

Limnex AG  
Neumarktplatz 18  
*Limnologie* 5200 Brugg  
044 313 13 00  
*Gewässerökologie* info@limnex.ch  
www.limnex.ch  
*Hydrometrie*



# Gewässerzustand der vier Oberengadiner Seen von 2014–2016

Und mutmassliche Entwicklung in den letzten Jahrzehnten



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

Brugg, 10. Mai 2017

## **Impressum**

Limnex-Projekt 2603  
5200 Brugg  
10. Mai 2017

### **Bearbeitung und Probenahmen**

Urs Vogel, David Tanno, Alexandra Chevrolet, Roman Gerber

### **Auftraggeber**

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

### **Titelbild**

Silvaplanersee an der tiefsten Stelle, Blickrichtung Champfèr (Foto: © Limnex AG).

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Resultate der Seeuntersuchungen und Vergleich mit älteren Daten</b> .....	<b>6</b>
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	11
3.5	Stickstoff	13
3.6	Lichtverhältnisse und Chlorophyll-a	14
3.7	Temperaturen, Leitfähigkeit, Trübstoffe und pH	15
3.8	Trophiegrad	17
3.9	Plankton und Fischertrag	18
<b>4</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>19</b>

# 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 2016 zum erstenmal seit 1991/92 wieder auf ihren limnologischen resp. 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-, Silvaplanner-, 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 O<sub>2</sub> können aber im Tiefenwasser noch nicht eingehalten werden, weshalb eine weitere Überwachung der Seen empfohlen wird.
- Im Silvaplanner- und Silsersee herrschen heute wie in der Vergangenheit durchwegs gute und gesetzeskonforme Sauerstoffverhältnisse. Im Silvaplannersee 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 aber im St. Moritzersee eher ab- und im Champfèrersee eher zugenommen. In den beiden übrigen Seen ist sie etwa gleichgeblieben.
- Durch das Phosphor-Verbot in Waschmitteln von 1986 und Optimierungen in der Siedlungsentswässerung 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 Verhältnisse sein.
- Durch die tiefen Phosphor-Konzentrationen ist auch die Produktion von Pflanzenbiomasse zurückgegangen, was anhand der seit 1991/92 gesunkenen Chlorophyll-a-Werte 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 4 Seen des Oberengadins im Vergleich zum natürlichen Zustand eine z.T. 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 Silvaplanner- 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 Biomassen bei den Algen zusammenhängen. Die Erträge sind heute auf einem tiefen Niveau und entsprechen mehr oder weniger den Erwartungen für die Oberengadiner Seen im naturnahen Zustand. Die hohen Erträge in der Vergangenheit waren wohl überdurchschnittlich und zudem durch die erhöhten Nährstoffgehalte (v.a. 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 die Fischbestände alleine zwischen 2004 und 2007 um ca. 60% zurückgebildet. Danach blieben die Bestände bis ca. 2010 stabil. Diverse fische-reiche Untersuchungen haben bisher keine Erklärungen für den Rückgang ergeben.

Da der limnologische resp. 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 4 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 resp. 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 Seezu-stand beschrieben und in Relation zu den Verbesserungen in der Abwasserreinigung und den beobach-teten Fischrückgängen bewertet. Zudem wird die Einhaltung der gesetzlichen Bestimmungen des Ge-wässerschutzgesetzes überprüft und die Seentwicklung im Vergleich zu älteren Untersuchungen seit 1946 beschrieben.



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

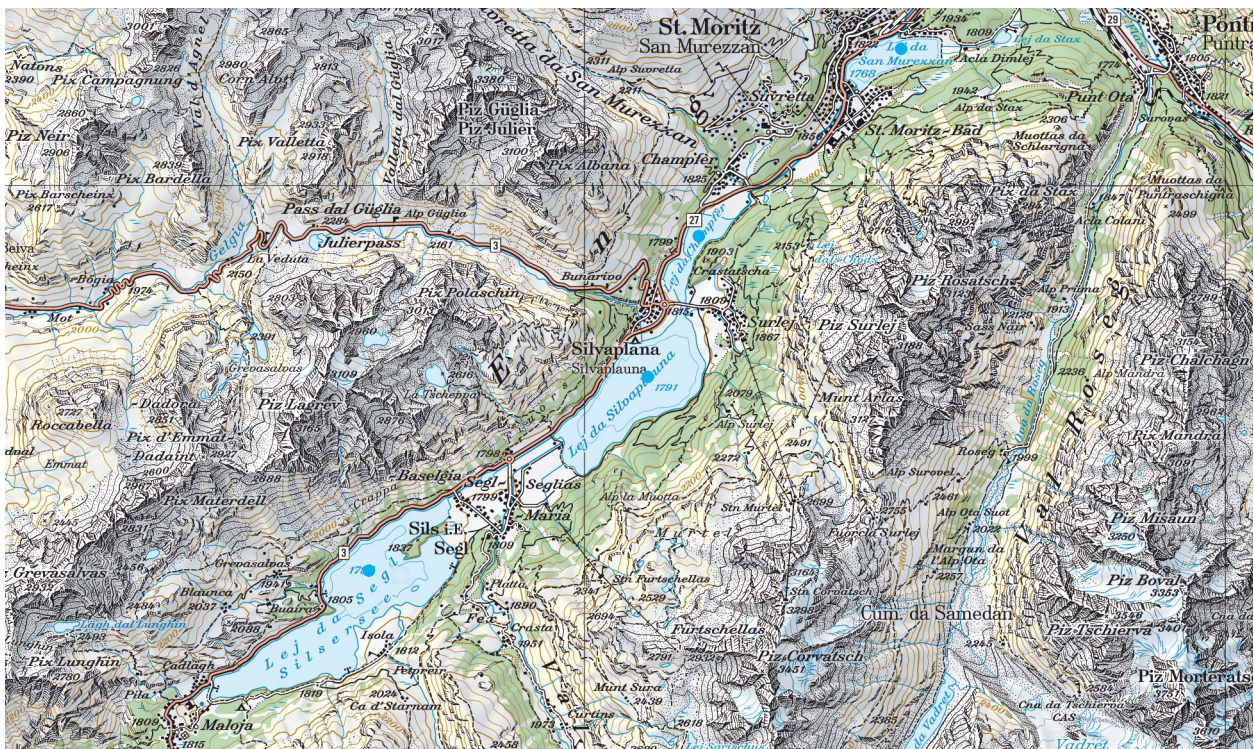


*Mit diesem Weidling des Amtes für Jagd und Fischerei des Kantons Graubünden wurden die Seeuntersuchungen in den Oberengadiner Seen durchgeführt.*

## 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 <sup>2</sup> ]	4.11	2.71	0.51	0.78
Seevolumen [Mio. m <sup>3</sup> ]	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 [müM]	1797	1791	1791	1768
Füllzeit [Jahre]	2.17	0.68	0.05	0.10
Mittlerer Durchfluss [m <sup>3</sup> /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 ekelregend 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 ca. 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 Innalläufe 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 einer Forschungsarbeit 2006-2008 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 O<sub>2</sub> betragen.“

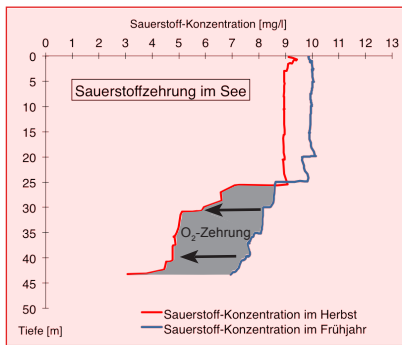
Zu den Sauerstoffverhältnissen im Winter unter Eis gibt es nur sehr wenige Messungen. Am 25.3.81 (Züllig, 1982) sank der Sauerstoff im St. Moritzersee nur in einer 3m-Schicht über dem Boden deutlich unter den gesetzlichen Grenzwert. Am 22.2.93 wurde über Grund ebenfalls eine Sauerstoff-Abnahme registriert, jedoch mit einem Minimalwert von 5.0 mg/l (Limnex, 1994). Neuere Messungen vom 8.4.08 (mündliche Angabe EAWAG) zeigen über dem Gewässergrund immer noch eine Unterschreitung des gesetzlichen Grenzwertes.

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 4 Oberengadiner Seen seit 1992 deutlich über 4 mg/l. Der tiefste Wert von 4.1 mg/l konnte 1992 im Champfèrersee festgestellt werden. In den Untersuchungsjahren 2014–2016 sank der Sauerstoffgehalt im Juni in keinem See unter 6 mg/l.

Über die Sauerstoffverhältnisse am Ende der Sommerstagnation im September/Oktober gibt es neben den aktuellen Untersuchungen von 2013-2016 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 Herbst-Messungen der letzten vier Jahre 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 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 (Silvaplaner- und Silsersee) können die gesetzlichen Anforderungen am Ende der Sommerstagnation eingehalten werden, auch wenn in einigen Metern über dem Seeboden eine Sauerstoffabnahme infolge der Sedimentzehrung festzustellen ist.





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 v.a. 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.

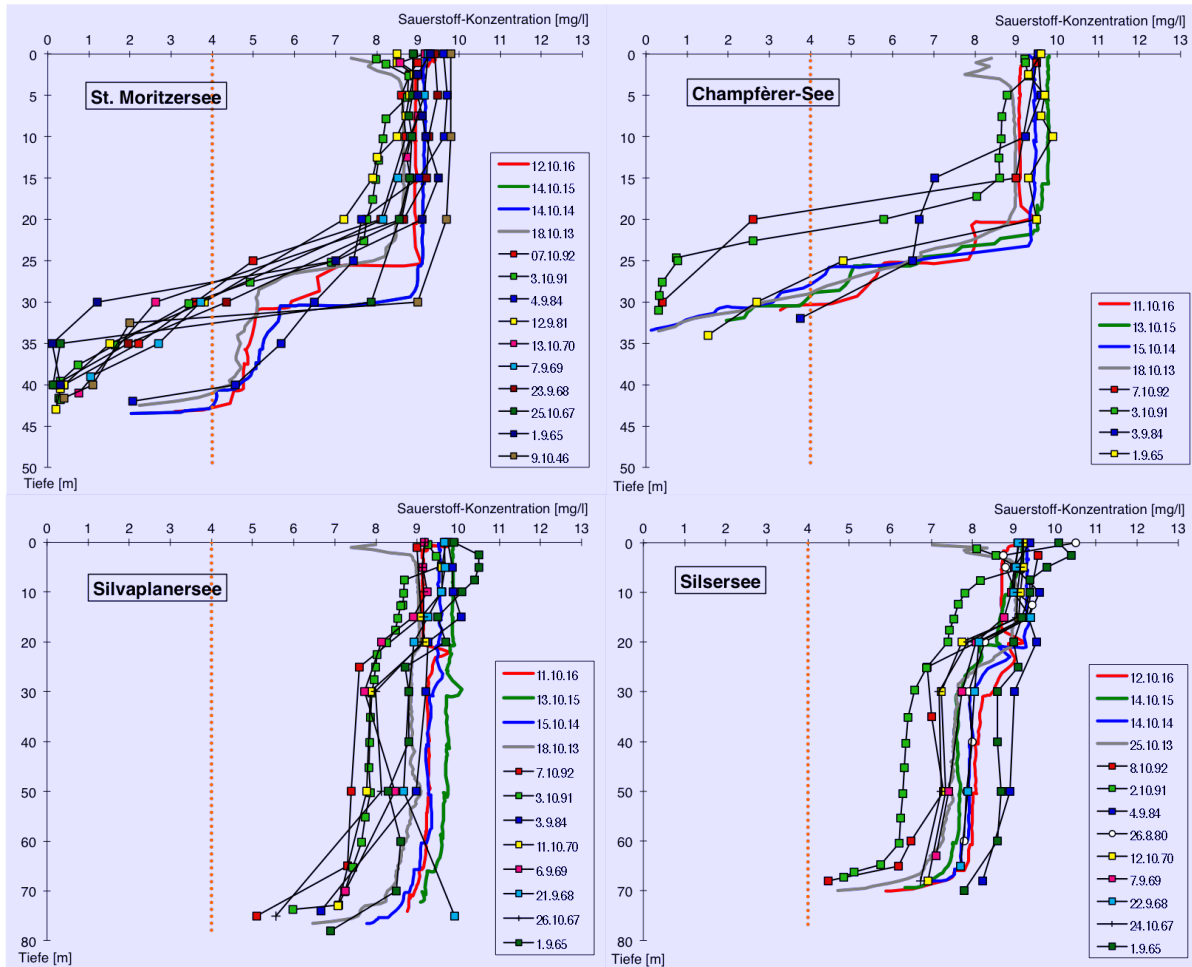
In den Jahren 1992 und 2014–2016 wurden sowohl im Frühjahr als auch im Herbst Sauerstoff-Messungen durchgeführt, was eine Berechnung der Sauerstoffzehrung in diesen Jahren ermöglicht. Im St. Moritzersee hat diese Zehrung im Vergleich zu 1992 deutlich abgenommen, während sie im Champfèrersee eher zugenommen hat (Tabelle 2). Hier traten auch die höchsten O<sub>2</sub>-Zehrungsraten der vier Seen auf (0.044 g O<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>/Tag). Im Silvaplanner- und Silsersee ist die Sauerstoff-Zehrung tief und es gibt keine deutlichen Veränderungen zu 1992. Da nur wenige Vergleichsjahre für die Beurteilung der O<sub>2</sub>-Zehrung vorliegen, sind die erwähnten Veränderungen mit einiger Unsicherheit behaftet.

### Fazit

Die Sauerstoffverhältnisse im St. Moritzer- und Champfèrersee haben sich gegenüber den Jahren 1946–1991 deutlich verbessert. Die gesetzlichen Anforderungen von 4 mg/l O<sub>2</sub> können aber im Tiefenwasser noch nicht eingehalten werden, weshalb eine weitere Überwachung der Seen empfohlen wird.

Im Silvaplanner- und Silsersee herrschen heute wie in der Vergangenheit durchwegs gute und gesetzeskonforme Sauerstoffverhältnisse. Im Silvaplannersee 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 St. Moritzersee eher ab- und im Champfèrersee eher zugenommen. In den beiden übrigen Seen ist sie etwa gleichgeblieben.



**Abbildung 2** Aktuelle und historische Sauerstoffkonzentration in den 4 Oberengadiner Seen jeweils am Ende der Sommerschichtung im September/Oktober. Die gepunktete Vertikale zeigt die gesetzliche Anforderung von mindestens 4 mg/l O<sub>2</sub>.

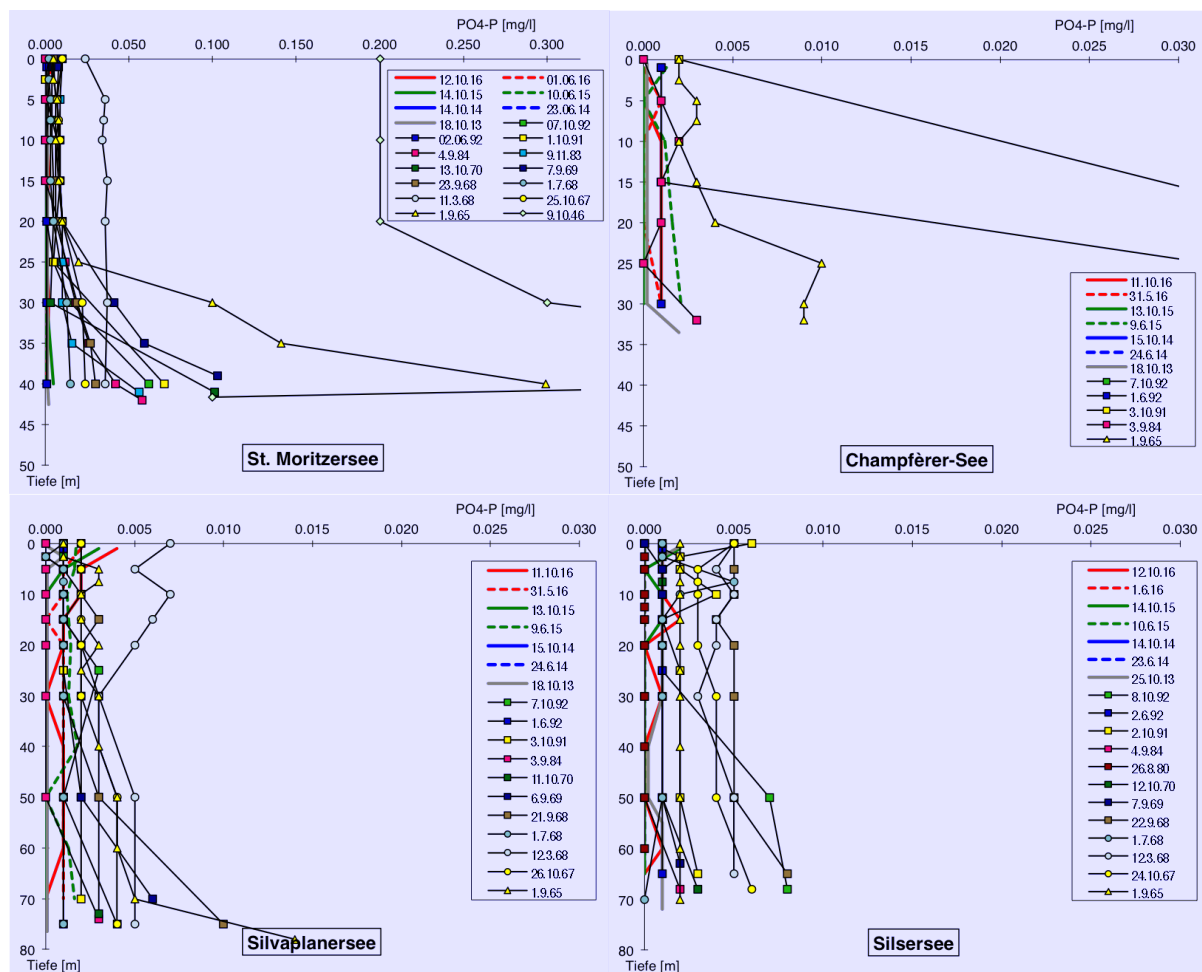
**Tabelle 2** Sauerstoffzehrungsrate im Tiefenwasser der 4 Oberengadiner Seen für die Jahre 1992 und 2014–2016.

See	Mittlere Sauerstoff-Zehrungsrate im Tiefenwasser [g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> /Tag]			
	1992	2014	2015	2016
St. Moritzersee	0.033	0.029	0.020	0.022
Champfèrersee	0.020	0.044	0.039	0.037
Silvaplanersee	0.013	0.009	0.003	0.008
Silsersee	0.011	0.012	0.017	0.012

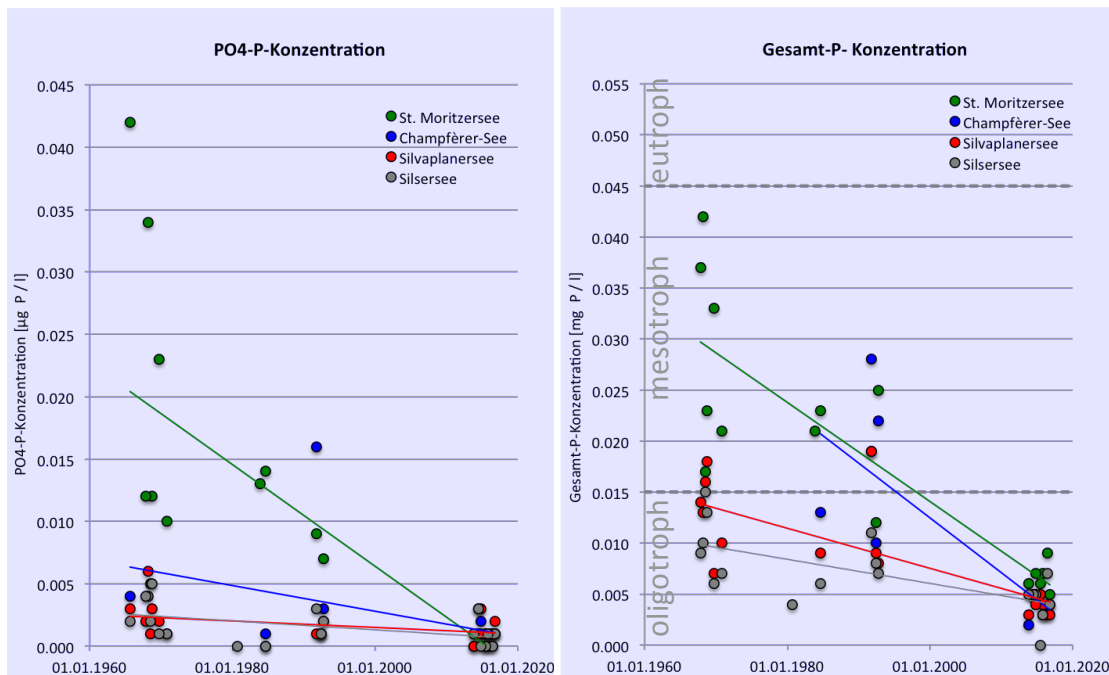
### 3.4 Phosphor

Für den Aufbau von Biomasse benötigen die Algen unter anderem Ortho-Phosphor ( $\text{PO}_4\text{-P}$ ). 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  $\text{PO}_4\text{-P}$  heute ein wachstumslimitierender Stoff und ist somit für die Produktion und die Nahrungskette von entscheidender Bedeutung.

Die  $\text{PO}_4\text{-P}$ -Konzentrationen in den Oberengadiner Seen lagen in den Jahren 2013 bis 2016 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 resp. 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  $\text{PO}_4\text{-P}$ -Konzentrationen von 0.042 auf 0.000–0.001 mg P/l abgenommen haben. Auch im Champfèrersee zeigt sich eine deutliche Abnahme auf heute 0.000–0.001 mg P/l. Im Silva-planer- 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 4 Oberengadiner Seen für die Periode von 1946 bis 2016. 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.



**Abbildung 4** Rückgang der mittleren Ortho- und Gesamt-Phosphor-Konzentrationen in den 4 Oberengadiner Seen zwischen 1965 und 2016. Die farbigen Linien zeigen die berechnete Konzentrations-Abnahme mittels linearer Regression. Beim Gesamt-Phosphor sind die Trophieabgrenzungen in grauer Farbe gemäss LAWA (1998) angegeben.

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 Silvaplansersee 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.

### Fazit

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 wieder deutlich näher an den natürlichen Verhältnisse sein.

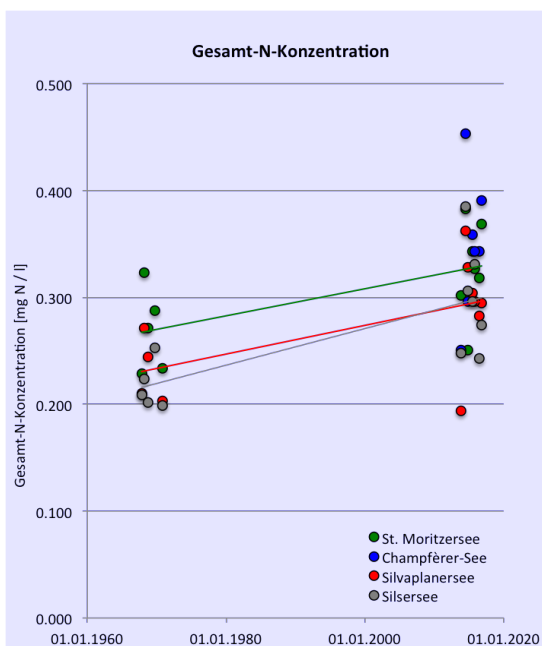
Die gesunkenen Phosphor-Konzentrationen wirken sich auch direkt auf die Produktion von Pflanzen- und Fischbiomassen aus.

### 3.5 Stickstoff

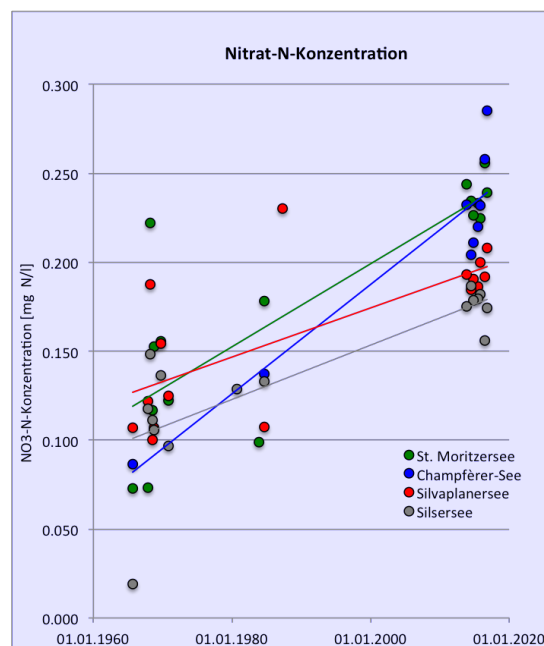
Wie der Phosphor ist auch der Stickstoff für den Aufbau von organischer Substanz in den Oberengadiner Seen sehr wichtig. Bei der Primärproduktion und zum Aufbau von pflanzlichem Plankton werden Phosphor und Stickstoff im Verhältnis 1:16 gebraucht. Der tiefengemittelte Gesamt-Stickstoff erreicht in den Oberengadiner Seen in den Jahren 2014–2016 Werte von 0.20 bis 0.45 mg N/l. Das Verhältnis des Gesamtstickstoffes zum Gesamtphosphor übersteigt damit das 16fache sehr deutlich (vgl. Kap. 3.4). Der Stickstoff ist somit im Gegensatz zum Phosphor für die Algenproduktion nicht limitierend. In den letzten 25 Jahren hat der Gesamt-Stickstoff in den Seen im Mittel um etwas 20% zugenommen (siehe Abbildung 5).

Für das Wachstum der pflanzlichen Organismen im See (Phytoplankton) sind v.a. Nitrat ( $\text{NO}_3$ ) und Ammonium ( $\text{NH}_4$ ) von Bedeutung. Bei hohen pH- und Temperatur-Werten im Wasser kann das Ammonium auch vermehrt als Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) vorliegen, welches für Fische toxisch ist. Auch Nitrit, das sich bei der Nitrifikation des Ammoniums 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 2014–2016 zwischen 0.15 und 0.28 mg N/l (siehe Abbildung 6). Die beiden oberen Seen (Silser- und Silvaplannersee) 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



**Abbildung 5** Veränderung der Gesamt-Stickstoff-Konzentrationen in den vier Oberengadiner Seen zwischen 1965 und 2016. 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).



**Abbildung 6** Veränderung der Nitrat-Stickstoff-Konzentrationen in den vier Oberengadiner Seen zwischen 1965 und 2016. 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).

<sup>1</sup> Dieser Wert wurde für Fließgewässer definiert.

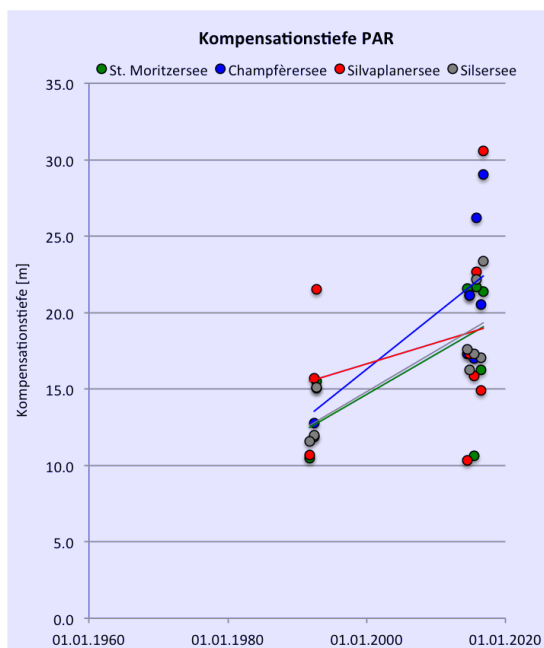
für die in jüngster Zeit beobachtete Zunahme des Nitrates wurden nicht weiter untersucht, es ist aber davon auszugehen, dass zumindest ein Teil auf das Konto der geringeren Algenproduktion geht (siehe Kapitel 3.6). Erwähnenswert bleibt noch, dass im St. Moritzersee 1946 eine deutlich höhere mittlere Nitratkonzentration von 1.42 mg N/l gemessen wurde (Schmassmann, 1948).

Die Nitrit-Konzentrationen sind in den Seen durchwegs sehr tief bei 0.001-0.002 mg N/l. Die höchsten gemessenen Werte zwischen 2014 und 2016 liegen bei 0.003 mg N/l und liegen damit deutlich unter den Zielvorgaben für Salmonidengewässer gemäss BAFU von 0.020 mg N/l (Liechti, 2010)<sup>1</sup>; sie würden sogar den noch deutlich strengeren Richtlinien der EU von maximal 0.003 mg N/l (EU, 2006) entsprechen. Die Nitritwerte sind somit für die Lebewesen in den Oberengadiner Seen unbedenklich.

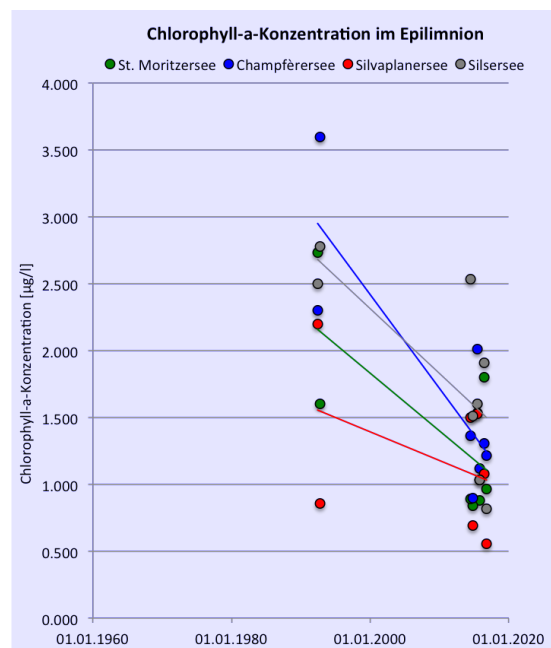
Die Ammonium-Konzentrationen in den Seen bewegen sich in den Jahren 2014–2016 meist an oder unter der Nachweisgrenze von 0.01 mg N/l. Die höchsten Werte zeigte der Silsersee am 23.6.14 in einer Tiefe von 15-50m, wo sie auf 0.02–0.03 mg N/l anstiegen. Dies entspricht aber immer noch sehr guten Verhältnissen. 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<sub>3</sub>-Konzentrationen nicht über 0.020 mg N/l<sup>1</sup> 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 ca. 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 2014–2016 liegen die Kompensationstiefen je nach See und Jahreszeit zwischen 10 und 30 m (siehe Abbildung 7). Seit 1991 haben diese in allen Seen um mehrere Meter zugenommen. Die vier Seen sind heute somit



**Abbildung 7** Kompensationstiefen in den vier Oberengadiner Seen für die Untersuchungsjahre 1991/92 und 2014–2016. Die farbigen Linien zeigen die berechnete Zunahme der Kompensationstiefe mittels linearer Regression.



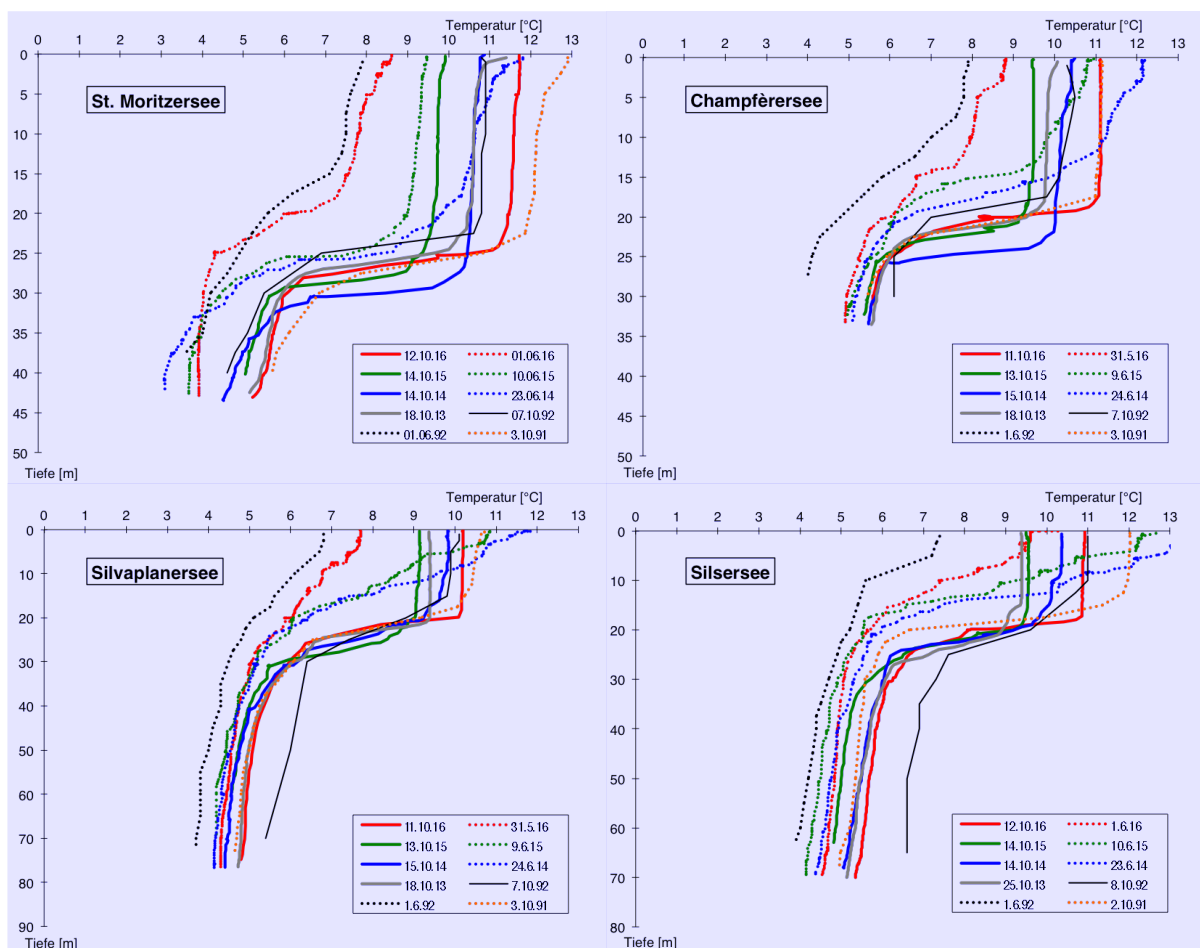
**Abbildung 8** Chlorophyll-a- in den vier Oberengadiner Seen für die Untersuchungsjahre 1991/92 und 2014–2016. Die farbigen Linien zeigen die berechnete Abnahme der Chlorophyll-a-Konzentration mittels linearer Regression.

deutlich klarer und lichtdurchfluteter als vor rund 25 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.

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 2016 wurden im Epilimnion der Seen (warme Oberflächenschicht von 0 bis ca. 25 m Tiefe) mittlere Konzentrationen zwischen 0.5 und 2.5 µg/l gemessen. Diese Werte sind durchwegs tief und sind typisch für nährstoffarme resp. oligotrophe Seen. Seit 1991/92 haben die Chlorophyll-Konzentrationen deutlich abgenommen (siehe Abbildung 8).

### 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). 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 20–30m.

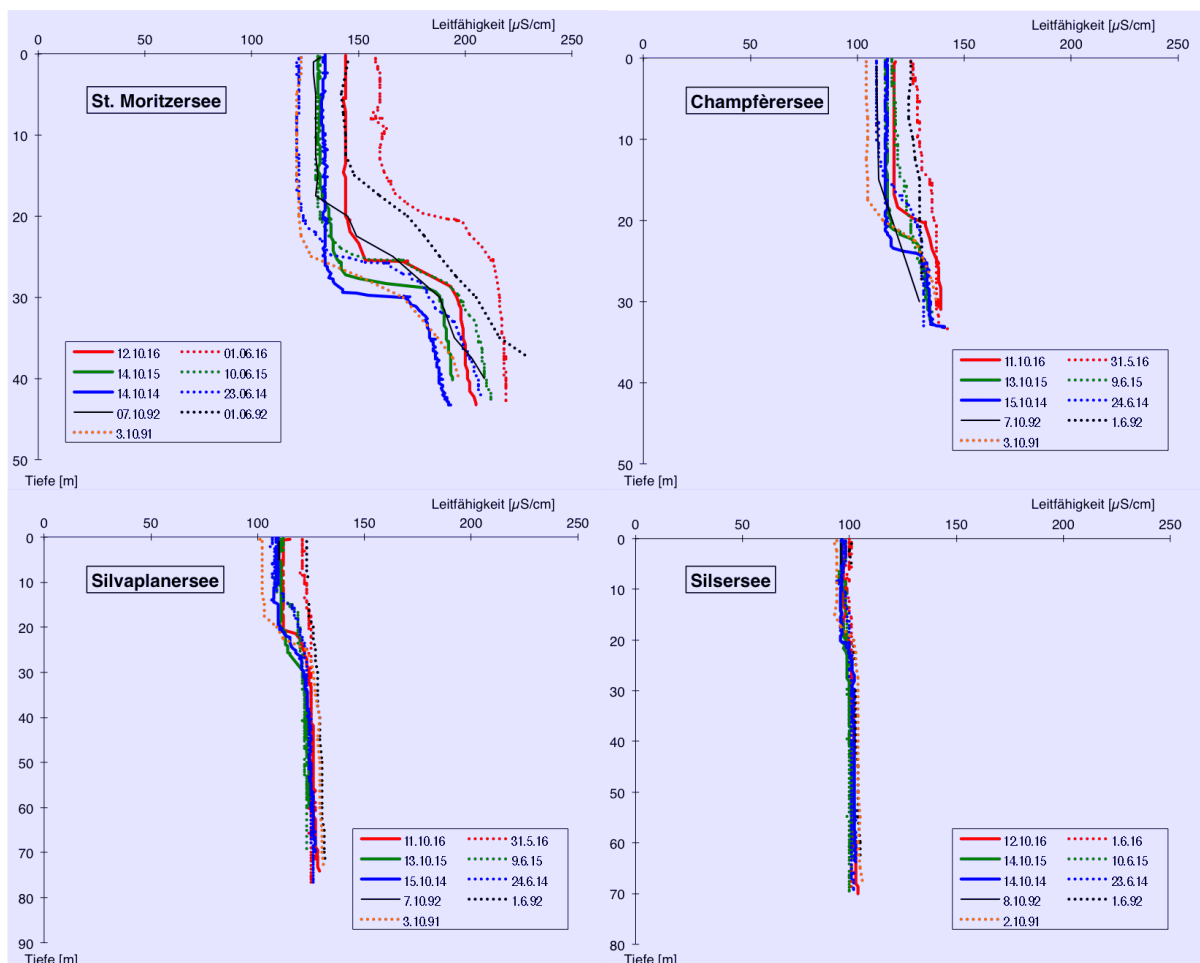


**Abbildung 9** Tiefenprofile der Temperatur in den vier Oberengadiner Seen für die Untersuchungsjahre 1991–1992 und 2013–2016.

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 (siehe 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 Champfärer- und St. Moritzersee u.a. mit der Sauerstoffarmut (siehe Kap. 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 93–106  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . In den nachfolgenden Seen erhöht sich diese Spannweite auf 101–132  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Silvaplanersee), 109–144  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Champfärersee) resp. 121–230  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (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.

Die sehr guten Lichtverhältnisse und die grossen Sichttiefen, welche in den letzten drei Untersuchungsjahren festgestellt wurden, 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. Moritzer- und Champfärersee kaum Werte über 2 mg/l, in den beiden anderen Seen kaum Werte über 3 mg/l, was sehr tiefen Schwebstoffkonzentrationen entspricht. Die etwas höheren Werte im Silser- und Silvaplanersee dürften v.a. aus dem Eintrag von Trübstoffen aus den grösseren Zuflüssen stammen. Der höchste Messwert von 7 mg/l wurde am 23.6.14 im Silsersee in einer Tiefe von 60 m festgestellt.



**Abbildung 10** Tiefenprofile der Leitfähigkeit in den vier Oberengadiner Seen für die Untersuchungsjahre 1991/92 und 2014–2016.



### 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 Seegeometrie (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 (siehe Tabelle 3). In den letzten Jahren (2014–2016) ergibt sich aus den Berechnungen in allen Seen wieder ein oligotropher Zustand. Der Gesamt-Phosphorgehalt in allen Seen zeigt für die letzten 3 Jahre ebenfalls einen oligotrophen Zustand an (siehe Kapitel 3.4) und stimmt mit der berechneten Einstufung nach LAWA gut überein.

**Tabelle 3** Berechnung des Trophiegrades der vier Oberengadiner Seen nach LAWA (1998) für die Untersuchungsjahre 1992 und 2014–2016. 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
<b>1992</b>				
Index Trophie nach LAWA	1.42	1.30	1.64	1.55
Einstufung Trophie	oligotroph (Tendenz zu mesotroph)	oligotroph (Tendenz zu mesotroph)	mesotroph	mesotroph
<b>2014–2016</b>				
Index Trophie nach LAWA	1.03	1.00	1.03	1.14
Einstufung Trophie	oligotroph	oligotroph	oligotroph	oligotroph

#### Fazit

In den Jahren 1965 bis 1992 konnte in allen 4 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 2014–2016 sind in einem separaten Bericht zuhanden des Amtes für Jagd und Fischerei des Kantons Graubünden (AJF) dargestellt. In diesem Bericht wird zudem den Gründen der rückläufigen Fischfangerträge nachgegangen. Der Bericht (Limnex, 2017) hält zusammenfassend fest:

- In den Oberengadiner Seen wurde in den letzten Jahren ein starker Rückgang der Fischfangerträge verzeichnet, wobei insbesondere die Seesaiblingfänge erheblich abnahmen. Um die Ursachen für diesen Rückgang zu ermitteln, wurden die vier Oberengadiner Seen von 2013-2016 auf ihren limnologischen Zustand untersucht. Im Zentrum stand neben den chemisch-physikalischen Messungen auch das Plankton, welches die Nahrungsgrundlage für viele Fische darstellt.
- 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 Massentfaltung 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. Dies allein kann jedoch den beobachteten Rückgang der Fangerträge in den letzten Jahren nicht erklären.
- Das theoretische Ertragsvermögen der Oberengadiner Seen wurde anhand von Literaturangaben abgeschätzt. Die verwendeten Berechnungsansätze basieren auf Korrelationen zwischen Phosphor- oder Chlorophyllkonzentration und Jahreshektarenertrag. Die Ergebnisse dieser Berechnungen zeigen auf, dass die heutigen Fangerträge grundsätzlich den theoretischen Erwartungen an oligotrophe und kühle Seen entsprechen. Die deutlich höheren Erträge in früheren Jahren resp. Jahrzehnten dürften daher mit höheren Phosphatkonzentrationen mit entsprechend höherer Planktondichte zusammenhängen. So zeigen die Abschätzungen für die Jahre 1991-92 gegenüber heute schon erhöhte theoretische Fangerträge an. Die noch höheren Phosphorkonzentrationen in den 1970er und 80er-Jahren können die Rekorderträge beispielsweise im Silsersee von bis zu 25 kg/ha erklären. Die rückläufigen Fangerträge decken sich somit mit den abnehmenden Phosphor- und Chlorophyllkonzentrationen in den letzten 25 Jahren.

## 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.
- Märki, E. (1966): Vorbericht über die chemisch-physikalische Untersuchung der Oberengadinerseen vom 30. August - 1. September 1965. Bericht zuhanden der internationalen Arbeitsgemeinschaft für die Donauforschung.
- 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.