

RAPPORT

Modellering av gödande ämnen i Björnöfjärdssystemet

Simulering av effekter av
åtgärder mot extern och intern
belastning

Mikael Malmaeus och Magnus Karlsson
B2135

Oktober 2013

Rapporten godkänd:
2013-10-18

John Munthe
Forskningschef/direktör

Organisation IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd.	Rapportsammanfattning
Adress Box 21060 100 31 Stockholm	Projekttitel Modellering av närsaltdynamiken i ett kustområde
Telefonnr 08-598 563 00	Anslagsgivare för projektet BalticSea2020
Rapportförfattare Mikael Malmaeus & Magnus Karlsson	
Rapporttitel och undertitel Modellering av gödande ämnen i Björnöfjärdssystemet Simulering av effekter av åtgärder mot extern och intern belastning	
Sammanfattning <p>I detta projekt har omsättningen av gödande ämnen studerats i Björnöfjärdssystemet i Stockholms skärgård, där Stiftelsen BalticSea2020 bedriver ett arbete med att återställa ekosystemet till en naturlig näringsnivå, utan övergödning, genom åtgärder i och kring fjärdarna. Syftet med föreliggande studie har varit att kartlägga flöden av fosfor, kväve, organiskt kol och syre för att på ett strukturerat sätt kunna bedöma och förutsäga effekter av olika åtgärder. Med hjälp av såväl nya som gamla data har massbalanser upprättats för fosfor, kväve och organiskt kol i fjärdssystemet, syrgashalten i bottenvattnet har beräknats med en statistisk modell.</p> <p>Storleksmässigt visar massbalansen att flödena av fosfor mellan sediment och vatten på årsbasis dominerar över externa inflöden, vilket också visar sig genom effekten av de simulerade åtgärder som testats i scenarierna. Behandling av sedimenten ger till synes större effekt på fosforhalten i vattenmassan än åtgärder i avrinningsområdet, även om en hundra procentig reduktion av externa inflöden uppnår nästan samma effekt. En kombination av åtgärder ger naturligt nog störst effekt. Att behandla sedimenten ger enligt modellen ett långvarigt resultat – omkring halva effekten återstår efter 30 år. I grunden är dock åtgärder mot externa flöden nödvändiga för att komma åt övergödningssymptomen och inte bara behandla symptomen.</p> <p>När det gäller övriga ämnen konstateras att kväveexporten ut ur systemet kommer att vara proportionell mot reduktionen i extern tillförsel. De minskningar av partikulärt kol i systemet som de simulerade åtgärderna väntas leda till, förväntas inte vara tillräckliga för att syresätta bottenvattnen i någon betydande omfattning.</p>	
Nyckelord samt ev. anknytning till geografiskt område eller näringsgren Fosfor, kväve, internbelastning, åtgärder, kemisk fällning, modellering, övergödning, Östersjön	
Bibliografiska uppgifter IVL Rapport B2135	
Rapporten beställs via Hemsida: www.ivl.se , e-post: publicationservice@ivl.se , fax 08-598 563 90, eller via IVL, Box 21060, 100 31 Stockholm	

Sammanfattning

I detta projekt har omsättningen av gödande ämnen studerats i Björnöfjärdssystemet i Stockholms skärgård. Stiftelsen BalticSea2020 bedriver där ett arbete med att återställa ekosystemet till en naturlig näringsnivå, utan övergödning, genom åtgärder i och kring fjärdarna. Syftet med föreliggande studie har varit att kartlägga flöden av fosfor, kväve, organiskt kol samt syreförbrukningen för att på ett strukturerat sätt kunna bedöma och förutsäga effekter av olika åtgärder på bland annat syresituationen.

Fjärdssystemet består av tre sammanhängande vikar – Säbyviken, Björnöfjärden och Torpe-Infjärden – med begränsat vattenutbyte med utanförliggande Nämndöfjärden. Enskilda avlopp och diffust läckage från jordbruksmark står för huvuddelen av den externa belastningen av gödande ämnen. Symptom på övergödning förekommer i synnerhet i de djupare delarna där allt högre liv är utslaget och halterna av fosfor och kväve är mycket höga. Det isolerade läget och den förhållandevis begränsade externa belastningen gör området lämpligt som pilotområde för att testa olika åtgärdsstrategier. Åtgärder som genomförs är kemisk fällning av sedimentfosfor, kalkfilterdiken i jordbruksområdet samt förbättrad rening i enskilda avlopp.

Med hjälp av såväl nya som gamla data har massbalanser upprättats för fosfor, kväve och organiskt kol i fjärdssystemet, syrgashalten i bottenvattnet har beräknats med en statistisk modell. Vattenutbytet med utanförliggande hav har beräknats med salthaltsrelationer och en dynamisk massbalansmodell för fosfor har anpassats för hela fjärdssystemet. I modellen ingår externa in- och utflöden, vattenutbyte mellan bassängerna, omblandning mellan yt- och djupvatten, sedimentation, resuspension och läckage från sediment. Massbalanserna för kväve och kol har delvis baserats på resultat från fosformodellen. Med hjälp av de upprättade massbalanserna har även effekter på näringsnivåer och syrgashalt beräknats i ett antal åtgärdsscenarier.

Storleksmässigt visar massbalansen att flödena av fosfor mellan sediment och vatten på årsbasis dominerar över externa inflöden, vilket också visar sig genom effekten av de simulerade åtgärder som testats i scenarierna. Behandling av sedimenten ger till synes större effekt på fosforhalten i vattenmassan än åtgärder i avrinningsområdet, även om en hundraprocentig reduktion av externa inflöden uppnår nästan samma effekt. En kombination av åtgärder ger naturligt nog störst effekt.

Att behandla sedimenten ger enligt modellen ett långvarigt resultat – omkring halva effekten återstår efter 30 år. I grunden är dock åtgärder mot externa flöden nödvändiga för att komma åt övergödningens problematik och inte bara behandla symptomen. Men även om alla möjliga åtgärder genomförs i och runt Björnöfjärden, kommer en viss förhöjning av fosforhalten jämfört med den naturliga halten att kvarstå. Simuleringar där utanförliggande kustvattens fosforhalt satts till $12 \mu\text{g}/\text{l}$ visar att en ursprunglig bakgrundshalt i Björnöfjärden ligger någonstans mellan 15 och $20 \mu\text{g}/\text{l}$ i ytvattnet, vilket alltså är lägre än vad som uppnås med samtliga simulerade åtgärder inne i systemet. Inte ens i ett så isolerat system som Björnöfjärden, vilket har begränsat utbyte med utanförliggande hav, går det alltså att helt återställa de naturliga förhållandena så länge övergödningen i havet består. Detta gäller naturligtvis i ännu högre grad andra kustområden vid Östersjön, där kontakten med utsjön är större, vilket talar för att storskaliga lösningar måste till för att rädda kusten. Lokala åtgärder kan bara uppnå en del av målet.

När det gäller övriga ämnen konstateras att kväveexporten ut ur systemet kommer att vara proportionell mot reduktionen i extern tillförsel. Minskad retention i sedimenten kommer enligt

beräkningarna i stort sett att kompenseras av minskad kvävefixering i vattenmassan. Kolbalansen ger vid handen att den interna produktionen av växtplankton är en dominerande kolkälla. Den förväntade depositionen av partikulärt kol till bottenarna minskar med en tredjedel, som en följd av åtgärderna, men detta bedöms inte vara tillräckligt för att upprätthålla syresättning av bottenvattnen i någon betydande omfattning.

Sammanfattningsvis konstateras att den massbalansmodell som applicerats i denna studie fungerat väl i sammanhanget och har gett en god uppfattning om betydelsen av olika substansflöden och processer samt hur dessa påverkas av åtgärder i systemet. Ett konstaterande är att osäkerheten gällande vattenutbytet mellan fjärdarna liksom sedimentationens storlek ger relativt stort utslag i en känslighetsanalys, vilket talar för att dessa processer om möjligt bör studeras i mer detalj, för att verifiera de resultat som framkommit genom denna rapport.

Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	1
1 Inledning.....	4
2 Bakgrund.....	4
2.1 Massbalansmodellering.....	4
2.2 Miljöförhållanden i Björnöfjärdssystemet.....	5
2.2.1 Fjärdssystemet.....	5
2.2.2 Vattenkvalitet.....	5
2.2.3 Vegetation.....	6
2.2.4 Bottenfauna.....	7
2.2.5 Fisk.....	7
2.2.6 Bottendynamiska förhållanden.....	7
2.2.7 Tillförsel och bortförsel av fosfor.....	8
3 Material och metoder.....	9
3.1 Vattenomsättning.....	9
3.2 Fosformodell.....	10
3.2.1 Känslighetsanalys.....	13
3.3 Kvävebalans.....	13
3.4 Balans för partikulärt organiskt kol (POC) och syrgasförbrukning.....	13
3.5 Scenarier.....	14
4 Resultat.....	14
4.1 Modellkalibrering.....	14
4.2 Massbalanser.....	17
4.2.1 Fosfor.....	17
4.2.2 Kväve.....	17
4.2.3 Kol.....	18
4.3 Scenarier.....	20
4.3.1 Fosfor.....	20
4.3.2 Övriga ämnen.....	22
4.4 Känslighetsanalys.....	25
5 Diskussion.....	26
6 Sammanfattande slutsatser.....	28
7 Referenser.....	29
8 Bilaga 1 - Kalibreringsresultat för fosformodellen.....	32

1 Inledning

Stiftelsen BalticSea2020 driver sedan 2011 ett omfattande arbete med att genom en rad olika åtgärder restaurera ett kustområde i Stockholms skärgård och därmed uppnå en god vattenmiljö och ett livskraftigt ekosystem utan övergödning. Genom att demonstrera nyttan av åtgärder i ett begränsat kustområde syftar projektet vidare till att skapa en ”vitbok” över hur skadade kustområden kan restaureras samt till vilka kostnader detta låter sig göras. Projektet går under namnet *Levande kust* och genomförs i de tre sammanlänkade fjärdarna Björnöfjärden, Säbyviken och Torpe-Infjärden i Värmdö kommun.

Åtgärderna inkluderar bland annat anläggning av dikesfilter och våtmarker, för att minska tillförseln av närsalter från jordbruksmark till kustområdet, fällning av fosfor med aluminium direkt i de syrefria sedimenten och insatser för att återställa ett naturligt fisksamhälle. Flera åtgärder har redan genomförts både på land och i vattnet, ytterligare åtgärder är planerade.

Det finns ett behov av att systematisera förväntade och uppmätta effekter av olika åtgärder med avseende på närsaltdynamiken i fjärdarna. När flera åtgärder genomförs parallellt kan effekten av de enskilda insatserna inte säkert särskiljas enbart genom mätningar. Det finns vidare ett behov av att göra prognoser över utvecklingen på kort och lång sikt för scenarier där olika åtgärdsalternativ utvärderas. Ett effektivt sätt att angripa dessa frågeställningar är att använda sig av ekosystemmodellering.

I denna rapport redovisas resultat från ett projekt där en hydrodynamisk massbalansmodell för i första hand fosfor har applicerats i det aktuella kustområdet. Modellen beskriver vattendynamiken i systemet – vattenutbytet mellan fjärdarna och utanföriggande hav – samt alla betydelsefulla flöden av fosfor till, från och inom systemet, inkluderande utbytet mellan vatten och sediment. Utöver att beskriva systemet kan modellen användas för att göra prognoser över utvecklingen på kort och lång sikt till följd av genomförda eller planerade åtgärder. Med hjälp av hydrodynamiken och annan tillgänglig information har också massbalanser för kväve, kol och syre tagits fram.

Syftet med föreliggande rapporterade projekt har dels varit att skapa en bättre förståelse för hur fosfor och andra ämnen omsätts i Björnöfjärdssystemet, dels har syftet varit att utnyttja denna förståelse för att bedöma hur olika åtgärdsalternativ kan tänkas påverka denna dynamik. Rapporten beskriver dynamiken i systemet och visar simuleringar av ett antal scenarier för framtiden.

2 Bakgrund

2.1 Massbalansmodellering

Massbalansmodeller har i detta projekt använts för att beskriva och förutsäga vilka flöden av fosfor och andra ämnen som sker in till, ut från och inom Björnöfjärdssystemet. Grundläggande för att upprätta en massbalans är kunskap om systemets vattenomsättning samt omsättningen av partiklar genom sedimentation och resuspension till och från bottenarna. Genom att upprätta dynamiska massbalanser kan koncentrationen i yt- och djupvatten av modellerade substanser beräknas vid olika tidpunkter på året och under olika förhållanden i valda scenarier.

Håkanson m fl. (1984) undersökte i början av 1980-talet vattenomsättningen i ett tjugotal kustområden längs Sveriges kust. De fann att vattenomsättningen generellt sett var snabb och att det fanns ett statistiskt samband mellan kustområdets öppenhet mot utanförliggande hav och ytvattnets omsättningstid, vilket sedermera omsattes i en matematisk modell för vattenomsättning i Östersjöns skärgårdsområden (Persson m fl., 1994). Kärnkraftsolyckan i Tjernobyl 1986 ledde till en hög deposition av radioaktivt cesium över stora delar av Europa. Detta har visat sig vara ett mycket användbart verktyg för att utveckla akvatiska ekosystemmodeller. Genom att följa pulsen av cesium-137 genom de akvatiska systemen har förståelsen för hur sedimentologiska processer påverkar omsättningen av material ökat väsentligt.

I början av 2000-talet utvecklades, baserat på ovan refererade studier en dynamisk massbalansmodell för omsättningen av suspenderat partikulärt material i kustområden (Håkanson m fl., 2004). Parallellt pågick arbete med att utveckla en liknande modell för fosfors omsättning i kustområden (Håkanson & Karlsson, 2003; Håkanson & Eklund, 2007; Malmaeus m fl., 2008). Under senare tid har samma metodik också tillämpats för att modellera omsättningen av dioxiner (Karlsson m fl. 2010). Olika varianter av massbalansmodellen har använts i miljödomstolsärenden för att bedöma miljöpåverkan av utsläpp från punktkällor, framförallt skogsindustrier, och för att bedöma effekten av utsläppsreducerande åtgärder (Karlsson & Håkanson, 2001; Karlsson, 2002; Lidén, 2003; Dahl m fl., 2003; Grahn m fl., 2004; Karlsson, 2004a; Karlsson 2004b; Bonde & Wester, 2005; Karlsson m fl., 2005; Karlsson & Malmaeus, 2006; Malmaeus & Karlsson, 2007). Massbalansmodellen har även använts i områden med betydande intern belastning bland annat i Östhammarsfjärden (Karlsson m fl., 2011) och i Edsviken (Gustafsson & Lindqvist, 2012).

2.2 Miljöförhållanden i Björnöfjärdssystemet

2.2.1 Fjärdssystemet

De tre angränsande vikarna Säbyviken, Björnöfjärden och Torpe-Infjärden på Ingarö valdes till projektet *Levande kust* som målområde, inte minst för att de på flera sätt liknar ett Östersjön i miniatyr, till exempel att vikarna har ett begränsat vattenutbyte med utanförliggande hav och för att vikarnas djupare delar har syrebrist med mycket höga halter av lösta näringsämnen. I Björnöfjärden, Säbyviken och Torpe-Infjärden finns möjligheter att kombinera åtgärder på land och i vattnet för att nå lokala förbättringar i vattenkvalitet och fiskproduktion och samtidigt generera ny kunskap om möjligheterna att förbättra situationen för hela Östersjön. Fjärdssystemets totala area är omkring 1,5 km², medeldjupet är omkring 7 meter. Den djupaste punkten är 24 meter och ligger i centrala Björnöfjärden.

2.2.2 Vattenkvalitet

Björnöfjärdssystemets djupa och långsmala karaktär medför att det utbildas ett temperatursprångskikt på ett djup mellan sex och tio meter under sommarhalvåret. Skiktningen gör att bottenvattnet inte blandas om och syresätts. Vikarna har emellertid ett rikt växt och djurliv ovanför skiktningen. Under språngskiktet är övergödningseffekterna tydliga: allt högre liv är utslaget, bottenvattnet har extremt höga halter av kväve och fosfor. Skiktningen kan ”maskera” övergödningen sommartid genom att näringen hålls nere under språngskiktet, där den inte kan bidra till algbloomingar. Det gör att vattenkvaliteten sommartid periodvis kan upplevas som bra, med till exempel ett bra siktdjup. När språngskiktet försvagas, genom kraftig blåst i vikarnas längdriktning, eller till hösten då ytvattentemperaturen sjunker, kommer näringsrikt bottenvatten

upp och driver fram kraftiga algblomningar, som pågår långt in på senhösten. När algerna dör och faller ner på botten bryts de ned varvid det lösta syret förbrukas (**Fig. 1**).



Figur 1 Utbredningen av syrefritt bottenvatten i september 2011. Från Kumblad och Rydén (2012).

I **Tabell 1** presenteras årsmedelvärden uppmätta under 2012 för några vattenkemisk/fysikaliska parametrar samt ekologiska effektvariabler. Det kan konstateras att näringsämneshalten är relativt höga, vilket manifesteras i en hög klorofyllhalt (indirekt mått på produktionen av växtplankton). Siktdjupet är förhållandevis stort medan syrgashalten i bottenvattnet är låg.

Tabell 1 Årsmedelvärde 2012 för några vattenkemiska/fysikaliska parametrar och ekologiska effektvariabler i Björnöfjärdssystemet i ytvattnet (0-6 m) respektive djupvattnet (>6 m).

Parameter	Ytvatten	Djupvatten
Salinitet (PSU)	4,6	5,2
Totalfosfor ($\mu\text{g/l}$)	32	49
Totalkväve ($\mu\text{g/l}$)	515	581
Klorofyll-a ($\mu\text{g/l}$)	7,4	6,2
Siktdjup (m)	3,6	-
Syrgashalt >6 m djup (mg/l)	9,7	2,7

2.2.3 Vegetation

Vegetationen på de grunda bottenarna i Björnöfjärdssystemet har hög status (Quarfordt m fl., 2011). Det gäller framförallt artrika växtsamhällen med stor täckning på sand- och mjukbottenar ned till cirka fem meters djup. Hårdbottensamhällena är betydligt artfattigare och glesare, vilket sannolikt beror på hög sedimentation. Hela viksystemet är klassat som mycket skyddat i vågexponeringsgrad, vilket innebär att sediment inte spolas bort från hårdbottenarna av våg- och vattenrörelser. Under sprängskiktet (> 7 meter djup) råder sämre förhållanden med låga syrehalter och liten ljusställgång. På dessa bottenar är det hög täckningsgrad av cyanobakterier och svavelbakterier.

2.2.4 Bottenfauna

I Björnöfjärdens grundare delar (< 10 m djup) påträffades totalt 9 taxa vid undersökningar 2011 (Lindqvist, 2011a). Vanligaste förekommande var gruppen *Insecta* och familjen *Chironomidae* (fjädermyggor). Enstaka exemplar av mer känsliga arter som den Nyzeeländska tusensnäckan (*Potamopyrgus antipodarum*) och märkräftor av släktet *Gammarus* påträffades på ett par platser. I zonen < 10 m var antalet taxa, individtäteten och biomassan av makroskopisk bottenfauna låg och BQI-index bedömdes till dålig status i samtliga vikar. I fjärdens djupare delar (> 10 m) påträffades endast ett fåtal djur, de flesta platser saknade helt bottenfauna.

2.2.5 Fisk

Vid yngelinventering och nätprovfiske fångades totalt nio respektive elva olika arter (Lindqvist, 2011a; Arvidsson, 2011; Lindqvist, 2011b). Antalsmässigt dominerade abborre, benlöja, björkna och mört. Fisket visade på en god yngelrekrytering bland de dominerande arterna. Rekrytering av gädda verkar fungera någorlunda väl. Kvoten mellan abborre och karpfiskar samt andelen fiskätande abborrar i Björnöfjärdssystemet visade på näringsrika förhållanden.

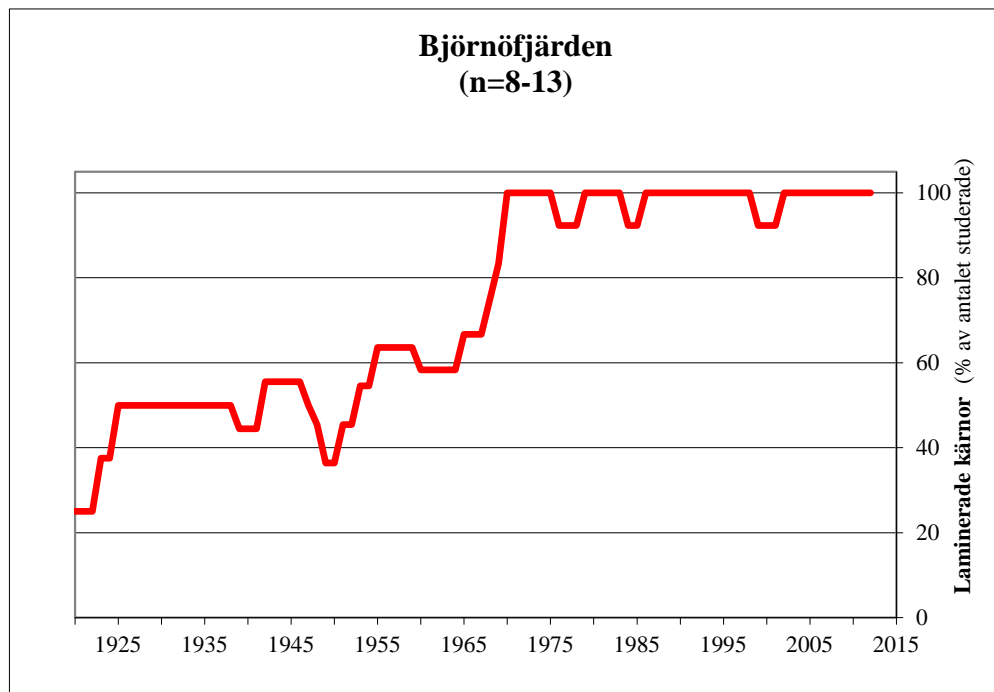
2.2.6 Bottendynamiska förhållanden

Bottarna i Björnöfjärdssystemet har karterats av Jonsson & Karlsson (2012). Vågbasen, det djup som separerar ackumulationsbottnar (A-bottnar) med kontinuerlig deposition av finmaterial från mer dynamiska erosions- och transportbottnar (ET-bottnar), bedömdes ligga vid 3 meters vattendjup. Arealen av A-bottnar var förhållandevis stor och varierade mellan 68 och 80 % inom respektive delområde. Den årliga sedimenttillväxten bestämdes genom datering med hjälp av kända lednivåer och räkning av årsvarv i laminerade kärnor till i medeltal 12 mm/år. Detta värde ligger strax under genomsnittet för ostkustens skärgårdsområden (Jonsson m fl., 2003). Den årliga torrsubstansdepositionen på A-bottarna beräknades till i medeltal 1 100 g/m². I **Tabell 2** sammanfattas sedimentdata för respektive delområde.

Tabell 2 Sedimentdata för Björnöfjärdssystemet. Från Jonsson & Karlsson (2012).

Delområde	Areal A-botten (km ²)	Andel A-botten (%)	Sedimenttillväxt i ytsediment (mm/år)	ts-deposition (g/ m ² år A-botten)	Koldeposition (g/m ² år fjäradyta)
Säbyviken	0,28	73	15	1 510	76
Björnöfjärden	0,66	80	12	1 100	60
Torpe-Infjärden	0,19	68	8	700	52
Medelvärde		74	12	1 100	63

Utvecklingen av laminerade (hypoxiska) bottnar i Björnöfjärden karaktäriseras av en mer eller mindre successivt ökande andel av laminerade bottnar från 1920-talets början (25 %) fram till mitten av 1960-talet (ca 60 %). I slutet av 1960-talet skedde en dramatisk förändring under några få år och i början av 1970-talet var 100 % av bottarna djupare än 8 m laminerade. Utvecklingen i Björnöfjärden avviker från den storskaliga utvecklingen i hela Stockholms skärgård (Jonsson m fl., 2003) vad gäller den extremt snabba utbredningen av hypoxiska bottnar från slutet av 1960-talet. I skärgården kunde man konstatera att utbredningen av de laminerade bottarna snarare var långsammare under denna period än både under tiden dessförinnan och därefter.



Figur 2 Historisk utveckling av laminerade bottnar i Björnöfjärden. Kärnor tagna från vattendjup $\geq 8,0$ m. Från Jonsson & Karlsson (2012).

2.2.7 Tillförsel och bortförsel av fosfor

Den landbaserade direkta tillförseln av fosfor till Björnöfjärdssystemet från enskilda avlopp har uppskattats till cirka 75 kg/år (Ecoloop, 2012). Tillförseln av fosfor via tillrinnande vattendrag har för 2012 beräknats till knappt 500 kg (Lindqvist, 2013). Den genomsnittliga fosforhalten vid mätstationen utanför Björnöfjärdssystemet var under 2012 27 $\mu\text{g/l}$, vilket var 5 $\mu\text{g/l}$ lägre jämfört med medelhalten i Björnöfjärdssystemet (32 $\mu\text{g/l}$) under samma period. Beräkningsmässigt blir därigenom inflödet av fosfor genom vattenutbyte cirka 850 kg/år.

Landhöjningen i Stockholmstrakten uppgår till cirka 4 mm/år. En konsekvens av detta är att äldre bottenmaterial, som avsattes vid den senaste isavsmältningen, successivt lyfts upp och utsätts för eroderande krafter från vind/vågpåverkan. Det kan exempelvis vara glaciala leror och som under lång tid legat begravt på bottenarna. Fosforhalten i äldre leror uppgår typiskt till 0,7 mg/g ts (Jonsson m fl., 2012). Om man antar att hälften av bottenarealen ovanför vågbasen utgörs av gamla leror som eroderas i motsvarande omfattning som landhöjningen erhålls ett fosfortillskott till ytvattnet via landhöjningsprocessen på cirka 350 kg/år. Merparten av detta stora tillskott kommer inte att bidra till primärproduktion, utan transporteras ut ur systemet, för att deponeras och begravas på djupare liggande ackumulationsbottnar i utsjön.

Fosforhalten på cirka 20 centimeters djup i sedimentkärnor från Björnöfjärdssystemets ackumulationsbottnar har uppmätts till i genomsnitt 0,9 mg/g ts (Arvidsson, 2012). Detta värde

ligger nära ett på liknade sätt uppmätt genomsnittsvärde för Svealandskusten (1,0 mg/g ts, Malmaeus m fl., 2012). Om man antar att torrsubstansdepositionen varierar från noll vid gränsen mellan A- och ET-bottnar till 1 100 g/m² i de djupare delarna av respektive delområde (Jonsson & Karlsson, 2012) samt att medelvärdet ligger mittemellan dessa extremvärden och dessutom antar att Arvidssons (2012) medelhalt är representativ för systemet, erhålls en årlig storleksordning på fastläggning av fosfor, som undandras det biogeokemiska kretsloppet, på cirka 500 kg fosfor/år.

Inom projektet levande kust genomförs åtgärder för att minska fosfortillförseln till Björnöfjärdssystemet. Åtgärder planeras såväl på jordbruksmark som i de enskilda avloppen som belastar systemet. Bland annat planeras näringsämnen från åkrarna att reduceras genom anläggning av sedimentationsdammar med kalkfilter och våtmark.

Under augusti-september 2012 aluminiumbehandlades sedimenten djupare än 6 meter i Säbyviken och Björnöfjärden. Motsvarande behandling genomförs i Torpe-Infjärden under 2013. Fosfathalterna i bottenvattnen har reducerats väsentligt i de två behandlade fjärdarna efter aluminiumbehandlingen.

3 Material och metoder

3.1 Vattenomsättning

Vid de förhållanden som råder vid Björnöfjärdssystemet med ett smalt och grunt sund som förbinder fjärdarna med utanförliggande vattenområde drivs vattenutbytet sannolikt främst av vattenståndsvariationer, så kallad barotrop pumpning (Håkanson m fl., 1984; Stigebrandt, 2001; Engquist & Stenström, 2004). Saliniteteten i ytvattnet vid en mätpunkt utanför Björnöfjärdssystemet uppgår i medeltal till 5,4 promille. Inne i Björnöfjärdssystemet uppgår medelvärdet under samma tidsperiod till 4,6 promille. Dessa värden har tillsammans med en uppskattning av sötvattentillförseln använts för att beräkna vattenomsättningen enligt metodik beskriven av Knudsen (1901). Det uppmätta värdet på salinitet utanför Björnöfjärdssystemet ligger nära det uppmätta långtidsmedelvärdet för samma parameter ytterligare en bit längre ut i Nämndöfjärden vid Stockholm Vattens provtagningsstation vid fyren Franska stenarna, varifrån det finns en lång tidsserie av mätvärden (Stockholm Vatten, opubl. data).

Det lokala avrinningsområde som dränerar markerna runt Björnöfjärdssystemet uppgår till 14 km². Den specifika avrinningen i regionen under 2012 uppgick till 12,5 l/s km² (www.vattenwebb.smhi.se). Detta ger en sötvattentillförsel på knappt 0,2 m³/s. För att massbalansen för salt ska gå ihop i enligt Knudsens teorem fordras då ett inflöde av saltvatten på 1,0 m³/s. Detta värde på brackvatteninflödet är av samma storleksordning som beräknats för Vemlingen (Stigebrandt, 2007), en närliggande havsvik med likartad form på förbindelsen med utanförliggande vattenområde. Den genomsnittliga uppehållstiden för ytvattnet i Björnöfjärdssystemet blir enligt ovanstående beräkningar 2 månader. Omsättningstider av samma storleksordning har beräknats för andra instängda vattenområden längs Svealandskusten (Karlsson m fl., 2011; Abrahamsson m fl., 2012). I **Tabell 3** sammanfattas parametrar som beskriver vattenutbytet mellan Björnöfjärdssystemet och utanförliggande Nämndöfjärden.

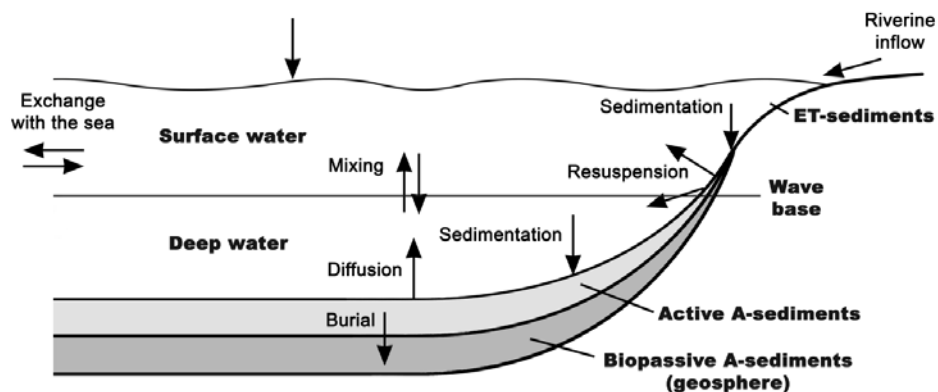
Tabell 3 Parametrar som beskriver vattenutbytet mellan Björnöfjärdssystemet och Nämndöfjärden.

Lokalt tillrinningsområde (km ²)	14
Specifik avrinning ¹ (l/ s km ²)	12,5
Sötvattentillförsel (m ³ /s)	0,2
Salinitet ytvatten (0-6 m) Björnöfjärdssystemet	4,6
Salinitet ytvatten Nämndöfjärden	5,4
Inflöde brackvatten Björnöfjärdssystemet (m ³ /s)	1,0
Utflöde Björnöfjärdssystemet (m ³ /s)	1,2
Genomsnittlig uppehållstid ytvatten Björnöfjärdssystemet (dygn)	60

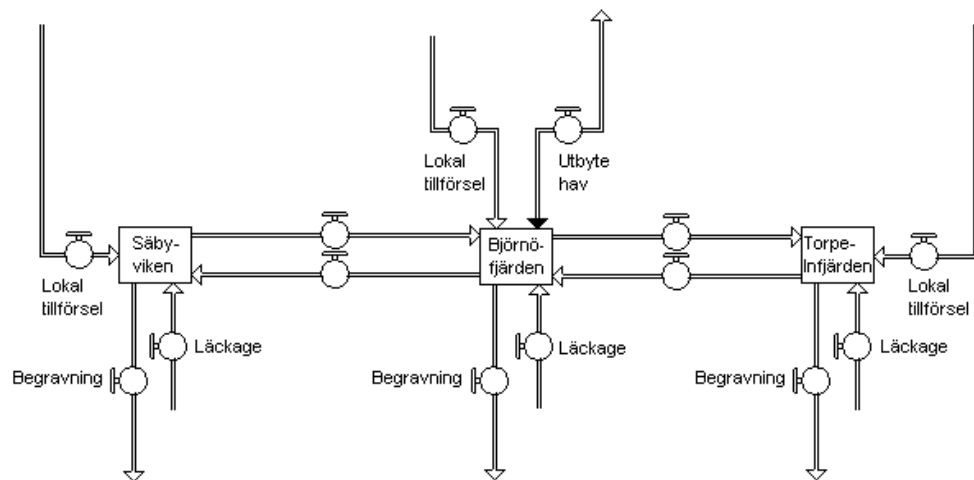
¹mätdata från Stormyrabäcken 2012 (www.vattenwebb.smhi.se)

3.2 Fosformodell

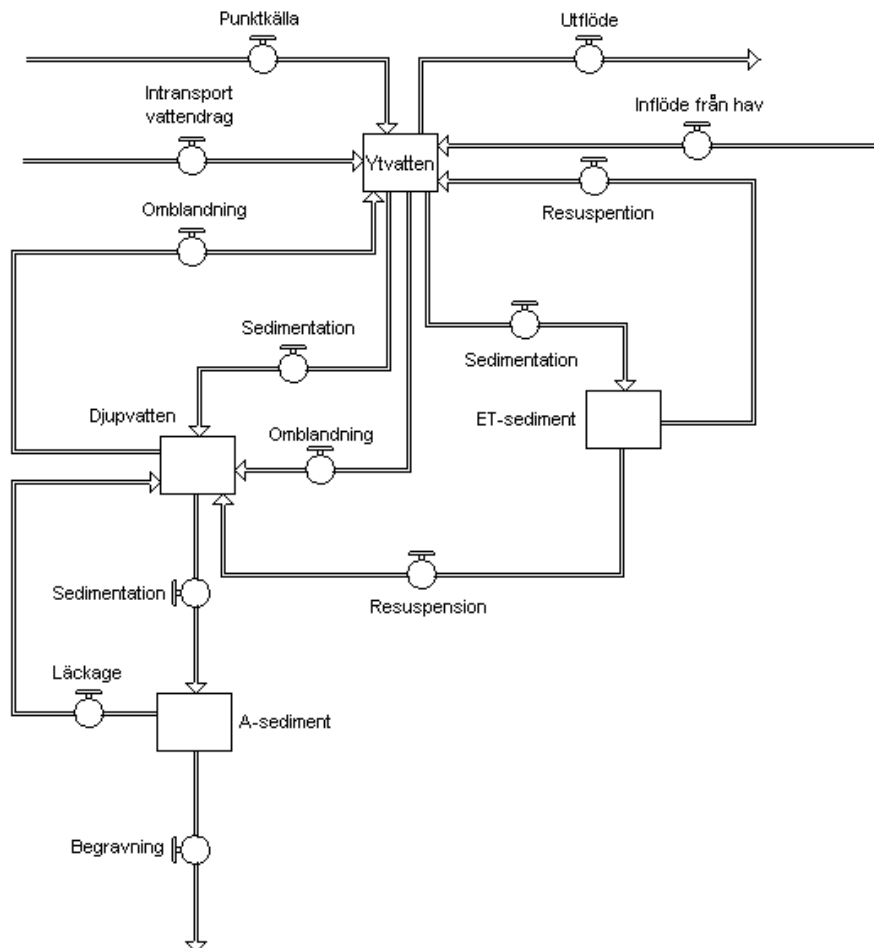
Modellen som applicerats på Björnöfjärdssystemet är en en-dimensionell massbalansmodell som beräknar koncentrationen av fosfor i vattenmassan genom att numeriskt lösa det system av ordinära differentialekvationer som uppstår när de flöden som redovisas i **Figur 3** parameteriseras. Modellen över systemet Säbyviken–Björnöfjärden–Torpe-Infjärden redovisas principiellt i **Figur 4**. För varje delbassäng beskrivs dynamiken i detalj med fyra tillståndsvARIABLER för fosfor (**Fig. 5**).



Figur 3 Principskiss över substansflöden i kustecosystem. Från Karlsson m fl. (2010).



Figur 4 Principskiss av modell över Björnöfjärdsystemet.



Figur 5 Fosformodellens struktur. Fosformängden beräknad för fosfor i ytvatten, djupvatten, erosions- och transportsediment (ET-sediment) samt i ackumulations sediment (A-sediment).

I modellen särskiljs ackumulationsbottnar (A-sediment) från erosions- och transportbottnar (ET-sediment), se sektion 2.2.6 för definitioner. Utbredningen av olika botten typer har definierats med hjälp av Jonsson & Karlsson (2012). Vågbasens läge och gränsen mellan ytvatten och djupvatten har bestämts med hjälp av statistiska modeller i kombination med uppmätta temperaturprofiler. Flödet mellan bassängerna har inte kunnat fastställas med hjälp av skillnader i salthalt, eftersom salthalten var densamma i alla tre delbassänger. I stället sattes vattenflödet till 2,5 cm/sekund över halva sektionens arean som skiljer bassängerna åt, vilket är ett typiskt värde för kustområden i Östersjön (Håkanson m fl., 1984).

Den detaljerade fosformodell (Fig. 5) som används för respektive fjärd finns beskriven i Malmaeus m fl. (2008). Förutom vattenflödena simuleras i denna modell också den vertikala omblandningen mellan yt- och djupvatten, sedimentation, resuspension, begravnin g och läckage från sediment. Med

hjälp av denna modell har effekter på systemets fosfordynamik av förändrat utbyte mellan vatten och sediment simulerats, liksom effekter av minskad extern tillförsel av fosfor.

3.2.1 Känslighetsanalys

Känslighets- och osäkerhetsanalyser har standardmässigt utförts med Monte Carlo simulering. I känslighetsanalysen har modellparametrar som styr externa och interna fosforflöden i systemet slumpmässigt varierats inom en relativ standardavvikelse (CV) på 50 %. För varje testad modellvariabel har 100 simuleringar utförts och den därigenom genererade fördelningen i fosforkoncentration i ytvattnet beräknats. Analysen ger ett mått hur känslig prediktion av fosfor i vattnet är för värdet av olika variabler.

3.3 Kvävebalans

Inflödet av kväve från havet beräknas som koncentrationen av totalkväve (TN) vid provtagningsstationen i Nämndöfjärden multiplicerad med det ingående vattenflödet. Tillförseln från tillrinnande vattendrag baseras på Naturvattens beräkning för 2012 (Lindqvist, 2013). Till detta kommer direkt tillförsel av kväve från enskilda avlopp (Ecoloop, 2012). Kvävefixeringen är beräknad från en generell algoritm för tillväxt av cyanobakterier presenterad av Håkanson m fl. (2009). Kvävefixeringens storlek bestäms i denna modell i grunden av fosforhalten (TP) i vattnet enligt väldokumenterade empiriska samband men det ingår också dimensionslösa moderatorer som tar hänsyn till vattnets salinitet och kväve/fosforkvoten. Fastläggningen av kväve i passiva sediment har beräknats från den uppmätta koldepositionen och mineraliseringen (Jonsson & Karlsson, 2012) samt ett antagande om att begravningskvoten för kol/kväve i sediment är 10 (Szczepańska m fl., 2012).

3.4 Balans för partikulärt organiskt kol (POC) och syrgasförbrukning

Skälet till att POC och inte den totala mängden organiskt kol (TOC) varit målvariabel i beräkningarna är att om den operationellt definierat lösta fraktionen (DOC) inkluderats skulle alla andra kolflöden drunkna i den alloktona in- och uttransporten av löst kol (Karlsson m fl. 2005), vilken till stor del utgörs av svårnedbrytbara humusämnen. DOC har förvisso stor betydelse för de akvatiska ekosystemens struktur och funktion (Wikner m fl., 2004) men ur det övergödningsspektivet som Björnöfjärdsprojektet är sprunget ur bedöms det som mer relevant att söka belysa flödena av partikulärt kol då det är dessa som primärt bidrar till syrgastäringen i bottenvattnet.

Tillförseln av POC från avrinningsområdet har skattats med en relation till den mängd fosfor som beräknas tillföras systemet från landbaserade källor (Lindqvist, 2013). Intransporten från Nämndöfjärden har beräknats genom att multiplicera det genomsnittliga brackvatteninflödet (tidigare beräknad med Knudsens (1900) relationer till 1,0 m³/s) med den genomsnittliga differensen mellan uppmätt TOC och DOC vid provtagningsstationen utanför Björnöfjärdssystemet (0,3 mg/l). Primärproduktionen har skattats med en regression mellan uppmätt genomsnittlig klorofyllhalt i Björnöfjärdssystemets ytvatten (7,9 µg/l) och daglig kolproduktion (mg C/m³ dag; Peters, 1986) samt en skattning av den fotiska zonen till att motsvara det genomsnittliga siktdjupet (3,6 m). Uttransporten till Nämndöfjärden är beräknad som det genomsnittliga vattenutflödet (1,2 m³/s)

multipliserat med genomsnittliga halten av POC i Björnöfjärdssystemets ytvatten. Depositionen av kol på fjärdarnas botten har beräknats från uppmätt koldeposition i sedimenten (Jonsson & Karlsson, 2012). Slutligen har mineraliseringen av POC i vattenmassan tjänstgjort som en kalibreringsparameter som iterativt bestämts till ett värde där den resulterande POC-halten i ytvattnet överensstämmer med det empiriskt uppmätta medelvärdet (0,6 mg/l).

Syrgashalten i bottenvattnet har under sommarhalvåret (april-oktober) simulerats vid olika tillförsel av organiskt material till sedimenten med hjälp av en statistisk modell utvecklad av Håkanson & Eklund (2007). I denna regressionsmodell utgörs drivvariablerna av data på tillförseln av material till sedimenten, djupvattnets omsättnings tid och kustområdets morfometriska egenskaper. Vi har antagit att en minskning av koltillförseln till sedimenten är proportionell mot en minskning av primärproduktionen i den fotiska zonen.

3.5 Scenarier

Med ovanstående antaganden och modeller har ett antal scenarier tagits fram där olika antaganden om åtgärder för att minska belastningen av fosfor till Björnöfjärdssystemet utvärderats. Följande scenarier redovisas i resultatdelen:

- 100 % minskning av antropogen fosfortillförsel från åker och enskilda avlopp
- 50 % minskning av antropogen fosfortillförsel från åker och enskilda avlopp
- 100 % minskning av antropogen fosfortillförsel från åker
- 100 % minskning av antropogen fosfortillförsel från enskilda avlopp
- Kemisk behandling av 75 % av A-bottenarealen i de tre fjärdarna
- Kemisk behandling av 100 % av A-bottenarealen i de tre fjärdarna

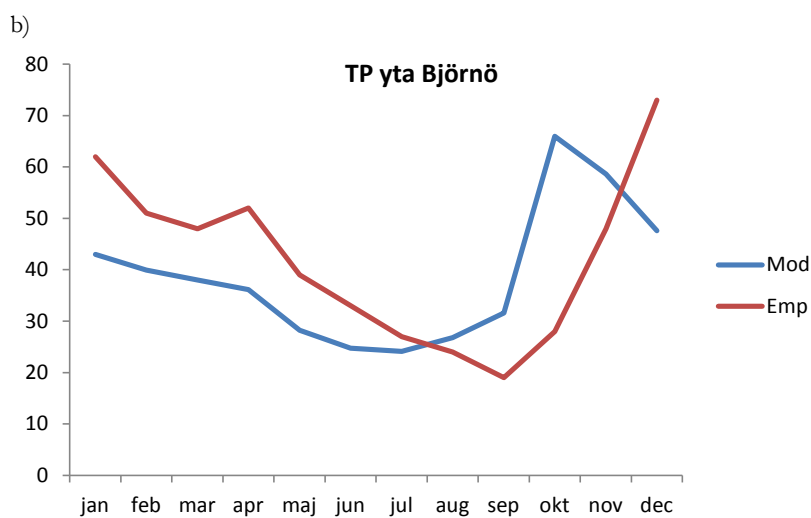
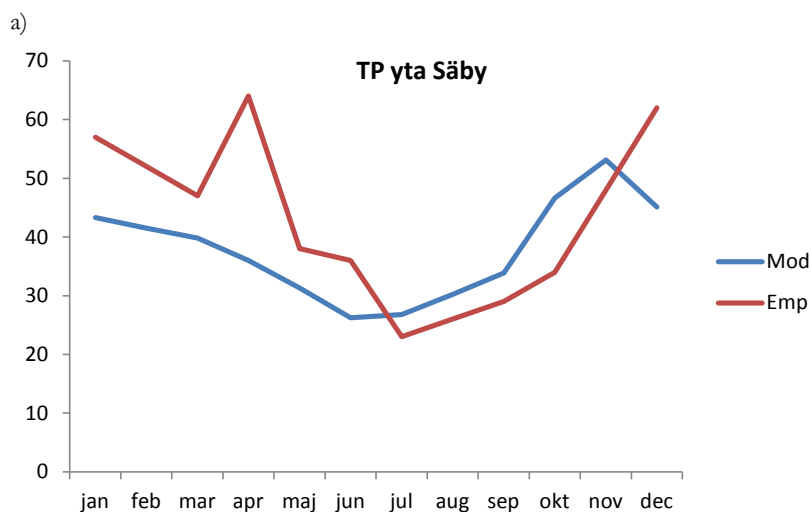
Vid behandling av A-botten har vi antagit att all tillgänglig fosfor i sedimenten binds permanent och därmed undgår läckage upp i vattenmassan. I scenarierna utvärderas den omedelbara effekten på systemet liksom hur långvarig effekten är av olika åtgärder. Förutom förändrade halter vattnet i de tre fjärdarna undersöks också hur exporten av fosfor och kväve ut ur systemet påverkas av de olika åtgärderna.

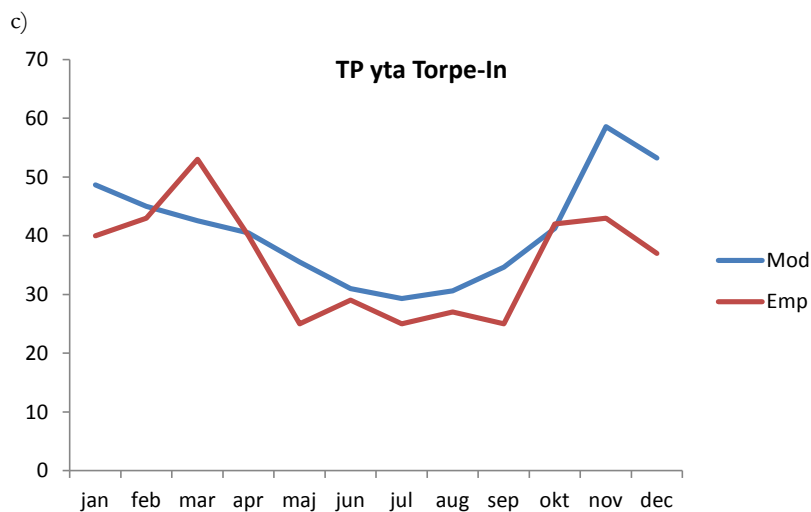
4 Resultat

4.1 Modellkalibrering

Fosformodellen bygger på generella parametrar för interna flöden baserade på bland annat morfometriska data, men dessa har delvis kalibrerats mot empiriska data för att uppnå bättre överensstämmelse. Givet att data för de flesta variabler endast finns tillgängliga för ca 1 år har dock viss återhållsamhet iakttagits när det gäller att ändra på standardvärden för de ingående parametrarna.

Modellens överensstämmelse med empiriska mätningar för fosfor i ytvattnet redovisas i **Figur 6 a-c**. I **Bilaga 1** visas årsmedelvärden och medelvärden för perioden april-oktober i ytvatten och djupvatten.





Figur 6 Modellerad halt jämfört med empirisk uppmätt halt av totalfosfor i ytvatten i a) Säbyviken, b) Björnöfjärden och c) Torpe-Infjärden.

Generellt kan konstateras att modellens överensstämmelse med empiriska data är god när det gäller ytvattnet, vilket är den ekologiskt mest relevanta parametern. När det gäller fosforkoncentration i djupvatten stämmer modellen väl för Björnöfjärden men överskattar värden i Säbyviken och Torpe-Infjärden.

4.2 Massbalanser

4.2.1 Fosfor

Massbalansen för fosfor enligt modellen framgår på årsbasis i **Tabell 4** samt i **Figur 7a**. Som framgår sker den största tillförseln från land till Säbyviken, och transporten mellan bassängerna är betydande i relation till övriga flöden.

Tabell 4 Fosforbalans för Björnöfjärdsystemets tre bassänger.

	Säbyviken	Björnöfjärden	Torpe-Infjärden	Hela systemet
Källor		(ton/år)		
Tillrinnande vattendrag	0,41	0,08	0,01	0,5
Inflöde från Nämdöfjärden		0,64		0,6
Inflöde från Björnöfjärden	1,83		0,75	
Landhöjning	0,11	0,24	0,08	0,4
Läckage	0,07	1,05	0,02	1,1
Summa	2,43	2,04	0,87	2,7
Sänkor		(ton/år)		
Utflöde till Björnöfjärden	2,2	[-0,38]*	0,76	
Utflöde till Nämdöfjärden		1,40		1,4
Sedimentation på A-botten	0,15	1,14	0,06	1,3
Begravning i sediment**	0,08	0,12	0,04	0,2
Summa	2,35	2,16	0,82	2,7

* Nettoflöde från Björnöfjärden till övriga bassänger ger att Björnöfjärden importerar 0,38 ton P/år från Säbyviken och Torpe-Infjärden.

** Begravningen sker från sedimenten och inte från vattenmassan och räknas därför inte in i summan av utflöden till bassängerna.

4.2.2 Kväve

Beräknade flöden av kväve på årsbasis redovisas i **Tabell 5** samt i **Figur 7b**. Systemet synes vara i balans och någon term för denitrifikation har därför inte införts.

Tabell 5 Kvävebalans för Björnöfjärdsystemet vid nuvarande förhållanden.

Källor	Flöde (ton/år)
Inflöde från Nämdöfjärden	10
Tillrinnande vattendrag	7
Enskilda avlopp	1
Kvävefixering	1
Summa	19
Sänkor	
Utflöde till Nämdöfjärden	17
Begravning i sediment	2
Summa	19

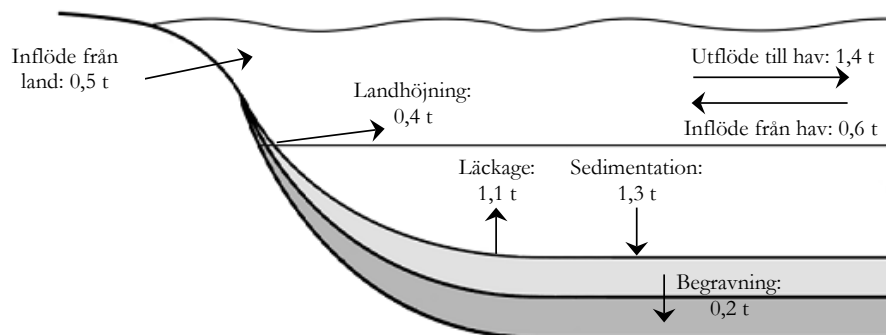
4.2.3 Kol

I **Tabell 6** samt i **Figur 7c** presenteras en beräknad massbalans för partikulärt organiskt kol (POC) i Björnöfjärdssystemet. Det kan konstateras att Björnöfjärdssystemets tillförsel av POC huvudsakligen emanerar från autokton produktion i fjärdarnas vattenmassa.

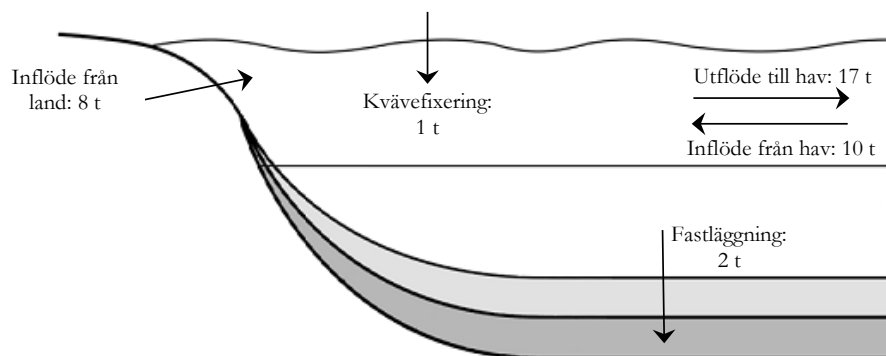
Tabell 6 Årlig massbalans för partikulärt kol i Björnöfjärdssystemet

Flödestyp	Flöde av partikulärt kol (ton/år)
Källor	
Tillförsel från avrinningsområdet	50
Intransport från Nämndöfjärden	10
Primärproduktion	338
<u>Summa</u>	<u>398</u>
Sänkor	
Uttransport till Nämndöfjärden	24
Deposition på botten	94
Mineralisering i vattenmassan	280
<u>Summa</u>	<u>398</u>

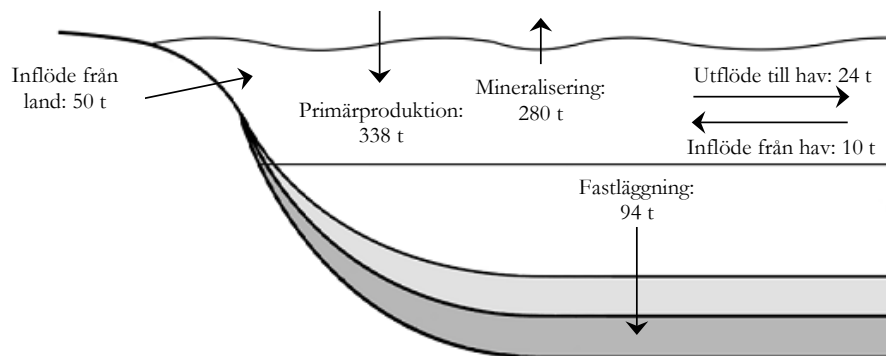
a) Fosfor



b) Kväve



c) Partikulärt kol

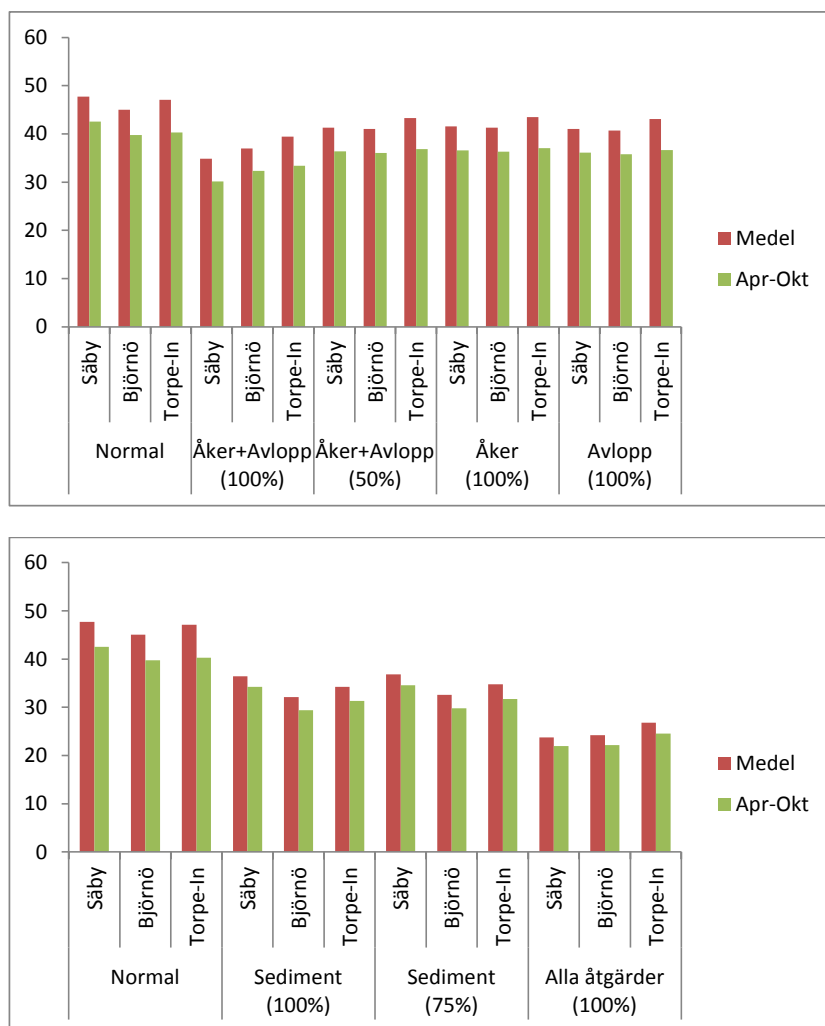


Figur 7 Massbalanser (ton/år) för a) fosfor, b) kväve och c) partikulärt kol.

4.3 Scenarier

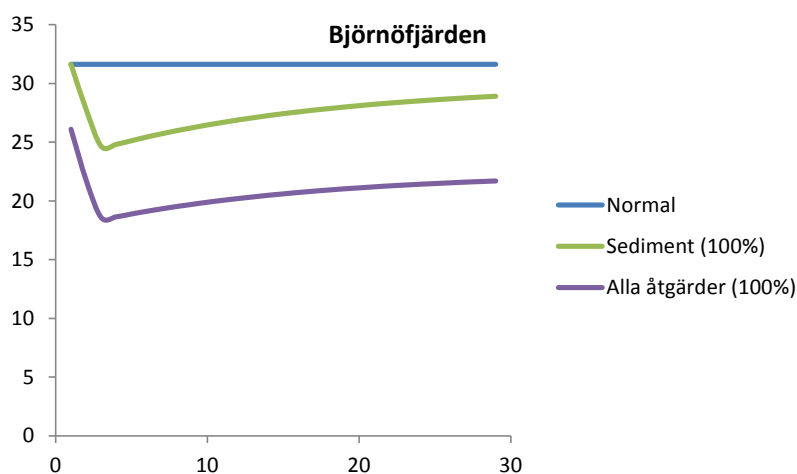
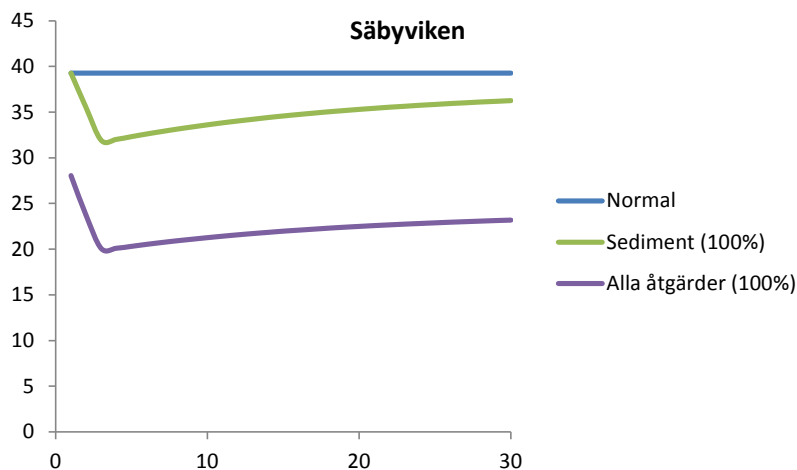
4.3.1 Fosfor

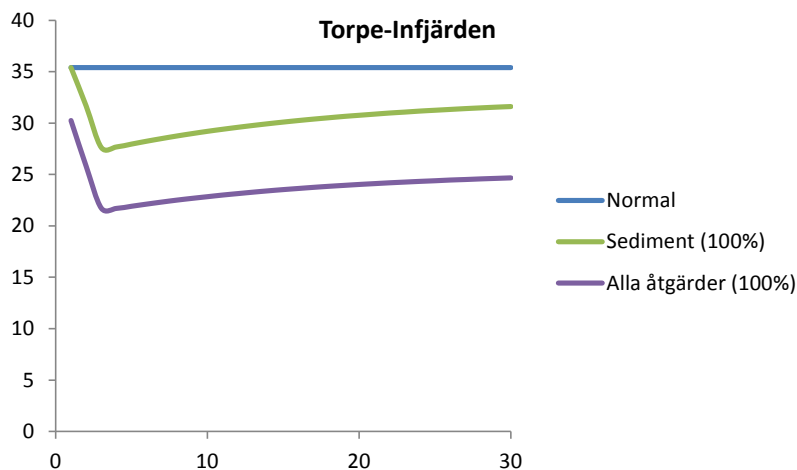
Påverkan på fosforhalten i ytvatten vid olika åtgärdsscenarioer visas i **Figur 8**. Behandling av sedimenten ger på det hela taget en något större effekt än reduktion av extern belastning, men den största effekten förutspås som väntat då både interna och externa åtgärder genomförs.



Figur 8 Fosforhalt i ytvatten ($\mu\text{g/l}$) som årsmedel (röda staplar) och under produktionsperioden (gröna staplar) vid olika åtgärdsscenarioer.

Hur snabbt systemet återgår till nuvarande förhållanden om sedimenten behandlas momentant illustreras i **Figur 9**. Efter 30 år återstår ungefär halva minskningen i fosforhalten i ytvattnet, och kurvan pekar mot att nivån fortsätter att stiga även efter detta. Om samtidigt externa åtgärder genomförs närmar sig systemet asymptotiskt en betydligt lägre fosforhalt i ytvattnet (20-20 µg/l).





Figur 9 Simulerad totalfosforhalt i ytvatten i augusti månad under 30 år efter behandling av hela sedimentarealen med och utan externa åtgärder i Björnöfjärdsystemets tre fjärdar.

Den beräknade exporten av fosfor ut ur systemet vid de olika scenarierna visas i **Tabell 7**.

Tabell 7 Export av fosfor ut till Nämndöfjärden i respektive scenario.

	ton
Normal	1,2
Åker+Avlopp (100 %)	1,0
Åker+Avlopp (50 %)	1,1
Åker (100 %)	1,1
Avlopp (100 %)	1,1
Sediment (100 %)	0,8
Sediment (75 %)	0,9
Alla åtgärder (100 %)	0,6

4.3.2 Övriga ämnen

Om alla planerade åtgärder genomförs och får ett önskat resultat beräknas TP-koncentrationen att kunna minska till drygt 20 µg/l på årsbasis. För kvävebalansen innebär detta beräkningsmässigt att kvävefixeringen kommer att minska från 0,8 till 0,4 ton/år. Genom att tillförseln av primärproducerat material till sedimenten minskar kommer också begravningen av kväve i sedimenten att minska från nivån 2,3 ton/år till 1,5 ton/år. Massbalansmässigt innebär detta att nettoexporten av kväve från Björnöfjärdsystemet till Nämndöfjärden kommer att minska i samma omfattning som den landbaserade kvävetillförseln minskar.

I **Tabell 8** redovisas den beräknade koltillförseln till sedimenten vid olika scenarier där fosfortillförseln minskat. Det kan konstateras att de minskningar av koltillförseln som kan

förutsägas vid olika simulerade avlastningar i fosfortillförseln inte räcker till för bottenvattnet skall syresättas under sommarhalvåret. Skälet till detta är den långsamma utbytestiden för djupvattnet. Med modellens hjälp har det även kunnat gå att skatta hur mycket primärproduktionen skulle behöva minska för att varaktigt åstadkomma en syrgasmättnad i bottenvattnet som överstiger 20 %. Klorofyllkoncentrationen i ytvattnet skulle då behöva komma ned till nivån 3 µg/l som årsmedelvärde. För åstadkomma detta skulle fosforkoncentrationen behöva minska till nivån 12 µg/l som årsmedelvärde. Detta är ett realistiskt scenario givet den trofiska status som idag råder i Östersjön och som inte kan uppnås med mindre än en radikal minskning av fosforhalten i hela egentliga Östersjöbassängen. Björnöfjärdssystemets morfometri och vattenomsättningsförhållandena medför således att även en måttlig organisk belastning ger ansträngda syrgasförhållanden längs djupare liggande botten. Om man anser det viktigt att åstadkomma en syresättning av hela systemet återstår åtgärderna att antingen syresätta genom nedpumpning av ytvatten eller att genom muddring och sprängning radikalt öka sektionens areal i utloppet till Nämndöfjärden så att vattenutbytet underlättas.

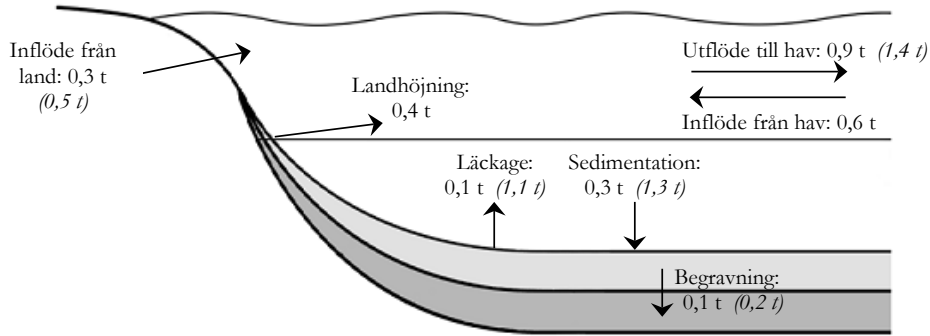
Tabell 8 Beräknad klorofyllhalt (Chl-a), primärproduktion (PP), koldeposition till sedimenten och syrgasmättnad i bottenvattnet, vid olika scenarier som minskar fosforhalten (TP) i ytvattnet.

	Normal	Sediment (100 %)	Avlopp (100 %)	Åker (100 %)	Alla åtgärder (100 %)	Scenario för att erhålla syresättning av djupvatten
TP ytvattnet årsmedel(µg/l)	39	27	37	34	24	12
Chl-a årsmedel (µg/l)	8	6	7,5	7	5	3
PP (ton C/år)	338	247	280	301	223	132
Koldeposition (ton C/år)	94	69	78	84	62	37
Syrgasmättnad (%)	0	0	0	0	0	20

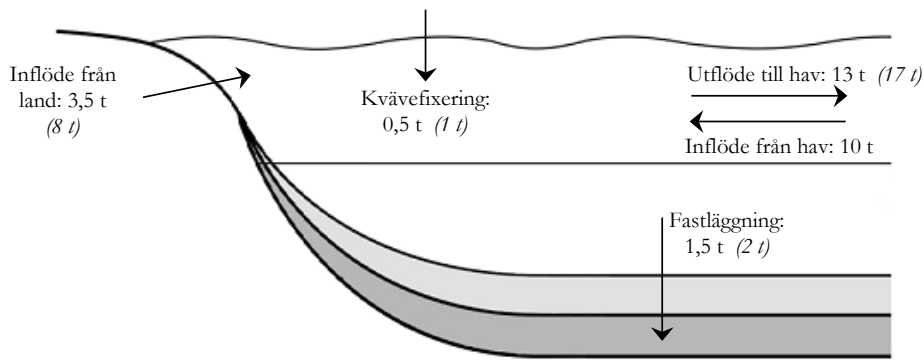
Ett annat sätt att försöka utröna hur syrgasförhållandena i bottenvattnet korrelerar med tillförseln av organiskt material är att stökiometriskt räkna på tillgänglig mängd löst syrgas i bottenvattnet och jämföra den med hur mycket syrgas som åtgår för att bryta ned den mängd kol som tillförs. Om man antar att det sker en fullständig syresättning i samband med höst/våromblandning och att det därefter inte sker något ytterligare syretillförsel finns 40 ton löst syrgas tillgänglig i djupvattnet. Syrgasförbrukningen under ett halvår kan beräknas från den uppmätta koldepositionen (Jonsson & Karlsson, 2012) ett antagande om att hälften mineraliseras och en relation mellan organiskt kol och COD (Chemical Oxygen Demand) enligt Wilander (1988). Detta ger en syrgasförbrukning på 60 ton. Om alla lokala åtgärder minskar koldepositionen med storleksordningen en tredjedel och syrgasförbrukningen till ca 40. Fortfarande finns således för lite tillgängligt syre kvar att syresätta systemet. De stökiometriska beräkningarna är således kongruenta med resultaten i **Tabell 2**.

I **Figur 10 a-c** visas massbalanser för fosfor, kväve och kol för fallet då alla åtgärder genomförts enligt ovan.

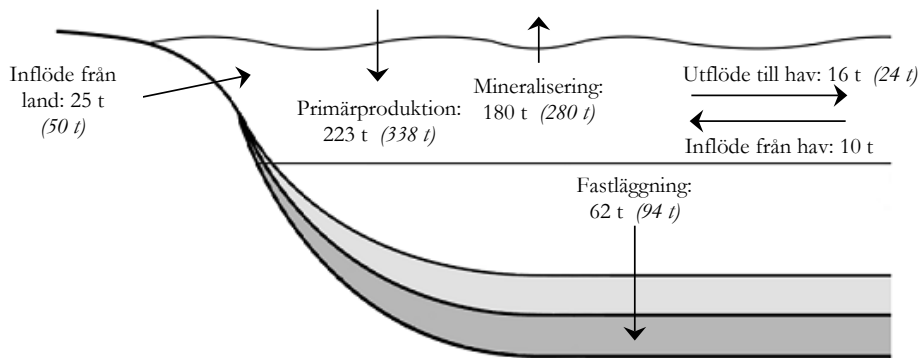
a) Fosfor



b) Kväve



c) Partikulärt kol

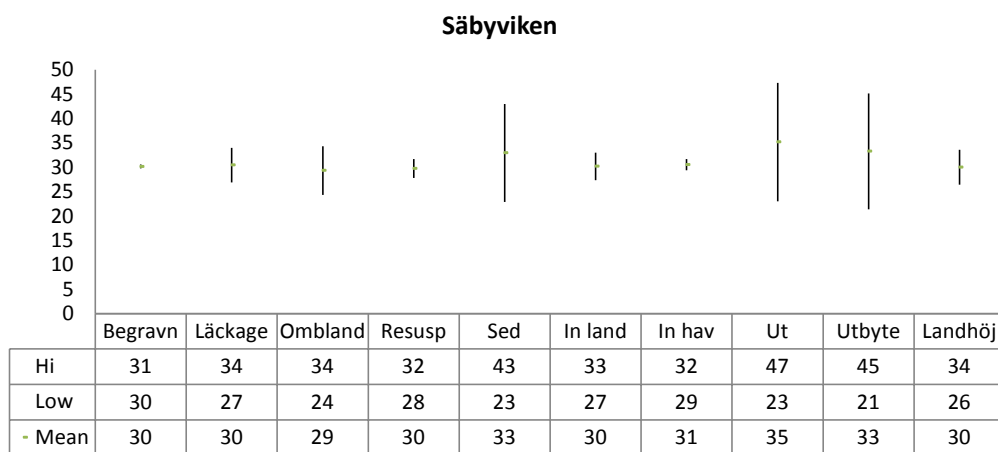


Figur 10 Beräknade massbalanser (ton/år) efter att alla åtgärder genomförts för a) fosfor, b) kväve och c) partikulärt kol. Flöden före åtgärder visas i kursiv stil för jämförelse.

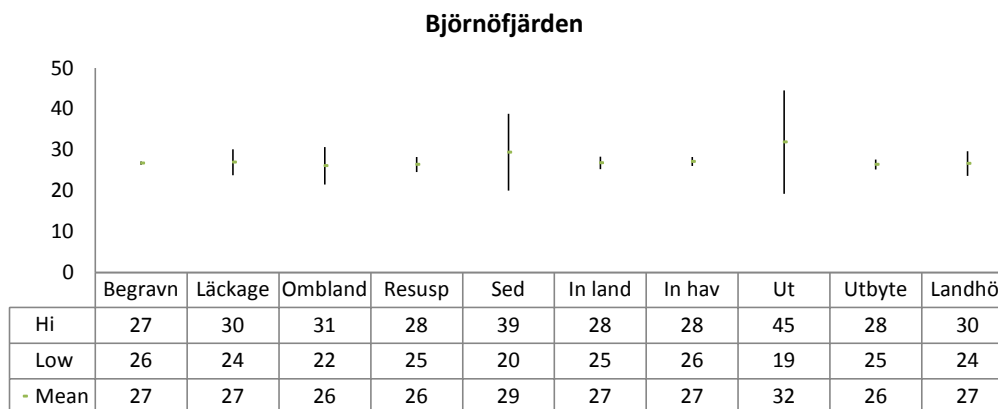
4.4 Känslighetsanalys

I **Figur 11 a-c** visas variationen i fosforkoncentration runt medelvärdet i de tre ingående fjärdarna när var och en av de valda parametrarna varierats.

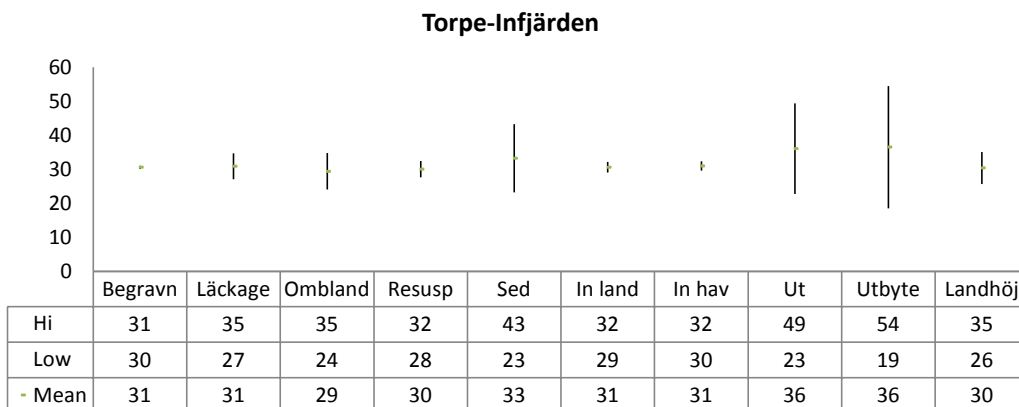
a)



b)



c)



Figur 11 Variation i ytvattenkoncentration av fosfor i respektive fjärd, med införd osäkerhet i parametrar som styr begravning, läckage, omblandning, resuspension, sedimentation, inflöde från land, inflöde från hav, utflöde till hav, utbyte mellan bassänger, respektive landhöjning i a) Säbyviken, b) Björnöfjärden och c) Torpe-Infjärden. Min, max och medel visas i figur och tabell.

Generellt visar känslighetsanalysen att modellen är mer känslig för uppskattningen av sedimentationens storlek än flera andra parametrar. Utbytet mellan bassängerna spelar också en stor roll, vilket är av intresse eftersom just detta flöde är en av de stora osäkerheterna i verkligheten då ingen uppskattning utifrån någon typ av mätdata kunnat göras.

5 Diskussion

Den grundläggande frågeställningen i projektet *Levande kust* är att utvärdera hur långt man kan nå med olika åtgärder och i vilken utsträckning man faktiskt kan återställa/uppnå god ekologisk status och till vilken kostnad. Denna modelleringsstudie har i sammanhanget två syften: att på förhand prognostisera resultatet av ett antal åtgärder, och att systematisera de kunskaper kring flöden och åtgärder som empiriska mätningar lett fram till. Den massbalansmodell som applicerats i denna delstudie ger en god uppfattning om betydelsen av olika substansflöden och processer samt hur dessa påverkas av åtgärder i systemet.

Storleksmässigt visar massbalansen att flödena av fosfor mellan sediment och vatten på årsbasis dominerar över externa inflöden, vilket också visar sig genom effekten av de simulerade åtgärder som testats i scenarierna. Behandling av sedimenten ger till synes större effekt på fosforhalten i vattenmassan än åtgärder i avrinningsområdet, även om en hundraprocentig reduktion av externa inflöden uppnår nästan samma effekt. En kombination av åtgärder ger naturligt nog störst effekt.

Att behandla sedimenten ger enligt modellen ett långvarigt resultat – omkring halva effekten återstår efter 30 år. I grunden är dock åtgärder mot externa flöden nödvändiga för att komma åt övergödningproblematiken och inte bara behandla symptomen. Men även om alla möjliga åtgärder genomförs i och runt Björnöfjärden kommer en viss förhöjning av fosforhalten jämfört med den

naturliga halten att kvarstå. Simuleringar där Nämndöfjärdens fosforhalt satts till 12 µg/l visar att en ursprunglig bakgrundshalt i Björnöfjärden ligger någonstans mellan 15 och 20 µg/l i ytvattnet, vilket alltså är lägre än vad som uppnås med samtliga simulerade åtgärder inne i systemet. Inte ens i ett så isolerat system som Björnöfjärden med begränsat utbyte med utanförliggande hav går det alltså att helt återställa de naturliga förhållandena så länge övergödningen i havet består. Detta gäller naturligtvis i ännu högre grad andra kustområden vid Östersjön där kontakten med utsjön är större, vilket talar för att storskaliga lösningar måste till för att rädda kusten. Lokala åtgärder kan bara uppnå en del av målet.

När det gäller övriga ämnen konstateras att kväveexporten ut ur systemet kommer att vara proportionell mot reduktionen i extern tillförsel. Minskad retention i sedimenten kommer enligt beräkningarna att ungefärligen kompenseras av minskad kvävefixering i vattenmassan. Kvävebalansen skall betraktas som indikativ, men bör ge en rättvisande bild av storleksordningen på primära kväveflöden och vilka principiella effekter åtgärder som minskad tillförseln ger upphov till. Det saknas i dagsläget processkunskap för att kvantifiera betydelsen av denitrifikation, det vill säga omvandlingen av nitratkväve till kvävgas. Utifrån massbalansen synes dock denna process inte vara särskilt betydelsefull i Björnöfjärdssystemet

Kolbalansen ger vid handen att den autoktona produktionen är ett dominerande kolflöde. Jämfört med andra kustområden där massbalansberäkningar för kol utförts (Lidén, 2003, Karlsson, 2004a; Bonde & Wester, 2005) är betydelsen inflödet av kol genom primärproduktion relativt sett större i Björnöfjärdssystemet. Förklaringen ligger i områdets begränsade vattenutbyte med utanförliggande skärgård och den höga näringshalten, som skapar förutsättningar för algutväxt. De minskningar av partikulärt kol i systemet som de simulerade åtgärderna väntas leda till, förväntas inte vara tillräckliga för att syresätta bottenvattnen i någon betydande omfattning.

Det bör poängteras att de simuleringar och beräkningar som ligger till grund för resultat och slutsatser i denna rapport till stor del bygger på data insamlade under ett år. Förutom att data alltid är osäkra i sig själva, så ger mätningar under ett år begränsad information om hur systemet fungerar långsiktigt. Vi vet kort sagt inte hur väl typiska förhållanden gällande vattenomsättning och fosfordynamik representeras av de mätningar vi haft tillgång till. Ett konstaterande är att osäkerheten gällande vattenutbytet mellan fjärdarna liksom sedimentationens storlek ger relativt stort utslag i en känslighetsanalys, vilket talar för att dessa processer om möjligt bör studeras i mer detalj för att verifiera de resultat som framkommit genom denna rapport.

6 Sammanfattande slutsatser

- Den massbalansmodell som tagits fram för fosfor har fungerat väl för ändamålet och ger en tämligen god överensstämmelse med empiriska data för den begränsade period då mätningar genomförts. Denna modell har vidare utnyttjats för att upprätta massbalanser för kväve och partikulärt kol samt för att i ett ytterligare steg beräkna syrgashalten i bottenvattnet.
- Storleksmässigt visar massbalansen att flödena av fosfor mellan sediment och vatten på årsbasis dominerar över externa inflöden, vilket också visar sig genom effekten av de simulerade åtgärder som testats i scenarierna.
- Behandling av sedimenten ger till synes större effekt på fosforhalten i vattenmassan än åtgärder i avrinningsområdet, även om en hundra procentig reduktion av externa inflöden uppnår nästan samma effekt. En kombination av åtgärder ger naturligt nog störst effekt.
- En reduktion av fosfortillförseln bör inte resultera i en ökad export av kväve från Björnöfjärdssystemet till utanför liggande skärgård. Skälet till detta är att minskad retention av kväve i sedimenten kompenseras av en minskad kvävefixering.
- Björnöfjärdssystemets morfometriska egenskaper med långsamt vattenutbyte och förhållandevis stora volym av djupare liggande vattenmassa innanför en tröskel medför att området är känsligt för organisk belastning. Det är därför inte troligt att en minskad belastning av näringsämnen och därigenom resulterande minskad primärproduktionen kommer att leda till betydande förbättringar av syrgasförhållandena i bottenvattnet.

7 Referenser

- Abrahamsson, S., Calestam, K-M, Joelsson, A-E., Fredriksson, L. & Matschoss-Falck, E., 2012. Vattnets omsättningstid i Högklykeviken, Gräsö – Vattenbalansens inverkan på vattenkvaliteten. Projektarbete i kursen Projekt Vattenresurser. Civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik, Uppsala univ./SLU.
- Arvidsson, M., 2011. Yngelinventering i Skarpösundet, Fjällsviksviken och Björnöfjärden 2011. Naturvatten i Roslagen rapport 2011:17.
- Arvidsson, M., 2012. Läckagebenägen fosfor i Björnöfjärdens bottensediment. Naturvatten i Roslagen rapport 2012:11.
- Bonde, C. & Wester, A., 2005. Miljöeffekter av Karlsborgs Bruk i Repskärsfjärden. Projektarbete Prediktiv limnologi, Miljö- och vattenteknikprogrammet, Uppsala universitet.
- Dahl, S., Eklund, J. & Rosenqvist, C., 2003. Utvärdering av Utansjö Bruks fosforutsläpp – En massbalansmodellering av omsättningen av totalfosfor i ett kustområde i Bottenhavet och koppling till ekologiska effektvariabler. Projektarbete Prediktiv limnologi, Miljö- och vattenteknikprogrammet, Uppsala universitet, 28 sid.
- Ecoloop, 2012. Levande Kust - Fosforbelastning från land till Björnöfjärden i Värmdö kommun. Ecoloop rapport 2012-04-13, 48 sid.
- Engqvist, A. & Stenström, P., 2004. Archipelago Strait Exchange Processes – An overview. Deep Sea Research II, 51: 371-392.
- Grahn O., Karlsson, M. & Lidén A., 2004. Miljökonsekvenser av utsläpp till vatten. ÅF-Miljöforskargruppen rapport S113303 för Kappa Kraftliner, Piteå, 25 sid.
- Gustafsson A. & Lindqvist U., 2012. Status och åtgärdsbehov för Edsviken. Underlag för statligt, kommunalt och mellankommunalt vattenvårdsarbete. Naturvatten i Roslagen AB Rapport 2012:05.
- Håkanson, L. and Eklund, J.M., 2007. A dynamic mass-balance model for phosphorus fluxes and concentrations in coastal areas. Ecological Research 22, 296-320.
- Håkanson, L. & Karlsson, M., 2003. A dynamic model to predict phosphorus fluxes, concentrations and eutrophication effects in Baltic coastal areas. In: Karlsson, M., 2004. Predictive Modelling – a Tool for Aquatic Environmental Management. Licentiate thesis, Uppsala University Department of Earth Sciences, LUVA 04-02, 116 p.
- Håkanson, L., Gyllenhammar, A., Brodin, A., 2004. A dynamic model to predict sedimentation and suspended particulate matter in coastal areas. Ecological Modelling 175, 353-384.
- Håkanson, L., Kulinski, I & Kvarnäs, H., 1984. Vattendynamik och bottendynamik i kustzonen. Statens Naturvårdsverk PM 1905.
- Håkanson, L., Hytteborn, J. & Bryhn, A., 2009. A new general approach to quantify Nitrogen fixation exemplified for the Baltic proper. The open Marine Biology Journal 3:36-48.
- Jonsson, P. & Karlsson, M., 2012. Björnöfjärdens historiska utveckling. JP Sedimentkonsult rapport 2012:2.
- Jonsson, P., (red.), Persson, J. & Holmberg, P., 2003. Skärgårdens bottnar. Naturvårdsverket rapport 5212.

- Jonsson, P., Kohonen, T., Lukkari, K., Karlsson, M., Malmaeus, M., Mattila, J. & Puttonen, I., 2012. Old clays – A forgotten source of phosphorus to the Baltic Sea. In: Virtasalo, J. & Vallius, H. (eds.) Abstract book, 11th Colloquium on Baltic Sea Marine Geology, Helsinki 19-21 September 2012. Geological Survey of Finland, Guide 57. ISBN 978-952-217-196-2.
- Karlsson, M., 2002. Fosforbudget för Iggesundrecipienten - simulering av alternativa utsläppsnivåer från Iggesund Bruk. ÅF-Miljöforskargruppen rapport S101702, 17 sid.
- Karlsson, M., 2004a. Modellering av recipientens omsättning av näringsämnen, organiskt material och suspenderade ämnen. ÅF-Miljöforskargruppen rapport S104803 för Skutskärs Bruk, 68 sid.
- Karlsson, M., 2004b. Miljöförhållanden i Yttrefjärden – omsättning av organiskt material och näringsämnen. ÅF-rapport för SCA Munksund.
- Karlsson, O., M. och Håkanson, L., 2001. Miljökonsekvensanalys av Korsnäsverkens fosforutsläpp till Gävle Yttre Fjärd. Uppsala universitet, Institutionen för geovetenskaper, 37 sid.
- Karlsson, M. & Malmaeus, M., 2006. Spridningsberäkning för utsläpp av fosfor och organiskt material till Bottenhavet från Vallviks Bruk. ÅF-Consult rapport, 21 sid.
- Karlsson, M., Grotell, C. & Malmaeus, M., 2005. Miljökonsekvenser av utsläpp till vatten. ÅF-Process rapport för Husums Fabrik, 64 sid. Karlsson, M., Malmaeus, M. & Lindgren, D., 2011. Modellering av fosforomsättningen i Östhammarsfjärden. IVL-rapport B1974.
- Karlsson, O.M., Malmaeus, J.M., Josefsson, S., Wiberg, K. & Håkanson, L., 2010. Application of a mass-balance model to predict PCDD/F turnover in a Baltic coastal estuary. Estuarine, Coastal and Shelf Science 88, 209-218.
- Kumblad, L., & Rydin, E., 2012. Björnöfjärdens karaktäristika och naturvärden. www.balticsea2020.org/bibliotek/33-levandekustzon/214-bjornofjardens-karakteristiska-och-naturvarden
- Knudsen, M., 1900. På tyska: Ein hydrographischer Lehrsatz. Ann. Hydrogr Maritim Met 316-320.
- Lidén A., 2003. Kvantifiering av POC-flöden till, från och inom Breidangen, Oslofjorden. Examensarbete Miljö- och vattenteknikprogrammet, Uppsala universitet. ISSN 1401-5765, 50 sid.
- Lindqvist, U., 2011a. Bottenfaunaundersökning i Björnöfjärden, Fjällsviksviken och Skarpösundet. Naturvatten i Roslagen rapport 2011:22.
- Lindqvist, U., 2011b. Provfiske i Björnöfjärden, Fjällsviksviken och Skarpösundet. Naturvatten i Roslagen rapport 2011:23.
- Lindqvist, U., 2013. Vattenkemiska undersökningar av Björnöfjärdens tillflöden under 2012. Naturvatten i Roslagen rapport 2013:xx.
- Malmaeus, M., & Karlsson, M., 2007. Modellering av omsättning av fosfor i Pukaviksbukten. ÅF-Consult AB rapport för Mörrums Bruk, 13 sid.
- Malmaeus J.M., Karlsson, O.M., Lindgren, D. & Eklund, J., 2008. The optimal size of dynamic phosphorus models for Baltic coastal areas. Ecological modelling 216: 303–315.
- Malmaeus, J.M., Rydin, E., Jonsson, P., Lindgren, D., Karlsson, O.M., 2012. Estimating the amount of mobile phosphorus in Baltic coastal soft sediments of central Sweden. Boreal Environmental Research 17:425-436.

Persson J., Håkanson, L., Pilesjö, P., 1994. Prediction of theoretical surface water turnover time in coastal waters using digital bathymetric information. *Environmetrics* 5: 433-449.

Peters, R.H., 1986. The role of prediction in limnology. *Limnology and Oceanography* 31: 1143-1159.

Qvarfordt, S., Fredriksson, R., & Borgiel, M., 2011. Marin vegetationsinventering i tre havsvikar. Del 1. Björnöfjärden, Ingarö. Sveriges Vattenekologer, november 2011, 77 sid.

Szczepańska, A., Zaborska, A., Maciejewska, A., Kulinski, K. & Pempkowiak, J., 2012. Distribution and origin of organic matter in the Baltic Sea sediments dated with ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs. *Geochronometria* 39: 1-9.

Stigebrandt, A., 2001. FjordEnv –a water quality model for fjords and other inshore waters. Göteborgs Universitet, Inst. För geovetenskaper, Rapport C40. 41 pp.

Stigebrandt, A., 2007. Vattenutbytet i Vemlingen. Rapport till Oscarskanalens Vänner. 3 sid.

Wikner, J., Andersson, A., Johansson, S., Sandberg, J., 2004. Älvburet organiskt kol strukturerar näringsväven i Bottenviken. I Wiklund, K. (red:) *Bottniska viken 2003*, sid 30-35. Umeå Marina Forskningscentrum.

Wilander A., 1988. Organiskt material i vatten - En jämförelse av resultat från olika analysmetoder. *Vatten* 44, 217-224.

Formatted: Swedish (Sweden)

8 Bilaga 1 - Kalibreringsresultat för fosformodellen

