

# Nährstoffbilanz Neusiedler See

Mag. Dr. Georg Wolfram

DWS Hydro-Ökologie GmbH, Technisches Büro  
für Gewässerökologie und Landschaftsplanung  
Zentagasse 47, 1050 Wien

Univ.Prof. Dr. Alois Herzig

Nationalpark Neusiedler See – Seewinkel

**Abstract:** Der Neusiedler See ist mit über 300 km<sup>2</sup> der größte See Österreichs. Aus ökonomischer wie ökologischer Sicht ist eine gute Wasserqualität ein wesentliches Ziel der Wasserwirtschaft. Seit der Eutrophierungsphase in den 1970er und Anfang der 1980er Jahre haben sich die Nährstoff-Konzentrationen im Freiwasser deutlich verringert, erfuhren jedoch in den trockenen Jahren nach 2000 wieder eine Aufhöhung. Anhand von Stoffbilanzen für Chlorid, Calcium und Phosphor wurden die externen Einträge in den See für einen Zeitraum von 15 bis 18 Jahren analysiert. Dabei zeigte sich, dass die Ableitungen von Seewasser über den Einserkanal den Salzgehalt des Gewässers signifikant verändern. Die Datenanalyse erlaubt eine Abschätzung der Bedeutung des Schilfgürtels für Deposition und Rücklösung von Phosphor. Eine Detailanalyse zu den Teilfrachten im Einzugsgebiet der Wulka und anderer Zubringer belegt einen markanten Rückgang anthropogener Frachten von Phosphor und Stickstoff in den vergangenen knapp zwei Jahrzehnten.

**Key Words:** Neusiedler See, Schilfgürtel, Stoffbilanz, Phosphor, Nährstoffbudget

## 1 Einleitung

### 1.1 Der Neusiedler See – ein einzigartiges Gewässer

Der Neusiedler See ist mit einer Gesamtoberfläche von mehr als 300 km<sup>2</sup> der größte See Österreichs. Mehr als die Hälfte dieser Fläche nimmt ein bis zu 4 km breiter Schilfgürtel ein, sodass die offene Wasserfläche nur rd. 150 km<sup>2</sup> ausmacht. Diese beiden großen Teillebensräume sind nicht voneinander isoliert, auch wenn die äußere Schilfkante oft einer undurchdringlichen Wand von Röhricht gleicht. Vielmehr besteht vor allem in den seenahen Schilfbereichen infolge von Wind- einwirkung und Strömungen über Kanäle ein reger Wasseraustausch. Offener See und Schilfgürtel stehen also physikalisch-chemisch und biologisch in enger Wechselbeziehung zu einander.

Was den See abseits von seiner Größe und der Ausdehnung des Schilfgürtels in limnologischer Hinsicht so besonders macht, ist zunächst die sehr geringe Wassertiefe von weniger als 2 m (Tabelle 1). Aufgrund der großen Windangriffsfläche ist der See fast ganzjährig durchmischt und weist infolge der Aufwirbelung von Feinsedimenten eine beständige Trübe auf. An stürmischen Tagen beträgt die Sichttiefe nur wenige Zentimeter.

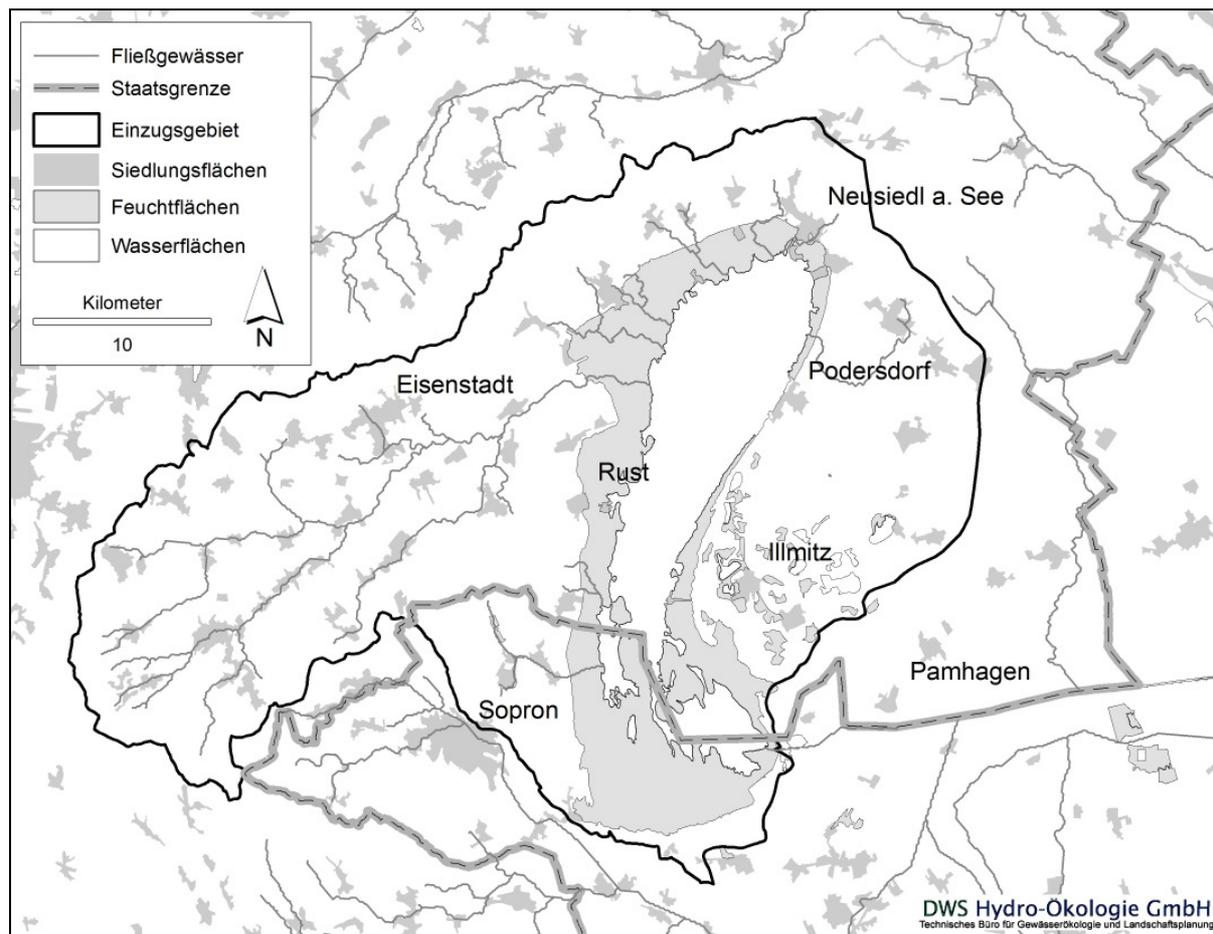


Abbildung 1: Einzugsgebiet des Neusiedler Sees.

In einer der trockensten Gegenden Österreichs gelegen, ist der See hydrologisch stark von Niederschlag und Verdunstung geprägt, während oberirdische Zuflüsse zur wenig zur Wasserbilanz beitragen (siehe weiter unten, Tabelle 2). Zudem besitzt der See keinen natürlichen Ausrinn. Erst über den 1909–1911 errichteten Einser- oder Hanság-Kanal kann Seewasser bei hohen Wasserständen nach Ungarn abgeleitet werden (Herzig 2001). In seiner ursprünglichen Charakteristik war der See jedoch – ähnlich wie die Salzlacken im östlich des Sees gelegenen Seewinkel – ein endorheisches System (Wolfram 2006).

Tabelle 1: Hydrographische und physikalisch-chemische/hydrochemische Kenndaten des Neusiedler Sees. Chemiedaten aus dem Zeitraum 1998–2009 von vier Messstellen im offenen See, Mittelwert (Minimum – Maximum).  
 Datenquelle: Biologische Station Neusiedler See (konsolidierter Datensatz).

<b>Morphometrische Kenndaten</b>	
Maximale Oberfläche (bei Pegel 116,0 m ü.A.)	315 km <sup>2</sup>
davon: offener See	48 %
Schilfgürtel	52 %
Einzugsgebiet	1.120 km <sup>2</sup>
Mittlerer Wasserspiegel	115,45 m ü.A.
Maximale Wassertiefe	1,8 m
Mittlere Wassertiefe	1,2 m
Maximales Volumen (bei Pegel 116,0 m ü.A.)	367,5 × 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Volumen bei Pegel 115,0 m ü.A.	114,9 × 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
<b>Physikal.-chemische / hydrochemische Kenndaten</b>	
elektrische Leitfähigkeit	2.249 (1.300-3.200) μS cm <sup>-1</sup>
pH-Wert	8,7 (8,0–9,1) –log[H <sup>+</sup> ]
Sauerstoff	10,3 (5,8–17,2) mg L <sup>-1</sup>
Wassertemperatur	14,7 (0,2–28,7) °C
Calcium Ca <sup>2+</sup>	31 (3–119) mg L <sup>-1</sup>
Magnesium Mg <sup>2+</sup>	144 (17–199) mg L <sup>-1</sup>
Natrium Na <sup>+</sup>	363 (207–684) mg L <sup>-1</sup>
Kalium K <sup>+</sup>	39 (15–67) mg L <sup>-1</sup>
Karbonat CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	39 (3–97) mg L <sup>-1</sup>
Hydrogenkarbonat HCO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	610 (346–1139) mg L <sup>-1</sup>
Chlorid	253 (141–406) mg L <sup>-1</sup>
Sulfat-S	163 (90–270) mg L <sup>-1</sup>
Ammonium-N NH <sub>4</sub> -N	33 (1–377) μg L <sup>-1</sup>
Nitrat-N NO <sub>3</sub> -N	157 (2–941) μg L <sup>-1</sup>
Gesamtphosphor	73 (14–552) μg L <sup>-1</sup>

Das semiaride Klima, die genannten hydrologischen Eigenheiten, salzhältige, tertiäre Meeresablagerungen und tektonische Bruchlinien (Verbindung zum Tiefengrundwasser) sind schließlich der Grund für den erhöhten Salzgehalt des Neusiedler Sees (Wolfram, 2006). Mit einer elektrischen Leitfähigkeit von rd. 2000 μS cm<sup>-1</sup> und einer Salinität von rd. 2,5‰ liegt das Gewässer zwar noch im oligohalinen Bereich, hebt sich aber doch chemisch deutlich von anderen Seen

Österreichs ab. Dominierendes Salz ist Natrium-Hydrogenkarbonat; der Neusiedler See ist demnach als Sodagewässer zu bezeichnen.

Abseits von hydromorphologischen und hydrochemischen Besonderheiten sind der Neusiedler See und sein Umland jedoch vor allem ein einzigartiges Ökosystem, das einer Vielzahl seltener und gefährdeter Tier- und Pflanzenarten Lebensraum bietet und sogar eine Reihe endemischer Formen beherbergt. Bereits früh wurde die naturschutzfachliche Bedeutung des Gebiets erkannt und gewürdigt. Der Neusiedler See und der Seewinkel sind heute Weltkulturerbe, Ramsar-Gebiet, Naturschutzgebiet, Europa-Schutzgebiet (Natura-2000) nach der FFH-Richtlinie, Vogelschutzgebiet nach der VS-Richtlinie und Nationalpark. Nicht zuletzt aufgrund dieser vielfältigen Auszeichnungen kommt der Region für Tourismus und Freizeitnutzung eine überragende Bedeutung zu.

Entsprechend groß ist die Verantwortung für den Schutz des Gewässers und im Besonderen für eine gute Wasserqualität. Damit ist in dieser Arbeit nicht der hygienisch-mikrobiologische Aspekt gemeint, sondern die Nährstoffseite bzw. die Produktivität des Gewässers – die Trophie.

## 1.2 Langzeitentwicklung der Nährstoffsituation im Neusiedler See

Doch was bedeutet Trophie eigentlich in einem flachen, polymiktischen See mit hoher anorganischer Trübe? Es ist evident, dass Licht einer der Schlüsselfaktoren im offenen See ist und für planktische Algen wachstumslimitierend. Dennoch wird die Algenmenge im See auch durch die Nährstoffverfügbarkeit gesteuert, wobei sowohl Phosphor als auch Stickstoff im Neusiedler See limitierende Faktoren werden können.

Phosphor ist in gelöster Form zeitweise nur in niedrigen Konzentrationen vorhanden, während der größte Anteil des Gesamtphosphors an Schwebstoffe gebunden und damit nur eingeschränkt verfügbar ist. Die Schwebstoffe stellen eine enorme Oberfläche dar und spielen eine wichtige Rolle im Nährstoffbudget im Sees, der im Sinne von Naumann (1932) entsprechend als „argillotroph“ bezeichnet werden kann. Stickstoff wiederum wird in hohem Ausmaß im Schilfgürtel denitrifiziert, sodass die Nitrat-Konzentrationen im Neusiedler See meist niedrig sind.

Erhöhte Nährstoffkonzentrationen brachte die Eutrophierung des Neusiedler Sees in den 1970er Jahren. Die höchsten Jahresmittelwerte von Gesamtphosphor lagen damals bei  $160 \mu\text{g L}^{-1}$ . Auch wenn die maximale Chlorophyll-a-Konzentration im Jahresmittel aufgrund der Lichtlimitation im offenen See nur rund  $14 \mu\text{g L}^{-1}$  betrug, so kam es doch in windberuhigten Buchten und Hafenanlagen immer wieder zu massiven Algenblüten (Herzig 1990).

In den folgenden Jahren wurden große Anstrengungen zur Seenreinigung unternommen, vor allem durch den Ausbau der Kläranlagen im Einzugsgebiet. Bis Ende der 1990er Jahre sanken die TP-Konzentrationen auf rund  $50 \mu\text{g L}^{-1}$ , die Chlorophyll-a-Konzentrationen im offenen See auf unter  $5 \mu\text{g L}^{-1}$  im Jahresmittel.

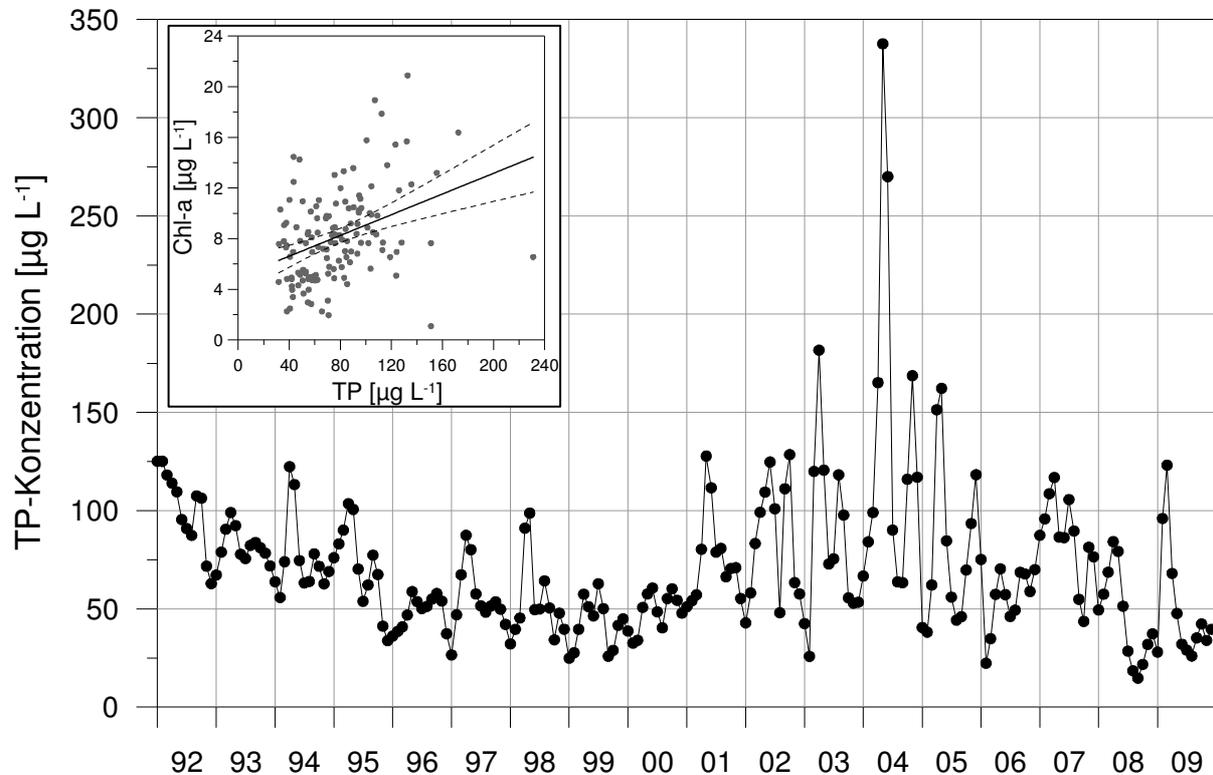


Abbildung 2: Gesamtposphor-Konzentration (Monatsmittel) im offenen See des Neusiedler Sees zwischen 1992 und 2009. Im Fenster: Korrelation zwischen den Gesamtposphor- und den Chlorophyll-a-Jahresmittelwerten im offenen See zwischen 1987 und 2009.

Nach den Hochwasserjahren Mitte der 1990er Jahre kam es jedoch mit sinkendem Wasserstand zu einem neuerlichen Anstieg der TP-Konzentrationen. Im Jahr 2004, nach extrem niedrigen Wasserständen im Herbst 2003, wurden schließlich monatliche Mittelwerte für Gesamtposphor von mehr als  $300 \mu\text{g L}^{-1}$  erreicht, das Jahresmittel kletterte auf knapp  $140 \mu\text{g L}^{-1}$ , und auch für Chlorophyll-a wurden wieder Konzentrationen von über  $17 \mu\text{g L}^{-1}$  im Jahresmittel gemessen. Erst mit steigendem Wasserstand (vgl. Abbildung 3) sanken die Nährstoff- und Chlorophyll-a-Konzentrationen wieder auf das ursprüngliche Niveau.

Aus dieser Darstellung ist ein Zusammenhang zwischen dem Wasserstand und dem Trophieniveau evident; weniger klar sind die genauen Ursachen. Eine erste Erklärung wäre die verstärkte Aufwirbelung von Feinsedimenten aufgrund des niedrigeren Wasserstands. Dies könnte eine Erhöhung des partikulären und

damit des Gesamtphosphors nach sich gezogen haben. Das limnologische Monitoring der Biologischen Station Illmitz lässt jedoch keine Änderung der Schwebstoffkonzentrationen oder der Sichttiefe im See innerhalb der letzten Jahre erkennen, die sich mit wechselnden Wasserständen erklären ließe. Es waren demnach offensichtlich andere Prozesse, welche das Nährstoffdargebot und die Produktivität des Sees prägten.

### 1.3 Fragestellung

Um den Ursachen dieser Langzeitveränderungen auf den Grund zu gehen, wurde die DWS Hydro-Ökologie mit der Erstellung einer Stoffbilanz für den Neusiedler See beauftragt (Wolfram *et al.* 2007; Zessner *et al.* 2012). Sie sollte vorrangig folgende Fragen klären:

- Wie haben sich die Phosphoreinträge in letzten zwei Jahrzehnten verändert?
- Welche Einträge in den See waren früher bzw. sind heute vorherrschend und prägen das trophische Niveau?
- Gibt es neben den externen Eintragungspfaden auch seeinterne Prozesse, die die Nährstoffkonzentration und das Trophieniveau des Neusiedler Sees maßgeblich mitbestimmen?

## 2 Methodik

### 2.1 Berechnungsansatz

Um ein Phosphorbudget für den Neusiedler See anhand empirischer Daten zu erstellen, wurde zunächst eine Stoffbilanz für **Chlorid** erstellt. Sie dient zum einen dazu, die zugrundeliegende hydrologische Bilanz zu validieren. Zum anderen erlaubt die Chloridbilanz eine Prüfung der Robustheit der einzelnen Eintragungspfade, welche in verschiedenen Szenarien je nach Datensicherheit und Plausibilität variiert wurden. Chlorid eignet sich dafür, da die Konzentrationen nur unwesentlich über biologische Prozesse verändert werden. Dies ermöglicht eine einfache Input-Output-Berechnung des Seeinhalts an Chlorid (zumindest für die Wassersäule, wie weiter unten näher ausgeführt wird), in weiterer Folge sogar eine Prognose der weiteren Entwicklung.

In einem zweiten Ansatz wurde ein vergleichbares Stoffbudget für **Calcium** berechnet, dessen Konzentration in der Wassersäule jedoch über Sedimentation und Rücklösung viel stärker seeinternen Veränderungen unterworfen ist. Schließlich erfolgte auch für **Phosphor** eine vergleichbare Abschätzung der Eintragungspfade und Frachten, wobei wie beim Calcium mit wesentlichen see-

internen Veränderungen zu rechnen war. Eine einfach Input-Output-Rechnung und eine Berechnung oder Prognose der weiteren Entwicklung sind also für Calcium und Phosphor ungleich schwieriger.

Die Stoffbilanzen wurden nach folgender Gleichung berechnet:

$$dX = X_{WD} + X_{DD} + X_T + X_{WWTP} + X_{GW} - X_H$$

$dX$  Veränderung des Seeinhalts von X (Chlorid, Calcium bzw. Gesamtphosphor in der Wassersäule) innerhalb 1 Monats

$X_{WD}$  Monatliche Fracht aus nasser Deposition (Niederschlag)

$X_{DD}$  Monatliche Fracht aus trockener Deposition („Staubfracht“)

$X_T$  Monatliche Fracht über oberflächige Zubringer (Wulka, Golser Kanal, Kroisbach/rákos-patak, andere kleinere Bäche und Gräben)

$X_{WWTP}$  Monatliche Fracht aus Kläranlagen, welche direkt in den See münden

$X_{GW}$  Monatliche Fracht über das Grundwasser (Zu-/Abfluss)

$X_H$  Monatliche Fracht im Ausrinn des Einser- oder Hanság-Kanals

## 2.2 Datenquellen

Grundlage der Stoffbilanz ist die hydrologische Bilanz des Sees nach G. Kubu in Zessner *et al.* (2012) (Tabelle 2). Sie wurde nur geringfügig modifiziert, indem die Einträge der direkt in den See mündenden Kläranlagen im Gegensatz zur Bilanz von Kubu separat ausgewiesen sind. Sie tragen zumindest in früheren Jahren nicht unbeträchtlich auch zur hydrologischen Bilanz bei.

Die chemischen Daten vom Neusiedler See stammen aus dem Monitoringprogramm der Biologischen Station Illmitz, mit teils wöchentlichen, meist aber monatliche Analysen. Für die Berechnungen wurden nur die Messstellen im offenen See berücksichtigt.

Tabelle 2: Wasserbilanz für den Zeitraum 1965–2008. Datenquelle: G. Kubu in Zessner *et al.* (2012).

Bilanzglied		
Niederschlag	570 mm	80%
Oberflächiger Zufluss	145 mm	20%
Grundwasser	?	?
Verdunstung	-646 mm	-90%
Abfluss	-74 mm	-10%
Bilanzfehler	-5 mm	
mittlere Wasserfläche	246 km <sup>2</sup>	

Messwerte aus der Wulka liegen für Chlorid und Gesamtphosphor größtenteils mit Tagesmittelwerten vor. Monatliche Messungen wurden im Golser Kanal durchgeführt; aus dem Kroisbach liegen teils monatliche, teils quartalsmäßig durchgeführte Analysen vor. Für die Abschätzung der Abfrachten aus den Kläranlagen konnte für einige Jahre auf Tagesmessungen, für andere auf Monatsmittelwerte zurückgegriffen werden. Die Daten aus den Fließgewässern und Kläranlagen wurden vom Amt der Bgld. Landesregierung (Gewässer-aufsicht Wulkaprodersdorf) zur Verfügung gestellt.

Chlorid- und Calcium-Konzentrationen im Niederschlagswasser stammen von der meteorologischen Messstation Illmitz (<http://www.nilu.no/projects/ccc/>). Für Phosphor wurden die Abschätzungen aus AGN (1984) übernommen (mittlere Phosphor-Konzentration:  $22 \mu\text{g L}^{-1}$ ). Auch für die trockene Deposition wurden mangels neuerer Daten die Annahmen der AGN-Studie aus den 1980er Jahren übernommen.

Die größte Unsicherheit besteht hinsichtlich der Konzentrationen und Frachten im Grundwasser. Auf Grundlage von spärlichen Messungen im Seewinkel wurden nach Experteneinschätzung folgende (konstante) mittlere Konzentrationen angenommen: Chlorid =  $60 \text{ mg L}^{-1}$ , Calcium =  $80 \text{ mg L}^{-1}$ , Gesamtphosphor =  $100 \mu\text{g L}^{-1}$ .

Die Grundlage für die Berechnung der Frachten im Ausrinn des Einserkanals sind die Konzentrationen im Südteil des Sees, die infolge der Evapotranspiration bei Chlorid um  $8,2 \pm 0,7\%$  (arithmetisches Mittel  $\pm 95\%$ -Konfidenzintervall) höher sind als im Mittel für den gesamten See. Die Calcium-Konzentrationen hingegen sind im Südteil um  $4,7 \pm 1,9\%$ , die Gesamtphosphor-Konzentrationen um  $7,9 \pm 5,9\%$  niedriger als im Mittel für den gesamten See.

Aus den umfangreichen Rohdaten wurde ein konsolidierter Datensatz mit Mittelwerten und Anfangskonzentration für jeden Monat zwischen 1993 und 2007 erstellt (Chlorid: 1992–2009). Datenlücken wurden durch Interpolation und Korrelation verschiedener Parameter ergänzt.

Eine Detailanalyse der diffusen und punktförmigen Quellen wurde für den Zeitraum 1992–2005 durchgeführt. Die Punktquellen wurden aus den Kläranlagenabläufen berechnet, das sind für das Einzugsgebiet der Wulka die ARA Wulkatal/Wulkaprodersdorf, Forchtenstein (bis 2003), Wiesen (bis 2003), Eisbachtal/Eisenstadt und RHV „Neusiedler See Westufer“ (ab 2000). Die Einträge aus diffusen Quellen ergeben sich aus der Differenz der Immission im Unterlauf der Wulka vor Einmündung in den Neusiedler See (Höhe Schützen/Geb.) und der Summe der Punktquellen (excl. RHV West).

## 3 Stoffbilanz für Chlorid und Calcium

### 3.1 Chlorid

Die Langzeitschwankungen, aber auch die saisonale Schwankungen der mittleren monatlichen Chlorid-Konzentration im offenen See korrelieren deutlich mit den Seespiegelschwankungen (Abbildung 3: oben und Mitte).

Der Seeinhalt (an gelöstem Chlorid) zeigt zunächst eine stetige Aufkonzentration in Zeiten niedrigerer Wasserstände (1992–1994, 2001–2008) und massive Verluste an Salz infolge von Ableitungen über den Einserkanal (1995–2000, Abbildung 4 oben). Daneben gibt es aber auch für den Seeinhalt deutliche saisonale Schwankungen (Abbildung 3 unten). Die periodischen Schwankungen der Chlorid-Konzentration sind demnach nur teilweise durch Verdünnung und Aufkonzentration infolge der Änderung des Seevolumens erklärbar. Das wird deutlich in der Darstellung des „Bilanzfehlers“, also der Defizite und Überschüsse von Chlorid, die nicht durch externe Frachten erklärbar sind. Sie lassen ein klares saisonales Muster erkennen (Abbildung 4 unten).

Ausschlaggebend für dieses Phänomen sind die enormen Flächen, die bei sinkendem Wasserstand im äußeren Schilfgürtelbereich trockenfallen und bei steigendem Wasserstand im Winter und zeitigen Frühjahr wieder überflutet werden. Wie von den Salzlacken im Seewinkel bekannt, kommt es auch im Neusiedler See zu Ausfällungen und Rücklösungen von Chlorid. Ein Beleg dafür ist die Korrelation zwischen der monatlichen Änderung der Seefläche und den monatlichen Defiziten bzw. Überschüssen im Chlorid-Seeinhalt in der Wassersäule ( $r=0,38$ ). Eine augenscheinliche Bestätigung sind auch die ausgedehnten weißen Salzflächen, die im Spätsommer in den vorseeischen Wiesen und randlichen Schilfgürtelbereichen zu sehen sind.

Berücksichtigt man die saisonalen Ausfällungen und Rücklösungen von Chlorid in der Stoffbilanz, so ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messwerten und Bilanzmodell (jeweils als Monatsmittelwert des Seeinhalts) gegeben ( $r = 0,93$ ; Abbildung 3 unten). Lediglich in Zeiten massiver Ausleitungen von Seewasser ist aufgrund offensichtlich unsicherer Angaben zu den ausgeleiteten Mengen eine größere Abweichung gegeben (in der Abbildung nicht dargestellt).

Insgesamt ergibt die Stoffbilanz für Chlorid erwartungsgemäß, dass die externen Einträge durch oberirdische Zuflüsse (inkl. der Kläranlagen) mit 2742 t pro Jahr (Mittelwert für den Zeitraum 1992–2009) die Haupteinträge liefern (89,4%), während nasse (80 t/a, 2,6%) und trockene Deposition (19 t/a, 0,6%), aber auch der Grundwasserzustrom (226 t/a, 7,4%) quantitativ unbedeutend sind. Bemerkenswert sind die Auswirkungen der Ableitungen von Seewasser, welche

über den gesamten Zeitraum einen mittleren jährlichen Verlust von 4.043 t Chlorid bewirkten und eine bis heute erkennbare Aussüßung des Neusiedler Sees nach sich zogen.

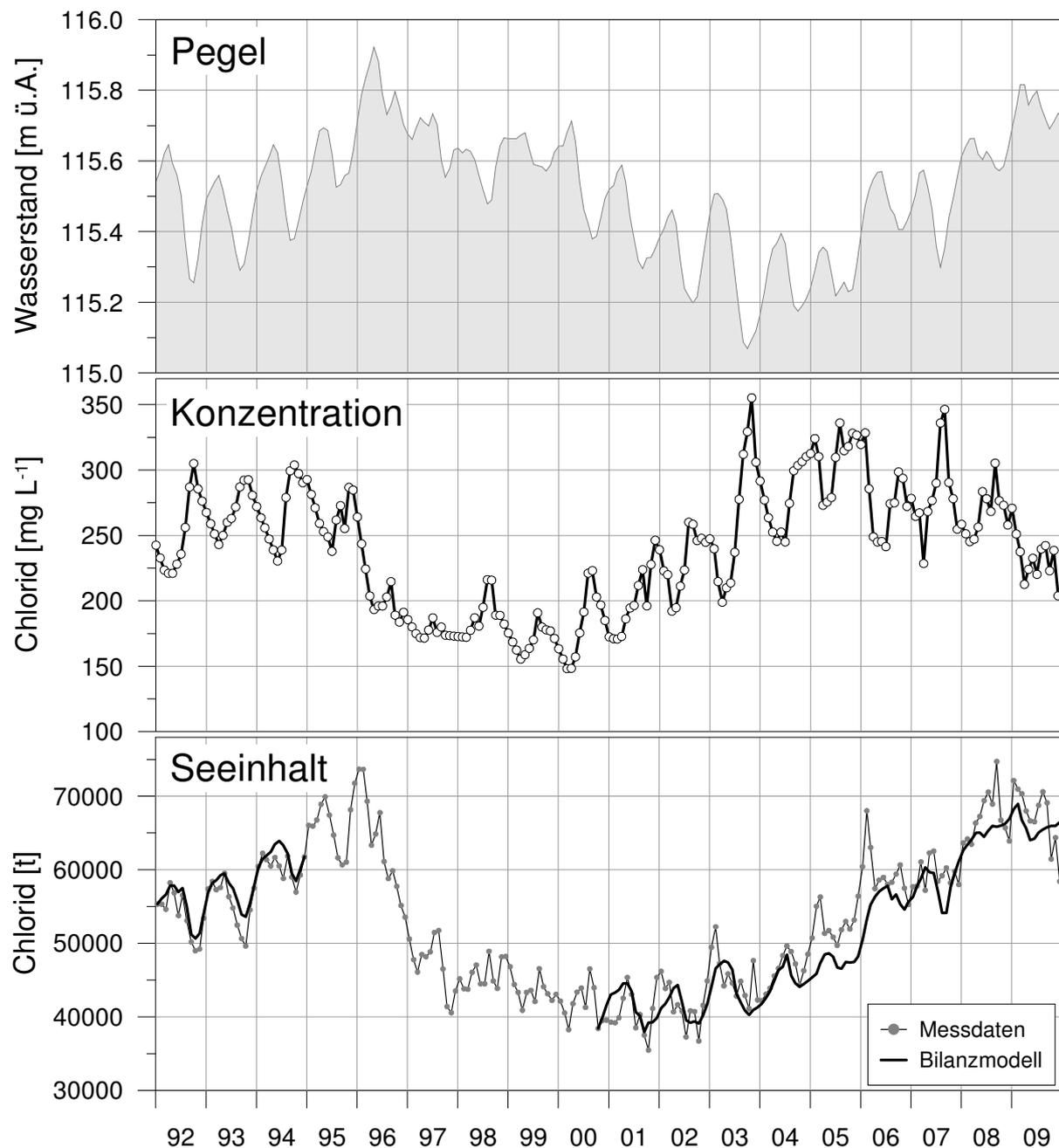


Abbildung 3: Wasserstand (Ruhewasserspiegel), Chlorid-Konzentration und Chlorid-Seeinhalt (jeweils als Monatsmittel) im Neusiedler Sees zwischen 1992 und 2009. In der untersten Grafik ist der aus dem Bilanzmodell errechnete Seeinhalt den (konsolidierten) Messdaten für die Jahre 1992–1994 und 2001–2009 gegenübergestellt.

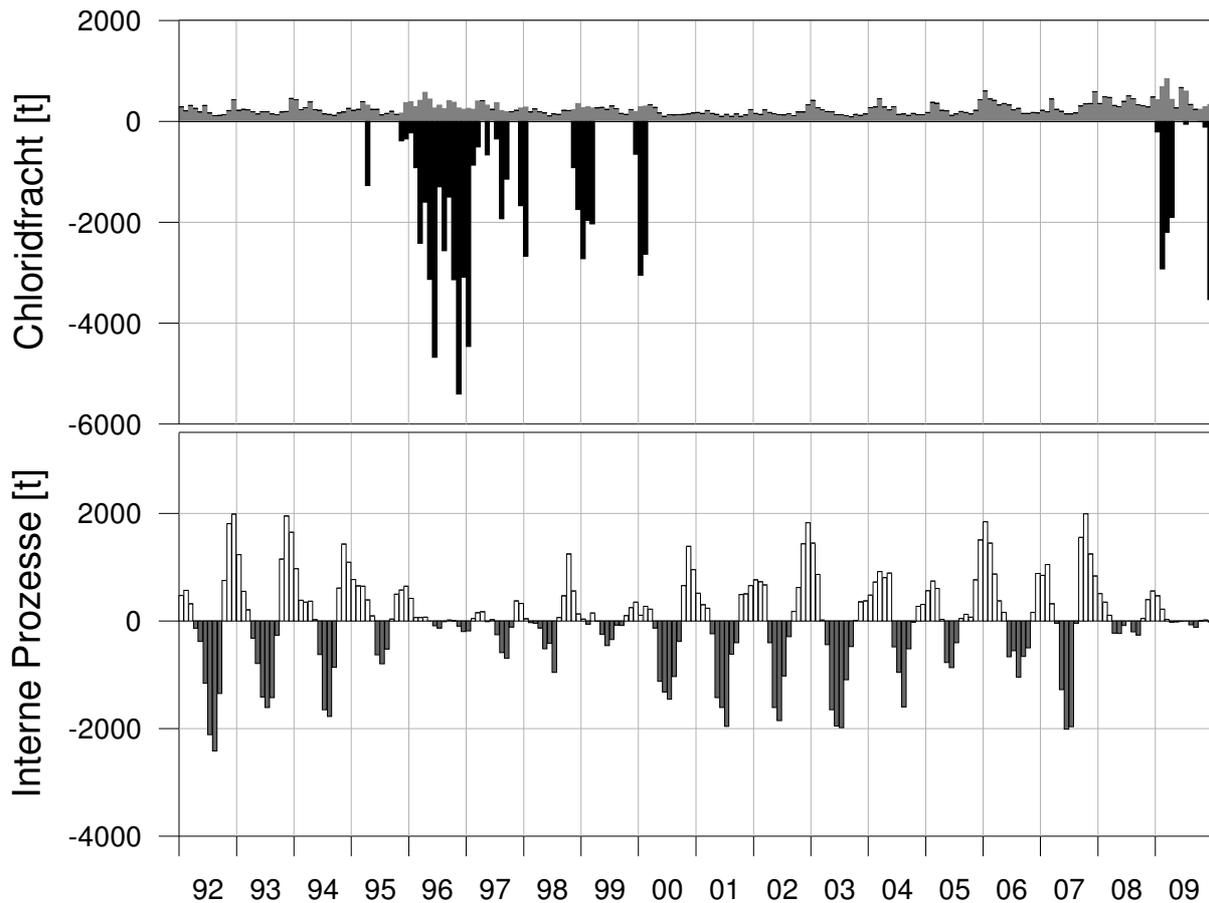


Abbildung 4: Monatliche externe Chloridfracht (Zubringer, Niederschlag, Abfluss) und saisonale, interne Veränderungen des Seeinhalts an gelöstem Chlorid (Ausfällung, Rücklösung; als gleitendes Mittel über 3 Monate) im Neusiedler See zwischen 1992 und 2009.

Die direkte Gegenüberstellung des Seevolumens und der Chlorid-Konzentration in Abbildung 5 verdeutlicht diese Entwicklung. Während die saisonalen Schwankungen der Chlorid-Konzentration durch die Volumensänderungen des Sees und die damit bedingte Aufkonzentration bzw. Verdünnung erklärbar ist, lassen sich in dieser Darstellung sowohl die Salzverluste infolge der Ableitung über den Einserkanal als auch die Aufkonzentration der Jahre 2000 bis 2008 gut nachvollziehen.

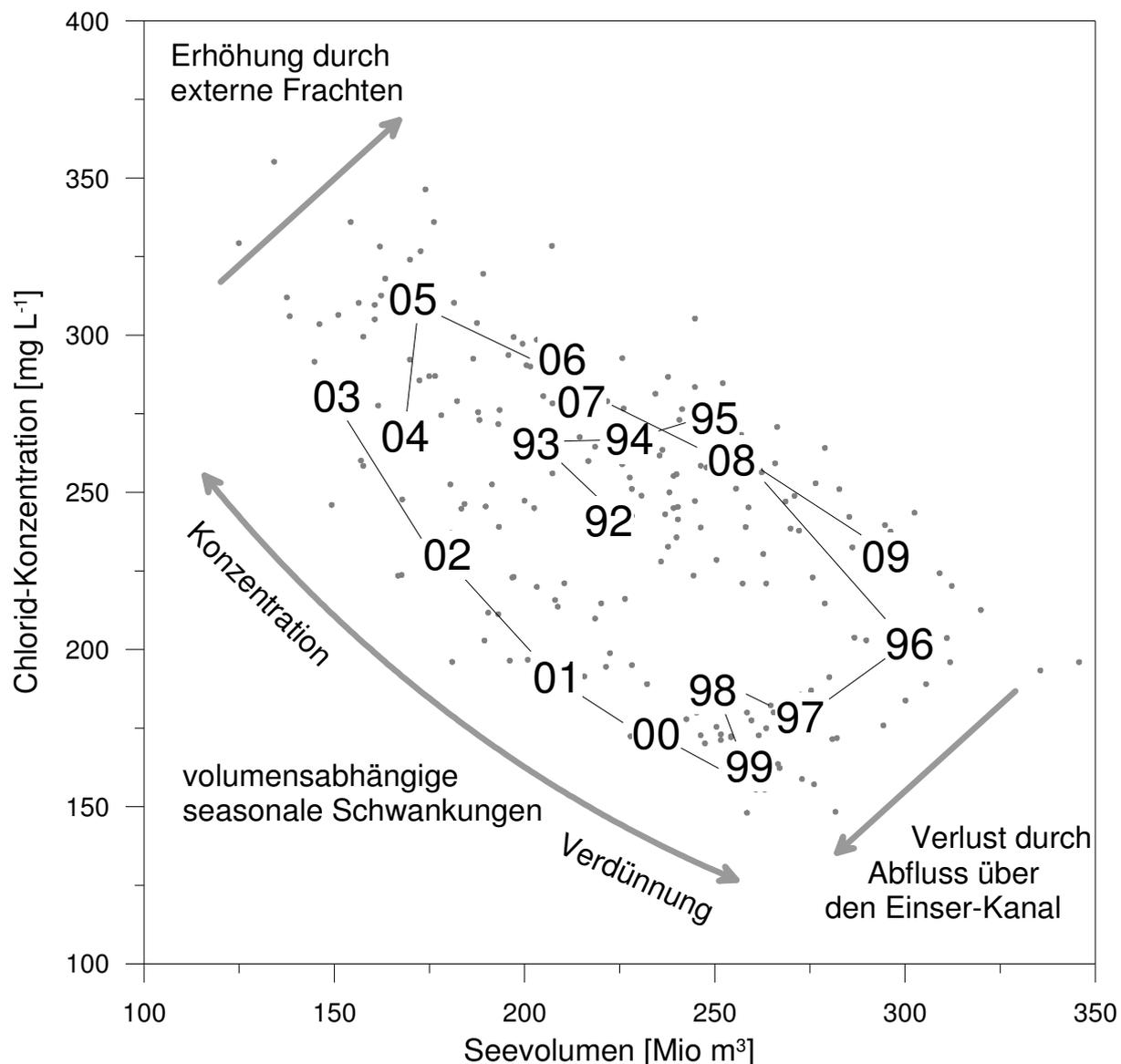


Abbildung 5: Beziehung zwischen dem Seevolumen und der Chlorid-Konzentration im Neusiedler See zwischen 1992 und 2009. Jeder Punkt entspricht einem Monatsmittelwert. Die Pfeile zeigen die Veränderungen infolge von volumensabhängiger Konzentration und Verdünnung bzw. von Ein- und Austrägen an.

### 3.2 Calcium

Ein gänzlich anderes Bild zeigt die Bilanz für Calcium. Hier überwiegen klar die Einträge gegenüber den Austrägen, selbst während des Hochwasserjahres 1996 (Abbildung 6 oben). Der jährliche Überschuss führt hier jedoch – im Gegensatz zum Chlorid – zu keiner Erhöhung des Seehalts von gelöstem Calcium (Abbildung 6 Mitte), wie es sich aus dem einfachen Bilanzmodell ergäbe. Der Grund dafür liegt in der Ausfällung von Calcit und Sedimentation im Schilfgürtel oder in windgeschützten Buchten.

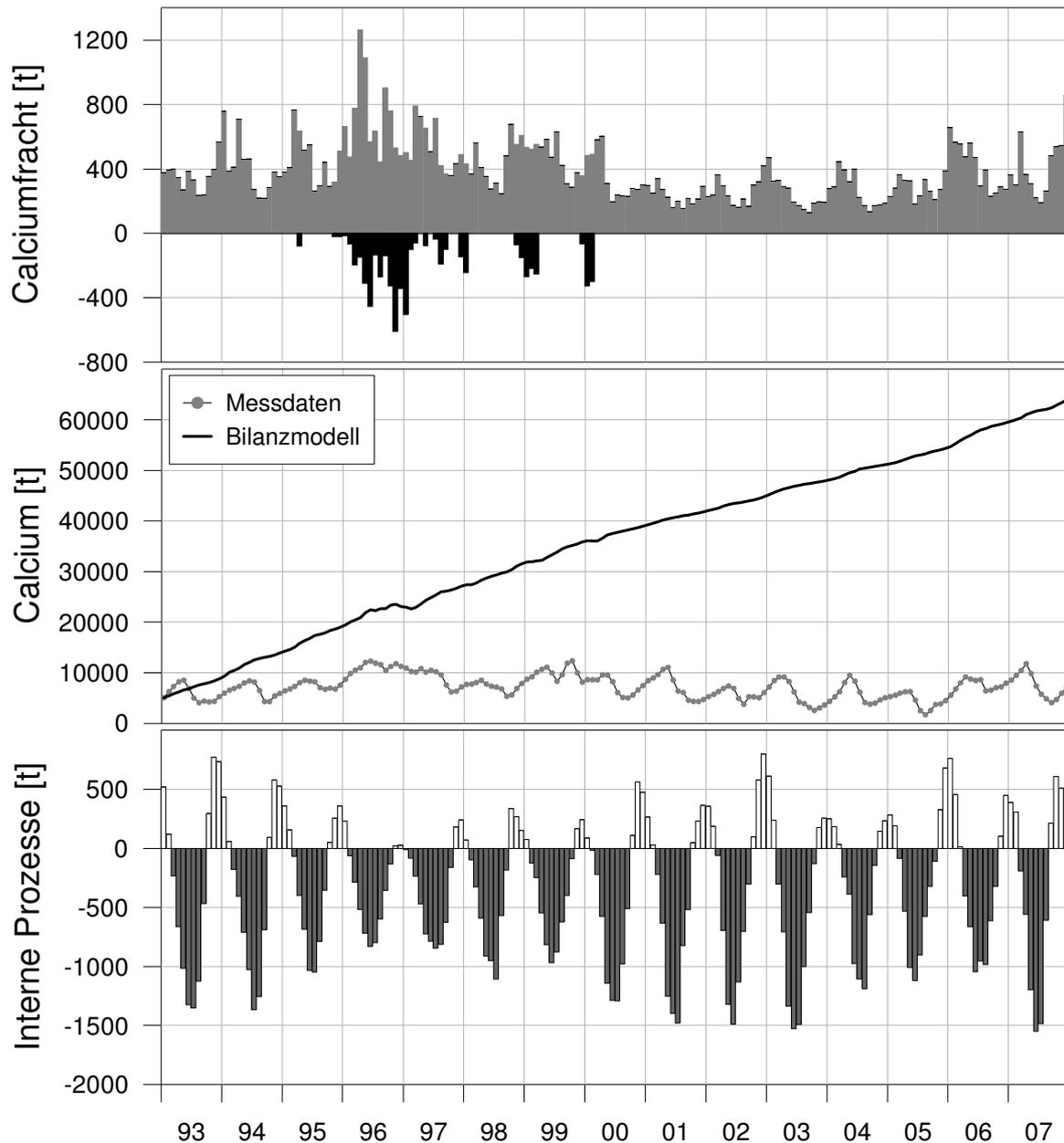


Abbildung 6: Monatliche externe Calciumfracht (Zubringer, Niederschlag, Abfluss) und saisonale, interne Veränderungen des Seeinhalts an gelöstem Calcium (Ausfällung, Rücklösung; als gleitendes Mittel über 3 Monate) im Neusiedler See zwischen 1993 und 2007.

Die Sedimentation überwiegt jedoch nur während der warmen Jahreszeit bei fallenden Wasserständen. Im Winter, bei steigendem Wasserstand und niedrigen Temperaturen, steigt der Seeinhalt an gelöstem Calcium an, und zwar in einem größeren Ausmaß, als dies die externen Frachten nahelegen. Offensichtlich kommt es in der kalten Jahreszeit unter Eis und bei geänderten pH-Werten zu einer Rücklösung von  $\text{CaCO}_3$ , welches in dissoziierter Form die Calcium-Konzentration im Freiwasser ansteigen lässt.

### 3.3 Phosphoreinträge in den Neusiedler See

Die externen Frachten von Phosphor in den Neusiedler See erfuhren in den letzten knapp 20 Jahren einen deutlichen Rückgang. Für 1982/83 ermittelten Malissa *et al.* (1984) und Stalzer *et al.* (1984) für den österreichischen Seeteil einen Jahreseintrag von Gesamtphosphor von rund 80 t, Anfang der 1990er Jahre betragen die externen Frachten (inkl. dem Einzugsgebiet des Kroisbaches in Ungarn) weniger als 30 t pro Jahr, sieht man von einem Spitzenwert im Jahr 1996 ab. In den trockenen Jahren nach 2000 schließlich verringerte sich die externe Jahresfracht sogar auf 10–13 t, um danach im Zuge erhöhter Wasserführung der Wulka und entsprechend erhöhten Frachten über diesen Eintragspfad wieder etwas zuzunehmen.

Der Zusammenhang zwischen externen Frachten und der Konzentration im See ist für den Zeitraum zwischen 1982 und 2000 gut nachvollziehbar (Abbildung 7). Die Diskrepanz in den Jahren 2002 bis 2006 kann als Indiz dafür gewertet werden, dass der Anstieg der Nährstoff-Konzentrationen im See nicht eine Folge erhöhter externer Einträge ist.

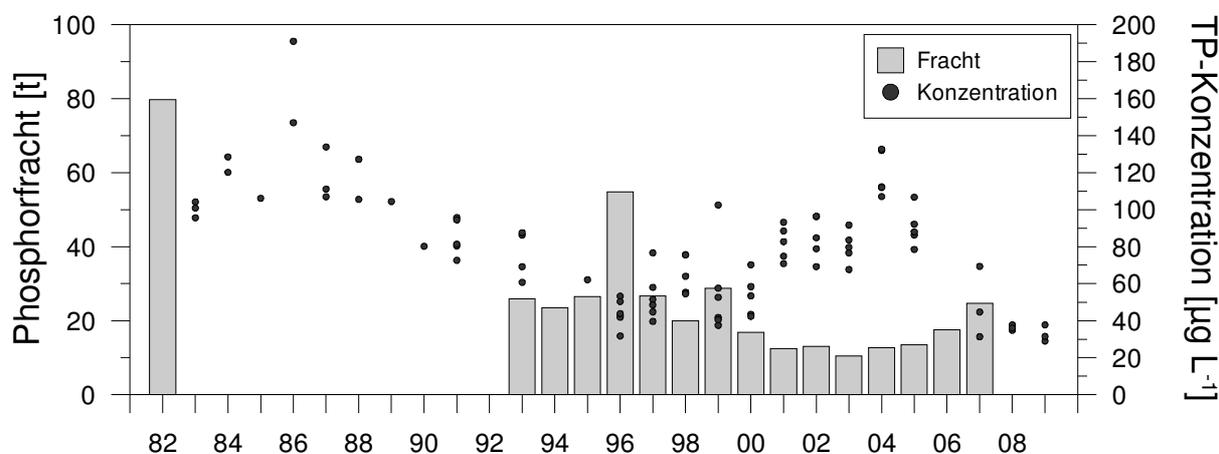


Abbildung 7: Externe Phosphorfracht und mittlere Gesamtphosphor-Konzentration im Neusiedler See (als Jahresmittel an verschiedenen Messstellen im offenen See) zwischen 1982 und 2009.

Die Detailanalyse der Eintragspfade für die Jahre 1992–2005 ist in Abbildung 8 im Vergleich zu den Berechnungen von Malissa *et al.* (1984) und Stalzer *et al.* (1984) für die Saison 1982/83 dargestellt. Demnach ist der Anteil der Phosphorfracht aus diffusen Quellen aus dem Wulka-Einzugsgebiet sowohl absolut als auch relativ betrachtet deutlich zurückgegangen. Etwas geringer war der Rückgang der Frachten aus punktförmigen Quellen (Kläranlagen), weshalb auch deren relativer Anteil an Bedeutung gewonnen hat. Externe Frachten aus

atmosphärischer Deposition sind absolut betrachtet in der gleichen Größenordnung geblieben, ihr relativer Anteil an der Gesamtfracht ist jedoch ebenso gestiegen. Insgesamt ist der anthropogene Beitrag zum Phosphoreintrag in den Neusiedler See sowohl in absoluten Zahlen als auch im relativen Anteil in den letzten rd. 25 Jahren signifikant zurückgegangen. Einen Beitrag zu dieser Entwicklung lieferte die Inbetriebnahme der Hauptkläranlage des RHV „Neusiedler See Westufer“ im Jahr 2000, die mehrere kleinere Kläranlagen, die zuvor direkt in den See mündeten, ablöste.

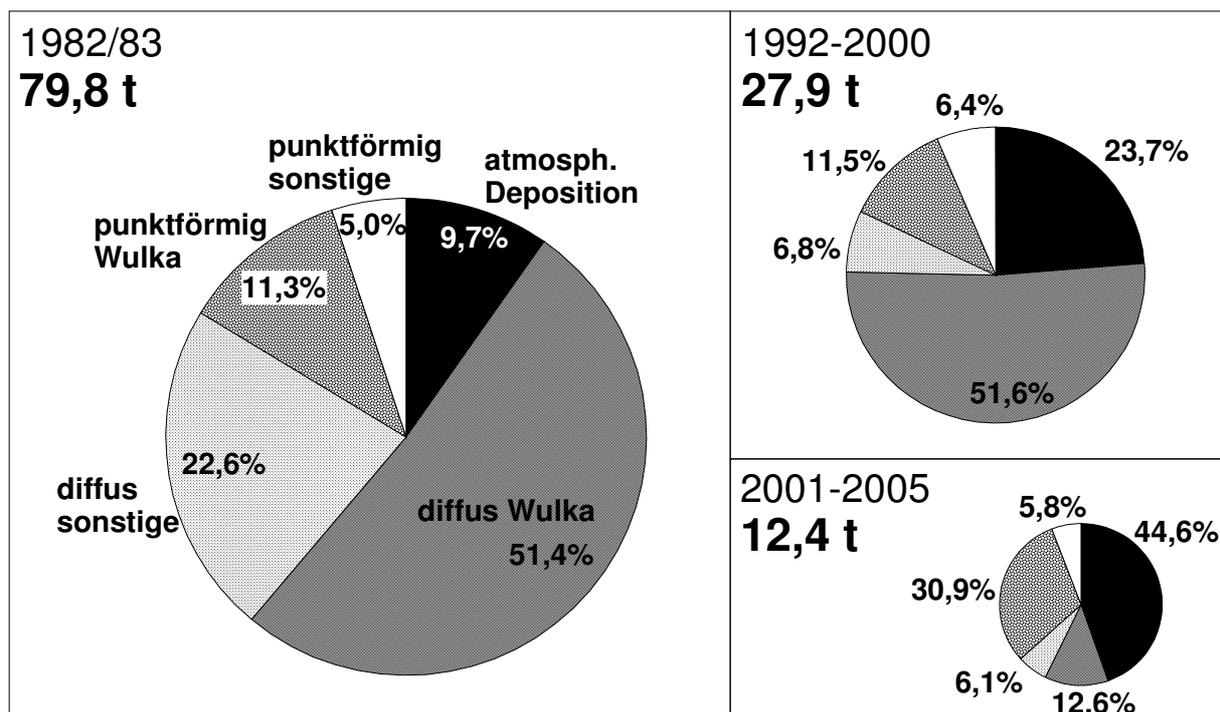


Abbildung 8: Jährliche externe Phosphorfrachten in den Neusiedler See und relative Anteile diffuser und punktförmiger Einträge aus dem Wolka-Einzugsgebiet bzw. anderen Zubringern und Quellen (Golser Kanal, Kroisbach, Kläranlagen) sowie atmosphärische Einträge aus nasser und trockener Deposition in der Saison 1982/83 und in den Zeiträumen 1992–2000 und 2001–2005 (jeweils als Jahresmittel).

### 3.4 Stickstoffeinträge in den Neusiedler See

Für den österreichischen Teil des Seeinzugsgebietes ermittelte Stalzer (1990) eine Gesamtfracht externer Einträge an anorganischem Stickstoff (Nitrat, Ammonium) von rund 885 t. Auch hier konnten die Frachten im Laufe der Jahre deutlich verringert werden, zunächst auf 559 t im Jahresmittel für den Zeitraum 1992–2000 und weiter auf 250 t im Zeitraum 2001–2005. Im Gegensatz zum Phosphor überwiegen die Einträge aus der atmosphärischen Deposition im

gesamten Zeitraum und nahmen in ihrem relativen Anteil sogar zu. Dies ist auf die deutliche Reduktion der Einträge aus diffusen, aber auch punktförmigen Quellen im Einzugsgebiet der Wulka und anderer Zubringer zurückzuführen, welche in Summe von über 500 t um 85% auf unter 90 t abnahmen. Wie beim Gesamtphosphor dokumentiert dies den sinkenden Anteil anthropogener Nährstoffeinträge in den Neusiedler See an der Gesamtfracht im Zeitraum 1982 bis 2005.

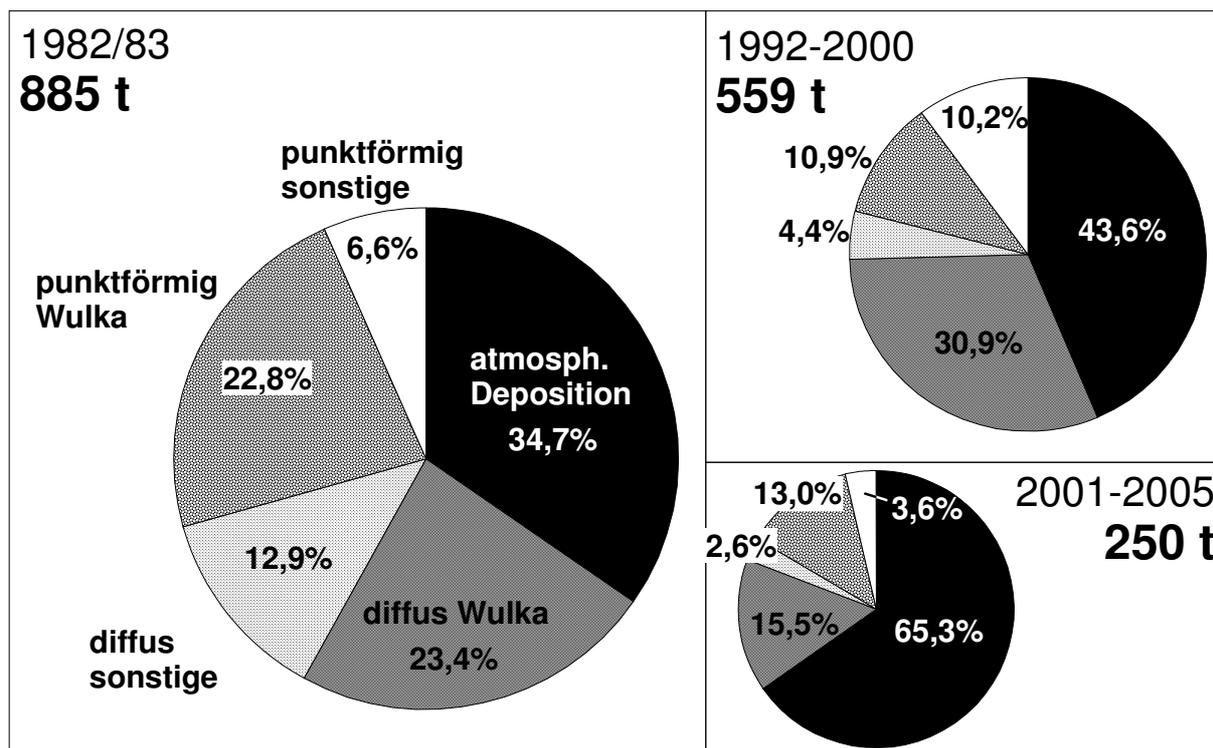


Abbildung 9: Jährliche externe Stickstofffrachten in den Neusiedler See und relative Anteile diffuser und punktförmiger Einträge aus dem Wulka-Einzugsgebiet bzw. anderen Zubringern und Quellen (Golser Kanal, Kroisbach, Kläranlagen) sowie atmosphärische Einträge aus nasser und trockener Deposition in der Saison 1982/83 (aus: Stalzer 1990) und in den Zeiträumen 1992–2000 und 2001–2005 (jeweils als Jahresmittel).

### 3.5 Phosphorbilanz unter Berücksichtigung der Austräge sowie seeinterner Prozesse

Stellt man die Einträge von Gesamtphosphor in den Neusiedler See den Austrägen über den Einserkanal gegenüber, so überwiegen erstere bei weitem. Die ungleiche Verteilung der Einträge zwischen den verschiedenen Jahren belegt die bekannte Bedeutung von Hochwasserereignissen für die Gesamtnährstofffracht eines Fließgewässers. So sind die Spitzen-Monatsfrachten im Jahr

1996 vor allem auf zwei Hochwässer der Wulka Anfang April (bis  $12,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  im Tagesmittel) und Ende September (mit über  $14 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) zurückzuführen. Nach den Bilanzberechnungen übertraf der Phosphoreintrag der Wulka in den Neusiedler See am 5. April 1996 den gesamten Jahreseintrag des abflussarmen Jahres 2003!

Im Vergleich zwischen dem aus den Frachten berechneten und dem gemessenen (Konzentration  $\times$  Seevolumen) Seeinhalt des Gesamtphosphors ist ein ähnliches Muster erkennbar wie beim Calcium. Die Abweichung von Bilanz und tatsächlichen Messwerten kann wie in jenem Fall als Sedimentation, also Export aus der freien Wassersäule, interpretiert werden. Sie lässt darüber hinaus abermals ein saisonales Muster erkennen, für das die Untersuchungen von Von der Emde *et al.* (1984) in den 1980er Jahren im Schilfgürtel Höhe Schützen/Geb. eine Erklärung bieten. Offenbar wird ein Großteil des Gesamtphosphors relativ rasch im Sediment deponiert und erreicht nicht den freien See. Im Winter kommt es in der Folge zu Rücklösungen und zu einem Austrag von gelöstem Phosphor aus dem Schilfgürtel in den offenen Seebereich. Es ist anzunehmen, dass diese Prozesse allerdings nicht auf den Bereich der Wulka-Mündung beschränkt sind, sondern in ähnlicher Form im gesamten Schilfgürtel ablaufen (Export von „Seetrübe“ und partikulärem Phosphor in den Schilfgürtel, Rücklösung von gelöstem Phosphor in der kalten Jahreszeit bei steigendem Wasserstand).

In der saisonalen Abfolge von Sedimentation und seeinternen Frachten (Abbildung 10 unten) sind vor allem die Veränderungen dieses wiederkehrenden Musters im Zeitraum 1993 bis 2007 von Interesse. Während in den meisten Jahren die Sedimentation überwiegt, nimmt das „internal loading“ in den trockenen Jahren mit niedrigem Wasserstand merklich zu. Im Winter 2003/2004, also unmittelbar nach dem seit vielen Jahren niedrigsten Wasserstand am Neusiedler See, ist seeintern ein deutlicher Netto-Zugewinn zu verzeichnen (Abbildung 10 unten).

Die Tatsache, dass in den feuchten Jahren 1995/1996 kein Netto-Austrag in den Wintermonaten gegeben war, ist nicht als ein Ausbleiben der Rücklösungsvorgänge zu deuten. Vielmehr stand in diesen Jahren über mehrere Monate praktisch der gesamte Schilfgürtel unter Wasser, was eine große potenzielle Sedimentationsfläche bot. Es ist anzunehmen, dass daher ein entsprechend hoher Austrag von Phosphor aus dem Freiwasser in den Schilfgürtel stattfand.

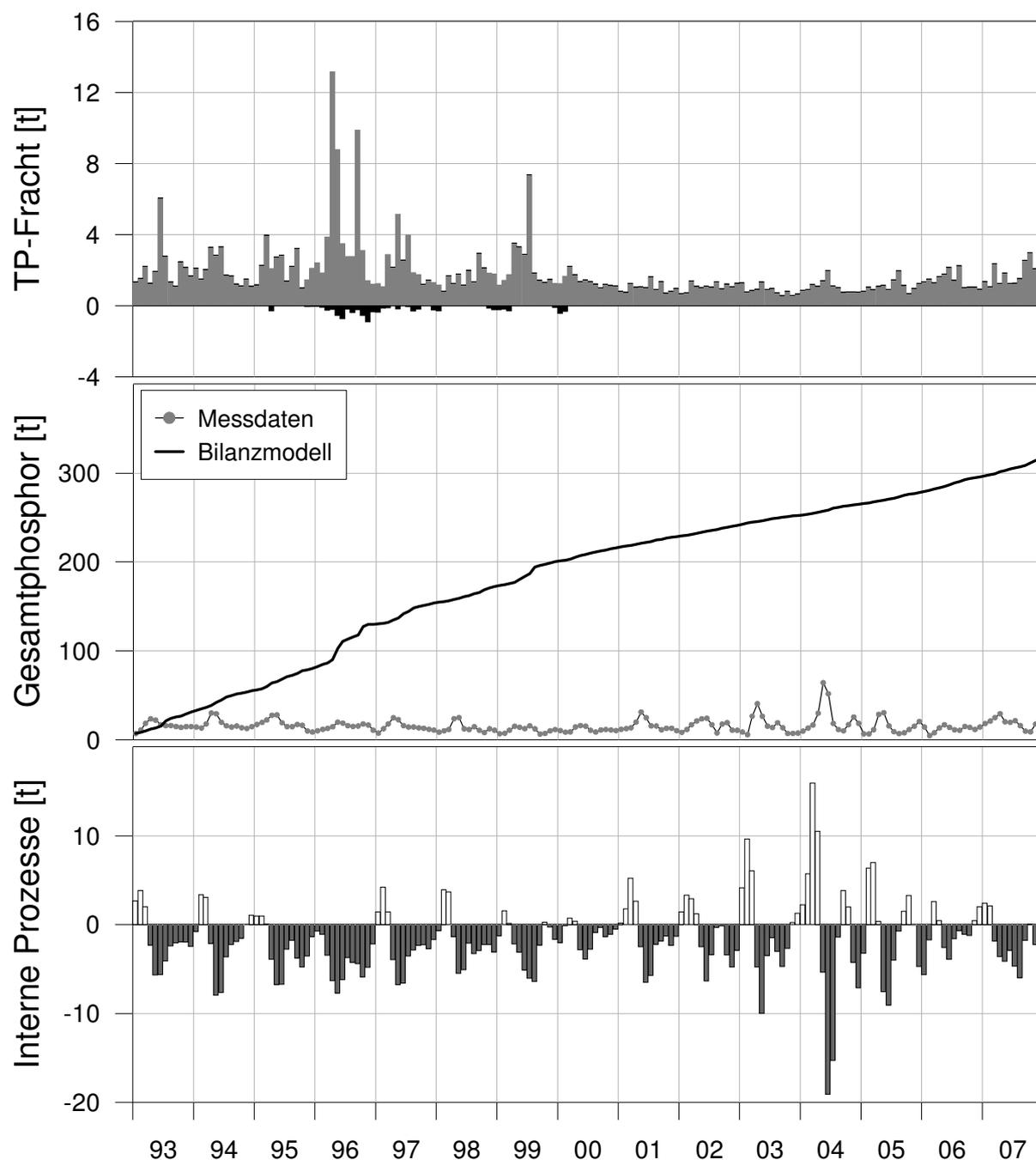


Abbildung 10: Monatliche externe Phosphorfracht (Zubringer, Niederschlag, Abfluss) und saisonale, interne Veränderungen des Seeinhalts an Gesamtphosphor in der Wassersäule (Sedimentation, Rücklösung; als gleitendes Mittel über 3 Monate) im Neusiedler See zwischen 1993 und 2007.

Ein ganz anderes Bild bot sich im Spätherbst 2003, als fast der gesamte Schilfgürtel trocken lag. Ein Export aus der freien Seefläche war in dieser Zeit praktisch nur über Kanäle oder in kleinräumigen Arealen mit lockeren Schilf-Randbeständen möglich. Infolge eines Überwiegens der Rücklösungsvorgänge in Kombination mit dem verringerten Austrag von partikulärem Phosphor in den Schilfgürtel manifestierte sich der Überschuss der externen Einträge (vgl.

Abbildung 10 Mitte) in dem beschriebenen Anstieg der Konzentrationen im Freiwasser (Abbildung 2).

Ein interessanter Aspekt ist dabei die Tatsache, dass sich der niedrige Wasserstand erst mit mehreren Monaten Verzögerung auf die Freiwasser-Konzentrationen von Gesamtphosphor auswirkte. Im Regressionsmodell zwischen dem Ruhewasserspiegel des Sees und der TP-Konzentration (jeweils als Monatsmittelwert) wird entsprechend das höchste Bestimmtheitsmaß ( $r^2$ ) dann erreicht, wenn als erklärende Variable nicht der aktuelle Wasserstand, sondern jener sieben Monate davor herangezogen wird (Abbildung 11). Anders ausgedrückt: Je niedriger der Wasserstand im Spätsommer/Herbst, desto eher sind im darauf folgenden Frühjahr erhöhte Phosphor-Konzentrationen zu erwarten.

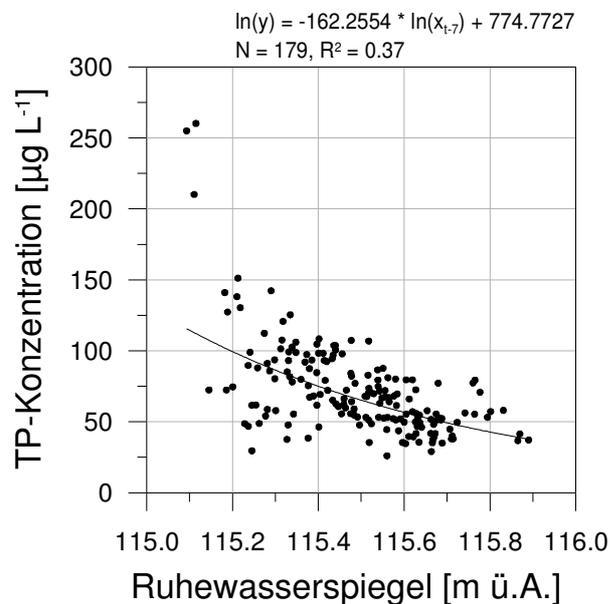


Abbildung 11:  
Relation zwischen dem Ruhewasserspiegel und der Gesamtphosphor-Konzentration im offenen See (zeitlich um 7 Monate versetzt).

## 4 Resümee und Ausblick

Die Berechnungen und Auswertungen des umfangreichen Datensatzes aus fast 20 Jahren limnologischem Monitoring haben gezeigt, dass es möglich ist, anhand der empirischen Daten Stoffbilanzen für ein so komplexes System wie den Neusiedler See zu erstellen und zumindest im Ansatz die vorherrschenden Austauschprozesse zwischen offenem See und Schilfgürtel abzubilden. Die Analysen haben zu folgenden wesentlichen Erkenntnissen geführt:

1. Ableitungen aus dem See über den Einserkanal haben große Auswirkungen auf den Chemismus des Sees. Der Austrag von gelösten Salzen führt zu einem deutlichen Aussüßen des Neusiedler Sees, was dessen Natur als endorheischem Sodagewässer entgegensteht. Allerdings können mehrere trockene Jahre ohne Ableitungen von Seewasser zu einer neuerlichen Aufkonzentration führen, die die vorherigen Verluste großteils kompensiert.
2. Der Schilfgürtel ist von großer Bedeutung für den Chemismus und die Wasserqualität des Neusiedler Sees. Die Konzentrationen im offenen See werden wesentlich durch den saisonalen Wechsel von Deposition und Rücklösung beeinflusst.
3. Eine Schlüsselrolle kommt dem Schilfgürtel als Sedimentationsdepot für Phosphor zu. Bei niedrigen Wasserständen kann der Schilfgürtel jedoch seine Funktion als Nährstoffsенke nicht erfüllen. Dies erklärt den Anstieg der Phosphor- (und in der Folge Chlorophyll-a-)Konzentrationen im Freiwasser während der niederschlagsarmen Jahre 2003/2004, als der Schilfgürtel zeitweise praktisch vollkommen trocken war.
4. Die Anstiege der Nährstoff-Konzentrationen Anfang der 2000er-Jahre sind demnach nicht auf externe Einträge, sondern auf interne Prozesse zurückzuführen. Anthropogene Nährstoffeinträge sind absolut und relativ betrachtet innerhalb der letzten zwei bis drei Jahrzehnte signifikant gesunken.

Für die Zukunft sind zwei Fragen von besonderem Interesse. Zum einen gibt es seit 2011 eine neue, von der Österreich-Ungarischen Grenzgewässerkommission verabschiedete Wehrregelung am Einserkanal. Sie erlaubt Ableitungen aus dem See erst bei etwas höheren Wasserständen, als dies noch in den 1990er Jahren der Fall war (Kubu 2010). Simulationen haben gezeigt, dass die neue Wehrregelung eine deutlich geringere Frequenz von Ableitungen zur Folge haben wird. Nachdem diese aber, wie oben gezeigt, einen massiven Verlust von Salzen mit sich bringen, bedeutet die geringere Häufigkeit solcher Ereignisse einen erhöhten Rückhalt von Salzen im System. Anhand der Simulationen kann somit auf eine Tendenz zu höheren Salzgehalten als Folge der neuen Wehrregelung geschlossen werden. Dies würde eine – aus ökologischer Sicht begrüßenswerte – Annäherung an die Verhältnisse mit sich bringen, die zeitweise noch zu Beginn des 20. Jahrhunderts geherrscht haben. Damals betrug der Salzgehalt noch rd.  $16 \text{ g L}^{-1}$  und damit das Mehrfache des heutigen Salzgehalts (Berger & Neuhuber 1979).

Eine andere Entwicklung betrifft die globale Klimaerwärmung, welche nach Kromp-Kolb *et al.* (2005) eine Erhöhung der Lufttemperatur im Raum Neusiedler See und damit in Folge eine erhöhte Evapotranspiration erwarten lässt. Die Konsequenz wären niedrigere Wasserstände, mit den oben aufgezeigten Auswirkungen auf die Austauschprozesse zwischen offenem See und Schilfgürtel. Genau auf diese Aspekte ist daher in den kommenden Jahren ein verstärkter Forschungsschwerpunkt zu legen.

## 5 Literatur

- AGN, 1984. Forschungsbericht 1981–1984. Naturraumpotential Neusiedler See, Erfassung des Nährstoffeintrages in den Neusiedler See. Arbeitsgemeinschaft Gesamtkonzept Neusiedler See - Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung, Gesundheit und Umweltschutz & Land Burgenland - Landesmuseum, Wien - Eisenstadt.
- Berger, F. & F. Neuhuber, 1979. The hydrochemical problem. In Löffler, H. (ed) Neusiedlersee - the limnology of a shallow lake in Central Europe Monographiae Biologicae 37. Dr. W. Junk bv Publ., The Hague - Boston - London, 89-99.
- Herzig, A., 1990. Zur limnologischen Entwicklung des Neusiedler Sees. AGN Tagungsbericht, Int. Symposium: Schutz und Entwicklung großer mitteleuropäischer Binnenseelandschaften. Bodensee-Neusiedler See-Balaton, 91-97.
- Herzig, A., 2001. Neusiedlersee - ein Steppensee in Europa. In Dokulil, M., A. Hamm & J.-G. Kohl (eds) Ökologie und Schutz von Seen. Facultas, Wien, 401-415.
- Kromp-Kolb, H., J. Eitzinger, G. Kubu, H. Formayer, H. Haas & T. Gerersdorfer, 2005. Auswirkungen einer Klimaänderung auf den Wasserhaushalt des Neusiedler Sees. Studie i.A. des Amtes der Burgenländischen Landesregierung, Landeswasserbaubezirksamt Schützen am Gebirge, Wien.
- Kubu, G., 2010. Grundlagen und Ergebnisse der Experten zur Neufassung der Wehrbetriebsordnung für die Wehranlage Mekszikópuszta am Rand des Neusiedler Sees unpubl., Wien, 6 pp.
- Malissa, H., H. Puxbaum, M. Pimminger & A. Nikoopour, 1984. Untersuchungen des Nährstoffeintrages in den Neusiedler See aus der Atmosphäre. In Arbeitsgemeinschaft Gesamtkonzept Neusiedler See (ed) Forschungsbericht 1981–1984 Naturraumpotential Neusiedler See, Erfassung des Nährstoffeintrages in den Neusiedler See. Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung, Gesundheit und Umweltschutz & Land Burgenland - Landesmuseum, Wien - Eisenstadt, 41-89.
- Naumann, E., 1932. Grundsätze der regionalen Limnologie. Binnengewässer 11:1-176.
- Stalzer, W., 1990. Wasserwirtschaft und Gewässerschutz im Raume Neusiedler See. AGN Tagungsbericht, Int. Symposium: Schutz und Entwicklung großer mitteleuropäischer Binnenseelandschaften. Bodensee-Neusiedler See-Balaton, 79-81.
- Stalzer, W., G. Spatzierer & U. Wenninger, 1984. Nährstoffeintrag in den Neusiedler See über die oberirdischen Zuflüsse. In Arbeitsgemeinschaft Gesamtkonzept Neusiedler

- See (ed) Forschungsbericht 1981–1984 Naturraumpotential Neusiedler See, Erfassung des Nährstoffeintrages in den Neusiedler See. Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung, Gesundheit und Umweltschutz & Land Burgenland - Landesmuseum, Wien - Eisenstadt, 125-187.
- Von der Emde, W., N. Matsché & F. Plahl-Wabnegg, 1984. Der Einfluss von Hochwasserereignissen auf die Nährstoffbelastung der Wulka und deren Auswirkungen auf die Stoffumsetzungen im Schilfgürtel des Neusiedler Sees. In Arbeitsgemeinschaft Gesamtkonzept Neusiedler See (ed) Forschungsbericht 1981–1984 Naturraumpotential Neusiedler See, Erfassung des Nährstoffeintrages in den Neusiedler See. Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung, Gesundheit und Umweltschutz & Land Burgenland - Landesmuseum, Wien - Eisenstadt, 93-121.
- Wolfram, G., 2006. Bedeutung und Vorkommen von Salzlebensräumen. In Wolfram, G., et al. (eds) Salzlebensräume in Österreich. Umweltbundesamt, Wien, 13-26.
- Wolfram, G., K. Donabaum & S. Hintermaier, 2007. Stoffbilanz Neusiedler See 1992-2005. Studie i.A. d. Arbeitsgemeinschaft Natürliche Ressourcen (AGN), Wien, 106 pp.
- Zessner, M., O. Gabriel, K. Schilling, M. Pannonhalmi, L. Sutheo, M. Kovács, I. Toth, A. Clement, T. Karches, F. Szilagyi, T. Kramer, J. Jozsa, G. Wolfram, K. Ruzicska & S. Hintermaier, 2012. Neusiedlersee - Ökodynamische Rehabilitation. Betrachtungen zur Wasserqualität der Raab. Endbericht. Amt der Burgenländischen Landesregierung, Abteilung 9 – Wasser und Abfallwirtschaft, Wien, Budapest, Győr, 197 pp.

### **Danksagung**

Die vorliegende Studie wurde im Rahmen eines von der Grenzgewässer-Kommission finanzierten und über die TU Wien (Projektleitung: Dr. Mathias Zessner) umgesetzten Projekts durchgeführt. Die hydrologischen Daten stellte dankenswerterweise Dr. Gerhard Kubu (Univ. Bodenkultur, Institut für Meteorologie und Physik) zur Verfügung, die hydrochemischen Daten stammen aus den Monitoringprogrammen der Bgld. Landesregierung (Abt. 5 – Biologische Station Neusiedler See; Abt. 9 – Hauptreferat Gewässeraufsicht und Gewässerentwicklung). Danke an Mag. Katharina Ruzicska und Ing. Silvia Hintermaier (DWS Hydro-Ökologie) für die Unterstützung bei den Modellberechnungen und an Dipl.Geogr. Dr. Oliver Gabriel für wertvolle Diskussionen.

### **Korrespondenz an:**

Autor: Mag. Dr. Georg Wolfram

DWS Hydro-Ökologie GmbH, Technisches Büro für Gewässerökologie und  
Landschaftsplanung  
Zentagasse 47, 1050 Wien

Tel +43 1 5482310

Mail [georg.wolfram@dws-hydro-oekologie.at](mailto:georg.wolfram@dws-hydro-oekologie.at)

Web [www.dws-hydro-oekologie.at](http://www.dws-hydro-oekologie.at)