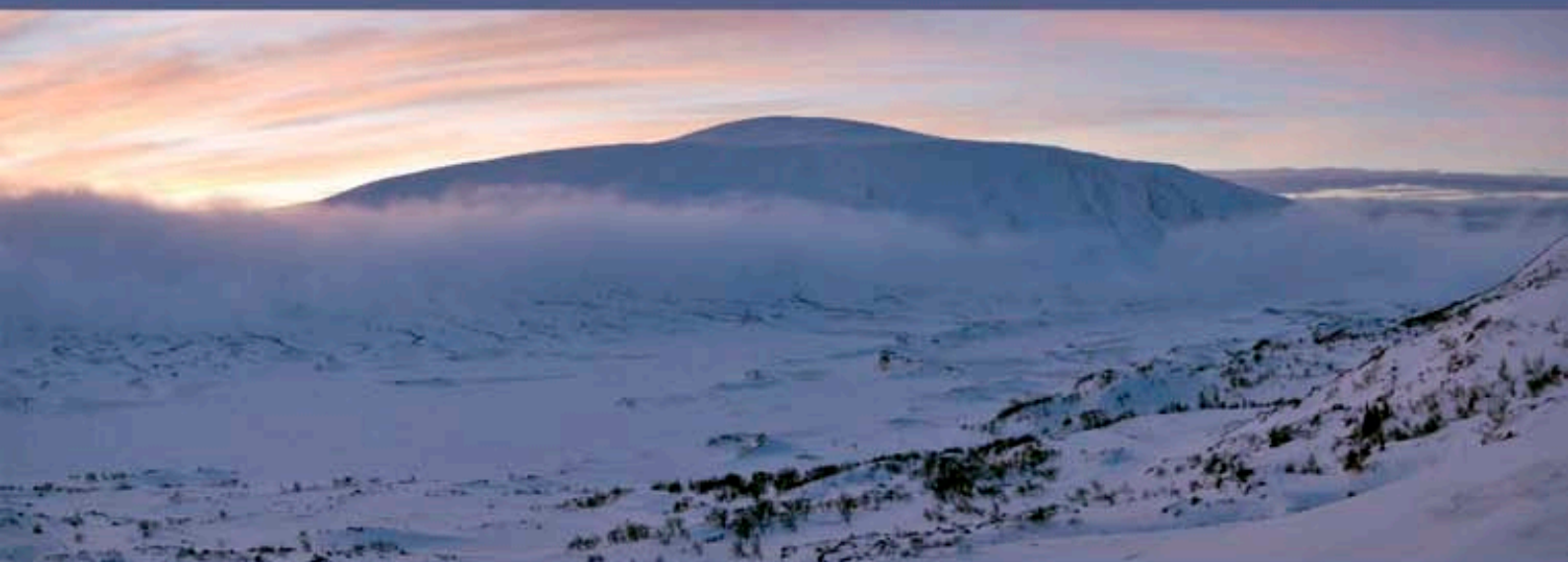


Fjällsjöar i nytt klimat

2008:02

Miljö/Fiske
Miljöövervakning



En modelleringsstudie av Dörrsjöarna Jämtland



Länsstyrelsen
Jämtlands län

Fjällsjöar i nytt klimat

– En modelleringsstudie av Dörrsjöarna, Jämtland

Maria Jaremalm
Andreas Gyllenhammar

Februari 2008

Omslagsbild: Micael Sundberg

Miljöövervakningsfunktionen
Avdelningen Miljö och Fiske
Länsstyrelsen i Jämtlands län
831 86 Östersund
Tfn: 063-14 60 00
www.z.lst.se

ISSN: 1654-4269

Vårmorgon med skarföre
Skidorna skrapar
mot den hårda snön
och ger eko genom morgontystnaden
Solen lyser som en majbrasa
från Hundshögens topp
och de frostiga björkarnas skuggor
rör sig som vålnader
allt eftersom solen stiger
högre upp på himlen

Lajla Johansson, 2004

Förord

Främst vill jag tacka Olof T Johansson, Tåssåsens Sameby, som genom allehanda expertkunskaper och hjälp har gjort det här projektet genomförbart. Jag vill även tacka min kollega Andreas Gyllenhammar för roligt och lärorikt samarbete. Jan Seibert, Stockholms universitet, och Lars Håkanson, Uppsala universitet, har varit förutsättningar för projektet genom att tillhandahålla de modeller som analysen bygger på. Teknisk och ämnesmässig support under arbetets gång har också uppskattats. Gesa Weyhenmeyer, Sveriges lantbruksuniversitet, och Jan Karlsson, Umeå universitet, har, förutom intressanta diskussioner, även tillhandahållit viktiga empiriska samband från egen forskning. Jenny Ask, Umeå universitet, har bidragit i diskussionerna kring utformning av övervakningen av fjällsjöar. De hydrologistudenter vid Stockholms universitet som hjälpt till med databearbetning har också varit till stor hjälp. Slutligen och kanske allra mest vill jag tacka Hundshögen för den härliga gästfrihet, med vackert väder och fantastiska vyer, som hon alltid visat vid mina besök vare sig jag kommit på skidor, skoter eller till fots.

Maria Jaremalm
Östersund, februari 2008

Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	8
1 Inledning.....	9
2 Syfte.....	10
3 Bakgrund.....	10
3.1 Områdesbeskrivning.....	10
3.2 Klimatet vid Dörrsjöarna om 100 år.....	12
4 Metod.....	13
4.1 Sjödata.....	14
4.2 Hydrologisk modellering – HBV.....	14
4.2.1 Modellbeskrivning.....	14
4.2.2 Kalibrering.....	15
4.2.3 Inparametrar till HBV.....	16
4.2.4 Nuvarande och framtida hydrologi.....	16
4.3 Näringssvagsmodellering – LakeWeb.....	17
4.3.1 Modellbeskrivning.....	17
4.3.2 Anpassning av LakeWeb till analys av klimateffekter i fjällsjöar.....	18
4.3.3 Inparametrar till LakeWeb.....	19
4.4 Framtida klimateffekter.....	19
4.4.1 Temperatur.....	19
4.4.2 Produktionsperiod.....	20
4.4.3 Hydrologi.....	21
4.4.4 Förändrad införsel av fosfor.....	21
4.4.5 Känslighetsanalys.....	21
5 Resultat.....	22
5.1 Sjödata.....	22
5.1.1 Morfometri.....	22
5.1.2 Limnologisk beskrivning.....	23
5.1.3 Temperatur.....	25
5.2 Hydrologisk modellering – HBV.....	26
5.2.1 Kalibrering.....	26
5.2.2 Analyser av dagens och framtidens flöden i Dörrsjöarna.....	27
5.3 Näringssvagsmodellering - LakeWeb.....	28
5.3.1 Fiskar.....	30
5.3.2 Bottendjur.....	30
5.3.3 Predatora djurplankton.....	31
5.3.4 Herbivora djurplankton.....	32
5.3.5 Växtplankton.....	33
5.3.6 Bentiska alger.....	34
5.3.7 Makrofyter.....	34
5.3.8 Bakterioplankton.....	35
5.4 Känslighetsanalys.....	36
6 Diskussion.....	37
6.1 Hydrologisk modellering.....	37
6.2 Näringssvagsmodellering.....	38
6.2.1 Fosforhalter.....	38
6.2.2 Organiskt kol.....	39
6.3 Resultat.....	40
6.4 Implikationer för miljöövervakningen.....	42
7 Slutsatser.....	44
8 Vidare diskussion kring övervakningsprogram för fjällsjöar.....	44
9 Referenser.....	47

Figur- och tabellförteckning

Figur 1.	Kartor över Dörrsjöarnas läge i Oviksfjällen	10
Figur 2.	Foton med sjöarnas utseende	11
Figur 3.	Foton över sjöarnas strandzoner	12
Figur 4.	Foton över vegetationen vid sjöarna	12
Figur 5.	Ändringar i temperatur och nederbörd i de två scenarier som används	13
Figur 6.	Skiss över principerna för HBV-modellering	15
Figur 7.	Överblick av de olika transportprocesser som inkluderas i LakeWeb	17
Figur 8.	Ett enkelt exempel på massbalansmodellering	18
Figur 9.	Jämförelse mellan veckomedelvärden av lufttemperatur och vattentemperatur	20
Figur 10.	Djupkartor över Dörrsjöarna	22
Figur 11.	Diagram över volymutvecklingen i sjöarna	22
Figur 12.	Karta över tillrinningsområden samt provpunkter för inflödesprover	24
Figur 13.	Uppmätta luft- och vattentemperaturer	26
Figur 14.	Uppmätta temperaturer i Dörrsjöarna	26
Figur 15.	Vattenflöden, veckomedelvärden 1995-2005	27
Figur 16.	Vattenflöden, månadsmedelvärden av tio år	27
Figur 17.	Siktdjupsförändringar	29
Figur 18.	Årsvariationen hos fiskbiomassan	30
Figur 19.	Årsvariationen hos botten djurens biomassa	31
Figur 20.	Årsvariationen hos biomassa av predatora djurplankton	31
Figur 21.	Årsvariationen hos växtplankton och olika typer av djurplankton	32
Figur 22.	Årsvariationen hos biomassa av herbivora djurplankton	33
Figur 23.	Årsvariationen hos växtplanktonbiomassa	33
Figur 24.	Årsvariationen hos den bentiska algbiomassa	34
Figur 25.	Årsvariationen hos makrofytbiomassa	35
Figur 26.	Årsvariationen hos bakterioplanktonbiomassa	35
Tabell 1.	Sammanställning av LakeWebs modelldomän	19
Tabell 2.	Morfometri och andra data för Dörrsjöarna	23
Tabell 3.	Sammanställning av vattenkemi i sjöarna	23
Tabell 4.	Resultat från provtagning av vattenkemi Dörrsjöarnas inflöden	24
Tabell 5.	Resultat från de elfisken som genomförts i Gäetiejaevries utlopp	25
Tabell 6.	Resultat från temperaturmätningar	25
Tabell 7.	Förändringen i biomassa då klimatvariablerna ändras enligt de båda framtidsscenarierna	28
Tabell 8.	Förändringen i biomassa då både klimatvariablerna och TP ändras enligt de båda framtidsscenarierna	28
Tabell 9.	Årlig produktion av biomassa per hektar för respektive grupp av organismer	29
Tabell 10.	Sammanställning av de CV-värden TP ger upphov till	36
Tabell 11.	Temperaturens inverkan på den totala årsbiomassan för respektive grupp av organismer	36
Tabell 12.	Produktionsperiodens inverkan på den totala årsbiomassan	37
Tabell 13.	Hydrologins inverkan på den totala årsbiomassan	37
Tabell 14.	Optimal temperatur för tillväxt samt övre temperaturgräns för tillväxt för några fiskarter	40
Tabell 15.	Tillväxten hos öring i nuvarande och framtida temperaturregim	41
Tabell 16.	Förslag till miljöövervakningsprogram för klimateffekter i fjällsjöar	46

Sammanfattning

De senaste åren har stora mängder ny kunskap framkommit om klimatförändringarna och dess effekter på olika ekosystem. Fjällen och dess näringsfattiga sjöar är naturligt känsliga system och där förväntas ske tydliga förändringar på grund av ett nytt klimat. För att kunna övervaka dessa förändringar på effektivaste sätt är det viktigt att få en uppfattning om hur climateffekterna påverkar näringsväven. Syftet med den här studien har varit att med hjälp av modeller förutspå dessa effekter och på så sätt kunna optimera den framtida miljöövervakningen. Två fjällsjöar i Oviksfjällen som tillhör Dörrsjöarna har undersökts och insamlade data har använts i kombination med regionala klimatscenarier. En hydrologisk modell, HBV, har använts för att förutspå förändringar i vattenflöden och avrinningsmönster. Effekter på näringsväven och förändringar i organismers biomassor har studerats med ekosystemmodellen LakeWeb.

Resultaten från genomförda mätningar visar att sjöarna är ultraoligotrofa med fosforhalter på 1-4 µg/l och har medeltemperaturer på mellan 5 och 6°C. Resultaten från näringsvävsmodelleringen visar att ett framtida klimat, med förändringar i vattentemperatur, nederbörd, flödesmönster, skulle leda till en ökning i biomassan hos alla grupper förutom växtplankton. Störst är förändringen hos predatora djurplankton som ökar sin biomassa med uppemot det dubbla. Då produktionen i den här typen av näringsfattiga fjällsjöar är fosforbegränsad skulle en ökad tillförsel av fosfor innebära stora förändringar för ekosystemen. Om fosforhalterna skulle öka till ungefär de dubbla skulle enligt modellen biomassan hos fiskar, bottendjur, djurplankton, bentiska alger och bakterioplankton också ungefär dubbleras. Den hydrologiska modelleringen visar att ett framtida klimat leder till en markant höjning av vinterflödet samt minskade vårflooder.

Modellens begränsningar ligger främst i att näringsvävens funktionella grupper kan bli väldigt beroende av artspecifika förhållanden i fjällsjöar, som är naturligt artfattiga system. Dessutom ifrågasätts om resultaten för förändringarna i makrofytbiomassa är av en rimlig storleksordning.

I rapportens sista del diskuteras utformningen av ett nytt miljöövervakningsprogram med inriktning mot climateffekter i fjällsjöar.

I Inledning

Globala klimatförändringar är ett mycket aktuellt miljöproblem. De flesta klimatscenarier indikerar att uppvärmningen kommer att bli som störst på de nordliga latituderna och speciellt under vintermånaderna (IPCC, 2007). I takt med att klimatet blir varmare förväntas de svenska kalvfjällen och den fjällnära naturen att genomgå stora förändringar (Sonesson & Lilliesköld, 2000). Redan under 1900-talet har trädgränsen expanderat mot allt högre höjder (Öberg, 2007). Det är en utveckling som på lång sikt kan medföra att större delen av de svenska kalvfjällen försvinner (Naturvårdsverket, 2006). Förändringarna förväntas även bli stora i fjällens vattenmiljöer. Interaktioner mellan temperatur, nederbörd och processer i tillrinningsområdet kommer att bestämma den kumulativa inverkan från klimatförändringen i vattenekosystemen på hög höjd.

Länsstyrelsernas miljöövervakning har som uppgift att beskriva tillståndet i miljön och bedöma hotbilder. Effekter av klimatförändringar har hittills varit ett eftersatt område inom miljöövervakningen. En anledning till det kan vara att det är svårt att veta vilka effekter ett ändrat klimat ger i naturen. Därmed är det även svårt att veta vad som är mest relevant att övervaka ur ett klimatperspektiv eller var eventuella effekter kommer att bli tydliga först. Naturvårdsverket uppmanar i sina senaste riktlinjer länsstyrelserna att utveckla och prioritera en övervakning som är mer inriktad på att följa upp effekterna av klimatförändringar. Det här projektet är ett led i att öka förståelsen kring klimatförändringens effekter på fjällsjöar och vilka indikatorer vi bör övervaka i dessa känsliga ekosystem.

I analysen har näringsvävsmodellering och hydrologisk modellering använts för att få en bild av vilka effekter vi kan förvänta oss i fjällsjöar i ett framtida klimat. Vi har utgått ifrån en generell näringsvävsmodell, LakeWeb (Håkanson och Boulion, 2002), som har anpassats till förhållanden i fjällsjöar och de frågeställningar som ställs i projektet. För den hydrologiska modelleringen har en HBV-modellen (Hydrologiska Byrån Vattenavdelningen) som är utvecklad vid SMHI använts (Bergström, 1976). Omfattande vattenprovtagning och kontinuerlig temperaturmätning kombinerat med klimatdata och framtidsscenarier från SMHI ligger till grund för modelleringen. Effekterna av olika klimatscenarier har analyserats för att få en uppfattning om vilka processer och komponenter i ekosystemet som är mest känsliga för förändringar i klimatet och därmed kommer att påverkas mest. Projektets mål är således att få en bild av vilka parametrar i fjällsjöarna som bör övervakas för att kunna dokumentera vad som händer när klimatet ändras.

Två fjällsjöar i samma område men med olika karaktär ingår i studien. De heter Vueliejaevrie och Gåetiejaevrie och ingår i en grupp av fyra sjöar, Dörrsjöarna, belägna i Oviksfjällen. Inom projektet har även en workshop hållits i den närbelägna Arådalen. Där samlades ett 50-tal personer för att diskutera eventuella förändringar som redan observerats i området och som skulle kunna sättas i samband med klimatförändringarna. På workshopen fanns representanter från Tåssåsens sameby, stugägare och boende i området samt fjällvandrare från STF (Svenska turistföreningen) med många års erfarenhet av att njuta av de jämtländska fjällen.

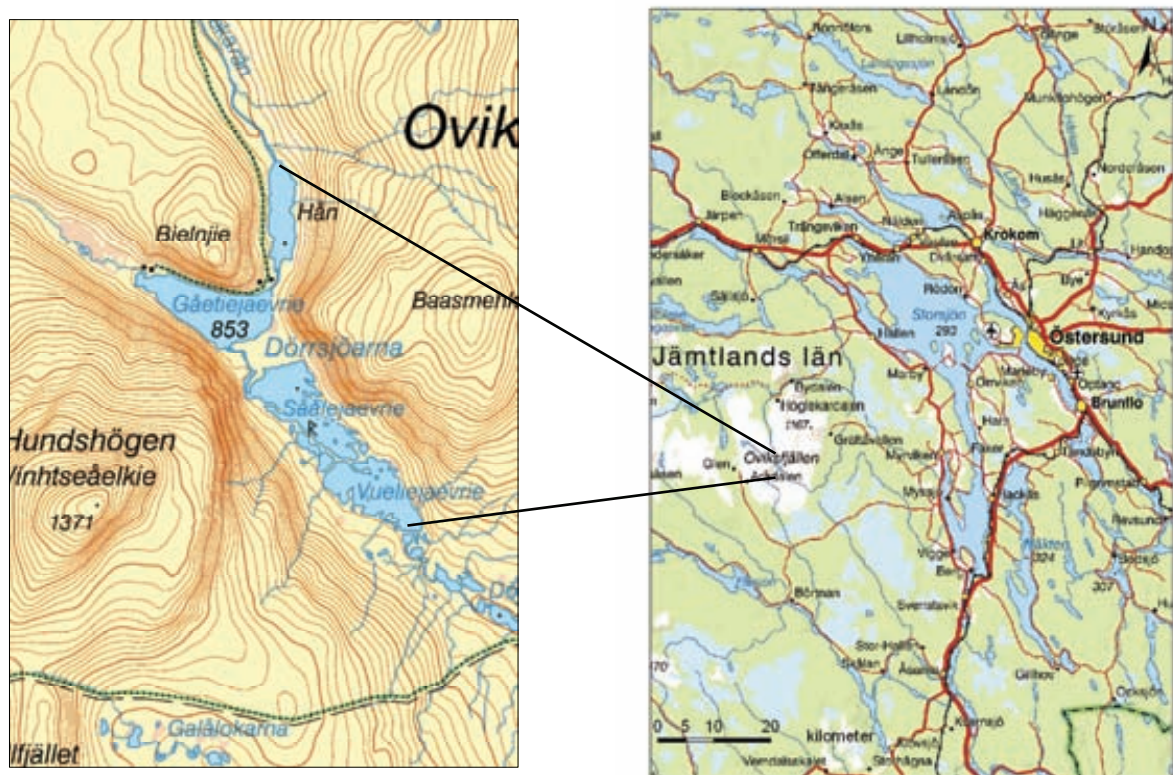
2 Syfte

Syftet med den här studien är att ta reda på vilka effekter som kan förväntas i fjällsjöar i ett framtida klimat. Kunskapen ska öka kring frågor som: *Vilka delar av ekosystemen i fjällsjöar är mest känsliga för klimatförändringar? Vilka grupper av organismer kommer att gynnas respektive missgynnas? Hur påverkar de olika delarna av klimatförändringen ekosystemen? Hur påverkas fysikaliska förutsättningar som hydrologi och isperiodens längd?* En ökad kunskap kring dessa frågor ger förutsättningar för att utarbeta ett övervakningsprogram som fångar in de viktigaste effekterna av klimatförändringen på sjöekosystemen i fjällen.

3 Bakgrund

3.1 Områdesbeskrivning

Området som valts ut för intensivstudier av klimateffekter ligger i Oviksfjällen, ca 5 mil sydväst om Östersund. I området finns fyra sjöar som tillsammans kallas Dörrsjöarna (figur 1).



Figur 1. Kartor över sjöarnas läge i Oviksfjällen.

För att se olika sjöegenskapers inverkan på effekter av klimatförändringar har de två mest olikartade sjöarna i området valts ut. Den ena sjön, Gåetiejaevrie, är en djup sjö utan öar, medan den andra, Vueliejaevrie, är en grundare sjö med många öar och stora djupvariationer (figur 2). En anledning till att just Dörrsjöarna i Oviksfjällen valdes ut är att det finns en hel del data och kunskap från tidigare verksamheter i området. Miljöövervakning har pågått i området och det finns bland annat en nederbördsstation

nära toppen av Hundshögen där deposition av kväve och svavel samlats in sedan 1995. Gåctiejaevrie är kalkad under en period, medan Vueliejaevrie aldrig kalkats. Vueliejaevrie är den första sjön i avrinningsområdet, därifrån rinner vattnet via en mellanliggande sjö till Gåctiejaevrie. Från Gåctiejaevrie fortsätter vattnet sedan vidare via Lekarån och Dammån till Indalsälven. Båda sjöarna är klara, näringsfattiga fjällvatten med endast två fiskarter, öring och elritsa.



Figur 2. Det vänstra fotot visar Vueliejaevrie, medan det högra visar Gåctiejaevrie en sommardag 2006.

Sjöarna ligger på en altitud strax ovan skogsgränsen, 850 meter över havet. Området domineras av näringsfattig berggrund och vegetationen är generellt fattig. Strandzonen runt Gåctiejaevrie består till stor del av block och sten, medan strandzonen runt Vueliejaevrie är av finare material med små sandstränder (figur 3).



Figur 3. Det vänstra fotot visar en typisk sträcka av strandzonen i Vueliejaevrie och det högra en typisk sträcka längs Gåctiejaevrie.

Den digitala vegetationskartan visar att vegetationen vid sjöarna skiljer sig åt genom att strandvegetationen vid Vueliejaevrie domineras av *frisk hed*, medan Gåctiejaevrie också har ett stort inslag av *mossrik/örtrik björkskog* längs dess norra strand (figur 4).



Figur 4. Det vänstra fotot visar ett typiskt område längs östra sidan av Vueliejaevrie. Det högra fotot visar Gåctiejaevries norra strand.

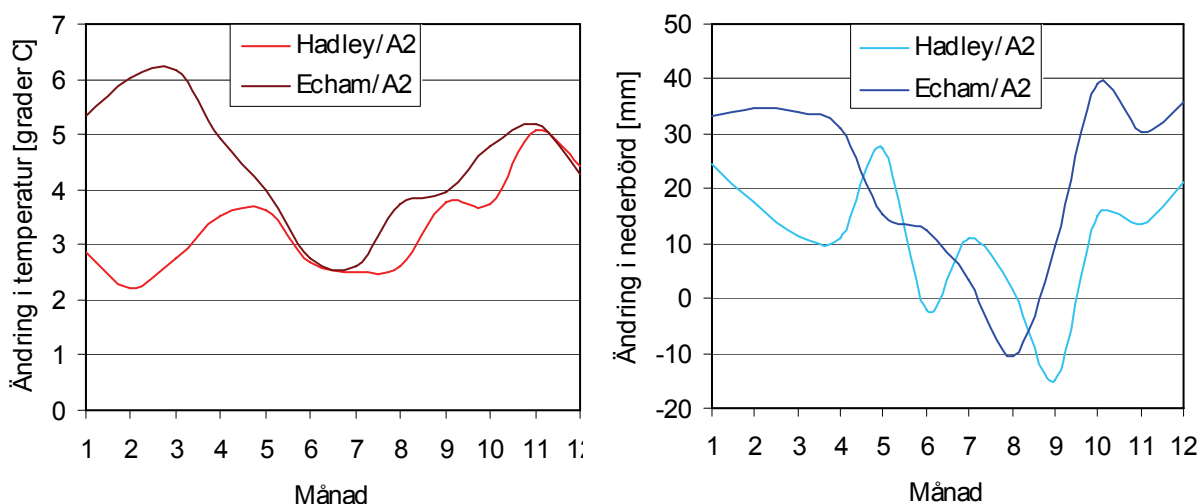
Sommaren 2007 gjordes en växtinventering längs sjöarnas stränder och i transekter över det högsta berget i området, Hundshögen. Vid inventeringen visade sig Gåctiejaevrie ha den mest artrika strandzonen (90 arter), i synnerhet var den norra delen av sjön artrik (82 arter). De vanligaste arterna vid Gåctiejaevrie var blåbär, kråkbär, skogsstjärna och styvstarr. Längs Vueliejaevries stränder hittades sammanlagt 75 arter. Där var de vanligaste arterna dvärgbjörk, hjortron, kråkbär, lingon, odon och styvstarr. För en närmare beskrivning av resultaten från inventeringen hänvisas till Carlsson (2007).

3.2 Klimatet vid Dörrsjöarna om 100 år

Till år 2100 spås en höjning av den globala medeltemperaturen med 3°C (2 - 4.5) om CO₂-halten i atmosfären fördubblas (IPCC, 2007). Klimatförändringen kommer dock inte fördela sig jämt över jordklotet eller över året. De flesta klimatscenarier indikerar att uppvärmningen kommer att bli som störst på de nordliga breddgraderna och speciellt

under vintermånaderna. Redan idag är klimatförändringarna i Jämtlands län mätbara. En jämförelse mellan den förra klimatperioden (1960-1990) och den innevarande perioden (med data från 1991-2005) visar att temperatur har ökat med ungefär en halv grad på sommaren och två grader på vintern (SMHI, 2006). Motsvarande jämförelse av nederbördens förändring visar en ökning med cirka 20 % på sommaren medan nederbördsmängderna på vintern hittills inte förändrats nämnvärt. Växtsäsongens längd har i Jämtlands län förlängts med 2-4 veckor under perioden 1982 till 1999 (Mikkelsen, 2006).

De scenarier för förändringen av klimatet som använts i den här studien är framtagna av SMHI med hjälp av en regional klimatmodell, RCA3 (Kjellström m.fl., 2005). För att få en så bra bild som möjligt av klimatet just i Dörrsjöarnas närområde har dessa förändringar lagts på uppmätta data från en närliggande klimatstation. Som randvillkor till RCA3 har data från två globala klimatmodeller använts; den tyska modellen ECHAM och den brittiska HADLEY. För att begränsa omfattningen av modelleringarna har bara utdata från ett scenario av framtidens utsläpp av växthusgaser tagits med i studien. Ett av de mer pessimistiska scenarierna (fortsatt stora antropogena CO₂-utsläpp), A2, valdes ut för att få en tydlig klimatsignal (Nakicenovic m.fl., 2000). De modelleringar som används är för klimatperioden 2071-2100, alltså ca 100 år framåt i tiden. Förändringarna i temperatur och nederbörd i de båda scenarierna visas i figur 5.



Figur 5. Det vänstra diagrammet visar ändringen i temperatur för de två olika scenarier som används. Det högra diagrammet visar motsvarande förändring i nederbörden.

4 Metod

Två olika datamodeller har använts för att få en bild av vad som händer med ekosystemen i fjällsjöar vid ett varmare klimat. Den ena är en näringsvävsmodell, LakeWeb, utvecklad av Lars Håkanson, Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet (Håkanson och Boulion, 2002). Olika klimatscenarier har testas i LakeWeb för att få en uppfattning om vilka processer och grupper av arter som är mest känsliga för förändringar i klimatet och därmed kommer att påverkas mest.

För den hydrologiska modelleringen har HBV använts (t.ex. Bergström, 1992 och Lindström m.fl., 1997) i versionen HBV-light (Seibert, 1997). Den hydrologiska modelleringen syftar till att få en bild av hur årsvariationen i vattenflödet i området ser ut idag och hur det kan komma att ändras i ett varmare och blötare klimat. Vattenflödet till sjöarna är dessutom en av invariablerna i LakeWeb. Den hydrologiska modelleringen har utförts i samarbete med Jan Seibert, institutionen för naturgeografi och kvartärgeologi, Stockholms universitet och studenter vid Stockholms universitet.

4.1 Sjödata

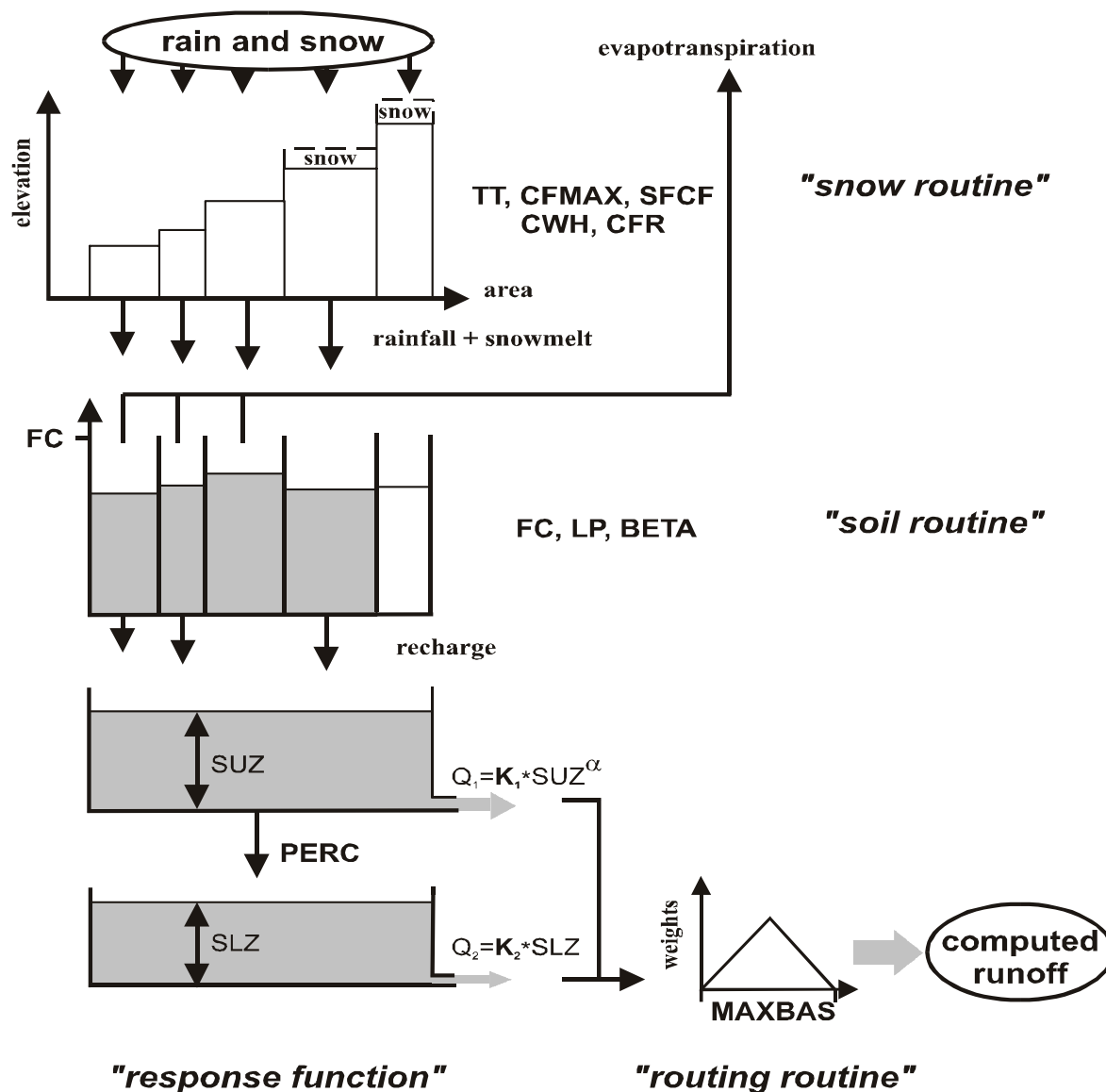
För att få indata till modelleringen har en rad olika mätningar gjorts i området. Mätningarna har gjorts under ett år med start sommaren 2006. Sjöarnas djupvariation har analyserats genom en kombination av mätningar i fält och dataanalys. Arcor för sjöarna och deras avrinningsområden är beräknade med hjälp av programvaran ArcMap 9.2. Temperaturmätare som loggar värden varje timme har varit utplacerade i djup- och ytvattnet i de båda sjöarna. Därutöver har även lufttemperaturen vid sjöarna (850 m ö h) och uppe på det närliggande fjället Hundshögen (1370 m ö h) mätts. De loggrar vi använt är: *HOBO Water Temp Pro* från *Onset Computer Corporation*. Vattenprover har tagits varannan månad och ett antal vattenkemiska variabler har analyserats (pH, kond., Ca, Mg, Na, K, SO₄, Cl, Fl, NH₄-N, NO₂+NO₃-N, Tot-N ps, PO₄-P, TP, TOC, alk./acid., absorbans OF och F, slamhalt, Mn, Si, Fe, Al och klorofyll). Dessa data, tillsammans med historiska klimatdata och hydrologisk modellering ligger sedan till grund för ekosystemmodelleringen av sjöarna.

4.2 Hydrologisk modellering – HBV

I ett förändrat framtida klimat förväntas nederbördens intensitet och säsongsmönster förändras. Dagens flödesregim är modellerad med lokala klimatdata för perioden 1996-2005, medan flödet i ett framtida klimat (2071-2100) är modellerat utifrån SMHI:s uppskattningar av förändringar i temperatur och nederbörd.

4.2.1 Modellbeskrivning

Principen i HBV är att flödet i ett avrinningsområde simuleras med hjälp av tidsserier för nederbörd och temperatur. Modellens olika parametrar bestäms med hjälp av ett referensområde. För referensområdet behöver man, förutom data på temperatur och nederbörd, även data på flödet. Modellen kalibreras genom att anpassa modellens parametrar tills det modellerade flödet stämmer så bra som möjligt överens med det uppmätta. Utgångspunkten är sedan att referensområdet är så pass likt avrinningsområdet för det sökta flödet att modellen ger en god uppfattning om flödesregimen. Modellstrukturen återges i figur 6.



Figur 6. Skiss över principerna för HBV-modellering (Uhlenbrook m. fl., 1999).

4.2.2 Kalibrering

Flödesdata för kalibreringen har inhämtats från SMHI. Modellen kalibreras i det här fallet genom att utgå ifrån två liknande avrinningsområden, Fångåmon 2 (SMHI ID:1831) och Kvarnbäcken, Ramundberget (SMHI ID:2123). Dessa två referensområden valdes ut i en avvägning mellan kravet på tillgång till så långa och sammanhållna dataserier som möjligt och att få referensområden som liknar området kring Dörrsjöarna i så stor utsträckning som möjligt. Anledningen till att två olika referensområden används är för att minimera risken för fel beroende på att referensområdet skiljer sig från det område som skall simuleras.

Rent tekniskt görs kalibreringen med hjälp av Monte Carlo simuleringar. Det innebär att en stor mängd slumpvis kombinerade parametrar testas. De uppsättningar som ger bäst överensstämmelser mellan modellerade och uppmätta data sparas. Intervallet för parametervärdena sattes från början utifrån max- och minvärden från Seiberts

undersökning (2006). Med dessa intervall som utgångspunkt testades först 1 miljon kombinationer. Utifrån de 200 bästa parameteruppsättningarna modifierades intervallen för parametrarna innan 1 miljon nya Monte Carlo simuleringar testades. De hundra bästa parameteruppsättningarna av dessa användes sedan för att simulera flödena i Dörrsjöarna.

4.2.3 Inparametrar till HBV

Modellen har anpassats till respektive område genom att lägga in data över avrinningsområdets höjdfördelning, temperatur, nederbörd, evaporation samt flöde (för referensområdena). Data över nederbörd och temperatur är hämtat från de av SMHI:s klimatstationer som har lämpligt geografiskt läge och så kompletta dataserier som möjligt med dygnvärden som sträcker sig mellan 1996 och 2005. Modellen justerar sedan temperatur- och nederbördsdata efter höjdfördelningen i respektive avrinningsområde.

För Dörrsjöarna har data från en mätstation i Höglekardalen använts för temperatur och nederbörd. Till Fångåmons avrinningsområde har ett medel mellan Höglekardalen och Mörsil, använts som temperaturuppskattning och ett medel mellan Höglekardalen och Vallbo som en uppskattning av nederbörden. För temperaturen i Kvarnbäckens avrinningsområde har Flatruets mätstation använts. Det är den mätstation som ligger på högst höjd, 950 meter över havet. Eftersom data inte fanns för alla dagar i den serien har några värden uppskattats genom en korrelation med Ljusnedals mätstation. För nederbörden har data för Malmagens väderstation använts. Evaporationen har i samtliga fall uppskattats utifrån mätstationen i Östersund.

De temperatur-, flödes-, och evaporationsdata som SMHI levererar går att använda som skattningar av de verkliga värdena rakt av. Nederbörden är dock svårare att mäta och SMHI använder en rad olika sorters mätare med olika typer av feluppskattningar. De data som levereras för den observerade nederbörden, Nbd_o , behöver därför korrigeras för att ge en bra bild av den verkliga nederbörden. Nederbördsdata är således korrigerade enligt den metod som beskrivs i SMHI:s rapport *Korrektion av nederbörd enligt enkel klimatologisk metodik* (Alexandersson, 2003). Den korrigerade nederbörden, Nbd_s , beräknas som:

$$Ndb_s = \frac{Vindkorrektion \times Nbd_o + Adunstningskoefficient \times T_m}{Adhesion + Adhesionsförlust}$$

där T_m är medeltemperaturen. Rapporten innehåller tabeller över de olika variablerna för respektive nederbördsmätare.

4.2.4 Nuvarande och framtida hydrologi

Flödet i de båda sjöarna simulerades med de hundra bästa parameteruppsättningarna från de båda referensområdena, Fångåmon och Kvarnbäcken. Av de 100 körningarna valdes den parameteruppsättning ut där resultatet gav den bästa korrelationen med medianvärdet vid simuleringen av nutidens flöde (1996-2005). Denna parameteruppsättning användes sedan för att simulera framtidens hydrologi i de

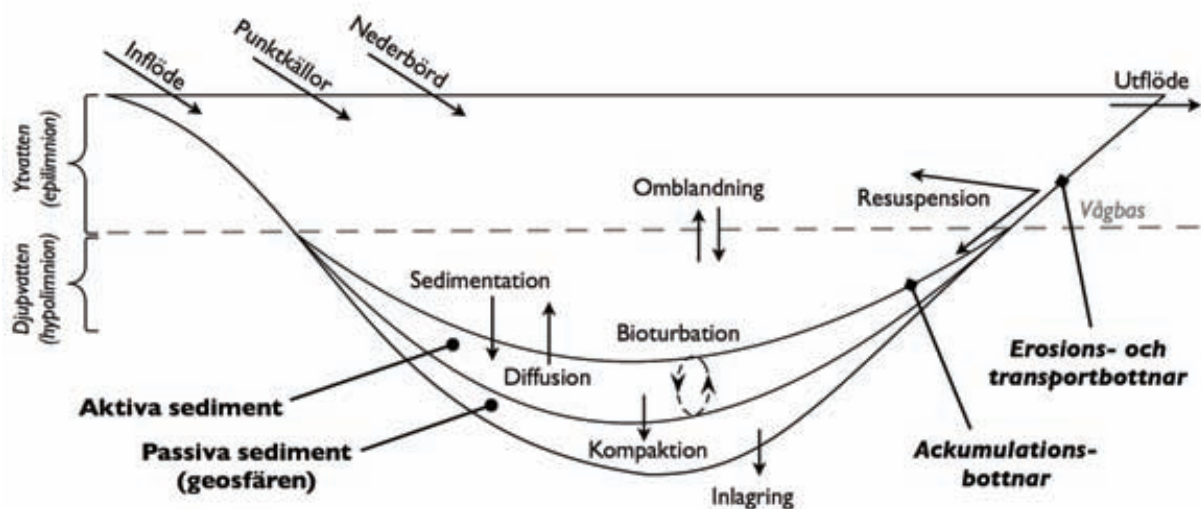
respektive scenarierna ECHAM A2 och HADLEY A2. I samtliga fall har dagliga värden på flödet tagits fram över tioårsperioder. Resultaten från den hydrologiska modelleringen har använts som inparametrar i näringsvävsmodelleringen.

4.3 Näringsvävsmodellering – LakeWeb

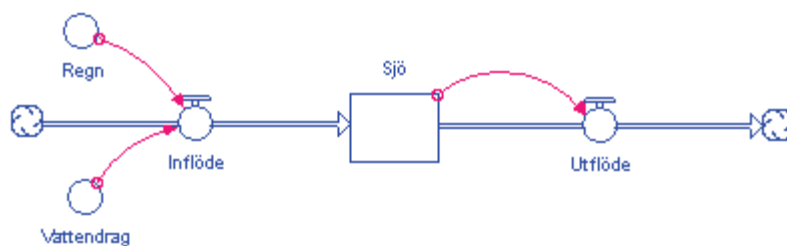
Konsekvenserna av ett förändrat klimat för fjällens sjöecosystem har analyserats med hjälp av en dynamisk näringsvävsmodell, LakeWeb. Till grund för modelleringen ligger 2 års mätdata, klimatdata framtagna av SMHI samt data från hydrologiska modelleringar. För att få en bild av hur resultatet beror av vilket klimat som används har två olika scenarier använts, ECHAM A2 och HADLEY A2. Den tidsperiod som jämförs med nuvarande klimat (år 1996-2005) är 2071-2100, alltså ca 100 år framåt i tiden. För en närmare beskrivning av framtidsscenarierna se kap. 2.2.

4.3.1 Modellbeskrivning

LakeWeb är en dynamisk näringsvävsmodell för sjöecosystem. Den är utvecklad och validerad av Lars Håkanson, Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet (Håkanson och Boulion, 2002). Modellen inkluderar såväl de fysikaliska processerna i sjöar som de trofiska interaktionerna mellan ekosystemets olika funktionella grupper (figur 7). LakeWeb bygger på massbalansberäkningar där processer som införsel, utförsel och omvandling av fosfor hanteras med hjälp av ordinära differentialekvationer (figur 8). För en fördjupad introduktion till massbalansmodellering, se Gyllenhammar (2004).



Figur 7. Överblick av de transportprocesser som inkluderas i LakeWeb.



Figur 8. Ett enkelt exempel på massbalansmodellering. Ingen materia kan skapas eller försvinna, bara transporteras.

LakeWeb delar upp organismerna i sjön i nio olika grupper beroende på deras funktion i ekosystemet. De nio funktionella grupperna i LakeWeb är: växtplankton, bentiska alger, makrofyter, herbivora respektive predatora djurplankton, bottendjur, bytesfiskar, rovfiskar samt bakterioplankton.

4.3.2 Anpassning av LakeWeb till analys av klimateffekter i fjällsjöar

Mycket av projektiden har gått till att anpassa LakeWeb till de utvalda sjöarna och frågeställningarna i studien. LakeWeb är en generell näringsvävsmodell som är konstruerad för att svara på hur förändringar i miljöfaktorer påverkar sjöars näringsväv. Men dock inte för att specifikt analysera effekter av klimatförändringar. Därför har en anpassning av vissa processer i modellen varit nödvändig. Klorofyllproduktionen har till exempel gjorts om så att den styrs av årsvariationen i antal ljustimmar istället för av temperaturen. Grundstrukturen för modellerande av vattentemperatur i LakeWeb förutsätter skiktade sjöar där djupvattentemperaturen aldrig understiger 4°C. Det stämmer inte för relativt grunda och oskyddade kalfjällssjöar som Dörrsjöarna. Mätvärden visar att sjöarna endast tillfälligtvis är skiktade och att djupvattentemperaturen kan bli nästan nollgradig. Därför används uppmätta tidsserier av veckovärden på yt- och djuptemperaturen i den här studien. Denna ombyggnad var även nödvändig för att kunna testa olika framtida klimatscenarier. Den tidigare strategin i LakeWeb, att beräkna klimatvariabler som temperatur och hydrologi utifrån generella samband med latitud, altitud och kontinentalitet (avstånd till havet) fungerar inte då det är just förändringar i klimatvariablerna som ska testas. De hydrologiska sambanden är anpassade så att flödesregimen sätts antingen genom tidsserier eller genom en generell ändring av årsnederbörden. Grundstrukturen i modellen förutsätter även ett flerartssystem av fiskar som inkluderar utpräglade rovfiskar. Anpassningar har därför gjorts för att kunna representera enartssystem som Dörrsjöarna utan uppdelning mellan rov- och bytesfiskar.

Samtliga förändringar har implementerats i modellen på ett sådant sätt att det genom ett enkelt knapptryck går att välja mellan olika scenarier för respektive variabel. Modellen är även uppbyggd så att det, på ett enkelt sätt, går att applicera den på andra sjöar med liknande frågeställningar.

4.3.3 Inparametrar till LakeWeb

För att ge sjöspecifika resultat behöver LakeWeb ett antal drivvariabler. Dessa är: pH, färgtal, fosforhalt, latitud, altitud, kontinentalitet, nederbörd, vattentemperatur, årsvariationen i antal ljustimmar, maxdjup, medeldjup samt arean av sjön respektive avrinningsområdet. Notera att detta är väsentligt mycket färre variabler och parametrar än vad andra sjöekosystemmodeller kräver, vilket beror på att detta är en generell modell (till skillnad från en sjöspecifik modell). LakeWeb skall inte kalibreras för olika sjöar utan den är framtagen med hjälp av statistiska samband för ett stort antal sjöar. Detta gör att modellen är validerad för en bred modelldomän (tabell 1). Dörrsjöarna befinner sig i utkanten av domänen för fosforhalt och färgtal.

Tabell 1. Sammanställning av LakeWebs modelldomän samt Dörrsjöarnas värden för respektive variabel.

	LakeWeb	Vueliejaevrie	Gäetiejaevrie
Storlek [km ²]	0,01-300	0,404	0,52
Djup [m]	1-100	15,8	18,0
Fosforhalt [µg/l]	2-300	1-4	1-4
Färgtal [mg Pt/l]	2-300	1,8	2,1
pH	3-11	6,4	6,5
Altitud [m ö h]	0-2000	853	853
Latitud	40°N - 75°N	63	63

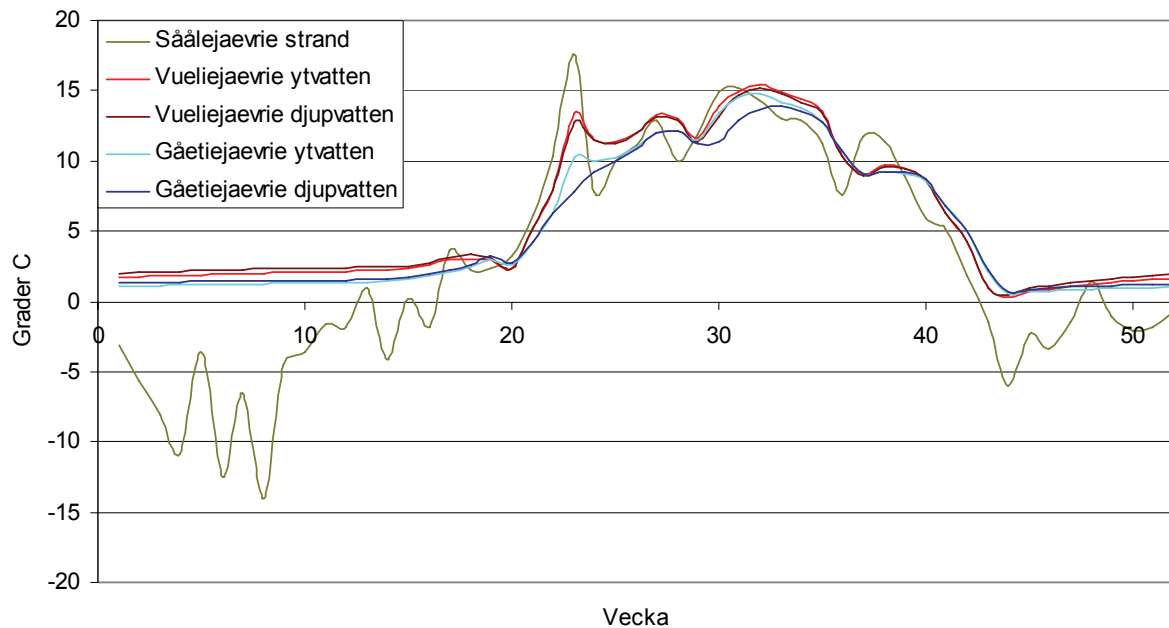
Årsserier över vattnets yt- respektive djuptemperatur är beräknade som veckomedelvärden för de mätdata som loggats varje timme under perioden sommaren 2006 till sommaren 2007. En tioårsserie av veckovärden för flödesregimen är modellerad utifrån mätdata för nederbörd och lufttemperatur från perioden 1996 -2005.

4.4 Framtida klimatteffekter

De förändringar som har testats i framtidsscenarierna är: varmare sjötemperaturer, längre isfria perioder, ökade nederbörds mängder, ändrade flödesmönster samt en ökat tillförsel av fosfor. Samtliga variabler har implementerats i modellen på ett sådant sätt att det enkelt går att variera en variabel i taget medan övriga hålls konstanta.

4.4.1 Temperatur

Framtidens sjötemperaturer har uppskattats utifrån SMHI:s klimatsimuleringar och de mätningar som gjorts i sjöarna. Figur 9 visar att vattentemperaturen i sjöarna i stort sett följer lufttemperaturen under den isfria perioden när det gäller veckomedelvärden. Därför antas här att förändringen i vattentemperatur är densamma som SMHI:s förutspådda höjning av lufttemperaturen.



Figur 9. Jämförelse mellan veckomedelvärden av lufttemperaturen vid sjöarna och vattentemperaturen i sjöarna uppmätt under 2006-2007.

Nya temperaturserier för vattnet i sjöarna har tagits fram genom att utgå ifrån ett års mätningar i sjöarnas yt- och djupvatten. Månatliga medelvärden av temperaturökningen har sedan adderats den uppmätta temperaturen under den isfria perioden för att få nya temperaturserier för respektive scenario.

4.4.2 Produktionsperiod

En direkt följd av ett varmare klimat är att isperiodens längd minskar. Utifrån data insamlade 1961 till 2000 från 72 sjöar fördelade över hela Sverige har Weyhenmeyer et al. (2004) visat att antalet isfria dagar, D , kan beräknas som:

$$D = 365 - \left(\left(\frac{365}{\pi} \right) \times \arccos \left(\frac{T_m}{T_a} \right) \right)$$

där T_m är årsmedeltemperatur och T_a är amplituden av månadsmedeltemperaturen (dvs. maximum av månadsmedeltemperaturen minus minimum av densamma). Emellertid mättes den isfria periodens längd 2006-2007 och därför har sambandet enbart använts för att bestämma förändringen. Det framtida värdet har alltså uppskattats genom att addera differensen mellan det beräknade framtida och det beräknade nutida värdet till dagens uppmätta värde. Denna beräkning innebär en ökning av den isfria perioden med 3 respektive 5 veckor i de två scenarier som simulerats. Förlängningen av den isfria perioden antas fördela sig jämnt mellan höst och vår. För att få en bild av den isfria periodens betydelse för ekosystemen testades även en förlängning av den isfria perioden med noll, fyra respektive åtta veckor.

4.4.3 Hydrologi

Den årliga variationen hos vattenflödet genom sjöarna är en av inparametrarna till LakeWeb. I nuläget finns inga uppmätta årsserier av flöden genom Dörrsjöarna. Därför har hydrologisk modellering (HBV) använts både för att ta fram skattningar av flödesregimen i dagens och framtidens klimat.

Dagens flödesregim är modellerad med utgångspunkt från lokala hydrologiska mätdata, medan flödet i ett framtida klimat är modellerat utifrån SMHI:s uppskattningar av framtidens temperatur och nederbörd. I båda fallen har dagliga värden på flödet tagits fram för 10-årsperioder. Av de tio år som simulerats har 1999 använts som ett typår för hur hydrologin vid Dörrsjöarna ser ut i dagens klimat. Detta är det år då det totala vattenflödet ligger närmast medianvärdet för de undersökta åren och där årsvariationen inte har några extrema avvikelser från det normala mönstret.

4.4.4 Förändrad införsel av fosfor

Det råder stor osäkerhet kring hur ett varmare klimat kan komma att påverka tillförseln av fosfor till fjällsjöar. En teori är att ett varmare klimat leder till ökad vittring. Kombinerat med ökade och intensivare flöden kan detta leda till en ökad omsättning av fosfor i landskapet. En ökad markvegetation kan också leda till större näringsämnesflöden. Fosformängden i sjön kan öka i och med att mer fosfor binds upp i organismer. Generellt gäller att fosforinnehållet i sjöar minskar med höjd över havet. Med det som bakgrund har här testats hur sjöekosystemen reagerar på en ökad fosfortillförsel. Storleksordningen på höjningen har beräknats utifrån ett samband framtaget genom en studie av sjöar på olika höjd över havet (Karlsson, 2005):

$$TP = 0,66T \times 0,30$$

där TP är halten totalfosfor och T är sjötemperaturen. Detta innebär en ökning av fosfortillförseln med 2,5 µg/l i scenario HADLEY A2 och 3,2 µg/l i scenario ECHAM A2. Denna beräkning grundar sig inte på ett perfekt samband mellan temperaturen och altituden. Korrelationskoefficienten mellan sjötemperatur och TP är 0,74.

4.4.5 Känslighetsanalys

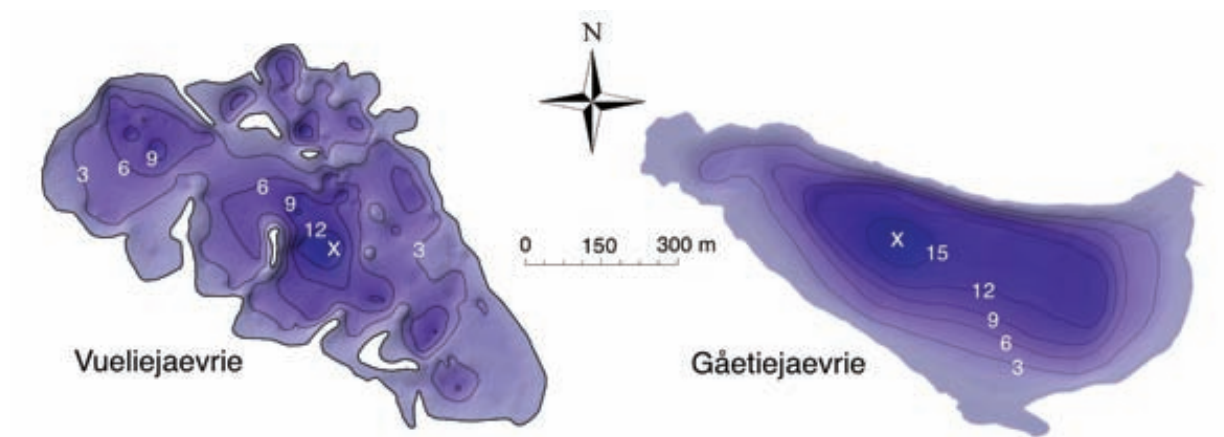
De ändringar i temperatur, produktionsperiod, hydrologi och TP som har simulerats ger upphov till olika förändringar i målvariablernas biomassa. För att få en bild av vilken av dessa förändringar som har störst betydelse för respektive målvariabel är det intressant att göra en känslighetsanalys. Fosforhalten i inflödet är den variabel som modellen är mest känslig för. För den variabeln görs en känslighetsanalys genom att jämföra variationskoefficienten (CV) i mätvärden med CV i modellresultaten. Modellens CV för de respektive funktionella grupperna beräknas utifrån 100 Monte Carlo simuleringar. För de tre klimatvariablerna fungerar inte den typen av enkel Monte Carlo simulering i och med att dessa invariabler består av långa tidsserier. I de fallen har istället tre olika alternativa tidsserier testats för respektive klimatvariabel för att få en uppfattning om känsligheten hos respektive funktionell grupp.

5 Resultat

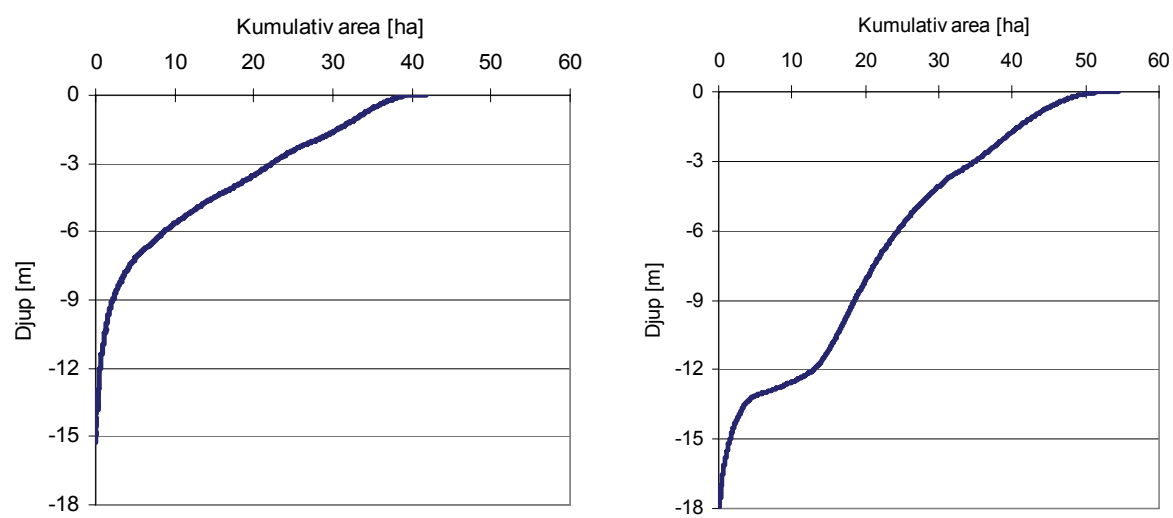
5.1 Sjödata

5.1.1 Morfometri

I Vueliejaevrie är endast en liten andel av sjön djupare än 6 meter, medan Gåctiejaevrie har en ganska stor bassäng djupare än 9 meter (figur 10 och figur 11). Sjöarnas morfometri och andra data återges i tabell 2.



Figur 10. Djupkartor över Vueliejaevrie och Gåctiejaevrie.



Figur 11. Det vänstra diagrammet visar volymutvecklingen i Vueliejaevrie och det högra i Gåctiejaevrie.

Tabell 2. Morfometri och andra data för sjöarna.

	Vueliejaevrie	Gåetiejaevrie
Sjöarea [ha]	40,4	52,0
Sjövolym [m ³]	1,55*10 ⁶	3,4*10 ⁶
Medeldjup [m]	3,8	6,3
Maxdjup [m]	15,8	18,0
Omkrets [m]	4810	3960
Avrinningsområdets storlek [ha]	380	2242
Teoretisk omsättningstid [år]	0,72	0,48

5.1.2 Limnologisk beskrivning

Några av de vattenkemiska parametrar som regelbundet mäts återfinns i tabell 3. En fullständig redogörelse för de vattenkemiprover som insamlats inom ramen för denna studie finns sammanställd i bilaga 1. Gåetiejaevrie är kalkad varje år mellan 1993 och 2005, med undantag från 1996-1998. Vueliejaevrie är aldrig kalkad (Dadell, 2008).

Tabell 3. Sammanställning av medelvärden av några av de kemiska parametrar som mäts i sjöarna.

	pH	Konduktivitet [mS/m]	Alkalinitet/ Aciditet [mekv/l]	TN [µg/l]	TP [µg/l]	TOC [mg/l]	Klorofyll [mg/m ³]	Abs F [420/5]
Vueliejaevrie	6,42	0,83	0,04	87,4	2,18	1,16	0,81	0,004
Gåetiejaevrie	6,5	1,17	0,05	86,2	2,36	1,12	1,17	0,004

För att få en bild av vattenkemin i Dörrsjöarnas inflöden togs några sådana prover sommaren 2007. Resultaten från inflödesproverna redovisas i tabell 4. Lokalisering för de olika proverna visas i figur 12 tillsammans med sjöarnas tillrinningsområden.



Figur 12. Karta över sjöarnas tillrinningsområden samt provlokaler för inflödesprovtagningen som gjordes sommaren 2007.

Tabell 4. Resultat från provtagning av vattenkemi i Dörrsjöarnas inflöden. Koderna representerar punkter i kartan i figur 12.

Kod	pH	Kond,	NH ₄ -N	NO ₂ + NO ₃	Si	Tot-N	Tot-P	PO ₄ -P	TOC	Datum
	[1]	[mS/m]	[ug/l]	[ug/l]	[mg/l]	[ug/l]	[ug/l]	[ug/l]	[mg/l]	
Z1	6,72	1,23	6	1	1,5	70	1	1	1,1	2007-07-12
Z2	6,45	1,01	23	2	1,1	119	1	1	1,0	2007-07-13
Z3	5,74	0,45	1	1	0,4	66	1	1	1,5	2007-07-14
Z4	6,93	0,99	8	1	0,9	86	1	1	1,2	2007-08-05
Z5	6,4	0,8	1	43	1,7	75	1	1	0,5	2007-07-16
Z6	6,41	0,77	10	1	1,1	64	4	1	0,9	2007-07-17

De elfisken som genomförts i Gåcticjaevries utlopp mellan 1995 och 2002 visar att röding inte förekommer i sjöarna (tabell 5). Detta stämmer väl överens med uppgifterna från de som fiskar i området. Elfisket visar på god föryngring. De sämre resultaten år 2000 och 2001 kan bero på att elfisket stördes av höga flöden.

Tabell 5. Resultat från elfiske i Gåetiejaevries utlopp.

Datum	Årsungar [antal/100 m ²]	Ettåringar och äldre [antal/100 m ²]	Totalt [antal/100 m ²]
1995-09-05	26,4	11,6	38
1996-09-16	20,7	20,2	40,9
1997-09-25	24,6	19,1	43,7
1999-09-29	15,1	13,6	28,7
2000-09-20	2,9	11,4	14,3
2001-10-03	4,7	7,9	12,6
2002-09-20	14,8	13,3	28,1

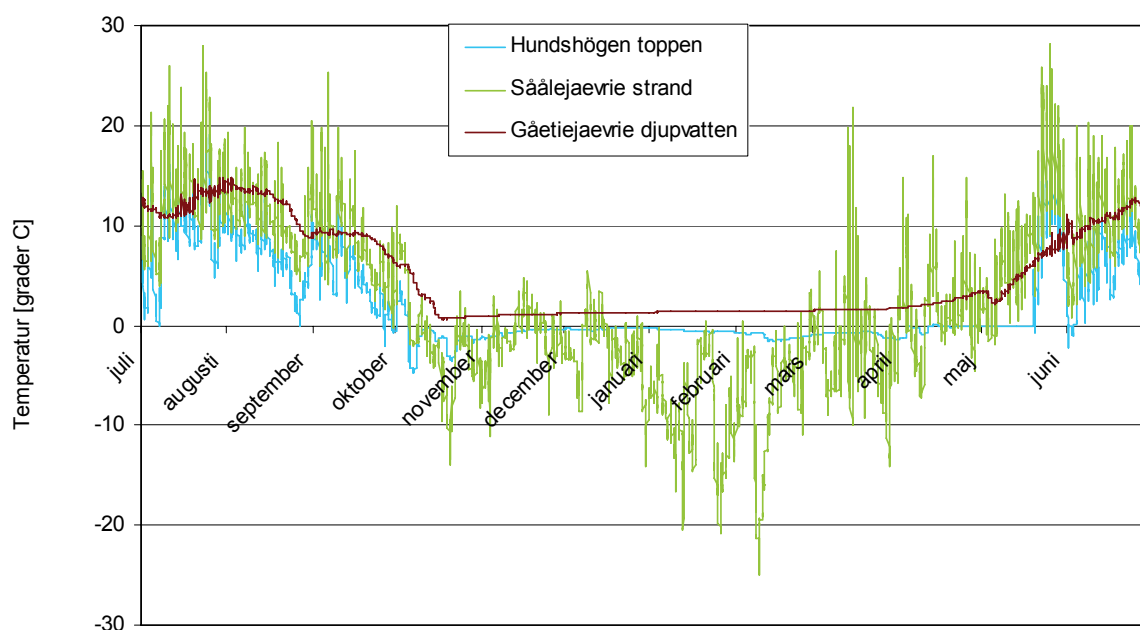
5.1.3 Temperatur

Temperaturen mättes kontinuerligt (varje timme) med hjälp av sex olika loggrar i området. Här redovisas resultat från mätningar under perioden juni 2006 till juni 2007 (tabell 6). Mätningarna visar att sjöarna endast periodvis har en antydning till skiktning. Yt- och djuptemperaturerna samvarierar i stort sett under hela året. Den grundare sjön, Vueliejaevrie, har något högre sommartemperaturer och något lägre vintertemperaturer. Årsmedeltemperaturen ligger mellan 5 och 6°C. Temperaturen 2 meter ovan vattenytan vid Såålejaevrie (sjön mellan Vueliejaevrie och Gåetiejaevrie) var som mest 28°C och som lägst

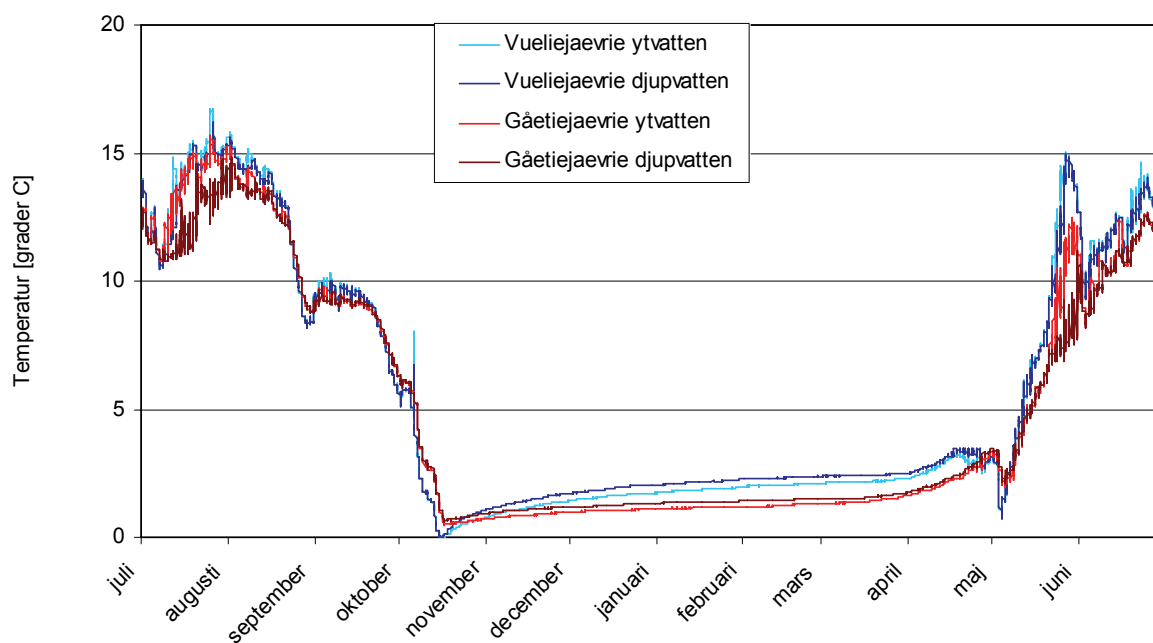
-25°C. Denna logger var placerad under taknocken på en sjöbod. Fördelen med den placeringen var att loggern var gömd och skyddad från att snöa över. Nackdelen var att strålningseffekter påverkar och överdriver de höga temperaturerna. Den logger som var placerad på Hundshögens topp (1371 m ö h) gav 19°C som högsta värde. Medelvärde och minimivärde för den mätaren är missvisande eftersom mätaren snöas igen under vinterhalvåret. Grafer över timvärden för de olika loggarna redovisas i figur 13 och 14.

Tabell 6. Sammanställning av de temperaturmätningar (°C) som genomförts i området mellan juni 2006 och juni 2007.

	Hundshögen Toppen	Sålejaure Stranden	Vueliejaevrie		Gåetiejaevrie	
			Ytvatten	Djupvatten	Ytvatten	Djupvatten
Medel	2,17	2,74	5,72	5,80	5,18	5,11
Min	-4,68	-24,99	0,00	0,02	0,47	0,58
Max	19,15	28,12	16,73	16,23	15,70	14,86



Figur 13. Uppmätta lufttemperaturer på Hundshögens topp och Såålejaevries strand samt djupvattentemperaturen i Gåetiejaevrie 2006-2007.



Figur 14. Uppmätta temperaturer i Dörrsjöarna 2006-2007.

5.2 Hydrologisk modellering — HBV

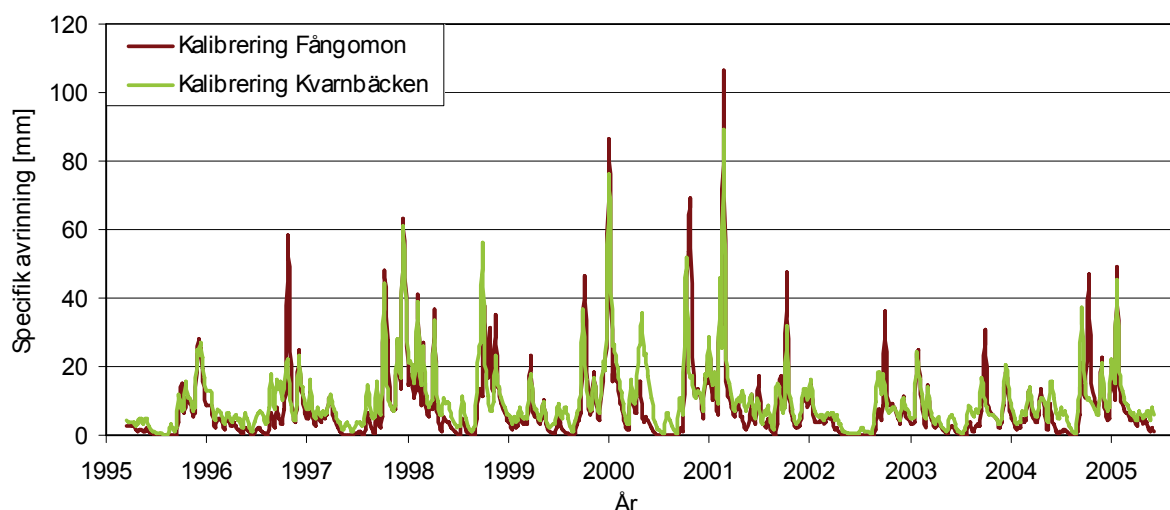
5.2.1 Kalibrering

Efter kalibreringen av parametrarna i HBV hade modelleringen av Kvarnbäckens flöde en modelleffektivitet (Nash och Sutcliff, 1970), R_{eff} , mellan 0,69 och 0,72 för de 100

bästa parameteruppsättningarna. För Fångåmon blev resultatet R_{eff} -värden mellan 0,87 och 0,89.

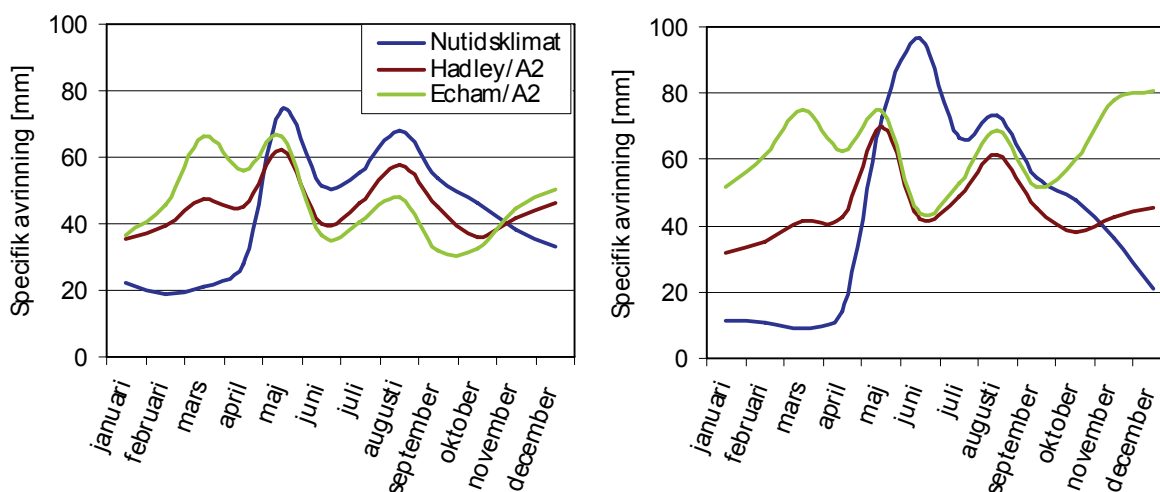
5.2.2 Analyser av dagens och framtidens flöden i Dörrsjöarna

Resultaten av modelleringen visar att de båda sätten att kalibrera modellen (med Fångåmon respektive Kvarnbäcken) ger liknande bilder av flödet. Veckomedelvärden på den specifika avrinningen beräknat över perioden 1996 till oktober 2005 visas i figur 15.



Figur 15. Diagrammet visar hur resultaten av modelleringen av hydrologin vid Dörrsjöarna påverkas av vilket referensområde som använts till kalibrering av modellen.

I samtliga modelleringar förändras flödesmönstret i ett varmare klimat mot ett väsentligt högre vinterflöde och till att vårfloedstoppen minskar. I figur 16 återges medelvärden för de tio simulerade åren. Värdena är beräknade som månadsmedelflöden.



Figur 16. Jämförelse av medelvärden av vattenflödet över tio årsperioder i olika klimat. Det vänstra diagrammet visar resultaten då Kvarnbäcken används som referensområde och det högra då Fångåmon används som referensområde i den hydrologiska modelleringen.

5.3 Näringsvävsmodellering - LakeWeb

Resultaten följer ungefär samma mönster i de båda sjöarna, men klimateffekterna i Vueliejaevrie är generellt sett något större. Mängden fiskar och bottendjur ökar endast marginellt av de direkta klimatfaktorerna, medan en ändrad fosforhalt kan mer än fördubbla mängden biomassa. Predatora djurplankton, bentiska alger och bakterioplankton visar upp likartade effekter. Hos dessa grupper ger både de ändrade klimatfaktorerna och en ökad tillförsel av fosfor en tydligt ökad mängd biomassa. Växtplankton och herbivora djurplankton svarar inte tydligt på ändringar i vattentemperatur och nederbörd, men desto tydligare på en kortare isperiod och en ökning i tillförseln av fosfor. Mängden makrofyter ökar med uppåt 50 % i ett varmare klimat. Enligt modellen har däremot en ökad fosfortillförsel en negativ inverkan på biomassan hos makrofyter och den sammantagna effekten blir därför en minskning med cirka 10 %. I tabell 7 respektive tabell 8 redovisas förändringen i årsmedelvärden av sjöarnas totala biomassa hos de olika grupperna av organismer. Tabell 9 visar produktion av biomassa per hektar och år i Vueliejaevrie.

Tabell 7. Sammanställning av förändringen i biomassa då klimatvariablerna ändras enligt de båda framtidsscenarierna. Resultaten visas som årlig procentuell förändring i respektive framtidsscenario (2071-2100) jämfört med 1999.

	Fisk	Bottendjur	Predatora djurplankton	Herbivora djurplankton	Växtplankton	Bentiska alger	Makrofyter	Bakterio- plankton
	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]
Gåetiejaevrie								
Hadley/A2	4,6	4,4	89,5	17,9	-1,1	32,8	33,8	27,5
Vueliejaevrie								
Hadley/A2	16,9	3,0	75,7	20,3	-1,2	43,8	43,6	42,8
Gåetiejaevrie								
Echam/A2	7,5	7,3	102,9	26,4	-1,0	41,1	41,8	34,6
Vueliejaevrie								
Echam/A2	24,5	9,7	90,6	33,9	0,5	54,2	50,3	50,9

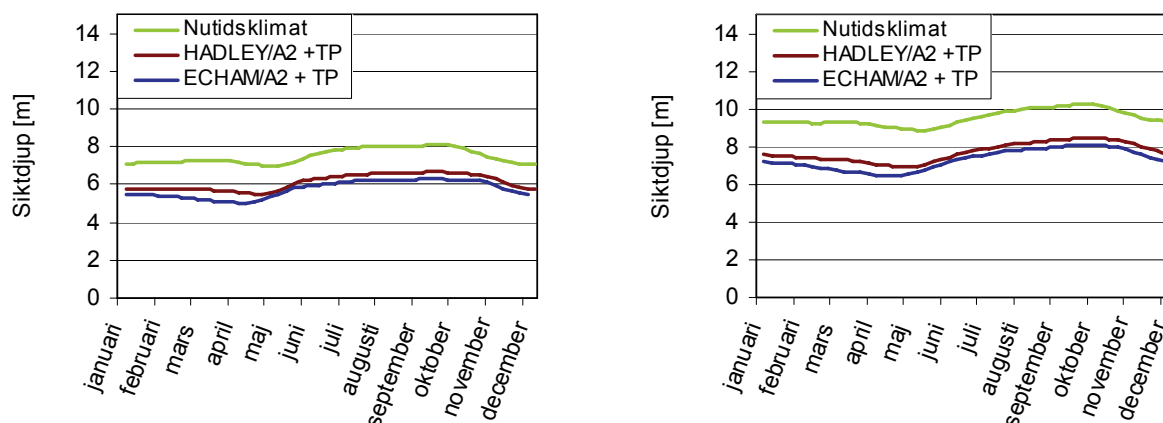
Tabell 8. Sammanställning av förändringen i biomassa då både klimatvariablerna och TP ändras enligt de båda framtidsscenarierna. Resultaten visas som årlig procentuell förändring i respektive framtidsscenario (2071-2100) jämfört med 1999.

	Fisk	Bottendjur	Predatora djurplankton	Herbivora djurplankton	Växtplankton	Bentiska alger	Makrofyter	Bakterio- plankton
	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]
Gåetiejaevrie								
Hadley/A2	116,2	91,2	124,5	76,2	47,9	65,8	-9,9	63,3
Vueliejaevrie								
Hadley/A2	121,6	98,4	129,5	76,0	48,1	83,1	-0,2	82,4
Gåetiejaevrie								
Echam/A2	159,5	130,6	148,5	105,0	61,5	86,3	-12,2	83,3
Vueliejaevrie								
Echam/A2	179,8	141,4	160,9	113,7	64,8	109,9	-10,9	105,0

Tabell 9. Årlig produktion av biomassa per hektar för respektive grupp av organismer. Jämförelse mellan produktionen i nuvarande klimat med den i scenario ECHAM/A2 i Vueliejaevrie.

	Fisk	Bottendjur	Predatorer djurplankton	Herbivora djurplankton	Växtplankton	Bentiska alger	Makrofyter	Bakterio- plankton
Vueliejaevrie nuvarande klimat [kg våtvikt/ha]	4	87	24	161	2531	1218	5011	1126
Vueliejaevrie ECHAM/A2 [kg våtvikt/ha]	5	103	47	251	2752	1878	7529	1722
Förändring jämfört med nuvarande klimat (ECHAM/A2)	38%	18%	94%	56%	9%	54%	50%	53%
Vueliejaevrie ECHAM/A2 + TP [kg våtvikt/ha]	11	217	62	363	4436	2577	5602	2295
Förändring jämfört med nuvarande klimat (ECHAM/A2 + TP)	183%	149%	158%	126%	75%	112%	12%	104%

Siktdjupet minskar i simuleringarna från 9-10 meter till 7-8 meter i Gåctiejaevrie då TP ändras. Även i Vueliejaevrie minskar siktdjupet med ett par meter, från 7-8 meter till 5-6 meter (figur 17).

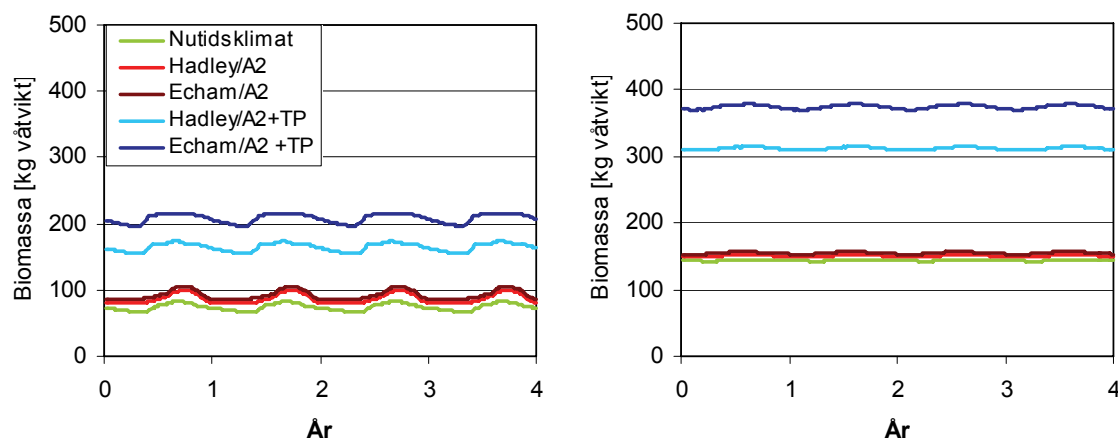


Figur 17: Det vänstra diagrammet visar de simulerade siktdjupsförändringarna i Vueliejaevrie och det högra Gåctiejaevrie.

För en mer detaljerad redogörelse av resultaten för varje funktionell grupp, se kap. 5.3.1 – 5.3.8 nedan. För enkelhets skull redovisas här endast en jämförelse mellan ett typiskt år i nuvarande klimat, 1999, och scenarierna HADLEY/A2 och ECHAM/A2. Fosfortillförseln har ökats med 2,5 µg/l i scenario HADLEY A2 och 3,2 µg/l i scenario ECHAM A2.

5.3.1 Fiskar

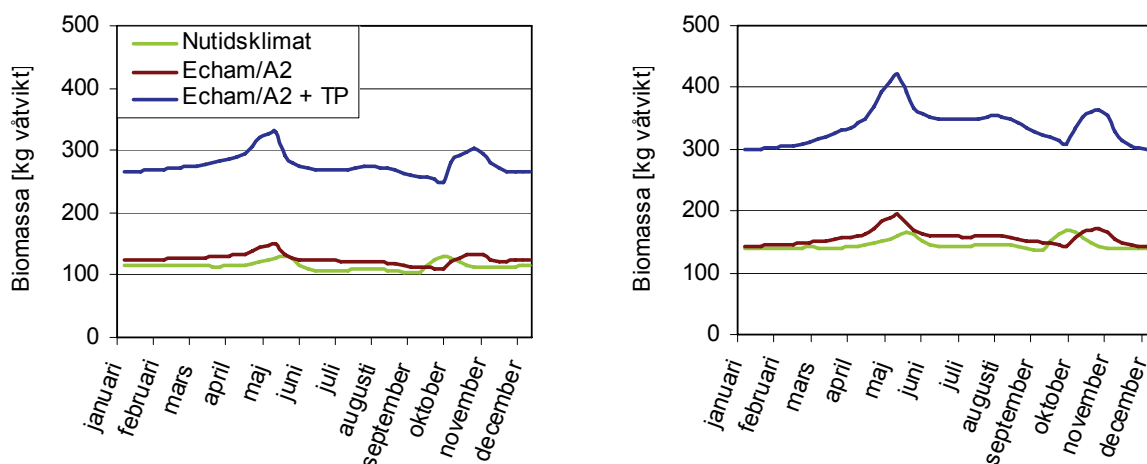
Fiskbiomassan ändras endast försumbart (några procent) av de direkta klimatförändringarna. Fiskarna är istället fosforbegränsade och ökar i takt med att tillförseln av fosfor ökar. I Vueliejaevrie ökar biomassan med 122 % i HADLEYs scenario och med 180 % i ECHAMs scenario då både klimatparametrar och TP ändras. I Gåctiejaevrie är motsvarande höjning 116 respektive 159 %. De båda typerna av sjöar verkar alltså reagera på ett likartat sätt (figur 18).



Figur 18. Årsvariationen hos fiskbiomassan över fyra år i olika klimat. Grön linje representerar 1999, röda linjer motsvarar biomassan då klimatvariablerna ändrats i enlighet med de båda framtidsscenarierna (år 2071-2100) och blå linjer motsvarar biomassan då både klimatvariabler och totalfosfor har ändrats. Det vänstra diagrammet visar resultaten för Vueliejaevrie medan det högra visar Gåctiejaevrie.

5.3.2 Bottendjur

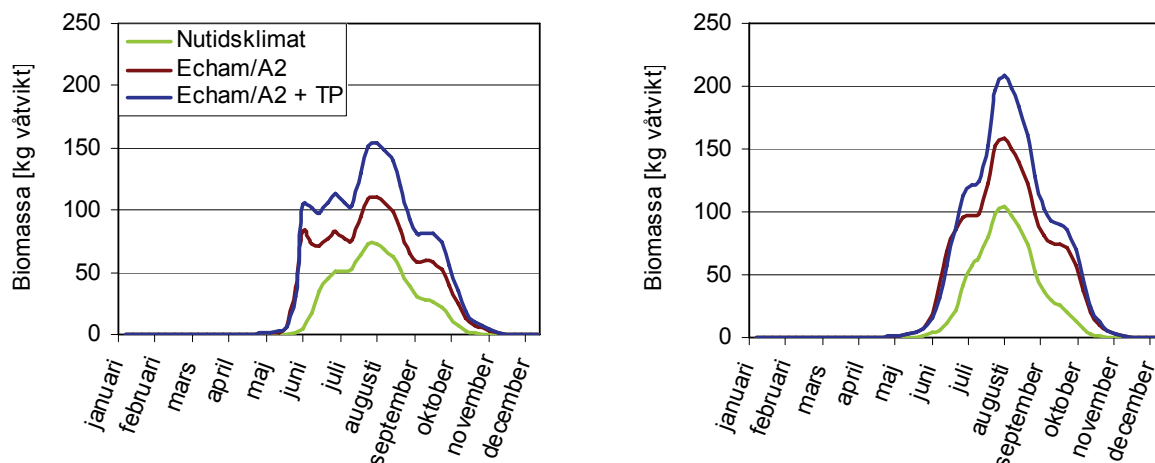
Vid en ändring av klimatvariablerna ökar bottendjurens biomassa endast med några få procent. Tidpunkten för bottendjurens vår- och hösttopp ändras däremot tydligt efter isperiodens längd. Den stora ökningen i biomassa inträffar dock först då även tillförseln av fosfor till sjöarna ökar. I Vueliejaevrie ökar biomassan med 98 % i HADLEYs scenario och med 141 % i ECHAMs scenario. Motsvarande siffror för Gåctiejaevrie är 91 respektive 131 %. Modellen reagerar alltså på ett likartat sätt för bottendjurens och fiskarnas biomassa vid en ändring av klimat och ökad tillförsel av fosfor (figur 19).



Figur 19: Årsvariationen för bottendjurens biomassa. Grön linje representerar 1999, mörkröd linje motsvarar biomassan då klimatvariablerna ändrats i enlighet med scenario ECHAM A2 (år 2071-2100) och blå linje motsvarar biomassan då både klimatvariabler och totalfosfor har ändrats. Det vänstra diagrammet visar resultaten för Vueliejaevrie medan det högra visar Gåctiejaevrie.

5.3.3 Predatora djurplankton

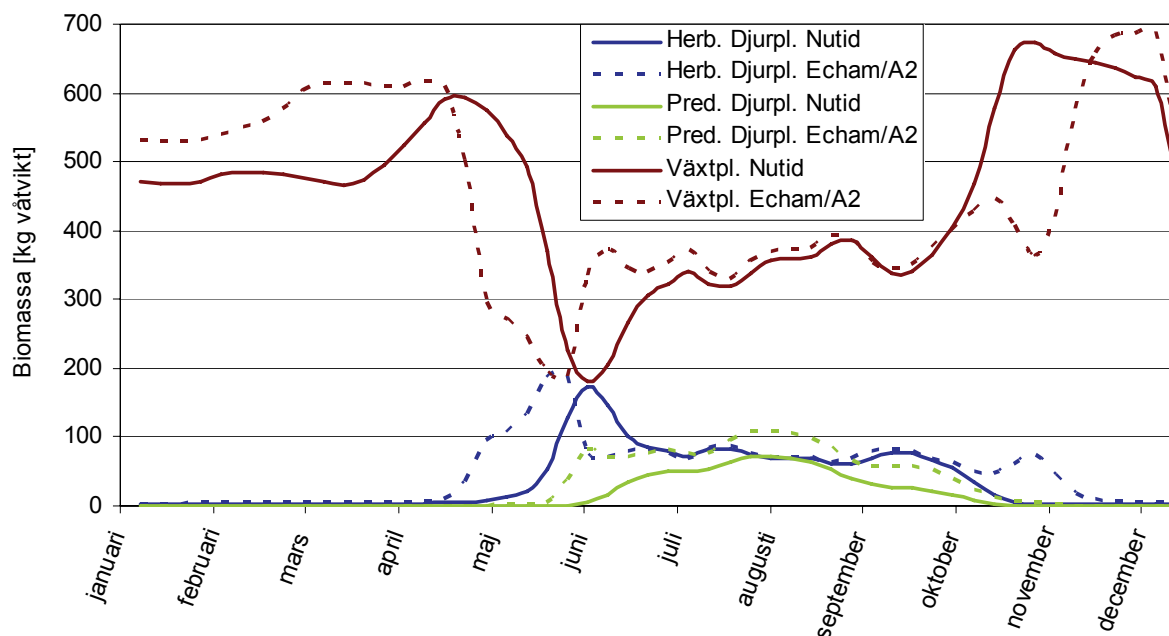
Predatora djurplankton svarar både på ett ändrat klimat och på en ändrad fosfortillförsel (figur 20). Då endast klimatvariablerna ändras ökar biomassan med 76 % och 91 % i HADLEYs respektive ECHAMs klimatscenario i Vueliejaevrie. I Gåctiejaevrie är motsvarande höjning 90 respektive 103 %. Då även fosforinförseln ändras ökar biomassan med som mest 161 % i Vueliejaevrie och 149 % i Gåctiejaevrie.



Figur 20. Årsvariationen hos biomassan av predatora djurplankton. Grön linje representerar 1999, röd linje motsvarar biomassan då klimatvariablerna ändrats i enlighet med scenario ECHAM A2 (år 2071-2100) och blå linje motsvarar biomassan då både klimatvariabler och totalfosfor har ändrats. Det vänstra diagrammet visar resultaten för Vueliejaevrie medan det högra visar Gåctiejaevrie.

Figur 21 visar ett exempel på hur växtplankton och djurplankton samvarierar under olika typer av klimat. Exemplet visar biomassornas årsvariation i Vueliejaevrie under 1999 jämfört med ECHAMs klimatscenario. För växtplankton och herbivora djurplankton

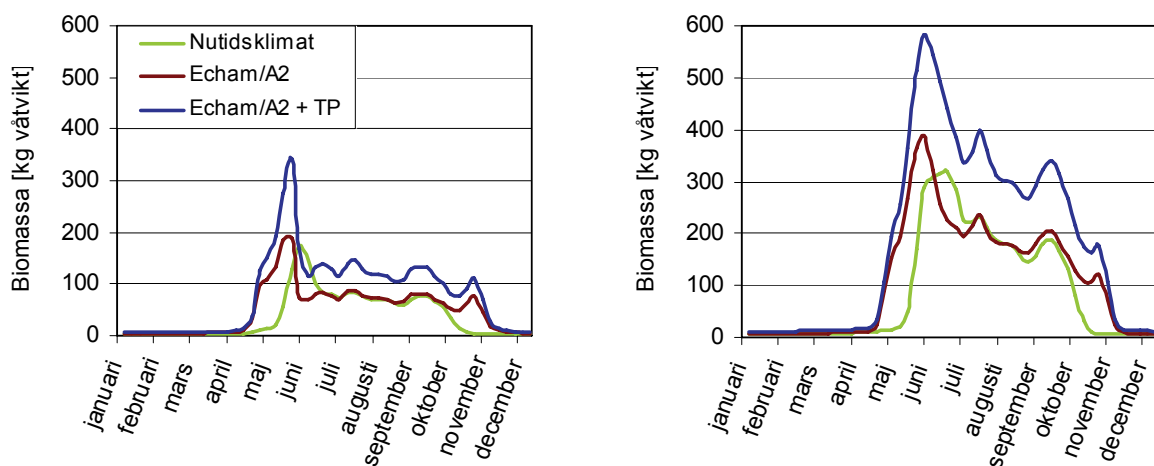
tidigareläggs produktionstoppen på våren efter tidpunkten för islossningen. Predators djurplankton kommer också igång tidigare på våren i och med en tidigare islossning. Däremot ändras inte tidpunkten för deras produktionstopp på sommaren av det ändrade klimatet.



Figur 21. Jämförelse av timing i produktionstoppar mellan växtplankton och olika typer av djurplankton i Vueliejaevrie.

5.3.4 Herbivora djurplankton

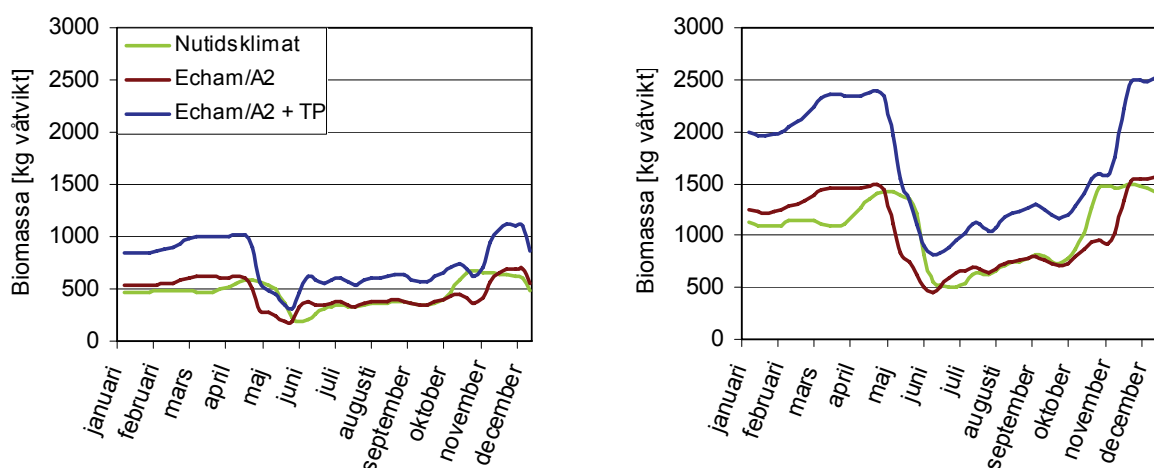
Herbivora djurplankton svarar tydligt på en ändring i isperiodens längd och ändrad införsel av fosfor, men påverkas inte nämnbart av ändringar i temperatur och nederbörd (figur 22). Den längre växtsäsongen leder till en ökning med 34 % i Vueliejaevrie och 26 % i Gåctiejaevrie med ECHAMs scenario. Då även fosforinförseln ändras ökar biomassan med som mest 114 % i Vueliejaevrie och 105 % i Gåctiejaevrie.



Figur 22. Modellerad årsvariation hos biomassan av herbivora djurplankton. Grön linje representerar 1999, röd linje motsvarar biomassan då klimatvariablerna ändrats i enlighet med scenario ECHAM A2 (år 2071-2100) och blå linje motsvarar biomassan då både klimatvariabler och totalfosfor har ändrats. Det vänstra diagrammet visar resultaten för Vueliejaevrie medan det högra visar Gåetiejaevrie.

5.3.5 Växtplankton

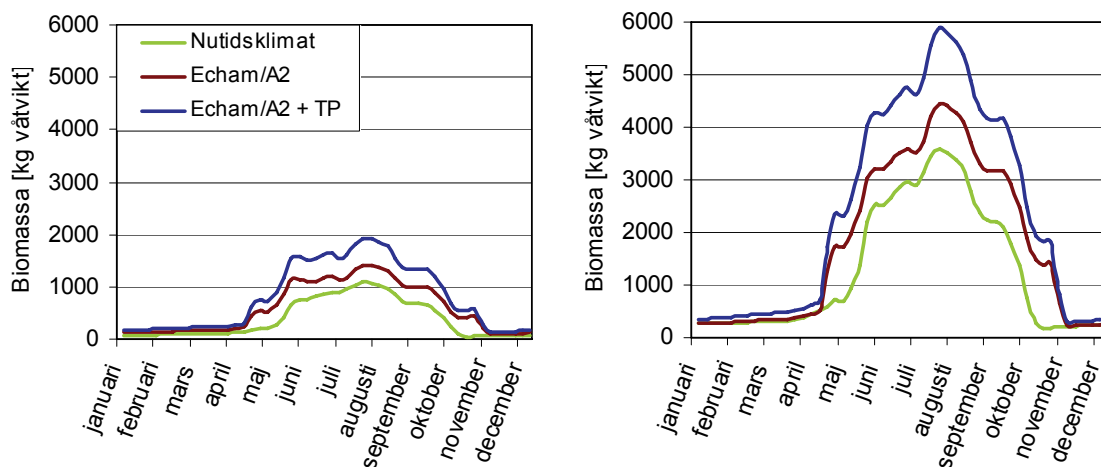
Växtplanktonbiomassan är som störst under isperioden till skillnad från de övriga grupperna (figur 23). Årsvariationen styrs tydligt av när växtsäsongen börjar och slutar. I Vueliejaevrie ökar biomassan med 48 % i HADLEYs scenario och med 65 % i ECHAMs scenario då både klimatet och fosfortillförseln ändras. Motsvarande värden för Gåetiejaevrie är 47 % respektive 61 % ökning.



Figur 23: Modellerad årsvariation hos växtplanktonbiomassan. Grön linje representerar 1999, röd linje motsvarar biomassan då klimatvariablerna ändrats i enlighet med scenario ECHAM A2 (år 2071-2100) och blå linje motsvarar biomassan då både klimatvariabler och totalfosfor har ändrats. Det vänstra diagrammet visar resultaten för Vueliejaevrie medan det högra visar Gåetiejaevrie.

5.3.6 Bentiska alger

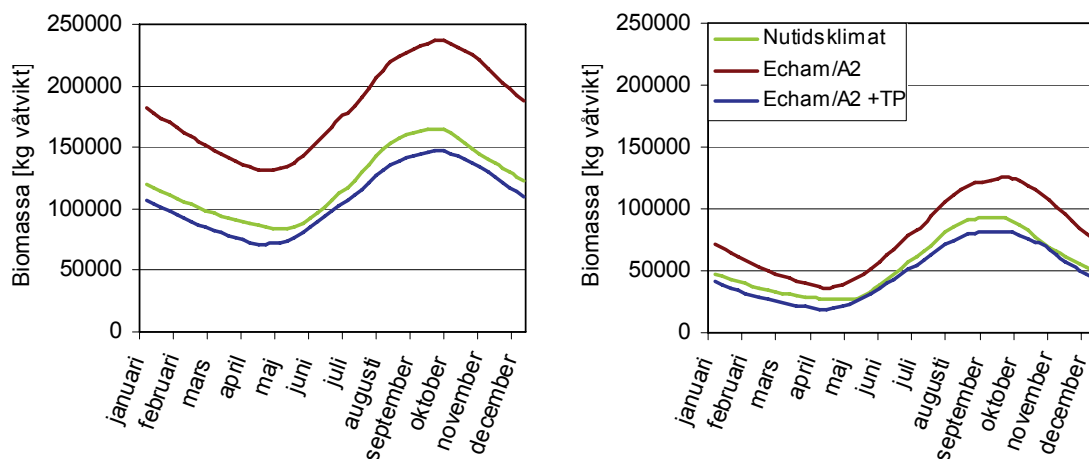
I likhet med predatora djurplankton och bakterioplankton bidrar både klimatförändringen och den ändrade fosfortillförseln till en ökning av biomassan hos de bentiska algerna (figur 24). I Vueliejaevrie ökar biomassan med 44 % respektive 54 % då klimatvariablerna ändras och till 83 % respektive 110 % då även fosfortillförseln ökar. Ökningen följer samma mönster i Gåctiejaevrie även om den procentuella ökningen inte är fullt lika kraftig.



Figur 24. Modellerad årsvariation hos den bentiska algbiomassan. Grön linje representerar 1999, röd linje motsvarar biomassan då klimatvariablerna ändrats i enlighet med scenario ECHAM A2 (år 2071-2100) och blå linje motsvarar biomassan då både klimatvariabler och totalfosfor har ändrats. Det vänstra diagrammet visar resultaten för Vueliejaevrie medan det högra visar Gåctiejaevrie.

5.3.7 Makrofyter

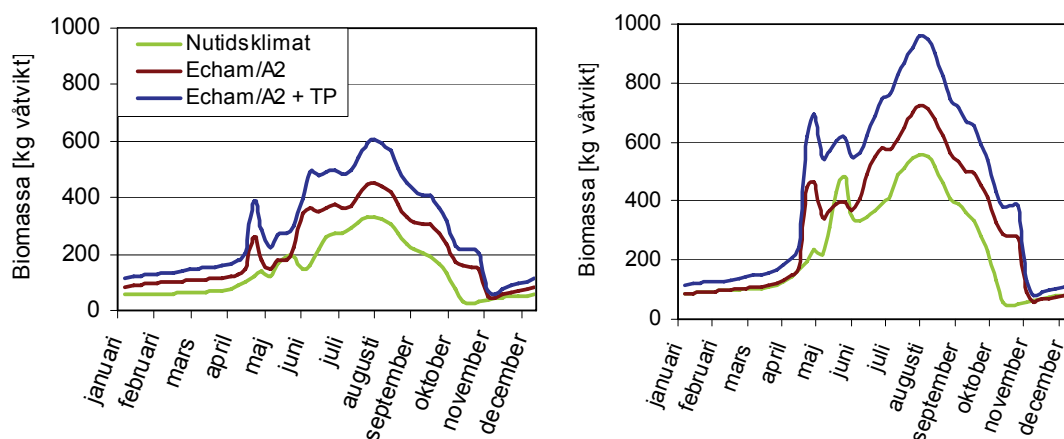
Modellen indikerar att makrofytbiomassan ökar i ett varmare klimat medan en ökad fosfortillförsel leder till en minskning (figur 25). Den grundare sjön Vueliejaevrie har en större mängd makrofyter. Då ett varmare klimat testas i Vueliejaevrie ger den en ökning med 44 % i HADLEYs scenario och med 50 % i ECHAMs scenario. I Gåctiejaevrie är motsvarande ökning 34 % och 42 %. Då ett varmare klimat kombineras med en ökad fosfortillförsel blir den sammantagna effekten en minskning av biomassan med som mest 11 % i Vueliejaevrie och 12 % i Gåctiejaevrie.



Figur 25. Modellerad årsvariation hos makrofytbiomassan. Grön linje representerar 1999, röd linje motsvarar biomassan då klimatvariablerna ändrats i enlighet med scenario ECHAM A2 (år 2071-2100) och blå linje motsvarar biomassan då både klimatvariabler och totalfosfor har ändrats. Det vänstra diagrammet visar resultaten för Vueliejaevrie medan det högra visar Gäctiejaevrie.

5.3.8 Bakterioplankton

Bakterioplankton svarar både på ett ändrat klimat och på en ändrad fosfortillförsel (figur 26). Biomassans vårtopp tidigareläggs efter tidpunkten för islossningen. Den sammanlagda årsbiomassan ökar i Vueliejaevrie med 43 % med HADLEYs klimatscenario och med 51 % i ECHAMs klimatscenario. Motsvarande värden för Gäctiejaevrie är något lägre, 27 % respektive 35 %. Att dessutom öka tillförseln av fosfor ger som mest en ökning av biomassan med 105 % i Vueliejaevrie och med 83 % i Gäctiejaevrie.



Figur 26. Modellerad årsvariation hos bakterioplanktonbiomassan. Grön linje representerar 1999, röd linje motsvarar biomassan då klimatvariablerna ändrats i enlighet med scenario ECHAM A2 (år 2071-2100) och blå linje motsvarar biomassan då både klimatvariabler och totalfosfor har ändrats. Det vänstra diagrammet visar resultaten för Vueliejaevrie medan det högra visar Gäctiejaevrie.

5.4 Känslighetsanalys

Monte Carlo simuleringen av TP visar att fosforhalten har en avgörande betydelse för hur modellen svarar för samtliga målvariabler. En typisk variationskoefficient (CV) för TP i sjöar är 0,35 (Håkanson, 1995). Tabell 10 visar de CV-värden modelleringen ger upphov till.

Tabell 10. Sammanställning av de CV-värden TP ger upphov till i modelleringen för de olika funktionella grupperna.

	Fisk	Bottendjur	Predatorer djurplankton	Herbivora djurplankton	Växtplankton	Bentiska alger	Makrofyter	Bakterio- plankton
Gåetiejaevrie	0,36	0,29	0,18	0,18	0,23	0,10	0,26	0,15
Vueliejaevrie	0,32	0,33	0,07	0,28	0,18	0,12	0,14	0,08

Vattentemperaturen har enligt modellen väldigt stor betydelse för biomassan av predatorer djurplankton. Den temperatur som förväntas om ca 100 år kan innebära att biomassan nära fördubblas för denna organismgrupp. Även för bentiska alger, makrofyter och bakterioplankton ger temperaturökningen stora ökningar i mängden biomassa. Herbivora djurplankton gynnas också medan växtplankton och bottendjur missgynnas av ökade temperaturer. Modellen visar dock inga större förändringar av fiskbiomassan vid ökade temperaturer. I det här fallet ger temperaturökningen en liten ökning i fiskbiomassan i Vueliejaevrie medan Gåetiejaevrie får en liten minskning. Tabell 11 visar den procentuella skillnaden i en jämförelse mellan temperaturen 1999 och i de båda framtidsscenarierna.

Tabell 11. Temperaturens inverkan på den totala årsbiomassan. Tabellen visar procentuell skillnad (jämfört med 1999) då temperaturen höjs enligt de båda scenarierna, medan nederbörd, växtsäsong och TP hålls konstanta.

	Fisk	Bottendjur	Predatorer djurplankton	Herbivora djurplankton	Växtplankton	Bentiska alger	Makrofyter	Bakterio- plankton
	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]
Gåetiejaevrie								
Hadley/A2	-6,8	-4,5	95,9	14,4	-9,2	31,7	46,4	22,2
Vueliejaevrie								
Hadley/A2	2,4	-9,8	61,3	14,3	-9,7	30,6	41,6	22,3
Gåetiejaevrie								
Echam/A2	-7,4	-5,1	114,0	15,1	-9,8	36,4	52,8	25,8
Vueliejaevrie								
Echam/A2	3,6	-10,8	72,6	14,6	-10,0	35,2	47,2	26,2

Små variationer i produktionsperiodens längd har endast mindre effekter på biomassorna. Djurplankton, bentiska alger, makrofyter och bakterioplankton gynnas svagt medan fiskar, bottendjur och växtplankton missgynnas av en fyra veckor produktionsperiod. Stora förändringar i produktionsperioden kan dock ge betydande effekter för predatorer djurplankton och makrofyter. Hos dessa grupper ökar biomassan med uppemot 50 % vid en åtta veckors ökning av produktionsperiodens längd. Tabell 12 visar den procentuella skillnaden då produktionsperiodens längd ökas med fyra respektive åtta veckor jämfört med en typisk period i nutidens klimat (24 veckor).

Tabell 12. Produktionsperiodens inverkan på den totala årsbiomassan. Tabellen visar procentuell skillnad (jämfört med 1999) då växtperioden förlängs fyra respektive åtta veckor jämfört med en typisk växtsäsong i nutidens klimat (24 veckor). Övriga variabler hålls konstanta.

	Fisk	Bottendjur	Predatora djurplankton	Herbivora djurplankton	Växtplankton	Bentiska alger	Makrofyter	Bakterio- plankton
	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]
Gäetiejaevrie + 4 veckor	-4,7	-4,4	13,1	15,0	-6,8	11,3	20,1	5,1
Vueliejaevrie + 4 veckor	-4,6	-7,5	13,7	10,8	-7,9	9,9	17,7	5,2
Gäetiejaevrie + 8 veckor	-9,4	-8,3	53,9	26,3	-13,0	28,6	50,1	16,1
Vueliejaevrie + 8 veckor	-3,8	-10,9	42,6	21,9	-12,7	27,1	41,6	18,3

De förändringar i hydrologin som förutspås visade sig endast ha liten inverkan på ekosystemen i sjöarna enligt LakeWeb. Valet av parameteruppsättning i den hydrologiska modelleringen har endast marginell effekt på slutresultatet av näringsvävsmodellen. Därför redovisas här endast resultaten då Kvarnbäckens parameteruppsättning använts. Förändringarna i hydrologin har en negativ effekt på predatora djurplankton och makrofyter, medan övriga grupper gynnas (tabell 13).

Tabell 13. Hydrologins inverkan på den totala årsbiomassan. Tabellen visar procentuell skillnad (jämfört med 1999) då vattenflödets säsongsvariation och intensitet ändras enligt de båda scenarierna samtidigt som övriga variabler hålls konstanta.

	Fisk	Bottendjur	Predatora djurplankton	Herbivora djurplankton	Växtplankton	Bentiska alger	Makrofyter	Bakterio- plankton
	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]	[% skillnad]
Gäetiejaevrie Hadley/A2	10,4	8,1	-6,9	4,2	6,3	1,4	-5,9	4,2
Vueliejaevrie Hadley/A2	9,8	8,4	-1,4	5,1	6,0	2,0	-3,3	3,4
Gäetiejaevrie Echam/A2	15,3	11,9	-11,7	6,0	9,3	1,8	-8,5	6,2
Vueliejaevrie Echam/A2	20,8	17,1	-1,8	10,4	12,0	4,4	-6,4	6,8

6 Diskussion

6.1 Hydrologisk modellering

Det fanns två huvudanledningar till att särstudera hydrologin inom ramarna för denna studie. Dels saknas det idag kunskap om hur hydrologin högt uppe i fjällsjöar kommer att påverkas av klimatförändringar, dels saknas kunskap om hur stor roll säsongsvariationer i hydrologin påverkar fjällsjöars näringsväv. Ett alternativ till modellering hade varit att använda grova uppskattningar av vattenflödet. Men en sådan förenklad bild av säsongsvariation inte hade kunnat ge svar på hydrologins inverkan på näringsväven. Ett annat alternativ hade varit fältnätningar av flöden, något som är både kostsamt, svårt och osäkert för dessa typer av fjällvatten i stenig och blockig terräng. Mätningar hade heller inte

kunnat förutspå det framtida klimatets hydrologi eftersom historiska tidsserier saknas. I det här projektet föll valet därför på modellering med hjälp av HBV-modellen, ett kostnadseffektivt sätt att få en uppfattning om ungefärliga flödesregimer i nuvarande och framtida klimat. Vi kunde utifrån modellresultaten konstatera att hydrologin förändras med ett utjämnat vårflöde och högre vinterflöden som tydliga effekter av klimatförändringarna. Däremot visar resultaten av näringsvävsmodelleringen att dessa hydrologiska förändringar inte är av någon avgörande betydelse för ekosystemens förändring framöver. Sjöarna agerar helt enkelt som buffertzoner för flödet och jämnar ut flödespulser. Viktiga faktorer här är sjöarnas och organismernas omsättningstider och dessa är i regel för långa för att kunna påverkas av de variationsförändringar som är att förvänta i vattenflödet. Dessa resultat ger också stöd för bedömningen att den noggrannhet i flödesinformation som HBV ger är fullt tillräcklig för den här studien.

6.2 Näringsvävsmodellering

6.2.1 Fosforhalter

Eftersom syftet med denna studie var att förutspå eventuella förändringar i näringsväven på grund av ett nytt klimat föll valet på en generell näringsvävsmodell (LakeWeb). Alternativen till LakeWeb är få, om man vill ha med hela näringskedjan och dessutom en dynamik i modelleringen. Andra modellansatser som använts för dynamisk ekosystemmodellering är till exempel ECOSIM-approachen som med olika tilläggsmoduler kan modellera akvatiska ekosystems respons på miljöförändringar (t.ex. Pauly m.fl., 2000) men den ansatsen hade varit alltför resurskrävande beträffande datainsamling och modellering för att passa syftet i denna studie. En av utmaningarna med att använda LakeWeb har varit att identifiera vilka processer och vilka indata som påverkas av klimatförändringarna. Ett antal processer som i LakeWeb är generella har även förfinats där vi haft mer kunskap än vad som behövs för att köra modellen. Det har sannolikt minskat osäkerheterna i modellresultaten. Det som har bidragit till ökad modellosäkerhet är det faktum att vi ligger i utkanten av vad modellen klarar av beträffande näringshalt och färgtal. Eftersom modellen ursprungligen är konstruerad för en rad olika typer av sjöar som ligger inom vissa intervall beträffande kemiska, biologiska och geografiska förhållanden kan man konstatera att Dörrsjöarna ligger i utkanten av vad modellen är framtagen för (modellens domän, eller range) beträffande näringsstatus. LakeWeb är framtagen med data från 52000 sjöar med totalfosforkoncentrationer mellan 2-300 µg/l. I Dörrsjöarna ligger nivån på 1-4 µg/l. Mycket av projektiden har gått åt till modellanpassningen, med den fördelen att det nu finns en modellstruktur som enkelt och snabbt går att applicera på nya frågeställningar om miljöförändringar i fjällsjöar.

Halten totalfosfor (TP) i inflödande vatten har en avgörande roll för predikterade biomasseförändringar. Detta bedöms som rimligt med tanke på sjöarnas låga fosforhalter. Men det finns liten kunskap om hur införseln av fosfor kommer att ändras som en följd av ett nytt klimat. Den beräkning som används här för att få

en bild av ändrad fosfortillförsel grundar sig på ett samband mellan temperatur och totalfosfor (korrelationskoefficient 0,74) och bygger på data framtagna av Jan Karlsson, CIRC, Abisko. I Karlssons studie (Karlsson m.fl., 2005) inverkar även naturliga variationer mellan sjöar, exempelvis olika berggrundsförhållanden. Höjningarna i TP ska alltså ses som exempel på möjliga framtida förändringar. En ytterligare förenkling som är gjord i antagandet om en framtida ökad fosforbelastning är att ingen hänsyn tas till eventuella säsongsvariationer i förändringen.

6.2.2 Organiskt kol

En begränsning med LakeWeb för den aktuella frågeställningen är att den inte kan ta hänsyn till förändringar i tillförseln av terrestriskt kol. Det finns studier som visar att siktdjupsförändringar just på grund av en ökad DOC-halt kan bli en av de viktigaste klimateffekterna i sjöar, åtminstone på lång sikt. Ökningen av trädbiomassa i avrinningsområdet ger både en ökad tillförsel av DOC och förändringar i kolets biotillgänglighet och kvalitet (Giesler m.fl., 2007). Ett ökat vattenflöde i framtiden kommer också att bidra till ett brunare vatten med mer organiskt material (Bishop m.fl., 2007). Fjällsjöar domineras normalt av bentisk, autokton produktion. I klara, små sjöar sker 80–90 % av primärproduktionen på botten i form av bentiska alger. Vid en ökad tillförsel av organiskt kol från den terrestra miljön väntas produktionen bli mer och mer heterotrof och pelagiskt dominerad (Karlsson, 2007). Karlsson förutspår att klimatförändringarna på lång sikt kommer att innebära att heterotrofa bakterier gynnas tillsammans med växtplankton och zooplankton medan bottendjur och bentiska alger missgynnas av det minskade ljusinsläppet. I den här studien syns inga tecken på att siktdjupet minskar i så hög grad att det överväger de positiva effekterna för bottendjur och bentiska alger. Det skulle kunna förklaras med att den här studien inte tar hänsyn till de siktdjupsminskningar som en eventuellt ökad tillförsel av organiskt material och terrestriskt kol skulle innebära.

Hur och i vilken takt klimatet kommer att påverka införseln av organiskt kol är idag oklart. Det finns forskning som indikerar att minskningen i surt nedfall kan vara en förklaring till de ökningar av DOC-halten i fjällvatten som dokumenterats de senaste två årtiondena (de Wit, 2007). Det finns även många andra faktorer som påverkar TOC-koncentrationer i sjöar (Rosén, m.fl., 2007); I boreala skogssjöar är myrformationer, frekvensen av skogsbränder och fuktighet de viktigaste faktorerna. I subarktiska sjöar spelar förändringar i vegetation och i det aktiva lagret i permafrosten stor roll och i alpina sjöar finns, enligt Rosén, en stark korrelation mellan klimat och TOC.

TOC-halter på 2-3 mg/l motsvarar i fjällsjöar normalt ca 15 meters siktdjup (Karlsson, 2008). Det skulle innebära ändrade förutsättningar för Gåetiejaevrie först när TOC-halten ökar till ungefär den dubbla. I den grundare sjön Vueliejaevrie skulle det krävas ännu större förändringar innan någon betydande ändring i ekosystemets förutsättningar skulle orsakas av ökning i tillförseln av organiskt kol. Sammantaget ger detta att LakeWebs resultat med beaktande av eventuella förändringar i TOC kan förväntas vara realistiska.

6.3 Resultat

Modelleringen visar inga större förändringar av fiskbiomassan vid ökade temperaturer. Detta är i sig något oväntat eftersom en ökad temperatur i det storleksintervall som scenarierna anger, borde leda till en avsevärt ökad tillväxt. Därmed skulle även biomassan öka under förutsättning att inte konkurrensförhållanden eller mortalitet påverkas. Eftersom det inte finns någon modellkoppling mellan näringsinförsel och ökad sjötemperatur medför inte temperaturökningen i sig någon ökad biomassa i sjön så förklaringen till den uteblivna ökningen är att födobasen, i första hand plankton och bottendjur, inte ökar i tillräcklig utsträckning. Vid ökad temperatur kan fisken vara mer aktiv och äta mer, men begränsas av födotillgången. En ökad temperatur ger i stort sett bara omfördelningar av näring i sjön, inget tillskott, och därför kan inte den totala biomassan öka. Detta beror på att förutom via intransport med vatteninflödet kan ett fosfortillskott bara komma från sedimenten (se figur 7) och dessa flöden är inte i samma storleksordning som övriga fosforflöden i modellen utan en faktor tio lägre.

Varje fiskart har sina speciella temperaturpreferenser. Tabell 14 visar exempel på optimal temperatur samt övre temperaturgräns för några fiskarters tillväxt (Elliott m.fl., 2000). Övre temperaturgräns för tillväxt innebär att fiskarna blir passiva och slutar äta. Är temperaturen högre än den övre gränsen under en längre tid (ca 2 veckor) dör fiskarna. Dessa samband gäller under förutsättning att födotillgången är obegränsad.

Tabell 14. Optimal temperatur för tillväxt samt övre temperaturgräns för tillväxt för några fiskarter.

	Optimal temperatur för tillväxt. [°C]	Övre temperaturgräns för tillväxt. [°C]
Öring	14-16	23-25
Lax	18-19	24
Röding	16-17	21
Abborre	25	29-30

Det finns även studier som visar hur tillväxthastigheten hos olika fiskarter förändras beroende på temperaturen. I experiment med i övrigt optimala förhållanden (obegränsad födotillgång o.s.v.) visas i en rapport av Elliott (2000) på tydliga samband mellan temperatur och tillväxt hos öring. Om dessa samband appliceras på Dörrsjöarna och de olika klimatscenarierna testas, erhålls en ökning i tillväxt med uppemot 50 % på ett år (Tabell 15). Exemplet bygger på en jämförelse av hur mycket en 10g (ca 2 år gammal) fisk ökar i vikt under ett år under nuvarande respektive framtida temperaturförhållanden.

Tabell 15. Vikten efter ett års tillväxt för en öring (2-årig) som första juni vägde 10g. Tillväxt redovisas för nuvarande temperaturregim samt för de två framtida scenarierna för temperatur.

	Nuvarande klimat [g]	ECHAM/A2 [g]	HADLEY/A2 [g]
Gåtiejaevrie	38,2	59,1	55,9
Vueliejaevrie	44,7	64,0	60,8

En annan aspekt som inte modelleras i den här studien är eventuella förändringar i artsammansättningen hos de olika grupperna av organismer. LakeWeb är en generell näringsvävsmodell som arbetar med funktionella grupper och för att göra artspecifika prediktioner krävs antingen detaljerade data för konsumtion och produktion eller ett antagande om att en viss funktionell grupp bara kan utgöras av en specifik art. Fördelarna med att modellera med funktionella grupper istället för med enskilda arter är många. Till exempel behöver man inte data på enskilda arters födoval och konsumtionshastigheter och ju färre modellvariabler man tillför desto lägre kan man hålla den totala modellosäkerheten. Grundidén är att en funktionell grupp alltid utför ett ”jobb” i ekosystemet och försvinner en art så görs det ”jobbet” av någon annan. En svaghet med konceptet funktionella grupper är att artfattiga system inte har samma breda artbas att hitta balans ifrån. De funktionella grupperna blir väldigt beroende av enskilda arters levnadsvillkor och födoval. I LakeWeb finns inte data för enskilda arter inlagda. Vill man förfinas modelleringen ytterligare vore nästa steg att ersätta födoval och konsumtionshastigheter med artspecifika data för exempelvis öring i olika åldrar. LakeWeb hanterar fisk i två funktionella grupper, rovfisk och bytesfisk. Eftersom sjöarna är så artfattiga beträffande fisk har vi valt att redovisa fiskbiomassan ihopslagen och detta ger givetvis en begränsning för vilka analyser man kan göra om utvecklingar i fiskbestånden.

Klimatförändringen kan innebära en risk för invasion av främmande arter av fiskar som till exempel gädda. Gäddinvasioner i fjällsjöar kan innebära stora förändringar för ekosystemen, dels genom att röding slås ut som en följd av konkurrens och predation, dels genom följd effekter neråt i näringskedjan (Byström m.fl., 2007). Abborre och sik kan också vandra uppströms i och med mildare klimatförhållanden men är inte lika skickliga vandrare som gädda. Abborre kan dock samexistera med öring/röding. Något invandringsscenario för Dörrsjöarna går inte att få fram utifrån modelleringarna med LakeWeb. Avgörande för den framtida artsammansättningen i dessa sjöar är dels vilka arter som finns närmast nedströms, i systemet, dels vilka förutsättningar de har att kolonisera i uppströmsriktning. Dörrsjöarnas utlopp, Lekarån, mynnar så småningom i Dammån vid Bydalen. Den rinner sedan ut i Ockesjön och den stora Indalsälven. I Dammån och Dalsjön vid Bydalen finns förutom öring, även harr, gädda, elritsa och röding. Sik och abborre finns längre nedströms men torde ha svårt ens nå till Bydalen, även om klimatet blir varmare. Detta som en följd av de vandringshinder som finns i Dammån. Även i Lekarån, finns flera naturliga vandringshinder som helt omöjliggör för ett flertal fiskarter att tränga uppströms till Dörrsjöarna. Öring bör kunna vandra upp, åtminstone i samband med högre flöden, men sämre simmare som gädda och harr torde inte kunna

passera de brantaste partierna. Sammantaget så är det alltså inte troligt att dagens fiskfauna i Dörrsjöarna (öring och elritsa) kommer att förändras som en följd av climateffekter. Men sett i ett större perspektiv är det mycket troligt att förskjutningar i fiskartsammansättning i många sjöar är att förvänta som en följd av kommande klimatförändringar (Klimat- och sårbarhetsutredningen, 2007).

Den här studien ger siktdjupsminskningar på ett par meter på hundra års sikt på grund av en ökad näringstillförsel. Om klimatförändringarna även skulle leda till en ökning i tillförseln av organiskt material skulle siktdjupet kunna minska ytterligare. Många studier indikerar att de bentiska algerna förväntas minska i takt med att siktdjupet minskar i ett framtida klimat. En liten ökning av TOC skulle kunna vara stimulerande i så här pass klara vatten, men en kraftig siktdjupsförändring skulle göra att de bentiska algerna missgynnas (Karlsson, 2008).

Makrofyterna gynnas av ett varmare vatten, men missgynnas enligt LakeWeb av att fosforhalten ökar. Det är därför svårt att säga om den sammanlagda effekten blir positiv eller negativ. Det är dock osäkert om de relativt låga halterna av TP ($<10 \mu\text{g/l}$) verkligen kan leda till så stora förändringar i makrofytbiomassan som modellen anger (Weyhenmeyer, 2008).

6.4 Implikationer för miljöövervakningen

Det sker idag en utbredd nationell och regional övervakning av vatten i Sverige. Tyvärr är denna provtagning idag dåligt utbyggd i fjällvattnen. I och med att ekosystemen i dessa vatten kan komma att påverkas mycket av klimatförändringarna vore det önskvärt med en riktad utvidgning av den nationella miljöövervakningen mot dessa känsliga miljöer.

Fosfortillförseln har visat sig vara av avgörande betydelse för samtliga målvariabler i den här typen av oligotrofa vattenekosystem. Särskilt gäller detta för fiskar och bottendjur, som verkar kunna öka sina biomassor till över det dubbla vid en höjning av fosforinförseln med 2-3 $\mu\text{g/l}$ (d.v.s. ungefär en fördubbling av mängden fosfor i vattnet). Därför är det viktigt att förändringar i vattnens fosforhalt övervakas.

Siktdjupet i sjöarna förväntas minska med ett par meter på 100 års sikt. I mycket klara fjällsjöar är dock inte siktdjupet den begränsande faktorn. Ibland överstiger siktdjupet sjöns djup. Förändringar i siktdjup är inte relevanta förrän det påverkar den fotiska zonen och gör att delar av vattenmassan och bottenarna inte nås av allt ljus. Det är dock en enkel och billig variabel att mäta som enkelt kan innefattas i all sjöprovtagning.

Vattentemperaturen är en viktig parameter för makrofyter, djurplankton, bentiska alger och bakterioplankton. Den har visat sig vara enkel och billig att mäta med den metod vi provat ut. Genom att mäta både yt- och djupvattentemperaturen får man även information om ändringar i graden av skiktning. Modellen visar även att tiden för isläggning och islossning är viktig för årscyklerna hos alla

plankton och alger. Genom att logga temperaturen på timbasis kan man göra noggranna analyser av eventuella förändringar både i års- och mellanårsvariationer.

Växtplankton svarar direkt på en ökad tillförsel av fosfor och en ändrad växtsäsong. Det är därför viktigt att den klorofyllprovtagning som finns inom de nationella trendsjöarna utökas i fjällen. Växtplankton utgör en näringsbas för sjöns ekosystem och förändringar i växtplankton påverkar hela näringskedjan i sjön.

För bottenfauna förutspås stora förändringar i biomassa om fosfortillförseln ökar. För att ha en överblick av förändringar i artsammansättning och påverkan på den biologiska mångfalden är det viktigt med bottenfaunaprovtagning. Bottenfauna mäts redan idag i de nationella trendsjöarna. Dessvärre ingår detta moment ofta inte i de regionala trendsjöarna. Det vore positivt om bottenfauna kunde prioriteras i alla trendsjöar – eller åtminstone de som ligger i fjällen. Inledningsvis rekommenderas att bottenfauna provtas en gång per år. Om en stabil tidsserie etableras utan trender kan provtagningen minskas till vart femte år. I och med att de stora förändringarna i bottenfaunans biomassa förväntas först om TP ökar kan bottenfauna övervakas mer sällan så länge inga tendenser till ökning i tillförseln av TP detekterats (efter att en stabil dataserie med referensvärden etablerats).

Makrofytter är en intressant grupp som det är svårt att förutsäga trender för i och med att de gynnas kraftigt av den ökade temperaturen samtidigt som de missgynnas kraftigt av en ökning i fosforhalten. Modellresultaten för makrofytter måste därför betraktas som osäkra. Det är sannolikt att makrofytterna påverkas i olika riktning i olika fjällsjöar beroende på avrinningsområdets benägenhet att tillföra ökade mängder fosfor. Den här studien indikerar dock att effekterna för gruppen som helhet ungefär tar ut varandra och att det inte blir några stora förändringar i den totala mängden makrofytbiomassa. Kvalitativ övervakning av makrofytter enligt Naturvårdsverkets undersökningstyp är mycket resurskrävande. Här rekommenderas istället en enkel fotodokumentering från land och båt vid väldefinierade lokaler i samband med vattenkemiprovtagningen. Om stora förändringar skulle upptäckas i jämförelsen av fotoserierna kan mer omfattande och detaljerad makrofyttundersökning övervägas.

Den grupp av organismer som enligt modellresultaten reagerar kraftigast på de direkta klimatförändringarna är predatora djurplankton. Växtplankton gynnas också sannolikt av ett varmare klimat, men detta syns inte lika tydligt i mätningar i och med att de äts upp av organismer högre upp i näringskedjan. Här krävs en kvantitativ analys för att beskriva trender och få en bild av ekosystemet. Månatlig provtagning mellan juni och oktober vore att föredra, men eftersom det är en resurskrävande analys är tre prover per år en mer rimlig nivå.

Den ökade mängden fiskar som skulle bli en effekt av en ökat halt TP skulle kunna övervakas genom provfiske i utvalda fjällsjöar. Nätprovfiske i glesa intervall

skulle kunna användas för att övervaka om några nya fiskarter etablerar sig i sjöarna.

7 Slutsatser

- Ett framtida klimat, med förändringar i vattentemperatur, nederbörd, flödesmönster, skulle enligt modelleringen leda till en ökning i biomassan hos alla grupper förutom växtplankton. Tydligast syns förändringen hos predatora djurplankton som ökar sin biomassa med uppemot det dubbla.
- Om ett varmare och mer nederbördsrikt klimat även skulle leda till en ökning i införseln av fosfor enligt antagandena i studien skulle nästan alla grupper öka sin biomassa till ungefär den dubbla. Växtplankton och makrofyter är undantag. Växtplanktons biomassa väntas endast öka med ca 50 % och hos makrofytorna sker inga stora förändringar.
- Analysen av hydrologins förändringar visar att vattenflödet i fjällen går mot tidigare och mindre vårfloder samt ett betydligt högre vinterflöde. Näringsvävsförändringar som en följd av hydrologiska förändringar är dock små och väntas inte påverka någon av de undersökta funktionella grupperna på något påtagligt sätt.
- Ett miljöövervakningsprogram för perioden 2009-2014 bör utformas i enlighet med förslaget på sidan 44.

8 Vidare diskussion kring övervakningsprogram för fjällsjöar

Fjällsjöprovtagningen i Jämtlands län bör utökas med ytterligare åtta sjöar. Dessa väljs ut så att de ligger i anslutning till de fyra fjälllokaler (förutom Hundshögen) för vegetationsövervakning som planeras för Jämtlands län. Att övervaka miljön både över och under vattenytan på ett antal olika lokaler ger en helhetsbild av de förändringar som sker vid respektive lokal och tolkning av vattendata underlättas då kunskap även inhämtas om avrinningsområdena. Den modell som har utarbetats vid Hundshögen och Dörrsjöarna, med en kombinerad övervakning av en topp och två närliggande sjöar utvidgas alltså till fler lokaler. Att provta två närliggande sjöar kostar inte så mycket extra i resurser men ger däremot ett stort mervärde i att man även får en bild av variationen. För samtliga fjällsjöar som provtas i Jämtlands län utarbetas ett gemensamt program.

De vattenkemiska parametrar som är mest intressanta ur klimateffektsynpunkt är näringsämnen, DOC, pH, klorofyll och absorbans. Dessa mäts redan i de nationella trendsjöarna och vattendragen. För att få jämförbara data som även kan användas till annat än klimateffektanalys inkluderas samtliga vattenkemiska parametrar som ingår i den nationella övervakningen. Sjöarna provtas fyra gånger per år enligt Naturvårdsverkets undersökningstyp (2006).

Siktdjupet är en annan indikator på förändringar som kan vara effekter av ett ändrat klimat. Siktdjupet förväntas minska till följd av ökad införsel av organiskt kol och en ökning av primärproduktionen till följd av ökad näringstillförsel.

Denna parameter ska också normalt mätas inom trendsjöarna. Dessvärre skippas detta moment ibland i fjällvattnen i och med att det är så extremt stora siktdjup. Det är dock viktigt att även denna parameter dokumenteras regelbundet (i de fall tillgång finns till båt) redan nu för att ha ordentligt med bakgrundsdata för att kunna räkna på eventuella förändringen i framtiden.

Om sjöarna börjar uppvisa starka skiktningar kan det vara intressant att även börja mäta syrgashalten vid botten. Normalt sett är det inga problem med syrgasbrist i klara fjällsjöar men halterna kan dock minska bland annat till följd av den ökade skiktning som är en direkt följd av ett varmare vatten. Här föreslås några inledande syrgasmätningar vid botten för att få referensvärden för framtiden. Därefter kan mätningarna upptas först om temperaturmätningarna visar på starka skiktningar kombinerat med kraftigt ökad produktion av material som ska brytas ner.

Elfiske, nätprovfiske och goda kontakter med lokalbefolkningen är bra sätt att hålla koll på om det sker någon förändring i artsammansättningen hos fisk. För elfiske och provfiske finns bra standardmetoder. För fjällsjöar rekommenderas att nätprovfiske utförs i 2-3 av sjöarna vart femte år. För övriga sjöar inom programmet vore det önskvärt att upprätta ett kontaktnät bland dem med fiskerätt i de respektive sjöarna för att på så sätt få in information om drastiska förändringar i populationsstorleken eller om nya arter etablerar sig i sjöarna.

Mjukbottnarna är viktiga bland annat för fiskar som äter bottendjur, t ex öring röding. Effekter i primärproduktion i mjukbottnarna kan mätas indirekt via bottenfaunaprovtagning. Bottenfauna mäts redan idag inom de nationella trendsjöarna. Att mäta bottenfauna litoral, sublitoral och profundal kan vara intressant för att få en bild av eventuella förändringar relationen mellan de olika delarna av sjön.

I september 2007 hölls en workshop i Arådalen kring klimatförändringar med representanter från samebyn, boende i området samt fjällvandrare. Här framkom bland annat att mängden påväxtalger på stenar i vattendrag ökad dramatiskt de senaste 20 åren. Det finns även forskning som indikerar att ett minskat siktdjup gynnar alger i t ex stenzonen (Ask, 2007). Förändringar i mängden påväxtalger kan antingen mätas med en utrustning som tar avskrap direkt från befintliga stenar eller genom att lägga ut stenar. Här rekommenderas en utrustning utvecklad vid Umeå universitet, som tar avskrap från en yta med bestämd storlek, framför Naturvårdsverkets undersökningstyp. Det ger även en uppskattning av förändringar i mängden biomassa.

En minskning i utbredningen av permafrost i en sjös tillrinningsområde leder till en ökad tillförsel av DOC (Kokfelt, 2007). Därmed är permafrostövervakning en viktig del i att studera och förstå förändringar i sjöar. För de sjöar som kan förväntas ha permafrost i sina tillrinningsområden föreslås att förändringar i permafrostens utbredning övervakas.

Sedimentprovtagning är ett alternativ som är intressant ur ett klimatperspektiv. Om man använder rörprovtagare får man långa tidsserier där recenta sediment kan analyseras på ett antal parametrar. Framför allt kan man titta på halten organiskt material som då ger en uppfattning om primärproduktionen i sjön. Fördelen med sedimentprovtagning är att man också får ett integrerat prov där årstids- och mellanårsvariationer jämnas ut om ger en högre klimatsignal än exempelvis de data man får vid direkta sjöprovtagningar.

Slutligen är det viktigt att poängtera den terrestra miljöövervakningen som bland annat kan ge svar på ett eventuellt ökande vegetationstäck i fjällen som därmed påverka även sjöarna. Det är viktigt att utveckla terrester och akvatisk miljöövervakning hand i hand och inse samordningsvinsterna.

Tabell 16. Förslag till miljöövervakningsprogram för klimateffekter i fjällsjöar.

	Metod	Frekvens
Vattenkemi	(Naturvårdsverket, 1996)	4 ggr/år
Siktdjup		3 ggr/år
Temperatur	Luft- och marktemperatur samt vattnets yt- och djupvattentemperatur.	1 g/h
Växtplankton	(Naturvårdsverket, 2004)	4 ggr/år
Bottendjur	(Naturvårdsverket, 1996 och 2003)	1 höstprovtagning /år
Makrofyter	Fotodokumentation	1 ggr/år
Djurplankton	(Naturvårdsverket, 2003)	3 ggr/år (jun-okt)
Påväxtalger	(Persson m. fl., 2006)	
Nätprovfiske	(Kinnerbäck, 2001)	1 g/5 år
Sedimentprov		1 g/10 år
Permafrost	(Jonasson, 2008)	1 g/år i de fall permafrost misstänks i tillrinningsområdet.

9 Referenser

- Alexandersson, H., 2003. Korrektion av nederbörd enligt enkel klimatologisk metodik. Rapport nr. 111, Serie Meteorologi, SMHI, Norrköping, Sverige.
- Ask, Jenny, 2007. Inst. för ekologi, miljö och geovetenskap, Umeå universitet. Muntlig referens.
- Bergström, S., 1992. The HBV model - its structure and applications. SMHI Reports RH, No. 4, Norrköping, Sverige.
- Bergström, S., 1976. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. SMHI Reports RHO, No. 7, Norrköping, Sverige.
- Bernes, C., 2007. En ännu varmare värld – Växthuseffekten och klimatets förändringar. Monitor 20. Naturvårdsverket Förlag.
- Bishop, K., Erlandsson, M., Fölster, J., Laudon, H. och Weyenmeyer, G., 2007. Modeling the drivers of Synchronous Organic Carbon trends in Swedish watercourses. Presentation vid workshop: High Latitude Terrestrial and Freshwater Ecosystems: Interactions and Response to Environmental Change, CIRC, Abisko, 11-14 september 2007.
Finns på: <http://www.emg.umu.se/circ/workshop/Abstracts.pdf>
- Byström, P., Karlsson, J., Nilsson, P., van Kooten, T., Ask, J. och Olofsson, F., 2007. Substitution of top predators: effects of pike invasion in a subarctic lake. *Freshwater Biology* 52:1271-1280.
- Carlsson, B-G., 2007. Klimatövervakning vid Hundshögen – En studie av vegetationens sammansättning i ett kalfjällsområde i Jämtland. Rapport. Länsstyrelsen i Jämtlands län.
Finns på: <http://www.z.lst.se/z/amnen/miljo/miljoovervakning/publikationer/>
- Dadell, Tommy, 2008. Länsstyrelsen i Jämtlands län. Muntlig referens.
- Elliot, J.M. (ed.), 2000 Predicting the effects of environmental change on freshwater fish production. Final report to European Commission. EC Contract No: FAIR CT95-0009. NERC Institute of Freshwater Ecology.
- Giesler, R., Karlsson, J., Roehm, C., Mörtz, M. och Klaminder, J., 2007. Vegetation as a proxy for terrestrial export of DOC and nutrients in the subarctic. Presentation vid workshop: High Latitude Terrestrial and Freshwater Ecosystems: Interactions and Response to Environmental Change, CIRC, Abisko, 11-14 september 2007.
Finns på: <http://www.emg.umu.se/circ/workshop/Abstracts.pdf>
- Gyllenhammar, A., 2004. Predictive Modelling of Aquatic Ecosystems at Different Scales using Mass Balances and GIS. Doktorsavhandling, Uppsala universitet. Sammanfattning finns på: <http://publications.uu.se/theses/abstract.xsql?dbid=4143>
- Håkanson, L och Boulion, V., 2002. The Lake Foodweb – modelling predation and abiotic/biotic interactions. Backhuys Publishers, Leiden.
- Håkanson, L. och Peters, R.H., 1995. Predictive Limnology – Methods for predictive modelling. SPB Academic Publishing, Amsterdam.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007 – The Physical Science Basis. Cambridge University Press.
Finns även på: <http://www.ipcc.ch>

- Jonasson, C., 2008. Abisko Naturvetenskapliga Station. Muntlig referens.
- Karlsson, J., Jonsson, A. och Jansson, M., 2005. Productivity of high-latitude lakes: climate effect inferred from altitude gradient. *Global Change Biology*. 11:710-715.
- Karlsson, Jan, 2007. Climate Impacts Research Center (CIRC), Abisko. Muntlig referens.
- Karlsson, Jan, 2008. Climate Impacts Research Center (CIRC), Abisko. Muntlig referens.
- Kinnerbäck, A., 2001. Standardiserad metodik för provfiske i sjöar. Finns på: <http://www.fiskeriverket.se>
- Kjellström, E., Barring, L., Gollvik, S., Hansson, U., Jones, C., Samuelsson, P., Rummukainen, M., Ullerstig, A., Willén U. och Wyser, K., 2005. A 140-year simulation of European climate with the new version of the Rossby Centre regional atmospheric climate model (RCA3). *Reports Meteorology and Climatology* 108, SMHI, Norrköping, Sverige. Finns på: http://www.smhi.se/sgn0106/if/biblioteket/rapporter_pdf/RMK108.pdf
- Kokfelt, U., Hammarlund, D., Rundgren, M., Reuss, N., Rosén, P., Sonesson, M. och Schoning, K., 2007. Three thousand years of lake responses to climate induced catchment changes: Results from high resolution multi-proxy lake and peat records. Presentation vid workshop: High Latitude Terrestrial and Freshwater Ecosystems: Interactions and Response to Environmental Change, CIRC, Abisko, 11-14 september 2007. Finns på: <http://www.emg.umu.se/circ/workshop/Abstracts.pdf>
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M. och Bergström, S., 1997. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology* 201:272-288.
- Mikkelsen, M., 2005. Conservation of Nordic Nature in a Changing Climate. Nordiska Ministerrådet. Finns på: <http://www.norden.org/order>
- Nakicenovic, N. och Swart, R. (red.), 2000. Special Report on Emissions Scenarios : a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, New York, NY. Finns på: <http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/index.htm>
- Nash, J.E. och Sutcliffe, J.V., 1970. River flow forecasting through conceptual models, I: A discussion of principles, *Journal of Hydrology*, 10:398-409.
- Naturvårdsverket, 2007. Riktlinjer för regionala miljöövervakningsprogram 2009-2014. Finns på: <http://www.naturvardsverket.se>
- Naturvårdsverket, 2004. Undersökningstyp: Växtplankton i sjöar. Ur: Handledning för miljöövervakning. Finns på: <http://www.naturvardsverket.se>
- Naturvårdsverket, 2003. Undersökningstyp: Djurplankton i sjöar. Ur: Handledning för miljöövervakning. Finns på: <http://www.naturvardsverket.se>
- Naturvårdsverket, 2003. Undersökningstyp: Bottenfauna i sjöars profundal och sublitoral. Ur: Handledning för miljöövervakning. Finns på: <http://www.naturvardsverket.se>
- Naturvårdsverket, 1996. Undersökningstyp: Bottenfauna i sjöars litoral och i vattendrag. Ur: Handledning för miljöövervakning. Finns på: <http://www.naturvardsverket.se>

Naturvårdsverket, 1996. Undersökningstyp: Vattenkemi i sjöar. Ur: Handledning för miljöövervakning. Finns på: <http://www.naturvardsverket.se>

Rosén, P., Karlsson, J., Cunningham, L., Förster, J., Vogel, H. och Persson, P., 2007. Effects of climate, vegetation, fire and permafrost on lake water TOC during the Holocene inferred from lake sediments and IR spectroscopy. Presentation vid workshop: High Latitude Terrestrial and Freshwater Ecosystems: Interactions and Response to Environmental Change, CIRC, Abisko, 11-14 september 2007.

Finns på: <http://www.emg.umu.se/circ/workshop/Abstracts.pdf>

Pauly, D., Christensen, V. och Walters, C., 2000. Ecopath, Ecosim and Ecospace as tools for evaluating ecosystem impact of fisheries. *ICES Journal of Marine Science* 57:697-706.

Persson, J., Hansson, H. och Renberg, I., 2006. The Stone Brusher, a new sampler for submerged epilithic material in shallow streams and lakes. *Hydrobiologia* 560:385-392.

Seibert, J., 1997. Estimation of parameter uncertainty in the HBV model. *Nordic Hydrology* 28:247-262.

SMHI, 2006. Klimat i förändring, Faktablad nr 29.

Finns på: http://www.smhi.se/sgn0102/n0205/faktablad_klimat.pdf

Sonesson, M., och Lilliesköld, M. (red.), 2000. Fjällens ekosystem i ett förändrat klimat. SNV Rapport 5085. Naturvårdsverket Förlag.

Uhlenbrook, S., Seibert, J., Leibundgut, Ch. och Rodhe, A., 1999. Prediction uncertainty of conceptual rainfall-runoff models caused by problems to identify model parameters and structure, *Hydrological Sciences - Journal des Sciences Hydrologiques* 44(5): 779-798.

Weyhenmeyer, Gesa, 2008. Inst. för miljöanalys, SLU, Uppsala. Muntlig referens.

Weyhenmeyer, G. A., Meili, M. och Livingstone, D.M., 2004. Nonlinear temperature response of lake ice breakup. *Geophysical Research Letters* 31: L07203.

de Wit, H., 2007. Drivers of long-term DOC trends in surface waters: climate or deposition? Presentation vid workshop: High Latitude Terrestrial and Freshwater Ecosystems: Interactions and Response to Environmental Change, CIRC, Abisko, 11-14 september 2007.

Finns på: <http://www.emg.umu.se/circ/workshop/Abstracts.pdf>

Öberg, L., 2007. Trädgränsen som indikator för ekologiska klimateffekter i fjällen – En metodstudie för långsiktig miljöövervakning. Rapport. Länsstyrelserna i Jämtlands och Dalarnas län. Finns på: <http://www.z.lst.se/z/amnen/miljo/miljoovervakning/publikationer>

Bilaga I: Resultat vattenkemiprovtagning 2006-2007

Vueliejaevrie													
Datum		2006 03-12	2006 05-08	2006 07-13	2006 08-30	2006 10-22	2006 12-09	2007 03-21	2007 04-24	2007 07-12	2007 08-06	2007 10-03	Medel
Siktdjup	[m]										10	9	9,500
Temp.	[°C]	1,5	2,2				0,5	0,7			13,3	5,2	6,400
pH		6,16	6,13	6,69	6,69	6,54	6,35	6,21	5,89	6,74	6,63	6,63	6,420
Kond.	[mS/m]	1,03	0,87	0,75	0,79	0,87	0,94	0,99	0,76	0,77	0,79	0,86	0,834
Ca	[mekv/l]	0,031	0,024	0,022	0,023	0,028	0,029	0,03	0,02	0,02	0,022	0,025	0,023
Mg	[mekv/l]	0,035	0,026	0,023	0,026	0,030	0,030	0,034	0,022	0,022	0,024	0,026	0,026
Na	[mekv/l]	0,022	0,018	0,018	0,017	0,020	0,022	0,021	0,019	0,018	0,016	0,015	0,018
K	[mekv/l]	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Alk./Acid	[mekv/l]	0,048	0,028	0,035	0,040	0,042	0,043	0,051	0,023	0,034	0,036	0,042	0,037
Sulfat	[mekv/l]	0,024	0,018	0,019	0,019	0,020	0,022	0,02	0,015	0,018	0,018	0,02	0,018
Klorid	[mekv/l]	0,011	0,013	0,010	0,008	0,008	0,010	0,009	0,013	0,009	0,008	0,01	0,010
Fluorid	[mg/l]	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
NH ₄ -N	[µg/l]	13	9	11	7	13	7	7	12	8	7	6	9,091
NO ₂ +NO ₃ -N	[µg/l]	44	131	9	11	1	41	43	73	1	1	2	32,455
Tot-N NO	[µg/l]							94	123	68	73	79	87,400
PO4-P	[µg/l]	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,091
Tot-P	[µg/l]	2	4	3	3	2	2	1	3	2	1	1	2,182
Abs OF	[420/5]	0,010	0,019	0,013	0,020	0,012	0,013	0,008	0,002	0,002	0,008	0,004	0,005
Abs F	[420/5]	0,009	0,012	0,010	0,013	0,008	0,008	0,007	0,001	0,001	0,007	0,002	0,004
Si	[mg/l]	0,31	0,58	0,28	0,37	0,29	1,30	1,47	1,23	0,79	0,76	0,76	1,002
Slamhalt	[mg/l]	0,5	0,3		0,6		0,3	0,1	0	0,2	0,7	-	0,250
TOC	[mg/l]	1,1	1,8	1,4	1,4	1,2	1,5	0,9	1	1,1	1,2	1,6	1,160
Fe	[µg/l]	6	28	8	23	30	24	7	9	9	8	8	14,545
Mn	[µg/l]	0,9	3,2	1,1	2,5	1,4	0,8	0,8	1,5	0,6	0,7	0,7	0,860
Al_ICPAES	[µg/l]	8,0	34	18	15	13	19	11	8	13	9,2	7,4	14,760
Kfyll	[mg/m3]	0,8	1,3	0,8	1,2		2,0	0,67	0,88	-	0,58	1,1	0,808

Gäetiejaevrie													
Datum		2006 03-12	2006 05-08	2006 07-13	2006 08-30	2006 10-19	2006 12-09	2007 03-21	2007 04-24	2007 07-12	2007 08-06	2007 10-03	Medel
Siktdjup	[m]										10	12,5	11,250
Temp.	[°C]	1,4	2,2				0,5	0,7			13,3	4,7	6,233
pH		6,56	6,31	6,74	6,68	6,61	6,28	6,26	6,12	6,79	6,59	6,72	6,496
Kond.	[mS/m]	1,34	1,09	1,01	1,07	1,12	1,11	1,29	1,38	1	1,04	1,12	1,166
Ca	[mekv/l]	0,051	0,033	0,036	0,039	0,039	0,039	0,043	0,045	0,03	0,035	0,038	0,038
Mg	[mekv/l]	0,045	0,027	0,031	0,035	0,037	0,035	0,044	0,045	0,03	0,033	0,036	0,038
Na	[mekv/l]	0,023	0,016	0,020	0,019	0,021	0,022	0,024	0,025	0,019	0,016	0,016	0,020
K	[mekv/l]	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,005	0,004	0,003	0,003	0,003	0,004
Alk./Acid	[mekv/l]	0,066	0,043	0,048	0,052	0,052	0,049	0,059	0,061	0,044	0,047	0,054	0,053
Sulfat	[mekv/l]	0,035	0,026	0,027	0,029	0,028	0,029	0,033	0,037	0,026	0,027	0,03	0,031
Klorid	[mekv/l]	0,012	0,012	0,011	0,010	0,010	0,010	0,012	0,013	0,012	0,008	0,011	0,011
Fluorid	[mg/l]	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
NH ₄ -N	[µg/l]	12	17	5	9	5	5	12	7	14	6	4	8,727
NO ₂ +NO ₃ -N	[µg/l]	65	88	9	15	6	60	44	77	1	1	2	33,455
Tot-N NO	[µg/l]							96	122	66	73	74	86,200
PO4-P	[µg/l]	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,091
Tot-P	[µg/l]	3	3	4	4	3	2	1	3	1	1	1	2,364
Abs OF	[420/5]	0,016	0,015	0,017	0,028	0,027	0,011	0,01	0,008	0,009	0,013	0,009	0,010
Abs F	[420/5]	0,010	0,010	0,009	0,017	0,013	0,008	0,007	0,006	0,003	0,003	0,002	0,004
Si	[mg/l]	1,02	0,63	0,94	0,53	0,45	1,49	1,45	1,8	0,98	0,94	0,94	1,222
Slamhalt	[mg/l]	1,2	0,2		0,6		0,3	0,3	0,3	0,5	0,3	-	0,350
TOC	[mg/l]	1,0	1,5	1,3	1,4	1,2	1,3	0,9	1,1	0,9	1,1	1,6	1,120
Fe	[µg/l]	15	27	15	30	21	34	12	22	24	24	19	22,091
Mn	[µg/l]	2,6	5,6	4,8	15	4,5	1,4	1,6	3,6	3,9	5,3	3,9	5,550
Al_ICPAES	[µg/l]	5,7	13	16	11	8,7	13	11	11	11	7,6	6,8	11,156
Kfyll	[mg/m3]	1,0	0,4	0,8	1,6		0,6	0,62	1,6	-	0,97	1,5	1,173