



Sveriges lantbruksuniversitet
Swedish University of Agricultural Sciences

Institutionen för vatten och miljö

Undersökning av näringsämnen i sediment under fiskodlingslokaler i Siljan

Brian Huser, Hanna Carlberg, Martyn Futter

SLU, Vatten och miljö: Rapport 2022:2

Referera gärna till rapporten på följande sätt:

Undersökning av näringsämnen i sediment under fiskodlingslokaler i Siljan.
Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för vatten och miljö, rapport
2022:2.

Tryck: SLU, Ultuna

Tryckår: 2022

Kontakt

brian.huser@slu.se

<http://www.slu.se/vatten-miljo>

Innehåll

1	Ordlista	1
2	Introduktion	2
2.1	Uppdraget	2
3	Bakgrund	3
3.1	Deltagande organisationer	3
3.2	Lokaler	3
3.2.1	Siljan	4
3.2.2	Referenslokalen	6
3.3	Provtagning	6
3.4	Analyser	6
3.5	Inkubering av proppar	7
4	Resultat	8
4.1	Sediment	8
4.1.1	Totalfosfor	8
4.1.2	Fosforfraktioner	8
4.2	Inkuberingsförsök	13
4.2.1	Syrgasförbrukning	13
4.2.2	Internbelastning av fosfor	14
5	Diskussion	17
5.1	Läckagebenägen fosfor i sedimenten	17
5.1.1	Jämförelse med referenslokalen och andra system	17
5.2	Syrgasförbrukning	18
5.3	Potential för återhämtning	18
5.3.1	Skillnader mellan modellerade och uppmätt internbelastning	18
5.3.2	Modellering av återhämtningstid	19
5.4	Osäkerheter	20
6	Slutsatser	22
	Referenser	23
	Bilaga 1	24

1 Ordlista

- Aktivt sedimentdjup – den delen av sedimentet som interagerar med vattnet. Mobil fosfor som finns i det aktiva sedimentdjupet kan, till exempel, frigöras till vattnet, medan fosfor som ligger bundet djupare i sedimentet inte frigörs
- Anoxisk – Syrefattigt förhållande i vattnet
- Fosforkoncentration – hur mycket fosfor som är bundet till en sedimentpartikel
- Fosformassa – mängden fosfor som finns i en viss volym av sediment
- Internbelastningshastighet – den hastighet som fosfor frigörs från sedimenten. Enheten är mg fosfor som frigörs från en kvadratmeter sedimentyta per dag ($\text{mg/m}^2/\text{d}$)
- Mobil (rörlig) fosfor – de fosforformer som lätt frigörs från sediment; fosfor i sedimentets porvatten, löst bunden fosfor, och fosfor bunden till järn
- Labil organisk fosfor – fosfor som återfinns i lätt nedbrytbart organiskt material såsom alger och makrofyter
- Läckagebenägen fosfor - mobil + labil organisk fosfor samt restfosfor

2 Introduktion

Vid fiskodling i öppna kassar ansamlas näringsrika fekalier och foderrester från produktionen under odlingskassarna. Det saknas idag kunskap rörande hur nedbrytning av sediment under fiskodlingsanläggningar sker i sjöar samt hur lång tid dessa processer kan förväntas ta. Dessutom finns det väldigt lite information om hur fiskodling generellt ger upphov till olika former av näringsämnen i sediment i både färsk- och bräcktattenmiljöer.

En fiskodlingslokal där odling av regnbåge bedrivits i öppna kassar i 15 år belägen invid stranden på västra sidan av Siljan undersöktes i syfte att öka kunskapen och förståelsen för de biokemiska processer som pågår under ytan. Detta projekt syftar även till att ta reda på hur lång tid dessa nedbrytningsprocesser kopplade till sedimentkemin och näringsämnen kan förväntas ta. Studien är finansierad genom medel från Jordbruksverket och har tydliga kopplingar till de mål som återfinns i *Handlingsplan för utveckling av svenskt vattenbruk*.

Både näring, akademi, myndigheter och intresseorganisationer har lyft behovet av de kunskapsluckor som behöver fyllas gällande sediment vid fiskodlingsanläggningar och dess näringsläckage.

En bättre bild av hur sediment bryts ner kommer även att ge oss mer kunskap kring lämpliga lokaler för att lokalisera vattenbruk vilket kan utgöra en hörnsten för fysisk planering med hänsyn till vattenbrukets förutsättningar. En mer detaljerad kunskap kring sedimenten, näringsläckage och nedbrytningstider kommer kunna hjälpa det svenska vattenbruket att tydligt kunna kommunicera kring miljöeffekter från vattenbruket.

2.1 Uppdraget

Syftet med denna undersökning är att bedöma näringsstatus av sedimentet och potential för återhämtning för botten under en fiskodlingslokal belägen vid Siljans sydvästra strand

Sveriges lantbruksuniversitet har av Jordbruksverket fått i uppdrag att undersöka hur stor del läckagebenägen fosfor och total fosfor (TP) som finns i sediment dels i ett område där fiskodling har bedrivits och dels för ett opåverkat referensområde. Inkubering av sedimentproppar har också gjorts för att beräkna internbelastning av fosfor och syrgasförbrukning. Resultaten har jämförts med tidigare rapporter, data, och andra informationskällor för att bedöma uppskattad tid för återhämtning.

3 Bakgrund

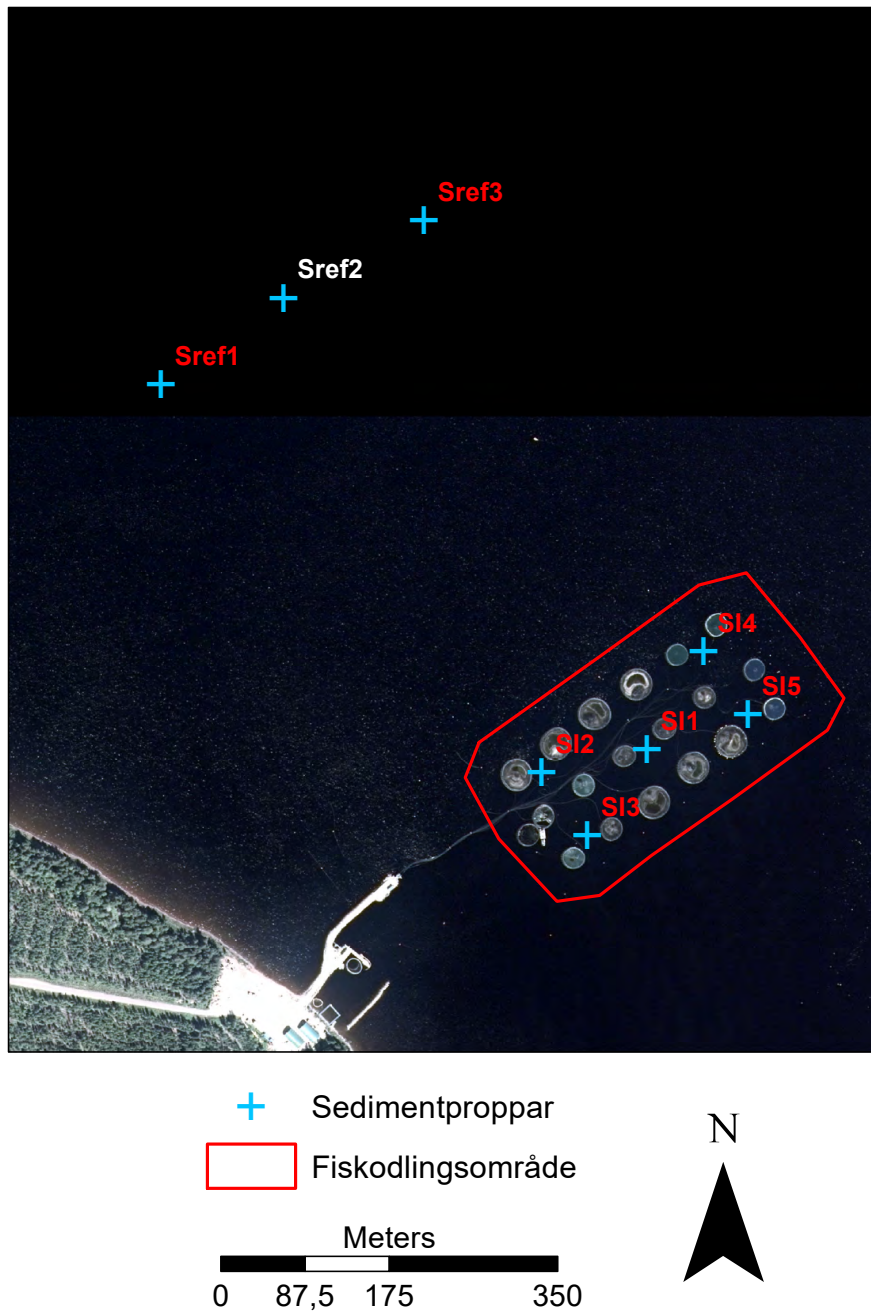
3.1 Deltagande organisationer

Sveriges lantbruksuniversitet – Projektansvarig, provtagning, sedimentanalyser, beräkningar, modellering och rapportering

Allumite konsult AB – Råd om anläggningen och provtagning

3.2 Lokaler

Samtliga studerade lokaler är belägna längs Siljans strand (figur 1).



Figur 1. Provtagningslokaler vid Siljan. Referenslokalen = Sref och odlingslokalen = SI.

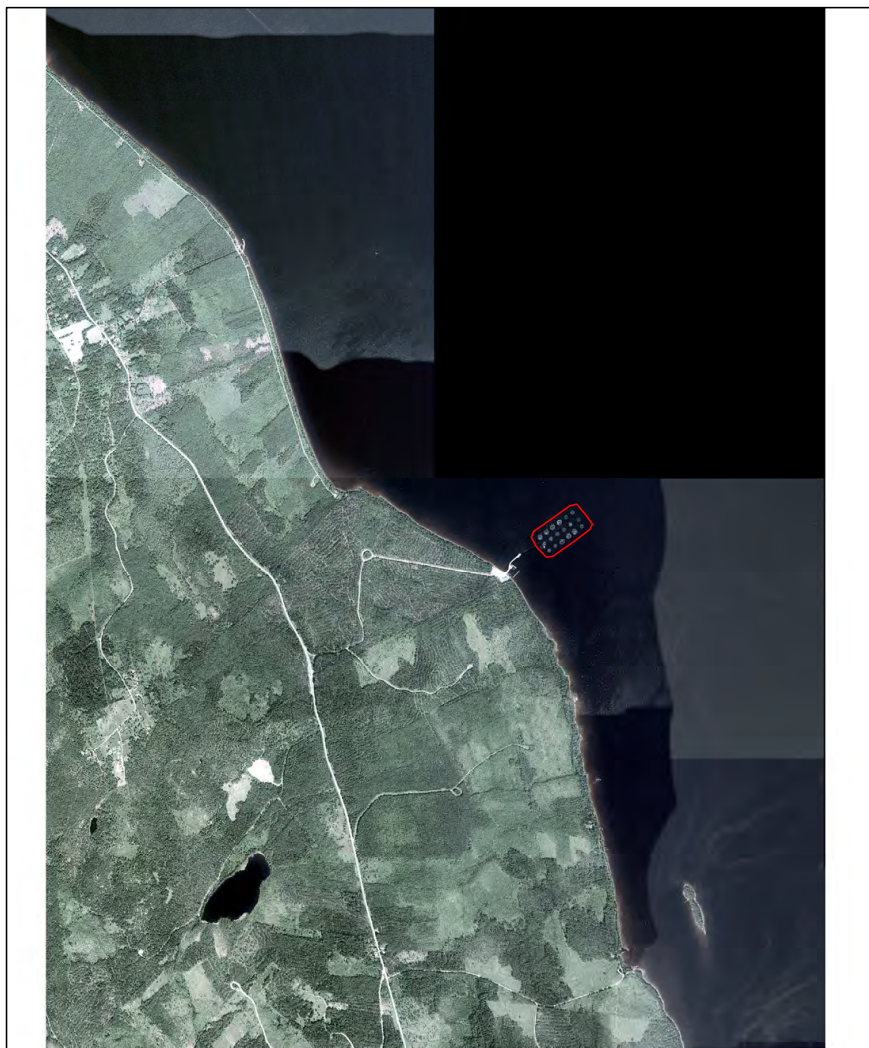
3.2.1 Siljan

Siljan är att betrakta som en näringsfattig sjö och fosforhalterna har under de senaste årtiondena i medeltal legat kring 5-6 ug/l.. Odlingslokalen är belägen vid Siljan i Mora kommun (Sollerö Björka, figur 2) och har använts till odling av regnbåge sedan år 2007.

Produktion är alltså pågående vid odlingslokalen. Det innebär att utfodring av fisk sker under ca maj-november. Mellan åren 2007 till 2011 har produktion på platsen bedrivits genom utfodring av ca 530-650 ton foder per

år, detta motsvarar en fiskproduktion om ca 550 ton fisk. Verksamheten använder sedan år 2012 totalt ca 1300 ton foder årligen vilket motsvarar en produktion om ca 1100 ton fisk årligen.

Tidigare undersökningar av den aktuella odlingslokalen visar att botten under odlingskassarna är påverkade genom pålagringar av näringsrika sediment. Mäktigheten av dessa varierar mellan 0 och ca 20 cm. Området under odlingen som skattas ha sediment påverkade från odlingsverksamheten är mellan 40 000-59 000 m². Storleken på detta område har tagits fram med hjälp av sedimentundersökningar samt modellering. Vattendjupet vid aktuell lokal är ca 15-45.



 Fiskodlingsområde

Meters

0 500 1 000 2 000



Figur 2. Lokalisering av fiskodlingslokalen vid Siljan.

3.2.2 Referenslokalen

Referenslokalen ligger 300 meter nordväst om fiskodlingslokalen. Vattendjup vid lokalen är ca 24,6 till 26,8 meter.

3.3 Provtagning

Från fiskodlingslokalen och referenslokalen (se figur 1) uttogs totalt 14 sedimentproppar den 28-30 september 2021. Provpunkternas lägen redovisas med koordinater i Bilaga 1. Åtta sediment proppar hämtades för kemiskanalys (5 från odlingslokalen och 3 från referensområdet) och ytterligare 6 proppar till inkuberingsförsöket (3 stycken var sig). Åtta av dessa proppar avsågs för kemisk analys och sex för vidare inkuberingsförsök. Representativa bilder av sedimentpropparna återfinns i bilaga 2.

Vattendjupet noterades vid varje provtagningspunkt och profilmätningar för syrgas, temperatur, och andra parametrar gjordes varje halvmeter med en multimeter/aquatroll. Detta för att fastställa att vattenmassan inte var skiktad och att maximal andel läckagebenägen fosfor fanns bunden i sedimentet. Sedimentpropparna avsedda för kemisk analys (n=8) skiktades omedelbart vid provtagning och skikten från 0-2, 2-4, 4-6, 6-8, 8-10, 10-15, 15-20, 20-25 och 25-30 centimeters djup sparades. Provtagningen utfördes av Sveriges lantbruksuniversitet och Allumite konsult AB.

3.4 Analyser

I en fraktionerad fosforanalys extraheras olika former av fosfor ur provet i olika steg: H₂O-P (porvatten och löst bunden/lätt löslig fosfor), BD-P (järnbunden fosfor), NaOH-P (aluminiumbunden fosfor), NaOH org-P (organisk fosfor) och HCl-P (kalciumbunden fosfor). Metoden finns ursprungligen beskriven av Psenner et al. (1988) och har modifierats av Hupfer et al. (1995). Läckagebenägen fosfor i sedimenten återfinns i huvudsak i de tre fraktionerna (1) löst bunden fosfor, (2) järnbunden fosfor, och (3) organisk fosfor. Totalfosfor analyserades också i samtliga proppar. Den löst bundna fosfor är direkt tillgänglig i vattenmassan, medan järnbunden fosfor kan bli lättillgänglig när syrgashalten understiger ca 2 mg/L. Dessa två fraktioner kallas också för ”mobil” fosfor. Alla koncentrationer presenteras beräknat utifrån sedimentets torrsvikt.

Organisk fosfor frigörs från organiskt material under nedbrytning och blir sedan en del av den mobila fosforfraktionen. Processen tar tid, från veckor till år. Organisk fosfor anses också vara labil eller lättrörlig, men en svårnedbrytbar rest av denna fraktion blir kvar i de djupare skikten. Dessa bakgrundskoncentrationer subtraheras från de högre halterna i de ytligare sedimentlagren för att beräkna mängden läckagebenägen organisk fosfor.

Vattenhalt och halten organiskt material i sedimenten kvantifierades enligt Håkanson och Jansson (1983). Proverna frystes under 24 timmar (-20 °C) och frystorkades sedan. De torra proverna brändes i en muffelugn (550 °C) i

två timmar. Mängden sediment som förbränns motsvarar mängden organiskt material i sedimenten. Dessa data används för att beräkna koncentration (på torrviktsbasis), sedimentdensitet, och fosformassa. Total kvävehalt, TN (ISO13878:1998) i sedimentproverna analyserades av Inst. för Mark och Miljöes mark och växtnäringslaboratorium på SLU.

Potentiell internbelastning av fosfor uppskattades med hjälp av en empirisk modell (Pilgrim et al. 2007) där mobil fosformassa i de översta sedimentlagren används för att beräkna maximal internbelastning.

3.5 Inkubering av proppar

Tre sedimentproppar från respektive lokal (d v s sex proppar totalt) inkuberades i drygt en månad. Alla rör som användes under inkubationen hade ca 20 cm sediment och ca 25 cm överliggande vatten. Ren mineralolja tillsattes till vattenytan i alla rör för att förhindra diffusion av syrgas. Vattnet provtogs från alla rör en gång i en vecka och sedan ytterligare tre veckor (varannan dag) för att kunna beräkna internbelastning av fosfor. Vattnet i alla rör omblandades dagligen för att bryta upp skiktning som kan uppstå under inkubering och alla rör förslöts med gummiproppar för att minska risken för kontaminering. Syrgashalten mättes (och kalibrerades mot temperatur) med en Presens optisk elektrod med sensorpunkter på insidan av rören. Vattenprov togs regelbundet och analyserades för total fosfor (TP) för att kunna beräkna internbelastningshastigheten av fosfor.

4 Resultat

4.1 Sediment

Vattenhalt och andel organiskt material för sedimentproven från odlingslokalen liknade sediment från eutrofa, näringsrika sjöar. Medelvattenhalten var 78 % (minimum och maximum, 50 – 96 %) och andel organiskt material i det aktiva djupet var 17 % i medelvärde (3 – 65 %) under fiskodlingsanläggningen. Medelvattenhalten i sedimentet från referensområdet var något högre (medelvärde 89 %; 83 – 95 %) och det organiska materialet lägre (medelvärde 10 %; 6 – 16 %). Dessa värden tyder generellt på att sedimenten hämtades från ackumulations- eller transportbottnar (Håkanson och Jansson 1983). Samtliga analysresultat redovisas i Bilaga 1.

4.1.1 Totalfosfor

De flesta prov som analyserades från sediment under fiskodlingsanläggningen bedöms som mycket höga avseende totalfosforkoncentrationer (Olofsson, 2003; tabell 3). Hela andelen av total fosfor var låga i sediment från referenslokalen. Total fosfor driver dock inte internbelastningen, utan det är bara de rörliga fraktionerna av fosfor (mobil och labil organisk fosfor) som bidrar till internbelastning och påverkar vattenkvaliteten negativt.

Tabell 3. Totalfosforkoncentrationer (medelvärde av de översta 6 cm sediment) i sediment från fiskodlingslokalen och referensområdet i Siljan.

	TP	TP	TP	TP	TP
	(mg/g)	(mg/g)	(mg/g)	(mg/g)	(mg/g)
Lokal	1	2	3	4	5
Fiskodling	11,1	11,1	7,2	6,6	13,1
Referens	1,2	1,4	1,3		

4.1.2 Fosforfraktioner

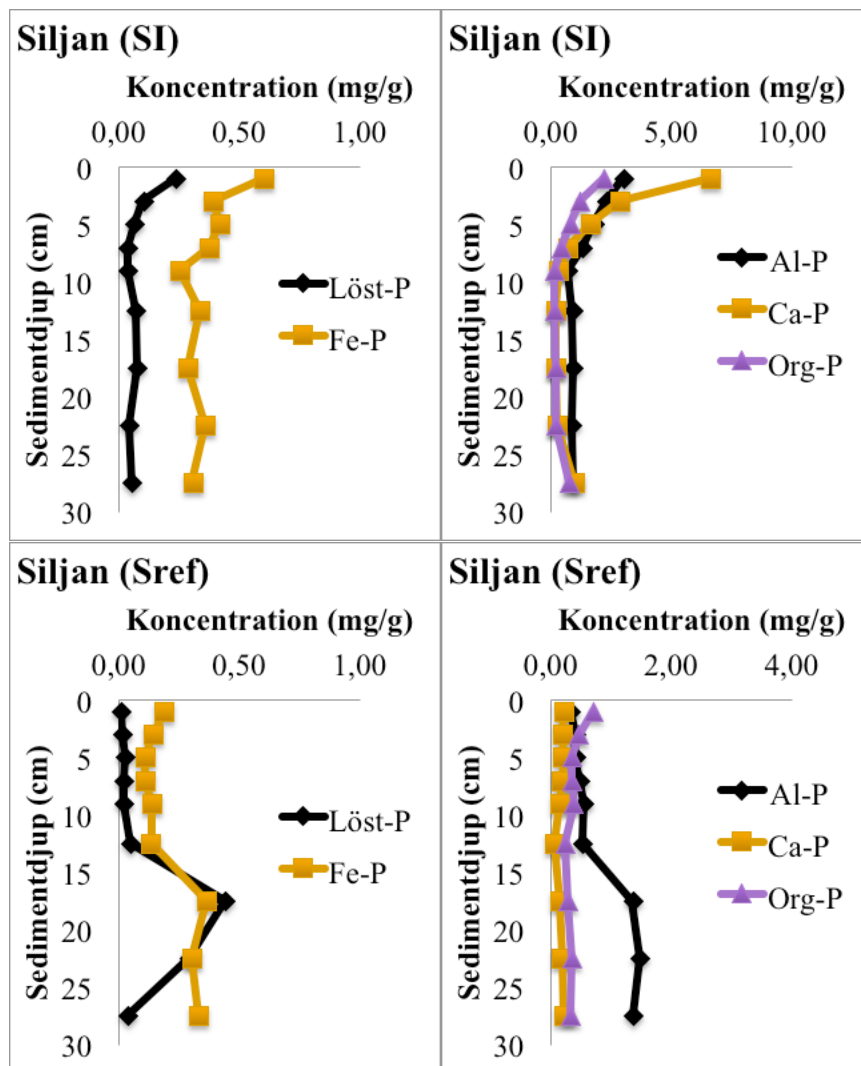
Löst bunden fosfor/porvatten anses som tillgänglig med järnbunden fosfor frigörs under syrgasfattiga förhållanden. Dessa två fraktioner kallas, som tidigare nämnts, för mobil fosfor eftersom de bidrar direkt till internbelastning. Genom att undersöka de översta sedimentlagren (0-4 cm) kan den potentiella internbelastningen av fosfor under syrgasbrist och höga temperaturer (d. v. s ett möjligt maxscenari) beräknas (Huser och Pilgrim 2014).

Aluminiumbunden fosfor (Al-P), kalciumbunden fosfor (Ca-P), och restfosfor (rest-P) anses generellt som stabila former av fosfor i sediment (Psenner et al. 1988). Den största andelen av fosfor i sedimenten från fiskodlingsanläggningen förekom som Ca-P, men Al-P och organisk P var också höga. Vid referenslokalen var organisk P var hög i ytsedimentet och Al-P var högst i djupare sediment (figur 3).

Organisk fosfor (Org-P) kan också frigöras, men endast efter nedbrytning. Denna nedbrytningsprocess sker vanligtvis naturligt över tid, varför koncentrationen av denna form minskar med ökande sedimentdjup (ökande ål-

der på sedimentet). Minskningen av koncentrationen med sedimentdjup indikerar att den frigörs till vattnet (d.v.s. denna del av den organiskt bundna fosfor kan betraktas som labil eller läckagebenägen).

Samtliga koncentrationer av fosforfraktioner i ytsediment som hämtades vid fiskodlingsanläggningen var förhöjda jämfört med de i sediment som hämtades från referenslokalen (figur 3). Både labila (läckagebenägna) och icke labila former av fosfor var förhöjda i sediment från fiskodlingslokalerna. Koncentrationen av löst-P, Fe-P, och Al-P ökade i djupare sediment vid referenslokalen, men eftersom dessa ökningar sker i sediment djupare än 15 cm anses dessa mängder begrävda och inte tillgängliga.



Figur 3. Medelkoncentrationer av fosforfraktioner i sediment från fiskodningslokalen (SI) och referensområdet (Sref). Notera att skalan på figurerna som visar Al-P, Ca-P, och Org-P är annorlunda för Sref figuren jämfört med den som visar samma fraktioner för SI. Fraktionerna delades upp i två bild för varje lokal p.g.a. olika skalor.

En rest av mobila och organiska fosforfraktioner fanns kvar även i djupare skikt (4-10 cm). I dessa djupare sedimentskikt stabiliseras dessa fosforformer kring en lägre, bakgrundshalt. Detta indikerar att frigörelse av fosfor har upphört och att enbart inerta organiska former av fosfor finns kvar i sedimenten. Under vissa omständigheter sker denna stabilisering först vid ännu större djup (>10 cm). Detta kan inträffa exempelvis när bottenlevande fisk (t.ex. karpfiskar) som stör bottensedimentet finns i stora mängder, vindpåverkan är stor (grunda områden), eller om vatten- och organisk halt i sedimentet är höga. Det sedimentdjup där mobil fosfor stabiliseras anses vara det *aktiva sedimentdjupet*, det vill säga den delen av sedimentet som interagerar med vattenmassan. Mängden fosfor i det aktiva djupet (enhet g/m²) kan därmed beräknas. Mängden fosfor som finns i det aktiva djupet summe-

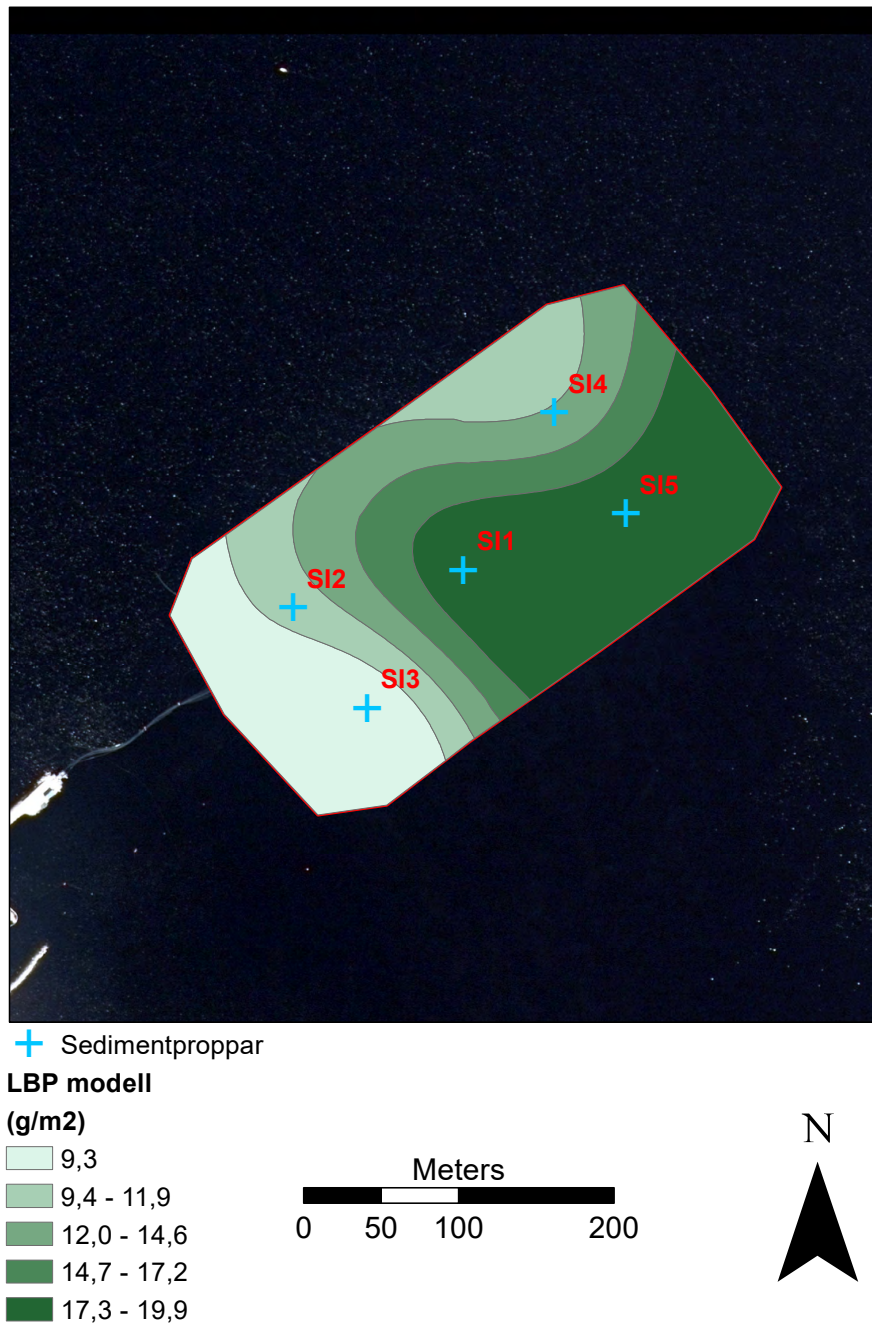
ras för att beräkna den totala massan som potentiellt över tid har en påverkan på internbelastningen.

Det aktiva djupet (medelvärde) i sediment under fiskodlingsanläggningen var 7,6 cm medan det var något mindre i sediment från referenslokalen (4,7 cm).

Massan av läckagebenägen fosfor (mobil fosfor och labil organisk fosfor) i det aktiva djupet summerades för alla proppar. Medelvärdet för sediment från fiskodlingslokalen var 13,7 g/m² läckagebenägen fosfor i det aktiva lagret, men med en stor variation mellan provtagningspunkterna. De prov med mest fosfor var de som var belägna mest centralt och på östra sidan i fiskodlingens verksamhetsområde (figur 4). Vid referensområdet återfanns 1,4 g/m² läckagebenägen fosfor i det aktiva lagret.

Tabell 4. Läckagebenägen fosfor (LBP) i det aktiva sedimentlagret vid fiskodlingslokalen i Siljan.

Lokal	Medel LBP (g/m ²)	Intervall LBP (g/m ²)
Fiskodling	13,7	6,6 – 19,9
Referens	1,4	0,9 – 2,0



Figur 4. Modellerat läckagebenägen fosfor (LBP) i det aktiva sedimentlagret vid Siljan

För att beräkna överskottet av läckagebenägen fosfor i sediment från Siljan, subtraherades bakgrundsvärdet vilket utgjordes av referenslokalens läckagebenägna fosformängd ($1,4 \text{ g/m}^2$) från de uppmätta värdena från fiskodlingslokalen. Sedan multiplicerades dessa värden med arean av påverkansområdet för att uppskatta hela överskottet av fosfor i sedimenten (tabell 5). Påverkansområdet har bedömts vara 40 000 till 59 000 m^2 i tidigare studier. Överskottet av läckagebenägen fosfor blir då ca 0,5 – 0,7 ton för uppskattade påverkansområdet i det aktiva sedimentlagret.

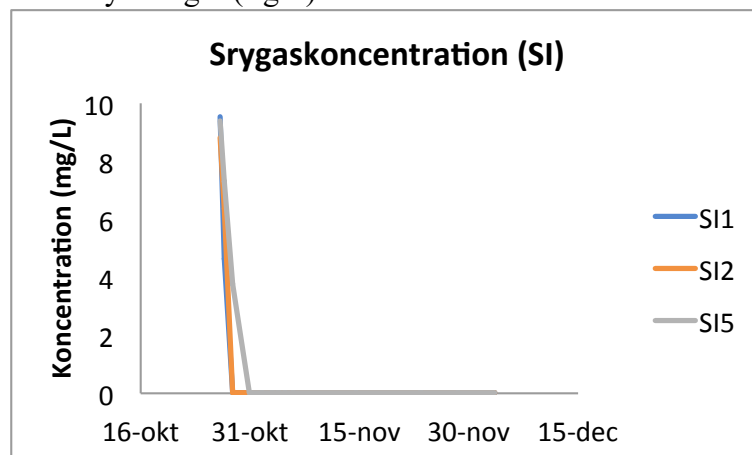
Tabell 5. Överskottet av läckagebenägen fosfor (LBP) i det aktiva sedimentlagret vid fiskodlingslokalen i Siljan.

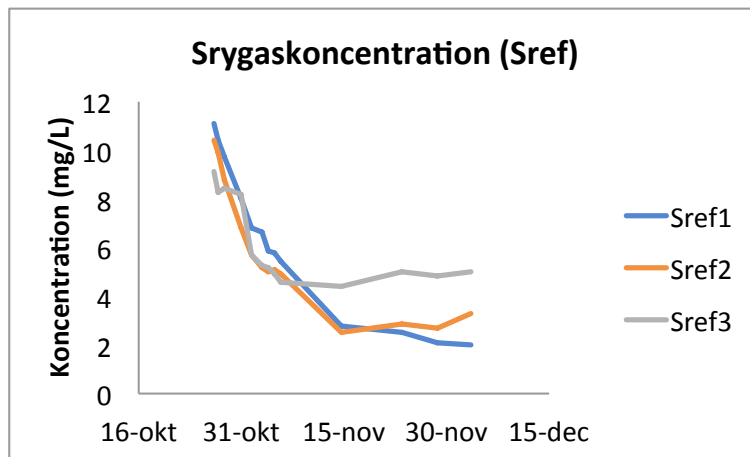
Area	LBP	LBP
(m^2)	(g/m^2)	(kg)
40 000-59 000	12,3	491 - 724

4.2 Inkuberingsförsök

4.2.1 Syrgasförbrukning

Tre proppar från varje provtagningslokal inkuberades i rör med start under den senare delen av oktober till början av december 2021. Mineralolja tillsattes till alla rör efter de leverats till laboratoriet för att förhindra diffusion av syrgas. Detta för att kunna beräkna syrgasförbrukning. Syrgashalten minskade i alla rör över tid. I rören med sediment från referenslokalen sjönk syrgashalten ej fullständigt, dvs nådde ej 0 mg/L över tid. Halten sjönk snabbast i rör med sediment från fiskodlingslokalen och nådde 0 mg/L inom tre till fyra dagar (figur).





Figur 5. Koncentration av syrgas i vattnet ovan sedimentet från fiskodling respektive (övre bild) och referenslokal (nedre bild).

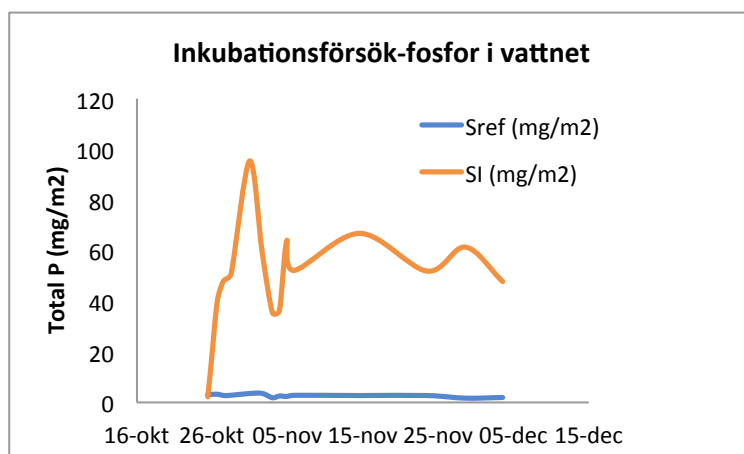
Syrgasförbrukningen varierade mellan 0,9 och 1,5 g/m²/d för sediment från fiskodlingslokalen men var betydligt lägre i de rör som hämtades från referenslokalen (mellan 0,06 och 0,09 g/m²/d, tabell 6).

Tabell 6. Syrgasförbrukning av sediment i tre sedimentproppar från referensområdet samt fiskodlingsanläggningen i Siljan.

Lokal	Station	Syrgasförbrukning (g/m ² /d)
Referens	Sref1	0,09
	Sref2	0,06
	Sref3	0,08
Fiskodling	SI1	1,45
	SI2	1,30
	SI5	0,93

4.2.2 Internbelastning av fosfor

Läckage av fosfor följde samma trend som syrgashalten med mest läckage från sediment hämtade från fiskodlingslokalen och minst läckage från sediment hämtade från referenslokalen (figur 6).



Figur 6. Medelmassan av fosfor i vattnet ovan sedimentet från fiskodlings- (SI) och referenslokalen (Sref).

Medelhastigheter för läckage av fosfor från sediment i odlingslokalen och referensområdet var 4,4 respektive 0,08 mg/m²/d. Maximala uppmätta värden följde samma trend med 16,2 och 0,44 mg/m²/d vid odlingslokalen respektive referensområdet. Alla värden presenteras i tabell 7.

Tabell 7. Internbelastningshastighet för fosfor (Li) från sediment från fiskodlings- och referenslokalen.

Lokal	Station	Medel Li (mg/m ² /d)	Max Li (mg/m ² /d)
Referens	Sref1	0,14	0,60
	Sref2	0,10	0,25
	Sref3	0,01	0,48
Fiskodling	SI1	5,6	19,3
	SI2	3,6	16,4
	SI5	4,0	12,9

Potentiell internbelastning beräknades också med den empiriska modellen av Pilgrim et al. (2007) med massan av mobil fosfor (porvatten, lättlöslig och järnbunden fosfor) i de översta sedimentlagren (0-4 cm). Eftersom det kan finnas mer organiskt material i sediment under fiskodlingsanläggningar (Huser et al. 2021a), testade vi att justera modellen för att inkludera denna fraktion. Vi antog att 10 % av organisk fosfor skulle brytas ned och bli tillgängligt per år i de översta 4 cm sediment. Inkludering av organisk fosfor hade dock bara en mindre effekt på internbelastningshastighet (Li, Tabell 9).

Tabell 9. Intervaller för potentiell internbelastningshastighet för fosfor baserat på modellen av Pilgrim et al. (2007) för enbart mobil fosfor samt för både mobil och organisk fosfor (org-P)..

Lokal	Li (mobil P)	Li (mobil + org P)
	(mg/m ² /d)	(mg/m ² /d)
Fiskodling	6 - 24,1	7,6 - 24,6
Referens	1 - 1,3	1,5 - 1,8

5 Diskussion

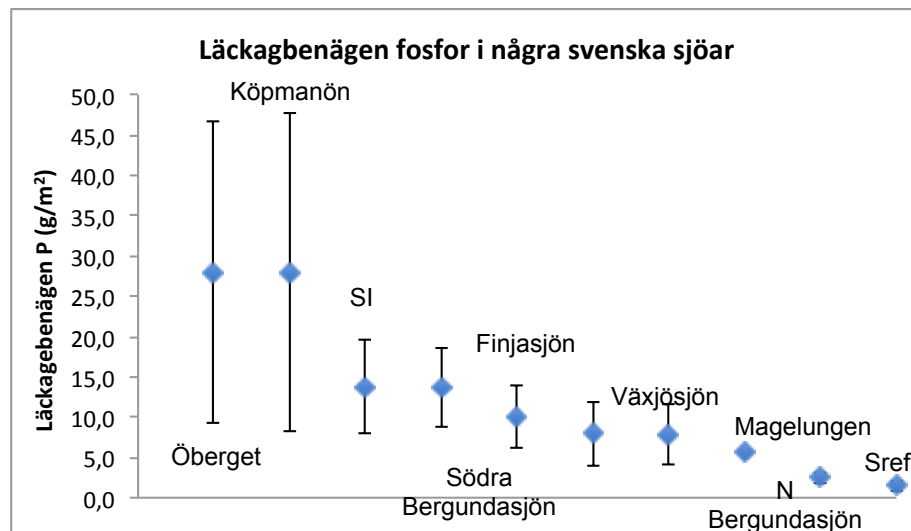
Fiskodlingsverksamheten har tydligt påverkat sedimentet under odlingsanläggningen vid Siljan, vilket är förväntat. Näringsämnen och organiskt material har lett till en ökad syrgasförbrukning och läckage av näringsämnen (fosfor) från sedimentet.

5.1 Läckagebenägen fosfor i sedimenten

Jämfört med referenslokalen var mängden läckagebenägen fosfor drygt 10 gånger högre i sediment under fiskodlingsanläggningen vid Siljan (tabell 4). Totalt finns det ett överskott av ca mellan 0,4 och 0,7 ton fosfor i det aktiva lagret som potentiellt kan frigöras från sedimenten över tid till Siljans vatten (tabell 5).

5.1.1 Jämförelse med referenslokalen och andra system

I figur 7 jämförs mängden läckagebenägen fosfor i sediment från Siljan med ett fåtal andra vattenförekomster i Sverige, inklusive två fiskodlingslokaler vid Höga Kusten (Öberget och Köpmanön). Läckagebenägen fosfor i sediment från Siljan är högre eller i paritet med mängden som finns i sjöar som klassas som mycket näringsrika (Södra Bergundasjön) medan sediment från referenslokalen liknar sediment från sjöar som är näringsfattiga, vilket stämmer väl överens med de förhållanden som naturligt finns i Siljan. En central skillnad mellan dessa lokaler är att sedimenten från fiskodlingslokalen kan anses vara direkt påverkade från en verksamhet medan de andra systemen står under en mer generell näringspåverkan/eutrofiering.



Figur 7. Mängden läckagebenägen fosfor i sediment från fiskodlings- och referenslokalen (SI respektive Sref), fiskodlingslokaler vid Höga Kusten (brackvatten) samt ett fåtal sjöar i Sverige. Södra Bergundasjön vilken anses som mycket näringsrik när det gäller vattenkvaliteten, Finjasjön till Norra Bergundasjön som näringsrika, och Magelungen som måttlig näringsrik. Data från de andra sjöarna kommer från Huser 2021a och 2021b.

5.2 Syrgasförbrukning

Syrgasförbrukningen var betydligt högre från sediment från fiskodlingslokalen jämfört med referensområdet (tabell 6). Medelvärde för syrgasförbrukning av sedimentet från fiskodlingen vid Siljan ($1,2 \text{ g/m}^2/\text{d}$) kan jämföras med fiskodlingsområdena Öberget ($2,7 \text{ g/m}^2/\text{d}$) och Köpmanön ($1,1 \text{ g/m}^2/\text{d}$) vid Höga Kusten. Dessa värden kan också jämföras med en studie av fem sjöar i södra Sverige där syrgasförbrukningen (1975-1976) var mellan $0,37 \text{ g/m}^2/\text{d}$ i näringsfattig sjö och $0,92 \text{ g/m}^2/\text{d}$ i en mycket näringsrik sjö (Granéli, 1978) samt intervall för sjöar i världen var $0,05$ till $1,0 \text{ g/m}^2/\text{d}$ (medelvärde av $0,32 \text{ g/m}^2/\text{d}$) enligt en sammanfattning av Biddanda (2005).

5.3 Potential för återhämtning

För att beräkna tiden det skulle ta för sedimentet vid fiskodlingslokalen i Siljan att återhämta sig med avseende på näringsämnen (fosfor) har överskottet av läckagebenägen fosfor (enhet g/m^2) använts i kombination med internbelastningshastigheter (enhet $\text{mg/m}^2/\text{d}$), både de som beräknades med inkuberingsförsöket (tabell 8) och potentiell internbelastning som beräknades med mobil fosfor i sedimentet (tabell 9).

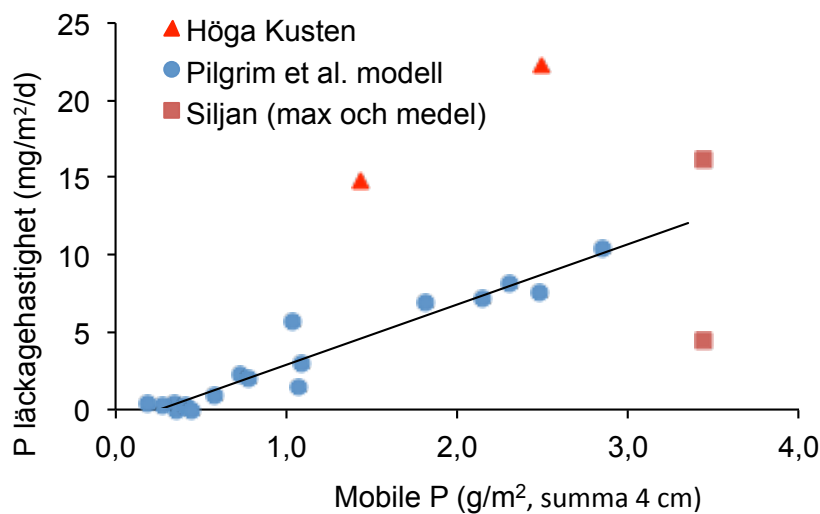
Återhämtningstid för Siljan varierade från 7,7 år (baserat på inkuberingsdata) till 2,7 år (baserat på sedimentmodellen). Uppskattad återhämtningstid är längre när den beräknade internbelastningen med uppmätta data används eftersom hastigheterna för läckage av fosfor var lägre i det genomförda försöket jämfört med de som modellerades fram (tabell 10).

Tabell 10. Uppskattad tid för kemisk återhämtning baserad på hastigheter för internbelastning av fosfor från modellering av mobil fosfor i sediment och läckage av fosfor från sediment under inkubering.

Lokal	Li	Li	Återhämtning	Återhämtning
	Modell	Inkubering	Modell	Inkubering
	(mg/m ² /d)		(år)	(år)
Siljan	12,3	4,4	2,7	7,7

5.3.1 Skillnader mellan modellerade och uppmätt internbelastning

Medelhastigheten för läckage av fosfor var lägre än uppskattat ($4,4 \text{ mg/m}^2/\text{d}$), medan det maximala värdet var något högre ($16,4 \text{ mg/m}^2/\text{d}$) i jämförelse (figur 7) med modellen av Pilgrim et al. ($12,3 \text{ mg/m}^2/\text{d}$, 2007).

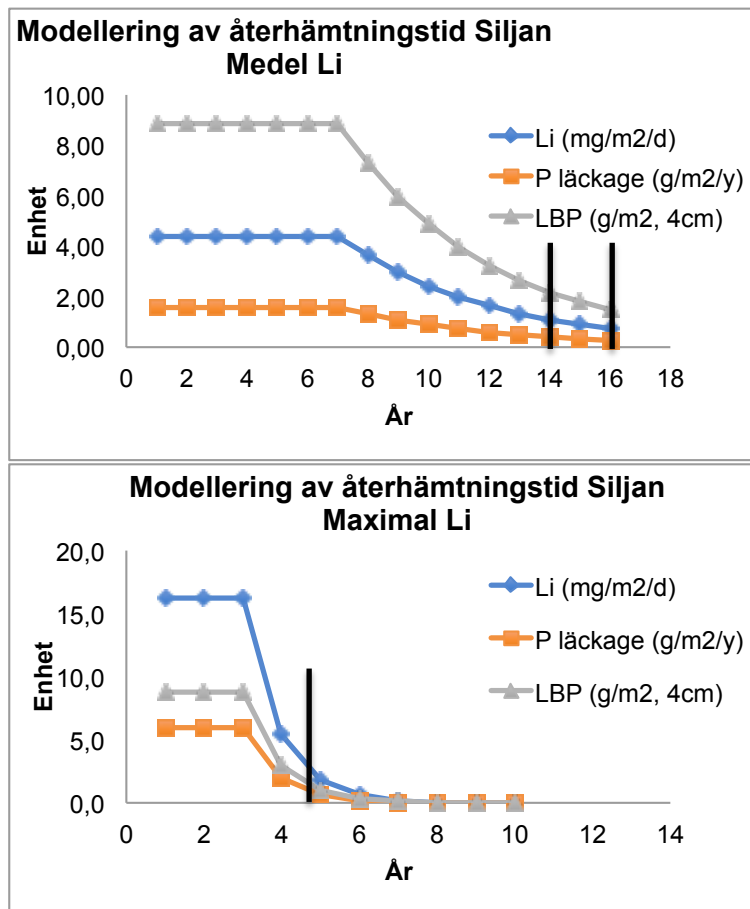


Figur 7. Medel och maxvärden för internbelastningshastighet under försöket i inkuberingsrör med sediment från Siljan jämfört med data från Höga Kusten samt sjöar som ingår i modellen av Pilgrim et al. (2007).

5.3.2 Modellering av återhämtningstid

Eftersom fosfor kommer att minska i sedimenten vid fiskodlingslokalen i Siljan över tid, kommer sedimentläckaget av fosfor också att minska. För att ta hänsyn till denna process, har vi skapat en enkel sedimentdiagenes (nedbrytnings) modell. Modellen använder mängden fosfor som frigörs under ett år från de översta 4 cm sediment, samt uppåtgående diffusion av fosfor från djupare sedimentlager (5-8 cm) för att beräkna mängden av läckagebenägen fosfor i sedimentet och tillhörande internbelastningshastighet. Läckagebenägen fosfor flyttar uppåt mot sedimentytan kontinuerligt och tar platsen som den fosfor som redan har släppts till vattnet har haft. Detta är en process som fortgår tills överskottet av läckagebenägen fosfor i djupare sedimentlager har tömts.

Figur 8 visar internbelastningshastighet (L_i), hur mycket fosfor som läcker från sedimentet varje år (P läckage) och mängden av läckagebenägen fosfor i de översta sedimentlagren (4 cm) för att kunna jämföra med läckagebenägen fosfor i sediment som hämtades från referenslokalen. Det fanns $1,4 \text{ g/m}^2$ (standardavvikelse = 1,2) läckagebenägen fosfor i de översta sedimentlagren vid referenslokalen. För att beräkna återhämtningstid har vi använt två slutpunkter som mål, mängden av läckagebenägen fosfor ($1,4 \text{ g/m}^2$) och mängden plus standardavvikelsen ($2,0 \text{ g/m}^2$).



Figur 8. Interbelastningshastighet (Li), årligt läckage av fosfor (P-läckage), och mängden läckagebenägen fosfor (översta 4 cm) i sediment från odlingslokalen i Siljan. Svarta linjerna visar förväntade återhämtningstider enligt data från genomförda försöket och modellen.

Enligt modellen kommer läckagebenägen fosfor att nå motsvarande mängd likt sediment vid referenslokalen om 14 till 16 år om medelhastigheten för läckage används och mellan 4 och 5 år om maximala värdet för läckaget används. Dessa värden ligger något högre jämfört med de uppskattningar från modellerade samt uppmätta värden genom inkuberingsförsök som visas i tabell 10 och är troligtvis mer rimliga eftersom internbelastningshastigheten kommer att variera i framtiden.

5.4 Osäkerheter

Det finns några osäkerheter gällande uppskattningar för återhämtningstid. Först, och kanske viktigast, är temperaturberoendet. Temperaturen i bottenvattnet varierar under säsongerna och ju kallare det blir desto mindre sker nedbrytning av organiskt material i sedimentet. Detta antyder att syrgashalterna inte minskar lika snabbt och läckaget av fosfor från sediment kan gå långsammare, vilket skulle leda till längre återhämtningstider. Läckage av fosfor från sedimenten kommer att minska mängden som finns i sediment

över tid, vilket antyder att hastigheter av läckage av fosfor kommer att minska, vilket också skulle leda till längre återhämtningstider.

En motsatt effekt uppkommer på grund av att vattnet i provtagningsrören inte omblandas i lika stor utsträckning som under naturliga förhållanden. Detta indikerar att när fosfor frigörs från sediment i rör, bildas högre och högre koncentrationer av fosfor i vattnet. Dessa späds snabbt ut i naturliga vatten, men inte i ett slutet system. Läckage av fosfor från sediment i rör kan minskas p.g.a. jämviktsprocesser, d.v.s. att när det redan finns mycket fosfor i vattnet blir det svårare för ännu mer fosfor i sedimentet att släppas till vattnet. Den här effekten kan ses i figur 6 där koncentrationer av fosfor planar ut under försöket efter en stark ökning. En sådan effekt skulle leda till en underskattning av hastigheter för läckagebenägen fosfor och en överskattning av återhämtningstider

Valet av referenslokalen har en stor betydelse och kan också ha påverkat resultaten. Sediment som hämtades från referenslokalen skulle klassas som sediment som återfinns på transportbottnar, medan sediment som hämtades från odlingslokalerna skulle klassas som den typen som ligger på ackumulationsbottnar enligt uppmätta data för vattenhalt och organiskt material (Håkanson 1981). Sediment som ligger på transportbottnar har generellt lägre halter av näringsämnen samt mindre sediment, vilket tyder på att mängden (d.v.s massan, g/m^2) läckagebenägen fosfor och andra näringsämnen är lägre jämfört med sediment från ackumulationsbottnar i samma vattenförekomst. Det är därför möjligt att referensvärdet för läckagebenägen fosfor har underskattats och återhämtningstider därför har överskattats.

6 Slutsatser

Sediment under fiskodlingsanläggningen vid Siljan var betydligt påverkat från verksamheten. Nedfall av fekalier och foderrester har resulterat i höga halter av fosfor i sedimentet, vilket var förväntat. Syrgasförbrukningen var också förhöjd p.g.a. att det fanns mycket näringsämnen och mycket organiskt material i sedimentet. Den totala belastningen av fosfor från sedimentläckage under den tiden det tar för återhämtning är betydligt mindre jämfört med den totala belastningen från andra källor till sjön under bara ett år.

Det totala överskottet av läckagebenägen fosfor i sedimentet under anläggningen var ca 890 kg, medan summan av alla källor av fosfor tillskott till Siljan är nästan 30 ton årligen. Den fosfor som finns i sedimentet kommer att frigöras under flera år och enligt modellen kommer att bidra med högst 0,2 ton per år.

Återhämtning kommer att ske naturligt och ta mellan 5 och 16 år enligt det genomförda försöket och sedimentdiagenesmodellen, med reservation för osäkerheter. Det är troligt att återhämtningstiden blir närmare 5 år. Det p.g.a. vattenutbytet vid odlingslokalen är hög.

Så vitt författarna vet är det här första studien som har undersökt andelen läckagebenägen fosfor och potential för återhämtning av sediment under fiskodlingsanläggningar i sötvatten. Vidare studier bör genomföras som besvarar frågor rörande temperaturs inverkan, påverkan från olika foder, och hur regelbunden flytt av odlingslokaler (s. k. odlingsrotation eller cirkulation) kan påverka sedimentet och bottenens möjlighet till återhämtning. Alla dessa faktorer kan påverka ackumulation av näringsämnen invid odlingsanläggningar och potentiell tid för återhämtning, vilka är viktiga faktorer för att välja lämplig lokalisering samt en lämplig odlingsteknik för att bedriva fiskodling.

Referenser

- Biddanda, B., 2005. Respiration in aquatic ecosystems. Edited by del
giorgio p. A. And williams p. J. Le b. Oxford university press, 2005,
315 pp.
- Granéli, W. 1978. Sediment oxygen uptake in south Swedish lakes. *Oikos*,
7-16.
- Hupfer M, Gachter R, Giovanoli R. 1995. Transformation of phosphorus
species in settling seston and during early sediment diagenesis.
Aquat Sci. 57(4):305-324.
- Huser, B.J., Carlberg, H., Futter, M.N. 2021a. Undersökning av närings-
ämnen i sediment under fiskodlingslokaler i Höga Kusten. SLU rap-
port 2021:07.
- Huser, B.J. 2021b. Undersökning av läckagebenägen fosfor och rekom-
mendation av aluminiumdosering i västra Riddarfjärden. Sjörestau-
tering rapport 2021:0301.
- Huser, B.J., & Pilgrim, K.M. 2014. A simple model for predicting alumi-
num bound phosphorus formation and internal loading reduction in
lakes after aluminum addition to lake sediment. *Water research*, 53,
378-385.
- Håkanson L, Jansson M. 1983. Principals of lake sedimentology. Berlin:
Springer-Verlag.
- Olofsson, H, 2003, Detaljerad sedimentundersökning i Ryssbysjön, Al-
control laboratories, Nässjö kommun.
- Pilgrim KM, Huser BJ, Brezonik PL. 2007. A method for comparative
evaluation of whole-lake and inflow alum treatment. *Water Res.*
41(6):1215-1224.
- Psenner R, Boström B, Dinka M, Pettersson K, Puckso R, Sager M. 1988.
Fractionation of phosphorus in suspended matter and sediment. *Ar-
chiv Fur Hydrobiologie Supplement.* 30:98-103.
- Stumm W, Morgan JJ. 1996. *Aquatic Chemistry*. New York: John Wiley
and Sons, Inc.

Bilaga 1

Tabell 1. Vattenhalt och organiskt material i prover från odlings- och referenslokaler vid Siljan samt vattendjup och koordinater till provpunkterna. Koordinatsystem är SWEREF 99 TM.

Station	Propp	Skikt	Vatten		Koordinat	Koordinat	Vatten	Organiskt
			djup				halt	material
		(cm)	(m)	X	Y		(%)	(%)
Odling	SI1	0-2	34,7	483304	6744645		94,0	45,7
		2-4					87,4	21,9
		4-6					84,4	17,7
		6-8					80,5	8,9
		8-10					77,6	13,1
		10-						
		15					71,1	10,3
		15-						
		20					72,0	6,8
		20-						
		25					70,5	6,4
		25-						
		30					72,9	7,3
Odling	SI1	0-2	26,5	483195	6744621		96,1	65,3
		2-4					51,4	5,8
		4-6					49,8	2,8
		6-8					55,6	3,5
		8-10					61,9	4,4
		10-						
		15					65,8	5,2
		15-						
		20					65,8	4,9
		20-						
		25					54,5	4,2
		25-						
		27					50,3	2,9
Odling	SI3	0-2	23,9	483195	6744621		79,7	15,9
		2-4					65,4	6,3
		4-6					60,9	3,6
		6-8					65,1	4,2
		8-10					66,8	4,0
		10-						
		15					65,2	2,9
		15-						
		20					62,9	2,8
		20-						
		25					60,7	4,2
Odling	SI4	0-2	36,7	483363	6744746		94,7	29,7

Institutionen för vatten och miljö

						2-4	90,6	18,8
						4-6	87,3	12,5
						6-8	83,4	8,9
						8-10	81,0	10,2
						10-		
						15	77,4	7,8
						15-		
						20	79,2	8,9
						20-		
						25	81,2	10,0
						25-		
						30	83,7	10,6
						30-		
						35	83,3	11,1
						35-		
						37	80,7	10,0
Odling	SI5					0-2	95,1	43,0
		36,7	483409	6744681		2-4	92,3	38,0
						4-6	91,3	27,8
						6-8	87,5	14,0
						8-10	77,5	13,9
						10-		
						15	75,6	9,9
						15-		
						20	79,0	8,8
						20-		
						25	79,8	9,6
						25-		
						30	81,6	10,6
						30-		
						35	81,8	10,1
Referens	Sref1					0-2	95,4	13,7
		26,3	482799	6745024		2-4	87,9	9,3
						4-6	83,3	6,4
						6-8	84,4	7,2
Referens	Sref2					0-2	95,2	15,6
		24,6	482927	6745114		2-4	91,2	12,4
						4-6	86,4	7,8
						6-8	85,8	7,1
						8-10	87,2	8,1
						10-		
						15	82,9	9,2
						15-		
						20	81,7	8,6
						20-	77,2	7,4

Institutionen för vatten och miljö

		25					
		25-					
		30				75,8	6,7
		30-					
		35				76,2	6,6
Referens	Sref3	0-2	26,8	483073	6745194	95,0	14,9
		2-4				92,3	12,9
		4-6				89,0	9,7
		6-8				86,1	7,7

Tabell 2. Fosforfraktioner i sedimentprover från Siljan.

Propp	Skikt	DDI	Fe-P	Al-P	Ca-P	org-P	TP
	(cm)	(mg/g)	(mg/g)	(mg/g)	(mg/g)	(mg/g)	(mg/g)
SI1	0-2	0,27	0,28	2,77	4,75	3,33	13,42
	2-4	0,09	0,41	2,19	3,03	1,42	8,92
	4-6	0,08	0,63	3,40	3,28	0,69	11,06
	6-8	0,06	0,54	2,58	0,80	0,54	5,01
	8-10	0,04	0,23	1,19	0,17	0,14	1,77
	10-15	0,17	0,64	1,61	0,13	0,09	3,25
	15-20	0,15	0,28	1,38	0,17	0,14	2,73
	20-25	0,01	0,21	1,12	0,25	0,19	1,90
	25-30	0,01	0,17	0,54	0,26	0,23	1,30
SI1	0-2	0,38	1,16	3,76	12,40	0,86	18,06
	2-4	0,08	0,31	2,06	2,30	0,08	13,69
	4-6	0,03	0,20	1,11	0,63	0,02	1,59
	6-8	0,02	0,13	0,58	0,60	0,14	0,92
	8-10	0,01	0,08	0,41	0,33	0,11	0,95
	10-15	0,02	0,14	0,49	0,22	0,13	1,26
	15-20	0,02	0,17	0,47	0,24	0,09	1,13
	20-25	0,06	0,29	0,39	0,29	0,05	1,43
	25-27	0,03	0,07	0,13	0,28	0,05	0,71
SI3	0-2	0,12	0,37	2,41	4,95	0,39	16,71
	2-4	0,05	0,24	1,51	1,31	0,13	3,30
	4-6	0,05	0,15	0,70	0,55	0,18	1,62
	6-8	0,01	0,18	0,63	0,82	0,12	1,87
	8-10	0,01	0,21	0,54	0,71	0,10	1,25
	10-15	0,01	0,23	0,41	0,29	0,10	1,10
	15-20	0,01	0,24	0,33	0,27	0,08	1,06
	20-25	0,01	0,48	0,60	0,32	0,08	1,76
SI4	0-2	0,15	0,62	2,73	3,91	3,05	12,78
	2-4	0,04	0,44	1,84	1,49	1,31	5,47
	4-6	0,02	0,31	0,64	0,32	0,37	1,69
	6-8	0,04	0,41	0,67	0,19	0,27	1,65
	8-10	0,12	0,53	0,63	0,17	0,18	2,00
	10-15	0,07	0,35	1,19	0,22	0,25	2,05
	15-20	0,04	0,38	1,20	0,22	0,32	2,14
	20-25	0,03	0,37	0,92	0,24	0,28	1,86
	25-30	0,04	0,32	0,57	0,24	0,23	1,42
SI5	30-35	0,06	0,42	0,66	0,22	0,27	1,69
	35-37	0,03	0,36	0,81	0,24	0,24	1,74
	0-2	0,25	0,57	3,35	7,07	3,45	11,91
	2-4	0,24	0,55	3,99	6,18	2,99	15,38
	4-6	0,16	0,81	3,08	3,38	2,72	11,94
	6-8	0,05	0,62	2,09	1,18	1,15	5,19

	8-10	0,02	0,23	0,80	0,23	0,21	1,45
	10-15	0,09	0,32	0,80	0,19	0,17	1,50
	15-20	0,15	0,37	1,26	0,21	0,36	2,29
	20-25	0,09	0,45	1,40	0,23	0,34	2,35
	25-30	0,04	0,36	0,80	0,24	0,29	1,73
	30-35	0,07	0,34	0,72	0,24	0,23	1,48
Sref1	0-2	0,01	0,18	0,29	0,24	0,64	1,38
	2-4	0,01	0,11	0,35	0,19	0,37	1,13
	4-6	0,02	0,09	0,40	0,19	0,29	1,10
	6-8	0,02	0,10	0,56	0,18	0,37	1,18
Sref2	0-2	0,01	0,21	0,35	0,22	0,74	1,54
	2-4	0,02	0,16	0,44	0,19	0,51	1,38
	4-6	0,03	0,11	0,41	0,21	0,34	1,15
	6-8	0,02	0,11	0,44	0,19	0,34	1,12
	8-10	0,02	0,14	0,55	0,14	0,37	1,23
	10-15	0,05	0,13	0,52	0,05	0,23	0,83
	15-20	0,44	0,36	1,36	0,14	0,27	2,32
	20-25	0,29	0,30	1,48	0,17	0,35	2,55
	25-30	0,04	0,33	1,37	0,21	0,32	2,44
	30-35	0,05	0,21	0,79	0,25	0,21	1,54
Sref3	0-2	0,01	0,18	0,35	0,21	0,71	1,44
	2-4	0,01	0,15	0,45	0,19	0,50	1,37
	4-6	0,02	0,12	0,40	0,19	0,37	1,14
	6-8	0,02	0,12	0,42	0,17	0,31	1,06