

REBEN

Reed Belt Neusiedler See/Fertő

Interreg-Projekt AT-HU 2014-20

Angewandte hydrologische und
limnologische Basisuntersuchungen

Bericht 7

Synthese



Titel: Synthese. Teilbericht im Rahmen der angewandten hydrologischen und limnologischen Basisuntersuchungen zum Projekt REBEN – Reed Belt Neusiedler See/Fertő (Interreg-Projekt AT-HU 2014-20)

Auftraggeber: Amt der Burgenländischen Landesregierung, Abt. 5 – Baudirektion
Europaplatz 1
7000 Eisenstadt

Ansprechpartner: DI Christian Sailer

Auftragnehmer: ARGE „DWS Hydro-Ökologie – TU Wien“

DWS Hydro-Ökologie GmbH
Technisches Büro für Gewässerökologie und Landschaftsplanung
Zentagasse 47, 1050 Wien
Tel. 01 / 548 23 10, Fax DW 18
Email: office@dws-hydro-oekologie.at

Technische Universität Wien
Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft
Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie
Karlsplatz 13/222, 1040 Wien

Projektleitung: Mag. Dr. Georg Wolfram

VerfasserInnen: Wolfram, G., P., Blaschke, R. Hainz, P. Riedler, M. Zessner, O. Zoboli, E. Csaplovics

Auftrag: A5/GEW.EUF-10003-11-2017

Seitenanzahl: 111

Interne Berichts-Nr.: 15/078-B07

Zitierweise: Wolfram, G., P. Blaschke, R. Hainz, P. Riedler, M. Zessner, O. Zoboli & E. Csaplovics (2020). Synthese. Teilbericht 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 Burgenländischen Landesregierung, Abt. 5 – Baudirektion, Wien.

Wien, November 2020

INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|---|------------|
| Zusammenfassung | 1 |
| Executive summary | 7 |
| 1 Einleitung | 12 |
| 1.1 Ausgangslage | 12 |
| 1.2 Projektstruktur und Aufgabenstellung | 14 |
| 1.3 Bewertungsmaßstab | 17 |
| 1.4 Struktur des Synthese-Berichts | 18 |
| 2 Stofftransport, Austauschprozesse und Frachten | 19 |
| 2.1 Einträge aus dem Einzugsgebiet (Wulka) | 19 |
| 2.2 Räumliche Muster und Gradienten | 22 |
| 2.3 Austauschprozesse | 26 |
| 2.4 Frachten von Fest-, Nähr- und Schadstoffen | 32 |
| 2.5 Langfristige Entwicklungen | 61 |
| 3 Szenarien – andere Rahmenbedingungen | 65 |
| 3.1 Definition von Szenarien | 65 |
| 3.2 Szenario P1 – Pegel <115,2 m ü.A. | 69 |
| 3.3 Szenario P2 – Pegel >115,8 m ü.A. | 73 |
| 3.4 Szenario W1 – diffuse Durchströmung der Wulka | 76 |
| 3.5 Szenario W2 – lineare Durchströmung der Wulka | 80 |
| 3.6 Szenario S1 – keine Schilfkanäle | 83 |
| 3.7 Szenario S2 – erweitertes Netz an Schilfkanälen | 87 |
| 3.8 Resümee | 95 |
| 4 Bewertung | 98 |
| 5 Wissensdefizite und offene Fragen | 104 |
| 6 Literatur | 108 |

ZUSAMMENFASSUNG

Zielsetzung des Projekts REBEN

Der Neusiedler See ist eine der größten und bedeutendsten Natur- und Kulturlandschaften Mitteleuropas. Aus früheren Studien war bekannt, dass ein funktionierender Wasser- und Stoffaustausch zwischen dem offenen See und dem Schilfgürtel für den Erhalt einer guten Wasserqualität von großer Bedeutung sind, doch bestanden gravierende Wissensdefizite über die genauen Zusammenhänge und die prägenden Einflussgrößen.

Das Projekt REBEN hatte zum Ziel, diese Wissensdefizite zu schließen und damit eine Basis für die Formulierung von wasserwirtschaftlichen Managementmaßnahmen zu schaffen. Das Projekt gliedert sich in zwei Arbeitspakete. Im Arbeitspaket T1 wurden Untersuchungen in den Bereichen Hydrologie, Chemie und Biologie durchgeführt, um unsere Kenntnis der Austauschprozesse zwischen offenem See und Schilfgürtel zu verbessern. Darauf aufbauend wird im Arbeitspaket T2 ein bilateral abgestimmter Managementplan für die Wasserwirtschaft erstellt (separates Dokument).

Die vorliegende Synthese dient der zusammenfassenden Beschreibung der Ergebnisse des **Arbeitspakets T1** (Untersuchungen zur Hydrologie, zu physikalisch-chemischen Parametern und Schadstoffen, zur Schilfstruktur und zum Sediment), der **Bewertung des Status Quo** aus hydrologischer, chemischer, limnologischer und wasserwirtschaftlicher Sicht sowie der Bewertung **alternativer Szenarien** unter geänderten Rahmenbedingungen. Die Bewertung des Status Quo erfolgt in Hinblick auf die wesentlichen wasserwirtschaftlichen Ziele gemäß Strategiestudie Neusiedler See Phase 1 von Wolfram et al. (2014). Sie betreffen drei Kernpunkte:

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

Einträge aus dem Einzugsgebiet

Die ehemals breitflächige Durchströmung des **Schilfgürtels der Wulka** besteht nicht mehr in dem gleichen Ausmaß wie bei früheren Untersuchungen in den 1980er Jahren. Das dürfte am beständigen Eintrag an Feststoffen in den Schilfgürtel liegen, die im Zuge der regelmäßigen **Ertüchtigung der Kanäle** entlang der Schilfkanäle aufgehäuft wurden. Dies führte zur Ausbildung von Längsdämmen, die nur an wenigen Öffnungen eine Durchströmung ermöglichen. Die Ergebnisse des Projekts REBEN bestätigen die

Bedeutung der **Umsetzungsprozesse** im Schilfgürtel, die bereits aus früheren Untersuchungen bekannt war. Es zeigten sich jedoch auch deutliche Unterschiede: So fließt die Wulka heute rascher und quasi **linear** über Kanäle in Richtung offenem See, während in den 1980er Jahren eine **diffuse** und langsame Durchströmung des Schilfgürtels vorherrschte, bei der Umsetzungsprozesse wie Denitrifikation und Phosphorrücklösung stärker ausgeprägt waren.

Räumliche Muster und Gradienten

Auf einer kleinräumigeren Ebene präsentiert sich der Schilfgürtel als **Mosaik** aus dichten Schilfbeständen, lockerem Jung- oder Altschilf und offenen Wasserflächen. Ein breites Band mit dichtem Schilf und höherer Sedimentauflage zieht sich seenah fast rund um den gesamten offenen See, während die großen offenen **Blänken** charakteristischerweise in den inneren Schilfgürtelbereichen (v.a. Höhe Mörbisch und Illmitz) zu finden sind. Zäsuren durch diesen **Seewall** und zugleich bevorzugte Transportpfade vom See in innere Schilfgürtelbereiche sind die zahlreichen künstlichen **Schilfkanäle**. Entlang dieser linearen Strukturen verlaufen abnehmende Gradienten von Schwebstoffen, d.h. anorganischen Partikeln ebenso wie pflanzlichem und tierischem Plankton. Gleichzeitig sind die Kanäle aber auch Wanderwege von Fischen.

Ein offensichtlicher **Gradient** betrifft die Wassertiefe, die von der See-Schilf-Grenze in Richtung der vorseesischen Wiesen abnimmt. 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. Kleinräumig strukturierte Blänken zeichnen sich zudem durch Temperaturextreme aus und infolge massiver Abbauprozesse durch eine intensive Sauerstoffzehrung bis zu völlig anoxischen Verhältnissen. Ähnliche Gradienten wie in der Wassersäule kennzeichnen die physikalisch-chemische Zusammensetzung des **Sediments**. So nehmen beispielsweise organischer Gehalt – und mit ihm verschiedene **Schadstoffe** – sowie der Wassergehalt entlang der Transekte vom See in Richtung Land markant zu. Folgende Einflussfaktoren und Ursachen sind verantwortlich für die vorgefundenen Gradienten:

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

Austauschprozesse

Der Stoffaustausch erfolgt auf **unterschiedlichen Ebenen**, nämlich zwischen dem offenen See und dem Schilfgürtel, zwischen verschiedenen Bereichen innerhalb des Schilfgürtels sowie zwischen Sediment und Wassersäule. Diese Prozesse sind 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 (Seiche-Bewegungen, d.h. stehende Wellen, die einem regelmäßigen Kippen des gesamten Seewasserspiegels vergleichbar sind).

Derzeit kommt den **Kanälen in Kombination mit dahinterliegenden offenen Wasserflächen** die größte Bedeutung für den Wasser- und Stoffaustausch zwischen offenem See und Schilfgürtel zu. 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 in geringem Ausmaß zu einer diffusen Durchströmung des Schilfgürtels kommen.

Anhand der Adsorptionsversuche konnte aufgezeigt werden, dass für bestimmte Stoffe (z.B. PFOS) noch eine ausreichend hohe **Adsorptionskapazität des Sediments** im Schilfgürtel vorhanden ist. Bei anderen Schadstoffen (z.B. manchen Schwermetallen) ist die Adsorptionskapazität hingegen nahezu erschöpft und damit ein grundsätzliches Potenzial für eine Rücklösung oder eine Aufkonzentration 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.

Frachten von Fest-, Nähr- und Schadstoffen

Die aus der Wulka in den See eingebrachten **Feststoffe** verbleiben zum größten Teil im Schilfgürtel des Mündungsbereiches. Das im See neu gebildete Sediment (Ca-Mg-Karbonate, sogenannter „Kalkschlamm“) übertrifft die aus dem Einzugsgebiet in den See gelangenden Feststoffe bei weitem. In Jahren mit großen Mengen von über den Einserskanal abgeleitetem Seewasser wird auch eine erhebliche Fracht an Trübe und damit Feinsediment aus dem See abgeleitet. Nichtsdestotrotz werden derzeit laufend größere Schwebstofffrachten aus dem offenen See in den Schilfgürtel transportiert und sind damit ein treibender Faktor einer potenziellen Verlandung in diesen Bereichen. 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.

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. Nichtsdestotrotz verbleiben aber im Mittel (Betrachtungszeitraum 20–25 Jahre) rd. 3 t Phosphor pro Jahr aus dem Wulka-Einzugsgebiet im Schilfgürtel, der somit einen wichtigen Retentionsraum für Nährstoffe darstellt. Der Austrag vom Schilfgürtel in den See erfolgt primär als gelöster Phosphor und ist geringer als der Eintrag vom See in den Schilfgürtel, der überwiegend in partikulärer Form erfolgt. 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.

Unter den **Schadstoffen** ist bei PFOS (Perfluorooctansulfonsäure) und PFT (perfluorierte Tenside) 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 Metabolite nicht auszuschließen sind. Fluoranthren sedimentiert höchstwahrscheinlich im Schilfgürtel, was allerdings auf eine potentielle Rückbelastung des Sees aus dem Speicher im Schilfgürtel – wie es auch für den Phosphor gezeigt werden konnte – hindeutet.

Langfristige Entwicklungen

Neben kurzfristigen Umsetzungs- und Austauschprozessen sind langfristige Entwicklungen für den Neusiedler See von Bedeutung, die zwar im Rahmen dieses Projekts nicht untersucht wurden, im wasserwirtschaftlichen Managementplan jedoch mit zu berücksichtigen sind: zum einen die **natürliche Verlandung** des Systems durch beständigen Eintrag an Feststoffen aus dem Einzugsgebiet sowie die autochthone Sedimentbildung, zum anderen die **globale Erwärmung** mit bereits nachweislichen Auswirkungen auf die Hydrologie des Sees.

Szenarien – andere Rahmenbedingungen

Anhand von **sechs Szenarien** wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Rahmenbedingungen auf bestehende Prozesse aufgezeigt:

- Szenario P1 Wasserstand <115,2 m ü.A.
- Szenario P2 Wasserstand >115,8 m ü.A.
- Szenario W1 ausschließlich diffuse Durchströmung der Wulka durch den Schilfgürtel
- Szenario W2 ausschließlich lineare Durchströmung der Wulka durch Schilfgürtel
- Szenario S1 keine Kanäle bzw. bestehende Kanäle verlandet oder verwachsen
- Szenario S2 Ausdehnung des bestehenden Netzes von Kanälen

Anhand der Beschreibung der Szenarien lassen sich **Auswirkungen auf die Gesamtbilanzen** von Fest-, Nähr- und Schadstoffen ableiten. Entscheidende Veränderungen sind vor allem bei einer Abkopplung des Schilfgürtels vom offenen See bei niedrigem Wasserstand und Verschilfung der Kanäle zu erwarten, dies vor allem in Bereichen, in denen die Kanäle als Verbindung zwischen offenem See und ausgedehnten Braunwasserflächen im Schilfgürtel fungieren (z.B. Höhe Mörbisch). In einigen Szenarien haben Folgewirkungen eine große Bedeutung auf den Chemismus und die Stoffbilanz des Sees, z.B. im Szenario W2 ein laufend erforderliches Ausbaggern der Wulka im Mündungsbereich oder im Szenario P2 eine häufige Ableitung von Seewasser und damit von Salzen aus dem See über den Einsenkanal.

Bewertung

Die sechs Szenarien wurden abschließend in einer Bewertungsmatrix in Hinblick auf die wasserwirtschaftlichen Ziele gemäß Strategiestudie Neusiedler See dargestellt. Dabei ergab sich für kein Szenario ein durchgängig positives oder negatives Bild (im Sinne von Annäherung oder Entfernung von den Zielen). Das unterstreicht die Komplexität der unterschiedlichen Prozesse und leitet zum Managementplan über, im Rahmen dessen Maßnahmen formuliert werden sollen, um die positiven Entwicklungen zu stärken und negative Trends zu vermeiden oder zumindest abzuschwächen.

Wissensdefizite und offene Fragen

Im Zuge der Bearbeitung ergaben sich offene Fragen, die nachstehend als vorrangige Wissensdefizite schlagwortartig zusammengefasst sind:

- Geländemodell im Bereich des Schilfgürtels
- Schilfwachstum und Schilfsterben
- kurzfristige Auswirkungen von Sedimentbaggerungen auf die Freisetzung von Nähr- und Schadstoffen
- Auswirkungen der Schilfernte auf die Freisetzung von Nähr- und Schadstoffen
- Einhaltung der Umweltqualitätsnormen (UQN) gemäß EU-Wasserrichtlinie
- Abbau und Adsorption von Schadstoffen
- Benthische Produktion im Schilfgürtel
- Mikrobiologische Prozesse und Stickstoffkreislauf

EXECUTIVE SUMMARY

Objectives of the project REBEN

Lake Neusiedl is one of the largest and most important natural and cultural landscapes in Central Europe. From earlier studies it was known that a functioning water and material exchange between the open lake and the reed belt is of great importance for the preservation of a good water quality, but there were serious knowledge deficits about the crucial processes and key factors.

The aim of the project REBEN was to close these knowledge gaps and thus to create a basis for defining water management measures. The project has two work packages. In work package T1, investigations in the fields of hydrology, chemistry and biology were conducted to improve our knowledge of the exchange processes between the open lake and the reed belt. Based on this, a bilaterally agreed water management plan will be developed in work package T2 (separate document).

This synthesis provides a summarizing description of the results of **work package T1** (investigations on hydrology, physico-chemical parameters and pollutants, reed structure and sediment), the evaluation of the status quo from hydrological, chemical, limnological and water management perspectives as well as the **assessment of alternative scenarios** under changed framework conditions. The evaluation of the status quo is carried out with regard to the main water management objectives according to the Strategy Study Lake Neusiedl Phase 1 by Wolfram et al (2014). They concern three key points:

- the risk of silting-up of the lake (and especially the reed belt),
- the protection of water quality (chemistry) and
- the maintenance of good ecological status (biotic communities).

Inputs from the catchment area

The once wide flow through of the river **Wulka** through the **reed belt** no longer exists to the same extent as observed in previous studies in the 1980s. This is probably due to the constant input of solids into the reed belt, which have been piled up along the **channels** during their **regular restoration**. Generating longitudinal dams, which only allow cross-flow through the reed belt at a few openings to the open lake. The results of the project REBEN confirm the importance of the **chemical and biological processes** in the reed belt as known from previous investigations. However, there were also clear differences: today the Wulka flows more rapidly and quasi **linearly** through channels towards the open lake, whereas in

the 1980s a **diffuse** and slow flow through the reed belt was predominant, with more pronounced processes such as denitrification and phosphorus dissolution.

Spatial patterns and gradients

On a smaller scale, the reed belt presents itself as a **mosaic** of dense reed beds, young or old reed beds and open water areas. A wide band of dense reed and higher sediment cover is found almost all around the open lake, while the **large open areas** are characteristically found in the inner reed belt areas (especially at Mörbisch and Illmitz). The numerous artificial **reed channels** are breaks through this **lake wall** and thus the preferred transport paths from the lake to the inner reed belt areas. Along these linear structures run decreasing gradients of suspended matter, *i.e.* inorganic particles as well as plant and animal plankton. At the same time, the channels are also migration routes for fish.

An obvious **gradient** is the decrease of water depth from the lake towards the offshore meadows. In areas that are not connected to the open lake at all or only via very long channel paths, the concentration of **dissolved solids in the** water in the reed belt can be three times as high as in the open lake. Small-scale structured reed beds are also characterized by temperature extremes and, due to massive degradation processes, by intensive oxygen consumption up to completely anoxic conditions. Similar gradients as in the water column characterize the physical-chemical composition of the **sediment**. For example, the organic content – and with it the content of various **pollutants** – as well as the water content increase significantly along the transects from lake to land. The following influencing factors and causes are responsible for the gradients found: the **water level** (depending on precipitation and inflows versus evaporation and discharges), the human uses (**reed cutting**) – especially in its long-term effects through damage to the reed and the development of extensive water areas in the inner reed belt – as well as the construction and restoration of **channels**, which function as priority transport pathways between the open lake and the central reed belt.

Exchange processes

Mass transfer takes place at **different levels**, namely between the open lake and the reed belt, between the different areas within the reed belt and between the sediment and the water column. These processes are subject to two main hydrological **rhythms**: the periodicity of the meteorological water balance (*i.e.* the seasonally fluctuating relationship between precipitation and evaporation) and the alternation between windless phases and

those with a strong influence by wind and waves (seiche movements, *i.e.* standing waves comparable to a regular tilting of the entire lake water level).

At present, the **channels connected with open water areas behind them** are of the greatest importance for the exchange of water and substances between the open lake and the reed belt. The channels are the preferred transport routes for suspended matter (as well as nutrients and adsorbed pollutants) into the reed belt as well as for dissolved matter (e.g. dissolved phosphorus) from the reed belt back into the open lake. Only when the water level is high, a diffuse flow through the reed belt can occur to a small extent.

Adsorption tests have shown that for certain substances (e.g. PFOS) there is still a sufficiently high **adsorption capacity of the sediment** in the reed belt. For other pollutants (e.g. some heavy metals), however, the adsorption capacity is almost exhausted and thus there is potential for re-solution or concentration increase. That this has not happened (yet) is probably due to the fact that new sediment (especially Ca-Mg-carbonates) is generated continuously, and provides new adsorption surfaces.

Loads of solids, nutrients and pollutants

Most of the **solids** introduced into the lake from the Wulka remain in the reed belt of the estuary. The newly formed sediment in the lake (Ca-Mg-carbonates, so-called "lime mud" or Kalkschlamm) exceeds by far the solids load in the river. In years with large amounts of lake water discharged via the Haság Channel, a considerable load of turbidity and thus fine sediment is also discharged from the lake. Nevertheless, at present high suspended sediment loads are continuously being transported from the open lake into the reed belt and are thus a driving factor of potential sedimentation in these areas. Just like the regular dredging in the marinas and bathing areas, the restoration of channels has also a noticeable influence on the overall sediment balance of the lake. The dredging of sediment from the channels definitely removes solids from the lake, even if they remain within the boundaries of the lake basin. Lateral sedimentation in the form of longitudinal dams, however, has a lasting effect on the structure and character of the reed belt.

In contrast to the solids, a lower proportion of **nutrients** (phosphorus) is retained in the Wulka estuary, and the largest part reaches the open lake – albeit sometimes with a time lag. Nevertheless, on the average and over a longer period of time, about 3 tons of phosphorus from the Wulka per year remain in the reed belt, which thus represents an important retention area for nutrients. The discharge from the reed belt into the lake is primarily in the form of dissolved phosphorus and is lower than the lake's input into the reed belt, which is mainly in particulate form. Dredging is not as important for the nutrient

balance as it is for the solid matter balance, but it does contribute to a significant removal of nutrients from the system.

Among the **pollutants**, PFOS (perfluorooctane sulfonic acid) and PFT (perfluorinated surfactants) are those substances that are discharged into the lake via deposition and are not found in the known discharges. Fluoranthene most probably settles in the reed belt, which however indicates a potential reloading of the lake from the reservoir in the reed belt – as it could be shown for phosphorus.

Long-term developments

In addition to short-term conversion and exchange processes, long-term developments are of importance for Lake Neusiedl. Although they have not been investigated in this project, they must be taken into account in the water management plan: on the one hand, the **natural sedimentation** of the system through continuous input of solids from the catchment area, on the other hand, **global warming** with already proven effects on the hydrology of the lake.

Scenarios – different framework conditions

Six scenarios were used to demonstrate the effects of different framework conditions on existing processes:

- Scenario P1 water level <115.2 m asl
- Scenario P2 water level >115.8 m asl
- Scenario W1 only diffuse flow of the Wulka through the reed belt
- Scenario W2 only linear flow of the Wulka through the reed belt
- Scenario S1 no channels or existing channels silted up or grown together
- Scenario S2 expansion of the existing network of channels

Based on the description of the scenarios, **effects on the overall balances** of solids, nutrients and pollutants can be derived. Decisive changes are to be expected above all when the reed belt is disconnected from the open lake at low water levels and overgrowth of the channels, especially in areas where the channels act as a connection between the open lake and extensive brown water areas in the reed belt (e.g. at Mörbisch). In some scenarios side effects have a great importance on the chemism and the material balance of the lake, e.g. in scenario W2 a continuously necessary dredging of the Wulka in the estuary area or in scenario P2 a frequent discharge of lake water and thus of salts from the lake via the Hanság Channel.

Assessment

The six scenarios were finally presented in an assessment matrix with regard to the water management goals according to the Strategy Study Lake Neusiedl. It did not result in a consistently positive or negative picture for any scenario (in the sense of approaching or moving away from the targets). This underlines the complexity of the different processes and leads to the management plan, which shall identify the measures to strengthen the positive developments and to avoid or at least mitigate negative trends.

Knowledge deficits and open questions

During the project, new questions arose, which are summarized below as priority knowledge deficits in keywords:

- Terrain model in the area of the reed belt
- Reed growth and reed death
- Short-term effects of sediment dredging on the release of nutrients and pollutants
- Effects of reed harvesting on the release of nutrients and pollutants
- Compliance with environmental quality standards (EQN) according to the EU Water Directive
- Degradation and adsorption of pollutants
- Benthic production in the reed belt
- Microbiological processes and nitrogen cycle

1 EINLEITUNG

INTRODUCTION

1.1 Ausgangslage

Baseline situation

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.

Der zeitliche Schwerpunkt der bisherigen Untersuchungen im und am Schilfgürtel des Neusiedler Sees lag in den 1980er Jahren (Brossmann *et al.* 1984). 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 (Abb. 1):

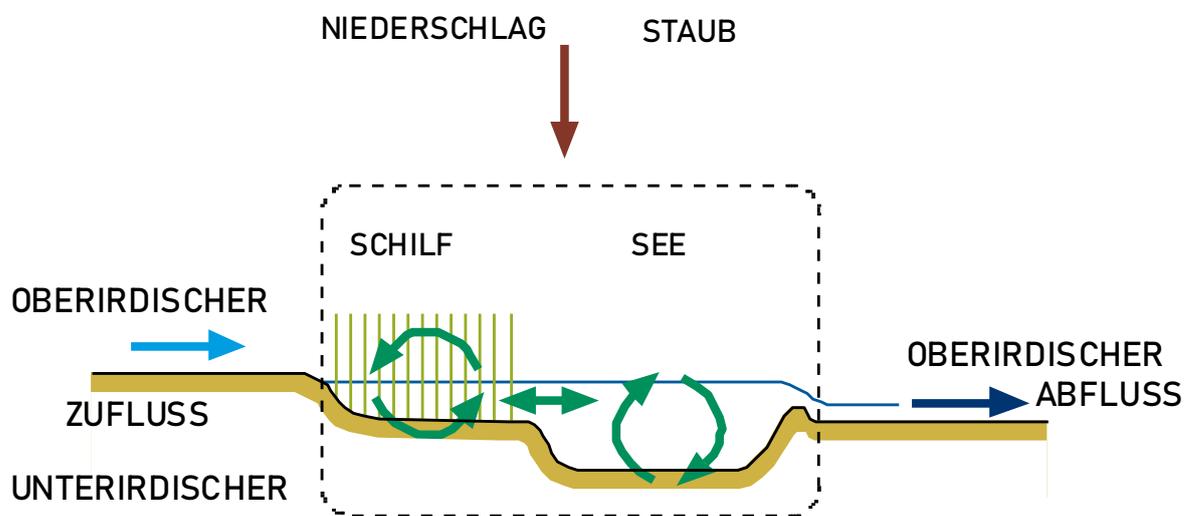


Abb. 1. Schematische Darstellung von Einträgen, Austrägen und Umsetzungsprozessen im Neusiedler See. Quelle: Stalzer & Spatzierer (1987) (verändert).

Figure 1. Scheme of inputs, outputs, and internal processes in Lake Neusiedl. Source: Stalzer & Spatzierer (1987) (modified).

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).

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

Project structure and objectives

1.2.1 Arbeitspakete T1 und t2

Work packages 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:

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

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:

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

1.2.2 Herangehensweise

Approaches

Die Bewältigung der Arbeitspakete erfolgte in einem Team von ExpertInnen der DWS Hydro-Ökologie und zweier Institute der Technischen Universität Wien. Die Herangehensweise umfasste dabei mehrere Ebenen: räumlich-zeitlich, thematisch, methodisch und

funktionell (Prozessebene). Die Komplexität der Aufgabe ist schematisch in Abb. 2 veranschaulicht.

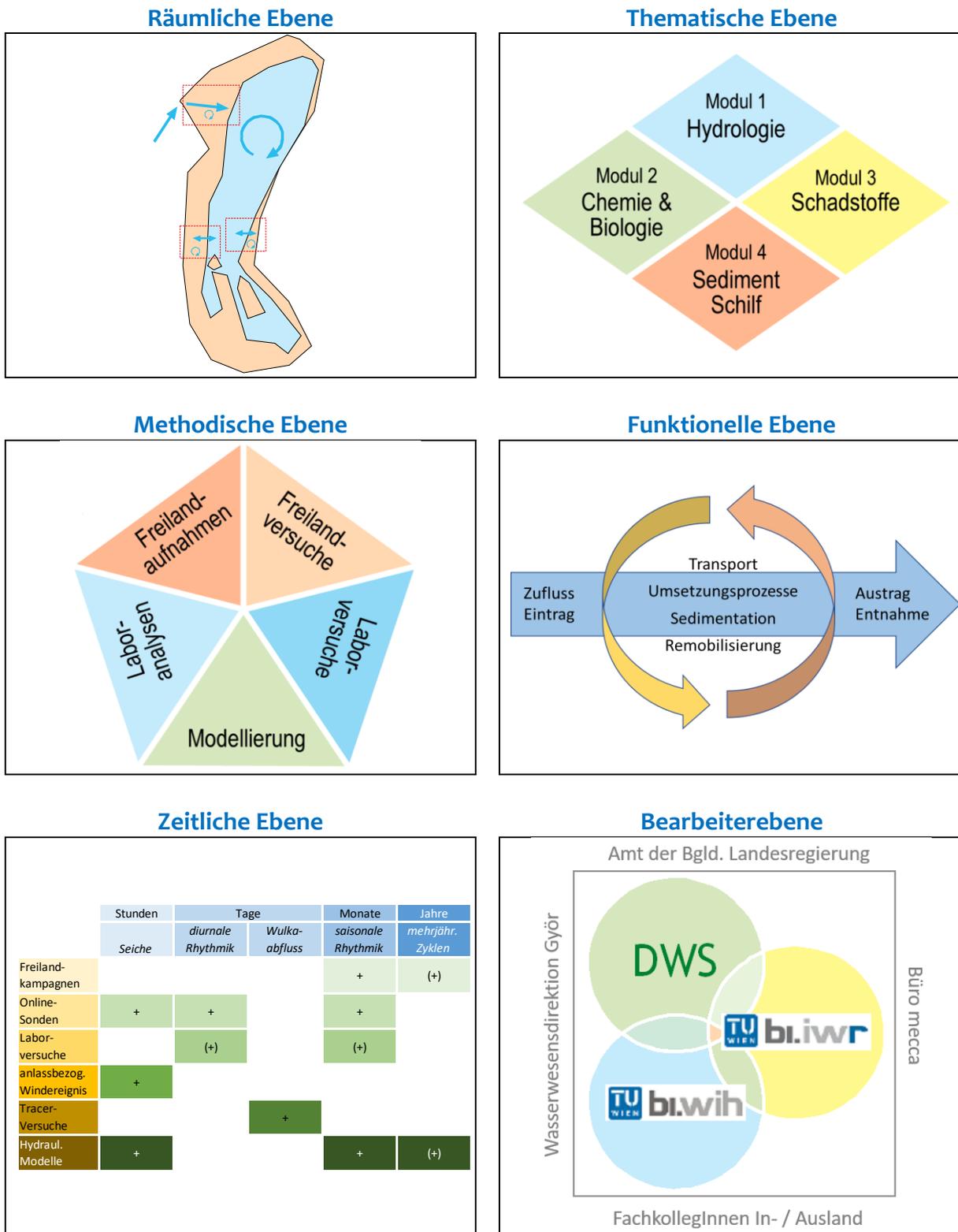


Abb. 2. Herangehensweise an die Arbeiten im Projekt REBEN auf unterschiedlichen Ebenen.

Figure 2. Approaches to the work of the project REBEN on different levels.

1.3 Bewertungsmaßstab

Evaluation benchmark

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 leiten die nationalen Synthesen somit zu den wasserwirtschaftlichen Empfehlungen über, die im Arbeitspaket T2 (Managementplan) ausformuliert werden sollen.

Hier kommt naturgemäß dem Bewertungsmaßstab große Bedeutung zu. 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 nationalen Synthese ist es dabei, ausgehend von Erkenntnissen auf lokaler Ebene (d.h. in den drei Testgebieten) 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).

Table 1. Important goals for water management according to the “Strategy study Lake Neusiedl” (Wolfram et al. 2014).

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

1.4 Struktur des Synthese-Berichts

Structure of the synthesis

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

- Kap. 2 Stofftransport, Austauschprozesse und Frachten
 - Kap. 2.1 Einträge aus dem Einzugsgebiet (Wulka)
 - Kap. 2.2 Räumliche Muster und Gradienten
 - Kap. 2.3 Austauschprozesse
 - Kap. 2.4 Frachten von Fest-, Nähr- und Schadstoffen
 - Kap. 2.5 Langfristige Entwicklungen
- Kap. 3 Szenarien unter anderen Rahmenbedingungen
- Kap. 4 Bewertung
- Kap. 5 Wissensdefizite und offene Fragen
- Kap. 6 Literatur

2 STOFFTRANSPORT, AUSTAUSCHPROZESSE UND FRACHTEN

MATTER TRANSPORT, PROCESSES AND LOADS

2.1 Einträge aus dem Einzugsgebiet (Wulka)

Inputs from the catchment area (Wulka)

■ 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, wobei der Beitrag des Ablaufs der Kläranlagen sonstige siedlungswasserwirtschaftliche Emissionen deutlich übersteigt (Gabriel *et al.* 2011).

Auch Spuren- bzw. Schadstoffe werden sowohl über diffuse als auch punktförmige Einträge in die Wulka emittiert. Die Abb. 3 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 des gesamte Einzugsgebiet der Wulka inklusive Deposition auf die Seeoberfläche. Während bei den Perfluortensiden 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.

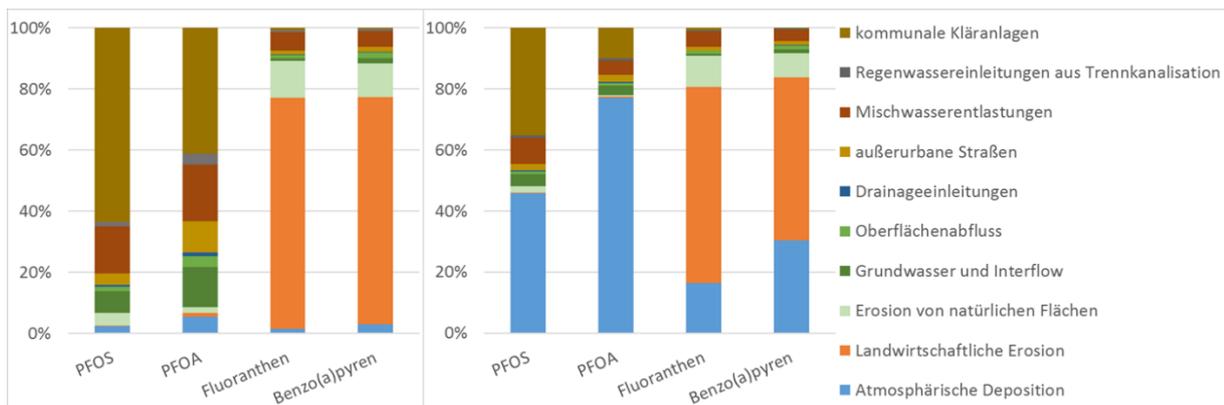


Abb. 3. Eintragspfade für ausgewählte Spurenstoffe in die Wulka (links) und in den See (rechts) (Zessner *et al.*, 2019).

Figure 3. Emission pathways in to river Wulka (left) and Lake Neusiedl (right) (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 (Abb. 4) (Wolfram *et al.* 2019).

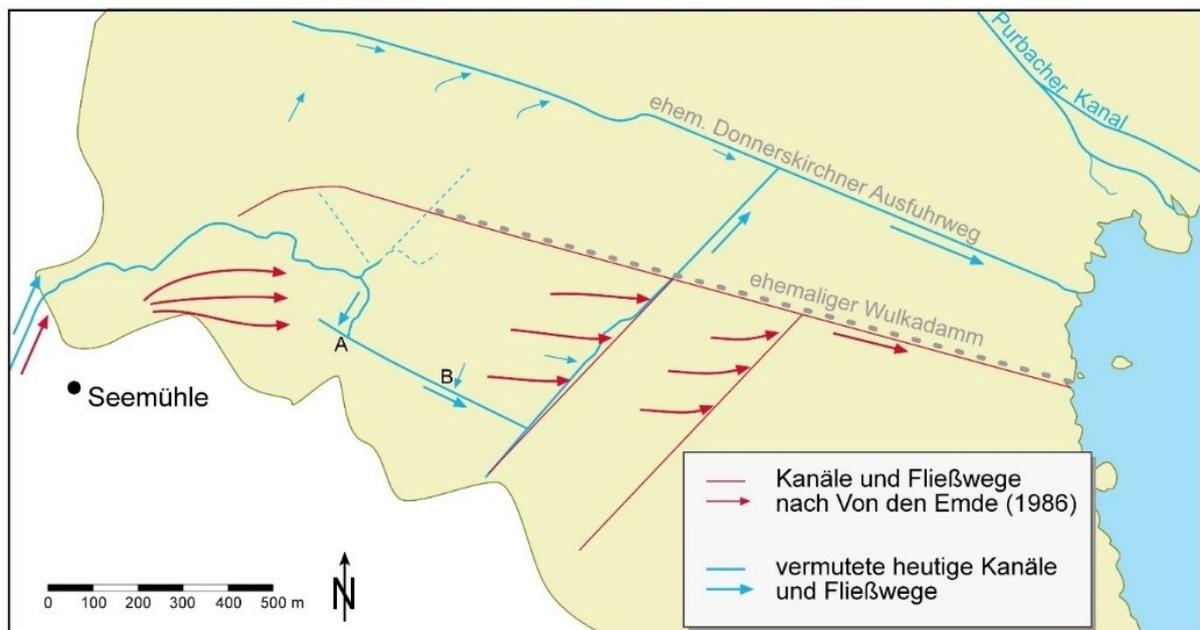


Abb. 4. Fließwege der Wulka durch den Schilfgürtel des Neusiedler Sees in den 1980er Jahren (nach Von der Emde et al. (1986)) und aktuell vermutete Fließwege.

Figure 4. Pathways of the river Wulka through the reed belt of Lake Neusiedl in the 1980s (after Von der Emde et al. (1986)) and currently assumed pathways.

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 Gesamtphosphor-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 gelösten Phosphor 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 Gesamtphosphor, 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.

2.2 Räumliche Muster und Gradienten

Spatial patterns and gradients

■ *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 Blänken 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.

■ 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 (in Teilbericht 2) lassen aber zumindest die Bandbreite in den Messungen der 1980er Jahre und den neueren, im Rahmen des GeNeSee-Projekts durchgeführten Aufnahmen erkennen (Abb. 5).

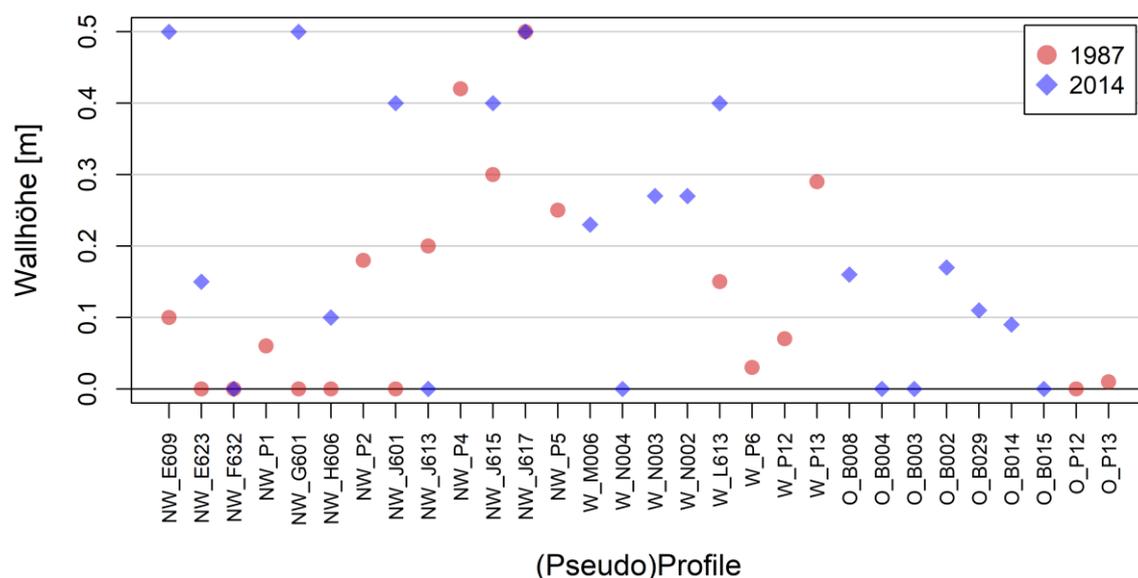


Abb. 5. Wallhöhen an mehreren Profilen und Pseudo-Profilen an der See-Schilfgürtel-Grenze (aus Kap. 3 in Teilbericht 2 „Schilfstruktur und Morphologie“).

Figure 5. Height of the sediment dam at several profiles and pseudo-profiles at the lake reed boundary (from chapter 3 in report 2 „Reed structure and morphology“).

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 mg L^{-1} und Alkalinitäten bis knapp 40 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 Sauerstoff-Konzentration).

■ 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 (Kap. 2.3), die schließlich die Grundlage für die Abschätzung von Frachten (Kap. 2.4) bilden.

■ Ökologische Gradienten

Planktongemeinschaften und Fischzönose sind innerhalb des Schilfgürtels durch deutliche, aber 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.

2.3 Austauschprozesse

Exchange process

■ Faktor Zeit

Die im vorangegangenen Kapitel und im Detail in den Teilberichten 3 bis 5 aufgezeigten hydrologischen und stofflichen Gradienten innerhalb des Schilfgürtels 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 Jahres- und Tagesrhythmik der Wassertemperatur (Abb. 6).

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.

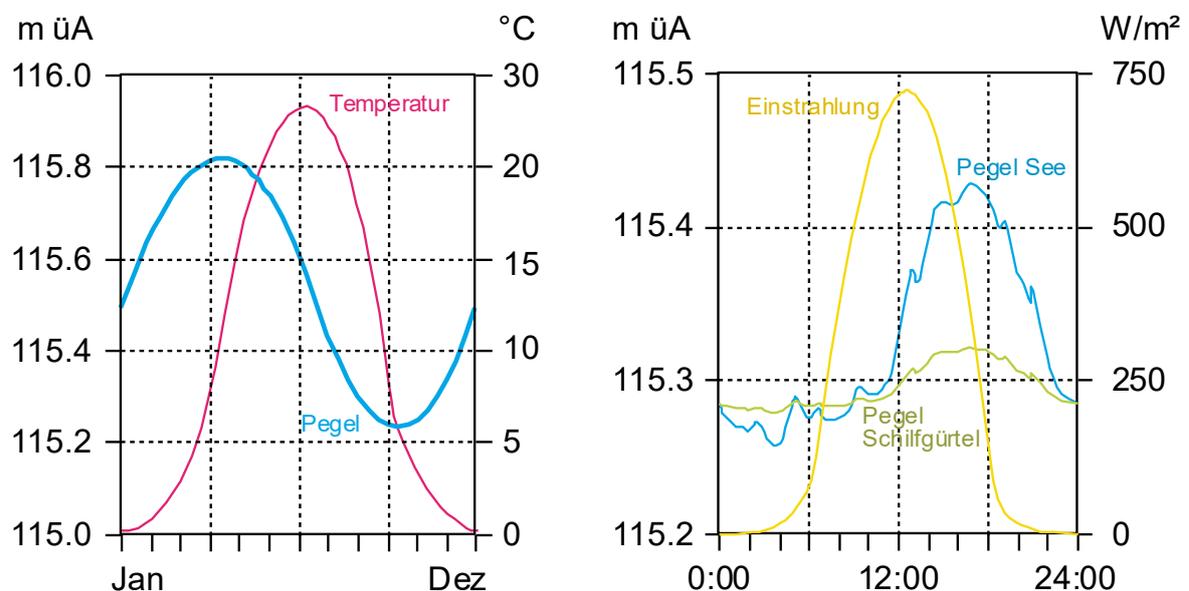


Abb. 6. Schematische Darstellung der prägenden Rhythmik am Neusiedler See. Links: saisonal mit Wasserstand und Temperatur, rechts: diurnal mit typischem Windereignis und entsprechender Seiche-Bewegung sowie Globalstrahlung.

Figure 6. Scheme of main rhythmicity at Lake Neusiedl. Left: seasonal with water level and temperature, right: diurnal with typical wind event and corresponding seiche movement, and global radiation.

■ 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 Einströmen 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 angetroffen. 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 Abb. 7) 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 Teilbericht 1 Hydrologie).

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 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. Abb. 7 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 Teilbericht 3) 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 (vgl. Abb. 7), 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 Teilbericht 3) 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 Teilbericht 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 Teilbericht 1).

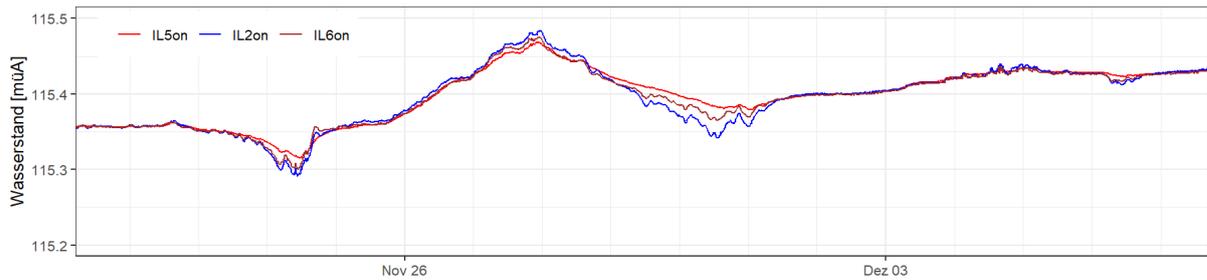


Abb. 7. Durch Wasserqualitätsmessstationen dokumentierte Wasserstandsschwankungen an drei Standorten im Schilfgürtel Höhe Illmitz zwischen 22.11.2018 und 07.12.2018. Die Station IL5on liegt in einer >14 ha großen, offenen Braunwasserfläche; 10 cm Aufhöhung entsprechen also einem Wassereintrag von >14.000 m³.

Figure 7. Water level fluctuations at three water quality stations in the reed belt of Illmitz between 22 Nov and 7 Dec 2018. Station IL5on lies in a large, open brown-water area with >14 ha; a rise of water level of 10 cm corresponds to a water inflow of >14,000 m³.

Die zuvor beschriebene Situation mit einem Wassertransport >14.000 m³ 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 m³ abgeschätzt (Seevolumen rd. 150 Mio m³).

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.

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.

2.4 Frachten von Fest-, Nähr- und Schadstoffen

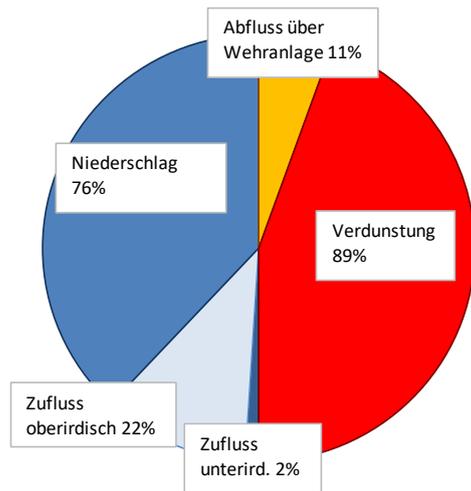
Loads of sediment, nutrients and pollutants

2.4.1 Wasserbilanz

Water balance

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 (Abb. 8 & Abb. 9, Tabelle 2).



Wasserbilanz 1965 - 2012, Mittelwerte in mm/a

| | |
|---------------------------|-----|
| Niederschlag | 574 |
| Zufluss gesamt | 180 |
| Summe + | 754 |
| Verdunstung | 660 |
| Ableitung über Wehranlage | 85 |
| Summe - | 745 |

Abb. 8. Wasserbilanz des Neusiedler Sees 1965–2012 (aus: Wolfram et al. (2014)).

Figure 8. Water balance of Lake Neusiedl 1965–2012 (from: Wolfram et al. (2014)).

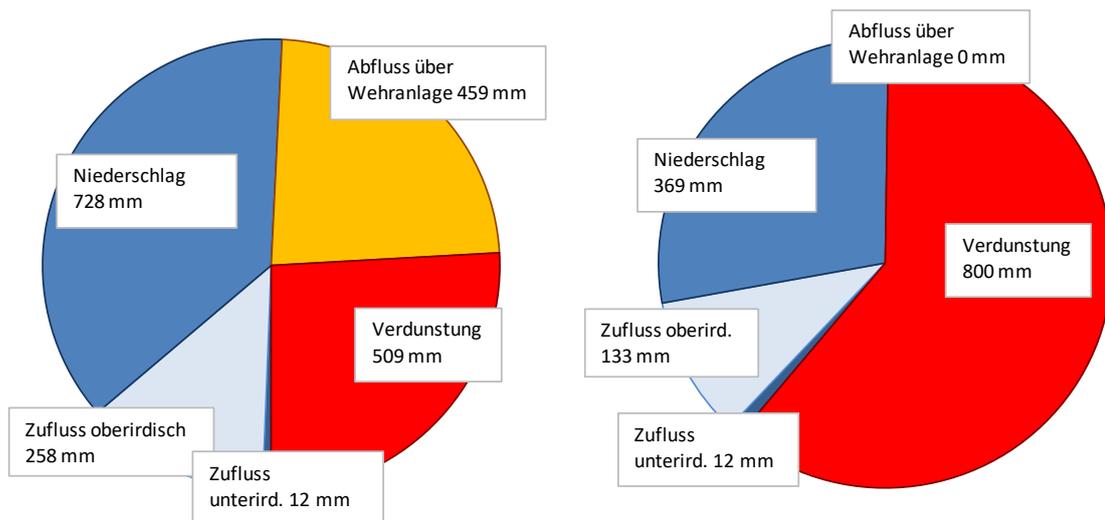


Abb. 9. Wasserbilanz des Neusiedler Sees in signifikanten Jahren. Links: 1996, rechts: 2003 (aus: Wolfram et al. (2014)).

Figure 9. Water balance of Lake Neusiedl in characteristic years. Left: 1996, right: 2003 (from: Wolfram et al. (2014)).

Tabelle 2. Wasserbilanzkomponenten für das Einzugsgebiet des Neusiedler Sees, abgeleitet aus Daten der Periode 2000–2012 (Quelle: Wolfram et al. (2014)).

Table 2. Water balance of Lake Neusiedl, derived from data in the period 2000–2012 (Source: Wolfram et al. (2014)).

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

* Annahme (assumption), # 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 Abb. 10. Es ist zu einer deutlichen Hebung des Seespiegels mit einer deutlich geringeren Schwankungsbreite gekommen.

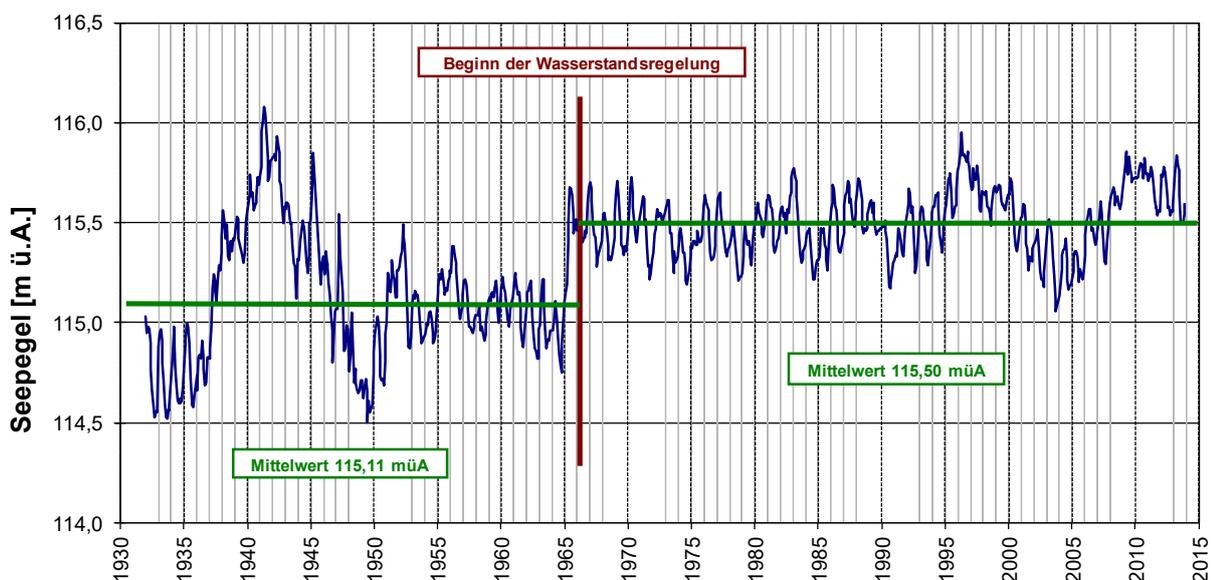


Abb. 10. Ganglinie des Seewasserpegels 1932–2013. Quelle: Amt der Bgld. Landesregierung, Referat Hydrographie.

Figure 10. Hydrograph of the lake water levels 1932–2013. Source: 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. Eines geht 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).*

2.4.2 Schwebstoffe

Suspended solids

Vorbemerkung

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 Frachtabeschätzungen 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.

■ Eintrag

Der Gesamt-Schwebstoffeintrag aus der **Wulka** in den Neusiedler See betrug in den letzten 20–30 Jahren (1992–2018) im **Mittel 3 890 t/a bei einer** Bandbreite von 740 – 24 230 t/a (vgl. Kap. 3.1 in Teilbericht 3 „Physikalisch-chemische Parameter und Schadstoffe“). Die hohe Variabilität zeigt sich nicht nur im Vergleich verschiedener Jahre, sondern auch auf Ebene der Tagesfrachten. Diese liegen zumeist im Bereich von 1–5 t/d, bei einem starken Hochwasserereignis und Schwebstoffkonzentrationen >1 000 mg L⁻¹ kann die

Schwebstofffracht der Wulka an einem einzigen Tag die Fracht eines gesamten – abflussarmen – Jahres übertreffen (vgl. Abb. 11).

Exemplarisch zeigt Abb. 12 den Verlauf der Schwebstoffkonzentration und der -frachten während eines starken Hochwassers ($>20 \text{ m}^3/\text{s}$) im Mai 2019. Die maximale Schwebstoffkonzentration bei Seehof (gemessen an der Wasserqualitätsmessstation WU4) lag bei über $3\,500 \text{ mg L}^{-1}$; innerhalb eines Tages wurden über 2 000 t Schwebstoffe in Richtung See (konkret: in den Schilfgürtel) transportiert. Leider liegen vom Austritt der Wulka an der äußeren Schilfkante zum offenen See keine Abflusswerte vor, doch zeigen bereits die Schwebstoffkonzentrationen der dortigen Wasserqualitätsmessstation WU1, dass bei diesem Ereignis nur ein Bruchteil der über die Wulka eingebrachten Feststoffe auch tatsächlich den offenen See erreichte. Selbst bei starken Hochwässern bleiben die Feststofffrachten aus dem Einzugsgebiet somit zum größten Teil im Schilfgürtel „hängen“. Sie erreichen den See in seiner Gesamtheit inkl. Schilfgürtel, nicht aber den freien See.

So offensichtlich die Differenz zwischen Eintrag in den Schilfgürtel und Austrag in den See bei hohen Durchflüssen und Frachten ist, so unsicher ist der Vergleich bei niedrigen Abflüssen. Aus den verfügbaren Schwebstoffmessungen kann aber geschlossen werden, dass auch bei Niederwasser der Wulka ein nennenswerter Anteil der Schwebstoffe im Schilfgürtel deponiert wird; allerdings ist dies nur ein sehr kleiner Anteil der Gesamtfracht. Nach Experteneinschätzung wird der Anteil der Feststofffracht der Wulka, die den freien See erreicht, mit rund 3% der Fracht auf Höhe von Seehof geschätzt.

Neben der Wulka sind noch **andere Eintragspfade** aus dem Einzugsgebiet in den See zu berücksichtigen. Der bedeutendste ist aller Wahrscheinlichkeit nach die äolische Fracht. Bei Messungen aus den 1980er Jahren wurden Staub-Konzentrationen in der Luft von durchschnittlich $47 \mu\text{g m}^{-3}$ ermittelt, was etwa um den Faktor 1000 über der Phosphor-Konzentration (55 ng m^{-3}) lag (Malissa *et al.* 1986). Der Phosphor-Eintrag aus der Luft als trockene Deposition wurde auf Grundlage der Messungen von Malissa *et al.* (1986) in der Stoffbilanz von Wolfram *et al.* (2012) im Zeitraum 1992–2009 mit rd. 3 t/a abgeschätzt. Akzeptiert man die Relation der Konzentrationen in der Luft auch für den Eintrag, so ergibt sich ein geschätzter Staub(=Feststoff-)Eintrag für den gesamten Neusiedler See von rd. 3 000 t/a.

Der Feststoff-Eintrag über sonstige Zubringer (Golser Kanal, Kroißbach) und aus Kläranlagen wird ebenfalls im Analogieschluss über die Phosphorbilanz abgeschätzt. Der Eintrag (in m^3/s) aus sonstigen Zubringern beträgt nach Wolfram *et al.* (2011) rund 17% der Fracht der Wulka, jener aus Kläranlagen (nach 2001, also nach den wesentlichen Umstellungen in der Abwasserreinigung im Neusiedler See-Einzugsgebiet) rd. 2% der Wulka-Gesamtfracht. Näherungsweise werden diese Anteile auch für die Feststoffbilanz der anderen Zubringer und der Kläranlagen abgeleitet, die Einträge in den Schilfgürtel

verursachen. Wie für die Wulka wird ein Rückhalt der Feststoffe von rund 97% angenommen.

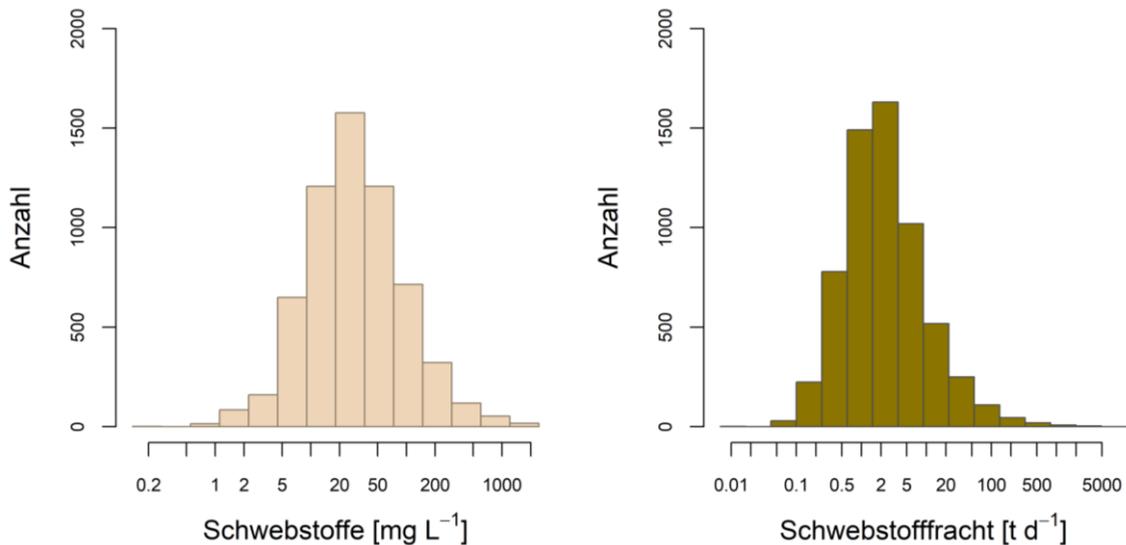


Abb. 11. Histogramm der Schwebstoff-Konzentration (links) und -Fracht (rechts) in der Wulka Höhe Schützen/Geb. im Zeitraum 1992–2018. Quelle: Amt der Bgld. Landesregierung, Abt. 5.

Figure 11. Histogram of suspended solid concentration (left) and load (right) in the river Wulka at Schützen/Geb. in the period 1992–2018. Source: Amt der Bgld. Landesregierung, Abt. 5.

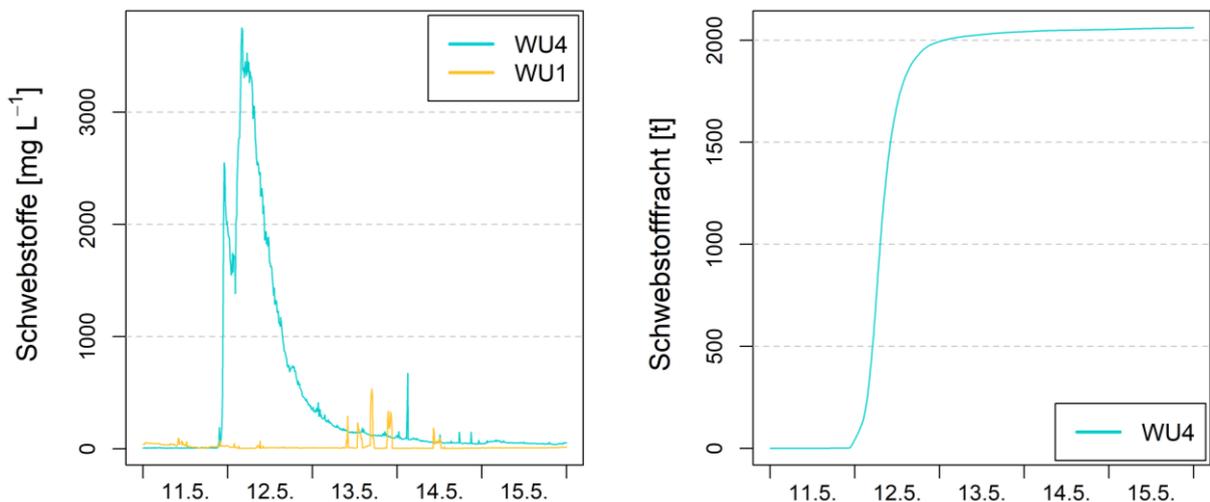


Abb. 12. Schwebstoffkonzentration (links) an den Wasserqualitätsmessstationen WU4 (Wulka Seehof) und WU1 (Wulka Einrinn an der Schilfkante zum offenen See) sowie kumulative Schwebstofffracht an der Stelle WU4 (rechts) während eines Hochwasserereignisses im Mai 2019 (Tagesmittel 12.05.2019: 11,1 m³/s).

Figure 12. Suspended solid concentration (left) at the water quality stations WU4 (river Wulka at Seehof) and WU1 (Wulka inflow at the reed edge to the open lake) and cumulative load of suspended solids at the site WU4 (right) during a flood event in May 2019 (daily average on 12th May 2019: 11.1 m³/s).

■ Sediment-Neubildung – Kalkschlamm

Wie aus früheren Studien bekannt, wird Sediment zu einem beträchtlichen Teil im See durch Fällungsprozesse neu gebildet. Diese Menge zu quantifizieren, ist sehr schwierig. Folgende Schätzung gibt einen Eindruck der Größenordnung der gebildeten Karbonate, wobei die Ableitung hier zur Vereinfachung auf Calcium beschränkt bleibt (Tabelle 3).

Tabelle 3. Abschätzung der Neubildung von Sedimenten in Form von Calcit (CaCO_3 ; als Trockenmasse). Berechnungen aus Wolfram et al. (2012).

Table 3. Estimation of newly formed sediments as calcite (CaCO_3 ; dry mass). Calculations from Wolfram et al. (2012).

| Sediment-Neubildung (Calcium) | |
|--|---------------------------|
| Calcium-Fracht Wulka (1993–2007) | 2 126 – 6 095 t/a |
| Calcium-Fracht sonst. Einträge (1993–2007) | 919 – 2 498 t/a |
| Calcium-Fracht Austrag (1993–2007) | 0 – 3 017 t/a |
| Verbleib im See (1993–2007) | rd. 3 000 – 5 800 t/a |
| Umrechnung auf CaCO_3 (Faktor 2,5) = Ausfällung als Kalkschlamm | |
| Jährliche Sediment-Neubildung als Calcium-Karbonat | 7 500 – 14 500 t/a |

Die Ableitung beruht auf der Differenz zwischen Calcium-Eintrag und -Austrag sowie dem Befund, dass der Calcium-Gehalt im Freiwasser *langfristig* näherungsweise gleich bleibt, d.h.: trotz deutlicher saisonaler Schwankungen und ungeachtet der Abhängigkeit vom Wasserstand (vgl. Wolfram et al. (2012)) besteht kein zu- oder abnehmender Trend der Calcium-Konzentration im See. Die Differenz der Frachten, also der Verbleib im See, kann daher als Sedimentation angenommen werden.

Neben Calcium ist auch Magnesium an der Sedimentbildung beteiligt (Krachler 2006; Preisinger 1979), allerdings ist für Magnesiumsalze eine höhere Löslichkeit gegeben. Das lässt sich u.a. an den deutlich höheren Mg-Konzentrationen im See im Vergleich zum Calcium erkennen, des Weiteren an der Aufkonzentration im See (Faktor *af* als Verhältnis der Konzentration im See zur Konzentration im Zufluss; vgl. dazu Diskussion in Kap. 5.3 in Teilbericht 3):

| | Ca^{2+} | Mg^{2+} |
|---|------------------|-------------------------|
| Eintrag über Wulka (Mittelwert Stelle WU1, n=13) | 98,0 | 43,5 mg L ⁻¹ |
| Offener See (Mittelwert schilfnaher Stelle IL1, n=13) | 16,5 | 125 mg L ⁻¹ |
| (Mittelwert schilfnaher Stelle MO1, n=13) | 17,6 | 128 mg L ⁻¹ |
| Faktor <i>af</i> (Aufkonzentration) | 0,17–0,18 | 2,89–2,95 |

Dennoch trägt auch Magnesium zu einem kleinen Teil zur Sedimentation der Karbonate bei. Wenn wir zusätzlich Silikate (als Fällungsprodukte) berücksichtigen, so ist die

Gesamtmenge der seeinternen (nicht-organischen) Sediment-Neubildung demnach etwas höher anzusetzen als in Tabelle 3 angegeben.

■ Organische Produktion (Schilf)

Die Abschätzung der Produktion von organischem Material und ihres Beitrags zur Sedimentbildung geht über die Zielsetzung des Projekts REBEN hinaus. Unbestritten ist ein Teil des Sediments jedoch organischen Ursprungs. Es ist anzunehmen, dass das nicht mineralisierte organische Material vor allem im anoxischen Sediment des Schilfgürtels akkumuliert.

Die folgenden Zahlen sollen eine Vorstellung der Größenordnung vermitteln:

Burian *et al.* (1986) geben die jährlich neue (Trocken-)Biomasse des Schilfs am Neusiedler See mit 9–12 t/ha für ungeschnittene und 10–22 t/ha für geschnittene Flächen an. Ausgehend von rd. 10 t/ha als jährliche Produktion errechnet sich eine Jahres-Gesamtproduktion von 180 000 t Trockenmasse. Wenn man die Ernteflächen mit 10% der österreichischen Schilffläche (100 km²) ansetzt, beträgt die Menge des jährlich entnommenen Schilfs rd. 10 000 t, was den Angaben für die 1980er Jahre entspricht¹. 170 000 t verbleiben demnach als jährliche Produktion im See, bilden über die Jahre Knick- und Altschilf und werden letztlich zerkleinert, abgebaut und mineralisiert. Je nachdem, wie hoch man den Anteil des nicht mineralisierten Schilfs annimmt, ergibt sich rechnerisch jene Menge, die langfristig zur Sedimentation und Verlandung des Schilfgürtels beiträgt. Bei 1% bzw. 5% nicht mineralisiertem Schilf wäre das eine Menge von 1 700 bzw. 8 500 t/a. Diese Werte sind jedoch spekulativ; es liegen dazu keine Daten vor. Zudem wäre zur Abschätzung der gesamten Produktion auch die unterirdisch gebildete Biomasse des Schilfs (und der Vollständigkeit halber auch jene der submersen Makrophyten sowie planktischer und benthischer Algen) hinzuzurechnen.

■ Austrag über den Einser-Kanal

Zum Austrag von Schwebstoffen über den Einser-Kanal liegen keine Berechnungen aus früheren Stoffbilanzen vor (Wolfram *et al.* 2007; Wolfram & Herzig 2013). Ausgehend vom mittleren Abfluss über den Einser-Kanal (1992–2009: ca. 20 Mio m³) und der mittleren Schwebstoff-Konzentration im offenen See (Mittelwert an den Messstellen IL1 und MO1: 80,6 mg L⁻¹, n=26, Projekt REBEN, siehe Teilbericht 3) kann die Feststofffracht, die den See über den Einser-Kanal im langjährigen Mittel verlässt, mit rd. 1 600 t/a abgeschätzt werden.

¹ Pannonhalmi (1984) gibt für den ungarischen Teil des Neusiedler Sees die Ende der 1970er / Anfang 1980er Jahre geerntete Schilfmenge mit durchschnittlich knapp 14 000 t/a an.

Wie bei den anderen Frachten ist die Bandbreite aber sehr groß und beträgt (über den Zeitraum 1992–2009) zwischen **0 t/a** (keine Ableitung) und **11 450 t/a** (Jahr 1996 mit massiven Ableitungen).

■ *Sediment-Entfernung durch Schlammabaggerungen*

Angaben zu den jährlichen Schlammabaggerungen in den Segelhäfen finden sich im Teilbericht 2 „Schilfstruktur und Morphologie“. Im Mittel werden rd. 20 000 m³ pro Jahr entnommen. Je nach Annahmen zur Sedimentbeschaffenheit (Wassergehalt, Sedimentdichte) entspricht dies rund 5 600 bis 8 100 t an Feststoffen, die in Sedimentationsbecken außerhalb des Sees zwischengelagert und letztlich dauerhaft aus dem See entfernt werden.

Neben den variablen Annahmen bestehen auch große Schwankungen zwischen den Jahren. Während die Entnahmen **in manchen Jahren vernachlässigbar gering** sind, erreichten sie in den letzten Jahren **Maximalwerte** von **16 600 t/a**.

■ *Sedimentation und Erosion im offenen See*

Verlagerungen von Sedimenten finden permanent im offenen See als Wechsel von Erosion und Sedimentation statt. In Zeiten niedrigen Wasserstands und in Bereichen mit dichten Beständen submerser Wasserpflanzen ist eine Verschiebung in Richtung Sedimentation anzunehmen, bei ausreichender Windangriffsfläche kann die Erosion überwiegen.

Die längerfristige Entwicklung ist – wie in Teilbericht 2 ausgeführt – komplex. So gibt es im Vergleich der Vermessungsdaten 1987/1996 (Csaplovics *et al.* (1997) versus 2014 (Univ. Bodenkultur 2016) einen einzigen Bereich mit positivem Vertikalgradienten (Höhenzuwachs, Sediment-Auflandung) im gesamten Seebecken im Bereich des offenen Sees. Er liegt bezeichnenderweise exakt in der Übergangszone diverser konträr wirkender Strömungssysteme (zirkular im Bereich Podersdorf-Hölle und in Seemitte auf der Höhe Oggau).

Für andere Bereiche, wie z.B. das Profil Mörbischer Schilfinsel – Seedamm Illmitz/Seedamm Biologische Station, kann für die letzten 20–30 Jahre ein signifikanter Abtrag (Erosion, Verfrachtung von Sediment) angenommen werden. Die Mischung aus teils gegensätzlich, teils gleichgerichtet wirkenden Inhomogenitäten infolge unterschiedlicher Mess-Ansätze und gewisser divergenter Trends *in situ* beeinträchtigt allerdings die Sicherheit konkreter Aussagen zur Sedimentdynamik. Das gilt umso mehr für Verlagerungen innerhalb des Schilfgürtels, für den seit Ende der 1980er Jahre keine flächendeckenden Aussagen zu den Höhenverhältnissen möglich sind.

■ Verfrachtungen aus dem offenen See in den Schilfgürtel

Im Projekt REBEN standen der Austausch zwischen offenem See und Schilfgürtel und die damit verbundenen Sediment-Verfrachtungen im Vordergrund. Beim Windereignis im Herbst 2019 wurde für den Kanal nördlich des Stationskanals (Biologische Station Illmitz) im Laufe einer windbedingten Seiche-Bewegung ein Netto-Schwebstoffeintrag von 195 kg berechnet. Aus den Daten der Wasserqualitätsmessstationen in einem Kanal bei Mörbisch wurde ein vergleichbar hoher Wert abgeschätzt, nämlich – als Mittelwert der täglichen Frachten im September & Oktober 2019 – rd. 180 kg. Unter Berücksichtigung der höheren Frachten im Frühjahr dieses Jahres (stärkere Winde, höherer Wasserstand) kann der Gesamt-Netto-Eintrag über den **Kanal bei Mörbisch** mit **rd. 330 t/a** abgeschätzt werden.

Die **Hochrechnung** auf den **gesamten See** ist naturgemäß mit sehr großen Unsicherheiten verbunden. Sie fußt auf den Erfahrungen der detaillierten Betrachtung in den Kanälen Höhe Mörbisch und Illmitz sowie der hydraulischen Modellierung für das gesamte Testgebiet von Mörbisch und Illmitz. Zur Abschätzung wurden zwei Berechnungsansätze gewählt:

Variante a) Hochrechnung anhand des digitalen Geländemodells (DGM)

- Fläche (Blänken) im inneren Schilfgürtel, die dem im Detail analysierten Kanal bei Mörbisch „zugewiesen“ werden kann: 25 ha
- Summe der offenen Wasserflächen im Schilfgürtel (berechnet anhand des von Elmar Csaplovics erstellten und zur Verfügung gestellten Schilf-Wasser-Layers; nur Österreich!): 11,7 km² (47x so groß wie die Detailfläche bei Mörbisch)
- Anteil der über Kanäle an den See angebundenen offenen Wasserflächen im Schilfgürtel (Schätzwert nach Analyse des DGM und Überprüfung anhand von Satelliten-Orthophotos / Google Earth): 49% (570 ha gut angebunden, 600 ha nicht angebunden)
- Hochrechnung der Ergebnisse des Mörbischer Kanals auf den gesamten Schilfgürtel in Österreich (Faktor 23,5): 7 755 t/a
- Schätzwert für zusätzliche Fracht in Ungarn (30% der Fracht in Österreich): 2 327 t
- Gesamtfracht: **10 082 t**

Variante b) Schätzwerte nach expert judgement basierend auf der Analyse von Satelliten-Aufnahmen / Google Earth unter Berücksichtigung von Schilfstruktur und Anzahl/Form der Kanäle)

- Schilfgürtel Bereich Mörbisch bis Staatsgrenze (10x Kanal Mörbisch): 3 300 t/a
- Schilfgürtel Bereich Rust: 1 000 t/a
- Schilfgürtel Bereich Oggau: 500 t/a
- Schilfgürtel Bereich Donnerskirchen (Wulka-Mündung): 0 t/a
- Schilfgürtel Bereich Purbach (nördl. Wulka-Kanal): 100 t/a
- Schilfgürtel Bereich Breitenbrunn: 100 t/a
- Schilfgürtel Bereich Winden bis Weiden: 150 t/a
- Schilfgürtel Bereich Illmitz bis Seebad: 1 000 t/a

- Schilfgürtel Bereich Illmitz Seebad bis Staatsgrenze: 100 t/a
 - Schilfgürtel Ungarn: 3 000 t/a
- Summe: **9 250 t/a**

Insgesamt beläuft die sich geschätzte Verlagerung von Feinsedimenten aus dem offenen See in den Schilfgürtel demnach je nach Abschätzung auf rund 9 250 bis 10 082 t/a. Diese Schätzung gilt für den gesamten See bei mittleren bis niedrigeren Wasserständen (wie sie während des Projekts REBEN vorherrschten) und für das derzeitige Netz an Kanälen. Zur Abschätzung unter geänderten Rahmenbedingungen (Kanäle, Wasserstand) siehe Kap. 3.

■ *Seeinterne Sediment-Verlagerungen durch Kanal-Ertüchtigungen*

Im Zuge der Ertüchtigung von Kanälen wird Sediment aus den Kanälen ausgebaggert und seitlich abgelagert, was im Laufe der Zeit zur Ausbildung von Dämmen entlang der Kanäle geführt hat. Diese Dämme werden mit jener neuen Ertüchtigung erhöht und verfestigt; ältere Dämme sind heute von Weiden und anderen Gehölzen bestockt (Abb. 13).

Die Abschätzung in Tabelle 4 beruht auf groben Annahmen (z.B. der Tiefe des entnommenen Sediments, Sedimentbeschaffenheit). Da auch die Bandbreite der Kanalerktüchtigungen zwischen verschiedenen Jahren sehr stark variiert (2,9–40,3 km, im Mittel 16,6 km) ist auch die Bandbreite der Schätzwerte für die Sedimententnahme mit 450 – 9 070 t/a sehr groß (Tabelle 4).

Die Baggerungen entlang der Kanäle entfernen das Sediment nicht dauerhaft aus dem See. Dennoch liegen die Dämme in der Regel über 116 m ü.A. und damit über dem Wasserspiegel. Das dort deponierte Sediment wird daher nicht mehr remobilisiert und dem Kreislauf zurückgeführt; es ist neuerlichen Verfrachtungen entzogen und kann ebenso wie die Saugbaggerungen in den Segelhäfen als dauerhafte Entfernung aus dem System gewertet werden.

Im Mittel liegt die Gesamtmenge der in den Kanälen ausgebaggerten Sedimente niedriger als jene, die durch Saugbaggerung aus Segelhäfen und Badebereichen entnommen wird. Die in Tabelle 4 angegebenen Zahlen beziehen sich allerdings nur auf den österreichischen Teil des Neusiedler Sees.



Abb. 13. Frisch ausgebaggertes Sediment (links) und Gehölze auf einem älteren Dammschnitt (rechts) entlang einem Kanal Höhe Purbach (02.04.2019).

Figure 13. Recently dredged sediment (left) and trees on an older section of a dam (right) along a channel near Purbach (2nd April 2019).

Tabelle 4. Abschätzung der aus Kanälen jährlich ausgebaggerten (und seitlich entlang der Kanäle) Sedimente im österreichischen Teil des Schilfgürtels (Trockenmasse).

Table 4. Estimation of sediments, which are dredged annually (and deposited laterally along the channels) in the Austrian part of the reed belt (dry mass).

| | |
|--|------------------------|
| Kanalertüchtigungen | |
| Gesamtlänge der ertüchtigten Kanäle ¹⁾ | 2,9 – 40,3 km |
| Mittlere Breite der Kanäle | 5 m |
| Tiefe des ausgebaggerten Sediments (Schätzwert) | 10 cm |
| Wassergehalt 70–75%, Sedimentdichte 1,25–1,5 g/cm ³ | |
| Gesamtmenge der in Kanälen ausgebaggerten Sedimente | 450 – 9 070 t/a |

¹⁾ Durchschnitt über den Zeitraum 2004–2019: 16,6 km

■ **Überblick**

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 5 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.

Tabelle 5. 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.

Table 5. Estimation of sediment loads (t/a) from the catchment area to the lake, internal loads and output. Positive loads are highlighted in yellow, negative loads in blue.

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

¹⁾ rd. 3% Transport bis zum offenen See

²⁾ Aufteilung auf 140 km² offene See und 180 km² Schilfgürtel, davon 10 km² im Bereich der Wulka-Mündung

³⁾ als Austrag gewertet, da dauerhaft von künftigen Austauschprozessen ausgeschlossen

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.

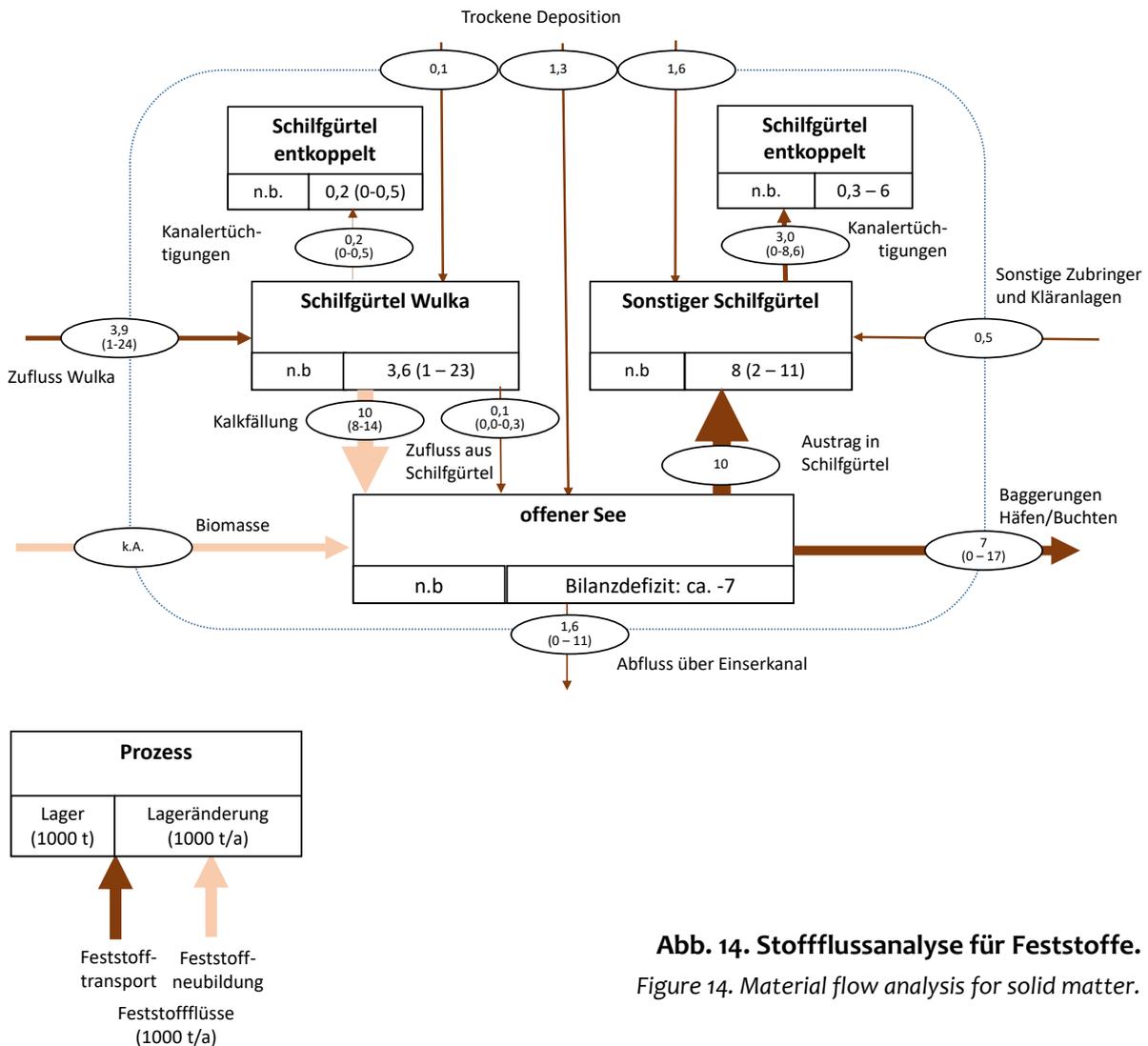
Die Zahlen in Tabelle 5 sind zur Visualisierung in Abb. 14 als Flussdiagramm dargestellt. Grundsätzlich ist hier erneut festzuhalten, dass die Abschätzungen keine ausgeglichene Bilanz im eigentlichen Sinn erlauben. Das war angesichts der zahlreichen Annahmen, Unschärfen und Unsicherheiten auch nicht zu erwarten. Die „Bilanzglieder“ sollen vielmehr einen Eindruck der Größenordnung vermitteln. Zu berücksichtigen ist insbesondere, dass manche Bilanzglieder seeweit 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 Südtel des Neusiedler Sees. Insgesamt aber sind Tendenzen ablesbar.

Eine frühere Abschätzung von Sedimentverfrachtungen liegt von Stalzer & Spatzierer (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. m³ (Csaplovics *et al.* 1997)² 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

² Aus dem Projekt GeNeSee liegt nur für den offenen See eine Angabe zum Schlammvolumen mit 54,7 Mio m³ vor (Univ. Bodenkultur, 2016).

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).



Für weiterführende Überlegungen zum Feststoffhaushalt und zur Frage der Verlandung des Neusiedler Sees bestehen vor allem zwei offene Fragen:

Die erste betrifft die Höhenverhältnisse im Schilfgürtel. Nachdem das Projekt GeNeSee praktisch nur für den freien See Aussagen treffen konnte, war es notwendig, anhand ergänzender Aufnahmen im Projekt REBEN zumindest für die drei Testgebiete näherungsweise ein DGM zu erstellen; dieses musste zusätzlich für die hydraulische Modellierung angepasst und stellenweise innerhalb der Modell-Software korrigiert werden. Die Frage

der längerfristigen Entwicklung des Schilfgürtels bleibt aber offen und sollte im Rahmen künftiger Forschungen am Neusiedler See vorrangig betrachtet werden.

Der zweite Punkt betrifft das *Schilf*. Die letzten umfangreichen Forschungen zum Wachstum der Schilfpflanze liegen bald 40 Jahre zurück (Burian *et al.* 1986) und waren vor allem auf die Produktion, teilweise auch auf die ökonomische Verwertung des Schilfrohrs ausgerichtet. In Hinblick auf die Verlandung des Schilfgürtels sollten neben der Produktion (anhand neuerer Methoden und unter den aktuellen Rahmenbedingungen) auch Aspekte des Abbaus und der Mineralisierung des organischen Materials untersucht werden – Fragen, die auch die Nährstoffdynamik berühren und damit zum nachfolgenden Kapitel überleiten.

2.4.3 Nährstoffe (Phosphor)

Nutrients (phosphorus)

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.

■ Eintrag

Der Gesamteintrag von Phosphor in den Neusiedler See wurde 1982/83 mit rd. 80 t (nur für den österreichischen Teil) berechnet (Malissa *et al.* 1986; Stalzer *et al.* 1986). Anfang der 1990er Jahre betragen die externen Frachten (*inkl.* Einzugsgebiet des Kroisbaches in Ungarn) weniger als 30 t pro Jahr (sieht man von einem Spitzenwert im Jahr 1996 ab). In den trockenen Jahren nach 2000 schließlich verringerte sich die externe Jahresfracht sogar auf 10–13 t, um danach im Zuge erhöhter Wasserführung der Wulka und entsprechend erhöhten Frachten über diesen Eintragspfad wieder zuzunehmen.

Im Projekt REBEN liegen detaillierte Messungen verschiedener Phosphorfraktionen von 13 Terminen vor (nachfolgend als Mittelwert \pm 95% Konfidenzintervall angegeben). Sie stammen aus der Wulka bei Seehof (WU4), aus dem Schilfgürtel (WU2) sowie an der Kante zum offenen See nach Durchströmen des Schilfgürtels (WU1):

| | WU4 | WU2 | WU1 |
|--|--------------|--------------|--------------|
| Gelöster reaktiver Phosphor [$\mu\text{g L}^{-1}$] | 88 \pm 17 | 114 \pm 23 | 110 \pm 28 |
| Gelöster Phosphor [$\mu\text{g L}^{-1}$] | 114 \pm 18 | 138 \pm 23 | 134 \pm 31 |
| Partikulärer Phosphor [$\mu\text{g L}^{-1}$] | 49 \pm 23 | 31 \pm 12 | 17 \pm 7 |
| Gesamtphosphor [$\mu\text{g L}^{-1}$] | 164 \pm 38 | 169 \pm 31 | 151 \pm 33 |

Der Anteil des gelösten Phosphors an der Gesamtphosphor-Konzentration betrug auf Basis dieser Messungen an der Stelle WU4 70%.

Aus den Daten der h2o-Datenbank errechnen sich für die Stelle Seehof folgende Konzentrationen und Relationen (Mittelwerte \pm 95%-Konfidenzintervall, meist 12 Termine/Jahr):

| | 1991–2020 | | 2010–2020 | |
|--|-------------|------|-------------|------|
| Gelöster reaktiver Phosphor [$\mu\text{g L}^{-1}$] | 119 \pm 1 | 54% | 68 \pm 1 | 47% |
| Gelöster Phosphor [$\mu\text{g L}^{-1}$] | 169 \pm 3 | 76% | 101 \pm 1 | 71% |
| Gesamtphosphor [$\mu\text{g L}^{-1}$] | 222 \pm 7 | 100% | 143 \pm 1 | 100% |

Die Zahlen legen eine leichte Abnahme des partikulären Anteils am Gesamtphosphor in der Wulka nahe, repräsentieren allerdings im Wesentlichen einen Niederwasserabfluss. Wie die Messungen mit den Wasserqualitätsmessstationen (Online-Sonden) zeigen und aus früheren Untersuchungen bekannt ist, tragen aber vor allem Hochwasserereignisse zur Gesamtphosphorfracht bei. Der größte Teil wird dabei in partikulärer Form in den Schilfgürtel transportiert.

Wie im Teilbericht 3 ausführlich dargelegt, verändert sich die Gesamtphosphor-Konzentration (jedenfalls bei Nieder- und Mittelwasser, vermutlich aber auch bei Hochwasser) beim Durchtritt durch den Schilfgürtel nicht signifikant, wohingegen die partikuläre Fraktion signifikant ab- und die gelöste Fraktion signifikant zunimmt (statistischer Test auf Ebene der einzelnen Termine, d.h. mit verbundenen Stichproben).

Die angeführten mittleren Konzentrationen wurden bei Nieder- bis Mittelwasser der Wulka erhoben. Bezieht man diese auf ein Niederwasserjahr der Wulka (z.B. 2003 mit knapp 22 Mio. m^3) so kann näherungsweise die theoretische Jahresfracht abgeschätzt werden. Sie liegt für das Jahr 2003 bei 3,6 t/a, was fast exakt dem Wert entspricht, der für dieses Jahr in der detaillierten Stoffbilanz von Wolfram *et al.* (2012) ermittelt wurde (3,5 t/a). Anhand der Daten aus dem Projekt REBEN kann dieser Wert aber näherungsweise auf die beiden Hauptfraktionen (partikulär PP, gelöst DP) aufgeteilt und zudem die Fracht nicht nur für die Wulka vor Eintritt in den Schilfgürtel (vor SG), sondern auch an der Grenze zum offenen See (nach SG) angegeben werden:

| | vor SG | nach SG | Differenz |
|----------|--------|---------|-----------|
| TP [t/a] | 3,6 | 3,3 | -0,3 |
| PP [t/a] | 1,1 | 0,4 | -0,7 |
| DP [t/a] | 2,5 | 2,9 | +0,4 |

Die Gesamtfracht von 3,6 t/a für dieses Jahr liegt an der unteren Grenze der Bandbreite, die in der detaillierten Stoffbilanz (allerdings nur für Gesamtphosphor) im Zeitraum 1992–

2009 berechnet wurde (3,5–39,8 t/a, MW 13,6 t/a). Dies unterstreicht erneut die Bedeutung starker Hochwässer für die Nährstoffbilanz.

Während die Daten aus REBEN eine Vorstellung der Jahresfrachten in *abflussarmen* Jahren ohne nennenswerte Hochwässer geben und zudem eine Betrachtung unterschiedlicher *Fraktionen* (partikulär vs. gelöst) sowie *vor und nach Durchtritt* des Schilfgürtels erlauben, bieten die Berechnungen zur *detaillierten Stoffbilanz* (von Wolfram *et al.* (2012), ergänzt um weitere Jahre) einen Einblick in die Verhältnisse inkl. erhöhter Frachten bei *Hochwasser*, wenn auch *nur für Gesamtphosphor* sowie die *Wulka vor dem Eintritt* in den Schilfgürtel. Die beiden Ansätze können aber – wie in Tabelle 6 zusammengefasst – kombiniert werden, indem die partikuläre Phosphorfracht näherungsweise als Differenz zwischen der Gesamtfracht (aus der detaillierten Stoffbilanz) und der Gelöstphosphor-Fracht (als Produkt der Wasserfracht und einer mittleren DP-Konzentration von $100 \mu\text{g L}^{-1}$ abgeschätzt wurde.

Konkret wurden folgende Anpassungen vorgenommen und Annahmen getroffen:

- Die Gesamtphosphorfracht variiert gemäß Stoffbilanz im Zeitraum 1992–2009 zwischen 4 und 40 t/a. (Eine aktuellere Stoffbilanz liegt nicht vor. Die Frachten dürften heute aber ähnlich hoch sein wie vor rd. 10 Jahren; zumindest lassen die Messungen der Gesamtphosphor-Konzentrationen in der Wulka Höhe Seehof gemäß den Erhebungen der Gewässerzustandsüberwachung keinen zu- oder abnehmenden Trend erkennen [h2o-Datenbank, unpubl. Auswertungen]. Die Gelöstphosphor-Konzentrationen dürften hingegen etwas zurückgegangen sein.)
- Nach dem zuvor beschriebenen Näherungsansatz beträgt die Aufteilung der Phosphorfracht *partikulär : gelöst* im Niederwasserjahr ca. 1 : 1, im Hochwasserjahr etwa 5 : 1 und im Mittel etwa 3 : 1.
- Der Anteil der im Schilfgürtel zurückgehaltenen partikulären Fracht ist unabhängig vom Abfluss der Wulka sehr hoch (vgl. Abb. 12). Den offenen See dürften <1 t/a erreichen. Analog den Feststoffen wird ein Rückhalt von 97% angenommen.
- Im Gegensatz dazu dürften hohe Gelöstphosphor-Frachten der Wulka (bei Hochwasser) aufgrund der verkürzten Zeit, die die Wulka bei Hochwasser für die Durchströmung des Schilfgürtels benötigt, zum Gutteil auch in den offenen See gelangen.
- Die oben dargelegte Aufhöhung des gelösten Phosphors dürfte in feuchten Jahren und bei hohen Durchflüssen nicht wesentlich höher sein als in einem Niederwasserjahr. Die Daten lassen auch keine merklichen saisonalen Schwankungen erkennen (im Gegensatz zu den 1980er Jahren). Die Aufhöhung wird mit rd. 1–7 t/a geschätzt.

■ *Austrag über den Einser-Kanal; Entnahmen durch Baggerungen und Kanal-Ertüchtigungen*

Einfacher als die Eintragssituation lässt sich der Austrag über den Einser-Kanal (direkt aus der Stoffbilanz übernommen) sowie die Entnahme durch Baggerungen und Kanalertüchtigungen abschätzen. Für letztere wurden die Feststoffentnahmen gemäß Tabelle 5 und die Phosphorgehalte aus den Sedimentanalysen (Teilbericht 3) herangezogen.

■ *Verfrachtungen aus dem offenen See in den Schilfgürtel*

Im Rahmen der Stoffbilanz wurde von Wolfram *et al.* (2012) die Netto-Deposition von Phosphor im Sediment des Neusiedler Sees rechnerisch abgeleitet. Sie liegt im Zeitraum 1992–2009 im Mittel bei 24 t/a, mit einer beträchtlichen Variation zwischen Hoch- und Niederwasserjahren (6 – 53 t/a). Die Netto-Deposition wurde aus den monatlichen Bilanzabweichungen (Ein- und Austräge, Änderungen im Ist-Bestand im See) berechnet. Monate mit Bilanzüberschüssen wurden als Zeiten der Netto-Sedimentation, solche mit Bilanzdefizit als Zeiten der Netto-Rücklösung bezeichnet. Die Sedimentation kann überwiegend als Austrag aus dem offenen See in den Schilfgürtel angesehen werden; der auffällige saisonale Wechsel von Sedimentation und Rücklösung konnte mit dem Wechsel des Wasserstands und damit verbundenen Prozessen erklärt werden.

Hier ist anzumerken, dass natürlich in Monaten mit überwiegender Sedimentation auch ein Austrag aus dem Schilfgürtel in den offenen See erfolgt und ebenso umgekehrt in Monaten mit Netto-Austrag nicht nur Rücklösungsprozesse, sondern auch Sedimentation erfolgt. Die monatlichen Frachten kennzeichnen nur den jeweils überwiegenden Prozess.

In der zusammenfassenden Tabelle 6 wurden die seeinternen Verfrachtungen von Phosphor über zwei Wege abgeschätzt:

(1) Aus der *Stoffbilanz* wurde eine Netto-Deposition von durchschnittlich 24 t/a errechnet. Wie oben ausgeführt, verbleibt ein Teil davon bereits im Schilfgürtel Höhe Wulka (3 t/a), ein Teil wird über Schlammabaggerungen entnommen (ebenfalls 3 t/a); diese Entnahme war in der Stoffbilanz von Wolfram *et al.* (2012) noch nicht berücksichtigt worden. Es verbleibt eine Fracht von **18 t/a**, die aus dem offenen See in den Schilfgürtel (excl. Bereich Wulka-Mündung) verfrachtet wird.

(2) Bei Mörbisch wurde in einem Schilfkanal anhand der *Wasserqualitätsmessstationen* (Online-Sonden) ein Schwebstoffeintrag von 550 t/a und ein Austrag von 220 t/a, somit ein Saldo von 330 t errechnet. Hochgerechnet auf den gesamten See entspricht dies rd. 12 925 t/a Eintrag, 5 170 t/a Austrag und 7 555 t/a als Saldo oder Netto-Eintrag. Dem steht eine Wasserfracht im Mörbischer Kanal in der Höhe von 3,135 Mio m³/a als Eintrag und 2,852 Mio m³/a als Austrag (Saldo 0,284 Mio m³) gegenüber. Mit dem gleichen Faktor

hochgerechnet ergibt dies eine jährliche Wasserfracht von 100 Mio m³ als Eintrag, 97 Mio m³ als Austrag und 10 Mio m³ als Jahressaldo. Aus dem Produkt der Wasserfracht mit der Partikulärphosphor-Konzentration im offenen See (Mittelwert der Messstellen IL1 und MO1, 66 µg L⁻¹, n=26) als Eintrag und mit der Gelöstphosphor-Konzentration im Schilfgürtel (Mittelwert der Messstellen IL2–5, MO2–4, 15 µg L⁻¹, n=91) als Austrag errechnen sich jährliche Frachten von 7 t/a Eintrag und 1 t/a als Austrag. Vermutlich muss hier der Eintrag höher angesetzt werden, da die Probenahmen und Messungen mehrheitlich an ruhigen bis mäßig windigen Tage durchgeführt wurden. Starke Windereignisse mit entsprechend hohem Eintrag an Schwebstoffen und Phosphor in den Schilfgürtel sind hingegen sicherlich unterrepräsentiert. Geht man von einem bis zu 2mal so hohen Eintrag aus (was bei Spitzen mit mehrfach höherer P-Konzentration im offenen See jedenfalls realistisch erscheint), so errechnet sich ein Eintrag von 7–14 t/a (überwiegend partikulär), was bei dem angegebenen Austrag von 1 t/a in überwiegend gelöster Form einen Netto-Eintrag von **6–13 t/a** ergibt. Diese Werte liegen noch in der Bandbreite der aus der Stoffbilanz abgeschätzten Phosphor-Deposition im Schilfgürtel.

Tabelle 6 fasst die Phosphorfrachten tabellarisch zusammen, wie für die Schwebstoffe bietet zudem Abb. 15 eine Visualisierung als Flow-Chart. Die wichtigsten Erkenntnisse aus der Frachtabschätzung sind:

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 Einser-Kanal der einzige mögliche Austragspfad aus dem gesamten See.

Tabelle 6. 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.

Table 6. Estimation of phosphorus loads (t/a) from the catchment area to the lake, internal loads and output. Positive loads are highlighted in yellow, negative loads in blue.

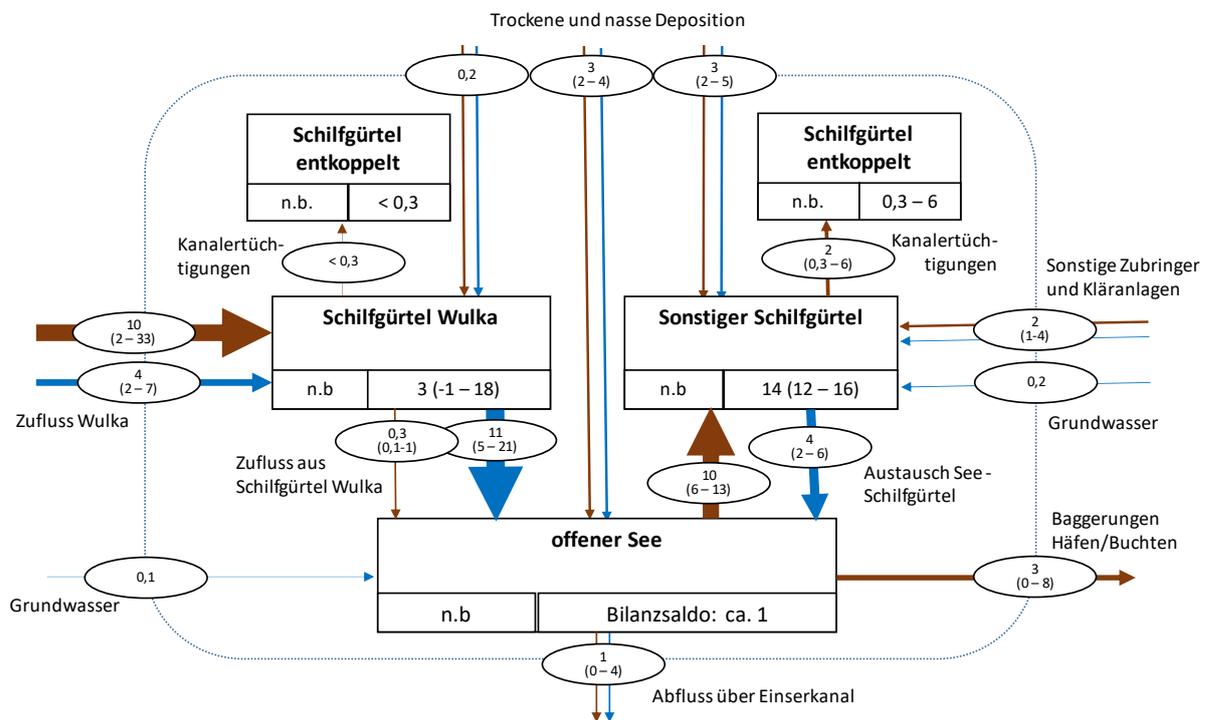
| Eintrag/Austrag/Transport | Gesamt | Schilfgürtel Wulka | Offener See | Sonstiger Schilfgürtel |
|-------------------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|---------------------------|
| Eintrag | | | | |
| Wulka inkl. HW (1992–2009) | 14 (4 – 40) | 3 (-1 – 18) | 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 |
| Austrag | | | | |
| 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. |
| Seeinterne Verlagerungen | | | | |
| 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.

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.

Es ist denkbar, dass das Ausmaß der Nährstoff-Remobilisierung, d.h. die Höhe der Gelöstphosphor-Fracht aus dem Schilfgürtel in den offenen See, durch mechanische Störungen vergrößert wird, beispielsweise im Zuge des Schilfschnitts, bei der Ertüchtigung von Kanälen oder durch Schlammabgrabbungen in den Segelhäfen und Badebereichen. Wie sehr diese Maßnahmen zu einer erhöhten Nährstoff-Verfügbarkeit im Freiwasser des Neusiedler Sees führen, kann derzeit nicht abgeschätzt werden.



Legende

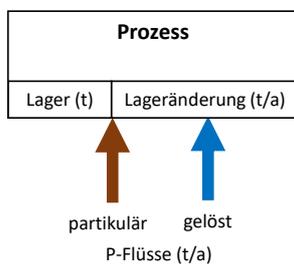


Abb. 15. Stoffflussanalyse für Phosphor.
 Figure 15. Material flow analysis for phosphorus.

2.4.4 Schadstoffe

Pollutants

■ Konzentrationsgradienten

Während die Belastung des Sees mit Nährstoffen oder Feststoffen schon seit langem ein wichtiger Untersuchungsgegenstand ist und damit ein hoher Wissenstand gegeben ist (z.B. Stalzer *et al.* (1986), Wolfram & Herzig (2013), Wolfram *et al.* (2019)), der im Zuge des REBEN-Projektes bis hin zu ersten Stoffbilanzen für Feststoffe und Phosphor unter Berücksichtigung der Austauschprozesse mit dem Schilfgürtel weiter entwickelt wurde, wurde die Belastung des Neusiedler Sees mit Schadstoffen/Spurenstoffen bisher erst wenig untersucht (Wolfram *et al.* 2014). Die Untersuchungen zu den Schadstoffen im Zuge des aktuellen Projektes können daher auf viel weniger Vorwissen aufbauen und betreten in vielen Bereichen Neuland.

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, Fluoranthen, 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 Zufluss zum See in der Wulka nach dem Durchtritt durch den Schilfgürtel, 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. In Abb. 16 ist diese Konzentrationsentwicklung beispielhaft für einige Stoffe dargestellt. Ausgehend von dieser Darstellung sollen mögliche Verhaltensmuster diskutiert werden. Die Erkenntnisse aus den Laborversuchen zu Adsorption und Mobilisierung (Teilbericht 6 „Laborversuche“) helfen bei einer besseren Einordnung der unterschiedlichen Befunde.

Aufgrund der Vielzahl der untersuchten Stoffe, wird in Abb. 16 nur eine Auswahl dargestellt. In dieser Auswahl sind zum einen jene Stoffe enthalten, 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 im Kapitel 5 des Teilbericht 3 „Physikalisch-chemische Parameter und Schadstoffe“ 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.

Alle weiteren in REBEN untersuchten, aber in Abb. 18 nicht dargestellten Stoffe, werden Gruppen mit ähnlichem Umweltverhalten, wie die dargestellten Stoffe zugeordnet. Stoffnamen, die bei dieser qualitativen Gruppenzuordnung in Klammer dargestellt sind, weisen auf einen uneindeutigen Befund und eine erhöhte Unsicherheit der Zuordnung hin. Eine umfangreiche Darstellung der Messdaten des REBEN-Projektes ist in Kap. 5 des Teilbericht 3 „Physikalisch-chemische Parameter und Schadstoffe“ enthalten.

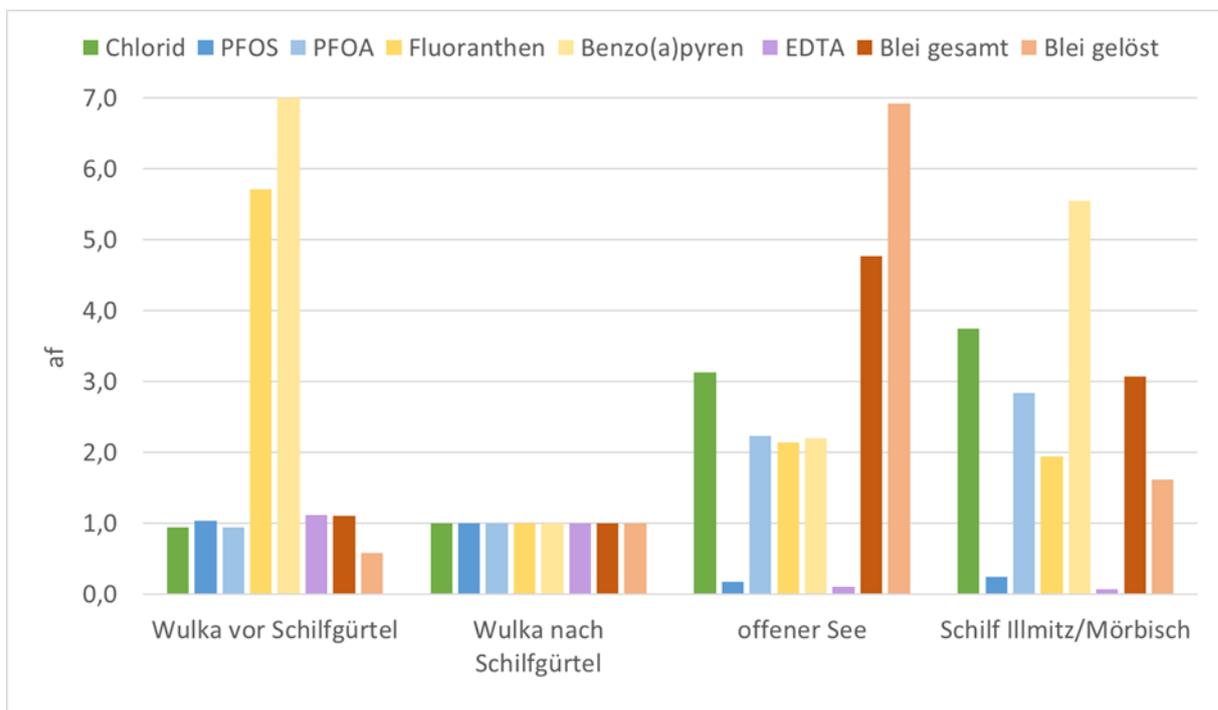


Abb. 16. Anreicherungs- bzw. Abreicherungsfaktor ($af = C_n/C_o$) für ausgewählte Parameter im Wulka-See-Schilfgürtel-Kontinuum. C_n steht für die Konzentration in der jeweiligen Wasserphase und für C_o wurde die Konzentration im Zufluss über die Wulka nach dem Schilfgürtel in den offenen See gewählt.

Figure 16. Enrichment or decrease factor ($af = C_n/C_o$) for selected substances. C_n means concentrations in each water phase and for C_o the concentrations in the inflow from the Wulka reed belt to the open lake was chosen.

Chlorid wird nicht zu den Schad- bzw. Spurenstoffen gezählt. In der Abb. 16 wird es als gut untersuchter Stoff als Referenz für jene Stoffe genutzt, die in See und Schilfgürtel

weitgehend persistent sind und für die es somit zu einer Aufkonzentrierung in der Wasserphase kommt. Das Ausmaß der Aufkonzentrierung wird dabei über den Anreicherungs- bzw. Abreicherungsfaktor ($af = C_n/C_o$) dargestellt. C_n steht für die Konzentration in der jeweiligen Wasserphase. Als Vergleichswert C_o wurde, anders als in anderen Darstellungen, nicht die Konzentrationen in der Wulka vor dem Schilfgürtel, sondern in der Wulka nach dem Schilfgürtel gewählt. Dadurch sollen die Vorgänge in See und Schilfgürtel besser herausgearbeitet und nicht durch Vorgänge im Wulka-Schilfgürtel verschleiert werden. Wie erwartet zeigt sich für Chlorid, dass bei der Durchströmung des Schilfgürtels der Wulka keine Konzentrationsänderungen auftreten (af im Wulkazufluss ist nahe 1). Im offenen See beträgt af (das bedeutet eine Aufkonzentration aufgrund des Überhanges der Verdunstung über den Niederschlag) etwa 3. Im Schilfgürtel erhöht sich af durch eine weitere Aufkonzentrierung auf annähernd 4. Da dieser Wert, je nachdem wie abgelesen eine Messstelle im Schilfgürtel ist (bzw. wie gut oder schlecht sie über Kanäle an den See angebunden ist), variieren kann, wurden für Chlorid jene Messstellen zum Vergleich herangezogen, bei denen auch die Schadstoffuntersuchungen durchgeführt wurden.

Das polyfluorierte Tensid PFOA weist ein sehr ähnliches Verhalten auf wie Chlorid: keine Veränderung der Konzentration beim Durchströmen der Wulka durch den Schilfgürtel, zunehmende Aufkonzentrierung in offenem See und den Schilfgürteln von Mörbisch und Illmitz. PFOA liegt in der Wulka überwiegend gelöst vor und ist in See und Schilfgürtel weitgehend persistent. Allerdings liegt die Aufkonzentrierung von PFOA etwas unter jener von Chlorid. Weiter untersuchte Stoffe mit ähnlichem Verhalten sind: das Pflanzenschutzmittel-Metabolit N,N-Dimethylsulfamid; die poly- und perfluorierten Chemikalien PFPeS, PFHpA, (PFNA und PFHxA) und der Süßstoff Acesulfam K.

Der Transport des polyfluorierten Tensids PFOS aus dem Einzugsgebiet der Wulka erfolgt nur zu einem sehr geringen Anteil partikulär. Eine Sedimentation von Schwebstoffen im Schilfgürtel der Wulka spielt damit keine wesentliche Rolle. Auch sonst zeigt PFOS keine Veränderung beim Durchströmen des Wulka-Schilfgürtels. Im See kommt es jedoch zu einer deutlichen Verringerung der Konzentration. Dies wäre zu Beginn der Untersuchungen so nicht zu erwarten gewesen, da dieser Stoff als in der Umwelt weitgehend persistent gilt. Da bei den Laborversuchen eine deutliche Adsorption von PFOS an das Sediment gezeigt werden konnte, ist ein Austrag von PFOS über Adsorption an Feststoffe des Schilfgürtels nicht auszuschließen, oder Ab- und Umbauvorgänge in See und Schilfgürtel spielen unter Seebedingungen trotz der Persistenz dieses Stoffes eine relevante Rolle (siehe auch Abschnitt „Frachten“).

Das polyfluorierte Tensid PFOS zeigt keine Veränderung beim Durchströmen des Wulka-Schilfgürtels. Sein Transport erfolgt nur zu einem sehr geringen Anteil partikulär. Im See kommt es jedoch zu einer deutlichen Verringerung der Konzentration. Dies wäre zu Beginn der Untersuchungen so nicht zu erwarten gewesen, da dieser Stoff, als in der Umwelt

weitgehend persistent gilt. Im Schilfgürtel von Mörbisch und Illmitz kommt es wieder zu einer leichten Konzentrationserhöhung. Da bei den Laborversuchen eine deutliche Adsorption von PFOS an das Sediment gezeigt werden konnte, ist ein Austrag von PFOS auf diesem Weg nicht auszuschließen.

EDTA ist in Abb. 16 das Beispiel für einen Stoff, der einem deutlichen Ab- bzw. Umbau unter den Umgebungsbedingungen des Sees unterliegt. Während kaum eine Reduktion beim Durchströmen der Wulka durch den Schilfgürtel gefunden wurde, nimmt die Konzentration im See und vermehrt im Schilfbereich Mörbisch und Illmitz deutlich ab. Zudem wurden keine Hinweise auf eine Speicherung in den Schilfsedimenten gefunden. Es ist daher davon auszugehen, dass es für EDTA zu einem weitgehenden Abbau bzw. Umbau kommt. Nichts kann auf Basis des derzeitigen Untersuchungsstandes über die Endprodukte so eines Umbaus gesagt werden, so kann es zu einer vollständigen Mineralisierung, aber auch zur Bildung von Abbauprodukten (Metaboliten) kommen. Weitere Stoffe, für die dieses Verhaltensmuster gefunden wurde, sind: die Arzneimittelwirkstoffe Carbamazepin, Diclofenac und Bezafibrat, die Komplexbildner NTA und Benzotriazol, der Pestizid-Metabolit Chloridazon-Desphenyl und eventuell der Süßstoff Acesulfam K.

Benzo(a)pyren und Fluoranthen gehören zu den polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK). Über die Wulka werden sie aus dem Einzugsgebiet in den Schilfgürtel vor allem in partikulärer Form transportiert. Durch weitgehenden Partikelrückhalt bei der Durchströmung der Wulka durch den Schilfgürtel werden sie daher zu einem großen Teil gemeinsam mit den Feststoffen im Wulka-Schilfgürtel zurückgehalten. Im See kommt es zu einer Aufkonzentrierung (af ca. 2), die im Bereich von PFOA und etwas unter jenem von Chlorid liegt und auf die Persistenz dieser Stoffe hinweist. Zudem ist durch Adsorption an die Feststoffe durch den Austrag dieser in den Schilfgürtel auch eine Verlagerung von Benzo(a)pyren und Fluoranthen aus dem See in den Schilfgürtel gegeben. Im Schilfgürtel von Mörbisch und Illmitz zeigen die vorhandenen Messdaten, dass es für Fluoranthen keine weitere Aufkonzentrierung gibt. Bei Benzo(a)pyren steigt af dagegen auf > 5. Dieser Befund kann als Hinweis auf die Bedeutung von Adsorptions- und Mobilisationsvorgänge dienen, denen hier eine wichtige Rolle zukommt. Dabei deuten die Messdaten (bei aller Unsicherheit aufgrund der begrenzten Anzahl an Analysen) für Benzo(a)pyren zur Zeit des Monitorings eher auf eine Mobilisierung aus dem Sediment und für Fluoranthen eher auf eine Festlegung im Sediment hin. Auch relevante Konzentrationen von Benzo(a)pyren, Fluoranthen in den Schilfsedimenten und die Erkenntnisse der Laborversuche weisen auf die Bedeutung der Schilfsedimente als Speicher dieser Stoffe sowie auf ein labiles Gleichgewicht von Adsorption und Mobilisation hin, welches bereits auf geringe Veränderungen der Umgebungsbedingungen reagiert. Zu den Stoffen, die ein ähnliches Verhalten wie Benzo(a)pyren, Fluoranthen aufweisen, zählen die weiteren höhermolekularen PAK.

Blei als Gesamtlei und gelöstes Blei ist in Abb. 16 als Beispiel für die Schwermetalle dargestellt, die alle tendenziell ein ähnliches Verhalten aufweisen. Im Schilfgürtel der Wulka kann auf Basis der vorhandenen Daten keine Veränderung der Gesamtleikonzentration gefunden werden. Dies müsste jedoch durch eine Verdichtung der Datenbasis noch näher untermauert werden. Da die Konzentration für gelöstes Blei deutlich zunimmt, dürfte hier der Befund ähnlich wie für Phosphor aussehen: durch den Rückhalt von Feststoffen im Schilfgürtel der Wulka wird partikulär gebundenes Blei zurückgehalten. Diese Konzentrationsreduktion wird bei Gesamtlei jedoch durch eine Rücklösung von gelöstem Blei beim Durchtritt durch den Schilfgürtel wieder aufgehoben. Im Weiteren zeigen Gesamtlei und gelöstes Blei einen ähnlichen Verlauf auf unterschiedlichem Niveau: beide zeigen eine deutliche Erhöhung der Konzentration im offenen See, die im Bereich des Schilfgürtels deutlich zurückgeht. Die Datenlage ist nicht umfassend genug, um hier endgültige Schlüsse ziehen zu können, vor allem da bei den Metallen große Konzentrationsschwankungen auftreten, die quantitative Aussagen auf Basis weniger Messdaten erschweren. Trotzdem sind die Daten ein deutlicher Hinweis auf die große Bedeutung, welche die Prozesse Adsorption, Speicherung in Sedimenten aber auch interne Mobilisierung bzw. Desorption für Schwermetalle spielen. So können die hohen Konzentrationen, die im See fallweise auftreten, nicht alleine durch den Eintrag über die Wulka oder die für den See typische Aufkonzentrierung erklärt werden. Viel spricht für eine Mobilisation aus internen Lagern, wie es die Feststoffe des Sees bzw. die Seesedimente darstellen. Auf der anderen Seite indizieren die reduzierten Gehalte in den Schilfbereichen von Mörbisch und Illmitz auch deutlich Sedimentations- und Adsorptionsprozesse, die zu einer Reduktion der Konzentrationen in der wässrigen Phase führen können. Ein umfassendes Verständnis sowie eine Quantifizierung dieser zeitlich und räumlich heterogen ablaufenden Prozesse ist jedoch derzeit nicht möglich. Es spricht jedoch viel dafür, dass die Bedeutung des Schilfgürtels und der dort ablaufenden Adsorptions-, Sedimentations- und Mobilisationsprozesse für die Belastung des Sees mit Schwermetallen, aber auch PAK von wesentlicher Bedeutung ist und neben dem Eintrag über externe Quellen, z.B. über die Wulka, ebenfalls zu berücksichtigen ist.

■ Frachten

Für PFOS, PFOA und Fluoranthene 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 Fluoranthren Konzentrationen in der Wulka vor dem Schilfgürtel, nach dem Schilfgürtel und im Freiwasser des Sees. So wird der Eintrag über Zuflüsse bzw. der Austrag mit dem Abfluss über den Einser-Kanal berechnet. Zudem werden Abschätzungen eines Eintrages über atmosphärische Deposition aus Zessner *et al.* (2019) herangezogen, um auch diesen Eintragspfad in der Bilanz zu berücksichtigen. Wie Abb. 17 (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. Setzt man für die PFOS-Konzentrationen in Feststoffen jene an, die in Schwebstoffen der Wulka oder im Sediment des Sees gemessen wurden (ca. 0,2 µg/kg TM) und geht man von einer Verfrachtung von Feststoffen aus dem See in den Schilfgürtel von einer Größenordnung von 10 000 t Trockenmasse pro Jahr aus (vgl. Kap. 2.4.2), dann erkennt man, dass dieser Austragspfad aus dem See keine wesentliche Relevanz hat und maximal in der Größenordnung des oberirdischen Abflusses liegen kann. Ähnliches gilt für einen möglichen Austrag über Fischverzehr durch Wasservögel oder Fischfang. Selbst wenn man den unrealistischen Fall annimmt, dass die jährliche Fischentnahme dem Fischbestand von etwa 600 t (Angabe von Nemeth *et al.* (2003)) entsprechen würde, so errechnet sich mit den PFOS Konzentrationen in Biota (Tab. 1) ein Entzug über diesen Pfad der deutlich unter 0,01 kg pro Jahr liegen würde.

Da auch ein relevanter Austrag von PFOS über Schilfschnitt von den Autoren dieser Arbeit als sehr unrealistisch eingeschätzt wird, lässt sich aus den genannten Stoffflüssen der Überhang des Eintrages von PFOS 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). Aus der Durchführung der Adsorptionsversuche lässt sich jedoch noch ein weiterer möglicher Austrag für PFOS aus der wässrigen Phase des Sees benennen. So konnte

im Teilbericht 6 „Laborversuche“ gezeigt werden, dass durch Adsorption aus gelösten PFOS in den Seesedimenten ein relevanter Austrag aus dem Seewasser erfolgen kann.

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 kurzkettingen 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.

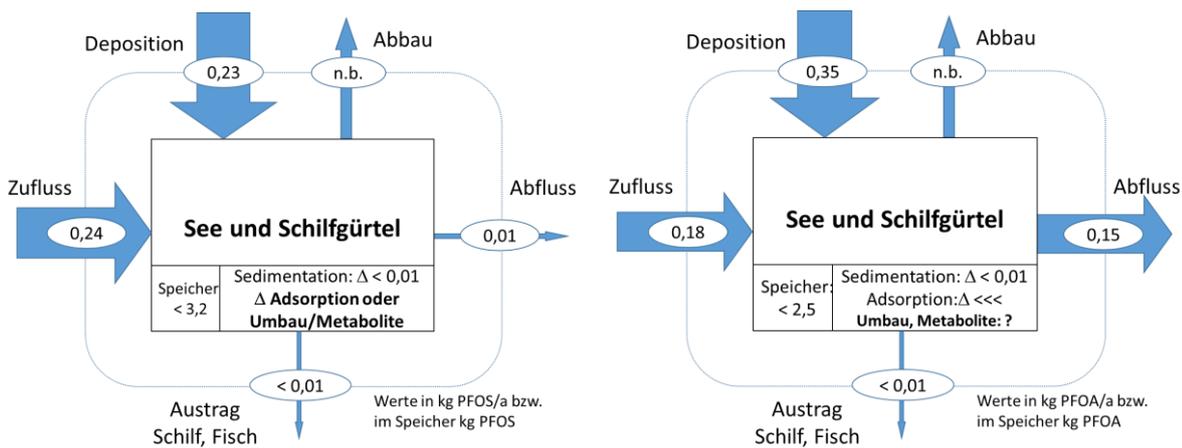


Abb. 17. Abschätzung von Jahresbilanzen (kg/a) des Neusiedler Sees für PFOS (links) und PFOA (rechts).

Figure 17. Estimation of a substance balance (kg/a) of the lake Neusiedl for PFOS (left) and PFOA (right).

Die Situation für PFOA ist ähnlich wie für PFOS (Abb. 17, 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 Seekonzentration 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 kurzkettinge PFT als Metaboliten nicht auszuschließen sind.

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 (vgl. Abb. 19 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 (vgl. Abb. 19 Mitte).

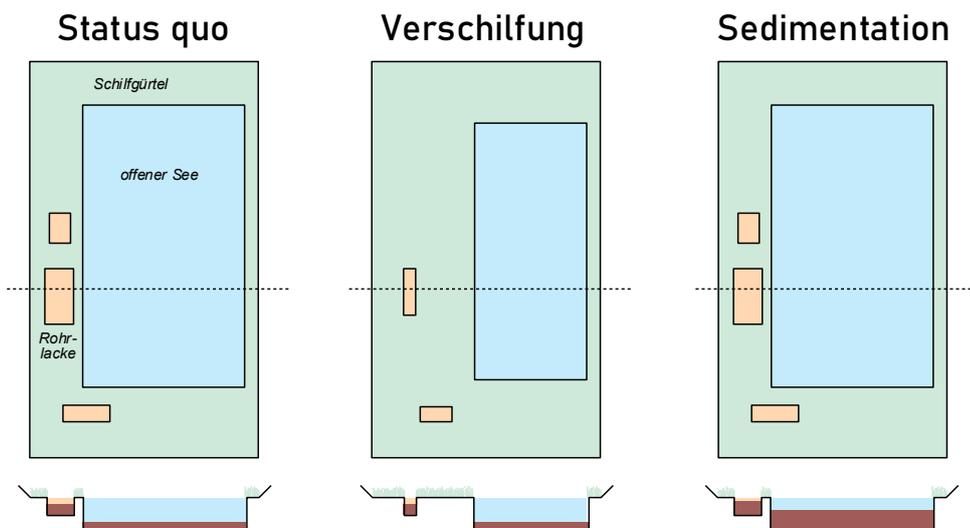


Abb. 19. Schematische Darstellung von Verlandung im Sinne einer Zunahme der Schilfbestände (Mitte) und durch Sedimentation (rechts).

Figure 19. Schematic drawing of “Verlandung” in the sense of an increase of reed stands (middle) and of sedimentation (right).

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 **Klimaerwärmung**. Die Untersuchungen von Soja *et al.* (2014) belegen eine merkliche Verkürzung der Eisbedeckung des Sees innerhalb der letzten 100 Jahre (Abb. 20), während Dokulil (2013) in seine Datenanalyse eine signifikante Temperaturerhöhung des Sees über die letzten paar Jahrzehnte aufzeigen konnte (Abb. 21). 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.

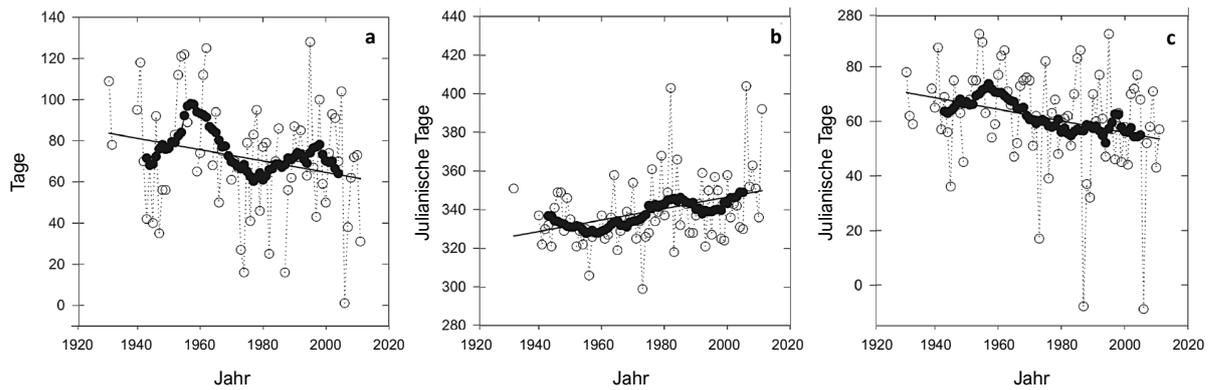


Abb. 20. Veränderung der Dauer (a), des Beginns (b) und Endes (c) der Eisbedeckung am Neusiedler See in den letzten 100 Jahren (aus: Soja et al. (2014)).

Figure 20. Change of the duration (a), the start (b) and the end (c) of ice cover in Lake Neusiedl during the last 100 years (from: Soja et al. (2014)).

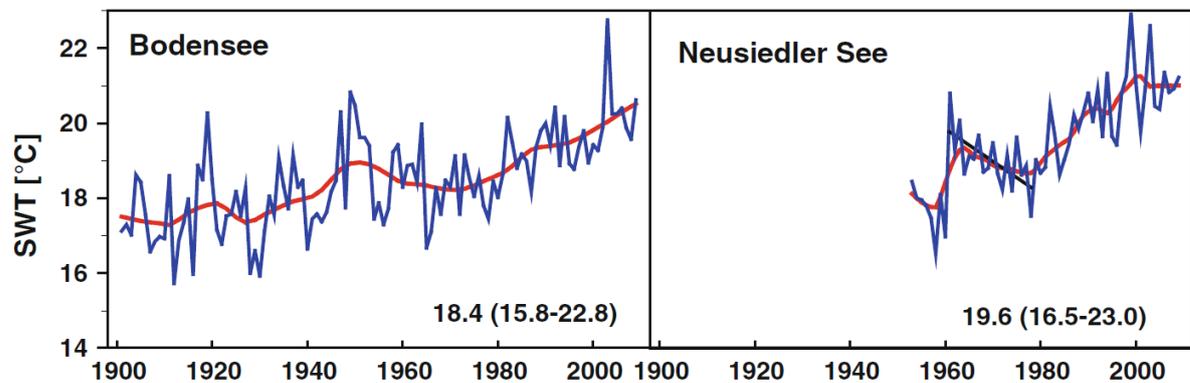


Abb. 21. Anstieg der sommerlichen Oberflächentemperatur des tiefsten und des seichtesten Sees Österreichs in den letzten Jahrzehnten (aus: Dokulil (2013)).

Figure 21. Increase of summer surface water temperature of the deepest and the most shallow lake in Austria over the last decades (from: 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.

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^{-1} (1992–2007) auf 595 mg L^{-1} (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 $6\,000 \mu\text{S cm}^{-1}$. In einer lange anhaltenden Niederwasserphase 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 – möglicherweise eine Folge der Klimaerwärmung und damit verbundener ersten Trends zu Veränderungen im Neusiedler See (vgl. Dokulil (2013)).

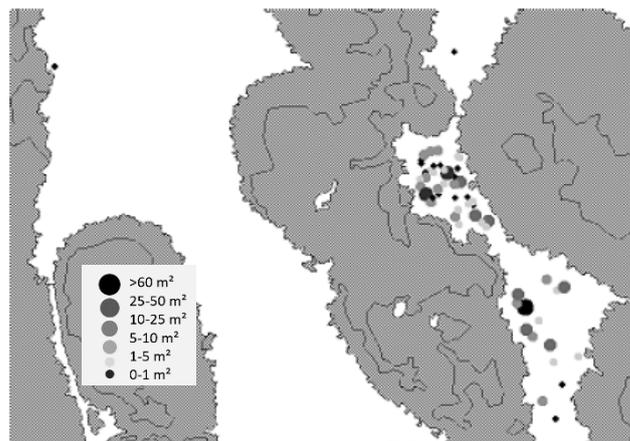


Abb. 22. Verbreitung der Strand-Teichbinse (*Schoenoplectus litoralis*) im Süden der Bucht von Fertőrákos (Quelle: M. Pannonhalmi).

Figure 22. Distribution of the littoral bulrush (*Schoenoplectus litoralis*) in the southern part of the Bay of Fertőrákos (source: M. Pannonhalmi).

Die beiden langfristigen Trends überlagern gewissermaßen die nachfolgend beschriebenen Szenarien. Auf einer dritten Ebene sind zur Abschätzung künftiger Entwicklungen Maßnahmen zu berücksichtigen, welche hier noch weitgehend ausgeklammert und ausführlich im Managementplan beschrieben werden.

3 SZENARIEN – ANDERE RAHMENBEDINGUNGEN

SCENARIOS – OTHER FRAMEWORK CONDITIONS

3.1 Definition von Szenarien

Definition of scenarios

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. 2.2 & 2.3 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.

3.1.1 Szenarien „Extreme Pegelstände“

Scenarios “Extreme water levels”

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).

3.1.2 Szenarien „Unterschiedliche Durchströmung des Schilfgürtels durch die Wulka“

Scenarios “Different flow of the river Wulka through the reed belt”

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 ausufernd 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.

3.1.3 Szenarien „Schilfkanäle“

Scenarios “Reed channels”

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. 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 IL9 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 (vgl. Abb. 23).

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 Abb. 23)
- **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)

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. 2 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 Frachtab-schätzungen (Kap. 2.4 des vorliegenden Berichts) herausgebildet hat.

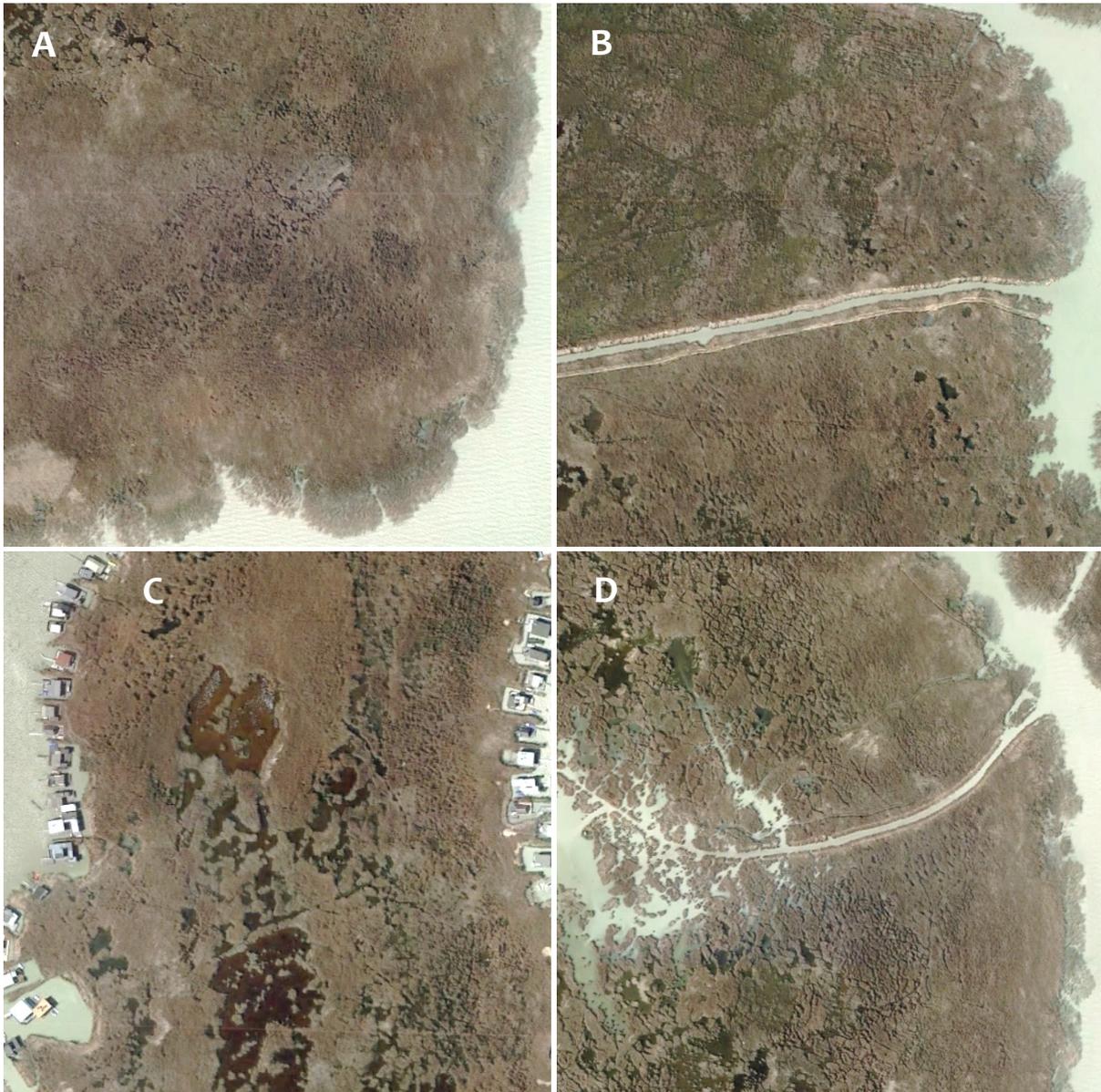


Abb. 23. Unterschiedliche Ausprägungen des Schilfgürtels Höhe Oggau/Rust. A: Bereich mit dichtem Schilf ohne Blänken und Kanäle, B: Von einem Kanal durchzogener Bereich ohne laterale Verbindung, C: Bereich mit Blänken ohne Anbindung an den See, D: Bereich mit gut an den See angebundenen Blänken.

Figure 23. Different characteristics of the reed belt near Oggau/Rust. A: area with dense reed without pools and channels, B: area crossed by a channel without lateral connection, C: area with pools without connection to the lake, D: area with pools with good connection to the lake.

3.2 Szenario P1 – Pegel <115,2 m ü.A.

Scenario P1 – water level <115.2 m asl

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. Nur sehr wenige Kanäle sind dann 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 (Abb. 24).

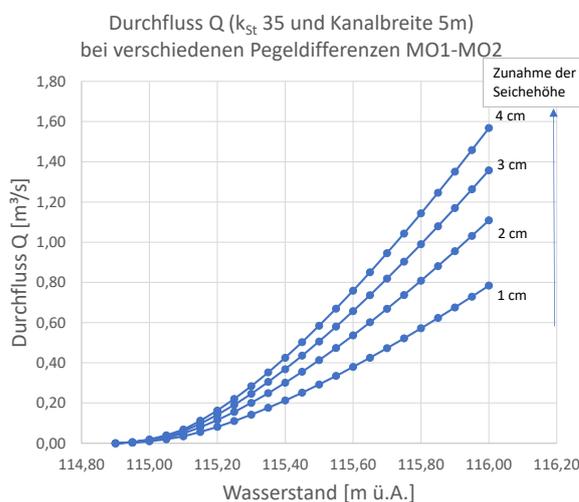


Abb. 24. Beziehung zwischen Wasserstand und Durchfluss durch einen Kanal bei Mörbisch unter Annahme unterschiedlicher Pegeldifferenzen (MO1 Seerand, MO2 im Schilfgürtel) infolge einer Seiche-Welle (modelliert nach Manning-Strickler).

Figure 24. Relation between water level and discharge through a channel near Mörbisch assuming varying water level differences (MO1 lake edge, MO2 reed belt) resulting from a seiche wave (model after 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 Schilf-

gürtels. 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.

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 m³, die bei gleichmäßiger Verteilung auf der Fläche des offenen Sees (140 km²) eine jährliche Sedimentation von 0,18 mm ausmachen. Bezieht man die Sedimentmenge auf geschätzte 10 km² 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. 2.5 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 Anreicherungsfaktors (*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 Überhanges 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 gelösten 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 Abb. 25 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).

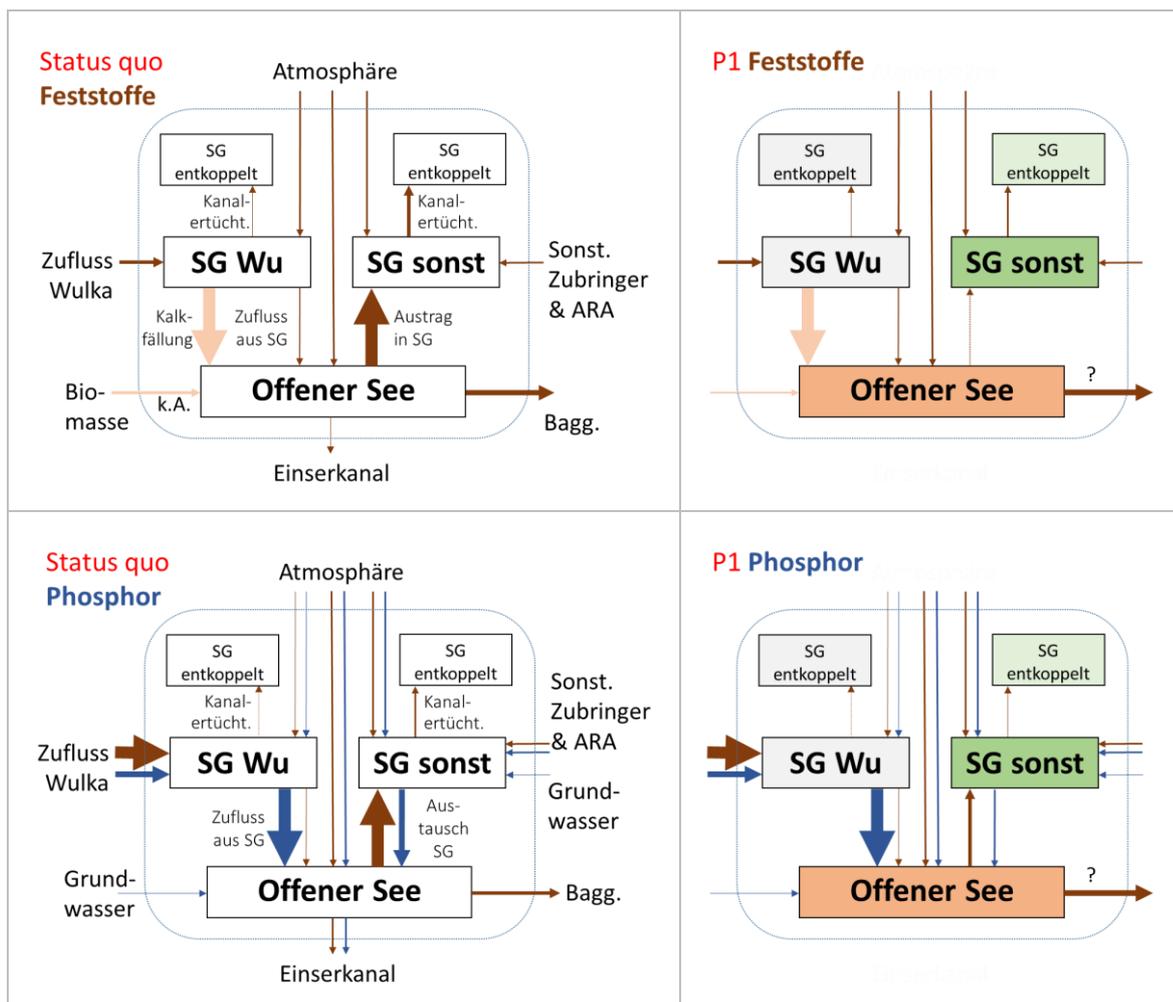


Abb. 25. Veränderungen der Stoffflüsse für Feststoffe (oben) und Phosphor (unten) im Szenario P1.

Figure 25. Alteration of matter flows for sediment (upper) and phosphorus (lower) in scenario P1.

3.3 Szenario P2 – Pegel >115,8 m ü.A.

Scenario P2 – water level >115.8 m asl

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. Abb. 24). 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). 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).

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 m³/s über den Einser-Kanal abgeleitet, von April bis August bis zu 6 m³/s. In den Monaten dazwischen verschiebt sich der Grenzwasserstand graduell; die Ableitungsmenge beträgt dann im Februar und März bis zu 6 m³/s, im Oktober bis zu 15 m³/s. Der Grenzwasserstand wurde zum Schutz von Infrastrukturen im Seerandbereich gewählt, die bei höheren Wasserstand im Fall von starken Windeinfluss oder bei kurzfristigem niederschlagsbedingtem Anstieg des Wasserstands gefährdet wären (vgl. Abb. 26).

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.



Abb. 26. Hochwassersituation im Bereich des Illmitzer Seebads am 9. März 2009 (Foto: M. Pannonhalmi).

Figure 26. Flood situation at the bathing resort of Illmitz on 9th March 2009 (photo: 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 vorseischen 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 „Schilf“ ausgeführten Zahlen und Annahmen zu Wassergehalt und Dichte – ein Volumen von rd. 20 000 m³. Bezogen auf die österreichische Fläche des Schilfgürtels (102 km²) entspräche dies einer jährlichen Aufhöhung von 0,2 mm. Bezogen auf die gesamten (11,7 km²) bzw. die gut angebundenen Wasserflächen (5,7 km²)

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 Abb. 27 dargestellt. Erklärung der Symbole siehe Abbildung 25 (Szenario P1).

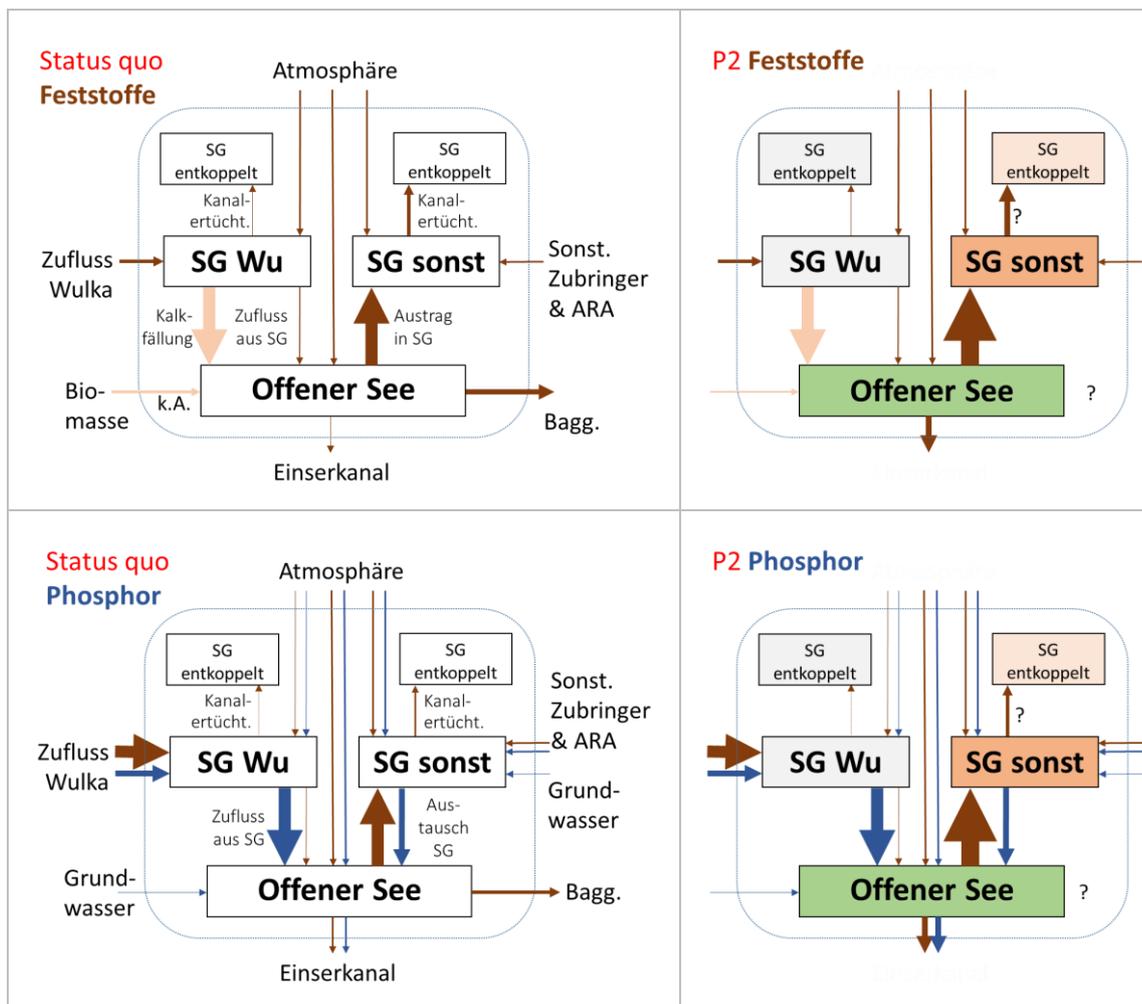


Abb. 27. Veränderungen der Stoffflüsse für Feststoffe (oben) und Phosphor (unten) im Szenario P2.

Figure 27. Alteration of matter flows for sediment (upper) and phosphorus (lower) in scenario P2.

3.4 Szenario W1 – diffuse Durchströmung der Wulka

Scenario W1 – diffuse flow of the river Wulka through the reedbelt

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 Schilfhalmen 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 5 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 m³ Feuchtvolumen) im Wulka-Mündungsbereich in Hinblick auf die zunehmende Anlandung möglich ist. Bezogen auf rd. 10 km² 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 Fluoranthen 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 Abb. 28.

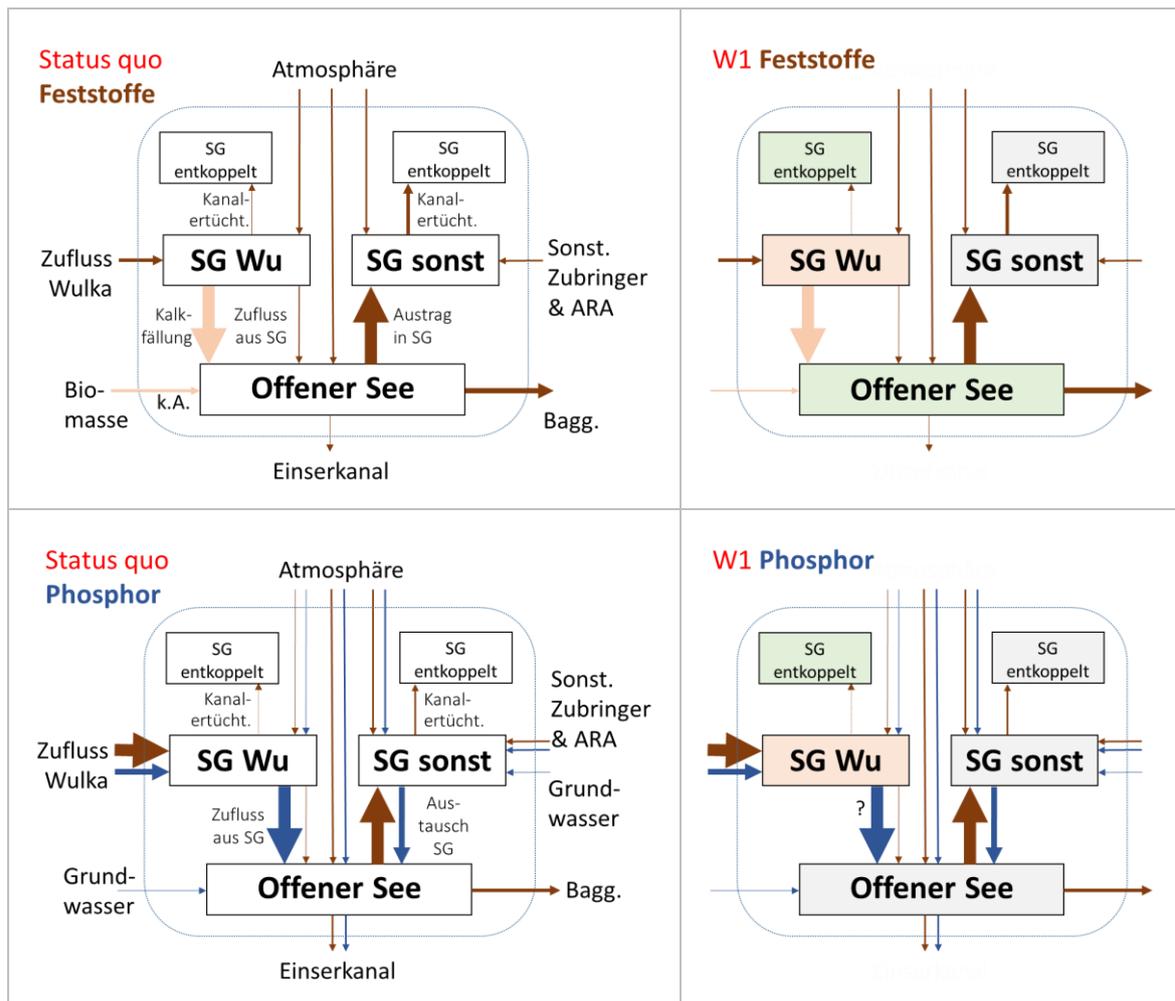


Abb. 28. Veränderungen der Stoffflüsse für Feststoffe (oben) und Phosphor (unten) im Szenario W1.

Figure 28. Alteration of matter flows for sediment (upper) and phosphorus (lower) in scenario W1.

3.5 Szenario W2 – lineare Durchströmung der Wulka

Scenario W2 – linear flow of the river Wulka through the reed belt

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 ufert 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 ausgebaggerte 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 diese 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 & Mikschi (2007), 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 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 Abb. 29 dargestellt.

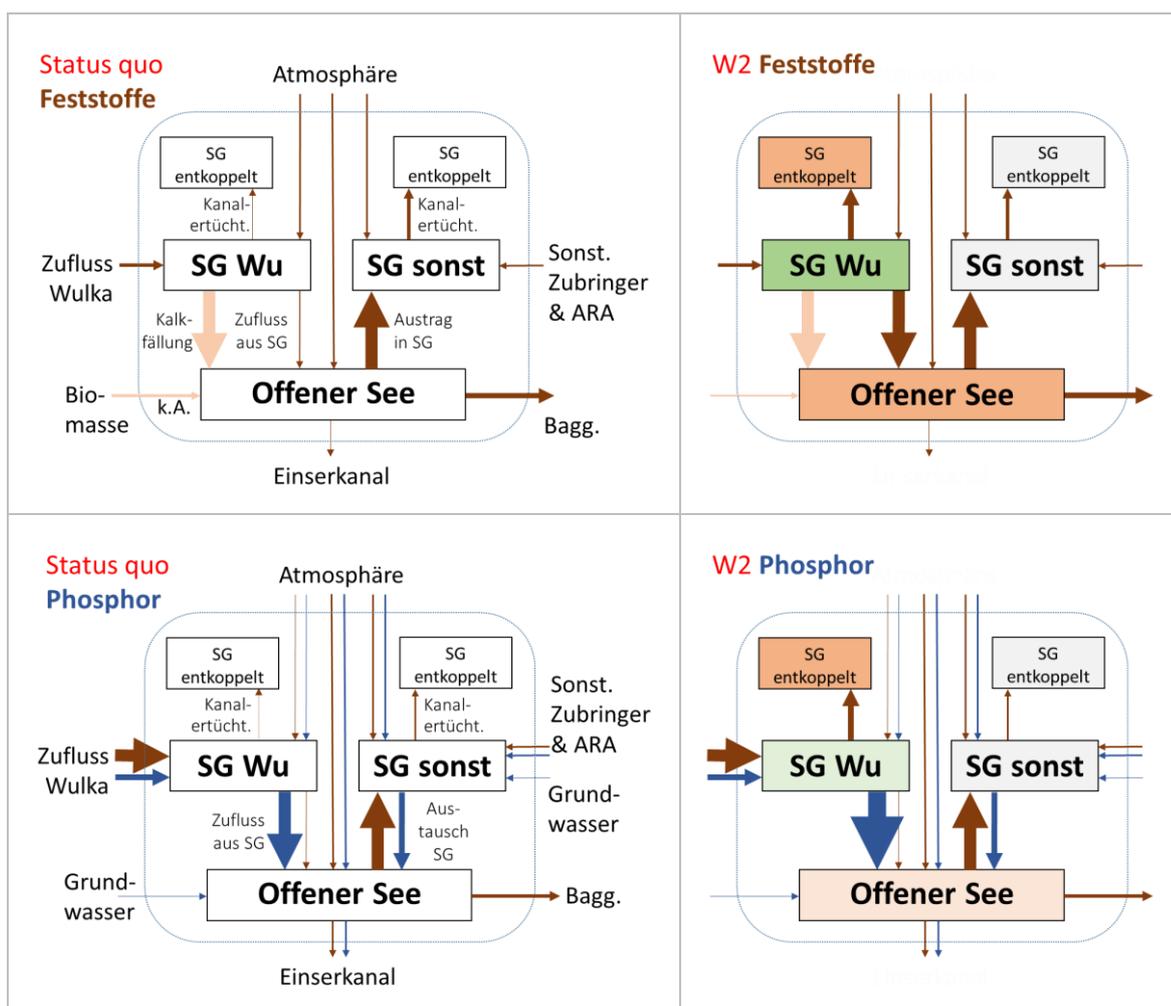


Abb. 29. Veränderungen der Stoffflüsse für Feststoffe (oben) und Phosphor (unten) im Szenario W2.
 Figure 29. Alteration of matter flows for sediment (upper) and phosphorus (lower) in scenario W2.

3.6 Szenario S1 – keine Schilfkanäle

Scenario S1 – no reed channels

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, wirkt Szenario S1 (über einen geringeren Wasserverlust an die Atmosphäre) stabilisierend auf den Wasserstand und begünstigt (bei hohen Niederschlägen) 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 sohnahen 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 Schilfhalmern 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 erwarten³. Auf der Austragsseite fallen jedoch die Kanalertüchtigungen weg, welche zu seitlichen Ablagerungen von Sedimenten führen („Schilfgürtel entkoppelt“ in Abb. 14). 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 Gesamtphosphor-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

³ Das Szenario bezieht sich auf die Kanäle *außerhalb* des Bereichs der Wulkamündung, die im Szenario W1 und W2 betrachtet werden.

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 See 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 Biozöosen 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 Abb. 30 schematisch dargestellt.

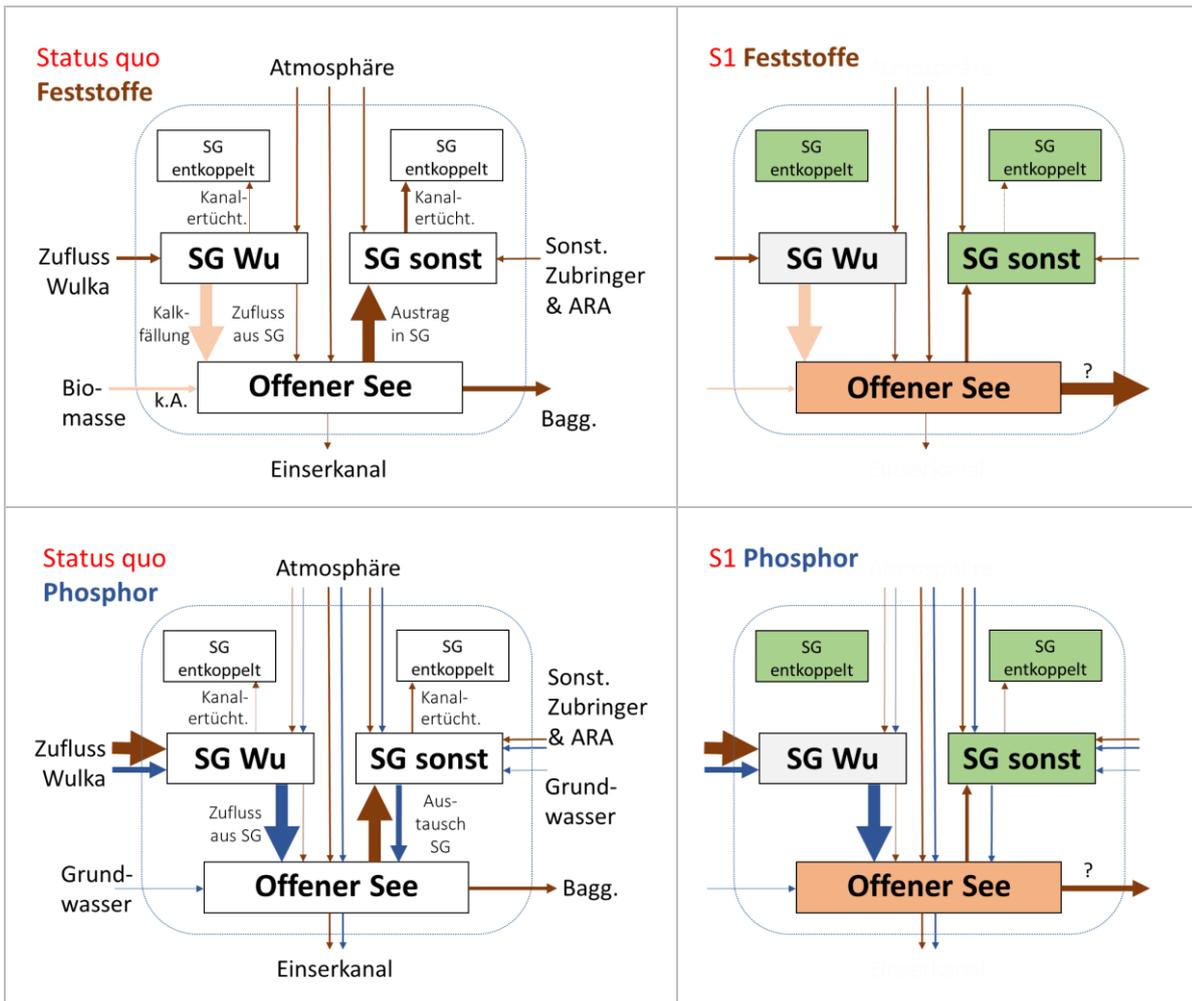


Abb. 30. Veränderungen der Stoffflüsse für Feststoffe (oben) und Phosphor (unten) im Szenario S1.

Figure 30. Alteration of matter flows for sediment (upper) and phosphorus (lower) in scenario S1.

3.7 Szenario S2 – erweitertes Netz an Schilfkanälen

Scenario S2 – extended network of reed channels

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 „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 wäre⁴.

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 verbunden⁵.

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 (Abb. 31). 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.

⁴ 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.

⁵ 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.

(Fragen zu den unterschiedlichen Ansätzen der Kanalerrichtung und -ertüchtigung in Ungarn und Österreich – vgl. Abb. 32 – 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.

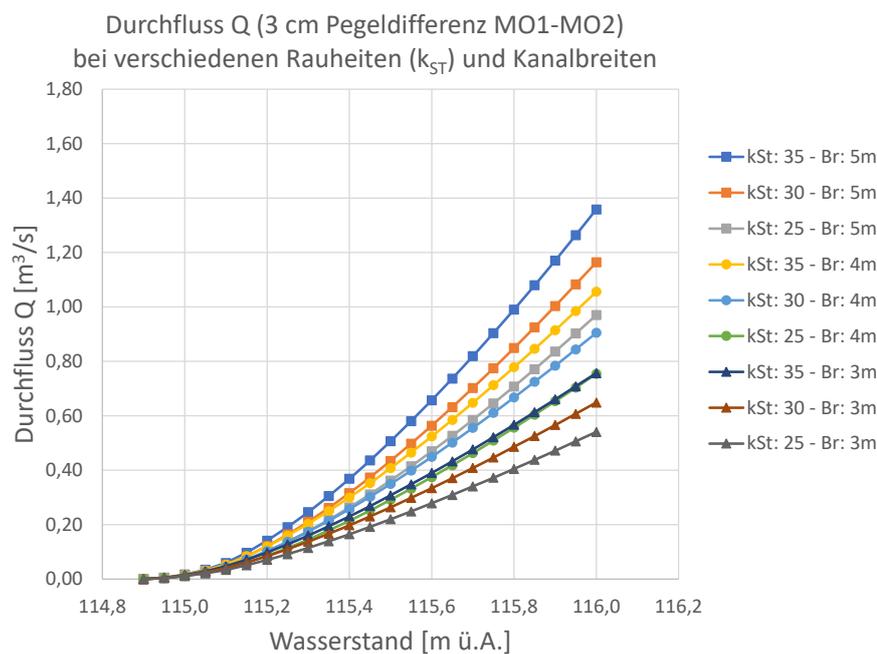


Abb. 31. Beziehung zwischen Wasserstand und Durchfluss durch einen Kanal bei Mörbisch unter Annahme unterschiedlicher Kanalbreite, modelliert nach Manning-Strickler (MO1 Seerand, MO2 im Schilfgürtel).

Figure 31. Relation between water level and discharge through a channel near Mörbisch assuming varying channel width, using the Manning-Strickler model (MO1 lake edge, MO2 reed belt).



Abb. 32. Unterschiedlich breite Schilfkanäle. Links: Höhe Fertőrákos (Ungarn), rechts: Höhe Mörbisch (Österreich). Fotos: M. Pannonhalmi (links), G. Kum / DWS Hydro-Ökologie (rechts).

Figure 32. Reed channels with varying width. Left: near Fertőrákos (Hungary), right: near Mörbisch (Austria). Photos: M. Pannonhalmi (left), G. Kum / DWS Hydro-Ökologie (right).

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. Abb. 33 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.

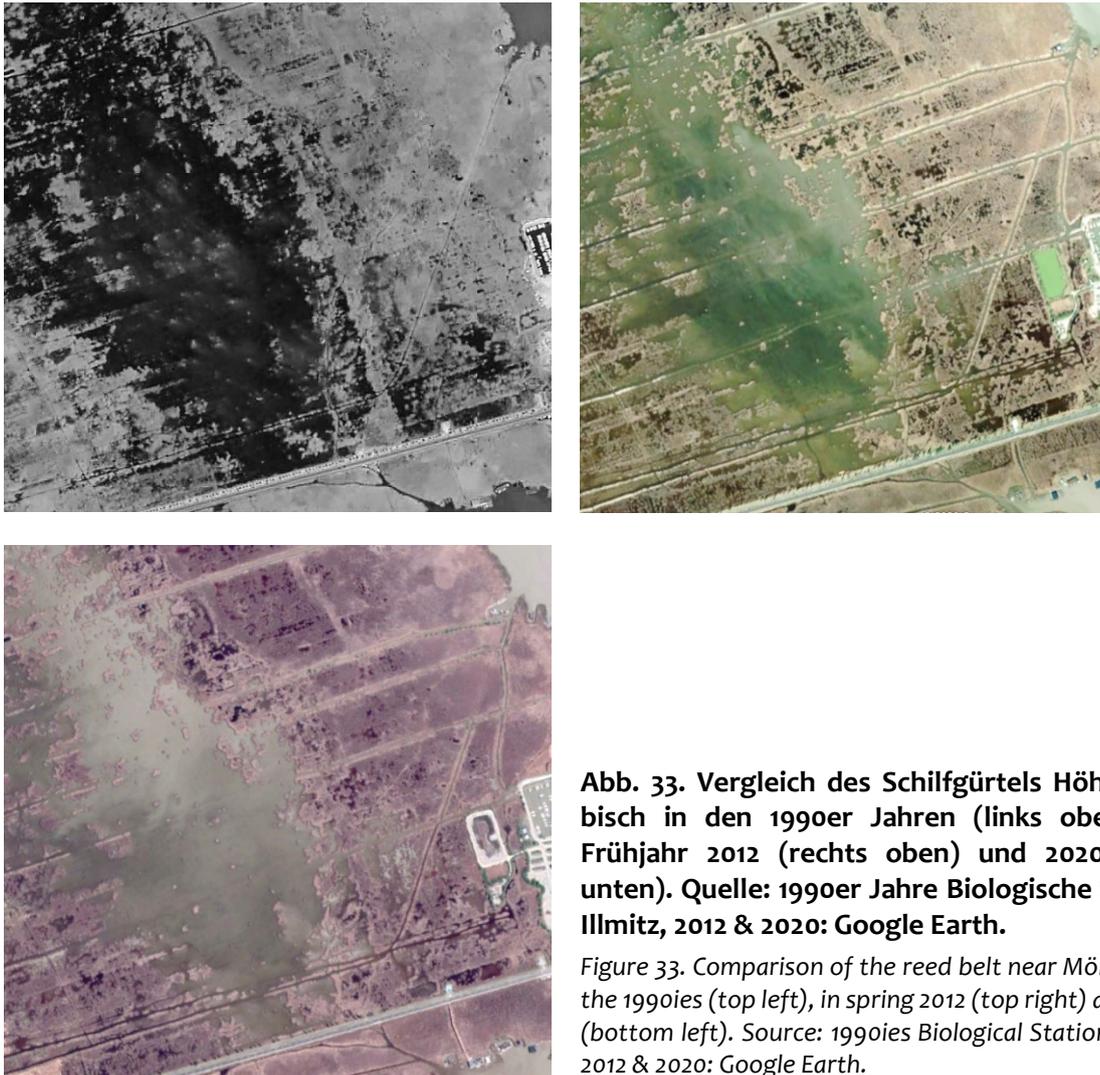


Abb. 33. Vergleich des Schilfgürtels Höhe Mörbisch in den 1990er Jahren (links oben), im Frühjahr 2012 (rechts oben) und 2020 (links unten). Quelle: 1990er Jahre Biologische Station Illmitz, 2012 & 2020: Google Earth.

Figure 33. Comparison of the reed belt near Mörbisch in the 1990ies (top left), in spring 2012 (top right) and 2020 (bottom left). Source: 1990ies Biological Station Illmitz, 2012 & 2020: Google Earth.

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.

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 trocken als vor der Mahd.

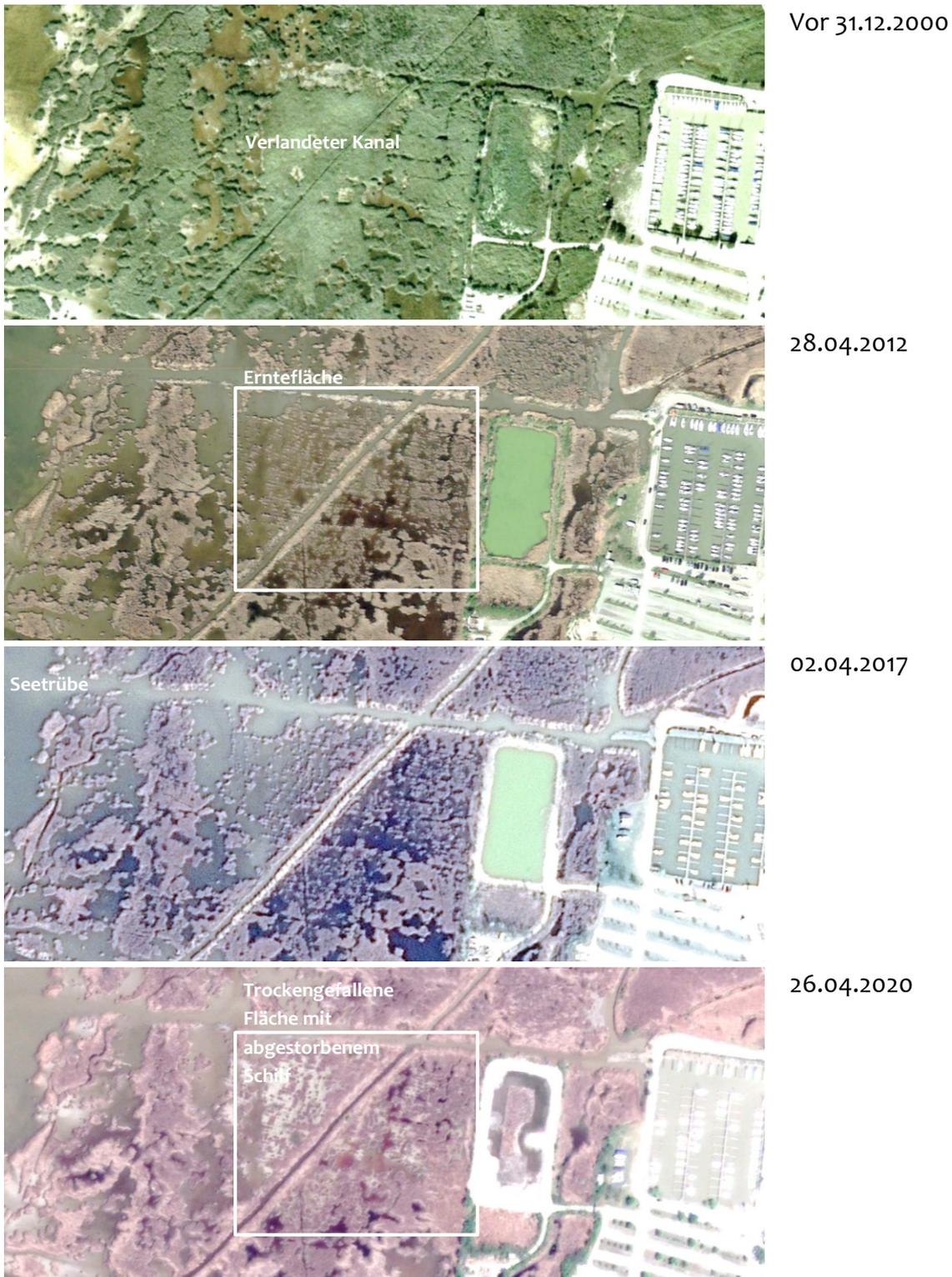


Abb. 34. Veränderungen der Struktur des Schilfgürtels in einem kleinräumigen Areal bei Mörbisch als Folge der Schilfmahd (Quelle: Google Earth).

Figure 34. Changes of the structure of the reed belt in a small area near Mörbisch resulting from reed harvesting (source: Google Earth).

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.

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 Abb. 35 dargestellt.

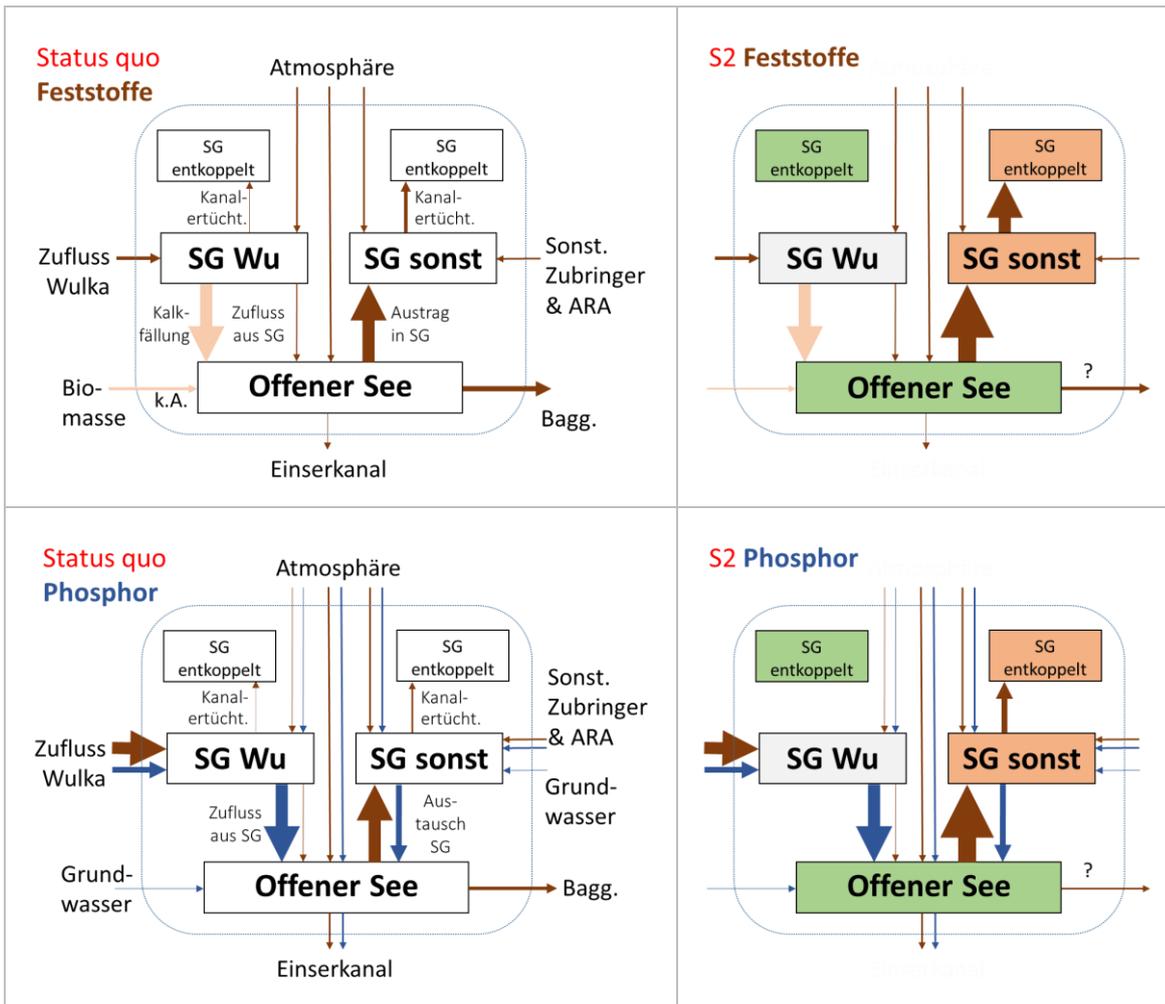


Abb. 35. Veränderungen der Stoffflüsse für Feststoffe (oben) und Phosphor (unten) im Szenario S2.

Figure 35. Alteration of matter flows for sediment (upper) and phosphorus (lower) in scenario S2.

3.8 Resümee

Résumé

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 Szenariopaare 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 erwärmbare 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 Teilbericht 1 „Hydrologie“ sowie weiter oben in Kap. 2.5 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.

4 BEWERTUNG

ASSESSMENT

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 Abb. 19 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. Abb. 19 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 eine Annäherung an die Ziele beitragen oder aber das Risiko einer künftigen Zielverfehlung erhöhen. Die Ziele werden zunächst separat bewertet, anschließend in Tabelle 7 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 darinnen 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*).

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 (P1) überstutzt die Ziele zur natürlichen Entwicklung. Das Risiko einer Aussüßung führt im Szenario P2 mit dauerhaft hohen Wasserständen – bei bestehender Wehrbetriebsordnung – zu negativen ökologischen Entwicklungen. Aus diesem Grund kann vor allem im Szenario P2, 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 S2) 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 S1 und S2 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 **Trophieniveau** 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 7 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 7. 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.

Table 7. Assessment of the status quo and the selected scenarios against the water management goals according to the strategy study. Specifications and supplements to the objectives as defined in the strategy study are written in italics. The degree of approach to or distance from the objectives is indicated by – – to + +.

| Bereich | Ziel | P1 | P2 | W1 | W2 | S1 | S2 |
|------------------------------|--|----|----|----|----|----|----|
| Hydro-Morphologie | 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 See</i> | -- | ++ | = | -- | -- | ++ |
| | Erhalt Austausch See – Schilfgürtel | -- | ++ | na | na | -- | ++ |
| Schilf | 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 | = | = |
| Phys.-Chem. Parameter | Erhalt natürlicher Chemismus | ++ | -- | = | = | = | = |
| | Erhalt natürliche phys.-chem. Dynamik | + | – | + | – | + | – |
| | Niedriges Trophieniveau | -- | ++ | + | – | -- | ++ |
| | Geringe externe Nährstofffrachten | na | na | – | + | na | na |
| | Geringe interne Nährstofffrachten (Rücklösung Sediment) | -- | ++ | + | – | – | + |
| Schadstoffe | Erhalt des guten chemischen Zustands | -- | ++ | = | – | -- | ++ |
| | Erhalt des guten ökologischen Zustands (Chemie) ⁶ | -- | ++ | = | – | -- | ++ |
| Biologie | Erhalt des guten ökologischen Zustands (Biologie) ⁷ | + | – | – | + | – | + |
| | Erhalt natürliche Variabilität (Biodiversität, Abundanz und Produktivität) | + | – | + | – | ± | ± |
| | Ungestörter Ablauf biolog. Prozesse | + | -- | + | – | ± | ± |

⁶ Im Sinne der Qualitätszielverordnung Chemie Oberflächengewässer (BGBl. II Nr. 96/2006 idgF)

⁷ Im Sinne der Qualitätszielverordnung Ökologie Oberflächengewässer (BGBl. II Nr. 99/2010 idgF)

5 WISSENSDEFIZITE UND OFFENE FRAGEN

KNOWLEDGE DEFICITS AND OPEN QUESTIONS

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, welches damit unmittelbar an die Strategiestudie anschließt. 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.

Eine wichtige Frage betrifft auch mögliche Veränderungen des Schilfgürtels bei langanhaltendem Trockenfallen. Die Hypothese, dass der See für ein langfristiges Überleben regelmäßige Austrocknungsphasen benötigt, mag für den offenen See gelten; für den Schilfgürtel erscheint das zumindest fragwürdig.

(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)

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** im Neusiedler See in der Wasserphase fehlt bisher, da im nationalen Monitoringprogramm (GZÜV) 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.

(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 **Speicherung** dort (PAK und Metalle) und den damit verbundenen Fragen einer langfristig möglichen Mobilisierung (siehe oben) muss dies 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 ein geringer Informationsstand gegeben 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.

6 LITERATUR

LITERATURE

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.

Brossmann, H., K. Burian, H. Dobesch, M. Dvorak, W. von der Emde, B. Grillitsch, H. Grillitsch, A. Grüll, 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. Siehardt, 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, 2011a. Mapping the Austrian reed bed of Lake Neusiedl by means of airborne optical scanner imagery. Paper presented at the International Symposium on Advanced Methods of Monitoring Reed Habitats in Europe (Fernerkundung und angewandte Geoinformatik 9), Illmitz, 25-26 November 2010.

Csaplovics, E. & J. Schmidt, 2011b. Schilfkartierung Neusiedler See, Ausdehnung und Struktur der Schilfbestände des Neusiedler Sees-Projektmanagement, Erfassung und Kartierung des österreichischen Anteils durch Luftbildklassifikation. Projekt-Abschlussbericht, OeNB Burgenland, Eisenstadt, Dresden.

Dokulil, M. T., 2013. Predicting summer surface water temperatures for large Austrian lakes in 2050 under climate change scenarios. *Hydrobiologia* 731(1):19-29 doi:10.1007/s10750-013-1550-5.

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.

- Gabriel, O., A. Kovács, S. Thaler, M. Zessner, G. Hochedlinger, C. Schilling & G. Windhofer, 2011. Stoffbilanzmodellierung für Nährstoffe auf Einzugsgebietsebene (STOBIMO-Nährstoffe) als Grundlage für Bewirtschaftungspläne und Maßnahmenprogramme. Endbericht. Studie im Auftrag des BMLFUW - Sektion VII (BMLFUW-UW.3.1.2/0029-VII/1/2008), Wien.
- 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.
- Herzig, A. & M. Dokulil, 2001. Neusiedlersee - ein Steppensee in Europa. In Dokulil, M., A. Hamm & J.-G. Kohl (eds) *Ökologie und Schutz von Seen*. Facultas, Wien, 401-415.
- Herzig, A., E. Mikschi, B. Auer, A. Hain, A. Wais & G. Wolfram, 1994. Fischbiologische Untersuchung des Neusiedler See. *BFB-Bericht* 81:1-125.
- Krachler, R., 2006. Neusiedler See - Ökodynamische Rehabilitierung: Wasserchemische Aspekte. Studie i.A. des Amtes der Bgld. Landesregierung, Landeswasserbauamt Schützen am Gebirge, Wien, 49 pp.
- Krachler, R., R. Krachler, A. Stojanovic, B. Wielander & A. Herzig, 2009. Effects of pH on aquatic biodegradation processes. *Biogeosciences Discuss* 6:13.
- Löffler, H., 1979. Neusiedlersee the limnology of a shallow lake in Central Europe. Dr. W. Junk bv Publishers, De Hague, X, 543 S., 1 Falttaf., 18 S. Taf.
- Malissa, H., H. Puxbaum, M. Pimminger, A. Nikoopour, H. Löffler, P. Zahradnik & H. Brossmann, 1986. Untersuchungen des Nährstoffeintrages in den Neusiedler See aus der Atmosphäre. *Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland* 72:41-89.
- Metz, H., 1984. Zur Phosphor- und Stickstoffsituation im Schilfgürtel des Neusiedler Sees. *Wissenschaftlichen Arbeiten aus dem Burgenland* 72:311-339.
- Nemeth, E., G. Wolfram, P. Grubbauer, M. Rössler, A. Schuster, E. Mikschi & A. Herzig, 2003. Interaction between fish and colonial wading birds within reed beds of Lake Neusiedl, Austria. In Cowx, I. (ed) *Interactions between fish and birds: implications for management*. Fishing News Books. Blackwell Science, 139-150.
- Pannonhalmi, M., 1984. Data to the nutrient balance of Fertölake. *BFB-Bericht* 51:73-75.
- Preisinger, A., 1979. Sediments. In Löffler, H. (ed) *Neusiedlersee - the limnology of a shallow lake in Central Europe Monographiae Biologicae* 37. Dr. W. Junk bv Publ., The Hague - Boston - London, 131-138.
- 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.

Stalzer, W. & G. Spatzierer, 1987. Zusammenhang zwischen Feststoff- und Nährstoffbelastung des Neusiedler Sees durch Sedimentverfrachtung. *Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland* 77:93-226.

Stalzer, W., G. Spatzierer & U. Wenninger, 1986. Nährstoffeintrag in den Neusiedler See über die oberirdischen Zuflüsse. *Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland* 72:125-187.

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.

Univ. Bodenkultur, 2016. GeNeSee. Geodätische Neuerfassung des Systems Neusiedler See – Hanságkanal. *Technischer Bericht (mit Aktualisierung 2016)*.

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., 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. & E. Mikschi, 2007. Rote Liste der Fische (Pisces) Österreichs. In Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft (ed) Rote Listen gefährdeter Tiere Österreichs, Teil 2: Kriechtiere, Lurche, Fische, Nachtfalter, Weichtiere. Böhlau Verlag, Wien - Köln - Weimar, 515 pp.

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. Fürnweger, 2018. Fischökologisches Monitoring Neusiedler See - Saisonen 2017 & 2018. Studie i.A. des Nationalparks Neusiedler See - Seewinkel, Wien, 71 pp.

Zessner, M., O. Gabriel, K. Schilling, M. Pannonhalmi, L. Sutheo, M. Kovács, I. Toth, A. Clement, T. Karches, F. Szilagy, 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.