



Modellering av vattenkvalitet i Nässjön: åtgärdsrekommendationer för minskad övergödning

Brian Huser, Sjörestauring Sverige AB



Foto framsida: Vy över Nässjön

Fotograf framsidebild: Daniel Larson

Utgiven av: Länsstyrelsen i Dalarnas län, 2023

Författare: Brian Huser, Sjörestaurering Sverige AB

Innehållsförteckning

| | |
|---|-----------|
| Modellering av vattenkvalitet i Nässjön: åtgärdsrekommendationer för minskad övergödning | 1 |
| Inledning | 3 |
| Modellering | 6 |
| Övervakning..... | 6 |
| Metoder..... | 8 |
| Kalibrering av modellen | 8 |
| Åtgärdsscenarioer..... | 10 |
| Resultat..... | 10 |
| Omätta källor | 13 |
| Åtgärdsscenarioer | 15 |
| Rekommenderade minskningar..... | 17 |
| Vad krävs för att nå vattenkvalitetsmålen? | 19 |
| Åtgärder | 22 |
| Åtgärder mot internbelastning | 22 |
| Åtgärder mot externbelastning | 22 |
| Applicering av stallgödsel | 22 |
| Plöjning | 22 |
| Skyddszoner | 23 |
| Sedimentationsdammar | 24 |
| Våtmarker | 24 |
| Andra möjliga lösningar | 25 |
| Förväntad fosforreduktion | 27 |
| Rekommendationer | 29 |
| Tidsplan | 29 |
| Referenser | 30 |

Inledning

Näringstillförsel till sjöar från omgivande landskap är en naturlig process. Ett accelererat förlopp av näringstillförsel orsakat av mänsklig aktivitet leder till högre produktion av alger och ökad vattengrumlighet. Det minskade siktdjupet missgynnar vattenlevande växter och skapar förutsättningar för förändringar i den allmänna artsammansättningen. En ökad växtplanktonproduktion kan uppträda säsongsmässigt med s.k. algbloomningar. När alger dör och ansamlas på sjöbottens sediment påbörjas nedbrytning som i sin tur förbrukar vattnets syre. Detta kan leda till syrefria bottenar med allvarliga konsekvenser för exempelvis bottenlevande djur och ökat fosforläckage (internbelastning) från sedimentet.

Nässjön uppvisar tydliga tecken på övergödning. Medelhalter av totalfosfor (28,4 µg/l uppmätt, 31 µg/l modellerat) och klorofyll/alger (24,5 µg/l uppmätt, 27,5 µg/l modellerat) bedöms vara otillfredsställande respektive dålig när det gäller status för övergödning. Totalfosfor i bottenvattnet nådde 161 µg/l under sommaren. Miljöövervakning har tidigare bedrivits i området, men endast genom enstaka provtagningar med syfte att bedöma sjöns status gällande övergödning. Regelbunden övervakning från vår till höst (vilket gjorts inom ramen för denna studie) krävs för att kunna modellera sjön och testa olika åtgärdsscenarioer.

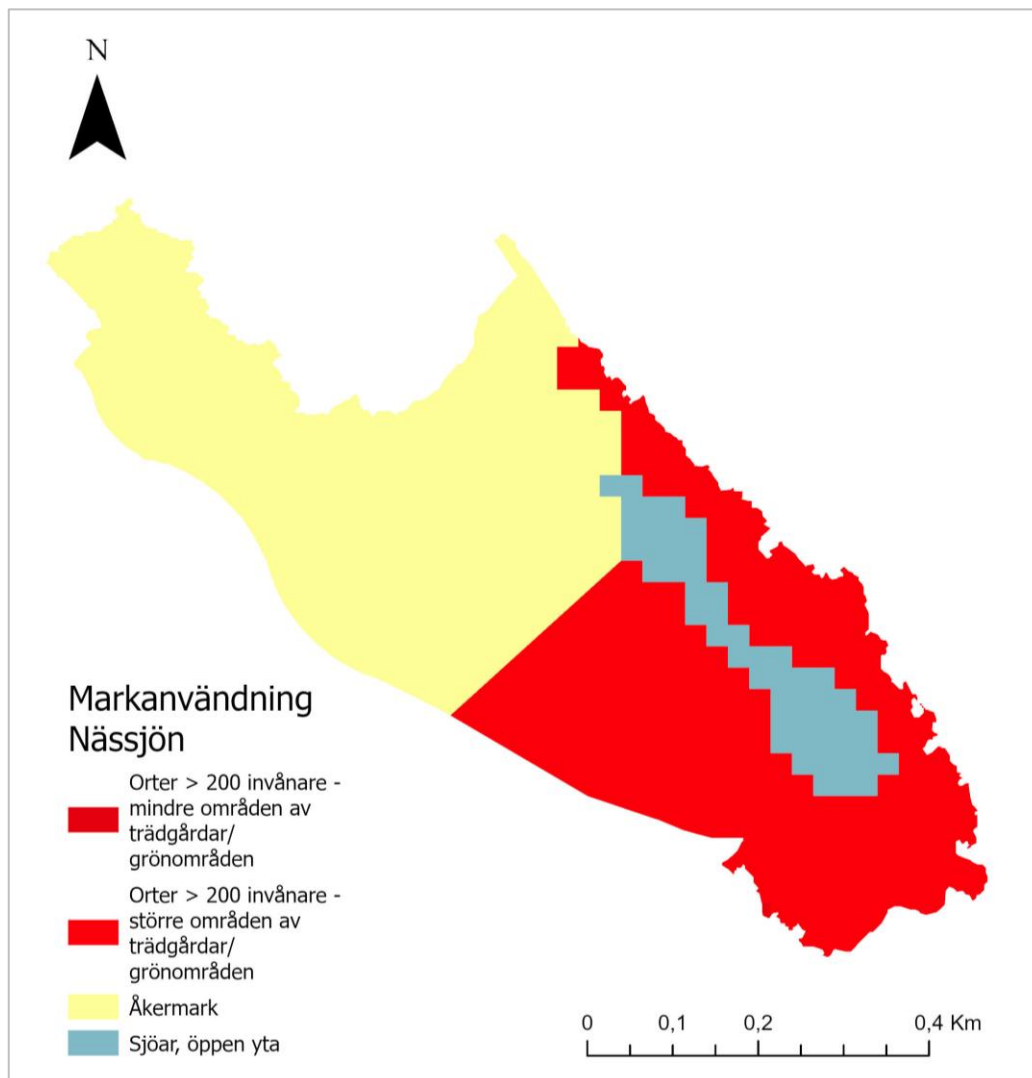
Höga halter av fosfor och syrgasbrist i bottenvattnet i Nässjön är tydliga tecken på förhöjd internbelastning av fosfor. Fosforhalterna i bottenvattnet tyder också på relativt hög risk gällande problem med internbelastning enligt nya riktlinjer för bedömning av svenska sjöar (Witter et al. 2022). Eftersom resultaten från modelleringen visar att den externa belastningen från omgivande mark kring sjön också är förhöjd, bedöms både intern- och externbelastning bidra till sjöns försämrade vattenkvalitet, även om externbelastning bidrog mest under 2021.

Nässjön ligger i Djurås, söder om Gagnef i Dalarnas län. Sjön är relativt liten till storleken (3,2 ha) har en förhöjd internbelastning av fosfor p.g.a. att sedimentet innehåller stora mängder läckagebenägen fosfor. Den är även dimiktisk, vilket innebär att den skiktas starkt under sommaren och fosforhalterna stiger och syrgashalten minskar ned till 0 mg/l i bottenvattnet (upp till ca 3 meters vattendjup). Avrinningsområdet har en yta på ca 38 ha där mindre tätorter och jordbruksmark dominerar markanvändningen (Figur 1, Tabell 1).

Tabell 1. Markanvändning i avrinningsområdet runt Nässjön.

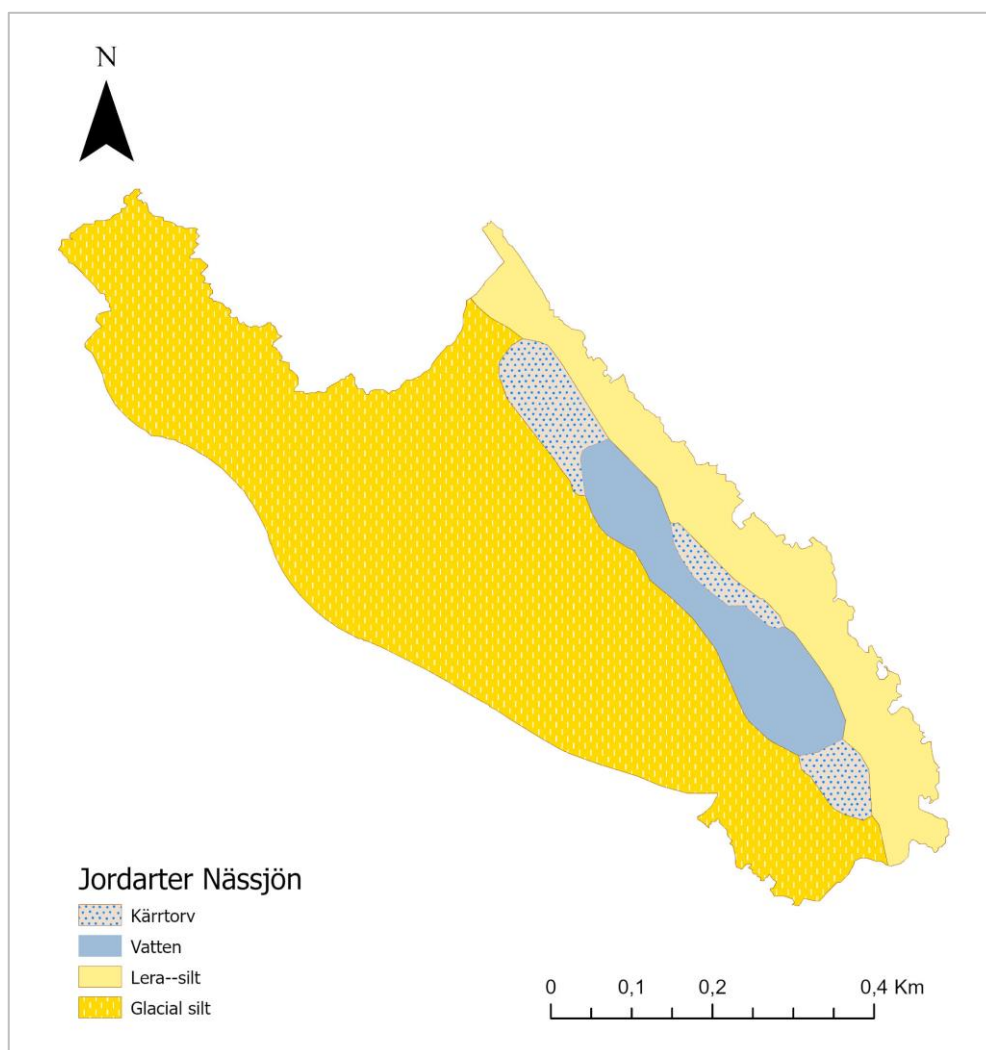
| Markanvändning | Area (ha) | Andel (%) |
|----------------------|-----------|-----------|
| Jordbruksmark | 19,0 | 50 |
| Småorter | 15,8 | 42 |

| Markanvändning | Area (ha) | Andel (%) |
|----------------|-----------|-----------|
| Vatten | 3,2 | 8 |



Figur 1. Karta över markanvändning inom Nässjöns avrinningsområde

Enligt SGU:s jordartskarta är den dominerande jordartsklassen i avrinningsområdet och närmast sjön glacial silt (Figur 2). En viktig egenskap hos sådana jordar är att de, på grund av svag kohesion, är benägna att erodera. Förluster av fosfor från åkermark har länge kopplats till erosionsproblematiken där ytavrinningen utpekats som den dominerande mekanismen för fosfortransport från mark till vatten.



Figur 2. Karta över jordarter inom Näs sjös avrinningsområde

Syftet med denna studie var att modellera vattenkvaliteten i sjön för att utvärdera olika åtgärdsscenarioer gällande reduktion av näringsämnen och övergödning i Näs sjö. Övervakningsdata från 2021 användes för att:

- Skapa och kalibrera en dynamisk sjömodell
- Beräkna källor av näringsämnen till sjöarna
- Simulera effekter av olika åtgärder på halter av näringsämnen och klorofyll

Med hjälp av dynamisk modellering kunde effekter av olika kombinationer av näringsämnesreduktion simuleras. Nödvändiga belastningsminskningar för att nå vattenkvalitetsmålen beräknades sedan. Rekommendationer för val och tillämpning av olika åtgärder föreslås.

Modellering

Övervakning

Provtagningar/mätningar i sjön utfördes en gång varje månad från vårcirkulation till höstcirkulation (april – oktober) under år 2021. Provtagning gjordes vid sjöns djupaste punkt (djuphållet, Figur 3). Mätningar av syrgas- och temperaturprofiler gjordes på metersintervall ned till botten vid varje provtagningstillfälle. Siktdjup mättes också vid varje provtagningstillfälle. Vattenkemiska prov hämtades från fyra olika djup beroende på hur syre- och temperaturprofilen såg ut i sjöarna vid provtagningstillfället.

En tryckmätare installerades i Nässjön för att mäta vattennivå med en datainhämtningsfrekvens på 60 minuters intervall. En pegel installerades på samma plats så att vattennivån också kunde avläsas av manuellt. Nivådata från tryckgivarna är en viktig del av modelleringen och användes för att beräkna sjövolym och kalibrera den hydrologiska delen av modellen.



Figur 3. Provtagningsstationer i Nässjön. Kartunderlag från Huser 2022.

Metoder

Modellen som användes för att simulera vattenkemi och hydrologi i sjöarna heter SDLEM (Shallow and Deep Lake Ecological Model). Modellen är en en-dimensionell, termodynamisk och hydrodynamisk modell kopplad till en ekologisk modell som kan simulera flöde, halter av näringsämnen (kväve och fosfor), ljusförhållanden, sjövolym, syrgas, vattentemperatur, växtplankton (alger), etc. med en simuleringsfrekvens av 60 minuter. Modellens indata inkluderar:

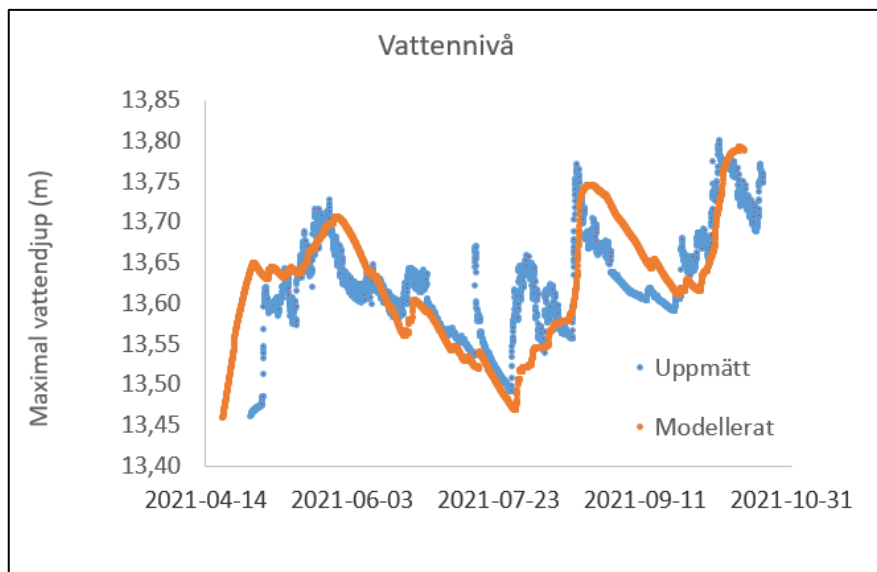
- Klimatdata (nederbörd, solljus, temperatur, etc.)
- Vattennivå
- In- och utflöden
- Fosforfraktioner i sedimentet
- Vattenkemi samt syrgas och temperaturprofiler i sjön

Med dessa data kan olika variabler modelleras såsom:

- Hydrologiska förhållanden (sjövolym, nederbörd, grundvatten)
- Internbelastning av fosfor
- Sedimentation av partiklar (inklusive fosfor)
- Omblandning av sjövattnet
- Näringsämnen (lösta och partikulära former)
- Växtplankton (klorofyll)

Kalibrering av modellen

Första steget i kalibreringen av modellen är att ta fram en vattenflödesbalans. Nederbörd och avdunstning beräknades. Sjönivåer användes för att beräkna sjövolymen och kalibrera den hydrologiska balansen (se exempel i Figur 4). Grundvatten beräknades som en restpost efter alla andra källor av vatten hade tagits hänsyn till.

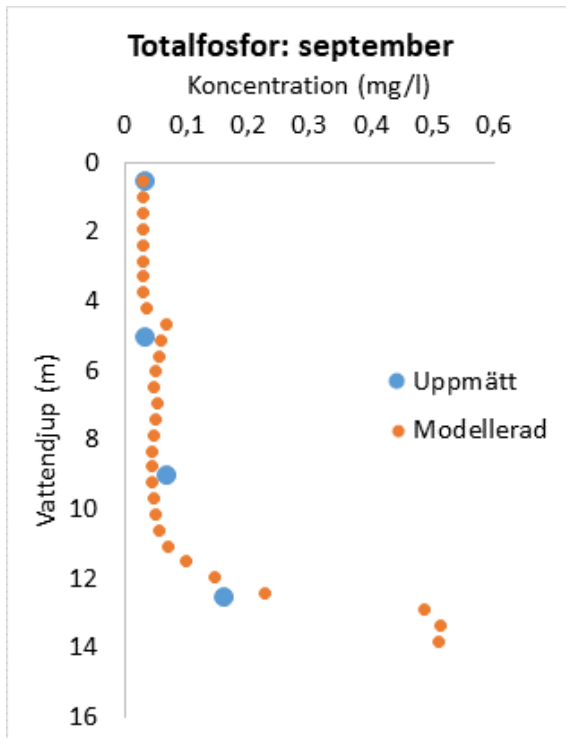


Figur 4. Kalibreringsresultat för vattennivå (t.ex. maximaldjup) i Nässjön.

Nästa steg i kalibreringen är att fastställa de initiala förutsättningarna gällande profiler för temperatur, syrgas, och näringsämnen samt klorofyll.

Externbelastning av näringsämnen modellerades med hjälp av klimat data och mängden internbelastning i sjön. Eftersom det inte finns något direkt inlopp till Nässjön och externbelastning mestadels kommer från lateralt flöde under markytan eller direkt / diffus avrinning från marken till sjön, var det inte möjligt att kalibrera den här delen av modellen mot uppmätta data. Den del av modellen som gjordes för internbelastning är dock mycket tillförlitlig (beräknad utifrån både vatten- och sedimentdata), vilket innebär att den externa belastningen kan räknas som en restpost. Det vill säga att övrig belastning (förutom den från internbelastning och nederbörd) kommer med stor säkerhet från externa källor.

Internbelastning beräknades och baserades på läckagebenägna former av fosfor i sedimentet (Huser 2022), syrgas (för att beräkna läckage av järnbunden fosfor) och temperatur (för att beräkna nedbrytning av organiskt material och frigörelse av organisk fosfor). Intern- och externbelastning av näringsämnen samt den hydrologiska vattenbalansen användes för att kalibrera modellen med uppmätta data för näringsämnen och klorofyll i sjön (se exempel i Figur 5).



Figur 5. Kalibreringsresultat för totalfosforhalter i Nässjöns vattenpelare (september).

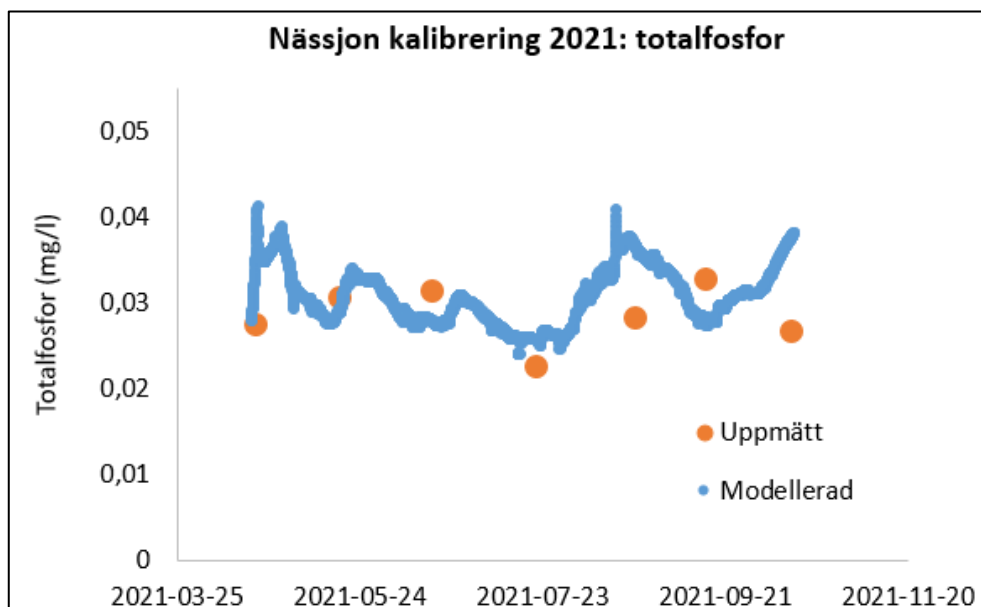
Åtgärdsscenarioer

Modellen som skapades med data från 2021 användes för att simulera effekterna av minskade näringshalter. Olika scenarier av belastningsminskningar testades med hjälp av den kalibrerade modellen för att bedöma effekter på näringshalter och klorofyll i sjöns ytvatten. Olika scenarier för reduktion av externbelastning tillämpades tillsammans med en 100 % reduktion av överskottet av internbelastning.

Resultat

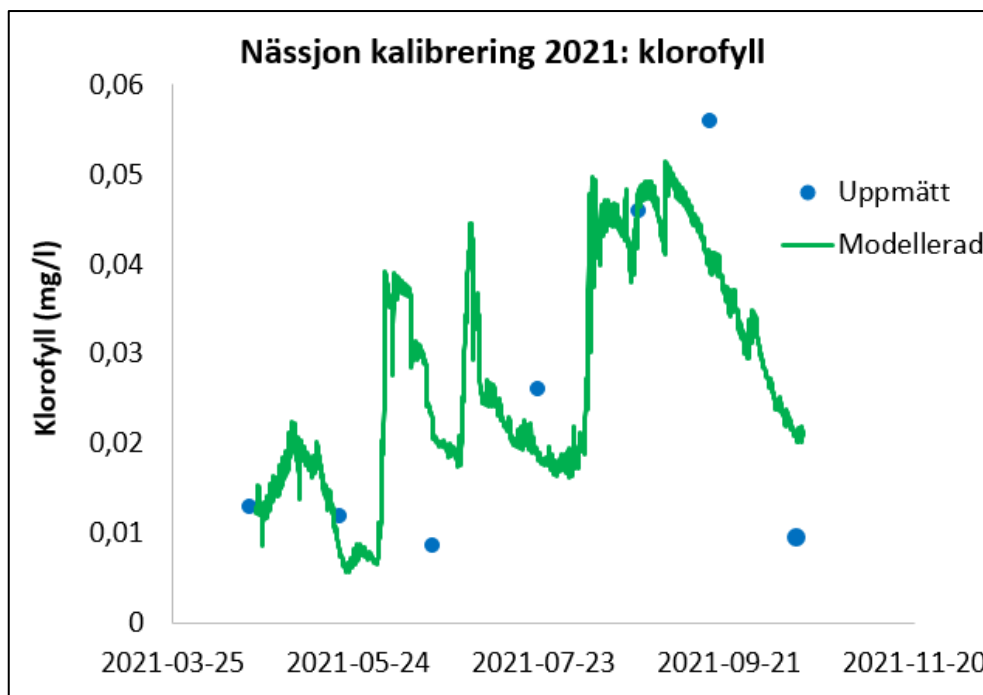
Kalibrering av modellen med uppmätta data för fosfor och klorofyll i Nässjön visas i Figur 6 och Figur 7. Fosforhalterna var något högre i ytvattnet under våren och tidig sommar, men började därefter minska under sommaren på grund av ökad sedimentation och lågt inflöde. Sedan steg halterna något under sensommar (Figur 6). Denna ökning beror delvis på internbelastning av fosfor från sedimentet (transport av den frigjorda fosfor från bottenvattnet till ytvattnet) men den huvudsakliga delen av fosfor som påverkade ytvattenhalterna kom från avrinningsområdet. Detta p.g.a. sjön

var mycket starkt skiktad under sommaren, vilket tyder på att även om brutto internbelastning var hög, nådde mindre än en tiondel av belastningen till ytvattnet under mätperioden år 2021.



Figur 6. Kalibreringsresultat för totalfosforhalter i Nässjön 2021.

Klorofyllhalterna varierade mycket under mätperioden. De ökade något under våren och tidig sommar, minskade under mitten av sommaren, och ökade igen under sensommaren och hösten (Figur 7). Detta var mest på grund av transport av fosfor från avrinningsområdet till sjön men också delvis på grund av internbelastning senare på sommaren.



Figur 7. Kalibreringsresultat för klorofyllhalter i Nässjön 2021.

Externbelastning av fosfor till Nässjön under modelleringsperioden (april-oktober) var 12,4 kg (Tabell 2). All extern fosforbelastning kom från det direkt anslutna avrinningsområdet, grundvatten (grunt), och nederbörd.

Tabell 2. Källor och sänkor av fosfor (kg) till Nässjön under kalibreringsåret 2021.

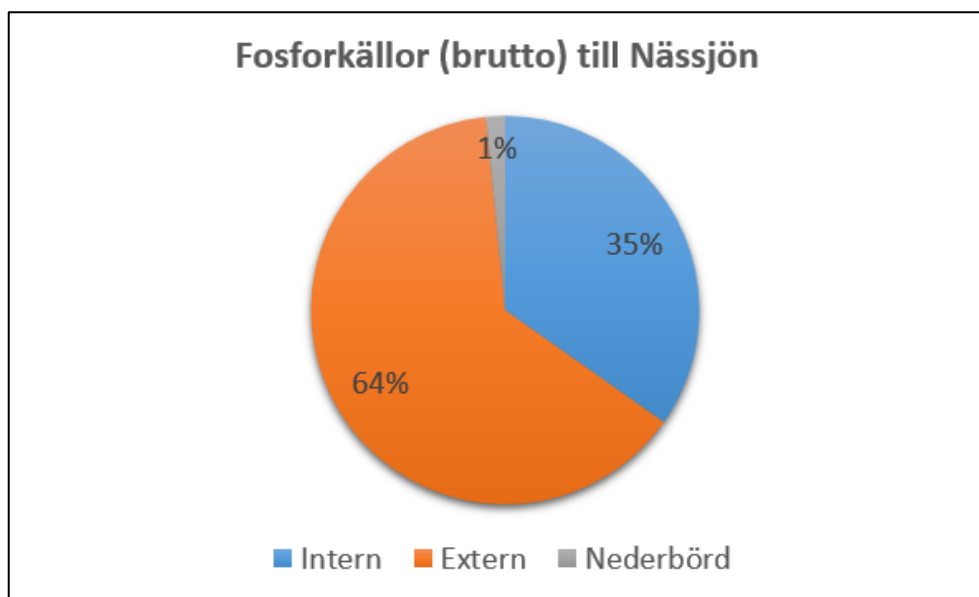
| Mätperiod | Källa - Extern belastning | Källa - Intern belastning (netto) | Sänka - Utlopp | Sänka - Sedimentation |
|--------------------|---------------------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------|
| April-oktober 2021 | 12,4 | 0,26 | 1,47 | 9,1 |

Brutto internbelastning, d.v.s. allt fosfor som frigjordes från sedimentet, var så hög som 35 % av den totala belastningen (Figur 8). Den mängd av internbelastningen som nådde ytvattnet under mätperioden var dock liten jämfört med den externa belastningen (netto internbelastning, Tabell 2 och 3). Skillnaden mellan brutto och netto internbelastning är så pass stor på grund av sjöns starka skiktning och att den sällan omblandas helt, vilket gör att den frigjorda fosfor stannar i bottenvattnet istället för att transporteras till ytvattnet.

Tabell 3. Internbelastning av fosfor (kg) till Nässjön under kalibreringsåret 2021 (april-oktober).

| Mätperiod | Brutto Internbelastning (kg) | Netto internbelastning (kg) |
|--------------------|------------------------------|-----------------------------|
| April-oktober 2021 | 6,7 | 0,26 |

Fördelning av fosforkällorna till sjön visas i Figur 8.



Figur 8. Fördelning av interna och externa fosforkällor till Nässjön, inklusive fosfor i nederbörd. Notera att internbelastning är den totala mängden (brutto) som frigjordes från sedimentet, inte den mängden som nådde ytvattnet under mätperioden (Tabell 3).

Omätta källor

Nästan allt vatten som når Nässjön kommer från grundvatten (ytligt eller djupt) eller direkt avrinning från marken runt sjön. Dessa potentiella källor/sänkor är mycket svårt att mäta, särskilt när det gäller halter av näringsämnen som faktiskt når recipienten. Det går inte heller att skilja mellan djupt och ytligt grundvatten. Eftersom dessa källor inte har kunnat mätas direkt och har beräknats som restposter, ökar osäkerheten av resultaten något. På grund av den omfattande provtagningen som gjordes i sjön (både i vatten och sediment) kan vi dock säkerställa mängden fosfor som frigjordes från sedimentet och påverkade ytvattnet. Detta betyder att resten av fosforbelastningen, förutom den från nederbörden, kommer från avrinningsområdet.

Koncentrationer av fosfor i djupgrundvatten var mellan 9,3 och 14 µg/l enligt data från mätstation Holtäpporna Rb0515 som ligger ca 8 km sydöst om sjön längs Övre Dalälven. Eftersom koncentrationerna vid den närmaste mätpunkten är så pass låga, är det troligt att flöde till och från det djupa grundvattenmagasinet funderar som en sänka i detta fall.

Ytligt grundvatten, eller lateralt flöde under markytan, rör sig när nederbörd faller på land, infiltrerar, och rinner genom jorden mot sjöar eller andra recipienter (Ehrhardt m.fl. 2022). Dräneringsrör, som förbättrar förhållanden i jordbruksmark, kan öka denna transport. Studier har visat att fosforhalterna i markvattnet ökar med ökande mängd fosforberikat gödsel och kan nå > 9 mg/l (9000 µg/l) (t.ex. Curley m.fl. 2010).

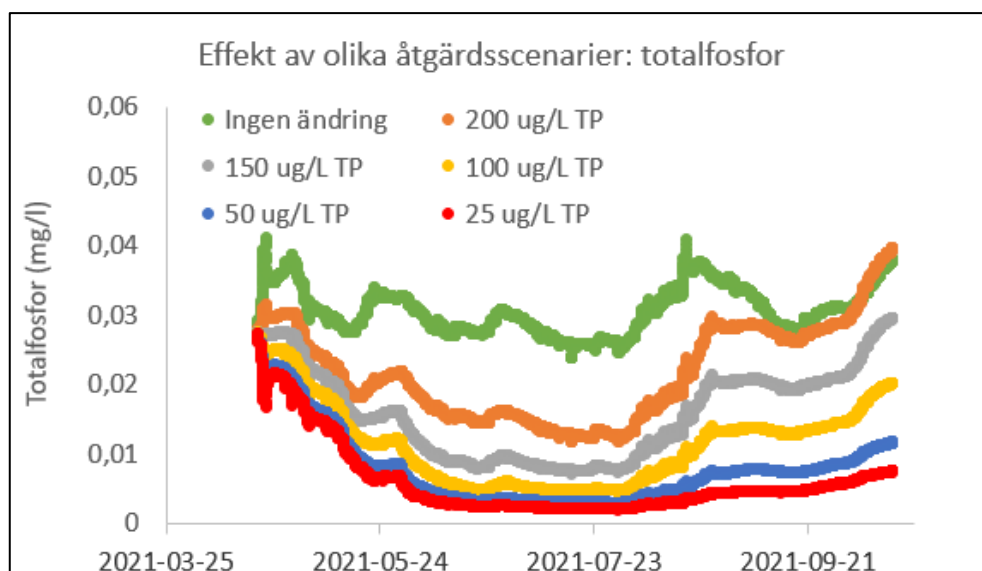
Direkt avrinning från markytor, hustak, och andra bebyggda ytor kan också vara en källa av näringsämnen till sjön, särskilt från ytor som ligger i direkt anslutning till sjön eller om vattnet rinner genom dagvattenrör. Om konstgjorda gräsmattor gödslas ökar givetvis avrinning av fosfor betydligt, särskilt på branta ytor, men även gräsmattor som inte gödslas kan påverka fosforhalter i avrinning till sjöar. Medelhalter av fosfat- och totalfosfor i avrinning från ogödslade gräsmattor har visats nå 430 µg/l respektive 2330 µg/l (Garn 2002).

Medelhalten av fosfor i vattnet som nådde Nässjön under 2021 var 229 µg/l vilket alltså är en kombination av direkt avrinning och lateralt flöde under markytan från bebyggda områden runt sjön, öppen mark, och jordbruksmark.

Åtgärdsscenarioer

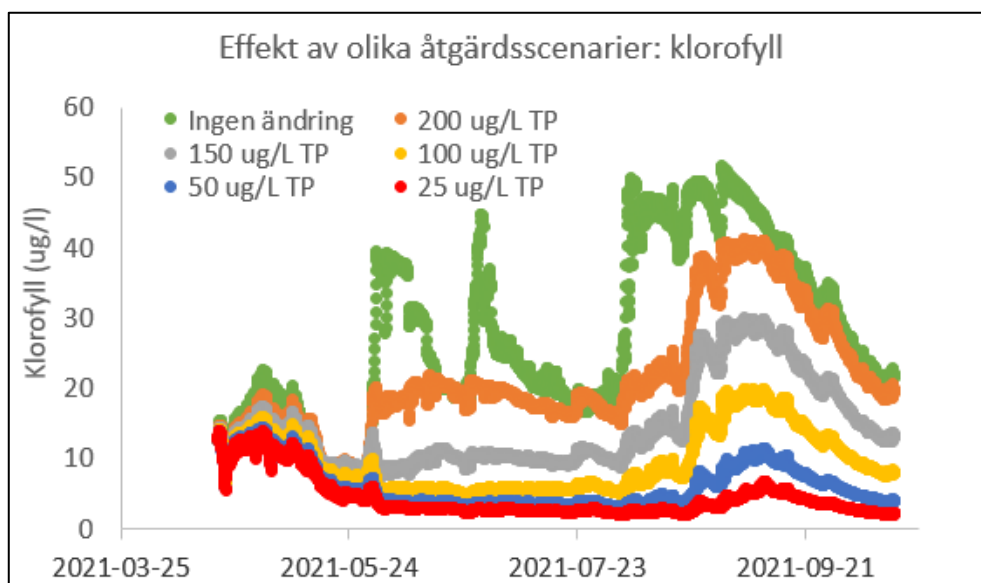
För att beräkna hur mycket fosforhalterna behöver minska för att vattenkvalitetsmålen ska kunna nås tillämpades den kalibrerade modellen i olika scenarier där fosforbidraget från externbelastning minskades i olika grad och internbelastning minskade med 100 %.

En reducerad externbelastning förväntas ge god effekt på totalfosforhalterna i ytvattnet i Nässjön (Figur 9). Medelhalten av fosfor i ytvattnet förväntas minska från 31 µg/l innan åtgärder (ingen ändring) till 6 µg/l med en minskning av den flödesviktade totalfosforhalten i tillrinnande vatten från 229 µg/l till 25 µg/l (Figur 9). 6 µg/l skulle ge hög status (gränsen = 9,4 µg/l) med god marginal.



Figur 9. Effekt av minskad externbelastning på totalfosforhalter i Nässjön baserat på data från 2021.

En reducerad extern belastning hade liknande effekt på klorofyllhalterna, som enligt modellen förväntas minska från 27,5 till 4,2 µg/l med en minskning av totalfosforhalten i tillrinnande vatten från 229 µg/l till 25 µg/l (Figur 10). 4,2 µg/l är en lägre halt än gränsen mellan god och måttlig status (4,8 µg/l), och sjön skulle således bedömas ha god status gällande klorofyllhalter.



Figur 10. Effekt av minskad externbelastning på klorofyllhalter i Nässjön baserat på data från 2021.

En minskad externbelastning av fosfor skulle kunna fungera som enskild åtgärd enligt data från 2021. Även om den interna belastningen (brutto) är relativt stor (6,7 kg), är mängden som nådde ytvattnet under mätperioden liten (0,26 kg). Detta betyder dock inte att internbelastning är oviktig, tvärtom kan den vara en betydande källa under år där vattenpelaren omblandas mer eller oftare.

Medelhalter av fosfor i ytvattnet samt andelen tid av den totala mätperioden då fosforhalterna beräknas överstiga gränsvärdena för antingen god (13,2 µg/l) eller hög (9,4 µg/l) status efter olika alternativa belastningsminskningar presenteras i Tabell 4. Till exempel skulle enligt modellen en minskning av fosforhalten i tillrinnande vatten till 50 µg/l och en samtidig 100 % minskning av internbelastning resultera i hög fosforstatus (baserat på medelhalt).

Tabell 4. Medelhalter av totalfosfor och andel tid av totala mätperioden då halterna överstiger 9,4 µg/l (hög status) och 13,2 µg/l (god status) i Nässjön innan och efter olika kombinationer av åtgärder.

| Scenarier | Totalfosfor (µg/l) | Andel >9,4 µg/l (%) | Andel >13,2 µg/l (%) |
|-----------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| Ingen ändring | 31 | 100 | 100 |
| 200 µg/L extern 100% intern | 22 | 100 | 88 |
| 150 µg/L extern 100% intern | 16 | 71 | 57 |
| 100 µg/L extern 100% intern | 11 | 56 | 36 |
| 50 µg/L extern 100% intern | 8 | 21 | 13 |

| Scenarier | Totalfosfor (µg/l) | Andel >9,4 µg/l (%) | Andel >13,2 µg/l (%) |
|----------------------------|--------------------|---------------------|----------------------|
| 25 µg/L extern 100% intern | 6 | 15 | 12 |

Enligt modellen lät bara en kombination av åtgärder sjön nå god status med avseende på klorofyllhalter (Tabell 5). Föreslagna minskningar avser totalfosforhalter, men om åtgärder som fokuserar på att minska tillgången på biotillgänglig fosfor genomförs kommer detta ha en större effekt på klorofyllhalterna jämfört med vad som redovisas i Tabell 5.

Tabell 5. Medelhalter av klorofyll och andel tid av totala mätperioden då halterna överstiger 2,4 µg/l (hög status) eller 4,8 µg/l (god status) i Nässjön innan och efter olika kombinationer av åtgärder.

| Scenarier | Klorofyll (µg/l) | Andel >2,4 µg/l (%) | Andel >4,8 µg/l (%) |
|-----------------------------|------------------|---------------------|---------------------|
| Ingen ändring | 27,5 | 100 | 100 |
| 200 µg/L extern 100% intern | 21,3 | 100 | 100 |
| 150 µg/L extern 100% intern | 14,3 | 100 | 100 |
| 100 µg/L extern 100% intern | 9,4 | 100 | 98 |
| 50 µg/L extern 100% intern | 5,9 | 100 | 48 |
| 25 µg/L extern 100% intern | 4,2 | 74 | 27 |

Rekommenderade minskningar

En rekommenderad minskning av medelfosforhalten i tillrinnande vatten till 50 µg/l och en åtgärdad internbelastning (100 % av överskottet) motsvarar en minskning av intern- och externbelastning med ca 6,6 kg (0,2 kg netto) respektive 9,4 kg. En minskning av externbelastning från 12,4 till 3,1 kg) är en ~75 % minskning. Enligt modellen kommer klorofyllhalten vara något över gränsen för god status med en sådan minskning av externbelastningen, men det bör vara ett första mål för att se hur sjön påverkas av åtgärderna. Därefter kan arbetet med internbelastning påbörjas. På så sätt minimeras risken för att ett nytt, fosforrikt sediment bildas och att internbelastningen återkommer efter att den har åtgärdats.

Transporten av fosfor ut ur sjön till grundvatten förväntas minska (Tabell 6). Även sedimentationen av fosfor i sjön skulle minska med nästan 50 %, vilket innebär en mer naturlig nivå av ackumulering av sediment på sjöbotten.

Tabell 6. Källor och sänkor av fosfor till Nässjön under kalibreringsåret 2021 och efter åtgärder.

| Scenarier | Källa - Extern belastning | Källa - Intern belastning | Sänka - Utlopp | Sänka - Sedimentation |
|------------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------|-----------------------|
| Kalibrering 2021 (kg) | 12,4 | 0,3 | 1,5 | 9,1 |
| Åtgärdsscenario (kg) | 3,1 | 0,1 | 0,4 | 4,5 |

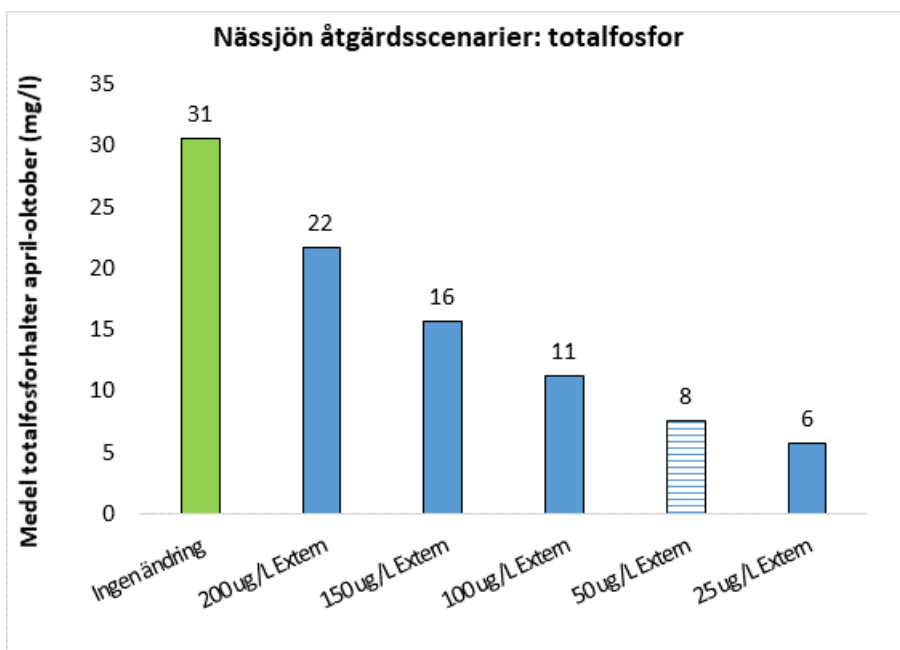
Vad krävs för att nå vattenkvalitetsmålen?

Rekommendationer för belastningsminskningar från olika fosforkällor baseras på referensvärden för fosfor- och klorofyllhalter i sjön. Enligt data från 2021 har Nässjön otillfredsställande eller dålig status gällande fosfor respektive klorofyll.

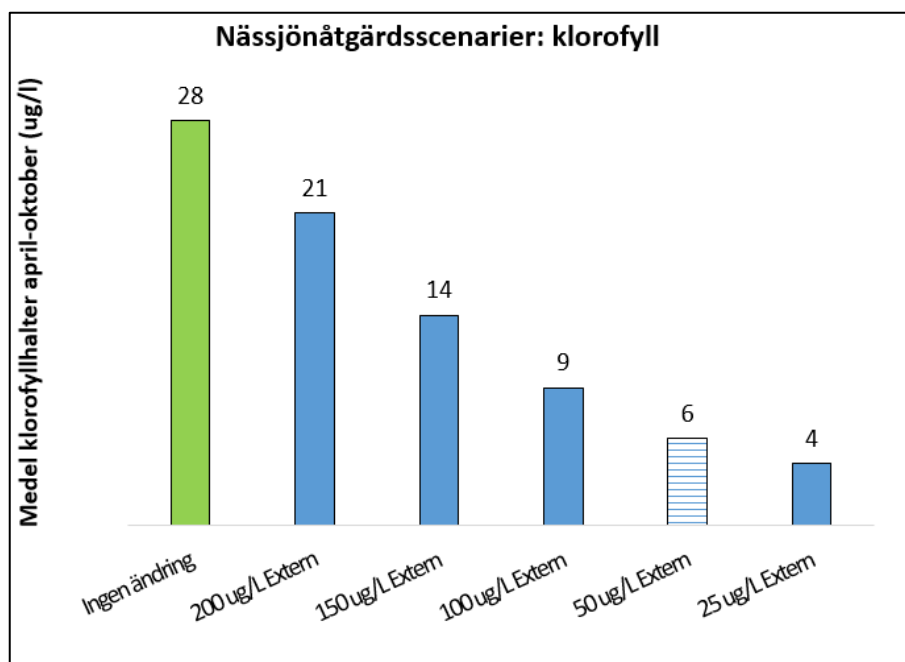
Eftersom både intern- och externbelastning ofta är förhöjda i övergödda sjöar är det viktigt att övervaka vattenkvaliteten i både sjön och eventuella inlopp från våren (efter islossning) till hösten (innan sjön fryser). Denna period ger bäst möjlighet att jämföra den relativa betydelsen av dessa två källor. Hänsyn måste också tas till externa källor som påverkar sjön från hösten till våren. Övervakning från senvåren till tidig höst ger dock en bra indikation av hur stora minskningar som krävs, även om externbelastningen givetvis fortsätter under andra perioder när internbelastningen är liten eller noll. Därför presenterar vi minskningar i enheten kg för modelleringsperioden och en medelhalt av fosfor i tillrinnande vatten som gäller under hela året. På det sättet kan mängden fosfor övervakas efter tillämpning av åtgärder under samma period som användes för att skapa modellen. Målet för medelkoncentrationen av totalfosfor i tillrinnande vatten kan användas för att säkerställa att åtgärder mot externbelastning fungerar under hela året.

Under 2021 var medelhalten av totalfosfor i Nässjön 28,4 µg/l (31 µg/l modellerat), d.v.s. strax under 32 µg/l vilket är gränsen mellan otillfredsställande och dålig status (Figur 11). Medelkoncentrationen av klorofyll var 24,5 µg/l, vilket är över gränsen för dålig status (19 µg/l), d.v.s. > 19 µg/l ger dålig status (Figur 12).

Även om internbelastning av fosfor påverkade ytvattnet i Nässjön en relativt liten del av året (2021), rekommenderas en reduktion av både extern- och internbelastning med 75 % respektive 100 % för att nå minst god status gällande övergödning i Nässjön under kommande år. Denna kombination kommer att ge hög status gällande fosforhalter i sjön (Figur 11) och minska klorofyllhalterna till en nivå som nästan når god status (Figur 12).



Figur 11. Totalfosforhalter under mätperioden år 2021 (april - oktober) och efter olika åtgärdsscenarier i Nässjön. Rekommenderat åtgärdsscenario är 100 % minskning av förhöjd internbelastning och en minskning av fosforhalten i tillrinnande vatten till 50 µg/l (stapel med horisontella linjer).



Figur 12. Medelvärde av klorofyllhalter under mätperioden år 2021 (april - oktober) och efter olika åtgärdsscenarier i Nässjön. Rekommenderat åtgärdsscenario är 100 % minskning av förhöjd internbelastning och en minskning av fosforhalten i tillrinnande vatten till 50 µg/l (stapel med horisontella linjer).

Det ska noteras att olika väderförhållanden i framtiden kan leda till en förhöjd, negativ effekt av internbelastning på vattenkvaliteten i sjön. Medan en del av fosfor som når sjön från avrinningsområdet inte är tillgängligt för tillväxt av alger, är de formerna som läcker från sedimenten 100 % biotillgänglig, d.v.s. alger kan använda den omedelbart när den når ytvattnet.

Om den förhöjda internbelastningen åtgärdas förväntas bruttobelastningen från sedimentet att minska från 6,7 kg till 0,1 kg fosfor under mätperioden (april till oktober). En ytterligare ca 75 % reduktion av externbelastningen skulle göra att den totala belastningen minskar från 19 kg till 3,5 kg (inklusive nederbörd).

Åtgärder

Det finns en rad olika åtgärder som kan tillämpas för att minska interna och externa källor av fosfor. Majoriteten av möjliga åtgärder presenteras nedan.

Åtgärder mot internbelastning

Vilka åtgärder som är lämpliga mot internbelastning i Nässjön har tidigare utretts. I korthet är rekommendationen att gå vidare med en behandling av sedimenten med fosforbindande mineral. I det här fallet rekommenderas att man använder sig av dricksvattenreningsrester, på grund av sjöns relativt låg alkalinitet och pH (Huser 2022).

Åtgärder mot externbelastning

Precis som åtgärder mot internbelastning finns det olika metoder för att minska transport av fosfor från avrinningsområdet till sjöar. De mest frekvent använda metoderna för att minska transport av fosfor från avrinningsområdet till sjöar är skyddszoner, plöjning när infiltrationskapacitet av marken är högst, sedimentationsbassänger, och våtmarker. Det finns dock andra, mer innovativa lösningar, som också kan tillämpas.

Applicering av stallgödsel

Spridning av stallgödsel då marken är tjälad eller mättad av vatten ökar fosforförluster eftersom jorden har dålig infiltrationskapacitet under sådana förhållanden. Därför bör spridning undvikas under blöta förhållanden. Om marken dessutom fryser blir den ogenomtränglig för vatten vilket gör att smältvatten eller regn som faller under vintern ofta ger ytavrinning. Därför bör tidpunkten för gödslings och jordbearbetning väljas så att hög avrinning undviks under ett par månader efteråt (Komiskey et al. 2011).

Plöjning

Denna åtgärd handlar om att bearbeta jordbruksmark när infiltrationskapaciteten är högst. Det skulle t.ex. kunna innebära att höstplöjning byts mot vårplöjning om plöjning görs efter tjällossning och då ytvattenavrinningen avtagit så att infiltrationskapaciteten är högre (Spännar 2008). En hög infiltrationskapacitet i marken leder generellt till minskade fosforförluster från jordbruksmark samtidigt som ytavrinningen avtar (Bergström et al. 2007). För att förbättra markens infiltrationskapacitet kan olika jordbearbetningsåtgärder användas. Vid vårbearbetning ligger

skörderester kvar på fältet under vintern och växande eller pålagt växtmaterial på markytan kan minska erosion och fosforförluster jämfört med om det är barmark (Persson, 1999).

En annan strategi inom jordbearbetningen för att minska fosforförlusterna är att bearbeta marken längs med höjdkurvorna, s.k. konturplöjning. Konturplöjning minskar vattenflödets hastighet genom att undvika att vattenfårar bildas längs med sluttningen. Vattnet stannar kvar längre på fältet vilket möjliggör ökad infiltration och minskad erosion och transport av näringsämnen till närliggande vattenförekomster.

Strukturkalkning är ett till sätt att minska fosforläckage från åkermark. Kalkning med strukturkalk förbättrar markstrukturen, vilket förbättrar markens vatten- och näringshållande. Denna åtgärd fungerar bäst på lerjordar.

Det är oklart om dessa åtgärder skulle minska fosforförluster till markvattnet och horisontell transport av markvattnet till sjön. De ökar infiltration av vattnet vertikalt, men det är möjligt att vattnet når sjön ändå under markytan.

Skydds zoner

Skydds zoner innebär en obrukad zon av åkermark och betesmark nära vattendrag/diken och naturliga växter vid sjöstranden där vatten kan rinna direkt till sjön. Det är en möjlig lösning som tar jämförbart liten plats och ger en ganska stor effekt. Skydds zoner är ytor i anslutning till sjöar och vattendrag där marken är vegetationsbevuxen året om. I skydds zonen får varken markbearbetning, gödsling eller ogräsbekämpning ske för att undvika utsläpp i recipienten. Det har tidigare visats att anläggning av skydds zoner som en åtgärd påtagligt minskar tillförsel av näringsämnen från jordbrukslandskapet och andra områden (t.ex. Leinweber et al. 2002).

Skydds zoner har även andra fördelar. De utgör en fredad zon för insekter som bin och ökar därför den biologiska mångfalden i odlingslandskapet. De mekanismer som styr fosforretentionen i skydds zonerna inkluderar sedimentation, ökad infiltration, och upptag av fosfor och kväve av vegetationen. Effektiviteten av skydds zoner styrs av zonens bredd. Fosfortransporten reducerades med ca 30 % med en 2 m bred skydds zon. Om skydds zonen ökas till 15 m kan transporten av fosfor reduceras med 89 % (Abu-Zreig et al. 2003). Som med alla andra åtgärder är det viktigt att skydds zonerna tas hand om ordentligt. De måste t.ex. skördas så att växtmaterialet, som kan brytas ned och frigöra näringsämnen, inte ligger kvar under vintern.

Skydds zoner kan vara viktiga att etablera runt Nässjön eftersom det inte finns några direkta inlopp till sjön.

Sedimentationsdammar

Sedimentationsdammar minskar vattenflödet, vilket möjliggör sedimentation av partiklar som innehåller näringsämnen såsom fosfor och kväve. Denna lösning rekommenderas inte som enskild åtgärd på grund av att dammar är ineffektiva när det gäller minskning av biotillgänglig fosfor. De kan dessutom bli en källa av löst fosfor under sommaren. Detta eftersom partiklar och organiskt material ackumuleras i en grund damm där temperaturen kan stiga kraftigt under sommaren. Detta leder sin tur till en snabbt ökande nedbrytning av organiskt material och sänkning av syrgashalten i vattnet, vilket gör att fosfor kan frigöras från både organiskt material och järnmineraller. Sedimentationsdammar som enskild åtgärd kan alltså öka biotillgängligheten av fosfor på lång sikt. De kan dock skydda och förbättra reningen av andra åtgärder såsom våtmarker och filter (se nedan).

Våtmarker

Våtmarker minskar fosforbelastningen genom sedimentation av partiklar (p.g.a. minskad vattenflödeshastighet) och upptagning av löst fosfor (och kväve) av vattenväxter och växtplankton. För att uppnå tillräcklig näringsreduktion måste våtmarken ha en stor volym i relation till det tillrinnande vattnet. Effektiviteten gällande fosforreduktion är mellan 25–50 %.

Sedan 1800-talet har utdikning genomförts i Sverige som har orsakat stora förluster av våtmarker i landskapet. Detta i sin tur har lett till ökade näringsförluster från marken. Genom att återskapa våtmarker får vattnet stanna längre i landskapet vilket ökar möjligheterna för naturens processer att rena vattnet från näringsämnen.

Idag görs det stora ekonomiska satsningar på anläggning av våtmarker i Sverige med huvudsyfte att minska läckaget av kväve från jordbruksmark. Dock kan anläggning av strategiskt placerade och utformade våtmarker även bidra till en begränsning av fosforförlusterna från jordbruksmark (Braskerud et al. 2005). Den viktigaste reningsmekanismen för fosfor i våtmarker är sedimentation av partikulärt bunden fosfor och upptag av biotillgänglig fosfor av makrofyter och alger. Vid anläggande av fosforreducerande våtmarker bör därför en konstruktion som gynnar sedimentation och motverkar resuspension eftersträvas. Sedimentation gynnas då våtmarken har en stor volym i relation till tillflödande vattenvolym och resuspension kan delvis förhindras genom stabiliserande vegetation samt en eller flera djuphålur (Kynkäänniemi 2013).

Andra möjliga lösningar

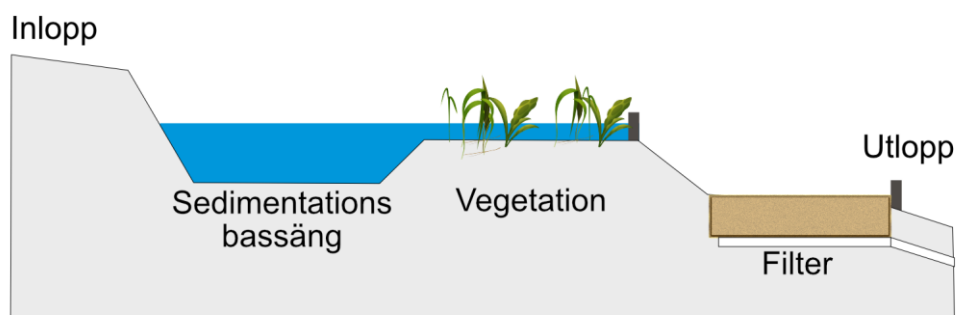
Eftersom stora belastningsminskningar krävs för Nässjön (relativt till storleken av sjön) blir det svårt att nå målen endast med de åtgärderna som nämns ovan. Dessutom kan våtmarker ta mycket plats beroende på inflödet och graden av rening som behövs. Ett annat problem är att avrinning från jordbruksmark ofta innehåller partiklar som inte sedimenterar nog fort, såsom lera. Det kan innebära att effekten av dammar och mindre våtmarker blir lägre än förväntat och att fosforbelastningen inte minskas tillräckligt. Som nämnts ovan kan dammar till och med bidra till ökade halter av biotillgänglig fosfor under sommaren om de används utan att tillämpa andra kompletterande åtgärder. Detta p.g.a. att dammar samlar partiklar och organiskt material under hela den isfria perioden av året. Eftersom de är grunda, ökar temperaturen på botten kraftigt under sommaren, vilket leder till en ökad nedbrytning av organiskt material och syrgasförbrukning jämfört med sjöar. Då produceras löst fosfor genom nedbrytning av organiskt material och det sker samtidigt en frigörelse av fosfor från järn, särskilt under natten när alger använder syrgas istället för att producera den. Mängden fosfor som lämnar sådana åtgärder kan alltså bli högre jämfört med den mängd som rinner till dem, vilket leder till en ökning av fosfortransport till sjön under sådana perioder (Huser et al. 2016).

En alternativ lösning är att förändra våtmarkskonceptet med tillägg som både kan hjälpa till med fällning av partiklar och reduktion av löst och partikulär fosfor. Istället för en enskild sedimentationsdamm eller stor våtmark, kan en damm anläggas i anslutning till en mindre våtmark för att maximera sedimentationen (tät vegetation lugnar vattenflödet och ökar sedimentationen). I tillägg kan ett sandfilter med ca 5 % järnpartiklar eller annan form av fosforbindande mineral installeras (Figur 13). Dessa filter behandlar en större mängd vatten, tar mindre plats och minskar fosforhalterna i högre grad jämfört med våtmarker.



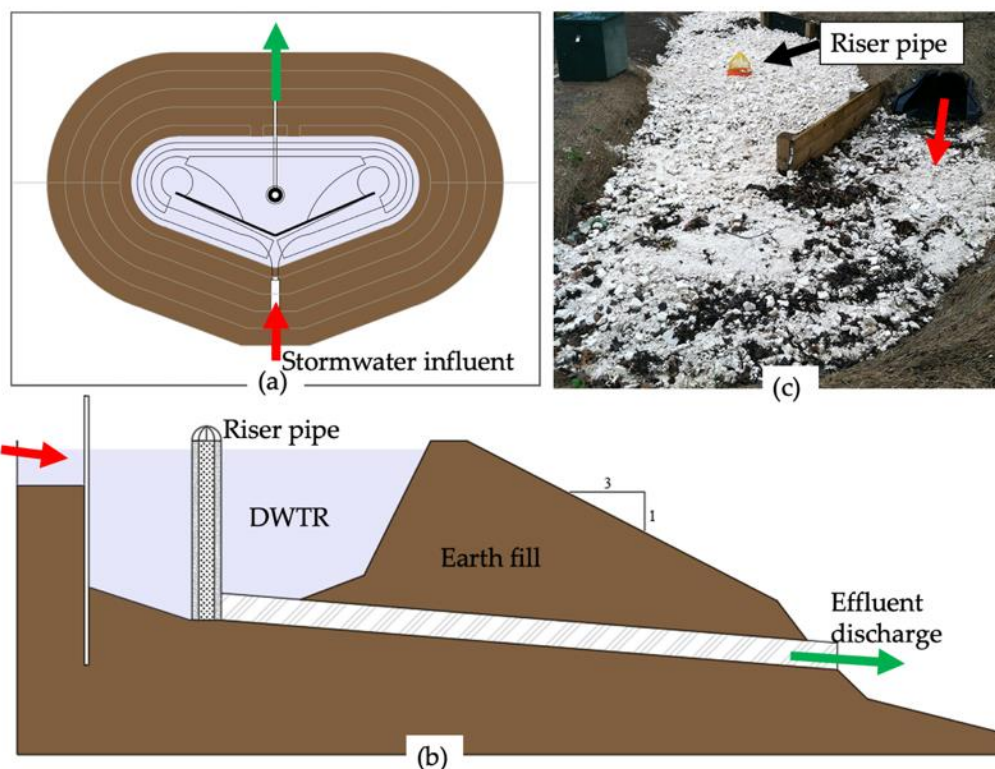
Figur 13. Ett sandfilter med tillsatt järn (5%) under uppbyggnad i St. Paul, Minnesota (USA). Bild av Brian Huser 2007.

En enkel konceptuell figur som visar kombinationen av en damm, våtmark/vegetationszon, och sandfilter visas i Figur 14. Denna åtgärd förväntas att minska fosforhalter (både löst och partikulärfosfor) i behandlade vattnet med 70-80 %.



Figur 14. Konceptuell figur som visar en kombination av sedimentationsdamm, vegetationszon/våtmark, och sandfilter.

Filter med mineraler från dricksvattenreningsrester kan också tillämpas (Kuster et al. 2021a,b). Filtret som visas i Figur 15 gav en 70 % minskning av total och löst fosfor och minskade även halterna av tungmetaller i dagvattnet. En ytterligare minskning av fosfor kan förväntas om en sedimentationsdamm eller våtmark anläggs uppströms filtret.



Figur 15. Designbild som visar principiell utformning av en DWTR filter. Bild a och b visar utformning och de röda pilarna visar inflödet medan de gröna visar utflödet. Bild c visar filtret i verkligheten. Från Kuster et al. 2022.

Oavsett vilka åtgärder som slutligen tillämpas bör de väljas med åtanke på reduktion av både fosfor och kväve. Vidare bör åtgärder som minskar lösta/biotillgängliga former av näringsämnen prioriteras.

Förväntad fosforreduktion

Förväntad fosforreduktion av de rekommenderade åtgärderna visas i Tabell 7. För de åtgärder där det var möjligt att beräkna fosforreduktion i kilo har det gjorts, annars anges en procentuell fosforreduktion i vattnet.

Tabell 7. Förväntad fosforreduktion av rekommenderade åtgärder i Nässjön.

| Åtgärder | Belastning | Reduktion (kg) | Reduktion (%) |
|--------------|------------|----------------|---------------|
| Skydds-zoner | Extern | - | 31-89 |

| Åtgärder | Belastning | Reduktion (kg) | Reduktion (%) |
|---------------------------------|-----------------|----------------|---------------|
| Våtmarker | Extern | - | 25-50 |
| Alternativa plöjningsstrategier | Extern | - | 30 |
| Kombination damm-våtmark-filter | Extern | - | 70-80 |
| Sedimentbehandling | Intern (brutto) | 6,6 | 98 |

Rekommendationer

Fokus på reduktion av externbelastning måste prioriteras vid Nässjön innan internbelastningen kan åtgärdas. Annars är risken stor att de interna åtgärder som görs slutar fungera inom några få år. Detta på grund av ansamling av nytt fosforrikt sediment från externa källor och en återgång till förhöjd internbelastning.

Flödesviktade halter i tillrinnande vatten behöver minskas från 229 µg/l till minst 50 µg/l innan åtgärder mot internbelastning kan börja tillämpas. Sedan bör man fortsätta arbeta med att få ned externbelastningen av fosfor till 25 µg/l om klorofyllhalterna är fortfarande för höga.

Tidsplan

Restaurering av sjöar är en process där storleken av källor av näringsämnen först behöver beräknas och områden och processer som bidrar till ökade fosforhalter i sjön behöver identifieras. Dessa delar är nu klara för Nässjön, d.v.s. storleken av fosforkällorna har beräknats och åtgärdsanalyser har genomförts för att bedöma vilken effekt alternativa minskningar av näringsbelastning skulle ha på vattenkvaliteten i sjön. Sista delen är utformning och tillämpning av åtgärder.

När det gäller internbelastning av fosfor finns det tillräckligt mycket sedimentdata för att kunna utforma den åtgärd som väljs. Gällande minskning av den externa belastningen krävs det ytterligare undersökningar av avrinningsområdet och identifiering av platser där åtgärder bäst placeras för att minska fosfortransporten till Nässjön på ett hållbart och kostnadseffektivt sätt. Mängden fosfor som behöver minskas har beräknats, men var och hur detta ska göras på ett så optimalt sätt som möjligt behöver redas ut innan åtgärder kan tillämpas.

En förändring av markanvändningen i avrinningsområdet lägger stor vikt på samarbete med markägare. På grund av de nuvarande höga halterna av fosfor som uppmätts i sjön kan det komma att behövas en kombination av naturliga och tekniskt baserade åtgärder för att nå målen. I första hand bör man jobba med att få till stånd förändringar av markanvändningen för att minska belastningen (t.ex. från jordbruket och strandnära tomter). Genomförda åtgärders effekt på vattenkvaliteten behöver därefter följas upp med provtagningar för att avgöra om belastningsminskningen är tillräcklig för att kunna gå vidare med åtgärder mot läckaget från sedimentet. Är belastningsminskningen inte tillräcklig kan de lokala förutsättningarna för anläggandet av mer tekniskt baserade åtgärder (såsom en fosfordamm/våtmark i kombination med ett mineralfilter) undersökas.

Referenser

- Abu-Zreig, M., Rudra, R.P., Whiteley, H.R., Lalonde, M.N., Kaushik, K. K. 2003. Phosphorus removal in vegetated filter strips. *Journal of Environmental Quality*. 32: 613-619.
- Bergström, L., Djodjic, F., Kirchmann, H., Nilsson, I., Ulén, B. 2007. Fosfor från jordbruksmark till vatten - tillstånd, flöden och motåtgärder i ett nordiskt perspektiv. Rapport MAT 21. 7:2007.
- Braskerud, B.C. 2002. Factors affecting phosphorus retention in small constructed wetlands treating agricultural non-point source pollution. *Ecological Engineering*. 19(1): 41-61.
- Curley, E. M., O'Flynn, M. G., & McDonnell, K. P. 2010. Phosphorus loss in subsurface flow from agricultural lands after manure application to *Miscanthus giganteus*-impacts on groundwater quality. *International Journal of Agricultural Research*, 5(5), 268-275.
- Ehrhardt, A., Berger, K., Filipović, V., Wöhling, T., Vogel, H. J., & Gerke, H. H. (2022). Tracing lateral subsurface flow in layered soils by undisturbed monolith sampling, targeted laboratory experiments, and model-based analysis. *Vadose Zone Journal*, 21(4), e20206.
- Garn, H. S. 2002. Effects of lawn fertilizer on nutrient concentration in runoff from lakeshore lawns, Lauderdale Lakes, Wisconsin (No. 2002-4130). US Geological Survey. <https://consensus.fsu.edu/Fertilizer-Task-Force/industry/Effects%20of%20lawn%20fertilizer%20on%20nutrient%20concentration%20in%20Wisc.pdf>
- Huser, B. J., Futter, M., Lee, J. T., & Perniel, M. 2016. In-lake measures for phosphorus control: the most feasible and cost-effective solution for long-term management of water quality in urban lakes. *Water Research*, 97, 142-152.
- Huser, B. 2022. Undersökning av läckagebenägen fosfor i Edstjärnen och Nässjön. Sjörestaurering Sverige AB rapport 2022.
- Komiskey, M. & Stuntebeck, T. & Frame, D. & Madison, F. 2011. Nutrients and sediment in frozen-ground runoff from no-till fields receiving liquid-dairy and solid-beef manures. *Journal of Soil and Water Conservation*. 66.
- Kuster, A.C., Huser, B.J., Padungthon, S., Junggoth, R., & Kuster, A.T. 2021a. Washing and Heat Treatment of Aluminum-Based Drinking Water Treatment Residuals to Optimize Phosphorus Sorption and Nitrogen Leaching: Considerations for Lake Restoration. *Water*, 13(18), 2465.
- Kuster, A. C., Huser, B. J., Thongdamrongtham, S., Padungthon, S., Junggoth, R., & Kuster, A. T. 2021b. Drinking water treatment residual as a

ballast to sink *Microcystis* cyanobacteria and inactivate phosphorus in tropical lake water. *Water Research*, 207, 117792.

Kuster A.C., Pilgrim K.M., Kuster A.T., Huser B.J. 2022. Field Application of Spent Lime Water Treatment Residual for the Removal of Phosphorus and other Pollutants in Urban Stormwater Runoff. *Water*. 14(13):2135.

Kynkäänniemi, P., Ulén, B., Torstensson, G., & Tonderski, K. S. 2013. Phosphorus retention in a newly constructed wetland receiving agricultural tile drainage water. *Journal of Environmental Quality*, 42(2), 596-605.

Leinweber, P., Turner, B.L., & Meissner, R. 2002. Phosphorus. In: *Agriculture, Hydrology and Water Quality*. Haygarth, P.M. & Jarvis, S.C. (eds). CABI Publishing, Wallingford, England. sidor 29-55.

Persson, K. 1999. Mindre fosforförluster på vårplöjda mjälajordar. SLU Fakta jordbruk nummer 14.

Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J. A., Folke, C., & Walker, B. 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413(6856), 591-596.

Spännar, M. 2008. Milsbosjöarna-ett pilotprojekt inför arbetet med åtgärdsprogram inom EU: s Ramdirektiv för vatten. Länsstyrelsen i Dalarnas län.

Witter, E., Huser, B.J., Malmaeus, M., Karlsson, M. 2022. Vitbok - Ett beslutsverktyg för åtgärder mot internbelastning av fosfor i sjöar samt i Östersjöns kustvatten. EU Life IP Rich Waters rapport, 18 sidor.