



UPPSALA
UNIVERSITET



UPTEC W 19 029

Examensarbete 30 hp
Juni 2019

Vilken effekt har framtida klimat på strömningsmönster i Ekoln - en modelleringsstudie baserad på MIKE 3 FM

Sandra Lindqvist

REFERAT

Vilken effekt har framtida klimat på strömningsmönster i Ekoln - en modelleringsstudie baserad på MIKE 3 FM

Sandra Lindqvist

Den globala uppvärmningen kommer att påverka Jordens klimat i många sekel framöver. Effekter som smältande isar, stigande havsnivåer och extremare väder, är alla konsekvenser av de enorma utsläpp koldioxid (CO₂), som vi människor orsakat. I Sverige kan vi i framtiden vänta oss varmare temperaturer, längre vegetationsperioder och flöden med stora säsongvariationer. I Uppsala kommer de framtida klimatförändringarna i samverkan med en växande befolkning att påverka stadens dricksvattenproduktion. Uppsala Vatten och avfall AB undersöker idag möjligheten till att använda Mälarbassängen Ekoln som kompletterande råvattentäkt.

För att säkerställa en säker dricksvattenproduktion, både utifrån den kvantitet och kvalitet som krävs, är det av intresse att veta hur flöden och vattenkvalitet i Ekoln kan komma att utvecklas i framtiden. Något som i stor grad påverkar vattenkvaliteten i våra Svenska sjöar, är den årstidsbundna cirkulationen, med vinter- och sommarstagnation, samt vår- och höstcirkulation. För att undersöka hur den årstidsbundna cirkulationen i Ekoln kan komma att förändras med framtida klimat, utfördes hydrodynamisk modellering för sjön med intilliggande vikar.

En bestående tredimensionell spridningsmodell av typ MIKE 3 Flow Model FM, skapad för att simulera spridning av avloppsvatten i Ekoln, erhöles från Tyréns AB. Modellen kalibrerades och anpassades för att simulera temperaturprofiler i sjön. För att täcka in beteendet för den årstidsbundna cirkulationen anpassades modellen till att simulera ett helt år. Modellen kördes för ett referensår, samt för de två strålningsdrivningsscenarierna RCP4.5 och RCP8.5 vid år 2050.

Kalibrering av modellen var lyckad och beräkningstiden förkortades genom anpassning av beräkningsnätet. Resultat från simuleringar visade på att sommarstagnation kan förekomma nio dagar längre vid RCP4.5 för år 2050, än under referensåret. Ingen förändring förväntas vid RCP8.5 under samma tidsperiod. Vid RCP8.5 förväntas dock vattentemperaturer i epilimnion att stiga och vinterstagnation förekommer ej. Temperaturer i vattenmassans övre skikt påverkas i hög grad av lufttemperatur och vid fortsatta studier är det även av intresse att undersöka hur skiktning och cirkulation påverkas av förändrade vindförhållanden, hur olika drivdata för vindförhållanden påverkar resultatet samt att undersöka en tidsperiod som är längre än ett år.

Nyckelord: Ekoln, temperaturprofil, hydrodynamisk modellering, MIKE 3 FM, årstidsbunden cirkulation, klimatförändringar

Institutionen för vatten och miljö, Sveriges lantbruksuniversitet, Lennart Hjelms väg 9, SE-75007 Uppsala, Sverige. ISSN 1401-5765.

ABSTRACT

The influence of future climate on circulation patterns in the Ekoln basin - a modelling study based on MIKE 3 FM

Sandra Lindqvist

For centuries in the future, the climate on Earth will be affected by the global warming. Effects as melting ices, increasing sea levels and extreme weather, are all consequences of the high amount of carbon dioxide (CO₂), that we humans have caused. In Sweden, can climate effects like higher temperatures, longer vegetation periods and greater seasonal variations in water fluxes, be expected. Due to climate changes and an increasing population, the drinking water production in Uppsala will be affected. In terms of securing the drinking water production in the future, Uppsala Vatten och Avfall AB are investigating the possibility to use the Ekoln basin in lake Mälaren, as a complementary raw water catchment area.

In order to keep a secure drinking water production, in regard to quantity and quality, it is of interest to investigate how fluxes and water quality will be affected in the future. The annual pattern of water mixing, with summer- and winter stratification, and overturn during spring and autumn, is something that significantly affects the water quality in the Swedish lakes. With the aim to study how the annual pattern of water mixing in the Ekoln basin, might change due to future climate changes, hydrodynamic modelling was performed on a model area consisting of the Ekoln basin with adjacently bays.

A hydrodynamic (3D) transport model of type MIKE 3 Flow Model FM, created by Tyréns AB for simulating transport of pollutions, was calibrated and adapted to simulate temperature profiles in the model area. To be able to study the annual pattern of water mixing, the model was also adapted to simulate a period of a year. Three scenarios were simulated, one reference year and two future scenarios, where the future scenarios were based on the climate scenarios RCP4.5 and RCP8.5 in year 2050.

The calibration of the model was successful, and the calculation time was reduced by adapting the mesh. Results from the three scenarios, showed that the period with summer stratification might become nine days longer by RCP4.5 in year 2050, compared to the reference scenario. Simulation of RCP8.5 during the same time period, did not show any changes. By RCP8.5 it is possible that water temperatures in the epilimnion, are increasing and that there will be no winter stratification. The temperature in the surface water are affected by the air temperature, in future studies it is in interest to investigate how stratification and circulation will be affected by changes in wind speed and wind direction, how different types of wind data effect the results, it is also in interest to study changes during a time period longer than one year.

Key words: Ekoln, temperature profile, hydrodynamic modelling, MIKE 3 FM, annual pattern of water mixing, climate changes

Department of Aquatic Sciences and Assessment, The Swedish University of Agricultural Sciences, Lennart Hjelms väg 9, SE-75007 Uppsala, Sweden, ISSN 1401-5765.

FÖRORD

Det här examensarbetet är det avslutande momentet av 5 års studier på civilingenjörsprogrammet i miljö- och vattenteknik, vid Uppsala universitet och Sveriges lantbruksuniversitet. Examensarbetet har utförts vid Sveriges lantbruksuniversitet, som en del av ett större projekt där Uppsala Vatten och Avfall AB var beställare. Arbetet kopplas även till projektet ClimAqua (Modellering av klimatförändringars effekter på mikrobiologiska risker för ett säkert och hållbart dricksvattensystem, 2017-01413) som finansieras av Formas, vilket är ett forskningsråd för hållbar utveckling.Handledare för examensarbetet var Ekaterina Sokolova, docent i vattensystemmodellering vid Chalmers tekniska högskola, och ämnesgranskare var Stephan Köhler, professor inom miljögeokemi vid Sveriges lantbruksuniversitet.

Jag vill tacka min handledare Ekaterina, som under arbetets gång varit ett ovärderligt stöd, och även en mycket pedagogisk lärare inom hydrodynamisk modellering. Även min ämnesgranskare Stephan, har varit ett stort stöd och bidragit med vägledande idéer och djup kunskap. Jag vill även tacka DHI för tillgång till en studentlicens för MIKE 3, samt Anna Karlsson på Tyréns AB, som genom delning av spridningsmodellen möjliggjorde detta examensarbete. Ytterligare vill jag tacka SMHI för tillgång till dataunderlag för framtida klimat.

Sandra Lindqvist
Uppsala, 2019

Copyright © Sandra Lindqvist och Institutionen för vatten och miljö, Sveriges lantbruksuniversitet
UPTEC W 19 029, ISSN 1401-5765
Digitalt publicerat vid Institutionen för geovetenskaper, Uppsala universitet
Uppsala, 2019.

POPULÄRVETENSKAPLIG SAMMANFATTNING

Vilken effekt har framtida klimat på strömningsmönster i Ekoln - en modelleringsstudie baserad på MIKE 3 FM

Sandra Lindqvist

Vår planet kommer att påverkas av klimatförändringar under en lång tid framöver. De förändringar som kan förväntas är smältande isar, stigande havsnivåer och mer extrema väderförhållanden. I Sverige kan vi i framtiden vänta oss varmare temperaturer, längre perioder med växtlighet och vattendrag som har högre flöden vintertid och lägre flöden under sommaren. Varmare temperaturer och förändrade flöden i vattendragen, är något som i sin tur kommer att påverka vattenkvaliteten i våra sjöar. Sveriges kanske viktigaste sjö är Mälaren, det är landets största vattentäkt och cirka två miljoner människor dricker vatten som ursprungligen kommer från sjön. På grund av Mälarens speciella form och stora antal avgränsade vikar, kan man dela in sjön i olika bassänger, utifrån hur stort flödet är och hur vattenkemin ser ut i de olika delarna. En sådan bassäng är Ekoln, som ligger i den nordöstra delen av Mälaren. Ekoln binds endast samman med resten av Mälaren genom ett smalt sund, och har därmed en annorlunda vattenkemi än resten av sjön.

Uppsala, som ligger precis norr om Ekoln, får idag en stor del av sitt dricksvatten från ån Fyrisån. På grund av en ökande befolkning och det förändrade klimatets påverkan på Fyrisån, kommer vattnet i ån inte att räcka till stadens dricksvattenproduktion i framtiden. Uppsala vatten och Avfall AB, som är ansvariga för dricksvattenproduktionen i staden, undersöker hur de kan säkra dricksvattenproduktionen i framtiden. En möjlig lösning är att använda Ekoln som en extra vattentäkt. För att kunna fatta ett beslut som är hållbart i många år framöver, är Uppsala Vatten och Avfall AB mycket intresserade av att veta hur vattenkvaliteten i Ekoln kan komma att se ut även i framtiden. Ett fenomen i sjön, som förväntas kunna förändras med bland annat varmare lufttemperaturer, är den årstidsbundna cirkulationen. Mälaren, som de flesta sjöar i Sverige, är en så kallad dimiktisk sjö, vilket innebär att vattnet i sjön blandas om två gånger per år. Att vattnet omblandas innebär att en cirkulationsström bildas under vår och höst, cirkulationen leder till att ytvatten och bottenvatten blandas om. Under sommar och vinter är vattnet däremot skiktat i olika lager, ett lager vid ytan och ett vid botten, där bland annat olika vattentemperaturer och koncentration av syre förekommer. Om den skiktade perioden exempelvis kommer att förlängas i framtiden, kommer det att påverka vattenkvaliteten i sjön, och på så sätt påverka Uppsalas framtida dricksvattenproduktion.

För att undersöka hur den årstidsbundna cirkulationen och skiktningen kan komma att förändras med framtida klimat, har en modelleringsstudie utförts för Ekoln med närliggande vikar. Det modelleringsverktyg som användes heter MIKE 3 FM, och är utvecklat av Dansk Hydraulisk Institut (DHI). Modellen för studien har skapats av företaget Tyréns AB. För att få ett så bra resultat som möjligt i studien behövde modellen anpassas och kalibreras. För att driva modellen samlades även stora datamängder in, så kallad drivdata. För att köra modellen krävs meteorologisk och hydrologisk drivdata i form av bland annat lufttemperatur, vindriktning, vindhastighet, flödes hastigheter för tillflödande åar, vattentemperaturer i tillflöden och i sjön, isdata för området, med mera.

För att undersöka vad som kan komma att ske med cirkulation och skiktning i framtiden kördes modellen för tre olika scenarier. De tre scenarierna byggde på ett referensår, samt två framtidsscenarier, vilka valdes till år 2050. Skillnaden mellan de två framtidsscenarierna var att de byggde på olika strålningsdrivningsscenarier, som är ett mått för hur mycket växthuseffekten kan förväntas öka i framtiden. De två strålningsdrivningsscenarierna som valdes var RCP4.5 och RCP8.5. RCP8.5 är det värsta möjliga scenariot som förväntas till år 2100, om utvecklingen för användning av fossila bränslen inte avstannar, att klimatpolitiken inte utvecklas, samt att utsläpp av metangas (CH_4) och koldioxid (CO_2) endast fortsätter att öka.

Resultatet från studien visade på att kalibrering av modellen var lyckad och att modellen därmed förbättrats. Det modelleringsresultat som erhöles från simulering av tre olika scenarier visade på att sommarperioden, när skiktning förekommer i sjön, kan komma att förlängas med nio dagar vid strålningsdrivningsscenario RCP4.5 vid år 2050. För RCP8.5 vid år 2050 visade simuleringen ingen förändring i periodens längd. Resultatet antas bero på hur lufttemperaturen varierade under året för de två framtidsscenarierna. För båda klimatscenarierna kan temperaturen i det översta skiktet i sjön komma att stiga, medan ingen större temperaturförändring väntas i det undre skiktet. Under vintern kommer skiktning att förekomma vid scenario RCP4.5 men inte vid RCP8.5. Förändringar i vattentemperaturer och skiktade förhållanden kan i hög grad påverka vattenkvaliteten i sjön. När vattenmassan är skiktad interagerar den övre och den undre vattenmassan inte med varandra, vilket leder till att bottenvattnet ofta blir syrefattigt. Vid syrefattiga förhållanden kan förekomst av järn, mangan och fosfor öka, vilket gör det svårare och mer kostamt att rena sjövattnet för dricksvattenproduktion. Ökade temperaturer i ytvattnet innebär ökad risk för alger och koliforma bakterier, som växer snabbare vid varma temperaturer. För fortsatt arbete är det av intresse att undersöka hur skiktning och cirkulation i sjön, kan komma att påverkas av förändrade vindförhållanden, i och med att vind antas vara den parameter som påverkar cirkulationen mest. För att få ett mer tillförlitligt resultat bör det även i framtiden undersökas hur förändringar kommer att ske under en längre tidsperiod än för ett enskilt år.

ORDLISTA

Aerosoler: Luftförorening i form av finfördelade partiklar i luften.

Alkalinitet: Mått på vattnets buffertförmåga, hur motståndskraftigt vattnet är mot försurning.

Batymetri: Beskriver hur djupet förändras över botten i en sjö eller ett hav.

Biaskorrigering: Statistisk korrigering av simulerade värden för att de ska likna observerade värden.

DBS-metoden: Distributionsbaserad skalering, metod för att anpassa utdata från klimatmodeller för att kunna användas som indata i hydrologiska modeller.

EC-Earth: Global klimatmodell, vilken är den som främst används för simulering av europeiskt och nordiskt klimat.

E-HYPE21: Hydrologisk modell som dagligen beräknar hydrologiska förhållanden över Europa.

Ensemble: Kluster av en mängd olika globala klimatmodeller för att täcka in spridning i resultatet.

Epilimnion: Det översta skiktet i en vattenmassa vid skiktade förhållanden.

HBV-modellen: Hydrologisk modell för simulering av flödesprognoser.

Hydrodynamisk modell: Modell som kan hantera strömningsmönster i vatten.

HYPE: Hydrologisk modell för simulering av vattenflöde i ett avrinningsområde.

Hypeweb: SMHI:s öppna databas innehållande simulerad data från HYPE.

Hypolimnion: Det understa skiktet i en skiktad vattenmassa.

Konduktivitet: Mått på vattnets förmåga att leda elektricitet, visar på hur höga salthalter som finns i vattnet.

Konvektion: Temperaturvariationer i en vätska eller gas bidrar till att mediets densitet varierar, ett paket av vätska eller gas kan således stiga och sjunka i höjdlängd på grund av temperaturvariationer.

Kustzonmodellen: Hydrologisk modell för beräkning av vattenvalitet i svenska vattendrag.

Lisflood: Hydrologisk modell för simulering av nederbörd och avrinning inom ett

avrinningsområde.

Mesh: Beräkningsnät bestående av ett stort antal element.

MIKE 3 FM: Hydrodynamiskt modelleringsverktyg framtaget av DHI.

MIKE Zero: En samling av två- och tredimensionella hydrodynamiska modelleringsverktyg anpassade för Windows.

Morfologi: Vattendragets form.

Nedskalning: Användning av data från global klimatmodell som indata i en regional klimatmodell, för att öka upplösningen av data.

Rosby Centre: SMHIs klimatmodelleringsenhet.

Råvattentäkt: Vattenförekomst som används för intag av råvatten till dricksvattenproduktion.

Salinitet: Vattnets salthalt.

Sommarstagnation: När vattenmassan är skiktad under sommaren.

Spridningsmodell: Modell anpassad för att simulera spridning av föroreningar eller utflödande vatten från en viss källa.

Strålningsdrivningsscenario: Mått på hur mycket växthuseffekten kan komma att öka till och med år 2100.

Temperaturprofil: Profil som visar hur vattentemperaturen varierar mellan olika djup i en vattenförekomst.

Termisk expansion: När volymen hos en vätska, gas eller fast kropp ökar vid ökad temperatur.

Termoklin: Språngskikt, det skikt som ligger mellan epilimnion och hypolimnion i en skiktad vattenmassa.

Vattenweb: SMHIs öppna databas för nedladdning av observerad och modellerad data för vattenförekomster och avrinningsområden.

VIC421: Hydrologisk modell som tar hänsyn till vattnets infiltration i marken.

Vinterstagnation: När vattenmassan är skiktad under vintern.

Innehållsförteckning

Referat	I
Abstract	II
Förord	III
Populärvetenskaplig sammanfattning	IV
Ordlista	VI
1 Inledning	1
1.1 Mål och syfte	1
1.2 Frågeställningar	1
1.3 Avgränsningar	2
2 Teori	3
2.1 Ekoln - en del av Mälaren	3
2.2 Årstidsbunden cirkulation	4
2.3 Framtida klimat	6
2.3.1 Stigande havsnivåer	8
2.3.2 Nederbörd	9
2.3.3 Tillrinning	10
2.3.4 Luft- och vattentemperatur	10
2.4 Modelleringsverktyg MIKE 3	12
3 Metod	14
3.1 Spridningsmodell för Ekoln	14
3.2 Anpassning av modell	15
3.3 Kalibrering av modell	16
3.3.1 Drivdata för kalibreringsår 2018	17
3.4 Validering av modell	20
3.4.1 Nash-Sutcliffes effektivitetskoefficient	20
3.4.2 Pearsons korrelationskoefficient	20
3.4.3 Root mean square error	20
3.5 Simulering vid framtida klimat	20
3.5.1 Val av referensår	20
3.5.2 Simulering år 2050	22
3.5.3 Jämförelse mellan kalibreringsår och referensår	24
4 Resultat	26
4.1 Kalibreringsresultat	26
4.2 Jämförelse mellan kalibreringsår och referensår	27
4.3 Simulering av framtida klimat	30
4.4 Jämförelse mellan resultat från olika drivdata	34

5	Diskussion	36
5.1	Modellens prestation	36
5.2	Simulering av framtida förhållanden	37
5.3	Möjliga förbättringar och fortsatta studier	38
6	Slutsatser	41
7	Tillkännagivanden	42
	Appendix A Antaganden och hypsograf	48
	Appendix B Variationer i drivdata	52
	Appendix C Heterogenitet för yttemperatur	54
	Appendix D Val av indata, påverkan på resultat	57

1 INLEDNING

Den globala uppvärmningen kommer att påverka Jordens klimat i många sekel framöver. Effekter som smältande isar, stigande havsnivåer och extremare väder, är alla konsekvenser av de enorma utsläpp koldioxid (CO₂), som vi människor orsakat (Rohli och Vega, 2018, s. 309). I Sverige kan vi i framtiden vänta oss varmare temperaturer, längre vegetationsperioder och flöden med stora säsongsvariationer. I Uppsala kommer de framtida klimatförändringarna i samverkan med en växande befolkning att påverka stadens dricksvattenproduktion (Lindqvist Pettersson, 2019). En av Uppsala Vatten och Avfall AB:s (hädanefter Uppsala Vatten) viktigaste råvattentäkter är Fyrisån. Vatten från ån pumpas till Uppsalaåsen för konstgjord infiltration, och bidrar på så vis till cirka 50 % av stadens dricksvattenproduktion (Uppsala Vatten och Avfall AB, 2016b).

Vattnet i Fyrisån anses dock inte uppfylla de krav, på vattenkvalitet och vattenmängd, som krävs för framtida klimat och befolkningsökning i staden. I och med detta undersöker Uppsala Vatten möjligheten i att ersätta Fyrisån som råvattentäkt, med antingen Dalälven eller Ekoln. I dagsläget anses Dalälven vara det bättre alternativet, med avseende på vattenkvalitet. Det är dock ändå av intresse att vidare öka kunskapen om Ekoln och dess vattenkvalitet, främst för att i framtiden kunna använda Ekoln som kompletterande råvattenresurs (Lindqvist Pettersson, 2019). Tyréns AB är en av de aktörer som på uppdrag av Uppsala Vatten arbetat med att ta fram underlag till planen Strategisk vattenförsörjningsplan Uppsala kommun. Som en del av arbetet har Tyréns AB skapat en spridningsmodell för Ekoln i det hydrodynamiska modelleringsverktyget MIKE 3 FM. Ytterligare en aktör som på uppdrag av Uppsala Vatten undersöker vattenkvaliteten i Ekoln är Sveriges lantbruksuniversitet (SLU). Detta examensarbete är en del av det arbete som utförs av SLU, och bygger på användning av den spridningsmodell som skapats av Tyréns AB.

1.1 MÅL OCH SYFTE

Målet med detta examensarbete är att öka förståelsen för strömningsmönster och vattenkvalitet i Ekoln genom hydrodynamisk modellering. Den hydrodynamiska modelleringen förväntas kunna visa på hur strömningsmönster i Ekoln, med fokus på förändring i den årstidsbundna skiktningen, kan komma att påverkas med framtida klimat. Syftet är att öka kunskapen om Ekoln och dess vattenkvalitet med avseende på att säkra Uppsalas framtida vattenförsörjning.

1.2 FRÅGESTÄLLNINGAR

Examensarbetet bygger på följande frågeställningar:

- Hur funktionell är den bestående spridningsmodellen för Ekoln och hur kan modellen förbättras genom kalibrering av olika parametrar?
- Kan spridningsmodellen vidareutvecklas för att kunna simulera den årstidsbundna cirkulationen i sjön?
- Hur kommer strömningsmönster, samt tidpunkt för sommarstagnation och höstcirkulation i Ekoln att förändras med framtida klimat?

1.3 AVGRÄNSNINGAR

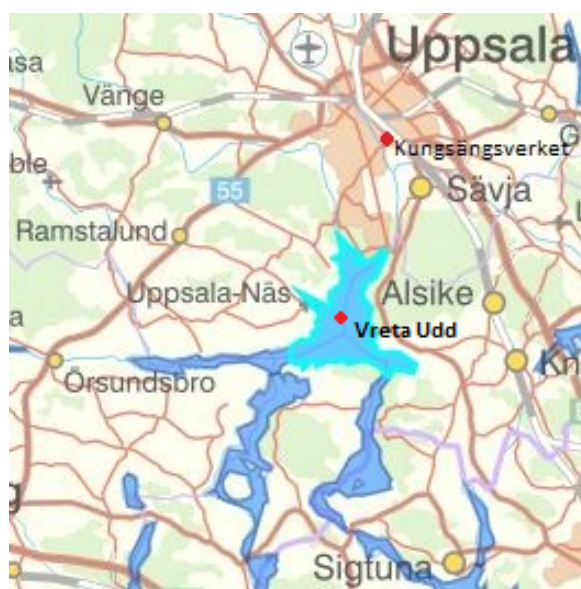
Antalet framtidsscenarier avgränsades till två stycken klimatscenarier, RCP4.5 och RCP8.5, vid mitten av detta sekel, år 2050. Vid simulering av framtida klimatscenarier användes endast drivdata från den globala klimatmodellen EC-Earth. Modelluppsättningen kalibrerades endast för år 2018 och som referensperiod användes endast år 1989.

2 TEORI

Detta avsnitt bygger på den litteraturstudie som utfördes under examensarbetets gång. Nedan presenteras relevant bakgrundsinformation om Ekoln, årstidsbunden cirkulation i sjöar, framtida klimat i Uppsala län samt det aktuella modelleringsverktyget MIKE 3 FM.

2.1 EKOLN - EN DEL AV MÄLAREN

Mälaren är Sveriges tredje största sjö och i dess närområde är idag tre miljoner människor bosatta, folkmängden förväntas ha ökat till fem miljoner till år 2050 (Mälardalsrådet, 2016). Sjön fungerar som Sveriges största dricksvattentäkt och en god vattenkvalitet är därmed avgörande för regionens framtida utveckling (Eklund m. fl., 2018). Mälarens form, dess morfologi, bidrar till att sjön består av ett flertal olika bassänger som är näst intill helt separerade från varandra. Det kan därmed råda stora skillnader i vattenkvalitet mellan bassängerna (Kvarnäs, 2001). En sådan bassäng är fjärden Ekoln, som är belägen i den nordöstra delen av Mälaren. Dess area är 22 km², och avrinningsområdet sträcker sig över cirka 3300 km². Enligt Uppsala Vatten (u.å. omfattas Ekolns avrinningsområde av 63 % skogsmark, 31 % jordbruksmark, 3 % sjöar, samt 3 % övrig mark. Det huvudsakliga tillflödet kommer från Fyrisån, men även mindre åar såsom Hågaån, Sävaån och Örsundaån bidrar med inflöde till Ekoln. Utloppet sker genom Stavsund och vidare ut till Skofjärden, där vattnet sedan kan transporteras vidare i Mälaren (Tyréns AB, 2018). Bassängen har ett maxdjup på 44 m och medeldjup 17 m (Persson m. fl., 2012; Nationalencyklopedin, u.å.). Enligt beräkningar utförda av Tyréns AB (2018) har Ekoln en uppehållstid på cirka 200 dygn, vilket är ett teoretiskt mått på hur länge det tar för allt vatten i sjön att bytas ut. Beräkning av uppehållstid sker under förenklade förhållanden såsom att vattnet är totalt omblandat och att flödet är konstant. Kartbild över Ekoln ses i figur 1.



Figur 1: Ekoln, markerat i ljusblått, med angränsande vikar och tätorter, samt Kungsängsverket i Uppsala markerat i rött och SLU:s mätstation Vreta Udd i mitten av bassängen ©Lantmäteriet I2018/00145 (Vatteninformationssystem Sverige, 2017).

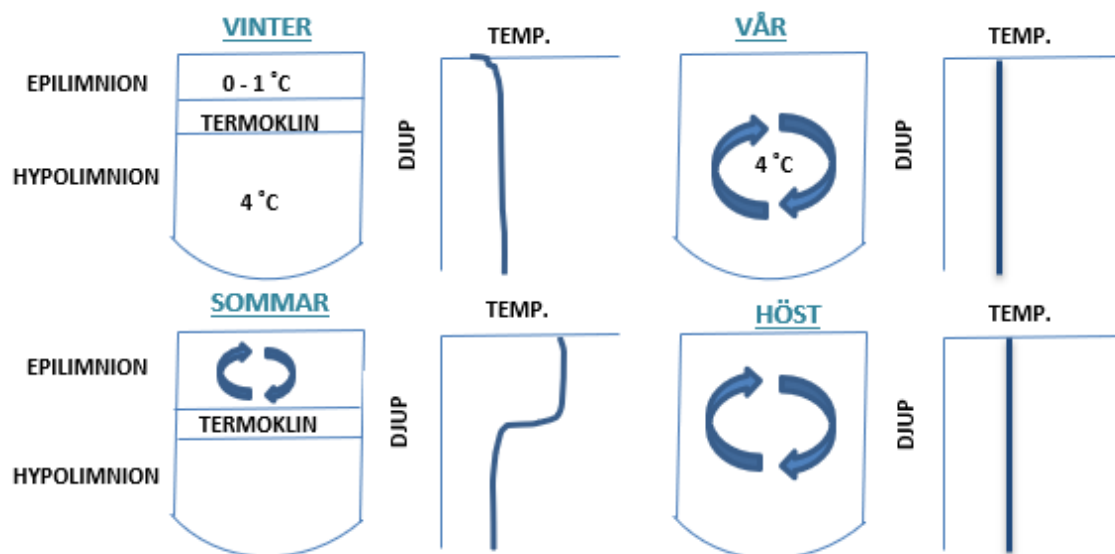
Ekoln är den bassäng i Mälaren som är mest näringsrik med avseende på kisel- och kvävehalter. Höga kvävehalter förekommer på grund av att tillrinningsområdet omfattas av stora jordbruksmarker, samt förekomst av ett stort antal enskilda avlopp. Kiselhalten beror av förekomst av kiselalger i sjön. Ytterligare en bidragande faktor till de höga halterna näringsämnen är att Kungsängsverket, det avloppsreningsverk som behandlar allt Uppsalas avloppsvatten, har Fyrisån som recipient. Som tidigare nämnt står Fyrisån för det största tillflödet till Ekoln, och renat avloppsvatten från Kungsängsverket flödar därmed ut i sjön. Även förekomst av organiska ämnen i form av totalt organiskt kol (TOC) är högre i Ekoln än i de resterande bassängerna. Precis som för näringsämnena, kommer TOC från jordbruksmark och skogsmark, och det är främst tillflöde från Fyrisån och Örsundaån som står för tillförseln (Tjällén, Wallman och Wallin, 2010). Enligt Wallman, Wallin och Tjälléns studie (2010) är Ekoln även den bassäng som har både högst alkalinitet och konduktivitet, dessa två parametrar är även så pass höga att sjön inte är känslig för försurning, sjön har en hög buffertkapacitet. Den höga alkaliniteten och konduktiviteten beror på de lättvittrade och kalkrika lerjordarna i avrinningsområdet.

Enligt den strategiska vattenförsörjningsplanen för Uppsala kommun har de högsta läkemedelshalterna i Mälaren uppmätts i Ekoln. Enligt Uppsala Vatten:s bedömning tillförs läkemedelsrester med det renade avloppsvattnet från Kungsängsverket (Uppsala Vatten och Avfall AB, 2018). Den ekologiska statusen i Ekoln klassas som måttlig, detta främst på grund av övergödning. Sjön uppnår inte heller god kemisk status i och med att höga medelhalter av kvicksilver, polybromerade difenyletrar (PBDE) och föreningar av tributyltenn (TBT) uppmätts (Vatteninformationssystem Sverige, 2017). Enligt Naturvårdsverket (2019) är kvicksilver en av de farligaste miljögifterna. Vid exponering av kvicksilver finns risk för skador på hjärnan och det centrala nervsystemet. PBDE är en grupp svårnedbrytbara bromerade flamskyddsmedel som har olika antal bromatomer. Samtliga av dessa är fettlösliga, vilket resulterar i att de ansamlas i fettvävnader hos levande organismer. Bromerade flamskyddsmedel har länge använts vid brandsläckningsarbete och vid framställning av olika material som inte ska kunna fatta eld (Naturvårdsverket, 2019b). TBT är en tennförening som sedan 60-talet använts i färg för båtskrov. Innehållet av TBT bidrar till att olika vattenlevande organismer inte fastnar på skrovet. Ämnet är starkt giftigt och svårnedbrytbart, det påverkar framförallt fortplantningsförmågan hos vattenlevande snäckor (Naturvårdsverket, 2018). Under sommaren förekommer även algblomning i sjön (Vatteninformationssystem Sverige, 2017).

2.2 ÅRSTIDSBUNDEN CIRKULATION

Ekoln, som en del av Mälaren, är en dimiktisk sjö. Det innebär att omblandning av vattenmassan sker två gånger per år (Uppsala Vatten och Avfall AB, 2018). Omblandningen kan ske då bassängens totala vattenvolym har samma temperatur och densitet, vilket är under vår och höst. Under vintern råder vinterstagnation, även kallad skiktning, i sjön. Om ett istäcke ligger på sjön är temperaturen i vattenmassans översta lager, även kallat epilimnion, 0–1 °C. Under termoklinen, i hypolimnion, har vattenmassan en temperatur av 4 °C, vilket ses i figur 2. Vatten med denna temperatur är alltid beläget i hypolimnion när skiktning råder, detta i och med att vatten har som högst densitet vid 4 °C. När isen smälter under tidig vår ökar temperaturen i ytvattnet. När

ytvattnet värmts upp till 4 °C och därmed fått samma temperatur som bottenvattnet, blandas vattenmassan om med vårcirkulationen. Cirkulationen beror av strömmar från tillflöden, och vindar som skapar vågor på vattenytan, dessa krafter bidrar tillsammans till rörelsemönster i vattenmassan. Vinden bidrar till rörelse på vattenytan och förflyttar den ytliga vattenmassan mot ena sidan av sjön. Vattenytan blir därmed snedställd med en högre vattennivå vid den sidan av sjön som vinden flyttat den ytliga vattenmassan till. För att jämna ut snedställningen uppstår en ström, motsatt vindriktningen, i djupvattnet. Strömmen leder till att djupvatten förs upp till ytan i den del av sjön där vatten förflyttats från med vinden, och vattennivån är lägre. Cirkulationen fortsätter, och en total omblandning av ytvatten och djupvatten sker så länge temperaturprofilen är konstant i vertikalled. Ytvattnet värms upp ytterligare under våren, när ytvattnet har uppnått en högre temperatur än bottenvattnet inställer sig sommarstagnation i sjön. I jämförelse med under vintern befinner sig nu det varmare vattnet i epilimnion och det kallare vattnet, som har en högre densitet, befinner sig i hypolimnion. Vid skiktade förhållanden utan istäcke, under sommaren, sker en kontinuerlig cirkulation i epilimnion. Högre vindhastighet, vilket bidrar till kraftigare cirkulation i epilimnion, leder till att epilimnions tjocklek ökar. På hösten kyles ytvattnet återigen, och höstcirkulationen kan påbörja när ytvatten och bottenvatten uppnått samma temperatur, den totala vattenmassan omblandas (SMHI, 2008). Enligt Robertson och Ragotzkie (1990) är en vattenmassa skiktad om temperaturskillnaden mellan ytvatten och bottenvatten är minst 2 °C.



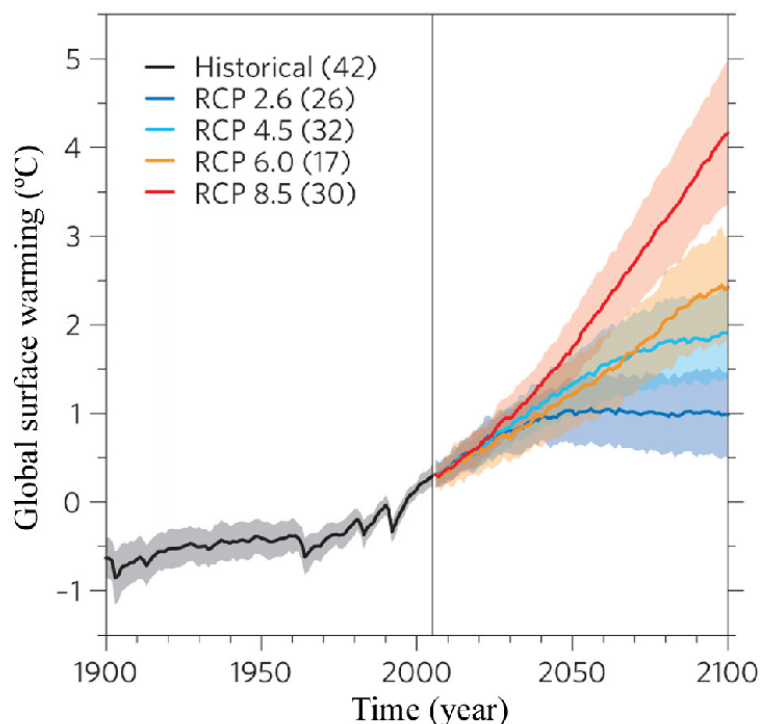
Figur 2: Årstidsbunden cirkulation av vattenmassan i en dimiktisk sjö, där vattenmassan är skiktad under vinter- och sommarstagnation. Vid skiktade förhållanden förekommer epilimnion i ytskiktet, hypolimnion i bottenkiktet, och termoklinen, även kallat språngskiktet, däremellan.

Den säsongsberoende skiktningen och omblandningen leder till att vattenkvaliteten varierar med årstiderna. Vår- och höstcirkulation som leder till att hela vattenmassan omblandas är avgörande för att bottenvattnet ska hållas syresatt. Kännedom om vattenkvalitet i en sjös olika skikt är mycket intressant för de dricksvattenproducenter som använder sig av ytvatten som råvattenresurs. En intagspunkt är ofta placerad under termoklinen för att få ett lagom tempererat vatten, och minska risken för intag av föroreningar. Kemiska och biologiska processer sker långsammare vid låga temperaturer, intag av vatten med låg temperatur leder därför till lägre risk för intag av kemiska och biologiska föroreningar. I och med att utsläpp av föroreningar ofta sker vid ytan är det även, vid skiktade förhållanden, mindre risk för intag av föroreningar längre ned i djupet. Det finns dock risk för att vattnet under termoklinen blir syrefritt under sensommaren och vintern, vid syrefria förhållanden ökar förekomsten av järn och mangan i vattnet. För att få tillgång till råvatten med så hög vattenkvalitet som möjligt används vanligtvis intagspunkter på olika djup för olika årstider (Svenskt Vatten, 2010).

2.3 FRAMTIDA KLIMAT

För att visualisera framtida klimat används ett flertal olika globala klimatmodeller. Olika globala klimatmodeller (GCMs) kan hantera olika processer. Vissa modeller är skapade för att hantera cirkulation i atmosfären, medan andra kan hantera cirkulation i havet. Det finns även mer komplicerade modeller som kan hantera cirkulation i både atmosfären och havet samtidigt, samt utföra beräkningar för värmeutbyte mellan hav och atmosfär. I globala klimatmodeller utförs beräkningar i ett tredimensionellt rutnät i atmosfären eller havet (Rohli och Vega, 2018, s. 327).

För att simulera olika utfall i modellerna används olika strålningsdrivningsscenarier, så kallade Representative Concentration Pathways (RCPs), som drivdata (Rohli och Vega, 2018, s. 326–330). FN:s klimatpanel, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), har definierat fyra sådana scenarier, RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 och RCP8.5. Dessa scenarier syftar till hur mycket strålningsdrivningen kommer att öka, från förindustriell tid till år 2100, alltså hur mycket jordytan kommer att värmas upp på grund av att en större mängd solstrålning stannar i atmosfären, vilket kan ses i figur 3. Scenarierna uttrycks som strålningsdrivning år 2100 där siffran efter RCP syftar till den strålningsdrivning som uppnås uttryckt i W/m^2 (SMHI, 2018). De olika scenarierna bygger på ett antal olika antaganden för hur bland annat befolkningens mängd och klimatpolitik kommer att ha utvecklats till år 2100. Även antaganden om utsläpp av koldioxid (CO_2) och metangas (CH_4) nämns i beskrivningen av de olika scenarierna. Antaganden för RCP4.5 och RCP8.5 ses i tabell 1.



Figur 3: Utveckling av global uppvärmning av markytan i °C från förhistorisk tid till år 2100. Förändringar visas för strålning drivningsscenarioer RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 och RCP8.5. Antalet globala klimatmodeller som en ensemble för respektive scenario bygger på, visas inom parentes (Knutti och Sedláček, 2012).

Tabell 1: Antaganden om utveckling fram till år 2100 för klimatscenarier RCP4.5 och RCP8.5 (SMHI, 2018).

RCP4.5	RCP8.5
•Utsläpp av CO ₂ kulminerar 2040	•Tre gånger så stora utsläpp CO ₂ år 2100
•Snabb utveckling i klimatpolitiken	•Klimatpolitiken utvecklas ej
•Befolkningsmängd under 9 miljarder	•Befolkningsmängd 12 miljarder
•Omfattande skogsplanteringsprogram	•Kraftig ökning av utsläpp av CH ₄
•Mindre arealkrävande jordbruk	•Långsam teknikutveckling

Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (hädanefter SMHI) har utfört nedskalning av RCP-scenarier för hela Sverige med samtliga län. Under nedskalningsprojektet har SMHI använt sig av nio stycken olika globala klimatmodeller. Efter simuleringar med de globala klimatmodellerna har den regionala klimatmodellen RCA4 använts för att ta fram klimatdata med högre upplösning över Sverige. RCA4 är en atmosfärmodell som är skapad av Rossby Centre vid SMHI. Klimatmodellerna skiljer sig åt med avseende på hur de är uppbyggda. Antalet processer och vilka processer som inkluderas i respektive modell avgör noggrannheten. Samtliga klimatmodeller har sina olikheter och kommer därför att generera olika resultat. För att täcka in spridningen mellan de olika klimatmodellerna har SMHI skapat en så kallad ensemble, där resultat från varje modell presenteras (SMHI, u.å.[c]). För att simulera hur

de hydrologiska förhållandena i Sverige kan komma att påverkas av klimatförändringar har SMHI använt sig av de hydrologiska modellerna HBV och HYPE, vilka tar hänsyn till markanvändning i modellområdet (Sjökvist m. fl., 2015b).

En av de klimatmodeller som ingår i ensemblen är jordsystemmodellen EC-Earth, som är ett europeiskt samarbete där SMHI är en central partner. Modellen består av ett flertal olika undermodeller som bidrar till att processer i atmosfär, mark, hav och is kan hanteras. SMHI biaskorrigerar data från EC-Earth genom DBS-metoden, där förändringar i medelvärden och extremvärden behålls (SMHI, 2017). Användning av EC-Earth för klimatmodellering motiveras av att modellen inte är bunden till någon tidsskala, vilket ger möjligheten att modellera klimat både i framtiden och i förhistorisk tid. I och med sin robusthet och förmåga att hantera specifika fysikaliska processer i atmosfären och havet är EC-Earth väl utvecklad för att användas vid olika upplösning i atmosfären och havet (ECMWF, 2018).

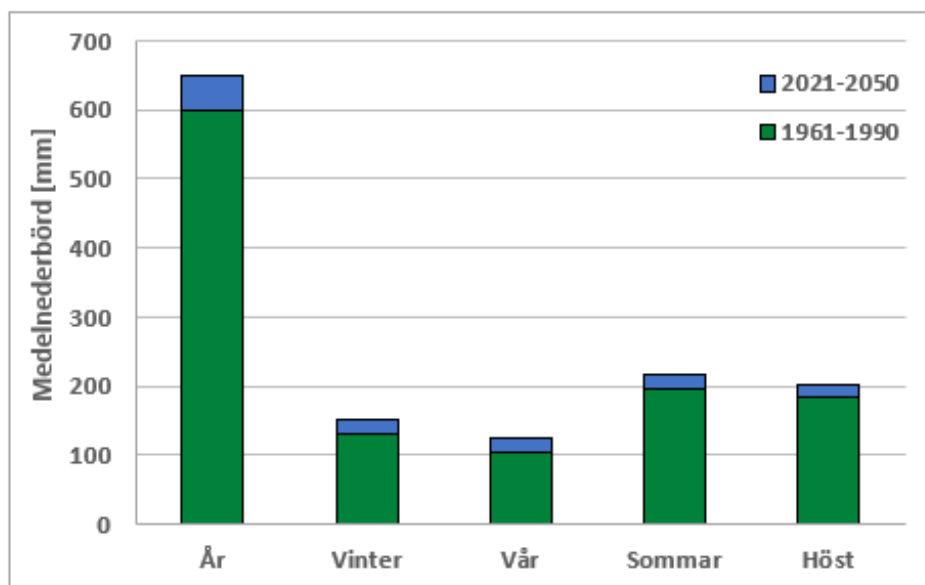
Enligt resultat från SMHI:s nedskalningsarbete, kommer alla de stora svenska sjöarna att påverkas av förändringar i klimatet, enligt beräkningar med HBV-modellen och Kustzonmodellen (Eklund m. fl., 2017a; Eklund m. fl., 2017b; Eklund m. fl., 2017c; Eklund m. fl., 2018; Stensen m. fl., 2017). De klimatförändringar som kommer att göra inverkan på våra svenska sjöar är stigande havsnivåer, förändrade vattenflöden, minskad istäckning och kraftigare säsongsvariationer för vattennivån. Dessa parametrar kommer alla att ha betydelse för sjöarnas framtida användningsområden och vattenkvalitet. Av de fyra stora sjöarna Vätern, Vättern, Mälaren och Hjälmaren är Mälaren troligtvis den sjö som kommer att drabbas hårdast av ett varmare klimat. Detta på grund av Mälarens direkta koppling till Östersjön via Saltsjön (Eklund m. fl., 2018).

2.3.1 Stigande havsnivåer

Stigande havsnivåer påverkas av ett flertal olika faktorer, de viktigaste faktorerna är den termiska expansionen och smältande isar. Mälarens vattennivå ligger idag cirka 70 cm ovanför Saltsjön och de båda vattendragen skiljs åt av Slussen, som är belägen i centrala Stockholm. För att minska risken för översvämningar i Mälaren vid framtida extrema flöden sker idag en ombyggnation av Slussen. Den nya slussen ska kunna släppa igenom större flöden från Mälaren till Saltsjön (Eklund m. fl., 2018). Vid stigande havsnivåer förväntas dock höjdskillnaden mellan Mälaren och Saltsjön på sikt suddas ut. Landhöjningen i området är idag större än havsnivåhöjningen, en stigande havsnivå märks därför inte i regionen i dagsläget. Den globala vattennivåhöjningen förväntas vara exponentiell över tid, och förväntas komma ikapp landhöjningen efter viss tid. Enligt beräkningar utförda av SMHI förväntas havsnivån i Saltsjön överstiga vattennivån i Mälaren år 2050. Detta är problematiskt i och med att risken för att saltvatten ska läcka in i Mälaren blir påtaglig. Inblandning av havsvatten i Mälaren kommer att påverka kvaliteten hos råvatten för dricksvattenproduktion betydligt. Enligt SMHI:s beräkningar kommer nettoförändringen för havsnivån minus landhöjningen att vara +40 cm i Mälaren år 2100 (Andréasson, Gustavsson och Bergström, 2011).

2.3.2 Nederbörd

För ett framtida klimat förväntas mängden nederbörd över året att förändras. Framtida nederbördsmängder för södra delarna av Uppsala län vid mitten av seklet ses i figur 4. Till mitten av seklet kommer det inte att vara någon skillnad mellan nederbördsmängderna mellan de två klimatscenerierna. Figuren visar på en ökad medelnederbörd för samtliga årstider där summan av dygnsmedelnederbörden under respektive årstid presenteras.

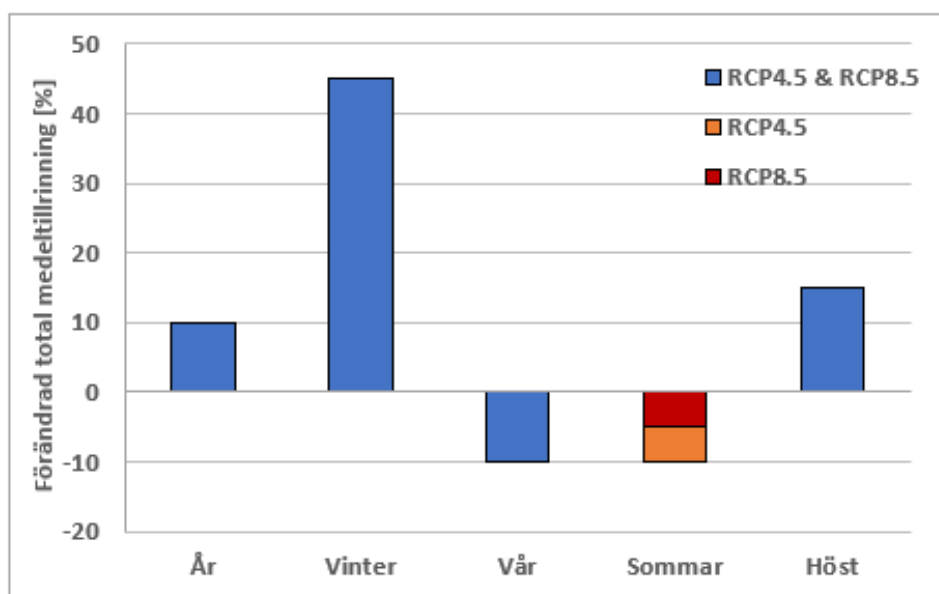


Figur 4: Årsmedelnederbörd och nederbörd uppdelad för samtliga årstider i södra delarna av Uppsala län, vilka angränsar till Ekoln. Givna tidsperioder representerar referensperiod (grön) samt förändring till mitten av seklet (blå). Till mitten av seklet förväntas samma förändring ske för de båda klimatscenerierna RCP4.5 och RCP8.5. Samtliga värden uttrycks som summan av en årstids dygnsmedelvärden i mm. Vinter innefattar månaderna december till februari, samtliga årstider innefattas av tre månader (Sjökvist m. fl., 2015a).

Extrem nederbörd medför risk för kontaminering av ytvatten (IPCC, 2007). Vid extrem nederbörd över en stad spolas olika föroreningar med i vattenmassorna. Föroreningarna kommer från bland annat avgaser, halkbekämpningsmedel och olika korroderande material. Även luftburna föroreningar, som exempelvis aerosoler, hamnar vid nederbörd i dagvattnet genom våtdeposition (Brinkmann, 1985). Dagvattensystemet i Uppsala är uppbyggt kring ett flertal recipienter, samtliga av dessa recipienter ligger inom Ekolns tillrinningsområde (Uppsala Vatten, u.å.). Samtliga föroreningar som inte sedimenteras eller brutits ned längre upp i avrinningsområdet kommer att hamna i Ekoln. Extrem nederbörd eller snösmältning kan även leda till överbelastning i avloppssystemet, vid överbelastning sker bräddning, vilket innebär att avloppsvattnet antingen leds förbi olika steg i reningsverket eller direkt leds vidare till recipienten, utan någon behandling. Avloppsvatten som ej genomgått fullständig behandling eller ingen behandling alls kan även hamna i recipienten på grund av systemfel eller läckor. Utsläpp av obehandlat avloppsvatten bidrar främst till ökad risk för mikrobiologisk påverkan och övergödning (Uppsala Vatten och Avfall AB, 2016a).

2.3.3 Tillrinning

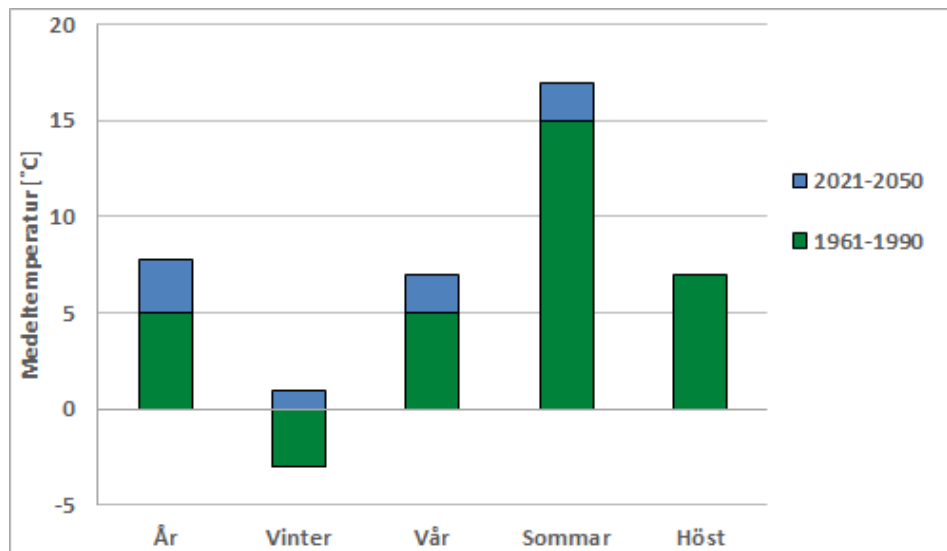
Enligt värden i figur 4, kommer nederbörden att öka vid ett framtida klimat. Detta betyder dock inte att även tillrinningen måste öka. Ett varmare klimat medför att vegetationsperioden blir längre, samt att avdunstningen ökar. Att vegetationsperioden blir längre bidrar till att vegetationen kan ta upp vatten under en längre period på året, och att avrinningen till vattendragen därmed minskar. Ökad avdunstning leder till att mindre andel vatten stannar kvar i marken och i vattendragen. Enligt SMHI:s beräkningar för framtida klimat i Uppsala län, kommer den totala medeltillrinningen under våren och sommaren att minska med cirka 20–25 % till slutet av detta sekel (Sjökvist m. fl., 2015a). I figur 5 redovisas förändring av total medeltillrinning till Ekoln från referensperioden, 1963–1992, till mitten av seklet, år 2050. Under våren och sommaren kommer tillrinningen att minska, och under hösten och vintern kommer den att öka. Under vinter, vår och höst förväntas samma förändring ske för de båda klimatscenerierna. Under sommaren förväntas en mindre tillrinning för RCP4.5. Den absolut största förändringen kommer att ske under vintertid då tillrinningen kan ha ökat med 45 % från referensvärdet.



Figur 5: Procentuell beräknad förändring i total medeltillrinning till Ekoln för hela året, samt för de fyra årstiderna med samma förändring för de båda klimatscenerierna (blå) samt endast RCP4.5 (orange) och RCP8.5 (röd). Samtliga värden uttrycks i procentuell förändring från referensperiod 1963–1992 till och med år 2050 (Sjökvist m. fl., 2015a).

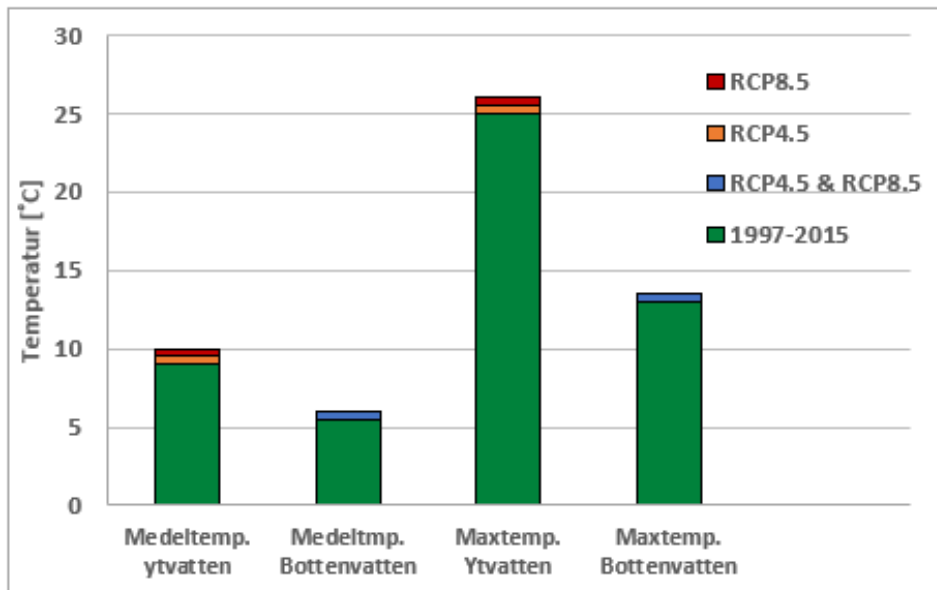
2.3.4 Luft- och vattentemperatur

Ett framtida klimat förväntas medföra högre temperaturer i atmosfären, vilket även bidrar till att vattenytor värms upp. I figur 6 ses förväntad förändring av lufttemperatur i södra Uppsala län, i närheten av Ekoln, från referensperioden 1961–1990 till mitten av seklet. Figuren visar på att lufttemperaturen kommer att stiga för samtliga årstider. Till mitten av seklet förväntas ingen större skillnad mellan de två klimatscenerierna RCP4.5 och RCP8.5 (Sjökvist m. fl., 2015a).



Figur 6: Förändring av årets och årstidernas lufttemperatur i södra delarna av Uppsala län, vilka angränsar till Ekoln. Givna årtal representerar referensperiod (grön) samt mitten av seklet (blå) där samma förändring förväntas för de båda klimatscenerierna, RCP4.5 och RCP8.5. Samtliga värden uttrycks i °C (Sjökvist m. fl., 2015a).

Genom användning av Kustzonmodellen har SMHI även beräknat hur vattentemperaturen i Mälaren kommer att förändras i framtiden. Vid utförande av dessa beräkningar har Mälarens morfologi förenklats, och sjön har endast delats upp i två bassänger, en för den västra- och en för den östra delen av sjön. Enligt värden i figur 7 kommer vattentemperaturen i Mälarens östra delar att stiga. Detta gäller både temperaturer för ytvatten, bottenvatten, medeltemperatur och maxtemperatur. Det bör dock noteras att dessa modelleringsresultat gäller för vikar i Mälaren som är djupare än Ekoln, och samma temperaturer kan därför inte antas gälla i Ekoln. Det kan dock antas att samma mönster med stigande vattentemperaturer för ett varmare klimat även gäller för Ekoln. Den varmaste perioden, då dygnsmedeltemperaturen för ytvattnet överstiger 20 °C, förväntas förlängas i framtiden, perioden har beräknats förlängas med 1–1,5 månad till slutet av seklet. Enligt värden för ytvatten och bottenvatten antas vattentemperaturen komma att förändras på olika djup för klimatscenerierna RCP4.5 och RCP8.5. Resultatet visar på att den period då sjön är skiktat, sommartid, kommer att förlängas. Resultatet visade även på att ju varmare klimatet blir, desto längre ned kommer termoklinen att flyttas och epilimnion sträcka sig djupare ned i sjön. Perioden med kallt vatten, vintertid, kommer att förkortas (Stensen m. fl., 2017).



Figur 7: Nuvarande vattentemperatur samt ökad vattentemperatur i östra delen av Mälaren vid två olika klimatscenarier. De olika färgerna representerar referensperiod (grön), mitten av seklet för de båda klimatscenierna (blå), RCP4.5 (orange) och RCP8.5 (röd) (Stensen m. fl., 2017).

Eftersom skiktning och cirkulation är direkt beroende av förhållanden i atmosfären, såsom vindar och lufttemperatur, är det av intresse att undersöka hur dessa påverkas av ett förändrat klimat. Enligt en studie utförd av Honzo och Stefan (1991), där fyra stycken sjöar i Nordamerika studerades för ett normalvarmt och ett extremvarmt år, påverkades vattenmassans beteende av ett varmare klimat. Vattentemperaturen i epilimnion påverkades kraftigt av en varmare temperatur i atmosfären, vattenmassan i hypolimnion påverkades dock inte lika kraftigt. En annan parameter som påverkades av de varmare förhållandena i atmosfären var avdunstning, vilken ökade med upp till 40 % för det varmare året. Skiktningen i de olika sjöarna förändrades på så sätt att epilimnion sträckte sig längre ned i djupet för det varmare året, och att sommarstagnation ställde in sig något tidigare på året.

2.4 MODELLERINGSVERKTYG MIKE 3

MIKE 3 är ett tredimensionellt hydrodynamiskt modelleringsverktyg utvecklat av Dansk Hydraulisk Institut (DHI). Verktöget är en del av MIKE Zero, som är en samling två- och tredimensionella hydrodynamiska modelleringsverktyg anpassade för Windows. MIKE Zero består av ett flertal olika modelleringsverktyg utvecklade för att kunna hantera avancerade beräkningsmodeller för beräkning av strömning och transport i olika vattenmassor. MIKE 3 är det verktyg som är utvecklat för tredimensionell modellering av djupvatten, flodmynningar och kustvatten (DHI, 2017b). Inom MIKE 3 finns två stycken inbyggda modeller, "Flow Model" och "Wave Model", vilka syftar till modellering av antingen flöden eller vågor (DHI, u.å.).

Det modellområde som anges i en modell av typ MIKE 3, är uppdelat i ett beräkningsnät, även kallat mesh. Beräkningsnätet sträcker sig både i horisontalld och

vertikalled, där beräkningar utförs i varje gridruta, även kallat element, för varje tidssteg. På så sätt kan exempelvis förändring av flöden, spridning av föroreningar eller temperaturförändringar, följas i varje element för varje tidssteg. Elementen kan antingen bestå av “single grid”, “multiple grid” eller “Flexible mesh (FM)”. Single- och multiple grid innebär att beräkningsnätet består av räta linjer, med högre upplösning för multiple grid (DHI, 2018). Flexible mesh är ett typ av rutnät där upplösningen kan variera över modellområdet, det är ett så kallat flexibelt rutnät. Elementen är formade som oregelbundna hexaedrar. Det horisontella beräkningsnätet består av oordnade element i form av trianglar medan det vertikala beräkningsnätet består av ett ordnat rutnät (DHI, 2012b). Modelleringsverktyget är uppbyggt på ett flertal olika moduler som kan hantera olika beräkningar för exempelvis hydrodynamik, advektion och spridning, undervattensakustik, sandtransport, oljeutsläpp och turbulens (DHI, 2018). Samtliga moduler är uppbyggda av en mängd olika ekvationer, vid körning av en modell utförs beräkningar för samtliga ekvationer i varje element i beräkningsnätet. Beräkningstiden påverkas således av beräkningsnätets finmaskighet, det vill säga antalet element, vinkelstorlek inom elementen, samt det minsta elementets storlek (DHI, 2012a).

Modelleringsverktygets förmåga att beräkna vattentemperaturer bygger på att det tar hänsyn till värmeutbyte och strålningsbalans i ett flertal olika processer. I ekvation 1 visas energibalansen mellan inkommande och utgående kortvågig strålning (R_S) och långvågig strålning (R_L), sensibelt värmefflöde (Q_S), latent värmefflöde (Q_L) och värmefflöde mellan markyta och jordskorpa (Q_G) (Rohli och Vega, 2018, s. 93). Modelleringsverktyget tar hänsyn till samtliga förutom (Q_G), eftersom det är vatten och inte mark som modelleras. Hur mycket kortvågig strålning, solstrålning, som når ända fram till markytan, är beroende av avstånd till solen, solvinkel, utomjordisk strålning, molnighet och andelen vattenånga i atmosfären. Genom att modellen tar hänsyn till samtliga av dessa parametrar beräknas den inkommande strålningen för varje tidssteg. Koordinater i beräkningsnätet samt vilken tid på året som simuleringen utförs för, är avgörande för att modellen ska kunna beräkna den kortvågiga strålningen under hela simuleringsperioden. Den långvågiga strålningen är den strålning som avges från föremål på jordytan, vilka värmts upp av den kortvågiga strålningen. Långvågig strålning är främst beroende av meteorologiska förhållanden, såsom lufttemperatur, luftens ångtryck och relativ luftfuktighet. Luftens ångtryck är beroende av lufttemperatur och relativ luftfuktighet, vilka anges som drivdata i modellen. I det sensibla värmefflödet, vilket beror av konvektion, tas hänsyn till parametrar för luftens densitet och specifika värmekapacitet, utbyteskoefficienter för uppvärmning och nedkylning, vindhastigheten tio meter ovanför vattenytan, samt temperatur i luften och vid vattenytan. Det latent värmefflödet beror av avdunstning och beskrivs av parametrar för latent avdunstningsvärme, utbyteskoefficienten för fuktighet, vindhastighet två meter ovanför vattenytan, samt vattenångans densitet vid vattenytan och i atmosfären (DHI, 2017a)

$$(R_S \downarrow - R_S \uparrow) + (R_L \downarrow - R_L \uparrow) = Q_S + Q_L + Q_G \quad (1)$$

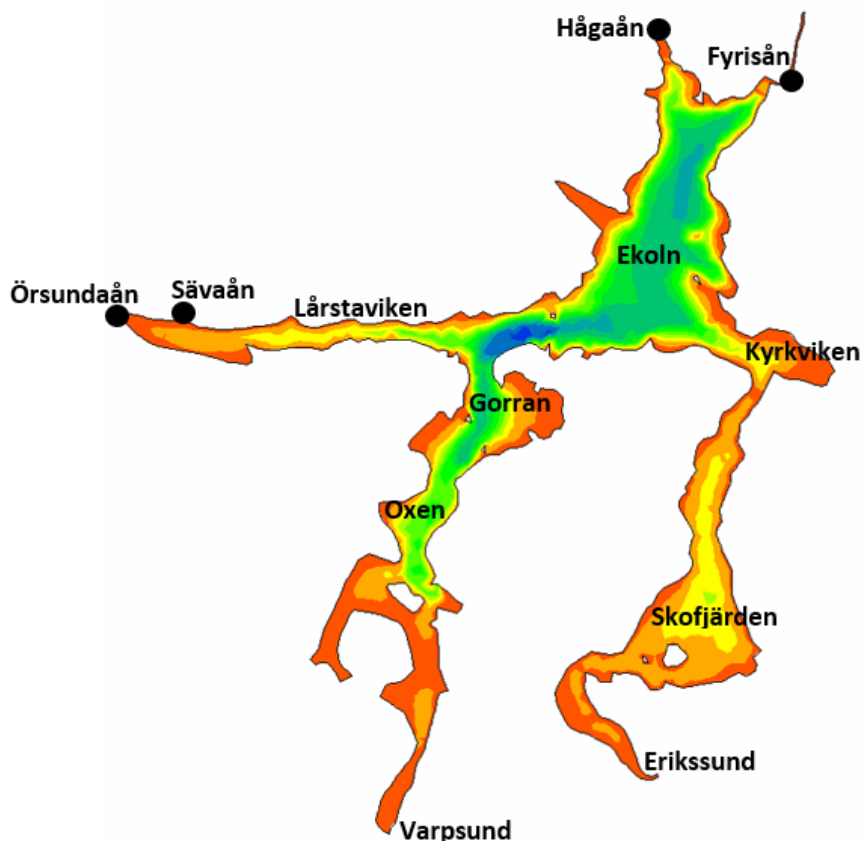
3 METOD

I detta avsnitt beskrivs den modell som kalibrerades och anpassades, metod för validering av modellen, val av referensår, samt metod för simulering av temperaturprofiler i Ekoln vid framtida klimat för år 2050.

3.1 SPRIDNINGSMODELL FÖR EKOLN

På uppdrag av Uppsala Vatten har Tyréns AB skapat en spridningsmodell för Ekoln. Modellen skapades i syfte för att kunna simulera hur vatten från Fyrisån, med viss andel vatten från Kungsängsverket, sprids i sjön. Modellen skulle kunna användas för att identifiera en lämplig intagspunkt för råvatten i sjön. Enligt Tyréns AB (2018) finns vissa brister i spridningsmodellen. I och med bristande djupdata kan osäkerheter i modelluppsättningens batymetri förekomma. Vid framtagande av modellen fanns endast temperaturprofiler med ett mycket begränsat antal datapunkter, vilket bidrar till stora osäkerheter i beskrivning av sjöns skiktning. Tyréns AB simulerade endast en tremånadersperiod.

Modellen är av typ MIKE 3 Flow Model FM, enligt Tyréns AB:s inställningar används moduler för hydrodynamik, transport, temperatur och salinitet, samt turbulens. De olika modulerna kan ta hänsyn till processer för värmetransport, salttransport, tryckskillnader med avseende på densitetsvariationer och variationer i vattennivå, bottenfriktion, vinddrivning på ytan, värmeutbyte mellan vattenmassa och atmosfär, tillflöden, turbulens och corioliseffekten. Den implementerade bottenpogرافin bygger på information från sjökort 112 samt specialsjökort från Sjöfartsverket. Tvärsnittsarean i Fyrisån beskrivs av data för djupmätningar vid Flottsundsbron, i närheten av Fyrisåns utlopp. Modellen drivs med meteorologisk och hydrologisk indata. Den hydrologiska drivdatan gäller för de tillflödande åarna Fyrisån, Hågaån, Sävaån och Örsundaån, vilka representerar 95 % av Ekolns tillflöde. Resterande 5 % består av bäckar och diffusa flöden och dessa tas inte hänsyn till i modellen. Utgående flöde från Kungsängsverket till Fyrisån finns även med i modellen, detta för simulering av hur vatten från Kungsängsverket sprids och späds ut i Ekoln. Det modellområde som gäller för spridningsmodellen sträcker sig mellan Örsundaåns mynning i Lårstaviken i väster, Hågaåns och Fyrisåns mynningar i Ekoln i norr, Kyrkviken i öster och Varpsund och Erikssund i söder, enligt figur 8. För att beskriva vad som händer i djupet är sjön uppdelad i 41 lager i vertikalled, respektive lager har en tjocklek av 1 m (Tyréns AB, 2018).



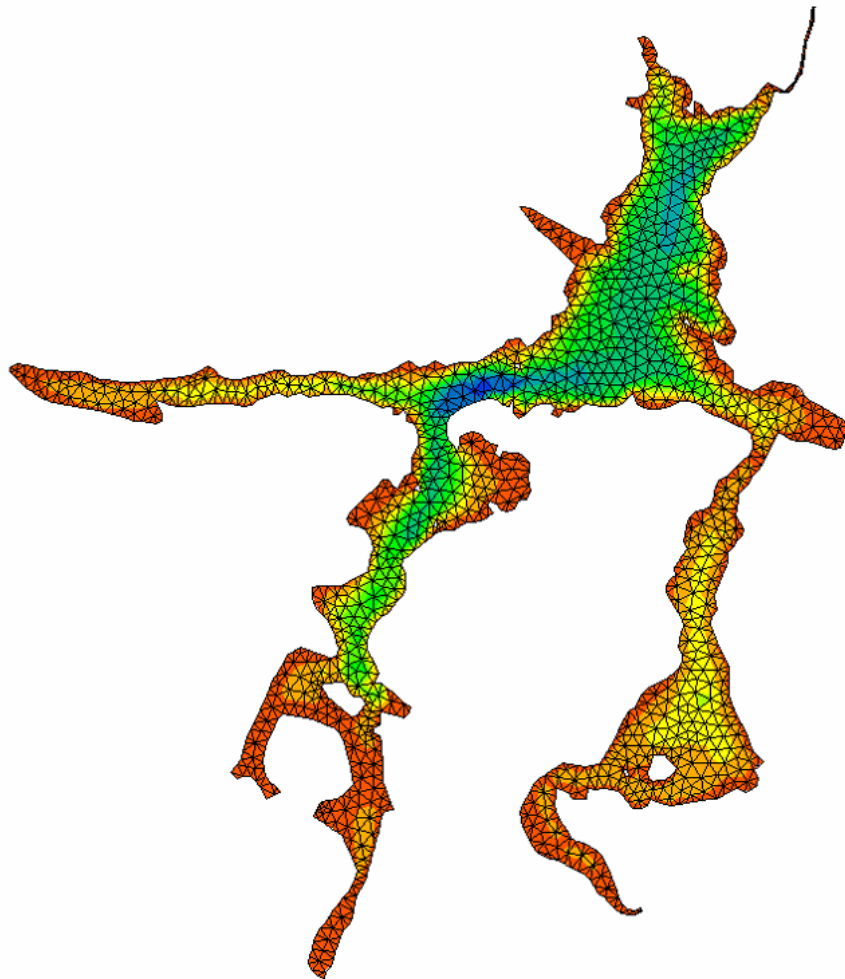
Figur 8: Modellområde med angränsande vikar och tillflöden enligt originalinställningar från Tyréns AB. Tillflödande åar är Örsundaån och Sävaån i väster, samt Hågaån och Fyrisån i norr. Utlopp till resten av Mälaren sker via Erikssund. De olika färgerna visar på sjöns batymetri, uttryckt i meter under ytan, där blå visar på djupast batymetri och röd är grunt vatten.

3.2 ANPASSNING AV MODELL

Den modelluppsättning som erhöles från Tyréns AB (hädanefters originalmodellen) var endast anpassad för att simulera strömningsmönster i Ekoln för sommaren år 2012. För att öka förståelsen för strömningsmönster i Ekoln fanns ett behov av att anpassa modellen till att kunna hantera de mest intressanta perioderna på året sett till den säsongsbberoende skiktningen.

Transportmodulen plockades bort eftersom arbetet, till skillnad från Tyréns AB:s arbete, inte syftade till att undersöka transport och spridning från olika källor. Även beräkningsnätet, modellens mesh, behövde anpassas för modellens nya syfte. Det beräkningsnät som skapats av Tyréns AB var uppbyggt för att noggrant följa spridning av föroreningar genom hela modellområdet. Beräkningsnätet var därför väldigt finmaskigt och bidrog till en väldigt lång beräkningstid, där beräkningstiden var cirka 100 timmar för att simulera en månad. För att minska beräkningstiden skapades ett grövre mesh, vilket ses i figur 9. Eftersom originalmodellen endast körts för en sommarperiod var funktionen för is i modellområdet inte aktiverad. Funktionen för

hantering av ett istäcke med specifik tjocklek aktiverades, och de dagar på året som modellområdet var täckt av is angavs. I originalmodellen fanns fem stycken olika inflöden till modellområdet aktiverade, vilka var Fyrisån, Hågaån, Sävaån, Örsundaån samt Kungsängsverket. Utifrån uppgifter från Uppsala Vatten finns även ett konstant tillflöde från Uppsalaåsen, vilket implementerades i modellen och antogs till det konstanta värdet $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ (Lindqvist Pettersson, 2019). Utdata sparades i form av vattentemperatur i varje lager i sjön, för varje timme under simuleringstiden.



Figur 9: Anpassat beräkningsnät över modellområdet. De olika färgerna visar på sjöns batymetri, uttryckt i meter under ytan. Blåa partier visar var de största djupen finns i modellområdet, medan de röda partierna är som grundast.

3.3 KALIBRERING AV MODELL

Omfattande temperaturprofilmätningar i Ekoln hade utförts av SLU vid mätplats Vreta Udd, som ses i figur 1, under sex olika dagar år 2018, 12 februari, 27 april, 14 maj, 19 juli, 21 augusti och 13 september. Användning av de nya temperaturprofilerna som indata i modellen antogs kunna förbättra modellens kapacitet. Körningstiden anpassades till år 2018, med 12 februari som startdatum och 13 september som slutdatum. Detta för att lätt kunna jämföra simulerade temperaturprofiler mot uppmätta värden.

För att fånga vattenmassans uppvärmning från islossning till slutet av sommaren, samt avkylning under hösten, justerades parametrar för värmeutbyte i modulen för temperatur och salinitet. De parametrar som justerades var koefficienter för uppvärmning och nedkylning, vilka ingår i det sensibla värmeflödet. Det sensibla värmeflödet ses i ekvation 2 där ρ_{air} står för luftens densitet 1.225 kg/m^3 , c_{air} står för luftens specifika värme 1007 J/(kg K) , $c_{heating}$ och $c_{cooling}$ är utbyteskoefficienter för uppvärmning och avkylning vid sensibelt värmeflöde, med värden $0,0011$ och $0,002$ i originalmodellen, W_{10} står för vindhastigheten 10 m ovan vattenytan, T_{air} och T_{water} står för temperatur i luft och vatten (DHI, 2017a).

$$q_c = \begin{cases} \rho_{air} c_{air} c_{heating} W_{10} (T_{air} - T_{water}), & T_{air} \geq T_{water} \\ \rho_{air} c_{air} c_{cooling} W_{10} (T_{air} - T_{water}), & T_{air} < T_{water} \end{cases} \quad [W/m^2] \quad (2)$$

För att anpassa epilimnions tjocklek under skiktade förhållanden ändrades inställningar för kortvågig strålning där koefficienten för ljusextinktion, hur solljuset avtar i djupet, justerades. Solljusets intensitet på ett visst djup beskrivs av Beer's lag som ses i ekvation 3, där $I(d)$ är intensitet vid ett visst djup d , konstanten β tar hänsyn till att en viss andel solljus absorberas vid vattenytan, I_0 beskriver ljusintensitet precis under vattenytan och λ är koefficienten för ljusextinktion (DHI, 2017a).

$$I(d) = (1 - \beta) I_0 e^{-\lambda d} \quad (3)$$

Kalibreringen utfördes genom ett flertal olika testsimuleringar, där utfallet för förändring av olika parametrar undersöktes. Förändring av parametrar i den långvägiga strålningen och det latent värmeflödet förbättrade inte modellens prestation och inställningar från originalmodellen behölls därför för dessa parametrar.

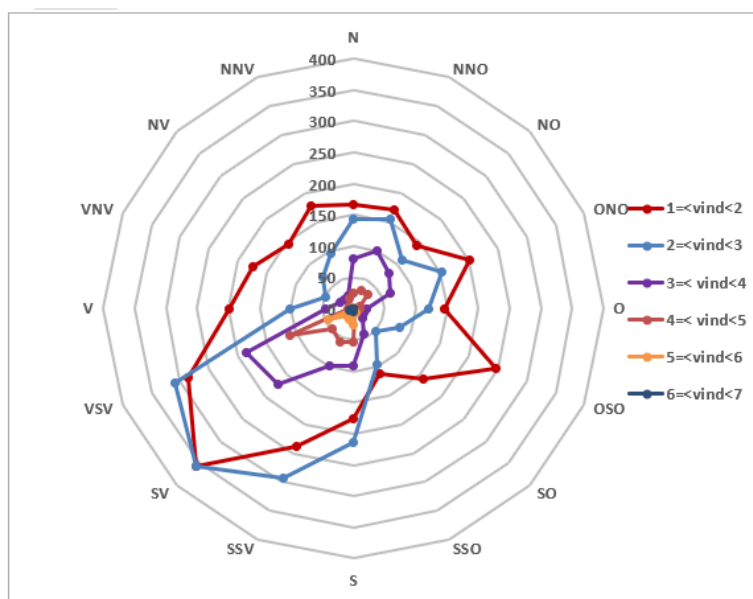
3.3.1 Drivdata för kalibreringsår 2018

För drivning av modellen krävs meteorologisk och hydrologisk drivdata. Timvärden för vindhastighet och vindriktning för år 2018 fördes in som drivdata för vinddrivning på ytan. Utifrån uppgifter från Uppsala Vatten adderades flöde från Uppsalaåsen som ytterligare en källa för tillflöde (Lindqvist Pettersson, 2019). Flödet från Uppsalaåsen antogs strömma in vid Ekolns nordöstra strandkant, söder om Fyrisåns utlopp. Inga exakta koordinater kunde väljas för denna källa i och med sekretess från Uppsala Vatten. Inflöde från åsen antogs även vara konstant till $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$. Inflöden från övriga källor såsom Fyrisån, Hågaån, Kungsängsverket, Sävaån och Örsundaån fördes in som drivdata i modellen i form av dygnsmedelvärden för år 2018. Vid Ekolns utlopp till Mälaren, vid Erikssund, på modellområdets rand, angavs dygnsmedelvärden för medelvattennivå i Mälaren år 2018. Data för vattennivå i Ekoln fanns inte att tillgå, i och med detta användes medelvattennivå i resterande delar av Mälaren, vilket baseras på mätningar vid sex olika mätpunkter i sjön. I delmodulen för temperatur och salinitet angavs ytterligare meteorologiska parametrar för år 2018 som indata för beräkningar av värmeutbyte. De meteorologiska parametrar som angavs var lufttemperatur, relativ luftfuktighet och molnfria förhållanden. Samtliga meteorologiska data angavs som timmedelvärden för hela simuleringperioden. Uppmätt data för molnfria förhållanden fanns ej att tillgå, dessa

beräknades därför som funktion av molnmängd enligt ekvation 4.

$$\text{Molnfria förhållanden} = 100 - \text{molnmängd} \quad [\%] \quad (4)$$

Samtliga meteorologiska data, förutom molnmängd, erhöles från Uppsala universitets mätstation vid Geocentrum, cirka 8 km norr om Ekoln. Data för molnmängd hämtades från SMHI:s mätstation vid Uppsala flygplats. Vindförhållanden under året redovisas i figur 10, där störst andel vind kom från sydväst med hastigheten 1–3 m/s.



Figur 10: Fördelning av vindhastigheter i samtliga vindriktningar, där den vertikala axeln visar antalet tillfällen som respektive vindhastighet förekommit under 2018 vid Uppsala universitets mätstation. Störst andel vind kom från sydväst, med hastigheten 1–3 m/s.

I modulen för temperatur och salinitet angavs drivdata för vattentemperatur i samtliga tillrinningskällor. Uppmätt vattentemperatur i Hågaån fanns ej att tillgå och vattentemperatur för Sävaån användes därför även för Hågaån. Genom jämförelse av flöden i samtliga tillrinnande vattendrag i tabell 2 ansågs att Sävaån var det vattendrag som bäst speglade förhållanden i Hågaån. Som initialförhållande i sjön användes den temperaturprofil som uppmätts vid simuleringsperiodens startdatum, 12 februari 2018. SMHI erhåller information om datum för isläggning och islossning i Sveriges sjöar, utifrån SMHI:s isdata kunde det anges i modellen för vilka dagar på året som det fanns is i modellområdet, förekomst av is angavs för hela modellområdet och tilläts inte variera över området. Isdata fanns ej att tillgå för Ekoln och data för Mälardalens Skarven, belägen vid Märsta cirka 13 km sydost om Erikssund användes därför. Skarven var den vik närmast Ekoln, för vilken isdata fanns att tillgå. Till ytan är Skarven mindre än Ekoln, utflödande vatten från Ekoln passerar genom Skarven och det kan därför förväntas att det är en hög genomströmning i Skarven. På grund av en konstant genomströmning är det möjligt att isläggning sker senare i Skarven än i Ekoln. År 2018

var det 98 dagar med is på Skarven, från den 10 januari till 17 april. Samtliga drivdata för kalibrering av modellen redovisas i tabell 3.

Tabell 2: Medelvattenflöde för total stationskorrigerad vattenföring i Ekolns tillflöden samt beräknade andelar av totalt tillflöde (SMHI, 2019e; Lindqvist Pettersson, 2019).

Tillflöde	Flöde [m ³ /s]	Andel [%]
Fyrisån	14,1	62,5
Hågaån	1,11	4,9
Sävaån	1,55	6,9
Uppsalaåsen	0,05	0,2
Örsundaån	5,76	25,5

Tabell 3: Drivdata för kalibreringsår 2018, flöde avser inflöde till Ekoln från olika källor och Temp. avser vattentemperatur.

	Parameter	Upplösning	Plats	Källa
Meteorologi	Lufttemperatur	1 h	Geocentrum	UU ¹
	Relativ luftfuktighet	1 h	Geocentrum	UU ¹
	Vindhastighet	1 h	Geocentrum	UU ¹
	Vindriktning	1 h	Geocentrum	UU ¹
	Molnighet	1 h	Uppsala flygplats	SMHI ²
Flöde	Fyrisån	24 h	Flottsund	SMHI ³
	Hågaån	24 h	Utlopp	SMHI ³
	Sävaån	24 h	Utlopp	SMHI ³
	Örsundaån	24 h	Utlopp	SMHI ³
	Uppsalaåsen	24 h	Uppsalaåsen	UVAAB ⁴
	Kungsängsverket	24 h	Kungsängsverket	UVAAB ⁵
Temp.	Ekoln	6 dagar/år	Vreta udd	SLU ⁶
	Fyrisån	1 h	Flottsund	SLU ⁷
	Sävaån	2 h	Säva kvarn	US ⁸
	Örsundaån	2 h	Vånsjöbro	US ⁸
Övrigt	Vattennivå	10 min.	Mälaren	SMHI ⁹
	Is	24 h	Mälaren Skarven	SMHI ¹⁰

¹ (Uppsala universitet, 2019)

² (SMHI, 2019d)

³ (SMHI, 2019e)

⁴ (Uppsala Vatten och Avfall AB, 2019a)

⁵ (Uppsala Vatten och Avfall AB, 2019b)

⁶ (SLU, 2019a)

⁷ (SLU, 2019b)

⁸ (Upplandsstiftelsen, 2019)

⁹ (SMHI, u.å.[a])

¹⁰ (SMHI, u.å.[b])

3.4 VALIDERING AV MODELL

Någon statistisk validering hade inte utförts för originalmodellen. De tre statistiska måtten Nash-Sutcliffes effektivitetskoefficient (NSE), Pearsons korrelationskoefficient (r), samt Root mean square error (RMSE), användes därför för att undersöka hur väl simulerade vattentemperaturer i temperaturprofilerna stämde överens med uppmätta värden.

3.4.1 Nash-Sutcliffes effektivitetskoefficient

Nash-Sutcliffes effektivitetskoefficient (NSE) används för att validera hydrologiska modeller. NSE beräknas genom ekvation 5 där O är observerat värde, P är simulerat värde och \bar{O} är medelvärdet av de observerade värdena. NSE kan variera mellan $-\infty$ och 1,0, där 1,0 är en perfekt korrelation och observerade och simulerade värden är identiska (Krause, Boyle och Bäse, 2005). NSE mindre eller lika med noll visar på att modellen inte uppfyller sitt syfte, användning av medelvärdet för de observerade värdena ger en bättre korrelation än simulerade värden (Ritter och Muñoz-Carpena, 2012).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (5)$$

3.4.2 Pearsons korrelationskoefficient

Pearsons korrelationskoefficient (r) beskriver korrelationen mellan två dataset, i detta fall observerade och simulerade värden. r beräknas genom att dividera kovariansen mellan de två dataseten, vilka representeras av X och Y , med standardavvikelserna för dataseten, enligt ekvation 6. Korrelationskoefficienten varierar inom spannet $-1,0$ till $+1,0$ där alla värden mellan $-0,5$ och $-1,0$ samt $+0,5$ och $+1,0$ klassas som starka korrelationer (Toppr, u.å.).

$$r_{XY} = \frac{cov(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (6)$$

3.4.3 Root mean square error

Root mean square error (RMSE) är ett standardmått för att beräkna precision i olika modeller, och beskrivs av ekvation 7 där n är antalet värden och e är skillnaden mellan det observerade och simulerade värdet (Chai och Draxler, 2014).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2} \quad (7)$$

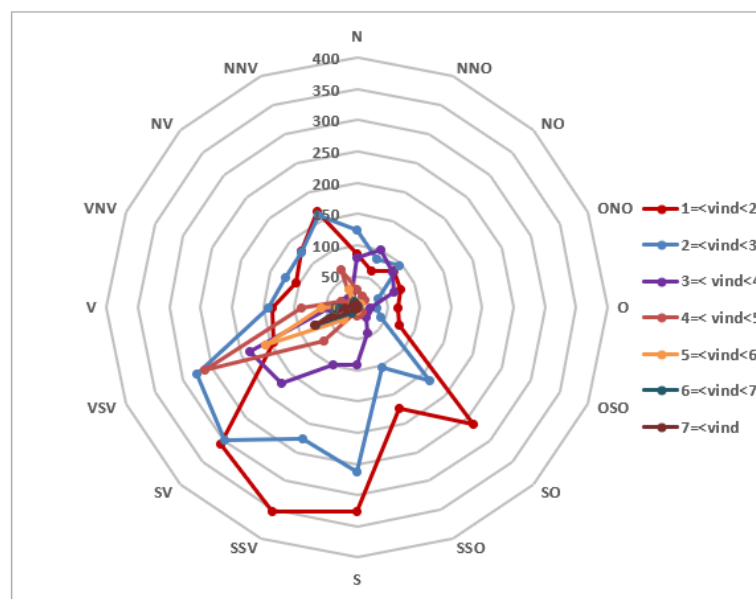
3.5 SIMULERING VID FRAMTIDA KLIMAT

3.5.1 Val av referensår

Framtida klimatdata användes från SMHI:s nedskalningsprojekt för Sverige. Som referensperiod använde sig SMHI av standardnormalperioden 1961–1990, vilket är internationell praxis (Sjökvist m. fl., 2015b). I detta projekt fanns inte möjlighet att simulera en sådan lång tidsperiod och ett referensår representativt för hela referensperioden valdes. Data för relativ luftfuktighet i närheten av modellområdet fanns endast att tillgå mellan åren 1987–1990 och möjliga år för referensperioden begränsades därför drastiskt. Utifrån jämförelser mellan nederbörd och lufttemperatur under hela

referensperioden valdes år 1989 till referensår. För vidare motivering till val av referensår, se figur A1 och figur A2, samt text i Appendix A.

Meteorologiska parametrar: För modellering av referensår drevs modellen med meteorologisk uppmätt data för lufttemperatur, nederbörd, vindhastighet, vindriktning och relativ luftfuktighet från Uppsala universitets mätstation, Uppsala Aut. Stationen är densamma som för meteorologisk data för kalibreringsåret, år 1989 var den dock placerad i Observatorieparken i Uppsala, ca. 1.5 km nordväst om Geocentrum, där stationen var placerad år 2018 (Uppsala universitet, 2019). Molnmängd hämtades från SMHI:s mätstation vid Uppsala flygplats. Fördelning av vindhastighet och vindriktning under året ses som en vindros i figur 11. Fördelning av vindhastigheter i respektive vindriktning visar på att störst andel vind kom från syd-sydväst med hastigheten 1–2 m/s.



Figur 11: Fördelning av vindhastigheter i samtliga vindriktningar, där den vertikala axeln visar antalet tillfällen som respektive vindhastighet förekommit under 1989. Störst andel vind kom från söder, med hastigheten 1–2 m/s.

Vattenföring: Flöden för Hågaån och Sävaån hämtades från SMHI:s vattenwebb, flöden för Fyrisån och Örsundaån beräknades utifrån flöde i Sävaån enligt förhållanden i tabell 2. Flöde för Uppsalaåsen antogs vara detsamma som för kalibreringsår 2018, 0,05 m³/s. Utflöde från Kungsängsverket beräknades till att vara konstant för alla årets dygn utifrån angett årsflöde från Uppsala Vatten för år 1989 (Uppsala Vatten och Avfall AB, 2019b).

Vattentemperatur: Uppmätt data för vattentemperaturer för tillflödande åar innefattades av stora luckor under året och för Kungsängsverket fanns ingen temperaturdata att tillgå. Vattentemperaturer för dessa fem tillflöden ställdes därför in till att anta samma vattentemperatur som i sjön. Någon detaljerad temperaturprofil för början av 1989 fanns ej att tillgå. Enligt figur A3 berodde värden i det övre skiktet i en temperaturprofil inte nämnvärt av temperaturen i föregående månad. Det antogs därför att andra parametrar,

såsom meteorologi, påverkade vattentemperaturer i mycket större grad än hur vattentemperaturen var under föregående månad. I och med detta användes den temperaturprofil som uppmätts 12 februari 2018 som initialdata även för år 1989.

Vattennivå och is: Data för vattennivå i Mälaren för referensåret hämtades från SMHI:s Vattenwebb. Även isdata hämtades från Vattenwebb, där information om is i Mälarviken Skarven antogs stämma även för Ekoln. År 1989 var det 56 dagar med is på Skarven, från 1 januari till 4 februari, samt från 11 december till 31 december. Samtliga drivdata för referensår samt var data hämtats redovisas i tabell 4. Precis som för kalibreringsåret jämfördes simulerade temperaturprofiler för referensåret med uppmätta temperaturprofiler, vilka erhöles från SLU:s öppna databas MVM data (SLU, 2019c).

Tabell 4: Drivdata för referensår 1989, flöde avser inflöde till Ekoln från olika källor.

	Parameter	Upplösning	Plats	Källa
Meteorologi	Lufttemperatur	1 h	Uppsala Aut	SMHI ¹
	Nederbörd	1 h	Uppsala Aut	SMHI ¹
	Relativ luftfuktighet	1 h	Uppsala Aut	SMHI ¹
	Vindhastighet	1 h	Uppsala Aut	SMHI ¹
	Vindriktning	1 h	Uppsala Aut	SMHI ¹
	Molnighet	1 h	Uppsala flygplats	SMHI ¹
Flöde	Hågaån	24 h	Utlopp	SMHI ²
	Sävaån	24 h	Utlopp	SMHI ²
	Uppsalaåsen	24 h	Uppsalaåsen	UVAAB ³
	Kungsängsverket	24 h	Kungsängsverket	UVAAB ⁴
Övrigt	Vattentemp.	2018-02-12	Ekoln, Vreta udd	SLU ⁵
	Vattennivå	24 h	Mälaren	SMHI ⁶
	Is	24 h	Mälaren Skarven	SMHI ⁶

¹ (SMHI, 2019d)

² (SMHI, 2019e)

³ (Uppsala Vatten och Avfall AB, 2019a)

⁴ (Uppsala Vatten och Avfall AB, 2019b)

⁵ (SLU, 2019a)

⁶ (SMHI, u.å.[b])

3.5.2 Simulering år 2050

I SMHI:s nedskalningsprojekt användes tidsperioden 2021–2050 för att simulera vad som kommer att ske till mitten av seklet (Sjökvisst m. fl., 2015b). I och med att det inte var möjligt att simulera en sådan lång tidsperiod i detta projekt valdes år 2050 som tidsperiod för att representera mitten av seklet.

Meteorologiska parametrar: SMHI:s studie om vilken meteorologisk parameter som kommer att påverkas mest av ett förändrat klimat, resulterade i att lufttemperatur är den parameter som kommer att förändras mest. I och med detta var lufttemperatur den enda meteorologiska parameter som förändrades i SMHI:s studie om framtida

vattentemperaturer och is i Mälaren (Stensen m. fl., 2017). Baserat på SMHI:s resultat användes drivdata för referensåret även för 2050, för de meteorologiska parametrarna relativ luftfuktighet, vindhastighet, vindriktning och molnmängd. Drivdata för lufttemperatur och nederbörd för de båda klimatscenerierna RCP4.5 och RCP8.5, erhöles som griddade värden från klimatmodellen EC-EARTH från SMHI:s nedskalningsprojekt. Data levererades som griddade dygnsmedelvärden för lufttemperatur, samt total dygnsnederbörd för hela Sverige, där gridrutornas upplösning var 4×4 km. Data för 13 stycken gridrutor, vilka täckte modellområdet, valdes ut och medelvärdesbildades för respektive klimatscenario. Skillnader i lufttemperatur och nederbörd mellan referensår och de två framtidsscenerierna ses i figur B1 och figur B2.

Vattenföring: Förändring i flöde i Fyrisån och Örsundaån, från och med referensperioden 1981–2017 till och med år 2050 för RCP4.5 och RCP8.5, hämtades som förändring för respektive månad uttryckt som procent från SMHI:s Hypeweb. Data från SMHI:s Hypeweb har simulerats med hjälp av de tre hydrologiska modellerna E-HYPE21, Lisflood och VIC421. Enligt tillrinningsområden i Hypeweb ligger Hågaån i samma område som Fyrisån, och Sävaån i samma område som Örsundaån, i och med detta antogs samma förändring ske för Hågaån som för Fyrisån och Sävaån som för Örsundaån (SMHI, 2019c). Dagligt flöde för de fyra åarna år 2050 beräknades genom att multiplicera den procentuella förändringen för respektive månad från Hypeweb med flödesdata för referensåret. Tillflöde från Uppsalaåsen antogs till samma flöde som för kalibreringsåret och referensåret, och förändrades inte mellan de olika klimatscenerierna. Enligt Uppsala Vatten förväntas utflödet från Kungsängsverket vara $30\,000\text{ Mm}^3/\text{år}$ vid år 2050 (Uppsala Vatten och Avfall AB, 2019b). Skillnader i vattenföring, mellan referensår och framtidsscenerier, för de fyra tillflödande åarna ses i figur B3 och figur B4.

Vattentemperatur: Enligt samma antagande som för referensåret, användes temperaturprofil för 12 februari 2018 som drivdata för modellområdets vattentemperatur i vertikalled. Även vattentemperaturer i tillflödande åar och Kungsängsverket antogs som för referensåret ha samma temperatur som sjön. Vattentemperatur i Uppsalaåsen hölls konstant till $8\text{ }^\circ\text{C}$, som i fallen för kalibreringsår och referensår.

Vattennivå och is: Enligt Andréasson m.fl. (2011) sker idag en ombyggnad av Slussen i Stockholm, för att vattennivåerna i Mälaren även ska kunna regleras i framtiden, för att varken bli för höga eller för låga, samt att saltvatten inte ska kunna tränga in i sjön. I och med ombyggnation av Slussen och den ständiga regleringen som sker av vattennivån i Mälaren, gjordes antagandet om att vattennivån i Mälaren och i Ekoln inte kommer att förändras nämnvärt till och med år 2050. Drivdata för vattennivå i Mälaren för referensåret användes därför även för simulering av år 2050 för de båda klimatscenerierna. Isdata för år 2050 sammanställdes från SMHI:s resultat för östra Mälaren (Stensen m. fl., 2017). Utifrån SMHI:s resultat angående antal dagar med is angavs 20 isdagar för RCP4.5 och RCP8.5. Is angavs mellan tidsperioderna 1 till 17 januari, samt 29 till 31 december. Samtliga parametrar för drivdata presenteras i tabell 5.

Tabell 5: Drivdata för framtida klimat för RCP4.5 och RCP8.5 vid år 2050, flöde avser inflöde till Ekoln från olika källor.

	Parameter	Upplösning	Plats	Källa
Meteorologi	Lufttemperatur*	24 h	Gridrutor ¹	SMHI ²
	Nederbörd*	24 h	Gridrutor ¹	SMHI ²
	Relativ luftfuktighet	1 h	Uppsala Aut	SMHI ³
	Vindhastighet	1 h	Uppsala Aut	SMHI ³
	Vindriktning	1 h	Uppsala Aut	SMHI ³
	Molnighet	1 h	Uppsala flygplats	SMHI ³
Flöde	Fyrisån*	Månad	Utlopp	SMHI ⁴
	Hågaån*	Månad	Utlopp	SMHI ⁴
	Sävaån*	Månad	Utlopp	SMHI ⁴
	Örsundaån*	Månad	Utlopp	SMHI ⁴
	Uppsalaåsen	Månad	Uppsalaåsen	UVAAB ⁵
	Kungsängsverket	Månad	Kungsängsverket	UVAAB ⁶
Övrigt	Vattentemp.	2018-02-12	Ekoln, Vreta udd	SLU ⁷
	Vattennivå	24 h	Mälaren	SMHI ⁸
	Is	År	Östra Mälaren	SMHI ⁹

* Separat drivdata för RCP4.5 och RCP8.5

¹ 13 stycken gridrutor över modellområdet

² (SMHI, 2019a)

³ (SMHI, 2019d)

⁴ (SMHI, 2019c)

⁵ (Uppsala Vatten och Avfall AB, 2019a)

⁶ (Uppsala Vatten och Avfall AB, 2019b)

⁷ (SLU, 2019a)

⁸ (SMHI, u.å.[b])

⁹ (Stensen m. fl., 2017)

3.5.3 Jämförelse mellan kalibreringsår och referensår

För ytterligare validering av modellen undersöktes även hur modelluppsättningen hanterade den årstidsbundna skiktningen under referensåret. För att förklara skillnader mellan de olika åren jämfördes uppmätta lufttemperatur, yt- och bottenvattentemperatur, termisk energi i vattenmassan, samt färgtal under olika månader. Uppmätt lufttemperatur för referensår och kalibreringsår hämtades från Uppsala universitets meteorologiska mätstation Uppsala Aut (SMHI, 2019d).

Den termiska energin i sjön, H (J), beskrivs enligt ekvation 8, där ρ är vattnets densitet uttryckt i kg/m^3 , c_p vattnets specifika värmekapacitet uttryckt i $\text{J/kg}^\circ\text{C}$, Z_{max} är det maximala djupet i sjön uttryckt i m, $A(z)$ är sjöns area över olika djup i m^2 och $T(z)$ är vattentemperatur vid olika djup uttryckt i $^\circ\text{C}$. Vattnets densitet och specifika värmekapacitet antogs vara konstanta till 1000 kg/m^3 och $4217 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ för samtliga vattentemperaturer (Eklund, 1998). Sjöns area för olika djup, $A(z)$, avläses från

hypsograf för Ekoln, bassäng B004 i figur A4.

$$H = \rho c_p \int_0^{z_{max}} A(z)T(z) dz \quad [J] \quad (8)$$

Färgtal för kalibreringsåret 2018 och referensåret 1989 studerades för att undersöka skillnader i vattnets ljusgenomsläplighet. Uppmätt data för färgtal i Ekoln för de båda åren fanns ej att tillgå, färgtal beräknades därför från absorbansvärde för filtrerat prov vid 420 nm (SLU, 2018). Förhållande mellan färgtal och absorbans beskrivs av ekvation 9, där enheten mgPt/l innebär att vattnets färg jämförts med färgen för en standard med hexakloroplatinat (PtCl_6^{2-}) (Löfgren, Forsius och Andersen, n.d.). Data för absorbansvärde hämtades från SLU:s öppna databas (SLU, 2019c). Ett högre färgtal visar på mörkare vatten och ljusextinktionen, λ i ekvation 3, blir således högre.

$$\text{Färgtal} \approx 500 \cdot \text{Abs}_{420} \quad [\text{mgPt/l}] \quad (9)$$

4 RESULTAT

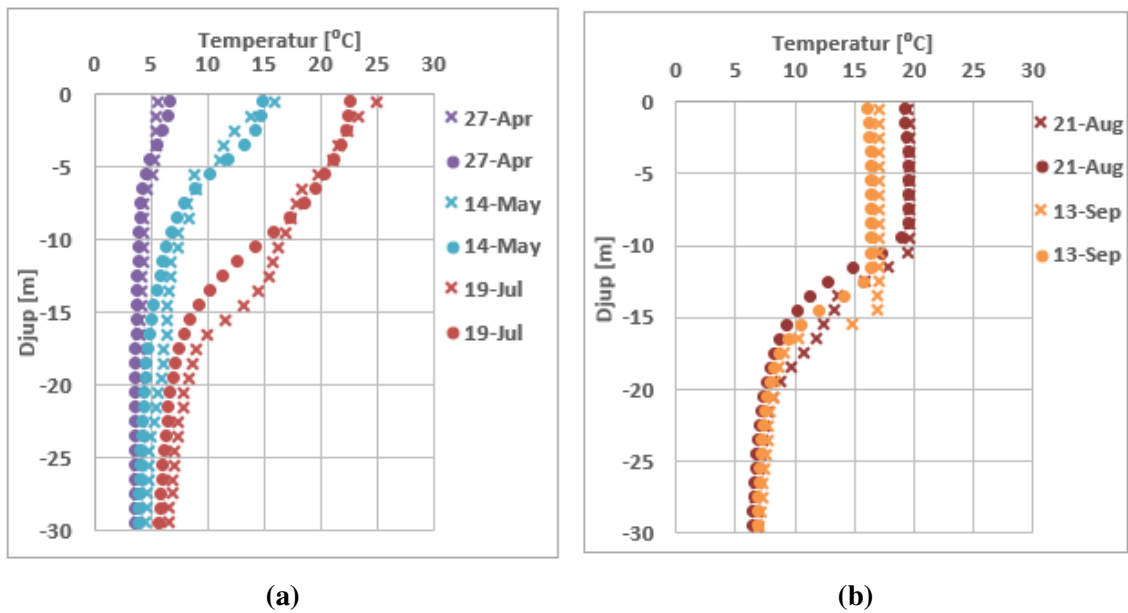
I följande avsnitt redovisas först resultat från kalibrering av modell och sedan resultat för simulering av framtida klimat där utfall från de båda klimatscenerierna jämförs med referensåret.

4.1 KALIBRERINGSRESULTAT

I tabell 6 redovisas de parametrar som kalibrerades i modellen, samt kalibreringsvärde för respektive parameter. Modifiering av modellens mesh, där antal noder, antal element och det minsta elementets area ändrades, bidrog till att beräkningstiden för att simulera en månad minskade från 100 timmar till cirka 10 timmar. Figur 12 visar uppmätta temperaturprofiler (x) för sex olika dagar år 2018, samt simulerade temperaturprofiler (o) efter kalibrering av modellen för samma tid på året. Modellens förmåga att simulera temperaturprofiler som stämde överens med uppmätta temperaturprofiler, förbättrades genom kalibrering. Enligt jämförelse mellan uppmätta och simulerade temperaturer i ytvattnet, efter kalibrering, hade modellen fortfarande vissa svårigheter med att fånga vattenmassans uppvärmning och nedkylning vid olika tidpunkter på året. Genom jämförelse med uppmätta värden, simulerar modellen en för långsam uppvärmning av ytvattnet i april och för snabb uppvärmning i maj och juli. På samma sätt simuleras för snabb nedkylning i september. Uppvärmning och nedkylning av vattenmassan beror av utbyteskoefficienter för uppvärmning och nedkylning ($c_{heating}$ och $c_{cooling}$). Modellen har även vissa svårigheter med att fånga epilimnions djup vid skiktade förhållanden. Kalibrering av koefficienten för ljusextinktion (λ) bidrog till att epilimnions djup anpassades väl i augusti men inte lika väl i september. Statistisk validering utfördes för 150 st uppmätta och 150 st simulerade värden. Enligt den statistiska valideringen var NSE 0,96, r 0,99 ($p < 0,001$) och RMSE 1,05 °C.

Tabell 6: Anpassade parametrar i modellens mesh samt kalibrerade parametrar för värmeutbyte. $c_{heating}$ och $c_{cooling}$ står för utbyteskoefficienter för uppvärmning och nedkylning vid sensibelt värmeutbyte och λ är koefficienten för ljusextinktion.

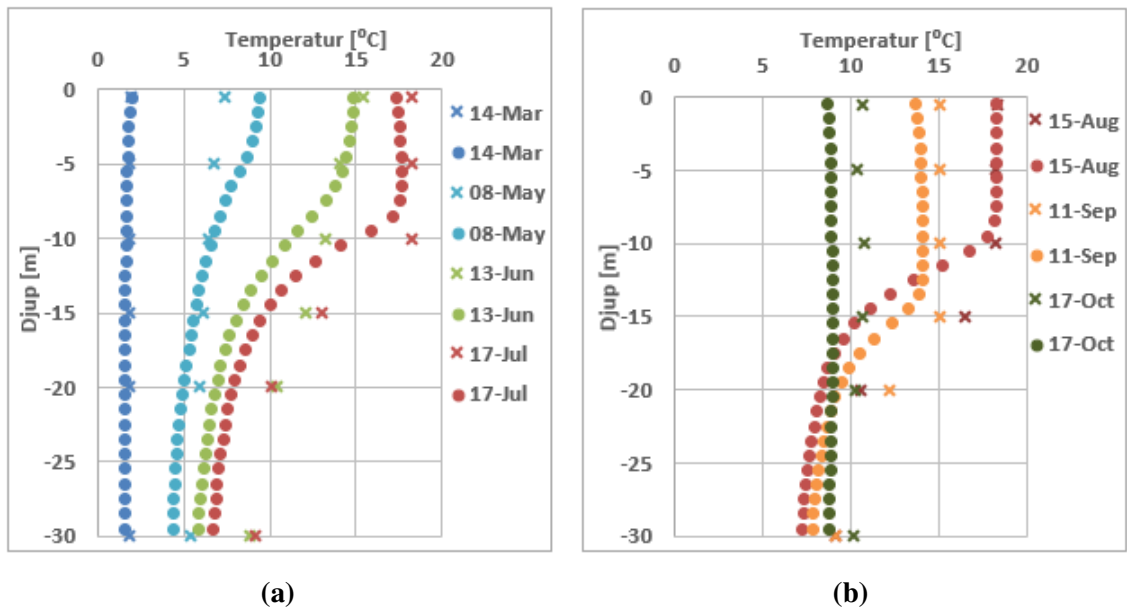
Typ	Parameter	Kalibrerat värde	Original-modell	Notering
Mesh	Antal noder	1 758	7 238	Samtliga parametervärden togs fram genom en mängd olika testsimuleringar
	Antal element	2 570	12 975	
	Minsta element	617 m ²	499 m ²	
Värmeutbyte	$c_{heating}$	0.0085	0.0011	
	$c_{cooling}$	0.0096	0.002	
	λ	0.25 m ⁻¹	1 m ⁻¹	



Figur 12: Uppmätta- (x) samt simulerade (o) vattentemperaturer för sex olika dagar år 2018. Temperaturprofiler för 27 april, 14 maj och 19 juli visas i a, medan temperaturprofiler för 21 augusti och 13 september visas i b. Uppmätta värden hämtade från Institutionen för vatten och miljö vid SLU (SLU, 2019a).

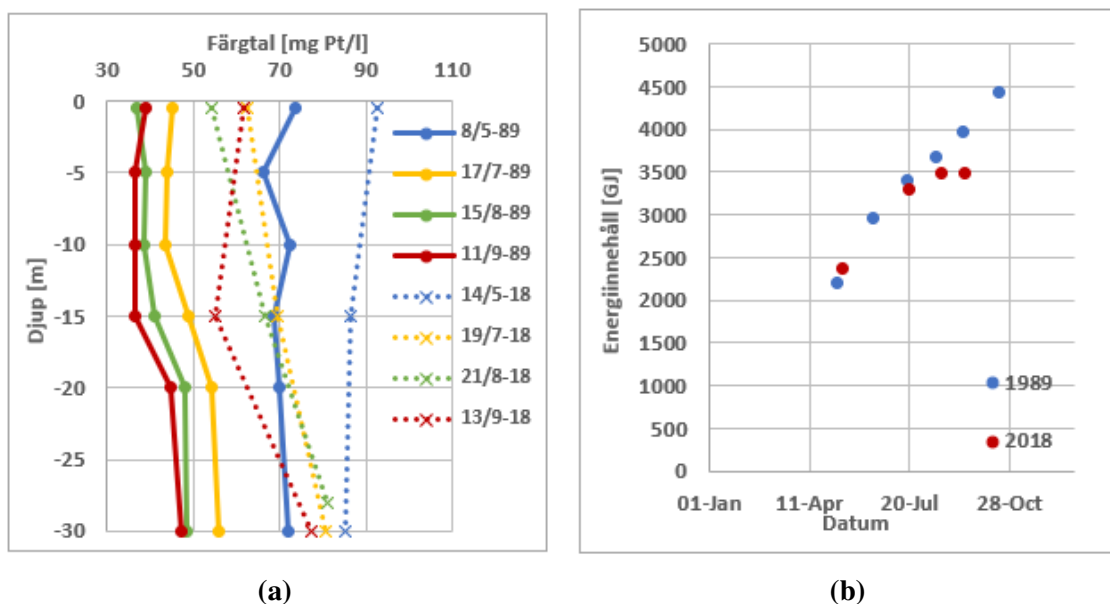
4.2 JÄMFÖRELSE MELLAN KALIBRERINGSÅR OCH REFERENSÅR

Vid jämförelse av uppmätta och simulerade temperaturprofiler för referensår 1989, vilka redovisas i figur 13, stämmer dessa inte lika bra överens som för kalibreringsåret 2018 i figur 12. Störst skillnader mellan uppmätta och simulerade temperaturprofiler för år 1989 är det under stabilt skiktade förhållanden under sommaren, från juli till september, där bottenvattnet inte uppnår samma temperaturer som för uppmätta värden. Enligt simulerade värden var vattenmassan skiktad den 8 maj 1989, något som inte visas för uppmätta värden. Statistisk validering för referensår 1989 utfördes för 42 stycken uppmätta och 42 st simulerade värden. NSE var 0,85, r 0,96 ($p < 0,001$) och RMSE 1,96 °C, vilka alla tre visar på att uppmätta och simulerade värden stämmer sämre överens med varandra för referensåret jämfört med för kalibreringsåret, statistisk validering för kalibreringsår 2018 redovisas i avsnitt 4.1.



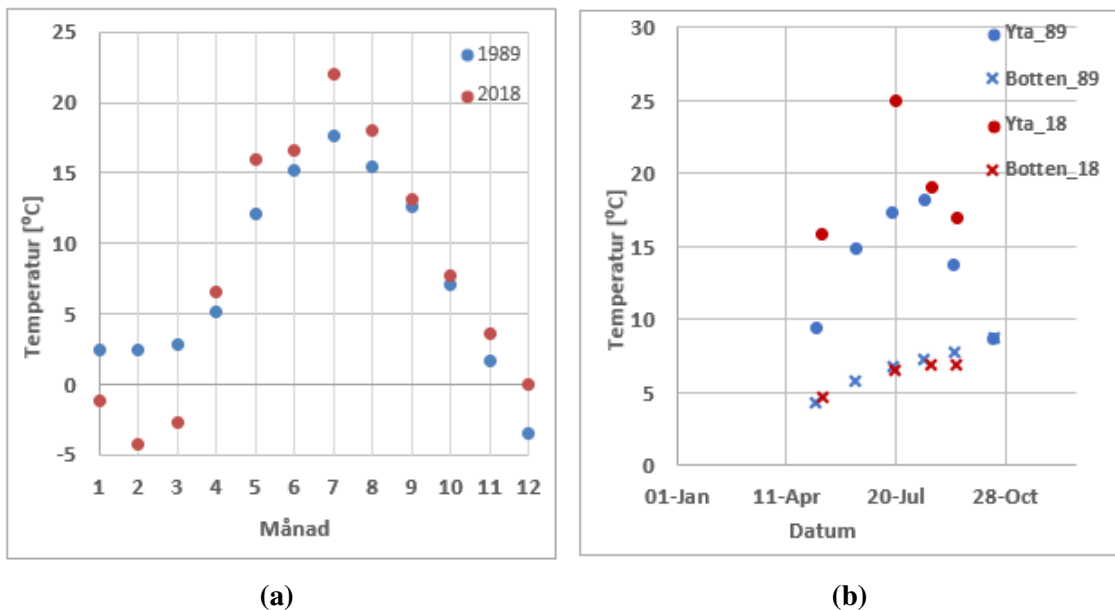
Figur 13: Jämförelse mellan uppmätta (x) och simulerade (o) temperaturprofiler för referensår 1989. Temperaturprofiler för 14 mars, 8 maj, 13 juni och 17 juli visas i figur a medan profiler för 15 augusti, 11 september och 17 oktober visas i figur b.

För att undersöka varför modellen presterade sämre vid simulering av referensår 1989 än för simulering av kalibreringsår 2018 undersöktes om några större skillnader i vattenmassan förekom för de två olika åren. Eftersom modellen inte lyckades fånga vattentemperaturen i hypolimnion för referensåret, undersöktes om vattnets färg, och således koefficienten för ljusextinktion, påverkade hur mycket värmeenergi som simulerades i djupet. Jämförelse mellan färgtal för kalibreringsår och referensår visas i figur 14a. Färgtal för månaderna maj, juli, augusti och september för respektive år redovisas. Resultat i figuren visar på att vattenmassan hade en mörkare färg år 2018 jämfört med år 1989, vilket gäller för alla undersökta månader. I figur 14b redovisas det beräknade totala termiska energiinnehållet, enligt ekvation 8, i hela vattenmassan i Ekoln för år 1989 och 2018. Energiinnehållet var högre för samtliga månader, förutom i maj, år 1989 än för år 2018. Mer solstrålning kan ta sig ned i djupet i en ljusare vattenmassa, energimängden för 1989 är därmed högre än för år 2018.



Figur 14: Färgtal [mg Pt/l] i djupet i Ekoln för månaderna maj, juli, augusti och september för åren 1989 och 2018 i a. I b redovisas beräknat totalt energihåll [GJ] i Ekoln för 1989 (blå) och 2018 (röd)

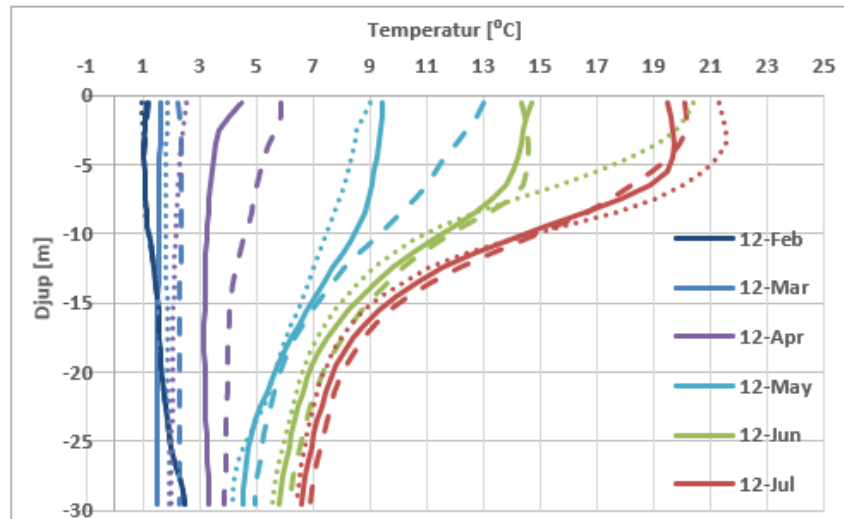
Eftersom ytvattentemperatur är beroende av lufttemperatur och energimängd i vattenmassan är beroende av temperatur i både ytvatten och bottenvatten undersöktes hur lufttemperaturer, ytvattentemperaturer och bottenvattentemperaturer varierade för referensår 1989 och kalibreringsår 2018. Jämförelse mellan lufttemperaturer för de båda åren redovisas i figur 15a. Under januari till april var lufttemperaturen lägre år 2018 i jämförelse med år 1989. Under sommarmånaderna 2018 steg temperaturen kraftigt och det blev varmare än för samma tid på året 1989. Vid jämförelse mellan yt- och bottenvattentemperaturer, i figur 15b, för de två åren ses att temperaturer för ytvatten följer samma utveckling som lufttemperaturen för respektive år. Temperaturer i ytvattnet från april till september, är varmare för år 2018 än för år 1989. Temperaturer i bottenvattnet var mycket lika mellan de två åren, om något högre för år 1989. Resultatet visar på att temperaturer i ytvattnet är direkt beroende av lufttemperatur, temperaturer i bottenvattnet är dock mycket lika för två åren och varken vattenfärg eller lufttemperaturer antas därför påverka temperaturen i bottenvattnet. Ekoln är troligtvis för djup för att vattnets färg och ska ha någon betydelse för hur mycket energi som kommer ned djupet.



Figur 15: Månadsmedelvärden för uppmätt lufttemperatur vid Observatorieparken år 1989 (blå), samt vid Geocentrum, Uppsala universitet år 2018 (röd) i figur a. Uppmätt ytvattentemperatur (o) och bottenvattentemperatur (x) för åren 1989 (blå) och 2018 (röd) visas i figur b.

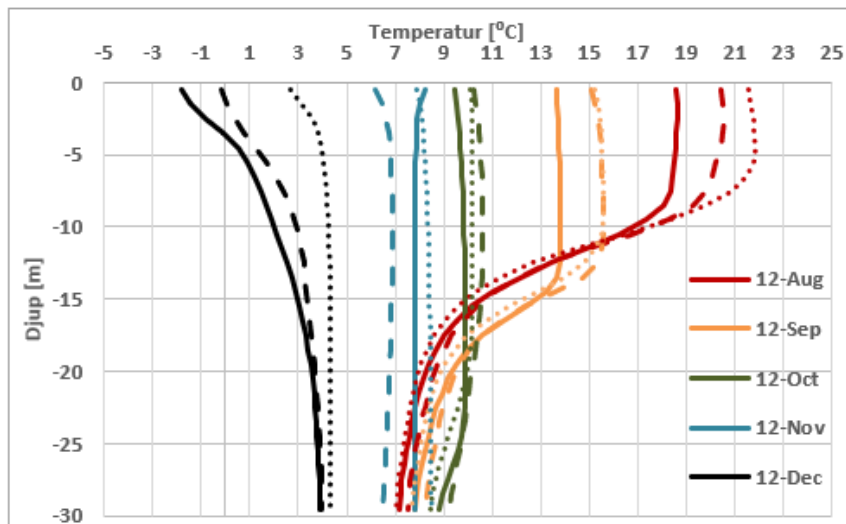
4.3 SIMULERING AV FRAMTIDA KLIMAT

I figur 16 visas en simulerad temperaturprofil för varje månad då uppvärmning av vattenmassan sker, från och med startdatum 12 februari till och med 12 juli, för referensåret 1989 (–), samt RCP4.5 (– –) och RCP8.5 (· ·) för år 2050. Enligt temperaturprofiler för februari och mars förväntas ingen större förändring ske, varken till år 2050 eller mellan de två olika framtidsscenarierna. Temperaturprofil för den 12 april 1989 och RCP4.5 vid år 2050, visar på att ytvattnet har börjat värmas upp, något som ännu inte inträffat för RCP8.5 år 2050. Precis som i april är det scenario RCP8.5 år 2050 som visar på kallast temperaturer den 12 maj, temperaturen är något kallare än för referensåret genom hela djupet. I maj förväntas temperaturen i ytvattnet att öka med ungefär 4 °C från referensåret till år 2050, för RCP4.5. Vid jämförelse av temperaturprofiler för 12 juni är temperaturprofiler för referensåret och RCP4.5 mycket lika. Temperaturprofil för juni år 2050 vid RCP8.5 visar däremot på en ytvattentemperatur som är 6 °C varmare än för referensåret och RCP4.5. Även i juli är temperaturprofiler för referensåret och RCP4.5 mycket lika, om något varmare temperatur i ytvattnet för framtidsscenariet. För RCP8.5 är ytvattentemperaturen 2 °C varmare än för referensåret. Att temperaturen i ytvattnet är som varmast, och bottenvattnet är som kallast, för RCP8.5, visar på att skiktningen är som mest stabil vid detta scenario.



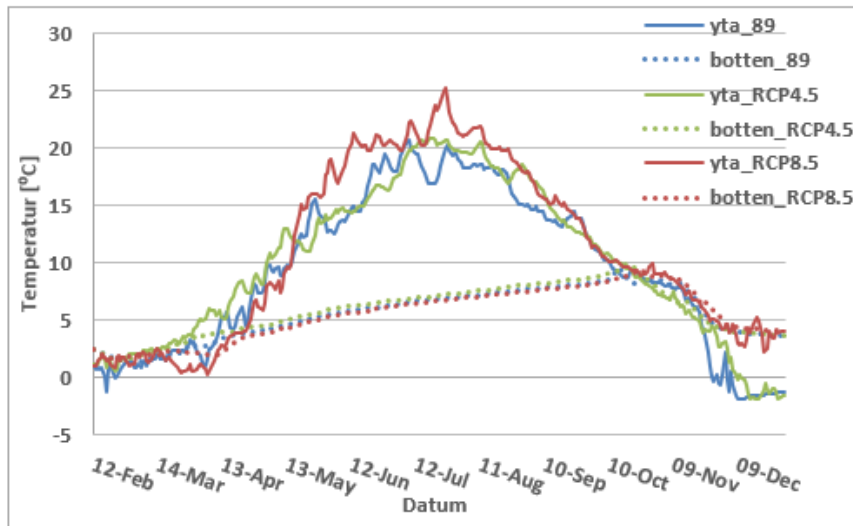
Figur 16: Simulerade temperaturprofiler för respektive månad då uppvärmning av vattenmassan sker, från 12 februari till 12 juli, för år 1989 (-), samt klimatscenarier RCP4.5 (- -) och RCP8.5 (··) för år 2050.

I figur 17 redovisas temperaturprofiler för när vattenmassan kyls ned, från augusti till december, för referensåret 1989 (-), samt klimatscenarier RCP4.5 (- -) och RCP8.5 (··) för år 2050. I augusti förväntas vattenmassan ha varmare temperaturer för de båda framtidsscenarierna, i jämförelse med för referensåret. Ytvattnet är som varmast för RCP8.5, bottenvattnet är även som kallast för samma scenario. Precis som för resultat i juli i figur 16 visar detta på att skiktningen är mest stabil för RCP8.5. För temperaturprofiler som redovisar förhållanden den 12 september, har tjockleken av epilimnion ökat för samtliga scenarier och de två framtidsscenarierna är nu mycket lika. I oktober har vattenmassan däremot blandats om för alla scenarier, vilket ses på temperaturprofilernas lodräta karaktär. Temperaturprofiler för 12 november visar på att vattentemperaturer år 2050 för RCP4.5 kan förväntas vara något kallare än för referensåret, medan vattentemperaturer för år 2050 vid RCP8.5 kan förväntas vara något varmare än för referensåret. För den 12 december förväntas vattentemperaturer för de båda framtidsscenarierna vara varmare än för referensåret, det är dock som varmast vid RCP8.5. För referensåret simulerar modellen negativa värden för 12 december, något som inte förekommer för RCP4.5 och RCP8.5 för år 2050. Ytheterogenitet för simuleringsperiodens slutdatum, 31 december, för de olika scenarierna redovisas i figur C1, figur C2 och figur C3 där störst temperaturskillnader över modellområdet förekommer vid scenario RCP8.5 vid år 2050 och minst temperaturskillnader förekommer för referensåret.



Figur 17: Simulerade temperaturprofiler för respektive månad då nedkylning av vattenmassan sker, från 12 augusti till 12 december, för referensår 1989 (—), samt klimatscenarier RCP4.5 (- -) och RCP8.5 (··) för år 2050.

Figur 18 visar på när cirkulation och skiktning inställer sig i sjön för referensåret och år 2050 vid RCP4.5 och RCP8.5. Variation mellan temperatur i ytvatten (—) och bottenvatten (··) visar på när olika förhållanden råder i sjön. Enligt Robertson och Ragotzkie (1990) råder skiktning om temperaturskillnaden mellan ytvatten och bottenvatten är minst 2 °C. För år 1989 (blå) uppstår skiktade förhållanden den 26 april. Höstcirkulation infaller den 8 oktober, och vattenmassan är totalt omblandad fram till den 25 november, då vinterstagnation inställer sig. För år 2050, vid RCP4.5, förekommer skiktade förhållanden den 16 april. Höstcirkulation inträffar den 7 oktober och vinterstagnation förekommer den 5 december. Vid RCP8.5, år 2050, förväntas skiktade förhållanden förekomma den 27 april. Höstcirkulationen förväntas infalla den 8 oktober och vinterstagnation förekommer inte alls.



Figur 18: Tidsserier för temperaturer i ytvatten (–) och bottenvatten (··) för de tre scenarierna, referensår 1989 (blå), år 2050 vid RCP4.5 (grön) och år 2050 vid RCP8.5 (orange). Temperaturskillnad på minst 2 °C mellan ytvatten och bottenvatten visar på att vattenmassan är skiktad.

Tidsperiod med sommarstagnation, var enligt simulerade temperaturprofiler för referensåret 165 dagar. Till år 2050 vid klimatscenario RCP4.5 förväntas tidsperioden förlängas med 9 dagar och ingen skillnad förväntas för RCP8.5. Sammanställning av förändring i vattentemperaturer samt antal dagar då sommarstagnation råder för referensåret och de två framtidsscenierna ses i tabell 7. Medeltemperaturen i den övre vattenmassan förväntas stiga fram till år 2050. Temperaturökningen gäller för de båda klimatscenierna RCP4.5 och RCP8.5. Störst förändring kan förväntas i ytvattnet vid RCP8.5, då medeltemperaturen förväntas stiga med 1,6 °C. Vid RCP4.5 förväntas en temperaturökning ske genom hela djupet och det skiljer endast 0,3 °C mellan temperaturökningen i ytvatten och bottenvatten. För RCP8.5 ses däremot endast en ökning från ytan ned till 10 meters djup.

Tabell 7: Sammanställning av resultat för medeltemperatur, i °C, vid olika djupnivåer i modellområdet för referensår 1989, samt förändring till år 2050 vid klimatscenarier RCP4.5 och RCP8.5. Nedre delen av tabellen visar simulerat datum för infall av sommarstagnation och höstcirkulation. Även antalet dagar per år för period med sommarstagnation, samt antalet dagar då ytttemperaturen överstiger 20 °C för referensår, samt förändring till 2050 för de två klimatscenarierna.

		Förändring till 2050		
		1989	RCP4.5	RCP8.5
Medeltemperatur vid djupnivå [°C]	Yta	9,3	+0,7	+1,6
	-5 m	9,4	+0,6	+1,3
	-10 m	8,5	+0,5	+0,4
	-15 m	7,0	+0,3	+/-0
	-20 m	6,1	+0,3	+/-0
	-25 m	5,6	+0,3	+/-0
	-30 m	5,5	+0,3	+/-0
	Infall sommarstag.	26/4	-10 dagar	+1 dagar
	Infall höstcirk.	8/10	-1 dagar	+1 dagar
	Antal dagar sommarstag.	165	+9 dagar	+/-0 dagar
	Yttemp.>20 °C	4	+17 dagar	+59 dagar

4.4 JÄMFÖRELSE MELLAN RESULTAT FRÅN OLIKA DRIVDATA

Genom att utföra samtliga simuleringar för två olika dataset av meteorologisk drivdata, undersöktes känslighet i resultatet beroende av vilken drivdata som används. Det första setet "Drivdata 1", syftar till den meteorologiska drivdata som beskrivs i tabell 4 och tabell 5, där meteorologisk data för vindförhållanden uppmätts vid Uppsala universitets mätstation inne i staden. Det andra setet "Drivdata 2" syftar till den meteorologiska drivdata som beskrivs i tabell D1, där vindförhållanden uppmätts vid Uppsala flygplats som är belägen utanför staden. För drivdata 1 användes uppmätt lufttemperatur och nederbörd från universitetets mätstation för år 1989 och för drivdata 2 för samma år hämtades lufttemperatur och nederbörd som griddade dataset över modellområdet. Valet att använda griddad data byggde på antagande om att griddad data över modellområdet var mer representativ för hela modellområdet. Det framkom dock att den meteorologiska drivdata som användes för simulering av referensår och framtidsscenarioer måste härstamma från samma mätstation som modellen kalibrerats för. På grund av detta hamnade fokus på resultat simulerade med drivdata 1. Resultatet för simulering med de två olika drivdataseten, som redovisas i tabell 8 visar på stora variationer gällande när sommarstagnation infaller, samt antalet dagar under året då sommarstagnation råder. Vid användning av det första datasetet för referensåret, förekommer sommarstagnation redan i slutet av april, medan sommarstagnation inte infaller förrän i början av juni vid användning av det andra datasetet. För referensåret infaller höstcirkulationens i oktober vid användning av meteorologisk drivdata från det första datasetet och redan i augusti för det andra setet. Perioden med sommarstagnation simulerades till att vara längre vid användning av dataset 1, men större skillnader för periodens längd mellan de tre olika scenarierna framkom vid användning av dataset 2.

Tabell 8: Sammanställning av resultat för medeltemperatur, i °C, vid olika djupnivåer i modellområdet för referensår 1989, samt förändring till år 2050 vid klimatscenarier RCP4.5 och RCP8.5. Nedre delen av tabellen visar simulerat datum för infall av sommarstagnation och höstcirkulation. Även antalet dagar per år för period med sommarstagnation för referensår samt förändring till 2050 för de två klimatscenierna. Resultat visas för två olika dataset för meteorologisk drivdata, där dataset 1 syftar till det dataset som nämns i avsnitt för metod. Dataset 2 bygger på den meteorologiska data som beskrivs i Appendix D.

	Drivdata 1			Drivdata 2		
	1989	RCP4.5	RCP8.5	1989	RCP4.5	RCP8.5
Temp. yta [°C]	9.3	+0,7	+1,6	8,6	+1,0	+2,0
Temp. botten [°C]	5.5	+0,3	±0	7,9	+0,7	+0,2
Infall sommarstag.	26/4	-10 d	-1 d	6/6	-11 d	-24 d
Infall höstcirk.	8/10	+9 d	+1 d	23/8	+9 d	+11 d
Antal dagar	165	+9	±0	78	+20	+35

5 DISKUSSION

I detta avsnitt diskuteras samtliga resultat, hur vattenkvaliteten kan påverkas av resultatet, osäkerheter och möjliga förbättringar i hantering av drivdata och val av metod, samt framtida studier.

5.1 MODELLENS PRESTATION

Resultat i figur 12, samt validering av modellen, visar på att kalibreringen var lyckad. De största skillnaderna som råder mellan uppmätta och simulerade värden i figur 12, är att modellen simulerar för låg ytvattentemperatur i juli, och att epilimnions tjocklek inte fångas i augusti och september, där epilimnion är en meter för grund i djupled i augusti och tre meter för grund i september. Något som påverkar både ytvattentemperaturer och epilimnions tjocklek är vindförhållanden. Uppmätta temperaturprofiler har registrerats vid sjöstationen Vreta Udd i Ekoln, viken är placerad i mitten av sjön. Öppet vatten finns i alla riktningar från stationen. Den drivdata som använts för simulering av vind för kalibreringsåret är uppmätt vid Uppsala universitets mätstation i centrala delarna av Uppsala, norr om Ekoln. Exakt samma vindförhållanden råder troligtvis inte vid sjöstationen, som vid mätstationen belägen i staden. Uppmätta temperaturprofiler visar på att epilimnions tjocklek är större än för simulerade temperaturprofiler. Detta kan förklaras med att vindhastigheten ute på sjön troligtvis var högre än den uppmätta vindhastigheten inne i staden. En högre vindhastighet leder till större vinddrivning på ytan och cirkulationen i epilimnion blir därmed kraftigare. En kraftigare cirkulation i epilimnion leder även till att vattenmassan i högre grad interagerar med hypolimnion, och epilimnion får en större tjocklek (SMHI, 2008).

Anpassning av modellens mesh förkortade beräkningstiden utan att gå miste om noggrannhet i resultatet. Detta undersöktes genom jämförelse av resultat beräknat med det finare meshet från originalmodellen, samt det anpassade, grövre meshet. Noggrannheten kunde bevaras i och med att meshet endast ändrades i horisontalled, och finmaskigheten i vertikalled, där gradienter uppstår, bevarades. Behovet av att öka koefficienter för värmeutbyte, vilket ses i tabell 6, antas bero på att vindhastigheten i drivdata var lägre än den faktiska vindhastigheten över sjön då temperaturprofiler uppmättes.

I figur 13 illustreras uppmätta och simulerade temperaturprofiler för sju stycken olika datum under referensåret. Enligt resultat i figur 13, samt den statistiska valideringen, stämmer simulerade- och uppmätta temperaturprofiler sämre överens med varandra för referensåret, i jämförelse med för kalibreringsåret. Störst temperaturskillnader råder i hypolimnion vid förekomst av sommarstagnation, där för kalla temperaturer simuleras. En stor skillnad finns även i epilimnions djup i augusti, där epilimnion är fem meter för grund vid simulering. Enligt jämförelse mellan färgtal och energinnehåll i figur 14 så är 2018 ett år med mörkare vatten jämfört med 1989 och energimängden i vattenmassan är generellt högre för år 1989. Enligt resultat för jämförelse mellan luft- och vattentemperaturer i figur 15 var lufttemperaturen kallare år 2018 för januari till april, under sommaren var det varmare år 2018 än år 1989 och under hösten förekom inga större temperaturskillnader mellan de två åren. För studerade yt- och bottenvattentemperaturer var ytvattnet varmare år 2018, för den undersökta perioden

april till september, i bottenvattnet förekom inga signifikanta temperaturskillnader. I och med att temperaturer i bottenvattnet inte skiljde sig nämnvärt mellan de två åren antas att vattnets färg inte påverkar temperaturen i bottenvattnet i en sådan djup sjö som Ekoln. En viktig faktor för att energi ska blandas ned i djupet är däremot vindhastighet. Som i fallet för kalibreringsåret finns även risk för att meteorologiska förhållanden, under referensåret, skiljer sig åt vid sjöstationen och mätstationen, vilket kan påverka vinddrivning och värmeutbyte med atmosfären. Modellen är kalibrerad för meteorologiska data som uppmätts vid Uppsala universitets mätstation vid Geocentrum. Simulering av referensåret baseras däremot på meteorologisk drivdata från samma station, när den var belägen i Observatorieparken i Uppsala. Eftersom mätstationen är belägen i staden visar den troligtvis inte på exakta väderförhållanden för modellområdet. Val av mätstation kan enligt Anna Karlsson på Tyréns AB (2019) vara avgörande för resultatet. För att avgöra vilken mätstation som är passande för meteorologisk drivdata till modellen bör en meteorolog rådfrågas.

5.2 SIMULERING AV FRAMTIDA FÖRHÅLLANDEN

Enligt resultat i figur 16 och figur 17 förväntas vattentemperaturer förändras i framtiden. Simuleringar visar på att högre vattentemperaturer förväntas för RCP4.5 än för RCP8.5 från mars till maj för år 2050. När sommarstagnation råder, mellan juni och augusti, förväntas däremot varmare vattentemperaturer för scenarie RCP8.5 än för RCP4.5. Bottentemperatur för alla tre scenarier är densamma. I september och oktober råder inga större skillnader mellan de två framtidsscenarierna, men i november och december kan en något högre vattentemperatur förväntas vid RCP8.5 än vid RCP4.5. Samtliga av dessa fluktuationer mellan de två klimatscenarierna kan kopplas till lufttemperaturer över året, som ses i figur B1. Skillnader mellan lufttemperaturer för RCP4.5 och RCP8.5 för år 2050 följer samma mönster som vattentemperaturerna i vattenmassans översta skikt under året. Att framtida vattentemperatur i stor grad kommer att bero av förändringar i lufttemperaturen stämmer även överens med Robertson och Ragotzkies studie (1990).

Orsaken till att negativa vattentemperaturer simuleras i december år 1989, anses vara att drivdata för förekomst av istäcke inte är helt representativ för modellområdet. Enligt angiven drivdata för år 1989 var sjön täckt av is från och med den 11 december till årets slut. Vid förekomst av istäcke ska värmeutbyte mellan vattenmassa och atmosfär inte vara möjligt. Negativa vattentemperaturer visar däremot på att värme avges från vattenmassan. För att förhindra att negativa temperaturer uppstår i vattenmassan bör perioden med is börja tidigare. Enligt standardinställningar i modellverktyget kan vattentemperaturer som lägst vara -2 °C. Standardinställningarna är anpassade efter havsvatten, som på grund av sin salinitet kan bli underkyllt vid isbildning (DHI, 2012a).

I figur 18 och tabell 7 redovisas antalet dagar för perioden med sommarstagnation för referensåret och de två framtidsscenarierna. Resultatet visar på att tidsperioden kommer att förlängas med 9 dagar från referensåret till år 2050 för RCP4.5, ingen skillnad förväntas för RCP8.5. Orsaken till detta anses vara de varmare lufttemperaturer som råder i april för RCP4.5 än för RCP8.5, vilket kan ses i figur B1. Sommarstagnationen inställer sig därför senare vid RCP8.5. Även medeltemperaturer i vattenmassan, förväntas stiga i framtiden, med större temperaturförändringar i den ytliga vattenmassan

än i djupvattnet. Antalet dagar per år då temperaturen i ytvattnet överstiger 20 °C, förväntas öka med 17 dagar för RCP4.5 och 59 dagar för RCP8.5. Stensen m.fl. (2017) beskriver att perioden med ytvattentemperatur över 20 grader kan förväntas förekomma 1–1,5 månader längre vid slutet av seklet, för östra delen av Mälaren. Detta arbete visar på att en sådan förändring kan förväntas redan till mitten av seklet i Ekoln. För RCP8.5 förväntas endast temperaturer i ytvattnet att förändras. Att medeltemperaturen i vattenmassan kan komma att stiga förekommer även i Hondzo och Stefans studie (1991), där vatten i epilimnion i större grad påverkades av ett varmare klimat, medan vatten i hypolimnion svarade svagt, eller inte alls, på ett varmare klimat.

Eftersom Uppsala Vatten undersöker möjligheten till att i framtiden använda Ekoln som kompletterande råvattenresurs, samt att Mälaren är Sveriges viktigaste råvattenresurs, är det av stor vikt att veta hur vattenkvaliteten kommer att påverkas av ett förändrat klimat. Varmare vattentemperaturer och längre period med sommarstagnation kan påverka vattenkvaliteten genom hela djupet i vattenmassan. Vid varmare temperaturer i epilimnion, under perioden med sommarstagnation, finns risk för ökad andel alger. Mer stabil skiktning och längre period med skiktade förhållanden leder till mindre utbyte av syre mellan epilimnion och hypolimnion. Vid syrefria förhållanden i hypolimnion kan ökad förekomst av mangan, järn och fosfor förväntas. Ökad temperatur kan även leda till ökad andel humus i vattnet. Samtliga av dessa förändringar i vattenkvalitet, kan ge stora svårigheter, ökade risker och kostnader i all den dricksvattenproduktion, där ytvatten används som råvattenresurs (Svenskt Vatten AB, 2007).

5.3 MÖJLIGA FÖRBÄTTRINGAR OCH FORTSATTA STUDIER

För val av metod, samt val och hantering av drivdata finns en mängd osäkerheter. För ett entydigt resultat bör meteorologisk data för samtliga simuleringar vara uppmätt vid samma plats. Meteorologisk data för kalibrering av modellen hämtades från Uppsala universitets mätstation vid Geocentrum, vilken är den mätstation som är belägen närmast Ekoln. Uppmätt molnmängd fanns dock inte att tillgå från Uppsala universitet och hämtades därför från mätstation vid Uppsala flygplats. För simulering av referensåret användes meteorologisk drivdata från universitetets mätstation, dock från en annan plats i staden. För framtiddscenarier användes samma data som för referensåret, för uppmätt meteorologisk data. Lufttemperatur och nederbörd erhöles i sin tur som griddad scenariedata från SMHI.

I samtlig uppmätt meteorologisk data som erhöles från SMHI fanns luckor, vilka fylldes i genom interpolering. Vinddata från mätstation vid Geocentrum, Uppsala universitet anses inte vara representativ för att spegla vindförhållanden på öppet vatten. Vindhastigheter i staden är i regel lägre än över sjön. Användning av isdata för Mälaren, samt vattennivå för hela Mälaren, är även detta något som kan påverka resultatet. I och med bristande tillgång till data för Ekoln, fanns inget annat alternativ. Isdata som är mer representativ för modellområdet bör användas, och standardinställningar för lägsta vattentemperatur bör anpassas efter sötvatten.

Enligt Magee och Wu (2017) har vindhastighet en större påverkan på cirkulation och vattentemperaturer, än vad lufttemperatur har. På grund av att drivdata för vind för

framtida klimat inte var tillgänglig, användes samma vindhastighet och vindriktning som för referensåret, för simulering av framtidsscenarioer. Enligt vindros i figur 11, förekom störst andel syd-sydvästlig vind av hastigheten 1–2 m/s, under referensåret. Syd-sydvästlig vind över sjön innebär att vinden har färdats över platta jordbruksmarker innan den når sjön. Vinden stöter därmed inte på några större hinder och tappar inte i hastighet. Om vinden däremot varit nordlig, skulle den behöva passera Uppsala, med intilliggande skogsområden, innan den nådde sjön. Skog och byggnader utsätter vinden för friktion och hastigheten skulle därmed minska. Minskad andel vind över sjön skulle i sin tur kunna påverka cirkulationen till att bli svagare. Resultatet visar på att den årstidsbundna cirkulationen i Ekoln, inte kommer att förändras betydligt till år 2050. Resultatet beror till stor del på lufttemperaturer under året, vilka kan påverkas av mellanårsvariationer.

Vid simulering av referensår och båda framtidsscenarioer, baserat på meteorologisk data i form av vindförhållanden, molnighet och relativ luftfuktighet från SMHI:s mätstation vid Uppsala flygplats för år 1989, samt griddad data för lufttemperatur och nederbörd för alla tre scenarier, vilket redovisas i Appendix D, blev resultatet annorlunda. För simulering av referensåret visar jämförelse mellan simulerade och uppmätta temperaturprofiler i figur D2, att modellen presterade sämre vid val av en annan meteorologisk mätstation, än den station som kalibreringen baserats på. Den stora skillnaden mellan uppmätta och simulerade temperaturprofiler för 1989 var att vattenmassan i hypolimnion, från juli till augusti, var för varmt. Modellen lyckades inte heller fånga skiktningen i september. Enligt resultat för färg, lufttemperatur, energiinnehåll och temperatur i ytvatten och bottenvatten, är vattenmassan för 1989 klarare än under år 2018, det är även mer energi i vattenmassan år 1989 och temperaturer i bottenvattnet är högre än för 2018. Detta i samband med att simulerade vattentemperaturer i hypolimnion var för varma tyder på att för mycket solljus, termisk energi, når ned i djupet. Men i och med att samma samband inte framkom vid simuleringar baserade på meteorologisk drivdata från samma mätstation som vid kalibrering av modellen, antas att val av meteorologisk data är avgörande för modellens prestation. Enligt resultat i tabell 8 visar simuleringar baserade på olika meteorologisk drivdata på stora skillnader i resultatet, med avseende på tidsperiodens längd för när sommarstagnation råder. För användning av dataset 2, vilket beskrivs i Appendix D, förlängdes perioden med ett större antal dagar för scenario RCP8.5 än för RCP4.5, vilket var väntat.

Att endast basera meteorologisk drivdata för simulering av framtida klimat på data från en global klimatmodell, kan bidra till stora osäkerheter i resultatet. När endast en klimatmodell används, erhålls ingen uppfattning om osäkerheter i framtidsprognosen. I och med att alla klimatmodeller har olikheter, bör resultatet baseras på data från så många modeller som möjligt för att minska osäkerheter i resultatet (Carslaw m. fl., 2018). På grund av tidsbrist var det dock inte möjligt att simulera de båda framtidsscenarioerna enligt meteorologisk drivdata från en mängd olika globala klimatmodeller. För att täcka in mellanårsvariationer bör även referensperioden och tidsperiod för framtidsscenarioer sträcka sig över en längre tidsperiod än ett år (Sjökvist m. fl., 2015b). Orsaken till att endast ett år för referensperioden och framtidsscenarioer

användes, berodde av att den hydrodynamiska modellens långa beräkningstid, på grund av tidsbrist var det inte möjligt att simulera tidsperioder längre än ett år. Vid fortsatt arbete bör dock ett representativt år för framtidsscenerierna väljas på samma sätt som för referensåret. Trots stora osäkerheter i resultatet kan ändå en indikation ges, för hur cirkulationen i sjön kan komma att se ut i framtiden.

För fortsatt arbete med detta projekt bör fokus läggas på att minska osäkerheter i resultatet, vilket är möjligt genom att ställa krav på att samtlig drivdata ska vara representativ för modellområdet. Referensperiod och framtidsscenerier bör sträcka sig över en tidsperiod längre än ett år. Drivdata för framtida klimat bör baseras på data från så många globala klimatmodeller som möjligt.

För framtida studier skulle det vara intressant att ändra drivdata för vindhastighet för framtidsscenerierna. Enligt Magee och Wu (2017) har vindhastigheten en större påverkan på cirkulation och vattentemperatur, än vad lufttemperaturen har. Modellen för Ekoln skulle även kunna användas för att undersöka nedbrytning av olika föroreningar och humushalter i sjön. Eftersom modellen även beräknar och sparar resultat för variationer i vattennivå under simuleringstiden, skulle det vara av intresse att simulera extremflöden och extrem nederbörd, för att se hur vattennivån förändras.

6 SLUTSATSER

En spridningsmodell utvecklad för Mälarbassängen Ekoln, har kalibrerats och anpassats för simulering av temperaturprofiler, med hjälp av uppmätta temperaturprofiler under år 2018. Simuleringar har utförts för ett referensår, samt två stycken framtidsscenarioer, för att undersöka hur den årstidsbundna cirkulationen i sjön, kan komma att påverkas av ett framtida klimat. Som referensår valdes år 1989, framtidsscenarioer bygger på de två strålningsdrivningsscenarioerna RCP4.5 och RCP8.5, för år 2050.

- Originalmodellen är inte funktionell för simulering av temperaturprofiler. Anpassning och kalibrering av originalmodellen möjliggjorde simulering av den årstidsbundna cirkulationen och höjde modellens prestation med avseende på att simulera temperaturprofiler genom hela djupet i Ekoln. För simulering av temperaturprofiler behövde utbyteskoefficienter för uppvärmning och nedkylning kalibreras, vilka påverkar värmeutbytet mellan atmosfär och vattenmassa. Även koefficienten för ljusextinction kalibrerades.
- I och med sitt finmaskiga beräkningsnät har originalmodellen en mycket lång beräkningstid, den är även endast anpassad för simulering av en sommarperiod. För att möjliggöra simulering av den årstidsbundna skiktningen, och därmed simulera alla årstider, anpassades beräkningsnätet till ett grövre format för att minska beräkningstiden. För simulering av vintertid behövde även is implementeras i modelluppsättningen. Efter kalibrering och anpassning av modellen var det möjligt att simulera den årstidsbundna cirkulationen. Kalibreringen bidrog till att validering mellan uppmätta- och simulerade temperaturprofiler resulterade i att NSE var 0,96, r 0,99 och RMSE 1,05 °C.
- Vid jämförelse mellan årstidsbunden skiktning för referensår 1989 och år 2050, vid framtida klimatscenarioer RCP4.5 och RCP8.5, framkom att temperaturer i epilimnion, under sommarstagnation, kommer att stiga. Sommarstagnation kommer att förekomma nio dagar längre för RCP4.5, vid år 2050, i jämförelse med för år 1989. För RCP8.5, vid år 2050, förväntas sommarstagnationens längd i jämförelse med år 1989, inte att förändras. Vinterstagnation förväntas ej förekomma vid RCP8.5, vattenmassan förblir omblandad under hela vinterperioden, i och med att ingen is ligger på sjön.

För följande studier bör val av mätstation för meteorologisk drivdata utvärderas, i och med att den använda mätstationen troligtvis inte noterar exakt samma väderförhållanden som över modellområdet. Det är av intresse att undersöka hur skiktningen påverkas av förändrade vindförhållanden och klimatdata simulerad från mer än en global klimatmodell. För att undvika extremår bör även framtidsscenarioerna baseras på ett medelår för en längre tidsperiod, på samma sätt som referensåret valdes.

7 TILLKÄNNAGIVANDEN

“We acknowledge the E-OBS dataset from the EU-FP6 project UERRA (<http://www.uerra.eu>) and the Copernicus Climate Change Service, and the data providers in the ECA&D project (<https://www.ecad.eu>)” “Cornes, R., G. van der Schrier, E.J.M. van den Besselaar, and P.D. Jones. 2018: An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Datasets, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 123. doi:10.1029/2017JD028200” (<https://www.ecad.eu/>)

REFERENSER

PUBLICERAT MATERIAL

- Andréasson, J., H. Gustavsson och S. Bergström (2011). *Projekt Slussen - Förslag till ny reglering av Mälaren*. Tekn. rapport SMHI RAPPORT NR 2011-64. SMHI.
- Brinkmann, W.L.F. (1985). "Urban stormwater pollutants: Sources and loadings". I: *GeoJournal* 11.Issue 3, s. 277–283.
- Carslaw, K. S., L. A. Lee, L. A. Regayre och S. Johnson (2018). "Climate models are uncertain, but we can do something about it". I: *Eos* 99. URL: <https://doi.org/10.1029/2018EO093757>.
- Chai, T. och R.R. Draxler (2014). "Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature". I: *Geoscientific Model Development* 7, s. 1247–1250.
- DHI (2012a). *MIKE 3 FLOW MODEL FM, Hydrodynamic module, User guide*. Tekn. rapport. Dansk Hydraulisk Institut, DHI.
- DHI (2012b). *MIKE ZERO, Mesh Generator, Step-by-step training guide*. Tekn. rapport. Dansk Hydraulisk Institut, DHI.
- DHI (2017a). *MIKE 21 & MIKE 3 Flow Model FM, Hydrodynamic and Transport Module, Scientific Documentation*. Tekn. rapport. Dansk Hydraulisk Institut, DHI.
- DHI (2017b). *MIKE Zero, The common DHI User Interface for Project Oriented Water Modelling*. Tekn. rapport. Dansk Hydraulisk Institut (DHI).
- DHI (2018). *Software catalogue*. s. 16-17.
- Eklund, A. (1998). "Vattentemperaturer i sjöar, sommar och vinter - resultat från SMHIs mätningar". I: *Hydrologi* 74.
- Eklund, A., A. Johnell, L. Tofeldt, J. Tengdelius-Brunell, M. Andersson, C-L. Ivarsson, J. German, E. Sjökvist och E. Andersson (2017a). *Vattennivåer, tappningar, vattentemperaturer och is i Hjälmaran - Beräkningar för dagens och framtidens klimatförhållanden*. Tekn. rapport SMHI KLIMATOLOGI Nr 43. SMHI.
- Eklund, A., K. Stensen, G. Alavi och K. Jacobsson (2018). *Sveriges stora sjöar idag och i framtiden*. Tekn. rapport SMHI KLIMATOLOGI Nr 49, 2018. SMHI.
- Eklund, A., L. Tofeldt, A. Johnell, J. Tengdelius-Brunell, J. German, E. Sjökvist, M. Rasmusson, U. Harbman och E. Andersson (2017b). *Vattennivåer, tappningar, vattentemperaturer och is i Väneren - Beräkningar för dagens och framtidens klimatförhållanden*. Tekn. rapport SMHI KLIMATOLOGI Nr 44. SMHI.
- Eklund, A., L. Tofeldt, J. Tengdelius-Brunell, A. Johnell, J. German, E. Sjökvist, M. Rasmusson och E. Andersson (2017c). *Vattennivåer, tappningar, vattentemperaturer och is i Vättern - Beräkningar för dagens och framtidens klimatförhållanden*. Tekn. rapport SMHI KLIMATOLOGI Nr 42. SMHI.
- Haylock, M. R., N. Hofstra, A. M. G. Klein Tank, E. J. Klok, P. D. Jones och M. New (2008). "A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006". I: *Journal of Geophysical Research* 113.D20119. URL: <https://doi.org/10.1029/%202008jd010201>.
- Honzo, M. och H.G. Stefan (1991). "Three Case Studies of Lake Temperature and Stratification Response to Warmer Climate". I: *Water Resources Research* 27.8, s. 1837–1846.

- IPCC (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaption and Vulnerability*. Tekn. rapport. IPCC Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate.
- Knutti, R. och Sedláček (2012). "Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections". I: *Nature CLimate Change*. URL: [10.1038/NCLIMATE1716](https://doi.org/10.1038/NCLIMATE1716).
- Krause, P., D.P. Boyle och F. Bäse (2005). "Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment". I: *Advances in Geosciences, European Geosciences Union 5*.hal-00296842, s. 89–97.
- Kvarnäs, H. (2001). "Morphometry and Hydrology of the Four Large Lakes in Sweden". I: *Ambio 30.8, The Large Lakes of Sweden*, s. 467–474.
- Ledesma, J.L.J. och M.N. Futter (2017). "Gridded climate data products are an alternative to instrumental measurements as inputs to rainfall–runoff models". I: *Hydrological Processes 31*, s. 3283–3293. URL: <https://doi.org/10.1002/hyp.11269>.
- Löfgren, S., M. Forsius och T. Andersen (n.d.). *Vattnets färg, klimatbetingad ökning av vattnens färg och humushalter i nordiska sjöar och vattendrag*. Svenska. Arbetsgruppen för Miljöövervakning och Data vid Nordiska Ministerrådet, Intuitionen för miljöanalys SLU, Finlands Miljöcentral och Norska Institutet för Vattenforskning. 12 s.
- Magee, M. R. och C. H. Wu (2017). "Response of water temperatures and stratification to changing climate in three lakes with different morphometry". I: *Hydrology and Earth System Sciences 21*, s. 6253–6274. URL: <https://doi.org/10.5194/hess-21-6253-2017>.
- Persson, I., J. Pirard, A. Larsson, C. Holm och A. Lousa-Alvin (2012). *Kväveavskiljningens effekt på Ekoln*. Tekn. rapport Nr 2012-12. Svenskt Vatten AB.
- Ritter, A. och R. Muñoz-Carpena (2012). "Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments". I: *Journal of Hydrology 480*, s. 33–45. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.004>.
- Robertson, D. M. och R. A. Ragotzkie (1990). "Changes in the thermal structure of moderate to large sized lakes in response to changes in air temperature". I: *Aquatic Sciences 52.4*, s. 1015–1621.
- Rohli, R.V. och A.J. Vega (2018). *Climatology*. fourth edition. Jones & Bartlett Learning, s. 309.
- Sjökvist, E., M. Asp, S. Berggren-Clausen, Berglöv G., E. Björck, A. Johnell, J. Axén Mårtensson, L. Nylén, A. Ohlsson och H. Persson (2015a). *Framtidsklimat i Uppsala län - enligt RCP-scenarier*. Tekn. rapport KLIMATOLOGI Nr 20, 2015. SMHI.
- Sjökvist, E. m. fl. (2015b). *Klimatscenarier för Sverige, Bearbetning av RCP-scenarier för meteorologiska och hydrologiska effektstudier*. Tekn. rapport KLIMATOLOGI Nr 15, 2015. SMHI.
- Stensen, K., J. Tengdelius-Brunell, E. Sjökvist, E. Andersson och A. Eklund (2017). *Vattentemperatur och is i Mälaren*. Tekn. rapport SMHI KLIMATOLOGI Nr 46, 2017. SMHI.
- Svenskt Vatten (2010). *Dricksvattenteknik 3, Ytvatten*. Tekn. rapport PUBLIKATION U8. Svenskt Vatten AB.

- Svenskt Vatten AB (2007). *Dricksvattenförsörjning i förändrat klimat, Underlagsrapport till Klimat- och sårbarhetsutredningen*. Meddelande M135.
- Tjällén, C., K. Wallman och M. Wallin (2010). *Synoptisk undersökning av Mälarens vattenkemi 2010-08-23 samt en jämförelse mellan åren 2008-2010*. Tekn. rapport 2010:16. Institutionen för vatten och miljö, SLU.
- Tyréns AB (2018). *Spridningsmodell för Ekoln - steg 1. 1.1*.
- Upplandsstiftelsen (2019). *ASPUNDERSÖKNINGAR i Funboån, Fyrisån, Sävaån och Örsundaån 2018*. RAPPORT 2019/2.
- Uppsala Vatten (u.å.). *Handbok för dagvattenhantering i Uppsala kommun*.
- Uppsala Vatten och Avfall AB (2016a). *Miljörapport 2016 Kungsängsverket*. 90.10.
- Uppsala Vatten och Avfall AB (2016b). *VA 2050 Uppsala kommun*.

HEMSIDOR

- DHI (u.å.). *Documentation*. URL: http://manuals.mikepoweredbydhi.help/2019/MIKE_3.htm (hämtad 2019-02-25).
- ECMWF (2018). *Using EC-Earth for climate prediction research*. URL: <https://www.ecmwf.int/en/newsletter/154/meteorology/using-ec-earth-climate-prediction-research> (hämtad 2019-04-26).
- European Climate Assessment & Dataset (2019). *E-OBS gridded dataset*. URL: <https://www.ecad.eu/download/ensembles/download.php> (hämtad 2019-04-08).
- Mälardalsrådet (2016). *Inriktningsmål för Mälardalsrådet 2016*. URL: <http://www.malardalsradet.se/app/uploads/2017/03/inriktningsma%5C%CC%5C%8A12016.pdf> (hämtad 2019-02-01).
- Nationalencyklopedin (u.å.). *Ekoln*. URL: <https://www-ne-se.ezproxy.its.uu.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%5C%C3%5C%A5ng/ekoln> (hämtad 2019-02-04).
- Naturvårdsverket (2018). *Metaller och organiska miljögifter i marin miljö*. URL: <https://www.naturvardsverket.se/Miljoarbete-i-samhället/Miljoarbete-i-Sverige/Miljoovervakning/Miljoovervakning/Kust-och-hav/metaller-och-organiska-miljogifter-i-marin-miljo/> (hämtad 2019-01-28).
- Naturvårdsverket (2019a). *Fakta om kvicksilver*. URL: <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Manniska/Miljogifter/Metaller/Kvicksilver-Hg/#> (hämtad 2019-01-28).
- Naturvårdsverket (2019b). *Flamskyddsmedel i miljön*. URL: <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Manniska/Miljogifter/Organiska-miljogifter/Flamskyddsmedel/> (hämtad 2019-01-28).
- SLU (2018). *Vattenfärg - absorbans*. URL: <https://www.slu.se/institutioner/vatten-miljo/laboratorier/vattenkemiska-laboratoriet/detaljerade-metodbeskrivningar/absorbans/> (hämtad 2019-05-16).

- SLU (2019c). *Miljödata MVM*. URL: <https://miljodata.slu.se/mvm/> (hämtad 2019-04-02).
- SMHI (u.å.[a]). *Mälaren*. URL: http://www.airviro.smhi.se/cgi-bin/malaren/apub.stncolmap2.cgi?page=ShowMapG&areaid=MA&gsize=450x370&stnshow=true&stngroup=0xffffffff&backgroundimg=images/blank.gif&mappostop=0&mapposleft=0&infocgi=apub.infostn2.cgi¯opath=stn&infoframe=_blank&rsrc=Monitoring.6.MainPage&lefthtmlpage=&apptag=colorstn&nrdec=1&subs=MASL&year=now&maxage=50000&gkey=AiZaSyBF-Ob8f1Z1LC2tCHARIUQ_9EYHPuSMwcs (hämtad 2019-02-27).
- SMHI (u.å.[b]). *Mätningar*. URL: <http://vattenwebb.smhi.se/station/> (hämtad 2019-04-12).
- SMHI (u.å.[c]). *Nedskalning av RCP-scenarier*. URL: <https://www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat/lansanalyser/metodik.html> (hämtad 2019-04-26).
- SMHI (2008). *Sveriges sjöar*. URL: http://www.smhi.se/polopoly_fs/1.504!Faktablad%5C%252039_webb.pdf (hämtad 2019-01-29).
- SMHI (2017). *EC-Earth*. URL: <https://www.smhi.se/forskning/forskningsomraden/klimatforskning/ec-earth-1.126825> (hämtad 2019-04-26).
- SMHI (2018). *Vad är RCP?* URL: <https://www.smhi.se/klimat/framtidens-klimat/vagledning-klimatscenarier/vad-ar-rcp-1.80271> (hämtad 2019-02-04).
- SMHI (2019c). *Europe Climate Impacts*. URL: <http://hypeweb.smhi.se/explore-water/climate-impacts/europe-climate-impacts/> (hämtad 2019-04-25).
- SMHI (2019d). *Ladda ner meteorologiska observationer*. URL: <https://www.smhi.se/klimatdata/meteorologi/ladda-ner-meteorologiska-observationer/#param=totalCloudCover,stations=active,stationid=97530> (hämtad 2019-02-27).
- SMHI (2019e). *Modelldata per område*. URL: <https://vattenwebb.smhi.se/modelarea/> (hämtad 2019-02-25).
- Toppr (u.å.). *Karl Pearson's Coefficient of correlation*. URL: <https://www.toppr.com/guides/business-mathematics-and-statistics/correlation-and-regression/karl-pearsons-coefficient-correlation/> (hämtad 2019-05-03).
- Vatteninformationssystem Sverige (2017). *Mälaren - Ekoln*. URL: <https://viss.lansstyrelsen.se/Waters.aspx?waterMSCD=WA73183242> (hämtad 2019-01-23).

OPUBLICERAT MATERIAL

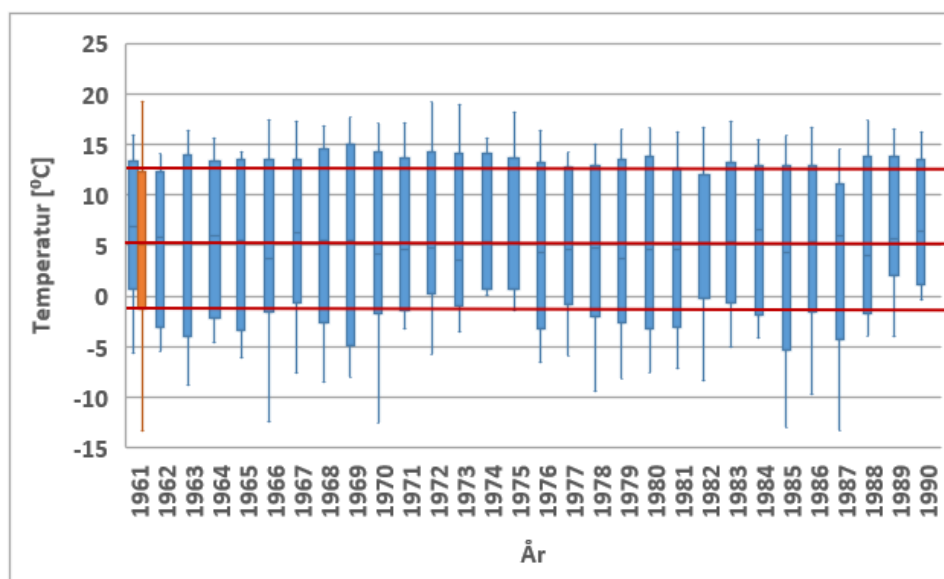
- Karlsson, A (2019). Muntlig kommunikation med Anna Karlsson på Tyréns AB, skapare av spridningsmodellen.
- Lindqvist Pettersson, M. (2019). E-mail. Mailkontakt med Maria Lindqvist Pettersson, Utredningsingenjör vid Uppsala Vatten och Avfall AB, 2019-01-24.
- SLU (2019a). E-mail. Mailkontakt med Johannes Kikuchi, Laboratorietekniker vid Institutionen för vatten och miljö Sveriges lantbruksuniversitet, 2019-02-18.

- SLU (2019b). E-mail. Mailkontakt med Stephan Köhler, Professor inom miljögeokemi vid Institutionen för vatten och miljö Sveriges lantbruksuniversitet, 2019-02-27.
- SMHI (2019a). E-mail. Mailkontakt med Elin Sjökvist, SMHI, 2019-04-11.
- SMHI (2019b). E-mail. Mailkontakt med Johan Temnerud, SMHI, 2019-05-21.
- Uppsala universitet (2019). E-mail. Mailkontakt med Hans Bergström, forskare inom vindenergi vid Institutionen för geovetenskaper Uppsala universitet, 2019-02-25.
- Uppsala Vatten och Avfall AB (2018). ”Strategisk vattenförsörjningsplan Uppsala kommun”. Urklipp från strategisk vattenförsörjningsplan Uppsala kommun.
- Uppsala Vatten och Avfall AB (2019a). E-mail. Mailkontakt med Maria Lindqvist Pettersson, Utredningsingenjör vid Uppsala Vatten och Avfall AB, 2019-02-25.
- Uppsala Vatten och Avfall AB (2019b). E-mail. Mailkontakt med Maria Khalili, Uppsala Vatten och Avfall AB, 2019-02-26.

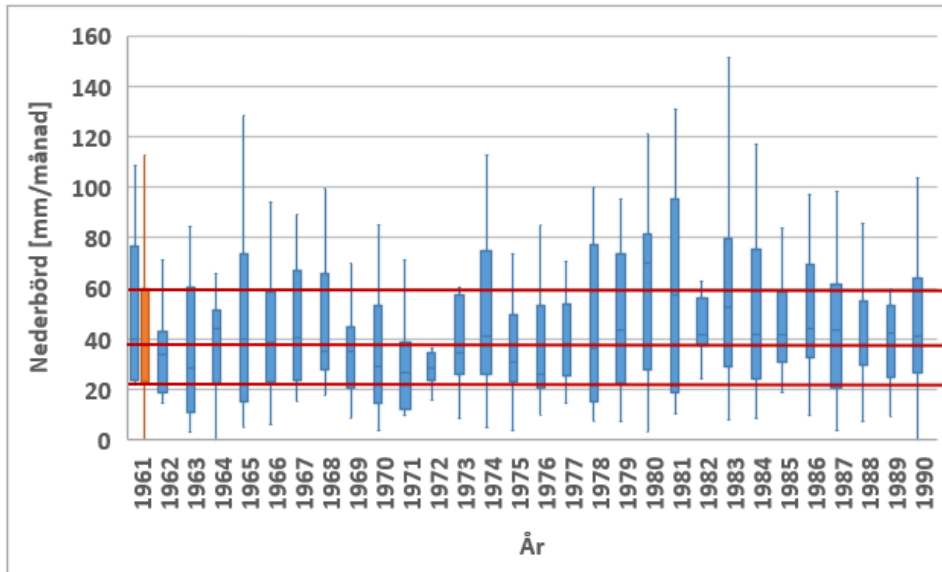
APPENDIX A ANTAGANDEN OCH HYPISOGRAF VAL AV REFERENSÅR

I SMHI:s nedskalningsprojekt användes tidsperioden 1961–1990 som referensperiod (Sjökvist m. fl., 2015b). Eftersom det i detta projekt inte var möjligt att simulera en sådan lång tidsperiod valdes ett referensår representativt för hela referensperioden. Enligt SMHI (2019) fanns endast data för relativ luftfuktighet i närheten av modellområdet tillgå från och med år 1987. Ett representativt referensår från år 1987 till 1990 valdes därför. Eftersom lufttemperatur och nederbörd förväntas vara de två meteorologiska parametrar som kommer att förändras mest, från referensperioden till och med slutet av detta sekel, och därmed påverka klimatet, undersöktes variationen av dessa två parametrar under referensperioden (Stensen m. fl., 2017).

I figur A1 redovisas variation i lufttemperatur i form av månadsmedelvärden för respektive år under referensperioden 1961–1990. Den första boxen representerar värden för hela tidsperioden. Enligt den tunna röda linjen i mitten, vilken visar medianvärde för hela tidsperioden, stämmer medianvärde för år 1989 bäst överens med medianvärde för hela tidsperioden, sett till åren 1987–1990, vilka är möjliga referensår. På samma sätt ses i figur A2 att medianvärde för år 1989 även stämmer bäst överens med medianvärde för hela tidsperioden, med avseende på nederbördsmängd för respektive månad.



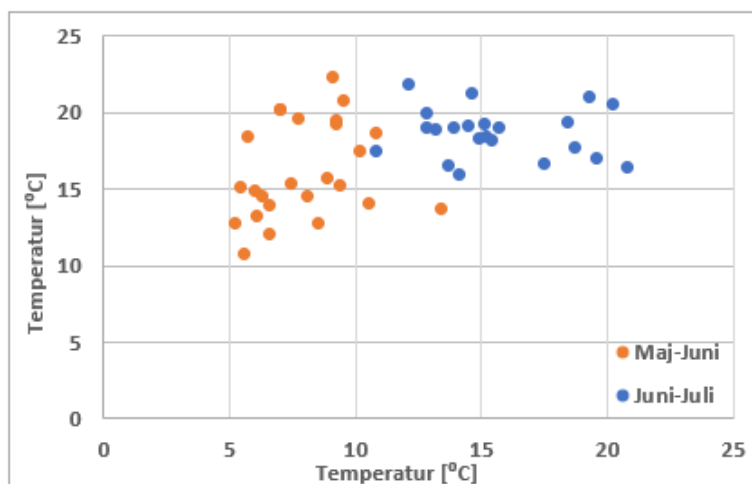
Figur A1: Boxplot för månadsmedeltemperaturer i luften för respektive år under referensperioden 1961–1990, där data för hela tidsperioden presenteras i den orangefärgade boxen och de blå boxarna representerar respektive år under tidsperioden. De röda linjerna visar medianvärde samt övre och undre percentilen för hela tidsperioden. De fyra åren 87–90 är möjliga år för val av referensår. Data hämtad från SMHI (SMHI, 2019d).



Figur A2: Boxplot för total månadsnederbörd för respektive år under referensperioden 1960–1990, där data för hela tidsperioden presenteras i den orangefärgade boxen. De röda linjerna visar medianvärde samt övre och undre percentilen för hela tidsperioden. De fyra åren 87–90 är möjliga år för val av referensår. Data hämtad från SMHI (SMHI, 2019d)

VATTENTEMPERATUR

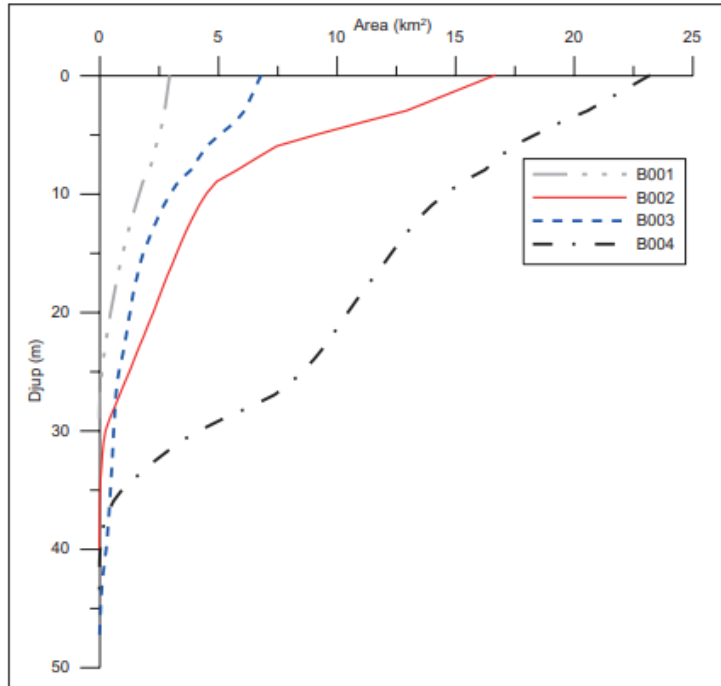
I figur A3 ses förhållandet mellan ytvattentemperatur i maj och juni, samt juni och juli för åren 1965–1990. Ingen korrelation mellan föregående och nästkommande månad förekommer. Det antas därför att andra parametrar, såsom meteorologiska parametrar, i högre grad påverkar vattentemperaturen än att vattentemperaturen beror av tidigare värden.



Figur A3: Förhållandet mellan vattentemperatur i sjöns översta skikt mellan olika månader. Data presenteras för månaderna maj-juli för samtliga år under tidsperioden 1965–1990, data hämtad från SLU:s databas “Miljödata-MVM” för station Ekoln Vreta Udd (SLU, 2019c).

HYSOGRAF FÖR EKOLN

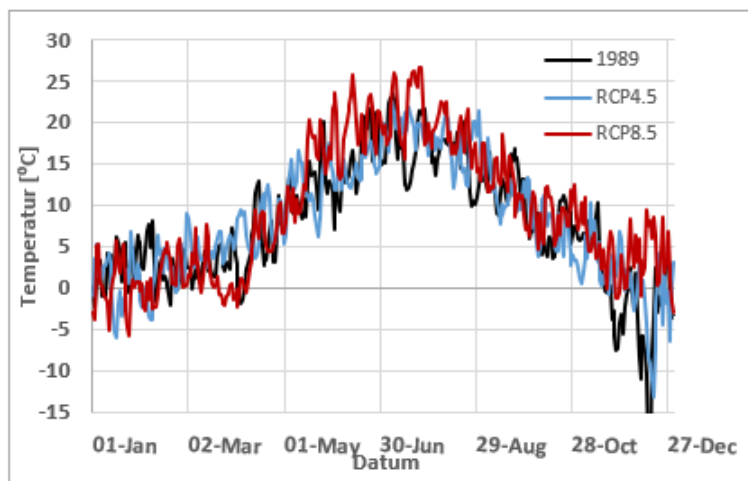
Hypsograf för Ekoln och bassänger i anslutning till Ekoln, figur A4. Hypsografen anger bassängernas area för olika djup. De olika bassängerna som presenteras i diagrammet är Stora Ullfjärden (B001), Gorran (B002), Lårstaviken (B003), samt Ekoln (B004). Hypsograf för Ekoln användes vid beräkning av energiinnehåll i vattenmassan, enligt ekvation 8.



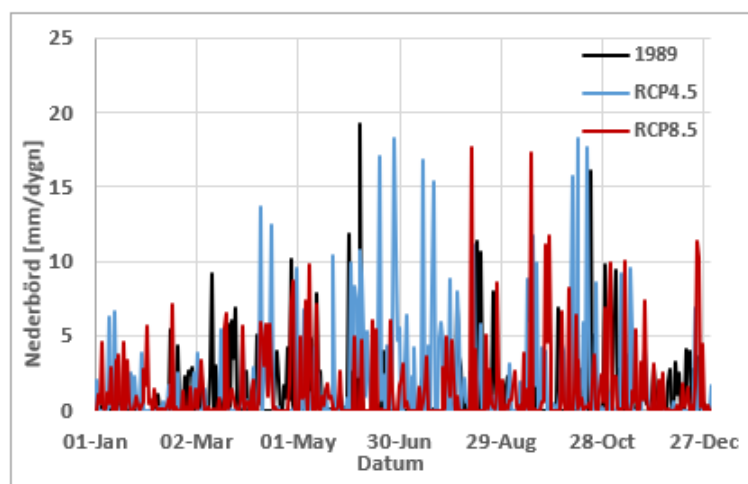
Figur A4: Hypsograf för bassänger Stora Ullfjärden (B001), Gorran (B002), Lårstaviken (B003) och Ekoln (B004). Hypsograf skapad av SMHI (SMHI, 2019b).

APPENDIX B VARIATIONER I DRIVDATA

Skillnader i drivdata för lufttemperatur för referensår 1989, samt de två framtidsscenarierna RCP4.5 och RCP8.5 för år 2050, ses i figur B1. På samma sätt visualiseras variationer mellan nederbörd för de olika scenarierna i figur B2.

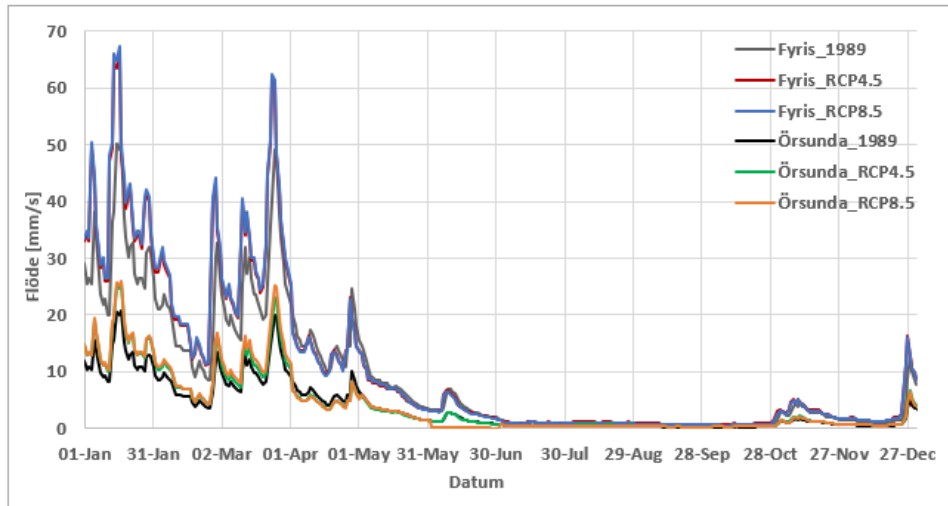


Figur B1: Variationer i drivdata för lufttemperatur under året, för referensår 1989 (svart), samt framtidsscenarierna RCP4.5 (blå) och RCP8.5 (röd) vid år 2050.

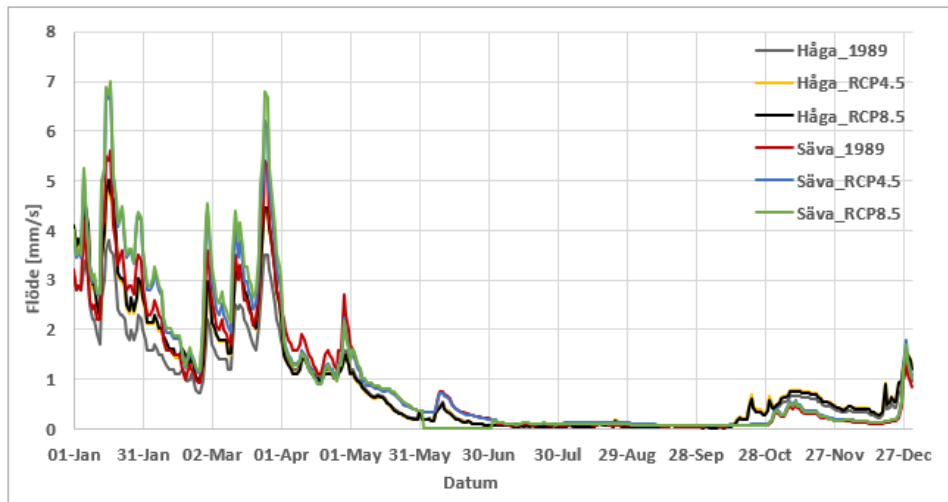


Figur B2: Årstidsvariationer i drivdata för nederbörd, för referensår 1989 (svart), samt framtidsscenarierna RCP4.5 (blå) och RCP8.5 (röd) vid år 2050.

Variationer i tillflöde från de fyra tillflödande åarna för referensår, samt de två framtidsscenarierna ses i figur B3 och B4. I figur B3 visas flöden för Fyrisån och Örsundaån, och i figur B4 visas flöden för Hågaån och Sävåån.



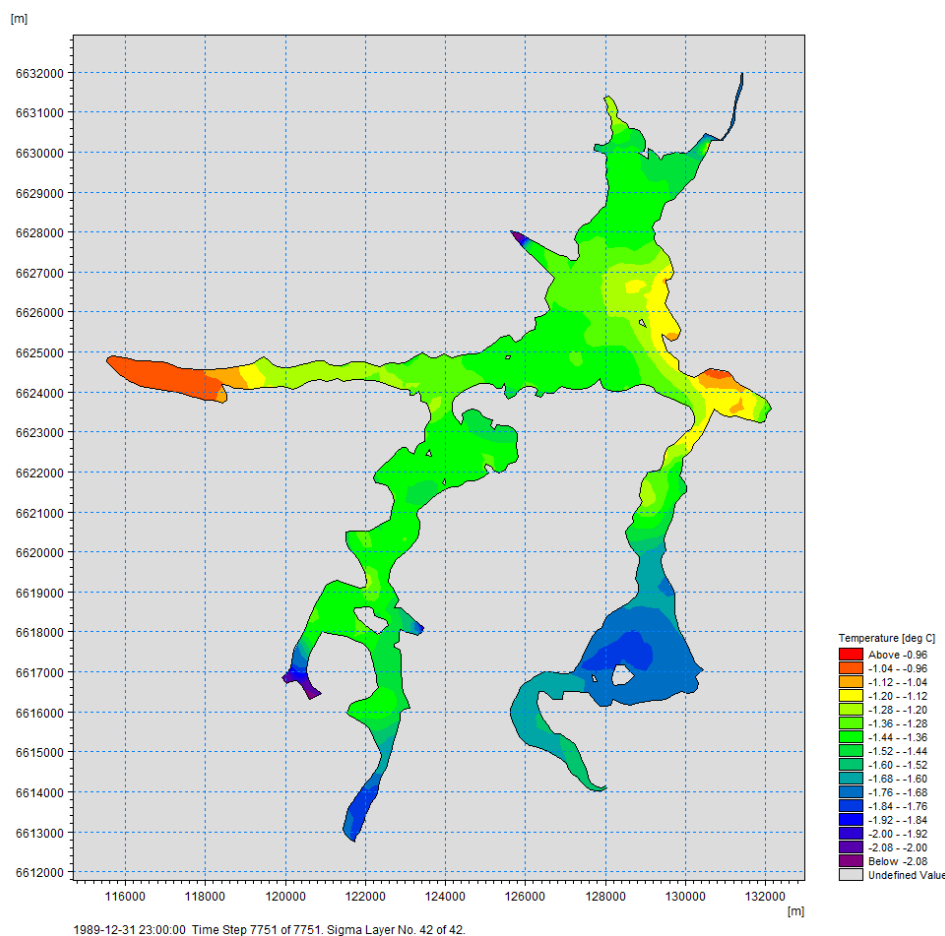
Figur B3: Flödesvariationer för Fyrisån och Örsundaån för referensår 1989, samt framtidsscenarioer RCP4.5 och RCP8.5 vid år 2050.



Figur B4: Flödesvariationer för Hågaån och Sävaån för referensår 1989, samt framtidsscenarioer RCP4.5 och RCP8.5 vid år 2050.

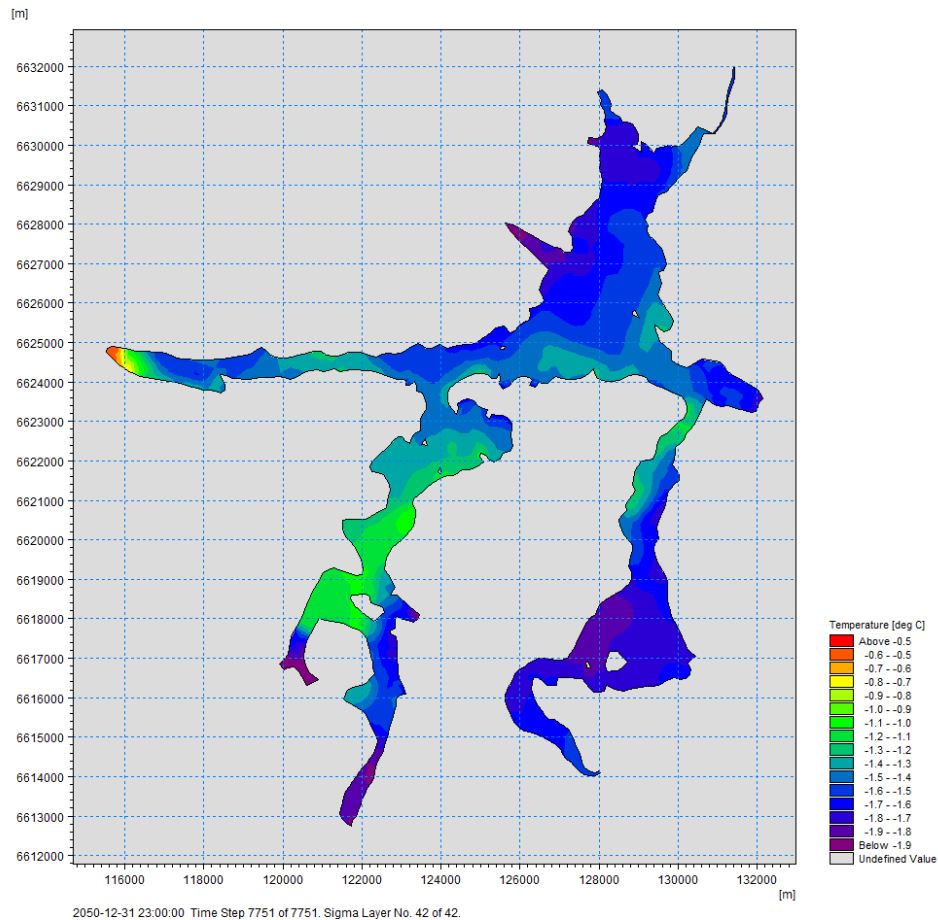
APPENDIX C HETEROGENITET FÖR YTTEMPERATUR

I figur C1 visas hur yttemperaturen varierar över modellområdet för simuleringsperiodens sista dag, den 31 december, för referensåret. Varmast temperaturer viss i rött och kallast temperaturer i lila. Enligt figuren förekommer varmast yttemperaturer (över $-0,96\text{ }^{\circ}\text{C}$) i Lårstaviken, i västra delen av modellområdet, där Örsundaån och Sävaån mynnar ut och även i en mindre del av Kyrkviken, i den östra delen av modellområdet. Kallast temperaturer (under $-2,08\text{ }^{\circ}\text{C}$) förekommer i en smal vik i Ekolns västra del, samt i en mindre del av sydvästra Gorran. Den maximala temperaturskillnaden för olika delar i modellområdet är således $1,12\text{ }^{\circ}\text{C}$.



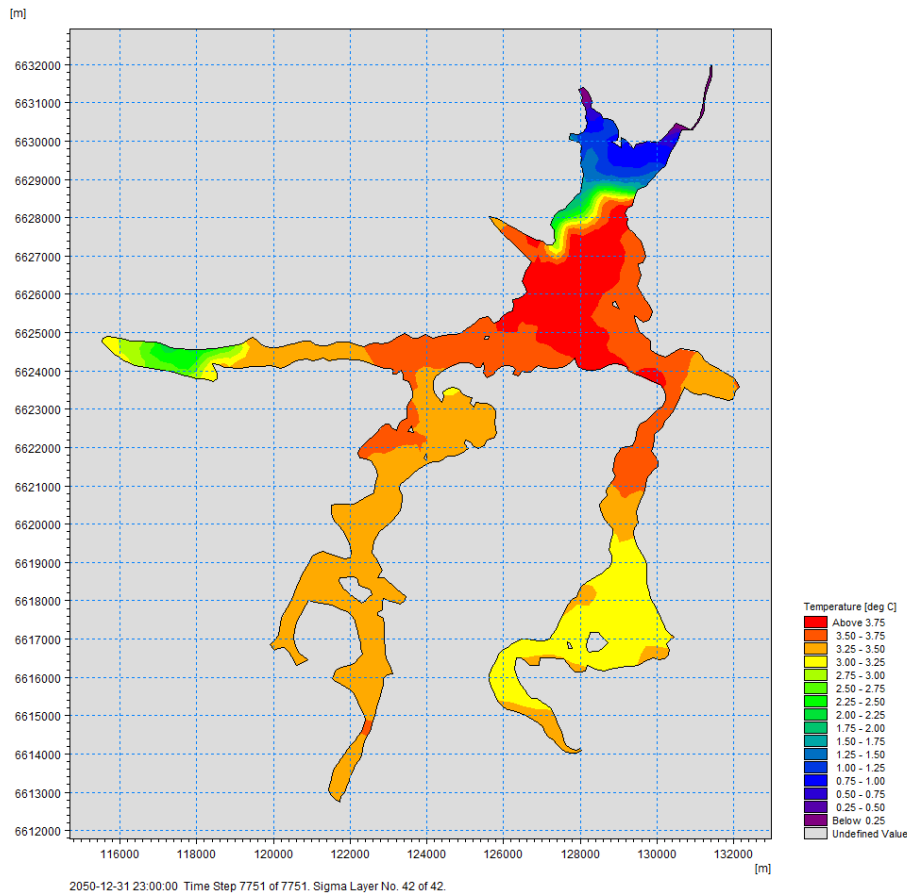
Figur C1: Skillnad i yttemperatur över modellområdet den 31 december för referensår 1989, där varmast temperaturer visas i rött (över $-0,96\text{ }^{\circ}\text{C}$) och kallast temperaturer visas i lila (under $-2,08\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Variation av yttemperatur i modellområdet för den 31 december vid framtidsscenario RCP4.5 vid år 2050 ses i figur C2. Varmast temperaturer (över $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), vilka visas i rött, förekommer längst västerut i Lårstaviken, vid Örsundaåns mynning. Kallast temperaturer (under $-1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$), vilka visas i lila, förekommer vid Varpsund i södra Gorran, i Ekolns västra delar, samt i Skofjärdens östra delar. Den maximala temperaturskillnaden i ytvattnet i olika delar i modellområdet är $1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Figur C2: Skillnad i ytemperatur över modellområdet den 31 december för framtidsscenario RCP4.5 år 2050, där varmaste temperaturer visas i rött (över $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) och kallaste temperaturer visas i lila (under $-1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Ytemperaturens variationer över modellområdet för den 31 december vid framtidsscenario RCP8.5 vid år 2050 ses i figur C3. Varmaste temperaturer (över $3,75\text{ }^{\circ}\text{C}$), vilka visas i rött, förekommer i centrala och södra delarna av Ekoln. Kallaste temperaturer (under $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$), vilka visas i lila, förekommer i Ekolns nordligaste delar, vid Hågaåns och Fyrisåns mynningar. Den maximala temperaturskillnaden i ytvattnet mellan de olika områdena är $3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

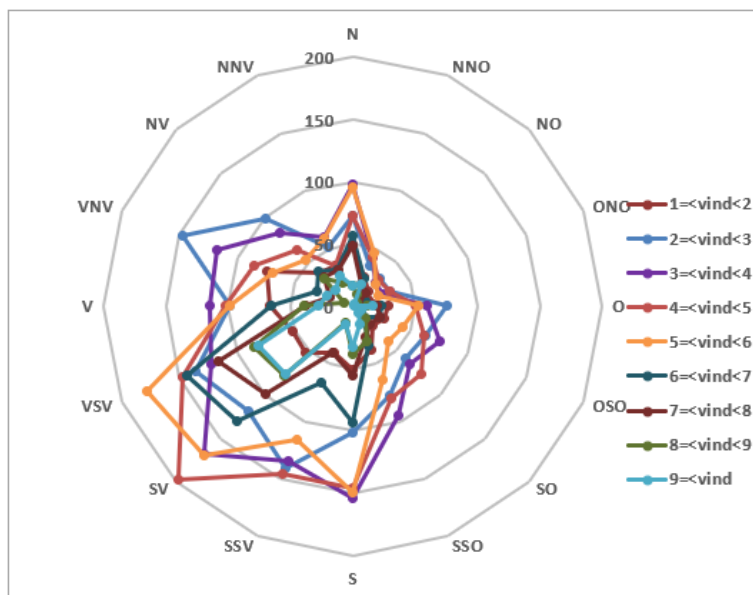


Figur C3: Skillnad i ytemperatur över modellområdet den 31 december för framtidsscenario RCP8.5 år 2050, där varmaste temperaturer visas i rött (över $-3,75\text{ }^{\circ}\text{C}$) och kallaste temperaturer visas i lila (under $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Utifrån resultat i figur C1, figur C2 och figur C3 förekommer störst ytheterogenitet vid scenario RCP8.5 år 2050 och minst ytheterogenitet vid referensåret. Även områden för förekomst av kallaste och varmaste temperaturer förekommer på olika platser för de olika scenarierna.

APPENDIX D VAL AV INDATA, PÅVERKAN PÅ RESULTAT

Samtliga simuleringar utfördes med meteorologisk drivdata från en annan mätstation än för vad som användes under kalibrering. För simulering av referensår drevs modellen med meteorologisk uppmätt data för vindhastighet, vindriktning och molnmängd från SMHI:s mätstation vid Uppsala flygplats. Fördelning av vindhastighet och vindriktning under året ses som en vindros i figur D1. Fördelning av vindhastigheter i respektive vindriktning visar på att störst andel sydvästlig vind av hastigheten 4–5 m/s, förekom under referensåret. Relativ luftfuktighet hämtades från SMHI:s mätstation Uppsala Aut. För att använda data representativ för hela modellområdet användes så kallad E-OBS griddad data för nederbörd och lufttemperatur (Ledesma och Futter, 2017). Den griddade datan bygger på uppmätt data från ett stort antal meteorologiska mätstationer över hela Europa. Dygnsdata för lufttemperatur och nederbörd i form av max-, min- och medelvärde finns att hämta för gridrutor av storleken $0.1 \times 0.1^\circ$ eller $0.25 \times 0.25^\circ$ (Haylock m. fl., 2008). Medelvärden för E-OBS griddad lufttemperatur och nederbörd valdes för de två gridrutorna av storleken $0.25 \times 0.25^\circ$ som täckte modellområdet. Ett medelvärde representativt för hela modellområdet beräknades sedan från data för de två gridrutorna.



Figur D1: Fördelning av vindhastigheter i samtliga vindriktningar, där den vertikala axeln visar antalet tillfällen som respektive vindhastighet förekommit under 1989, vid mätstation Uppsala flygplats. Störst andel vind kom från sydväst, med hastigheten 3–4 m/s.

För de meteorologiska parametrarna relativ luftfuktighet, vindhastighet, vindriktning och molnmängd, användes samma drivdata som för referensåret. Drivdata för lufttemperatur och nederbörd för de båda klimatscenerierna RCP4.5 och RCP8.5, erhöles som griddade värden från klimatmodellen EC-EARTH från SMHI:s nedskalningsprojekt. Data levererades som griddade dygnsmedelvärden för lufttemperatur, samt total dygnsnederbörd för hela Sverige där gridrutornas upplösning var 4×4 km. Data för 13 stycken gridrutor, vilka täckte modellområdet, valdes ut och medelvärdesbildades för

respektive klimatscenario. Samtliga meteorologiska parametrar för referensår samt framtidsscenarioer redovisas i tabell D1

Tabell D1: Meteorologisk drivdata för referensår 1989, samt framtidsscenarioer RCP4.5 och RCP8.5, vid år 2050

Parameter	Simulering	Tidsperiod	Plats	Källa
Lufttemperatur	1989	24 h	Gridrutor ¹	ECA&D ²
	RCP4.5	24 h	Gridrutor ³	SMHI ⁴
	RCP8.5	24 h	Gridrutor ³	SMHI ⁴
Nederbörd	1989	24 h	Gridrutor ¹	ECA&D ²
	RCP4.5	24 h	Gridrutor ³	SMHI ⁴
	RCP8.5	24 h	Gridrutor ³	SMHI ⁴
Relativ luftfuktighet*	1989	1 h	Uppsala Aut	SMHI ⁵
	RCP4.5	1 h	Uppsala Aut	SMHI ⁵
	RCP8.5	1 h	Uppsala Aut	SMHI ⁵
Vindhastighet*	1989	1 h	Uppsala flygplats	SMHI ⁵
	RCP4.5	1 h	Uppsala flygplats	SMHI ⁵
	RCP8.5	1 h	Uppsala flygplats	SMHI ⁵
Vindriktning*	1989	1 h	Uppsala flygplats	SMHI ⁵
	RCP4.5	1 h	Uppsala flygplats	SMHI ⁵
	RCP8.5	1 h	Uppsala flygplats	SMHI ⁵
Molnighet*	1989	1 h	Uppsala flygplats	SMHI ⁵
	RCP4.5	1 h	Uppsala flygplats	SMHI ⁵
	RCP8.5	1 h	Uppsala flygplats	SMHI ⁵

* Samma drivdata för samtliga tre scenarier

¹ N 59.625 E 17.625 & N 59.875 E 17.625

² (European Climate Assessment & Dataset, 2019)

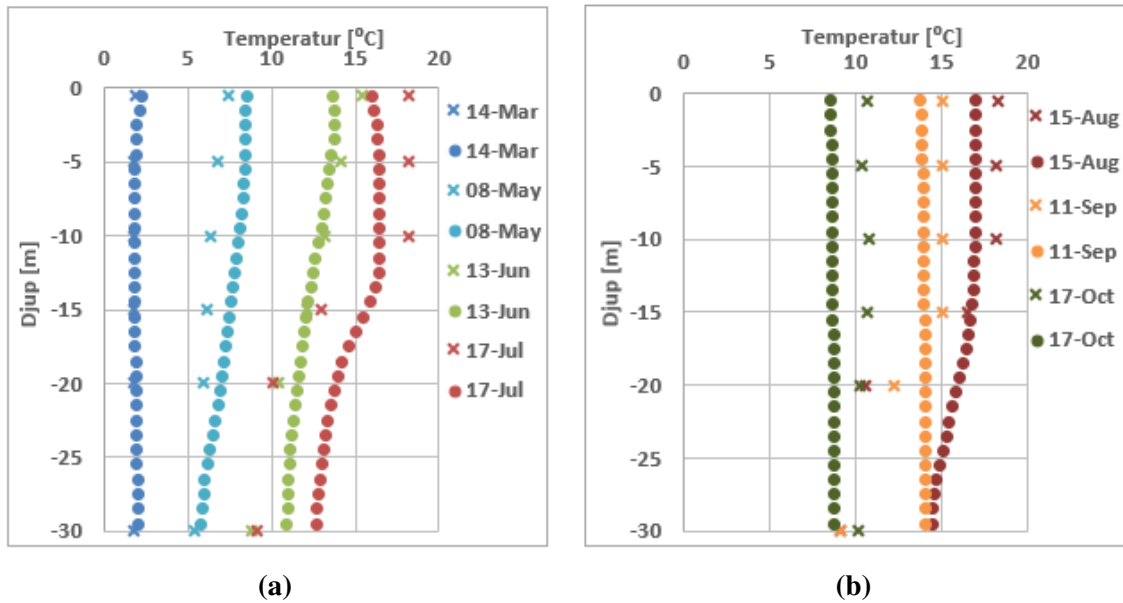
³ 13 stycken gridrutor över modellområdet

⁴ (SMHI, 2019a)

⁵ (SMHI, 2019d)

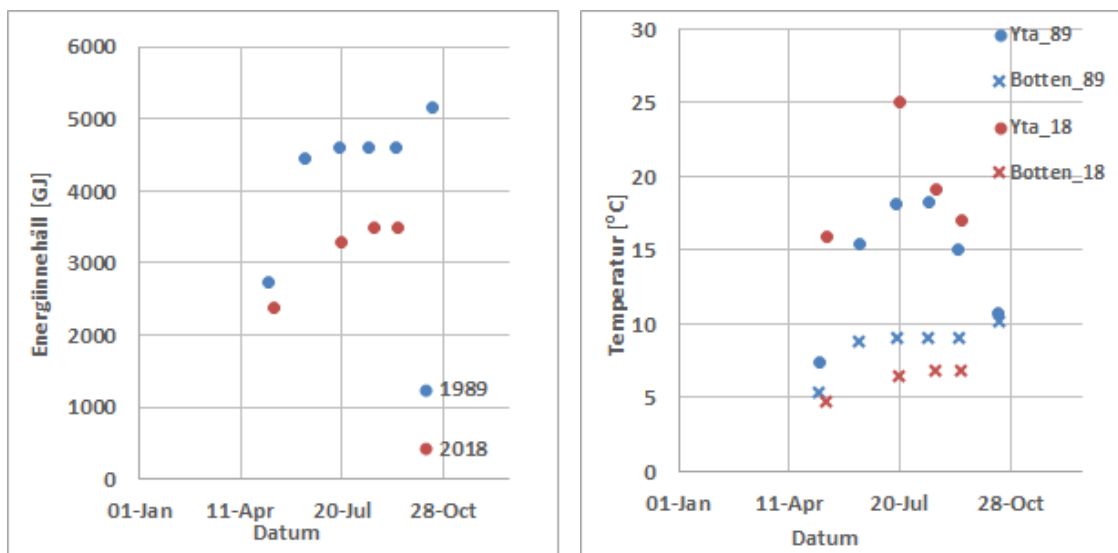
JÄMFÖRELSE MELLAN KALIBRERINGSÅR OCH REFERENSÅR

Vid jämförelse av uppmätta och simulerade temperaturprofiler för referensåret, vilka redovisas i figur D2, visar resultatet på störst skillnader under stabilt skiktade förhållanden, från juli till september. Temperaturskillnad mellan ytvatten och bottenvatten enligt uppmätta data är ungefär 9 °C i juli och augusti, medan temperaturskillnaden för simulerade värden endast uppgår till 3 °C. Uppmätta värden visar även på att vattenmassan var skiktad den 11 september, enligt simulerad temperaturprofil samma dag var vattenmassan däremot totalt omblandat, i och med sin vertikala utsträckning genom hela djupet. Statistisk validering utfördes för 42 stycken uppmätta och 42 st simulerade värden. NSE var 0,83, r 0,92 (p < 0,001) och RMSE 2,1 °C.



Figur D2: Jämförelse mellan uppmätta (x) och simulerade (o) temperaturprofiler för referensåret. Temperaturprofiler för 14 mars, 8 maj, 13 juni och 17 juli visas i figur a medan profiler för 15 augusti, 11 september och 17 oktober visas i figur b.

I figur D3a redovisas det beräknade totala termiska energiinnehållet, enligt ekvation 8, i hela vattenmassan i Ekoln för år 1989 och 2018. Energiinnehållet var högre för samtliga månader år 1989 än för år 2018. Vid jämförelse mellan yt- och bottenvattentemperaturer, i figur D3b, för de två åren ses att temperaturer för ytvatten följer samma utveckling som lufttemperaturen för respektive år. Temperaturer i ytvattnet från april till september, är varmare för år 2018 än för år 1989. Temperaturer i bottenvattnet visar dock inte på samma mönster. Bottenvattnet var kallare för samtliga månader år 2018 i jämförelse med år 1989.



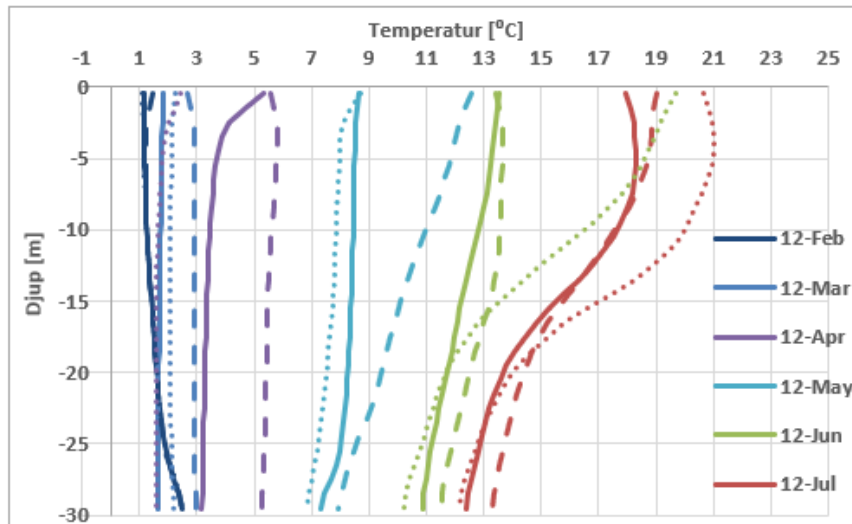
(a)

(b)

Figur D3: Beräknat totalt energiinnehåll [GJ] i Ekoln för 1989 (blå) och 2018 (röd) i figur a. Uppmätt ytvattentemperatur (o) och bottenvattentemperatur (x) för åren 1989 (blå) och 2018 (röd) visas i figur b.

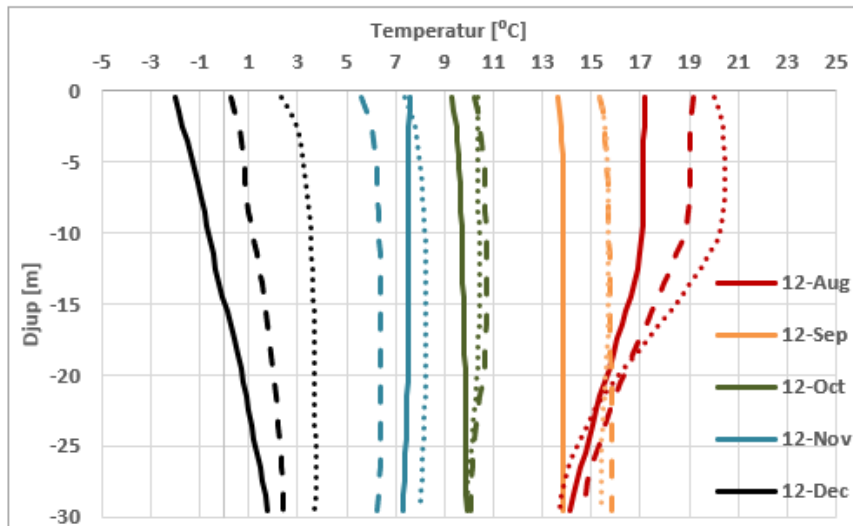
SIMULERING AV FRAMTIDA KLIMAT

I figur D4 visas en simulerad temperaturprofil för varje månad då uppvärmning av vattenmassan sker, från och med startdatum 12 februari till och med 12 juli, för referensåret 1989 (–), samt RCP4.5 (– –) och RCP8.5 (· ·) för år 2050. Enligt temperaturprofiler för februari och mars förväntas ingen större förändring ske, varken till år 2050 eller mellan de två olika framtidsscenerierna. Temperaturprofil för den 12 april 1989 visar att uppvärmning av ytvattnet har påbörjats, för RCP4.5 år 2050 är vattenmassan däremot totalt omblandad. Profil för april för RCP8.5 år 2050 visar på kallare vattentemperatur i jämförelse med referensåret och RCP4.5. Precis som i april är det scenario RCP8.5 år 2050 som visar på kallast temperaturer den 12 maj, ytvattentemperaturen är densamma som för referensåret, men temperaturen är lägre i djupet. I maj förväntas temperaturen i ytvattnet att öka med 4 °C från referensåret till år 2050, för RCP4.5. Vid jämförelse av temperaturprofiler för 12 juni är ytvattentemperaturen för referensåret och år 2050 vid RCP4.5 densamma. RCP4.5 har något varmare bottentemperatur. Temperaturprofil för juni år 2050 vid RCP8.5 visar däremot på en ytvattentemperatur som är 6 °C varmare än för referensåret och RCP4.5, profilen visar även tydligt på att sommarstagnation råder. I juli förväntas ytvattentemperaturen öka för de båda framtidsscenerierna. Att temperaturen i ytvattnet är som varmest, och bottenvattnet är som kallast, för RCP8.5 visar på att skiktningen är som mest stabil vid detta scenario. Temperaturprofil för RCP8.5 visar även på att tjockleken av epilimnion kan komma att öka i framtiden.



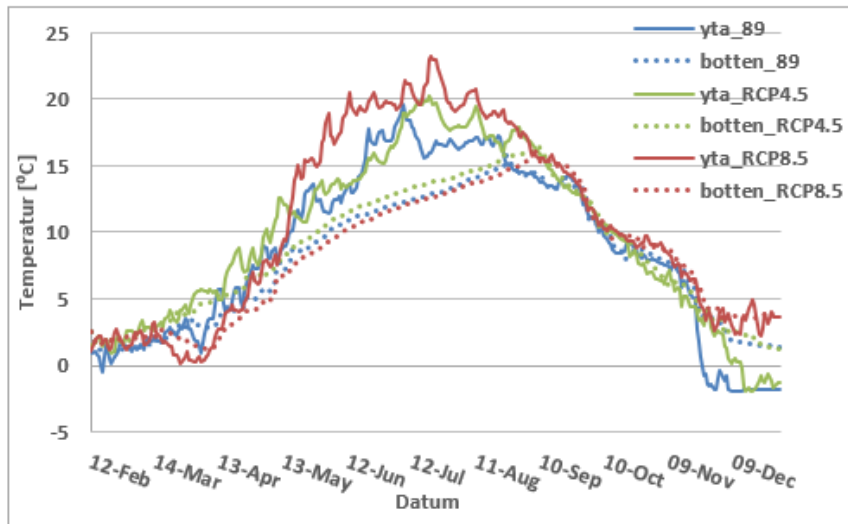
Figur D4: Simulerade temperaturprofiler för respektive månad då uppvärmning av vattenmassan sker, från 12 februari till 12 juli, för år 1989 (-), samt klimatscenarier RCP4.5 (- -) och RCP8.5 (··) för år 2050.

I figur D5 redovisas temperaturprofiler för när vattenmassan kyls ned, från augusti till december, för referensåret 1989 (-), samt klimatscenarier RCP4.5 (- -) och RCP8.5 (··) för år 2050. I augusti förväntas vattenmassan ha varmare temperaturer för de båda framtidsscenarierna, i jämförelse med för referensåret. Ytvattnet är som varmast för RCP8.5, och även bottenvattnet är som kallast för samma scenario. Precis som för resultat i juli i figur D4 visar detta på att skiktningen är mest stabil för RCP8.5. För temperaturprofiler som redovisar förhållanden den 12 september, har vattenmassan blandats om för samtliga scenarier, vilket ses på att temperaturprofilerna är lodräta. Vattentemperaturer i vertikalled är varmare för framtidsscenarier än för referensåret, temperaturer för de båda framtidsscenarierna är dock mycket lika. Samma mönster som för september följer även i oktober, där de båda framtidsscenarierna visar på något varmare vattentemperaturer, men det råder ingen signifikant skillnad mellan de båda framtidsscenarierna. Temperaturprofiler för 12 november visar på att vattentemperaturer år 2050 för RCP4.5 kan förväntas vara något kallare än för referensåret, medan vattentemperaturer för år 2050 vid RCP8.5 kan förväntas vara något varmare än för referensåret. För den 12 december förväntas vattentemperaturer för de båda framtidsscenarierna vara varmare än för referensåret, det är dock som varmast för RCP8.5. För referensåret simulerar modellen negativa värden för 12 december, något som inte förekommer för RCP4.5 och RCP8.5 för år 2050.



Figur D5: Simulerade temperaturprofiler för respektive månad då nedkylning av vattenmassan sker, från 12 augusti till 12 december, för referensår 1989 (-), samt klimatscenarier RCP4.5 (- -) och RCP8.5 (· ·) för år 2050.

Figur D6 visar på när cirkulation och skiktning inställer sig i sjön för referensåret och år 2050 vid RCP4.5 och RCP8.5. Variation mellan temperatur i ytvatten (linje) och bottenvatten (streckad) visar på när olika förhållanden råder i sjön. Enligt Robertson och Ragotzkie (1990) råder skiktning om temperaturskillnaden mellan ytvatten och bottenvatten är minst 2 °C. För år 1989 (blå) uppstår skiktade förhållanden redan den 29 april. Temperaturskillnad mellan ytvatten och bottenvatten är dock inte stabil över 2 °C förrän den 6 juni. Höstcirkulation infaller den 23 augusti, och vattenmassan är totalt omblandad fram till den 22 november, då vinterstagnation inställer sig. För år 2050, vid RCP4.5, förekommer skiktade förhållanden den 17 april men skiktningen blir stabil först den 26 maj. Höstcirkulation inträffar den 1 september och vinterstagnation förekommer den 7 december. Vid RCP8.5, år 2050, förväntas skiktade förhållanden förekomma den 28 april och stabilitet uppnås den 13 maj. Höstcirkulationen förväntas infalla den 3 september och vinterstagnation förekommer inte alls.



Figur D6: Tidsserier för temperaturer i ytvatten (–) och bottenvatten (··) för de tre scenarierna, referensår 1989 (blå), år 2050 vid RCP4.5 (grön) och år 2050 vid RCP8.5 (orange). Temperaturskillnad på minst 2 °C mellan ytvatten och bottenvatten visar på att vattenmassan är skiktad.

Tidsperiod med sommarstagnation, var enligt simulerade temperaturprofiler för referensåret 78 dagar. Till år 2050 vid klimatscenario RCP4.5 förväntas tidsperioden förlängas med 20 dagar och 35 dagar för RCP8.5. Sammanställning av förändring i vattentemperaturer samt antal dagar då sommarstagnation råder för referensåret och de två framtidsscenarierna ses i tabell D2. Medeltemperaturen i vattenmassan förväntas stiga fram till år 2050. Temperaturökningen gäller för de båda klimatscenarierna RCP4.5 och RCP8.5. Störst förändring kan förväntas i ytvattnet vid RCP8.5, då medeltemperaturen förväntas stiga med 2 °C. Vid RCP4.5 förväntas en temperaturökning ske genom hela djupet och det skiljer endast 0,3 °C mellan temperaturökningen i ytvatten och bottenvatten. För RCP8.5 ses däremot att ökningen kommer vara som mest påtaglig från ytan ned till 10 meters djup, för att sedan avta, med endast 0,2 °C ökning vid 30 meters djup.

Tabell D2: Sammanställning av resultat för medeltemperatur, i °C, vid olika djupnivåer i modellområdet för referensår 1989, samt förändring till år 2050 vid klimatscenarier RCP4.5 och RCP8.5. Nedre delen av tabellen visar simulerat datum för infall av sommarstagnation och höstcirkulation. Även antalet dagar per år för period med sommarstagnation, samt antalet dagar då ytemperaturen överstiger 20 °C för referensår, samt förändring till 2050 för de två klimatscenarierna.

		1989	Förändring till 2050	
			RCP4.5	RCP8.5
Medeltemperatur vid djupnivå [°C]	Yta	8,6	+1,0	+2,0
	-5 m	8,7	+1,0	+1,8
	-10 m	8,7	+0,9	+1,6
	-15 m	8,5	+0,8	+1,0
	-20 m	8,2	+0,7	+0,3
	-25 m	8,0	+0,7	+0,3
	-30 m	7,9	+0,7	+0,2
Infall sommarstag.	6/6	-11 dagar	-24 dagar	
Infall höstcirk.	23/8	+9 dagar	+11 dagar	
Antal dagar	78	+20 dagar	+35 dagar	
Yttemp.>20 °C	0	+1 dag	+29 dagar	