# **Validierungsrahmen für hochfrequente Gütedaten von Badeseen in Vorpommern-Greifswald: Methodik und Referenzwerte für die automatisierte Datenqualitätskontrolle**

## **I. Einleitung und methodischer Rahmen**

### **1.1. Zielsetzung und Anwendungsbereich**

Die kontinuierliche Überwachung von Badegewässern mittels hochfrequenter Messungen durch mobile Stationen stellt einen Paradigmenwechsel in der Gewässerbewirtschaftung dar. Sie ermöglicht eine zeitnahe Erfassung von Umweltveränderungen und potenziellen Risiken, stellt jedoch zugleich hohe Anforderungen an die Validität und Zuverlässigkeit der generierten Rohdaten. Ziel dieses Berichts ist die Bereitstellung eines wissenschaftlich fundierten und operativ anwendbaren Rahmens für die automatisierte Qualitätskontrolle von stündlichen Messdaten aus 20 Badeseen im Landkreis Vorpommern-Greifswald.

Dieser Bericht liefert eine detaillierte Tabelle mit oberen und unteren Schwellen- und Grenzwerten für 15 physikalische, chemische und biologische Parameter. Diese Werte sind speziell für den Einsatz in einem automatisierten Validierungssystem konzipiert, das, wie im Anforderungsprofil beschrieben, auf Python-Bibliotheken wie pyod mit dem Isolation Forest (iForest) Algorithmus basiert und die finale Kennzeichnung der Datenqualität (Flagging) nach dem QARTOD-Standard (Quality Assurance of Real-Time Oceanographic Data) vornimmt. Die hier definierten Werte dienen als Grundlage für die ersten Stufen dieses Validierungsprozesses und sind darauf ausgelegt, eine hohe Datenqualität für nachfolgende Analysen und öffentliche Informationen sicherzustellen.

### **1.2. Die zweistufige Validierungsphilosophie nach QARTOD**

Um eine strukturierte und nachvollziehbare Datenvalidierung zu gewährleisten, orientiert sich die vorgeschlagene Methodik an internationalen Standards, insbesondere am QARTOD-Framework. Dieses sieht eine hierarchische Abfolge von Tests vor.1 Für die anwenderspezifische Anforderung, "Grenzwerte" und "Schwellenwerte" zu definieren, werden zwei zentrale QARTOD-Tests adaptiert. Diese zweistufige Philosophie bildet das Rückgrat der automatisierten Qualitätskontrolle.

Stufe 1: Gross Range Test (Grenzwerte)

Der Gross Range Test ist die grundlegendste Prüfung und dient der Identifizierung von Werten, die physikalisch, chemisch oder sensor-spezifisch unmöglich sind. Ein Messwert, der außerhalb der hierfür definierten Grenzwerte liegt, deutet auf einen schwerwiegenden Fehler hin, wie z.B. einen Sensordefekt, eine Fehlfunktion der Energieversorgung, eine Störung in der Datenübertragung oder einen extremen, nicht plausiblen Zustand (z.B. ein gefrorener Sensor).3 Solche Datenpunkte sind als ungültig zu betrachten und werden gemäß QARTOD-Standard mit dem Flag

4 (Fail) gekennzeichnet. Diese Grenzwerte sind in der Regel statisch und basieren auf den absoluten Grenzen der Messbarkeit und den physikalischen Eigenschaften des Mediums.

Stufe 2: Climatology Test (Schwellenwerte)

Der Climatology Test prüft, ob ein Messwert innerhalb des erwarteten, plausiblen Bereichs für einen bestimmten Ort zu einer bestimmten Jahreszeit liegt. Die hierfür definierten Schwellenwerte sind enger gefasst als die Grenzwerte und basieren auf historischem Wissen, wissenschaftlicher Literatur und den spezifischen limnologischen Eigenschaften der Gewässerregion.3 Ein Wert, der diese Schwellenwerte verletzt, ist nicht zwangsläufig falsch, aber "verdächtig" (

suspect). Er weicht signifikant von der Erwartung ab und sollte einer genaueren Prüfung unterzogen werden. Gemäß QARTOD wird ein solcher Datenpunkt mit dem Flag 3 (Suspect) versehen. Diese Werte können saisonal angepasst werden und bilden die ideale Grundlage für die Anomalieerkennung durch fortgeschrittene Algorithmen.

Ergänzung durch Algorithmen wie iForest

Die im Anforderungsprofil genannte Anwendung des Isolation Forest (iForest) Algorithmus aus der pyod-Bibliothek stellt eine dritte, anspruchsvollere Validierungsstufe dar. Während die Grenz- und Schwellenwerttests primär univariate (eindimensionale) Prüfungen sind, kann iForest komplexe, multivariate Anomalien erkennen. Der Algorithmus kann Muster in den Daten identifizieren, die zwar innerhalb der plausiblen Schwellenwerte liegen, in ihrer Kombination jedoch unlogisch sind (z.B. hohe Algenbiomasse ohne korrespondierende Erhöhung des pH-Wertes). Die Schwellenwertprüfung dient somit als effektiver Vorfilter, um die nachfolgende, rechenintensivere Anomalieerkennung auf den relevanten Datenraum zu fokussieren.

### **1.3. Regulatorischer Kontext: Grenzen der EU-Badegewässerrichtlinie**

Eine naheliegende Quelle für Grenzwerte bei der Überwachung von Badeseen ist die europäische Gesetzgebung. Die maßgebliche Vorschrift ist die Richtlinie 2006/7/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Qualität der Badegewässer und deren Bewirtschaftung.6 Diese Richtlinie wurde in Deutschland durch länderspezifische Verordnungen in nationales Recht umgesetzt, für Mecklenburg-Vorpommern durch die Badegewässerlandesverordnung (BadegewLVO M-V).8

Eine detaillierte Analyse dieser Vorschriften zeigt jedoch, dass ihr Fokus fast ausschließlich auf der hygienischen, d.h. der mikrobiologischen Wasserqualität liegt. Die Richtlinie und ihre nationalen Umsetzungen definieren konkrete numerische Grenzwerte für die Konzentration der Fäkalindikatoren *Intestinale Enterokokken* und *Escherichia coli*.7 Diese Parameter sind jedoch nicht Teil des hier betrachteten Messprogramms.

Für die Mehrheit der 15 angefragten Parameter (z.B. pH-Wert, Leitfähigkeit, Trübung, Nährstoffe, TOC) legen weder die EU-Richtlinie noch die Landesverordnung spezifische numerische Grenz- oder Schwellenwerte fest.6 Die Richtlinie fordert zwar eine Überwachung auf andere potenzielle Gefahren, wie z.B. Massenvermehrungen von Cyanobakterien ("Blaualgen") oder sichtbare Verschmutzungen (z.B. Teer, Plastik), jedoch basieren die daraus resultierenden Maßnahmen auf einer Gefahrenbewertung und visueller Kontrolle, nicht auf festen numerischen Schwellen.6

Diese Erkenntnis ist fundamental: Für die Erstellung einer umfassenden Validierungstabelle für das vorliegende Messprogramm ist die Badegewässergesetzgebung unzureichend. Die Ableitung der erforderlichen Werte muss daher auf einer breiteren wissenschaftlichen und limnologischen Grundlage erfolgen.

### **1.4. Wissenschaftlicher Kontext: Die Bedeutung der Seentypologie nach WRRL**

Da die Badegewässergesetzgebung keine ausreichende Grundlage bietet, wird die EU-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL, 2000/60/EG) zur zentralen wissenschaftlichen Leitlinie. Die WRRL verfolgt einen ökosystemaren Ansatz, dessen Ziel der "gute ökologische Zustand" bzw. das "gute ökologische Potenzial" für alle Oberflächengewässer ist.15 Ein Kernkonzept der WRRL ist die Klassifizierung von Gewässern in Typen mit ähnlichen geologischen, hydrologischen und morphologischen Eigenschaften.17

Die 20 untersuchten Badeseen in Vorpommern-Greifswald liegen im Norddeutschen Tiefland (Ökoregion 13/14). Gemäß der Typologie der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) fallen sie voraussichtlich in Kategorien wie "Sandgeprägte Tieflandbäche" (Typ 14, für Zuflüsse), "Sand- und lehmgeprägte Tieflandflüsse" (Typ 15, für größere Zuflüsse), "Organisch geprägte Bäche" (Typ 11, bei Mooreinfluss) oder, für die Seen selbst, in Typen wie "Kalkreicher, geschichteter Flachlandsee mit relativ großem Einzugsgebiet" oder "Seeausflussgeprägte Fließgewässer".17

Diese Typologie ist entscheidend, da sie den zu erwartenden "natürlichen" Referenzzustand und damit die plausible Schwankungsbreite der Wasserqualitätsparameter definiert.19 Die für den Climatology Test benötigten

*Schwellenwerte* werden daher nicht aus hygienischen, sondern aus ökologischen Plausibilitätsüberlegungen abgeleitet. Die zentrale Frage für die Validierung lautet somit nicht "Ist das Wasser zum Baden sicher?", sondern "Ist dieser Messwert für diesen Seentyp zu dieser Jahreszeit ökologisch plausibel?". Diese Herangehensweise liefert eine robuste und wissenschaftlich verteidigbare Basis für die Datenqualitätskontrolle.

## **II. Parameter-spezifische Analyse und Festlegung der Validierungswerte**

In diesem Abschnitt werden für jeden der 15 Messparameter die Grenz- und Schwellenwerte detailliert hergeleitet. Die Werte basieren auf den im vorigen Kapitel dargelegten Prinzipien: Die Grenzwerte definieren die absoluten physikalisch-technischen Grenzen (Gross Range Test), während die Schwellenwerte den erwarteten, ökologisch plausiblen Bereich für Badeseen im Norddeutschen Tiefland abstecken (Climatology Test).

### **2.1. Physikalische Leitmessgrößen**

Diese Parameter beschreiben die fundamentalen physikalischen Bedingungen im Gewässer und in der Atmosphäre, die alle biologischen und chemischen Prozesse maßgeblich steuern.

#### **2.1.1. Lufttemperatur (°C)**

* **Definition:** Die Lufttemperatur ist ein wesentlicher meteorologischer Treiber, der die Wassertemperatur, die thermische Schichtung und die Verdunstung direkt beeinflusst. Sie dient als wichtiger Referenzwert für die Plausibilitätsprüfung der Wassertemperaturmessungen.
* **Grenzwerte (Gross Range Test):** Die absoluten Grenzen werden durch die historischen Klimarekorde für Mecklenburg-Vorpommern und die technischen Spezifikationen des Sensors definiert.
  + **Unterer Grenzwert: -35 °C.** Dieser Wert liegt deutlich unter dem absoluten Kälterekord für die Region (z.B. -31.0 °C in Neubrandenburg, Februar 1929) 20 und fängt extreme Sensorfehler oder Vereisungsartefakte ab.
  + **Oberer Grenzwert: +45 °C.** Dieser Wert liegt über dem Hitzerekord für die Region (z.B. 39.4 °C in Boizenburg/Elbe, Juli 2022) 20 und berücksichtigt zukünftige, durch den Klimawandel bedingte Extreme.21
* **Schwellenwerte (Climatology Test):** Diese Werte sind saisonabhängig und basieren auf den 30-jährigen Klimanormalen und jüngsten Trends für Mecklenburg-Vorpommern.22
  + **Winter (Dez-Feb): -15 °C bis +15 °C.** Berücksichtigt sowohl kalte Phasen mit Dauerfrost als auch milde Winterperioden.
  + **Sommer (Jun-Aug): +8 °C bis +35 °C.** Spiegelt die Bandbreite von kühlen Sommernächten bis zu Hitzewellen wider.
  + **Übergangszeiten (Mär-Mai, Sep-Nov): -5 °C bis +25 °C.** Deckt die hohe Variabilität im Frühling und Herbst ab.

#### **2.1.2. Wassertemperatur (°C) (0.5m, 1.0m, 2.0m)**

* **Definition:** Die Wassertemperatur ist der kritischste physikalische Parameter in aquatischen Ökosystemen. Sie steuert Stoffwechselraten von Organismen, die Löslichkeit von Gasen (insbesondere Sauerstoff) und die Ausbildung der thermischen Schichtung, die den Stoffaustausch zwischen Oberflächen- und Tiefenwasser reguliert.25
* **Grenzwerte (Gross Range Test):**
  + **Unterer Grenzwert: -2 °C.** Da Süßwasser bei 0 °C gefriert, deutet ein Wert darunter auf eine Fehlfunktion oder Vereisung des Sensors hin. Ein leichter Puffer nach unten ist sinnvoll, um Kalibrierungsungenauigkeiten abzufangen.
  + **Oberer Grenzwert: +38 °C.** Selbst während extremer Hitzewellen ist es unwahrscheinlich, dass die Wassertemperatur in norddeutschen Seen diesen Wert übersteigt. Ein solcher Wert würde auf eine direkte Sonneneinstrahlung auf einen trockengefallenen Sensor oder einen technischen Defekt hindeuten.
* **Schwellenwerte (Climatology Test):** Die plausiblen Bereiche sind stark saisonabhängig.
  + **Winter (Dez-Feb): 0 °C bis +6 °C.** In dieser Zeit ist der See typischerweise nicht oder nur schwach geschichtet und die Temperatur liegt nahe dem Dichtemaximum von 4 °C oder ist bei Eisbedeckung nahe 0 °C an der Oberfläche.
  + **Sommer (Jun-Aug): +15 °C bis +28 °C.** Dies ist der typische Bereich für das Epilimnion (die durchmischte Oberflächenschicht) in einem norddeutschen Badesee. Temperaturen über 28 °C sind möglich, aber seltener und sollten als "interessant" markiert werden.
  + **Übergangszeiten (Mär-Mai, Sep-Nov): +4 °C bis +20 °C.** In diesen Phasen erwärmt sich der See bzw. kühlt er ab und durchläuft die Vollzirkulation.
* **Konsistenzprüfung der Tiefenstaffelung:** Die Messung in drei verschiedenen Tiefen erlaubt eine hochentwickelte Plausibilitätsprüfung der thermischen Struktur.
  + **Stabilitätsbedingung:** In einem stabilen Zustand darf die Temperatur in einer größeren Tiefe nicht höher sein als in einer geringeren Tiefe (T2.0m​≤T1.0m​≤T0.5m​), außer im Winter unter Eis (inverse Schichtung). Eine Verletzung dieser Regel deutet auf eine Verwechslung der Sensoren oder eine Störung hin.
  + **Gradientenprüfung:** Während der sommerlichen Schichtungsphase (ca. Mai-September) ist ein Temperaturgradient zu erwarten. Ein plötzlicher Zusammenbruch des Gradienten (T0.5m​≈T2.0m​) kann auf ein starkes Windereignis (Vertiefung des Epilimnions) oder eine fehlerhafte Messung (z.B. durch Drift der Messstation in flacheres Wasser) hinweisen. Ein unrealistisch hoher Gradient (z.B. >5 °C pro Meter) ist ebenfalls verdächtig.

### **2.2. Elektrochemische Parameter**

Diese Parameter werden durch elektrochemische Sensoren erfasst und geben Aufschluss über die grundlegende chemische Beschaffenheit des Wassers und die biogeochemischen Prozesse.

#### **2.2.1. pH-Wert (pH)**

* **Definition:** Der pH-Wert ist ein Maß für die Konzentration von Wasserstoffionen und beschreibt, ob das Wasser sauer (pH<7), neutral (pH=7) oder alkalisch (pH>7) ist. Er wird durch die geologische Beschaffenheit des Einzugsgebiets (Pufferkapazität) und maßgeblich durch die biologische Aktivität (Photosynthese und Respiration) beeinflusst.26
* **Grenzwerte (Gross Range Test):**
  + **Unterer Grenzwert: 0.** Entspricht der Untergrenze der pH-Skala und des Sensors.
  + **Oberer Grenzwert: 14.** Entspricht der Obergrenze der pH-Skala und des Sensors.
* **Schwellenwerte (Climatology Test):** Seen im Norddeutschen Tiefland sind typischerweise gut gepuffert und zirkumneutral bis leicht alkalisch.19 Extreme Abweichungen werden durch biologische Prozesse verursacht.
  + **Unterer Schwellenwert: 6.5.** Werte darunter sind in dieser Region selten, es sei denn, es liegt ein starker Einfluss von Moorgebieten (huminsäurereiche Wässer) oder saurem Regen in schlecht gepufferten Systemen vor.
  + **Oberer Schwellenwert: 9.5.** Während intensiver Algenblüten kann der pH-Wert durch den massiven Entzug von Kohlendioxid (CO2​) aus dem Wasser durch Photosynthese stark ansteigen. Werte bis 9.5 sind in eutrophen Seen im Sommer plausibel.28 Werte über 9.5 sind sehr selten und verdächtig.

#### **2.2.2. Redoxpotential (mV)**

* **Definition:** Das Oxidations-Reduktions-Potenzial (ORP) ist ein Maß für die Fähigkeit eines Gewässers, Stoffe chemisch zu oxidieren oder zu reduzieren. Es ist ein Indikator für die An- oder Abwesenheit von gelöstem Sauerstoff und anderen oxidierenden bzw. reduzierenden Substanzen. Hohe positive Werte zeigen sauerstoffreiche (oxische) Bedingungen an, während niedrige oder negative Werte auf sauerstoffarme (anoxische) und reduzierende Verhältnisse hindeuten.29
* **Grenzwerte (Gross Range Test):** Basierend auf typischen Sensorbereichen.
  + **Unterer Grenzwert: -1500 mV.**
  + **Oberer Grenzwert: +1500 mV.**
* **Schwellenwerte (Climatology Test):** Im Oberflächenwasser (Epilimnion) von Badeseen, das im Kontakt mit der Atmosphäre steht und Photosynthese stattfindet, sind stark oxidierende Bedingungen zu erwarten.
  + **Unterer Schwellenwert: +100 mV.** Werte unterhalb dieses Bereichs im Oberflächenwasser sind ungewöhnlich und deuten auf Sauerstoffzehrung, den Eintrag stark reduzierender Substanzen (z.B. Abwasser) oder eine Fehlfunktion des Sensors (Verschmutzung, Drift) hin. Ein gesunder, gut durchlüfteter See sollte Werte zwischen +300 und +500 mV aufweisen.29
  + **Oberer Schwellenwert: +600 mV.** Extrem hohe Werte sind selten und könnten auf den Eintrag starker Oxidationsmittel oder Sensorprobleme hindeuten.

#### **2.2.3. Leitfähigkeit (µS/cm)**

* **Definition:** Die elektrische Leitfähigkeit ist ein Maß für die Fähigkeit des Wassers, elektrischen Strom zu leiten. Sie hängt direkt von der Konzentration, Beweglichkeit und Wertigkeit der gelösten Ionen (Salze, Mineralien) ab und dient als guter Proxy für die gesamten gelösten Feststoffe (TDS).31
* **Grenzwerte (Gross Range Test):**
  + **Unterer Grenzwert: 0 µS/cm.**
  + **Oberer Grenzwert: 2500 µS/cm.** Süßwasser überschreitet diesen Wert nur bei massiver Verschmutzung oder Salzwassereintrag.31
* **Schwellenwerte (Climatology Test):** Die Leitfähigkeit in Binnenseen des Norddeutschen Tieflands wird durch die Geologie und den Grad der anthropogenen Beeinflussung bestimmt. Die Werte sind im Vergleich zu Gebirgsseen tendenziell höher.
  + **Unterer Schwellenwert: 100 µS/cm.** Werte darunter deuten auf sehr mineralarmes Wasser oder eine starke Verdünnung durch massive Niederschläge hin.
  + **Oberer Schwellenwert: 1000 µS/cm.** Basierend auf Studien an Seen in geologisch ähnlichen Regionen (z.B. Polen, Deutschland) liegt der typische Bereich meist zwischen 150 und 800 µS/cm.32 Werte über 1000 µS/cm sind für Badeseen in der Region unüblich und deuten auf erhöhte Einträge aus Landwirtschaft oder Siedlungsentwässerung hin.

#### **2.2.4. Gelöster Sauerstoff (mg/L)**

* **Definition:** Die Konzentration von gelöstem, molekularem Sauerstoff (O2​) im Wasser ist für fast alle höheren aquatischen Lebewesen überlebenswichtig. Sie wird durch das Gleichgewicht von physikalischem Eintrag aus der Atmosphäre, der Produktion durch Photosynthese und dem Verbrauch durch Respiration und Zersetzungsprozesse bestimmt.35
* **Grenzwerte (Gross Range Test):**
  + **Unterer Grenzwert: 0 mg/L.**
  + **Oberer Grenzwert: 25 mg/L.** Die physikalische Löslichkeit von Sauerstoff in kaltem Wasser liegt bei ca. 14 mg/L. Durch Photosynthese kann es zu einer starken Übersättigung kommen, aber Werte über 20-25 mg/L sind extrem unwahrscheinlich und deuten auf einen Sensorfehler hin.35
* **Schwellenwerte (Climatology Test):** Die Sauerstoffkonzentration ist extrem dynamisch.
  + **Unterer Schwellenwert: 4 mg/L.** Dieser Wert gilt als kritische Grenze für viele Fischarten.25 Ein Unterschreiten dieses Wertes im Oberflächenwasser eines Badesees ist ein alarmierendes Zeichen für eine massive Sauerstoffzehrung (z.B. nach dem Zusammenbruch einer Algenblüte) oder einen Sensordefekt.
  + **Oberer Schwellenwert: 18 mg/L.** Während starker Algenblüten an sonnigen Tagen kann die Sauerstoffkonzentration durch intensive Photosynthese weit über die Sättigungsgrenze ansteigen (Übersättigung). Werte bis zu 18 mg/L (oder ca. 200% Sättigung) sind in solchen Situationen plausibel.26
* **Konsistenzprüfung mit anderen Parametern:** Die stärkste Validierung für die elektrochemischen Parameter ergibt sich aus ihrer wechselseitigen Abhängigkeit, die durch die Photosynthese angetrieben wird. In einem produktiven See (erkennbar an hohen Chlorophyll-Werten) muss ein klares Tagesgangmuster zu beobachten sein:
  + **Tagsüber:** Photosynthese dominiert. CO2​ wird verbraucht, was den pH-Wert ansteigen lässt. O2​ wird produziert, was die Konzentration an gelöstem Sauerstoff erhöht.26
  + **Nachts:** Respiration dominiert. CO2​ wird freigesetzt, was den pH-Wert senkt. O2​ wird verbraucht, was die Konzentration an gelöstem Sauerstoff senkt.
  + Eine Verletzung dieses Musters (z.B. hohe Chlorophyll-Werte, aber flache pH- und Sauerstoffkurven; oder ein Anstieg des pH-Wertes bei gleichzeitigem Abfall des Sauerstoffs am Tag) ist ein starkes Indiz für einen Sensorfehler oder einen systemischen Messfehler und sollte durch den iForest-Algorithmus als multivariate Anomalie erkannt werden.

### **2.3. Optische und partikuläre Parameter**

Diese Parameter werden mit optischen Methoden erfasst und beschreiben die im Wasser suspendierten Partikel sowie die daraus resultierende Wasserfarbe und -klarheit.

#### **2.3.1. Trübung (NTU)**

* **Definition:** Die Trübung (Nephelometric Turbidity Units) ist ein optisches Maß für die Streuung von Licht durch im Wasser suspendierte Partikel. Dazu gehören anorganische Partikel (Ton, Schluff), organische Partikel (Algen, Detritus) und andere Substanzen.38 Sie ist ein Hauptindikator für die Wasserklarheit.
* **Grenzwerte (Gross Range Test):** Basierend auf typischen Sensorbereichen.
  + **Unterer Grenzwert: 0 NTU.**
  + **Oberer Grenzwert: 4000 NTU.**
* **Schwellenwerte (Climatology Test):** Die Trübung ist sehr variabel und hängt vom Seentyp, der Jahreszeit und externen Ereignissen (Sturm, Starkregen) ab.
  + **Unterer Schwellenwert: 1 NTU.** Sehr klare, nährstoffarme Seen können Werte unter 2 NTU aufweisen.39 Ein Wert nahe Null ist plausibel.
  + **Oberer Schwellenwert: 50 NTU.** Nährstoffreiche (eutrophe) Seen können während Algenblüten oder nach Starkregenereignissen mit hohem Sedimenteintrag deutlich höhere Werte erreichen. Werte über 50 NTU gelten als sehr trüb.41 An Badestellen wird eine solche Trübung als starke Beeinträchtigung wahrgenommen und kann auch auf hygienische Probleme hindeuten.43

#### **2.3.2. Chlorophyll-a (Chl-a) (µg/L)**

* **Definition:** Chlorophyll-a ist das primäre Photosynthesepigment in allen Algen und Cyanobakterien. Seine Konzentration wird als Standard-Proxy für die gesamte Phytoplankton-Biomasse in einem Gewässer verwendet und ist ein zentraler Indikator für den Trophiegrad (Nährstoffzustand) eines Sees.36
* **Grenzwerte (Gross Range Test):**
  + **Unterer Grenzwert: 0 µg/L.**
  + **Oberer Grenzwert: 500 µg/L.** In extremen Fällen von aufschwimmenden Algenmatten ("scums") können lokal höhere Konzentrationen auftreten, aber für eine Messung im Wasserkörper ist 500 µg/L ein robuster oberer Grenzwert.
* **Schwellenwerte (Climatology Test):** Die Schwellenwerte orientieren sich direkt an den Trophieklassifikationssystemen.41
  + **Unterer Schwellenwert: 1 µg/L.** Werte, die dauerhaft darunter liegen, sind für die meisten norddeutschen Seen untypisch und könnten auf ein Problem mit dem Sensor (z.B. Biofouling) hindeuten.
  + **Oberer Schwellenwert: 150 µg/L.** Dieser Wert repräsentiert eine sehr starke Algenblüte. Die Trophiegrenzen sind wie folgt:
    - Oligotroph (nährstoffarm): <2 µg/L
    - Mesotroph (mäßig nährstoffreich): 2−8 µg/L
    - Eutroph (nährstoffreich): 8−50 µg/L
    - Hypereutroph (übermäßig nährstoffreich): >50 µg/L  
      Messwerte über 50 µg/L deuten klar auf eine starke, potenziell problematische Algenblüte hin und sollten als verdächtig geflaggt werden.

#### **2.3.3. Phycocyanin Abs. & Phycocyanin Abs. (comp) (Abs/m)**

* **Definition:** Phycocyanin ist ein akzessorisches Photosynthesepigment, das spezifisch für Cyanobakterien (umgangssprachlich "Blaualgen") ist.46 Seine Messung erlaubt eine spezifische Erfassung der Biomasse dieser potenziell toxischen Organismengruppe, im Gegensatz zu Chlorophyll-a, das alle Algen erfasst. Die Einheit "Abs/m" deutet auf eine Messung der Absorption pro Meter hin, typisch für in-situ Spektrophotometer. Der Zusatz "(comp)" steht wahrscheinlich für eine kompensierte Messung, die z.B. Störungen durch Trübung oder Gelbstoffe korrigiert.
* **Grenzwerte (Gross Range Test):** Sensor-spezifisch.
  + **Unterer Grenzwert: 0 Abs/m.**
  + **Oberer Grenzwert: 1000 Abs/m.** Ein hoher Wert, der die meisten denkbaren Blooms abdeckt.
* **Schwellenwerte (Climatology Test):** Dies ist der am schwierigsten zu definierende Schwellenwert, da es keine universelle, direkte Umrechnung von instrumentellen Einheiten (Abs/m oder auch RFU - Relative Fluorescence Units) in biologisch relevante Einheiten wie Zellen/mL oder Toxin-Konzentrationen gibt.47 Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) hat Warnstufen basierend auf Zellzahlen oder Biovolumen definiert, die mit Risiken für die menschliche Gesundheit korrelieren.49 Beispielsweise entspricht die "Alert Level 1" der WHO ca. 20,000 Cyanobakterien-Zellen/mL, was wiederum grob einer extrahierten Phycocyanin-Konzentration von 30 µg/L entsprechen kann.51
  + **Unterer Schwellenwert: 0.1 Abs/m.** Ein Wert nahe Null ist zu erwarten, wenn keine Cyanobakterien vorhanden sind.
  + **Oberer Schwellenwert: 100 Abs/m.** Dies ist ein vorläufiger, konservativer Wert.
  + **Dringende Empfehlung:** Es ist unerlässlich, eine standort- und sensor-spezifische Kalibrierung durchzuführen. Dabei sollten parallel zur in-situ Messung Wasserproben entnommen und im Labor auf Cyanobakterien-Zellzahlen und/oder Chlorophyll-a analysiert werden. Nur so können robuste, für die Gesundheitsbewertung relevante Schwellenwerte in der Einheit "Abs/m" abgeleitet werden. Als grober Anhaltspunkt könnten Werte über 20-30 Abs/m eine beginnende Blüte signalisieren.
* **Konsistenzprüfung der optischen Parameter:** Das Verhältnis der drei Parameter Trübung, Chlorophyll-a und Phycocyanin erlaubt eine Differenzierung der Ursachen für eine schlechte Sichttiefe.
  + **Szenario 1: Cyanobakterienblüte.** Hohe Trübung, hohe Chl-a-Werte, hohe Phycocyanin-Werte.
  + **Szenario 2: Andere Algenblüte (z.B. Grünalgen, Kieselalgen).** Hohe Trübung, hohe Chl-a-Werte, niedrige Phycocyanin-Werte.
  + **Szenario 3: Anorganische Trübung.** Hohe Trübung, niedrige Chl-a-Werte, niedrige Phycocyanin-Werte. Dies deutet auf aufgewirbeltes Sediment nach einem Sturm oder einen starken Eintrag von Partikeln nach Starkregen hin. Eine Regel wie IF (Trübung > 20 NTU) AND (Chl-a < 5 µg/L) THEN Flag = 'Anorganisches Trübungsereignis' kann wertvolle Zusatzinformationen liefern.

### **2.4. Chemische Summenparameter und Nährstoffe**

Diese Parameter beschreiben den Gehalt an organischem Material und wesentlichen Nährstoffen, die das Algenwachstum steuern.

#### **2.4.1. TOC (Total Organic Carbon) & DOC (Dissolved Organic Carbon) (mg/L)**

* **Definition:** TOC (gesamter organischer Kohlenstoff) ist die Summe allen Kohlenstoffs in organischen Verbindungen. DOC (gelöster organischer Kohlenstoff) ist die Fraktion davon, die einen feinen Filter (meist 0.45 µm) passiert. In den meisten Seen macht DOC über 90% des TOC aus.52 Die Quellen sind sowohl extern (allochthon, z.B. Huminstoffe aus Mooren und Böden des Einzugsgebiets) als auch intern (autochthon, z.B. Ausscheidungen von Algen).52
* **Grenzwerte (Gross Range Test):**
  + **Unterer Grenzwert: 0 mg/L.**
  + **Oberer Grenzwert: 100 mg/L.** Werte darüber sind in nicht-industriell beeinflussten Süßwässern praktisch ausgeschlossen.53
* **Schwellenwerte (Climatology Test):** Seen im Norddeutschen Tiefland sind oft durch Einflüsse aus Mooren und Wäldern geprägt und können daher von Natur aus erhöhte DOC-Konzentrationen aufweisen, die zu einer Braunfärbung des Wassers führen (huminstoffreiche Seen).
  + **Unterer Schwellenwert: 2 mg/L.** Werte darunter sind typisch für sehr klare, nährstoffarme Gebirgsseen, aber untypisch für die norddeutsche Tiefebene.
  + **Oberer Schwellenwert: 25 mg/L.** Der typische Bereich für diese Region liegt zwischen 3 und 20 mg/L.54 Werte über 25 mg/L sind hoch und deuten auf einen sehr starken Moorerdeinfluss oder eine organische Verschmutzung hin.

#### **2.4.2. Nitrat (mg/L)**

* **Definition:** Nitrat (NO3−​) ist eine der wichtigsten anorganischen Stickstoffverbindungen und ein essentieller Nährstoff für das Algenwachstum. Hohe Konzentrationen deuten auf Einträge aus der Landwirtschaft oder aus Kläranlagen hin.
* **Grenzwerte (Gross Range Test):**
  + **Unterer Grenzwert: 0 mg/L.**
  + **Oberer Grenzwert: 100 mg/L.** Der Grenzwert für Trinkwasser liegt bei 50 mg/L.57 Ein Wert von 100 mg/L dient als sicherer oberer Grenzwert für die Messung im Oberflächenwasser.
* **Schwellenwerte (Climatology Test):** Die Nitratkonzentration im Epilimnion produktiver Seen ist während der Vegetationsperiode (Frühling/Sommer) typischerweise sehr niedrig, da es von Algen schnell aufgenommen und verbraucht wird (Zehrung).
  + **Unterer Schwellenwert: 0.01 mg/L.** Werte nahe der Nachweisgrenze sind während Algenblüten zu erwarten und völlig plausibel.
  + **Oberer Schwellenwert: 5.0 mg/L.** Der Orientierungswert der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) für Flüsse, die in die Ostsee münden, liegt bei 2.6 mg/L Gesamtstickstoff, was ca. 11.5 mg/L Nitrat entspricht.17 In stehenden Gewässern sind die Konzentrationen jedoch oft niedriger. Werte über 5.0 mg/L im Sommer deuten auf einen starken, kontinuierlichen Nährstoffeintrag hin, der die Aufnahmekapazität der Algen übersteigt, oder auf eine Fehlmessung. Im Winter, wenn die biologische Aktivität gering ist, können höhere Werte (bis 10-15 mg/L) plausibel sein.

## **III. Konsolidierte Validierungstabelle und Implementierungshinweise**

Dieser Abschnitt fasst die Ergebnisse der parameter-spezifischen Analyse in einer zentralen, operativ nutzbaren Tabelle zusammen und gibt weiterführende Empfehlungen für die Implementierung und Verfeinerung des Validierungssystems.

### **3.1. Master-Tabelle der Schwellen- und Grenzwerte**

Die folgende Tabelle stellt das Kernergebnis dieses Berichts dar. Sie listet für jeden Parameter die empfohlenen unteren und oberen Grenzwerte (für den QARTOD Gross Range Test, Flag 4) und Schwellenwerte (für den QARTOD Climatology Test, Flag 3) auf. Die Spalte "Begründung & Anmerkungen" fasst die Herleitung zusammen und gibt wichtige Hinweise für die praktische Anwendung.

**Tabelle 1: Master-Tabelle der Validierungswerte für die automatisierte Qualitätskontrolle von Badesee-Messdaten**

| Parameter | Einheit | Unterer Grenzwert | Oberer Grenzwert | Unterer Schwellenwert | Oberer Schwellenwert | Begründung & Anmerkungen |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Physikalische Leitmessgrößen** |  |  |  |  |  |  |
| Lufttemperatur | °C | -35 | 45 | -15 (Winter) / +8 (Sommer) | +15 (Winter) / +35 (Sommer) | Basiert auf Klimarekorden und 30-Jahres-Mitteln für MV.20 Schwellenwerte sind saisonal anzupassen. |
| Wassertemperatur (alle Tiefen) | °C | -2 | 38 | 0 (Winter) / +15 (Sommer) | +6 (Winter) / +28 (Sommer) | Untergrenze berücksichtigt Gefrierpunkt. Obergrenze übertrifft Hitzewellen-Szenarien. Schwellenwerte saisonal.25 Tiefenstaffelung auf Konsistenz prüfen. |
| **Elektrochemische Parameter** |  |  |  |  |  |  |
| pH-Wert | (keine) | 0 | 14 | 6.5 | 9.5 | Sensor-Range. Schwellenwerte basieren auf typ. Pufferkapazität und biolog. Aktivität (Photosynthese) in nordd. Seen.19 |
| Redoxpotential | mV | -1500 | 1500 | +100 | +600 | Sensor-Range. Schwellenwerte für oxisches Oberflächenwasser. Werte < +100 mV sind im Epilimnion sehr verdächtig.29 |
| Leitfähigkeit | µS/cm | 0 | 2500 | 100 | 1000 | Typischer Bereich für Süßwasser. Schwellenwerte basieren auf Daten für geologisch ähnliche Tieflandseen.32 |
| Gelöster Sauerstoff | mg/L | 0 | 25 | 4.0 | 18.0 | Obergrenze berücksichtigt starke Übersättigung durch Photosynthese. Unterer Schwellenwert ist kritische Grenze für Fische.25 |
| **Optische & Partikuläre Parameter** |  |  |  |  |  |  |
| Trübung | NTU | 0 | 4000 | 1.0 | 50.0 | Sensor-Range. Oberer Schwellenwert repräsentiert stark getrübtes Wasser durch Algenblüte oder Sedimenteintrag.39 |
| Chl-a | µg/L | 0 | 500 | 1.0 | 150.0 | Oberer Schwellenwert repräsentiert eine sehr starke Algenblüte. Werte > 50 µg/L deuten auf hypereutrophe Bedingungen hin.41 |
| Phycocyanin Abs. (comp) | Abs/m | 0 | 1000 | 0.1 | 100.0 | **WICHTIG:** Schwellenwerte sind grobe Schätzungen. Eine standort- und sensor-spezifische Kalibrierung ist für eine valide Interpretation unerlässlich.48 |
| Phycocyanin Abs. | Abs/m | 0 | 1000 | 0.1 | 100.0 | Siehe Phycocyanin (comp). Die unkompensierte Messung ist anfälliger für Störungen durch Trübung und Gelbstoffe. |
| **Chemische Summenparameter & Nährstoffe** |  |  |  |  |  |  |
| TOC | mg/L | 0 | 100 | 2.0 | 25.0 | Schwellenwerte spiegeln den typischen Bereich für huminstoffbeeinflusste norddeutsche Tieflandseen wider.55 |
| DOC | mg/L | 0 | 100 | 2.0 | 25.0 | In der Regel >90% des TOC. Dieselben Werte wie für TOC sind anwendbar. |
| Nitrat | mg/L | 0 | 100 | 0.01 | 5.0 | Oberer Schwellenwert für die Vegetationsperiode. Im Sommer sind Werte nahe der Nachweisgrenze durch Algenzehrung zu erwarten.17 |

### **3.2. Empfehlungen für die dynamische Anpassung der Schwellenwerte**

Die in Tabelle 1 angegebenen Schwellenwerte stellen eine robuste, wissenschaftlich fundierte Ausgangsbasis dar. Eine der Stärken des QARTOD-Ansatzes liegt jedoch in seiner Fähigkeit, sich an lokale Gegebenheiten anzupassen.5 Es wird daher dringend empfohlen, die kontinuierlich anfallenden und validierten Messdaten zu nutzen, um diese initialen Schwellenwerte im Laufe der Zeit zu verfeinern.

Ein bewährtes Verfahren hierfür ist die Berechnung statistischer Kennzahlen aus den eigenen historischen Zeitreihen. Nach einer Anlaufphase von mindestens einem vollen Jahr können für jeden Parameter und für jeden Monat (oder jede Jahreszeit) die Perzentile aus den validierten Daten berechnet werden. Beispielsweise könnten der neue untere und obere Schwellenwert als das 5. und 95. Perzentil der Daten des jeweiligen Monats aus den Vorjahren definiert werden. Dieser Ansatz führt zu dynamischen, standortspezifischen und saisonal angepassten Schwellenwerten, die die Genauigkeit der Anomalieerkennung erheblich steigern und die Anzahl der Fehlalarme reduzieren.

### **3.3. Implementierung von Multi-Parameter-Konsistenzprüfungen**

Die fortschrittlichste Stufe der automatisierten Validierung, die ideal für die Implementierung mit iForest geeignet ist, geht über die Prüfung einzelner Parameter hinaus und bewertet die Plausibilität ihrer Kombinationen. Basierend auf der limnologischen Analyse in Abschnitt II werden folgende Konsistenzprüfungen empfohlen:

* **Prüfung des diurnalen Zyklus:** In produktiven Seen besteht eine starke Kopplung zwischen Algenbiomasse, pH-Wert und gelöstem Sauerstoff.
  + **Regel:** IF (Chl-a > 10 µg/L) THEN EXPECT (positive\_correlation(diurnal\_pattern(pH), diurnal\_pattern(DO))).
  + **Logik:** Wenn die Chlorophyll-Konzentration auf eine signifikante Algenpopulation hindeutet, müssen pH-Wert und gelöster Sauerstoff einen ausgeprägten Tagesgang mit einem Maximum am späten Nachmittag und einem Minimum vor Sonnenaufgang aufweisen.26 Das Fehlen dieses Musters oder eine negative Korrelation zwischen pH und Sauerstoff am Tag ist hochgradig anomal.
* **Prüfung der Trübungsquelle:** Das Verhältnis von Trübung zu Algenpigmenten ermöglicht eine qualitative Aussage über die Herkunft der Trübung.
  + **Regel:** IF (Trübung > 20 NTU) AND (Chl-a < 5 µg/L) THEN FLAG ('Non-Algal Turbidity Event').
  + **Logik:** Eine hohe Trübung bei gleichzeitig niedriger Algenbiomasse deutet darauf hin, dass die Trübung nicht durch Phytoplankton, sondern durch aufgewirbeltes anorganisches Sediment (nach Sturm) oder durch einen Eintrag von partikulärem Material (nach Starkregen) verursacht wird.38
* **Prüfung der thermischen Schichtung:** Die Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche und 2 m Tiefe definiert den Schichtungszustand des Sees.
  + **Regel:** IF (Wassertemperatur\_0.5m - Wassertemperatur\_2.0m) > 2°C THEN FLAG ('Stratified').
  + **Logik:** Im geschichteten Zustand entkoppeln sich die biogeochemischen Prozesse im Oberflächen- und Tiefenwasser. Dies hat Auswirkungen auf die erwarteten Werte anderer Parameter in der Tiefe (z.B. Sauerstoffzehrung). Die Kenntnis des Schichtungszustands ist für die Validierung von Tiefenprofilen entscheidend.
* **Prüfung der Nährstoffzehrung:** In einem nährstofflimitierten System führt hohes Algenwachstum zur Erschöpfung der verfügbaren Nährstoffe.
  + **Regel:** IF (Chl-a > 20 µg/L) THEN EXPECT (Nitrat -> Nachweisgrenze).
  + **Logik:** Hohe Nitratkonzentrationen während einer starken Algenblüte sind unplausibel. Sie deuten entweder auf einen Fehler des Nitratsensors oder auf einen massiven, neuen Nährstoffeintrag hin, der die Aufnahmekapazität der Algen übersteigt.

Diese multivariaten Prüfungen nutzen die Synergien zwischen den verschiedenen Messparametern und ermöglichen eine weitaus robustere und intelligentere Qualitätskontrolle, als es mit univariaten Schwellenwerten allein möglich wäre.

## **IV. Zusammenfassung und strategische Empfehlungen**

Die Etablierung eines robusten Systems zur automatisierten Qualitätskontrolle für hochfrequente Gewässerdaten ist eine komplexe Aufgabe, die über die reine Anwendung von Algorithmen hinausgeht. Sie erfordert ein fundiertes Verständnis der regulatorischen Rahmenbedingungen, der limnologischen Prozesse und der informationstechnischen Möglichkeiten.

Dieser Bericht hat einen umfassenden Validierungsrahmen für die Überwachung von 20 Badeseen in Vorpommern-Greifswald dargelegt. Die zentrale Erkenntnis ist, dass die geltende EU-Badegewässerrichtlinie für die Mehrheit der gemessenen physikalisch-chemischen Parameter keine numerischen Grenzwerte vorschreibt. Die Ableitung operativ nutzbarer Validierungswerte muss daher auf einer wissenschaftlichen Grundlage erfolgen, die sich an der Ökologie und Typologie der Gewässer nach der Wasserrahmenrichtlinie orientiert.

Es wurde eine zweistufige Validierungsphilosophie basierend auf dem internationalen QARTOD-Standard vorgestellt, die zwischen absoluten **Grenzwerten** (Gross Range Test) zur Erkennung von Totalausfällen und ökologisch plausiblen **Schwellenwerten** (Climatology Test) zur Identifizierung verdächtiger Daten unterscheidet. Die detaillierte, parameter-spezifische Herleitung dieser Werte wurde in einer konsolidierten Master-Tabelle zusammengefasst, die als direkte Grundlage für die Implementierung im automatisierten Validierungssystem dient.

Darüber hinaus wurden Empfehlungen für die dynamische Anpassung der Schwellenwerte auf Basis der eigenen wachsenden Datenbasis sowie für die Implementierung von anspruchsvollen Multi-Parameter-Konsistenzprüfungen gegeben. Diese fortgeschrittenen Prüfungen, die die komplexen Wechselwirkungen zwischen biologischen und chemischen Prozessen (z.B. den diurnalen Zyklus von Photosynthese und Respiration) nutzen, stellen das höchste Potenzial für eine intelligente und kontextsensitive Datenvalidierung dar.

Als abschließende strategische Empfehlung wird die **Priorisierung der standortspezifischen Kalibrierung des Phycocyanin-Sensors** hervorgehoben. Da dieser Sensor ein direkter Indikator für potenziell gesundheitsgefährdende Cyanobakterien-Blüten ist, ist seine genaue Quantifizierung von höchster Bedeutung für den Schutz der Öffentlichkeit. Die Korrelation der instrumentellen Messwerte (Abs/m) mit laboranalytisch bestimmten Zellzahlen ist der entscheidende Schritt, um die hochfrequenten Messdaten in belastbare, für die Gesundheitsbehörden handlungsrelevante Informationen zu überführen.

Die Kombination aus hochfrequenter In-situ-Sensorik und einem mehrstufigen, wissenschaftlich fundierten, automatisierten Validierungssystem, wie hier skizziert, bildet die Grundlage für ein modernes, effizientes und proaktives Gewässermanagement, das den Anforderungen des 21. Jahrhunderts gerecht wird.

#### Referenzen

1. Manual for Real-Time Quality Control of Water Level Data, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://ocefpaf.github.io/qartod_manuals/v0.1.0/Water_Level/>
2. Manual for - Real-Time Quality Control of Wind Data - Repository OceanBestPractices, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://repository.oceanbestpractices.org/bitstream/handle/11329/264/qartod_wind_manual.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
3. Manual for Real-Time Quality Control of Dissolved Oxygen Observations - IOCCP, Zugriff am Juli 7, 2025, <http://www.ioccp.org/images/D4standards/qartod_dissolved_oxygen_manual.pdf>
4. QARTOD - Ocean Observatories Initiative, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://oceanobservatories.org/tag/qartod/>
5. APPENDIX F - AOOS QARTOD APPLICATONS - Alaska Ocean Observing System, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://aoos.org/wp-content/uploads/APPENDIX-F-AOOS-QARTOD-APPLICATONS.pdf>
6. RICHTLINIE 2006/7/EG DES EUROPÄISCHEN ... - EUR-Lex, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2006:064:0037:0051:DE:PDF>
7. Richtlinie 2006/7/EG (Badegewässerrichtlinie) - Wikipedia, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://de.wikipedia.org/wiki/Richtlinie_2006/7/EG_(Badegew%C3%A4sserrichtlinie)>
8. Badewasserkarte - Regierungsportal M-V - regierung-mv.de, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.regierung-mv.de/Landesregierung/sm/gesundheit/Badewasserqualitaet/badewasserkarte/>
9. Badewasserqualität - Regierungsportal M-V, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.regierung-mv.de/Landesregierung/sm/gesundheit/Badewasserqualitaet/>
10. Badewasserhygiene / LK Vorpommern-Rügen Web, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.lk-vr.de/Kreisverwaltung/Gesundheit/Hygiene-Infektionsschutz/Badewasserhygiene/>
11. Sächsische Badegewässer-Verordnung – SächsBadegewVO - REVOSax, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.revosax.sachsen.de/vorschrift/10076-Saechsische-Badegewaesser-Verordnung>
12. Rechtsgrundlage & Überwachung - Ministerium für Arbeit, Soziales, Gesundheit und Gleichstellung - Landesportal Sachsen-Anhalt, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://ms.sachsen-anhalt.de/themen/gesundheit/daten-zur-gesundheit/badegewaesser/rechtsgrundlage-ueberwachung>
13. Aktuelle Hinweise - Regierungsportal M-V, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.regierung-mv.de/Landesregierung/sm/gesundheit/Badewasserqualitaet/Aktuelle-Hinweise/>
14. Badegewässer - hamburg.de, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.hamburg.de/politik-und-verwaltung/behoerden/bukea/themen/wasser/badegewaesser>
15. WRRL in Zahlen - Wasserrahmenrichtlinie in Mecklenburg-Vorpommern, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.wrrl-mv.de/service/WRRL-in-Zahlen/>
16. Arbeitshilfe zur Erstellung von Vorplanungen für Vorhaben zur hydromorphologischen Verbesse- rung von Fließgewässern, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.regierung-mv.de/static/Regierungsportal/Ministerium%20f%C3%BCr%20Landwirtschaft%20und%20Umwelt/Inhalte/F%C3%B6rderungen/2024_LB_ANLAGE_1.13_arbeitshilfe_vorplanungen_hydromorphologische_vorhaben.pdf>
17. OGewV - Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer 1 - Gesetze im Internet, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.gesetze-im-internet.de/ogewv_2016/BJNR137310016.html>
18. Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung - OGewV) - Gesetze im Internet, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.gesetze-im-internet.de/ogewv_2016/OGewV.pdf>
19. Fließgewässer der Bundesrepublik Deutschland - Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser - LAWA, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.lawa.de/documents/fliessgewaesser_bundesrepublik_deutschland_karten_wasserbeschaffenheit_1982-1987_teil_1_1552305915.pdf>
20. Temperaturrekorde MV - Wetter und Klima in Mecklenburg-Vorpommern, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://mv-wetter.com/temperaturrekorde-mv/>
21. Regionale Klimafolgen in Mecklenburg-Vorpommern - Umweltbundesamt, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/folgen-des-klimawandels/klimafolgen-deutschland/regionale-klimafolgen-in-mecklenburg-vorpommern>
22. Klimareport Mecklenburg-Vorpommern 2024, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.wrrl-mv.de/static/WRRL/Dateien/Dokumente/Service/Dokumente/2024_Klimareport_MV_bf.pdf>
23. Mecklenburg-Vorpommern: Durchschnittliche Temperatur (1981-2010) | Norddeutscher Klimamonitor, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.norddeutscher-klimamonitor.de/klima/1981-2010/jahr/durchschnittliche-temperatur/mecklenburg-vorpommern/dwd-nkdz.html>
24. Klimaausblick Mecklenburg-Vorpommern - Climate Service Center Germany, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.climate-service-center.de/imperia/md/content/csc/projekte/klimasignalkarten/gerics_klimaausblick_mecklenburgvorpommern_version1.2_deutsch.pdf>
25. German lakes under climate change - IGB Berlin, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.igb-berlin.de/en/news/german-lakes-under-climate-change>
26. parameters - LakeTech, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.laketech.com/parameters>
27. Limnology Unit 2 – Physical Properties of Freshwater Systems - Fiveable, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://library.fiveable.me/limnology/unit-2>
28. (PDF) RELATIONSHIP BETWEEN CHLOROPHYLL-A, PH, AND DISSOLVED OXYGEN IN A TROPICAL URBAN LAKE WATERS: A CASE STUDY FROM AIR HITAM LAKE, SAMARINDA CITY, INDONESIA - ResearchGate, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.researchgate.net/publication/390152616_RELATIONSHIP_BETWEEN_CHLOROPHYLL-A_PH_AND_DISSOLVED_OXYGEN_IN_A_TROPICAL_URBAN_LAKE_WATERS_A_CASE_STUDY_FROM_AIR_HITAM_LAKE_SAMARINDA_CITY_INDONESIA>
29. Oxidation-Reduction Potential (ORP), Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.gov.nt.ca/sites/ecc/files/oxidation-reduction_potential.pdf>
30. From the Aquarium Lab - Oxidation Reduction Potential of Substrate - Evaluating ORP Values of Substrate Size, Depth, and the Effect of Current, Zugriff am Juli 7, 2025, <http://www.aquaworldaquarium.com/articles/ORPofSubstrate.html>
31. Water quality standards, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://mrccc.org.au/wp-content/uploads/2013/10/Water-Quality-Salinity-Standards.pdf>
32. Spatial Differentiation and Multiannual Dynamics of Water Conductivity in Lakes of the Suwałki Landscape Park - MDPI, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.mdpi.com/2073-4441/12/5/1277>
33. What Is The Typical Water Conductivity Range? - Atlas Scientific, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://atlas-scientific.com/blog/water-conductivity-range/>
34. Predicting current and future background ion concentrations in German surface water under climate change - PubMed Central, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6283972/>
35. Dissolved Oxygen - Environmental Measurement Systems, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/dissolved-oxygen/>
36. Understanding Water Quality Parameters - Part 1 - NexSens, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.nexsens.com/blog/water-quality-parameters-part-1.htm>
37. Common Lake Water Quality Parameters - Illinois Environmental Protection Agency, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://epa.illinois.gov/content/dam/soi/en/web/epa/documents/water/conservation/lake-notes/quality-parameters.pdf>
38. Turbidity, Total Suspended Solids & Water Clarity - Environmental Measurement Systems, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.fondriest.com/environmental-measurements/parameters/water-quality/turbidity-total-suspended-solids-water-clarity/>
39. Minnesota Lake Water Quality Assessment Report: Developing Nutrient Criteria. Third Edition, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.pca.state.mn.us/sites/default/files/wq-lar3-01.pdf>
40. An Assessment of Trophic Status of 25 Lakes in the Matanuska-Susitna Borough, Alaska, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.adfg.alaska.gov/fedaidpdfs/RIR.2A.2000.26.pdf>
41. Water Quality Parameters - KnowYourH2O, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://files.knowyourh2o.com/pdfs/FS-WQ-Parameters.pdf>
42. Water Quality Parameters - KnowYourH2O, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://files.knowyourh2o.com/water-library/Lake/wq_parameters.pdf>
43. Wasserqualität von Badessen: So erkennt man sie - ZDFheute, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.zdfheute.de/ratgeber/wasserqualitaet-badesee-badegewaesser-100.html>
44. Lake Parameter Fact Sheets - NY.gov, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://extapps.dec.ny.gov/docs/water_pdf/cslaplkpara.pdf>
45. Learn More: Trophic State Index (TSI) - Lake County Water Atlas - University of South Florida, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://lake.wateratlas.usf.edu/library/learn-more/learnmore.aspx?toolsection=lm_tsi>
46. Empirical Model for Phycocyanin Concentration Estimation as an Indicator of Cyanobacterial Bloom in the Optically Complex Coastal Waters of the Baltic Sea - MDPI, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.mdpi.com/2072-4292/8/3/212>
47. Chlorophyll and Phycocyanin Raw Fluorescence May Inform Recreational Lake Managers on Cyanobacterial HABs and Toxins: Lake Fayetteville Case Study | UCOWR, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://ucowr.org/issue/177/chlorophyll-and-phycocyanin-raw-fluorescence-may-inform-recreational-lake-managers-on-cyanobacterial-habs-and-toxins-lake-fayetteville-case-study/>
48. Monitoring of cyanobacterial breakthrough and accumulation by in situ phycocyanin probe system within full-scale treatment plants, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10435606/>
49. Harmful algal blooms - Guidelines on Recreational Water Quality - NCBI Bookshelf, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK572631/>
50. Recommendations for Cyanobacteria and Cyanotoxin Monitoring in Recreational Waters - Environmental Protection Agency (EPA), Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.epa.gov/sites/default/files/2019-09/documents/recommend-cyano-rec-water-2019-update.pdf>
51. Phycocyanin as a proxy for algal blooms in surface waters: case study of Ukerewe Island, Tanzania, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://eprints.whiterose.ac.uk/id/eprint/144642/1/Mchau%20et%20al%20-%20phycocyanin%20as%20an%20algal%20bloom%20proxy%20Proof%20Final-Leeds%20%28003%29.pdf>
52. First pan-Arctic assessment of dissolved organic carbon in lakes of the permafrost region, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://bg.copernicus.org/articles/18/3917/2021/>
53. Dissolved organic carbon (DOC) concentrations in discrete water column samples collected from lakes in the McMurdo Dry Valleys, Antarctica (1993-2022, ongoing), Zugriff am Juli 7, 2025, <https://mcm.lternet.edu/content/dissolved-organic-carbon-concentrations-lakes>
54. (A) Total organic carbon (TOC) concentrations in lake water and the... - ResearchGate, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.researchgate.net/figure/A-Total-organic-carbon-TOC-concentrations-in-lake-water-and-the-relative-ratio_fig3_266379307>
55. Number of TOC and COD Mn analyses and median values of selected water... | Download Scientific Diagram - ResearchGate, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.researchgate.net/figure/Number-of-TOC-and-COD-Mn-analyses-and-median-values-of-selected-water-quality-variables_tbl1_230598466>
56. Inferring Past Trends in Lake Water Organic Carbon Concentrations in Northern Lakes Using Sediment Spectroscopy - PubMed, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29064242/>
57. FAQs zu Nitrat im Grund- und Trinkwasser | Umweltbundesamt, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/grundwasser/nutzung-belastungen/faqs-zu-nitrat-im-grund-trinkwasser>
58. FAQs zur Ausweisung von mit Nitrat belasteten und eutrophierten Gebieten Stand: 09.01.2024, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuv/wasser/oberflaechengewaesser/pdf/FAQs_Gebietsausweisung_fuer_Infostelle_01_2024.pdf>
59. Nitratbericht 2020 - Bundesministerium für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Zugriff am Juli 7, 2025, <https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewaesser/nitratbericht_2020_bf.pdf>