

20 Jahre Seen-Beobachtung im Kreis Plön: 44 Seen im Vergleich

Wolfgang Hofmann

1. **Zusammenfassung: Die wichtigsten Ergebnisse**
2. **Einleitung**
3. **Die Temperatur- und Sauerstoff-Bedingungen im Sommer**
4. **Die Nährstoffe Phosphor und Nitrat-Stickstoff während der herbstlichen Durchmischung**
5. **Weitere chemische Parameter: pH-Wert – Leitfähigkeit – gelöster organischer Kohlenstoff**
6. **Sichttiefen: Klarwasser-Stadium und Sommer-Sichttiefen**
7. **Abhängigkeit der Sommer-Sichttiefe von der mittleren Tiefe des Sees und dem Phosphor-Gehalt**
8. **Literatur**
9. **Liste der untersuchten Seen**

1. Zusammenfassung: Die wichtigsten Ergebnisse

- Von den 44 Seen sind 23 im Sommer **geschichtet**, die anderen sind **ungeschichtete** Flachseen. In den geschichteten Seen war das **Tiefenwasser** am Ende des Sommers **sauerstofffrei** (Ausnahme: Selenter See). - Die **Sauerstoffsättigung** im **oberflächennahen Wasser** während des Sommers war sehr unterschiedlich: In 18 Seen lagen die langjährigen Mittelwerte zwischen 105-119 %, in 17 Seen bei 120-129 % und in 9 Seen bei 132-166 %.
- Die langjährigen Mittelwerte des **Gesamt-Phosphors** reichten von 35-45 µg/l im Schöhsee, Suhrer See und Selenter See bis 182-295 µg/l im Görnitzer See, Honigsee und Löptiner See. - Die Phosphor-Werte lagen bei 8 Seen im **mesotrophen**, bei 17 Seen im **eutrophen** und bei 19 – ausschließlich ungeschichteten – Seen im **polytrophen** Bereich. - Allgemein **nahmen die Phosphor-Gehalte** in den Jahren 1991 bis 1995 **ab**. Die Daten deuten darauf hin, dass sie ab 2007 **wieder zunahmen**.
- Die Gehalte an **Nitrat-Stickstoff** lagen im Plußsee, Suhrer See, Großer Madebrökensee und Schöhsee im Durchschnitt bei 24-55 µg/l und - am anderen der Skala – im Scharsee, Schierensee (Wankendorf), Bothkamper See, Heidensee und Honigsee bei >2000 µg/l. - Die zeitliche Dynamik der Nitrat-Werte war gekennzeichnet durch **synchrone Schwankungen** in fast allen Seen, mit ausgeprägten Minima in den Jahren 1995, 1997, 2000 und 2006. Ab 2001 **gingen die Gehalte** allgemein **zurück**.
- Die **pH-Werte** und die **Leitfähigkeit** kennzeichnen die Seen als alkalisch-kalkreich. - Die Leitfähigkeitswerte sind in den Jahren 1993 bis 1997 **gesunken** und in den letzten beiden Jahren **wieder angestiegen**.
- Die Konzentration an **gelöstem organischem Kohlenstoff** (DOC) lag im Durchschnitt zwischen 4,3 mg/l im Suhrer See und 16,7 mg/l im Honigsee. Hohe Werte traten

gehäuft bei höheren Trophiegraden auf. - Die DOC-Werte **nahmen** ab 1998 allgemein **zu**.

- In den meisten Seen war im Frühjahr ein **Klarwasser-Stadium** zu beobachten, und zwar am häufigsten in der in der Zeit zwischen der 19. und der 23. Woche. Die maximalen Sichttiefen reichten im langjährigen Mittel von 1,04 m Kleinen Madebrökensee bis 6,90 m im Schöhsee.
- Die langjährigen Mittelwerte der **Sommer-Sichttiefen** waren im Selenter See und Schöhsee mit 4,50 m am größten und im Görnitzer See und Dannauer See mit rund 0,30 m am geringsten. – Nach den Sichttiefen waren 14 Seen (4,30-2,36 m) **mesotroph**, 21 Seen (2,20-0,86 m) **eutroph** und 8 Seen (0,85-0,34 m) **polytroph**. Der Dannauer See war mit einem Durchschnittswert von 0,32 m im **hypertrophen** Bereich. – Es gab bei den Sichttiefen **keinen allgemeinen Trend** von Veränderungen während der Untersuchungszeit. Bei 12 Seen nahmen die Sichttiefen anscheinend ab, bei 8 Seen nahmen sie zu und bei 13 blieben sie mehr oder weniger konstant.
- Nach den vorliegenden Daten war die **Sommer-Sichttiefe** **signifikant korreliert** sowohl mit der **mittleren Tiefe** der Seen als auch mit dem Gehalt an **Gesamt-Phosphor**.

2. Einleitung

Die Jungmoränenlandschaft des Kreises Plön ist reich an Seen. Hier gibt es über 80 Seen mit einer Fläche von jeweils mehr als 5 ha. Sie sind sehr unterschiedlich hinsichtlich ihrer Größe, Tiefe und Beschaffenheit ihrer Einzugsgebiete. Über einige größere von ihnen gibt es eingehende Untersuchungen, über die meisten von ihnen war bisher wenig bekannt.

Um einen Eindruck von den in den Seen des Kreises herrschenden ökologischen Bedingungen, wie Temperaturschichtung, Sauerstoff- und Nährstoffverhältnissen und eventuell vorhandenen Belastungen, zu bekommen, wurde im Jahr 1991 begonnen, 44 Seen mit einem **einfachen limnologischen Messprogramm** zu untersuchen und über einen **längeren Zeitraum zu beobachten**. Die ausgewählten Seen waren unterschiedlich groß (0,05 – 30 km²) und tief (2 – 58 m) und gehörten überwiegend zum Einzugsgebiet der Schwentine (38 Seen), einzelne zu dem der Hagener Au (3), der Kossau (2) und der Eider (1).

Angewandt wurden drei verschiedene Untersuchungsmethoden:

- Einmal im Jahr wurde während der sommerlichen Schichtung jeweils im Bereich der größten Wassertiefe ein vertikales **Temperatur- und Sauerstoff-Profil** aufgezeichnet.
- Während der herbstlichen Vollzirkulation wurde eine Wasserprobe für **chemische Analysen** entnommen.
- Vom Frühjahr bis zum Herbst wurden wöchentlich die **Sichttiefen** gemessen.

Nach den Berichten über die ersten fünf Jahre und die ersten zehn Jahre des Beobachtungsprogramms (Kreis Plön 1998, 2002) ist dies die dritte Auswertung der Messdaten, die nunmehr einen Zeitraum zwanzig Jahren umfassen.

Wie schon in den vorangegangenen Bearbeitungen (Hofmann 1998, 2002), werden im Folgenden die Mess-Ergebnisse der einzelnen Seen und der Untersuchungsjahre miteinander verglichen,

- um die Bandbreite der chemischen und biologischen Parameter zu erfassen und die Seen auf einer **Messwertskala** anzuordnen
- und um Unterschiede zwischen den Untersuchungsjahren und eventuelle **langfristige Veränderungen** zu erkennen.

Dieser Bericht ist als eine **Fortschreibung der bisherigen Bearbeitungen** gedacht. Es geht dabei in erster Linie um eine Zusammenstellung und Aufbereitung der Messdaten und nicht um eine Diskussion und Bewertung der Ergebnisse. Um den Vergleich mit den vorangegangenen Darstellungen zu ermöglichen, wurden die Auswertungsmethoden und die Art der graphischen Darstellung weitgehend beibehalten. Für die statistischen Auswertungen (Mittelwerte / Standardabweichung, Box-Whisker-Plots, Korrelation / Regression) wurde die Software WinSTAT[®] für Excel (Beneke & Schwippert, 2001) benutzt. Bei der Auswertung ist zu bedenken, dass die Temperatur-/Sauerstoff – Untersuchungen und die chemischen Analysen in jedem See nur einmal im Jahr - im Sommer bzw. im Herbst – durchgeführt wurden.

Die Organisation des Seen-Beobachtungsprogramms, die Auswahl der Seen und die Methodik der Probennahmen und Messungen wurden in den beiden bereits vorliegenden Bearbeitungen erläutert (Reck-Mieth 1998, 2002).

3. Die Temperatur- und Sauerstoff-Bedingungen im Sommer

Die Erwärmung des Wassers im Sommer führt in den tiefen Seen der Region zu einer **Temperaturschichtung** (Stagnation): eine Schicht warmen Oberflächenwassers (Epilimnion) liegt über kaltem Tiefenwasser (Hypolimnion). Dazwischen befindet sich eine Zone, in der die Wassertemperatur sehr schnell abnimmt (Temperatur-Sprungschicht). Diese Schichtung bleibt während des Sommers erhalten. Windeinwirkung kann sie nicht zerstören, da das Wasser der oberen Schicht physikalisch leichter ist. Im Herbst kühlt das Wasser ab, der Dichteunterschied der Wasserschichten verschwindet, und die gesamte Wassersäule wird durchmischt (Zirkulation). In den flachen Seen kann sich eine solche sommerliche Schichtung nicht ausbilden.

Die im Sommer gemessenen Temperatur- und Sauerstoffwerte sollen vor allem Aufschluss über diese Schichtungsbedingungen geben. Sie zeigen an, ob ein See im Sommer eine Temperaturschichtung aufweist, in welcher Tiefe die Temperatur-Sprungschicht liegt und ob die Schichtung zu einer Sauerstoffzehrung im Tiefenwasser führt. Darüber hinaus weisen hohe Sauerstoff-Übersättigungen in der oberen Wasserschicht auf hohe Nährstoff-Konzentration und entsprechend starkes Phytoplankton-Wachstum, also eutrophe Bedingungen, hin.

Die Tiefenprofile wurden in den einzelnen Jahren zu unterschiedlichen Zeiten der Sommerperiode genommen, und zwar in den Jahren 1991 bis 1997 meist im September (1995: August) und in den Jahren danach im Juni und Juli. Insofern beziehen sich die Daten

auf unterschiedliche Phasen der sommerlichen Entwicklung und sind nicht direkt miteinander vergleichbar.

Daher waren auch die gemessenen **Wassertemperaturen** der **oberen Wasserschicht** (Epilimnion) (**Abb. 1**) in den ersten Jahren niedriger (im Mittel meist 17-18 °C) als in den folgenden (Mittel: 18-20 °C). Deutlich spiegelt sich der außergewöhnlich warme Sommer 1995 in den Wassertemperaturen wider (Mittelwert aller Seen: 22,6 °C). Der Selenter See war der einzige See mit einer Temperatur <20 °C. Auch sonst lag dessen Wassertemperatur bei den Juni- und Juli-Proben immer etwa 2-3 °C unter dem Durchschnitt aller Seen.

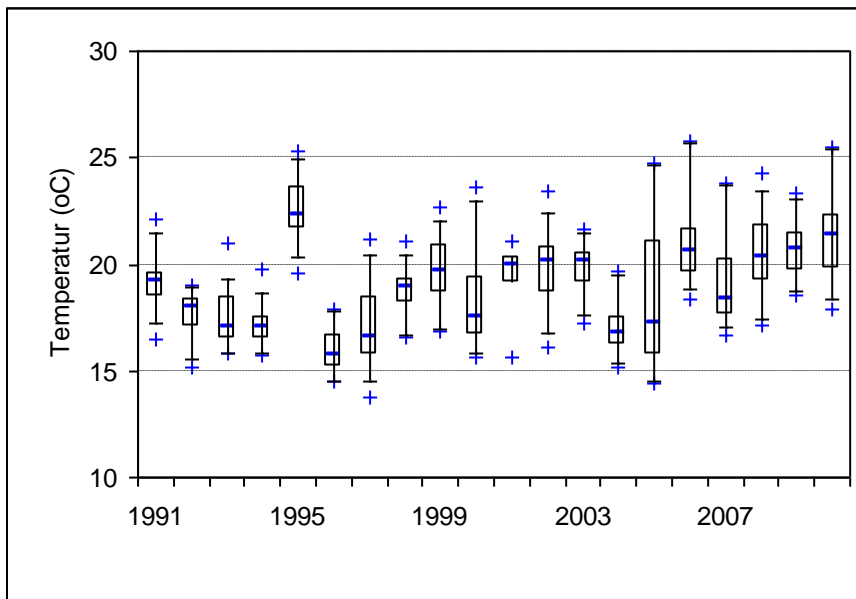


Abb. 1 Mittelwerte und Verteilung der maximalen **Wassertemperaturen** (°C) der 44 Seen in den Jahren 1991 bis 2010 (50 % der Werte innerhalb der Kästchen; 90 % der Werte zwischen den Fehlerbalken; Kreuze: Minimal- und Maximalwerte).

An den mittleren sommerlichen **Wassertemperaturen am Seegrund** (**Abb. 2**) lassen sich deutlich die jeweiligen **Schichtungsverhältnisse** ablesen. Bei **flachen, ungeschichteten Seen** wird die ganze Wassersäule bei Windeinwirkung durchmischt und somit auch im Sommer bis zum Seegrund erwärmt. In tieferen, **geschichteten Seen** wird nur der obere Teil der Wassersäule (Epilimnion) durchmischt und erwärmt, während der Bereich darunter kühl bleibt (Hypolimnion). Bei 17 der 24 **geschichteten Seen** betrug die Wassertemperatur am Seegrund im Durchschnitt 4,2-9,0 °C, und war bei 14 von diesen $\leq 7,2$ °C. Stark dem Wind ausgesetzte Seen oder solche mit überwiegend flachen Bereichen haben trotz ihrer großen Maximaltiefe ein relativ warmes Tiefenwasser (Selenter See (35,8 m, 12,9 °C), Suhrer See (24,7 m, 12,6 °C), Dobersdorfer See (18,8 m, 13,4 °C), andererseits ist das Tiefenwasser in windgeschützten Seen wegen der früh einsetzenden Schichtung besonders kühl (Plußsee (28,0 m, 4,3 °C)). In den **ungeschichteten Seen**, die maximal 10 m tief waren, war das Wasser am Grund im Mittel 15,0-19,2 °C warm (Ausnahme: Holzsee - 13,3 °C). Seen mit einer Wassertiefe von etwa 10 m können, in Abhängigkeit von der Form des Seebeckens und der windexponierten Lage, geschichtet (Edebergsee: 9,7 m, 8,0 °C, Kolksee: 9,7 m, 7,1 °C) oder ungeschichtet sein (Passader See: 10,7 m, 17,0 °C, Postsee: 9,1 m, 16,4 °C).

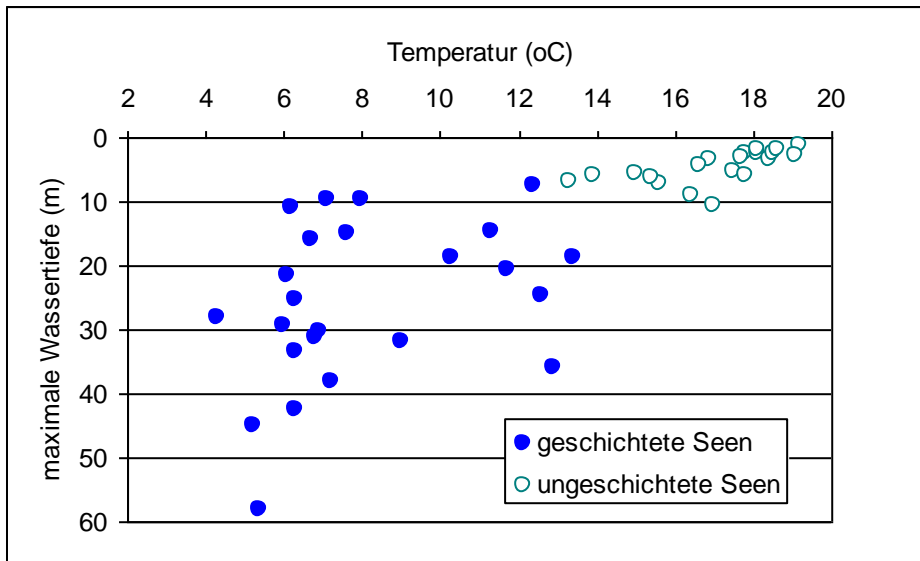


Abb. 2 Mittlere **Wassertemperatur** (°C) der 44 Seen im Sommer über dem Seegrund.

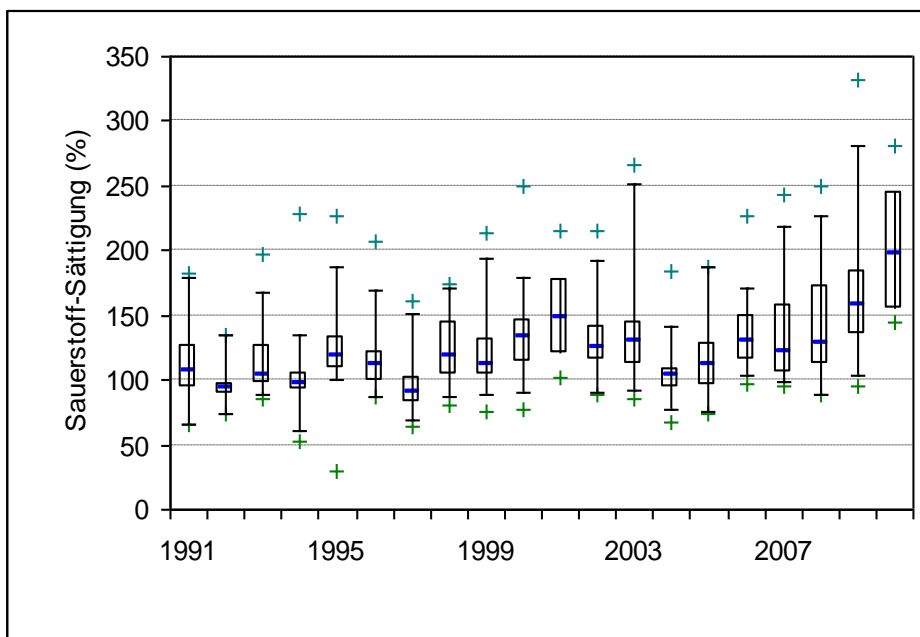


Abb. 3 Mittelwerte und Verteilung der maximalen **Sauerstoff-Sättigung** (%) der 44 Seen in den Jahren 1991 bis 2010 (Erläuterung s. Abb. 1).

Die unterschiedlichen Probestermine wirkten sich auch auf die Werte der **Sauerstoff-Sättigung** (**Abb. 3**) im oberflächennahen Wasser (Epilimnion) aus. Im Diagramm ist eine allgemeine Zunahme höherer Sauerstoff-Übersättigungen während der Untersuchungsperiode zu erkennen. Im Mittel stiegen die Werte von 95-115 % in den Jahren 1991 bis 1997 (Ausnahme 1995: 126 %) auf 117-164 % (Ausnahmen 2004: 104 %, 2010: 207 % (nur 11 Seen)). Diese Unterschiede sind allerdings allein durch die **Verschiebung der Probestermine** vom September in den Sommer zu erklären. Im Juni/Juli fördern die günstigeren Lichtbedingungen die Intensität der Photosynthese der Planktonalgen und

verursachen damit eine höhere Sauerstoffproduktion. In **ungeschichteten Seen** wurden mehrfach durch Abbauvorgänge hervorgerufene **Sauerstoff-Untersättigungen** gemessen. Die bei den September-Terminen der Jahre 1992, 1994 und 1997 gemessenen Sauerstoff-Untersättigungen sind in geschichteten Seen auf die Verlagerung der Temperatur-Sprungschicht und damit verbundene Abbauvorgänge und Nitrifikation zurückzuführen.

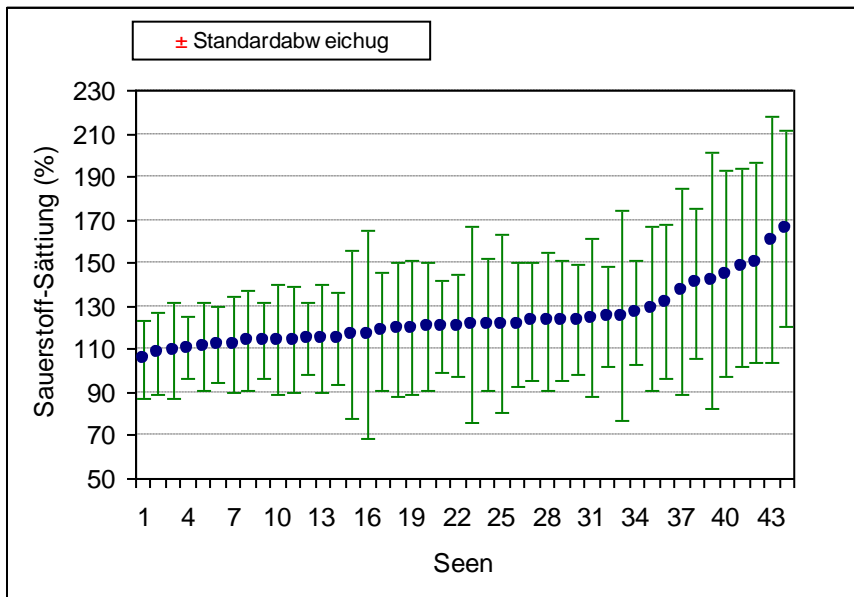


Abb. 4 Mittelwerte und Streuung (Standardabweichung) der **maximalen Sauerstoff-Sättigung** (%) in den Vertikalprofilen der 44 Seen in den Jahren 1991 bis 2009.

Die sommerlichen **Sauerstoff-Gehalte** in den **oberflächennahen Wasserschichten** stehen in Beziehung zum **Trophiegrad** der Gewässer, da hohe Unter- oder Übersättigungen durch intensive Produktions- bzw. Abbauvorgänge verursacht werden. In **Abb. 4** sind die Seen nach ihren maximalen Sauerstoff-Sättigungswerten der einzelnen Jahre (Mittelwerte 1991-2009) angeordnet. In 2010 wurde der Sauerstoff-Gehalt nur in elf Seen gemessen. Diese Werte wurden hier nicht berücksichtigt.

In dieser **Rangfolge** sind drei Gruppen von Seen zu erkennen:

- Vierzehn Seen vom Großen Binnensee (Nr. 1) bis zum Stocksee (Nr. 14) mit Mittelwerten von 105-115 % und geringen Über-/Untersättigungen;
- die Gruppe vom Rosensee (Nr. 15) bis zum Schluensee (Nr. 36) mit Mittelwerten von 117-132 % und stärkeren Über-/Untersättigungen und
- die acht Seen vom Bothkamper See (Nr. 37) bis Görnitzer See (Nr. 44) mit Mittelwerten von 137-166 % Sättigung und sehr starken Über-/Untersättigungen.

Auf der linken Seite der Skala befinden sich viele tiefe, **geschichtete Seen**, während besonders starke Sauerstoff-Übersättigungen gehäuft in den flachen, **ungeschichteten Seen** auftraten. So sind alle Seen der dritten Gruppe ungeschichtete Flachseen und in den anderen beiden Gruppen fallen die flachen Seen Scharssee (Nr. 16), Unterer Ausgrabensee (Nr. 23), Kronsee (Nr. 25) und Honigsee durch hohe Streuung der Sauerstoffwerte auf, d. h. durch starke Abweichungen vom 100%-Wert. Besonders in diesen Fällen werden die Bedingungen

durch diese positiven und negativen Abweichungen von der Sättigung beschrieben und nicht durch den Mittelwert.

In 22 von 24 der tiefen, **geschichteten Seen** war das **Tiefenwasser** am Ende der Sommer-Stagnation weitgehend oder ganz **sauerstofffrei** (**Abb. 5**). Nur im Selenter See (35,8 m) und Schöhsee (29,4m) wurden im Mittel noch 9 % bzw. 7 % Sauerstoff-Sättigung über dem Grund gemessen. In dem Diagramm kommt nicht zum Ausdruck, dass einige tiefe Seen, wie zum Beispiel Großer Plöner See, Behler See und Dieksee, im Juli besonders im oberen Hypolimnion noch beträchtliche Sauerstoff-Vorräte hatten. Auch werden die variablen Sauerstoffbedingungen im Tiefenwasser des Selenter Sees mit dem Mittelwert von 9 % Sättigung nicht angemessen wiedergegeben.

In den **ungeschichteten Seen** waren die Sauerstoff-Verhältnisse über dem Seegrund sehr unterschiedlich. Sie reichten von Übersättigung im Dannauer See und Heidensee (Mittelwerte: 123 % bzw. 121 %) bis zu erheblichem Sauerstoffmangel im Unterem Ausgrabensee und Schierensee (Wankendorf) (Mittelwerte: 14 % bzw. 11 %). Im Holzsee war das Tiefenwasser sauerstofffrei, was, unter Berücksichtigung der relativ niedrigen Wassertemperatur von 13,3 °C (s.o.), anzeigt, dass dieser See eher dem geschichteten Seetyp entspricht.

Die **sommerlichen Sauerstoffbedingungen** im oberflächennahen Wasser mit den häufig gemessenen Über- und Untersättigungen weisen allgemein auf **nährstoffreiche** (eutrophe), in einigen Flachseen (s. Abb. 4) auf hoch eutrophe, Verhältnisse in den Seen der Region hin. Der **Sauerstoffmangel** im **Tiefenwasser** der geschichteten Seen gegen Ende der Sommerstagnation (Schichtungsperiode) ist ein Merkmal **eutropher Seen**. In den Diagrammen der Abbildungen 3 und 4 wurden zwar Messwerte aus unterschiedlichen Perioden (Juni/Juli und August/September) der sommerlichen Schichtung vermischt, was die tatsächlichen Situationen etwas verfälscht, aber die sehr variablen Sauerstoff-Bedingungen kommen hier gut zum Ausdruck.

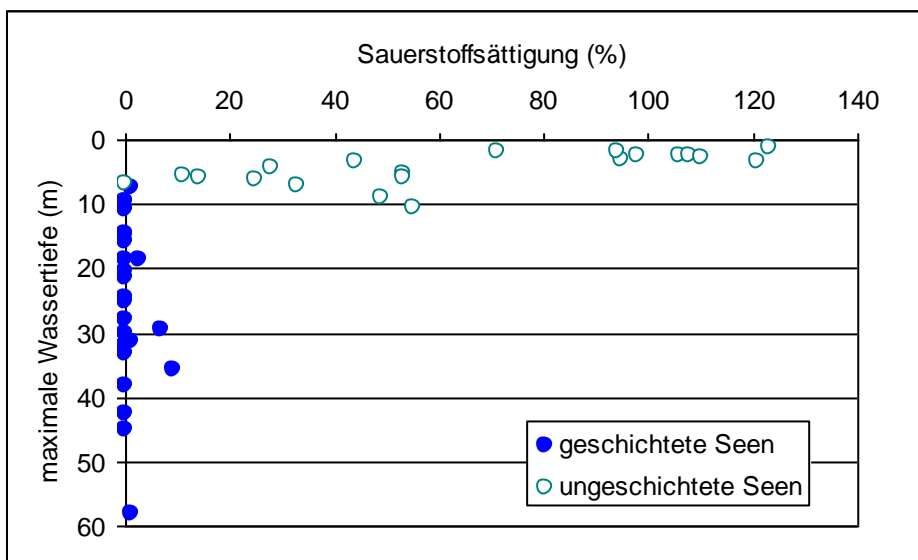
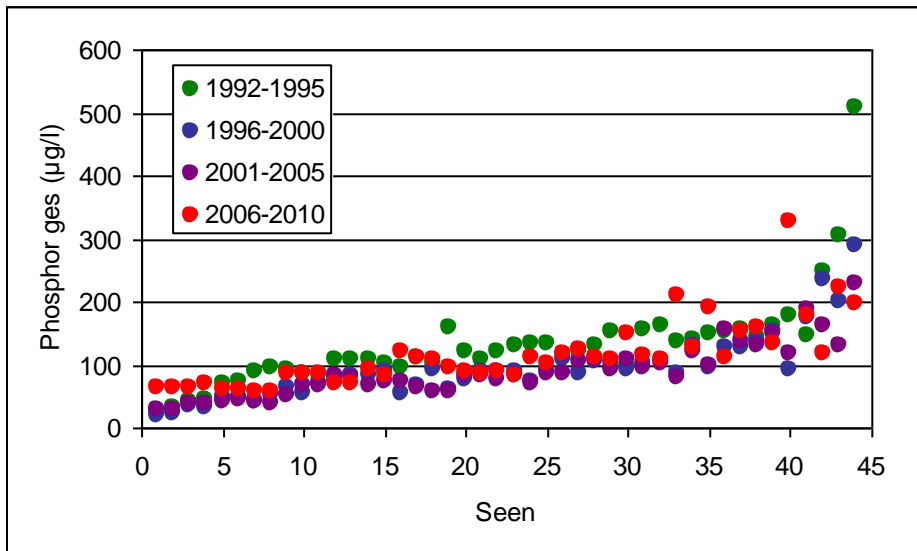


Abb. 5 Mittlere Sauerstoff-Sättigung (%) der 44 Seen im Sommer über dem Seegrund.

4. Die Nährstoffe Phosphor und Stickstoff während der herbstlichen Durchmischung

Im **Herbst** verschwinden mit der Abkühlung des Wassers vorhandene thermische Schichtungen, die gesamte Wassersäule wird **vom Wind durchmischt**, und es herrschen hier ausgeglichene Bedingungen. Dies ist ein geeigneter Zeitpunkt, eine oberflächennahe Wasserprobe für eine Analyse der Nährstoffe und anderer chemischer Parameter zu benutzen.



Rang	See	Pges	Rang	See	Pges	Rang	See	Pges	Rang	See	Pges
1	SCHÖ	35	12	STAD	84	23	BEHL	94	34	ROSE	129
2	SUHR	37	13	KIRCH	85	24	PASS	95	35	TREH	134
3	SELE	45	14	LANK	87	25	DIEK	101	36	PLUS	137
4	KOLK	46	15	GREB	87	26	SCIW	106	37	BOTH	141
5	STOC	55	16	TREN	87	27	VIER	107	38	WIEL	142
6	SCIG	55	17	EDEB	87	28	STOL	112	39	POST	148
7	HOLZ	55	18	SCAR	89	29	KPLÖ	113	40	DANN	170
8	GMAD	59	19	UNTA	90	30	GBIN	113	41	HEID	173
9	SCLU	72	20	GPLA	91	31	FUHL	114	42	GÖRN	182
10	TRAM	72	21	GPLP	91	32	KRON	115	43	HONI	210
11	DOBE	76	22	HÖFT	93	33	KMAD	126	44	LÖPT	295

Abb. 6 Mittelwerte der Gehalte an **Gesamt-Phosphor** ($\mu\text{g/l}$) in den Perioden 1992-1995, 1996-2000, 2001-2005 und 2006-2010; **Tabelle: Rangfolge der Seen** nach den mittleren Phosphor-Gehalten ($\mu\text{g/l}$) im Zeitraum 1992-2010 – Trophiestufen: **mesotroph** – **eutroph** – **polytroph**.

In **Abb. 6** sind die Seen nach ihren mittleren **Gesamt-Phosphor-Gehalten** der Jahre 1992 bis 2010 angeordnet. Hier zeigen sich die **enormen Unterschiede der Nährstoff-Situation** in den Seen der Region: Die Durchschnittswerte reichen von $35 \mu\text{g/l}$ bis $295 \mu\text{g/l}$. Dabei erscheinen die einzelnen Seen grundsätzlich in der gleichen Reihenfolge wie in der entsprechenden Darstellungen der ersten fünf Jahre und der ersten zehn Jahre (Hofmann 1998, 2002):

- Die vier Seen mit den niedrigsten mittleren Konzentrationen (35-46 µg/l) sind nach wie vor Schöhsee, Suhrer See, Selenter See und Kolksee.
- Die drei Seen mit den höchsten Phosphor-Mengen (182-295 µg/l) sind wieder Görnitzer See, Honigsee und Löptiner See.
- Zwischen diesen beiden Gruppen liegen die übrigen Seen in einem Kontinuum von 55 µg/l (Stocksee) bis 148 µg/l (Postsee). Etwas abgesetzt davon der Dannauer See (170 µg/l) und der Heidensee (173 µg/l).

Die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser hat mithilfe der Parameter Gesamt-Phosphor-Gehalt, Chlorophyll-Gehalt und Sommer-Sichttiefe die **Trophie-Stufen** stehender Gewässer definiert (Länderarbeitsgemeinschaft Wasser 1998, s. Hofmann 2002). In der **Tabelle** zur **Abb. 6** ist mit der farblichen Markierung angezeigt, in welchem Trophie-Bereich die Seen nach den gemessenen Phosphor-Werten liegen. Dazu wurden die Mittelwerte für die Zeit 1992-2010 benutzt und diese im Herbst gemessenen Werte mit den „Gesamt-P-Werten Frühjahr“ der Trophie-Skala verglichen. Die Zuordnung zu den Trophiestufen soll nur eine grobe Orientierung geben, sie ersetzt keine Trophiegrad-Bestimmung nach dem Verfahren der Länderarbeitsgemeinschaft.

Nach den **Kriterien der Richtlinie** wurden von den 44 Seen 25 Seen als **geschichtet** und 19 als **ungeschichtet** eingestuft. Aus der Tabelle zu Abb. 6 geht hervor, dass 8 der **geschichteten Seen** nach ihrem mittleren Phosphorgehalt (35-59 µg/l) im **mesotrophen Bereich**, 17 der **geschichteten Seen** (72-142 µg/l) im **eutrophen Bereich** und alle 19 **ungeschichteten Seen** (85-295 µg/l) im **polytrophen Bereich** liegen. Zwischen 85 µg/l und 142 µg/l Phosphor gelten geschichtete Seen als eutroph und ungeschichtete bereits als polytroph. Das liegt u. a. daran, dass in ungeschichteten Seen zum Sommer hin die Nährstoffgehalte zunehmen und daher im Frühjahr niedrigere Werte erforderlich sind, um im Sommer die für eutrophe Seen typischen Sichttiefen und Chlorophyll-Werte zu erreichen.

Im **Zehn-Jahres-Bericht** wurde festgestellt, dass - mit der einzigen Ausnahme Heidensee - in allen Seen die mittleren Gesamt-Phosphor-Gehalte von der Periode 1992-1995 zur Periode 1996-2000 abgenommen haben, dass es also einen allgemeinen Phosphor-Rückgang in den Seen der Region gab. Besonders stark war die **Abnahme** in den Seen mit den höchsten Phosphor-Gehalten, Honigsee und Löptiner See.

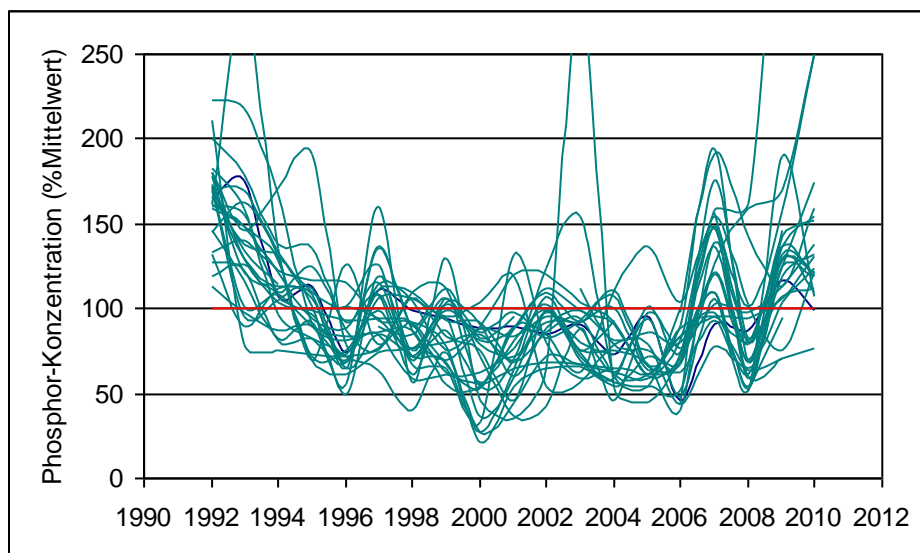
Wie aus **Abb. 6** an den Durchschnittswerten der vier Fünf-Jahres-Perioden zu ersehen, hat sich dieser **Trend nicht weiter fortgesetzt**. Zwar nahmen in sieben Seen (Stadtsee, Kirchsee, Behler See, Postsee, Görnitzer See, Löptiner See) die Werte in den letzten fünf Jahren weiter ab, aber in den meisten Seen gab es **nach 2005 eine Zunahme der Phosphor-Gehalte**. In vielen Fällen waren die Werte der Jahre 2006 bis 2010 sogar die höchsten der gesamten Beobachtungszeit.

Den **zeitlichen Ablauf der Veränderungen** von Jahr zu Jahr zeigt **Abb. 7**. Hier wurden dieselben 24 Seen (zusätzlich Bothkamper See) herangezogen, bei denen in den ersten zehn Jahren die Phosphor-Werte langfristig deutlich abnahmen (Hofmann 2002, Abb. 7). Anders als dort wurde als Bezugsgröße nicht der Ausgangswert des Jahres 1992 gewählt, sondern der für jeden See ermittelte 19-jährige Durchschnittswert (Mittelwert). Als Maß für Veränderungen dienen die prozentualen Abweichungen von diesem Mittelwert in den einzelnen Jahren.

Nach dieser Darstellung sind **drei Phasen der Entwicklung** zu erkennen:

- In den Jahren 1992-1995 waren die Phosphor-Gehalte in allen 25 Seen deutlich höher als in den Jahren danach. Sie lagen meist weit über dem langjährigen Mittel.
- Danach (1996-2006) pendeln die Werte auf einem niedrigeren Niveau unterhalb des langjährigen Mittels.
- Abgesehen vom Jahr 2008, stiegen die Phosphor-Konzentrationen danach wieder an und lagen deutlich über dem langfristigen Durchschnitt.

Die **einzelnen Seen** verhielten sich im kurzfristigen Verlauf **meist sehr unterschiedlich**, wie die vielen gegenläufigen Kurvenbewegungen zeigen. Bei einigen von ihnen entstand allerdings ein Muster **synchroner Kurvenverläufe**, bedingt durch einen gleichzeitigen Wechsel zwischen niedrigen und höheren Phosphor-Konzentrationen. Dabei lagen Minima in den Jahren 1996, 1998, 2000, 2006, 2008 und Maxima in 1997, 1999, 2002, 2007, 2009. Diese gleichsinnigen Veränderungen gab es nicht nur in Seen, die in Seenketten durch Fließgewässer (z. B. Schwentine) verbunden sind. Am Phosphor-Maximum in 1997 sind neben mehreren Schwentine-Seen auch Kolksee, Holzsee, Schierensee (Grebbin) und Honigsee beteiligt und am Minimum in 2000 Dannauer See, Trentsee, Kleiner Madebrökensee, Kolksee und Kirchsee. In den Jahren 2001, 2003, 2004 und 2005 lösen sich diese synchronen Verläufe in zahlreiche gegenläufige Kurvenbewegungen auf. Ab 2006 gab es in diesen Seen wieder synchrone Zu- und Abnahmen mit hohen Werten in 2007, 2009 und 2010 und deutlich niedrigeren Werten im Jahr 2008.



BEHL	DIEK	GMAD	HÖFT	KIRC	KOLK	SCIG	TRAM	VIER
BOTH	EDEB	GPLA	HOLZ	KMAD	KRON	STAD	TREN	
DANN	FUHL	GPLP	HONI	KPLÖ	LÖPT	STOC	UNTA	

Abb. 7 Verlauf der Gehalte an **Gesamt-Phosphor** (% des langjährigen Mittelwertes des jeweiligen Sees) in 25 Seen. **Tabelle:** Liste der 25 Seen.

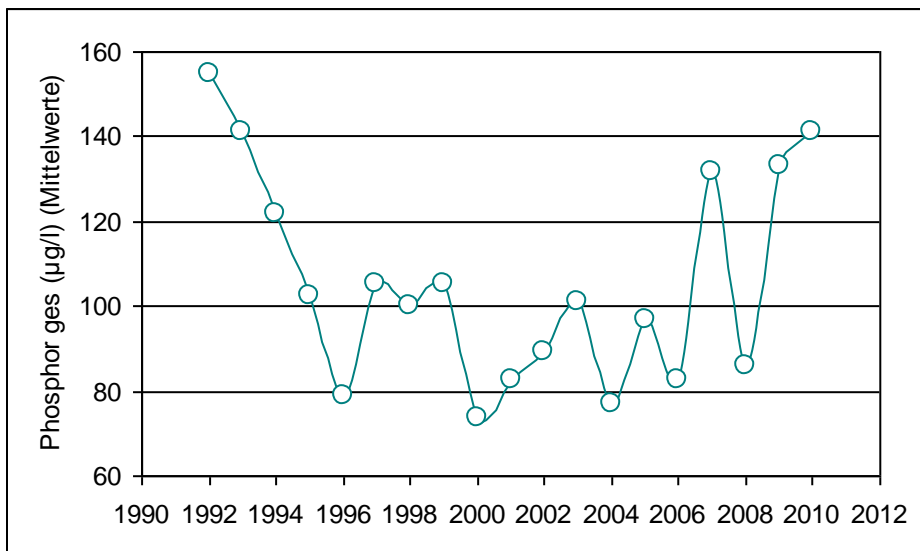


Abb. 9 Durchschnittliche **Phosphor-Konzentration** ($\mu\text{g/l}$) in den 44 Seen in den Jahren 1992 bis 2010.

Die **durchschnittlichen Phosphor-Gehalte aller 44 Seen** im Verlauf der Jahre 1992 bis 2010 (**Abb. 9**) zeigen noch einmal die oben genannten drei Phasen der Entwicklung der Phosphor-Gehalte und außerdem die Größenordnung der gemessenen Unterschiede: Die Ausgangskonzentration von rund $140 \mu\text{g/l}$ verminderte sich auf $80 - 100 \mu\text{g/l}$ Phosphor und wurde am Ende der Untersuchungsperiode durch den Anstieg in 2007 wieder erreicht. Außerdem fällt auf, dass die als **langfristige Entwicklung** gedeutete Verringerung der Werte in den Jahren 1992 bis 2006 (Hofmann 2002) in 2007 bis 2010 in der gleichen Größenordnung von Jahr zu Jahr, also als **kurzfristige Schwankung** auftrat.

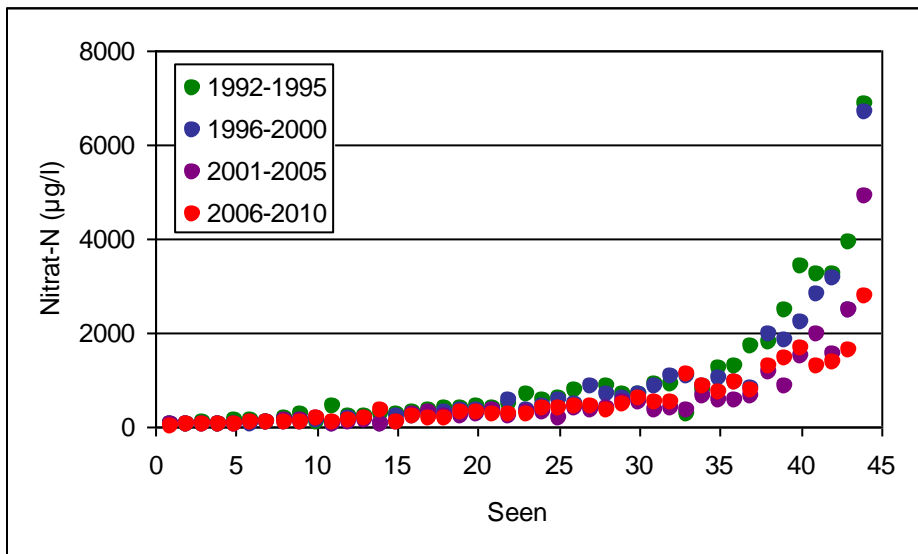
Daher bleibt unklar,

- ob die Nährstoffgehalte in dem Untersuchungszeitraum zunächst **abgenommen** und dann **wieder zugenommen** haben
- oder ob die Werte **natürlichen kurzfristigen und langfristigen Schwankungen**, z. B. verursacht durch Witterungsbedingungen, unterliegen und die Diagramme die Bandbreite dieser Änderungen wiedergeben.

Abb. 10 zeigt die **enorme Bandbreite** der Gehalte an **Nitrat-Stickstoff** in den Seen der Region. Im langjährigen Durchschnitt waren die Werte bei den ersten sieben Seen (Plußsee bis Kolksee) $<100 \mu\text{g/l}$ und lagen bei den sieben letzten zwischen $1532 \mu\text{g/l}$ und $2610 \mu\text{g/l}$ (Postsee bis Heidensee) und im Honigsee sogar bei $5220 \mu\text{g/l}$ Nitrat-N. Dazwischen stiegen bis zum Passader See (Nr. 35) zunächst mäßig und vom Postsee (Nr. 36) bis Honigsee (Nr.44) steil an. In den Seen mit Nitrat-Werten $< 165 \mu\text{g/l}$ N war in den meisten Fällen die Nitrifikation noch nicht weit fortgeschritten, und anorganischer Stickstoff lag überwiegend als Ammonium-Stickstoff vor (s. Hofmann 2002).

Zu erkennen ist auch, dass die Mittelwerte der vier Fünfjahres-Perioden bis auf wenige Ausnahmen in der ersten Phase (1992-1995) am höchsten und in der letzten (2006-2010) am

niedrigsten waren. Die **Nitrat-Gehalte** haben also **allgemein abgenommen**, besonders deutlich in den Seen mit hohen Konzentrationen.



Rang	See	Nitrat	Rang	See	Nitrat	Rang	See	Nitrat	Rang	See	Nitrat
1	PLUS	24	12	GREB	144	23	KPLÖ	380	34	DANN	771
2	SUHR	45	13	UNTA	161	24	DIEK	403	35	LÖPT	858
3	GMAD	54	14	SCIG	164	25	LANK	420	36	WIEL	909
4	SCHÖ	55	15	STOC	169	26	TREH	489	37	PASS	934
5	TRAM	57	16	STAD	239	27	DOBE	510	38	POST	1532
6	KMAD	83	17	GPLP	262	28	GÖRN	526	39	ROSE	1607
7	KOLK	83	18	HOLZ	268	29	VIER	556	40	SCAR	2131
8	EDEB	117	19	HÖFT	307	30	STOL	610	41	SCIW	2320
9	SCLU	128	20	BEHL	319	31	KRON	627	42	BOTH	2322
10	SELE	132	21	GPLA	327	32	FUHL	672	43	HEID	2610
11	TREN	133	22	KIRC	362	33	GBIN	768	44	HONI	5220

Abb. 10 Mittelwerte der Gehalte an **Nitrat-Stickstoff** ($\mu\text{g/l}$) in den Perioden 1992-1995, 1996-2000, 2001-2005 und 2006-2010. **Tabelle: Rangfolge der Seen** nach den mittleren Gehalten an Nitrat-Stickstoff ($\mu\text{g/l}$) im Zeitraum 1992-2010.

Im Zehn-Jahres-Bericht (Hofmann 2002) wurde gezeigt, dass die Entwicklung der Nitrat-Werte nicht durch einen langfristigen Trend, sondern durch **starke kurzfristige Schwankungen** gekennzeichnet ist. **Abb. 11** lässt das Ausmaß dieser Änderungen erkennen, zugleich wird deutlich, dass die Schwankungen in einigen Jahren in allen Seen synchron verliefen, wodurch in den Jahren 1995, 1997, 2000 und 2006 ausgeprägte Minima entstanden. Ab 2001 nahm die Höhe der Maxima und dadurch auch die Amplitude der Schwankungen allgemein ab. Dies führt zu dem in **Abb. 10** gezeigten Rückgang der durchschnittlichen Nitrat-Gehalte in den Jahren 2000 bis 2010. Die beobachtete Dynamik der Nitrat-Werte resultiert nicht aus gegenläufigen Änderungen der Gehalte an Ammonium-Stickstoff (s. Hofmann 2002).

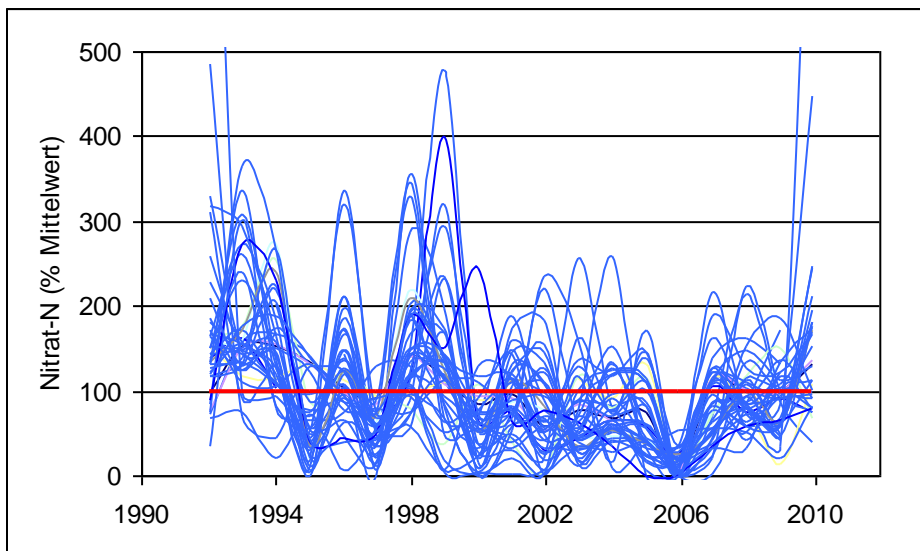
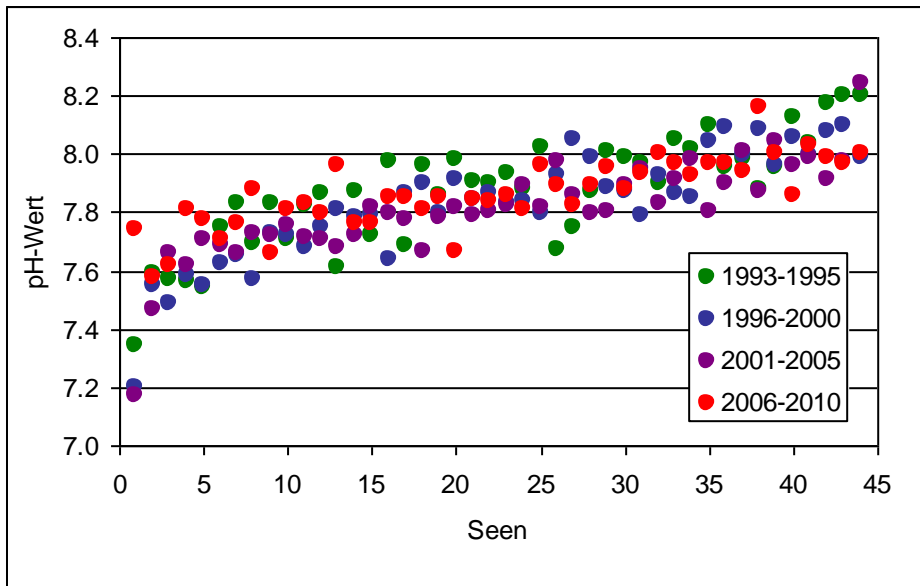


Abb. 11 Verlauf der Gehalte an **Nitrat-Stickstoff** (% des langjährigen Mittelwertes des jeweiligen Sees) in den 44 Seen im Zeitraum 1992 bis 2010.

5. Weitere chemische Parameter: pH-Wert – Leitfähigkeit – gelöster organischer Kohlenstoff

Bei 43 Seen lagen die **Fünf-Jahres-Mittelwerte** im Bereich zwischen **pH 7,4 und 8,2**. Trotz dieser geringen Schwankungsbreite gibt es offensichtlich signifikante Unterschiede zwischen den Seen (**Abb. 12**). Von der Gruppe Kleiner Madebrökensee (Nr. 2) bis zum Edebergsee (Nr. 11) mit pH-Werten zwischen 7,6 und 7,9 gab es einen kontinuierlichen Anstieg zur Gruppe, die von den Seen Passader See (Nr. 36) bis zum Großen Binnensee (Nr. 44) gebildet wird, mit Werten meist zwischen pH 7,9 und 8,2. Von diesen Seen durch niedrigere Werte etwas abgesetzt ist der Plußsee (Nr. 1), bei dem die pH-Mittelwerte der Perioden von 1993 bis 2005 im Bereich zwischen 7,2 und 7,4 lagen. Die Unterschiede, die zwischen den Untersuchungsperioden in den einzelnen Seen auftraten, sind so gering, dass sie als zufällig gelten können. Die Mittelwerte der einzelnen Seen für die gesamte Messperiode von 1993 bis 2010, wie sie in der Tabelle aufgezeigt sind, geben die pH-Wert-Situation während der Herbst-Vollzirkulation in den Seen der Region gut wieder. Im Sommer würden die Werte wegen des CO₂-Verbrauchs durch die Photosynthese der Planktonalgen durchweg höher sein, besonders bei den Seen mit einem hohem Trophiegrad, also hohem Nährstoffgehalt und geringen Sichttiefen.



Rang	Seen	pH	Rang	Seen	pH	Rang	Seen	pH	Rang	Seen	pH
1	PLUS	7.3	12	GREB	7.8	23	STOL	7.9	34	KIRC	7.9
2	KMAD	7.5	13	SUHR	7.8	24	HEID	7.9	35	GPLP	8.0
3	HONI	7.6	14	SCIG	7.8	25	HÖFT	7.9	36	PASS	8.0
4	GMAD	7.6	15	ROSE	7.8	26	SCAR	7.9	37	TREN	8.0
5	LÖPT	7.7	16	BOTH	7.8	27	TREH	7.9	38	DANN	8.0
6	WIEL	7.7	17	DIEK	7.8	28	HOLZ	7.9	39	LANK	8.0
7	UNTA	7.7	18	SCHÖ	7.8	29	STAD	7.9	40	TRAM	8.0
8	GÖRN	7.7	19	STOC	7.8	30	FUHL	7.9	41	DOBE	8.0
9	SCIW	7.7	20	BEHL	7.8	31	POST	7.9	42	GPLA	8.0
10	KOLK	7.8	21	VIER	7.8	32	KPLÖ	7.9	43	SELE	8.1
11	EDEB	7.8	22	SCLU	7.8	33	KRON	7.9	44	GBIN	8.1

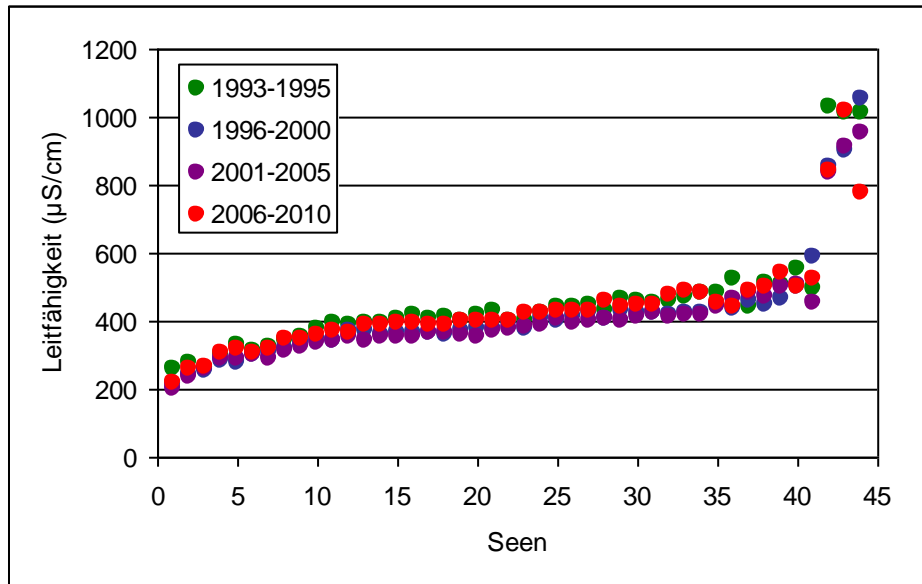
Abb. 12 Mittelwerte der **pH-Werte** in den Perioden 1993-1995, 1996-2000, 2001-2005 und 2006-2010. **Tabelle: Rangfolge der Seen** nach den mittleren pH-Werten im Zeitraum 1993-2010.

Die **Leitfähigkeit** ist ein Maß für den Elektrolytgehalt des Wassers. Die Fünfjahres-Mittelwerte zeigen, dass die Rangfolge der Seen seit Beginn der Untersuchungen nahezu unverändert ist (**Abb. 13**). Nach dem langjährigen Durchschnitt bilden 41 Seen vom Plußsee bis zum Stadtsee eine Reihe, in der die Werte von 218 $\mu\text{S}/\text{cm}$ auf 517 $\mu\text{S}/\text{cm}$ kontinuierlich ansteigen. Durch eine breite Lücke von diesen getrennt sind drei Seen: Trentsee, Großer Binnensee und Trammer See, mit Werten von 878-955 $\mu\text{S}/\text{cm}$. In der ersten Gruppe von 41 Seen ist die Leitfähigkeit in erster Linie abhängig vom Calcium-Gehalt, während sie im Großen Binnensee vom Brackwasser der Ostsee und beim Trammer See und Trentsee von Kochsalz-haltigen Quellen im Trammer See beeinflusst wird (s. Hofmann 1998: S. 19-20, 2002: S. 36-37).

Der Calciumgehalt von $> 30 \text{ mg}/\text{l}$ (s. Hofmann 2002), Leitfähigkeitswerte von meist $> 300 \mu\text{S}/\text{cm}$ und pH-Werte > 7 kennzeichnen die Seen der Region als „alkalisch kalkreich“ (Mauersberger 2006).

In Bezug auf die zeitliche Entwicklung ist ein fast einheitlicher Trend zu erkennen: In 39 Seen hat die Leitfähigkeit zur Periode 2001-2005 hin abgenommen. Die Fünfjahres-

Mittelwerte sanken im Durchschnitt um 41 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Maximum: 69 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Danach stiegen sie in 39 Seen wieder an, bezogen auf die Mittelwerte, um durchschnittlich 33 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Maximum: 73 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Die Werte änderten sich beim Trammer See und Trentsee in gleicher Weise, nur waren die Unterschiede hier wesentlich höher. Im Großen Binnensee ging die Leitfähigkeit von durchschnittlich 1011 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in 1993-1995 auf 953 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in 2001-2005 und schließlich auf 777 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in 2006-2010 zurück.



Rang	Seen	Leitf.	Rang	Seen	Leitf.	Rang	Seen	Leitf.	Rang	Seen	Leitf.
1	PLUS	218	12	SCIG	368	23	STOL	394	34	ROSE	446
2	SCHÖ	249	13	DOBE	370	24	POST	409	35	VIER	453
3	KMAD	258	14	EDEB	370	25	TREH	414	36	GÖRN	462
4	SUHR	295	15	GPLA	375	26	KOLK	415	37	HONI	470
5	UNTA	300	16	HÖFT	379	27	KIRC	422	38	DANN	477
6	GREB	305	17	BEHL	379	28	WIEL	424	39	SCIW	496
7	SELE	307	18	GPLP	379	29	LANK	429	40	HEID	513
8	GMAD	327	19	SCLU	380	30	KRON	431	41	STAD	517
9	STOC	340	20	PASS	383	31	FUHL	433	42	TREN	878
10	HOLZ	351	21	DIEK	390	32	KPLO	436	43	TRAM	948
11	LÖPT	357	22	BOTH	392	33	SCAR	445	44	GBIN	955

Abb. 13 Mittelwerte der **Leitfähigkeit** ($\mu\text{S}/\text{cm}$) in den Perioden 1993-1995, 1996-2000, 2001-2005 und 2006-2010. **Tabelle: Rangfolge der Seen** nach den mittleren Leitfähigkeitswerten im Zeitraum 1993-2010.

Abb. 14 zeigt die **Mittelwerte der Leitfähigkeit** von 40 Seen in den Jahren **1993 bis 2010**. Nicht berücksichtigt wurden die vier Seen, in denen der Elektrolyt-Gehalt durch Brackwasser bzw. Kochsalzquellen beeinflusst wird; dazu gehört – außer dem Großen Binnensee, Trammer See und Trentsee - auch der Stadtsee, der über den Trentsee mit dem Trammer See in Verbindung steht und in einigen Jahren deutlich erhöhte Werte von bis zu 929 $\mu\text{S}/\text{cm}$ aufwies. Die zeitliche Abfolge der in **Abb. 13** beschriebenen Änderungen der Leitfähigkeit in den Seen der Region wird hier etwas genauer gezeigt: **Hohe Werte** (im Mittel 395–417 $\mu\text{S}/\text{cm}$) wurden in den ersten vier Jahren gemessen, danach **nahmen** sie **ab** und schwankten bis 2007 im Bereich von durchschnittlich 360–380 $\mu\text{S}/\text{cm}$. **Danach stiegen die Werte wieder an** und

waren mit Mittelwerten um 426 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in 2009 und 2010 sogar höher als am Beginn der Untersuchungen. Die Daten aus dem Jahr 2008 wurden wegen eines Messfehlers nicht berücksichtigt.

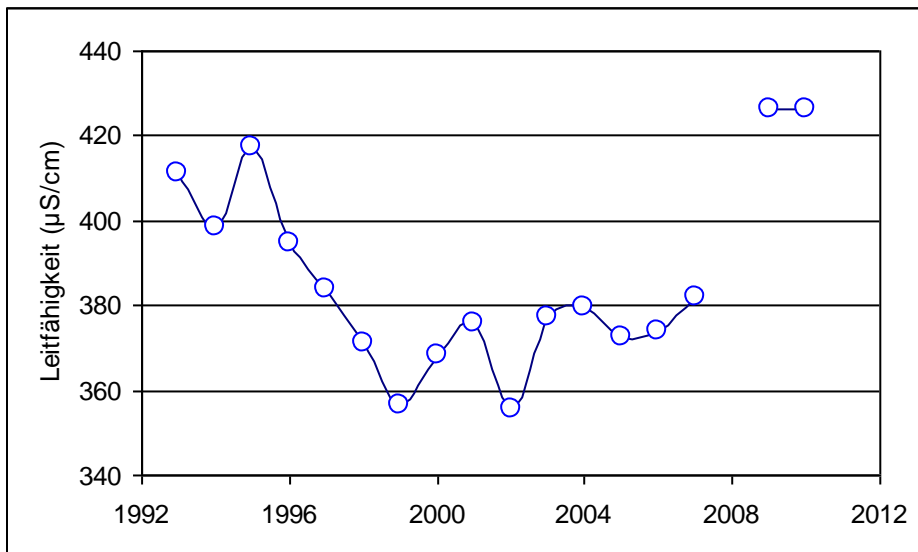
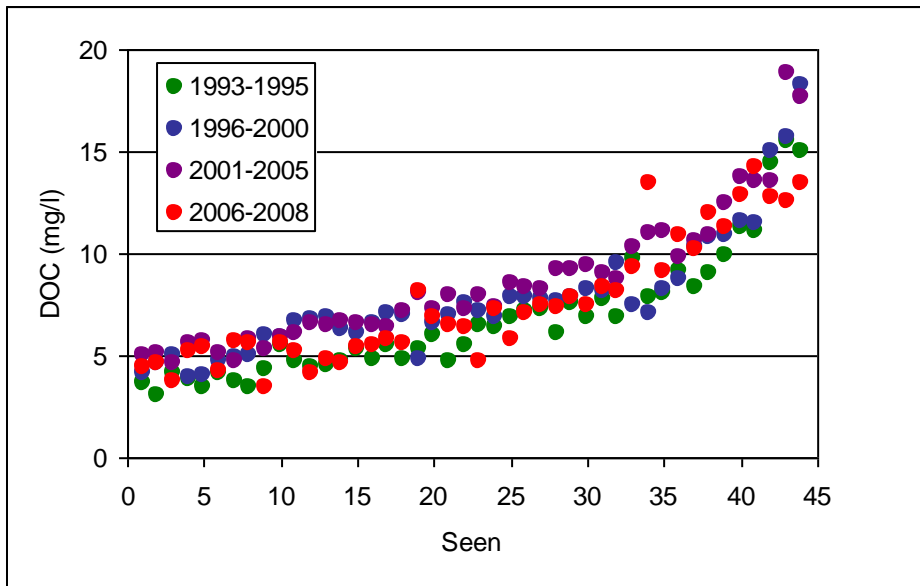


Abb. 14 Durchschnittliche **Leitfähigkeitswerte** ($\mu\text{S}/\text{cm}$) in 38 Seen (s. Text) im Zeitraum 1993-2010.

Der Gehalt an **gelöstem organischem Kohlenstoff (DOC)** ist ein Maß für die Menge an unterschiedlichen gelösten organischen Substanzen, die im See selbst produziert oder aus dem Einzugsgebiet eingetragen wurden. Es handelt sich überwiegend um schwer abbaubare Substanzen, bei denen Abbau und Zufuhr in einem Gleichgewicht stehen. In einem See ist daher die Menge an solchen Substanzen unabhängig von Wassertiefe und Jahreszeit recht konstant. Die Konzentration an gelöstem organischem Kohlenstoff nimmt mit dem Trophiegrad, aber auch mit dem Humusgehalt zu (Wetzel 1975, Lampert & Sommer 1993).

In den untersuchten Seen **nahmen die langjährigen Mittelwerte (1993-2008) kontinuierlich zu** von 4,3 mg/l im Suhrer See (Nr.1) bis 9,4 mg/l DOC im Scharsee (Nr. 36). Vom Plußsee (Nr.37) bis zum Honigsee (Nr.44) steigen die Werte etwas steiler an von 10,0 mg/l auf 16,7 mg/l DOC (**Abb. 15**).

Hinsichtlich der **zeitlichen Entwicklung** ist in **Abb. 15** zu erkennen, dass in den meisten Seen die DOC-Gehalte im ersten Abschnitt (1993-1995) **am niedrigsten** waren, danach **anstiegen** und in der Zeit von 2001 bis 2005 einen Höchststand erreichten. Danach gingen die **Werte wieder zurück**, waren aber meist höher als zu Beginn der Untersuchung. Diese letzte Periode umfasste allerdings nur drei Jahre, wobei nur aus zwei Jahren Messwerte vorlagen.



Rang	Seen	DOC	Rang	Seen	DOC	Rang	Seen	DOC	Rang	Seen	DOC
1	SUHR	4.3	12	KPLÖ	5.9	23	EDEB	7.0	34	TREH	9.4
2	TREN	4.4	13	GPLP	5.9	24	LANK	7.0	35	GBIN	9.4
3	STOC	4.5	14	KRON	6.0	25	GMAD	7.6	36	SCAR	9.4
4	SCLU	4.6	15	SCIG	6.0	26	DOBE	7.8	37	PLUS	10.0
5	TRAM	4.6	16	FUHL	6.1	27	ROSE	7.8	38	KMAD	10.5
6	SCHÖ	4.7	17	GREB	6.4	28	HEID	7.8	39	UNTA	11.3
7	SELE	4.7	18	DIEK	6.4	29	WIEL	8.2	40	DANN	12.4
8	VIER	5.0	19	HOLZ	6.4	30	KOLK	8.3	41	BOTH	12.5
9	STOL	5.0	20	KIRC	6.7	31	PASS	8.4	42	LÖPT	14.1
10	STAD	5.8	21	BEHL	6.8	32	SCIW	8.5	43	GÖRN	16.5
11	GPLA	5.9	22	HÖFT	6.9	33	POST	9.1	44	HONI	16.7

Abb. 15 Mittelwerte der Gehalte an **gelöstem organischen Kohlenstoff** (DOC) (mg/l) in den Perioden 1993-1995, 1996-2000, 2001-2005 und 2006-2008. **Tabelle: Rangfolge der Seen** nach den mittleren Gehalten an DOC (mg/l) im Zeitraum 1993-2008.

Die **Mittelwerte aller Seen** im Untersuchungszeitraum (1993–2008) (**Abb. 16**) zeigen ebenfalls den zeitlichen Ablauf der Veränderungen der DOC-Gehalte: Von 1993 bis 1998 lagen die mittleren Konzentrationen recht konstant bei 6,3 mg/l bis 7,0 mg/l DOC. Danach – von 1999 bis 2005 – folgte eine **deutliche Zunahme** der Werte und ihrer Schwankungsbreite (7,8 mg/l – 9,9 mg/l DOC). Unklar ist, ob dann die Gehalte wieder abgenommen haben, wie der Wert von 7,0 mg/l DOC andeutet, denn danach folgte wieder ein hoher Wert von 7,9 mg/l DOC.

Die Gehalte an **gelöstem organischem Kohlenstoff** zeigen zum Teil gute Übereinstimmung mit anderen **Trophie-Indikatoren**: Die fünf Seen mit den höchsten Werten (Dannauer See, Bothkamper See, Löptiner See, Görnitzer See und Honigsee) (**Abb. 15**) sind Gewässer mit hohen Nährstoff-Gehalten und besonders geringen Sommer-Sichttiefen, und unter den Seen mit geringsten DOC-Konzentrationen befinden sich mit dem Suhrer See, Schöhsee, Selenter See, Stocksee und Schluensee die Seen mit den geringsten Nährstoff-Werten und den größten Sommer-Sichttiefen. Allerdings befinden sich in dieser Gruppe auch Trammer See und Trentsee, die hinsichtlich der anderen Trophie-Anzeiger nur mittlere Ränge einnehmen (s. **Abb. 6, 19**).

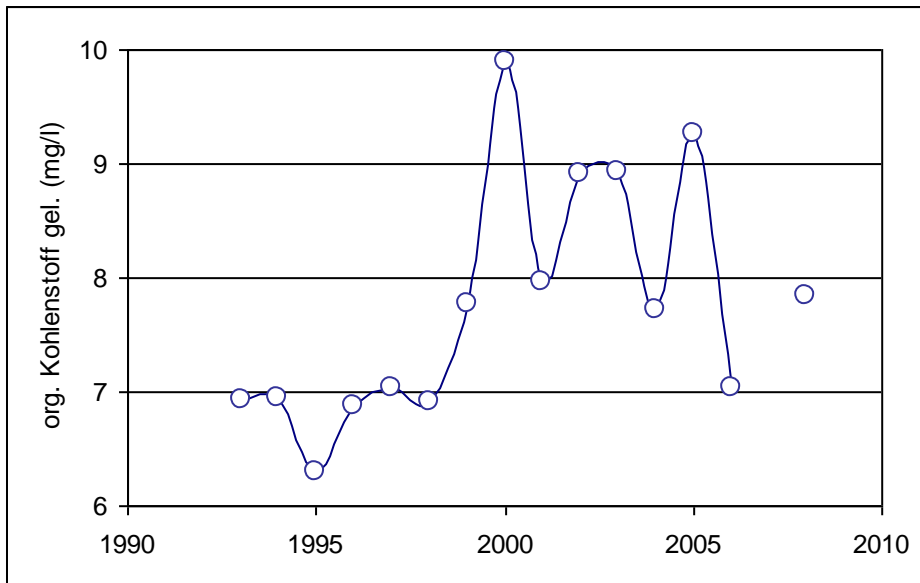


Abb. 16 Durchschnittliche Gehalte an **gelöstem organischem Kohlenstoff** (DOC) (mg/l) in den 44 Seen im Zeitraum 1993-2008.

6. Sichttiefen: Klarwasser-Stadium und Sommer-Sichttiefen

In den Seen der Region lösen sich im Jahresverlauf typischerweise - abhängig von der Entwicklung des pflanzlichen Planktons - mehrere **Phasen unterschiedlicher Sichttiefenverhältnisse** ab: Wenn sich nach dem Winter die Lichtbedingungen verbessern, führt dies zu einer starken Vermehrung der Planktonalgen und einer entsprechenden Verringerung der Sichttiefen (**Frühjahrsblüte**). Die Planktonalgen werden danach durch Zooplanktonfraß stark dezimiert, wodurch das Wasser wieder klarer wird und die Sichttiefen sich erhöhen (**Klarwasser-Stadium**). Im Sommer erscheinen relativ große, nicht gut verwertbare Phytoplankton-Arten, und die Sichttiefen nehmen wieder ab (**Sommer-Sichttiefen**). Hier sollen das Klarwasserstadium und die Periode der Sommer-Sichttiefen erörtert werden.

Klarwasser-Stadien traten in mehreren flachen, ungeschichteten Seen nie (Dannauer See, Görnitzer See, Heidensee, Honigsee, Trenthorster See) oder nur ausnahmsweise auf. Im Bothkamper See wurde nur in drei Jahren (1992, 1993, 2001) ein Klarwasserstadium beobachtet

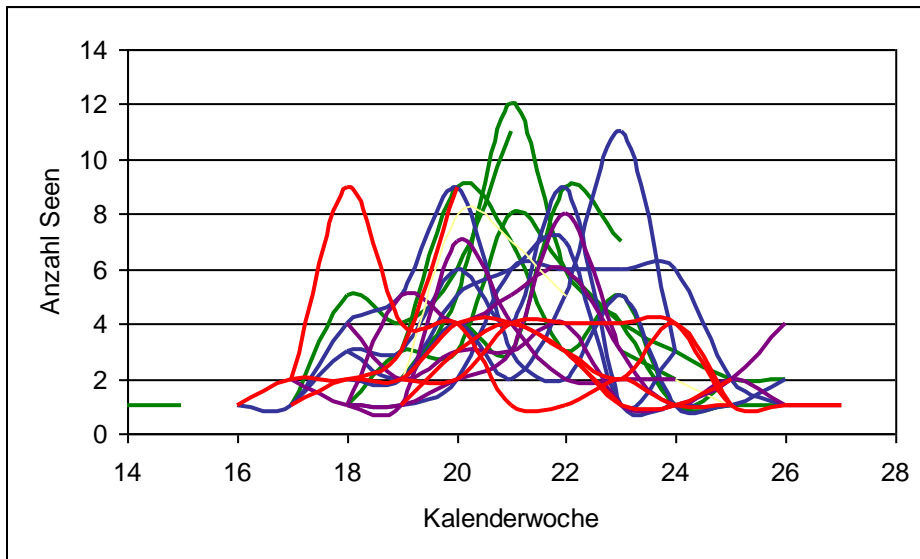
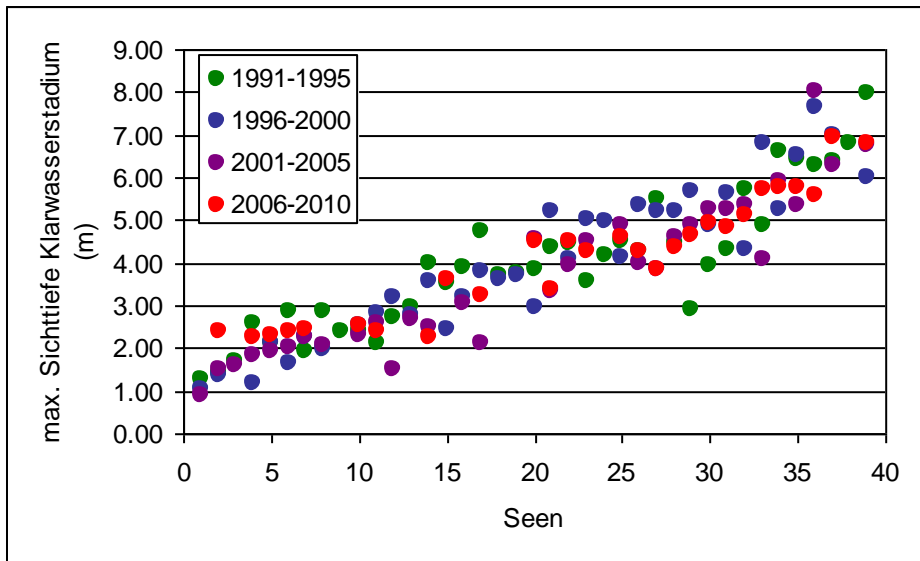


Abb. 17 Zeitpunkt des Maximums des **Klarwasser-Stadiums** in 39 Seen (s. Text) in den Jahren 1991-2010.

Im langjährigen Mittel hatte in den übrigen Seen die **Klarwasserphase ihr Maximum** in der **19. bis 23. Woche** (Anfang Mai – Anfang Juni) mit einer Häufung um die 21. Woche (Ende Mai), nur im Scharsee lag dieser Zeitpunkt früher (15. Woche, Mitte April) und im Kleinen Madebrökensee später (25. Woche, Mitte Juni); allerdings gab es von diesen beiden Seen nur wenige Messungen. **Abb. 17** zeigt, dass es von diesen Durchschnittswerten zahlreiche Abweichungen gab. In einigen Jahren lagen die Termine allgemein etwas früher (1993, 2000, 2004) und in anderen etwas später (1991, 1996, 2003, 2005) .

Die **Klarwasser-Stadien einiger flacher Seen** (Nr. 1 – 4) waren trotz der geringen maximalen Sichttiefen von 1 – 2 m gut zu identifizieren, da davor und danach die Werte deutlich geringer waren. Maximale Sichttiefen von 6 – 8 m wurden im Stocksee, Selenter See, Suhrer See und Schöhsee (Nr. 36 – 39) gemessen. (**Abb. 18**). Zwischen diesen Extremen gab es eine kontinuierliche Reihe vom Kolksee (Nr. 5) bis Höftsee (Nr. 35) mit Werten zwischen 2 m und 6 m.

Aus **Abb. 18** geht außerdem hervor, dass die Mittelwerte der vier Fünf-Jahres-Perioden (1991-1995, 1996-2000, 2001-2005, 2006-2010), dass die Werte während der Untersuchungszeit **weder** eine allgemeine **Zunahme noch eine Abnahme** erkennen lassen, sondern in den einzelnen Seen in unterschiedlicher Weise variieren.



Rang	See	KWST	Rang	See	KWST	Rang	See	KWST	Rang	See	KWST
1	KMAD	1.04	11	LÖPT	2.47	21	LANK	4.20	31	PLUS	5.04
2	SCAR	1.54	12	KIRCH	2.73	22	GPLP	4.25	32	EDEB	5.10
3	BOTH	1.67	13	GREB	2.84	23	STOL	4.37	33	SCLU	5.35
4	GBIN	1.79	14	PASS	3.21	24	VIER	4.40	34	GPLA	5.90
5	KOLK	2.09	15	TRAM	3.36	25	SCIW	4.53	35	HÖFT	6.01
6	UNTA	2.21	16	STAD	3.42	26	KPLÖ	4.55	36	STOC	6.61
7	ROSE	2.23	17	TREN	3.53	27	DIEK	4.60	37	SELE	6.65
8	DOBE	2.33	18	FUHL	3.66	28	BEHL	4.66	38	SUHR	6.80
9	SCIG	2.38	19	KRON	3.72	29	GMAD	4.69	39	SCHÖ	6.89
10	POST	2.43	20	HOLZ	3.92	30	WIEL	4.72			

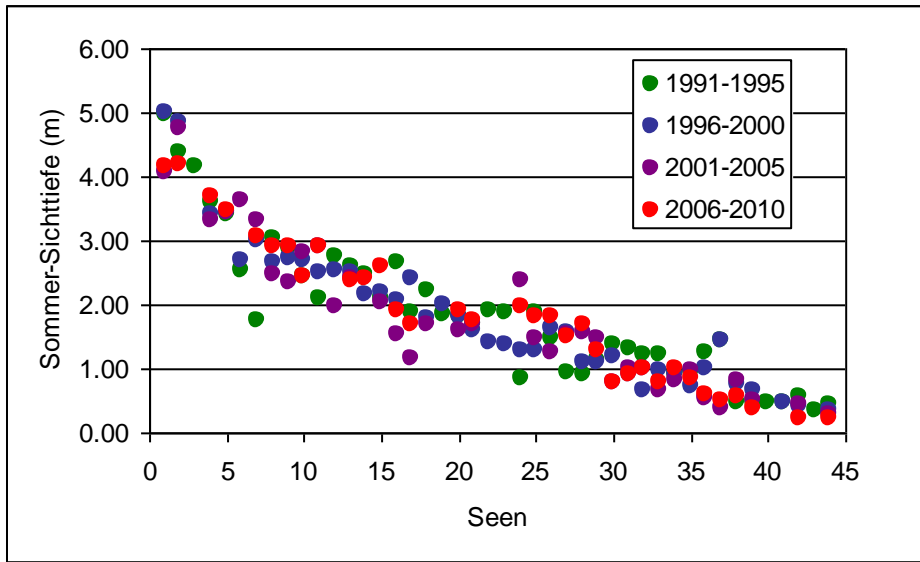
Abb. 18 Mittelwerte der **maximalen Sichttiefen** (m) während des **Klarwasser-Stadiums** in den Perioden 1991-1995, 1996-2000, 2001-2005 und 2006-2010. **Tabelle: Rangfolge der Seen** nach den mittleren Maximal-Sichttiefen während des Klarwasserstadiums (KWST) im Zeitraum 1991-2010.

Bei den **Sichttiefen-Werten** wurde die Zeit von der 27. bis zur 39. Woche (Anfang Juli bis Ende September) als **Sommer-Periode** betrachtet (s. Hofmann 1998). Die **Mittelwerte der Fünf-Jahres-Perioden** reichen bei den Sommer-Sichttiefen von 0,30 – 0,40 m im Dannauer See, Görnitzer See und Bothkamper See (Nr. 1–3) in einer kontinuierlichen Reihe bis zum Schluensee (Nr. 41) mit rund 3,50 m). Davon etwas abgesetzt sind Suhrer See, Schöhsee und Selenter See (Nr. 42–44) mit Werten von 4,00 bis 5,00 m (**Abb. 19**). Die **Sichttiefen steigen** also, wie auch beim Klarwasserstadium, von den flachen, **ungeschichteten** zu den tiefen, **geschichteten Seen an**. Die Rangfolge der Seen auf dieser Skala bleibt während der Untersuchungszeit erhalten, d. h. Seen mit hohen Sichttiefen hatten immer hohe Sichttiefen, ebenso verhielten sich die Seen mit niedrigen Werten.

Nach den Kriterien der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (1998) entsprechen die mittleren Sommer-Sichttiefen von 14 geschichteten Seen mit Werten von 4,53 m bis 2,36 m **mesotrophen** Bedingungen, 10 geschichtete und 11 ungeschichtete Seen mit Mittelwerten von 2,20 m bis 0,86 m befanden sich im **eutrophen** Bereich und 7 ungeschichtete Seen und ein geschichteter See (Lanker See) mit Sichttiefen von 0,85 m bis 0,34 m waren **polytroph**.

Von letzteren geringfügig unterschieden, gilt der Dannauer See mit einem Mittelwert von 0,32 m als **hypertroph**.

Selenter See, Schöhsee, Suhrer See, Stocksee, Großer Madebrökensee und Schierensee (Grebin) waren sowohl nach ihrem **Phosphor-Gehalt** als auch nach der **Sommer-Sichttiefe** im **mesotrophen** Bereich, während Kirchsee, Trenter See, Kleiner Madebrökensee, Heidensee, Honigsee, Bothkamper See und Görnitzer See nach beiden Kriterien **polytroph** waren.



Rang	See	SST	Rang	See	SST	Rang	See	SST	Rang	See	SST
1	SELE	4.53	12	GREB	2.56	23	SCIW	1.61	34	POST	0.90
2	SCHÖ	4.52	13	GPLP	2.47	24	FUHL	1.61	35	LÖPT	0.86
3	SUHR	4.17	14	TRAM	2.36	25	HOLZ	1.59	36	LANK	0.85
4	SCLU	3.50	15	BEHL	2.20	26	WIEL	1.53	37	KIRC	0.84
5	STOC	3.44	16	TREN	2.04	27	STOL	1.42	38	TREH	0.67
6	PLUS	2.96	17	STAD	1.94	28	SCAR	1.33	39	KMAD	0.50
7	GMAD	2.80	18	KPLÖ	1.94	29	UNTA	1.22	40	HEID	0.47
8	GPLA	2.78	19	VIER	1.88	30	PASS	1.04	41	HONI	0.46
9	HÖFT	2.71	20	DIEK	1.80	31	DOBE	1.00	42	BOTH	0.41
10	SCIG	2.60	21	KRON	1.66	32	GBIN	0.91	43	GÖRN	0.34
11	EDEB	2.60	22	KOLK	1.66	33	ROSE	0.90	44	DANN	0.32

Abb. 19 Mittelwerte der Sommer-Sichttiefen (m) in den Perioden 1991-1995, 1996-2000, 2001-2005 und 2006-2010. **Tabelle: Rangfolge der Seen** nach den mittleren Sommer-Sichttiefen (SST) im Zeitraum 1991-2010. Trophiestufen: **mesotroph** – **eutroph** – **polytroph** – **hypertroph**.

Das Diagramm zeigt **keinen** allgemeinen **Trend einer Zu- oder Abnahme der Sichttiefen** während der Untersuchungszeit. Diesen Eindruck vermitteln auch die Mittelwerte aller Seen für die einzelnen Jahre. Sie bewegen sich in der Zeit von 1991 bis 2010 in einem Bereich zwischen 1,50 m und 2,00 m auf und ab (**Abb. 20**).

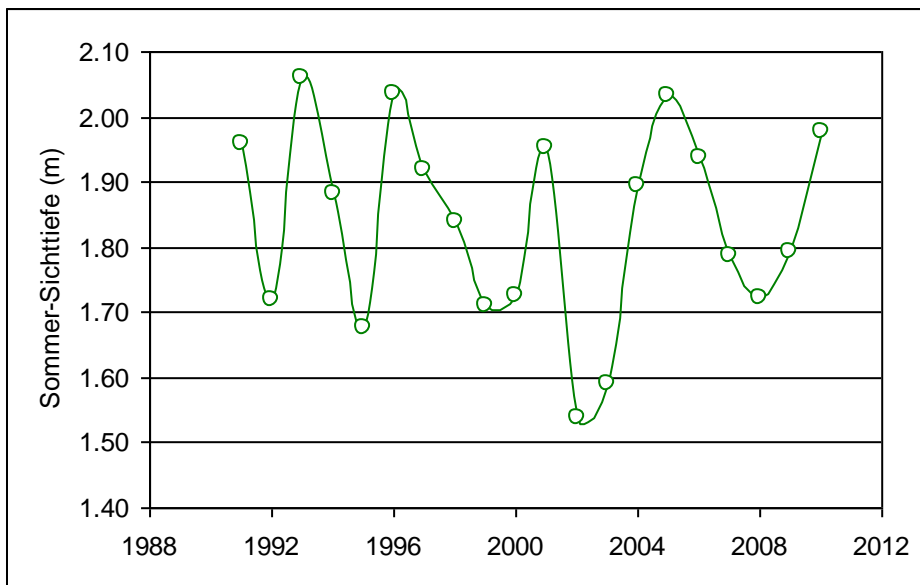


Abb. 20 Mittelwerte der **Sommer-Sichttiefen** aller Seen im Zeitraum 1991-2010.

Dennoch sind bei einzelnen Seen langfristige Trends zu erkennen: Bei acht Seen ist eine Zunahme und bei 12 Seen eine Abnahme der Sommer-Sichttiefen angedeutet (**Abb. 21-23**), und bei 13 Seen variierten die Werte von Jahr zu Jahr unregelmäßig und blieben mehr oder weniger konstant. Bei den übrigen 11 Seen waren die Daten zu lückenhaft für eine Auswertung.

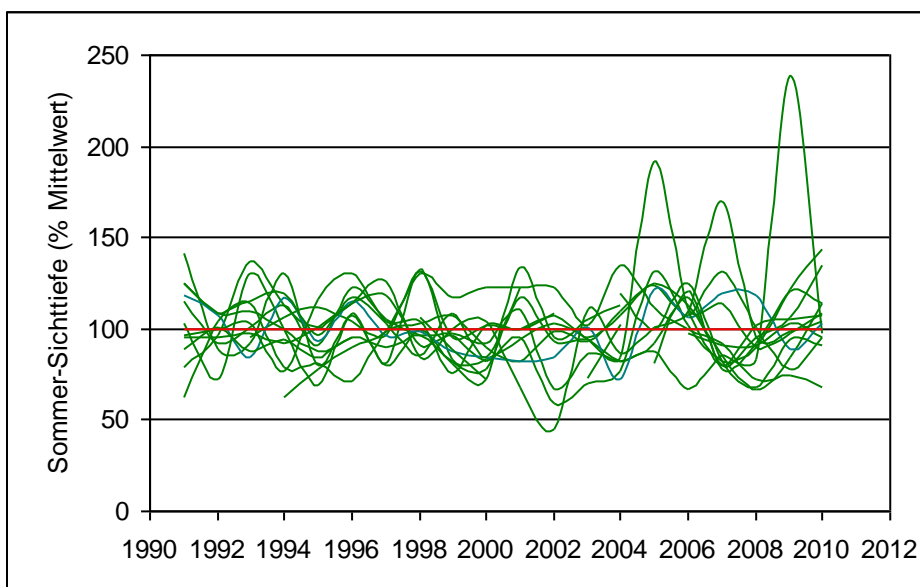


Abb. 21 Sommer-Sichttiefen von 13 Seen mit +/- **konstanten Werten** im Zeitraum 1991-2010 (s. Tab. 2).

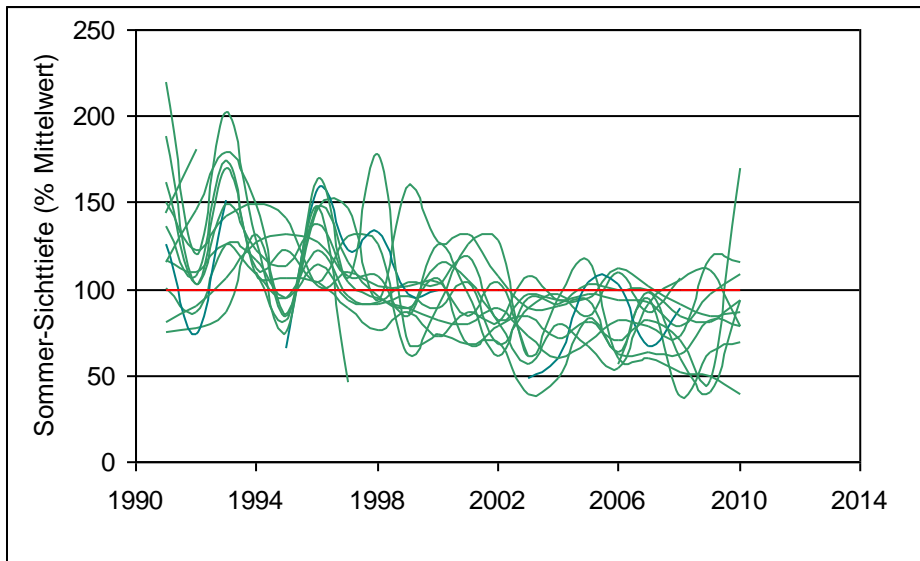


Abb. 22 Sommer-Sichttiefen von 12 Seen mit **abnehmenden Werten** im Zeitraum 1991-2010 (s. Tab. 2).

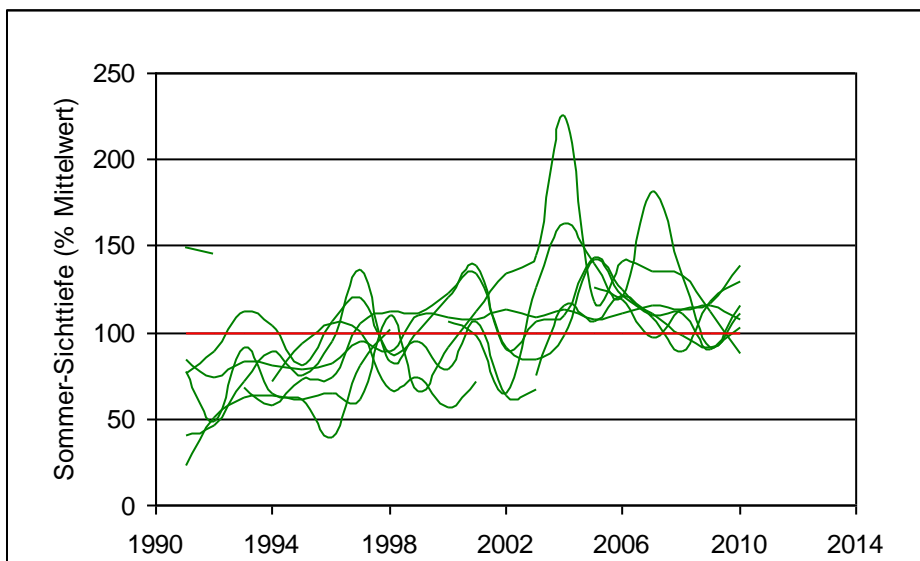


Abb. 23 Sommer-Sichttiefen von 8 Seen mit **steigenden Werten** im Zeitraum 1991-2010 (s. Tab. 2).

Sichttiefen: konstant	Sichttiefen: Abnahme	Sichttiefen: Zunahme
DIEKSEE EDEBERGSEE HÖFTSEE KOLKSEE LÖPTINER SEE ROSENSEE SCHLUENSEE SCHÖHSEE STOCKSEE TRAMMER SEE TRENTER SEE UNT. AUSGRABENSEE WIELENER SEE	BOTHKAMPER SEE DANNAUER SEE DOBERSDORFER SEE GR. PLÖNER SEE (ASCH.) GR. PLÖNER SEE (PLÖN) KL. MADEBRÖKENSEE KL. PLÖNER SEE LANKER SEE PASSADER SEE POSTSEE SELENER SEE TRENTSEE	BEHLER SEE GR. MADEBRÖKENSEE HOLZSEE PLUSSEE SCHARSEE SCHIERENSEE (GREBIN) SCHIERENSEE (WANK.) STOLPER SEE
13 Seen	12 Seen	8 Seen

Tabelle 2 Liste der Seen, in denen im Zeitraum 1991-2010 die **Sommer-Sichttiefen** +/- konstant waren, abnahmen bzw. zunahmen.

7. Abhängigkeit der Sommer-Sichttiefe von der mittleren Tiefe des Sees und dem Phosphor-Gehalt

Bei dem Vergleich der **Sommer-Sichttiefen** in den 44 Seen (s. **Abb. 19**) wurde deutlich, dass die Werte von den **tiefen zu den flachen Seen hin abnehmen**, dass also die Sichttiefe von der Tiefe der Seen abhängt. In den vorhergehenden Berichten (Hofmann 1998, 2002) wurde gezeigt, dass eine **signifikante lineare Beziehung** zwischen **Sommer-Sichttiefe** (SST) und der **mittleren Tiefe** der Seen (Z_m) besteht: $SST = A + BX$. Für die 20-Jahres-Durchschnittswerte der Sichttiefen ergibt sich die Funktion: $SST = 0,53 + 0,21 Z_m$. Der Korrelationskoeffizient beträgt $r = 0,79$ (**Abb. 24**). Suhrer See, Schöhsee und Selenter See setzen sich durch besonders hohe, und der Dieksee weicht durch besonders geringe Sichttiefen von den anderen Seen ab. Erstere haben bei mittleren Tiefen von 8,3 bis 13,2 m durchschnittliche Sichttiefen von 4,20 bis 4,50 m der Dieksee hat bei einer mittleren Tiefe von 14 m dagegen nur eine Sichttiefe von 1,80 m. Verglichen mit den vorangegangenen Perioden hat sich die Korrelation zwischen mittlerer Tiefe und Sommer-Sichttiefe quantitativ kaum verändert. Nach obiger Funktion würde ein See mit einer mittleren Tiefe von 10 m eine durchschnittliche Sichttiefe von 2,63 m haben, der entsprechende Wert betrug für die Zeit von 1991 bis 1995 2,55 m und für 1991 bis 2000 2,65 m (Hofmann 2002: S. 42).

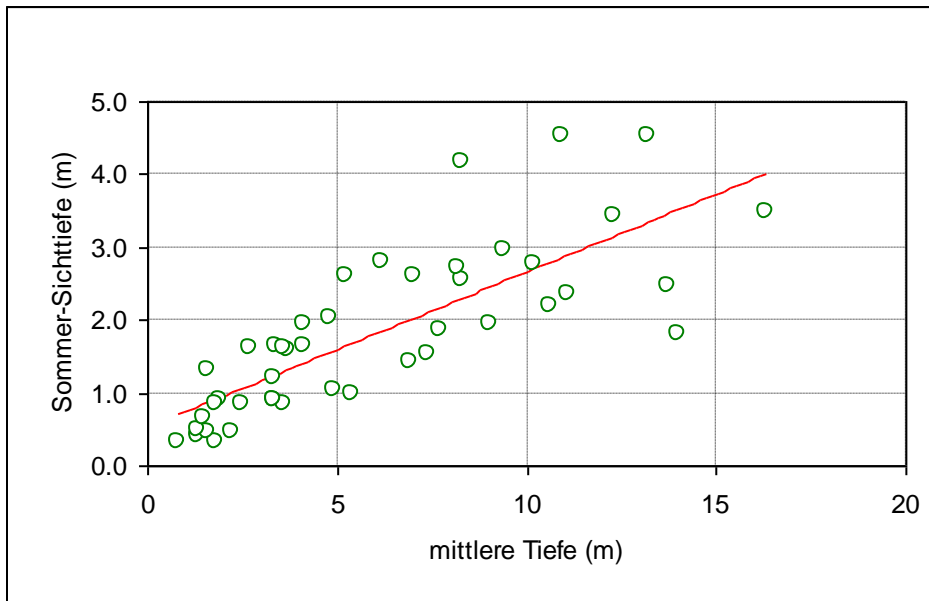


Abb. 24 Sommer-Sichttiefen (m) (Mittelwerte und Regressionsgerade 1991-2010) in Abhängigkeit von **der mittleren Tiefe** (m) der Seen.

Da die **Sichttiefe**, d. h. die Phytoplankton-Entwicklung, vom Nährstoff-Angebot, also dem **Phosphor-Gehalt**, abhängt, ist eine quantitative Beziehung zwischen diesen beiden Parametern zu erwarten. Eine solche **Korrelation** ist tatsächlich anhand der langjährigen Mittelwerte (1991-2010) der einzelnen Seen zu erkennen (**Abb. 25**). Eine Gleichung in der Form $Y = A + B / X$ ergab eine maximale Korrelation der Daten (Einfache Regression). Für die Parameter Sommer-Sichttiefe (SST) und Gesamt-Phosphor während der Herbst-Vollzirkulation (P_{ges}) lautet die Beziehung: $SST = 0,069 + 151,25 / P_{ges}$ ($r = 0,756$). Sie wird durch die Kurve im Diagramm beschrieben. Von ihr weicht am weitesten der Plußsee ab, der bei einem hohen Phosphor-Gehalt von durchschnittlich $137 \mu\text{g/l}$ eine Sichttiefe von $2,96 \text{ m}$ erreicht. In diesem See sind wegen der besonders lang anhaltenden Schichtung die Phosphor-Gehalte im Sommer sehr gering (wegen Sedimentation) im Verhältnis zu den Werten während der Zirkulation (Vermischung mit Phosphor-reichem Tiefenwasser), daher: im Sommer große Sichttiefen und im Herbst hohe Phosphor-Werte.

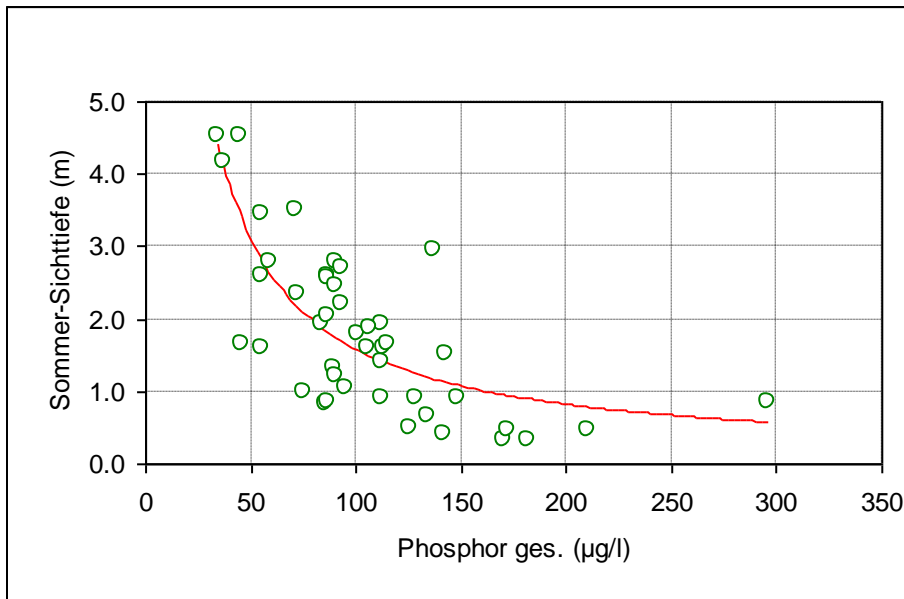


Abb. 25 Sommer-Sichttiefen (m) (Mittelwerte und Regression 1991-2010) in Abhängigkeit vom Gehalt an **Gesamt-Phosphor** ($\mu\text{g/l}$) während der Herbst-Zirkulation (Mittelwerte 1992-2010).

Das Diagramm zeigt auch, dass etwa ab $150 \mu\text{g/l}$ Phosphor eine weitere Erhöhung der Nährstoff-Werte kaum einen Einfluss auf die Sichttiefe hat, weil bei der dann vorhandenen hohen Phytoplankton-Dichte der Faktor Licht eine weitere Zunahme des Plankton begrenzt. Umgekehrt würde eine Verringerung der Phosphor-Konzentration von $300 \mu\text{g/l}$ auf $150 \mu\text{g/l}$ keine Zunahme der Sichttiefe bewirken, eine solche würde erst unterhalb von etwa $100 \mu\text{g/l}$ Phosphor einsetzen.

8. Literatur

Beneke, T. & Schwippert, W. (2001): WinSTAT[®] für Excel.

Hofmann, W. (1998): Die Seen im Vergleich. In: Kreis Plön (Hrsg.) : Seen-Beobachtung. 50 Gewässer aus dem Kreis Plön im Vergleich. Plön: 18-33.


Hofmann, W. (2002): Die Seen im Vergleich. In: Kreis Plön (Hrsg.): 10 Jahre Seen-Beobachtung im Kreis Plön 1991-2000. Plön: 22-50.

Lampert, W. & Sommer, U. (1983): Limnoökologie. – Thieme Verlag, Stuttgart.

Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (Hrsg.) (1998): Gewässerbewertung – stehende Gewässer. – Kulturbuch-Verlag, Berlin.

Mauersberger, R. (2006): Klassifikation der Seen für die Naturraumerkundung des nordostdeutschen Tieflandes. – Arch. Naturschutz und Landschaftsforschung: 51-90.

Reck-Mieth, E. (1998): Einführung in das Seen-Beobachtungsprogramm. In: Kreis Plön (Hrsg.) : Seen-Beobachtung. 50 Gewässer aus dem Kreis Plön im Vergleich. Plön: 12-17.



Reck-Mieth, E. (2002): Kurzdarstellung des Seen-Beobachtungsprogrammes mit Lageplan der beobachteten Gewässer. In: Kreis Plön (Hrsg.): 10 Jahre Seen-Beobachtung im Kreis Plön 1991-2000. Plön: 10-13.

Wetzel, R.G. (1975): Limnology. – W.B. Saunders Company, Philadelphia, London, Toronto.

9. Liste der untersuchten Seen

See	Abk.	Fläche (km ²)	max. Tiefe (m)	mittl. Tiefe (m)	Gewässer- system
Behler See	BEHL	3,1	42,5	10,6	Schwentine
Bothkamper See	BOTH	1,23	2,5	1,3	Eider
Dannauer See	DANN	0,19	1,3	0,8	Kossau
Dieksee	DIEK	3,86	38,1	14,0	Schwentine
Dobersdorfer See	DOBE	3,12	18,8	5,4	Hagener Au
Edebergsee	EDEB	0,08	9,7	5,2	Schwentine
Fuhlensee	FUHL	0,14	5,3	2,7	Schwentine
Görnitzer See	GÖRN	0,11	2,5	1,8	Schwentine
Grebiner See	GREB	0,29	25,3	8,3	Schwentine
Großer Binnensee	GBIN	4,8	3,0	1,9	Kossau
Gr. Madebrökensee	GMAD	0,07	10,8	6,2	Schwentine
Gr. Plöner See/ Plön	GPLP	17,6	58	13,7	Schwentine
Gr. Plöner S./ Ascheb.	GPLA	12,4	32	10,2	Schwentine
Heidensee	HEID	0,15	3,3	2,2	Schwentine
Höftsee	HÖFT	0,19	15,5	8,2	Schwentine
Holzsee	HOLZ	0,2	6,9	3,7	Schwentine
Honigsee	HONI	0,05	3,3	1,6	Schwentine
Kirchsee	KIRC	0,1	2,5	1,8	Schwentine
Kl. Madebrökensee	KMAD	0,04	2,0	1,3	Schwentine
Kl. Plöner See	KPLÖ	2,39	31,4	9,0	Schwentine
Kolksee	KOLK	0,03	9,7	4,1	Schwentine
Kronsee	KRON	0,23	7,3	3,4	Schwentine
Lanker See	LANK	3,8	20,5	3,6	Schwentine
Löptiner See	LÖPT	0,12	4,5	2,5	Schwentine
Passader See	PASS	2,73	10,7	4,9	Hagener Au
Plußsee	PLUS	0,14	28	9,4	Schwentine
Postsee	POST	2,76	9,1	3,3	Alte Schwentine
Rosensee	ROSE	0,38	6,0	3,3	Schwentine
Scharsee	SCAR	0,36	2,9	1,6	Schwentine
Schierensee/Grebin	SCIG	0,15	20,0	7,0	Schwentine
Schierensee/Wankd.	SCIW	0,27	5,5	3,6	Alte Schwentine
Schluensee	SCLU	1,27	45,0	16,3	Schwentine
Schöhsee	SCHÖ	0,78	29,4	10,9	Schwentine
Selenter See	SELE	22,39	35,8	13,2	Mühlenau
Stadtsee	STAD	0,07	7,6	4,1	Schwentine
Stocksee	STOC	2,11	30,2	12,3	Schwentine
Stolper See	STOL	1,4	14,6	6,9	Alte Schwentine
Suhrer See	SUHR	1,37	24,7	8,3	Schwentine
Trammer See	TRAM	1,63	33,4	11,1	Schwentine
Trenter See	TREH	0,13	3,0	1,5	Schwentine
Trentsee	TREN	0,09	6,3	4,8	Schwentine
Unt. Ausgrabensee	UNTA	0,05	6,0	3,3	Schwentine
Vierer See	VIER	1,32	18,8	7,7	Schwentine
Wielener See	WIEL	0,25	15,4	7,4	Schwentine