Indikator-Factsheet: Wassertemperatur von Seen

Verfasser*innen:	Bosch & Partner GmbH (Konstanze Schönthaler) i. A. des Umweltbundesamtes / KomPass, FKZ 3716 48 104 0 Grundlegend überarbeitet: i. A. des Umweltbundesamtes / KomPass, FKZ 3720 48 101 0	
Mitwirkung:	für 2019: Neuentwicklung in Zusammenarbeit mit dem Fachteam Seen der LAWA-Kleingruppe Klimaindikatoren: Senatsverwaltung für Umwelt, Mobilität, Verkehr und Klimaschutz Berlin (SenUMVK), II B24 (Antje Köhler) Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt (LM) Mecklenburg-Vorpommern, Referat 420 Gewässerkunde, Seenprogramm, Klimawandel (Eckard Kohlhas) Sächsische Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft (SMEKUL, Dr. Kerstin Röske) Landesamt für Umwelt (LfU) Rheinland-Pfalz (Dr. Wolfgang Frey) für 2023: Weiterentwicklung in Zusammenarbeit mit dem Fachteam Seen der LAWA-Kleingruppe Klimaindikatoren	
Letzte Aktualisierung:	05.05.2014	Ecologic Institut (Evelyn Lukat, Jenny Tröltzsch): Vorherige Indikator-Version im Rahmen von UBA FKZ 3711 41 106
	18.03.2019	Bosch & Partner GmbH (Konstanze Schönthaler): Neufassung des Indikators; Indikator von 2015 bleibt mit seinem Titel erhalten, wird aber ab 2019 anders berechnet und basiert zum großen Teil auch auf anderen Daten.
	30.03.2020	Bosch & Partner GmbH (Konstanze Schönthaler): Ergänzung um Daten zu weiteren Seen in Anlage VIII.2 und um zusätzliche Auswertungsoptionen in Anlage VIII.3
	21.07.2020	Bosch & Partner GmbH (Konstanze Schönthaler): Kleine redaktionelle Anpassung nach dem Umlaufverfahren der LAWA-Kleingruppe Klimaindikatoren
	09.06.2022	Bosch & Partner GmbH (Konstanze Schönthaler): Auflösung der Fallstudie und starke methodische Überarbeitung des Indikators unter anderem zur Aggregierung der einzelnen Seendaten; Nummerierung und Titel des Indikators geändert (vorher WW-I-5 Wassertemperatur stehender Gewässer)
	05.08.2022	Bosch & Partner GmbH (Konstanze Schönthaler): Ergänzung weiterer Datensätze und Einarbeitung von Anmerkungen aus der LAWA-Kleingruppe Klimaindikatoren
	26.10.2022	Bosch & Partner GmbH (Konstanze Schönthaler): Einarbeitung von Anregungen zur perspektivischen Weiterentwicklung im Rahmen der abschließenden Sitzung der LAWA Kleingruppe Klimaindikatoren am 24.10.2022
	06.11.2023	Bosch & Partner GmbH (Konstanze Schönthaler): Aktualisierung der Links
Nächste Fortschreibung:	ab sofort	Ergänzend zu der im Indikator bereits vollzogenen differenzierten Darstellung der Flussseen sollte auch eine getrennte Auswertung der geschichteten und ungeschichteten Seen des Norddeutschen

		Tieflands erprobt werden, da hier größere Unterschiede in der Entwicklung erwartet werden. Im Rahmen des im Auftrag des UBA durchgeführten DASIF-Projekts (Operationalisierung von Indikatoren der Deutschen Anpassungsstrategie Klimawandel mit Fernerkundungsdaten, FKZ 3719 48 101 0) werden Satellitendaten zur ferngestützten Erfassung der Oberflächentemperatur von Seen ausgewertet, die künftig die Datengrundlage des Indikators deutlich erweitern können. Der LAWA Expertenkreis (EK) Seen hat an ausgewählten Seen („Klimaseen“) ein Klimafolgenmonitoring initiiert. Dabei werden hochfrequente Messungen mit Thermistorketten und Datenloggern durchgeführt. Diese Seen könnten perspektivisch die Datengrundlage für das DAS-Monitoring verbessern. Es wird allerdings noch einige Jahre dauern, bis ausreichend lange und damit auswertbare Zeitreihen aus diesen Messungen zur Verfügung stehen.

I Beschreibung

Interne Nr. **WW-I-8**	**Titel:** **Wassertemperatur von Seen**
Einheit: Grad Abweichung <u>Zusatz:</u> Grad Abweichung	**Kurzbeschreibung des Indikators:** Mittelwert der (indexierten) Oberflächentemperatur (zwischen 0 und 50 cm) während der Saison von 1.4. bis 31.10. differenziert für die Regionen Norddeutsches Tiefland, zentrale Mittelgebirge sowie Alpen und Alpenvorland <u>Zusatz:</u> Mittelwert der (indexierten) Oberflächentemperatur (zwischen 0 und 50 cm) während der Saison von 1.3. bis 31.10. differenziert für die Regionen Norddeutsches Tiefland, zentrale Mittelgebirge sowie Alpen und Alpenvorland
	Berechnungsvorschrift: <u>Schritt 1:</u> Auswahl von Seen und Talsperren Auswahl von Seen und Talsperren mit möglichst kontinuierlichen Datenreihen und ganzjährigen Messungen der oberflächennahen Temperatur (zwischen 0 und 50 cm); Talsperren können nur dann berücksichtigt werden, wenn keine Wasserentnahmen aus den oberen Wasserschichten stattfinden. Für den Indikator werden Seen und Talsperren aus den folgenden Ökoregionen berücksichtigt (vgl. Abschnitt VIII.1): • Alpen und Alpenvorland: BY: Waginger See, Rottachsee, Wörthsee, Ammersee, Bodensee (Lindau), Chiemsee, Königssee, Schliersee, Starnberger See, Tegernsee; BW: Bodensee (Seemitte) • Zentrale Mittelgebirgsregion: TH: Bleilochtalsperre, Hohenwarte Talsperre, Talsperre Ohra, Talsperre Leibis-Lichte, Talsperre Schönbrunn, Talsperre Neustadt, Talsperre Scheibe-Alsbach SN: Saidenbachtalsperre BY: Altmühlsee, Kleiner Brombachsee • Norddeutsches Tiefland (ohne Flussseen): BE: Tegeler See, Groß Glienicker See BB: Stechlinsee, Müggelsee MV: Binnenmüritz, Borgwallsee, Malchiner See, Schweriner See, Carwitzer

	See NI: Dümmer ST: Arendsee • Norddeutsches Tiefland – Flussseen: BE: Dämeritz, Dahme Schmöckwitz (Zeuthener See), Seddinsee, Oberhavel Konradshöhe, Havel Krughorn, Großer Wannsee MV: Nonnensee **Arbeitsschritte für jeden einzelnen See:** Schritt 2: Zusammenstellung oder Berechnung der Monatswerte Die Daten werden in unterschiedlicher zeitlicher Auflösung geliefert. Für einige Messstellen müssen zunächst die Monatsmittelwerte aus den Tageswerten berechnet werden. Für manche Seen liegen nur monatliche Stichprobenmessungen zur Verfügung. Schritt 3: Fehlwertergänzung Trotz der Fokussierung auf Seen mit kontinuierlichen Datenreihen ist nicht auszuschließen, dass einzelne Werte fehlen können. Für die Mittelwertbildung muss jedoch für jeden Monat 1 Wert in die Berechnung eingehen, um eine Gleichgewichtung der unterschiedlichen jahreszeitlichen Verhältnisse zu erreichen und eine Vergleichbarkeit zwischen den Jahren zu ermöglichen. Bei Vorliegen mehrerer Messwerte pro Monat werden diese zu einem einzelnen Monatswert gemittelt. Bei Vorliegen nur eines einzelnen Messwerts gilt dieser als Monatswert. Fehlwerte für Monate können auf folgende Weise ergänzt werden (s. auch Abschnitt VIII.2): • Anrechnung eines Messwerts aus dem Vormonat, wenn die Messung am Ende des Monats erfolgt ist und es weitere Messwerte für den Vormonat gibt; analog Anrechnung eines Messwerts aus dem Folgemonat, wenn die Messung am Anfang des Monats erfolgt ist und es weitere Messwerte für den Folgemonat gibt; • Interpolation der Werte des Vormonats und des Folgemonats, wenn dies aus fachlicher Sicht möglich erscheint (vor allem während der Sommermonate); fehlende Messungen im März oder April können aufgrund der noch schwankenden und zwischen den Jahren sehr unterschiedlichen Temperaturentwicklungen in diesen Monaten nicht interpoliert werden. Zwei und mehr Fehlmonate in Folge können ebenfalls nicht interpoliert werden. • Fehlende Winterwerte werden nicht ergänzt; sie werden für den Indikator nicht berücksichtigt Können fehlende Monatswerte in der Saison nicht ersetzt werden, wird das jeweilige Jahr als Fehljahr behandelt. Alle Fehlwertergänzungen werden im Daten-Factsheet gekennzeichnet. Schritt 4: Mittelung für die Saison Durchschnitt der Oberflächentemperatur in der Saison 1.4. bis 31.10. für jeden See = Summe von 7 Monatswerten des jeweiligen Sees (aus Schritt 2) / 7 Zusatz: Durchschnitt der Oberflächentemperatur in der Saison 1.3. bis 31.10. für jeden See = Summe von 8 Monatswerten des jeweiligen Sees (aus Schritt 2) / 8 Schritt 5: Indexierung der Werte Zur Vorbereitung der Aggregation über mehrere Seen müssen alle Absolutwerte indexiert werden. Dabei wird das Jahr 2014 auf „0“ gesetzt, und für alle anderen Werte wird dann die Differenz zum ursprünglichen Wert des Jahres 2014 (in Kelvin) ermittelt. Das Jahr 2014 wurde ausgewählt, weil dies das am weitesten zurückliegenden Jahr ist, in dem von allen Messstellen Daten zur Verfügung stehen. Der Indexwert wird als Grad Abweichung (Kelvin) angegeben.

	z. B. Index 2019 = Temperaturwert 2019 – Temperaturwert 2014 **Arbeitsschritte zur Aggregation:** Schritt 5: Mittelung der Indexierung für die Ökoregionen Die indexierten Werte werden über alle Messstellen, die der jeweiligen Ökoregion zugeordnet wurden (s. Schritte 1), gemittelt. Liegen für ein Jahr zu einer Messstelle keine Daten vor, bleibt diese Messstelle bei der Mittelung unberücksichtigt.
Interpretation des Indikatorwerts:	Indikator und Zusatz: Je höher der Indikatorwert, desto höher ist die relative Wassertemperatur in den betrachteten Gewässern im Mittel der Saison.

II Einordnung

Handlungsfeld:	Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft
Themenfeld:	Physikalisch-chemischer Gewässerzustand
Thematischer Teilaspekt:	Erwärmung von Gewässern, Veränderung der Eisbedeckung
DPSIR:	Impact

III Herleitung und Begründung

Referenzen auf andere Indikatorensysteme:	EEA: CLIM 019 Water temperature (Jährliche mittlere Wassertemperatur in ausgewählten Flüssen und Seen) Thüringer Klimafolgenmonitoring: I-WW-5 Wassertemperatur stehender Gewässer
Begründung:	Die Wassertemperatur des Epilimnions von stehenden Gewässern wird schnell und direkt durch die Lufttemperatur beeinflusst. Bereits vor zehn Jahren ließ sich – Literaturstudien zufolge – eine klimabedingte Erhöhung der Oberflächentemperatur von Seen (Epilimnion) fast weltweit feststellen (u. a. Arvola et al. 2010, Schneider & Hook 2010 zit. in KLIWA 2015: 19). Die Wassertemperatur ist ein zentraler Parameter, der den physikalisch-chemischen sowie biologischen Gewässerzustand charakterisiert. Sie nimmt Einfluss auf die Dauer der Eisbedeckung, die Durchmischungs- bzw. Schichtungsverhältnisse, die Wasserchemie sowie auf die Artenzusammensetzung und die Struktur der Nahrungsnetze (IGB 2018: 5). Klimawandelbedingt können höhere Temperaturen den Beginn und das Ausmaß der Frühjahrsalgenentwicklung und damit indirekt die Sauerstoffzehrung beeinflussen. In eutrophen Gewässern können im Sommer thermophile, potenziell toxinbildende Cyanobakterienarten auftreten (z. B. *Cylindospermopsis raciborski*). Um einen bundesweiten Überblick zur Entwicklung der Seentemperaturen zu erhalten, aber dennoch die Besonderheiten der unterschiedlichen Seentypen annähernd zu berücksichtigen, werden die Daten der für den Indikator berücksichtigten Seen für die drei großen Ökoregionen Alpen und Alpenvorland, zentrale Mittelgebirge und Norddeutsches Tiefland differenziert bearbeitet und dargestellt. Da es im Bereich der zentralen Mittelgebirge nur wenige größere natürliche Seen gibt, werden – um diese Region ebenfalls abbilden zu können – auch Talsperren herangezogen. Diese können jedoch nur dann berücksichtigt werden, wenn keine (betriebsbedingten) Wasserentnahme aus den oberen Wasserschichten stattfindet. Die für die Indikatordarstellung verwendeten Daten stammen aus Messungen im obersten Epilimnion (bis zu 50 cm Tiefe). Diese Schicht ist i. d. R. gut durchmischt (vorausgesetzt, es ist nicht extrem sonnig und völlig windstill) und

	reagiert vergleichsweise unmittelbar auf Veränderungen de Lufttemperatur. Die Entwicklung der Wassertemperaturen im Hypolimnion ist hingegen in Abhängigkeit vom Schichtungsmuster der einzelnen Seen sehr unterschiedlich, und die Zusammenhänge mit dem Klimawandel sind deutlich komplexer. Bei den Flachseen können sich infolge des Klimawandels der Durchmischungstyp und das Schichtungsregime verändern, was sprunghafte Änderungen der Hypolimnion-Temperatur nach sich ziehen kann. (KLIWA 2015: 19-21) Als Folge des Klimawandels wird vor allem auch mit höheren Wassertemperaturen im Winter und im zeitigen Frühjahr gerechnet. Dies hat Auswirkungen auf die Frühjahrsalgenblüte und damit auf die Entwicklung des aquatischen Nahrungsnetzes im gesamten Jahresverlauf. In der Praxis werden bei Eisbedeckung allerdings i. d. R. keine Messungen durchgeführt, oder diese sind lückenhaft. Dadurch schränkt sich das nutzbare Datenkollektiv für die Berechnung von Ganzjahresmitteln (bezogen auf das hydrologische Jahr) stark ein. Der Indikator schließt daher die Wintertemperaturen aus und stellt das Mittel der Saison von April bis Oktober dar. Als Indikator-Zusatz wird die Saison von Anfang März bis Ende Oktober abgebildet, da sich in den vergangenen Jahren an mehreren Seen bereits deutlich gestiegene Märztemperaturen und z. T. deutlich verfrühte Frühjahralgenblüten beobachten ließen. Als Hauptindikator wird aber die Saison ab April abgebildet, da die Datenlage hier besser ist (es fehlen immer wieder März-Messungen). Der Indikator basiert auf indexierten Werten. Das bedeutet, für jeden See werden die relativen Abweichungen von einem auf den Wert 0 gesetzten Indexjahr (hier das Jahr 2014) ermittelt. Unterschiedliche Höhenlagen-, Naturraum- und Seen-typische Temperaturniveaus werden damit relativiert, sodass die Werte über verschiedene Seen hinweg gemittelt werden können. Das Jahr 2014 wird als Indexjahr gewählt, da es das am weitesten zurückliegende Jahr ist, in dem von allen Messstellen Daten zur Verfügung stehen.
Einschränkungen:	Mit der Mittelung der Indexwerte der verschiedenen Seen für die einzelnen Ökoregionen wird über mitunter sehr unterschiedliche individuelle Seencharakteristika hinweg gemittelt. Vor allem, wenn für einzelne Jahre und einzelne Seen Daten fehlen und die Mittelwertbildung in einzelnen Jahren nur über wenige Seen vorgenommen wird, kann dies zu (leichten) Brüchen in der Zeitreihe führen. Die Messfrequenz der Datenerhebungen an den einzelnen Seen ist unterschiedlich. Wenn nur einmal monatlich gemessen wird, erfolgt diese Messung nicht immer am gleichen Tag des Monats. Diese unterschiedlichen Zeitintervalle zwischen den Messungen wirken sich auf die Mittelwertbildung aus. Bei Stichprobenerhebungen hängen die Messergebnisse stark von den jeweiligen Bedingungen zum Zeitpunkt der Temperaturmessung ab. Dieses Problem lässt sich aber letztendlich nur über kontinuierlicher Datenlogger-gestützte Messungen ausräumen. Auch eine lineare Interpolation zwischen den Einzelwerten brächte hier nur eine weitere Annäherung. Der Einsatz meteorologisch angetriebener Modelle zur Interpolation erscheint für ein Monitoring nicht mit vertretbarem Aufwand praktisch umsetzbar. Grundsätzlich kann konstatiert werden, dass die derzeitige Messpraxis für ein Klimafolgenmonitoring nicht ausreichend ist. Das vom LAWA EK Seen initiierte kontinuierliche Seenmonitoring wird zu einer deutlichen Verbesserung des Monitorings beitragen. Die zur Komplettierung der Zeitreihen vorgenommene Fehlwertergänzung bringt weitere Unsicherheiten mit sich (s. Anlagen VIII.2).
Rechtsgrundlagen, Strategien:	• Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3901) • Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel 2008 (DAS)

In der DAS beschriebene Klimawandelfolgen	DAS, Kap. 3.2.3: Eine zunehmende Erwärmung der Wasser- und Bodentemperaturen aquatischer Systeme im Sommer bewirkt beispielsweise, dass der Sauerstoffgehalt der Gewässer sinkt. Für Wassertiere und -pflanzen bedeutet das zusätzlichen Stress, denn sie leiden bereits unter einer hohen Wassertemperatur und eingeschränktem Wasservolumen. Geringe Sauerstoffgehalte und höhere Wassertemperaturen begünstigen während Niedrigwasserperioden Rücklösungen aus Sedimenten und können so einen Stoffeintrag ins Gewässer nach sich ziehen. Darüber hinaus belasten Einleitungen, beispielsweise aus Kläranlagen, aber auch diffuse Einträge wegen des verschlechterten Verdünnungsverhältnisses die Gewässer in verstärktem Maße.
Ziele:	WHG, § 27 Bewirtschaftungsziele für oberirdische Gewässer: (1) Oberirdische Gewässer sind, soweit sie nicht […] als künstlich oder erheblich verändert eingestuft werden, so zu bewirtschaften, dass […] ein guter ökologischer und ein guter chemischer Zustand erhalten oder erreicht werden. (2) Oberirdische Gewässer, die […] als künstlich oder erheblich verändert eingestuft werden, sind so zu bewirtschaften, dass […] ein gutes ökologisches Potenzial und ein guter chemischer Zustand erhalten oder erreicht werden. DAS, Kap. 3.2.3: In der WRRL sollten Maßnahmen bevorzugt werden, die die natürliche Anpassungsfähigkeit der Gewässer wie auch die Lebensraum- oder Habitatvielfalt unserer Gewässer erhalten oder stärken. Das koordinierte Management von Schutz und Nutzung aller Gewässer in einem Flussgebiet [...] erfolgt mit dem konkreten Ziel einen guten Zustand der Gewässer zu erreichen. Die Auswirkungen des Klimawandels werden zukünftig für Gewässer und deren Management zunehmend an Bedeutung gewinnen.
Berichtspflichten:	Die Gewässertemperatur wird nach WRRL als allgemeine physikalisch-chemischen Qualitätskomponente unterstützend für die Bewertung und Überwachung des Gewässerzustands herangezogen (s. a. Oberflächengewässerverordnung vom 20. Juni 2016 (BGBl. I S. 1373), die zuletzt durch Artikel 2 Absatz 4 des Gesetzes vom 9. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2873), Anlage 3). Im Rahmen ihrer Berichtspflichten gegenüber der EU (Artikel 8 und 15 WRRL) sind die Länder verpflichtet, über die Ergebnisse der Überwachung des Zustands der Gewässer zu berichten. Hinweis: Die Anforderungen, die im Zusammenhang mit der WRRL-Berichterstattung an das Monitoring gestellt werden, werden für das Klimafolgenmonitoring als nicht ausreichend erachtet. Es wären hierfür höherfrequente (möglichst tägliche) und kontinuierlichere Messungen über das ganze Jahr hinweg erforderlich. Der LAWA EK Seen fordert in diesem Zusammenhang vor alle Datenlogger-gestützte Messungen.

IV Technische Informationen

Datenquelle:	Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Landesanstalt für Umwelt Bayern (LfU), Senatsverwaltung für Umwelt, Mobilität, Verkehr und Klimaschutz Berlin (SenUMVK), Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt Mecklenburg-Vorpommern, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN),Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (TLUBN), Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen-Anhalt (LHW): Seenmonitoring Thüringer Fernwasserversorgung (TFV), Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen (LTV): Talsperrenüberwachung Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei (IGB): Forschung und Monitoring von Seen	
Räumliche Auflösung:	flächenhaft	NUTS: nicht relevant

Geographische Abdeckung:	Ausgewählte Seen in den drei Ökoregionen Norddeutsches Tiefland, zentrale Mittelgebirge sowie Alpen und Alpenvorland
Zeitliche Auflösung:	jährlich, seit 1961
Beschränkungen:	keine
Verweis auf Daten-Factsheets:	WW-I-8_Daten_Wassertemperatur_Seen.xlsx

V Zusatz-Informationen

Glossar:	**Epilimnion:** bezeichnet die obere erwärmte und stark bewegte Wasserschicht in einem geschichteten stehenden Gewässer. **Hypolimnion:** ist die untere, nur durch interne Wellen und deren Ausgleichsströmungen bewegte Wasserschicht in einem geschichteten stehenden Gewässer. Es ist durch die Sprungschicht, das Metalimnion, von der oberen Wasserschicht, dem Epilimnion, getrennt. **LAWA-Seetypen:** Die Typologie der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA, Mathes et al. 2002) für die deutschen Seen umfasst 14 Seetypen mit Flächen größer 50 Hektar. Die 14 Typen werden den drei Ökoregionen Alpen und Alpenvorland, zentrale Mittelgebirge und Norddeutsches Tiefland zugeordnet (diese Regionalisierung orientiert sich an den biozönotischen Ökoregionen von Illies 1978, der Deutschland im Wesentlichen in drei Ökoregionen „zentrales Tiefland“ (Region 14), „zentrale Mittelgebirge“ (Region 9) und „Alpen“ (Region 4) eingeteilt hat). Die Typologie nutzt abiotische Kriterien: Ökoregion, Geologie, Seegröße, relative Größe des Einzugsgebietes und Schichtungsverhalten. Als erster Ansatzpunkt für die Lebensgemeinschaften wurde die Trophie berücksichtigt. (www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/seen#textpart-2)
Weiterführende Informationen:	Informationen aus KLIWA zur Betroffenheit von Seen durch den Klimawandel: www.kliwa.de/gewaesseroekologie-seen-betroffenheit.htm Adrian R., O’Reilly C. M., Zagarese H., Baines S.B., Hessen D.O., Keller W., Livingstone D.M., Sommaruga R., Straile D., Van Donk E., Weyhenmeyer G.A., Winderl M. 2009: Lakes as sentinels of climate change. Limnol. Oceanogr., 54 (6, part 2): 2283-2297. doi: 10.4319/lo.2009.54.6_part_2.2283 Boehrer B. & Schultze M. 2009: IV-2.2 Schichtung von Seen. Handbuch Angewandte Limnologie. Limnologische Grundlagen-Gewässerbelastungen-Restaurierung-Aquatische Ökotoxikologie-Gewässerschutz-Bewertung: 3-21. www.wiley-vch.de/books/sample/3527321314_c01.pdf Hering D. 2011: Climate Change and Freshwater. Indicating the status of freshwater ecosystems under changing climate conditions. www.climate-and-freshwater.info IGB – Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei 2018: Seen im Klimawandel – Diagnosen und Prognosen aus der Langzeitforschung. IGB Dossier, Berlin, 11 S. Illies J. 1978: Limnofauna Europaea. Eine Zusammenstellung aller die europäischen Binnengewässer bewohnenden mehrzelligen Tierarten mit Angaben über ihre Verbreitung und Ökologie. Stuttgart, 532 S. Jeppesen E., Meerhoff M., Holmgren K., Gonzalez-Bergonzoni I., Teixeira-de Mello F., Declerck S. A. J., De Meester L., Søndergaard M., Lauridsen T. L., Bjerring R., Conde-Porcuna J. M., Mazzeo N., Iglesias C., Reizenstein M., Malmquist H. J., Liu Z , Balayla D, Lazzaro X. 2010: Impacts of climate warming on lake fish community structure and potential effects on ecosystem function. Hydrobiologia 646: 73-90.

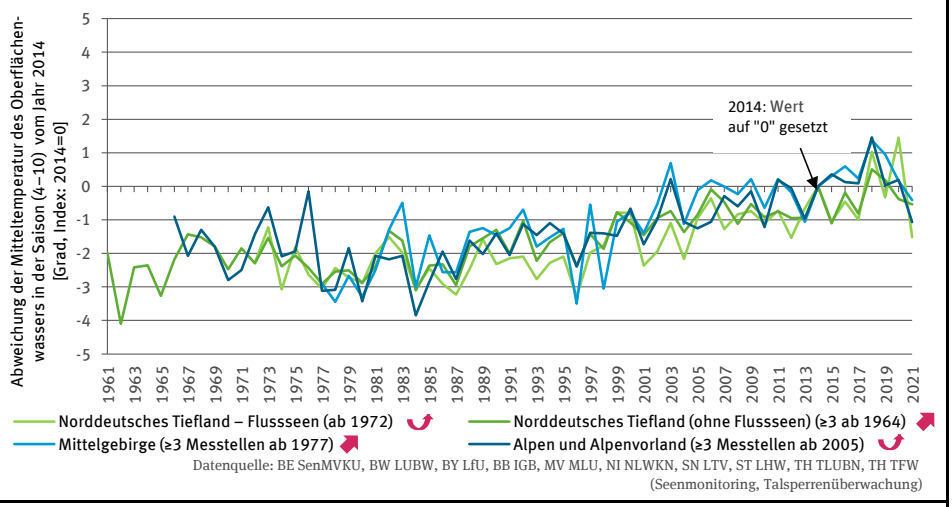
	KLIWA – Kooperationsvorhaben Klimaveränderung und Wasserwirtschaft 2015: Einfluss des Klimawandels auf Seen – Literaturauswertungsstudie. Konstanz, 125 S. www.kliwa.de/_download/Literaturstudie-Seen-2015.pdf LAWA – Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Wasser & Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2017: Wasserwirtschaftliche Klima-Indikatoren in vorhandenen Monitoring-Programmen – Bundesweite Zusammenstellung und Handlungsempfehlungen für eine Vereinheitlichung und Anpassung. Stuttgart, 128 S. Mathes J., Plambeck G., Schaumburg J. 2002: Das Typisierungssystem für stehende Gewässer in Deutschland mit Wasserflächen ab 0,5 km² zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie. In Nixdorf B. & Deneke R. (Hg.): Ansätze und Probleme bei der Umsetzung der EU- Wasserrahmenrichtlinie. Aktuelle Reihe BTU Cottbus, Sonderband: 15-24. Shimoda Y, Azim M. E., Perhar G., Ramin M., Kenney M.A., Sadraddini S., Gundimov A., Arhonditsis G. B. 2011: Our current understanding of lake ecosystem response to climate change: What have we really learned from the north temperate deep lakes? Journal of Great Lakes Research 37 (1): 173-193. Vincent W.F. 2009: Encyclopedia of Inland Waters: 55-60. Weinberger S. & Vetter M. 2012: Using the hydrodynamic model DYRESM based on results of a regional climate model to estimate water temperature changes at Lake Ammersee. Ecological Modelling 244: 38-48.

VI Umsetzung – Aufwand und Verantwortlichkeiten

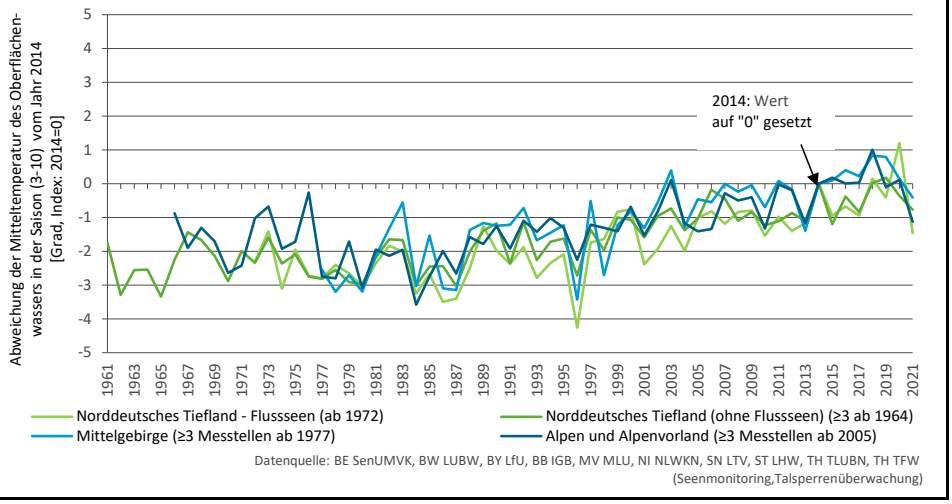
Aufwandsschätzung:	Datenbeschaffung:	**3**	mehrere datenhaltende Institutionen; Daten müssen von den einzelnen datenhaltenden Institutionen individuell abgefragt werden
	Datenverarbeitung:	**3**	Die Daten können nicht direkt übernommen werden, eine Generierung der Monatsdaten und aufwändige Verrechnungen sind notwendig.
	Erläuterung: Die zeitliche Auflösung sowie die Messfrequenzen der einzelnen Seen sind unterschiedlich und variieren auch innerhalb der jeweiligen Zeitreihe. Es müssen zuerst konsistente Datenreihen von Monatswerten erzeugt werden. Der Aufwand für das Zusammentragen und Aufbereiten der Daten beläuft sich auf ca. 4 Tage.		
Datenkosten:	keine		
Zuständigkeit:	Koordinationsstelle		
	Erläuterung: keine		

VII Darstellungsvorschlag

Indikator:



Zusatz:



VIII Anlagen

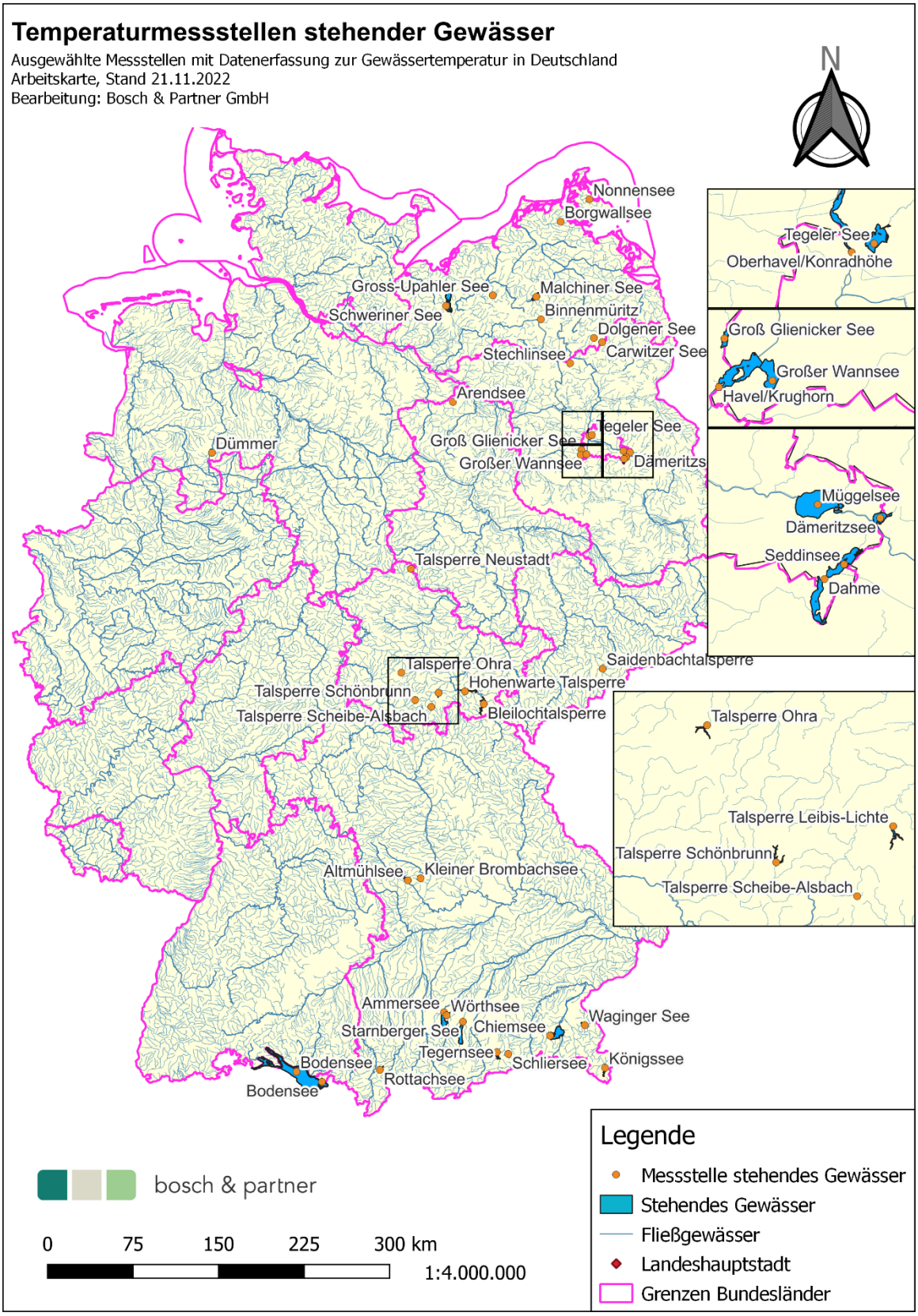
VIII.1 Berücksichtigte Seen für in situ-Auswertung

Die nachstehende Tabelle ordnet die im Indikator berücksichtigten Seen und Talsperren den Ökoregionen und LAWA-Seentypen zu. Die darunterliegende Abbildung zeigt die Verteilung der Messstellen im Bundesgebiet. Es wurden zu weiteren Seen (u. a. aus Schleswig-Holstein und Niedersachsen) Datensätze geprüft, deren Datenreihen aber aufgrund zu vieler Datenlücken nicht berücksichtigt werden konnten.

Ökoregion	**LAWA-Seentyp**	**See** (und Bundesland)
Alpen und Alpenvorland	Typ 2: Geschichteter Alpenvorlandsee mit relativ großem Einzugsgebiet	BY: Waginger See
	Typ 3: Geschichteter Alpenvorlandsee mit relativ kleinem Einzugsgebiet	BY: Rottachsee BY: Wörthsee
	Typ 4: Geschichteter Alpensee	BY: Ammersee BW: Bodensee BY: Bodensee

Ökoregion	**LAWA-Seentyp**	**See** (und Bundesland)
		BY: Chiemsee BY: Königssee BY: Schliersee BY: Starnberger See BY: Tegernsee
Mittelgebirge	Typ 5: Geschichteter, calciumreicher Mittelgebirgssee mit relativ großem Einzugsgebiet	TH: Bleilochtalsperre TH: Hohenwarte Talsperre SN: Saidenbachtalsperre
	Typ 6: Polymiktischer, calciumreicher Mittelgebirgssee	BY: Altmühlsee BY: Kleiner Brombachsee
	Typ 7: Geschichteter, calciumreicher Mittelgebirgssee mit relativ kleinem Einzugsgebiet	
	Typ 8: Geschichteter, calciumarmer Mittelgebirgssee mit relativ großem Einzugsgebiet	TH: Talsperre Ohra TH: Talsperre Leibis-Lichte
	Typ 9: Geschichtete, calciumarme Talsperre mit kleinem Einzugsgebiet	TH: Talsperre Schönbrunn
	Zuordnung nicht möglich	TH: Talsperre Neustadt TH: Talsperre Scheibe-Alsbach
Norddeutsches Tiefland	Typ 10: Geschichteter Tieflandsee mit relativ großem Einzugsgebiet	BE: Tegeler See MV: Dolgener See (erst ab 2016) MV: Binnenmüritz
	Typ 11: Polymiktischer Tieflandsee mit relativ großem Einzugsgebiet	BB (IGB): Müggelsee MV: Borgwallsee MV: Malchiner See MV: Gross-Upahler See (erst ab 2016) NI: Dümmer
	Typ 12: Flusssee im Tiefland	BE: Dämeritzsee BE: Dahme Schmöckwitz (Zeuthener See) BE: Seddinsee BE: Oberhavel Konradshöhe BE: Havel Krughorn BE: Großer Wannsee MV: Nonnensee
	Typ 13: Geschichteter Tieflandsee mit relativ kleinem Einzugsgebiet	BE: Groß Glienicker See BB (IGB): Stechlinsee MV: Schweriner See MV: Carwitzer See ST: Arendsee
	Typ 14: Polymiktischer Tieflandsee mit relativ kleinem Einzugsgebiet	

Lage der ausgewählten in situ Temperaturmessstellen in Seen und Talsperren:



VIII.2 Berücksichtigte Seen für fernerkundungsgestützte Datenauswertungen

Zur Unterstützung der Weiterentwicklung der Seen-Indikatoren hat das Umweltbundesamt ein FuE-Vorhaben beauftragt (Operationalisierung von Indikatoren der Deutschen Anpassungsstrategie Klimawandel mit Fernerkundungsdaten – DASIF, FKZ 3719 48 101 0, Laufzeit 12/2019 bis 02/2023), im Rahmen dessen an Monitoringindikatoren gearbeitet wurde, die auf Satellitendaten beruhen.

Parallel zur Auswertung der in situ-Daten wurden im DASIF-Projekt Fernerkundungsdaten zu 7 Seen in der Region Alpen und Alpenvorland, 5 Seen und Talsperren in der Zentralen Mittelgebirgsregion und 10 Seen in der Region Norddeutsches Tiefland ausgewertet. Zehn Seen decken sich mit den Seen, zu denen auch in situ-Daten ausgewertet wurden. Die Ergebnisse wurden ebenfalls für die drei Ökoregionen aggregiert und sind grundsätzlich vergleichbar. Die Auswertung der Fernerkundungsdaten ermöglicht perspektivisch eine Erweiterung der Datengrundlage. Es wurde aber entschieden, für den Monitoringbericht 2023 in situ-Daten zu nutzen, zumal die Zeitreihe mit Fernerkundungsdaten erst 1984 starten kann.

Grundlagen der thermalen Fernerkundung:

Entscheidend für die Bestimmung der Temperatur an der Wasseroberfläche eines Sees ist die Strahlung, die aufgrund der Eigenwärme vom Wasserkörper emittiert wird. Thermale Satellitensensoren erfassen die emittierte Wärmestrahlung in ein oder mehreren Bändern im thermalen Infrarot (Wellenlängenbereich zwischen 10 und 12 µm). Aus der von Satelliten gemessenen, emittierten Strahlung kann über verschiedene Verfahren die Temperatur der Wasseroberfläche (LSWT) berechnet werden. Auf deren Basis können Zusammenfassungen von Seen diskutiert werden. Um kleinere Seen zu analysieren, eignet sich das Landsat-Archiv, das bis ca. 1984 zurückreicht. Die verfügbaren Landsat-Daten besitzen nur ein funktionierendes Band im thermalen Bereich zwischen 10 und 12 µm. Landsat 8 besitzt eigentlich zwei thermale Bänder, jedoch ist eines aufgrund von Streulichtproblemen nicht valide nutzbar. Um den atmosphärischen Einfluss auf das Signal am Satellitensensor zu korrigieren, müssen zusätzliche Daten zu Wasserdampfgehalt der Atmosphäre und Lufttemperatur einbezogen werden. Die abgeleitete LSWT entspricht der sogenannten „skin temperature“, also einem etwa 500 µm dünnen Bereich, der sich an der Schnittstelle zwischen Wasser und Luft befindet[1]. Schichtungen und Wind an der Wasseroberfläche führen dazu, dass die „skin temperature“ kühler ist als die in-situ gemessene, kinetische „bulk temperature“. Nichtsdestotrotz zeigen diverse Studien, dass beide Temperaturen stark miteinander korrelieren (R^2 oft > 0.9), beispielsweise für das Landsat-Archiv[2]. Die methodischen und absoluten Unterschiede müssen aber berücksichtigt

[1] Pareeth S., Salmaso N., Adrian R., Neteler M. 2016: Homogenised daily lake surface water temperature data generated from multiple satellite sensors: A long-term case study of a large sub-Alpine lake. Sci. Rep. 2016, 6.

[2] Zum Beispiel:
Simon R.N., Tormos T., Danis P.-A. 2014: Retrieving water surface temperature from archive LANDSAT thermal infrared data: Application of the mono-channel atmospheric correction algorithm over two freshwater reservoirs. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 2014, 30.
MODIS: s. Fußnote 1
AVHRR: Lieberherr G., Wunderle S. 2018: Lake Surface Water Temperature Derived from 35 Years of AVHRR Sensor Data for European Lakes. Remote Sens. 2018, 10.

und gegebenenfalls homogenisiert werden, wenn in-situ gemessene und satellitenbasierte Wasseroberflächentemperaturen verglichen werden.

Datengrundlage:

Für alle Seen liegen Datenreihen mit einer räumlichen Auflösung von 100 m für die Jahre 1984 bis 2019 und einer Wiederholrate von 8-16 Tagen vor. Am Brombachsee und Rottachsee beginnen die Datenreihen ab dem Zeitpunkt der Aufstauung. Die zeitliche Auflösung wird zusätzlich vom Wetter am Aufnahmezeitpunkt beeinflusst und kann die zeitliche Auflösung verringern. Gerade in der Zeit zwischen November und März reduzieren häufig Wolken die Anzahl der Satellitenaufnahmen. Das erschwert die Berechnung von ganzjährigen Mittelwerten.

Validierungsarbeiten mit in situ-Messungen:

Zur Validierung der Wasseroberflächentemperatur aus Satellitendaten wurden über den LAWA Expertenkreis Seen Ansprechpersonen aus Ländern und wissenschaftlichen Einrichtungen angefragt, um Messdaten aus den Monitoringprogrammen bereitzustellen. Für die Validierung wurden die Messungen ausgewählt, die am nächsten zur Oberfläche durchgeführt wurden (zumeist 0 m oder 0,5 m) und innerhalb von 1-2 Tagen vor oder nach der Satellitenaufnahme stattfanden.

Die nachstehende Tabelle ordnet die im Indikator berücksichtigten Seen und Talsperren den Ökoregionen und LAWA-Seentypen zu. Die fett hervorgehobenen Seen sind auch Gegenstand des in situ-basierten DAS-Monitoringindikators.

Alpen und Alpenvorland	BY: Abtsdorfer See **BY: Ammersee** **BY/BW: Bodensee** BY: Großer Alpsee **BY: Rottachspeicher** **BY: Starnberger See** BY: Walchensee
Mittelgebirge	**BY: Brombachsee** RP: Laacher See SN: Talsperre Bautzen **TH: Bleilochtalsperre** **SN: Saidenbachtalsperre**

Norddeutsches Tiefland	ST: Arendsee **BE: Dahme** SH: Dobersdorfer See MV: Kummerower See **BB: Müggelsee** **MV: Müritz** SH: Großer Plöner See SN: Speicher Witznitz BB: Stechlinsee NI: Steinhuder Meer

Auswertungen und Ergebnisse:

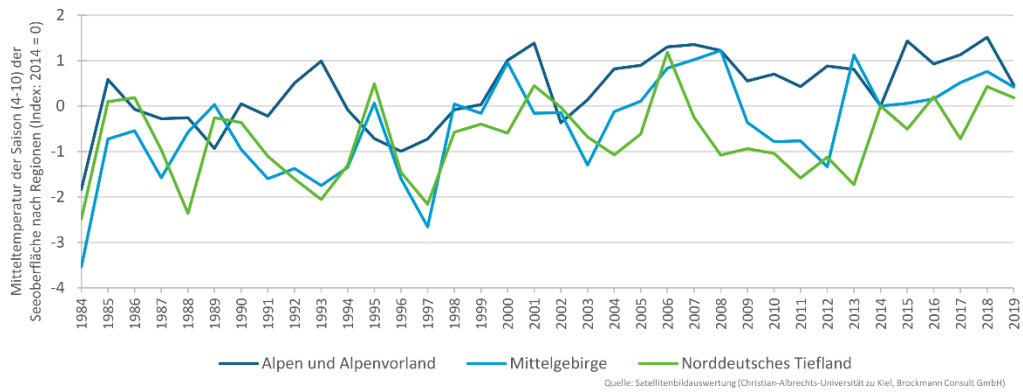
Für die Fallstudien wurden mehrere Seen unterschiedlicher LAWA-Typen für jeden Hauptnaturraum in Absprache mit Fachpersonen aus dem LAWA EK Seen ausgewählt. Die Seen sollten mindestens 300 x 300 m groß sein. Außerdem sollten in situ Messdaten für diese Seen vorhanden sein, um die Fernerkundungsalgorithmen zu validieren.

Für jeden See wurde aus allen verfügbaren, wolkenfreien (See max. zu 45 % mit Wolken bedeckt) Landsat-Daten (5, 7 und 8) die Wasseroberflächentemperatur berechnet (Mono-

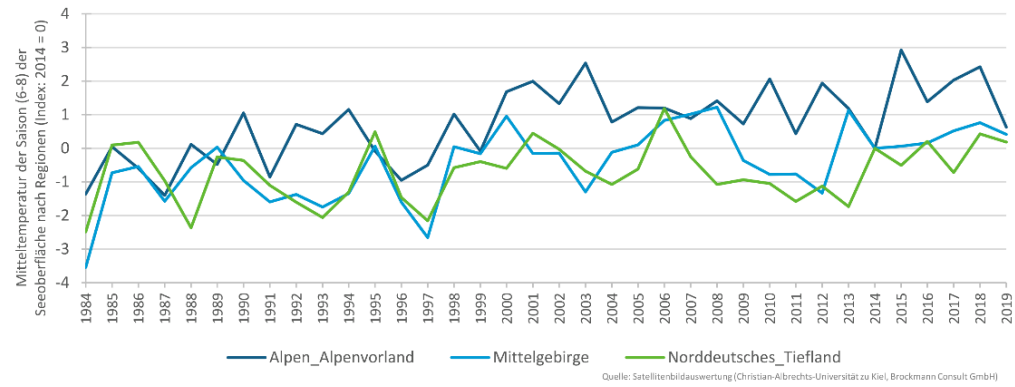
Window-Algorithmus nach Sobrino[3]). Für jeden Aufnahmetag wurde die durchschnittliche Wassertemperatur (arithmetisches Mittel) in einem See berechnet, wobei die flachen Bereiche durch einen 100 m Puffer ausgeschlossen wurden. Da drei unterschiedliche Landsat-Sensoren benutzt wurden, wurde alle Ergebnisse auf Landsat 8 harmonisiert. Aus den Tageswerten wurden Monatsmittel berechnet. Fehlwerte durch fehlende Aufnahmen wurden über den nächstgelegenen Messtermin vorher und nachher interpoliert, wobei der zeitliche Abstand hierfür kleiner 4 Wochen sein muss. Frühjahrsmonate (März bis Mai) wurden nicht interpoliert. Aus diesen Monatswerten wurden pro See Saisonmittel erstellt und wie oben beschrieben auf das Jahr 2014 indexiert. Im Anschluss wurde die Ergebnisse anhand der Naturraumregionen aggregiert.

Ähnlich wie beim in situ basierten Indikator zeigen die Seen in den Alpen und im Alpenvorland die stärkste Veränderung. Die Entwicklungslinien der Seen im Mittelgebirge und Norddeutschen Tiefland verhalten sich ähnlich. Sprunghafte Veränderungen zwischen den Jahren können bei der Datengrundlage der Satellitendaten durch fehlende Monate zustande kommen. Gerade in den Frühjahrs- und Herbstmonaten verringern Wolken die zeitliche Auflösung und die Anzahl der Messtermine pro Jahr deutlich. Daher wurden im DASIF-Projekt Qualitätskriterien entwickelt, die zusätzlich andeuten, wie verlässlich die Messwerte aus einem bestimmten Jahr sind. Die Sommermonate weisen durch häufigere, wolkenfreie Aufnahmen einen weniger verrauschten Verlauf auf (s. untenstehende Grafik). Die Entwicklung in den Naturräumen ist aber ähnlich wie die des Saisonmittels.

Indikator



[3] Jimenez-Munoz J. C., Sobrino J. A., Skokovic D., Mattar C., Cristobal J. 2014: Land Surface Temperature Retrieval Methods from Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data. In: IEEE Geosci. Remote Sensing Lett. 11 (10): 1840-1843.

Sommer, 6-8	

VIII.3 Umgang mit Datenlücken der in situ-Messungen

Zahlreiche Datenreihen weisen Datenlücken auf. Um diese Datenreihen dennoch für die Auswertung nutzbar zu machen, müssen Fehlwertergänzungen vorgenommen werden. Voraussetzung für die in den verschiedenen Auswertungen vorgenommenen Mittelwertbildungen ist, dass für jeden Monat zumindest ein Wert zur Verfügung steht, da sonst – in Abhängigkeit vom Fehlmonat – das Ergebnis verzerrt wird. In einigen Fällen ermöglicht eine genaue Sichtung der einzelnen Terminwerte eine andere Monatszuordnung der Daten. So lässt sich im folgenden Beispiel der Ende November gemessene Wert dem Dezember zuordnen.

Jahr	**Monat**	**Messdatum**	**Hydrologisches Jahr**	**Wassertemperatur** [°C]
1998	10	05.10.1998	1998	10,3
1998	11	02.11.1998	1999	5,9
1998	12	30.11.1998	1999	1,9
1999	2	22.02.1999	1999	1,9

als früher Dezemberwert gerechnet

In anderen Fällen lassen sich Monatswerte durch Interpolation ergänzen. Dies ist in jedem Falle eine sehr grobe Annäherung. Vor allem für Monate, in denen von einem auch sprunghaften Temperaturwechsel ausgegangen werden muss (wie z. B. in den Monaten März oder April), sind die Möglichkeiten in Abhängigkeit der vorangegangenen oder nachfolgenden Messergebnisse zu prüfen. Keinesfalls können auf diese Weise zwei Fehlwerte in Folge oder gehäuft auftretende Fehlwerte innerhalb eines Jahres ergänzt werden. In diesem letztgenannten Fall muss ein komplettes Jahr als Fehljahr gewertet werden.

Jahr	**Monat**	**Hydrologisches Jahr**	**Wassertemperatur – Monatsmittel** [°C]
1994	9	1994	15,8
1994	10	1994	9,1
1994	11	1995	7,8
1994	12	1995	6,4

Wert interpoliert zwischen 24.10.1994 und 06.12.1994