

REBEN



Neusiedler See/Fertő tó nádas öv (Interreg AT-HU 2014-2020)

Alkalmazott hidrológiai és alapvető limnológiai vizsgálatok *Osztrák-magyar szintézisjelentés*



Cím:	Osztrák-magyar szintézisjelentés. A REBEN – Neusiedler See/Fertő-tó nádas öv (Interreg-Projekt AT-HU 2014-20) projekt keretében megvalósuló, alkalmazott hidrológiai és alapvető limnológiai vizsgálatok
Projektpartnerek:	Amt der Burgenländischen Landesregierung, Abt. 5 – Baudirektion Europaplatz 1, 7000 Eisenstadt Képviselő: DI Christian Sailer Észak-dunántúli Vízügyi Igazgatóság Képviselő: Kovács Richárd, projektmenedzser
Vállalkozók:	ARGE „DWS Hydro-Ökologie – TU Wien“ (Ausztria) <ul style="list-style-type: none"> 1) DWS Hydro-Ökologie GmbH Technisches Büro für Gewässerökologie und Landschaftsplanung Zentagasse 47, A-1050 Wien Tel. 01 / 548 23 10, Fax DW 18 E-mail: office@dws-hydro-oekologie.at 2) Technische Universität Wien Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie Karlsplatz 13/222, A-1040 Wien 3) A DWS Hydro-Ökologie alvállalkozója Technische Universität Dresden Fertő 2019 Consortium (Magyarország) <ul style="list-style-type: none"> 4) Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék H-1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3. 5) GYMSM Kormányhivatal Környezetvédelmi Mérőközpont H-9021 Győr, Árpád út 32. 6) Ökológiai Kutatóközpont H-8237 Tihany, Klebelsberg Kunó u. 3.
Projektvezető:	Mag. Dr. Georg Wolfram ¹⁾
Szerzők:	Wolfram, G. ¹⁾ , E. Boros ⁶⁾ , A. P. Blaschke ²⁾ , E. Csaplovics ³⁾ , R. Hainz ¹⁾ , G. Király ⁴⁾ , T. Krámer ⁴⁾ , R. Mayer ⁵⁾ , M. Pannonhalmi, P. Riedler ¹⁾ , M. Zessner ²⁾ , I. Vass ⁵⁾ , O. Zoboli ²⁾
Megbízás:	A5/GEW.EUF-10003-11-2017 (Ausztria)
Oldalak száma:	103
Belső jelentés száma:	15/078-Bo8
Hivatkozások:	Wolfram, G., E. Boros, A. P. Blaschke, E. Csaplovics, R. Hainz, G. Király, T. Krámer, R. Mayer, M. Pannonhalmi, P. Riedler, M. Zessner, I. Vass & O. Zoboli (2020). Austrian-Hungarian Synthesis. Applied hydrological and basic limnological investigations of the project REBEN – Reed Belt Lake Neusiedl/Fertő (Interreg-Projekt AT-HU 2014-20). Technical report for the Amt der Burgenländischen Landesregierung, Abt. 5 – Baudirektion, and the Észak-dunántúli Vízügyi Igazgatóság. Vienna – Budapest – Győr.

TARTALOMJEGYZÉK

Extended summary	1
1 Introduction.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
1.1 Baseline situation	Fehler! Textmarke nicht definiert.
1.2 Project structure and objectives	11
1.3 Assessment benchmark.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
1.4 Structure of the synthesis report	Fehler! Textmarke nicht definiert.
2 Ecosystem services	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3 Matter transport, processes, and loads	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.1 Inputs from the catchment area	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.2 Spatial patterns and gradients	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.3 Exchange processes.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.4 Loads of sediment, nutrients, and pollutants.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.5 Soda lake characteristics.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.6 Reed structure and changes.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
3.7 Long-term developments	Fehler! Textmarke nicht definiert.
4 Scenarios – different framework conditions	60
4.1 Definition of scenarios.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
4.2 Scenario P1 – water level <115.2 m ü.A.	63
4.3 Scenario P2 – water level >115.8 m asl.....	67
4.4 Scenario W1 – diffuse flow of the river Wulka through the reed belt.....	72
4.5 Scenario W2 – linear flow of the river Wulka through the reed belt.....	75
4.6 Scenario S1 – no reed channels	78
4.7 Scenario S2 – extended network of reed channels.....	81
4.8 Résumé.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5 Assessment.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
6 Knowledge deficits and open questions.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
7 Literature.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A projekten dolgozó munkacsoport szeretné kifejezni köszönetét a projektpartner felé a jó együttműködésért, az osztrák oldalon különösképpen DI Helmut Rojacz-nak és Mag. Herbert Szinovatz-nak, akik elindították a projektet, valamint DI Christian Sailernek, DI Karl Maraceknek és DI Brigitte Nikolavcic-nek, akik több, mint három évig folyamatosan kritikus szemmel, de mindvégig konstruktívan kísérték figyelemmel a projekt előrehaladását. Kiemelt jelentőséggel bírtak az Univ.-Prof. Dr. Alois Herziggel folytatott tudományos vonatkozású megbeszélések, hiszen nála jobban senki nem ismeri a Fertő tó limnológiai rendszerét. Köszönet illeti az Illmitzi Biológiai Állomás vezetőjét, Mag. Dr. Thomas Zechmeister-t és kollégáit, továbbá a Neusiedler See – Seewinkel Nemzeti Park igazgatóját és munkacsoportját is, akik stratégiai partnerekként vettek részt a projektben.

A műszaki jelentésekben és szintézisjelentésekben felsorolt szerzőkön kívül a következő személyek nyújtottak segítséget a projekt során, helyszíni illetve laboratóriumi munkákban: Veronika Kasper MSc, Martin Kvarda MSc, Ruby Pieber, Ing. Bernhard Weidinger (a DWS Hydro-Ökologie kémiai laboratóriuma), Ulrich Donabaum MSc (a DWS Hydro-Ökologie helyszíni munkacsoportja), Richard Haider (Illmitzi Biológiai Állomás), DI Gerhard Lindner (Bécsi Műszaki Egyetem, Vízépítési és Mérnöki Hidrológiai Intézet). Dr. Stefan Schuster (TBS WaterConsult) nagy erőfeszítéssel és különös gondossággal installálta az online vízminőségmérő állomást és irányította a kapcsolódó helyszíni munkákat.

VEZETŐI ÖSSZEFOGLALÓ

Kiindulási helyzet és célkitűzések

2014-ben az Osztrák-Magyar Vízügyi Bizottság egy átfogó interdiszciplináris és bilaterális tanulmányt folytatott annak érdekében, hogy stratégiai célokat fogalmazzon meg a Neusiedler See / Fertő tó régióra vonatkozóan. A tanulmányt készítő konzorcium számos, a hidrológia, az ökológia és a természetvédelem területén tevékenykedő szakértőből, valamint a tó ökoszisztémájának különböző vonatkozásait érintő, a gyakorlat területéről érkező személyekből állt.

Kiderült, hogy minden területen közös megegyezés van a projekt résztvevői között a tekintetben, hogy a szociopolitikai jelentőségű, komplex kihívásoknak csak egyértelmű és átlátható adatok, illetve szilárd tudományos ismeretek birtokában tudunk eleget tenni. A Neusiedler See / Fertő tó régióra jellemző hidrológiai, kémiai valamint ökológiai kölcsönhatások alapos megértése vitathatatlan előfeltétele annak, hogy az érintettek és a politikusok számára egyaránt szükséges alapot teremthessünk potenciálisan messzemenő következményekkel járó döntéseik meghozatalához.

Mindezeket szem előtt tartva egyeztettük és foglalmaztuk meg a Stratégiai Tanulmány célkitűzéseit, továbbá olyan általános intézkedésekre is javaslatot tettünk, melyek ezen célok elérését támogatják. Végül azonosításra kerültek olyan hiányzó ismeretek, melyek pótlása nélkülözhetetlennek bizonyult ahhoz, hogy jobban megérthessük az ökoszisztéma működését.

A REBEN projekt a Neusiedler See / Fertő tavi nádas övhöz kapcsolódó folyamatokra vonatkozó hiányzó ismeretek pótlását tűzte ki célul. Míg a nyílt tóról viszonylag sok leírás készült, jóval kevesebb ismeretanyag áll rendelkezésre a nádas öv esetében, holott az teszi ki a tó teljes területének több, mint felét. Tudjuk azonban, hogy a kiterjedt parti öv rendkívüli fontosságú a tó vízminősége és kezelése szempontjából és ezért a Fertő tó Stratégiai Tanulmány számos központi célkitűzését érinti.

A REBEN projekt keretében egy átfogó mérési, elemzési és modellezési program került kivitelezésre a Neusiedler See / Fertő tavi nádas övben három éven keresztül (2017–2019). Az eredményeket tizenegy műszaki jelentés mutatja be, melyek olyan témákat érintenek, mint a hidrológia, fizikai-kémiai paraméterek, szennyezőanyagok, biológiai közösségek, nádstruktúra és üledék. A program eredményei, melyeket két nemzeti szintézisjelentés foglal össze, teljesítik a REBEN projekt T1 munkacsomagjának feladatait és képezik a T2 munkacsomag alapját, mely azzal a céllal jött létre, hogy közös vízkezelési tervet dolgozzunk ki a Neusiedler See / Fertő tóra vonatkozólag.

Ez az osztrák-magyar szintézisjelentés egyesíti a T1 munkacsomag nemzeti jelentéseit és egy kölcsönös egyetértésen alapuló, közös nézőpontot képvisel a Neusiedler See / Fertő tó nádas övének kulcsfontosságú tényezőit, hajtóerőit és fő folyamatait illetően, a fent említett területeken. Jelen szintézisjelentés célja, hogy vízkezelési szempontból adjon egy mérési rendszert a fennálló állapotról, valamint bemutasson egy értékelési rendszert a lehetséges forgatókönyvekről, ami a nádas öv vízszint- és csatornakerbantartását illeti. Bár a jelentés alapjául helyi / nemzeti eredmények szolgáltak, tartalma a teljes tó területére érvényes és így a kölcsönös vízkezelési terv egyeztetései során kiindulási pontként értelmezhető.

Ökoszisztéma szolgáltatások

A második fejezetben bemutatjuk a Neusiedler See / Fertő tó ökoszisztéma szolgáltatásait, hogy hangsúlyozzuk azon előnyöket, melyeket a tó nyújt az emberek számára, valamint kifejtjük azt is, hogyan, milyen közvetett és közvetlen módokon járul hozzá a tó ökoszisztémája az emberi jóléthez. Ezek ugyanis sokrétűek. Ide tartoznak az ellátó szolgáltatások, mint például a halászat és a nádaratás, a szabályozó szolgáltatások, például a vízminőség szabályozása, de kulturális szolgáltatások, köztük az ökoturizmus és a vitorlázás, és a támogató szolgáltatások, mint például az elsődleges termelés is. Az EU Víz-keretirányelvének megvalósítása is közvetlen kapcsolatban áll az ökoszisztéma szolgáltatásokkal. E szolgáltatások illetve az EU Víz-keretirányelvben definiált, környezettel kapcsolatos célkitűzések megfontolása támogatják a nem valorizált javak jövőbeli, fenntartható fejlesztését a következő generáció számára, valamint elősegíthetik az egymással ellentétes érdekek közti konfliktusok elkerülését, az emberek és az ökoszisztéma érdekében.

Szállítás, folyamatok és terhelés

A harmadik fejezet taglalja az anyagszállítás, a folyamatok és a terhelés témáját, melyek hatással vannak a víz minőségére és a tó nádas övének kémiai és biológiai folyamataira. A Neusiedler See / Fertő tó körüli parti öv a nádas és a vízfelszín komplex mozaikjának számít, gyakran a vízmélység és a nádállomány sűrűségének jellegzetes térgradienseivel együtt, melyek megfelelő fizikai-kémiai gradiensekkel társulnak. Az elemzéseink feltűnő különbségekre világítottak rá a nyílt vízzel szorosan összefüggő területek és a belső nádas öv elszigetelt területei között, mely utóbbinál extrém környezeti körülmények is uralkodhatnak (pl. 35 °C feletti vízhőmérséklet és 6000 $\mu\text{S cm}^{-1}$ feletti elektromos vezetőképesség).

A nádas övre nem csak szélsőséges környezeti viszonyok jellemzőek, hanem a hőmérséklet tekintetében figyelemre méltó változatosság is. Elemzéseinkben megpróbáltunk továbbá különbséget tenni a vízszint és a levegő/víz hőmérséklet periodikus változása által kiváltott hatások és olyan rövidtávú hatások között, melyeket a szél felerősödése / enyhülése vált ki *tóingás* (álló hullámok) kíséretében, melyek a vízszint ingásához és következésképpen a nyílt tótól a nádas felé ill. vissza irányuló hullámok képződéséhez vezetnek.

A hidrológiai változékonyságot a hidraulikus modellezés különböző megközelítéseinek segítségével írtuk le, melyek az anyagterhelés-szállítás számításainak az alapját képezték a lebegőanyagokra, a foszforra (mint fő elemre) és a válogatott szennyezőanyagokra vonatkozóan. A hidraulikus alaphelyzeten kívül a vízhőmérsékletet, a redox körülményeket és a pH-t kulcstényezőkként határoztuk meg, melyek befolyásolják a víz alkotóelemeinek horizontális eloszlását és sorsát. A helyszíni mérések átfogó programjának keretében, számos mintavételen keresztül, online megfigyelőállomások adatainak elemzésével, laboratóriumi elemzések és kísérletek segítségével és végül különböző modellezési megközelítésekkel, a REBEN projekt jelentős módon bővítette a nádas övben zajló folyamatokról szerzett ismereteinket és fontos mennyiségi adatokat szolgáltatott a nyílt tó és a nádas öv közti kölcsönhatásról a csatornákat, belső medencéket és a kiterjedt barna vizű zónákat tekintve.

A szintézisjelentés számításainak egyik fő eredménye az üledékre és a foszforterhelésre irányuló becslés a vízgyűjtő terület és a tómedence illetve a tó különböző szakaszai között. Ehhez mind a REBEN projektben szerzett, mind külső forrásból származó adatokat is felhasználtunk, részben többéves, megbízható adatbázisokat (pl. az 1992–2009-es anyagmérleget), részben pedig hozzávetőleges becsléseket. Ennélfogva a (lebegő és lerakódott) szilárd halmazállapotú és foszforos anyagok egyensúlya nem tekinthető százszázalékos mérlegnek, hanem inkább egy olyan eszköznek, ami nagyságrendileg segít behatárolni a viszonylagosan becsült terhelést és értékelni a különböző elemeket relevancia és fontosság szempontjából.

A terhelésszámítások rávilágítottak, hogy a Vulka (mint a tó fő mellékfolyója) által szállított üledékterhelés túlnyomó része a Donnerskirchen / Purbach közelében található nádas övbe kerül és nem éri el a nyílt tavat. Az odakerülő lebegő szilárd részecskék egy egyenletes üledéklerakódást eredményeznek a környéken, mennyiségük éves átlagban körülbelül 3890 tonnára becsülhető. Egy jelentősen nagyobb teher (kb. 10.000 tonna évente) autoktonikus módon termelődik a tóban kalcitkiválás útján (és egyéb ásványok, például dolomitok és szilikátok kiválásával). Ezek a kalcitkristályok okozzák a nyílt tó vizének jellegzetes turbiditását. A helyszíni mérések és az online megfigyelőállomások adatalemzése során kiderült az is, hogy a nyílt tóban fellelhető, lebegő szilárd részecskék csatornákon keresztül jutnak a nádas övbe, ahol végül nyílt vízi területeken rakódnak le. A

kotrással történő üledékeltávolítás jelentős módon hozzájárulhat a tómedence üledékének exportálásához (kikötőkből: 6800 t, csatornákból 3140 t évente).

A foszforterhelések útvonalai több szempontból is hasonlítanak az üledékterhelésekére: a partikuláris foszforos frakció nagy része, melyet a Vulka szállít a tómedencébe, a nádas övben rakódik le, habár később jelentős mértékű terhelés szabadul fel újra és kerül át a nyílt tóba oldott foszfor formájában. Összességében, a Vulka folyó összes foszfor koncentrációja jórészt a nádas öv szélén éri el a nyílt tavat, igaz különböző formában. Az adatelemzések kimutatták, hogy mind a Vulka folyó külső foszforterhelése, mind a tóban észlelhető koncentráció sokkal kisebb napjainkban, mint az Ausztriában végzett, korábbi átfogó tanulmányok idején, az 1980-as években. A 2017 és 2019 között folytatott öt kampány során (összesen 13 mintavétel) Ausztriában, a nyílt vízben kimutatható ortofoszfát koncentráció ($\text{PO}_4\text{-P}$) sosem haladta meg az $5 \mu\text{g L}^{-1}$ értéket (a nádas övön belül ez maximum $9 \mu\text{g L}^{-1}$ értéket mutatott), míg a korábbi tanulmányokban több, mint $100 \mu\text{g L}^{-1}$ $\text{PO}_4\text{-P}$ koncentráció szerepel. A magyarországi csatornában közepes koncentráció volt észlelhető a REBEN projekt során (a mérések mediánja $30 \mu\text{g L}^{-1}$, $n=151$ volt).

A szennyezőanyagok közül különös figyelmet szenteltünk a válogatott nehézfémeknek és szerves összetevőknek (perfluoroktán-szulfonát PFOS / perfluoroktán-sav PFOA és fluorantén). Az elemzések kimutatták, más-más sorsa van ezen szennyezőanyagoknak. A PFOS rendkívül tartósnak bizonyul a környezetben, de úgy tűnik, túlnyomórészt rövidláncú PFT-vé (metabolitokká) alakul át. Továbbá, adszorpció útján eltűnik a tó vizes fázisából és a lebegő üledékekkel átkerül a nádas övbe, ahonnan eltávolításra kerül a tó vizéből. Ezzel szemben a PFOA eliminációja jóval kevésbé kiterjedt, mint a PFOS esetében és jelentősen nagyobb koncentrációban található meg a tóban, mint a Vulka folyóban. A PFOA releváns adszorpciója az üledékeken kizárható. A fluorantén sorsa hasonló a PFOS-éhez, bár az adatok jeleznek egyfajta kiválási potenciált az üledékgyűjtő területről a nádas övben, hasonlóan a foszforhoz.

A REBEN projekt elemzéseinek középpontjában Európa legnagyobb szikes tavának, a Neusiedler See / Fertő tónak kémiai és fizikai jellemzői álltak, ugyanis ezek erőteljesen befolyásolják a vízi közösségeket. A projekt keretein belül fitoplankton és zooplankton közösségek vizsgálatára is sor került mind az osztrák, mind a magyar oldalon. Különös figyelmet fordítottunk a nádszerkezet vizsgálatára a tó magyar partján. A Neusiedler See / Fertő tó magyar oldalán mutatkozó területi változásokat korai katonai felmérések (1785-1920) során használt archív térképek és 1959 és 2017 között készült légifelvételek segítségével vizsgáltuk. A vizsgálat eredményei szerint a nádas terület aránya a tó magyar oldalán nagymértékben nőtt, a korábbi évek kb. 25%-áról 1959-re kb. 83%-ra. A vízszint 1965-ös szabályozása után a nádas terület növekedése többé-kevésbé megállt (2017-re elérte a kb. 86%-ot). Az öt kijelölt mintavételi helyszín részletes összehasonlítása nem

mutatott jelentős változásokat 1982 és 2017 között, sem megújulás, sem fejlődés tekintetében (kivételt képeznek ezalól a csatornákból és a kotrási üledékekből nyert minták). Azonban országszerte általánosan észrevehető volt a nádas terület kismértékű növekedése (kb. 4 ha/év), Ausztriában a nyílt vízi terület aránya a nádas övön belül 2%-ról 15%-ra nőtt 1979 és 2008 között. Magyarországon kifejezetten ügyelni kell a kiterjedt *Schoenoplectus litoralis* állományra (de az alámerült makrofitákra is, mint például a *Potamogeton pectinatus*, a *Myriophyllum spicatum* és a *Najas marina*), melyek az utóbbi években gyarapodtak a tó magyar oldalán található nyílt vízi területeken.

A REBEN projekt megállapításai néhány évtizedes tapasztalatokon alapulnak és a jövőbeli fejlesztésekkel kapcsolatos megfontolások is egy olyan időintervallumot érintenek, ami a “rövidtől a középtávúig” értelmezhető. A hosszútávú fejlesztéseket röviden taglaljuk, hogy értékelhessük azok potenciális hatását a tóra. Ez utóbbiak az üledékek kalcitkiválás folyamán kialakuló, hosszútávú felhalmozódására és a globális felmelegedés következtében, a vízgyengénységben bekövetkező változásokra fókuszálnak.

Különböző keretfeltételek alapján készített forgatókönyvek és összehasonlító mérés

A szintézisjelentés negyedik fejezetében kifejtjük, hogy a folyamatok és tehergyengénységek hogyan képesek megváltozni különböző feltételek között. Megállapításaink szakértői méréseken nyugszanak, melyek a REBEN projekt átfogó vizsgálatain és következtetésein alapulnak, valamint jelenlegi tudásunkat tükrözik és hozzáértő becslésnek tekinthetők.

Az alábbi forgatókönyveket különböztetjük meg:

- Forgatókönyvek, melyek extrém vízszinthez kötődnek (115,2 m tengerszint feletti magasság alatt versus 115,8 m tengerszint feletti magasság felett)
- Forgatókönyvek, melyek a Vulka folyó nádas övön keresztüli folyásának különböző mintáival kapcsolatosak (a folyó diffúz versus csak lineáris, medren belüli áramlása a nádas övön keresztül)
- Forgatókönyvek, melyek a nádcsatornák hálózatára vonatkoznak (nincsenek csatornák vagy eliszaposodott ill. benőtt csatornák vannak versus a létező hálózat növekedik)

Az összehasonlítás megmutatta, hogy a legjelentősebb hatás ott várható, ahol a nyílt tó és a nádas öv közti kicserélődési folyamatok érintettek. Ez leginkább azokat a csatornákat illeti, melyek a nyílt tavat kötik össze a nádas övvel és így lehetővé teszik a szilárd halmazállapotú anyagok, tápanyagok és szennyezőanyagok hatékony szállítását, valamint a halak számára vonulási útvonalakként és élőhelyként szolgálnak. Azok a forgatókönyvek, melyek ezeket az útvonalakat megteremtik vagy támogatják, a lebegő üledékek és az abszorbeált tápanyagok jelentős exportálásához vezetnek a nyílt tóból a

parti övbe, ezzel javítva a nyílt víz vízminőségét. E forgatókönyvek összehasonlító elemzése arra is rávilágított, hogy a tavat érintő antropogén beavatkozások mennyiségileg releváns hatással bírnak: közvetlenül befolyásolják a tanulmányozott anyagegyensúlyokat kiáramlással (Hanság-csatorna), eltávolítással (kotrás) vagy áttelepítéssel, de közvetetten kihathatnak az üledéklerakódási folyamatokra a nyílt tóban (a védett öblökben) és a környező nádas övben egyaránt.

A fennálló állapot és a különböző forgatókönyvek szerinti lehetséges fejlesztések végső felmérése a Fertő tó Stratégiai Tanulmányban megfogalmazott stratégiai célokra és célkitűzésekre öszpontosított. Az üledéklerakódási folyamatok közvetlenül kapcsolódnak a fő célkitűzések egyikéhez: a “nyílt víz : nád” arány fenntartásához a tó medencéjében. Habár az ezekben a folyamatokba történő (közvetett vagy közvetlen) emberi beavatkozások nehezen egyeztethetők össze azzal a céllal, hogy hagyjuk fejlődni a rendszert és fenntartsuk a zavartalan fizikai-kémiai és biológiai folyamatokat – legalábbis amennyiben ezt a célt nagyon szigorúan értelmezzük. Ez a példa is jól szemlélteti, hogy egyik forgatókönyv sem teljesíti egyszerre a Stratégiai Tanulmány összes célkitűzésében megfogalmazott követelményeket. Néhány esetben még akár azokkal ellentétesnek is látszanak. Ennélfogva szükséges a célkitűzések prioritizálása.

Az egyértelmű, hogy a Neusiedler See / Fertő tó többé már nem egy teljesen természetes és változatlan rendszer, hanem számos hatást megélt: a mesterséges kiáramlás megteremtésétől (a 20. század elején) vízszabályozási mechanizmusokon át (1965-ben és 2011-ben) a vízgyűjtő területet érintő szignifikáns változásokig és az azt követő eutrofizációs folyamatokig valamint a fürdőterületek és kikötők növekvő terjeszkedéséig (a 20. század második felében). Következésképpen a tó és különösen annak parti öve jelentős változásokon ment keresztül, melyek közül a legszembetűnőbb a nádas öv figyelemre méltó terjeszkedése az 1860-as ill. 1950-es évek száraz periódusai során. Kevés kétség fér hozzá, hogy a hidrológiai hatások és az azokkal járó változások a tó kémiai rendszerében voltak a nádas növekedésének fő tényezői. Kiemelkedő természeti értéke ellenére a tó egy megváltozott rendszer – rendkívül összetett és különösen sebezhető. Ennek korai felismerése komoly erőfeszítéseket vont maga után, melyek arra irányulnak, hogy ellensúlyozzák ezt a negatív tendenciát. Az Osztrák-Magyar Vízügyi Bizottság erőfeszítései, mint például a közös gátszabályozás és a külső szennyezőanyagok csökkentése a vízgyűjtő területen (főként az 1980-as évek óta), továbbá egy bilaterális Nemzeti Park létrehozása 1993-ban fontos mérföldköveknek tekinthetők az ökoszisztéma ökológiai integritásának fejlesztése és helyreállítása során, valamint egyben nagymértékben hozzájárulnak egy fenntartható vízkezeléshez. Ezenkívül átfogó megfigyelő programok is indultak, először az Osztrák-Magyar Vízügyi Bizottság kezdeményezésében, később helyi és nemzeti szinten is az elmúlt 20 évben az EU Víz-keretirányelv követelményei alapján. Mindezek a két ország együttműködésében

valósultak meg és a vízkezelés ill. természetvédelem szakembereinek és érintettjeinek bevonásával. Ebből logikusan következett a bilaterális Neusiedler See – Seewinkel / Fertő Hanság Nemzeti Park bevonása is a REBEN projektbe mint a két nemzeti vízügyi hatóság stratégiai partnere.

Azonban még mindig sok a tennivaló. Évtizedekkel azután, hogy egyrészt negatív antropogén hatások érték a tavat, másrészt pozitív erőfeszítések és lépések történtek ezek javítására, meggyőződésünk, hogy a tavat nem szabad sorsára hagynunk. Egy effajta megközelítés természetesen teljesen indokolt a Nemzeti Park természetvédelmi területén, de csakis ott és az egész rendszer részeként. A tó fennmaradó nagyobb részét nézve konkrét intézkedéseket kell egyeztetni és meg kell határozni, hogy a Stratégiai Tanulmány célkitűzései hogyan valósíthatók meg, illetve a tó miként tudja megőrizni ökológiai értékét és biztosítani a fenntartható használat lehetőségét. Ezzel foglalkozik a Kezelési Terv, melynek célja, hogy összehangolja a különböző érdekeket és célkitűzéseket, szem előtt tartva az érintett, egymásnak ellentmondó ill. egymással szembenálló folyamatokat.

1 BEVEZETÉS

1.1 Kiindulási helyzet

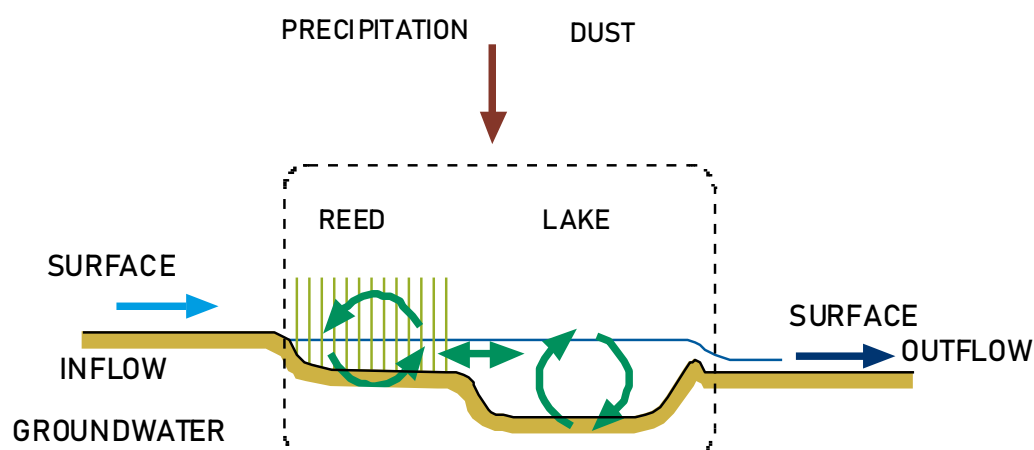
2014-ben egy átfogó interdiszciplináris és bilaterális tanulmány (Wolfram *et al.* 2014) stratégiai célokat fogalmazott meg a Neusiedler See / Fertő tó régióra, melyek eléréséhez a szerző összesen 74 intézkedést javasolt, közülük 27-et a vízkezelés, míg 18-at a limnológia területén.

Manapság általános egyetértés van a tekintetben, hogy a szociopolitikai vonatkozású, összetett kihívásoknak csak szilárd tudományos ismeretek birtokában lehet eleget tenni és ez a megállapítás a stratégiai tanulmányban megfogalmazott célokra is érvényes. Az a tény, hogy ezen célok részben akár egymásnak ellentmondó dokumentumok is, megnehezíti a különböző érdekek közti kompromisszum megteremtését, és egyben még inkább hangsúlyozza egy megbízható műszaki alap szükségességét bizonyos intézkedésekre vonatkozó döntések meghozatala ill. elvetése során. Hogy egy, a koronavírus válság során felkapott szakkifejezéssel éljünk: az intézkedéseknek bizonyítékokon kell alapulniuk. Ahhoz, hogy az érintettek és a politikai döntéshozók számára megteremthessük a potenciálisan hosszútávú következményekkel járó döntéseik meghozatalához szükséges bizonyosságot, mindenképpen alaposan kell értenünk a hidrológiai, kémiai és ökológiai kölcsönhatásokat.

Más közép-európai vizekkel összehasonlítva, a Neusiedler See / Fertő tó egy sokat kutatott ökoszisztéma és a tanulmány szerzői képletesen érte olyan nagy elődök nyomdokaiba lépnek, akik az 1960-as évek óta rengeteg vizsgálatot folytattak a tó hidrológiájával, szedimentológiájával, kémiájával és biológiájával kapcsolatban. E tanulmányok többsége azonban nem csak új tudást adott, hanem új kérdéseket is felvetett és néha még olyan dolgok megvalósításához is vezetett, amiknek mi csak a felszínét kapargatjuk tudományos törekvéseink során. A Neusiedler See / Fertő tó mérete és összetettsége ugyanis gyakran határt szab az ökoszisztéma folyamatainak és dinamikájának holisztikus és modellalapú megértését illetően.

Vízi ökológiai szempontból a nyílt tó viszonylag jól feltérképezett és ismert (Herzig & Dokulil 2001; Löffler 1979). Sokkal kevesebb ismeretünk van azonban nádas övről, holott az teszi ki a Neusiedler See / Fertő tó teljes területének több, mint felét. Tudjuk azonban, hogy a kiterjedt parti öv rendkívüli fontosságú a tó vízminősége és kezelése szempontjából és ezért a Fertő tó Stratégiai Tanulmány számos központi célkitűzését érinti (Wolfram *et al.* 2014).

A Neusiedler See / Fertő tó nádas övének fő vizsgálatát Ausztriában végezték az 1980-as években (Brossmann *et al.* 1984), míg Magyarországon az 1960-as évek elején kezdtek el vizsgálatokat folytatni (Tóth & Szabó 1962). Számos tanulmány foglalkozott a Vulka folyó által szállított anyagok tóba kerülésével (Stalzer *et al.* 1986; Von der Emde *et al.* 1986), a nádvágás hatásaival (Gunatilaka 1986) és a nádas öv biológiai körülményeivel (Burian *et al.* 1986; Hacker & Waidbacher 1986). Tekintettel arra, hogy akkoriban a legsürgősebb feladat a Neusiedler See / Fertő tó eutrofizációjának csökkentése volt, a hangsúly főként a Vulka torkolatánál található nádas övre helyeződött és csak ritkábban más területekre, mint például Rust (Stalzer & Spatzierer 1987) vagy Illmitz (Metz 1984). Leegyszerűsített formában, Stalzer & Spatzierer (1987) szerint, a belépés és a konverziós folyamatok a következőképpen néznek ki (1. ábra):



1. ábra. A Neusiedler See / Fertő tóban zajló bemeneti, kimeneti és belső folyamatok sematikus vázlata. Forrás: Stalzer & Spatzierer (1987) (módosított változat).

Az 1980-as évek vizsgálatainak eredményei fontosnak számítottak már a jelenlegi projekt tervezési fázisában is, mintegy hivatkozási alapot nyújtva saját vizsgálati megállapításainkhoz egészen a kezdetektől. Azonban hamar kiderült, hogy a korábbi vizsgálatok csak korlátozottan voltak összevethetőek a jelen felmérésekkel és eredményeik közül többet nem is lehetett átvinni az aktuális helyzetre. Ennek oka egyrészt a megváltozott körülményekben keresendő (bemenet a vízgyűjtő területéről, a Vulka folyása a nádas övön keresztül, az úgynevezett tavi gát túlfolyása), másrészt módszertani szempontokra is visszavezethető (pl. egyéni mintavétel versus vízminőségmérő állomások).

Napjainkban a Neusiedler See / Fertő tó vízgyűjtő területének ausztriai oldalán a kezelt (C, P, N eltávolítás) szennyvízterhelés a következő:

- a szennyvíz a Vulka-völgyből a Vulka folyón át közvetett módon kerül a Neusiedler See / Fertő tóba,

- a nyugati régióból (Windentől Mörbisch-ig) a Vulkán át közvetett módon a Neusiedler See / Fertő tóba
- a nyugati régióból (Jois), egy patakon keresztül a Neusiedler See / Fertő tóba
- az északi régióból (Neusiedler See, Weiden, Parndorf) a vízgyűjtő területen kívül, a Lajta folyón keresztül, egyesített szennyvíztúlfolyásokból, patakokon keresztül a Neusiedler See / Fertő tóba
- Gols-ból és Mönchhofból a Gols-csatornán keresztül közvetett módon a Neusiedler See / Fertő tóba,
- Illmitz régióból a vízgyűjtő területen kívül a Hanság-főcsatornába.

Száraz időben az átlagos szennyvízáramlás, ami a vízgyűjtő területen kívülről kerül be, körülbelül 2 millió m³-t tesz ki évente (ez a szám a Neusiedler Seeből, Parndorfból és Weidenből történő szennyvízelvezetés összege száraz időjárás esetén; az éves átlagok napi 5000 és 7000 m³ között ingadoznak).

A tó magyarországi részét érintő osztrák kutatások alapján a tápanyagegyensúly javult (Pannonhalmi 1984). A tápanyagok, különösen a foszfor tóba történő bevitelének fő forrása mind a múltban, mind napjainkban a Rákos-patak, ami a fő felszíni beáramlás a tó magyarországi részén.

1995-ben elkészült a szennyvízcsatorna-rendszer a Neusiedler See / Fertő tó déli részén található települések számára, és azóta az összegyűjtött szennyvizet a tó vízgyűjtő területén kívül, Fertőendrédben kezelik és az Ikva-patak fogadja be.

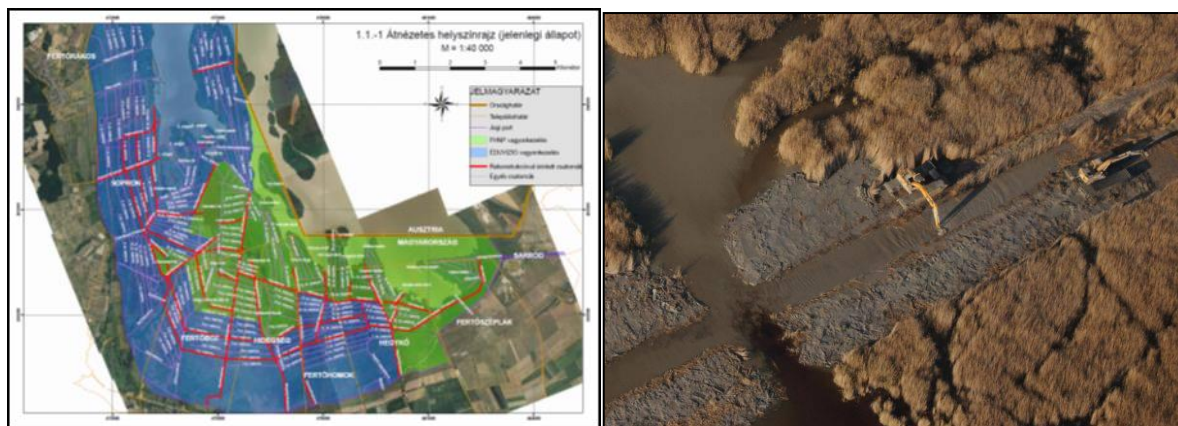
2000-ben elkezdődtek a tervezési munkálatok, hogy csökkentsék a tó közvetlen terhelését a magyar oldalon és 2004-ben két mesterséges lápos területet létesítettek: egyet a fertőrákosi szennyvíztisztító telep számára (beleértve az üdülőterületet) és egyet a Rákos-patak vízfolyásának.

Miután a fertőrákosi szennyvíztisztító telep munkálatai befejeződtek és egy vízátemelő vette át a helyét, 2009-től kezdve a szennyvíz tisztítása Sopronban zajlik (Sopron STP) és az Ikva-patak fogadja be. A Rákos-patak mesterséges lápos területe még mindig működik.

Az utolsó, pontszerű szennyezőforrást, Balf falu szennyvizét 2014-ben kapcsolták a Sopron STP-hez.

2014 óta összességében semmilyen kezeletlen vagy kezelt kommunális szennyvízterhelés nem kerül a magyar oldalon a Neusiedler See / Fertő tóba, ennél fogva többé nincs nyoma sok szerves anyagnak, például gyógyszermaradványoknak.

A nádas egy körülbelül 300 km hosszú csatornarendszerrel rendelkezik, melynek egy részén 2014 és 2015 között a KEOP projekt keretén belül áramlásfejlesztési rekonstrukciós munkákat hajtottak végre.



2. ábra. Csatornarekonstrukció – 2014 (Fotó: FHPNI, Pellingner A.)

Ezért a REBEN projekt célja az volt, hogy ellenőrizze a korábbi következtetéseket és egyben időben és térben kibővítse az ott megfogalmazott ismereteket. A REBEN projekt új megállapításokra jutott a Vulka torkolatát illetően, valamint a Vulka torkolatától távol eső nádas öv (Mörbisch, Illmitz, a nádas öv magyar oldala) és a tó közti kicserélődés vonatkozásában is. Mindezekon túl mérőföldkőnek tekinthetők a kicserélődési folyamatok modellezésének különböző megközelítései, amik először adnak lehetőséget a tóbelső anyagmérlegeinek mennyiségi meghatározására.

A következő oldalakon a REBEN projekt struktúráját és célkitűzéseit mutatjuk be, majd a szintézisjelentés azt követő fejezeteiben összefoglaljuk a legfontosabb kutatási eredményeket.

1.2 Projektstruktúra és célkitűzések

1.2.1 T1 és T2 munkacsomag

A REBEN projekt két **munkacsomagra** bontható:

- T1 Szakértői felmérések az alábbi témákban: hidrológia, fizikai-kémiai paraméterek, szennyezőanyagok, nádszerkezet és üledék
- T2 Egy közös kezelési terv kifejlesztése a Neusiedler See / Fertő tó vízkezelését illetően

Az előző vizsgálatok eredményeit alapul véve, a T1 munkacsomag azt tűzte ki célul, hogy megszüntesse a komoly tudásbeli hiányosságokat és létrehozza a vízkezeléshez szükséges adatbázist. A különböző hidrológiai, kémiai és biológiai vizsgálatok elvégzésével ugyanis fejleszteni kell a vízről, a nádas öv és a nyílt víz közti tömegátvitelről, valamint ezen folyamatok vízminőségre vetített relevanciájáról alkotott tudásunkat.

A T1 MCS **négy moduljának célkitűzései** az alábbiak szerint fogalmazhatók meg:

Ausztria

Hidrológia A már rendelkezésre álló éghajlati és vízrajzi adatok értékelése; nyomás- (vízszint) és hőmérséklet-adatgyűjtők kiegészítő installálása; mérési kampányok folytatása a nádas öv áramlási viszonyainak mérésére; vízegyensúlyra vonatkozó számítások elvégzése tipikus (területi, éghajlati és hidrológiai) forgatókönyvekre vetítve; ezen forgatókönyvek szerinti, a nádas öv részeire vonatkozó hidraulikus modellezés

Kémia/Biológia Nyílt víz: Általános fizikai-kémiai paraméterek ellenőrzése a vízoszlopban; vízminőség-ellenőrző állomások installálása a dinamika jellemzésére

Üledék: az üledék jellemzése EEM fluoreszcencia spektroszkópia segítségével; tápanyagtranszformációs folyamatokkal kapcsolatos laboratóriumi kísérletek elvégzése (redisszolúció, immobilizálódás); az üledék foszforfrakcionálása

Biológiai minőségkomponensek az EU-VKI szerint: planktonikus és bentikus közösségek

Szennyezőanyagok Rétegzett mintavétel a nádállomány különböző típusaiból, valamint válogatott nehézfémek és szerves nyomanyagok elemzése; válogatott anyagok üledékben történő adszorpciójának és mobilizációjának laboratóriumi tesztelése; válogatott szerves nyomanyagok biológiai és fotokatalitikus lebomlásának az üledékre és a nyílt vízoszlopra vonatkoztatott összehasonlító laboratóriumi vizsgálata; többhetes tesztállítás: gazdagodás/degradáció aerob/anaerob körülmények között, különböző pH-értékek mellett

Nád/Üledék Az üledék szerkezetének és összetételének vizsgálata hidrológiai körülmények függvényében, számos időpontban

Magyarország

A tó hidrológiai és hidrodinamikai adottságait a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME) vizsgálta. A tó vizéből és a fenéküledékből az

ÉDUVIZIG személyzete vett mintákat, míg azok fizikai és kémiai elemzését a Győr-Moson-Sopron Megyei Kormányhivatal Győri Járási Hivatal Népegészségügyi Osztálya, Laboratóriumi Osztálya, ill. Környezetvédelmi Mérőközpontja végezte. A Központ fitobentosz mintákat is vett ill. bentikus algákból vett és elemzett mintákat, valamint ezekre az adatokra alapozva értékelte az ökológiai állapotot. Az Ökológiai Kutatóközpont (ÖK) jellemezte a fitoplanktonokat, zooplanktonokat és a vízben lebegő ill. a fenékhez rögzült nádfüvet. Dr. Vörös Lajos és Dr. Zsuga Katalin szakértők alvállalkozóként vettek részt a vizsgálatban, míg a BME Dr. Király Gézát bízta meg a nádszerkezet vizsgálatával.

A T1 MCS négy moduljában folytatott kutatások eredményeit az **ágazati jelentések** ismertetik részletesen. A kutatási program változásaiban a projektpartnerek megegyeztek. Technikai okokból helyénvalónak tűnt, hogy az eredményeket az alábbi ágazati jelentésekben kissé módosított formában foglaljuk össze:

Ausztria

1. jelentés Hidraulikus modellezés
2. jelentés Nád (GeNeSee adatok feldolgozása, a nád felhasználásának területei)
3. jelentés A nyílt víz és az üledék általános fizikai-kémiai paraméterei; szennyezőanyagok (nyomanyagok)
4. jelentés Biológia
5. jelentés Online mérések (vízminőségmérő állomások) és helyszíni felmérések
6. jelentés Laboratóriumi vizsgálatok

Magyarország

1. jelentés Hidrológiai és hidrodinamikai állapotok
2. jelentés Tesztelési módszerek és a víz- és üledékminták eredményeinek értékelése
3. jelentés Fitobentoszok vizsgálata
4. jelentés Biológiai vízminőség paraméterek vizsgálata (fitoplankton, zooplankton, vízi makrofiták)
5. jelentés A nádszerkezet vizsgálata

1.3 Értékelési referenciamutató

A **jelen szintézisjelentés** az alábbiakat hivatott szolgálni:

- a T1 MCS eredményeinek összefoglaló bemutatása,
- a fennálló állapot értékelése hidrológiai, fizikai-kémiai, limnológiai és vízkezelési szempontból és
- az alternatív forgatókönyvek kiértékelése a megváltozott körülmények tükrében.

A tényleges állapotot (T1 MCS leírása) és a különböző körülményekre vetített értékelést alapul véve, a szintézisjelentés vízkezelési javaslatokat ad, melyek a T2 munkacsomagban kerülnek megfogalmazásra (kezelési terv).

A **fennálló állapot értékelése** a fő **vízkezelési célkitűzésekre** való tekintettel történt, Wolfram et al. (2014) **stratégiai tanulmánya** alapján. Ezeket az 1. Táblázat foglalja össze és három fő pontot érintenek:

- az üledéklerakódás veszélye a tóban (és különösen a nádas övben)
- a vízminőség védelme (kémia)
- egy jó ökológiai állapot megőrzése (biotikus közösségek)

A szintézisjelentés célja, hogy egy olyan értékelést adjon helyi szintű kutatási eredmények alapján (Ausztria három vizsgálati területe és a magyarországi ellenőrzőpontok), ami a tó egészére érvényes. Hasonlóképpen, a kezelési terv (T2 munkacsomag) sem csupán helyi vonatkozású intézkedéseket tűz ki célul, hanem a tó egész területére nézve, mind az osztrák, mind a magyar oldalon.

1.táblázat. Fontos vízkezelési célok a "Strategy study Lake Neusiedl" (Wolfram et al. 2014) alapján.

Területek	Vízkezelési célok
Hidromorfológia	<ul style="list-style-type: none"> • A tómedence hidromorfológiai jellemzőinek megőrzése a nyílt vízben és a nádas övben (tájelem) • Kontrollálatlan üledékképződés megelőzése a nádas övben (nyílt víz <i>versus</i> nád aránya) • A nádas és a tóvíz közti kicserélődési mechanizmusok garantálása ("vízminőség")
Nádas öv	<ul style="list-style-type: none"> • A nádas öv egyedülálló jellegének megóvása konzerválás és fenntartható kezelés segítségével (tájelem) • A nádas sokrétűségének megőrzése és a nád növekedésének korlátozása (nyílt víz <i>versus</i> nád aránya) • A nádas öv megőrzése mint a Neusiedler See / Fertő tó ökoszisztémájának szerves része ("vízminőség")
Fizikai-kémiai paraméterek	<ul style="list-style-type: none"> • A tó természetes kémiájának megőrzése mint az ökológiai működés és a jó ökológiai állapot előfeltétele (sótartalom, pH, tápanyagok) • A fizikai-kémiai paraméterek természetes területi és időbeli dinamikájának megőrzése • Alacsony táplálkozási szint • Alacsony külső és belső tápanyagterhelés
Szennyezőanyagok	<ul style="list-style-type: none"> • Egy jó kémiai és ökológiai állapot fenntartása (specifikus és elsődleges szennyezőanyagok, EU VKI VIII. és X. melléklete)
Biológia	<ul style="list-style-type: none"> • Jó ökológiai állapot megőrzése • A biológiai sokszínűség, bőség és produktivitás természetes térbeli és időbeli változatosságának megőrzése • A biológiai folyamatoknak nagyrészt zavartalanul kell lezajlania

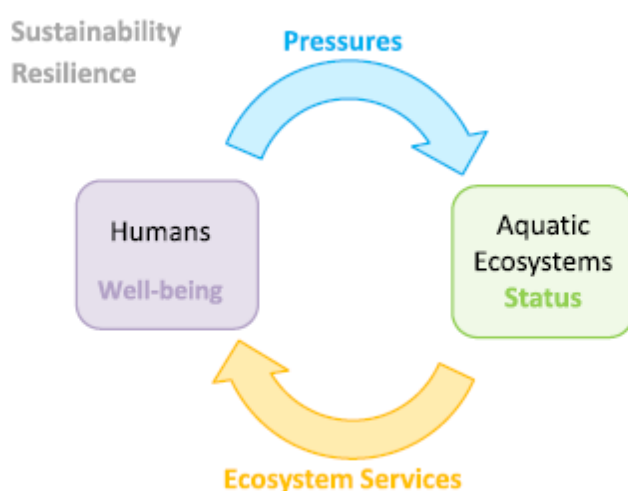
1.4 A szintézisjelentés struktúrája

Az előző részekben megfogalmazott feladatokkal összhangban, a szintézisjelentés a következő fejezetekre bontható:

- 3. Fejezet Anyagszállítás, folyamatok, terhelések
 - 3.1 Fejezet A vízgyűjtő területről származó bevitelek
 - 3.2 Fejezet Térbeli mintázatok és gradiensek
 - 3.3 Fejezet Kicserélődési folyamatok
 - 3.4 Fejezet Anyagmérlegek
 - 3.5 Fejezet Hosszútávú tendenciák
- 4. Fejezet Különböző körülményekre készített forgatókönyvek
- 5. Fejezet A fennálló állapot és az alternatív forgatókönyvek értékelése
- 6. Fejezet Tudásbeli hiányosságok és nyitott kérdések

2 ÖKOSZISZTÉMA SZOLGÁLTATÁSOK

Ökoszisztéma szolgáltatások alatt egyrészt azokat az előnyöket értjük, amiket az emberek az ökoszisztémából nyernek (Millenium Ecosystem Assessment (MEA)) (Reid et al. 2005), másrészt az ökoszisztéma közvetlen és közvetett hozzájárulását az emberi jóléthez (TEEB 2010). A biológiai társulásokra és biotópokra vonatkozó erőforrások és szolgáltatások létfontosságúak az emberi jóléthez és meghatározzák a jövőbeli gazdasági és szociális fejlődést (3. ábra).



3. ábra. Az ember és az ökoszisztéma kapcsolata (Forrás: Grizzetti et al. (2016)).

A gazdaságra és az ökoszisztéma szolgáltatások osztályozására vonatkozó alapvető megközelítések a The Economics of Ecosystem and Biodiversity (TEEB) és a Common International Classification of Ecosystem Services (CICES) (Haines-Young & Potschin 2012). A hétköznapi felhasználók számára folytatott MEA kutatások szerint az ökoszisztéma szolgáltatások kifejezés azokra az előnyökre utal, amiket az emberek a természettől nyerhetnek. Ezek az előnyök lehetnek valorizáltak és nem valorizáltak ugyanazon ökoszisztémán belül, illetve jelen lehetnek különböző időben, térben és mértékben. Az ökoszisztéma szolgáltatások fő hajtóereje a biológiai sokszínűség. A gazdag flóra és fauna erős természetes állapotot és szolgáltatási lehetőségek sokaságát jelenti.

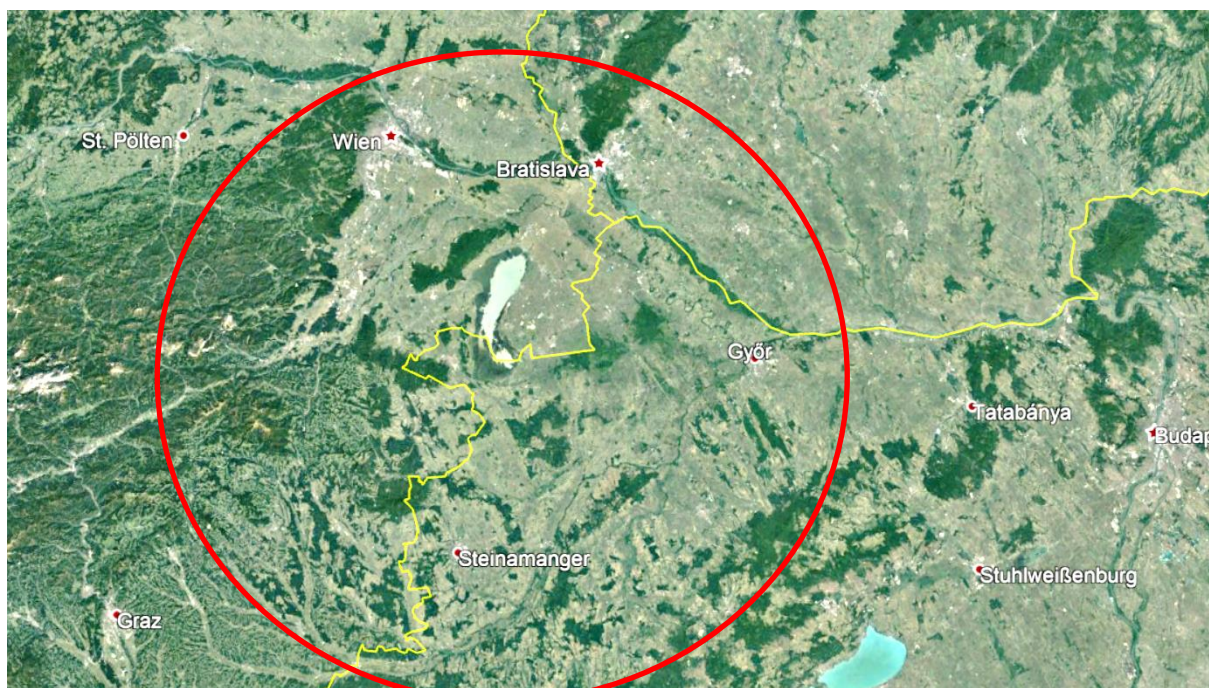
A MEA szerint négy vízzel kapcsolatos ökoszisztéma szolgáltatás létezik a Neusiedler See / Fertő tó esetében, ezeket a 2. táblázat foglalja össze.

2. táblázat. Vízzel kapcsolatos ökoszisztéma szolgáltatások a Neusiedler See / Fertő tó esetében.

Ellátó szolgáltatások	Szabályozó szolgáltatások	Kulturális szolgáltatások	Támogató szolgáltatások
Haltermelés	Vízminőség szabályozás	Táj megtekintése	Tápanyagciklus
Halászat	Helyi éghajlat szabályozása	Rekreáció	Elsődleges termelés
Nádaratás		Ökoturizmus	
		Sporthorgászat	
		Vitorlázás	
		Szabadidős csónakázás	
		Vízisportok	
		Szabadtéri színpad	

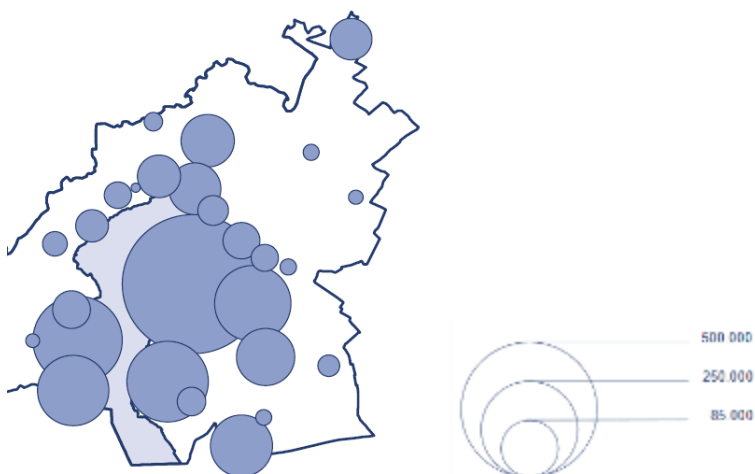
A Magyar Tudományos Akadémia tudósai megvizsgálták az ökoszisztémák mindennapi életünkben betöltött szerepét (Báldi *et al.* 2017) és e szempontból legfontosabbnak a Balatont tartják, ám jópár megközelítés a Neusiedler See / Fertő tó esetében is igaznak bizonyult.

A Víz-keretirányelv (VKI) megvalósítása szoros összefüggésben áll az ökoszisztéma szolgáltatásokkal. A VKI legfőbb célja a Neusiedler See / Fertő tó esetén egy jó ökológiai és kémiai állapot megteremtése és megőrzése, és ez, valamint az intézkedési programok ki kell, hogy elégítsék az ökoszisztéma szolgáltatásokkal kapcsolatos igényeket is (2011. 6. Víz Világfórum). Az egyik fő célkitűzés a folyamat során az, hogy megtaláljuk annak módját, hogy a következő generáció számára a nem valorizált javakat a jövőben fenntartható módon fejleszthessük. Az emberi nyomás a tóra ugyanis hatalmas, hiszen 100 km-es körzetben két főváros is található, összesen több, mint 3 millió lakossal (4. ábra).



3. ábra. Neusiedler See / Fertő tó – A közvetlen emberi behatás területe. Forrás: Google Earth.

A vízgyűjtő területnek nincs jelentős ipara. A helyiek bevételi forrását a turizmus, a mezőgazdaság és a kapcsolódó szolgáltatások adják, így az úgynevezett turizmusipar dominál. 2019-ben a Neusiedler See / Fertő tó ausztriai oldalán a szállóvendégek száma több, mint 1,6 milliót tett ki (5. ábra). A látogatók döntő részben Podersdorf keleti parti külterületein veszik igénybe a tó szolgáltatásait (Statistik Burgenland 2020). Ezzel szemben a magyar oldalon jóval kisebb ez a szám, de Fertőrákos turisztikai infrastruktúrája jelentős fejlesztés alatt áll.



4. ábra. Szállásfoglalások a Neusiedler See / Fertő tó régióban 2019-ben (Forrás: Statistik Burgenland (2020)).

Az éghajlati adottságok és a széljárás – a napsütéses órák száma több, mint 2000 évente – kedveznek a vitorlázásnak, körülbelül 4150 kikötőhely található a tó osztrák oldalán (Kurier 2018). A határokon átnyúló nemzeti park kínálja ökoturizmus a The International Ecotourism Society (TIES 2019) szerint “a természeti területekre történő utazások egy felelős módja, mely megőrzi a környezetet és fenntartja a helyiek jólétét, miközben az értelmezés és oktatás területeit is érinti”. A TIES az alábbi javaslatokat fogalmazza meg a területre vonatkozó alapelvekként:

- környezeti és kulturális tudatosságra és tiszteletre nevelés
- pozitív élmények megteremtése a látogatók és a vendéglátók számára egyaránt
- a természetvédelem közvetlen pénzügyi előnyeinek biztosítása
- pénzügyi előnyök megteremtése mind a helyiek, mind a magánszektor számára
- emlékeztető, nevelő élmények nyújtása, melyek érzékenyebbé teszik a látogatókat a vendéglátó ország politikai, környezeti és szociális körülményeire
- alacsony környezeti hatású létesítmények tervezése, építése és működtetése
- fizikai, szociális, viselkedésszerű és pszichológiai hatások minimalizálása
- a helyiek jogainak és vallási meggyőződésének felismerése a saját közösségen belül, megteremtve ezzel a jó partneri együttműködést és tudatos magatartást

A szabályozó szolgáltatások és a helyi éghajlati adottságok jelentős hatást gyakorolnak a Neusiedler See / Fertő tó régió bortermelésére és zöldségtermesztésére. Az elmúlt évtizedek során az ellátó szolgáltatások, mint például a nádfelhasználás és a kereskedelmi célú halászat szerepe csökkent, de lehetőségük még mindig adott. Mindkettő összefügg más szabályozó szolgáltatásokkal is, mint például a vízminőség szabályozása, amit a REBEN projekt multidiszciplináris megközelítése is vizsgált és értékelt.

Továbbá különös figyelmet kell fordítani arra is, hogy ne aknázzuk ki túlzott mértékben az ökoszisztéma szolgáltatásokat, mert annak végeredménye drámai következményekkel járna az egész rendszer számára és a másodlagos felhasználókat is negatívan érintené. A korábbi ökoszisztéma szolgáltatások helyreállítása vagy újbóli megteremtése ugyanis nagyon költséges és nem mindig találkozik a helybeliek igényeivel és elképzeléseivel.

A közeljövőben mindinkább sürgetővé válik a Neusiedler See / Fertő tó ökoszisztéma szolgáltatásainak minél hatékonyabb összekapcsolása a környezetre vonatkozó célkitűzésekkel azért, hogy az emberek és az ökoszisztéma érdekében elkerülhetővé váljanak az ellentétes érdekekből eredő konfliktushelyzetek.

3 ANYAGSZÁLLÍTÁS, FOLYAMATOK, TERHELÉSEK

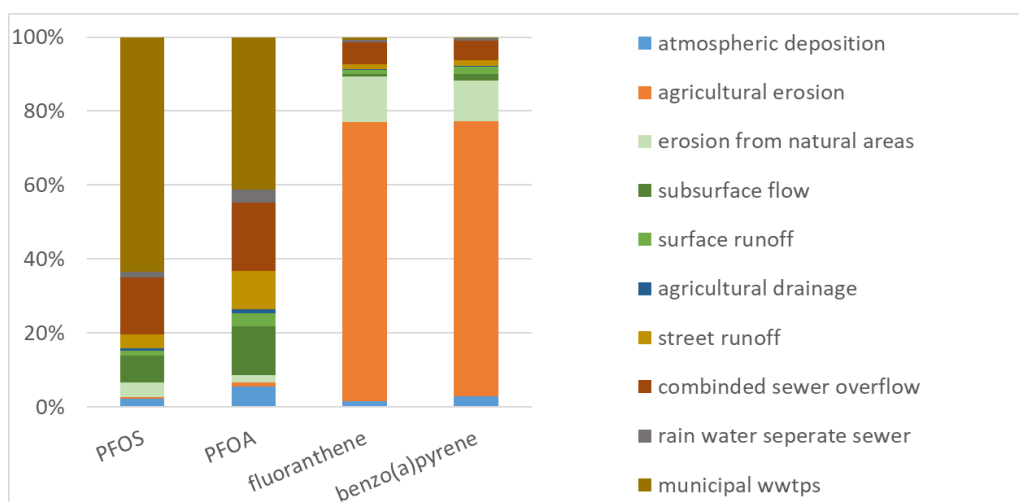
3.1 A vízgyűjtő területről származó bevitel

■ Bevitel a Vulka folyóba

A Vulka a Neusiedler See / Fertő tó legfőbb mellékfolyója és – a légköri inputon és a szennyvíztisztító telepeken kívül, amik a nádas övön keresztül, különböző csatornákon át jutnak a tóba (Jois, Gols, Podersdorf szennyvíztisztító telepei) – egyben a külső tápanyagok legfontosabb beviteli forrása is a víztestbe. Ez egyrészt a vízgyűjtő területen végzett intenzív mezőgazdasági használatnak köszönhető, melyből jelentős mennyiségű, részecskékhez kötött tápanyag mosódik bele a Vulkába. Másfelől, Észak-Burgenlandban viszonylag alacsony a csapadék mennyisége Ausztria más régióival összehasonlítva, és száraz időszakokban a szennyvíztisztító telepekről származó kezelt szennyvíz kibocsátása a vízgyűjtő területen a Vulka alacsony vízkibocsátásának több, mint 50%-át teszi ki (Wolfram et al. 2019).

Míg a lebegő szilárd részecskék terhelése a Vulkában szinte kizárólag mezőgazdasági erózióból ered, a foszforkibocsátás hosszútávon átlagosan közel 70%-ot tesz ki ezen a beviteli forráson keresztül és szemcsés formában kerül a Vulkába. A nitrogén esetében a bevitel nagyrészt oldott formában történik a talajvízen és mezőgazdasági vízelvezető rendszereken keresztül. A mezőgazdasági erózió és a részecskeszállítás relatíve jelentéktelen. Miután a szennyvíztisztító telepek működését nagymértékű foszfor- és nitrogéneltávolítással fokozták, a kiömlő szennyvíz a nitrogén- és foszforkibocsátás mintegy 20-25%-át tette ki a Vulkát illetően.

Nyomanyagok és szennyezőanyagok is kerülnek a Vulkába szórt vagy pontszerű formában. A 6. ábra egy becslést szemléltet a PFOS, PFOA, benzo(a)pirén és fluorantén paraméterek beviteli útvonalainak megoszlására, magára a Vulkára vonatkozóan, valamint a Vulka teljes vízgyűjtő területére is, beleértve a tó felszínén található lerakódást is. Míg a PFOS és a PFOA perfluorált tenzidek főként szennyvíztisztító létesítményeken keresztül jutnak a Vulkába, a PAH-ok leginkább erózióval terjednek szét (Zessner et al. 2019). Valószínűleg a légköri lerakódás is nagy szerepet játszik magában a tóban, azonban a mennyiségi adatok nagyon bizonytalanok a kisszámú mintavétel miatt.

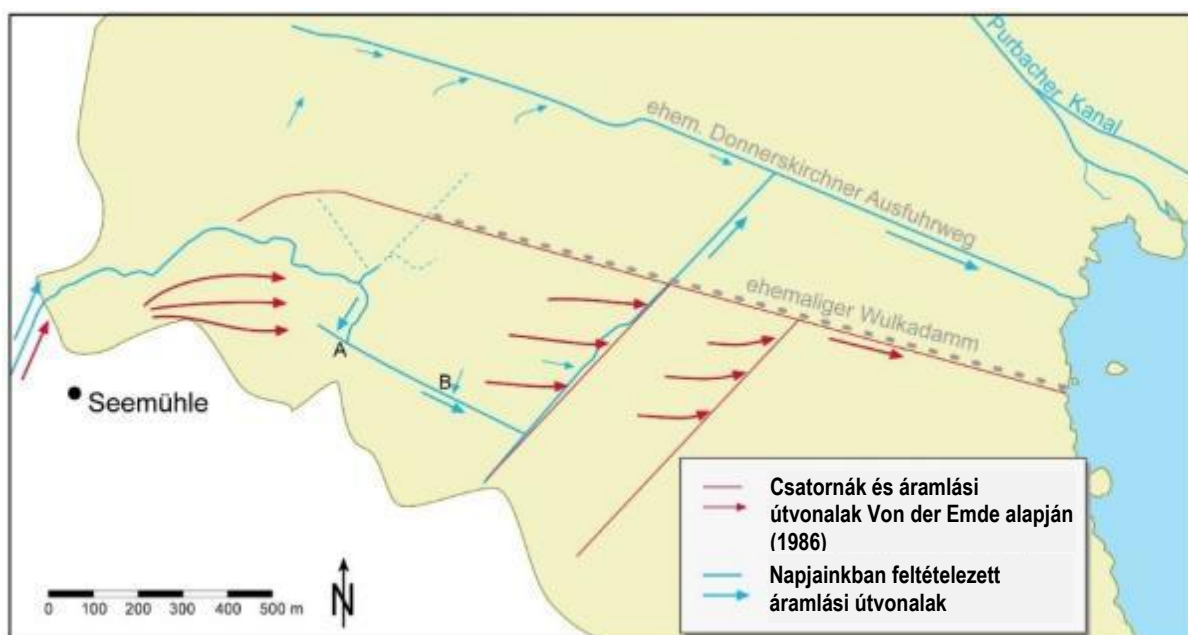


6. ábra. Kibocsátási útvonalak a Vulka folyóba (Zessner et al. 2019).

■ Bevitel a Vulkából a Neusiedler See / Fertő tóba

Mielőtt a Vulka ténylegesen belefolyna a Neusiedler See / Fertő tóba, keresztül folyik a nádas övön, ahol több kilométer széles. Ahogy azt régóta tudjuk, ez az a terület, ahol sokrétű és összetett átalakulási és lebomlási folyamatok mennek végbe. Az a tény, hogy a korábbi vizsgálatok eredményeit nem lehet közvetlenül átvinni a jelen helyzetre, azzal magyarázható, hogy a Vulka útvonala a nádas övön keresztül már több évtizede folyamatos változásoknak van kitéve és a pontos áramlási útvonalról a projekt kezdetekor nem rendelkezünk kellő ismeretekkel.

Mint ahogy azt a terület többszöri vizsgálata megmutatta, a nádas övön keresztül folyó, egykor széles áramlat ma már nem olyan kiterjedt, mint amilyen korábban volt. Ez arra vezethető vissza, hogy a csatorna rendszeres helyreállítása során az üledék a nádcsatornák mentén rakódott le, hosszirányú gátakat létrehozva. Ezek pedig csak nagyon ritkán nyitnak utat egy keresztirányú áramlásnak. A részletekben van azonban némi bizonytalanság, különösen ami az áramlási útvonalakat illeti a Vulka magasabb vízállásainál. Mindenesetre manapság a Vulka folyó alacsony és közepes méretű kibocsátása esetén lineáris áramlás dominanciája figyelhető meg mesterséges csatornákon keresztül (5 ábra) (Wolfram et al. 2019).



5. ábra. A Vulka folyó útvonalai a Neusiedler See / Fertő tó nádas övének keresztül az 1980-as években (Von der Emde et al. (1986) alapján) és a jelenleg feltételezett útvonalak.

A jelenlegi vizsgálatok alapvetően igazolják a nádas övben végbemenő transzformációs folyamatok fontosságát, ám jól látható különbségek vannak a csatornákon keresztül folyó gyorsabb áramlás és a nádas övön keresztül folyó szétterjedt és lassú áramlás között, mely utóbbi esetén jóval hangsúlyosabbak a konverziós folyamatok (denitrifikáció, szilárd halmazállapotú anyagok retenciója, oldott foszfor felbomlása). Összességében elmondható azonban, hogy nem észleltünk szignifikáns változást az összes foszfor koncentráció tekintetében a Vulka és a nádas öv külső szélénél lévő nyílt vízbe folyó torkolat között, mivel a partikuláris foszfor retenciója és az oldott foszfor felbomlása egyensúlyban volt egymással alacsony és közepes kibocsátás esetén. A denitrifikációs folyamatoknak köszönhetően a nitrogén koncentrációja csökkent, de nincs bizonyíték a nitrogén teljes kiürülésére egészen a nádas nyílt tóba vezető torkolatáig. Úgy tűnik, hogy legalább a Vulka által a tó felé szállított foszforterhelés egésze és a nitrogénterhelés egy része valóban eléri a tó nyílt részét alacsony és közepes kibocsátásnál. Ez különbözik az 1980-as évek elejéről származó vizsgálati eredményektől, ami azzal indokolható, hogy a Vulka alapterhelése napjainkban jelentősen alacsonyabb, mint 30-40 évvel ezelőtt (Wolfram et al. 2019). (Ezek az eredmények kevésbé megbízhatóak az áradás esetén történő szállításra vetítve, de az online vízminőségmérő állomások lebegőanyagokkal kapcsolatos mérései azt jelzik, hogy a részecskékhez kötött foszfor nagy része a nádas övben marad.)

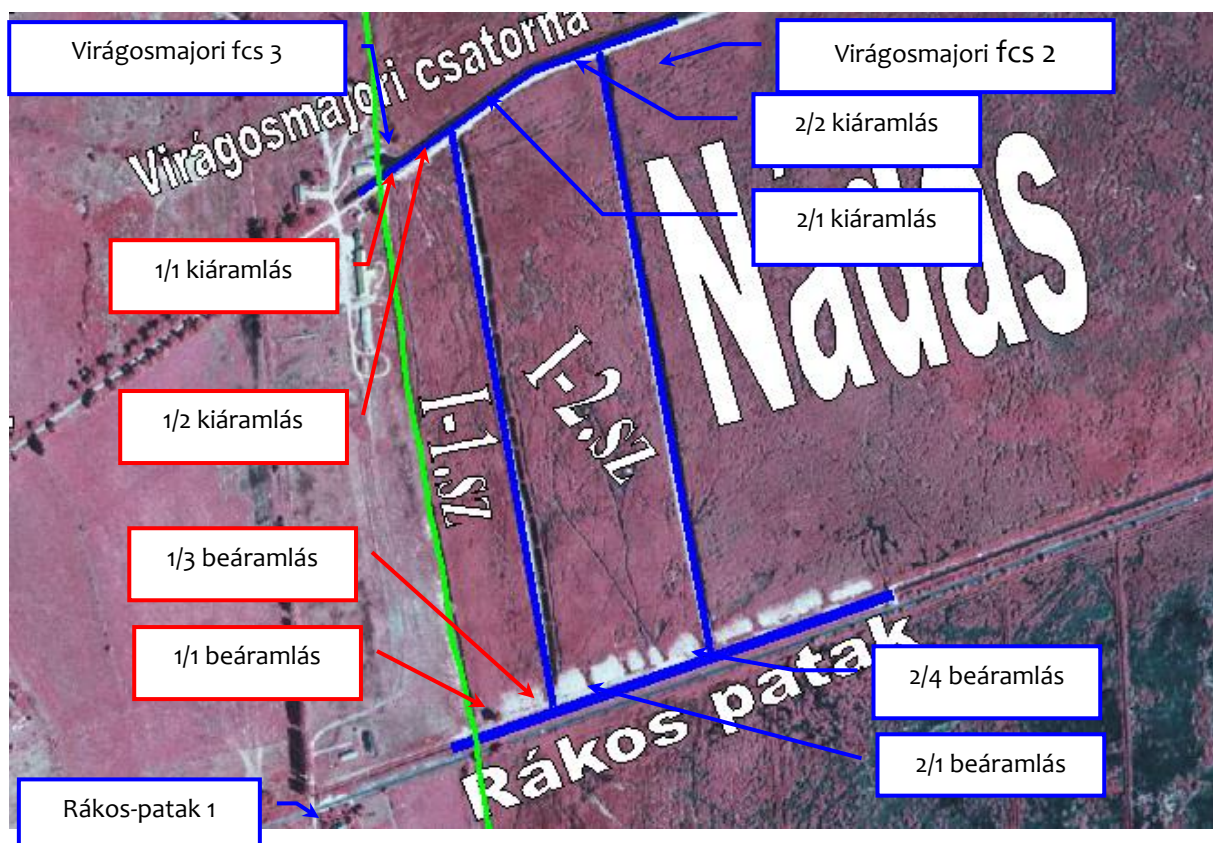
Mindazonáltal nem szabad megfeledkezni két fő nyitott kérdésről. Először is, nem biztos, hogy a Vulka teljes kibocsátását kellő mértékben feljegyezték a REBEN projekt

megfigyelési programja során. Ahogy azt már korábban is kiemeltük, a Vulka diffúz áramlási útvonalai nem teljesen ismertek. Másodszor, a Vulka kibocsátása a mérések idején lassú áramlás és az átlagos áramlás 2,5-szerese között ingadozott. Az áradáskori körülmények és konverziós folyamatok rögzítésére nem volt lehetőség a projekt keretein belül, ezért ezt a kérdést a Vulka különböző vízállásainál végzett, folyamatos nyomjelző kísérletekkel kell tisztázni.

■ *Bevitel a Rákos-patakából a Neusiedler See / Fertő tóba*

A REBEN projekt során nem végeztünk specifikus vizsgálatokat a Rákos-patakkal, a Gols-csatornával és a tó más kis mellékfolyóival kapcsolatban, ezeket korábbi anyagmérlegek tartalmazzák (Wolfram et al. 2007; Wolfram & Herzig 2013; Wolfram et al. 2012), és ez lehetőséget teremt arra, hogy a korábbi elemzések eredményeit belevegyük a szintézisjelentésbe.

Annak érdekében, hogy a Neusiedler See / Fertő tó vízminőségének védelmén javítsunk, valamint csökkentsük a tó külső tápanyagterhelését és a nádpusztulást, két biológiai vizes élőhelyet is létrehoztunk. Egyet a fertőrákosi szennyvíztisztító telepből származó kezelt szennyvíz biológiai utókezelésére, egyet pedig a Rákos-patak számára. A megbízásra 2004-ben került sor. 2008 óta a fertőrákosi szennyvizet a soproni integrált szennyvíztisztító telepre vezették. A balfi szennyvíztisztító telepet, ami korábban a tóba vezette az általa kezelt szennyvizet, 2016-ban bezárták. Operatív vízminőség ellenőrzést számos helyszínen végeztek a Rákos-patak vizes élőhelyein (8. ábra).



6. ábra. Mintavételi helyszínek a vizes élőhelyeken

3.2 Térbeli mintázatok és gradiensek

■ A nádas és a vízfelszín mozaikja

A Vulka torkolatánál található nádas öv speciális jellegű, a Vulkából és a Vulka irányított áramlatából folyamatos anyagbeáramlás érkezik a tó irányába. A nádas öv maradék részét változó folyásirányok és anyagszállítás jellemzi a tóból a nádas övbe és visszafelé is. Ám ennek ellenére is, a Neusiedler See / Fertő tó nádas övének e nagyobbik része nem egy homogén vagy egyhangú élőhely. Sokkal inkább nagyfokú szerkezeti sokrétűség jellemző rá. Nagyobb mértékben mérve, a nyugati parton vagy a magyar részen található több kilométer széles nádas övi területek és a Weiden és Illmitz közt húzódó keleti part keskeny sávja között szembetűnő a különbség, ugyanis a keleti part sokkal jobban ki van téve az uralkodó ÉNY-i szeleknek. A szél és a hullámok erősebb mechanikai hatása a keleti parton az érdeesebb (homokosabb) üledékben és az üledék eltérő kémiájában mutatkozik meg.

Kisebb mértékben, a nádas öv sűrű nádasok, laza fiatal vagy idős nád és nyílt vízi területek mozaikjaként jelenik meg. Utóbbi keskeny csatornák sűrű hálózata alkotja, de néhány helyen vannak kiterjedt vízi területek (medencerendszerek) is, ahol a szél támadási

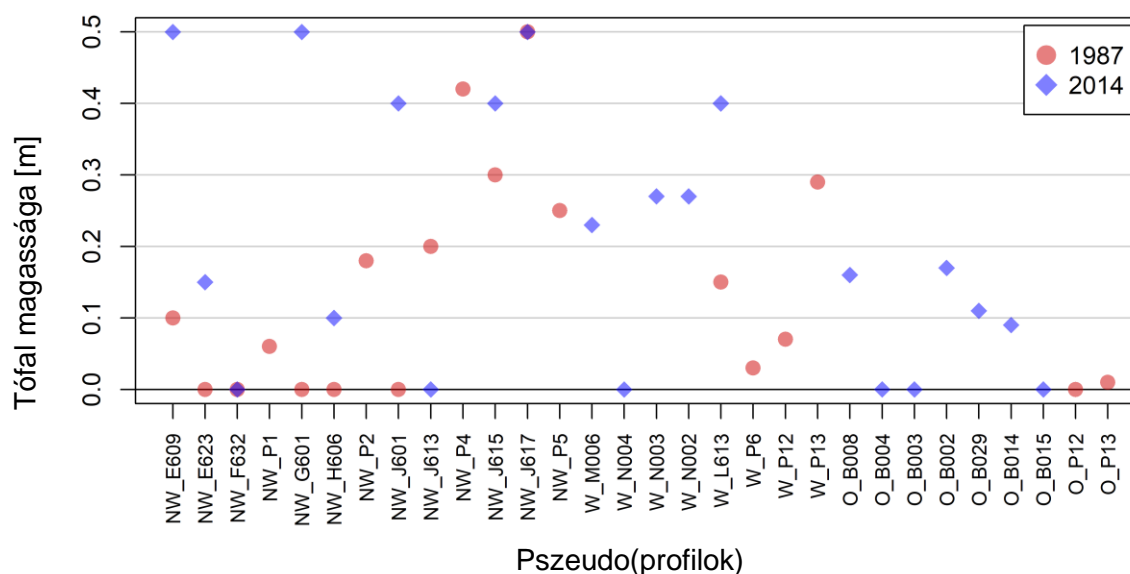
felületet talál és helyenként felkavarja a finom üledéket és a belső nádas övre jellemző zavarossághoz vezet.

A különböző struktúrák nem random módon oszlanak el a nádas övben: részben áthathatatlan nádas széles sávja fut végig szinte az egész nyílt tó körül, míg hatalmas nyílt vízi területeket jellemzően Mörbisch és Illmitz belső nádas övi részein találhatunk. Természetvédelem szempontjából ezek közül a nyílt vízi területek közül néhányat pejoratív kifejezéssel élve gyakran "lepusztult"-nak titulálnak, mivel ezek valószínűleg a nehéz aratógépekkel végzett nádvágás kései következményei. Más nádas tavak (a Herrlakni és a Hidegségi tó Magyarországon, a Ruster Poschn és a Hoadaseppposchnlucka Ausztriában) természetes eredetűek.

■ Szerkezeti gradiensek és lebegő szilárd anyagok

A REBEN projekt kérdéseit tekintve különösen fontosak a hidromorfológiai és anyaggradiensek a nád szélétől a nyílt tóig terjedő rész és a nádas öv part felé eső széle között. Egy nyilvánvaló gradiens a vízmélységet érinti, ami a tó-nád határvonaltól a tó előtti rétek irányába csökken, míg a szárazföldre való tényleges átmenetet a víz fluktuációja miatt nehéz megragadni. Mindenesetre ez az átmeneti zóna valószínűleg jelentős szerepet játszik a nádas öv tápanyagciklusában, mivel összetett konverziós folyamatok színteréül szolgál, ugyanis itt gyakran változnak meg a körülmények nedves állapotból száraz állapotba.

Azonban a vízmélységek a nádas öv tó felé eső oldalán semmi esetre sem egységesek vagy könnyen definiálhatók. Az úgynevezett "tavi gát" egy lineáris üledékagglomeráció a nád-tó szél mentén, ami a nádas övbe sodródó víz turbiditásának, majd a finom üledék szomszédos, alacsony turbulenciájú nádas területeken történő lerakódásának következménye. Sajnálatos módon a nádas öv különböző részein mért, a gát magasságára vonatkozó többidejű adatok nem elegendőek ahhoz, hogy megbízható információt adjanak a térbeli-időbeli változásokról. E. Csaplovics elemzése (az osztrák szakértői csoport 2. jelentése) legalább szemlélteti a magasságingadozások dinamikájának tartományát a kései 1980-as évek kiterjedt felmérései és a GeNeSee projekt idevágó, jelentősen korlátozott számú adatai alapján. (7. ábra).



7. ábra. A tavi gát magassága a tó-nád határának számos profiljánál és pszeudoprofiljánál (az osztrák "Nádszerkezet és morfológia" című 2. szakértői jelentés 3. fejezetéből).

A számos mesterséges csatorna rész a tavi gáton és egyidejűleg preferált szállítási útvonal is a tó irányából a belső nádas övi területekre. Ezen lineáris struktúrák mentén kerülnek megfigyelésre a lebegőanyag csökkenő gradiensei, azaz a szervesanyag részecskéi, mint például a növényi és állati planktonok. Azonban ezek a csatornák vándorlási útvonalak is a halak számára, amik tavasszal alkalmas ívóhelyet vagy – a környezeti állapotoktól függően – egy kedvezőbb helyet keresnek a nádas övben vagy a nyílt tóban.

■ Oldott anyag

A REBEN projekt eredményei hangsúlyozzák a csatornák fontosságát a Neusiedler See / Fertő tó nádas övében belül megfigyelhető, különböző kémiai tulajdonságok szempontjából. Azokon a területeken, amik csak kismértékben vagy egyáltalán nincsenek összeköttetésben a nyílt tóval, a víz oldott összetevőinek koncentrációja háromszor magasabb is lehet, mint a nyílt tóban. Elektromos vezetőképességre akár $>6\,000\ \mu\text{S cm}^{-1}$ -t, a klór koncentrációjára $800\ \text{mg L}^{-1}$ értéket és lúgokra akár majdnem $40\ \text{mMol L}^{-1}$ -t mértünk. A koncentráció az ionok relatív arányának eltolódásához vezet a kalciumkicsapódásnak köszönhetően.

A belső nádas övben lévő elszigetelt területeket illetve az egymáshoz lazán kapcsolódó vízi területeket is hőmérsékleti szélsőségek ($>35\ ^\circ\text{C}$) és nagy napi hőmérsékletingadozások jellemzik. A nyílt tóval való csökkent kicserélődés következtében egyre intenzívebbé válnak a kismértékben strukturált nádasok

degradációs folyamatai, ami az óriási oxigénfogyasztás miatt teljesen oxigénhiányos állapotokhoz vezet a nyári és őszi időszakokban.

Tápanyagok szempontjából a jelen projekt szilikon- (nádfogyás, a Characeae és planktonikus alga fogyása) és nitrátszökkenést (denitrifikáció) dokumentált, valamint megállapította, hogy az oldott szerves nitrogén és szerves szén (humanyagok koncentrációja és felhalmozódása) és az összes oldott foszfor (koncentráció és újbóli feloldódás) nőtt a tótól a szárazföld irányába húzódo metszetek mentén.

A jelentős eltérés a belső nádas övben és a nyílt tóban észlelhető koncentrációk között néhány szennyezőanyag esetén is egy koncentrációs folyamatot vagy újbóli feloldódást jelzett, ami egyezik a laboratóriumi vizsgálatok eredményeivel (magasabb mobilizációs ráták magasabb hőmérséklet és alacsony oxigénkoncentráció esetén).

■ Üledék

Az üledék fizikai-kémiai összetétele hasonlít a megfelelő paraméterek gradienseire a vízben. Például a tótól a szárazföld irányába húzódo metszetek mentén a szervesanyag tartalom és a víztartalom nagymértékben nő. Elszigetelt részek esetén a mérések akár >40% izzítási veszteséget és akár >95% víztartalmat mutattak a nagyon laza, pelyhes üledékben. Feltételezhető, hogy humin komplexek magas százaléku jelenléte a szervesanyagokban megakadályozza az üledék tömörödését. Többféle szennyezőanyag pozitív összefüggésben áll a szervesanyag tartalommal (pl. PFOS). Ami a tápanyagokat illeti, a szárazanyag grammonkénti összes foszfor tartalmának növekedése volt kimutatható a REBEN projekt során, míg a területre (és így az üledéktérfogatra) vetített tartalom a szárazföld irányába csökken. A foszforkötések különböző formái közül leginkább a szerves frakció és a humanyagokhoz kötődő frakció mutat növekvő tendenciát a szárazföld irányába haladva, a metszetek mentén.

Összefoglalva, a gradiensek következő tényezőit és okait igazolja a REBEN projekt:

- vízszint (a csapadéktól és beáramlásoktól versus a párolgástól és a kibocsátásoktól függően)
- emberi használat (nádvágás) – különösen a hosszútávú hatásokat tekintve, a nádat ért kárnak és a belső nádas övben kiterjedt vízi területek létrejöttének köszönhetően
- csatornák építése és helyreállítása, melyek elsődleges szállítási útvonalakként szolgálnak a nyílt tó és a belső nádas öv között

Nem újdonság, hogy ezek a hidromorfológiai tényezők és körülmények kiemelt jelentőségűek a tó vízminőségét illetően, viszont a REBEN projekttel sikerült sokkal

pontosabban meghatározni és leírni a különféle tényezők és paraméterek kölcsönhatásait és részletesen dokumentálni a disztribúciós mintákat, valamint az időbeli változékonyságot. Különösen fontos a minőségi leírástól a kicserélődési folyamatok mennyiségi meghatározásának irányába történő elmozdulás (2.3 fejezet), ami a terhelések megbecslésének alapja (2.4 fejezet).

■ Ökológiai gradiensek

A nádas övön belül, a planktonközösségeket és a halpopulációt egyértelmű, de ellentétes gradiensek jellemzik a nyílt tótól a szárazföld irányába haladva. Fontos megjegyezni, hogy különösen a nádas övben található plankton nem csak kissé módosult “tavi közösségeket” alkot, hanem független fajegyüttesként jelenik meg.

A nádas öv elszigetelt részein fellelhető fitoplankton-, zooplankton- és halpopulációk eltérő jellege kiemeli a nyílt tóval való kapcsolat fontosságát. A nádas öv főként szélvédett és nyugodt területeire jellemző extrém fizikai-kémiai körülmények elősegítik egy specializált és változatos planktonikus biocönózis létrejöttét, ami szignifikáns halsűrűség (és így ragadozók) hiányában, változatos módon, magas sűrűség- és biomasszaértékekkel tud fejlődni. A belső nádas öv viszonylag jó táplálékellátását a nyílt tóval való rossz kapcsolódás és így a korlátozott vándorlási lehetőség miatt, csak korlátozott mértékben tudják kihasználni a halak, mivel többségük olyan területekhez kötött, amik közel vannak a tóhoz és ahol jó az összeköttetés.

Halökológiai szempontból ezért egy jobb kapcsolat lenne kívánatos a nyílt víz és a belső nádas öv vízi területei között. A fizikai-kémiai szélsőségek enyhítése lehetővé tenné a halak számára ezen területek intenzívebb “kolonizációját” és új ívőhelyeket illetve táplálékforrásokat teremtené számukra. Ami azonban a fito- és zooplanktonokat illeti, a fokozott kapcsolat fokozott kicserélődést jelentene a két élőhely között, ami pozitív hatással lenne a biodiverzitásra.

3.3 Kicserélődési folyamatok

■ Időfaktor

A nádas övön belüli hidrológiai és anyaggradiensek – melyeket az előző fejezet és az osztrák szakértői csoport 3. és 5. jelentése is részletesen kifejt – egyáltalán nem állandóak, csupán tipikus, bizonyos mértékig “átlagos” eloszlási mintázatok, valamint komplex kicserélődési folyamatok eredményei, melyek végtére is jelentős időbeli változékonyságnak vannak kitéve.

A tömegátvitel különböző időbeli ritmusban és szinteken zajlik:

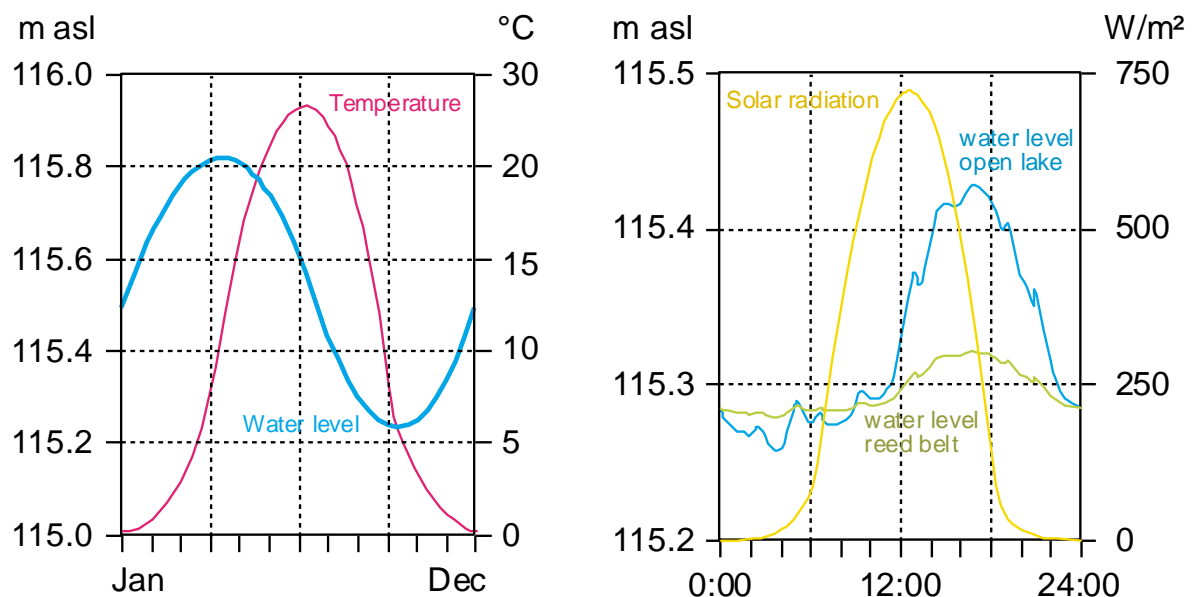
- a nyílt tó és a nádas öv között
- különböző területek között a nádas övön belül
- az üledék és a vízoszlop között.

Méretének, sekély vízmélységének, valamint a Kárpát-medencében való földrajzi elhelyezkedésének – jellemzően erős szelekkel – köszönhetően, a Neusiedler See / Fertő tó két fő hidrológiai ritmusnak van kitéve:

- a meteorológiai vízgyensúly periodicitásának (azaz a csapadék és a párolgás közti, évszakonként változó kapcsolatának) és
- a szélcsendes illetve a szél és hullámok által erősen befolyásolt időszakok közti váltásnak.

Ez a két külső tényező – a csapadék/párolgás és a szél – a tóban zajló kicserélődési folyamatok döntő meteorológiai-hidrológiai időztője. Ehhez jön még a fény napi ritmusa (mint a fotoszintézis és így az oxigéntermelés és a bomlási folyamatok időztője) valamint a víz hőmérséklet éves és napi ritmusa (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

A kicserélődési folyamatok során kiemelt jelentőséggel bír a szél felerősödése/enyhülése és az azt kísérő tóingás (állóhullámok). A tónál uralkodó ÉNY-i szelek gyakran egy napi ritmustól függenek, ami a vízfelszín észak-déli irányú ingásához vezet. Kelet-nyugati irányban kisebbek a felszín elmozdulásai és a tóingás rövid ideig, 30-60 percig tart.



10. ábra. Fő ritmusok a Neusiedler See / Fertő tónál. Balra: szezonális, a vízszint és a hőmérséklet függvényében, jobbra: napi, a tipikus szélesemény és az azzal járó felszínmozdulás, illetve a globális sugárzás függvényében.

■ Üledék – víz (laboratóriumi vizsgálatok)

Az üledék-víz átmeneti zónában zajló kicserélődési folyamatok rendkívül összetettek és helyszíni mérésekkel nehezen számszerűsíthetők. Annak érdekében, hogy a legfontosabb kapcsolatok és befolyásoló hatású változók leírhatóvá váljanak, a REBEN projekt során válogatott anyagok adszorpcióját és mobilizációját laboratóriumi vizsgálatoknak vetettük alá.

Az adszorpció vizsgálatok kimutatták, hogy bizonyos anyagok, pl. a PFOS esetében az üledék továbbra is kellően magas adszorpció képességgel rendelkezik, azaz az üledék a nádas övben még mindig tartályként funkcionál e szennyezőanyagok számára. Más szennyezőanyagokat, pl. néhány nehézfémeket illetően az adszorpció kapacitása szinte teljesen kimerült, tehát további anyagok adszorpciójának képessége jelenleg csekély. Ez azt jelenti, hogy van egy alapvető potenciál arra nézve, hogy a jövőben újbóli feloldódás és koncentráció-növekedés menjen végbe. Az, hogy ez (még) nem történt meg, valószínűleg arra a tényre vezethető vissza, hogy folyamatosan új üledék termelődik (különösen Ca-Mg-karbonátok) és ez új adszorpció felületeket biztosít. Ezért a turbiditás nem csak a szervesanyag bomlására (lásd Krachler *et al.* (2009)), de az adszorpcióra és így a szennyezőanyagok süllőedésére is jelentős hatással van.

A változó víz hőmérsékletek és változó oxigénkoncentráció, továbbá változó pH értékek mellett végzett kísérletek során nem volt bizonyítható, hogy ezek a változók észrevehető hatással lennének az adszorpcióra, a szennyezőanyagok mobilizációjára viszont igen. Legalább néhány nehézfém mobilizációja volt megfigyelhető magas hőmérsékleten és anaerob környezetben (vagy alacsonyabb pH értékek mellett). A PFOS és a PFOA szennyezőanyagok esetén szignifikáns mobilizációs potenciált lehetett kimutatni még aerob körülmények között is. Ez – némi megkötéssel – a foszforra is igaz, aminek a mobilizációs rátáit a kezdeti koncentráció egyértelműen befolyásolta.

A megváltozott oxigén- és hőmérsékleti körülményekre adott különböző reakciók, melyeket különböző kísérleti körülmények között mértünk (túlfolyás vizsgálata versus rázóvizsgálata), arra a következtetésre vezetnek, hogy az üledék felszínén tapasztalható viszonyok nagy jelentőségűek az üledék-víz átmeneti zóna tömegátvitel szempontjából. Ez a megállapítás lényeges az üledék turbulenciáját tekintve is, akár a szél indukálja a nádas öv nyílt vízi területein, akár mesterségesen jön létre csatornahelyreállítási munkálatok során. A nádas öv különböző szerkezeti összetételét tekintve azt a következtetést lehetett levonni, hogy a nyílt nádas rendszerekben, mint Mörbisch belső

nádas övében, nagyobb – és egyben hatékonyabb vagy mennyiségileg jelentősebb – potenciál észlelhető a szennyező- és tápanyagok remobilizációjára, mint a keskeny, sűrű nádas területeken, ahol kisebb a szél és csökkent mértékű az áramlás. Másfelől azonban a sűrű nádállományban nagyobb a veszélye az anaerob körülményeknek, ami egyúttal egyes szennyezőanyagok, mint például néhány nehézfém, a PFOS/PFOA és valószínűleg a foszfor intenzívebb remobilizációjához vezet.

■ Nyílt víz – nádas öv (vízminőség-ellenőrző állomások és szélesemény)

A REBEN projekt keretében részletes dokumentálásra került a nyílt víz és a nádas öv között fellépő víz- és tömegcsere folyamata. Ehhez vízminőségellenőrző állomásokat, valamint a 2019 őszén végzett vizsgálatsorozat eredményeit (szélesemény) és hidraulikus modellezést használtunk. Alacsonyabb vízszintek esetén a kicserélődés szinte teljes egészében csatornákon keresztül zajlik. Ahogy azt az 1980-as években a tóval kapcsolatban megfigyelték, a nádon keresztülhaladó diffúz áramlás csak akkor lehetséges, ha a vízszint egyértelműen túllépi a tó gátjának tetejét a nádas öv tó felőli külső szélénél. Azonban az Illmitz területén végzett numerikus modellezés megmutatta, hogy a tóvíz diffúz beáramlása még így is nagymértékben függ a nád szerkezetétől. Az elárasztott nádas területtel összefüggésben végzett modellszámítások egy akár 115,80 m tengerszint feletti magasság (Adriai-tenger szintje felett) és a még mindig meglévő “átjárhatóság” tekintetében (melyet a $k_{st}=4 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ Manning-Strickler együttható fejez ki) kimutatták, hogy a tóvíz diffúz beáramlása mélyen a nádas övbe valóban megtörténhet. A Vulka területén található nádas övben hasonló megfigyelések születtek. Mégis vannak azonban arra irányuló jelzések, hogy a nádállomány alig átjárható és inkább egyfajta “gátként” működik, ahol gyakorlatilag nincs diffúz áramlás. Ebben az esetben két jelenség figyelhető meg:

- i. A nádas területeket lassan benedvesítik vagy feltöltik a tóval összeköttetésben lévő nagyobb vízi területek a nádas öv szárazföld felé eső részén és/vagy
- ii. áramlás érzékelhető a számos létező kis és legkisebb csatornán keresztül, amik pedig a tóhoz kapcsolódó, nagyobb nyílt vízi területekből táplálkoznak.

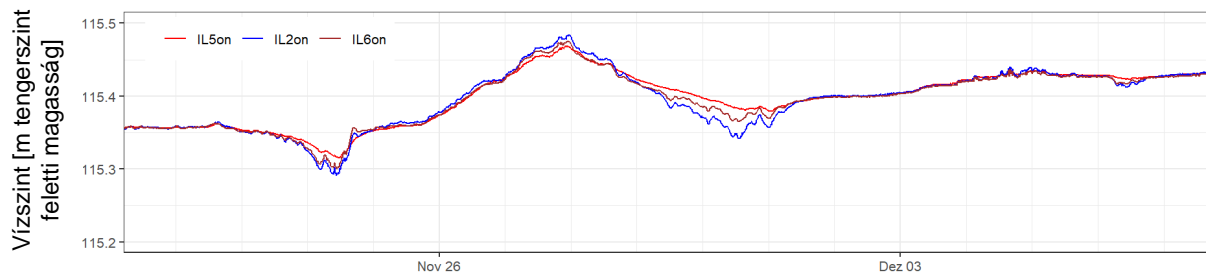
A projektfázis megfigyelési kampányai során a lehetséges kicserélődési értékek becslése egy-egy csatorna (egy Illmitz-ben – 11. ábra – és egy Mörbisch-ben) két-háromnapos, nagy időbeli felbontású mérései, illetve az online állomások adatai alapján történt. Az illmitzi mérési kampány a numerikus modellezés eredményeinek megerősítését is lehetővé tette (lásd az osztrák szakértői csoport “Hidrológia” című 1. jelentését).

A csatornában meglepően nagy, akár másodpercenként több deciméteres **áramlási sebesség** alakul ki az erős szelek és az azokkal járó vízfelszín-elmozdulások hatására. Ha

egy 2 m² (5 m széles × 0,4 m mély) csatornakeresztmetszeti területet feltételezünk, ez egy akár 1 m³/s áramlási sebességnek felel meg. Ezáltal hosszú idő alatt hatalmas víztömegek kerülnek a nyílt tóból a nádas övbe és vissza egyetlen csatornán keresztül. A 11. ábra a vízszint alakulását szemlélteti három megfigyelőállomáson Illmitz közelében. A nádas öv leghátsó területein több napon keresztül >10 cm növekedést lehetett mérni. Az IL5 közelében fekvő nyílt, barna vizű területek >14 ha vízfelszíne esetén (lásd az osztrák szakértői csoport “Kémia” című 3. jelentését) >14.000 m³ vízszállítást jelent.

A **be- és kiáramlási fázisok időtartama** könnyen leolvasható a videófelvételekről és az adatrögzítésből. Az események akár több napig is eltarthatnak (lásd 11. ábra), de lehetnek nagyon rövidek is (pl. néhány percesek). Ez utóbbi tapasztalható a vízszint felvételein változó, egyenetlen pályán, mely alatt (viszonylag) nagy áramlási sebességű áramlási fázisok és fordított áramlási irányú nyugalmi fázisok rövid intervallumonkénti váltakozását értjük. Tömegátviteli szempontból ez váltakozó átvitelt (részben eróziót) és üledéklerakódást jelent.

A nádcsatornákon keresztül történő kicserélődés mértéke függ egyrészt a vízszinttől, másrészt a nádcsatorna méretétől és alakjától. Keskeny részeken (pl. az Illmitz magasságában fekvő régióban, a nyílt tó felé eső külső szélén, az IL3 ellenőrzőpont és az úgynevezett Zander-öböl között, lásd az osztrák szakértői csoport 3. jelentése) az üledék redkívvül kemény, ami a finom üledékek folyamatos eróziójára és nagyon magas folyási sebességre (sugárhatás) utal. A belső nádas övben azonban szűkületek is gátolhatják az áramlást, mintegy fékező hatást keltve, ami elősegíti a nád áthatolhatóságát és a csatorna egyre erőteljesebb “eltömődéséhez” vezet. A **nádcsatorna eliszaposodása** ezután felgyorsul, mígnem a vízcsere teljesen leáll. Egy ilyen irányú változást – a csatorna eliszaposodik és nád növi be néhány méter után – láthatunk például a korábbi horgászcsatornákból Ruster Poschn és a nyílt tó között, az IL8 mérőpontnál (lásd 3. osztrák jelentés) és a Neusiedler See / Fertő tó déli részén található nemzeti park természetvédelmi területén húzódó horgászcsatornákból (pl. az úgynevezett Thell-csatornában), melyeket hosszú ideje nem tartanak karban. Ez a folyamat gyorsan, csupán néhány év alatt végbemehet. A hidraulikus modellek jól szemléltetik, hogy a nyílt víz és a nádas öv közti vízcsere a nádcsatorna üledéklerakódásának következtében egy vagy két nagyságrenddel is csökkenhet. Ezt a hatást is jól ábrázolja a numerikus modell (lásd az osztrák szakértői csoport “Hidrológia” című 1. jelentése).



11. ábra. A vízszint alakulása három megfigyelőállomáson Illmitz nádas övében 2018. nov. 22. és dec. 7. között. Az IL5on állomás egy nagy, nyílt barna vízű >14 ha területen fekszik; 10 cm-es vízszintnövekedés >14 000 m³ vízbeáramlásnak felel meg.

A fent ábrázolt szituáció több, mint 14 000 m³ vízszállítással két-három napon keresztül megfigyelhető volt olyan területen, ahol a **belső nádas övben nagy nyílt vízi területek** helyezkednek el. Ilyen területeket találhatunk például Illmitz és Mörbisch közelében. Mörbisch területén a csatornánkénti maximum napi terhelés akár 40 000 m³ is lehet, ami megegyezik a Vulka folyó napi beáramlásával alacsony kibocsátás esetén.

Amennyiben nincsenek nyílt vízi területek a belső nádas övben (pl. sűrű nádasokban Oggaunál és Breitenbrunn-nál), a vízszállítás lehetősége elkerülhetetlenül kisebb, ugyanis csak maga a csatornarendszer és a kis medencék sűrű szövésű mozaikja tudja elnyelni a nyílt tóból érkező vizet. Feltételezhető, hogy a korlátozott vízszállítás és így a lebegőanyagok korlátozott bevitele a nádas övbe fokozza az üledék lerakódását a nyílt tóban, azaz az öblökben és a nádszigetek mögött található szélvédett helyeken. A nemzeti park hatalmas nádszigetének déli szélénél tapasztalható erős üledéklerakódás megfigyelése is alátámasztja ezt a hipotézist.

A belső nádas öv nádszerkezetén kívül a **nádcsatornák elhelyezkedése és alakja** is fontos a víz- és anyagkicserélődés szempontjából. A Mörbisch területéről származó folyamatos vízminőségadatok rávilágítottak arra, hogy akkor kerül a legtöbb lebegőanyag a nádas övbe, amikor a szél pontosan a csatornába fúj és így szó szerint “belenyomja” a zavaros tóvizet a nádas övbe. A Neusiedler See / Fertő tónál lévő csatornák többsége a nyugati parton helyezkedik el és Ny-K irányba húzódik, ezért a bemutatott helyzet csak a (relatív ritka) keleti szél hatására jön létre. A tó keleti partján található csatornában (Illmitz-től Apetlonig) nagyobb vagy nagyobb lenne a lehetőség a víz- és anyagszállításra a nyílt tó és a nádas öv között. Feltehetőleg a csatornák alakja (egyenes versus “szögletes” szűkületekkel) és térhálós jellege is befolyásolja a nádas övbe történő víz- és anyagbevitt. Ezt jelzik azok a hidrológiai vizsgálatok is, melyek a nádas öv magyar oldalán valósultak meg, ahol csatornák sűrű hálózata jellemzi a területet.

Ugyanis a szél jelentős mértékű horizontális keveredést tud okozni a **nádas öv kiterjedt magyar oldalán** inkább kerületmenti gravitációs erejének köszönhetően, mintsem

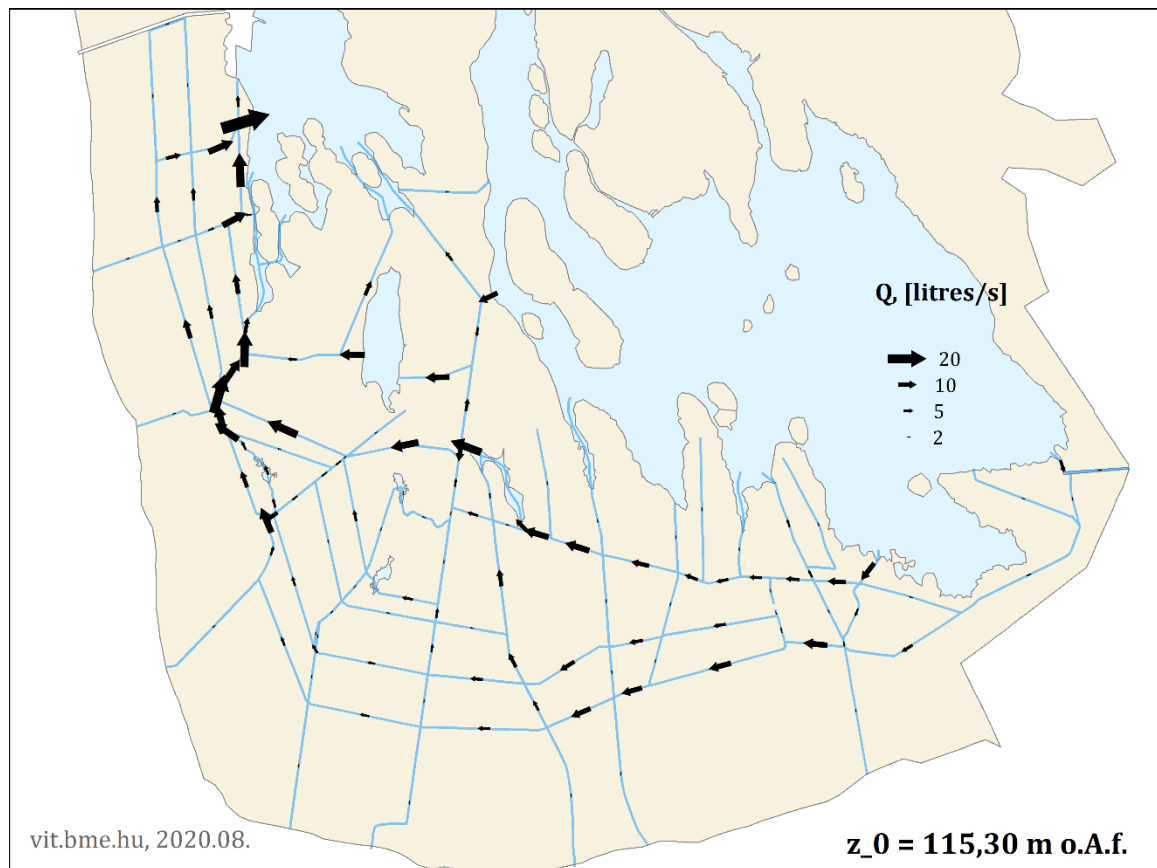
közvetlenül szélnyírás útján. Ahogy azt az 1. jelentésben magyar kutatók leírták, a numerikus modellezés megmutatta, hogy az elárasztás távolsága körülbelül 1 km azokban az esetekben, amikor a szél keltette erős hullámozás 1-2 deciméterrel a tó gátja fölé emelkedik. A GeNeSee projekt repülő lézerszkenneres vizsgálata nem tudta megfejtetni a nádas elárasztott mikrotopográfiáját, beleértve a rég elhanyagolt csatornák és barna vízű tavak batimetriáját, így a sekély áradás nem modellezhető teljes pontossággal.

Még a nemrég kikotort magyar csatornáknál is, a meder érdekessége és főleg az előtött oldalsó nádas részek együttesen jelentős hidraulikus ellenállást gyakorolnak az áramlásra. A számítások egy alacsony, $10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ Strickler-együtthatót eredményeztek, ami jellemző a vegetáló csatornákra és nem sokkal simább, mint a nádas osztrák modell által feltételezett érdekessége.

A nyílt tó szélrohamai sekély haladómozgásbeli hullámokként törnek be a csatornába, tehát a felszíni hullámforma és a víztömeg ugyanabba az irányba mozognak. Ezek a határvezérelt **felszíni hullámok a távolság növekedésével csillapodnak** frekvenciájuk függvényében. A tóingás (1 órás periódusban vagy annál rövidebb idő alatt) gyorsan a maximum amplitúdójának törekedésére esik vissza néhány kilométeres távolságon belül, igazolva korábbi tanulmányok megállapításait (Takáts 1984). Ezzel ellentétben a szél keltette erős hullámok aperiodikus komponense, a szél feltámadása illetve enyhülése, ami napokban mérhető, kinematikus hullámokként hatol be a nádcsatornába, alig veszítve amplitúdójából.

Ami a szélhullámokat illeti, hatásuk a vízből kiemelkedő vegetáció 10-30 méteres távolságára korlátozódik (Irish et al. 2008), ami mindazonáltal jelentős mértékben befolyásolja a nádállományt.

Mivel az uralkodó szélirány ÉNY-ÉÉNY-i irányú, a szél keltette erős hullámok gyakran magasabbak a Madárvárta-öbölben, mint a Fertőrákosi-öbölben, létrehozva egy vízfelszín-gradienst a csatornatorkolatok között. A déli nádas zónában ez (csatornánként) 5-15 liter/másodperc **átlagos éves nettó áramlást** okoz a két öböl között, a kerületi csatornáknál, az uralkodó széliránnyal ellentétesen, azaz DK-ről ÉNY-i irányba (12. ábra). Ez a folyási ráta megfelel az átlagos áramlási sebességnek ($0,001 \text{ m/s}$), ami a kerületi csatornák barna vizét körülbelül 50–100 nap alatt mossza bele a Fertőrákosi-öbölbe (7 m^2 átlagos csatornakeresztmetszettel számolva alacsony tóvízszint esetén).



12. ábra. A nettó éves átlagos áramlás térképe a magyar nádas övben, alacsony tóvízszintre szimulálva (115,30 m tengerszint feletti magasság).

A maradék víz elmozdulása némi advektív keveredést okoz a nyílt tó és a nádas öv között, a szél felerősödésekor és enyhülésekor egyaránt. A tóvíz által végigsöpört zóna körülbelül 1,2 kilométer széles a déli nádas övben, ami az alacsony átlagos tóvízszinttől a magasig terjedőre igaz. Ezt a penetrációs távolságot az ebben a zónában található tavak zavarossága jelzi, míg a messzebb fekvő tavak vize transzparens (Padisák 1993). Amikor alacsony-közepes vízszint esetén (azaz a nádas öv nincs elárasztva) söpör végig egy erős szélroham, jelentős mennyiségű tóvíz marad vissza a terepsüllyedésekben a vihar elültével.

Összefoglalásképpen elmondhatjuk, hogy jelenleg a csatornák, a mögöttük lévő nyílt vízi területekkel együtt, a legfontosabbak a nyílt tó és a nádas öv közti víz- és tömegcsere szempontjából. A csatornák ugyanis a preferált szállítási útvonalai a lebegőanyagoknak (valamint a részecskékhez kapcsolódó táp- és szennyezőanyagoknak) a nádas övbe, illetve az oldott anyagoknak (pl. oldott foszfornak) a nádas övből vissza a nyílt tóba. Diffúz áramlás a nádas övön keresztül csak magas vízszint esetén tud kialakulni, de még akkor is csekély jelentőségű a csatornákon keresztül történő szállításhoz képest.

Azonban, ahogy azt a tavi gát fokozatos emelkedése is jelzi a nádas öv tó felé eső külső szélén, a tóvíz és a nádas öv kapcsolata rendkívül fontos a nádas öv e peremterületén.

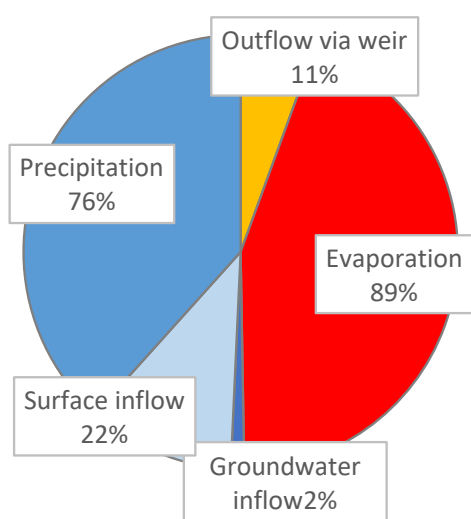
Habár a GeNeSee projekt vizsgálati eredményei nem tudták bizonyítani, hogy a tó az elmúlt 20-30 év során iszaposodásnak indult, ez egy nagyon valószínű forgatókönyv és hosszútávon a Neusiedler See / Fertő tó két fő szakaszának fokozott különválásához vezet.

3.4 Üledék-, tápanyag- és szennyezőanyag-terhelés

3.4.1 Vízmérleg

A Neusiedler See / Fertő tó esetében már hosszú ideje készítenek teljes vízmérleget, kezdve a Vízrajzi Szolgálat szisztematikus feljegyzéseivel. Mivel azonban a jelen projekt a nyílt tó vízi területe és a nádas öv közti kicserélődési folyamatokra fókuszál, a létező mérlegek bemutatása csupán áttekintő jellegű. A következőkben a mérleget érintő, az éghajlat előrelátható alakulásainak köszönhető, lehetséges változásokat taglaljuk.

Bár a párolgás méretére irányuló kérdés megválaszolása mindig nehéz feladat a mérleg elkészítése során (ez gyakran a mérleg fennmaradó része), a párolgási folyamatok nagy horderejűek a Neusiedler See / Fertő tóra nézve. Csak nagyon esős években kevesebb a párolgás az éves csapadéknál. Ez a körülmény szintén kulcsfontosságú tényező a jövőbeli változásokat tekintve (13. ábra, 3. táblázat).



Vízmérleg 1965–2018, átlagértékek mm/a-ban

Csapadék	579
Felszíni és talajvíz beáramlás	180
Összesen +	759
Párolgás	667
Kiáramlás a Hanság-csatornán keresztül	84
Összesen –	751

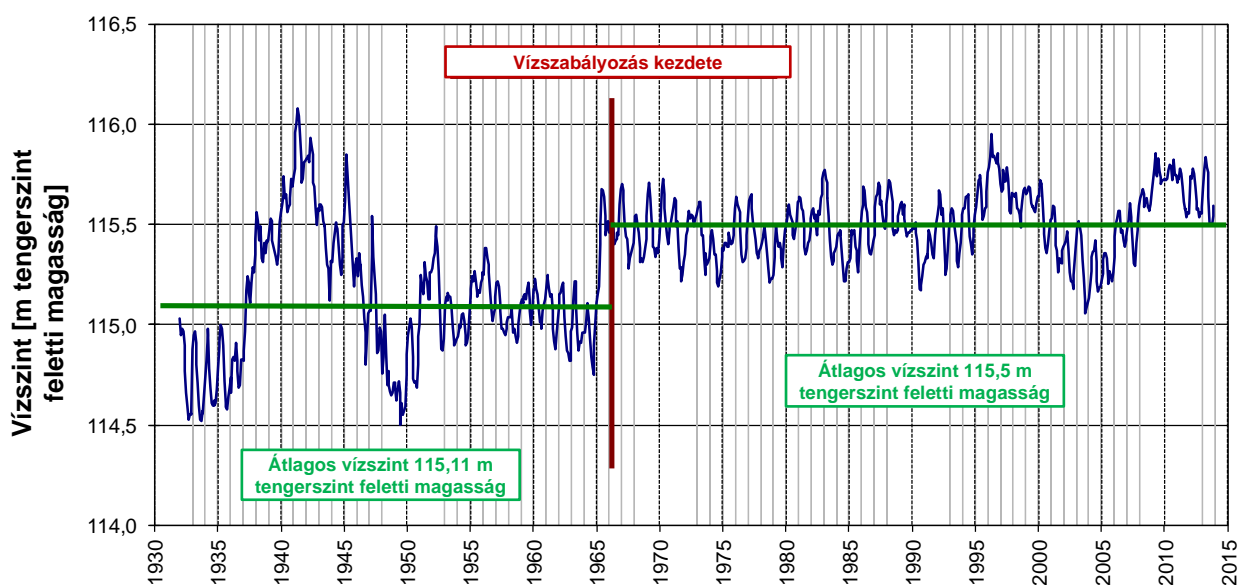
13. ábra. A Neusiedler See / Fertő tó vízmérlege 1965–2018 között (Amt Bgld. Landesregierung, Abt. 5).

3. táblázat. A Neusiedler See / Fertő tó vízgyűjtő területének vízmérlege a 2000–2012 közötti adatok alapján. Forrás: Wolfram et al. (2014)).

Komponens	Terület [km ²]	Talajvíz kibocsátás nélkül		Feltételezett talajvíz kibocsátással	
		Éves arány [mm/a]	Térfogat [10 ⁶ m ³ /a]	Éves arány [mm/a]	Térfogat [10 ⁶ m ³ /a]
Csapadék	1116	596	665	596	665
Összes pozitív	1116	596	665	596	665
Párolgás – vízgyűjtő (a tó nélkül)	796	466	371	466	371
Párolgás – tó (nádas és vízi terület)	320	866	277	796	255
Evapotranszpiráció – nád	182	878 [#]	160	756 [#]	138
Párolgás – nyílt tó	138	850	117	850	117
Talajvíz kiáramlás		0*	0	20*	21
Felszíni kiáramlás	1116	16	18	16	18
Összes negatív	1116	596	665	596	665

* Feltételezés, [#] Maradék érték

Hasonlóképpen, a Hanság-csatornán keresztül történő vízelvezetés is fontos szerepet játszik a vízmérleget illetően. A gát jelenleg érvényes működési szabályozása ennek megfelelően irányítja a vízszintet, feltéve, hogy elegendő víz áll rendelkezésre az irányításhoz. Ennek az 1960-as években kezdődött irányításnak a tó vízszintjére gyakorolt hatását szemlélteti a 14. ábra, ami a tó szintjének jelentős emelkedését és csekély mértékű változását ábrázolja.



14. ábra. Tóvízszintek hidrográfja 1932–2013 között. Forrás: Amt der Bgld. Landesregierung, Referat Hydrographie.

Ahogy azt a klímaváltozással kapcsolatos kutatások is megmutatták (Blöschl et al. 2018; Blöschl et al. 2011; Schöner et al. 2011), a levegőhőmérséklet növekedésére kell számítani, ami egyúttal fokozott párolgáshoz is vezet. Továbbá azok az éghajlati modellek, melyek a tanulmányok alapját képezik, megmutatják, hogy Kelet-Ausztriában a csapadék mennyiségének kismértékű növekedése fog bekövetkezni. Annak ellenére, hogy ez az állítás nagyobb ráterheléssel kezelendő, mint a levegő hőmérsékletének növekedéséről szóló megállapítás, megválaszolatlan kérdés marad, hogy milyen mértékben hat mindez a vízmérlegre. A szezonális mérés eredményei (magyar kutatók 1. jelentése) szárazabb körülményeket (azaz kevesebb csapadékot és/vagy beáramlást) jeleznek január, június, novemberre és decemberre, míg úgy tűnik, hogy a május, a szeptember és az október nedvesebb lesz. A havi átlaghőmérsékleti tendenciák elemzése július és augusztus hónapra várja a legnagyobb növekedést. Egy dolgot világosan jeleznek a vizsgálatok: a Neusiedler See / Fertő tó és környéke rendkívül érzékeny és sebezhető, ami a vízkezelést illeti.

Idézetek Schönertől et al. (2011):

Neusiedler See / Fertő tó

- *Mivel a vízmérleg jelenti a különbséget a két megközelítőleg azonos szám (csapadék és párolgás) között, a tó vízmérlegére vonatkozó előrejelzések nagyon bizonytalanok (meggyőző bizonyíték).*
- *A CLM éghajlati modell (a 2021-től 2050-ig terjedő időintervallumot összehasonlítva az 1976–2007 közti időszakkal) körülbelül 1 °C-os levegő-hőmérséklet növekedést és körülbelül 5%-kal több csapadékot eredményez. Ilyen körülmények között a tó vízszintje nagyjából a mai értéken marad (gyenge bizonyíték).*

A hosszútávú előrejelzések bizonytalanságát magyar kutatók azon következtetése is megerősíti (1. jelentés), miszerint a klímaváltozás valószínűleg ahhoz vezet majd, hogy a tó felől kisebb mennyiségű víz kerül kibocsátásra a Hanság-csatornán keresztül. A legrosszabb forgatókönyv eredményei – 198 mm éves vízmérlegvesztést jósolnak a 24 mm gyarapodással szemben, a tó csökkenő vízszintjét vetítve ki a jövőre. A csökkenő vízszint fokozza a csatornákkal határos termőföld lecsapolását és végül kiszárítja az élőhelyet. Hacsak nem erősödnek fel a jövőben a szelek, a szélrohamok, amik kiterjedt áradásokat okoznak a déli övben, sokkal ritkábbakká válnak.

3.4.2 Levegő szilárd részecskék

Az alábbiakban bemutatott adatok a vízgyűjtő terület és a tó, valamint a nyílt tó és a nádas öv közti terhelések, illetve be- és kiáramlások durva becsléseinek minősülnek. Az adatbázis és a becsült terhelések viszonyítási időpontjai nagyon eltérőek, ezért a

számítások nem adnak egy végső mérleget, az adatok inkább arra szolgálnak, hogy nagyságrendi értékeket közöljenek, melyek segítségével mérhető az egyes terhelések jelentősége.

Ez a szintézisjelentés csak röviden taglalja a vízmérleg összetevőit. Az adatbázis részletes kifejtését és az egyes adatok értelmezését az osztrák kutatások szintézisjelentése tartalmazza (Wolfram et al. 2020).

A tóba kerülő, a tóban képződő vagy a tóban szállított üledékek és lebegő szilárd részecskék mennyiségi felsorolását a 4. táblázat foglalja össze. Ahogy azt már korábban is említettük, ezek az adatok még nem elegendőek egy helyes tömegmérleg kiszámításához, főként a feltételezések bizonytalan volta és a nagy időbeli változékonyság miatt. Azonban minden bizonytalanság ellenére is, az alábbi következtetéseket tudjuk mindezekből levonni:

1. A Vulkából származó szilárd anyagok többnyire a torkolat nádas övében maradnak. Ez nagyon nagy, áradás okozta terhelésekre is igaz, melyek meghaladhatják egy év éves terhelését kevés elfolyással egyetlen nap alatt.
2. A tóban újonnan képződött üledék (Ca-Mg-karbonátok, mésziszap vagy német nevén “Kalkschlamm”) messze meghaladja a vízgyűjtő területéről a tóba kerülő szilárd anyagok mennyiségét.
3. Azokban az években, amikor nagy vízmennyiség távozik a tóból a Hanság-csatornán keresztül, jelentős mértékű zavarosságterhelés és finom üledék kerül kivonásra a tóból.
4. A kikötőkben és fürdőhelyeken végzett rendszeres kotrási munkálatok nem pusztán az eliszaposodás megelőzésére irányuló helyi intézkedések, hanem nagyban befolyásolják a tó teljes üledékmérlegét.
5. Mindazonáltal nagyobb lebegőanyag terhelések folyamatos szállítása történik a nyílt tóból a nádas övbe és ez a kiváltó oka e területek potenciális eliszaposodásának.
6. Hasonlóan a kikötők és fürdőhelyek rendszeres kotrásához, a csatornakerbantartási munkálatok is jelentős hatással vannak a tó teljes üledékmérlegére. Az üledék kikotrása a csatornákból tartósan eltávolítja a szilárd anyagokat a tóból, még akkor is, ha ezek a tómedence határain belül maradnak. A hosszirányú gátak formájában történő oldalsó lerakódások tartósan befolyásolják a nádas öv szerkezetét és jellegét.

A 4. táblázatban szereplő számok folyamatábraként kerülnek bemutatásra a 15. ábrán. Fontos ismételten megjegyezni, hogy a becsült értékek nem adnak valóban kiegyensúlyozott mérleget. Ez nem is volt elvárható a sok feltételezés és bizonytalanság miatt. A “mérleg összetevői” inkább arra szolgálnak, hogy nagyságrendileg kapjunk

benyomást. Különösen fontos szem előtt tartani, hogy a mérleg néhány komponense a tó egészére nézve került meghatározásra (pl. a mésziszap, németül “Kalkschlamm”), míg más részei csak Ausztriára vonatkoznak (pl. kotrás). Továbbá az őshonos ökológiai termelést sem vettük bele. További bizonytalanság áll fenn a nyílt tóban zajló szállítást (eróziót, lerakódást) illetően is, pl. olyan öblökben, mint a Rust-öböl vagy a Neusiedler See / Fertő tó strukturált déli része, az általános helyzet azonban leírható.

4. táblázat. A vízgyűjtő területéről a tóba kerülő üledékterhelés, a belső terhelések és a kimenet becsült értékei. A pozitív terheléseket (a megfelelő részre történő importot) sárga színnel, a negatív terheléseket (a megfelelő részéről történő exportot) kékkel emeltük ki.

bevitel/kimenet/szállítás	összesen	Vulka nádas öv	nyílt tó	egyéb nádas öv
bevitel				
Vulka ¹⁾	3 890 (740 – 24 230)	3 773 (718 – 23 500)	117 (22 – 730)	0
egyéb beviteli útvonalak				
egyéb mellékfolyók	440	0	13	427
szennyvíztisztító telepek	52	0	2	50
száraz ülepedés ²⁾	3 000	95	1 315	1 595
új képződmények				
szervetlen (CaCO ₃)	10 000 (7 500 – 14 500)	0	10 000 (7 500 – 14 500)	0
szerves	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
kimenet				
kibocsátás a Hanság-csatornán keresztül	1 600 (0 – 11 450)	0	1 600 (0 – 11 450)	0
kotort kikötők/öblök	6 800 (50 – 16 600)	0	6 800 (50 – 16 600)	0
csatornahelyreállítás ³⁾	3 140 (450 – 9 070)	160 (20 – 450)	0	2 980 (0 – 8 620)
belső terhelések				
szállítás nyílt tó -> nádas öv	0	0	9 666 (9 250 – 10 082)	9 666 (9 250 – 10 082)

¹⁾ kb. 3% -os szállítás a nyílt tóba

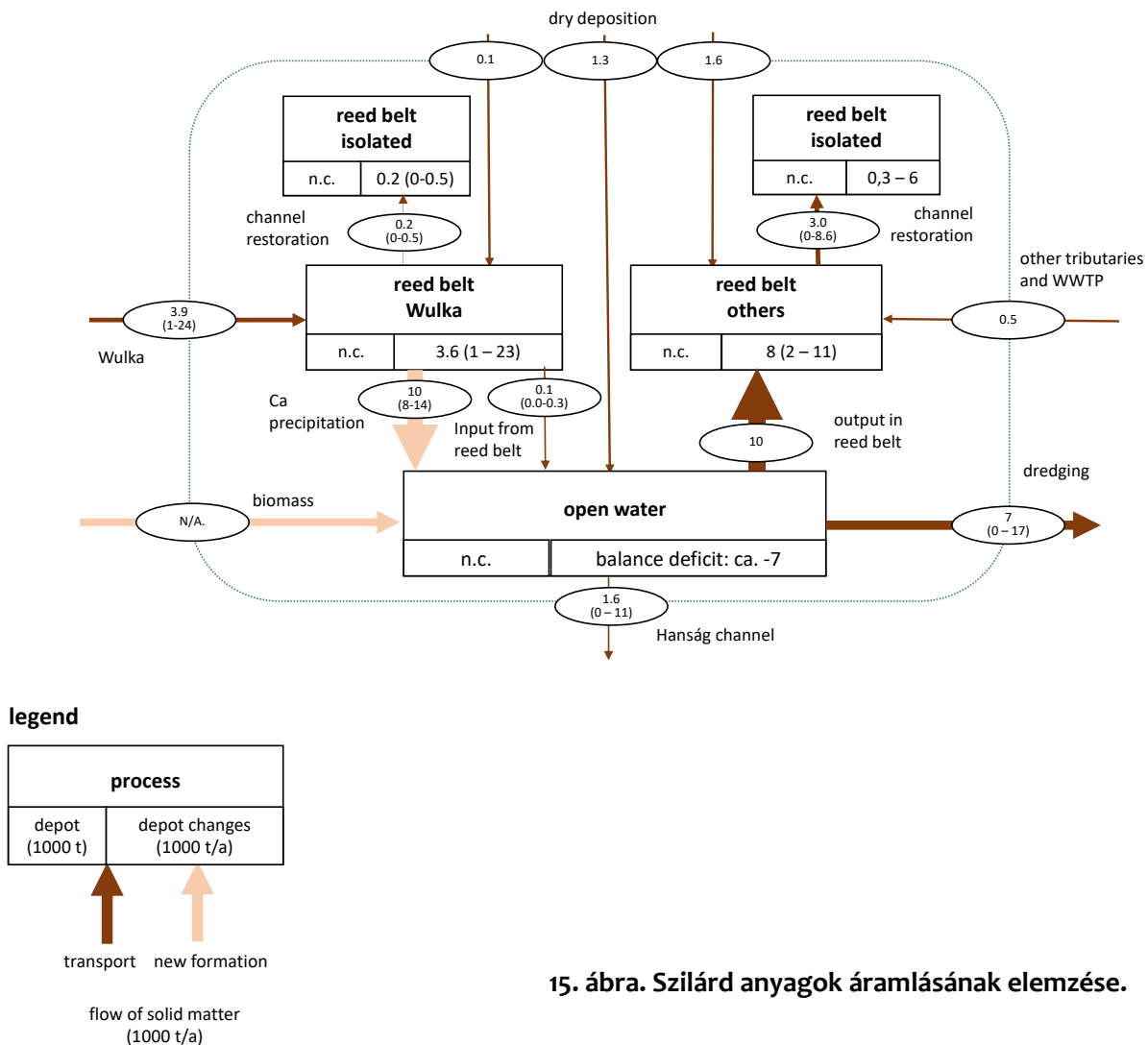
²⁾ Szétválás: 140 km² nyílt tó és 180 km² nádas öv, ebből 10 km² a Vulka torkolatának területén

³⁾ kibocsátásként megítélve, hiszen tartósan ki van zárva a jövőbeli kicserélődési folyamatokból

n.a. = nem értékelt

Az üledékszállítás egy korábbi becslését Stalzer & Spatzierer (1987) taglalja. A szerzők a lebegőanyagok tóbelsőben végbemenő, szél általi szállítását a nyílt tóból a nádas övbe körülbelül 13 000 t/a értékre becsülték. A módszertani különbségek ellenére ez az érték összhangban van a REBEN projektben meghatározott értékkel (kb. 9 700 t/a).

A becsült terhelés többnyire 10^4 - 10^5 tonna évente. A tó több, mint 200 millió m^3 teljes üledéktérfogatához mérve (Csaplovics *et al.* (1997) vagy annak körülbelül 100 millió tonnányi megfelelőjével (szárazanyag) összehasonlítva ez elhanyagolható mennyiség. Azonban az, hogy különösen a tó üledékének legfelső rétege szorosabb és gyakoribb kicserélődési kapcsolatban áll a nyílt vízzel, más megvilágításba helyezi a számokat és az éves terheléseket, valamint hangsúlyozza az üledékmérleg potenciális jelentőségét a tó hosszútávú morfológiai (hordaléklerakódás), minőségi (vízminőség) és ökológiai (ökológiai állapot) változásait tekintve.



3.4.3 Tápanyagok (foszfor)

A Neusiedler See / Fertő tó tápanyagmérlegére vonatkozó megfontolások alapvetően korábbi tanulmányok eredményein alapulnak, az 1980-as évek első részletes kutatásától kezdve (Brossmann *et al.* 1984) a 2010-es évek hosszútávú számításaiig (Wolfram *et al.* 2007; Wolfram & Herzig 2013; Wolfram *et al.* 2012). Wolfram *et al.* (2012) kalkulációi rávilágítottak arra, milyen fontos az üledéklerakódás és a nádas öv kapcsolódása a nyílt tóhoz, azonban a tápanyag lerakódás típusára és helyére vonatkozó részletek tisztázatlanok maradtak. A REBEN projekt keretein belül végzett vizsgálatok során fontos új következtetésekre jutottunk ezeket illetően (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** táblázat, 8. ábra):

1. A szilárd anyagokkal ellentétben a tápanyagok (foszfor) kis mértékben maradnak a Vulka torkolatában és többnyire eléri a nyílt tavat alacsony-közepes kibocsátás esetén – még ha kissé megkésve is. Csak másodlagosan kerül vissza foszfor a nyílt tóból a nádas övbe.
2. Hosszútávú átlagban és hosszú időn keresztül mintegy 3 t, a Vulka vízgyűjtő területéről származó foszfor marad a nádas övben, ahonnan nem jut el a nyílt tóba. Ennélfogva a Vulka nádas öve fontos tápanyagvisszatartó területnek minősül. Erős áradásokat mellőző, száraz években a Vulka torkolata azonban mégsem foszfortartályként, hanem foszforforrásként funkcionál. Ez nem jelent fokozott terhelést a nyílt tóra nézve, csupán jelzi az alacsony bevitelt a Vulka vízgyűjtő területéről alacsony kibocsátású években.
3. A külső bevételek közül a Vulka csak valamivel több, mint a felét teszi ki a teljes bevételnek, szemben a korábbi (1980-as) évek magas arányával (lásd Herzig & Wolfram 2013). Míg a szilárd anyagban a mészszip (kalcit, "Kalkschlamm") őshonos termelődése jelentősen hozzájárul a tóban található szilárd anyag teljes mennyiségéhez, a foszfor esetén nincs hasonló mérlegtétel.
4. A Vulka területén található és más nádasokból egyaránt jelentős mennyiségű oldott foszfor kerül a nyílt tóba, ami kevesebb, mint a nádas övbe kerülő partikuláris foszfor.
5. A kotrás nem annyira fontos a tápanyagmérleg vonatkozásában, mint az üledék tömegmérlegét illetően, ám hozzájárul ahhoz, hogy jelentős mértékű tápanyag kerüljön eltávolításra a rendszerből és – a Hanság-csatornán keresztül végbemenő kibocsátástól eltekintve –, az egyetlen lehetséges kiviteli mód a tómedencéből.

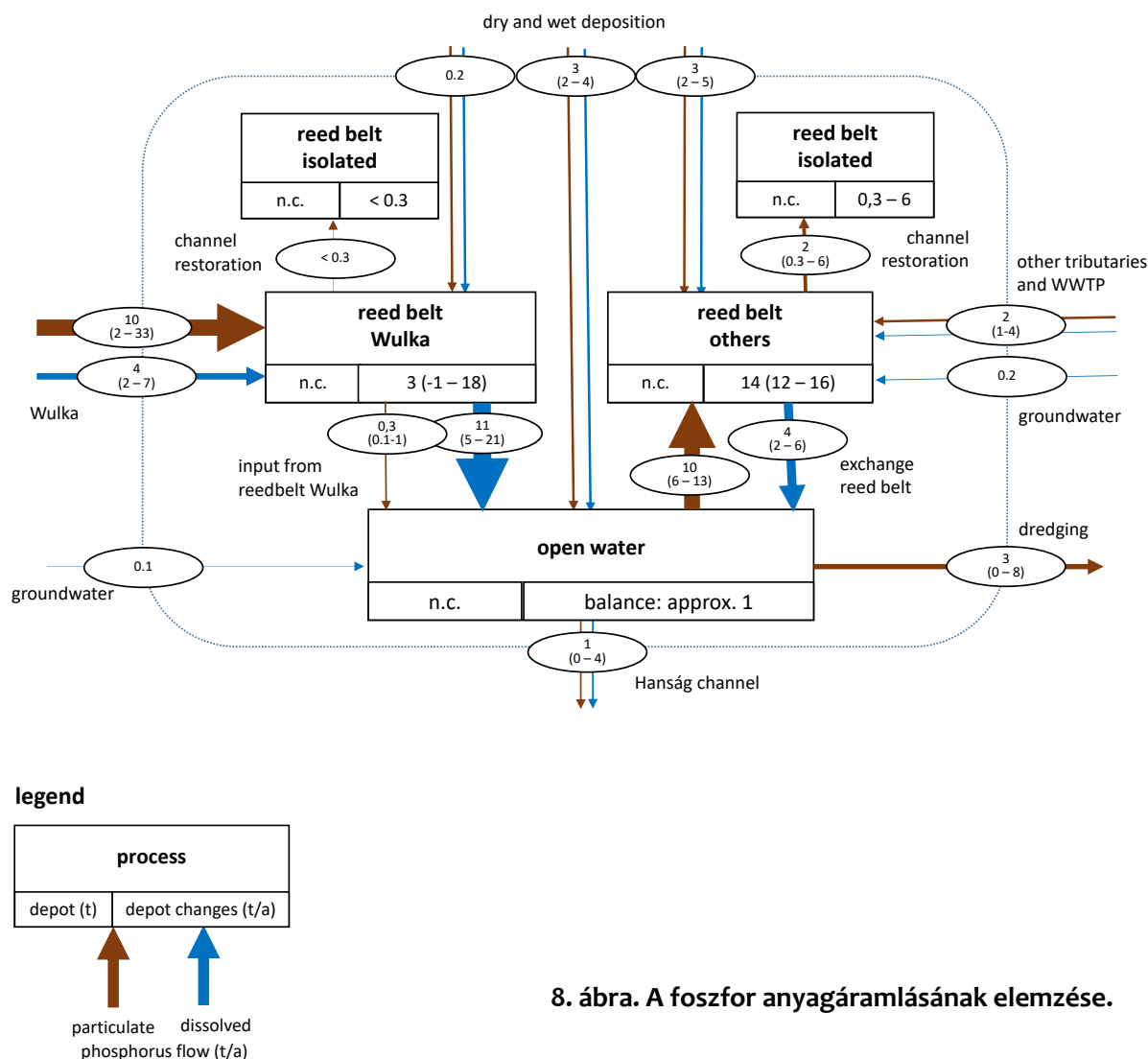
Ahogy a szilárd anyagok esetében is, a foszfor éves ki- és bevétele, valamint tóban történő szállítása elhanyagolható a tóban jelenlévő teljes tápanyagmennyiséghez képest. Azonban fontos megemlíteni, hogy a foszfor főként üledékhez kötött formában van jelen, azaz az üledéklerakódás (a nádas övben) a rendszerből való tartós kivonásnak felel meg. Ahogy az már a korábbi tanulmányokból is ismeretes (pl. Gunatilaka (1986)), az üledék tápanyagforrásként is funkcionálhat – mind a Vulka folyó torkolatánál, mind a nádas övben –, de ami dominál, az a nyílt tóból a nádas övbe irányuló nettó kibocsátás.

5. táblázat. A vízgyűjtő területről a tóba kerülő foszforterhelés (t/a), a belső terhelések és a kimenet becsült értékei. A pozitív terheléseket (a megfelelő részre történő importot) sárga színnel, a negatív terheléseket (a megfelelő részről történő exportot) kékkel emeltük ki.

Bevitel/kimenet/szállítás	összesen	Vulka nádas öv	nyílt tó	egyéb nádas öv
bevitel				
Vulka beleértve MV (1992–2009)	14 (4 – 40)	3 (-1 – 18)	11 (5 – 22)	0
partikuláris	10 (2 – 33)	9,7 (1,9 – 32)	0,3 (0,1 – 1)	0
oldott	4 (2 – 7)	6,7 (2,9 – 14)	10,7 (4,9 – 21)	0
egyéb beviteli útvonalak (partikuláris + oldott) *)	10 (6 – 16)	<1	6 (3 – 10)	4 (2 – 5)
egyéb mellékfolyók	2 (1 – 4)	0	2 (1 – 4)	0
szennyvíztisztító telepek (2001 óta)	0,2	0	0,2	0
száraz ülepedés	3 (2 – 4)	0,1	1,3	1,6
nedves ülepedés	3 (2 – 5)	0,1	1,5	1,8
talajvíz	0,3 (0,2 – 0,5)	<0,1	0,1	0,2
kimenet				
kibocsátás a Hanság-csatornán keresztül	1 (0 – 4)	0	1 (0 – 4)	0
kotort kikötők/öblök	3 (0 – 8)	0	3 (0 – 8)	0
csatornahelyreállítás	0,3 – 6	max. 0,3	0	0,3 – 6
nádaratás	n.a.	n.a.		n.a.
belső terhelések				
nyílt tó -> nádas öv				
i. becslés tömegmérlegből *)	0	0	18 (7 – 35)	18 (7 – 35)
ii. becslés a terhelésekből	0	0	9,5 (6–13)	9,5 (6–13)
partikuláris	0	0	10,5 (7–14)	10,5 (7–14)
oldott	0	0	1	1

*) A számok Wolfram et al. (2012) üledék-tömegmérlegéből származnak, ami ugyan a tó egészére vonatkozik, de a magyar oldal esetén (pl. Rákospatak) csak durva becsléseket tartalmaz. Az 1980-as években Pannonhalmi (1984) 1t/a értékkel becsülte meg a teljes ülepedést (nedves és száraz) a tó magyar oldalán.

n.a. = nem értékelt



3.4.4 Szennyezőanyagok

■ Koncentrációs gradiensek

A szennyezőanyagok vizsgálatának elsődleges célkitűzése az volt, hogy információt szerezzünk a különböző területekről származó, eltérő alkalmazási módú és környezeti viselkedésű anyagok előfordulásáról és sorsáról. A vizsgálati paramétereket is ennek megfelelően választottuk ki. Azonban a környezetminőségi előírásoknak (EQS) és a felszíni vizek kémiájára vonatkozó minőségi követelményekről szóló osztrák rendeletnek (Qualitätszielverordnung Chemie Oberflächengewässer) való megfelelés monitorozása, valamint az összes szabályozott anyag vizsgálata nem tartozott kutatási feladataink közé. Mindazonáltal a vizsgált paraméterek megmutatják, hogy a biótákban észlelhető higanytal és a PBDE-kel fennálló ismert problémákon túl, a PFOS-sal, fluoranténal, benzo(a)pirénnel vagy más, nagy molekuláris súlyú PAH-kel való szennyeződést

kritikusnak kell tekinteni, ugyanis lehetséges, hogy nem felelnek meg az EQS-nek. Emellett a nyílt tóban található ólom esetében is az EQS túllépésére utaló jeleket találtunk, bár a vízfázisban fennálló többlet egyértelmű igazolásához egy alkalmas megfigyelési programot kellett volna végezni évi 12 mintavétellel és kellően pontos elemzéssel.

Az ebben a kutatásban kiválasztott kémiai anyagok tóban és a tó nádas övében tapasztalható környezeti viselkedésének első mérését már az alapján el lehet végezni, hogy mekkora koncentrációban vannak jelen a Vulkán keresztüli beáramlásban, illetve a nyílt tóban és a nádas övben. A zárójelekben megnevezett paraméterek azonban ellentmondó eredményekre és nagyfokú bizonytalanságra utalnak.

A vizsgált anyagok, amik egyértelmű degradációt vagy konverziót mutatnak a tó környezeti adottságai mellett; gyógyszerkészítmények: karbamazepin, diklofenák és bezafibrát; komplexképzők: EDTA, NTA és benzotriazol; peszticid-metabolitok: kloridazon-deszfénil; (poli- és perfluortartalmú vegyszerek: PFOS), (édesítőszer: aceszulfám K).

Azok az anyagok, amik folyamatosan nagy arányban vannak jelen a tóban és a vízfázis gazdagodásához vezetnek; peszticid-metabolitok: N,N-dimetil-szulfamid; poli- és perfluortartalmú vegyszerek: PFOA, PFPeS, PFHpA, (PFNA és PFHxA); (édesítőszer: aceszulfám K).

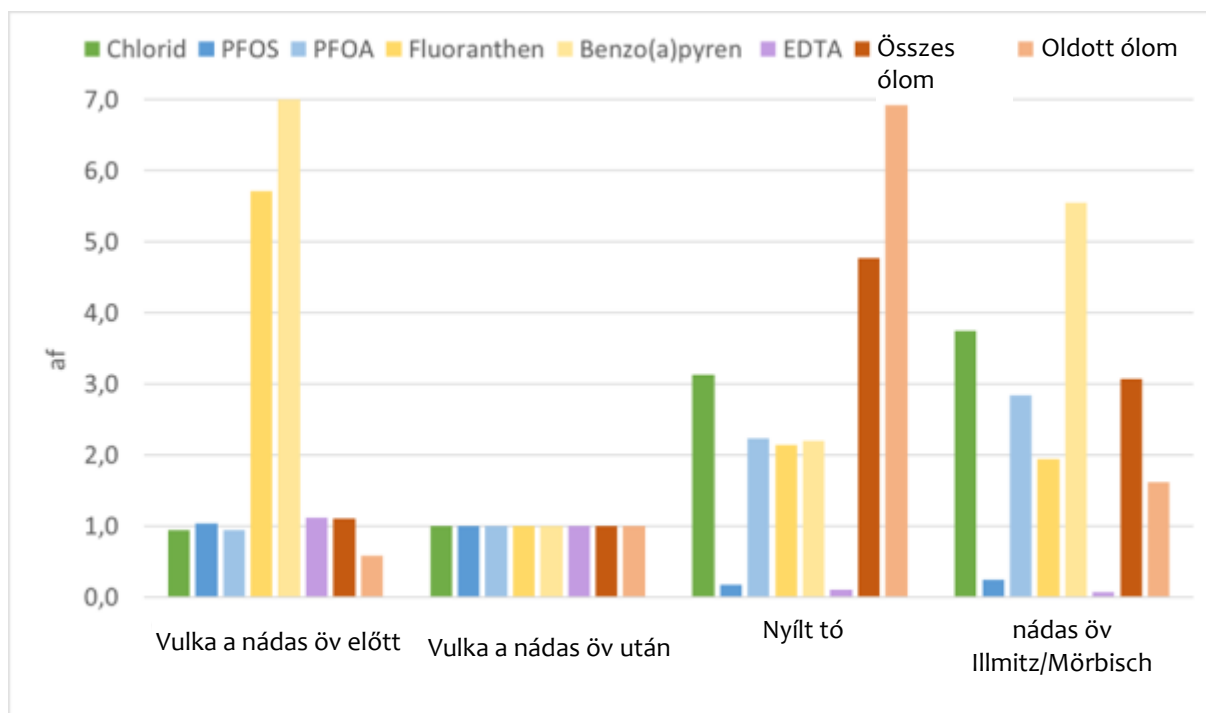
Azok az anyagok, amik főként a Vulka torkolatából, lebegőanyagok üledéklerakódásának útján kerülnek jelentős mértékű visszatartásra a nádas övben; nagyobb molekuláris súlyú PAH-ok: pl. benzo(a)pirén, fluorantén; fémek: pl. vörösréz, ólom, nikkel, cink.

Azok az anyagok, amiknél a nádas öv üledékébe történő adszorpció mutatkozik, ami az oldott koncentráció csökkenéséhez vezet a tóban a Vulkához képest vagy a nádas övben a tóhoz képest; (poli- és perfluortartalmú vegyszerek: PFOS); (fémek: kadmium, vörösréz, ólom, nikkel, cink).

Azok az anyagok, amik a nádas öv üledékéből való mobilizáció tendenciáját mutatják a helyszíni vizsgálatok során, ami örökölt szennyeződésekhez vezethet a nádas övből a tó irányába (PAH-ok: benzo(a)pirén, fluorantén).

Ez a válogatás olyan anyagokat tartalmaz, melyek esetén az EQS lehetséges túllépése tapasztalható (PFOS, fluorantén, benzo(a)pirén és ólom (oldott)). Emelett a klorid, a PFOA és az EDTA is bemutatásra kerül, hogy összehasonlításként megmutassuk a környezeti viselkedés tipikus mintázatait. Az itt kiválasztott értékeléshez és bemutatáshoz, a REBEN projekt keretein belül végzett és a 3. jelentés (osztrák szakértői csoport) "Fizikai-kémiai paraméterek és szennyezőanyagok" című 5. fejezetében összefoglalt kutatásokon túl, korábbi – legfőképp a Vulkára vonatkozó – vizsgálatok

adatait is felhasználtuk. A külső forrásokból származó adatok használata ugyanis még átfogóbb bemutatást tesz lehetővé. A felhasznált forrásokat Zessner et al. (2019) fejti ki részletesen.



9. ábra. A kiválasztott anyagok gyarapodási vagy csökkenési tényezője ($af = C_n/C_o$). A C_n az egyes vízfázisok koncentrációit jelöli, míg a C_o a Vulka nádas övéből a nyílt tóba történő beáramlás koncentrációit jelzi.

A tó magyar oldalán, a 2019-es év vegetációs időszakában a nyílt tó és a nádcSATORNÁK többnyire “jó”, néhány esetben “kiváló” állapotban voltak a Víz-keretirányelv besorolása szerint (magyar kutatók 2. jelentése). Magas gradiensértékeket lehetett megfigyelni, ugyanis a “rossz” vízminőségű nádállomány a “jó” állapotban lévő nádcSATORNÁKKAL volt határos. A szerves (nehézfémek, PAH, PCB és TPH) és szerves mikroszennyezők egyetlen mért és átlagolt koncentrációja sem haladta meg a magyar rendelet által előírt környezeti limiteket, kivéve a benzo(a)pirén esetében.

■ Terhelések

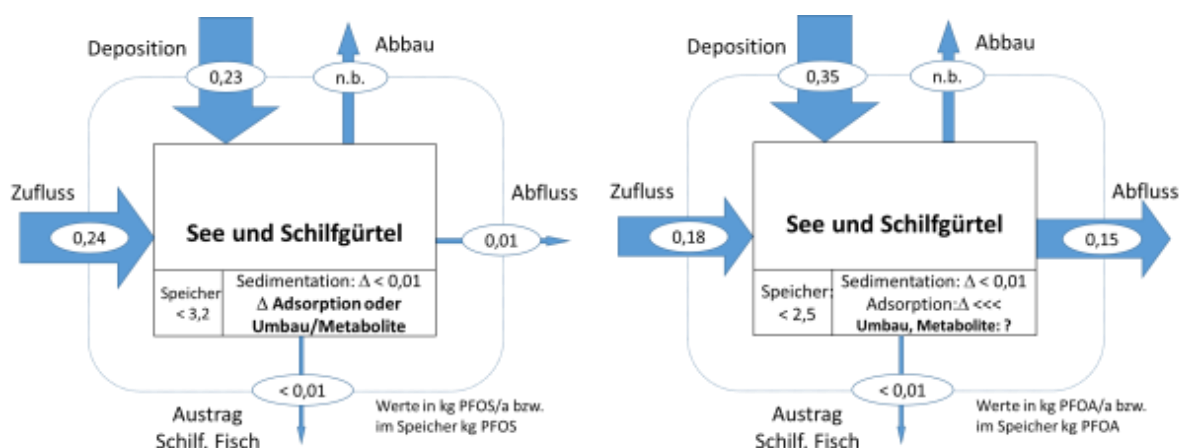
A PFOS, a PFOA és a fluorantén esetében a Neusiedler See / Fertő tóba és onnan kifelé irányuló alapvető anyagáramlás anyagmérlegek segítségével kerül összehasonlításra. A szilárd anyagokkal és a foszforral ellentétben a vizsgált rendszer egy leegyszerűsítési folyamaton ment keresztül a szennyezőanyagokról rendelkezésre álló kisebb információmennyiség miatt. A beviteli és kimeneti értékek a tó teljes nádas övi rendszerére vonatkoznak. A rendszer raktározásában bekövetkező változások retenciót

jeleznek a nádas övi vízgyűjtőben, míg a szennyezőanyagok jelenléte a Vulka-torkolat területén található nádas övben nem tér el a más nádas területeken tapasztaltaktól.

Az összeállítás a mennyiségre vonatkozó pontosság igénye nélkül készült, azonban lehetővé teszi a nagyságrendi összevetést és a mérlegrések azonosítását. Ezért itt nem adtuk meg a bizonytalanság határvonalait. A megadott adatokat nagyságrendbeli jelzéseként kell felfogni az adott anyagáramlásra vonatkozóan. A becslés során a tóba történő be- és kiáramlás vízmérlegkomponenseit használtuk és ezeket összekapcsoltuk a Vulka nádas öv előtti illetve utáni részén, valamint a tó nyílt vizén mért PFOS, PFOA és fluorantén koncentrációkkal. A rendszerből való kimenetet a Hanság-csatornán keresztül haladó átlagos kiáramlás és a nyílt tóban tapasztalható koncentrációk alapján számoltuk ki. (A REBEN projekt vizsgálatai során a gát zárva volt.) Ezen kívül felhasználásra kerültek Zessner *et al.* (2019) légköri lerakódásra vonatkozó becslései is a mérleg ezen beviteli útvonalára való tekintettel. Ahogy azt a 16. ábra (balra) szemlélteti, a PFOS-ben a beáramlás kiegészül az azonos nagyságrendű üledékbevitellel. A Hanság-csatornán keresztül történő kiáramlás során végbemenő PFOS-kibocsátás a beáramláshoz képest nagyon alacsony. Ennek oka a tóban észlelhető alacsony koncentráció. Például évente körülbelül fél kilogramm PFOS bocsátódik ki, szemben a kiáramlás okozta 0,01 kg-os évenkénti kibocsátással.

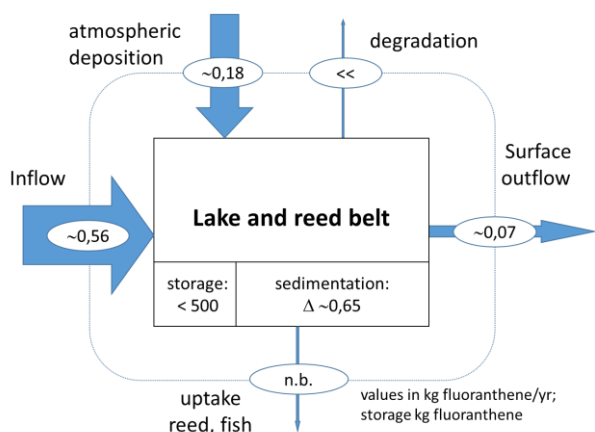
Összességében véve az ismert anyagáramlások nem adnak magyarázatot a kibocsátás által keletkező PFOS többletbevitelre. A PFOS rendkívül perzisztensnek mutatkozik a környezetben (Beach *et al.* 2006), ám bizonyos körülmények között lehetségessé válik a PFOS ürülése. Ez azonban túlnyomórészt rövidláncú PFT képződéséhez vezethet, aminek az állandósága jóval nagyobb mértékű, mint ami a PFOS esetében tapasztalható (Trojanowicz *et al.* 2018). Az adszorpció vizsgálatok eredményei azt jelzik, hogy adszorpcióval a PFOS további eliminációja is lehetséges a tó vizes fázisából, ami releváns útvonal lehet a nyílt tóból a nádas övi üledékekbe (az osztrák kutatók “Laboratóriumi vizsgálatok” című 6. jelentése).

Általánosságban kijelenthetjük, hogy a Neusiedler See / Fertő tó PFOS-mérlege a PFOS nagyfokú ürülését jelzi a tóvízből. A teljes ásványosodás kevésbé tűnik valószínűnek. Valószínűbbnek tűnik azonban egy rövidláncú PFT-vé történő átalakulás metabolitokként, amiknek további sorsa a környezetben ismeretlen. Továbbá a PFOS adszorpciója a nád üledékébe is a tóvízből való távozást segíti elő.



18. ábra. A Neusiedler See / Fertő tó anyagmérlegének becslése (hosszútávú vízmérleg a 2017-2019 közötti időszakból származó anyagkoncentrációkkal kombinálva) a PFOS-re (balra) és a PFOA-ra vonatkozóan (jobbra).

A PFOA és a PFOS helyzete hasonló (**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden..** ábra, jobbra). A lerakódáson keresztül történő bevitel valószínűleg meghaladja a felszíni mellékfolyókon keresztül zajló bevitelt, és a becsült kibocsátás nem ad teljes magyarázatot a tóba történő bevitel sorsáról. Ezzel szemben a PFOA eliminációja sokkal kevésbé kiterjedt, mint a PFOS esetében, a tóbeli koncentráció jelentősen nagyobb marad, mint a Vulkában, és így a Hanság-csatornán keresztül végbemenő kibocsátás hasonló nagyságrendű, mint a (főként a Vulkán keresztüli) beáramlás. A PFOA releváns adszorpciója a nád üledékein a “Laboratóriumi vizsgálatok” című 6. osztrák jelentés eredményei alapján kizárható. Így legalább az anyagterhelés, ami lerakódással kerül a tóba, nem található a tóból történő ismert kimenetekben és a mérleg releváns degradációs és transzformációs folyamatokat jelez a tóban, ahol rövidláncú PFT mint metabolitok nem zárhatók ki mint végtermék.



19. ábra. A Neusiedler See / Fertő fluorantén anyagmérlegének becslése (hosszútávú vízmérleg a 2017-2019 közti időszakból származó anyagkoncentrációkkal kombinálva).

Első ránézésre a fluorantén mérleg (19. ábra) is hasonlít a PFOS mérlegére. A beáramlás és lerakódáson keresztül zajló bevitel ellentétben áll a kiáramlás általi jóval kisebb kibocsátással. Így a tó hasznos tartályként is szolgál a fluorantén számára. Egy alaposabb vizsgálat azonban egyértelmű eltéréseket jelez. Például a fluorantén tározó a tó üledékében körülbelül 2 nagyságrenddel nagyobb, mint a PFOS-nél. A fluorantén esetén az üledéklarakódással történő eltávolítás a nyílt tó vizéből jól kimutatható a Vulka nádas övében. Az ott található nádas öv fennmaradó része szintén egyértelmű bizonyítéka a fluorantén lebegőanyag-lerakódás általi eltávolításának. Ez a helyzet a nádas övben található víztározóból való kibocsátás lehetőségére is rávilágít, mint ahogy a foszfor esetében is, bár ennek tényleges mértéke nem becsülhető meg a rendelkezésre álló információk alapján.

3.5 A szikes tó jellemzői

A Neusiedler See / Fertő tó Európa legnagyobb szikes tavaként és egyben a legnyugatabbra fekvő sztyepte-tavaként ismert és az ott található sokszínű víztestek egy egyedülálló ökoszisztémát alkotnak a Kárpát-medence összes jellemző szikes élőhelyével, melyeket sokrétű, szélsőséges fizikai és kémiai környezet és biogeokémiai folyamatok határoznak meg. A közönséges nád (*Phragmites australis*) fontos szerepet játszik az ökoszisztémában. Populációs dinamikáját és helyi sajátosságait nagymértékben befolyásolják az extrém környezeti tényezők és a nádas biológiai öröklődése is nagy hatással van környezetére.

A tó sekélyisége és ingadozó vízszintje száraz sztyepei éghajlatot hozott létre, így a napi hőmérséklet-ingadozás a zárt belső tavakban és a nádas zónában akár 10–20°C is lehet, ami a klímaváltozásnak köszönhetően a jövőben várhatóan tovább növekszik.

3.5.1 A víz kémiai összetétele

A magyar szikes belvizek (lápok és tavak) közül a leggyakoribb a nátrium-hidrogén-karbonát (NaHCO_3), mint például a Neusiedler See / Fertő tó, de az anionok közül a nátrium-klorid és a nátrium-szulfát is előfordul a Seewinkel (Fertőzug) területén található asztatikus tavakban.

A sótartalom $1,5$ és $2,5 \text{ g L}^{-1}$ között váltakozik a szemisztatikus Neusiedler See / Fertő tóban. A tipikus asztatikus tavakra és vizekre állandó lúgos környezet jellemző (pH: 8–10), a szikességgel összefüggően. Más fontos fizikai és kémiai tulajdonságok – mint a nagyfokú turbiditás – a szervesetlen lebegő szilárd anyagok nagy koncentrációjának következményei (Secchi-korong átlátszóság 1–20 cm), ami a Neusiedler See / Fertő tó nyílt vizében tipikus jelenség, valamint a hipertrófikus tápanyagállapotú, magas (polihumin $>16 \text{ mgC L}^{-1}$) oldott, szerves széntartalom (DOC) miatt alakulnak ki. Ezek a környezeti hajtóerők többszörösen szélsőséges körülményeket, sajátos tápanyagciklusokat (C, N, P), sajátos trófikus rendszert és ökoszisztémát mutatnak.

A víz magas DOC-tartalma főként a nádasok belső (öshonos) bomlásának eredménye. Az oldott szerves szén jelentős része elszíneződött, oldott szerves anyag (CDOM), ez adja a víz jellegzetes barna színét a nádállományban. A tartósan lúgos környezet pedig szintén fontos szerepet játszik a humuszos anyagok nagy koncentrációjának fenntartásában.

Az oxidációs-redukciós potenciál – a továbbiakban redoxpotenciál – az üledékben szintén jelentős hatást gyakorol az anyagkörforgásokra, meghatározva a növény növekedését, közvetlenül az üledékben található, rendelkezésre álló nitrogén-, foszfor- és részben szénmennyiségen keresztül.

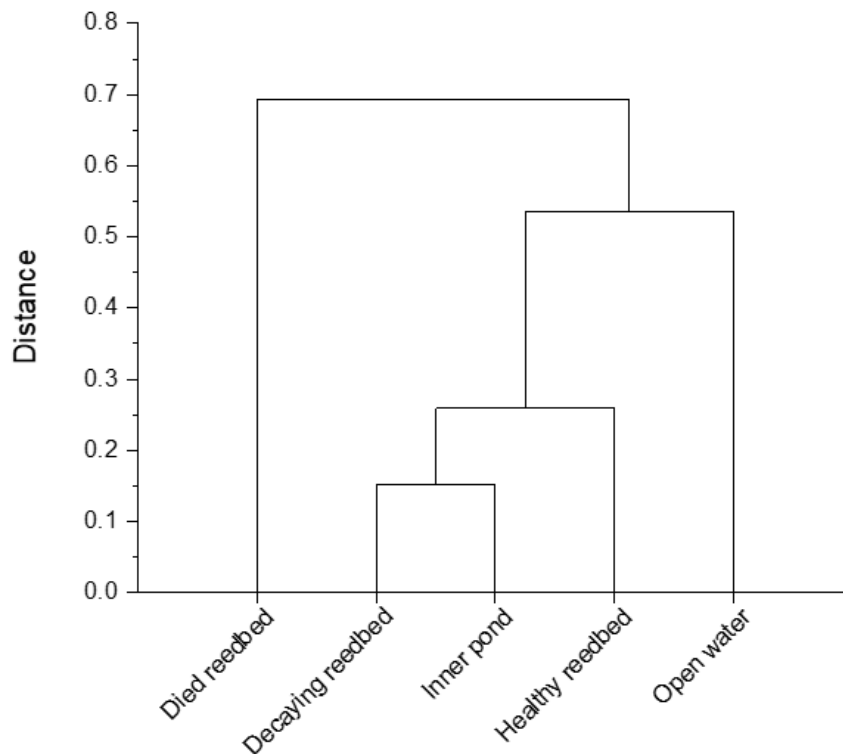
A legalacsonyabb összes (TOC) és oldott szerves szén (DOC) koncentrációt a Neusiedler See / Fertő tó nyílt vizében találták ("ATHU2 Vogelwarte - Madárvárta 2 projekt), míg a legmagasabb értékek a belső, ritka nádállományban mutatkoztak. Ez az oka annak, hogy a szén a hanyatló nádállományban halmozódik fel és így polihumin állapotot teremt (rendkívül gazdag humuszos anyagokban). Azonban e jelenség alaposabb megértéséhez további idevágó kutatásokra van szükség. A TOC és az összes nitrogén (TN) közti szoros összefüggés arra enged következtetni, hogy a TN-tartalmat a szerves kötésű nitrogén határozza meg, ezért a legmagasabb TN-értékeket a pusztuló nádállományban lehetett észlelni. Azonban az algák számára elérhető ásványi nitrogén (ammónia és nitrát nitrogén) mennyisége minden élőhelyen két nagyságrenddel kisebb volt, mint az összes nitrogéntartalom, és a nádból származó, lassan bomló, szerves (humuszos) anyag felhalmozódásából jön létre. Az algák számára hozzáférhető éves, átlagos, oldható ortofoszfát-foszfor átlagosan egy nagyságrenddel volt kisebb, mint a nagyon alacsony

értéken mozgó összes foszfor mennyisége, valamint több nagyságrenddel volt alacsonyabb, mint a Seewinkel periodikus szikes tavaira jellemző többeszes értékek. Ennek ellenére az összes nitrogén és foszfor aránya viszonylag magas (átlagosan 46), különösen a periodikus szikes tavakkal összehasonlítva, ahol ez az érték gyakran 1 alatt marad. Ami a trófikus arányokat illeti, az évi átlagos összes foszfor koncentráció alapján (OECD) minden vizsgált élőhely illetve víztest eutrófikusnak minősült, míg az évi átlagos klorofill koncentráció szerint csak a mezotrófikus kategóriába esett, ami szintén jellemző tulajdonsága a Kárpát-medencében található szikes tavaknak (Boros et al. 2017).

3.5.2 Biológiai minőségi elemek

A fitobentosz törzsek fajösszetétele kis mértékben eltér az erre a típusra jellemző közösségi jellemzőktől és sokkal jobban meg van zavarva, mint egy jó állapot esetén. A populációsűrűség kissé különbözik az erre a típusra jellemző közösségektől. Néhány metszetben a fitobentosz állományt baktériumkolóniák és –bevonatok károsíthatták, melyek antropogén hatásoknak köszönhetően fejlődtek ki.

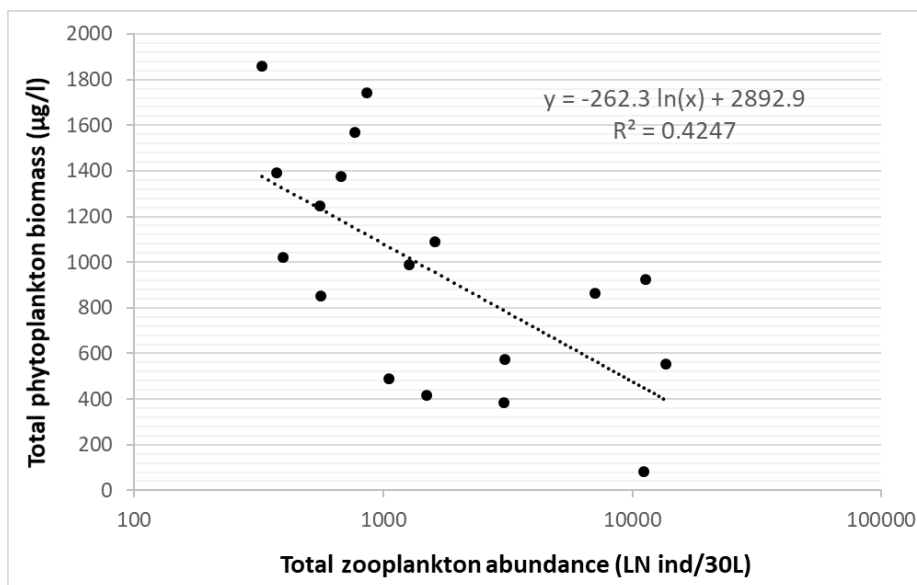
A fitoplankton biomassa friss súlya 100-tól 5000 $\mu\text{g L}^{-1}$ -ig terjed, míg a fajösszetétel jelentős eltéréseket mutatott a különböző évszakok és élőhelyek tükrében. A tavaszi fitoplankton fő jellegzetessége a piko-cianobaktérium dominanciája a nyílt vízben (Somogyi et al. 2010), míg ezek az algák nincsenek jelen a nádas övben és a belső tavakban. A valódi planktonikus algán kívül, a nyílt vízben észlelhető másik jellemző csoport a meroplanktonok (Padisák & Dokulil 1994). Nincsenek jelen a nádas övben, viszont hozzájárulásuk a teljes fitoplankton populációhoz nagyon változó, ugyanis a vízoszlop szélkeverékétől függ. Ezért a pikoplankton és meroplanktonikus organizmusok a legjobb indikátorai a nádas öv különböző élőhelyei és a nyílt víz közti kapcsolatnak. Van egy jellemző sóindikátor faj is, a *Chaetoceros muellerii*, ami kis mennyiségben fordult elő a teljes tóban. A nádállományban, ahol a planktonikus algafajok mellett számos perifitikus/bentikus faj is előfordult, sok különböző algaközösség is jelen van. A nyílt vízben és az elhalt nádasban élő fitoplankton közösségek eltérnek a nádas zónában találhatóktól, ahol az élőhelyek a belső tavakkal együtt többé-kevésbé homogén csoportot alkotnak (20. ábra).



20. ábra: A fitoplankton közösség összetétele alapján vizsgált élőhelyek hasonlósága (klasztermódszer: csoportátlag, korreláció) a tó magyar oldalán.

Van néhány sós jellegű faj a zooplankton közösségben, ami jelzi a Neusiedler See / Fertő tó szikes-sós kémiai jellegét. Például a szikes jellegű *Arctodiaptomus spinosus* megtalálható a nyílt vízben.

Egy nemlineáris kapcsolat volt megfigyelhető a fitoplanktonok és zooplanktonok között (21. ábra). A magyar öv zárt, makrofitákban gazdag részein a zooplankton állomány volt a legbőségebb, és ezekben a víztestekben a zooplanktonok erőteljesen, felülről irányítják a fitoplanktonokat.

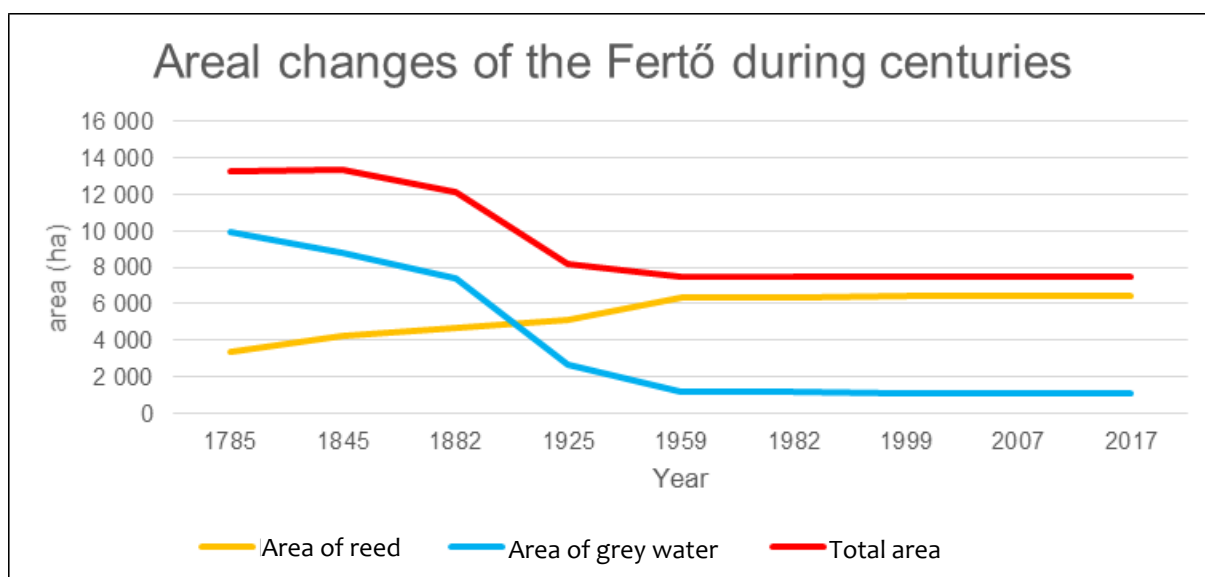


21. ábra: A zooplankton bőség és a fitoplankton biomassza viszonya a Neusiedler See / Fertő tóban.

Mennyiségi elemzésük alapján az alámerült makrofiták néha sokkal kisebb területet fednek le, mint 2019-ben, ám szétterjedésük a fluktuációnak köszönhetően idővel sűrű lefedést okozhat, ezért ezek is fontos szerepet töltenek be a tó vízkezelésének gyakorlatában.

3.6 Nádszerkezet és annak változása

A Neusiedler See / Fertő tó magyar oldalán történő változásokat különböző forrásokból származó adatok segítségével vizsgáltuk a REBEN projekt keretein belül. Vizsgálatainkhoz elsődleges adatforrásként használtuk fel az Első (1785), Második (1845), Harmadik (1882) és Átdolgozott Harmadik (1920) Katonai Felmérés archív térképeit és különböző légifelvételeket (az alábbi évekből: 1959, 1982, 1991, 1999, 2007 és 2017). Az eredmények szerint a nádas terület jelentős mértékben növekedett a magyar oldalon, 1959-ig ~25%-ról (de a tó jelenlegi területére nézve kevesebb, mint 1%-ról) ~84,6%-ra. Ehhez képest a növekedés jóval lassabb a vízszabályozás óta (14. ábra), ~86%-ra nőtt 2017-ig (lásd 22. ábra). Ez évi 4,6 hektárt jelent az utóbbi tíz évben (2007–2017).

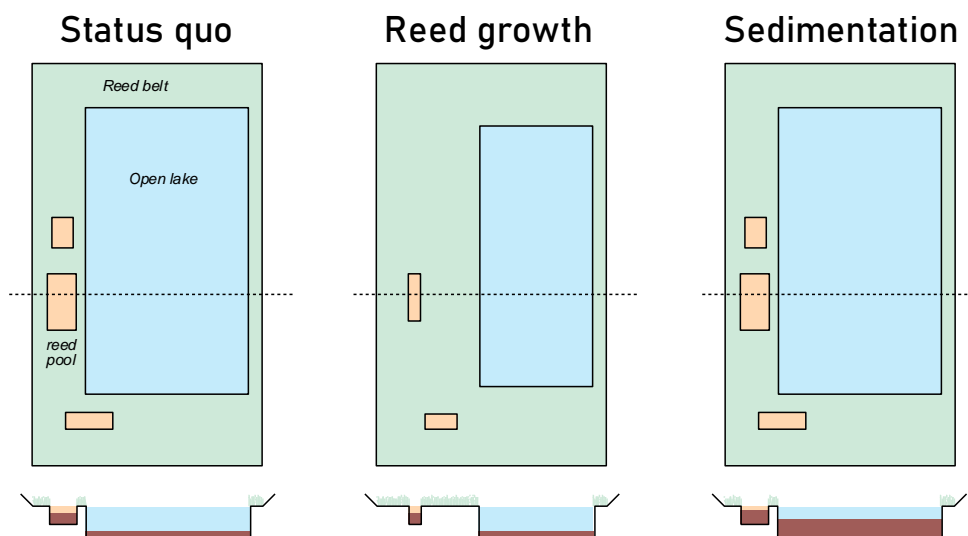


22. ábra. A Neusiedler See / Fertő tó magyar oldalán megfigyelhető területi változások az évszázad során.

3.7 Hosszútávú változások

A REBEN projekt kutatási eredményei az előző évtizedek tapasztalatain alapulnak és a hosszútávú változásokra vonatkozó megfontolások egy, a “rövidtől a középtávúig” terjedő időszakot is figyelembe vesznek, illetve maximum 50 évre tekintenek előre a jövőbe. Emelett azonban a hosszabb távú változások és tendenciák is fontosak.

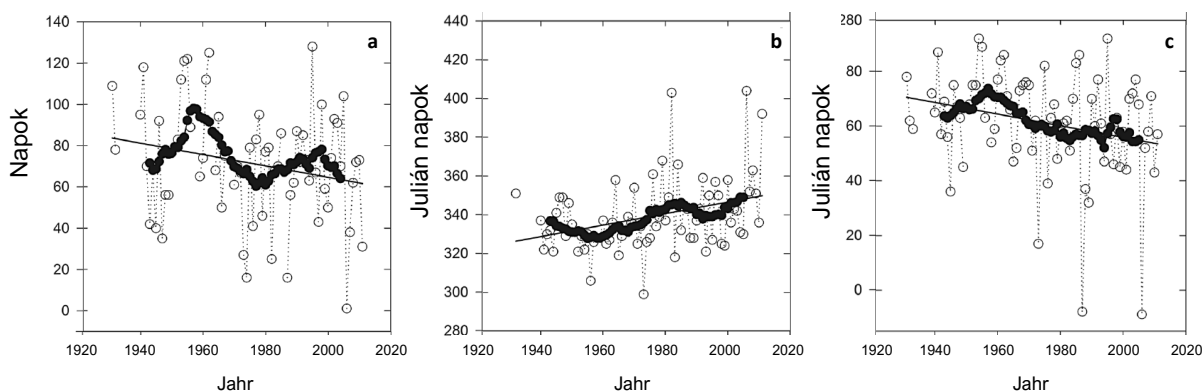
A tó hosszútávú átalakulásának egyik szempontját, a tómedence eliszaposodását is vizsgálta a REBEN projekt. Mivel nagy mennyiségű szilárd anyag kerül minden egyes évben a tóba vagy keletkezik ott csapadék és más folyamatok által, csak idő kérdése, míg a relatíve sekély tómedence feltöltődik, nem csak földtörténeti időtávlatban mérve. Ami jelentősen csökkentheti ezt a folyamatot, az a bevitel csökkentése és/vagy az üledékkotrás. Ez szó szerint az üledéklerakódás szempontját érinti, kvázi a tómedence “feltöltődését” szilárd anyagokkal (lásd 23. ábra jobbra). Ettől azonban meg kell különböztetnünk a nádnövekedés okozta üledéklerakódást a nádas övben, ami vagy a nádas övben található nyílt nádasok és barna vizű területek túlnövése által jön létre vagy a nádas öv összterületének növekedése okozza a nyílt tó területének kárára (lásd 23. ábra középen).



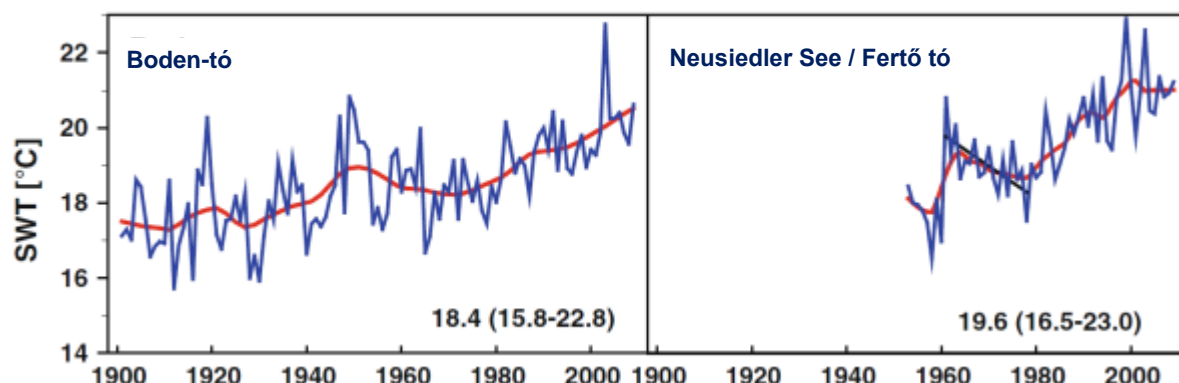
23. ábra. A “Verlandung” (feltöltődés) sematikus ábrája a nádállomány növekedése (középen) és az üledéklerakódás (jobbra) szempontjából.

A következő forgatókönyvek célja, hogy megfejtsek az üledéklerakódás különböző aspektusait (melyekre nem találtunk sem német, sem magyar vagy angol nyelvi megfelelőt, ami egyértelmű lenne), nem utolsósorban azon vízkezelési célkitűzésekre való tekintettel, melyek az üledékképződéssel és a nádnövekedéssel kapcsolatosak.

Az osztrák szakértői csoport “Hidrológia” című 1. jelentése által már korábban említett második hosszútávú szempont a **globális** felmelegedés. Soja et al. (2014) kutatásaik során arra jutottak, hogy az az időtartam, míg a tavat jégtakaró borítja, az elmúlt 100 év alatt észrevehetően csökkent (24. ábra), míg Dokulil (2013) adatelemzése a tó jelentős nyári hőmérsékletemelkedésére világított rá az elmúlt néhány évtizedet vizsgálva (25. ábra). Bár e hosszú időintervallum során a hőmérséklet ingadozása nagy volt, a globális felmelegedéssel való kapcsolat a 20. század második felétől egyértelmű. Az adatgyűjtők legfrissebb, az 1976-2018-ig terjedő időszakra vonatkozó elemzése szerint a vízhőmérséklet $1,9^{\circ}\text{C}$ -kel emelkedett (Maracek & Sailer 2019).



24. ábra. A Neusiedler See / Fertő tó jégtakarójának időtartamában (a), illetve kialakulásának kezdetében (b) és végében (c) bekövetkező változások az elmúlt 100 év során (Forrás: Soja *et al.* (2014)).

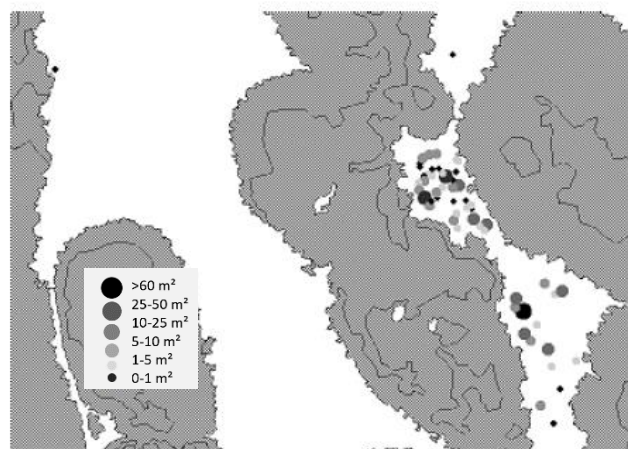


10. ábra. A vízfelszín hőmérsékletének nyári emelkedése (SWT) Ausztria legmélyebb és legsekélyebb vízű tavában az elmúlt évtizedekben (Forrás: Dokulil (2013)).

Az osztrák kutatók “Hidrológia” című 1. jelentésében is szerepel, hogy Schöner *et al.* (2011) és Blöschl *et al.* (2018) klímaváltozással kapcsolatos kutatásai a levegőhőmérséklet további emelkedésére hívják fel a figyelmet a következő évtizedekben. Eitzinger *et al.* (2009) szerint ekkor valószínűleg egyre gyakoribbak (vagy hosszabbak) lesznek a száraz időszakok, ami hosszútávon a vízszintek várható csökkenéséhez vezet. Schöner *et al.* (2011) szerint azonban az Ausztria keleti részén előforduló csapadék vonatkozásában megjósolt kismértékű emelkedés arra utal, hogy a veszteségek többé-kevésbé kárpótlásra kerülnek és megmarad a jelenlegivel körülbelül azonos állapot. Mégis a Neusiedler See / Fertő tó elmúlt analóg éveit társítva a jövőbeli éghajlattal (magyar kutatók 1. jelentése) arra a megállapításra juthatunk, hogy a klímaváltozás hatására valószínűleg kevesebb víz bocsátódik ki a tóból a Hanság-csatornán keresztül.

A vízszintek csökkenésével a víz alkotóelemeinek koncentrációjában bekövetkező fokozatos emelkedés várható, ahogy azt a hosszú, száraz időszakok alatt megfigyelhető sótartalom változás modellezése is megmutatta. Zessner *et al.* (2012) éghajlati modellje és az az alapján készült tömegmérleg (Wolfram *et al.* 2012) a kloridkoncentráció emelkedését jelzik előre a mediánban 246 mg L⁻¹ értékről (1992–2007) 595 mg L⁻¹ értékre (500-éves forgatókönyv). Hasonló emelkedés várható a nátrium és a (hidrogén-)karbonát esetében is. Így a tó mindinkább felveszi majd az igazi szikes tó jellegét és az elemi kémia szempontjából ezzel megközelíti a Seewinkel terület sómedencéinek alacsony koncentrációját. A belső nádas öv vezetőképessége már most is eléri a több, mint 6 000 µS cm⁻¹-t száraz időszakokban. Hosszantartó alacsony vízfázisban, a Hanság-csatornán keresztül zajló kibocsátás hiányában ilyen értékek a nyílt tóban is előfordulnak majd.

Nehéz megmondani, hogy vajon a nyílt tó szerkezeti változásokon is keresztülmegy-e (pl. az alámerült makrofiták és egyéb nádfajok penetrációja által), de nem zárható ki. A tenger melléki (parti) káka jelenléte is a globális felmelegedés egyik lehetséges következménye, ami a Neusiedler See / Fertő tó változásának első jele is egyben. A Neusiedler See / Fertő tó magyar részén az elmúlt években a tenger melléki káka (*Schoenoplectus litoralis*) megnövekedett penetrációja volt megfigyelhető. A Neusiedler See / Fertő tó legnagyobb tartós populációja a Kőbokor-tónál található, amit a Püspök-tó és a Gémes-tó, majd végül a Hidegség-tó követ. Nagyfokú sokszínűséget lehetett érzékelni a különböző helyszíneken, ami a parcellák méretét, sűrűségét és a virágzás arányát illeti (Szőke 2016).



26. ábra. A tenger melléki káka (*Schoenoplectus litoralis*) eloszlása a Fertőrákosi-öböl déli részén (Forrás: Pannonhalmi M.).



27. ábra. A tengermelléki káka (*Schoenoplectus litoralis*) eloszlása a Búzaszem-bokor környékén. Fotó: Kalmár, Forrás: Szőke (2016).

E két hosszútávú tendencia bizonyos mértékig háttérbe szorítja a lentebb vázolt forgatókönyveket. Harmadsorban pedig további intézkedésekre van szükség, hogy megbecsülhessük a jövőbeli változásokat, melyeket a jelen szintézisjelentés nem tartalmazza, azokat a kezelési terv taglalja részletesen.

4 FORGATÓKÖNYVEK – KÜLÖNBÖZŐ KERETFELTÉTELEK

4.1 A forgatókönyvek meghatározása

A következőkben azt fejtjük ki, hogy az előző fejezetekben tárgyalt folyamatok és mérlegek miképpen változhatnak meg különböző körülmények között. Előrejelzéseink egy néhány évtizedes időintervallumra vonatkoznak.

Nyilvánvaló, hogy ezek a megfontolások nem pontos kalkulációk eredményei, hanem főként szakértői méréseken alapulnak, melyek a REBEN projekt átfogó vizsgálataira és kutatási eredményeire hagyatkoznak. Jelenlegi tudásunkat tükrözik vissza és “legvalószínűbb feltételezéseként” értelmezendők.

A **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** és **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** fejezet a vízszintről (és így közvetlen módon az éghajlati és időjárási adottságokról), valamint a nádas öv szerkezetéről (itt elsősorban a nádcsatornákról) mint az anyagszállítás legfontosabb tényezőiről szolt. Ezért ésszerűnek tűnik a különböző körülményekre készített forgatókönyvek meghatározása is e két befolyásoló tényező mentén. Összesen három forgatókönyvpárt különböztetünk meg.

4.1.1 Forgatókönyvek: “Szélsőséges vízszintek”

A REBEN projekt vizsgálati fázisában a Neusiedler See / Fertő tó vízszintje 115,3 és 115,6 m tengerszint feletti magasság között mozgott (max. 115,5 m tengerszint feletti magassággal az online megfigyelőállomások működésekor). A nagyon alacsony vagy nagyon magas vízszintek esetén fennálló körülményekkel kapcsolatban kevés tapasztalatra tudunk hagyatkozni korábbi kutatásokból (mindenekfelett az anyagmérlegre (Wolfram et al. 2012)). Mindazonáltal, ezek a helyzetek nagyon fontosak nem csak a fokozatos globális felmelegedés során bekövetkező lehetséges változásokat, hanem a külső forrásokból származó lehetséges mesterséges vízellátást tekintve is. Ennélfogva itt két forgatókönyvet különböztethetünk meg:

- **P1-es forgatókönyv** <115,2 m tengerszint feletti magasság
- **P2-es forgatókönyv** >115,8 m tengerszint feletti magasság

A P1-es forgatókönyv azt feltételezi, hogy még nagyon alacsony vízszintnél is előfordulnak vízszintingadozások. A P2-es forgatókönyvet illetően meg kell, hogy jegyezzük, hogy csak a magas vízszint hatásait vettük figyelembe, de nem mértük, hogy

hogyan éri el ezt a forgatókönyvet (pl. vízellátás külső forrásból). Azonban tekintettel voltunk a következményekre (kiáramlás a Hanság-csatornán keresztül).

4.1.2 Forgatókönyvek: “A Vulka folyó nádas övön keresztüli áramlásának különböző mintázatai”

Az ezidáig rendelkezésre álló összes információ szerint (helyszíni megfigyelések, kémiai elemzések, vízminőségellenőrző állomások, nyomjelző kísérlet, modellezés) a Vulka folyó nádas övön keresztüli áramlása alacsony áramlásértékek esetén főként lineáris. Áradásnál azonban a Vulka valószínűleg elárasztja és összezavarja a nádas övet. Két forgatókönyv-változat különböztethető meg:

- **W1-es forgatókönyv** csak diffúz áramlás a nádas övön keresztül
- **W2-es forgatókönyv** csak lineáris áramlás a nádas övön keresztül

A W2-es forgatókönyv (a P2-es forgatókönyvvel ellentétben, lásd fent) sok intézkedést és beavatkozást követel a nádas övbe, melyeket leírásunk során figyelembe vettünk. Ezeket a következő mérés tartalmazza (4. fejezet).

4.1.3 Forgatókönyvek: „Nádcsatornák”

A kutatási eredmények világosan jelzik, hogy a csatornák nagyon fontos szerepet töltenek be a nyílt tó és a nádas öv között zajló kicserélődési folyamatokban. A létező csatornahálózat alapján, feltételezve annak megfelelő állapotát (nincs eliszaposodva vagy benőve), 9 250 vagy 13 200 t szilárd anyag és 15 vagy 18 t (az anyagmérleg hosszú időintervallumra vonatkozik és 7- 35 tonnáig terjed) foszfor szállítása zajlik le évente a nyílt tóból a nádas övbe.

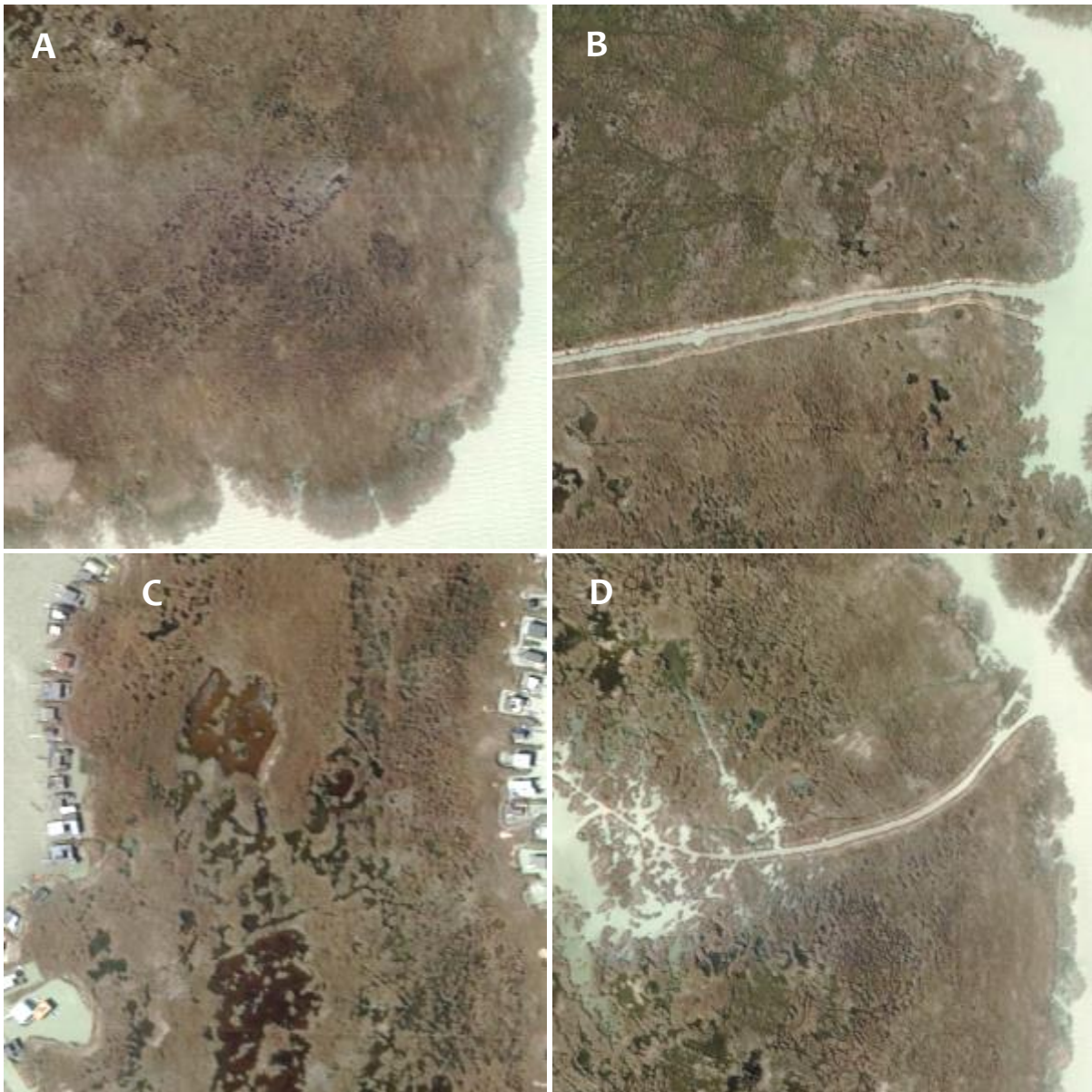
Azonban nem csak a csatornák lényegesek, hanem a mögöttük húzódó, kapcsolódó vízviSSzatartó terület is. Itt nagyjából négy nádszerkezet-típust különböztethetünk meg. Ezt a besorolást csak az ebben a jelentésben foglalt forgatókönyvek értékelésére használtuk. Ennél sokkal gondosabban kidolgozott osztályozási rendszerek is készültek a nádas öv osztrák részét illetően (Csaplovics & Schmidt 2010a; b) és a magyarországi tavak vonatkozásában is, beleértve a Neusiedler See / Fertő tavat (Márkus et al. 2008).

Az osztrák nádas öv közel fele nagyon sűrű (A típus) és többnyire csatornák keresztezik (B típus) párhuzamos gáttal. Ezért a nádas öv e része szegényes vízviSSzatartó területet kínál a vízzsállításra és tömegátvitelre. Ausztriában nyílt területeket főként Mörbisch és Illmitz közelében találunk, valamint kisebb területeket Rustnál és Jois-nál. Ezekre helyezték a hangsúlyt a REBEN projektben végzett kutatások. Ezek az osztrák nádas öv területének körülbelül 15%-át teszik ki és többségük jelenleg jó összeköttetésben van a nyílt tóval (D típus).

Az IL9 mérőállomásnál, Illmitz-nél, ami nem vagy alig kapcsolódik a nyílt tóhoz (C típus), egy speciális esetet figyelhetünk meg. Ez a terület kémiai és biológiai szempontból is különbözik a feljebb északabbra fekvő, a tóval összeköttetésben lévő területektől (lásd 28. ábra).

A nádas övnek ezeket az eltérő adottságait számba véve két forgatókönyvet határozhatunk meg:

- **S1-es forgatókönyv** A csatornák, illetve egy létező csatorna sincs eliszaposodva vagy benőve; a létező csatornák nem kapcsolódnak a kiterjedt vízi területekhez, azaz a nádas öv túlnyomórészt az A, B és D típusoknak felel meg (v.ö. 28. ábra)
- **S2-es forgatókönyv** A létező csatornahálózat bővítése és egy jó összeköttetés létrehozása a nádas öv belső területeivel, azaz a C típust megőrizzük és a D típus nádasai kapcsolódnak a tóhoz (-> C típusúvá alakítva)



28. ábra. A nádas öv különböző jellemzői Oggau/Rust közelében. A: sűrű nádas terület medencék és csatornák nélkül, B: egy csatorna által átszelt terület laterális kapcsolat nélkül, C: medencékkel tarkított terület, ami nincs összeköttetésben a tóval, D: medencékkel tarkított terület jó összeköttetéssel a tóhoz.

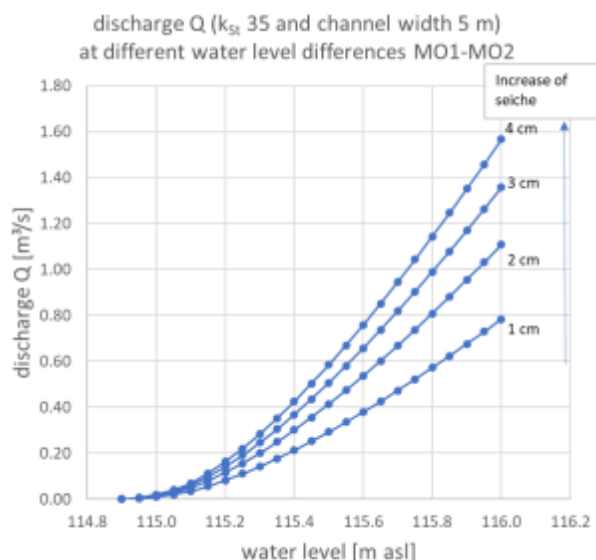
A W2-es forgatókönyvhöz hasonlóan, az S2 is számos intézkedést és beavatkozást követel a nádas övbe, így ezeket is figyelembe kell venni a 4. fejezetben tárgyalt mérések során. Természetesen az intézkedések a Neusiedler See / Fertő tó Nemzeti Parkon kívüli területére korlátozódnak, ahol jelenleg tilos az emberi beavatkozás a tó déli részén fekvő konzervációs zónában. Ez azonban egyben azt is jelenti, hogy a Neusiedler See / Fertő tó teljes területén lesznek olyan részek, amelyek nem kötődnek a nyílt tóhoz, még az S2-es forgatókönyvben is.

Ehhez a hat forgatókönyvhöz a 3. fejezetben taglalt gradienseket, kicserélődési folyamatokat és terheléseket újra kell mérni és újra le kell írni a következőkben. Az előrejelzések egy jól megalapozott szakértői mérés eredményei. Ezt a mérést szakértői csoport fejlesztette átfogó elemzések és adatkiértékelések alapján (az osztrák szakértői csoport 1-6. jelentése) vagy az ezekből származó terhelésszámításokra támaszkodva (a jelen beszámoló **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** fejezete).

4.2 P1-es forgatókönyv – vízszint <115,2 m tengerszint feletti magasság

Egy olyan forgatókönyv, ahol a vízszint <115,2 m a tengerszint felett nem pusztán hipotetikus jellegű, még akkor sem, ha a REBEN projekt vizsgálatai során a vízszintek tartósan magasabbak voltak. A szerzők 2003/2004-es eredményekre tudtak hagyatkozni és még e jelentés megírásakor is (2020. augusztus), a tó átlagos vízszintje 115,2 m tengerszint feletti magasság alatt van (<https://wasser.bglld.gv.at>).

A nemrég végzett felmérések azt jelzik, hogy 115,2 m-es vízszintnél a nádas öv nagy része már száraz. 115,0 m tengerszint feletti magasságnál, ahogy azt 2003 őszén láthattuk, a teljes nádas öv *de facto* ki van száradva és a tó a nyílt víz felszínéig süllyedt. A tó osztrák részén csak nagyon kevés olyan csatorna található, ami még mindig hajózható és ahol erősen korlátozott a vízcsere. A bejövő víz nem talál eléggé mély, elárasztható területet és így a kevés mélyebb csatornába nyomott víztömegek nagyon kicsik, még erős szélben és tóingáskor is. Ez a hatás jól szemléltethető a Manning-Strickler-féle modell segítségével: az áramlási érték egy alaposan megvizsgált csatornán keresztül Mörbisch-nél a csökkenő vízszinttel együtt jelentősen csökken, azaz egyre erőteljesebb tóingást követel, olyan hullámokkal, melyek képesek vizet juttatni a csatornába (29. ábra).



11. ábra. A vízszint és a kibocsátás kapcsolata egy Mörbisch közelében lévő csatornán keresztül, változó vízszintkülönbségeket feltételezve (MO1 tó széle, MO2 nádas öv) egy seiche-hullám következtében (Manning-Strickler alapján készített modell).

Míg a helyzet, ahogy azt már említettük, relatíve jól megbecsülhető az alacsony vízszintek rövid fázisaira, a hosszútávú változásokat tekintve (pl. számos átlagos vízszintű év 115,2 m és egy minimum 115,0 m körüli tengerszint feletti magassággal) kevésbé világos. A legnagyobb bizonytalanság a nádas öv változásával kapcsolatos. Elképzelhető, hogy a növények, kivéve a fragmitákat, behatolnak a félszárazföldi területre és a magasan fekvő területeken terjednek szét (ahogy az mostanság a csatornák menti gátakon megfigyelhető). Az sem zárható ki, hogy a nádas öv üledékének rendszeres kiszáradása és a légköri oxigénnel való fokozott kapcsolata hozzájárul a szervesanyag egy megváltozott (talán fokozott) degradációjához. Azonban ezt a feltételezést jelenleg egy kutatási eredmény vagy megbízható adat sem támasztja alá, sőt Hietz (1989) adatai épp ennek ellenkezőjét jelzik.

A tó tömegmérlegére vonatkozóan feltételezhetjük, hogy a mészüledék ("Kalkschlamm") bevitele és újbóli képződése a tóban csak kis mértékben fog változni, amennyiben nem vesszük figyelembe a Vulka kisebb beáramlásait és a kevesebb csapadéknak és nagyobb párolgásnak köszönhetően alacsony vízszintet veszünk alapul. 115,2 m-nél kisebb tengerszint feletti magasságban azonban nincs elérhető üledékesedési terület a nádas övben, azaz a bejuttatott és újonnan képződött üledék főként a nyílt tóban fog megtelepedni a part közelében, szélvédett helyen. Ez pedig még inkább szükségessé teszi a kikötők és fürdőzésre alkalmas öblök kotrását. Azonban a tó déli részén (nemzeti park) található üledékesedési zónák megmaradnak, illetve kiterjedtebbé válnak.

A nyílt tóban található megnövekedett üledékmennyiséget nagyjából meg lehet becsülni a mintegy 9700 t alapján, ami manapság szállítással kerül a tóból a nádas övbe (a tó egészére számítva, 5. táblázat). Ez körülbelül 25 700 m³ üledéktérfogatnak felel meg, ami

ha egyenletesen oszlik el a nyílt tó területén (140 km²), évi 0,18 mm üledéklerakódást jelent. Ha az üledéktérfogatot egy 10 km³-re becsült, öblök és szélvédett helyek által jellemzett területhez (azaz potenciális lerakóterületekhez) viszonyítjuk, ez az arány ennek megfelelően éppen 2 mm/a alá nő, azaz 10 év alatt néhány centimétert.

A tápanyagok esetében szintén csökkent mértékű kivitel várható a nádas övbe alacsony vízszinteknél, ahogy azt Wolfram *et al.* (2012) anyagmérlege is feltételezi. Ez pedig a tápanyag koncentrációk növekedését okozza a nyílt tóban. Azonkívül, hogy az üledék és a tápanyagok kivitele a nádas övbe csökkenő tendenciát mutat, a részecskékhez kötött tápanyagok fokozott reszuszpenziója az üledékből a nyílt tóban (az alacsonyabb vízmélységnek köszönhetően) valószínűleg szintén nagy szerepet fog játszani. A foszforkoncentráció 2004-es növekedése ennek a változásnak a kezdetét jelezte. Az egyéb anyagok koncentrációjára gyakorolt hatásokat a **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** fejezet tárgyalja.

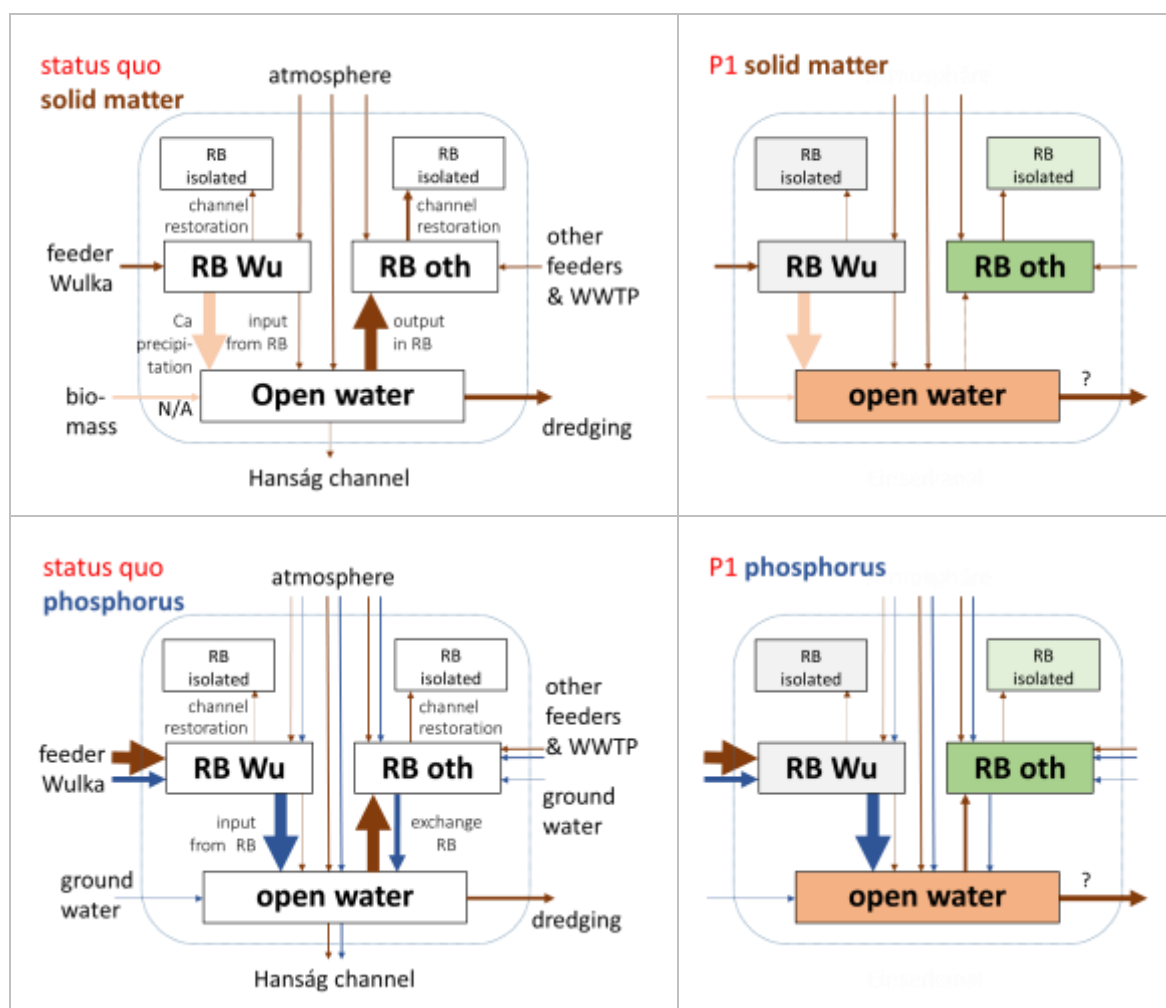
Nincsenek egyértelmű számításaink az alacsony vízszint esetére készített forgatókönyv számára azokról a szennyezőanyagokról, amik nagyrészt lebomlottak vagy a tó nádas övi rendszerébe épültek be. Mivel a degradációs és konverziós folyamatok részben fotokatalitikusak, eléggé valószínű, hogy a koncentráció csökkenése folytatódik. Jelenlegi tudásunk alapján nem lehet megjósolni, hogy a szilárd anyagok nádas övbe történő kibocsátásának köszönhető turbiditásnövekedés vajon alacsonyabb degradációs értékeket és így koncentrációnövekedést eredményezne-e. Eltérő a helyzet azon anyagok esetében, melyek jórészt állandóak a nyílt tóban (pl. a PFOA vagy a N,N-dimetil-szulfamid). Amennyiben azt feltételezzük, hogy a Vulkán keresztül változatlan marad a bevitel és más bevitel, mint például a légköri lerakódás sem változnak, valamint hogy a csökkenő vízszint a csapadékhoz képest megnövekedett párolgás eredménye, akkor azt is feltételezhetjük, hogy a gazdagodási tényező (*af*) nő és így a jelenleg mértnél magasabbak lesznek a koncentrációértékek is a tóban.

A PFOS, a fluorantén és a benzo(a)pirén esetén, ahol ezen a ponton még nem zárható ki egy EQS-hiba, a helyzet valószínűleg rosszabb lesz. Egyrészt ezeknek az anyagoknak a koncentrációja szintén fontos a csapadékhoz képest jóval nagyobb mértékű párolgás miatt. Másrészt feltételezhető, hogy a két PAH (a fluorantén és a benzo(a)pirén) lebegőanyagokkal történő kibocsátása és szállítása a nádas övbe nem ugyanolyan mértékben fog végbemenni. Ennélfogva a tó általános megnövekedett koncentrációjára lehet számítani, még akkor is, ha a kibocsátás és így a belső terhelés szintje is (pl. a benzo(a)pirén esetében) csökken. A PFOS adszorpciója a nádüledékbe csökkentheti a koncentrációkat a tóban. Ez hiábavalóvá válhat, ha a vízszint hosszútávon alacsony marad és nem történik vízcsera a nádas övvel. Ilyenkor aztán a PFOS koncentrációk további emelkedésére lehet számítani. Az oldott ólom esetében fennáll a környezetminőségi előírásoknak való meg nem felelés veszélye, amit számításba kell venni. Ebben az esetben

az adszorpció, az üledékesedés, valamint a lerakódás és az üledékből történő mobilizáció is fontos szerepet játszik. A nádas övbe irányuló és a szilárd anyagokkal együttesen történő jelenlegi kibocsátás mellett, az ólommal és más nehézfémekkel kapcsolatos adatok azt jelzik, hogy jelenleg a nádas övi adszorpció is felülmúlja az oldott fémek mobilizációját és a nádas övvel való kapcsolat hiánya valószínűleg megnöveli az oldott ólom koncentrációját a tóban. A jelenlegi forgatókönyv ennél fogva növeli annak kockázatát, hogy az említett anyagok esetében nem felel meg a környezetminőségi előírásoknak (EQS).

Limnológiai nézőpontból, a P1-es forgatókönyv kezdetben valószínűleg a biológiai sokszínűség csökkenéséhez vezetne, ugyanis a vízi élőhelyek elvesznének, ha a nádas öv kiszáradna. Ez pedig érintené a helyi közösségeket (a halak közül pl. a széles kárászt) és olyan fajokat is, melyek rendszeresen vándorolnak a nyílt tóból a nádas övbe. Azonban ha a sótartalom nő (lásd fent), speciális fajok, mint például amiket jelenleg találunk a Seewinkel sómedencéiben, előnyre tehetnek szert és gyarapodhatnak. A vízi közösségekre is jellemző lenne egy (természetes) eltolódás a fajösszetétel szempontjából, ha tartósan fennáll az alacsony vízszint, ami ökológiailag pozitívnak mutatkozik, amennyiben fenntartjuk a vízszint változékonyságát – még alacsony szint esetén is.

Összefoglalásképpen, a lebegőanyagok és tápanyagok várható alakulását a 30. ábra szemlélteti egyszerűsített formában. A nyilak a terheléseket jelzik, vastagságuk a terhelés függvényében változó. Négyzetek jelölik a tárolást/lerakódást vagy a koncentrációkat. Az ábra felső részében az üledék kerül bemutatásra, itt barna nyilak mutatják a szilárd anyagok szállítását, míg bézs színnel az új szilárd anyagok képződése látható. Az alsó rész a foszfor tömegfluxusait ábrázolja. Barna nyilak jelölik a szemcsés részt, kékek az oldottat. A baloldali oszlop foglalja össze a szilárd anyagok és a foszfor fennálló állapotát, a jobboldali oszlop pedig a forgatókönyv szerinti változást. A terhelések változását a nyilak vastagságának változása jelzi, míg a tárolás/lerakódás (téglalapok) koncentrációiban bekövetkező változásokat különböző színekkel szemléltetjük (narancssárga ... növekvő, zöld ... csökkenő, szürke ... konstans).



30. ábra. Az anyagáramlások átalakulása az üledék (felső rész) és a foszfor (alsó rész) esetén, a P1-es forgatókönyv szerint.

4.3 P2-es forgatókönyv – vízszint >115,8 m tengerszint feletti magasság

Magas vízszinteket már az előző évtizedekben is tapasztaltunk. Az 1990-es évek közepén, a Neusiedler See / Fertő tó egy csúcsértéket ért el a tengerszint feletti magasság tekintetében (közel 116 m), ami masszív kibocsátásokat okozott a Hanság-csatornán keresztül. Következésképpen, akkor először foglalkoztak a releváns kutatások a magas sókibocsátás problémájával (Wolfram et al. 2004a). Ezért ebben a forgatókönyvben a tó elemi kémiájában nagy vízkibocsátás esetén bekövetkező lehetséges változások hatásait kell fontolóra venni. Továbbá ebben a forgatókönyvben a Hanság-csatornán keresztül történő lebegőanyag kibocsátás mérlegösszetevőjét is érik hatások.

Alapjában véve, az előző forgatókönyvben leírt változások ellentétesek a magas vízszintek esetén tapasztalható változásokkal vagy azok fordítottjai. A

csatornakerbantartás kérdéséről függetlenül (lásd alább), a (nyílt) csatornák magas vízszinteknél hajózhatóak és hatékony vízcserét tesznek lehetővé a nyílt tó és a nádas öv között (lásd 29. ábra). Számítani lehet továbbá arra is, hogy a hullámok és a tóingás “skálája” magasabb, mint közepes vízszint esetén. A nádas övbe jutó vízterhelések kis része diffúzzá válik, legalábbis a nyílt tóval határos területen.

A nádas övbe irányuló megnövekedett vízbevitel fokozott lebegőanyag-bevitelhez vezet. Nagyon valószínű, hogy ez továbbra is elsődlegesen csatornákon keresztül zajlik. Azonban a tóhoz közel eső területen a víz biztosan el fogja érni a tó gátjának területét, ami ennek következtében “nőni” fog. Ez egy olyan hatás, ami alacsony vízszintek esetén nem, vagy csak elhanyagolható mértékben fordul elő. Ennek ellenére, mai nézőpontunkból ítélve, meglehetősen valószínűtlen, hogy a nádas övbe történő diffúz beáramlás jelentősen hozzájárul az összes terheléshez (az 1980-as években viszont valószínűleg még ez történt).

A nyílt tóban a hordaléklerakódás területeit érintő hatásokat nehéz mérni. Ezek ugyanis állandóan ki vannak téve az eróziós és szedimentációs folyamatok kölcsönhatásának és elképzelhető, hogy a magas vízszintek és az újonnan elérhető hordaléklerakódási területek miatt a nyílt tóban zajló felkavarodás csökken. Azonban ez a feltételezés eddig még nem nyert igazolást, nem utolsósorban pusztán az üledékfelszínről készült, hozzáférhető képek végső értelmezésének nehézsége miatt (lásd az osztrák szakértői csoport “Nád” című 2. jelentése). Mindenesetre nagy üledékkibocsátásra kell számítani a nyílt tóból a nádas övbe. A kibocsátásoknak köszönhetően a lebegőanyagok kivitele is végbemegy a teljes tórendszerből Magyarország felé.

Ami a kikötők és fürdőzésre alkalmas helyek kotrását illeti, lehetséges, hogy ezeket kevésbé látjuk sürgősnek, amikor a vízszintek magasak, ezért az önkormányzatok ilyen irányultságú tevékenysége időszakosan csökkenthető lenne. Ezek azonban egy bizonyos idő után valószínűleg újra felerősödnének, miközben a hordaléklerakódás a kikötők és fürdőhelyek állóvízes területein tovább fokozódna. A 2004 óta elérhető kotrási adatok azonban nem mutatnak összefüggést a vízszintek és az üledékeltávolítás között.

Ami a tápanyagokat (foszfort) illeti, egy, a szilárd anyagokéhoz hasonló változásra lehet számítani. A lebegőanyagok kibocsátása a nyílt tóból egyúttal a tápanyagok kivitelét is jelenti, ami következésképpen alacsonyabb koncentrációkat eredményez a nyílt tóban. Az üledékek felkavarodása a tófenékről szintén mérséklődni fog >2 m-es vízmélységnél, holott a tó minden bizonnyal megőrzi majd a rá jellemző turbiditást, még magas vízszintek esetén is. Összességében mégis a foszforkoncentrációk észrevehető csökkenése várható a nyílt vízben magas vízszinteknél, legfőképpen a nádas övbe irányuló tápanyagkibocsátásnak köszönhetően, ahogy az már az 1990-es évek közepén is megfigyelhető volt (lásd az osztrák kutatók 3. jelentésének 45. ábrája).

A szennyezőanyagok esetében bekövetkező változások is az előző forgatókönyvben taglaltak ellentétei vagy azok fordítottjai magas vízszinteknél. Ezért feltételezhetjük, hogy magas vízszinteknél és a Hanság-csatornán keresztül történő fokozott kibocsátás esetén, a perzisztens anyagok felhalmozódása a tóban (*af*) csökken. Továbbá a nádas öv szorosabb kapcsolódása és így a szilárd anyagok fokozott kibocsátása a tóból szintén a részecskékhez kötött szennyezőanyagok – mint például a PAH vagy a fémek – nagyobb kibocsátását váltja ki, vagy az oldott szennyezőanyagok potenciálisan nagyobb adszorpcióját eredményezi a nádas öv üledékén. Azonban jelenleg még nem tudjuk megítélni, milyen mértékben járul hozzá a távolabb fekvő nádas területekkel való, magas vízszintek következtében kialakuló szorosabb kapcsolódás a fokozott mobilizációhoz és a tó belső terheléséhez. Összességében viszont arra lehet számítani, hogy a hosszútávon magas vízszintekre készített forgatókönyv esetén kisebb a veszélye annak, hogy a vizsgált anyagok tekintetében nem felelünk meg a környezetminőségi előírásoknak, amennyiben a nádas öv megfelelően kapcsolódik a nyílt tóhoz.

A tartósan magas vízszint is potenciális veszélyt jelent a Neusiedler See / Fertő tó elemi kémiájára. A gátműködés jelenlegi szabályozása szerint novembertől januárig, a vízszint 115,70 m tengerszint feletti magasságától akár 15 m³/s a Hanság-csatornán keresztül történő kibocsátás értéke, áprilistól augusztusig maximum 6 m³/s. A köztes hónapokban a vízszint limitje fokozatosan eltolódik, a kibocsátás térfogata akár 6 m³/s is lehet februárban és márciusban, illetve akár 15 m³/s októberben. A vízszinttel kapcsolatos célkitűzések a tóparti terület infrastruktúrájának védelmére irányulnak, ez viszont veszélybe kerülne az erős szelek következtében kialakuló magasabb vízszintek esetén vagy a vízszint rövidtávú, csapadék okozta emelkedése okán (lásd 31. ábra).

Ezért a jelenleg érvényben lévő gátszabályozás értelmében a P2-es forgatókönyvben, >115,8 m tengerszint feletti magasságnál a tóvíz majdnem állandó kibocsátására lenne szükség. A gyakori kibocsátások hatásait a sómérlegre – konkrétan: annak veszélyét, hogy a tó sótartalma csökken – Wolfram *et al.* (2004a) tárgyalja részletesen, annyi azonban itt is elmondható, hogy a hatások sokrétűek: a fokozott eutrofizációtól egészen a szikes tavakra jellemző biológiai életközösség eltűnéséig. A P2-es forgatókönyv magas vízszintje által okozott ilyen hatásokat itt nem fejtjük ki, annyi azonban világos, hogy a P2-es forgatókönyv megvalósítása csak az adott körülmények és a gátműködés szabályozásának összehangolásával lehetséges (beleértve az érzékeny infrastruktúrákat érintő áradásvédelmi intézkedéseket is).

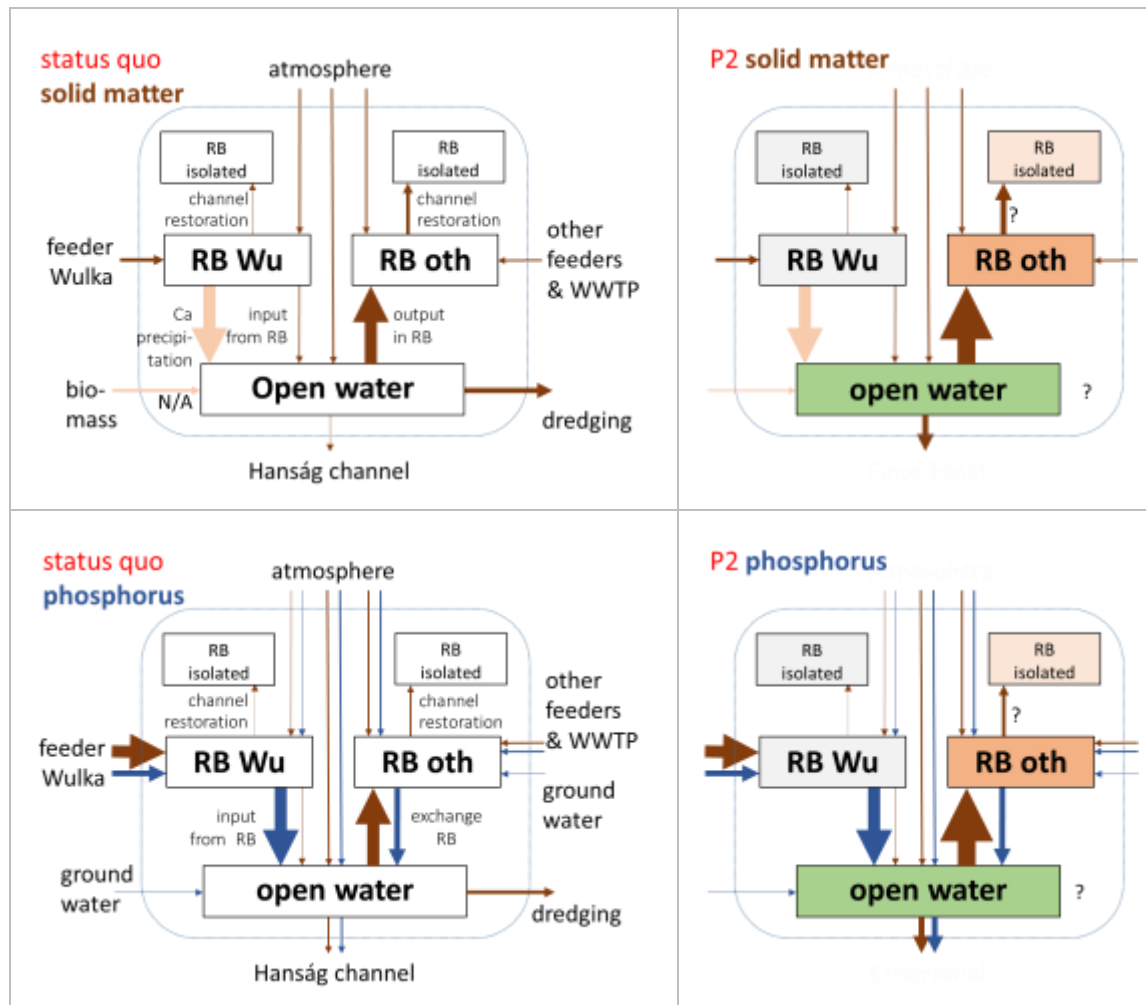


31. ábra. Áradás az illmitzi fürdőhelyen 2009. március 9-én (Fotó: Pannonhalmi M.).

Függetlenül a vízszint szabályozására és a vízszint és a gátműködés szabályozásának összehangolására vonatkozó megfontolásoktól, szorosabb lesz a laterális hálózat a nyílt tó és a nádas öv között és az azon túl fekvő, parttól távolabbi rétek felé is magas vízszintek esetén. Mindez pedig kémiai és ökológiai hatásokat egyaránt kivált: pl. a halak ívóhelyként használják a sekély vizű területeket. Hosszútávon számíthatunk rá, hogy a tó gátjának fokozódó emelkedése újból korlátozni fogja a nádas övön keresztülfolyó diffúz áramlást. Továbbá felmerül a kérdés, hogy a nádas öv mennyi ideig és mennyi hordaléklerakódást “bír el”. A következő számok segíthetik az eligazodást:

A körülbelül 7 555 t/a lebegőanyag bevitele a nádas övbe (csak Ausztriában) körülbelül 20 000 m³ térfogatot jelent – figyelembe véve a víztartalom- és sűrűségadatokat és az azokkal kapcsolatos feltevéseket, melyeket az osztrák szakértői csoport a “Nád” című 2. jelentésében fogalmazott meg. A nádas öv ausztriai területének vonatkozásában (102 km²) ez évi 0,2 mm-es növekedésnek felelne meg. Ausztriában, a teljes (11,7 km²) vagy megfelelő összeköttetéssel bíró vízi területekre nézve (5,7 km²), a nádvíz GIS-rétege alapján, a hordaléklerakódás 1,7 or 3,5 mm/a lenne, ami jópár centimétert jelent 10 éves időtávlatban.

Összegzésül, a lebegőanyagok és tápanyagok várható változását a 32. ábra szemlélteti. A jelmagyarázat a P1-es forgatókönyvnél olvasható.



32. ábra. Az anyagáramlások alakulása az üledék (felső rész) és a foszfor (alsó rész) esetén, a P2-es forgatókönyv szerint.

4.4 W1-es forgatókönyv – a Vulka folyó diffúz áramlása a nádas övön keresztül

A nyílt területen végzett megfigyelések alapján, az elérhető kémiai elemzések szerint, valamint a nyomjelző kísérlet rendelkezésre álló eredményei szerint, a Vulka a nádas övön keresztül, alacsony vízállásnál, főként egy létező csatornarendszeren keresztül folyik, ami azonban viszonylag gyorsan eliszaposodik a nádnak és más növényeknek köszönhetően. Az utóbbi években szükségessé vált ennek a csatornarendszernek a rendszeres helyreállítása, legutoljára 2018-ban, azaz a REBEN projekt során. A projekt kezdetekor a Vulka vizének nagy része lehet, hogy diffúz módon áramlott volna a nádas övön keresztül és csak bizonyos fokú késéssel érte volna el a csatornákat. Áradások idején a csatornák kapacitása túl alacsony, ez esetben pedig a Vulka főként diffúz módon folyik keresztül a nádas övön.

A W1-es forgatókönyv azt feltételezi, hogy a Vulka torkolatánál található csatornákat már nem állítják helyre és még egy alacsony vízállásnál bekövetkező kibocsátásnak is először diffúz módon kell megtalálnia a maga útját a nádszárak között a főcsatornáig és a nyílt tóba vezető torkolatig. Azt is feltehetjük, hogy a sűrű nádas nem csak az áramlási sebesség jelentős csökkenését vonja maga után, de egyfajta torlódással is jár, ami kissé megemeli a vízszintet a Vulka torkolati területén. Mivel nem állnak rendelkezésre geodéziai adatok a nádas elevációjával kapcsolatosan a nádas területen és a csatornában, nincs pontosabb információnk.

A 4. táblázat tömegmérlege szemlélteti, hogy az áramlási sebesség ilyen jellegű változása hatással lesz a lebegőanyagok bevitelére, mivel az éves terhelés nagy része (aminek a szállítása leginkább áradásokkal történik) a Vulka nádas övében marad, azonban valószínű a visszatartott teher tendenciális növekedése. Így elkerülhetetlen annak kérdése, mennyi ideig lehetséges átlagosan körülbelül évi 3 800 t szilárd anyag lerakódása (mint körülbelül 10 000 m³ nedves térfogatnak megfelelő szárazanyag) a Vulka torkolati területén, tekintettel a fokozódó eliszaposodásra. Egy körülbelül 10 km² területű nádas övre vonatkoztatva, az ülepedés sebessége 1 mm/a. A tényleges visszatartó területre vonatkozó feltevések alapján valószínűbb az évi 2 vagy több mm vagy 10 év alatt több centiméter. Az ezen felüli szilárd anyagok befogadásának esélye valószínűleg belátható időn belül megszűnik. Azonban a Vulka torkolatánál található nádas öv "élettartama" növelhető, amennyiben az éves szilárdanyag terhelés csökkentése megvalósul, pl. a vízgyűjtő terület eróziójának szabályozásával és/vagy a lebegőanyagok hatékony visszatartásának biztosításával, mielőtt azok belépnének a nádas övbe, pl. egy visszatartó

medencében, amiből természetesen rendszeresen el kellene távolítani a felhalmozódó szilárd anyagokat.

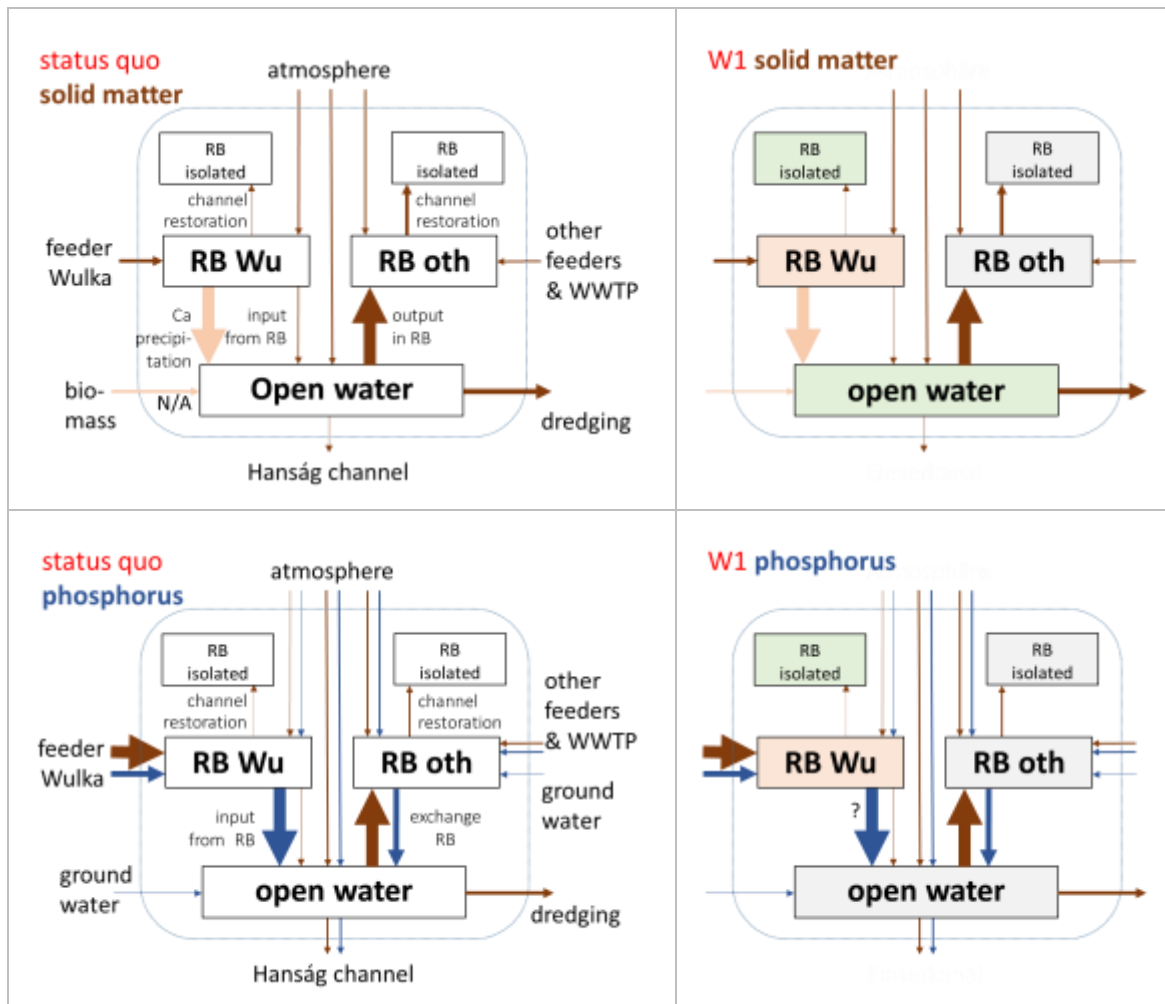
A foszforra ugyanaz vonatkozik, mint a szilárd lebegőanyagokra. A részecskékhez kötött foszfor nagy része visszatartásra kerül a nádas övben, ahol az áramlás túlnyomórészt vagy kizárólag diffúz. Azonban az oldott foszfor növekvő kibocsátását is feltételezhetjük, ami utána eléri a nyílt tavat (lásd "Kémia" című 3. osztrák jelentés: a WU₃ mintavételi helyszín adatai). A rendelkezésre álló adatok alapján az összes foszfornak az a hányada, ami a nádas övbe történő áramlás és átalakulás után eléri a nyílt tavat, éppen hogy 80% alattira becsülhető, valószínűleg ez az érték áradásos években kisebb (körülbelül 60%). Jelenleg ebből az adatból nem feltételezhetünk nagyobb retenciós sebességet az összes foszfor tekintetében, aminek nádas övön keresztüli áramlása egyre inkább diffúz. Azonban ez a feltételezés bizonytalan a sűrű nádas övben zajló konverziós folyamatok összetett struktúrája és az arról alkotott ismereteink hiányos volta miatt. Lehetséges például, hogy a csatornahelyreállítás szükségessége nélkül is létrejönnek meghatározó áramlási útvonalak, amiket magasabb áramlási sebesség és jobb oxigénellátás jellemez, olyannyira, hogy az anaerob konverziós folyamatok szerepe elhanyagolhatóvá válik.

Feltételezhető, hogy ez a forgatókönyv nem lesz nagy hatással a tó szennyeződésére és így az EQS (környezetminőségi előírások) által támasztott követelményeknek való megnefelelés kockázatára. A nagyrészt perzisztens anyagok, melyek szállítása főként oldott formában történik (pl. a PFOS vagy a PFOA), valószínűleg javarészt változatlan formában haladnak keresztül a Vulka nádas övén, ahogy e forgatókönyv esetén is. A túlnyomórészt részecskékhez kötött anyagok esetén, mint például a PAH-ok, a benzo(a)pirén vagy a fluorantén, a részecske frakció nagyrészt különválik és, ahogy azt fent leírtuk, jelenleg nem észlelhető nagy változás a szilárdanyagok visszatartásában. A fémek, mint például az ólom esetében jelenleg hasonló viselkedést figyelhetünk meg, mint a foszfornál. A részecskékhez kötött ólom retencióját oldott ólom mobilizációja ellensúlyozza. Azt, hogy vajon az itt leírt forgatókönyv az ólom fokozott oldódását eredményezné-e, még nem tudjuk megmondani.

Következésképpen egy, a Vulka nádas övén keresztülhaladó, túlnyomórészt vagy kizárólagosan diffúz áramlás hatásait a biológiai életközösségek tükrében is ki kell értékelni. Ahogy azt a REBEN projekt során végzett felmérések is megmutatták, a Vulka torkolatának területe magasfokú ökológiai és természetvédelmi értéket képvisel. A nádas övben felfedezhetőek a Vulka-rendszer halfajai és tisztán stagnofil fajok is, beleértve olyanokat is, melyek jelenlétét évek vagy évtizedek óta nem tapasztalhattuk a tóban (pl. szivárványos ökle, széles kárász). A Vulka áramlási útvonalainak nagyon kicsi csatornákká csökkenése feltételezhetően szűkítené ezen fajok élőhelyét vagy legalább a Vulka közeli szegmensre korlátozná, mivel itt – a folyótól a nádas övbe terjedő átmeneti zónában –

valószínűleg továbbra is fennmaradnának a torkolatszerű körülmények és a nagyfokú strukturális sokszínűség, még karbantartási munkálatok híján is.

A lebegőanyagok és tápanyagok alakulását a 33. ábra foglalja össze sematikus formában.



33. ábra. Az anyagáramlások alakulása az üledék (felső rész) és a foszfor (alsó rész) esetén, a W1-es forgatókönyv szerint.

4.5 W2-es forgatókönyv – a Vulka folyó lineáris áramlása a nádas övön keresztül

Mindenekelőtt a Vulka folyó nádas övön keresztüli lineáris áramlására íródott forgatókönyvet kell kiértékelni, amennyire ez hidraulikus szempontból lehetséges. A hidraulikus modellezés nagyfokú bizonytalanságai ellenére, amik a nádas öv terepmodelljének hiányzó adataira vezethetők vissza, feltételezhető, hogy még rendszeres karbantartási munkálatokkal is, a létező csatornák túl kicsik ahhoz, hogy általuk kibocsátások történhessenek jóval a közepes vízállás felett. Mindenesetre, jelenleg, magas vízállásnál a Vulka folyó elárasztja a nádas övet illetve diffúz módon folyik keresztül rajta.

Egy túlnyomórészt lineáris áramlás tehát a csatornák nagyobb hidraulikus kapacitását követelné meg, akár kiegészítő csatornák kotrásával, akár a létezőek jelentős kiszélesítésével. Azonban ez elősegítené az ülepedést és a nád növekedését, ezzel gyakoribb helyreállítási munkálatokat szükségessé téve. Következésképp tisztázni kellene, hogy a kikotort anyag (gyökértörzs, nádszárak, Vulka üledék) a helyszínen kerüljön lerakásra vagy el legyen távolítva. Költséghatékonysági okokból ez utóbbi aligha tűnik megvalósíthatónak, viszont a helyszínen, a nádas övben, elkülönített üledéklerakó zónákban történő lerakás a jelen gyakorlat (csatornák menti lerakás) alternatívája lehetne.

Ezekből a megfontolásokból világosan látszik, hogy a W2-es forgatókönyvet tovább kell pontosítani és csak bizonyos előfeltételek teljesülésével valósítható meg. Azonban ha ezeket adottnak és megvalósíthatónak fogadjuk el, akkor a forgatókönyvnek kétségtelenül észrevehető hatása lenne az üledék- és tápanyagmérlegre.

A W2-es forgatókönyvben szereplő szilárdanyagokat illetően a nyílt tóba belépő terhelés növekedésére lehetne számítani. Az érdekesebb részek (az iszaptól a homokig) valószínűleg nagymértékben, a tó északi oldalán rakódnának le, a finomabb részek erodálódnának vagy tovább szállítódnának és ezzel megváltoztatnák a “kotrási kikötők” és a “belső szállítás és terhelés” egyensúlyi elemeit. Az, hogy a W2-es forgatókönyvben a Vulka folyóból származó szilárdanyagok milyen mértékben érik el a nyílt tavat, az áradási eseményektől függ. Ha ezeket is át kell vezetni a nádas övön, akkor az csak egy megfelelő árvízcsatorna megtervezésével lehetséges, pl. az oldalsó gátak megemelésével és biztosításával.

Alacsony vízállásnál a Vulka nádas övi területén kikotrandó üledékmennyiséget jelentősen növelni kellene, hogy a csatornában elkerülhetővé váljon az ülepedés és a nádképződés, és fenntarthassuk a W2-es forgatókönyv szerinti körülményeket. Cserébe az ülepedési sebesség a sűrű nádas övben jelentős mértékben csökkenne.

A részecske frakció csökkentett retenciója a foszfort is érintené, az oldott foszfor kibocsátása kisebb mértékű lenne. Mivel komoly áradások esetén egy kizárólag lineáris áramlás a nádas övön keresztül már nem lehetséges, csak ritkán fordulna elő diffúz áramlás és az oldott anyagok kibocsátása a nádas övből. Egy hosszabb periódus alatt, átlagosan, ez a kibocsátás valószínűleg alacsonyabb lenne a mostaninál, de egyenlőtlenül oszlana el az idő során és “ritka csúcsterhelésnek” minősülne.

A szilárdanyagok nagymértékben csökkent retenciója a Vulka nádas övében, ahogy azt a forgatókönyvek eredményeképp vártuk, szintén jelentős hatást gyakorolna a tóra, abban az értelemben, hogy a tó erősebben ki lenne téve azoknak a szennyezőanyagoknak, amik túlnyomórészt részecskék formájában szállítódnak és amiket jelenleg a nádas öv visszatart. A vizsgált anyagok közül, amelyek esetén fennáll az EQS-nek való megnevezés veszélye, a PAH-ok, a benzo(a)pirén és a fluorantén különösen említésre méltóak. Esetükben ennek a forgatókönyvnek a megvalósítása növeli annak kockázatát, hogy a kitűzött célt nem érjük el. Továbbá fontolóra kell venni annak rizikóját, hogy a csatornahelyreállítás kapcsán megtett, a kotrásokkal kapcsolatos nagyobb horderejű intézkedések a limitek túllépéséhez vezethetnek: A nagy mennyiségű üledék kiásása és áthelyezése elősegítheti a szennyezőanyagok fokozott kibocsátását az üledékből, megnövelve így a tó koncentrációit. Egy ilyen belső terhelés kvantitatív mértékét jelenleg nem lehet meghatározni. Kiterjedt kotrási munkálatok esetében megfelelő ellenőrző intézkedéseket kell biztosítani.

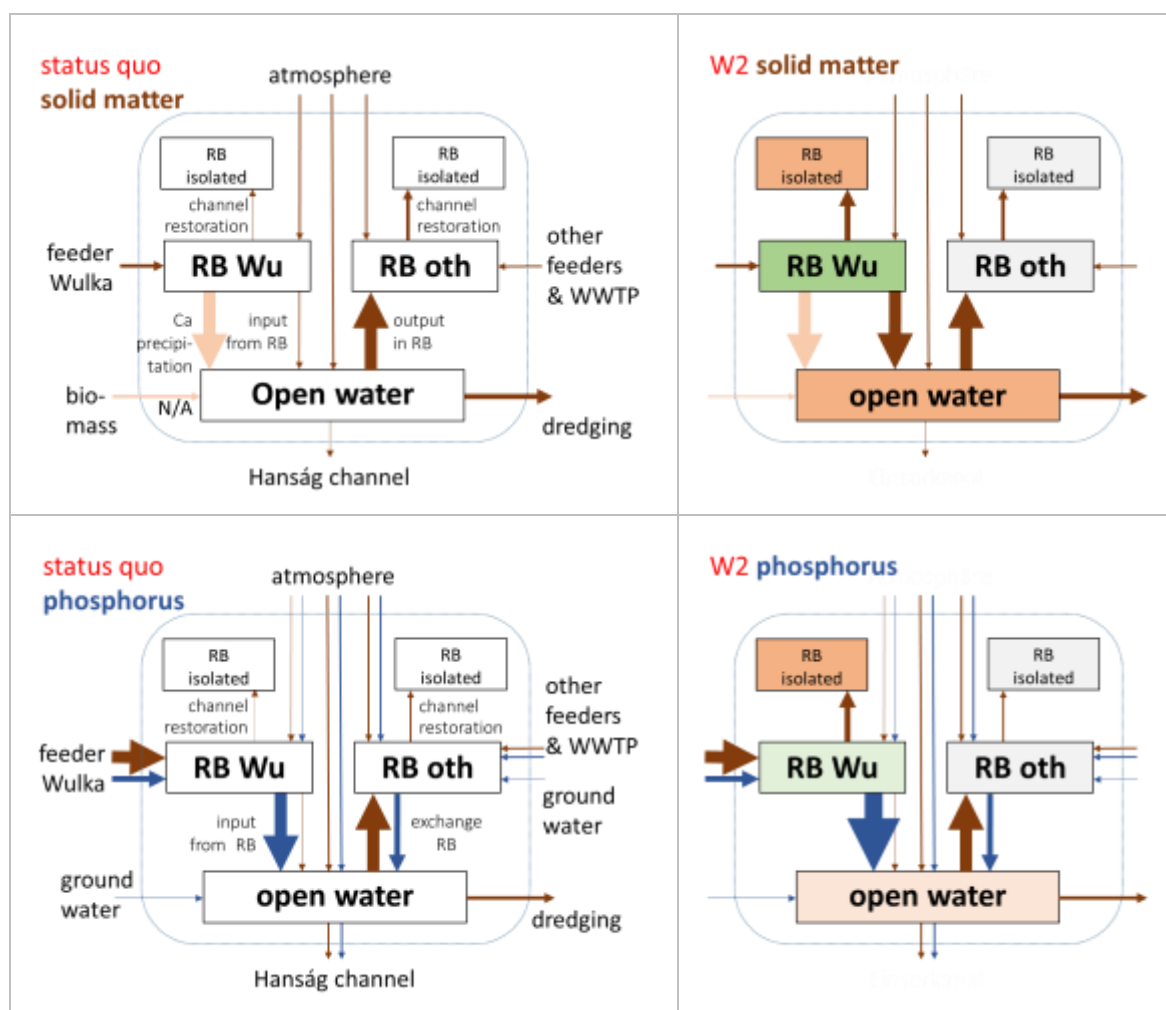
A nádas övön keresztülhaladó, kizárólag lineáris áramlás hatásai az ebben a csomópontban megfigyelhető közösségekre minden bizonnyal szorosabbá tenné a folyó és a tó közti összeköttetést és a közösségek közt zajló kicserélődést, különösen áradások során, feltételezve, hogy ezek hamarabb elérik a tavat és így nem csak egy intenzívebb anyagkivitel okoznak, hanem a folyami fajok tóba sodródását is támogatnák. Mindenesetre a Vulka rendszeréhez való hozzáférés jobbá válna a halak és más mobil fajok számára. Nagyon valószínűnek tűnik, hogy a Vulkát néhány halfaj ívóhelynek használná pl. a karikakeszeg vagy a szélhajtó kűsz. Ezenkívül a reofil vagy áramláskedvelő fajok (fejes domolykó, fenékjáró küllő, márna) tóba történő ideiglenes behatolására is számíthatunk. Mindez összességében kétségtelenül közelebb vinné a tavat annak halökológiai referenciaállapotához (cf Zick et al. (2006), Wolfram et al. (2008), Wolfram et al. (2018).

Azonban a döntő tényező az oxigénkoncentráció lenne, ami jelenleg egyik napról a másikra 0 mg L^{-1} értékre eshetne a Vulka csatornában a nyílt tó torkolatánál. Ez egy hosszabb időzésre utal a nádas övben, mialatt a Vulkán keresztül bekerült oxigén teljesen felhasználdik a szervesanyagok bomlásának köszönhetően. Egy pusztán lineáris áramlás arra enged következtetni, hogy ilyen oxigénszélsőségek még alacsony vízállásnál sem

fordulnak elő és hogy ebből kifolyólag a Vulka a reofil és oxigénérzékeny fajok számára is élőhelyként szolgálhat a teljes áramlási szakaszban egészen a tóig.

A sztagnofil fajok esetében, mint például a lápi póc, a széles kárász és a szivárványos ökle, egy pusztán lineáris folyás a nádas övön keresztül az élőhelyük korlátozását jelentené. Azonban feltehetjük, hogy ez a forgatókönyv is megóvjá az említett fajok élőhelyeül szolgáló területeket, melyek között szerepelnek olyanok is, ahol nagyon alacsonyak az oxigénkoncentrációk, ami az említett fajok versenyelőnyét jelenti más fajokkal szemben.

A 34. ábra a lebegőanyagok és tápanyagok alakulását foglalja össze és szemlélteti.



34. ábra. Az anyagáramlások alakulása az üledék (felső rész) és a foszfor (alsó rész) esetén, a W2-es forgatókönyv szerint.

4.6 S1-es forgatókönyv – nincsenek nádcsatornák

A nyílt tó és az osztrák nádas öv közti vízcseréről alkotott tudásunk megszerzését, a nádcsatornák jelenléte vagy hiánya tükrében, nem utolsósorban a három vizsgálati helyszínre készült digitális terepmodell megalkotásának nehézsége is befolyásolta. Ugyanis a kiválasztott terepmodelltől függően, a hidraulikus modellezés eredményei jelentősen eltértek egymástól. Arra azonban nagyon egyértelműen rávilágítottak, hogy milyen komoly hatása lehet a csatornák szűkülésének a vízcserére. Illmitz területén, például, másodpercenkénti több deciméteres áramlási sebességet lehetett megfigyelni az eseményekhez kötődő méréssorozat során 2019 őszén ("szélesemény", lásd az osztrák szakértői csoport 5. jelentése), amiből több 100 L/s értékű áramlásokat állapíthattunk meg egy beáramlási és kiáramlási cikluson belül egy csatornán keresztül. Az első hidraulikus modellszámítások során olyan áramlási sebességek és áramlási értékek kerültek megállapításra, melyek egy vagy két nagyságrenddel alacsonyabbak voltak ezeknél az értékeknél. Ez csatornaszűkületet okozott a digitális modellben, egy esetben teljesen "zárt" csatornát eredményezett (Ruster Poschn felé). Ez szemlélteti a csatornák mint a nádas öv felé haladó szállítási útvonalak manapság betöltött óriási szerepét. Hasonlóképpen, a vízcserére gyakorolt jelentős hatást lehetett kimutatni Mörbisch-ben, különböző feltevésekkel a csatornák szélességét illetően.

Egy másik tényező, amit nem lehetett mennyiségileg meghatározni, az a nagyobb fokú párolgás, egy gyakoribb kicserélődés esetében a nyílt tó és a nádas öv között, ami jelentősen nagyobb, nagyon sekély vízi területek kialakulásához is vezethet a csak rövid időre elárasztott belső nádas övben. Az S1-es forgatókönyv megelőzi ennek kialakulását. A csökkent mértékű kicserélődés a tó és a nádas öv között fontosabb lenne a teljes vízmérlegre nézve. Más szóval, az S1-es forgatókönyv bizonyos értelemben támogatja a P2-es forgatókönyvet (magas vízszint).

Ezenkívül, az S1-es forgatókönyv a tó és a nádas öv közti vízcseré hatásaira fókuszál, amik a nádcsatornák rendszeres karbantartásának hiányában nagyrészt megszűnnének, szinte nullára redukálódnának. A tó gátja jelenleg olyan magas, hogy alacsony vízszint esetén egyáltalán nem szállítódik víz a belső nádas övbe. De még közepesen magas vízszintnél is, ami magasabb a tó gátjának felső szélénél, a tó és a nádas öv közti vízcseré elhanyagolható, köszönhetően a sűrű nádasok feneke környékén fekvő területek nagyon magas hidraulikus érdességének. Csak jóval magasabb vízszintnél lehetséges bizonyos áramlás a lazán elhelyezkedő nádszárak között, de még akkor is messze elmarad a csatornákon keresztül végbemenő hatékony kicserélődés mögött. A széles nádcsatornák "főútvonalakként" funkcionálnak a nyílt tó és a nádas öv közti gyors vízcseré során, míg a nádszárak közti nagyon kicsi és keskeny helyek hálózata inkább egy óváros görbe, kanyargós utcáira emlékeztet.

Manapság azt feltételezhetjük, hogy az S1-es forgatókönyv nádcsatornák nélkül főként a tó déli részén, az osztrák nemzeti park területén domináns. Az illmitzi kikötőhöz vezető úttól délre már most is létezik egy olyan terület, ami nem kapcsolódik a nyílt tóhoz. Az ott uralkodó körülmények hidrokémiai és biológiai vonatkozásban is dokumentálásra kerültek a REBEN projekt során, az IL9 mintavételi pont segítségével.

A vízcsera hiányának következményei az anyagok belső szállítására nézve a tóban nyilvánvalóak. A beviteli oldalon nem várhatóak számottevő változások, tekintettel a kalcitkiválással létrejövő új képződményekre. Ami a kibocsátást illeti, a csatornakarbantartási munkálatok, melyek laterális üledéklerakódáshoz vezetnek, leállításra kerültek (“nádas öv kettéválasztva”, lásd 15. ábra). Mindenek felett a tóba bevitt és a tóban újonnan képződött üledékek a nyílt tórészben maradnak és csak nyugodt öblökben és a nagyobb nádszigetek szélvédett helyein tudnak lerakódni (pl. az uralkodó ÉNY-i szelek miatt a Nagy Nádsziget déli szélén). A nyílt tóra nézve ez körülbelül évi 10 000 t szilárdanyag felhalmozódását jelenti (ami intenzívebb kotráshoz vezethet a kikötőkben). A nyílt tó egészére vonatkozóan ez évi 0,2 mm szedimentációs értéknek felelne meg. Amennyiben azonban a lehetséges lerakóhelyek a tó körülbelül 10%-ára korlátozódnának, ez az érték várhatóan a tízszeresére nőne, mindez 10 évre vetítve 2 cm-es helyi növekedést eredményezne. Viszont a nádas övben a szedimentációs érték ennek megfelelően csökkenne.

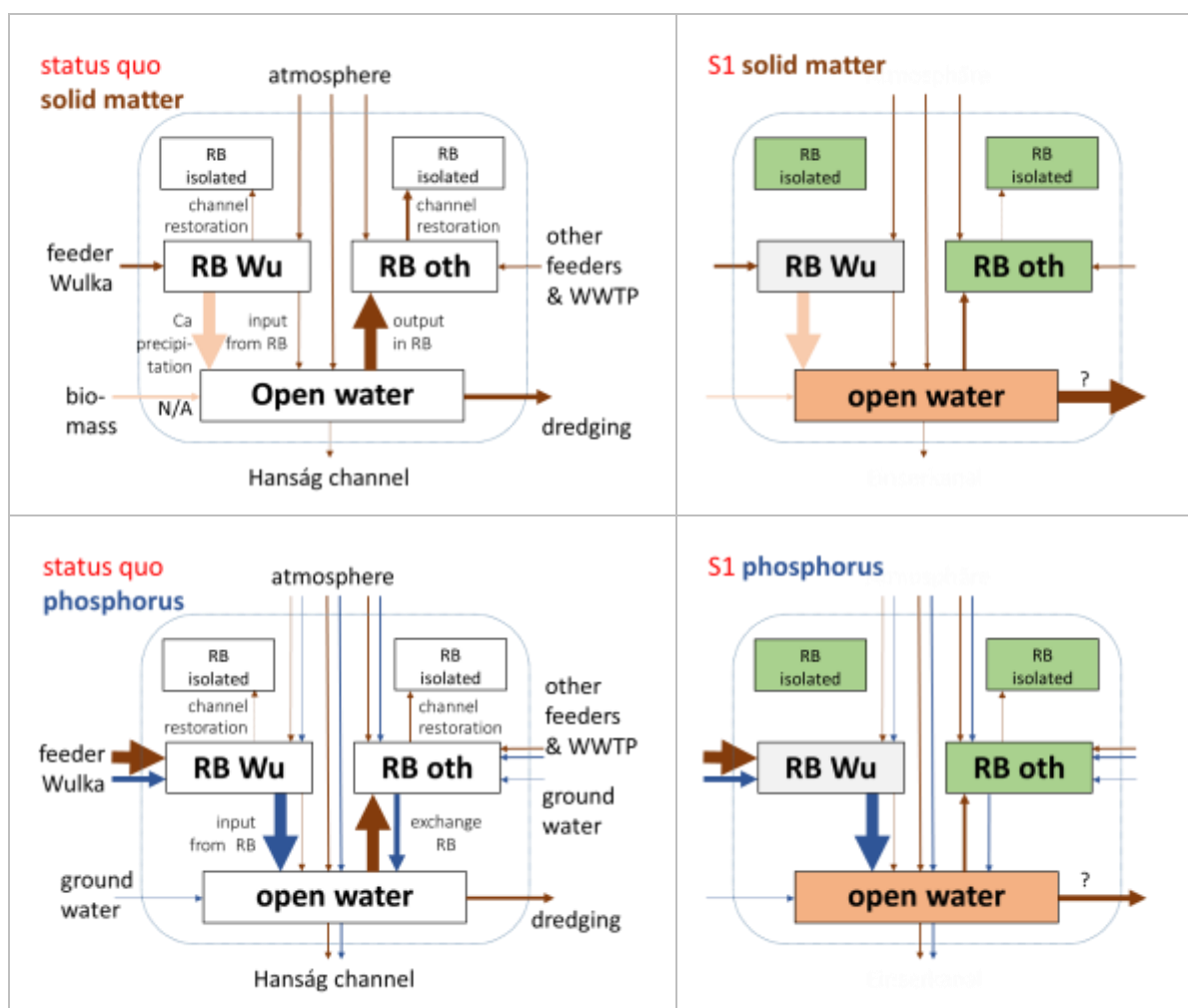
A foszformérleget illetően ugyanazok az elemek érintettek, mint az üledékmérleg esetében. Azonban ez esetben nem feltételezhetjük, hogy a lerakódás állandó, mint a szilárdanyagokra vonatkozóan. A részecskék formájában bekerült foszfor kezdetben így is rakódik le, de a biológiai ciklusokon keresztül, oldott formában bocsátódik ki újra. A foszfor, oldott és részecskeformában (potenciálisan a lebegőanyagok megnövekedett terhelésével) egyaránt, minden esetben az összes foszfor koncentráció mérhető emelkedését vonja maga után a nyílt tóban. Annak mértéke, hogy ez az átalakulás mennyire tükröződik vissza a megnövekedett termelődésben, nem becsülhető meg hitelt érdemlően, köszönhetően a tápanyagokon kívüli, egyéb korlátozó tényezőknek (különösen a fénynek). Hosszútávon, tágabb értelemben nem zárható ki a vízminőség romlása.

A szennyezőanyagok koncentrációjára várhatóan nem lenne hatással ez a forgatókönyv, amennyiben a vízmérleg (kisebb párolgás) nem változik. Ezenkívül, ezt a forgatókönyvet a P1-eshez hasonlóan kell kiértékelni, ahol a nyílt tó és a nádas öv közti kapcsolat az alacsony vízszintek miatt megszűnt: A nyílt tóból a nádas területekre történő üledékkibocsátás hiányában több szennyezőanyag marad a tóban. Az oldott szennyezőanyagok már nem bocsátódnak ki adszorpcióval a nád üledékébe. Másfelől, a szennyezőanyagok nem bocsátódnának ki a nád üledékéből a nyílt tóba sem. Mindazonáltal várhatóan a környezeti cékitűzések elvételének kockázata is nő, mivel

jelenleg a szilárdanyag kibocsátás (= fennálló állapot) várhatóan ellensúlyozza a csökkentett nettó mobilitást (az S1-es forgatókönyvben).

A vízi társulások esetében a nádas övi vízi területek és a nyílt tó kettéválasztása részben élőhelyvesztéssel párosul. A nádas öv belső részében azok a speciális fajok, melyek jól viselik az ottani körülményeket (pl. a lápi póc) előnyre tehetnek szert. A nyílt tóban élő fajokra nézve, amik inkább a külső nádas övet kedvelik vagy a szárazföldhöz kötött, parttól távolabb eső réteket használják ívóhelyként (pl. a vad ponty, lásd Herzig et al. (1994), Wolfram et al. (2004b)), a vándorlási folyosók felszámolása negatív hatással bírna.

Végül a lebegőanyagok és tápanyagok alakulását a 35. sematikus ábra szemlélteti.



35. ábra. Az anyagáramlások alakulása az üledék (felső rész) és a foszfor (alsó rész) esetén, az S1-es forgatókönyv szerint.

4.7 S2-es forgatókönyv – nádcsatornák kiterjedt hálózata

Mint ahogy az előző forgatókönyvpár esetében is, az S2-es forgatókönyv is ellentétes az S1-essel. Jelenleg a mörbischi helyzet felel meg ennek a forgatókönyvnek, mivel ott számos nádcsatornát találhatunk, melyek karbantartása az utóbbi években megvalósult (lásd az osztrák szakértői csoport “Nád” című 2. jelentése). Illmitz üdülőhelytől északra fekvő területén is jónak mondható a nádas öv csatornák általi összeköttetése, bár minden bizonnyal van még potenciál több csatornára is¹.

Ahogy azt részletesen kifejtettük, a tó és a nádas öv közti vízcsera nagyrészt csatornák széles hálózatán keresztül történik; a tóhoz közel fekvő nádas övi területeken keresztül folyó diffúz áramlás elhanyagolható átlagos vízszinteknél. Ezért a nádcsatornák rendszerének kiterjesztése javítaná a tó és a nádas öv között zajló vízcserét².

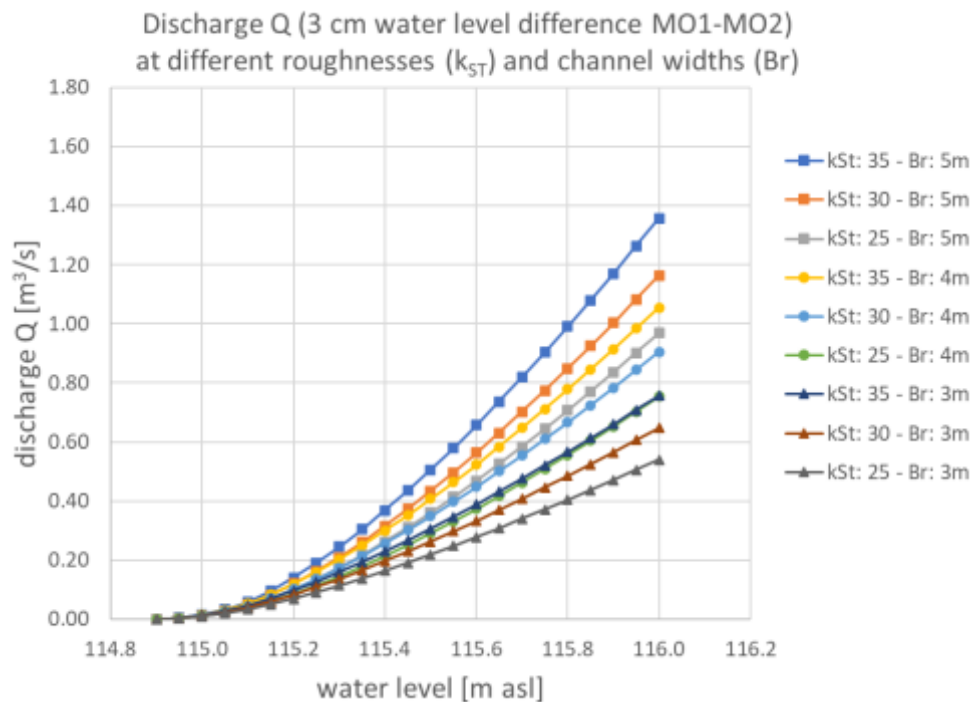
Ebben a forgatókönyvben nem lenne változás a szilárdanyagok anyagmértékében a beviteli oldalon, tekintettel az üledékképződésre. Azonban egy fokozott kicserélődés a nyílt tó és a nádas öv között döntően befolyásolná a szilárdanyagok tavon belüli szállítását. Figyelembe véve az ülepedés problémáját, az S2-es forgatókönyv “megkönnyebbülést” hozna a nyílt tónak, de egyúttal az ülepedés nádas övbe való eltolódását is jelentené.

Azt, hogy a terhelés eltolódása a nádas övbe milyen mértékben növelhető, nem lehet teljes bizonyossággal megbecsülni a teljes tóra nézve, de a különböző szélességű csatornákra vetített áramlási érték Manning-Strickler modellje jelzi azt (36. ábra). A modell alapján látható, hogy a csatornák számán és elhelyezkedésén túl, a szélesség is nagyban befolyásolja az áramlási sebességet. Ezt a hidraulikus modellezés (lásd az osztrák kutatók “Hidrológia” című 1. jelentése) is világosan megmutatja, még úgy is, hogy nem állnak rendelkezésre konkrét adatok a különböző szélességű csatornában történő víz- és tömegszállítással kapcsolatosan. (A magyarországi és ausztriai csatornaépítés és –felújítás különböző megközelítéseit érintő kérdéseket – lásd 37. ábra – a Kezelési terv tárgyalja).

¹ Mindkét esetben hozzá kell azonban tennünk, hogy a “jelenleg” kifejezés alatt a helyszíni felmérések idejét értjük (2017 ősztől 2019 tavaszáig, Illmitz területén 2019 ősziig). Néhány csatornában nagyon gyors nádnövekedést lehetett észlelni, még az Illmitzi Biológiai Állomás viszonylag “forgalmas” csatornájában is. Nagyon valószínű, hogy a projektben használt csatornák néhány éven belül elveszítik folytonosságukat, ami a fennálló állapot eltolódását jelentené az S1-es forgatókönyv irányába.

² Érdekes kérdés ebben az összefüggésben, hogy egy nagyobb vízviasszartató terület is releváns-e a partközeli infrastruktúrák árvízvédelmének szempontjából, erős szél indukálta víztömegszállítás esetén. Ezt jelen pillanatban nem tudjuk teljes bizonyossággal megválaszolni, ám érdemesnek tűnik egy külön kutatásra.

A fent említett modellek alapján arra a következtetésre jutottunk, hogy a nádas nettó lebegőanyag terhelésének megkétszereződése realisztikus elképzelés. Továbbá a kibocsátás oldalán lehetséges a kikötők kotrásának kisebb "igénye", ám ahhoz, hogy az S2-es forgatókönyvet fenntarthassuk, a nádcsatornák gyakoribb helyreállítására lenne szükség.



12. ábra. A vízszint és egy Mörbisch közelében lévő csatornán keresztül történő kibocsátás kapcsolata, változó csatornaszélességet feltételezve, a Manning-Strickler modell felhasználásával (MO1 tó széle, MO2 nádas öv).

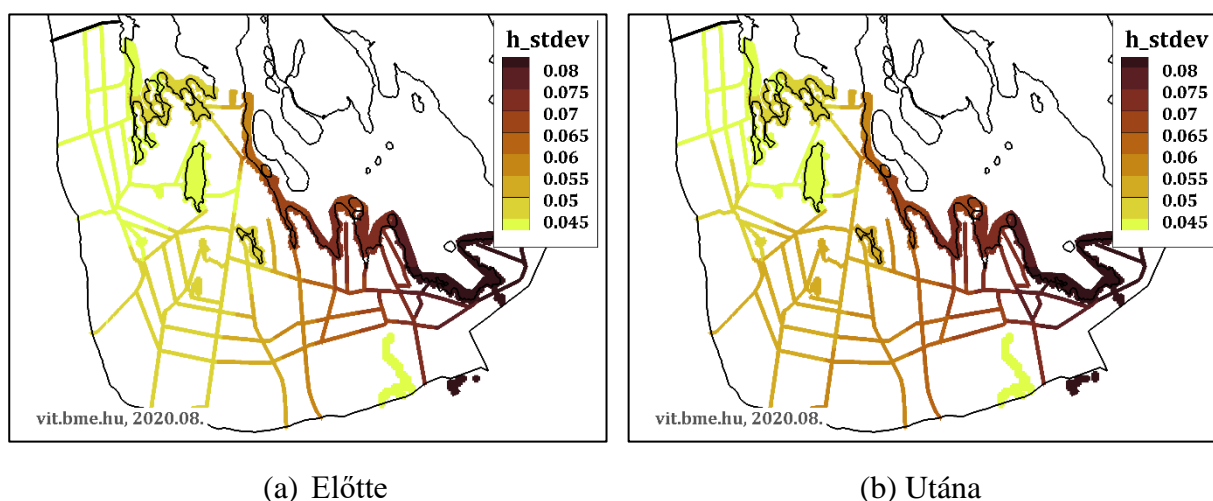


37. ábra. Változó szélességű nádcsatornák. Balra lent: Fertőrákos közelében 2015-ben (Magyarország), jobbra lent: Mörbisch közelében (Ausztria). Fotók: Kovács R. (balra lent), G. Kum / DWS Hydro-Ökologie (jobbra lent).

A nádcsatornák 2015-ös helyreállítása az elmúlt évtized leglátványosabb szabályozási intézkedése volt a Neusiedler See / Fertő tó magyar oldalán és egyben fontos betekintést is nyújt abba, amit az S2-es forgatókönyv esetén várunk. A hidrodinamikai tanulmány szerint (magyar kutatók 1. jelentése) a csatornában javult a hidraulikus kapcsolat a magyar nádas övön belül, de ez nem jár egyértelműen pozitív következményekkel. A tó közepes vízszintje esetén a csatornák, a tó gátjának köszönhetően, aszimmetrikus módon

viselkednek: nem fokozzák jelentősen a szél keltette áradást, de segítik lecsapolni a nádas övet az áradás végén (vagy amikor a szél elkezd csillapodni), ezzel csökkentve a nádas vízviszatartását. A nádasból kiömlő barna víz további hátránya, hogy több szervesanyag kerül a tóba, ahol a bomlási folyamatok oxigént vonnak el.

Hogy demonstráljuk a magyarországi nádcsatornák rekonstrukciójának tulajdonítható hatást, rekonstrukciót megelőző körülményeket szimuláltunk, egyfajta hidraulikus szállítást rendelve a korábbi geometriához, ám a jelenlegi (rekonstruált) geometriát használva. Az eredmények azt jelzik, hogy a nádcsatornák rekonstrukciója néhány 10%-kal felerősítette a vízfelszín ingadozását (a vízszint standard eltéréseivel mérve) a csatornák legbelsőbb részeiben, alacsony tóvíz esetén. Azonban válaszként nem nőtt jelentős mértékben az az időtartam, míg víz lepi el a nádállományt (38. ábra). Viszont az áramlási sebesség, azaz az öblítési hatékonyság néhány csatornában a 10-szeresére nőtt a helyreállítási munkálatoknak köszönhetően. Ez a jelenlegi sebesség 3-szorosát jelenti és a nyílt tó sokkal nagyobb befolyását a nádas övre, szintén a tó alacsony vízszintje esetén.



38. ábra. A szél okozta vízszíningadozások standard eltérése a csatornában (a) a rekonstrukció előtt (b) jelenleg, alacsony vízszintre modellezve (115,30 m tengerszint feletti magasság), [m]-ben megadva.

A kutatási eredmények és a párhuzamosan zajló “ATHU2 Vogelwarte - Madárvárta 2” projekt eredményei alapján arra következtethetünk, hogy a rekonstrukció nem gyakorolt jelentős hatást a nádállomány vízháztartására és ökológiai állapotára, alacsony vízszint esetén, 2019-hez hasonlóan. Az “ATHU2 Vogelwarte - Madárvárta 2” projektben vizsgált fizikai, kémiai és biológiai tényezők alapján arra a megállapításra lehetett jutni, hogy a vízcsera a nyílt tó – csatorna – nádas vízrendszerben 1 km-es távolságban észlelhető a nádas övbe befelé haladva, átlagosan, 1,5 km maximum értékkel, a felmérés idején tapasztalható viszonylag alacsony vízszinteknél (2017–2019). Azt, hogy a nád minősége

nem mutatott semmiféle egyértelmű javulást, az inkább alacsony vízszinteknek, a csatornák vízcserére gyakorolt, nem kellően nagy hatásának vagy más okoknak tudható-e be, az ezalatt a rövid idő alatt gyűjtött adatokból nem lehetett megállapítani.

A legélesebb térbeli mintázatot az elszíneződött oldott szervesanyag (CDOM) mutatta délnyugaton, a zárt és pusztulófélben lévő nádas részekben (Fertőboz és Sopron periférikus területén) és az ott elhelyezkedő, rekonstruált csatornában, sejtetve, hogy hiába valósult meg a csatornák néhány évvel korábbi rekonstrukciója, nem került sor vízcserére a nyílt víz és e területek között.

A magyar csatornák helyreállítása során a kikotort anyag a csatornák mentén került lerakásra, ahol körülbelül 80 m-enként ketté lett vágva, 4 m szélességben. Ami a felszíni áramlást illeti, a csatornák és a nádállományok közti határfelület hossza ennél fogva a korábbival összehasonlítva 5%-ra csökkent. A vízellátástól elvágott területeket helyre kell állítani a hosszútávú célkitűzések függvényében. Úgy tűnik erre két lehetőség adott: a nád megtartása és helyreállítása vagy a nyílt vízi élőhely helyreállítása.

Az S2-es forgatókönyv kulcsfontosságú kérdése az, hogy meddig lehetséges az üledék kibocsátása a nádas övbe. Szóval nem az a kérdés, hogy *vajon* a nádas öv végül feltöltődik-e üledékkel, hanem csak az, hogy *mikorra*. A nádas övről készült különböző ortofotók összehasonlítása megmutatja ezt. A 39. ábra a nádas öv egy szakaszát ábrázolja Mörbisch-nél, az 1990-es években (a csatornarehabilitáció előtt), valamint 2012 és 2020 tavaszán. Az összehasonlításnál nem észlelhető jelentős változás a nádas öv nyílt vízi területén található nádasok vonatkozásában. Amennyiben hihetünk a Google Earth felvételeken látható színeknek, a nádas vízi területek szürke zónái 2012-ben lebegőanyagok és finom üledékek említésre méltó bevitelét jelzik erre a területre (a nyílt tóba vezető csatornák közelében található vízterület keleti részén). Ez még jobban látszik a 2020-as műholdfelvételen (a tó zavarossága a nyílt vízi terület északi részén).



**39. ábra. A Mörbisch közelében található nádas öv időbeli összehasonlítása: 1990-es évek (balra fent), 2012 tavasza (jobbra fent) és 2020 (balra lent).
Forrás: 1990s Illmitzi Biológiai Állomás, 2012 & 2020: Google Earth.**

Természetesen ez az összehasonlítás elnagyolt és csak orientáció gyanánt szolgál. Minden bizonnyal részletes fotogrammetriai elemzésre lenne szükség ahhoz, hogy megbízható mennyiségi következtetésekre jussunk. Mindazonáltal az adatok azt jelzik, hogy az eliszaposodás folyamata is figyelemre méltóan fokozódik egy vagy két évtizeden belül. Azáltal, hogy a belső nádas övben csökken a vízvisszatartó terület, a beáramló víz- és lebegőanyag-terhelés csökkenésére lehet számítani. Így ez a folyamat lelassulna a nyílt tóból származó szilárdanyag bevitel miatt – ami az jelenti, hogy újra fokozott ülepedés menne végbe a nyílt tó védett részein.

Tisztázásképpen hangsúlyoznunk kell, hogy itt ülepedésről kizárólag a szó szoros értelmében beszélünk, tehát (főként szervesetlen) lebegő szilárd részecskék által. A nád növekedést érintő hatást, azaz az előállított és az ülepedéshez hozzájáruló, szervesanyag mennyiségét itt mellőzzük. Ez különösen igaz a lebegőanyagok és tápanyagok bevitelének és más kapcsolódó folyamatoknak (pl. redox) a nád mint növény

fiziológiájára gyakorolt hatásaira, azaz hogy mikor és hol kerül sor a nádas fokozott növekedésére vagy elhalására. Amikor ebben a jelentésben ülepedésről beszélünk, pusztán az üledék emelkedésére gondolunk (akár a nyílt tóban, akár a nádas övben, esetleg mint csatornamenti gátak). A nádnövekedés és az élő vagy holt szervesanyagok termelődése (szárak, levelek, gyökértörzs) – röviden: üledékképződés mint “nádképződés” – nem tárgya e jelentésnek. Ebben az értelemben a nádaratás hatásait érintő kérdések túlmutatnak a REBEN projekt keretein (lásd 2.5 fejezet).

Azonban nem fér hozzá kétség, hogy mindezek jelentős hatással vannak az anyagok kicserélődésére azáltal, hogy megváltoztatják a potenciális vízviszatartó területet, új útvonalakat hoznak létre a nádason keresztül. Ezen a ponton a lehetséges változásokat csak műholdfelvételek segítségével fogjuk jelezni (Google Earth). Az ülepítő medence közelében, amit mint közbülső tároló területet, a mörbischi kikötő kotrása során építettünk, körülbelül 20 évvel ezelőtt volt egy olyan terület, amit nagyon sűrű nádas borított. Az ezen a területen végzett aratás után (2012 előtt; felismerhető a nagyon szabályos vágási struktúrákról) a nád szemmel láthatóan nem tudott rendbe jönni. Manapság ez a terület egy gyér vízfelszín és így egy potenciális ülepedési terület, ellentétben a nádvágás előtti állapotával. Azonban a műholdfelvétel szerint a terület talán hamarabb kiszárad a csökkenő vízszint következtében, mint amilyen gyorsan ez a nádvágás előtti időszakban történt.

A foszfor esetén a korábbi forgatókönyvvel szemben ellentétes változásra számíthatunk: megnő a részecskékhez kötött foszfor bevitele a nádas övbe. A csatornák karbantartása és az üledék csatornák mentén történő lerakása (a jelenlegi gyakorlatnak megfelelően) a tápanyagok állandó eltávolítását jelenti a rendszerből. Azonban a foszfor oldott formában való kibocsátása a nádas övön belüli nyílt vízi területen lerakódott üledékből teljes mértékben elképzelhető (lásd 3. és 5. osztrák jelentés) és elvárható. Végül a nyílt tóból a nádas övbe, majd onnan az üledékbe történő kivitel kell, hogy egyértelműen domináljon, mint ahogy jelenleg is (lásd 6. táblázat).

Erre a forgatókönyvre is igaz, hogy ha a vízmérlegre gyakorolt hatásokat negligáljuk, a szennyezőanyagok fokozott koncentrációja nem befolyásolná negatívan a nyílt tavat. Az S1-es forgatókönyvvel ellentétben, a szemcsés szennyezőanyagok kibocsátása a tóból a nádas övbe fokozódna és így csökkenne annak kockázata, hogy a kritikus szennyezőanyagok limitjét túllépjük. Ezenfelül azonban, ahogy a W2-es forgatókönyvben is, figyelembe kell venni a szennyezőanyagok remobilizációjának kockázatát, ami a csatornarehabilitáció nagyobb volumenű kotrási munkálatainak következménye. A nagy mennyiségű üledék kiásása és áthelyezése elősegítheti a szennyezőanyagok elmozdulását az üledékből, növelve ezzel az oldott szennyezőanyagok koncentrációját a nyílt tóban, azonban ennek mértékét jelen pillanatban nem tudunk mennyiségileg meghatározni, kiterjedt kotrási munkálatok esetén megfelelő ellenőrző intézkedésekre lenne szükség.



2001 előtt



2012. ápr. 28.



2017. ápr. 2.

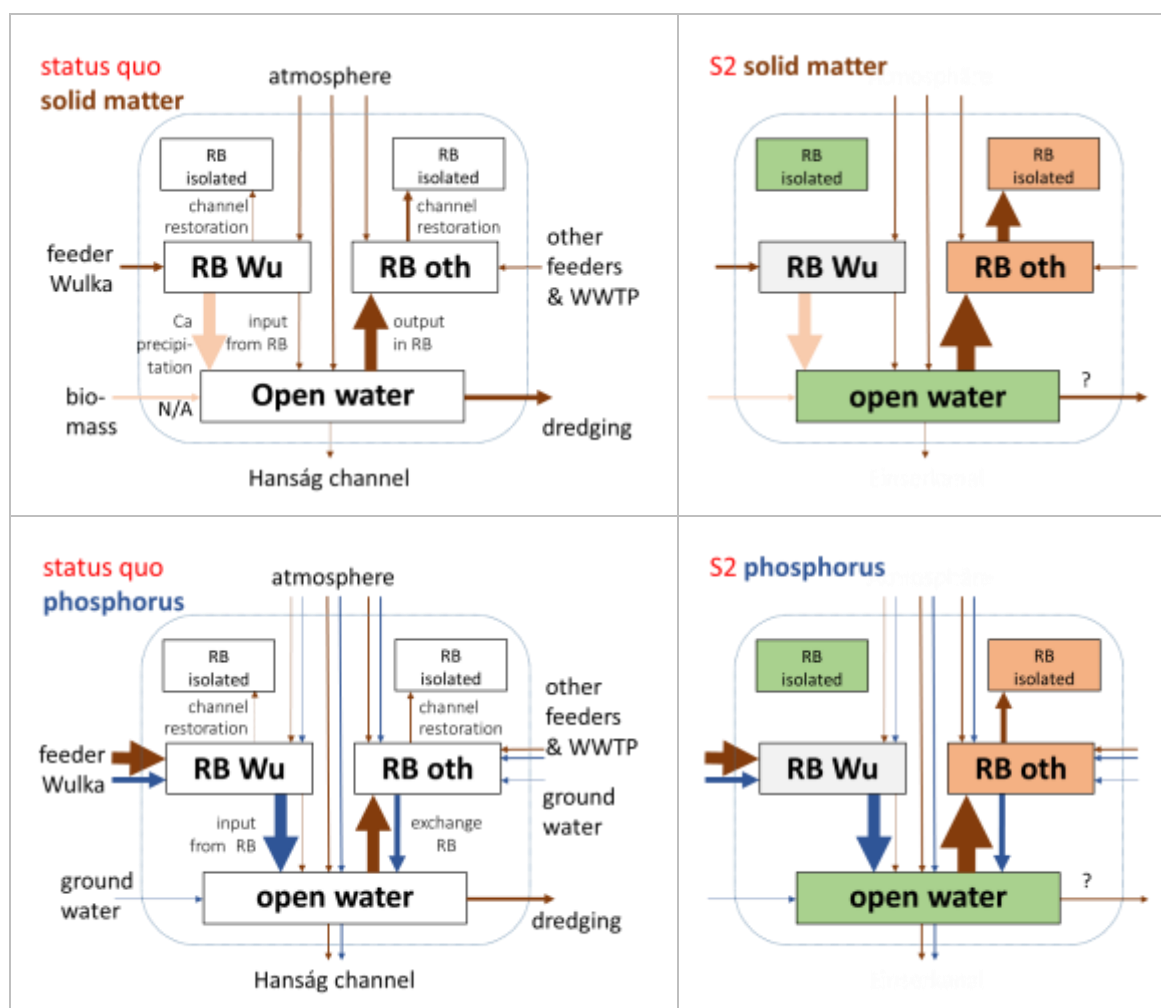


2020. ápr. 26.

13. ábra. A nádas öv nádaratás által okozott szerkezeti változásai egy kis területen Mörbisch közelében (Forrás: Google Earth).

Végül a nádcsatornák kiterjedt hálózatát a vízi közösségek szempontjából is figyelembe kell vennünk. Ezek ugyanis kétségtelenül előnyhöz jutnának a nyílt tó és a nádas öv jobb összekapcsolódása által, mivel ez növelné az élőhelyek elérhetőségét és hozzáférhetőségét a tóban és szélesítené az ökológiai nisek skáláját. Amennyiben azt feltételezzük, hogy a kiterjedt csatornahálózat csak a tó nemzeti parkon kívüli részét érintené, akkor az S2-es forgatókönyv is kínál olyan területeket a nádas övben, melyek nem kapcsolódnak a tóhoz. Így azokat a fajokat is megőrizhetnénk a Neusiedler See / Fertő tóban, amik a belső nádas övben található, elkülönített részeket kedvelik (vagy az itt uralkodó szélsőséges körülmények között versenyképesebbek, mint a “nyílt tavi fajok”).

Végezetül megállapításainkat a 41. ábra foglalja össze, ismételten tekintetbe véve a szilárdanyagok és a foszfor össz mérlegére gyakorolt hatásokat.



14. ábra. Az anyagáramlások alakulása az üledék (felső rész) és a foszfor (alsó rész) esetén, az S2-es forgatókönyv szerint.

4.8 Összefoglalás

A hat bemutatott forgatókönyv elméleti modellként szolgál azzal a céllal, hogy bemutassa a várható tendenciákat és azok lehetséges hatásait a szilárdanyagok, a tápanyagok és a szennyezőanyagok összmérlegére. Az alábbi következtetéseket vonhatjuk le:

- i) **Pozitív összmérlegre** számíthatunk, azaz a szilárdanyagok, a foszfor és a szennyezőanyagok nagyobb mértékben maradnak a nyílt tóban, ha a tóból történő kibocsátás csökken (P1-es forgatókönyv, alacsony vízszint) és a csatornák kotrása is kevésbé valósul meg (S1) (függetlenítés a rendszertől csatornamenti gátakon történő lerakódással, többnyire 116 m tengerszint feletti magasság felett). Viszont ha a kibocsátás és a kotrás mértéke nő, akkor kevesebb anyag marad a nyílt tóban. Ez az eredmény nem meglepő, de az ebben a jelentésben szereplő mennyiségi meghatározás rávilágított arra, hogy ezek a változások fontosak az összmérlegre nézve.
- ii) Ami a **Vulka** torkolati területét illeti, a csatorna W2-es forgatókönyv szerinti gyakori kotrása az anyagok folyamatos eltávolításával járna. Azonban a szilárdanyagok és szennyezőanyagok visszatartása ezen a területen jelentősen csökkenne és a tó szennyeződése nagyobb méreteket öltene. Ha fennmarad az anyagok konstans retenciója a Vulka nádas övében egy legalább részben diffúz áramlás fenntartásával, a lerakódás hosszútávú alakulása tisztázatlan marad. Hosszútávon szükséges lenne az üledék eltávolítása a nádas övből, ami azonban pénzügyi és technikai okokból valószínűleg nem valós opció. Ezzel pedig eljutunk a lebegőanyagok visszatartásának kérdéséhez, mielőtt azok elérik a nádas övet – ezt a szempontot azonban itt nem fejtjük ki, további részletek a Kezelési tervben olvashatóak.
- iii) A **nyílt tóban**, a kevesebb kibocsátás (vagy annak teljes hiánya) alacsony vízszintek esetén (P1-es forgatókönyv), a Vulka túlnyomórészt lineáris áramlása a nádas övön keresztül (W2) és az üledékképződés a nádcsatornában (S1) megnövekedett üledékterhelést von maga után. Ennek hatására pedig nagyobb lenne az üledékképződés a nyugodt öblökben – amit a kikötők és fürdőhelyek gyakoribb kotrása követne. Fordított változásra lehetne számítani magas vízszintnél és a nádcsatornák széles hálózatának rendelkezésre állásával.
- iv) Az alacsony vízszinten végbemenő alacsony kibocsátások (P1) szintén a tó nagyobb **koncentrációs hatásához** vezetnének. Így arra számíthatunk, hogy összességében megnő a szennyezőanyagok és a foszfor koncentrációja a nyílt tóban (és a iii pontban leírt folyamatok is lezajlanának).
- v) A **nádas öv** forgatókönyvei a nyílt tó változásainak tükréiként jelennek meg. Ennélfogva az üledékképződés magas vízszintek esetén és a csatornákon

keresztüli, kellő mértékű vízcseré által egyértelműen a nádas övbe tolódik el. Ez szintén egyre fontosabb szerepbe helyezi a nádas övet mint visszatartó területet illetve mint lehetséges foszfor- és szennyezőanyag-forrást a tóban.

- vi) Mindegyik forgatókönyvben központi szerepet játszik a tó és a nádas öv közti **vízcseré**. Röviden összefoglalva, a tó ezen két része egymás felé nyomja az üledékeket és a tápanyagokat, az általános körülményektől függően. Egy valódi változás az összmérlegben csak a Hanság-csatornán keresztüli kibocsátással és a kikötők kotrásával történne. A nádas övben való lerakódás (nádcsatornák kotrása) eltávolítja a rendszerből a kicserélődési folyamatokban részt vevő szilárdanyagokat, foszfort és szennyezőanyagokat, de végső soron ezek a Neusiedler See / Fertő tó medencéjének határain belül maradnak.

Ahogy azt korábban említettük, a hat forgatókönyv alapvetően három ellentétpárt alkot és ezek kombinációja a tendenciák erősödéséhez vagy gyengüléséhez vezethet. Például a "P1W2S1" megfelelne egy olyan forgatókönyvnek, ahol nagyrészt lineáris áramlás zajlana a Vulka nádas övének keresztül és a tó és a nádas öv közti víz- és anyagcsere jelentéktelen lenne. Így az eliszaposodás tendenciája a nyílt tóban jelentősen felerősödne. Azonban az is lehetséges, hogy az S1-es forgatókönyv (csökkent mértékű kicserélődés a tó és a nádas öv között, kevesebb vízáramlás a part menti zónába, illetve nagy, sekély és potenciálisan könnyen felmelegedő vízfelszínének rendszeres képződésének hiánya) csökkentené a párolgást és így támogatná a P2-es forgatókönyvet (magas vízszint).

Ha főként a szilárdanyagokra koncentrálunk, ez nem utolsósorban annak tudható be, hogy a lebegő szilárd részecskék eloszlásának és lerakódásának mechanikus megközelítése viszonylag jól megalapozottnak tűnik, mind a mért adatoknak és a modellezésnek köszönhetően. A tápanyagok és a szennyezőanyagok esetében a körülmények – az üledékben zajló konverziós folyamatok miatt – komplikáltabbak. Mindazonáltal ezekre az anyagokra nézve is megállapíthatjuk hogy az ideiglenesen túlsúlyban lévő részecskékötés döntő fontosságú a be- és kivitelek, valamint a tóban zajló szállítás tekintetében. A REBEN projekt kutatási eredményei alapján nem csak a vízgyűjtő területről származó bevitel, hanem a tóban zajló folyamatok figyelembe vétele is egyre sürgetőbbnek tűnik minden későbbi, vízkezeléssel kapcsolatos megfontolás során, tekintettel az üledékképződésre vagy a vízminőségre.

A jelentésben bemutatott hat forgatókönyv modelleket ad számunkra, hogy illusztrálhassuk a különböző keretfeltételek tömegátvitelre gyakorolt hatását a Neusiedler See / Fertő tóban. Ezeket nem a Neusiedler See / Fertő tó következő években várt alakulása alapján határoztuk meg, de természetesen pontosan ez a kérdés különösen fontos a kezelési terv szempontjából. Mindenekelőtt azt kell azonban definiálni, hogy milyen módon változik a tó az elkövetkező 20 év során, emberi beavatkozás nélkül.

Ez elkerülhetetlenül is egy tematikus területhez vezet, amit az osztrák szakértői csoport “Hidrológia” című 1. jelentése és a későbbi 2.5 fejezet is érint: a **globális felmelegedés** hatásai a Neusiedler See / Fertő tóra. E témát illetően azonban nagyok a bizonytalanságok. A száraz periódusok hosszabbodásával nő a P1-es forgatókönyv valószínűsége (gyakoribbá válnak a <115.2 m tengerszint feletti magasság jellemezte vízszintek), legalábbis emberi beavatkozás nélkül. Ezenkívül, a nádcsatornák rendszeres karbantartásának mellőzésével, a tó helyzetének alakulása a W1-es (a Vulka túlnyomórészt diffúz folyása a nádas övön keresztül) és S1-es forgatókönyv irányába mozdulna el (a nádas öv függetlenítése a nyílt tótól). A W2-es (lineáris áramlás) és S2-es forgatókönyv (kiterjedt csatornahálózat a nádas övben) nem valósítható meg a nádas övbe való folyamatos beavatkozás nélkül. Magasabb vízszint elérése (P2-es forgatókönyv) természetes módon is (több csapadék és kevesebb párolgás) és a meglévő vízszintszabályozással vagy külső forrásból származó vízellátással is lehetséges.

5 ÉRTÉKELÉS

Ez a fejezet összefoglalja a forgatókönyvek eredményeit és összeveti azokat az 1.3 fejezetben meghatározott legfontosabb vízkezelési célkitűzésekkel a Fertő tó Stratégiai Tanulmánynak megfelelően (Wolfram et al. 2014).

A 3.7 fejezetben kiemeltük, hogy a terminusok világos meghatározása elengedhetetlen a forgatókönyvek kiértékeléséhez. Mivel a “nyílt tó versus nád aránya” kifejezés kétszer is szerepel a Fertő tó Stratégiai Tanulmány célkitűzései között, a következő korlátozás és tisztázás szükségeltetik: a REBEN projekt a szilárdanyagok (lebegőanyagok, üledék) dinamikájára, valamint a (részecskékhez kötött és oldott) tápanyagok és szennyezőanyagok dinamikájára fókuszál. A nádnövekedés aspektusát és a nádas növekedésének problematikáját a nyílt tóban épphogy csak érintettük a projekt során, így ezek nagyrészt tisztázatlan kérdések maradnak az értékelést illetően.

Ami a világosabb meghatározást illeti, a Fertő tó Stratégiai Tanulmány szerinti első hidromorfológiai célkitűzés (“A tómedence hidromorfológiai jellemzőinek megőrzése a nyílt vízben és a nádas övben (tájelem)”) is az üledékképződésre korlátozódik, a szó szorosabb értelmében (lásd fent, 23. ábra jobbra). Hasonlóképpen, a “kontrollálatlan üledékképződés megelőzése a nádas övben (nyílt víz versus nád aránya)” célkitűzést is kizárólag az üledékdinamika szemszögéből vizsgáljuk.

A “Nád” részben is, a Fertő tó Stratégiai Tanulmány célkitűzését úgy fogalmaztuk meg, hogy fenntartsuk a “nyílt víz : nád” arányát, ellensúlyozva a nádas progresszív térnyerését a nyílt vízi területek kárára. Ezt oly módon határoztuk meg, hogy a nádas övön belül található vízi területek (és a tó területének) arányát megőrizzük (lásd 23. ábra középen).

A továbbiakban a hat forgatókönyv értékelésére kerül sor a Fertő tó Stratégiai Tanulmányban meghatározott célkitűzések alapján. Első lépésként az ott megfogalmazott célkitűzések **jelen állapotát** értékeljük ki. Majd a **forgatókönyvek értékelése** részben, minden egyes célkitűzést külön megvizsgálva értékelünk aszerint, hogy az elérésükre vagy az elvételük kockázatának növekedésére látunk-e tendenciát. Mindezeket végül a 7. táblázat foglalja össze.

Végül harmadsorban azt kell megvizsgálunk, hogy tehetünk-e intézkedéseket annak érdekében, hogy gyorsabban **megvalósíthassuk a célkitűzéseket**. Ide tartoznak a már taglalt, nádcsatornákat és vízszintet érintő vagy azok hatáskörén túlmutató, a vízgyűjtő területre vagy magára a tóra vonatkozó intézkedések. Ezeket a témákat **külön dokumentumban** tárgyaljuk, ajánlásainkat a **kezelési terv** tartalmazza.

Az első vízkezelési célkitűzés, nevezetesen a tómedence **hidromorfológiai adottságainak** megőrzése a nyílt tóban és a nádas övben (tájelem), egyfelől leírja a fennálló állapotot, másfelől magában foglalja az ezen állapot hosszútávú fenntartására irányuló erőfeszítéseket, azaz hogy **megelőzzük a tómedence (tó és nádas) eliszaposodását**. Azonban az üledékképződés egy természetes folyamat, amit a hat forgatókönyv egyike sem tud meggátolni. Ebben az értelemben, pillanatnyilag úgy vehetjük, hogy ezt a célkitűzést nem sikerült elérni és a hat, megváltozott körülményekre íródott forgatókönyv meg sem közelíti a releváns célkitűzést. Annak érdekében, hogy a Vulkából származó lebegőanyag terhelést fenntartható módon csökkentsük, intézkedésekre van szükség (*meggyőző bizonyíték*) a vízgyűjtő területen (és részben magában a tómedencében is). Ezeket a kezelési terv taglalja.

Jelenleg még azt a célt sem értük el, hogy megelőzzük a nádas öv tómedencén belüli eliszaposodását, mivel a nyílt tó felől folyamatos az üledékszállítás a nádas övbe. Ugyan a Fertő tó Stratégiai Tanulmány egyetlen vízkezelési célkitűzése sem érinti explicit módon a nyílt tó üledékképződésének megelőzését, mégis ésszerűnek tűnik felvenni ezt a részt a célok közé – annak ellenére, hogy még a GeNeSee projektet követően sem mondató meg teljes bizonyossággal, hogy ez a cél egyáltalán elérhető-e.

Mindkét célkitűzés a tómedence eliszaposodásának megelőzésére törekszik. A bemutatott forgatókönyvek közül a nádas övben zajló ülepedést – a nyílt tóból kiinduló korlátozott vagy gátolt üledékszállítás értelmében – inkább a P1-es (alacsony vízszint) és az S1-es (csatornák hiánya) forgatókönyv biztosítja, mintsem a magas vízszint (P2) vagy a szoros kapcsolat a nyílt tó és a nádas öv között (S2). A P1-es és az S1-es forgatókönyvben legalább nem nő az üledékréteg a nádas övben a nyílt tóból történő kivétel által. Cserébe azonban a nyílt tóban fokozódik az üledékképződés. A W1-es és W2-es forgatókönyv hatásai valószínűleg marginálisak a nádas öv egészét tekintve, ugyanis csak egy kis hányad számít érintettnek a torkolati területtel. Azonban a nyílt tóra gyakorolt hatások messzemenőbbek (*meggyőző bizonyíték*).

A fennálló állapot során csak korlátozott a hatékony **kicserélődés a nyílt tó és a nádas öv között**, ám sokkal hangsúlyosabb lenne a magas vízszintekre készült forgatókönyv esetén (P2), mint alacsony vízszinteken (P1). Mivel a diffúz áramlás szerepe elhanyagolható, a nádcsatornák széles hálózatára van szükség a laterális vízcsere érdekében (S2) (*meggyőző bizonyíték*). A magyar részen nemrég kikotort csatornahálózat, ami mindkét oldalán kapcsolódik a nyílt tóhoz, közepes áramlást tud biztosítani a nádas övön keresztül, ezáltal frissebb vízzel ellátva a nádas, de egyúttal szervesanyagot ömlesztve a tóba, alacsonytól magas vízszintek esetén.



42. ábra. A barna víz beszivárgása a nyílt tóba 2019. június 15-én (S2-kép).

A “Nád” rész célkitűzéseinek értékelése nehéz. Nem csak azért, mert a REBEN projekt munkaprogramja csak marginálisan érintette ezt a területet, hanem azért is, mert a Fertő tó Stratégiai Tanulmányban megfogalmazott célkitűzések meglehetősen általánosak. A nádas öv napjainkban kétségkívül egyedi tájlelmékként jelenik meg, amit nádasok és barna vizű területek sokszínűsége jellemez és a Neusiedler See / Fertő tó ökoszisztémájának szerves részét képezi. Ebben az értelemben pedig a “Nád” területhez kapcsolódó vízkezelési célokat megvalósítottak tekinthetjük. Ez azonban egyúttal azt is jelenti, hogy feladatunk ezen egyedülálló élőhely jövőbeli megóvása.

A forgatókönyvek tekintetében feltételezhetjük, hogy a nádas öv hosszas kiszáradása (P1) nem felel meg a terület egyedülálló voltának megőrzésére irányuló célkitűzésünkkel. Ez a csatornakotrás jelenlegi gyakorlatára is igaz, aminek mértéke a nádas övön belüli összeköttetéssel csökken, köszönhetően a laterális gátak felhalmozódásának (S2, W2). A hosszú időn át száraz nádas öv hosszútávú (vegetáció-ökológiai) változása nem egyértelmű, azonban egy olyan nádas öv, ami hosszú ideig túlnyomórészt száraz, valószínűleg nem hasonlítható össze a Neusiedler See / Fertő tó manapság tapasztalható sokrétű élőhelyeivel – annak ellenére, hogy – tágabb értelemben – még egy javarészt száraz nádas öv is “a Neusiedler See / Fertő tó ökoszisztémájának szerves részét” képezné hosszútávon (gyenge bizonyíték).

A további célkitűzések a Neusiedler See / Fertő tó **természetes fejlődését** érintik. Szigorúan véve, a tó ma egyáltalán nem számít természetes rendszernek, inkább egy emberi beavatkozás által erősen módosított rendszert takar: hidrológiai (Hanság-csatorna), tápanyagokat érintő (az 1970-es és 1980-as évek eutrofizációs fázisa) és strukturális értelemben (a nádas öv kiterjesztése a 20. században, nádcatornák

létesítése és fejlesztése, tóparti kotrás). Bizonyos részein a tó zavartalanul tud ma is fejlődni, de csak a több, mint 100 év alatt az emberi kéz által szabott kereteken belül és az elmúlt évtizedek hatásainak súlya alatt. A természetes fejlődés célkitűzése alatt a jelenleg zajló folyamatok megőrzését és akár (tér- vagy időbeli) kiterjesztését értjük. Ez már folyamatban van a “Neusiedler See – Seewinkel” nemzeti park védett területén. Azonban szükségessé válhat a negatív változások megállítása, melyek az ökoszisztémát érintő, hosszú múltra visszatekintő, emberi beavatkozásból erednek. A fenntartható kezelés ehhez járul hozzá, míg a tó magára hagyása ellentétes hatást fejtene ki.

Összefoglalásképpen elmondható, hogy a **természetes fejlődés** (kemizmus, dinamika, változékonyság, folyamatok) célkitűzései mára részben megvalósultak, de néhány esetben a hatások ellensúlyozzák ezt. Egy olyan forgatókönyv, amiben nincs igény a Hanság-csatornán keresztüli kiáramlásra (P1), támogatja a természetes fejlődést. A P2-es forgatókönyv tartósan magas vízszintjei esetén a vízkivitel kockázata negatív ökológiai változásokhoz vezet – a jelenlegi gátszabályozás mellett. Ezért, különösen a P2-es forgatókönyvben, azaz végsősoron amikor a lefolyástalan tó “áramlásokkal keresztezett” víztestté alakul át, aligha lehet **zavartalanul végbemenő biológiai folyamatokról** beszélni (*meggyőző bizonyíték*).

Az olyan forgatókönyvek értékelése, melyekben a nyílt tó és a nádas öv különböző térhálói szerepelnek, nehéz. Még ha a nádas öv teljes függetlenítése a nyílt tótól, a csatornakotrás mellőzésével (S2-es forgatókönyv) természetes fejlődésnek is tekinthető, bizonyos biológiai folyamatokat gátlunk, vagy legalábbis megzavarunk. Egy olyan rendszerben, mely már nem teljesen természetes, mint például a Neusiedler See / Fertő tó, indokoltnak (vagy talán még szükségesnek is) tűnik e folyamatok mérsékelt intézkedésekkel való támogatása, mint például egy bizonyos mértékű kicserélődés fenntartása, illetve a tó és a nádas öv közti vándorlási útvonalak megőrzése. Még ilyen intézkedésekkel is természetes és zavartalan módon folytatódhatnak a jelenlegi folyamatok több területen is (természetesen a beavatkozások mértékétől és természetétől függően). A célkitűzésként megfogalmazott “természeti sokszínűség megőrzése” szempontjából az S1-es és S2-es forgatókönyv értékelése ambivalens, ezért a megfelelő intézkedéseket a kezelési tervben konkretizálni kell.

A **jó kémiai állapot fenntartása** vagy elérése (beleértve a **kémiai paramétereket**, melyeket az **ökológiai állapot** értékelése tartalmaz) jelenleg nem biztosított (*meggyőző bizonyíték*). A szennyezőanyagok bevitelének fenntartható csökkentése érdekében a tó vízgyűjtő területét érintő intézkedések meghozatalát fontolóra kell venni (kezelési terv). A koncentráció tó okozta erősebb hatása (P1), de a nyílt tó és a nádas öv közti kicserélődés megszűnése is (P1, S1) romló állapotot jelent vagy annak megnövekedett kockázatát, hogy egy jó állapotot teremthessünk meg (*közepes bizonyíték*). Másrészt, egy fordított értékelést adhatunk magas vízszintek és a csatornák folyamatos helyreállítása

esetén: a víz alkotóelemei felhígulnak vagy dominánssá válik a nyílt tóból a nádas övbe irányuló kibocsátás és ott történő raktározás a nádas övből eredő, fordított belső terhelés révén. Annak kockázata, hogy elvétjük célunkat, csökken (*közepes bizonyíték*). Nem szabad megfélekezni a nádas övből kiinduló, a csatornarehabilitáció során tapasztalható lehetséges terhelésekről annak érdekében, hogy az anyagok kritikus mobilizációját elkerüljük (*meggyőző bizonyíték*). A magas vízszint és a csatornák rendszeres karbantartása szintén elősegíti az alacsony trófikus szint elérését és az EQS-nek való megfelelést a tápanyagokat illetően.

Ami az **alacsony tápanyagterhelés bevitelét** illeti: Ha a tavat a nádas öv és a nyílt víz kombinációjaként fogjuk fel, akkor a W2-es forgatókönyv a Vulka nagyrészt lineáris áramlásával a nádas övön keresztül csökkenti a **külső** terhelést, amennyire ezt ez a forgatókönyv, folyamatos kotrással lehetővé teszi. Ez egyúttal magában foglalja az üledék és a tápanyagok eltávolítását is, mielőtt azok eléri a nyílt tavat. Ebben az értelemben, a W2-es forgatókönyv bizonyos mértékig csökkenti a tápanyagok tóba történő bevitelét – vagy helyesebben: az egyensúlyt, a kotrás és kivonás eredményeképpen (*gyenge bizonyíték*). A P1/P2 és az S1/S2 forgatókönyvpárok nincsenek hatással a külső terhelésekre.

A **belső** tápanyagterhelés növekvő tendenciát mutat a W2-es forgatókönyv nádas övön keresztülhaladó, tisztán lineáris áramlásával, mivel így a Vulka torkolatánál ki van iktatva a nádas övben történő lerakódás. Amennyiben a belső terhelés csökkentésének célját nem csak az üledékből való csökkent remobilizációként értelmezzük, hanem úgy is felfogjuk, mint az üledékben való fokozott és tartós lerakódást, főként a nádas övbe irányuló kivétel által, akkor megállapíthatjuk, hogy a P2-es, de a W1-es és az S2-es forgatókönyv is elősegíti e célkitűzés megvalósítását, míg az ellentétes forgatókönyvek akadályozzák azt. Nyitott marad azonban az a kérdés, hogy miként hatnak a tóbelsőt érintő intézkedések (pl. kotrás) a tápanyagok és szennyezőanyagok remobilizációjára, az üledék kérdésébe történő beavatkozás közvetlen eredményeképpen.

A 6. táblázat alább összefoglalja ezt az értékelést. Újra ki kell emelnünk, hogy ez az értékelés a különböző alapfeltételeket veszi figyelembe, melyeket a hat forgatókönyvben határoztunk meg. Így a vízkezelési terv célja az kell, hogy legyen, hogy kidolgozásra kerüljenek olyan intézkedések, melyek segítségével optimalizálhatjuk célkitűzéseink megvalósítását, fontolóra véve az érintett, egymásnak ellentmondó vagy egymással ellentétes folyamatokat.

6- táblázat. A fennálló állapot és a kiválasztott forgatókönyvek értékelése a vízkezelési terv tükrében, a stratégiai tanulmányban foglaltaknak megfelelően. A stratégiai tanulmányban megfogalmazott célkitűzések specifikációi és kiegészítései dőltten szedve olvashatók. A célkitűzések megközelítésének mértékét vagy az azoktól való eltávolodás fokát az alábbiak szerint jelöltük: – – ill. + +.

Terület	Vízkezelési célok	P1	P2	W1	W2	S1	S2
Hidromorfológia	A tó hidromorfológiai jellemzőinek megőrzése (nem iszaposodik el a teljes tómedence, azaz a tó és a nádas öv)	–	–	–	–	–	–
	Nem iszaposodik el a nádas öv (minimalizált üledékképződés a nádas övben)	++	--	–	+	++	--
	Nem iszaposodik el a nyílt tó	--	++	=	--	--	++
	A tó és a nádas öv közti kicserélődés lehetővé tétele	--	++	na	na	--	++
Nádas öv	A nádas öv egyedülálló jellegének megóvása, fenntartható kezelés (tájelem)	–?	+	+	–	+	–
	A nádas sokrétűségének megőrzése és a nád növekedésének korlátozása (nyílt víz versus nád)	–?	+	na	na	–	+
	A nádas öv megőrzése mint a Neusiedler See / Fertő tó ökoszisztémájának szerves része	=	=	na	na	=	=
Fiz.-kém. paraméterek	A természetes kémia megóvása	++	--	=	=	=	=
	A természetes fizikai-kémiai dinamika megóvása	+	–	+	–	+	–
	Alacsony táplálkozási szint	--	++	+	–	--	++
	Alacsony külső tápanyagterhelés	na	na	–	+	na	na
	Alacsony belső tápanyagterhelés (remobilizáció az üledékből)	--	++	+	–	–	+
Szennyezőanyagok	Egy jó kémiai állapot megőrzése	--	++	=	–	--	++
	Egy jó kémiai állapot megőrzése (kémiai vegyületek) ³	--	++	=	–	--	++
Biológia	Egy jó ökológiai állapot megőrzése (biológia) ⁴	+	–	–	+	–	+
	A természetes sokrétűség megőrzése (biológiai sokszínűség, bőség és produktivitás)	+	–	+	–	±	±
	A biológiai folyamatoknak nagyrészt zavartalanul kell lezajlania	+	--	+	–	±	±

³ a Qualitätszielverordnung Chemie Oberflächengewässer (BGBl. II Nr. 96/2006 idgF) értelmében

⁴ a Qualitätszielverordnung Ökologie Oberflächengewässer (BGBl. II Nr. 99/2010 idgF) értelmében

6 TUDÁSBELI HIÁNYOSSÁGOK ÉS NYITOTT KÉRDÉSEK

2014-ben, Wolfram *et al.* (2014) a Fertő tó Stratégiai Tanulmányban összefoglalta a különböző szakterületeken szerzett aktuális ismereteket, valamint ezekre alapozva számos tudásbeli hiányosságot is megfogalmazott. E tudásnak a fejlesztését a Neusiedler See / Fertő tó régióra kitűzött célok felsorolása tartalmazza.

Az egyik ilyen hiányos ismeretünk a nyílt tó és a nádas öv közti víz- és anyagcseréhez kapcsolódik – egy olyan összetett témához, ami a REBEN projekt vizsgálatainak középpontjában állt. A REBEN projekt különböző módszertani megközelítések segítségével tisztázni tudott alapvető kérdéseket. Az ott végzett helyszíni felmérések, laboratóriumi vizsgálatok, az adatok kiértékelése és a modellezés adják a vízkezelési terv alapját, ami az osztrák és a magyar szakértők egyetértésével, külön dokumentumként készült el.

Ahogy minden más tudományos kutatás esetén, úgy a REBEN projekt során is felmerültek új kérdések, így e szintézisjelentés egy, az adatelemzésekből és a két ország szakértőinek egyeztetéseiből eredő tudásbeli hiányosságainkról szóló fejezettel zárul.

(1) Terepmodell

Az egyik legfontosabb pont – meglepő módon – a Neusiedler See / Fertő tó tömedencéjének vizsgálatát érinti. A GeNeSee projekt rendelkezésre álló adatainak felülvizsgálata rávilágított arra, hogy a nádas övben végzett felmérések nem voltak elég átfogóak és részletesek ahhoz, hogy megfelelő adatbázissal szolgáljanak a tervezett modellezéshez. Jelenleg nem tudjuk megmondani, milyen mértékben iszaposodott el a nádas öv, illetve mennyivel lett magasabb a tó gátja a legutóbbi, az 1980-as és 1990-es években végzett kutatások óta. A sűrű nádasok terepmagasságát illető bizonytalanságok pedig jelentősen megnehezítették a modellezést.

Legalább három vizsgálati területen (Illmitz, Mörbisch és a Vulka torkolati területe) került sor a kiválasztott csatornák és medencék vízmélységének kiegészítő méréseire a REBEN projekt során (a megbízás hatáskörén túl). A tó nyílt vize és a nádas közti peremrész, illetve a nádas övben található nyílt vízi területek GIS-rétegével együtt (Csaplovics & Schmidt 2011a; Csaplovics & Schmidt 2011b), ezek a kiegészítő mérések lehetővé tették egy olyan digitális terepmodell elkészítését erre a három területre vonatkozóan, amit fel tudtunk használni a hidraulikus modellezéshez. **Az üledékszintek átfogó vizsgálata a**

nádas övben, különösen a tó gátjának területén, de a szárazföldön is, az elkövetkező évek egyik alapvető feladata lesz a szerzők meglátásai szerint, ugyanis az ebből nyert információk szintén elegendhetetlenek a Neusiedler See / Fertő tó vízellátását illetően.

(2) Nádnövekedés és nádpusztulás

Az üledékképződés valamint a tó és a nádas öv közti tömegátvitel vizsgálata a szintézisjelentésben az ásványi összetevőkre fókuszált. Azonban a szervesanyag termelődés és annak közreműködése az ülepedési folyamatokban két olyan kérdés, melyre a válasz nem kellőképpen ismert. Az e területen végzett kutatások egy több évtizeddel korábbi időszakból származnak és kétségkívül felülvizsgálatra és kiegészítésre szorulnak. Ehhez a területhez még olyan további témák kapcsolódnak, mint a nádnövekedés, de a belső nádas övben található nád elhalása is. Különös fontos tisztázni, hogy mely területeken tapasztalható **a nádállomány terjeszkedése** vagy **pusztulása**.

Több évtizednyi együttműködés után a nád igazán standardizált, homogén felmérésére és minősítésére van szükség az egész tó esetében.

(3) Az üledékkotrás hatása

A kikötők kotrása általi üledékeltávolítás és a csatornahelyreállítás jelentőségét az általános egyensúlyra nézve e jelentés mutatta be és értékelte részletekbe menően. Azonban nem ismeretes számunkra, hogy ezek a beavatkozások az üledékbe milyen mértékben vezetnek **a tápanyagok és szennyezőanyagok remobilizációjához** a nyílt vízben és hogy egy ilyen remobilizáció milyen rövidtávú (és végsősoron potenciálisan hosszabb távú) hatást tud kifejteni.

(4) Nádaratás

A nádas öv gazdaságos felhasználása nádaratás segítségével közvetlen módon befolyásolja a tó tápanyag- és szilárdanyag-mérlegét. Ez szintén felveti a korábban a nádas övben lerakódott **tápanyagok és szennyezőanyagok remobilizációjának** kérdését. Továbbá újra fel kell mérnünk a rendszerből nádaratás során **eltávolított anyagok mennyiségét**. Előzőleg 40 évvel korábban folytak erre vonatkozó kutatások.

(5) A környezetminőségi előírásoknak (EQS) való megfelelés

Ausztria

A Neusiedler See / Fertő tóban végzett biótakutatókban kiderült, hogy a higany és a PBDE esetében nincs meg az összhang az EQS-sel. Ez nem kifejezetten a Neusiedler See / Fertő tó jellegzetessége, ugyanez tapasztalható szerte Ausztriában és az EU nagy részén is. A Qualitätszielverordnung Chemie Oberflächengewässer (QZV Chemie OG, A felszíni vizek kémiaiára vonatkozó osztrák rendelet, BGBl. II Nr. 96/2006) paramétereinek ellenőrzése a Neusiedler See / Fertő tó vízfázisában eddig még nem történt meg, ugyanis a nemzeti megfigyelési programban, a Gewässerzustandsüberwachungsverordnung (GZÜV, A felszíni vizek és a talajvíz ellenőrzéséről szóló rendelet, BGBl. II Nr. 479/2006) szerint, nincs ellenőrzőpont a Neusiedler See / Fertő tónál. Az e projekt hatáskörébe tartozó jelen kutatások nem az EQS ellenőrzésére lettek megtervezve. Mindazonáltal a vizsgálatok azt jelzik, hogy az EQS túllépése elképzelhető a PFOS, a benzo(a)pirén, a fluorantén és más PAH-ok, valamint az oldott ólom esetében is. Azonban a cél jelenlegi elérésével kapcsolatban még nem jutottunk végső megállapodásra.

Magyarország

A második vízgyűjtő-gazdálkodási terv (RBMP) (2015) a következő módon sorolja be a megfigyelés eredményeit a Neusiedler See / Fertő tó esetében:

Víztest-kategória	Biológiai állapot	Fizikai-kémiai állapot	Specifikus szennyezőanyagok	Hidromorfológiai állapot
természetes	jó	jó	jó	kiváló

(6) A szennyezőanyagok degradációja és adszorpciója

Számos, a környezetben nagyrészt perzisztens anyag került jelentős mértékben eltávolításra a tó és nádasainak vízi fázisából. A szilárdanyagokkal együtt történő kibocsátáson a nádas övbe és az ottani elraktározódáson (PAH és fémek), valamint a hosszútávon lehetséges mobilizáció ide tartozó kérdésén (lásd fent) túl, az egyéb paraméterek esetében ez a tó környezeti körülményei között végbemenő degradációs vagy konverziós folyamatoknak tulajdonítható (pl. karbamazepin, diklofenák, PFOA). E degradációs folyamatok végtermékei illetve a metabolitok lehetséges termelődése nem kerültek azonosításra. A PFOS esetében is kimutatható volt a tó vízi fázisából való jelentős mértékű eltávolítás, de a PFOS sorsát nem lehetett egyértelműen megállapítani. Míg a PFOA és a PFOS a perfluorált felületaktív anyagok (PFT) csoportjába tartoznak, használatuk egyre kevésbé jellemző, helyüket egyre inkább egyéb, rövidláncú PFT-k veszik át. Ezek rendkívül perzisztens vegyszerek, bevitelükről és a tóban való

viselkedésükről jelenleg kevés információ áll rendelkezésre, ezért hosszútávon kritikusan kell szemlélni őket a tó érzékenysége miatt.

(7) Bentikus termelődés

Az előző vizsgálatok ígéretes eredményei ellenére (Wolfram *et al.* 2015) a bentikus közösségek esetében tervezett mintavétel a jelenlegi koncepció alapján módszertanilag bizonytalannak minősült a hibalehetőségek miatt. Ezért a projektpartnerek beleegyezésével és kölcsönös egyetértésében az algaszerű bentoszok (fitobentoszok) elemzése kikerült a programból és helyette halökológiai kutatásokra került sor. Azonban különösen a belső nádas öv sekély, barna vizű területein a bentikus termelődés a rendszerbe történő biomaszra bevitel fontos eleme lehet. Így aztán nincsenek megállapításaink a későbbi fogyasztói láncra, a növényevő és ragadozó fenéklakó állatokra (rovarlárvákra, csigákra, kukacokra stb.) vonatkozólag, amik a bentikus halak táplálékforrásai.

(8) Mikrobiológia és nitrogén ciklus

A vízben elpusztult organizmusok, oldott szerves vegyületek és a külső forrásból származó szervesanyagok sorsa a tó anyagmérlegének központi kérdése. Állóvizekben szinte minden, az organizmusokban található anyag végül vissza kell, hogy kerüljön a vízbe és csak kis hányaduk rögzül az üledékben. Ez a visszatérés a vízbe főként mikrobiális degradáción keresztül zajlik, ami különböző mértékben és különböző stádiumokban mehet végbe. Az, hogy ebben mely baktériumok vesznek részt és hogy az oldott anyagok milyen mértékben integrálódnak újra az anyagkörforgásba szintén fontos szerepet játszik a rendszerfolyamatok megértésében. Míg a REBEN projektben átfogó tudásra tehetünk szert a foszformérleget illetően, a sokkal komplexebb nitrogén ciklust, amibe számos különböző módon avatkoznak be mikroorganizmusok, alig vizsgáltuk.

(9) Talajvízzel való kicserélődés

A Kárpát-medencében található szikes tavak és medencék magas $\text{Na-HCO}_3\text{-Cl}$ tartalmának elsődleges forrása a feláramló, mély, sós talajvízből származó kibocsátás, amit a párolgás még inkább fokoz. E hidrológiai hatás a Neusiedler See / Fertő tó vízmérlegére és kémiaiára jelenleg még nem ismert és jövőbeli kutatások tárgyát kell, hogy képezze egy hatékonyabb tógazdálkodás érdekében.

(10) Laterális kicserélődés a csatornák mentén

Egy jelentős hiányt képez a Neusiedler See / Fertő tóról szerzett ismereteinkben a csatornák és a velük határos nádas közti hidraulikus kapcsolat, konkrétan a kotrási üledékek hatása a felszíni áramlásokra a magyarországi csatornák menti vágatok hatékonysága, valamint az alsó talajréteg vezetőképessége. Annak érdekében, hogy távérzékeléssel csökkentsek a csatornafelmérések okozta kihívásokat, helyszíni adatokat (pl. jelzőanyag koncentráció) kell gyűjteni a kikotort csatornák kísérleti területein, alacsony és magas vízállásnál is.

(11) Párolgás

Továbbra is nagy a bizonytalanság a Neusiedler See / Fertő tó párolgási értéke körül és megbízhatóbb párolgási adatok hiányában a vízmérleg bármely elemzése is nagymértékben bizonytalan marad. Ajánlott továbbá a korábban alkalmazott párolgásszámítási módszer helyett a Penman-egyenlet használata, hiszen annak sikeressége Magyarországon, a Balaton és a Velencei-tó esetében már bebizonyosodott.

(12) Folyamatos megfigyelés

A nyílt víz – csatorna – nádas vízrendszerének további, hosszútávú vizsgálata szintén szükséges, különösen a kulcsfontosságú limnológiai tényezők és mutatók szempontjából, különböző hidrológiai és meteorológiai helyzetekben, annak érdekében, hogy egy megfelelő túkezelési és –helyreállítási stratégiát dolgozhassunk ki. A nádas öv magyar oldalán végzett csatornahelyreállítás hatását ugyanis csak alacsony-közepes vízszintnél érzékelhettük. Hasonlóképpen, a nádas öv hidraulikus modellje is csak a felmérés során észlelt alacsony vízszintekre érvényes. A folyamatos megfigyelés mellett helyszíni felmérések elvégzését is javasoljuk tartósan magas vízállás előfordulásának esetén.

7 IRODALOMJEGYZÉK

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

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

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

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

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

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

Brossmann, H., K. Burian, H. Dobesch, M. Dvorak, W. von der Emde, B. Grillitsch, H. Grillitsch, A. 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. Sieghardt, O. Hammer & G. Teuschl, 1986. Produktionsbiologische Untersuchungen an *Phragmites*-Beständen im geschlossenen Schilfgürtel des Neusiedler Seeer Sees. Wissenschaftliche Arbeiten aus dem Burgenland 72:189-221.

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

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

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

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

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

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

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

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

Szőke, E., 2016. A Tengermelléki káka (*Schoenoplectus litoralis* SCHRADER (PALLA)) Fertő tavi állományának változása. Nyugat-magyarországi Egyetem Erdőmérnöki kar Geomatikai, Erdőfeltárási és Vízgazdálkodási intézet.

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

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

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

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

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

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

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

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

Wolfram, G., L. Déri & S. Zech, 2014. Strategiestudie Neusiedler Seer 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 Seer See. Gutachten i.A. des BMLFUW und des Amts der Bgld. Landesregierung, Wien, 247 pp.

Wolfram, G., K. Donabaum & S. Hintermaier, 2007. Stoffbilanz Neusiedler Seer 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 Seer See 2004. Studie i.A. des Nationalparks Neusiedler Seer 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 Seer See. Österr Wasser- und Abfallw doi:doi.org/10.1007/s00506-019-00620-4.

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

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

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

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

Zessner, M., O. Gabriel, K. Schilling, M. Pannonhalmi, L. Sutheo, M. Kovács, I. Toth, A. Clement, T. Karches, F. Szilagyi, T. Kramer, J. Jozsa, G. Wolfram, K. Ruzicska & S. Hintermaier, 2012. Neusiedler Seeer See - Ökodynamische Rehabilitation. Betrachtungen zur Wasserqualität der Raab. Studie i.A. des Amts 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 Seeer 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.