

Fosfordynamik i Hjälmmaren

Resultat av simuleringar

Mikael Malmaeus & Magnus Karlsson

Författare: Mikael Malmaeus, Magnus Karlsson

Medel från: Havs- och vattenmyndigheten på uppdrag av Länsstyrelsen i Örebro län

Rapportnummer: C 72

Upplaga: Finns endast som PDF-fil för egen utskrift

© IVL Svenska Miljöinstitutet 2015

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

Tel: 08-598 563 00 Fax: 08-598 563 90

www.ivl.se

Rapporten har granskats och godkänts i enlighet med IVL:s ledningssystem

Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	3
1 Inledning.....	4
2 Bakgrund.....	4
3 Material och metoder.....	8
3.1 Utnyttjade data.....	8
3.2 Fosformodell	10
3.3 Känslighetsanalys.....	12
3.4 Scenarier.....	12
4 Resultat	13
4.1 Kalibrering.....	13
4.2 Massbalanser.....	16
4.3 Scenarier.....	17
4.4 Känslighetsanalys.....	19
5 Diskussion.....	21
6 Slutsatser.....	24
7 Referenser	24

Sammanfattning

Hjälmaren anses vara kraftigt påverkad av övergödning och Länsstyrelsen ansvarar för att utreda förbättringsbehovet och ge förslag till åtgärder för att minska näringsbelastningen, i enlighet med EU:s ramdirektiv för vatten. Fosforhalten i ytvattnet visar en tydlig nedåtgående trend i Hemfjärden sedan 1970-talet, medan ingen motsvarande trend syns i Hjälmarens östligare bassänger under samma period. Samtliga bassänger i Hjälmaren bedöms ha otillfredsställande ekologisk status, främst pga. näringsämnespåverkan på både växtplankton och bottenfauna. Flera faktorer indikerar att den interna belastningen av fosfor från sjöns botten sediment är en betydande källa till övergödning. För att kunna uppnå miljö kvalitetsnormen för Hjälmaren måste fosforhalten i Hjälmarens ytvatten minska från nuvarande ca 50 µg P/l till 22 µg/l. Detta kan vara svårt att uppnå med åtgärder i avrinningsområdet, vilket gör att åtgärder för att minska den interna belastningen kan komma att övervägas.

För att kartlägga Hjälmarens fosfordynamik och för att bedöma potentialen för olika åtgärder att bidra till att minska fosforhalten har en hydrodynamisk massbalansmodell för fosfor (LEEDS-modellen) applicerats för sjöns delbassänger. Modellen beskriver utbytet mellan bassängerna liksom 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 scenarier över utvecklingen på kort och lång sikt till följd av simulerade åtgärder. Modellen visar god överensstämmelse gentemot empiriska data i alla fyra delbassänger, såväl i ytvattnet som i djupvattnet, och ger därmed en god bild av de flöden och interna processer som styr Hjälmarens fosfordynamik. Generellt kan konstateras att sedimentens roll har en stor betydelse för Hjälmarens fosfordynamik, i synnerhet i sjöns centrala och östra delar. Det går inte att utesluta att Hjälmarens näringsrikedom till stor del är naturligt betingad genom sjöns form och djupförhållanden, och att miljöförhållandena fortfarande påverkas av den stora sjösänkningen i slutet av 1800-talet samt näringsämnestillförseln innan kemisk fällning av fosfor infördes i reningsverken.

Sammantaget tyder simuleringarna med modellen på att extern tillrinning styr fosforhalten i Hemfjärden och Mellanfjärden, men att Storhjälmaren och Östra Hjälmarens fosforhalter till stor del bestäms av interna processer där sedimenten spelar en nyckelroll. Detta framgår särskilt tydligt i det scenario där minskad extern belastning ger en god effekt i de två västra bassängerna medan fosforhalten i sjöns centrala och östra delbassänger inte minskar i någon märkbar utsträckning. Detta stämmer också med den historiska erfarenheten, då tidigare åtgärder i reningsverken runt sjön under 1970-talet gav goda resultat i Hemfjärden medan fosforhalten i Storhjälmaren förblivit tämligen oförändrad. Omvänt skulle åtgärder för att binda fosfor i sediment i Storhjälmaren enligt simuleringarna kunna vara ett sätt att åstadkomma minskade halter i de centrala och östliga delarna av sjön. En mer ingående undersökning av sedimentens beskaffenhet och fosforförråd är emellertid nödvändig före denna typ av åtgärder på allvar kan övervägas.

1 Inledning

Hjälmarén anses vara kraftigt påverkad av övergödning och Länsstyrelsen i Örebro ansvarar inom ramen för vattenförvaltningen för att utreda förbättringsbehovet och ge förslag till åtgärder för att minska näringsbelastningen, i enlighet med EU:s ramdirektiv för vatten. Samtliga bassänger i Hjälmarén bedöms ha otillfredsställande ekologisk status, främst pga. näringsämnespåverkan på både växtplankton och bottenfauna. Dessutom har fiskdöd förekommit vid upprepade tillfällen under årens lopp. Orsaken till fiskdöden är inte klarlagd men tros åtminstone delvis bero på höga nitrit- och ammoniumhalter, vilket i sin tur skulle kunna bero på övergödning och av övergödningen orsakad syrebrist i bottenvattnet. Låga syrehalter leder i sin tur sannolikt till att järnbunden fosfor läcker från bottensedimenten och bidrar ytterligare till övergödningen. Fosforhalterna i ytvattnet visar en tydlig nedgående trend i västra Hjälmarén sedan 1970-talet, medan östra Hjälmarén däremot visar en svag tendens till ökade halter under samma period.

För att kunna uppnå miljö kvalitetsnormen för Hjälmarén måste fosforhalten i Hjälmaréns ytvatten minska från nuvarande ca 50 µg P/l till 22 µg/l, vilket i princip innebär att fosforbelastningen måste minska i motsvarande grad, dvs. med ca 50 – 60 %. Det är osäkert om det är möjligt att åstadkomma detta enbart genom åtgärder i avrinningsområdet eller om det även är nödvändigt att genomföra åtgärder för att minska den interna belastningen från sjöns bottensediment om miljö kvalitetsnormen ska kunna uppnås.

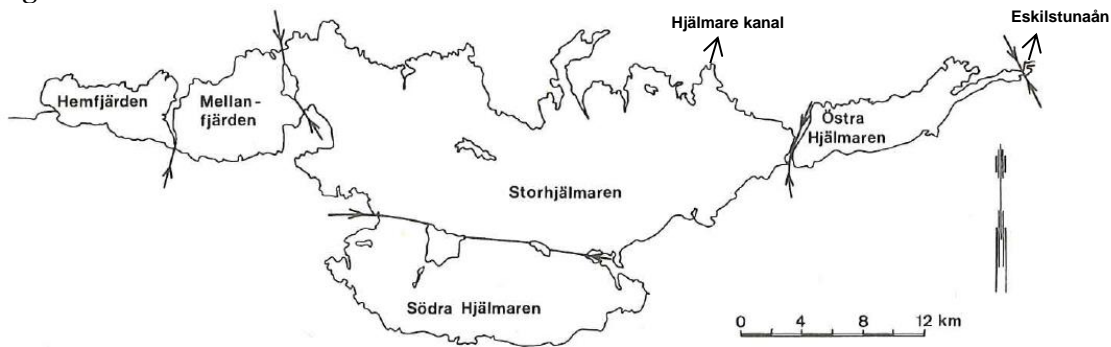
För att kartlägga Hjälmaréns fosfordynamik och för att bedöma potentialen för olika åtgärder att bidra till att minska fosforhalterna har en hydrodynamisk massbalansmodell för fosfor (LEEDS-modellen) applicerats för sjöns delbassänger. Modellen beskriver utbytet mellan bassängerna liksom alla betydelsefulla flöden av fosfor till, från och inom systemet, inkluderande utbytet mellan vatten och sediment. Utöver att beskriva systemet kan modellen användas för att göra scenarier över utvecklingen på kort och lång sikt till följd av simulerade åtgärder.

Syftet med denna rapport är att ge Länsstyrelsen ett underlag för att kunna bedöma i vilken omfattning interna processer i Hjälmaréns bassänger påverkar fosforhalterna i Hjälmaréns ytvatten i dagsläget, och hur långt olika typer av åtgärder kan nå för att minska halterna av fosfor i systemet. Projektet bör ses som en förstudie och de slutsatser som redovisas behöver underbyggas med ett mer omfattande empiriskt underlag innan beslut om faktiska åtgärder fattas. Utredningen har gjorts på uppdrag av Länsstyrelsen och finansierats med anslag från Havs- och Vattenmyndigheten.

2 Bakgrund

Hjälmarén, Sveriges till ytan fjärde största sjö, karakteriseras av fyra mer eller mindre avgränsade delbassänger (**Fig. 1**). Södra Hjälmarén räknas här som en del av Storhjälmaren då dessa båda bassänger inte är topografiskt välavgränsade. Tillrinningsområdet huvudsakligen beläget i Örebro och Södermanlands län är relativt tätbefolkat och ytan täcks av en förhållandevis stor areal jordbruksmark. Hjälmarén är

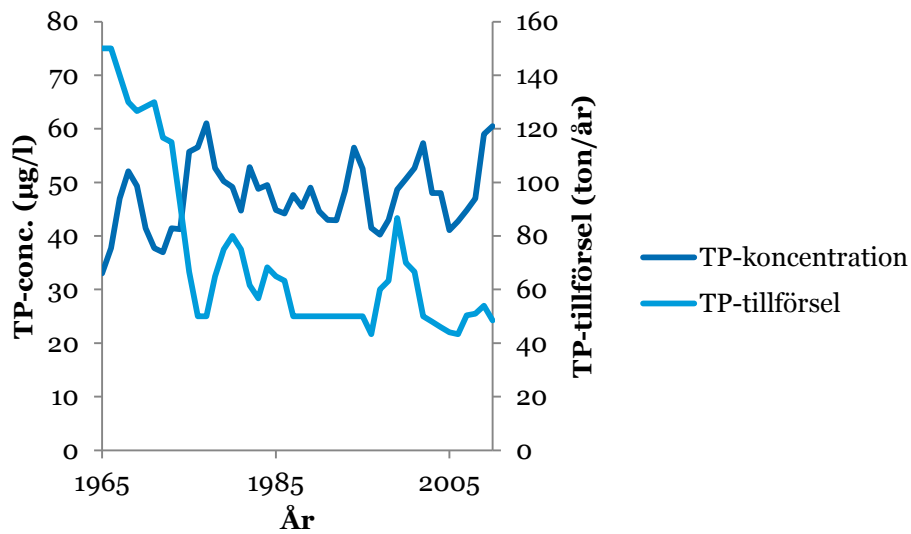
näringsrik med hög produktion av växtplankton och litet siktdjup. Äldre uppgifter tyder på att så varit fallet under lång tid, i varje fall sedan 1700-talet (referenser i NV, 1996 och Degerman et al., 2001). Sjön är grund med ett medeldjup på 6 meter för hela sjön och enbart 1 till 2 meter i de västra delbassängerna. Hjälmaren är fiskrik och det bedrivs ett livskraftigt kommersiellt fiske, huvudsakligen inriktat på gös och signalkräfta.



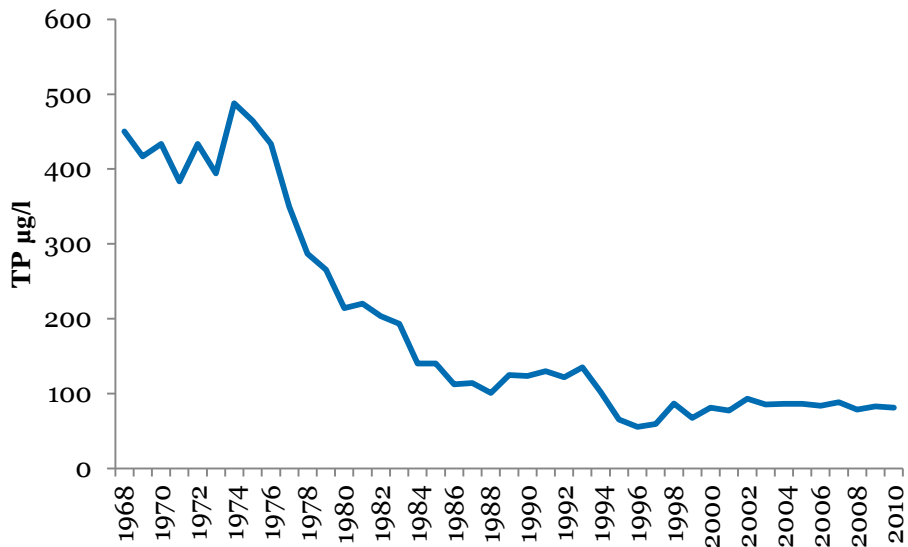
Figur 1 Karta över Hjälmaren med delbassänger, tillflöden och utflöden. Södra Hjälmaren räknas i detta arbete som en del av Storhjälmaren. Från Håkanson (1978).

En drastisk förändring av sjöns ägde rum i slutet av 1800-talet då sjön genom utdikning sänktes närmare 2 m varvid knappt 200 km² torrlades. Håkanson (1978) beräknade att sjöns livslängd därigenom minskades med cirka 1000 år. Sjösänkningen orsakade stora förändringar i sjön genom utsvällning av sediment mot djupare liggande bottnar och kolonisation av vattenväxter på de nya grundbottnar som blev tillgängliga för vegetation.

Ca 80 % av sjöns tillrinning och intrasport av näringsämnen kommer via tre tillflöden: Svartån, Täljeån och Forsån. En stor förändring i tillförseln av fosfor skedde under början av 1970-talet i samband med att reningsverken införde kemisk fällning. Tillförseln av totalfosfor (TP) till Hjälmaren minskade inom loppet av några år från storleksordningen 150 ton/år till cirka 50 ton/år. Den sammanlagda fosfortillförseln har med en betydande mellanårsvariation legat på denna nivå fram till dags dato. Förvånande nog har dock den stora avlastning av fosfor som skedde på 1970-talet inte gett upphov till nämnvärt minskade fosforhalter i Hjälmarens centrala delar (**Fig. 2**). Totalfosforkoncentration har sedan regelbundna mätningar startade 1965 pendlat kring ett medelvärde på cirka 50 µg/l, vilket kan jämföras mot det uppsatta målvärdet inom vattenförvaltningen på 22 µg/l. I Hemfjärden, primärrecipient för utsläpp från Örebro stad, medförde emellertid reningsverksuppgraderingen en minskning av fosforkoncentration i proportion till avlastningen (**Fig. 3**). En liknande tidsutveckling som i Hemfjärden har även noterats i Mellanfjärden.



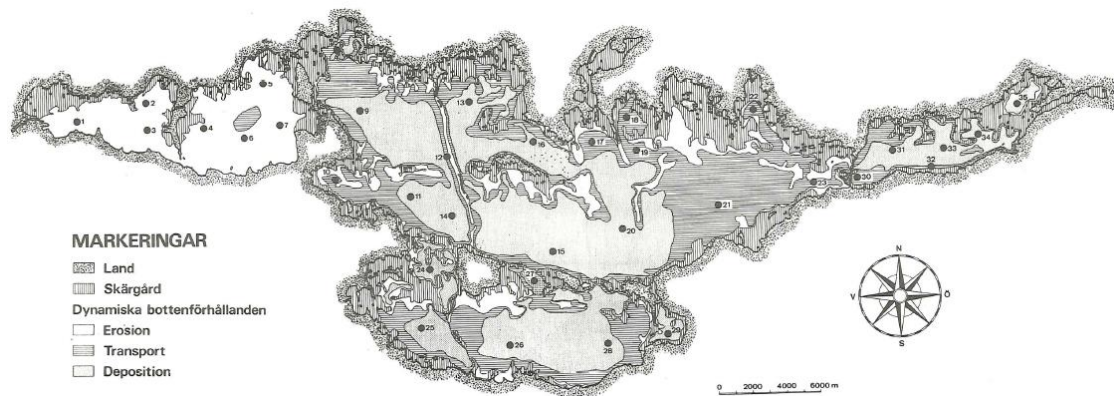
Figur 2 Tidsutveckling avseende fosforkoncentration i Storhjälmarens ytvatten och sammanlagd fosfortillförsel till Hjälmaren 1965-2010. Recipientkontrolldata presenterade som 3-års löpande medelvärden.



Figur 3 Tidsutveckling avseende totalfosforkoncentrationen i Hemfjärden (den västligaste HjälmARBASSÄNGEN) 1968-2010. Recipientkontrolldata presenterade som löpande treårsmedelvärden.

Omsättningen av fosfor i Hjälmaren har tidigare studerats av Olsson (1987) och NV (1996). Med hjälp av matematiska modeller har transporten av näringsämnen mellan olika delbassänger simulerats och kvantifierats. Modellberäkningarna indikerar att sedimenten i de västra fjärdarna haft ett nettoläckage av fosfor under vissa perioder. Undersökningar av de bottendynamiska förhållandena (Håkanson, 1981) har visat att i sjöns västra fjärdar dominerar erosions- och transportbottnar (ET-bottnar) d.v.s. bottnar där det inte sker någon deposition av finmaterial (**Fig. 4**). De analyser som

gjorts av sediment från Hemfjärden (Boström, 1988; Hjuvf, 1991) visar på kompakta sediment med låg vattenhalt, låg organisk halt och låga fosforhalter, typiskt för äldre glaciala och postglaciala leror. I Storhjälmaren och Östra Hjälmaren är andelen ackumulationsbottnar (A-bottnar), dvs. mjuka bottnar med kontinuerlig deposition av finmaterial (Håkanson & Jansson, 1983) betydligt större.



Figur 4 Bottendynamisk karta för Hjälmaren. Från Håkanson (1981).

Inom ramen för det löpande recipientkontrollprogrammet utförs varje år en massbalansberäkning för fosfor och kväve där den samlade intransporten från mätta och uppskattade tillflöden jämförs mot uppmätta och beräknade utflöden. Under det senaste decenniet har den genomsnittliga beräknade sammanlagda intransporten av totalfosfor legat på 52 ton. Motsvarande siffra för uttransporten har uppgått till 40 ton/år, vilket ger en nettofastläggning i sediment på 12 ton fosfor/år. Den årliga retentionen i blir därmed av storleksordningen 25 %.

3 Material och metoder

3.1 Utnyttjade data

I **Tabell 1** redovisas morfologiska och hydrologiska data över Hjälmarén som utnyttjats för att sätta upp LEEDS-modellen. A-bottnar där fosfor och andra ämnen associerade till finmaterial permanent kan fastläggas och överlagras med nytt sedimentande material förekommer huvudsakligen i de djupare delarna av Storhjälmaren samt de östra bassängerna. Sedimenttillväxten på A-bottnar har uppskattats till 3-5 mm/år (Håkanson, 1981). Fosforhalten i ytsediment från A-bottnar uppmättes i slutet av 1970-talet till 1,8 mg/g ts (Håkanson, 1981), vilket är ett typiskt värde för oxiderade sediment. TP-halten i Hemfjärdens erosions sediment har uppmätts till i medel tal 0,6 mg/g ts (Hjvuf, 1991), vilket är ett typiskt värde för äldre glaciala och postglaciala leror.

Tabell 1 Morfometriska, bottendynamiska och hydrologiska förhållanden för Hjälmarén och dess delbassänger. Bearbetat efter Håkanson (1978) och Håkanson (1981) A-area = andelen ackumulationsbottnar.

	Area (km ²)	Volym (km ³)	Medeldjup (m)	Maxdjup (m)	A-area (%)	Tillrinning (m ³ /s)	Utbytestid (månader)
Hemfjärden	25,4	0,024	1,0	2,6	0	13	0,7
Mellanfjärden	40,1	0,073	1,8	3,2	0		2,2
Storhjälmaren	376	2,6	6,9	22	49,5	13	38
Östra Hjälmarén	35,7	0,18	5,0	20	60,4	2	2,8
Hela Hjälmarén	478	2,9	6,1	22	43,6	27	41

I **Tabell 2** redovisas genomsnittliga transporter av fosfor till och från Hjälmarén via olika vattendrag och luftdeposition samt den beräknade nettofastläggningen som erhålls ur massbalanskriteriet. För vissa vattendrag (Svartån, Täljeån och Forsån) finns tillförlitliga mätdata medan övrig intransport är schablonmässigt beräknad. Motsvarande för uttransporten är utflödet genom Eskilstunaån uppmätt medan flödet via Hjälmaré kanal är uppskattat. I **Tabell 3** redovisas summerad intransport, uttransport och retention för enskilda år 2004-2013.

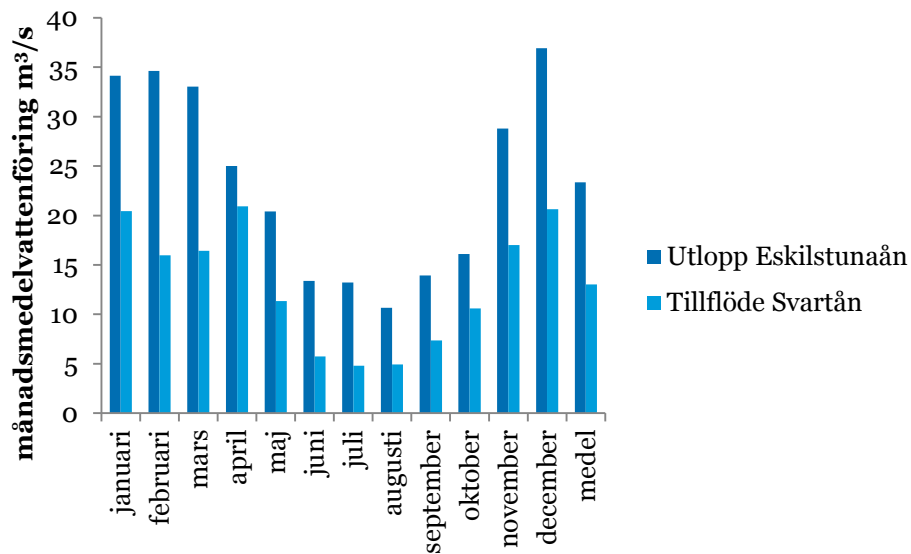
Tabell 2 Medelvärde 2004-2013 för intransporter, uttransporter och retention (fastläggning i sediment) av fosfor i Hjälmaren, (data från årsrapporter för recipientkontroll Hjvvf).

<i>Vattendrag</i>	<i>Bassäng</i>	<i>Flöde (ton/år)</i>
<i>Intransport</i>		
Svartån	Hemfjärden	21
Täljeån	Storhjälmaren	15
Forsån	Storhjälmaren	3
Tandlaån	Östra Hjälmaren	4
Näshultaån	Östra Hjälmaren	1
Övriga	Storhjälmaren	6
Luftdeposition	Alla	3
<i>Summa:</i>		<i>52</i>
<i>Uttransport</i>		
Eskilstunaån	Östra Hjälmaren	37
Hjälmare kanal	Storhjälmaren	3
<i>Summa:</i>		<i>40</i>
<i>Retention</i>		<i>12</i>

Tabell 3 Summerade årliga flöden av fosfor till och Hjälmaren samt beräknad nettofastläggning (retention). Data från årsrapporter för recipientkontroll Hjvvf.

	Intransport (ton/år)	Utflöde (ton/år)	Retention (ton/år)
2006	50	21	22
2007	42	26	16
2008	65	38	27
2009	46	38	8
2010	51	59	-8
2011	55	42	13
2012	59	47	12
2013	48	32	16
Medel	50	34	15
Max	65	59	27
Min	42	21	-8

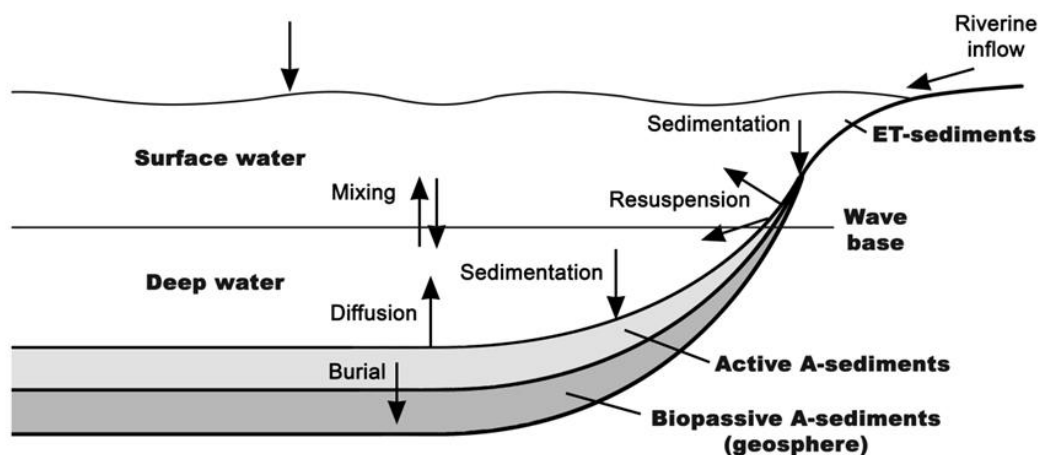
I **Figur 3** visas den genomsnittliga månadsmedelvattenföringen i det största tillflödet Svartån samt det huvudsakliga utflödet via Eskilstunaån för perioden 2004-2013.



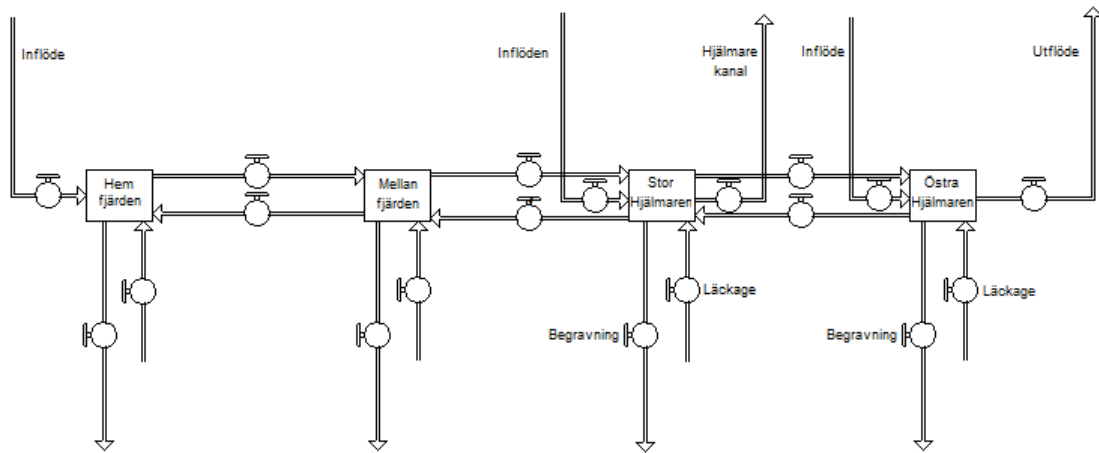
Figur 3 Genomsnittlig månadsmedelvattenföring perioden 2004-2013 för största tillflödet via Svartån samt utflödet via Eskilstuna. Data från SMHI vattenwebb.

3.2 Fosformodell

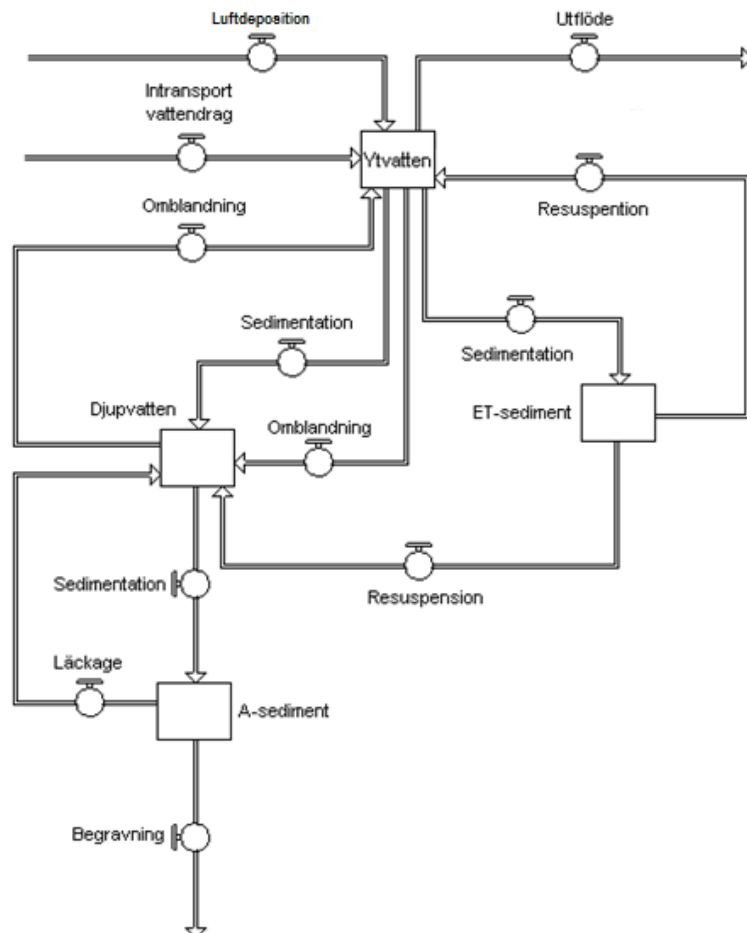
Modellen som applicerats på Hjälmaren är en en-dimensionell massbalansmodell som beräknar koncentrationen av fosfor i vattenmassan genom att numeriskt lösa det system av ordinära differentialekvationer som uppstår när de flöden som redovisas i **Figur 4** parameteriseras. För att applicera modellen för Hjälmarens fyra bassänger modelleras fyra delsystem och kopplas ihop så som visas principiellt i **Figur 5**. För varje delbassäng beskrivs dynamiken i detalj med fyra tillståndsvariabler för fosfor (**Fig. 6**).



Figur 4 Principskiss över substansflöden i ett limniskt system. Från Karlsson (2011).



Figur 5 Principskiss över Hjälmarén som ett system med fyra delbassänger.



Figur 6 LEEDS-modellens struktur. Fosformängden beräknad för fosfor i ytvatten, djupvatten, erosions- och transportsediment (ET-sediment) samt i ackumulationssediment (A-sediment).

I modellen särskiljs ackumulationsbottnar (A-sediment) från erosions- och transportbottnar (ET-sediment), se avsnitt 2 för definitioner. Utbredningen av olika bottentyper har definierats med hjälp empiriska data. Vågbasens läge och gränsen mellan ytvatten och djupvatten har bestämts med hjälp av statistiska modeller i kombination med uppmätta temperaturprofiler. Flödet mellan bassängerna har tagits från NV (1996).

Den detaljerade fosformodell (**Fig. 6**) som används för respektive fjärd finns beskriven i Malmaeus & Håkanson (2004). Förutom vattenflöden simuleras i denna modell också den vertikala omblandningen mellan yt- och djupvatten, sedimentation, resuspension, begravnin g och läckage från sediment. Modellen drivs av morfologiska och hydrologiska data med kalibrerade algoritmer för interna processer (sedimentation, resuspension, läckage, omblandning) som i sin tur drivs av data på syrehalt och vattentemperatur i ytvatten och djupvatten. 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.

3.3 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 på hur känslig prediktionen av fosfor i vattnet är för värdet av olika variabler.

3.4 Scenarier

Med ovan beskrivna ansats för modelleringen har tre scenarier tagits fram där antaganden om åtgärder för att minska extern respektive intern belastning av fosfor utvärderats. Scenarierna har tagits fram i samråd med uppdragsgivaren och är tänkta att illustrera vilka effekter som principiellt kan förväntas vid olika typer av åtgärder. Följande scenarier redovisas i resultatdelen:

- 50 % minskning av extern fosfortillförsel via vattendrag till samtliga bassänger
- Behandling av 50 % av A-bottenarealen i Storhjälmaren
- En kombination av ovanstående två åtgärder

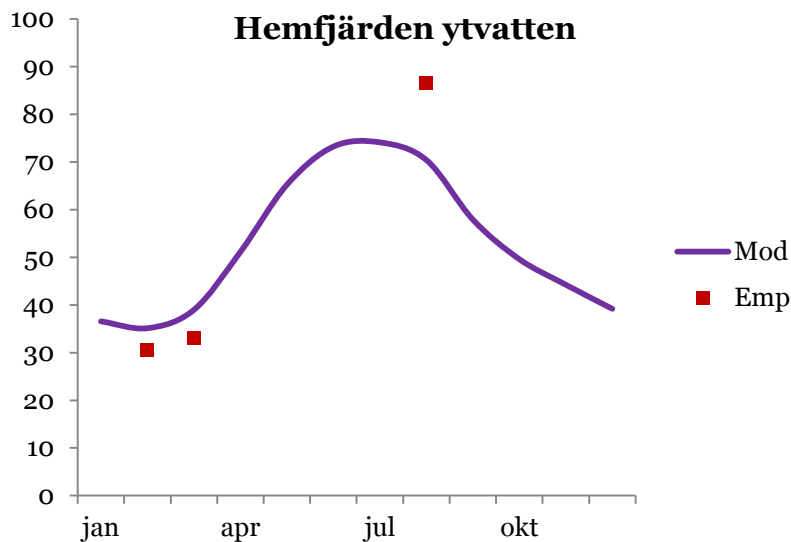
Vid behandling av Storhjälmarens A-bottnar har vi antagit att all tillgänglig fosfor i de behandlade sedimenten binds permanent och därmed undgår läckage upp i vattenmassan. Vi definierar inte närmare vilken metod som i praktiken skulle användas för behandling, men att kemiskt binda den tillgängliga fosfor skulle ge liknande effekter som de som simuleras här.

4 Resultat

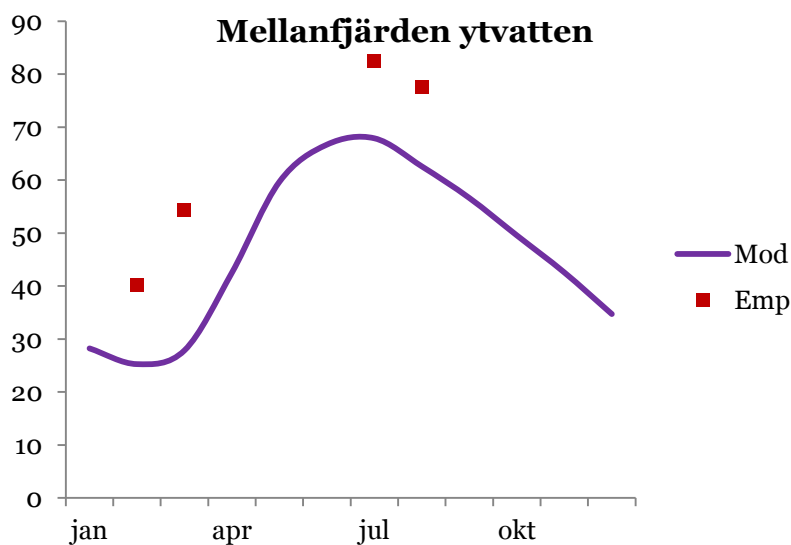
4.1 Kalibrering

Fosformodellen bygger på generella parametrar för interna flöden baserade på bland annat morfometriska data, men dessa har finjusterats mot empiriska data för att uppnå bättre överensstämmelse. Morfometriska och hydrologiska data liksom fosfortillförseln till de olika bassängerna har antagits enligt avsnitt 3.1. Vattenflöden mellan bassängerna har hämtats från NV (1996). Modellens överensstämmelse med empiriska mätningar (2004-2013) för fosfor i ytvatten (samtliga bassänger) och djupvatten (för de två djupare bassängerna) redovisas i **Figur 7 a-f**.

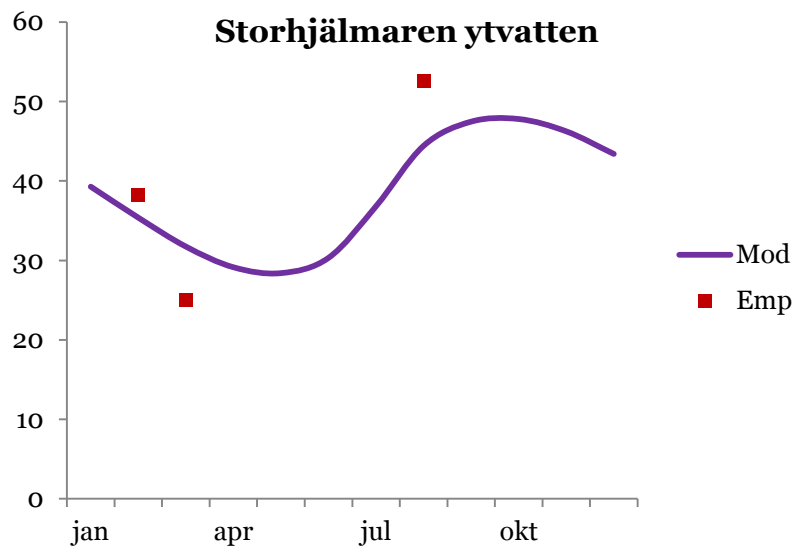
a)



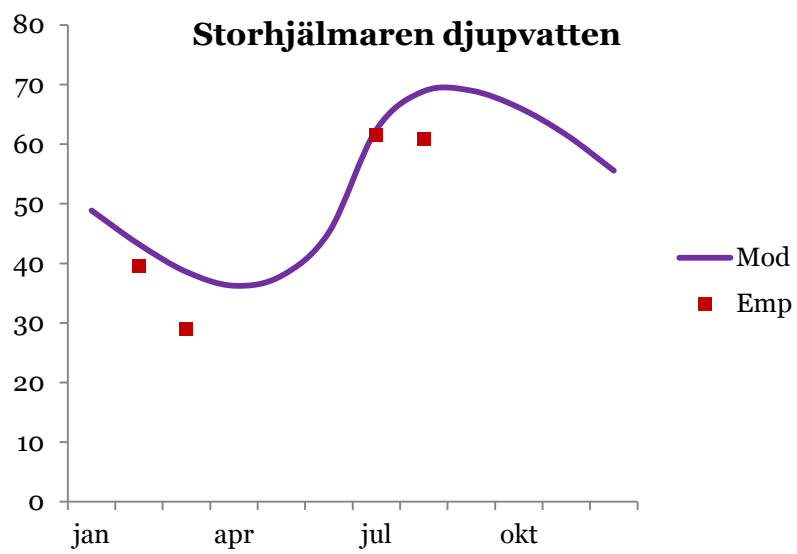
b)



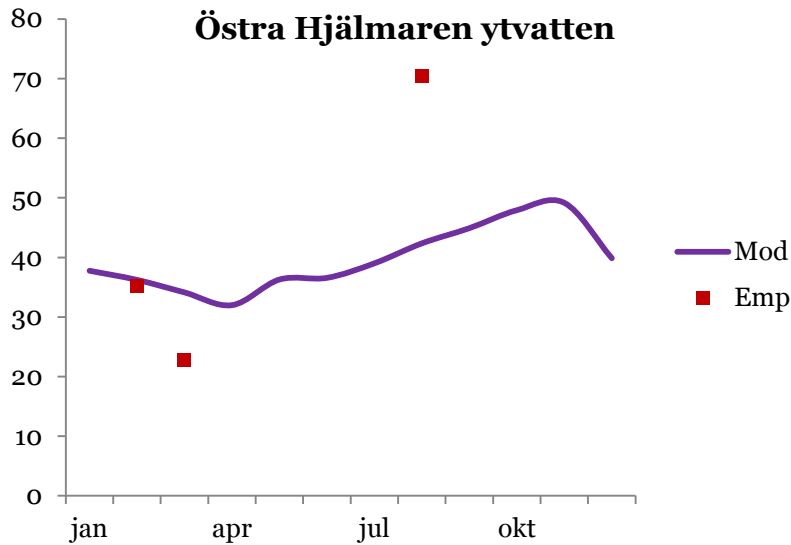
c)



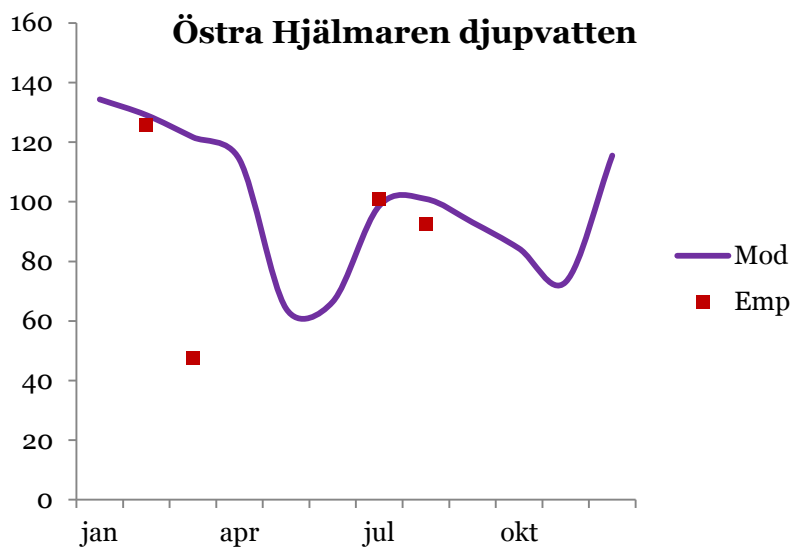
d)



e)



f)



Figur 7 Modellerad halt ($\mu\text{g/l}$) jämfört med empirisk uppmätt halt (medelvärden 2004-2013) av totalfosfor i a) Hemfjärden, b) Mellanfjärden, c) Storhjälmaren (ytvatten), d) Storhjälmaren (djupvatten), e) Östra Hjälmaren (ytvatten) samt f) Östra Hjälmaren (djupvatten).

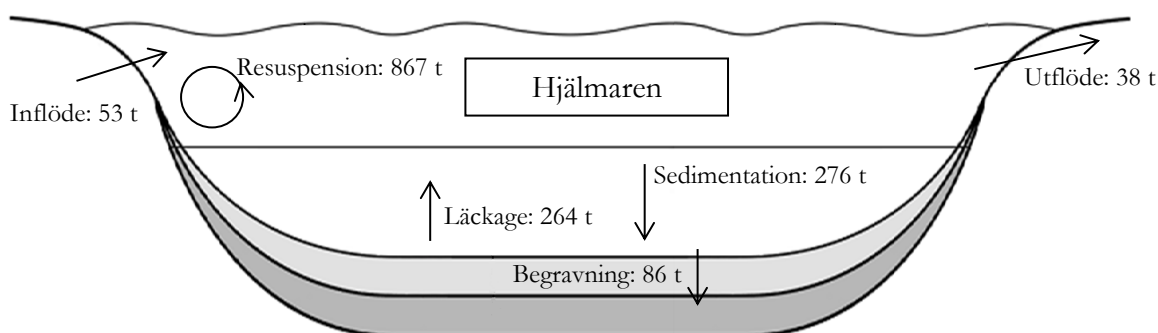
Generellt kan konstateras att modellens överensstämmelse med empiriska data är god, rentav mycket god för Hemfjärden, Storhjälmaren och för Östra Hjälmarens djupvatten.

4.2 Massbalanser

Massbalansen för fosfor enligt modellen framgår på årsbasis i **Tabell 4**. Som framgår så är utbytet som sker mellan vatten och sediment (sedimentation och läckage) i Storhjälmaren ca 10 gånger större än inflöde och utflöde till bassängen, vilket kan förklaras av den stora arealen ackumulationsbottnar som finns i denna bassäng. Utöver detta finns ett utbyte mellan vatten och ET-bottnar (resuspension och sedimentation). De stora flödena mellan vatten och sediment speglar det stora utbytet mellan dessa och nettoflödet är tämligen litet, men varierar över året och styr därmed i hög grad årstidsvariationen i fosforkoncentration i vattenmassan. Som framgår i tabellen så är flödet från nedströms bassäng det samma utflödet till uppströms i nästa bassäng. Utflödet nedströms blir ett inflöde från uppströms bassäng bortsett från att en mindre del (8 %) av utflödet från Storhjälmaren rinner ut via Hjälmare kanal. Flödet mellan bassängerna är betydande och i de två första bassängerna är också flödet från nedströms bassänger signifikant. Begravningsflödet jämnar ut skillnaden mellan inflöden och utflöden och upprätthålls av en pool av mobil fosfor tillgänglig i sedimenten (se vidare diskussion avsnitt 5). Massbalansen för Hjälmarren som helhet illustreras i **Figur 8**.

Tabell 4 Fosforbalans för Hjälmarens fyra bassänger. Alla flöden i ton/år.

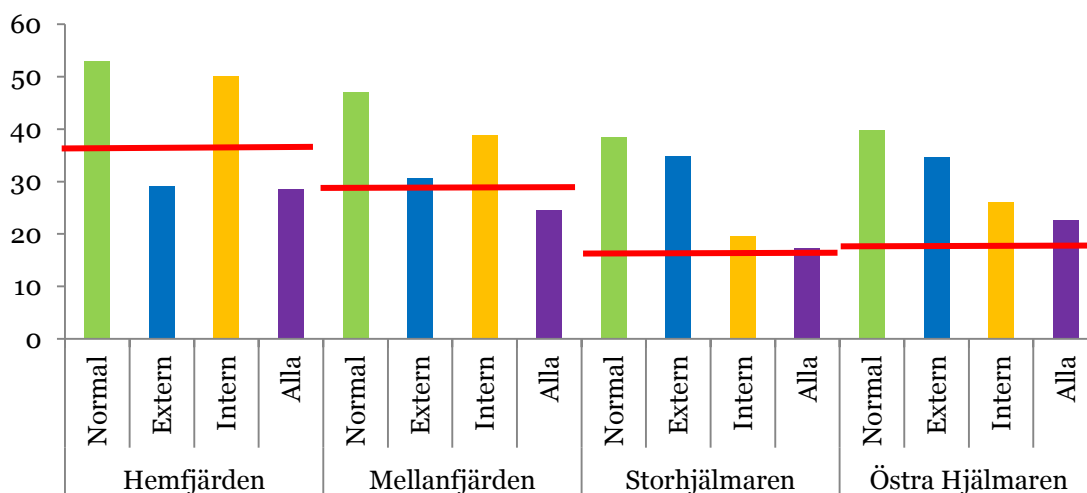
	Hemfjärden	Mellanfjärden	Storhjälmaren	Östra Hjälmarren	Hela systemet
Källor					
Tillrinnande vattendrag	21	0	26	5	53
Från uppströms bassäng		29	30	29	0
Från nedströms bassäng	8	11	0		0
Resuspension	61	125	666	15	867
Läckage	0	0	255	8	264
Summa	90	165	978	57	1184
Sänkor					
Utflöde nedströms/ut	29	30	31	35	38
Till uppströms bassäng	0	8	11	0	0
Sedimentation på ET-botten	61	125	666	15	867
Sedimentation på A-botten	0	2	266	6	276
Summa	90	165	974	57	1180
Begravning i sediment	0	0	79	6	86



Figur 8 Massbalans för fosfor för hela systemet (ton/år).

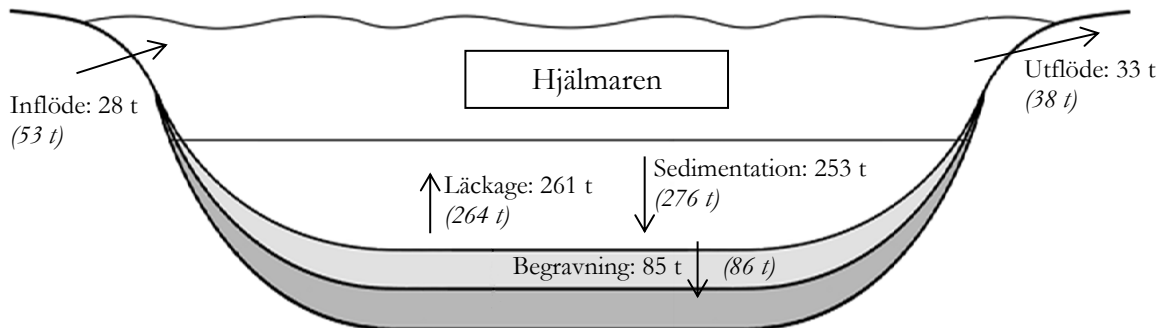
4.3 Scenarier

Påverkan på fosforhalten i de fyra bassängernas ytvatten jämfört med dagens nivåer i de tre scenarierna visas i **Figur 9**. Enligt dessa simuleringar skulle minskad extern tillförsel främst ge effekt i Hemfjärden och Mellanfjärden medan effekten i de två östra bassängerna är liten. Behandling av Storhjälmarens sediment ger en betydligt större effekt både i Storhjälmaren och i Östra Hjälmaren, och syns även uppströms i Mellanfjärden. God status uppnås i tre av fyra bassänger med någon av dessa åtgärder utom i Östra Hjälmaren. Skulle behandling av sedimenten även göras i Östra Hjälmaren skulle sannolikt även den bassängen nå god status enligt denna modell. Simuleringarna tyder också på att effekten av en behandling av sedimenten av detta slag skulle hålla i sig under åtminstone ett par decennier då den externa tillförseln behöver längre tid än så för att bygga upp nya förråd av fosfor i de djupa sedimenten. Resultaterande fosforflöden i de tre åtgärdsscenierna redovisas i **Figur 10**.

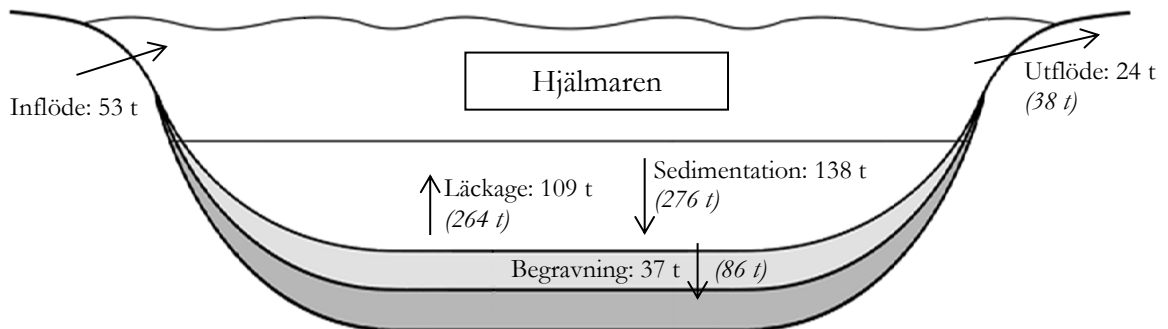


Figur 9 Modellerad halt av totalfosfor ($\mu\text{g/l}$) i ytvatten (årsmedelvärde) i Hjälmarens fyra bassänger under nuvarande betingelser (grönt), 50 % minskad extern tillförsel (blått), behandling av 50 % av bottenarealen i Storhjälmaren (orange) samt kombinerade åtgärder (lila). I figuren visas också gränsen för god status i respektive bassäng (röd linje).

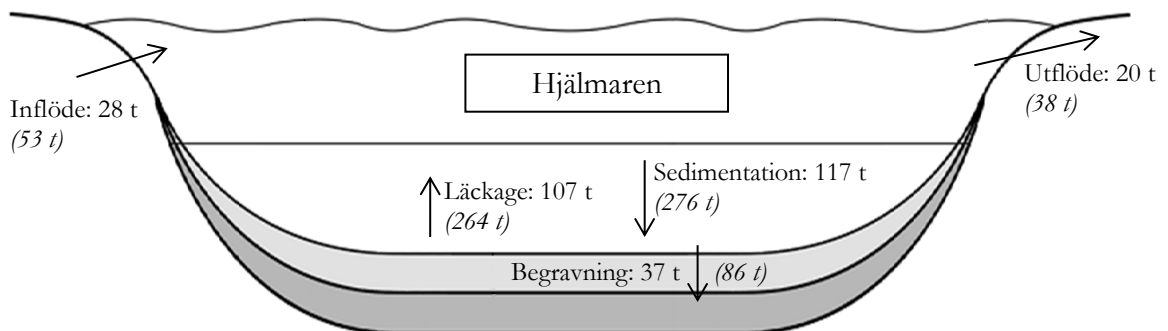
a) Minskad extern belastning



b) Minskad intern belastning



c) Minskad extern + intern belastning

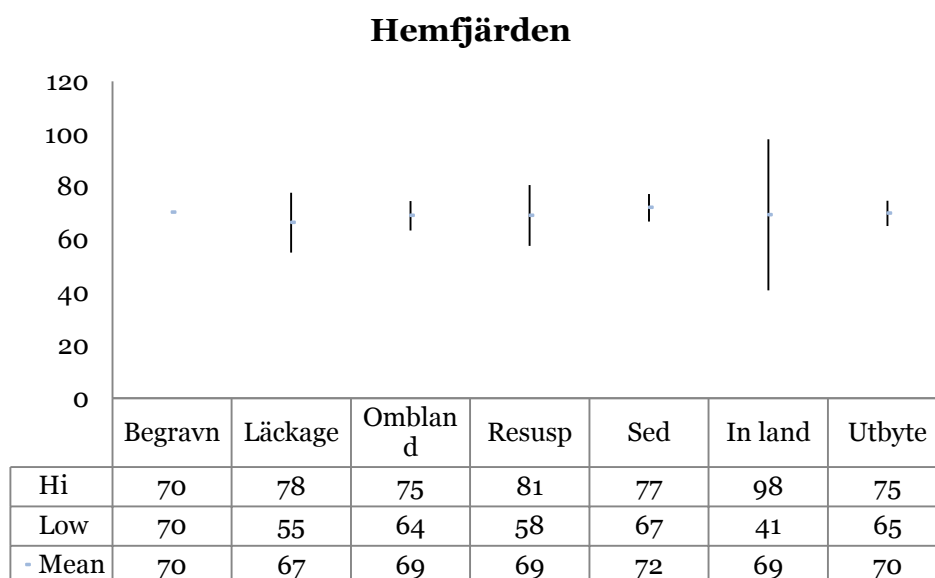


Figur 10 Massbalanser (ton/år) för hela systemet med a) minskad extern belastning, b) minskad intern belastning och c) minskad extern och intern belastning. Flöden före åtgärder visas i kursiv stil för jämförelse.

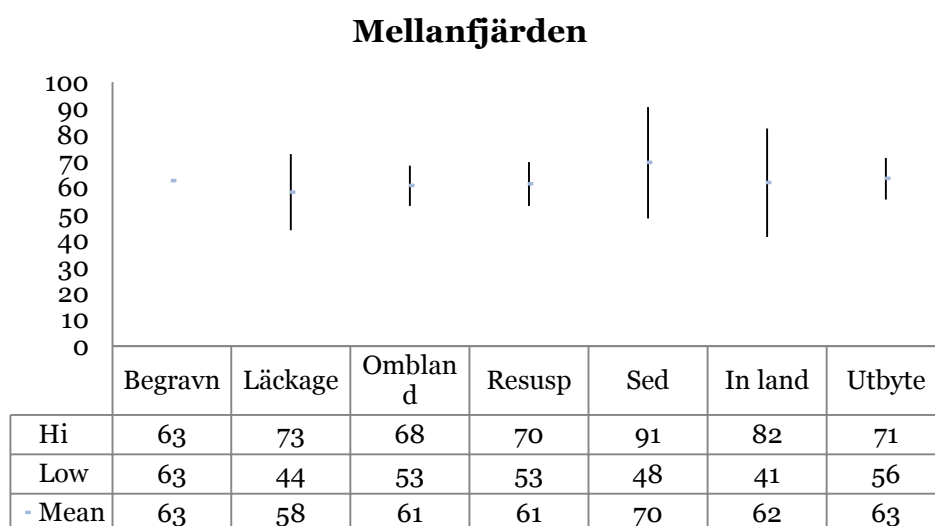
4.4 Känslighetsanalys

I **Figur 11 a-d** visas variationen i fosforkoncentration runt medelvärdet i de fyra bassängerna när var och en av de valda parametrarna varierats.

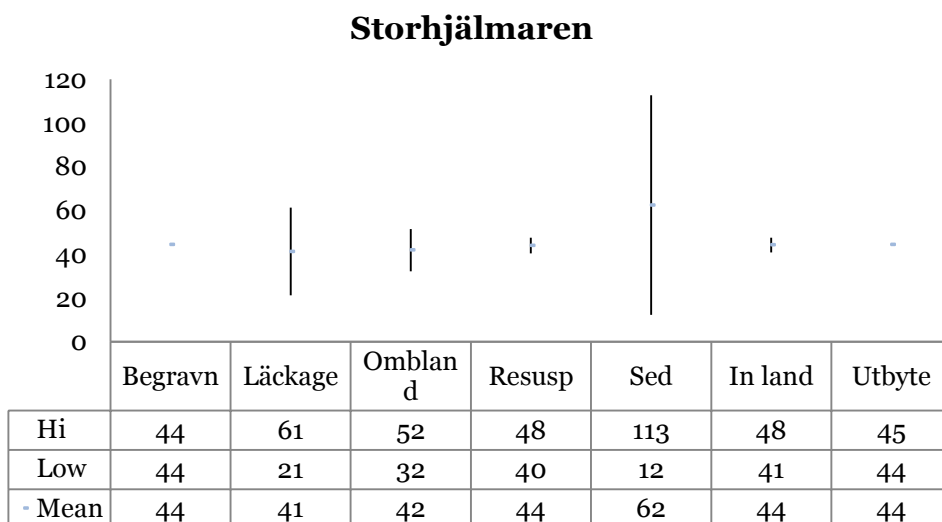
a)



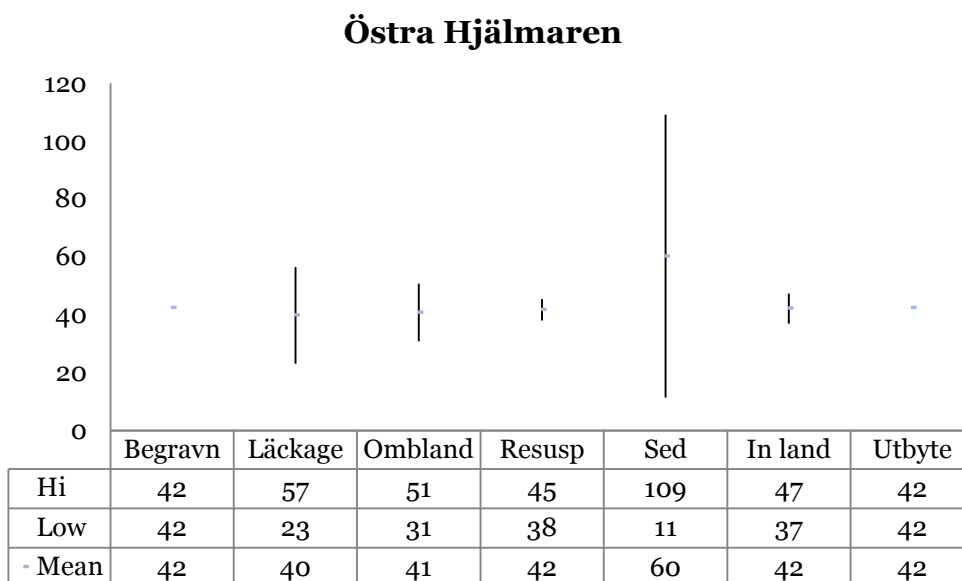
b)



c)



d)



Figur 11 Variation i ytvattenkoncentration av fosfor ($\mu\text{g/l}$) i respektive bassäng, med införd osäkerhet i parametrar som styr begravnin, läckage, omblandning, resuspension, sedimentation, inflöde från land och utbyte mellan bassänger a) Hemfjärden, b) Mellanfjärden, c) Storhjälmaren och d) Östra Hjälmaren. Min, max och medel visas i respektive figur och tabell.

Generellt visar känslighetsanalysen att modellen är mer känslig för uppskattningen av sedimentationens storlek än flera andra parametrar, framför allt i de två östliga bassängerna. Inflödet spelar en stor roll i de två västliga bassängerna, och betydelsen av omblandning och resuspension är medelstor. Eftersom mätningar saknas för

sedimenten betyder osäkerheten kring läckaget därifrån mycket i praktiken och bidrar som framgår också en hel del till modellosäkerheten.

5 Diskussion

Den fosformodell som använts för Hjälmaren i detta arbete visar god överensstämmelse gentemot empiriska data i alla fyra delbassänger, såväl i ytvattnet som i djupvattnet, och de modellparametrar som antagits vid kalibreringen (omblandningskonstanter, sedimentations- och läckagehastigheter) ligger inom typiska intervaller för svenska sjöar. Detta tyder på att den upprättade massbalansen ger en god bild av de flöden och interna processer som styr Hjälmarens fosfordynamik. Det råder naturligtvis en viss osäkerhet kring den exakta storleken på olika flöden men sannolikt är storleksordningarna korrekta och därmed också de huvudsakliga resultat som erhålls vid olika scenarier. Generellt kan konstateras att sedimentens roll har en stor betydelse för Hjälmarens fosfordynamik, i synnerhet i sjöns centrala och östra delar. Under sommarhalvåret sker ett utflöde ur sedimenten som kan förklaras av högre vattentemperatur, höga pH-värden till följd av primärproduktion och låg syrehalt i sjöns djupare delar. Fosforhalterna i vattenmassan är därmed förhöjda under sommaren jämfört med vinterhalvåret.

En del av den fosfor som sedimenterar på sjöars ackumulationsbottnar kommer med tiden att överlagras av nytt sedimentande material och på så sätt hamna längre och längre ned i sedimentlagren, så kallad begravning eller fastläggning. En typisk koncentration av totalfosfor i passiva sediment, den så kallade begravningskoncentrationen (sediment från djupare liggande sedimentlager varifrån det ej längre sker något läckage), är i boreala glaciala sjöar (Håkanson, 2003; Carey & Rydin, 2011) och i kustsediment från Östersjön (Puttonen et al., 2014) ca 1 mg/kg ts. Om man antar detta värde och känner den årliga sedimenttillväxten samt arealen ackumulationsbottnar kan den årliga fastläggningen av fosfor uppskattas (Karlsson et al., 2014). På Hjälmarens A-bottnar har den årliga sedimenttillväxten uppskattas till mellan 3 och 5 mm/år (Håkanson, 1981), vilket infört i en beräkningsalgoritm redovisad i Karlsson et al. (2014) ger en sammanlagd årlig fosforfastläggning av storleksordningen 80 ton/år för hela Hjälmaren. Ett värde som är i paritet med vad den nu använda modellens beräkningsalgoritm gett vid handen som begravningsflöde av fosfor (86 ton/år).

I de utförda modellberäkningarna kompenseras den beräknade fosforfastläggningen i djupare sediment delvis av ett läckage av fosfor från ytligare sedimentlager så att den årliga nettoretentionen av fosfor blir ca 15 ton/år, vilket är i överensstämmelse med den genomsnittliga beräknade retentionen utifrån uppmätta och beräknade in- och utflöden av fosfor (**Tab. 3**). Modellens förklaring till varför en betydande reduktion i den externa fosfortillförseln endast ger en marginell effekt på fosforkoncentrationen i centrala och östra Hjälmaren är således att det finns ett stort fosforflöde ut från sedimenten från ett förråd av mobil fosfor i de översta sedimentlagren. Detta skulle kunna förklaras av att det under tiden före reningsverksutbyggnaden successivt byggdes upp ett förråd av biotillgänglig fosfor i sedimenten som fortfarande påverkar förhållandena i vattnet. Det får dock anses som ovanligt att utsläpp som skedde för mer än 40 år sedan fortfarande är av betydelse för en rådande miljösituation. I exempelvis

de andra stora mellansvenska sjöarna (Vänern, Vättern och Mälaren) har återhämtningen efter att tillförseln av näringsämnen minskat varit betydligt snabbare (Wilander & Persson, 2001). Detta skulle delvis kunna bero på att Hjälmaren i jämförelse mot de andra stora sjöarna är grundare och har en lägre andel av A-bottnar där det kan ske en permanent fastläggning av fosfor i sedimenten.

En alternativ förklaringsmodell skulle kunna vara att det i Hjälmaren sker en mer eller mindre kontinuerlig erosion av leror från grundare liggande bottnar genom våg- och strömerosion. Denna process har visat sig kunna förklara varför flera instängda kustområden längs Sveriges Östersjökust är mycket näringsrika trots att det saknas utsläppskällor som kan förklara förhållandena (Karlsson et al., 2014). Erosion av postglaciala och glaciala leror verkar, trots att de i sig innehåller relativt låga halter av biotillgänglig fosfor, ändå kunna ge ett signifikant bidrag av fosfor i grunda kustområden där vågerosion påverkar bottnarna och orsakar uppvirvling av finsediment. Betydande erosion och resuspension är heller inget ovanligt fenomen i Hjälmaren som i förhållande till sin sjöyta är grund och där vinden har en tillräckligt lång sträcka (fetch) för att bygga upp vågor till en höjd som kan orsaka turbulens längs bottnarna (Håkanson & Jansson, 1983). I Hjälmaren innebar dessutom den stora sjösänkningen i slutet av 1800-talet (Håkanson, 1978) att betydande arealer av bottnar som tidigare legat under vågbasen (det maximala djup som vågenergi kan tränga ned till och orsaka erosion) lyftes upp ovan densamma och därmed blev tillgängliga för erosion. En process som kan liknas vid de förhållanden man idag har längs delar av Östersjökusten genom den pågående landhöjningen. Utfallet av modellberäkningarna tyder inte på att erosion av gamla leror ger ett betydande tillskott av fosfor till vattnet i Hem- och Mellanfjärden, vilket delvis motsäger ovanstående hypotes. Å andra sidan finns det stora arealer av ET-bottnar även i Storhjälmaren där det finns förutsättningar för erosion av gamla leror.

Ett enkelt laboratorieexperiment (Karlsson et al., 2014) har visat ett dos-respons samband mellan tillsatts av postglacial lera och stimulerad tillväxt av flytbladsväxten andmat (*Lemna minor*) (Fig. 12). Detta är i överensstämmelse med studier av primärproduktionen nedströms glaciärer där recent glacialera bildas (Bretschko 1966, Tockner et al. 2002, Hodson et al. 2004). I detta perspektiv skulle således Hjälmaren med sitt läge som en stor och grund slättlandssjö i ett avrinningsområde med en hög andel av finkorniga lerjordar delvis betraktas som ett naturligt näringsrikt system där bakgrundshalten av fosfor är högre än de referensförhållanden som standardmässigt kan uppskattas.

För att bättre kunna belysa sedimentens och olika sedimentprocessers betydelse för dagens näringsförhållanden i Hjälmaren och för att på ett bättre sätt kunna beskriva fosfordynamiken och prediktera effekten av olika framtida åtgärder skulle det vara värdefullt att på ett systematiskt sätt undersöka sedimentens innehåll av fosfor genom karteringar och provtagning av sedimentkärnor från olika delar av sjön, vilka skivas upp på olika nivåer i lagerföljden och genom så kallad fosforfraktionering (Rydin et al., 2011) analyseras med avseende på olika former av fosfor (biotillgängliga respektive inerta). Därigenom skulle det vara möjligt att exempelvis kunna bestämma förrådet av potentiellt biotillgänglig mobil fosfor, en faktor som kontrollerar utbytet av fosfor mellan sediment och vatten. Det skulle även vara önskvärt att för att bättre fånga

fosfordynamiken öka frekvensen i övervakningen av Hjälmarens vattenmassa till månatlig provtagning.



Figur 12 Tillsatts av postglacial lera stimulerar tillväxt av andmat i laboratorieexperiment (Karlsson et al., 2014). Foto: Tomas Viktor, IVL.

Sammantaget tyder simuleringarna med modellen på att extern tillrinning styr fosforhalten i Hemfjärden och Mellanfjärden, men att Storhjälmarens och Östra Hjälmarens fosforhalter till stor del bestäms av interna processer där sedimenten spelar en nyckelroll. Detta framgår inte minst i de två scenarierna där minskad extern belastning ger en god effekt i de två västra bassängerna medan fosforhalten sjöns centrala och östra delbassänger inte minskar i någon märkbar utsträckning. Detta stämmer också med den historiska erfarenheten då tidigare åtgärder i reningsverken runt sjön under 1970-talet gav goda resultat i Hemfjärden och Mellanfjärden medan fosforhalterna i Storhjälmaren förblivit tämligen oförändrade. Omvänt skulle åtgärder för att binda fosfor i sediment i Storhjälmaren enligt simuleringarna kunna vara ett sätt att åstadkomma minskade halter i vattenmassan.

Att genomföra åtgärder i sediment är emellertid ett omfattande företag, i synnerhet i en stor sjö som Hjälmaren. I dagsläget saknas empiriskt underlag för att bedöma hur stort förrådet av fosfor i Hjälmarens botten faktiskt är och i vilken form den föreligger. Erfarenheter från sjöar i Nordamerika liksom från svenska kustområden visar att kemisk behandling av sediment kan vara en effektiv åtgärd för att minska den interna fosforbelastningen. Sådan behandling är troligen mest effektiv på relativt stort botten djup där vind- och vågomblandning inte fysiskt påverkar sedimenten. En mer ingående undersökning av sedimentens beskaffenhet och fosforförråd i Hjälmaren är nödvändig före denna typ av åtgärder på allvar kan övervägas.

En annan åtgärd som diskuterats är att i Hemfjärden anlägga konstgjorda öar genom att muddra upp och innesluta bottensediment. De sedimentundersökningar som utförts (Boström, 1988; Hjälvf, 1991) tyder emellertid på att de av vågturbulens påverkade sedimenten i den grunda Hemfjärden innehåller små mängder mobil fosfor varför en sådan åtgärd sannolikt skulle få en marginell effekt på fosfortransporten genom systemet.

6 Slutsatser

- De utförda modellberäkningarna indikerar att åtgärder för att minska den externa tillförseln av fosfor skulle ha liten inverkan på centrala och östra Hjälmarens näringsstatus men vara av viss betydelse för förhållandena i de västra bassängerna Hemfjärden och Mellanfjärden. Denna prognos överensstämmer med utfallet efter att stora utsläppsreduktioner av fosfor skedde i samband med utbyggnad av reningsverkskapaciteten i början av 1970-talet
- Modellberäkningarna tyder på att ett flöde av fosfor från sedimenten kontrollerar fosforkoncentration i centrala och östra Hjälmaren
- Det går inte att utesluta att Hjälmarens näringsriktighet till stor del är naturligt betingad genom sjöns form och djupförhållanden, samt lokalisering i en region med hög andel av näringsrika finkorniga jordar i tillrinningsområdet och lersediment i sjön vilka succesivt eroderas. Det är också tänkbart att tröghet i systemet gör att effekter av den stora sjösänkningen i slutet av 1800-talet och näringsämnestillförseln innan kemisk fällning av fosfor infördes i reningsverken fortfarande påverkar dagens miljöförhållanden
- Det är nödvändigt att genomföra detaljerade undersökningar av sediments fosforförråd för att bättre kunna förstå betydelsen av olika sedimentprocesser och därigenom kunna ge tillförlitligare prediktioner av verkansgraden i olika åtgärder för att sänka halterna av näringsämnen i sjön.

7 Referenser

- Boström, B., 1988. Sedimentstudier i Hemfjärden och Mellanfjärden, Hjälmaren 1988. Undersökningar av sedimentfosfors fraktionsfördelning och potentiella rörlighet. – rap. b 13, Limnologiska inst. Uppsala univ., 18 s.
- Bretschko, G., 1966. Untersuchungen zur Phosphatführung zentralalpiner Gletscherabflüsse. Archiv für Hydrobiologie 62: 327-334.
- Carey, C. C., & Rydin, E., 2011. Lake trophic status can be determined by the depth distribution of sediment phosphorus. Limnology and Oceanography 56: 2051-2063.
- Degerman, E., Hammar, J., Nyberg, P. & Svärdson, G., 2001. Human impact on the fish diversity in the four largest lakes of Sweden. Ambio 30:522-528.
- Hjvvf, 1991. Redogörelse för recipientkontrollen i Eskilstunaåns avrinningsområde 1991.
- Hodson, A., Mumford, P. & Lister, D., 2004: Suspended sediment and phosphorus in proglacial rivers: bioavailability and potential impacts upon the P status of ice-marginal receiving waters. Hydrological Processes 18: 2409-2422.
- Håkanson, L., 1978. Hjälmaren – en naturgeografisk beskrivning. SNV PM 1079.

- Håkanson, L., 1981. Sjösedimenten i recipientkontrollen – principer, processer och praktiska exempel. SNV PM 1398.
- Håkanson, L. 2003. Quantifying burial, the transport of matter from the lake biosphere to the geosphere. *International Review of Hydrobiology* 88: 539–560.
- Håkanson L. & Jansson M., 1983. *Principles of Lake Sedimentology*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 316 p.
- Karlsson, O.M., 2011. Predicting Ecosystem response from Pollution in Baltic Archipelago areas using Mass-balance Modelling. Doctoral thesis Uppsala University, ISBN 978-91-554-8012-7.
- Karlsson O.M, Malmaeus J.M., Viktor T., Andersson M.G. & Rydin E., 2014. A revised semi-empirical mass balance model for phosphorus in Baltic coastal areas. *Fundamental and Applied Limnology* 185: 209-221
- Malmaeus J.M. & Håkanson L., 2004. Development of a Lake Eutrophication model. *Ecol. Model.* 171, 35-63.
- NV, 1996. Hjälmaren under 29 år - Undersökningar inom PMK 1965-1994. Naturvårdsverket rapport 4535.
- Olsson, H., 1987. Hjälmarens fosfor- och kvävebelastning 1966-1985. Naturvårdsverket rapport 3309.
- Puttonen, I., Mattila, J., Jonsson, P., Karlsson, O. M., Kohonen, T., Kotilainen, A., Lukkari, K., Malmaeus, J. M. & Rydin E., 2014. Distribution and estimated release of sediment phosphorus in the northern Baltic Sea archipelagos. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 145 9-21.
- Rydin, E., Malmaeus, J. M., Karlsson, O. M. & Jonsson, P., 2011. Phosphorus release from coastal Baltic Sea sediments as estimated from sediment profiles. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 92: 111-117.
- Tockner K., Malard F., Uehlinger U., & Ward J. V., 2002. Nutrients and organic matter in a glacial river-floodplain system (Val Roseg, Switzerland). *Limnology and Oceanography* 47:266-277.
- Wilander A. & Persson G., 2001. Recovery from eutrophication: experiences of reduced phosphorus input to the four largest lakes of Sweden. *Ambio* 30:475-485.



IVL Svenska Miljöinstitutet AB, Box 210 60, 100 31 Stockholm
Tel: 08-598 563 00 Fax: 08-598 563 90
www.ivl.se