# Auswirkungen durch die Anlage und den Betrieb einer schwimmenden PV-Anlage auf dem Baggersee Langenbrücken (Fa. Philipp & Co. KG)

BGL

BÜRO FÜR GEWÄSSERKUNDE
UND LANDSCHAFTSÖKOLOGIE
KLAUS- JÜRGEN BOOS

erstellt von:
Klaus-Jürgen Boos (Dipl. Geogr.)

Saarbrücken,

Juni 2022

Ziehrerstraße 11
66130 Saarbrücken
Telefon: (0681) 872962

Telefax: (0681) 872962
E-Mail: BGL.Boos@ t-online.de
Internet: www.bgl-boos.de

# Inhaltsverzeichnis

**1 EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG ..... 3**

**2 VORHABENSBESCHREIBUNG ..... 5**

**3 WASSERHAUSHALT DES BAGGERSEES ..... 6**

**4 GÜTEZUSTAND DES BAGGERSEES ..... 7**

**4.1 QUALITÄTSZIELE UND GÜTEANFORDERUNGEN ..... 7**
**4.2 GÜTEBILD DES SEES ..... 8**

**5 VORBELASTUNG DES SEES DURCH BESTEHENDE EXTERNE NÄHRSTOFFEINTRÄGE 11**

**5.1 PHOSPHOREINTRÄGE ..... 11**
**5.2 STICKSTOFFEINTRÄGE ..... 12**

**6 VORAUSSETZUNGEN UND VORGEHENSWEISE ..... 13**

**6.1 DEFINITION MÖGLICHER EINFLUSSFAKTOREN ..... 13**
6.1.1 PRIMÄRE EINFLUSSFAKTOREN (PRIMÄRE METEOROLOGISCHE WIRKGRÖßEN) ..... 13
6.1.2 SEKUNDÄRE EINFLUSSFAKTOREN ..... 13
**6.2 ERMITTLUNG DER VORHABENSAUSWIRKUNGEN IN DREI ARBEITSSCHRITTEN ..... 13**

**7 LITERATURAUSWERTUNG ..... 17**

**7.1 AUSWAHLKRITERIEN ZUR ERMITTLUNG GEEIGNETER LITERATURQUELLEN ..... 17**
7.1.1 BERÜCKSICHTIGUNG HYDRODYNAMISCHER PROZESSE ..... 17
7.1.2 ERFASSUNG MASKIERENDER EINFLUSSGRÖßEN ..... 19
7.1.3 QUANTIFIZIERUNG DER VORHABENSBEDINGTEN BEEINFLUSSUNGEN METEOROLOGISCHER WIRKGRÖßEN ..... 21
7.1.4 ALLGEMEINE NUTZBARKEIT EINER LITERATURQUELLE FÜR DIE AUFGABENSTELLUNG ..... 21
**7.2 UMWELTRELEVANZ SCHWIMMENDER PHOTOVOLTAIK (SPV) ANLAGEN DARGESTELLT AUF DER GRUNDLAGE EINER LITERATURAUSWERTUNG ..... 22**
7.2.1 EMPIRISCHE STUDIEN ..... 23
7.2.2 MODELLSTUDIEN ..... 24
7.2.3 KOMBINATIONSSTUDIE: ILGEN (2021) ..... 25
7.2.4 HAUPTAUSSAGEN ..... 25

**8 NATÜRLICHES REFERENZGEWÄSSER ..... 27**

**9 BEEINFLUSSUNG DER GEWÄSSERGÜTEKENNWERTE DES PHILIPPSEES DURCH EXPOSITION VON SOLARMODULEN ..... 33**

**9.1 MORPHOLOGISCHE KENNWERTE UND METEOROLOGISCHE WIRKGRÖßEN ALS INPUTDATEN DER MODELLBERECHNUNG ..... 33**
**9.2 ISTZUSTAND ..... 34**
9.2.1 TEMPERATURHAUSHALT ..... 35
9.2.2 SAUERSTOFFHAUSHALT ..... 38
9.2.3 PHOSPHORGEHALTE ..... 41
9.2.4 CHLOROPHYLL-A GEHALTE ..... 43
9.2.5 CYANOBAKTERIENENTWICKLUNG ..... 43
**9.3 GENEHMIGUNGSZUSTAND ..... 44**
9.3.1 TEMPERATURHAUSHALT ..... 45

9.3.2 SAUERSTOFFHAUSHALT ..... 48

**10 WEITERE BEEINFLUSSUNGSFAKTOREN ..... 52**

**10.1 ENTWICKLUNG BENTHISCHER (AM SUBSTRAT HAFTENDER) CYANOBAKTERIEN ..... 52**
**10.2 ENTWICKLUNG VON SCHWACHLICHT ARTEN (*PLANKTOTHRIX RUBESCENS*) ..... 52**
**10.3 BEEINFLUSSUNG DES GRUNDWASSERS DURCH CYANOTOXINE ..... 53**
**10.4 BELASTUNG DES WASSERS DURCH MIKROPLASTIK ..... 53**

**11 ZUSAMMENFASSENDE DARSTELLUNG DER VORHABENSAUSWIRKUNGEN FÜR DEN PHILIPPSEE ..... 54**

**12 BEWERTUNG DER MAßNAHMENAUSWIRKUNGEN NACH EU-WRRL ..... 55**

**13 BEEINFLUSSUNG DES ABSTROMIGEN WASSERSCHUTZGEBIETES ..... 57**

**14 ÜBERTRAGUNG DER MODELLERGEBNISSE AUF WEITERE VARIANTEN ..... 58**

**15 ABBILDUNGSVERZEICHNIS ..... 59**

**16 TABELLENVERZEICHNIS ..... 60**

**17 LITERATURVERZEICHNIS ..... 61**

**18 ANHANG ..... 63**

# 1 Einleitung und Aufgabenstellung

Die Firma O&L Nexentury GmbH plant die Installation einer schwimmenden Photovoltaik Anlage mit der Leistung von 15 MWp auf dem Philippsee in Bad Schönborn-Langenbrücken. Der vorliegende Bericht erarbeitet die erforderlichen limnologischen und gewässerökologischen Unterlagen für die Genehmigungsprüfung zu Erstellung und Betrieb dieser Anlage unter Bezug auf die folgenden Anforderungsprofile und Stellungsnahmen:

1. Projektpräsentation vom 24.11.21 „Schwimmende Photovoltaikanlage- Beurteilung der potentiellen Auswirkungen des Vorhabens auf die Umwelt
2. Konkretisiertes Untersuchungskonzept 04.02.22
3. Checkliste PV-Anlage Baggersee Philipp Langenbrücken vom 3.12.2021
4. Stellungnahme des Landratsamtes Karlsruhe (LRA KA) vom 25.3.22.

In der Stellungnahme des LRA KA wurden die folgenden Punkte hervorgehoben, denen folglich in der gutachterlichen Bearbeitung eine primäre Beachtung zukommt:

### Schutzgut Arten & Lebensgemeinschaften und biologische Vielfalt

- Veränderung des Stoffkreislaufs sowie Effekte auf die Produzenten und Konsumenten.
- Beschattung von Fischlebensräumen und deren Verlust für Freiwasserfische wie die Ukelei (externe Bearbeitung).
- Prognose der Güteentwicklung und Einfluss auf das Zoo- und Phytoplankton.
- Prognose der Güteentwicklung nach Einstellung der Auskiesungstätigkeit.

### Schutzgut Fläche

- Bewertung des Flächenverlustes für limnologische Funktionen, Fischerei und Freizeitaktivitäten (externe Bearbeitung).

### Schutzgut Wasser

- Entstehung von Mikroplastik durch die Anlagenverwitterung und deren Auswirkungen auch für den Grundwasserschutz.
- Bedeutung von Cyanobakterienentwicklungen im abgeschatteten Bereich (Schwachlichtarten und benthische Lebensformen)

### Fachtechnik

- Bezüglich der Vorhabensauswirkungen soll detailliert auf die vorhabensbedingten Auswirkungen für Zirkulationsverhalten, Sauerstoffhaushalt sowie weitere Güteparameter eingegangen werden.
- Auf dieser Basis sollte ein auf die Vorhabensauswirkungen angepasstes Monitoringprogramm erarbeitet werden.

Im Rahmen des Gutachtens erfolgt auf der Grundlage der limnologischen Vorhabensbewertung eine Diskussion der folgenden Parameter und Sachverhalte:

- Zirkulationsverhalten
- Temperaturhaushalt
- Seeverdunstung
- Sauerstoffhaushalt
- Algen- und Cyanobakterienentwicklung (Chl-a) und Nährstoffhaushalt
- Entwicklung benthischer Cyanobakterien als Aufwuchs auf den Schwimmkörpern
- Entwicklung von Schwachlicht-Cyanobakterien-Arten (z.B. *Planktothrix rubescens)* im abgeschatteten Bereich
- Darstellung möglicher sekundärer Belastungen z.B. durch Antifouling, Leaching, Mikroplastik etc.
- Badegewässerqualität

# 2 Vorhabensbeschreibung

Auf dem Philippsee soll eine energetische Nutzung im Umfang von 15 MWp Photovoltaikleistung durch schwimmende PV-Anlagen realisiert werden. Hierfür ist die Überbauung einer 8,7 ha großen Seefläche vorgesehen.

Bezogen auf den Fortgang der weiteren Abgrabung im Rahmen der Kiesgewinnung ergeben sich für den derzeit 58 ha großen See daraus die folgenden Überdeckungsgrade der Seefläche.

***Tabelle 2.1: Flächenausdehnung des Philippsees und Überdeckungsgrade durch die PV-Anlage***

| | Seesohle [m. NHN] | Volumen [m³] | Fläche [ha] | Ausdehnung PV-Anlage [ha] | Anteil der Seeüberdeckung [%] |
|---|---|---|---|---|---|
| Istzustand | 65,5 | 11.900.000 | 58 | 8,7 | 15 % |
| Genehmigungszustand | 65,5 | .600.000 | 62,5 | | 14% |
| Erweiterungsbereich (Planzustand & Sicherungsfläche) | 65.5 | / | 86,5 | | 10 % |

Die Ausbringung der schwimmenden Solarmodule erfolgt analog zu einer vergleichbaren Anlage, die in Abbildung 2.1 dargestellt ist, und verursacht eine weitgehende Abschattung der Seeoberfläche im Expositionsbereich.

***Abbildung 2.1: Darstellung einer schwimmenden PV-Anlage auf dem Bomhofsplas See in Zwolle***

# 3 Wasserhaushalt des Baggersees

Zur Beschreibung der limnologischen und hydrologischen Ausgangsverhältnisse können Untersuchungsergebnisse aus dem Bericht ***Limnologisches Begleitgutachten zur UVU Kiesgrubenerweiterung Philipp & Co. KG Bad Schönborn*** (Boos 2020) verwendet werden.

Die im Rahmen des Gutachtens benutzen Grundwasserzuflusswerte (Schäfer 2020) sind der Tabelle 3.1 zu entnehmen. Eine detaillierte Darstellung findet sich im oben genannten Bericht.

***Tabelle 3.1: Grundwasseranbindung des Baggersees (Grundwassermodell)***

| | | 1 (OGWL) | 2 (OGWL) | 3 (OGWL) | 4 (MGWL) | Gesamt |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Istzustand | Tiefenlage oben [m ü.NN] | 105 | 80 | 78 | 75 | |
| | Tiefenlage unten [m ü.NN] | 80 | 78 | 75 | 65 | |
| | ø Tiefenlage [m ü.NN] | 93 | 79 | 76,5 | 65 | |
| | Grundwasserzufluss [l/s] | 38,1 | 0 | 1,2 | 0,4 | 39,7 |
| | Grundwasserzufluss [m³/Jahr] | 1.201.522 | 0 | 37.843 | 12.614 | 1.251.979 |
| | Grundwasserzufluss [m³/Tag] | 3.292 | 0 | 104 | 35 | |
| | Anteil am Gesamtzufluss | 95% | 1% | 4% | 1% | |
| | **Seevolumen [m³]** | **11.900.000** | | **GW-Verweilzeit [J]** | | **9,5** |
| Genehmigungszustand | Tiefenlage oben [m ü.NN] | 105 | 80 | 78 | 75 | |
| | Tiefenlage unten [m ü.NN] | 80 | 78 | 75 | 65 | |
| | ø Tiefenlage [m ü.NN] | 93 | 79 | 76,5 | 65 | |
| | Grundwasserzufluss [l/s] | 22,1 | 3,8 | 8,2 | 3,3 | 37,4 |
| | Grundwasserzufluss [m³/Jahr] | 696.946 | 119.837 | 258.595 | 104.069 | 1.179.446 |
| | Grundwasserzufluss [m³/Tag] | 1.909 | 328 | 708 | 285 | |
| | Anteil am Gesamtzufluss | 61% | 0% | 20% | 13% | |
| | **Seevolumen [m³]** | **.600.000** | | **GW-Verweilzeit [J]** | | **14,1** |

# 4 Gütezustand des Baggersees

Unter Bezug auf die ausführlichen Darstellungen im Bericht ***Limnologisches Begleitgutachten zur UVU Kiesgrubenerweiterung Philipp & Co. KG Bad Schönborn*** (Boos 2020) kann der Gütezustand des Baggersees zusammenfassend wie folgt beschrieben werden. Der Gütezustand des Sees kann für seine Empfindlichkeit gegenüber möglicher Eingriffe, wie die Solarnutzung von Bedeutung sein.

## 4.1 Qualitätsziele und Güteanforderungen

Das Gütebild eines Sees wird maßgeblich von den Nährstoffkonzentrationen und der dazu in einer Wechselwirkung stehenden Qualität des Sauerstoffhaushaltes bestimmt. Hier soll daher zunächst dargestellt werden, in welchem Umfang eine externe Belastung durch Nährstoffe toleriert werden kann und wie sich die Nährstoffzufuhr auf die Flächenbelastung und den trophischen Zustand eines Sees auswirkt. Seen mit einer daraus entstehenden Belastungsfunktion sind ggf. empfindlicher gegenüber den Auswirkungen einer Solarnutzung, eine unmittelbare Beeinflussung des Nährstoffhaushaltes ergibt sich aber durch diese Nutzung nicht.

Baggerseen, die wie das Untersuchungsgewässer eine Wassertiefe von mehr als 10 m aufweisen und weder an Fließgewässer angebunden sind noch im Überflutungsbereich eines großen Fließgewässers liegen, sollten zumindest über einen mesotrophen Status verfügen.

- **Nährstoffgehalte**

Als Grundlage für die trophische Einstufung des Gewässers auf der Basis der Phosphorgehalte dienen die folgenden Zuordnungsgrößen, wobei ein mesotropher Referenzzustand zugrunde gelegt wird:

| **Gesamt-Phosphor** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Oligotroph | **Mesotroph** | Eutroph | Polytroph | Quelle |
| Zirkulation | [µg/l] | < 15 | **15 - 45** | 45 - 150 | > 150 | LAWA 1998 |
| | [mg/l] | < 0,015 | **0,015 - 0,045** | 0,045 - 0,150 | > 0,150 | |
| Stagnation | [µg/l] | 1 - 6 | **7 - 36** | 43 - > 200 | / | LAWA 2003 |
| | [mg/l] | 0,001 - 0,006 | **0,007 - 0,036** | 0,043 - > 0,2 | / | |

- **Sauerstoffgehalte**

Der Sauerstoffhaushalt steht in einem direkten Bezug zur Nährstoffbelastung und Biomasseentwicklung, er beeinflusst maßgeblich das Besiedlungsbild eines Sees. In eingeschichteten Seen kann die relative Mächtigkeit der sauerstoffarmen (< 2 mg/l $O_2$) Wasserschicht über Grund im Verhältnis zur Gesamttiefe als Trophieindikator herangezogen werden (LfU 2004). Bei einem mesotrophen Gewässerstatus, der als Zielgröße für das Untersuchungsgewässer gilt, beträgt diese Schicht 10 - 30 % der maximalen Seetiefe.

| | Oligotroph | **Mesotroph** | Eutroph | Polytroph | Verfahren/Quelle |
|---|---|---|---|---|---|
| Anteil der $O_2$-freien Schicht in % | 0-10 | **10-30** | >30 | >>30 | LfU 2004 |

- **Chlorophyllgehalte**

Auch der Parameter Chlorophyll-a Gehalt bietet eine wichtige Beurteilungsgrundlag für den Trophiestatus eines Gewässers. Als Bezugsgrößen für die trophische Einstufung dienen die im Folgenden angegebenen Werte für das Saisonmittel (1.5. bis 15.9), wobei ein mesotropher Referenzzustand zugrunde gelegt wird:

| | Oligotroph | **Mesotroph** | Eutroph | Polytroph | Verfahren/Quelle |
|---|---|---|---|---|---|
| Chlorophyll-a [µg/l] | < 4 | **4 - 12** | 12 - 35 | 35 - 103 | MIETZ et al. 1995 |

- **Cyanobakterien**

Obwohl die oft als Blaualgen bezeichneten Cyanobakterien taxonomisch nicht zu den Algen gehören, bevorzugen sie ähnliche Milieubedingungen wie Algen, so dass in algenreichen Seen immer auch Massenentwicklungen von Cyanobakterien möglich sind. In der EU-Badegewässerrichtlinie (2006) wird die Belastung durch Cyanobakterien thematisiert, es gibt aber weder in dieser noch in der Badegewässerverordnung Baden-Württembergs konkrete Grenzwerte für Cyanobakterien. Daher werden im Folgenden die Empfehlungswerte des UBA (2015) für die Einstufung der Wasserbeschaffenheit von Badegewässern zur Beurteilung der vorhabensbedingten Auswirkungen auf die Cyanobakterienentwicklung herangezogen:

| **Warnstufe UBA (2015)** | **Cyanobakterien Chl-a** | | **Cyanobakterienbiomasse** |
|---|---|---|---|
| Wasserbeschaffenheit Badegewässerqualität | < 5 µg/L | ↔ | < 1 $mm^3$/L |
| Warnstufe 1 | 5 µg/L | ↔ | 1 $mm^3$/L |
| Warnstufe 2 | 15 µg/L | ↔ | 3 $mm^3$/L |
| Warnstufe 3 | 75 µg/L | ↔ | 15 $mm^3$/L |

- **Sichttiefe**

Die verstärkte biologische Aktivität in einem belasteten See verursacht vor allem infolge der Algenentwicklung eine deutliche Gewässertrübung, die ebenfalls als Maßstab für die Bestimmung des Trophiestatus genutzt werden kann. Sofern Trübungseffekte auch durch die Kiesgewinnung oder die mit dem Kieswaschwasser eingetragenen Feinmineralien entstehen, ist der Indikatorwert der Sichttiefe allerdings eingeschränkt, da die mineralische Trübung kein Sekundäreffekt der Eutrophierung ist.

Als Bezugsgrößen für die trophische Einstufung dienen die im Folgenden wiedergegebenen Werte. Als Referenz wird ein mesotropher Zustand zugrunde gelegt.

| | Oligotroph | **Mesotroph** | Eutroph | Polytroph | Verfahren/Quelle |
|---|---|---|---|---|---|
| Sichttiefe [m] | 11,7 bis 4,8 | **4,4 bis 2** | 1,8 bis 0,8 | < 0,8 | LAWA 2003 |

## 4.2 Gütebild des Sees

Die Erfassung des aktuellen Gütezustandes des Sees stützte sich auf insgesamt 13 Beprobungen der chemisch-physikalischen Wasserqualität und 4 Sedimentproben, die im Zeitraum 2008 bis 2019 durchgeführt wurden. Als Bezugsgröße zur Beurteilung der Gewässergüte dienten die mesotrophen Kenngrößen der trophieindizierenden Parameter.

Der Belastungszustand des Sees, insbesondere die Temperatur-, Sauerstoff und Nährstoffverhältnisse sind für die Empfindlichkeit des Sees gegenüber weiteren Eingriffen wie der Solarnutzung von Bedeutung, aus diesem soll hier eine detaillierte Beschreibung des Seewasserkörpers vorgenommen werden.

Die Temperaturtiefenprofile zeigten eine Zirkulation des Wasserkörpers in den Winterhalbjahren und eine teilweise infolge der Baggertätigkeit abgeschwächte thermische Schichtung in den Sommerhalbjahren an. Ein sauerstoffarmer Wasserkörper über Grund mit $O_2$- Gehalten unter 2 mg/l bildete sich zu keinem Zeitpunkt aus, der Zielwert für einen mesotrophen Status (maximale Ausdehnung der sauerstoffarmen Schicht 10 - 30 % der Gesamttiefe) wurde demnach stets deutlich erreicht. Zeitweise ergaben sich Hinweise auf einen biogenen

Sauerstoffeintrag durch Algen. Die elektrische Leitfähigkeit als Indikator für die Menge der im Wasser gelösten Ionen erreichte im Untersuchungsgewässer mittlere, für die geogene Grundbelastung des Naturraums typische Werte. Unter Bezug auf das Wertemuster güteindizierender Ionen war weder aus den absoluten Konzentrationen noch aus der Verteilung über die Gewässertiefe auf Gütedefizite zu schließen.

Gesamtphosphor war während der Untersuchungstermine in stark schwankenden, zumeist geringen Konzentrationen im Seewasser vorhanden. Die für die Trophieeinstufung relevanten Messergebnisse im Epilimnion wiesen den See als mesotrophes Gewässer aus. Über Grund kam es zeitweise zu einer Erhöhung der Werte, die aber nicht ein erhebliches Rücklösungspotential für Phosphor anzeigte. Der direkt pflanzenverfügbare ortho-Phosphat-Phosphor war zumeist aufgezehrt. Während Ammonium und Nitrit nur in geringen bis mäßigen Konzentrationen gemessen wurde, erreichten die Nitratgehalte entsprechend der Beschaffenheit des zuströmenden Grundwassers hohe Konzentrationen. Allerdings war eine deutliche Absenkung des Belastungsniveaus im Vergleich zu den Vorjahren und insbesondere unter Bezug auf die sehr hohen Werte in den 1990er Jahren festzustellen.

Die Gehalte des gesamten organischen Kohlenstoffs (TOC) wie auch des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC) waren gering, so dass von einer Belastung des Sauerstoffhaushaltes durch die Mineralisierung organischer Wasserinhaltsstoffe im Untersuchungsgewässer nicht auszugehen ist. Die Algenentwicklung war nur schwach ausgeprägt und die Chlorophyll-a Werte lagen stets im Bereich eines mesotrophen Status. Die Sichttiefenwerte blieben aufgrund der betriebsbedingten mineralischen Trübung gering. Der See besitzt infolge der geogenen Gegebenheiten im Einzugsgebiet ein hohes Pufferungsvermögen gegenüber Phosphoreinträgen.

Schadstoffuntersuchungen auf das Pestizid Terbutryn und eine Auswahl von PFC`s am 22.8.2019 ergaben keine PFT- oder Terbutryn-Belastungen.

Die Nährstoffgehalte im Sediment erreichten eine geringe bis mäßige Ausprägung und entsprachen dem Entwicklungsstadium eines gering belasteten, noch in Auskiesung befindlichen Gewässers mit erst beginnendem Seebodenbildungsprozess.

Bei einer Beprobung des Makrozoobenthos im August 2018 wurden an 2 Probestellen 27 Arten nachgewiesen. Dominierende Taxa waren Wassermilben (*Hydrachnidia*), die Zwergruderwanze (*Micronecta scholtzi*), die Neuseeländische Zwergdeckelschnecke (*Potamopyrgus antipodarum*). Rund 26% der nachgewiesenen Taxa waren Neozoen, in den Roten Listen der gefährdeten Tierarten Deutschlands (RL BRD) und Baden-Württembergs (RL BA-Wü) gelistete Arten traten nicht auf.

Die Untersuchung des Phytoplanktons am 19.10.18 und 22.08.19 ergab eine geringe bis mäßige Algenentwicklung. Allerdings erreichte 2018 die potenziell toxinbildende Cyanobakterie *Planktothrix rubescens* einen hohen Biomasseanteil. Belastungen oder Einschränkungen ergaben sich hierdurch jedoch nicht, selbst der UBA Schwellenwert für die Warnstufe 1 (1 mg/l potentiell toxinbildende Cyanobakterien) wurde mit 0,68 mg/l deutlich unterschritten.

Wie die in der Tabelle 4.1 dargestellte zusammenfassende Bewertung ausweist, sind derzeit keine Belastungen oder Negativentwicklungen im Untersuchungsgewässer festzustellen. Allerdings begünstigt die Auskiesungstätigkeit das Zirkulationsverhalten und trägt somit zum positiven Gewässerzustand bei. Dies wirkt sich auch auf das Phytoplankton und insbesondere auf die Einschränkung von Algenmassenentwicklungen aus.

***Tabelle 4.1: Zusammenfassende Bewertung des Gewässerzustandes***

| Parameter | Indikatorbedeutung | Bewertung | Orientierungswert | Einstufung |
|---|---|---|---|---|
| Temperatur & Gewässerschichtung | Bei eingeschränktem Zirkulationsverhalten (Meromixis) entwickeln sich Sauerstoffdefizite. | See zirkuliert, das Zirkulationsverhalten wird auch durch die Auskiesungstätigkeit gefördert. | / | Positiv |

| Parameter | Indikatorbedeutung | Bewertung | Orientierungswert | Einstufung |
|---|---|---|---|---|
| Sauerstoffhaushalt | Sauerstoffdefizite weisen auf ein Überangebot an Nährstoffen und hohe Zehrungsintensität der Sedimente hin. | Keine Sauerstoffdefizite im Tiefenwasserkörper. Auskiesungstätigkeit verbessert die Sauerstoffsituation. | Höchstens 30% der Wassersäule über Grund $O_2$-Gehalt < 2mg/l | Positiv, deutlich besser als Leitbildwert. |
| Leitfähigkeit | Ionenanreicherungen in der Tiefe weisen auf hohe Trophie hin. | Die Leitfähigkeitswerte nehmen im Sommer mit der Seetiefe kaum zu. Die Auskiesung fördert die Durchmischung. | / | Positiv, keine Belastung erkennbar. |
| Phosphorgehalte | Erhöhte Phosphorkonzentrationen begünstigen Algenwachstum und indirekt Sauerstoffdefizite. | Geringe Phosphorgehalte im Wasserkörper. Keine Rücklösung in der Tiefe. | 0,007 bis 0,036 mg/l | Positiv, Messwerte liegen im Bereich des Orientierungswertes oder unterschreiten diesen teils deutlich. |
| Chlorophyll-a Gehalte | Hohe Chlorophyll-a Gehalte indizieren starkes Algen- und Cyanobakterienwachstum. | Niedrige Chlorophyll-a Gehalte im Wasserkörper infolge geringer Phosphorkonzentrationen und intensiver Wasserumwälzung durch Auskiesungstätigkeit. | 4-12 $\mu$g/l | Positiv, Messwerte liegen meist im Bereich des Orientierungswertes oder unterschreiten diesen. Vereinzelt treten höhere Werte auf. Der Mittelwert ist aber deutlich leitbildkonform. |
| Sichttiefe | Geringe Sichttiefenwerte sind ein Indikator für Algen- und Cyanobakterienmassenentwicklungen, sofern nicht durch mineralische Trübe bedingt. | Sichttiefenwerte wegen intensiver Auskiesungstätigkeit (mineralische Trübe) reduziert. | 4,4 – 2 m | Wegen mineralischer Trübe nicht als Trophieindikator verwertbar. |
| Algen- und Cyanobakterienentwicklung | Hohe Algendichten weisen auf ein Überangebot an Nährstoffen hin. Zudem begünstigt die Klimaerwärmung die Phytoplanktonentwicklung. | Geringe bis mäßige Nährstoffgehalte, die Auskiesungstätigkeit und die hohe Seetiefe schränken die Phytoplanktonentwicklung ein. | Cyanobakterienbiomasse < 3 $mm^3$/L | Geringes Entwicklungspotential aufgrund des günstigen Nährstoffhaushaltes. |

Insgesamt weist das Untersuchungsgewässer einen guten, leitbildkonformen oder sogar besseren Gewässerzustand auf, so dass sich im gegenwärtigen Zustand keine Belastungssituation ergibt.

# 5 Vorbelastung des Sees durch bestehende externe Nährstoffeinträge

Die Wasserqualität eines Stillgewässers wird wesentlich von externen Belastungen geprägt, die auf unterschiedliche Art und Weise in den See gelangen.

Inwieweit derartige Einträge das Gütebild eines Stillgewässers negativ beeinflussen, resultiert neben den absoluten Belastungsgrößen auch aus der Fähigkeit des Seemetabolismus zur Abpufferung der Belastungen, die wesentlich durch morphologische (z.B. Fläche, Tiefe, Uferform), hydraulische (z.B. Wasserhaushalt, Wasserverweilzeit) oder auch biotische (z.B. Lebensgemeinschaften, Nahrungsnetz) Faktoren geprägt ist. Die Folgen externer Belastungen für die Wasserqualität fallen je nach Gewässertyp sehr unterschiedlich aus. Daher kann von einem externen Belastungsmuster nicht unmittelbar auf die damit verbundenen Auswirkungen für den Gütezustand des Sees geschlossen werden.

Zur Ermittlung der externen Belastung des Sees mit dem Grundwasserzustrom wurden zwei unterschiedliche Belastungsvarianten untersucht, die sich durch die Auswahl der Grundwassermessstellen zur Erfassung der relevanten Belastungskennwerte unterscheiden. Die Belastungsvariante 1 weist insbesondere eine höhere Nitratbelastung, aber auch höhere Sulfatwerte auf.

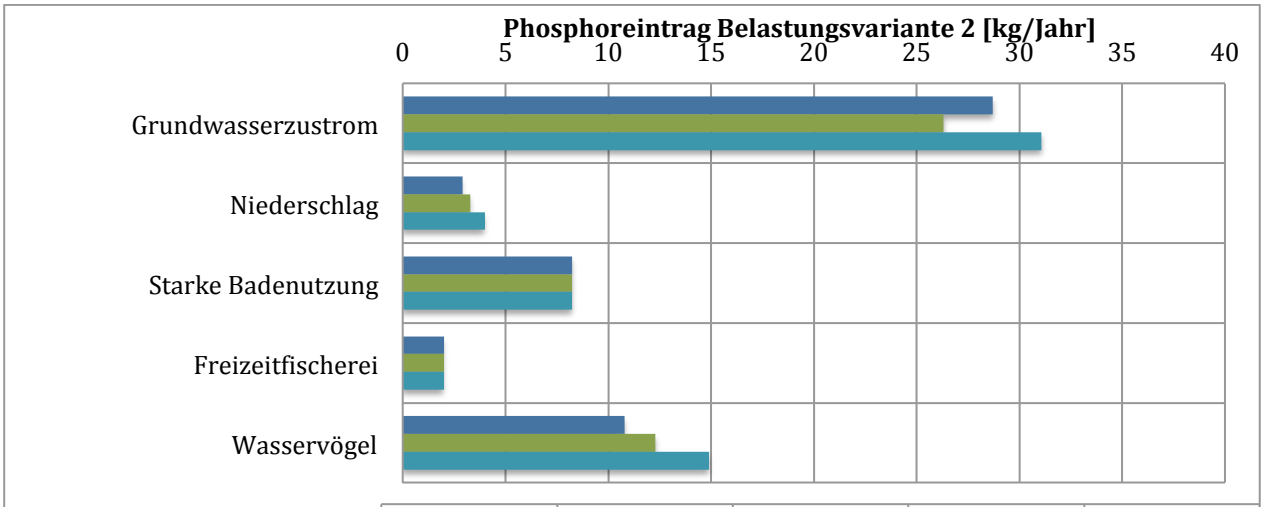
Eine Plausibilitätsprüfung mit Hilfe von Modellsimulationen zur Nitratbelastung des Seewassers für den Zeitraum 1997 bis 2019 und einem Vergleich mit zeitgleich erhobenen Messwerten ergab eine deutliche Präferenz für die Belastungsvariante 2 mit etwas geringeren, aber immer noch hohen Nitrateinträgen in den See. Im Rahmen der folgenden Ausführungen wurde nur diese Variante zu Grunde gelegt.

Bezüglich der Herleitung aller Belastungskomponenten sei auf Boos (2020) verwiesen. Hier soll nur die Gesamtbilanz aller Belastungsgrößen für die Belastungsvariante 2 dargestellt werden.

## 5.1 Phosphoreinträge

Die Bilanzierung aller Phosphoreinträge in den See zeigt, dass das Grundwasser für alle untersuchten Zustände (Istzustand, Genehmigungszustand und Planvarianten) die mit Abstand wichtigste Eintragsquelle für Phosphor darstellt (vgl. Abbildung 5.1).

Allerdings gewinnt wegen des absolut gesehen vergleichsweise niedrigen Belastungspotentials des Grundwassers auch der Eintrag durch Wasservögel eine nicht unerhebliche Bedeutung. Insgesamt führt die beabsichtigte Erweiterung des Sees nur zu einer geringfügigen Vermehrung des Phosphoreintrages.

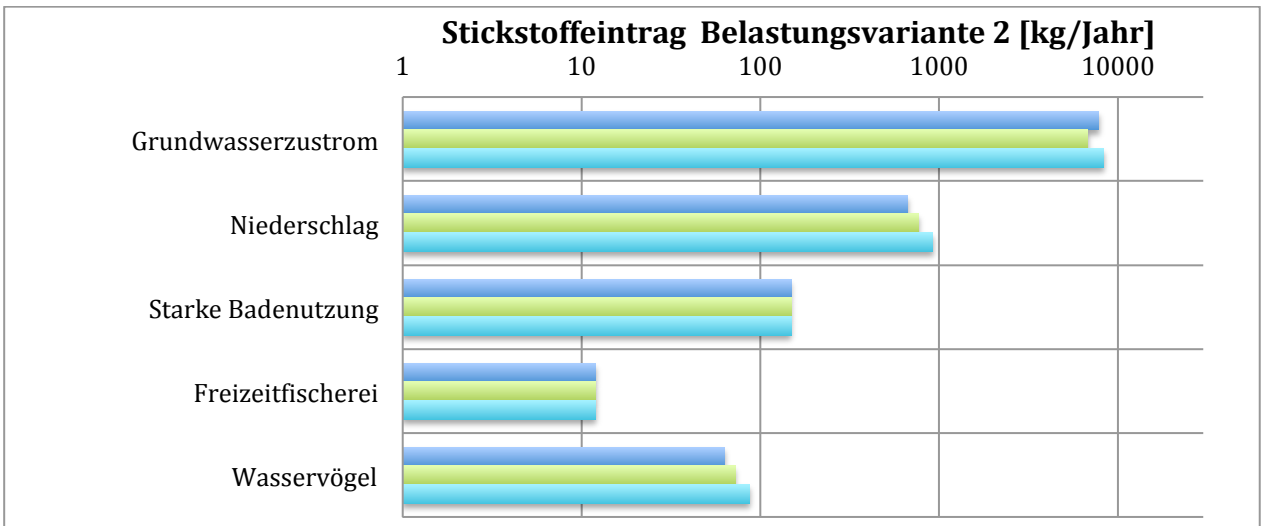



| | Wasservögel | Freizeitfischerei | Starke Badenutzung | Niederschlag | Grundwasserzu strom |
|---|---|---|---|---|---|
| Istzustand Bel.Var. 2 | 10,8 | 2,0 | 8,3 | 2,9 | 28,7 |
| Genehmigungszustand Bel.Var. 2 | 12,3 | 2,0 | 8,3 | 3,3 | 26,3 |
| Planzustand Bel.Var. 2 | 14,9 | 2,0 | 8,3 | 4,0 | 31,1 |

***Abbildung 5.1: Modellbilanz der externen Phosphoreinträge in den See (Grundwasser- Belastungsvariante 2)***

## 5.2 Stickstoffeinträge

Für die Stickstoffeinträge bildet der Grundwasserzufluss die dominante Belastungskomponente aus. Der Niederschlag macht als zweitgrößte Eintragskomponente lediglich 10% der Gesamtbelastung aus (vgl. Abbildung 5.2).




| | Wasservögel | Freizeitfischerei | Starke Badenutzung | Niederschlag | Grundwasserzu strom |
|---|---|---|---|---|---|
| Istzustand Bel.Var. 2 | 63 | 12 | 149 | 667 | 7.796 |
| Genehmigungszustand Bel.Var. 2 | 72 | 12 | 149 | 765 | 6.764 |
| Planzustand Bel.Var. 2 | 87 | 12 | 149 | 921 | 8.311 |

***Abbildung 5.2: Modellbilanz der externen Stickstoffeinträge in den See (Grundwasser- Belastungsvariante 2)***

# 6 Voraussetzungen und Vorgehensweise

## 6.1 Definition möglicher Einflussfaktoren

### 6.1.1 Primäre Einflussfaktoren (primäre meteorologische Wirkgrößen)

Das Zirkulationsverhalten und der Lichthaushalt eines Sees wird neben der Seemorphologie und der hydraulischen Anbindung an Grund- und Oberflächenwasserkörper von den folgenden Faktoren (Tabelle 6.1) beeinflusst, die durch die Aufstellung von PV-Modulen eine Veränderung erfahren können.

*Tabelle 6.1: Vorhabensbedingte Beeinflussung meteorologische Wirkgrößen*

| Nr. | Meteorologischen Wirkgrößen | Effekt durch PV-Module | Auswirkungen auf | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Wassertemperatur | Zirkulationsverhalten |
| 1. | Globalstrahlung [W/m²] | Verringerung | Verringerung | Verstärkung |
| 2. | Langwellige Rückstrahlung [W/m²] | Verringerung | Erhöhung | Verringerung |
| 3. | Windgeschwindigkeit [m/s] | Verringerung | Erhöhung | Verringerung |
| 4. | Lufttemperatur [°C] | kein bzw. gering | / | / |
| 5. | Dampfdruck [hPa] | geringe Erhöhung | sehr geringe Erhöhung | sehr geringe Verringerung |
| 6. | Niederschlagshöhe in mm | kein | / | / |

### 6.1.2 Sekundäre Einflussfaktoren

Neben dem Zirkulations- und Einschichtungsverhalten ergeben sich Veränderungen der Seewasserbeschaffenheit für Parameter, die in direktem oder indirektem Zusammenhang mit Veränderungen der meteorologischen Wirkgrößen stehen. Im Einzelnen sind dies:

- Temperaturhaushalt infolge veränderter Wasserzirkulation.
- Sauerstoffhaushalt durch veränderte physikalische und biogene Belüftung.
- Ab- und Umbauvorgänge im Wasserkörper (Gewässergüte) u.a. als Folge des veränderten Temperatur- und Sauerstoffhaushaltes.
- Das Besiedlungsbild insbesondere von Makrophyten und Phytoplankton durch veränderte Nährstoffbedingungen und ein anderes Einschichtungsverhalten.

## 6.2 Ermittlung der Vorhabensauswirkungen in drei Arbeitsschritten

Derzeit existieren nur wenige Baggerseen, an denen die Wirkung von PV-Anlagen untersucht werden kann. Meist weisen diese Baggerseen eine vergleichsweise geringe Anlagengröße mit entsprechend niedriger Flächenüberdeckung (<< 10%) auf und befinden sich zudem noch in der Auskiesung. Daher eignen sich diese Seen nur begingt als Referenzgewässer, da mögliche Veränderungen des Gewässerzustandes durch Einwirkungen der PV-Anlagen im Vergleich zu den Effekten, die von der Baggertätigkeit ausgehen, nur ein geringes Ausmaß annehmen können und nicht verlässlich darstellbar sind.

Zur Ermittlung der Vorhabensauswirkungen werden daher im Folgenden Literaturrecherchen, empirische Datenerhebungen und eine Modellsimulation in drei aufeinander aufbauenden Bearbeitungsschritten kombiniert:

1. Ermittlung und Quantifizierung maßnahmenverursachter Effekte im Rahmen einer Literaturauswertung.
2. Darstellung der Effekte an einem Referenzgewässer, das über vergleichbare Verschattungseffekte verfügt, wie sie infolge des Aufbaus der PV-Anlage im Untersuchungsgewässer entstehen, so dass die im Referenzgewässer gewonnenen Ergebnisse auf das Vorhabensgewässer übertragen und zur Kalibrierung des hydrodynamischen Modells (siehe Punkt 3) genutzt werden können.
3. Berechnung der Vorhabensauswirkungen in Bezug auf die relevanten Güteparameter für das Vorhabensgewässer (Philippsee) mittels eines hydrodynamischen Modells.

Zur Prognose der Vorhabensauswirkungen von Temperaturhaushalt und Zirkulationsverhaltens kam das 1-D hydrodynamische Modell DYRESM (Dynamic Reservoir Simulation Model) zur Anwendung.

Dieses wird für die Prognose der Wasserqualität mit dem Programm CAEDYM gekoppelt wird. DYRESM wird seit 1978 unter stetiger Weiterentwicklung an einer Vielzahl von Seen eingesetzt und entspricht dem Stand der Technik. Das Modell stellt die Turbulenzverhältnisse durch Berücksichtigung der turbulenten kinetischen Energie (TKE) dar, so dass konvektive und advektive sowie durch Reibung an Grenzschichten verursachte Vermischungsvorgänge in die Berechnung einbezogen werden.

Seemodellierungen mittels DYRESM erfordern einen umfangreichen Dateninput, u.a. von Kenngrößen der Seemorphologie, meteorologischen Tages- oder Stundenwerten, Wasserzu- und Wasserabflussmengen sowie betriebsbedingten Kenngrößen, die sich auf die Entwicklung der Wassertemperaturen auswirken. Zusätzlich kommt das Programmpaket CAEDYM in der Version 2.3 zur Anwendung, das aufbauend auf dem hydrodynamischen Modell DYRESM und den damit simulierten Einschichtungs- und Durchflussverhältnissen die Simulation der Stoffflüsse durch die einzelnen Kompartimente eines aquatischen Ökosystems ermöglicht. Dabei werden alle wesentlichen Produktions- und Abbauprozesse in Wasserkörper und Sediment einschließlich der Wechselwirkungen mit den Gewässerorganismen abgebildet sowie in Tagesschritten berechnet.

Da bei der Bewertung des Untersuchungsgewässers einschließlich seiner unterschiedlichen Entwicklungsphasen dem Sauerstoffhaushalt eine zentrale Rolle zukommt, soll hier das diesbezügliche Vorgehen bei der Prognosestellung erläutert werden. Das Sauerstoffmodul berücksichtigt alle Einzelkompartimente einschließlich der Sauerstoffeinträge durch die Photosyntheseaktivität von Algen oder Makrophyten und des Sauerstoffverbrauchs durch biogene Ab- und Umbauvorgänge sowie die Zehrung des Sediments (vgl. Abbildung 6.1).

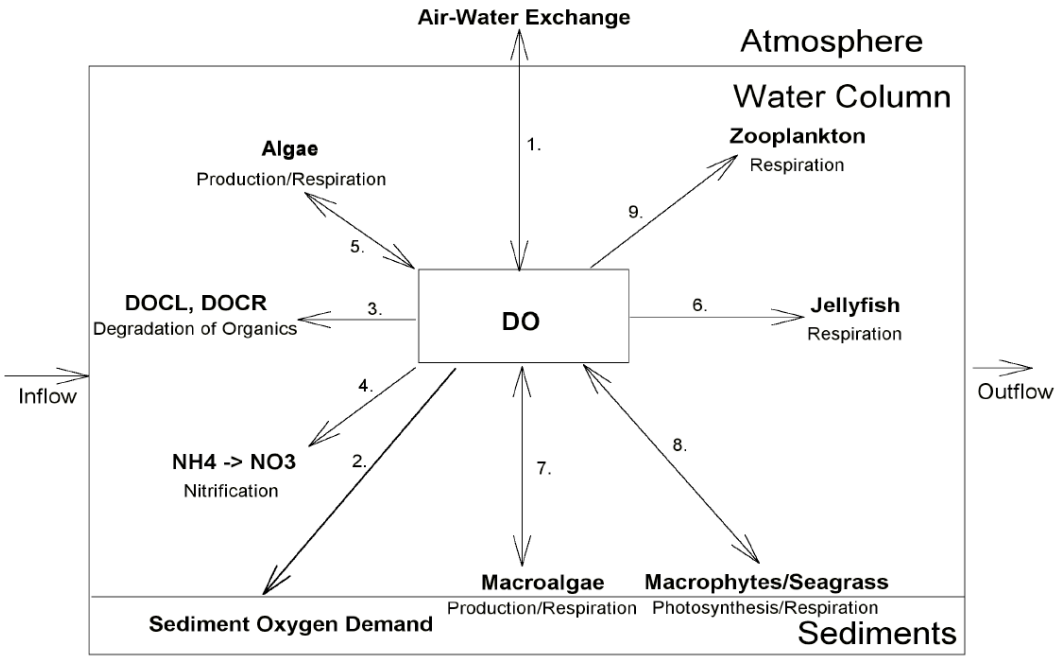



*Abbildung 6.1: Abhängigkeit des Sauerstoffhaushaltes von den Einzelkompartimenten (Abb. aus HIPSEYet. al. 2006)*

Für die Entwicklung der Wasserqualität ist das Zirkulationsverhalten des Sees, aber auch die Sauerstoffzehrungsrate des Sediments insbesondere in der Langfristperspektive von sehr erheblicher Bedeutung, da sie zumeist entscheidend auf den Zustand des Sauerstoffhaushaltes einwirkt, der seinerseits wesentliche Gütekennwerte bestimmt. Für die Modelleinstellungen wurde auf die folgenden Parameter von ÖZKUNDAKCI et al. (2011), die für einen ähnlich großen See (32 ha) wie dem Untersuchungsgewässer ermittelten wurden, zurückgegriffen (vgl. Tabelle 6.2). Ähnliche Werte wurden auch von CUI et al. (20) publiziert, wobei sich aufgrund einer anderen Morphologie des Referenzgewässers Unterschiede hinsichtlich Windeinwirkung und Sauerstoffzehrungsrate des Sediments ergeben.

*Tabelle 6.2: Modellkonstanten*

| Bezeichnung | Einheit | ÖZKUNDAKCI et al. (2011) |
|---|---|---|
| **Physical parameters** | | |
| Effective surface area coefficient | $m^2$ | $1{,}45*10^{-6}$ |
| Critical wind speed | m/s | 3 |
| shear production efficiency (eta_K) | | 0.21 |
| potential energy mixing efficiency (eta_P) | | 0,2 |
| wind stirring efficiency (eta_S) | | 0,2 |
| Benthic boundary layer dissipation coefficient | $m^2/s$ | $7{,}5*10^{-6}$ |
| vertical mixing coeff. | / | 600 |
| Tageszeitpunkt (sec) der Modellierung 36.000 sec oder 10h Sonnenzeit | sec | 36.000 |
| **Sediment Parameters** | | |
| Sediment DO demand | $g/m^2/day$ | 2 |
| Half-saturation coefficient for sediment oxygen demand | mg/l | 0,25 |
| Maximum potential $PO_4$ $g/m^2/day$ | $g/m^2/day$ | 0,0 |
| Oxygen and nitrate half-saturation for release of phosphate from bottom sediments | mg/l | 1,5 |
| Maximum potential $NH_4$ release rate | $g/m^2/day$ | 0,1 |
| Oxygen half-saturation constant for release of ammonium from bottom sediments | mg/l | 5 |
| Temperature multiplier for nutrient release | | 1,05 |
| **Nutrient parameters** | | |
| Decomposition rate of POPL to DOPL | $d^{-1}$ | 0,0035 |
| Mineralisation rate of DOPL to $PO_4$ | $d^{-1}$ | 0,025 |

| Bezeichnung | Einheit | OZKUNDAKCI et al. (2011) |
|---|---|---|
| Decomposition rate of PONL to DONL | $d^{-1}$ | 0,007 |
| Mineralisation rate of DONL to $NH_4$ | $d^{-1}$ | 0,01 |

Zur Verwendung des Modells und zur Auswahl der Modellparameter finden sich detaillierte Angaben im Bericht ***Limnologisches Begleitgutachten zur UVU Kiesgrubenerweiterung Philipp & Co. KG Bad Schönborn*** (Boos 2020).

# 7 Literaturauswertung

## 7.1 Auswahlkriterien zur Ermittlung geeigneter Literaturquellen

Bei der Auswahl der gesichteten Literatur wurden folgende Kriterien zu Grunde gelegt:

1. Ausreichende Berücksichtigung hydrodynamischer Prozesse bei der Bewertung der Einflussgrößen.
2. Darstellung maskierender Einflussgrößen, die ähnliche Auswirkungen auf die Gewässergüte verursachen wie die Solarnutzung, aber nicht von dieser selbst ausgehen (z.B. Intensivierung der Zirkulation durch Baggerbetrieb, Gewässertrübung durch Kieswaschwasser etc.).
3. Genaue Quantifizierung der meteorologischen Wirkgrößen.
4. Weitere Angaben zu sekundären Einflussgrößen

### 7.1.1 Berücksichtigung hydrodynamischer Prozesse

Mögliche Auswirkungen für die Seewasserbeschaffenheit durch die PV-Module, wie z.B. Veränderungen des Temperaturhaushaltes, werden infolge der hydrodynamischen Prozesse (Vermischung) im See sehr schnell ausgeglichen. Eine Verringerung der Wassertemperatur unter den Modulen wird also durch die Transportprozesse im See nivelliert und ist durch Differenzmessungen kaum noch zu erfassen. Gleichwohl ergeben sich maßnahmenbedingte Auswirkungen, die allerdings den gesamten Seebereich betreffen, wie sie z.B. durch Trübungsprozesse infolge der punktuellen Einleitung von Kieswaschwasser enststehen (vgl. Abbildung 7.1).

*Abbildung 7.1: Trübungsausbreitung in einem Baggersee der Oberrheinebene (Foto Boos)*

Differenzmessungen, wie sie bei der Untersuchung der Vorhabensauswirkungen am Bomhofsplas See in Zwolle durchgeführt wurden (De Lima et al. 2021), sind folglich zur Feststellung der Vorhabensauswirkungen nur bedingt geeignet.

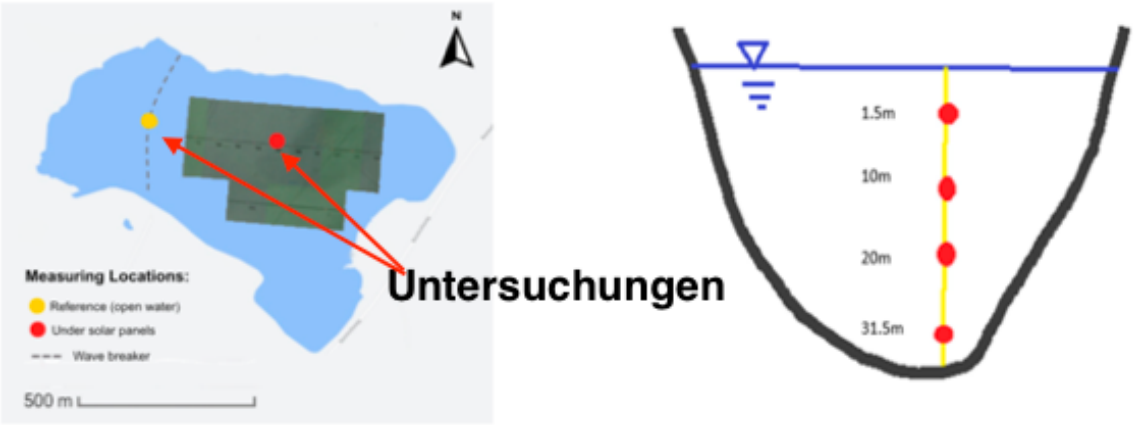



*Abbildung 7.2: Untersuchung der Vorhabenauswirkungen am Bomhofsplas See in Zwolle (de Lima et al. 2021).*

Wie stark die hydrodynamischen Vorgänge in einem See zur horizontalen Angleichung von lokalen Belastungsgradienten führen, ist aus der Verteilung der Parameter Temperatur, Sauerstoff und elektrische Leitfähigkeit in dem teilweise von Teichlinsen überdeckten Kölner Altrheinarm Untere Groov (vgl. Abbildung 7.3) zu ersehen.

*Abbildung 7.3: Teichlinsenüberdeckungen an der Unteren Groov (Bild Google)*

Die hier mit einer CTD Sonde am 16.8.2021 an 6010 Messpunkten erfassten Werte (vgl. Tabelle 7.1) zeigen, dass im Bereich der Teichlinsenbedeckung und im unbedeckten Wasser nur geringe Unterschiede auftreten, da es infolge der Horizontalströmungen zu einer raschen Angleichung kommt. Die insgesamt geringen Sauerstoffwerte und die für ein Flachgewässer im Sommer vergleichsweise niedrige Wassertemperatur zeigen aber, dass die Teichlinsenüberdeckung deutliche Auswirkungen für das gesamte Gewässer hat.

*Tabelle 7.1: Veränderung von Beschaffenheitskennwerten bei teilweiser Überdeckung mit Teichlinsen*

| | Temperatur [°C] | Sauerstoffgehalt [mg/L] | Sauerstoffsättigung [%] | el. Leitf.$_{25}$ [µS/cm] |
|---|---|---|---|---|
| Teichlinsenbedeckung 100 % | 21,64 | 4,78 | 54,48 | 403,05 |
| Teichlinsenbedeckung < 1% | 21,28 | 4,83 | 54,63 | 404,86 |

Folglich ist anzunehmen, dass auch die Überdeckung mit Solarmodulen zwar Effekte auf die Seewasserbeschaffenheit, z.B. in Form eines Rückgangs der Sauerstoffgehalte, ausüben, diese aber aufgrund der Austausch- und Vermischungsvorgänge innerhalb des gesamten Seevolumens nicht zu lokal begrenzten Veränderungen der Wasserbeschaffenheit führen. Daher können diese Auswirkungen nicht durch Differenzmessungen erfasst werden.

### 7.1.2 Erfassung maskierender Einflussgrößen

Seen, in denen schwimmende PV-Anlagen installiert wurden bzw. in naher Zukunft betrieben werden sollen, sind in der Regel künstliche Gewässer und darüber hinaus anthropogen stark überformt und weisen Mehrfachnutzungen auf. Hieraus können sich Beeinflussungen ergeben, die ähnliche Wirkungen entfalten wie installierte Solarmodule und somit die Herausarbeitung der davon ausgehenden Effekte erschweren, da sie diese quasi maskieren. In diesem Zusammenhang ist primär die Kiesgewinnung zu nennen, die zu erheblichen Veränderung des Einschichtungs- und Durchmischungsverhaltens sowie der Gewässertrübung in Baggerseen führt. Als Haupteinflussfaktoren fungieren dabei:

- Die Abbaggerung mittels Schaufelbagger
- Wasserentnahme und Rückleitung durch Saugbagger
- Kieswäsche und Rückleitung von Kieswaschwasser

Durch die Kiesentnahme mit einem Bagger ergibt sich ein direkter Auswirkungsbereich mit einem Durchmesser, der etwa dem 10-fachen der Wassertiefe unter dem Bagger entspricht (vgl. Abbildung 7.4).

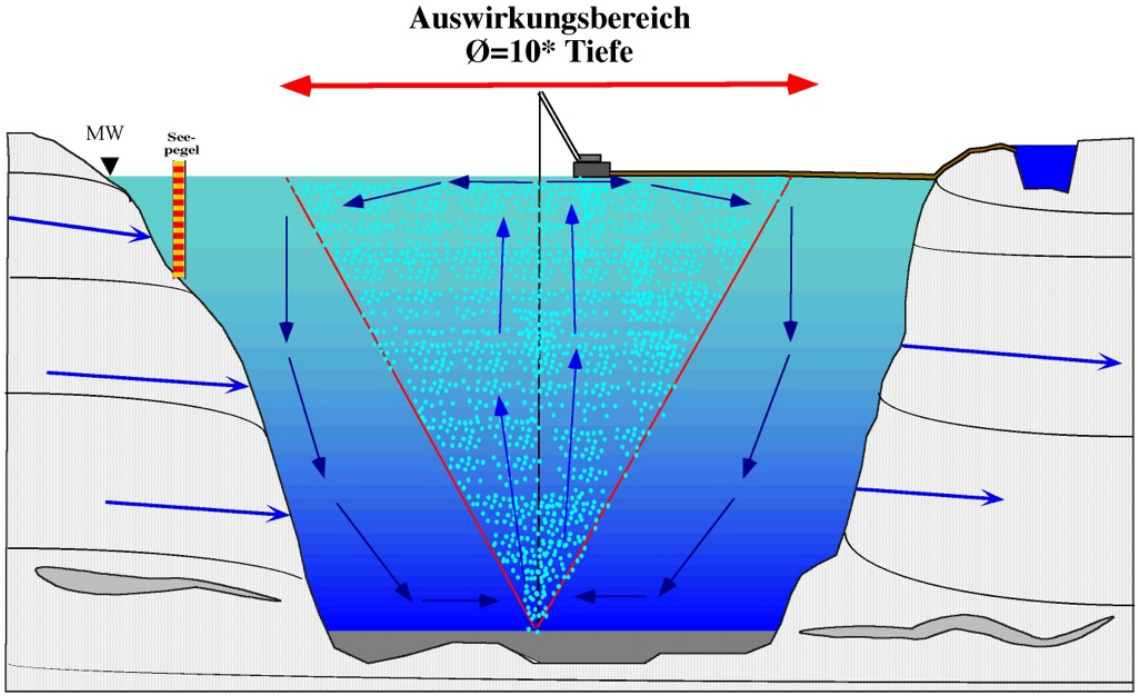



*Abbildung 7.4: Direkter Auswirkungsbereich der Baggertätigkeit in einem Baggersee*

Allerdings kommt es durch Ausgleichsströmungen zu einer vollständigen Beeinflussung des gesamten Wasserkörpers über wenige Tage (vgl. Abbildung 7.5). Dabei ergeben sich erhebliche Auswirkungen auf den Gewässerzustand, die Baggerseen in Auskiesung bei ansonsten identischen Kennwerten (Morphologie, Hydrologie etc.) deutlich von Seen ohne Baggerbetrieb unterscheiden. Dies gilt vor allem im Hinblick auf:

- Höhere Temperaturen im Hypolimnion
- Geringere Temperaturdifferenzen zwischen epilimnischem und hypolimnischem Wasserkörper
- Abgeschwächte Algenentwicklung im Epilimnion aufgrund erhöhter mineralischer Trübung, geringerer Sichttiefe und verstärkter Turbulenzen (Vertikalvermischung)
- Eine verbesserte Sauerstoffversorgung im Hypolimnion
- Einen ausgeglichenen Sauerstoffhaushalt im Epilimnion nahe des Sättigungsbereiches

*Abbildung 7.5: Verteilung mineralischer Trübung im Petersee bei Achern durch Ausgleichströmungen über den unmittelbaren Einwirkungsbereich hinaus (Luftbild Boos 2006)*

### 7.1.3 Quantifizierung der vorhabensbedingten Beeinflussungen meteorologischer Wirkgrößen

Die in Kapitel 6.1.1 beschriebenen meteorologischen Wirkgrößen werden durch die Exposition von schwimmenden Solarmodulen beeinflusst. Die genaue Kenntnis der maßnahmenbedingten Veränderungen dieser Einflussgrößen erlaubt die Quantifizierung der Vorhabenseffekte und die Berechnung der Vorhabensauswirkungen auf die Gewässergüteparameter mit numerischen Modellen. In der Tabelle 7.2 werden die Voraussetzungen für eine qualitative Beurteilung definiert.

***Tabelle 7.2: Informationstiefe zur Beurteilung vorhabensbedingter Beeinflussung meteorologischer Wirkgrößen***

| Wirkgrößen | Effekt durch PV-Module | Keine Einstufung | Qualitative Einstufung | Quantitative Einstufung |
|---|---|---|---|---|
| Globalstrahlung [W/m²] | Verringerung durch Abschattung | Es werden keine Angaben zur vorhabensbedingten Beeinflussung meteorologischer Wirkgrößen (z.B. Strahlungs- und Windreduktion) gemacht. | Allgemeine Angaben zur Beeinflussung der meteorologischen Wirkgrößen. | Quantitative Angaben zur Beeinflussung zumindest der Wirkgrößen Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit |
| Langwellige Rückstrahlung [W/m²] | Verringerung durch Abschattung | | | |
| Windgeschwindigkeit [m/s] | Verringerung durch verminderten Windangriff | | | |
| Dampfdruck [hPa] | geringe Erhöhung | | | |

Die Veränderung der meteorologischen Wirkgrößen führt zu einer Beeinflussung der physikalischen, chemischen und biochemischen Beschaffenheit eines Gewässers sowie des Besiedlungsbildes. Der Informationsgehalt einer Literaturquelle ist demnach umso höher, je genauer die Folgewirkungen der Installation einer PV-Anlage auf die relevanten Parameter dargestellt sind.

### 7.1.4 Allgemeine Nutzbarkeit einer Literaturquelle für die Aufgabenstellung

Im Idealfall sollten Literaturquellen, die Auswirkungen von PV-Modulen auf die Wasserqualität einzelner Seen darstellen, zu allen oben aufgeführten Punkten Informationen liefern. Das Ausmaß der dabei erreichten Informationstiefe bestimmt den Nutzen der jeweiligen Quelle für die Aufgabenstellung dieser Studie. Unter diesem Aspekt wird die gesichtete Literatur, wie am folgenden Beispiel (siehe Tabelle 7.3) dargestellt, ausgewertet.

***Tabelle 7.3: Auswertung einer Literaturquelle (Beispiel)***

| | | |
|---|---|---|
| 1 | De Lima, R.L.P.; Paxinou, K.; C. Boogaard, F.; Akkerman, O.; Lin, F.-Y. In-Situ Water Quality Observations under a Large-Scale Floating Solar Farm Using Sensors and Underwater Drones. Sustainability 2021, 13, 6421. https://doi.org/10.3390/su13116421 | |
| 2 | Seetyp, Gewässernutzung und Untersuchungsschwerpunkt | In Auskiesung befindlicher Baggersee (Bomhofsplas See bei Zwolle. Fläche 63 ha, Tmax= 35m, Überdeckung durch PV-Module 18,25 ha, Überdeckungsgrad 29%). Untersucht wird im Rahmen einer **empirischen Studie** der Effekt, den Solarmodule auf einen noch in Auskiesung befindlichen Baggersee ausüben. |
| 3a | Berücksichtigung hydrodynamischer Prozesse bei der Bewertung der Einflussgrößen | Untersucht wurden Temperatur, $O_2$-Gehalt sowie Leitfähigkeit im Freiwasserkörper und unter den Solarmodulen. Auf die Auswirkungen hydrodynamischer Effekte, die zum Ausgleich der Wertedifferenzen unter den Solarmodule und im Freiwasserkörper führen, wurde nicht eingegangen. |
| 3b | Erfassung maskierender Einflussgrößen | Auf Einflussgrößen der Kiesgewinnung, welche die vorhabensbedingten Effekte maskieren können, wurde nicht eingegangen |

| | | |
|---|---|---|
| 3c | Quantifizierung der primären met. Wirkgrößen | Es werden keine Angaben zur Beeinflussung meteorologischer Wirkgrößen gemacht. |
| 4a | Temperaturhaushalt, Zirkulations- und Schichtungsverhalten | Die Änderungen zwischen Referenzpunkt im Freiwasserköper und Messstelle unterhalb der PV Anlage sind bei den Temperatur- und Leitfähigkeitswerten sehr gering. Temperaturhaushalt, Leitfähigkeit und Einschichtungsverhalten sind folglich von der Maßnahme nur in geringem Umfang betroffen. |
| 4b | Sauerstoffhaushalt (Auswirkungen durch veränderte physikalische und biogene Belüftung) | Die Standortunterschiede der Sauerstoffwerte legen nahe, dass durch die Anlage eine Minderung der Sauerstoffwerte infolge geringerer physikalischer Belüftung und geringerem biogenem Sauerstoffeintrag verursacht wird. Die insgesamt aber immer noch hohen Sauerstoffwerte im See lassen nicht auf eine starke Überformung des noch in Auskiesung befindlichen Baggersees schließen. |
| 4c | Ab- und Umbauvorgänge im Wasserkörper (Gewässergüte | Nicht untersucht |
| 4d | Entwicklung des Besiedlungsbildes insbesondere von Makrophyten und Phytoplankton | Nicht untersucht |
| 4e | Entwicklung von Cyanobakterien | Nicht untersucht |
| 4f | Freisetzung von Mikroverunreinigungen | Nicht untersucht |
| 5 | Informationsgehalt und Nutzbarkeit für die Aufgabenstellung | Die Studie stellt eine umfangreiche Erhebung physikalischer Kennwerte an einem bestehenden See mit intensiver Nutzung durch SPV Anlagen dar, die den direkten Einwirkungsbereich der SPV Anlage erfasst. Nicht untersucht wurde der Nährstoffhaushalt mit den Trophiemerkmalen (C-N-P) oder biotischen Parametern wie Algen- und Wasserpflanzenentwicklung. Eine Bewertung der Vorhabensauswirkungen ist nur eingeschränkt möglich, da sich die Untersuchung auf Standortunterschiede an nur einem Gewässer beschränkt und die zwischen den Standorten stattfindenden Austauschprozesse keine Berücksichtigung finden. |

Die entsprechenden Auswertungstabellen für die einzelnen Literaturquellen sind im Anhang enthalten.

## 7.2 Umweltrelevanz schwimmender Photovoltaik (SPV) Anlagen dargestellt auf der Grundlage einer Literaturauswertung

Die Literatur zur Bewertung der Umweltrelevanz von schwimmenden Photovoltaik (SPV) Anlagen kann in drei Kategorien gefasst werden:

1. Empirische Studien an bestehenden Gewässern durch Messung der von SPV-Anlagen ausgehenden Effekte.
2. Modellstudien auf der Grundlage mathematischer Verfahren zu den Auswirkungen von SPV-Anlagen auf die Seewasserbeschaffenheit.
3. Eine Kombination von empirischen Erhebungen mit Modellberechnungen (im Folgenden: Kombinationsstudien), die eine Modell-Kalibrierung ermöglichen, um mittels des validierten Modells übertragbare Aussagen für unterschiedliche Seen mit verschiedenen Nutzungsintensitäten (Ausbaustufen) machen zu können.

### 7.2.1 Empirische Studien

#### 1. DeLima et al (2021)

DeLima et al. (2021) haben an einem noch betriebenen Baggersee in Holland (Bomhofsplas See bei Zwolle) mit einer Fläche von 63 ha, einer Maximaltiefe von 35m und einer Überdeckung durch PV-Module von 18,25 ha (Überdeckungsgrad 29%) vorhabensbedingte Effekte durch Differenzmessungen zwischen dem von der Anlage beanspruchten Seebereich und dem unbeeinflussten Freiwasserkörper untersucht. Quantitative Angaben zur anlagebedingten Veränderung der primären meteorologischen Wirkgrößen wurden nicht vorgenommen.

Bei dem Überdeckungsgrad von 29% ergaben sich bezüglich Temperaturhaushalt und Schichtungsverhalten kaum messbare Unterschiede zwischen Einwirkungsbereich (unterhalb der Schwimmflöße) und Freiwasserkörper.

Für den Sauerstoffhaushalt wurden deutlichere Unterschiede ermittelt. Da die Sauerstoffverhältnisse aber immer noch als gut anzusehen sind, lassen sich daraus keine erheblichen vorhabensbedingten Beeinträchtigungen ableiten. Aussagen zu anderen Qualitätskomponenten (Nährstoffe, Algenentwicklung etc.) wurden nicht gemacht.

Zu relativieren sind die Ergebnisse bezüglich der folgenden beiden Punkte:

- Zum einen verwischen die hydrodynamischen Ausbreitungsvorgänge (Stofftransport) die Standortunterschiede zwischen Freiwassermessstelle und Messpunkt unter dem Anagenkörper. Diese Wasserströmungen wurden im Rahmen der Studie nicht berücksichtigt.
- Zum anderen ergeben sich durch die noch bestehende Auskiesungstätigkeit maskierende Effekte, die das Vermischungsverhalten und den Sauerstoffhaushalt positiv beeinflussen, so dass das Ausmaß der anlagenverursachten Beeinflussungen nicht in vollem Umfang herausgearbeitet werden konnte.

Die Kernaussage der Studie lautet: Bezogen auf das Untersuchungsgewässer sind bei einem Überdeckungsgrad von 29% keine erheblichen Beeinträchtigungen des Zirkulationsverhalten und des Sauerstoffhaushaltes zu erwarten.

#### 2. Mathijssen et al. (2020)

Mathijssen et al. (2020) untersuchten das Wasserreservoir Kralingen mit einer Seefläche von 2,7 ha und einem Volumen von 72.000 $m^3$. Die Expositionsfläche der SPV-Anlage beträgt 8000 $m^2$ und erreicht damit einen Bedeckungsgrad von 30%. In dem zur Trinkwassergewinnung genutztem Gewässer wurden der Einfluss der Solarmodule auf die Trinkwasserbeschaffenheit untersucht und Aussagen zur Keimbelastung und zur Schadstofffreisetzung aus dem Material (Leaching) gemacht. Im Vordergrund standen Fragestellungen zu den Auswirkungen auf die Absterberaten der Dauerstadien von Cryptosporidien, Giardien und Campylobacter sowie zum Freisetzungspotential von Schwermetallen durch Leaching.

Bezogen auf den anlagenspezifischen Überdeckungsgrad von 30% wird der Effekt für die Eliminationsrate von Keimen als gering angesehen. Ein Leaching von Schwermetallen aus PE-Schwimmkörpern, PE-Bauteilen, Dichtmaterial und Solarmodule war feststellbar, aber sehr gering und immer weit unter den Grenzwerten, so dass sich hieraus ebenfalls keine Beeinträchtigungen ergaben. Organische Verbindungen wurden ebenfalls untersucht, es wurde diesbezüglich aber keine Bewertung zu möglichen Beeinträchtigungen durch die SPV-Anlage vorgenommen.

Durch den Versuchsaufbau war eine Berücksichtigung hydrodynamischer Effekte nicht notwendig, maskierende Effekte durch Nutzungen waren nicht zu erwarten. Quantitative Angaben zur anlagebedingten Veränderung der primären meteorologischen Wirkgrößen wurden nicht getroffen. Diese waren allerdings für die Studie auch nicht erforderlich.

Die Kernaussage der Studie lautet: Im Untersuchungsgewässer sind bei der vorhabensbedingten Überdeckung von 30% der Seefläche keine Beeinträchtigungen der Trinkwassernutzung zu erwarten.

### 7.2.2 Modellstudien

#### 3. Exley et al. (2021)

Exley et al. (2021) untersuchten mittels Modellberechnungen (MyLake) an einem Natursee in England, dem Süd-Becken des Windermere Sees, mögliche Auswirkungen der Installation und Nutzung einer SPV Anlage.

Mit einer Seefläche von 670 ha, einer maximalen Tiefe von 42 m und einer mittleren Tiefe von 16,8 m erreicht das Gewässer im Vergleich zu Baggerseen eine erhebliche Größe. Im Rahmen einer Modellstudie wurden Auswirkungen auf die Seewasserbeschaffenheit für Bedeckungsgrade von 0-100 % untersucht. Da ein hydrodynamisches 1d-Modell (MyLake) genutzt wurde, konnte hydrodynamischen Veränderungen, die sich aus der Überdeckung mit den Modulen ergeben, Rechnung getragen werden.

Quantitative Angaben zur anlagebedingten Veränderung der primären meteorologischen Wirkgrößen wurden nicht vorgenommen. Statt dessen wurde vorausgesetzt, dass sich durch die Exposition der Anlage der Beschattungsgrad von 0-100 % erhöht und die Windgeschwindigkeit von 0-100 % verringert. Zusammenhänge zwischen Anlagengröße und Globalstrahlung bzw. Windgeschwindigkeit lassen sich hieraus nicht ableiten. Meteorologischen Wirkgrößen wie Feuchte bzw. Dampfdruck und langwellige Rückstrahlung, die durch die vorhabensbedingten Auswirkungen eine Veränderung erfahren, sind für den Modellantrieb von MyLake nicht notwendig, so dass hierzu auch keine Angaben in der Studie enthalten sind.

Auf der Grundlage des Modells wurden Aussagen zum Temperaturhaushalt, Einschichtungsverhalten und zur Verdunstung gemacht. Aufgrund des Versuchsaufbaus und der Vielzahl der Simulationen kann die Aussage getroffen werden, dass bei einem Überdeckungsgrad von 25-30 % für das Untersuchungsgewässer nur mit geringen Veränderungen zu rechnen ist. Maßgeblich für die verhältnismäßig geringen Veränderungen ist der Umstand, dass die meteorologischen Haupteinflussgrößen Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit vorhabensbedingt gegenläufige Effekte auf den Temperaturhaushalt und das Zirkulationsverhalten ausüben. So führt die Flächenvergrößerung einer SPV Anlage dazu, dass die Globalstrahlung abnimmt und sich folglich auch die Wassertemperatur verringert. Die ebenfalls abnehmende Windgeschwindigkeit hingegen verursacht wiederum eine Temperaturerhöhung, so dass es zu einer zumindest teilweisen Kompensation kommt.

Als Kernaussage der Publikation ist festzuhalten: Durch eine Überdeckung der Seefläche mit Solarmodulen von 25-35 % stellten sich im Untersuchungsgewässer keine erhebliche Gewässerbeeinträchtigung ein.

#### 4. Haas et al. (2020)

Die Arbeit von Haas et al. (2020) untersucht im Rahmen einer Modellstudie (Elcom/Caedym/3d Modell) die möglichen Auswirkungen einer SPV Anlage für die Rapel-Staustufe in Chile. Diese dient der Elektrizitätsgewinnung mit einer Wasserkraftnutzung von ca. 377 mW. Die Staustufe verfügt über eine Fläche von 4.000 ha und je nach Befüllung ein Wasservolumen von bis zu 400 Mio. $m^3$. Hieraus ergibt sich eine mittlere Tiefe von 10 m. Die maximale Tiefe beträgt 55 m.

Untersuchungsgegenstand waren die anlagenbedingten Auswirkungen der Exposition von SPV Anlagen auf die Algenentwicklung (Chl-a). Durch die Betriebsweise der Anlage mit stark schwankenden Wasserspiegeln blieb die im Modell berechnete maximale Ausdeh-

nung schwimmender Solarmodule auf eine Überdeckungsgrad von höchstens 40% beschränkt. Hydrodynamische Prozesse wurden durch die Verwendung eines entsprechenden Modells (Elcom/Caedym/3d Modell) berücksichtigt. Allerdings wurde nur der vorhabensbedingte Einfluss auf die Globalstrahlungswerte berücksichtigt. Eine Angabe, welchen Einfluss der Überdeckungsgrad auf die einfallende Globalstrahlung hat, wurde nicht gegeben.

Die Untersuchung beschränkt sich auf Aussagen zur vorhabensbedingten Beeinflussung der Algenentwicklung (Chlorophyll-a) und zur Veränderung der Verdunstungsrate des Gewässers. Der Einfluss auf andere Parameter wurde im Rahmen der Studie nicht untersucht. Maskierende Einflüsse können sich durch die Wasserspiegelabsenkungen und die Tiefenwasserentnahme infolge der Stauraumbewirtschaftung im Rahmen der Wasserkraftnutzung ergeben. Aufgrund der Größe des Sees (4000 ha) und der sehr hohen Wasseraustauschrate sind die Ergebnisse nur bedingt auf Baggerseen mit deutlich längeren Verweilzeiten (0,5 bis 20 Jahre) übertragbar.

Die Kernaussage der Publikation lautet: Eine Überdeckung der Seefläche mit Solarmodulen von bis zu 40 % verursacht im Untersuchungsgewässer keine erhebliche Gewässerbeeinträchtigungen.

### 7.2.3 Kombinationsstudie: Ilgen (2021)

Kombinationsstudien mit empirischen Untersuchungen an einem Gewässer, die als Grundlage zur Modellkalibrierung dienen, und einer anschließenden Modellierung wurde im Rahmen der Literaturrecherche nur für ein Gewässer gefunden (Ilgen 2021).

Untersucht wurde hier der Einfluss der SPV Anlage auf einen betriebenen Baggersee (Maiwaldsee in Renchen). Der Maiwaldsee verfügt derzeit über eine Seefläche von 36,96 ha, ein Volumen von 8.800.000 $m^3$, eine maximale Tiefe von 70m und eine mittlere Tiefe von 24m. Bei einer Expositionsfläche der SPV-Anlagen von 7.700 $m^2$ besteht eine Flächenüberdeckung von ca. 2%. In dem Baggersee ergeben sich maskierende Effekte durch die bestehende Kiesgewinnung und die Grundwassergewinnung, die im Rahmen der Untersuchung keine Berücksichtigung fanden. Allerdings wirken sich diese Effekte primär auf den tiefen Wasserkörper aus, der weniger stark von vorhabensbedingten Einflüssen betroffen ist als der hier primär untersuchte Oberflächenbereich.

Im Rahmen der Arbeit wird eine Erheblichlichkeitsschwelle von ca. 40% ermittelt.

Im Rahmen der Studie wurden deutliche Veränderungen der meteorologischen Wirkgrößen festgestellt. Die (netto) Globalstrahlung geht nur unter den Solarmodulen um 73% und die Windgeschwindigkeit (hier allerdings über den Schwimmkörpern gemessen) um 23% zurück.

Aufgrund des Seetyps, der Seegröße und der angewandten Methodik lassen sich die hier gewonnenen Ergebnisse sehr gut auf andere Baggerseen in der Oberrheinebene übertragen. Insbesondere die ermittelte Veränderung der meteorologischen Wirkgrößen Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit bilden eine gute Grundlage für die Beurteilung der Umweltrelevanz von SPV Anlagen auf Baggerseen.

### 7.2.4 Hauptaussagen

Auf Basis der gesichteten Literatur kann eine Erheblichkeitsschwelle für die Nutzung von SPV-Anlagen auf Baggerseen bei einem Überdeckungsgrad zwischen 25-40 % abgeleitet werden. Insgesamt ist aber anzumerken, dass diese Angabe meist der zufällig gewählten Flächenausdehnung des jeweiligen Vorhabens entsprachen oder jene Ausdehnung umfasste, die gerade technisch umsetzbar war.

Nur eine Studie ILGEN (2021) erarbeitete Angaben zur anlagenbedingten Beeinflussung der primären meteorologischen Wirkgrößen Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit.

Für viele Merkmale sind nur qualitative Aussagen möglich. In Bezug auf die Beeinflussung meteorologischer Wirkgrößen durch die Installation von SPV Anlagen konnten durch die Literaturauswertung folgende Angaben ermittelt werden:

***Tabelle 7.4: Vorhabensbedingte Beeinflussung meteorologischer Wirkgrößen (Literaturangaben)***

| Meteorologischen Wirkgrößen | Qualitative Effekt | Quantitative Effekte * | Auswirkungen auf | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Wassertemperatur | Zirkulationsverhalten |
| Globalstrahlung [W/m²] | Verringerung | 73% | Verringerung | Verstärkung |
| Langwellige Rückstrahlung [W/m²] | Verringerung | 23 % | Erhöhung | Verringerung |
| Windgeschwindigkeit [m/s] | Verringerung | keine Angaben | Erhöhung | Verringerung |
| Dampfdruck [hPa] | geringe Erhöhung | | geringe Erhöhung | geringe Verringerung |

* Nur Ilgen (2021). Die Verringerung der Solarstrahlung um 73 % erfolgt nur unter den Solarmodulen. Die nicht überdeckte Seefläche erfährt keine Veränderung.

Für Auswirkungen auf die Seewasserbeschaffenheit ist das in der Tabelle 7.5 angegebene Ausmaß anzunehmen. Mit Erheblichkeitsschwellen für das Zirkulationsverhalten und den Temperaturhaushalt ist ab Überdeckungsgraden von 25 % der Seefläche zu rechnen. Beeinträchtigungen des Sauerstoffhaushaltes und Belastungen durch Stofffreisetzung aus den Solarmodulen wurden bis zu den Nutzungsintensitäten mit Überdeckungsgraden von 30 % nicht ermittelt. Veränderungen des Nährstoffhaushaltes sind erst bei einer Überdeckung von mehr als 40% zu erwarten.

***Tabelle 7.5: Vorhabensbedingte Auswirkungen auf die Seewasserbeschaffenheit (Literaturangaben)***

| Beschreibung der anlagenbedingten Effekte bezogen auf: | Erheblichkeitsschwelle |
|---|---|
| Zirkulationsverhalten | ≥ 25 % Überdeckung |
| Temperaturhaushalt | ≥ 25 % Überdeckung |
| Seeverdunstung | vorhabensbedingte Abnahme |
| Sauerstoffhauhalt einschließlich Tag-Nacht-Rhythmus | ≥ 30 Überdeckung |
| Algen- und Cyanobakterienentwicklung (Chl-a) und Nährstoffhaushalt | ≥ 40 Überdeckung |
| Entwicklung benthischer Cyanobakterien als Aufwuchs auf den Schwimmkörpern | keine Angaben |
| Entwicklung von Schwachlicht-Cyanobakterien-Arten (z.B. Planktothrix rubescens) im abgeschatteten Bereich | |
| Darstellung möglicher sekundärer Belastungen z.B. durch Antifouling, Leachig etc. | ≥ 30 Überdeckung |

# 8 Natürliches Referenzgewässer

Derzeit können an keinem See die Umweltauswirkungen einer vorhandenen SPV-Anlage ohne maskierende Effekte, z.B. aus der Kiesgewinnung, untersucht werden. Daher soll im Folgenden zur Ermittlung der durch Abschattung entstehenden Effekte ein Referenzgewässern dienen, dessen Wasseroberfläche eine in Teilen nahezu vollständige Überdeckung durch Teichlinsen aufweist, so dass hier vergleichbare Effekte auftreten wie bei der Installation von Solarmodulen.

Es handelt sich um einen abgetrennten Rheinaltarm in Köln (Untere Groov), für den ein umfangreiches Datenmaterial, das derzeit von unserem Büro ausgewertet wird, zur Verfügung steht. Auf der Basis dieses Materials wird das für die Modellierung verwendete Modell (vgl. Kapitel 6.2) an die Aufgabenstellung angepasst.

Obwohl die Untere Groov hinsichtlich ihrer Morphologie und der hydraulischen Anbindung an das Grundwasser und den Rhein überhaupt nicht mit Baggerseen vergleichbar ist, lassen sich Teilergebnisse doch vollständig auf alle Seetypen übertragen, wenn ausschließlich die beiden hier abgeleiteten Parameter Beschattungsgrad und Windgeschwindigkeit unter dem beschattenden Element für den Modellantrieb Berücksichtigung finden. Alle übrigen Einflussfaktoren wie Gewässermorphologie, hydraulische Anbindung und Nährstoffeinträge sind im Modell frei variierbar und können den Gegebenheiten des jeweiligen Untersuchungsgewässers angepasst werden. Das Modell berechnet also die Auswirkungen, die ein entsprechend großer Beschattungsgrad und eine vergleichbare Verminderung der Windgeschwindigkeit auf die Gewässergüte des Philippsees ausübt.

In der Unteren Groov waren für die Teichlinsenmassenentwicklungen die folgenden Arten verantwortlich:

- *Lemna minor* 25 %,
- *Lemna gibba* 25 %,
- *Spirodela polyrhiza* und
- *Wolffia columbiana*

Bei einem Bedeckungsgrad von 50% während der Probenahme ergaben sich vergleichsweise geringe Unterschiede zwischen den Sauerstoff- und Temperaturwerte im überdeckten und im offenen Wasserkörper (vgl. Tabelle 8.1).

***Tabelle 8.1: Veränderung von Beschaffenheitskennwerten unter und außerhalb der Lemnaceaen-Überdeckung***

| | Temperatur [°C] | Sauerstoffgehalt [mg/L] | Sauerstoffsättigung [%] | el. Leitf.$_{25}$ [$\mu$S/cm] |
|---|---|---|---|---|
| Teichlinsenbedeckung 100 % | 21,64 | 4,78 | 54,48 | 403,05 |
| Teichlinsenbedeckung < 1% | 21,28 | 4,83 | 54,63 | 404,86 |

Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die räumliche Verteilung der Sauerstoff- und Temperaturwerte. Ein Horizontalgradient war zwar gegeben, er blieb aber für beide Parameter über die gesamte Wasserfläche gering. Aus dem Messergebnis lassen sich folgende Schlüsse ableiten:

- Die Ausgleichsströmungen sind so groß, dass Veränderung durch die Überdeckung in kurzer Zeit ausgeglichen werden. Die Verhältnisse können also mit einer 1d-Modellierung zutreffend wiedergegeben werden.

- Die leichte Erhöhung der Wassertemperaturen im überdeckten Bereich kann als Hinweis darauf gewertet werden, dass neben der Globalstrahlung auch die Reduktion der Windgeschwindigkeit und die verminderte Verdunstung sowie die geringere langwellige Rückstrahlung einen Einfluss auf den Temperaturhaushalt haben.

Folglich ist davon auszugehen, dass auch bei einer Solarüberdeckung der Seefläche sich keine abgrenzbaren Seebereiche mit deutlichen Werteunterschieden unterhalb und außerhalb des Abschattungsbereiches ausbilden.

*Abbildung 8.1: Verlauf der Sauerstoffwerte in der Unteren Groov (Köln) bei einer 50%-igen Seeüberdeckung durch Lemnacaeen.*

*Abbildung 8.2: Verlauf der Temperaturwerte in der Unteren Groov (Köln) bei einer 50% igen Seeüberdeckung durch Lemnacaeen*

Für die Untere Groov wurde unter der Annahme einer Teichlinsenbedeckung von über 50% der Teichfläche und den in der Tabelle 8.2 angegebenen Auswirkungen auf die meteorologischen Wirkgrößen eine Modellierung des Temperatur- und Sauerstoffhaushaltes durchgeführt.

***Tabelle 8.2: Auswirkungen auf die meteorologischen Wirkgrößen durch die Überdeckung mit Teichlinsen***

| | Effekt durch Teichlinsen | |
|---|---|---|
| **Meteorologischen Wirkgrößen** | **qualitativ** | **quantitativ*** |
| Globalstrahlung [W/m²] | Verringerung | 85 % |
| Langwellige Rückstrahlung [W/m²] | Verringerung | keine langwellige Rückstrahlung |
| Windgeschwindigkeit [m/s] | Verringerung | 80 % |
| Dampfdruck [hPa] | geringe Erhöhung | 20 % |
| * Rückgang nur unter den Solarmodulen | | |

Die Gegenüberstellung von Modellwert und Messwert zeigt in Bezug auf die Wassertemperatur bei der vorausgesetzten 50 % Überdeckung eine gute Übereinstimmung (vgl. Abbildung 8.3).

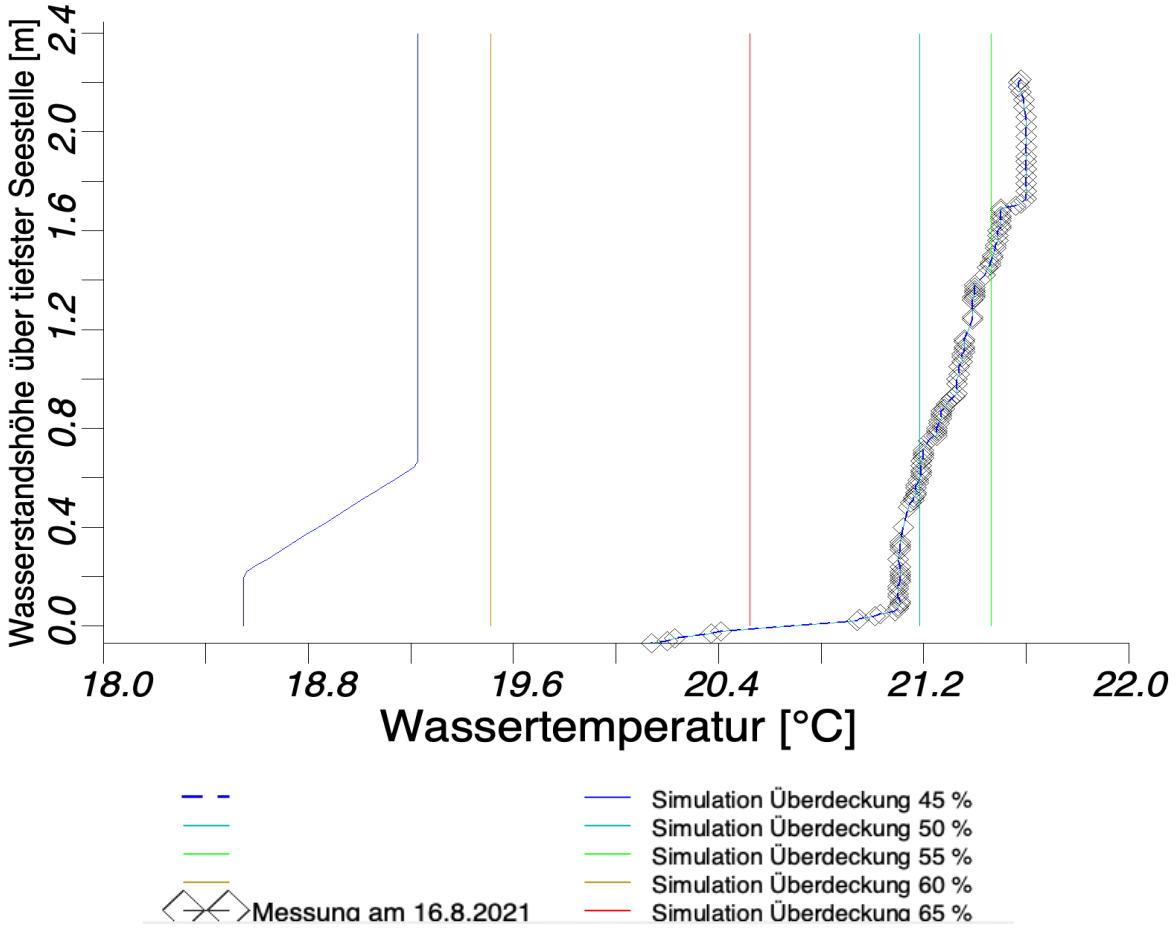



***Abbildung 8.3: Gegenüberstellung von Messwerten und Modellwerten der Wassertemperatur bei unterschiedlichem Überdeckungsgrad der Seefläche mit Teichlinsen***

Eine deutlich schlechtere Übereinstimmung ergibt sich für die Sauerstoffwerte (vgl. Abbildung 8.4). So wird der gemessene Sauerstoffgehalt im Modell erst erreicht, wenn der Überdeckungsrad ein Ausmaß von 75-80 % annimmt. Der Grund ist darin zu sehen, dass durch die Überdeckung nicht nur die meteorologischen Kennwerte Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit, Dampfdruck und langwelliger Rückstrahlung beeinflusst werden, sondern auch die Sauerstoffdiffusionskonstante zwischen Atmosphäre und Wasserköper.

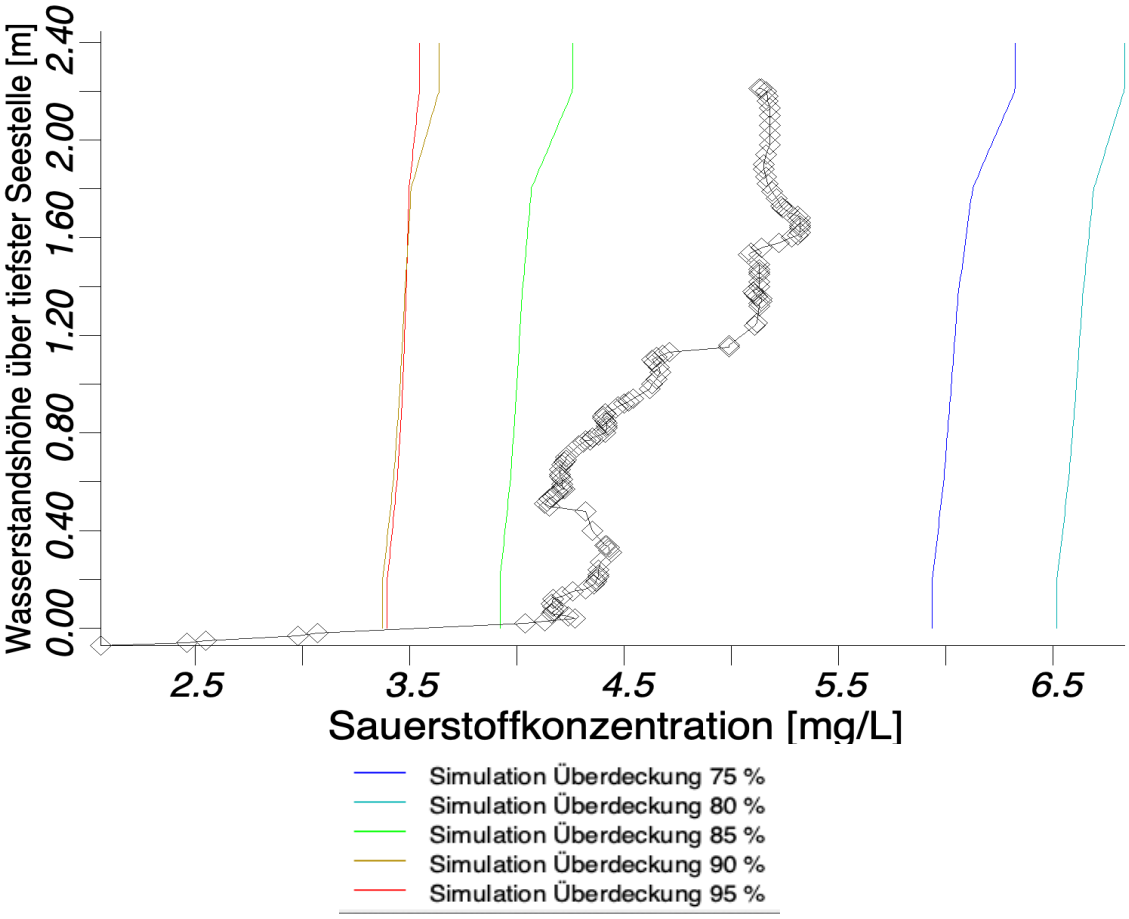



***Abbildung 8.4: Gegenüberstellung von Messwerten und Modellwerten der Sauerstoffkonzentrationen bei unterschiedlichem Überdeckungsgrad der Seefläche mit Teichlinsen***

Zusammenfassend ergeben sich aus der Untersuchung eines Naturgewässers mit Teichlinsenüberdeckung die folgenden Schlussfolgerungen:

- Die Veränderung der meteorologischen Wirkgrößen durch Seeflächenüberdeckung weicht von den experimentell ermittelten Werten (Ilgen 2021) ab (vgl. Kapitel 9.1). Dies ist auch zu erwarten, da die Abschirmung von Teichlinsen gegenüber dem Windangriff und der langwelligen Rückstrahlung sowie der Veränderung des Dampfdrucks stärker ausfällt als bei Solaranlagen. Außerdem führte Ilgen (2021) die Windmessungen auf den Schwimmkörpern und nicht darunter durch.

- Der Einfluss auf den Sauerstoffhaushalt des Gewässers dürfte etwas stärker sein, als durch das Modell berechnet, da die Veränderung der Sauerstoffdiffusion über die Oberfläche im Modell keine Berücksichtigung findet. Auch hier ist aber zu beachten, dass die Schwimmkörper der Solaranlagen eine geringere Überdeckungsfunktion aufweisen als ein Teichlinsenteppich und unter Solarmodulen die Sauerstoffdiffusion zudem höher ist.

# 9 Beeinflussung der Gewässergütekennwerte des Philippsees durch Exposition von Solarmodulen

## 9.1 Morphologische Kennwerte und meteorologische Wirkgrößen als Inputdaten der Modellberechnung

Die Beeinflussung der Gewässergüte, mit denen im Philippsee durch die Installation von Solarmodulen zu rechnen ist, wird für die beiden Varianten Istzustand und Genehmigungszustand, deren morphologische Kenngrößen in der Tabelle 9.1 angegeben sind, im Modell (vgl. Kapitel 6.2) berechnet. Für die Planvariante mit einer weiteren Vergrößerung der Seefläche (Erweiterungsbereich, vgl. Tabelle 2.1 auf Seite 5) wird keine gesonderte Modellberechnung durchgeführt, da diese Variante über eine größere Seefläche und somit einen geringeren Überdeckungsgrad durch die Solarmodulen verfügt, so dass die Maßnahmenauswirkungen geringer ausfallen. Zur Beurteilung dieser Variante dient die Übertragung der Modellergebnisse für die Varianten Istzustand und Genehmigungszustand auf der Grundlage einer gutachterlichen Einschätzung (vgl. Kapitel 14).

***Tabelle 9.1: Morphologische Kenngrößen des Philippsees***

| | Seesohle [m. NHN] | Fläche [ha] | Betriebszustand | Ausdehnung PV-Anlage [ha] | Anteil der Seeüberdeckung [%] |
|---|---|---|---|---|---|
| Istzustand mit Solartechnik | 65,5 | 58 | in Auskiesung | 8,7 | 15% |
| Genehmigungszustand mit Solartechnik | 65,5 | 62,5 | in Auskiesung | | 14% |
| | | | stillgelegt | | |
| Erweiterungsbereich (Planzustand & Sicherungsfläche) | 65,5 | 86,5 | in Auskiesung | | 10 % |
| | | | stillgelegt | | |

Dabei wird davon ausgegangen, dass sich unter der von den Solarmodulen überdeckten Wasserfläche die meteorologischen Wirkgrößen in dem Ausmaß verändern, das in der Tabelle 9.2 verzeichnet ist. Aus den in den Kapiteln 7 und 8 dargestellten Grundlagen lassen sich für diese Parameter zwei Varianten ableiten. Zum einen die an dem natürlichen Referenzgewässer Obere Groov ermittelten Werte und zum anderen die am Maiwaldsee gewonnenen Daten (Ilgen 2021). Zu beachten ist, dass die Windgeschwindigkeiten am Maiwaldsee über und nicht unter den Schwimmkörpern gemessen wurden.

***Tabelle 9.2: Prozentuale Veränderung meteorologischer Wirkgrößen durch Überdeckung***

| | Variante 1 (V1) | Variante 2 (V2) |
|---|---|---|
| **Meteorologischen Wirkgrößen** | **Obere Groov** | **Maiwaldsee** |
| Globalstrahlung [W/m²] | 85 % (Abnahme)* | 73 % (Abnahme)* |
| Langwellige Rückstrahlung [W/m²] | 20 % (Abnahme)* | |
| Windgeschwindigkeit [m/s] | 80 %(Abnahme)* | 23 % (Abnahme)* |
| Dampfdruck [hPa] | 20 % (Zunahme)* | |
| Überdeckungsgrad Istzustand | 15 % | 15 % |
| Überdeckungsgrad Genehmigungszustand | 14 % | 14 % |
| Erweiterungsbereich (Planzustand & Sicherungsfläche | 10 % | 10 % |

*Die anteilige Reduktion beschränkt sich auf den Überdeckungsbereich.

Aus den in der Tabelle 9.2 angegebenen Werten errechnen sich unter Bezug auf die Mittelwerte folgenden Veränderungen der meteorologischen Wirkgrößen am Untersuchungsgewässer für den Zeitabschnitt 2009 bis 2018 (vgl. Tabelle 9.3):

*Tabelle 9.3: Veränderungen der meteorologischen Wirkgrößen am Untersuchungsgewässer (ø 1997 bis 2018)*

| | Globalstrahlung [W/m²] | Bedeckungsgrad [%] * | Temperatur [°C] | Dampfdruck [mb] | Windgeschwindigkeit [m/s] |
|---|---|---|---|---|---|
| Istzustand und Genehmigungszustand ohne Solartechnik | 127,9 | 0,61 | 11,98 | 10,53 | 2,78 |
| Istzustand mit Solartechnik Variante 1 | 110,3 | 0,67 | 11,98 | 10,53 | 2,42 |
| Istzustand mit Solartechnik Variante 2 | 112,8 | 0,61 | 11,98 | 10,53 | 2,68 |
| Genehmigungszustand mit Solartechnik Variante 1 | 111,7 | 0,67 | 11,98 | 10,53 | 2,45 |
| Genehmigungszustand mit Solartechnik Variante 2 | 114,0 | 0,61 | 11,98 | 10,53 | 2,68 |
| Erweiterungsbereich mit Solartechnik (Planzustand & Sicherungsfläche Variante 1 | 116,2 | 0,65 | 11,98 | 10,53 | 2,54 |
| Erweiterungsbereich (Planzustand & Sicherungsfläche Variante 2 | 117,9 | 0,61 | 11,98 | 10,53 | 2,71 |

* Als Grundlage zur Umrechnung in langwellige Strahlung

Die aus diesen Veränderungen entstehenden Effekte werden für einen 10-jährigen Prognosezeitraum unter Bezug auf die folgenden Parameter untersucht:

- Temperaturhaushalt und Zirkulationsverhalten
- Sauerststoffhaushalt
- Phosphor als wichtigsten Nährstoff
- Algenentwicklung (Algen-Chlorophyll-a)
- Cyanobakterien (Cyanobakterien-Chlorophyll-a)

## 9.2 Istzustand

Die Auskiesungstätigkeit intensiviert das Zirkulationsverhalten im Istzustand erheblich und setzt damit die Schichtungsstabilität deutlich herab. Dieser Prozess ist vergleichbar mit hydromechanischen Effekten durch Rührwerke zur Destratifikation, die im Modell berücksichtigt werden können, so dass auf diese Weise eine Simulation der auskiesungsverursachten Beeinflussungen des Schichtungsverhaltens möglich wird (LEWIS et al. 2001).

Die Zirkulationswirksamkeit der Baggertätigkeit kann anhand der eingesetzten Baggertechnik (Seilbagger), der täglichen Hebezyklen (Seilbagger), der umgeschlagenen Wassermenge (Kieswäsche), der Zahl der Betriebstage und Betriebsstunden, der Baggertiefe und der Schaufelgeometrie ermittelt werden.

Aufgrund von Erfahrungswerten bezüglich der üblicherweise in vergleichbaren Baggerseen eingesetzten Gewinnungstechnik wird dabei von einer mittleren Wasserumwälzung durch den Hebevorgang ausgegangen, die einem Volumenstrom von 0,7 m³/s entspricht.

Die durch den Saugbagger und im Rahmen der Kieswäsche umgewälzten Wassermengen nehmen das folgende Ausmaß an:

- Saugbagger ca. 650.000 m³/Jahr
- Kieswäsche ca. 1.040.000 m³/Jahr

Unter diesen Voraussetzungen wird im Folgenden die Entwicklung der Qualitätsparameter für den Istzustand ohne Solarnutzung und für den Istzustand mit Solarnutzung unter Bezug auf die beiden in Kapitel 9.1 dargestellten Varianten diskutiert:

- Istzustand ohne Solarnutzung
- Istzustand mit Solarnutzung Variante 1 (Herleitung der Veränderung der meteorologischen Wirkgrößen anhand eines Gewässers mit Teichlinsenbedeckung)
- Istzustand mit Solarnutzung Variante 2 (Herleitung der Veränderung der meteorologischen Wirkgrößen anhand des Maiwaldsees)

### 9.2.1 Temperaturhaushalt

Für den gesamten Untersuchungszeitraum errechnet das Modell für den Istzustand ohne und mit Solarnutzung (bei beiden Varianten) eine Volldurchmischung des Sees während der Winterhalbjahre und eine Stratifizierung im Sommer (vgl. Abbildung 9.1).

Die vergleichsweisen hohen hypolimnischen Wassertemperaturen von bis zu 12 °C in den Sommermonaten sind auf auskiesungsbedingte Zirkulationsströmungen zurückzuführen, die allerdings keine Auflösung der Schichtung bewirken.

Aus den Isoplethendarstellungen sind keine signifikanten Unterschiede zwischen dem Istzustand mit und ohne Solarnutzung zu ersehen.

Bei der Variante 1, für die ein Rückgang der Windgeschwindigkeiten von 80 % vorausgesetzt wird, ist mit geringfügig höheren Temperaturen zu rechnen als beim Istzustand oder der Variante 2.

Diese weist die geringsten Temperaturen im Epilimnion auf, da hier im Überdeckungsbereich (15 % der Seefläche) die Globalstrahlungum 73 %, die Windgeschwindigkeit aber nur um 23 % zurückgeht.

Der Rückgang der Globalstrahlungführt zu einer Verringerung des Wärmeeintrages, die Verringerung der Windgeschwindigkeit zu einer Erhöhung. Da die Veränderung der beiden meteorologischen Wirkgrößen in der Variante 2 nicht proportional stattfindet, verstärkt sich der Abkühlungseffekt.

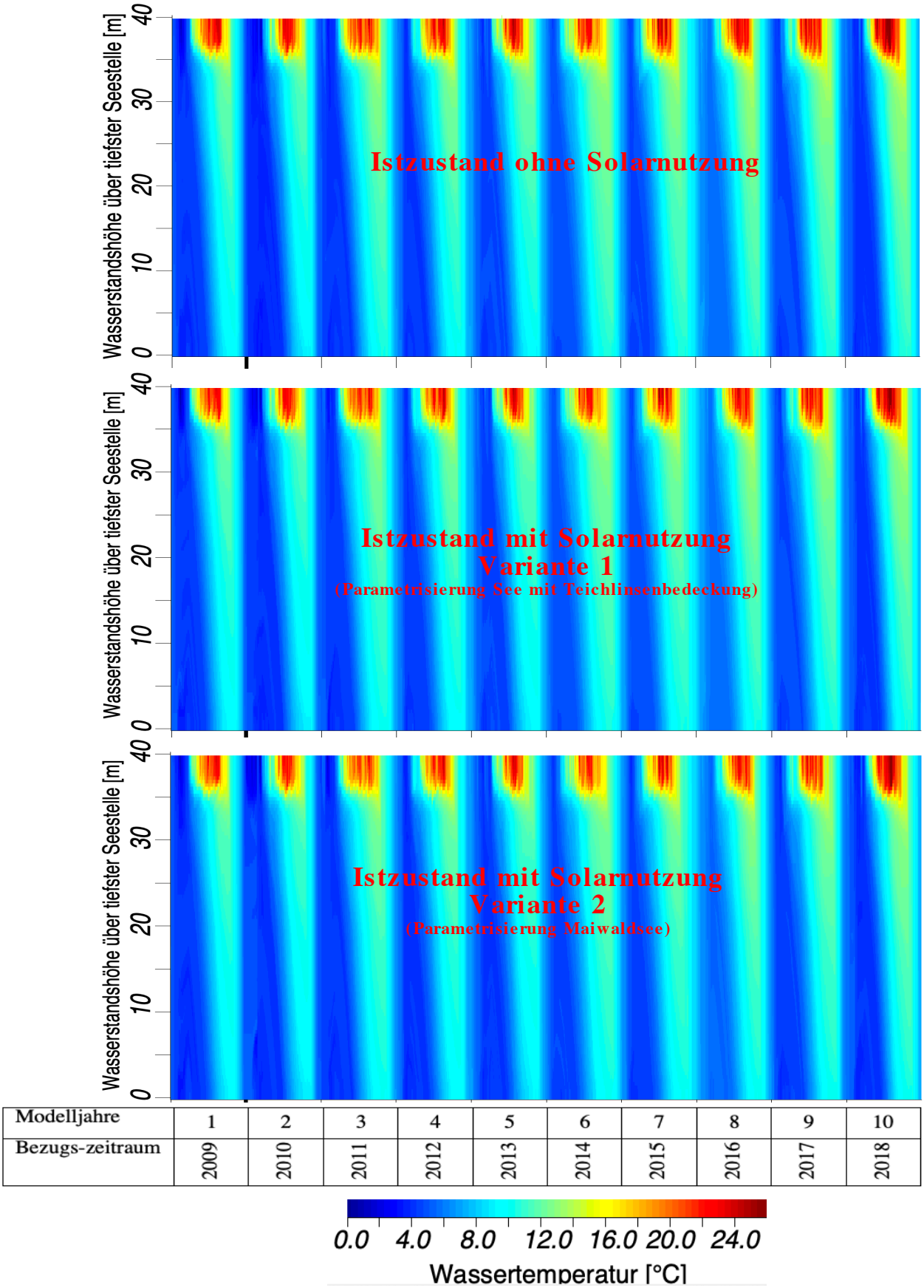



*Abbildung 9.1: Temperatursimulation unter Bezug auf die Kennwerte des Istzustandes mit den Klimadaten vom 1.1.2009 bis zum 31.12.2018 (Tageswerte)*

Einen starken Einfluss auf den Temperaturhauhalt übt die Baggertätigkeit aus, so dass die Effekte aus der Solarnutzung zum Teil überlagert werden. Auch daher ergeben sich im epilimnischen Wasserkörper kaum Temperaturunterschiede zwischen dem Istzustand ohne Solarnutzung und den beiden Varianten mit Solarnutzung (vgl. Abbildung 9.2). Tendenziell ist bei der Variante 2 eine stärkere Abnahme der Temperatur zu erkennen als bei Variante 1.

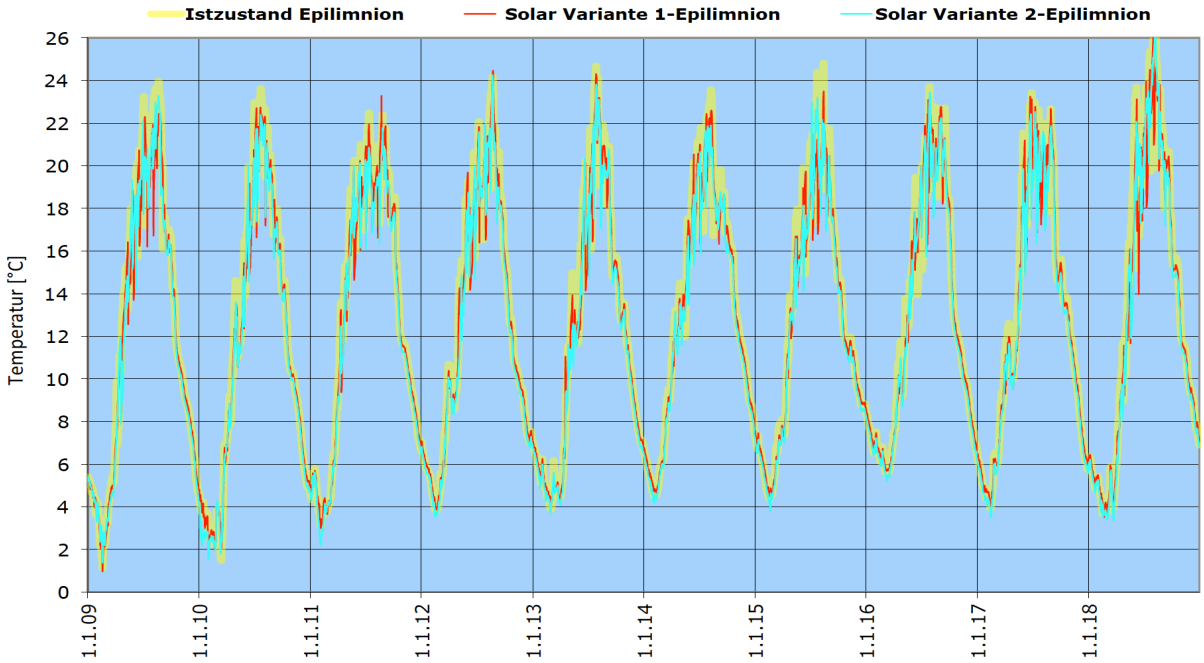



*Abbildung 9.2: Temperaturwerte der Simulation des Istzustandes im Epilimnion*

Dies zeigen auch die in der Tabelle 9.4 dargestellten statistischen Lageparameter. Unter Bezug auf die Mittelwerte ist von einer minimalen Abnahme der Wassertemperaturen im Epilimnion als Folge der Solarnutzung auszugehen. Verantwortlich dafür ist der erhöhte Beschattungsgrad unter der überdeckten Fläche.

*Tabelle 9.4: Wassertemperaturen im Epilimnion für die Kennwerte des Istzustandes*

| | Istzustand ohne Solarnutzung | Istzustand Solarnutzung Variante 1 | Istzustand Solarnutzung Variante 2 |
|---|---|---|---|
| Mittelwert [°C] | 12,71 | 12,42 | 12,16 |
| Maximum [°C] | 26,43 | 26,02 | 26,44 |
| 75 Perzentil [°C] | 18,29 | 17,80 | 17,62 |
| 25 Perzentil [°C] | 7,07 | 7,09 | 6,82 |

Die maßnahmenverursachten Veränderungen des Temperaturhaushaltes im Epilimnion bleiben so gering, dass Erheblichkeitsschwellen nicht erreicht werden. Der Eingriff in den Temperaturhauhalt des Epilimnions durch Solarnutzung ist folglich bei bestehender Auskiesung als unerheblich einzustufen.

Im tiefsten Seebereich sind die Vorhabensauswirkungen nur unwesentlich stärker ausgeprägt und erreichen ebenfalls ein minimales Ausmaß (vgl. Abbildung 9.3). Tendenziell führt die Solarnutzung zu einer geringen Abnahme der Wassertemperaturen im grundnahmen Bereich. Auch hier ist zu berücksichtigen, dass die vom der Auskiesung verursachten Vermischungsvorgänge die Effekte der Solarnutzung überlagern.

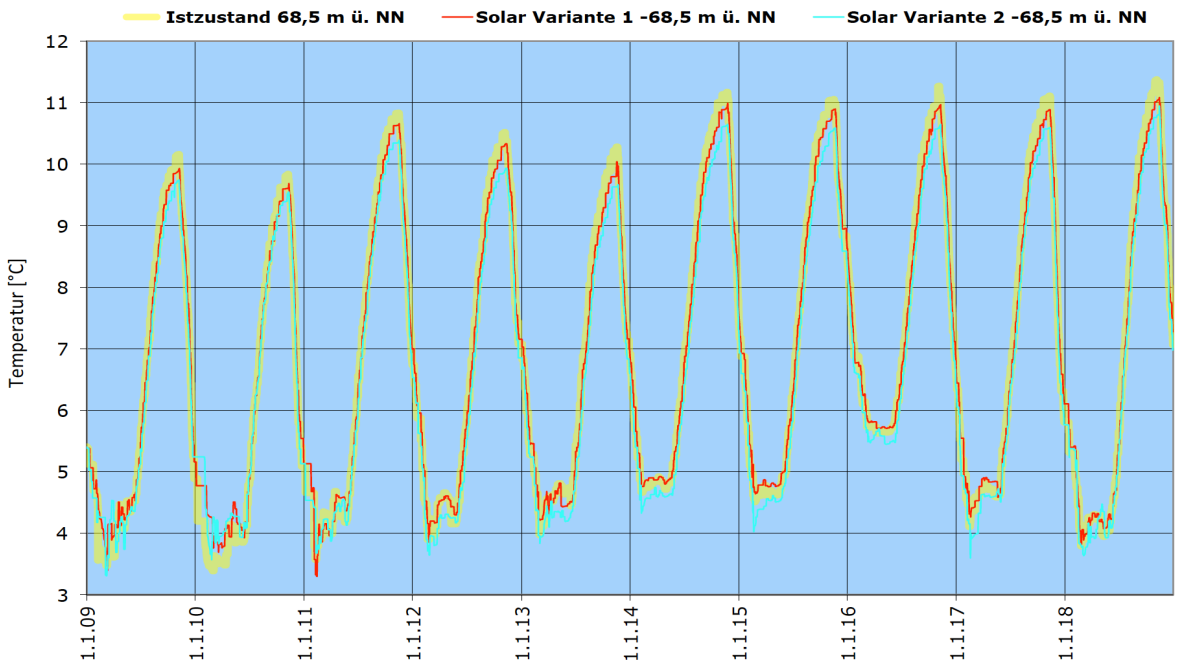



*Abbildung 9.3: Temperaturwerte der Simulation des Istzustandes im tiefen Hypolimnion*

Im tiefen Hypolimnion ist nur von einer sehr geringen Abnahme der Wassertemperaturen infolge der Solarnutzung auszugehen (vgl. Tabelle 9.5). Der Temperaturrückgang ist bei weitem nicht so stark, dass sich ein negativer Einfluss auf die Habitatqualität des winterlichen Ruheraums von Fischen ergeben könnte. Der Eingriff in den Temperaturhauhalt des tieferen Hypolimnions durch Solarnutzung ist folglich bei bestehender Auskiesung als unerheblich einzustufen.

*Tabelle 9.5: Wassertemperaturen im tiefen Hypolimnion für die Kennwerte des Istzustandes*

| | Istzustand ohne Solarnutzung | Istzustand Solarnutzung Variante 1 | Istzustand Solarnutzung Variante 2 |
|---|---|---|---|
| Mittelwert [°C] | 6,90 | 6,88 | 6,66 |
| Maximum [°C] | 11,37 | 11,08 | 10,94 |
| 75 Perzentil [°C] | 9,20 | 9,08 | 8,82 |
| 25 Perzentil [°C] | 4,66 | 4,77 | 4,53 |

### 9.2.2 Sauerstoffhaushalt

Wie dem Isoplethendiagramm (Abbildung 9.4) zu entnehmen ist, ergibt sich für die Phase der Auskiesungstätigkeit immer eine sehr gute Sauerstoffversorgung des Gewässers. Während der Stagnationsphasen im Sommer können die Sauerstoffgehalte im Tiefenwasserkörper zwar auf Werte von bis zu 6 mg/l zurückgehen, die Mindestanforderungen für den Sauerstoffhaushalt von 2 mg/l über mindestens 30 % der maximalen Wassertiefe (vgl. Kapitel 4.1) werden aber immer deutlich erreicht. Signifikante Unterschiede für den Istzustand mit Solarnutzung oder ohne Solarnutzung sind nicht zu erkennen.

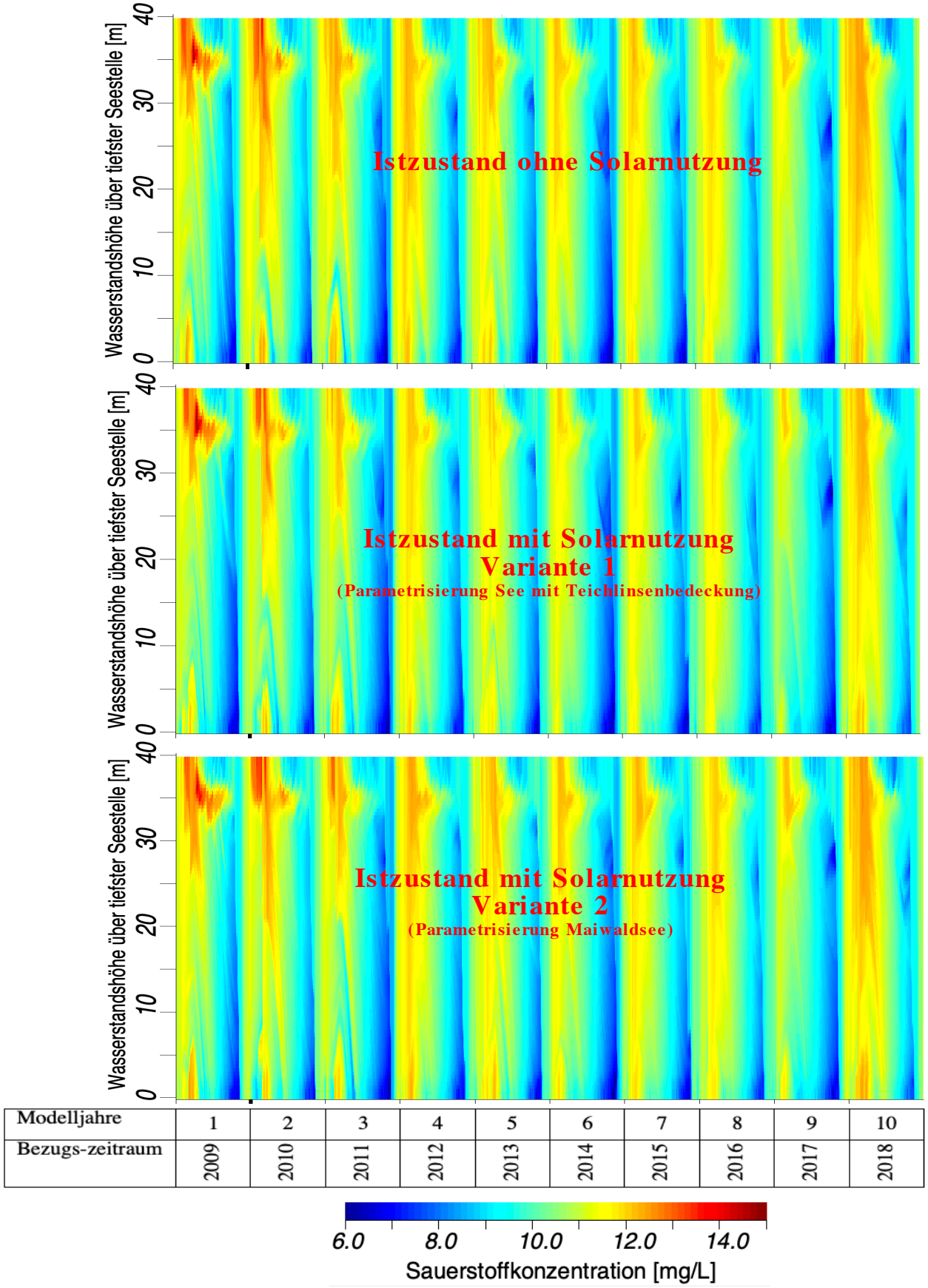



*Abbildung 9.4: Sauerstoffsimulation unter Bezug auf die Kennwerte des Istzustands mit den Klimadaten vom 1.1.2009 bis zum 31.12.2018 (Tageswerte)*

Die Sauerstoffgehalte im Epilimnion erfahren durch die Solarnutzung kaum eine Veränderung (vgl. Abbildung 9.5).

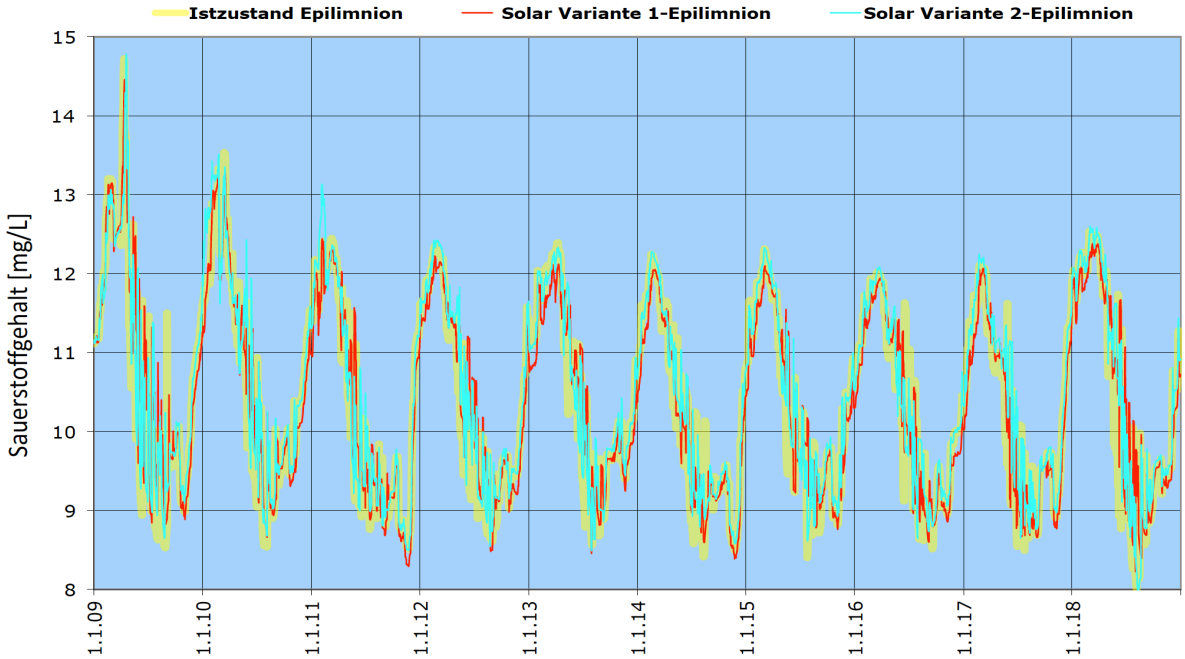



*Abbildung 9.5: Sauerstoffwerte der Simulation des Istzustandes im Epilimnion*

Nur sehr geringe Abweichungen zwischen den Varianten zeigen auch die in der Tabelle 9.6 dargestellten statistischen Lageparameter. Eine Beeinflussung der Sauerstoffgehalte im Epilimnion durch die Solarnutzung ist nicht zu erkennen. Diese Vereinheitlichung ist auch eine Folge der starken Wasservermischung durch die Baggertätigkeit, die sowohl einen vermehrten Sauerstoffeintrag über die Wasseroberfläche als auch stärkere Verteilung des oberflächennahen Wassers über die gesamte Seefläche verursacht. Die Auswirkungen der Solarnutzung auf den Sauerstoffhaushalt des Epilimnions sind bei bestehender Auskiesung als unerheblich einzustufen.

*Tabelle 9.6: Sauerstoffgehalte im Epilimnion für die Kennwerte des Istzustandes*

| | Istzustand ohne Solarnutzung | Istzustand Solarnutzung Variante 1 | Istzustand Solarnutzung Variante 2 |
|---|---|---|---|
| Mittelwert [mg/l] | 10,42 | 10,41 | 10,52 |
| Maximum [mg/l] | 14,72 | 14,46 | 14,78 |
| Minimum [mg/l] | 7,99 | 8,22 | 7,98 |
| 75 Perzentil [mg/l] | 11,49 | 11,40 | 11,57 |
| 25 Perzentil [mg/l] | 9,38 | 9,38 | 9,47 |

Auch der Tiefenwasserkörper weist sowohl ohne als auch mit Solarnutzung eine sehr gute Sauerstoffversorgung auf. In der Abbildung 9.6 ist der Verlauf der Sauerstoffwerte in 77,5 m NN dargestellt. Dies entspricht einer Gewässertiefe, in der ein Sauerstoffwert von 2 mg/l nicht unterschritten werden sollte (vgl. Kapitel 4.1). Das Modell weist hier auch in den sommerlichen Stagnationsphasen deutlich höhere Werte aus. Die Veränderungen, die sich aus der Exposition von Solarmodulen ergeben sind so gering, dass Effekte weit unterhalt einer Erheblichkeitsschwelle liegen.

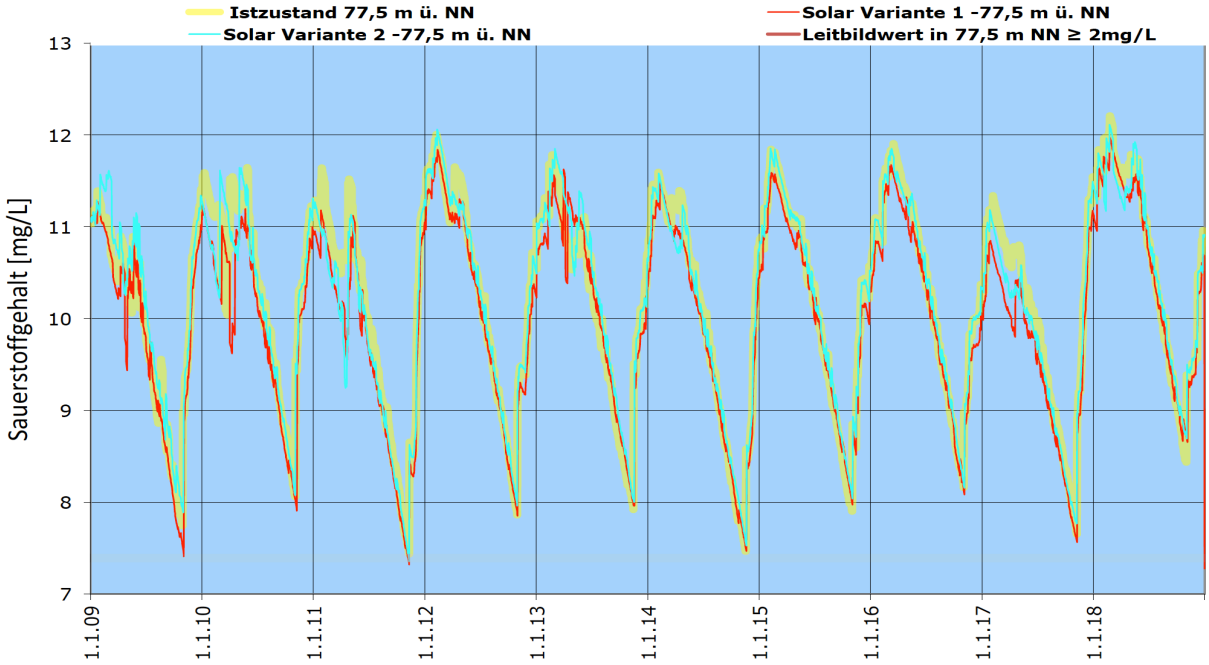



*Abbildung 9.6: Sauerstoffwerte der Simulation des Istzustandes im Hypolimnion*

Diese positive Ausprägung des Sauerstoffhaushaltes im Hypolimnion (vgl. auch Tabelle 9.7) ist auf die geringe Nährstoffbelastung des Sees, aber auch auf betriebsbedingte Auswirkungen zurückzuführen. Die Auskiesungstätigkeit sorgt dafür, dass sauerstoffreiches Oberflächenwasser in die Gewässertiefe gelangt und so auch während der Sommermonate eine permanente Sauerstoffnachlieferung von der Gewässeroberfläche aus stattfindet. Der Eingriff in den Sauerstoffhauhalt des Hypolimnions durch Solarnutzung ist bei bestehender Auskiesung als unerheblich einzustufen.

*Tabelle 9.7: Sauerstoffgehalte im Hypolimnion für die Kennwerte des Istzustandes*

| | Istzustand ohne Solarnutzung | Istzustand Solarnutzung Variante 1 | Istzustand Solarnutzung Variante 2 |
|---|---|---|---|
| Mittelwert [mg/l] | 10,20 | 10,01 | 10,20 |
| Maximum [mg/l] | 12,21 | 11,97 | 12,21 |
| Minimum [mg/l] | 7,44 | 7,27 | 7,44 |
| 75 Perzentil [mg/l] | 11,12 | 10,89 | 11,12 |
| 25 Perzentil [mg/l] | 9,37 | 9,24 | 9,37 |

### 9.2.3 Phosphorgehalte

Während des Istzustandes kommt es durch die Rückleitung von Kieswaschwasser und die umwälzungsbedingt geringere Sedimentationsrate zu einer Aufkonzentration der Phosphorwerte im See, die aber insgesamt noch deutlich unterhalb des Zielwertes von 0,036 mg/l (vgl. Kapitel 4.1) liegen. Die starke Abnahme der Phosphorwerte im ersten Jahr der Modellanalyse (vgl. Abbildung 9.7) ergeben sich durch die relativ hohen Startwerte (Messwerte) für die Seemodellierung. Aufgrund der stetigen Abnahme der Grundwasserbelastungen in den zurückliegenden Jahren befindet sich der See noch nicht in einem Gleichgewichtszustand.

Als Folge der Solarnutzung kommt es zu einem leichten, im Hinblick auf den Gütezustand allenfalls marginalen Rückgang der Phosphorwerte im Seewasser, die wesentlich auf die verminderte Algenentwicklung infolge der Beschattung durch die Solarmodule zurückzuführen ist. Dies betrifft insbesondere die Variante 1, bei der eine Reduktion der Glo-

balstrahlung unter den Solarmodulen von 85% vorausgesetzt wird. Eine geringere Algenentwicklung bedingt einen höheren Verlust an Phosphor durch Sedimentation. Eine stärkere Algenentwicklung erhöht die Phosphorregeneration im Epilimnion.

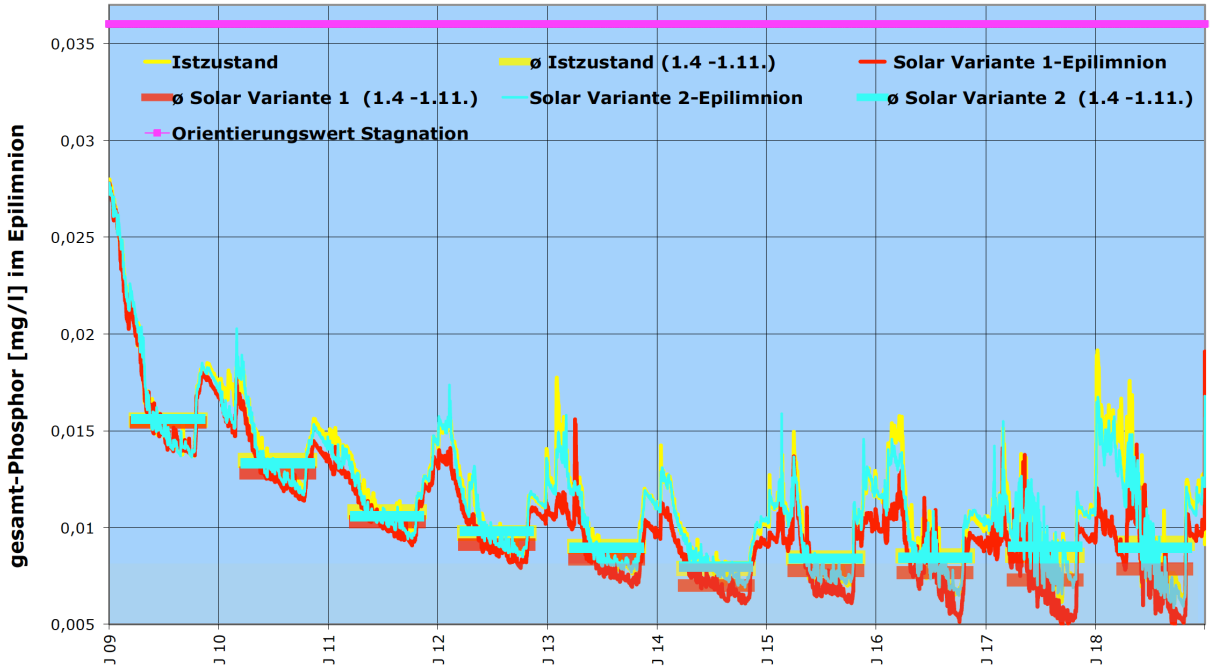



***Abbildung 9.7: Phosphorsimulation unter Bezug auf die Kennwerte des Istzustandes mit den Klimadaten vom 1.1.2009 bis zum 31.12.2018 (Tageswerte)***

Auch für die Variante 2 weist das Modell etwas geringere Phosphorbelastungen aus als ohne Solarnutzung (vgl. Tabelle 9.8). Insgesamt sind die Unterschiede so gering, dass nicht von einer erheblichen Veränderung des Phosphorhaushaltes durch die Exposition der Solarmodule ausgegangen werden kann. Der Eingriff in den Phosphorhauhalt durch Solarnutzung ist als unerheblich einzustufen.

***Tabelle 9.8: Phosphorwerte im Epilimnion für die Kennwerte des Istzustandes***

| | Istzustand ohne Solarnutzung | Istzustand Solarnutzung Variante 1 | Istzustand Solarnutzung Variante 2 |
|---|---|---|---|
| Mittelwert [mg/l] | 0,012 | 0,010 | 0,011 |
| Maximum [mg/l] | 0,028 | 0,028 | 0,028 |
| Minimum [mg/l] | 0,006 | 0,005 | 0,006 |
| 75 Perzentil [mg/l] | 0,014 | 0,012 | 0,013 |
| 25 Perzentil [mg/l] | 0,009 | 0,008 | 0,009 |

### 9.2.4 Chlorophyll-a Gehalte

Die in der Abbildung 9.8 dargestellten Prognoseergebnisse für die Chlorophyllgehalte im Seewasser als Kennwert der Algenentwicklung weisen nur geringe Unterschiede zwischen den untersuchten Varianten aus. Die Simulationswerte liegen im Grenzbereich vom oligotrophen zum mesotrophen Status und weisen den See als nährstoffarm aus.

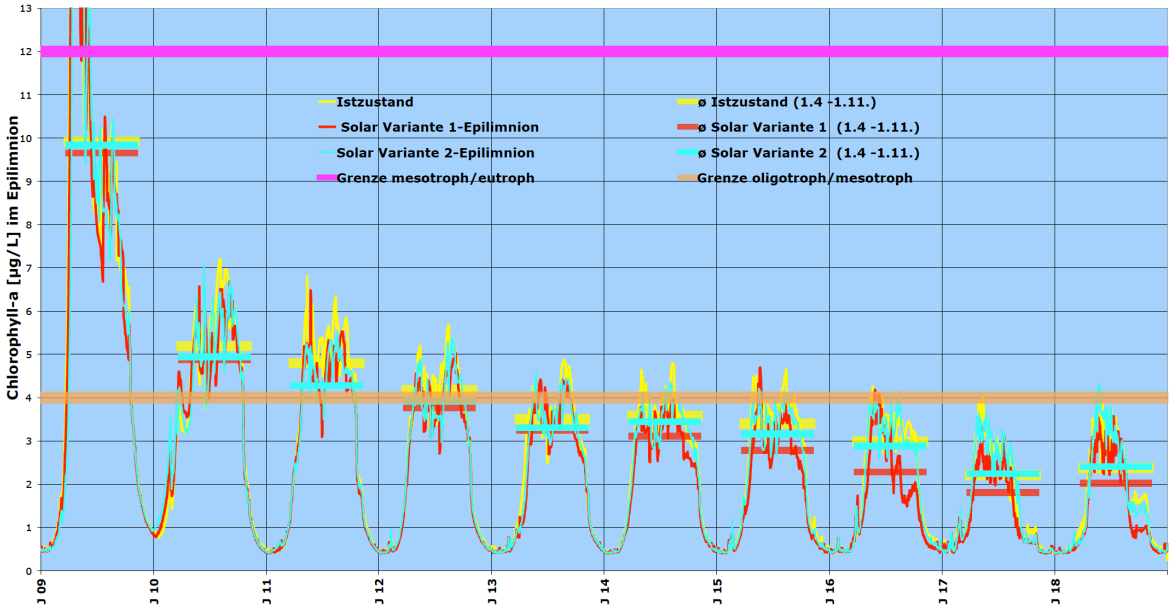



***Abbildung 9.8: Simulation der Chlorophyll-a Werte unter Bezug auf die Kennwerte des Istzustandes mit den Klimadaten vom 1.1.2009 bis zum 31.12.2018 (Tageswerte)***

Tendenziell ergeben sich für die Variante 1 die geringsten Chlorophyll-a Gehalte. Wie bei der Diskussion der Phosphorwerte (Kapitel 9.2.3) schon angesprochen, ist bei einer stärkeren Beschattung das Entwicklungspotential für Algen geringer, so dass die Abschattungsfunktion der Solarmodule das Algenwachstum vermindert. Auch die Variante 2 weist trotz der im Vergleich zur Variante 1 geringeren Beschattung noch eine minimal geringer Algenentwicklung auf als der Istzustand ohne Solarnutzung.

Insgesamt sind die Unterschiede aber gering, so dass nicht von erheblichen Unterschieden ausgegangen werden kann, die sich aus der die Exposition der Solarmodule ergeben. Generell ist zu berücksichtigen, dass die Auskiesungstätigkeit durch Trübung und Vollumwälzung das Algenwachstum hemmt.

***Tabelle 9.9: Saisonmittelwerte der Chlorophyll-a Gehalte des Epilimnions im Istzustand***

| | Istzustand ohne Solarnutzung | Istzustand Solarnutzung Variante 1 | Istzustand Solarnutzung Variante 2 |
|---|---|---|---|
| Mittelwert [Chl-a µg/l] | 4,21 | 3,78 | 4,04 |
| Maximum [Chl-a µg/l] | 9,91 | 9,65 | 9,84 |
| Minimum [Chl-a µg/l] | 2,21 | 1,81 | 2,24 |
| 75 Perzentil [Chl-a µg/l] | 4,80 | 4,28 | 4,28 |
| 25 Perzentil [Chl-a µg/l] | 2,98 | 2,28 | 2,88 |

### 9.2.5 Cyanobakterienentwicklung

Während der Auskiesung ist von einem geringen Entwicklungspotential für Cyanobakterien im Seewasser auszugehen (vgl. Abbildung 9.9). Hierfür sind die insgesamt geringen Nähr-

stoffgehalte im Seewasser, aber auch die auskiesungsbedingten Turbulenzen verantwortlich.

Die Solarnutzung reduziert durch die erhöhte Beschattungsfunktion die Cyanobakterienentwicklung zusätzlich.

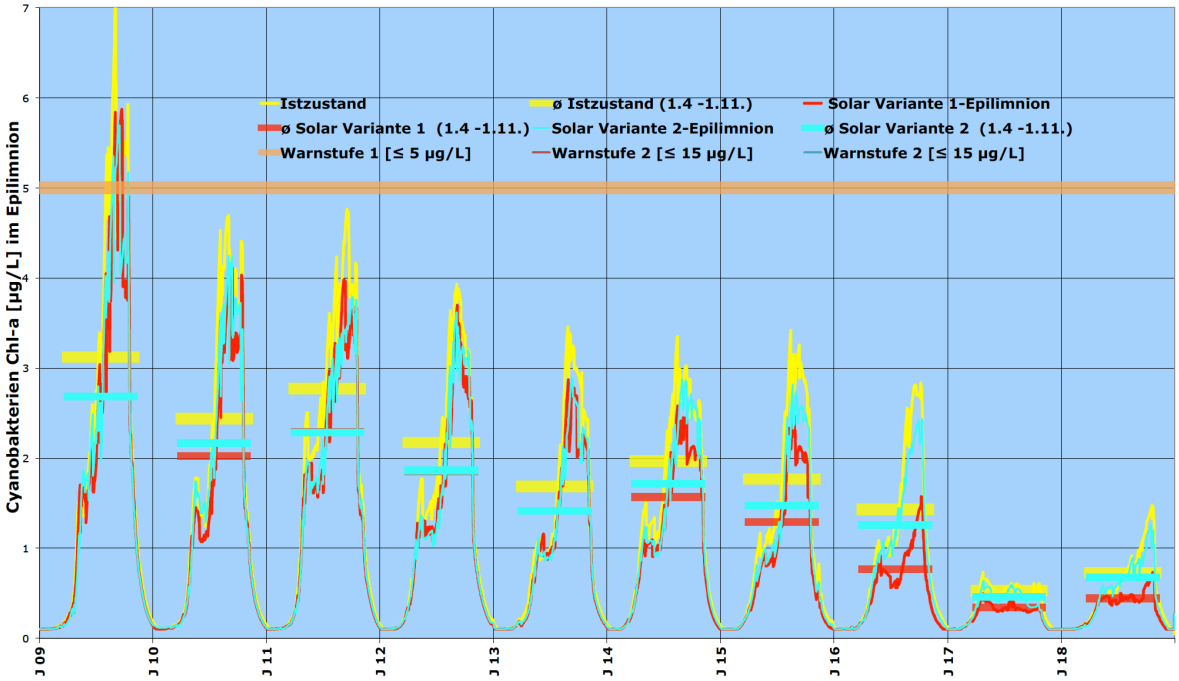



***Abbildung 9.9: Simulation der Cyanobakterien-Gehalte unter Bezug auf die Kennwerte des Istzustandes mit den Klimadaten vom 1.1.2009 bis zum 31.12.2018 (Tageswerte)***

Tendenziell weist die Variante 1 die geringsten Cyanobakterien-Entwicklungen auf (vgl. Tabelle 9.10). Insgesamt sind die Werte aber für alle Varianten sehr gering. Folglich ist durch die Solarnutzung auch bezüglich des Badebetriebes während der Auskiesungsphase keine negative Beeinträchtigung zu erwarten.

***Tabelle 9.10: Saisonmittelwerte der Cyanobakterien-Gehalte des Epilimnions im Istzustand***

| | Istzustand ohne Solarnutzung | Istzustand Solarnutzung Variante 1 | Istzustand Solarnutzung Variante 2 |
|---|---|---|---|
| Mittelwert [Chl-a µg/l] | 1,86 | 1,47 | 1,60 |
| Maximum [Chl-a µg/l] | 3,12 | 2,68 | 2,69 |
| Minimum [Chl-a µg/l] | 0,53 | 0,34 | 0,46 |
| 75 Perzentil [Chl-a µg/l] | 2,44 | 2,02 | 2,17 |
| 25 Perzentil [Chl-a µg/l] | 1,43 | 0,77 | 1,26 |

## 9.3 Genehmigungszustand

Für den Genehmigungszustand wird davon ausgegangen, dass die Auskiesung soweit abgeschlossen ist, dass daraus entstehende Umwälzungseffekte, die im Istzustand wirksam sind, nunmehr fehlen.

Das kann eine Verstärkung güterelevanter Auswirkungen der Maßnahme zur Folge haben.

Dieser Effekt der Auskiesungstätigkeit auf die Wasserbeschaffenheit wird im Rahmen der Modellierungen berücksichtigt.

### 9.3.1 Temperaturhaushalt

Auch im Genehmigungszustand ist für die Varianten mit Solarnutzung wie auch ohne Solarnutzung von einer Volldurchmischung des Sees während des Winterhalbjahres und einer Stratifizierung im Sommer auszugehen (vgl. Abbildung 9.10).

Nach dem Wegfall der Beeinflussungen durch die Baggertätigkeit ist mit einer generellen Erhöhung der Wassertemperaturen im Epilimnion zu rechnen, die ohne energetische Nutzung am stärksten ausfällt.

Die Erwärmung unter den Solarpanelen ist für beide Varianten geringer, wobei, wie auch im Istzustand, für die Variante 2 die niedrigsten epilimnischen Wassertemperaturen ermittelt werden.

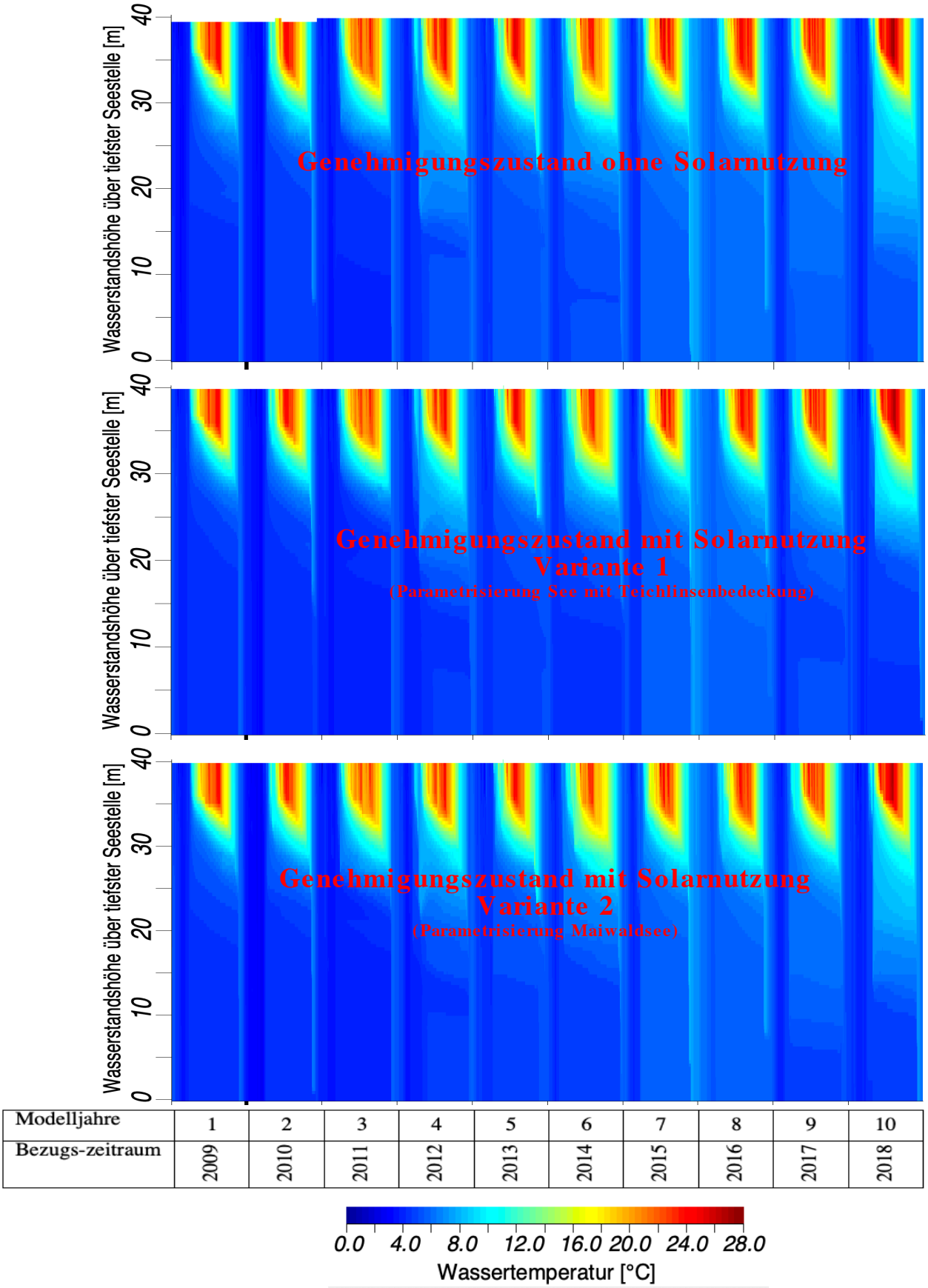



*Abbildung 9.10: Temperatursimulation unter Bezug auf die Kennwerte des Genehmigungszustandes mit den Klimadaten vom 1.1.2009 bis zum 31.12.2018 (Tageswerte)*

Auch nach Abschluss der Kiesgewinnung ergeben sich durch die Solarnutzung nur geringe Einwirkungen auf die Wassertemperatur im Epilimnion (vgl. Abbildung 9.11).

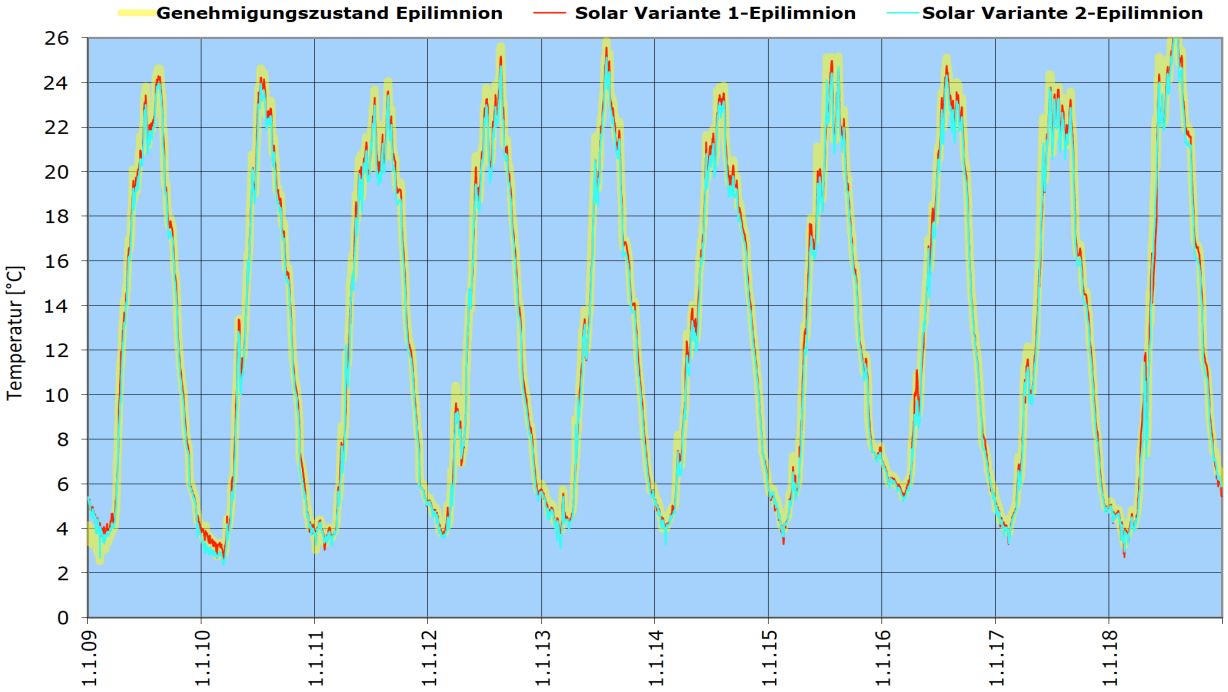



***Abbildung 9.11: Temperaturwerte der Simulation des Genehmigungszustandes im Epilimnion***

Unter Bezug auf die Mittelwerte verursacht die Solarnutzung eine Verringerung der Wassertemperaturen im Epilimnion um 0,2 °C bei Variante 1 bzw. 0,5 °C bei Variante 2 (vgl. Tabelle 9.11). Der Eingriff in den Temperaturhauhalt des Epilimnions durch Solarnutzung ist folglich auch nach abgeschlossener Auskiesung als gering einzustufen.

***Tabelle 9.11: Wassertemperaturen im Epilimnion für die Kennwerte des Genehmigungszustandes***

| | Istzustand ohne Solarnutzung | Istzustand Solarnutzung Variante 1 | Istzustand Solarnutzung Variante 2 |
|---|---|---|---|
| Mittelwert [°C] | 12,95 | 12,75 | 12,46 |
| Maximum [°C] | 27,52 | 27,19 | 26,91 |
| 75 Perzentil [°C] | 20,02 | 19,60 | 19,28 |
| 25 Perzentil [°C] | 5,87 | 5,70 | 5,56 |

Die für das tiefere Hypolimnion berechneten Temperaturwerte (vgl. Abbildung 9.12) zeigen allerdings, dass es ohne die auskiesungsbedingten Zirkulationsströmungen zu einer Verschlechterung des Zirkulationsverhaltens kommen kann. Die Temperaturschwankungen im grundnahen Seewasser verweisen aber darauf, dass der See immer vollständig zirkuliert.

Mögliche Beeinträchtigungen wären ohne erheblichen Aufwand mittels anlagengebundener, technischer Mittel zu kompensieren.

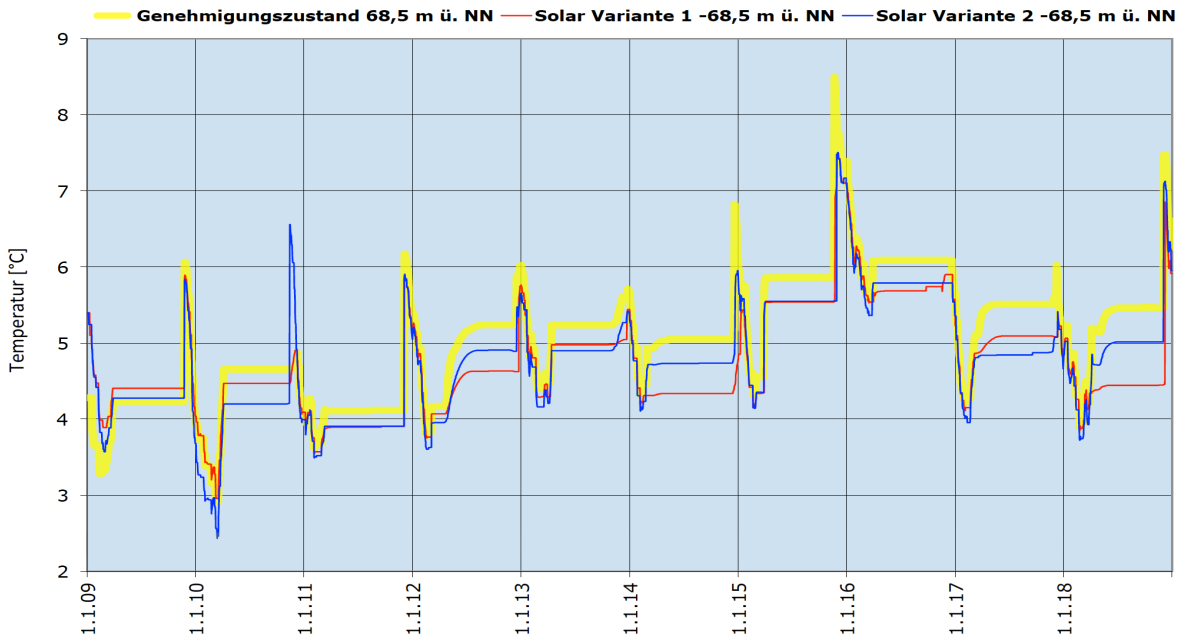



***Abbildung 9.12: Temperaturwerte der Simulation des Genehmigungszustandes im tiefen Hypolimnion***

Wie die statistischen Kennwerte in der Tabelle 9.12 ausweisen, ist nutzungsbedingt nicht mit einer starken Absenkung der hypolimnischen Wassertemperaturen zu rechnen. Die Habitatqualität als winterlicher Ruheraum für Fische wird nicht beeinträchtigt.

***Tabelle 9.12: Wassertemperaturen im tiefen Hypolimnion für die Kennwerte des Genehmigungszustandes***

| | Istzustand ohne Solarnutzung | Istzustand Solarnutzung Variante 1 | Istzustand Solarnutzung Variante 2 |
|---|---|---|---|
| Mittelwert [°C] | 5,05 | 4,74 | 4,77 |
| Maximum [°C] | 8,49 | 7,50 | 7,50 |
| Minimum [°C] | 2,91 | 2,96 | 2,43 |
| ΔMin/Max [°C] | 5,58 | 4,54 | 5,07 |
| 75 Perzentil [°C] | 5,51 | 5,09 | 5,05 |
| 25 Perzentil [°C] | 4,31 | 4,34 | 4,20 |

Der Eingriff in den Temperaturhauhalt des tieferen Hypolimnions durch die geplante Solarnutzung ist für den Philippsee auch im Genehmigungszustand als unerheblich einzustufen.

### 9.3.2 Sauerstoffhaushalt

Nach Abschluss der Auskiesung ist ebenfalls mit einer guten Sauerstoffversorgung des Sees zu rechnen, die durch die geplante Solarnutzung kaum und güteneutral verändert wird (vgl. Abbildung 9.13). Wie in den meisten tiefen Baggerseen nach dem Ende der Kiesgewinnung kommt es auch im Untersuchungsgewässer zu einer Abnahme der Sauerstoffwerte, die Mindestanforderungen für den Sauerstoffhaushalt von 2 mg/l über mindestens 30 % der maximalen Wassertiefe (vgl. Kapitel 4.1) werden aber immer erreicht.

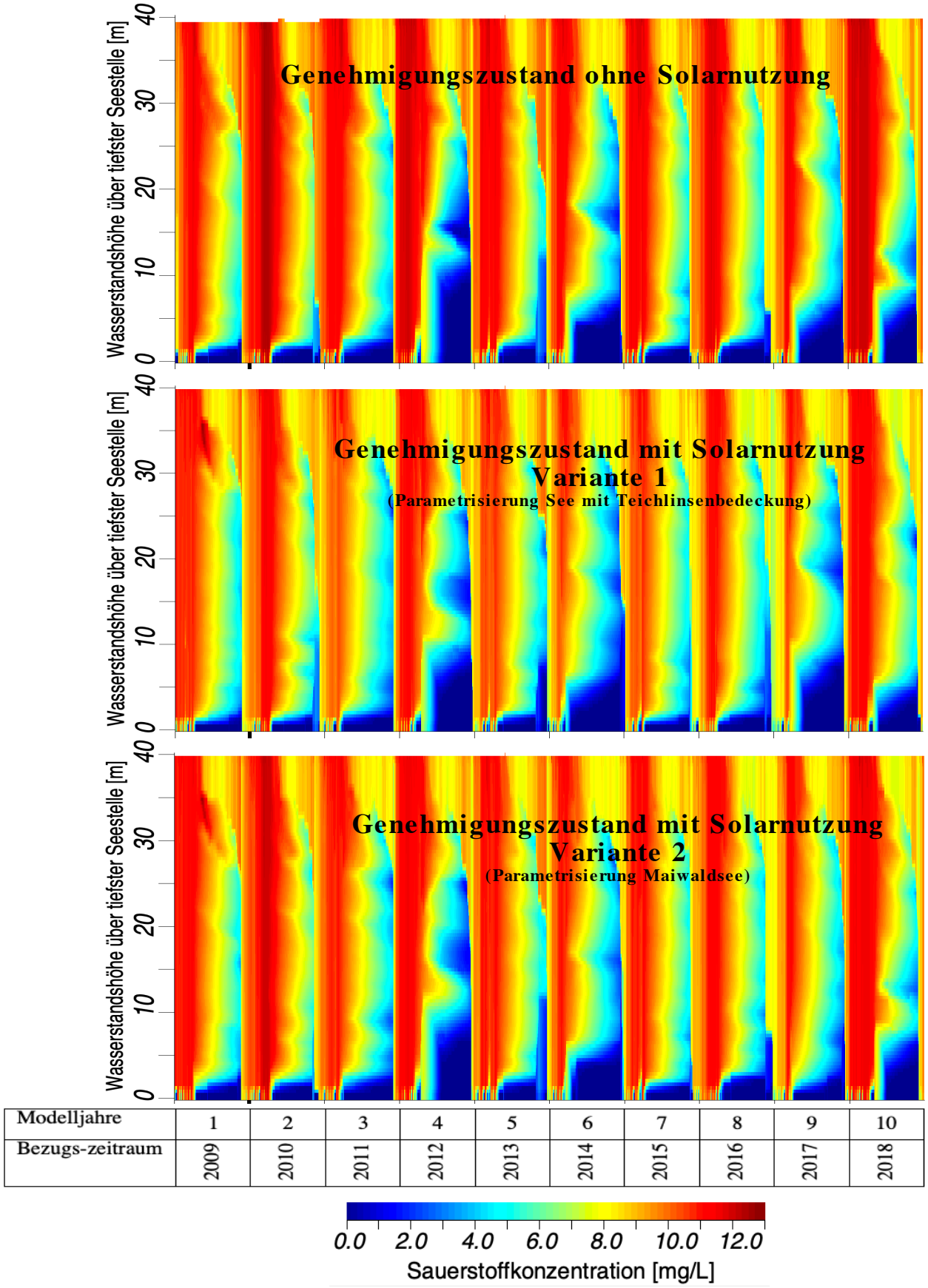



*Abbildung 9.13: Sauerstoffsimulation unter Bezug auf die Kennwerte des Genehmigungszustandes mit den Klimadaten vom 1.1.2009 bis zum 31.12.2018 (Tageswerte)*

Im Vergleich zu den Berechnungen mit den Kennwerten des Istzustandes (vgl. Kapitel 9.2.2) ergeben sich etwas stärkere nutzungsbedingte Auswirkungen auf den Sauerstoffhaushalt im Epilimnion (vgl. Abbildung 9.14). Trotzdem ist auch ohne die auskiesungsbedingte Wasserzirkulation für sämtliche Varianten stets von einer guten Sauerstoffversorgung des epilimnischen Wasserkörpers auszugehen.

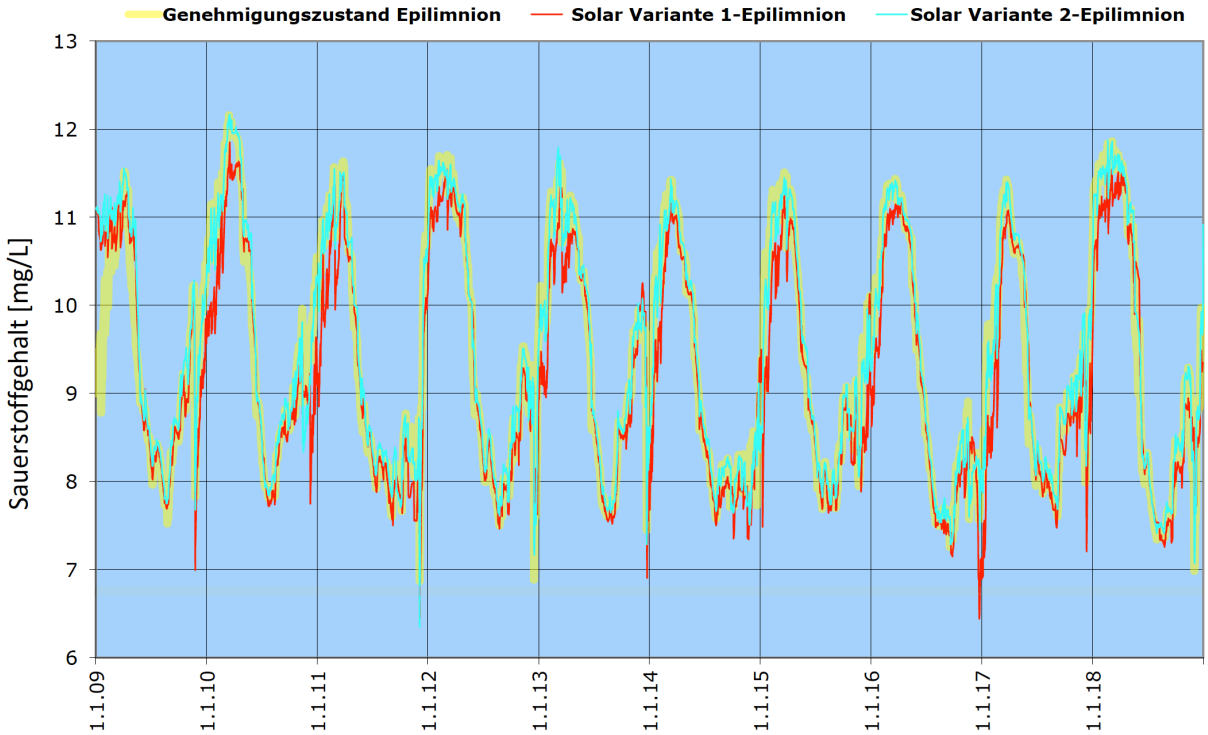



*Abbildung 9.14: Sauerstoffwerte der Simulation des Genehmigungszustandes im Epilimnion*

Wie auch die statistischen Kennwerte in der Tabelle 9.13 ausweisen, bleiben die Beeinflussungen des Sauerstoffhaushaltes im Epilimnion im Genehmigungszustand ebenfalls gering und können als unerheblich eingestuft werden.

*Tabelle 9.13: Sauerstoffgehalte im Epilimnion für die Kennwerte des Genehmigungszustandes*

| | Einheit | Istzustand ohne Solarnutzung | Istzustand Solarnutzung Variante 1 | Istzustand Solarnutzung Variante 2 |
|---|---|---|---|---|
| Mittelwert [mg/l] | mg/L | 9,42 | 9,23 | 9,47 |
| Maximum [mg/l] | mg/L | 12,16 | 11,85 | 12,17 |
| Minimum [mg/l] | mg/L | 6,87 | 6,44 | 6,34 |
| 75 Perzentil [mg/l] | mg/L | 10,70 | 10,53 | 10,81 |
| 25 Perzentil [mg/l] | mg/L | 8,24 | 8,15 | 8,30 |

Auch im Tiefenwasserkörper gehen die Sauerstoffgehalte nach Abschluss der Auskiesung im Vergleich zum Istzustand (vgl. Kapitel 9.2.2) zurück. Der Leitbildwert (vgl. Kapitel 4.1), demzufolge der Sauerstoffgehalt über Grund in einem Bereich von höchstens 30 % der maximalen Seetiefe unter 2 mg/l fallen sollte (Grenzlinie hier bei 77.5 m ü.NN) wird aber eingehalten (vgl. Abbildung 9.15).

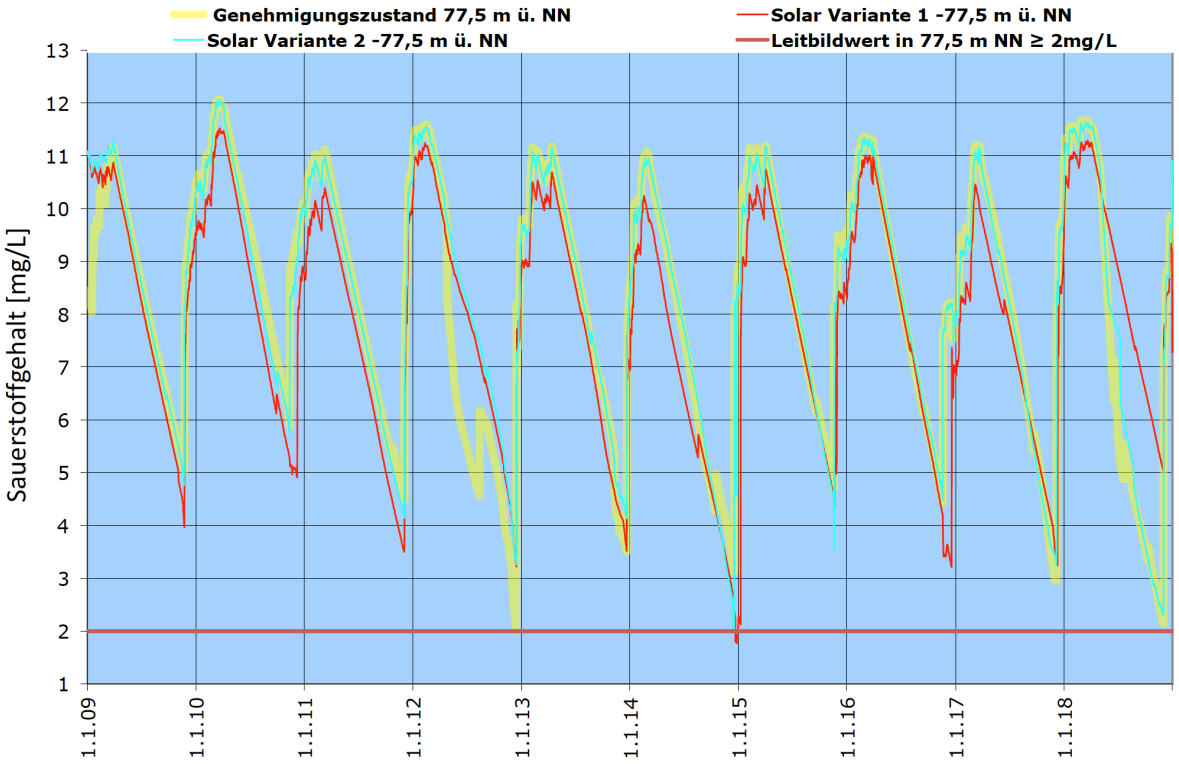



***Abbildung 9.15: Sauerstoffwerte der Simulation des Genehmigungszustandes im Hypolimnion***

Die tabellarisch dargestellten Werte (Tabelle 9.14) zeigen, dass vorhabensbedingt keine Erheblichkeitsschwelle erreicht wird. Bei tieferen Seen mit höherer Überdeckung (>> 25%) können sich aber, insbesondere wenn kein Energieeintrag z.B. durch Baggertätigkeit erfolgt, negative Effekte ergeben, die jedoch durch die Verbesserung des Zirkulationsverhaltens z.B. mit einem Rührwerk einfach zu kompensieren wären.

Im Untersuchungsgewässer sind auch nach Abschluss der Kiesentnahme die Auswirkungen der geplanten Nutzung auf den Sauerstoffhaushalt des Hypolimnions als unerheblich einzustufen.

***Tabelle 9.14: Sauerstoffgehalte im Hypolimnion für die Kennwerte des Genehmigungszustandes***

| | Einheit | Istzustand ohne Solarnutzung | Istzustand Solarnutzung Variante 1 | Istzustand Solarnutzung Variante 2 |
|---|---|---|---|---|
| Mittelwert | mg/L | 8,22 | 7,91 | 8,33 |
| Maximum | mg/L | 12,07 | 11,53 | 12,06 |
| Minimum | mg/L | 2,01 | 1,76 | 1,96 |
| 75 Perzentil | mg/L | 10,36 | 9,79 | 10,40 |
| 25 Perzentil | mg/L | 6,22 | 6,21 | 6,63 |

# 10 Weitere Beeinflussungsfaktoren

## 10.1 Entwicklung benthischer (am Substrat haftender) Cyanobakterien

Die Schwimmkörper werden von benthischen Gewässerorganismen als Substrat (Aufwuchsflächen) genutzt. Neben den in den Baggerseen dominanten Muscheln, hier insbesondere den beiden Dreissena- oder Zebramuschelarten (*Dreissena polymorpha* und *Dreissena rostriformis bugensis*), bieten die Schwimmkörper auch anderen Gewässerorganismen Aufwuchsflächen. Von besonderer Bedeutung sind dabei benthisch lebendende Cyanobakterienarten (u.a. Oszillatoria-Arten). In diesem Zusammenhang sind Arten der Gattungen *Lyngbya, Oscillatoria, Phormidium* und *Tychonema* zu nennen, da diese zur Beeinträchtigung der Badegewässernutzung führen können.

Am Tegeler See und am Schlachtensee kam es nach erfolgreicher Seesanierung und Senkung der Phosphorkonzentrationen unter 0,025 mg/L Pgesamt nicht mehr zur Massenentwicklung von planktischen Cyanobakterien (Chorus et al. 2011). Allerdings trat in den letzten Jahren (ab 2017) am Tegeler See eine benthische Cyanobakterienart auf. Es handelt sich um *Tychonema spp.* eine Oszillatorienart, die am Tegeler See in Wassermoosbeständen (*Fontinalis antipyretica*) als Aufwuchs höhere Dichten erreicht und sehr starke Toxine bildet. Insbesondere Hunde, die das fischig-faulig riechende Wasser getrunken haben, sind daran gestorben.

Ähnlich wie *Tychonema* entwickeln sich benthische Arten auch bei geringen Nährstoffgehalten. Die benthische Lebensweise bietet im nährstoffärmeren Milieu den Vorteil, da durch das vorbeiströmende Wasser eine bessere Nährstoffversorgung gegeben ist als bei planktischer Lebensweise, wobei die Cyanobakterien mit dem Wasser verdriftet werden.

Aufgrund der geringen Nährstoffgehalte im Philippsee und der ungünstigen Lichtverhältnisse unter den abgeschatteten Schwimmkörpern ist nicht mit einem erheblichen Aufkommen benthischer Cyanobakterien zu rechnen. Trotzdem ist dies nicht auszuschließen und sollte in das Gewässermonitoring aufgenommen werden.

Die Beseitigung des Aufwuchses auf mechanische Weise (Wasserstrahl) oder mittels Licht (UV-Strahlung) auch in automatisierter Form ist relativ einfach umzusetzen.

## 10.2 Entwicklung von Schwachlicht Arten (*Planktothrix rubescens*)

Die Burgunderblutalge Art (*Planktothrix rubescens)* kommt in den meisten Voralpenseen, aber auch in einigen Baggerseen der Oberreineben vor. Sie kann auch in großer Seetiefe unter ungünstigen Lichtverhältnissen Photosynthese betreiben und hat denzufolge gegenüber anderen Arten einen Konkurrenzvorteil. Beispielsweise beeinträchtigt diese Art im mesotrophen Zürichsee die Trinkwassergewinnung, da sie sich in ca. 40 Meter Wassertiefe einschichtet und in die Trinkwasserfassungen gelangt.

*Planktothrix rubescens* kommt in sehr geringen Individuendichten auch im Philippsee vor. Eine Begünstigung dieser Art unter den Solarmodulen ist nicht zu erwarten, da diese nur einen geringen Überdeckungsgrad von 15% der Seefläche aufweisen und die Strömungsverhältnisse im See so stark sind, dass diese Art hier den Konkurrenzvorteil als Schwachlichtart nicht nutzen kann.

## 10.3 Beeinflussung des Grundwassers durch Cyanotoxine

Sowohl im Istzustand als auch im Genehmigungszustand nach Abschluss der Auskiesung sind nur geringe Phytoplanktonentwicklungen einschließlich des Cyanobakterienaufkommens zu erwarten. Eine Belastung des Grundwassers insbesondere des Trinkwasserschutzgebietes im Abstrom des Philippsees ist auszuschließen, da sich Cyanotoxine sehr schnell abbauen und die Fließzeit des seeabstromigen Grundwassers bis zum Grundwasserschutzgebiet mehrere Jahre beträgt.

So erfolgt der Abbau der Microcystine innerhalb weniger Tage (https://toxische-cyanobakterien.de/hintergrundinformation/cyanotoxine/).

Bei Cylindrospermopsin kann der biochemische Abbau deutlich länger dauern, diese Toxine treten allerdings in Europa sehr selten auf. Auch hier stellt die lange Fließzeit des Grundwassers eine sichere Barrierefunktion dar.

Für weitere Toxine wie Anatoxin, Lyngbiatoxin und Nodularin (primär brackisch) standen keine Angaben in Bezug auf die Abbaurate zur Verfügung.

## 10.4 Belastung des Wassers durch Mikroplastik

Veröffentlichte Untersuchungen zur Belastung von Seen durch Mikroplastik, das aus Schwimmköpern von Solaranlagen freigesetzt wird, existieren nicht. Ein Angabe zur Stofffreisetzung aus Bojen und Fendern, die am ehesten mit den Schwimmkörpern vergleichbar sind, sind bei (Bertling et al. 2018) zu finden. Danach ergibt sich nur eine minimale Belastung durch die entsprechenden Materialien.

In einer für den Schwimmkörperhersteller (Zimmermann PV-Floating) durchgeführten Untersuchung konnte im Rahmen von Abrasionstests keine Mikroplastikfreisetzung festgestellt werden. Die Untersuchungsergebnisse lagen allerdings nur als Power-Point Präsentation vor.

# 11 Zusammenfassende Darstellung der Vorhabens-auswirkungen für den Philippsee

Auf Basis der Modelluntersuchungen wurde berechnet, inwieweit sich durch die Solarnutzung Beeinträchtigungen der Seewasserbeschaffenheit im Philippsee ergeben. Dabei wurden zwei Phasen berücksichtigt:

- Istzustand mit besehender Auskiesungstätigkeit und
- Genehmigungszustand nach Aufgabe der Auskiesungstätigkeit

Außerdem wurden hinsichtlich der Beeinflussung meteorologischer Wirkgrößen zwei Varianten (vgl. Kapitel 9.1) untersucht, die zum einen an einem natürlichen Referenzgewässer mit starker Teichlinsenüberdeckung (Variante 1) und an einem Baggersee mit Solarnutzung (Variante 2).

In der Tabelle 11.1 wird für den Istzustand und den Genehmigungszustand unter Bezug auf die Modellberechnungen (Modell) und die gesichtete Literatur (Lit.) dargelegt, ob und inwieweit bei der gewählten Nutzungsintensität (15 % Seeüberdeckung durch Solarmodule) Erheblichkeitsschwellen überschritten werden.

***Tabelle 11.1: Zusammenfassende Bewertung vorhabensbedingter Auswirkungen***

| | Istzustand | | Genehmigungszustand | |
|---|---|---|---|---|
| | Variante 1 | Variante 2 | Variante 1 | Variante 2 |
| Rückgang der Globalstrahlung unter den Solarmodulen | 85 % | 73 % | 85 % | 73 % |
| Rückgang der Windgeschwindigkeit unter den Solarmodulen | 80 % | 23 % | 80 % | 23 % |
| Nutzungsart | in Auskiesung | | Auskiesung eingestellt | |
| **Beschreibung der anlagenbedingten Effekte bezogen auf:** | | | | |
| Zirkulationsverhalten | unerheblich (Modell & Lit.) | | unerheblich (Modell & Lit.) | |
| Temperaturhaushalt | unerheblich (Modell & Lit.) | | unerheblich (Modell & Lit.) | |
| Seeverdunstung | unerheblich (Lit.) | | unerheblich (Literatur) | |
| Sauerstoffhauhalt | unerheblich (Modell) | | unerheblich (Modell | |
| Nährstoffhaushalt sowie Algen- und Cyanobakterienentwicklung (Chl-a) | unerheblich (Modell) | | unerheblich (Modell) | |
| Entwicklung benthischer Cyanobakterien als Aufwuchs auf den Schwimmkörpern | unerheblich (Lit.) | | unerheblich (Lit.) | |
| Entwicklung von Schwachlicht-Cyanobakterien-Arten (z.B. Planktothrix rubescens) im abgeschatteten Bereich | unerheblich (Lit.) | | unerheblich (Lit.) | |
| Darstellung möglicher sekundärer Belastungen z.B. durch Antifouling, Leaching etc. | unerheblich (Lit.) | | unerheblich (Lit.) | |

Für keinen der untersuchten Parameter wurden Erheblichkeitsschwellen überschritten. Die geplante Nutzung zur Energiegewinnung im angegebenen Ausmaß kann demnach uneingeschränkt im Philippsee erfolgen.

# 12 Bewertung der Maßnahmenauswirkungen nach EU-WRRL

Das Untersuchungsgewässer ist mit einer Seeflächenausdehnung von mehr als 50 ha ein EU-WRRL Gewässer. Die Bewertung von EU-WRRL Gewässern erfolgt unter Bezug auf die in Abbildung 12.1 dargestellten Qualitätskomponenten.

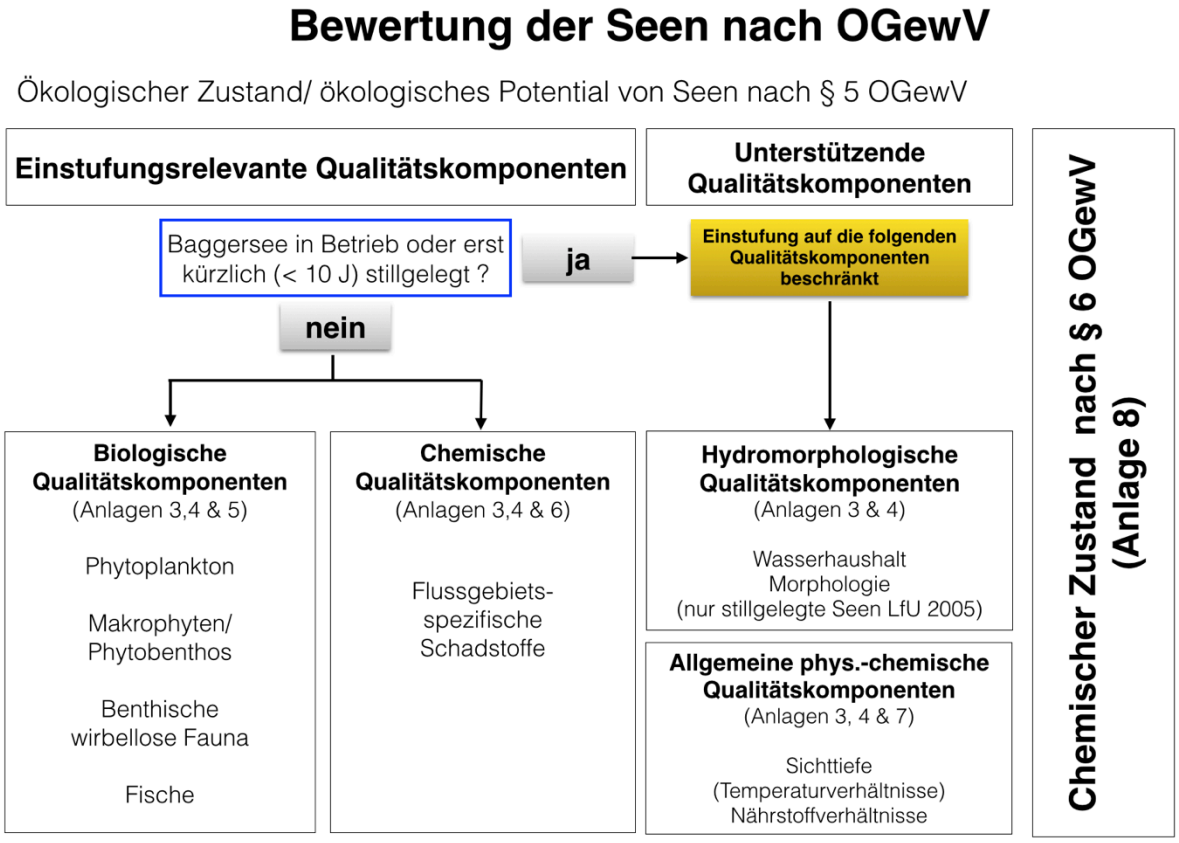



*Abbildung 12.1: Schema zur Beurteilung des betriebenen Abgrabungsgewässers nach EU-WRRL*

Leider ist mittels der EU-WRRL und der mit ihr beschriebenen Verfahrenstechniken keine Beurteilung geplanter Eingriffe möglich, da keine Methodik zur Verfügung steht, mit der vorhabensbedingte Effekte nach EU-WRRL oder OGewV Vorgaben beurteilt werden können. Viele Qualitätskomponenten lassen sich erst ca. 10 Jahre nach Beendigung der Auskiesung bewerten. Aus diesem Grunde müssen die Effekte auf die biologischen Qualitätskomponenten, wie in der Tabelle 12.1 angegeben, aus den allgemeinen physikalisch-chemischen Qualitätskomponenten abgeleitet werden.

*Tabelle 12.1: Beurteilung der Maßnahmenauswirkungen nach EU-WRRL*

| Gegenstand | Beurteilung |
|---|---|
| Biologische Qualitätskomponenten | Aufgrund der geringen Vorhabensauswirkungen für die im Modell berechneten allgemeinen phys.-chemischen Qualitätskomponenten ist ebenfalls mit geringen Beeinflussungen der biologischen Qualitätskomponenten zu rechnen. Dies betrifft insbesondere das Phyto- und Zooplankton sowie die Zusammensetzung des Makrozoobenthos. |

| | |
|---|---|
| Chemische Qualitätskomponenten (Flussgebietsspezifische Schadstoffe) | In der Anlage werden für die Schwimmkörper Kunststoffe aus High-Density Polyethylen (HDPE/ PE-HD) benutzt. Diese gelten als lebensmittelecht und werden auch bei der Trinkwassergewinnung/Aufbereitung eingesetzt. Sie gelten als unbedenklich. Insofern lassen sich hieraus keine Belastungen ableiten.<br>Bei den Metallgestellen kommen unterschiedliche Legierungen in Frage. Der Hersteller geht für die gesamte Anlage von einer Freisetzung von ca. 2 kg/J Zink aus. Die OGewV gibt als Zinkkonzentration im Sediment einen Wert von 800 mg/kg an, der nicht überschritten werden soll. Geht man von einer Seefläche 58 ha aus und einem Betrieb der Anlage von 30 Jahren, dann ist mit einer mittleren Sedimentbildungsrate von 10 bis 20 cm zu rechnen (vgl. BOOS 1998). In dieser Sedimentauflage wurde das Zink beigemischt. Bei 58 ha oder 580.000 $m^2$ Seefläche und einer Sedimentmächtigkeit aus Neubildung von 0,1 m ergibt sich bei einer Lagerungsdichte von 1,5 t/$m^3$ eine Menge von 85.500 t, die sich über 30 Jahre gebildet hat und, nach Umrechnung der Einheiten, eine mittlere Sedimentkonzentration von 0,7 mg/kg TS. Folglich entsteht keine Belastung des Sediments durch Zinkfreisetzung weder für den Istzustand mit Auskiesung noch für die verschiedenen Varianten, die aufgrund der Seevergrößerung über ein noch geringeres Belastungsniveau verfügen. |
| Hydromorphologischen Qualitätskomponenten | Die Uferform nimmt eine maßgebliche Rolle bei der hydromorphologischen Bewertung von Untersuchungsgewässern ein. Die im Rahmen des Erweiterungsvorhabens durchgeführte Uferbewertung (vgl. Boos 2021) bezieht sich auf einen maximal 50 breiten Ufersaum. Uferfernere Bereiche sind nicht mehr dem Ufer zuzuordnen und weisen eine Wassertiefe in der Regel von mehr als 10m, meist von mehr als 25 m auf. Die Anlage wird immer eine Uferdistanz von mehr als 50m erreichen, so dass sich hieraus keine Beeinträchtigungen ergeben. |
| Allgemeine chemisch-physikalische Qualitätskomponenten | Aufgrund der geringen Vorhabensauswirkungen auf die im Modell ermittelten allgemeinen phys.-chemischen Qualitätskomponenten ergeben sich bezüglich dieser Parameter keine negativen Veränderungen der Wasserbeschaffenheit. Dies gilt insbesondere für den Temperatur-, Sauerstoff- und Nährstoffhaushalt sowie die Algenentwicklung |

# 13 Beeinflussung des abstromigen Wasserschutzgebietes

Die Umsetzung der Maßnahme führt nicht zu einer Verschlechterung der Seewasserbeschaffenheit und damit auch nicht zu Beeinträchtigungen des abstromig gelegenen Wasserschutzgebietes. Die Komponenten, die eine Beeinträchtigung erfahren könnten, sind in der Tabelle 13.1 mit einer jeweiligen Bewertung aufgelistet.

***Tabelle 13.1: Auswirkungen auf das abstromige Wasserschutzgebiet***

| Komponente | Beeinflussung | Erläuterung |
|---|---|---|
| Chemische Qualitätskomponenten (Flussgebietsspezifische Schadstoffe) | Unerheblich | Für Zink liegt kein Grenzwert der TVO vor. Die WHO gibt als Leitwert eine Konzentration von 3 mg/L an. Bei einer Wasseraustauschrate für den Istzustand von 39,7 L/s oder 1,25 Mio. $m^3$/J ergibt sich unter der Voraussetzung einer Einmischung des gesamten maßnahmenbedingten Eintrags von Zink (2 kg/J) in das Seewasser (ohne Berücksichtigung der Sedimentation) eine mittlere Konzentration von 0,0015 mg/l und damit ein Wert deutlich unterhalb der Erheblichkeitsschwelle. Dieser Wert wird sich im Rahmen der Erweiterung und der damit verbundenen Zunahme der Grundwasseraustauschrate noch weiter verringern. |
| Allgemeine chemisch-physikalische Qualitätskomponenten | Unerheblich | Die allgemeinen chemisch-physikalischen Qualitätskomponenten wie Temperatur, Sauerstoff und Nährstoffe erfahren keine oder nur minimale Veränderungen, so dass sich hieraus keine negative Beeinflussung ergibt. |
| Wasserquantität | Unerheblich | Durch die teilweise Abschattung der Seefläche ergibt sich eine Verringerung der Verdunstungsrate. Diese fällt aufgrund der geringen Vorhabensauswirkungen und dem geringen Ausmaß der solaren Seenutzung mit 15 % Seeüberdeckung für den Istzustand und 10 % Seeüberdeckung für den erweiterten See entsprechend niedrig aus. |
| Beeinflussung des Grundwassers durch Cyanotoxine | Unerheblich | Die Maßnahme lässt keine Zunahme der Cyanobakterien erwarten. Ohnehin würde auf der langen, mehrere Jahre in Anspruch nehmenden Fließstrecke zwischen dem abstromigen Uferbereich und dem Wasserschutzgebiet aufgrund der geringen Halbwertzeit der Cyanobakterientoxine ein vollständiger Abbau dieser Stoffe stattfindet. |

# 14 Übertragung der Modellergebnisse auf weitere Varianten

Im Folgenden soll dargestellt werden, in welchem Maße die Modellergebnisse auch Aussagen zu den Vorhabensauswirkungen durch weitere Planvarianten erlauben. Neben dem modellierten Istzustand in Auskiesung und dem Genehmigungszustand geht es um die geplanten Erweiterungsphasen in den Betriebszuständen „in Auskiesung“ und „stillgelegt“.

Wie der Tabelle 14.1 zu entnehmen ist, ergeben sich für alle Erweiterungsvarianten keine Verschlechterungen Im Vergleich zum Istzustand und zum Genehmigungszustand. Eher ist mit einer Verringerung der Vorhabensauswirkungen zu rechnen, da infolge der vergrößerten Seefläche der Überdeckungsgrad durch die Solarmodule zurückgeht.

***Tabelle 14.1: Bewertung der Vorhabensauswirkungen in Bezug auf weitere Planvarianten***

<table>
<tr><th></th><th>Istzustand</th><th>Genehmigungszustand</th><th colspan="2">Erweiterungsbereich (Planzustand und Sicherungsfläche</th></tr>
<tr><th>Betriebsphase</th><th>in Auskiesung</th><th>stillgelegt</th><th>in Auskiesung</th><th>stillgelegt</th></tr>
<tr><td>Fläche [ha]</td><td>58</td><td>62,5</td><td>86,5</td><td>86,5</td></tr>
<tr><td>Anteil der Seeüberdeckung</td><td>15%</td><td>14%</td><td>10%</td><td>10%</td></tr>
<tr><td>Zirkulationsverhalten</td><td colspan="2">unerheblich (Modell & Lit.)</td><td colspan="2" rowspan="8">unerheblich (Übertragung), da sich durch die Verringerung des Flächenanteils der Solarnutzung auch die Vorhabensauswirkungen verringern und somit auch bei diesen Planungsvarianten das Überschreiten von Erheblichkeitsschwellen auszuschließen ist.</td></tr>
<tr><td>Temperaturhaushalt</td><td colspan="2">unerheblich (Modell & Lit.)</td></tr>
<tr><td>Seeverdunstung</td><td colspan="2">unerheblich (Lit.)</td></tr>
<tr><td>Sauerstoffhauhalt</td><td colspan="2">unerheblich (Modell)</td></tr>
<tr><td>Nährstoffhaushalt sowie Algen- und Cyanobakterienentwicklung (Chl-a)</td><td colspan="2">unerheblich (Modell)</td></tr>
<tr><td>Entwicklung benthischer Cyanobakterien als Aufwuchs auf den Schwimmkörpern</td><td colspan="2">unerheblich (Lit.)</td></tr>
<tr><td>Entwicklung von Schwachlicht-Cyanobakterien-Arten (z.B. Planktothrix rubescens) im abgeschatteten Bereich</td><td colspan="2">unerheblich (Lit.)</td></tr>
<tr><td>Darstellung möglicher sekundärer Belastungen z.B. durch Antifouling, Leaching etc.</td><td colspan="2">unerheblich (Lit.)</td></tr>
</table>

# 15 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Darstellung einer schwimmenden PV-Anlage auf dem Bomhofsplas See in Zwolle ..... 5
Abbildung 5.1: Modellbilanz der externen Phosphoreinträge in den See (Grundwasser-Belastungsvariante 2) ..... 12
Abbildung 5.2: Modellbilanz der externen Stickstoffeinträge in den See (Grundwasser-Belastungsvariante 2) ..... 12
Abbildung 6.1: Abhängigkeit des Sauerstoffhaushaltes von den Einzelkompartimenten (Abb. aus HIPSEYet. al. 2006) ..... 15
Abbildung 7.1: Trübungsausbreitung in einem Baggersee der Oberrheinebene (Foto Boos) ..... 17
Abbildung 7.2: Untersuchung der Vorhabenauswirkungen am Bomhofsplas See in Zwolle (de Lima et al. 2021). ..... 18
Abbildung 7.3: Teichlinsenüberdeckungen an der Unteren Groov (Bild Google) ..... 18
Abbildung 7.4: Direkter Auswirkungsbereich der Baggertätigkeit in einem Baggersee ..... 19
Abbildung 7.5: Verteilung mineralischer Trübung im Petersee bei Achern durch Ausgleichströmungen über den unmittelbaren Einwirkungsbereich hinaus (Luftbild Boos 2006) ..... 20
Abbildung 8.1: Verlauf der Sauerstoffwerte in der Unteren Groov (Köln) bei einer 50%-igen Seeüberdeckung durch Lemnacaeen. ..... 29
Abbildung 8.2: Verlauf der Temperaturwerte in der Unteren Groov (Köln) bei einer 50% igen Seeüberdeckung durch Lemnacaeen ..... 30
Abbildung 8.3: Gegenüberstellung von Messwerten und Modellwerten der Wassertemperatur bei unterschiedlichem Überdeckungsgrad der Seefläche mit Teichlinsen ..... 31
Abbildung 8.4: Gegenüberstellung von Messwerten und Modellwerten der Sauerstoffkonzentrationen bei unterschiedlichem Überdeckungsgrad der Seefläche mit Teichlinsen ..... 32
Abbildung 9.1: Temperatursimulation unter Bezug auf die Kennwerte des Istzustandes mit den Klimadaten vom 1.1.2009 bis zum 31.12.2018 (Tageswerte) ..... 36
Abbildung 9.2: Temperaturwerte der Simulation des Istzustandes im Epilimnion ..... 37
Abbildung 9.3: Temperaturwerte der Simulation des Istzustandes im tiefen Hypolimnion ..... 38
Abbildung 9.4: Sauerstoffsimulation unter Bezug auf die Kennwerte des Istzustands mit den Klimadaten vom 1.1.2009 bis zum 31.12.2018 (Tageswerte) ..... 39
Abbildung 9.5: Sauerstoffwerte der Simulation des Istzustandes im Epilimnion ..... 40
Abbildung 9.6: Sauerstoffwerte der Simulation des Istzustandes im Hypolimnion ..... 41
Abbildung 9.7: Phosphorsimulation unter Bezug auf die Kennwerte des Istzustandes mit den Klimadaten vom 1.1.2009 bis zum 31.12.2018 (Tageswerte) ..... 42
Abbildung 9.8: Simulation der Chlorophyll-a Werte unter Bezug auf die Kennwerte des Istzustandes mit den Klimadaten vom 1.1.2009 bis zum 31.12.2018 (Tageswerte) ..... 43
Abbildung 9.9: Simulation der Cyanobakterien-Gehalte unter Bezug auf die Kennwerte des Istzustandes mit den Klimadaten vom 1.1.2009 bis zum 31.12.2018 (Tageswerte) ..... 44
Abbildung 9.10: Temperatursimulation unter Bezug auf die Kennwerte des Genehmigungszustandes mit den Klimadaten vom 1.1.2009 bis zum 31.12.2018 (Tageswerte) ..... 46
Abbildung 9.11: Temperaturwerte der Simulation des Genehmigungszustandes im Epilimnion ..... 47
Abbildung 9.12: Temperaturwerte der Simulation des Genehmigungszustandes im tiefen Hypolimnion ..... 48
Abbildung 9.13: Sauerstoffsimulation unter Bezug auf die Kennwerte des Genehmigungszustandes mit den Klimadaten vom 1.1.2009 bis zum 31.12.2018 (Tageswerte) ..... 49
Abbildung 9.14: Sauerstoffwerte der Simulation des Genehmigungszustandes im Epilimnion ..... 50
Abbildung 9.15: Sauerstoffwerte der Simulation des Genehmigungszustandes im Hypolimnion ..... 51
Abbildung 12.1: Schema zur Beurteilung des betriebenen Abgrabungsgewässers nach EU-WRRL ..... 55

# 16 Tabellenverzeichnis

TABELLE 2.1: FLÄCHENAUSDEHNUNG DES PHILIPPSEES UND ÜBERDECKUNGSGRADE DURCH DIE PV-ANLAGE ..... 5
TABELLE 3.1: GRUNDWASSERANBINDUNG DES BAGGERSEES (GRUNDWASSERMODELL) ..... 6
TABELLE 4.1: ZUSAMMENFASSENDE BEWERTUNG DES GEWÄSSERZUSTANDES ..... 9
TABELLE 6.1: VORHABENSBEDINGTE BEEINFLUSSUNG METEOROLOGISCHE WIRKGRÖßEN ..... 13
TABELLE 6.2: MODELLKONSTANTEN ..... 15
TABELLE 7.1: VERÄNDERUNG VON BESCHAFFENHEITSKENNWERTEN BEI TEILWEISER ÜBERDECKUNG MIT TEICHLINSEN ..... 19
TABELLE 7.2: INFORMATIONSTIEFE ZUR BEURTEILUNG VORHABENSBEDINGTER BEEINFLUSSUNG METEOROLOGISCHER WIRKGRÖßEN ..... 21
TABELLE 7.3: AUSWERTUNG EINER LITERATURQUELLE (BEISPIEL) ..... 21
TABELLE 7.4: VORHABENSBEDINGTE BEEINFLUSSUNG METEOROLOGISCHER WIRKGRÖßEN (LITERATURANGABEN) ..... 26
TABELLE 7.5: VORHABENSBEDINGTE AUSWIRKUNGEN AUF DIE SEEWASSERBESCHAFFENHEIT (LITERATURANGABEN) ..... 26
TABELLE 8.1: VERÄNDERUNG VON BESCHAFFENHEITSKENNWERTEN UNTER UND AUßERHALB DER LEMNACEAEN-ÜBERDECKUNG ..... 27
TABELLE 8.2: AUSWIRKUNGEN AUF DIE METEOROLOGISCHEN WIRKGRÖßEN DURCH DIE ÜBERDECKUNG MIT TEICHLINSEN ..... 31
TABELLE 9.1: MORPHOLOGISCHE KENNGRÖßEN DES PHILIPPSEES ..... 33
TABELLE 9.2: PROZENTUALE VERÄNDERUNG METEOROLOGISCHER WIRKGRÖßEN DURCH ÜBERDECKUNG ..... 33
TABELLE 9.3: VERÄNDERUNGEN DER METEOROLOGISCHEN WIRKGRÖßEN AM UNTERSUCHUNGSGEWÄSSER (Ø 1997 BIS 2018) ..... 34
TABELLE 9.4: WASSERTEMPERATUREN IM EPILIMNION FÜR DIE KENNWERTE DES ISTZUSTANDES ..... 37
TABELLE 9.5: WASSERTEMPERATUREN IM TIEFEN HYPOLIMNION FÜR DIE KENNWERTE DES ISTZUSTANDES ..... 38
TABELLE 9.6: SAUERSTOFFGEHALTE IM EPILIMNION FÜR DIE KENNWERTE DES ISTZUSTANDES ..... 40
TABELLE 9.7: SAUERSTOFFGEHALTE IM HYPOLIMNION FÜR DIE KENNWERTE DES ISTZUSTANDES ..... 41
TABELLE 9.8: PHOSPHORWERTE IM EPILIMNION FÜR DIE KENNWERTE DES ISTZUSTANDES ..... 42
TABELLE 9.9: SAISONMITTELWERTE DER CHLOROPHYLL-A GEHALTE DES EPILIMNIONS IM ISTZUSTAND ..... 43
TABELLE 9.10: SAISONMITTELWERTE DER CYANOBAKTERIEN-GEHALTE DES EPILIMNIONS IM ISTZUSTAND ..... 44
TABELLE 9.11: WASSERTEMPERATUREN IM EPILIMNION FÜR DIE KENNWERTE DES GENEHMIGUNGSZUSTANDES ..... 47
TABELLE 9.12: WASSERTEMPERATUREN IM TIEFEN HYPOLIMNION FÜR DIE KENNWERTE DES GENEHMIGUNGSZUSTANDES ..... 48
TABELLE 9.13: SAUERSTOFFGEHALTE IM EPILIMNION FÜR DIE KENNWERTE DES GENEHMIGUNGSZUSTANDES ..... 50
TABELLE 9.14: SAUERSTOFFGEHALTE IM HYPOLIMNION FÜR DIE KENNWERTE DES GENEHMIGUNGSZUSTANDES ..... 51
TABELLE 11.1: ZUSAMMENFASSENDE BEWERTUNG VORHABENSBEDINGTER AUSWIRKUNGEN ..... 54
TABELLE 12.1: BEURTEILUNG DER MAßNAHMENAUSWIRKUNGEN NACH EU-WRRL ..... 55
TABELLE 13.1: AUSWIRKUNGEN AUF DAS ABSTROMIGE WASSERSCHUTZGEBIET ..... 57
TABELLE 14.1: BEWERTUNG DER VORHABENSAUSWIRKUNGEN IN BEZUG AUF WEITERE PLANVARIANTEN ..... 58

# 17 Literaturverzeichnis

Bertling, J.; Bertling, R.; Hamann, L. (2018): Kunststoffe in der Umwelt: Mikro- und Makroplastik. Ursachen, Mengen, Umweltschicksale, Wirkungen, Lösungsansätze, Empfehlungen. Kurzfassung der Konsortialstudie, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik Umsicht (hrsg.), Oberhausen, Juni 2018)

Boos, K.-J. (2021): Limnologisches Begleitgutachten zur UVU Kiesgrubenerweiterung Philipp & Co. KG Bad Schönborn - Fachbeitrag EU-WRRL

Boos, K.-J. (2020): Limnologisches Begleitgutachten zur UVU Kiesgrubenerweiterung Philipp & Co. KG Bad Schönborn (Mai 2020). Gutachten erstellt im Auftrag der Philipp & Co. KG Bad Schönborn.

Boos, K.-J. (1998): Zustandsbeschreibung und Restaurierungsvorschläge für den Aalkistensee bei Maulbronn, unveröffentl. Bericht im Auftrag der BNL-Karlsruhe

Chorus, I. et al. (2011): Oligotrophication of Lake Tegel and Schlachtensee, Berlin - Analysis of system components, causalities and response thresholds compared to responses of other waterbodies, UBA Texte 45/2011, http://www.uba.de/uba-info-medien-e/4144.html.

Cui, Yang et al. (2016): Modeling the response of phytoplankton to reduced external nutrient load in a subtropical Chinese reservoir using DYRESM-CAEDYM, Lake and Reservoir Management, 32:2, 146-157, DOI: 10.1080/10402381.2015.1136365

De Lima, R.L.P et al. (2021): In-Situ Water Quality Observations under a Large-Scale Floating Solar Farm Using Sensors and Underwater Drones. Sustainability 2021, 13, 6421. https://doi.org/10.3390/su13116421

Exley, G. et al. (2021): Floating photovoltaics could mitigate climate change impacts on water body temperature and stratification. Solar Energy 219 (2021) 24–33

Haas, J. et al. (2019): Floating photovoltaic plants: Ecological impacts versus hydropower T operation flexibility. Energy Conversion and Management Volume 206, 15 February 2020, 112414. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112414

Hipsey, M.R. et al. (2006): Computational Aquatic Ecosystem Dynamics Model: CAEDYM v2. v2.3 Science Manual. Centre for Water Research, University of Western Australia

Ilgen, K. (2021): Der Einfluss eines schwimmenden Solarkraftwerks auf die Thermik und Ökologie eines Baggersees. Masterarbeit im Fach Hydrologie der Universität Freiburg in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme.

LAWA - Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (1998): Zielvorgaben zum Schutz oberirdischer Binnengewässer, Bd. 2 - Ableitung und Erprobung von Zielvorgaben zum Schutz oberirdischer Binnengewässer für die Schwermetalle Blei, Cadmium, Chrom. Kupfer, Nickel, Quecksilber und Zink, Berlin

LAWA - Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (2003): Vorläufige Richtlinie für eine Erstbewertung von Baggerseen nach trophischen Kriterien, Berlin: Kulturbuch-Verlag

Lewis, D.M. et al. (2001): Numerical simulation of surface mixers used for destratification of reservoirs, International Congress on Modelling and Simulation, MODSIM 2001, 311-317

LfU - Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2004): Kiesgewinnung und Wasserwirtschaft - Empfehlungen für die Planung und Genehmigung des Abbaues von Kies und Sand, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie 88), Karlsruhe, 104 S.

Mathijssen, D. et al. (2020): Water Practice & Technology Vol 15 No 3. doi: 10.2166/wpt.2020.062. http://iwaponline.com/wpt/article-pdf/15/3/807/745404/wpt0150807.pdf

Mietz, O., H. Vietinghoff & I. Gabrysch (1995): Statistische Untersuchung zur Auswahl, Wichtung und zum Abgleich von Parametern innerhalb eines Klassifikationsansatzes für deutsche Seen sowie die regionale und typenbezogene Differenzierung der Seen in diesem Ansatz, Endbericht zu dem DVWK- Forschungsauftrag, Potsdam, 36 S.

Özkundakci, D. et al. (2011): Modelling the response of a highly eutrophic lake to reductions in external and internal nutrient loading, New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research, 45:2, 165-185, DOI: 10.1080/00288330.2010.548072

OGewV (2016): Verordnung zum Schutz von Oberflächengewässern (Oberflächengewässerverordnung) vom 20. Juni 2016

Robinson, S & A. Meindl (2019): Potential for leaching of heavy metals and metalloids from crystalline silicon photovoltaic systems. Journal of Natural Resources and Development 2019; 09: 19- 24.

Schäfer (2015): Grundwassermodell für den Bereich des ZV Gruppenwasserversorgung Hohberg (Gemeinde Östringen, Kreis Karlsruhe) und des WGZ Hardtwald (Gemeinde St. Leon-Rot, Rhein-Neckar-Kreis) - Zwischenbericht

Schäfer (2020): Modellrechnungen für den Baggersee der Fa. Philipp & Co KG (Gemarkung Langenbrücken)

TrinkwV (2001): Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch (Trinkwasserverordnung - TrinkwV 2001)

UBA (2015): Empfehlung zum Schutz von Badenden vor Cyanobakterien-Toxinen. Bundesgesundheitsbl 2015· 58: 908–920 DOI 10.1007/s00103-015-2192-8 Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015

# 18 Anhang

## Literaturquelle 1

| | | |
|---|---|---|
| 1 | De Lima, R.L.P.; Paxinou, K.; C. Boogaard, F.; Akkerman, O.; Lin, F.-Y. In-Situ Water Quality Observations under a Large-Scale Floating Solar Farm Using Sensors and Underwater Drones. Sustainability 2021, 13, 6421. https://doi.org/10.3390/su13116421 | |
| 2 | Seetyp, Gewässernutzung und Untersuchungsschwerpunkt | In Auskiesung befindlicher Baggersee (Bomhofsplas See bei Zwolle. Fläche 63 ha, Tmax= 35m, Überdeckung durch PV-Module 18,25 ha, Überdeckungsgrad 29%). Untersucht wird im Rahmen einer **empirischen Studie** der Effekt, den Solarmodule auf einen noch in Auskiesung befindlichen Baggersee ausüben. |
| 3a | Berücksichtigung hydrodynamischer Prozesse bei der Bewertung der Einflussgrößen | Untersucht wurden Temperatur, $O_2$-Gehalt sowie Leitfähigkeit im Freiwasserkörper und unter den Solarmodulen. Auf die Auswirkungen hydrodynamischer Effekte, die zum Ausgleich der Wertedifferenzen unter den Solarmodule und im Freiwasserkörper führen, wurde nicht eingegangen. |
| 3b | Erfassung maskierender Einflussgrößen | Auf Einflussgrößen der Kiesgewinnung, welche die vorhabensbedingten Effekte maskieren können, wurde nicht eingegangen |
| 3c | Quantifizierung der primären met. Wirkgrößen | Es werden keine Angaben zur Beeinflussung meteorologischer Wirkgrößen gemacht. |
| 4a | Temperaturhaushalt, Zirkulations- und Schichtungsverhalten | Die Änderungen zwischen Referenzpunkt im Freiwasserköper und Messstelle unterhalb der PV Anlage sind bei den Temperatur- und Leitfähigkeitswerten sehr gering. Temperaturhaushalt, Leitfähigkeit und Einschichtungsverhalten sind folglich von der Maßnahme nur in geringem Umfang betroffen. |
| 4b | Sauerstoffhaushalt (Auswirkungen durch veränderte physikalische und biogene Belüftung) | Die Standortunterschiede der Sauerstoffwerte legen nahe, dass durch die Anlage eine Minderung der Sauerstoffwerte infolge geringerer physikalischer Belüftung und geringerem biogenem Sauerstoffeintrag verursacht wird. Die insgesamt aber immer noch hohen Sauerstoffwerte im See lassen nicht auf eine starke Überformung des noch in Auskiesung befindlichen Baggersees schließen. |
| 4c | Ab- und Umbauvorgänge im Wasserkörper (Gewässergüte | Nicht untersucht |
| 4d | Entwicklung des Besiedlungsbildes insbesondere von Makrophyten und Phytoplankton | Nicht untersucht |
| 4e | Entwicklung von Cyanobakterien | Nicht untersucht |
| 4f | Freisetzung von Mikroverunreinigungen | Nicht untersucht |
| 5 | Informationsgehalt und Nutzbarkeit für die Aufgabenstellung | Die Studie stellt eine umfangreiche Erhebung physikalischer Kennwerte an einem bestehenden See mit intensiver Nutzung durch SPV Anlagen dar, die den direkten Einwirkungsbereich der SPV Anlage erfasst. Nicht untersucht wurde der Nährstoffhaushalt mit den Trophiemerkmalen (C-N-P) oder biotischen Parametern wie Algen- und Wasserpflanzenentwicklung. Eine Bewertung der Vorhabensauswirkungen ist nur eingeschränkt möglich, da sich die Untersuchung auf Standortunterschiede an nur einem Gewässer beschränkt und die zwischen den Standorten stattfindenden Austauschprozesse keine Berücksichtigung finden. |

# Literaturquelle 2

| | | |
|---|---|---|
| 1 | Giles Exley , Alona Armstrong , Trevor Page, Ian D. Jones (2021): Floating photovoltaics could mitigate climate change impacts on water body temperature and stratification. Solar Energy 219 (2021) 24–33 | |
| 2 | Seetyp, Gewässernutzung und Untersuchungsschwerpunkt | Natursee in England (Süd-Becken des Windermere Sees, Seefläche 670 ha, maximale Tiefe 42 m, mittlere Tiefe 16,8 m). Die **Modellstudie** untersucht Auswirkungen durch die Exposition einer SPV-Anlage, indem Bedeckungsgrade in einem Spektrum zwischen 0 und 100 % simuliert werden. |
| 3a | Berücksichtigung hydrodynamischer Prozesse bei der Bewertung der Einflussgrößen | Die hydrodynamischen Prozesse wurden durch die Verwendung eines entsprechenden Modells (MyLake / 1d-Modell) berücksichtigt. |
| 3b | Erfassung maskierender Einflussgrößen | Maskierende Einflüsse, wie Kiesgewinnung, Teichlinsenmassenentwicklungen etc. spielen in dem Untersuchungsgewässer keine Rolle. |
| 3c | Quantifizierung der primären met. Wirkgrößen | Untersucht wurden die möglichen Auswirkungen von SPV Anlangen mit Überdeckungsgraden von 0 bis 100% und demensprechenden Auswirkungen auf Globalstrahlung (Reduktion um 0-100%) und Windgeschwindigkeit (Reduktion um 0-100%). Es erfolgte eine semiquantitative Bewertung dieser 2 Wirkgrößen. Eine genaue quantitative Ermittlung der Auswirkungen auf die meteorologischen Wirkgrößen in Abhängigkeit einer festen Anlagengröße wurde nicht vorgenommen. Auf die Parameter langwellige Rückstrahlung und Dampfdruck, die bei dem eingesetzten Modell keine Berücksichtigung finden, wurde nicht eingegangen. |
| 4a | Temperaturhaushalt, Zirkulations- und Schichtungsverhalten | Die Studie enthält eine umfängliche Bewertung der physikalischen Beeinflussung von Temperaturhaushalt und Schichtungsverhalten. Die anlagenbedingte Abnahme der Windgeschwindigkeit führt zu einer Zunahme der Wassertemperatur im Epilimnion, die Abnahme der Globalstrahlung hingegen zu einer Reduzierung der Wassertemperatur im Epilimnion. Da durch die Vollbeschattung des Sees die Globalstrahlung prozentual stärker zurückgeht als die Windgeschwindigkeit ist insgesamt eher mit einer Temperaturabnahme im Epilimnion des Sees zu rechnen, wodurch sich das Zirkulationsverhalten des Gewässers intensiviert und die Mächtigkeit des Epilimnions zunimmt. Auch die Wassertemperatur im Hypolimnion wird infolge dieses Geschehens vermindert. Erhebliche Auswirkungen für den Temperaturhaushalt ergeben sich ab einem Überdeckungsgrad von mehr als 25-30% ($\Delta\pm1°C$). Die Dauer der Stagnationsphase verringert sich durch eine SPV Anlage. Mit erheblichen Beeinträchtigungen ist für das Untersuchungsgewässer ab Überdeckungsgraden von ≥50% zu rechnen. |
| 4b | Sauerstoffhaushalt (Auswirkungen durch veränderte physikalische und biogene Belüftung) | Die Modellierungen beschränken sich auf die physikalischen Faktoren Temperaturhaushalt, Einschichtungsverhalten und Verdunstung. Aussagen zum Sauerstoffhaushalt basieren auf Literaturangaben. Eine starke Beschattung verringert den biogenen und physikalischen Sauerstoffeintrag, so dass Belastungen des Sauerstoffhaushaltes eher eintreten können. |
| 4c | Ab- und Umbauvorgänge im Wasserkörper (Gewässergüte | Auch Aussagen zu Ab- und Umbauvorgängen basieren auf Literaturangaben. Bei einer Verschlechterung des Sauerstoffhaushaltes erhöht sich die Rücklösungsrate sedimentgebundener Stoffe. |
| 4d | Entwicklung des Besiedlungsbildes insbesondere von Makrophyten und Phytoplankton | Aussagen basieren auf Literaturangaben. |
| 4e | Entwicklung von Cyanobakterien | Nicht untersucht. Es wird aber die Möglichkeiten einer Zönosenverschiebung der Algen-/ Cyanobakterien- Gemeinschaft diskutiert. |
| 4f | Freisetzung von Mikroverunreinigungen | Nicht untersucht |

| | | |
|---|---|---|
| 5 | Informationsgehalt und Nutzbarkeit für die Aufgabenstellung | Die Untersuchung arbeitet sehr detailliert mittels numerischer Modelle die Beeinflussungen des Temperaturhaushalters und des Schichtungsverhaltens durch SPV-Anlagen heraus. Eine quantitative Angabe, wie sich durch die SPV-Anlagen die primären meteorologischen Wirkgrößen verändern, existiert allerdings nicht. Aussagen zur Gewässergüte basieren auf Literaturangaben. Die Ergebnisse sind gut auf das Vorhaben übertragbar, es ist aber zu berücksichtigen, dass bei dem relativ großen See (Nebenbecken mit 670ha) windinduzierte Effekte eine größere Rolle spielen, als die durch Temperaturvorgänge zurückgehenden konvektive Prozesse, so dass in den relativ kleinen Baggerseen maßnahmenbedingte Auswirkungen ein stärkeres Gewicht haben dürften. |

## Literaturquelle 3

| | | |
|---|---|---|
| 1 | J. Haas, J. Khalighi, A. de la Fuente, S.U. Gerbersdorf, W. Nowak, Po-Jung Chen (2019): Floating photovoltaic plants: Ecological impacts versus hydropower T operation flexibility. Energy Conversion and Management Volume 206, 15 February 2020, 112414. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112414 | |
| 2 | Seetyp, Gewässernutzung und Untersuchungsschwerpunkt | Untersucht wird im Rahmen einer **Modellstudie** die Rapel-Staustufe in Chile. Diese dient der Elektrizitätsgewinnung mit einer Wasserkraftnutzung (ca. 377 mW). Die Staustufe verfügt über eine Fläche von 4.000 ha und ein Volumen von bis zu 400 Mio. m³. Hieraus ergibt sich eine mittlere Tiefe von 10 m. Die maximale Tiefe beträgt 55 m. Im Rahmen der Studie werden die Auswirkungen der Exposition von SPV Anlagen auf die Algenentwicklung (Chl-a) modelliert. Durch die Betriebsweise der Anlage mit stark schwankenden Wasserspiegeln ist die maximale Ausdehnung schwimmender Solarmodule auf einen maximalen Überdeckungsgrad von 40% beschränkt. Ansonsten ergeben sich Einschränkungen bezüglich des Absenkungsziels und damit der Stauraumnutzung und Energiegewinnung. |
| 3a | Berücksichtigung hydrodynamischer Prozesse bei der Bewertung der Einflussgrößen | Die hydrodynamischen Prozesse wurden durch die Verwendung eines entsprechenden Modells (Elcom/Caedym/3d Modell) berücksichtigt. |
| 3b | Erfassung maskierender Einflussgrößen | Maskierende Einflüsse könne sich durch die Wasserspiegelabsenkungen und die Tiefenwasserentnahme im Rahmen der Stauraumbewirtschaftung und Wasserkraftnutzung ergeben. |
| 3c | Quantifizierung der primären met. Wirkgrößen | Untersucht wurde in der Modellstudie die möglichen Auswirkungen von SPV Anlangen für Überdeckungsgrade zwischen 0-100 %. Die Überdeckung führt zu einer Reduktion der Globalstrahlung, wobei von einer vollständigen Abschattung durch die Solarmodule an der Expositionsstelle ausgegangen wird. Die Solarmodule sind folglich lichtundurchlässig. Es wurden keine Angaben gemacht, in welchem Umfang weitere meteorologischen Wirkgrößen wie Windgeschwindigkeit, langwellige Strahlung und Dampfdruck Änderungen erfahren. Es erfolgt die semiquantitative Bewertung nur einer Wirkgröße. |
| 4a | Temperaturhaushalt, Zirkulations- und Schichtungsverhalten | Die Untersuchung beschränkt sich auf die Algenentwicklung. Aussagen zum Schichtungsverhalten werden nicht gemacht. Allerdings wird auf das Ausmaß der Seeverdunstung eingegangen. Diese kann sich bei einer Vollüberdeckung um bis zu 15% reduzieren. |
| 4b | Sauerstoffhaushalt (Auswirkungen durch veränderte physikalische und biogene Belüftung) | Nicht untersucht |
| 4c | Ab- und Umbauvorgänge im Wasserkörper (Gewässergüte | Nicht untersucht |
| 4d | Entwicklung des Besiedlungsbildes insbesondere von Makrophyten und Phytoplankton | Modelliert wird mittels Caedym. Berücksichtigt werden zwei Algengruppen (Grün- und Kieselalgen) und die Cyanobakterien. Bis zu einem Überdeckungsgrad von 40 % sind kaum oder nur geringe Effekte auf die Algenentwicklung zu erwarten. |
| 4e | Entwicklung von Cyanobakterien | Hierzu liegen keine Untersuchungen vor, es wird aber die Möglichkeiten einer Zönoseverschiebung der Algen-/ Cyanobakterien- Gemeinschaft diskutiert. |

| | | |
|---|---|---|
| 4f | Freisetzung von Mikroverunreinigungen | Nicht untersucht |
| 5 | Informationsgehalt und Nutzbarkeit für die Aufgabenstellung | Die Untersuchung arbeitet sehr detailliert mittels numerischer Modelle (Elcom/Cardym) die Beeinflussungen der Algenentwicklung heraus. Auf den Temperaturhaushalt, Nährstoffhaushalt und das Schichtungsverhalten durch SPV-Anlagen wird nicht eingegangen. Quantitative Angabe, wie sich durch die SPV-Anlagen die primären meteorologischen Wirkgrößen verändern, existiert nicht. Die Ergebnisse sind nur bedingt auf das Vorhaben übertragbar, da der See relativ groß ist (4.000 ha) und über eine sehr hohen Wasseraustauschrate von ca. 14 Tagen verfügt. |

## Literaturquelle 4

| | | |
|---|---|---|
| 1. | D. Mathijssen, B. Hofs, E. Spierenburg-Sack, R. van Asperen, B. van der Wal, J. Vreeburg and H. Ketelaars (2020). Water Practice & Technology Vol 15 No 3 . doi: 10.2166/wpt.2020.062. http://iwaponline.com/wpt/article-pdf/15/3/807/745404/wpt0150807.pdf | |
| 2 | Seetyp, Gewässernutzung und Untersuchungsschwerpunkt | Wasserreservoir Kralingen (Seefläche 2,7 ha, Volumen 72.000 $m^3$, Expositionsfläche der SPV-Anlagen 8000 $m^2$. Überdeckte Fläche 28,5 %. Die Kotaktfläche der Solarmodule (7.700 $m^2$) bezogen auf das Volumen (72.000 $m^3$) beträgt ca. 1,1 $cm^2$/L.<br><br>Untersucht wird im Rahmen einer **experimentellen Studie** der Einfluss der Solarmodule auf die Trinkwasserqualität. Die Seen mit exponierten SPV-Anlagen werden mittelbar oder unmittelbar (Uferfiltration) zur Trinkwassergewinnung eingesetzt. Neben der Ermittlung von Leachingeffekten (Eluation) aus den Modulen und den Schwimmkörpern einschließlich Dichtungsmitteln liegt ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt auf der Keimbelastung (hier: Cryptosporidium, Giardia & Campylobacter) im Gewässer, da Keime zuverlässig durch die natürliche UV-Strahlung, die unter den Modulen nicht gegeben ist, eliminiert werden. |
| 3a | Berücksichtigung hydrodynamischer Prozesse bei der Bewertung der Einflussgrößen | Aufgabestellung und Versuchsaufbau erfordern nicht die Berücksichtigung hydrodynamischer Prozesse. |
| 3b | Erfassung maskierender Einflussgrößen | Bezüglich der Fragestellung waren keine maskierenden Einflüsse zu erkennen. |
| 3c | Quantifizierung der primären met. Wirkgrößen | Nicht untersucht |
| 4a | Temperaturhaushalt, Zirkulations- und Schichtungsverhalten | Nicht untersucht |
| 4b | Sauerstoffhaushalt (Auswirkungen durch veränderte physikalische und biogene Belüftung) | Nicht untersucht |
| 4c | Ab- und Umbauvorgänge im Wasserkörper (Gewässergüte | Nicht untersucht |
| 4d | Entwicklung des Besiedlungsbildes insbesondere von Makrophyten und Phytoplankton | Untersucht wurden Auswirkungen von SPV Anlagen auf Keimbelastungen, wobei hier die für die Trinkwassergewinnung im Vordergrund stehenden Protozooen (Cryptosporidium und Giardia ) sowie das Bakterium Campylobacter betrachtet werden. Die durch Reduktion der Globalstrahlungzu erwartende Verringerung der UV-Exposition wurde anhand des Bedeckungsgrades abgeschätzt bzw. die Absterberate anhand des Bedeckungsgrades berechnet. Überdeckungen der Seefläche mit einem Deckungsgrad von 10-30% werden als akzeptabel erachtet. |
| 4e | Entwicklung von Cyanobakterien | Nicht untersucht |

| | | |
|---|---|---|
| 4f | Freisetzung von Mikroverunreinigungen | Die Freisetzung von Mikroverunreinigungen durch Leachingeffekte wurde umfänglich untersucht. Bei den Schwermetallen ergaben sich einige Freisetzungen gegenüber der Nullprobe (Zuflusswasser), die aber nicht zu einer Beeinträchtigung der Trinkwasserqualität geführt haben. Dies betraf die Metalle Aluminium, Kupfer, Mangan und Zink. Die höchsten Freisetzungen ergaben sich für die PE-Teile und die Dichtmittel. Die geringste ging von den Solarmodulen aus. Bezüglich der Schwermetalle wie Arsen, Bor, Cadmium, Chrom, Quecksilber, Blei, Nickel und Selen wurden keine Leachingeffekte festgestellt. Untersucht wurden die Solarmodule, PE Schwimmkörper, Fittings und Dichtmittel. Weitere organische Schadstoffe wurden ebenfalls untersucht, die Ergebnisse in dieser Studie aber nicht diskutiert. Eine ebenfalls geringe Belastung durch Solarmodule im terrestrischen Bereich weisen Robinson & Meindl (2019) nach. |
| 5 | Informationsgehalt und Nutzbarkeit für die Aufgabenstellung | Die Studie beschränkt sich auf Beeinflussungen, die ausschließlich das Leaching von Schadstoffen aus Anlagenbauteilen und die verminderte Keimreduktion durch eine verringerte UV-Strahlung betrifft. Bei allen berücksichtigten Stillgewässern handelt es sich um Seen, die der Trinkwassergewinnung dienen. Für diese Gewässer wird die Exposition von SPV Anlagen mit einem Überdeckungsgrad von 30 % als akzeptabel erachtet, wobei sich dieser Schwellenwert aus der maßnahmenbedingt verminderten Keimeliminationsrate und erhöhten Schadstoffbelastungen ableitet.<br><br>Die Studie gibt wertvolle Hinweise zu möglichen Belastungen durch Mikroverunreinigungen des Wasserkörpers. |

## Literaturquelle 5

| | | |
|---|---|---|
| 1. | Ilgen, Konstantin (2021): Der Einfluss eines schwimmenden Solarkraftwerks auf die Thermik und Ökologie eines Baggersees. Masterarbeit im Fach Hydrologie der Universität Freiburg in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme. | |
| 2 | Seetyp & Nutzung und Untersuchungsschwerpunkt | Maiwaldsee (betriebener Baggersee). Seefläche 36,96 ha, Volumen 8.800.000 $m^3$, maximale Tiefe 70 m, mittlere Tiefe 24 m, Expositionsfläche der SPV-Anlagen 7.700 $m^2$, Flächenüberdeckung ca. 2%. Der See wird noch zur Kiesgewinnung genutzt. Die Solarmodule sind auf schwimmenden Pontons befestigt.<br><br>Untersucht wird im Rahmen einer **Kombinations-Studie** zuerst der Einfluss der Solarmodule auf den Temperaturhaushalt und das Einschichtungsverhalten eines Baggersees mittels der Erfassung der Strahlungs- und Windkomponenten im Bereich der offenen Seefläche und unter den Modulen (empirische Studie). Neben der Erfassung der Temperaturwerte mittels Thermistorkette und durch Profilmessungen erfolgte auch eine Messung der Sauerstoffwerte. Diese Datenerhebung liefert die Grundlage für die Nutzung des Modells GLM, ein 1d-Mocell, das Schichtungsverhalten und Temperaturhaushalt ermitteln kann. Nicht modelliert wurden die chemisch-physikalischen oder biochemischen Kennwerte. |
| 3a | Berücksichtigung hydrodynamischer Prozesse bei der Bewertung der Einflussgrößen | Die hydrodynamischen Prozesse wurden durch das GLM-Modell berücksichtigt, die auskiesungsbedingten Umwälzungseffekte auf den See wurden allerdings nicht in die Bewertung einbezogen. Die Untersuchung und auch die Nutzung des Modells beschränkt sich primär auf die obere Wasserschicht (0-10m) die in erster Linie von den vorhabensbedingten Effekten und weniger von den Auswirkungen der Kiesgewinnung betroffen ist, die stärker auf den hypolimnischen Wasserkörper wirkt. |
| 3b | Erfassung maskierender Einflussgrößen | Bei dem Untersuchungsgewässer ergeben sich maskierende Effekte durch die Kiesgewinnung und die hydraulische Anbindung des Gewässers an den Grundwasserkörper. Diese betreffen das Einschichtungs- und Zirkulationsverhalten sowie den Temperatur- und Sauerstoffhaushalt. Die Kiesgewinnung mit Baggertätigkeit verursacht eine Zwangsumwälzung. Der Zufluss des im Winter vergleichsweise warmen Grundwassers erhöht die Seewassertemperatur und verringert das Einschichtungsverhalten. |

| | | |
|---|---|---|
| 3c | Quantifizierung der primären met. Wirkgrößen | Es werden Aussagen zur Verringerung der Globalstrahlung und der Windgeschwindigkeit im unmittelbaren Einwirkbereich der Anlage gemacht. Bei einer vollständigen Überdeckung des Sees mit Solarmodulen würde sich die Globalstrahlung um 73 % die Windgeschwindigkeit um 23% verringern. Angaben zur Veränderung der langwelligen Strahlung und zum Dampfdruck liegen nicht vor. |
| 4a | Temperaturhaushalt, Zirkulations- und Schichtungsverhalten | Die mittlere Wassertemperatur im Epilimnion reduziert sich unter dem ermittelten Wind- und Globalstrahlungseinfluss bei einem Überdeckungsgrad von 42% um 0,5 °C. |
| 4b | Sauerstoffhaushalt (Auswirkungen durch veränderte physikalische und biogene Belüftung) | Aussagen zum Sauerstoffhaushalt beziehen sich auf Messungen vor Ort. Die Unterschiede zwischen Anlagenbereich und Freiwasserkörper fallen gering aus, hierfür werden auch advektive Prozesse (Ausgleichsströmungen) als Erklärung herangezogen. |
| 4c | Ab- und Umbauvorgänge im Wasserkörper (Gewässergüte | Nicht untersucht |
| 4d | Entwicklung des Besiedlungsbildes insbesondere von Makrophyten und Phytoplankton | Nicht untersucht |
| 4e | Entwicklung von Cyanobakterien | Nicht untersucht |
| 4f | Freisetzung von Mikroverunreinigungen | Nicht untersucht |
| 5 | Informationsgehalt und Nutzbarkeit für die Aufgabenstellung | Die Studie ermittelt wichtige meteorologischen Wirkgrößen, wie die anlagenbedingte Beeinflussung der Globalstrahlung (73 %) und der Windgeschwindigkeit (23%) bei Vollüberdeckung des Sees. Dabei werden in der Kombinationsstudie sowohl Datenerhebungen vor Ort als auch Modellergebnisse genutzt, wobei die Modelleichung anhand der Messdaten erfolgt. Nicht berücksichtig wurden maskierende Effekte, die sich aus der bestehenden Kiesgewinnung ergeben. Diese betreffen aber in stärkerem Maße den Tiefenwasserkörper, der bei dieser Studie nicht im Vordergrund der Untersuchung stand. |