

# REBEN



Reed Belt Neusiedler See/Fertő (Interreg AT-HU 2014-2020)

## Angewandte hydrologische und limnologische Grundlagenuntersuchungen *Österreichisch-Ungarische Synthese*



|                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Titel:</b>                | Österreichisch-Ungarische Synthese. Angewandte hydrologische und limnologische Grundlagenuntersuchungen im Rahmen des Projekts REBEN – Reed Belt Neusiedler See/Fertő (Interreg-Projekt AT-HU 2014-20)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Auftraggeber:</b>         | Amt der Burgenländischen Landesregierung, Abt. 5 – Baudirektion<br>Europaplatz 1, 7000 Eisenstadt<br>Ansprechpartner: DI Christian Sailer<br><br>Észak-dunántúli Vízügyi Igazgatóság<br>Ansprechpartner: Richárd Kovács, Projektmanager                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| <b>Vertragspartner:</b>      | ARGE „DWS Hydro-Ökologie – TU Wien“ (Österreich) <ul style="list-style-type: none"> <li>1) DWS Hydro-Ökologie GmbH<br/>Technisches Büro für Gewässerökologie und Landschaftsplanung<br/>Zentagasse 47, A-1050 Wien<br/>Tel. 01 / 548 23 10, Fax DW 18<br/>Email: office@dws-hydro-oekologie.at</li> <li>2) Technische Universität Wien<br/>Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft<br/>Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie<br/>Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien</li> <li>3) Subauftragnehmer der DWS Hydro-Ökologie<br/>Technische Universität Dresden</li> </ul><br>Fertő 2019 Konsortium (Ungarn) <ul style="list-style-type: none"> <li>4) Budapest University of Technology and Economics<br/>Department of Hydraulics and Water Resources Engineering<br/>H-1111 Budapest, Műgyetem rkp. 3.</li> <li>5) GYMSM Kormányhivatal Környezetvédelmi Mérőközpont (Győr-Moson<br/>Sopron, County District Office, Environmental Measurement Center)<br/>H-9021 Győr, Árpád út 32.</li> <li>6) Centre for Ecological Research<br/>H-8237 Tihany, Klebersberg Kunó u. 3.</li> </ul> |
| <b>Projektleiter:</b>        | Mag. Dr. Georg Wolfram <sup>1)</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Autorinnen/Autoren:</b>   | Wolfram, G. <sup>1)</sup> , E. Boros <sup>6)</sup> , A. P. Blaschke <sup>2)</sup> , E. Csaplovics <sup>3)</sup> , R. Hainz <sup>1)</sup> , G. Király <sup>4)</sup> , T. Krámer <sup>4)</sup> , R. Mayer <sup>5)</sup> , M. Pannonhalmi, P. Riedler <sup>1)</sup> , M. Zessner <sup>2)</sup> , I. Vass <sup>5)</sup> , O. Zoboli <sup>2)</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Auftrag:</b>              | A5/GEW.EUF-10003-11-2017 (Austria)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Seitenanzahl:</b>         | 108                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Interne Berichts-Nr.:</b> | 15/078-Bo8                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <b>Zitierweise:</b>          | Wolfram, G., E. Boros, A. P. Blaschke, E. Csaplovics, R. Hainz, G. Király, T. Krámer, R. Mayer, M. Pannonhalmi, P. Riedler, M. Zessner, I. Vass & O. Zoboli (2020). Österreichisch-Ungarische Synthese. Angewandte hydrologische und limnologische Grundlagenuntersuchungen im Rahmen des Projekts REBEN – Reed Belt Neusiedler See/Fertő (Interreg-Projekt AT-HU 2014-20). Studie im Auftrag des Amtes der Burgenländischen Landesregierung, Abt. 5 – Baudirektion, and the Észak-dunántúli Vízügyi Igazgatóság. Wien – Budapest – Győr.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

# INHALTSVERZEICHNIS

|                                                               |            |
|---------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Zusammenfassung .....</b>                                  | <b>1</b>   |
| <b>1 Einleitung .....</b>                                     | <b>8</b>   |
| 1.1 Ausgangslage .....                                        | 8          |
| 1.2 Projektstruktur und Aufgabenstellung .....                | 11         |
| 1.3 Bewertungsmaßstab .....                                   | 13         |
| 1.4 Struktur des Syntheseberichts .....                       | 15         |
| <b>2 Ökosystem-Dienstleistungen .....</b>                     | <b>16</b>  |
| <b>3 Stofftransport, Austauschprozesse und Frachten .....</b> | <b>20</b>  |
| 3.1 Einträge aus dem Einzugsgebiet .....                      | 20         |
| 3.2 Räumliche Muster und Gradienten .....                     | 24         |
| 3.3 Austauschprozesse .....                                   | 29         |
| 3.4 Frachten von Fest-, Nähr- und Schadstoffen .....          | 37         |
| 3.5 Eigenschaften eines Sodasees .....                        | 50         |
| 3.6 Schilfstruktur und -entwicklung .....                     | 54         |
| 3.7 Langfristige Entwicklungen .....                          | 55         |
| <b>4 Szenarien – andere Rahmenbedingungen .....</b>           | <b>60</b>  |
| 4.1 Definition der Szenarien .....                            | 60         |
| 4.2 Szenario P1 – Pegel <115.2 m ü.A. ....                    | 64         |
| 4.3 Szenario P2 – Pegel >115,8 m ü.A. ....                    | 69         |
| 4.4 Szenario W1 – diffuse Durchströmung der Wulka .....       | 73         |
| 4.5 Szenario W2 – lineare Durchströmung der Wulka .....       | 76         |
| 4.6 Szenario S1 – keine Schilfkanäle .....                    | 79         |
| 4.7 Szenario S2 – erweitertes Netz an Schilfkanälen .....     | 82         |
| 4.8 Resümee .....                                             | 91         |
| <b>5 Bewertung .....</b>                                      | <b>94</b>  |
| <b>6 Wissensdefizite und offene Fragen .....</b>              | <b>100</b> |
| <b>7 Literatur .....</b>                                      | <b>105</b> |

# DANKSAGUNG

Das Projekt-Team möchte den Auftraggebern für die gute Zusammenarbeit danken, auf österreichischer Seite insbesondere DI Helmut Rojacz und Mag. Herbert Szinovatz, die das Projekt initiierten, sowie DI Christian Sailer, DI Karl Maracek und DI Brigitte Nikolavcic, welche die Arbeit über mehr als drei Jahre hinweg kritisch, aber stets konstruktiv begleiteten. Von großem Wert waren die fachlichen Diskussionen mit Univ.-Prof. Dr. Alois Herzig, der die Limnologie des Neusiedler Sees wie kaum ein zweiter kennt. Danke auch dem Leiter der Biologischen Station Illmitz, Mag. Dr. Thomas Zechmeister, und seinen Mitarbeitern sowie dem Direktor des Nationalparks Neusiedler See – Seewinkel und seinem Team, die als Strategische Partner das Projekt begleiteten.

Neben den in den Technischen Berichten und in den Syntheseberichten angeführten Autoren arbeiteten im Freiland und im Labor folgende Personen mit: Veronika Kasper MSc, Martin Kvarda MSc, Ruby Pieber, Ing. Bernhard Weidinger (Chemielabor DWS Hydro-Ökologie), Ulrich Donabaum MSc (Freilandteam DWS Hydro-Ökologie), Richard Haider (Biologische Station Illmitz), DI Gerhard Lindner (Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie der TU Wien). Dr. Stefan Schuster (TBS WaterConsult) betreute mit viel Aufwand und souverän die Online-Sonden zur Wasserqualität.

# ZUSAMMENFASSUNG

## Ausgangslage und Aufgabenstellung

Im Jahr 2014 wurde im Rahmen der Österreichisch-Ungarischen Gewässerkommission eine breite interdisziplinäre und bilaterale Studie durchgeführt, um strategische Ziele für die Region Neusiedler See zu definieren. Das Konsortium, das diese Studie erstellte, bestand aus Experten der Hydrologie, Ökologie und des Naturschutzes sowie aus Personen, die in verschiedensten Bereichen der Ökosystemnutzung rund um den See tätig waren.

Es stellte sich als gemeinsamer Konsens in allen Bereichen heraus, dass komplexe Herausforderungen mit gesellschaftspolitischer Relevanz nur auf der Basis von Datenevidenz und fundierten wissenschaftlichen Erkenntnissen bewältigt werden können. Ein tiefgreifendes Verständnis der hydrologischen, chemischen und ökologischen Zusammenhänge am Neusiedler See ist eine unbestrittene Voraussetzung, um Stakeholdern und Politikern die notwendigen Grundlagen für Entscheidungen mit potenziell weitreichenden Konsequenzen zu liefern.

Vor diesem Hintergrund wurden die Ziele der Strategiestudie diskutiert und formuliert. Darüber hinaus wurden allgemeine Maßnahmen zur Erreichung dieser Ziele vorgeschlagen. Schließlich wurden Wissenslücken identifiziert, die zu schließen als notwendig erachtet wurde, um unser Verständnis der Funktionsweise des Ökosystems zu vertiefen.

Das Projekt REBEN hatte zum Ziel, Wissenslücken über die Prozesse im Zusammenhang mit dem Schilfgürtel des Neusiedler Sees zu schließen. Während der offene See vergleichsweise gut beschrieben ist, ist über den Schilfgürtel, der mehr als die Hälfte der Gesamtfläche des Sees ausmacht, weitaus weniger bekannt. Was wir jedoch wissen, ist, dass die ausgedehnte Litoralzone von größter Bedeutung für die Wasserqualität und die ökologische Funktionsfähigkeit des Sees ist und somit einige der zentralen Ziele der Strategiestudie Neusiedler See berührt.

Im Projekt REBEN wurde im Schilfgürtel des Neusiedler Sees über drei Jahre (2017–2019) ein umfangreiches Programm an Messungen, Analysen und Modellierungen durchgeführt. Die Ergebnisse werden in elf Berichten präsentiert, die die Themen Hydrologie, physikalisch-chemische Parameter, Schadstoffe, Lebensgemeinschaften, Schilfstruktur und Sediment abdecken. Zusammengefasst in zwei nationalen Syntheseberichten erfüllen diese Ergebnisse die Aufgaben des Arbeitspakets T1 des Projekts REBEN und bilden die Grundlage für das Arbeitspaket T2, das die Entwicklung eines gemeinsamen wasserwirtschaftlichen Managementplans für den Neusiedler See zum Ziel hat.

Diese österreichisch-ungarische Synthese führt die nationalen Berichte des Arbeitspakets T1 zusammen und stellt eine bilateral abgestimmte, gemeinsame Sichtweise der Schlüsselfaktoren, treibenden Kräfte und Hauptprozesse im Schilfgürtel des Neusiedler Sees in den oben genannten Bereichen dar. Ziel der Synthese ist es, eine Bewertung des Status quo aus wasserwirtschaftlicher Sicht sowie eine Bewertung alternativer Szenarien unter Berücksichtigung des Wasserstandes und der Kanäle im Schilfgürtel zu liefern. Obwohl die Synthese auf Erkenntnissen auf lokaler / nationaler Ebene beruht, soll sie für den gesamten See gültig sein und daher als Ausgangspunkt der Überlegungen für den bilateralen wasserwirtschaftlichen Managementplan gesehen werden.

### **Ökosystem-Dienstleistungen**

In Kapitel 2 beschreiben wir die Ökosystemleistungen des Neusiedler Sees, um den Nutzen, den die Menschen aus dem See ziehen, sowie die direkten und indirekten Beiträge des Ökosystems zum menschlichen Wohlbefinden hervorzuheben. Sie sind vielfältig und umfassen versorgende Leistungen wie Fischerei und Schilfernte, regulierende Leistungen wie die Regulierung der Wasserqualität, kulturelle Leistungen wie Ökotourismus und Segeln und unterstützende Leistungen wie die Primärproduktion. Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie und den Ökosystemleistungen. Die Berücksichtigung dieser Leistungen sowie der Umweltziele, wie sie in der EU-Wasserrahmenrichtlinie definiert sind, soll eine zukünftige nachhaltige Entwicklung der nicht bewertbaren Güter für die nächste Generation unterstützen, aber auch helfen, Konflikte zwischen gegensätzlichen Interessen zu vermeiden – zum Wohle der Menschen und des Ökosystems.

### **Stofftransport, Austauschprozesse und Frachten**

Kapitel 3 beschäftigt sich mit Stofftransport, Austauschprozessen und Frachten, die die Wasserqualität sowie chemische und biologische Prozesse im Schilfgürtel des Sees beeinflussen. Die Litoralzone des Neusiedler Sees umfasst ein komplexes Mosaik aus Schilf und Wasserflächen, oft entlang charakteristischer räumlicher Gradienten der Wassertiefe und der Schilfbestandsdichte, die mit entsprechenden Gradienten der physikalisch-chemischen Eigenschaften einhergehen. Unsere Analysen zeigten auffällige Unterschiede zwischen Bereichen, die eng mit dem offenen See verbunden sind, und isolierten Bereichen im inneren Schilfgürtel, wo extreme Umweltbedingungen (z. B. Wassertemperatur über 35 °C und elektrische Leitfähigkeit über 6 000  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) auftreten können.

Der Schilfgürtel ist nicht nur ein Extremstandort, sondern weist auch eine bemerkenswerte zeitliche Variabilität auf. In unseren Analysen haben wir versucht, die Auswirkungen der



periodischen Änderungen des Wasserstandes und der Luft-/Wassertemperatur von den kurzfristigen Auswirkungen aufgrund von auflebenden und abklingenden Windereignissen und den begleitenden Seiche-Bewegungen (stehende Wellen) zu trennen, die zu einem Kippen des Wasserspiegels und in der Folge zu Strömungen vom offenen See in den Schilfgürtel und zurück führen.

Die hydrologische Variabilität wurde mit Hilfe verschiedener Ansätze der hydraulischen Modellierung beschrieben, die die Grundlage für Frachtberechnungen von Schwebstoffen, Phosphor (als Hauptnährstoff) und ausgewählten Schadstoffen bildeten. Neben den hydraulischen Ausgangsbedingungen wurden die Wassertemperatur, die Redoxbedingungen und der pH-Wert als Schlüsselfaktoren identifiziert, die die horizontale Verteilung und den Verbleib der Wasserinhaltsstoffe beeinflussen. Basierend auf einem umfangreichen Programm von Freilandmessungen während mehrerer Probenahmekampagnen, Datenanalysen von Online-Messstationen, Laborversuchen sowie Experimenten und schließlich verschiedenen Modellierungsansätzen konnte das Projekt REBEN unser Wissen über die Prozesse im Schilfgürtel deutlich verbessern und insbesondere quantitative Daten über den Austausch zwischen dem offenen See und dem Schilfgürtel mit seinen Kanälen, inneren Blänken und ausgedehnten Braunwasserzonen liefern.

Ein Schlüsselergebnis der Berechnungen in dieser Synthese ist die Abschätzung der Sediment- und Phosphorfrachten, die zwischen dem Einzugsgebiet und dem Seebecken sowie zwischen verschiedenen Kompartimenten innerhalb des Sees transportiert werden. Es wurden sowohl Daten aus REBEN als auch aus externen Quellen verwendet, teils aus einer mehrjährigen verlässlichen Datenbasis (z.B. Massenbilanz 1992–2009), teils unter Verwendung grober Schätzungen und Näherungen. Daher sollte die Bilanz von (suspendierten und abgelagerten) Feststoffen und von Phosphor nicht als echte Stoffbilanz betrachtet werden, sondern eher als ein Werkzeug, um Größenordnungen für die jeweiligen geschätzten Frachten zu liefern. Sie soll helfen, verschiedene Bilanzpositionen hinsichtlich ihrer Relevanz und Bedeutung zu bewerten.

Die Frachtberechnungen ergaben, dass der größte Teil der Sedimentfracht der Wulka (als Hauptzufluss des Sees) sich im Schilfgürtel bei Donnerskirchen / Purbach absetzt und nicht in den offenen See gelangt. Der mittlere jährliche Eintrag an Schwebstoffen, der zur stetigen Verlandung in diesem Bereich beiträgt, wurde auf ca. 3 890 t geschätzt. Eine wesentlich größere Fracht (ca. 10 000 t pro Jahr) wird autochthon im See durch Ausfällung von Calcit (zusammen mit anderen Mineralien wie Dolomit und Silikaten) gebildet. Die Calcitkristalle verursachen die charakteristische Trübung des offenen Seewassers. Wie die Freilandmessungen und die Datenanalysen der Online-Messstationen zeigen, werden die Schwebstoffe im offenen See durch Kanäle in den Schilfgürtel transportiert, wo sie sich in offenen Wasserbereichen ablagern. Die Entnahme von Sedimenten durch Baggerungen

kann erheblich zum Export von Sedimenten aus dem Seebecken beitragen (aus Yachthäfen: 6 800 t, aus Kanälen 3 140 t pro Jahr).

Die Pfade der Phosphorfrachten sind in mehreren Aspekten mit denen der Sedimentfrachten vergleichbar: Ein großer Teil der partikulären Phosphorfraktion, die über die Wulka in das Seebecken gelangt, wird im Schilfgürtel abgelagert. Eine bedeutende Menge wird jedoch wieder freigesetzt und als gelöster Phosphor in den offenen See transportiert. Insgesamt erreichen die Gesamtposphorkonzentrationen der Wulka den offenen See weitgehend am Rande des Schilfgürtels, allerdings in unterschiedlicher Form. Die Datenanalysen zeigten, dass sowohl die externen Phosphorfrachten in der Wulka als auch die Konzentrationen im See heute deutlich geringer sind als bei den letzten umfangreichen Untersuchungen in Österreich in den 1980er Jahren. Während der fünf Kampagnen zwischen Herbst 2017 und Frühjahr 2019 (insgesamt 13 Beprobungstermine) überstiegen die Orthophosphatkonzentrationen (als  $\text{PO}_4\text{-P}$ ) im offenen See in Österreich nie  $5 \mu\text{g L}^{-1}$  (innerhalb des Schilfgürtels: maximal  $9 \mu\text{g L}^{-1}$ ), während in früheren Studien eine Konzentration von mehr als  $100 \mu\text{g L}^{-1} \text{PO}_4\text{-P}$  gefunden wurde. In Kanälen in Ungarn wurden während REBEN mittlere Konzentrationen von  $30 \mu\text{g L}^{-1}$  gefunden (Median aller Messungen,  $n=151$ ).

Unter den Schadstoffen wurde besonderes Augenmerk auf ausgewählte Schwermetalle und organische Verbindungen (Perfluorooctansulfonsäure PFOS / Perfluorooctansäure PFOA und Fluoranthren) gelegt. Die Analysen ergaben einen unterschiedlichen Verbleib für diese Schadstoffe. PFOS gilt als extrem persistent in der Umwelt, scheint aber als Metaboliten in überwiegend kurzkettige PFT umgewandelt zu werden. Zudem wird es durch Adsorption aus der wässrigen Phase des Sees eliminiert, über Schwebstoffe in den Schilfgürtel transportiert und damit aus dem Seewasser entfernt. Im Gegensatz dazu ist die Elimination von PFOA weit weniger umfangreich als bei PFOS, was zu deutlich höheren Konzentrationen im See als in der Wulka führt. Eine relevante Adsorption von PFOA an den Sedimenten kann ausgeschlossen werden. Der Verbleib von Fluoranthren ist vergleichbar mit dem von PFOS, wobei die Daten – ähnlich wie bei Phosphor – auf ein Rücklösungspotential aus dem Sedimentreservoir im Schilfgürtel hinweisen.

Die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Neusiedler -Sees, des größten Sodasees in Europa, waren ein Schwerpunkt der Analysen in REBEN. Sie beeinflussen die aquatischen Lebensgemeinschaften beträchtlich. Im Rahmen des Projekts wurden Phyto- und Zooplanktongemeinschaften an verschiedenen Standorten sowohl in Österreich als auch in Ungarn untersucht. Besonderes Augenmerk wurde auf die Schilfstruktur im ungarischen Teil des Sees gelegt. Die flächenmäßigen Veränderungen des ungarischen Teils des Neusiedler -Sees wurden anhand von Archivkarten früherer militärischer Vermessungen zwischen 1785 und 1920 und Luftaufnahmen von 1959 bis 2017 untersucht. Die Ergebnisse zeigten, dass der Anteil der Schilffläche im ungarischen Teil des Sees von



ca. 25% in früheren Jahren auf ca. 83% im Jahr 1959 deutlich zugenommen hat. Nach der Regulierung des Wasserstandes im Jahr 1965 kam es zu keiner weiteren nennenswerten Zunahme der Schilffläche (ca. 86% im Jahr 2017). Ein detaillierter Vergleich von fünf ausgewiesenen Probestellen ergab keine signifikanten Veränderungen zwischen 1982 und 2017 (mit Ausnahme derer, die aus Kanalertüchtigungen und Baggerungen resultieren), also weder einen Hinweis auf eine Regeneration noch einen Zuwachs. Allerdings wurde landesweit eine geringe Zunahme der Schilffläche (ca. 4 ha/Jahr) beobachtet. In Österreich stieg der Anteil der offenen Wasserflächen innerhalb des Schilfgürtels von 2% im Jahr 1979 auf 15% im Jahr 2008. In Ungarn sollte besonderes Augenmerk auf die ausgedehnten Bestände von *Schoenoplectus litoralis* (aber auch anderen submersen Makrophyten wie *Potamogeton pectinatus*, *Myriophyllum spicatum* und *Najas marina*) gelegt werden, die in den letzten Jahren in den Freiwasserbereichen des Sees zugenommen haben.

Die Erkenntnisse aus dem Projekt REBEN beruhen auf den Erfahrungen einiger Jahrzehnte und auch die Überlegungen zur weiteren Entwicklung betreffen einen Zeitraum, der als „kurz- bis mittelfristig“ bezeichnet werden kann. Langfristige Entwicklungen des Sees wurden kurz diskutiert, um mögliche Auswirkungen auf den See zu bewerten. Sie konzentrieren sich vor allem auf die langfristige Akkumulation von Sedimenten, die aus den Kalkausfällungen resultieren, und auf Änderungen im Wasserhaushalt als Folge der globalen Erwärmung.

### **Szenarien unter anderen Rahmenbedingungen und vergleichende Bewertung**

In Kapitel 4 dieser Synthese beschreiben wir, wie sich die Prozesse und Bilanzen unter verschiedenen Rahmenbedingungen verändern können. Die Überlegungen beruhen auf Experteneinschätzungen, die jedoch auf den umfangreichen Untersuchungen und Erkenntnissen des Projekts REBEN basieren. Sie spiegeln den aktuellen Stand des Wissens wider und können als „educated guess“ betrachtet werden.

Es werden die folgenden Szenarien unterschieden:

- Szenarien in Bezug auf extreme Wasserstände (unter 115,2 m ü. A. versus über 115,8 m ü. A.)
- Szenarien in Bezug auf unterschiedliches Fließverhalten der Wulka durch den Schilfgürtel (diffuse versus nur lineare Durchströmung durch den Schilfgürtel)
- Szenarien, die sich auf das Netz der Schilfkanäle beziehen (keine Kanäle oder bestehende Kanäle verschlammt oder zugewachsen versus Erweiterung des bestehenden Kanalnetzes)

Der Vergleich zeigte, dass die größten Auswirkungen dort zu erwarten sind, wo Austauschprozesse zwischen dem offenen See und dem Schilfgürtel betroffen sind. Dies

betrifft vor allem die Kanäle, die den offenen See mit dem Schilfgürtel verbinden und einen effektiven Transport von Feststoffen, Nährstoffen und Schadstoffen ermöglichen, aber auch als Wanderwege und Lebensraum für Fische dienen. Szenarien, in denen diese Wege errichtet oder gefördert werden, führen zu einem signifikanten Export von Schwebstoffen und adsorbierten Nährstoffen aus dem offenen See in die Litoralzone und verbessern damit die Wasserqualität im offenen See. Die vergleichende Analyse der Szenarien zeigte auch, dass die anthropogenen Eingriffe in den See einen quantitativ relevanten Einfluss haben: Sie beeinflussen die untersuchten Stoffbilanzen direkt durch Abfluss (Einser-Kanal), Entnahme (Ausbaggern) oder Verlagerung, können aber auch indirekt die Sedimentationsprozesse sowohl im offenen See (geschützte Buchten) als auch im umgebenden Schilfgürtel beeinflussen.

Eine abschließende Bewertung des Status Quo und möglicher Entwicklungen bei verschiedenen Szenarien konzentrierte sich auf die strategischen Ziele, wie sie in der Strategiestudie Neusiedler See definiert wurden. Sedimentationsprozesse stehen in direktem Zusammenhang mit einem der Hauptziele: der Aufrechterhaltung des Verhältnisses „Freiwasser : Schilf“ innerhalb des Seebeckens. Anthropogene Eingriffe auf diese Prozesse (indirekt oder direkt) sind jedoch kaum mit dem Ziel vereinbar, dem System eine ungestörte Entwicklung und Aufrechterhaltung der physikalisch-chemischen und biologischen Prozesse zu ermöglichen – zumindest, wenn man dieses Ziel sehr streng interpretiert. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass in keinem der Szenarien die Anforderungen aller Ziele der Strategiestudie gleichzeitig erfüllt werden. In einigen Fällen erscheinen sie sogar widersprüchlich. Daher ist eine Priorisierung der Ziele erforderlich.

Natürlich ist der Neusiedler See nicht mehr ein völlig natürliches und unbeeinflusstes System. Er hat zahlreiche Einflüsse erfahren: von der Schaffung eines künstlichen Abflusses (zu Beginn des 20. Jahrhunderts), über Wasserregulierungsmechanismen (1965 und 2011) bis hin zu bedeutenden Veränderungen im Einzugsgebiet, nachfolgenden Eutrophierungsprozessen und einer zunehmenden Ausdehnung von Badeplätzen und Yachthäfen (zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts). Infolgedessen erfuhren der See und insbesondere seine Litoralzone signifikante Veränderungen, unter denen die bemerkenswerte Ausdehnung des Schilfgürtels zwischen der Austrocknungsphase in den 1860er und den 1950er Jahren am auffälligsten ist. Es besteht wenig Zweifel, dass die hydrologischen Einflüsse und die daraus resultierenden Veränderungen in der Chemie des Sees die Hauptfaktoren für das Wachstum der Schilfgürtel waren. Trotz seines herausragenden Naturwerts ist der See ein verändertes System – hochkomplex und sehr sensibel. Dies wurde früh verstanden und führte zu tatkräftigen Bemühungen, negativen Trends entgegenzuwirken. Die Bemühungen der Österreichisch-Ungarischen Gewässerkommission wie die gemeinsame Wehrregulierungsverordnung und die Reduktion der externen Belastung aus dem Einzugsgebiet (hauptsächlich seit den 1980er Jahren) sowie die Schaffung eines bilateralen Nationalparks

im Jahr 1993 können als wichtige Meilensteine auf dem Weg zur Verbesserung und Wiederherstellung der ökologischen Integrität des Ökosystems und als wichtige Beiträge zu einer nachhaltigen Wasserwirtschaft gesehen werden. Darüber hinaus wurden umfassende Überwachungsprogramme eingerichtet, zuerst von der Österreichisch-Ungarischen Gewässerkommission, später auf lokaler und nationaler Ebene und in den letzten 20 Jahren unter den Anforderungen der EU-Wasserrahmenrichtlinie. All dies geschah in Zusammenarbeit der beiden Länder und unter Einbeziehung von Experten und Interessenvertretern aus Wasserwirtschaft und Naturschutz. Es war daher eine logische Konsequenz, dass der bilaterale Nationalpark Neusiedler See – Seewinkel / Fertő Hanság Nemzeti Park als strategischer Partner der beiden nationalen Wasserwirtschaftsbehörden in das Projekt REBEN eingebunden wurde.

Dennoch gibt es noch viel zu tun. Nach Jahrzehnten negativer anthropogener Einflüsse auf der einen Seite und positiver Bemühungen und Verbesserungsschritte auf der anderen Seite sind wir überzeugt, dass wir den See nicht seinem eigenen Schicksal überlassen dürfen. Ein solches Vorgehen ist freilich in der Schutzzone des Nationalparks voll gerechtfertigt, aber nur als Teil des Gesamtsystems. Für den verbleibenden größeren Teil des Sees sind konkrete Maßnahmen zu diskutieren und zu definieren, wie die Ziele der Strategiestudie erreicht werden können und wie der See seinen ökologischen Wert sowie sein Potenzial für eine nachhaltige Nutzung erhalten kann. Dies wird die Aufgabe des Managementplans sein, mit dem Ziel, einen Kompromiss zwischen verschiedenen Interessen und Zielen zu finden, der auch widersprüchliche oder gegenläufige Prozesse berücksichtigt.

# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Ausgangslage

Im Jahr 2014 wurden in einer breit angelegten, interdisziplinären und bilateralen Studie strategische Ziele für die Region Neusiedler See formuliert (Wolfram et al. 2014). Zur Erreichung dieser Ziele schlugen die Autoren und Autorinnen insgesamt 74 Maßnahmen vor, davon 27 im Bereich Wasserwirtschaft und 18 im Bereich Limnologie.

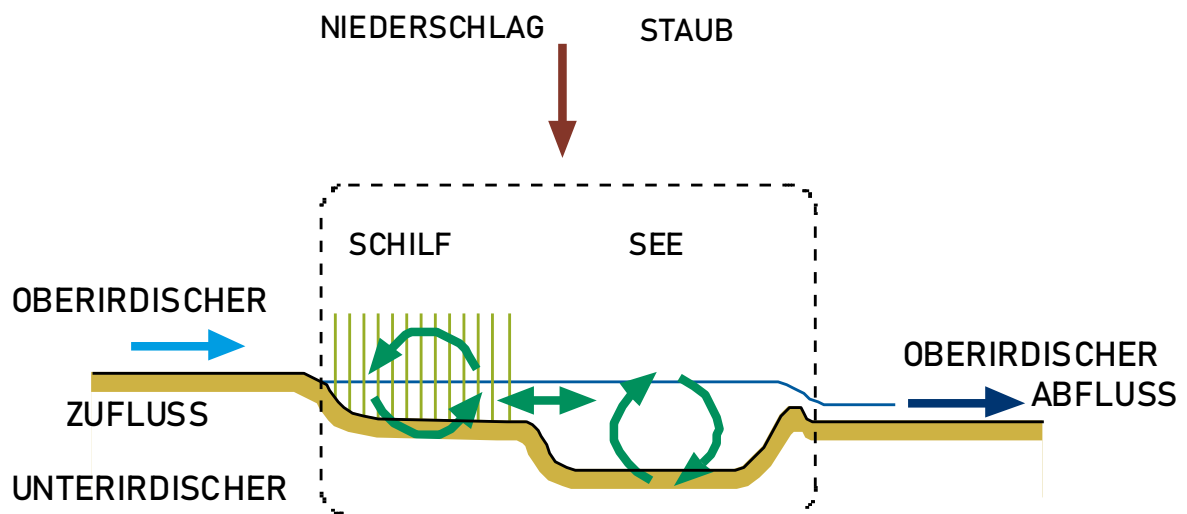
Es ist heute allgemeiner Konsens, dass komplexe Herausforderungen mit gesellschaftspolitischer Relevanz nur auf Grundlage abgesicherter wissenschaftlicher Erkenntnisse zu bewältigen sind. Das gilt auch für die in der Strategiestudie formulierten Ziele. Dass diese teilweise sogar im Widerspruch zueinander stehen, dokumentiert die Schwierigkeit, unterschiedliche Interessenslagen zu einem Konsens zu bringen, unterstreicht aber umso mehr die Notwendigkeit, für Entscheidungen *pro* oder *contra* bestimmte Maßnahmen die erforderlichen fachlichen Grundlagen zu schaffen. Um ein Schlagwort aus der Corona-Krise zu verwenden: Maßnahmen müssen *evidenzbasiert* sein. Erst auf Grundlage eines tieferen Verständnisses von hydrologischen, chemischen und ökologischen Zusammenhängen ist es möglich, Stakeholdern und politischen Verantwortungsträgern die nötige Sicherheit für Entscheidungen mit potenziell weitreichenden Konsequenzen zu bieten.

Der Neusiedler See ist im Vergleich zu anderen Gewässern in Mitteleuropa ein gut untersuchtes Ökosystem, und mit der vorliegenden Studie stehen die Autoren und Autorinnen auf den sprichwörtlichen Schultern von Riesen, die seit den 1960er Jahren eine Vielzahl an Untersuchungen zur Hydrologie, Sedimentologie, Chemie und Biologie des Neusiedler Sees durchgeführt haben. Doch nahezu jede dieser Studien brachte nicht nur Wissensgewinn, sondern auch neue Fragen und führte mitunter zu der Erkenntnis, dass wir in unserem wissenschaftlichen Streben oft nur an der Oberfläche kratzen. Die Größe und Komplexität des Neusiedler Sees setzen der Suche nach einem gesamtheitlichen und modellhaften Verständnis der Prozesse und Dynamik des Ökosystems oftmals eine Grenze.

Vergleichsweise gut ist aus gewässerökologischer Sicht der offene See beschrieben und bekannt (Herzig & Dokulil 2001; Löffler 1979). Viel weniger wissen wir über den Schilfgürtel, der doch mehr als die Hälfte der gesamten Fläche des Neusiedler Sees ausmacht. Was wir allerdings wissen, ist, dass die ausgedehnte Litoralzone von kaum zu unterschätzender Bedeutung für die Wasserqualität des Sees ist und damit einige zentrale Ziele der Strategiestudie Neusiedler See berührt (Wolfram et al. 2014).

Der zeitliche Schwerpunkt der bisherigen Untersuchungen im und am Schilfgürtel des Neusiedler Sees lag in den 1980er Jahren (Brossmann et al. 1984). In Ungarn begannen die

Untersuchungen Anfang der 1960er Jahre (Tóth & Szabó 1962). Mehrere Arbeiten beschäftigten sich mit dem Stoffeintrag über die Wulka (Stalzer *et al.* 1986; Von der Emde *et al.* 1986), den Auswirkungen des Schilfschnitts (Gunatilaka 1986) und den biologischen Verhältnissen im Schilfgürtel (Burian *et al.* 1986; Hacker & Waidbacher 1986). Angesichts der damals vordringlichen Aufgabe – die Eindämmung der Eutrophierung des Neusiedler Sees – richtete sich der Blick vor allem auf den Schilfgürtel Höhe Wulka-Mündung, nur vereinzelt auf andere Bereiche Höhe Rust (Stalzer & Spatzierer 1987) oder Illmitz (Metz 1984). In vereinfachter Form stellen sich die Einträge und Umsetzungsprozesse nach Stalzer & Spatzierer (1987) wie folgt dar (Abbildung 1):



**Abbildung 1** Schematische Darstellung von Einträgen, Austrägen und Umsetzungsprozessen im Neusiedler See. Quelle: Stalzer & Spatzierer (1987) (verändert).

Die Ergebnisse der Untersuchungen aus den 1980er Jahren waren für das vorliegende Projekt bereits in der Planung von Bedeutung und stellten von Anfang an eine Referenz zu den eigenen Befunden dar. Der Vergleich verdeutlichte aber sehr bald, dass die früheren Untersuchungen nur eingeschränkt mit den aktuellen Aufnahmen vergleichbar und viele Ergebnisse nicht auf die heutige Situation übertragbar sind, einerseits angesichts geänderter Rahmenbedingungen (Einträge aus dem Einzugsgebiet, Durchströmung der Wulka durch den Schilfgürtel, Überströmung des sogenannten Seewalls), andererseits aus methodischen Gründen (z.B. Einzelaufnahmen versus Wasserqualitätsmessstationen).

Nachstehend ist die Herkunft der geklärten Abwässer (C-, P-, N-Elimination) auf der österreichischen Seite des Einzugsgebietes des Neusiedler Sees sowie ihre Ableitungen zusammengefasst:

- Wulka-Tal, Empfänger Wulka, indirekt zum Neusiedler See,
- Region West (Winden bis Mörbisch), Vorfluter Wulka, indirekt zum Neusiedler See
- Region West (Jois), Vorfluter Bach zum Neusiedler See

- Region Nord (Neusiedl, Weiden, Parndorf) außerhalb des Einzugsgebietes, Vorfluter Leitha, Mischwasserüberläufe werden in Bäche zum Neusiedler See eingeleitet
- Gols und Mönchhof, Vorfluter Gols-Kanal, indirekt zum Neusiedler See,
- Region Illmitz außerhalb des Einzugsgebiets, Vorfluter Hanság-főcsatorna.

Der mittlere Trockenwetterabfluss, der aus dem Einzugsgebiet heraus abgeführt wird, beträgt ca. 2 Mio. m<sup>3</sup>/Jahr (als Summe der Trockenwetterabflüsse von Neusiedl, Parndorf und Weiden; Jahresmittelwerte schwanken zwischen 5 000 und 7 000 m<sup>3</sup> pro Tag).

Auf der Basis österreichischer Untersuchungen wurde für den ungarischen Teil des Sees eine Nährstoffbilanz erstellt (Pannonhalmi 1984). Der Haupteintrag von Nährstoffen, insbesondere von Phosphor, in den See erfolgte in der Vergangenheit und auch heute noch über der Kroißbach (Rákos-Patak), der den größten Oberflächenzufluss des Sees auf der ungarischen Seite darstellt.

Im Jahr 1995 wurde die Kanalisation für die südlichen Siedlungen des Neusiedler Sees fertiggestellt und die gesammelten Abwässer werden seither außerhalb des Einzugsgebietes des Sees in Fertőendréd behandelt, Vorfluter ist die Ikva.

Im Jahr 2000 begannen die Planungsarbeiten zur Reduktion der direkten Belastung des Sees auf der ungarischen Seite und im Jahr 2004 wurden zwei künstliche Feuchtgebiete angelegt: eines für die Kläranlage Fertőrákos (einschließlich Erholungsgebiet) und eines für den Kroißbach (Rákos-patak).

Nachdem die Kläranlage Fertőrákos fertiggestellt und durch eine Pumpstation ersetzt wurde, erfolgt die Reinigung des Abwassers seit 2009 in der Kläranlage Sopron mit der Ikva als Vorfluter. Das künstliche Feuchtgebiet Rákos patak ist immer noch in Betrieb.

Die letzte punktförmige Abwassereinleitung der Gemeinde Balf wurde 2014 an die Kläranlage Sopron angeschlossen.

Seit 2014 werden keine kommunalen Abwässer – weder ungeklärt noch geklärt – von ungarischer Seite in den Neusiedler Sees eingeleitet, dementsprechend fällt auch die Quelle für organische Stoffe wie z.B. Arzneimittelrückstände, weg.

Der Schilfgürtel umfasst ein etwa 300 km langes System von Schilfkanälen. Die auf eine bessere Durchströmung abzielende Errichtung einiger Kanäle wurde 2014–2015 im Rahmen eines KEOP-Projekt umgesetzt (Abbildung 2).



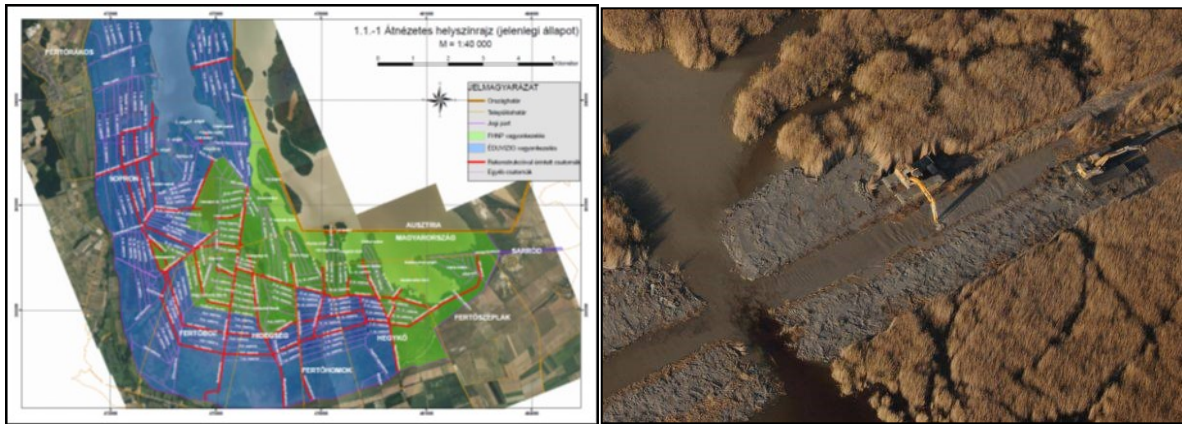


Abbildung 2. Kanalrekonstruktion 2014 (Foto: FHPNI, Pellingner A.)

Es war daher das Bestreben, mit dem Projekt REBEN ältere Befunde zu überprüfen, aber auch zu erweitern und räumlich wie zeitlich auszudehnen. Sowohl für die Wulka-Mündung als auch hinsichtlich des Austausches zwischen See und Schilfgürtel weitab vom Wulka-Mündungsbereich (Mörbisch, Illmitz) konnten mit dem Projekt REBEN neue Erkenntnisse gewonnen werden. Ein Meilenstein sind vor allem die unterschiedlichen Ansätze zur Modellierung der Austauschprozesse, die erstmals eine Quantifizierung zu seeinternen Stoffbilanzen ermöglichen.

Nachfolgend sollen die Projektstruktur und die Zielsetzungen des Projekts REBEN dargestellt werden, bevor in den weiteren Kapiteln die wichtigsten Erkenntnisse in einer Synthese zusammengefasst werden.

## 1.2 Projektstruktur und Aufgabenstellung

### 1.2.1 Arbeitspakete T1 and T2

Das Projekt REBEN gliedert sich in **zwei Arbeitspakete**:

- T1 Untersuchungen zu Themen wie Hydrologie, physikalisch-chemische Parameter, Schadstoffe, Schilfstruktur und Sediment
- T2 Erarbeitung eines gemeinsamen Managementplans für die Wasserwirtschaft am Neusiedler See

Ausgehend von früheren Untersuchungen wurde für das **Arbeitspaket T1** als Ziel formuliert, gravierende Wissensdefizite zu beheben und die notwendigen Datengrundlagen für das Gewässermanagement zu erstellen. Mit der Durchführung von Untersuchungen in den Bereichen Hydrologie, Chemie und Biologie sollte der Wissensstand über

den Wasser- und Stoffaustausch zwischen dem Schilfgürtel und dem Freiwasser sowie die Bedeutung dieser Prozesse für die Wasserqualität verbessert werden.

Die **Detailziele für die vier Module** des AP T1 wurden wie folgt formuliert:

## Österreich

*Hydrologie* Auswertung vorhandener klimatischer und hydrographischer Daten; ergänzende Installation von Datensammlern für Druck (Wasserstand) und Temperatur; Messkampagnen zur Messung der Strömungsverhältnisse im Schilfgürtel; Bilanzierungen des Wasserhaushaltes für typische Szenarien (räumlich, klimatisch und hydraulisch); hydraulische Modellierungen für Teilbereiche im Schilfgürtel entsprechend den Szenarien

*Chemie/Biologie* *Freiwasser:* Monitoring allgemeiner physikalisch-chemischer Parameter in der Wassersäule; Installation von Wasserqualitätsmessstationen zur Charakterisierung der Dynamik

*Sediment:* Charakterisierung des Sediments mittels EEM Fluoreszenz-Spektroskopie; Laborversuche zu Nährstoffumsätzen (Rücklösung, Immobilisierung); Phosphorfraktionierung des Sediments

*Biologische Qualitätskomponenten gem. EU-WRRL:* Aufnahme planktischer und benthischer Lebensgemeinschaften

*Schadstoffe* Stratifizierte Probenahme in unterschiedlichen Schilfkategorien und Analyse der ausgewählten Schwermetalle und organischen Spurenstoffe; Laborversuche zur Adsorption und Mobilisierung ausgewählter Stoffe im Sediment; Laborversuche zum biologischen bzw. photokatalytischen Abbau ausgewählter organischer Spurenstoffe im Vergleich Sediment und offene Wassersäule; mehrere Versuchseinstellungen über mehrere Wochen: Anreicherung/Abbau unter aeroben/anaeroben Verhältnissen und bei unterschiedlichem pH-Wert

*Schilf/Sediment* Untersuchung der Sedimentstruktur und -zusammensetzung in Abhängigkeit von hydrologischen Rahmenbedingungen an mehreren Terminen

## Ungarn

Bewertungen der Hydrologie und Hydrodynamik erfolgten durch Experten der Budapester Universität für Technik und Wirtschaft (BME). Die Mitarbeiter von ÉDUVIZIG nahmen Proben des Freiwassers und des Sediments, die physikalischen und chemischen Analysen wurden vom Bezirksamt Győr-Moson-Sopron, Abteilung für öffentliche Gesundheit, Laborabteilung, Zentrum für Umweltmessungen durchgeführt. Durch das Zentrum für Umweltmessungen erfolgte auch die Analyse des Phytobenthos und die Bewertung des

ökologischen Zustands. Das Zentrum für ökologische Forschung (ÖK) bearbeitete das Phytoplankton, das Zooplankton und die aquatischen Makrophyten. Subauftragnehmer für diese Untersuchung waren Dr. Lajos Vörös und Dr. Katalin Zsuga, während das BME Dr. Géza Király mit der Untersuchung der Schilfstruktur beauftragt wurde.

Die Ergebnisse der Untersuchungen der vier Module im Rahmen des AP T1 werden ausführlich in den entsprechenden **Modulberichten** beschrieben und diskutiert. Änderungen im Untersuchungsprogramm wurden mit dem Auftraggeber abgestimmt. Aus fachlichen Gründen schien es zweckmäßig, die Ergebnisse in (gegenüber der Struktur des AP T1) leicht veränderter Form zu folgenden Modulberichten zusammenzufassen:

### Österreich

- |           |                                                                                                    |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bericht 1 | Hydraulische Modellierungen                                                                        |
| Bericht 2 | Schilf (Aufarbeitung von GeNeSee Daten, Schilfnutzungen)                                           |
| Bericht 3 | Allgemeine physikalisch-chemische Parameter in Freiwasser und Sediment; Schadstoffe (Spurenstoffe) |
| Bericht 4 | Biologie                                                                                           |
| Bericht 5 | Online-Sonden (Wasserqualitätsmessstationen) und Freilandversuche                                  |
| Bericht 6 | Laborversuche                                                                                      |

### Ungarn

- |           |                                                                                                       |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bericht 1 | Hydrologische und hydrodynamische Modellierungen                                                      |
| Bericht 2 | Analyse und Auswertung von Wasser- und Sedimentproben                                                 |
| Bericht 3 | Untersuchung des Phytobenthos                                                                         |
| Bericht 4 | Untersuchung der biologischen Qualitätsparameter (Phytoplankton, Zooplankton, aquatische Makrophyten) |
| Bericht 5 | Auswertung der Schilfstruktur                                                                         |

## 1.3 Bewertungsmaßstab

Die **vorliegende Synthese** dient:

- der zusammenfassenden **Beschreibung der Ergebnisse des AP T1**,
- der **Bewertung des Status Quo** aus hydrologischer, chemischer, limnologischer und wasserwirtschaftlicher Sicht, sowie
- der **Bewertung alternativer Szenarien** unter geänderten Rahmenbedingungen

Ausgehend von IST-Zustand (Beschreibung AP T1) und der Bewertung unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen leitet die Synthese somit zu den wasserwirtschaftlichen Empfehlungen über, die im Arbeitspaket T2 (Managementplan) formuliert werden sollen.

Die **Bewertung des Status Quo** erfolgt in Hinblick auf die wesentlichen **wasserwirtschaftlichen Ziele** gemäß **Strategiestudie** von Wolfram et al. (2014). Sie sind in **Tabelle 1** zusammengefasst und betreffen drei Kernpunkte:

- das Risiko einer Verlandung des Sees (und insbesondere des Schilfgürtels)
- den Schutz der Wasserqualität (Chemie)
- den Erhalt des guten ökologischen Zustands (Lebensgemeinschaften)

Der Anspruch der Synthese ist es, ausgehend von den Erkenntnissen auf lokaler Ebene, d.h. in den drei Testgebieten Österreichs und den Messstellen in Ungarn, zu Aussagen zu gelangen, die für den gesamten See Gültigkeit haben. Analog zielt auch der Managementplan (Arbeitspaket T2) nicht auf Maßnahmen mit rein lokaler Wirkung ab, sondern betrifft den gesamten See auf österreichischem und ungarischem Staatsgebiet.

**Tabelle 1. Wesentliche wasserwirtschaftliche Ziele gemäß „Strategiestudie Neusiedler See“ (Wolfram et al. 2014).**

| Fachgebiete                             | Wasserwirtschaftliche Ziele                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Hydro-morphologie</b>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhalt der hydromorphologischen Besonderheiten des Seebeckens im offenen See und in den Schilfbereichen (Landschaftselement)</li> <li>• Verhinderung einer unkontrollierten Verlandung des Schilfgürtels (Verhältnis Freiwasser versus Schilf)</li> <li>• Gewährleistung von Austauschmechanismen zwischen Schilf- und Seewasser („Wasserqualität“)</li> </ul>                           |
| <b>Schilfgürtel</b>                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Schutz der Einzigartigkeit des Schilfgürtels durch Bewahrung und nachhaltiges Management (<i>Landschaftselement</i>)</li> <li>• Bewahrung der Diversität (Vielfalt) der Schilfflächen und Begrenzung der Verschilfung (Verhältnis Freiwasser versus Schilf)</li> <li>• Erhalt des Schilfgürtels als integrativer Bestandteil des Ökosystems Neusiedler See („Wasserqualität“)</li> </ul> |
| <b>Physikalisch-chemische Parameter</b> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhalt des natürlichen Chemismus des Sees als Voraussetzung für die ökologische Funktionsfähigkeit und einen guten ökologischen Zustand (Salzgehalt, pH, Nährstoffe)</li> <li>• Erhalt der natürlichen räumlichen und zeitlichen Dynamik der physikalisch-chemischen Parameter</li> <li>• Niedriges Trophieniveau</li> <li>• Geringe externe und interne Nährstofffrachten</li> </ul>    |
| <b>Schadstoffe</b>                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhaltung des guten chemischen und guten ökologischen Zustands (spezifische und prioritäre Schadstoffe, Annex VIII und X EU-WRRL)</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Aquatische Lebensgemeinschaften</b>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Erhaltung des guten ökologischen Zustands</li> <li>• Erhaltung der natürlichen räumlichen und zeitlichen Variabilität von Biodiversität, Abundanz und Produktivität</li> <li>• Biologische Prozesse sollen weitgehend ungestört ablaufen</li> </ul>                                                                                                                                      |

## 1.4 Struktur des Syntheseberichts

Entsprechend der in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Aufgabenstellung gliedert sich der Synthesebericht in folgende Kapitel:

- Kap. 2      Ökosystemdienstleistungen
- Kap. 3      Stofftransport, Austauschprozesse und Frachten
  - Kap. 3.1    Einträge aus dem Einzugsgebiet
  - Kap. 3.2    Räumliche Muster und Gradienten
  - Kap. 3.3    Austauschprozesse
  - Kap. 3.4    Frachten von Fest-, Nähr- und Schadstoffen
  - Kap. 3.5    Eigenschaften eines Sodasees
  - Kap. 3.5    Schilfstruktur und -entwicklung
  - Kap. 3.5    Langfristige Entwicklungen
- Kap. 4      Szenarien unter anderen Rahmenbedingungen
- Kap. 5      Bewertung
- Kap. 6      Wissensdefizite und offene Fragen
- Kap. 7      Literatur

## 2 ÖKOSYSTEM-DIENSTLEISTUNGEN

Ökosystemleistungen sind definiert als der Nutzen, den Menschen aus Ökosystemen ziehen (Millenium Ecosystem Assessment (MEA)) (Reid et al. 2005), sowie als die direkten und indirekten Beiträge von Ökosystemen zum menschlichen Wohlbefinden (TEEB 2010). Die Ressourcen und Dienstleistungen, die von Lebensgemeinschaften und Lebensräumen abgedeckt werden, sind grundlegend für das menschliche Wohlbefinden und bestimmen die zukünftige wirtschaftliche und soziale Entwicklung (Abbildung 3).

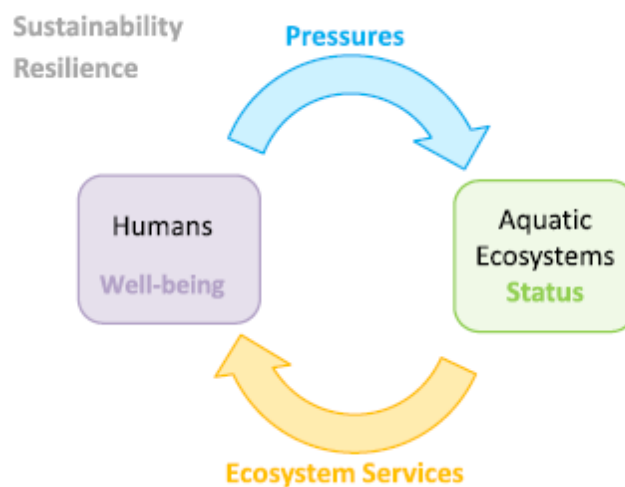


Abbildung 3. Beziehung zwischen Mensch und Ökosystem (aus: Grizzetti et al. (2016)).

Die grundlegenden wissenschaftlichen Ansätze aufgrund der Ökonomie und Klassifizierung von Ökosystemleistungen sind *The Economics of Ecosystem and Biodiversity (TEEB)* und *Common International Classification of Ecosystem Services (CICES)* (Haines-Young & Potschin 2012). Nach den MEA-Untersuchungen bezeichnet der Begriff Ökosystemleistungen im allgemeinen einen Nutzen, den der Mensch aus der Natur ziehen kann. Die Vorteile können im selben Ökosystem valorisiert oder unvalorisiert sein und in verschiedenen Zeiten, Räumen und Maßstäben gegeben sein. Schlüsselfaktor für Ökosystemleistungen ist die Biodiversität. Eine reiche Flora und Fauna ermöglicht einen stabilen natürlichen Zustand und eine Vielzahl an Dienstleistungsmöglichkeiten.

Gemäß MEA sind die vier wasserbezogenen Ökosystemdienstleistungen im Fall des Neusiedler Sees in Tabelle 2 zusammengefasst.

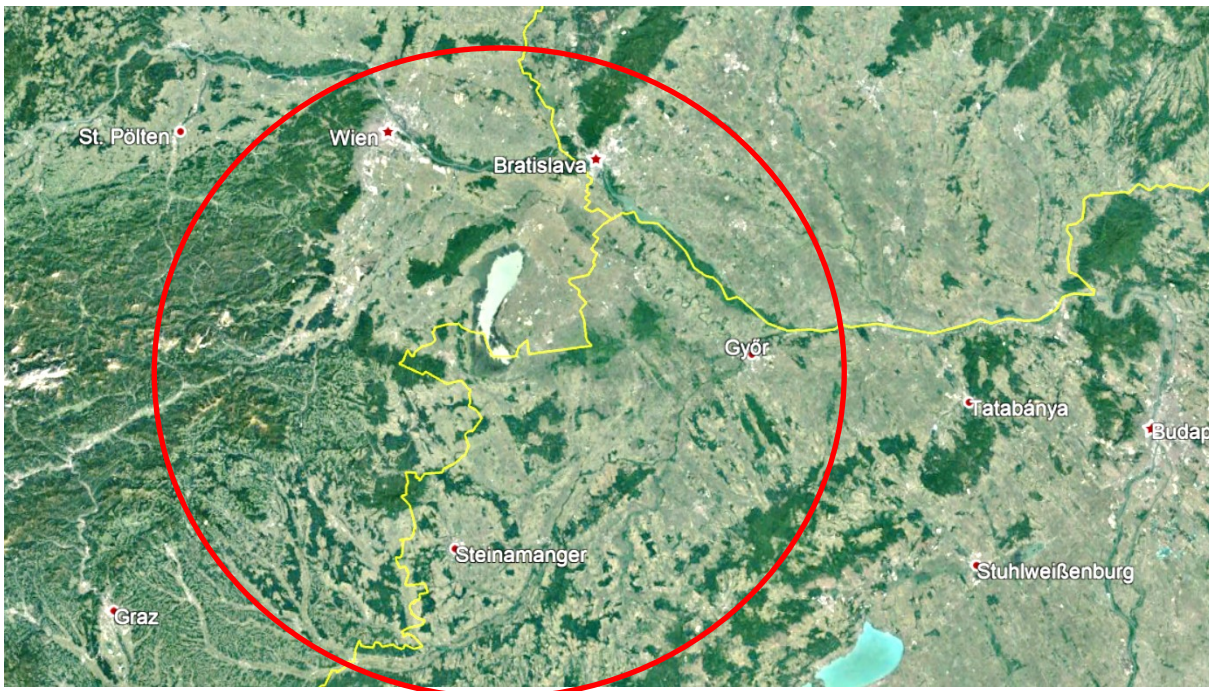


**Tabelle 2. Wasserbezogene Ökosystem-Diensteleistungen im Fall des Neusiedler Sees.**

| Bereitstellungs-<br>dienste | Regulationsdienste               | Kulturelle Dienste                  | Unterstützende<br>Dienste |
|-----------------------------|----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| Fischzucht                  | Regulation der<br>Wasserqualität | Landschaftstourismus                | Nährstoffkreislauf        |
| Fischerei                   | Lokale Klimaregulierung          | Erholung                            | Primärproduktion          |
| Schilfernte                 |                                  | Ökotourismus                        |                           |
|                             |                                  | Sportfischerei                      |                           |
|                             |                                  | Segeln                              |                           |
|                             |                                  | Ruder/Tretboot fahren               |                           |
|                             |                                  | Wassersport                         |                           |
|                             |                                  | Spielstätte für<br>Freilichttheater |                           |

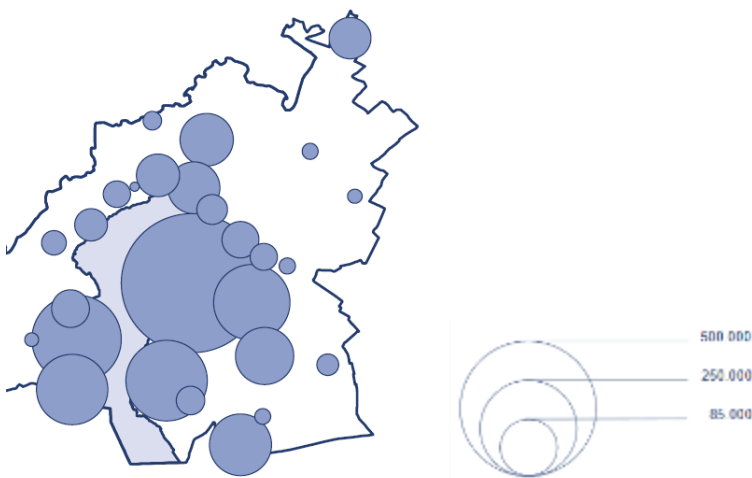
Wissenschaftler der Ungarischen Akademie der Wissenschaften untersuchten die Bedeutung von Ökosystemen im täglichen Leben (Báldi *et al.* 2017). Hohe Priorität wurde dem Plattensee eingeräumt, aber einige Punkte sind auch für den Neusiedler See gültig.

Die Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) hat einen direkten Bezug zu den Ökosystemleistungen. Im Fall des Neusiedler Sees müssen das Gesamtziel der WRRL, d.h. das Erreichen oder den Erhalt des guten ökologischen und chemischen Zustandes, wie auch die Maßnahmenprogramme die Anforderungen an die Ökosystemleistungen erfüllen (6<sup>th</sup> World Water Forum 2011). Eines der Hauptziele in diesem Prozess ist es, den Weg für eine zukünftige nachhaltige Entwicklung der nicht bewertbaren Güter für die nächste Generation zu finden. Der menschliche Druck auf den See ist enorm, in einem Umkreis von 100 km befinden sich zwei Hauptstädte mit insgesamt mehr als 3 Millionen Einwohnern (Abbildung 4).



**Abbildung 4. Fläche mit unmittelbarem, hohem anthropogenen Druck auf den Neusiedler See.**  
Quelle: Google Earth.

Im Einzugsgebiet gibt es keine nennenswerte Industrie. Das Einkommen der Einheimischen basiert auf dem Tourismus, der Landwirtschaft und den damit verbundenen Dienstleistungen; daher ist die sogenannte Tourismusindustrie dominant. Im Jahr 2019 wurden rund um den Neusiedler See auf der österreichischen Seite mehr als 1,6 Millionen Nächtigungen gezählt (Abbildung 5). Die Besucher nutzen die Angebote am See vor allem am Ostufer in Podersdorf (Statistik Burgenland 2020). Auf der ungarischen Seite sind die Zahlen weitaus geringer, aber die touristische Infrastruktur in Fertőrákos ist stark im Aufbau begriffen.



**Abbildung 5. Übernachtungen in der Region Neusiedler See in 2019 (aus: Statistik Burgenland (2020)).**

Die Klima- und Windverhältnisse – mehr als 2 000 Sonnenstunden pro Jahr – sind günstig für den Segelsport, auf der österreichischen Seite des Sees gibt es rund 4 150 Liegeplätze in Segelhäfen (Kurier 2018). Der grenzüberschreitende Nationalpark bietet Ökotourismus, der in der Definition der Internationalen Ökotourismus-Gesellschaft (TIES 2019) „verantwortungsvolles Reisen in Naturgebiete, das die Umwelt erhält, das Wohlbefinden der lokalen Bevölkerung fördert und Interpretation und Bildung beinhaltet“. TIES listet die folgenden Empfehlungen als Prinzipien in diesem Bereich auf:

- Aufbau eines Umwelt- und Kulturbewusstseins bzw. -respekt
- Positive Erfahrungen für Besucher und Gastgeber
- Direkte finanzielle Vorteile für den Naturschutz
- Finanzielle Vorteile für die lokale Bevölkerung und die Privatwirtschaft
- einprägsame Erlebnisse für Besucher, die die Sensibilität für das politische, ökologische und soziale Klima des Gastlandes erhöhen
- Planung, Bau und Betrieb von umweltfreundlichen Einrichtungen
- Minimierung der physischen, sozialen, verhaltensbezogenen und psychologischen Einflüsse
- Anerkennen der Rechte und des spirituellen Glaubens der indigenen Bevölkerung, partnerschaftliche Zusammenarbeit

Die Regulierungsleistungen und die lokalen klimatischen Bedingungen haben einen wesentlichen Einfluss auf die regionale Wein- und Gemüsekultur rund um den Neusiedler See. In den letzten Jahrzehnten sind die Versorgungsleistungen wie die Schilfnutzung und die kommerzielle Fischerei zurückgegangen, aber die Möglichkeiten sind noch vorhanden. Beide sind mit anderen Regulierungsleistungen wie der Regulierung der Wasserqualität verbunden, die im Rahmen des REBEN-Projekts in einem multidisziplinären Ansatz untersucht und bewertet wurde.

Es muss besonders darauf geachtet werden, dass die Ökosystemleistungen nicht überstrapaziert werden, um dramatische Folgen für das gesamte System und einen negativen Einfluss auf Sekundärnutzer zu vermeiden. Die Rückgewinnung oder Wiederherstellung ehemaliger Ökosystemleistungen ist sehr teuer und entspricht nicht immer den Anforderungen und Vereinbarungen der lokalen Bevölkerung.

In naher Zukunft besteht die dringende Notwendigkeit, die Ökosystemleistungen des Neusiedler Sees stärker mit den Umweltzielen zu verknüpfen, um Konflikte zwischen gegensätzlichen Interessen zu vermeiden – zum Wohle der Menschen und des Ökosystems.

# 3 STOFFTRANSPORT, AUSTAUSCHPROZESSE UND FRACHTEN

## 3.1 Einträge aus dem Einzugsgebiet

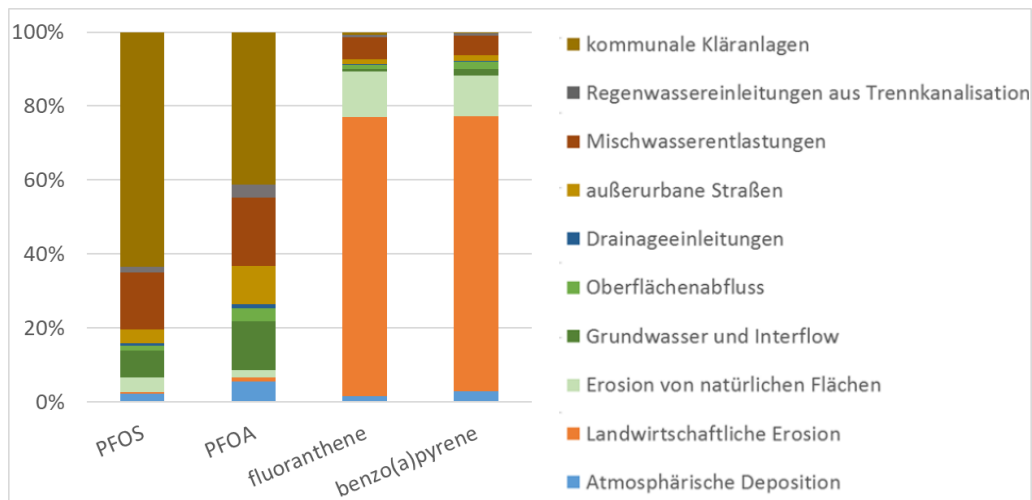
### ■ Einträge in die Wulka

Die Wulka ist der abflussreichste Zubringer in den Neusiedler See und stellt – neben dem atmosphärischen Eintrag und den direkt in den See mündenden Kläranlagen – auch den wichtigsten Eintragspfad für externe Nährstoffe in das Gewässer dar. Dies liegt einerseits an der intensiven landwirtschaftlichen Nutzung des Einzugsgebietes, aus dem große Mengen an partikulär gebundenen Nährstoffen in die Wulka abgeschwemmt werden. Andererseits ist das Nördliche Burgenland gegenüber anderen Regionen Österreichs vergleichsweise niederschlagsarm; in Trockenzeiten machen die Ausleitungen der gereinigten Abwässer der Kläranlagen im Einzugsgebiet mehr als 50% des Niederwasserabflusses der Wulka aus (Wolfram et al. 2019).

Während die Schwebstofffracht in der Wulka fast ausschließlich der landwirtschaftlichen Erosion entstammt, werden beim Phosphor im langjährigen Mittel immer noch annähernd 70% über diesen Eintragspfad und damit in partikulärer Form in die Wulka emittiert. Beim Stickstoff kommt der überwiegende Anteil der Einträge in gelöster Form über das Grundwasser und landwirtschaftliche Drainagen. Die landwirtschaftliche Erosion bzw. der partikuläre Transport sind hier vergleichsweise unbedeutend. Die Abwasserentsorgung liefert für beide Parameter nach flächendeckender Implementierung einer weitgehenden Phosphor- und Stickstoffentfernung bei der Abwasserreinigung etwa 20–25% der Emissionen in die Wulka.

Auch Spuren- bzw. Schadstoffe werden sowohl über diffuse als auch punktförmige Einträge in die Wulka emittiert. Die Abbildung 6 zeigt beispielhaft eine Abschätzung der Verteilung der Eintragspfade für die Parameter PFOS, PFOA, Benzo(a)pyren und Fluoranthen für die Wulka selbst aber auch für das gesamte Einzugsgebiet der Wulka inklusive Deposition auf die Seeoberfläche. Während bei den Perfluorotensiden PFOS und PFOA der Eintrag in die Wulka über abwasserwirtschaftliche Einrichtungen überwiegt, erfolgt jener der PAK überwiegend diffus über Erosion (Zessner et al. 2019). Für die Einträge in den See selbst dürfte auch die atmosphärische Deposition eine wesentliche Rolle

spielen, wobei hier die quantitativen Angaben aufgrund einer geringen Probenanzahl große Unsicherheiten aufweisen.



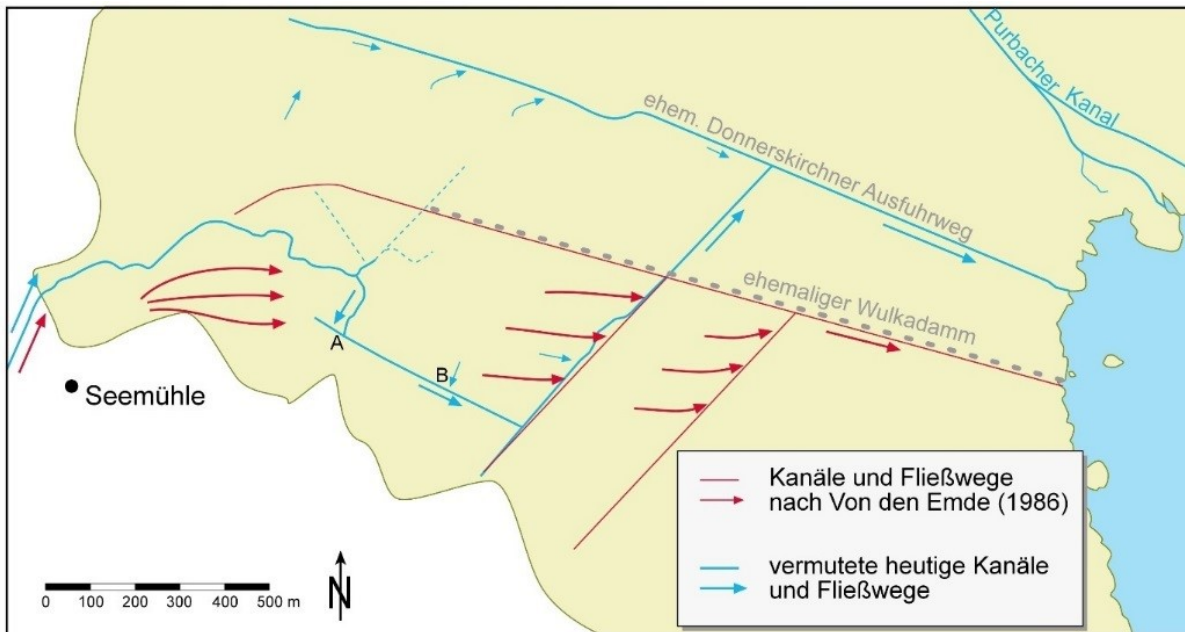
**Abbildung 6. Eintragspfade für ausgewählte Spurenstoffe in die Wulka (Zessner et al. 2019).**

#### ■ Einträge über die Wulka in den Neusiedler See

Bevor die Wulka tatsächlich in den Neusiedler See einmündet, durchströmt sie den mehrere Kilometer breiten Schilfgürtel. Hier kommt es, wie man seit langem weiß, zu mannigfaltigen und komplexen Umsetzungsprozessen. Dass die Erkenntnisse früherer Untersuchungen nicht direkt auf die heutige Situation übertragbar sind, hängt damit zusammen, dass der Weg der Wulka durch den Schilfgürtel im Laufe der letzten Jahrzehnte immer wieder Veränderungen unterworfen war. Der genaue Verlauf der Fließwege war zu Beginn des Projektes ungenügend bekannt.

Wie mehrmalige Befahrungen des Gebietes zeigten, besteht die ehemals breitflächige Durchströmung des Schilfgürtels heute nicht mehr in dem gleichen Ausmaß wie bei früheren Untersuchungen. Das könnte daran liegen, dass im Zuge der regelmäßigen Ertüchtigung der Kanäle Sedimente entlang der Schilfkanäle aufgehäuft und damit Längsdämme geschaffen wurden, die nur an sehr wenigen Öffnungen dieser Barrieren eine Durchströmung ermöglichen. Im Detail bestehen aber Unsicherheiten, insbesondere was die Fließwege bei höheren Wasserführungen der Wulka anlangt. Feststehen dürfte jedenfalls, dass heute die lineare gegenüber der diffusen Durchströmung des Schilfgürtels überwiegt (Abbildung 7) (Wolfram et al. 2019).





**Abbildung 7. Fließwege der Wulka durch den Schilfgürtel des Neusiedler Sees in den 1980er Jahren (nach Von der Emde et al. (1986)) und aktuell vermutete Fließwege.**

Die aktuellen Untersuchungen bestätigen grundsätzlich die Bedeutung der Umsetzungsprozesse im Schilfgürtel. Es zeigen sich jedoch deutliche Unterschiede eines rascheren Durchfließens über Kanäle gegenüber einer diffusen und langsamen Durchströmung des Schilfgürtels mit wesentlich ausgeprägteren Umsatzvorgängen (Denitrifikation, Feststoffrückhalt, Rücklösung von gelöstem Phosphor). Insgesamt konnte keine signifikante Veränderung der Gesamtposphor-Konzentrationen zwischen der Wulka und der Mündung in den offenen See am äußeren Rand des Schilfgürtels nachgewiesen werden, da sich Rückhalt von partikulärem Phosphor und Rücklösung von gelöstem Phosphor bei geringem bis mittlerem Abfluss die Waage halten. Beim Stickstoff ist zwar infolge der Denitrifikation eine Reduktion der Konzentrationen zu verzeichnen, eine völlige Aufzehrung bis zur Mündung in den offenen See jedoch keinesfalls gegeben. Jedenfalls für den Gesamtposphor, für den Stickstoff nur zum Teil, scheint zu gelten, dass die Frachten, die die Wulka in Richtung See transportiert, bei Nieder- und Mittelwasser auch tatsächlich den offenen See erreichen. Dieser Unterschied zu den Befunden von Anfang der 1980er Jahre mag daran liegen, dass die Grundbelastung der Wulka heute deutlich geringer ist als vor 30–40 Jahren (Wolfram et al. 2019). (Für Hochwasser liegen keine sicheren Befunde vor, doch deuten die Schwebstoffmessungen an den Online-Wasserqualitätsstationen darauf hin, dass ein Großteil des partikulär gebundenen Phosphors im Schilfgürtel verbleibt.)

Zwei wesentliche offene Fragen sollten jedoch nicht vergessen werden: Zum einen ist nicht gesichert, dass wirklich der gesamte Wulkaabfluss mit dem Messprogramm des Projekts



REBEN hinreichend erfasst wurde. Wie zuvor betont, sind die diffusen Fließwege der Wulka keineswegs vollständig bekannt. Zum anderen variierte der Abfluss der Wulka zu den Zeitpunkten der Messungen zwischen Niederwasser und zweieinhalbfachem Mittelwasser. Die Verhältnisse und Umsetzungsprozesse bei Hochwasser konnten im Rahmen des Projektes nicht erfasst werden. Diese Frage sollte daher anhand von laufenden Tracer-Versuchen bei unterschiedlicher Wasserführung der Wulka geklärt werden.

#### ■ *Einträge vom Rákos patak in den Neusiedler See*

Im Rahmen des Projekts REBEN wurden keine spezifischen Untersuchungen am Rákospatak, dem Golser Kanal oder anderen kleinen Zuflüssen zum See durchgeführt. Diese Zubringer wurden jedoch in früheren Stoffbilanzen berücksichtigt (Wolfram *et al.* 2007; Wolfram & Herzig 2013; Wolfram *et al.* 2012), was es erlaubt, die Ergebnisse früherer Analysen in diese Synthese einzubeziehen.

Um den Schutz der Wasserqualität des Neusiedler Sees zu verbessern, die externe Nährstoffbelastung des Sees zu reduzieren und die Degradierung des Schilfs zu verringern, wurden zwei Feuchtgebiete eingerichtet, eines für die biologische Nachbehandlung des gereinigten Abwassers aus der Fertőrákos-Kläranlage und eines für den Rákos-Bach. Die Inbetriebnahme fand im Jahr 2004 statt. Seit 2008 werden die Abwässer aus Fertőrákos in die integrierte Kläranlage in Sopron umgeleitet. Die Kläranlage Balfi, die früher ihre gereinigten Abwässer in den See einleitete, wurde 2016 geschlossen. Eine operative Überwachung der Wasserqualität wird an mehreren Stellen des Feuchtgebietes am Kroißbach (Rákos patak) durchgeführt (Abbildung 8).

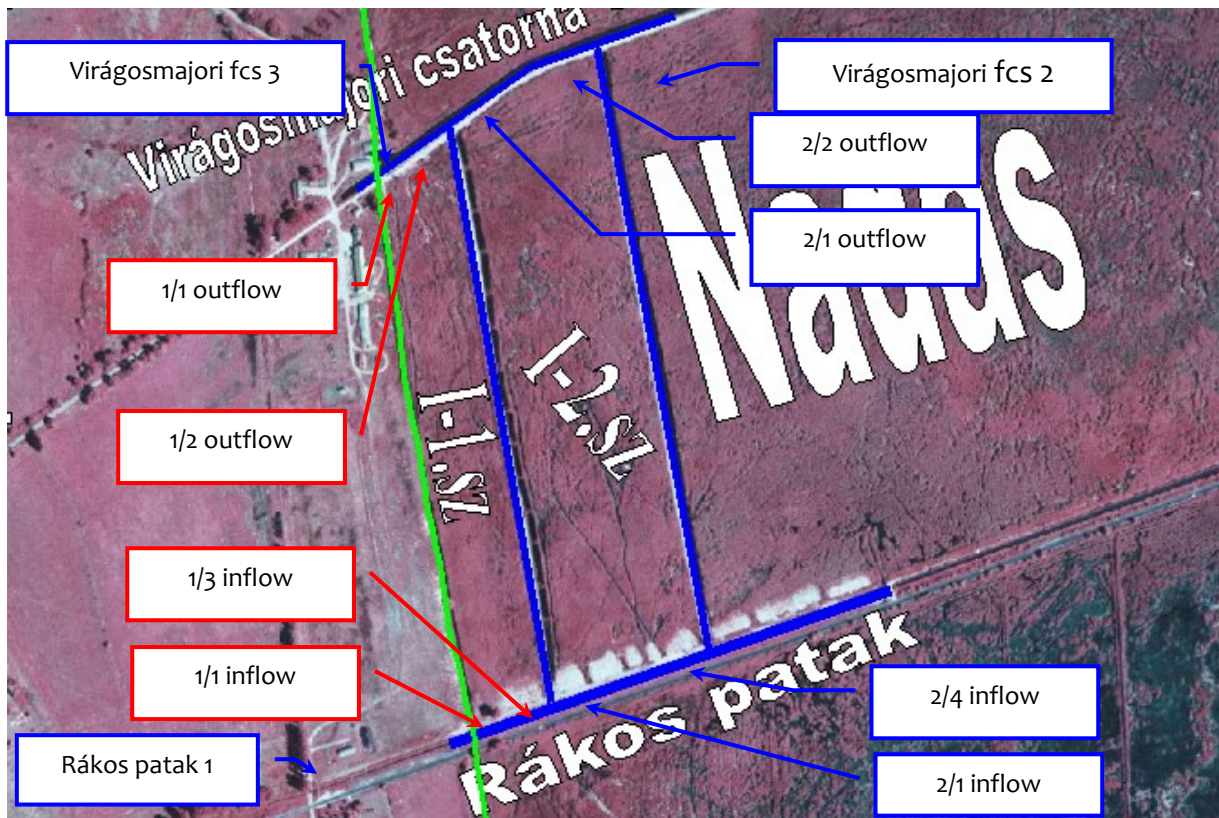


Abbildung 8. Probenahmestellen im Feuchtgebiet um den Kroißbach (Rákospatak).

### 3.2 Räumliche Muster und Gradienten

#### ■ Mosaik aus Schilf und Wasserflächen

Der Schilfgürtel im Mündungsbereich der Wulka stellt einen Sonderfall dar, der durch einen ständigen Stoffeintrag aus der Wulka und durch eine gerichtete Strömung von der Wulka zum See hin geprägt ist. Der sonstige Schilfgürtel ist durch wechselnde Strömungsrichtungen und Stofftransport vom See in den Schilfgürtel, aber auch umgekehrt geprägt. Doch auch so ist dieser größere Teil des Schilfgürtels des Neusiedler Sees kein homogener oder gar monotoner Lebensraum, sondern durch eine hohe Strukturvielfalt ausgezeichnet. Großräumig betrachtet, sticht der Unterschied zwischen den mehrere Kilometer breiten Schilfgürtelbereichen am Westufer bzw. im ungarischen Teil und dem schmalen Saum am Ostufer zwischen Weiden und Illmitz ins Auge. Er resultiert aus der höheren Exposition des Ostufers gegenüber den vorherrschenden NW-Winden. Die stärkere mechanische Einwirkung von Wind und Wellen am Ostufer spiegelt sich unter anderem im größeren (sandigeren) Sediment und im unterschiedlichen Sedimentchemismus wider.

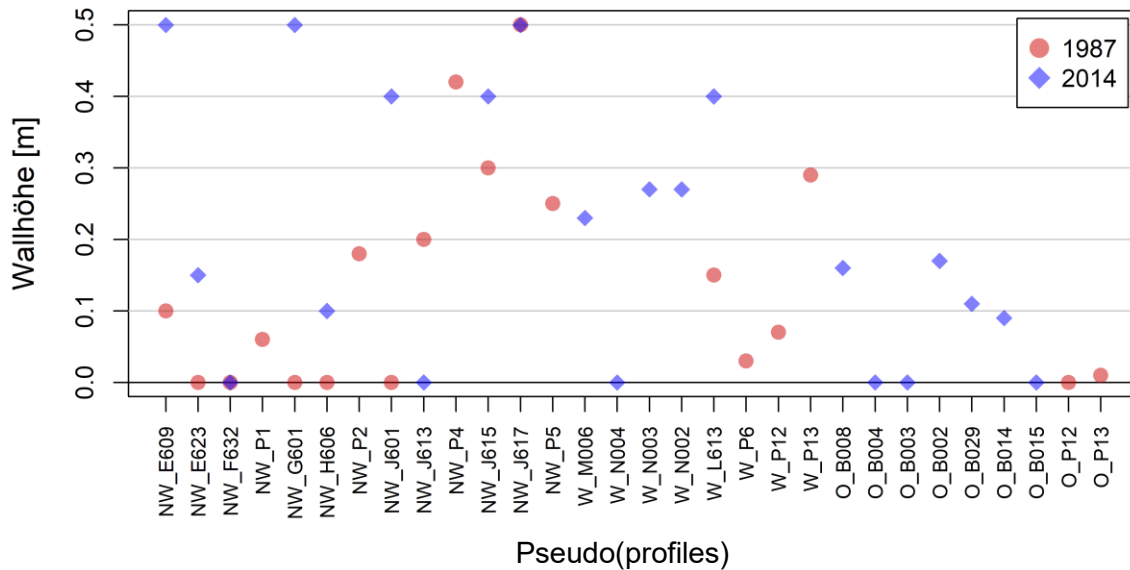
Auf einer kleinräumigeren Ebene präsentiert sich der Schilfgürtel als Mosaik aus dichten Schilfbeständen, lockerem Jung- oder Altschilf und offenen Wasserflächen. Letztere bilden ein enges Netz schmaler Kanäle, in einigen Bereichen gibt es aber auch ausgedehnte Wasserflächen (Blänkensysteme), in denen der Wind eine Angriffsfläche findet und lokal zu einer Aufwirbelung von Feinsedimenten und einer autochthonen Trübe im inneren Schilfgürtel führen kann.

Die unterschiedlichen Strukturen sind im Schilfgürtel nicht zufällig verteilt. Ein breites Band mit besonders undurchdringlichem Schilf zieht sich fast rund um den gesamten offenen See, während die großen offenen Blänke charakteristischerweise in den inneren Schilfgürtelbereichen Höhe Mörbisch und Illmitz zu finden sind. Aus naturschutzfachlicher Sicht werden diese offenen Wasserflächen oftmals pejorativ als „degradiert“ bezeichnet; sie sind vermutlich zumeist eine Spätfolge des Schilfschnitts mit schweren Erntemaschinen. Andere Schilfseen (Herrlakni und Hidegségi in Ungarn, Ruster Poschn und Hoadaseppl-poschnlucka in Österreich) sind natürlichen Ursprungs.

#### ■ Strukturgradienten und Schwebstoffe

Für die Fragestellungen des Projekts REBEN von besonderem Interesse sind hydro-morphologische und stoffliche Gradienten zwischen der Schilfkante zum offenen See und der landseitigen Grenze des Schilfgürtels. Ein offensichtlicher Gradient betrifft die Wassertiefe, die von der See-Schilf-Grenze in Richtung der vorseelischen Wiesen abnimmt, wobei der eigentliche Übergang zum Land aufgrund der Wasserstandsschwankungen schwer fassbar ist. Für die Stoffumsätze im Schilfgürtel dürfte dieser Übergangsbereich dennoch eine nicht unerhebliche Rolle spielen, ist er doch infolge des häufigen Wechsels vom benetzten zum trockenen Zustand komplexen Umsetzungsprozessen unterworfen.

Die Wassertiefen sind jedoch auch seeseitig im Schilfgürtel keineswegs einheitlich und klar definiert. In dem oben angesprochenen breiten Band dichter Schilfbestände liegt der sog. Seewall, eine Sedimentaufhöhung, die auf früheren Eintrag von Seetrübe und Ablagerung von Feinsedimenten in Bereichen geringer Turbulenz zurückzuführen ist. Leider sind die Daten zur Höhe des Seewalls in verschiedenen Bereichen des Schilfgürtels nicht ausreichend, um ein konsistentes Bild seiner zeitlich-räumlichen Veränderungen zeichnen zu können. Die Auswertungen von E. Csaplovics (Bericht 2 des österreichischen Expertenteams) zeigen zumindest die Bandbreite der Dynamik der Höhenveränderungen auf Basis der ausgedehnten Erhebungen der späten 1980er Jahre und der deutlich eingeschränkten Datenmenge aus dem GeNeSee-Projekt (Abbildung 9).



**Abbildung 9. Wallhöhen an mehreren Profilen und Pseudo-Profilen an der See-Schilfgürtel-Grenze (aus Kap. 3 in Teilbericht 2 „Schilfstruktur und Morphologie“).**

Zäsuren durch den Seewall und zugleich bevorzugte Transportpfade vom See in innere Schilfgürtelbereiche sind die zahlreichen künstlichen Kanäle. Entlang dieser linearen Strukturen verlaufen abnehmende Gradienten von Schwebstoffen, d.h. anorganischen Partikeln ebenso wie pflanzlichem und tierischem Plankton. Die Kanäle sind aber auch Wanderwege von Fischen, die im Frühjahr geeignete Laichplätze oder je nach Milieubedingungen günstigere Standorte im Schilfgürtel oder im freien See aufsuchen.

#### ■ Gelöste Inhaltsstoffe

Die Ergebnisse der Projekts REBEN unterstreichen die Bedeutung der Kanäle für unterschiedliche Ausprägungen im Chemismus innerhalb des Schilfgürtels des Neusiedler Sees. In Bereichen, die gar nicht oder nur über sehr lange Kanalwege mit dem offenen See verbunden sind, kann das Wasser im Schilfgürtel dreimal so hohe Konzentrationen gelöster Wasserinhaltsstoffe erreichen wie im offenen See. Es wurden Werte der elektrischen Leitfähigkeit bis  $>6\,000\ \mu\text{S cm}^{-1}$ , Chlorid-Konzentrationen von  $800\ \text{mg L}^{-1}$  und Alkalinitäten bis knapp  $40\ \text{mMol L}^{-1}$  gemessen. Die Aufkonzentration führt in der Folge durch Ausfällung von Calcium zu Verschiebungen im Ionengleichgewicht.

Isolierte und schlecht angebundene Wasserflächen im inneren Schilfgürtel zeichnen sich zudem durch Temperaturextreme ( $> 35^\circ\text{C}$ ) und große diurnale Temperaturschwankungen aus. Der ungenügende Austausch mit dem offenen See hat auch zur Folge, dass Abbauprozesse in kleinräumig strukturierten Blänken besonders stark zu Tage treten, was sich

beispielsweise im Sommer und Herbst in einer intensiven Sauerstoffzehrung bis zu völlig anoxischen Bedingungen manifestiert.

Bei den Nährstoffen wurde in den Kampagnen des vorliegenden Projekts entlang der Transekte vom See Richtung Land eine Abnahme von Silizium (Aufzehrung durch Schilf, Characeen und planktische Algen) und Nitrat (Denitrifikation) sowie eine Zunahme des gelösten organischen Stickstoffs und Kohlenstoffs (Aufkonzentrierung, Akkumulation von Huminstoffen) und des gesamten gelösten Phosphors (Aufkonzentrierung und Rücklösung) dokumentiert.

Auch bei manchen Schadstoffen lässt der deutliche Unterschied zwischen den Konzentrationen im inneren Schilfgürtel und im freien See auf eine Aufkonzentration oder auf Rücklösungsprozesse schließen, was mit den Befunden aus den Laborversuchen in Einklang steht (höhere Mobilisierungsraten bei höherer Temperatur und geringer Sauerstoffkonzentration).

#### ■ Sediment

Ähnliche Gradienten wie im Freiwasser kennzeichnen die physikalisch-chemische Zusammensetzung des Sediments. So nehmen beispielsweise organischer Gehalt und Wassergehalt entlang der Transekte vom See in Richtung Land markant zu. An isolierten Standorten wurden im sehr lockeren, flockigen Sediment Glühverluste bis >40% und Wassergehalte bis >95% gemessen. Es ist anzunehmen, dass hier ein hoher Anteil an Huminkomplexen im organischen Material einer Kompaktierung des Sediments entgegensteht. Mit dem organischen Gehalt sind verschiedene Schadstoffe positiv korreliert (z.B. PFOS). Bei den Nährstoffen wurde im Rahmen des Projekts REBEN eine Zunahme des Gesamt-Phosphorgehalts pro g Trockensubstanz nachgewiesen, während der Gehalt pro Fläche (und damit pro Sedimentvolumen) Richtung Land abnimmt. Unter den verschiedenen Phosphorbindungsformen ist es vor allem die organische und die an Huminstoffe gebundene Fraktion, die entlang der Transekte landwärts zunimmt.

Zusammenfassend konnten damit im Projekt REBEN folgende Einflussfaktoren und Ursachen für die vorgefundenen Gradienten bestätigt werden:

- der *Wasserstand* (in Abhängigkeit von Niederschlag und Zuflüssen versus Verdunstung und Ableitungen)
- menschliche Nutzungen (*Schilfschnitt*) – vor allem in seinen langfristigen Auswirkungen durch Schädigung des Schilfs und die Entstehung *ausgedehnter Wasserflächen* im inneren Schilfgürtel
- die Errichtung und Ertüchtigung von *Kanälen*, die als vorrangige Transportpfade zwischen offenem See und zentralem Schilfgürtel fungieren



Dass diesen hydromorphologischen Einflussgrößen und Rahmenbedingungen eine zentrale Bedeutung für die Wasserqualität des Sees zukommt, ist nicht neu. Mit dem Projekt REBEN konnten die Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Faktoren und Parametern jedoch wesentlich genauer erfasst und beschrieben sowie die Verteilungsmuster und die zeitliche Variabilität im Detail dokumentiert werden. Von besonderer Bedeutung ist aber der Schritt von der qualitativen Beschreibung hin zu einer Quantifizierung von Austauschprozessen (Kapitel 2.3), die schließlich die Grundlage für die Abschätzung von Frachten (Kapitel 2.4) bilden.

### ■ Ökologische Gradienten

Planktongemeinschaften und Fischzönose sind innerhalb des Schilfgürtels durch deutliche, teilweise gegenläufige Gradienten vom offenen See Richtung landwärts gekennzeichnet. Dabei ist festzuhalten, dass insbesondere das Plankton im Schilfgürtel keineswegs nur leicht abgewandelte „See-Gemeinschaften“ ausbildet, sondern sich durchaus eigenständig präsentiert.

Die Unterschiede in der Ausprägung der Populationen von Phytoplankton, Zooplankton und Fischen an den isolierten Standorten im Schilfgürtel unterstreichen die Bedeutung der Anbindung an den offenen See. Die in physikalisch-chemischer Hinsicht extremen Verhältnisse in den mehrheitlich windgeschützten und strömungsberuhigten Bereichen des Schilfgürtels ermöglichen das Aufkommen einer spezialisierten und diversen planktischen Lebensgemeinschaft, die sich bei Fehlen nennenswerter Fischdichten (und damit Prädatoren) divers und mit hohen Dichten und Biomassen entwickeln können. Bei ungenügender Anbindung an den freien See und entsprechend eingeschränkten Wandermöglichkeiten für Fische kann also das vergleichsweise gute Nahrungsangebot im inneren Schilfgürtel von Fischen nur wenig genutzt werden, da diese mehrheitlich auf die seenahen und gut angebundenen Bereiche beschränkt sind.

Aus fischökologischer Sicht wäre demnach eine verbesserte Konnektivität zwischen offenem See und den Wasserflächen im inneren Schilfgürtel wünschenswert. Die Dämpfung von physikalisch-chemischen Extremen würde eine erhöhte „Besiedelbarkeit“ dieser Bereiche durch Fische ermöglichen und ihnen neue Laichplätze und Nahrungsressourcen erschließen. Für das Phyto- und Zooplankton aber hätte eine verstärkte Anbindung einen vermehrten Austausch zwischen den beiden großen Teillebensräumen zur Folge, der sich positiv auf die Biodiversität auswirken würde.



### 3.3 Austauschprozesse

#### ■ Faktor Zeit

Die hydrologischen und stofflichen Gradienten innerhalb des Schilfgürtels – im vorigen Kapitel und im Detail in den Berichten Nr. 3 bis Nr. 5 des österreichischen Expertenteams dargestellt – sind keinesfalls statisch, sondern lediglich typische, gewissermaßen „durchschnittliche“ Verteilungsmuster und Ergebnis komplexer Austauschprozesse, letztlich aber einer erheblichen zeitlichen Variabilität unterworfen.

Der Stoffaustausch erfolgt auf unterschiedlichen Ebenen

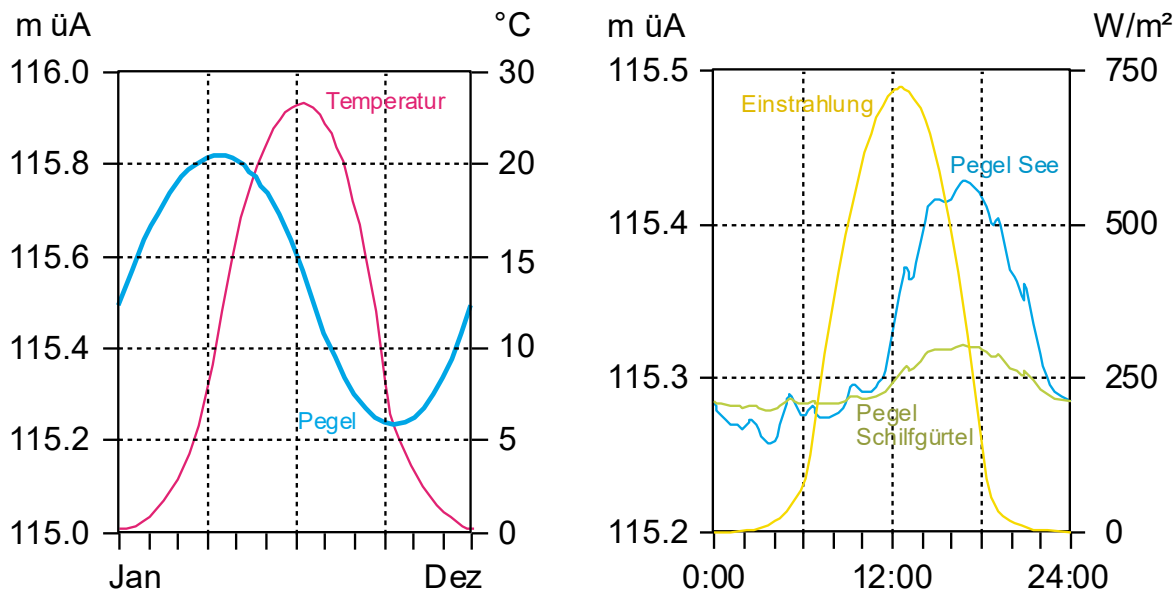
- zwischen dem offenen See und dem Schilfgürtel
- zwischen verschiedenen Bereichen innerhalb des Schilfgürtels
- zwischen Sediment und Wassersäule

sowie in unterschiedlichen zeitlichen Rhythmen. Aufgrund seiner Größe und geringen Wassertiefe sowie der geografischen Lage im, durch starke Winde gekennzeichneten, pannonischen Flachland ist der Neusiedler See vor allem zwei maßgeblich hydrologischen Rhythmen unterworfen:

- der Periodik der meteorologischen Wasserbilanz (d.h. dem saisonal schwankenden Verhältnis von Niederschlag und Verdunstung), und
- dem Wechsel zwischen windstillen Phasen und solchen mit starkem Einfluss durch Wind und Wellen

Diese beiden externen Faktoren – Niederschlag/Verdunstung und Wind – sind die entscheidenden meteorologisch-hydrologischen Zeitgeber für die Austauschprozesse im See. Sie werden überlagert durch die Tagesrhythmik von Licht (als Zeitgeber für die Photosynthese und somit für die Rhythmik sauerstoffauf- und abbauender Prozesse) sowie der Abbildung 10).

Für die Austauschprozesse sind vor allem die Seiche-Bewegungen von Interesse (stehende Wellen des Sees). Die am See vorherrschenden NW-Winde unterliegen oftmals einer Tagesrhythmik, die zu einem „Kippen des Wasserspiegels“ in Nord-Süd-Ausrichtung führt. Ebenfalls windbedingt sind die Seiche-Bewegungen in Ost-West-Ausrichtung, die aufgrund der kurzen Strecke nicht im Tagesrhythmus, sondern in Wellen meist zwischen einer halben und einer ganzen Stunde erfolgen.



**Abbildung 10.** Schematische Darstellung der prägenden Rhythmik am Neusiedler See. Links: saisonal mit Wasserstand und Temperatur, rechts: diurnal mit typischem Windereignis und entsprechender Seiche-Bewegung sowie Globalstrahlung.

#### ■ Sediment – Wasser (Laborversuche)

Die Austauschprozesse in der Sediment-Wasser-Übergangszone sind äußerst komplex und anhand von Freilandmessungen nur schwer quantitativ zu erfassen. Um die wichtigsten Zusammenhänge und Einflussgrößen beschreiben zu können, wurden daher im Projekt REBEN Laborversuche zur Adsorption und zur Mobilisierung ausgewählter Stoffe durchgeführt.

Anhand der Adsorptionsversuche konnte aufgezeigt werden, dass für bestimmte Stoffe, wie z.B. PFOS, noch eine ausreichend hohe Adsorptionskapazität des Sediments vorhanden ist, d.h. das Sediment im Schilfgürtel kann weiterhin als Senke für diese Schadstoffe fungieren. Bei anderen Schadstoffen, wie z.B. manchen Schwermetallen, ist die Adsorptionskapazität hingegen nahezu erreicht, d.h. die Fähigkeit, weitere Stoffe zu adsorbieren, ist derzeit gering. Damit ist auch ein grundsätzliches Potenzial für eine Rücklösung oder eine Aufkonzentration neu eingebrachter und nicht mehr adsorbierbarer Schadstoffe gegeben. Dass dies derzeit (noch) nicht der Fall ist, dürfte daran liegen, dass laufend neues Sediment (v.a. Ca-Mg-Karbonate) gebildet wird, welches damit auch neue Adsorptionsflächen zur Verfügung stellt. Der Seetrübe kommt damit nicht nur beim Abbau von organischem Material (vgl. Krachler *et al.* (2009)), sondern auch zur Adsorption und damit als Senke von Schadstoffen eine große Bedeutung zu.

In den unterschiedlichen Versuchsansätzen mit variablen Wassertemperaturen und Sauerstoff-Konzentrationen (hier aber auch Überlagerung durch schwankende pH-Werte) wurde

zwar kein erkennbarer Einfluss dieser Variablen auf die Adsorption nachgewiesen, sehr wohl aber auf die Mobilisierung von Schadstoffen. Zumindest einige Schwermetalle wurden bei höheren Temperaturen und unter anaeroben Bedingungen (resp. niedrigeren pH-Werten) mobilisiert. Bei den Schadstoffen PFOS und PFOA konnte sogar unter aeroben Verhältnissen ein deutliches Mobilisierungspotenzial nachgewiesen werden. Das gilt mit Einschränkungen auch für Phosphor, dessen Mobilisierungsraten am deutlichsten von der Ausgangskonzentration beeinflusst wurden.

Die unterschiedlichen Reaktionen auf geänderte Sauerstoff- und Temperaturbedingungen in unterschiedlichen Versuchsansätzen (Überströmung versus Schüttelversuche) lassen den Schluss zu, dass der Interaktion Wasser – Sediment eine große Bedeutung für den Stoffaustausch an der Sediment-Wasser-Übergangszone zukommt. Relevant ist dieser Befund für Überlegungen zur Aufwirbelung von Sediment, sei es windbedingt in offenen Wasserflächen im Schilfgürtel, sei es künstlich im Zuge der Ertüchtigung von Kanälen. In Hinblick auf die unterschiedlichen Strukturen im Schilfgürtel könnte daraus abgeleitet werden, dass in offenen Blänkensystemen wie im inneren Schilfgürtel Höhe Mörbisch ein größeres – und letztlich effektiveres bzw. quantitativ bedeutenderes – Potenzial zur Remobilisierung von Schad- und Nährstoffen besteht als in engen, dichten Schilfbereichen mit geringem Windangriff und stark eingeschränkter Durchströmung. Andererseits besteht dort ein höheres Risiko zur Ausbildung anaerober Verhältnisse in dichten Schilfbeständen, was ebenfalls eine verstärkte Remobilisierung von Schadstoffen wie manchen Schwermetallen, PFOS/PFOA und wohl auch Phosphor nach sich zieht.

#### ■ Offener See – Schilfgürtel (Wasserqualitätsmessstationen und Windereignis)

Der Wasser- und Stoffaustausch zwischen offenem See und Schilfgürtel konnte im Rahmen des Projekts REBEN detailliert anhand der Wasserqualitätsmessstationen, der anlassbezogenen Messserie im Herbst 2019 (Windereignis) und der hydraulischen Modellierungen dokumentiert werden. Bei niedrigen Wasserständen erfolgt der Austausch praktisch ausschließlich über Kanäle. Eine diffuse Durchströmung des Schilfs, wie sie für den See in den 1980er Jahren beschrieben wurde, ist erst möglich, wenn der Wasserstand deutlich über der Höhe des Seewalls am äußeren Rand des Schilfgürtels zum See liegt. Selbst dann aber ergaben die numerischen Modellierungen im Bereich Illmitz, dass das diffuse Einstromen von Seewasser sehr stark von der jeweiligen Schilfsituation abhängt. Modellrechnungen mit einer Welle bis zu 115,80 m ü.A. und einer noch vorhandenen „Durchlässigkeit“ (ausgedrückt über den Rauigkeitsbeiwert nach Strickler von  $k_{St}=4 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ ) des überströmten Schilfbereiches zeigten, dass es durchaus zu einem diffusen Eindringen von Seewasser bis weit in den Schilfgürtel kommen kann. Ähnliche Beobachtungen wurden auch im Schilfgürtel im Bereich der Wulka gemacht. Es gibt jedoch auch Hinweise, dass ein

Schilfbestand kaum durchlässig ist und eher wie ein „Wehr“ wirkt und praktisch kein diffuses Durchströmen stattfindet. In diesem Fall sind zwei Phänomene zu beobachten:

- i. Es kommt zu einem langsamen Benetzen bzw. Auffüllen der Schilfbereiche aus den größeren, an den See angeschlossenen Wasserflächen im landseitigen Bereich des Schilfgürtels, und/oder
- ii. es findet eine Durchströmung über die Vielzahl vorhandener kleiner und kleinster Kanäle, die wiederum aus den größeren an den See angeschlossenen offenen Wasserflächen gespeist werden, statt.

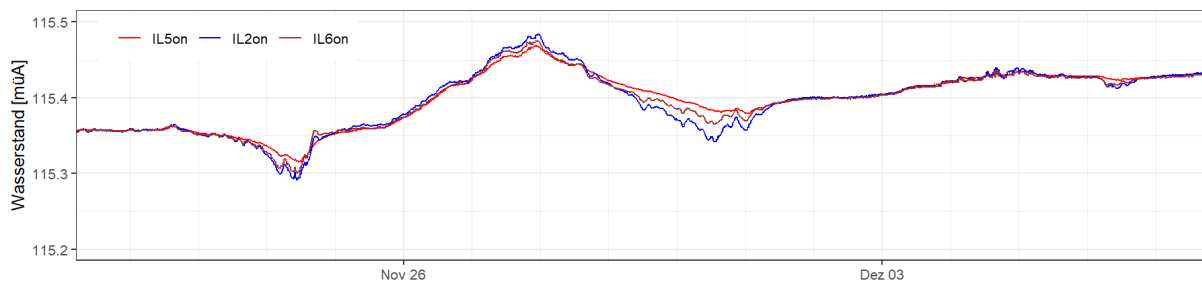
Aus den Messkampagnen während der Projektphase konnten aus Messungen über zwei bis drei Tage mit zeitlich hoher Auflösung in jeweils einem Kanal in Illmitz (siehe Abbildung 11) und Mörbisch sowie den Daten aus den Online-Stationen Abschätzungen über mögliche Austauschmengen gewonnen werden. Die Messkampagne in Illmitz ermöglichte auch die Überprüfung der numerischen Modellierung (siehe Bericht 1 „Hydrologie“ des österreichischen Expertenteams).

In den Kanälen werden bei starken Winden und entsprechenden Seiche-Bewegungen erstaunlich hohe **Fließgeschwindigkeiten** von bis zu mehreren Dezimetern pro Sekunde erreicht. Bei einer angenommenen Kanal-Querschnittsfläche von  $2 \text{ m}^2$  (5 m Breite  $\times$  0.4 m Tiefe) entspricht das einem Durchfluss von bis zu  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Über eine längere Zeit werden so über einen einzigen Kanal große Wassermassen aus dem offenen See in den Schilfgürtel und wieder zurückverfrachtet. Abbildung 11 zeigt exemplarisch den Verlauf des Wasserstands an drei Wasserqualitätsmessstationen bei Illmitz. In den hintersten Bereichen des Schilfgürtels wurde über mehrere Tage hinweg eine Aufhöhung von  $>10 \text{ cm}$  gemessen. Bei einer Wasserfläche von  $>14 \text{ ha}$  in den offenen Braunwasserflächen nahe Sonde IL5 (siehe Bericht 3 „Chemie“ des österreichischen Expertenteams) entspricht dies einem Wassertransport von  $>14\,000 \text{ m}^3$ !

Die **Dauer der Ein- bzw. Ausströmphasen** kann aus Videoaufzeichnungen und anhand der Messungen der Wasserqualitätsmessstationen gut abgelesen werden. Sie können sich über mehrere Tage erstrecken (siehe Abbildung 11), aber auch nur sehr kurz dauern (z.B. wenige Minuten). Letzteres zeigt sich in den Aufzeichnungen der Pegelkurven in einem unruhigen, zackigen Verlauf, d.h. es wechseln in kurzen Abständen Strömungsphasen mit (relativ) hoher Fließgeschwindigkeit und Ruhephasen, in denen sich die Strömungsrichtung umkehrt. Für den Stoffaustausch bedeutet das einen Wechsel von Transport (teilweise auch Erosion) und Sedimentation.

Wie sehr der Austausch über die Schilfkanäle und -gräben zur Geltung kommt, hängt einerseits vom Wasserstand, andererseits von der Größe und Form der Schilfkanäle ab. An engen Stellen (z.B. Höhe Illmitz, äußere Kante zum offenen See zwischen Messstelle IL3 und der sog. Zanderbucht, siehe Bericht 3 des österreichischen Expertenteams) ist das

Sediment stellenweise extrem hart, was auf eine permanente Erosion der Feinsedimente und sehr hohe Fließgeschwindigkeiten schließen lässt (Düseneffekt). Im inneren Schilfgürtel können Engstellen aber auch die Strömung behindern und einen Bremseffekt hervorrufen, was das Vordringen des Schilfs erleichtert und zu einem zunehmenden „Verstopfen“ des Kanals führt. Der **Prozess der Verlandung der Schilfkanäle** beschleunigt sich dann, bis der Wasseraustausch völlig zum Erliegen kommt. Das Ergebnis einer solchen Entwicklung – ein nach wenigen Metern verlandeter und verschilfter Kanal – zeigen beispielsweise der ehemalige Fischerkanal zwischen Ruster Poschn und offenem See Höhe Messstelle IL8 (siehe österreichischer Bericht 3) sowie die, längere Zeit nicht mehr ertüchtigten, Fischerkanäle in der Naturzone des Nationalparks im Südteil des Neusiedler Sees (z.B. sog. Thell-Kanal). Diese Entwicklung kann rasch gehen und nur wenige Jahre dauern. Die hydraulischen Modellierungen zeigen eindrucksvoll, dass der Wasseraustausch zwischen offenem See und Schilfgürtel infolge einer Verlandung der Schilfkanäle um ein bis zwei Zehnerpotenzen abnehmen kann. Dieser Effekt konnte auch sehr eindrucksvoll bei der numerischen Modellierung gezeigt werden (siehe Bericht 1 „Hydrologie“ des österreichischen Expertenteams).



**Abbildung 11.** Durch Wasserqualitätsmessstationen dokumentierte Wasserstandsschwankungen an drei Standorten im Schilfgürtel Höhe Illmitz zwischen 22.11.2018 und 07.12.2018. Die Station IL5on liegt in einer >14 ha großen, offenen Braunwasserfläche; 10 cm Aufhöhung entsprechen also einem Wassereintrag von >14.000 m<sup>3</sup>.

Die zuvor beschriebene Situation mit einem Wassertransport >14 000 m<sup>3</sup> über zwei bis drei Tage hinweg wurde in einem Bereich nachgewiesen, in dem es **große offene Wasserflächen im inneren Schilfgürtel** gibt. Solche Bereiche finden sich z.B. Höhe Illmitz und Mörbisch. Für den Bereich Mörbisch wurden maximale tägliche Frachten in einem Kanal sogar bis knapp 40 000 m<sup>3</sup> abgeschätzt, was dem täglichen Zufluss der Wulka bei Niedrigwasserabfluss entspricht.

Fehlen die offenen Wasserflächen im inneren Schilfgürtel (z.B. in dichten Schilfbeständen Höhe Oggau oder Breitenbrunn), so ist das Potenzial für den Wassertransport zwangsläufig geringer, da dann nur das Kanalnetz selbst sowie ein engmaschiges Mosaik aus

kleinen Blänken das Wasser aus dem offenen See aufnehmen kann. Es ist denkbar, dass der eingeschränkte Wassertransport und damit auch der reduzierte Schwebstoffeintrag in den Schilfgürtel dazu führt, dass die Seetrübe vermehrt in Sedimentationsflächen im freien See abgesetzt wird, d.h. in Buchten und im geschützten Lee hinter Schilfinseln. Beobachtungen starker Sedimentablagerungen am südlichen Rand der großen Schilfinsel im Nationalpark scheinen diese Hypothese zu unterstützen.

Neben dem Hinterland ist auch die **Lage und Form der Schilfkanäle** für den Wasser- und Stoffaustausch von Bedeutung. Die Analysen der kontinuierlichen Wasserqualitätsdaten Höhe Mörbisch zeigten, dass der größte Schwebstoffeintrag in den Schilfgürtel dann gegeben ist, wenn der Wind genau in Längsrichtung des Kanals bläst und damit das trübe Seewasser förmlich in den Schilfgürtel „hineinschiebt“. Die meisten Kanäle am Neusiedler See liegen am Westufer und sind in W-O-Richtung angelegt; der beschriebene Effekt ist daher nur bei einem (relativ seltenen) Ostwind gegeben. Ein größeres Potenzial für Wasser- und Stoffaustausch zwischen offenem See und Schilfgürtel haben bzw. hätten Kanäle am Ostufer des Sees (Höhe Illmitz bis Apetlon). Vermutlich beeinflussen auch die Form (geradlinig versus „verwinkelt“ und mit Engstellen) und die Vernetzung der Kanäle den Wasser- und Stoffeintrag in den Schilfgürtel. Darauf deuten die hydrologischen Untersuchungen im ungarischen Teil des Schilfgürtels hin, welcher durch ein dichtes Netzwerk von Kanälen gekennzeichnet ist.

Der Wind kann nämlich im **ausgedehnten ungarischen Teil des Schilfgürtels** eine beträchtliche horizontale Durchmischung bewirken, die auf einen schwerkraftbedingten Ausgleich von Wassermassen und nicht direkt auf Windscherung zurückzuführen ist. Wie im Bericht 1 der ungarischen Experten beschrieben, wurde durch numerische Modellierung nachgewiesen, dass die Durchströmungsstrecke etwa 1 km beträgt, wenn der Wasserstand den Seewall um 1 bis 2 Dezimeter übersteigt. Die Airborne-Laserscan-Vermessung im Rahmen des GeNeSee-Projekts konnte weder die unter Wasser liegende Mikrotopographie des Schilfgürtels auflösen noch bathymetrische Angaben zu aufgelassenen Kanälen und Braunwasserflächen liefern, so dass die flächige Überflutung nur mit einer reduzierten Genauigkeit modelliert werden kann.

Auch in den neu ausgebagerten ungarischen Kanälen üben die Sohlrauigkeit und vor allem das untergetauchte seitliche Schilf einen erheblichen hydraulischen Widerstand auf die Strömung aus. Die Kalibrierung ergab einen niedrigen Strickler-Koeffizienten von  $10 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ , der typisch für bewachsene Kanäle ist und nur unwesentlich kleiner ist als die in der österreichischen Modellierung angenommene Rauigkeit des Schilfbetts.

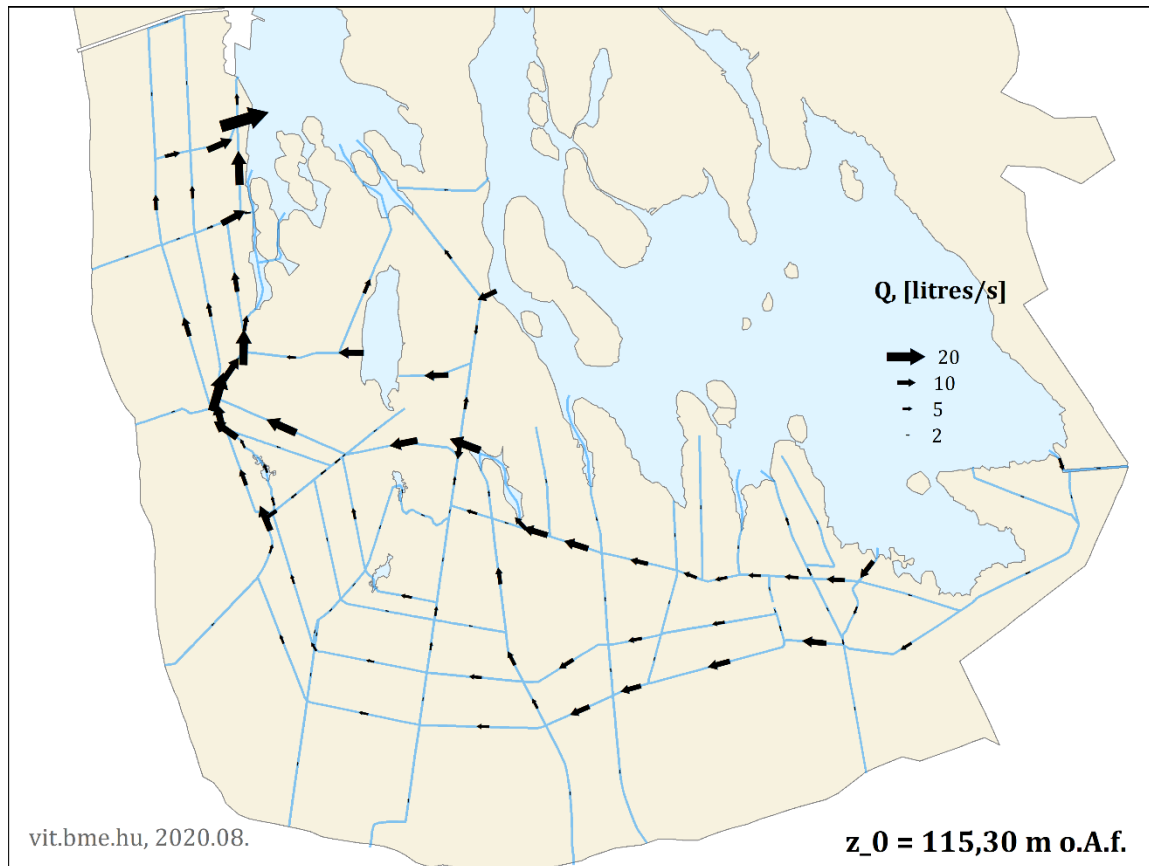
Windstöße im offenen See dringen als flache Translationswellen in die Kanäle ein, d.h. Oberflächenwellenform und Wassermasse bewegen sich in die gleiche Richtung. Diese **Oberflächenwellen schwächen sich mit der Entfernung** entsprechend ihrer Frequenz ab.



Seiche-Oszillationen (mit einer Periode von 1 Stunde oder weniger) nehmen innerhalb weniger Kilometer rasch auf einen Bruchteil ihrer Grenzamplitude ab, was die Schlussfolgerungen früherer Studien bestätigt (Takáts 1984). Im Gegensatz dazu dringt die aperiodische Komponente von Sturmfluten, an- und abschwellige Winde, die eine Zeitskala von Tagen haben, als kinematische Wellen in die Schilfkanäle ein, mit geringem Amplitudenverlust.

Was die Windwellen betrifft, so ist ihre Wirkung bis zu einer Entfernung von 10 bis 30 m in die aufrecht wachsende Vegetation hinein begrenzt (Irish et al. 2008), was dennoch einen erheblichen Einfluss auf die Schilfbestände hat.

Aufgrund der vorherrschenden Windrichtung NW-NNW, ist der Windstoß in der Madárvárta/Vogelwarte-Bucht (= Silbersee) oft höher als in der Fertőrákos-Bucht, wodurch ein Wasserflächengefälle zwischen den Kanalmündungen entsteht. Dies führt in der südlichen Schilfzone zu einer **mittleren jährlichen Netto-Strömung** von 5 bis 15 l/s (pro Kanal) zwischen diesen beiden Buchten in den umlaufenden Kanälen gegen die vorherrschende Windrichtung, also von SO nach NW (Abbildung 12). Das entspricht einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit in der Größenordnung von 0,001 m/s, die in etwa 50–100 Tagen Braunwasser aus den umlaufenden Kanälen in die Fertőrákos-Bucht spülen kann (gerechnet mit einem mittleren Kanalquerschnitt von 7 m<sup>2</sup> bei niedrigem Seewasserstand).



**Abbildung 12.** Karte des jährlichen Netto-Durchflusses im ungarischen Schilfgürtel, modelliert für einen niedrigen Seewasserstand (115.30 m ü. A.).

**Wasserverschiebungen** führen zu einer advektiven Durchmischung zwischen dem offenen See und dem Schilfgürtel, sowohl während des Anschwellens des Windes als auch während des Abflauens. Die vom Seewasser überströmte Zone ist im südlichen Schilfgürtel etwa 1,2 km breit – bei niedrigen bis mittleren Wasserständen. Diese Eindringdistanz zeigt sich auch in der Trübung der Wasserflächen in der Kehrzone, während weiter entfernte Wasserflächen klar sind (Padisák 1993). Wenn eine starke Windflut bei niedrigem bis mittlerem Wasserstand (d.h. bei nicht überflutetem Schilfgürtel) auftritt, wird am Ende des Sturms eine bedeutende Menge des Seewassers in Geländemulden zurückgehalten.

**Zusammenfassend** kann festgehalten werden, dass derzeit den Kanälen in Kombination mit dahinterliegenden offenen Wasserflächen die größte Bedeutung für den Wasser- und Stoffaustausch zwischen offenem See und Schilfgürtel zukommt. Die Kanäle sind die bevorzugten Transportwege von Schwebstoffen (sowie von an diesen adsorbierten Nähr- und Schadstoffen) in den Schilfgürtel sowie von gelösten Inhaltsstoffen (z.B. gelöster Phosphor) aus dem Schilfgürtel zurück in den offenen See. Erst bei hohem Wasserstand kann es auch zu einer diffusen Durchströmung des Schilfgürtels kommen. Sie ist aber auch dann quantitativ gegenüber dem Transport durch die Kanäle von geringer Relevanz. Wie

jedoch die fortschreitende Aufhöhung des Seewalls am äußeren Rand des Schilfgürtels zum See hin zeigt, kommt in diesem Randbereich des Schilfgürtels dem Kontakt zwischen Seewasser und dem Schilfgürtel eine hohe Bedeutung zu.

Die Aufhöhung des Seewalls über die letzten 20–30 Jahre konnte zwar mangels Vermessungsdaten im Schilfgürtel aus jüngerer Zeit nicht gesichert nachgewiesen werden, ist jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit anzunehmen und trägt damit langfristig zu einer Trennung der beiden Hauptkompartimente des Neusiedler Sees bei.

## 3.4 Frachten von Fest-, Nähr- und Schadstoffen

### 3.4.1 Wasserbilanz

Gesamtwasserbilanzen für den Neusiedler See wurden und werden beginnend mit den systematischen Aufzeichnungen des Hydrographischen Dienstes immer wieder gemacht. Im vorliegenden Projekt steht jedoch der Austausch zwischen der offenen Seewasserfläche und dem Schilfgürtel des Neusiedler Sees im Mittelpunkt. Für einen Überblick werden deshalb vorhandene Bilanzierungen dargestellt. Nachfolgend wird auf mögliche Veränderungen in der Bilanzierung aufgrund der zu erwartenden Veränderungen im Klima eingegangen.

Wenngleich die Frage der Größe der Verdunstung immer eine sehr schwierige Aufgabe in einer Bilanzierung darstellt (häufig als Restglied der Bilanz), zeigen die Auswertungen die sehr große Bedeutung für den Neusiedler See. Lediglich in sehr niederschlagsreichen Jahren ist die Verdunstung geringer als der Jahresniederschlag. Dieser Umstand ist auch für die künftige Entwicklung ein wesentlicher Faktor (Abbildung 13, Tabelle 3).

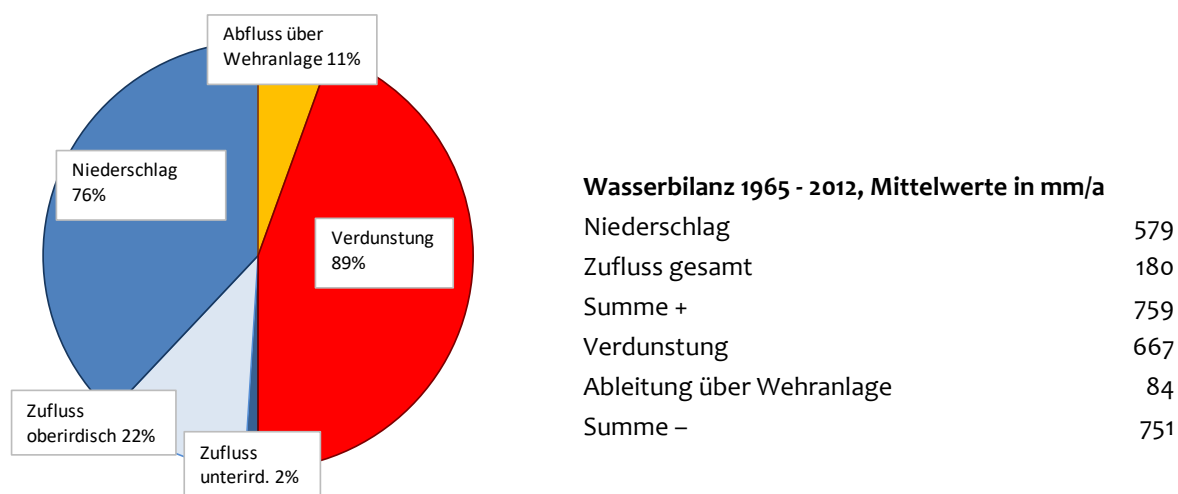


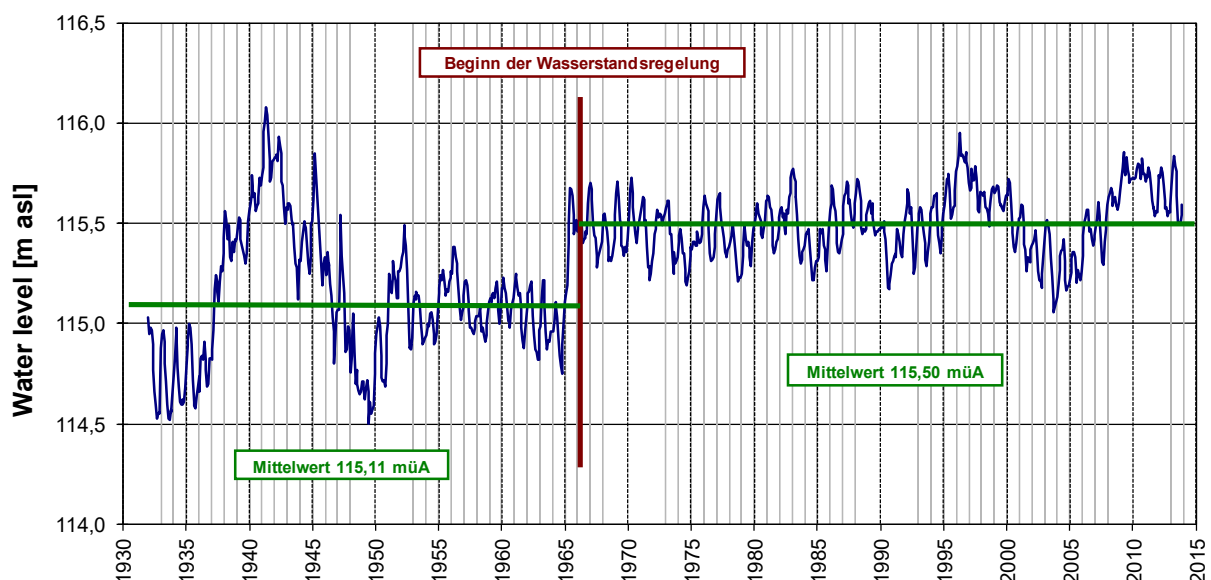
Abbildung 13. Wasserbilanz des Neusiedler Sees 1965–2018 (Amt Bgld. Landesregierung, Abt. 5).

**Tabelle 3. Wasserbilanzkomponenten für das Einzugsgebiet des Neusiedler Sees, abgeleitet aus Daten der Periode 2000–2012 (Quelle: Wolfram et al. (2014)).**

| Komponente                              | Fläche<br>[km <sup>2</sup> ] | ohne<br>Grundwasserabfluss |                                                | Annahme von<br>Grundwasserabfluss |                                                |
|-----------------------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------|
|                                         |                              | Jährl. Rate<br>[mm/a]      | Volumen<br>[10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /a] | Jährl. Rate<br>[mm/a]             | Volumen<br>[10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /a] |
| Niederschlag                            | 1116                         | 596                        | 665                                            | 596                               | 665                                            |
| <b>Gesamt positiv</b>                   | <b>1116</b>                  | <b>596</b>                 | <b>665</b>                                     | <b>596</b>                        | <b>665</b>                                     |
| Verdunstung Einzugsgebiet (ohne See)    | 796                          | 466                        | 371                                            | 466                               | 371                                            |
| Verdunstung See (Schilf + Wasserfläche) | 320                          | 866                        | 277                                            | 796                               | 255                                            |
| Evapotranspiration Schilf               | 182                          | 878 <sup>#</sup>           | 160                                            | 756 <sup>#</sup>                  | 138                                            |
| Verdunstung freie Wasserfläche          | 138                          | 850                        | 117                                            | 850                               | 117                                            |
| Grundwasser Abfluss                     |                              | 0*                         | 0                                              | 20*                               | 21                                             |
| Oberirdischer Abfluss                   | 1116                         | 16                         | 18                                             | 16                                | 18                                             |
| <b>Gesamt negativ</b>                   | <b>1116</b>                  | <b>596</b>                 | <b>665</b>                                     | <b>596</b>                        | <b>665</b>                                     |

\* Annahme (assumption), <sup>#</sup> Restgröße (residual value)

Ebenfalls spielt der oberirdische Abfluss über den Einser-Kanal eine wesentliche Rolle in der Wasserbilanz. Die nunmehr gültige Wehrbetriebsordnung steuert dementsprechend die Höhe des Seewasserstandes, sofern genügend Wasser für eine Steuerung vorhanden ist. Wie sich diese Steuerung auf den Seewasserstand seit den 1960er Jahren ausgewirkt hat, zeigt die Abbildung 14. Es ist zu einer deutlichen Hebung des Seespiegels mit einer deutlich geringeren Schwankungsbreite gekommen.



**Abbildung 14. Ganglinie des Seewasserpegels 1932–2013. Quelle: Amt der Bgld. Landesregierung, Referat Hydrographie.**

Wie Untersuchungen in Studien zum Klimawandel zeigten (Blöschl et al. 2018; Blöschl et al. 2011; Schöner et al. 2011), ist mit einer Zunahme der Lufttemperatur zu rechnen, die jedenfalls auch zu einer erhöhten Verdunstung führen wird. Weiters zeigen die Klimamodelle, die den Studien zugrunde liegen, dass es im Osten Österreichs zu einer leichten Zunahme der Niederschläge kommt. Wenngleich diese Aussage mit größerer Unsicherheit als die Zunahme der Lufttemperatur zu betrachten ist, bleibt offen, inwieweit es hier zu einem Ausgleich oder Veränderung hinsichtlich der Wasserbilanz kommen wird. Die detaillierte Betrachtung der saisonalen Variabilität (Bericht 1 der ungarischen Experten) zeigt trockenere Bedingungen (d.h. weniger Niederschlag und/oder Zufluss) für Januar, Juni, November und Dezember, während Mai, September und Oktober feuchter zu werden scheinen. Die Trendanalyse der monatlichen Mitteltemperatur zeigte den stärksten Anstieg für Juli und August. Eines geht jedenfalls aus den Untersuchungen hervor: das Gebiet des Neusiedler Sees und Umland ist von hoher wasserwirtschaftlicher Sensitivität und Vulnerabilität.

Zitat aus Schöner et al. (2011):

- *Da die Wasserbilanz die Differenz zweier etwa gleich großer Zahlen (Niederschlag und Verdunstung) ist, sind die Prognosen der Wasserbilanz des Sees sehr unsicher (harte Aussage).*
- *Das Szenario mit dem CLM Klimamodell (2021–2050 im Vergleich zu 1976–2007) ergibt eine Erhöhung der Lufttemperatur um ca. 1°C und eine Zunahme des Niederschlags um ca. 5%. Unter diesen Voraussetzungen bleibt der Seepegel annähernd gleich dem derzeitigen Zustand (weiche Aussage).*

Die Unsicherheit langfristiger Vorhersagen wird auch durch die Feststellung ungarischer Experten (Bericht 1) bestätigt. Der Klimawandel wird wahrscheinlich dazu führen, dass geringere Wassermengen über den Einser-Kanal abgeleitet werden. Die Ergebnisse für das Worst-Case-Szenario sagen ein jährliches Defizit von –198 mm bis zu einem Zuwachs von 24 mm in der Wasserbilanz voraus und prognostizieren damit sinkende Wasserstände des Sees. Sinkende Wasserstände werden die Entwässerung des an die Kanäle angrenzenden Bodens erhöhen und den Lebensraum letztlich austrocknen. Sofern die Winde in Zukunft nicht stärker werden, werden Windfluten, die im südlichen Schilfgürtel großflächige Überschwemmungen verursachen, viel seltener auftreten.

### 3.4.2 Schwebstoffe

Die nachfolgende Darstellung dient einer groben Abschätzung der Frachten, Ein- und Austräge zwischen Einzugsgebiet und See sowie zwischen dem offenen See und dem Schilfgürtel. Die Datenbasis und der zeitliche Bezug der Frachtabschätzungen sind sehr

heterogen, sodass sich die Berechnungen nicht zu einer schlüssigen Bilanz zusammenfügen lassen. Die Zahlen sollen Größenordnungen vermitteln, um die Bedeutung der einzelnen Frachten bewerten zu können.

In dieser Synthese geben wir nur eine kurze Beschreibung der Bilanzpositionen. Für eine ausführliche Beschreibung der Datenbasis und die Grundlage der einzelnen Positionen verweisen wir auf die Synthese der österreichischen Untersuchungen (Wolfram *et al.* 2020).

Die angeführten Mengen an Feststoffen, die in den See eingebracht, in diesem gebildet oder innerhalb des Sees verfrachtet und umgelagert werden, sind nachfolgend in Tabelle 4 zusammengefasst. Wie oben ausgeführt, erlauben diese Zahlen keine echte Bilanzierung, v.a. zum einen aufgrund von Unsicherheiten in Annahmen, zum anderen aufgrund der großen zeitlichen Variabilität.

Allen Unsicherheiten zum Trotz können folgende Aussagen aus dieser Zusammenstellung abgeleitet werden:

1. Die aus der Wulka in den See eingebrachten Feststoffe verbleiben zum größten Teil im Schilfgürtel des Mündungsbereiches. Das gilt auch für sehr große, hochwasserbedingte Frachten, die an einem einzigen Tag die Jahresfracht eines abflussarmen Jahres übertreffen können.
2. Das im See neu gebildete Sediment (Ca-Mg-Karbonate, Kalkschlamm) übertrifft die aus dem Einzugsgebiet in den See gelangenden Feststoffe bei weitem.
3. In Jahren mit großen Mengen von über den Einser-Kanal abgeleitetem Seewasser wird auch eine erhebliche Fracht an Trübe und damit Feinsediment aus dem See abgeleitet.
4. Die regelmäßigen Baggerungen in den Segelhäfen und Badebereichen sind nicht nur als lokale Maßnahmen zur Verhinderung der Verschlammung zu sehen, sondern haben merklichen Einfluss auf die Gesamt-Feststoffbilanz des Sees.
5. Nichtsdestotrotz werden laufend größere Schwebstofffrachten aus dem offenen See in den Schilfgürtel transportiert und sind damit ein treibender Faktor einer potenziellen Verlandung in diesen Bereichen.
6. So wie die regelmäßigen Baggerungen in den Segelhäfen und Badebereichen haben auch die Kanalertüchtigungen einen merklichen Einfluss auf die Gesamt-Feststoffbilanz des Sees. Das Ausbaggern von Sediment aus den Kanälen entzieht dem See dauerhaft Feststoffe, auch wenn sie innerhalb der Grenzen des Seebeckens verbleiben. Die seitliche Ablagerung in Form von Längsdämmen beeinflusst aber nachhaltig Struktur und Charakter des Schilfgürtels.



Die Zahlen in Tabelle 4 sind zur Visualisierung in Abbildung 15 als Flussdiagramm dargestellt. Grundsätzlich ist hier erneut festzuhalten, dass die Abschätzungen keine ausgeglichene Bilanz im eigentlichen Sinn erlauben. Das war angesichts der zahlreichen Annahmen, Unschärfen und Unsicherheiten auch nicht zu erwarten. Die „Bilanzglieder“ sollen vielmehr einen Eindruck der Größenordnung vermitteln. Zu berücksichtigen ist insbesondere, dass manche Bilanzglieder seewert ermittelt wurden (z.B. Kalkschlamm), andere nur für Österreich (z.B. Baggerungen). Nicht erfasst wurde auch die autochthone organische Produktion. Eine Unsicherheit besteht auch bei den seeinternen Verfrachtungen (Erosion, Deposition) im offenen See, z.B. in Buchten wie der Ruster Bucht oder im strukturierten Südteil des Neusiedler Sees. Insgesamt aber sind Tendenzen ablesbar.

**Tabelle 4. Abschätzung von Sediment-Frachten (t/a) aus dem Einzugsgebiet in den See, see-internen Verfrachtungen und Austrägen/Entnahmen. Positive Frachten (Eintrag in das betrachtete Kompartiment) sind gelb, negative Frachten (Austrag aus dem betrachteten Kompartiment) sind blau eingefärbt.**

| Eintrag/Austrag/Transport          | Gesamt                     | Schilfgürtel<br>Wulka   | Offener See                | Sonstiger<br>Schilfgürtel |
|------------------------------------|----------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|
| <b>Eintrag</b>                     |                            |                         |                            |                           |
| Wulka <sup>1)</sup>                | 3 890<br>(740 – 24 230)    | 3 773<br>(718 – 23 500) | 117<br>(22 – 730)          | 0                         |
| Sonstige Eintragspfade             |                            |                         |                            |                           |
| Andere Zubringer                   | 440                        | 0                       | 13                         | 427                       |
| ARA                                | 52                         | 0                       | 2                          | 50                        |
| Trockene Deposition <sup>2)</sup>  | 3 000                      | 95                      | 1 315                      | 1 595                     |
| <b>Neubildung</b>                  |                            |                         |                            |                           |
| Anorganisch (CaCO <sub>3</sub> )   | 10 000<br>(7 500 – 14 500) | 0                       | 10 000<br>(7 500 – 14 500) | 0                         |
| Organisch                          | k.A.                       | k.A.                    | k.A.                       | k.A.                      |
| <b>Austrag</b>                     |                            |                         |                            |                           |
| Ableitung über den Einser-Kanal    | 1 600<br>(0 – 11 450)      | 0                       | 1 600<br>(0 – 11 450)      | 0                         |
| Baggerungen Häfen/Buchten          | 6 800<br>(50 – 16 600)     | 0                       | 6 800<br>(50 – 16 600)     | 0                         |
| Kanalertüchtigungen <sup>3)</sup>  | 3 140<br>(450 – 9 070)     | 160<br>(20 – 450)       | 0                          | 2 980<br>(0 – 8 620)      |
| <b>Seeinterne Verlagerungen</b>    |                            |                         |                            |                           |
| Transport off. See -> Schilfgürtel | 0                          | 0                       | 9 666<br>(9 250 – 10 082)  | 9 666<br>(9 250 – 10 082) |

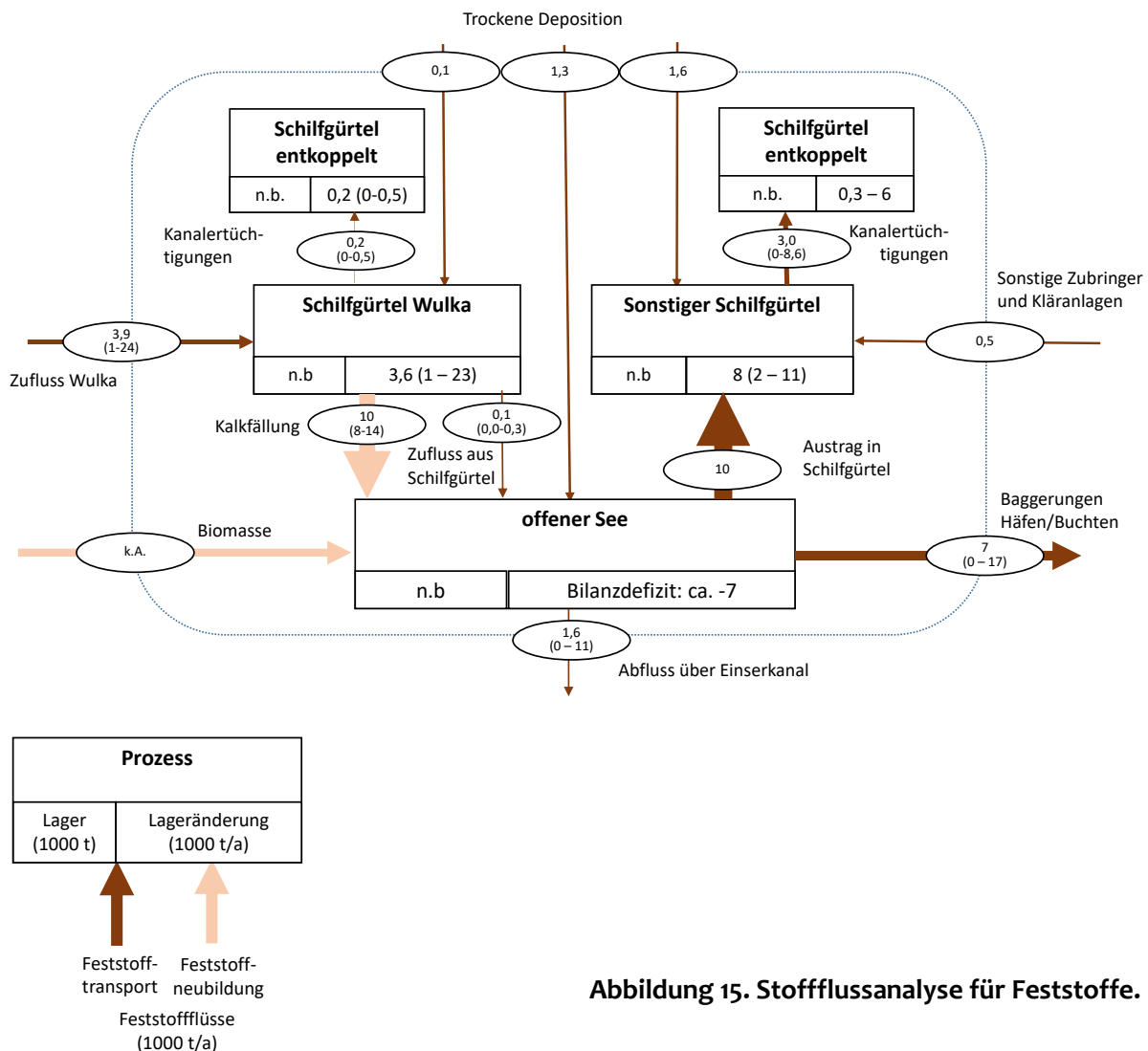
<sup>1)</sup> rd. 3% Transport bis zum offenen See

<sup>2)</sup> Aufteilung auf 140 km<sup>2</sup> offene See und 180 km<sup>2</sup> Schilfgürtel, davon 10 km<sup>2</sup> im Bereich der Wulka-Mündung

<sup>3)</sup> als Austrag gewertet, da dauerhaft von künftigen Austauschprozessen ausgeschlossen

Eine frühere Abschätzung von Sedimentverfrachtungen liegt von Stalzer & Spatzier (1987) vor. Die Autoren schätzten den seeinternen, windinduzierten Schwebstofftransport vom offenen See in den Schilfgürtel auf rund 13 000 t/a. In der Größenordnung stimmt dieser Wert trotz aller methodischen Unterschiede mit dem im Projekt REBEN ermittelten Wert von rund 9 700 t/a gut überein.

Die abgeschätzten Frachten liegen mehrheitlich im Bereich von 4 bis 5 Zehnerpotenzen von Tonnen pro Jahr. Im Vergleich zum gesamten Schlammvolumen des Sees von über 200 Mio. m (Csaplovics et al. (1997) oder umgerechnet rund 100 Mio. t (Trockenmasse) ist dies verschwindend gering. Der Umstand, dass vor allem die oberste Schicht der Seesedimente in engerem und häufigerem Austausch mit dem Freiwasser steht, rückt die Zahlen und jährlichen Frachten aber in ein anderes Licht und unterstreicht die potenzielle Bedeutung der Feststoffbilanz für längerfristige Veränderungen des Sees in morphologischer (Verlandung), qualitativer (Wasserqualität) und ökologischer Sicht (ökologischer Zustand).



### 3.4.3 Nährstoffe (Phosphor)

Die nachfolgenden Überlegungen zum Nährstoffhaushalt des Neusiedler Sees fußen wesentlich auf früheren Untersuchungen, von den ersten detaillierten Forschungen in den 1980er Jahren (Brossmann *et al.* 1984) bis zu den Langzeitberechnungen der 2010er Jahre (Wolfram *et al.* 2007; Wolfram & Herzig 2013; Wolfram *et al.* 2012). Die Berechnungen von Wolfram *et al.* (2012) zeigten die Bedeutung der Sedimentation und der Anbindung des Schilfgürtels an den offenen See auf. Unklar waren jedoch im Detail die Art der Nährstoffdeposition, aber auch der Ort. Hier können die Untersuchungen des Projekts REBEN wichtige neue Erkenntnisse beisteuern (Tabelle 5, Abbildung 16):

1. Im Gegensatz zu den Feststoffen wird ein geringerer Anteil an Nährstoffen (Phosphor) im Wulka-Mündungsbereich zurückgehalten, der größte Teil erreicht – wenn auch teilweise zeitversetzt – den offenen See. Erst sekundär wird der Phosphor aus dem offenen See wieder in den Schilfgürtel verfrachtet.
2. Im Mittel aber und über einen längeren Zeitraum betrachtet, verbleiben rd. 3 t Phosphor pro Jahr aus dem Wulka-Einzugsgebiet im Schilfgürtel und erreichen nicht den offenen See. Der Schilfgürtel Höhe Wulka ist somit ein wichtiger Retentionsraum für Nährstoffe. In trockenen Jahren ohne nennenswerte Hochwässer der Wulka fungiert der Schilfgürtel Höhe Wulkamündung nicht als Senke, sondern als Quelle. Das bedeutet insgesamt keine erhöhte Belastung für den offenen See, sondern spiegelt lediglich den geringen Eintrag aus dem Wulka-Einzugsgebiet in abflussschwachen Jahren wider.
3. Unter den externen Einträgen macht der Anteil der Wulka im Gegensatz zu früher (1980er Jahre) nur mehr etwas mehr als die Hälfte der Gesamteinträge aus (vgl. Herzig & Wolfram 2013). Während in der Feststoffbilanz die autochthone Produktion von Kalkschlamm (Calcit) maßgeblich zur Gesamtmenge an Feststoffen im See beiträgt, gibt es beim Phosphor kein vergleichbares Bilanzglied.
4. Sowohl im Bereich der Wulka als auch im sonstigen Schilfgürtel gibt es einen nennenswerten Austrag von gelöstem Phosphor in den freien See, der jedoch geringer ist als der Eintrag von partikulärem Phosphor in den Schilfgürtel.
5. Baggerungen haben für die Nährstoffbilanz nicht jene Bedeutung, die ihnen für die Feststoffbilanz zukommt, tragen aber doch zu einer nicht unerheblichen Entfernung von Nährstoffen aus dem System bei und sind neben dem Abfluss über den Einserskanal der einzige mögliche Austragspfad aus dem gesamten See.

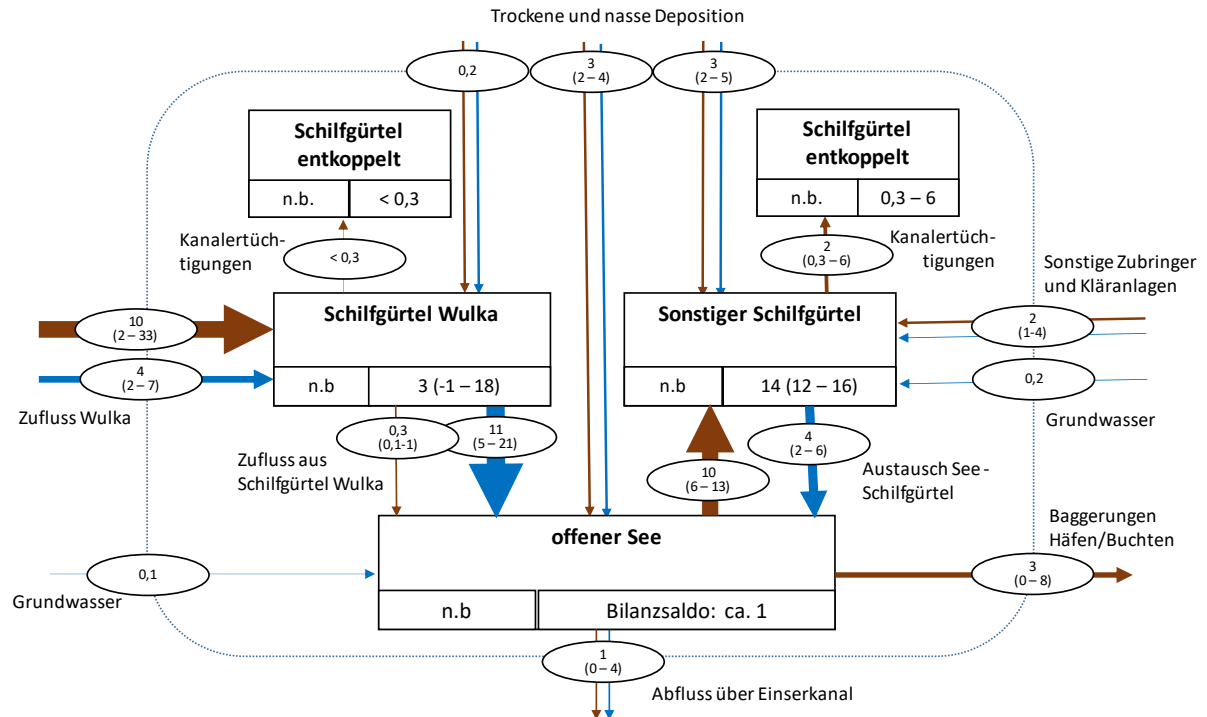
Wie bei den Feststoffen sind der jährliche Ein- und Austrag und die seeinternen Verfrachtungen von Phosphor verschwindend gering im Vergleich zur gesamten Menge der im See vorhandenen Nährstoffe. Diese sind freilich überwiegend im Sediment gebunden, d.h. die

Sedimentation (im Schilfgürtel) kommt einer dauerhaften Entfernung aus dem System gleich. Wie bereits aus früheren Untersuchungen bekannt (z.B. Gunatilaka (1986)) kann es zwar zu Rücklösungen aus dem Sediment kommen, und zwar sowohl im Bereich der Wulka als auch im sonstigen Schilfgürtel, es überwiegt aber der Nettoaustrag aus dem offenen See in den Schilfgürtel.

**Tabelle 5. Abschätzung von Phosphorfrachten (t/a) aus dem Einzugsgebiet in den See, seeinternen Verfrachtungen und Austrägen/Entnahmen. Positive Frachten (Eintrag in das betrachtete Kompartiment) sind gelb, negative Frachten (Austrag aus dem betrachteten Kompartiment) sind blau eingefärbt.**

| Eintrag/Austrag/Transport           | Gesamt          | Schilfgürtel Wulka | Offener See     | Sonstiger Schilfgürtel |
|-------------------------------------|-----------------|--------------------|-----------------|------------------------|
| <b>Eintrag</b>                      |                 |                    |                 |                        |
| Wulka inkl. HW (1992–2009)          | 14 (4 – 40)     | 3 (-1 – 18)        | 11 (5 – 22)     | 0                      |
| davon partikulär                    | 10 (2 – 33)     | 9,7 (1,9 – 32)     | 0,3 (0,1 – 1)   | 0                      |
| gelöst                              | 4 (2 – 7)       | 6,7 (2,9 – 14)     | 10,7 (4,9 – 21) | 0                      |
| Sonst. Eintragspfade (part. + gel.) | 10 (6 – 16)     | <1                 | 6 (3 – 10)      | 4 (2 – 5)              |
| Andere Zubringer                    | 2 (1 – 4)       | 0                  | 2 (1 – 4)       | 0                      |
| ARA (ab 2001)                       | 0,2             | 0                  | 0,2             | 0                      |
| Trockene Deposition *)              | 3 (2 – 4)       | 0,1                | 1,3             | 1,6                    |
| Nasse Deposition                    | 3 (2 – 5)       | 0,1                | 1,5             | 1,8                    |
| Grundwasser                         | 0,3 (0,2 – 0,5) | <0,1               | 0,1             | 0,2                    |
| <b>Austrag</b>                      |                 |                    |                 |                        |
| Ableitung über den Einser-Kanal     | 1 (0 – 4)       | 0                  | 1 (0 – 4)       | 0                      |
| Baggerungen Häfen/Buchten           | 3 (0 – 8)       | 0                  | 3 (0 – 8)       | 0                      |
| Kanalertüchtigungen                 | 0,3 – 6         | max. 0,3           | 0               | 0,3 – 6                |
| Schilfschnitt                       | k.A.            | k.A.               |                 | k.A.                   |
| <b>Seeinterne Verlagerungen</b>     |                 |                    |                 |                        |
| Offener See -> Schilfgürtel         |                 |                    |                 |                        |
| i) Abschätzung aus Stoffbilanz      | 0               | 0                  | 18 (7 – 35)     | 18 (7 – 35)            |
| ii) Abschätzung aus Frachten        | 0               | 0                  | 9,5 (6–13)      | 9,5 (6–13)             |
| davon partikulär                    | 0               | 0                  | 10,5 (7–14)     | 10,5 (7–14)            |
| gelöst                              | 0               | 0                  | 1               | 1                      |

\*) Zahlen aus der Stoffbilanz (Wolfram et al. 2012). Mit 1 t/a Phosphor wurde die Gesamtdeposition (trocken, nass) von Pannonhalmi (1984) in den 1980er Jahren für den ungarischen Teil abgeschätzt.



### 3.4.4 Schadstoffe

#### ■ Konzentrationsgradienten

Erstes Ziel der Untersuchungen für Schadstoffe war es, Hinweise auf Vorkommen und Verbleib von Stoffen aus unterschiedlichen Herkunftsbereichen und mit unterschiedlichen Einsatzbereichen sowie unterschiedlichem Umweltverhalten zu erhalten. Entsprechend wurden auch die Untersuchungsparameter ausgewählt. Eine Überwachung der Einhaltung der Umweltqualitätsnormen (UQN) der Qualitätszielverordnung Chemie Oberflächengewässer bzw. eine Untersuchung aller dort geregelten Stoffe war dagegen nicht die Aufgabe dieser Untersuchungen. Trotzdem zeigt sich bei den untersuchten Parametern, dass neben den bekannten Problemen mit Quecksilber und PBDE in Biota die Belastung mit PFOS, Fluoranthren, Benzo(a)pyren und anderen PAK mit hohem Molekulargewicht als kritisch in Hinblick auf eine mögliche Verfehlung der Qualitätsziele zu betrachten ist. Auch

für Blei konnten im offenen See Hinweise auf Überschreitungen der UQN gefunden werden. Eine eindeutige Prüfung von Überschreitungen in der Wasserphase müsste jedoch über ein geeignetes Messprogramm mit 12 Messungen im Jahr und ausreichend genauer Analytik erfolgen.

Für die untersuchten Stoffe kann bereits aufgrund der in der Wulka, im offenen See und in den Bereichen des Schilfgürtels bei Illmitz und Mörbisch durchgeführten Konzentrationsmessungen eine erste Einschätzung über das jeweilige Umweltverhalten in See und Schilfgürtel erfolgen. Stoffnamen, die in Klammer dargestellt sind, weisen auf einen uneindeutigen Befund und eine erhöhte Unsicherheit der Zuordnung hin.

Die untersuchten Substanzen, die einen deutlichen Abbau oder eine Umwandlung unter den Umweltbedingungen des Sees zeigen: Pharmazeutika: Carbamazepin, Diclofenac und Bezafibrat; Komplexbildner: EDTA, NTA und Benzotriazol; Pestizidmetaboliten: Chloridazon-Deshenyle; (poly- und perfluorierte Chemikalien: PFOS), (Süßstoff: Acesulfam K).

Stoffe, die im See in hohem Maße persistent sind, was zu einer Anreicherung in der Wasserphase führt: Pestizidmetabolite: N,N-Dimethylsulfamid; poly- und perfluorierte Chemikalien: PFOA, PFPeS, PFHpA, (PFNA und PFHxA); (Süßstoff: Acesulfam K).

Stoffe, die im Schilfgürtel vor allem aus dem Mündungsbereich der Wulka durch Sedimentation von Schwebstoffen in erheblichem Umfang zurückgehalten werden: PAK mit höherem Molekulargewicht: z.B. Benzo(a)pyren, Fluoranthen; Metalle: z.B. Kupfer, Blei, Nickel, Zink.

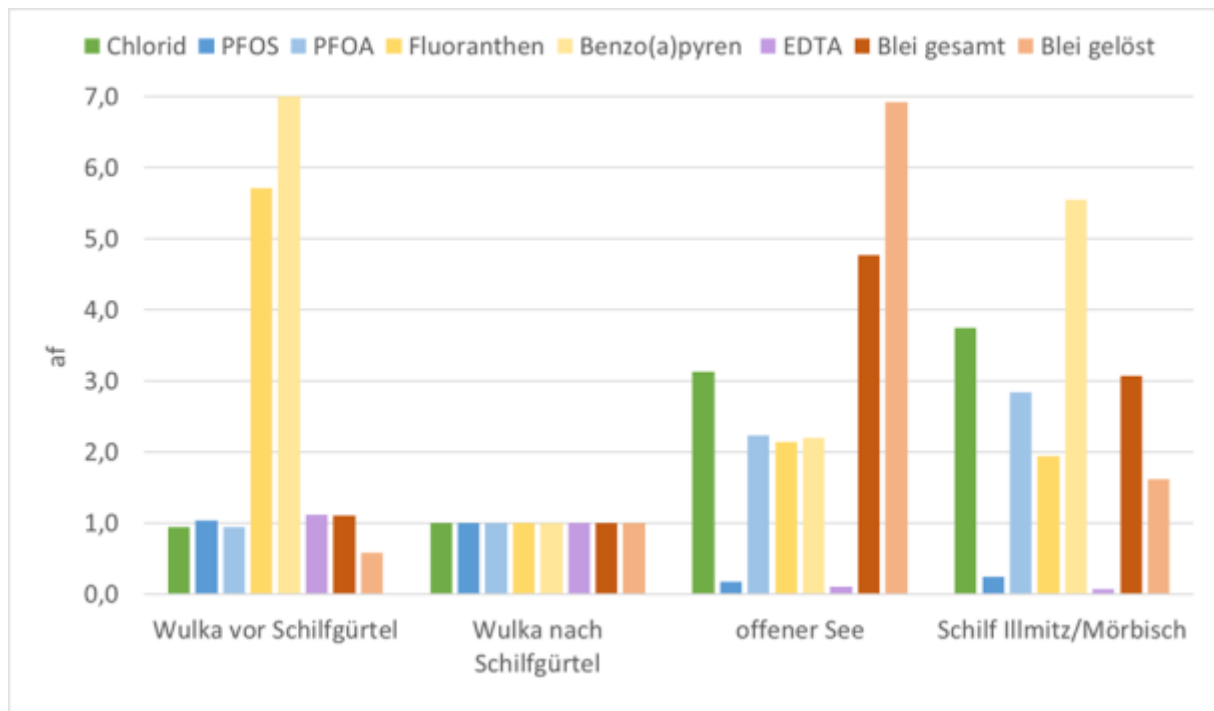
Stoffe, die eine Adsorption an die Sedimente im Schilfgürtel zeigen, was zu einer Verringerung der gelösten Konzentrationen im See im Vergleich zur Wulka oder im Schilfgürtel im Vergleich zum See führt: (poly- und perfluorierte Chemikalien: PFOS); (Metalle: Cadmium, Kupfer, Blei, Nickel, Zink).

Stoffe, die bei Felduntersuchungen Tendenzen zur Mobilisierung aus den Sedimenten des Schilfgürtels zeigen, was zum Austrag aus dem Schilfgürtel in den See führen könnte; (PAK: Benzo(a)pyren, Fluoranthen;).

Diese Auswahl umfasst diejenigen Stoffe, bei denen Indikationen zu einer möglichen Überschreitung der UQN gefunden wurden (PFOS, Fluoranthen, Benzo(a)pyren und Blei (gelöst)). Zudem wurden die Stoffe Chlorid, PFOA und EDTA dargestellt, um typische Muster des Umweltverhaltens im Vergleich zu zeigen. Für die hier gewählte Auswertung und Darstellung wurden neben den im REBEN-Projekt durchgeführten und Kap. 5 des Berichts Nr. 3 „Physikalisch-chemische Parameter und Schadstoffe“ (österreichisches Expertenteam) zusammen gestellten Untersuchungen auch Daten aus früheren Untersuchungen vor allem in der Wulka genutzt. Die Nutzung externer Daten ermöglicht



eine umfassendere Darstellung. Genutzte Quellen werden bei Zessner *et al.* (2019) näher erläutert.



**Abbildung 17. Anreicherungs- bzw. Abreicherungsfaktor ( $af = C_n/C_o$ ) für ausgewählte Parameter im Wulka-See-Schilfgürtel-Kontinuum.  $C_n$  steht für die Konzentration in der jeweiligen Wasserphase und für  $C_o$  wurde die Konzentration im Zufluss über die Wulka nach dem Schilfgürtel in den offenen See gewählt.**

Im ungarischen Teil befanden sich der offene See und die Schilfkanäle in der Vegetationsperiode 2019 überwiegend in einem „guten“, in einigen Fällen in einem „sehr guten“ Zustand gemäß der Klassifizierung der Wasserrahmenrichtlinie (Bericht 2 der ungarischen Experten). Es wurden steile Gradienten gefunden: ein „schlechter“ Wasserqualitätszustand innerhalb der Schilfbestände grenzte an Schilfkanäle in „gutem“ Zustand. Keine der gemessenen und gemittelten Konzentrationen von anorganischen (Schwermetalle, PAK, PCB und TPH) und organischen Mikroverunreinigungen überschritten die Umweltgrenzwerte der ungarischen Verordnung, mit Ausnahme von Benzo(a)pyren.

#### ■ Frachten

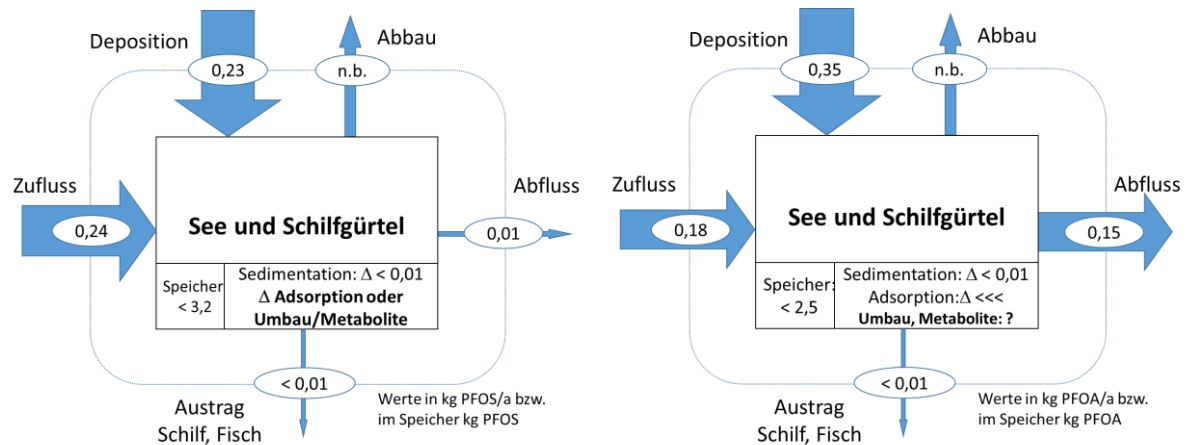
Für PFOS, PFOA und Fluoranthen sollen nun beispielhaft über Stoffbilanzen wesentliche Stoffflüsse in und aus dem Neusiedler See einander gegenübergestellt werden. Im Gegensatz zu Feststoffen und Phosphor wurde das betrachtete System aufgrund des

geringeren Informationsniveaus bei den Schadstoffen vereinfacht. Es werden Einträge und Austräge in das See-Schilfgürtelsystem als Ganzes betrachtet. Speicheränderungen im System weisen auf einen Rückhalt im Speicher des Schilfgürtels zurück, wobei bei den Darstellungen für die Schadstoffe nicht zwischen dem Schilfgürtel im Bereich der Wulka-mündung und dem sonstigen Schilfgürtel unterschieden wird.

Die Zusammenstellung erhebt dabei keinen Anspruch auf quantitative Exaktheit, soll jedoch einen Vergleich von Größenordnungen und eine Identifikation von Bilanzlücken ermöglichen. Aus diesem Grund werden hier auch keine Schwankungsbreiten angeführt. Die angegebenen Werte verstehen sich nur als Hinweise auf die Größenordnung des jeweiligen Stoffflusses. Die Abschätzung nutzt die Wasserbilanzkomponenten für Zufluss und Abfluss zum See und verknüpft diese mit PFOS, PFOA und Fluoranthen Konzentrationen in der Wulka vor dem Schilfgürtel, nach dem Schilfgürtel und im Freiwasser des Sees. Der Austrag aus dem System wird mit dem mittleren Abfluss über den Einser-Kanal und den Konzentrationen im offenen See berechnet. (Zum Zeitpunkt der Untersuchung von REBEN war das Wehr geschlossen.) Zudem werden Abschätzungen eines Eintrages über atmosphärische Deposition aus Zessner *et al.* (2019) herangezogen, um auch diesen Eintragspfad in der Bilanz zu berücksichtigen. Wie Abbildung 18 (links) zeigt, kommt bei PFOS zu den Einträgen über die Zuflüsse ein Eintrag über die Deposition hinzu, der in derselben Größenordnung liegt. Der Austrag von PFOS über den Abfluss im Einser-Kanal ist aufgrund der geringen Konzentrationen im See im Vergleich mit den Einträgen sehr gering. So steht einem Eintrag von rund einem halben Kilo PFOS pro Jahr ein Austrag über den Abfluss von lediglich 0,01 kg pro Jahr gegenüber.

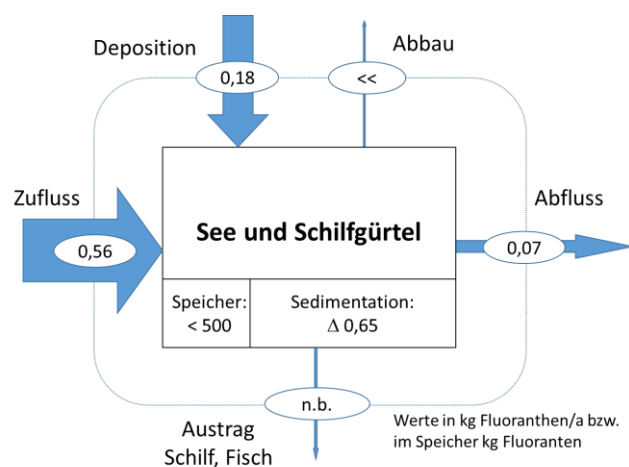
Insgesamt können die bekannten Stoffströme den Überschuss des PFOS-Eintrags über den Austrag nicht erklären. PFOS gilt als in der Umwelt extrem persistent (Beach *et al.* 2006). Unter gewissen Bedingungen erscheint eine Elimination von PFOS jedoch möglich. Dabei können allerdings überwiegend kurzkettigere PFT entstehen, deren Persistenz noch wesentlich höher ist als jene von PFOS (Trojanowicz *et al.* 2018). Die Ergebnisse der Adsorptionsversuche zeigen, dass PFOS potenziell weiter aus der wässrigen Phase des Sees durch Adsorption eliminiert werden kann, was ein relevanter Pfad aus dem offenen See in die Sedimente des Schilfgürtels sein könnte (Bericht 6 „Laborversuche“ der österreichischen Experten).

Insgesamt indiziert also die PFOS-Bilanz des Neusiedler Sees, dass PFOS weitgehend aus dem Seewasser eliminiert wird. Eine komplette Mineralisation erscheint dabei unwahrscheinlich. Wahrscheinlicher ist ein Umbau zu kurzkettigen PFT als Metaboliten, deren weiterer Verbleib in der Umwelt unbekannt ist. Zudem kann auch eine Adsorption von PFOS an das Schilfsediment einen Austragspfad aus dem offenen See darstellen.



**Abbildung 18. Abschätzung von Jahresbilanzen (kg/a) des Neusiedler Sees für PFOS (links) und PFOA (rechts).**

Die Situation für PFOA ist ähnlich wie für PFOS (Abbildung 18, rechts). Der Eintrag über die Deposition dürfte jenen über die oberirdischen Zuflüsse übersteigen, und der bekannte Austrag kann den Verbleib der Einträge im See nicht zur Gänze erklären. Unterschiedlich ist, dass die Elimination von PFOA wesentlich geringer ist als bei PFOS, eine See-konzentration verbleibt, die deutlich über jener in der Wulka liegt und somit der Austrag über den Einser-Kanal in einer ähnlichen Größenordnung liegt wie der Eintrag über den Zufluss (überwiegend über die Wulka). Eine relevante Adsorption von PFOA an den Schilfsedimenten kann auf Basis der Ergebnisse aus Teilbericht 6 „Laborversuche“ ausgeschlossen werden. Somit ist zumindest jene Stofffracht, die über Deposition in den See eingetragen wird, nicht in den bekannten Austrägen wiederzufinden und die Bilanz indiziert relevante Ab- bzw. Umbauprozesse im See, als deren Endprodukt kurzkettige PFT als Metaboliten nicht auszuschließen sind.



**Abbildung 19. Abschätzung von Jahresbilanzen des Neusiedler Sees für Fluoranthene.**

Auf den ersten Blick ähnelt auch die Bilanz für Fluoranthen (Abbildung 19) jener für PFOS. Einem Eintrag über Zuflüsse und Deposition steht ein deutlich geringerer Austrag über den Abfluss gegenüber. Der See wirkt somit auch für Fluoranthen als effektive Senke. Bei genauerer Betrachtung werden jedoch deutliche Unterschiede erkennbar. So ist der Fluoranthenspeicher im Seesediment auch im Verhältnis zu den Einträgen um etwa zwei Zehnerpotenzen größer als jener für PFOS. Für Fluoranthen lässt sich ein Austrag über Sedimentation bereits im Schilfgürtel der Wulka deutlich nachweisen. Auch für den restlichen Schilfgürtel sind deutliche Hinweise für einen Austrag von Fluoranthen aus dem offenen See über Schwebstoffe und deren Sedimentation gegeben. Diese Situation indiziert aber auch eine potentielle Rückbelastung des Sees aus dem Speicher im Schilfgürtel, wie es auch für den Phosphor gezeigt werden konnte. In welchem Ausmaß diese Rückbelastung jedoch tatsächlich stattfindet, lässt sich aus den vorhandenen Informationen noch nicht seriös ableiten.

### 3.5 Eigenschaften eines Sodasees

Der Neusiedler See ist der größte Sodasee und der westlichste Steppensee Europas. Die vielfältigen Wasserkörper des Neusiedler Sees stellen ein einzigartiges Ökosystem unter den Sodahabitaten des Karpatenbeckens dar, das durch eine Vielzahl extremer physikalischer und chemischer Umweltbedingungen und biogeochemische Prozesse bestimmt wird. Das kosmopolitische Schilf (*Phragmites australis*) spielt eine wichtige Rolle in diesem Ökosystem. Seine Populationsdynamik und seine lokalen Eigenschaften werden von den extremen Umweltfaktoren wesentlich beeinflusst, auch die biologische Sukzession des Schilfs hat einen großen Einfluss auf seine Umgebung.

Der niedrige und schwankende Wasserstand des Sees sind auf das semiaride Steppenklimate zurückzuführen. Die tägliche Temperaturschwankung in den isolierten, inneren Wasserflächen und der Schilfzone kann eine Spannbreite von 10–20 °C erreichen und wird vermutlich durch den Klimawandel in Zukunft noch zunehmen.

#### 3.5.1 Chemische Zusammensetzung des Seewassers

Unter den ungarischen Sodatypen der Binnengewässer (Feuchtgebiete und Seen) ist der basische Sodatyp ( $\text{NaHCO}_3$ ), wie z.B. im Neusiedler See, am häufigsten anzutreffen, aber basierend auf den vorherrschenden Anionen können in den astatischen Sodalacken des Seewinkels (Fertőzug) auch die Untertypen Soda-Chlorid und Soda-Sulfat unterschieden werden.

Der Salzgehalt variiert zwischen 1,5 und 2,5 g L<sup>-1</sup> im semistatischen Neusiedler See. Die typischen Sodaseen und -pfannen sind durch ein dauerhaft alkalisches Milieu (pH: 8–10) gekennzeichnet, was mit der Alkalinität der Gewässer zusammenhängt. Andere wichtige physikalische und chemische Eigenschaften wie die hohe Trübe werden durch hohe anorganische Schwebstoffkonzentration (Secchi-Scheiben-Transparenz 1–20 cm) verursacht, die im offenen Wasser des Neusiedler Sees charakteristisch ist, ebenso wie der hohe Gehalt an gelöstem organischen Kohlenstoffgehalt (DOC, polyhumid >16 mgC L<sup>-1</sup>) und der hoch eutrophe Nährstoffzustand. Diese Umweltfaktoren repräsentieren eine Vielzahl von extremen Bedingungen betreffend spezielle Nährstoff-Zyklen (C, N, P), das trophische System und das Ökosystem insgesamt.

Der hohe DOC-Gehalt des Wassers ist hauptsächlich das Produkt der internen (autochthonen) Zersetzung von Schilf. Der wesentliche Teil des gelösten organischen Kohlenstoffs besteht aus gelöstem organischen Material (CDOM), das den Blänken die charakteristische braune Farbe verleiht. Die alkalische Umgebung spielt eine große Rolle bei der Aufrechterhaltung der hohen Konzentration an Huminstoffen.

Das Oxidations-Reduktions-Potential – im Folgenden Redox-Potential genannt – im Sediment hat ebenfalls einen wesentlichen Einfluss auf den Stoffkreislauf und bestimmt das Pflanzenwachstum direkt über die verfügbare Menge an Stickstoff, Phosphor und teilweise Kohlenstoff im Sediment.

Die niedrigsten Konzentrationen des Gesamtkohlenstoffs (TOC) und des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC) wurden im offenen Wasser des Neusiedler Sees (Projekt „ATHU2 Vogelwarte – Madárvárta 2“) gefunden, während die höchsten Werte in den inneren, lockeren Schilfbeständen zu finden waren, so dass die Anreicherung von Kohlenstoff in absterbenden Schilfbeständen zu einem polyhumiden Zustand (außerordentlich reich an Huminstoffen) führt. Eine genauere Erkenntnis des Phänomens bedarf jedoch weiterer gezielter Forschung. Die signifikante Korrelation zwischen TOC und Gesamtstickstoff (TN) deutet darauf hin, dass der TN-Gehalt durch organisch gebundenen Stickstoff bestimmt wird, weshalb in absterbenden Schilfbeständen höchste TN-Werte festgestellt werden konnten. Die Menge des für Algen verfügbaren mineralischen Stickstoffs (Ammoniak- und Nitratstickstoff) war jedoch in allen Habitaten um zwei Größenordnungen geringer als der Gesamtstickstoffgehalt, was auf die Akkumulation von langsam zersetzendem organischem (Humin-)Material aus dem Schilf zurückzuführen ist. Das für Algen verfügbare lösliche Orthophosphat-Phosphor war im Jahresmittel um eine Größenordnung niedriger als der an sich schon geringe Gesamtphosphorgehalt und dieser wiederum um mehrere Größenordnungen niedriger als die für die periodischen Sodalacken des Seewinkels typischen Werte im Tausenderbereich. Das Verhältnis von Gesamtstickstoff und -phosphor ist jedoch relativ hoch (durchschnittlich 46), insbesondere im Vergleich zu den periodischen Sodalacken, wo dieser Wert oft unter 1 bleibt. Was die trophischen

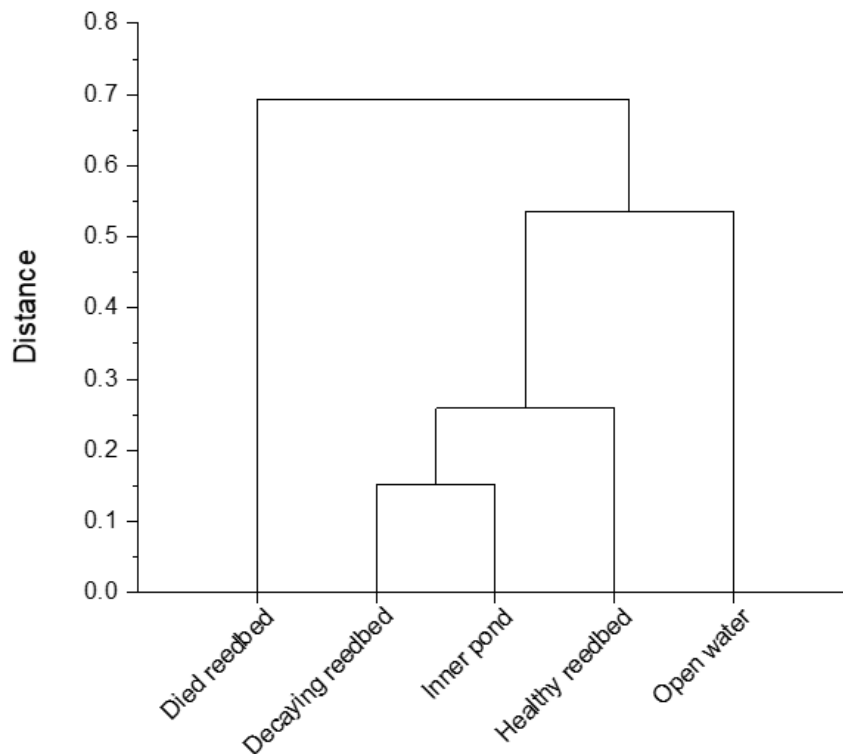
Verhältnisse betrifft, so wurden alle untersuchten Habitate und Wasserkörper nach dem Jahresdurchschnitt der Gesamtposphorkonzentration (OECD) als eutroph eingestuft, während sie nach dem Jahresdurchschnitt der Chlorophyll-a-Konzentration nur dem mesotrophen Niveau entsprachen, was auch ein Merkmal der Sodalacken im Karpatenbecken ist (Boros *et al.* 2017).

### 3.5.2 Biologische Qualitätselemente

Die Artenzusammensetzung des Phyto benthos weicht gemäß den in Ungarn durchgeführten Aufnahmen der gewässertypischen Lebensgemeinschaft ab und entspricht nicht einem guten ökologischen Zustand. Auch die Populationsdichte weicht mäßig von der typischen charakteristischen Zönose ab. In bestimmten Bereichen wird der Algenaufwuchs durch Bakterienkolonien und -belege infolge anthropogener Einwirkungen beeinträchtigt.

Das Frischgewicht der Phytoplankton-Biomasse lag zwischen 100 und 5 000  $\mu\text{g L}^{-1}$  und auch die Artenzusammensetzung ergab signifikante Unterschiede in der saisonalen und räumlichen Verteilung. Das Hauptmerkmal des Frühjahrs-Phytoplanktons ist die Dominanz von Pico-Cyanobakterien im Freiwasser (Somogyi *et al.* 2010), während diese Algen im Schilfgürtel und in den inneren Blänken fehlen. Die zweite charakteristische Gruppe des offenen Sees ist das Meroplankton (Padisák & Dokulil 1994). Ihr Auftreten variiert in Abhängigkeit von der Winddurchmischung der Wassersäule, auch sie kommen im Schilfgürtel nicht vor. Das Picoplankton und die meroplanktischen Organismen sind daher sehr gute Indikatoren zur Unterscheidung der verschiedenen Lebensräume vom Freiwasser bis hin zum dichten Schilfgürtel. Charakteristisch für den offenen See ist der Salzzeiger, *Chaetoceros muellerii*, der in geringer Abundanz im gesamten See vorkam. Im Schilfbestand findet man hingegen eine ausgeprägte diverse Algengemeinschaft, in der neben den planktischen Algenarten zahlreiche periphytische/benthische Arten vorkommen. Die Phytoplanktongemeinschaften des Freiwassers und der Bereiche mit degradiertem Schilf unterscheiden sich deutlich von jenen der Schilfzone. Die Lebensräume im Schilfgürtel und in den Blänken bilden eine mehr oder weniger homogene Gruppe (Abbildung 20).

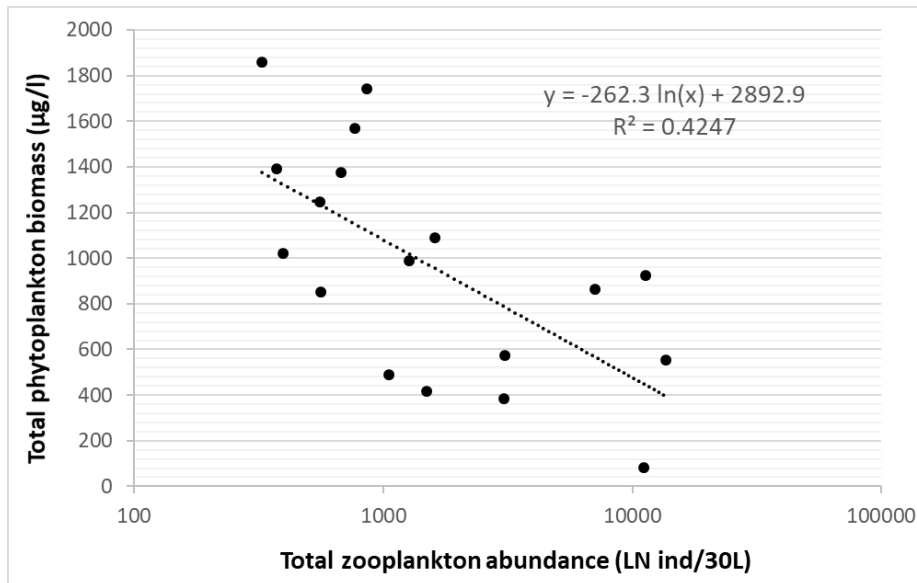




**Abbildung 20: Ähnlichkeit der untersuchten Habitate basierend auf der Zusammensetzung der Phytoplanktongemeinschaft (group average clustering) im ungarischen Teil des Sees.**

In der Zooplankton-Gemeinschaft gibt es einige alkalophile Charakterarten, die auf den Soda-Typ des Neusiedler Sees hinweisen. Zum Beispiel wurde der Soda-Zeiger *Arctodiaptomus spinosus* im Freiwasser nachgewiesen.

Zwischen dem Phytoplankton und dem Zooplankton wurde ein nicht linearer Zusammenhang festgestellt (Abbildung 21). Das Zooplankton erreichte in den geschlossenen, makrophytenreichen Bereichen des ungarischen Schilfgürtels die größten Dichten und bewirkt dort eine bedeutende Top-down-Kontrolle des Phytoplanktons.



**Abbildung 21: Zusammenhang zwischen Zooplanktondichte und Phytoplanktonbiomasse im Neusiedler See.**

Die quantitative Erhebung der submersen Makrophyten hat gezeigt, dass die aktuelle Deckung deutlich geringer ist als 2019. Da ihre Ausbreitung innerhalb kurzer Zeit aber auch zu sehr dichten Beständen führen kann, sollten sie im wasserwirtschaftlichen Management berücksichtigt werden.

### 3.6 Schilfstruktur und -entwicklung

Die flächenmäßigen Veränderungen des ungarischen Teils des Schilfgürtels wurden im Rahmen des REBEN-Projekts unter Verwendung verschiedener Datenquellen untersucht. Die Archivkarten der ersten (1785), zweiten (1845), dritten (1882) und reambulierten dritten (1920) Militärvermessung wurden zusammen mit verschiedenen Luftaufnahmen (aus den Jahren 1959, 1982, 1991, 1999, 2007 und 2017) als primäre Datenquellen verwendet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Schilffläche auf dem ungarischen Teil von ~25% (weniger als 1% der aktuellen Seefläche) bis 1959 auf ~84,6% signifikant zugenommen hat. Nach der Wasserstandsregulierung war die Zunahme (Abbildung 14) weitaus geringer – bis 2017 erreichte die Schilffläche ~86% (siehe Abbildung 22). Das entspricht einer Fläche von 4,6 ha/Jahr in den letzten 10 Jahren (2007-2017).

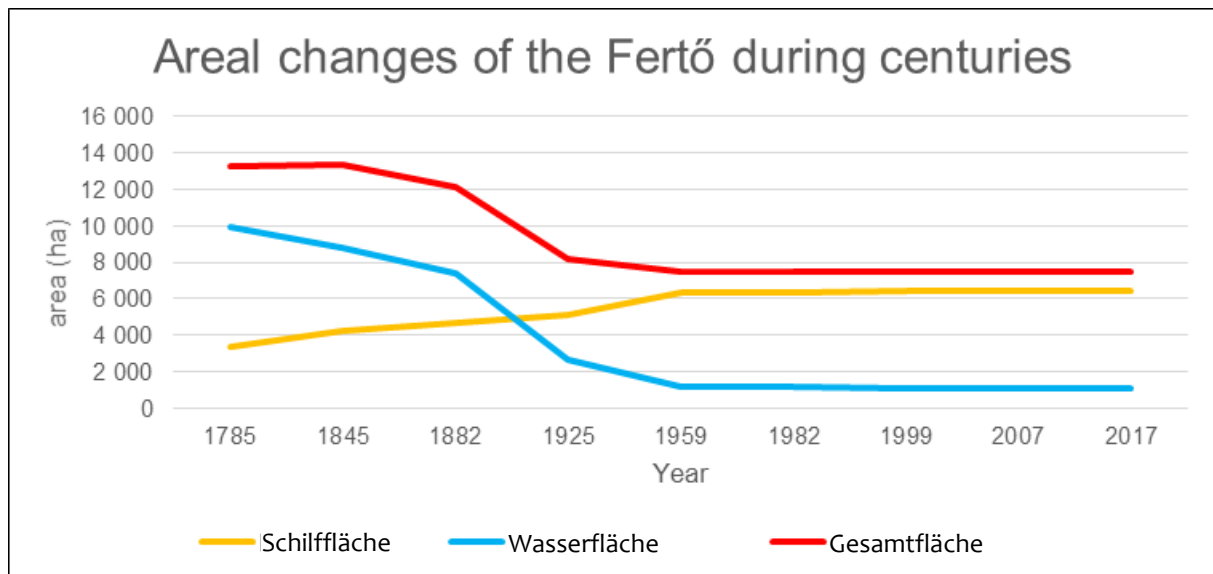
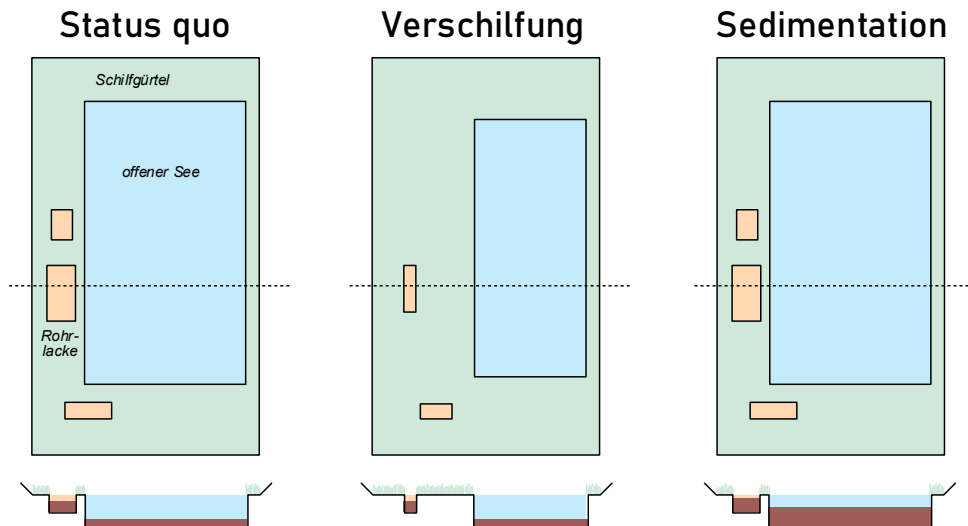


Abbildung 22. Veränderung der Schilf- und Wasserflächen des ungarischen Teils des Neusiedler Sees von 1785 bis 2017.

### 3.7 Langfristige Entwicklungen

Die Erkenntnisse aus dem Projekt REBEN fußen neben den eigenen Untersuchungen auf den Erfahrungen der letzten Jahrzehnte, und auch die Überlegungen zur weiteren Entwicklung betreffen einen Zeitraum, der als „kurz- bis mittelfristig“ bezeichnet werden kann und maximal 50 Jahre in die Zukunft blickt. Darüber hinaus sind aber auch langfristige Entwicklungen und Trends von Interesse.

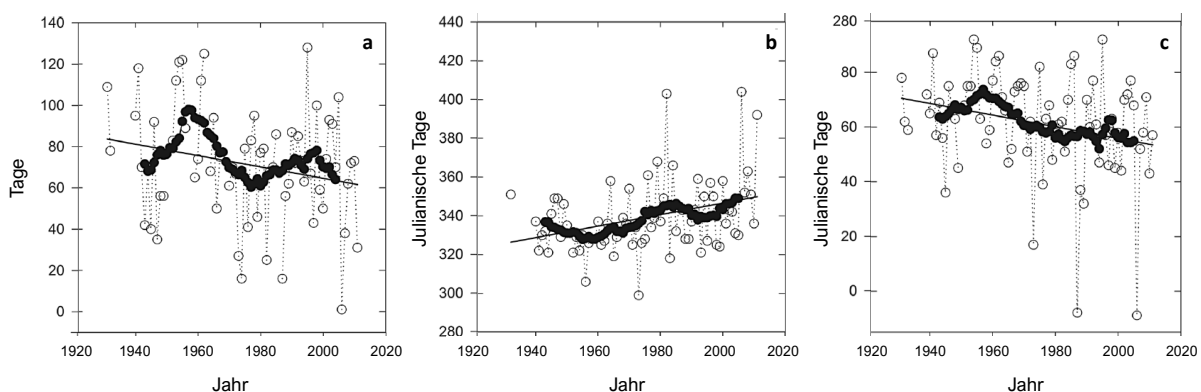
Ein Aspekt der langfristigen Entwicklung des Sees wurde mit dem Projekt REBEN unter die Lupe genommen: die **Verlandung** des Seebeckens. Nachdem jährlich eine große Menge an Feststoffen in den See gelangt oder durch Fällungs- und andere Prozesse in diesem gebildet wird, ist es nur eine Frage der Zeit, bis das relativ flache Seebecken aufgefüllt ist – sofern der Eintrag nicht deutlich reduziert und/oder der Austrag bzw. die Entnahme forciert wird. Es betrifft dies den Aspekt der Verlandung durch Sedimentation, quasi ein „Auffüllen“ des Seebeckens durch Feststoffe (siehe Abbildung 23 rechts). Davon zu unterscheiden ist die Verlandung des Schilfgürtels durch verstärktes Schilfwachstum, sei es durch Auffüllen offener Blänken und Braunwasserflächen im Schilfgürtel, sei es durch Vergrößerung der Gesamtfläche des Schilfgürtels auf Kosten der Fläche des offenen Sees (siehe Abbildung 23 Mitte).



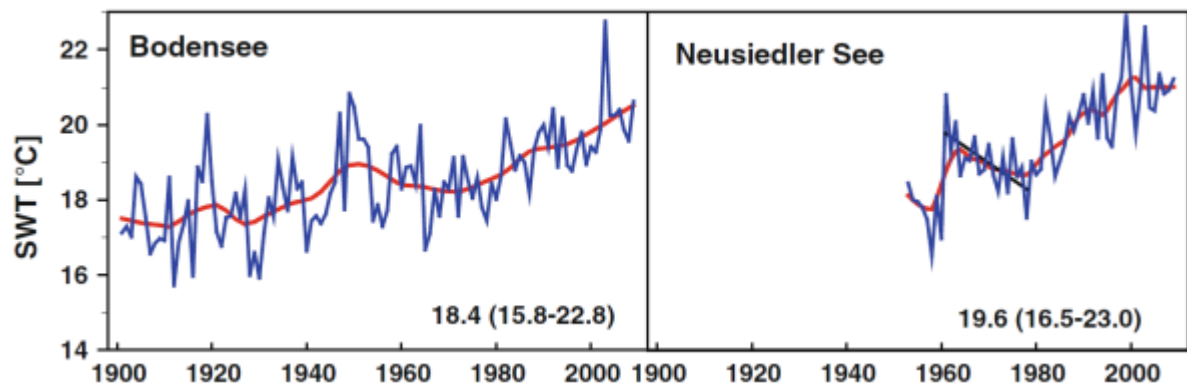
**Abbildung 23.** Schematische Darstellung von Verlandung im Sinne einer Zunahme der Schilfbestände (Mitte) und durch Sedimentation (rechts).

In den nachfolgenden Szenarien wird versucht, diese unterschiedlichen Aspekte der Verlandung (zu denen es keine klaren sprachlichen Äquivalente im Deutschen, Ungarischen und Englischen gibt) zu trennen, nicht zuletzt in Hinblick auf jene wasserwirtschaftlichen Ziele, in denen auf Verlandung und Verschilfung Bezug genommen wird.

Ein zweiter Langzeitaspekt, der bereits im Teilbericht 1 „Hydrologie“ angesprochen wurde, ist die **Klimawärmung**. Die Untersuchungen von Soja et al. (2014) belegen eine merkliche Verkürzung der Eisbedeckung des Sees innerhalb der letzten 100 Jahre (Abbildung 24), während Dokulil (2013) in seine Datenanalyse eine signifikante Temperaturerhöhung des Sees über die letzten paar Jahrzehnte aufzeigen konnte (Abbildung 25). Auch wenn die Schwankungen über diesen langen Zeitraum groß sind, so ist ein Zusammenhang mit der globalen Erwärmung ab der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts naheliegend. Aktuelle Analysen von Datensammlern für den Zeitraum 1976-2018 ergaben einen Anstieg der Wassertemperatur um 1,9 °C (Maracek & Sailer 2019).



**Abbildung 24.** Veränderung der Dauer (a), des Beginns (b) und Endes (c) der Eisbedeckung am Neusiedler See in den letzten 100 Jahren (aus: Soja et al. (2014)).



**Abbildung 25. Anstieg der sommerlichen Oberflächentemperatur des tiefsten und des seichtesten Sees Österreichs in den letzten Jahrzehnten (aus: Dokulil (2013)).**

Wie im Teilbericht 1 „Hydrologie“ ausgeführt, deuten die Untersuchungen zum Klimawandel von Schöner *et al.* (2011) und Blöschl *et al.* (2018) für die kommenden Jahrzehnte auf eine weitere Zunahme der Lufttemperatur. Nach Eitzinger *et al.* (2009) ist für die kommende Jahrzehnte eine Tendenz zu häufigeren (bzw. längeren) Trockenphasen wahrscheinlich, was langfristig einen abnehmenden Wasserstand erwarten lässt. Nach Schöner *et al.* (2011) hingegen deutet die prognostizierte leichte Zunahme der Niederschläge im Osten Österreichs darauf hin, dass die Verluste eher kompensiert werden und der künftige Zustand annähernd gleich dem derzeitigen sein wird. Die Gegenüberstellung des bisherigen klimatischen Einflusses auf den Neusiedler See und des zukünftigen Klimas (Bericht 1 der ungarischen Forscher) zeigte jedoch, dass die Auswirkung des Klimawandels wahrscheinlich zu sinkenden Wassermengen führen würde, die aus dem See über den Einser-Kanal abgeleitet werden.

Bei den Wasserinhaltsstoffen ist mit abnehmenden Wasserständen eine sukzessive Aufkonzentration zu erwarten, wie dies auch die Modellierungen des Salzgehalts bei langen Trockenzeiten aufzeigen konnten. Die Klimamodellierung in Zessner *et al.* (2012) und die darauf aufbauende Stoffbilanz (Wolfram *et al.* 2012) prognostizieren einen Anstieg der Chlorid-Konzentration im Median von 246 mg L<sup>-1</sup> (1992–2007) auf 595 mg L<sup>-1</sup> (500-Jahr-Szenario). Ein ähnlicher Anstieg ist für Natrium und (Hydrogen)karbonat zu erwarten. Der See würde stärker den Charakter eines echten Sodasees annehmen und sich damit im Grundchemismus den niederkonzentrierten Salzlacken des Seewinkels annähern. Bereits derzeit erreicht die Leitfähigkeit im inneren Schilfgürtel in Trockenzeiten über 6 000 µS cm<sup>-1</sup>. In einer lange anhaltenden Niedrigwasserphase ohne Ableitungen über den Einser-Kanal sind solche Werte durchaus auch im offenen See denkbar.

Ob sich auch der offene See strukturell verändern würde (z.B. durch Vordringen von submersen Makrophyten oder anderen Röhrichtarten), ist schwer zu sagen, kann aber nicht ausgeschlossen werden. Im ungarischen Teil des Neusiedler Sees wurde in den letzten

Jahren ein vermehrtes Vordringen der Strand-Teichbinse (*Schoenoplectus litoralis*) beobachtet (Abbildung 26, Abbildung 27) – möglicherweise eine Folge der Klimaerwärmung und damit verbundener ersten Trends zu Veränderungen im Neusiedler See (vgl. Dokulil (2013)). Die größte stabile Population befindet sich im Bereich von Kőbokor-tó, gefolgt von Beständen bei Püspök-tó, Gémes-tó und Hidegség-tó. Zwischen den Standorten wurden signifikante Unterschiede in Bezug auf die Größe, die Dichte und den Blühverhältnissen der Bestände beobachtet (Szőke 2016).

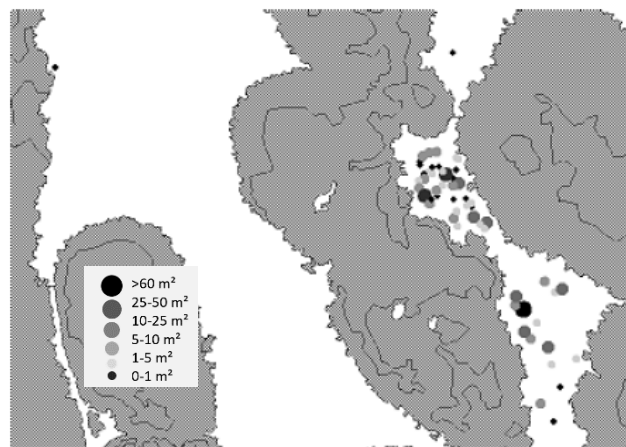


Abbildung 26. Verbreitung der Strand-Teichbinse (*Schoenoplectus litoralis*) im Süden der Bucht von Fertőrákos (Quelle: M. Pannonhalmi).



Abbildung 27. Verbreitung der Strand-Teichbinse (*Schoenoplectus litoralis*) bei Búzaszem-bokor. Photo: Kalmár in Szőke (2016).



Bis zu einem gewissen Grad überschatten die beiden langfristigen Trends die im Folgenden beschriebenen Szenarien. Auf einer dritten Ebene müssen Maßnahmen zur Abschätzung zukünftiger Entwicklungen berücksichtigt werden, die hier weitgehend ausgeklammert und im Managementplan detailliert beschrieben werden.

## 4 SZENARIEN – ANDERE RAHMENBEDINGUNGEN

### 4.1 Definition der Szenarien

Im Folgenden soll beschrieben werden, wie sich die in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Prozesse und Bilanzen bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen ändern könnten. Der betrachtete Prognosezeitraum liegt im Bereich von wenigen Jahrzehnten.

Es liegt auf der Hand, dass diese Überlegungen nicht das Resultat präziser Berechnungen sind, sondern stark auf Experteneinschätzungen beruhen. Diese fußen allerdings auf den umfangreichen Untersuchungen und daraus abgeleiteten Erkenntnissen des Projekts REBEN. Sie spiegeln den aktuellen Wissensstand wider und können als „best guess“ angesehen werden.

In den Kap. 3.2 und 3.3 wurden der Wasserstand (und damit indirekt die klimatischen bzw. meteorologischen Bedingungen) und die Struktur im Schilfgürtel (und hier vorrangig die Schilfkanäle) als wichtigste Einflussfaktoren beschrieben. Es erscheint daher sinnvoll, auch die Szenarien mit geänderten Rahmenbedingungen anhand dieser beiden Einflussgrößen zu definieren. Dabei werden drei Gruppen von Szenarien unterschieden.

#### 4.1.1 Szenarien „Extreme Pegelstände“

Die im Rahmen des Projekts REBEN durchgeführten Untersuchungen decken eine Bandbreite des Wasserstands zwischen 115,3 und 115,6 m ü.A. (die Wasserqualitätsmessstationen nur bis 115,5 m ü.A.) ab. Für die Verhältnisse bei sehr tiefen oder sehr hohen Wasserständen sind wir auf spärliche Erfahrungen aus früheren Untersuchungen (v.a. Stoffbilanz (Wolfram *et al.* 2012) angewiesen. Diese Situationen sind gleichwohl in Hinblick auf mögliche Veränderungen im Zuge einer fortschreitenden Klimaerwärmung, aber auch einer möglichen künstlichen Wasserzufuhr, von großem Interesse. Es werden daher zwei Szenarien definiert:

- **Szenario P1** <115,2 m ü.A.
- **Szenario P2** >115,8 m ü.A.

Szenario P1 geht davon aus, dass auf sehr niedrigem Niveau dennoch Schwankungen des Wasserstands gegeben sind. Zum Szenario P2 ist zu ergänzen, dass darin nur die Verhältnisse bei hohem Wasserstand an sich beurteilt werden, nicht aber allfällige Auswirkungen

von Maßnahmen, die notwendig sein könnten, um dieses Szenario zu erreichen (z.B. Wasserzuleitung). Sehr wohl sind aber Konsequenzen berücksichtigt (Ableitung über den Einser-Kanal).

#### 4.1.2 Szenarien „Unterschiedliche Durchströmung des Schilfgürtels durch die Wulka“

Nach allen bisher vorliegenden Informationen (Beobachtungen im Feld, chemische Analysen, Wasserqualitätsmessstationen, Tracer-Versuch, Modellierung) erfolgt die Durchströmung des Schilfgürtels durch die Wulka bei niedrigen Abflüssen überwiegend linear. Bei Hochwasser dürfte die Wulka hingegen ausufern und den Schilfgürtel diffus durchströmen. Es werden zwei alternative Szenarien definiert:

- **Szenario W1** ausschließlich diffuse Durchströmung des Schilfgürtels
- **Szenario W2** ausschließlich lineare Durchströmung des Schilfgürtels

Szenario W2 ist (anders als das Szenario P2, siehe Anm. oben) nur mit umfangreichen Maßnahmen und Eingriffen in den Schilfgürtel möglich, die daher in der Beschreibung berücksichtigt werden und auch in die anschließende Beurteilung (Kap. 4) einfließen.

#### 4.1.3 Szenarien „Schilfkanäle“

Die Befunde zeigen deutlich, dass die Kanäle für den Austausch zwischen offenem See und Schilfgürtel von großer Bedeutung sind. Auf Grundlage des bestehenden Netzes von Kanälen und der Annahme, dass diese auch weitgehend durchgängig und noch nicht verlandet bzw. zugewachsen sind, wurde abgeschätzt, dass jährlich je nach Rechenansatz 9 250 bzw. 13 200 t Feststoffe und 15 bzw. 18 t (Bandbreite aus der Stoffbilanz über einen längeren Zeitraum: 7 bis 35 t) Phosphor aus dem offenen See in den Schilfgürtel transportiert werden.

Es ist aber nicht nur die *Anwesenheit von Kanälen* allein entscheidend, sondern auch die Größe des dahinter liegenden *Retentionsraums*. Hier lassen sich sehr grob vier Schilftypen unterscheiden. Diese Klassifizierung wurde nur für den Zweck der Bewertung der Szenarien in diesem Bericht verwendet. Wesentlich ausgefeiltere Schilfklassifizierungssysteme wurden für den österreichischen Teil des Schilfgürtels (Csaplovics & Schmidt 2010a; b) sowie für ungarische Seen einschließlich des Neusiedler Sees entwickelt (Márkus et al. 2008).

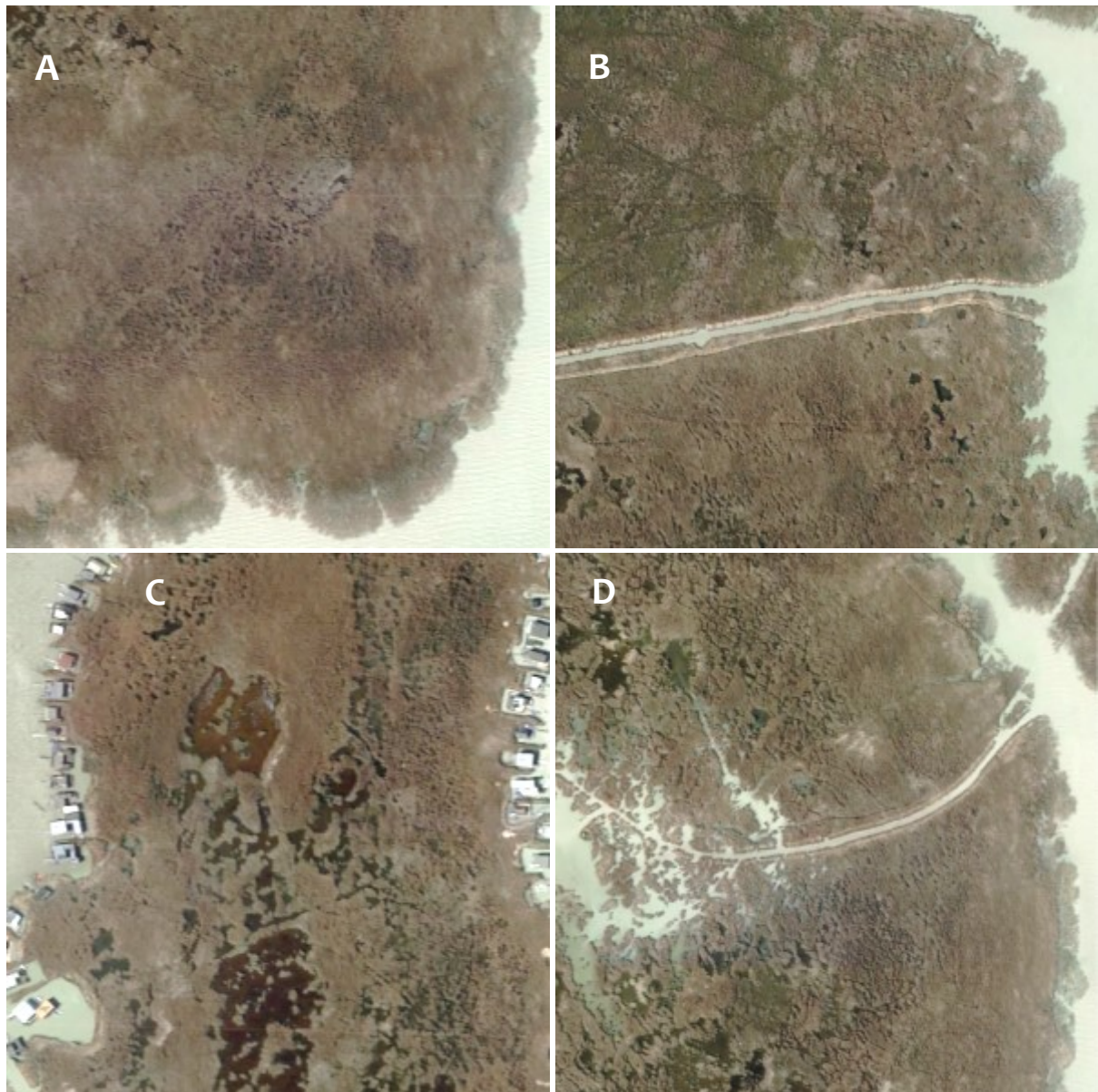
Fast die Hälfte des österreichischen Schilfgürtels ist sehr dicht (Typ A) und allenfalls von Kanälen durchzogen (Typ B), die von Dämmen begleitet sind. Dieser Teil des Schilfgürtels

bietet also kaum Retentionsraum für Wasser- und Stoffaustausch. Offene Bereiche finden sich vor allem Höhe Mörbisch und Illmitz, mit kleineren Flächen auch bei Rust und Jois. Sie standen im Zentrum der REBEN-Untersuchungen und machen rd. 15% der Fläche des österreichischen Schilfgürtels aus. Ein Großteil dieser Flächen ist derzeit gut an den offenen See angebunden (Typ D).

Eine besondere Situation repräsentiert die Messstelle ILg Höhe Illmitz Seebad, die nicht oder kaum an den offenen See angebunden ist (Typ C) und sich chemisch und biologisch markant von den angebundenen Bereichen weiter nördlich unterscheidet (siehe Abbildung 28).

In Hinblick auf diese unterschiedlichen Ausprägungen des Schilfgürtels können zwei Szenarien definiert werden:

- **Szenario S1** keine Kanäle bzw. bestehende Kanäle verlandet oder verwachsen; durchgängige Kanäle sind nicht an größere Wasserflächen angebunden, d.h. der Schilfgürtel entspricht überwiegend Typ A, B und C (cf Abbildung 28)
- **Szenario S2** Ausdehnung des bestehenden Netzes von Kanälen und gute Anbindung an die inneren Bereiche des Schilfgürtels, d.h. die Bereiche von Typ D bleiben erhalten und Schilfflächen vom Typ C werden an den See angebunden (-> in Typ D umgewandelt)



**Abbildung 28. Unterschiedliche Ausprägungen des Schilfgürtels Höhe Oggau/Rust. A: Bereich mit dichtem Schilf ohne Blänke und Kanäle, B: Von einem Kanal durchzogener Bereich ohne laterale Verbindung, C: Bereich mit Blänken ohne Anbindung an den See, D: Bereich mit gut an den See angebundenen Blänken.**

Wie Szenario W2 ist auch S2 nur mit umfangreichen Maßnahmen und Eingriffen in den Schilfgürtel möglich. Sie sind damit auch in der Beurteilung in Kap. 4 mit zu berücksichtigen. Die Maßnahmen beschränken sich freilich auf den Neusiedler See außerhalb des Nationalparks, wo in der Naturzone im Südteil des Sees derzeit keinerlei anthropogene Eingriffe zugelassen sind. Das bedeutet aber auch, dass es im gesamten Neusiedler See auch im Szenario S2 Bereiche geben wird, die nicht an den offenen See angebunden sind.

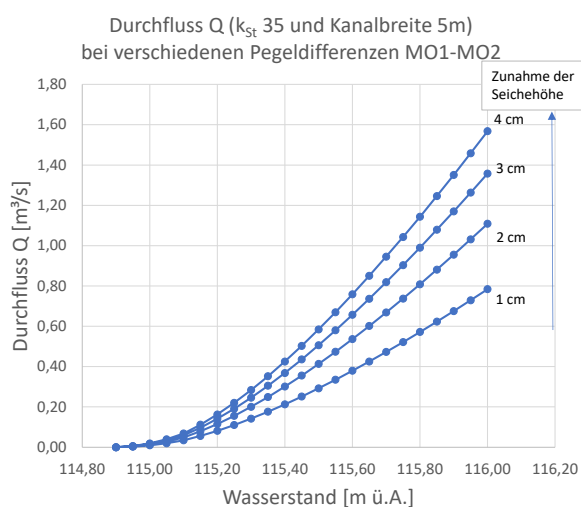
Für die sechs Szenarien sollen im Folgenden die in Kap. 3 dargestellten Gradienten, Austauschprozesse und Frachten neu bewertet und beschrieben werden. Die Prognosen

stellen das Ergebnis einer gut fundierten Experteneinschätzung dar, die sich im Team der Bearbeiterinnen und Bearbeiter auf Grundlage von umfangreichen Analysen und Datenauswertungen (Teilberichte 1 bis 6) bzw. den daraus abgeleiteten Frachtabschätzungen (Kap. 3.4 des vorliegenden Berichts) herausgebildet hat.

## 4.2 Szenario P1 – Pegel <115.2 m ü.A.

Das Szenario mit einem Pegel <115,2 m ü.A. ist kein rein hypothetisches, auch wenn die Wasserstände im Zeitraum der Untersuchungen des Projekts REBEN durchwegs höher lagen. Die Verfasser können jedoch auf Erfahrungen aus den Jahren 2003/2004 zurückgreifen und auch aktuell zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts (August 2020) liegt der mittlere Wasserstand des Sees unter 115,2 m ü.A. (<https://wasser.bgld.gv.at>).

**Jüngste Befahrungen zeigten, dass bei einem Pegel um 115,2 m ein Großteil des Schilfgürtels bereits trocken liegt. Bei 115,0 m ü.A., wie zuletzt im Herbst 2003, ist *de facto* der gesamte Schilfgürtel trocken und der See auf die offene Wasserfläche reduziert.** Im österreichischen Gebiet sind dann nur sehr wenige Kanäle noch befahrbar und stehen für einen stark eingeschränkten Wasseraustausch zur Verfügung. Das einströmende Wasser findet jedoch keine Flächen, die tief genug lägen, um überflutet zu werden. Damit sind auch die Wassermassen, die selbst bei stärkeren Windereignissen und Seiche-Bewegungen in die wenigen tieferen Kanäle gedrückt werden, sehr gering. Anhand der Manning-Strickler-Modellierung lässt sich dieser Effekt deutlich aufzeigen: Der Durchfluss durch einen gut untersuchten Kanal bei Mörbisch sinkt mit abnehmendem Wasserstand markant ab, d.h. es braucht immer stärkere Seiche-Bewegungen und Wellen, um Wasser in den Kanal eintragen zu können (Abbildung 29).



**Abbildung 29. Beziehung zwischen Wasserstand und Durchfluss durch einen Kanal bei Mörbisch unter Annahme unterschiedlicher Pegeldifferenzen (MO1 Seerand, MO2 im Schilfgürtel) infolge einer Seiche-Welle (modelliert nach Manning-Strickler).**



Während die Situation, wie beschrieben, für kürzere Phasen niedrigen Wasserstands relativ gut abgeschätzt werden kann, ist die Frage der längerfristigen Entwicklung (z.B. mehrere Jahre mit einem mittleren Wasserstand um 115,2 m ü.A. und einem Minimum um 115,0 m ü.A.) weniger klar. Die größte Unsicherheit betrifft dabei die Entwicklung des Schilfgürtels. Es ist denkbar, dass verstärkt andere Pflanzen als *Phragmites* in den semi-terrestrischen Bereich vordringen und sich auf den höher gelegenen Flächen ausbreiten (wie dies derzeit auf Dämmen entlang von Kanälen beobachtet werden kann). Es ist auch nicht auszuschließen, dass ein regelmäßiges Austrocknen des Sediments im Schilfgürtel und ein verstärkter Kontakt mit Luftsauerstoff zu einem veränderten (erhöhten?) Abbau von organischem Material beiträgt. Diese Annahme kann sich jedoch derzeit auf keine Befunde oder gesicherten Indizien stützen. Beispielsweise zeigen Untersuchungen von Hietz (1989) eine gegenteilige Entwicklung.

Für die Feststoffbilanz des Sees ist anzunehmen, dass sich die Einträge wie auch die Kalkschlamm-Neubildung im See nur geringfügig ändern werden, sofern man geringere Zuflüsse der Wulka außer Acht lässt und den niedrigen Wasserstand als Ergebnis geringerer Niederschläge oder höherer Verdunstung ansieht. Bei <115,2 m ü.A. fehlen jedoch die Ablagerungsflächen im Schilfgürtel, d.h. die eingetragenen und neu gebildeten Sedimente werden verstärkt in ufernahen windgeschützten Bereichen des offenen Sees sedimentieren. Möglicherweise führt dies zu verstärkten Aktivitäten zur Ausbaggerung von Segelhäfen und Badebuchten. Sedimentationsflächen im Südteil des Sees (Nationalpark) werden jedoch bestehen bleiben und anwachsen.

Eine Abschätzung der verstärkten Sedimentation im offenen See kann näherungsweise vorgenommen werden, wenn man von den rd. 9 700 t ausgeht, die derzeit aus dem See in den Schilfgürtel verfrachtet werden (Tabelle 5). Sie entsprechen einem Sedimentvolumen von rund 25 700 m<sup>3</sup>, die bei gleichmäßiger Verteilung auf der Fläche des offenen Sees (140 km<sup>2</sup>) eine jährliche Sedimentation von 0,18 mm ausmachen. Bezieht man die Sedimentmenge auf geschätzte 10 km<sup>2</sup> an Buchten und windgeschützten Bereichen, d.h. potenziellen Ablagerungsflächen, so erhöht die Rate entsprechend auf knapp 2 mm/a und damit in 10 Jahren wenige Zentimeter.

Auch für Nährstoffe ist bei niedrigem Wasserstand mit einem deutlich verringerten Export in den Schilfgürtel zu rechnen, wie dies bereits die Stoffbilanz von Wolfram *et al.* (2012) nahegelegt hat. Damit erhöhen sich die Nährstoffkonzentrationen im offenen See, wobei neben dem fehlenden Austrag von Sediment und Nährstoffen in den Schilfgürtel auch eine verstärkte Resuspension von partikelgebundenen Nährstoffen aus dem Sediment im offenen See (aufgrund der geringeren Wassertiefe) eine Rolle spielen dürfte. Der Anstieg der Phosphor-Konzentration im Jahr 2004 konnte diese Entwicklung im Ansatz zeigen. Veränderungen der Konzentrationen anderer Wasserinhaltsstoffe sind in Kap. 3.7 beschrieben.

Für jene Schadstoffe, die im See-Schilfgürtel-System weitgehend ab- oder umgebaut werden, kann für das Szenario eines niedrigen Wasserspiegels keine klare Abschätzung getroffen werden. Da der Ab- und Umbau teilweise fotokatalytisch erfolgt, wäre ein Weiterlaufen der Konzentrationsreduktion durchaus denkbar. Ob es bei Erhöhung der Trübe durch den fehlenden Austrag von Feststoffen in den Schilfgürtel zu geringeren Abbauleistungen und damit einer Erhöhung der Konzentrationen kommen würde, ist auf Basis des derzeitigen Kenntnisstandes nicht vorhersehbar. Anders ist die Situation bei Stoffen, die sich im offenen See weitgehend persistent verhalten (z.B. PFOA oder N,N-Dimethylsulfamid). Wenn von einem unveränderten Eintrag über die Wulka und anderen Einträgen wie z.B. die atmosphärische Deposition ausgegangen wird und sich der fallende Wasserspiegel aus einem verstärkten Überhang der Verdunstung über den Niederschlag ergibt, dann ist mit einer Erhöhung des Anreicherungs-faktors ( $af$ ) und damit höheren Konzentrationen im See als derzeit auszugehen.

Für die Stoffe PFOS, Fluoranthen und Benzo(a)pyren, für die bereits derzeit das Risiko einer Verfehlung der UQN nicht auszuschließen ist, dürfte sich die Situation unter den oben dargestellten Annahmen weiter verschärfen. Zum einen spielt auch für diese Stoffe eine Aufkonzentrierung aufgrund des Überhangs der Verdunstung über den Niederschlag eine Rolle, zum anderen ist jedenfalls für die beiden PAK (Fluoranthen und Benzo(a)pyren) davon auszugehen, dass der Austrag und die Sedimentation über Schwebstoffe in den Schilfgürtel nicht mehr wie bisher funktionieren werden und damit eine gegenüber heute insgesamt erhöhte Konzentration im See zu erwarten ist, auch wenn die Bedeutung einer Mobilisierung und damit einer Rückbelastung des Sees (z.B. bei Benzo(a)pyren) zurück gehen würde. Für PFOS dürfte zurzeit eine Adsorption an das Schilfsediment eine Dämpfung der auftretenden Konzentrationen im See bewirken. Diese könnte im Falle langzeitiger Niederwasserstände und dem fehlenden Austausch mit dem Schilfgürtel nicht mehr wirksam werden. Tendenziell ist damit auch für PFOS bei längerfristigen niedrigen Wasserständen mit weiter erhöhten Konzentrationen zu rechnen. Für das gelöste Blei ist derzeit auch das Risiko einer Zielverfehlung nicht auszuschließen. Auch hier spielen Adsorption und Sedimentation sowie Desorption und Mobilisierung aus dem Sediment eine wichtige Rolle. Neben einem aktuellen Austrag mit Feststoffen über Sedimentation in den Schilfgürtel, deuten die Daten für Blei und andere Schwermetalle darauf hin, dass aktuell auch die Adsorption im Schilfgürtel die Mobilisierung von gelösten Metallen überwiegt und eine fehlende Anbindung an den Schilfgürtel die Konzentration von gelöstem Blei im See erhöhen dürfte. Das betrachtete Szenario dürfte demnach das Risiko einer Verfehlung der Umweltqualitätsnormen (UQN) für die betrachteten Stoffe erhöhen.

Aus gewässerökologischer Sicht brächte das Szenario P1 zunächst vermutlich eine gewisse Verarmung mit sich, da mit dem Trockenfallen des Schilfgürtels die aquatischen Habitate verloren gingen. Das beträfe die dortigen Lebensgemeinschaften (unter den Fischen z.B.

die Karausche), aber auch Arten, die aus dem offenen See regelmäßig in den Schilfgürtel einwandern. Bei einem Anstieg des Salzgehalts (siehe oben) könnten aber Spezialisten, wie sie derzeit in den Salzlacken im Seewinkel vorkommen, profitieren und in den Vordergrund treten. Die aquatischen Biozönosen erführen bei langanhaltendem Niederwasserstand letztlich also auch eine (natürliche) Verschiebung der Zusammensetzung, welche durchaus ökologisch positiv gesehen werden kann, solange die Variabilität des Wasserstands – wenn auch auf niedrigem Niveau – erhalten bleibt.

Zusammenfassend sind die erwartbaren Änderungen für die Schwebstoff- und Nährstoffentwicklung in vereinfachter Form in Abbildung 30. dargestellt. Pfeile stehen für Frachten, wobei die Linienstärke mit der Höhe der Fracht korreliert. Kästchen bilden Lager/Depots bzw. Konzentrationen ab. In der Oberen Hälfte der Graphik sind die Feststoffe dargestellt, wobei braune Pfeile den Feststofftransport kennzeichnen und beige Pfeile die Feststoffneubildung. In der unteren Hälfte der Abbildung sind die Stoffflüsse für Phosphor dargestellt, braune Pfeile bilden hier die partikuläre Fraktion, blaue Pfeile die gelöste Fraktion ab. Die linke Spalte enthält jeweils den Status quo für Feststoffe und Phosphor, die rechte Spalte die Veränderung entsprechend dem Szenario. Veränderungen der Frachten sind durch Änderungen der Pfeilstärken ersichtlich, Änderungen der Konzentrationen in den Lagern /Depots farblich unterschiedlich (orange ... zunehmend, grün ... abnehmend, grau ... gleichbleibend).

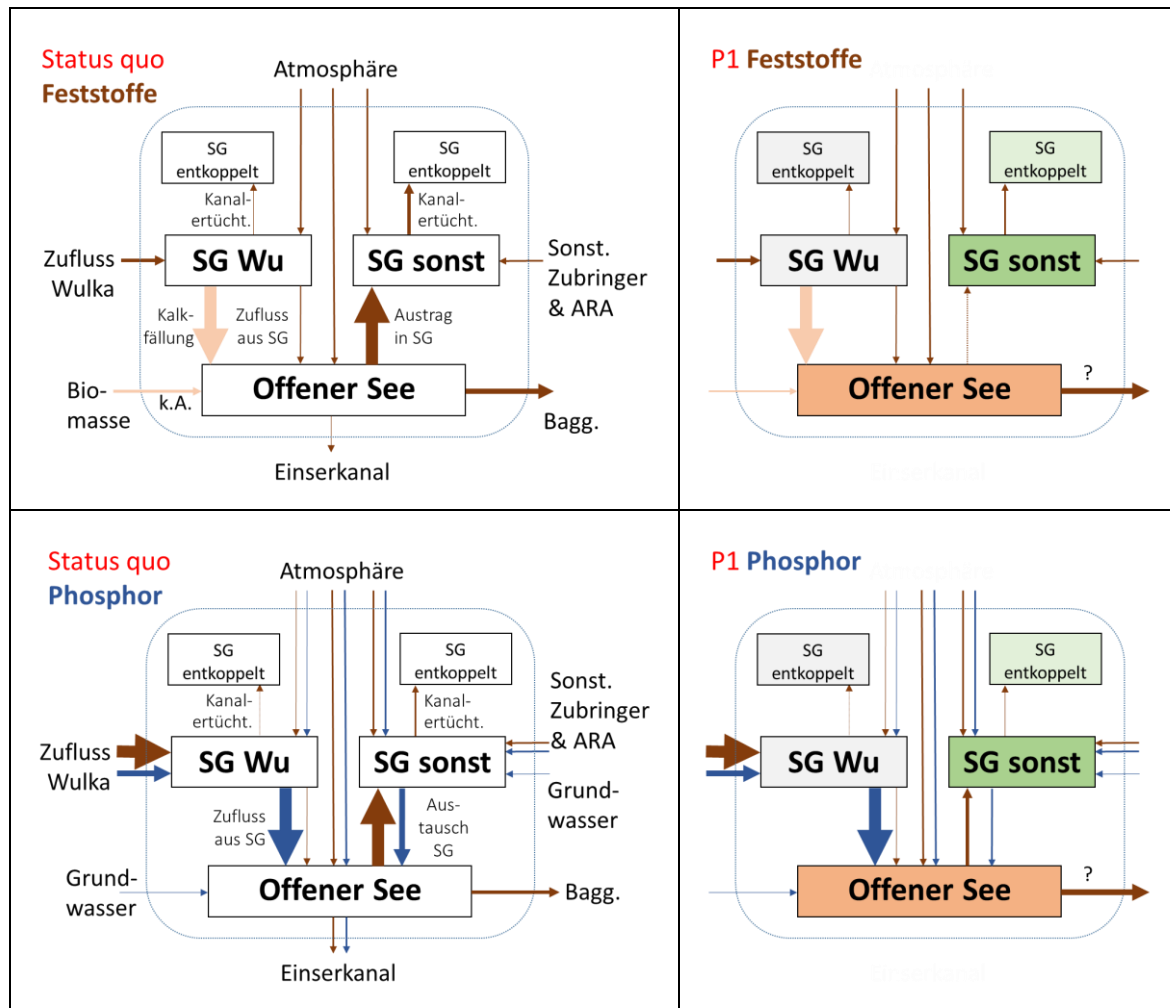


Abbildung 30. Veränderungen der Stoffflüsse für Feststoffe (oben) und Phosphor (unten) im Szenario P1.

### 4.3 Szenario P2 – Pegel >115,8 m ü.A.

Auch für hohe Wasserstände gibt es Erfahrungen aus den letzten Jahrzehnten. Mitte der 1990er Jahre erreichte der Neusiedler See einen Höchststand von knapp 116 m ü.A., der massive Ableitungen über den Einser-Kanal zur Folge hatte. Erstmals wurde in der Folge die Problematik von hohen Salzableitungen thematisiert (Wolfram *et al.* 2004a). Die Auswirkungen, die sich aus möglichen Veränderungen des Grundchemismus des Sees bei hohen Wasserableitungen erheben, sind daher in diesem Szenario mit zu berücksichtigen. Neben den Veränderungen im See selbst wird auch das Bilanzglied der Schwebstoffableitung über den Einser-Kanal in diesem Szenario beeinflusst.

Grundsätzlich sind die im vorigen Szenario beschriebenen Veränderungen jenen bei hohen Wasserständen gegenläufig und vielfach spiegelbildlich zu sehen. Ungeachtet der Frage der Kanalertüchtigung (siehe unten) sind bei hohem Wasserstand die (offenen) Kanäle befahrbar und ermöglichen einen effektiven Wasseraustausch zwischen offenem See und Schilfgürtel (vgl. Abbildung 29). Es ist weiters zu erwarten, dass die „Reichweite“ der Wellen und Seiche-Bewegungen größer ist als bei mittlerem Wasserstand. Ein kleiner Anteil der Wasserfrachten in den Schilfgürtel wird, zumindest im seenahen Bereich, auch diffus erfolgen.

Mit dem erhöhten Wassereintrag in den Schilfgürtel geht auch ein erhöhter Schwebstoffeintrag einher. Es erscheint sehr wahrscheinlich, dass dieser weiterhin primär über Kanäle erfolgen wird. Im seenahen Bereich wird aber sicherlich auch der Bereich des Seewalls erreicht, der in der Folge eine weitere Aufhöhung erfahren und damit weiter „wachsen“ wird – ein Effekt, der bei niedrigem Wasserstand nicht oder nur in irrelevantem Ausmaß gegeben ist. Generell ist aber aus heutiger Sicht eher unwahrscheinlich, ob die diffuse Einströmung in den Schilfgürtel nennenswert zur Gesamtfracht beiträgt (wie dies vermutlich in den 1980er Jahren noch der Fall war).

Auswirkungen auf Sedimentationsbereiche im offenen See sind schwer abzuschätzen. Diese unterliegen immer einem Wechselspiel von Erosion und Sedimentation, und es ist denkbar, dass bei höherem Wasserstand und neu zur Verfügung stehenden Ablagerungsbereichen die Resuspension im offenen See abnehmen wird. Diese Hypothese kann allerdings derzeit nicht überprüft werden; nicht zuletzt angesichts der Schwierigkeit, allein die vorliegenden Aufnahmen zur Sedimentoberfläche schlüssig zu interpretieren (vgl. Bericht 2 der österreichischen Experten). In jedem Fall aber ist für die im See gebildeten Sedimente ein starker Austrag aus dem offenen See in den Schilfgürtel zu erwarten. Ebenso ist infolge von Ausleitungen über den Einserkanal ein Export von Schwebstoffen aus dem gesamten Seesystem in Richtung Ungarn gegeben.

Was die Ausbaggerungen von Segelhäfen und Badebuchten betrifft, so ist denkbar, dass diese bei hohem Wasserstand als weniger dringlich empfunden werden. Entsprechende Aktivitäten der Gemeinden könnten daher vorübergehend eingeschränkt werden. Sie würden aber wohl nach einiger gewissen Zeit, in der die Sedimentanlandung in den Stillwasserbereichen der Marinas und Badebereiche weiter zunimmt, wieder intensiviert werden. Die vorliegenden Daten zur Ausbaggerung seit 2004 lassen allerdings keinen Zusammenhang zwischen Wasserstand und Schlammentnahmen erkennen.

Für Nährstoffe (Phosphor) ist eine vergleichbare Entwicklung wie für die Feststoffe zu erwarten. Mit dem Schwebstoffaustrag aus dem offenen See wird es auch zu einem Export an Nährstoffen kommen, der entsprechend niedrigere Konzentrationen im offenen See zur Folge haben wird. Auch die Resuspension von Sedimenten vom Seeboden wird bei einer Wassertiefe von  $>2$  m abnehmen, wenngleich der See sicherlich auch bei hohem Wasserstand seine typische Trübe beibehalten wird. Insgesamt aber ist bei hohem Wasserstand primär infolge Nährstoffaustrag in den Schilfgürtel eine merkliche Abnahme der Phosphorwerte im Freiwasser zu erwarten, wie dies bereits Mitte der 1990er Jahre beobachtet werden konnte (vgl. Abb. 45 in Teilbericht 3 der österreichischen Experten).

Auch für die Schadstoffe sind die im vorigen Szenario beschriebenen Veränderungen jenen bei hohen Wasserständen gegenläufig und vielfach spiegelbildlich zu sehen. So ist davon auszugehen, dass bei höheren Wasserständen und vermehrtem Austrag über den Einser-Kanal die Anreicherung von persistenten Stoffen im See (af) geringer wird. Auch führen eine verstärkte Anbindung des Schilfgürtels und der damit verstärkte Austrag von Feststoffen aus dem See auch zu einem verstärkten Austrag von partikelgebundenen Schadstoffen wie PAK oder Metalle bzw. zu einer potenziell verstärkten Adsorption gelöster Schadstoffe an Schilfsedimente. Wieweit sich eine durch höhere Wasserstände verstärkte Anbindung abgelegener Schilfbereiche in einer verstärkten Mobilisierung und Rückbelastung des Sees niederschlägt, kann derzeit nicht abgeschätzt werden. Insgesamt ist jedoch zu erwarten, dass im Falle des Szenarios längerfristiger hoher Wasserstände das Risiko einer Verfehlung der UQN für die betrachteten Stoffe verringert, solange eine Vernetzung mit dem Schilfgürtel bestehen bleibt.

Gravierend ist ein anhaltend hoher Wasserstand potenziell auch für den Grundchemismus des Neusiedler Sees. Gemäß der derzeitigen Wehrbetriebsordnung werden von November bis Jänner ab einem Wasserstand von 115,70 m ü.A. bis zu 15 m<sup>3</sup>/s über den Einser-Kanal abgeleitet, von April bis August bis zu 6 m<sup>3</sup>/s. In den Monaten dazwischen verschiebt sich der Grenzwasserstand graduell; die Ableitungsmenge beträgt dann im Februar und März bis zu 6 m<sup>3</sup>/s, im Oktober bis zu 15 m<sup>3</sup>/s. Der Grenzwasserstand wurde zum Schutz von Infrastrukturen im Seerandbereich gewählt, die bei höherem Wasserstand im Fall von starken Windeinfluss oder bei kurzfristigem niederschlagsbedingtem Anstieg des Wasserstands gefährdet wären (vgl. Abbildung 31).



Die aktuell gültige Wehrregelung bringt daher mit sich, dass im Szenario P2 bei >115,8 m ü.A. quasi permanent eine Ableitung von Seewasser erforderlich wäre. Die Auswirkungen häufiger Ableitungen auf den Salzhaushalt – konkret: das Risiko einer Aussüßung des Sees – wurden ausführlich von Wolfram *et al.* (2004a) thematisiert und sind mannigfaltig: von dem Risiko einer verstärkten Eutrophierung bis hin zum Verlust der typischen Lebensgemeinschaft des Sodasees. Diese Konsequenzen eines hohen Wasserstands im Szenario P2 werden hier nicht weiter ausgeführt, sie machen aber deutlich, dass eine Realisierung des Szenarios P2 nur mit einer Anpassung der Wehrbetriebsordnung (ggf. auch Hochwasserschutzmaßnahmen sensibler Infrastrukturen) möglich ist.



**Abbildung 31. Hochwassersituation im Bereich des Illmitzer Seebads am 9. März 2009 (Foto: M. Pannonhalmi).**

Ungeachtet der Überlegungen zur Wasserstandsregulierung und einer Anpassung der Wehrbetriebsordnung wird insgesamt bei hohem Wasserstand jedenfalls eine stärkere laterale Vernetzung zwischen offenem See und Schilfgürtel sowie darüber hinaus bis in die vorseeeischen Wiesen gegeben sein, die neben den chemischen auch gewässerökologische Auswirkungen hat, so z.B. die Nutzung von Flachwasserbereichen als Laichplatz für Fische. Langfristig ist freilich zu erwarten, dass die zunehmende Aufhöhung des Seewalls die diffuse Durchströmung des Schilfgürtels wieder einschränken wird. Auch drängt sich die Frage auf, wie lange und wie viel Sedimentation der Schilfgürtel „verträgt“. Dazu können folgende Zahlen eine Orientierung geben:

Der Eintrag von rund 7 555 t/a an Schwebstoffen in den Schilfgürtel (nur Österreich) ergibt – bei Berücksichtigung der im Teilbericht 2 der österreichischen Experten „Schilf“ ausgeführten Zahlen und Annahmen zu Wassergehalt und Dichte – ein Volumen von rd. 20 000 m<sup>3</sup>. Bezogen auf die österreichische Fläche des Schilfgürtels (102 km<sup>2</sup>) entspräche dies einer jährlichen Aufhöhung von 0,2 mm. Bezogen auf die gesamten (11,7 km<sup>2</sup>) bzw. die gut angebundenen Wasserflächen (5,7 km<sup>2</sup>) in Österreich gemäß Schilf-Wasser-Layer läge

die Sedimentationsrate bei 1,7 bzw. 3,5 mm/a und damit in 10 Jahren bei mehreren Zentimetern.

Zusammenfassend sind die erwartbaren Änderungen für die Schwebstoff- und Nährstoffentwicklung wiederum in Abbildung 32 dargestellt. Erklärung der Symbole siehe Abbildung 25 (Szenario P1).

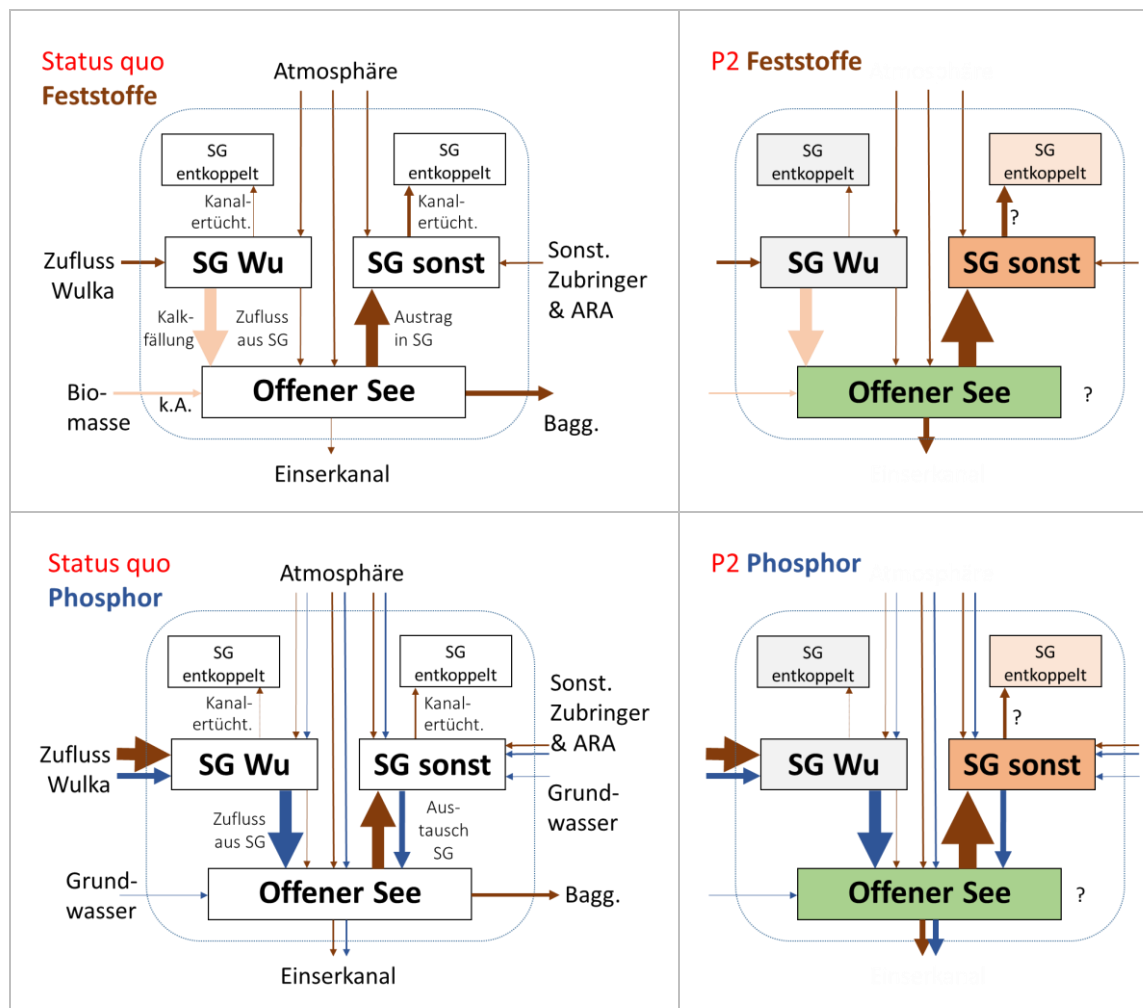


Abbildung 32. Veränderungen der Stoffflüsse für Feststoffe (oben) und Phosphor (unten) im Szenario P2.

## 4.4 Szenario W1 – diffuse Durchströmung der Wulka

Nach den vorliegenden chemischen Analysen, auf Grundlage der Beobachtungen im Freiland und nach den vorliegenden Befunden aus dem Tracer-Versuch strömt die Wulka auf ihrem Weg durch den Schilfgürtel bei Niederwasser überwiegend über ein bestehendes Kanalsystem, das allerdings relativ rasch durch Schilf und anderes Röhricht verlandet. Entsprechend häufig war es in den vergangenen Jahren erforderlich, diesen Kanal zu ertüchtigen, zuletzt im Jahr 2018 und damit während der Laufzeit des Projekts REBEN. Zu Beginn des Projekts dürfte ein größerer Anteil des Wulkawassers zunächst noch diffus durch den Schilfgürtel geströmt sein und erst mit einer gewissen Verzögerung die Kanäle erreicht haben. Bei Hochwasser ist die hydraulische Kapazität der Kanäle zu gering; die Wulka strömt dann in jedem Fall überwiegend diffus durch den Schilfgürtel.

Das Szenario W1 geht davon aus, dass die Kanäle im Wulka-Mündungsbereich nicht mehr ertüchtigt werden und auch ein Niederwasserabfluss zunächst diffus seinen Weg zwischen den Schilfhalmern bis zum Hauptkanal und zur Mündung in den offenen See finden muss. Es ist anzunehmen, dass das dichte Schilf nicht nur eine signifikante Verringerung der Fließgeschwindigkeit, sondern auch einen Rückstau verursacht, der eine leichte Aufhöhung des Wasserspiegels im Bereich der Wulka-Mündung mit sich bringt. Genauere Angaben sind mangels geodätischer Daten zur Sohlhöhe im Schilfbereich und in den Kanälen nicht möglich.

Wie aus der Feststoffbilanz in Tabelle 4 ersichtlich, wird diese Änderung der Durchströmung für den Schwebstoffeintrag nur geringe Auswirkungen haben, da auch derzeit ein Großteil der Jahresfracht (die ja überwiegend bei Hochwässern transportiert wird) im Schilfgürtel der Wulka verbleibt. Eine tendenzielle Aufhöhung der zurückgehaltenen Frachten ist allerdings wahrscheinlich. Hier stellt sich zwangsläufig die Frage, wie lange die Deposition von durchschnittlich rund 3 800 t Feststoffen pro Jahr (als Trockenmasse, entspricht rd. 10 000 m<sup>3</sup> Feuchtvolumen) im Wulka-Mündungsbereich in Hinblick auf die zunehmende Anlandung möglich ist. Bezogen auf rd. 10 km<sup>2</sup> Schilfgürtel ergibt sich eine Sedimentationsrate von 1 mm/a, je nach Annahme zum tatsächlichen Retentionsraum ist eher von 2 oder mehr mm pro Jahr bzw. in 10 Jahren von mehreren Zentimetern auszugehen. Das Potenzial, Feststoffe aufzunehmen, ist damit naheliegenderweise auf absehbare Zeit erschöpft. Die „Lebensdauer“ des Schilfgürtels Höhe Wulka-Mündung kann allerdings verlängert werden, wenn die jährliche Feststofffracht z.B. durch Erosionsschutz im Einzugsgebiet verringert wird und/oder ein effektiver Rückhalt an Schwebstoffen vor Eintritt in den Schilfgürtel z.B. in einem Retentionsbecken gewährleistet wird. Die anfallende Menge an Feststoffen müsste allerdings regelmäßig aus diesem Retentionsbecken entfernt werden.

Für Phosphor gilt zunächst das gleiche wie für die Schwebstoffe. Der partikulär gebundene Phosphor wird bei überwiegend bis ausschließlich diffuser Durchströmung zum größten

Teil im Schilfgürtel zurückgehalten. Allerdings ist auch eine zunehmende Freisetzung von gelöstem Phosphor anzunehmen, der in der Folge den offenen See erreicht (vgl. Kap. Chemie: Daten der Messstelle WU3). Auf Basis der vorliegenden Daten wurde der Anteil des Gesamtphosphors, der den offenen See nach Durchströmung und Umsetzungen im Schilfgürtel erreicht, auf knapp 80% geschätzt, in Hochwasserjahren vermutlich weniger (rd. 60%). Derzeit geben die Daten keinen Anlass, bei zunehmend diffuser Durchströmung des Schilfgürtels für Gesamtphosphor eine höhere Retentionsrate anzunehmen; vielmehr dürften sich der Rückhalt von partikulärem und der Export von gelöstem Phosphor die Waage halten. Diese Annahme ist allerdings angesichts der strukturellen Komplexität und Wissensdefizite zu den Umsetzungen im dichten Schilfgürtel unsicher. So ist es denkbar, dass sich auch ohne Ertüchtigung von Kanälen bevorzugte Fließwege etablieren, in denen eine größere Fließgeschwindigkeit und eine bessere Sauerstoffversorgung herrscht, sodass anaerobe Umsetzungsprozesse eine untergeordnete Rolle spielen.

Es ist anzunehmen, dass dieses Szenario keinen wesentlichen Einfluss auf die Schadstoffbelastung des Sees und damit auf das Risiko einer Verfehlung der UQN haben würde. Weitgehend persistente Stoffe, die überwiegend gelöst transportiert werden (z.B. PFOS oder PFOA), werden voraussichtlich wie bisher auch im Falle dieses Szenarios den Schilfgürtel der Wulka weitgehend unverändert passieren. Bei überwiegend partikulär transportierten Stoffen wie die PAK Benzo(a)pyren oder Fluoranthene wird der partikuläre Anteil auch derzeit weitgehend zurückgehalten, und es ist wie oben bereits dargestellt keine große Veränderung des Feststoffrückhaltes zu erwarten. Im Falle von Metallen wie Blei ist derzeit ein ähnliches Verhalten wie bei Phosphor zu beobachten. Einem Rückhalt von partikulärem Blei steht eine Mobilisierung von gelöstem Blei gegenüber. Ob das hier betrachtete Szenario eine verstärkte Rücklösung von Blei mit sich bringen würde, kann derzeit nicht abgeschätzt werden.

Abschließend sind die Auswirkungen einer überwiegend oder rein diffusen Durchströmung des Schilfgürtels durch die Wulka auch in Hinblick auf die Lebensgemeinschaften zu bewerten. Wie die Erhebungen im Projekt REBEN zeigten, stellt der Mündungsbereich der Wulka einen ökologisch und naturschutzfachlich wertvollen Hotspot dar. Im Schilfgürtel konnten Fischarten des Wulka-Systems ebenso nachgewiesen werden wie rein stagnophile Arten, darunter auch solche, die im See seit Jahren bis Jahrzehnten nicht mehr nachgewiesen worden waren (z.B. Bitterling, Karausche). Die Reduktion der Fließwege der Wulka auf kleinste Kanäle würde den Lebensraum dieser Arten vermutlich einengen oder zumindest auf den wulkanahen Abschnitt beschränken, da hier – im Übergang vom Fluss zum Schilfgürtel – wohl auch ohne Ertüchtigung der Fließwege ästuarartige und strukturell sehr vielfältige Verhältnisse erhalten blieben.

Eine zusammenfassende Darstellung der Änderungen für die Schwebstoff- und Nährstoffentwicklung bietet in schematischer Form die Abbildung 33.

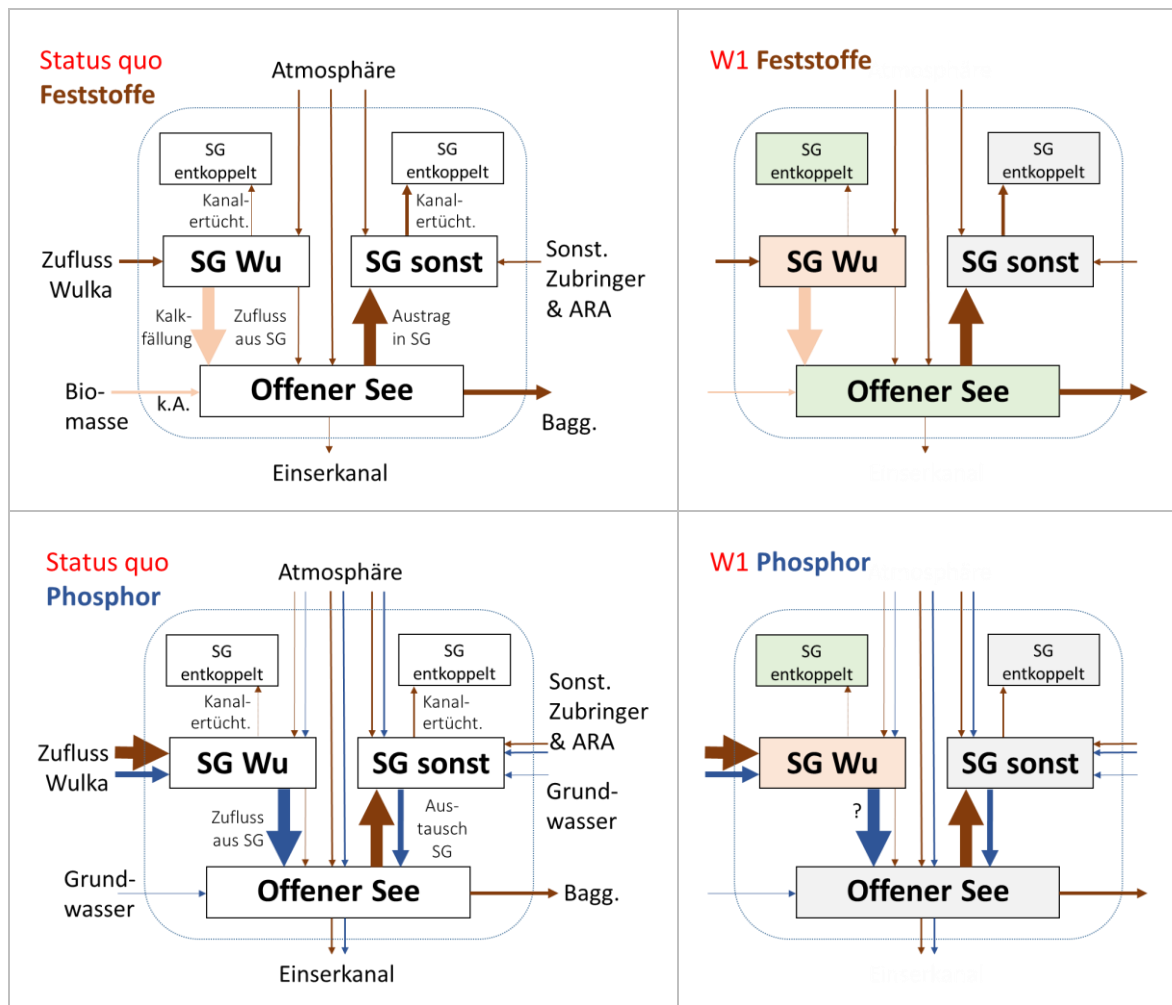


Abbildung 33. Veränderungen der Stoffflüsse für Feststoffe (oben) und Phosphor (unten) im Szenario W1.

## 4.5 Szenario W2 – lineare Durchströmung der Wulka

Das Szenario zur linearen Durchströmung des Schilfgürtels durch die Wulka ist zunächst danach zu beurteilen, inwieweit es aus hydraulischer Sicht überhaupt möglich ist. Trotz der großen Unsicherheiten der hydraulischen Modellierung aufgrund fehlender Daten zum Geländemodell des Schilfgürtels ist davon auszugehen, dass die vorhandenen Kanäle selbst bei ständiger Ertüchtigung zu klein dimensioniert sind, um Abflüsse abführen zu können, die deutlich über Mittelwasser liegen. Jedenfalls aber bei Hochwasser uferf die Wulka aus und strömt derzeit diffus durch den Schilfgürtel.

Eine überwiegend lineare Durchströmung wäre demnach nur möglich, wenn die hydraulische Kapazität des Kanalnetzes deutlich erhöht würde, sei es durch die Baggerung weiterer Kanäle oder durch massive Verbreiterung des bestehenden Gerinnes. Dieses wäre dann allerdings umso stärker dem Risiko einer Verlandung und Verschilfung unterworfen, was entsprechend häufige Räumungen erforderlich machen würde. In der Folge wäre zu klären, ob das ausgebagerte Material (Rhizom, Schilfhalme, Wulkasediment) vor Ort deponiert würde oder abtransportiert wird. Letzteres erscheint aus Kostengründen kaum realisierbar. Für die Deposition vor Ort wäre allerdings eine Alternative zur derzeitigen Praxis (Ablagerung entlang der Kanäle) denkbar, nämlich die Schaffung von größeren Sedimentationsflächen im Schilfgürtel.

Aus diesen Überlegungen wird ersichtlich, dass das Szenario W2 mit weiteren Annahmen präzisiert werden müsste und nur unter bestimmten Rahmenbedingungen realisierbar ist. Nimmt man diese jedoch als gegeben und realisierbar an, so hätte das Szenario zweifelsohne merklichen Einfluss auf die Feststoff- und Nährstoffbilanz.

Für die Feststoffe wäre im Szenario W2 eine Erhöhung der Fracht anzunehmen, die den offenen See erreicht. Die gröberen Anteile (Schluff bis Sand) würden vermutlich weitgehend im Norden des Sees deponiert, die feineren erodiert und weitertransportiert. Sie gehen in der Folge in das Bilanzglied „Baggerungen Häfen“ oder „seeinterne Verfrachtungen“ ein. In welchem Ausmaß die Feststoffe aus der Wulka im Szenario W2 bis zum offenen See gelangen, hängt vom Durchtritt von Hochwässern ab. Sollen auch diese durch den Schilfgürtel geleitet werden, so wäre das wohl nur durch entsprechende Ausgestaltung eines Hochwassergerinnes möglich, z.B. durch Erhöhung und Sicherung der seitlichen Dämme.

Bei Niederwasser müsste jedenfalls die Menge der auszubaggernden Sedimente im Bereich des Wulka-Schilfgürtels signifikant erhöht werden, um eine Verlandung und Verschilfung der Kanäle zu vermeiden und das Szenario W2 als solches weiterhin zu ermöglichen. Im Gegenzug würde aber die Sedimentationsrate im dichten Schilfgürtel markant reduziert werden.



Auch beim Phosphor wäre ein verringerter Rückhalt der partikulären Fraktion zu erwarten, daneben würde gelöster Phosphor in geringerem Maße freigesetzt werden. Da eine ausschließlich lineare Durchströmung des Schilfgürtels bei starken Hochwässern nicht mehr möglich sein dürfte, wäre sporadisch eine diffuse Durchströmung und damit ein Austrag gelöster Inhaltsstoffe aus dem Schilfgürtel anzunehmen. Im Mittel über einen längeren Zeitraum dürfte dieser geringer sein als derzeit, wäre allerdings zeitlich ungleich verteilt und als „seltene Stoßbelastung“ zu verstehen.

Ein stark verringerter Rückhalt von Feststoffen im Wulka-Schilfgürtel, wie er als Resultat dieses Szenarios erwartet wird, hätte auch einen wesentlichen Einfluss auf die Belastung des Sees mit Schadstoffen, die überwiegend partikulär transportiert und zurzeit im Schilfgürtel zurückgehalten werden. Von den betrachteten Stoffen, für die derzeit ein Risiko einer Verfehlung der UQN besteht, sind dabei vor allem die PAK Benzo(a)pyren und Fluoranthen zu erwähnen. Für diese Stoffe würde sich im Falle der Umsetzung dieses Szenarios das Risiko einer Zielverfehlung erhöhen. Daneben wäre das Risiko zu beachten, das von größeren Baggerungen zur Kanalertüchtigung ausgehen kann: Aufgraben und Umlagern größerer Sedimentmengen hat das Potential die Mobilisierung von Schadstoffen aus dem Sediment zu fördern und so zu einer Erhöhung des Sees mit gelösten Schadstoffen zu verursachen, welche zuvor in den Schilfsedimenten fixiert waren. Über das quantitative Ausmaß so einer Rückbelastung kann zurzeit keine Aussage gemacht werden. Entsprechende Überwachungsmaßnahmen wären aber im Fall umfassender Baggerungen vorzusehen.

Die Auswirkungen einer rein linearen Durchströmung des Schilfgürtels auf die Lebensgemeinschaften in diesem Hotspot brächten sicherlich eine stärkere Vernetzung der See- und Flussgemeinschaften mit sich, insbesondere im Zuge von Hochwässern unter der Annahme, dass diese den See rascher erreichen und damit nicht nur einen intensiveren stofflichen Eintrag, sondern auch eine Verdriftung von Flussbewohnern in den See mit sich bringen. Der derzeit eingeschränkte Zugang zum Wulka-System wäre für Fische und andere mobile Arten jedenfalls deutlich erleichtert. Es erscheint sehr wahrscheinlich, dass die Wulka von einigen Fischarten verstärkt als Laichgewässer genutzt würde, z.B. Güster oder Laube. Des Weiteren ist zeitweise ein Vordringen von rheophilen bis strömungsindifferenten Arten (Aitel, Gründling, Barbe) in den See zu erwarten. Insgesamt wäre damit unzweifelhaft eine Annäherung an das fischökologische Leitbild des Sees gegeben (vgl. Zick *et al.* (2006), Wolfram *et al.* (2008), Wolfram *et al.* (2018)).

Ein entscheidender Faktor wäre allerdings der Sauerstoff, dessen Konzentration im Wulka-Kanal an der Mündung zum offenen See derzeit im Hochsommer über Nacht auf  $0 \text{ mg L}^{-1}$  abfallen kann. Das deutet auf eine längere Aufenthaltszeit im Schilfgürtel hin, in welcher der über die Wulka eingebrachte Sauerstoff infolge des Abbaus organischer Substanzen vollständig aufgezehrt wird. Eine rein lineare Durchströmung lässt erwarten, dass solche

Sauerstoffextreme selbst in Niederwassersituationen nicht auftreten und die Wulka damit auch für rheophile und sauerstoffempfindlichere Arten bis zum See als Lebensraum nutzbar ist.

Für stagnophile Arten wie den Schlammpeitzger, die Karausche und den Bitterling könnte eine reine lineare Durchströmung des Schilfgürtels mit einer Einengung ihres Lebensraumes einhergehen. Es ist aber doch anzunehmen, dass auch in diesem Szenario Bereiche erhalten bleiben, die den genannten Arten als Lebensraum dienen können. Das schließt auch Areale mit sehr niedrigen Sauerstoffkonzentrationen ein, in denen die genannten Arten gegenüber anderen einen Konkurrenzvorteil haben.

Zusammenfassend sind die Änderungen für die Schwebstoff- und Nährstoffentwicklung in Abbildung 34 dargestellt.

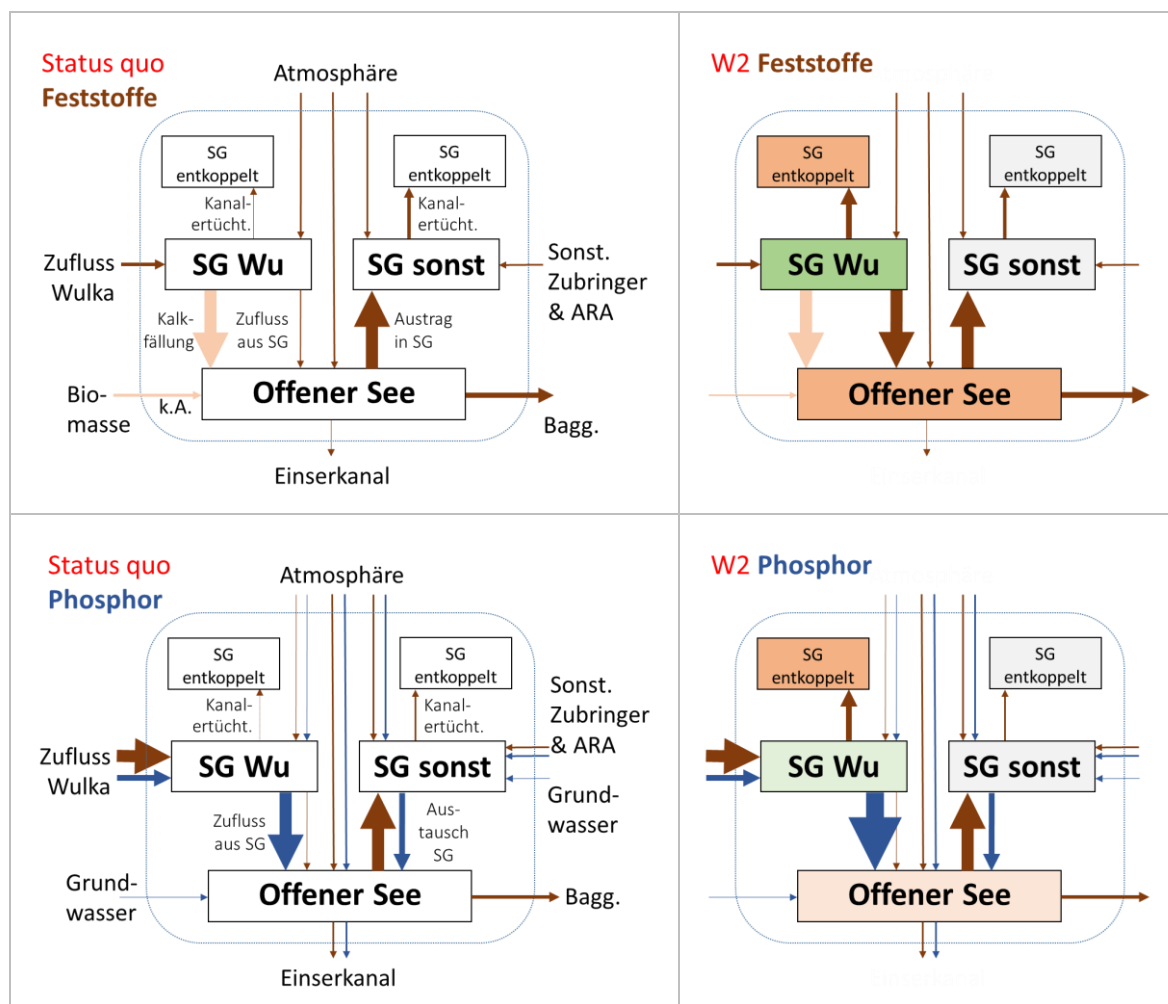


Abbildung 34. Veränderungen der Stoffflüsse für Feststoffe (oben) und Phosphor (unten) im Szenario W2.

## 4.6 Szenario S1 – keine Schilfkanäle

Unser Wissen um den Wasseraustausch zwischen offenem See und Schilfgürtel, der bei An- bzw. Abwesenheit von Schilfkanälen gegeben ist, verdanken wir nicht zuletzt den Schwierigkeiten, die mit der Erstellung des digitalen Geländemodells für die drei Testgebiete verbunden waren. Je nach gewähltem Geländemodell differierten die Ergebnisse der hydraulischen Modellierung beträchtlich. Sie zeigten sehr deutlich die gravierenden Auswirkungen einer Verengung von Kanälen auf den Wasseraustausch auf. So wurden im Bereich Illmitz bei der anlassbezogenen Messserie im Herbst 2019 („Windereignis“, siehe Teilbericht 5) Fließgeschwindigkeiten von mehreren Dezimeter pro Sekunde beobachtet und daraus Durchflüsse von mehreren 100 L/s innerhalb eines Ein- und Ausström-Zyklus durch einen Kanal abgeleitet. Die ersten hydraulischen Modellberechnungen ergaben hingegen Fließgeschwindigkeiten und Durchflusswerte, die um ein bis zwei Zehnerpotenzen unter diesen Werten lagen. Als Ursache konnten Kanalverengungen im digitalen Modell, in einem Fall ein völlig „verschlossener“ Kanal (Richtung Ruster Poschn) ausfindig gemacht werden. Dies verdeutlicht die enorme Bedeutung, die den Kanälen heute als Transportwegen in den Schilfgürtel zukommt. In ähnlicher Weise konnte bei Mörbisch mit unterschiedlichen Annahmen zur Breite von Kanälen ein signifikanter Einfluss auf den Wasseraustausch nachgewiesen werden.

Ein weiterer Punkt, der aber nicht quantifiziert werden konnte, ist die höhere Evaporation, die mit einem häufigeren Austausch zwischen offenem See und Schilfgürtel und damit zeitweise deutlich vergrößerten, sehr seichten Wasserflächen bzw. kurzzeitig benetzten Stellen im inneren Schilfgürtel gegeben ist. Mit dem Szenario S1 wird dieser Effekt unterbunden. Ein reduzierter Austausch See – Schilfgürtel also für die Gesamt-Wasserbilanz von Bedeutung sein. Anders ausgedrückt, begünstigt Szenario S1 tendenziell die Entwicklung in Richtung Szenario P2 (hoher Wasserstand).

Lässt man diesen Aspekt beiseite, so stehen im Szenario S1 die Auswirkungen auf den Wasseraustausch zwischen See und Schilfgürtel im Vordergrund, der ohne regelmäßig ertüchtigte Schilfkanäle weitgehend zum Erliegen käme. Der Seewall ist mittlerweile so hoch, dass bei niedrigen Wasserständen kein Wasser in den inneren Schilfgürtel verfrachtet wird. Aber auch bei mittelhohem Wasserstand über der Oberkante des Seewalls ist der Wasseraustausch See – Schilfgürtel infolge der sehr hohen Rauigkeit des sohlernen Bereichs im dichten Schilf vernachlässigbar. Erst bei deutlich höherem Wasserstand ist in Bereichen mit lockerem Bestand von Schilfhalmen eine gewisse Durchströmung möglich, die jedoch auch dann weit hinter dem effektiven Austausch über die Kanäle zurückbleibt. Die breiten Schilfkanäle fungieren gleichsam als „Autobahnen“ für den raschen Wasseraustausch zwischen offenem See und Schilfgürtel, während das Netzwerk sehr kleiner und enger Zwischenräume zwischen den Schilfhalmen mehr einem verwinkelten „Gasslwerk“ einer Altstadt gleicht.

Heute ist davon auszugehen, dass das Szenario S1 ohne Schilfkanäle weitgehend im Südteil des Sees auf dem Gebiet des österreichischen Nationalparks vorherrscht. Bereits südlich der Straße zum Illmitzer Seebad befindet sich ein Bereich ohne Anbindung an den offenen See. Die dort herrschenden Verhältnisse wurden im Projekt REBEN mit der Messstelle IL9 hydrochemisch und biologisch dokumentiert.

Die Konsequenzen eines de facto zum Erliegen kommenden Wasseraustausches für den seeinternen Stofftransport liegen auf der Hand. Auf der Eintragsseite wie auch hinsichtlich der Sedimentneubildung durch die Calcitfällung sind keine nennenswerten Änderungen zu erwarten. Auf der Austragsseite fallen jedoch die Kanalertüchtigungen weg, welche zu seitlichen Ablagerungen von Sedimenten führen („Schilfgürtel entkoppelt“ in Abbildung 15). Vor allem aber verbleiben die in den See eingebrachten und im See neugebildeten Sedimente im offenen See und können nur in strömungsberuhigten Buchten oder leeseitig größerer Schilfinseln (z.B. angesichts vorherrschender NW-Winde am Südrand der Großen Schilfinsel) abgelagert werden. Für den offenen See bedeutet dies einen jährlichen Anfall von Feststoffen von rd. 10 000 t (der möglicherweise zu intensivierten Baggerungen in Segelhäfen führen wird). Bezogen auf den gesamten offenen See entspräche das einer jährlichen Sedimentationsrate von 0,2 mm. Beschränkt man den Anteil der potenziellen Depositionsflächen hingegen auf rd. 10%, so verzehnfacht sich entsprechend auch die dort zu erwartende Sedimentationsrate – auf 10 Jahre hochgerechnet ergäbe sich damit lokal eine Aufhöhung von 2 cm. Umgekehrt würde die Sedimentationsrate im Schilfgürtel natürlich entsprechend abnehmen.

In der Phosphorbilanz sind die gleichen Bilanzglieder betroffen wie bei der Feststoffbilanz. Es kann allerdings nicht wie bei den Feststoffen von einer dauerhaften Deposition ausgegangen werden. Der als partikuläre Fraktion eingebrachte bzw. an Schwebstoffe adsorbierte Phosphor wird als solcher zwar zunächst abgelagert, kann jedoch über biologische Kreisläufe in gelöster Form wieder freigesetzt werden. Sowohl als gelöster Phosphor als auch partikulär (potenziell mit erhöhter Beladung der Schwebstoffe) wird Phosphor jedenfalls zu einer messbaren Erhöhung der Gesamtposphor-Konzentration im See führen. Inwieweit sich diese Entwicklung auch in einer erhöhten Produktion widerspiegeln wird, kann angesichts anderer limitierender Faktoren neben den Nährstoffen (v.a. Licht) nicht plausibel abgeschätzt werden. Langfristig ist aber eine Verschlechterung der Wasserqualität im weiteren Sinne nicht auszuschließen.

Für die Aufkonzentrierung von Schadstoffen würde dieses Szenario keine erwartbaren Auswirkungen haben, solange nicht von einer geänderten Wasserbilanz (geringere Verdunstung) ausgegangen wird. Abgesehen davon wäre dieses Szenario für die Schadstoffe allerdings ähnlich zu bewerten wie das Szenario P1, wo die Anbindung des offenen Sees an den Schilfgürtel aufgrund niedriger Wasserstände verloren geht: Durch den fehlenden Austrag von Feststoffen aus dem offenen Seen in den Schilfgürtel

verbleiben mehr Schadstoffe im See. Ebenso geht die Möglichkeit des Austrags von gelösten Schadstoffen durch Adsorption an das Schilfsediment verloren. Dem gegenüber wird aber auch eine Mobilisierung von im Schilfsediment gespeicherten Schadstoffen unterbunden. Insgesamt ist aber bei diesem Szenario trotzdem tendenziell eine Erhöhung des Risikos einer Zielverfehlung zu erwarten, da der Austrag über Feststoffe derzeit (= Status quo) gegenüber einer verringerten Nettomobilisation (im Szenario S1) überwiegen dürfte.

Für die aquatischen Biozönosen kommt die Abkopplung von Wasserflächen im Schilfgürtel vom offenen See teilweise einem Lebensraumverlust gleich. Im Inneren des Schilfgürtels könnten zwar spezialisierte Arten profitieren, die die dort herrschenden Bedingungen tolerieren (z.B. Schlammpeitzger). Für Arten des offenen Sees, die bevorzugt im äußeren Schilfgürtel leben oder die landseitigen vorseelischen Wiesen als Laichgebiet nutzen (z.B. Wildkarpfen, vgl. Herzig et al. (1994), Wolfram et al. (2004b)) würde sich der Wegfall von Wanderkorridoren nachteilig auswirken. Zusammenfassend sind die Änderungen für die Schwebstoff- und Nährstoffentwicklung in Abbildung 35 schematisch dargestellt.

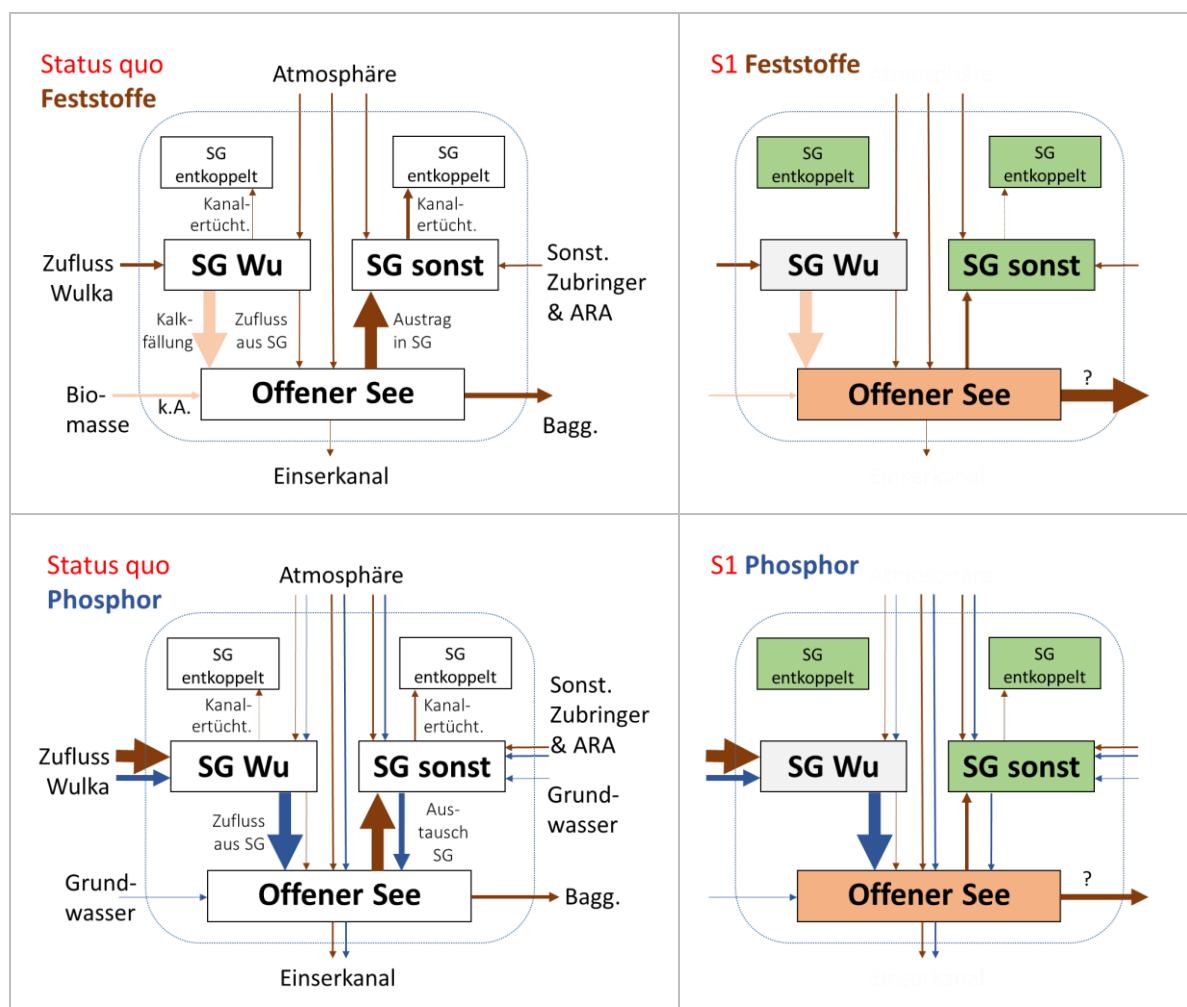


Abbildung 35. Veränderungen der Stoffflüsse für Feststoffe (oben) und Phosphor (unten) im Szenario S1.

## 4.7 Szenario S2 – erweitertes Netz an Schilfkanälen

Wie bei den vorigen Paaren von Szenarien ist auch S2 dem zuvor besprochenen Szenario S1 gegensätzlich. Aktuell entspricht die Situation Höhe Mörbisch diesem Szenario, da hier zahlreiche Schilfkanäle bestehen, die in den letzten Jahren immer wieder ertüchtigt und freigehalten wurden (vgl. Teilbericht 2 der österreichischen Experten „Schilf“). In Ansätzen ähnelt auch der Bereich Illmitz nördlich Seebad dem Bild eines durch Kanäle gut angebundenen Schilfgürtels, wenngleich hier sicherlich noch Potenzial für mehr Kanäle gegeben wäre<sup>1</sup>.

Wie ausführlich dargelegt, erfolgt der Wasseraustausch zwischen See und Schilfgürtel bei Anwesenheit eines ausreichend dimensionierten Netzwerks von Kanälen überwiegend über diese; die diffuse Einströmung durch seenahe Bereiche des Schilfgürtels ist hingegen bei durchschnittlichen Wasserständen vernachlässigbar. Wird das derzeitige System von Schilfkanälen erweitert, so wäre eine solche Maßnahme daher mit einem entsprechend höheren Wasseraustausch See – Schilfgürtel verbunden<sup>2</sup>.

Für die Feststoffbilanz ergäben sich in diesem Szenario eintragsseitig und hinsichtlich der Sedimentneubildung keine Änderungen. Entscheidenden Einfluss hätte ein intensivierter Austausch zwischen offenem See und Schilfgürtel aber auf die seeinternen Verfrachtungen von Feststoffen. In Hinblick auf die Verlandungsproblematik bringt das Szenario S2 eine „Entlastung“ des offenen Sees, zugleich aber eine Verlagerung der Sedimentation in den Schilfgürtel.

In welchem Ausmaß die Verlagerung in den Schilfgürtel gesteigert werden könnte, lässt sich für den gesamten See nicht gesichert darstellen; einen Anhaltspunkt gibt aber die Modellierung des Durchflusses nach Manning-Strickler für unterschiedlich breite Kanäle (Abbildung 36). Sie zeigt, dass neben der Anzahl und Lage der Kanäle die Breite einen wesentlichen Einfluss auf den Durchfluss hat. Dies konnte auch in den hydraulischen Modellierungen klar nachgewiesen werden (siehe Teilbericht 1 „Hydrologie“), auch wenn konkrete Daten zum Wasser- und Stoffaustausch unterschiedlich breiter Kanäle nicht vorliegen. (Fragen zu den unterschiedlichen Ansätzen der Kanalerichtung und -

---

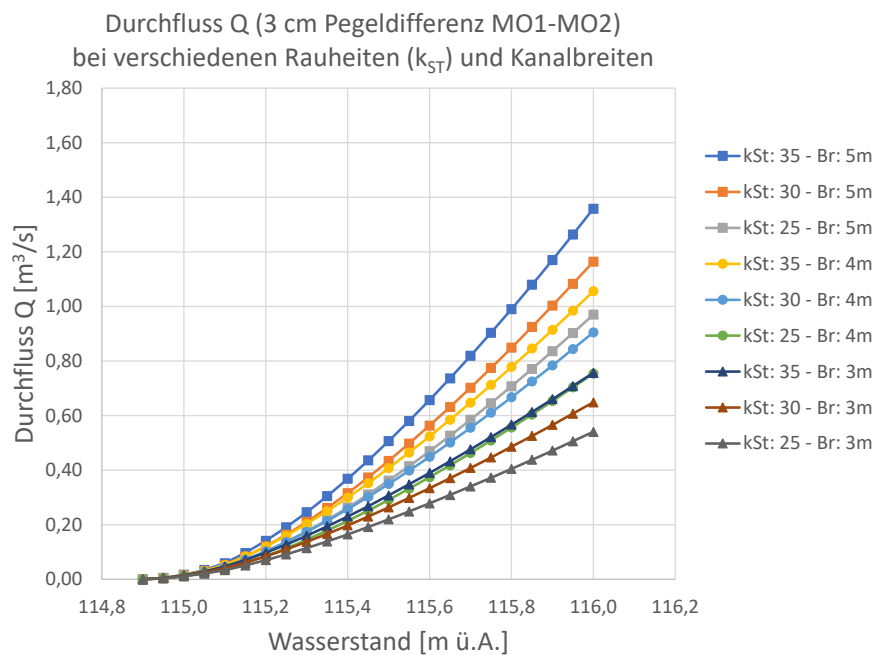
<sup>1</sup> In beiden Fällen ist freilich hinzuzufügen, dass mit „aktuell“ der Zustand zum Zeitpunkt der Freilandaufnahmen (Herbst 2017 bis Frühjahr 2019, im Bereich Illmitz bis Herbst 2019) gemeint ist. In einigen Kanälen konnte eine sehr rasche Verschilfung beobachtet werden, das betrifft selbst den vergleichsweise viel befahrenen Kanal zur Biologischen Station Illmitz. Es ist durchaus möglich, dass die im Projekt genutzten Kanäle innerhalb weniger Jahre ihre Durchgängigkeit einbüßen, womit der Status quo sich in Richtung Szenario S1 bewegen würde.

<sup>2</sup> Eine interessante Frage ist in diesem Zusammenhang, ob ein vergrößerter Retentionsraum bei starken windbedingten Verfrachtungen von Wassermassen auch aus Sicht des Hochwasserschutzes ufernaher Infrastrukturen relevant ist. Das kann derzeit nicht mit Sicherheit gesagt werden, erscheint aber eine gesonderte Untersuchung wert.



ertüchtigung in Ungarn und Österreich – vgl. Abbildung 37 – werden im Managementplan thematisiert.)

Auf Basis der erwähnten Modellierungen ist nach Experteneinschätzung eine Verdoppelung der Netto-Schwebstofffrachten in den Schilfgürtel realistisch. Des Weiteren ist auf der Austragsseite eine geringerer „Bedarf“ an Baggerungen in Segelhäfen denkbar, dafür wären häufigere Ertüchtigungen von Schilfkanälen erforderlich, um das Szenario S2 als solches aufrecht zu erhalten.



**Abbildung 36. Beziehung zwischen Wasserstand und Durchfluss durch einen Kanal bei Mörbisch unter Annahme unterschiedlicher Kanalbreite, modelliert nach Manning-Strickler (MO1 Seerand, MO2 im Schilfgürtel).**

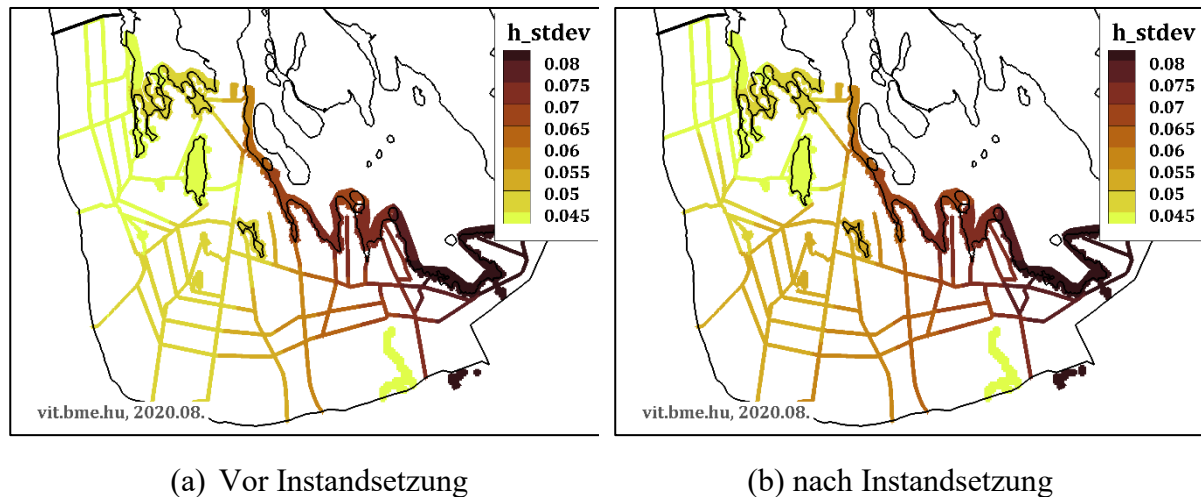


**Abbildung 37. Unterschiedlich breite Schilfkanäle. Oben und unten links: Höhe Fertőrákos 2015 (Ungarn), unten rechts: Höhe Mörbisch (Österreich). Fotos: R. Kovács (unten links), G. Kum / DWS Hydro-Ökologie (unten rechts).**

Die Rekonstruktion der Schilfkanäle im Jahr 2015 war die umfassendste Managementmaßnahme des letzten Jahrzehnts im ungarischen Teil des Neusiedler Sees und kann zu wichtigen Erkenntnissen darüber führen, was vom Szenario S2 zu erwarten ist. Laut der hydrodynamischen Studie (Bericht 1 der ungarischen Forscher) gelingt es mithilfe der Kanäle, die hydraulische Konnektivität innerhalb des ungarischen Schilfgürtels zu verbessern, was aber nicht eindeutig mit positiven Folgen einhergeht. Bei mittleren

Wasserständen wirken die Kanäle aufgrund des Seewalls asymmetrisch: Sie verstärken windinduzierte Überflutungen nicht signifikant, tragen aber dazu bei, den Schilfgürtel am Ende der Überflutung (oder zu Beginn einer Windflaute) zu entwässern, was die Wasserretention des Schilfgürtels verringert. Mit dem Braunwasser gelangt auch mehr organisches Material in den See, wodurch es zu erhöhten, sauerstoffzehrenden Zersetzungsprozessen kommt.

Um den Effekt zu veranschaulichen, der auf die Rekonstruktion der ungarischen Schilfkanäle zurückzuführen ist, wurden die Bedingungen vor der Instandsetzung simuliert, indem die aktuelle Geometrie mit den hydraulischen Bedingungen der früheren Geometrie verschnitten wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass die Rekonstruktion der Schilfkanäle die Schwankung des Wasserspiegels (gemessen durch die Standardabweichung des Wasserstandes) in den innersten Abschnitten der Kanäle bei niedrigem Seewasserstand um einige 10% verstärkte (Abbildung 38). Als Reaktion darauf hat sich jedoch die Dauer der Wasserbedeckung in den Schilfbeständen nicht wesentlich erhöht (Abbildung 38). Die Fließgeschwindigkeiten und damit der „Spüleffektivität“, wurde jedoch durch den Umbau in einigen Kanälen um das bis zu 10-fache erhöht. Das bedeutet, bei niedrigem Wasserstand eine 3-fach höhere Strömungsgeschwindigkeit und einen deutlicheren Einfluss des offenen Sees auf den Schilfgürtel.



**Abbildung 38.** Standardabweichung der windbedingten Wasserstandsschwankungen in [m] in den Kanälen (a) vor und (b) nach der Ertüchtigung, modelliert für Niedrigwasser (115,30 m ü.A.) in [m].

Aufgrund dieser Ergebnisse und des parallel laufenden Projekts „ATHU2 Vogelwarte 2“ kann man schlussfolgern, dass die Rekonstruktion keinen wesentlichen Einfluss auf das Wasserregime und den ökologischen Zustand der Schilfbestände bei niedrigem Wasserstand wie im Jahr 2019 hatte. Gemäß den untersuchten physikalischen, chemischen und

biologischen Faktoren im Projekt „ATHU2 Vogelwarte 2“ wurde festgestellt, dass der Wasseraustausch bis in eine Entfernung von durchschnittlich 1 km in den Schilfgürtel hinein nachgewiesen werden kann. Das Maximum lag bei 1,5 km während relativ niedriger Wasserstände im Untersuchungszeitraums (2017–2019). Ob das Ausbleiben einer deutlichen Verbesserung der Schilfqualität auf die eher niedrigen Wasserstände, auf einen nicht ausreichend hohen Einfluss der Kanäle oder auf sonstige Ursachen zurückzuführen ist, konnte anhand der in diesem kurzen Zeitraum erhobenen Daten nicht festgestellt werden.

Das deutlichste räumliche Muster zeigte sich anhand der Konzentrationen der gelösten organischen Substanz (CDOM) in den südwestlichen, isolierten und absterbenden Schilfgebieten (Randgebiet von Fertőboz und Sopron) sowie in den dort befindlichen rekonstruierten Kanälen. Das darauf hindeutet, dass trotz der einige Jahr zuvor erfolgten Kanalertüchtigungen kein Wasseraustausch zwischen dem offenen Wasser und diesen Blänken stattgefunden hat.

Bei der Instandsetzung der ungarischen Kanäle wurde das Baggergut entlang der Gerinne abgelagert und dieser Damm etwa alle 80 Meter auf einer Breite von 4 m durchschnitten. Um den Oberflächenabfluss zu erhöhen, wurde der Abstand zwischen den Kanälen im Vergleich zu früher um 5% reduziert. Die isolierten Schilfbereiche müssen in Abhängigkeit von den langfristigen Zielen „verbessert“ werden, was entweder einen Erhalt oder eine Förderung des Schilfs oder eine Wiederherstellung der Blänken bedeuten kann.

Eine Schlüsselfrage ist in diesem Szenario, wie lange ein Austrag von Sedimenten in den Schilfgürtel möglich ist. Es ist also keine Frage, *ob* der Schilfgürtel irgendwann verlandet, sondern lediglich eine des *Zeitraums*. Einen Hinweis darauf gibt ein Vergleich unterschiedlich alter Orthophoto-Aufnahmen aus dem Schilfgürtel. Abbildung 39 zeigt einen Ausschnitt des Schilfgürtels Höhe Mörbisch aus den 1990er Jahren (vor Ertüchtigung der Kanäle) sowie aus dem Frühjahr 2012 und 2020. Der Vergleich lässt einerseits keine signifikante Veränderung der Schilfbestände im Bereich der offenen Wasserfläche im Schilfgürtel erkennen. Sofern die Farbschattierungen der Google-Earth-Bilder zuverlässig sind, deuten andererseits jedoch die grauen Flächen in der Schilf-Wasserfläche im Jahr 2012 (im östlichen Bereich der Wasserfläche nahe den Kanälen zum offenen See) auf einen merklichen Eintrag an Schwebstoffen und Feinsedimenten in diesem Bereich hin. Deutlicher noch scheint dies beim Satellitenbild aus dem Jahr 2020 (Seetrübe im nördlichen Bereich der offenen Wasserfläche) der Fall zu sein.

Dieser Vergleich ist freilich sehr grob und kann allenfalls Indizien geben. Eine detaillierte fotogrammetrische Analyse wäre sicherlich nötig, um gesicherte quantitative Aussagen zu ermöglichen. Dennoch lässt dieser Einblick erkennen, dass die Verlandung auch binnen ein bis zwei Jahrzehnte spürbar voranschreitet. Mit abnehmendem Retentionsraum im inneren Schilfgürtel ist allerdings auch eine Abnahme der einströmenden Wasser- und



Schwebstofffrachten zu erwarten. Der Prozess würde sich also in Hinblick auf den Eintrag von Feststoffen aus dem offenen See verlangsamen – womit die Sedimentation wieder verstärkt in Randbereichen des offenen Sees erfolgen würde.



**Abbildung 39. Vergleich des Schilfgürtels Höhe Mörbisch in den 1990er Jahren (links oben), im Frühjahr 2012 (rechts oben) und 2020 (links unten). Quelle: 1990er Jahre Biologische Station Illmitz, 2012 & 2020: Google Earth.**

Zur Klarstellung sei an dieser Stelle betont, dass hier ausschließlich von Sedimentation und Verlandung durch (überwiegend anorganische) Schweb-/Feststoffe gesprochen wird. Auswirkungen auf das Schilfwachstum, d.h. die Menge der produzierten und zur Sedimentation beitragenden organischen Substanz, sind hier ausgeklammert. Das gilt insbesondere für Auswirkungen des Schweb- und Nährstoffeintrags sowie damit verbundener Prozesse (z.B. Redox) auf die Physiologie der Schilfpflanze, d.h. in weiterer Folge, wann und wo es zu einer Wachstumssteigerung oder zu einem Absterben von Röhrichtbeständen kommt. Wenn in diesem Bericht von Verlandung die Rede ist, so bezieht sich dieser Begriff also lediglich auf Aufhöhungen des Sediments (sei es im offenen See oder im Schilfgürtel, ggf.

auch als Dämme entlang von Kanälen). Das Schilfwachstum und die Produktion von lebender bzw. toter organischer Substanz (Halme, Blätter, Rhizom) – kurz: eine Verlandung im Sinne einer „Verschilfung“ des Sees – werden hier nicht thematisiert. In diesem Sinne gehen auch Fragen zu Auswirkungen der Schilfernte über die Fragestellung des Projekts REBEN hinaus (vgl. dazu Kap 2.5).

Dass diese jedoch über Veränderungen des potenziellen Retentionsraums und die Schaffung neuer Wegigkeiten durch das Schilf maßgeblichen Einfluss auf den Stoffaustausch haben können, steht außer Zweifel. Auch zu diesem Punkt sollen mögliche Veränderungen lediglich anhand von Satellitenfotos (Google Earth) angedeutet werden. Nahe dem Sedimentbecken, das als Zwischenlagerfläche bei Baggerungen des Segelhafens von Mörbisch errichtet wurde, bestand vor rd. 20 Jahren noch ein Areal mit sehr dichtem Schilfbestand. Nach einer Ernte in diesem Bereich (vor 2012; erkennbar an sehr regelmäßigen Schnittstrukturen) konnte sich das Schilf hier offensichtlich nicht mehr erholen. Das Areal präsentiert sich heute als schütter bestandene Wasserfläche und damit als potenzielle Sedimentationsfläche, die sie vor der Mahd offensichtlich nicht war. Nach dem Satellitenbild zu urteilen, dürfte das Areal bei sinkendem Wasserstand früher trockenfallen als vor der Mahd.

Für Phosphor ist zunächst, analog dem zuvor besprochenen Szenario, eine gegenläufige Entwicklung zu erwarten, d.h. ein vermehrter Eintrag von partikulär gebundenem Phosphor in den Schilfgürtel. Mit der Ertüchtigung von Kanälen und der Deposition von Sediment entlang der Kanäle (gemäß derzeitiger Praxis) ist eine dauerhafte Entnahme von Nährstoffen aus dem System gegeben. Von den in offenen Wasserflächen im Schilfgürtel abgelagerten Sedimenten ist aber eine Freisetzung von Phosphor in gelöster Form sehr wohl denkbar (siehe Teilberichte 3 und 5) und auch zu erwarten. Letztlich dürfte aber der „Export“ aus dem offenen See in den Schilfgürtel und dort ins Sediment deutlich überwiegen, wie das auch derzeit der Fall ist (vgl. Tabelle 6).

Auch für dieses Szenario gilt, dass bei Vernachlässigung von Auswirkungen auf die Wasserbilanz eine Aufkonzentrierung von Schadstoffen keine erwartbaren Auswirkungen haben würde. Sehr wohl würde im Gegensatz zu Szenario S1 der Austrag von partikulär gebundenen Schadstoffen aus dem See in den Schilfgürtel gefördert werden und daher insgesamt eine tendenzielle Verringerung des Risikos einer Zielverfehlung der UQN bei kritischen Schadstoffen zu erwarten sein. Daneben wäre jedoch wie schon bei Szenario W2 das Risiko einer Schadstoffremobilisierung im Zuge größerer Baggerungen zur Kanalertüchtigung zu berücksichtigen. Aufgraben und Umlagern größerer Sedimentmengen hat das Potential die Mobilisierung von Schadstoffen aus dem Sediment zu fördern und so zu einer Erhöhung des Sees mit gelösten Schadstoffen zu verursachen, welche zuvor in den Schilfsedimenten fixiert waren. Über das quantitative Ausmaß so einer Rückbelastung



kann zwar zurzeit keine Aussage gemacht werden, jedoch wären im Fall umfassender Baggerungen entsprechende Überwachungsmaßnahmen vorzusehen.



vor 2001



28.04.2012



02.04.2017



26.04.2020

**Abbildung 40. Veränderungen der Struktur des Schilfgürtels in einem kleinräumigen Areal bei Mörbisch als Folge der Schilfmahd (Quelle: Google Earth).**

Zuletzt ist das erweiterte Netz an Schilfkanälen hinsichtlich der aquatischen Lebensgemeinschaften zu betrachten. Diese würden bei einer verstärkten Vernetzung von offenem See und Schilfgürtel zweifelsohne profitieren, da damit Teillebensräume des Sees zugänglich gemacht und das Angebot ökologischer Nischen erweitert wird. Geht man davon aus, dass das erweiterte Kanalnetz nur den See außerhalb des Nationalparkgebietes betrifft, so blieben im S2 Szenario auch Areale im Schilfgürtel erhalten, die nicht an den See angebunden sind. Arten, welche die abgetrennten Bereiche im inneren Schilfgürtel bevorzugen (oder unter den herrschenden extremen Bedingungen konkurrenzstärker sind als die „See-Arten“), blieben damit im Neusiedler See erhalten.

Abschließend werden die Überlegungen wiederum in Hinblick auf Auswirkungen auf die Gesamtbilanz für Feststoffe und Phosphor in Abbildung 41 dargestellt.

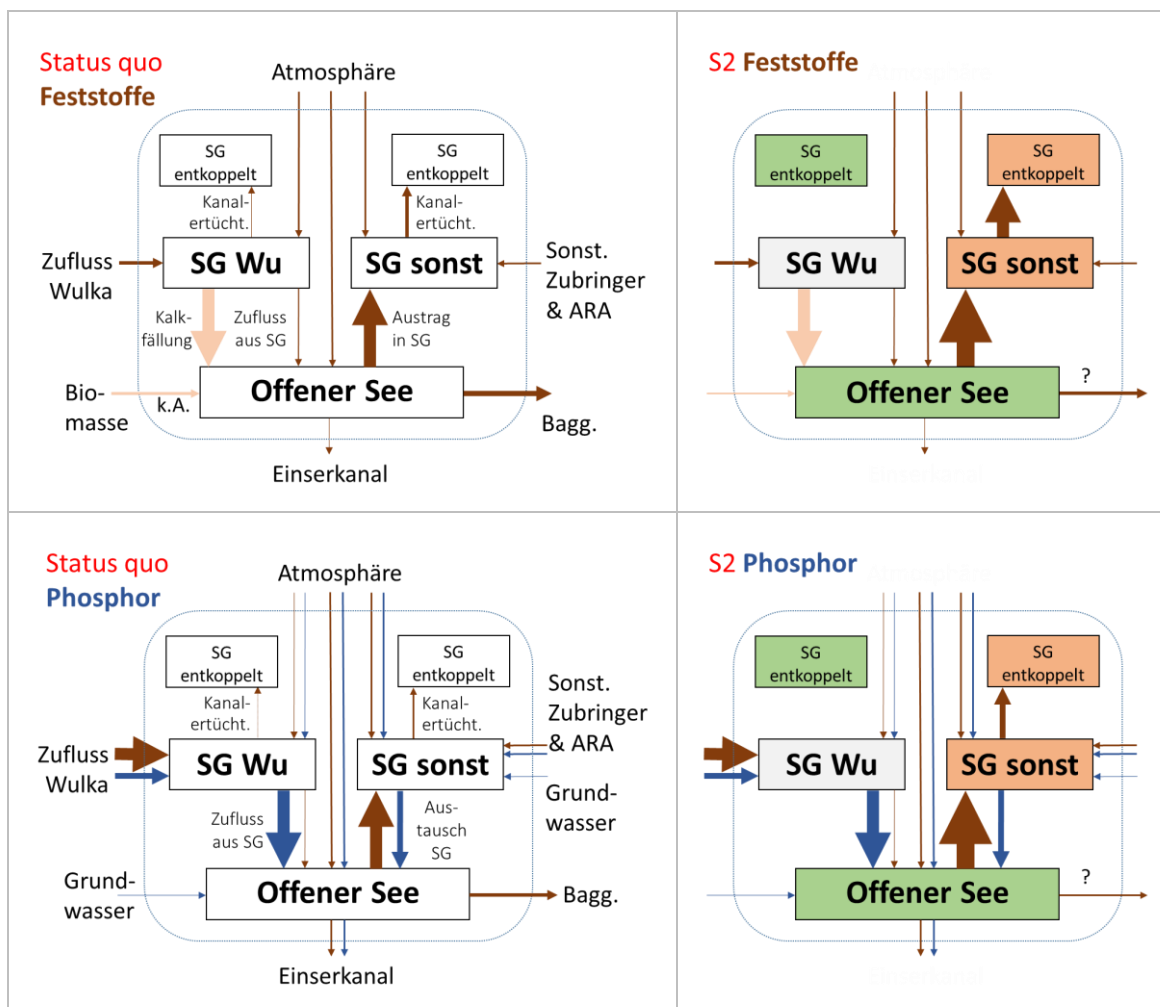


Abbildung 41. Veränderungen der Stoffflüsse für Feststoffe (oben) und Phosphor (unten) im Szenario S2.

## 4.8 Resümee

Die sechs ausgeführten Szenarien stellen theoretische Modelle dar, die dazu dienen sollen, Trends und mögliche Auswirkungen auf die Gesamtbilanzen von Fest-, Nähr- und Schadstoffen aufzuzeigen. Folgende Schlüsse können gezogen werden:

- i) Eine positive **Gesamtbilanz**, d.h. eine Zunahme von im offenen See verbleibenden Feststoffen, Phosphor und Schadstoffen, ist bei einem Rückgang von Ableitungen aus dem See (Szenario P1 niedriger Wasserstand) und einem Rückgang von Baggerungen von Kanälen (S1) (Entkopplung vom System durch Deposition auf Dämmen entlang der Kanäle, zumeist >116 m ü.A.) zu erwarten. Umgekehrt führen vermehrte Ableitungen und Baggerungen zu einer Abnahme der im offenen See verbleibenden Stoffe. Diese Erkenntnis ist wenig überraschend, anhand der Quantifizierung in diesem Bericht konnte jedoch gezeigt werden, dass diese Veränderungen für die Gesamtbilanz signifikant sind.
- ii) Für den Bereich der **Wulka**-Mündung brächte die häufige Ausbaggerung des Gerinnes im Szenario W2 eine beständige Entnahme von Stoffen mit sich. Allerdings würde sich der Fest- und Schadstoffrückhalt in diesem Bereich deutlich reduzieren und die Belastung des Sees erhöhen. Bleibt der ständige Rückhalt von Stoffen im Wulka-Schilfgürtel durch Erhalt einer zumindest teilweisen diffusen Durchströmung bestehen, bleibt die Frage der Deposition, die im Falle einer Ablagerung im Schilfgürtel früher oder später vermutlich an ihre Grenzen stößt, offen. Das heißt, es wäre dann ein Abtransport aus dem Schilfgürtel notwendig, der aber vermutlich aus finanziellen und technischen Gründen keine wirkliche Option darstellt. Dies führt zur Frage des Rückhalts der Schwebstofffracht vor Eintritt in den Schilfgürtel – ein Aspekt, auf den hier nicht näher eingegangen wird. Es wird auf die Ausführungen im Managementplan verwiesen.
- iii) Im **offenen See** bewirken weniger (oder keine) Ableitungen bei niedrigem Wasserstand (Szenario P1), eine überwiegend lineare Durchströmung des Schilfgürtels durch die Wulka (W2) und die Verlandung der Schilfkanäle (S1) eine Zunahme der dort anfallenden Sedimentfracht. Die Folge wären eine erhöhte Sedimentation in strömungsberuhigten Buchten – möglicherweise gefolgt von intensiveren Aktivitäten zur Freihaltung von Segelhäfen oder Badebereichen. Eine umgekehrte Entwicklung lassen ein hoher Wasserstand und ein gut dimensioniertes Netz von Schilfkanälen erwarten.
- iv) Geringere Ableitungen bei niedrigem Wasserstand (P1) führen zudem zu einer verstärkten **aufkonzentrierenden Wirkung** des Sees. Damit ist insgesamt (gemeinsam mit den unter iii beschriebenen Vorgängen) eine Erhöhung der Konzentrationen von Schadstoffen aber auch von Phosphor im offenen See zu erwarten.

- v) Als Spiegel der Entwicklung im offenen See können die Szenarien zum **Schilfgürtel** angesehen werden. So verlagert sich die Sedimentation mit hohen Wasserständen und ausreichendem Wasseraustausch über Kanäle ganz deutlich in den Schilfgürtel. Damit nimmt auch die Bedeutung des Schilfgürtels als Retentionsraum oder mögliche Belastungsquelle des Sees mit Phosphor und Schadstoffen zu.
- vi) In allen Szenarien spielt der **Wasseraustausch** zwischen See und Schilfgürtel eine zentrale Rolle. Salopp formuliert, schieben sich diese beiden Kompartimente des Sees je nach Rahmenbedingungen die Sediment- und Nährstofffrachten gewissermaßen gegenseitig zu. Eine echte Veränderung in der Gesamtbilanz ist nur im Falle von Ableitungen über den Einser-Kanal und durch die Baggerungen der Segelhäfen gegeben. Die Deposition im Schilfgürtel (Ertüchtigungen von Schilfkanälen) entzieht dem an den Austauschprozessen beteiligten System zwar Feststoffe, Phosphor und Schadstoffe, diese verbleiben letztlich aber innerhalb der Grenzen des Neusiedler-See-Beckens.

Wie oben ausgeführt, handelt es bei den sechs Szenarien im Grunde um drei gegensätzliche Paare. Diese drei Szenarienpaare sollten auch kombiniert gedacht werden, wodurch es zu einer Verstärkung oder Abschwächung von Trends kommen kann. So entspräche beispielsweise „P1W2S1“ einem Szenario mit weitgehend linearer Durchströmung des Wulka-Schilfgürtels und einem zum Erliegen kommenden Wasser- und Stoffaustausch zwischen See und Schilfgürtel. Die Verlandungstendenz im offenen See würde sich damit merklich verstärken. Es ist aber auch denkbar, dass mit dem Szenario S1 (reduzierter Austausch See – Schilfgürtel, geringere horizontale Verfrachtung von Wasser, keine häufige Ausbildung großer, seichter und potenziell leicht erwärmbarer Wasserflächen) die Verdunstung abgeschwächt und damit das Szenario P2 (hoher Wasserstand) gefördert wird.

Wenn in diesen Betrachtungen vorwiegend auf die Feststoffe eingegangen wird, so liegt dies nicht zuletzt daran, dass hier der mechanistische Denkansatz zur Verteilung und Deposition der Schwebstoffe relativ gut abgesichert erscheint, sowohl durch Messdaten als auch durch die Modellierungen. Bei den Nähr- und Schadstoffen sind die Verhältnisse aufgrund der Umsetzungsprozesse im Sediment komplizierter. Dennoch kann festgehalten werden, dass auch für diese Stoffe die zeitweise vorherrschende partikuläre Bindung in Hinblick auf Ein- und Austräge bzw. seeinterne Verfrachtungen von entscheidender Bedeutung ist. Auf Grundlage der Erkenntnisse aus dem Projekt REBEN erscheint es umso vordringlicher, bei allen künftigen wasserwirtschaftlichen Überlegungen zu Verlandung oder Wasserqualität neben den Einträgen aus dem Einzugsgebiet auch die seeinternen Prozesse mit zu berücksichtigen.

Die sechs beschriebenen Szenarien stellen Modelle dar, um die Auswirkungen unterschiedlicher Rahmenbedingungen auf die Stoffaustauschprozesse im Neusiedler See zu beleuchten. Sie wurden nicht dahingehend definiert, in welche Richtung sich der Neusiedler



See in den kommenden Jahren aller Wahrscheinlichkeit entwickeln wird. Genau diese Frage ist aber natürlich in Hinblick auf den Managementplan von großem Interesse, wobei zunächst zu klären ist, wie sich der See in den nächsten 20 Jahren ohne menschliche Eingriffe entwickeln würde.

Dies führt unweigerlich in ein thematisches Feld, das im österreichischen Teilbericht 1 „Hydrologie“ sowie weiter oben in Kap. 3.7 angesprochen wurde: die Auswirkungen der **globalen Erwärmung** auf den Neusiedler See. Die Unsicherheiten zu diesem Thema sind jedoch groß. Im Falle einer Zunahme der Trockenphasen steigt jedenfalls ohne menschliche Eingriffe die Wahrscheinlichkeit des Szenarios P1 (häufigere Wasserstände <115,2 m ü.A.). Zudem wird der See ohne regelmäßige Ertüchtigung der Schilfkanäle in Richtung der Szenarien W1 (überwiegend diffuse Durchströmung des Schilfgürtels durch die Wulka) und S1 (Abkopplung des Schilfgürtels vom offenen See) entwickeln. Die Szenarien W2 (lineare Durchströmung) und S2 (erweitertes Kanalnetz im Schilfgürtel) sind ohne laufende Eingriffe in den Schilfgürtel nicht realisierbar. Ein höherer Wasserstand (Szenario P2) ist sowohl natürlicherweise (gesteigerte Niederschläge bzw. geringere Verdunstung) oder durch Änderungen in der bestehenden Wasserstandsregulierung bzw. eine externe Wasserzufuhr möglich.

## 5 BEWERTUNG

Das vorliegende Kapitel fasst die Ergebnisse der Szenarienbeschreibung zusammen und stellt sie den wichtigsten der in Kap. 1.3 definierten wasserwirtschaftlichen Zielen gemäß Strategiestudie Neusiedler See (Wolfram et al. 2014) gegenüber.

In Kap. 3.7 wurde hervorgehoben, dass eine klare Abgrenzung von Begriffen wichtig ist, um eine Bewertung von Szenarien vornehmen zu können. Nachdem der Begriff „Verhältnis Freiwasser versus Schilf“ in den Zielen der Strategiestudie Neusiedler See zweimal vorkommt, ist daher folgende Einschränkung und Präzisierung notwendig: Das Projekt REBEN beschäftigte sich vorrangig mit der Feststoffdynamik und mit dem Chemismus des Sees (Nährstoffe, Schadstoffe). Aspekte zum Schilfwachstum und zum Problem der Verschilfung des Sees wurden im Projekt nur am Rande gestreift und müssen daher auch in der Bewertung weitgehend offenbleiben.

Zur klareren Abgrenzung wird das erste Ziel im Fachbereich Hydro-Morphologie gemäß Strategiestudie Neusiedler See („Erhalt der hydro-morphologischen Besonderheiten des Seebeckens im offenen See und in den Schilfbereichen (Landschaftselement)“ auch auf die Verlandung durch Sedimentation beschränkt (vgl. weiter oben Abbildung 23 rechts). Ebenso wird das Ziel „Verhinderung einer unkontrollierten Verlandung des Schilfgürtels (Verhältnis Freiwasser versus Schilf)“ ausschließlich aus Sicht der Feststoffdynamik betrachtet.

Auch im Fachbereich Schilf wurde in der Strategiestudie Neusiedler See als Ziel formuliert, das Verhältnis „Freiwasser : Schilf“ zu erhalten und damit einer fortschreitenden Verschilfung der Freiwasserfläche entgegenzuwirken. Dies wird hier so präzisiert, dass der Anteil der Wasserflächen innerhalb des Schilfgürtels (sowie die Seefläche als solche) erhalten bleiben soll (vgl. Abbildung 23 Mitte).

Im Folgenden werden die sechs Szenarien nach den Zielen gemäß Strategiestudie Neusiedler See bewertet. Es wird im Text für alle Ziele gemäß Strategiestudie in einem ersten Schritt der **aktuelle Zustand** bewertet. In der **Bewertung der Szenarien** wird in einem zweiten Schritt betrachtet, inwieweit geänderte Rahmenbedingungen zu einer Annäherung an die Ziele beitragen oder aber das Risiko einer künftigen Zielverfehlung erhöhen. Die Ziele werden zunächst separat bewertet, anschließend in Tabelle 6 zusammengefasst.

In einem dritten Schritt ist schließlich zu erörtern, ob eine raschere **Annäherung an die Ziele durch Maßnahmen** möglich ist, sei es durch Kombination bereits diskutierter Maßnahmen betreffend Schilfkanäle und Wasserstand, sei es durch darüber hinausgehende Maßnahmen im Einzugsgebiet oder im See selbst. Diese Punkte werden in einem **separaten Dokument** diskutiert und in Form eines **Managementplans** vorgeschlagen.



Das erste wasserwirtschaftliche Ziel, nämlich der Erhalt der **hydromorphologischen Besonderheiten** des Seebeckens im offenen See und in den Schilfbereichen (Landschaftselement), beschreibt einerseits den Zustand an sich, der augenscheinlich dem Status quo entspricht. Andererseits steckt darin auch das Bestreben, diesen Zustand langfristig zu erhalten, d.h. eine **Verlandung des Seebeckens** (See und Schilfgürtel) zu **verhindern**. Die Verlandung ist jedoch ein natürlicher Prozess, dem keines der sechs Szenarien entgegenwirkt, da alle nur auf die Verhältnisse *innerhalb* des Seebeckens abzielen. In diesem Sinne kann man das Ziel derzeit als nicht erreicht betrachten, und auch die sechs Szenarien mit geänderten Rahmenbedingungen stellen keine Annäherung an das Ziel dar. Für eine nachhaltige Reduktion der Anreicherung von Feststoffen im Seebecken ist eine Reduktion des Eintrages der Schwebstofffracht aus der Wulka durch Maßnahmen im Einzugsgebiet und Entnahmen aus dem See und Schilfbereich erforderlich (*harte Aussage*), auf die im Managementplan eingegangen wird.

Auch das Ziel, innerhalb des Seebeckens die **Verlandung des Schilfgürtels** zu **verhindern**, ist derzeit nicht erreicht, da beständig Sedimente aus dem offenen See in den Schilfgürtel transportiert werden. Die **Verhinderung der Verlandung des offenen Sees** wird mit keinem der wasserwirtschaftlichen Ziele in der Strategiestudie Neusiedler See explizit angesprochen, doch erscheint es zielführend, diesen Punkt in die Liste der Ziele aufzunehmen – wobei selbst nach GeNeSee nicht gesichert ist, ob dieses Ziel unter den gegebenen Rahmenbedingungen erreicht ist.

Beide Ziele können als Sub-Ziele zum übergeordneten Ziel, die Verlandung des Seebeckens zu verhindern, angesehen werden. Unter den besprochenen Szenarien kann die Verlandung des Schilfgürtels – im Sinne eines eingeschränkten oder unterbundenen Feststoffeintrags aus dem offenen See – mit P1 (niedriger Wasserstand) und S1 (keine Kanäle) eher hintangehalten werden als bei hohem Wasserstand (P2) und enger Vernetzung von offenem See und Schilfgürtel (S2). In den Szenarien P1 und S1 ist zumindest keine Zunahme der Sedimentmächtigkeit im Schilfgürtel durch Export aus dem offenen See gegeben. Im Gegenzug wird aber die Sedimentation im offenen See zunehmen. Die Auswirkungen der Szenarien W1 und W2 sind für den Schilfgürtel insgesamt vermutlich nur am Rande relevant, da mit dem Mündungsbereich nur eine vergleichsweise kleine Fläche betroffen ist. Die Auswirkungen auf den offenen See sind hingegen weitreichender (*harte Aussage*).

Im Status quo ist ein effektiver **Austausch zwischen offenem See und Schilfgürtel** nur eingeschränkt gegeben, wäre aber im Szenario mit hohem Wasserstand (P2) deutlich stärker ausgeprägt als bei niedrigem Wasserstand (P1). Da die diffuse Durchströmung eine untergeordnete Rolle spielt, braucht es aber auch ausreichend Schilfkanäle, um den lateralen Wasseraustausch zu ermöglichen (S2) (*harte Aussage*). Das kürzlich ausgebaggte Kanalnetz im ungarischen Teil, das an beiden Enden mit dem offenen See verbunden ist, kann unabhängig vom Wasserstand eine mittlere Strömung im Schilfgürtel

gewährleisten, die das Schilf mit frischem Wasser versorgt und gleichzeitig organisches Material in den See spült.



Abbildung 42. Infiltration von Braunwasser in den offenen See am 15.06.2019 (Szenario S2).

Eine Bewertung der **Ziele im Fachbereich „Schilf“** ist schwierig, nicht nur, weil dieser Bereich nur am Rande im Arbeitsprogramm des Projekts REBEN enthalten war, sondern auch weil die Ziele in der Strategiestudie Neusiedler See recht allgemein gehalten sind. Zweifelsohne stellt der Schilfgürtel heute ein **einzigartiges** Landschaftselement mit einer hohen **Vielfalt** an Schilf- und Braunwasserflächen dar, der als solcher ein **integrativer Bestandteil** des Ökosystems Neusiedler See ist. In diesem Sinne können die wasserwirtschaftlichen Ziele zum Fachbereich Schilf als erreicht angesehen werden. Sie formulieren jedoch gleichzeitig den Auftrag, diesen einzigartigen Lebensraum auch künftig zu erhalten.

In Hinblick auf die Szenarien kann davon ausgegangen werden, dass ein lang andauerndes Trockenfallen des Schilfgürtels (P1) dem Ziel, dessen Einzigartigkeit zu erhalten, nicht zuträglich ist. Das gilt auch für die derzeitige Praxis der Kanalbaggerungen, die die Vernetzung innerhalb des Schilfgürtels durch die Aufhäufung von seitlichen Dämmen entgegensteht (S2, W2). Unklar ist die längerfristige (vegetationsökologische) Entwicklung eines lange trocken liegenden Schilfgürtels. Ein Schilfgürtel, der lange Zeit überwiegend trocken liegt, dürfte aber kaum mit dem diversen Lebensraum vergleichbar sein, den dieser Teil des Neusiedler Sees heute darstellt – ungeachtet der Tatsache, dass auch ein überwiegend trockener Schilfgürtel im weitesten Sinne noch lange einen „integrativen Bestandteil im Ökosystem Neusiedler See“ bilden würde (*weiche Aussage*).

Weitere Ziele sprechen die **natürliche Entwicklung** des Neusiedler Sees an. Streng genommen entspricht der See heute keineswegs einem natürlichen, sondern einem anthropogen stark veränderten System: in hydrologischer (Einser-Kanal), stofflicher (Eutrophierungsphase der 1970er und 1980er Jahre) und struktureller Hinsicht (Ausdehnung des Schilfgürtels im 20. Jhdt., Errichtung und Ertüchtigung von Schilfkanälen, Baggerungen im Seerandbereich). In Teilen kann sich der See heute ungestört entwickeln, aber nur innerhalb der Grenzen, die ihm seit über 100 Jahren durch menschliche Eingriffe gesetzt wurden, und unter der Last von Eingriffen vergangener Jahrzehnte. Die Ziele zur natürlichen Entwicklung können so verstanden werden, dass die derzeit laufenden Prozesse erhalten oder sogar (räumlich oder zeitlich) ausgedehnt werden sollen. Das geschieht derzeit bereits in der Naturzone des Nationalparks Neusiedler See – Seewinkel. Es kann aber auch notwendig sein, negative Entwicklungen hintanzuhalten, die aus der langen Historie der menschlichen Eingriffe in das Ökosystem resultieren. Dazu kann ein nachhaltiges Management beitragen; ein Sich-selbst-Überlassen des Sees wäre hingegen kontraproduktiv.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Ziele zur **natürlichen Entwicklung** (Chemismus, Dynamik, Variabilität, Prozesse) heute teilweise erreicht sind, teilweise aber Eingriffe anhalten, die dem entgegenwirken. Ein Szenario ohne Notwendigkeit von Ableitungen über den Einser-Kanal (P<sub>1</sub>) überstützt die Ziele zur natürlichen Entwicklung. Das Risiko einer Aussüßung führt im Szenario P<sub>2</sub> mit dauerhaft hohen Wasserständen – bei bestehender Wehrbetriebsordnung – zu negativen ökologischen Entwicklungen. Aus diesem Grund kann vor allem im Szenario P<sub>2</sub>, das heißt letztlich bei Umwandlung des derzeit endorheischen Sees in ein durchströmtes Gewässer, kaum von einem **ungestörten Ablauf biologischer Prozesse** gesprochen werden (*harte Aussage*).

Schwieriger ist die Bewertung der Szenarien mit unterschiedlicher Vernetzung von offenem See und Schilfgürtel. Auch wenn eine völlige Abkopplung des Schilfgürtels vom offenen See bei Unterbleiben von Kanalbaggerungen (Szenario S<sub>2</sub>) als natürliche Entwicklung angesehen werden kann, so werden doch gewisse biologische Prozesse gestört oder zumindest eingeschränkt. In einem nicht mehr völlig naturnahen System wie dem Neusiedler See erscheint es daher gerechtfertigt, diese Prozesse durch moderate Maßnahmen wie den Erhalt eines gewissen Austausches, aber auch von Wanderwegen zwischen See und Schilfgürtel zu unterstützen. Auch mit solchen Maßnahmen können die derzeitigen Prozesse in vielen Bereichen natürlich und ungestört weiterlaufen (natürlich in Abhängigkeit vom Ausmaß und der Art der Eingriffe). Zum Ziel „Erhalt natürliche Variabilität“ fällt die Bewertung der Szenarien S<sub>1</sub> und S<sub>2</sub> daher ambivalent aus. Die entsprechenden Maßnahmen werden daher im Managementplan zu präzisieren sein.

Das Erreichen bzw. der **Erhalt des guten chemischen Zustandes** (inkl. der **chemischen Parameter**, die in die Bewertung des **ökologischen Zustands** einfließen) ist derzeit nicht

gesichert (*harte Aussage*). Für eine nachhaltige Reduktion der Schadstoffeinträge sind Maßnahmen im Seeinzugsgebiet ins Auge zu fassen (Managementplan). Eine Verstärkung des Effektes der Aufkonzentrierung durch den See (P1), aber auch der Wegfall des Austausches (P1, S1) zwischen offenem See und Schilfgürtel bedeutet für die kritischen Parameter eine Verschlechterung bzw. eine Erhöhung des Risikos einer Zielverfehlung des guten Zustandes (*mittelharte Aussage*). Bei hohem Wasserstand und laufender Ertüchtigung der Kanäle ist andererseits eine spiegelbildliche Bewertung gegeben: Wasserinhaltsstoffe werden verdünnt bzw. es überwiegt der Austrag aus dem offenen See in den Schilfgürtel und die dortige Speicherung über eine Rückbelastung aus dem Schilfgürtel. Das Risiko einer Zielverfehlung wird geringer (*mittelharte Aussage*). Mögliche Rückbelastungen aus dem Schilfgürtel im Zuge von Kanalertüchtigungen sollten aber jedenfalls im Auge behalten werden, um eine kritische Mobilisierung von Stoffen zu vermeiden (*harte Aussage*). Ein niedriges **Trophienniveau** und die Einhaltung der UQN für Nährstoffe wird bei hohem Wasserstand und laufender Ertüchtigung der Kanäle ebenfalls erleichtert (*harte Aussage*).

Zum **Eintrag geringer Nährstofffrachten**: Sieht man den See als Gesamtheit von Schilfgürtel und offenem See, so verringert Szenario W2 mit weitgehend linearer Durchströmung des Schilfgürtels durch die Wulka die **externen** Frachten insofern, als dieses Szenario nur mit laufenden Baggerungen möglich ist. Diese sind gleichbedeutend mit einer Entnahme von Fest- und Nährstoffen, bevor diese den offenen See erreichen können. In diesem Sinne wird im Szenario W2 gewissermaßen der Nährstoffeintrag in den See – oder korrekt: die Bilanz infolge der Entnahme – verringert (*weiche Aussage*). Die Szenarien P1/P2 und S1/S2 haben keinen Einfluss auf die externen Frachten.

Die **internen** Nährstofffrachten werden im Szenario W2 bei rein linearer Durchströmung des Schilfgürtels erhöht, da die Deposition im Schilfgürtel Höhe Wulka-Mündung entfällt. Interpretiert man das Ziel, die internen Frachten zu verringern, nicht nur als reduzierte Rücklösung aus dem Sediment, sondern auch als verstärkte und dauerhafte Deposition im Sediment, v.a. durch Export in den Schilfgürtel, so fördern die Szenarien v.a. P2, aber auch W1 und S2 dieses Ziel, die Gegenszenarien stehen ihm entgegen. Offen ist die Frage nach möglichen Auswirkungen seeinterner Maßnahmen (z.B. Baggerungen) auf Nähr- und Schadstoffrücklösungen unmittelbar als Folge des Eingriffs in das Sediment.

Die anschließende Tabelle 6 fasst die Bewertungen zusammen. Es sei nochmals betont, dass diese Bewertung die unterschiedlichen Rahmenbedingungen berücksichtigt, die mit den sechs Szenarien definiert wurden. Eine Optimierung der Zielerreichung, mit der auch ein Ausgleich von widersprüchlichen und gegenläufigen Entwicklungen ermöglicht werden soll, wird anhand von Maßnahmen im wasserwirtschaftlichen Management angestrebt.

**Tabelle 6. Bewertung der ausgewählten Szenarien hinsichtlich der wasserwirtschaftlichen Ziele gemäß Strategiestudie im Vergleich zum Status Quo. Präzisierungen und Ergänzungen der in der Strategiestudie definierten Ziele sind kursiv geschrieben. Das Ausmaß der Annäherung an das oder Entfernung vom Ziel wird durch – – bis + + angezeigt.**

| Bereich                      | Ziel                                                                                                                 | P1 | P2 | W1 | W2 | S1 | S2 |
|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|
| <b>Hydro-Morphologie</b>     | Erhalt der hydrom. Besonderheiten ( <i>keine Verlandung des gesamten Seebeckens, d.h. von See und Schilfgürtel</i> ) | –  | –  | –  | –  | –  | –  |
|                              | keine Verlandung des Schilfgürtels ( <i>minimierter Sedimenteintrag in den Schilfgürtel</i> )                        | ++ | -- | –  | +  | ++ | -- |
|                              | <i>keine Verlandung des offenen Sees</i>                                                                             | -- | ++ | =  | -- | -- | ++ |
|                              | Erhalt Austausch See – Schilfgürtel                                                                                  | -- | ++ | na | na | -- | ++ |
| <b>Schilf</b>                | Schutz der Einzigartigkeit des Schilfgürtels, nachhaltiges Management (Landschaftselement)                           | –? | +  | +  | –  | +  | –  |
|                              | Bewahrung der Diversität, Begrenzung der Verschilfung (Freiwasser vs Schilf)                                         | –? | +  | na | na | –  | +  |
|                              | Erhalt des Schilfgürtels als integrativer Bestandteil des Ökosystems Neusiedler See                                  | =  | =  | na | na | =  | =  |
| <b>Phys.-Chem. Parameter</b> | Erhalt natürlicher Chemismus                                                                                         | ++ | -- | =  | =  | =  | =  |
|                              | Erhalt natürliche phys.-chem. Dynamik                                                                                | +  | –  | +  | –  | +  | –  |
|                              | Niedriges Trophieniveau                                                                                              | -- | ++ | +  | –  | -- | ++ |
|                              | Geringe externe Nährstofffrachten                                                                                    | na | na | –  | +  | na | na |
|                              | Geringe interne Nährstofffrachten (Rücklösung Sediment)                                                              | -- | ++ | +  | –  | –  | +  |
| <b>Schadstoffe</b>           | Erhalt des guten chemischen Zustands                                                                                 | -- | ++ | =  | –  | -- | ++ |
|                              | Erhalt des guten ökologischen Zustands (Chemie) <sup>3</sup>                                                         | -- | ++ | =  | –  | -- | ++ |
| <b>Biologie</b>              | Erhalt des guten ökologischen Zustands (Biologie) <sup>4</sup>                                                       | +  | –  | –  | +  | –  | +  |
|                              | Erhalt natürliche Variabilität (Biodiversität, Abundanz und Produktivität)                                           | +  | –  | +  | –  | ±  | ±  |
|                              | Ungestörter Ablauf biolog. Prozesse                                                                                  | +  | -- | +  | –  | ±  | ±  |

<sup>3</sup> Im Sinne der Qualitätszielverordnung Chemie Oberflächengewässer (BGBl. II Nr. 96/2006 idgF)

<sup>4</sup> Im Sinne der Qualitätszielverordnung Ökologie Oberflächengewässer (BGBl. II Nr. 99/2010 idgF)

## 6 WISSENSDEFIZITE UND OFFENE FRAGEN

Im Jahr 2014 fassten Wolfram *et al.* (2014) in der Strategiestudie Neusiedler See den aktuellen Wissensstand zu verschiedenen Fachgebieten zusammen und formulierten, davon ausgehend, eine Reihe von Wissensdefiziten. Deren Beseitigung wurde in die Liste der strategischen Ziele für die Region Neusiedler See aufgenommen.

Eines dieser Wissensdefizite betraf den Wasser- und Stoffaustausch zwischen offenem See und Schilfgürtel – ein Themenkomplex, der im Mittelpunkt des Projekts REBEN stand. Auf Basis unterschiedlicher methodischer Ansätze konnten im Projekt REBEN wesentliche Fragen geklärt werden. Die Ergebnisse der Freilandaufnahmen, Laborversuche, Datenauswertungen und Modellierungen bilden die Grundlage für den wasserwirtschaftlichen Managementplan, der als eigenes Dokument in Abstimmung zwischen den österreichischen und ungarischen Expertinnen und Experten erstellt wurde.

Wie bei jeder wissenschaftlichen Untersuchung tauchten auch im Projekt REBEN im Zuge der Bearbeitung neue Fragen auf, und so schließt auch die vorliegende Synthese mit einem Kapitel zu den Wissensdefiziten, die sich aus den Datenanalysen sowie in zahlreichen Diskussionen unter den Fachleuten beider Länder neu ergeben haben.

### (1) Geländemodell

Einer der wichtigsten Punkte stellt überraschenderweise ein Bereich dar, der mit dem Projekt GeNeSee bereits ausreichend bearbeitet geglaubt war, nämlich die Vermessung des Seebeckens des Neusiedler Sees. Wie sich bei Durchsicht der verfügbaren Daten herausstellte, waren die Aufnahmen im Schilfgürtel nicht umfangreich und detailliert genug, um für die geplanten Modellierungen eine geeignete Datengrundlage zu bieten. Wir wissen heute nicht, in welchem Ausmaß der Schilfgürtel seit den letzten Aufnahmen in den 1980er/90er Jahre verlandet ist, insbesondere wie sehr die Höhe des Seewalls zugenommen hat. Die Unsicherheiten zur Geländehöhe im dichten Schilf erschwerten die Modellierungen maßgeblich.

Zumindest in den drei Testgebieten Illmitz, Mörbisch und Wulka-Mündung wurden im Projekt REBEN – über den beauftragten Arbeitsumfang hinaus – ergänzende Vermessungen der Wassertiefe ausgewählter Kanäle und Blänken durchgeführt. Sie ermöglichten es in Kombination mit einem GIS-Layer zur Schilf-See-Grenzlinie und zur Lage der offenen Wasserflächen im Schilf (Csaplovics & Schmidt 2011a; Csaplovics & Schmidt 2011b), für diese



drei Gebiete ein digitales Geländemodell zu erstellen, das für die hydraulische Modellierung nutzbar war.

Eine umfassende **Aufnahme der Sedimenthöhen im Schilfgürtel**, insbesondere im Bereich des Seewalls, aber auch landseitig, wird aber seitens der VerfasserInnen als wesentliche Aufgabe der kommenden Jahre angesehen. Die daraus zu gewinnenden Informationen sind auch für Überlegungen zu einer Wasserzufuhr in den Neusiedler See unerlässlich.

## (2) Schilfwachstum und Schilfsterben

Die Betrachtungen zur Sedimentbildung und zum Stoffaustausch zwischen See und Schilfgürtel im vorliegenden Synthese-Bericht konzentrierten sich auf die mineralischen Feststoffe. Die Frage der Produktion von organischem Material und ihr Beitrag zur Verlandung ist jedoch nicht ausreichend bekannt. Die letzten Untersuchungen zu diesem Thema liegen mehrere Jahrzehnte zurück und bedürfen zweifelsohne eine Überarbeitung und Ergänzung. Damit verbunden sind Fragen zum Schilfwachstum, aber auch zum Schilfsterben im inneren Schilfgürtel. Konkret sollte geklärt werden, in welchen Bereichen es zu einer **Ausdehnung** oder einem **Rückgang der Schilfbestände** kommt.

Nach jahrzehntelanger Zusammenarbeit ist eine standardisierte, homogene Schilfvermessung und -qualifizierung für den gesamten See notwendig.

## (3) Auswirkungen von Sedimentbaggerungen

Die Bedeutung der Sedimententnahmen durch Baggerungen von Segelhäfen und der Ertüchtigung von Kanälen für die Gesamtbilanz wurde in diesem Bericht ausführlich diskutiert und bewertet. Wir wissen jedoch nicht, in welchem Ausmaß es im Zuge dieser Eingriffe ins Sediment zu einer **Remobilisierung von Nähr- und Schadstoffen** ins Freiwasser kommt sowie welche kurzfristigen (aber letztlich potenziell auch längerfristigen) Auswirkungen eine solche Remobilisierung hat.

## (4) Schilfschnitt

Die wirtschaftliche Nutzung des Schilfgürtels durch den Schilfschnitt greift unmittelbar in den Nährstoff- und Feststoffhaushalt des Sees ein. Auch hier stellt sich die Frage einer **Remobilisierung von Nähr- und Schadstoffen**, die zuvor im Schilfgürtel deponiert wurden. Daneben sollten aber auch die **Stoffmengen** neu abgeschätzt werden, die **mit der Schilfernte dem System entzogen** werden. Die letzten Untersuchungen zu diesem Thema liegen rund 40 Jahre zurück.

## (5) Einhaltung der Umweltqualitätsnormen (UQN)

### Österreich

Aus Biota-Untersuchungen im Neusiedler See ist bekannt, dass die UQN für Quecksilber und PBDE nicht eingehalten werden. Dies ist kein Spezifikum des Neusiedler Sees, da eine entsprechende Zielverfehlung flächendeckend in Österreich und in großen Teilen der EU gegeben ist. Eine Überwachung der Parameter der **QZV Chemie Oberflächengewässer** (QZV Chemie OG, Verordnung über die chemischen Grenzwerte in Oberflächengewässern, BGBl. II Nr. 96/2006) im Neusiedler See in der Wasserphase fehlt bisher, da im nationalen Monitoringprogramm (Gewässerzustandsüberwachungsverordnung: GZÜV, Verordnung zur Überwachung von Oberflächen- und Grundwasser, BGBl. II Nr. 479/2006) keine Messstelle am Neusiedler See vorgesehen ist. Die vorliegenden Untersuchungen im Rahmen dieses Projektes waren nicht zur Überwachung der UQN konzipiert. Trotzdem weisen die Untersuchungen auf mögliche Überschreitungen der UQN für PFOS, Benzo(a)pyren, Fluoranthen und weitere PAK sowie gelöstem Blei hin. Eine endgültige Aussage über die aktuelle Zielerreichung ist allerdings nicht möglich.

### Ungarn

Gemäß dem zweiten Gewässerbewirtschaftungsplan (2015) wurde der Neusiedler See basierend auf den Monitoring-Daten wie folgt eingestuft:

| Wasserkörper | Biologischer Status Quo | Chemischer Status Quo | Schadstoffe Status Quo | Hydromorphologischer Status Quo |
|--------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|---------------------------------|
| natürlich    | gut                     | gut                   | gut                    | hoch                            |

## (6) Abbau und Adsorption von Schadstoffen

Eine Reihe von in der Umwelt weitgehend persistenten Stoffen werden im See und dessen Schilfgürtel aus der wässrigen Phase in relevanten Umfang entfernt. Neben einem Austrag mit Feststoffen in den Schilfgürtel sowie einer dortigen **Speicherung** (PAK und Metalle) und den damit verbunden Fragen einer langfristig möglichen Mobilisierung (siehe oben) muss dies wie für andere Parameter auf einen Ab- oder Umbau unter den Umgebungsbedingungen des Sees zurückgeführt werden (z.B. Carbamazepin, Diclofenac, PFOA). Nicht bekannt sind die Endprodukte dieser Abbauvorgänge bzw. eine allfällige **Bildung von Metaboliten**. Auch für PFOS konnte eine relevante Entfernung im See aus der wässrigen Phase gezeigt, aber der Verbleib nicht restlos geklärt werden. Während PFOA und PFOS zu den perfluorierten Tensiden (PFT) gehören, deren Einsatz rückläufig ist, werden diese vermehrt durch andere zumeist kurzkettiger PFT ersetzt. Diese können als Beispiel für äußerst **persistenter Chemikalien** genannt werden, über deren Eintrag und Verhalten im

See derzeit wenig bekannt ist, und welche unter den sensiblen Rahmenbedingungen des Sees langfristig kritisch zu betrachten sind.

### (7) Benthische Produktion

Trotz vielversprechender Aufnahmen in früheren Untersuchungen (Wolfram *et al.* 2015), waren die geplanten Probenahmen der benthischen Lebensgemeinschaften im vorliegenden Konzept methodisch unsicher und fehlerbehaftet. In Abstimmung und mit Zustimmung des Auftraggebers wurden die Analysen des Algenbenthos daher aus dem Programm gestrichen und stattdessen fischökologische Aufnahmen durchgeführt. Gerade in den flachen Braunwasserblänken im inneren Schilfgürtel kann die **benthische Produktion** aber ein relevantes Bilanzglied zum Biomasseinput in das System darstellen. Keine Aussage im Projekt konnte demnach auch zur nachfolgenden Konsumentenkette, den herbivoren und carnivoren Bodentieren (Insektenlarven, Schnecken, Milben etc.) getroffen werden, die ihrerseits Nahrungsgrundlage für benthisch lebende Fische darstellen.

### (8) Mikrobiologie und Stickstoffkreislauf

Das Schicksal und der Verbleib der im Gewässer abgestorbenen Organismen, der gelösten organischen Verbindungen sowie der von außen zugeführten organischen Stoffe sind zentrale Fragen des limnischen Stoffhaushaltes. In stehenden Gewässern muss fast alles in den Organismen inkorporierte Material letztthin wieder in das Wasser zurückkehren und nur ein geringer Teil wird im Sediment festgelegt. Diese Rückführung geschieht größtenteils über den **mikrobiellen Abbau**, der unterschiedlich rasch und über verschiedene Stufen erfolgen kann. Auch die Fragen, welche Bakterien sind beteiligt und in welchem Ausmaß werden die gelösten Stoffe wieder in den Stoffkreislauf einbezogen, spielen eine wichtige Rolle für das Verständnis der Systemprozesse. Während REBEN sehr umfangreiche Erkenntnisse in Hinblick auf die Phosphorbilanz geben konnte, ist der weitaus komplexere **Stickstoffkreislauf**, in den Mikroorganismen in vielfältiger Weise eingreifen, noch kaum untersucht.

### (9) Grundwasseraustausch

Die primäre Quelle für den hohen Na-HCO<sub>3</sub>-Cl-Gehalt von Sodaseen und Salzlacken im Karpatenbecken ist aufsteigendes salzhaltiges **Tiefengrundwasser**. Ein Prozess, der durch Verdunstung verstärkt wird. Dieser hydrogeologische Einfluss auf den Wasserhaushalt und die Chemie des Neusiedler Sees ist noch unbekannt und sollte Teil eines künftigen Managements werden.

### (10) Lateraler Austausch zwischen Kanälen

Eine Grauzone in unserem Wissen über den Neusiedler See ist die hydraulische Konnektivität zwischen den Kanälen und dem angrenzenden Schilfgürtel. Genauer gesagt, der Einfluss der Baggerablagerungen auf die Oberflächenströmungen und die Wirksamkeit des Schilfschnitts entlang der ungarischen Kanäle sowie die Leitfähigkeit des Substrats. In einem ersten Schritt zur Vermessung der Kanäle mittels Fernerkundung, sollten während Niedrig- und Hochwasserphasen Felddaten (z. B. Tracerkonzentrationen) in Pilotbereichen der ausgebaggerten Kanäle gesammelt werden.

### (11) Verdunstung

Nach wie vor bestehen Unsicherheiten in der Berechnung der tatsächlichen **Verdunstungsraten** des Neusiedler Sees, die sich u.a. in der Zuverlässigkeit der Wasserbilanzen niederschlagen. Es wird vorgeschlagen, anstatt der bisher angewandten Methode zur Berechnung der Verdunstung die Penman-Gleichung anzuwenden. Sie wird bereits bei den Modellierungen für den Plattensee und den Velencei-See in Ungarn eingesetzt.

### (12) Monitoring

Ein langfristiges Monitoring des Systems offener See – Kanäle – Schilfgürtel ist erforderlich, insbesondere für limnologische Schlüsselfaktoren und Indikatoren in verschiedenen hydrologischen und meteorologischen Situationen, um die geeignete Strategie für das wasserwirtschaftliche Management zu planen. Die **Auswirkungen der Kanalbaggerungen** im ungarischen Schilfgürtel konnten bisher nur bei niedrigem bis mittlerem Wasserstand untersucht werden. Ebenso kann das **hydrodynamische Modell** des Schilfgürtels nur für niedrige Wasserstände, die während REBEN herrschten, als **validiert** angesehen werden. Zusätzlich zu einem kontinuierlichen Monitoring empfehlen wir die Durchführung von **Vermessungen** während anhaltender Hochwasserphasen.

## 7 LITERATUR

6<sup>th</sup> World Water Forum, 2011. Can the concept of ecosystem services help the implementation of the WFD? 2<sup>nd</sup> “Water Science meets Policy” event, 29-30<sup>th</sup> September 2011, Brussels.

Báldi, A., A. Engloner & L. Vörös, 2017. A vízi ökoszisztémák jelentőség a társadalom számára. Magyar Tudomány 178:10 doi:10.1556/2065.178.2017.10.4.

Beach, S., J. Newsted, K. Coady & J. Giesy, 2006. Ecotoxicological evaluation of perfluorooctanesulfonate (PFOS). Rev Environ Contam Toxicol 186:133-174.

Blöschl, G., A. Blaschke, K. Haslinger, M. Hofstätter, J. Parajka, J. Salinas & W. Schöner, 2018. Auswirkungen der Klimaänderung auf Österreichs Wasserwirtschaft – ein aktualisierter Statusbericht. Österr Wasser- und Abfallw 70(9-10):462-473.

Blöschl, G., W. Schöner, H. Kroiß, A. Blaschke, R. Böhm, K. Haslinger, N. Kreuzinger, R. Merz, J. Parajka, J. Salinas & A. Viglione, 2011. Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft - Ziele und Schlussfolgerungen der Studie für Bund und Länder. Österr Wasser- und Abfallw 63(1-2):1-10.

Boros, E., K. V.-Balogh, L. Vörös & Z. Horváth, 2017. Multiple extreme environmental conditions of intermittent soda pans in the Carpathian Basin (Central Europe), vol 62.

Brossmann, H., K. Burian, H. Dobesch, M. Dvorak, W. von der Emde, B. Grillitsch, H. Grillitsch, A. Grill, A. Gunatilaka, R. Hacker, L. Hammer, O. Hammer, B. Hofbauer, E. Kusel-Fetzmann, H. Löffler, R. Maier, H. Malissa, N. Matsché, H. Metz, F. Neuwirth, A. Nikoopour, M. Pimminger, F. Plahlwabnegg, H. Puxbaum, J. Ripfel, R. Sezemsky, H. Siehardt, G. Spatzierer, W. Stalzer, G. Teuschl, H. Waidbacher, U. Wenninger, P. Zahradnik & E. Zwicker, 1984. Forschungsbericht 1981-1984. Bundesministerien für Wiss. & Forsch. & Gesundheit & Umweltschutz, Land Burgenland.

Burian, K., R. Maier, H. Sieghardt, O. Hammer & G. Teuschl, 1986. Produktionsbiologische Untersuchungen an *Phragmites*-Beständen im geschlossenen Schilfgürtel des Neusiedler Sees. Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland 72:189-221.

Csaplovics, E., L. Bácsatyai, I. Márkus & A. Sindhuber, 1997. Digitale Geländemodelle des Neusiedler Seebeckens. Wiss Arb Bgld 97.

Csaplovics, E. & J. Schmidt, 2010a. Schilfkartierung Neusiedler See - Teil 1. Natur und Umwelt im Pannonischen Raum H.3.

Csaplovics, E. & J. Schmidt, 2010b. Schilfkartierung Neusiedler See - Teil 2. Natur und Umwelt im Pannonischen Raum H.4.

Dokulil, M., 2013. Impact of climate warming on European inland waters. Inland Waters:27-40 doi:10.5268/IW-4.1.705.

Eitzinger, J., G. Kubu, H. Formayer, P. Haas, T. Gerersdorfer & H. Kromp-Kolb, 2009. Auswirkungen einer Klimaänderung auf den Wasserhaushalt des Neusiedler Sees. Endbericht im Auftrag des Amtes der Burgenländischen Landesregierung, Landeswasserbaubezirksamt Schützen am Gebirge, Institut für Meteorologie (BOKU-Met), Wien, 80 pp.

Grizzetti, B., D. Lanzanova, C. Liqueste, A. Reynaud & A. C. Cardoso, 2016. Assessing water ecosystem services for water resource management. Environmental Science & Policy 61:194-203 doi:<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2016.04.008>.

Gunatilaka, A., 1986. Nährstoffkreisläufe im Schilfgürtel des Neusiedler Sees - Auswirkungen des Grünschnittes. Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland 72:223-310.

- Hacker, R. & H. Waidbacher, 1986. Fischereibiologische Untersuchungen am Neusiedler See unter besonderer Berücksichtigung des Aales. Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland 72:467-525.
- Haines-Young, R. & M. Potschin, 2012. Common International Classification of Ecosystem Services (CICES). European Environment Agency.
- Herzig, A., E. Miksch, B. Auer, A. Hain, A. Wais & G. Wolfram, 1994. Fischbiologische Untersuchung des Neusiedler See. BFB-Bericht 81:1-125.
- Hietz, P., 1989. I. Zur Freisetzung von Nährstoffen aus dem Litter von *Phragmites australis* im Schilfgürtel des Neusiedler Sees. AGN.
- Krachler, R., R. Krachler, A. Stojanovic, B. Wielander & A. Herzig, 2009. Effects of pH on aquatic biodegradation processes. Biogeosciences Discuss 6:13.
- Kurier, 2018. Der Neusiedler See ist nicht Monaco. <https://kurier.at/chronik/burgenland/der-neusiedler-see-ist-nicht-monaco/400109171> Accessed 24<sup>th</sup> September 2020.
- Maracek, K. & C. Sailer, 2019. Hydrographisches Monitoring am Neusiedler See als Grundlage angewandter Wasserwirtschaft. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich 89:104-119.
- Márkus, I., G. Király & Z. Börcsök, 2008. A Fertő tó magyarországi nádasainak minősítése és osztályozása. Kutatási jelentés. ÉDUKÖVIZIG.
- Metz, H., 1984. Zur Phosphor- und Stickstoffsituation im Schilfgürtel des Neusiedler Sees. Wissenschaftlichen Arbeiten aus dem Burgenland 72:311-339.
- Padisák, J., 1993. Dynamics of phytoplankton in brown-water lakes enclosed with reed-belts (Fertő/Neusiedlersee; Hungary/Austria). Verh Internat Verein Limnol 25:675-679.
- Padisák, J. & M. Dokulil, 1994. Meroplankton dynamics in a saline, turbulent, turbid shallow lake (Neusiedlersee, Austria and Hungary). Hydrobiologia 289:3-42.
- Pannonhalmi, M., 1984. Data to the nutrient balance of Fertőlake. BFB-Bericht 51:73-75.
- Reid, W., H. Mooney, A. Cropper, D. Capistrano, S. Carpenter, K. Chopra, P. Dasgupta, T. Dietz, A. Duraipapp, R. Hassans, R. Kasperson, R. Leemans, R. May, A. McMichael, P. Pingali, C. Samper, R. Scholes, R. Watson, A. H. Zakri & M. Zurek, 2005. Millenium Ecosystem Assessment Synthesis Report.
- Schöner, W., R. Böhm, K. Haslinger, G. Stanzer, R. Merz, A. Blaschke, A. Viglione, J. Parajka, H. Kroiß, N. Kreuzinger & G. Blöschl, 2011. Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- Soja, A.-M., K. Kutics, K. Maracek, G. Molnár & G. Soja, 2014. Changes in ice phenology characteristics of two Central European steppe lakes from 1926 to 2012 - influences of local weather and large scale oscillation patterns. Climatic Change 126:119-133 doi:10.1007/s10584-014-1199-8.
- Somogyi, B., T. Felföldi, M. Dinka & L. Vörös, 2010. Periodic picophytoplankton predominance in a large, shallow alkaline lake (Lake Fertő, Neusiedlersee). Annales de Limnologie - International Journal of Limnology 46(01):9-19 doi:doi:10.1051/limn/2010001.
- Stalzer, W. & G. Spatzier, 1987. Zusammenhang zwischen Feststoff- und Nährstoffbelastung des Neusiedler Sees durch Sedimentverfrachtung. Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland 77:93-226.
- Stalzer, W., G. Spatzier & U. Wenninger, 1986. Nährstoffeintrag in den Neusiedler See über die oberirdischen Zuflüsse. Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland 72:125-187.
- Statistik Burgenland, 2020. Tourismus 2019. Eisenstadt.
- Szőke, E., 2016. A Tengermelléki káka (*Schoenoplectus litoralis* SCHRADER (PALLA)) Fertő tavi állományának változása. Nyugat-magyarországi Egyetem Erdőmérnöki kar Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási intézet.



Takáts, T., 1984. About the inner ponds of Fertő-Lake. BFB-Bericht 51:31-36.

TEEB, 2010. The Economics of Ecosystems and Biodiversity Ecological and Economic Foundations. Edited by Pushpam Kumar. Earthscan, London - Washington.

TIES, 2019. What is ecotourism? <https://ecotourism.org/what-is-ecotourism/> Accessed 24<sup>th</sup> September 2020.

Tóth, L. & E. Szabó, 1962. Botanikai és környezettani vizsgálatok a Fertő-tó nádasában. Hidrológiai Tájékoztató 2(3):129-138.

Trojanowicz, M., A. Bojanowska-Czajka, I. Bartosiewicz & K. Kulisa, 2018. Advanced oxidation/reduction processes treatment for aqueous perfluorooctanoate (PFOA) and perfluorooctanesulfonate (PFOS) – A review of recent advances. Chemical Engineering Journal 336:170-199.

Von der Emde, W., N. Matsché & F. Plahl-Wabnegg, 1986. Der Einfluss von Hochwasserereignissen auf die Nährstoffbelastung der Wulka und deren Auswirkungen auf die Stoffumsetzungen im Schilfgürtel des Neusiedler Sees. Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland 72:91-121.

Wolfram, A., M. Großschartner & H. Krisa, 2015. Der Schilfgürtel des Neusiedler Sees: Lebensraum für Kleinlebewesen und Fische. Naturschutzbund Burgenland, Eisenstadt.

Wolfram, G., A. P. Blaschke, R. Hainz, P. Riedler, M. Zessner & O. Zoboli, 2020. Synthese. Teilbericht Nr. 7 im Rahmen der angewandten hydrologischen und limnologischen Basisuntersuchungen zum Projekt REBEN – Reed Belt Neusiedler See/Fertő (Interreg-Projekt AT-HU 2014-20). Studie im Auftrag des Amtes der Bgld. Landesregierung, Abt. 5 – Baudirektion, Wien.

Wolfram, G., L. Déri & S. Zech, 2014. Strategiestudie Neusiedler See – Phase 1 / Fertő tó Stratégiai Tanulmány – 1. Studie im Auftrag der Österreichisch-Ungarischen Gewässerkommission / Osztrák Vízügyi Bizottság megbízásából, Wien - Szombathely, 246 pp.

Wolfram, G., K. Donabaum, M. Dokulil, H. Gassner, A. Kirschner, N. Kreuzinger, E. Mikschi, E. Nemeth, K. Pall, M. Richter & M. Salbrechter, 2004a. Ökologische Machbarkeitsstudie Dotation Neusiedler See. Gutachten i.A. des BMLFUW und des Amtes der Bgld. Landesregierung, Wien, 247 pp.

Wolfram, G., K. Donabaum & S. Hintermaier, 2007. Stoffbilanz Neusiedler See 1992-2005. Studie i.A. d. Arbeitsgemeinschaft Natürliche Ressourcen (AGN), Wien, 106 pp.

Wolfram, G., A. Hain, E. Mikschi & A. Wolfram, 2004b. Fischökologisches Monitoring Neusiedler See 2004. Studie i.A. des Nationalparks Neusiedler See - Seewinkel, Wien.

Wolfram, G., R. Hainz, S. Hintermaier, G. Kum, P. Riedler, M. Zessner, O. Zoboli & A. Herzig, 2019. Eintragspfade, Umsetzungsprozesse und Langzeitveränderungen von Nährstoffen im Neusiedler See. Österr. Wasser- und Abfallw. doi:doi.org/10.1007/s00506-019-00620-4.

Wolfram, G. & A. Herzig, 2013. Nährstoffbilanz Neusiedler See. Wiener Mitteilungen 228:317-338.

Wolfram, G., K. Ruzicska & S. Hintermaier, 2012. Kap. 3.2.5 Stoffbilanzen. In Zessner, M., O. Gabriel & K. Schilling (eds) Neusiedler See - Ökodynamische Rehabilitation Betrachtungen zur Wasserqualität der Raab. Technische Universität Wien, Studie i.A. des Amtes der Burgenländischen Landesregierung, Abteilung 9 – Wasser und Abfallwirtschaft, Wien - Budapest - Győr.

Wolfram, G., E. Sigmund & G. Fürnweiger, 2018. Fischökologisches Monitoring Neusiedler See - Saisonen 2017 & 2018. Studie i.A. des Nationalparks Neusiedler See - Seewinkel, Wien, 71 pp.

Wolfram, G., A. Wolfram & E. Mikschi, 2008. Fischökologisches Monitoring Neusiedler See 2006 & 2007. Studie i.A. des Nationalparks Neusiedler See - Seewinkel, Wien, 51 pp.

Zessner, M., O. Gabriel, K. Schilling, M. Pannonhalmi, L. Sutho, M. Kovács, I. Toth, A. Clement, T. Karches, F. Szilagyí, T. Kramer, J. Jozsa, G. Wolfram, K. Ruzicska & S. Hintermaier, 2012. Neusiedler See - Ökodynamische Rehabilitation. Betrachtungen zur Wasserqualität der Raab. Studie i.A. des Amtes der Burgenländischen Landesregierung, Abteilung 9 – Wasser und Abfallwirtschaft, Wien, Budapest, Győr, 189 pp.

Zessner, M., O. Zoboli, D. Reif, A. Amann, E. Sigmund, G. Kum, Z. Saracevic, E. Saracevic, S. Kittlaus, J. Krampe & G. Wolfram, 2019. Belastung des Neusiedler Sees mit anthropogenen Spurenstoffen: Überlegungen zu Herkunft und Verhalten. Österr Wasser- und Abfallw 71(11):522-536 doi:<https://doi.org/10.1007/s00506-019-00623-1>.

Zick, D., H. Gassner, J. Wanzenböck, B. Pamminer-Lahnsteiner & G. Tischler, 2006. Changes in the fish species composition of all Austrian lakes >50 ha during the last 150 years. Fisheries Management and Ecology 13:103-111.