

Bewertung ökologischer Zustand

Für die Bewertung mit Phytoplankton werden immer ganze Jahrgänge betrachtet. Es wird mit mindestens sechs Probenahmen ein Jahresgeschehen meist von März bis Oktober oder November bewertet.

Die Bewertung erfolgt auf drei Ebenen der Bestimmungstiefe der Algen:

- **Metric Biomasse:** anhand Gesamtbiomasse
- **Metric Algenklassen:** anhand der Zusammensetzung der Algenklassen
- **Metric Phytoplankton-Taxa-Seen-Index (PTSI):** anhand Zusammensetzung der Arten

Die abschließende Bewertung eines Jahrgangs, der Phyto-See-Index (kurz PSI) wird durch eine gewichtete Mittelung der drei Teilmetrics errechnet. Der PSI nimmt Werte von 0,5 bis 5,5 ein und wird gemäß Tabelle 1 den fünf ökologischen Zustandsklassen der WRRL zugeordnet. Die Teilmetric-Ergebnisse werden ebenfalls im Wertebereich von 0,5 bis 5,5 ausgegeben, so dass auf jeder Ebene der Bewertung eine Beurteilung der ökologischen Qualität nach der Tabelle 1 möglich ist.

Metric bedeutet generell Maßzahl oder - im hier vorliegenden Zusammenhang - Bewertungszahl

Tab. 1: Mögliche Wertebereiche der Bewertungsergebnisse und ökologische Zustandsklasse.

Wertebereich der Metrics und des PhytoSee-Index	Ökologische Zustandsklasse
0,50 – 1,50	1 = sehr gut
1,51 – 2,50	2 = gut
2,51 – 3,50	3 = mäßig
3,51 – 4,50	4 = unbefriedigend
4,51 – 5,50	5 = schlecht

Sowohl der Biomasse- als auch der Algenklassen-Metric besitzen weitere "Bewertungskriterien". Die gesamte PSI-Berechnung wird in dem Microsoft-Access-basierten Auswerteprogramm "PhytoSee" automatisiert durchgeführt.

Metric Biomasse

Der Biomasse-Metric besteht aus drei Teilmetrics:

- Biovolumen-Saisonmittel
- Chlorophyll-a-Saisonmittel
- Chlorophyll-a-Maximum

Das Chlorophyll-a-Maximum in der Saison (= Vegetationsperiode = März/April – Oktober/November) sollte mindestens 1,25mal größer sein als das Saisonmittel. Liegt es darunter wird es nicht als Maximum angesehen und der Teilmetric entfällt.

Für die Biomasse-Kenngrößen stehen für jeden Phytoplanktontyp Bewertungsformeln zur Verfügung (s. Tabelle 2).

Tab. 2: Bewertungsformeln zur Berechnung der Teilmetric-Ergebnisse der Biomasse-Parameter am Beispiel des Phytoplankton-Seetyps 7.

Phytoplankton-Seetyp	Biomasse-Teilmetrics	Bewertungsfunktion y = Bewertungszahl von 0,5-5,5 x = Wert des jeweiligen Teilmetrics
7	BV-Saisonmittel [mm ³ /l]	$y = 1,6793 * \ln(x) + 1,9635$
	Chlorophyll-a-Saisonmittel [µg/l]	$y = 1,7271 * \ln(x) - 0,4071$
	Chlorophyll-a-Maximum [µg/l]	$y = 1,5366 * \ln(x) - 1,1267$

Der arithmetische Mittelwert der Teilergebnisse ergibt das Gesamtergebnis im Biomassemetric.

Metric Algenklassen

Für den Algenklassen-Metric wurde für jeden Seetyp bzw. jede Seetypgruppe eine eigene Kombination aus Algenklassen ausgewählt. Es kamen nur diejenigen Algenklassen zum Zug, die eine Zunahme der Trophie zuverlässig anzeigen.

So sind z. B. die Chlorophyceae in den calciumarmen Mittelgebirgsseen nicht geeignet, die Trophie anzuzeigen und bleiben dort unberücksichtigt. In den calciumreichen Seen sind sie dagegen meist geeignet (s. Tabelle 3). Der See wird umso schlechter bewertet, je höher deren Biomasse im Saisonmittel ansteigt. Die Cyanobakterien sind in allen Seetypen indikativ und werden oberhalb eines Biovolumen-Schwellenwertes zur Bewertung herangezogen.

Für jeden Phytoplanktontyp-Seetyp kommen zwischen zwei und vier z.T. kombinierte Teilmetrics zur Anwendung (s. Tabelle 3).

Tab. 3: Verwendung von Trophie-anzeigenden Algenklassen oder Algenklassen-Kombinationen in den Phytoplankton-Seetypen bzw. Seetyp-Gruppen. Saison = Vegetationsperiode (März/April – Oktober/November).

Ökoregion	Alpen & Alpenvorland		Zentrales Mittelgebirge			Norddeutsches Tiefland	
	Phytoplankton-Seetyp-Gruppe	1	4	5	6.1	8	10.1
Algenklasse oder Algenklassen-Kombination	2		7	6.2	9	10.2	11.2
	3			6.3		13	14
Kenngroße: Biovolumen-Mittelwert in der Saison (Sais) oder von Juli-Oktober (JO)							
Bacillario- & Chlorophyceae						Sais	
Chloro- & Cryptophyceae	JO			Sais			
Chloro- & Euglenophyceae	Sais						
Chlorophyceae			Sais				Sais
Bacillario- & Cryptophyceae		Sais					Sais
Cryptophyceae			Sais		Sais	Sais	

Cryptophyceae & Cyanobacteria	Sais	Sais					Sais
Cyanobacteria			Sais	Sais	Sais		
Dinophyceae & Cyanobacteria						JO	
KenngroÙe: Prozentualer Anteil der Algenklasse am Gesamtbiovolumen im Saisonmittel (Sais)							
Chryso- & Dinophyceae				Sais	Sais		
Chrysophyceae			Sais			Sais	
Dinophyceae		Sais					

In der Regel sind die Biovolumen-Saisonmittel der jeweiligen Algenklasse für die Metric-Berechnung am besten geeignet. Für manche Typen wird jedoch mit der Dominanz (relatives Biovolumen) oder mit dem Biovolumen-Sommermittel (Juli bis Oktober) ein besser korrelierendes Ergebnis erzielt. Z. B. sind bei den Chrysophyceen und Dinophyceen oftmals die Dominanzen indikativer (s. Tabelle 3) und nehmen mit zunehmender Degradation des Gewässers ab.

Für die KenngroÙen Saison- und Sommermittelwert stehen für jede Algenklasse und jeden Seetyp Bewertungsformeln zur Verfügung (s. Tabelle 4).

Tab. 4: Bewertungsformeln zur Berechnung der Teilergebnisse im Algenklassenmetric am Beispiel des Phytoplankton-Seetyps 7.

Phytoplankton-Seetyp	Algenklassen-Teilmetrics	Bewertungsfunktion y = Bewertungszahl von 0,5-5,5 x = Wert des jeweiligen Teilmetrics
7	Chrysophyceae Saison (%), Dominanz > 0,6%	$y = -1,126 * \ln(x) + 3,9802$
	Cryptophyceae Saison [mm³/l]	$y = 1,5399 * \ln(x) + 5,5609$
	Chlorophyceae Saison [mm³/l]	$y = 1,009 * \ln(x) + 5,5761$
	Cyanophyceae Saison [mm³/l], BV > 0,3 mm³/l	$y = 0,9915 * \ln(x) + 3,589$

Metric Phytoplankton-Taxa-Seen-Index (PTSI)

Die Trophie-Bewertung von Seen auf Basis von Indikatortaxa mit dem PTSI erfolgt in **zwei Schritten**:

Trophie-Klassifizierung (Schritt 1)

Das Indexergebnis wird in der Skala des Trophieindex nach LAWA (LAWA 2014) angegeben und liegt in der Regel zwischen 0,5 (= oligotroph) und 5 (= hypertroph) (s. Tabelle 5). In der Ausgabe "Gesamtbewertung" des PhytoSee-Auswertetools wird der Klassifikations-PTSI im hinteren Teil der Tabelle ebenfalls ausgegeben, der Spaltenkopf heißt "PTSI_Jahreswert".

Tab. 5: Ermittlung des trophischen Status eines Sees anhand des PTSI. Wertebereiche und Status entsprechend der LAWA-Trophieklassifizierung.

PTSI (Skala wie LAWA-Index)	Trophieklasse	Kurzbezeichnung Trophieklasse
0,5-1,5	oligotroph	oligo
> 1,5 – 2,0	mesotroph 1	meso1
> 2,0 – 2,5	mesotroph 2	meso2
> 2,5 – 3,0	eutroph 1	eu1
> 3,0 – 3,5	eutroph 2	eu2
> 3,5 – 4,0	polytroph 1	poly1
> 4,0 – 4,5	polytroph 2	poly2
> 4,5	hypertroph	hyper

Der PTSI wird mit einer gewichteten Mittelwertberechnung ermittelt. Für jeden Probenbefund wird ein PTSI errechnet. Es gehen folgende Größen ein:

$$PTSI = \frac{\sum (BV\text{-Klasse}_i * Sten\ddot{o}kiefaktor_i * TAW_i)}{\sum (BV\text{-Klasse}_i * Sten\ddot{o}kiefaktor_i)}$$

TAW_i = Trophieankerwert des
 Indikator taxons i
 BV-Klasse_i = Biovolumenklasse des
 Indikator taxons i
 Stenökiefaktor_i = Stenökiefaktor des
 Indikator taxons i

Der Trophieankerwert ist eine Verrechnungsgröße, in die der Verbreitungsschwerpunkt im Trophiespektrum eingeht. Der Stenökiefaktor gibt an, wie eng die Bindung des Taxons an den Trophieschwerpunkt ist. Er ist ein Maß für die Indikatorqualität, kann Werte zwischen 1 und 4 annehmen und ist umso höher, je zuverlässiger das Taxon die Trophie anzeigt. Die Einrechnung der Biovolumenklasse (Tabelle 6) berücksichtigt die "Häufigkeit" des Taxons in der Probe.

Tab. 6: Zuordnung der Taxonbiovolumina in der Probe zu den Biovolumenklassen.

Biovolumen (mm ³ /l)	Biovolumen-Klasse	Biovolumen (mm ³ /l)	Biovolumen-Klasse
≤ 0,0001	1	> 1-5	6
> 0,0001-0,001	2	> 5-25	7
> 0,001-0,01	3	> 25-300	8
> 0,01-0,1	4	> 300	9

> 0,1-1	5		
---------	---	--	--

Für die deutschen Phytoplanktontypen existieren insgesamt sechs Indikatorlisten, welche für die jeweiligen Seetypgruppen eingesetzt werden (s. Tabelle 7).

Tab. 7: Phytoplankton-Indikatorlisten für die Phytoplanktontyp-Gruppen in den Ökoregionen. HTL = Harmonisierte Taxaliste, AWB = künstliche Wasserkörper, HMWB = erheblich veränderte Wasserkörper.

Phytoplankton-Seetypen	Indikatorliste für	Anzahl der Indikator-taxa	Anzahl der "angesprochenen" Taxon-IDs in HTL	Kurzbezeichnung der Liste
1 bis 4	Alpen- und Alpenvorlandseen inkl. AWB/HMWB	144	203	AVA
5 bis 9	Mittelgebirgsseen inkl. AWB/HMWB	117	160	MG
10.1, 10.2, 13	natürliche, geschichtete Seen des Norddeutschen Tieflands	115	173	TL_gesch
11.1, 11.2, 12, 14	natürliche, polymiktische Seen des Norddeutschen Tieflands	111	193	TL_poly
10.1k 10.2k 13k	geschichtete AWB, HMWB und Sondertypen des Norddeutschen Tieflands und der Niederungen großer Flüsse und Ströme, z. B. Oberrhein und Elbe	158	217	TgeschAWB
11.1k, 11.2k 12k, 14k	polymiktische AWB, HMWB und Sondertypen des Norddeutschen Tieflands und der Niederungen großer Flüsse und Ströme z. B. Oberrhein und Elbe	113	162	TpolyAWB

Jede Liste enthält zwischen 110 und 160 Indikator taxa. Ist das Indikator taxon eine Gattung, so werden alle in der HTL aufgeführten Arten der Gattung in die PTSI-Berechnung eingeschlossen. So wurden z. B. in der Mittelgebirgsliste 117 Indikator taxa gefunden. Die Anzahl der in der HTL enthaltenen Taxa liegt bei 160 (s. Tabelle 7).

Jede Liste enthält zwischen 110 und 160 Indikator taxa. Ist das Indikator taxon eine Gattung, so werden alle in der HTL aufgeführten Arten der Gattung in die PTSI-Berechnung eingeschlossen. So wurden z. B. in der Mittelgebirgsliste 117 Indikator taxa gefunden. Die Anzahl der in der HTL enthaltenen Taxa liegt bei 160 (s. Tabelle 8).

Tab. 8: Auszug aus der Indikatorliste für Mittelgebirgsseen. TAW = Trophieankerwert (Verrechnungsgröße im Index PTSI).

Liste	HTL-ID	Algenklasse	Indikator taxon	Stenökiefaktor	TAW
MG	168	Conjugatophyceae	<i>Closterium limneticum</i>	1	4,9
MG	179	Chlorophyceae	<i>Coelastrum astroideum</i>	2	3,3
MG	184	Chlorophyceae	<i>Coelastrum reticulatum</i>	1	3,2
MG	216	Chlorophyceae	<i>Crucigeniella pulchra</i>	2	0,9
MG	227	Cryptophyceae	<i>Cryptomonas reflexa</i>	1	2,5
MG	1260	Bacillariophyceae	<i>Cyclostephanos delicatus</i>	2	5,5
MG	247	Bacillariophyceae	<i>Cyclostephanos dubius</i>	1	2,9
MG	248	Bacillariophyceae	<i>Cyclostephanos invisitatus</i>	1	2,9
MG	252	Bacillariophyceae	<i>Cyclotella comensis</i>	2	1,3
MG	254	Bacillariophyceae	<i>Cyclotella cyclopuncta</i>	1	1,4
MG	260	Bacillariophyceae	<i>Cyclotella meneghiniana</i>	2	4,3

Alle Indikatorlisten des PTSI sind im "Handbuch Phyto-See-Index" (Download) enthalten und stehen *hier* <Link zu PTSI-Indikator taxa> als Exceldatei zur Verfügung.

Der PTSI-Jahreswert ist der Mittelwert aller PTSI-Probenwerte. Die Bildung eines Saisonmittelwertes ist im Normalfall nicht notwendig. Das Zwischenergebnis PTSI pro Probe kann für die Interpretation der Bewertungsergebnisse eine Hilfe sein. Die Grenze einer sicheren Trophie-Indikation mit dem PTSI liegt bei mindestens vier Indikator taxa pro Probe im Jahresmittel.

Trophie-Bewertung (Schritt 2)

Das Metric-Ergebnis des PTSI wird unter Berücksichtigung des seetypspezifischen trophischen Referenzwertes (Einheiten des LAWA-Index) berechnet. Die Abweichung des PTSI von der Referenzsituation wird in eine Bewertungszahl zwischen 0,5 und 5,5 umgerechnet. Diese gibt die ökologische Qualität an und es können die ökologischen Zustandsklassen der WRRL von 1 bis 5 zugeordnet werden.

Der Metric PTSI wird mit folgender Formel aus der PTSI-Trophieklassifikation berechnet:

$$\text{Metric PTSI} = 0,5 + (\text{PTSI-Jahreswert} - \text{trophischer Referenzwert}) * 2$$

Die trophischen Referenzwerte sowie die Verankerung der ökologischen Zustandsklassen in der Skala des LAWA-Index sind je nach Phytoplanktontyp unterschiedlich festgelegt und in der Tabelle 9 enthalten.

Tab. 9: Trophische Referenzwerte für die Phytoplankton-Seetypen in der Skala des LAWA-Trophie-Index und Lage der ökologischen Zustandsklassen im LAWA-Trophiesystem.

Phyto- plankton- Seetyp	trophischer Referenzwert	trophischer Referenz zustand Obergrenze	sehr gut/ gut	gut/ mäßig	mäßig/ unbefriedigend	unbefriedigend/ schlecht
Alpen und Alpenvorland						
4	0,75	oligo	1,25	1,75	2,25	2,75
3	1.00	oligo	1.50	2.00	2.50	3.00
2	1,25	meso1	1,75	2,25	2,75	3,25
1	2,00	meso2	2,50	3,00	3,50	4,00
Zentrale Mittelgebirge						
7 / 9	1,00	oligo	1,50	2,00	2,50	3,00
5 / 8	1,25	meso1	1,75	2,25	2,75	3,25
6.1	1,75	meso2	2,25	2,75	3,25	3,75
6.2	2,00	meso2	2,50	3,00	3,50	4,00
6.3	2,25	eu1	2,75	3,25	3,75	4,25
Norddeutsches Tiefland*						
13	1,25	meso1	1,75	2,25	2,75	3,25
10.1	1,50	meso1	2,00	2,50	3,00	3,50
10.2	1,75	meso2	2,25	2,75	3,25	3,75
14	1,75	meso2	2,25	2,75	3,25	3,75
11.1	2,00	meso2	2,50	3,00	3,50	4,00
11.2	2,25	eu1	2,75	3,25	3,75	4,25
12	2,75	eu2	3,00	3,50	4,00	4,50

* Im Tiefland erhalten AWB, HMWB sowie Sondertypen hinter der Seetypnummer das Suffix "k", z. B. 13k. AWB, HMWB und Sondertypen natürlicher Seen, die in Niederungen größerer Flüsse und Ströme liegen, werden in der Regel im "ähnlichsten" Phytoplanktontyp des Tieflands am stimmigsten bewertet und bekommen in ihrer

Typbezeichnung ebenfalls das k-Suffix.

Gesamtbewertung Phyto-See-Index (PSI)

Für die PSI-Gesamt-Bewertung sind die drei oben beschriebenen Metrics mit einer gewichteten Mittelwertbildung zusammen zu fassen. Die Gewichtungen der Metrics hängen von deren Eignung im jeweiligen Seetyp ab (Beispiele s. Tabelle 10).

Als Maß für die Eignung wurden die Korrelationen der Metrics zur Belastung Gesamtphosphor und Trophie ermittelt und miteinander verglichen.

Die Berechnungsformel für die PSI-Gesamtbewertung lautet:

$$\text{Phyto-See-Index} = \frac{\sum (\text{Metric}_{1-3} * \text{Gewichtungsfaktor}_{1-3})}{\sum (\text{Gewichtungsfaktor}_{1-3})}$$

Tab. 10: Seetypspezifische Gewichtungsfaktoren für die Metrics zur Berechnung des Phyto-See-Index. Beispiele: Alpensee Typ 4, geschichtete Mittelgebirgsseen Typ 5-9 ohne 6, geschichteter See im Tiefland Typ 13 sowie Flachsee im Tiefland Typ 11.2.

Phytoplankton-Seetyp	BM-Metric	AK-Metric	PTSI-Metric
5, 7, 8 und 9	3	2	3
13	4	1	2
11.2	4	2	1

Das Gesamtergebnis PSI sollte in jedem Fall mit den Eingangsdaten und anhand von Vergleichsjahrgängen plausibilisiert werden. Da alle Teilmetrics die Belastung "Nährstoffe und Trophie" anzeigen sollen, müssten diese weitgehend gleichsinnig reagieren. Größere Abweichungen der Teilmetrics voneinander geben oft Hinweise auf Besonderheiten des Jahrgangs oder der Witterung.

Unplausible oder abweichende Ergebnisse können durch Effekte in der planktischen Nahrungskette verursacht werden. Hier kommt den Fischen oder dem Fischbesatz und den natürlichen Fressfeinden des Phytoplanktons - dem Zooplankton - eine besondere Rolle zu.

Zur Abschätzung des Zooplankton-Fraßdrucks auf das Phytoplankton und der Frage, ob die Phytoplanktonbewertung durch Fraßeffekte beeinflusst wird, wurde das sog. PhytoLoss-Modul entwickelt. In diesem werden synchron erfasste Phyto- und Zooplanktonbefunde miteinander verschnitten. Die Anwendung des PhytoLoss-Moduls gibt Aufschluss über quantitative Effekte im planktischen Nahrungsnetz bis hin zum Fischbestand. Es trägt zur Absicherung und Plausibilisierung der Bewertung mit dem Phyto-See-Index bei.

Die Beschreibung des Verfahrens nach Deneke et al. (2015) (Kurzanleitung und Anleitung) sowie das Berechnungstool von Deneke et al. (2016) stehen als Download zur Verfügung.