



Modellering av vattenkvalitet i Edstjärnen: åtgärdsrekommendationer för minskad övergödning

Brian Huser, Sjörestaurering Sverige AB



Foto framsida: Vy över Edstjärnen vid provtagning i oktober 2021

Fotograf framsidebild: Daniel Larson

Författare: Brian Huser, Sjörestauring Sverige AB

Utgiven av: Länsstyrelsen i Dalarnas Län, 2023

Diarienummer: 501-12169-2022

Innehållsförteckning

Modellering av vattenkvalitet i Edstjärnen: åtgärdsrekommendationer för minskad övergödning	1
Inledning	3
Modellering	6
Övervakning.....	6
Metoder.....	7
Kalibrering av modellen	8
Åtgärdsscenarioer.....	9
Resultat.....	10
Omätta källor	12
Åtgärdsscenarioer	14
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	23
Våtmarker	24
Andra möjliga lösningar	24
Förväntad fosforreduktion	26
Rekommendationer	28
Tidsplan	28
Referenser	29

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 negativa konsekvenser för exempelvis bottenlevande djur och ökat fosforläckage (internbelastning) från sedimentet.

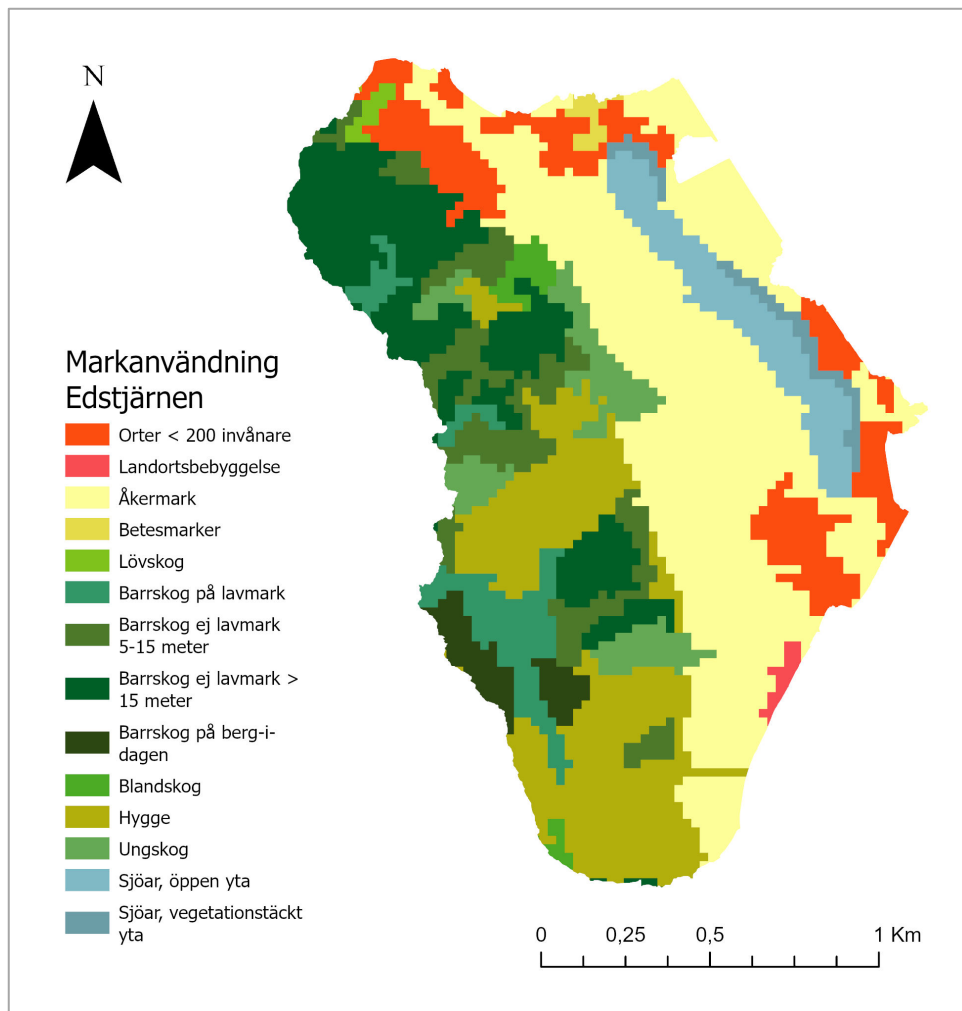
Edstjärnen uppvisar tydliga tecken på övergödning. Medelhalter av totalfosfor (33 µg/l uppmätt, 32 µg/l modellerat) och klorofyll/alger (15,4 µg/l uppmätt, 15,1 µg/l modellerat) bedöms vara otillfredsställande när det gäller status för övergödning. Miljöövervakning har tidigare bedrivits i området och det finns en rapport med redovisade resultat från år 2005, 2011 och 2020 (Göthe 2021). Förhöjda halter av näringsämnen i yt- och bottenvattnet samt en hög biovolym och stor andel cyanobakterier (alger) har uppmätts. Syrgasbrist i bottenvattnet under sommar- och vinterperioder beskrivs också. Höga halter av fosfor och syrgasbrist i bottenvattnet är tydliga tecken på internbelastning. Fosforhalterna i bottenvattnet tyder på hög risk enligt nya riktlinjer för bedömning av internbelastning i svenska sjöar (Witter et al. 2022). Eftersom det också uppmätts förhöjda halter av näringsämnen i tillrinnande vatten, bedöms både intern- och externbelastning bidra till sjöns försämrade vattenkvalitet.

Edstjärnen ligger ca 2 km söder om Gagnef i Dalarnas län och är relativt liten till storleken (17,8 ha). Sjön 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, medan syrgashalten minskar ned till 0 mg/l i bottenvattnet (upp till ca 3 meters vattendjup). Avrinningsområdet med utlopp till Österdalälven har en yta på ca 260 ha där jordbruksmark och skog dominerar markanvändningen (Tabell 1, Figur 1).

Tabell 1. Markanvändning i avrinningsområdet runt Edstjärnen.

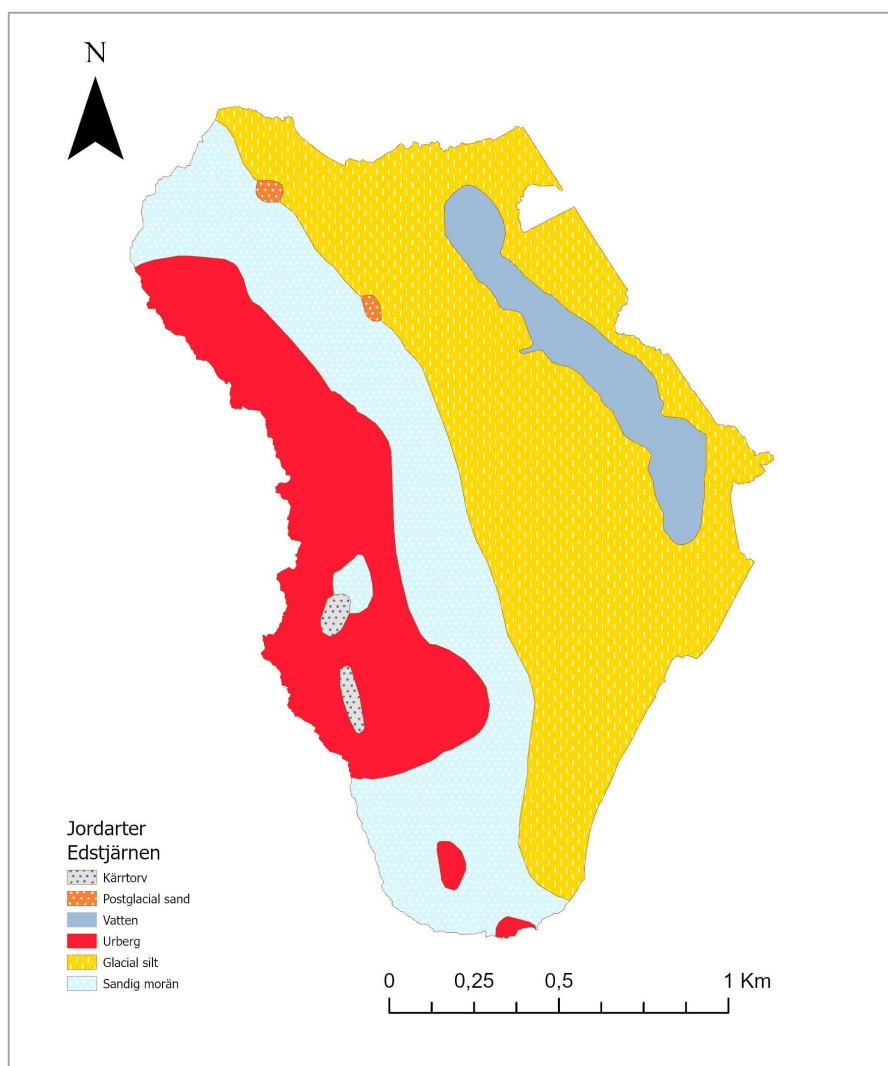
Markanvändning	Area (ha)	Andel (%)
Jordbruksmark	87,3	33,1
Skog	87,1	33,1
Hygge	43,0	16,3
Småorter	27,1	10,3

Markanvändning	Area (ha)	Andel (%)
Vatten	17,9	6,8
Betesmark	1,3	0,5



Figur 1. Karta över markanvändning inom Edstjärnens 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 Edstjärnens avrinningsområde

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

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

Med hjälp av en dynamisk modell kunde effekter av olika kombinationer av näringsämnesreduktion simuleras. Nödvändiga belastningsminskningar för att nå vattenkvalitetsmålen beräknades sedan för båda sjöarna.

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 vid varje provtagningstillfälle. Vattenkemiska prov hämtades från fyra olika djup beroende på hur syre- och temperaturprofilen såg ut i sjöarna vid provtagningstillfället.

Vattenkemiska provtagningar samt mätning av temperatur, vattendjup och vattenflödes hastighet gjordes i inloppet i anslutning till sjöprovtagningen (Figur 3). I inloppet mättes djup och vattenhastighet för att kunna beräkna flödet: vattenhastighet multiplicerat med area (bestämt av rådande vattendjup) ligger till grund för beräkning av flödesvolym över tid. Vattenhastigheten mättes med en flödesmätare. Notera att det inte fanns något mätbart utflöde från Edstjärnen från april-oktober år 2021.

En tryckmätare installerades i Edstjärnen 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 användes för att beräkna sjövolym och kalibrera den hydrologiska delen av modellen.



Figur 3. Provtagningsstationer i och runt Edstjärnen. Provtagningsstation 1 (utloppet) hade inget flöde under övervakningsperioden. 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:

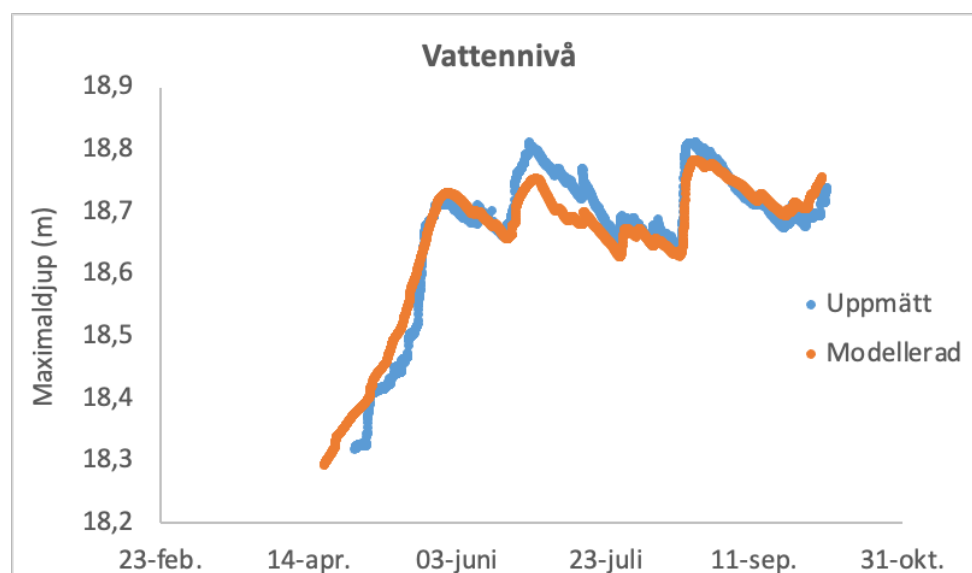
- Klimatdata (nederbörd, solljus, temperatur, etc.)
- Vattennivå
- In- och utflöden (flöde och koncentrationer av näringsämnen, m.m.)
- Fosforfraktioner i sedimentet
- Vattenkemi samt syrgas och temperaturprofiler i sjön

Med dessa data kan olika variabler modelleras såsom:

- Hydrologiska förhållanden (vattenflöde in och ut, samt sjövolym)
- Internbelastning av fosfor
- Sedimentation av partiklar (inklusive fosfor)
- Omblandning av sjövattnet
- Näringsämnen (lösta och partikulära former)
- Växtplankton (klorofyll)

Kalibrering av modellen

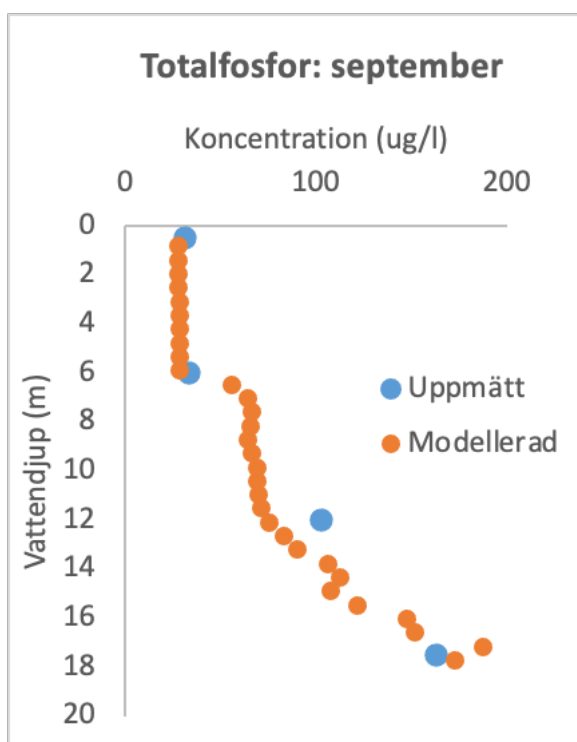
Första steget i kalibreringen av modellen är att ta fram en vattenflödesbalans. Uppmätta data för in- och utflöde användes för att kalibrera modellerade flödesdata från SMHI. Även nederbörd och avdunstning beräknades. Sjönivåer användes för att beräkna sjövolymen och kalibrera den hydrologiska balansen (se exempel i Figur 4).



Figur 4. Kalibreringsresultat för vattennivå (t.ex. maximaldjup) för Edstjärnen.

Nästa steg i kalibreringen är att fastställa de initiala förutsättningarna gällande profiler för temperatur, syrgas, och näringsämnen samt klorofyll. Externbelastning av näringsämnen beräknades med uppmätta data från övervakade inlopp. Uppmätta koncentrationer (viktade medelvärden) användes sedan för att beräkna inflödet av näringsämnen från de delar av avrinningsområdet som inte övervakats.

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 totalfosfor i vattenpelaren för Edstjärnen (september).

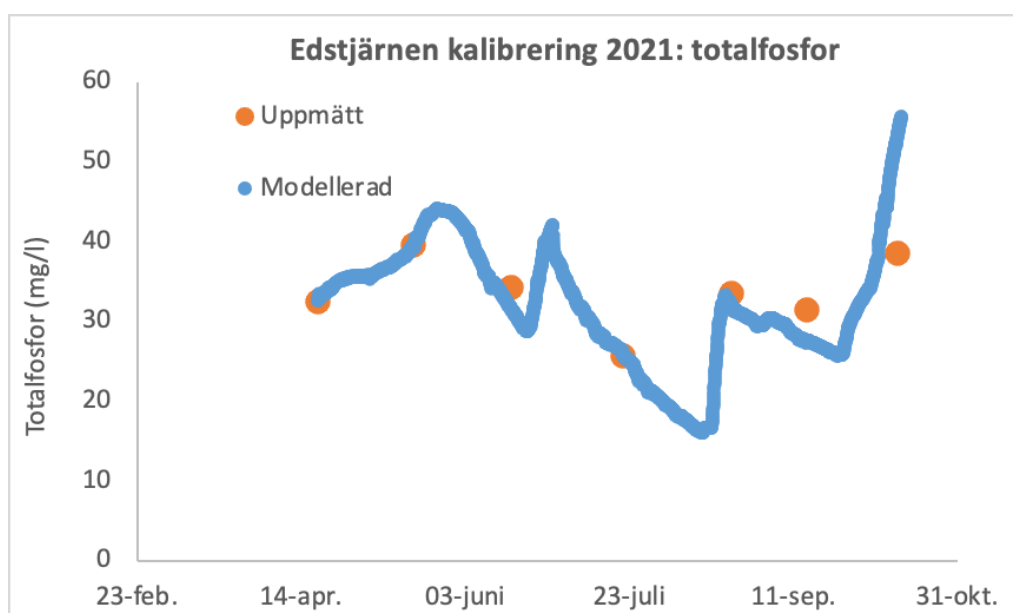
Åtgärdsscenarioer

Data som inhämtades under 2021 användes för att simulera effekterna av minskad näringsbelastning. 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.

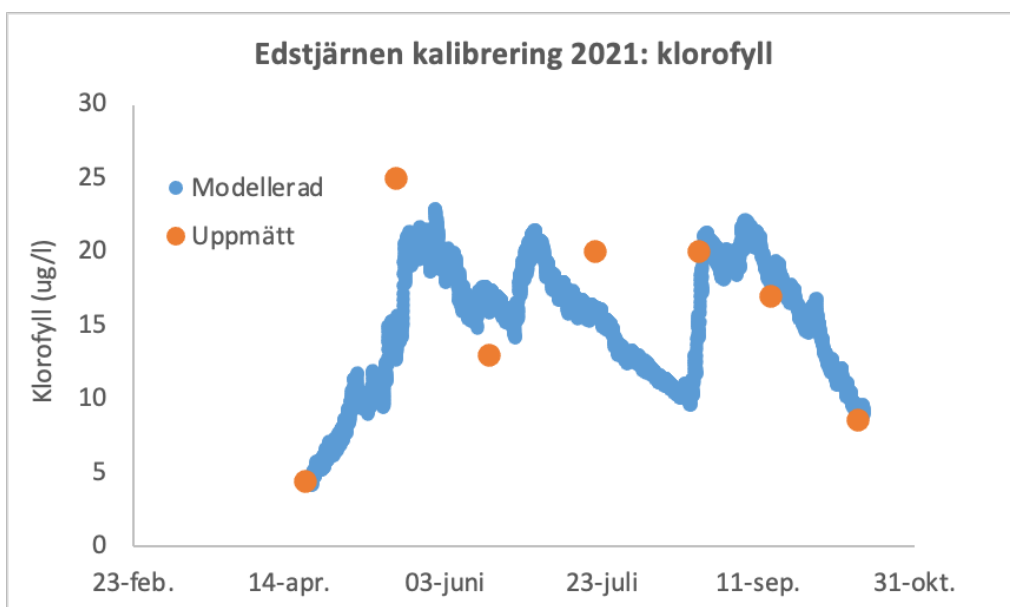
Resultat

Kalibrering av modellen med uppmätta data för fosfor och klorofyll i Edstjärnen visas i Figur 6 och Figur 7. Fosforhalterna var något högre i ytvattnet under vår och tidig sommar men började därefter minska under sommaren på grund av ökad sedimentation och lågt inflöde. Sedan steg halterna igen under sensommar och höst (Figur 6). Denna ökning beror både på internbelastning av fosfor från sedimentet (transport av den frigjorda fosfor från bottenvattnet till ytvattnet) och inflödet.



Figur 6. Kalibreringsresultat för totalfosfor i Edstjärnen 2021.

Klorofyllhalterna ökade under våren, var relativt konstant under tidig sommar, och minskade något under mitten av sommaren (Figur 7). Det skedde sedan en kraftig ökning under sensommaren och hösten när påverkan av intern- och externbelastning av fosfor var som högst. Detta på grund av den transport av fosfor som frigjorts från sedimentet under sommaren till ytvattnet och avrinning från avrinningsområdet till sjön.



Figur 7. Kalibreringsresultat för klorofyll i Edstjärnen 2021.

12,4 kg av den frigjorda fosfor från sedimentet transporterades till ytvattnet från april till oktober under 2021 (netto internbelastning) och sjöns ytvattenkvalitet påverkades mest av internbelastning under sensommar och höst. Externbelastning av fosfor var således mer än sex gånger högre än nettointernbelastning under mätperioden 2021 (Tabell 2).

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

Mätperiod	Källa - Extern belastning	Källa - Intern belastning (netto)	Sänka - Utlopp	Sänka - Sedimentation
April-oktober 2021	83	12,4	7,9	62,1

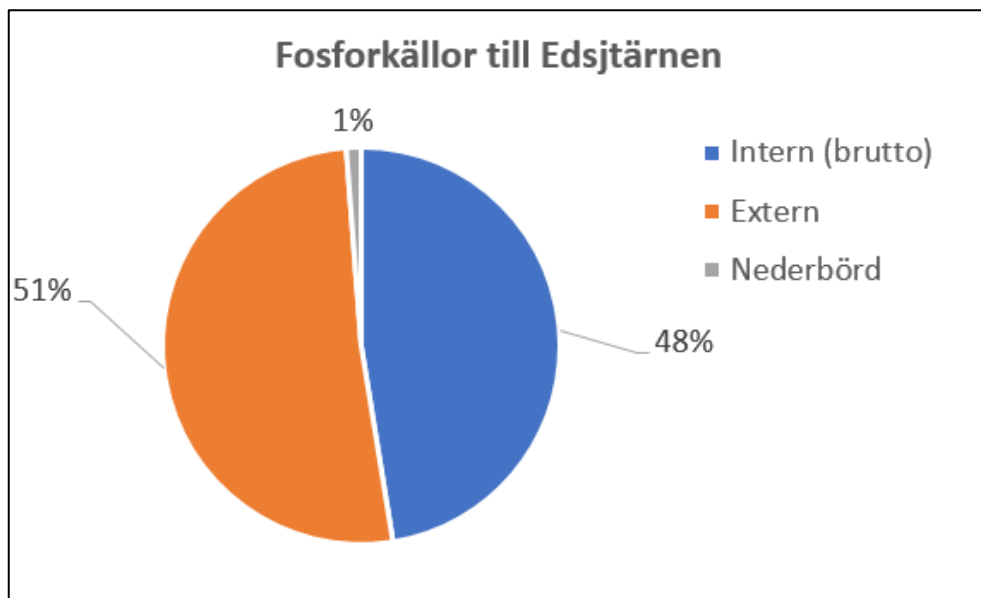
Externbelastning av fosfor till Edstjärnen under modelleringsperioden (april-oktober) var 83 kg. Merparten av fosforbelastningen kom från det direkt anslutna avrinningsområdet eller andra omätta källor och inlopp 1 (Tabell 3).

Tabell 3. Externa källor av fosfor (kg) till Edstjärnen under kalibreringsåret 2021 (maj-oktober).

Mätperiod	Inlopp 1	Nederbörd	Direkt/omätt
April-oktober 2021	51,5	1,9	29,6

Brutto internbelastning, d.v.s. den totala mängden fosfor som frigjordes från sedimentet under mätperioden 2021, var så hög som 48% av den totala belastningen (Figur 8). Den mängd av internbelastningen som nådde

ytvattnet (netto internbelastning) under mätperioden var dock endast 12,4 kg (Tabell 2 och 4), vilket motsvarar 13 % av den totala belastningen som påverkade fosfor- och klorofyllhalter i ytvattnet. 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.



Figur 8. Fördelning av interna och externa fosforkällor till Edstjärnen, 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 4).

Tabell 4. Internbelastning av fosfor (kg) till Edstjärnen under kalibreringsåret 2021 (april-oktober).

Mätperiod	Brutto Internbelastning (kg)	Netto internbelastning (kg)
April-oktober 2021	75	12,4

Omätta källor

En del av vattnet som når Edstjärnen kommer från grundvatten (ytligt eller djupt) eller via 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 man dock säkerställa mängden fosfor

som frigjordes från sedimentet och påverkade ytvattnet. Övervakning av den mängd som tillfördes till sjön genom inloppet minskar också osäkerheten. Resten av fosforbelastningen, förutom den från nederbörden, kommer alltså från direkt avrinning och grundvatten.

Koncentrationer av fosfor i djupgrundvatten var mellan 9,3 och 14 µg/l enligt data från mätstation Holtäpporna Rb0515 som ligger ca 10 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 fosforhalter i markvattnet ökar med ökande mängd fosforberikat gödsel och kan nå >9 mg/l (9000 µg/l) (t.ex. Curley m.fl. 2010).

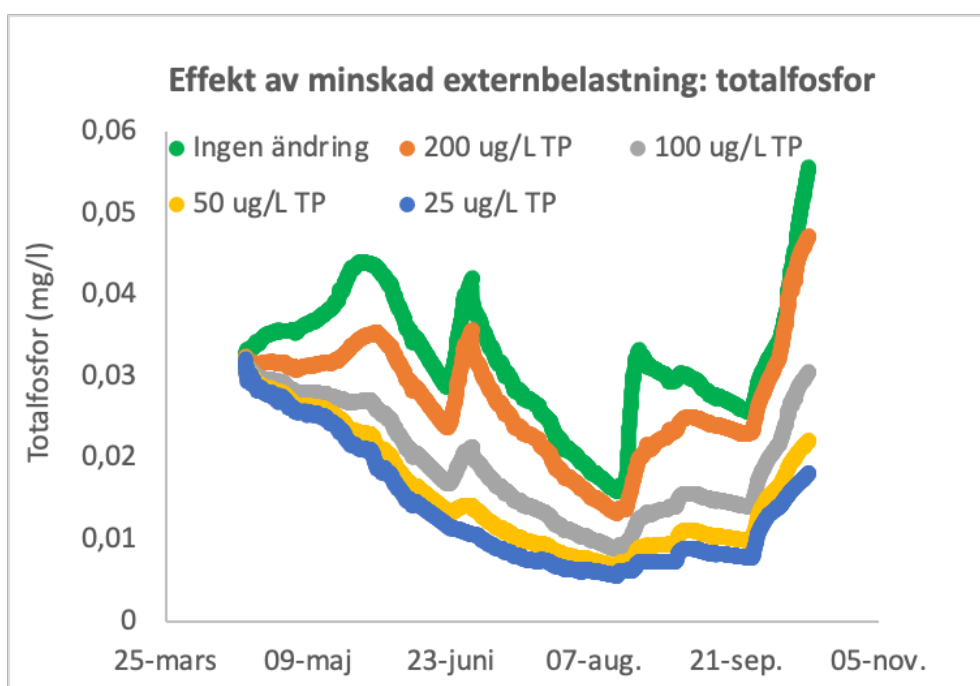
Direkt avrinning från markytor, hustak, och andra bebyggda ytor kan också vara en källa av näringsämnen till sjön, särskilt från ytor som ligger i direkt anslutning till sjön eller om vattnet rinner genom dagvattenrör. Om konstgjorda gräsmattor gödslas ökar givetvis avrinning av fosfor betydligt, särskilt 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 Edstjärnen under 2021 var 287 µg/l vilket alltså är en kombination av direkt avrinning och lateralt flöde under markytan från bebyggda områden runt sjön, öppen mark, och jordbruksmark samt koncentrationerna i inflödet.

Åtgärdsscenarier

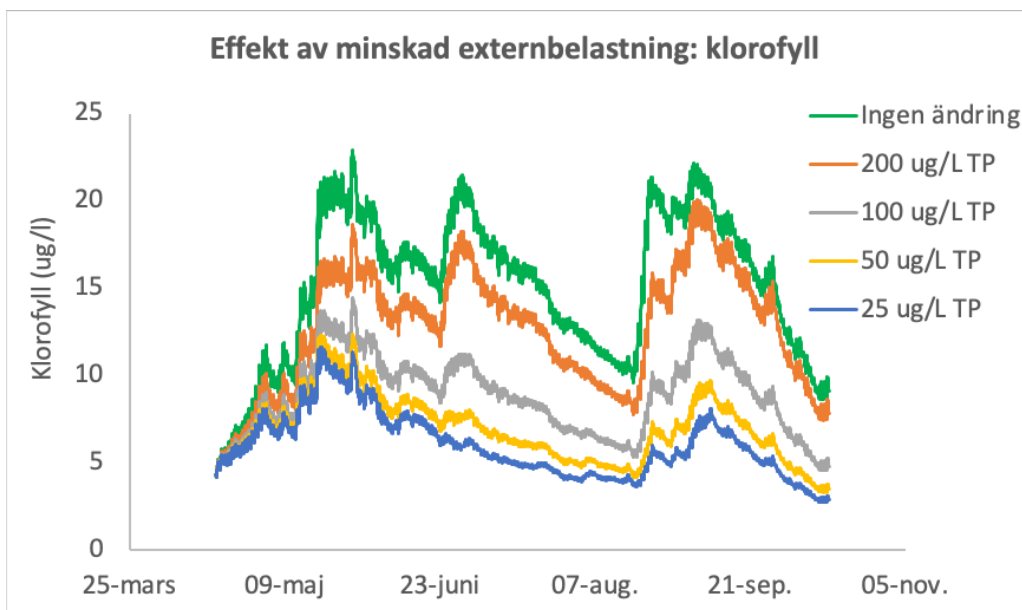
För att beräkna hur mycket fosforhalterna måste minska för att vattenkvalitetsmålen ska kunna nås tillämpades de kalibrerade modellerna i olika scenarier där fosforbidraget från externbelastning minskades i olika grad och internbelastning minskade med 100 %.

En reducerad extern belastning förväntas ge god effekt på totalfosforhalterna i Edstjärnens ytvattnet. Medelhalten av fosfor i ytvattnet förväntas minska från 32 µg/l innan åtgärder (ingen ändring) till 14 µg/l om totalfosforhalten i sjöns inflöden minskas från 287 µg/l till 25 µg/l (Figur 9). 14 µg/l ligger på gränsen mellan måttlig och god status.



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

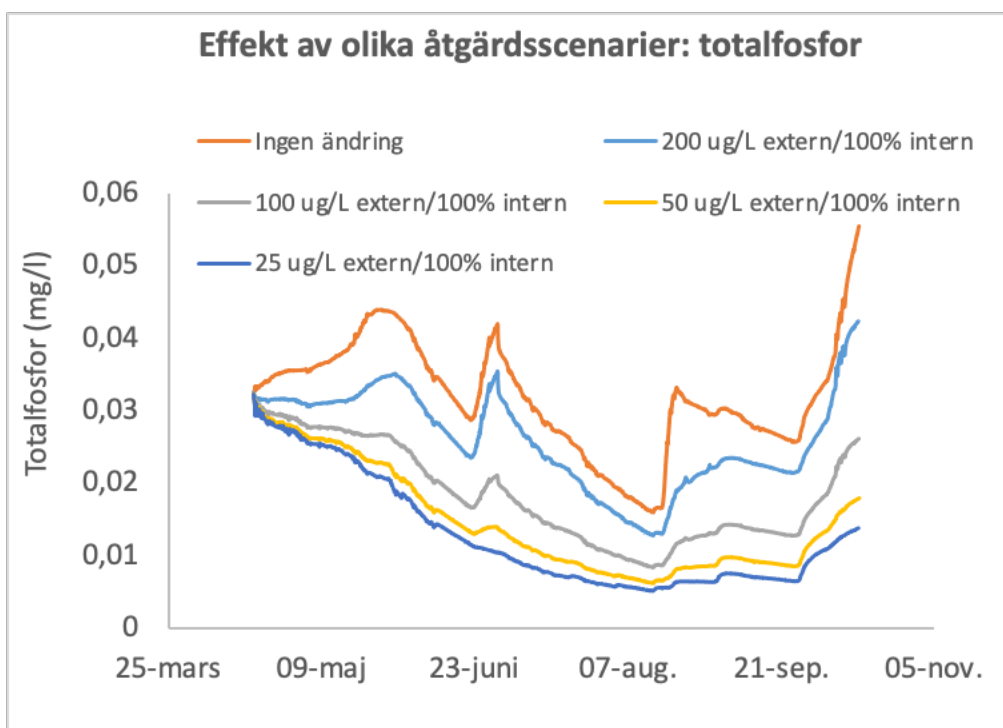
En reducerad extern belastning hade liknande effekt på klorofyllhalterna, som enligt modellen förväntas minska från 15,1 till 6 µg/l med en 50 % minskning av totalfosforhalten i tillrinnande vatten från 287 µg/l till 25 µg/l (Figur 10). 6 µg/l är en högre halt än gränsen mellan god och måttlig status (4,8 µg/l) och sjön skulle således bedömas ha måttlig status gällande klorofyllhalter.



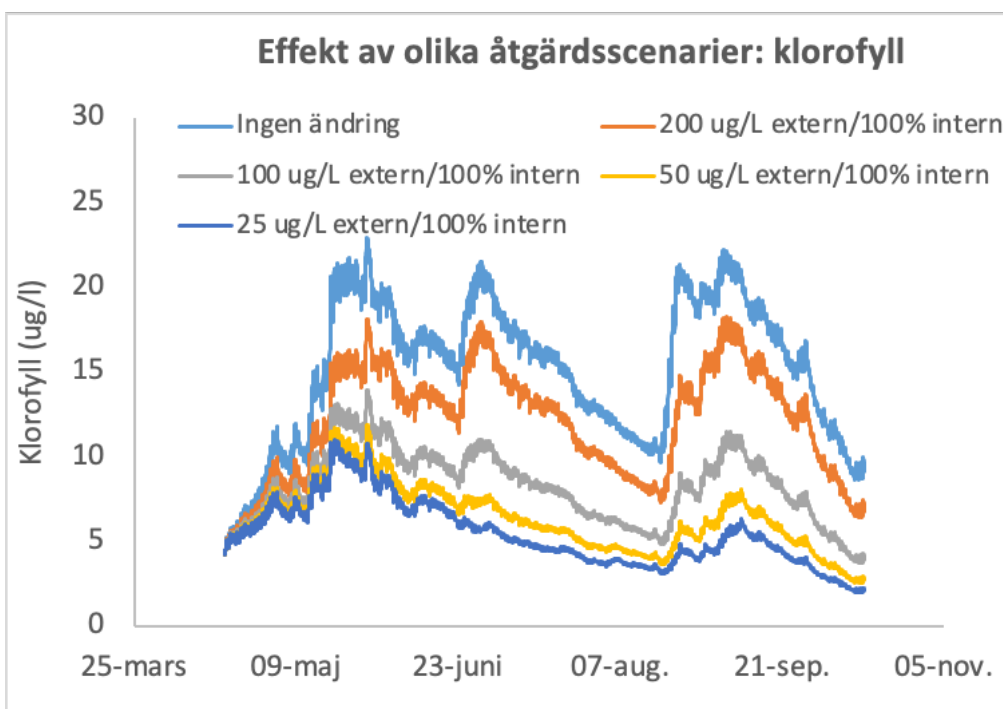
Figur 10. Effekt av minskad externbelastning på klorofyllhalter i Edstjärnen baserat på data från 2021.

En minskad externbelastning av fosfor kommer alltså inte att fungera som enskild åtgärd utan det krävs en samtidig minskning av internbelastningen för att kunna nå vattenkvalitetsmålen. Alla scenarier ovan testades därför tillsammans med en åtgärdad internbelastning (d.v.s. 100 % minskning av överskottet). Effekten av dessa scenarier på totalfosfor- och klorofyllhalter i Edstjärnens ytvatten presenteras i Figur 11-12.

Enligt modellen förväntas medelfosforhalterna i sjön minska från 32 $\mu\text{g/l}$ till 12,8 $\mu\text{g/l}$ med en 100% minskning av internbelastningen och en samtidig minskning av totalfosforhalten i inkommande vatten till 25 $\mu\text{g/l}$ (Figur 11). Detta medelvärde ger god status gällande totalfosforhalten i sjön. I samma scenario minskade klorofyllhalten från 15 $\mu\text{g/l}$ till 5 $\mu\text{g/l}$. Denna halt ger ett medelvärde nära god status (Figur 12).



Figur 11. Effekt av olika åtgärdsscenarioer på totalfosforhalter i Edstjärnen baserat på data från 2021.



Figur 12. Effekten av olika åtgärdsscenarioer på klorofyllhalter i Edstjärnen baserat på data från 2021.

Medelhalter av fosfor i ytvattnet samt andelen tid av den totala mätperioden då fosforhalterna beräknas överstiga gränsvärdena för antingen god (14 µg/l) eller hög (10 µg/l) status efter olika alternativa belastningsminskningar presenteras i Tabell 5. Till exempel skulle enligt modellen en minskning av fosforhalten i tillrinnande vatten till 25 µg/l och en samtidig 100 % minskning av internbelastning resultera i god fosforstatus (baserat på medelhalt).

Tabell 5. Medelhalter av totalfosfor och andel tid av totala mätperioden då halterna överstiger 10 µg/l (hög status) och 14 µg/l (god status) i Edstjärnen innan och efter olika kombinationer av åtgärder.

Scenarier	Totalfosfor (mg/l)	Andel >10 µg/l (%)	Andel >14 µg/l (%)
Ingen ändring	0,032	100	100
100 µg/L minskning extern	0,019	93	76
50 µg/L minskning extern	0,015	71	45
25 µg/L minskning extern	0,014	51	37
100 µg/L extern 100% intern	0,018	92	63
50 µg/L extern 100% intern	0,015	58	40
25 µg/L extern 100% intern	0,013	49	31

Enligt modellen lät ingen kombination av åtgärder sjön nå god status med avseende på klorofyllhalter, även om halterna låg nära gränsen (Tabell 6). Det finns två potentiella förklaringar till detta. För det första är en stor del av den fosfor som rinner till sjön biotillgänglig, antingen som fosfatfosfor eller löst organisk fosfor. Föreslagna minskningar avser totalfosforhalter, men om åtgärder som fokuserar på att minska tillgången på biotillgänglig fosfor genomförs kommer detta ha en mycket större effekt på klorofyllhalterna jämfört med vad som redovisas i Tabell 6.

Tabell 6. 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 Edstjärnen innan och efter olika kombinationer av åtgärder.

Scenarier	Klorofyll (µg/l)	Andel >2,4 µg/l (%)	Andel >4,8 µg/l (%)
Ingen ändring	15	100	100
100 µg /L minskning extern	9	100	99
50 µg/L minskning extern	7	100	93
25 µg/L minskning extern	6	100	80
100 µg/L extern 100% intern	8	100	96
50 µg/L extern 100% intern	6	100	76
25 µg/L extern 100% intern	5	97	55

En minskning av fosforhalten i tillrinnande vatten till 25 µg/l och en åtgärdad internbelastning motsvarar en minskning av intern- och externbelastning med ca 10 respektive 72 kg. Även transporten av fosfor ut ur sjön till nedströms liggande vattenförekomster/grundvatten förväntas minska (Tabell 7). Även sedimentationen i sjön skulle minska med nästan 57 %, vilket skulle innebära en mer naturlig nivå av ackumulering av sediment på sjöbotten.

Tabell 7. Källor och sänkor av fosfor till Edstjärnen under kalibreringsåret 2021 och efter åtgärder.

Scenarier	Källa - Intern belastning	Källa - Extern belastning	Sänka - Utlopp	Sänka - Sedimentation
Kalibrering 2021 (kg)	12,4	82,5	7,9	62,1
Åtgärdsscenario (kg)	2,7	10,2	2,3	27,0

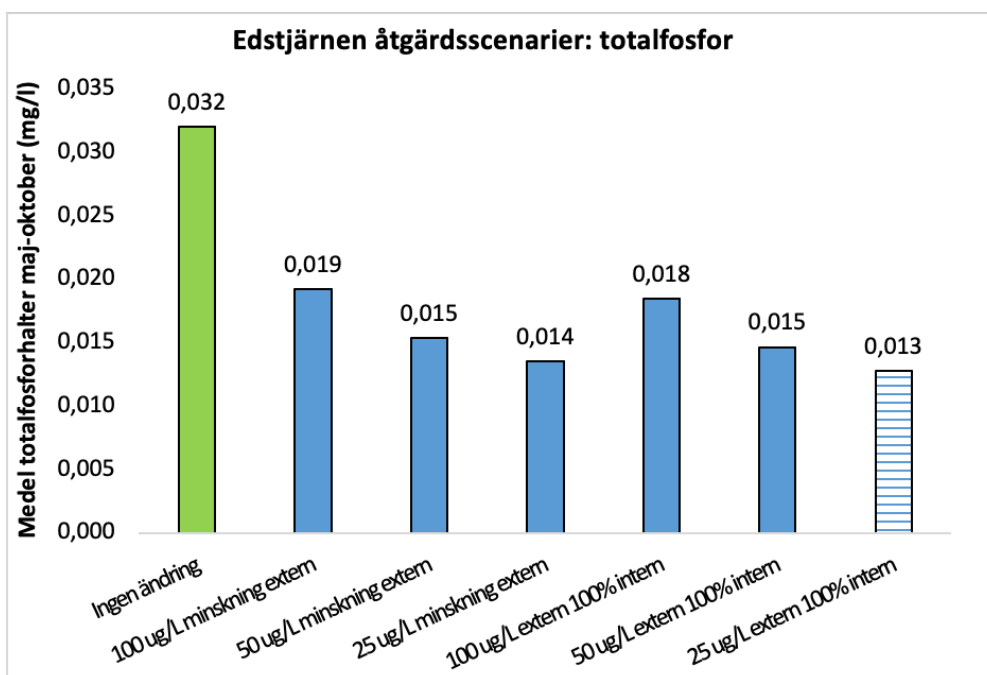
Vad krävs för att nå vattenkvalitetsmålen?

Rekommendationer för belastningsminskningar från olika fosforkällor baseras på referensvärden för fosfor- och klorofyllhalter i sjön. Det är också viktigt att ta hänsyn till hur förhöjda fosforhalter kan påverka nedströmsliggande vattenförekomster. Enligt data från 2021 har Edstjärnen otillfredsställande status gällande fosfor och klorofyll.

Eftersom både intern- och externbelastning ofta är förhöjda i övergödda sjöar är det viktigt att övervaka vattenkvaliteten i både sjön och inloppen från våren (efter islossning) till hösten (innan sjön fryser). Denna period ger den bästa möjligheten att jämföra den relativa betydelsen av dessa två källor. Hänsyn måste också tas till externa källor som påverkar sjöar 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 ska användas för att säkerställa att åtgärder mot externbelastning fungerar under hela året.

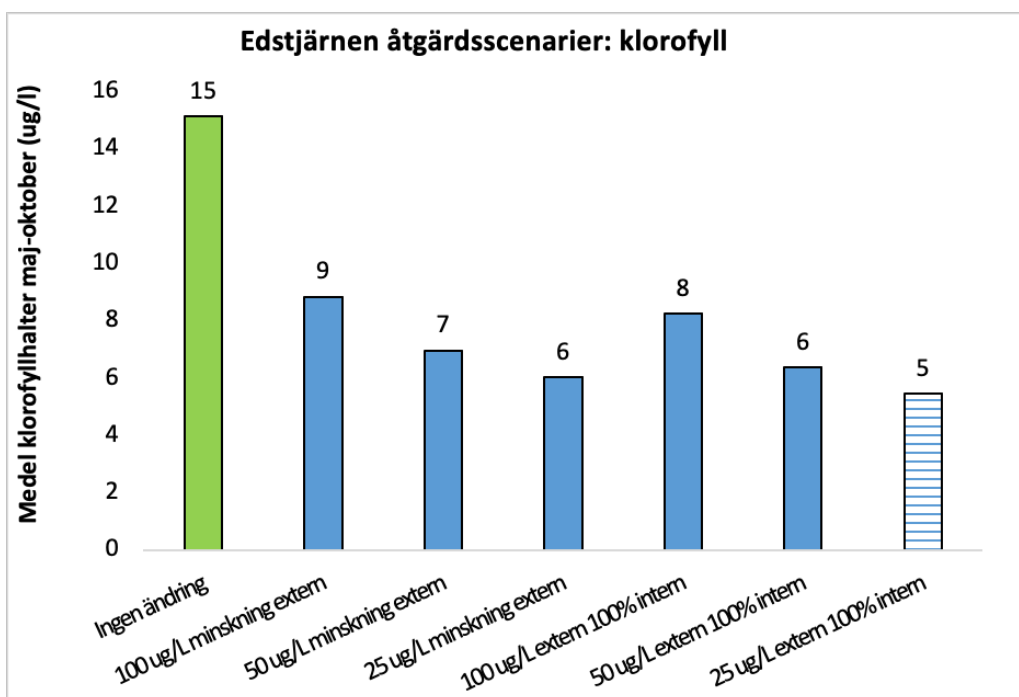
Under 2021 var medelhalten av totalfosfor i Edstjärnen 33 µg/l (32 µg/l modellerat), d.v.s. strax under 35 µg/l som är gränsen mellan otillfredsställande och dålig status. Medelkoncentrationen av klorofyll var 15 µg/l vilket är över gränsen mellan måttlig och otillfredsställande status (10 µg/l), d.v.s. >10 µg/l ger otillfredsställande status, <10 µg/l ger måttlig status.

En reduktion av både extern- och internbelastning krävs för att nå god status gällande övergödning i Edstjärnen (Figur 13). Även om den totala internbelastningen är mindre jämfört med externbelastningen påverkas sjön mycket av fosforläckaget från sedimenten under en kort period (sensommar till höst). Bruttointernbelastning motsvarade nästan 50 % av den totala belastningen till sjön, men bara 13 % nådde ytvattnet under mätperioden där den påverkade fosfor- och klorofyllhalter. Detta tyder inte på att internbelastningen är oviktig, tvärtom kan den vara en ännu större källa under år där vattenpelaren omblandas mer eller oftare. Den form av fosfor som läcker från sedimenten är också 100 % biotillgänglig, d.v.s. alger kan använda den omedelbart när den når ytvattnet.



Figur 13. Totalfosforhalter under mätperioden år 2021 (april - oktober) och efter olika åtgärdsscenarioer i Edstjärnen. Rekommenderat åtgärdsscenario är 100 % minskning av förhöjd internbelastning och en minskning av fosforhalten i tillrinnande vatten till 25 µg/l (stapel med horisontella linjer).

Denna reduktion kommer att minska klorofyllhalterna till en nivå som nästan når god status (Figur 14). Anledningen till att det är svårt att nå god klorofyllstatus är de höga halterna av biotillgänglig fosfor i tillrinnande vatten. Andelen biotillgänglig fosfor (*filtrerad* totalfosfor) vilket inkluderar både fosfatfosfor och löst organisk fosfor är så hög som 86 %.



Figur 14. Medelvärde av klorofyllhalter under mätperioden år 2021 (april - oktober) och efter olika åtgärdsscenarier i Edstjärnen. Rekommenderat åtgärdsscenario är 100 % minskning av förhöjd internbelastning och en minskning av fosforhalten i tillrinnande vatten till 25 µg/l (stapel med horisontella linjer).

Om den förhöjda internbelastningen åtgärdas förväntas belastningen till sjön minska från 95 kg till 85 kg fosfor under mätperioden (april till oktober). En ytterligare 88 % reduktion av externbelastningen skulle göra att den totala belastningen minskar från 85 kg till 13 kg.

Åtgärder

Åtgärder mot internbelastning

Vilka åtgärder som är lämpliga mot internbelastning i Edstjärnen 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 låga alkalinitet och pH (Huser 2022).

Åtgärder mot externbelastning

Det finns en rad olika metoder för att minska transport av fosfor från avrinningsområdet till sjöar. De mest frekvent använda metoderna är skyddszoner, plöjning när infiltrationskapaciteten 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 gödsling 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.

Skyddszoner

Skyddszoner innebär en obrukad vegetationsbevuxen zon av åkermark nära vattendrag/diken och naturlig växtlighet vid stränder där vatten annars rinner direkt till sjön. Det är en möjlig lösning som tar jämförelsevis liten plats och ger en ganska stor effekt. I skyddszonen får varken markbearbetning, gödsling eller ogräsbekämpning ske för att undvika utsläpp i recipienten. Anläggning av skyddszoner är en åtgärd som påtagligt minskar tillförsel av näringsämnen från jordbrukslandskapet (Leinweber et al. 2002).

Skyddszoner 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 skyddszonerna inkluderar sedimentation, ökad infiltration och upptag av fosfor och kväve av vegetationen. Effektiviteten av skyddszoner styrs av zonens bredd. Fosfortransporten reducerades med ca 30 % med en 2 m bred skyddszon. Om skyddszonen 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 skyddszonerna tas om hand ordentligt. De måste t.ex. skördas så att växtmaterialet, som kan brytas ned och frigöra näringsämnen, inte ligger kvar under vintern.

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 reduktion av biotillgänglig fosfor. De kan dessutom bli en källa av löst fosfor under sommarperioden. Detta eftersom partiklar och organiskt material ackumuleras i en grund damm där temperaturen kan stiga kraftigt under sommaren. Detta leder i sin tur till en snabbt ökande nedbrytning av organiskt material och en sänkning av syrgashalten i vattnet, vilket gör att fosfor kan frigöras från både organiskt material och järnmineraler. 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.

Våtmarker

Våtmarker minskar fosforbelastningen genom sedimentation av partiklar (p.g.a. minskad vattenflödes hastighet) 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 naturliga 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 djuphålor (Kynkäänniemi 2013).

Andra möjliga lösningar

Eftersom relativt stora belastningsminskningar krävs för Edstjärnen 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. 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. Mängden fosfor som lämnar dammen kan alltså bli högre jämfört med den mängd som

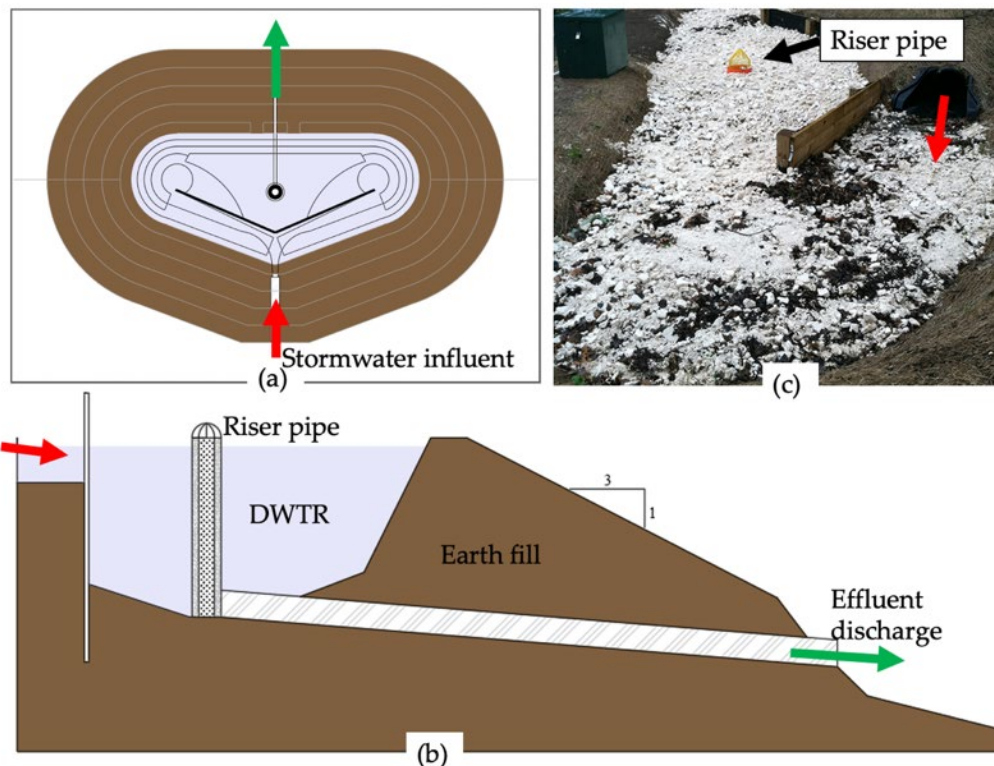
rinner till dammen, vilket leder till en ökning av fosfortransport till sjön under sådana perioder (Huser et al. 2016).

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 15). Dessa filter behandlar en större mängd vatten, tar mindre plats och minskar fosforhalterna i högre grad jämfört med våtmarker.



Figur 15. Ett sandfilter med tillsatt järn (5%) under uppbyggnad i St. Paul, Minnesota (USA). Bild av Brian Huser 2007.

Filter med mineraler från dricksvattenreningsrester kan också tillämpas (Kuster et al. 2021a,b). Filtret som visas i Figur 16 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 och/eller våtmark anläggs uppströms filtret.



Figur 16. Designbild som visar principiell utformning av ett 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 8. För de åtgärder där det var möjligt att beräkna fosforreduktion i kilo har det gjorts, annars anges en procentuell fosforreduktion i vattnet.

Tabell 8. Förväntad fosforreduktion av rekommenderade åtgärder i Edstjärnen.

Åtgärder	Belastning	Reduktion (kg)	Reduktion (%)
Skyddszoner	Extern	-	31-89
Våtmarker	Extern	-	25-50
Alternativa plöjningsstrategier	Extern	-	30
Kombination damm-våtmark-filter	Extern	-	70-80

Åtgärder	Belastning	Reduktion (kg)	Reduktion (%)
Sedimentbehandling	Intern	10	78

Rekommendationer

Fokus på reduktion av externbelastning behöver prioriteras vid Edstjärnen 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 287 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 för att effekten ska bli så långvarig som möjligt.

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 Edstjärnen, 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.

Nästa steg 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. Innan åtgärder mot internbelastning genomförs behöver dock den externa belastningen reduceras ytterligare vilket ställer stora krav på ett nära samarbete med markägare i området. Det kommer behövas ytterligare undersökningar på plats i avrinningsområdet för att (1) reda ut vilka åtgärder som är möjliga att genomföra samt (2) identifiera platser där åtgärder bäst placeras för att minska fosfortransporten till Edstjärnen 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. På grund av nuvarande förhöjda halter av fosfor som uppmätts i sjön i denna och tidigare undersökningar kan det dock behövas en kombination av naturliga och tekniskt baserade åtgärder för att nå målen.

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>
- Göthe, E. 2021. Sammanställning av analysresultat – Edstjärnen. Länsstyrelsen Dalarna rapport.
- 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.

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.