



Gewässerzustand der vier Oberengadiner Seen von 2014 – 2021

Und mutmassliche Entwicklung in den letzten Jahrzehnten



Auftraggeber:
Amt für Natur und Umwelt (ANU)
Gürtelstrasse 89
7001 Chur

ANU-406-52

Impressum

Limnex-Projekt 3131
5200 Brugg
23. Dezember 2021

Bearbeitung und Probenahmen

Urs Vogel, David Tanno, Alexandra Chevrolet, Roman Gerber, Nora Weissert

Auftraggeber

Amt für Umwelt und Natur (ANU)
Gürtelstrasse 89
7001 Chur

Titelbild

Silsersee, Blickrichtung Sils Maria (Foto: © Limnex AG).

Inhalt

1	Zusammenfassung.....	4
2	Einleitung.....	5
3	Resultate der Seeuntersuchungen und Vergleich mit älteren Daten.....	6
3.1	Allgemeine Angaben zu den Seen	6
3.2	Historische Entwicklung der Abwasserbelastung und ältere Seeuntersuchungen	7
3.3	Sauerstoff und Sauerstoffzehrung	8
3.4	Phosphor	10
3.5	Stickstoff	12
3.6	Lichtverhältnisse und Chlorophyll-a	14
3.7	Temperaturen, Leitfähigkeit, Trübstoffe und pH	16
3.8	Trophiegrad	18
3.9	Plankton und Fischertrag	19
4	Literaturverzeichnis.....	21

1 Zusammenfassung

Die Fischerträge der Oberengadiner Seen sind in den letzten Jahren deutlich um bis zu 60% zurückgegangen. In der Folge sind die Seen zwischen 2014 und 2021 zum ersten Mal seit 1991/92 wieder auf ihren limnologischen respektive gewässerökologischen Zustand untersucht worden. Im vorliegenden Bericht wird der aktuelle Zustand dargestellt und dessen Entwicklung mithilfe von älteren Untersuchungsdaten seit 1946 diskutiert.

Zusammenfassend lässt sich der Zustand der vier Oberengadiner Seen (Silser-, Silvaplaner-, Champfèrer- und St. Moritzersee) wie folgt beschreiben:

- Die Sauerstoffverhältnisse im St. Moritzer- und Champfèrersee haben sich gegenüber den Jahren 1946–1991 deutlich verbessert. Die gesetzlichen Anforderungen von 4 mg/l O₂ können aber im Tiefenwasser noch nicht eingehalten werden, weshalb eine weitere Überwachung der Seen empfohlen wird.
- Im Silvaplaner- und Silsersee herrschen heute wie in der Vergangenheit durchwegs gute und gesetzeskonforme Sauerstoffverhältnisse. Im Silvaplanersee haben sich diese in den letzten Jahren noch verbessert, während sie sich im Silsersee im Rahmen der älteren Untersuchungen bewegen.
- Über die Sauerstoffzehrung (Mass für die organische Belastung) können noch keine gesicherten Aussagen gemacht werden, da noch zu wenige Vergleichsjahre vorliegen. Tendenziell hat diese im Champfèrersee im Vergleich zu 1992 eher zugenommen. In den drei übrigen Seen ist sie etwa gleichgeblieben.
- Durch das Phosphor-Verbot in Waschmitteln von 1986 und Optimierungen in der Siedlungsentwässerung sind die Phosphor-Konzentrationen in allen Seen zwischen 1960 und 2016 deutlich zurückgegangen. Heute dürften die Phosphor-Konzentrationen in den Seen bereits sehr nahe an den natürlichen Verhältnissen sein.
- Durch die tiefen Phosphor-Konzentrationen ist auch die Produktion von Pflanzenbiomasse zurückgegangen, was anhand der seit 1991/92 gesunkenen Chlorophyll-a-Werten erkennbar ist. Die Seen sind dementsprechend heute auch deutlich klarer als vor 25 Jahren. Die geringere Algendichte wirkt sich auch auf die Nahrungskette aus, indem das Nahrungsangebot für die Fische geschmälert wird.
- Im Gegensatz zum Phosphor sind die Stickstoff-Konzentrationen heute höher als vor 25 Jahren, da die Algenproduktion heute weniger Stickstoff verbraucht. Generell ist der Stickstoffgehalt in den Seen aber tief und es konnten keine toxischen Konzentrationen von Nitrit oder Ammoniak festgestellt werden.
- In den Jahren 1965 bis 1992 konnte in allen vier Seen des Oberengadins im Vergleich zum natürlichen Zustand eine zum Teil deutlich erhöhte Nährstoffbelastung beobachtet werden. Der St. Moritzersee dürfte zwischen 1965 und 1970 wegen der hohen Nährstoffbelastung sogar eutroph gewesen sein. Der Champfèrersee zeigte 1991/92 eine mittlere Belastung (mesotroph), während der Silvaplaner- und Silsersee eine geringere Nährstoffbelastung aufwiesen und nur noch eine Tendenz zur Mesotrophie zeigten. Diese Belastungen haben sich bis heute in allen Seen klar verringert und der Zustand der Seen liegt wieder nahe am natürlichen Zustand. Die Seen sind heute oligotroph.
- Der beobachtete Rückgang der Fangerträge bei den Fischen dürfte direkt mit der Abnahme der Phosphor-Konzentrationen und Biomassen bei den Algen zusammenhängen. Die Erträge sind heute auf einem tiefen Niveau. Im Untersuchungsjahr 2019, mit der besten Datengrundlage aller Untersuchungsjahre, entsprachen die effektiven Fangerträge im St. Moritzer- und im Champfèrersee recht gut den berechneten Erwartungen, in den beiden oberen Seen liegen sie jedoch weit darunter. Die hohen Erträge in der Vergangenheit waren wohl überdurchschnittlich und zudem durch die erhöhten Nährstoffgehalte (vor allem Phosphor) in den Seen begründet.

Abgesehen von den Defiziten beim Sauerstoffgehalt im St. Moritzer- und Champfèrersee zeigen sich heute alle vier Oberengadiner Seen in einem limnologisch resp. gewässerökologisch guten Zustand.

2 Einleitung

In den Oberengadiner Seen sind die Fischerträge in den letzten Jahren deutlich zurückgegangen. Seit der Einführung der Fischfangstatistik im Jahre 2002 haben sich diese alleine zwischen 2004 und 2007 um circa 60 % zurückgebildet. Danach blieben die Erträge bis circa 2009 stabil. Ab 2010 nahmen die Erträge weiter ab und erreichten 2018 und 2019 die tiefsten Werte seit Einführung dieser Statistik.

Da der limnologische respektive gewässerökologische Zustand von Seen sich direkt auf die Fischbestände auswirken kann und die Oberengadiner Seen letztmals zwischen 1991 und 1993 intensiv untersucht und beurteilt wurden (Limnex, 1994), werden die vier grossen Oberengadiner Seen seit 2013 jährlich anhand verschiedener Parameter wie z. B. Sauerstoff und Nährstoffgehalt untersucht. Die Analyse der Nahrungskette anhand des Phytoplanktons (frei schwebende Algen) und des Zooplanktons (z. B. Kleinkrebse) bildet zudem eine weitere Grundlage für die Beurteilung des Nahrungsangebotes für die Fische. Zudem wurde anhand der neueren Seeuntersuchungen die Fischertragsfähigkeit ermittelt und in Relation zu den registrierten Fischfängen gemäss der Fischfangstatistik des Kantons gesetzt.

In den letzten 20 Jahren wurden bei verschiedenen Kläranalgen im Oberengadin und im Einzugsgebiet der Seen Sanierungen und Ableitungen realisiert. Welche Auswirkungen respektive welchen Erfolg diese Sanierungen auf die Gewässerqualität der Gewässer haben, wurde jedoch seit 1993 nicht mehr umfassend überprüft. Die aktuellen Untersuchungen seit 2013 ermöglichen auch diesbezüglich eine Einschätzung.

Gemäss Gewässerschutzgesetz (GSchG Art. 50, 57 und 58) sind der Bund und die Kantone zudem dazu verpflichtet, Grundlagendaten der Gewässer zu erheben und die Öffentlichkeit darüber zu informieren.

Im nachfolgenden Bericht werden die neuesten Seeuntersuchungen dargestellt und der aktuelle Seezustand beschrieben und in Relation zu den Verbesserungen in der Abwasserreinigung und den beobachteten Fischrückgängen bewertet. Zudem wird die Einhaltung der gesetzlichen Bestimmungen des Gewässerschutzgesetzes überprüft und die Seeentwicklung im Vergleich zu älteren Untersuchungen seit 1946 beschrieben.



Blick von St. Moritz-Suvretta auf den Champfèrersee (links) und den Silvaplannersee (rechts).



Mit diesem Weidling des Amtes für Jagd und Fischerei des Kantons Graubünden wurden die Seeuntersuchungen in den Oberengadiner Seen durchgeführt.

3 Resultate der Seeuntersuchungen und Vergleich mit älteren Daten

3.1 Allgemeine Angaben zu den Seen

Das Oberengadin ist eines der höchstgelegenen und bewohnten Täler in Europa. Die darin eingebettete Oberengadiner Seenplatte bildet die obere Talstufe des Inns und liegt zwischen 1768 und 1797 m ü.M. Die Seenplatte erstreckt sich über eine Länge von rund 16 km und setzt sich aus dem Silsersee, Silvaplannersee, Champfèrersee und St. Moritzersee zusammen. Die jeweils tiefste Stelle im See, welche zugleich die Untersuchungsstelle für alle Seeuntersuchungen darstellt, ist in Abbildung 1 markiert. In Tabelle 1 sind die wichtigsten Kenngrössen der Seen ersichtlich.

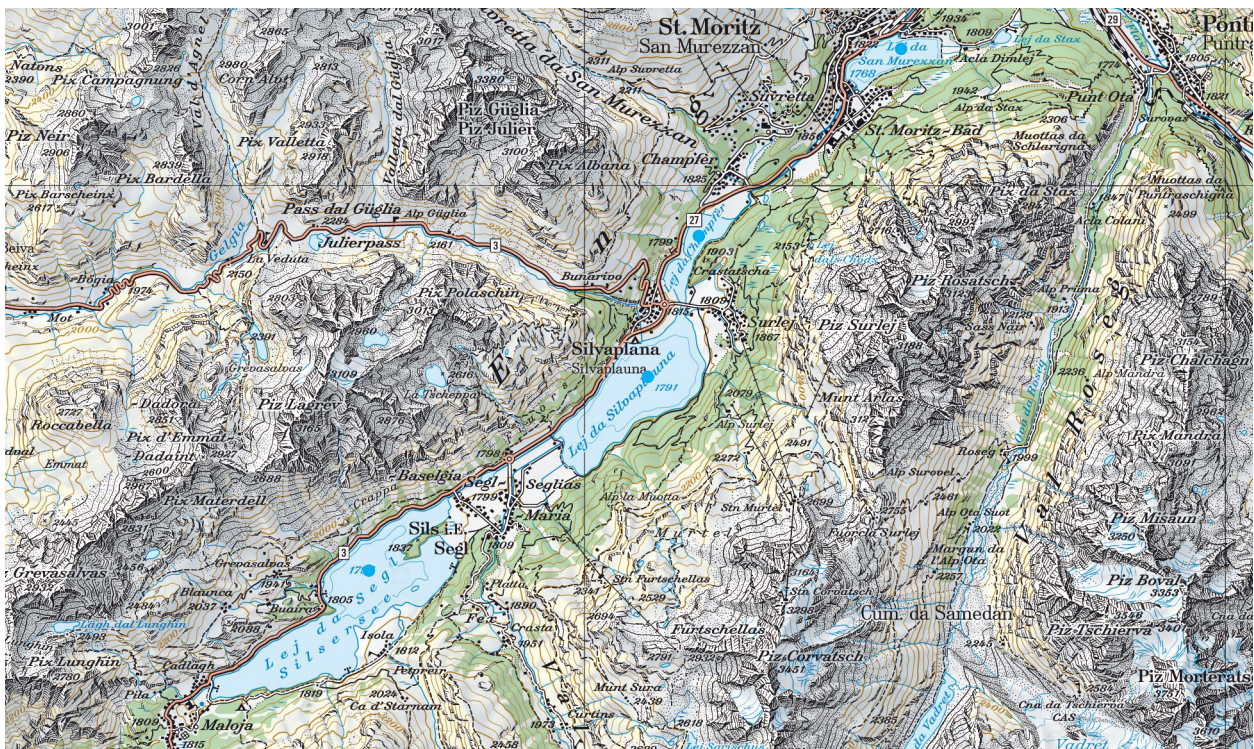


Abbildung 1 Oberengadiner Seenplatte mit den vier untersuchten Seen (Silsersee, Silvaplannersee, Champfèrersee, St. Moritzersee). Die jeweils tiefste Stelle im See – entspricht zugleich der Untersuchungsstelle – ist mit einem blauen Punkt markiert (Karte von swisstopo, 2017).

Tabelle 1 Kenngrössen der vier Oberengadiner Seen.

Parameter	Silsersee / Lej da Segl	Silvaplannersee / Lej da Silvaplauna	Champfèrersee / Lej da Champfèr	St. Moritzersee / Lej da San Murezzan
Seefläche [km ²]	4.11	2.71	0.51	0.78
Seevolumen [Mio. m ³]	136.7	127.1	8.7	19.8
Max. Seetiefe [m] ca.	70	78	34	43
Mittl. Seetiefe [m]	33.2	46.8	16.9	25.4
Mittlerer Seespiegel [m ü. M.]	1797	1791	1791	1768
Füllzeit [Jahre]	2.17	0.68	0.05	0.10
Mittlerer Durchfluss [m ³ /s]	2.0	5.9	5.9	6.0

3.2 Historische Entwicklung der Abwasserbelastung und ältere Seeuntersuchungen

In der Oberengadiner Seenkette spiegelten sich schon zu Beginn des letzten Jahrhunderts, früher als in vielen Gewässern des Mittellandes, die schnell wachsenden zivilisatorischen Bedürfnisse. So bekam der Lej da San Murezzan ungefähr ab der vorletzten Jahrhundertwende die Kehrseite des enormen Aufschwungs von St. Moritz als Fremdenverkehrsort zu spüren. Schmassmann (1920a) beschreibt den Zustand des St. Moritzersees im Jahre 1912 wie folgt:

„Die vom Dorf St. Moritz eingeleitete Kanalisation verursacht in der Mulde des Sees stark fauligen, schwarzen Schlamm, welcher ekelerregend nach Schwefelwasserstoff riecht.“

Im Vergleich zu den anderen untersuchten, hochalpinen Seen — worunter sich auch der Silsersee, der Silvaplanersee sowie der Davosersee befinden — hält Schmassmann ferner fest:

„Als eigentlich verunreinigt kann nur der St. Moritzersee gelten...“

Jüngere Untersuchungen an den Sedimenten des Lej da San Murezzan (Züllig, 1982; Ariztegui, 1993) haben ergeben, dass die stark gestiegene Einleitung ungeklärter Siedlungsabwässer und die damit verbundene Zunahme des Nährstoffeintrags in den See ungefähr ab 1900 zu einer erhöhten Produktion und Akkumulation organischen Materials (hauptsächlich Phytoplankton) und dadurch zu einer rapiden Verschlechterung der Sauerstoffverhältnisse im Tiefenwasser geführt haben müssen (Eutrophierung).

Trotz der schon früh erkannten Probleme blieben die Arbeiten von Schmassmann (1920a) und Borner (1922) zur Bodenfauna des Lej da San Murezzan für längere Zeit die einzigen verfügbaren Grundlagen über die Oberengadiner Gewässer. Die erste und bisher umfangreichste limnologische Bestandesaufnahme an allen Seen wurde in den Jahren zwischen 1965 und 1970 durchgeführt (Märki, 1966; Bosli-Pavoni, 1971). Dabei gelangte Bosli-Pavoni für die drei grösseren Seen zu sehr unterschiedlicher Einschätzung:

„Silser- und Silvaplanersee sind bezüglich Sauerstoff, Phosphat- und Gesamtphosphor, Nitrat und Gesamtstickstoff als oligotroph zu betrachten. Sie gehören wohl zu den saubersten Seen der Schweiz. Der St. Moritzersee, bis zum Jahre 1968 beeinflusst durch die direkte Einleitung der häuslichen Abwässer von St. Moritz, muss bezüglich Sauerstoffgehalt, Phosphat- und Gesamtphosphor, weniger aber aufgrund seines Gehaltes an Nitrat, seiner Biomassewerte und Assimilationsraten, als eutroph bezeichnet werden.“

Ab circa 1960 wurden die Oberengadiner Gemeinden sowie ein Grossteil der teilweise abgelegenen touristischen Infrastruktur (Bergbahnen, Bergrestaurants, Alphütten etc.) an grössere zentrale oder kleinere dezentrale Abwasserreinigungsanlagen (ARA) angeschlossen (Gartmann, 1982; Züllig, 1982). Bereits 1983 betrug der Anschlussgrad an die Kläranlagen im Oberengadin — von wenigen Ausnahmen wie etwa dem Val Fex abgesehen — nahezu 100 % (BUS, 1985).

Die erste systematische Untersuchung der wichtigsten Oberengadiner Fliessgewässer und gleichzeitig die erste Erfolgskontrolle der getroffenen Gewässerschutzmassnahmen wurde durch das kantonale Amt für Gewässerschutz (heute Amt für Natur und Umwelt) 1981/82 vorgenommen. Dabei erwiesen sich die grösseren Bäche im Einzugsgebiet der Seen durchwegs als unbelastet bis höchstens schwach belastet, während besonders die Innaltläufe und -zuflüsse bei Samedan (Gravatscha, Gebiet Isla Glischa) deutlich bis stark belastet waren.

Probenahmen im Lej da San Murezzan und seinen Zuflüssen im November 1983 sowie eine zusätzliche Untersuchung des Sees im September 1984 führte die EAWAG (1983; 1984) zu folgenden Schlüssen:

„Der Wasserkörper des St. Moritzersees weist einen Zustand auf, der kaum als schlecht zu bezeichnen ist. Die mittleren Nährstoffkonzentrationen vermögen eine Biomasseproduktion zu unterhalten, welche zu einem substantiellen Sauerstoffschwund in der Seetiefe mit Minimalwerten unterhalb der 4 mg/l-Grenze führt.“

Anstehende Entscheide zur umfassenden oder teilweisen Sanierung einzelner Kläranlagen veranlassten das kantonale Amt für Umweltschutz (heute ANU) im Jahre 1991, den Zustand der Oberengadiner Seen

und Fließgewässer erneut überprüfen zu lassen. In der Folge wurden die vier Oberengadiner Seen im Herbst 1991 sowie im Frühjahr und Herbst 1992 untersucht, im St. Moritzersee erfolgte zudem im Februar 1993 eine Untersuchung unter Eis (Limnex, 1994 und 1995).

Zwischen 1993 und dem Beginn der aktuellen Untersuchungen von 2013 wurden die Oberengadiner Seen nicht mehr umfassend untersucht, es existieren allerdings noch einzelne Tiefenprofile für Sauerstoff und Temperatur, welche die EAWAG im Rahmen von Forschungsarbeiten erhoben hat.

3.3 Sauerstoff und Sauerstoffzehrung

Die meisten Organismen in einem See (z.B. Fische, Insektenlarven usw.) sind für ihren Stoffwechsel auf Sauerstoff angewiesen. Bei hoher Nährstoffbelastung eines Sees z.B. aus Landwirtschaft oder Kläranlagen kann es zu erhöhter Produktion von Organismen kommen, welche dann nach dem Absterben den Sauerstoff im See während des Abbauprozesses aufbrauchen. Der Sauerstoffgehalt ist deshalb ein gutes Mass für die organische Belastung eines Sees. Gemäss Gewässerschutzverordnung (GSchV, Anhang 2, Art. 13b) gelten diesbezüglich folgende Anforderungen an stehende Gewässer:

„Der Sauerstoffgehalt des Wassers darf zu keiner Zeit und in keiner Seetiefe weniger als 4 mg/l O₂ betragen.“

Zu den Sauerstoffverhältnissen im Winter unter Eis gibt es nur sehr wenige Messungen. Am 25.03.1981 (Züllig, 1982) sank der Sauerstoff im St. Moritzersee nur in einer 3 m – Schicht über dem Boden deutlich unter den gesetzlichen Grenzwert. Am 22.02.1993 wurde über Grund ebenfalls eine Sauerstoff-Abnahme registriert, jedoch mit einem Minimalwert von 5.0 mg/l (Limnex, 1994). Messungen vom 08.04.2008 (mündliche Angabe EAWAG) zeigen über dem Gewässergrund immer noch eine Unterschreitung des gesetzlichen Grenzwertes. Die neuesten Messungen vom 10.03.2020 (Limnex AG) zeigen im Silser- und im Champfèrersee wenig über Grund Werte unter 5 mg/l, während sie im St. Moritzer- und Silvaplannersee mehr als 8 mg/l betragen. Die gesetzlichen Anforderungen von 4 mg/l können im Winter fast vollständig eingehalten werden.

Im Juni, zu Beginn der sommerlichen Temperaturschichtung (Sommerstagnation), wenn sich das erwärmte Oberflächenwasser nicht mehr mit dem kalten und schwereren Tiefenwasser mischt, liegen die Sauerstoffkonzentrationen in allen vier Oberengadiner Seen seit 1992 meist deutlich über 4 mg/l. Im Juni 2020 sank der Sauerstoffgehalt im Champfèrersee jedoch auf 3.7 und im Juni 2021 auf 4.1 mg/l. Im St. Moritzersee erreichten die Tiefstwerte im Juni 2017 4.0 und im Juni 2020 4.5 mg/l. In allen anderen Seen und Untersuchungsjahren fiel der Sauerstoffgehalt im Juni nicht unter 6 mg/l.

Über die Sauerstoffverhältnisse am Ende der Sommerstagnation im September/Oktober gibt es neben den aktuellen Untersuchungen von 2013 – 2021 je nach See bis zu 10 historische Messungen, welche bis 1946 zurückreichen. Der historische Vergleich zeigt folgendes Bild:

- Die Sauerstoffverhältnisse haben sich in den drei unteren Seen im historischen Vergleich deutlich verbessert (Abbildung 2), sodass die neuen Herbst-Messungen die besten Sauerstoffverhältnisse zeigen.
- Im Silsersee zeigen sich durchgehend gute Sauerstoffverhältnisse (Abbildung 2), auch wenn die neuesten Messwerte im historischen Vergleich nicht zu den besten, aber auch nicht zu den schlechtesten, gehören.
- Im Tiefenwasser des St. Moritzer- und Champfèrersees erreichen die Sauerstoffkonzentrationen – trotz deutlichen Verbesserungen zu den Vorjahren – immer noch Werte unter 4 mg/l. Die gesetzlichen Bestimmungen können in diesen beiden Seen somit noch nicht eingehalten werden.
- In den beiden grossen Seen (Silvaplanner- und Silsersee) können die gesetzlichen Anforderungen am Ende der Sommerstagnation eingehalten werden, auch wenn in einigen Metern über dem Seeboden eine Sauerstoffabnahme infolge der Sauerstoffzehrung festzustellen ist.

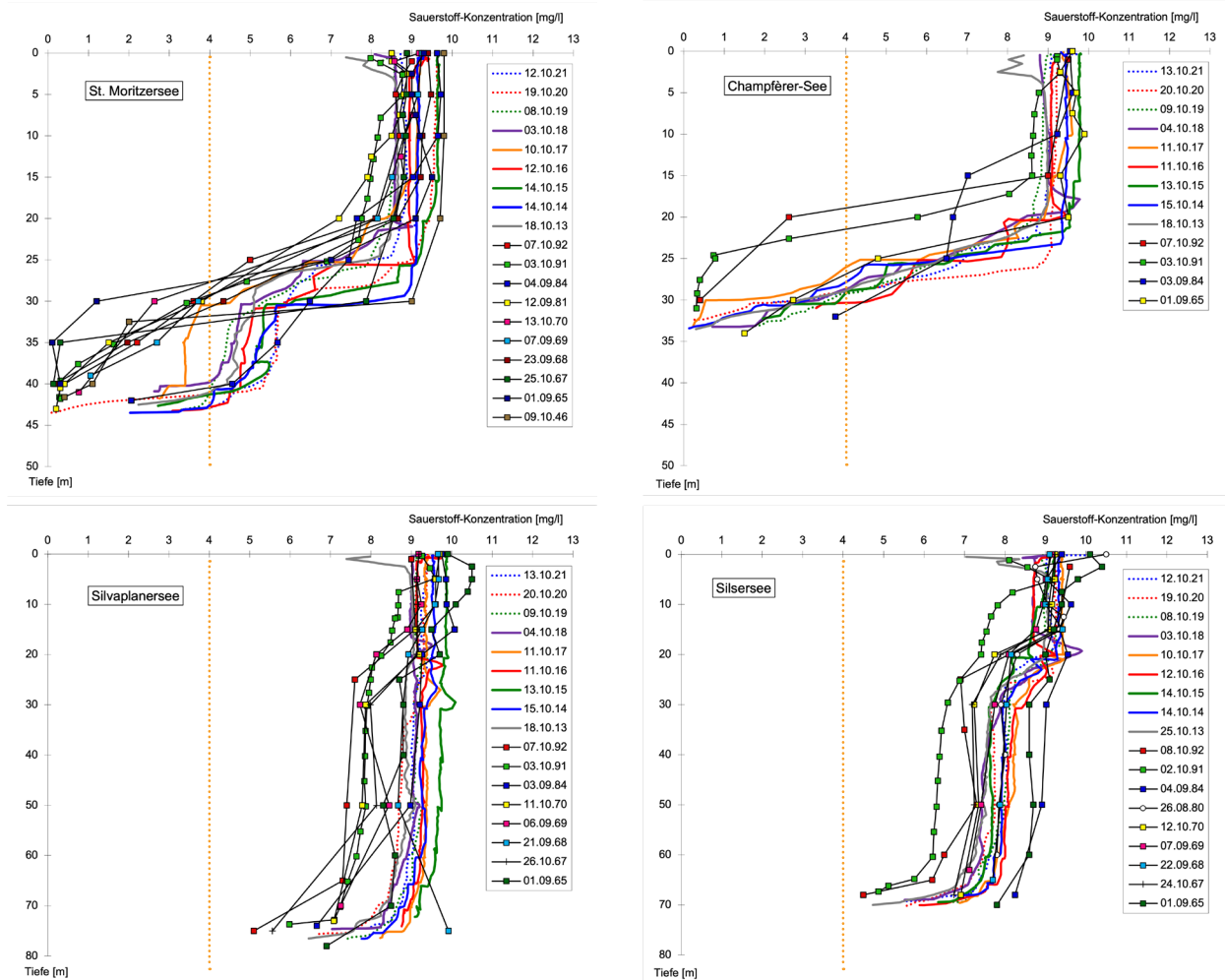
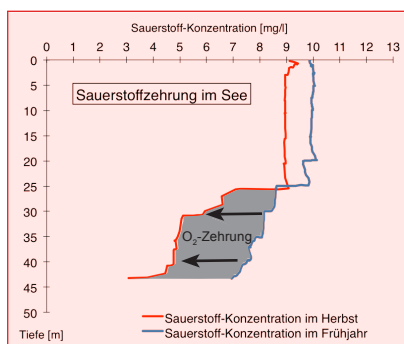


Abbildung 2 Aktuelle und historische Sauerstoffkonzentration in den vier Oberengadiner Seen jeweils am Ende der Sommerschichtung im September/Oktobre. Die gepunktete Vertikale zeigt die gesetzliche Anforderung von mindestens 4 mg/l O₂.



Die Abnahme des Sauerstoffgehaltes im Tiefenwasser von Seen zwischen Beginn und Ende der Sommerstagnation wird als Sauerstoffzehrung bezeichnet (siehe roter Kasten), dabei schwimmt das warme Oberflächenwasser über dem kalten und schwereren Tiefenwasser, ohne sich mit diesem zu mischen. Die Sauerstoffabnahme im Tiefenwasser ist somit vor allem durch den biologischen Abbau von organischem Material beeinflusst und ist ein Mass für die organische Belastung eines Sees. Neben der Produktivität entscheidet auch die Beschaffenheit (Morphologie) eines Sees über die Zehrung der Sauerstoffvorräte, so sind tiefe Seen bezüglich Sauerstoffzehrung meist begünstigt, da sie ein besseres Verhältnis zwischen Seefläche und Volumen haben. So sind der Silvaplanner- und der Silsersee deutlich tiefer als die beiden anderen Seen.

In den Jahren 1992 und 2014 – 2021 wurden sowohl im Frühjahr als auch im Herbst Sauerstoff-Messungen durchgeführt, was eine Berechnung der Sauerstoffzehrung in diesen Jahren ermöglicht. Im St. Moritzersee hat diese Zehrung im Vergleich zu 1992 etwas abgenommen, während sie im Champfèrersee eher zugenommen hat (Tabelle 2). Hier traten auch die höchsten Sauerstoffzehrungsraten der vier Seen auf (0.051 g O₂/m³/Tag). Im Silvaplanner- und Silsersee ist die Sauerstoffzehrung tief und es gibt im Silsersee keine deutlichen Veränderungen zu 1992, im Silvaplannersee könnte die Zehrung sogar leicht abgenommen haben. Da nur wenige Vergleichsjahre für die Beurteilung der Sauerstoffzehrung vorliegen, sind die erwähnten Veränderungen mit einiger Unsicherheit behaftet.

Tabelle 2 Sauerstoffzehrungsrate im Tiefenwasser der vier Oberengadiner Seen für die Jahre 1992 und 2014 – 2021.

See	Mittlere Sauerstoffzehrungsrate im Tiefenwasser [g O ₂ /m ³ /Tag]								
	1992	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
St. Moritzersee	0.033	0.029	0.020	0.022	0.035	0.034	0.031	0.020	0.020
Champfèrersee	0.020	0.044	0.039	0.037	0.051	0.045	0.039	0.024	0.034
Silvaplanersee	0.013	0.009	0.003	0.008	0.012	0.015	0.008	0.008	0.007
Silsersee	0.011	0.012	0.017	0.012	0.014	0.020	0.015	0.011	0.014

Fazit

Die Sauerstoffverhältnisse im St. Moritzer- und Champfèrersee haben sich gegenüber den Jahren 1946 – 1991 deutlich verbessert. Die gesetzlichen Anforderungen von 4 mg/l O₂ können aber im Tiefenwasser noch nicht eingehalten werden, weshalb eine weitere Überwachung der Seen empfohlen wird.

Im Silvaplaner- und Silsersee herrschen heute wie in der Vergangenheit durchwegs gute und gesetzeskonforme Sauerstoffverhältnisse. Im Silvaplanersee haben sich diese in den letzten Jahren noch verbessert, während sie sich im Silsersee im Rahmen der älteren Untersuchungen bewegen.

Über die Sauerstoffzehrung können noch keine gesicherten Aussagen gemacht werden, da noch zu wenige Vergleichsjahre vorliegen. Tendenziell hat diese aber im Champfèrersee im Vergleich zu 1992 eher zugenommen, im Silsersee ist sie etwa gleich geblieben und im St. Moritzer- und Silvaplanersee hat sie eher abgenommen.

3.4 Phosphor

Für den Aufbau von Biomasse benötigen die Algen unter anderem Ortho-Phosphor (PO₄-P). Dieser Pflanzennährstoff ist im Gegensatz zum Gesamt-Phosphor, welche häufig in partikel-gebundener Form vorliegt, für Pflanzen schnell und direkt verfügbar. In den Oberengadiner Seen ist PO₄-P heute ein wachstumslimitierender Stoff und ist somit für die Produktion und die Nahrungskette von entscheidender Bedeutung.

Die PO₄-P-Konzentrationen in den Oberengadiner Seen lagen in den Jahren 2013 bis 2021 auf einem sehr tiefen Niveau und erreichen Werte zwischen 0.000 und 0.005 mg P/l, wobei die höchsten Werte nur im Tiefenwasser festgestellt wurden (Abbildung 3). Die sehr tiefen Werte im Oberflächenwasser zeigen, dass der Phosphor in allen Seen häufig für die Algenproduktion limitierend ist. Auch im historischen Vergleich der Daten seit 1946 haben wir heute die tiefsten Phosphor-Konzentrationen seit 1946 respektive 1965. Das ist einerseits auf des Phosphor-Verbot in Waschmitteln von 1986 und auf dauernden Verbesserungen in der Abwassersanierung, welche bis heute fortgesetzt werden, zurückzuführen. Diese Verbesserungen sind in Abbildung 4 deutlich erkennbar, wo die Abnahme der mittleren P-Konzentrationen seit 1965 dargestellt sind. Am deutlichsten zeigen sich die Veränderungen im St. Moritzersee, wo die PO₄-P-Konzentrationen von 0.042 auf 0.000 – 0.002 mg P/l abgenommen haben. Auch im Champfèrersee zeigt sich eine deutliche Abnahme auf heute 0.000 – 0.002 mg P/l. Im Silvaplaner- und Silsersee starteten die entsprechenden Werte bereits 1965 auf tiefem Niveau und gingen ebenfalls zurück.

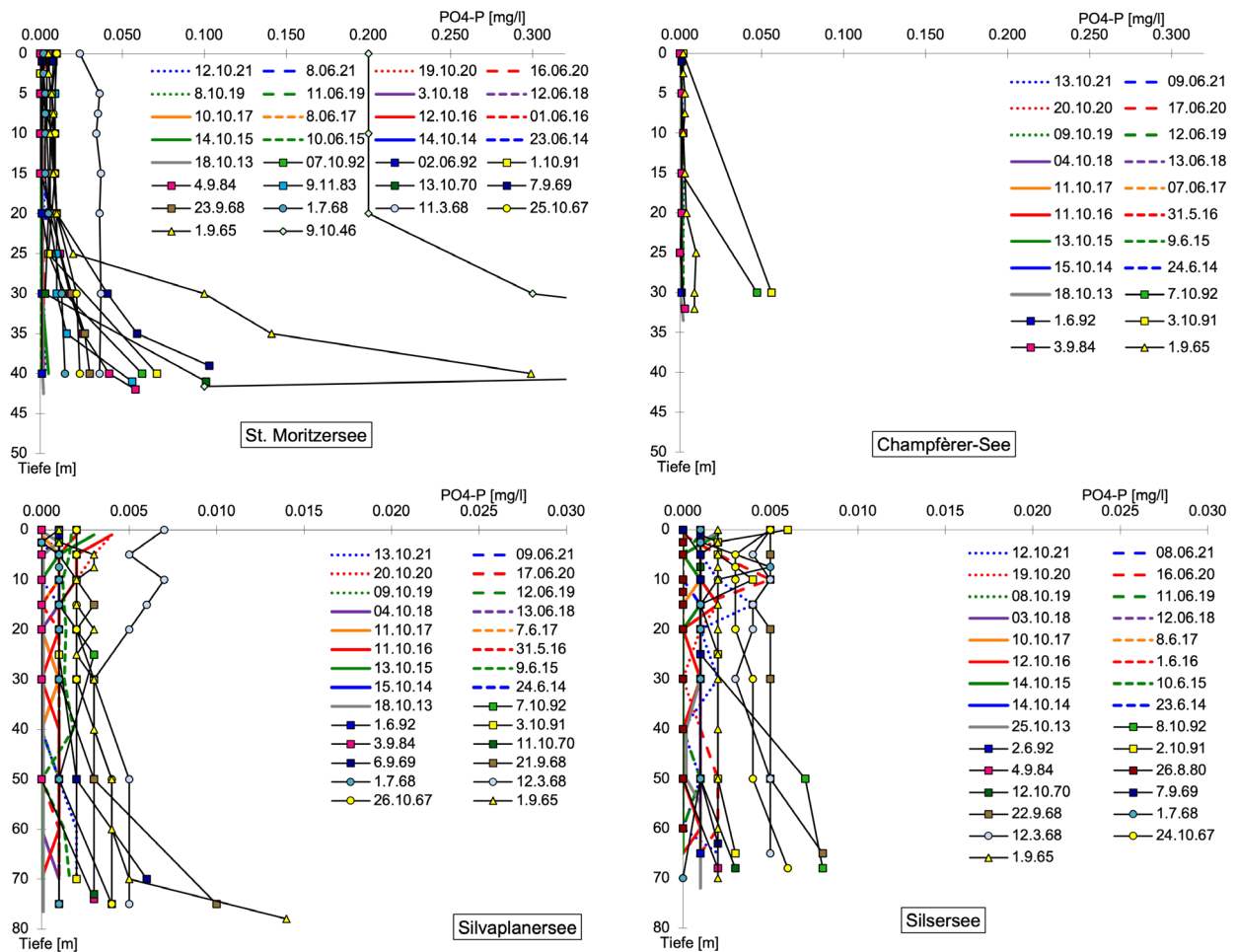


Abbildung 3 Aktuelle und historische Ortho-Phosphor-Konzentration in den vier Oberengadiner Seen für die Periode von 1946 bis 2021. Beim St. Moritzersee wurde auf der X-Achse eine geringere Auflösung gewählt, um die hohen P-Konzentrationen der Jahre 1946, 1965 und 1968 noch darstellen zu können.

Der deutliche Rückgang der Ortho-Phosphor-Konzentrationen in den letzten 50 Jahren kann auch beim Gesamt-Phosphor beobachtet werden. Heute erreichen alle Seen im Frühjahr und Herbst Konzentrationen von weniger als 0.010 mg P/l. Der Trophiegrad aller Seen bezüglich Phosphor (Belastung durch anorganische Pflanzen-Nährstoffe) kann heute somit durchwegs als oligotroph (nährstoffarm) bezeichnet werden. Die beiden untersten Seen (St. Moritzer- und Champfèrersee) waren vor der Jahrtausendwende wegen den hohen P-Konzentrationen aus der Siedlungsentwässerung deutlich höher belastet als heute. Der Zustand dürfte in dieser Zeit meso- bis eutrophen Verhältnissen (mittlere bis hohe Nährstoffbelastung) entsprochen haben. Der Silvaplannersee zeigte zwischen 1960 und 1990 ebenfalls deutliche Tendenzen zu erhöhter Nährstoffbelastung (Eutrophierung) und dürfte zumindest teilweise ebenfalls mesotrophe Verhältnisse aufgewiesen haben. Der oberste See des Oberengadins zeigte als einziger See immer oligotrophe Verhältnisse, auch wenn die Phosphor-Konzentrationen in der Vergangenheit deutlich höher waren als heute. Der Rückgang der Phosphor-Konzentrationen in den letzten 50 Jahren hat sich auch direkt auf die Nahrungskette ausgewirkt, da die Produktion von pflanzlichem und tierischem Plankton vermutlich ebenfalls deutlich zurückgegangen ist und damit auch die Fische in den Seen heute ein geringeres Nahrungsangebot finden als in den vergangenen Jahrzehnten (siehe Kapitel 3.9). Der heutige Zustand der Seen entspricht aber wieder eher den natürlichen Verhältnissen dieser hochalpinen Seen.

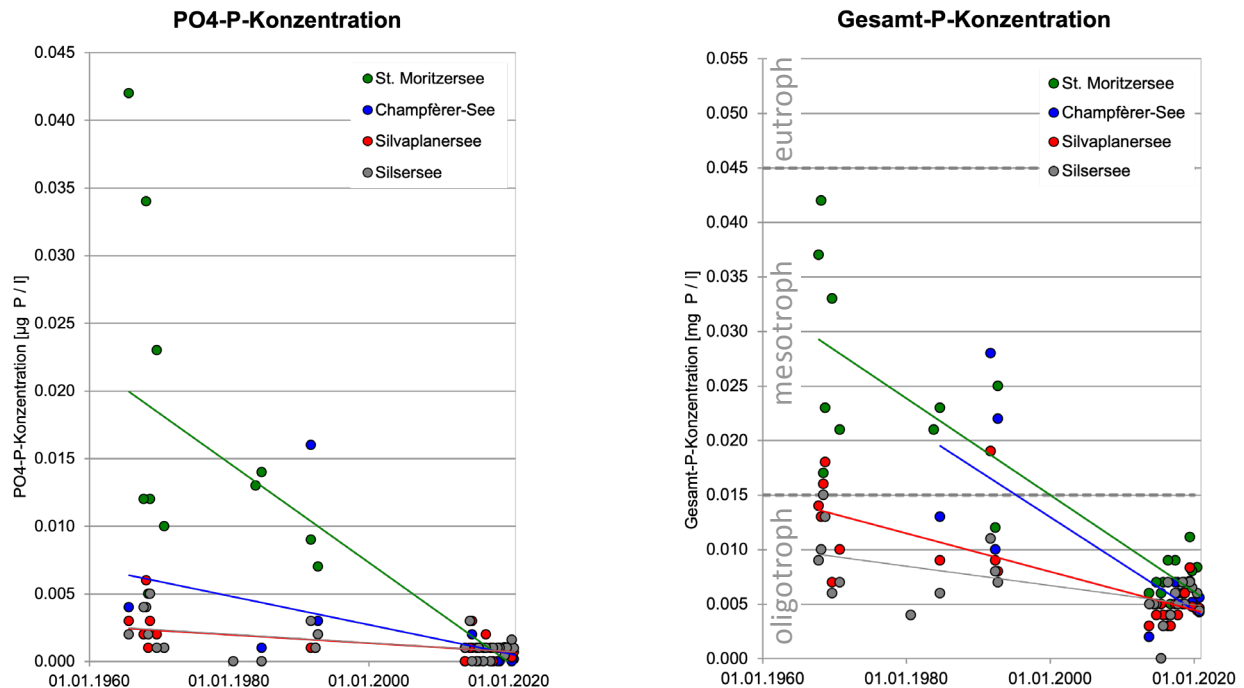


Abbildung 4 Rückgang der mittleren (tiefergemittelt ohne Berücksichtigung der Jahreszeit) Ortho- und Gesamt-Phosphor-Konzentrationen in den vier Oberengadiner Seen zwischen 1965 und 2021. Die farbigen Linien zeigen die berechnete Konzentrations-Abnahme mittels linearer Regression. Beim Gesamt-Phosphor sind die Trophieabgrenzungen in grauer Farbe gemäss LAWA (1998) angegeben.

Fazit

Durch das Phosphor-Verbot in Waschmitteln von 1986 und Optimierungen in der Siedlungsentwässerung sind die Phosphor-Konzentrationen in allen Seen zwischen 1960 und 2021 deutlich zurückgegangen. Heute dürften die Phosphor-Konzentrationen in den Seen wieder deutlich näher an den natürlichen Verhältnissen sein.

Die gesunkenen Phosphor-Konzentrationen wirken sich auch direkt auf die Produktion von Pflanzen- und Fischbiomassen aus.

3.5 Stickstoff

Wie der Phosphor ist auch der Stickstoff für den Aufbau von organischer Substanz in den Oberengadiner Seen sehr wichtig. Bei der Primärproduktion und zum Aufbau von pflanzlichem Plankton werden Phosphor und Stickstoff im Verhältnis 1:16 gebraucht. Der tiefergemittelte Gesamt-Stickstoff erreicht in den Oberengadiner Seen in den Jahren 2014 – 2021 Werte von 0.20 bis 0.46 mg N/l. Das Verhältnis des Gesamtstickstoffes zum Gesamtphosphor übersteigt damit das 16fache sehr deutlich (vergleiche Kapitel 3.4). Der Stickstoff ist somit im Gegensatz zum Phosphor für die Algenproduktion nicht limitierend. In den letzten 50 Jahren hat der Gesamt-Stickstoff in den Seen im Mittel um etwas 20 – 30 % zugenommen (Abbildung 5).

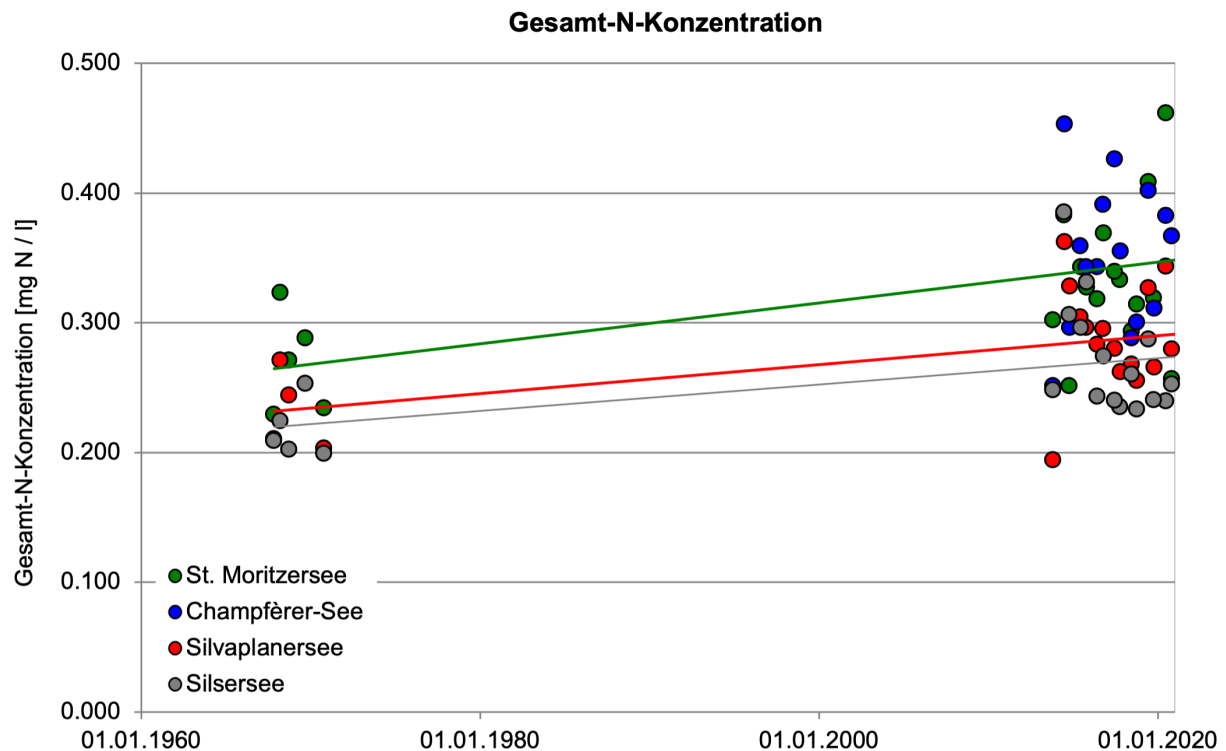


Abbildung 5 Veränderung der Gesamt-Stickstoff-Konzentrationen in den vier Oberengadiner Seen zwischen 1965 und 2021. Dargestellt sind die tiefengemittelten Stickstoffkonzentrationen pro Untersuchungszeitpunkt, ohne Berücksichtigung der Jahreszeit. Die farbigen Linien zeigen die berechnete Konzentrations-Zunahme mittels linearer Regression (ausser Champfèrersee, wo keine älteren Daten vorliegen).

Für das Wachstum der pflanzlichen Organismen im See (Phytoplankton) sind vor allem Nitrat (NO_3) und Ammonium (NH_4) von Bedeutung. Bei hohen pH- und Temperatur-Werten im Wasser kann das Ammonium auch vermehrt als Ammoniak (NH_3) vorliegen, welches für Fische toxisch ist. Auch Nitrit, das sich bei der Nitrifikation des Ammoniaks zu Nitrat als Zwischenprodukt bilden kann, ist ebenfalls toxisch. Für Gewässer sollten somit die Nitrit- und Ammonium/Ammoniak-Konzentrationen möglichst tief gehalten werden.

Der anorganische Stickstoff besteht in den Oberengadiner Seen zum grössten Teil aus Nitrat-Stickstoff. Die mittleren Konzentrationen in den vier Seen – gemittelt über die ganze Wassertiefe – lagen in den Jahren 2014 – 2021 zwischen 0.15 und 0.30 mg N/l (Abbildung 6). Die beiden oberen Seen (Silser- und Silvaplanersee) weisen dabei tiefere Nitrat-Konzentrationen auf als die beiden nachfolgenden Seen (Champfèrer- und St. Moritzersee). Der Nitrat-Gehalt hat sich in den Oberengadiner Seen seit 1965 von durchschnittlich 0.1 auf etwa 0.2 mg N/l verdoppelt, wobei die Streuungen zwischen den einzelnen Jahren und Jahreszeiten beträchtlich sind. Generell ist der Nitratgehalt in den Seen jedoch tief. Die Gründe für die in jüngster Zeit beobachtete Zunahme des Nitrates wurden nicht weiter untersucht, es ist aber davon auszugehen, dass zumindest ein Teil auf das Konto der geringeren Algenproduktion geht (siehe Kapitel 3.6). Erwähnenswert bleibt noch, dass im St. Moritzersee 1946 eine deutlich höhere mittlere Nitratkonzentration von 1.42 mg N/l gemessen wurde (Schmassmann, 1948).

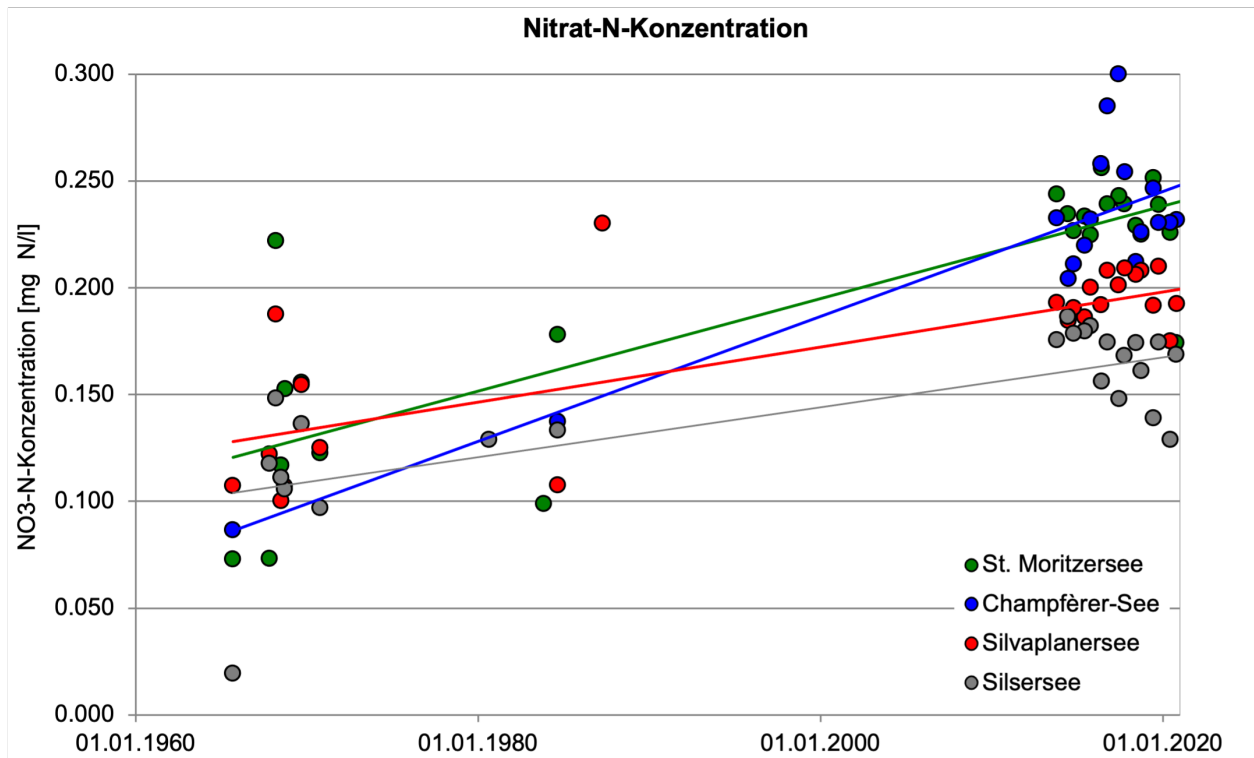


Abbildung 6 Veränderung der Nitrat-Stickstoff-Konzentrationen in den vier Oberengadiner Seen zwischen 1965 und 2021. Dargestellt sind die tiefengemittelten Konzentrationen pro Untersuchungszeitpunkt, ohne Berücksichtigung der Jahreszeit. Die farbigen Linien zeigen die berechnete Konzentrations-Zunahme mittels linearer Regression (ausser Champfèrersee, wo keine älteren Daten vorliegen).

Die Nitrit-Konzentrationen sind in den Seen durchwegs sehr tief bei 0.001 – 0.002 mg N/l. Die höchsten, vereinzelt gemessenen Werte zwischen 2014 und 2021 liegen bei 0.003 bis 0.006 mg N/l und liegen damit deutlich unter den Zielvorgaben für Salmonidengewässer gemäss BAFU von 0.020 mg N/l (Liechti, 2010)¹; diese seltenen, einzelnen Werte würden knapp nicht mehr den deutlich strengerer Richtlinien der EU von maximal 0.003 mg N/l (EU, 2006) entsprechen. Die Nitritwerte sind trotz einzelner Ausreisser für die Lebewesen in den Oberengadiner Seen unbedenklich.

Die Ammonium-Konzentrationen in den Seen bewegen sich in den Jahren 2014 – 2021 meist an oder unter der Nachweisgrenze von 0.01 mg N/l. Die höchsten Werte zeigte der Champfèrersee in den Jahren 2016 – 2021 in Bodennähe, wo sie auf 0.02 – 0.06 mg N/l anstiegen. Dies entspricht aber immer noch sehr guten Verhältnissen. Unter Berücksichtigung der gemessenen pH- und Temperaturverhältnisse steigen die Ammoniak-Werte aber nicht über 0.001 mg N/l, was für die Lebewesen im See unbedenklich ist. Gemäss BAFU (Liechti, 2010) sollten in Fliessgewässern die NH_3 -Konzentrationen nicht über 0.020 mg N/l¹ steigen. Für die Eier und Brut von Edelfischen können bereits Konzentrationen über 0.008 mg N/l toxisch sein.

3.6 Lichtverhältnisse und Chlorophyll-a

Neben den Nährstoff- sind auch die Lichtverhältnisse in Seen massgebend für die Primärproduktion der Algen. Aus den Tiefenprofilen der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) kann die Licht-Kompensationstiefe bestimmt werden, welche die Tiefengrenze für das Algenwachstum darstellt. In diese Tiefe dringt nur noch circa 1 % des Oberflächenlichtes ein. In den vier Oberengadiner Seen ist das Wasser meist sehr klar und das Licht dringt in grosse Tiefen ein. Gemäss den aktuellen Untersuchungen von 2014 – 2021 liegen die Kompensationstiefen je nach See und Jahreszeit zwischen 8 und 30 m (Abbil-

¹ Dieser Wert wurde für Fliessgewässer definiert.

dung 7). Seit 1991 haben diese in allen Seen um mehrere Meter zugenommen. Die vier Seen sind heute somit deutlich klarer und lichtdurchfluteter als vor rund 30 Jahren. Diese Feststellung deckt sich auch sehr gut mit den gestiegenen Sichttiefen nach Secchi, welche durch Absenken einer weissen Scheibe bis zur Unkenntlichkeit bestimmt werden. Die grössten Sichttiefen seit 1991 wurden im Oktober 2016 gemessen.

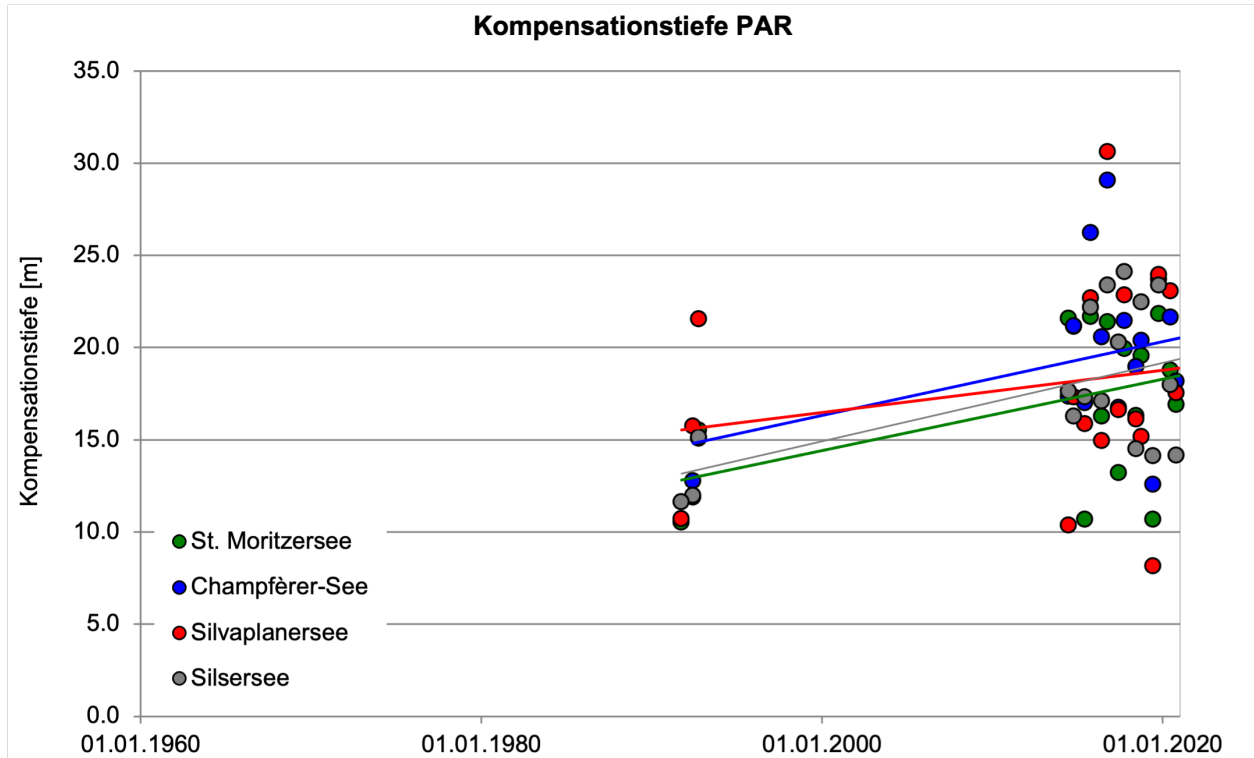


Abbildung 7 Kompensationstiefen in den vier Oberengadiner Seen für die Untersuchungsjahre 1991/92 und 2014 – 2021. Die farbigen Linien zeigen die berechnete Zunahme der Kompensationstiefe mittels linearer Regression.

Das Chlorophyll-a (photosynthetisch aktives Pigment der Algen) ist ein Mass für die vorhandene Biomasse des pflanzlichen Planktons im See (standing crop). Zwischen 2014 und 2021 wurden im Epilimnion der Seen (warme Oberflächenschicht von 0 bis circa 25 m Tiefe) mittlere Konzentrationen zwischen 0.5 und 3.6 $\mu\text{g/l}$ gemessen. Diese Werte sind durchwegs tief und sind typisch für nährstoffarme respektive oligotrophe Seen. Seit 1991/92 haben die Chlorophyll-Konzentrationen abgenommen (Abbildung 8).

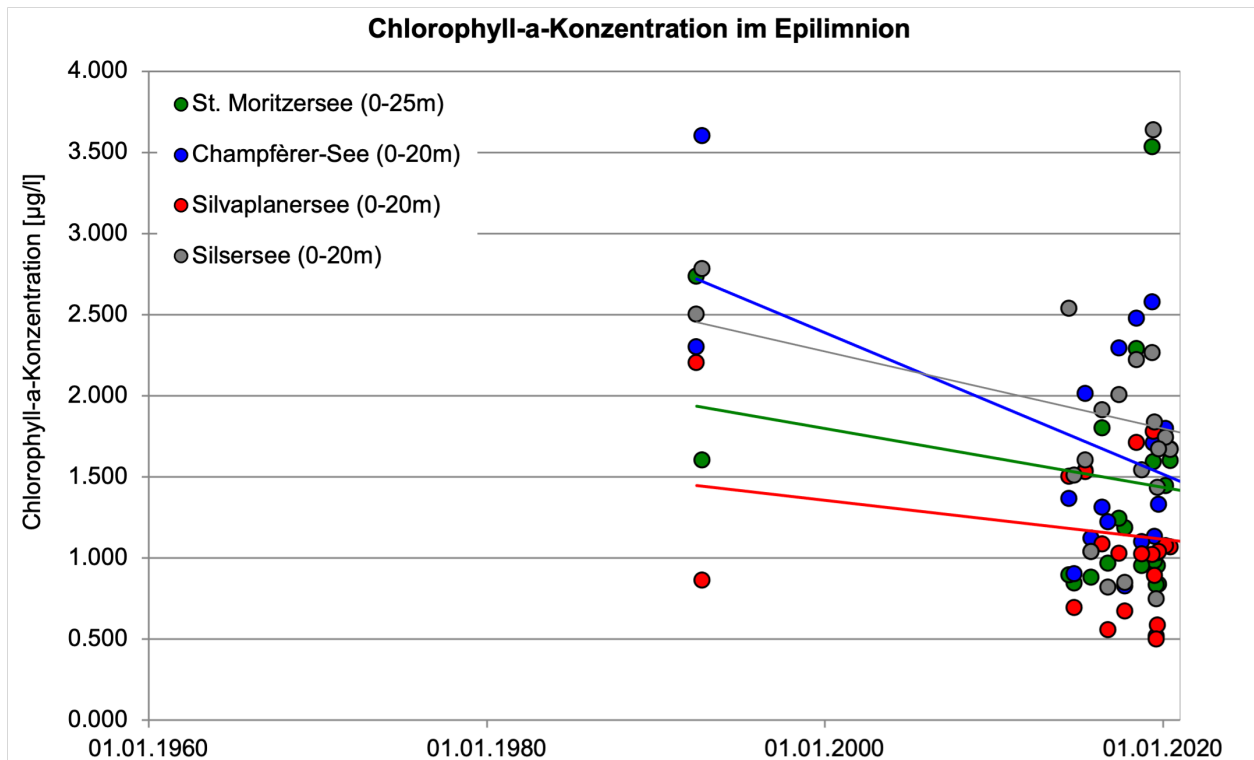


Abbildung 8 Chlorophyll-a-Konzentrationen in den vier Oberengadiner Seen für die Untersuchungsjahre 1991/92 und 2014 – 2021. Die farbigen Linien zeigen die berechnete Abnahme mittels linearer Regression.

3.7 Temperaturen, Leitfähigkeit, Trübstoffe und pH

Alle vier Oberengadiner Seen gehören zu den dimiktischen Gewässern, mit je einer Vollzirkulation im Frühjahr und Herbst. Dazwischen liegt die Stagnationsphase im Sommer, wenn das warme Oberflächenwasser auf dem kälteren Tiefenwasser aufliegt und sich mit diesem nicht mischt; bei der winterlichen Stagnationsphase schwimmt das Eis auf der Wasseroberfläche und verhindert so eine Durchmischung. Die Temperaturmessung in den Seen erfolgte meist im Juni und Oktober, wobei die Oberflächentemperaturen kaum über 13 °C stiegen (Abbildung 9). In den Sommermonaten wurden 17 °C erreicht (siehe Messkampagne Sommer 2019). Die Seen sind der Höhenlage entsprechend somit auch im Sommer eher kühl. Die Tiefenwassertemperatur liegt meist zwischen 3 und 7 °C, was natürlichen Verhältnissen entspricht. Die warme Oberflächenschicht (Epilimnion) erreicht in allen Seen im Herbst eine Mächtigkeit von 20 – 30 m.

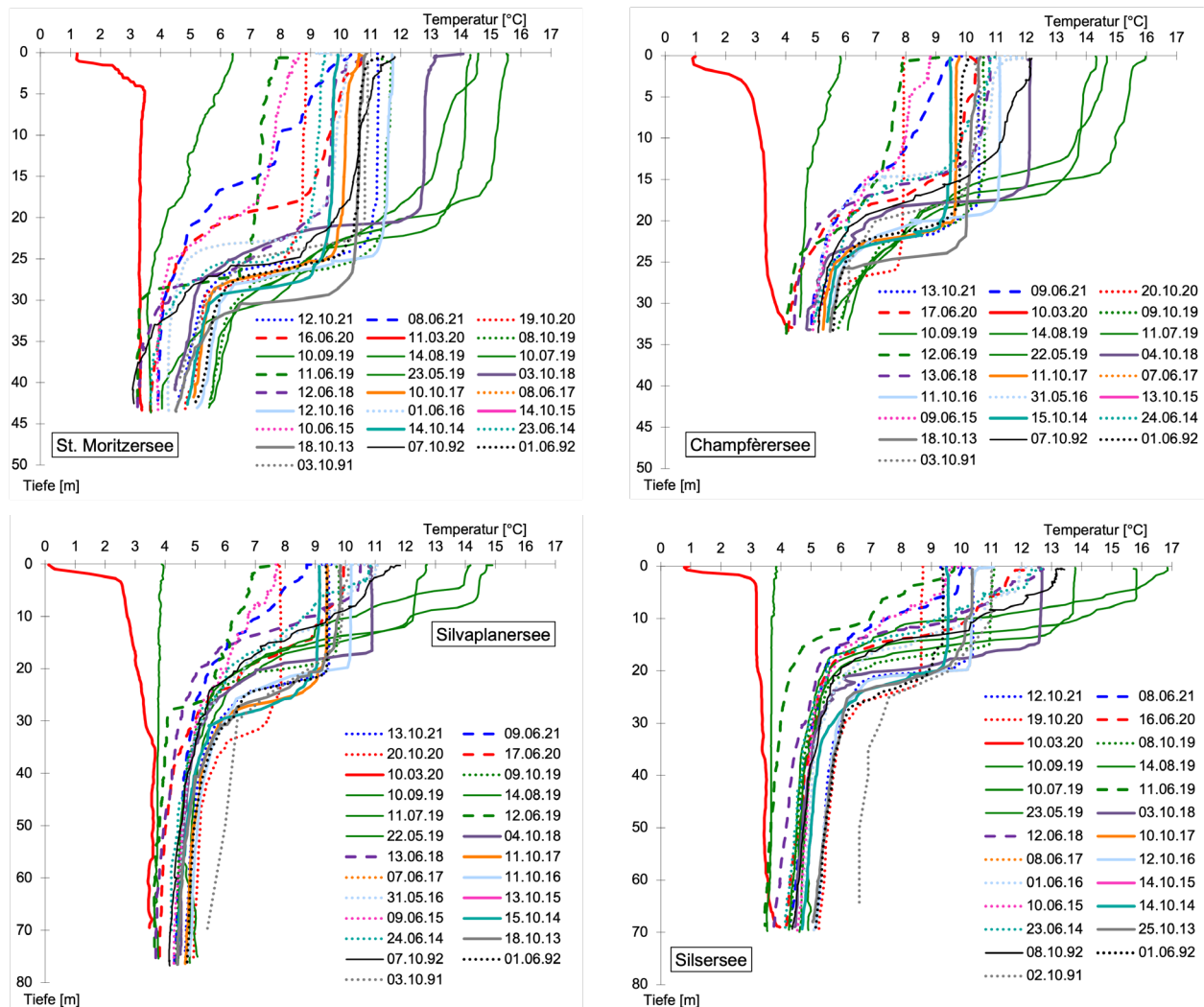


Abbildung 9 Tiefenprofile der Temperatur in den vier Oberengadiner Seen für die Untersuchungsjahre 1991 – 1992 und 2013 – 2021.

Bei der Leitfähigkeit gibt es zwischen den Seen deutliche Unterschiede. Zwischen dem obersten See (Silsersee) und dem untersten See (St. Moritzersee) nehmen die durchschnittlichen Leitfähigkeiten um etwa 50 % zu (Abbildung 10). Zudem kann beobachtet werden, wie sich die Leitfähigkeit im Tiefenwasser von See zu See (in Fliessrichtung betrachtet) gegenüber dem Oberflächenwasser mehr und mehr erhöht. Dies hat im Champfèrer- und St. Moritzersee unter anderem mit der Sauerstoffarmut (Kapitel 3.3) und der entsprechenden Nährstoff-Rücklösung im Tiefenwasser zu tun. In den St. Moritzersee gelangt zudem über einen Zufluss Wasser mit hohen Leitfähigkeiten. Die Leitfähigkeiten im Silsersee bewegen sich seit 1991 in einem sehr engen Band von 93 – 127 $\mu\text{S}/\text{cm}$. In den nachfolgenden Seen erhöht sich diese Spannweite auf 101 – 147 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Silvaplanersee), 109 – 181 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Champfèrersee) respektive 121 – 246 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (St. Moritzersee).

Die pH-Werte liegen in allen Seen meist im Bereich zwischen pH7 und pH9 und zeigen damit keine besonderen Auffälligkeiten. Hohe pH-Werte, welche zur Bildung von toxischem Ammoniak führen können, kommen keine vor.

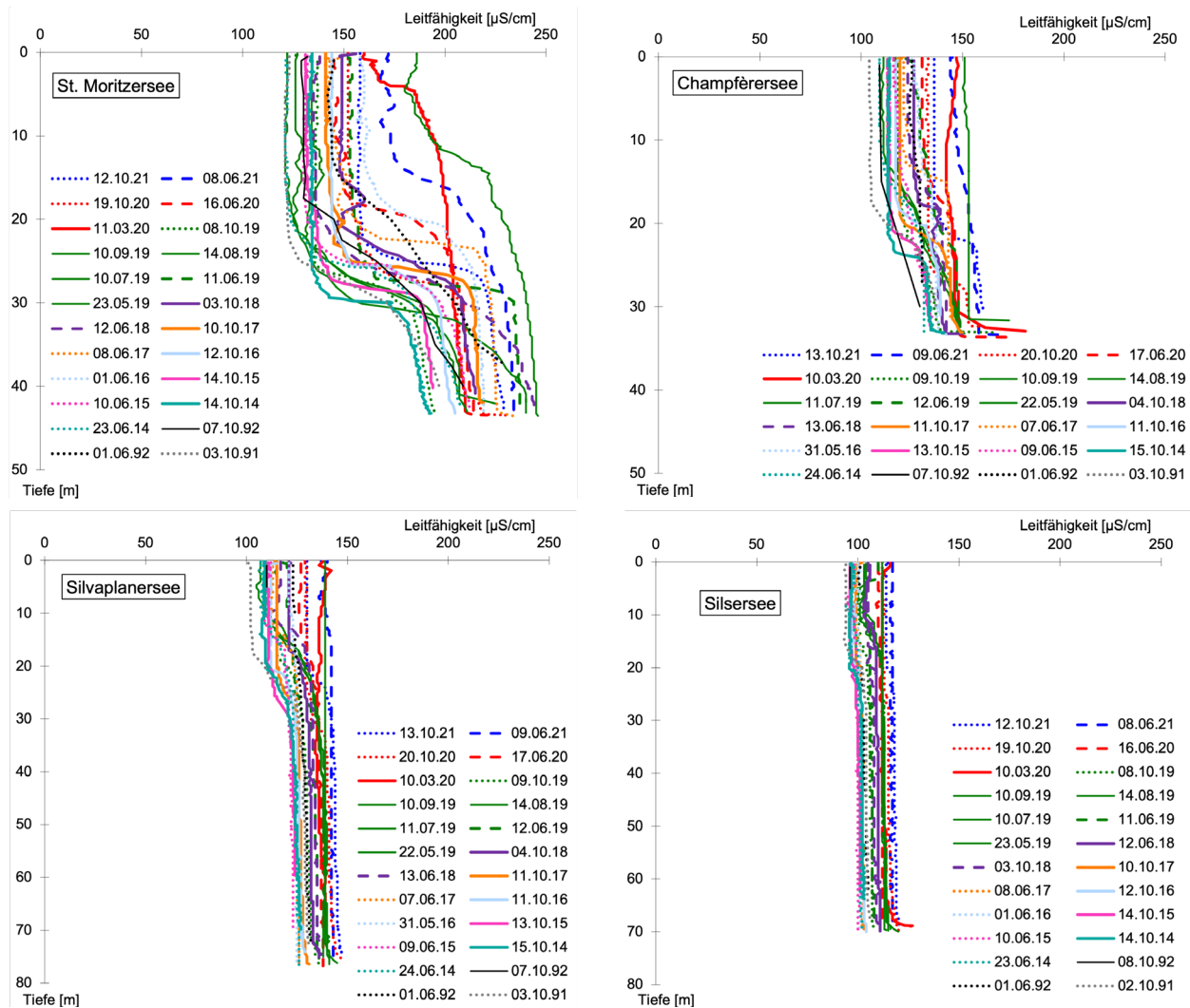


Abbildung 10 Tiefenprofile der Leitfähigkeit in den vier Oberengadiner Seen für die Untersuchungsjahre 1991 – 1992 und 2014 – 2021.

Die sehr guten Lichtverhältnisse und die zum Teil grossen Sichttiefen lassen vermuten, dass auch die Konzentration an Trübstoffen sehr gering ist. Dies kann anhand der GUS-Werte (Gesamte ungelöste Stoffe) durchwegs bestätigt werden. Die Trübstoffmenge erreicht im St. Moritzersee kaum Werte über 2 mg/l. Im Champfèrersee erreicht sie an vereinzelten Probenahmeterminen mehr als 2 mg/l (Oktober 2017, Juni 2018 und 2019). Im Silvaplannersee erreicht die Trübstoffmenge kaum Werte über 3 mg/l (ausser im Juni 2019 bis 5.9 mg/l). Der Silsersee hat mit Abstand die geringsten GUS-Werte, sie überschreiten selten 2 mg/l. Die genannten Werte entsprechen sehr tiefen Schwebstoffkonzentrationen. Die etwas höheren Werte im Silvaplannersee dürften vor allem aus dem Eintrag von Trübstoffen aus den grösseren Zuflüssen stammen.

3.8 Trophiegrad

Der Trophiegrad eines Sees zeigt den Gehalt resp. die Belastung durch Pflanzennährstoffen an. Mit zunehmendem Nährstoffgehalt des Seewassers wird die Nahrungskette angekurbelt und es kann zu erhöhten Biomassen bei Algen und Fischen im See kommen. Erreicht der Nährstoffgehalt ein bestimmtes Mass, so spricht man von Eutrophierung. Seen mit wenig Nährstoffen werden als oligotroph, solche mit vielen Nährstoffen als eutroph bezeichnet, bei mittlerer Belastung spricht man von mesotrophen Seen.

Der Trophiegrad eines Sees im ursprünglichen Zustand (Referenzzustand) kann anhand der Seegeome-

trie (Länge, Breite, Tiefe, Volumen, Oberfläche) abgeschätzt werden (LAWA, 1998). Gemäss dieser Einstufungsmethode dürften alle Seen des Oberengadins in historischer Vergangenheit nährstoffarm und somit oligotroph gewesen sein. Der Trophiegrad der Seen wurde ebenfalls nach LAWA (1998) anhand des Chlorophyllgehaltes, der Sichttiefe und der Gesamt-Phosphor-Konzentrationen berechnet. 1992 wiesen der St. Moritzer- und der Champfèrersee entsprechend einen mesotrophen Zustand auf, während der Silvaplaner- und Silsersee einen oligotrophen Zustand, jedoch mit deutlicher Tendenz zu mesotroph zeigten (Tabelle 3). In den letzten Jahren (2014 – 2016 und 2017 – 2021) ergibt sich aus den Berechnungen in allen Seen wieder ein oligotropher Zustand. Der Gesamt-Phosphorgehalt in allen Seen zeigt für die letzten sechs Jahre ebenfalls einen oligotrophen Zustand an (Kapitel 3.4) und stimmt mit der berechneten Einstufung nach LAWA (1998) gut überein.

Tabelle 3 Berechnung des Trophiegrades der vier Oberengadiner Seen nach LAWA (1998) für die Untersuchungsjahre 1992 und 2014 – 2021. Als Grundlage der Berechnungen dienten die in den Seen gemessenen Werte von Chlorophyll-a, Gesamt-Phosphor und der Sichttiefe.

Bewertungsskala Trophie-Index:

- < 1.55 oligotroph
- 1.55 – 2.55 mesotroph
- > 2.55 eutroph
- > 3.55 polytroph

	Silsersee	Silvaplanersee	Champfèrersee	St. Moritzersee
1992				
Index Trophie nach LAWA	1.42	1.30	1.64	1.55
Einstufung Trophie	oligotroph (Tendenz zu mesotroph)	oligotroph (Tendenz zu mesotroph)	mesotroph	mesotroph
2014 – 2016				
Index Trophie nach LAWA	1.03	1.00	1.03	1.14
Einstufung Trophie	oligotroph	oligotroph	oligotroph	oligotroph
2017 – 2021				
Index Trophie nach LAWA	1.26	1.13	1.21	1.23
Einstufung Trophie	oligotroph	oligotroph	oligotroph	oligotroph

Fazit

In den Jahren 1965 bis 1992 konnte in allen vier Seen des Oberengadins im Vergleich zum natürlichen Zustand eine erhöhte Nährstoffbelastung beobachtet werden. Diese Belastung hat sich bis heute wieder deutlich verringert und der Zustand der Seen liegt wieder nahe am natürlichen Zustand.

3.9 Plankton und Fischertrag

Die Resultate der Planktonuntersuchungen der Jahre 2014 – 2019 sind in zwei separaten Berichten zuhanden des Amtes für Jagd und Fischerei des Kantons Graubünden (AJF) zusammengefasst (Limnex, 2017b und 2020). In diesen Berichten wird auch den Gründen der rückläufigen Fischfangerträge nachgegangen. Die Untersuchungen führten zu folgenden Erkenntnissen:

- Die theoretisch zu erwartende Gesamtbiomasse (standing crop) der Fische in den vier Seen, berechnet anhand des Gesamt-Phosphor-Gehaltes, dürfte sich in der rund 25-jährigen Zeitspanne zwischen den Untersuchungen von 1991/92 und 2014 – 2019 deutlich reduziert haben (Abbildung 11). Für 1991/92 wurden für die vier Seen noch 29 – 43 kg/ha berechnet, während für die letzten Jahre von 2014 – 2019 die theoretische Biomasse der Fische nur noch zwischen 18 und 22 kg/ha erreichte. Die Streuungen der Werte sind z.T. recht hoch (siehe schwarze Vertikalstriche in Abbildung 11). Der Rückgang der Gesamtbiomasse bei den Fischen beträgt somit in der Theorie und über die rund 25 Jahre betrachtet rund 40 – 60%.
- Im St. Moritzersee stimmen die theoretischen Fangerträge in allen Untersuchungsjahren sehr gut mit den effektiven Erträgen gemäss der kantonalen Fangstatistik überein. Im Champfèrersee liegen die effektiven Fischfänge in den Jahren 2014 – 2019 zum Teil über dem Erwartungswert. Im Silser- und Silvaplanersee hingegen lagen die Fangerträge 1991/92 zum Teil noch deutlich über den Erwartungswerten, während sie heute (2014 – 2019) z.T. ebenso deutlich unter den erwarteten Werten liegen. Im Untersuchungsjahr 2019, mit der besten Datengrundlage aller Untersuchungsjahre, entsprechen die effektiven Fangerträge im St. Moritzer- und im Champfèrersee recht gut den Erwartungen, in den beiden oberen Seen liegen sie jedoch weit darunter.
- Die Zusammensetzung des Planktons weist in den Oberengadiner Seen auf keine gravierende Störung der Biozönose hin. Es handelt sich um vielfältige und ausgewogene Artengemeinschaften, ohne Massenentfaltung einzelner Gruppen. Toxische Formen, welche die Fische beeinträchtigen können, kommen keine vor. Die Planktonbiomassen und somit die Futterbasis für Fische sind aber generell tief und dürften zudem seit den Neunzigerjahren wegen tieferen Phosphorwerten abgenommen haben. Trotz den eher geringen Biomassen ist im Sommerhalbjahr genügend Nahrung für planktivore Fische vorhanden. Der Winter stellt hingegen wegen der geringen Dichte an Planktontieren einen Engpass bei der Nahrungsgrundlage dar.

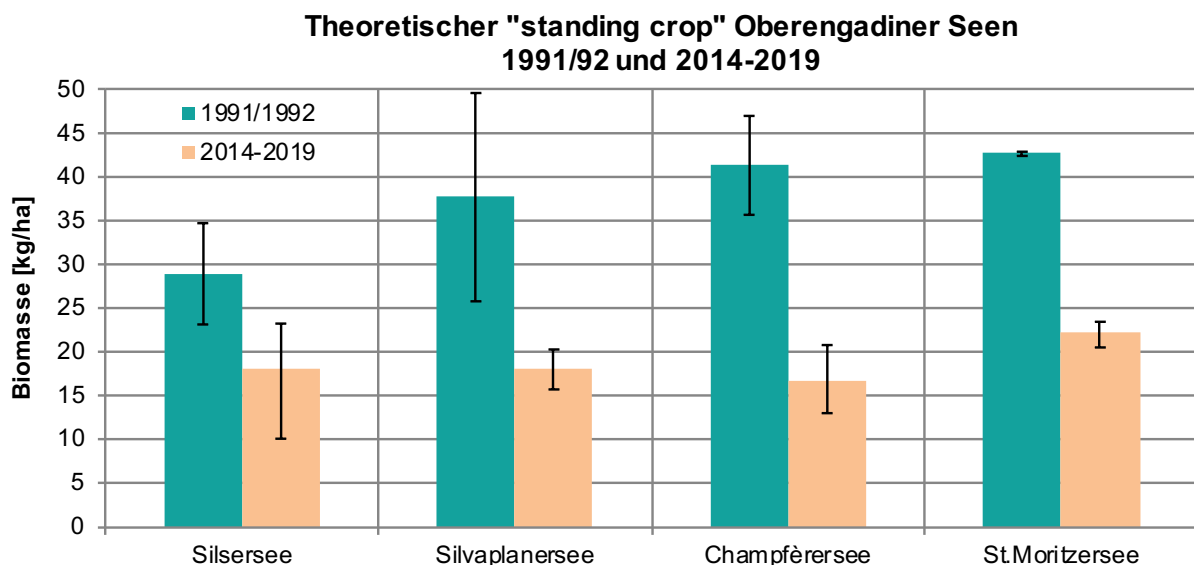


Abbildung 11 Mittlere theoretische Fischbiomasse (standing crop) in den vier Oberengadiner Seen berechnet nach dem Ansatz von Peters (1986) und für die beiden Perioden 1991/92 und 2014 – 2019. Die Fehlerbalken zeigen die Streuung innerhalb eines Sees (Minimum und Maximum). Die Werte basieren auf den Gesamt-Phosphorkonzentrationen der Jahre 1991/92 und 2014 – 2019.

4 Literaturverzeichnis

- Ariztegui, D. (1993): Paleoenvironmental and paleoclimatic implications of sedimented organic matter variations in lacustrine systems: Lake St. Moritz, a case study. Mitt. Geol. Inst. ETH Zürich Nr. 1022.
- Borner, L. (1922): Die Bodenfauna des St. Moritzer Sees. Eine monographische Studie. Arch. Hydrobiol. 13, 1 - 91 und 209 - 281.
- Bosli-Pavoni, M. (1971): Ergebnisse der limnologischen Untersuchungen der Oberengadiner Seen. Schweiz. Z. Hydrol. 33, 386 - 409.
- BUS (1985): Gewässerschutzstatistik. Schriftenreihe Umweltschutz Nr. 46, herausgegeben vom Bundesamt für Umweltschutz, Bern.
- EU (2006): Richtlinie 2006/44/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 6. September 2006 über die Qualität von Süsswasser, das schutz- und verbesserungsbedürftig ist, um das Leben von Fischen zu erhalten.
- Gartmann, R. (1982): Hydrologische Verhältnisse und Gewässerschutzmassnahmen im Engadin. Schweiz. Z. Hydrol. 44, 171 - 180.
- LAWA (1998): Gewässerbewertung – stehende Gewässer“. Vorläufige Richtlinie für eine Erstbewertung von natürlich entstandenen Seen nach trophischen Kriterien. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser.
- Liechti Paul (2010): Methoden zur Untersuchung und Beurteilung der Fliessgewässer. Chemisch-physikalische Erhebungen, Nährstoffe. Umwelt-Vollzug Nr. 1005. Bundesamt für Umwelt, Bern. 44 S.
- Limnex AG (1994): Gewässerzustand und Gewässerschutzmassnahmen im Oberengadin. Bericht zuhanden des Amt für Umweltschutz des Kantons Graubünden.
- Limnex AG (1995): Oberflächengewässer des Oberengadins. Synthesebericht über den Zustand und die Gewässerschutzmassnahmen. Oktober 1995. Bericht zuhanden des Amt für Umweltschutz des Kantons Graubünden.
- Limnex AG (2017): Gewässerzustand der vier Oberengadiner Seen von 2014 – 2016. Und mutmassliche Entwicklung in den letzten Jahrzehnten. Bericht im Auftrag des Amtes für Natur und Umwelt des Kantons Graubünden. Brugg. 19 S.
- Limnex AG (2017b): Fischereiliche Abklärungen zum Rückgang der Fischfangerträge in den Oberengadiner Seen. Inkl. Beurteilung des Planktons von 2014 – 2016. Bericht im Auftrag des Amtes für Jagd und Fischerei des Kantons Graubünden.
- Limnex AG (2020): Monitoring des Nahrungsangebotes resp. des Zooplanktons in den 4 Oberengadiner Seen. Datenerhebung im Referenzjahr 2019, inkl. Angaben zur Fisch-Ertragsfähigkeit, zum Phytoplankton und zum Chlorophyll-a-Gehalt. Bericht im Auftrag des Amtes für Jagd und Fischerei des Kantons Graubünden.
- Märki, E. (1966): Vorbericht über die chemisch-physikalische Untersuchung der Oberengadiner Seen vom 30. August – 1. September 1965. Bericht zuhanden der internationalen Arbeitsgemeinschaft für die Donauforschung.
- Peters, R.H. (1986): The role of prediction in limnology. Limnol. Oceanograph. 31 (5), 1986, 1143 – 1159.
- Schmassmann, W. (1920): Die Bodenfauna hochalpiner Seen. Arch. Hydrobiol. Suppl. III/1, 1 - 106.

- Schmassmann, W., Schmassmann, H. (1948): Chemische Untersuchungen im St. Moritzersee. Schweiz. Z. Hydrol. 10, 23 - 35.
- Züllig, H. (1982): Die Entwicklung von St. Moritz zum Kurort im Spiegel der Sedimente des St. Moritzersees. Wasser, Energie, Luft 74, Heft 7/8, 177 - 183.