



UPPSALA
UNIVERSITET

Prediktiv limnologi
Projektarbete 5 p
Maj 2007

Modellering av fosfor i Bagarsjön, Nacka

Mats Andersson
Oscar Tottie



Civilingenjörsprogrammet i **miljö- och vattenteknik**

Master of Science Program in Aquatic and Environmental Engineering

Sammanfattning

Bagarsjön är en sjö strax utanför Stockholm som har stora problem med övergödning och har återkommande syrebrist på dess botten, framförallt på vintrarna. Det stora problemet i sammanhanget är den stora mängd fosfor som kommit in till sjön och ansamlats i sediment. En rad åtgärder för att komma till rätta med detta har genomförts under åren med varierande resultat vilket gör att Bagarsjön är i starkt behov av en långsiktig och kostnadseffektiv lösning. I detta projekt har de befintliga strategier som används idag runt om Sveriges sjöar i restaureringssyfte och som kan tillämpas på Bagarsjön utvärderats genom simuleringar med den processbaserade massbalansmodellen LakeMab och med en litteraturstudie som komplement. Utvärderingen visade på att det finns flera sätt att minska fosforhalten i Bagarsjön. De metoder som enligt modellen ger bäst resultat är avledning av fosforrikt bottenvatten, installation av en sedimentationsdamm vid det största dagvatteninflödet, muddring av sjön och minskning av fosfordiffusion från sedimenten genom antingen syresättning med pumpar eller kemisk fällning. Vilken av dessa åtgärder som är mest kostnadseffektiv för Bagarsjön kan bara bestämmas efter en ekonomisk undersökning som återstår att göra.

Abstract

Lake Bagarsjön is situated just outside Stockholm. It is a relatively small lake that is used for bathing and fishing by the surrounding households. Unfortunately the lake has problems with eutrophication and oxygen deficit at the bottom of the lake, especially during the winter. There have been many attempts to come to terms with these problems with varying success. None of the used methods in the different attempts have been carefully investigated and therefore all are possible methods of lake restoration. In this project all the methods that have been used over the years in Lake Bagarsjön as well as other commonly used lake restoration methods have been evaluated using the process based mass-balance model LakeMab. From the results four different successful strategies were found that could reduce the phosphorous concentration in the lake. These are sediment dredging, removing phosphorous rich bottom water from the lake, decreasing the phosphorous concentration in the inflow by settling and to decrease the transport of phosphorous from the sediments back to the lake, either by increasing the oxygen level using pumps, or by chemical precipitation with chemicals. Which one of these different strategies that are the most cost efficient for Lake Bagarsjön can only be concluded after an economic evaluation.

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	Bagarsjön.....	1
1.2	Fosfor och övergödning	2
1.3	Massbalans	2
1.4	Restaureringsförsök av bagarsjön.....	3
1.5	Syfte	5
2	Metod	6
2.1	ArcGIS	6
2.2	Sjömodellering i LakeMab.....	6
2.1.1	LakeMab.....	6
2.1.2	Tillämpning av LakeMab på Bagarsjön	8
2.3	Modelltester.....	8
2.3.1	Känslighetsanalys.....	8
2.3.2	Osäkerhetsanalys.....	9
2.4	Simulerade scenarier	9
3	Resultat.....	11
3.1	Beräkning av sjöns area och tillrinningsområde i ArcGIS.....	11
3.2	Modelltester.....	12
3.2.1	Känslighetsanalys.....	13
3.2.2	Osäkerhetsanalys.....	14
3.3	Sjömodellering LakeMab	15
3.3.1	Scenario 1 - Rening av dagvatteninflöde	15
3.3.2	Scenario 2 – Minskad diffusion	16
3.3.3	Scenario 3 - Avledning av bottenvatten	16
3.3.4	Scenario 4 – Muddring.....	17
3.3.5	Scenario 5 – Hushållspåverkan	19
3.3.6	Jämförelse av scenarierna.....	20
4	Diskussion	21
5	Slutsatser	22
6	Referenser.....	22

1 Inledning

1.1 Bagarsjön

I Nacka strax utanför Stockholm ligger Bagarsjön. Det är en relativt liten sjö omgiven av både vägar och hushåll. Bagarsjön nyttjas för både bad och fiske och har under hela 1900-talet haft näringsrik status. Det finns en mycket kraftig undervattensvegetation, särskilt i sjöns östra del, där bland annat näckrosor och vattenaloe breder ut sig. Vanliga djurarter i sjön är abborre, mört, sarv, signalkräfter och ruda samt musselarterna spetsig målarmussla och stor dammussla. Sjön är övergödd och har måttligt siktdjup och höga halter av fosfor. Den löper därför stor risk för igenväxtning och syrebrist, framförallt på vintrarna. Syrebristen har hittills lett till att vissa arter slagits ut helt samt att övergödningen gjort att sjön varit på väg att växa igen vid ett flertal tillfällen. Tidigare var sjön receptiv för enskilda avlopp, stora mängder dagvatten och andra näringsrika tillflöden vilket fick stora delar av sjön att växa igen. Idag har sjön ett huvudsakligt in och utflöde. Flödena in och ut är relativt små så vattnet blir lätt stillastående i sjön men tack vare att västra delen har ett medeldjup på cirka 2 meter blandas ändå delar av sjön om vid starka vindar. Med en minskad eutrofiering och högre syrenivå hoppas invånarna runt Bagarsjön att fisk- och kräftbeståndet ska bli rikare, att de ska få en sjö med mindre risk för igenväxt, samt bra badvattenkvalitet.

1.2 Fosfor och övergödning

Övergödning är ett tillstånd som kan drabba sjöar, hav och rinnande vatten när de utsätts för onaturligt stor näringstillförsel. De vanligaste begränsande näringsämnen i sjöar och hav är kväve och fosfor. Dessa två ämnen är viktiga för växter på såväl land som i vatten och är ofta en begränsande faktor för tillväxt. Detta innebär att desto mer kväve och fosfor som finns i ett vattendrag desto mer kommer kunna växa där under förutsättning att det finns god tillgång på solljus. Planktonalger kan tillväxa kraftigt då det finns gott om näring. Dessa alger sedimenterar till sjöns botten där de bryts ner av mikroorganismer. Vid denna nedbrytning förbrukas syre vilket i värsta fall kan leda till att syrenivåerna vid botten kan bli så låga att fiskar och bottendjur dör. Svenska sjöar är speciellt utsatta för detta under vintertid då isläggningen gör att sjön inte kan bladas om och nytt syre tillförs. Tillförsel av näringsämnen kan alltså leda till stora förändringar av en sjös ekosystem.

1.3 Massbalans

Miljöpåverkan på ekosystem kan undersökas med hjälp av massbalanser för olika ämnen. En massbalans bygger på att massa inte kan förstöras eller skapas i ett system, dvs att mängden i systemet är lika med summan av det som fanns där innan plus det som förs in minus det som förs ut. En massbalansmodell består av flöden mellan olika avdelningar av ekosystemet. Exempelvis kan fosfor i en sjö bland annat finnas i sediment, bundet i växter och i den fria vattenmassan. Det sker ständigt flöden av fosfor mellan dessa olika avdelningar men summan av mängden fosfor hela sjön påverkas bara av in och utflöden ur systemet. (Se figur 1)



Figur 1. Grundläggande massbalans för fosfor.

1.4 Restaureringsförsök av bagarsjön

Ett studiebesök till Bagarsjön genomfördes för att göra bedömningar på plats om sjöns in och utlopp, gamla provtagningsplatser samt ta reda på mer information kring de tidigare restaureringsförsöken av sjön genom intervjuer med ansvariga hos att Nacka kommun och föreningen Karporna som är en lokal intresseförening. Följande beskrivning av de metoder som prövats för att minska övergödningen och syrebristen i sjön är ett resultat av dessa intervjuer samt en litteraturstudie:

✓ MUDDRING.

Mellan åren 1988 - 1989 muddrades Bagarsjön. 25 000 m² sjöbotten grävdes ur och kördes till en lokal sopptipp. Muddring innebär att näringsrika och kanske förgiftade sediment tas bort. Sjön görs samtidigt djupare vilket kan bli bestående om inte sedimentationen går alltför snabbt (Nacka Kommun, 2007). Denna muddringinsats tros ha räddat Bagarsjön från att ha växa igen totalt och sjön hade troligtvis varit oanvändbar som bad- och fiskesjö om inte denna muddring genomförts (Karporna, 2007).

✓ FOSFORFÄLLNING MED KEMIKALIER

1997 genomfördes en bottenfällning med aluminiumklorid för att minska fosforhalten i sjön. Året efter fällningen noterades betydligt lägre fosforhalter i framförallt de djupare delarna av sjön (Karporna, 2007). Metoden har använts sedan 70-talet, främst i USA, den fungerar genom att en fosforfällande kemikalie tillförs vattenmassan varefter fosfor binds och sedimenterar. Vanliga fosforfällande kemikalier som används inom sjörestaurering är aluminiumklorid och aluminiumfosfat. Vid normala och höga pH värden är aluminiumet bundet i komplex med till exempel fosfor. Dessa komplex kan bilda flockar som sedimenterar. Det finns vissa risker med fosforfällning. Viktigast är att pH kontrolleras i samband med kemisk fosforfällning för att inte påverka sjöns biologi på ett negativt sätt. Aluminium kan förekomma i många olika former i en sjö. Om pH-värdet är mindre än 5.5 förekommer aluminium i sin fria jonform Al³⁺. Den fria jonformen av aluminium är toxisk främst för fiskar som andas med gälar och vissa bottenlevande djur. Den äldre metoden att tillsätta fällningskemikalien innebär att man sprid kemikalien från ytan vilket innebär att man påverkar hela vattenmassans biologi. Detta sätt att tillsätta och dosera fällningskemikalie är grovt och kan ge en stor effekt på ekosystemet. I Bagarsjön har man istället använt en metod där man tillsätter fällningskemikalien direkt till bottenvattnet man påverkar då en mindre del av sjöns biologi (Vattenresurs AB, 2007).

Fosforfällning ger en momentan effekt, för en långsiktig minskning av övergödningen måste även inflöden av fosfor från avrinningsområdet minskas.

✓ SKÖRDNING AV VATTENVÄXTER.

En gång per år har en sjöskördemaskin använts i Bagarsjön med vilken ett par ton växter tagits bort varje höst (Karporna, 2007). Genom att skörda vattenväxter som t ex vass så ökar cirkulation i vattnet. Det är viktigt att ta bort hela växten inklusive rot för att minimera nedbrytningen i vattnet då detta förbrukar syre (Karporna, 2007). För att få ut den största möjliga mängden näring som möjligt ur sjön bör vattenväxterna dock skördas under juli-augusti. Det är då den största biomassan växer till samt att det är då som mest näring är bunden i de ovanjordiska delarna i vass. En skörd av tät, grön vass

under sensommaren tar bort ca 9 kg fosfor/hektar. Om motsvarande skördning av vass skulle ske på vintern skulle man få bort 10-20 % av näringsmängderna. Därför är det viktigt att göra detta på just sommaren (Ålands lanskapsregering, 2007).

✓ **SNÖFRIA ISAR**

Vintern år 2000 började föreningen ploga bort snön från isarna för att öka fotosyntesen

i vattnet. Plogningen vintern 2000 tros ha haft stor inverkan för syresättningen och kräftornas överlevnad denna vinter och syrenivåerna tros ha höjts på kort sikt tack vare snöplogningen av sjön (Hessin och Heldh-Paoli, 2007). Det saknas dock empiriska data som bevis för detta. Huruvida den ökade produktion av växtplankton producerade mer syre än vad som förbrukades vid nedbrytning är oklart.

✓ **SYRESÄTTNING AV BOTTENVATTEN**

Vintern 1995/1996 dog de flesta av de inplanterade kräftorna och en del fisk pga syrebrist. Man prövade att syresätta sjön med hjälp av en pump fast den klarade inte av att syresätta tillräckligt mycket för att rädda kräftorna. Syresättningen verkar dock ha haft en betydande effekt för överlevnaden hos sjöns fiskbestånd (Hessin och Heldh-Paoli, 2007). Det är dock ännu oklart om man med en starkare pump hade klarat av att rädda även kräftbeståndet denna långa vinter.

Alla ovanstående åtgärder har genomförts utan ordentlig uppföljning vilket gör att man ej kan utesluta att ett visst resultat inte skulle kunna bero av någon annan faktor. Därför inkluderar vi alla dessa restaureringsmetoder i vår analys.

Det finns även ytterliggare alternativ som har övervägts som lämpliga strategier för att rädda Bagarsjön eller som har testats vid restaurering av sjöar med liknande problem. Dessa är:

▪ **BORTLEDNING AV BOTTENVATTEN**

Genom att avleda bottenvatten från Bagarsjön (istället för ytvatten) skulle fosforutflödet öka då bottenvattnet är mer fosforrikt än ytvattnet. Det gör man genom att pumpa upp vatten från botten och leda ut vattnet med en slang samtidigt som utloppet däms upp och hindrar ytvattnet från att rinna ut. En förutsättning för att detta ska fungera är att sjön har en stabil skiktning, annars är det ingen större skillnad på fosforkoncentrationen i yt- och djupvatten. Skiktningen varierar i regel under året vilket gör att effekten av denna åtgärd också varierar under året.

▪ **SEDIMENTATIONS DAMM**

En sedimentationsdamm skulle kunna anläggas där den största dagvattenledningen mynnar ut i sjön. På så sätt skulle större delen av inkommande fosfor till sjön tas bort vilket skulle leda till att fosforkoncentrationen i sjön skulle minska på lång sikt. Ett problem med att införa en sedimentationsdamm kan vara platsbrist.

▪ **BIOLOGISKT MANIPULATION**

Genom att ändra i ekosystemet kan man ändra det till sjöns fördel ur närings och syresynpunkt. Detta kan till exempel ske genom utplantering av gräskarp som äter av växtligheten i vattnet, vilket kan ge en ökning i cirkulation. Karpen är dock tyvärr inte så effektiv som många har hoppats på. Upp till 70 % av växterna slutar ofta som söndertuggade växtdelar som flyter omkring på ytan som i sin tur kan orsaka algbloomning och syrebrist. Fisken är även temperaturkänslig och passar därför dåligt i svenska sjöar som är för kalla för att den ska kunna överleva (SLU, 2007). En annan

tänkbar åtgärd är att minska beståndet av mört, som äter djurplankton. Om det blir fler djurplankton får dessa större möjlighet att beta av växtplankton, vilket i sin tur bl.a. förbättrar siktdjupet vilket gör att fotosyntesen kan fungera längre ner och därmed öka syrehalten (Nacka kommun, 2007). Att öka predationstrycket på småfisk eller fiska ur den verkar alltså vara en bättre idé än inplantering av gräskarp, men effekten av en sådan insats är fortfarande dåligt utredd. Ingen av dessa åtgärder leder till en minskning av den totala fosformängden i sjön.

- **MINSKA HUSHÅLLSUTSLÄPP**

Eftersom Bagarsjön har ett litet och relativt tätbebyggt tillrinningsområde kan fosforutsläpp från närboende sannolikt påverka tillflödet av fosfor till sjön. Om alla som bor inom tillrinningsområdet slutade gödsla sina trädgårdar, tvätta sina bilar, och hindrade aska från brasor att rinna ner i sjön skulle bagarsjöns fosfornivå eventuellt kunna reduceras.

1.5 Syfte

Målet med detta projekt är att med hjälp av en massbalansmodell för fosfor i sjöar, LakeMab, ta reda på vilken strategi som är den bästa för att komma till rätta med övergödningen och syrebristen i Bagarsjön.

2 Metod

För att kunna testa olika restaureringsmetoder användes en dynamisk massbalansmodell för fosfor utvecklad vid Uppsala universitet, LakeMab (Håkansson och Bryhn, 2007). Denna modell modifierades för att beskriva Bagarsjön och testades med känslighetsanalys och osäkerhetsanalys. Den data om sjöns egenskaper som modellen behövde beräknades från digitala kartor från lantmäteriet, via litteraturstudier samt undersökningar på plats.

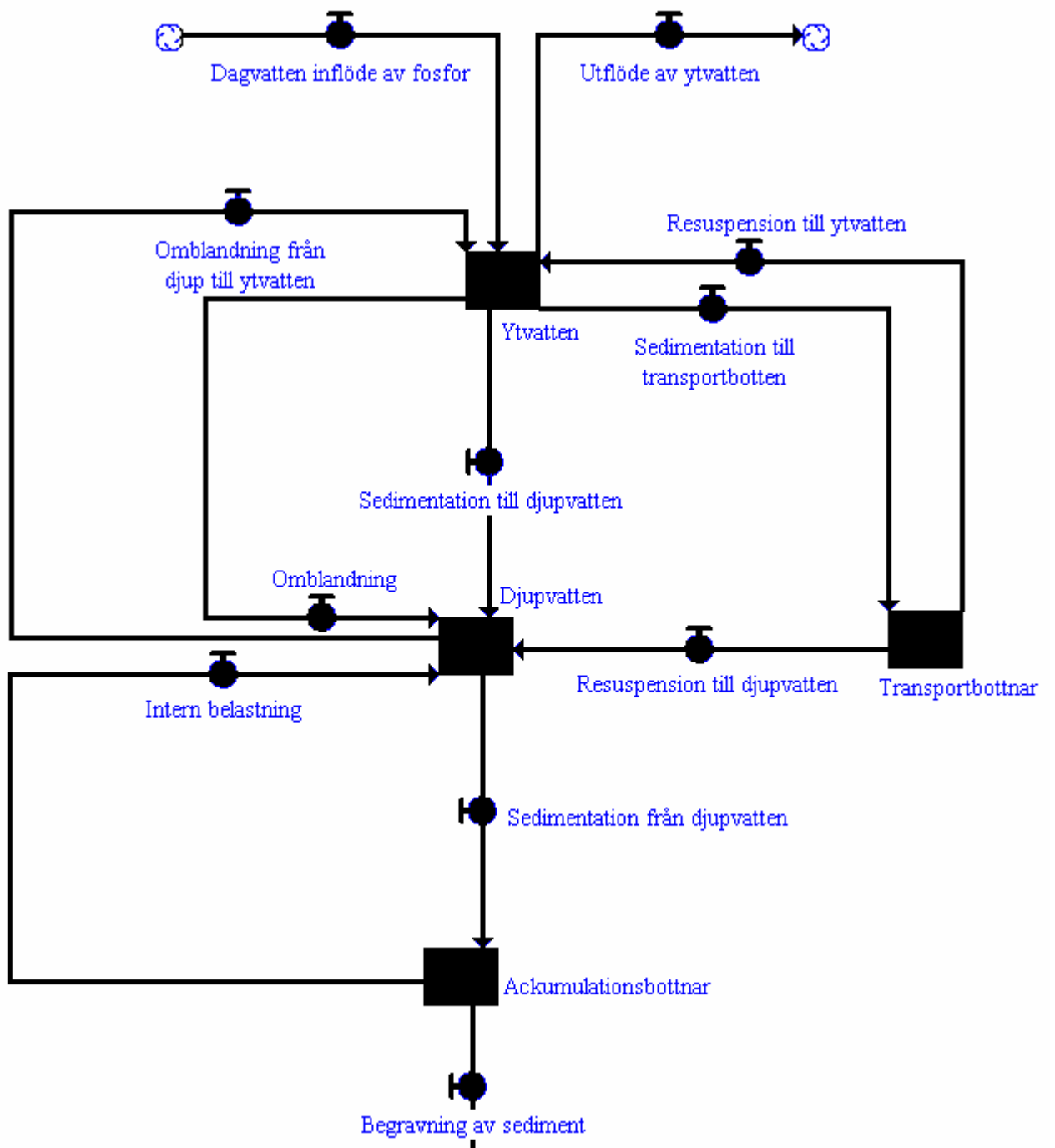
2.1 ArcGIS

För att få fram viktiga drivvariabler till LakeMab som beskriver sjöns morfologiska egenskaper använde vi programserien ArcGIS. Det är ett geografiskt informationssystem som bla används inom byggsektorn, lantmäteri och av hydrologer. Genom att använda digitala terrängkartor från lantmäteriets digitala kartbibliotek (Digitala Kartbiblioteket, 2007) och importera dessa till ArcMAP kunde vi beräkna Bagarsjöns storlek och avrinningsområde. Sedan kunde dessa beräkningar jämföras med tidigare undersökningar av länsstyrelsen och Nacka kommun.

2.2 Sjömodellering i LakeMab

2.1.1 LakeMab

LakeMab är en processbaserad dynamisk massbalansmodell utvecklad i programmet STELLA som beskriver massflöden av fosfor i ett sjöekosystem. Modellen delar in en sjö i fyra olika delar där det vid varje tidpunkt finns en viss mängd fosfor. Dessa fyra olika avdelningar binds sedan ihop för att kunna interagera med varandra. De fyra olika delarna i LakeMab är ytvatten, djupvatten, ackumulationsbottnar (A-bottnar) och så kallade erosion- och transportbottnar (ET-Bottnar). A-bottnar finner man i de djupare delarna av sjön och ET-bottnar vid de grundare delarna. Modellen innehåller differentialekvationer som beskriver in- och utflöden ur dessa avdelningar. I modellen ingår även en rad interna flöden som sedimentation, resuspension, diffusion, omblandning och begravning av sediment. LakeMab har tidigare testats för olika sjöar med vitt skilda egenskaper och har visat sig kunna prediktera månadsvärden för totala fosforhalter mycket bra (Håkansson, 2007). Modellen behöver ett antal olika drivvariabler för att kunna användas och modellen använder sig av dessa drivvariabler för att genomföra beräkningar på sjöns massbalans. En stor fördel med modellen är att de drivvariabler som används är lätt tillgängliga, man behöver inte utföra dyra och tidsödande mätningar av vattenkemi. Figur 2 ger en överblick över modellens struktur och flöden.



Figur 2. Grundstruktur och flöden i modellen LakeMab.

2.1.2 Tillämpning av LakeMab på Bagarsjön

Drivvariablernas värden för Bagarsjön, tabell 1, erhöles från Nacka Kommuns tidigare utredningar samt Karparnas egna mätningar (Nacka kommun, 2007).

Tabell 1. Drivvariabler i LakeMab

Drivvariabel	Bagarsjöns värde
Maximalt djup	6 m
Medeldjup	2,8 m
Area	6 ha
Avrinningsområde	1,0 km ²
Salthalt	0
Sjöns pH-värde	7,7
Initial fosforhalt i vattnet	25 ug P / L
Initial fosforhalt i sedimenten	1 ug P / kg TS
Fosforhalt i inflöden	Årstidsvarierande med data från provtagningar
Övriga källor till fosfortillförsel	-
Höjd över havet	16 m
Latitud	59 °
Årsnederbörd	600 mm

2.3 Modelltester

Modellen testades först mot empiriska data för att kontrollera att de resultat som erhöles är rimliga för Bagarsjön. Detta test genomfördes genom att ett 95% konfidensintervall bildades runt de empiriska data och det undersöktes om modellens värden höll sig inom detta intervall. För att ytterligare testa hur tillförlitliga resultaten från LakeMab egentligen är utfördes känslighetsanalys och osäkerhetsanalys. Två drivvariabler undersöktes inte då deras värden ansågs var säkra. Dessa var latitud och sjöns höjd över havet.

2.3.1 Känslighetsanalys

Med en känslighetsanalys vill man se hur en drivvariabels variabilitet kan påverka modellens prediktion. Det gör man genom att hålla alla drivvariabler konstanta i en modell utom en som tillåts att variera (Håkansson och Peters, 1995). Genom att variera denna drivvariabel ser man sedan hur viktigt det är att just den variabeln ska stämma exakt eller om den kan ha en viss felmarginal utan att den påverkar resultatet nämnvärt. Detta test utfördes i STELLA och resultaten presenterades sedan som box-plottar i Statistica. En viktig del i känslighetsanalys är huruvida karaktäristiska- eller uniforma osäkerheter (CV-värden) används. I testet användes uniforma CV-värden vilket ger ett annorlunda resultat än om karaktäristiska CV-värden skulle användas. Med uniforma CV-värden antas alla variabler ha samma osäkerhet vilket är ett antagande. Detta skiljer sig från karaktäristiska CV-värden på 10 % där varje variabel har en egen osäkerhet. Uniforma CV-värden valdes för att erhålla en större förståelse för hur modellen fungerar.

2.3.2 Osäkerhetsanalys

Även detta test utfördes i STELLA och resultaten presenterades sedan som box-plottar i Statistica. Analysen genomförs genom att den totala variationen jämförs med variationen då en variabel i taget hålls konstant. Om variationen minskar kraftigt när en viss variabel hålls konstant så betyder det att variation i den variabeln bidrar med mycket osäkerhet till modellen (Håkansson och Peters, 1995).

2.4 Simulerade scenarier

Efter viss kalibrering av LakeMab utvärderades olika scenarier med hjälp av denna. Dessa var att pumpa ut bottenvatten, rena inflödet, ta bort sediment genom muddring, och minska diffusionen och därmed transporten av fosfor tillbaka från sedimenten. Detta görs antingen genom syresättning med pumpar eller genom stabilisering av sediment med kemisk fällning. Alla massor och flöden kan ändras för att återskapa olika scenarier. Vid samtliga simuleringar har datavärden under ett år jämförts. Detta år har valts ut efter 2400 månader då modellen har nått jämvikt.

- **Scenario 1 – Sedimentationsdamm.** Genom att minska inflödet av koncentrationen av fosfor i inflödet av dagvatten till sjön simulerades effekten av en sedimentationsdamm. En simulering med normala värden på drivvariablerna jämfördes mot en reningseffekt på 25 respektive 50% av fosfor i inflödet.
- **Scenario 2 – Minskad diffusion.** Då syrehalten vid botten minskar ökar diffusionen. Diffusion är en spontan spridningsprocess som innebär att ett löst ämne transporteras från vatten med en hög koncentration till vatten med lägre koncentration. Det betyder att löst fosfor kan återflöda till sjön där hastigheten som reglerar detta återflöde beror på syrehalten och koncentrationsgradienten (dvs. skillnaden mellan koncentrationen i sedimenten och koncentrationen i vattnet runt omkring). Syret gör transporten möjlig rent kemiskt och ger också upphov till en större bioturbation som i sin tur bryter ned sedimenten. En ökad syrehalt kan simuleras med en ökad diffusionshastighet i LakeMab. Syrenivån finns inte utsatt som en egen box så för att kunna pröva hur en syresättning genom pumpar skulle påverka fosforhalten ändrades diffusionshastigheten i modellen istället. Diffusionen påverkas på samma sätt vid kemisk fällning, men den åtgärden påverkar mer än så. Sedimenten blir mer stabila efter en fällning och därför sjunker både diffusionshastigheten och begravnings av sediment, det vill säga övergång från aktiva till passiva sediment, ökar. Hur mycket begravnings påverkas av kemisk fällning är oklart och därför simuleras inte det i detta projekt. Man kan dock tänka sig en liknande effekt av kemisk fällning som av minskad diffusion på grund av ökad syrehalt.
- **Scenario 3 - Bortledning av bottenvatten.** Genom att simulera att utloppet består av både bottenvatten och ytvatten kunde effekten av denna restaureringsmetod bestämmas. De simulerade fallen var att utloppet bestod av 50 % bottenvatten och 100 % av bottenvatten vilket jämfördes mot om allt är ytvatten, som det är idag. Ett praktiskt problem med detta scenario är att den ände av sjön där sjöns utlopp ligger är grund och merparten av sjöns djupvatten ligger i andra änden av sjön.
- **Scenario 4 – Muddring.** De fall som simulerades var att gräva ur 25 respektive 50 % av sjöns sediment och därmed lika stor andel av den fosfor som finns i sedimenten. Dessa procentsatser kan låta stora, men skulle 10 cm bottenmaterial muddras så

motsvarar det att man tar bort allt fosfor som modellen räknar med finns i sedimentet. Vad modellen inte tar hänsyn till är att man vid muddring eventuellt kan aktivera underliggande passiva sediment.

- **Scenario 5 – Hushållspåverkan.** Huruvida fosfor tillkommer till sjön genom hushållspåverkan som biltvätt, gödsel och aska från brasor är ett omdebatterat ämne. Med ett par grova uppskattningar om människors vanor och överdrivna och överkliga transportprocesser av fosfor i marken har ett "worst case scenario" tagits fram om hur betydande hushållens påverkan är för Bagarsjöns fosforbalans. Det intressanta här är att kunna ge en fingervisning om denna påverkan är överdriven eller sann. Endast fosforhalten och övergödningspåverkan undersöktes, men medel som konstgödsel och bilschampo kan även ha andra effekter på naturen. Transporten av fosfor sker ofta tillsammans med lerpartiklar det vill säga små jordpartiklar till vilka fosfor binds. Därför är transporten med fosfor från t ex aska genom jorden till sjön komplicerad och det är stor chans att en stor del stannar på vägen och binds i jord och biomassa (Bergström mfl, 2007). Som ett "worst case scenario" antar vi dock i dessa beräkningar att allt rinner ut och hamnar i sjön på en gång. En grov uppskattning har även gjorts att 500 hushåll finns i Bagarsjöns avrinningsområde. Endast de hushållsutsläpp som ansågs vara värst i rekommendationen på karparnas hemsida har undersökts. Dessa var användning av bilvårdsprodukter, trädgårdsgödsel samt eldning. Följande antaganden har gjorts:

i Alla hushåll antas använda en flaska bilschampo (0,5 l) per år där all fosfor rinner ner

Bagarsjön. Halten fosfor i bilvårdsprodukter varierar stort produkter emellan men baserat på några vanliga bilschampon uppskattas ett genomsnittligt värde på ca 3% av produkten innehålla någon form av fosfat (Svanen, 2007; Turtle Wax, 2007; Nilfisk-Advance, 2007). 500 hushåll ger då uppskattningsvis ett bidrag på 7,5 kg/år.

Aska från lövträd innehåller lite mer fosfor än barrträd (1.7 % löv, 1,1 % barr fosfor i aska; Liss, 2003) och vi tänker oss därför att alla runt Bagarsjön eldar just lövträd. Vi tänker oss att ca 500 hushåll eldar en brasa per år som producerar 1 kilo aska. Om all denna aska tänks hällas ut i Bagarsjön blir det totalt ett tillskott på 8,5 kg fosfor/år.

I flytande trädgårdsgödsel finns det olika mängd fosfor i olika produkter. I en vanligt använd produkt fanns det 3 viktprocent fosfor där 10 ml flytgödsel ska räcka till 10 m² gräsmatta för önskad effekt enligt produktbladet (Bayer Garden Sverige, 2007). Med förutsättningen att folk följer denna rekommendation, att varje hushåll har 1000m² gräsmatta, att de gödslar en gång per år och att medlet väger ungefär lika mycket som vatten blir totala mängden fosfor därifrån 15 kg/år. Det motsvarar ungefär vad den mängd fosfor som kommer in per månad med dagvattnet. Det ska noteras att många andra populära gödslingsprodukter för just gräsmattor innehåller väsentligt mycket lägre halter av just fosfor.

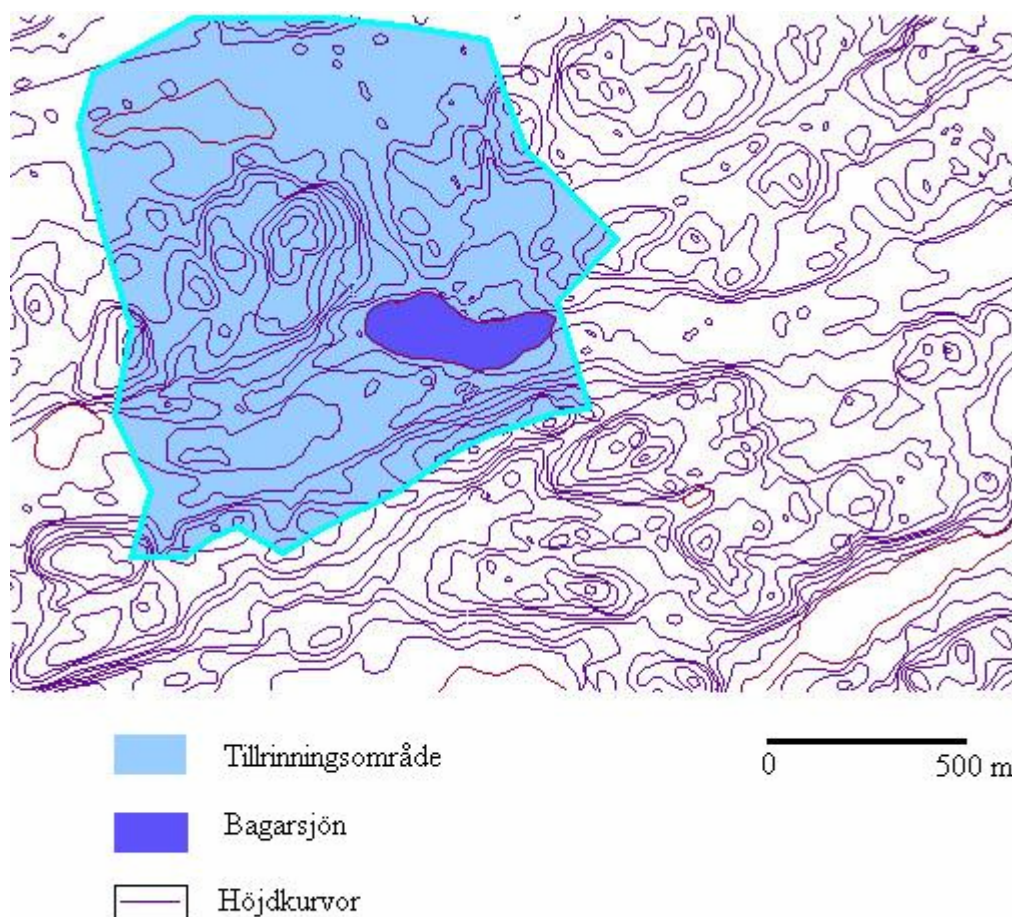
3 Resultat

I samtliga figurer som visar fosforkoncentrationer motsvarar det ett medelvärde för koncentrationen av fosfor i sjön, det vill säga ej specifik yt- eller djupvattenkoncentration.

3.1 Beräkning av sjöns area och tillrinningsområde i ArcGIS

Från beräkningar i ArcMap kunde Bagarsjöns Area fastställas till 60446 m² det vill säga ca 6,04 ha vilket är något mer än siffran från Nacka kommun (6 ha).

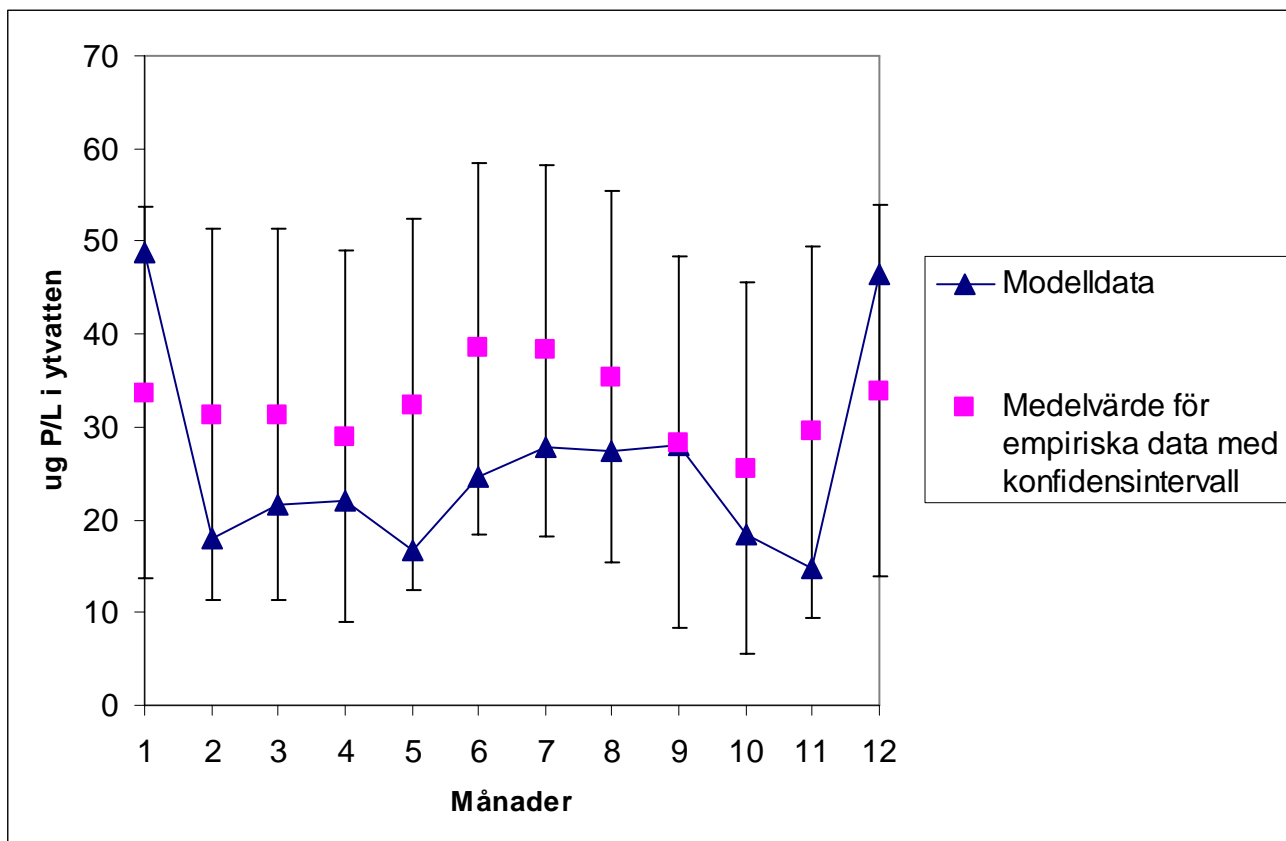
Ett värde utifrån topografin i området, Figur 3, beräknades till ca 1,4 km². Eftersom området är asfalterat till stor del och dagvattenledningar går över områdets gränser är dock denna siffra ej tillförlitlig. Istället användes litteraturvärdet på 1,1 km² i analysen.



Figur 3 . Bagarsjöns tillrinningsområde från ArcMap.

3.2 Modelltester

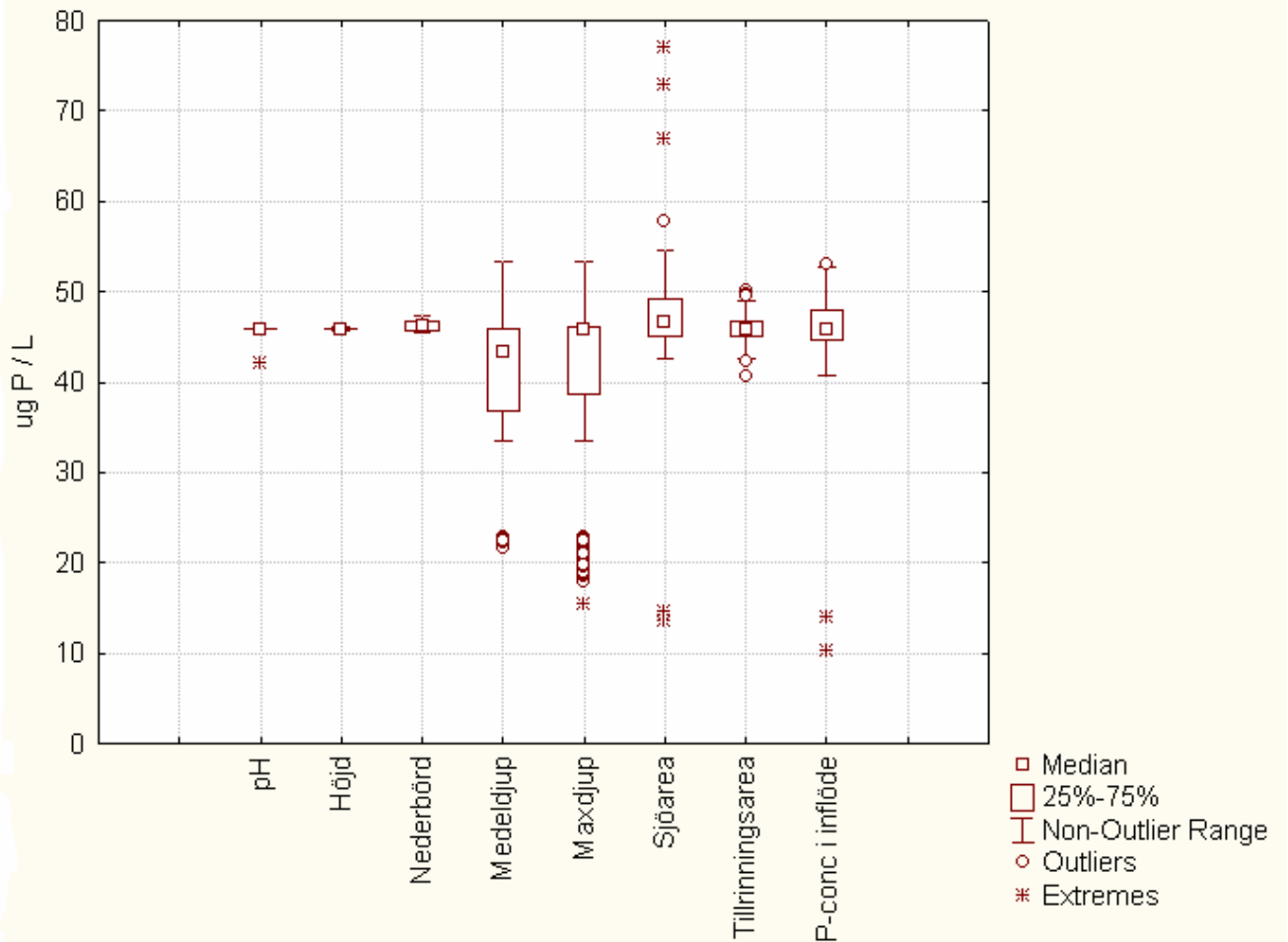
Modellen testades mot ett 95% konfidensintervall för empiriska data. Modellens prediktion hamnade inom detta konfidensintervall, figur 4, vilket visar på att modellens resultat är rimliga för Bagarsjön.



Figur 4. Modell testad mot empiri med 95 % konfidensintervall.

3.2.1 Känslighetsanalys

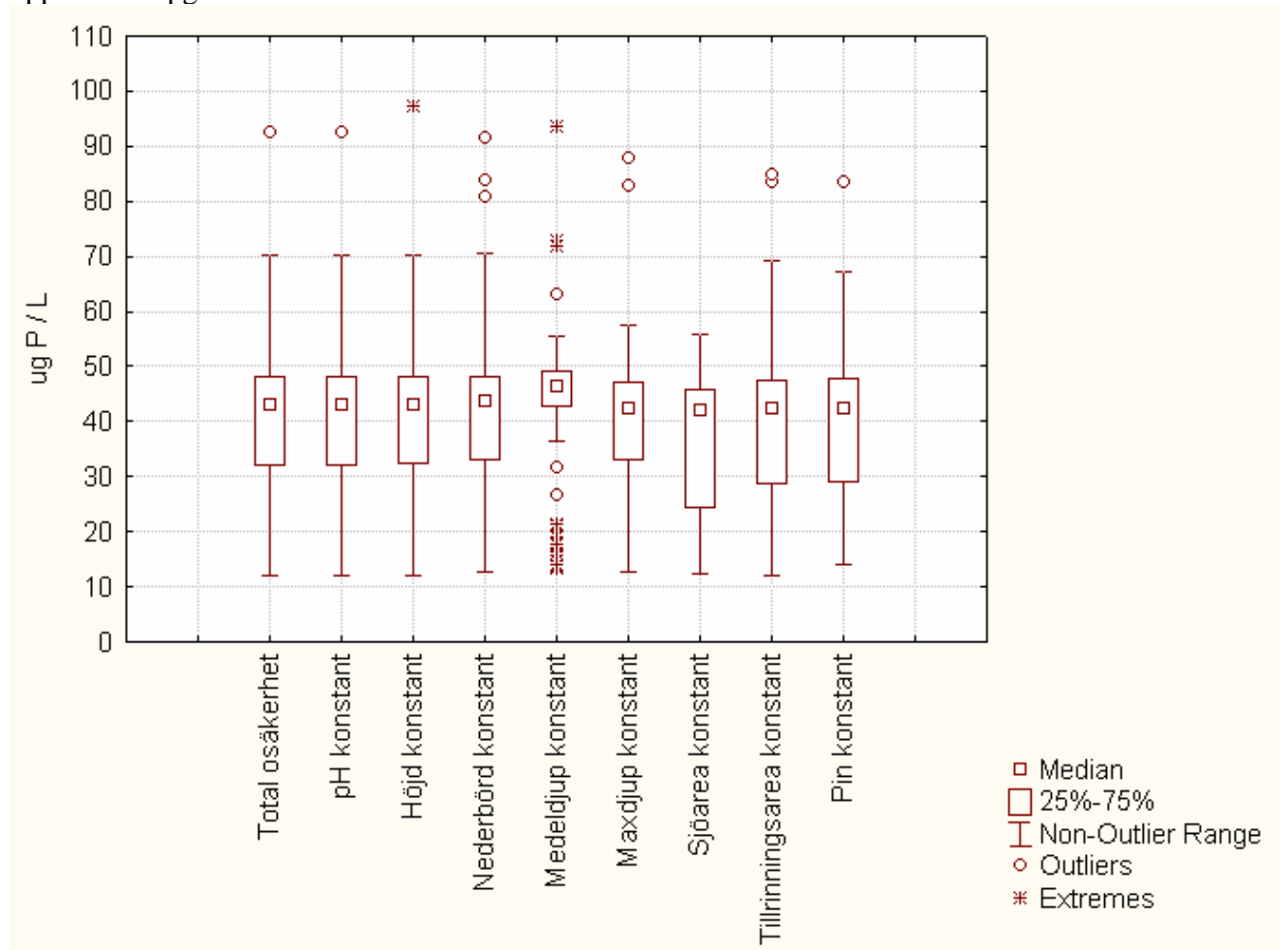
Känslighetsanalysen visade att modellen är känsligast för osäkerheter i medel- och maxdjup följt av sjöarea och fosforkoncentrationen i inflödet, figur 5. Det betyder att det är av yttersta vikt att dessa drivvariabler är så exakta som möjligt då de påverkar resultatet mycket. Oftast har man bra uppmätta och tillförlitliga värden på dessa morfologiska variabler, men fosforkoncentrationen i inflödet är mer osäker



Figur 5. Resultat av känslighetsanalys på drivvariablerna i modellen. .

3.2.2 Osäkerhetsanalys

Den drivvariabel som bidrog med mest osäkerhet till den totala osäkerheten var medeldjupet (fig. 6). Återigen visar det på att det är mycket viktigt att medeldjupet är uppmätt korrekt, men vilken metod som använts för detta är oklart. Den totala osäkerheten blir mindre än om man skulle ta bort osäkerheten för arean. Detta kan betraktas som en statistisk anomalitet som uppkommer pga samvariation mellan de olika drivvariablerna.



Figur 6. Resultat av osäkerhetsanalys på drivvariablerna i modellen.

3.3 Sjömodellering LakeMab

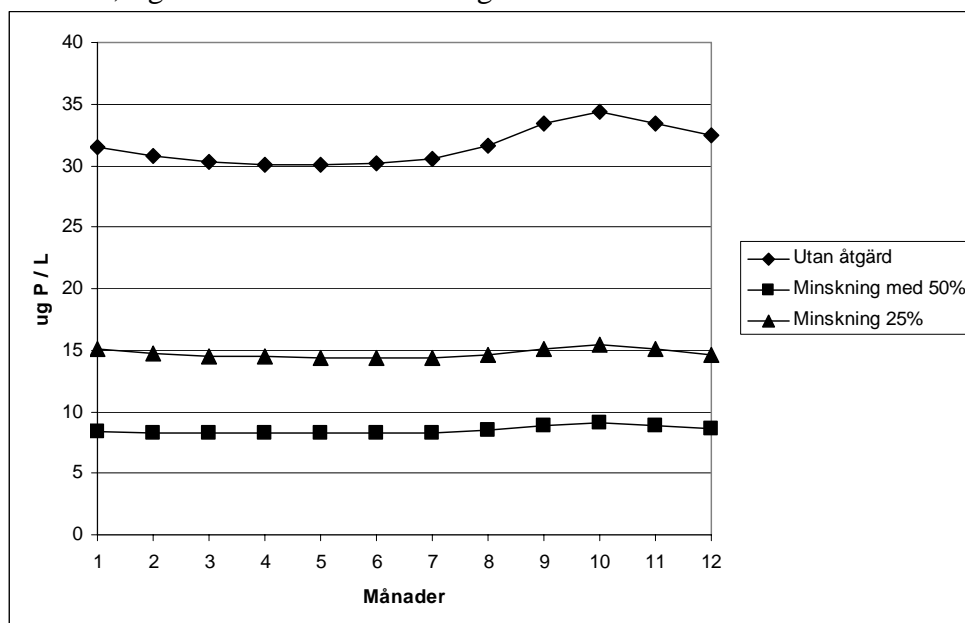
Efter anpassning av modellen till Bagarsjön kunde flödet av fosfor till, från och inom sjön avläsas (se tabell 2).

Tabell 2. Simulerade flöden i LakeMab i Bagarsjön

Fosforflöde	F = [kg P / mån]
Total diffusion från botten	7,3
Total sedimentation till botten	6,9
Dagvatteninflöde	0,4
Utflöde	0,3

3.3.1 Scenario 1 - Rening av dagvatteninflöde

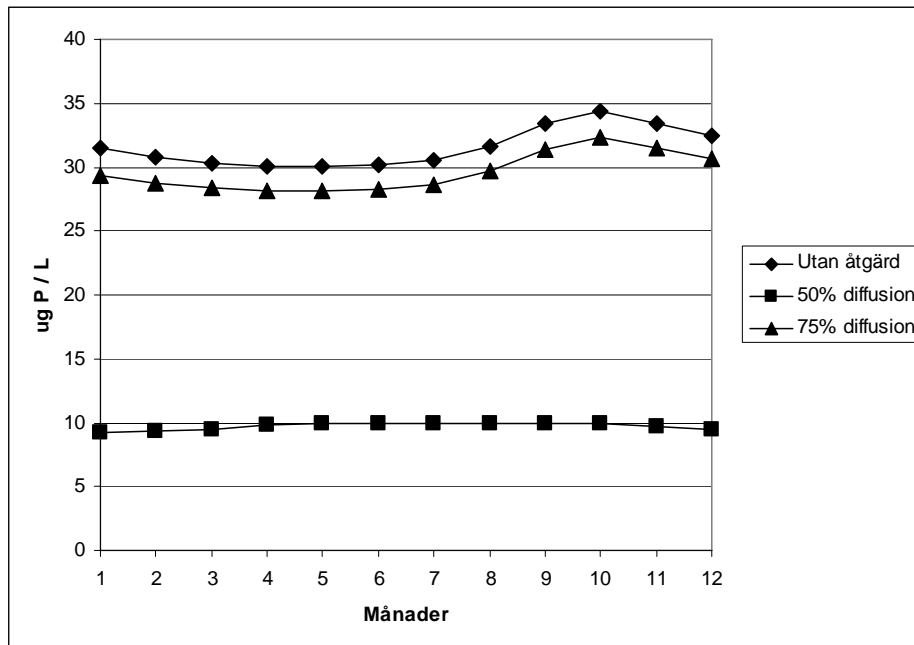
En minskning av fosforkoncentrationen i dagvatteninflödet ger en tydlig positiv effekt för Bagarsjön. Om reningsgraden ökas från 25 till 50 % blir effekten inte lika stor som den från 0 till 25 %, figur 7. Även en liten rening av inflödet får därför en relativt stor effekt.



Figur 7. Jämförelse mellan olika reningsgrader hos en filtreringdamm.

3.3.2 Scenario 2 – Minskad diffusion

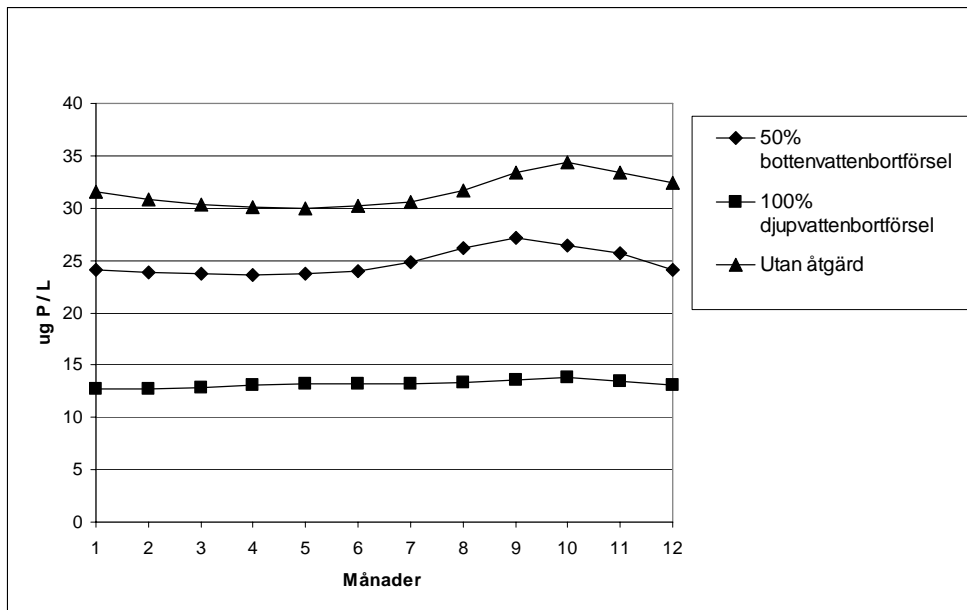
Här simuleras påverkan av antingen luftning av sjöns bottenvatten med pump eller stabilisering av sedimenten med kemisk fällning. Det krävs en stor minskning av diffusionen för att få en betydande minskning av fosforhalten i sjön (figur 8). Om minskningen bara når 75 % av det normala värdet blir effekten inte särskilt stor fast minskas diffusionen med 50 % blir effekten dock mycket bra.



Figur 8. Jämförelse mellan olika minskningar i diffusion.

3.3.3 Scenario 3 - Avledning av bottenvatten

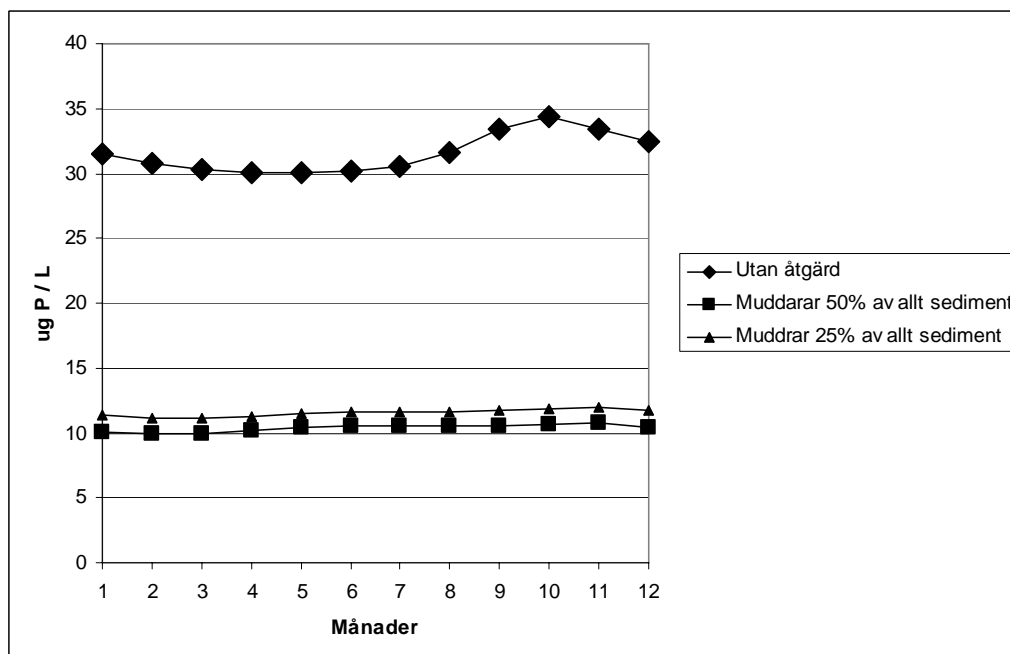
Om utflödet i sjön består av minst 50 % bottenvatten kommer sjöns fosformängd minska markant enligt figur 9. Om utflödet består av enbart bottenvatten kommer resultatet bli klart bättre.



Figur 9. Jämförelse mellan olika mängd avlett bottenvatten.

3.3.4 Scenario 4 – Muddring

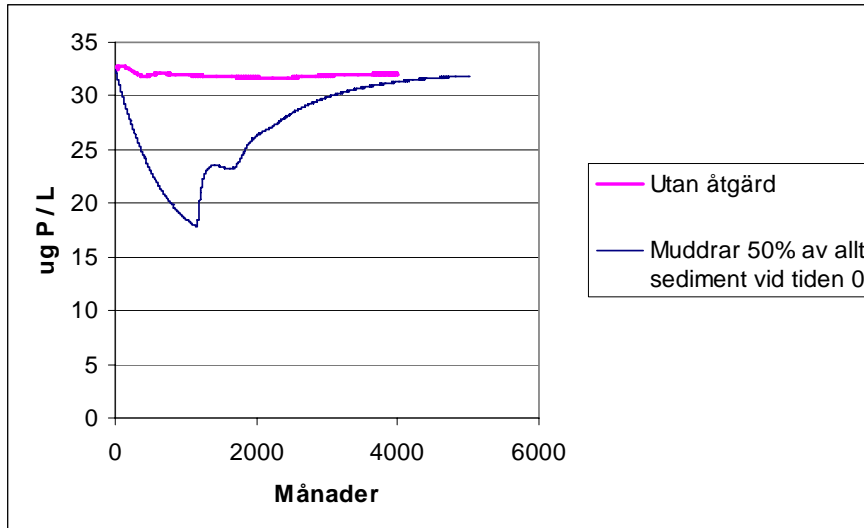
Med muddring märks det klart att en liten insats gör nästan lika stor inverkan som en stor. I figur 10 ser man hur en fördubblad mängd muddrat sediment knappt gör någon skillnad. Det är också betydligt enklare och billigare att gräva ut en mindre bit av sjön än halva.



Figur 10. Jämförelse mellan olika mängd muddrat sediment.

För att visa på att muddringseffekten endast är temporär simulerades ett tidsförlopp där muddringsåtgärden skedde vid tiden noll. Se figur 11. Storleken på effekten är mindre än i figur 10 vilket beror på att kraftig medelvärdesutjämning har använts för att kunna se

långsiktiga förändringar och inte årsvariationer. Resultatet visar att efter cirka 80 år så vänder den positiva effekten av åtgärden och fosforhalten i vattnet börjar stiga. Efter en längre tid kommer sedimenten återskapas och näringsnivåerna återgå till de ursprungliga värdena om fosforinflödet är detsamma som idag.



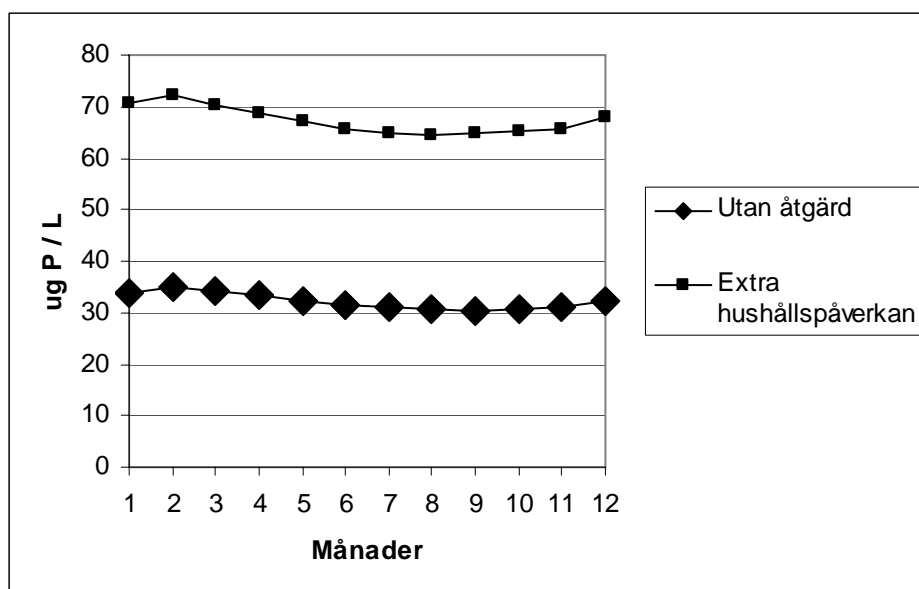
Figur 11. Översikt av muddringseffektens tidsförlopp.

3.3.5 Scenario 5 – Hushållspåverkan

En extrem påverkan från hushållen skulle kunna ge ett mycket stort fosfortillskott till sjön, se tabell 3. Denna extrema påverkan skulle kunna fördubbla fosforhalten i Bagarsjön, se figur 12.

Tabell 3. Jämförelse mellan olika tillflöden av fosfor till Bagarsjön

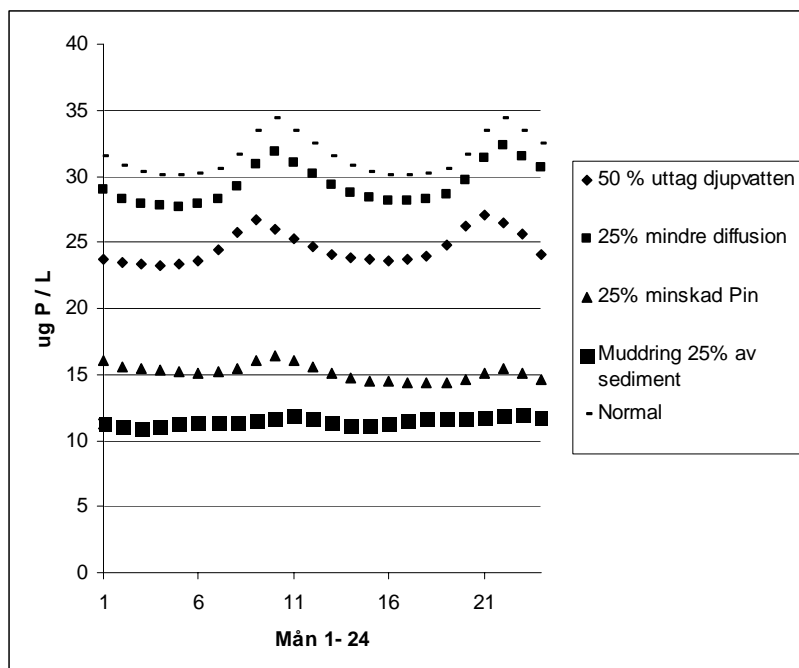
Källa	Tillflöde av fosfor [kg/år]
Från sediment	96
Dagvatten	5
Trädgårdsgödning	15
Aska från brasor	8,5
Bilschampo	7,5



Figur 12. Simulering av extra påverkan från hushåll.

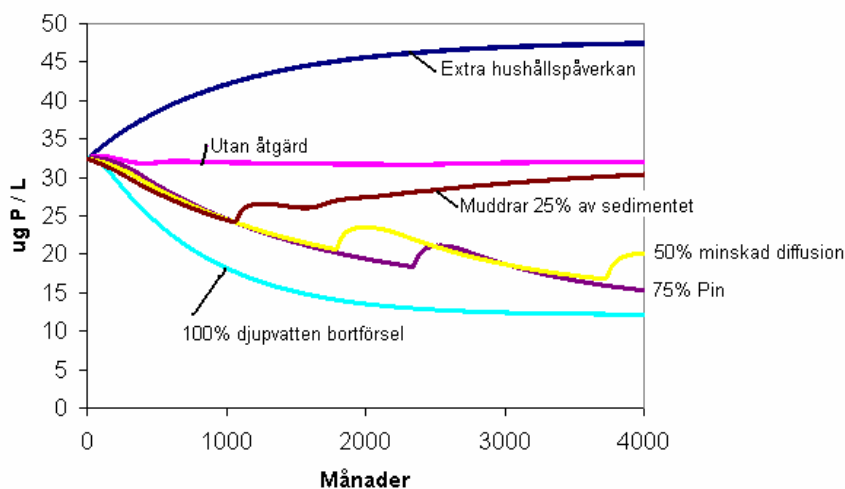
3.3.6 Jämförelse av scenarierna

Ett sammanfattat resultat av de olika simulerade åtgärderna illustreras i figur 13. De scenarios som undersökts är de som ansetts vara mest realistiska. Muddring ger bäst resultat följt av sedimentationsdamm, minskad diffusion och bortledning av bottenvatten.



Figur 13. Jämförelse mellan olika sjörestaureringsmetoder.

Simuleringar gjordes för att undersöka vilken av åtgärderna som snabbast ger resultat, figur 14. För att göra denna jämförelse användes medelvärden under långa tidsperioder för att eliminera säsongsvariationer. Denna medelvärdesbildning gör att värdena för halterna av fosfor i vattnet ofta är missvisande och fosforhalten på y-axeln ska bara användas som en jämförande parameter och inte som ett realistiskt resultat för Bagarsjön som erhöles i de tidigare simuleringarna. Simuleringen tyder på att bortledning av djupvatten ger snabba resultat.



Figur 14. Jämförelse mellan olika sjörestaureringsmetoders tidsförlopp.

4 Diskussion

Det man klart kan se av alla försök till restaurering av Bagarsjön är att en mer effektiv och beprövad strategi är nödvändig för att på ett kostnadseffektivt sätt erhålla långsiktiga resultat och komma till bukt med Bagarsjöns övergödningsproblem. En långsiktig åtgärd måste minska tillflödet av fosfor och/eller få ut mer fosfor ur systemet sjö + biomassa än det som kommer in.

Modelltesterna av den använda modellen gav bra resultat. Testerna visar klart att det är just de morfologiska egenskaperna area, medel- och maxdjup samt koncentrationen fosfor i inflödet som är känsligast. Arean och maxdjupet finns det som tur är bra och exakta värden på medan inflödets koncentration och medeldjupet har sämre noggrannhet. Känslighetsanalysen visade på att det var just medeldjup, maxdjup, area och koncentrationen i inflödet som påverkade resultatet mest (figur 5). Osäkerhetsanalysen gav delvis oväntade resultat. Den visade att det var främst medeldjupet som medförde mest osäkerhet vilket kunde antagas efter känslighetsanalysen. Övriga resultat i osäkerhetsanalysen var inte lika lätta att förutspå. Dessa tester tyder ändå på att modellen ger tillförlitliga resultat.

De simulerade resultatet i LakeMab gav mycket tydliga resultat. I figur 13 jämförs de mest realistiska scenarierna av de olika restaureringsmetoderna. Muddring gav bäst resultat följt av sedimentationsdamm, djupvattenbortförsel och minskad diffusion. Muddringen kräver dock att kompletterande åtgärder görs i kombination för att effekten inte ska avklinga. Det finns också en risk att tidigare begrävda sediment kan bli tillgängliga efter muddring och har de en hög fosforhalt blir effekten inte alls som den simulerade i LakeMab. Värdena för muddringseffekten har också tagits efter 50 år då effekten är som störst. Att rena dagvatteninflödet visade sig vara en mycket bra metod och därför är en sedimenteringsdamm vid sjöns inlopp en mycket bra långsiktigt hållbart alternativt. På kort sikt verkar det dock inte kunna göra så mycket för Bagarsjöns fosforbalans då inflödet av fosfor är litet jämfört med till exempel det flöde som kommer från sedimenten (se tabell 3). Att avleda bottenvatten är också en mycket bra metod som gav mycket bra långsiktiga resultat och den är troligtvis lätt att genomföra rent praktiskt men kräver kontinuerligt underhåll. Diffusionen i sjön är en stor bidragande källa för fosfor vilket bekräftas av simuleringarna. Vilken metod som är bäst för att minska diffusionen är tyvärr fortfarande oklar. Effekten av luftningen/fällningen är bra men bara om man minskar diffusionen mycket. I figur 8 illustreras hur en liten minskning av diffusionen inte räcker till utan en rejäl minskning på ca 50 % behövs för att radikalt minska fosforhalten i ytvattnet. Vilken av alla dessa metoder som är bäst kan dock inte fastställas innan de även har utvärderats ur en ekonomisk synvinkel.

Med litteraturstudien kunde en del metoder utvärderas. En rekommendation som samhället kring Bagarsjön tidigare fått är att inte gödsla sin gräsmatta, inte tvätta bilen och inte elda på sin tomt och samla upp askan. Ur en fosforsynpunkt pekar simuleringen i scenario 5 mot att detta ur försiktighetssynpunkt definitivt bör följas och att man ska använda bilschampo och trädgårdsgödsel med så låg fosforhalt som möjligt. Troligen kommer dock en stor del av fosfor fastläggas i marken och därför kommer effekten att bli avsevärt mindre än den simulerade. Det går att minska utsläppen från gödsling genom att gödsla effektivare. Man bör inte gödsla precis innan en störtkur med regn vilket skulle få en stor del att rinna bort. Samma sak gäller för bilvårdsprodukter där många bra produkter inte ens innehåller fosfor.

I litteraturstudien av biomanipulation var det inget som tydde på att det skulle vara en bra restaureringsmetod för Bagarsjön. Litteraturstudien gav tyvärr inga resultat på huruvida metoden att hålla isarna syrefria var en bra idé. Detta verkar dock vara en tveksam metod för att minska mängden fosfor i vattnet då nettosyreproduktionen efter nedbrytningen inte är ordentligt utredd. Det skulle med en klar snöfri kärnis och stillastående vatten kanske kunna ackumuleras syrgas lokalt, där t ex fisk kan ansamlas och överleva men det är mycket tveksamt om den producerade syrgasen är stor nog att ha betydelse för syrekoncentrationen i hela sjön (Brunberg, 2007).

5 Slutsatser

- Tester tyder på att LakeMab predikterar korrekt.
- Samtliga simulerade restaureringsmetoder verkar fungera bra. Vilken av dessa åtgärder som är mest kostnadseffektiv för Bagarsjön kan bara bestämmas efter en ekonomisk undersökning som återstår att göra.
- Muddring kräver kompletterande åtgärder för att den positiva effekten inte ska försvinna efter cirka 80 år.
- Det finns inga väl underbyggda resultat av biomanipulering i Sverige som stödjer biomanipulation som restaureringsmetod för att minska fosforhalten. Biomanipulation kan därför inte rekommenderas.
- Troligtvis leder inte snöfria isar till en långsiktigt ökad syresättning av sjön, men kan eventuellt ge kortsiktiga effekter för att rädda fisk.
- Skörd av växter i juli-augusti istället för på hösten ökar uttaget av fosfor.

6 Referenser

Bayer garden Sverige, 2007. Blåkorn flytande trädgårdsgödselmedel, hämtad 2007-05-17.
http://www.bayer.se/bayer/Internet_Bayergarden_SE.nsf/Public/6F23AAEAA8792134C12570D6004ABAA8

Bergström, L., Djodjic, F., Kirchmann, H. Nilsson, I., Ulén, B. Fosfor från Jordbruksmark till Vatten, Repro, SLU, Uppsala. 63 s.

Brunberg, Anna, 2007 vid institutionen för ekologi och evolution, *Limnologi*.
Skriftl. E-post 2007-05-10

Digitala Kartbiblioteket, Hämtad 2007-05-10
https://geoimager.lantmateriet.se/digibib/index_s.html

Heldh-Paoli, Birgitta. Muntlig konversation 2007-05-04

Håkansson, Lars. Muntlig konversation 2007-05-03

Håkansson, L., Bryhn, A., 2007. A dynamic mass-balance model for phosphorus in lakes.
Manuskript, Uppsala Universitet.

Håkansson, L., Peters, R.H., 1995. Predictive Limnology, SPM Academic Publishing, Amsterdam. 464 s.

Karparna, 2007. Sjövärdan. Hämtad 2007-05-10.
http://www.karparna.com/sjovard/karparna_3b.shtml

Liss, J.-E., 2003. Använda energislag samt beräknad produktion av träaska vid uppvärmning av småhus år 2003. Arbetsdokument / Institutionen för matematik, naturvetenskap och teknik, Högskolan Dalarna. 25 s.

Nacka Kommun, 2007. Bagarsjön. Hämtad 2007-05-15.
http://infobanken.nacka.se/www/miljo_halsa/sjoar/bagarsjon.htm

Nilfisk-Advance, 2007. Auto Combi. Hämtad 2007-05-21
http://www.nilfisk-advance.se/upload/auto_combi.pdf

Nordin, Håkan. Muntlig konversation 2007-05-04

Svanen, 2007. Svanmärkning av Bil- och båtvårdsprodukter. Hämtad 2007-05-21
<http://www.svanen.nu/DocNord/013.pdf>

Sveriges lantbruksuniversitet (SLU) Umeå, 2007. Frågor. Hämtad 2007-05-17.
<http://www-umea.slu.se/fisk/sve/fragor/2Fu3.htm>

Turtle Wax, 2007. Spray on wheel cleaner. Hämtad 2007-05-21
<http://www.turtlewax.com/main.taf?p=2,1,3,3>

Vattenresurs AB, 2007. Sjörestaurering. Hämtad 2007-05-12.
<http://www.vattenresurs.se/>

Ålands landskapsregering, 2007. Skörd av vass: information och råd. Hämtad 2007-15-21.
<http://www.ls.aland.fi/socialomiljo/miljo/vass.pbs>