



Sveriges lantbruksuniversitet
Swedish University of Agricultural Sciences

Institutionen för vatten och miljö

Undersökning av näringsämnen i sediment under fiskodlingslokaler i Storsjön

Brian Huser, Hanna Carlberg, Martyn Futter

SLU, Vatten och miljö: Rapport 2023:4

Referera gärna till rapporten på följande sätt:

Undersökning av näringsämnen i sediment under fiskodlingslokaler i Storsjön. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för vatten och miljö, rapport 2023:4.

Tryck: SLU, Ultuna

Tryckår: 2023

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	Vattviken	5
3.2.2	Referenslokalen	7
3.3	Provtagning	7
3.4	Analys	7
3.5	Inkubering av sedimentproppar	8
4	Resultat	9
4.1	Sediment	9
4.1.1	Fosforfraktioner	9
4.1.2	Syrgasförbrukning	11
4.1.3	Internbelastning av fosfor	13
5	Diskussion	15
5.1	Läckagebenägen fosfor i sedimenten	15
5.1.1	Jämförelse med referenslokalen och andra system	15
5.2	Syrgasförbrukning	15
5.3	Potential för återhämtning	16
5.3.1	Modellering av återhämtningstid	16
5.4	Osäkerheter	17
6	Slutsatser	18
	Referenser	19
	Bilaga 1	20

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 ($\text{mg}/\text{m}^2/\text{d}$)
- 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

2 Introduktion

Vid fiskodling i öppna kassar ansamlas näringsrika fekalier och foderrester från produktionen under eller i närheten av odlingskassarna. Det finns idag en kunskapsbrist 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 bräckvattenmiljöer.

En fiskodlingslokal där odling av regnbåge bedrivits i öppna kassar från 2015, enligt gällande miljötillstånd, belägen invid stranden i Vattviken (Storsjön) 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.

En mer detaljerad kunskap kring sedimenten, näringsläckage och nedbrytningstider kommer kunna hjälpa det svenska vattenbruket att tydligare förstå och kunna kommunicera kring miljöeffekter från vattenbruket.

2.1 Uppdraget

Syftet med denna undersökning var att bedöma näringsstatus av sedimentet och potential för återhämtning för botten under en fiskodlingslokal belägen vid Vattviken.

Sveriges lantbruksuniversitet har undersökt hur stor del läckagebenägen fosfor och total fosfor (TP) som finns i sediment dels i ett område där fiskodling bedrivits, ett område med aktiv fiskodling samt ett referensområde. Den aktuella anläggningen arbetar med en så kallad "cirkulationsplan" där de roterar odlingsplats vart ca 5-år. 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

3.2 Lokaler

Samtliga studerade lokaler är belägna längs stranden runt Vattviken i Storsjön, Jämtland. (figur 1).



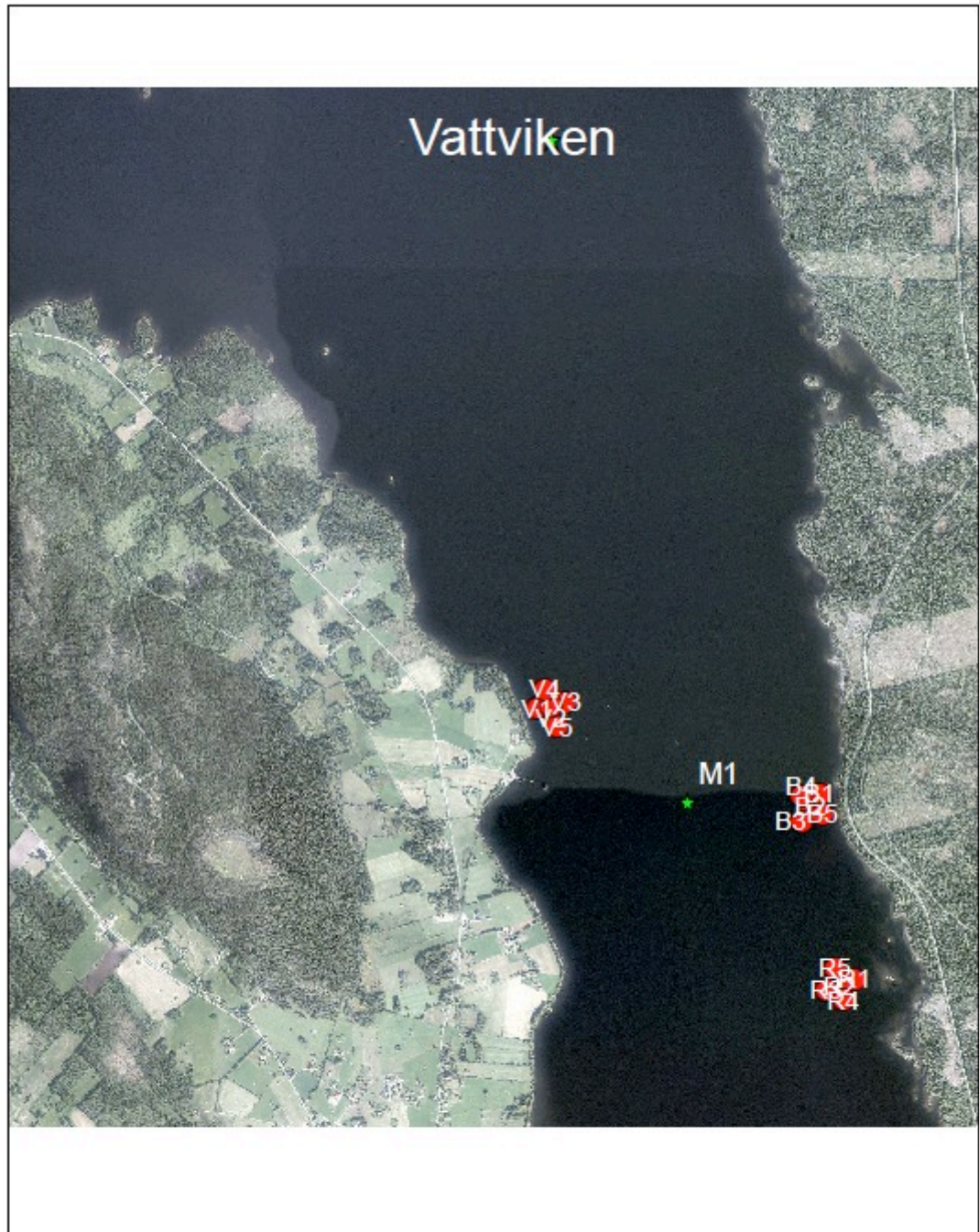
Figur 1. Provtagningslokaler vid Vattviken i Storsjön. Referenslokal = R1-5, lokalen Vattviken = V1-5, lokalen Bratthällan/Brattholmen B1-5, och mittpunkten (djuphålan) = M1.

3.2.1 Vattviken

Storsjön är att betrakta som en näringsfattig sjö och fosforhalterna har under de senaste årtiondena i medeltal legat kring 5 µg/l (20-års medelvärde). Odlinglokalen är belägen vid Vattviken i Bergs kommun (figur 2) och har använts till odling av regnbåge sedan år 2015, enligt gällande miljötillstånd. Det har i området Vattviken funnits några mindre fiskodlingar tidigare, men dessa har varit mindre än 40 ton foder per år och sannolikt inte på exakt samma lokaliseringar som nuvarande verksamhet.

Den aktuella odlingen har en så kallad cirkulationsplan där odling sker under fem odlingssäsonger vid en lokal för att sedan flytta till den andra lokalen. Denna odlingsregim inleddes 2015 med produktion vid lokalen Hammarn (härefter benämndes Vattviken) under fem år (2015-2019). Till odlingssäsongen 2020 flyttades kassarna och produktionen till Bratthällan (benämndes också Brattholmen i denna rapport). Vid genomförandet av denna studie hade således odling pågått under en odlingssäsong vid Bratthällan och lokalen hade sedan legat tom under vintern till dess att provtagning genomfördes i mars 2021. Lokalen Vattviken hade vid tidpunkten för undersökningen legat i träda under ca 1,5 år, dvs ingen odling genomfördes där under sommarhalvåret 2020.

Produktion är alltjämt pågående vid odlingslokalen Bratthällan. Utfodring av fisk sker mellan ca maj-november. Produktion på platsen har bedrivits genom utfodring av ca 174-360 ton foder per år för perioden 2015-2021, detta motsvarar en fiskproduktion om ca 340 ton fisk.



0 380 760 1 520 Meters



Figur 2. Lokalisering av fiskodlingslokalerna vid Vattviken.

3.2.2 Referenslokalen

Referenslokalen ligger ca 900 meter söder om Bratthällan på östra sidan av viken. Vattendjup vid provtagningsplatserna (förutom provpunkten mittpunkten) varierade från 9,1 till 26,2 meter (Tabell 1).

Tabell 1. Vattendjup vid provtagningsplatserna.

	Proppar	Djup min (m)	Djup max (m)
Vattviken	V2, V3, V4	23,2	26,2
Bratthällan	B1, B2, B3, B4, B5	11,6	17
Referens	R2, R3, R4, R5	9,1	17,2
Mittpunkten	M1	43,6	43,6

3.3 Provtagning

Från fiskodlingslokalerna och referenslokalen (se figur 1) uttogs totalt 13 sedimentproppar den 3-4 mars 2021. Provpunkternas lägen redovisas med koordinater i Bilaga 1. Tretton sedimentproppar hämtades för kemisk analys-8 från odlingslokalerna, 4 från referensområdet, och 1 från mittpunkten. Ytterligare 6 proppar hämtades till inkuberingsförsöket (från alla ställen förutom mittpunkten). Planen var att hämta fem proppar per lokal för kemisk analys, men det var svårt att hitta områden med tillräckligt mycket sediment för att kunna hämta en sedimentkärna vid lokalen Vattviken och referenslokalen.

Vattendjupet noterades vid varje provtagningspunkt och profilmätningar för syrgas, temperatur, och andra parametrar gjordes varje meter med en multi-meter/aquatroll. Detta för att fastställa att vattenmassan inte var skiktad och att maximal andel läckagebenägen fosfor fanns bunden i sedimentet. Om viken hade varit skiktad skulle en del av de labila formerna av fosfor skulle hade redan frigjorts, vilket skulle ha lett till en underskattning av påverkan på sedimentet (dvs. mindre fosfor i sedimentet).

Sedimentpropparna avsedda för kemisk analys (n=13) skiktades omedelbart vid provtagning och skikten från 0-2, 2-4, 4-6, 6-10, 10-15, 15-20, 20-25 och 25-30 centimeters djup sparades. Vid vissa provpunkter var sedimenttjockleken mindre än 30 cm och därför finns det färre prover för dessa. Provtagningen utfördes av Sveriges lantbruksuniversitet från is.

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 (organiskt

bunden 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. 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 tillsammans 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 lättörslig, 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 torrsviktsbasis), sedimentdensitet och fosformassa.

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 sedimentproppar

Två sedimentproppar från respektive lokal (dvs. sex proppar totalt) inkuberades i drygt en månad. Propparna inkuberades för att kunna beräkna hur fort fosfor i sedimentet frigjordes. 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 efter ca två veckor. Vattnet provtogs från alla rör en gång dagligen i början av försöket och därefter varannan dag i tre veckor för att kunna beräkna internbelastning av fosfor under oxiska (syrerika) och anoxiska (syrefattiga) förhållanden. Vattnet i alla rör omblandades dagligen för att bryta upp skiktning som kan uppstå under inkubering och alla rör förslöts med gummi-proppar för att minska risken för kontaminering. Syrgashalten mättes (och kalibrerades mot temperatur) med en Presens optisk elektrod med sensorpunkter på insidan av rören. Vattenprov analyserades för total fosfor (TP).

4 Resultat

4.1 Sediment

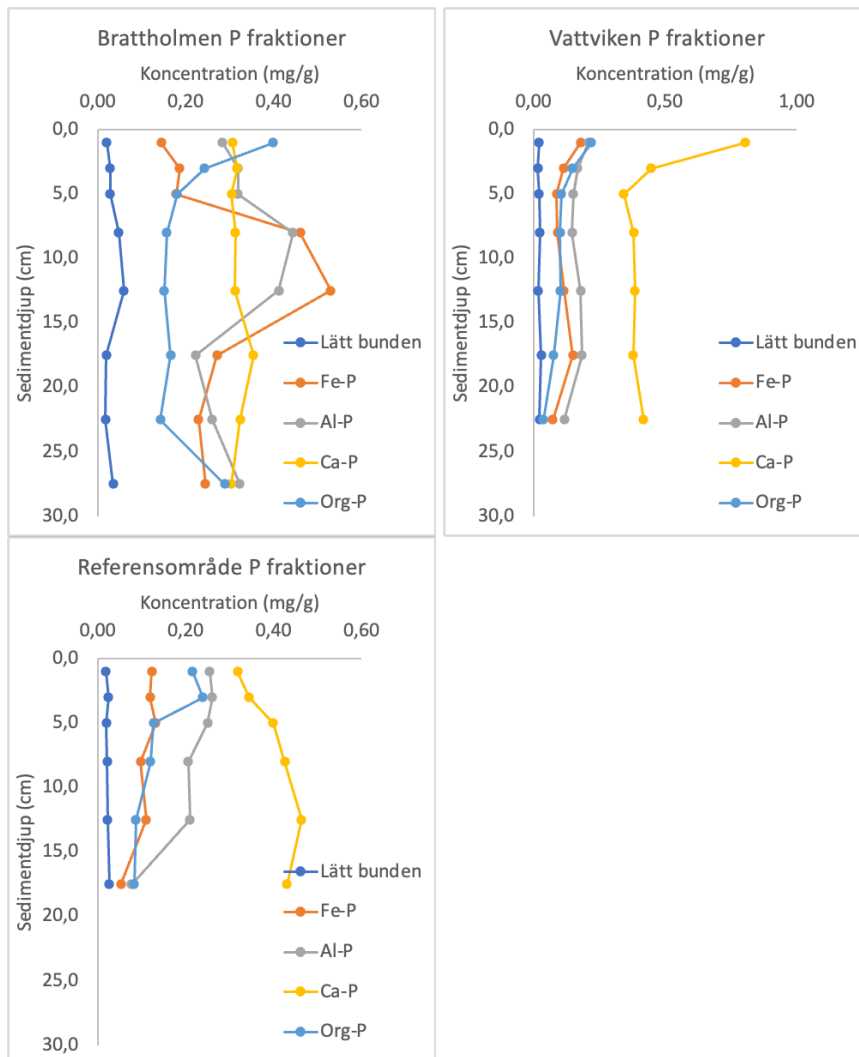
Medelvattenhalten var 80 % vid Bratthällan (min och max, 67 – 92 %), 71 % vid Vattviken (minimum och maximum, 53 – 89 %), och 77 % vid referenslokalen (minimum och maximum, 66 – 89 %). Andel organiskt material i de översta sedimentlagren (0-4 cm) var 9,1, 7,4, och 6,9 % vid Bratthällan, Vattviken, och referenslokalen. Dessa värden tyder generellt på att sedimentpropparna hämtades från transportbottnar (Håkanson och Jansson 1983). Samtliga analysresultat redovisas i Bilaga 1.

4.1.1 Fosforfraktioner

Löst bunden fosfor/porvatten anses som tillgänglig. Detsamma gäller för järnbunden fosfor (Fe-P) vilken 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 maxscenario) 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 lokalen Vattviken och referensområdet förekom som Ca-P, annars fanns det inga tydliga trender i de prov som uttogs med undantag för en högre koncentration av Fe-P mellan 8 och 17,5 cm sedimentdjup vid Bratthällan (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 ålder 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). Koncentrationer av Org-P i ytsediment som hämtades vid fiskodlingsanläggningen Bratthällan var förhöjda jämfört med de i sediment som hämtades från referenslokalen och Vattviken, men de är inte att betrakta som höga jämfört med övergödda sjöar (figur 3).



Figur 3. Medelkoncentrationer av fosforfraktioner i sediment från fiskodlingslokalerna (Brattholmen/Bratthällan och Vattviken) och referensområdet.

Massan av läckagebenägen fosfor (mobil fosfor och labil organisk fosfor) i det aktiva djupet summerades för alla proppar (tabell 2). Medelvärdet för sediment från fiskodningslokaler Bratthällan och Vattviken var 24 respektive 5,0 g/m² läckagebenägen fosfor i det aktiva lagret, men med en stor variation mellan provtagningspunkterna vid Bratthällan. Vid referensområdet återfanns 5,6 g/m² läckagebenägen fosfor i det aktiva lagret.

Tabell 2. Läckagebenägen fosfor (LBP) i det aktiva sedimentlagret vid fiskodningslokalerna vid Vattviken.

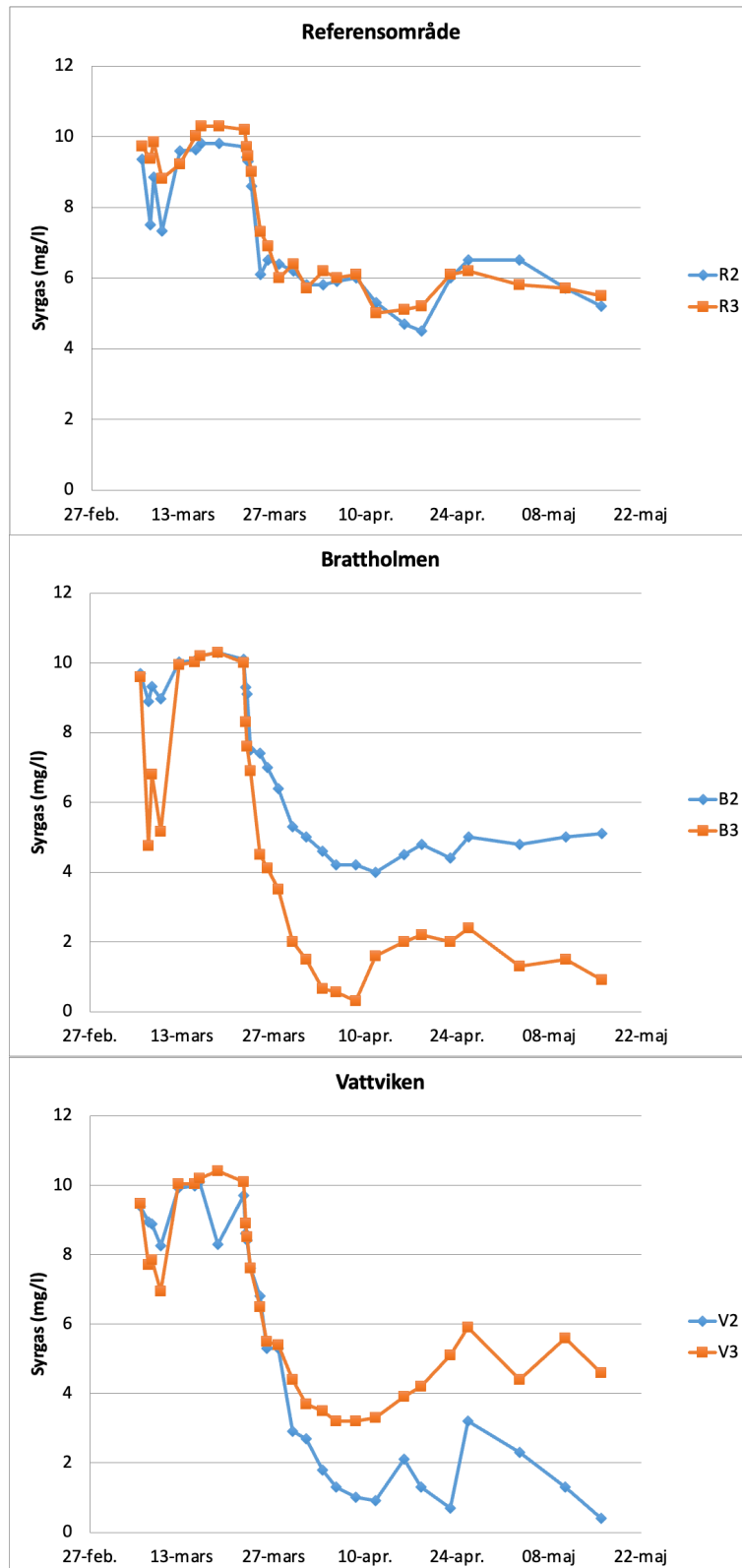
Lokal	Medel (g/m ²)	Intervall (g/m ²)
Bratthällan	24,0	5,4 -54,8

Vattviken	5,0	3,2 -6,6
Referens	5,6	3,2 -7,2

För att beräkna överskottet av läckagebenägen fosfor i sediment från fiskodlingslokalerna, subtraherades bakgrundsvärdet, vilket utgjordes av referenslokalens läckagebenägna fosformängd ($5,6 \text{ g/m}^2$), från de uppmätta värdena från fiskodlingslokalerna. Dessa siffror användes för att beräkna återhämtningstiden, dvs. hur lång tid det skulle ta för sedimenten att likna de från referensområdet gällande fosfor.

4.1.2 Syrgasförbrukning

Två proppar från varje provtagningslokal inkuberades i rör under våren 2021. Mineralolja tillsattes till alla rör efter två veckor för att förhindra diffusion av syrgas. Detta för att kunna beräkna syrgasförbrukning under både syrerika (oxiska) och syrefattiga (anoxiska) förhållanden. Syrgashalten minskade i alla rör över tid efter tillsättning av mineralolja. I de flesta rören sjönk syrgashalten ej fullständigt, dvs nådde ej 0 mg/L över tid. (figur 4).



Figur 4. Koncentration av syrgas i vattnet ovan sedimentet från fiskodningslokalerna respektive och referenslokalen.

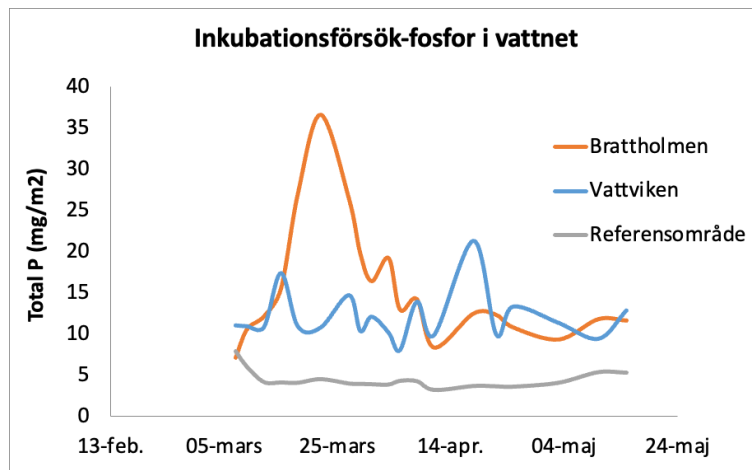
Syrgasförbrukningen varierade mellan 0,058 och 0,11 g/m²/d för sediment från fiskodlingslokalerna och var mellan 0,039 och 0,046 g/m²/d i rör med sediment från referensområdet (medelvärden finns i tabell 6).

Tabell 3. Medelsyrgasförbrukning av sediment från referensområdet samt fiskodlingsanläggningarna.

Lokal	Syrgasförbrukning (g/m ² /d)
Bratthällan	0,072
Vattviken	0,091
Referens	0,042

4.1.3 Internbelastning av fosfor

Läckage av fosfor från sedimenten var högre i rören med sediment hämtade från fiskodlingslokalerna och mindre i rören med sediment som hämtades från referenslokalen (figur 5).



Figur 5. Medelmassan av fosfor i vattnet ovan sedimentet från fiskodlings- respektive referenslokalen.

Medelhastigheterna för läckage av fosfor från sediment från odlingslokaler Bratthällan och Vattviken var 4,4 respektive 3,1 mg/m²/d, medan den var 0,3 mg/m²/d vid referensområdet.

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. 2021), testade vi att justera modellen för att inkludera båda mobil och organisk fosfor. Vi antog att 10 % av den organiska fraktionen skulle brytas ned och bli tillgängligt per år i de översta 4 cm sediment. Inklude-

ringen av organisk fosfor hade dock bara en mindre effekt på internbelastningshastighet (< 5 %, tabell 4). Notera att vattenhalten i sedimentet vid lokalen Vattviken och referensområdet var generellt låg och utanför modellens gränserna. Detta skulle leda till en överskattning av internbelastning av fosfor.

Tabell 4. Intervaller för potentiell internbelastningshastighet (Li) 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)	
Bratthällan	5,4-6,5	5,6-6,7
Vattviken	6-7	6,1-7,1
Referense	4,5-6,2	4,6-6,3

5 Diskussion

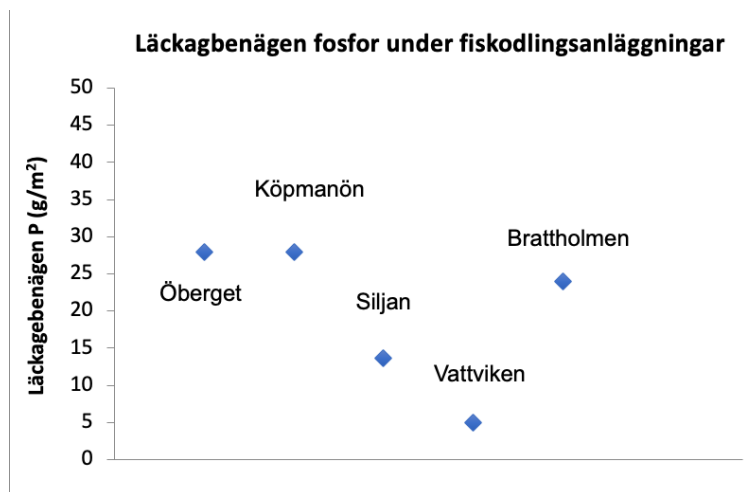
Fiskodlingsverksamheten har påverkat sedimentet något under odlingsanläggningarna vid Vattviken, vilket är förväntat. Näringsämnen och organiskt material har lett till en något ökad syrgasförbrukning och läckage av näringsämnen (fosfor) från sedimentet på vissa ställen, medan andra provpunkter inte kan skiljas från referensområdet.

5.1 Läckagebenägen fosfor i sedimenten

Lokalen Vattviken hade vid tillfället för provtagning legat i träda i en odlings säsong (dvs ingen utfodring under 2020). Resultaten från denna undersökning antyder att sedimenten vid Bratthällan var mer påverkade än de vid Vattviken (tabell 2). Vid lokalen Bratthällan pågår produktion sedan 2020.

5.1.1 Jämförelse med referenslokalen och andra system

I figur 6 jämförs mängden läckagebenägen fosfor i sediment från lokaler i Vattviken med ett fåtal andra fiskodlingsanläggningar i Sverige. Läckagebenägen fosfor i sediment från Bratthällan är något lägre än lokalerna vid Höga Kusten (Öberget och Köpmanön) medan sediment från Vattviken hade betydligt mindre läckagebenägen fosfor i sedimentet.



Figur 6. Mängden läckagebenägen fosfor i sediment från fiskodlingslokalerna vid Vattviken (Storsjön), Höga Kusten (brackvatten), och Siljan. Data från Huser et al 2021 och 2022.

5.2 Syrgasförbrukning

Syrgasförbrukningen var något högre i sediment från fiskodlingslokalerna jämfört med referensområdet (tabell 3). Medelvärdet för syrgasförbrukning av sedimentet från referensområdet (0,042 g/m²/d) kan jämföras med fiskodlingsområdena Bratthällan (0,072 g/m²/d) och Vattviken (0,091 g/m²/d) vid Vattviken i Storsjön. Dessa värden kan jämföras med en studie av två fiskodlingsanläggningar vid Höga kusten där syrgasförbrukningen (2020)

var mellan 1,1 g/m²/d och 2,7 g/m²/d (Huser et al. 2021) samt med intervall för sjöar runt i världen av 0,05 till 1,0 g/m²/d (medelvärde av 0,32g/m²/d). enligt en sammanfattning av Biddanda (2005).

5.3 Potential för återhämtning

För att beräkna tiden det skulle ta för sedimentet vid fiskodlingslokalerna i Vattviken att återhämta sig med avseende på näringsämnen (fosfor) har överskottet av läckagebenägen fosfor (g/m²) använts i kombination med internbelastningshastigheter (mg/m²/d), både de som beräknades från inkuberingsförsöket och potentiell internbelastning som beräknades från mobil fosfor i sedimentet.

Återhämtningstid för Bratthällan beräknades till 8,4 år (baserat på sedimentmodellen) samt 11,5 år (baserat på inkuberingsdata). 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 5). Sedimenten vid lokalen Vattviken är baserat på resultaten från dessa undersökningar redan att betrakta som återhämtade gällande mängden läckagebenägen fosfor i sedimentet (tabell 5).

Tabell 5. 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	Internbelastning		Återhämtningstid	
	Modell (mg/m ² /d)	Inkubering (mg/m ² /d)	Modell (år)	Inkubering (år)
Bratthällan	6,0	4,4	8,4	11,5
Vattviken	6,6	3,1	0,0	0,0

5.3.1 Modellering av återhämtningstid

Eftersom fosfor kommer att minska i sedimenten vid fiskodlingslokalerna i Vattviken 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 6 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 nått en stabil bakgrundsnivå.

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 långsammare 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 innebära minskning av mängden som finns i sediment över tid, vilket antyder att hastigheten av läckage av fosfor kommer att minska, vilket också skulle leda till längre återhämtningstider.

En motsatt effekt uppkommer däremot 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. Denna process kan bidra till en överskattning av återhämtningstiden baserat på experimentella data.

6 Slutsatser

Sedimenten under fiskodlingsanläggningarna vid Vattviken i Storsjön var något påverkade från verksamheten. Nedfall av fekalier och foderrester har resulterat i förhöjda halter av fosfor i sedimentet vid lokalen Bratthällan, vilket var förväntat. Men vid lokalen Vattviken var sedimenten inte annorlunda jämfört med referensområdet gällande fosfor, vilket var oväntat.

Några möjliga anledningar till detta resultat är mindre ackumulation av foderrester och fekalier, en snabbare nedbrytning pga. högre temperaturer i bottenvattnet, och strömmar genom sjön som stärker jämviktsprocesser som leder till en snabbare återhämtning. Det är också möjligt att en del av det påverkade sedimentet har transporterats bort från lokalen till andra, djupare delar av viken.

Syrgasförbrukningen var också något förhöjd vid båda fiskodlingens lokalerna, men betydligt mindre jämfört med andra ställen där fiskodling har bedrivits.

Återhämtning kommer att ske naturligt och ta mellan ca 8 och 11 år för lokalen vid Bratthällan enligt det genomförda försöket och sedimentdiagenesmodellen, med reservation för osäkerheter. Det är troligt att återhämtningstiden (gällande fosfor) kommer att bli kortare med hänvisning till sedimentet vid lokalen Vattviken, vilket liknar det som provtogs vid referenslokalen. Detta trots att lokalen Vattviken endast legat i träda under en odlings-säsong när provtagningen genomfördes. Vid denna lokal har alltså återhämtningen gått snabbare än vad modellerna visade.

Så vitt författarna vet finns det bara ett fåtal studier som har undersökt andelen läckagebenägen fosfor och potential för återhämtning av sediment under fiskodlingsanläggningar i sötvatten och inga studier gällande cirkulation eller flyttning av odlingskassar på kort tid, i.e. fem år.

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 en viktig faktor för att välja lämplig lokalisering samt en lämplig odlingsteknik för att bedriva fiskodling. Dessa studier, samt mätningar under längre perioder, skulle också förbättra modelleringen av återhämtning.

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.
- 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. 2021. Undersökning av näringsämnen i sediment under fiskodlingslokaler i Höga Kusten. SLU rapport 2021:07.
- Huser, B.J., Carlberg, H., Futter, M.N. 2022. Undersökning av näringsämnen i sediment under fiskodlingslokaler i Siljan. SLU rapport 2022:2.
- Huser, B.J., & Pilgrim, K.M. 2014. A simple model for predicting aluminum 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.
- 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. *Archiv Fur Hydrobiologie Supplement.* 30:98-103.

Bilaga 1

Tabell 1. Vattendjup och koordinater till provpunkterna.

Prov-plats	Lat	Long	Datum och tid	Djup [m]
V2	14,46895	62,83232	2021-03-03 13:00	23,4
V3	14,47044	62,83256	2021-03-03 11:48	26,2
V4	14,46866	62,83306	2021-03-03 12:25	23,2
B1	14,49424	62,82852	2021-03-04 13:14	13,3
B2	14,49341	62,82797	2021-03-04 12:39	13,5
B3	14,49236	62,8275	2021-03-04 11:43	17
B4	14,49295	62,82851	2021-03-04 13:28	14,9
B5	14,49446	62,82763	2021-03-04 11:53	11,6
R1	14,49799	62,82054	2021-03-04 15:10	7,4
R2	14,49645	62,82028	2021-03-04 14:22	12,7
R3	14,49499	62,82008	2021-03-04 13:54	17,2
R4	14,49669	62,81981	2021-03-04 15:28	14,1
R5	14,49628	62,8209	2021-03-04 15:55	9,1
M1	14,48159	62,8281	2021-03-04 16:21	43,6

Tabell 2. Fysiska egenskaper av analyserade proverna från Storsjön.

Propp	Inter-vall	H ₂ O (%)	Organiskt material (%)
B1	0-2	92,0	14,9
	2-4	87,2	12,2
	4-6	74,2	5,8
	6-10	74,8	6,4
	10-15	65,5	5,3

Institutionen för vatten och miljö

	15-20	64,0	6,1
B2	0-2	76,1	6,7
	2-4	73,6	5,7
	4-6	73,8	5,8
	6-10	68,9	6,0
	10-15	63,2	5,8
	15-20	58,5	4,9
	20-25	55,7	4,8
B3	0-2	87,9	12,3
	2-4	82,1	13,1
	4-6	81,4	10,8
	6-10	80,4	8,9
	10-15	79,6	10,4
	15-20	76,9	8,7
	20-25	76,9	8,1
	25-30	78,2	8,1
B4	0-2	81,3	8,7
	2-4	73,1	7,0
	4-6	70,7	6,1
	6-10	71,6	5,8
	10-15	68,1	5,8
	15-20	65,5	6,0
B5	0-2	79,7	6,7
	2-4	66,6	4,0
	4-6	69,0	4,7
	6-10	66,3	4,0
	10-15	56,9	4,1
V2	0-2	57,1	5,9
	2-4	61,7	4,8
	4-6	60,8	4,2
	6-10	57,4	3,8
	10-15	53,6	3,4
	15-20	46,4	3,2
	15-25	48,6	3,8
V3	0-2	88,7	12,4
	2-4	84,8	10,6
	4-6	83,1	11,6
	6-10	82,8	8,7
	10-15	78,0	6,7
	15-18	70,0	5,6
V4	0-2	79,1	7,1
	2-4	53,0	3,7
	4-6	41,5	3,5

Institutionen för vatten och miljö

	6-10	42,8	3,2
	10-15	53,2	3,5
	15-18	57,8	4,4
R5	0-2	51,6	4,9
	2-4	52,4	3,8
	4-6	46,0	3,6
	6-10	46,9	3,7
R2	0-2	88,7	10,6
	2-4	77,7	7,1
	4-6	71,1	15,1
	6-10	73,2	5,8
	10-15	72,3	5,8
	15-20	67,0	5,0
R3	0-2	80,1	7,7
	2-4	75,0	5,8
	4-6	71,6	5,6
	6-10	70,5	5,7
	10-15	72,1	6,1
	15-20	69,2	6,4
R4	0-2	74,1	5,5
	2-4	65,8	4,9
	4-6	62,5	4,5
	6-10	60,2	4,1
	10-15	61,3	4,6
M1	0-2	90,6	29,0
	2-4	87,5	30,6
	4-6	89,5	14,6
	6-8	88,8	12,1
	8-10	85,6	10,4
	10-12	83,9	10,4
	12-14	83,4	10,1
	14-16	80,9	13,2
	16-18	79,1	9,3
	18-20	79,7	11,6
	20-25	81,3	10,8
	25-30	80,7	9,9
	30-32	80,5	10,1

Tabell 3. Fosforfraktioner i de analyserade proverna från Storsjön.

Propp	Intervall	Porvatten- P	Fe-P	Al-P	Ca-P	Org-P
		(mg/g)	(mg/g)	(mg/g)	(mg/g)	(mg/g)
B1	0-2	0,020	0,15	0,20	0,2	0,5

Institutionen för vatten och miljö

	2-4	0,022	0,16	0,23	0,2	0,4
	4-6	0,048	0,27	0,47	0,3	0,2
	6-10	0,143	1,55	1,20	0,2	0,1
	10-15	0,060	1,29	0,67	0,2	0,1
	15-20	0,023	0,45	0,13	0,3	0,1
B2	0-2	0,045	0,12	0,47	0,3	0,2
	2-4	0,034	0,13	0,56	0,5	0,2
	4-6	0,026	0,15	0,56	0,3	0,2
	6-10	0,049	0,14	0,48	0,3	0,2
	10-15	0,056	0,28	0,54	0,3	0,2
	15-20	0,028	0,38	0,30	0,4	0,1
	20-25	0,016	0,22	0,16	0,4	0,1
B3	0-2	0,012	0,22	0,38	0,5	0,8
	2-4	0,040	0,40	0,47	0,2	0,3
	4-6	0,022	0,20	0,32	0,3	0,3
	6-10	0,012	0,23	0,28	0,3	0,2
	10-15	0,028	0,53	0,64	0,3	0,3
	15-20	0,021	0,23	0,40	0,3	0,3
	20-25	0,019	0,23	0,36	0,3	0,2
	25-30	0,035	0,24	0,32	0,3	0,3
B4	0-2	0,017	0,16	0,25	0,3	0,2
	2-4	0,035	0,17	0,16	0,3	0,1
	4-6	0,024	0,17	0,08	0,4	0,1
	6-10	0,006	0,08	0,08	0,4	0,1
	10-15	0,014	0,02	0,08	0,4	0,1
	15-20	0,006	0,02	0,07	0,4	0,2
B5	0-2	0,007	0,06	0,12	0,3	0,2
	2-4	0,008	0,07	0,17	0,3	0,2
	4-6	0,020	0,10	0,16	0,2	0,1
	6-10	0,026	0,31	0,18	0,3	0,1
	10-15	0,137	0,52	0,12	0,3	0,0
V2	0-2	0,018	0,20	0,25	1,5	0,2
	2-4	0,017	0,14	0,22	0,6	0,1
	4-6	0,011	0,10	0,20	0,3	0,1
	6-10	0,007	0,09	0,14	0,4	0,1
	10-15	0,015	0,10	0,15	0,4	0,1
	15-20	0,034	0,07	0,12	0,4	0,1
	15-25	0,022	0,07	0,12	0,4	0,0
V3	0-2	0,034	0,30	0,27	0,4	0,4
	2-4	0,020	0,19	0,21	0,4	0,3
	4-6	0,012	0,11	0,15	0,3	0,2
	6-10	0,009	0,12	0,18	0,3	0,2
	10-15	0,019	0,14	0,24	0,3	0,2

Institutionen för vatten och miljö

	15-18	0,029	0,17	0,25	0,4	0,1
V4	0-2	0,017	0,14	0,15	0,5	0,2
	2-4	0,017	0,05	0,09	0,4	0,1
	4-6	0,036	0,08	0,14	0,4	0,1
	6-10	0,034	0,08	0,13	0,4	0,0
	10-15	0,019	0,11	0,14	0,4	0,0
	15-18	0,021	0,20	0,18	0,3	0,0
R5	0-2	0,011	0,07	0,16	0,8	0,1
	2-4	0,009	0,07	0,15	0,4	0,1
	4-6	0,025	0,06	0,12	0,4	0,0
	6-10	0,047	0,07	0,13	0,4	0,0
R2	0-2	0,005	0,13	0,13	0,3	0,2
	2-4	0,012	0,08	0,15	0,3	0,3
	4-6	0,024	0,12	0,14	0,4	0,1
	6-10	0,026	0,08	0,07	0,5	0,1
	10-15	0,031	0,06	0,06	0,6	0,1
	15-20	0,035	0,05	0,05	0,4	0,1
R3	0-2	0,020	0,14	0,36	0,3	0,2
	2-4	0,023	0,14	0,16	0,4	0,2
	4-6	0,018	0,12	0,15	0,5	0,1
	6-10	0,015	0,10	0,14	0,5	0,1
	10-15	0,012	0,08	0,11	0,5	0,1
	15-20	0,017	0,05	0,10	0,5	0,1
R4	0-2	0,028	0,09	0,28	0,4	0,2
	2-4	0,038	0,14	0,47	0,3	0,2
	4-6	0,015	0,15	0,46	0,4	0,2
	6-10	0,022	0,12	0,41	0,3	0,2
	10-15	0,024	0,19	0,46	0,3	0,1
M1	0-2	0,012	0,12	0,08	0,2	0,2
	2-4	0,017	0,19	0,07	0,2	0,2
	4-6	0,042	0,81	0,10	0,2	0,2
	6-8	0,048	0,42	0,11	0,3	0,2
	8-10	0,025	0,27	0,09	0,3	0,2
	10-12	0,035	0,62	0,16	0,3	0,2
	12-14	0,024	0,35	0,15	0,2	0,2
	14-16	0,104	1,44	0,66	0,4	0,1
	16-18	0,042	0,40	0,25	0,3	0,2
	18-20	0,309	1,98	0,59	0,3	0,2
	20-25	0,129	0,70	0,37	0,3	0,2
	25-30	0,056	0,46	0,29	0,4	0,2
	30-32	0,058	0,43	0,27	0,3	0,2