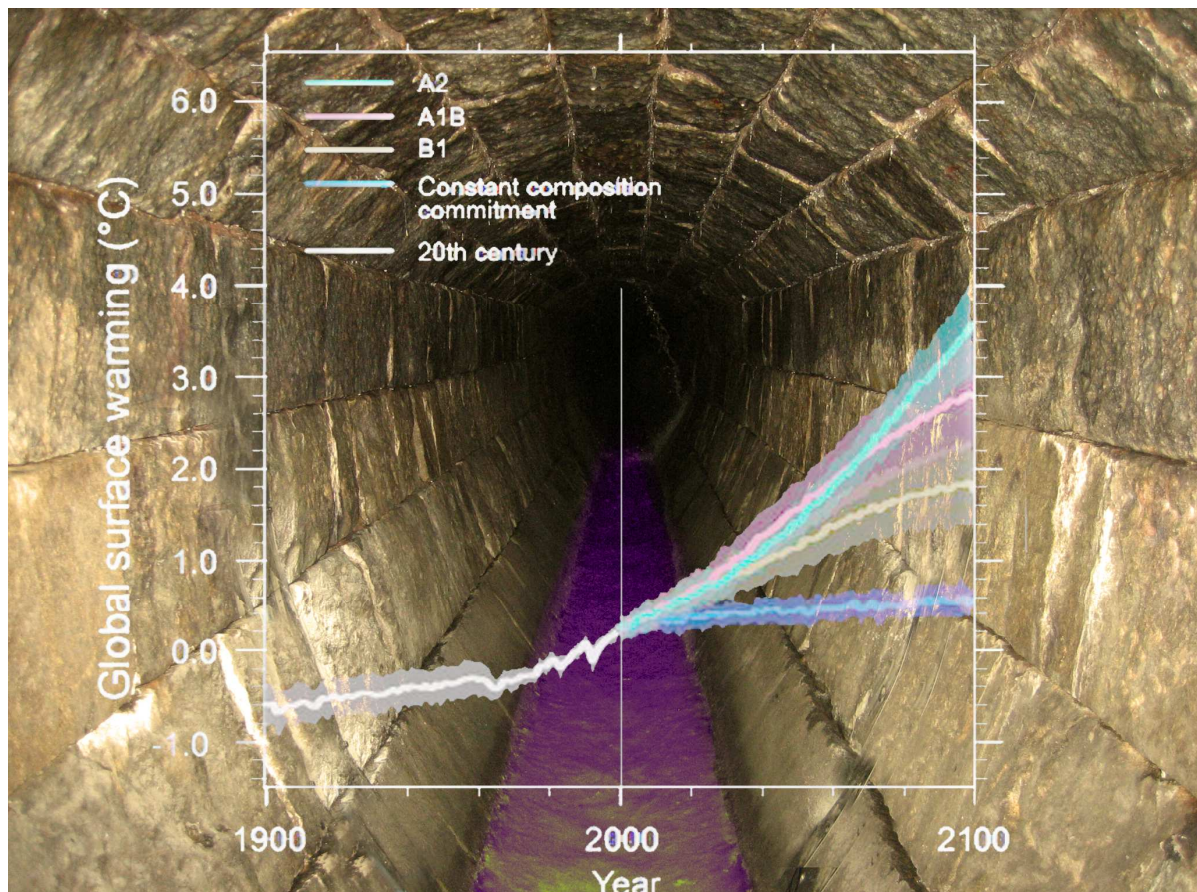


Jonas Olsson
Joel Dahné
Jonas German
Bo Westergren
Mathias von Scherling
Lena Kjellson
Fredrik Ohls
Alf Olsson

En studie av framtida flödesbelastning på Stockholms huvudavloppssystem



En studie av framtida flödesbelastning på Stockholms huvudavloppssystem

Jonas Olsson¹, Joel Dahné¹, Jonas German², Bo Westergren³, Mathias von Scherling³, Lena Kjellson³, Fredrik Ohls³, Alf Olsson⁴

¹ Forskning och Utveckling (hydrologi), SMHI

² Miljö och Säkerhet (hydrologi), SMHI

³ Stockholm Vatten AB

⁴ Sweco AB

Report Summary

Issuing Agency Swedish Meteorological and Hydrological Institute S-601 76 NORRKÖPING Sweden		Report number CLIMATOLOGY No. 3	
		Report date December 2010	
Authors Jonas Olsson, Joel Dahné, Jonas German, Bo Westergren, Mathias von Scherling, Lena Kjellson, Fredrik Ohls, Alf Olsson			
Title En studie av framtida flödesbelastning på Stockholms huvudavloppssystem			
Abstract This study was performed within the <i>SWEdish research programme on Climate, Impacts and Adaptation</i> (SWECIA), funded by the Foundation for Strategic Environmental Research (MISTRA), with additional funding from Stockholm Vatten AB. The aim of the study was to assess the discharge load on Stockholm's main sewer system during the rest of this century in light of both climate change and population increase. For this assessment, flow simulations with MIKE Urban were performed. Reference simulations for today's climate were done both for a representative year (1984) and for some 200 selected rainfall events between 1983 and 2007. In future simulations the climate effect was taken into account by rescaling input data (temperature, precipitation, evaporation) in line with climate model scenarios and the population effect by an increase in line with official estimations. The results indicate in particular that the spill volumes to Lake Mälaren and Saltsjön will increase substantially, but also an increased inflow to the treatment plant, and thus an increased need for treatment, and an increased flood risk.			
Sammanfattning Denna studie utfördes inom <i>SWEdish research programme on Climate, Impacts and Adaptation</i> (SWECIA), finansierat av Stiftelsen för Miljöstrategisk Forskning (MISTRA), med delfinansiering från Stockholm Vatten AB. Studiens syfte var att bedöma flödesbelastningen på Stockholms huvudavloppssystem under resten av detta sekel mot bakgrund av både klimatförändring och befolkningsökning. Som underlag gjordes flödessimuleringar med MIKE Urban. Referenssimuleringar för dagens klimat gjordes dels för ett representativt helår (1984), dels för c:a 200 utvalda regnhändelser mellan 1983 och 2007. I framtidssimuleringar beskrevs klimateffekten genom omskalning av indata (temperatur, nederbörd, avdunstning) i enlighet med klimatmodellscenarier och befolkningseffekten genom en ökning i enlighet med officiell bedömning. Resultaten indikerar framför allt att bräddade volymer till Mälaren och Saltsjön kommer att öka kraftigt, men även ett ökat inflöde till reningsverket, och därmed ökat behov av rening, samt en ökad översvämningrisk.			
Key words Climate change, population increase, Stockholm sewer system, discharge, spill, flooding			
Supplementary notes Appendix I: CLIMATE ANALYSES OF LAKE MÄLAREN, Internal report for Mistra-SWECIA by Jonas Olsson, Joel Dahné, Johan Andréasson, SMHI 2009 (in Swedish) Appendix II: URBAN HYDROLOGICAL CLIMATE SCENARIOS IN STOCKHOLM, Sensitivity analysis of the impact of sea levels and population increase on Stockholm's main sewer system, Alf Olsson, SWECO 2009 (in Swedish)		Number of pages 86	Language Swedish
ISSN and title ISSN 1654-2258 CLIMATOLOGY			
Report available from: SMHI S-601 76 NORRKÖPING Sweden			

Innehållsförteckning

1	Sammanfattning	1
2	Inledning	2
3	Syfte och avgränsningar.....	2
4	Mistra-SWECIA samt angränsande utredningar och forskningsprojekt	3
4.1	Mistra-SWECIA	3
4.2	Klimat- och Sårbarhetsutredningen.....	3
4.3	Risk och Sårbarhetsanalys hos Stockholms Stad	4
4.4	Stockholms stad – Handlingsplan mot växthusgaser – Anpassning till ett förändrat klimat	4
4.5	Slussens ombyggnation	5
4.6	SMHI-samarbeten med Luleå Tekniska Universitet (LTU).....	5
4.7	SUDPLAN.....	5
5	Huvudavloppssystemet och hydraulisk modell	6
5.1	Huvudavloppssystemet och ledningsnätsmodell	6
5.2	Historiska klimatdata.....	9
5.3	Modellberäkningar.....	9
5.4	Resultat från nuläggssimulering	11
6	Klimatprojektioner	14
6.1	Klimatprojektioner Mälaren	15
6.2	Klimatprojektioner Stockholm	16
6.3	Generering av klimatindata	21
6.4	Hydraulisk modellering av klimatprojektioner	22
7	Resultat: helår	24
7.1	Inflöde till Henriksdal	24
7.2	Bräddning till Mälaren och Saltsjön.....	29
8	Resultat: utvalda regnhändelser 1983-2007.....	31
8.1	Inflöde till Henriksdal	31
8.2	Bräddning till Mälaren och Saltsjön.....	34
8.3	Dämning i utvalda punkter.....	36
9	Slutsatser och diskussion.....	38
10	Tackord.....	40
11	Referenser	40
	Bilaga 1: Klimatanalyser av Mälaren inom Mistra-SWECIA (Intern Mistra-SWECIA rapport).....	43
	Bilaga 2: Urbanhydrologiska klimatscenarier i Stockholm (Känslighetsanalys på effekten av havsnivåer och befolkningstillväxt på avloppssystemet i Stockholm).....	82

1 Sammanfattning

Den framtida flödesbelastningen på Stockholms huvudavloppssystem har uppskattats genom simuleringar med ledningsnätmodellen MIKE Urban. Simuleringar har gjorts dels för en kontinuerlig 1-årsperiod, dels för de 195 tillfällena under perioden 1983-2008 med störst inflöde till Henriksdals reningsverk. Som indata har använts historiska tidsserier av nederbörd, temperatur, avdunstning och vattennivå i Mälaren. Dessa har använts dels i ursprungligt skick, dels omskalade med olika varianter av metoden Delta Change för att simulera tidsserier i ett framtida förändrat klimat.

De framtida klimatförändringar som använts i omskalningen kommer från tre projektioner gjorda med den globala klimatmodellen ECHAM med IPCC-scenarier B2, A1B och A2 som randvillkor. Dessa resultat har nedskalats till ett 50×50 km grid över Europa med den regionala modellen RCA3. Tre framtida 30-årsperioder har använts: 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100. Förutom klimatförändringen har även den framtida befolkningsförändringen uppskattats.

Tre aspekter har studerats: (1) flödesbelastning till Henriksdals reningsverk, (2) bräddad volym till Mälaren och Saltsjön och (3) risk för översvämning i utvalda punkter. För samtliga studerade aspekter sker en ökning med normalt 10-30%, ibland något mindre, ibland något mer. Förutom för bräddning på helårsbasis syns sällan någon tydlig trend mot kraftigare ökningar mot slutet av seklet vilket kan förklaras dels av ökad avdunstning, dels på sättet framtida befolkningsökning beskrivits. De studerade projektionerna ger i allmänhet ett likartat resultat.

Befolkningsökningen fram till år 2030 innebär ett ökat flöde till Henriksdals reningsverk med c:a 15% på årsbasis och c:a 6% i samband med ett dimensionerade 10-årsregn. Beräkningarna visar att volymen spillvatten som bräddar kommer att öka kraftigt. Den största effekten på bräddad volym kommer från klimatförändringen vilken beräknas leda till 15-20% ökning. Befolkningsökningen fram till 2030 kommer dessutom att ytterligare öka bräddningen med c:a 5%.

En fortsatt befolkningsökning på 1% per år efter 2030 inom Henriksdals reningsverks avrinningsområde kommer, tillsammans med den av klimatförändringen förväntade ökningen av bräddvolym, att innebära problem redan i mitten av seklet. Stockholm Vatten behöver därför jobba med åtgärder för att fortsatt uppfylla de gällande kraven för bräddvolym.

2 Inledning

En markant förändring av klimatet kan på olika sätt förändra belastningen på avloppsnätet. Detta studerades i samband med Klimat- och Sårbarhetsutredningen, Sverige inför klimatförändringarna - hot och möjligheter (SOU, 2007:60). Svenskt Vatten tog 2007 i samband med utredningen fram en underlagsrapport gällande avlopp. Rapporten nämner följande klimatfaktorer som påverkar avloppssystemen:

”Ändrad nederbörd:

- Intensivare kortvariga regn
- Risk för ändrad utbredning och karaktär på regnen, t.ex. mycket långa regn vilket kan resultera i:
 - Ökad risk för översvämningar och bräddningar vid korta intensiva regn
 - Ökade regnmängder att avleda
 - Långvariga regn på årstider med låg avdunstning, vattenmättad mark ger mycket stora vattenvolymer som skall hanteras

Högre vattenstånd i recipienter

Vilket kan resultera i:

- Ökad risk för översvämningar av bebyggelse
- Sämre avledning av dagvatten om recipienten dämmer längre in i dagvattensystemen
- Risk för återströmning i brädd och nödavlopp”

En aspekt som är mycket viktig för Stockholms framtida avloppssystem är en förändrad tillrinning till Mälaren, och resulterande förändrade vattennivåer. En annan aspekt, förutom de storskaliga hydrologiska förändringar som avspeglas i Mälarens vattenstånd, är att avloppsnätet kan komma att påverkas av mera lokala förändringar i Stockholmsregionen, främst vad gäller nederbördsmängder och intensiteter. Simuleringar med klimatmodeller har indikerat en ökad vinternederbörd i regionen och även intensivare skyfall. Stockholm Vatten har ett utsläppsvillkor för bräddvatten från ledningsnätet som uppgår till 325 000 m³/årligen som ett rullande tioårsmedelvärde. För närvarande uppfyller den årliga breddningen nätt och jämt villkoret.

Utöver klimatförändringen finns även andra förväntade förändringar som kommer att påverka belastningen på systemet, främst förtätning av bebyggelsen och resulterande befolkningsökning. Stockholms stad beräknas växa med c:a 200 000 invånare fram till 2030 (Stockholms stads Risk och Sårbarhetsutredning, 2009).

Denna kombination av samtidiga förändringar och med osäkerheter i prognoser och projektioner av klimatförändringars globala och lokala mönster gör frågeställningen om framtida belastning på urbana vattensystem extra komplex. Enbart ett fåtal studier har hittills försökt uppskatta kombinerade effekter, t.ex. Semadeni-Davies m.fl. (2008a, b) som studerade effekter på dagvatten och kombinerat system i Helsingborg. Resultaten belyste de risker och betydande osäkerheter som finns men demonstrerade också att insatser som syftar till hållbar dagvattenhantering kan minska sårbarheten för framtida klimatförändringar.

3 Syfte och avgränsningar

Det grundläggande syftet med denna studie är att analysera hur klimatförändringen påverkar belastningen på Stockholms huvudavloppsnät ur tre aspekter: (1) inflöden till reningsverk, (2) bräddning till olika recipienter och (3) översvämning i kritiska punkter. Dessa analyser är baserade på resultat från befintliga ledningsnätsmodeller för Stockholms huvudavloppssystem, drivna med klimatdata representerande dagens eller framtida klimat. Ingen analys görs av vattnets kvalitet utan enbart flöden och volymer beräknas. Denna studie omfattar endast det kombinerade huvudavloppsnätet, d.v.s. där både regnvatten och spillvatten avleds. De rena dagvattensystemen – ledningar, diken och bäckar har inte studerats. Effekten från vattenståndshöjningar kan inte simuleras med avloppsnätsmodellen som är kalibrerad efter nuvarande vattenstånds- och

grundvattenförhållanden. Men en höjning av grundvatten- och vattenståndsnivåer kommer att öka inläckaget i ledningsnätet.

I simuleringarna av det framtida klimatet har tre olika scenarier använts, vilka representerar olika antaganden vad gäller framtida utsläpp av växthusgaser men med samma kombination av global och regional klimatmodell. Eftersom olika modeller kan ge olika resultat, även med samma utsläppsscenario, representerar spridningen i resultatet inte hela osäkerheten i den framtida klimatpåverkan.

Ett andra syfte är att jämföra effekten av klimatförändringen med förväntad befolkningsutveckling i Stockholm, samt att uppskatta den totala effekten på avloppsledningssystemet. Den prognostiserade befolkningsökningen, inom Stockholm, är bara införlivad i modellerna fram till och med år 2030. Därefter är befolkningen konstant i beräkningarna. Anledning till detta är att för stor osäkerhet råder kring om flöden genererade av tillkommande befolkningsökning kommer att leda till Henriksdal.

Inga förändringar av infrastruktur eller markytegenskaper har gjorts i de framtida simuleringarna, d.v.s. systemfunktionen förutsätts vara i princip densamma som idag. Inga kombinerade system separeras, men inget nytt dagvatten kopplas heller på befintligt kombinerat nät. Vidare har tillflödet från grannkommunerna (Nacka, Haninge, Tyresö och Huddinge) till modellerna i alla simuleringar antagits vara konstant lika med 2005 års nivå. Ingen hänsyn har således tagits till förändrade förutsättningar varken på grund av förändrat klimat eller ökad befolkning i grannkommunerna.

4 Mistra-SWECIA samt angränsande utredningar och forskningsprojekt

I detta kapitel presenteras först forskningsprojektet Mistra-SWECIA, inom vilket denna studie genomförts. Därefter beskrivs översiktligt angränsande utredningar och forskningsprojekt inom detta område.

4.1 Mistra-SWECIA

Mistra-SWECIA – Swedish Research Programme on Climate, Impacts and Adaptation – är ett tvärvetenskapligt och integrerat klimatforskningsprogram som omfattar klimatprocesser, klimateffekter, klimatekonomi och anpassning till ett förändrat klimat. Programmet är ett samarbete mellan SMHI, Stockholm Environment Institute, Institutionen för naturgeografi och ekosystemanalys (Lunds universitet) samt Meteorologiska institutionen och Institutet för internationell ekonomi (Stockholms universitet). Stiftelsen för miljöstrategisk forskning, Mistra, finansierar programmet och SMHI är programvärd. Första programfasen är fyra år, 2008-2011.

Inom programmet ska det utvecklas ett gemensamt ramverk för avancerad modellering av klimat, ekonomi, klimateffekter och anpassning. Forskningen utförs i fyra olika projekt som handlar om klimatsystemmodellering, klimat- och ekonomimodeller, modellering av klimateffekter respektive anpassningsprocesser. Modellerna används för studier av kopplingar och osäkerheter, för scenarier och för ökad kunskap om anpassningsprocessen. Inte minst är det relationer inom klimatsystemet och mellan klimatsystemet och samhället som är i fokus. Syftet med forskningen är att utarbeta vetenskapliga kunskaper, men också underlag som olika samhällsaktörer kan använda för information, analyser och beslutsfattande.

Det läggs inom programmet stor vikt vid kommunikation med användare av forskningsresultaten, t.ex. genom fallstudier. Den första fallstudien som genomförs inom Mistra-SWECIA rör klimatanpassning i Stockholmsregionen och analysen av huvudavlopssystemet som redovisas i denna rapport är en del av denna fallstudie.

4.2 Klimat- och Sårbarhetsutredningen

Klimat- och Sårbarhetsutredningens viktigaste slutsatser och förslag som berör denna utredning är (SOU 2007:60):

- Det är nödvändigt att påbörja anpassningen till klimatförändringarna i Sverige. Huvuddragen i klimatscenarierna är trots osäkerheter tillräckligt robusta för att användas som underlag.
- Risken för översvämningar, ras, skred och erosion ökar.
- Östersjön riskerar dramatiska förändringar av ekosystemen. Klimatförändringarna förvärrar dagens situation och arbetet med att minska utsläppen bör intensifieras.
- Vattenkvaliteten i sjöar och vattendrag kommer att försämrast.

4.3 Risk och Sårbarhetsanalys hos Stockholms Stad

I Stockholms stads Risk och Sårbarhetsutredning med anledning av klimatförändringar anges följande framtida förändringar kopplade till klimatet i Stockholmsregionen (SBK 2010:1):

- Det blir varmare med störst förändring under vintern
- Ökad nederbörd med blötare vintrar och torrare somrar
- Mindre snö och kortare snösäsong
- Kortare säsong med is på sjöar och Östersjön
- Längre växtsäsong
- Ökad översvämningrisk p.g.a. högre vattenstånd vintertid i Mälaren
- Lägre vattenstånd i Mälaren sommartid

I scenariobeskrivningen beskrivs följande för VA-verksamheten intressanta potentiella scenario:

- De skyfall som drabbat Stockholms stads centrala delar under senare tid (runt år 2030) har varit något intensivare än de som drabbade staden i början av 2000-talet. Under 2020-talet har sjöarna i Stockholmsregionen endast varit täckta av is under korta perioder eller, som under år 2023, varit helt isfria. Nederbörden i form av snö har också varit mer ovanlig under dessa år jämfört med början av 2000-talet.

Arbetsgången inom Stockholms Stads arbete med Risk och sårbarhetsanalys är följande:

1. Modell (Risk och Sårbarhetsanalys, RSA) för analys framtagen och används inom Stockholm (2008)
2. Analys av förändringarna genomförda (2009)
3. Beskrivande scenarier framtagna (2009-2010)
4. Utgångspunkt i stadens verksamheter – analys ur ett verksamhetsperspektiv i alla verksamheter (2010)
5. Stadsövergripande analys (2011)

4.4 Stockholms stad – Handlingsplan mot växthusgaser – Anpassning till ett förändrat klimat

I Mars 2007 tog Miljöförvaltningen i Stockholms stad fram ett PM med syfte att ta fram en inledande gemensam bild av stadens behov av att arbeta med klimatanpassning. Stockholm Vatten har gett input till handlingsplanen gällande VA-frågorna och det framgår följande:

- Höjda vattennivåer leder till slut till att befintliga lågt liggande spillvattensystem slås ut. Stockholm Vatten och Stockholms Stad beslöt 2005 att lägsta avloppsrenhet i bebyggelse vid Saltsjön respektive Mälaren inte får ansluta med självfall till det allmänna avloppssystemet under nivån +1.50 m (tidigare +0.85 m) respektive +1.60 m (tidigare +1.01⁵ m)
- Ökad nederbörd kan leda till stora problem för dagvattensystem som redan idag är underdimensionerat. Stockholm Vatten har kontrollerat hur väl dagvattenförande avloppssystem (kombinerat och dagvatten) klarar recipientnivåerna +1.3 och +2.3 meter. Redan vid nivån +1.3 ser det problematiskt ut för många fastigheter anslutna till dämnda system.
- Driften vid vattenverken vid Norsborg och Lovön kan påverkas vid översvämningar i Mälaren. Översvämningar och omfattande regn kan leda till att vatten når områden som är förorenade

⁵ Höjderna redovisas i höjdsystemet RH00

vilka kan påverka vattenkvaliteten i Mälaren. Minskad nederbörd i kombination med ökad temperatur kan även påverka dricksvattnet.

4.5 Slussens ombyggnation

Risken för översvämningar i centrala Stockholm är redan i dagsläget hög och sårbarheten är dessutom stor. Under 2010 kommer samråd angående Mälarens reglering och avbördningskapacitet att genomföras och en tillståndsansökan till miljödomstolen lämnas in i början av 2011. De nya avtappningskanalerna är ännu inte finansierade.

Slussens ombyggnad kommer att från det beräknande färdigställandet år 2018 medföra avsevärda förbättringar i Mälarens avtappningsförmåga - men det är fortfarande oklart om förbättrad regleringsfunktion kommer att vara tillräcklig sett mot en längre tidshorisont. Risken för omfattande översvämningar minskar men vattennivån i Mälaren kommer sannolikt att öka något under vinter och vår efter år 2018 till följd av ny reglering vilket något ökar inläckaget till avlopps nätet och flödena till Henriksdals reningsverk. Stigande havsnivåer läggs fram som ett reellt hot för kustnära städer i världen, men för Stockholms del kommer det att motverkas av landhöjningen så att effekterna sannolikt inte kommer att märkas förrän om c:a 50 år. Se även <http://www.stockholm.se/slussen>.

Stor osäkerhet föreligger dock om hur snabbt havet kommer att stiga. Vissa studier pekar på en betydligt snabbare havsnivåhöjning i Östersjön än den i Klimat- och Sårbarhetsutredningen antagna på upp till maximalt +0.8 m till år 2100.

4.6 SMHI-samarbeten med Luleå Tekniska Universitet (LTU)

Sedan 2006 samarbetar SMHI med forskargruppen Stadens Vattensystem, LTU, inom olika FORMAS-finansierade projekt. Förutom Mistra-SWECIA är det inom detta samarbete som huvuddelen av SMHIs erfarenheter och kompetens vad gäller urbanhydrologiska climateffekter förvärvats.

Det första samarbetsprojektet var *Urban drainage and climate changes*, som hade ganska allmänt formulerade mål om att öka kunskapen om urbanhydrologiska climateffekter och att leverera information och beslutsunderlag för att hantera riskerna. En fallstudie genomfördes i en del av Kalmar, inom vilken SMHI levererade indata (nederbörd) som LTU använde i modellering av ledningsnätet (med MOUSE-modellen). Indata utgjordes av en observerad tidsserie som omskalats för att simulera framtida förändringar i nederbörds mönstret (Olsson m.fl., 2009). Resultaten indikerade en ökning av antalet översvämningar med 20-45% under detta sekel.

För närvarande (2010) sker samarbetet huvudsakligen inom projektet *Hydroimpacts2.0* (2010-2014). Detta projekt täcker hela kedjan i hydrologiska climateffektstudier från utveckling av klimatmodeller, via tolkning och nedskalning av klimatmodellernas utdata till hydrologisk simulering och slutligen visualisering och tillgängliggörande av resultaten. Projektet omfattar hydrologiska processer på olika skalor och i olika typer av områden, däribland stadsmiljö. Avsikten är att utvärdera regionala skillnader i urbanhydrologisk klimatpåverkan samt att utveckla indikatorer som beskriver funktion och påverkan för ett urbant system.

4.7 SUDPLAN

Inom det nyligen startade EU-projektet SUDPLAN (*Sustainable Urban Development Planner for Climate Change Adaptation*; 2010-2012; <http://www.smhi.se/sudplan>) ska en webbaserad tjänst utvecklas som stöd för stadsutveckling mot bakgrund av klimatiförändringen. Tjänsten ska omfatta hela Europa och tre specifika processer: intensiv nederbörd, avrinning och luftkvalitet. Tanken är att användaren efter val av process, område, utsläppsscenario och tidsperiod från tjänsten ska kunna hämta både allmän information kring framtida förändringar och konkreta data att använda i egna effektstudier.

SMHI bidrar bl.a. med rutiner för hantering av intensiv nederbörd. Principen är att användaren först laddar upp historiska nederbördsdata, antingen en kontinuerlig tidsserie eller extremnederbörd för viss varaktighet och återkomsttid. Därefter sker i systemet omskalning i enlighet med valt scenario och tidsperiod, varefter omskalade data kan laddas ner för fortsatt analys. En annan möjlig funktion hos systemet är simulering av nederbördshändelse över ett avrinningsområde, inklusive storlek och riktning, och generering av konsistenta tidsserier i utvalda punkter.

5 Huvudavloppssystemet och hydraulisk modell

5.1 Huvudavloppssystemet och ledningsnätmodell

För att kunna utvärdera climateffekterna på Stockholms huvudavloppssystem har befintliga ledningsnätmodeller använts. De är uppbyggda i modellsystemet MIKE Urban (hydrauliskt verktyg för ledningsnätmodellering framtaget av DHI; se <http://www.mikebydhi.com/>) med syftet att underlätta planering och beslut om åtgärder för förnyelse och utveckling av ledningsnätet.

Under åren 2003-2007 togs modeller fram som täckte hela huvudavloppsnätet inom Stockholm Vattens verksamhetsområde. Avrinningsytorna definierades med GIS, och modellen kalibrerades systematiskt och enligt enhetliga principer med hjälp av flödesmätningar på de strategiskt mest relevanta punkterna. Modellernas slutpunkter är reningsverken.

Stockholms avloppssystem är till knappt hälften ett kombinerat system där spillvatten och dagvatten avleds i samma ledningar och tunnlar till reningsverken. Dagvattnet står för merparten av flödet vid regn och för att inte få orimligt stora dimensioner finns ett antal bräddpunkter till recipienter.

Syftet med modellerna är:

- Övergripande funktionskontroll av det befintliga ledningsnätet.
- Beräkna den hydrauliska funktionen i huvudavloppsnätet.
- Redovisa frekvens och volym på bräddning för alla bräddpunkter på årlig basis.
- Utvärdera effekten av planerade åtgärder.
- Prognostisera ledningsnätets funktion med hänsyn till exploateringarna och den framtida befolkningsutvecklingen.

Inom detta projekt har två delmodeller använts:

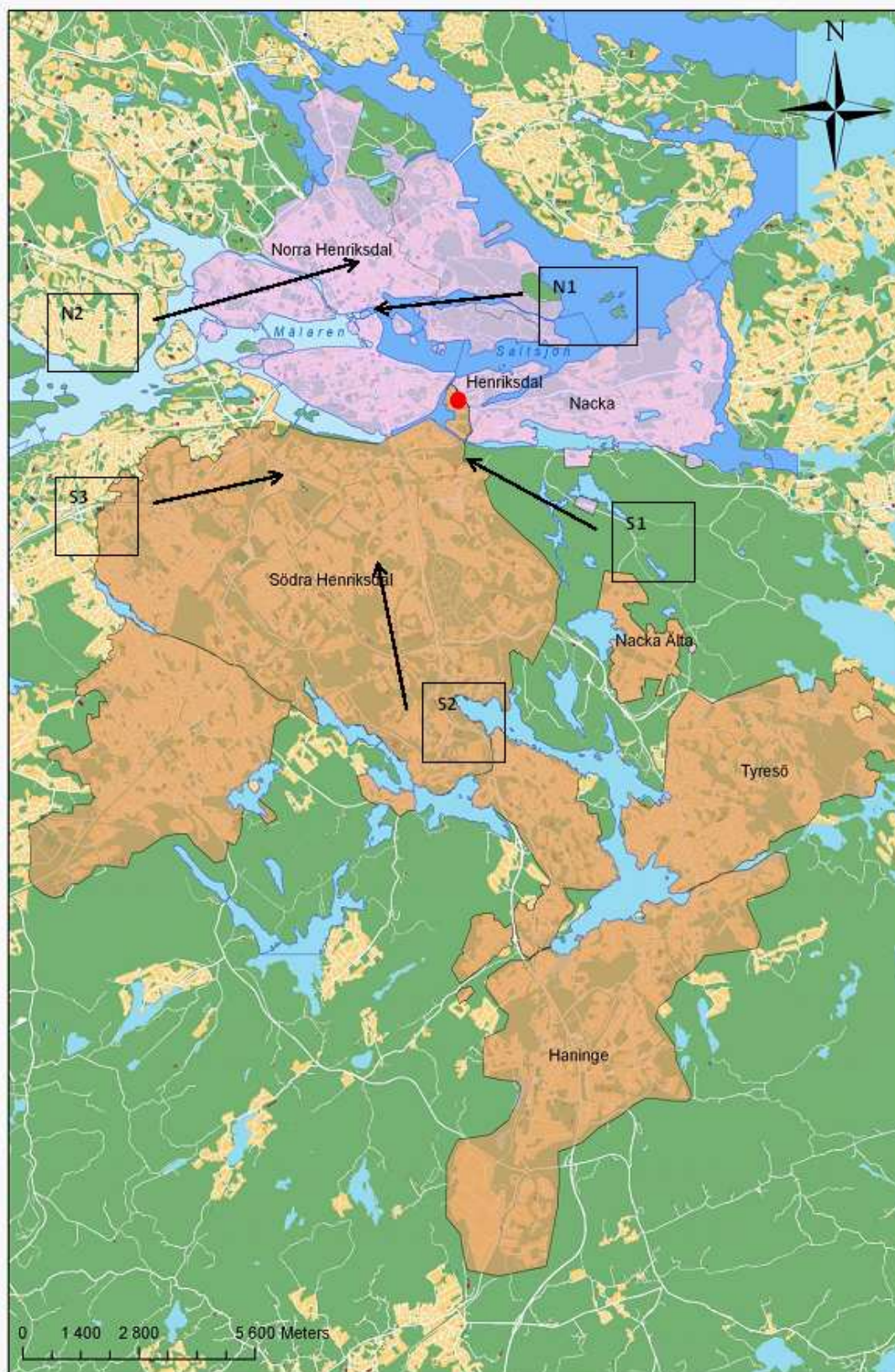
- Henriksdal Norra som beskriver ledningsnätet som leder spillvatten direkt till grovreningen i Henriksdals avloppsreningsverk.
- Henriksdal Södra som beskriver ledningsnätet i Stockholm söderort och Huddinge som avrinner till grovreningen i Sickla (spillvatten som tillförs från Nacka, Tyresö och Haninge har lagts in som punktblastningar) och sedan vidare till Henriksdals avloppsreningsverk.

Övriga två modeller (Bromma och Syvab) har inte använts inom denna studie.

Omfattningen på de hydrauliska modellerna som använts i denna undersökning redovisas i Tabell 1 och i Figur 1.

Tabell 1. Omfattningen på de hydrauliska modellerna som använts i denna undersökning.

	Norra Henriksdal	Södra Henriksdal
Delområden	380	570
Avrinningsområde [ha]	5790	14900
Längd ledningar [km]	130	240
Antal pumpar	70	35
Antal bräddar/skibord	160	90



Figur 1. Karta över Norra och Södra Henriksdals huvudavloppsmodeller. Förutom områdena i Stockholm och Huddinge ingår Haninge, Tyresö och Nacka i Södra Henriksdal som varsitt inflöde till modellen. Pilarna i figuren visar på platser i ledningsnätet där dämningnivån har studerats i denna utredning.

Ledningsnätmodellerna beskriver huvudavlopssystemet med hög detaljeringsgrad. I modellerna finns den fysiska beskrivningen av avloppssystemet såsom ledningsdimension, material, lutningar, marknivåer, skibord, pumpar, tunnlar, magasin, borrhål, spillvattenförbrukning, styrningsstrategier av pumpar m.m. Utöver den fysiska beskrivningen har modellen kalibrerats mot flödesmätningar så att rätt mängd hårdgjorda ytor belastar modellen vid regn. Denna kalibrering har pågått sedan modellerna började byggas och ger idag en bra beskrivning av flödesbelastningen på ledningsnätet och Henriksdals avloppsreningsverk under alla årstider. Dock ligger fokus i denna utredning framförallt på relativ förändring jämfört med beräkningsresultatet i nuläget.

Vissa förenklingar och antaganden finns i modellerna, t.ex. där ledningsnätet ansluter till en tunnel via borrhål kan i vissa fall borrhålets storlek vara begränsande för hur stort flöde som kan föras ner i tunneln. Där dimension och/eller borrhålets kapacitet är känd är den medtagen i modellen, för övriga borrhål har obegränsad kapacitet lagts in. Vid val av ledningar som ingår i modellen har en målsättning varit att alla viktiga bräddavlopp ska ingå i modellen. I vissa områden är dock inte alla bräddavlopp med, men uppskattningsvis är c:a 80% av alla kända bräddavlopp definierade i modellerna, och med största sannolikhet innefattas alla bräddar med större volymer.

Spillvattenflöde i modellerna har lagts in baserat på uppgifter om vattenförbrukning och vattenförbrukningen har antagits variera över dygnet beroende på verksamhet som bedrivs inom respektive fastighet.

Taktytor och gatutytor har beräknats baserat på kartor och GIS-data. I områden där en betydande andel av taken inte varit beskrivna i underlagsmaterial har underlaget kompletterats genom att takytorna digitaliserats med hjälp av ortofoton. För kvarter/fastigheter där i stort sett hela kvarteret består av hårdgjorda ytor har dock takytorna inte digitaliserats separat utan hela kvarteret/fastigheten har digitaliserats som en enhet och angivits som hårdgjord yta.

Modellen har indelats i avrinningsområden baserat på förekomsten av utbyggt dagvattennät. Områdena har indelats i de tre typerna kombinerat⁶, *delvis utbyggt dagvatten*⁷ och *fullt utbyggt dagvatten*⁸ och avrinningskoefficienter enligt Svenskt Vattens publikation P90 har använts.

Denna studie har fokuserat på tre aspekter:

- Inflöde till Henriksdals reningsverk
- Bräddning till Mälaren respektive Saltsjön
- Hög vattennivå/översvämning i kritiska punkter

⁶ Dagvattenserviser och dagvattenledning saknas i området.

⁷ Dagvattenledning finns men dagvattenserviser saknas i området

⁸ Dagvattenledning och dagvattenserviser finns i området

Tabell 2. Utvalda punkter för dämning och översvämningsanalyser.

Namn (beteckning i Figur 1)	Beskrivning	Belägenhet (kopplat till)
Delinlopp Södra Henriksdal (S1)	Denna punkt representerar Fagersjö-Sicklatunnelns inlopp till Sickla grovrening. Dämning här är inte direkt skadlig men indikerar även hög belastning på Henriksdals reningsverk	Längst ner i systemet (Södra Henriksdal)
Kombinerad avloppsledning i Östbergatunneln (S2)	Avloppsledningen är redan idag överbelastad vid regn.	Långt ner (Södra Henriksdal)
Årstafältet (S3)	Efter punkten går kulverten i dykarledning under Södra länken.	Mindre långt ner (Södra Henriksdal)
Väster om KXII PS (N1)	Punkten representerar nivåer vid Karl XII:s pumpstation. Höga nivåer här leder till bräddning till Saltsjön.	Långt ner (Norra Henriksdal)
Ormen PS (N2)	Punkten ligger i bräddvattenmagasinet Ormen. Dämning här är inte direkt skadlig utan ger ett mått på magasinets utnyttjandegrad.	Mindre långt ner (Norra Henriksdal)

5.2 Historiska klimatdata

Tabell 3 beskriver de observationer som representerar dagens klimat och som ligger till grund för modellstudien. Nederbörd har uppmätts med en vippskålmätare tillhörande Stockholm Vatten AB. Denna typ av (ouppvärmad) mätare är inte tillförlitlig under vinterperioder med snöfall, därför har värdena under sådana perioder ersatts med 12-h värden från en SMHI-mätare i Stockholm (nr. 9821), från vilken också dygnstemperaturer hämtats. Potentiell avdunstning har hämtats från en uppskattning av månadsvärden för hela Sverige i perioden 1961-1978 baserat på avdunstning enligt Penmans formel (Penman, 1948) från en vegetationsyta (Eriksson, 1981).

Tabell 3. Karakterisering av de observationer som använts.

	Beteckning	Obs. av	Plats	Period	Upplösning
Nederbörd	P	SVAB	Torsgatan	1982-2008	Sekund
Temperatur	T	SMHI	Station 9821	1982-2008	Dygn
Pot. avdunstning	PET	SMHI	Bromma	1961-1978	Månad
Nivå Mälaren	W	Sthlms Hamn	Riddarfjärden	1970-2008	Dygn
Nivå Saltsjön	-	Sthlms Hamn	Hamnbassängen	1990-2008	Dygn

5.3 Modellberäkningar

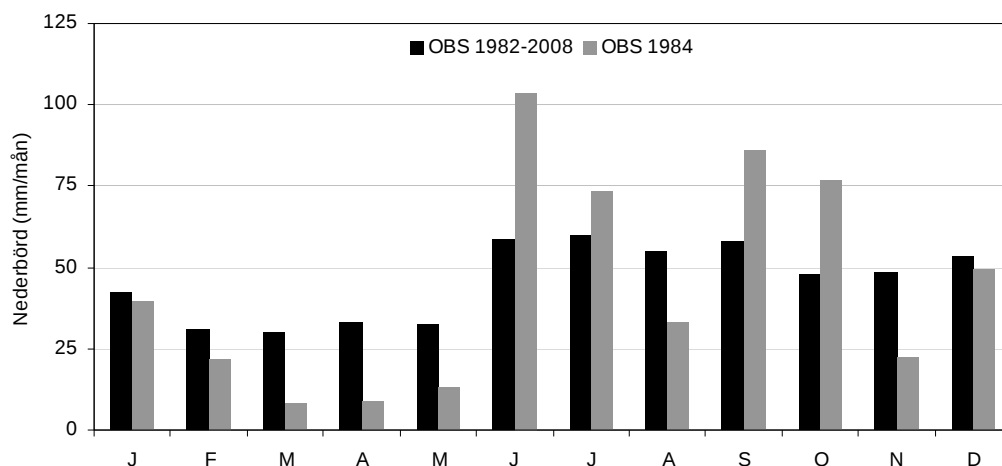
Modellberäkningen av spillvattensystemet består av två olika beräkningar. Den första är en hydrologisk modellering där avrinningen från varje delområde beräknas. I den andra beräkningen simuleras den i steg ett beräknade avrinningen samt spillvattenflöde från varje fastighet i rörnätsmodellen.

I en verklig flödeshydrograf för ett avloppssystem håller flödestoppen vid regn ofta i sig längre än regnets varaktighet. Det är inte ovanligt att svansen på denna flödestopp fortsätter flera dagar efter regnet, medan det vid andra tillfällen inte blir någon flödessvans över huvud taget. Detta beror på flödet inte enbart beror på hur mycket det regnar utan hur den hydrologiska situationen är vid regnet. Det finns alltså ett hydrologiskt minne som påverkar avrinningen. Minnet från tidigare regnhändelser påverkar därför och för att inte få med några felaktigheter i detta minne används alltid första året på en avrinningsberäkning för att ställa in minnet. Resultatet från det första året har således inte använts i utvärderingen.

De hydrauliska modellerna beskriver ledningsnätet som det ser ut idag. För nulägesmodellering används den nuvarande beskrivningen av ledningsnätet och befolkningmängden för år 2005 - enbart

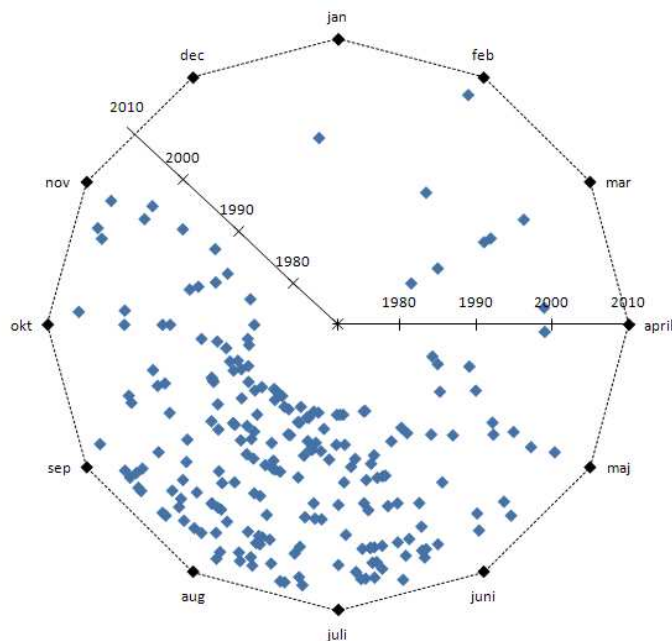
klimatdatan ändras vid beräkningar. Beräkningar i MIKE Urban är mycket tidskrävande och för att kunna göra de simuleringar som krävdes inom studiens resurser genomfördes två typer av förkortade simuleringar, en kontinuerlig och en händelsebaserad.

Syftet med den kontinuerliga simuleringen var att studera statistik för totala inflöden och bräddningar under en längre period. I denna simulering valdes ett historiskt år ut och användes som indata i både ursprunglig och omskalad form. Året 1984 valdes ut dels eftersom ett flertal stora regn inträffade som orsakade hög belastning och problem på det kombinerade avloppsnätet, dels för att den totala nederbördsvolymen nästan motsvarade ett normalt år. Året 1984 karakteriserades av normala nederbördsmängder under vintern men mycket små under våren (Figur 2). Därefter kom under juni nästan dubbelt så mycket som normalt och även perioden september-oktober var mycket nederbördsrik. Total nederbörd år 1984 var c:a 580 mm vilket är något mer än normalt för Stockholm.



Figur 2. Observerad månadsmedelnederbörd dels i perioden 1982-2008, dels under 1984.

I den händelsebaserade simuleringen var syftet att specifikt studera tillfällen med kraftig nederbörd och avrinning. Urvalet av regnhändelser baserades på kriteriet att det totala inflödet (från nederbörd, spillvattenförbrukning m.m.) till modellen skulle överstiga 10 m³/s under 5 min. Detta gav 195 inflödeshändelser mellan 1982 och 2008 med en varaktighet mellan 12.5 och 77 h, i genomsnitt knappt ett dygn långa. Cirka 2/3 av händelserna inträffar under sommaren (juni-augusti) och de flesta övriga i april, maj eller september (Figur 3). Den genomsnittliga totala nederbörden var 13.5 mm och den maximala 62.1 mm. Den maximala 30-min nederbörden under händelserna var i genomsnitt 4.6 mm och som högst 29.3 mm.

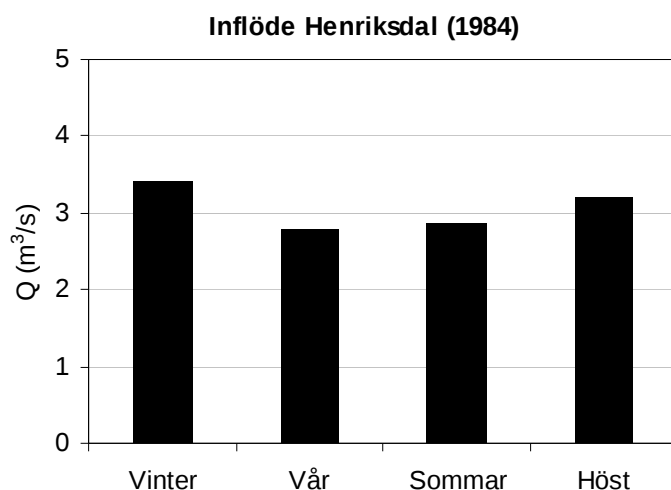


Figur 3. Fördelning av regnhändelserna årstidsvis. Årtalet visas genom avståndet från mitten och datumet visas genom händelsens placering.

5.4 Resultat från nuläggessimulering

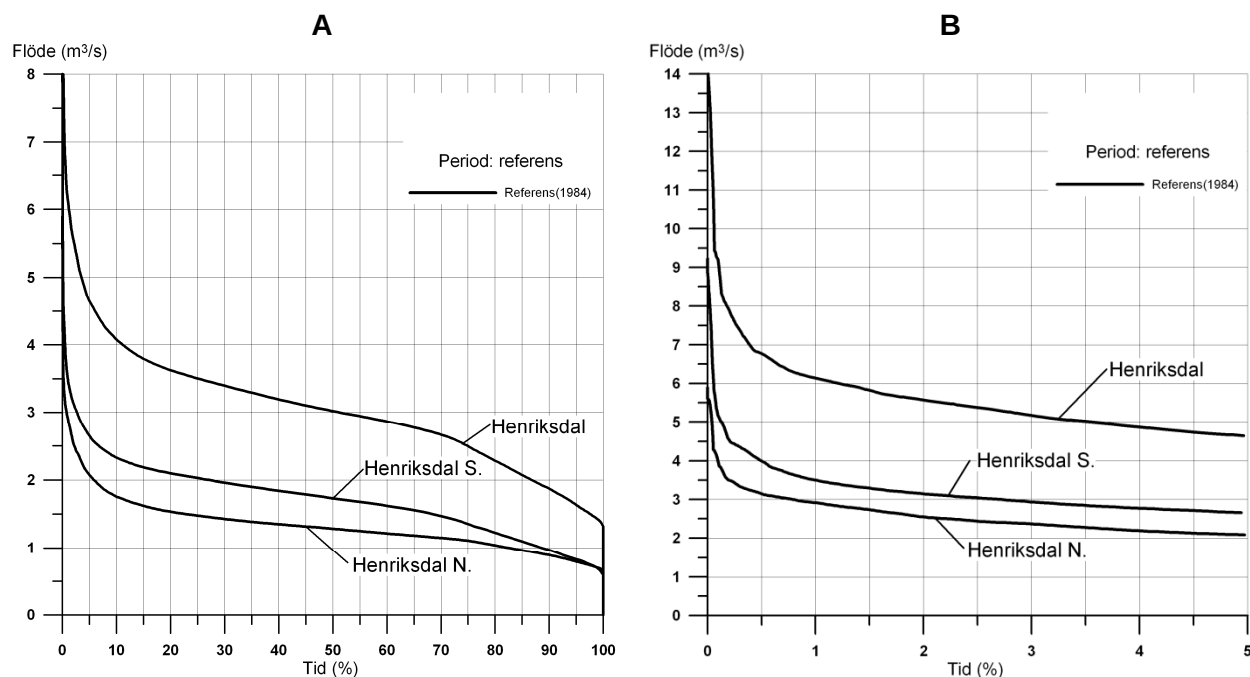
I detta avsnitt redovisas resultat från den hydrauliska modelleringen med observerade indata, dels för år 1984, dels för de 195 utvalda regnhändelserna under perioden 1980-2010. I de fall säsongsvisa resultat redovisas antas vintern omfatta perioden december-februari, våren mars-maj, sommaren juni-augusti och hösten september-november.

Medelinflödet till Henriksdals reningsverk var under 1984 3.1 m³/s med en årstidsvariation enligt Figur 4. Medelinflödet varierar från det lägsta värdet 2.8 m³/s under våren upp till 3.4 m³/s under vintern.



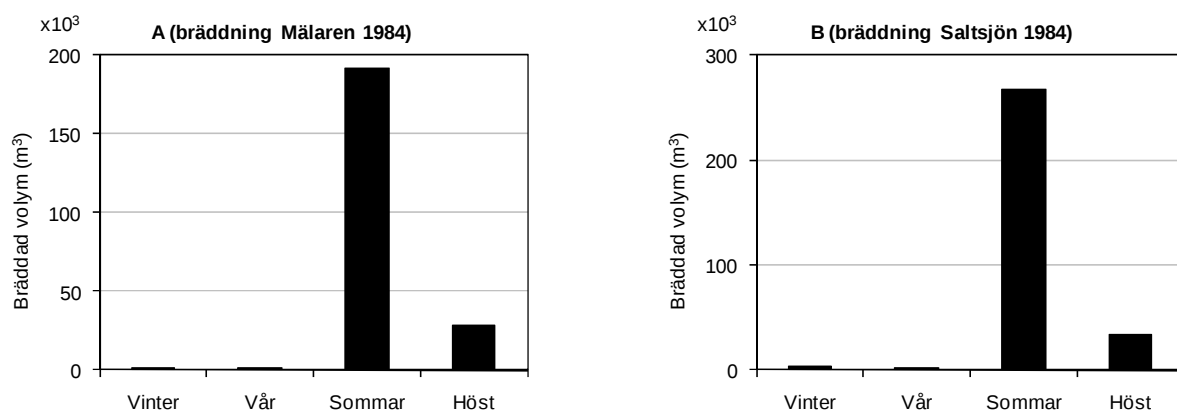
Figur 4. Medelinflödet till Henriksdals reningsverk under 1984 uppdelat på årstider.

Varaktighetskurvor för inflödet visas i Figur 5.



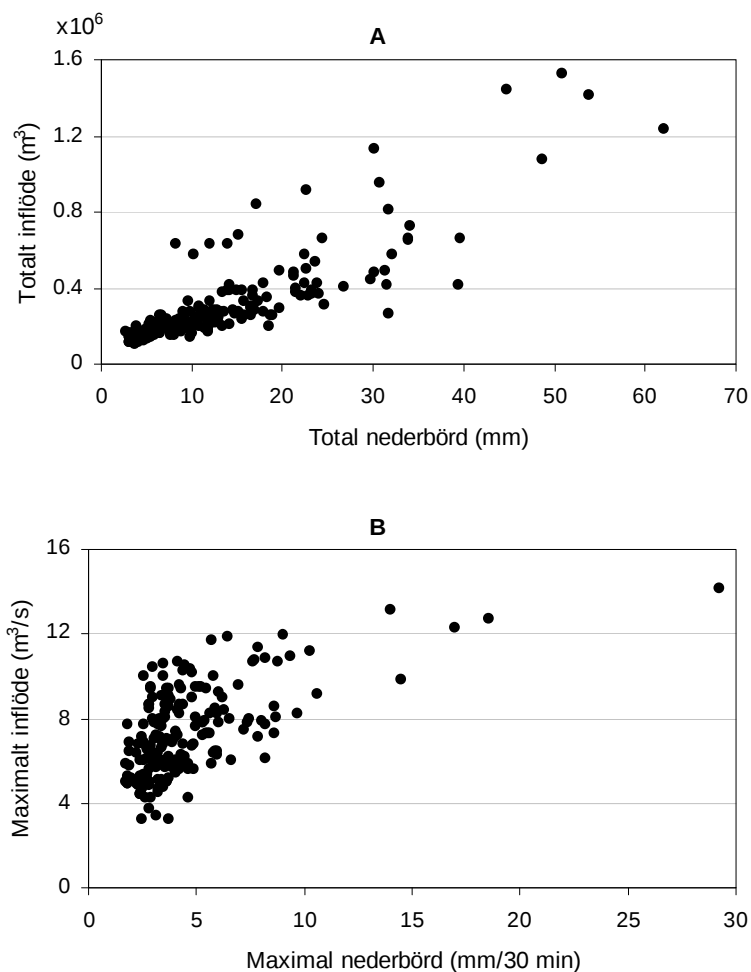
Figur 5. Varaktighetskurvor för tillrinning till Henriksdals reningsverk: 100% av tiden (A) och en uppförstoring av de 5% av tiden med högst flöde (B).

Enligt beräkningarna var den totala bräddningen till Mälaren under referensåret 1984 220 000 m³ och till Saltsjön 310 000 m³. Den mesta bräddningen till Mälaren och Saltsjön skedde under sommaren. Under vintern och våren inträffade knappt någon bräddning (Figur 6).



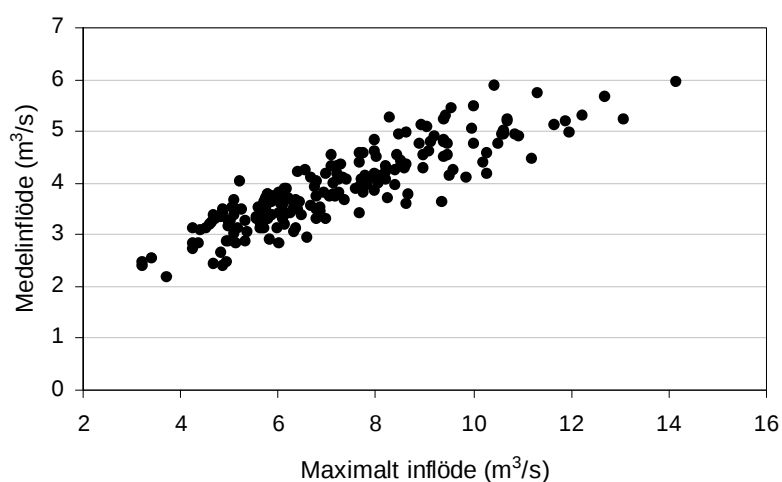
Figur 6. Bräddning till Mälaren (A) och Saltsjön (B) under 1984 uppdelat på årstider.

Figur 7 visar hur total och maximal nederbörd under de utvalda regnhändelserna korrelerar med totalt och maximalt inflöde. De minsta regnhändelserna med en total nederbörd på bara ett fåtal mm genererar ett totalt inflöde på knappt 200 000 m³ per händelse (Figur 7a). De största regnhändelserna med över 50 mm nederbörd ger ett inflöde på upp till 1 400 000 m³ per händelse inklusive spillvatten. Vad gäller maximalt inflöde (Figur 7b) når detta upp till c:a 14 m³/s för de mest intensiva regnen med över 15 mm/30 min.



Figur 7. Totalt inflöde som funktion av total nederbörd (A) och maximalt inflöde som funktion av maximal 30-min nederbörd (B) för de utvalda regnhändelserna.

Det finns ett starkt samband mellan en händelses medelinflöde och maximala inflöde (Figur 8). Det är således ovanligt med kraftiga flödestoppar i för övrigt små regnhändelser, vilket kan förklaras av systemets storlek och den resulterande rumsliga utjämnningen av lokala nederbördsextremer.



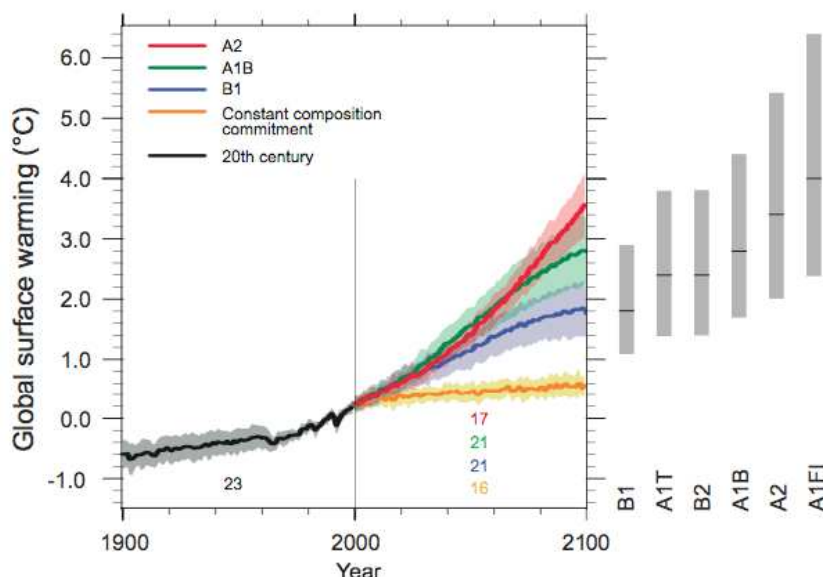
Figur 8. Medelinflöde som funktion av maximalt inflöde för de utvalda regnhändelserna under referensperioden 1980-2010.

6 Klimatprojektioner

Klimatets framtida utveckling är beroende av utsläppen av växthusgaser framöver. Olika antaganden om bl.a. framtida global integration, befolkningsökning, teknisk och socio-ekonomisk utveckling ligger till grund för de olika utsläppsscenarioer som används av den internationella klimatpanelen IPCC (Nakićenović m.fl., 2001; IPCC, 2007). Tre olika scenarier har använts i denna studie, vilka grovt kan beskrivas enligt följande:

- B2: uppdelad men uthållig värld, med begränsad befolkningsökning, medelsnabb teknisk och ekonomisk utveckling
- A1B: mera integrerad värld med snabb teknisk och ekonomisk utveckling, stabiliserande befolkning
- A2: uppdelad värld med oberoende nationer, kraftig befolkningsökning, långsam teknisk utveckling

Översatt i förväntad global temperaturökning till slutet av århundradet representerar B2 ett något lägre scenario, A1B ett medelscenario och A2 ett något högre scenario (Figur 9). Klimatmodellkörningar baserade på andra utsläppsscenarioer fanns inte tillgängliga för denna studie.



Figur 9. Global temperaturökning i olika klimatscenarier. Intervallen kring de heldragna färgade linjerna representerar spridningen i resultat mellan olika globala klimatmodeller (en standardavvikelse). De grå till höger staplarna representerar den bästa gissningen (horisontellt streck) samt ett troligt intervall baserat på olika antaganden (IPCC, 2007).

Resultaten av simuleringar av framtida klimat beror förutom utsläppsscenarioet också på de klimatmodeller som används. Normalt används först en global klimatmodell som simulerar hela jordens klimat i relativt grov rumsupplösning (vanligtvis 200-300 km), driven med ett visst utsläppsscenario. Därefter appliceras en regional klimatmodell som skalar ner det globala resultatet till vanligtvis 25-50 km. Med denna rumsupplösning erhålls en avsevärt förbättrad geografisk beskrivning (t.ex. altitud och uppdelning mellan land och hav) jämfört den globala modellen vilket ökar realismen i det simulerade klimatet.

I denna studie används globala simuleringar med modellen ECHAM (Roeckner m.fl., 1996), nedskalade med den regionala klimatmodellen RCA3, utvecklad vid Rossby Centre, SMHI (Kjellström m.fl., 2005). RCA3 är en regional klimatmodell för atmosfären och dess utbyte med landytan. RCA3 har sitt ursprung i den numeriska väderprognosmodellen HIRLAM (Undén m.fl.,

2002). Skillnader mellan RCA3 och HIRLAM rör särskilt markytans energibalans och vattenbalans, på vilka det ställs större krav i långa klimatsimuleringar. Både HIRLAM och RCA är hydrostatiska modeller som gör alla beräkningar på ett diskret gridnät över ett område.

Resultatet av en viss kombination av klimatmodeller och utsläppsscenario benämns ofta, och häranefter i denna rapport, *projektion*. Tre projectioner har således använts, baserade på samma modellkombination men olika utsläppsscenarioer. För ökad läslighet benämns scenario B2 häranefter ”L” (för låg), A1B ”M” (medel) och A2 ”H” (hög). Observera dock att dessa nivåer alltså gäller endast den globala medeltemperaturen – de lokala effekterna i Stockholmsområdet och för andra variabler kan vara annorlunda. Ett försök att sätta de tre använda projectionerna i ett bredare perspektiv görs i avsnitt 6.1, där de jämförs med 13 andra projectioner för Mälarenregionen.

6.1 Klimatprojektioner Mälaren

Som en förberedelse inför studien av Stockholms huvudavloppssystem gjordes under 2008 klimatprojektioner för Mälaren omfattande hela perioden 1961-2100. Ursprungligen användes fem olika projectioner, samtliga baserade på utsläppsscenario M (A1B) men med olika globala och regionala modeller (Bilaga 1). Under 2009 utökades antalet projectioner (med bl.a. L och H) till att omfatta totalt 16. I detta avsnitt redovisas först översiktligt metodik och huvudsakliga resultat från detta arbete. Därefter används den utökade ensemblen av projectioner för att sätta de regionala förändringarna i de utvalda projectionerna (L, M, H) i ett större sammanhang.

I princip är metodiken desamma som vid framtagandet av underlaget till Klimat- och sårbarhetsutredningen, för detaljerad information hänvisas till denna underlagsrapport (Bergström m.fl., 2006). Angreppssättet är att driva den hydrologiska HBV-modellen, uppsatt och kalibrerad för Mälarens avrinningsområde, med indata (temperatur, nederbörd) från klimatscenarioer. Före HBV-simuleringen bias-korrigeras indata, vilket innebär en reduktion av systematiska fel i nederbörd och temperatur från klimatmodellen. På detta sätt genereras hydrologiska klimatscenarioer (tillrinning, vattenstånd) för Mälaren. De främsta skillnaderna gentemot Bergström m.fl. (2006) ligger i dels den utökade ensemblen av uppdaterade klimatprojektioner, dels i att en nyligen utvecklad förbättrad metod för bias-korrigerad klimatmodellresultat använts (*Distribution-Based Scaling, DBS*; Yang m.fl., 2010). Viktigt att nämna är att effekten av ökad avtappning och ändrade vattennivåer genom den nya regleringen i nya Slussen från och med år 2018 inte tas hänsyn till i dessa klimatprojektioner.

De huvudsakliga resultaten, vid nuvarande reglering av Mälaren, kan sammanfattas enligt följande:

- Säsongsdynamiken för tillrinningen till Mälaren förändras. Dagens tydliga vårflodestopp suddas ut och de högsta tillrinningarna kommer i stället att ske under vintern. Den lägsta tillrinningen (sommartid) blir lägre.
- Maximal 30-dygns tillrinning förblir i stort sett oförändrad. Minimal 30-dygns tillrinning minskar tydligt och i stort sett kontinuerligt under seklet.
- Variationerna i Mälarens vattenstånd ökar under seklet, främst mot en ökad frekvens av låga nivåer. Medelhögvattennivån sjunker något, medellågvattennivån sjunker kraftigare.
- Framtida maximala vattenstånd för enskilda år är ungefär desamma som i dagens klimat. Vad gäller framtida minimala vattenstånd indikerar resultaten nivåer under de lägsta som observerats historiskt.
- Den maximala längden av perioder med en vattennivå under dagens medellågvattenstånd ökar kraftigt redan till mitten av seklet. Även medellängden och det totala antalet dagar med lågvatten ökar kraftigt mot slutet av seklet.

För komplett redovisning hänvisas till Bilaga 1.

I Tabell 4 illustreras hur de utvalda projectionerna L, M och H relaterar till övriga projectioner i den utökade ensemblen m.a.p. framtida temperatur, nederbörd och tillrinning i Mälarenregionen. Det bör understrykas att temperatur och nederbörd i detta fall avser medelvärden över hela Mälarens avrinningsområde, som sträcker sig förbi Örebro i sydväst och Ludvika i nordväst. Jämförelsen gäller

således östra Svealand snarare än Stockholmsregionen, men slutsatserna bör generellt gälla även den sistnämnda.

I analysen har de 16 projektionerna rankats m.a.p. framtida förändringar mellan 1 (lägsta värde) och 16 (högsta). I Tabell 4 innebär ”-” att kombinationen av projektion och tidsperiod är rankat i intervallet 1-5, ”±” i intervallet 6-11 och ”+” i intervallet 12-16. För temperatur och nederbörd innebär ”-” en liten ökning och ”+” en stor ökning; för tillrinning innebär ”-” en minskning och ”+” en ökning.

Tabell 4. Relativ nivå av framtida förändringar i Mälarenregionen i de utvalda projektionerna L, M och H.

	T (temperatur)			P (nederbörd)			Q (tillrinning)		
	L	M	H	L	M	H	L	M	H
2025	+	-	+	+	-	±	±	-	-
2055	+	±	+	+	±	±	±	±	-
2085	+	±	+	±	+	±	±	±	-

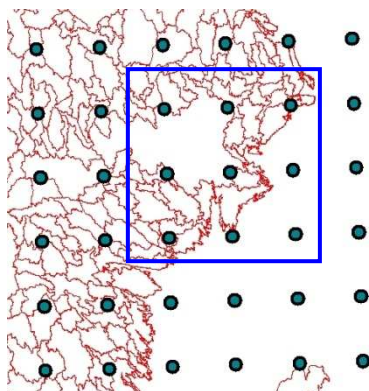
Vad gäller temperatur uppvisar projektion H en relativt sett kraftig temperaturökning i Mälarenregionen, vilket alltså överensstämmer med förändringen av global medeltemperatur (Figur 9). Emellertid ligger även projektion L i det övre intervallet, även om den globala ökningen är relativt liten blir alltså den regionala ökningen relativt stor. Projektion M ligger oftast i det mittersta intervallet. För nederbörd uppvisar L en relativt kraftig framtida ökning och H en medelstor ökning. Projektion M går från en liten ökning i period 2025 till en stor ökning 2085.

Resultaten för tillrinning avspeglar i grova drag resultaten för temperatur och nederbörd. Projektion H har en kraftig temperaturökning, vilket leder till hög avdunstning, och en måttlig nederbördsökning, vilket leder till tydligt minskad tillrinning (c:a 10-20%). Projektion L har relativt stora ökningsar av både temperatur och nederbörd, vilket leder till medelstor förändring av tillrinningen. Projektion M ligger i det mittersta intervallet i alla avseenden.

6.2 Klimatprojektioner Stockholm

I denna sektion karakteriseras klimatprojektionerna dels genom jämförelser med observationer och modellberäknade värden i referensperioden, dels genom utvecklingen under framtidsperioderna. Utvärderingen fokuserar främst på projektion M, som i föregående avsnitt visades beskriva en genomsnittlig framtida klimatförändring såväl i Mälarenregionen som globalt. Noterbara skillnader i de båda andra projektionerna beskrivs i texten.

Från projektionerna hämtades nederbörd, temperatur och potentiell avdunstning från nio modellgridpunkter centrerade i Stockholm (Figur 10), där varje punkt representerar en area av 50×50 km. Nederbörd hämtades på 30-min tidssteg; temperatur och potentiell avdunstning på dygnssteg. Vad gäller Mälarens vattennivå hämtades denna (på dygnssteg) från simuleringar med den hydrologiska HBV-modellen (Lindström m.fl., 1997), baserade på samma projektioner (se avsnitt 6.1). HBV-modellen är en hydrologisk avrinningsmodell som utvecklades vid SMHI i början av 1970-talet (Bergström, 1976). Modellen beskriver på ett förenklat sätt huvuddragen i vattnets kretslopp och den tar hänsyn till variationer i hydrologiska förhållanden genom indelning i delområden, sjöar, markanvändning och höjdzoner.



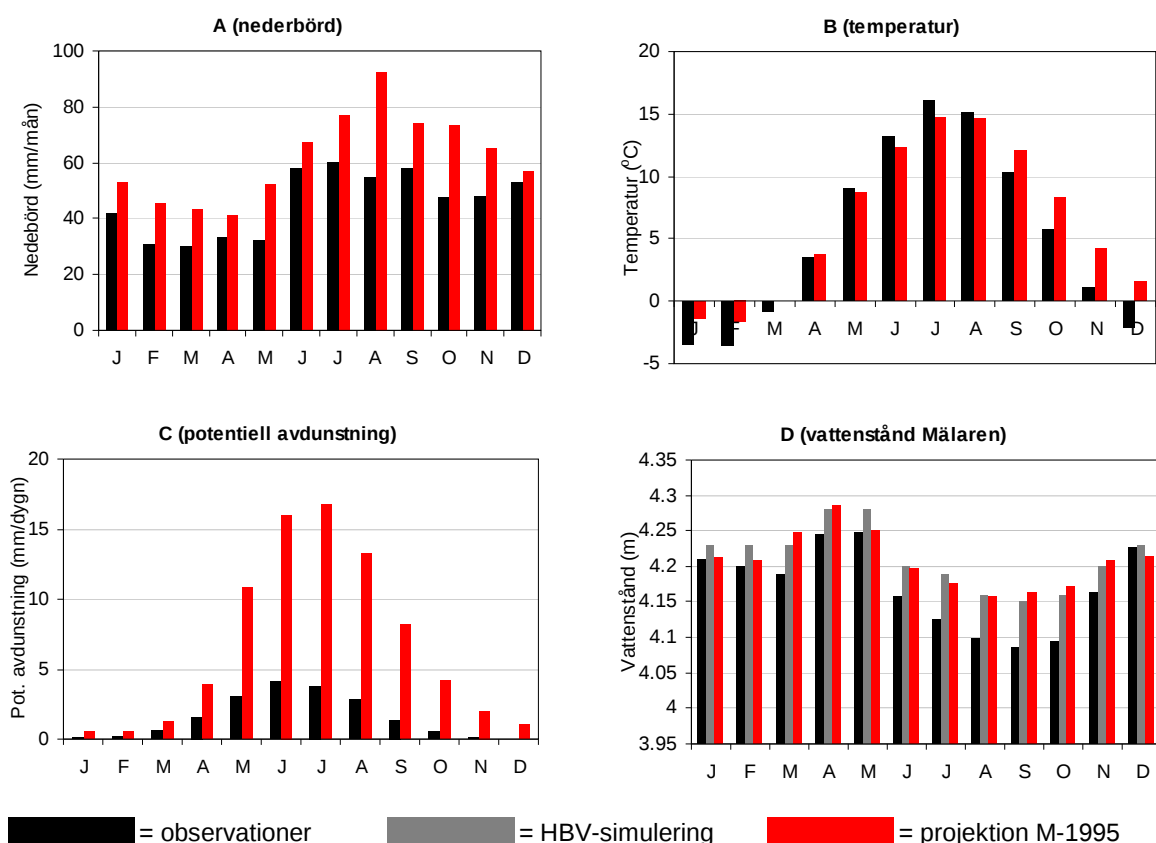
Figur 10. De modellgridpunkter som har använts i Stockholmsregionen.

En 30-års referensperiod definierades som 1980-2010, för att överensstämja med tillgängliga observationer (Tabell 3). För att bedöma hastigheten i eventuella framtida förändringar definierades tre framtidsperioder med olika tidshorisont: 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100. För att referera till de olika tidsperioderna används härnäst det mittersta året i varje utvald tidsperiod (1995 för referensperioden, 2025, 2055, 2085). En specifik kombination av framtida period och utsläppsscenario benämns således enligt Tabell 5. Tabellen visar också det färgschema som använts med en grundfärg för varje projektion och i vissa fall olika nyanser för att förtydliga vilken framtidsperiod det handlar om.

Tabell 5. Benämningar och färgschema för kombinationer av tidsperioder och utsläppsscenarier.

	1980-2010	2011-2040	2041-2070	2071-2100
B2	L-1995	L-2025	L-2055	L-2085
A1B	M-1995	M-2025	M-2055	M-2085
A2	H-1995	H-2025	H-2055	H-2085

Figur 11 visar jämförelser i referensperioden 1980-2010. För samtliga variabler (temperatur, nederbörd, potentiell avdunstning och vattenstånd) görs jämförelser med de observationer som beskrivs i Tabell 3. För vattenstånd jämförs också med värden beräknade av HBV-modellen för Mälaren med observerad temperatur och nederbörd som indata. Resultaten för temperatur, nederbörd och potentiell avdunstning från klimatprojektionerna har medelvärdesbildats över de nio gridpunkterna i Figur 10.



Figur 11. Observerade och simulerade genomsnittliga årscykler av nederbörd, temperatur, potentiell avdunstning och vattenstånd Mälaren.

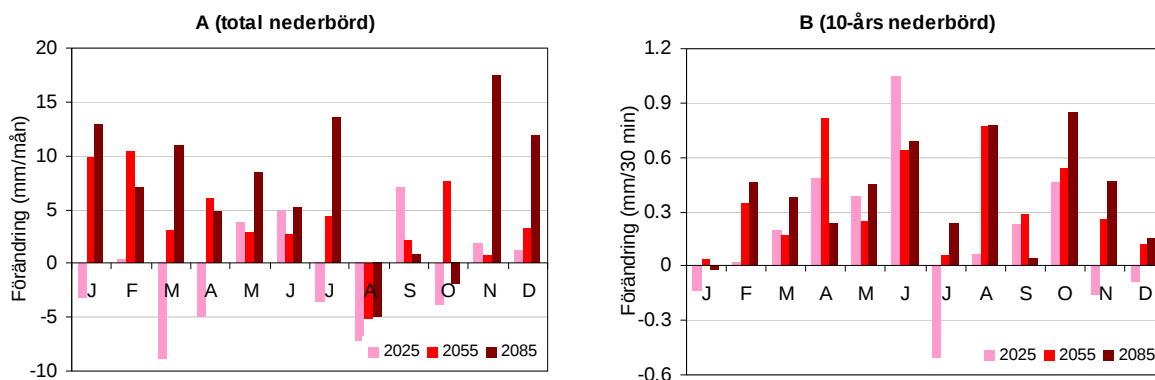
Figur 11a visar således månadsmedelnederbörden under referensperioden dels i observationerna (svart), dels i projektion M (rött). Det är tydligt att nederbörden överskattas i klimatmodellen. Denna överskattning är relativt konstant över året, och därför reproduceras den observerade årscykelns dynamik, för att vara en klimatprojektion, relativt väl. Inspektion av datamaterialet indikerar att överskattningen består av mycket små men frekventa nederbörds mängder, vilket också funnits i tidigare utvärderingar av RCA3-data (t.ex. Kjellström m.fl., 2005; Carlsson m.fl., 2006). Den observerade årscykeln för temperatur reproduceras överlag väl av klimatmodellen (Figur 11b), dock underskattas den totala amplituden något.

Potentiell avdunstning i klimatprojektion är avsevärt högre än den observerade (Figur 11c), vilket främst torde bero på att klimatmodellens avdunstning beräknas på ett helt annat sätt än den av SMHI framtagna och därför inte är direkt jämförbar. Medan observationerna som nämnts är uppskattade med Penmans formel, enligt internationell standard (Allen m.fl., 1998), uppskattas potentiell avdunstning i klimatmodellen som den verkliga avdunstningen från en vattenmättad markyta. Den årliga dynamiken i projektionen överensstämmer någorlunda väl med observationerna och vi antar att framtida relativa förändringar i modellberäknad potentiell avdunstning är representativa.

Vattenståndet i klimatprojektion överensstämmer överlag väl med observerat (Figur 11d), dock överskattas de låga observerade nivåerna under sommaren. Detta kan bero på minskat läckage mellan Mälaren och Saltsjön på grund av tätning av luckor och grundvattenströmning genom Helgeandsholmen samt reglering som inte kan fullt beskrivas i HBV-modellen. Det HBV-simulerade vattenståndet ligger i allmänhet nära klimatprojektion, vilket indikerar att kvaliteten på det vattenstånd som simuleras med indata (temperatur och nederbörd) från klimatprojektion är ungefär likvärdig med det som simuleras med observerade indata.

Överensstämmelsen med observationer visad i Figur 11 är överlag representativ också för projektioner L och H. Den observerade årscykeln av nederbörd är dock något bättre beskriven i M (Figur 11a) än i L och H. I H är överskattningen av vintertemperaturer något kraftigare än i M (Figur 11b). I L och H är den potentiella avdunstningen något lägre än i M (Figur 11c). Överskattningen av observerat vattenstånd sommartid i M (Figur 11d) är något mindre tydlig i L och H.

I Figur 12 visas den framtida förändringen av dels månadsmedelnederbörd (Figur 12a), dels månads 30-min nederbörd med 10 års återkomsttid (Figur 12b), i förhållande till referensperioden 1981-2010. Värdet för 10-årsnederbörden har uppskattats som det tredje största värdet under varje 30-års period. Ett positivt värde på y-axeln innebär en framtida ökning; ett negativt värde en minskning.



Figur 12. Framtida månadsförändringar av total och maximal nederbörd i projektion M.

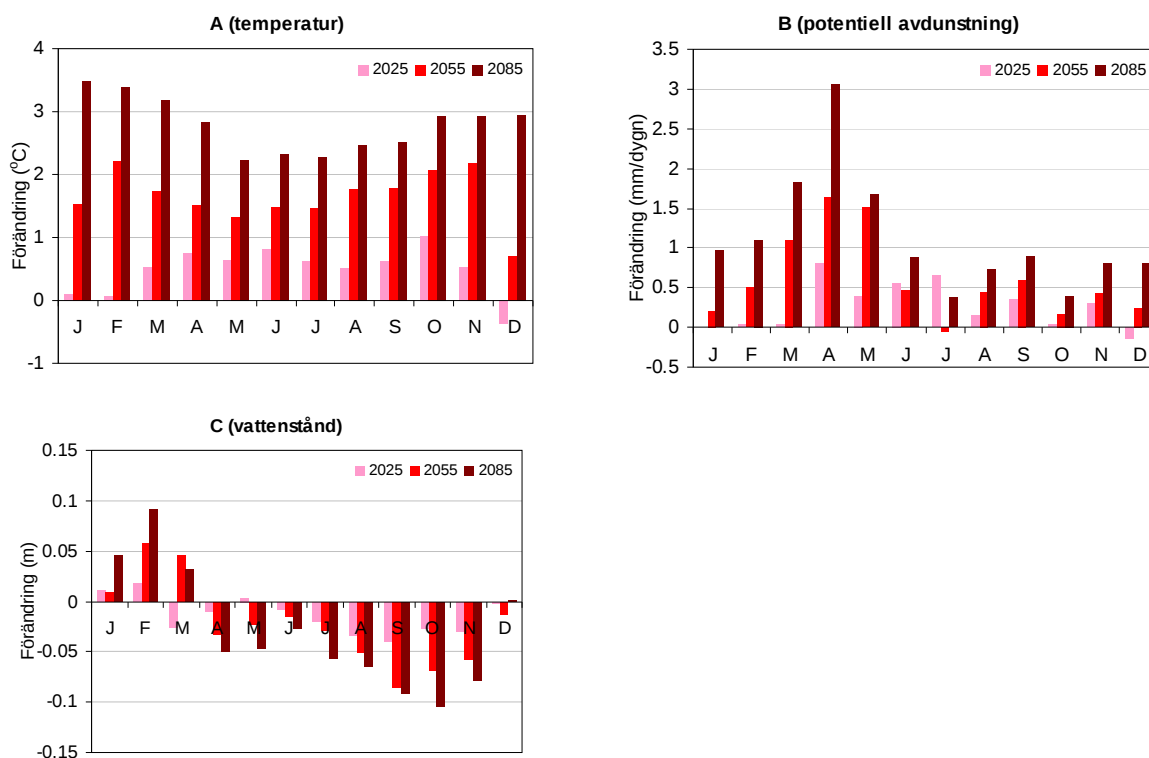
Vad gäller medelnederbörd (Figur 12a) är denna totalt sett relativt oförändrad i period 2025 med en ökning vissa månader och en minskning andra utan tydlig säsongsvariation. För 2055 syns framför allt en tydlig ökning av nederbörden under vintern och våren med 5-10 mm/mån, vilket motsvarar 15-20% jämfört med referensperioden (Figur 11; M-1995). För 2085 ökar nederbörden kraftigt även nov-dec. Denna ökning av vinternederbörden är ännu tydligare i projektioner H och L, med upp till 50% för enskilda månader (jan-feb). Medelnederbörden under sommaren ser ut att förbli tämligen oförändrad, detta även i projektioner H och L.

Vad gäller framtida förändring av 10-års nederbörd är bilden för period 2025 ganska varierad med både ökning och minskningar (Figur 12b). För 2055 och 2085 syns tydliga ökning under större delen av året, främst sommarhalvåret. Ökningarna på upp till 1 mm/30 min i figuren motsvarar ökning på upp till 50-60% för enskilda månader. Mest intressant i detta avseende är sommaren (jun-aug) då de mest intensiva korttidsregnen framför allt inträffar, i samband med t.ex. åskskurar. Projektion M indikerar en genomsnittlig ökning av den maximala 30-min sommarnederbörden från 13% i period 2025 till 27% 2085. Bilden är lite annorlunda i projektioner H och L vilka båda indikerar en minskning (med 10-15%) av den maximala 30-min sommarnederbörden till 2025, samma värden som i referensperioden för 2055 och en ökning (med 5-10%) till 2085.

Det bör påpekas att analyser av extremvärden är till sin natur osäkra och att ett 10-årsvärde uppskattat från 30 års data är förknippat med stor osäkerhet. I en kompletterande analys gjordes en mera formell extremvärdesanalys genom anpassning av GEV-fördelning (*Generalized Extreme Value*) till årliga maxima av olika varaktigheter. Resultatet bekräftade i stort sett över alla projektioner indikeras i stort sett oförändrad 10-års korttidsnederbörd till 2025, en svag ökning (c:a 5%) till 2055 och en kraftigare ökning (c:a 15%) till 2085.

Figur 13 visar beräknade framtida förändringar av temperatur, potentiell avdunstning och vattenstånd i Mälaren för projektion M. Vad gäller temperatur (Figur 13a) ökar denna mest under perioden mar-nov för period 2025, men mot slutet av seklet sker den kraftigaste ökningen under vinterhalvåret. I linje med temperaturökningen ökar också potentiell avdunstning under hela året, men här sker den

kraftigaste ökningen under våren för alla perioder (Figur 13b). För Mälarens vattenstånd ses en ökning under vintern och en minskning under sensommar och höst (Figur 13c)



Figur 13. Framtida månadsförändringar av temperatur, potentiell avdunstning och vattenstånd i projektion M.

I Tabell 6 sammanfattas de framtida förändringarna i Stockholm. För temperatur och vattenstånd överensstämmer de simulerade värdena i referensperioden väl med de observerade värdena (Figur 11b och d), beaktat att det handlar om klimatprojektioner med stora osäkerheter. De framtida förändringarna av dessa variabler i Tabell 6 har därför hämtats direkt från simuleringarna. För nederbörd och potentiell avdunstning avviker emellertid simulerade värden kraftigt från de observerade i referensperioden (Figur 11a och c) och därför är de simulerade framtida värdena inte jämförbara med observationerna i referensperioden. Därför har för dessa båda variabler en relativ, procentuell förändring beräknats mellan å ena sidan simulerade värden i referensperioden, å andra sidan simulerade värden i framtidsperioderna. Värdena för framtidsperioderna (rader 2025, 2055, 2085) i Tabell 6 för nederbörd och potentiell avdunstning är uttryckta som denna procentuella andel av det observerade värdet i referensperioden (rad 1995).

Tabell 6. Observerat medelvärde under referensperioden 1983-2007 (rad 1995 i figuren) samt framtida förändringar i projektionerna av temperatur, nederbörd, potentiell avdunstning och vattenstånd i Stockholm.

	Temperatur (°C)			Nederbörd (mm/år)			Pot. avdunstning (mm/d)			Vattenstånd Mälaren ⁹ (m)		
	L	M	H	L	M	H	L	M	H	L	M	H
1995		5.4			549			1.52			4.17	
2025	+1.2	+0.5	+0.9	+6	-12	+5	+0.47	+0.06	+0.30	-0.03	-0.01	-0.04
2055	+2.0	+1.7	+1.8	+37	+43	+44	+0.88	+0.42	+0.80	-0.04	-0.02	-0.05
2085	+2.8	+2.8	+3.4	+61	+73	+69	+1.44	+0.97	+1.61	-0.06	-0.03	-0.10

De inbördes förhållandena mellan de olika projektionerna vad gäller framtida förändringar i Stockholm (Tabell 6) överensstämmer överlag väl med bilden för Mälärregionen (Tabell 4). Det enda

⁹ Vid oförändrad reglering

tydliga undantaget är nederbördsökningen i projektion L-2055, som är hög i Mälarenregionen men lägst för Stockholm. Skillnaderna mellan projektionerna är dock små.

6.3 Generering av klimatindata

Indata till modellstudien genererades genom omskalning av de historiska observationer som beskrivs i avsnitt 5.2 (Tabell 3). Metoden att omskala observerade data i enlighet med klimatförändringssignalen kallas ofta *Delta Change* (DC) (t.ex. Hay m.fl., 1990). I denna metod används inte klimatmodelldata direkt i effektmodelleringen utan indirekt genom att ur dem beräkna förändringar som i omskalningen överförs på observationerna. Genom detta förfarande minskar betydelsen av systematiska fel i klimatmodellresultaten. Metoden är dock begränsad i det avseende att den vanligen enbart beaktar grundläggande karakteristika såsom förändrade medelvärden och inte mera komplexa egenskaper som variabilitet, intermittens o.dyl.

Nederbördsserien har omskalats med en version av DC som beskrivits av Olsson m.fl. (2009). I denna skalas olika percentiler av nederbördensintensitetens sannolikhetsfördelning om i enlighet med klimatförändringssignalen. Olika intensitetsnivåer skalas således om på olika sätt, vilket gör det möjligt att reproducera komplicerade signaler såsom minskad totalnederbörd men ökade intensitetstoppar, vilka kan finnas under sommaren i klimatscenarier. Metoden beaktar inte explicit extrem korttidsnederbörd men analyser av omskalade data visar att de som helhet tillfredsställande reproducerar de förändringar som uppskattats från klimatmodellresultaten.

I Olsson m.fl. (2009) beskrivs också en metodik att omskala vippskålsdata genom att betrakta vippskålens volym som variabel. Figur 14 visar ett exempel på omskalad indatafil. Registreringarna infaller på samma tidpunkt men intensiteten är omskalad för att reflektera klimatförändringssignalen.

	REF (1995)	2025	2055	2085
1988-12-06 03:36:00	0.1874999006	0.1874683472	0.2052799808	0.2284805059
1988-12-06 03:50:00	0.1071429000	0.1071248694	0.1173029552	0.1305604105
1988-12-06 04:02:00	0.1249999996	0.1278062082	0.1366484740	0.1538011899
1988-12-06 04:14:00	0.1249999996	0.1278062082	0.1366484740	0.1538011899
1988-12-06 04:24:00	0.1500000012	0.1533674516	0.1639781706	0.1845614300
1988-12-06 04:44:00	0.0833333199	0.0833192962	0.0912355807	0.1015469290
1988-12-06 04:54:00	0.1500000012	0.1499747584	0.1642240729	0.1827845030
1988-12-06 05:08:00	0.1071429000	0.1028199271	0.1153695247	0.1270056968
1988-12-06 06:08:01	0.0611111098	0.0586454152	0.0658033307	0.0724402558
1988-12-06 06:58:00	0.0500000001	0.0479826136	0.0538390901	0.0592693016
1988-12-06 07:22:00	0.0624999898	0.0599782570	0.0672988515	0.0740866147
1988-12-06 07:46:00	0.0625000002	0.0599782670	0.0672988627	0.0740866271
1988-12-06 08:24:00	0.0499999998	0.0479826133	0.0538390898	0.0592693013
1988-12-06 08:50:00	0.0576923099	0.0553645561	0.0621220293	0.0683876582
1988-12-06 14:32:00	1.4999959100	1.4394744789	1.6151682951	1.7780741956
1988-12-06 16:22:00	0.0388888901	0.0373198116	0.0418748490	0.0460983470

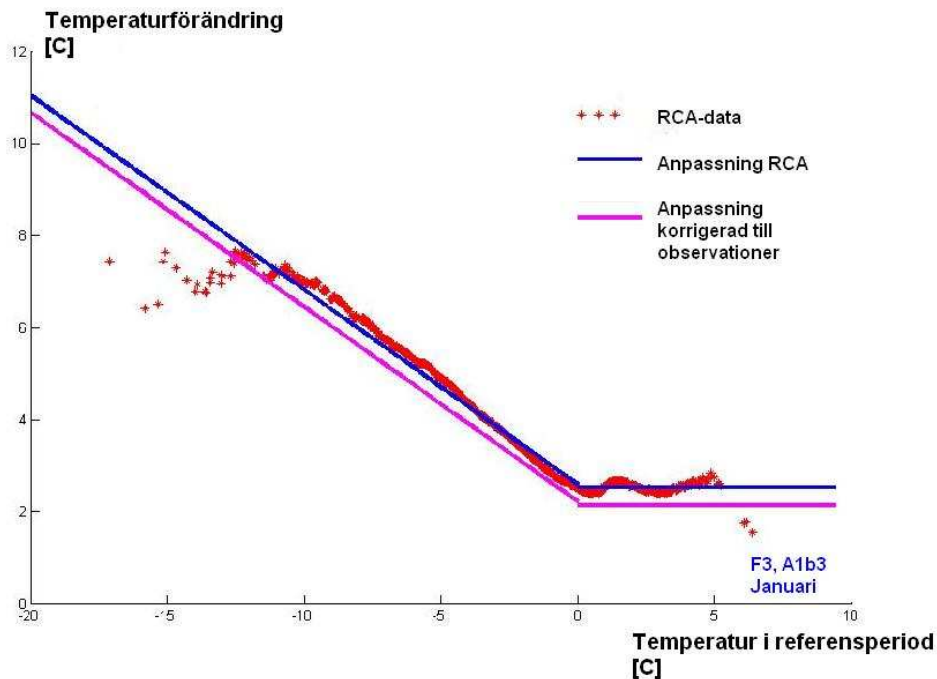
Figur 14. Exempel på omskalade indata för nederbörd (enhet: $\mu\text{m/s}$).

Vad gäller temperatur gjordes för varje projektion skaleringen på följande sätt. Först sorterades temperaturvärdena i både referensperioden och en framtidsperiod. Därefter plottades temperaturen i referensperiodperioden mot förändringen jämfört med motsvarande värde i framtidsperioden (Figur 15). Punkterna i diagrammet indikerar att uppvärmningen ökar med minskande temperatur under 0°C . Den kraftigaste temperaturökningen sker alltså när det är som kallast. För temperaturer över 0°C är ökningen ungefär konstant.

För att modellera denna förändring gjordes en anpassning enligt

$$\begin{aligned} \Delta t &= \alpha_{ref} + \beta_1 & t_{ref} < 0 \\ \Delta t &= \beta_2 & t_{ref} \geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

där t_{ref} är projektionens temperatur i referensperioden, Δt temperaturförändringen och α , β_1 och β_2 konstanter. För varje kombination av projektion och framtidsperiod bestämdes först konstanterna, därefter applicerades (1) på observationerna med t_{ref} utbytt mot t_{obs} och skalerade temperaturer genererades som $t_{obs} + \Delta t$. För att eliminera systematiska fel i klimatmodelldata parallellförskjöts regressionerna avslutningsvis så att förändringarna i medelvärde överensstämde med scenarierna (Figur 15).

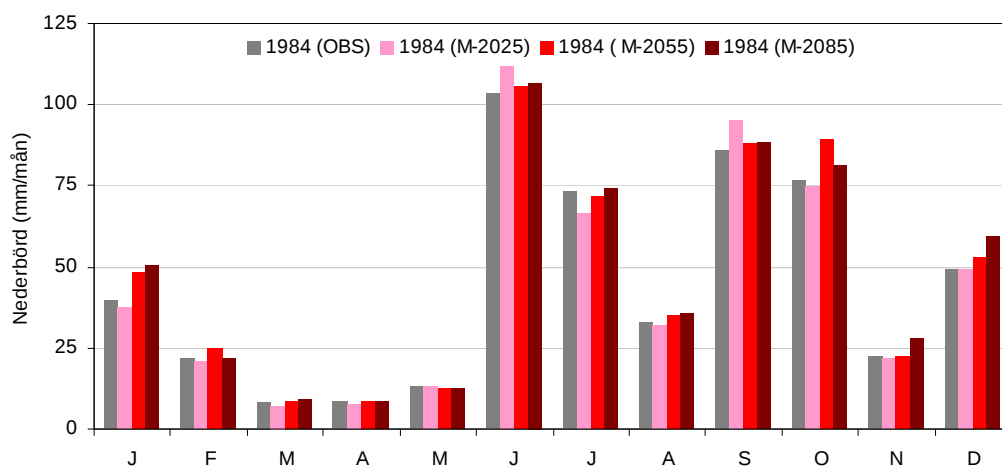


Figur 15. Principskiss för omskalning av temperatur för januari i period 2085 och utsläppscenario M.

För potentiell avdunstning och vattenstånd i Mälaren beräknades för varje projektion månadsmedelvärden för referensperioden och framtidsperioderna. För omskalning av vattenstånd adderades skillnaden i månadsmedelvärden till alla observationer under denna månad. För omskalning av potentiell avdunstning beräknades för varje månad relativa skillnader vilka applicerades på de observerade månadsvärdena.

6.4 Hydraulisk modellering av klimatprojektioner

I den hydrauliska modelleringen av klimatprojektionerna användes således indata från året 1984, dels de 195 utvalda regnhändelserna under perioden 1983-2007, omskalade enligt ovan. Den enligt klimatprojektionerna omskalade nederbörden för 1984 (Figur 16) motsvarar i stort tidigare redovisade förändringar för Stockholm (Figur 12a). Vissa mindre skillnader finns, vilket beror på att omskalningen för ett enskilt år alltid avviker något från omskalningen för hela perioden (1983-2007; Tabell 3).



Figur 16. Observerad månadsmedelnederbörd under 1984, samt omskalade värden enligt projektion M.

Tabell 7 visar genomsnittliga framtida förändringar av total och maximal nederbörd i de 195 utvalda regnhändelserna efter att de omskalats enligt klimatprojektionerna.

Tabell 7. Observerat medelvärde under referensperioden (1984) samt framtida förändringar i projektionerna av total och maximal nederbörd i de 195 regnhändelserna.

	Tot. nederbörd (mm)			Max. nederbörd (mm/30 min)		
	L	M	H	L	M	H
1984		13.5			4.6	
2025	-0.6	+0.3	+0.1	-0.2	+0.2	+0.1
2055	-0.5	+1.2	+0.4	-0.2	+0.6	+0.3
2085	+1.0	+1.3	+0.3	+0.6	+0.7	+0.5

I simuleringarna beaktades utöver de projicerade klimatförändringarna (Tabell 6) också förväntad befolkningsökning. Denna ökning har fram till 2030 beräknats till 25% från år 2005 och detta värde har använts för samtliga framtidsperioder. För Henriksdals reningsverk innebär detta en total ansluten befolkning på drygt 900 000 personer år 2030. Det rena spillvattenflödet till Henriksdals reningsverk ökade då från 57.1 Mm³/år till 71.3 Mm³/år. En känslighetsstudie visade att denna befolkningsökning motsvarar ett ökat inflöde till Henriksdals reningsverk med 6% vid ett dimensionerande regn och c:a 15% totalt för ett år (Bilaga 2).

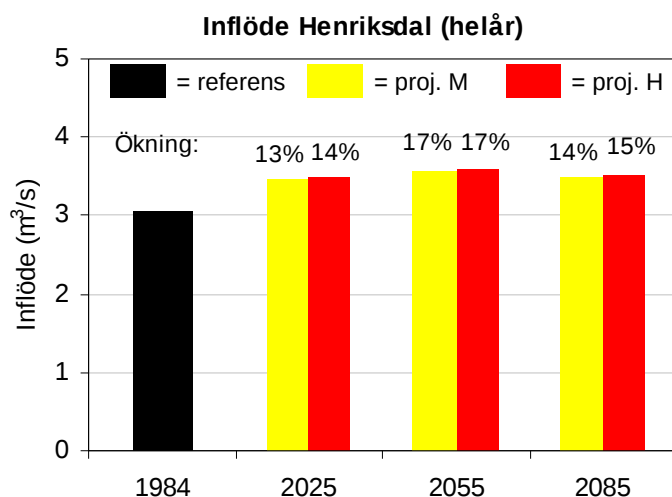
För övrigt antas systemet oförändrat vad gäller ledningsnät och avrinningsparametrar, d.v.s. andel hårdgjord yta, koncentrationstid, snösmältningshastighet och andra hydrologiska parametrar som reglerar funktionen på markens olika vattenmagasin. En potentiellt viktig aspekt är Saltsjöns nivå, men inom denna studie fanns inte resurser att beakta även denna utan den har hållits konstant på dagens nivå. Det bör emellertid vara en bra estimering för 2025 och 2055 då landhöjningen motverkar havsnivåhöjningen fram till c:a år 2060 (se t.ex. hemsidan för Slussens ombyggnation: <http://www.stockholm.se/slussen>).

7 Resultat: helår

I det följande redovisas resultat från projektioner M och H. Skälen till att projektion L inte är med är två: (1) studiens resurser räckte inte till kompletta modellkörningar av denna projektion och (2) de simuleringar med projektion L som gjordes visade på ett resultat som låg nära de båda andra projektionerna. I de fall säsongsvisa resultat redovisas antas vintern omfatta perioden december-februari, våren mars-maj, sommaren juni-augusti och hösten september-november.

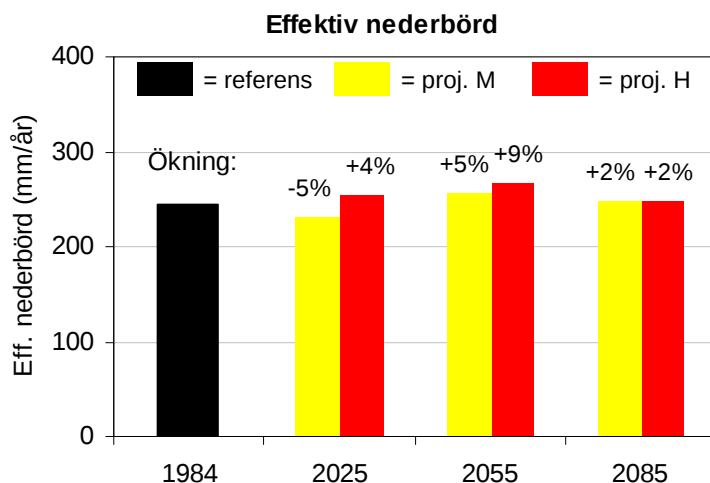
7.1 Inflöde till Henriksdal

Framtida inflöde till Henriksdals reningsverk visas i Figur 17. Där kan det ses att den största ökningen i genomsnittliga årsvolymen sker redan till 2025. Från 2025 till 2055 sker enbart en mindre ökning och till 2085 sker t.o.m. en återgång till inflödet i period 2025. Detta kan förklaras av två saker, dels att ett ökat inflöde p.g.a. befolkningsökning som leds till Henriksdal antas ske redan till 2025, därefter har befolkningen antagits vara konstant. Den befolkningstillväxt på 25% från år 2005 för beräkning av spillvattenmängd som är inlagd motsvarar som tidigare nämnts omkring 6% ökat tillflöde vid dimensionerande regn och med c:a 15% ökat tillflöde totalt per år till Henriksdal. Denna siffra ökar vid torra år och minskar under blötare år.



Figur 17. Simulerat medelinflöde till Henriksdals reningsverk under helåret för referensperioden (svart), projektion M (gul) och H (röd). Siffrorna i diagrammet anger procentuell ökning relativt referensperioden.

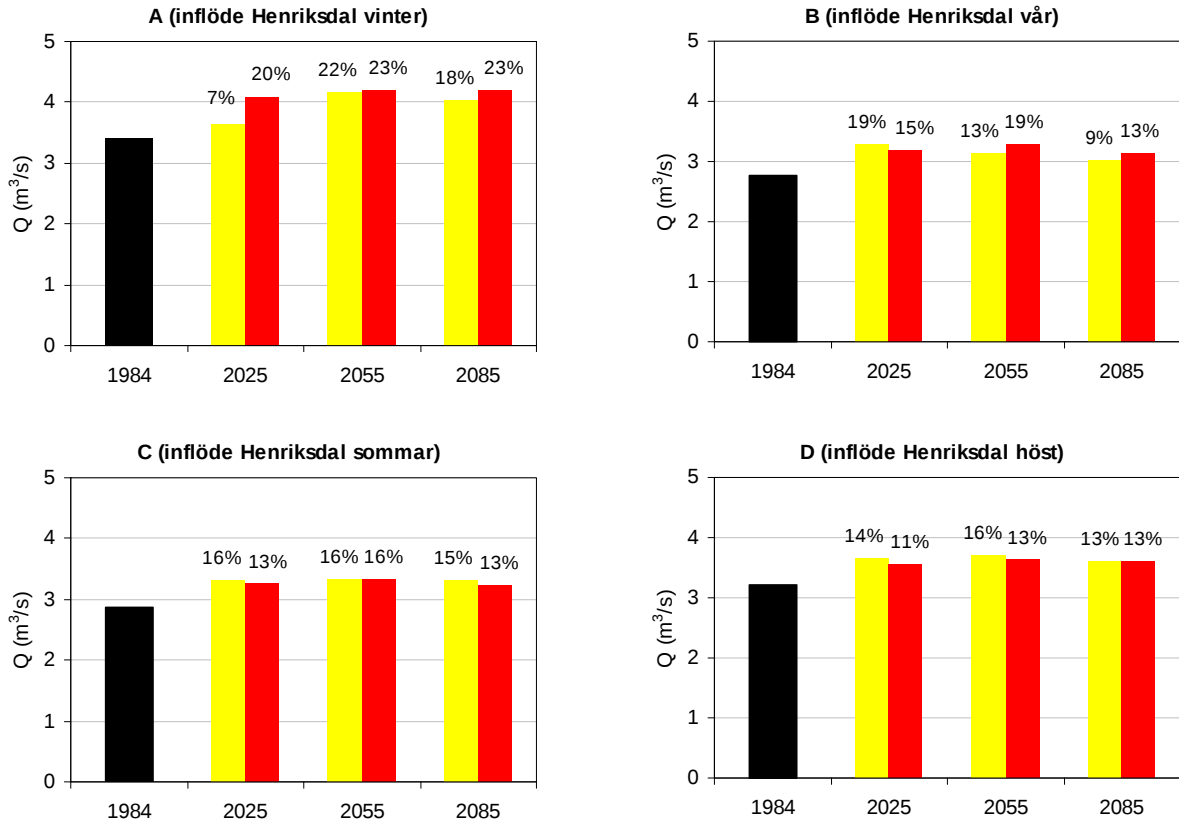
Den andra viktiga förklaringen är att stigande temperaturer ger ökad avdunstning (Tabell 6) vilket leder till att de successivt ökade framtida nederbördsmängderna inte får ett direkt genomslag i ökade avrinningar. En analys av effektiv nederbörd (nederbörd minus avdunstning) i de förberedande hydrologisimuleringarna bekräftar att denna är i stort sett oförändrad i period 2025, ökar med 5-10% till 2055 och därefter minskar igen till en nivå nära nuläget (Figur 18).



Figur 18. Effektiv nederbörd (nederbörd minus avdunstning) under hydrologisimuleringarna.

Det måste understrykas att den framtida avdunstningen är mycket osäker, bl.a. beroende på klimatmodellens hantering av potentiell avdunstning (avsnitt 6.2). I simuleringarna ökar den verkliga avdunstningen från referensperioden med i genomsnitt c:a 5% i period 2025, 10% i period 2055 och 15% i period 2085. I HBV-simuleringarna för Mälaren (avsnitt 6.1) har en annan modell för avdunstning använts (Thornthwaite, 1948) vilken resulterade i kraftigare framtida ökning (c:a 10-30%). Detta indikerar att avdunstningsökningen beräknad i denna studie snarast är i underkant.

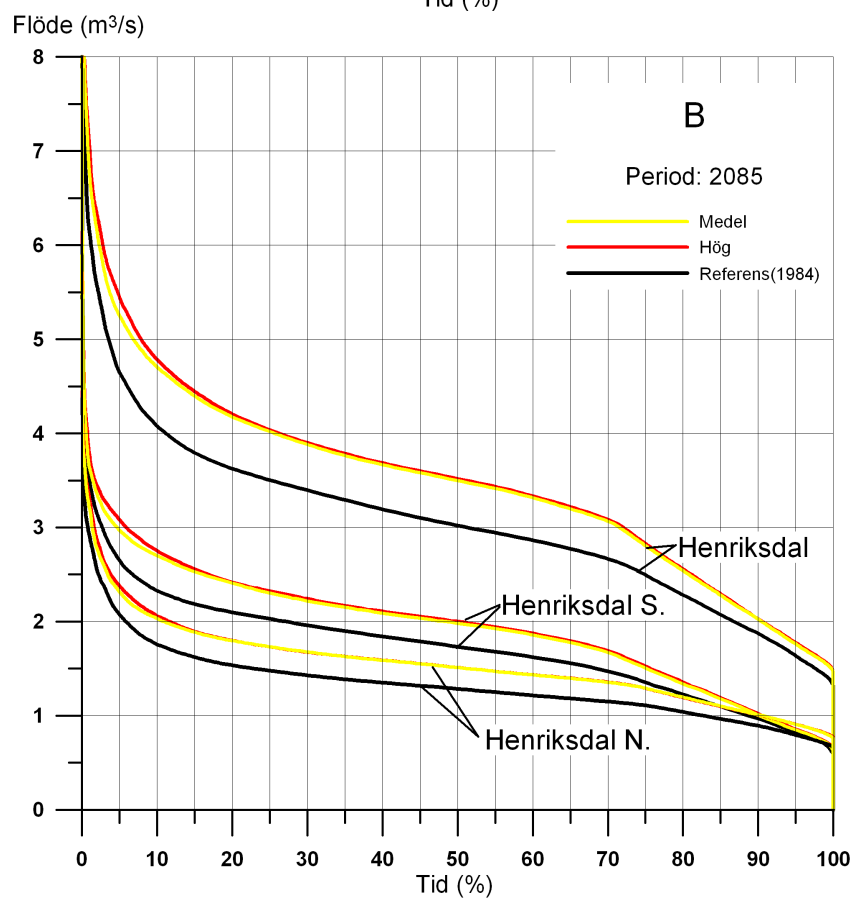
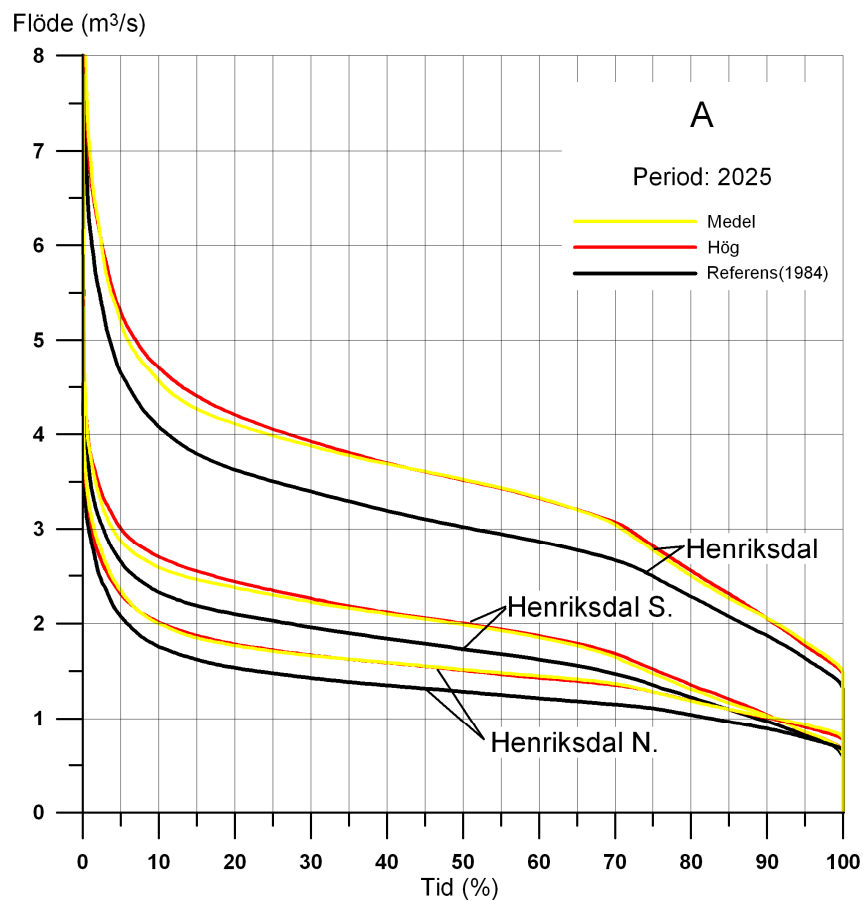
Årsvariationen i tillrinningen förändras också i ett framtida klimat (Figur 19). De största förändringarna sker vintertid beroende på både ökad nederbörd och en ökad andel som regn i stället för snö eftersom temperaturen ökar (Figur 12a och Figur 13a). Ökningen av inflödet vintertid är c:a 20% och liksom för helåret syns ingen tydlig framtida trend. På våren indikeras en trend mot minskade inflöden från period 2025 till 2085 vilket kan förklaras av en kraftigt ökad potentiell avdunstning i denna period (Figur 13b).



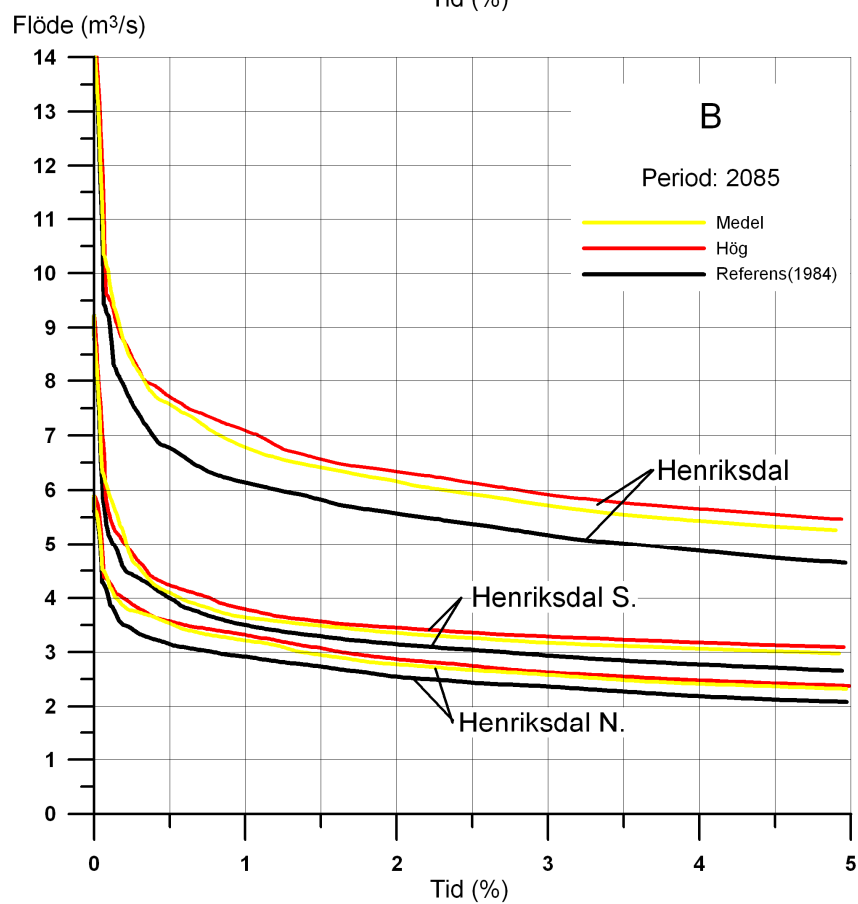
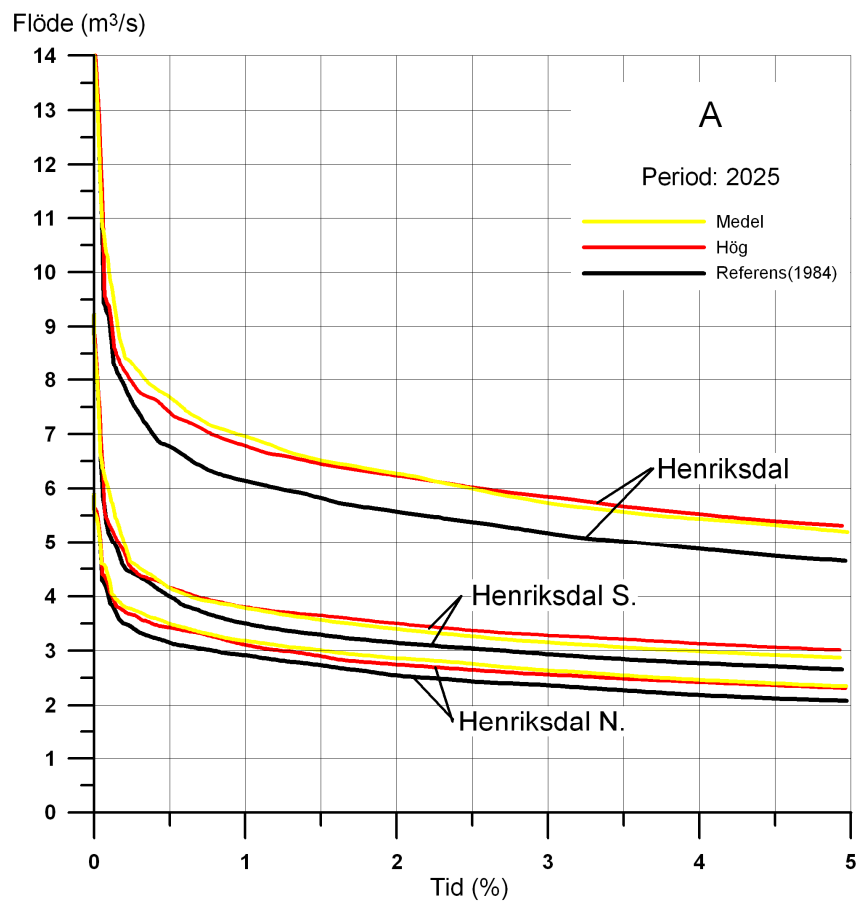
Figur 19. Simulerat medelflöde under olika årstider, beteckningar enligt Figur 17.

I Figur 20 redovisas hela varaktighetskurvorna för inflödet till Henriksdals reningsverk i period 2025 och 2085, både totalt och för södra och norra delen separat. Skillnaden mellan projektionerna är liten, men kurvorna för M ligger generellt något högre i linje med Figur 17.

I Figur 21 visas uppförstorade diagram för de 5% av tiden med högst inflöde. Henriksdals reningsverk är dimensionerat för att klara ett flöde på max 10 m³/s. Vad gäller det totala inflödet till Henriksdal har även 7 m³/s valts som en gräns för bedömning av stora flöden eftersom dessa stora flöden innebär stor hydraulisk belastning som kan störa reningsprocessen på Henriksdals reningsverk. Att döma av Figur 21 kommer andelen tid med inflöde > 7 m³/s att ungefär fördubblas från 0.4%, motsvarande knappt ett och halvt dygn/år, till 0.8% i både period 2025 och 2085. Det maximala inflödet år 1984 var 14 m³/s och ökar till c:a 15 m³/s i perioden 2085 för projektion H. För södra delen är motsvarande gräns 5 m³/s och i detta fall är den resulterande framtida ökningen av andel tid över gränsen något mindre.



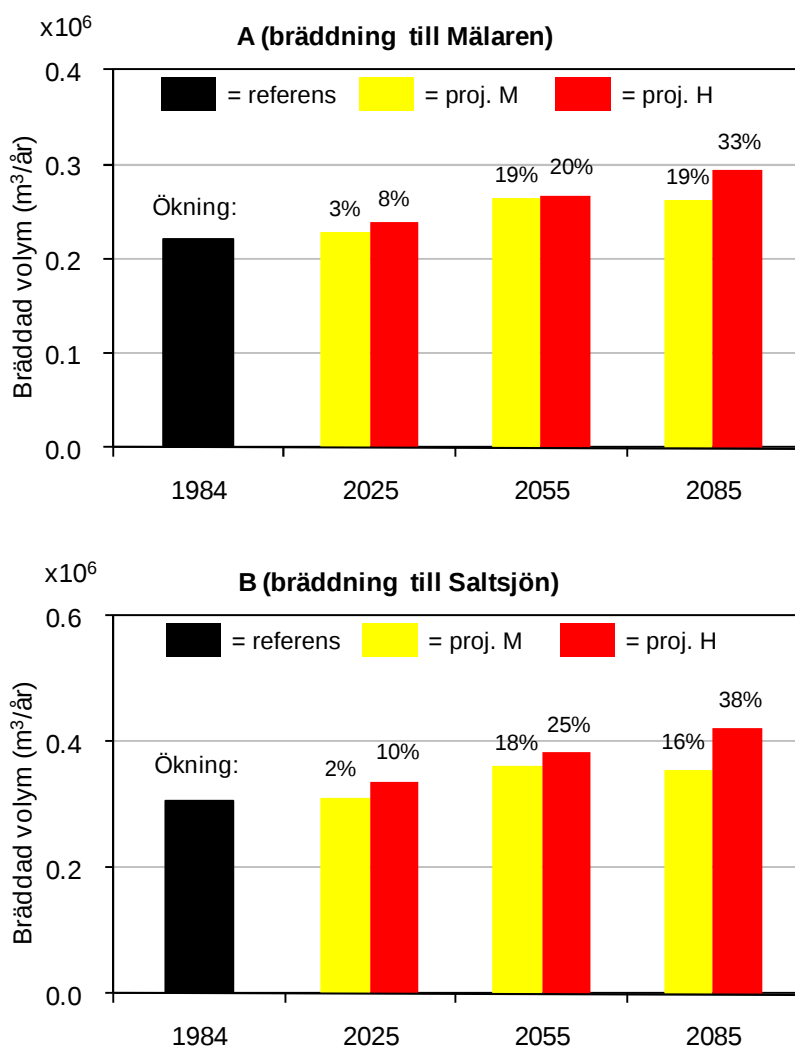
Figur 20. Varaktighetskurvor för tillrinning till Henriksdals reningsverk (0-100% av tid).



Figur 21. Varaktighetskurvor för tillrinning till Henriksdals reningsverk (0-5% av tid).

7.2 Bräddning till Mälaren och Saltsjön

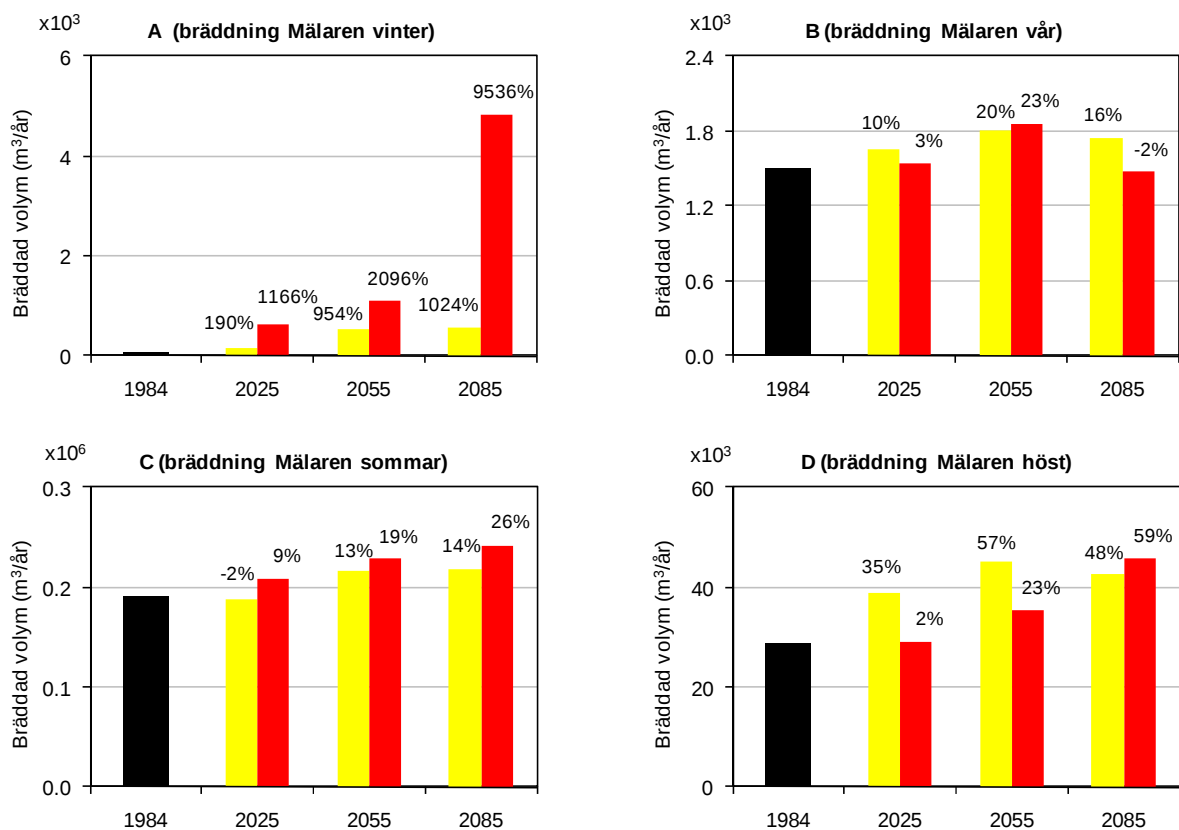
Den totala bräddade volymerna till både Mälaren och Saltsjön ökar med c:a 5-10% i den närmaste framtiden och c:a 20-40% mot slutet av seklet (Figur 22). Den tendens mot minskade volymer mot slutet av seklet som fanns i inflödet till Henriksdal (Figur 17) är inte uppenbar i bräddningsanalysen, troligen eftersom avdunstningen inte har lika stor betydelse vid de intensiva nederbördstillfällena som ger upphov till bräddningar. För bräddvolymerna har befolkningsökningen en något mindre betydelse än vad den har för totala tillrinningen, befolkningsökningen på 25% ger c:a 5% ökning i bräddade volymer.



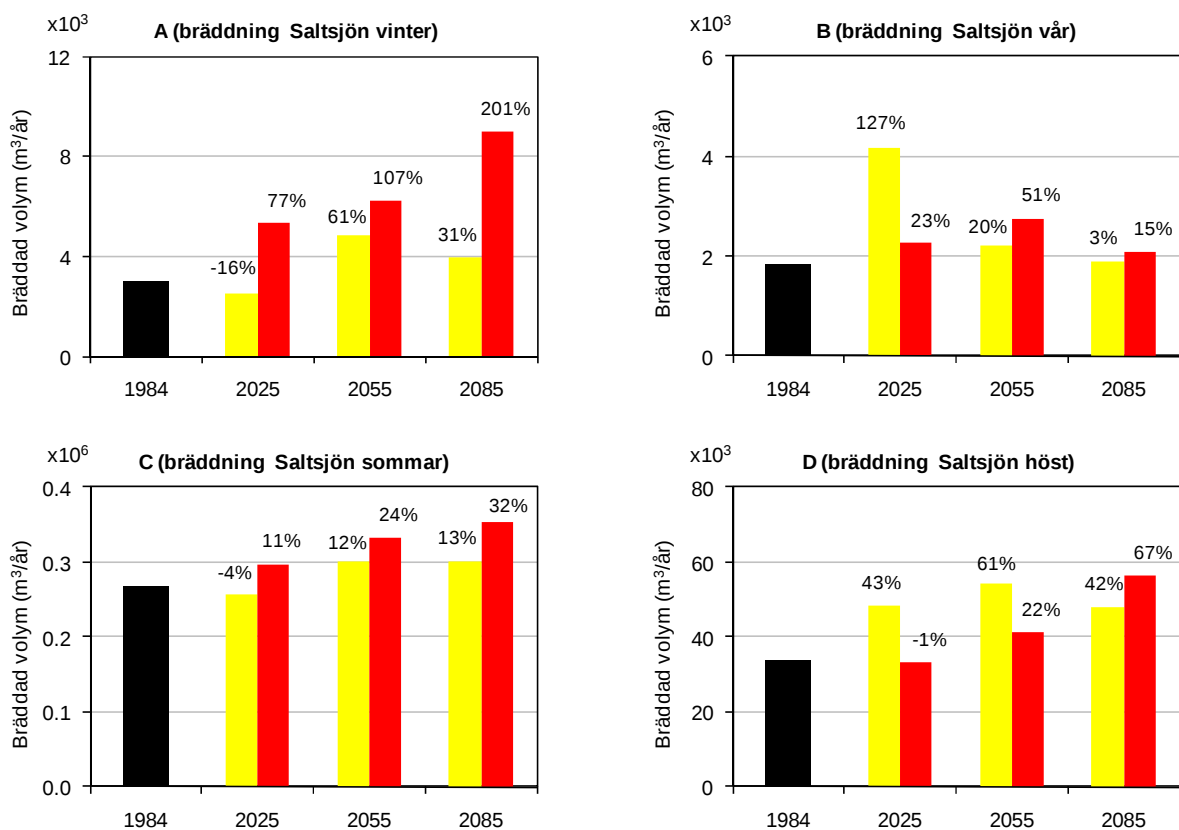
Figur 22. Förändring i bräddad volym till Mälaren (A) och Saltsjön (B) under helåret.

Figur 23 och Figur 24 visar förändringar i bräddad volym till Mälaren och Saltsjön under olika årstider (observera att figurerna har olika enheter på axlarna; 10^3 resp. 10^6). Totalt sett är den procentuella ökningen störst under vintern än för övriga årstider. Dock var bräddningen till Mälaren väldigt liten (50 m^3) på vintern för referensåret 1984 vilket förklarar de stora procenttalen i Figur 23a. Förutom under vintern sker en markant ökning av bräddvolymen också under hösten, upp emot 60-70%, medan ökningen under vår och sommar oftast ligger i intervallet 10-30%.

Den övervägande tendensen i beräkningarna är att bräddvolymerna ökar successivt under seklet, p.s.s. som för den totala volymen (Figur 22). Även för årstiderna är mönstret tydligt för projektion H, medan projektion M visar en mera stabil tendens mot slutet av seklet.



Figur 23. Årstidsförändring i bräddad volym till Mälaren, beteckningar enligt Figur 22.



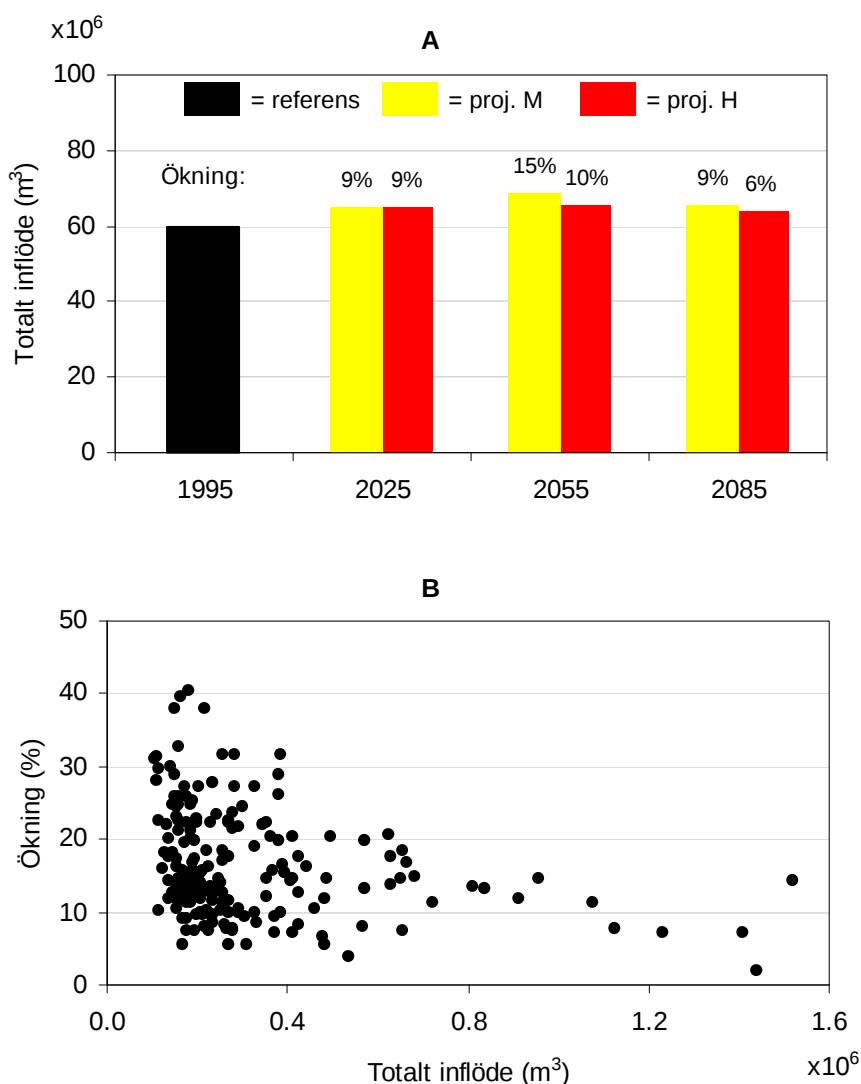
Figur 24. Årstidsförändring i bräddad volym till Saltsjön, beteckningar enligt Figur 22.

8 Resultat: utvalda regnhändelser 1983-2007

Av samma skäl som för helårssimuleringen redovisas resultat enbart för projektioner H och M och. Vidare saknas resultat för projektion H, period 2055, i vissa analyser nedan p.g.a. tekniska problem med 2-min utdata från denna simulering.

8.1 Inflöde till Henriksdal

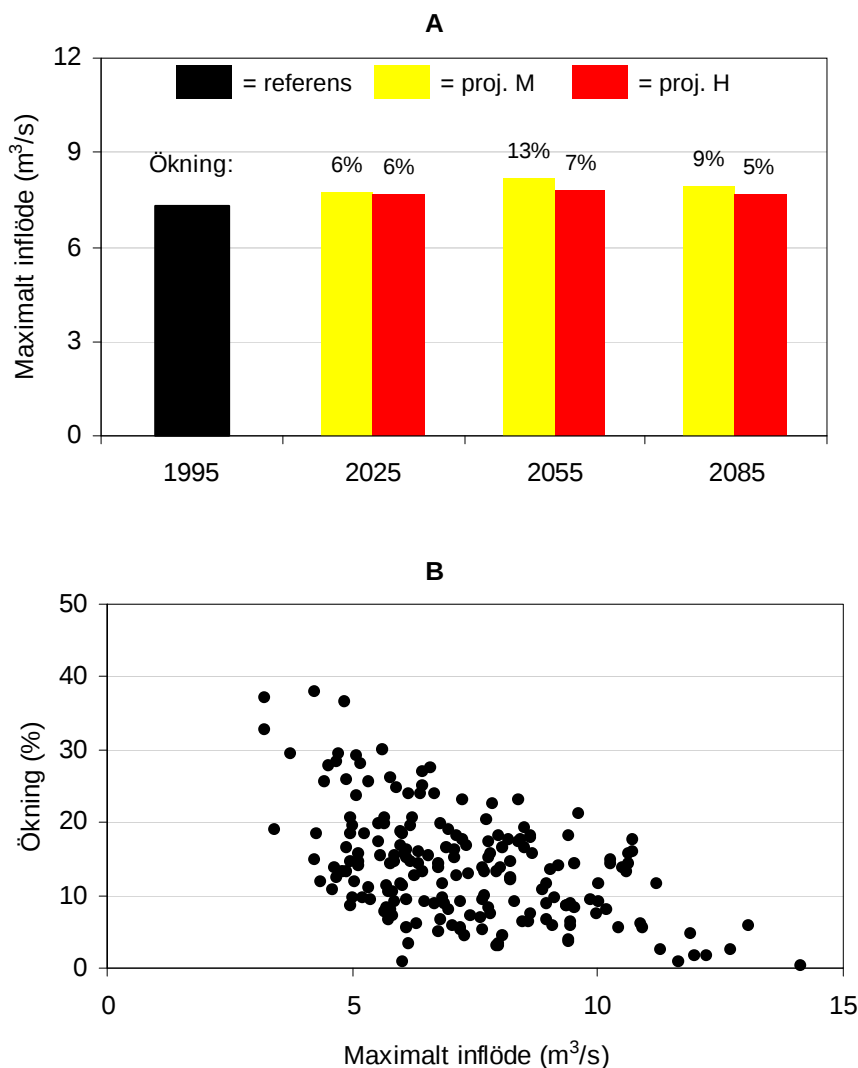
Det totala inflödet till Henriksdal under regnhändelserna ökar i projektionerna med ungefär 10% för båda projektionerna (Figur 25A). Störst ökning syns i likhet med helåret (Figur 17) i period 2055. Stora regnhändelser med inflöde > 600 000 m³ per händelse ligger i allmänhet under den genomsnittliga procentuella ökningen, men det totala inflödet för mindre regnhändelser kan öka med upp till 50% (Figur 25B).



Figur 25. Totalt inflöde till Henriksdal under de utvalda regnhändelserna (A) och procentuell ökning av totalt inflöde för projektion M-2055 som funktion av händelsens totala inflöde i referensperioden 1983-2007 (B).

Det maximala inflödet till Henriksdal under regnhändelserna ökar relativt sett något mindre än det totala inflödet, med generellt 5-10% för båda projektionerna (Figur 26a). Störst ökning syns för period 2055. I likhet med det totala inflödet ökar stora regnhändelser mindre och små regnhändelser mer än

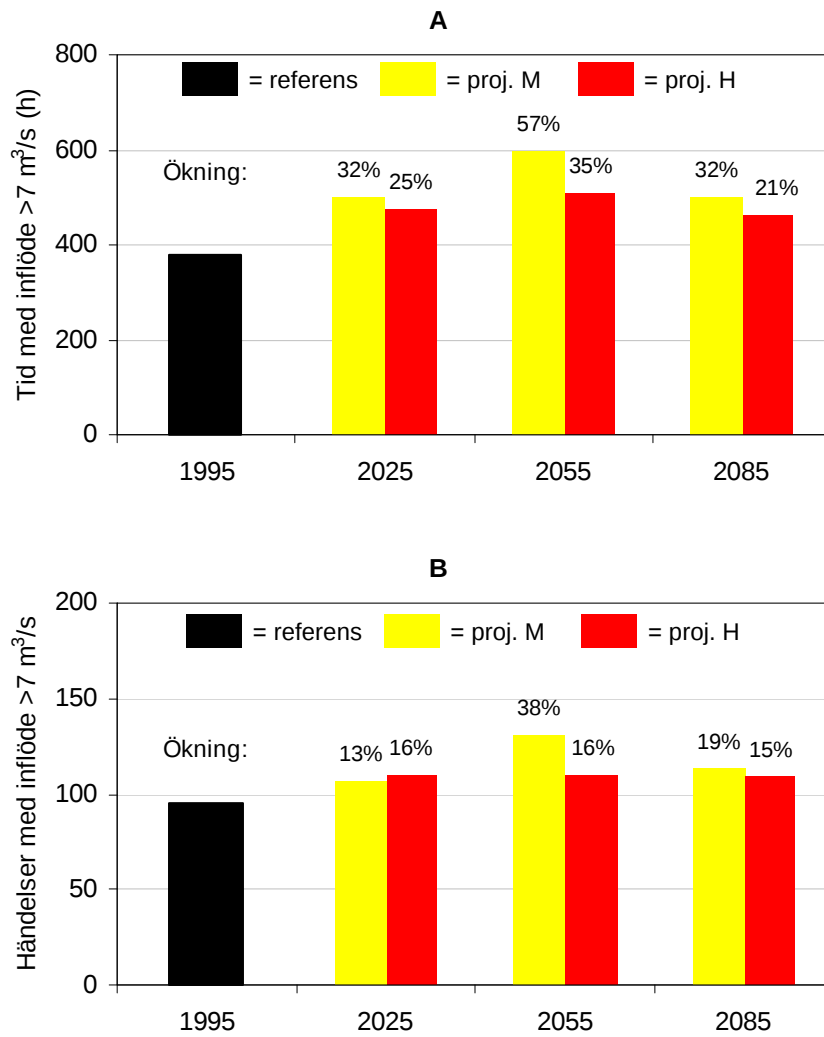
genomsnittet, dock något mer systematiskt i detta fall (Figur 26b). I absoluta tal innebär detta en ökning på i genomsnitt $0.9 \text{ m}^3/\text{s}$, oberoende av händelsens storlek.



Figur 26. Maximalt inflöde till Henriksdal under de utvalda regnhändelserna (A) och ökningen av maximalt inflöde för projektion M-2055 som funktion av händelsens maximala inflöde i referensperioden 1983-2007 (B).

Andelen tid som inflödet under regnhändelserna överstiger gränsen $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ökar med 25-30% i period 2025, från referensperiodens 380 h till knappt 500 h (Figur 27a). Därefter sker till period 2055 ännu en ökning med upp till 600 h för projektion M, motsvarande nästan 60%, varefter andel tid för period 2085 återgår till ungefär samma värden som för period 2025.

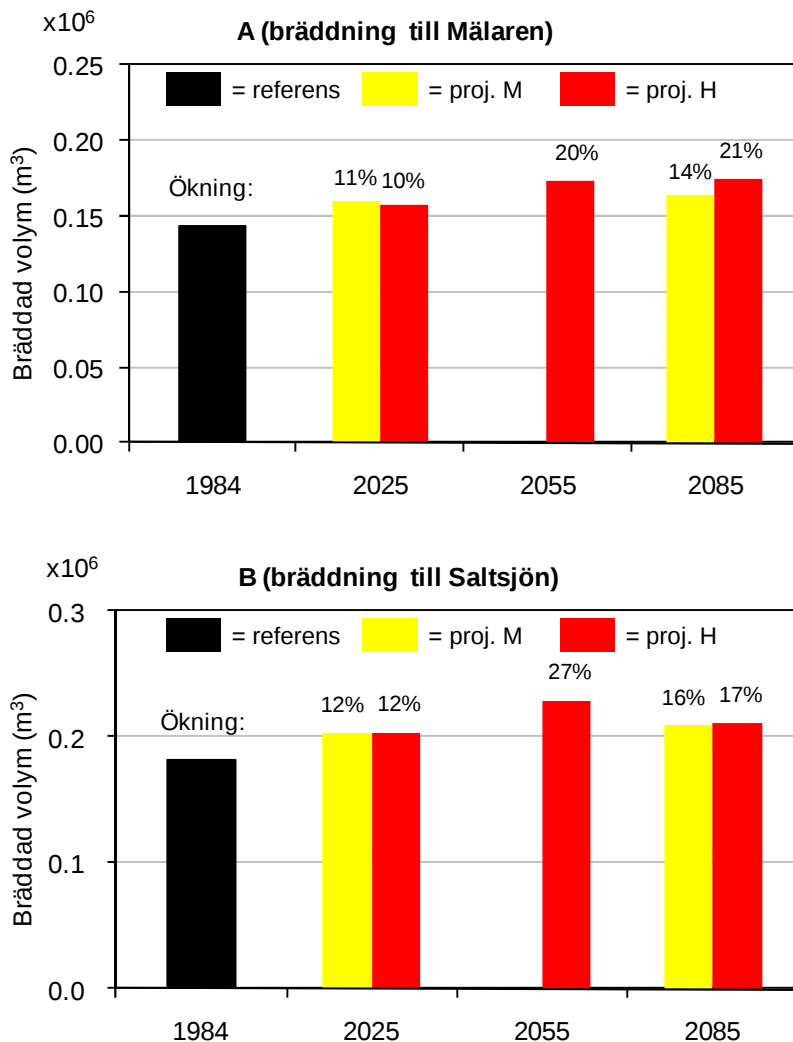
Antalet regnhändelser i vilka inflödet någon gång överskrider $7 \text{ m}^3/\text{s}$ ökar med 10% i period 2025 och därefter något ytterligare (Figur 27b)



Figur 27. Andel av tid med inflöde >7 m³/s (A) och antal regnhändelser med inflöde >7 m³/s (B) till Henriksdal.

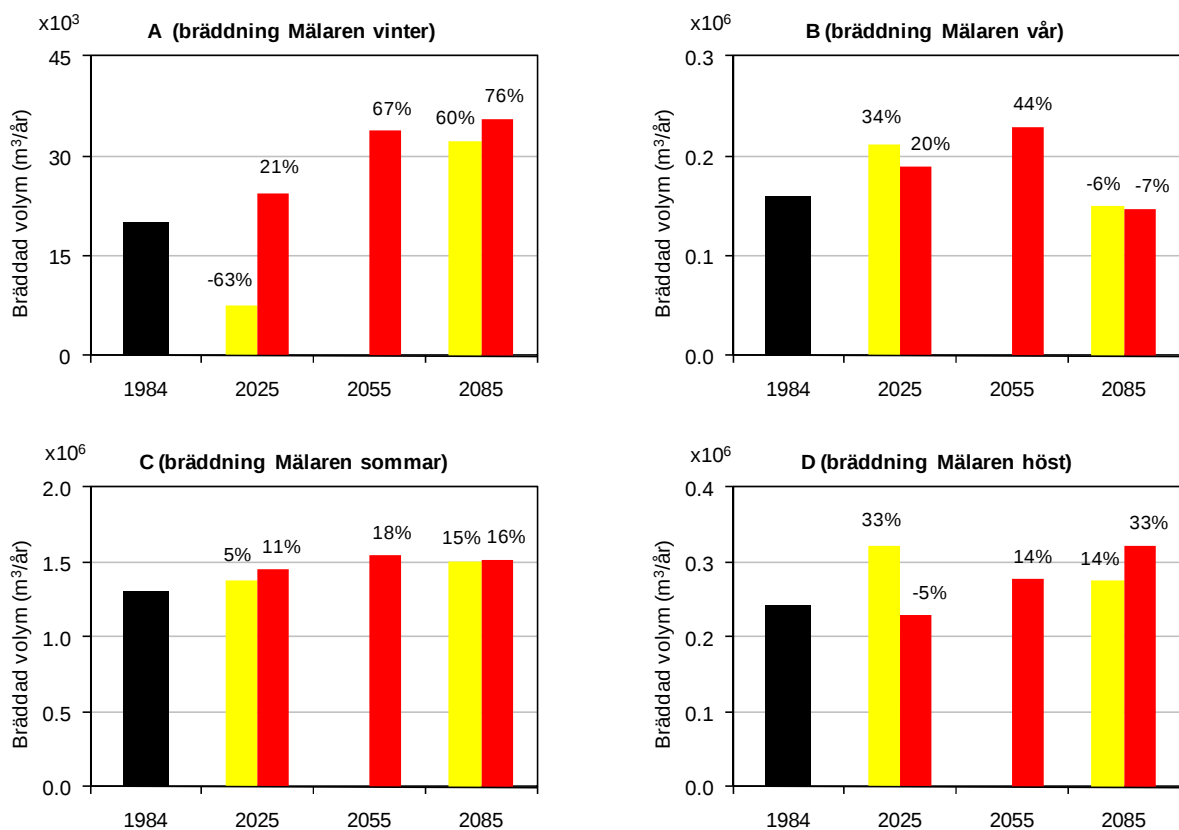
8.2 Bräddning till Mälaren och Saltsjön

Bräddningen under regnhändelserna till Mälaren ökar mest i perioden 2085, med 21%, och till Saltsjön med 27% för period 2055 (Figur 28). Förändringarna är tämligen likartade de för inflödet till Henriksdals reningsverk under regnhändelserna (Figur 25a).

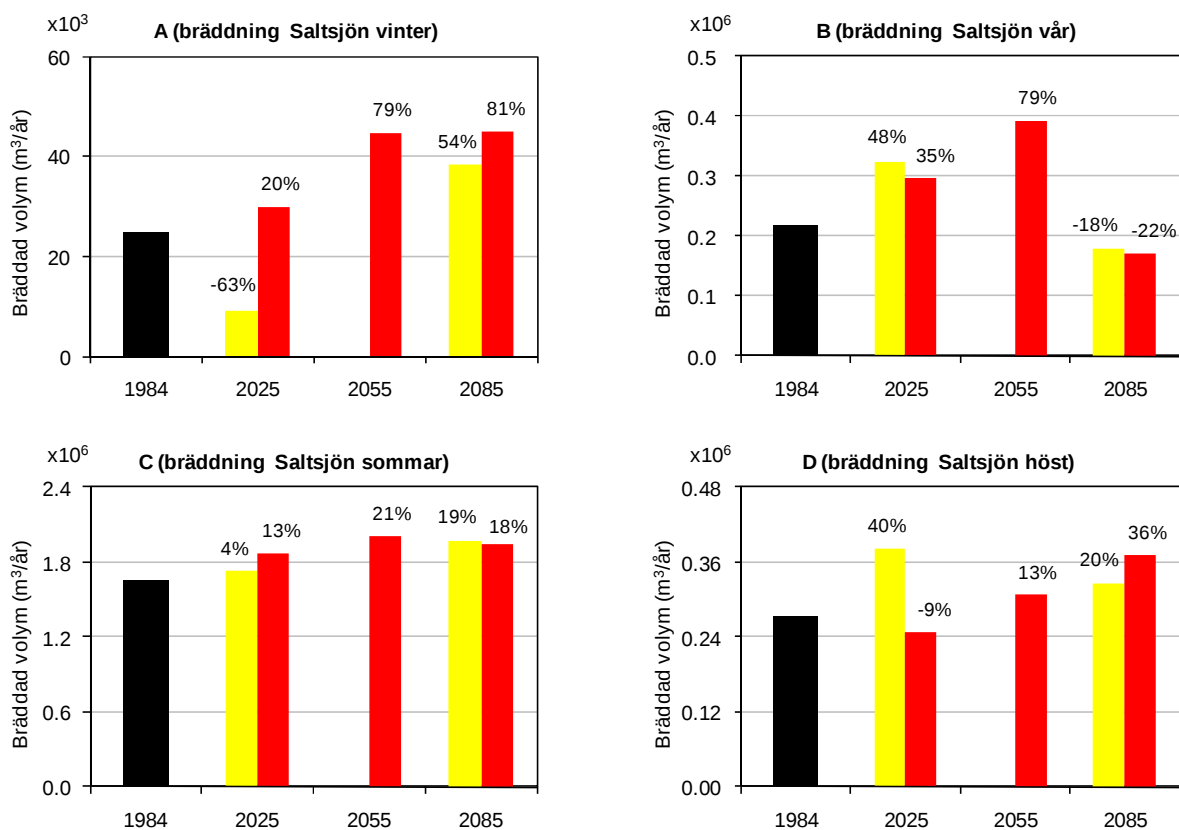


Figur 28. Förändring i bräddad volym till Mälaren (A) och Saltsjön (B) under de utvalda regnhändelserna.

Vad gäller framtida förändringen av bräddning i olika årstider är utvecklingen likartad för Mälaren och Saltsjön (Figur 29 och Figur 30) och även ganska lik resultaten från helårsanalysen (avsnitt 7.2). Under vintern indikeras en ökning av den bräddade volymen med upp emot 80% från mitten av seklet och framåt. Sommar och höst syns en ökning med 20-30%, medan bräddvolymen på våren ser ut att minska i slutet av seklet.



Figur 29. Årstidsförändring i bräddad volym till Mälaren, beteckningar enligt Figur 28.



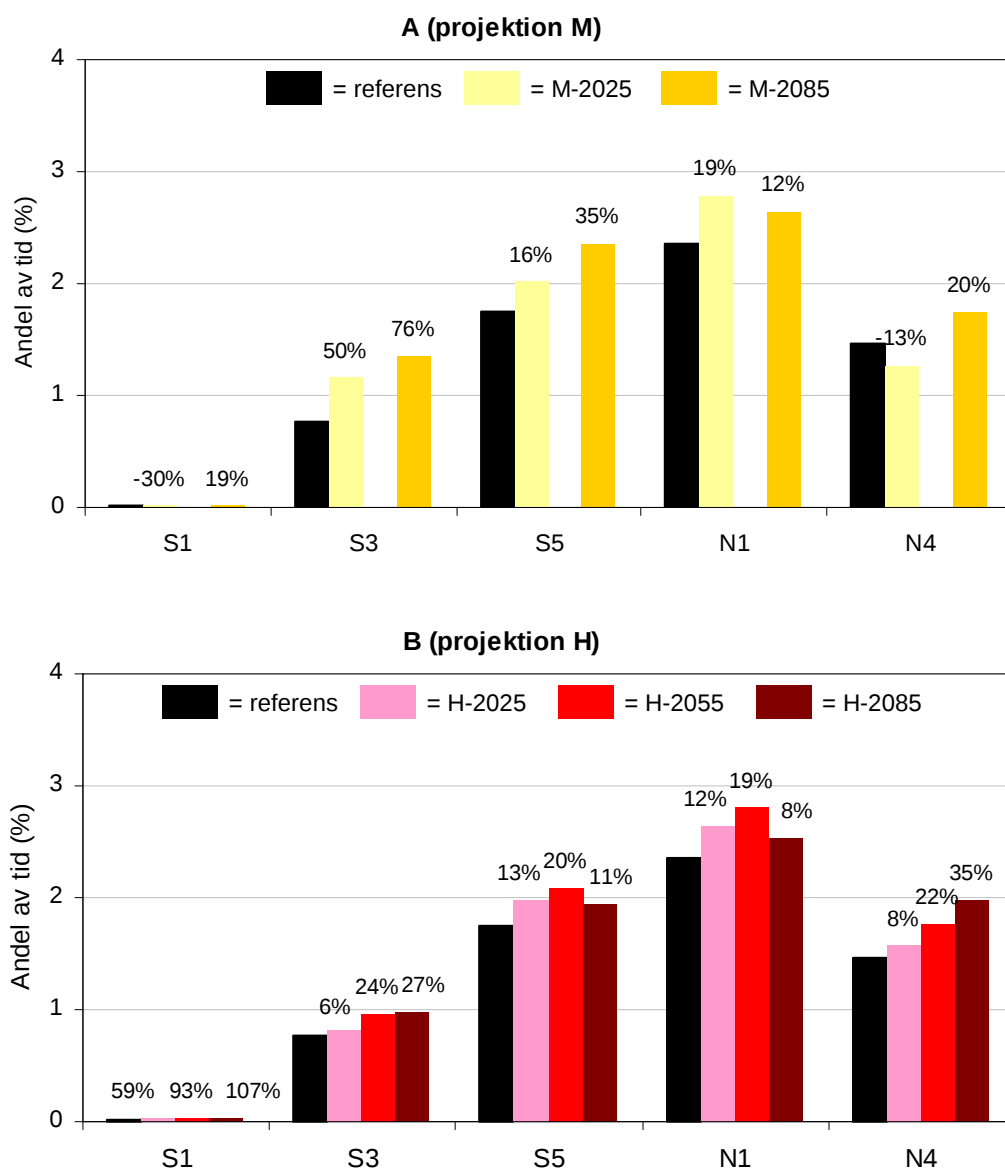
Figur 30. Årstidsförändring i bräddad volym till Saltsjön, beteckningar enligt Figur 28..

8.3 Dämning i utvalda punkter

En mindre analys gjordes av risken för höga vattennivåer och dämningar i utvalda punkter (Tabell 2). I analysen beräknades andelen tid under regnhändelserna som nivån i punkterna översteg hjässa+0.5 m. Vid denna nivå finns risk för översvämning av källargolv när man tittar på en punkt som ligger långt upp i ett ledningssystem. För andra punkter kan denna nivå vara en indikation på utnyttjandegraden.

Andelen av tiden under referensperioden med en nivå > hjässa+0.5 m varierar från 0.02% i punkt S1 upp till 2.4% i punkt N1 (Figur 31).

Resultaten från framtidsperioderna uppvisar stor spridning men i genomsnitt ökar andelen tid med 10-20% till period 2025 och 30-40% till period 2085. De största relativa ökningarna inträffar för punkt S3 med projektion M och, framför allt, punkt S1 med projektion H i vilken andelen tid över den kritiska nivån fördubblas. Detta kan indikera en större risk för framtida problem i systemets nedersta delar där S1 är belägen, men det måste understrykas att det handlar om mycket små andelar tid i både referensperiod och framtidsperioder.

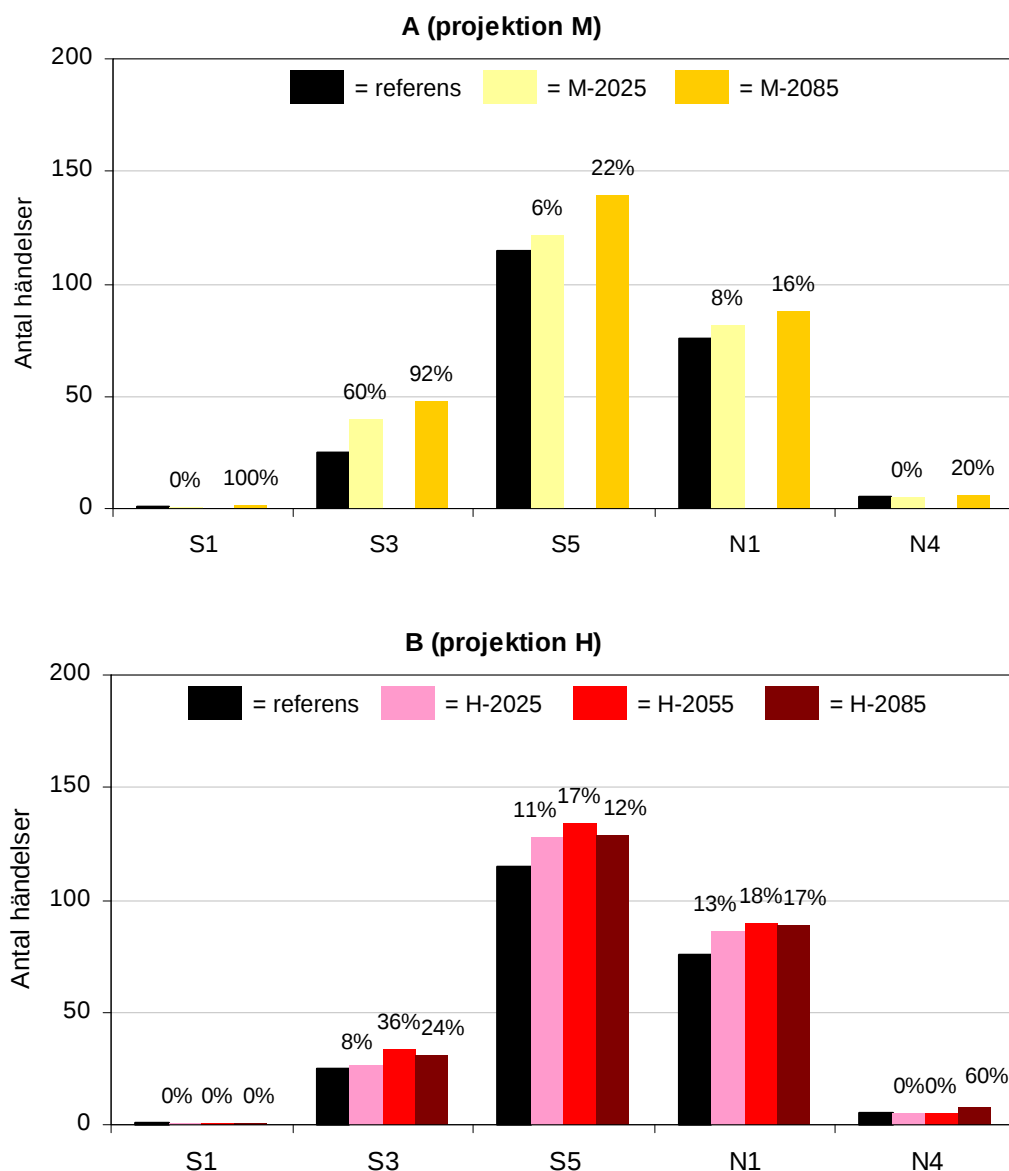


Figur 31. Andel av total tid med en vattennivå > hjässa+0.5 m i utvalda punkter för projektion M (A) och H (B) (siffror ovanför staplar anger procentuell ökning).

Ett annat sätt att betrakta resultatet från översvämningsanalysen är i termer av antalet regnhändelser under vilka nivån någon gång överstiger hjässa+0.5 m (Figur 32). Under referensperioden uppnåddes den kritiska nivån för endast en regnhändelse i punkt S1, för fem regnhändelser i punkt N4 och för mer än 25 regnhändelser i övriga punkter.

I punkter S3, S5 och N1 ökar antalet regnhändelser under framtidsperioderna på likartat sätt som andelen tid (Figur 31). För punkt S5 innebär detta att ledningen kommer att gå dämnd vid de flesta regnhändelser.

I punkter S1 och N4 är antalet regnhändelser emellertid konstant under perioder 2025 och 2055, den ökade andelen tid i Figur 31 beror således enbart på längre perioder över den kritiska nivån för samma regnhändelser som i referensperioden. Under period 2085 tillkommer enstaka regnhändelser i punkter S1 och N4. I punkt N4, som representerar utjämningsmagasinet Ormen, visar projektionerna för 2085 att magasinet går fullt vid 20-60% fler tillfällen än under referensperioden.



Figur 32. Antal regnhändelser med maximal vattennivå > hjässa+0.5 m i utvalda punkter för projektion M (A) och H (B) (siffror ovanför staplar anger procentuell ökning).

9 Slutsatser och diskussion

De huvudsakliga slutsatserna från denna studie kan sammanfattas enligt följande.

Klimatförändring:

- Enligt de tre klimatprojektioner som använts kommer årsmedeltemperaturen i Stockholm att öka med 0.5-1.2°C under de närmaste 30 åren och med 2.8-3.4°C under seklets sista 30 år. För nederbörd ses ingen förändring i den första perioden men en ökning med c:a 70 mm (motsvarande 13%) i den sista perioden. Den potentiella avdunstningen förväntas öka med c:a 20% i den första perioden och nästan 90% i den sista.
- Simuleringar av Mälarens vattenstånd, med reglering enligt gällande vattendom, indikerar ett minskat medelvattenstånd med mellan 1 cm och 10 cm fram till år 2100. Variationerna går mot en ökad frekvens låga nivåer, lägre medellågvattennivå och lågvattennivåer under de lägsta som observerats historiskt. Från år 2018/2020 då nya Slussen är färdig och ny vattendom (reglering) av Mälaren sannolikt trätt i kraft kommer medelvattennivån i Mälaren att höjas med några cm.
- Saltsjöns nivå förväntas i framtiden höjas men detta har inte studerats i denna utredning. En anledning till detta är att nivåhöjningen till en början kommer att motverkas av landhöjningen, en annan att det råder stor osäkerhet kring hur snabbt havsnivåhöjningen kommer att utvecklas.
- Effekten från vattenståndshöjningar kan inte simuleras med avloppsnätsmodellen som är kalibrerad efter nuvarande vattenstånds- och grundvattennivåförhållanden. Men en höjning av grundvatten- och vattenståndsnivåer kommer att öka inläckaget i ledningsnätet.

Flödesbelastning Henriksdals reningsverk:

- Inflödet till Henriksdals reningsverk ökar med c:a 15-20% på årsbasis (6% i samband med dimensionerade 10-års regn). Under vinterhalvåret är flödesökningen störst. Den största delen av flödesökningen består av ökad spillvattenmängd till följd av ökad befolkning fram till år 2030 i beräkningarna. Det bör påpekas att befolkningsökningen kan öka även efter år 2030 med ytterligare ökat flöde till Henriksdal vilket som nämnts inte är medräknat i simuleringarna i denna studie. Förändringen av inflöde är tämligen konstant under hela seklet, troligen eftersom ökad nederbörd och avdunstning tar ut varandra. De på lång sikt viktigaste faktorerna för ökning av totalt inkommande flöde till Henriksdal kommer sannolikt från högre vattennivåer i Saltsjön och Mälaren samt ökad befolkning.
- För regnhändelser ökar det totala inflödet med c:a 10%, varav maximala inflöden ökar med 5-10% och mindre flöden ökar med upp till 50%.
- En möjlig förklaring till höga inflöden till Henriksdal under vintern är att nederbörden kommer i större utsträckning att falla som regn. Därmed kommer de redan höga grundvattennivåerna på hösten höjas ännu mer och tillföra mer läck och dränvatten till ledningsnätet än idag. Mindre volymer regn kommer alltså att magasineras under vintern som snö.
- Andelen av tiden då inflödet till Henriksdal överstiger 7 m³/s ökar från dagens (referensåret 1984) 1.5 dagar till 3 dagar per år. Det visar på att flödestopparna till Henriksdals reningsverk kommer att öka på grund av förändrad nederbörd.

Bräddningar avloppsnät:

- Oavsett om man ser till det klimatscenario som ger störst förändring av temperatur/nederbörd eller det mildare fallet kommer bräddvolymerna att öka kraftigt de kommande decennierna.
- På helårsbasis kommer de totala bräddade volymerna till både Mälaren och Saltsjön enligt resultaten att öka med 5-10% i den närmaste framtiden och 20-40% mot slutet av seklet. Beräkningarna visar att bräddningen kommer att procentuellt öka mest under vintern och hösten.

- Resultatet för de 195 utvalda regnhändelserna visar på en ökande bräddvolym för de kommande decennierna men att ökningstakten börjar minska i mitten av seklet.

Dämning i avloppsnät:

- Andelen av tiden då vattennivån överstiger hjässa med +0.5 m i utvalda punkter ökar med 10-20% till period 2025 och 30-40% till period 2085. Spridningen är dock stor, från en minskad till en mer än fördubblad andel tid. Totalt sett ger resultaten dock en indikation på att risken för översvämningar ökar.
- Ökade bräddmängder är i sig också en indikation på högre nivåer i ledningsnätet.

Mot bakgrund av de stora osäkerheter som finns i studien bör resultaten främst tolkas kvantitativt och i termer av storleksordningar. Den totala osäkerheten kring de framtida förändringarna kan delas upp i två komponenter: osäkerhet i klimatprojektioner och klimatindata samt osäkerheter i befolkningsmängd och områdesbeskrivning. Vad gäller klimatprojektioner har enbart en kombination av global (ECHAM) och regional (RCA) modell använts, med tre olika utsläppsscenarier. Andra modellkombinationer hade givit andra resultat. Tabell 4 visar dock att i synnerhet den projektion M som använts representerar en medelnivå vad gäller framtida förändringar i Mälarenregionen baserat på 16 olika projektioner. Detta kan tolkas som att projektion M beskriver en utveckling nära den ”mest troliga” mot bakgrund av den kunskap som finns tillgänglig idag.

En annan källa till osäkerhet är skillnaden i rumslig skala mellan den regionala modellens gridskala (2 500 km²) och det studerade avrinningsområdet (210 km²). Denna skillnad påverkar i synnerhet nederbörden vars statistiska egenskaper är helt fundamentalt olika på dessa båda skalor; således kan inte resultat på gridskala användas direkt i detta fall. För att skala ned från gridskala till lokal skala har s.k. Delta Change använts, som bygger på en omskalning av historiska observationer i enlighet med statistiska förändringar beräknade ur klimatprojektioner. Härvid måste antas att förändringar på gridskala är representativa också för den lokala skalan. Preliminära försök att skala ner nederbörd från gridskala till punktskala indikerar att förändringar på lokal skala kan bli något större än på gridskala (Olsson och Willén, 2010). Således skulle förändringar på gridskala kunna ses som en konservativ bedömning av förändringar på lokal skala. Det kan nämnas att utvecklingen mot högre rumslig upplösning i klimatmodellerna går snabbt och att det inom några år kommer att finnas resultat på 5-10 km².

Vidare har omskalningsmetoden Delta Change uppenbara begränsningar, speciellt i fallet nederbörd med sin kraftiga småskaliga variation i tid och rum. Även om omskalningen beaktar förändringar på olika intensitetsnivåer så tas ingen hänsyn till eventuella förändringar i frekvens på lokal skala. Exempel på sådana tänkbara framtida förändringar som inte har beaktats är förändringar mot fler eller färre nederbördstillfällen under olika årstider samt förändringar av regnhändelsers varaktighet. Dessa typer av framtida förändringar är emellertid svåra att uppskatta beroende både på skalproblematiken och på klimatmodellens svårighet att korrekt reproducera frekvensen av nederbörd (se avsnitt 6.2). Trots begränsningarna hos Delta Change finns egentligen inget praktiskt tillämpbart alternativt angrepp att föra ner förändringar i klimatprojektioner till urbanhydrologiska skalor.

Befolkningsökningen 2005-2010 har varit något snabbare än antagen utveckling för Stockholm 2000-2030. Ökningen fram till 2030 med 25% leder till en spillvattenbelastning som ger en 5% ökning av bräddvolymen till Saltsjön och Mälaren. Utöver detta kommer bräddvolymen att öka ytterligare 15-20% från faktorer som härrör från klimatförändringarna. Dessa ökningar i bräddvolymen har en stor betydelse när vi idag är nära tillåten bräddmängd enligt gällande villkor.

En fortsatt befolkningstillväxt efter 2030, inom Henriksdals reningsverks avrinningsområde, tillsammans med ökad bräddning till följd av ökad avrinning p.g.a. eventuella klimatförändringar kommer att innebära problem redan i mitten av seklet. Stockholm Vatten behöver därför jobba med åtgärder för att fortsatt uppfylla de gällande kraven för bräddvolymen.

10 Tackord

Studien är gemensamt finansierad av Stiftelsen för miljöstrategisk forskning (Mistra) genom forskningsprogrammet Mistra-SWECIA, samt Stockholm Vatten AB. Tack till Wei Yang för hjälp med Mälaranalysen och till Elin Löwendahl och Pelle Boberg för assistans med presentationen av Mistra-SWECIA samt färdigställandet av denna rapport.

11 Referenser

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper, 56. FAO, Rome.
- Bergström, S., 1976. Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments. SMHI Reports Hydrology and Oceanography, nr. 7, 134 pp.
- Bergström, S., Hellström, S.S. and Andréasson, J., 2006. Nivåer och flöden i Vänerns och Mälarens vattensystem - Hydrologiskt underlag till Klimat- och sårbarhetsutredningen. SMHI Reports Hydrology, No. 20, SMHI, Norrköping, 53 pp.
- Carlsson, B., Bergström, S., Andréasson, J., Hellström, S.-S., 2006. Framtidens översvämningsrisker (Future flood risks). Reports Hydrology, vol. 19. SMHI, Sweden. 69 pp (in Swedish, with English abstract).
- Eriksson, B., 1981. Den "potentiella" evapotranspirationen i Sverige. Reports Meteorology and Climatology, No. 28, SMHI, Norrköping.
- Hay LE, Wilby RL, Leavesley GH (2000) A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States. J Am Water Resour Assoc 36(2):387–397.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: the physical science basis*, summary for policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC.
- Kjellström, E., Bärring, L., Gollvik, S., Hansson, U., Jones, C., Samuelsson, P., Rummukainen, M., Ullerstig, A., Willén, U., Wyser, K., 2005. A 140-year simulation of European climate with the new version of the Rossby Centre regional atmospheric climate model (RCA3). Reports Meteorology and Climatology, No. 108, SMHI, Norrköping, 54 pp.
- Lindström, G., B. Johansson, M. Persson, M. Gardelin and S. Bergström, 1997. Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. J. Hydrol., 201, 272-288.
- Nakićenović, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., 2000. *Special Report on Emissions Scenarios*, Working Group III, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge. 595 pp.
- Olsson, J., and U. Willén (2010) Downscaling extreme RCA3-precipitation for urban hydrological applications, Mistra-SWECIA Working Paper nr. 3, 32 pp.
- Olsson, J., Berggren, K., Olofsson, M., and M. Viklander (2009) Applying climate model precipitation scenarios for urban hydrological assessment: a case study in Kalmar City, Sweden, Atmos. Res., 92, 364-375.

Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society of London, A193: 120-146.

Roeckner, E., Arpe, K., Bengtsson, L., Christoph, M., Claussen, M., Dümenil, L., Esch, M., Giorgetta, M., Schlese, U., Schulzweida, U., 1996. The atmospheric general circulation model ECHAM4: model description and simulation of present-day climate. Report No. 218. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg.

SBK 2010:1, *Promenadstaden – översiktsplan för Stockholm*, Stadsbyggnadskontoret, <http://www.stockholm.se/oversiktsplan>

Semadeni-Davies, A., Hernebring, C., Svensson, G., Gustafsson, L.-G. (2008a) The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Combined sewer system, *Journal of Hydrology*, 350:100-113.

Semadeni-Davies, A., Hernebring, C., Svensson, G., Gustafsson, L.-G. (2008b) The impacts of climate change and urbanisation on drainage in Helsingborg, Sweden: Suburban stormwater, *Journal of Hydrology*, 350:114-125.

SOU 2007:60, *Sverige inför klimatförändringarna – hot och möjligheter*, Slutbetänkande av Klimat- och sårbarhetsutredningen.

Svenskt Vatten, 2007. *Klimatförändringarnas inverkan på allmänna avloppssystem*, Underlagsrapport till Klimat- och sårbarhetsutredningen, Meddelande M134.

Thornthwaite, C.W. (1948). "An approach toward a rational classification of climate". *Geographical Review* 38: 55–94.

Undén, P., L. Rontu, H. Järvinen, P. Lynch, J. Calvo, G. Cats, J. Cuxart, K. Eerola, C. Fortelius, J. Antonio Garcia-Moya, C. Jones, G. Lenderlink, A. McDonald, R. McGrath, B. Navascues, N. Woetman Nielsen, V. Ødegaard, E. Rodriguez, M. Rummukainen, R. Rööf, K. Sattler, B. Hansen Sass, H. Savijärvi, B. Wichers Schreur, R. Sigg, H. The and A. Tijn, 2002. HIRLAM-5 Scientific Documentation. HIRLAM-5 Project, c/o Per Undén SMHI, S-601 76 Norrköping, Sweden.

Yang, W., Andréasson, J., Graham, L.P., Olsson, J., Rosberg, J., and F. Wetterhall (2010) Distribution-based scaling to improve usability of regional climate model projections for hydrological climate change impacts studies, *Hydrology Research*, 41:211-229.



Författare:

Jonas Olsson

Granskare:

Uppdragsgivare:

Mistra-SWECIA

Granskningsdatum:

090114

Rapport nr

Dnr:

Version:

Klimatanalyser av Mälaren inom SWECIA

Jonas Olsson, Joel Dahné, Johan Andréasson

Uppdragstagare SMHI 601 76 Norrköping	Kontaktperson Jonas Olsson 011-4958322 jonas.olsson@smhi.se
Uppdragsgivare Mistra-SWECIA	Kontaktperson Markku Rummukainen
Distribution	
Klassificering	
Nyckelord	
Övrigt	

SAMMANFATTNING

Tillrinning och vattenstånd i Mälaren har beräknats med nya klimatscenarier omfattande en ensemble av två globala klimatmodeller (varav en med två olika initialtillstånd) och fyra regionala klimatmodeller. Totalt sett överensstämmer resultaten väl med de som redovisades i underlaget till Klimat- och sårbarhetsutredningen. Vad gäller tillrinning till Mälaren sker en omfördelning inom året mot större volymer vintertid och lägre volymer övriga årstider. Tidpunkten för maximal tillrinning förskjuts från vår till vinter. Både årsmedeltillrinningen och den maximala tillrinningen förblir i genomsnitt tämligen oförändrade fram till 2100, emedan den minimala tillrinningen tydligt minskar. Vad gäller vattenstånd sker en ökning av variabiliteten, mot färre dagar med en nivå nära medelvärdet och framför allt fler låga nivåer. Både årsmedelnivån och medelhögvattenståndet minskar svagt fram till 2100, emedan medellågvattenståndet uppvisar en kraftigare minskning. En tröskelbaserad lågvattenanalys visade på en kraftig ökning både av det totala antalet dagar med lågt vattenstånd och längden av sammanhängande lågvattenperioder.

BAKGRUND

Inom projektet Mistra-SWECIA utförs en fallstudie i Stockholmsregionen som bl.a. omfattar en urbanhydrologisk klimatanalys. I delar av Stockholm (t.ex. innerstaden) är flödena i dagvattennätet påverkade av Mälarens vattennivå. I princip måste således en urbanhydrologisk analys inkludera information om Mälarens tillstånd, dock är det inte helt okomplicerat rent tekniskt att använda vattenståndet som randvärde till en urbanhydrologisk avrinningsmodell. Under antagandet om att detta går att lösa har Mälaren analyserats för ett antal klimatscenarier som tillkommit sedan Klimat- och sårbarhetsutredningen.

SYFTE

Att utöka resultatensemblen från underlaget till Klimat- och sårbarhetsutredningen med nya emissionsscenarier och klimatmodeller och p.s.s. få en uppdaterad och fördjupad bild av Mälarens framtid. Eftersom både tidigare och nya resultat pekar tydligt mot lägre lågvatten har ett delsyfte varit att något mera detaljerat än tidigare studera lågvattenperioder, något som också efterfrågats av avnämare (t.ex. på SWECIA-seminarer under 2008).

DATA

För analyserna av Mälarens tillrinning och vattenstånd beräknades tidsserier med HBV-modellen. Som indata till HBV-modellen användes klimatberäkningar från fyra olika regionala klimatmodeller med två globala klimatmodeller (varav en med två olika initialtillstånd) som randvillkor enligt Tabell 1. Tabellen visar de regionala klimatmodeller som använts i analysen med tillhörande globala klimatmodell. Det utsläppsscenario som använts är i samtliga fall A1B (IPCC, 2007).

Tabell 1: Kombination av globala och regionala modeller som använts vid analyserna

NAMN	Regional klimatmodell		Global klimatmodell		Tidsperiod
	<u>Institut</u>	<u>Modell</u>	<u>Institut</u>	<u>Modell</u>	
RCAE51	SMHI	RCA3	MPI	ECHAM5:1	1961 - 2100
RCAE53	SMHI	RCA3	MPI	ECHAM5:3	1961 - 2100
MPI	MPI	REMO	MPI	ECHAM5:3	1961 - 2100
KNMI	KNMI	RACMO	MPI	ECHAM5:3	1961 - 2100
CNRM	CNRM	ALADIN	CNRM	ARPEGE	1961 - 2050

I texten hänvisas ofta till *perioder* med detta menas perioderna 1961-1990 (referensperiod; RP), 2011-2040 (FP1), 2041-2070 (FP2) och 2071-2100 (FP3).

Tabell 2 visar temperaturförändringen i Mälarenregionen (°C) för nio 30-årsperioder fram till 2100. Varje period är förskjutet 10 år i förhållande till den förra.

Temperaturförändringen är i förhållande till referensperioden och temperatur för denna anges som absolut temperatur (°C).

Tabell 2: Temperatur (°C) under referensperioden för de olika modellerna (första raden) samt temperaturskillnad för 30-årsperioder under innevarande sekel (rad två och neråt).

<u>Period</u>	<u>RCAE51</u>	<u>RCAE53</u>	<u>KNMI</u>	<u>MPI</u>	<u>CNRM</u>
1961-1990 (RP)	5,25	5,26	5,27	5,27	5,23
2001-2030	0,69	0,50	0,56	0,58	0,87
2011-2040 (FP1)	1,10	1,08	1,16	1,35	1,10
2021-2050	1,88	1,68	1,51	1,86	1,45
2031-2060	2,40	2,36	2,04	2,65	-
2041-2070 (FP2)	3,03	2,82	2,34	2,96	-
2051-2080	3,60	3,48	2,86	3,64	-
2061-2090	4,45	4,07	3,31	4,21	-
2071-2100 (FP3)	4,99	4,38	3,57	4,62	-

ANALYSER

I princip är metodiken desamma som vid framtagandet av underlaget till Klimat- och sårbarhetsutredningen, för detaljerad information hänvisas till denna underlagsrapport (Bergström et al., 2006). Angreppssättet är att driva den hydrologiska HBV-modellen, uppsatt och kalibrerad för Mälarens avrinningsområde, med indata (temperatur, nederbörd) från klimatscenarier. På detta sätt genereras hydrologiska klimatscenarier (tillrinning, vattenstånd) för Mälaren.

En skillnad gentemot Bergström et al. (2006) ligger i hur klimatmodelldata använts för att generera indata till HBV-modellen. I Bergström et al. (2006) användes ”Delta Change-metoden”, som i princip går ut på att historiska observationer modifieras i enlighet med klimatsignalen (t.ex. Hay et al., 2000; Andréasson et al., 2004). I denna rapport har i stället ”scaling” använts, i vilken justerade klimatmodelldata används direkt som indata (t.ex. Yang et al., 2009). Den senare metoden förväntas bättre beskriva olika aspekter av framtida förväntade förändringar än den förra metoden, som i hög grad styrs av egenskaperna hos de historiska observationer som modifieras.

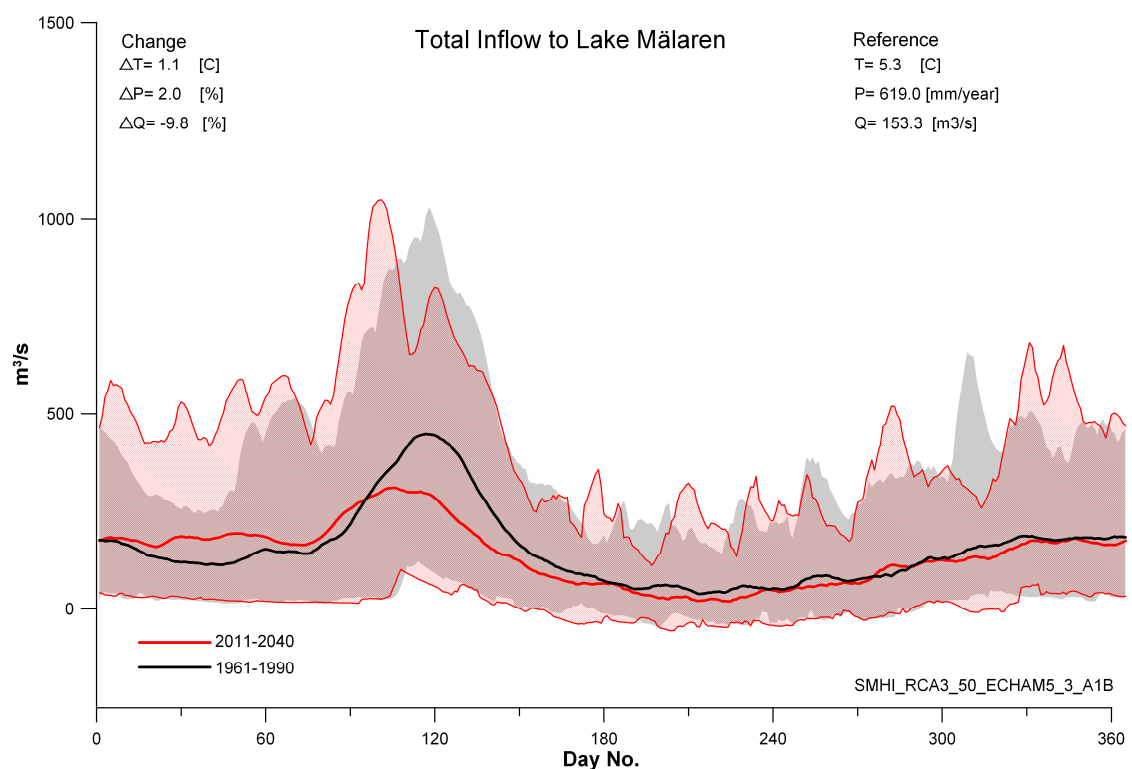
Vad gäller tillrinning har analyserats årlig variation, medeltillrinning (årlig, 30-årsgenomsnitt, säsongsfördelning) samt maximal och minimal 30-dygns tillrinning (årlig, 30-årsgenomsnitt). Vad gäller vattenstånd har gjorts frekvensanalyser, analyser av årsmedelnivå, högvatten och lågvatten (årlig, 30-årsgenomsnitt) samt en fördjupad analys av lågvattenperioder.

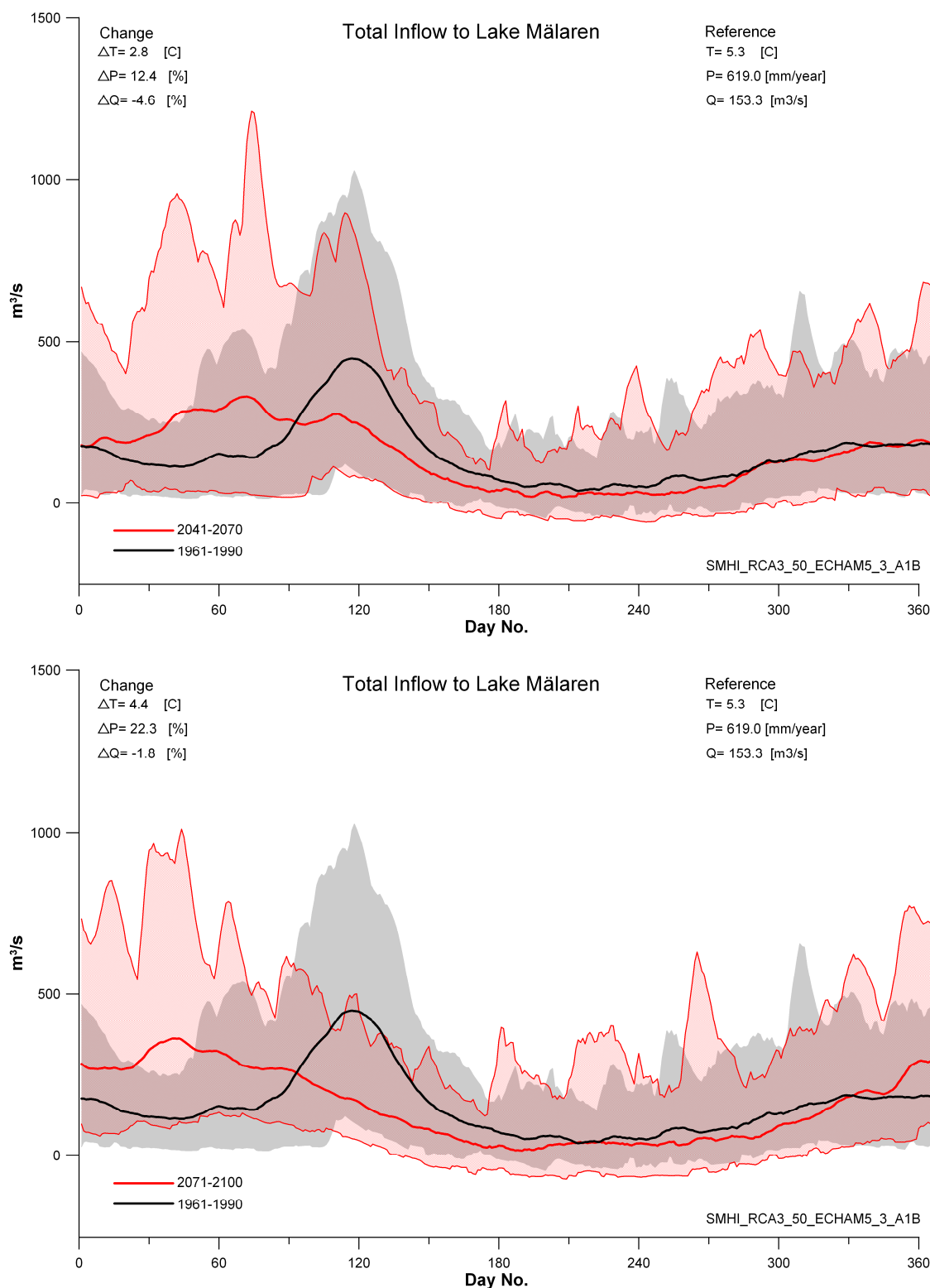
RESULTAT OCH DISKUSSION

I huvudtexten redovisas antingen resultat från samtliga modellkombinationer, eller så illustreras resultaten med modellkombination RCAE53 (Tabell 1). Fullständiga resultat från övriga modellkombinationer redovisas i Appendix 1-43.

Tillrinning

Figur 1 visar förändringen av tillrinningens årssynamik enligt RCAE53. För RP ses en tydlig vårflodstopp, vilken successivt suddas ut i framtidsperioderna beroende på högre temperaturer och därmed minskat snötäcke. De högsta tillrinningarna förskjuts



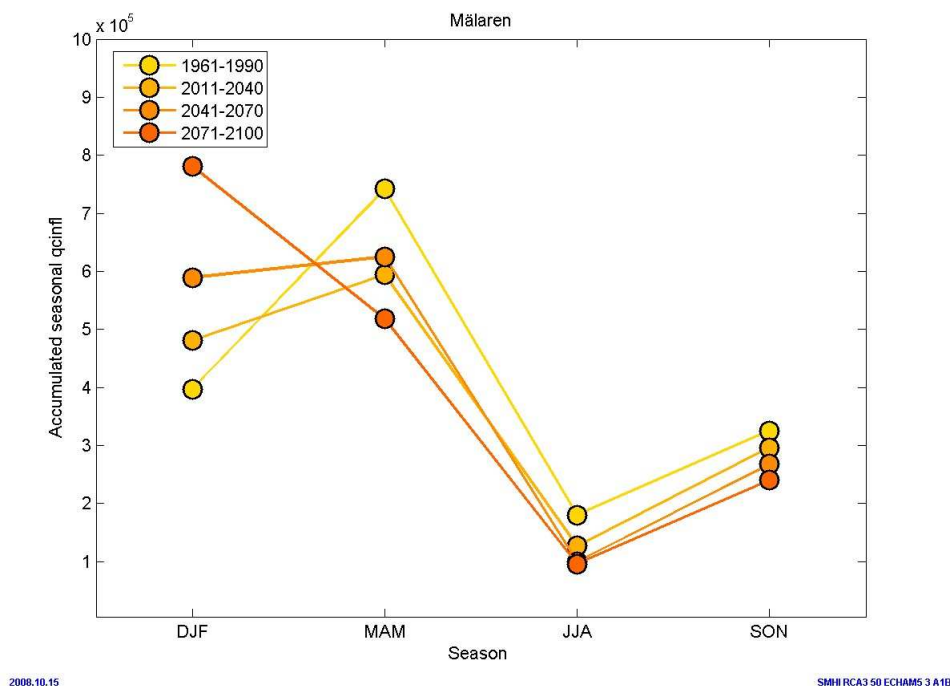


Figur 1: Beräknad förändring i årsdynamiken av tillrinningen till Mälaren enligt RCAE53. Svart (röd) kurva visar dygnsmedeltillrinning under RP (FP); grått (rött) fält visar minimal och maximal dygnsstillrinning under RP (FP). Övre diagram (föregående sida): FP1, mittdiagram: FP2, nedre diagram: FP3.

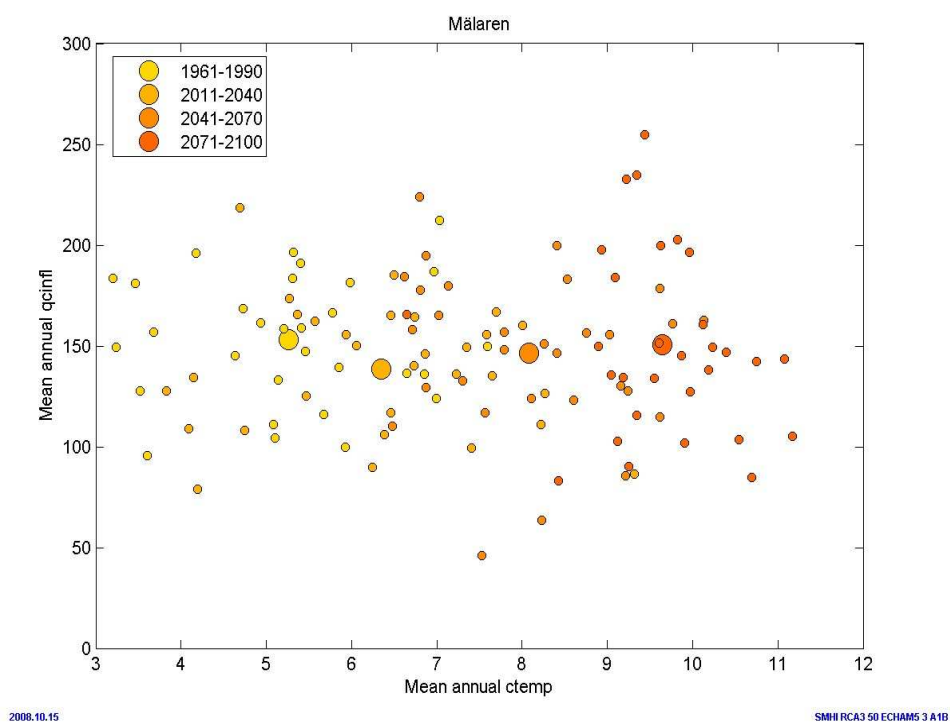
från våren till vintern, troligen kopplade till kraftigare nederbördstillfällen, eventuellt i kombination med tillfälliga snöavsmältningar. Högre tillrinningar orsakade av

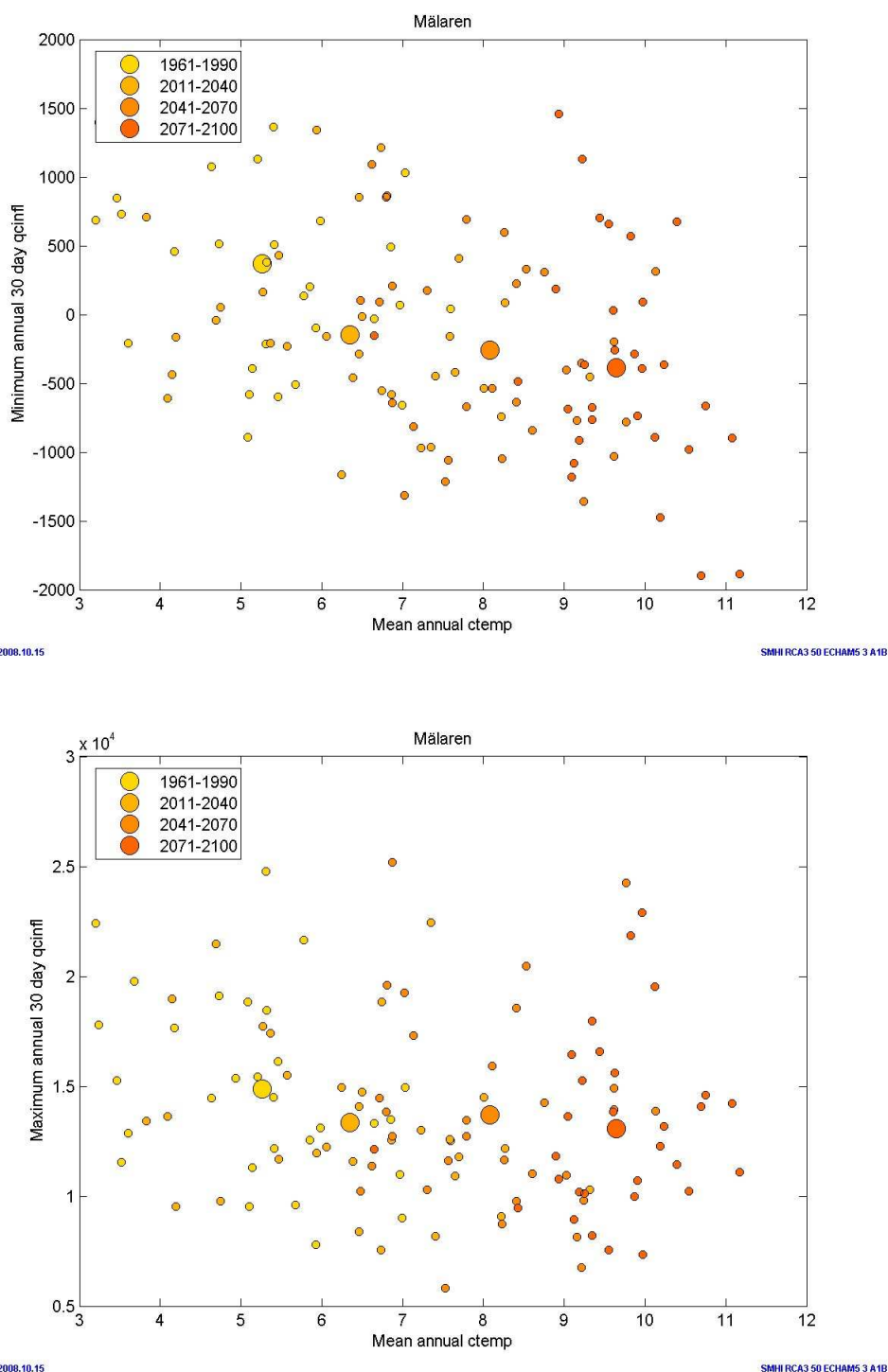
kraftigare nederbörd ses även på sommaren. Den maximala tillrinningen är i grova drag oförändrad i framtidsperioderna emedan den minimala tillrinningen tydligt minskar. Resultaten från övriga modellkombinationer överensstämmer på det hela taget med resultatet från RCAE53, se Appendix 1.

Figur 2 illustrerar hur den tillrunna volymen i framtiden successivt omfördelas till vintern från framförallt våren men även sommaren och hösten.



Figur 2: Ackumulerad tillrunnen volym till Mälaren (m³) under de olika årstiderna enligt RCAE53.





Figur 3: Kontinuerlig beräkning av tillrinning till Mälaren som funktion av årsmedeltemperatur under de olika klimatperioderna enligt RCAE53. De större cirklarna är medelvärden för perioderna och de mindre representerar enskilda år. Övre diagram (föregående sida): medeltillrinning, mittdiagram: minimal (ackumulerad) 30-dygns tillrinning, nedre diagram: maximal (ackumulerad) 30-dygns tillrinning.

I Figur 3 visas hur medel-, minimal och maximal tillrinning förändras med årsmedeltemperaturen i de olika klimatperioderna. Medeltillrinningen inom perioden

(stora cirklar) förblir relativt konstant, med en svag tendens mot ökad spridning för enskilda år. Den minimala tillrinningen minskar tydligt, både som periodmedelvärde och för enskilda år. (Negativ tillrinning innebär att tillrunnen volym är mindre än avdunstad volym.) Periodmedelvärdet av maximal tillrinning minskar svagt, men för enskilda år inom perioderna är den maximala tillrinningen i stort sett oförändrad. Resultaten från övriga modellkombinationer överensstämmer på det hela taget med resultatet från RCAE53, se Appendix 3.

I Tabell 3 sammanfattas i siffror de resultat som visas i diagram av typ Figur 3. Värdena på tillrinningar och förändringar i Tabell 3 motsvarar således de stora cirkelarna i Figur 3 och motsvarande figurer i Appendix 3.

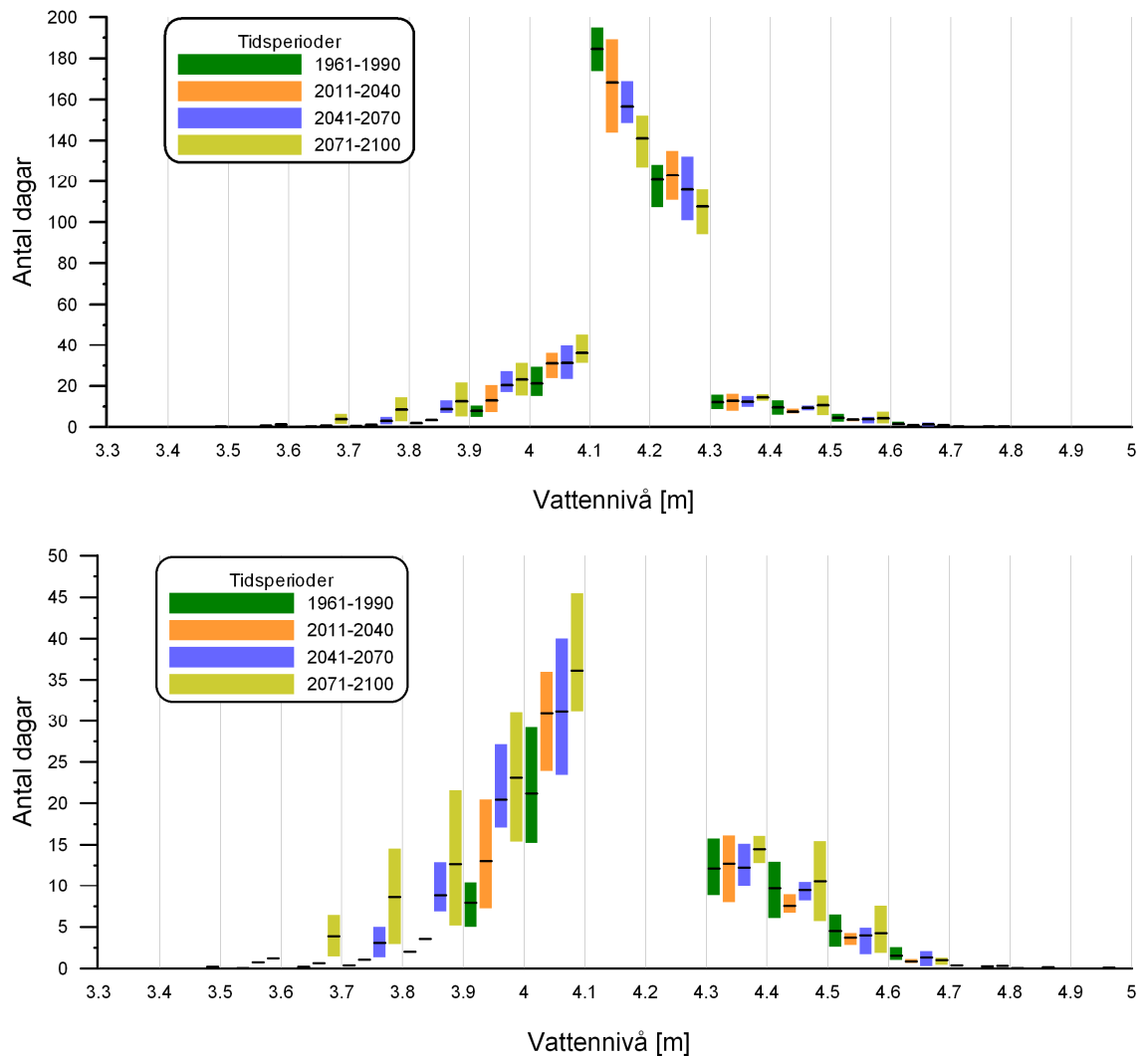
Tabell 3: För RP: medeltillrinning (MEDEL) samt minimal (MIN) och maximal (MAX) 30-dygns tillrinning (m^3/s ; dygnsmedelvärde) under klimatperioderna (årsmedelvärden). För FP1-FP3: skillnad jämfört med RP.

	MIN				MEDEL				MAX			
	RP	FP1	FP2	FP3	RP	FP1	FP2	FP3	RP	FP1	FP2	FP3
RCAE51	14	-9	-26	-44	150	10	6	-11	468	-23	-30	-27
RCAE53	12	-17	-21	-25	153	-15	-7	-3	496	-50	-39	-60
MPI	8	-21	-26	-38	152	-17	-22	-33	519	-93	-100	-134
KNMI	6	-14	-19	-21	155	-10	-6	3	458	-29	-1	14
CNRM	0	-10			146	9			414	17		

Vattenstånd

Det bör påpekas att vattenstånd beräknats med användning av de regleringsrutiner som används vid den nuvarande Slussen. Dessa rutiner kommer att förändras, och på sikt hela Slussen att byggas om, vilket troligen kommer att kraftigt påverka Mälarens vattenstånd och förutsättningarna att reglera detta. Genom jämförelser med referensperioden kan de utförda scenarieberäkningarna ändå ge en indikation på de framtida förändringarna, mot bakgrund av dagens förhållande.

Figur 4 visar frekvensfördelningen över antalet dagar per år med olika vattenstånd inom de olika klimatperioderna. Det övre diagrammet visar att antalet dagar med ett vattenstånd nära medelvärdet minskar, se nivåer 4.1 och 4.2 m, och att i stället antalet dagar med låga vattenstånd ökar. Det senare syns ännu tydligare i det nedre diagrammet, som visar en förtydligad bild av höga och låga vattenstånd. Dessa resultat överensstämmer med resultaten i Bergström et al. (2006). I Bergström et al. (2006) indikerades emellertid också en ökning av antalet dagar med medelhöga vattenstånd (nivåer 4.3-4.6), men en sådan ökning är inte uppenbar här.

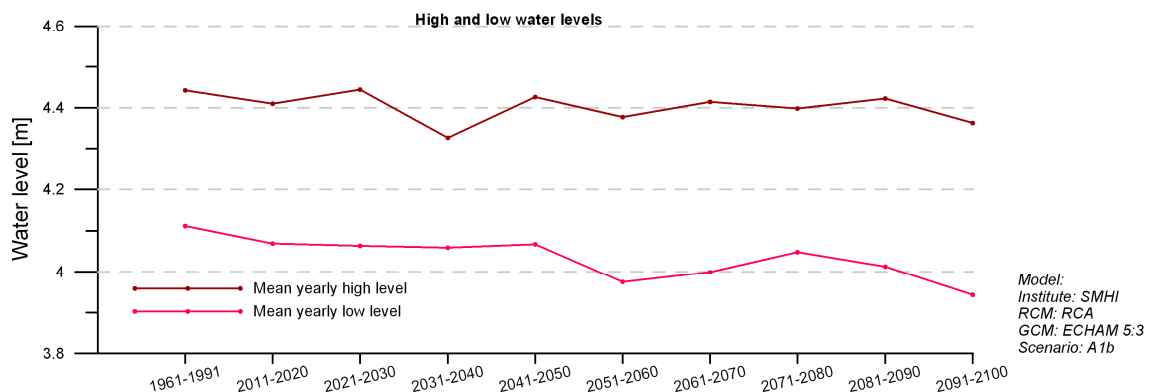


Figur 4: Beräknat antal dagar (per år) med olika vattennivåer i Mälaren i de olika klimatperioderna. Det horisontella svarta strecket betecknar medelvärdet av de fem scenarierna, det färgade intervallet spannet mellan det högsta och lägsta värdet. Det nedre diagrammet visar en förstoring av resultatet för höga och låga nivåer i det övre diagrammet.

Vad gäller de allra högsta och lägsta vattenstånden visar Figur 5 på en svag framtida minskning av medelhögvattennivån, alltså det genomsnittligt högsta vattenståndet under ett år, och en mera kraftig minskning av medellågvattennivån. De observerade värdena på medelhögvattenstånd och medellågvattenstånd för dagens klimat (1968-2003) i Slussen är 4.46 respektive 4.00 (Sjöfartsverket, 2008). Det med HBV-modellen simulerade högvattenståndet för dagens klimat överensstämmer mycket väl med det observerade, medan det simulerade medellågvattenståndet är överskattat med en dryg decimeter.

I Figur 6 visas hur medel-, minimala och maximala vattenstånd förändras med årsmedeltemperaturen i de olika klimatperioderna. Medelvattenståndet inom perioden (stora cirklar) minskar svagt, men för enskilda år kan medelvattenståndet vid mitten och slutet av detta sekel komma att ligga drygt två decimeter under nuvarande medelvattenstånd. En ännu tydligare minskning syns för medellågvattenstånd och årliga minima. Vid slutet av seklet nås nivåer som ligger

Lake Mälaren

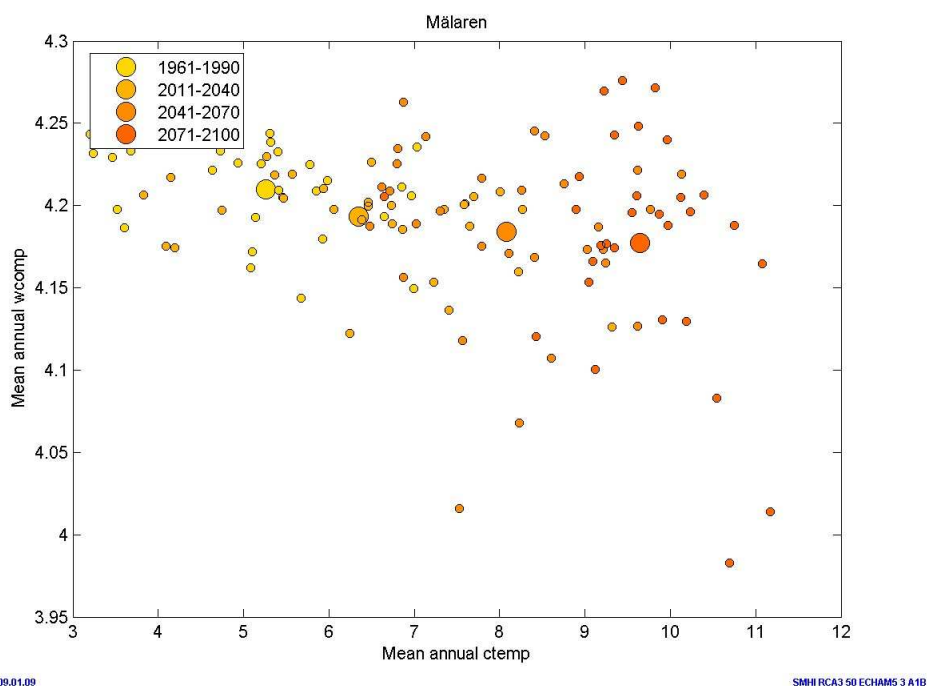


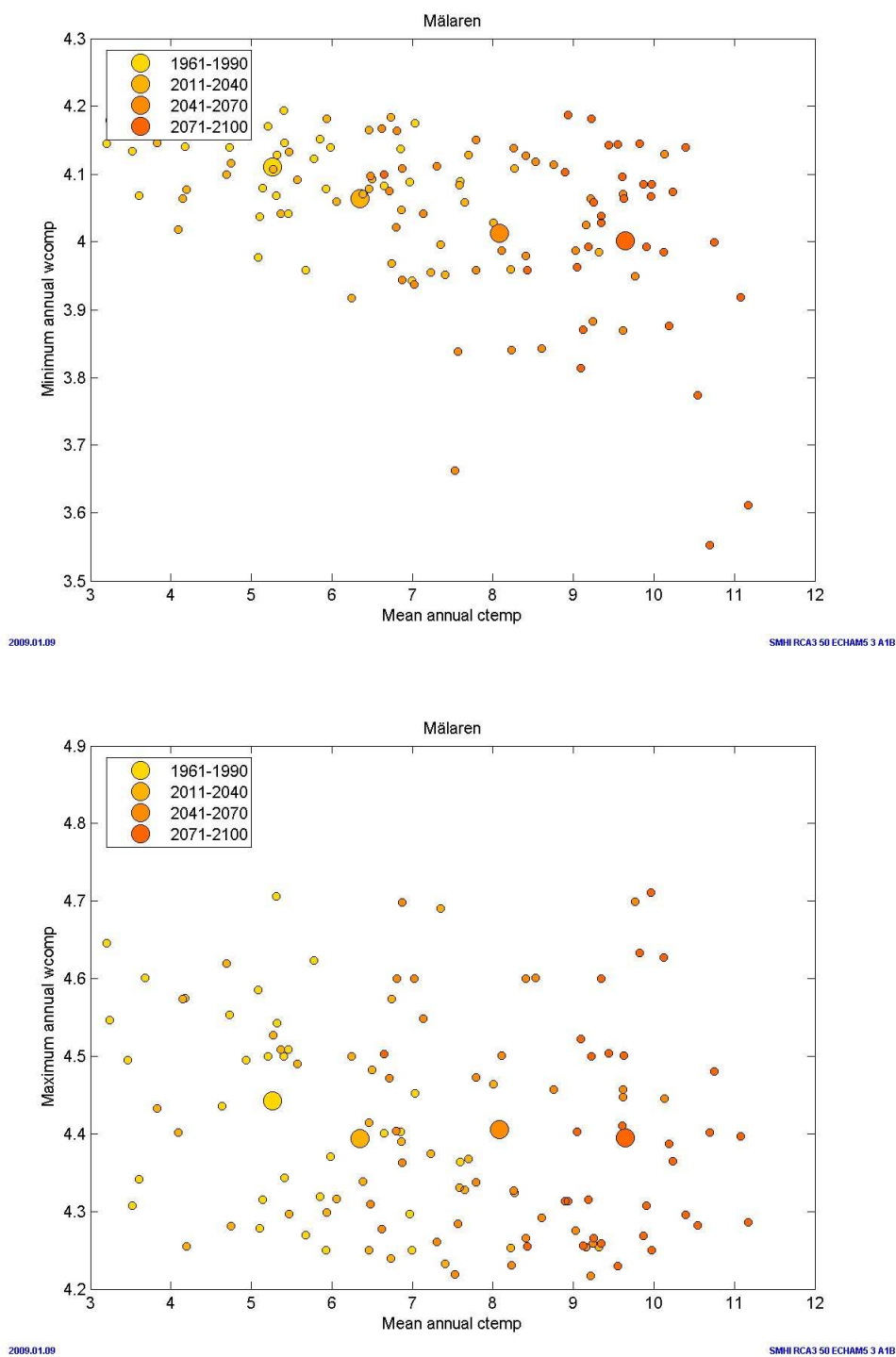
Figur 5: Framtida utveckling av medelhögvattenstånd (=medelvärde av årsmaxima över en längre period) och medellågvattenstånd (=medelvärde av årsminima över en längre period) enligt RCAE53.

drygt en halv meter under dagens medellågvattenstånd. Som jämförelse kan nämnas att det lägsta historiska observerade vattenståndet är 3.72 m, alltså knappt tre decimeter under observerat medellågvattenstånd (Sjöfartsverket, 2008).

Medelhögvattenståndet sjunker svagt men spridningen i årsmaxima motsvarar den i dagens klimat. Resultaten från övriga modellkombinationer överensstämmer på det hela taget med resultatet från RCAE53, se Appendix 4.

I Tabell 4 sammanfattas i siffror de resultat som visas i diagram av typ Figur 6. Värdena på tillrinningar och förändringar i Tabell 4 motsvarar således de stora cirklarna i Figur 6 och motsvarande figurer i Appendix 4.





Figur 6: Kontinuerlig beräkning av vattenstånd i Mälaren som funktion av årsmedeltemperatur under de olika klimatperioderna enligt RCAE53. De större cirklarna är medelvärden för perioderna och de mindre representerar enskilda år. Övre diagram (föregående sida): medelnivå, mittdiagram: minimal nivå, nedre diagram: maximal nivå.

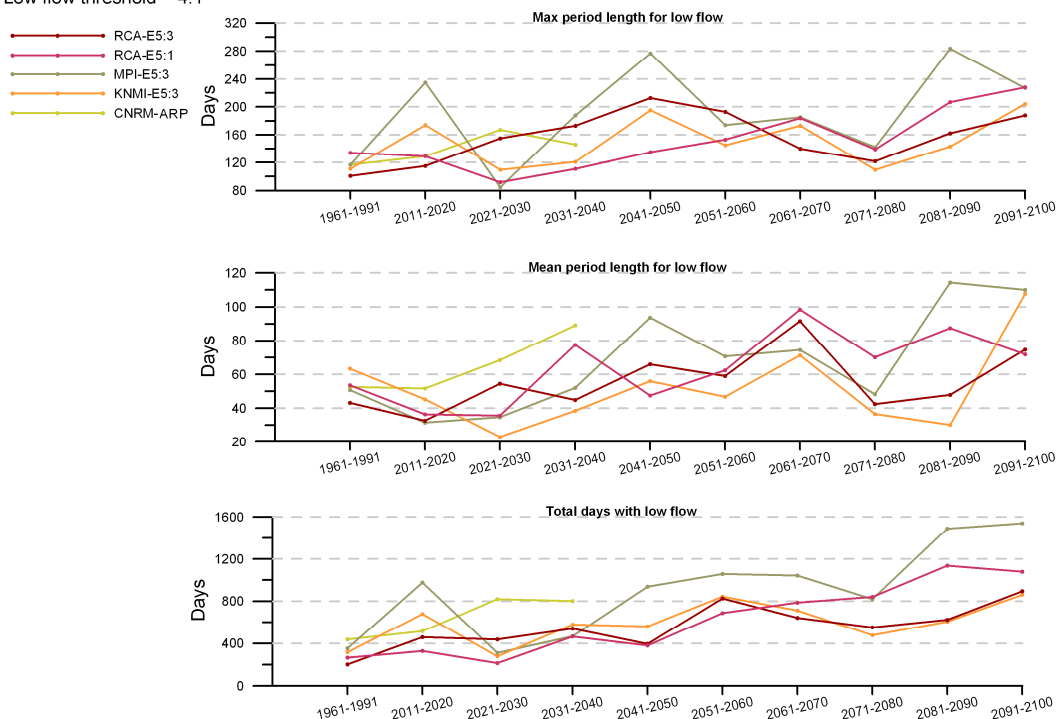
Tabell 4: För RP: medelvattenstånd (MEDEL), medellågvattenstånd (LÅG) och medelhögvattenstånd (HÖG) (cm) under perioden (årsmedelvärden). För FP1-FP3: skillnad jämfört med RP.

	LÅG				MEDEL				HÖG			
	RP	FP1	FP2	FP3	RP	FP1	FP2	FP3	RP	FP1	FP2	FP3
RCAE51	410	-2	-9	-20	420	0	-2	-6	441	-2	-3	-2
RCAE53	411	-5	-10	-11	421	-2	-3	-3	444	-5	-4	-5
MPI	408	-7	-14	-21	421	-3	-5	-9	446	-9	-8	-12
KNMI	408	-4	-8	-8	420	-2	-2	-2	440	-2	1	2
CNRM	405	-5			419	-1			436	1		

Lågvatten

Eftersom det tydligaste resultatet från föregående sektion är en ökad frekvens av låga vattennivåer har även en tröskelbaserad analys av låga vattenstånd genomförts. Som tröskelvärde har använts 4.1 m, alltså beräknat medellågvattenstånd i dagens klimat. I analysen har för framtida 10-årsperioder beräknats förändringar av dels det totala

Lake Mälaren, scenario A1b
Low flow threshold = 4.1



Figur 7: Övre diagram: maximal längd av period under dagens medellågvattenstånd. Mittdiagram: genomsnittlig längd av period under dagens medellågvattenstånd. Nedre diagram: totala antalet dagar (under 10-årsperioden) med en nivå under dagens medellågvattenstånd.

antalet dagar under denna nivå, dels medelvärde och maximalt värde för längden av perioder av underskridande.

Resultatet visas i Figur 7. Fram till mitten av seklet syns en relativt begränsad ökning av det totala antalet dagar med lågvatten, men både medelvärdet och framför allt den maximala längden av lågvattenperioder ökar tydligt. Den maximala längden har i genomsnitt nästan fördubblats från dagens värde. Vid slutet av seklet har samtliga tre variabler ökar kraftigt.

I Tabell 5 redovisas värdena för den maximala längden av lågvattenperioder.

Tabell 5: Maximal längd av period under dagens medellågvattenstånd (d).

<u>Period</u>	<u>R3E53A1b</u>	<u>R3E513A1b</u>	<u>KNMI</u>	<u>MPI</u>	<u>CNRM</u>
1961-1991	101	134	111	117	117
2011-2020	115	129	174	235	129
2021-2030	155	92	110	85	167
2031-2040	173	111	121	188	146
2041-2050	213	135	195	277	-
2051-2060	193	153	145	174	-
2061-2070	140	184	173	185	-
2071-2080	122	139	110	142	-
2081-2090	162	207	143	284	-
2091-2100	188	228	204	227	-

SLUTSATSER

- ❖ Säsongsdynamiken för tillrinningen till Mälaren förändras. Dagens tydliga vårflödestopp suddas ut och de högsta tillrinningarna kommer i stället att ske under vintern. Den lägsta tillrinningen (sommartid) blir lägre.
- ❖ Maximal 30-dygns tillrinning förblir i stort sett oförändrad. Minimal 30-dygns tillrinning minskar tydligt och i stort sett kontinuerligt under seklet.
- ❖ Variationerna i Mälarens vattenstånd ökar under seklet, främst mot en ökad frekvens av låga nivåer. Medelhögvattennivån sjunker något, medellågvattennivån sjunker kraftigare.
- ❖ Framtida maximala vattenstånd för enskilda år är ungefär desamma som i dagens klimat. Vad gäller framtida minimala vattenstånd indikerar resultaten nivåer under de lägsta som observerats historiskt.
- ❖ Den maximala längden av perioder med en vattennivå under dagens medellågvattenstånd ökar kraftigt redan till mitten av seklet. Även medellängden och det totala antalet dagar med lågvatten ökar kraftigt mot slutet av seklet.

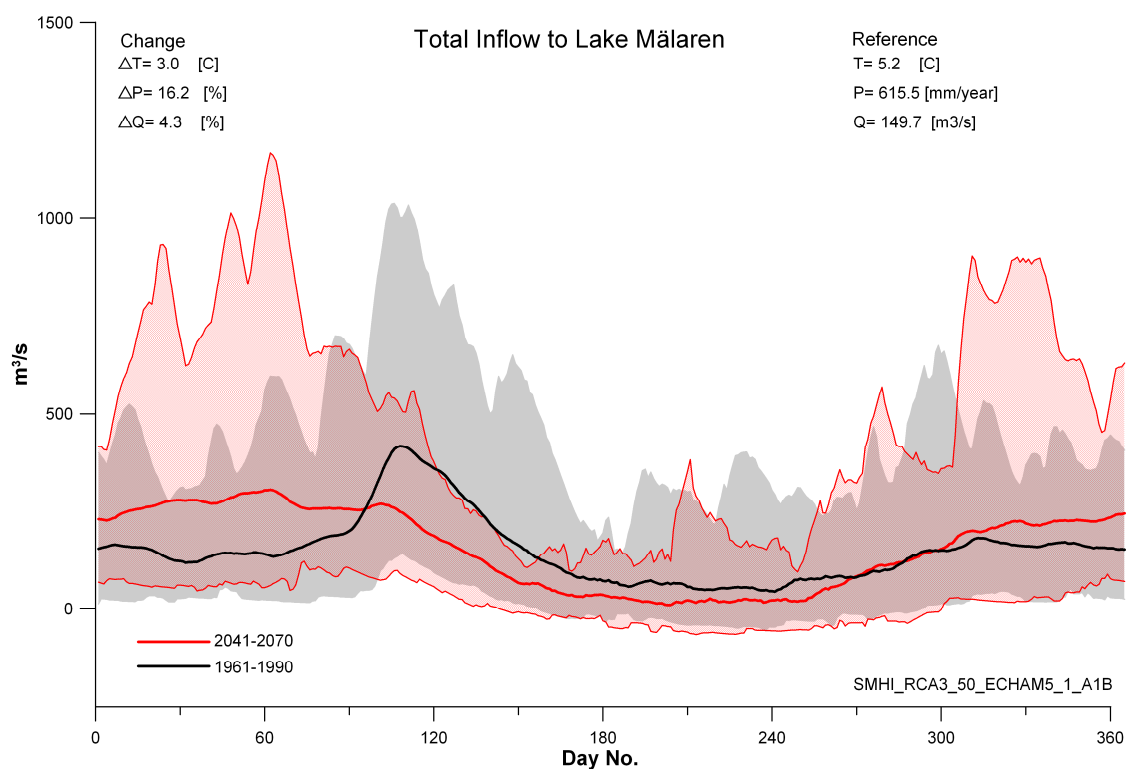
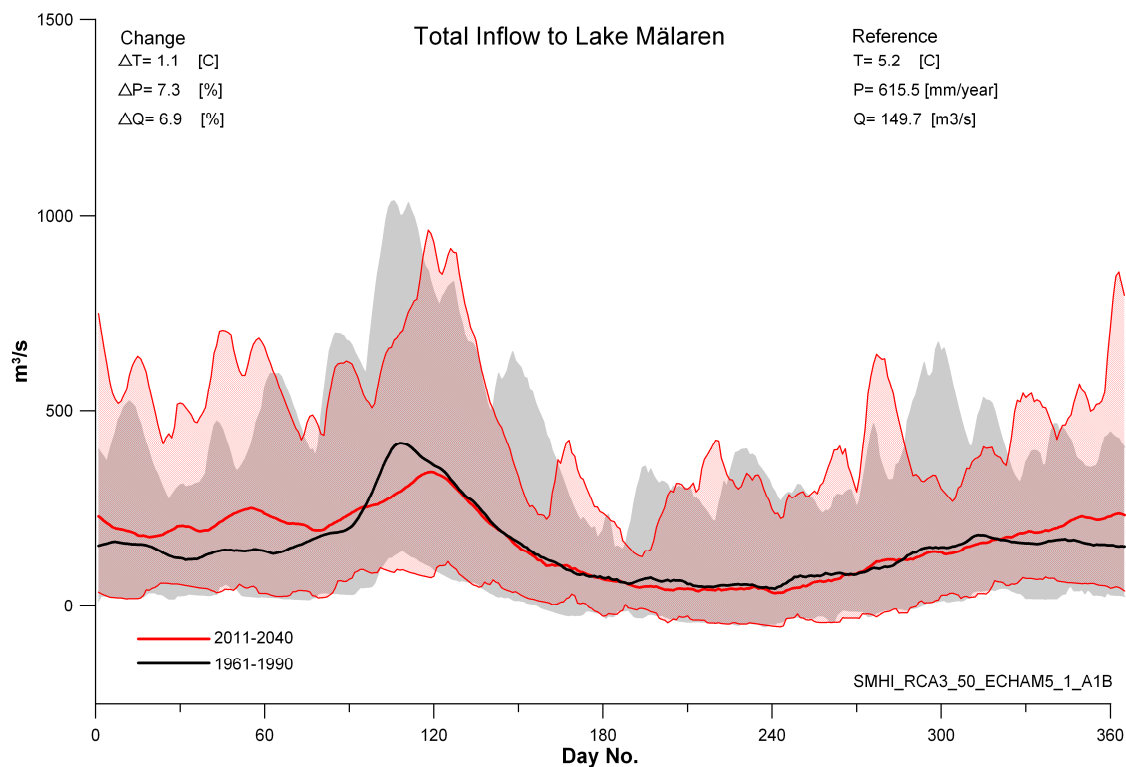
Tackord

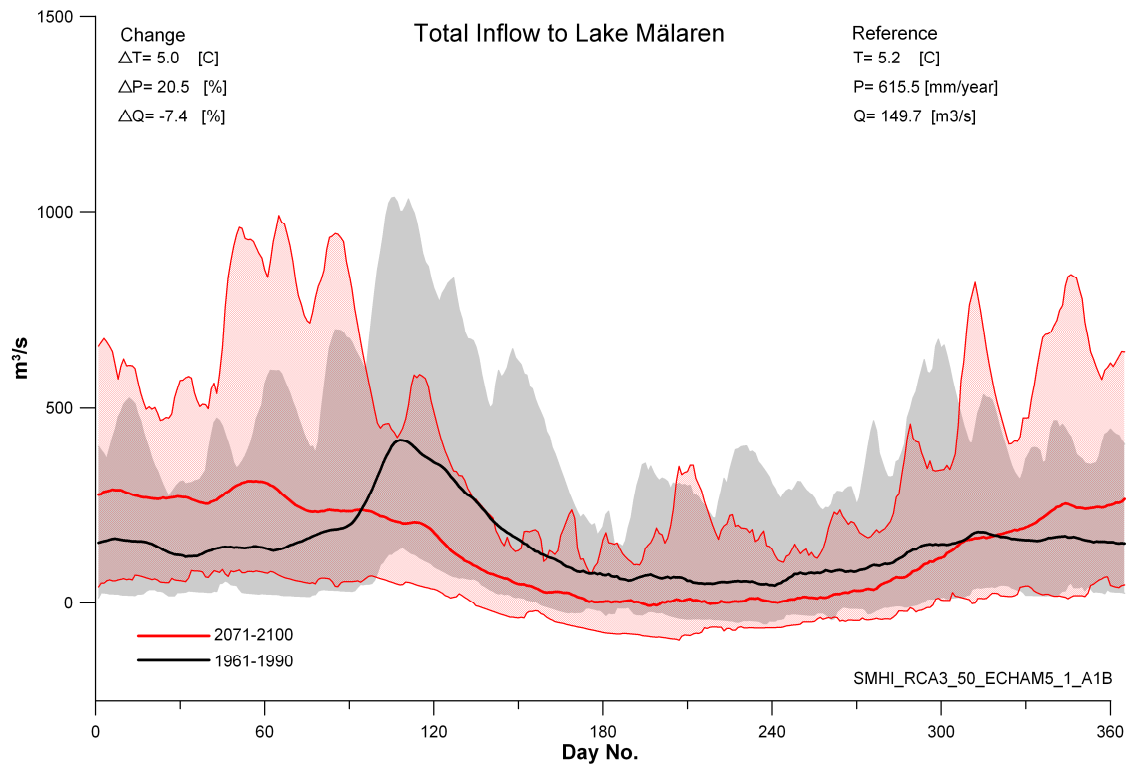
Detta arbete är en del av forskningsprogrammet *SWEdish research programme on Climate, Impacts and Adaptation* (Mistra-SWECIA), finansierat av Mistra (Stiftelsen för Miljöstrategisk Forskning).

Referenser

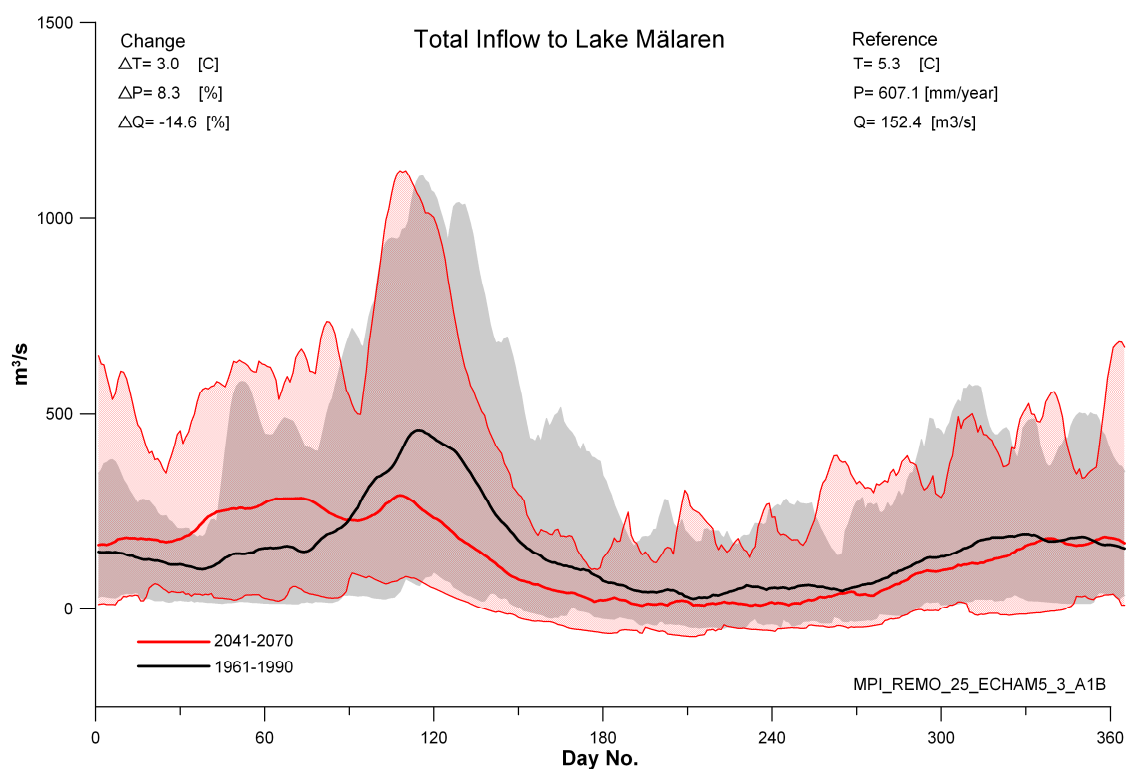
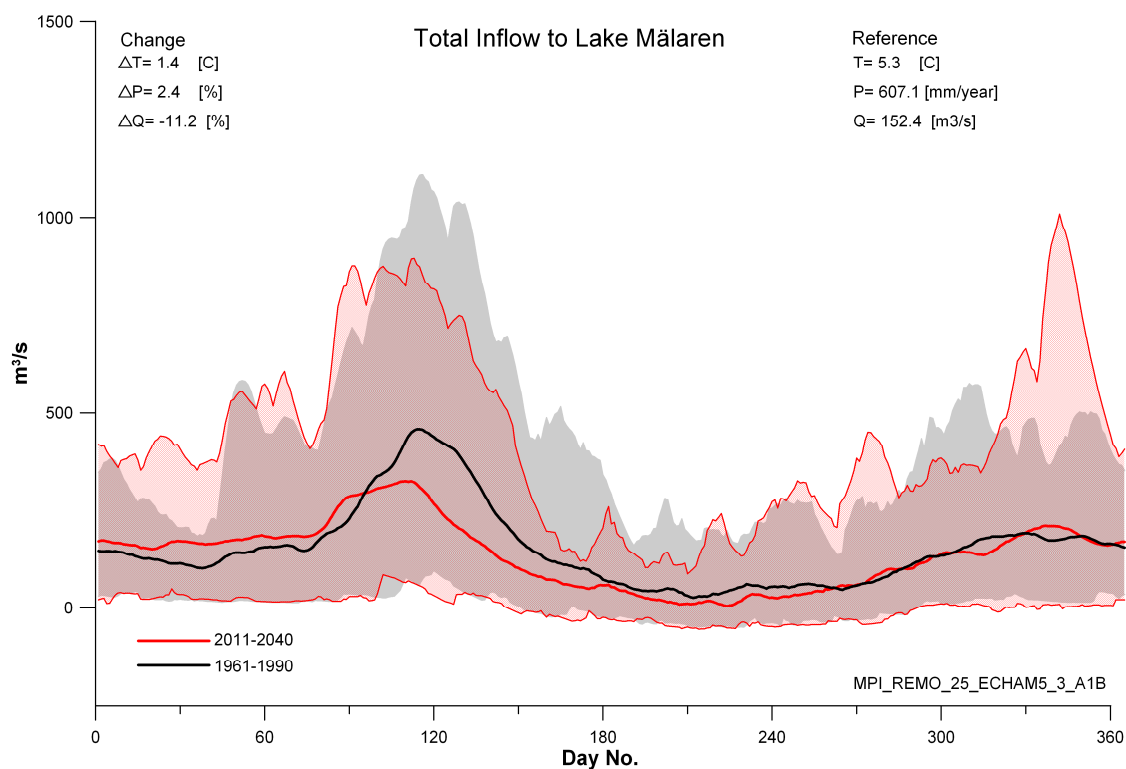
- Andréasson, J., Bergström, S., Carlsson, B., Graham, P and Lindström, G., 2004. Hydrological change – climate change impact simulations for Sweden. *Ambio*, 23:228-234.
- Bergström, S., Hellström, S.-S. and Andréasson, J., 2006. Nivåer och flöden i Vänerns och Mälarens vattensystem – Hydrologiskt underlag till Klimat- och sårbarhetsutredningen. Reports Hydrology, nr. 20, Swedish Meteorological and Hydrological Institute, 601 76 Norrköping, Sweden.
- Hay, L.E., Wilby, R.L. and Leavesley, G.H., 2000. A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States. *J. AWRA*, 36:2.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policymakers. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC.
- Sjöfartsverket, 2008.
http://www.sjofartsverket.se/templates/SFVXPage____1017.aspx
- Yang, W., Andréasson, J., Graham, L.P., Olsson, J., Rosberg, J. and F. Wetterhall, 2009. Improved use of RCM simulations in hydrological climate change impact studies, *Hydrol. Res.*, submitted.

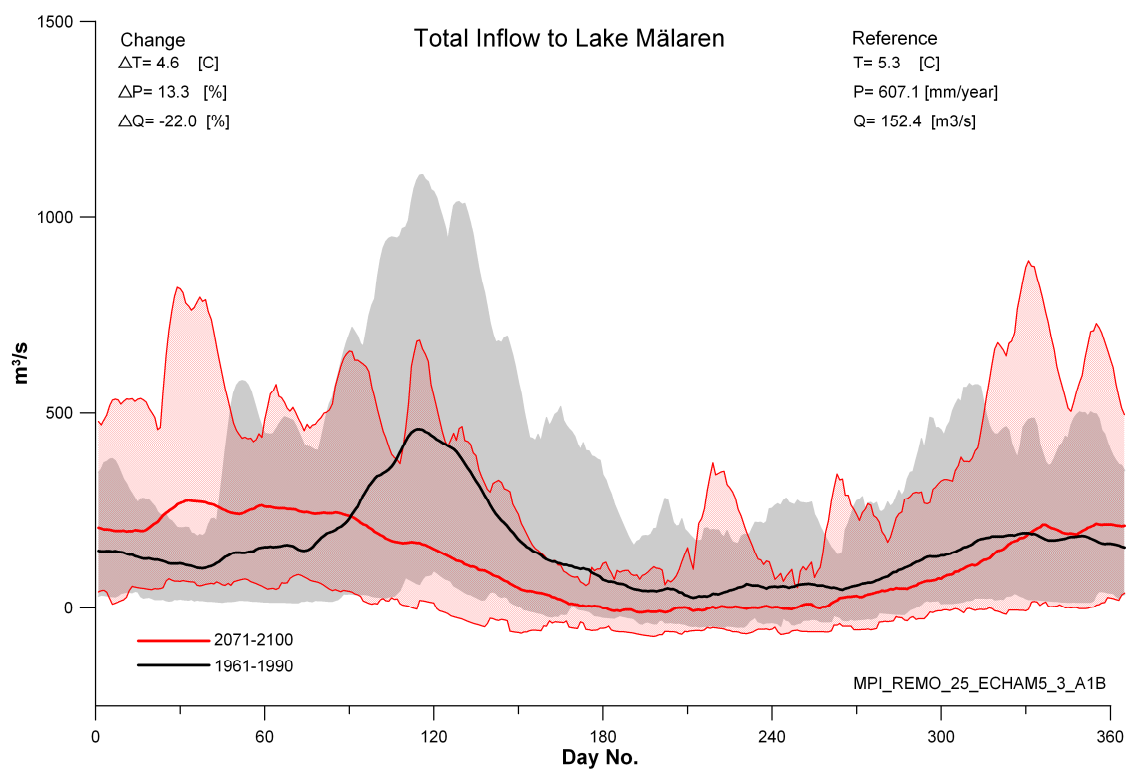
APPENDIX 1 – MODELL: RCA3E51



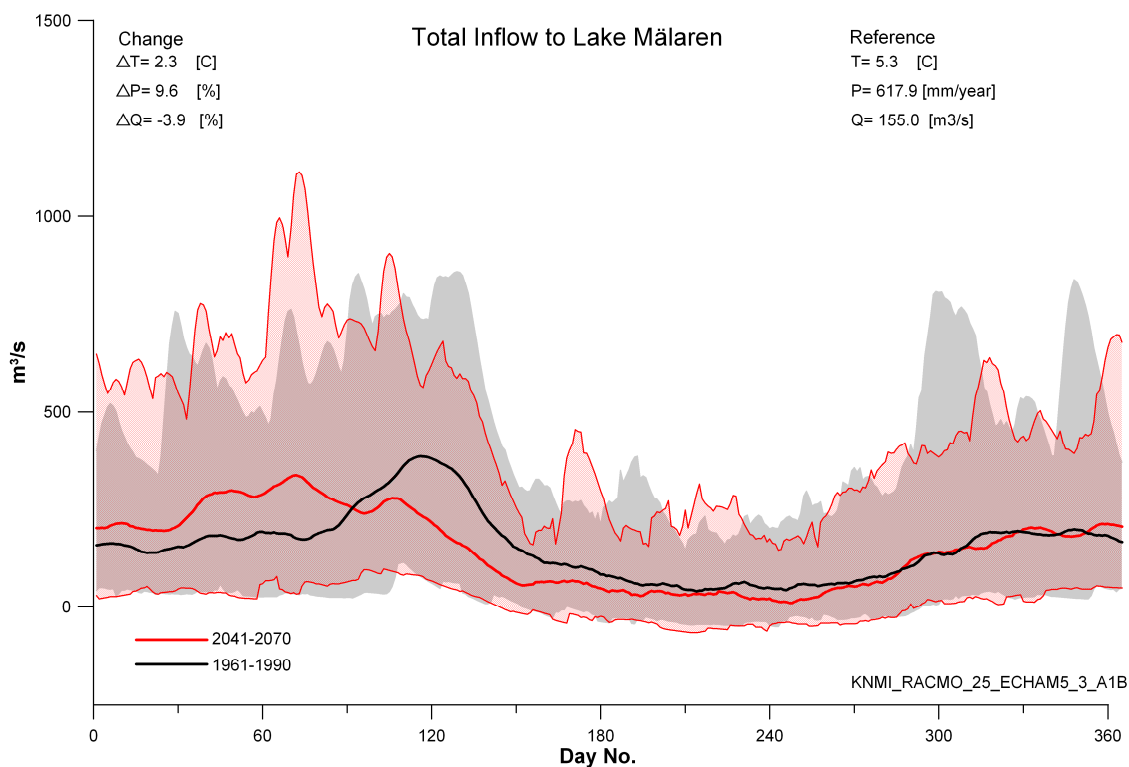
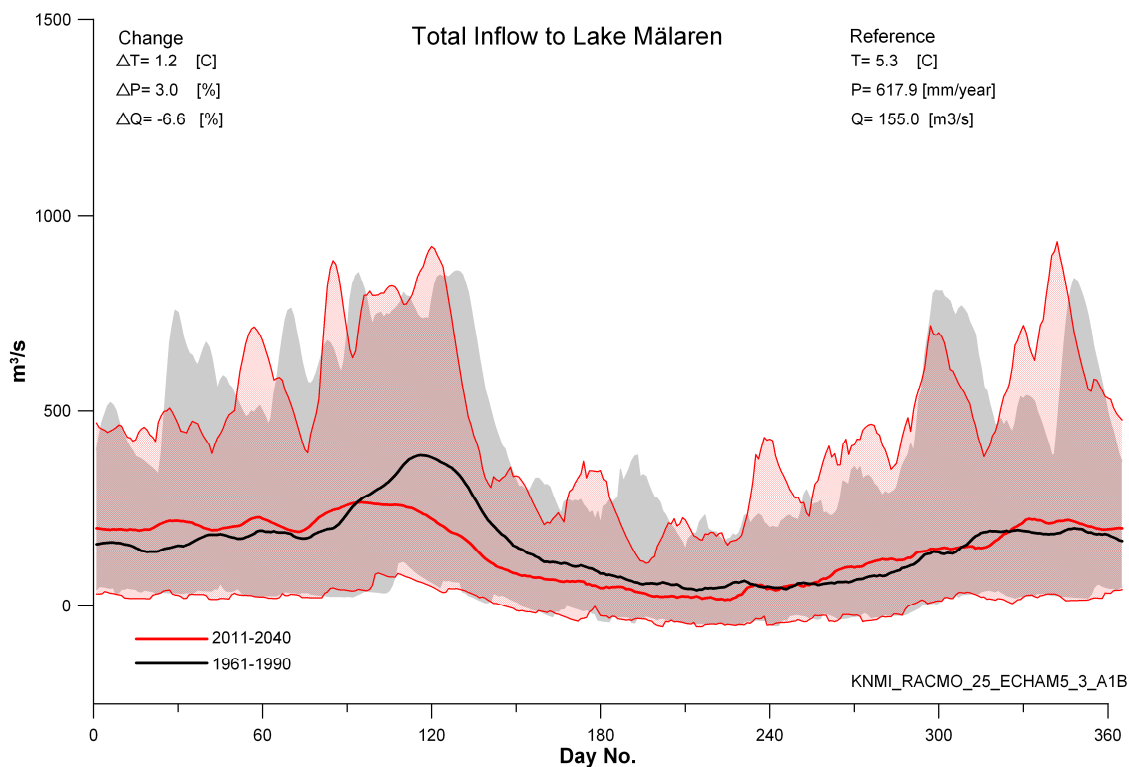


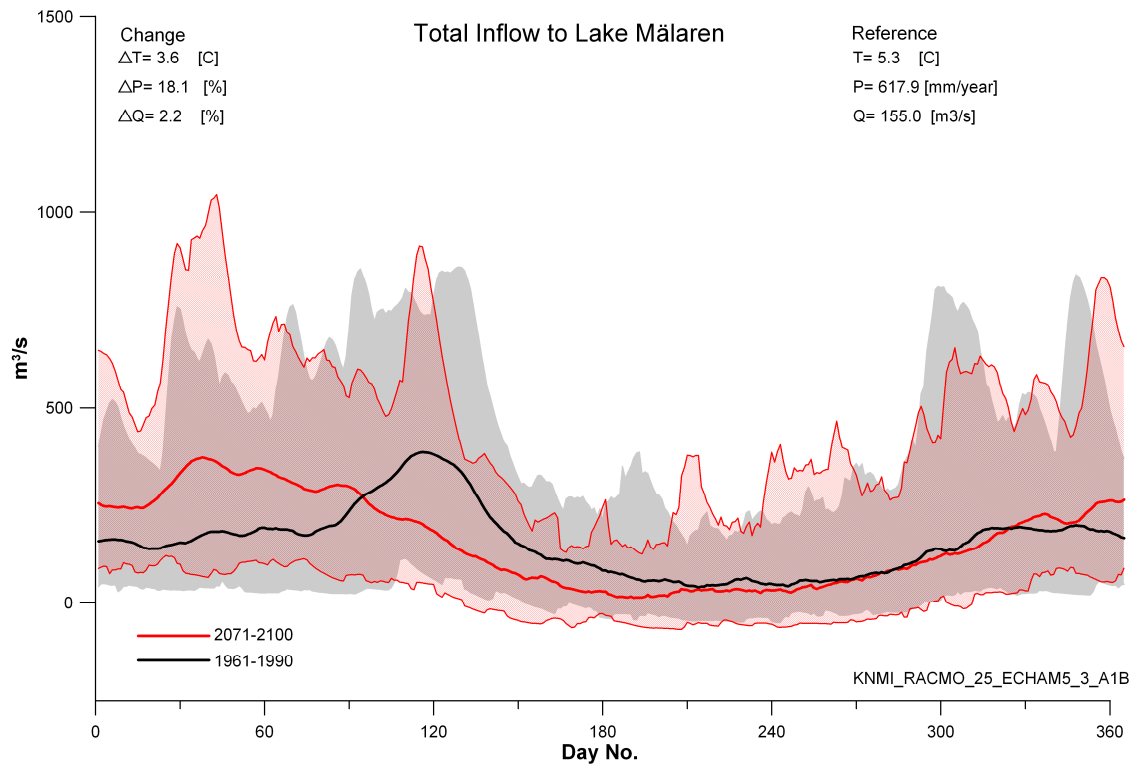
APPENDIX 1 – MODELL: MPI

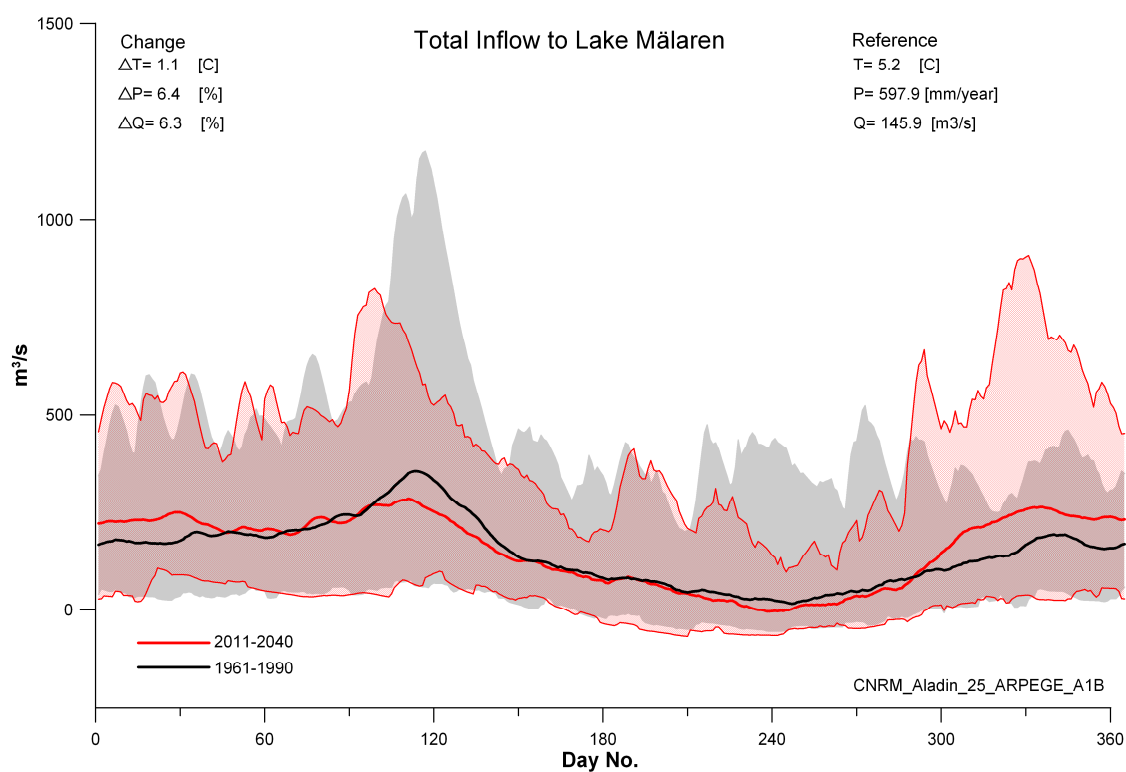




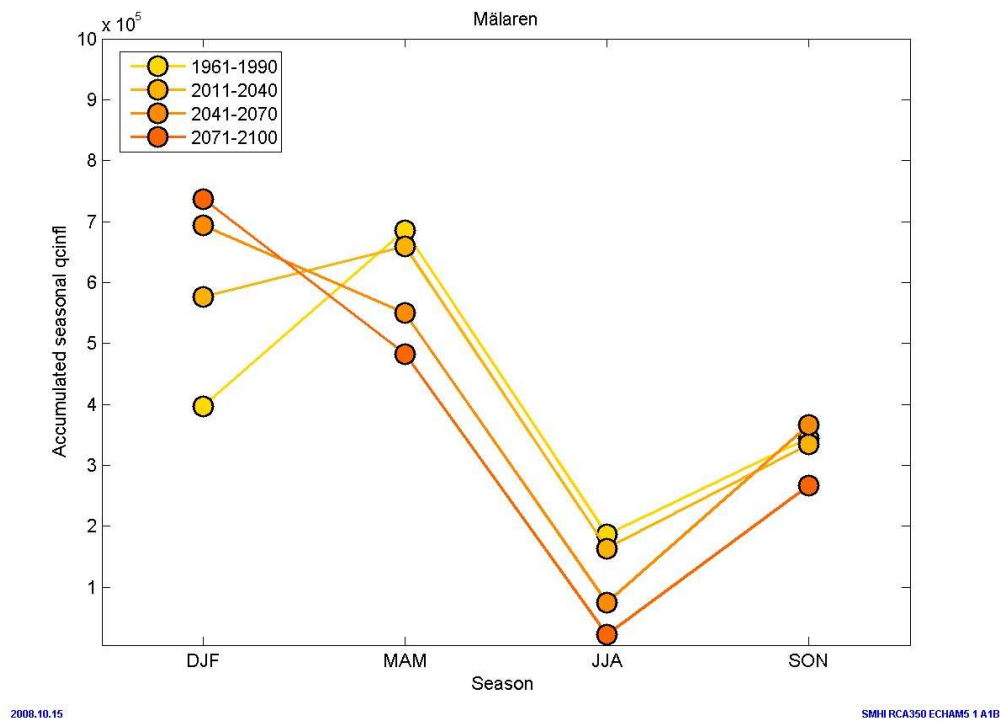
APPENDIX 1 – MODELL: KNMI



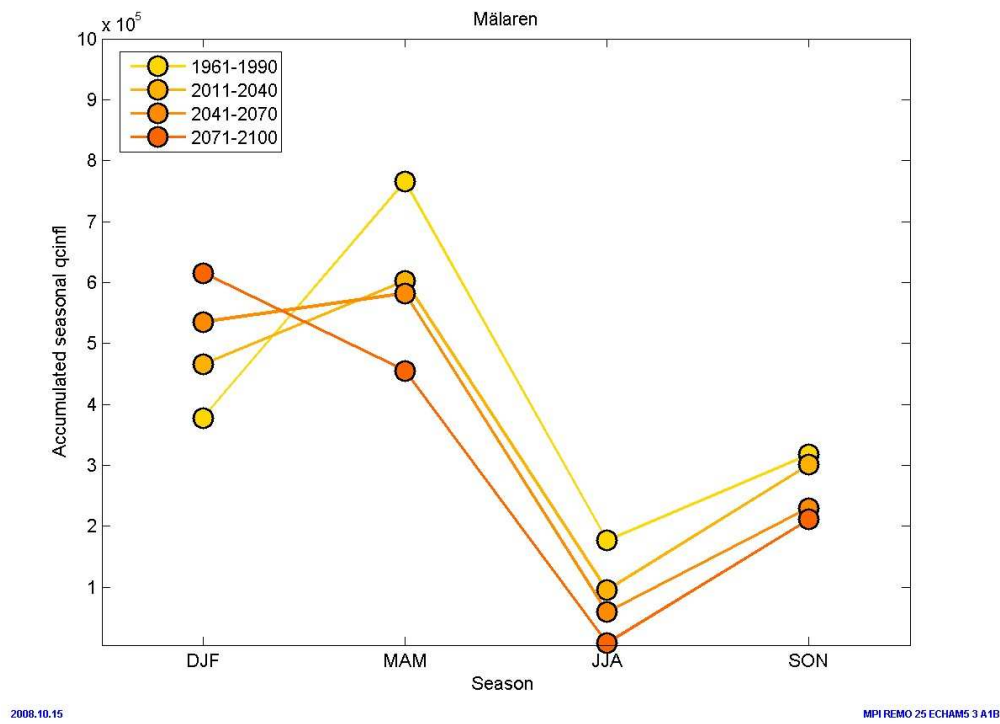


APPENDIX 1 – MODELL: CNRM

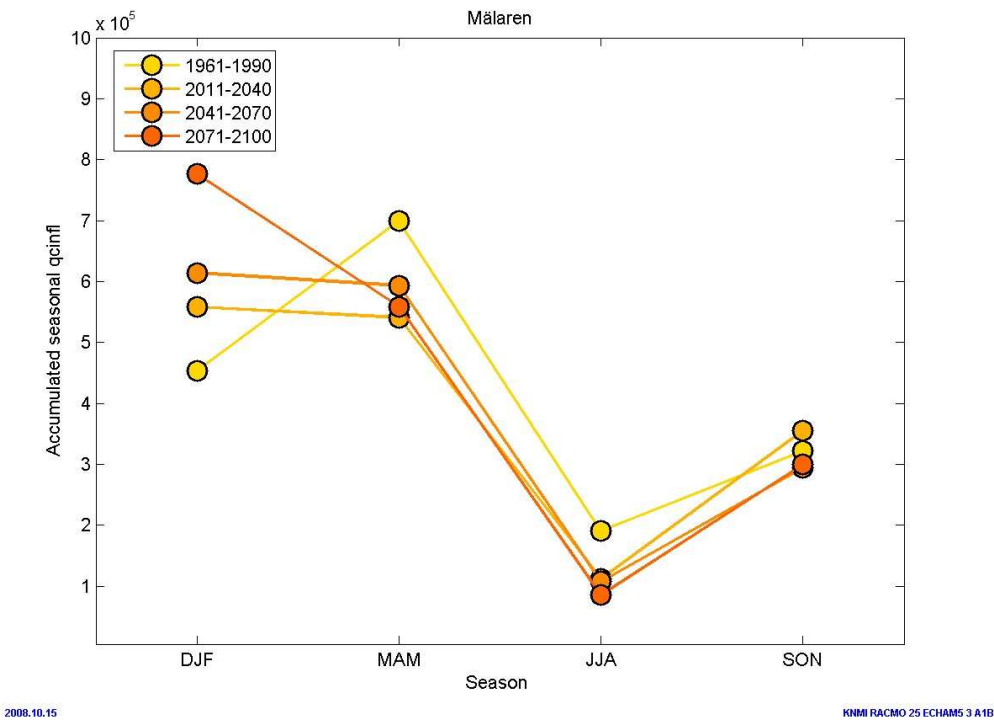
APPENDIX 2 – MODELL: RCA3E51



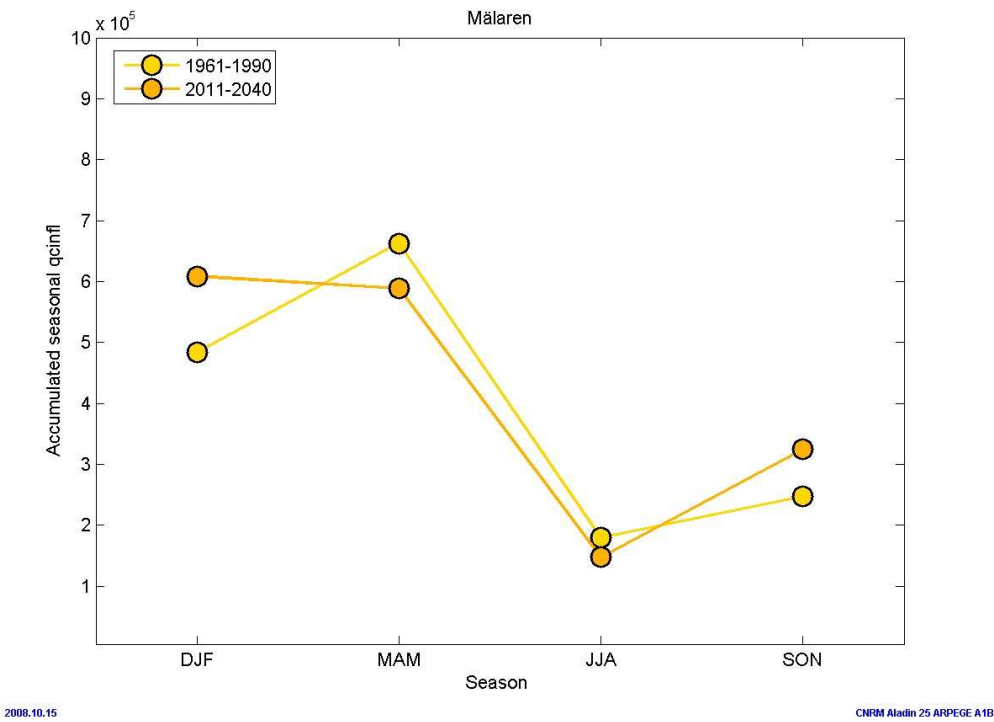
APPENDIX 2 – MODELL: MPI

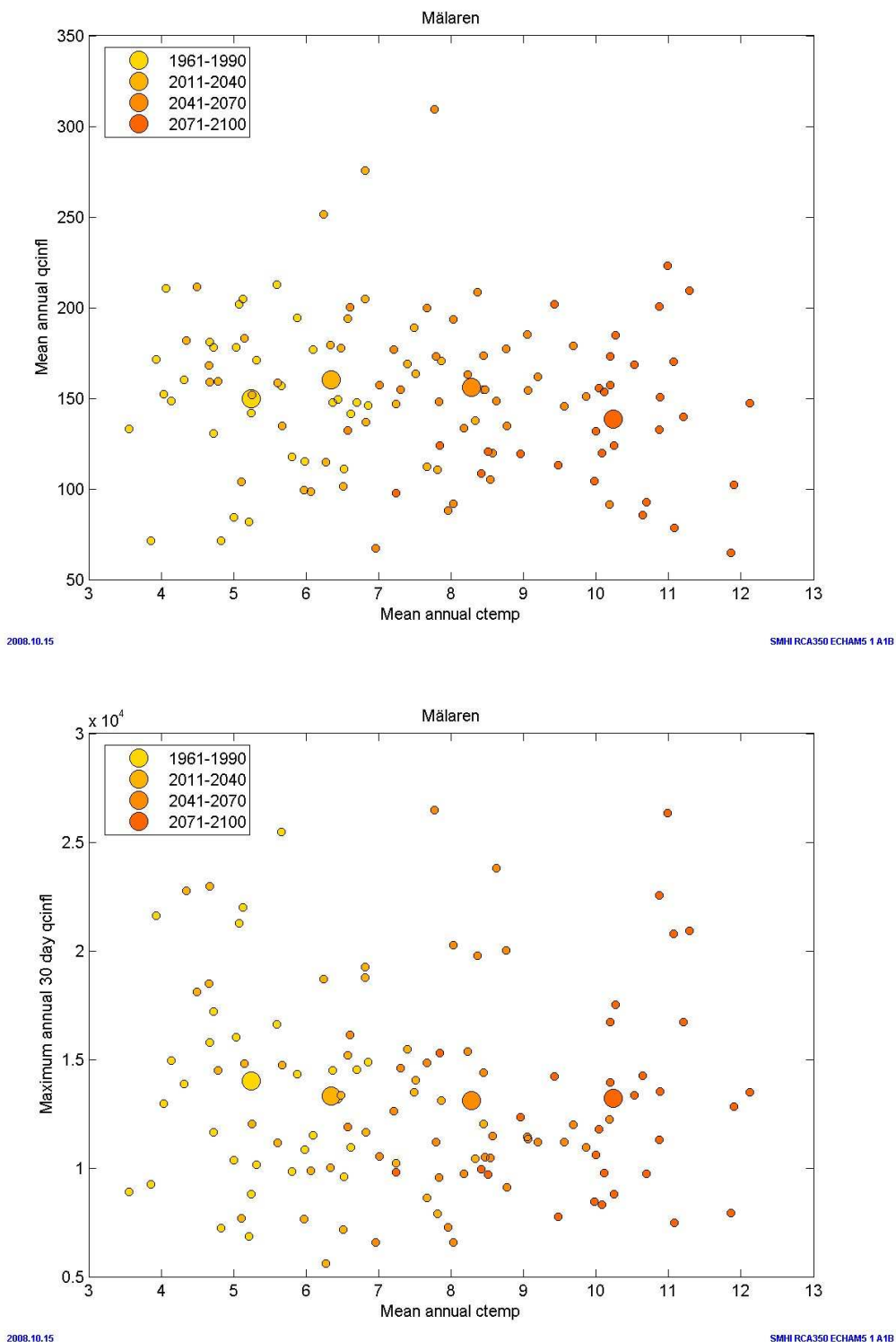


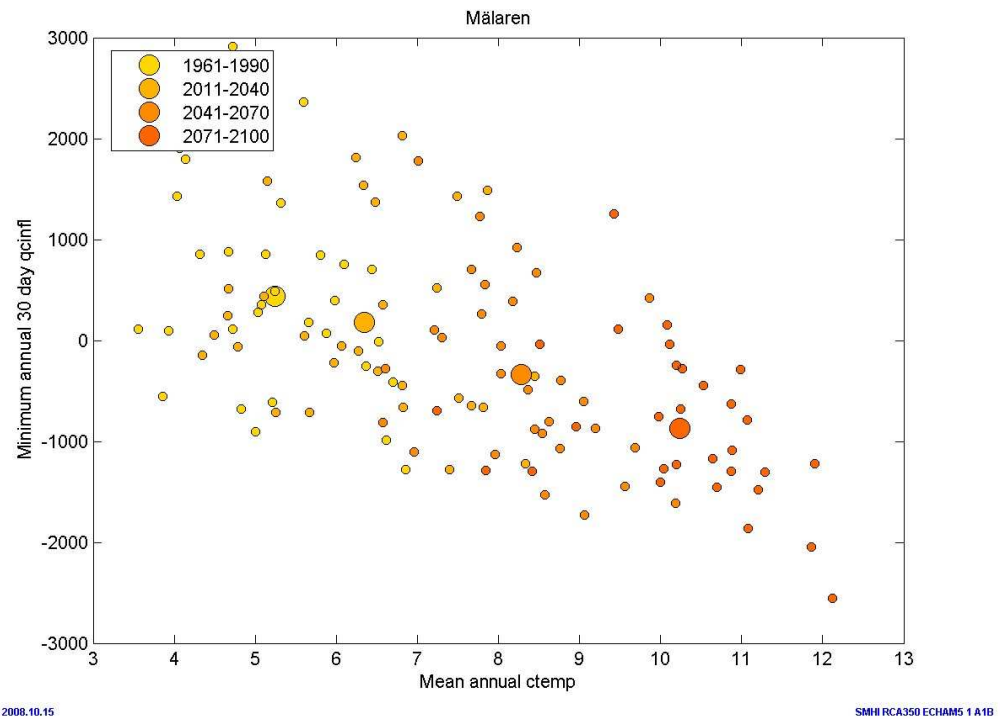
APPENDIX 2 – MODELL: KNMI



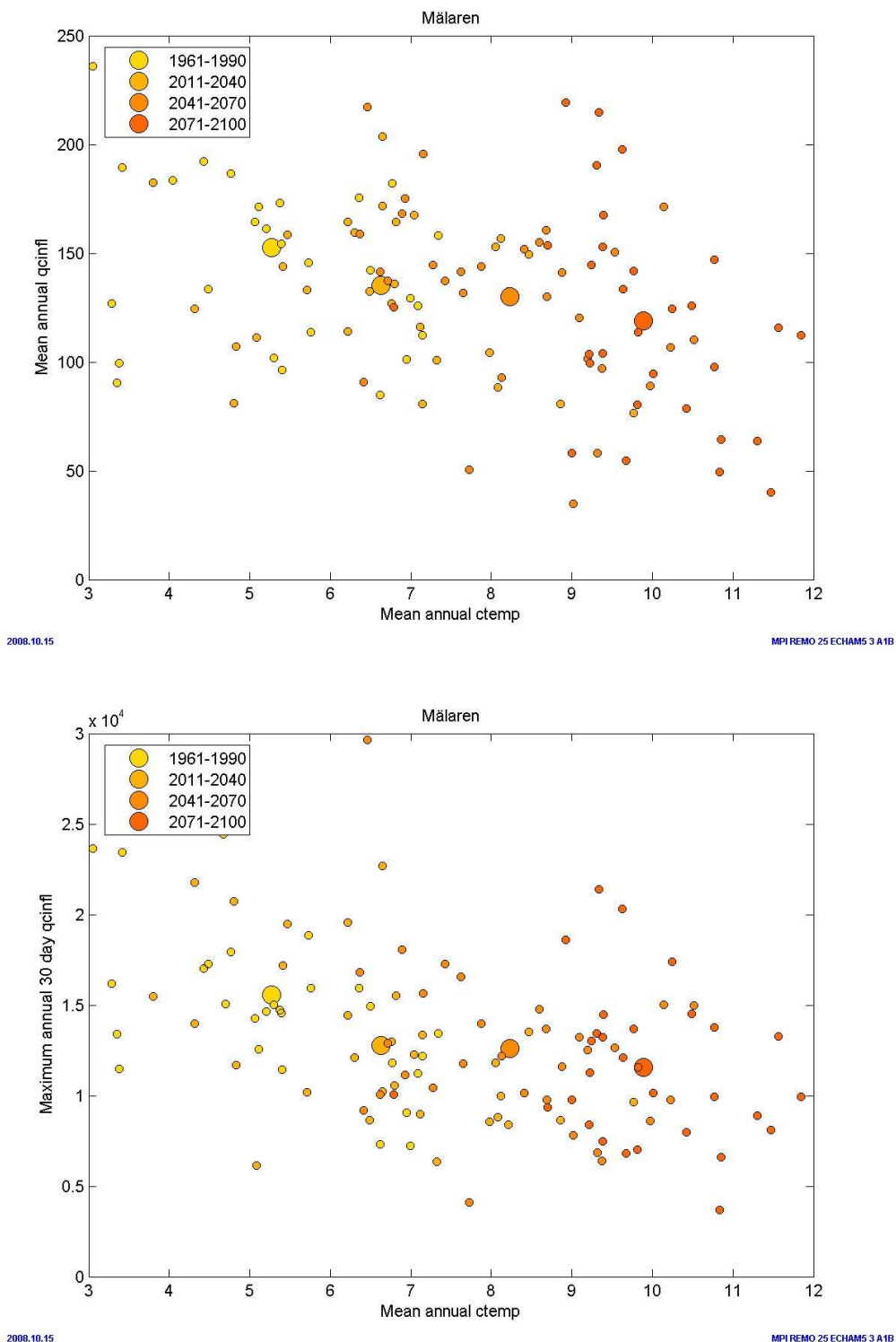
APPENDIX 2 – MODELL: CNRM

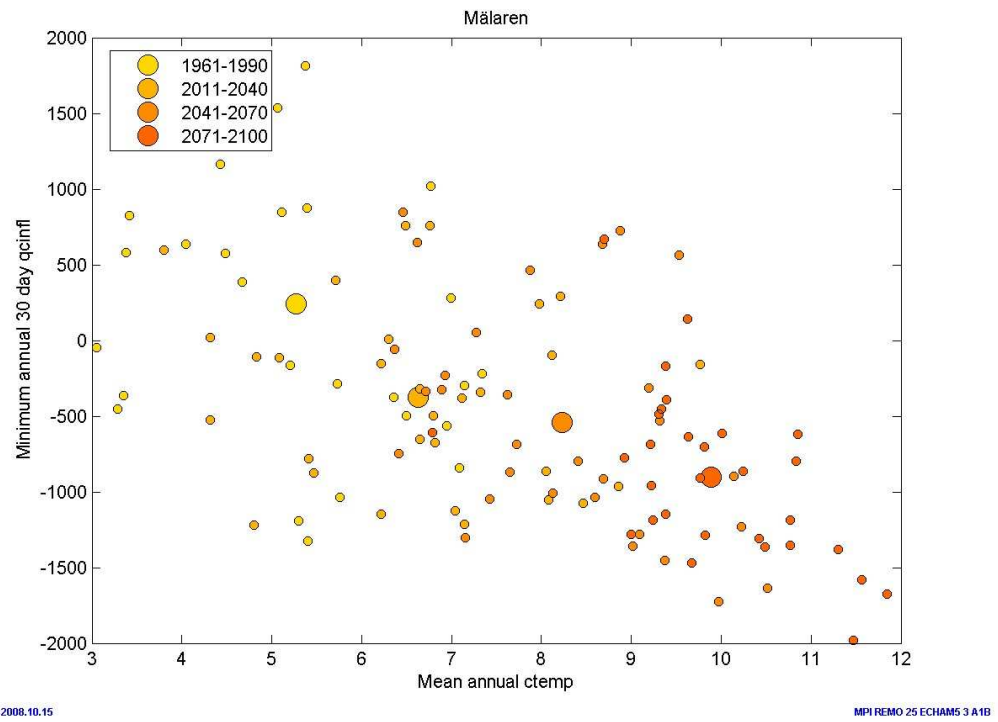


APPENDIX 3 – MODELL: RCA3E51

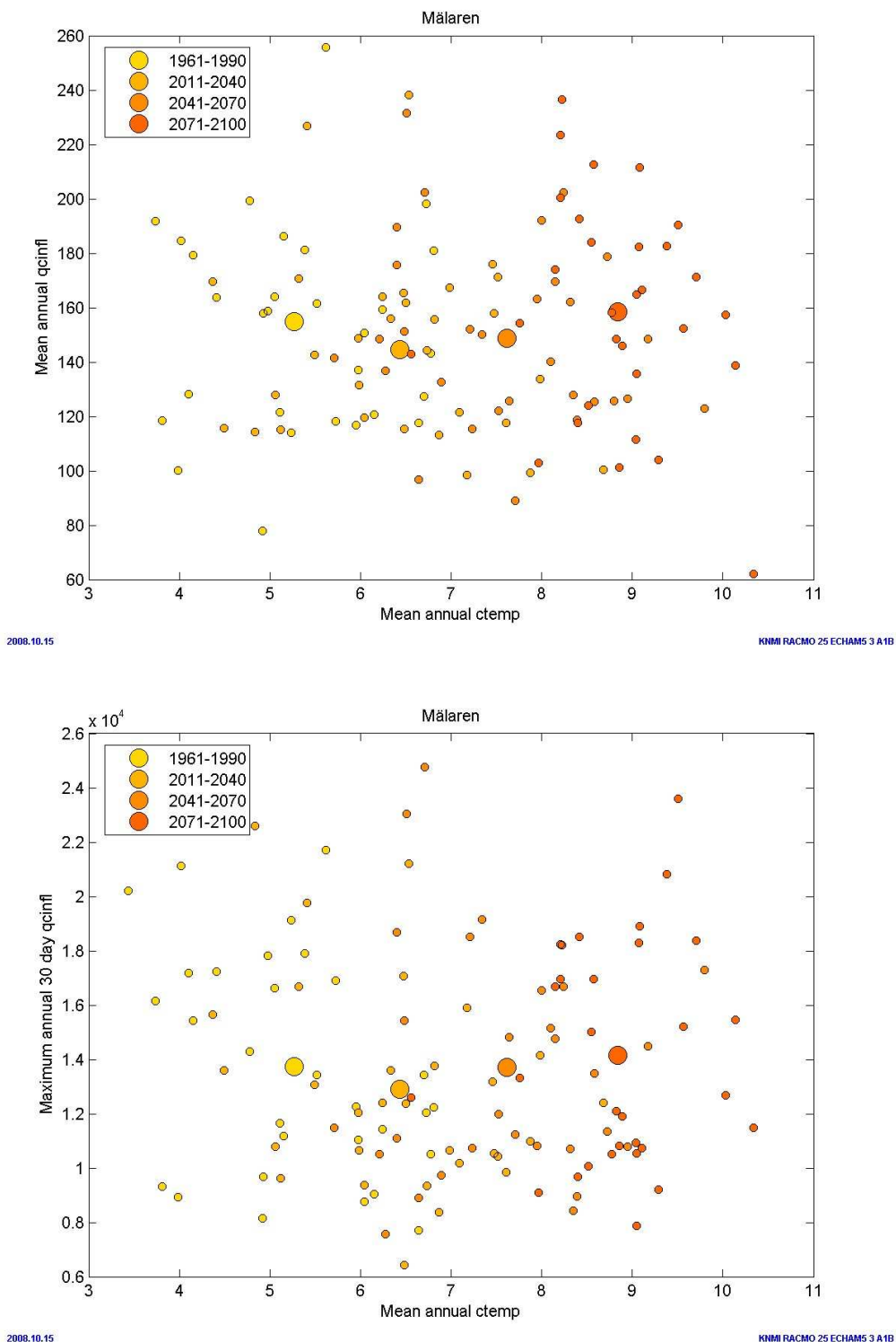


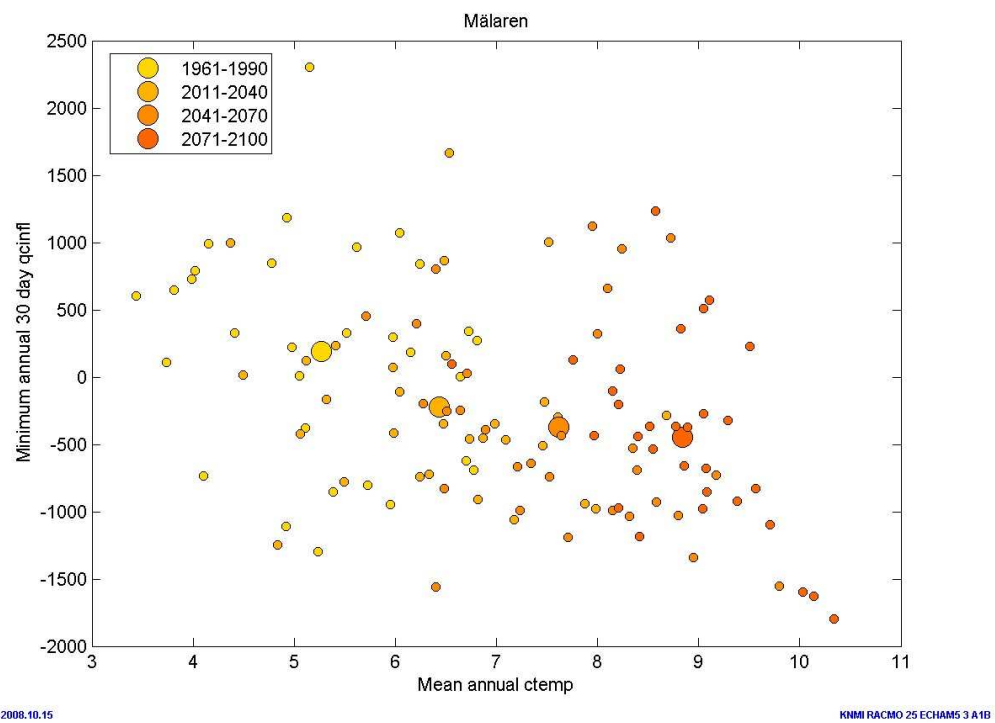
APPENDIX 3 – MODELL: MPI



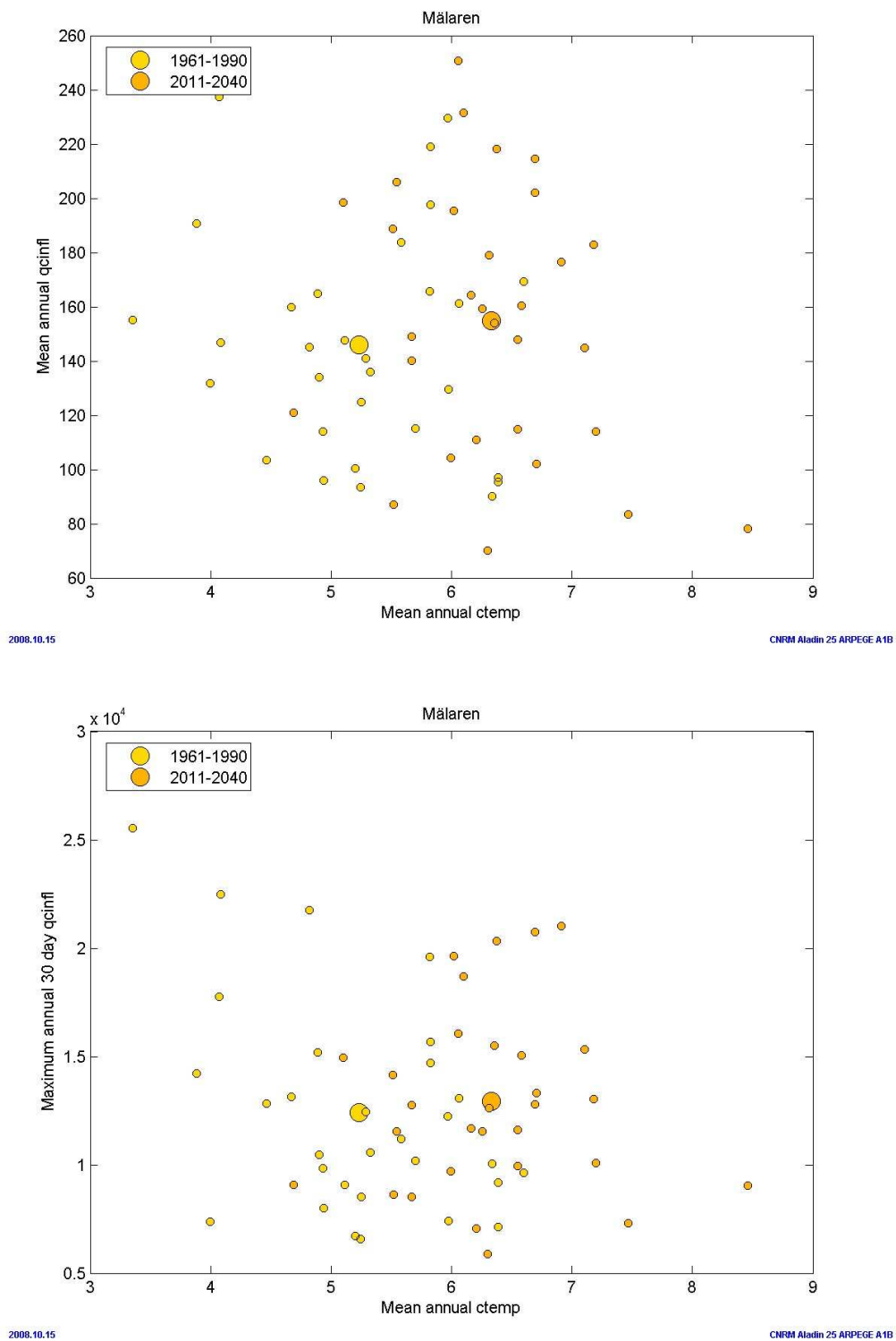


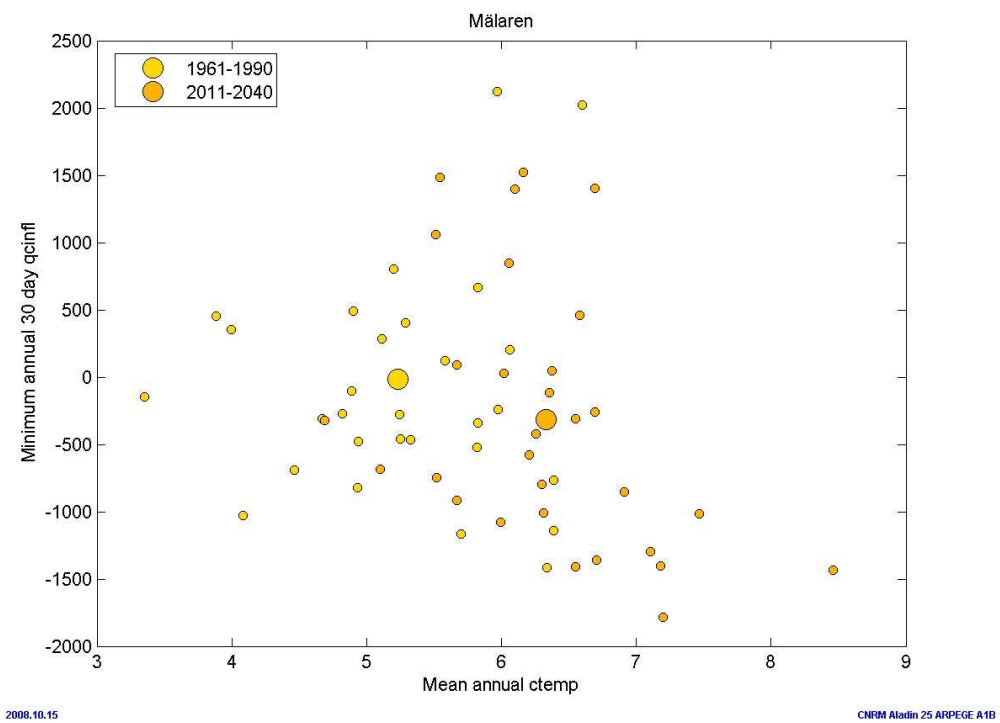
APPENDIX 3 – MODELL: KNMI

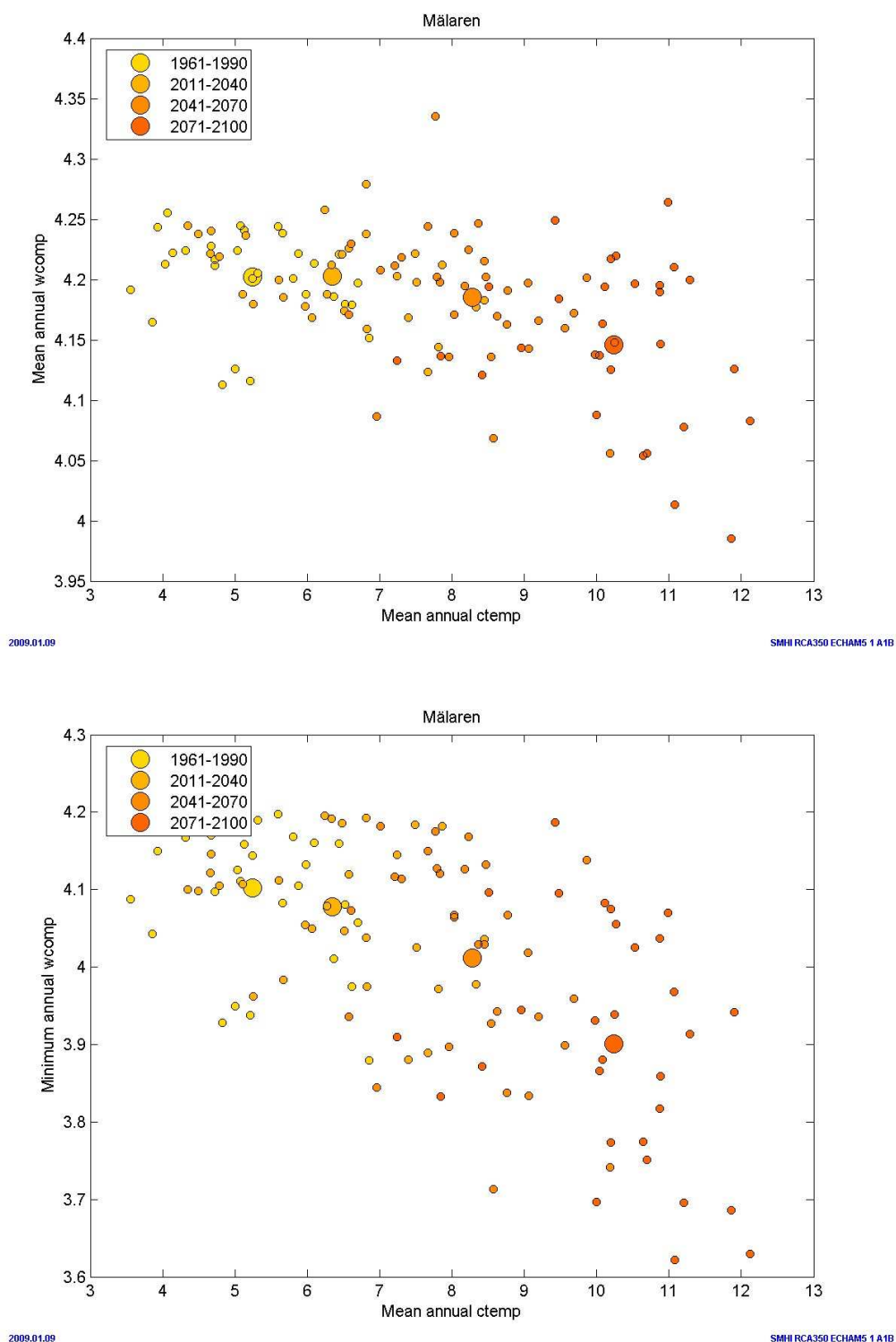


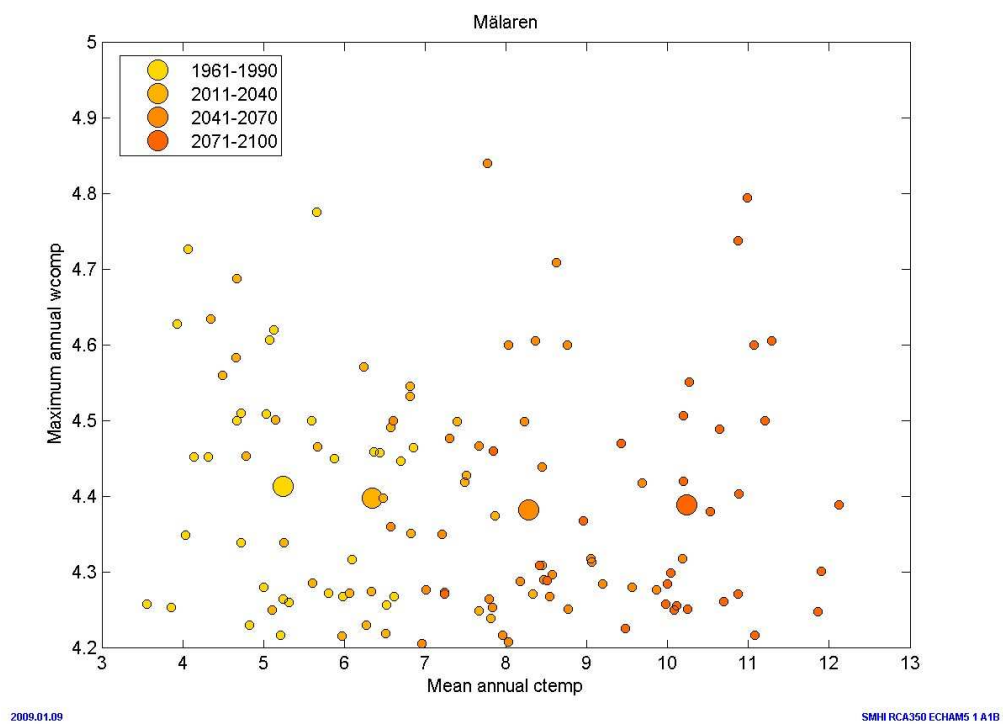


APPENDIX 3 – MODELL: CNRM

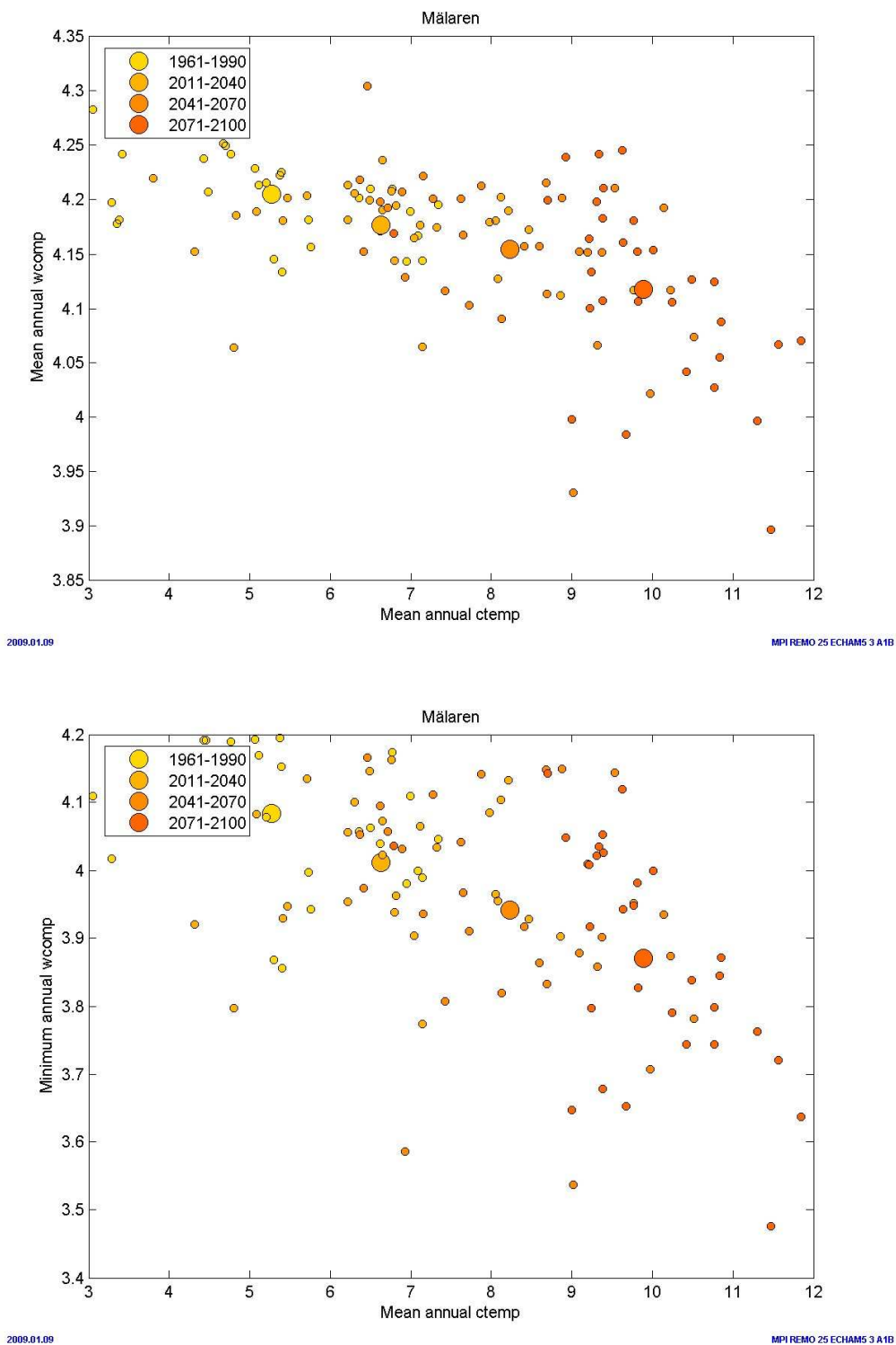


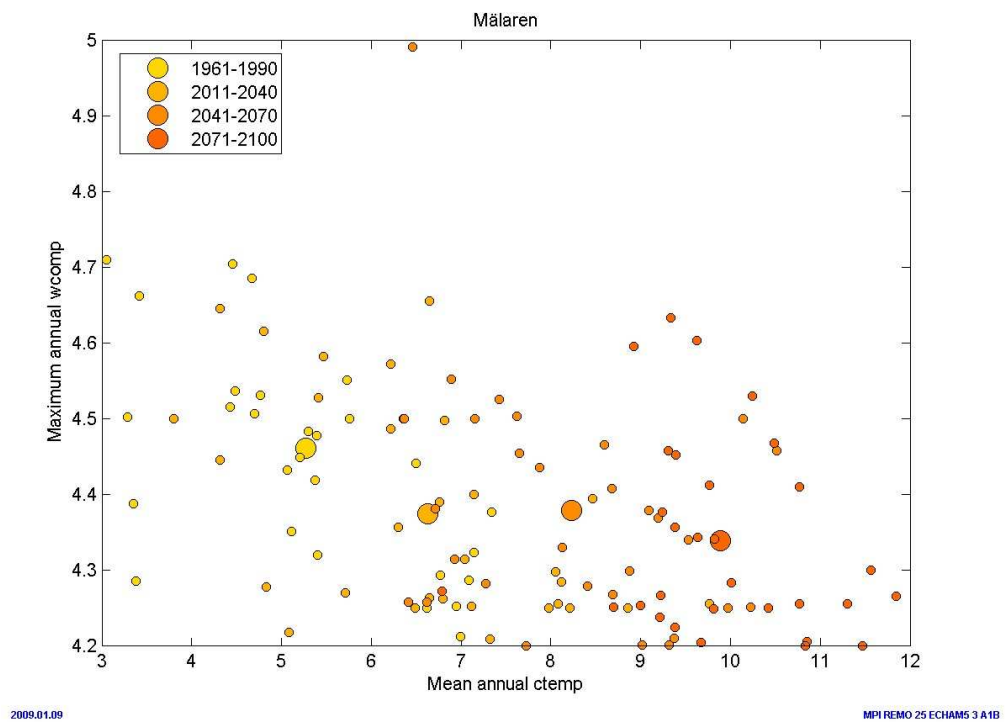


APPENDIX 4 – MODELL: RCA3E51

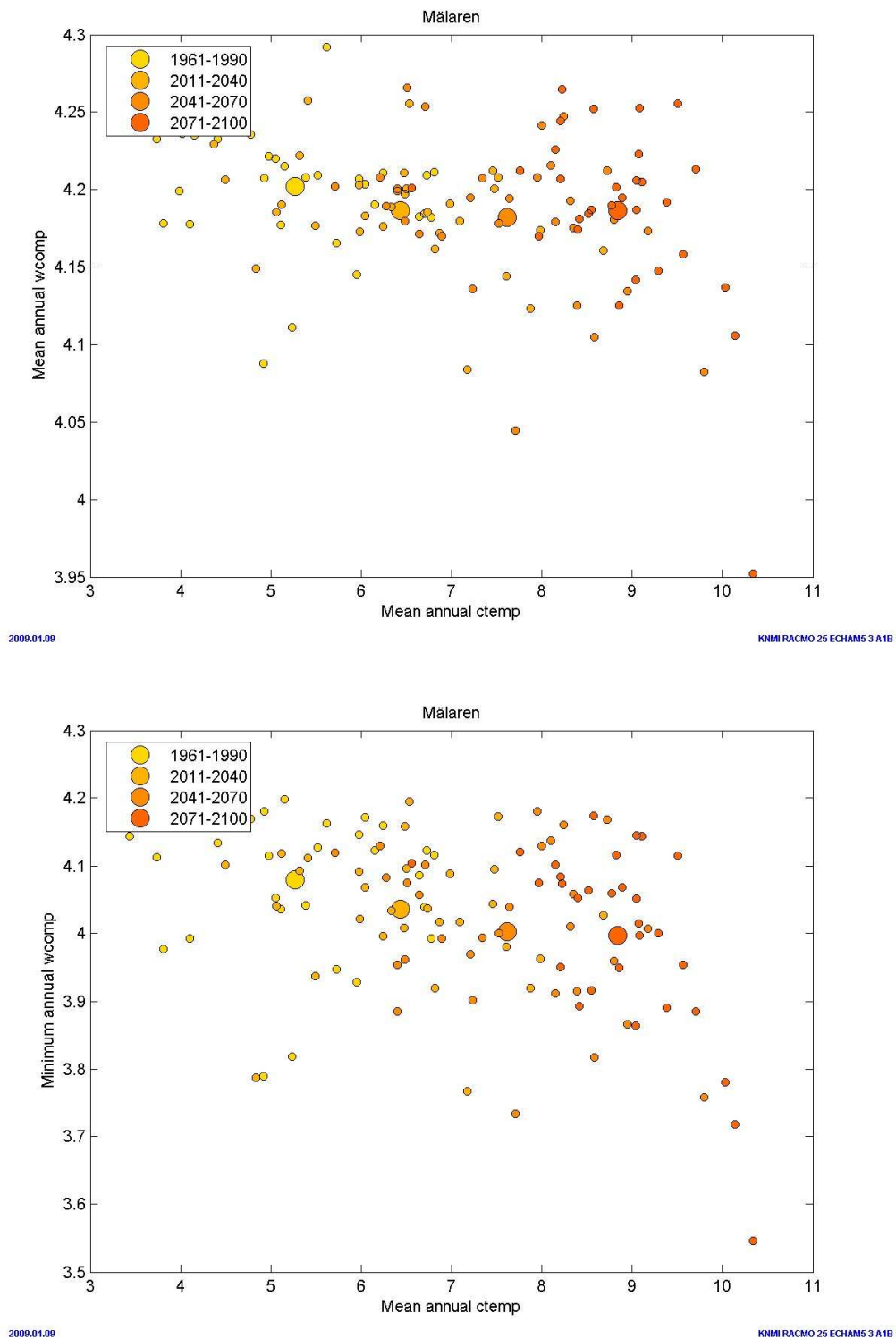


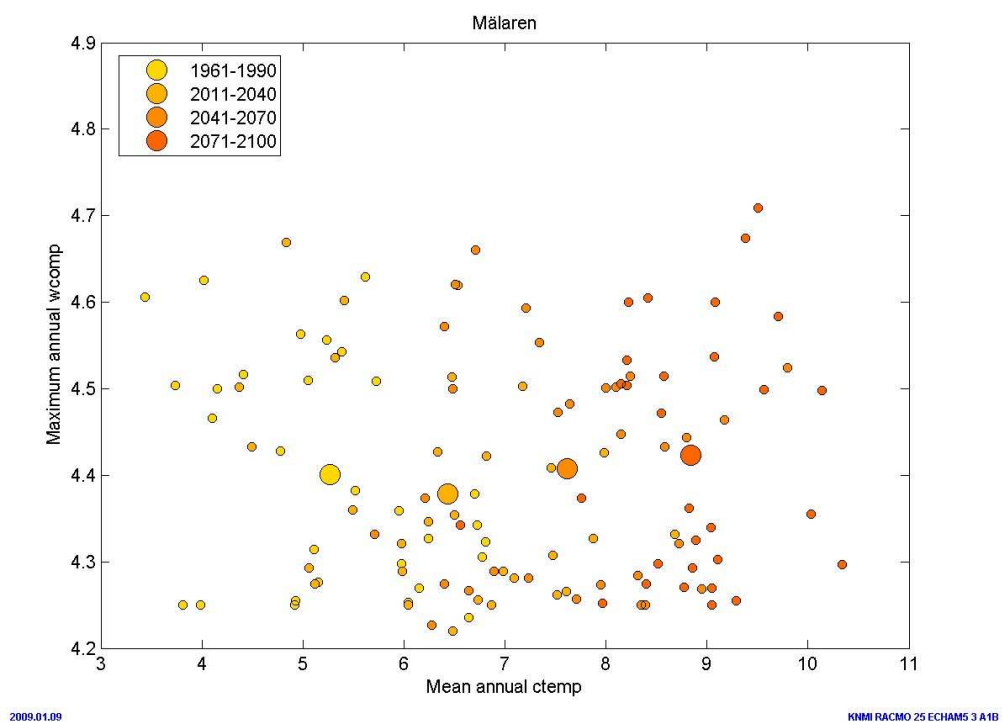
APPENDIX 4 – MODELL: MPI



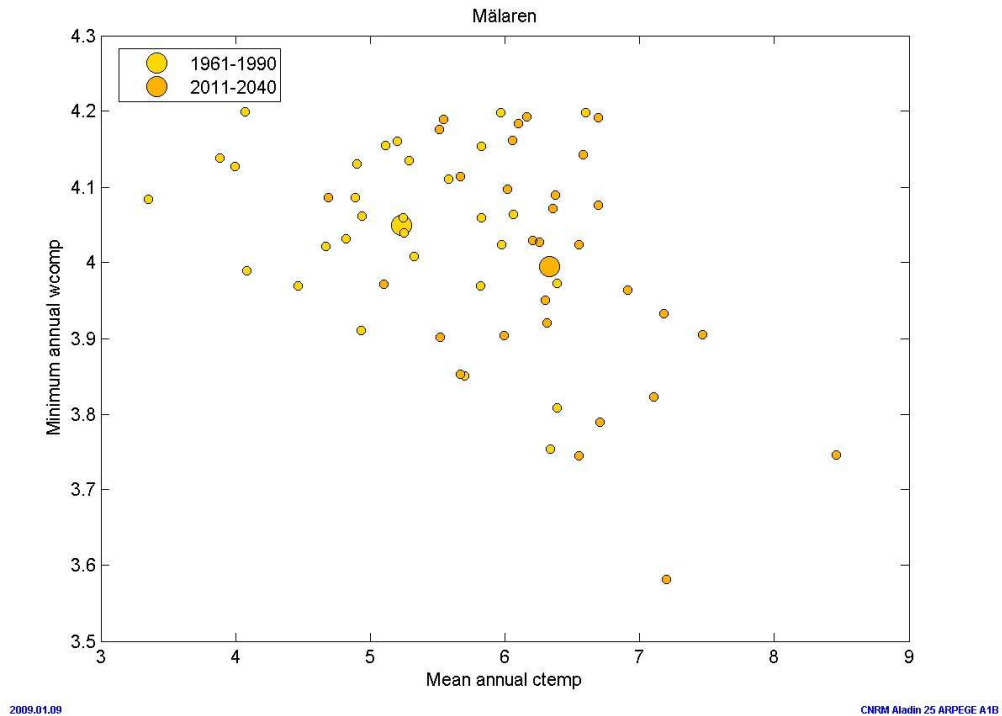
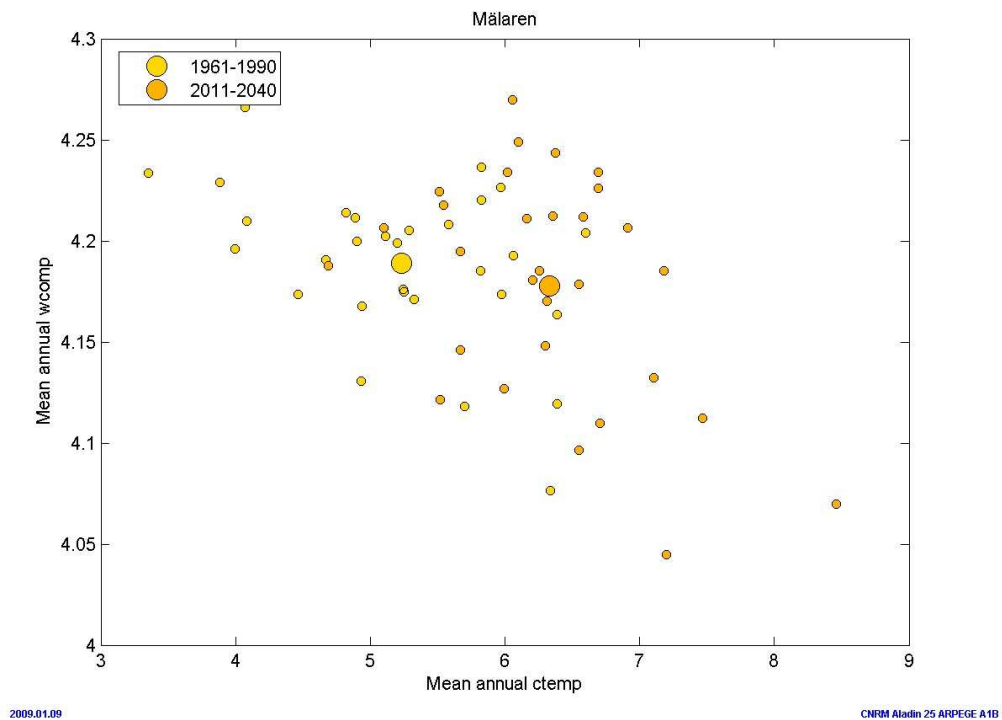


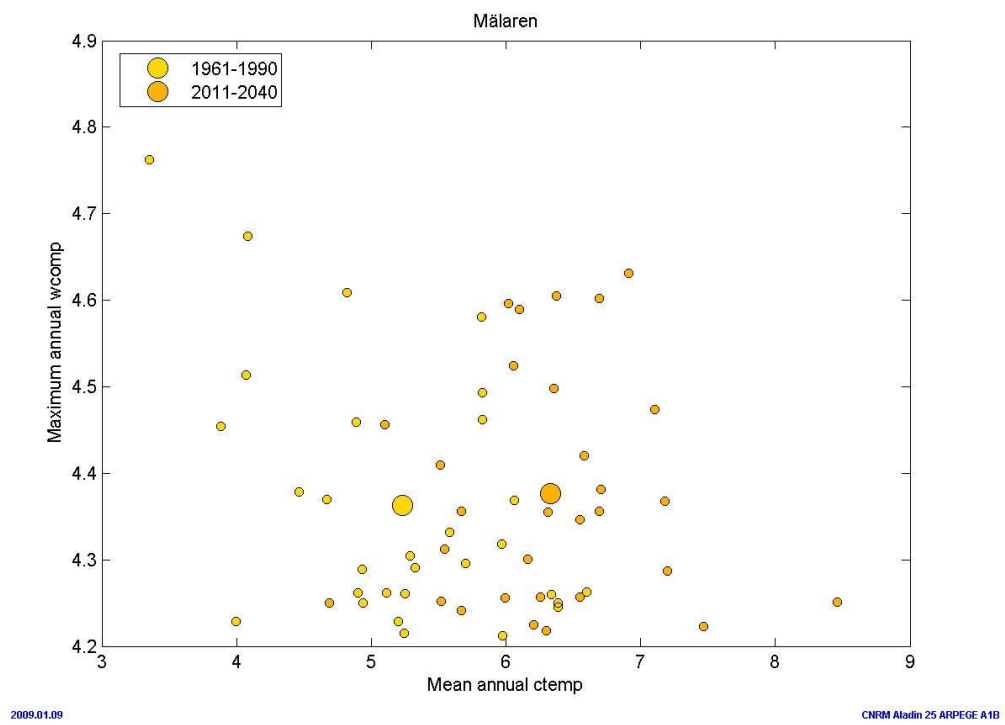
APPENDIX 4 – MODELL: KNMI





APPENDIX 4 – MODELL: CNRM

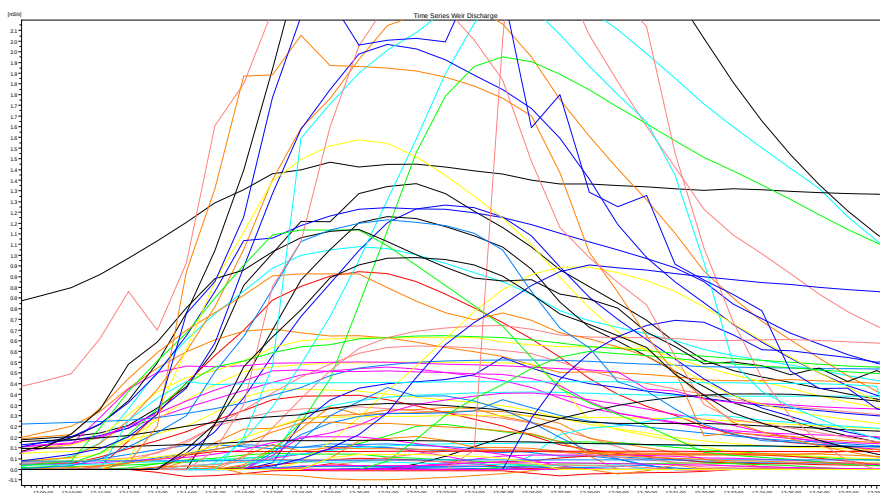




Stockholm Vatten AB

URBANHYDROLOGISKA KLIMATSCENARIER I STOCKHOLM

Känslighetsanalys på effekten av havsnivåer och
befolkningstillväxt på avloppssystemet i Stockholm



Figur 1: Bräddflöden vid ett 10 års regn.

Stockholm 2009-11-03

Uppdragsnummer: 1141107

Innehåll

1	Syfte och beskrivning	83
1.1.1	Befolkningstillväxt	83
1.1.2	Mälarens och Saltsjöns nivå.	83
2	Modellbeskrivning	84
	Ursprung och omfattning av modellerna	84
3	Resultat	85
3.1	Bräddad volym	85
3.2	Inkommande volym Henriksdal	85
3.3	Nivå i kritiska punkter	86
4	Slutsats	86

1 Syfte och beskrivning

Detta PM är en beskrivning av känslighetsanalys av klimateffekter och framtida belastningar på avloppssystemet som avleds till Henriksdals avloppsreningsverk. Utöver detta PM finns det en detaljerad rapport som SWECIA sammanställt för de längre beräkningar som genomförts i projektet.

I denna känslighetsanalys har modellerna över avloppssystemet belastas med ett dimensionerande 10 års regn varefter en parameter har lags till per beräkning.

Följande parametrar undersöks i detta PM

- Befolkningstillväxt
- Mälarens och Saltsjöns nivå.

Effekten av dessa förändringar studeras via bräddad volym, inflöde till Henriksdals reningsverk samt nivå i ledningsnätet på kritiska punkter. Högre vattennivåer i recipienterna påverkar också inläckaget till ledningarna, vilket kan vara en betydande faktor för tillrinningen till reningsverken. Detta kan dock inte simuleras med modellerna i nuläget och har inte studerats här.

1.1.1 Befolkningstillväxt

I nuläget belastas Henriksdals reningsverk med 520 000 PE. År 2030 räknar man med att belastningen har ökat med 25 % till 650 000 PE¹.

1.1.2 Mälarens och Saltsjöns nivå.

I nuläget har Mälarens nivå satts till 0,4 m. Effekten av en nivå på 0,7 m har undersökts.

För Saltsjön har nivån antagits förändrad från 0 till 0,5 m.

Detta projekt har engagerat en stor grupp människor. Jonas German och Jonas Olsson på Swecia/SMHI, Lena Kjellsson, Bo Westergren, Mathias von Scherling, Fredrik Ohls på Stockholm Vatten och Alf Olsson samt Robert Elfving på Sweco.

Stockholm 2009-11-17

Alf Olsson

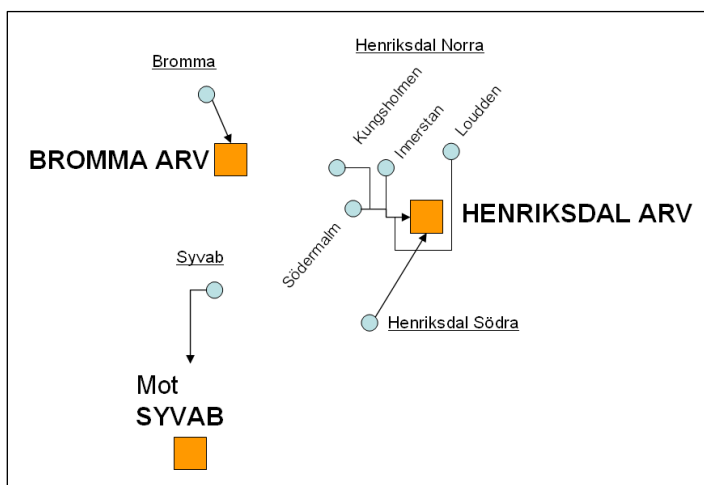
¹ Detta värde baseras på en 25 % ökning av vad den kalibrerade spillvattenmodellen visar. 1 PE har i detta fall antagits till 300 l/PE och dygn.

2 Modellbeskrivning

Ursprung och omfattning av modellerna

De hydrauliska modellerna är ursprungligen upprättade i Mouse. I slutet av 2005 och början av 2006 överfördes modellerna successivt till MIKE URBAN genom att de upprättade Mouse-modellerna importerades via fördefinierade importfunktioner. Modellarbetet har därefter genomförts i MIKE URBAN. Stockholm Vattens avloppssystem beskrivs med 4 modeller vilka motsvarande inloppen till reningsverken. Dessa benämns:

- **Bromma:** ledningsnätet inom Stockholm som avrinner till Bromma reningsverk. Spillvatten som tillförs från Sundbyberg, Järfälla och Ekerö har lagts in som punktblastningar.
- **SYVAB:** ledningsnätet inom Stockholm och Huddinge som avrinner till SYVAB:s reningsverk.
- **Henriksdal Norra:** ledningsnätet som leder spillvatten till grovreningen i Henriksdal. Denna modell har varit uppdelad i 4 olika delmodeller men har i detta projekt fogats samman till en.
- **Henriksdal Södra:** ledningsnätet i Stockholm söderort och Huddinge som avrinner till grovreningen i Sickla. Spillvatten som tillförs från Nacka, Tyresö och Haninge har lagts in som punktblastningar.



I detta projekt har modellerna för Henriksdals ARV använts. Ledningsnätmodellerna beskriver huvudavloppssystemet med alla dess detaljer. I modellerna finns den fysiska beskrivningen av avloppssystemet såsom

ledningsdimension, material, lutningar, marknivåer, skibord, pumpar, tunnlar, magasin, borrhål, spillvattenförbrukning, styrningsstrategier av pumpar mm.

Utöver den fysiska beskrivningen har modellen kalibrerats mot hydrologiska modeller så att rätt flöden belastar modellen vid regn. Denna kalibrering har pågått sedan modellerna började byggas och ger idag en bra beskrivning flödesbelastningen på Henriksdals ARV under alla årstider.

3 Resultat

3.1 Bräddad volym

	Nuläge	Befolkningsökning till år 2030	Befolkningsökning och ökad vattennivå i Mälaren & Saltsjön
Södra Henriksdal	55 000	58 000	58 000
Norra Henriksdal	109 000	114 000	106 000

3.2 Inkommande volym Henriksdal

	Nuläge	Befolkning år 2030	Vattennivå Mälaren & Saltsjön
Södra Henriksdal	529 000	572 000	572 000
Norra Henriksdal	848 000	891 000	908 000

3.3 Nivå i kritiska punkter

	Södra Henriksdal			Norr Henriksdal		
	Östberga tunneln	Årstafältet	Henriksdal ARV	Sveaplan	Danvikstull	Tegelbacken
Nuläge	10.2	12,26	1,63	8,86	2,3	1,55
Befolkning år 2030	10.2	12,25	1,63	8,86	2,31	1,55
Befolkningsökning och ökad vattennivå i Mälaren & Saltsjön	10.2	12,25	1,63	8,86	2,31	1,60

4 Slutsats

Denna korta analys visar att bräddningen ökar med ca 5 % när befolkningen ökar med 25 % för avrinningsområdet till Henriksdals avloppsverk. Räknar man samtidigt med en ökad havsnivå kommer möjligheten att brädda att minska då havsvattnet håller tillbaka bräddvattnet. Detta leder i sin tur till minskad bräddning för Norra Henriksdal.

Maxnivån vid ett dimensionerande regn kommer på de flesta punkter inte att öka förutom i närheten vid punkter som kräver fungerande bräddar och andra punkter där kapaciteten är begränsad redan idag.

Dessa slutsatser förutsätter dock att Henriksdals reningsverk obehindrat kan ta emot ökat flöde och inte påverkas negativt av ökade havsnivåer.

I denna känslighetsanalys har inte förändrad nederbörd studerats.

SMHIs publiceringar

SMHI ger ut sju rapportserier. Tre av dessa, R-serierna är avsedda för internationell publik och skrivs därför oftast på engelska. I de övriga serierna används det svenska språket.

Seriernas namn	Publiceras sedan
RMK (Report Meteorology and Climatology)	1974
RH (Report Hydrology)	1990
RO (Report Oceanography)	1986
METEOROLOGI	1985
HYDROLOGI	1985
OCEANOGRAFI	1985
KLIMATOLOGI	2009

I serien **KLIMATOLOGI** har tidigare utgivits:

- 1 Lotta Andersson, Julie Wilk, Phil Graham, Michele Warburton, (University KwaZulu Natal) (2009)
Local Assessment of Vulnerability to Climate Change Impacts on Water Resources in the Upper Thukela River Basin, South Africa – Recommendations for Adaptation
- 2 Gunn Persson, Markku Rummukainen (2010)
Klimatförändringarnas effekter på svenskt miljömålsarbete



Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut
601 76 NORRKÖPING
Tel 011-495 80 00 Fax 011-495 80 01

ISSN 1654-2258