Richtung) wird eine Abschwächung von 50 % angenommen. Bei Windrichtungen dazwischen wird entsprechend interpoliert.
- Globalstrahlung: Die Globalstrahlung setzt sich aus dem direkten und dem diffusen Anteil der Sonneneinstrahlung zusammen. In abgeschatteten Bereichen wirkt nur der diffuse Anteil. Für die Modellszenarien wurden auf Stundenbasis die durch die vertikalen Module abgeschatteten Bereiche berechnet und für diese nur der diffuse Anteil der Globalstrahlung angesetzt. Der Einfluss der Schwimmkörper der Module wurde aufgrund deren geringen Fläche vernachlässigt.
- Lufttemperatur, relative Feuchte und langwellige Strahlung: Aufgrund der nur sehr geringen Seefläche, die tatsächlich durch die Schwimmkörper der Module bedeckt wird, wird der Einfluss auf Lufttemperatur, relative Feuchte und langwellige Strahlung als vernachlässigbar angenommen.

Berechnung der Globalstrahlung in den abgeschatteten Bereichen: Je nach Bedeckungsgraden wurden auf den vorgesehenen Flächen zunächst die Reihenstrukturen platziert und daraus anschließend für den Simulationszeitraum vom 01.01.2002 bis zum 01.01.2006 auf Stundenbasis in Abhängigkeit des Sonnenstandes die abgeschatteten Seeflächen berechnet. Daraus wurde für jede Modellzelle zu jedem Zeitpunkt die Globalstrahlung aus diffusem Anteil zuzüglich je nach Abschattungsgrad dem direkten Anteil berechnet. Beide Größen sind im Rahmen der verwendeten Daten des Reanalyse-Modells COSMO-REA6 des DWD verfügbar.

Abbildung 2.16 zeigt die auf diese Weise berechnete Globalstrahlung im Bereich der FPV-Reihenstrukturen, die unveränderte Globalstrahlung außerhalb der abgeschatteten Reihen sowie die daraus berechnete prozentuale Abnahme der Globalstrahlung mit FPV. Im Jahresmittel beträgt die Abschattung durch die vertikalen FPV-Module ca. 8-12 %.

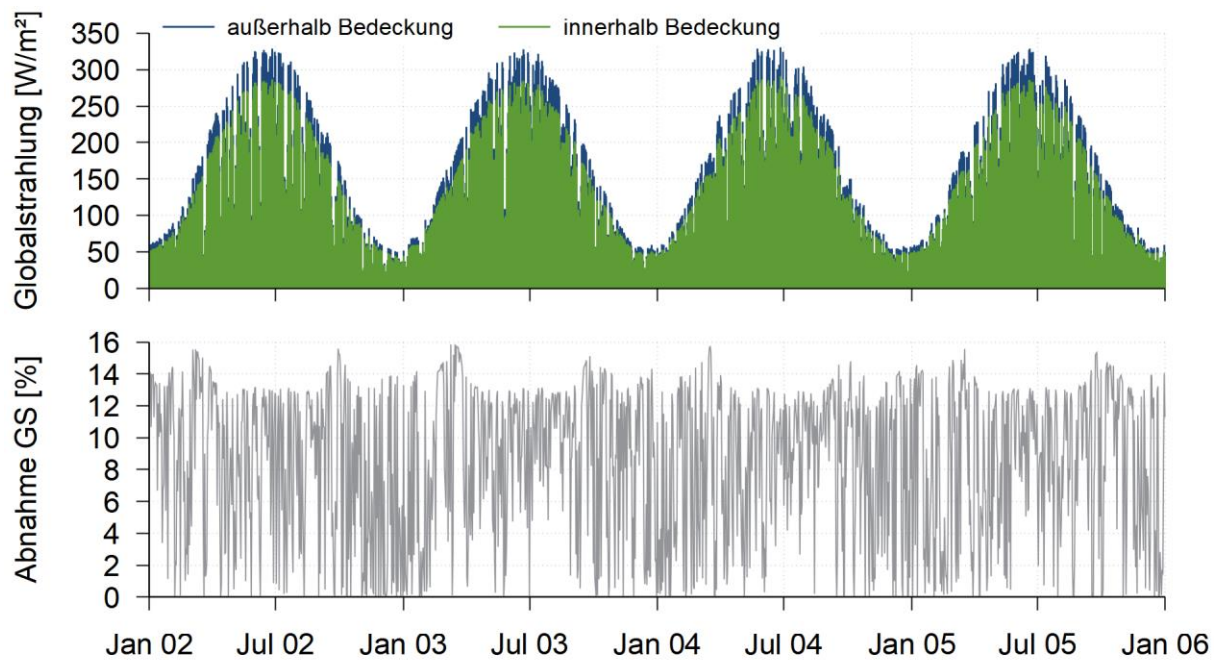


Abbildung 2.16: Berechnete Globalstrahlung (Tagesmittelwerte) innerhalb und außerhalb der Reihenstrukturen mit vertikalen FPV-Modulen (oben) sowie daraus berechnete Abnahme der Globalstrahlung mit FPV (unten) im Simulationszeitraum der Jahre 2002 bis 2006

In den Modellszenarien mit vertikalen FPV-Modulen werden Bedeckungsgrade von 35 %, 60 % und 80 % auf dem Modellsee 1 betrachtet. Abbildung 2.17 zeigt die dabei angenommenen, mit Reihenstrukturen belegten Flächen. Die Bereiche mit Bedeckungsgraden von 35 % und 60 % entsprechen den in den Szenarien mit liegenden FPV-Modulen angesetzten Bereichen. Der Bedeckungsgrad von 80 % wurde mit liegenden FPV-Modulen nicht betrachtet.

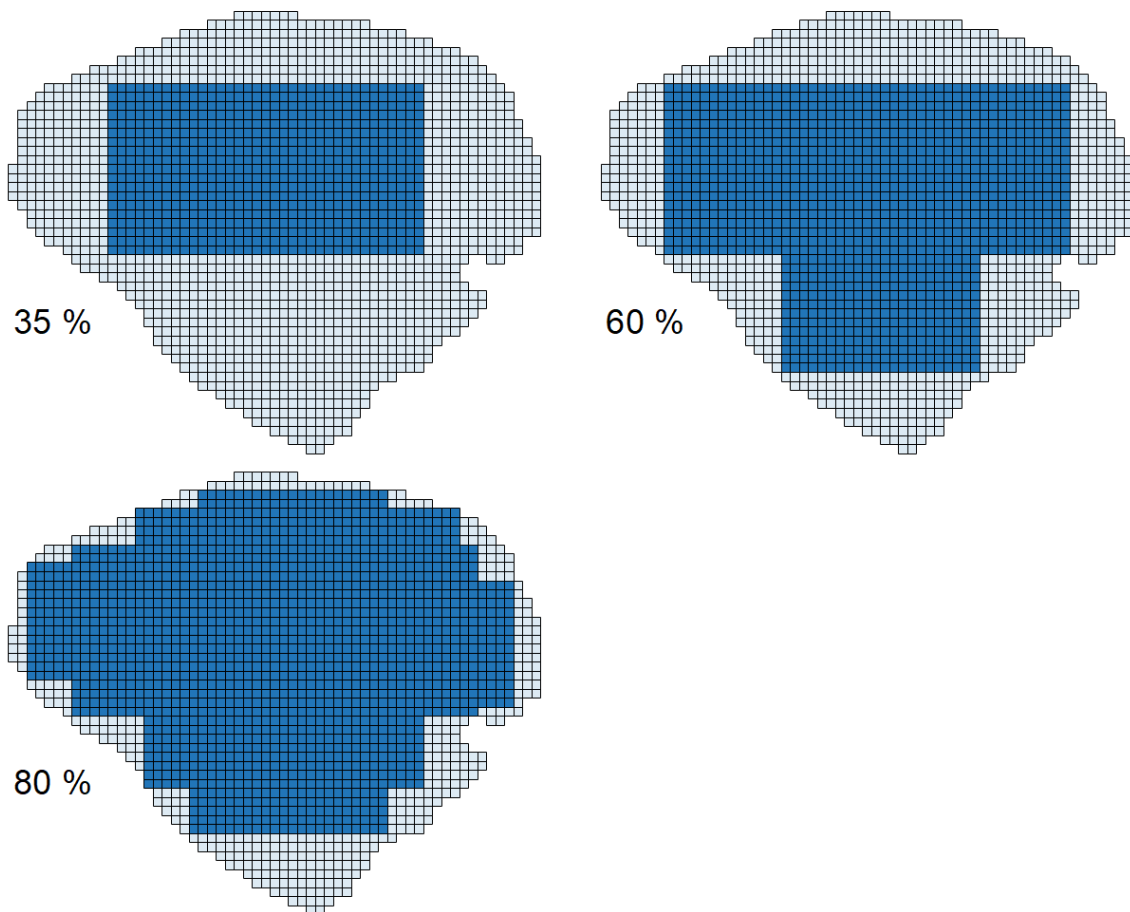


Abbildung 2.17: Im Modell verwendete, mit vertikalen FPV-Modulen bedeckte Flächen auf dem Modellsee 1 in blau bei Bedeckungsgraden von 35 %, 60 % und 80 %

Für den Abstand der einzelnen Reihen mit vertikalen FPV-Modulen wurde ein Wert von 5 m gewählt, der der Größe der im Modellsee 1 verwendeten Modellzellen entspricht. Somit werden die FPV-Module innerhalb der Bedeckungsbereiche entlang der Spalten des Modellnetzes angeordnet, wobei der Abstand der Module innerhalb einer Reihe 40 cm beträgt. Damit ergibt sich die in Tabelle 2.2 angegebene Anzahl an eingesetzten Modulen sowie die durch die Schwimmkörper der Module tatsächlich bedeckte Seefläche für jeden der drei betrachteten Bedeckungsgrade. Letztere ist im Vergleich zu den gewählten Bedeckungsgraden etwa um den Faktor 10 geringer.

Tabelle 2.2: Anzahl der vertikalen FPV-Module und damit tatsächlich bedeckter Anteil der Seefläche des Modellsees 1 für die einzelnen Modellszenarien

Modellszenario	Anzahl Module	Tatsächlich bedeckter Anteil der Seefläche [%]
Referenzsituation ohne FPV	0	0
FPV mit Bedeckungsgrad 35 %	1750	3,5
FPV mit Bedeckungsgrad 60 %	2998	6,0
FPV mit Bedeckungsgrad 80 %	4045	8,1

Folgende Modellsituationen wurden mit vertikalen FPV-Modulen für den Modellsee 1 untersucht:

- Primärproduktion durch Phytoplankton ohne Makrophyten
- Primärproduktion durch Makrophyten ohne Phytoplankton mit einer Makrophytenbedeckung von 100 % der Seefläche
- Primärproduktion durch Makrophyten mit höherem Lichtbedarf ohne Phytoplankton mit einer Makrophytenbedeckung von 100 % der Seefläche (nur Referenzszenario und Bedeckungsgrad 80 %)

3 Ergebnisse Modellszenarien

3.1 Modellsee 1: liegende FPV-Module

3.1.1 Wärmeaustauschprozesse

Unmittelbare Auswirkung der Bedeckung mit FPV ist eine Veränderung der Wärmeflüsse zwischen See und Atmosphäre. Abbildung 3.1 zeigt die vom Modell berechneten Wärmeflüsse exemplarisch für Bedeckungsgrade von 15 % und 60 % im Vergleich mit der Situation ohne Bedeckung für das Jahr 2002. Die kurzweilige Einstrahlung (Globalstrahlung) stellt den größten Anteil der Wärmezufuhr ins Gewässer dar. Mit FPV verringert sich dieser Anteil entsprechend der bedeckten Fläche. Die fühlbaren und latenten Wärmeflüsse sowie die langweilige Nettostrahlung sind fast ganzjährig mit einem Wärmeverlust für den Modellsee 1 verbunden. Mit FPV-Bedeckung verringern sich diese Verluste und wirken so dem geringeren Wärmeeintrag über die Solarstrahlung entgegen. Diese Veränderungen sind im Jahresverlauf nicht konstant. In den Herbst- und Wintermonaten ist mit FPV-Bedeckung der Wärmeverlust des Gewässers verringert. Somit kühlt der See langsamer ab. Von Februar bis Oktober ist hingegen mit Bedeckung der Wärmeeintrag ins Gewässer verringert, so dass sich dieses langsamer erwärmt. Insgesamt kommt es bei Einsatz von FPV also zu einer Verzögerung sowohl der Erwärmung als auch der Abkühlung des Gewässers, wobei das Ausmaß vom Bedeckungsgrad abhängt.

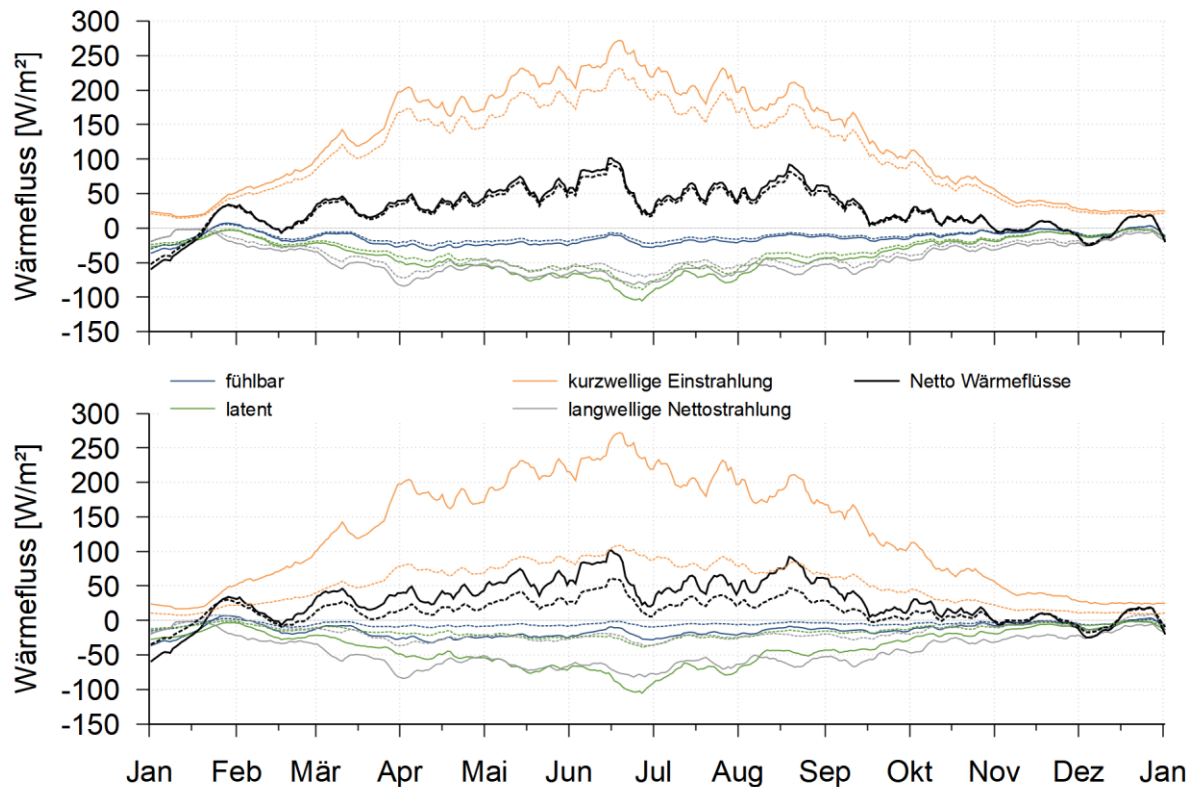


Abbildung 3.1: Wärmeflüsse der einzelnen Wärmeaustauschprozesse und Nettowärmefluss mit (gestrichelte Linien) und ohne (durchgezogene Linien) FPV-Bedeckung exemplarisch für das Jahr 2002; oben: Vergleich ohne und mit FPV auf 15 % der Seefläche; unten: Vergleich ohne und mit FPV auf 60 % der Seefläche

3.1.2 Wassertemperaturen

Eine Veränderung der Wärmeflüsse hat direkten Einfluss auf die Wassertemperaturen im Gewässer. Abbildung 3.2 zeigt die berechneten, oberflächennahen Wassertemperaturen im Modellsee 1 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden sowie die Differenzen der FPV-Szenarien zum Referenzszenario. Im Frühjahr wärmt der See mit FPV-Bedeckung langsamer auf und behält auch im Sommer geringere Wassertemperaturen. Für den Monat Juni beträgt die temperaturmindernde Wirkung der PV-Anlagen im Mittel ca. 0,4 °C pro 10 % Bedeckung. Die Abkühlung im Herbst und Winter hingegen ist verzögert und die Wassertemperaturen sind somit zeitweise in diesem Zeitraum etwas höher mit FPV-Bedeckung. Auffällig sind die kurzzeitig auftretenden, hohen Temperaturdifferenzen im März der Jahre 2003 und 2005. Mit FPV-Bedeckung werden in diesen Zeiträumen um einige Grad Celsius höhere Wassertemperaturen berechnet. Ursache hierfür sind Veränderungen bei der Eisbedeckung des Gewässers mit FPV. Abbildung 3.3 zeigt die berechneten Eisdicken auf dem Modellsee 1 im Zeitraum der Jahre 2002 bis 2005. Mit FPV-Bedeckung werden

geringere Eisdicken sowie ein früheres Abschmelzen der winterlichen Eisbedeckung berechnet. Damit kann sich im März mit FPV-Bedeckung der See bereits erwärmen, während im Szenario ohne FPV noch eine Eisbedeckung vorliegt.

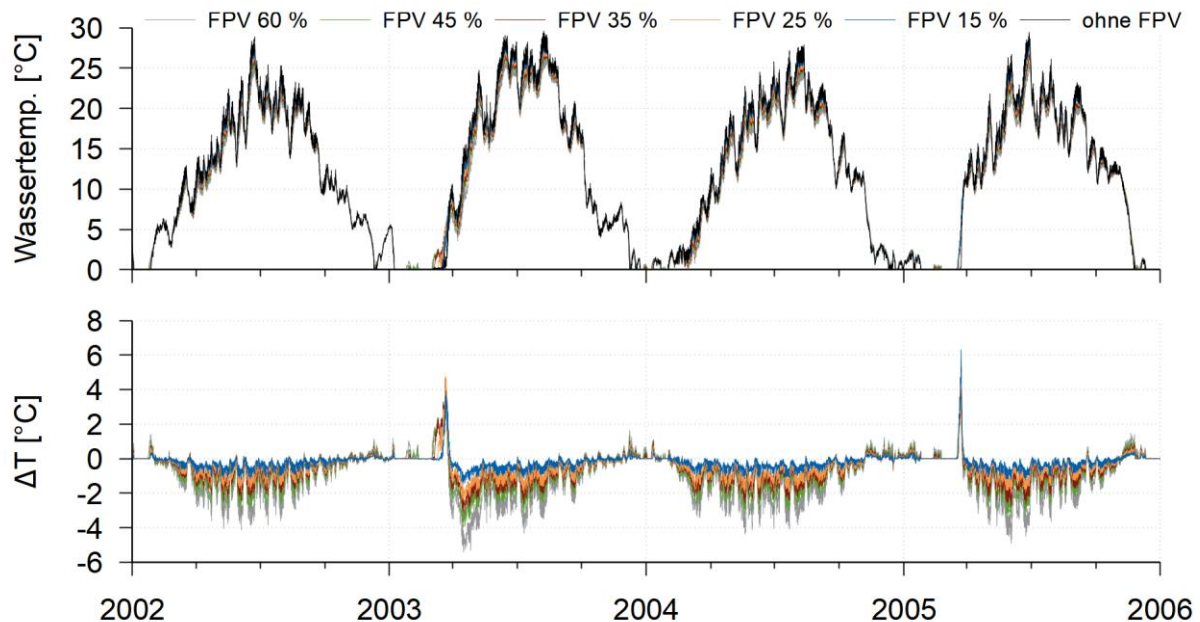


Abbildung 3.2: Berechnete Wassertemperaturen an der Wasseroberfläche des Modellsees 1 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden (oben) sowie Differenz der FPV-Szenarien zur Situation ohne FPV (unten)

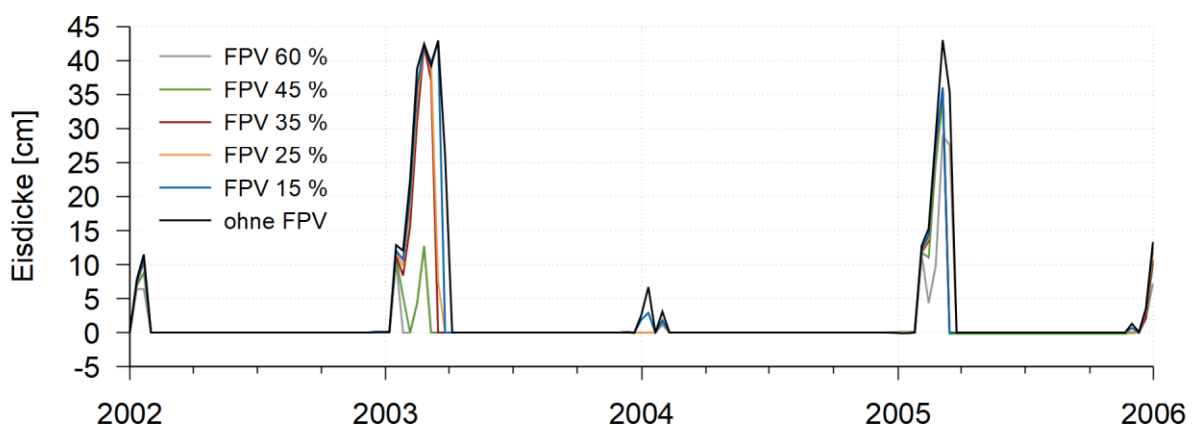


Abbildung 3.3: Berechnete Eisdicke auf dem Modellsee 1 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden

Abbildung 3.4 zeigt die berechneten Wassertemperaturen im tiefsten Bereich des Modellsees 1 im Profil für das Szenario ohne FPV sowie die Temperaturdifferenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden. Hier wird auch nochmals deutlich, dass die größten Veränderungen im Frühjahr und Sommer auftreten.

Zudem sind die Differenzen fast über den gesamten Zeitraum vertikal homogen. Die FPV-Bedeckung führt also nicht zum Aufbau einer vertikalen Dichteschichtung.

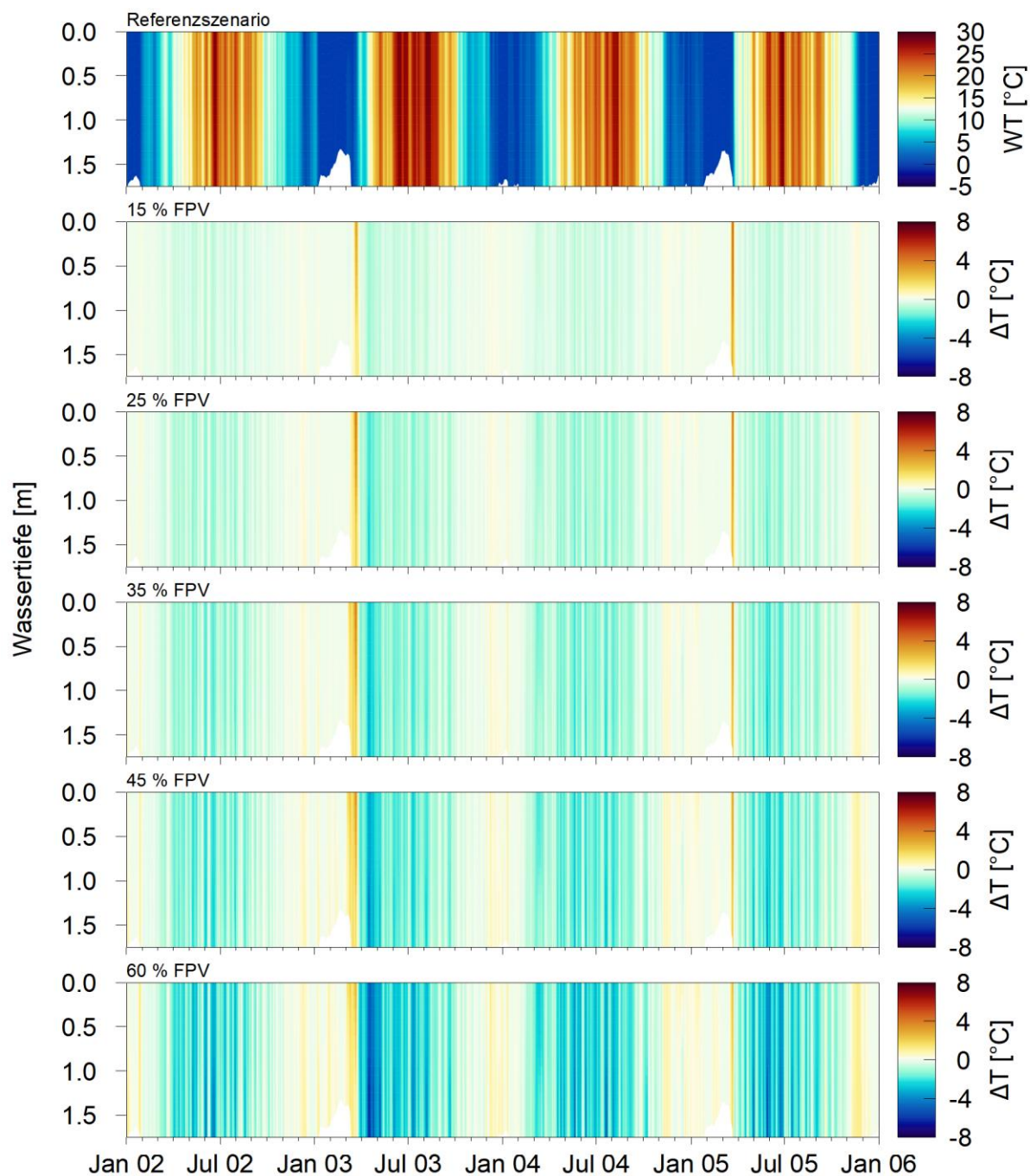


Abbildung 3.4: Berechnetes Temperaturprofil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Temperaturdifferenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im tiefsten Bereich des Modellsees 1; weiße Flächen am Grund kennzeichnen Abnahme der Wassertiefe durch Eisbedeckung

Die Bedeckung mit FPV kann zumindest temporär zu horizontalen Temperaturunterschieden im Weiher führen. Dies gilt insbesondere für heiße Sommertage mit geringen bis vernachlässigbaren Windgeschwindigkeiten und geringen Zuflussmengen. Abbildung 3.5 zeigt exemplarisch die berechneten, oberflächennahen Wassertemperaturen am 30. Juli 2002 um 12 Uhr für die Szenarien ohne und mit FPV. Neben den insgesamt abnehmenden Wassertemperaturen mit zunehmendem Bedeckungsgrad ist bei allen FPV-Szenarien der bedeckte Bereich anhand geringerer Temperaturen im Vergleich zum nicht bedeckten Bereich zu erkennen. Der Temperaturunterschied beträgt etwa bis zu 1 °C. Insgesamt überwiegen allerdings die Zeiträume, in denen der horizontale Austausch und die Strömungsgeschwindigkeit im Gewässer die Unterschiede im Wärmeaustausch mit der Atmosphäre zwischen bedeckten und nicht bedeckten Bereichen ausgleichen. Abbildung 3.6 zeigt einen Mittelwert der oberflächennahen Wassertemperaturen im Zeitraum Juni, Juli und August 2002 für die Szenarien ohne und mit FPV. Die Wassertemperaturen nehmen mit zunehmendem Bedeckungsgrad ab. Durchgehend geringere Temperaturen im Bereich der Bedeckung sind allerdings in keinem der FPV-Szenarien zu erkennen.

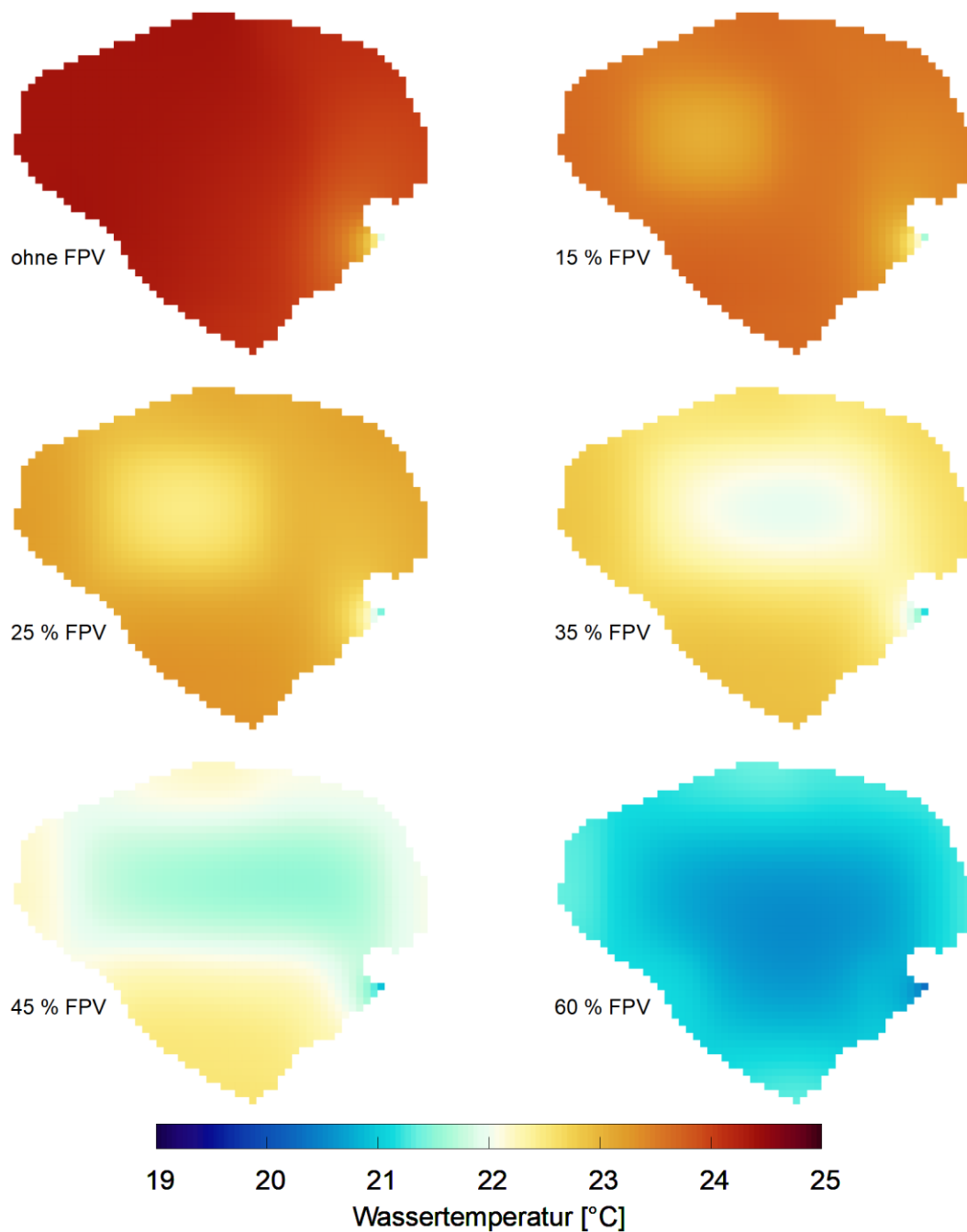


Abbildung 3.5: Berechnete, oberflächennahe Wassertemperaturen am 30.07.2002 um 12 Uhr ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 1

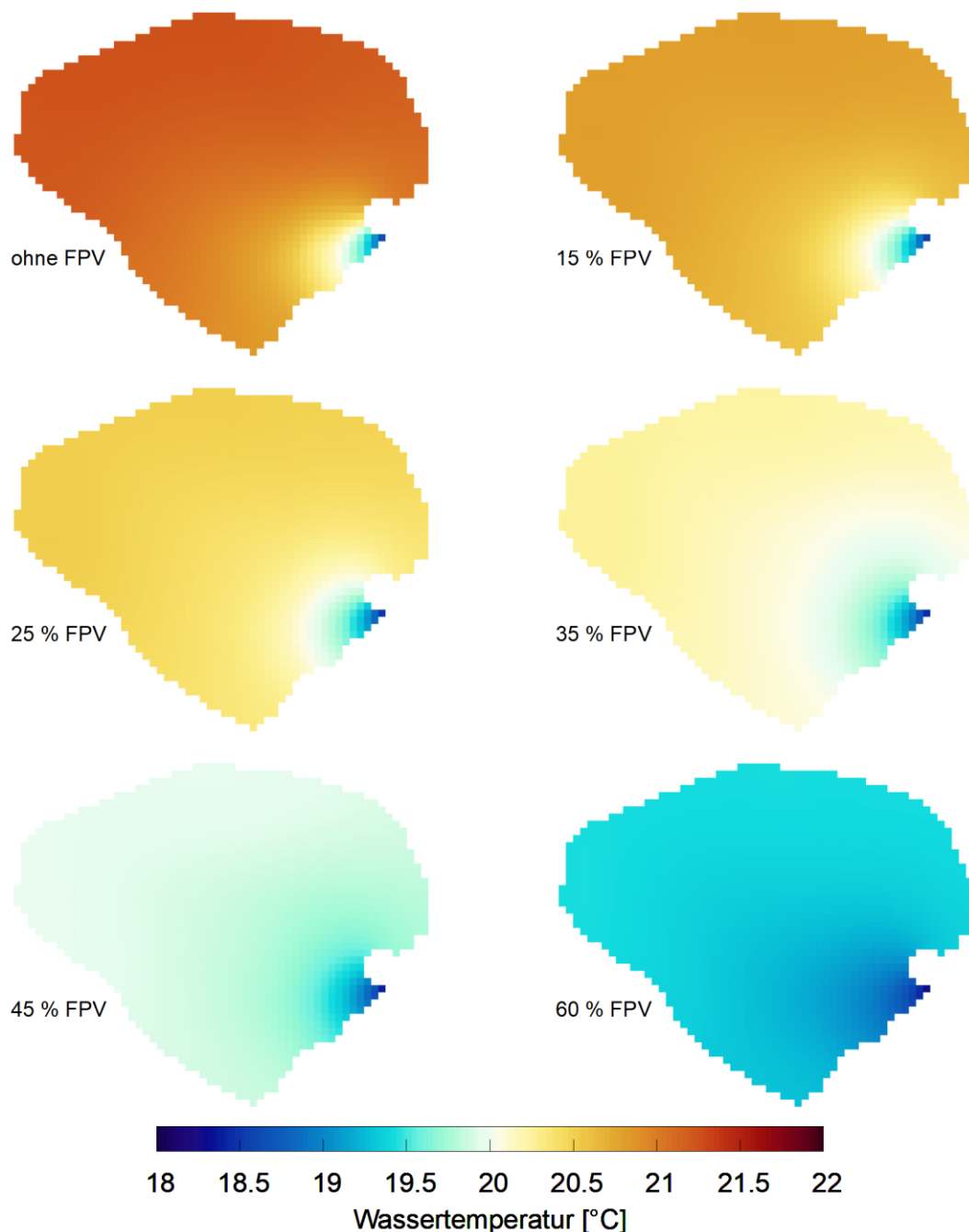


Abbildung 3.6: Berechnete, oberflächennahe Wassertemperaturen im Mittel über die Monate Juni, Juli und August 2002 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 1

3.1.3 Phytoplankton-Entwicklung und Sichttiefe

Die Primärproduktion ist licht- und temperaturabhängig. Wie oben gezeigt, nehmen die Wassertemperaturen im Sommerhalbjahr mit zunehmender FPV-Bedeckung ab. Gleichzeitig findet auf den bedeckten Flächen keine Lichteinstrahlung ins Gewässer statt. Somit ist mit FPV-Bedeckung mit einem Rückgang der Primärproduktion zu rechnen. Für den bedeckten Bereich wird angenommen, dass keine

Primärproduktion stattfindet. Abbildung 3.7 zeigt die berechneten Konzentrationen an **Chlorophyll a** im Modellsee 1 für die Modellszenarien ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im unbedeckten und tiefsten Bereich nahe dem Auslass. Bei allen FPV-Szenarien tritt die Frühjahrsblüte im Vergleich zur Situation ohne FPV je nach Bedeckungsgrad um einige Tage bis Wochen verzögert auf. Bei geringen Bedeckungsgraden ähnelt der saisonale Verlauf der Situation ohne FPV, wenn auch mit verringerten Konzentrationen. Bei einer Bedeckung von 60 % bricht die Phytoplanktongemeinschaft zeitweise oder wie im Jahr 2002 auch über die gesamte Saison zusammen.

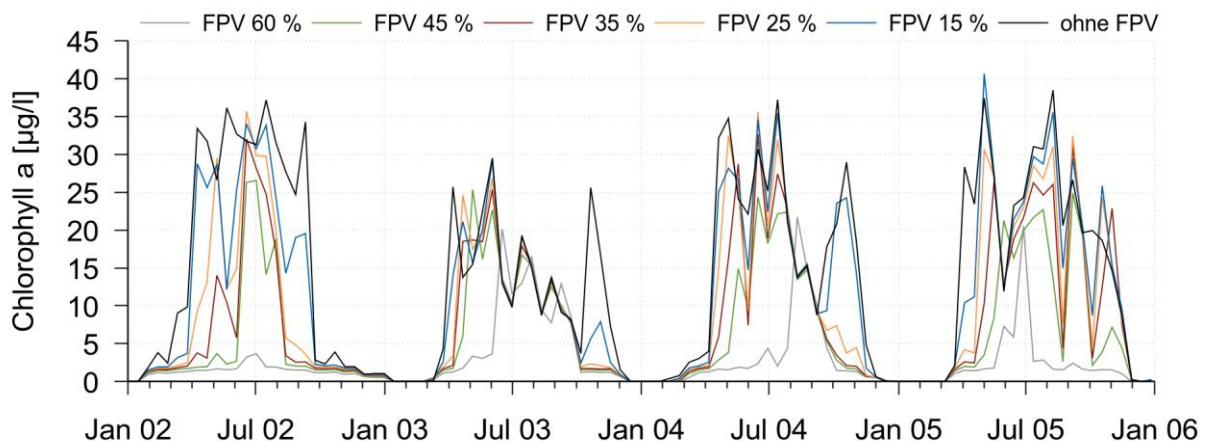


Abbildung 3.7: Berechnete Konzentrationen an Chlorophyll a ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 1 (seewerte Mittelwerte über 14 Tage)

Zwischen bedecktem und nicht bedecktem Bereich entstehen **horizontal hohe Konzentrationsunterschiede**. Abbildung 3.8 zeigt die berechneten, oberflächennahen Chlorophyll-a-Werte im Mittel über das Jahr 2002 ohne und mit FPV. Da über die horizontale Strömung Algen in bedeckte Bereiche transportiert werden können, sind die Konzentrationen dort nicht null, im Vergleich zu den nicht bedeckten Bereichen aber sehr gering.

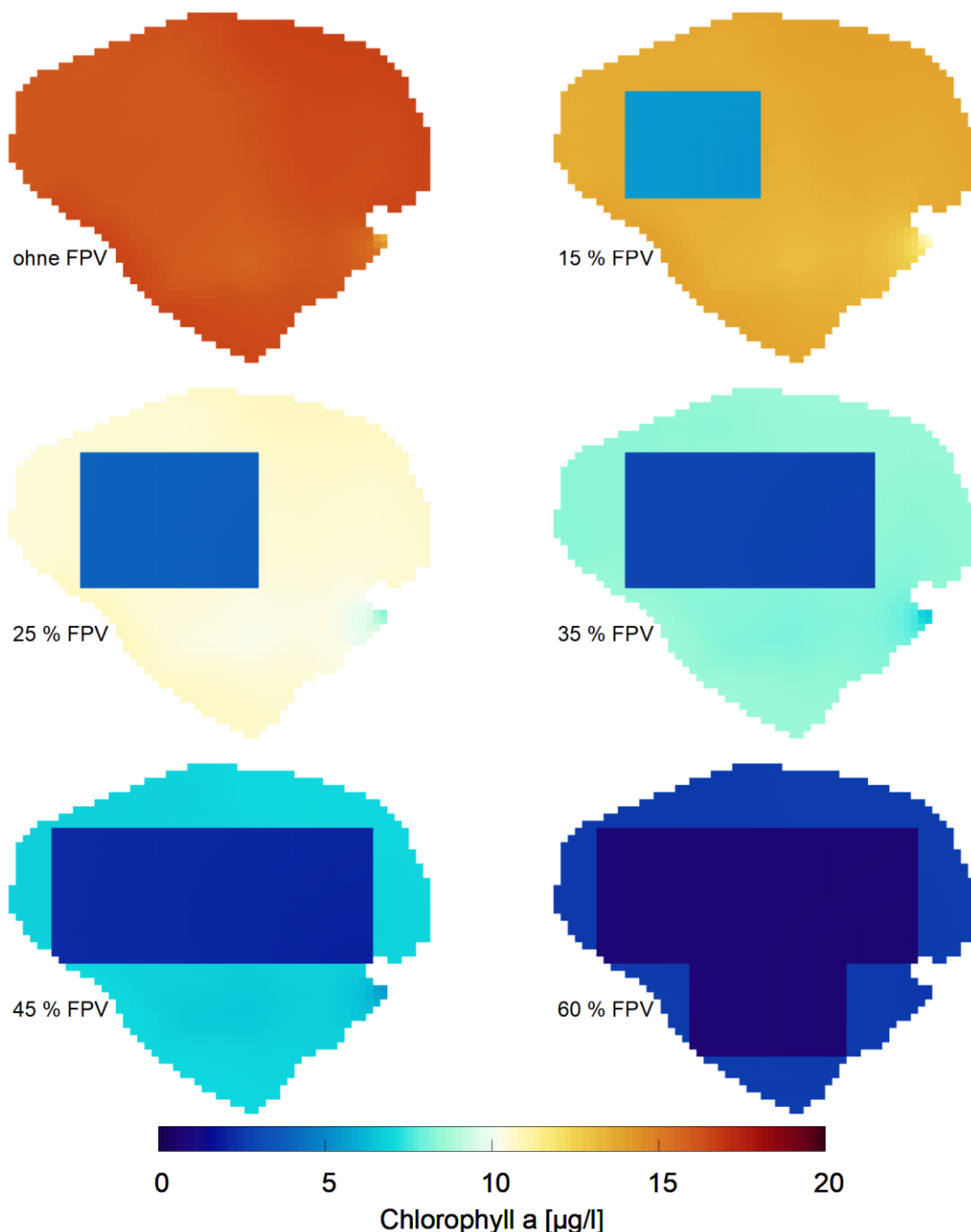


Abbildung 3.8: Berechnete, oberflächennahe Konzentrationen an Chlorophyll a im Mittel über das Jahr 2002 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 1

Im Modell sind zwei Algengruppen berücksichtigt, die einerseits Kieselalgen und andererseits alle übrigen Algen repräsentieren. In der Referenzsituation ohne FPV berechnet das Modell eine typische **saisonale Sukzession** dieser beiden Gruppen mit hohen Anteilen an Kieselalgen im Frühjahr und ggf. im Herbst und hohen Anteilen der übrigen Algen in den Sommermonaten. Im Modell wird diese Sukzession über eine entsprechende Konfiguration der licht- und temperaturabhängigen Wachstumsraten beider Gruppen gesteuert. Auf diese Weise

werden für die Gruppe der Kieselalgen bei geringerer Lichtverfügbarkeit und geringeren Wassertemperaturen im Frühjahr höhere Wachstumsraten als für die Gruppe der übrigen Algen berechnet, während es sich in den Sommermonaten bei hohen Wassertemperaturen umgekehrt verhält. Abbildung 3.9 zeigt die Modellergebnisse für die Anteile beider Algengruppen für die Szenarien ohne und mit FPV. Mit zunehmender Bedeckung nehmen die Anteile an Kieselalgen deutlich ab, während die übrigen Algen zumindest bei geringen Bedeckungsgraden zeitweise höhere Konzentrationen erreichen als in der Referenzsituation ohne FPV (z. B. Frühjahr 2005). Entscheidend hierfür dürfte die höhere Sinkgeschwindigkeit der Kieselalgen sein, die dazu führt, dass deren Möglichkeit, Licht aufzunehmen, geringer sind. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass im Hinblick auf die tatsächlich im Gewässer vorliegende, deutlich komplexere Phytoplanktongemeinschaft mit einer FPV-Bedeckung Arten mit geringeren Sinkgeschwindigkeiten und ggf. aktiven Fortbewegungsmöglichkeiten Wachstumsvorteile aufweisen.

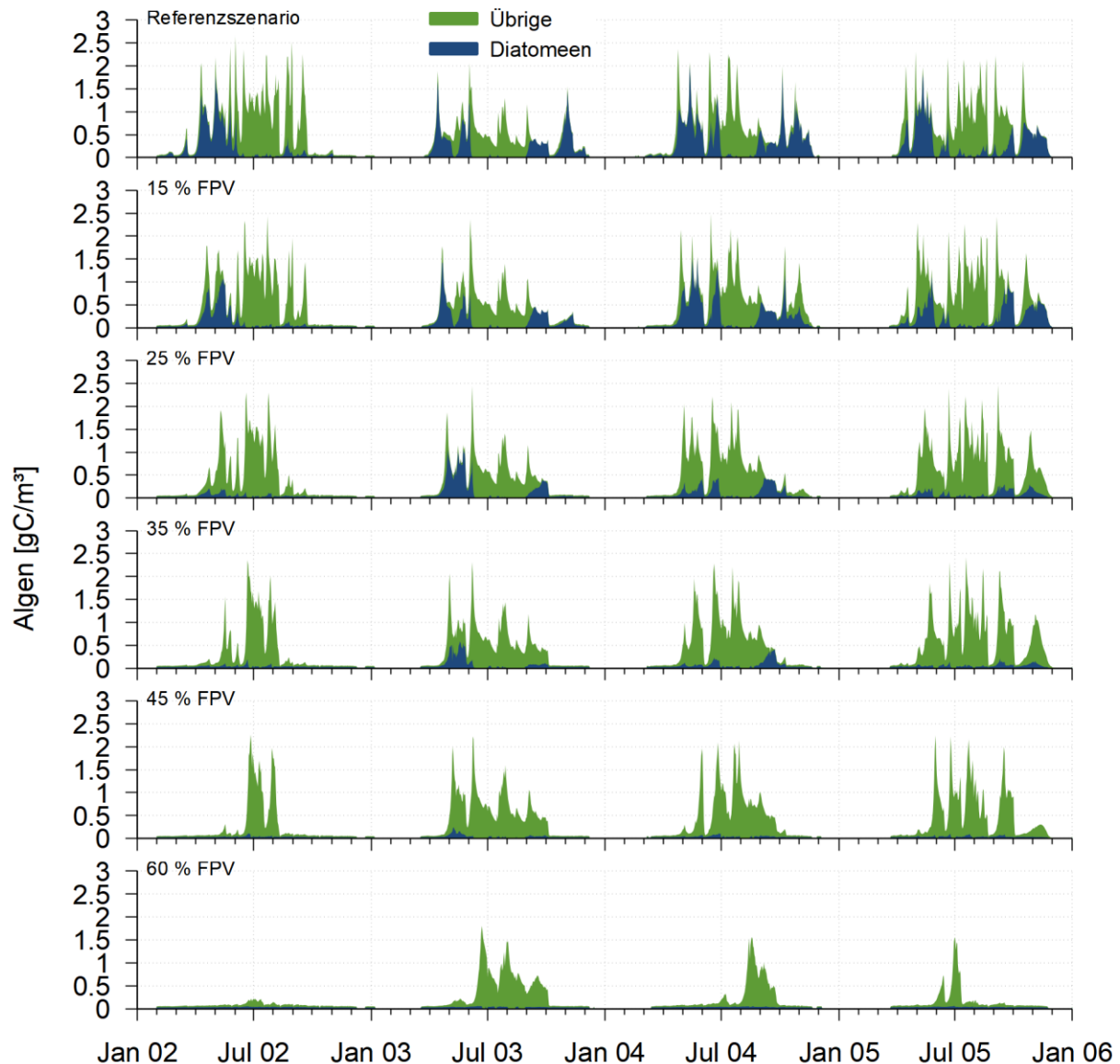


Abbildung 3.9: Berechnete Algenkonzentrationen für die beiden Modellgruppen Diatomeen und übrige Algen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 1 im unbedeckten Bereich nahe dem Auslass

Abbildung 3.10 zeigt die berechnete jährliche **Nettoprimärproduktion** ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden. Tabelle 3.1 listet die dazugehörigen Zahlenwerte mit Angabe der prozentualen Abnahme mit FPV-Bedeckung auf. Die Produktivität des Gewässers nimmt mit zunehmendem FPV-Bedeckungsgrad ab. Dabei variiert die prozentuale Abnahme bei gleichbleibendem Bedeckungsgrad von Jahr zu Jahr. Im betrachteten Zeitraum ist die Abnahme im Jahr 2002 am stärksten und im darauffolgenden Jahr 2003 am geringsten. Die Abflussspende des Zuflusses im Modellsee 1 war im Jahr 2002 überdurchschnittlich, während sie im Jahr 2003 unterdurchschnittlich ausfiel. Die damit im Jahr 2003 höheren Verweilzeiten des Wassers im Weiher bei gleichzeitig höheren Wassertemperaturen als im Jahr 2002

dürften für die geringere Abnahme der Primärproduktion mit FPV-Bedeckung im Jahr 2003 verantwortlich sein. Die Unterschiede zwischen beiden Jahren im Referenzszenario ohne FPV sind ebenfalls auf die Abflussspende zurückzuführen. Da die Zuflusskonzentrationen der Nährstoffe im Modell zeitlich konstant sind, sind die in den Weiher eingetragenen Nährstofffrachten direkt vom Abfluss abhängig.

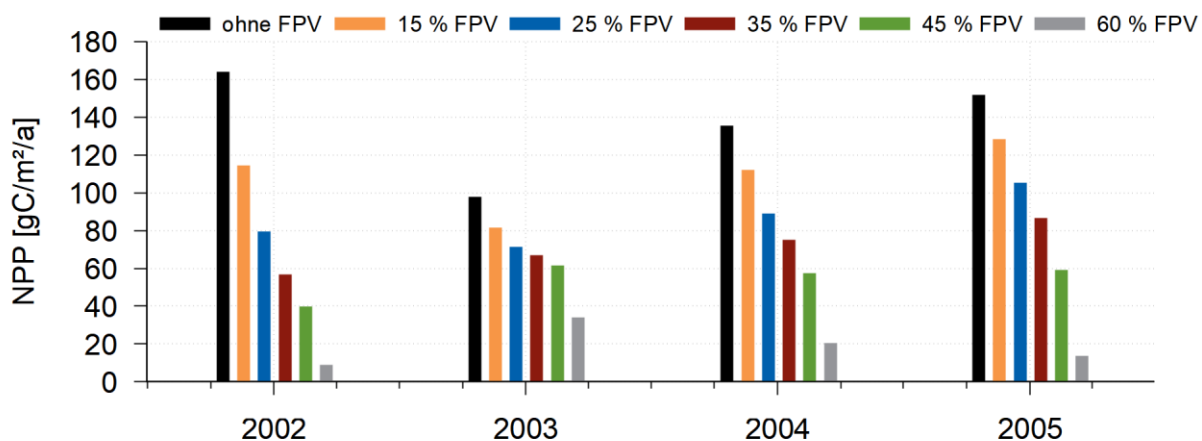


Abbildung 3.10: Berechnete jährliche Nettoprimärproduktion ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 1

Tabelle 3.1: Berechnete, jährliche Nettoprimärproduktion in gC/m²/a im Modellsee 1 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden sowie prozentuale Abnahme mit FPV im Vergleich zur Situation ohne FPV

Jahr	Ohne FPV	15 % FPV	25 % FPV	35 % FPV	45 % FPV	60 % FPV
2002	164,1	114,4 (-30,2 %)	79,5 (-51,6 %)	56,8 (-65,4 %)	39,9 (-75,7 %)	8,9 (-94,6 %)
2003	97,7	81,8 (-16,3 %)	71,3 (-27,1 %)	67,1 (-31,3 %)	61,5 (-37,1 %)	34,2 (-65,0 %)
2004	135,4	112,3 (-17,1 %)	89,1 (-34,2 %)	75,1 (-44,6 %)	57,3 (-57,7 %)	20,3 (-85,0 %)
2005	151,8	128,5 (-15,4 %)	105,5 (-30,5 %)	86,7 (-42,9 %)	59,2 (-61,0 %)	13,9 (-90,9 %)

Fazit

Es lässt sich festhalten, dass die Bedeckung eines Gewässers mit FPV generell zu einer Abnahme der Primärproduktion führt. Das Ausmaß der Abnahme ist dabei abhängig vom Bedeckungsgrad sowie weiteren Einflussfaktoren, insbesondere der Wasseraustauschrate des Sees. Zu beachten ist, dass die Modellergebnisse auf der Annahme beruhen, dass sich die Algengemeinschaft durch FPV-Nutzung nicht grundlegend ändert. Tatsächlich ist aber eine Anpassung der Zusammensetzung der vorherrschenden Algenarten an die neuen Verhältnisse wahrscheinlich, so dass eine effizientere Nutzung der vorhandenen Ressourcen möglich ist und die Abnahme der Produktivität geringer ausfällt als prognostiziert.

Folgeeffekt einer verringerten Primärproduktion durch Phytoplankton ist eine Zunahme der **Sichttiefe**. Abbildung 3.11 zeigt die berechneten Sichttiefen im Modellsee 1 für die Szenarien ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden. Mit zunehmendem Bedeckungsgrad steigt aufgrund der verringerten Lichtextinktion durch das Phytoplankton die Sichttiefe im Weiher an. Dies kann, je nach Gewässer, die Wachstumschancen von Makrophyten vergrößern und zu Makrophytendominanz in vorher algentrüben Gewässern oder zu höheren Bedeckungsgraden von Makrophyten führen.

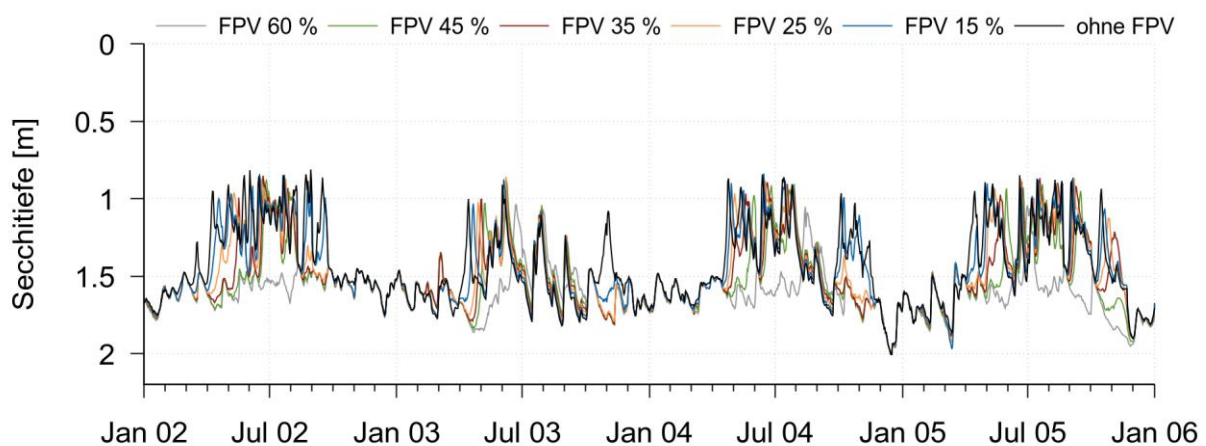


Abbildung 3.11: Berechnete Sichttiefen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 1 nahe dem Auslass

3.1.4 Primärproduktion Makrophyten

Neben den Auswirkungen der FPV-Bedeckung auf das Phytoplankton wurden mit dem Modell auch die Auswirkungen auf das Makrophytenwachstum betrachtet. Hierzu wurden zwei Szenarien mit Bewuchsflächen von 50 % und 100 % der Gewässerfläche definiert und mit dem Modell die Situation ohne und mit FPV für die verschiedenen Bedeckungsgrade berechnet.

Abbildung 3.12 zeigt exemplarisch die berechnete **Biomasse an Makrophyten** bei 100 % Bewuchsfläche im Modellsee 1 während der Wachstumsphase im Mai 2002 für die Situation ohne und mit FPV bei Bedeckungsgraden von 15 % und 60 %. Die maximale flächenbezogene Makrophytenbiomasse wird als Modellparameter vorgegeben und beträgt für die gezeigten Modellszenarien 500 gC/m². Da unter die FPV-Anlagen keine Sonneneinstrahlung gelangt, findet direkt unter den mit FPV bedeckten Flächen kein Makrophytenwachstum statt. Somit schrumpft die Makrophytenbiomasse im Sommer im Gewässer in Abhängigkeit der mit FPV bedeckten Bewuchsfläche. Abbildung 3.13 und Abbildung 3.14 zeigen die berechneten mittleren Biomassen an Makrophyten bei 50 % und 100 %

Bewuchsfläche im Modellsee 1 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden. Mit der maximalen flächenbezogenen Makrophytenbiomasse von 500 gC/m^2 beträgt der maximale, seeweite Mittelwert beim Szenario mit 50 % Bewuchsfläche 250 gC/m^2 . Die Abnahme der Biomasse mit FPV entspricht im Modell dem Anteil der jeweiligen, mit FPV bedeckten Bewuchsfläche. Tatsächlich dürfte die Abnahme der Biomasse etwas geringer ausfallen, da an den Rändern der FPV-Bedeckung Schwachlichtarten bis zu einem gewissen Grad auch noch unter den Modulrändern wachsen können. Dieser Aspekt ist im Modell nicht berücksichtigt.

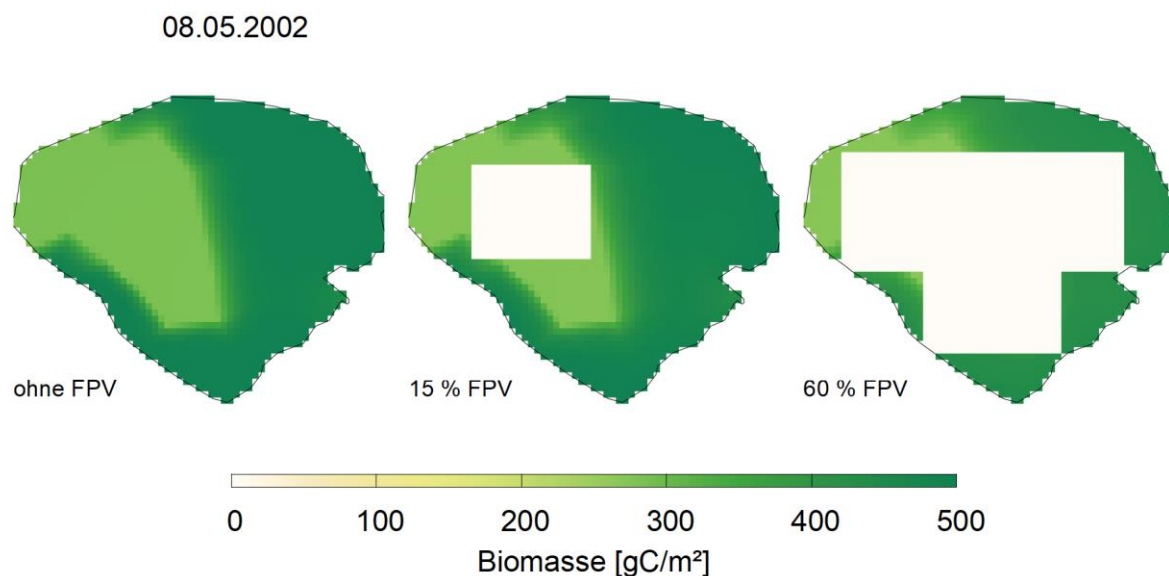


Abbildung 3.12: Berechnete Biomasse an Makrophyten bei 100 % Bewuchsfläche ohne FPV (links) sowie mit FPV bei Bedeckungsgraden von 15 % (Mitte) und 60 % (rechts) im Modellsee 1 am 8. Mai 2002

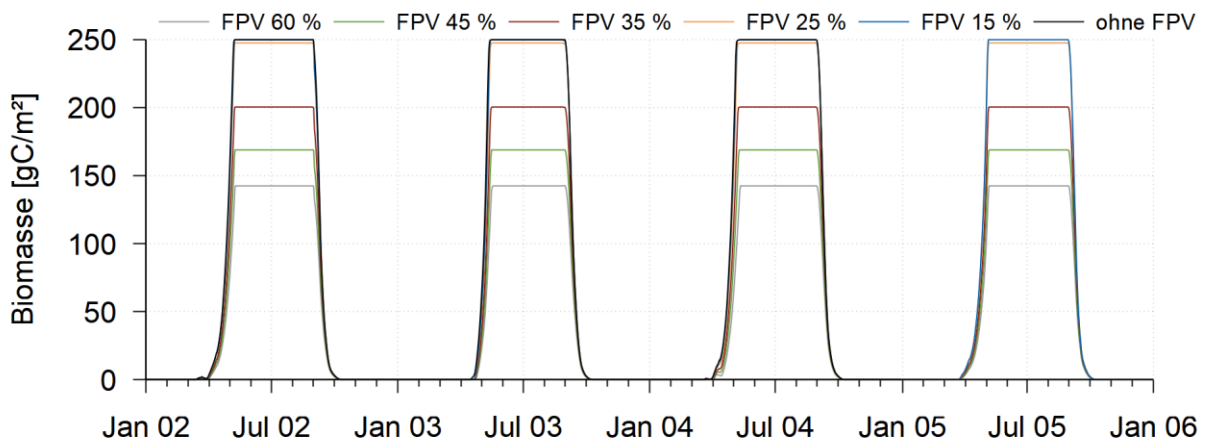


Abbildung 3.13: Berechnete mittlere Biomasse an Makrophyten bei 50 % Bewuchsfläche im Modellsee 1 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden

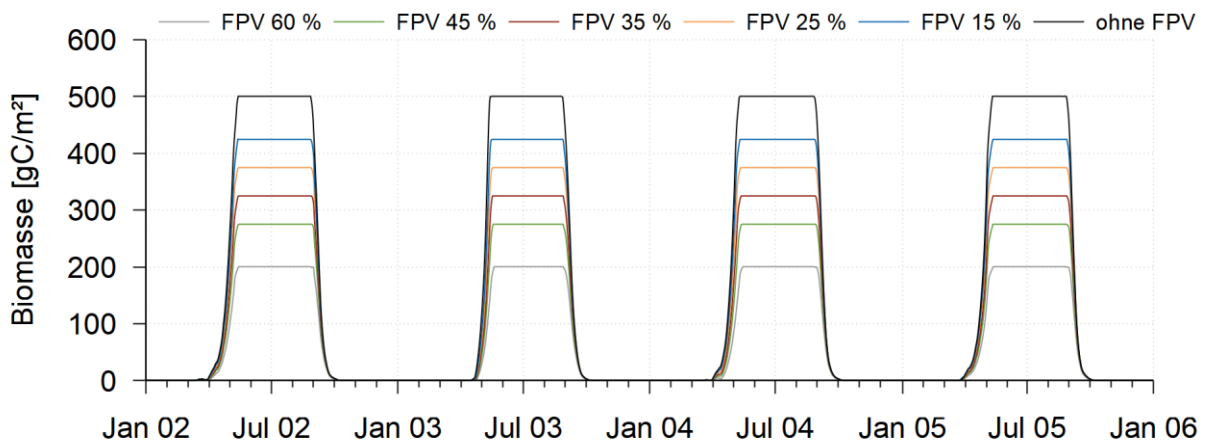


Abbildung 3.14: Berechnete mittlere Biomasse an Makrophyten bei 100 % Bewuchsfläche im Modellsee 1 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden

Ein weiterer Effekt der FPV-Bedeckung auf das **Makrophytenwachstum** entsteht aufgrund der **veränderten Wassertemperaturen** im Gewässer mit FPV. Mit zunehmendem Bedeckungsgrad verzögert sich die Erwärmung des Wassers im Frühjahr sowie die Abkühlung im Herbst. Da das Makrophytenwachstum temperaturabhängig ist, führt dies mit FPV-Bedeckung an nicht bedeckten Bereichen zu einem späteren Makrophytenwachstum im Frühjahr und einem späteren Absterben im Herbst. Abbildung 3.15 zeigt exemplarisch für das Jahr 2002 die berechneten Makrophytenbiomassen ohne und mit FPV an einem Punkt im nördlichen, nicht bedeckten Teil des Sees. Dort wird in allen Szenarien im Sommer die maximale flächenbezogene Biomasse von 500 gC/m² erreicht. Die beschriebene Verzögerung ist abhängig vom Bedeckungsgrad und beträgt einige Tage bis wenige Wochen.

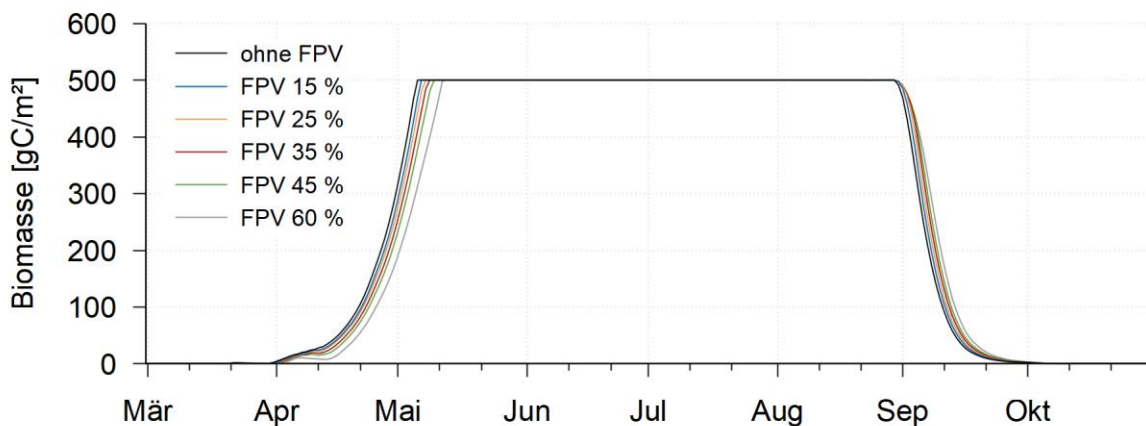


Abbildung 3.15: Berechnete Biomasse an Makrophyten an einer nicht mit FPV bedeckten Position im nördlichen Teil des Modellsees 1 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Jahr 2004

3.1.5 Sauerstoffgehalt

Die folgende Betrachtung bezieht sich auf den phytoplanktondominierten Zustand. Veränderungen bei der Primärproduktion wirken sich direkt auf die Sauerstoffverhältnisse im Gewässer aus. Zum einen wird die Sauerstoffproduktion durch eine verringerte Photosynthese verringert, zum anderen nimmt die Biomasse im Gewässer und somit die Sauerstoffzehrung ab. Beide Prozesse wirken also entgegengesetzt, wobei sich im Rahmen der Modellprüfung für den Modellsee 1 gezeigt hat, dass sich der Einfluss der Sauerstoffzehrung auf die Sauerstoffkonzentrationen im Gewässer aufgrund der geringen Wassertiefe und der ungeschichteten Verhältnisse kaum identifizieren lässt. Abbildung 3.16 zeigt die berechneten Sauerstoffkonzentrationen ohne und mit FPV mit den verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 1. Die Variabilität in den Sommermonaten ist mit Ausnahme des Szenarios mit einem Bedeckungsgrad von 60 % bei allen Szenarien hoch. Im Jahresmittel sinken die Sauerstoffkonzentrationen mit zunehmenden Bedeckungsgrad ab, da die Übersättigungen im Sommer geringer ausfallen. Aufgrund des zeitlich versetzten Auftretens von Algenblüten in den verschiedenen Szenarien sind jedoch die Differenzen zwischen den Szenarien ohne und mit FPV zeitlich hoch variabel. Insgesamt liegen die Minimalwerte der Sauerstoffkonzentration mit FPV nicht unter denen des Szenarios ohne FPV. Ein negativer Einfluss der Bedeckung auf die Sauerstoffkonzentrationen lässt sich hier somit nicht identifizieren. Grund hierfür ist sicherlich auch die hohe Wasseraustauschrate des Weihers, die eine Stagnation des Wasserkörpers und somit einen stärkeren Einfluss von Zehrungsprozessen auf die Sauerstoffkonzentrationen verhindert. Dies bestätigen auch die Ergebnisse der Modellszenarien mit verringerter Durchflussrate für den Modellsee 3 (Kapitel 3.6).

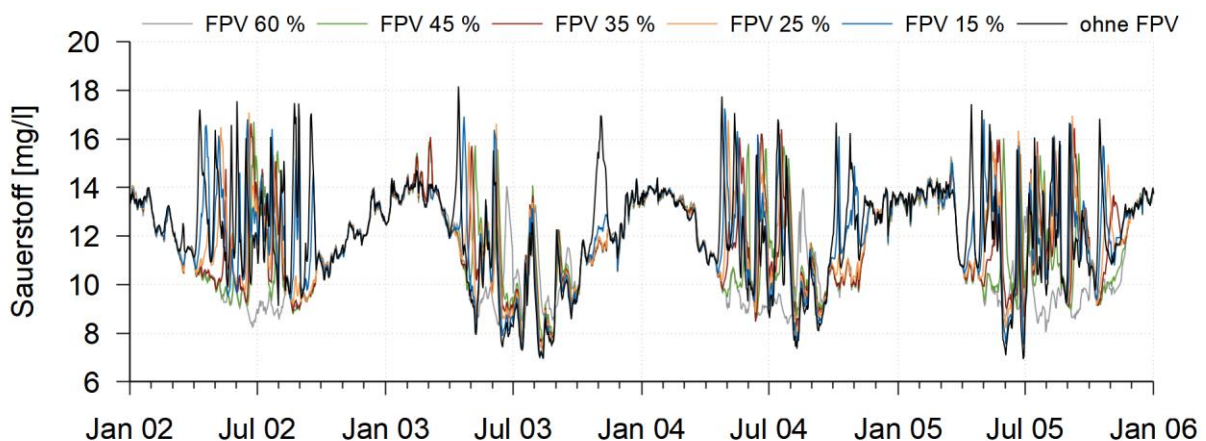


Abbildung 3.16: Berechnete Sauerstoffkonzentrationen oberflächennah ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 1 im unbedeckten Bereich nahe dem Auslass

Einfluss der Eisbedeckung

In den für die Szenarienberechnungen verwendeten Modellversionen für die Berechnung der Wasserqualität ist der durch eine Eisbedeckung auf dem Gewässer verringerte bzw. verhinderte Stoffaustausch zwischen Wassersäule und Atmosphäre nicht berücksichtigt. Dies betrifft z. B. den Sauerstoffaustausch zwischen Gewässer und Atmosphäre, der auftritt, falls im Gewässer keine Sättigungskonzentrationen vorliegen. Um zu untersuchen, welchen Einfluss dieser Effekt auf die Sauerstoffkonzentrationen im Winter hat, wurde ein zusätzliches Modellszenario für das Modellsee 1 berechnet, in dem der Sauerstoffaustausch mit der Atmosphäre in Zeiträumen mit Eisbedeckung unterbunden ist. Abbildung 3.17 zeigt die Ergebnisse der oberflächennahen Sauerstoffkonzentrationen im Vergleich mit dem Referenzszenario. In den Zeiträumen mit Eisbedeckung sinkt in der Modellversion ohne Sauerstoffaustausch die Konzentration im Weiher deutlich ab. Dies ist im Februar/März 2005 mit einer Abnahme um ca. 5 mg/l am ausgeprägtesten. Ursache der Sauerstoffabnahme ist die fortlaufende Mineralisierung von abgestorbener Biomasse im und auf dem Sediment. Trotz der signifikanten Abnahme der Sauerstoffkonzentrationen sind die Werte aufgrund der hohen Sättigungskonzentrationen im Winter immer noch hoch. Kritische Sauerstoffkonzentrationen werden nicht erreicht. Mit einer Bedeckung des Gewässers mit FPV dürfte der Effekt der Sauerstoffzehrung unter Eis geringer ausfallen. Zum einen ist die Produktivität des Gewässers und damit die entstehende Biomasse geringer und zum anderen nehmen mit FPV die Zeiträume mit Eisbedeckung tendenziell ab.

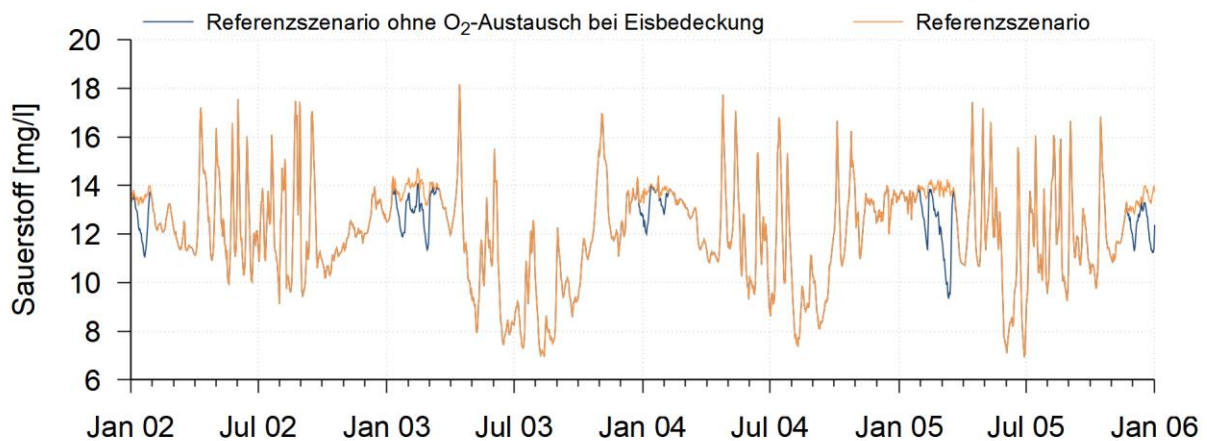


Abbildung 3.17: Berechnete Sauerstoffkonzentrationen ohne FPV mit dem Referenzmodell sowie mit einer Modellversion ohne Sauerstoffaustausch mit der Atmosphäre in Zeiträumen mit Eisbedeckung im Modellsee 1

3.1.6 Nährstoffe

Wie oben gezeigt nimmt die Primärproduktion mit FPV-Bedeckung ab. Damit verringert sich grundsätzlich auch die Nährstoffzehrung im Gewässer. Abbildung 3.18 zeigt die Konzentrationsverläufe an Phosphatphosphor, Nitrat- und Ammoniumstickstoff sowie Silizium ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 1. Wie auch beim Sauerstoff ist die Variabilität der Konzentrationen aufgrund kurzfristig auftretender Algenblüten hoch. Deren zeitlich versetztes Auftreten führt zudem auch zu einer zeitlich hohen Variabilität der Differenzen zwischen den Szenarien ohne und mit FPV. In Abbildung 3.19 sind zusätzlich die Jahresmittelwerte dieser Nährstoffe für die einzelnen Szenarien dargestellt. Die Phosphat-, Nitrat- und Siliziumkonzentrationen im Modellsee 1 nehmen mit zunehmendem Bedeckungsgrad aufgrund der geringeren Primärproduktion zu. Die Konzentrationen an Ammoniumstickstoff nehmen hingegen im Mittel ab. Ammoniumstickstoff spielt bei der Primärproduktion eine untergeordnete Rolle, da die Konzentrationen im Sommer sehr gering sind. Im Winter bei geringeren Nitrifikationsraten hingegen steigen die Ammoniumkonzentrationen aufgrund der Mineralisierung von Biomasse auf dem Sediment an. Da bei den FPV-Bedeckungsszenarien die produzierte Biomasse geringer ist, ist auch die Menge des bei der Mineralisierung freigesetzten Ammoniums geringer.

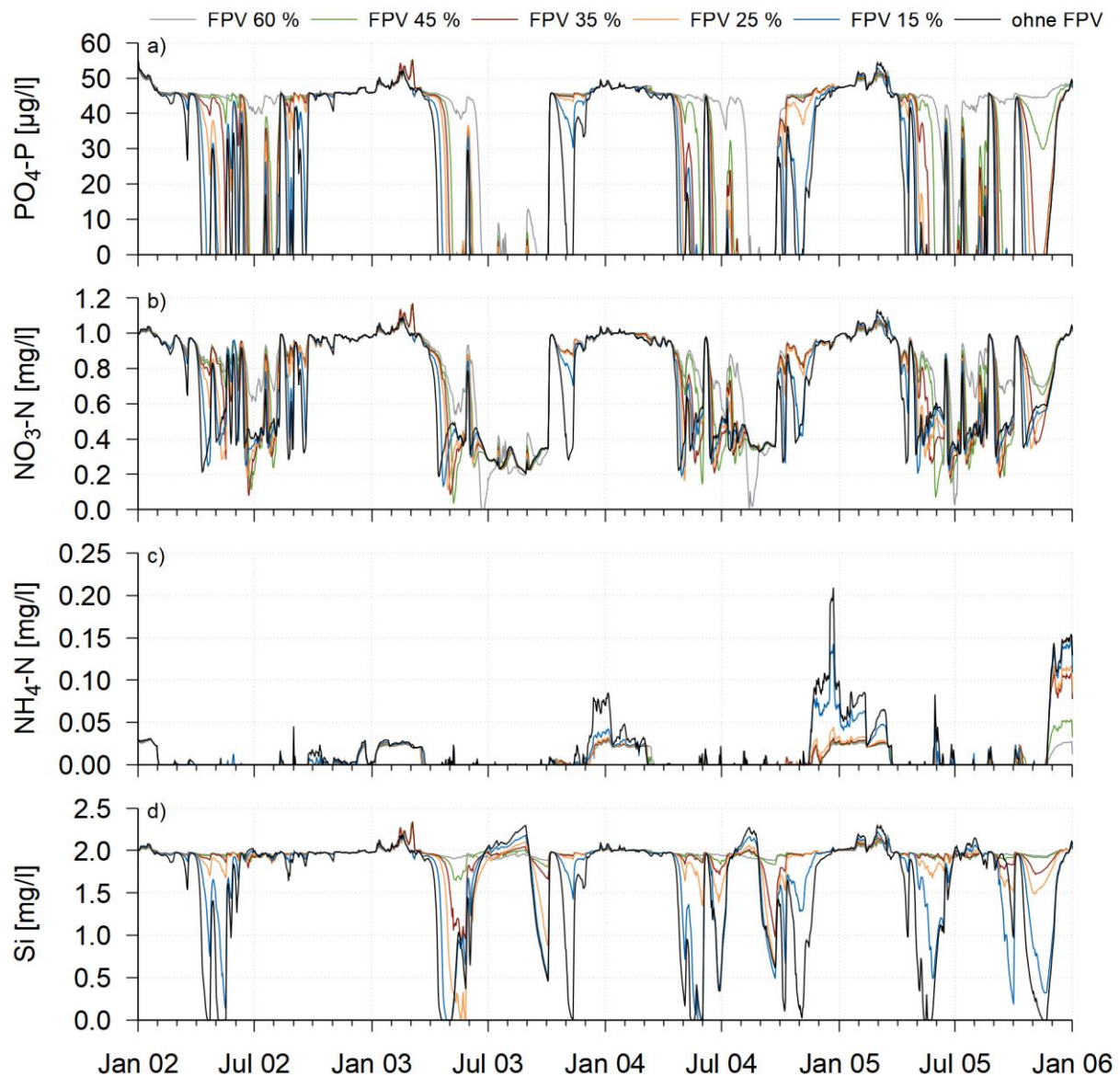


Abbildung 3.18: Berechnete Konzentrationen an a) Phosphatphosphor, b) Nitratstickstoff, c) Ammoniumstickstoff und d) Silizium ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 1 nahe dem Auslass

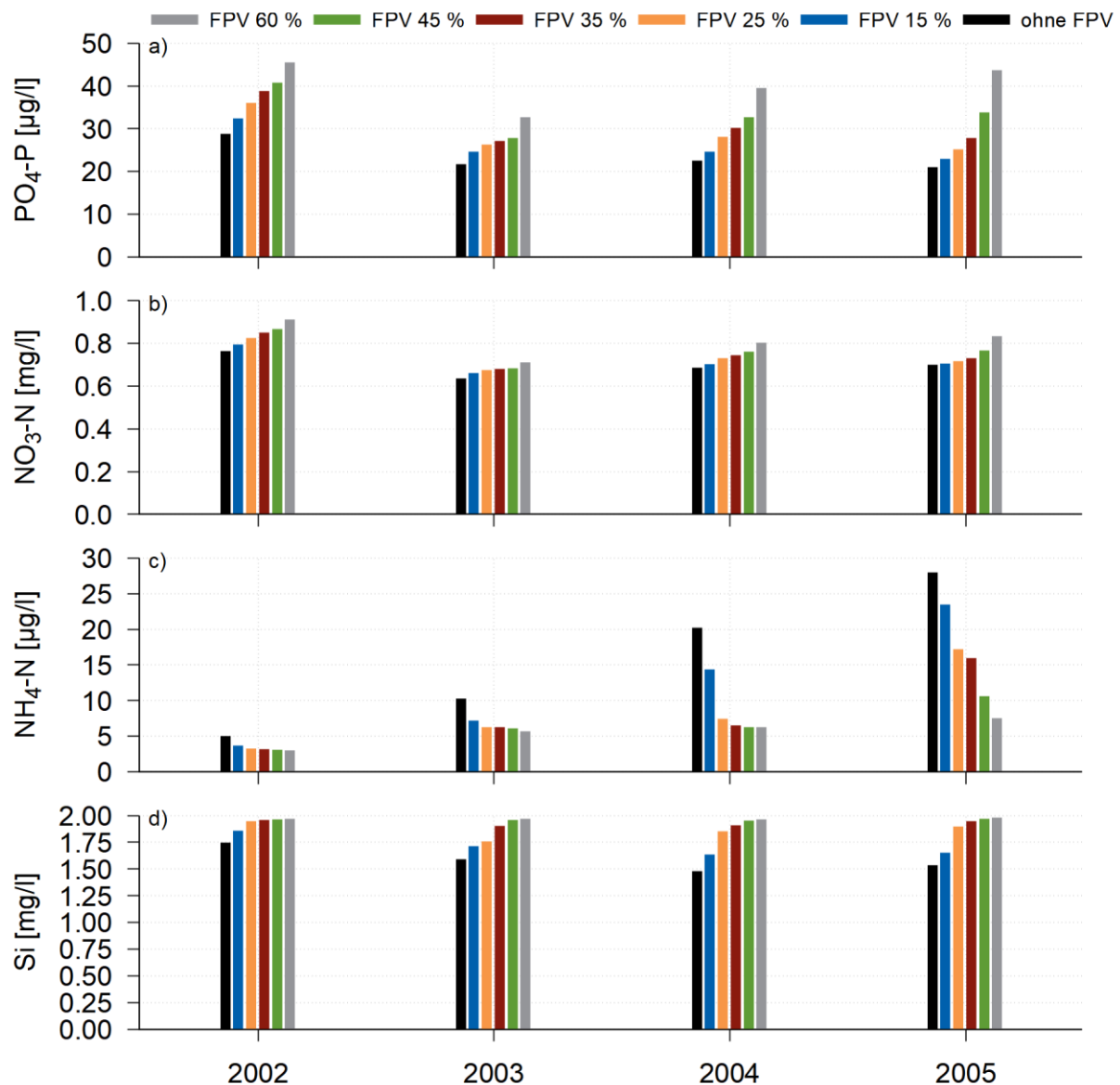


Abbildung 3.19: Jahresmittelwerte der berechneten Konzentrationen an a) Phosphatphosphor, b) Nitratstickstoff, c) Ammoniumstickstoff und d) Silizium ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 1

3.2 Modellsee 1: liegende FPV-Module, erhöhter Phosphorgehalt

Zusätzlich zu den im vorangegangenen Kapitel gezeigten Ergebnissen wurden für den Modellsee 1 weitere Modellszenarien mit erhöhtem Nährstoffgehalt berechnet. Hierzu wurde die Phosphatphosphorkonzentration im Zufluss von ca. 50 µg/l auf 150 µg/l angehoben. Dies wirkt sich im Gewässer neben den Nährstoffkonzentrationen direkt auf die Primärproduktion sowie die Sauerstoffverhältnisse aus.

3.2.1 Nährstoffe

Abbildung 3.20 zeigt die berechneten Nährstoffkonzentrationen für die verschiedenen Szenarien ohne und mit FPV bei erhöhtem Phosphoreintrag in den Modellsee 1. In Abbildung 3.21 sind die daraus berechneten Jahresmittelwerte dargestellt. Die Phosphatkonzentrationen sind entsprechend der größeren Zuflussfrachten höher. Im Unterschied zur Situation ohne erhöhten Nährstoffeintrag sind die Zeiträume im Sommerhalbjahr, in denen Phosphat vollständig gezehrt wird, kürzer. Grund hierfür ist die veränderte Nährstoffstöchiometrie im Gewässer, die dafür sorgt, dass Stickstoff häufiger vollständig gezehrt wird und damit den limitierenden Nährstoff bei der Primärproduktion darstellt. Auch Silizium wird in geringerem Ausmaß gezehrt wie in der Situation ohne erhöhtem Phosphoreintrag, was darauf hinweist, dass die Anteile an Kieselalgen geringer sind als beim Referenzszenario. Grund hierfür dürften die geringeren Sichttiefen und damit die geringere Lichtverfügbarkeit für die schneller absinkenden Kieselalgen sein.

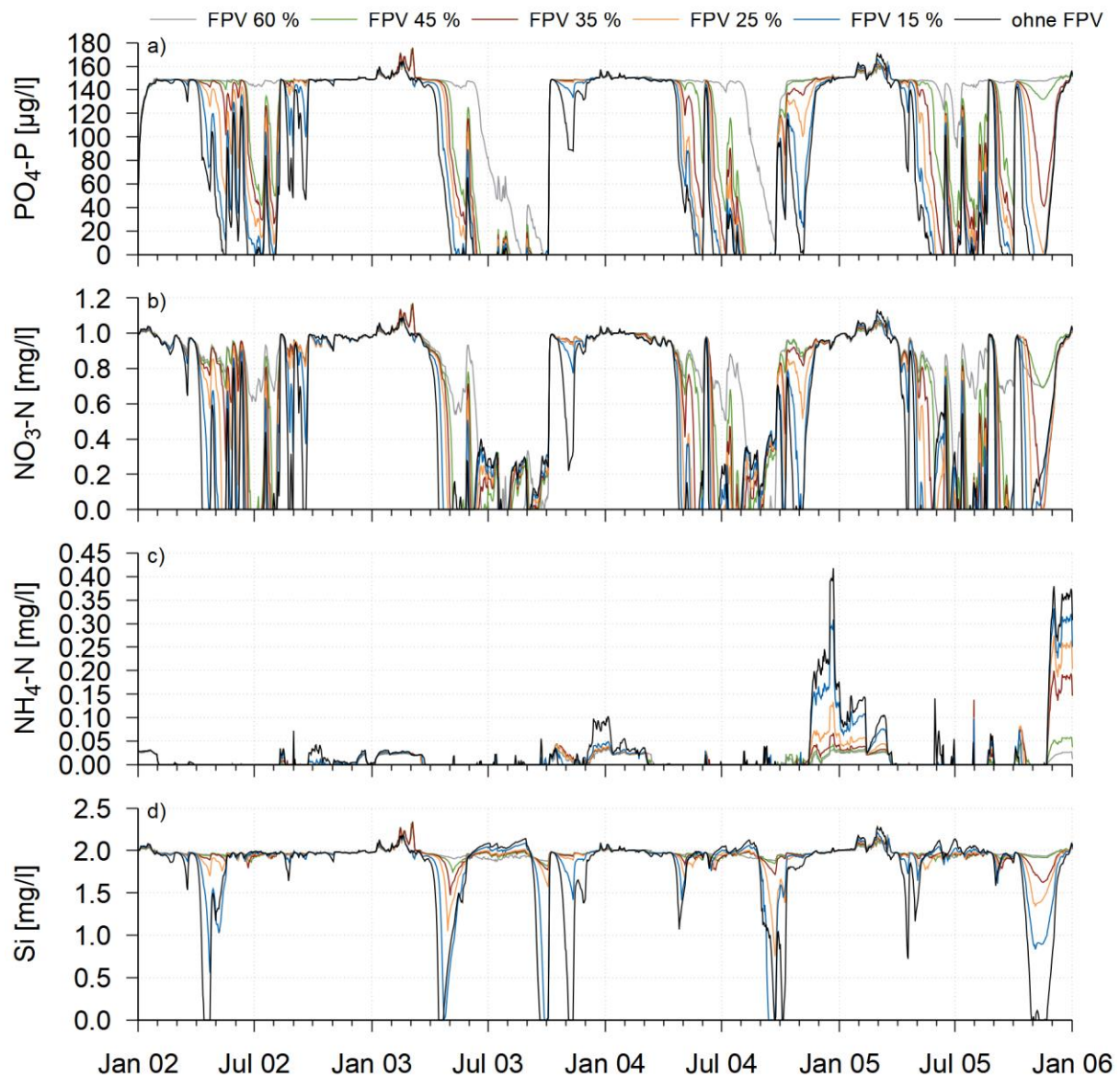


Abbildung 3.20: Berechnete Konzentrationen an a) Phosphatphosphor, b) Nitratstickstoff, c) Ammoniumstickstoff und d) Silizium ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden und erhöhtem Phosphorgehalt im Modellsee 1 nahe dem Auslass

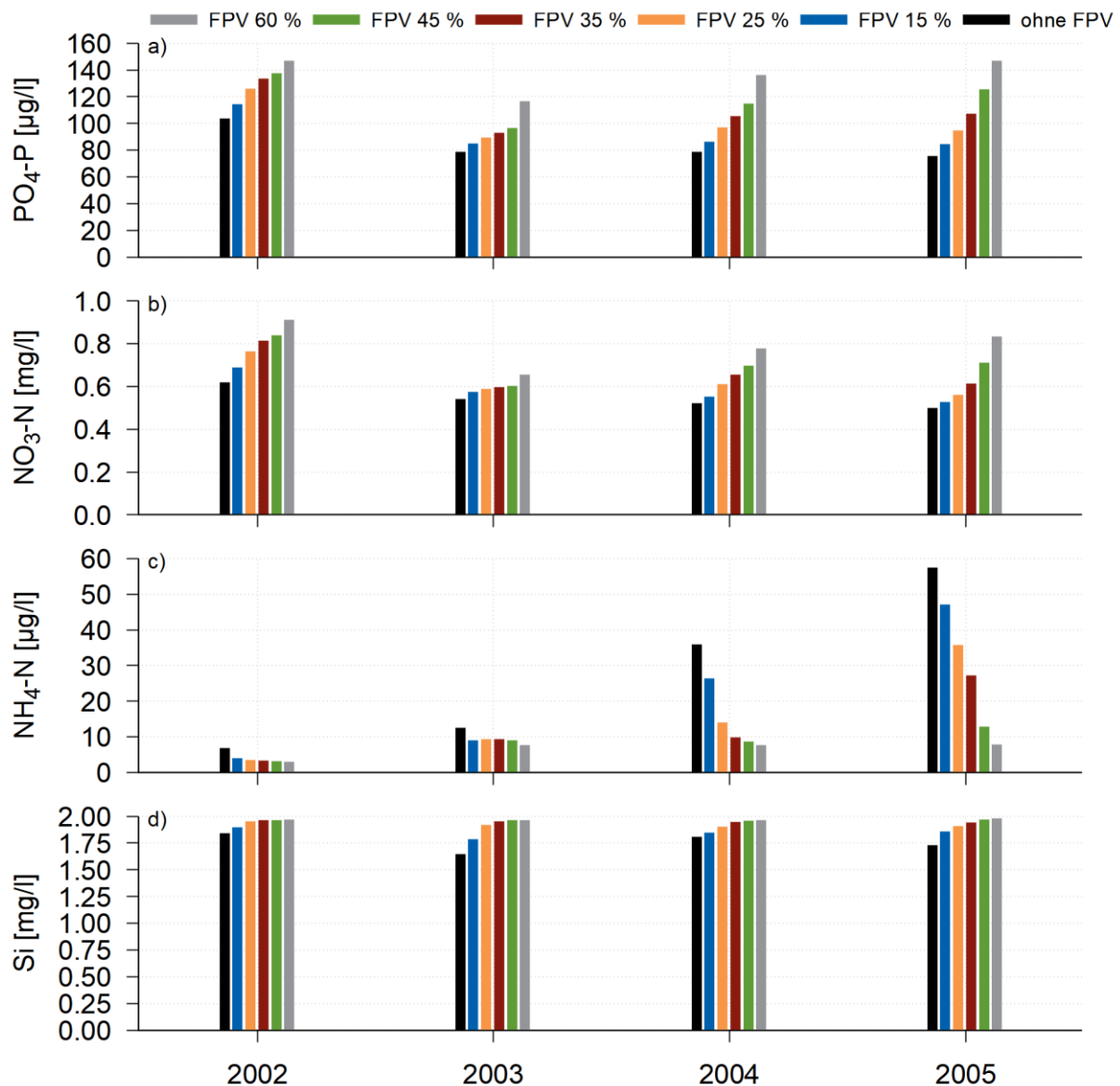


Abbildung 3.21: Jahresmittelwerte der berechneten Konzentrationen an a) Phosphatphosphor, b) Nitratstickstoff, c) Ammoniumstickstoff und d) Silizium ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden und erhöhtem Phosphorgehalt im Modellsee 1

3.2.2 Phytoplankton-Entwicklung

Abbildung 3.22 zeigt die Ergebnisse für **Chlorophyll a** ohne und mit FPV-Bedeckung. Die Konzentrationen sind erwartungsgemäß deutlich höher als beim Szenario mit geringerem Phosphoreintrag, die zeitlichen Verläufe aber vergleichbar. In Abbildung 3.22 ist die berechnete jährliche Nettoprimärproduktion ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden und erhöhtem Nährstoffeintrag dargestellt. Tabelle 3.2 listet die zugehörigen Zahlenwerte mit prozentualer Abnahme mit FPV im Vergleich zur Situation ohne FPV. Die prozentualen Abweichungen der **Nettoprimärproduktion** mit FPV sind ebenfalls ähnlich wie in den oben gezeigten

Szenarien mit geringerem Phosphorgehalt. Je nach Jahr und Szenario können Abweichungen um einige Prozentpunkte auftreten, die in erster Linie durch die Verschiebung der Nährstoffverhältnisse im Gewässer entstehen. Mit den höheren Phosphatkonzentrationen treten gehäuft Zeiträume mit einer Stickstofflimitierung des Phytoplanktonwachstums auf. Dies ist z. B. im Jahr 2003 der Fall. Damit sinkt in diesen Zeiträumen der Einfluss der FPV-Bedeckung auf die Primärproduktion, da die Stickstofflimitierung im Szenario ohne FPV aufgrund der höheren Primärproduktion stärker wirkt.

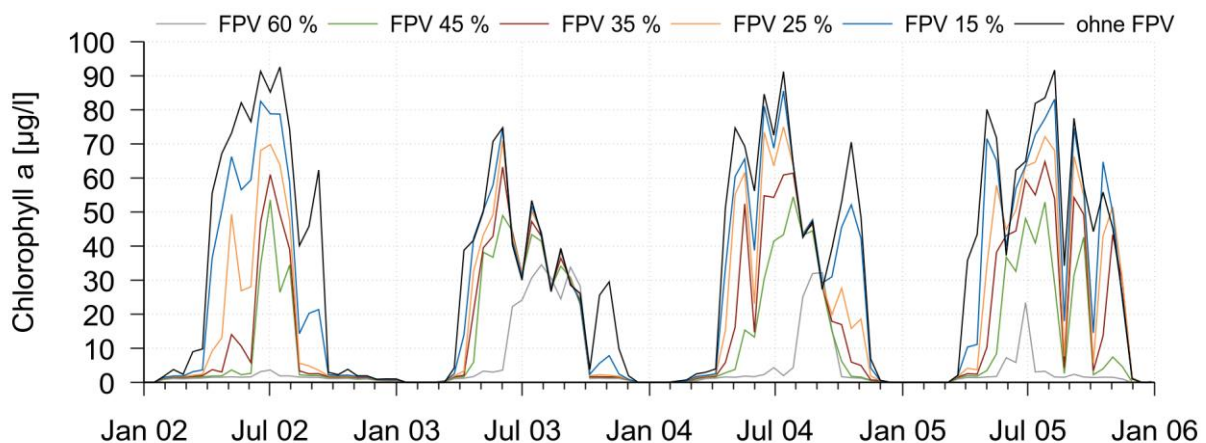


Abbildung 3.22: Berechnete Konzentrationen an Chlorophyll a ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden und erhöhtem Phosphorgehalt im Modellsee 1 (seeweite Mittelwerte über 14 Tage)

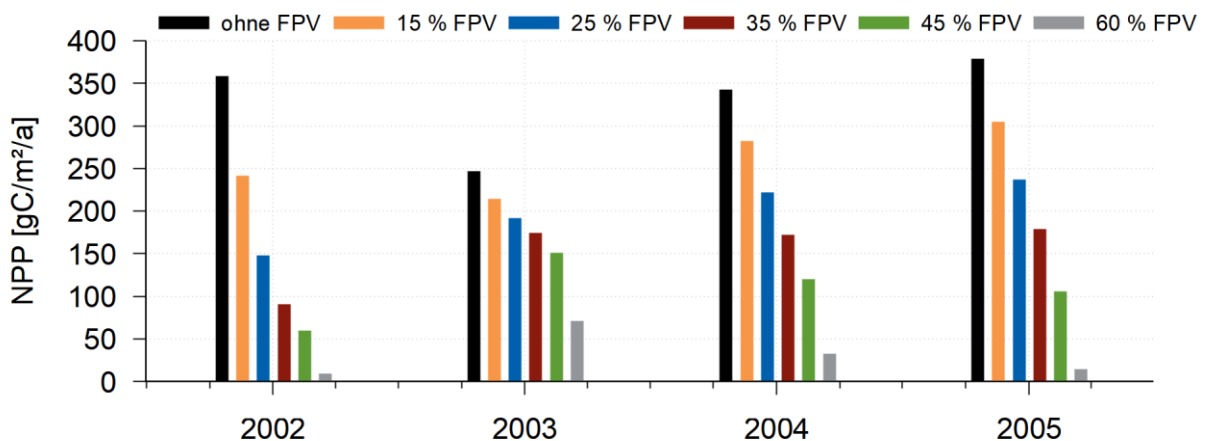


Abbildung 3.23: Berechnete jährliche Nettoprimärproduktion ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden und erhöhtem Phosphorgehalt im Modellsee 1

Tabelle 3.2: Berechnete, jährliche Nettoprimärproduktion in gC/m²/a im Modellsee 1 bei erhöhtem Phosphorgehalt ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden sowie prozentuale Abnahme mit FPV im Vergleich zur Situation ohne FPV

Jahr	Ohne FPV	15 % FPV	25 % FPV	35 % FPV	45 % FPV	60 % FPV
2002	358,4	241,7 (-32,6 %)	147,9 (-58,7 %)	91,0 (-74,6 %)	59,7 (-83,3 %)	8,9 (-97,5 %)
2003	247,2	214,9 (-13,1 %)	191,8 (-22,4 %)	174,4 (-29,5 %)	151,0 (-38,9 %)	71,4 (-71,1 %)
2004	342,9	282,2 (-17,7 %)	221,9 (-35,3 %)	172,5 (-49,7 %)	120,2 (-64,9 %)	32,4 (-90,5 %)
2005	379,2	304,7 (-19,6 %)	236,9 (-37,5 %)	178,8 (-52,9 %)	105,8 (-72,1 %)	14,5 (-96,2 %)

3.2.3 Sauerstoffgehalt

Abbildung 3.24 zeigt die berechneten Sauerstoffkonzentrationen für die Modellszenarien mit erhöhtem Phosphorgehalt. Im Vergleich zur Situation mit geringerem Nährstoffgehalt steigen in erster Linie die Übersättigungen im Sommerhalbjahr an, da die Primärproduktion aufgrund des höheren Nährstoffangebots größer ist. Diese fallen auch hier unter FPV mit steigender Bedeckung zunehmend geringer aus. Die minimalen Konzentrationen im Sommer ändern sich nicht merklich und unterschreiten 8 mg/l nur in Einzelfällen geringfügig.

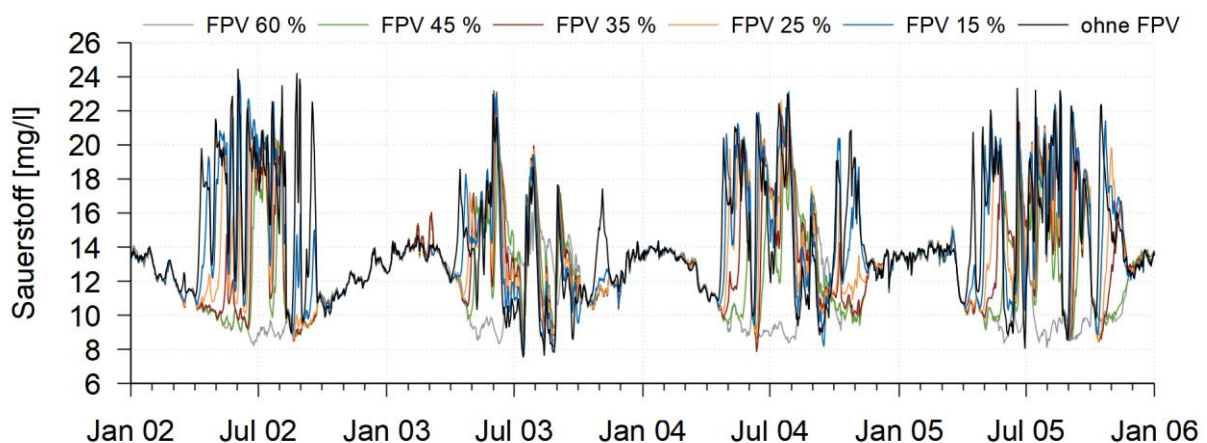


Abbildung 3.24: Berechnete Sauerstoffkonzentrationen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden und erhöhtem Phosphorgehalt im Modellsee 1 nahe dem Auslass

3.3 Modellsee 1: vertikale FPV-Module

3.3.1 Wassertemperaturen

Aufgrund der geringeren Abschattung mit vertikalen FPV-Modulen im Vergleich zur liegenden Variante ist mit geringeren Auswirkungen auf den Wärmehaushalt eines Gewässers zu rechnen. Dies wird durch die Modellergebnisse bestätigt. Abbildung 3.25 zeigt das berechnete Temperaturprofil an der tiefsten Stelle des Modellsees 1 für die Referenzsituation ohne FPV sowie Profile der Temperaturdifferenzen ohne und mit vertikalen FPV-Modulen mit den drei untersuchten Bedeckungsgraden. Mit Ausnahme zweier Zeiträume im März 2003 und 2005 sind die entstehenden Temperaturdifferenzen zur Referenzsituation bei allen Bedeckungsszenarien gering. Eine Veränderung der Dichteschichtung tritt nicht auf. Wie die in Abbildung 3.26 dargestellten, oberflächennahen Wassertemperaturen sowie die daraus berechneten Differenzen zwischen Referenz- und Bedeckungsszenarien aufzeigen, lassen sich keine deutlichen jahreszeitlichen Trends feststellen, wie dies bei den Modellszenarien mit liegenden Modulen der Fall war. Die Temperaturdifferenzen variieren meist im Bereich zwischen -1 K und 1 K und sind tendenziell in den Sommermonaten etwas höher. Grund hierfür ist die etwas verzögerte Reaktion der Wassertemperaturen auf Wetterumschwünge mit FPV-Bedeckung, da die verringerten Windgeschwindigkeiten den Wärmeaustausch mit der Atmosphäre reduzieren. Damit unterscheiden sich die Ergebnisse deutlich von denen mit liegenden FPV-Modulen, bei denen die Wassertemperaturen bei hohen Bedeckungsgraden um einige Grad Celsius geringer ausfallen und zudem die Dichteschichtung stabiler wird. Mit den vertikalen FPV-Modulen sind auch bei sehr hohen Bedeckungsgraden die Auswirkungen auf die Wassertemperaturen kaum feststellbar.

Auffallend bei den Darstellungen der Temperaturdifferenzen ist die kurzzeitige Abnahme der Wassertemperatur mit FPV im März 2003 bzw. deren Zunahme im März 2005. Grund hierfür sind entstehende Unterschiede bei der Dauer der Eisbedeckung (Abbildung 3.27). Im Winter 2003 bleibt die Eisbedeckung in den Szenarien mit FPV länger bestehen als in den Szenarien ohne FPV. Im Winter 2005 ist es hingegen umgekehrt. Je nach meteorologischem Einflussfaktor kann also die Eisbedeckung mit Nutzung vertikaler FPV-Module verlängert oder verkürzt werden. Auf der einen Seite sorgt die geringere Globalstrahlung für einen geringeren Wärmeeintrag und damit ein stärkeres Auskühlen der oberen Wasserschichten. Auf der anderen Seite ist der Wärmeaustausch mit der Atmosphäre aufgrund der geringeren Windgeschwindigkeiten reduziert, was bei einem frühjährlichen Anstieg der Lufttemperaturen zu einem langsameren Abschmelzen der Eisbedeckung führen kann.

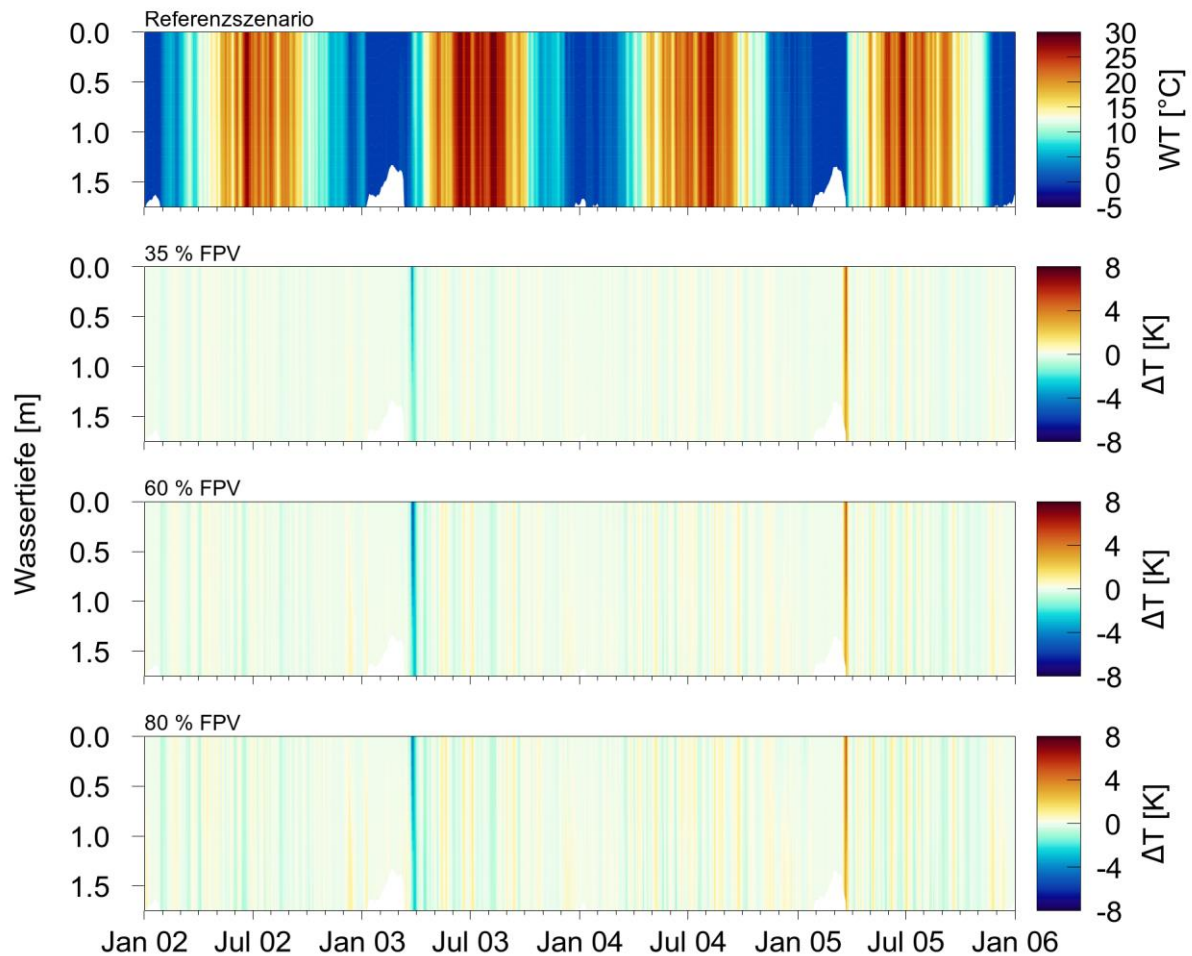


Abbildung 3.25: Berechnetes Temperaturprofil für die Situation ohne FPV (oben) sowie Profile der Temperaturdifferenzen ohne und mit vertikalen FPV-Modulen bei verschiedenen Bedeckungsgraden im tiefsten Bereich des Modellsees 1; weiße Flächen am Grund kennzeichnen Abnahme der Wassertiefe durch Eisbedeckung

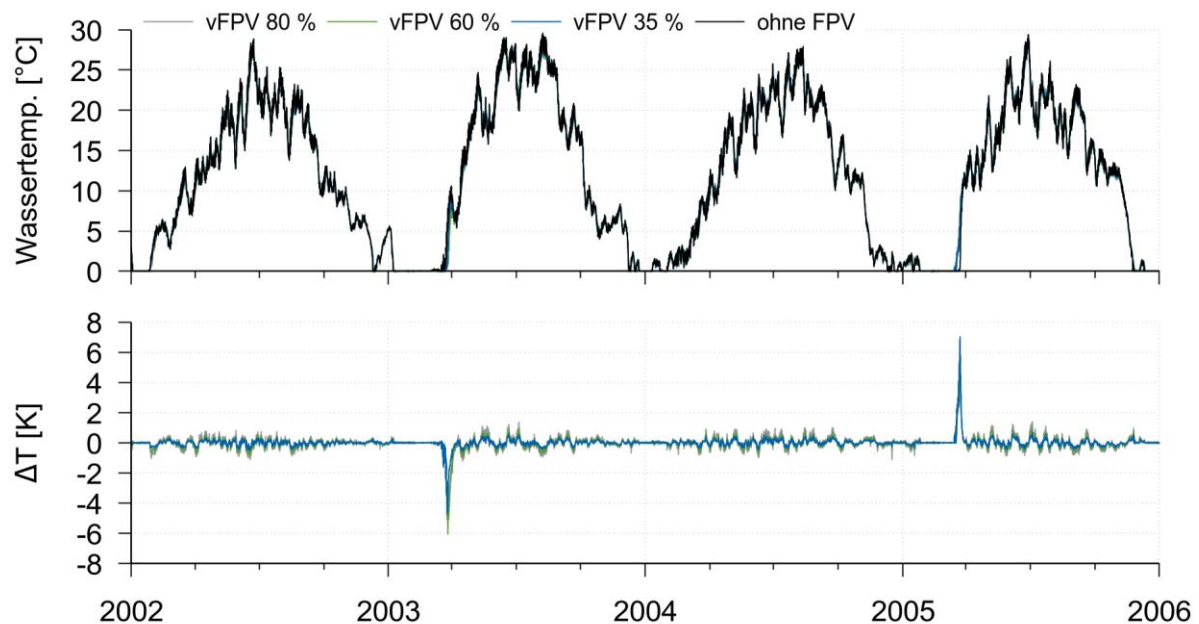


Abbildung 3.26: Berechnete Wassertemperaturen an der Wasseroberfläche des Modellsees 1 ohne und mit vertikalen FPV-Modulen bei verschiedenen Bedeckungsgraden (oben) sowie Differenz der FPV-Szenarien zur Situation ohne FPV (unten)

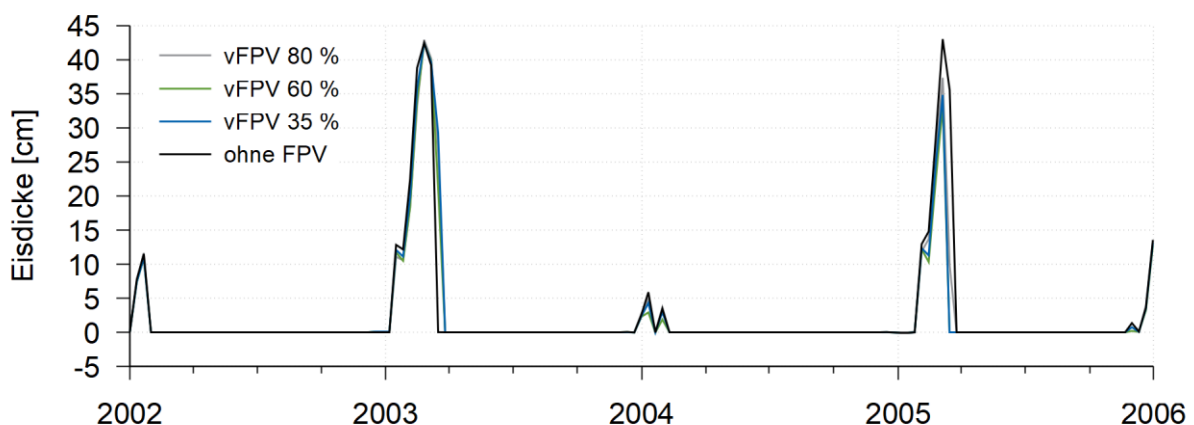


Abbildung 3.27: Berechnete Eisdicke auf dem Modellsee 1 ohne und mit vertikalen FPV-Modulen bei verschiedenen Bedeckungsgraden

3.3.2 Phytoplankton-Entwicklung

Bei den Modellszenarien mit liegenden FPV-Modulen konnten insbesondere bei hohen Bedeckungsgraden starke Veränderungen der Primärproduktion festgestellt werden. Die starke Lichtabschattung bringt ein signifikant reduziertes Algenwachstum mit sich. Mit vertikalen FPV-Modulen ist die Lichtverringernung in der Wassersäule deutlich geringer. Abbildung 3.28 zeigt die berechneten seeweiten

Mittelwerte der Chlorophyll-a-Konzentrationen für das Referenzszenario sowie die drei Bedeckungsszenarien. Die Verläufe zeigen für alle Szenarien nur vernachlässigbare Differenzen. Damit wird deutlich, dass der Lichteintrag bei Verwendung vertikaler FPV-Module ausreichend hoch ist, um weitestgehend unverändert zum Referenzzustand Primärproduktion zu ermöglichen. Dies bestätigen auch die in Abbildung 3.29 dargestellten jährlichen Nettoprimärproduktionsraten für die einzelnen Szenarien. Unabhängig vom Bedeckungsgrad gibt es bei allen Bedeckungsszenarien keinen signifikanten Unterschied zwischen den Werten des Referenzszenarios. Damit sind die Auswirkungen vertikaler FPV-Module auf das Phytoplankton vernachlässigbar.

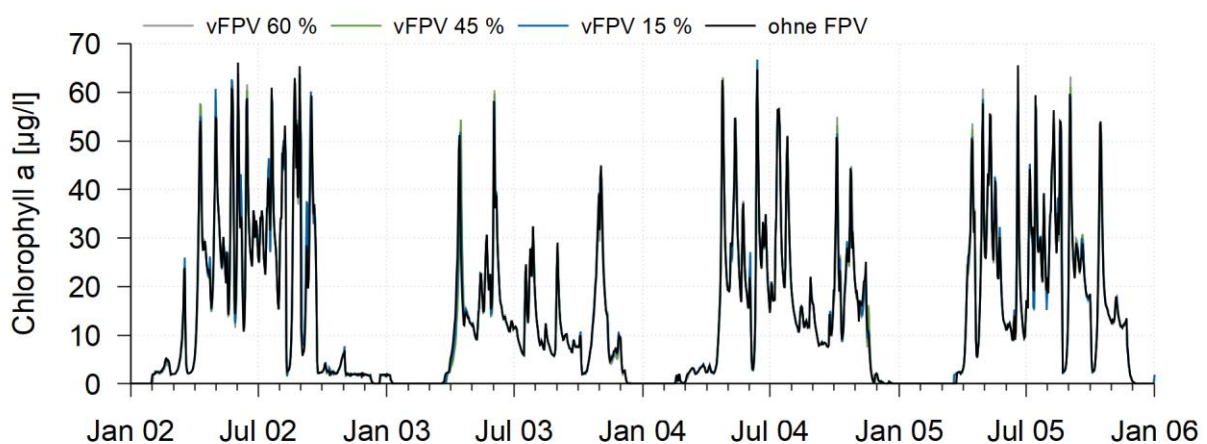


Abbildung 3.28: Berechneter, seewweiter Mittelwert der Konzentration an Chlorophyll a ohne und mit vertikalen FPV-Modulen bei verschiedenen Bedeckungsgraden im tiefsten Bereich des Modellsees 1

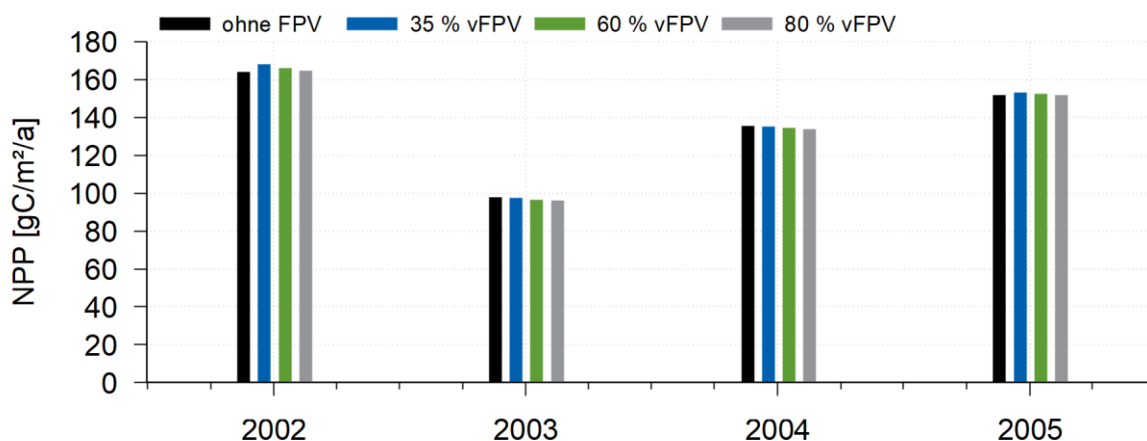


Abbildung 3.29: Berechnete jährliche Nettoprimärproduktion ohne und mit vertikalen FPV-Modulen bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 1

3.3.3 Makrophyten-Entwicklung

Die Auswirkungen liegender FPV-Module auf Makrophyten sind im bedeckten Bereich besonders gravierend. Aufgrund der Lichtabschirmung ist kein Wachstum möglich. Bei Verwendung vertikaler FPV-Module sind hingegen keine Auswirkungen auf das Makrophytenwachstum erkennbar, wie Abbildung 3.30 zeigt. Bei allen Szenarien beginnt das Wachstum im Frühjahr und erreicht wenige Wochen später die im Modell definierte maximale flächenbezogene Biomasse von 500 gC/m². Ein signifikanter zeitlicher Versatz des Wachstums lässt sich nicht beobachten.

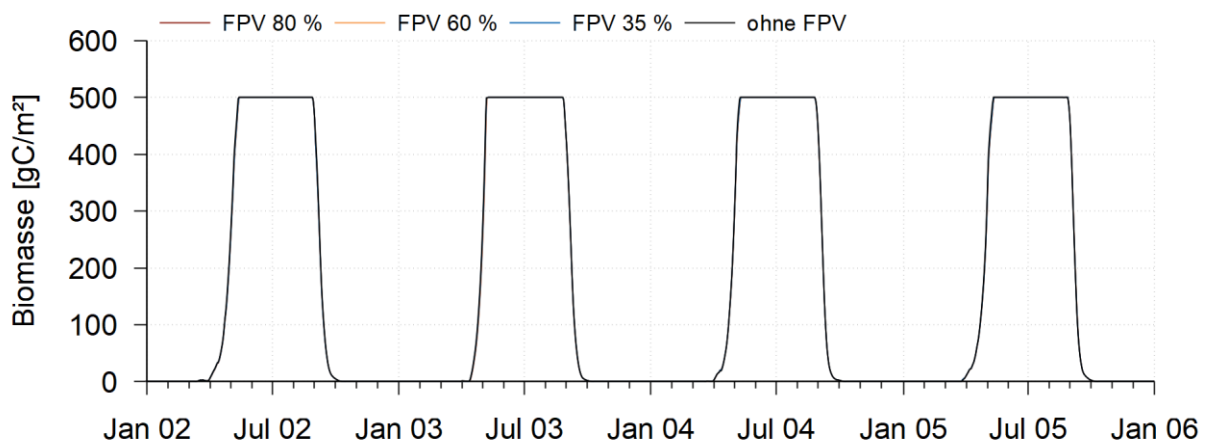


Abbildung 3.30: Berechnete mittlere Biomasse an Makrophyten bei 100 % Bewuchsfläche im Modellsee 1 ohne und mit vertikalen FPV-Modulen bei verschiedenen Bedeckungsgraden

Abbildung 3.31 zeigt die vom Modell berechnete Lichtlimitierungsfunktion auf Grundlage der Sonneneinstrahlung. Die Werte der einzelnen Szenarien liegen meist aufeinander, so dass aufgrund der Lichtabschattung keine Auswirkungen mit FPV-Nutzung zu erwarten sind. Um zu untersuchen, welchen Effekt die vertikalen FPV-Module auf Makrophyten mit höherem Lichtbedarf ausüben, wurde der Modellparameter, der festlegt, ab welchem Strahlungswert keine Limitierung mehr auftritt, von 30 W/m² auf 60 W/m² verdoppelt. Abbildung 3.32 zeigt die Ergebnisse. Im Frühjahr 2005 tritt die Wachstumsphase mit dieser Modellvariante beim Szenario mit 80 % Bedeckung um ca. 3-4 Tage später ein. Ansonsten sind auch bei dieser Modellvariante die Unterschiede zwischen Referenz- und Bedeckungsszenarien sehr gering.

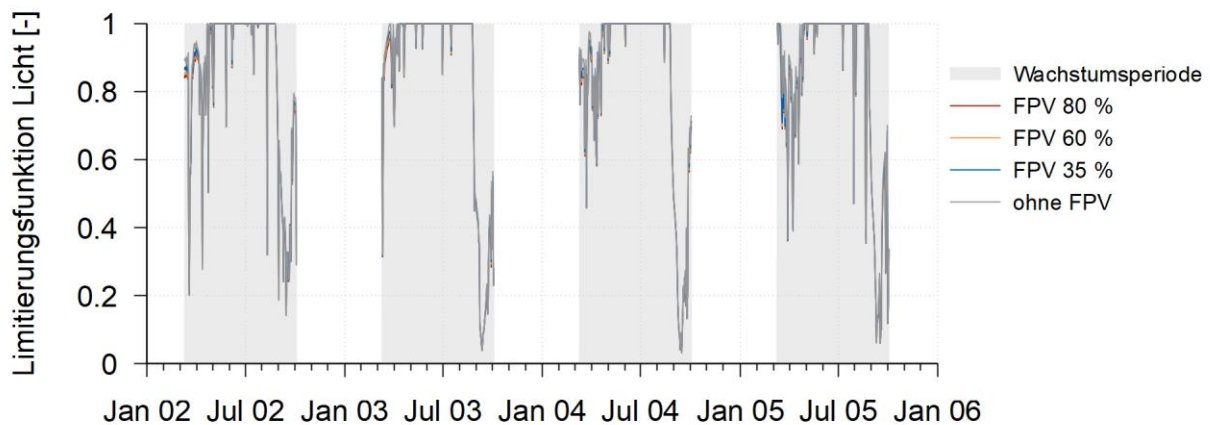


Abbildung 3.31: Lichtlimitierungsfunktion für das Makrophytenwachstum im Modellsee 1 ohne und mit vertikalen FPV-Modulen bei verschiedenen Bedeckungsgraden

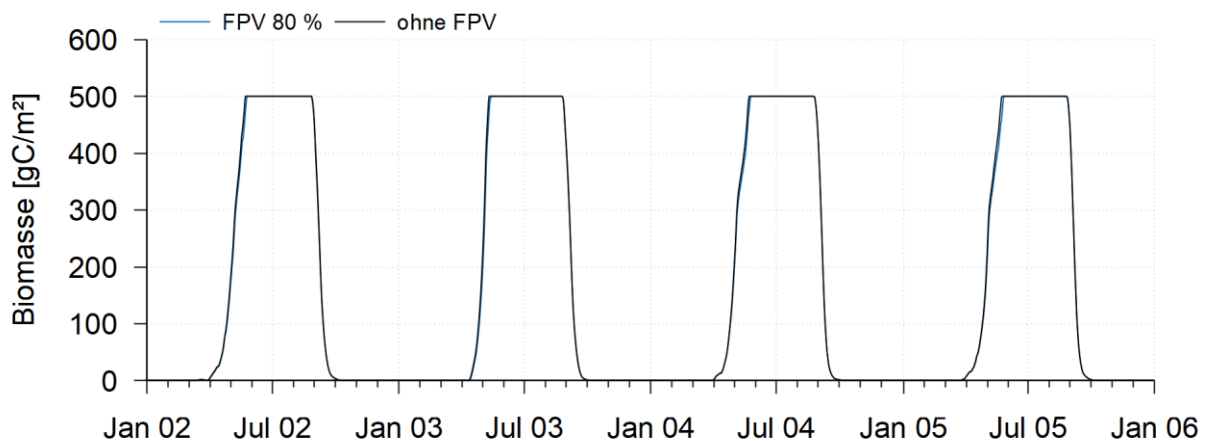


Abbildung 3.32: Berechnete mittlere Biomasse an Makrophyten bei 100 % Bewuchsfläche im Modellsee 1 ohne und mit vertikalen FPV-Modulen bei verschiedenen Bedeckungsgraden und erhöhtem Lichtbedarf der Makrophyten

3.3.4 Sauerstoffgehalt

Die Sauerstoffkonzentrationen im Gewässer hängen stark von der Primärproduktion sowie der Zehrung von Biomasse ab. Da die Primärproduktion in den Szenarien mit vertikalen FPV-Modulen fast unverändert ist, sind auch die Auswirkungen auf den Sauerstoffhaushalt vernachlässigbar klein. Abbildung 3.33 zeigt die Modellergebnisse an der Wasseroberfläche für das Referenzszenario und die FPV-Szenarien. Die Verläufe der vier Kurven sind sehr ähnlich, signifikante Unterschiede entstehen mit Nutzung vertikaler FPV-Module nur temporär, z. B. aufgrund von geringfügigen zeitlichen Verschiebungen beim Auftreten von Algenblüten.

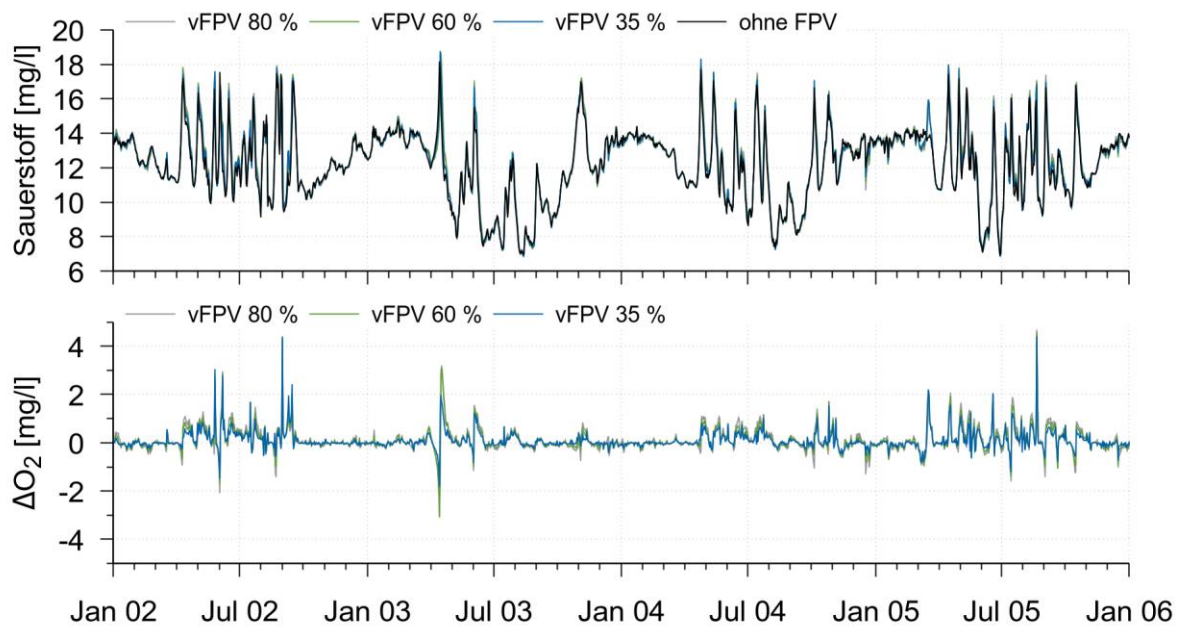


Abbildung 3.33: Berechnete Sauerstoffkonzentrationen ohne und mit vertikalen FPV-Modulen bei verschiedenen Bedeckungsgraden (oben) sowie Differenzen der Sauerstoffkonzentrationen zwischen den Szenarien mit und ohne FPV im Modellsee 1 nahe dem Auslass

3.3.5 Nährstoffe

Auch bei den Nährstoffkonzentrationen gibt es keine signifikanten Auswirkungen auf die Konzentrationen im Gewässer. Abbildung 3.34 zeigt die oberflächennah berechneten Konzentrationen an Phosphat, Nitrat, Ammonium und Silikat im Modellsee 1 für das Referenzszenario und die Szenarien mit vertikalen FPV-Modulen. Im Vergleich zum Referenzszenario sind in den Bedeckungsszenarien praktisch keine Veränderungen der Nährstoffkonzentrationen festzustellen. Grund ist auch hier die unveränderte Primärproduktion mit FPV-Nutzung und die damit im Vergleich zum Referenzszenario unveränderte Zehrung an Nährstoffen sowie Freisetzung durch Mineralisierungsprozesse.

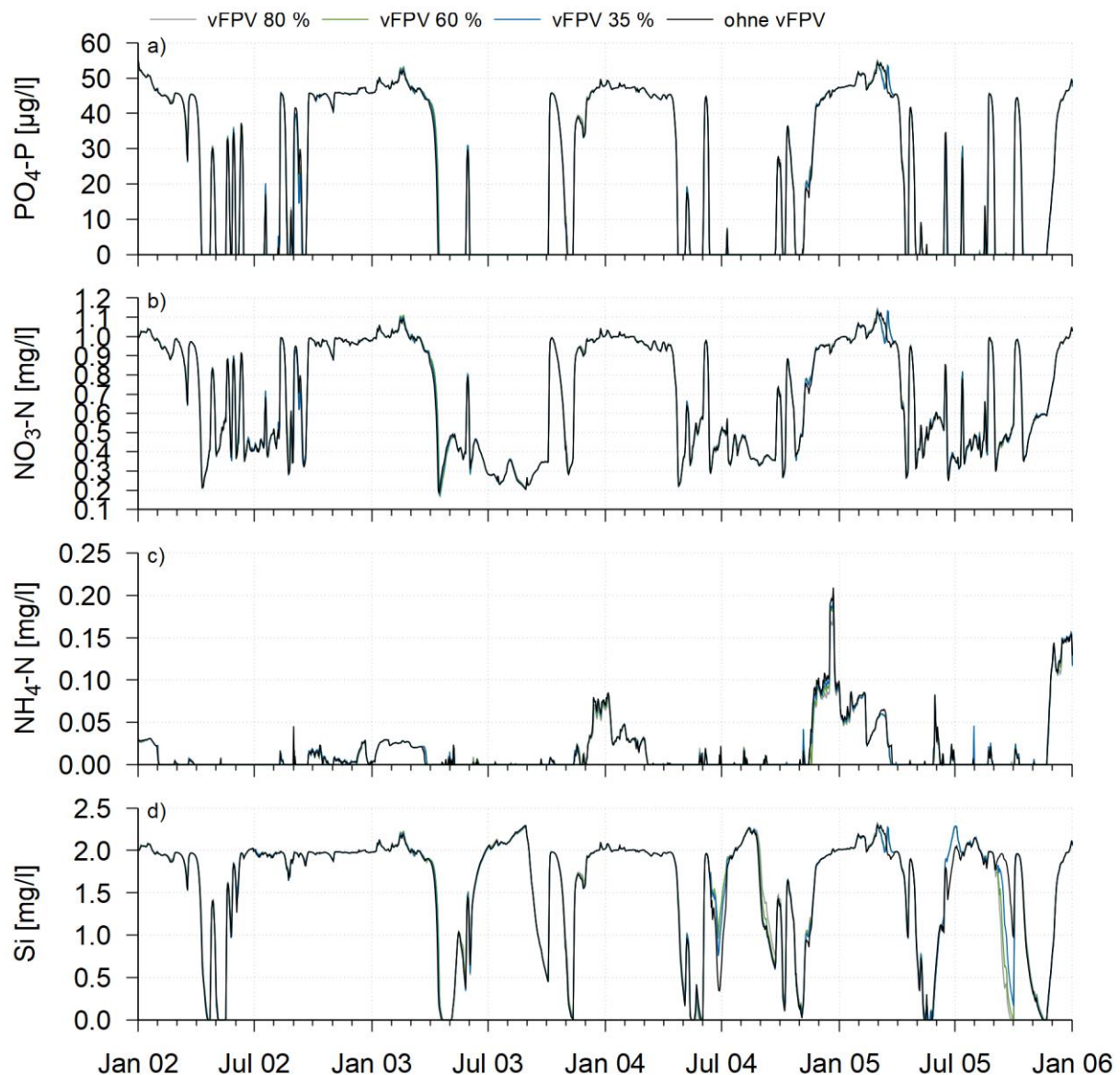


Abbildung 3.34: Berechnete Konzentrationen an a) Phosphatphosphor, b) Nitratstickstoff, c) Ammoniumstickstoff und d) Silizium ohne und mit vertikalen FPV-Modulen bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 1 nahe dem Auslass

3.4 Modellsee 2: liegende FPV-Module

3.4.1 Wassertemperaturen

Mit seiner maximalen Wassertiefe von 7 m ist der zweite Modellsee, der „eingetieftete Modellsee 1“, der tiefste der drei betrachteten Seen. Damit ist in diesen Modellszenarien auch die stabilste Dichteschichtung zu erwarten, was wiederum Auswirkungen auf weitere Wasserqualitätsparameter mit sich bringt. Abbildung 3.35 zeigt die berechneten, **oberflächennahen Wassertemperaturen** für die Modellszenarien ohne und mit FPV sowie die Differenzen der FPV-Szenarien zum

Referenzszenario. Der saisonale Verlauf der Differenzen ist vergleichbar mit dem beim Modellsee 1. Das Gewässer wärmt im Frühjahr und Sommer mit FPV langsamer auf und kühlt im Herbst und Winter langsamer ab. Dadurch sind die Wassertemperaturen mit FPV im Frühjahr und Sommer geringer als im Szenario ohne FPV, während sie im Herbst und Winter zeitweise höher sein können. Im Sommer und bei hohen Bedeckungsgraden sind die mit FPV entstehenden Differenzen beim Modellsee 2 höher als beim Modellsee 1. Grund hierfür ist wohl die vollständige Bedeckung der tieferen Seebereiche und der damit unterbundene kurzzeitige Wärmeintrag in tiefere Wasserschichten.

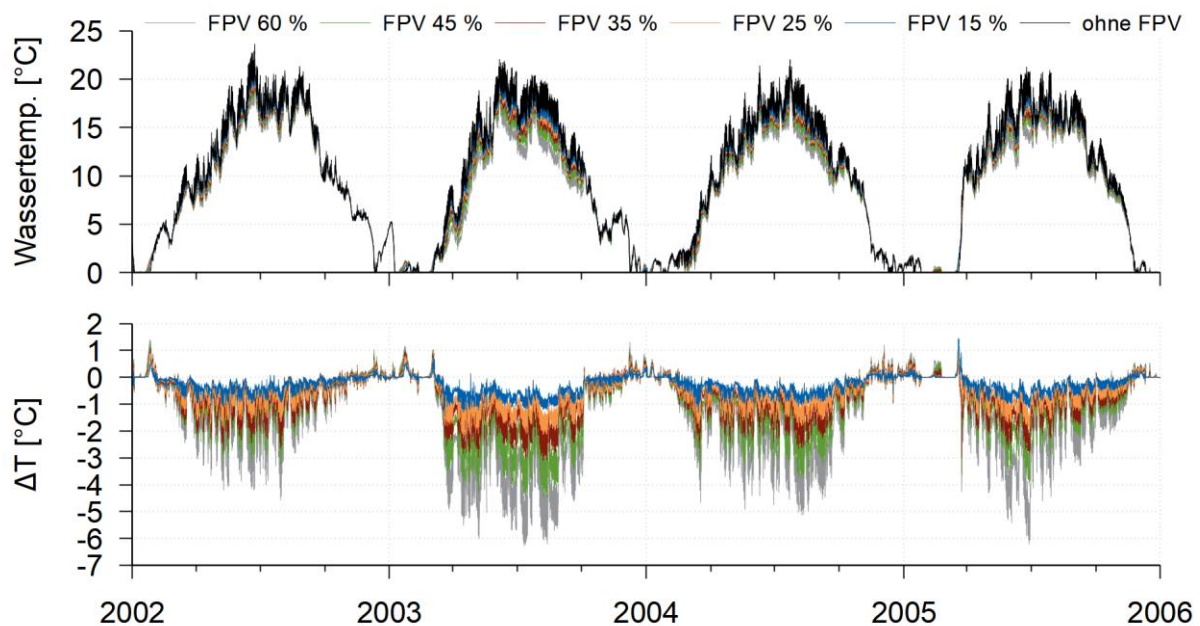


Abbildung 3.35: Berechnete Wassertemperaturen an der Wasseroberfläche des Modellsees 2 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden (oben) sowie Differenz der FPV-Szenarien zur Situation ohne FPV (unten)

Abbildung 3.36 zeigt die berechneten **Wassertemperaturen über Grund** im tiefsten Bereich für die Modellszenarien ohne und mit FPV sowie die Differenzen der FPV-Szenarien zum Referenzszenario. Die Temperaturen sind im Sommerhalbjahr in allen Szenarien in der Tiefe geringer als an der Wasseroberfläche. In diesen Zeiträumen liegt also eine Temperaturschichtung vor. Die kurzzeitigen Anstiege der Temperaturen weisen auf Durchmischungsereignisse hin. Mit zunehmender Bedeckung mit FPV nimmt die Anzahl dieser Ereignisse ab. Im Szenario mit 60 % bedeckter Fläche liegt in den meisten Jahren im See von April bis September unterbrochen eine stabile Temperaturschichtung vor. Die FPV-Bedeckung verringert somit die Durchmischung zwischen oberflächennahen und tiefen Wasserschichten

und führt zu einer stabileren Temperaturschichtung, obwohl auch die Oberflächentemperatur mit zunehmender PV-Bedeckung geringer wird.

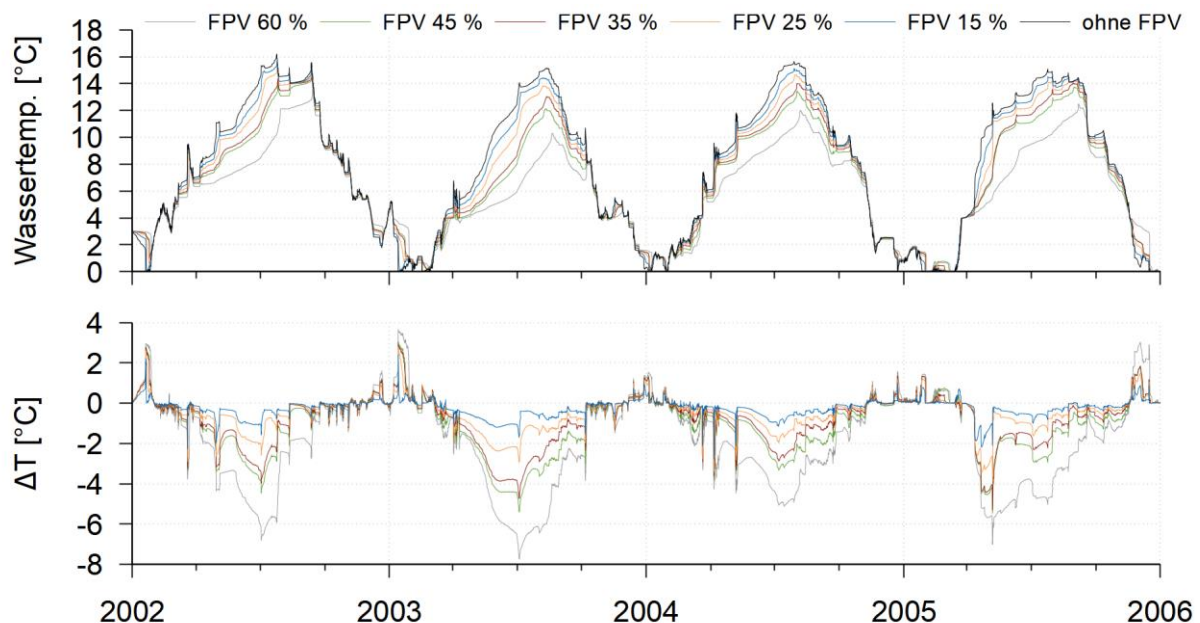


Abbildung 3.36: Berechnete Wassertemperaturen über Grund des Modellsees 2 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden (oben) sowie Differenz der FPV-Szenarien zur Situation ohne FPV (unten)

Abbildung 3.37 zeigt die berechneten **Wassertemperaturen** im tiefsten Bereich des Modellsees 2 **im Profil** für das Szenario ohne FPV sowie die Temperaturdifferenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden. Die Differenzen verdeutlichen nochmals die oben beschriebenen Veränderungen der Wassertemperaturen mit FPV. Besonders deutlich wird der Einfluss der FPV-Bedeckung auf die Wassertemperaturen in den Sommermonaten.

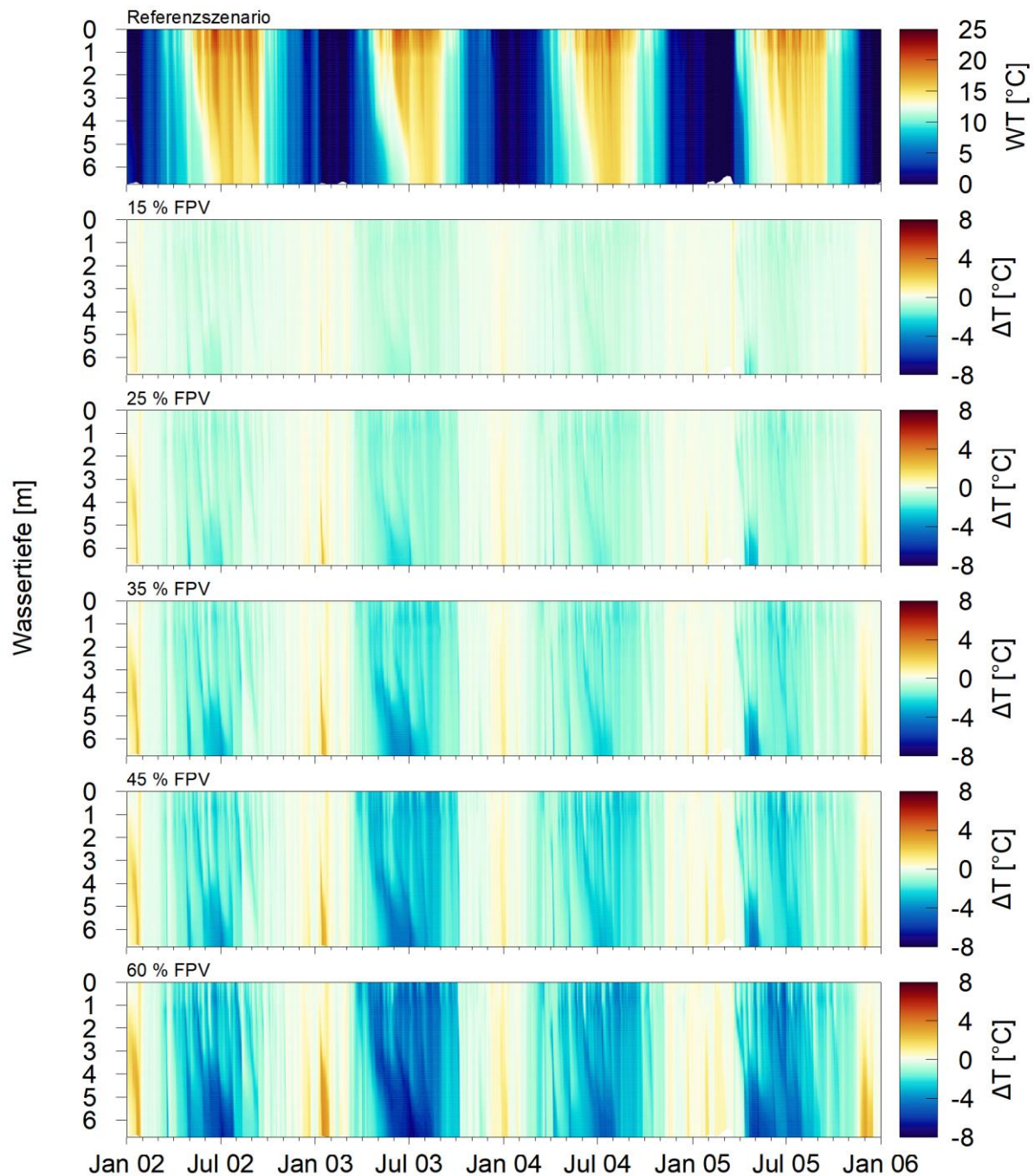


Abbildung 3.37: Berechnetes Temperaturprofil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Temperaturdifferenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im tiefsten Bereich des Modellsees 2

3.4.2 Phytoplankton-Entwicklung und Sichttiefe

Mit abnehmender Lichteinstrahlung und geringeren Wassertemperaturen bewirkt die Bedeckung mit FPV eine Verringerung der Primärproduktion. Abbildung 3.38 zeigt die berechneten, oberflächennahen Konzentrationen an **Chlorophyll a** ohne und mit FPV im Modellsee 2. Abbildung 3.39 zeigt das Konzentrationsprofil für das

Referenzszenario ohne FPV sowie die Differenzen zu den FPV-Szenarien. Bei allen Bedeckungsgraden ist ein zeitlich verzögertes Einsetzen der Frühjahrsblüte zu erkennen. Mit zunehmenden Bedeckungsgraden setzt diese später ein, wobei bei einem Bedeckungsgrad von 60 % die Algenpopulation in allen Jahren vollständig zusammenbricht. Damit nimmt mit 60 % Bedeckung die Primärproduktion noch stärker ab als beim selben Bedeckungsszenario für den Modellsee 1 mit geringerer Wassertiefe. Ein Grund hierfür sind die deutlich geringeren Wassertemperaturen in diesem Szenario im eingetieften Weiher. Diese bewirken eine **Verschiebung der Anteile** der beiden im Modell verwendeten Algengruppen der **Kieselalgen und übrigen Algen** für den Modellsee 2 im Vergleich zum Modellsee 1 mit geringerer Tiefe. Abbildung 3.40 zeigt die Modellergebnisse für die Szenarien ohne und mit FPV im Modellsee 2. Während beim Modellsee 1 im Referenzszenario Kieselalgen im Frühjahr und Herbst und die übrigen Algen in den Sommermonaten dominieren, sind im eingetieften Gewässer die Kieselalgen größtenteils ganzjährig dominant. Unter diesen Bedingungen haben die Kieselalgen mit der gewählten Modellkonfiguration, die unverändert derjenigen vom Modellsee 1 mit geringerer Wassertiefe entspricht, Wachstumsvorteile gegenüber den übrigen Algen, da deren Wachstumsraten bei geringen Wassertemperaturen höher angesetzt wurden als die der übrigen Algen. Mit zunehmender FPV-Bedeckung wird hingegen das Wachstum der Gruppe der übrigen Algen begünstigt, da diese aufgrund geringerer Sinkgeschwindigkeiten Vorteile bei der Lichtaufnahme aufweisen. Dies wird am deutlichsten in den Jahren mit hohen Zuflüssen in den Weiher, da die Aufenthaltszeiten der Algen im Weiher geringer und die Verdriftung unter die Bedeckung in diesen Zeiträumen größer ist. Im zuflussarmen Jahr 2003 hingegen dominieren auch bis zu einem Bedeckungsgrad von 35 % noch die Kieselalgen.

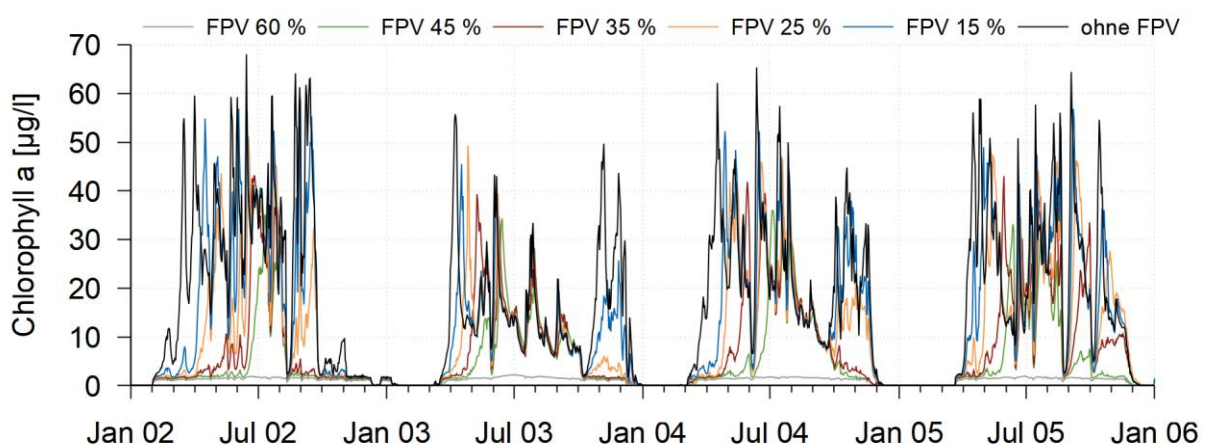


Abbildung 3.38: Berechnete, oberflächennahe Konzentrationen an Chlorophyll a ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 2

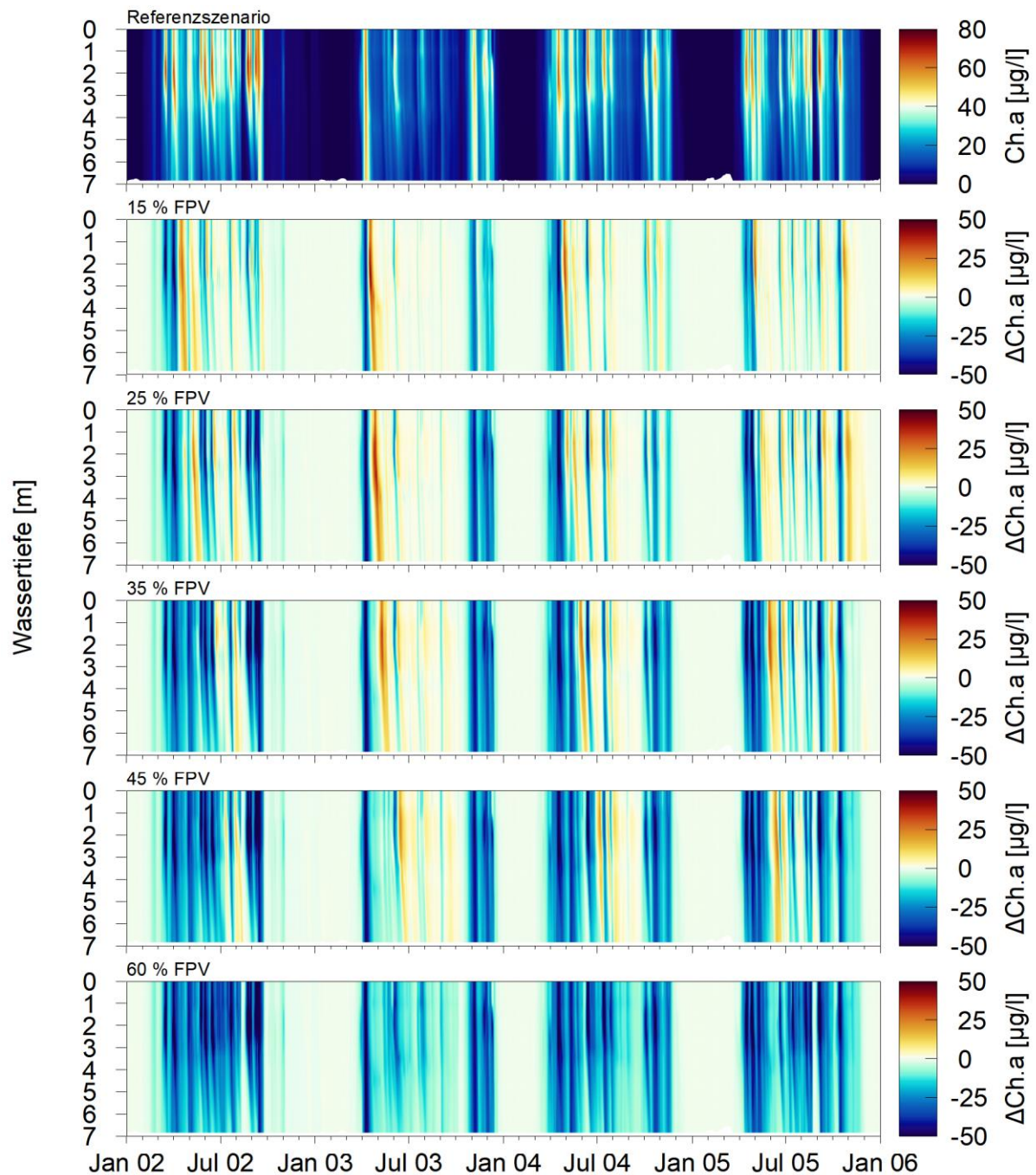


Abbildung 3.39: Berechnete Konzentrationen an Chlorophyll a im Profil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Differenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im tiefsten Bereich des Modellsees 2 (horizontale Mittelwerte)

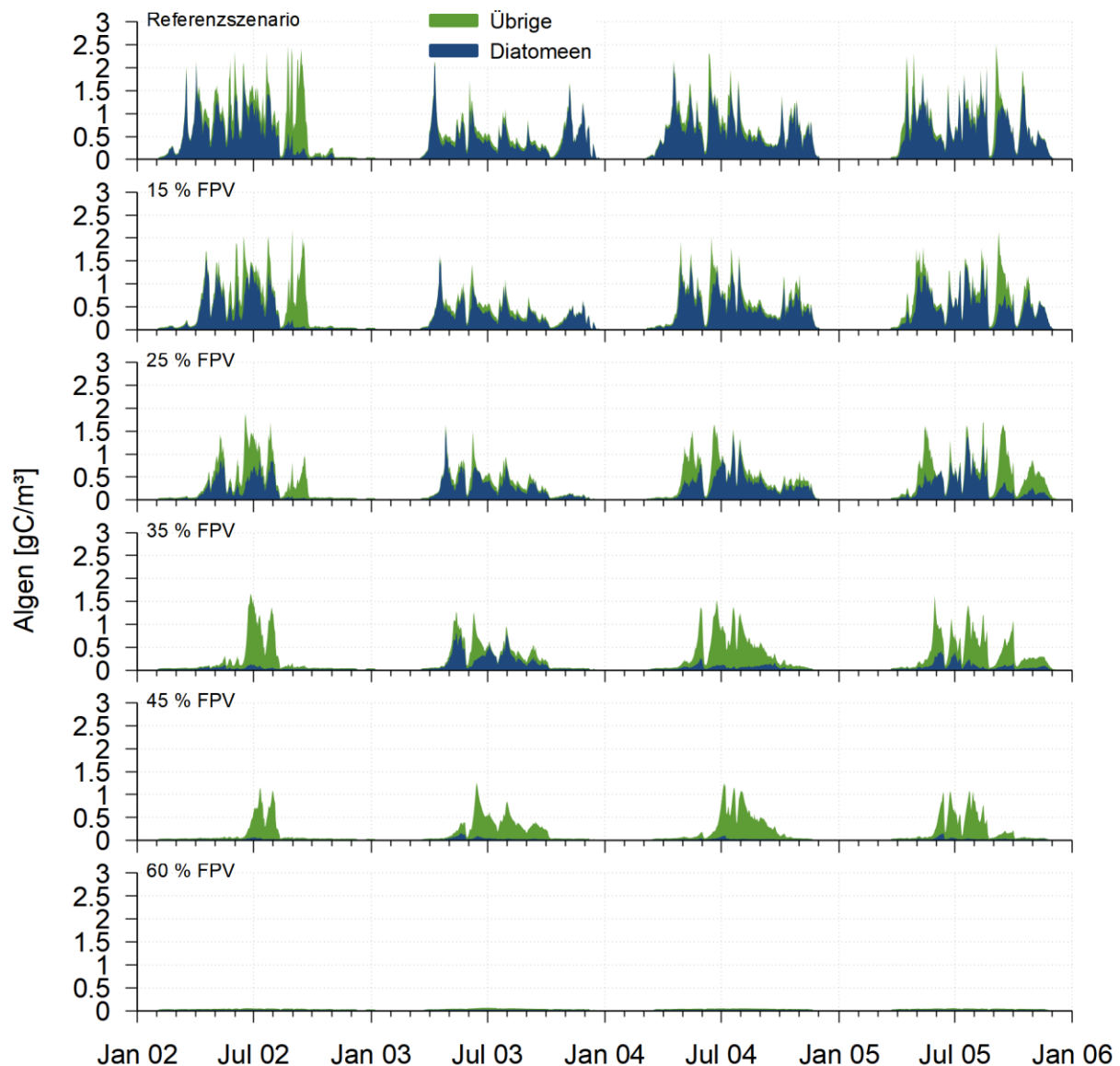


Abbildung 3.40: Berechnete Algenkonzentrationen für die beiden Modellgruppen Diatomeen und übrige Algen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 2

Abbildung 3.41 zeigt die berechnete jährliche **Nettoprimärproduktion** ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden. Tabelle 3.3 listet die dazugehörigen Zahlenwerte mit Angabe der prozentualen Abnahme mit FPV-Bedeckung auf. Mit zunehmendem FPV-Bedeckungsgrad nimmt die Produktivität in allen Jahren ab. Für die Szenarien bis zu einer Bedeckung von 45 % sind von Jahr zu Jahr ähnliche, etwas stärkere Unterschiede bei der Abnahme wie beim Modellsee 1 mit geringerer Wassertiefe zu erkennen, die auf die Zuflusssituation und den damit verbundenen Verweilzeiten im Gewässer zurückzuführen sind. Beim 60 %-Szenario ist hingegen in allen Jahren wie bereits diskutiert die Nettoprimärproduktionen vernachlässigbar gering.

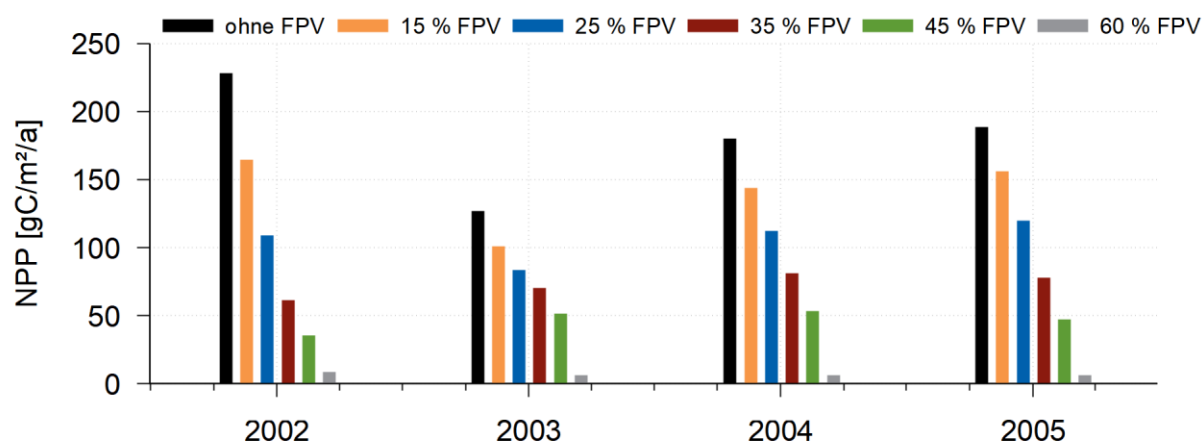


Abbildung 3.41: Berechnete jährliche Nettoprimärproduktion ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 2

Tabelle 3.3: Berechnete, jährliche Nettoprimärproduktion in gC/m²/a im Modellsee 2 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden sowie prozentuale Abnahme mit FPV im Vergleich zur Situation ohne FPV

Jahr	Ohne FPV	15 % FPV	25 % FPV	35 % FPV	45 % FPV	60 % FPV
2002	228,2	164,8 (-27,8 %)	109,1 (-52,2 %)	61,2 (-73,2 %)	35,7 (-84,4 %)	8,6 (-96,3 %)
2003	127,0	100,9 (-20,5 %)	83,4 (-34,3 %)	70,2 (-44,7 %)	51,6 (-59,3 %)	6,3 (-95,1 %)
2004	180,4	144,1 (-20,1 %)	112,3 (-37,8 %)	81,1 (-55,0 %)	53,6 (-70,3 %)	6,1 (-96,6 %)
2005	188,7	156,2 (-17,2 %)	120,1 (-36,3 %)	77,9 (-58,7 %)	47,5 (-74,8 %)	6,1 (-96,8 %)

Als Folge einer geringeren Primärproduktion steigen im Gewässer die **Sichttiefen** an. Abbildung 3.42 zeigt die berechneten Secchi-Tiefen im Modellsee 2 für die Szenarien ohne und mit FPV. Analog zur Abnahme der Algenkonzentration nimmt auch die Sichttiefe zu. Zudem führt auch die geringere Mineralisierung von Biomasse zu einer Abnahme der gelösten organischen Stoffe (z. B. Huminstoffe) im Weiher, die ebenfalls die Sichttiefe beeinflussen. Dies wird insbesondere im Szenario mit 60 % Bedeckung in Zeiträumen mit geringen Austauschzeiten im Gewässer im Sommer deutlich. Eine höhere Sichttiefe begünstigt das Makrophytenwachstum und kann somit zu einem Wechsel vom phytoplanktondominierten in den makrophytendominierten Zustand führen.

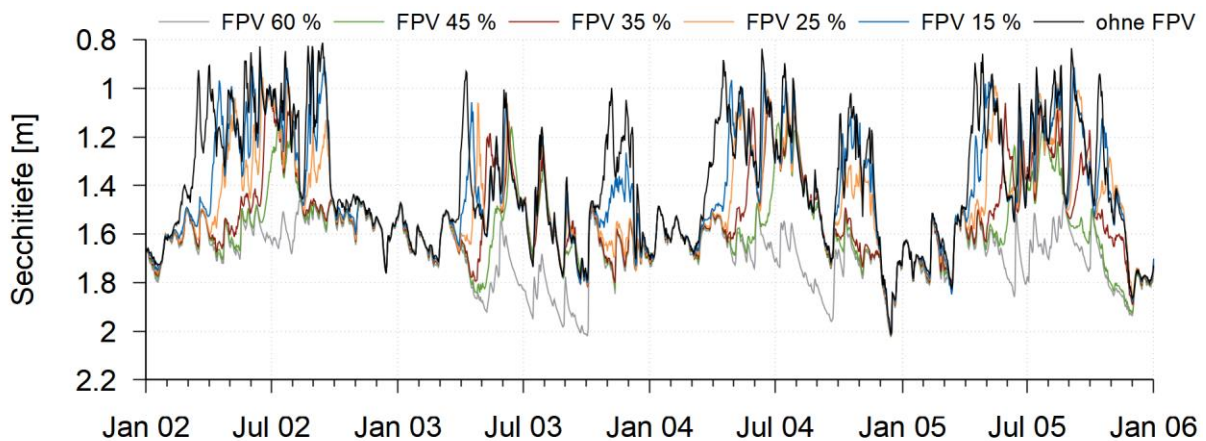


Abbildung 3.42: Berechnete Sichttiefen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 2

3.4.3 Sauerstoffgehalt

Im Gegensatz zu den Szenarien des Modellsees 1 mit geringeren Wassertiefen liegen im Modellsee 2 während der Sommermonate stabile Schichtungsverhältnisse vor, die auch die Sauerstoffkonzentrationen beeinflussen. Abbildung 3.43 zeigt die berechneten **Sauerstoffkonzentrationen** für die Modellszenarien ohne und mit FPV **an der Wasseroberfläche** (Diagramm a)) **und über Grund** (Diagramm c)). Die Diagramme b) und d) zeigen jeweils die Differenzen zwischen den FPV-Szenarien und dem Referenzszenario. Die Dichteschichtung führt dazu, dass im Tiefenwasser der Sauerstoff vollständig gezehrt wird. Oberflächennah hingegen ähneln die Ergebnisse denen des Modellsees 1. Die Sauerstoffkonzentrationen sind dort ganzjährig hoch und im Sommerhalbjahr durch die Übersättigungen aufgrund der Primärproduktion geprägt. Da letztere in den Szenarien mit FPV-Bedeckung abnimmt, fallen in diesen Szenarien die Übersättigungen geringer aus. Damit sind die Sauerstoffkonzentrationen mit FPV-Bedeckung oberflächennah meist geringer als ohne, wie auch die in Diagramm b) dargestellten Differenzen veranschaulichen. Zeitliche Verschiebungen beim Auftreten von Algenblüten können zeitweise auch zu einem Anstieg der Konzentrationen führen. Auch beim Sauerstoff im Tiefenwasser sind die Konzentrationen tendenziell geringer mit FPV-Bedeckung. Mehrere Effekte sind für die entstehenden Differenzen ohne und mit FPV verantwortlich. Die Bedeckung mit FPV führt, wie die Auswertungen der Wassertemperaturen in Kapitel 3.4.1 gezeigt haben, zu einer geringeren Durchmischung des Wasserkörpers und einer stabileren Temperaturschichtung. Dieser Effekt wirkt sich nicht nur im Sommer aus, sondern auch in den Wintermonaten. Abbildung 3.43 d) zeigt auch im Winter mit FPV signifikante Abnahmen bei der Sauerstoffkonzentration. Begünstigt wird dieser Effekt durch die gewählte Bathymetrie des Modellsees 2. Die Fläche mit Wassertiefen größer 5 m ist relativ gering. Damit ist das Verhältnis von Sedimentoberfläche zu Wasservolumen im Tiefenwasser hoch, was die

Sauerstoffzehrung beschleunigt. In den Sommermonaten treten Durchmischungsereignisse mit FPV seltener auf oder sind schwächer ausgeprägt, was die Auffrischung des Tiefenwassers mit Sauerstoff verringert. Ein weiterer Effekt, der die Sauerstoffkonzentrationen im Tiefenwasser maßgeblich beeinflusst, ist die geringere Primärproduktion mit FPV-Bedeckung. Die damit geringeren Übersättigungen führen bei ungeschichteten Verhältnissen (z. B. Frühjahr und Herbst 2003) oder während sommerlicher Durchmischungsereignisse im Tiefenwasser zu einer Abnahme der Sauerstoffkonzentrationen im Vergleich zur Situation ohne FPV. Mit FPV ist aber auch zeitweise mit einer Zunahme der Sauerstoffkonzentrationen im Tiefenwasser zu rechnen. Grund hierfür ist die geringere Produktion an Biomasse im Gewässer, die auf die Sohle absinkt und dort unter Sauerstoffverbrauch mineralisiert wird. Dieser Effekt ist am deutlichsten in der zweiten Hälfte der Wachstumsperiode erkennbar, wenn sich bereits größere Mengen an Biomasse abgelagert haben und die Sauerstoffkonzentrationen nach dem Auflösen der Dichteschichtung wieder ansteigen. In allen Jahren im betrachteten Zeitraum sind in diesem Zeitraum signifikante Zunahmen der Sauerstoffkonzentrationen mit FPV zu erkennen.

Abbildung 3.44 zeigt die berechneten **Sauerstoffkonzentrationen** im Modellsee 2 **im Profil** für das Szenario ohne FPV sowie die Sauerstoffdifferenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden. Die Differenzenprofile stellen die beschriebenen Effekte auf anschauliche Weise dar.

Inwieweit diese Prozesse mit ihrer teilweise gegenläufigen Wirkung auf die Sauerstoffkonzentrationen **eine Verbesserung oder Verschlechterung der Sauerstoffverhältnisse bewirken, lässt sich nicht eindeutig beantworten**. Dies veranschaulicht die Auswertung der **Anzahl an Tagen pro Jahr mit Sauerstoffkonzentrationen kleiner 2 mg/l über Grund** in Abbildung 3.45. In den Jahren 2002 und 2005 überwiegen die beschriebenen Effekte der geringeren Durchmischung mit FPV. In der Folge nehmen in diesen Jahren mit FPV die Tage mit sauerstoffarmen bzw. sauerstofffreien Verhältnissen im Tiefenwasser zu. In den Jahren 2003 und 2004 hingegen ist die Anzahl dieser Tage in allen Szenarien fast unverändert. Hier machen sich die Effekte der geringeren Sauerstoffzehrung in Folge der verringerten Produktion an Biomasse bemerkbar.

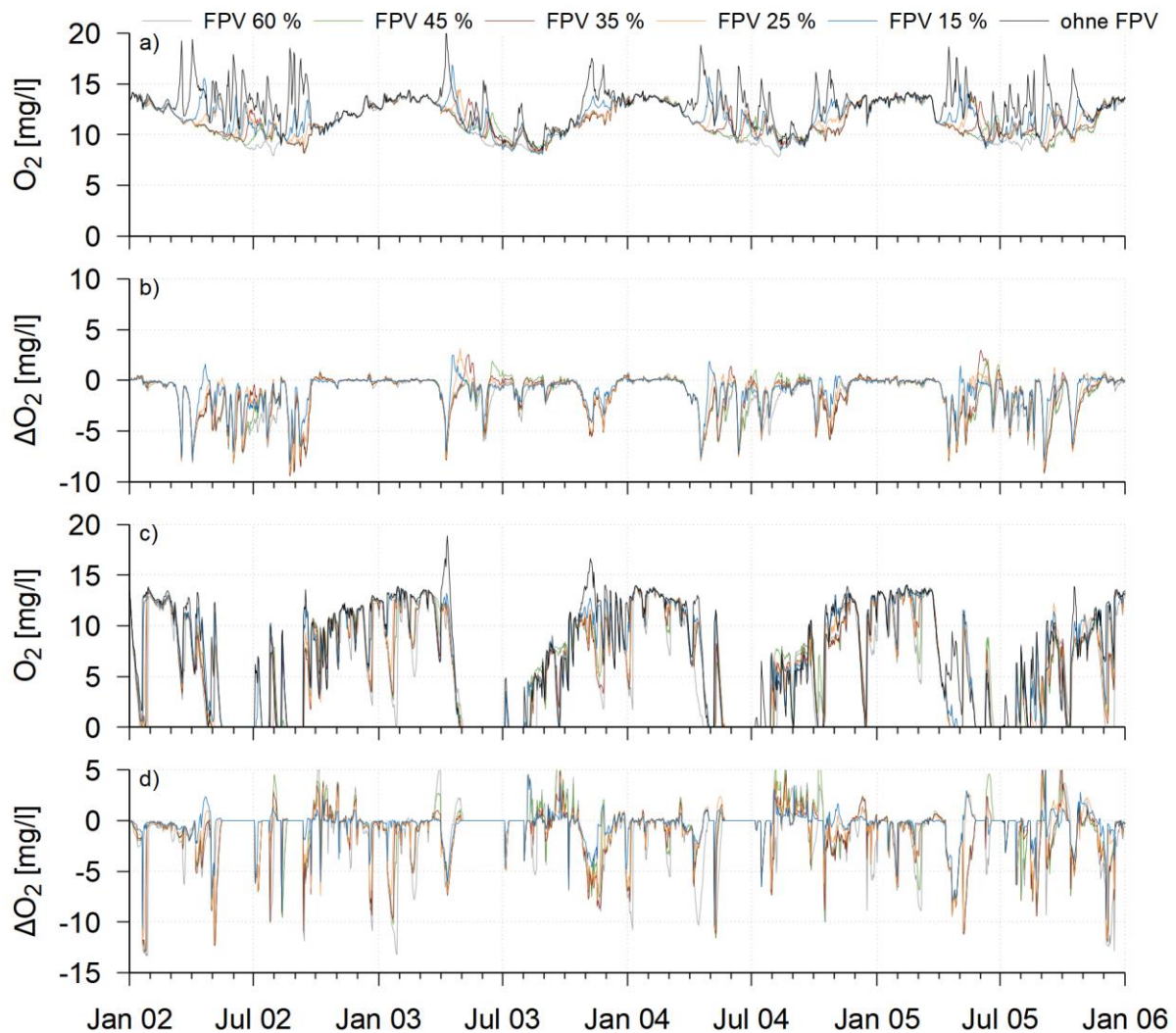


Abbildung 3.43: Berechnete Sauerstoffkonzentrationen a) an der Wasseroberfläche und c) über Grund des Modellsees 2 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden sowie Differenz der FPV-Szenarien zur Situation ohne FPV b) an der Wasseroberfläche und d) über Grund

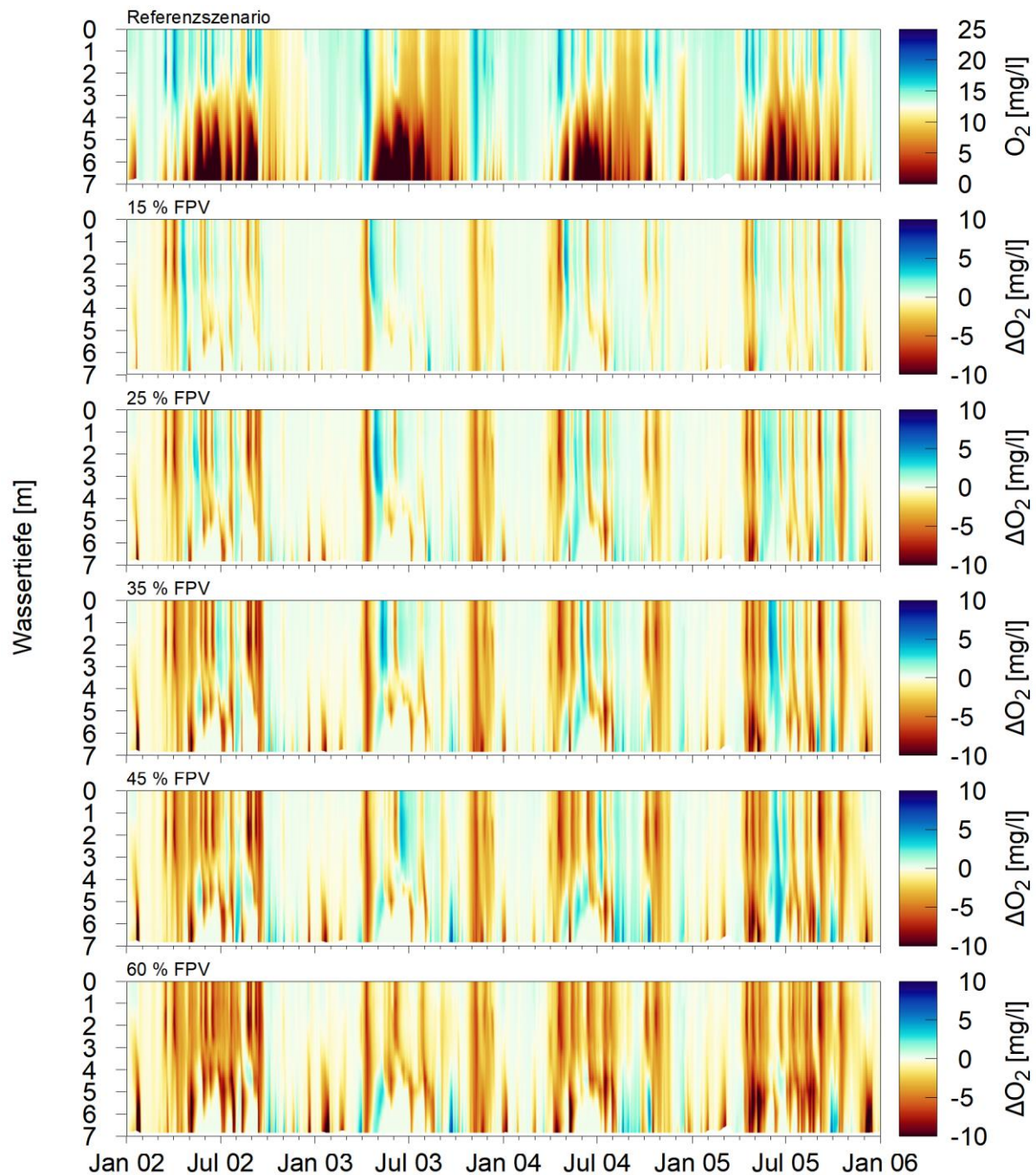


Abbildung 3.44: Berechnete Sauerstoffkonzentrationen im Profil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Differenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden des Modellsees 2 (horizontale Mittelwerte)

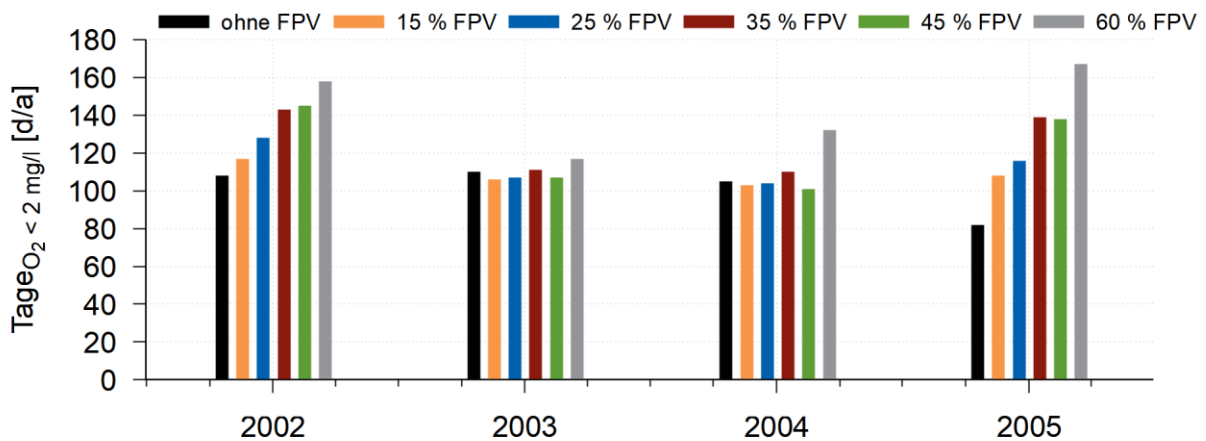


Abbildung 3.45: Anzahl der Tage pro Jahr mit Sauerstoffkonzentrationen kleiner 2 mg/l über Grund im tiefsten Bereich des Modellsees 2

3.4.4 Nährstoffe

Eine veränderte Primärproduktion im Gewässer hat Auswirkungen auf dessen Nährstoffkreisläufe. Abbildung 3.46, Abbildung 3.47, Abbildung 3.48 und Abbildung 3.49 zeigen die Konzentrationen an Phosphatphosphor, Nitratstickstoff, Ammoniumstickstoff und Silizium im Modellsee 2 im Profil für das Szenario ohne FPV sowie die Temperaturdifferenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden. Beim Phosphat, Nitrat und Silizium bewirkt die FPV-Bedeckung eine Zunahme der Konzentrationen. Je größer der Bedeckungsgrad, desto höher fallen die Konzentrationsanstiege aus. Grund hierfür ist die geringere Primärproduktion mit FPV und die damit verbundene, verringerte Zehrung an Nährstoffen. Beim Szenario mit 60 % FPV-Bedeckungsgrad tritt praktisch keine Nährstoffabnahme in der Wachstumsperiode auf, da die Primärproduktion fast vollständig zusammengebrochen ist. Die Ammoniumkonzentrationen hingegen nehmen mit FPV-Bedeckung ab. Aufgrund der geringeren Primärproduktion wird weniger Biomasse im Gewässer mineralisiert und damit sinkt auch die Ammoniumfreisetzung. Dies macht sich insbesondere in den Sommermonaten während geschichteter Verhältnisse im Tiefenwasser bemerkbar, da dort unter sauerstofffreien Verhältnissen Ammonium akkumuliert wird. Auch im Winter, wenn die Nitrifikation von Ammonium zu Nitrat aufgrund geringer Temperaturen langsamer abläuft, macht sich die geringere Ammoniumfreisetzung in den FPV-Szenarien bemerkbar.

Phosphatrücklösungsprozesse sind in den Modellszenarien des Modellsees 2 nicht berücksichtigt, da hierfür die Modellkonfiguration des Modellsees 1 mit geringeren Wassertiefen verwendet wurde und sich die Rücklösung beim Modellsee 1 als nicht relevant gezeigt hat. Im Modell für den Modellsee 3 wird dieser Prozess wieder betrachtet.

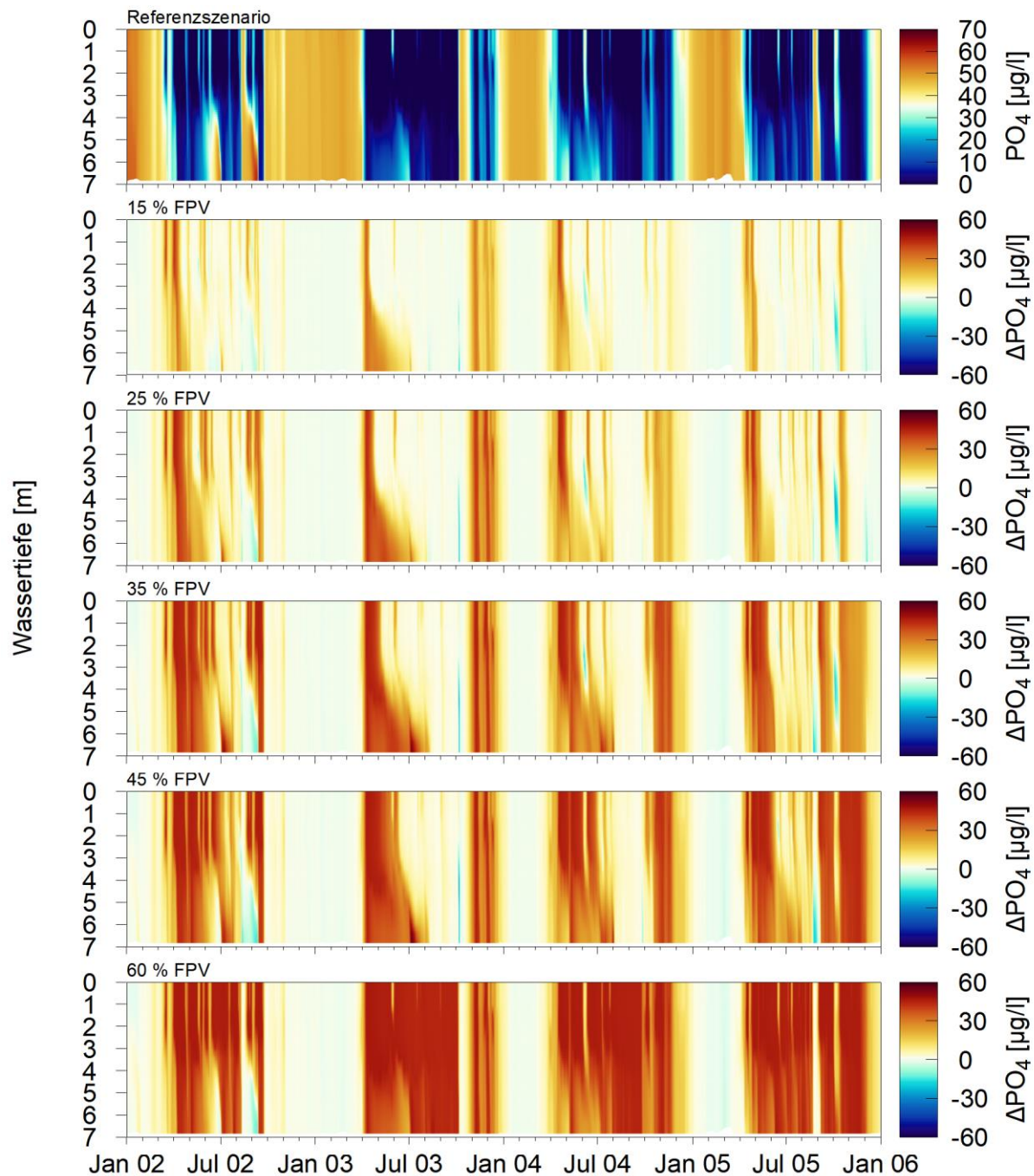


Abbildung 3.46: Berechnete Phosphatphosphorkonzentrationen (ohne Rücklöseprozesse, s. hierzu Modellsee 3) im Profil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Differenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 2 (horizontale Mittelwerte)

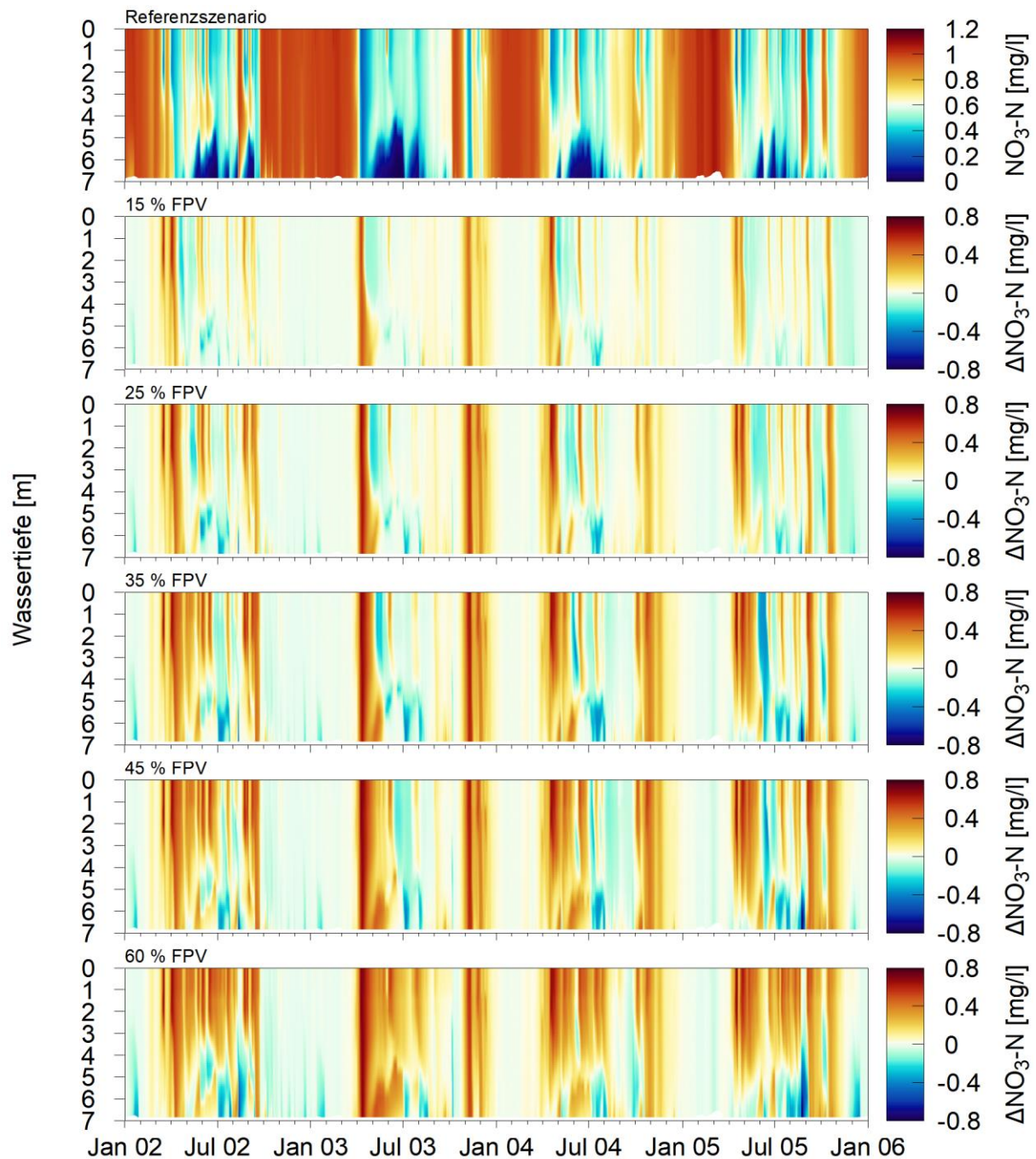


Abbildung 3.47: Berechnete Nitratstickstoffkonzentrationen im Profil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Differenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 2 (horizontale Mittelwerte)

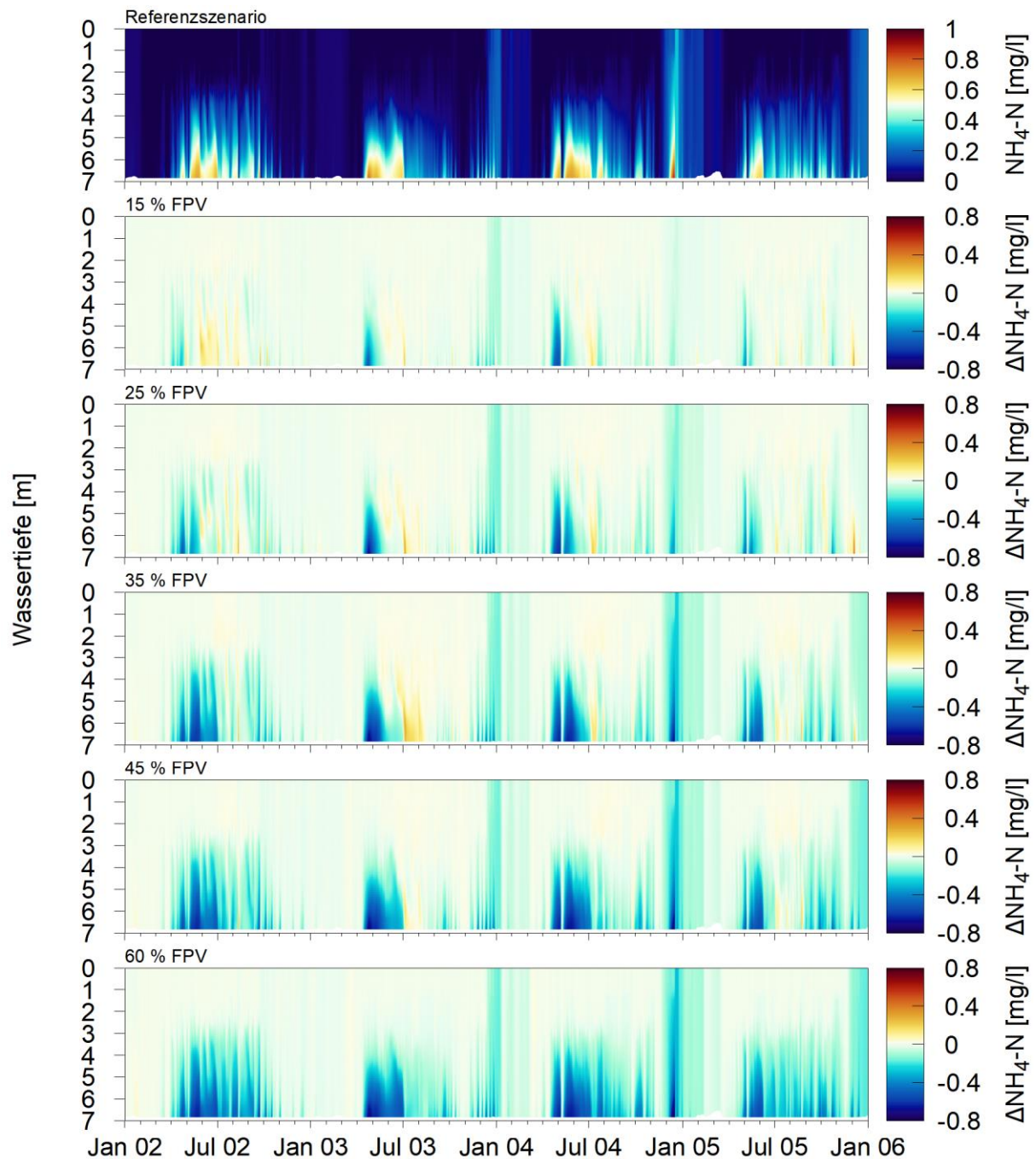


Abbildung 3.48: Berechnete Ammoniumstickstoffkonzentrationen im Profil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Differenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 2 (horizontale Mittelwerte)

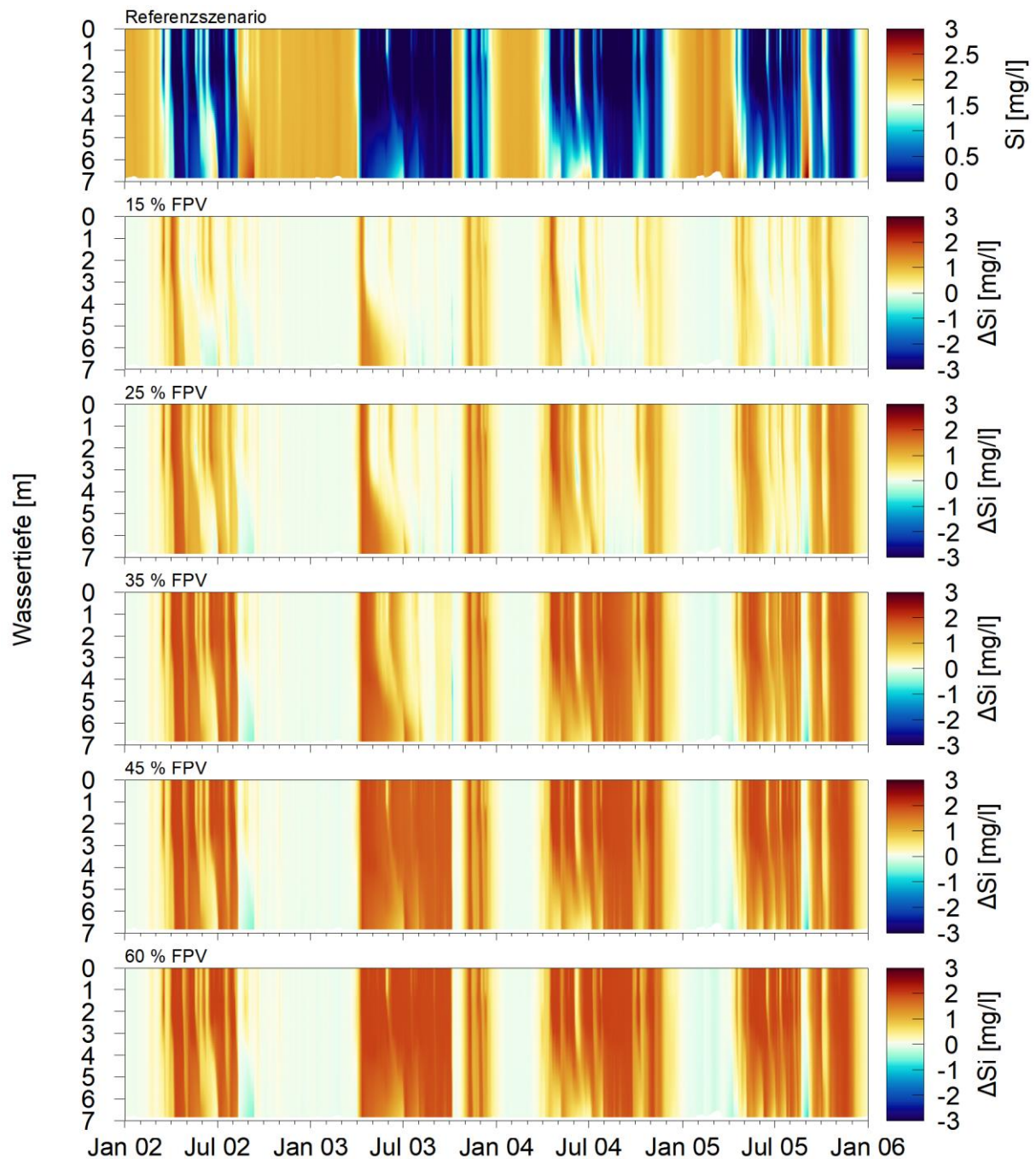


Abbildung 3.49: Berechnete Siliziumkonzentrationen im Profil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Differenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 2 (horizontale Mittelwerte)

3.5 Modellsee 3: liegende FPV-Module

3.5.1 Wassertemperaturen

Bei einer Bedeckung der Wasseroberfläche mit FPV ändern sich die Wärmeflüsse zwischen Gewässer und Atmosphäre. Dies wurde in Kapitel 3.1.1 für den

Modellsee 1 vorgestellt und gilt in vergleichbarer Form auch für den Modellsee 3. Daraus resultieren Veränderungen bei den Wassertemperaturen im Gewässer. Abbildung 3.50 zeigt die berechneten, **oberflächennahen Wassertemperaturen** im Modellsee 3 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden sowie die Differenzen der FPV-Szenarien zum Referenzszenario. Ähnlich wie beim Modellsee 1 wird mit zunehmendem Bedeckungsgrad die Erwärmung des Gewässers im Frühjahr weiter verzögert und die Wassertemperaturen im Sommer sind geringer. Im Herbst hingegen kühlt das Gewässer langsamer ab und die Wassertemperaturen sind zeitweise geringfügig höher mit FPV.

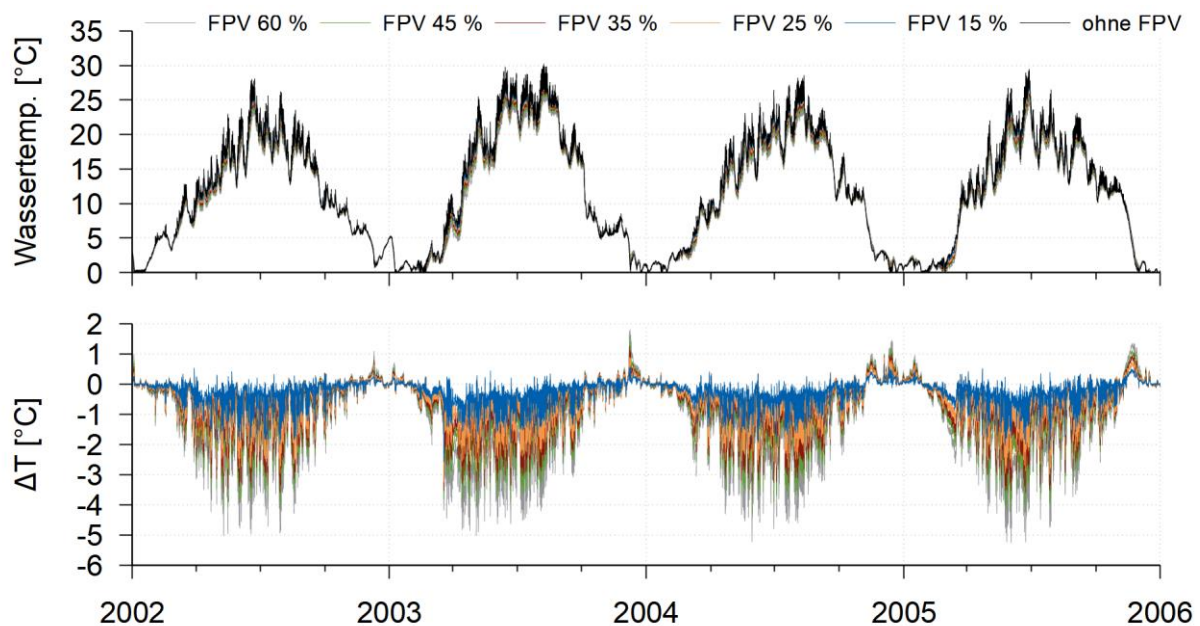


Abbildung 3.50: Berechnete Wassertemperaturen an der Wasseroberfläche des Modellsees 3 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden (oben) sowie Differenz der FPV-Szenarien zur Situation ohne FPV (unten)

Im Gegensatz zum Modellsee 1 stellt sich im Modellsee 3 in den Sommermonaten eine Temperaturschichtung ein, die von der FPV-Bedeckung beeinflusst wird. Abbildung 3.51 zeigt die berechneten **Wassertemperaturen über Grund** im tiefsten Bereich des Modellsees 3 für die Szenarien ohne und mit FPV sowie die Differenzen der FPV-Szenarien zum Referenzszenario. In den Sommermonaten sind die Wassertemperaturen mit FPV geringer. Zudem nehmen insbesondere bei den höheren Bedeckungsgraden die Durchmischungsereignisse, bei denen die Wassersäule vollständig umgewälzt wird, ab. Die Dichteschichtung bleibt somit mit FPV länger bestehen. Besonders auffallend ist dies im warmen und niederschlagsarmen Jahr 2003.

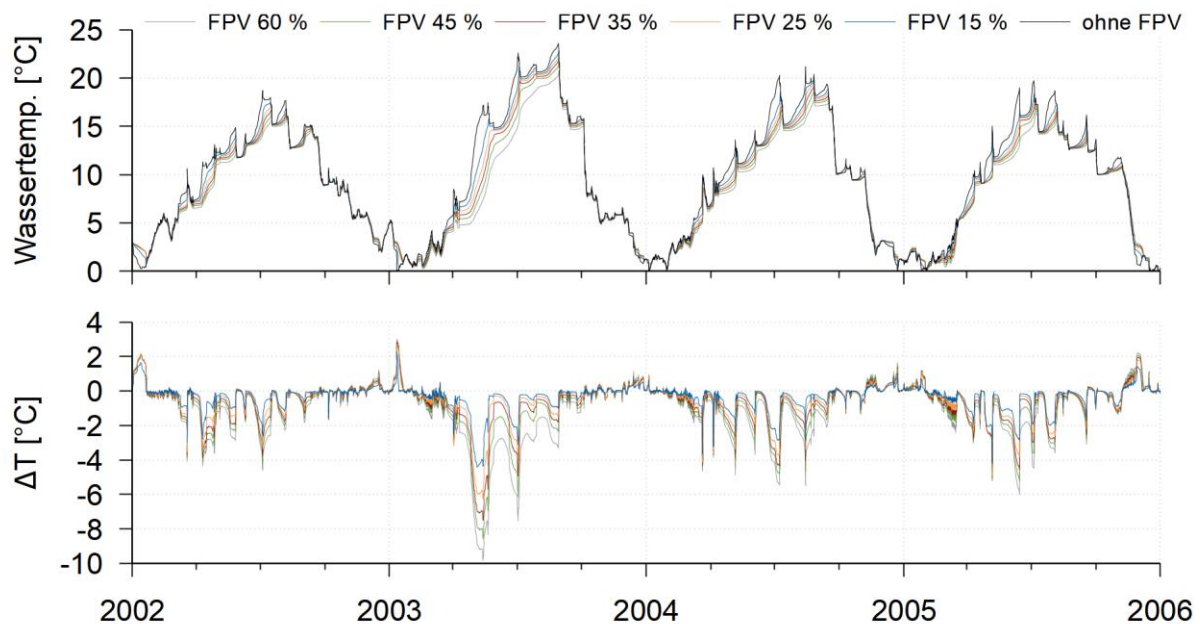


Abbildung 3.51: Berechnete Wassertemperaturen über Grund des Modellsees 3 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden (oben) sowie Differenz der FPV-Szenarien zur Situation ohne FPV (unten)

Abbildung 3.52 zeigt die berechneten **Wassertemperaturen** im tiefsten Bereich des Modellsees 3 **im Profil** für das Szenario ohne FPV sowie die Temperaturdifferenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden. Hier wird auch nochmal die Tendenz zu geringeren Temperaturen im Sommer und höheren im Winter mit FPV deutlich. Zudem zeigt sich bei den Differenzen in den Sommermonaten ein vertikaler Gradient mit höheren Temperaturunterschieden im Tiefenwasser im Vergleich zum Oberflächenwasser. Damit wird die Dichteschichtung mit FPV-Bedeckung stabiler.

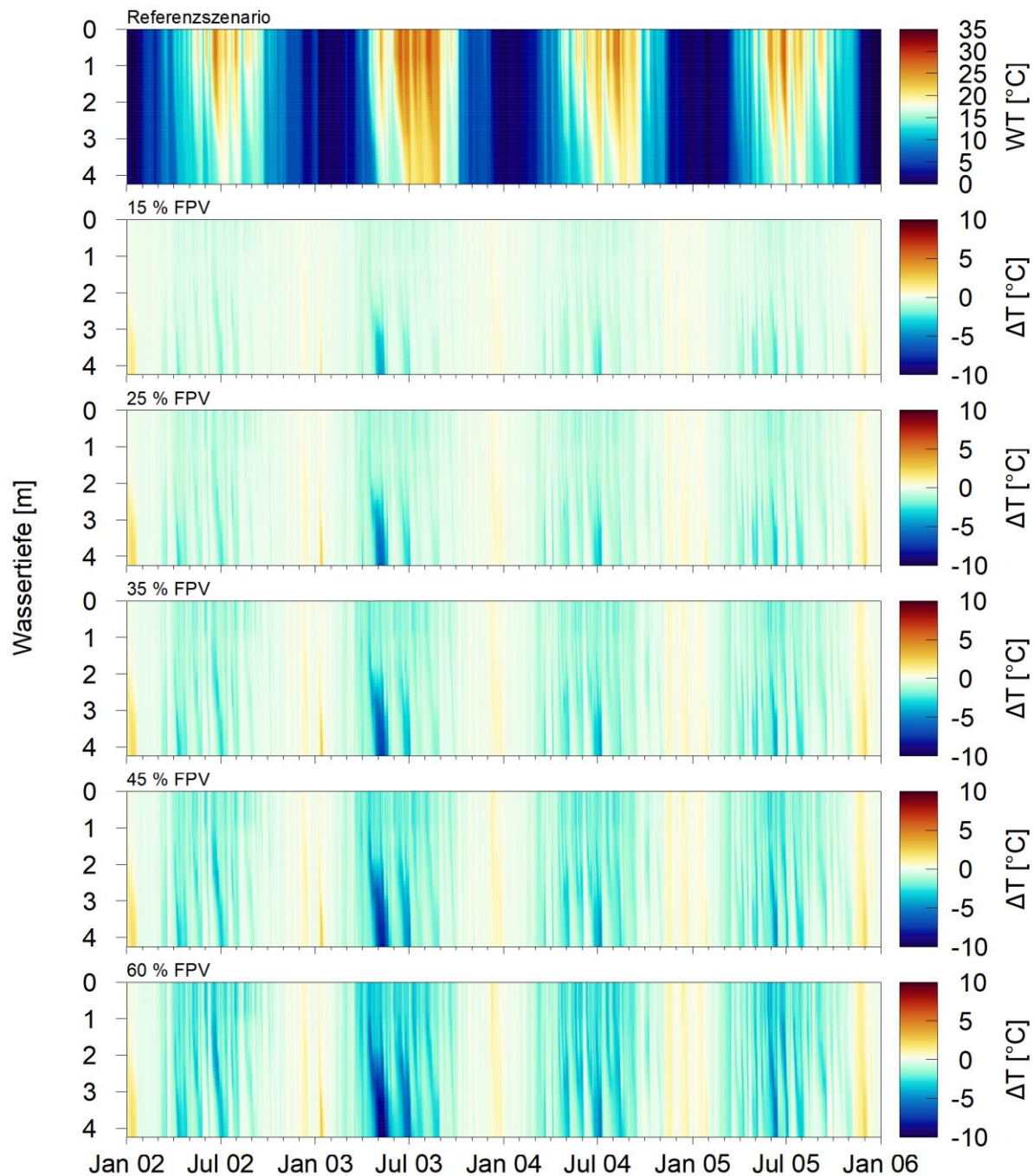


Abbildung 3.52: Berechnetes Temperaturprofil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Temperaturdifferenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im tiefsten Bereich des Modellsees 3

3.5.2 Phytoplankton-Entwicklung und Sichttiefe

Wie bereits in den vorhergehenden Kapiteln gezeigt, nimmt die Primärproduktion mit FPV-Bedeckung grundsätzlich ab, da die Lichtzufuhr ins Gewässer beschränkt ist und die Wassertemperaturen geringer sind. Dies gilt auch für die Modellszenarien des Modellsees 3. Abbildung 3.53 zeigt die berechneten, oberflächennahen

Konzentrationen an **Chlorophyll a** ohne und mit FPV im Gewässer. In Abbildung 3.56 sind zudem Konzentrationsprofile für das Szenario ohne FPV sowie die Differenzen zu den Szenarien mit FPV dargestellt. In allen FPV-Szenarien verschiebt sich die Frühjahrsblüte um einige Tage bzw. Wochen nach hinten. Dies gilt auch für Algenblüten während der Sommermonate. Aufgrund dieser Verschiebungen zeigen die Differenzenprofile einen hochvariablen Verlauf. Im zuflussarmen Jahr 2003 werden in den Sommermonaten mit zunehmendem FPV-Bedeckungsgraden kurzzeitig höhere Konzentrationen an Chlorophyll-a erreicht. Aufgrund der geringen Nährstofffrachten ins Gewässer in diesem Jahr erfolgt die Nährstoffstoffverarmung im Epilimnion im Referenzszenario früher als bei den Bedeckungsszenarien. Somit sind mit Bedeckung stärkere Algenblüten im Sommer möglich. Über den gesamten Jahresverlauf betrachtet nehmen jedoch die Chlorophyll-a-Konzentrationen mit zunehmendem Bedeckungsgrad weiter ab. Dies wird im Folgenden auch anhand der jährlichen Nettoprimärproduktion veranschaulicht. Beim Szenario mit 60 % Bedeckung bricht im Jahr 2002 das Algenwachstum fast komplett zusammen.

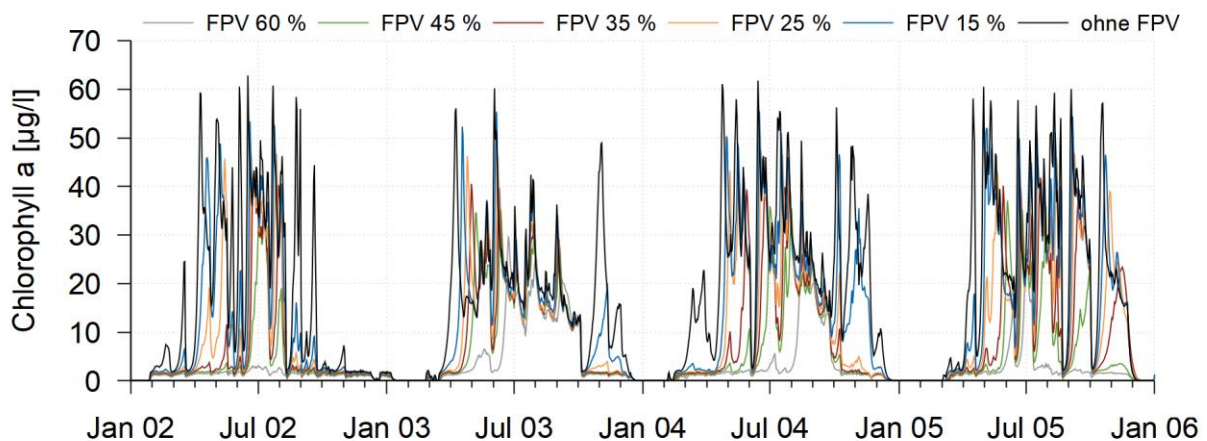


Abbildung 3.53: Berechnete, oberflächennahe Konzentrationen an Chlorophyll a ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 3 (seeweite Mittelwerte)

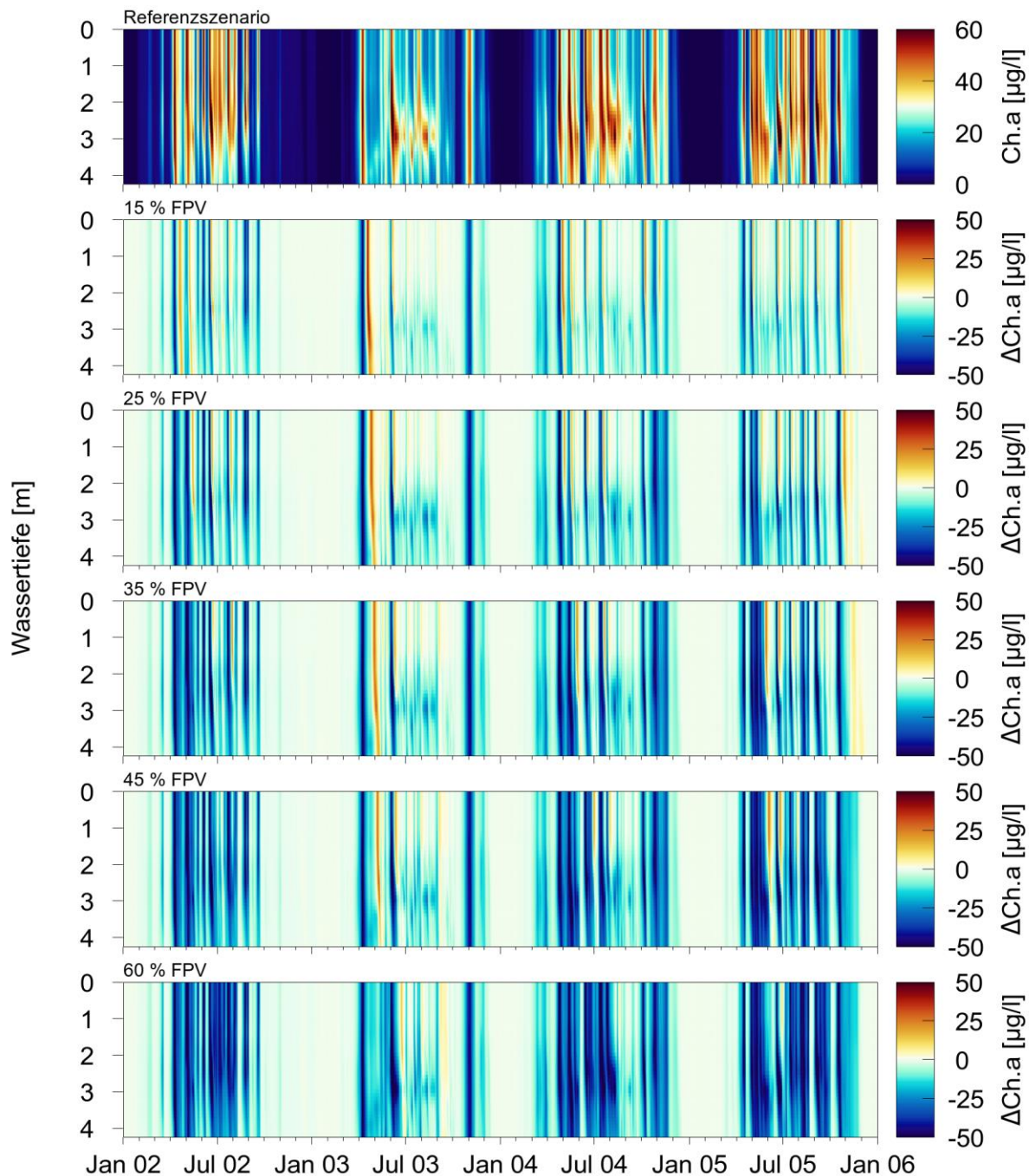


Abbildung 3.54: Berechnete Konzentrationen an Chlorophyll a im Profil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Differenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 3 (seeweite horizontale Mittelwerte)

Abbildung 3.55 zeigt die berechneten, jeweiligen **Anteile der beiden im Modell verwendeten Algengruppen** für die Szenarien mit und ohne FPV. Wie auch im Modellsee 1 nimmt der Anteil der Kieselalgen mit zunehmender FPV-Bedeckung weiter ab, während der Anteil der übrigen Algen in einigen Jahren fast konstant bleibt bzw. leicht abnimmt. Grund hierfür ist die geringere Sinkgeschwindigkeit der übrigen Algen, die dieser Gruppe einen Wachstumsvorteil gegenüber den schneller

absinkenden Kieselalgen verschafft. Ebenso auffällig ist insgesamt eine deutliche Verkürzung des saisonalen Wachstums der Algen mit zunehmender Bedeckung, was der verzögerten Erwärmung im Frühjahr und der zunehmend starken Beschattung geschuldet ist.

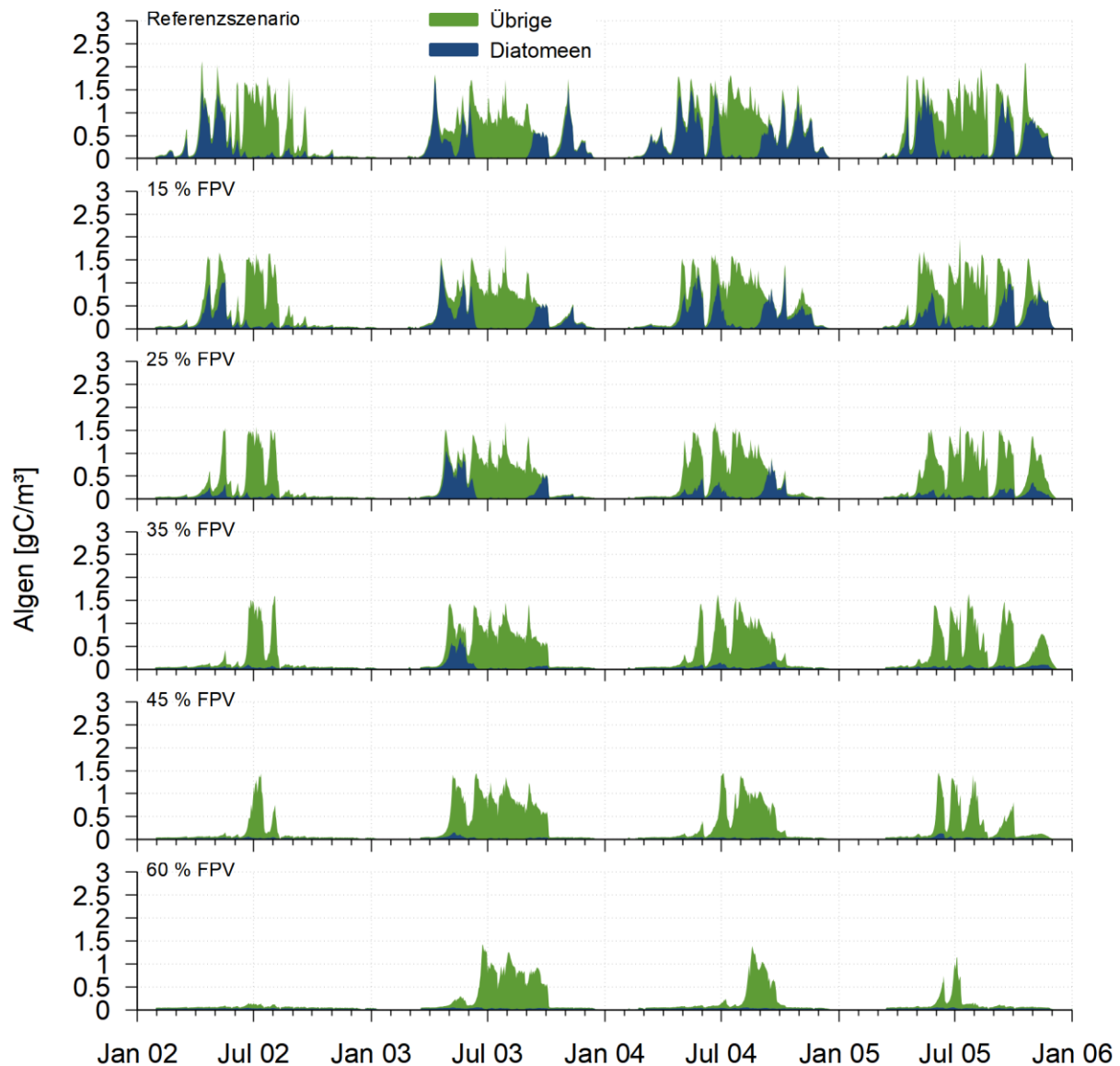


Abbildung 3.55: Berechnete Algenkonzentrationen für die beiden Modellgruppen Diatomeen und übrige Algen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 3

Abbildung 3.56 zeigt die berechnete jährliche **Nettoprimärproduktion** ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 3. Tabelle 3.4 listet die dazugehörigen Zahlenwerte mit Angabe der prozentualen Abnahme mit FPV-Bedeckung auf. Die Primärproduktion nimmt in Abhängigkeit des Bedeckungsgrads ab. Das Ausmaß der Abnahme variiert dabei von Jahr zu Jahr. Im Jahr 2003 ist die

Abnahme der Primärproduktion im Vergleich zu den anderen Jahren mit FPV deutlich geringer. Dieser Effekt konnte vergleichbar auch beim Modellsee 1 festgestellt werden. Im Unterschied zu den anderen Jahren war 2003 sehr trocken und damit die Abflussspende über den Zufluss gering. Damit steigt die Verweilzeit des Wassers im Gewässer an, was den Aufbau einer Algenpopulation auch unter widrigen Lichtverhältnissen mit FPV-Bedeckung ermöglicht.

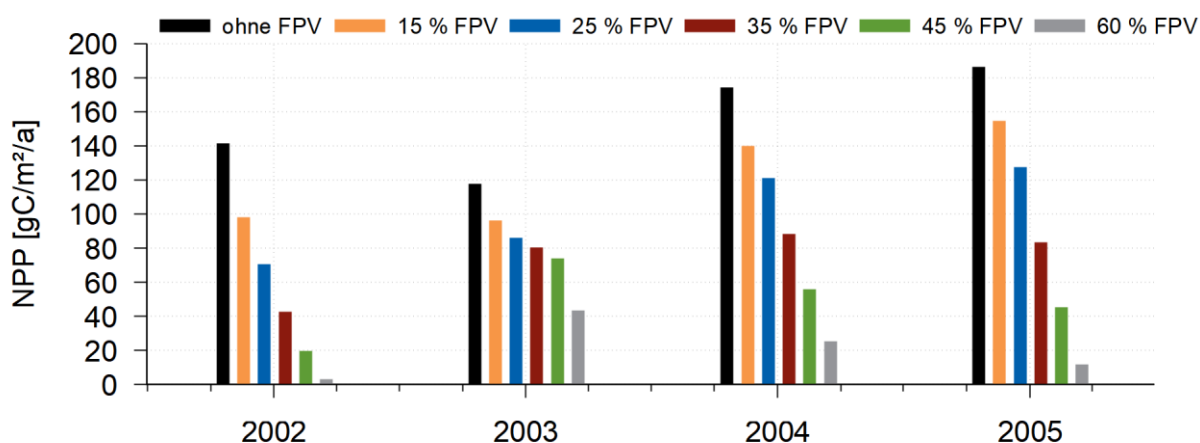


Abbildung 3.56: Berechnete jährliche Nettoprimärproduktion ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 3

Tabelle 3.4: Berechnete, jährliche Nettoprimärproduktion in gC/m²/a im Modellsee 3 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden sowie prozentuale Abnahme mit FPV im Vergleich zur Situation ohne FPV

Jahr	Ohne FPV	15 % FPV	25 % FPV	35 % FPV	45 % FPV	60 % FPV
2002	141,6	98,4 (-30,5 %)	70,7 (-50,0 %)	42,7 (-69,9 %)	19,6 (-86,1 %)	3,1 (-97,8 %)
2003	117,9	96,4 (-18,2 %)	86,1 (-26,9 %)	80,6 (-31,6 %)	74,0 (-37,2 %)	43,7 (-63,0 %)
2004	174,3	140,1 (-19,7 %)	121,2 (-30,5 %)	88,5 (-49,2 %)	56,1 (-67,8 %)	25,6 (-85,3 %)
2005	186,6	154,6 (-17,1 %)	127,4 (-31,7 %)	83,6 (-55,2 %)	45,3 (-75,7 %)	11,8 (-93,7 %)

Folgeerscheinung einer geringeren Primärproduktion ist ein Anstieg der **Sichttiefe** im Weiher. Abbildung 3.57 zeigt die berechneten Sichttiefen im Modellsee 3 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden. Bei sehr hohen Bedeckungsgraden verändert sich die Sichttiefe während der Wachstumsperiode im Sommer kaum gegenüber den hohen Winterwerten. Eine höhere Sichttiefe begünstigt das Makrophytenwachstum und kann somit zu einem Wechsel vom phytoplanktondominierten in den makrophytendominierten Zustand führen.

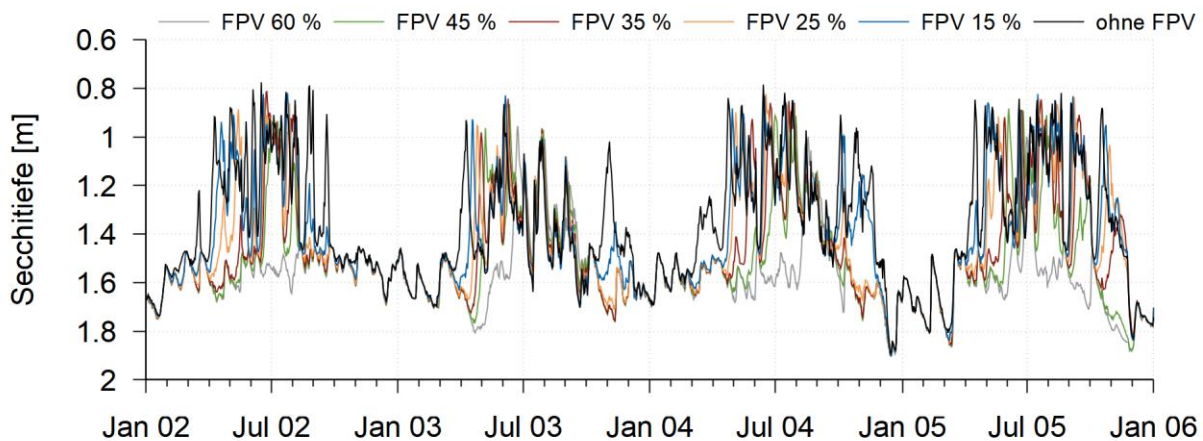


Abbildung 3.57: Berechnete Sichttiefen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 3

3.5.3 Sauerstoffgehalt

Aufgrund der Dichteschichtung im Sommerhalbjahr entstehen im Modellsee 3 in diesen Zeiträumen vertikale Gradienten bei den Sauerstoffkonzentrationen. Abbildung 3.58 zeigt die berechneten **Sauerstoffkonzentrationen** für die Modellszenarien ohne und mit FPV **an der Wasseroberfläche** (Diagramm a)) **und über Grund** (Diagramm c)). Die Diagramme b) und d) zeigen jeweils die Differenzen zwischen den FPV-Szenarien und dem Referenzszenario. In Abbildung 3.59 sind zudem die berechneten **Sauerstoffkonzentrationen** des Modellsees 3 **im Profil** für das Szenario ohne FPV sowie die Sauerstoffdifferenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden dargestellt. Oberflächennah ähneln die Ergebnisse denen vom Modellsee 1. Hier entstehen Unterschiede zwischen den FPV-Szenarien und dem Referenzszenario in erster Linie aufgrund eines zeitlich versetzten Auftretens von Algenblüten sowie insgesamt geringerer Primärproduktion, die zu geringeren Übersättigungen führt. Über Grund wird der Sauerstoff während geschichteter Zeiträume vollständig gezehrt. Durchmischungsereignisse führen in den Sommermonaten kurzzeitig zu einer Auffrischung der Sauerstoffkonzentrationen. Über Grund entstehen mit FPV im Vergleich zum Referenzszenario zeitweise große Unterschiede. Insgesamt überwiegt dabei eine Abnahme der Konzentrationen mit FPV. Dies bestätigt auch eine Auswertung der **Anzahl an Tagen pro Jahr mit Sauerstoffkonzentrationen kleiner 2 mg/l über Grund** (Abbildung 3.60). Dabei spielen mehrere Effekte eine Rolle. Zum einen finden mit FPV im Sommer weniger vertikale Durchmischungsereignisse statt bzw. diese werden schwächer, wie die Auswertung der Wassertemperaturen in Kapitel 3.5.1 gezeigt hat. Damit nimmt die Sauerstoffzufuhr aus den oberen Wasserschichten ins Tiefenwasser ab. Zum anderen sind aufgrund der geringeren Primärproduktion mit FPV die Übersättigungen in den oberen Wasserschichten geringer, was während Durchmischungsereignissen ebenfalls zu einer verringerten Sauerstoffzufuhr ins Tiefenwasser führt. Auf der

anderen Seite nimmt in den FPV-Szenarien die Sauerstoffzehrung im Tiefenwasser ab, da weniger Biomasse produziert wird. Dies ist in Abbildung 3.58 d) anhand der Zeiträume mit Zunahme der Sauerstoffkonzentrationen mit FPV zu erkennen. Diese folgen häufig auf Durchmischungsereignisse mit einer Auffrischung der Sauerstoffkonzentrationen. Aufgrund der geringeren Zehrung nehmen die Sauerstoffkonzentrationen mit FPV langsamer ab als im Referenzszenario. Dieser Effekt führt dazu, dass mit hohen Bedeckungsgraden in einigen Jahren mit sehr geringer Primärproduktion die Anzahl der Tage, an denen Konzentrationen unter 2 mg/l erreicht werden, abnehmen (Abbildung 3.60).

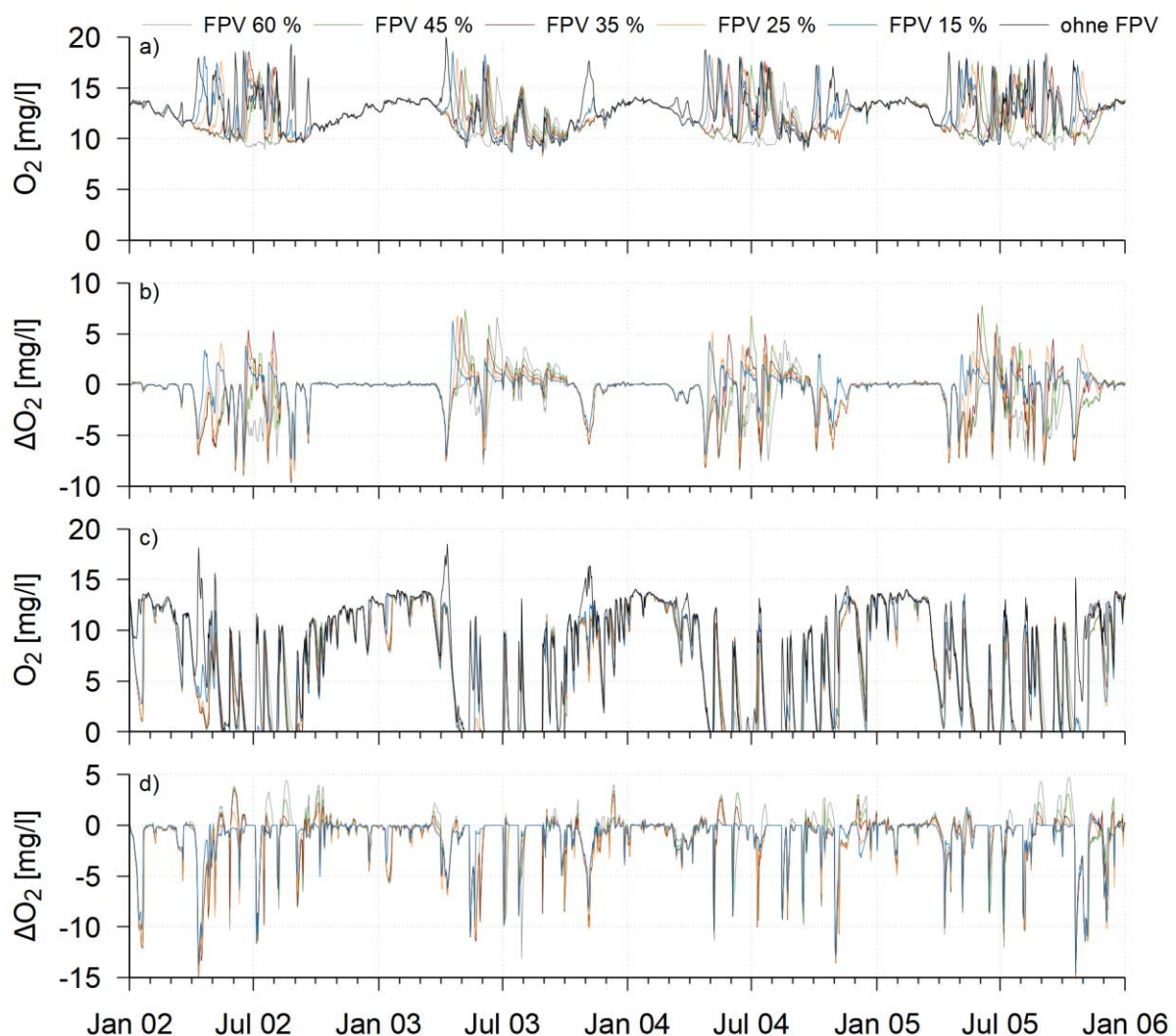


Abbildung 3.58: Berechnete Sauerstoffkonzentrationen a) an der Wasseroberfläche und c) über Grund des Modellsees 3 ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden sowie Differenz der FPV-Szenarien zur Situation ohne FPV b) an der Wasseroberfläche und d) über Grund

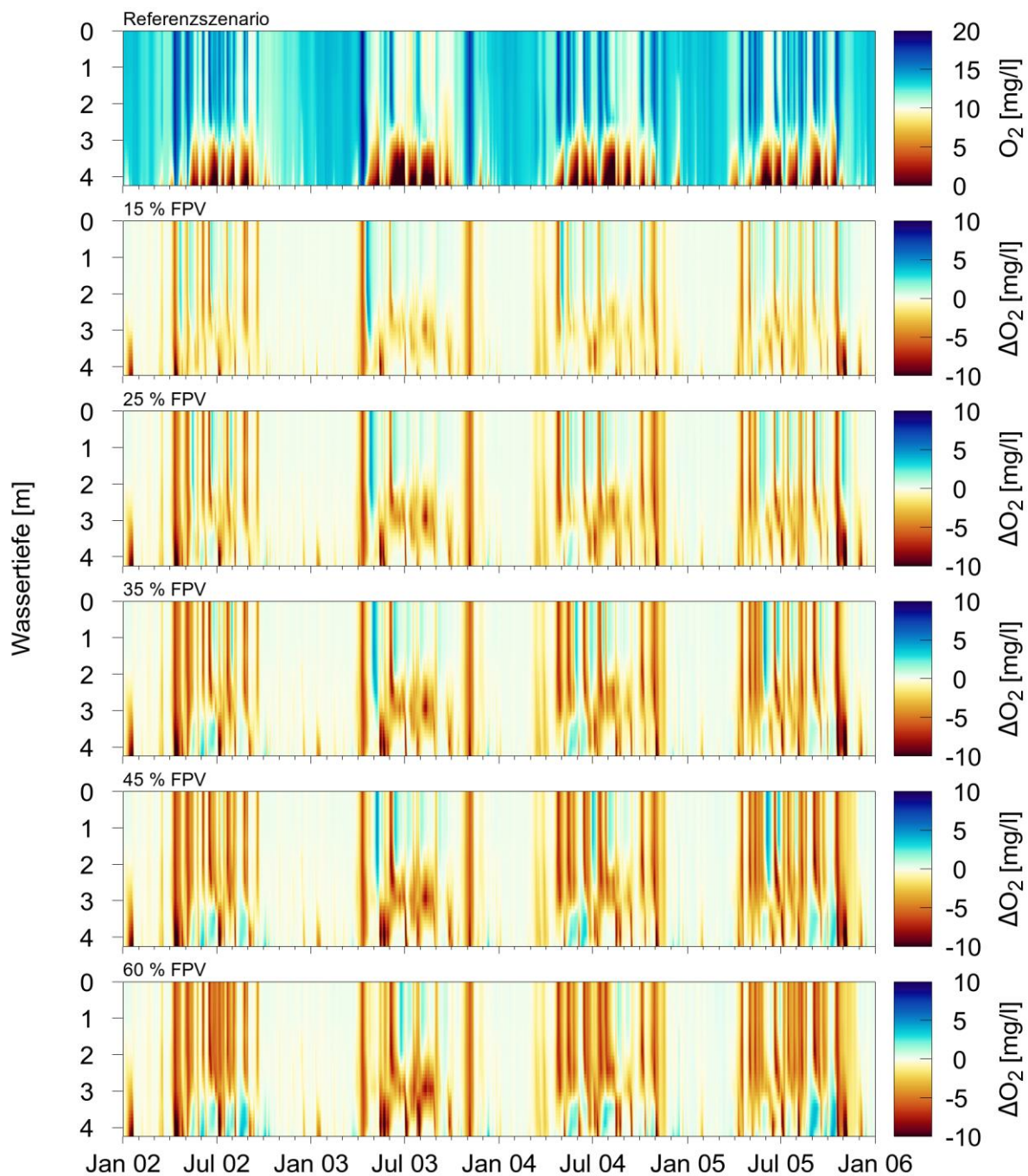


Abbildung 3.59: Berechnete Sauerstoffkonzentrationen im Profil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Differenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 3 (horizontale seeweite Mittelwerte)

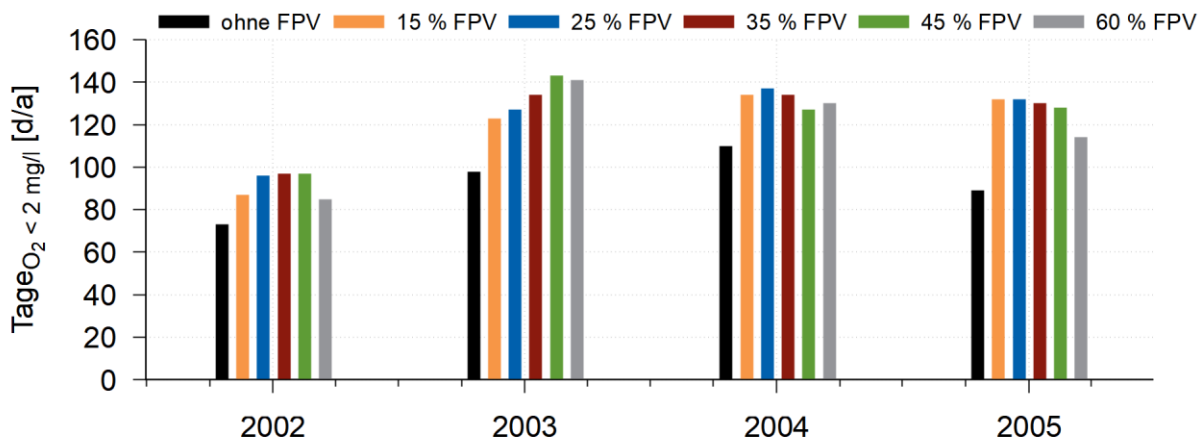


Abbildung 3.60: Anzahl der Tage pro Jahr mit Sauerstoffkonzentrationen kleiner 2 mg/l über Grund im tiefsten, nicht mit Modulen bedeckten Bereich des Modellsee 3

3.5.4 Nährstoffe

Wie bereits weiter oben für den Modellsee 1 gezeigt, ist die sich mit FPV-Bedeckung ändernde Primärproduktion der größte Einflussfaktor auf Veränderungen bei den Nährstoffkonzentrationen im Gewässer. Abbildung 3.61, Abbildung 3.62, Abbildung 3.63 und Abbildung 3.64 zeigen die Konzentrationen an Phosphatphosphor, Nitratstickstoff, Ammoniumstickstoff und Silizium im Modellsee 3 im Profil für das Szenario ohne FPV sowie die Differenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden. Die **Phosphatkonzentrationen** nehmen aufgrund der geringeren Primärproduktion mit FPV insgesamt zu. Bei geschichteten Verhältnissen im Sommer ist im Tiefenwasser zeitweise auch eine Abnahme zu beobachten, da Rücklösungsprozesse auf dem Sediment aufgrund der geringeren Biomasse mit FPV abnehmen. Auch beim **Nitrat** nehmen mit FPV die Konzentrationen insgesamt zu, während sie im Tiefenwasser bei geschichteten Verhältnissen zeitweise abnehmen. Grund hierfür sind geringere Ammoniumkonzentrationen und somit eine geringere Umwandlung von Ammonium zu Nitrat im Rahmen der Nitrifikation. Aufgrund der oben gezeigten Zunahme sauerstofffreier Verhältnisse mit FPV wird zudem unter diesen Umständen potenziell mehr Nitrat für die Mineralisierung von Biomasse verwendet. Beim **Ammonium** haben die beiden, mit FPV entstehenden Effekte der geringeren Primärproduktion und sauerstoffärmerer Verhältnisse im Tiefenwasser gegenläufige Auswirkungen. Zum einen wird weniger Ammonium aus der Mineralisierung freigesetzt, zum anderen nimmt potenziell die Umwandlung von Ammonium zu Nitrat, die Sauerstoff benötigt, ab. Wie Abbildung 3.63 zeigt, überwiegt insbesondere bei hohen FPV-Bedeckungsgraden der Effekt der geringeren Primärproduktion. Die **Siliziumkonzentrationen** im Weiher nehmen mit FPV deutlich zu. Grund hierfür ist die starke Abnahme an Kieselalgen mit FPV-Bedeckung (siehe Kapitel 3.5.2).

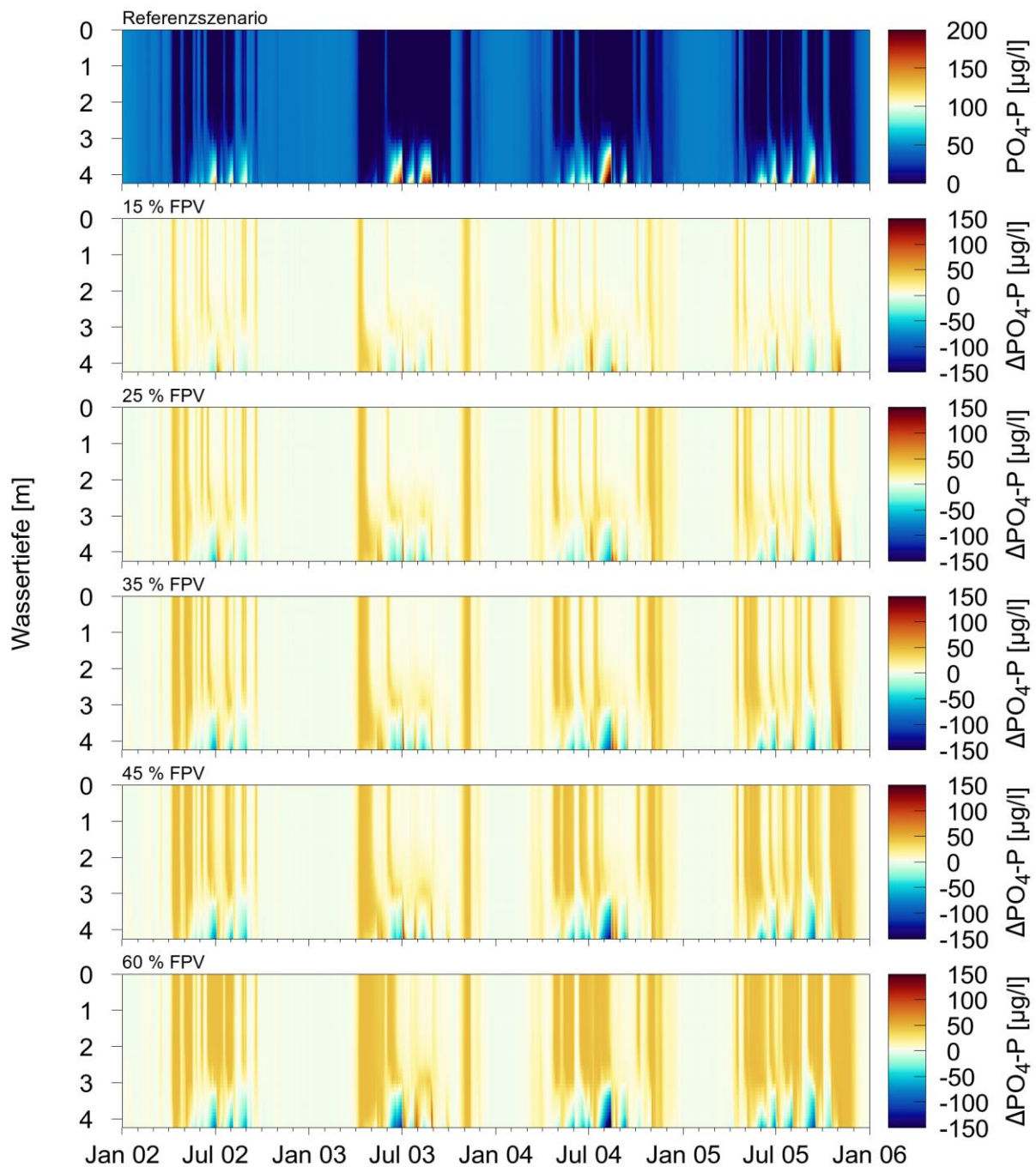


Abbildung 3.61: Berechnete Phosphatphosphorkonzentrationen im Profil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Differenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 3 (horizontale seeweite Mittelwerte)

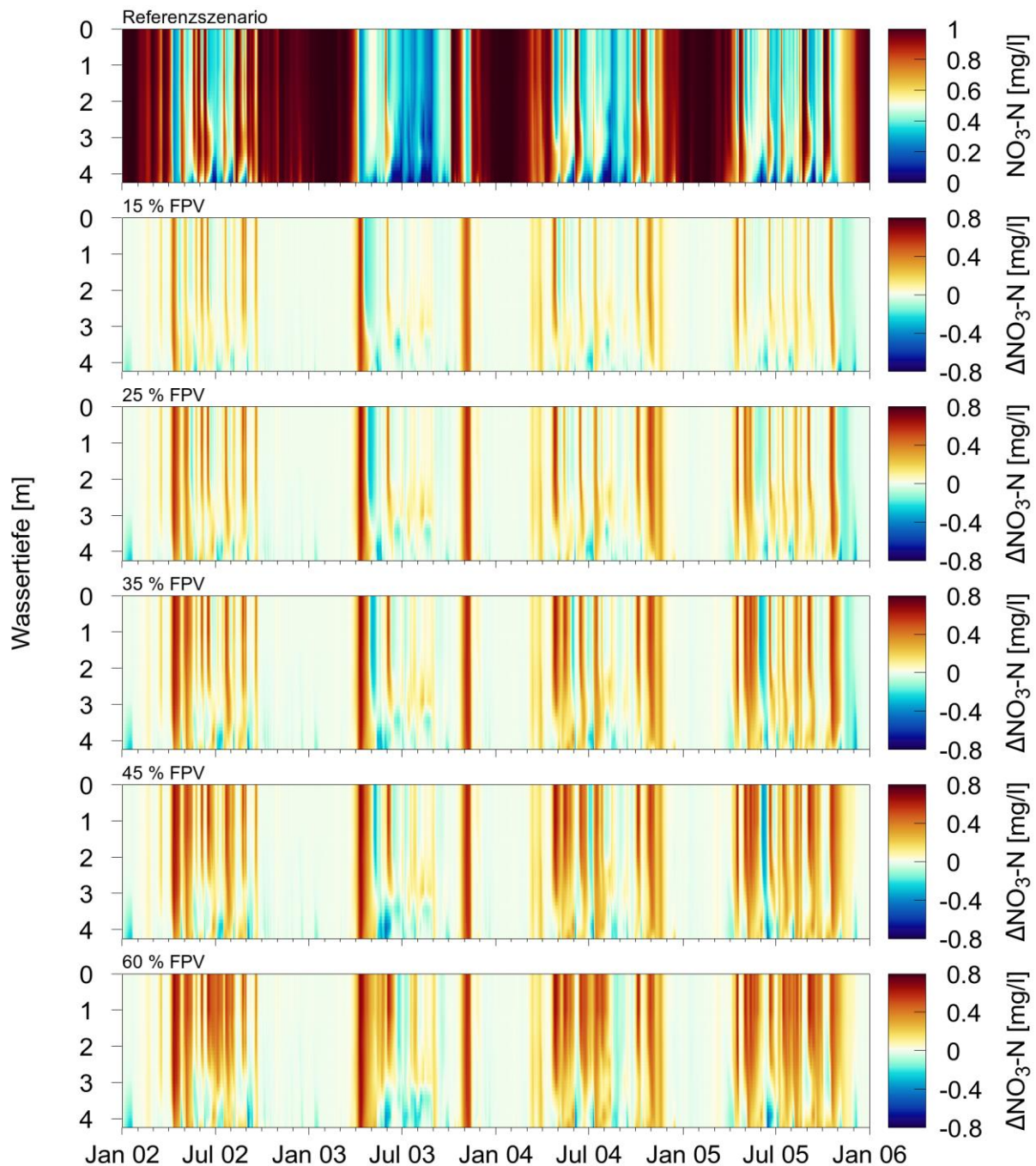


Abbildung 3.62: Berechnete Nitratstickstoffkonzentrationen im Profil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Differenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 3 (horizontale seeweite Mittelwerte)

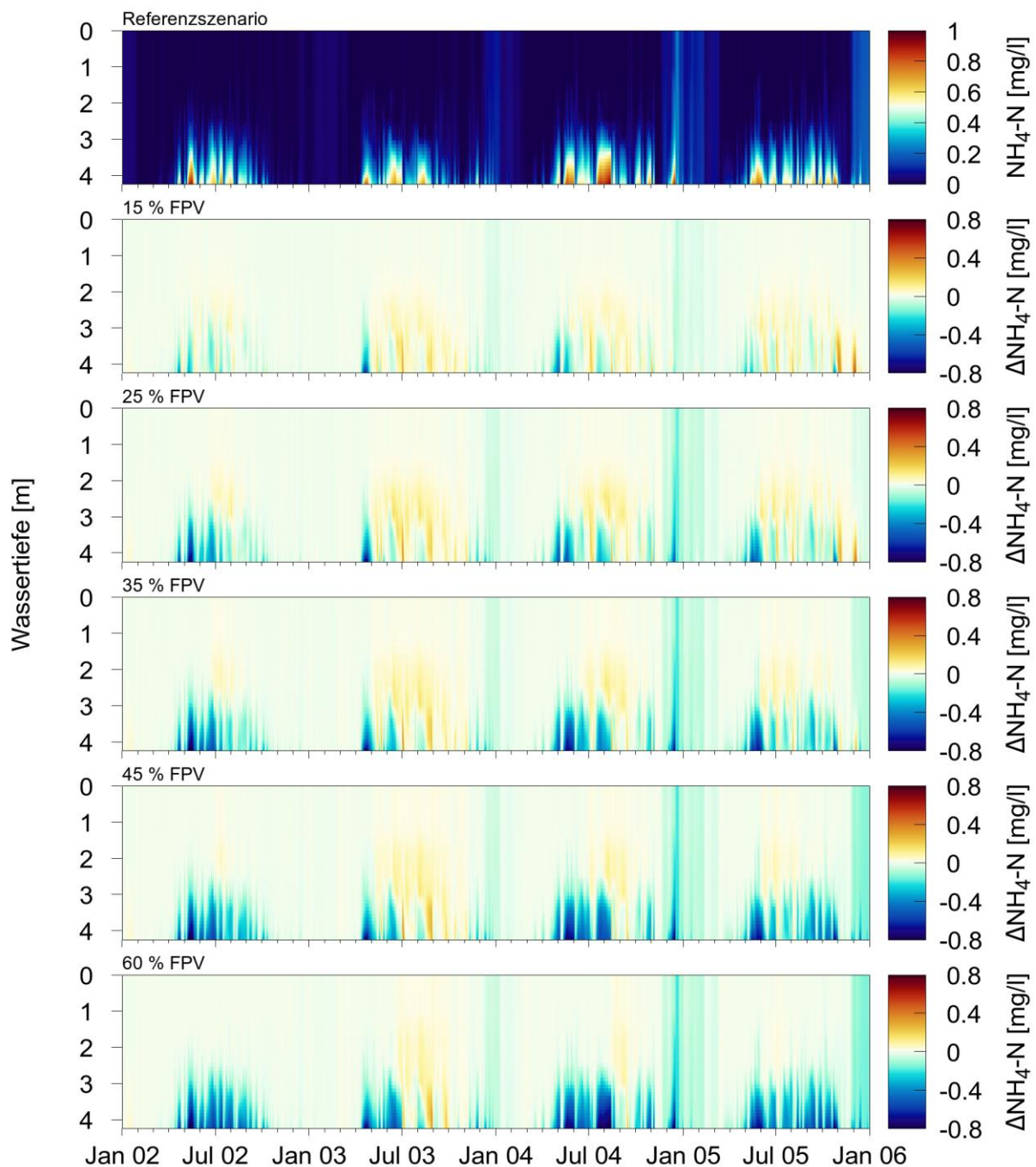


Abbildung 3.63: Berechnete Ammoniumstickstoffkonzentrationen im Profil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Differenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 3 (horizontale seeweite Mittelwerte)

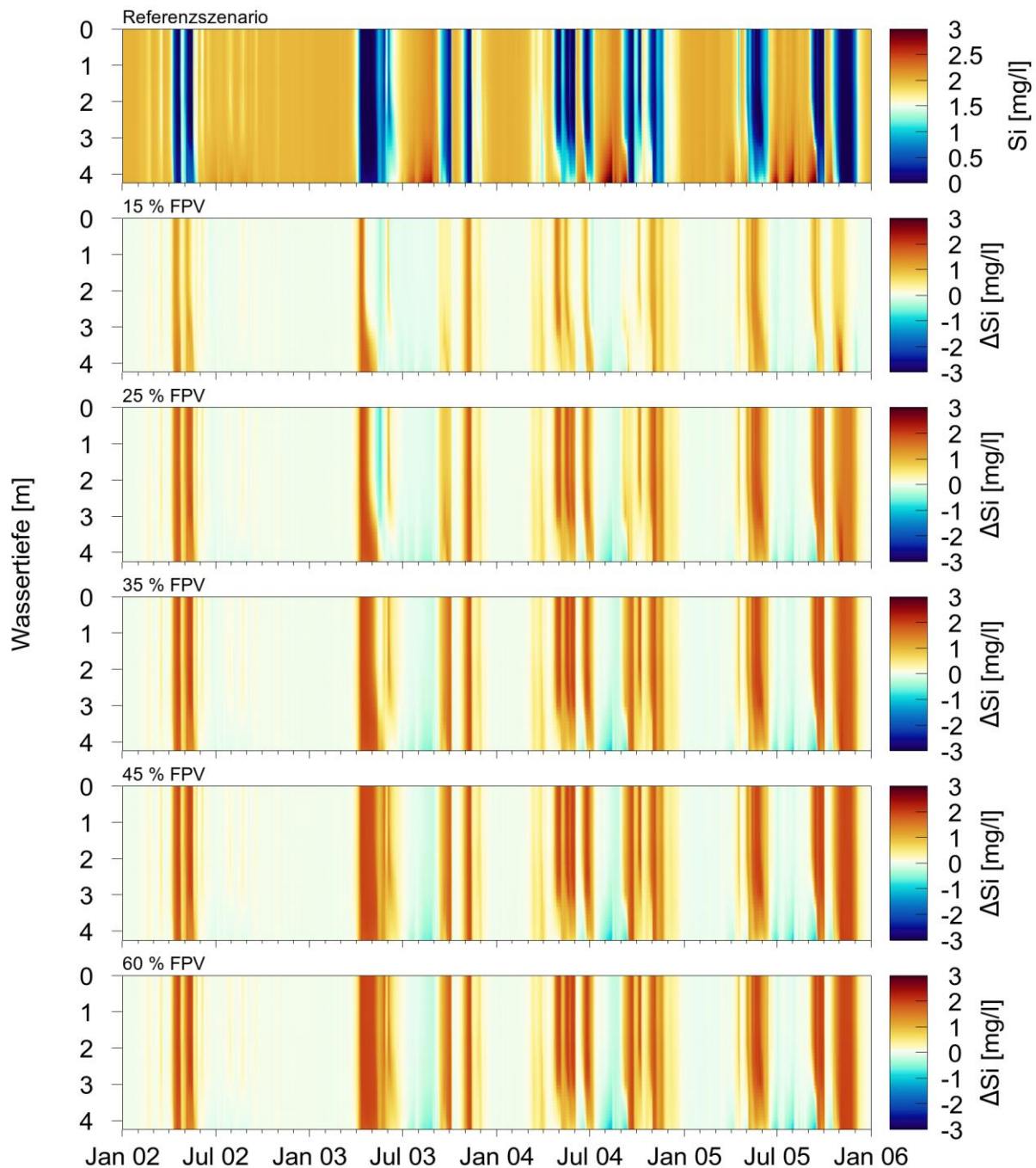


Abbildung 3.64: Berechnete Siliziumkonzentrationen im Profil für die Situation ohne FPV sowie Profile der Differenzen ohne und mit FPV bei verschiedenen Bedeckungsgraden im Modellsee 3 (horizontale seeweite Mittelwerte)

3.6 Modellsee 3: liegende FPV-Module, verringerte Durchflussrate

3.6.1 Wassertemperaturen

Die im Modell verwendeten, aus einzelnen Messwerten abgeleiteten Wassertemperaturen des Zuflusses des Modellsees 3 sind insbesondere im Sommer

deutlich geringer als die Wassertemperaturen im Gewässer selbst. Der Zufluss hat somit eine kühlende Wirkung auf das Gewässer. Dies zeigt der in Abbildung 3.65 dargestellte Vergleich der berechneten Wassertemperaturen an der Wasseroberfläche und im Tiefenwasser des Modellsees 3 für die Referenzszenarien ohne FPV bei unverändertem und auf 25 % verringertem Durchfluss. Die Temperaturen in beiden Tiefen sind im Szenario mit reduziertem Durchfluss in den Sommermonaten um ca. 1-3 K höher.

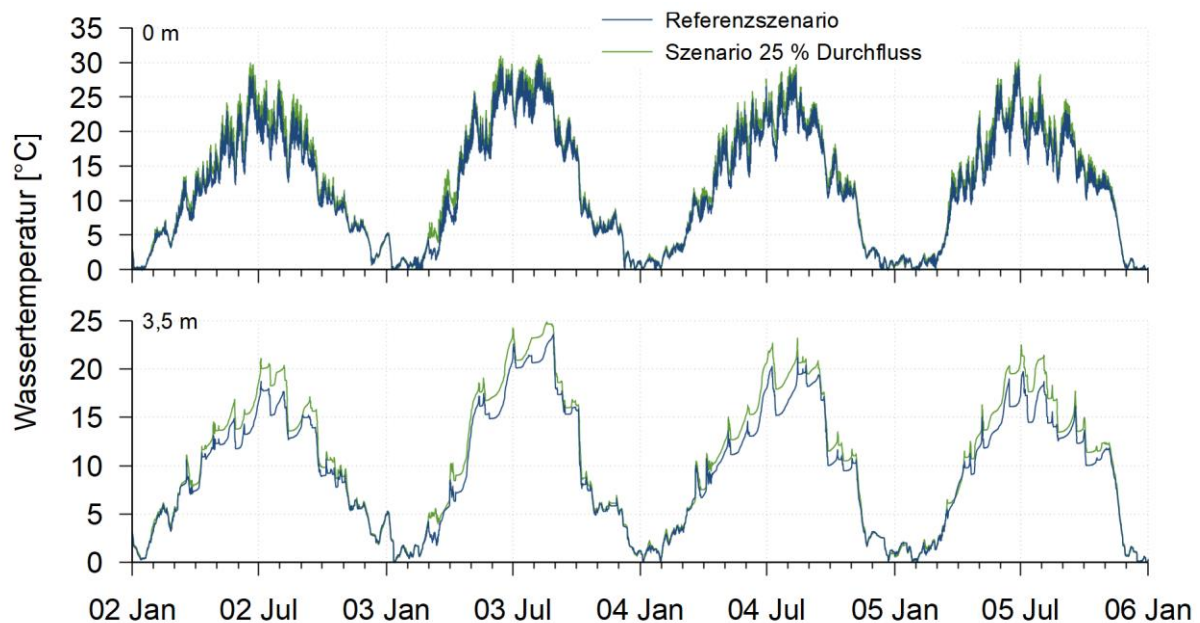


Abbildung 3.65: Berechnete Wassertemperaturen an der Wasseroberfläche (oben) und im Tiefenwasser (unten) des Modellsees 3 für die Referenzszenarien ohne FPV mit unverändertem und auf 25 % reduziertem Durchfluss

Vergleicht man die Situation bei verringertem Durchfluss ohne und mit FPV bei einem Bedeckungsgrad von 60 %, so zeigen sich auf den ersten Blick ähnliche Auswirkungen auf die Wassertemperatur wie bei den Szenarien mit unverändertem Durchfluss. Abbildung 3.66 zeigt die Situation an der Wasseroberfläche, Abbildung 3.67 über Grund. Bei beiden Abbildungen ist zudem die Differenz zwischen den Szenarien ohne und mit FPV dargestellt, jeweils für die beiden Modellvarianten mit unverändertem und verringertem Durchfluss. Mit FPV erwärmt sich das Gewässer langsamer im Frühjahr, über den Sommer bleiben die Temperaturen kühler und im Herbst kühlt das Gewässer langsamer aus. Vergleicht man die Differenzen der Szenarien ohne und mit FPV für beide Durchflussvarianten, so wird deutlich, dass die mit FPV-Nutzung entstehenden Temperaturänderungen in der Modellvariante mit verringertem Durchfluss höher sind als bei unverändertem Durchfluss. An der Oberfläche sind die Temperaturen mit FPV-Nutzung im

Jahresmittel bei verringertem Durchfluss nochmals um etwa 0,1-0,3 K niedriger als mit dem ursprünglichen hohen Durchfluss, im Tiefenwasser ca. 0,1-0,6 K. In den Sommermonaten sind Unterschiede zudem größer. Damit lässt sich festhalten, dass bei verringertem Durchfluss die Auswirkungen einer FPV-Nutzung auf die Wassertemperaturen höher sind und die Schichtungsstabilität in den Sommermonaten ansteigt.

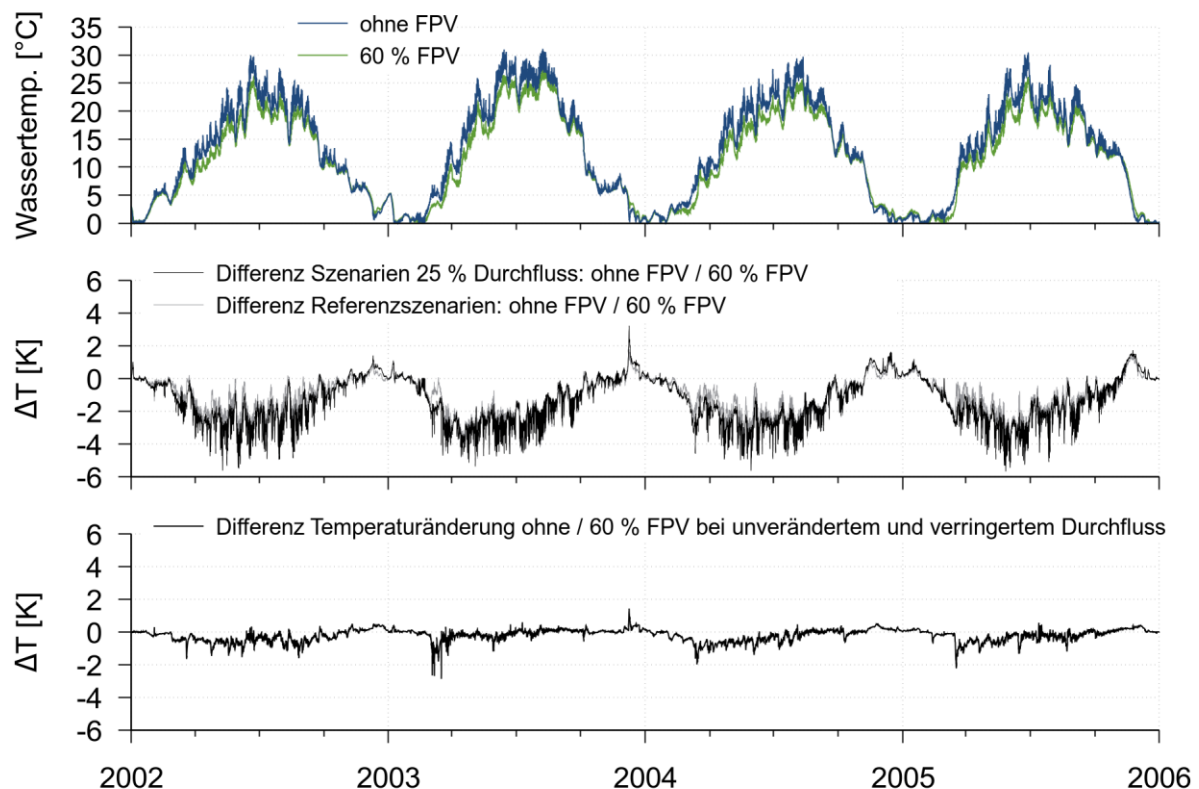


Abbildung 3.66: Berechnete Wassertemperaturen an der Wasseroberfläche des Modellsees 3 bei auf 25 % verringertem Durchfluss ohne und mit FPV (oben), Temperaturdifferenzen zwischen Szenarien ohne und mit 60 % FPV jeweils mit unverändertem und auf 25 % verringertem Durchfluss (Mitte) und unten Temperaturdifferenzen der beiden dargestellten Verläufe in der Mitte (zwischen den Temperaturänderungen ohne und mit 60 % FPV für die Szenarien mit unverändertem und auf 25 % verringertem Durchfluss)

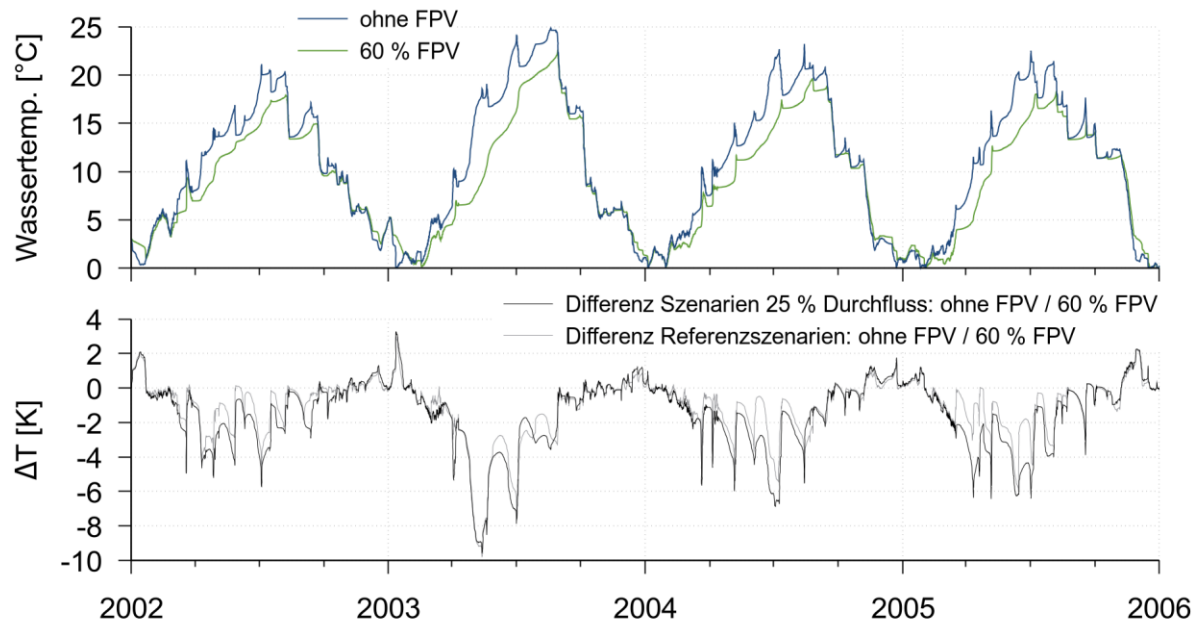


Abbildung 3.67: Berechnete Wassertemperaturen im Tiefenwasser des Modellsees 3 bei auf 25 % verringertem Durchfluss ohne und mit FPV (oben) sowie Temperaturdifferenzen zwischen Szenarien ohne und mit 60 % FPV jeweils mit unverändertem und auf 25 % verringertem Durchfluss (unten)

3.6.2 Phytoplankton-Entwicklung

Beim sehr hohen Bedeckungsgrad von 60 % wurde für die Modellszenarien mit unverändertem Durchfluss eine starke Abnahme des Algenwachstums berechnet. In einzelnen Jahren brach die Algenpopulation fast vollständig zusammen. Abbildung 3.68 zeigt die Situation für verschiedene Kombinationen der Szenarien ohne und mit FPV bei unverändertem und auf 25 % verringertem Durchfluss anhand der Chlorophyll-a-Konzentrationen. Den Einfluss des Durchflusses ohne FPV zeigt das obere Diagramm. Hier setzt die Frühjahrsblüte beim Szenario mit verringertem Durchfluss etwas früher ein. Die Konzentrationen sind über die gesamte Wachstumsperiode meist etwas geringer als bei unverändertem Zufluss. Bei 60 % Bedeckung mit FPV hingegen sind die Werte mit verringertem Durchfluss mit Ausnahme des Jahres 2002 höher als bei unverändertem Zufluss. Es tritt kein Jahr auf, in dem das Algenwachstum fast vollständig ausbleibt und die Chlorophyll-a-Konzentrationen ganzjährig gering bleiben.

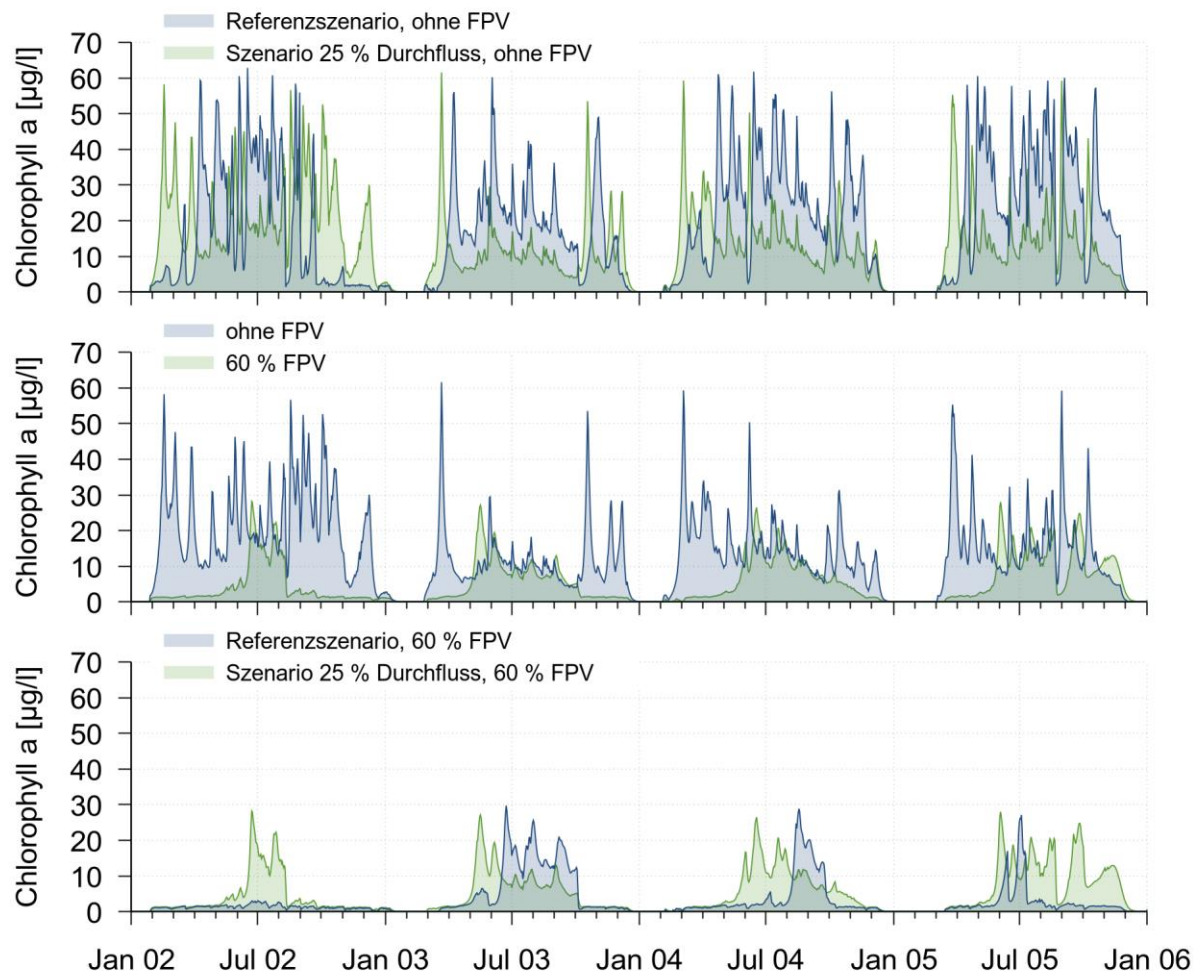


Abbildung 3.68: Berechnete Konzentrationen an Chlorophyll a im Modellsee 3 ohne FPV bei unverändertem und auf 25 % verringertem Durchfluss (oben), ohne und mit 60 % FPV bei jeweils auf 25 % verringertem Durchfluss (Mitte) sowie mit 60 % FPV bei unverändertem und auf 25 % verringertem Durchfluss

Dies bestätigt auch ein Vergleich der jährlichen Nettoprimärproduktionsraten für die Szenarien ohne und mit FPV bei unverändertem und auf 25 % verringertem Durchfluss (Abbildung 3.69). Die prozentuale Abnahme der Primärproduktion mit FPV bei einem Bedeckungsgrad von 60 % ist bei den Szenarien mit reduziertem Durchfluss weitaus geringer. Besonders deutlich wird dies im ohnehin abflussarmen Jahr 2003, aber auch in den Jahren 2004 und 2005. Im Jahr 2002 bricht im FPV-Szenario mit unverändertem Durchfluss die Primärproduktion fast vollständig zusammen, während beim FPV-Szenario mit verringertem Durchfluss trotzdem Algenwachstum stattfindet, wenn auch in geringem Maße. Im Vergleich der beiden Referenzszenarien ohne FPV fällt zudem auf, dass bei den Szenarien mit verringertem Durchfluss die jährliche Nettoprimärproduktion geringer ausfällt. Grund hierfür sind die mit verringertem Durchfluss gesunkenen Nährstoffeinträge in den Weiher, die das Algenwachstum limitieren.

Es lässt sich festhalten, dass mit geringem Durchfluss und FPV-Bedeckung die Abnahme der Primärproduktion geringer ausfällt als bei hohem Durchfluss. Grund ist die höhere Wasseraufenthaltsdauer im Gewässer, die den Aufbau einer Algenpopulation begünstigt. Wie bei den Szenarien mit unverändertem Zufluss gilt auch bei den neuen Szenarien, dass aufgrund der Modellannahme, dass sich die Artengemeinschaft des Phytoplanktons nicht grundlegend ändert, die Abnahme der Primärproduktion überschätzt wird. Tatsächlich ist eine Anpassung der Zusammensetzung der vorherrschenden Algenarten an die neuen Verhältnisse wahrscheinlich, so dass eine effizientere Nutzung der vorhandenen Ressourcen möglich ist.

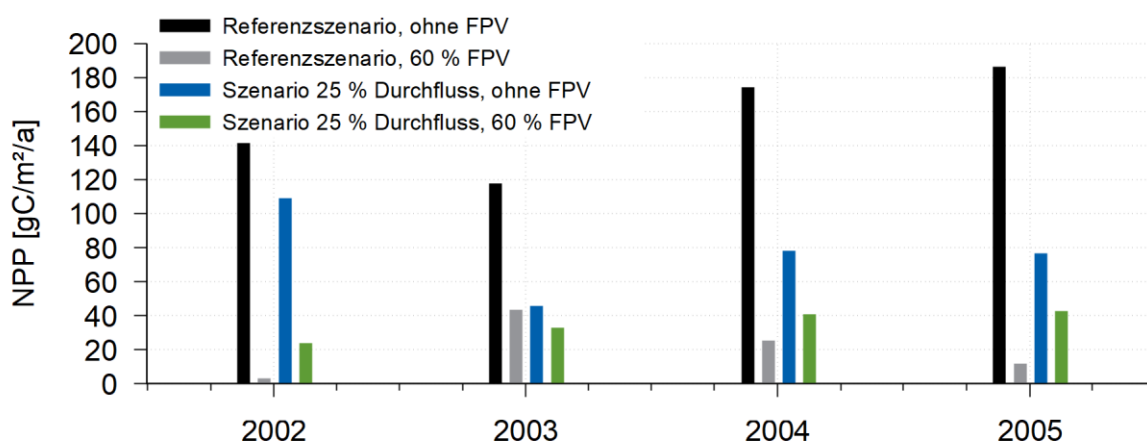


Abbildung 3.69: Berechnete jährliche Nettoprimärproduktion ohne und mit FPV bei einem Bedeckungsgrad von 60 % im Modellsee 3 für die beiden Modellvarianten mit unverändertem und auf 25 % verringertem Durchfluss

3.6.3 Sauerstoffgehalt

Wie im vorangegangenen Abschnitt gezeigt, verringert sich bei reduziertem Zufluss die ins Gewässer eingetragene Nährstofffracht und damit auch die Nettoprimärproduktion. Dies hat auch Auswirkungen auf den Sauerstoffhaushalt. Abbildung 3.70 zeigt einen Vergleich der Sauerstoffkonzentrationen im Profil im tiefsten Bereich des Modellsees 3 für die beiden Referenzszenarien ohne FPV bei unverändertem und verringertem Durchfluss. Da die Primärproduktion bei reduziertem Durchfluss geringer ausfällt, fallen zum einen die Übersättigungen in der Wachstumsperiode im oberflächennahen Bereich geringer aus und zum anderen nimmt die Sauerstoffzehrung im Tiefenwasser ab. Somit nimmt im Szenario mit verringertem Durchfluss zumindest zeitweise die Mächtigkeit des sauerstofffreien Bereichs im Tiefenwasser ab.

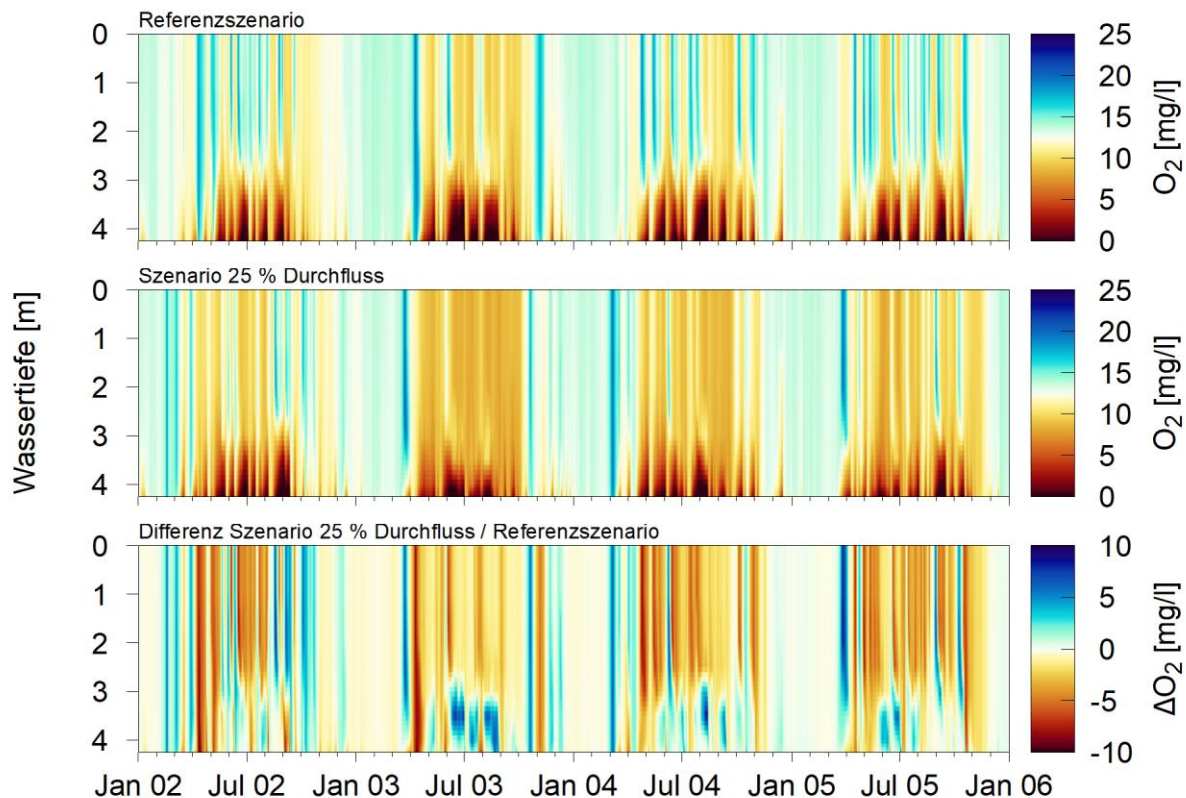


Abbildung 3.70: Berechnete Sauerstoffkonzentrationen im Profil im tiefsten Bereich des Modellsees 3 für die Referenzszenarien ohne FPV mit unverändertem (oben) und auf 25 % reduziertem Durchfluss (Mitte) sowie Profil der Differenzen beider Szenarien ohne FPV (unten)

Abbildung 3.71 zeigt die Sauerstoffprofile im tiefsten Bereich für die Situation ohne und mit FPV bei verringertem Durchfluss. Es fällt auf, dass die Sauerstoffzehrung im Tiefenwasser im Szenario mit FPV-Bedeckung deutlich zunimmt. Die Primärproduktion ist in diesem Szenario geringer als im Szenario ohne FPV, so dass als Ursache für die Verschlechterung der Sauerstoffverhältnisse in erster Linie eine höhere Schichtungsstabilität und eine verringerte Durchmischung in Frage kommen. In allen Jahren treten kürzere Zeiträume mit höheren Sauerstoffkonzentrationen im oberflächennahen Bereich mit FPV auf (z. B. Juni 2002, Mai 2003, Juni 2004 und 2005). Diese Zeiträume korrelieren mit auftretenden Algenblüten (vgl. Abbildung 3.68). Da diese Blüten nicht zeitgleich im Szenario ohne FPV auftreten, kommt es zu entsprechenden Differenzen bei den Sauerstoffkonzentrationen beider Szenarien.

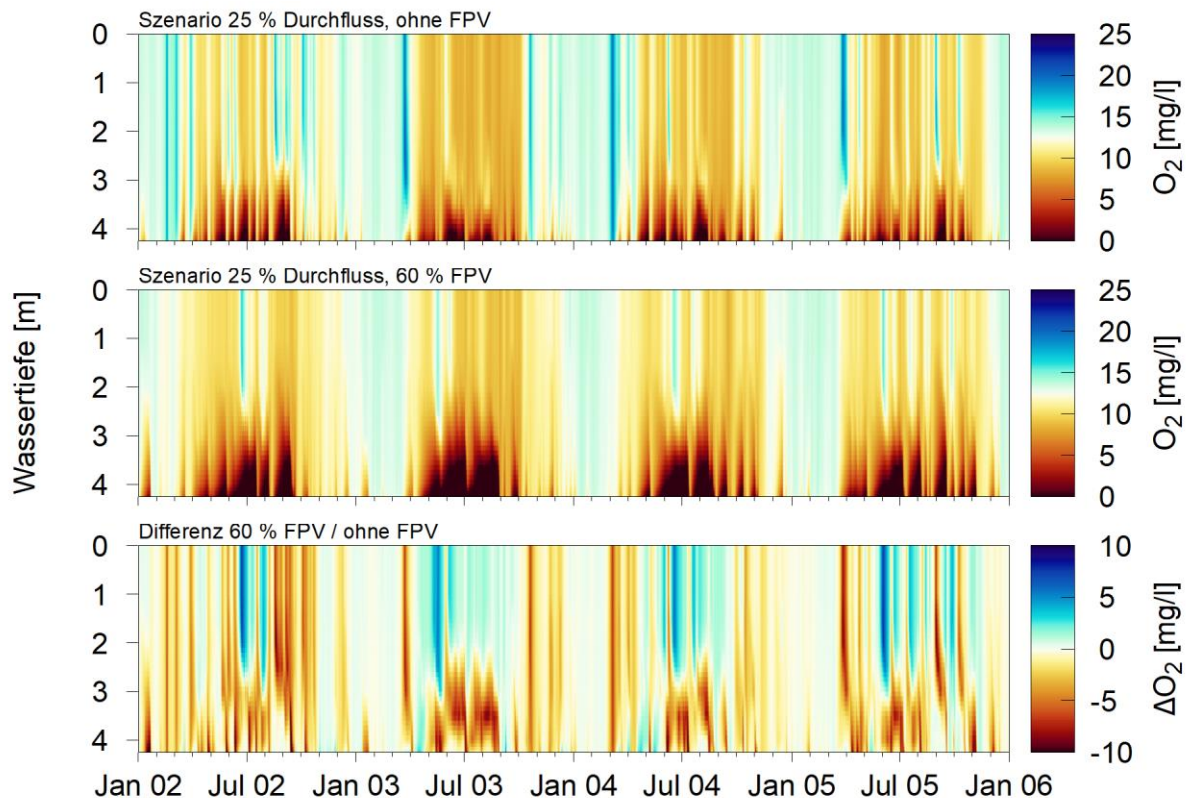


Abbildung 3.71: Berechnete Sauerstoffkonzentrationen im Profil im tiefsten Bereich des Modellsees 3 für die Modellszenarien ohne (oben) und mit (Mitte) FPV bei auf 25 % reduziertem Durchfluss sowie Profil der Differenzen beider Szenarien ohne und mit FPV (unten)

Der Einfluss der Algenblüten auf die Sauerstoffkonzentrationen ist auch anhand der Übersättigungen in den in Abbildung 3.72 dargestellten, oberflächennahen Sauerstoffkonzentrationen für die beiden Szenarien mit unverändertem und verringertem Durchfluss mit FPV-Nutzung ersichtlich. Die Zeitpunkte, an denen die Algenblüten auftreten, unterscheiden sich für beide Szenarien. Die Differenzen zwischen den Szenarien mit und ohne FPV, jeweils für unveränderten und verringerten Durchfluss, zeigen tendenziell eine geringere Abnahme der Sauerstoffkonzentrationen mit FPV bei den Szenarien mit verringertem Durchfluss, was unter anderem an der höheren Primärproduktion liegen dürfte.

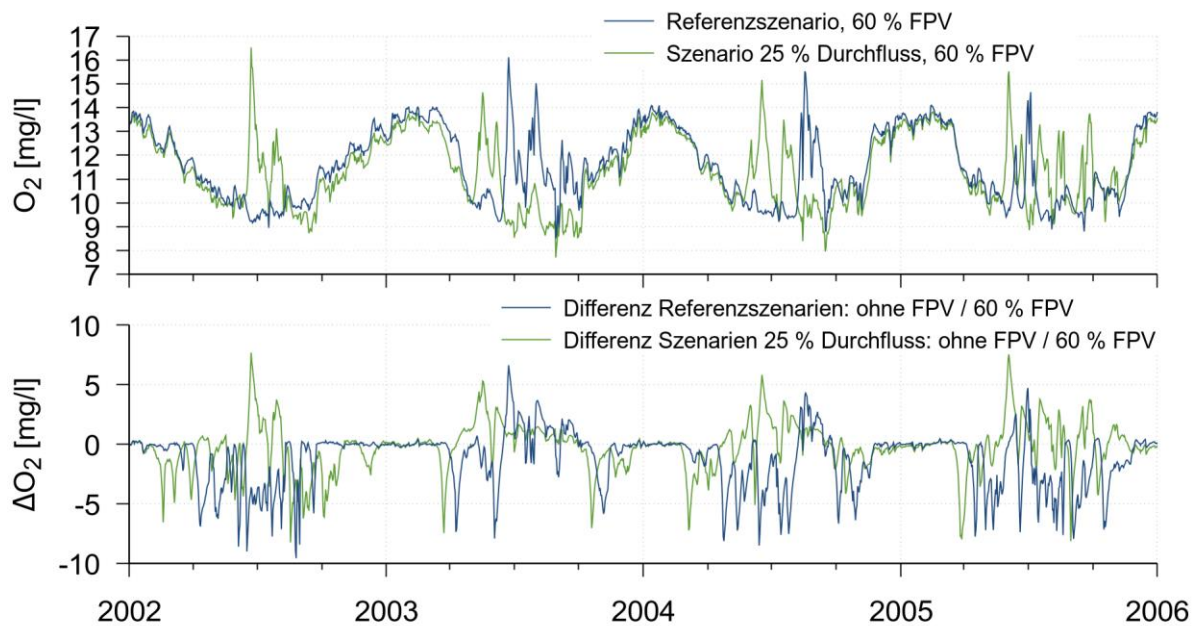


Abbildung 3.72: Berechnete, oberflächennahe Sauerstoffkonzentrationen im Modellsee 3 bei auf 25 % verringertem Durchfluss ohne und mit FPV (oben) sowie Sauerstoffdifferenzen zwischen Szenarien ohne und mit 60 % FPV jeweils mit unverändertem und auf 25 % verringertem Durchfluss (unten)

Abbildung 3.73 zeigt einen Vergleich der berechneten Sauerstoffkonzentrationen im Tiefenwasser des Modellsees 3 für die FPV-Szenarien mit unverändertem und verringertem Durchfluss. Zudem sind die Differenzen der Sauerstoffkonzentration in dieser Tiefe zwischen den Situationen ohne und mit FPV für beide Durchflusszustände dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die Sauerstoffkonzentrationen mit FPV-Nutzung im Szenario mit auf 25 % verringertem Durchfluss im Tiefenwasser stärker abnehmen als im Szenario mit unverändertem Durchfluss. Ein geringerer Durchfluss führt also zu einer Verschlechterung der Sauerstoffsituation im Gewässer mit FPV-Bedeckung. Besonders deutlich wird dies anhand der in Abbildung 3.74 dargestellten Tage im Jahr mit Sauerstoffkonzentrationen unter 2 mg/l für die einzelnen Szenarien mit und ohne FPV bei verschiedenen Durchflussraten. Beim Szenario mit FPV und verringertem Durchfluss steigt die Anzahl der Tage im Vergleich zur Situation ohne FPV in allen Jahren stark an. Bei geringen Durchflussverhältnissen führt somit eine FPV-Nutzung zu einer verstärkten Abnahme der Sauerstoffkonzentrationen im Tiefenwasser im Vergleich zur Situation mit hohen Durchflüssen.

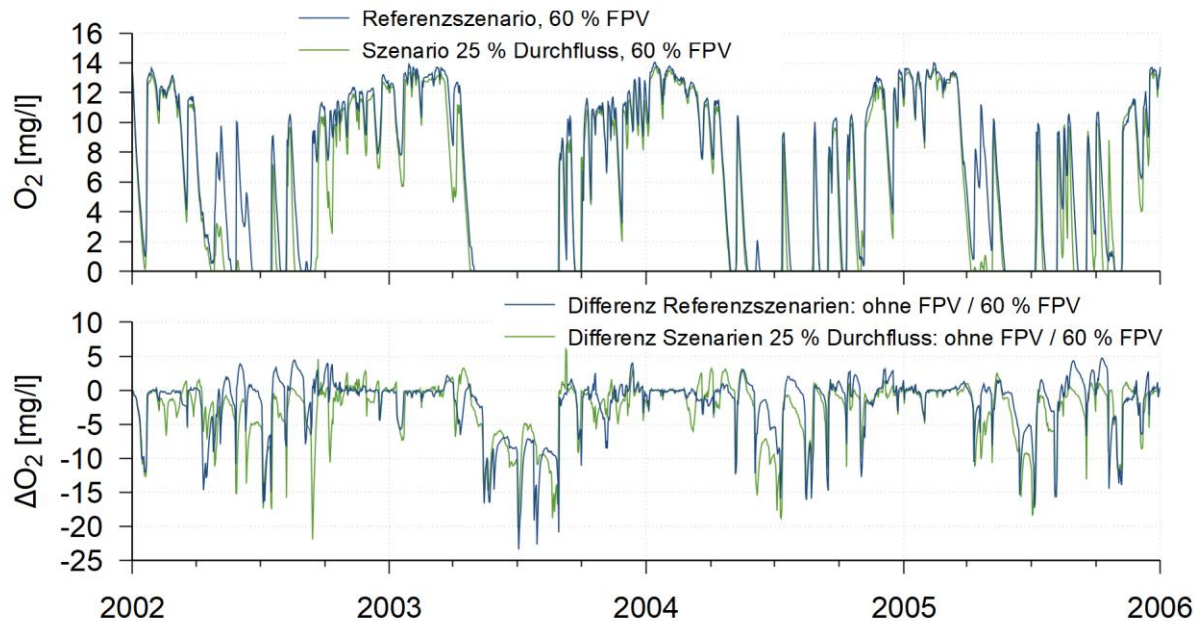


Abbildung 3.73: Berechnete Sauerstoffkonzentrationen im Tiefenwasser des Modellsees 3 bei auf 25 % verringertem Durchfluss ohne und mit FPV (oben) sowie Sauerstoffdifferenzen zwischen Szenarien ohne und mit 60 % FPV jeweils mit unverändertem und auf 25 % verringertem Durchfluss (unten)

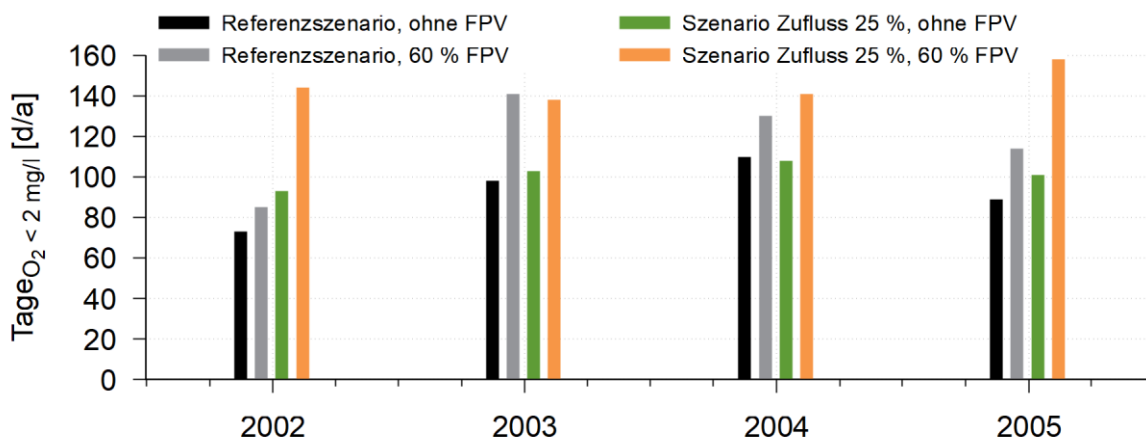


Abbildung 3.74: Anzahl der Tage pro Jahr mit Sauerstoffkonzentrationen kleiner 2 mg/l über Grund im tiefsten Bereich des Modellsees 3 für die Modellszenarien ohne und mit FPV bei einem Bedeckungsgrad von 60 % bei unverändertem und auf 25 % verringertem Durchfluss

3.6.4 Nährstoffe

Wie bereits in den vorangegangenen Abschnitten erwähnt, führt unabhängig von einer FPV-Nutzung der verringerte Durchfluss zu geringeren Nährstofffrachten in das

Gewässer. Abbildung 3.75 zeigt die Differenz der Phosphatphosphorkonzentrationen zwischen den Szenarien mit unverändertem und verringertem Durchfluss, jeweils ohne FPV. Negative Werte weisen auf geringere Konzentrationen im Szenario mit verringertem Durchfluss hin. Erwartungsgemäß ist fast der gesamte Zeitraum von einer Abnahme der Phosphatkonzentrationen bei verringertem Durchfluss geprägt. Ausnahme bildet ein kurzer Zeitraum im September 2002, in dem sohnah ein Konzentrationsanstieg auftritt. Grund ist vermutlich ein im Szenario mit verringertem Durchfluss ausbleibendes Durchmischungsereignis.

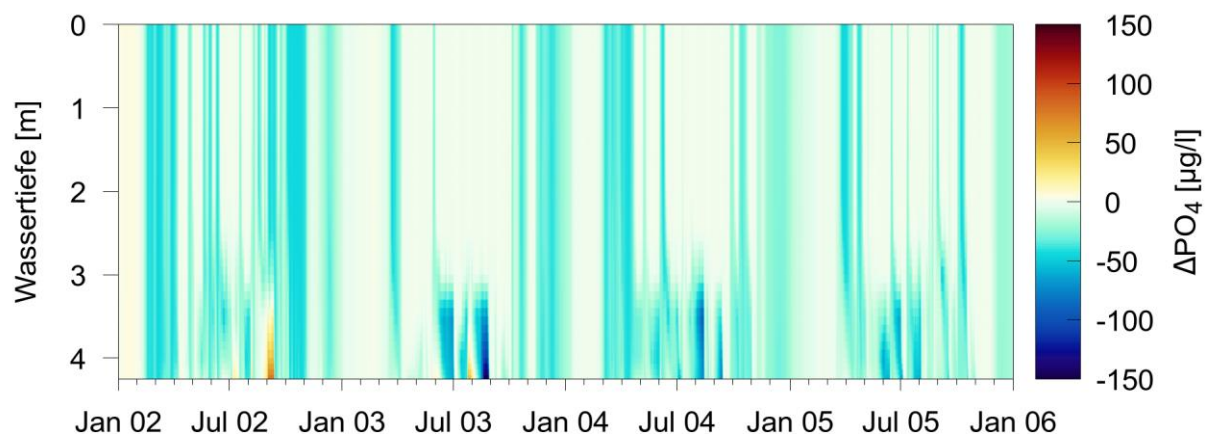


Abbildung 3.75: Differenz der berechneten Konzentrationen an Phosphatphosphor der Szenarien mit unverändertem und verringertem Durchfluss ohne FPV im tiefsten Bereich des Modellsees 3

Veränderungen bei den Nährstoffkreisläufen mit FPV-Bedeckung sind in erster Linie auf die veränderte Primärproduktion zurückzuführen. Abbildung 3.76, Abbildung 3.77 und Abbildung 3.78 zeigen die berechneten Konzentrationsprofile an Phosphatphosphor, Nitratstickstoff und Ammoniumstickstoff im tiefsten Bereich des Modellsees 3 für die Modellszenarien ohne und mit FPV bei verringertem Durchfluss. Mit FPV nimmt die Zehrung der Nährstoffe im oberen Teil des Wasserkörpers ab, was zu einem Anstieg der Nährstoffkonzentrationen führt. Aufgrund der geringeren Primärproduktion mit FPV nimmt auch der Umfang der Mineralisierungsprozesse auf dem Sediment ab, was tendenziell zu geringeren Phosphat- und Ammoniumkonzentrationen im Tiefenwasser führt. Die geringeren Sauerstoffkonzentrationen im Tiefenwasser und die höhere Schichtungsstabilität können zeitweise auch zu einem Anstieg der Phosphat- und Ammoniumkonzentrationen in den Sommermonaten über Grund aufgrund erhöhter Rücklösung aus dem Sediment führen. Im Vergleich zur Nährstoffsituation bei den Szenarien mit unverändertem Durchfluss entstehen Unterschiede in erster Linie durch die veränderten Nährstofffrachten ins Gewässer. Diese sind bei den Szenarien

mit reduziertem Durchfluss geringer, so dass die Nährstoffkonzentrationen in diesen Szenarien insgesamt geringer sind.

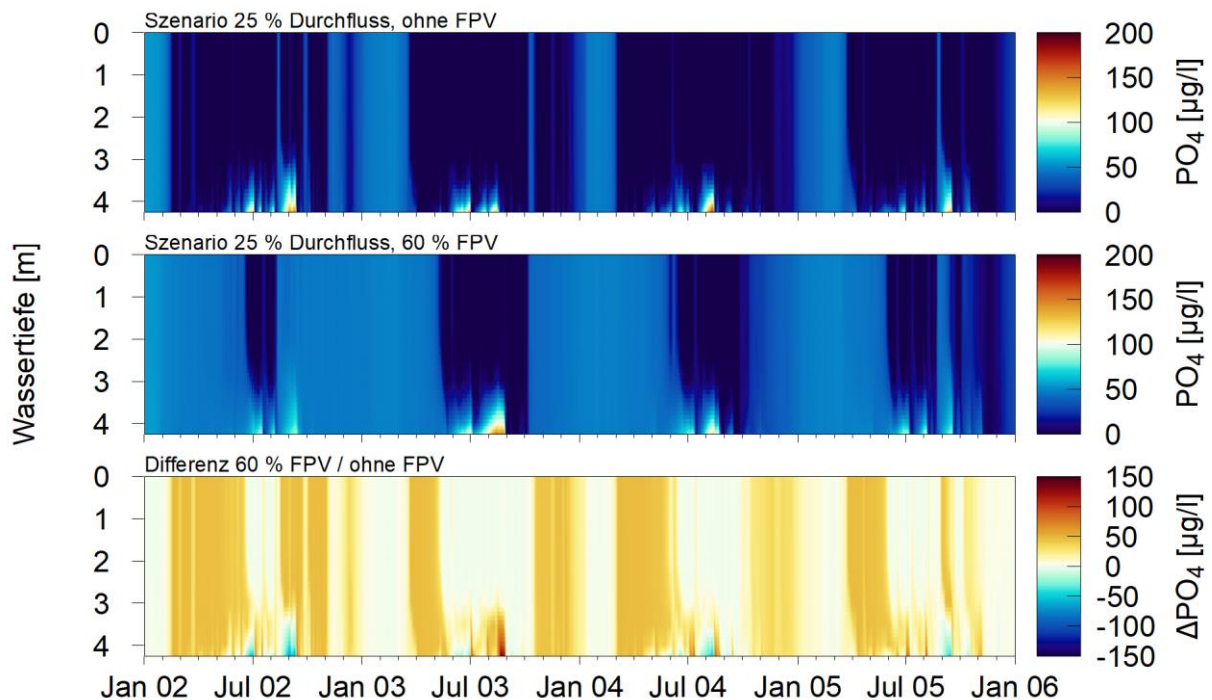


Abbildung 3.76: Berechnete Konzentrationen an Phosphatphosphor im Profil im tiefsten Bereich des Modellsees 3 für die Modellszenarien ohne (oben) und mit (Mitte) FPV bei auf 25 % reduziertem Durchfluss sowie Profil der Differenzen beider Szenarien (unten)

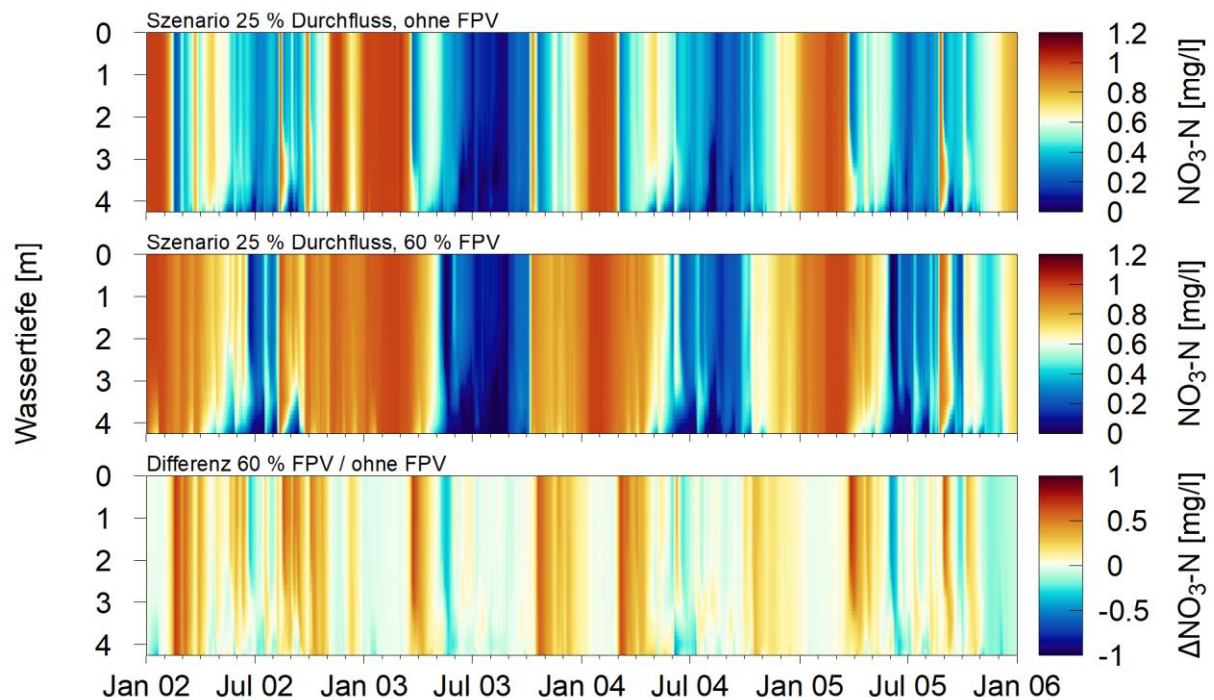


Abbildung 3.77: Berechnete Konzentrationen an Nitratstickstoff im Profil im tiefsten Bereich des Modellsees 3 für die Modellszenarien ohne (oben) und mit (Mitte) FPV bei auf 25 % reduziertem Durchfluss sowie Profil der Differenzen beider Szenarien (unten)

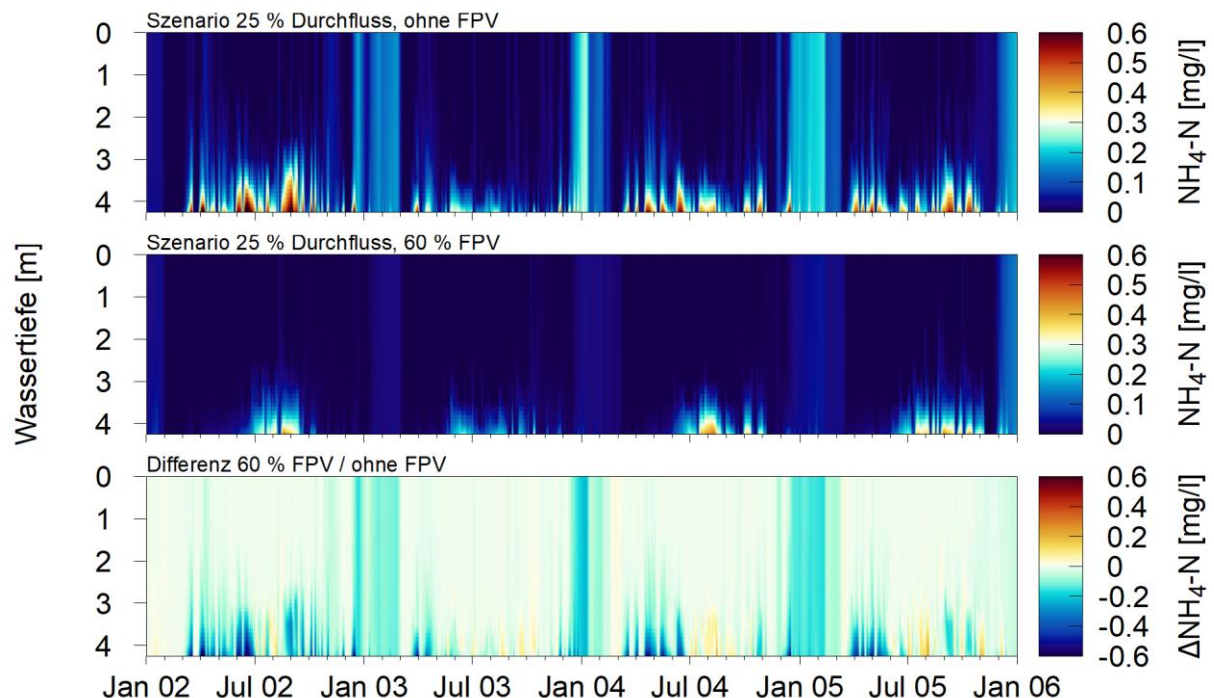


Abbildung 3.78: Berechnete Konzentrationen an Ammoniumstickstoff im Profil im tiefsten Bereich des Modellsees 3 für die Modellszenarien ohne (oben) und mit (Mitte) FPV bei auf 25 % reduziertem Durchfluss sowie Profil der Differenzen beider Szenarien (unten)

3.6.5 Treibhausgasemissionen

Um den Einfluss der FPV-Bedeckung auf die Treibhausgasemissionen im Sinne einer Worst-Case Kombination der betrachteten Modellszenarien abzuschätzen, wurde das Modell des Modellsees 3 mit verringertem Durchfluss und hoher FPV-Bedeckung von 60 % verwendet. Hierzu wurde das Modell um die Prozesse, bei denen Methan entsteht, erweitert. Dies ist zum einen die Mineralisierung in der Wassersäule, bei der unter entsprechenden Verhältnissen, d. h. ohne Vorhandensein von Sauerstoff und Nitrat, Methan entsteht, das in der Wassersäule gelöst wird. Dieses gelöste Methan gasst über die Wasseroberfläche aus. Zum anderen wird im Sediment unter gleichen Bedingungen bei der Mineralisierung von organischem Material Methan gebildet, das dort zu Bläschen akkumuliert, bevor diese aufsteigen und in die Atmosphäre gelangen. Im Modell wurde nur die oberste Sedimentschicht betrachtet, da für die untere Schicht dauerhafte sauerstoff- und nitratfreie Verhältnisse angenommen werden und somit in erster Näherung keine Unterschiede zwischen der Situation mit und ohne FPV zu erwarten sind. Mit dem Modell wird also nicht der vollständige Methanfluss des Gewässers in die Atmosphäre betrachtet, sondern nur die Differenz zwischen der Situation ohne und mit FPV bei einem Bedeckungsgrad von 60 % abgeschätzt.

Flüsse gelöstes Methan

Abbildung 3.79 zeigt die berechneten Konzentrationen an gelöstem Methan im Bereich der Wasseroberfläche, die Transferkoeffizienten für den Methanaustausch mit der Atmosphäre sowie den aus diesen beiden Größen berechneten Fluss an im Wasser gelöstem Methan in die Atmosphäre. Im Modell entsteht gelöstes Methan in der Wassersäule nur dann, wenn sowohl Sauerstoff als auch Nitrat vollständig gezehrt sind. Dies ist zeitweise während der Sommermonate im geschichteten Tiefenwasser des Modellsees 3 der Fall. Das gelöste Methan gelangt während Durchmischungsereignisse an die Wasseroberfläche. Dies verursacht die einzelnen, in der Abbildung dargestellten Methanspitzen. Mit Ausnahme des ersten Jahres sind in den übrigen Jahren die an der Wasseroberfläche auftretenden Methankonzentrationen beim Szenario mit FPV-Bedeckung signifikant größer. Grund hierfür ist die größere Sauerstoff- und Nitratzehrung im Tiefenwasser des Gewässers im Szenario mit FPV und auf 25 % verringerter Durchflussrate (siehe Kap. 3.6.3 und 3.6.4). Die vom Modell berechneten Transferkoeffizienten für den Methanaustausch mit der Atmosphäre sind hingegen beim FPV-Szenario geringer als beim Szenario ohne FPV. Grund sind die mit der FPV-Bedeckung verringerten Windgeschwindigkeiten an der Wasseroberfläche, die den Austausch mit der Atmosphäre limitieren. Das Verhältnis der ohne und mit FPV berechneten Transferkoeffizienten ist zeitlich nicht konstant, da die Windabschwächung durch die FPV-Module richtungsabhängig ist. Der Fluss an gelöstem Methan in die Atmosphäre wird aus dem Transferkoeffizient und der Konzentration an gelöstem

Methan an der Wasseroberfläche berechnet. Im ersten Jahr ist der Fluss mit FPV-Bedeckung etwas geringer als ohne FPV. Ursache ist die vom Modell berechnete, starke Reduzierung der Primärproduktion mit FPV in diesem Jahr (siehe Kap. 3.6.2). In den übrigen Jahren, in denen die Unterschiede bei der Primärproduktion geringer sind, überwiegt die stärkere Methanproduktion im Tiefenwasser aufgrund der höheren Sauerstoff- und Nitratzehrung mit FPV. In Tabelle 3.5 sind die über die jeweiligen Jahre gemittelten Flüsse an gelöstem Methan für die Szenarien ohne und mit FPV aufgelistet.

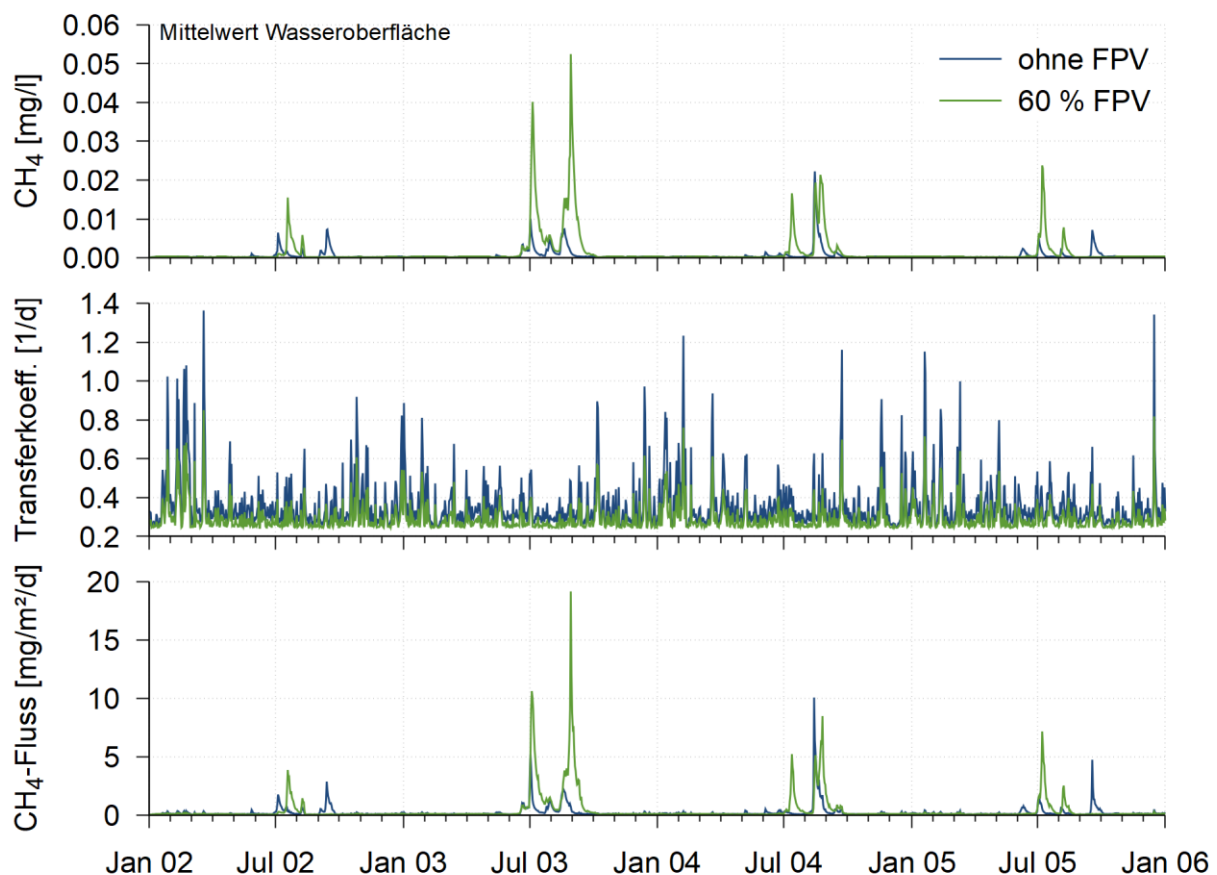


Abbildung 3.79: Berechnete Konzentrationen an gelöstem Methan im Bereich der Wasseroberfläche (oben), berechnete Transferkoeffizienten für den Methanaustausch mit der Atmosphäre (Mitte) und berechneter Fluss an gelöstem Methan in die Atmosphäre (unten) für die Modellszenarien des Modellsees 3 ohne und mit FPV bei einem Bedeckungsgrad von 60 %

Flüsse Methan-Bläschen

Der Fluss an in der oberen Sedimentschicht gebildeten Methan-Bläschen in die Atmosphäre ist abhängig von der Menge an organischem Material, das auf die Sedimentoberfläche absinkt. Abbildung 3.80 zeigt diese Mengen sowie die daraus

entstehenden Flüsse an Methan-Bläschen in die Atmosphäre für die Szenarien ohne und mit FPV bei auf 25 % verringertem Durchfluss. Das organische Material auf dem Sediment nimmt in Folge von Algenblüten zu und durch Mineralisierungsprozesse, entweder unter Zehrung von Sauerstoff und Nitrat oder der Entstehung von Methan, ab. Im Modellszenario mit FPV ist die aufs Sediment fallende Menge an abgestorbener Biomasse deutlich geringer als im Szenario ohne FPV. Besonders deutlich ist der Unterschied im Jahr 2002, aber auch in den folgenden Jahren macht sich insbesondere die fehlende Frühjahrs- und Herbstblüte bemerkbar. In der Folge ist die Methanentstehung in der oberen Sedimentschicht und somit die Ausgasung von Methanbläschen in die Atmosphäre im FPV-Szenario in allen Jahren geringer als im Szenario ohne FPV. Die über die einzelnen Jahre gemittelten Flüsse an Methanbläschen für beide Szenarien sind in Tabelle 3.5 aufgelistet. Die Abnahme des Methanflusses mit FPV ist am deutlichsten im Jahr 2002 mit einer Reduzierung auf ca. 16 % des Wertes ohne FPV, aber auch in den Jahren 2004 und 2005 wird eine Verringerung auf ca. 38 % bzw. 33 % berechnet. Im Jahr 2003 ist die Abnahme mit ca. 80 % des Werts ohne FPV am geringsten. Diese Werte korrelieren mit der Abnahme der Primärproduktion mit FPV in den einzelnen Jahren, die im Jahr 2002 am stärksten und im Jahr 2003 am schwächsten ausfällt.

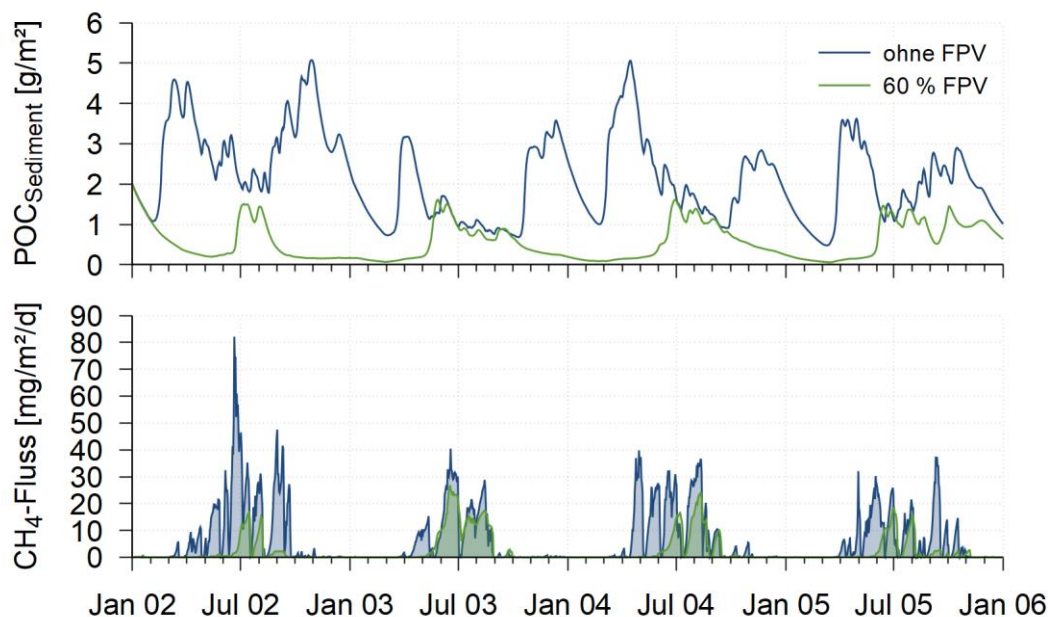


Abbildung 3.80: Berechnete Menge an partikulärem organischem Kohlenstoff an der Sedimentoberfläche (oben) und Fluss an Methan-Bläschen in die Atmosphäre (unten) für die Modellszenarien des Modellsees 3 ohne und mit FPV bei einem Bedeckungsgrad von 60 % (Mittelwerte über die gesamte Sedimentoberfläche)

Summarische Betrachtung und Einordnung

Abbildung 3.81 zeigt die aus den Flüssen von gelöstem und bläschenförmigen Methan gebildete Jahressummen für die beiden Szenarien ohne und mit FPV. Tabelle 3.5 listet die Werte auf. Überraschenderweise zeigen die Modellergebnisse im Szenario mit einer FPV-Bedeckung von 60 % insgesamt eine Abnahme der Methanemissionen in die Atmosphäre.

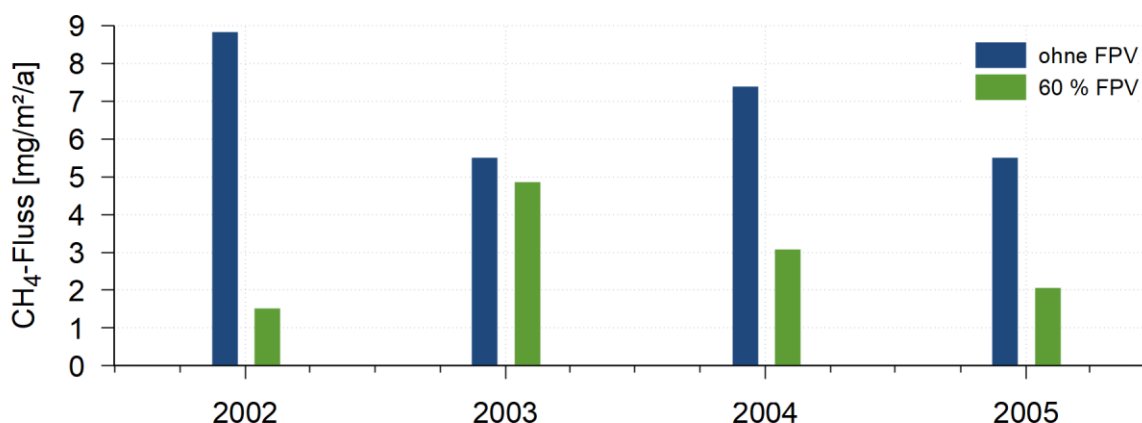


Abbildung 3.81: Jahresmittelwerte des berechneten Methanflusses aus dem Modellsee 3 in die Atmosphäre für die Modellszenarien ohne und mit FPV bei einem Bedeckungsgrad von 60 %

Tabelle 3.5: Jahresmittelwerte der Flüsse an gelöstem Methan und Methan-Bläschen aus dem Modellsee 3 in die Atmosphäre sowie Summe beider Prozesse für die Modellszenarien ohne und mit FPV bei einem Bedeckungsgrad von 60 %

Jahr	Fluss gelöstes CH ₄ [mg/m ² /d]		Fluss CH ₄ -Bläschen [mg/m ² /d]		Summe [mg/m ² /d]	
	Ohne FPV	60 % FPV	Ohne FPV	60 % FPV	Ohne FPV	60 % FPV
2002	0,18	0,16	8,7	1,4	8,9	1,6
2003	0,26	0,78	5,2	4,1	5,5	4,9
2004	0,26	0,40	7,1	2,7	7,4	3,1
2005	0,19	0,25	5,3	1,8	5,5	2,1

Die Ergebnisse stehen damit im Kontrast zu den Ergebnissen der Studie von Ray et al. (2024), die insgesamt eine Zunahme der Methan-Emissionen aufgrund aufsteigender Bläschen auf den untersuchten Teichen festgestellt haben. Die Unterschiede könnten zum einen in den unterschiedlichen Eigenschaften der Gewässer, als auch durch getroffene Modellannahmen begründet sein:

- Wichtigster Faktor für die Reduzierung der Methanemissionen in den Modellszenarien mit FPV ist die berechnete Abnahme der Primärproduktion mit FPV. Wie bereits an anderer Stelle erwähnt, liegt dem die Modellannahme

zu Grunde, dass sich mit FPV die Artenzusammensetzung nicht grundlegend ändert. Tatsächlich ist eine Anpassung der Zusammensetzung der vorherrschenden Algenarten an die neuen Verhältnisse wahrscheinlich. In diesem Fall wäre die Abnahme der Primärproduktion vom Modell überschätzt und somit die Methanproduktion im Szenario mit FPV größer als prognostiziert. Im hypothetischen Fall einer unveränderten Primärproduktion ohne und mit FPV wäre die Methanemission im Szenario mit FPV aufgrund der geringeren Sauerstoffkonzentrationen höher als im Szenario ohne FPV. Das bedeutet, dass auch eine geringere Primärproduktion mit FPV bis zu einem gewissen Grad höhere Methanemissionen als im Szenario ohne FPV bedingt.

- Die Differenzen der ohne und mit FPV auftretenden Sauerstoffverhältnisse im Gewässer sind in der Studie von Ray et al. deutlich höher als in den Modellszenarien des Modellsees 3. Im Modellsee 3 treten auch ohne FPV-Bedeckung im Sommer im Tiefenwasser sauerstofffreie Verhältnisse auf, die im Szenario mit FPV weiter verstärkt werden. In den in der Studie betrachteten Teichen tritt ohne FPV ebenfalls zeitweise Sauerstoffarmut über Grund auf. Mit FPV ist hingegen die komplette Wassersäule sauerstoffarm bzw. -frei. Damit liegen in den Teichen mit FPV deutlich günstigere Verhältnisse für die Methanbildung vor als in denen ohne FPV.
- Die in der Studie von Ray et al. untersuchten Teiche sind makrophytendominiert. Die Bedeckung zweier der drei Teiche erfolgte im Juni bzw. Juli. Die bis dahin gewachsenen Makrophyten dürften nach der Bedeckung relativ rasch abgestorben sein und damit zur innerhalb weniger Tage nach der Bedeckung aufgetretenen Sauerstoffarmut und verstärkten Methanproduktion entscheidend beigetragen haben.

4 Zusammenfassung und Bewertung

Die Auswirkungen von schwimmenden Photovoltaikanlagen (FPV, von engl.: floating photovoltaik) auf Seen sind noch nicht abschließend bekannt. Einen wichtigen Beitrag hierzu können computergestützte Modellstudien liefern, mit denen sich räumlich und zeitlich hochaufgelöst die in Seen ablaufenden physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse nachbilden und analysieren lassen. Um die in Flachseen durch FPV hervorgerufenen Veränderungen untersuchen und bewerten zu können, wurden entsprechende Modellsysteme aufgebaut und in Szenarienberechnungen ohne und mit FPV die Auswirkungen identifiziert und quantifiziert.

4.1 Modellaufstellung

Um verlässliche und belastbare Ergebnisse zu erhalten, muss sichergestellt werden, dass die Modelle alle relevanten Prozesse im Gewässer nachbilden können. Hierzu wurden im ersten Teil der Modellstudie die Modellsysteme für zwei reale Flachseen in Bayern, für die eine breit gefächerte Messdatenbasis zur Verfügung steht, aufgebaut und die Ergebnisse anhand der Messdaten überprüft. Dabei konnte aufgezeigt werden, dass mit den Modellen die Temperatur- und Schichtungsverhältnisse, die Primärproduktion durch Phytoplankton, der Sauerstoffhaushalt sowie die Phosphor-, Stickstoff- und Siliziumkreisläufe mit hoher Genauigkeit nachgebildet werden können.

4.2 Modellseen, Modellannahmen und Szenarien

Diese Modelle bilden die Grundlage für verschiedenste Szenarienberechnungen, mit denen die Auswirkungen von FPV auf Flachseen untersucht wurden (Tabelle 4.1). Hierbei wurden drei Modellseen betrachtet. Neben den beiden für die Modellüberprüfung verwendeten Gewässern (Modellsee 1 und 3) wurde zusätzlich auf Grundlage der Geometrie des Modellsees 1 ein weiterer, fiktiver See mit einer schüsselförmigen Bathymetrie mit einer maximalen Wassertiefe von 7 m definiert (Modellsee 2). Der Modellsee 1 ist mit einer maximalen Wassertiefe von 2 m relativ flach und im Sommer nicht geschichtet, während der Modellsee 3 mit einer maximalen Wassertiefe von 4,7 m etwas tiefer ist und im Sommer zeitweise eine stabile Temperaturschichtung aufweist. Alle drei Seen sind eutroph und besitzen relativ kurze theoretische Austauschzeiten von einigen Tagen. Für den Modellsee 1 wurde zudem ein Szenario, in dem die Phosphorkonzentration des Zuflusses erhöht wurde, sowie Szenarien zu den Auswirkungen von FPV auf Makrophyten betrachtet. Die Auswirkungen auf das Phytoplankton wurden für alle drei Seen untersucht. Für den Modellsee 3 wurde ein weiteres Szenario mit einer auf 25 % verringerten Durchflussrate definiert.

Tabelle 4.1: Übersicht der FPV-Modellszenarien; für alle Szenarien wurden, falls nicht abweichend angegeben, Bedeckungsgrade von 15 %, 25 %, 35 %, 45 % und 60 % betrachtet

Szenario	Modellsee 1	Modellsee 2	Modellsee 3
Algendominanz ohne Makrophyten	x	x	x
Algendominanz ohne Makrophyten, erhöhter Nährstoffgehalt	x		
Algendominanz ohne Makrophyten, verringerte Durchflussrate, mit Betrachtung Treibhausgasemissionen (nur 60 % Bedeckungsgrad)			x
Algendominanz ohne Makrophyten, vertikale FPV-Module (Bedeckungsgrade: 35 %, 60 % und 80 %)	x		
Makrophytenbedeckung 50 % ohne Algen	x		
Makrophytenbedeckung 100 % ohne Algen	x		
Makrophytenbedeckung 100 % ohne Algen, vertikale FPV-Module (Bedeckungsgrade: 35 %, 60 % und 80 %)	x		

Für die FPV-Szenarien wurden zwei verschiedene Konstruktionsvarianten untersucht. Bei der ersten Variante handelt es sich um auf einer schwimmenden, lichtundurchlässigen Unterkonstruktion montierte, liegende PV-Module. Für diese Variante wurden verschiedene Nutzungsintensitäten mit Bedeckungsgraden von 15 %, 25 %, 35 %, 45 % und 60 % der Seefläche betrachtet. Im Modell wurden die meteorologischen Randbedingungen auf den Bedeckungsflächen mit folgenden Annahmen entsprechend modifiziert:

- Wind: Aufgrund der Reihenstrukturen der FPV wird der Wind in Nord-Süd-Richtung unterbunden und in Ost-West-Richtung um 50 % abgeschwächt.
- Lufttemperatur und relative Luftfeuchte: Bei windschwachen Verhältnissen gleichen sich die Lufttemperaturen den Wassertemperaturen an und die relative Luftfeuchte nähert sich 100 %. Bei steigenden Windgeschwindigkeiten der Ost-West-Komponente gleichen sich beide Größen den aus den Wettermodellen vorgegeben Werten an.

- Globalstrahlung: Aufgrund der vollständigen Abschattung wird die Globalstrahlung auf 0 W/m² gesetzt.
- Langwellige Einstrahlung: Anstelle der atmosphärischen, langwelligen Einstrahlung wird die Wärmeabstrahlung der über der Wasseroberfläche befindlichen FPV-Strukturen abgeschätzt.

Bei der zweiten Variante handelt es sich um vertikale FPV-Module. Vertikale FPV-Anlagen bestehen aus einzelnen, bifazialen PV-Modulen, die mit einem Schwimmkörper und einer Rahmenkonstruktion vertikal aufgerichtet im Gewässer platziert werden. Die Modulflächen werden in Ost-West-Richtung ausgerichtet. In den Modellszenarien mit vertikalen FPV-Modulen werden die verwendeten, meteorologischen Randbedingungen folgendermaßen verändert:

- Wind: Die Windabschwächung durch die Module ist aufgrund deren Ausrichtung richtungsabhängig. Die Windkomponente längs zu den Reihen (Nord-Süd-Richtung) wird nicht abgeschwächt. Für die Komponente quer zu den Reihen (West-Ost-Richtung) wird eine Abschwächung von 50 % angenommen. Bei Windrichtungen dazwischen wird entsprechend interpoliert.
- Globalstrahlung: Die Globalstrahlung setzt sich aus dem direkten und dem diffusen Anteil der Sonneneinstrahlung zusammen. In abgeschatteten Bereichen wirkt nur der diffuse Anteil. Für die Modellszenarien wurden auf Stundenbasis die durch die vertikalen Module abgeschatteten Bereiche berechnet und für diese nur der diffuse Anteil der Globalstrahlung angesetzt. Der Einfluss der Schwimmkörper der Module wurde aufgrund deren geringen Fläche vernachlässigt.
- Lufttemperatur, relative Feuchte und langwellige Strahlung: Aufgrund der nur sehr geringen Seefläche, die tatsächlich durch die Schwimmkörper der Module bedeckt wird, wird der Einfluss auf Lufttemperatur, relative Feuchte und langwellige Strahlung als vernachlässigbar angenommen.

Somit verändert sich auf den mit FPV bedeckten Flächen der Wärmeaustausch mit der Atmosphäre, der Windimpulseintrag ins Gewässer sowie die Lichteinstrahlung. Um sowohl sich über längere Zeiträume entwickelnde bzw. akkumulierende Auswirkungen als auch Variabilität von Jahr zu Jahr untersuchen zu können, wurde ein vierjähriger Simulationszeitraum gewählt.

4.3 Wichtigste Parameter und deren Modellierungsergebnisse

Anhand der Modellergebnisse lassen sich für die einzelnen Komponenten des **Wärmeaustauschs** zwischen Gewässer und Atmosphäre die Veränderung durch die FPV-Bedeckung analysieren. Die kurzwellige Einstrahlung (Globalstrahlung) stellt den größten Anteil der Wärmezufuhr ins Gewässer dar. Mit liegenden FPV-Modulen verringert sich dieser Anteil entsprechend der bedeckten Fläche. Dem entgegen wirkt

der geringere Wärmeverlust über die fühlbaren und latenten Wärmeflüsse sowie die langwellige Nettostrahlung. Diese Veränderungen sind im Jahresverlauf nicht konstant. In den Herbst- und Wintermonaten ist mit FPV-Bedeckung der Wärmeverlust des Gewässers verringert. Von Februar bis Oktober ist hingegen mit Bedeckung der Wärmeeintrag ins Gewässer verringert.

Diese Veränderungen bei den Wärmeflüssen wirken sich direkt auf die **Wassertemperaturen** in den Flachseen aus. Mit liegenden FPV-Modulen erwärmen sich die Gewässer im Frühjahr langsamer und bleiben auch im Sommer kühler, während die Abkühlung im Herbst verlangsamt ist und die Wassertemperaturen zeitweise geringfügig höher sein können als ohne FPV. Bei hohen Bedeckungsgraden und einer vollständigen Bedeckung der tieferen Bereiche steigen die Temperaturänderungen insbesondere in den Sommermonaten an, da auf diese Weise der kurzweilige Wärmeeintrag in tiefere Wasserschichten unterbunden wird.

Die Modellergebnisse weisen zudem darauf hin, dass die **Bathymetrie des Gewässers das Ausmaß der Temperaturänderungen unter FPV beeinflussen kann**. Bei etwas tieferen Gewässern, bei denen sich im Sommer zumindest temporär eine Temperaturschichtung einstellt, ist im Tiefenwasser neben einer Abnahme der Temperaturen auch mit einer verringerten Durchmischung zwischen oberflächennahen und tiefen Wasserschichten und einer stabileren Temperaturschichtung zu rechnen. Diese Effekte sind bei niedrigen Bedeckungsgraden von 15 % oder 25 % noch relativ schwach ausgeprägt, können bei hohen Bedeckungsgraden das Mischungsregime aber deutlich verändern.

Die höheren Wassertemperaturen im Winter mit liegender FPV-Bedeckung haben zudem einen weiteren Effekt. Die Modellergebnisse zeigen, dass mit FPV im Winter die **Eisdicken** abnehmen sowie die Zeiträume mit geschlossener Eisdecke kürzer werden, was die Gefahr von winterlichen Sauerstoffzehrungen unter Eis mit Gefahr von Fischsterben verringern kann.

Für die Berechnung der Primärproduktion durch **Phytoplankton** wurden im Modell zwei Algengruppen berücksichtigt. Die erste Gruppe der Kieselalgen benötigt zusätzlich Silizium und weist größere Sinkgeschwindigkeiten auf als die zweite Gruppe, die alle übrigen Algen umfasst. Für das Referenzszenario ohne FPV wurden die Eigenschaften der beiden Gruppen so eingestellt, dass sich eine typische saisonale Sukzession mit Dominanz der Kieselalgen im Frühjahr und ggf. im Herbst sowie größere Anteile der übrigen Algen im Sommer einstellt. Die Ergebnisse der FPV-Szenarien mit der liegenden Variante zeigen, dass die Primärproduktion in Abhängigkeit des Bedeckungsgrads abnimmt. Beim Szenario mit einem Bedeckungsgrad von 60 % bricht in manchen Jahren das Algenwachstum fast vollständig zusammen. Insgesamt ist die saisonale Entwicklung der Algen mit zunehmender FPV-Bedeckung deutlich verkürzt. Die prozentuale Abnahme der Primärproduktion variiert bei gleichbleibendem Bedeckungsgrad von Jahr zu Jahr.

Grund hierfür sind in erster Linie Unterschiede bei der Abflussspende in die Seen. Geringe Zuflüsse bedeuten höhere Verweilzeiten im Gewässer und damit eine geringere Abnahme der Primärproduktion mit FPV. Mit FPV-Bedeckung ändern sich auch die Anteile der beiden Algengruppen. Je höher der Bedeckungsgrad, umso geringer werden die Anteile der Kieselalgen. Entscheidend hierfür dürfte deren höhere Sinkgeschwindigkeit sein und damit deren verringerte Fähigkeit, Licht aufzunehmen. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass im Hinblick auf die tatsächlich im Gewässer vorliegende, deutlich komplexere Phytoplanktongemeinschaft mit einer FPV-Bedeckung Arten mit geringeren Sinkgeschwindigkeiten und ggf. aktiven Fortbewegungsmöglichkeiten Wachstumsvorteile aufweisen.

Zu beachten ist, dass die Modellergebnisse auf der Annahme beruhen, dass sich die Algengemeinschaft durch die FPV-Nutzung nicht grundlegend ändert. Tatsächlich ist aber eine Anpassung der Zusammensetzung der vorherrschenden Algenarten an die neuen Verhältnisse wahrscheinlich, so dass eine effizientere Nutzung der vorhandenen Ressourcen möglich ist und die Abnahme der Produktivität geringer ausfallen kann als prognostiziert.

Nebeneffekt eines verringerten Phytoplanktonwachstums ist ein Anstieg der **Sichttiefe** im Gewässer. Dies kann, je nach Gewässer, die Wachstumschancen von Makrophyten vergrößern und zu Makrophytendominanz in vorher algentrüben Gewässern oder zu höheren Bedeckungsgraden von Makrophyten führen.

Mit dem Modell für den Modellsee 1 wurden die Auswirkungen der liegenden FPV-Module auf das Auftreten und Wachstum von **Makrophyten** untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass aufgrund der Lichtarmut unter bedeckten Seeflächen kein Makrophytenwachstum möglich ist. In nicht bedeckten Bereichen zeigt sich zudem in Abhängigkeit des Bedeckungsgrads ein um einige Tage bis wenige Wochen später eintretender Wachstumsbeginn im Frühjahr und ein späteres Absterben im Herbst. Dies ist auf die Verzögerung der Erwärmung des Wassers im Frühjahr sowie der Abkühlung im Herbst zurückzuführen. Nicht berücksichtigt werden konnte eine Verschiebung von Plankton- zu Makrophytendominanz.

Veränderungen bei der Primärproduktion wirken sich direkt auf die **Sauerstoffverhältnisse** im Gewässer aus, hier betrachtet anhand der Szenarien mit Phytoplanktondominanz. Zum einen nimmt die Sauerstoffproduktion durch eine verringerte Photosyntheseaktivität ab. Dieser Effekt dominiert beim flachen See ohne Temperaturschichtung sowie im **oberen Teil des Wasserkörpers** bei den beiden tieferen Seen mit Temperaturschichtung im Sommer. Die Sauerstoffkonzentrationen sind dort ganzjährig hoch, wobei mit liegender FPV-Bedeckung die Übersättigungen geringer sind. Insgesamt liegen die Minimalwerte der Sauerstoffkonzentration mit liegenden FPV-Modulen nicht unter denen des Szenarios ohne FPV. Ein negativer Einfluss der Bedeckung auf die Sauerstoffkonzentrationen lässt sich somit in den oberen Wasserbereichen und bei ungeschichteten Gewässern nicht identifizieren.

Der Einfluss der FPV-Bedeckung auf den **unteren, zeitweise geschichteten Teil** des Wasserkörpers bei den **beiden tieferen Seen** ist dagegen vielschichtiger und von Prozessen mit teilweise gegenläufiger Wirkung auf die Sauerstoffkonzentrationen geprägt. Aufgrund der mit FPV-Bedeckung verringerten vertikalen Durchmischung und stabileren Temperaturschichtung nimmt die Sauerstoffzufuhr aus den oberen Wasserschichten ins Tiefenwasser ab. Verstärkt wird dieser Effekt durch die beschriebenen, geringeren Sauerstoffkonzentrationen im oberen Teil des Wasserkörpers. Auf der anderen Seite nimmt in den FPV-Szenarien die Sauerstoffzehrung im Tiefenwasser ab, da weniger Biomasse produziert wird. Insgesamt hat sich damit die Sauerstoffsituation im Tiefenwasser der betrachteten Seen mit FPV verschlechtert. Die Tage pro Jahr mit sauerstoffarmen oder -freien Verhältnissen im Tiefenwasser nehmen im Mittel zu. In einzelnen Jahren konnte allerdings für die Szenarien des Modellsees 2 auch eine leichte Verbesserung festgestellt werden. In diesen Jahren überwiegt der Effekt der geringeren Sauerstoffzehrung gegenüber der verringerten Durchmischung. Dies zeigt, dass sich die Auswirkungen von liegenden FPV-Modulen im Detail nicht verallgemeinern lassen und die Eigenheiten eines Gewässers die zu erwartenden Veränderungen maßgeblich beeinflussen können.

Auch die **Nährstoffkreisläufe** werden von liegenden FPV-Modulen signifikant beeinflusst. Grund hierfür ist in erster Linie die verringerte Primärproduktion. In der Folge nehmen bei allen Modellszenarien mit FPV im Mittel die Phosphat-, Nitrat- und Siliziumkonzentrationen in den Flachseen zu. Ammoniumkonzentrationen hingegen nehmen tendenziell ab, da weniger Biomasse anfällt und damit die Freisetzung durch Mineralisierungsprozesse abnimmt. Letzteres kann auch, je nach Rücklösungsrate und Bindekapazität des Sediments, eine geringere Phosphatakkumulation im Tiefenwasser der geschichteten Seen bewirken. Auch sinkt aufgrund der geringeren Ammoniumkonzentration die Umwandlung zu Nitrat im Rahmen der Nitrifikation. Insgesamt überwiegt in allen Modellszenarien allerdings die Phosphat- und Nitratzunahme durch geringere Primärproduktion mit liegenden FPV-Modulen bei weitem.

4.4 Szenario mit verringertem Zufluss

In weiteren Szenarien wurde der **Einfluss der Durchflussrate bzw. Wasseraustauschzeit** eines Gewässers auf die Auswirkungen einer FPV-Nutzung untersucht. Hierzu wurde im Modell des etwas tieferen und zeitweise geschichteten Modellsees 3 der Zu- und Abfluss jeweils auf 25 % des ursprünglichen Werts verringert und in zwei Szenarien die Situation ohne FPV und mit FPV bei einem Bedeckungsgrad von 60 % betrachtet. Dabei wurden liegende FPV-Anlagen angenommen.

Der verringerte Durchfluss hat **unabhängig von einer FPV-Nutzung** Einfluss auf die Verhältnisse im Gewässer. Da die Wassertemperaturen des Zuflusses im Sommer deutlich unter denen im Weiher liegen, hat dieser eine kühlende Wirkung auf das Gewässer. In den Szenarien ohne FPV sind daher mit verringertem Durchfluss im Sommer die Wassertemperaturen im Weiher um ca. 1-3 K höher als im Szenario mit unverändertem Durchfluss. Zudem sind insgesamt die Nährstoffkonzentrationen im Gewässer aufgrund des verringerten Eintrags niedriger. Das hat zur Folge, dass im Vergleich zum Szenario mit unverändertem Durchfluss eine geringere Nettoprimärproduktion und Sauerstoffzehrung berechnet werden.

Im Vergleich mit den Ergebnissen der **FPV-Szenarien** mit unverändertem Durchfluss zeigt sich, dass mit verringertem Durchfluss die durch die FPV-Bedeckung entstehenden Auswirkungen auf die **Wassertemperatur** zunehmen. Das Gewässer kühlt sich unter FPV-Bedeckung mit verringertem Durchfluss nochmals um weitere 0,1-0,3 K an der Wasseroberfläche und um 0,1-0,6 K im Tiefenwasser ab im Vergleich zur Situation mit FPV bei unverändertem Durchfluss. Damit wird auch die Temperaturschichtung in den Sommermonaten stabiler. Beim **Phytoplankton** hingegen zeigt sich, dass mit verringertem Durchfluss das Wachstum zwar geringer ausfällt, mit FPV aber auch weniger stark abnimmt als bei unverändertem Durchfluss. Grund ist einerseits der geringere Nährstoffinput, der das Algenwachstum reduziert, andererseits die höhere Wasseraufenthaltsdauer im Weiher, die den Aufbau einer Algenpopulation begünstigt. Insgesamt ist die Nettoprimärproduktion in den Modellszenarien mit reduziertem Durchfluss geringer, da der Einfluss des Nährstoffeintrags ins Gewässer überwiegt. Trotz geringerer Primärproduktion verschlechtert sich die **Sauerstoffsituation** im Tiefenwasser bei verringertem Durchfluss. Ursache ist in erster Linie eine höhere Schichtungsstabilität und eine verringerte Durchmischung. Bei den **Nährstoffkreisläufen** entstehen mit verringertem Durchfluss Unterschiede in erster Linie durch die veränderten Nährstofffrachten ins Gewässer. Die geringere Primärproduktion bedingt zudem eine geringere Zehrung im oberen Wasserkörper sowie eine geringere Rücklösung aus dem Sediment. Da im Tiefenwasser rückgelöste Nährstoffe in Folge von Durchmischungsereignissen für das Algenwachstum wieder verfügbar sind, bedeutet eine Abnahme der Rücklösungsprozesse eine weitere Limitierung des Algenwachstums.

Abbildung 4.1 fasst den Einfluss des Durchflusses auf die Auswirkungen einer FPV-Nutzung für verschiedene Prozesse eines Gewässers zusammen. Die Ergebnisse der Modellszenarien zeigen somit auf, dass sich mit verringertem Durchfluss die Auswirkungen einer FPV-Nutzung insgesamt verstärken.



geringer Durchfluss

hoher Durchfluss

Abbildung 4.1: Einfluss einer FPV-Nutzung auf die Wassertemperatur, Schichtungsstabilität, Primärproduktion und Sauerstoffarmut eines Gewässers in Abhängigkeit des Durchflusses

Tabelle 4.2 fasst die beschriebenen Auswirkungen einer FPV-Nutzung mit der liegenden Konstruktionsvariante auf ungeschichteten und geschichteten Flachseen nochmals zusammen.

Tabelle 4.2: Zusammenfassung der Auswirkungen von liegenden FPV-Modulen auf die untersuchten Prozesse in ungeschichteten und geschichteten Flachseen

Parameter	Ungeschichtete Flachseen	Geschichtete Flachseen
Wassertemperatur	Abnahme der Wassertemperaturen von Februar – Oktober, ggf. Zunahme im Winter	Abnahme der Wassertemperaturen von Februar – Oktober, ggf. Zunahme im Winter
Dichteschichtung	-	Stabilere Schichtung, weniger Durchmischung
Eisbedeckung	geringere Eismächtigkeit, früheres Abschmelzen der Eisbedeckung	geringere Eismächtigkeit, früheres Abschmelzen der Eisbedeckung
Phytoplankton	Abnahme der Nettoproduktion in Abhängigkeit des Bedeckungsgrads, Zusammenbruch der Population möglich	Abnahme der Nettoproduktion in Abhängigkeit des Bedeckungsgrads, Zusammenbruch der Population möglich
Makrophyten	Verschwinden in bedeckten Bereichen, insgesamt leicht veränderte Wachstumsbedingungen	Verschwinden in bedeckten Bereichen, insgesamt leicht veränderte Wachstumsbedingungen

	aufgrund geringerer Wassertemperaturen in Wachstumsperiode	aufgrund geringerer Wassertemperaturen in Wachstumsperiode
Sauerstoff	Abnahme der Übersättigungen	Oberflächennah Abnahme der Übersättigungen, tendenziell Abnahme im Tiefenwasser
Nährstoffe	Zunahme Phosphat, Nitrat und Silizium, Abnahme Ammonium	Zunahme Phosphat, Nitrat und Silizium, Abnahme Ammonium

4.5 Auswirkungen vertikaler FPV-Module

Vertikale FPV-Module werden mittels Schwimmkörper und stabilisierender, ins Wasser eintauchender Rahmenkonstruktion in Reihen auf dem Gewässer platziert. Dadurch ist der tatsächlich bedeckte Anteil der Wasseroberfläche bei dieser Variante deutlich geringer als bei liegenden PV-Modulen. Damit unterscheiden sich die Auswirkungen beider Varianten auf die meteorologischen Modellrandbedingungen an der Wasseroberfläche. Mit vertikalen FPV-Modulen wird eine Reduzierung der Globalstrahlung um im Mittel etwa 8-12 % innerhalb der bedeckten Bereiche berechnet. Der Wind wird richtungsabhängig abgeschwächt im Modell ebenfalls abgebildet, während der Einfluss auf die Lufttemperatur, relative Feuchte und langwellige Strahlung als vernachlässigbar eingestuft wird. In verschiedenen Modellszenarien wurden Bedeckungsgrade von 35 %, 60 % und 80 % mit der Situation ohne FPV verglichen, wobei der Bedeckungsgrad die umhüllende Seefläche der Reihenstrukturen darstellt und nicht den tatsächlich mit Schwimmkörper bedeckten Anteil, der weitaus geringer ist (bei Bedeckungsgraden von 35/60/80 % sind 3,5/6,0/8,1 % der Fläche bedeckt).

Die Ergebnisse zeigen im Vergleich mit der horizontalen Variante deutlich geringere Auswirkungen auf das Gewässer. Die **Wassertemperaturen** ändern sich mit vertikaler FPV selbst bei sehr hohen Bedeckungsgraden von 80 % nur geringfügig. Differenzen entstehen hauptsächlich bei Wetterumschwüngen in den Sommermonaten, bei denen die Wassertemperaturen mit FPV etwas träger als in der Situation ohne FPV reagieren. Die Differenzen bewegen sich meist in der Größenordnung ± 1 K. Ausnahme stellen zwei kurze Zeiträume von wenigen Tagen im März 2003 und 2005 dar, bei denen kurzzeitig höhere Temperaturdifferenzen aufgrund unterschiedlicher Zeiträume mit Eisbedeckung entstehen. Die Modellergebnisse zeigen, dass mit vertikalen FPV-Modulen sowohl eine Verlängerung als auch eine Verkürzung der eisbedeckten Zeiträume möglich ist, da zum einen die geringere Globalstrahlung ein stärkeres Auskühlen der oberen Wasserschichten ermöglicht und zum anderen der Wärmeaustausch mit der Atmosphäre aufgrund der geringeren Windgeschwindigkeiten reduziert ist, was den Einfluss warmer und kalter Wetterlagen auf die Wassertemperaturen abpuffert.

Signifikante Auswirkungen auf die Schichtungsverhältnisse konnten nicht festgestellt werden.

Der Einfluss der vertikalen FPV-Module auf die **Primärproduktion** wurde sowohl anhand des Phytoplanktons als auch anhand der Makrophyten betrachtet. In beiden Fällen konnte keine signifikante Beeinträchtigung des Wachstums festgestellt werden. Der Einfluss der Module auf den Lichthaushalt des Gewässers ist zu gering, um eine effektive Lichtlimitierung der Primärproduktion zu verursachen.

Eng verknüpft mit den Schichtungsverhältnissen und der Primärproduktion sind der **Sauerstoffhaushalt** und die **Nährstoffkreisläufe**. Da sich beide Einflussfaktoren mit einer Bedeckung mit vertikalen FPV-Modulen nur geringfügig ändern, werden auch für diese nur vernachlässigbare Auswirkungen mit vertikaler FPV-Bedeckung prognostiziert.

Es lässt sich somit festhalten, dass im Vergleich mit den liegenden FPV-Modulen die vertikale Variante deutlich geringere Auswirkungen auf den Wärmehaushalt und die Wasserqualitätsprozesse im Gewässer mit sich bringt.

4.6 Treibhausgasemissionen

Auf Grundlage der Szenarien des Modellsees 3 mit verringerten Durchflussraten wurden die Auswirkungen einer liegenden FPV-Nutzung auf die Treibhausgasemissionen untersucht. Hierzu wurde das Modell um die Prozesse, bei denen Methan entsteht, erweitert. Dies ist im Rahmen der Methanogenese der Fall, bei der unter sauerstoff- und nitratfreien Verhältnissen bei der Mineralisierung von organischem Material Methan freigesetzt wird. Im Modell wurde die Methanentstehung zum einen in der Wassersäule in Form von im Wasser gelöstem Methan, das über die Wasseroberfläche in die Atmosphäre ausgasen kann, und zum anderen über Bläschenbildung im oberen Teil des Sediments berücksichtigt. Die untere Sedimentschicht wird vernachlässigt, da für diese Schicht dauerhaft sauerstoff- und nitratfreie Verhältnisse angenommen werden und somit in erster Näherung keine Unterschiede zwischen der Situation mit und ohne FPV zu erwarten sind. Mit dem Modell wird also nicht der vollständige Methanfluss des Gewässers in die Atmosphäre betrachtet, sondern nur die Differenz zwischen der Situation ohne und mit FPV abgeschätzt. Einschränkend kommt hinzu, dass keine gemessenen Vergleichswerte für die Methanproduktion vorliegen, so dass die Betrachtung eine reine Modellbetrachtung ohne messtechnische Überprüfung ist.

In zwei Modellszenarien wurde die Situation für den Referenzzustand ohne und mit FPV-Bedeckung bei einem Bedeckungsgrad von 60 % betrachtet. Die Ergebnisse zeigen im Mittel mit FPV eine Zunahme der Emission von im Wasser gelöstem Methan sowie eine Abnahme der Emission von Methan-Bläschen in die Atmosphäre. Mit FPV nehmen die Sauerstoffzehrung im Tiefenwasser und damit die sauerstoff- und nitratfreien Zeiträume zu, was den Anstieg von gelöstem Methan erklärt. Auf der

anderen Seite ist die Menge des ins Sediment absinkende und zur Mineralisierung zur Verfügung stehende organische Material im FPV-Szenario deutlich geringer. In der Folge entsteht weniger Methan in der oberen Sedimentschicht und somit verringert sich die Ausgasung von Methanbläschen in die Atmosphäre. In der Summe wird somit mit einer FPV-Bedeckung von 60 % in dem betrachteten Szenario insgesamt eine Abnahme der Methanemissionen in die Atmosphäre prognostiziert. Dieses Ergebnis ist mit gewissen Unsicherheiten behaftet.

4.7 Zusammenfassende Bewertung

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass mit den Modellsystemen die Auswirkungen der FPV-Nutzung auf verschiedene Flachseen mit hohem Detailgrad aufgezeigt und quantifiziert werden können. Aus den Betrachtungen zu drei verschiedenen Flachseen lassen sich Rückschlüsse auf die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Gewässer ziehen. Die Auswirkungen einer liegenden FPV-Bedeckung auf die Wärmeaustauschprozesse mit der Atmosphäre, der Wassertemperaturen, der Dichteschichtung und Durchmischungsprozesse sowie der Primärproduktion zeigen für alle drei Gewässer ein vergleichbares Muster und sind auf weitere Gewässer übertragbar. Bei den Auswirkungen auf den Sauerstoffhaushalt und die Nährstoffkreisläufe sind die Eigenschaften der einzelnen Gewässer, wie z. B. maximale Tiefe, Bathymetrie und Schichtungsverhalten, bei einer Übertragung zu berücksichtigen. Der Durchfluss ist für alle Parameter zu berücksichtigen.

Tabelle 4.3 fasst die gewonnen Erkenntnisse in Form einer Bewertung der Auswirkungen von liegenden FPV-Anlagen auf die einzelnen betrachteten Prozesse für die verschiedenen untersuchten Gewässertypen zusammen. Daraus lässt sich für ein gegebenes Gewässer eine Empfehlung hinsichtlich weitestgehend unbedenklicher Bedeckungsgrade ableiten. Folgende Anmerkungen sind dabei zu beachten:

- Insgesamt ist mit einer gewissen Schwankungsbreite der Auswirkungen zu rechnen, die auf spezifische Gegebenheiten der Gewässer zurückzuführen sind. Dies verdeutlichen auch die unterschiedlichen Ergebnisse für die Modellseen 2 und 3. Bei beiden Gewässern handelt es sich um geschichtete Flachseen mit hohem Durchfluss, wobei die Auswirkungen der FPV-Bedeckung z. B. auf das Phytoplankton unterschiedlich ausfallen.
- Mit einer Anpassung der Artengemeinschaft des Phytoplanktons an neue Bedingungen mit FPV-Bedeckung ist zu rechnen. Daher ist es wahrscheinlich, dass der prognostizierte Rückgang der Primärproduktion tatsächlich deutlich geringer ausfällt.
- Makrophytenwachstum unter den FPV-Modulen ist aufgrund der Lichtabschattung nicht möglich. Eine FPV-Bedeckung über bewachsenen

Flächen führt daher zu einer Abnahme bzw. einem Verschwinden der Makrophyten. Bei Gewässern mit unbewachsenen Flächen ist ggf. eine Platzierung der FPV-Module außerhalb der bewachsenen Bereiche möglich. Damit lassen sich negative Auswirkungen auf Makrophyten vermeiden.

- Semitransparente FPV-Module wurden in der vorliegenden Studie nicht betrachtet. Ggf. lassen sich damit die Auswirkungen auf Makrophyten in bedeckten Bereichen verringern.
- Die geringsten Auswirkungen einer FPV-Nutzung sind in ungeschichteten Flachseen mit hohen Austauschraten zu erwarten. Zu diesem Typus zählt der Modellsee 1, bei dem ein Bedeckungsgrad von 35 % Änderungen der Wassertemperatur von ca. 2 K, einen moderaten Einfluss auf die Primärproduktion sowie vernachlässigbare Auswirkungen auf den Sauerstoff- und Nährstoffhaushalt mit sich bringt.
- Eine FPV-Nutzung kann auch positive Auswirkungen mit sich bringen, z. B.:
 - verringerte Gefahr von Sauerstoffmangel aufgrund verkürzter Zeiträume mit Eisbedeckung im Winter
 - Begünstigung eines Wechsels vom phytoplankton- in den makrophytendominierten Zustand
 - Entgegenwirken der Auswirkungen des Klimawandels auf die Wassertemperaturen

Tabelle 4.3: Bewertung der Auswirkungen einer FPV-Nutzung mit liegenden Modulen auf unterschiedliche Prozesse in geschichteten und ungeschichteten Flachseen mit geringen und hohen Durchflüssen; grün = tendenziell keine negativen Auswirkungen zu erwarten, gelb = signifikante negative Auswirkungen bei hohen Bedeckungsgraden (45 % bis 60 %), orange = signifikante negative Auswirkungen bei mittleren bis hohen Bedeckungsgraden (ab 35 %)

	Ungeschichtete Flachseen mit geringem Durchfluss	Ungeschichtete Flachseen mit hohem Durchfluss	Geschichtete Flachseen mit geringem Durchfluss	Geschichtete Flachseen mit hohem Durchfluss
Wassertemperatur	grün	grün	grün	grün
Dichteschichtung	grün	grün	gelb/orange	gelb
Eisbedeckung	grün	grün	grün	grün
Phytoplankton	gelb	orange	gelb/orange	gelb/orange
Makrophyten	gelb/orange	gelb/orange	gelb/orange	gelb/orange
Sauerstoff	orange	grün	gelb/orange	gelb
Nährstoffe	grün	grün	grün	grün

LITERATURVERZEICHNIS

Bollmeyer, C., Keller, J.D., Ohlwein, C., Wahl, S., Crewell, S., Friederichs, P., Hense, A., Keune, J., Kneifel, S., Pscheidt, I., Redl, S. and Steinke, S. (2015), Towards a high-resolution regional reanalysis for the European CORDEX domain. Q.J.R. Meteorol. Soc., 141: 1-15. <https://doi.org/10.1002/qj.2486>

Deltares (2019a): Delft3D-FLOW - Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual Version 3.15, Delft

Deltares (2019b): D-Water Quality - Versatile water quality modelling in 1D, 2D or 3D systems including physical, (bio)chemical and biological processes. User Manual Version 1.1, Delft

Kup / Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner (2022): Modellierungen zur Folgenabschätzung von schwimmenden Photovoltaikanlagen. Projektbericht im Auftrag des Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg; verfügbar unter <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10548>

Kup / Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner (2025): Modellierung der Auswirkungen verschiedener Bedeckungsgrade von Floating PV Anlagen auf Flachseen/Teiche: Methodenbericht. Projektbericht im Auftrag des Landesamts für Umwelt Bayern.

Müller, B., Bryant L.D., Matzinger, A., Wüest, A. (2012): Hypolimnetic Oxygen Depletion in Eutrophic Lakes. Environ. Sci. Technol., 2012, 46 (18), 9964–9971

Ray, N. E., Holgerson, M. A., Grodsky, S. M. (2024): Immediate Effect of Floating Solar Energy Deployment on Greenhouse Gas Dynamics in Ponds. Environmental Science & Technology 2024 58 (50), 22104-22113; doi: 10.1021/acs.est.4c06363