



Nr C 721  
December 2022

# Koldioxidavtryck av olika åtgärder mot internbelastning av fosfor i sjöar

Anton Rydstedt, Christian Junestedt, Magnus Rahmberg & Magnus Karlsson



**Författare:** Anton Rydstedt, Christian Junestedt, Magnus Rahmberg & Magnus Karlsson  
**Medel från:** EU Life IP Rich Waters

**Rapportnummer** C 721

**ISBN** 978-91-7883-450-1

**Upplaga** Finns endast som PDF-fil för egen utskrift

**© IVL Svenska Miljöinstitutet 2022**

IVL Svenska Miljöinstitutet AB, Box 210 60, 100 31 Stockholm

Tel 010-788 65 00 // [www.ivl.se](http://www.ivl.se)

Rapporten har granskats och godkänts i enlighet med IVL:s ledningssystem. Ansvar för innehållet ligger hos IVL och författarna och återspeglar inte Europeiska unionens officiella hållning.

## Innehållsförteckning

Inledning .....	4
Metodik.....	4
Resultat .....	7
Aluminiumbehandling.....	7
Konventionell muddring .....	7
Lågflödesmuddring .....	9
Reduktionsfiske.....	11
Sammanvägd bedömning .....	11
Referenser.....	13

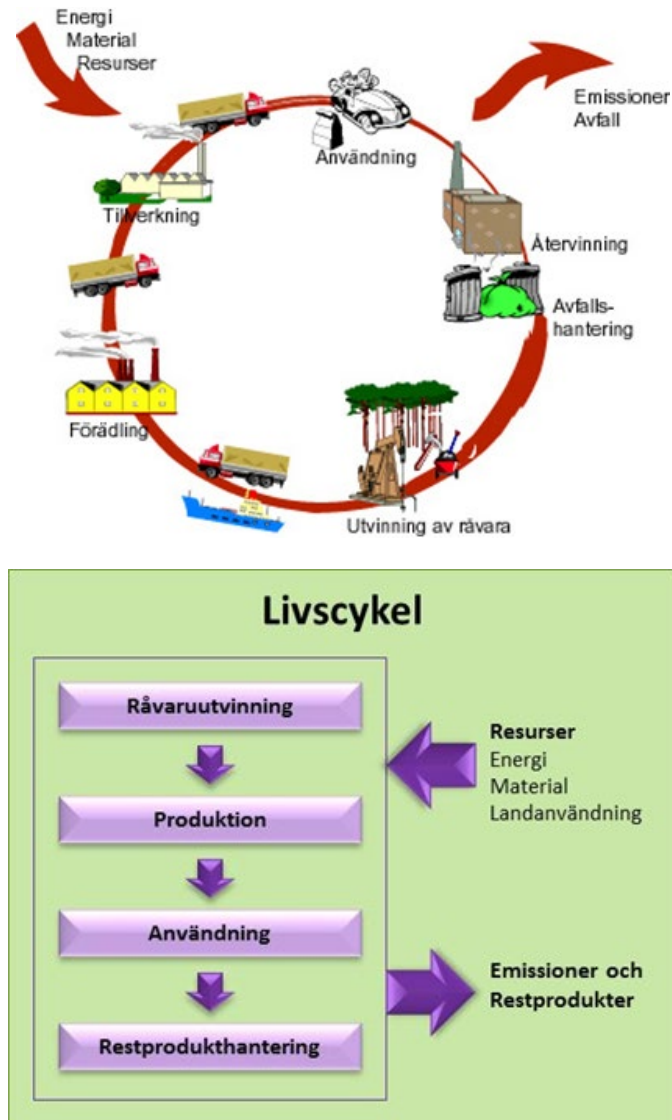
# Inledning

Fosfor är ett essentiellt ämne för alla fotosyntetiserande organismer. I sjöar är det framförallt växtplankton som utgör basen för näringsväven. När tillförseln av fosfor till sjöar blir förhöjd, exempelvis genom kommunala och industriella avlopp eller näringsämnesläckage från jordbruksmark, ökar produktionen av växtplankton, ett fenomen benämnt övergödning. Övergödning av sjöar började i slutet av 1960-talet uppmärksammas som ett tilltagande miljöproblem och olika samhällsliga åtgärder vidtogs för att reducera tillförseln av fosfor, exempelvis genom att introducera fosforfällning vid de kommunala avloppsreningsverken. Åtgärderna har i många, *men inte alla*, fall varit effektiva. Ett skäl till att vissa sjöar fortsatt att uppvisa hög näringsrikedom, trots att den externa tillförseln av fosfor till sjön via tillrinnande vattendrag och direkta punktutsläpp reducerats, är så kallad internbelastning. Normalt sett sker en betydande fastläggning av fosfor i sjöars bottensediment i biologiskt otillgängliga former, men under vissa förhållanden blir denna process mindre effektiv och biotillgänglig fosfor fortsätter år efter år att cirkulera mellan vatten och sediment och stimulerar därmed algproduktionen. Under senare år har samhällsliga åtgärder mot denna internbelastning alltmer kommit att diskuteras och på sina håll har även konkreta åtgärder genomförts.

Med livscykelanalyser (LCA) kan effektiviteten i miljöskyddsåtgärder utvärderas utifrån deras sammanvägda miljöpåverkan med hänsyn tagen inte bara till deras positiva verkan på miljön utan även deras potentiellt negativa miljöpåverkan. I en LCA, ibland kallad vagga-till-graven-analys, utvärderas ett tekniskt system eller process utifrån alla dess ingående komponenter, exempelvis, vilka naturresurser som åtgår vid tillverkning, transporter, energiförbrukning vid användning och resursförbrukning vid slutligt omhändertagande. Miljöpåverkan kvantifieras för olika påverkanskategorier, exempelvis försumningspotential, klimatpåverkan och övergödningspotential. Vid IVL Svenska Miljöinstitutet finns en lång tradition av att nyttja LCA-verktyget i holistiska bedömningar av olika miljöskyddsåtgärder. I det följande redovisas LCA-beräkningar specifikt avseende klimatpåverkan från olika åtgärder syftande till att minska internbelastningen av fosfor i sjöar.

# Metodik

Livscykelanalys (LCA) är en sammanställning och utvärdering av relevanta inflöden och utflöden från ett produktsystem eller process samt utvärdering av de potentiella miljöeffekterna hos produktsystemet över hela dess livscykel (ISO 14040:2006 och 14044:2006). Med inflöden och utflöden avses användning av naturresurser respektive generering av emissioner och restprodukter som är knutna till systemet. Livscykeln utgör ett tekniskt system bestående av processer och transporter i alla stadier från uttag av naturresurser till och med slutligt omhändertagande av produkten samt kvittblivning av restprodukter (avfallshantering och återvinning). LCA kallas ibland "vagga-till-graven-analys" (Fig. 1).



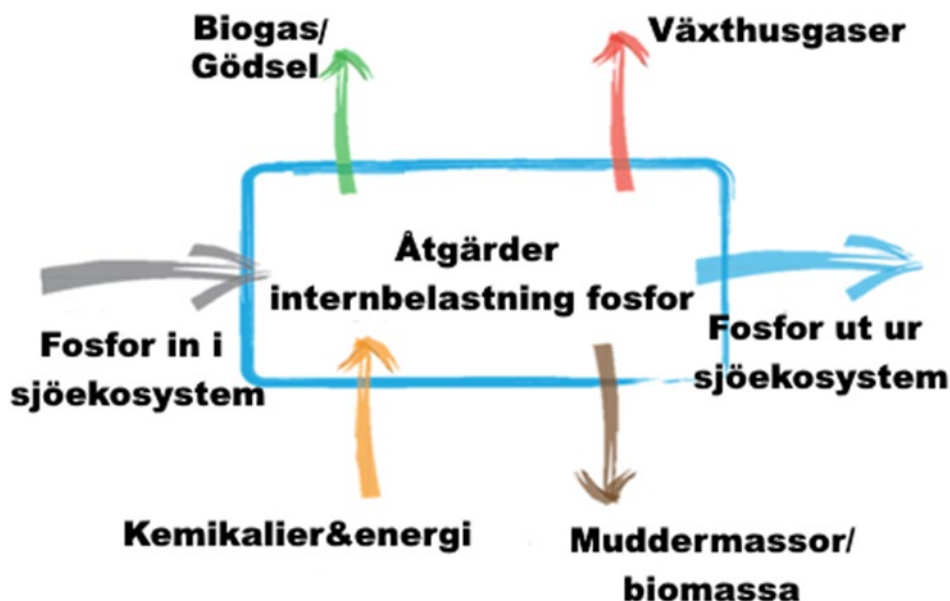
Figur 1. Illustration av ett LCA-system.

För att reducera internbelastningen finns i teorin ett antal möjliga åtgärder att tillgripa, alltifrån att fysiskt gräva bort sediment eller avleda fosforrikt bottenvatten till att fiska ut vitfiskbestånd eller med hjälp av fällningskemikalier på likartat sätt som i avloppsreningsverk fälla ut fosfor i icke biotillgängliga former. Den metod som såväl internationellt som i Sverige är mest beprövad är att genom att dosera ett aluminiumsalt till vattenområdets vattenmassa eller botten sediment fälla ut fosfor i botten sedimenten i en form där den inte kommer att läcka tillbaka till vattenmassan utan begravas i en stabil förening. Det är en process som sker naturligt i de flesta vattenmiljöer. Aluminium är det fjärde vanligaste grundämnet i jordskorpan, men i områden med överskott på fosfor finns helt enkelt inte dessa bindarpartiklar i tillräcklig mängd för att kunna förenas med all den tillgängliga fosfor. Ett tiotal sjöar i Sverige har behandlats på detta sätt med övervägande gott resultat, och i Nordamerika har ett hundratal sjöar sedan 1960-talet aluminiumbehandlats.

En annan metod är att kraftigt minska på bestånden av fisk, framförallt arter som braxen, mört, nors och gärs genom utfiskning. Genom ett hårt fisketryck lyfter man handgripligen ut en viss mängd fosfor ur sjön. Strikt talat är inte reduktionsfiske en åtgärd mot internbelastning utan en

åtgärd för att minska fosformängden i ett vattensystem oavsett om belastningen kommer från externa eller interna källor. Vi inkluderar den dock här eftersom den kan användas för att minska fosforinnehållet i internbelastade sjöar. Muddring av bottensediment är en relativt vanlig åtgärd i miljövardssammanhang när det handlar om att sanera avgränsade områden från miljöfarliga ämnen. En teknik som diskuterats och börjat testas under senare år är så kallad lågflödesmuddring, vilket innebär att under ett långsamt tidsförlopp successivt sugmuddra ytsedimenten och sprida de erhållna muddermassorna som jordförbättringsmedel på omgivande åkermarker. Sammantaget finns således ett antal tänkbara metoder för att reducera internbelastning av fosfor som skiljer sig avsevärt vad gäller teknisk utformning inklusive vilka resurser de fordra och vilka resulterande emissioner av koldioxid som genereras (Fig. 2). I det följande utvärderas:

- 1) Aluminiumbehandling av sediment
- 2) Konventionell muddring
- 3) Lågflödesmuddring
- 4) Reduktionsfiske



Figur 2. Aspekter som behöver beaktas i livscykelanalys av åtgärder mot internbelastning.

Funktionell enhet för beräkningarna har varit 1 kg potentiellt biotillgänglig fosfor (Mob-P), dvs alla beräkningar har normaliserats för att besvara hur mycket koldioxid respektive åtgärd genererar för att undandra 1 kg Mob-P från aktuellt vattenområde. Vid beräkningar av sträckor för transporter har vi utgått från att åtgärderna genomförs i en urban mellansvensk sjö. Tidigare utförda arbeten vid IVL Svenska Miljöinstitutet (Karlsson et al., 2012; Karlsson et al., 2019) har varit en utgångspunkt för beräkningarna.

# Resultat

## Aluminiumbehandling

PAX XL 100 (polyaluminiumklorid) kan spridas till sjöars vattenmassa eller bottensediment från båt för att fälla ut fosfor. I det följande antas att det åtgår 100 kg PAX XL 100 för varje kg fastlagd fosfor (Karlsson et al., 2019). Fällningskemikalien framställs i Helsingborg och transporteras från Helsingborg till Mellansverige (700 km) på lastbil. Den sprids till sjöss från en bensindriven båt som drar 0,55 liter bensin för att sprida 100 kg PAX XL 100. Bidraget till klimatpåverkan från fällning av fosfor med hjälp av PAX XL 100 under dessa antaganden blir då enligt **Tabell 1**.

**Tabell 1. Klimatavtryck av aluminiumbehandling.**

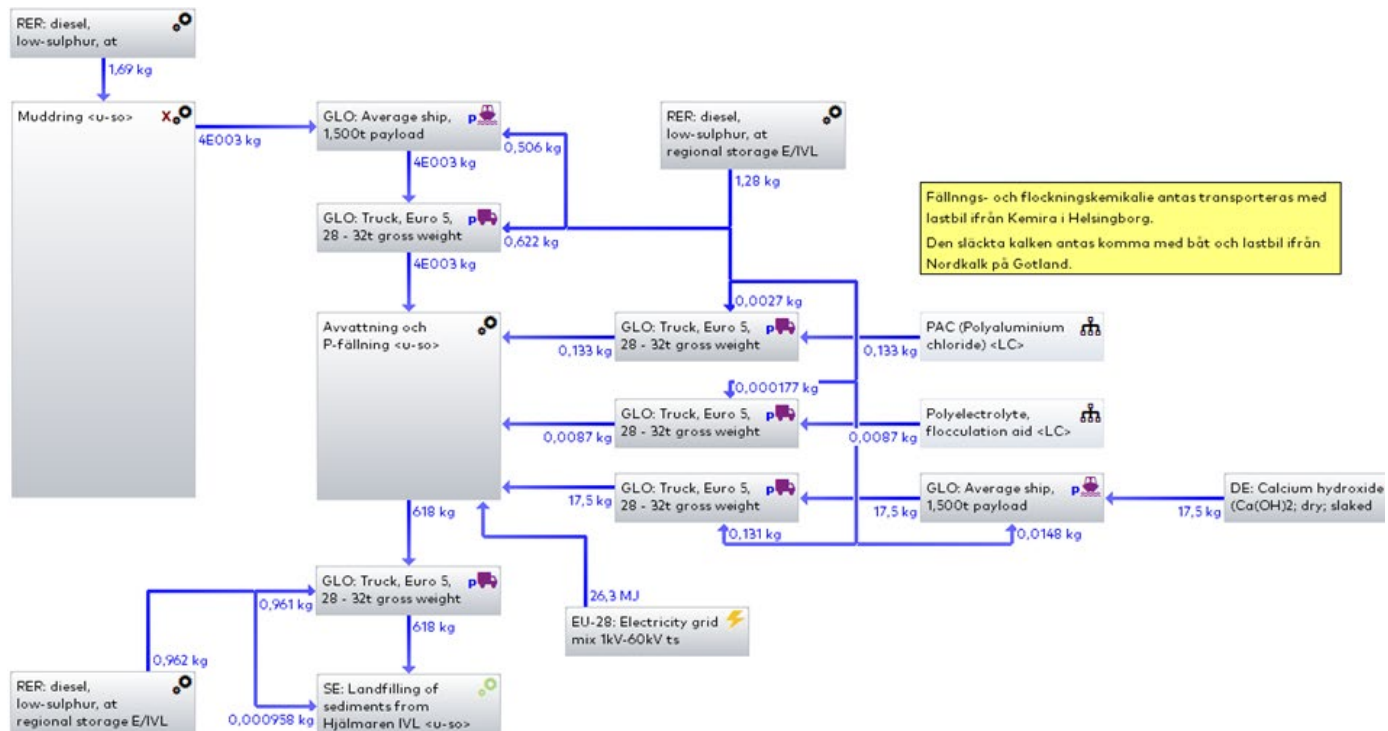
	kg CO <sub>2</sub> -ekv./kg P
Tillverkning inklusive transport.	50
Transport	7
Spridning	3
<b>Totalt</b>	<b>60</b>

Som jämförelse kan nämnas att vid kommunala reningsverk renas avloppsvatten från fosfor på liknande sätt som vid behandling av sjöar med fällningskemikalier. Ett sätt att minska fosforbelastningen på recipienter är en utökad fällning av fosfor vid reningsverk. Det krävs således resurser i form av energi och fällningskemikalier för att minska fosforutsläppet. Baserat på erfarenheter och tidigare projekt (Åmand et al., 2016) uppskattas en utökad fosforavskiljning vid ett kommunalt avloppsreningsverk med normal teknisk standard typiskt leda till en ökad klimatpåverkan med cirka 40 kg CO<sub>2</sub>-ekv./kg avskilt fosfor.

## Konventionell muddring

Konventionell muddring, som mekanisk och hydraulisk muddring, används ofta vid schaktning av botten, och ibland även vid avlägsnande av förorenade sediment (Elander & Jersak, 2017). Valet av muddringsmetod är ofta kopplat till botten typ, exempelvis lämpar sig mekanisk muddring (även kallad skop- eller grävuddring) för botten av fast typ med stenar och block medan hydraulisk muddring (även kallad suguddring) passar bättre för lösa botten som gytta, lös lera, sand eller grus. Andra kriterier för val av muddringsmetod är djup, muddermassans volym, innehåll av föroreningar och kostnad (HaV, 2018).

Vid suguddring sugs sediment blandat med vatten upp till mudderverket i en så kallad slurry. Slurryn transporteras därefter via rörledningar till avsedd plats där den kan dumpas alternativt avvattnas. För att snabba på avvattningen av muddermassor används ibland polymerer, och för att fälla ut fosfor i slurryn kan polyaluminiumklorid (PAC) användas. I **Figur 3** visas processerna som LCA för den konventionella muddringen beräknades utifrån.



Figur 3. Processflöde för LCA konventionell muddring

Resultatet av LCA:n för en genomsnittlig muddring av konventionell typ visas i **Tabell 2**. För beräkningen användes pumpflöden och energiåtgång från en muddring av Oskarshamns hamnbassäng (Oskarshamn, 2016). Vidare antogs att mudderverket transporterades 15 km med hjälp av en pråm, och att kemikalier användes för att avvattna muddermassorna och fälla ut fosfor. Muddermassorna antogs vidare ha transporterats 30 km med lastbil till deponi.

Tabell 2. Koldioxidavtryck av konventionell muddring.

	kg CO <sub>2</sub> - ekv./kg P
Kemikalier (avvattnings, fällning, flockning)	16
Transporter vid muddring	4
Transporter av muddermassor till deponi	2
Övrigt	3
<b>Totalt</b>	<b>25</b>



## Lågflödesmuddring

Lågflödesmuddring är en variant av sugmuddring där en muddringsenhet svävar över botten och suger upp bottenmaterialet (HaV, 2018). Metoden är relativt ny och fortfarande under utveckling. Vid konventionell muddring är vanligen målet att schaktningen av bottenmassorna ska gå fort och massflödet är därför i regel stort. Vid lågflödesmuddring är massflödet lägre och muddringen kan kontrolleras noggrannare. En annan fördel med metoden är att den ger betydligt mindre partikelspridning jämfört med konventionella muddringsmetoder och är därför mer skonsam mot omgivningen (HaV, 2018).

De lägre massflödena innebär att energiåtgången är mindre per tidsenhet vilket öppnar upp möjligheterna för att använda förnybara bränslen. Vid en lågflödesmuddring som gjordes i sjön Ralången i Jönköpings län (Lindell et al., 2022) användes ett eldrivet mudderverk och en pump som under stora delar av förfarandet drevs av platsbyggda solceller.

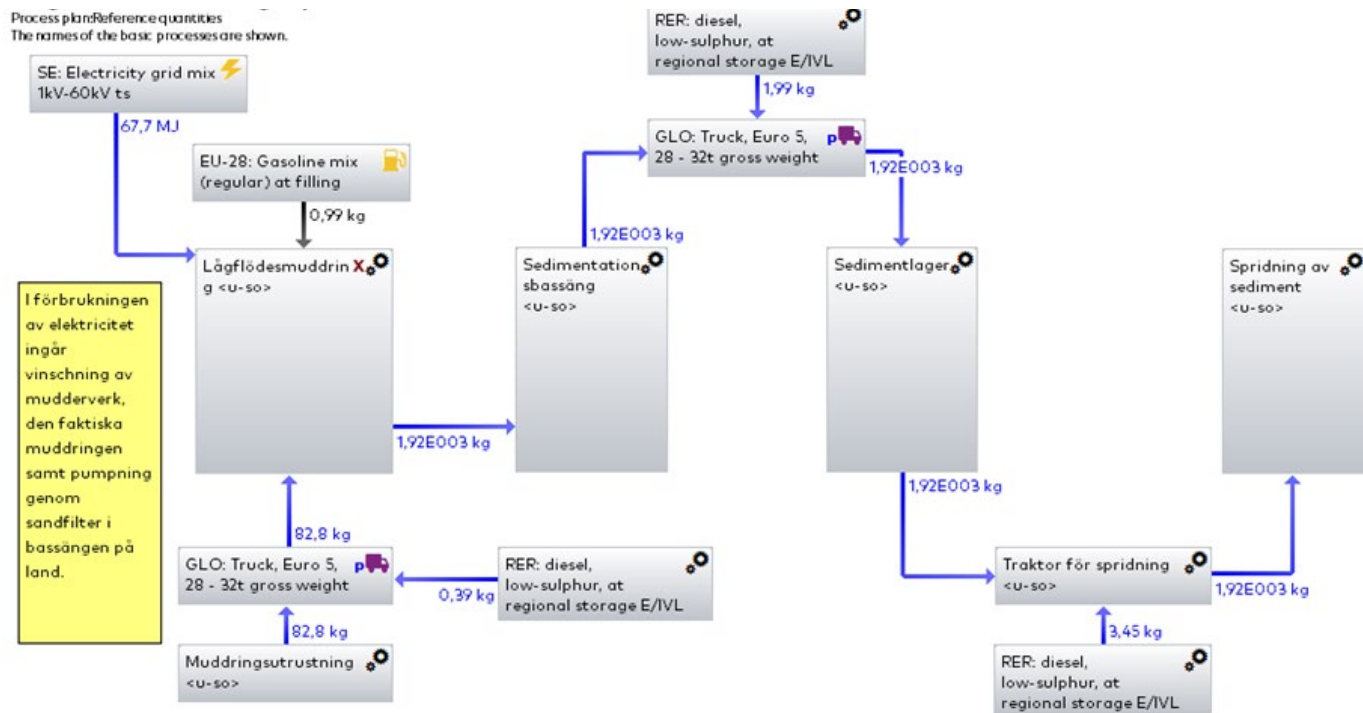
Vid lågflödesmuddring avlägsnas enbart det översta lagret av sedimentet eftersom det är där potentiellt biotillgängliga former av fosfor förekommer i störst omfattning. En annan positiv sideeffekt med att avlägsna detta översta sedimentlager är att syretärande material förs bort och kan förbättra strukturen i jorden på åker- eller skogsmark. På grund av att massflödet är lägre än vid konventionell muddring kan det vara lättare att styra hur djupt ner i sedimenten det ska muddras.

För att kunna jämföra lågflödesmuddringens klimatpåverkan med andra metoder för fosforreduktion i sjöar, har vi utfört en LCA med utgångspunkt i muddringen av sjön Ralången (Lindell et al., 2022). LCA:n inbegriper transport till och från sjön samt avvattning av sedimenten.

Muddringen skedde enligt följande. Först körde en bensindriven pråm ut mudderverket en bit från stranden. Därefter vinschades mudderverket in mot stranden innan det återigen bogserades ut av pråmen. Denna procedur upprepades till den förutbestämd bottenyta var muddrad. Vinschen drevs av ett dieseldrivet elverk som stod på land.

Muddermassorna transporterades från pråmen via en slang till en platstillverkad sedimentationsbassäng med en borrarad filterbrunn. Flödet från mudderverket var ungefär 7 m<sup>3</sup>/tim och totalt pumpades ca 750 m<sup>3</sup> slurry (sediment och sjövattnet) upp. Sedimentationsbassängen byggdes av betonglego och grävdes ned en bit i marken med hjälp av en grävmaskin (grävmaskinen användes under ett par timmar totalt). Muddermassorna renades genom geomembran och sandfilter och när filtratet blivit lika rent eller renare än sjövattnet pumpades det tillbaka till sjön. Cirka 50 % av muddermassornas vikt fördes tillbaka till sjön och 50 % blev kvar i sedimentationsbassängen.

Under pågående muddring pumpades sjövattnet tillbaka till sjön med en pump som drivs av elverket. Efter avslutad muddring och när inga nya muddermassor längre tillfördes, kopplades en solcellsdriven pump in i filterbrunnen som fortsatte att pumpa tillbaka sjövattnet, ingen energi tillfördes nu utöver den från solcellerna. Inga kemikalier användes vid avvattningen. Allt sediment från muddringen hamnade i 6 containrar, totalt fanns ca 29 kg fosfor i dessa. Processflödet för LCA:n för lågflödesmuddring framgår av **Figur 4**. Koldioxidavtrycket framgår av **Tabell 3**.



Figur 4. Processflöde för LCA lågflödesmuddring.

Tabell 3. Koldioxidavtryck av lågflödesmuddring.

	Kg CO <sub>2</sub> - ekv./kg P
Transport av muddermassor till spridning	7
Spridning av muddermassor	2
Muddring	1
Övrigt	2
<b>Totalt</b>	<b>12</b>

## Reduktionsfiske

Målsättningen med reduktionsfiske, vilket innebär stora uttag av olika arter av vittfisk, är dels att skörda närsalter, främst fosfor, genom att fisk som levt och vuxit upp i vattenförekomsten avlägsnas, dels förändra artsammansättningen mot stora rovfiskar. Högre andel stora rovfiskar leder till starkare predationstryck på små plankton- och bottendjursätande fiskar. Minskas tätheten av dessa arter kan man få mer djurplankton och mer bottendjur, vilket får följd effekter i form av nedbetning av växtplankton och påväxtalger. Konsekvensen blir ökat siktdjup och minskad påväxt på stenar och makroalger som blåstång, vilket i sig är en minskning av övergödningssymptomen. I det följande beaktas emellertid enbart den direkt fosforreducerande effekten.

Om man efter ett reduktionsfiske väljer att röta den erhållna fångsten genereras CO<sub>2</sub>-emissioner i samband med båttransporter till och från fiskeplatserna, vid infrysning av fångsten samt vid transport av fisken till en biogasanläggning. Vid biogasanläggningen genereras ett bränsle, metangas vilket i denna analys betraktas som ett negativt CO<sub>2</sub>-utsläpp då det kan ersätta fossila drivmedel, exempelvis bensin som fordonsbränsle. Vid ett försök vid KTH (Shi, 2012) med rötning av avloppsslam, fiskrens och bifångster från yrkesfiske erhöles ett utbyte motsvarande 0,5 m<sup>3</sup> gas per kilo våtvikt fisk. Med detta som utgångspunkt och ett antagande att fångsten behöver transporteras på lastbil 50 km till en biogasanläggning erhålles sammantaget ett negativt koldioxidavtryck enligt **Tabell 4**. Om fångsten från reduktionsfisket istället skulle saluföras som livsmedel eller djurfoder erhålles också potentiellt en koldioxidbesparing genom att andra produkter ersätts.

**Tabell 4. Koldioxidavtryck av reduktionsfiske.**

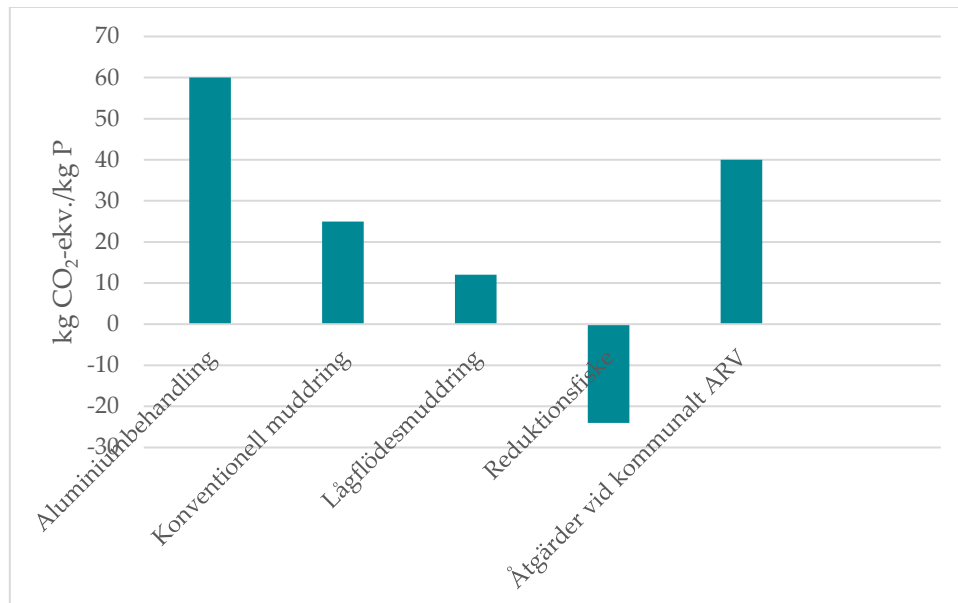
	Kg CO <sub>2</sub> - ekv./kg P
Biogasproduktion	-25
Transporter	1
<b>Totalt</b>	<b>-24</b>

## Sammanvägd bedömning

Av **Tabell 5** och **Figur 4** framgår att det högsta klimatavtrycket per kilogram avskilt fosfor genereras vid aluminiumbehandling följt av konventionell muddring och lågflödesmuddring, medan reduktionsfiske genererar en koldioxidbesparing genom att fångsten nyttiggörs som biogas. Jämfört mot åtgärder för att förbättra reningen i kommunala reningsverk med normal teknisk standard (Åmand et al., 2016) kan konstateras att åtgärder mot internbelastning ligger inom samma storleksordning avseende koldioxidavtrycket.

**Tabell 5. Koldioxidavtryck av olika åtgärder mot internbelastning och som jämförelse åtgärder kommunala respektive skogsindustriella reningsanläggningar för att reducera fosfortillförsel.**

Åtgärd	kg CO <sub>2</sub> - ekv./kg P
Aluminiumbehandling	60
Konventionell muddring	25
Lågflödesmuddring	12
Reduktionsfiske	-24
Åtgärder vid kommunalt ARV	40



**Figur 5.** Koldioxidavtryck av olika åtgärder mot internbelastning och som jämförelse åtgärder kommunala respektive skogsindustriella reningsanläggningar för att reducera fosfortillförsel.

Som ytterligare en jämförelse kan nämnas att det årliga koldioxidutsläppet av den svenska befolkningens konsumtion beräknas till 8 ton/person och år (<https://www.naturvardsverket.se/data-och-statistik/konsumtion/vaxthusgaser-konsumtionsbaserade-utslapp-per-person>). En aluminiumbehandling av en 100 ha stor sjöyta genererar en klimatpåverkan på 50 ton CO<sub>2</sub>-ekv. eller således drygt 6 personers årliga utsläpp.

En annan aspekt av klimatpåverkan, som legat utanför ramen för denna studie att belysa, är hur åtgärderna i sig påverkar kolbalanserna i sjöarna. I sjöar med ansträngda syrgasförhållanden kan åtgärder mot internbelastning medföra förbättrade syreförhållanden längs botten, vilket skulle kunna leda till att en högre andel av det organiska material som sedimenterat längs botten bryts ned och avgår som koldioxid och att en mindre andel permanent fastläggs i sedimenten. Å andra sidan skulle förbättrade syreförhållanden kunna leda till minskad metanbildning, vilket i det korta tidsperspektivet är en potentare växthusgas.

## Referenser

Elander, P. & Jersak, J., 2017. Fiberbankar i Norrland – Metoder för efterbehandling av fibersediment. Länsstyrelserna rapport 2017:1.

HaV, 2018. Havs- och Vattenmyndighetens rapport 2018:19: Muddring och hantering av muddermassor Vägledning och kunskapsunderlag av 11 och 15 kap. miljöbalken.

Jacobson, A., Rahmberg, M., Karlsson, M., & Hållén, J., in prep. LCA-bedömning av utökad avloppsvattenrening vid Iggesunds bruk. Manuskript IVL Svenska Miljöinstitutet.

Karlsson, M., Malmaeus, M., Baresel, C., Sivard, Å., Ericsson, T. & Grahn, O., 2012. Kostnadseffektivitet i åtgärder mot övergödning – Fallstudie Gävle fjärdar, IVL-rapport B2078.

Karlsson, M. & Malmaeus, M. & Rydin, E., 2019. Åtgärder mot internbelastning av fosfor i Hjälmarens kostnad, nytta och konsekvenser. IVL-rapport C381.

Lindell, M., Carlsson, F., & Ekström, M., 2022. Återföring av näringsrika ytsediment till produktionsmark - Erfarenheter av muddring, pelletsproduktion samt testodling. Länsstyrelsen i Jönköpings län, Meddelande 2022:09.

Oskarshamns kommun, 2016. Saneringen av Oskarshamns hamnbassäng., 2016 Projekt och erfarenhetsrapport 1996-2015, 2016:1.

Shi, C., 2012. Potential biogas production from fish waste and sludge. M.Sc.-thesis. Department of Land and Water Resources Engineering. Royal Institute of Technology (KTH). TRITA LWR Degree project 12:37.

Åmand, L., Andersson, S., Oliveira, F., Rahmberg, M., Junestedt, C., Arnell, M., 2016. Nya utsläppskrav för svenska reningsverk – effekter på reningsverkens totala miljöpåverkan. IVL B2246.

