Europas temperaturklimat under det senaste millenniet

En jämförelse av resultat från en regional klimatmodell med proxydata och observationsdata

Malin Friis

Malin Friis
Examensarbete i geovetenskap 15 hp
Avseende kandidatexamen
Rapporten godkänd:
Handledare: Erik Kjellström, Christian Bigler

European temperature climate during the last Millennium. A comparison of results from a regional climate model with proxy data and observational data.

Malin Friis

Abstract

The aim of this study was to evaluate the Rossby Centre regional climate model (RCA3) for the time period AD 951-1998, to find how well it can reproduce the near-surface temperature climate in Europe. The lateral boundary conditions in the model came from the global climate model ECHO-G, which was forced by solar variability, changes in greenhouse gases and changes in orbital parameters. Results from the regional model were compared to five proxy-based temperature reconstructions from different parts of Europe, with respect to average temperatures, variability and correlation during the last Millennium and during the Medieval Warm Period and Little Ice Age. The utility of the reconstructions was tested by comparison to instrumental temperature observations from the Climate Research Unit from AD 1901-2009, which showed that not only temperature explains the variability in the proxy series. The correlation between the proxy series from the Alpine region was weak, which indicated a different development of temperatures over time. On the contrary, both temperature observations and model results showed a high degree of correlation between the locations in the proxy series. RCA3 showed lower temperatures in comparison to all the reconstructions. The warmest 100-year period in RCA3 never coincided with the warmest 100-year period in the reconstructions, and the coldest periods only coincided in two cases. The poor agreement between RCA3 and proxy data is interpreted partly as a consequence of deficiencies and error margins in the proxy reconstructions. Model errors and simplified treatment of forcing conditions also contributes to the discrepancies.

Key words: Climate modeling · RCA3 · proxy data · temperature · Europe

Förord

I en tid då mänsklig påverkan på klimatet är av stor betydelse, måste vi lära oss att leva utan att tära på jordens resurser. Med hjälp av klimatmodeller kan vi säga någonting om jordens framtida klimat, vilket är viktigt för att vi ska veta i vilken utsträckning vi behöver ställa om våra levnadsmönster. Att i mitt examensarbete jobba med att utvärdera en klimatmodell kändes därför både spännande och viktigt.

Ett varmt tack vill jag rikta till min handledare Erik Kjellström på SMHIs klimatforskningsavdelning Rossby Centre för att han gav mig chansen att göra detta examensarbete. Jag är väldigt tacksam för hans trevliga bemötande, för att han alltid ställde upp när jag behövde hjälp och för alla ovärderliga tips han gav mig under datahantering, analyser och rapportskrivning. Ett stort tack till Gustav Strandberg på Rossby Centre för att han hjälpte mig med att komma igång med MATLAB, för att han tog fram de data jag behövde och för alla intressanta diskussioner. Ett stort tack till min handledare Christian Bigler på Institutionen för ekologi, miljö och geovetenskap vid Umeå Universitet, för värdefulla tips på vägen och för att han läste och kommenterade min rapport. Jag vill även tacka mina vänner och min familj för att de har hejat på. Sist men inte minst vill jag tacka Björn för allt stöd, med en hälsning att Nu är det vår.

Innehållsförteckning

1 Inledning 1
1.1 Syfte 2
1.2 Bakgrund 2
1.2.1 Klimatsystemet och faktorer som påverkar det 2
1.2.2 Klimatproxy och variabler som påverkar dem 2
1.2.3 Klimatet under det senaste millenniet 3
1.2.4 Klimatmodeller 5
2 Data och metoder 6
2.1 Modelldata 6
2.1.1 Den globala klimatmodellen ECHO-G 6
2.1.2 Den regionala klimatmodellen RCA3 7
2.2 Proxydata 8
2.2.1 Urval av proxydataserier 8
2.2.2 Beskrivning av proxydataserierna 11
2.3 Observationsdata 14
2.3.1 Climate research unit (CRU) 15
2.3.2 SMHIs observationsstation Abisko 15
2.4 Metoder 16
2.4.1 Datahantering 16
2.4.2 Analyser 17
3 Resultat och diskussion 18
3.1 Jämförelser mellan proxydata och observationsdata 18
3.1.1 French Alps/CRU 19
3.1.2 Lake Silvaplana/CRU 20
3.1.3 Stockholm/CRU 20
3.1.4 Swiss Plateau/CRU 21
3.1.5 Torneträsk/observationsdata 21
3.1.6 Proxyseriernas användbarhet 23
3.2 Jämförelser mellan proxydata och modelldata 24
3.2.1 French Alps/RCA3 26
3.2.2 Lake Silvaplana/RCA3 27
3.2.3 Stockholm/RCA3 29
3.2.4 Swiss Plateau/RCA3 30
3.2.5 Torneträsk/RCA3 31
3.2.6 Korrelation och autokorrelation av proxy och modell 34
3.3 Korrelationsanalys av proxy-, CRU- och modellserier från geografiskt närliggande/spridda platser 34
3.4 Svårigheter med jämförelser av proxydata och modelldata 36
3.4.1 Svårigheter relaterade till proxyserierna 36
3.4.2 Svårigheter relaterade till modellen 38
3.5 Slutsats och framtida studier 39
4 Referenser 41

1 Inledning

Enligt FNs klimatpanel, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), har de nuvarande klimatförändringarna med mycket stor sannolikhet uppstått som en följd av mänsklig aktivitet (IPCC 2007). Mänsklig påverkan på klimatet i stor skala började under 1800-talet (Hegerl m.fl. 2007). Det är dock viktigt att kunna sätta dagens klimatförändringar i ett längre perspektiv (Guiot m.fl. 2010), eftersom Jordens klimat även före 1800-talet genomgick stora förändringar (Jansen m.fl. 2007). Paleoklimatologi är studien om forna tiders klimatförändringar (Stockholms universitet 2012), dvs. klimatförändringar som ägde rum innan instrumentella meteorologiska observationer började utföras (NOAA 2011 A).

Under den senaste interglacialen, Holocen, dvs. de senaste ca 11 600 åren, har solens strålning haft stor betydelse för klimatet (Wanner m.fl. 2008). Jordens rörelse runt solen är en annan faktor som påverkat klimatet på längre tidsskala (Berger 1977); likaså variationen av växthusgaser (Bogren m.fl. 1999). Kalla episoder kan även förklaras med bland annat hög vulkanaktivitet (Guiot m.fl. 2010). I tillägg till yttre drivkrafter, varierar klimatet naturligt och uppvisar en intern variabilitet på olika tids- och rumsskalor. Bland annat är variationer i den storskaliga cirkulationen mycket viktiga för att förklara regionala och lokala variationer i klimatet (Jansen m.fl. 2007).

Vad som påverkat klimatet mest och hur mycket det varierat under det senaste millenniet är delvis omtvistat (Larocque-Tobler m.fl. 2010). Mycket tyder på att en period av varmare klimat, den så kallade Medeltida Värmeperioden inträffade under den tidigare delen av det senaste millenniet; en period med temperaturer jämförbara med dagens (Jansen m.fl. 2007). Denna period övergick så småningom troligen i en kallare period, den så kallade Lilla Istiden (Wanner m.fl. 2008).

Naturliga och historiska arkiv fungerar som klimatapproximationer av forna tiders klimat. Dessa ger dock ingen fullständig bild av klimatets historia, eftersom olika proxyarkiv har olika styrkor och svagheter beträffande t.ex. vilken klimatsignal de representerar, samt daterings- och kalibreringsmetoder. Temperaturen är en klimatvariabel som ofta går att rekonstruera med hjälp av proxydata och dessutom en tydlig indikator för klimatförändringar. Proxydata för temperaturer är dock inte heltäckande i tid och rum. Vidare är det svårt att få fram information om andra variabler såsom exempelvis nederbörd, vindhastighet eller molnighetsförhållanden.

Klimatmodeller ger en mer heltäckande bild av klimatets historia och de används bland annat för att ta fram scenarier om framtida klimat. För att modellerna ska ge så liten osäkerhet som möjligt är kontinuerliga utvärderingar nödvändiga. Sådana görs främst genom jämförelse mellan modell och observationer för de senaste decennierna, då tillgången på data är god. Man vill också kunna testa om modellerna kan simulera klimatet under tidigare perioder, vilket kan göras med hjälp av klimatproxy. Rossby Centres regionala atmosfäriska klimatmodell, RCA3 (Samuelsson m.fl. 2011), har körts för olika områden och tidsperioder (Jones m.fl. 2011). Fokus för analyser och utvärdering av modellen har i huvudsak legat på de senaste decennierna samt scenarier för 2000-talet (Kjellström m.fl. 2011; Samuelsson m.fl. 2011). Ett experiment har nu också gjorts för Europa för det senaste millenniet (år 951-1998) (Shimanke m.fl. 2011).

1.1 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att utvärdera den körning av RCA3 som gjorts för den förindustriella delen av det senaste millenniet; detta för att se hur väl modellen kan återge temperaturklimatet i Europa under denna tid. Modelldata utvärderas mot tillgängliga temperaturdata (proxy och observationer) från olika delar av Europa, dels med fokus på hela tusenårsperioden, dels med fokus på kända perioder av varmt/kallt klimat under det senaste millenniet; den Lilla Istiden och den Medeltida Värmeperioden.

1.2 Bakgrund

1.2.1 Klimatsystemet och faktorer som påverkar det

Jordens klimat har i alla tider genomgått naturliga förändringar, påverkade av externa och interna faktorer (Bogren m.fl. 1999). Solen är en av de externa faktorer som utlöser långsiktiga variationer i klimatet, då dess strålning varierar i olika tidsskalor, från dagar till millennium (Forster m.fl. 2007). Solstrålningens påverkan på klimatet gäller framför allt för en global eller hemisfärisk skala, medan den blir mer tvetydig på en regional skala (Shimanke m.fl. 2011).

Förändringar i jordens rörelse runt solen är en annan extern faktor som påverkar jordens klimat. Rörelserna sammanfattas i Milankovitchs teori, som omfattar formen på jordens bana, jordaxelns lutning, och tidpunkt på året då jorden är närmast solen (Wanner m.fl 2008). Dessa variationer är viktiga på längre tidsskalor, men har mindre betydelse i tusenårsperspektivet, som är av störst intresse i detta arbete.

Den naturliga växthuseffekten är en intern klimatförändrande faktor, som uppstår till följd av den naturliga variationen av främst vattenånga och koldioxid. Under det senaste millenniet har dock variationerna av växthusgaser varit små, undantaget är 1900-talet, då mänsklig aktivitet var av stor betydelse (Hegerl m.fl. 2007).

I samband med kraftiga vulkanutbrott kan partiklar hamna på hög höjd, i stratosfären. Där kan de stanna kvar i flera år (Bogren m.fl. 1999; Shimanke m.fl. 2011). Särskilt viktiga är vulkanutbrott i tropikerna då partiklarna får en stor geografisk spridning, eftersom askan snabbt når höga höjder på grund av Hadleycellerna. Enligt Fischer m.fl. (2007) bidrar den direkta kyleffekten av vulkanutbrott till lägre sommartemperaturer under ett till tre år efter utbrottet. Andra faktorer som är viktiga för klimatet är exempelvis olika sorters partiklar som påverkar jordens strålningsbalans antingen direkt eller indirekt genom att modifiera molnens egenskaper (Wanner m.fl. 2008).

1.2.2 Klimatproxy och variabler som påverkar dem

Instrumentella mätningar av klimat sträcker sig bara ungefär 100-200 år tillbaka i tiden (Stockholms universitet 2012). Ett undantag är mätningar av temperatur i Centrala England som kan dateras tillbaka till 1600-talet (Manley 1974). Bristen på instrumentella mätningar före 1800-talet gör användandet av naturliga och historiska arkiv nödvändigt, för att vi ska lära oss mer om klimatförändringar under Jordens tidigare historia (Moberg m.fl. 2006; Mann m.fl. 2008).

Naturliga och historiska arkiv fungerar som klimatapproximationer, s.k. klimatproxy, av

forna tiders klimat (benämns fortsättningsvis ”proxy”). *Naturliga proxy* kan extraheras från olika geologiska och biologiska arkiv (Moberg m.fl. 2006), såsom isborrkärnor, trädringar och sjösediment (Grudd 2008; Mann m.fl. 2008; Larocque-Tobler m.fl. 2010). Dokumentationsdata, t.ex. avseende vindruvors skördedatum eller datum för den isfria säsongen i hamnar, kan användas som historiska proxy (Meier m.fl. 2007; Leijonhufvud m.fl. 2010).

Olika typer av proxy ger oss information av olika kvalitet och karaktär vad gäller t.ex. upplösning, tidsseriens längd samt vilken säsong som kan rekonstrueras (Moberg m.fl. 2006). Medan trädringar oftast ger årsupplösning, ger sjösediment oftast lägre upplösning. Isborrkärnor kan ge tidsserier i storleksordningen hundratusentals år (Jouzel m.fl. 2007), medan tidsserierna för dokumentationsdata är i storleksordningen hundratals år (Mann m.fl. 2008). Många proxyarkiv är känsliga för växtsäsongens temperatur (Guiot m.fl. 2010), exempelvis uppsättningen av fjädermyggor som går att finna i sjösediment (Larocque-Tobler m.fl. 2010). Likaså är datumet för skörd av vindruvor beroende av växtsäsongens temperatur (Meier m.fl. 2007). Trädringar i områden där träds tillväxt är temperaturbegränsad ger information om temperatur under vår/sommarsäsongen (Grudd 2008, Corona m.fl. 2011). I andra områden kan det var torka som är begränsande, varvid trädringsserierna säger mer om hydrologiska förhållanden. Islossningsdatumet i Stockholms hamn är beroende av lufttemperaturen. Det är ett exempel på dokumentationsdata som kan användas som proxy för vinterklimat (Leijonhufvud m.fl. 2010).

Då man använder sig av proxydata är det viktigt att ha i åtanke att de är just approximationer. Proxy kan även påverkas av andra miljövariabler än klimat. Osäkerheter kring sådana variabler kan orsaka feltolkningar av proxy. Trädringars tillväxt kan till exempel vara beroende av trädets ålder, huruvida trädet befinner sig i ett söderläge, eller om det befinner sig i en sluttning (Mitton m.fl. 1981). I sjösediment kan inte bara temperatur, utan även pH påverka uppsättningen av kiselalger (Bigler och Hall 2003). Det är även viktigt att tänka på att olika proxytyper representerar olika stora områden. Dessutom har proxydata andra felkällor, felmarginaler och brister, vilket gör det svårt att direkt överföra informationen från proxydata till klimat (Jansen m.fl. 2007).

Vid studier av klimatförändringar är ofta en kombination av klimatvariabler av intresse, t.ex. temperatur, nederbörd, lufttryck i havsytans nivå, molntäcke och vindhastighet. Av dessa är temperatur det som tydligast indikerar klimatförändringar och därmed en av de mest studerade variablerna. Det finns osäkerheter om hur lång tid det tar för olika proxy att svara på olika klimatvariabler (Guiot m.fl. 2010). Nederbörd kan vara speciellt svårtolkad, då den rumsliga variationen är större för nederbörd än för temperatur. Då man talar om variabeln temperatur i klimatforskningssammanhang, brukar man ofta tala om lufttemperaturen på två meters höjd (Samuelsson m.fl. 2011).

1.2.3 Klimatet under det senaste millenniet

Under det senaste millenniet inträffade en varm period, den Medeltida Värmeperioden och en kall period, Lilla Istiden (Wanner m.fl. 2008). Här används samma definition av perioderna som hos Shimanke m.fl. (2011): 1100-1299 (Medeltida Värmeperioden) och 1600-1799 (Lilla Istiden). Olika studier använder olika definitioner och enligt andra tidigare definitioner inträffade Lilla Istiden 1350-1850 (Tabell 1, Wanner m.fl. 2008 Corona m.fl. 2011). Allra kallast var det runt år 1600 (Mann m.fl 2008; Guiot m.fl. 2010).

Många kalla perioder under det senaste millenniet kan förklaras med hög vulkanaktivitet (Guiot m.fl. 2010). Förklaringarna blir dock osäkrare ju längre tillbaka i tiden man går, pga. bristande information om vulkanutbrotten.

Några av de mest explosiva vulkanutbrotten under det senaste millenniet skedde 1912 (Novarupta, Alaska), 1902 (Santa Maria, Guatemala), 1883 (Krakatoa, Indonesien), 1815 (Tambora, Indonesien), 1783 (Laki, Island) och 1600 (Huaynaputina, Peru) (Guiot m.fl 2010). Ytterligare ett större utbrott inträffade år 1660 (+/- 20 år) på Long Island (Alaska) (Global Volcanism Program 2012).

Perioder av hög solstrålning under det senaste millenniet inträffade 1095-1145 och 1355-1375, medan perioder av låg solstrålning inträffade 1030-1070 (Oort minimum), 1295-1325 (Wolf minimum), 1425-1465 (Spörer minimum), 1665-1705 (Maunder minimum) och 1790-1830 (Dalton minimum) (Tabell 1, Guiot m.fl. 2010).

Spörer minimum var den enda perioden med låg solstrålning då det var tydligt kallt i hela Europa (Guiot m.fl. 2010). Perioder av hög/låg solaktivitet i Europa under det senaste millenniet, har i tidigare studier definierats på olika vis, vilket enligt Guiot m.fl (2010) innebär att det är svårt att dra någon slutsats om huruvida variationer i solstrålningens intensitet är den avgörande faktorn för det regionala klimatet. Det är förmodligen olika faktorer som samverkat för att påverka klimatet under denna tid (Guiot m.fl. 2010).

Tabell 1: Inträffandet av den Medeltida Värmeperioden och Lilla istiden enligt olika definitioner, samt definitioner av perioder med hög/låg solaktivitet under det senaste millenniet.

Period	År	Kommentarer och referenser
Medeltida värmeperioden	1100-1299	Millenniets varmaste 200-årsperiod enligt Shimanke m.fl. 2011
Lilla istiden	1600-1799 1350-1850	Millenniets kallaste 200-årsperiod enligt Shimanke m.fl. 2011 Allmänt känd definition av Lilla istiden, enligt t.ex. Wanner m.fl. 2008, Corona m.fl. 2011
Period av hög solstrålning	1095-1145	Guiot m.fl 2010
Period av hög solstrålning	1355-1375	Guiot m.fl 2010
Oort minimum (period av låg solstrålning)	1030-1070	Guiot m.fl 2010
Wolf minimum (period av låg solstrålning)	1295-1325	Guiot m.fl 2010
Spörer minimum (period av låg solstrålning	1425-1465	Guiot m.fl 2010
Maunder minimum (period av låg solstrålning)	1665-1705	Guiot m.fl 2010
Dalton minimum (period av låg solstrålning)	1790-1830	Guiot m.fl 2010

1.2.4 Klimatmodeller

För att vi ska kunna säga något om framtida klimat är klimatmodeller det enda verktyg som finns att tillgå. Klimatmodeller behövs också för att vi ska kunna testa hypoteser om varför klimatet förändras och vad som orsakat tidigare förändringar. De innehåller fysikaliska beskrivningar av atmosfären/haven och kan sättas upp för hela jorden och köras för långa perioder. Olika processer i systemet, såsom utbytet av t.ex. energi och vatten mellan atmosfär/land och hav beskrivs i modellerna (Randall m.fl. 2007).

Det viktigt att klimatmodellernas utgångslägen är väl definierade i tid och rum, så att modellerna kan representera en så stor del av den naturliga variabiliteten i klimatsystemet som möjligt. Det är inte rimligt att anta att en simulering av den naturliga variabiliteten följer samma tidsutveckling som den man kan se i observationer. Man gör många körningar från olika utgångslägen för att modellen ska lyckas simulera så många aspekter av den naturliga variabiliteten som möjligt. Långsiktiga trender är dock rimliga att simulera med modellen (SMHI 2009).

I en klimatmodell delas atmosfären normalt upp i ett rutnät av både vertikala och horisontella rutor (Fig. 1, SMHI 2012). För varje volym i rutnätet görs beräkningar stegvis i tiden för olika meteorologiska, hydrologiska och klimatologiska variabler, såsom temperatur, nederbörd och vind (SMHI 2012). Förutom interna processer så kan modellen räkna på ändringar i yttre faktorer, såsom ändringar i solstrålning, växthusgaskoncentration och partikelhalt (Forster m.fl. 2007).

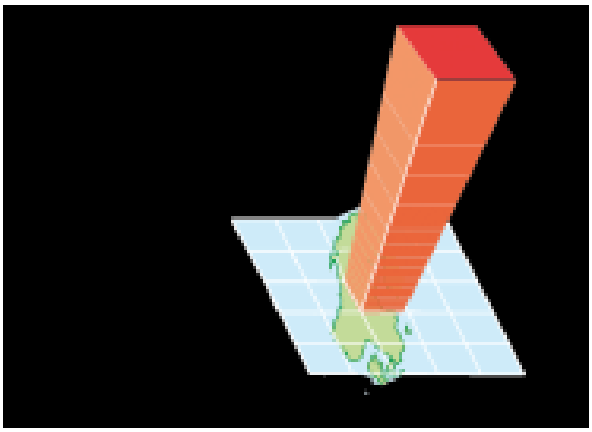


Fig. 1: Atmosfären delas i en klimatmodell upp i vertikala och horisontella rutor.

Globala klimatmodeller beskriver hela jordens klimat. På grund av åtgången av datorkraft, är upplösningen i globala klimatmodeller inte speciellt hög. I dagens globala klimatmodeller är 100-300 km typiskt (IPCC 2007), vilket innebär att detaljrikedomen på lokal- och regional skala blir relativt låg (SMHI 2012).

I klimatforskningssammanhang behövs ofta bättre upplösning hos en klimatmodell är vad en global klimatmodell kan bidra med, vilket är en anledning till att man väljer att med regionala modeller skala ned globala modeller. I regionala klimatmodeller är detaljrikedomen högre, på grund av att området som betraktas är mycket mindre än i globala klimatmodeller (Fig.2). Information om det som sker utanför beräkningsområdet för den regionala modellen tas från en global klimatmodell (SMHI 2012). Eftersom klimatet i en

begränsad region till stor del styrs av den storskaliga cirkulationen i atmosfären, kommer de storskaliga dragen i den regionala modellen att styras av resultaten från den globala modellen. Regionala klimatmodeller har kommit att bli viktiga redskap för att förse oss med detaljerade uppskattningar om framtida klimatförändringar (Rummukainen 2010). De används även till simuleringar av paleoklimat (Strandberg m.fl. 2011).

Eftersom alla klimatmodeller är förenklingar, kommer de aldrig att kunna återge verkligheten exakt, med konsekvensen att de får vissa fel och brister. Modellerna kommer därför alltid behöva utvärderas för att kunna utvecklas ytterligare (Randall m.fl. 2007).

Fig. 2: Jorden indelad i ett rutnät samt Europas klimatregion markerad.

När en regional klimatmodell används för att skala ned en global klimatmodell, kan utvärdering inte göras genom en direkt jämförelse mellan modell och observationer för någon speciell tidpunkt. Detta beror på att den globala klimatmodellen inte nödvändigtvis är i fas med den naturliga variabiliteten i klimatsystemet (SMHI 2009). Utvärderingen av regionala klimatmodeller försvåras även av att fel i den globala modellen förs med till den regionala modellen (Rummakainen 2010).

2 Data och metoder

I detta examensarbete har modelldata, proxydata och observationsdata använts i analyser av Europas temperaturklimat under de senaste 1000 åren. Modelldata kom från SMHIs regionala klimatmodell, RCA3, som använts för att nedskala den globala klimatmodellen ECHO-G. Proxydata för temperatur kom från fem studier från olika delar av Europa. Observationsdata för temperatur kom från Climatic Research Unit (CRU) och från en av SMHIs observationsstationer. Nedan beskrivs var och en av de olika modell-, proxy- och observationsdataserierna.

2.1 Modelldata

2.1.1 Den globala klimatmodellen ECHO-G

ECHO-G är en global klimatmodell som består av en atmosfärisk komponent och en havskomponent (Legutke och Voss 1999). I den aktuella klimatsimuleringen har ECHO-G

drivits med variationer i extern klimatpåverkan, såsom variabilitet i solstrålning, ändrade astronomiska förhållanden och ändringar i växthusgaskoncentrationer mellan 7000 år f. Kr och år 1990 e.Kr. (Hünicke m.fl. 2010). Faktorer som inte har tagits med i beräkningarna är partiklar från vulkaner och förbränning, samt markanvändning. Effekten av vulkanutbrott har inte tagits med, eftersom tillförlitliga uppgifter saknas för den långa perioden. Modellens upplösning är 3,75x3,75˚, vilket motsvarar ca 300x300 km. Detta är en grov upplösning där Skandinavien motsvaras av endast ett fåtal gridrutor (Fig. 3). I vertikal ledd finns 19 lager för den atmosfäriska komponenten.

Fig. 3: Europa enligt den globala klimatmodellen ECHO-G; med en upplösning på 3,75x3,75˚

2.1.2 Den regionala klimatmodellen RCA3

Rossby Centre Atmospheric climate model (RCA) är en regional klimatmodell som har utvecklats på SMHIs klimatforskningsenhet, Rossby Centre (Samuelsson m.fl. 2011).

Det har visat sig att RCA3 är väl jämförbar med andra regionala klimatmodeller (Christensen m.fl. 2010). I jämförelsen som låg till grund för den uppgiften utvärderades olika aspekter av klimatet. Till exempel undersöktes hur väl de regionala klimatmodellerna kunde reproducera den storskaliga atmosfäriska cirkulationen, säsongsvariationer i temperatur och nederbörd, långsiktiga trender i temperaturen samt extremhändelser i nederbörd.

Fig. 4: Europa enligt den regionala klimatmodellen RCA3; med en upplösning på 0,44x0,44˚.

Här har RCA3 satts upp för ett område som består av 102x111 gridrutor som täcker Europas landyta i ett rutnät (Fig. 4). Rutorna är ungefär 50x50 km. I vertikal ledd finns 24 lager. Körningen av modellen har gjorts med tidssteget 30 min och randvärden från ECHO-G har lästs in var 12:e timme (Shimanke m.fl. 2011).

Data som extraherats från RCA3 för detta arbete motsvarar de geografiska punkter och tidsperioder som de proxyserier de ska jämföras mot. Proxyseriens centrala punkt jämförs i första hand med den gridruta från modellen som representerar samma geografiska punkt. Analys av närliggande gridrutor från modellen har också gjorts, i de fall då dessa bättre motsvarar proxyseriens centrala punkt, t.ex. med avseende på höjden över havet.

2.2 Proxydata

2.2.1 Urval av proxydataserier

Utgångsläget för urval av proxydataserier var att de skulle representera temperaturklimatet i Europa under så stor del som möjligt av det senaste millenniet; helst med årlig upplösning.

Proxydataserierna kommer från fem olika platser i Europa och de kommer hädanefter benämnas med namnen; ”French Alps”, ”Lake Silvaplana”, ”Swiss Plateau”, ”Stockholm” och ”Torneträsk” (Fig. 5, Tabell 2 a). De tre förstnämnda befinner sig i Alpregionen i kontinentala Europa, medan de två sistnämnda befinner sig i södra respektive norra Sverige.

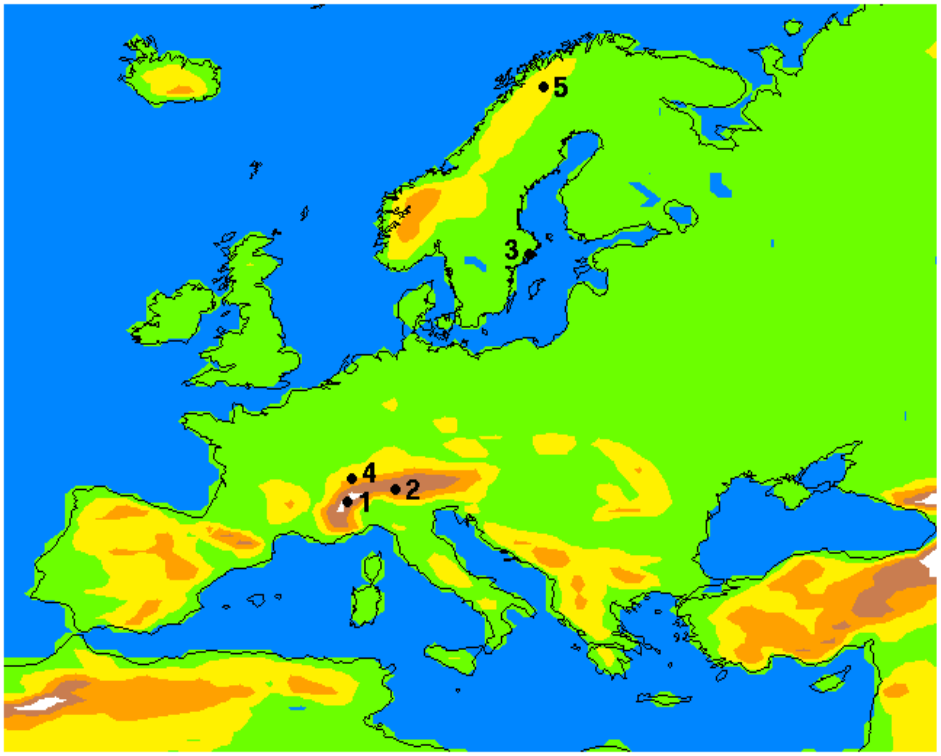


Fig. 5: Geografiska lägen för de fem utvalda proxyserierna: 1. French Alps, 2. Lake Silvaplana, 3. Stockholm, 4. Swiss Plateau, 5. Torneträsk. Observera att färgerna i figuren inte anger en exakt beskrivning av terrängen.

Alla utvalda proxyserier relaterar till temperaturklimatet. Hela millenniet representeras av två av de valda proxyserierna (Torneträsk och French Alps), medan de övriga representerar de senaste 500 åren (Tabell 2 b). Alla utvalda proxyserier har årsupplösning; om än i bearbetad form i dataserien från Lake Silvaplana (Tabell 2 a).

Proxyserierna valdes även med avseende att representera olika typer av proxy; dels för att kunna göra jämförelser mellan olika proxytyper på närliggande platser; dels för att kunna göra jämförelser mellan samma proxytyp, på geografiskt spridda platser. De valda proxyserierna representeras av proxytyperna dokumentationsdata (Stockholm och Swiss Plateau), trädringar (Torneträsk och French Alps) och sjösediment (Lake Silvaplana, Tabell 2 a).

Vilken säsong de olika proxyserierna representerade var också av betydelse för urvalet. I detta urval var önskan att både sommar- och vinterklimat skulle representeras; detta för att se hur väl modellen simulerar temperaturklimatet för respektive säsong. Fyra av de fem serierna representerar sommartemperaturer. Proxyserier som representerar vintertemperaturer finns i allmänhet bristande tillgång till. Här representerar serien från Stockholm vintertemperaturer (Tabell 2 a).

Tabell 2 a: Metadata för de utvalda proxyserierna: platsernas namn, platsernas koordinater för hela proxyområdet (inom parentes anges koordinater för den punkt som modelldata motsvarar), proxytyp, upplösning och höjd över havet (meter). Höjd över havet anges för alla proxyserier, med undantag för Swiss Plateau (*), där uppgiften saknas pga. att området är stort. Från modellen anges höjd över havet i den gridruta som geografiskt motsvarar proxyserierna; för Torneträsk anges även höjden i den närliggande gridruta, där modellens höjd över havet bäst motsvarar proxyseriens höjd över havet (inom parentes).

Plats	Longitud, proxy (modell)	Latitud, proxy (modell)	Proxytyp	Upplösning	Höjd över havet enligt proxy-serierna	Höjd över havet enligt modellen (samt ”bästa höjd”)
French Alps	6°30'-7°45' Ö (7°00'Ö)	44°00'-45°30' N (45°50'N)	Trädringsvidd	Årlig	1600-2300 m	1 040 m
Lake Silvaplana	9°47' Ö (9°80'Ö)	46°27 'N (46°45'N)	Sjösediment	1-20 år	1790 m	1 840 m
Stockholm	18°07' Ö (18°07' Ö)	59°33' N (59°33'N)	Dokumentation	Årlig	0,00 m	9,00 m
Swiss Plateau	6°10' -8°50' Ö (6°00' Ö')	46°10'-47°40' N (47°00' N)	Dokumentation	Årlig	*	959 m
Torneträsk	19°45'-19°80' Ö (19°80'Ö)	68°21'-68°31' N (68°31'N)	Trädringsdensitet	Årlig	350-450 m	664 m (369 m)

Tabell 2 b: Metadata för de utvalda proxyserierna, forts: rekonstruerad säsong, dataformat (dvs. huruvida proxyserien representerar temperaturanomalier eller absoluta temperaturer), rekonstruktionsperiod (första och sista år) samt studiernas referenser.

Plats	Säsong	Dataformat	Första år	Sista år	Referens
French Alps	juni-augusti	Anomali, referensperiod 1961–90	1000	2008	Corona m.fl. (2011)
Lake Silvaplana	juli	Anomali, referensperiod 1961–90	1400	1995	Larocque-Tobler m.fl. (2010)
Stockholm	januari-april	Anomali, referensperiod 1961–90	1502	2008	Leijonhufvud m.fl. (2010)
Swiss Plateau	april-augusti	Anomali, referensperiod 1961–90	1480	2006	Meier m.fl. (2007)
Torneträsk	april-augusti	Absolut temperatur	1000	2004	Grudd (2008)

2.2.2 Beskrivning av proxydataserierna

Nedan summeras studierna som ligger till grund för de proxyserier som används i detta arbete med avseende på t.ex. proxytyp, datering, klimatsignal, kalibrering och felmarginaler/felkällor/andra brister. För mer information om studierna hänvisas direkt till dem, samt till Tabell 2a och 2b.

French Alps – Sommartemperaturer baserade på trädringsvidd

I studien från de franska Alperna av Corona m.fl. (2011) har en rekonstruktion av sommarmedeltemperaturer (juni-augusti) gjorts för varje år under perioden 751-2008, baserat på ett tätt nätverk av trädringsviddkronologier. I det här arbetet, kommer dock endast data för det senaste millenniet från French Alps användas.

Analysen av trädringar ligger till grund för den förgrening inom paleoklimatologin som kallas dendroklimatologi. I studien från French Alps (Tabell 2a) analyseras trädringarnas vidd. Inom dendroklimatologin studeras även trädringsdensitet och isotopsammansättning. Inom en region påverkas ofta varje träds ringkaraktär på samma sätt av samma klimatfaktorer och man kan på grund av det korsdatera trädringar från olika träd, för att bestämma varje rings exakta kalenderårdatering, med syfte att bygga upp en kronologi. Kronologier från träd som är känsliga för klimatpåverkan kan sedan användas för att rekonstruera klimatparametrar (NOAA 2011).

I studien från French Alps användes provmaterial av trädringsviddata som erhållits från 548 lärkträd på 34 platser, utspridda över Alperna. Materialet kom från levande och tork-dödade träd på hög höjd, nära trädgränsen (1600-2300 m.ö.h.). Att en del av materialet kommer från tork-dödade träd, antyder att inte bara temperaturen, utan även nederbörd, är av betydelse för trädringars tillväxt.

På lång sikt påverkas trädens tillväxt inte bara av klimatologiska faktorer. För att ta bort dessa icke-klimatologiska faktorer, men samtidigt bevara variabiliteten på lång sikt, har man i studien från French Alps använt en metod som inom dendroklimatologin kallas standardisering, vilket emellertid leder till att viss klimatinformation går förlorad (Grudd m.fl. 2008). Vidare har proxyserien kalibrerats, dvs. överförts till klimat respektive temperatur, mot HISTALP-data (Historical Instrumental Climatological Surface Time Series Of The Greater Alpine Region) från punktvärden omslutande French Alps-området, för perioden 1760-2003 (HISTALP 2012). Trots justeringar, utförda för att begränsa varma bias i tidiga instrumentella temperaturmätningar, kvarstår ”kallare” värden hos rekonstruktionen än hos de instrumentella mätningarna mellan 1760 och 1840. Proxyseriens utvecklingen av temperaturer under 1900-talet, inklusive den allra senaste uppvärmningen är dock i linje med HISTALP (Corona m.fl. 2011).

Lake Silvaplana – Sommartemperaturer baserade på sjösediment

Larocque-Tobler m.fl. (2010) har i en studie av en sjö med varvade sediment, Lake Silvaplana (Tabell 2a), i Schweiz, rekonstruerat sommarmedeltemperaturen (juli) under det senaste millenniet. Med hjälp av fjädermyggor i sjöns varvade sediment har temperaturen härletts med en upplösning på 1-20 år (Larocque-Tobler m.fl. 2010).

Det analyserade provmaterialet i studien av Larocque-Tobler m.fl. (2010) består av 649 sedimentprover från fyra olika borrkärnor, som täcker de senaste 1000 åren. Prover från

borrkärnorna jämnades ut genom att prover tilldelades det närmaste kalenderåret. För de kalenderår som saknade temperaturvärde, utfördes en linjär interpolation från de närmaste proverna. För de kalenderår som hade flera än ett värde användes genomsnittsvärdet. För att undvika en förändrad variabilitet till följd av varierande tidsupplösning och interpolation, jämnades temperaturserien ut med ett filter. Tillbaka till år 1400 utfördes filtreringen med max 10 år. I detta arbete används data från Lake Silvaplana för perioden 1400-1995 i jämförelsen med modelldata.

Analysen av sjösediment utgör den del av paleoklimatologin som kallas paleolimnologi. Sjösediment är nära kompletta arkiv av forna limnologiska förändringar och kan användas för rekonstruktion av forna klimatförändringar. Kontinuerliga serier av sediment kan hämtas med olika typer av borrkärnor från de allra flesta sjöar. Inom paleolimnologin tittar man t.ex. på förändringar i sedimentets mineralogi och på förekomst av organismer som levde i sjön. Då sjösedimenten är varvade (dvs. har ett sedimentlager per år), kan dess kronologi fastställas genom att man räknar dessa lager (Smol och Cumming 2000).

Fjädermyggor är beroende av temperaturklimatet för sin livscykel och de har visat sig vara en av de mest lovande biologiska indikatorerna av forna klimatförändringar (Larocque och Bigler 2004). Även andra faktorer än klimat påverkar myggorna, men temperatur har visat sig vara en av de viktigaste faktorerna. Trots att Lake Silvaplana är djup (77 m), kan man hitta ett samband mellan förekomsten av myggor och temperatur; detta för att uppsättningen av fjädermyggor domineras av strandnära taxa (Larocque-Tobler m.fl. 2010).

Man har tidigare funnit en överensstämmelse mellan sommarmedeltemperaturen rekonstruerad från sediment i Lake Silvaplana och instrumentella temperaturdata, som går tillbaka till 1864, från en meteorologisk station (Sils-Maria) vid stranden av sjön. Medelskillnaden mellan dessa serier är endast 0,7°C, vilket indikerar att de rekonstruerade uppskattningarna är trovärdiga. Meteorologiska data från samma station visar att den högsta månadsmedeltemperaturen uppmäts i juli (Larocque-Tobler m.fl. 2010). På längre tidsskala (tillbaka till ca 1580) fann man att rekonstruktionen från Lake Silvaplana överensstämmer väl med åtta andra paleoklimatologiska uppgifter från Alpregionen (Larocque-Tobler m.fl. 2010).

Stockholm – Vinter/vårtemperaturer baserade på islossningen i Stockholms hamn
I studien från Stockholm har Leijonhufvud m.fl. (2010) använt sig av dokumentationsdata som vittnar om islossningen i Stockholms hamn (Tabell 2a) för att rekonstruera vinter/vårtemperaturen (januari-april) för perioden 1502-2008 . Hypotesen bakom studien är att isen i hamnen ligger kvar längre under en kall vinter än vad den gör under en varm vinter, vilket är starkt relaterat till medellufttemperaturen under vintern (Leijonhufvud m.fl. 2010).

De dokumentationsdata som använts i Stockholms-studien kommer från en rad olika källor, både kvantitativa (såsom tulljournaler, fraktböcker och hamnavgifter) och kvalitativa (beskrivande källor, såsom statliga brev och privata dagböcker). De allra flesta data kommer från Stockholm, men de kompletteras med data från Västerås, som korrelerar väl med Stockholmsdata. Från och med år 1533 finns tulljournaler, där datum anges för det första fartyget som seglade in i hamnen för året, eller när det första avseglade (Leijonhufvud m.fl. 2010). För tiden före 1533 används främst bevarade brev från riksföreståndarnas och Gustav

Vasas kanslier. Av de kvalitativa respektive kvantitativa data har två självständiga tidsserier konstruerats, av vilka den kvantitativa serien är den huvudsakliga. Data har tolkats noggrant för att användas i rekonstruktion av tidsserier, som speglar havsistillståndet i Östersjön (Leijonhufvud m.fl. 2010).

Rekonstruktionen från Stockholm gjordes om till en medelvärdesserie och kalibrerades mot åren 1756-1860, eftersom det från denna period finns instrumentellt uppmätta temperatur, deskriptiv information och tidpunkten för seglarsäsongens start. Sambandet som erhölls för kalibreringsperioden tillämpas på tiden före 1756, då uppmätta temperaturer saknas. Antagandet om att seglarsäsongens början motsvarar en viss medeltemperatur under januari-april håller inte för tiden efter 1860, eftersom man då började använda sig av fartyg med metallskrov och isbrytare. En svårighet med tulljournaler är att mängden handel minskar ju längre man går tillbaka i tiden. Ju mer handel, desto troligare är det att det första skeppet kom till Stockholms hamn så fort vattnet var isfritt (Leijonhufvud m.fl. 2010).

Den kvantitativa serien från studien av Leijonhufvud m.fl. (2010) har jämförts med en gridad temperaturrekonstruktion över Europa för december-maj och man fann stark korrelation från omkring år 1900. Detta beror dock förmodligen på att båda serierna är baserade på instrumentella mätningar under denna period. Före 1750 är korrelationen dem emellan låg, vilket förmodligen beror på att den gridade serien innehåller för lite data från området från den tiden. Mellan Stockholmsdata och islossningsdata från västra Östersjöregionen finns en stark korrelation under extrema perioder under 1900-talet. Generellt sett verkar korrelationen med andra serier bli svagare ju längre tillbaka i tiden man går, vilket förmodligen reflekterar datakvalitén i tidigare serier (Leijonhufvud m.fl. 2010).

Swiss Plateau – Vår/sommartemperaturer baserade på vindruvors skördedatum
Proxyserien från Swiss Plateau är en rekonstruktion av vår/sommartemperaturer (april-augusti) för perioden 1480-2006, och publicerades av Meier m.fl. (2007). Rekonstruktion är baserad på historiska dokumentationsdata om vindruvors skördedatum. Data är hämtat från 15 olika platser på den schweiziska platån i nordvästra Schweiz (Tabell 2a).

Vindruvors tillväxt och mognad är beroende av temperaturen under hela vegetationsperioden och kan sättas i relation till skördedatum vid slutet av växtsäsongen. Dataserien har kalibrerats mot genomsnittliga månadsdata från stationer i Genève och Basel för åren 1928-1979, samt verifierats över 1980-2006. Tolv dagars skillnad i vindruvsskörd motsvaras av ungefär 1° skillnad i april-augustitemperatur (Meier m.fl. 2007).

Datum för vindruvsskörd är en viktig klimatproxy för sommartemperatur, eftersom de förser oss med en av de längsta oavbrutna serierna utan kronologiska osäkerheter, men på grund av förändringar i vinodlingsdistriktens traditioner och annan miljöpåverkan än klimat, kan osäkerheter i proxyserien själv vara underskattade (Meier m.fl. 2007)

Luckor i dataserien finns mellan 1481-1600, år 1876, mellan 1879-1884 och år 1927. Anledningen till luckan mellan 1879-1884 var en allvarlig vindruvsskördsjukdom, som uppstod till följd av hög nederbörd, vilket antyder att inte bara temperatur är en viktig klimatfaktor för vindruvors skördedatum. Under 29 septembermånader under de senaste 500 åren var nederbörden ovanligt hög. Den uppskattade felmarginalen på årlig skala är 0,82° för rekonstruktionsperioden, men med tanke på osäkerheterna nämnda ovan är denna

uppskattning förmodligen optimistisk (Meier m.fl. 2007)

Meier m.fl. (2007) har jämfört sin rekonstruktion med oberoende temperaturuppskattningar från Europa, t.ex. av vindruvors skördedatum i Bourgogne, trädringar i Schweiziska Alperna, multi-proxy från Alpregionen, och Europeiska landregionen. Alla jämförelser, förutom den med trädringsrekonstruktionen, visar liknande variabilitet. Starkast samband finns med rekonstruktionen av vindruvors skördedatum i Bourgogne (Meier m.fl. 2007).

Torneträsk – Vår/sommartemperaturer baserade på trädringsvidd -och densitet
I studien från Torneträsk har Grudd (2008) rekonstruerat medeltemperaturen för vår/sommar (april-augusti) för varje år under perioden 500-2004. Detta har han gjort genom att analysera dels vidden på årsringarna i träd, dels den maximala densiteten i sommarved från området kring sjön Torneträsk i Lappland (Tabell 2a). Endast data från för det senaste millenniet kommer att användas i det här arbetet.

De rekonstruerade medeltemperaturerna anges i studien från Torneträsk som absoluta temperaturer. Provmaterialet i studien består av fossila tallar och levande tallar. Databasen för analyser av vedens maximala densitet består av 100 träd och täcker perioden 441-2004. För analys av trädringsvidd täcks perioden 500-2005 av 662 träd (Grudd 2008).

Traditionellt sett har man inom dendroklimatologin studerat årsringarnas tjocklek, vilka huvudsakligen baseras på ett kortvarigt värde av sommartemperaturen. Tidigare studier från Torneträsk, utförda med denna metod, har dock visat på felaktigt låga temperaturer. Trädringarnas densitet relaterar till en längre sommarperiod, varför korrelationen mellan trädringarnas densitet och sommartemperaturen är högre, och därmed ger bättre klimatinformation. Rekonstruktioner baserade på enbart vedens densitet leder till högre temperaturuppskattningar än vad man funnit i tidigare studier (Grudd 2008).

Trädens tillväxt i norra Fennoskandia begränsas framför allt av låga sommartemperaturer i Lappland. Även icke-klimatologiska faktorer påverkar trädens tillväxt; varför standardisering har använts. Kronologierna i Torneträsk-studien är kalibrerade/verifierade mot lokala och regionala, instrumentella klimatmätningar. Medeltemperaturen från april-augusti från Bottenviken användes för de två perioderna 1860-1931 och 1932-2004 samt för hela perioden 1860-2004. För samtliga perioder ger data för vedens densitet bättre korrelation med denna medeltemperatur än vad data för årsringarnas tjocklek gör. Korrelationen av vedens densitet och medeltemperaturen under hela perioden är hög (R=0,79). Felmarginalen kan emellertid vara stor, på grund av den begränsade tillgången till data (Grudd 2008).

Ett problem med temperaturrekonstruktioner baserade på trädringsdata är att de slutar just före de extrema temperaturökningar som skett under de senaste decennierna. Dessutom har trädtillväxtens känslighet till temperatur förändrats under andra halvan av 1900-talet, vilket betyder att trädringsdata avviker från instrumentella data (Grudd 2008).

2.3 Observationsdata

Långa och homogena, instrumentella temperaturserier (dvs. termometermätningar) är viktiga för studier inom paleoklimatologi (Jones och Moberg 2003). Instrumentella observationsmätningar ger den mest exakta kvantitativa representationen av tidigare klimat

(Moberg m.fl. 2006). Med hjälp av sådana kan vi bedöma användbarheten och trovärdigheten hos proxydata (Jones och Moberg 2003). Tyvärr är antalet långa tidsserier mycket begränsat. Det finns bara några enstaka serier som startar före år 1800 (Camuffo och Jones 2002). Det var först under senare delen av 1800-talet som serierna blev bättre i Europa.

2.3.1 Climate research unit (CRU)

Climate Research Unit (CRU) är ett av de ledande instituten i världen som studerar naturlig och antropogen klimatförändring. De har utvecklat ett antal dataserier som används i stor omfattning inom klimatforskning, däribland en global klimatdataserie, som används för att övervaka klimatsystemet (CRU 2012 A). FNs världsmeteorologiska organisation (WMO) visar att CRU-data överensstämmer väl med observationsdata från de andra ledande instituten i värden; National Climate Data Center och Goddard Institute for Space Studies (Fig. 6).

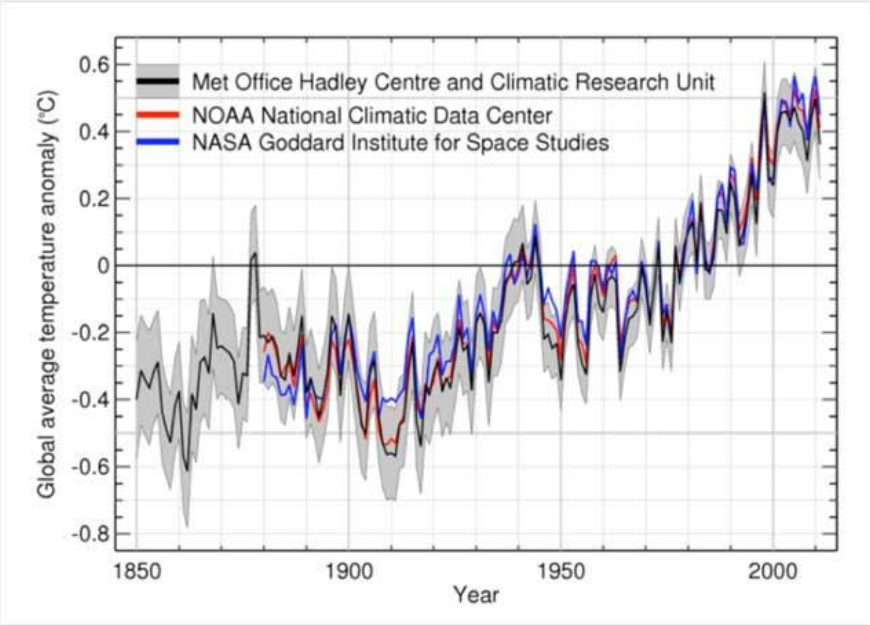


Fig. 6: Överensstämmelsen mellan CRU och observationsdata från andra ledande institut i världen; National Climate Data Center och Goddard Institute for Space Studies, visas här i ett diagram från den Världsmeteorologiska organisationen, WMO.

Månatlig temperaturdata har hämtats från 3000 stationer från världens landregioner för uppbyggnaden av CRU-serierna. Täckning av data är allra störst i t.ex. USA, Europa och Japan. Datapunkter som saknats har genererats från befintliga datapunkter. Stationsdata har gjorts om till anomalier mot referensperioden 1961-90 och gridats i rutor om 5° latitud och longitud, för att täcka hela världen (CRU 2012 B).

Versionen av CRU-data som har tagits fram för denna studie heter CRU-TS31. Dessa CRU-data är årsupplösta och representerar åren 1901-2009.

2.3.2 SMHIs observationsstation i Abisko

Från SMHIs observationsstation i Abisko, som ligger intill Torneträsk (ca 68˚20' N; 18˚50' Ö, Höjd över havet: 388 m; ej i tabell) finns observationsdata sedan 1966. För att möjliggöra ytterligare jämförelser mellan proxyserien från Torneträsk och observationsdata, används temperaturdata från denna observationsstation för perioden 1966-01-01–2011-11-01.

2.4 Metoder

Extraherade proxydata och motsvarande data från RCA3 (modelldata), CRU (observationsdata) och data från SMHIs observationsstation i Abisko (observationsdata) används i jämförelser i detta arbete. Dataserierna är kvantifierbara och kan sammanfattas i statistisk form. De statistiska resultaten kan användas för att besvara de frågeställningar som finns i detta arbete.

2.4.1 Datahantering

Programmeringsspråket MATLAB (MATrix LABoratory, version R2010b) används för visualisering, filtrering och statistiska analyser av extraherade data. MATLAB är en interaktiv miljö, och ett scriptspråk, där skrivna program tolkas i körningen (Bergman och Gustafsson 2003; MathWorks 2012).

Visualisering

I MATLAB skrivs och körs program, här för att visualisera de fem proxydataserierna i grafer; dels tillsammans med motsvarande observationsdataserier; dels tillsammans med motsvarande modelldataserier. Både filtrerade och ofiltrerade dataserier av temperaturanomalier, och i undantagsfall även absoluta temperaturer, visualiseras.

Filtrering

Eftersom modellens kalender inte är i fas med den riktiga kalendern och dess temperaturdata därför inte kan jämföras med specifika år, är det inte meningsfullt att göra en korrelationsanalys för mellanårsvariabiliteten mellan modell- och proxydata. För att en korrelationsanalys mellan proxydata och modelldata ska vara meningsfull måste dataserierna vara filtrerade. Statistiska analyser av medelvärde och standardavvikelse är meningsfulla både för filtrerade och ofiltrerade data.

Dataserierna filtreras med ett löpande medelvärde på 30 år och med ett löpande medelvärde på 100 år (benämns hädanefter ”Filter30” respektive ”Filter100”). Ett löpande medelvärde för en tidsserie, är en serie av medelvärden av ett bestämt antal observationer, som flyttar sig längs med den ursprungliga serien; detta för att jämna ut kurvan och möjliggöra statistiska analyser i ett längre tidsperspektiv (SCB 2012). Det här betyder att de filtrerade tidsserierna har ett mindre antal datapunkter jämfört med ursprungsserierna. Då data filtreras med Filter30 finns alltså 30 punkter mindre och då data filtreras med Filter100 finns alltså 100 punkter mindre än i ursprungsdataserierna.

Proxydataserierna, då de filtrerats med löpande medelvärde på 100 år; används för att definiera den varmaste respektive den kallaste hundraårsperiod under det senaste millenniet. Den kallaste hundraårsperioden definieras med avseende på både modell och proxy för samtliga proxyplatser. Den varmaste hundraårsperioden definieras endast för ”French Alps” och ”Torneträsk”; detta eftersom dessa två serier innefattar tiden för den Medeltida Värmeperioden, medan Lilla Istiden definieras för alla proxyserier och motsvarande modellserier.

Statistiska metoder

Data sammanfattas med avseende på medelvärden, standardavvikelser och korrelation. Även autokorrelationen, dvs. sambandet mellan intilliggande värden i en tidsserie (SCB 2012),

beräknas för var och en av de ofiltrerade proxyserierna och motsvarande modelldata. År där temperaturdata för proxyserierna saknas tas inte med i beräkningen av korrelation; detta för att resultaten så gott som möjligt ska representera bakomliggande data.

2.4.2 Analyser

Eftersom värden för alla proxyserier finns angivna i temperaturanomalier (referensår 1961-90), görs statistiska beräkningar och analyser utifrån dessa. Relativa skillnader i olika tidsperioder inom de olika tidsserierna kan här betraktas. Från Torneträsk finns även absoluta temperaturdata att tillgå, vilka ligger till grund för analyser av absolutvärden.

Tidsserieanalyser utförs, vilka här innefattar analyser av skillnader hos klimatvariabeln temperatur över tid. Detta görs i jämförelser mellan proxydata och CRU-data under det senaste seklet (1901-2009), mellan proxydata och observationsdata från en SMHI observationsstation sedan 1966, samt i jämförelser mellan modelldata och proxydata under det senaste millenniet (1000-1998).

Jämförelse mellan proxydata och observationsdata

I denna studie används temperaturdata från CRU för att användbarheten av valda temperaturproxyserier i någon mån ska kunna bedömas. Eftersom proxyserierna ska representera temperaturen med årsupplösning, kan man förvänta sig att de ska överensstämma med CRU i korta tidsskalor. Temperaturproxyserierna som behandlas i denna studie jämförs mot CRU-data för motsvarande gridrutor. Jämförelsen görs så detaljerat som möjligt, dvs. med ofiltrerade dataserier. Här jämförs de olika proxyserierna med CRU med hjälp av de statistiska metoderna medelvärde, standardavvikelse och korrelation; i den mån proxydata finns för denna period. Om överensstämmelsen är god mellan proxyserierna och CRU, är fortsatta analyser av dessa meningsfulla (Jones och Moberg 2003). En sådan överensstämmelse säger dock ingenting om de aktuella proxyseriernas trovärdighet längre tillbaka i tiden, t.ex. på millennieskala. Dessutom finns det färre temperaturdata från observationer ju längre tillbaka i tiden, varför osäkerheterna blir större ju längre tillbaka i tiden man går (CRU 2012 B). De absoluta temperaturerna från Torneträsk-serien jämförs även mot temperaturdata från SMHIs mätstation i Abisko.

Jämförelse mellan proxydata och RCA3

Alla proxydataserier jämförs med statistiska metoder med modelldata för motsvarande tid och rum. Fokus för analyserna ligger dels på de varmaste respektive kallaste 100-årsperioderna under det senaste millenniet, dels på hela tusenårsperioden.
Analyserna utförs med avseende på temperaturanomalier (referensperiod 1961-90) för alla proxyserier; för Torneträsk även med avseende på absoluta temperaturer. Jämförelserna utförs för de gridrutor i modellen, där vardera proxyserie har sin centrala punkt (Tabell 2a). För modelldata från Torneträsk utförs även analyser för den närliggande gridruta, där höjden över havet stämmer bättre överens med proxyseriens höjd över havet.

Med data filtrerat med ett löpande medelvärde på 100 år, definieras den varmaste/kallaste 100-årsperioden i proxyserierna respektive modellserierna. Inträffandet av de varmaste/kallaste hundraårsperioderna enligt proxyseriernas definitioner jämförs dels mot de varmaste/kallaste perioderna enligt modellens definitioner, dels mot tidigare känd information om varma/kalla perioder under det senaste millenniet. 100-årsperioderna och hela millenniet analyseras med ovan nämnda statistiska metoder; framför allt med Filter30,

och i vissa fall med ofiltrerade data eller Filter100.

Kända perioder av hög/låg solaktivitet samt perioder av hög vulkanisk aktivitet jämförs med varma/kalla perioder enligt proxy- och modelldata.

Korrelationsanalys av dataserier från geografiskt närliggande/spridda platser
Korrelationsanalys utfördes dels mellan proxyserierna från närliggande platser, dvs. de från Alpområdet, dels mellan proxyserierna från spridda platser, dvs. de från Alpområdet och de från norra Skandinavien; för ofiltrerade data och för data filtrerade med ett löpande medelvärde på 30 år; detta på sekelskala och på millennieskala. Mellan modelldataserier från motsvarande platser utfördes korrelationsanalyser med 30-årsfiltreringen på millennieskala. Mellan observations dataserier utfördes korrelationsanalyser för ofiltrerade data och för data filtrerade med ett löpande medelvärde på 30 år, på sekelskala. Man kan förvänta sig att korrelationen mellan dataserier från närliggande platser är stark och att korrelationen mellan dataserier från spridda platser är svagare.

3 Resultat och diskussion

I kapitel 3.1 redovisas resultaten av jämförelserna mellan proxydata och observationsdata i tabell. Resultaten presenteras i text och grafer i kapitel 3.1.1-3.1.5, där de även diskuteras. Proxyseriernas användbarhet, enligt de funna resultaten, diskuteras sedan i kapitel 3.1.6.

I kapitel 3.2 redovisas resultaten av jämförelserna mellan modelldata och proxydata i tabeller. Resultaten av medelvärden och standardavvikelser presenteras i text och grafer i kapitel 3.2.1-3.2.5, där de även diskuteras. I kapitel 3.2.6 presenteras och diskuteras resultat av korrelations- och autokorrelationsanalyser av proxydata och modelldata.

Resultaten av korrelationsanalyser av proxy-, CRU- och modellserier, från geografiskt närliggande/spridda platser redovisas i tabeller, samt presenteras i text, i kapitel 3.3. I samma kapitel diskuteras dessa resultat.

Några av de faktorer som försvårar jämförelsen mellan dataserierna; relaterade till proxydata (kap. 3.4.1) och modelldata (kap. 3.4.2), presenteras och diskuteras i kapitel 3.4.

Slutligen presenteras slutsatser och förslag till framtida studier i kapitel 3.5.

3.1 Jämförelser mellan proxydata och observationsdata

Medelvärden och standardavvikelser för ofiltrerade data av temperaturanomalier från var och en av de fem proxyserierna samt från motsvarande CRU-data visas i Tabell 3. I tabellen finns även värden av korrelationen mellan proxy och CRU. Motsvarande statistik finns för absoluta temperatur från Torneträsk. Dessa resultat presenteras och diskuteras i kapitel 3.1.1-3.1.6. Man ska komma ihåg att förklaringsgraden av korrelationen är korrelationskoefficienten i kvadrat och att en betydande del av variabiliteten i proxyserierna därmed förklaras av någonting annat än temperatur (Tabell 3).

Tabell 3: *Medelvärde och standardavvikelse för var och en av de fem proxyserierna (för temperaturanomalier och absoluta temperaturer) samt från CRU för motsvarande platser. Korrelationen avser korrelationskoefficienten mellan proxyserierna och CRU, för den period från vilken data finns tillgängliga från båda serierna. Proxyserien från Stockholm baseras under det senaste seklet på observationsdata och är därmed inte helt relevant att jämföra med CRU.*

Plats	Period	Medelvärde	Standard-avvikelse	Korre-lation
French Alps, anomalier (proxy/CRU)	**1901-2008**	-0,02/ 0,20	0,48/ 0,97	0,68
Lake Silvaplana, anomalier (proxy/CRU)	**1901-1995**	0,37/-0,02	0,75/ 1,34	0,44
Stockholm, anomalier (proxy/CRU)	**1901-2008**	*0,34/ 0,34*	*1,94/ 1,88*	*1,00*
Swiss Plateau, anomalier (proxy/CRU)	**1901-2006**	0,23/ 0,18	0,63/ 0,91	0,74
Torneträsk, anomalier (proxy/CRU)	**1901-2004**	-0,21/ -0,04	0,83/ 0,99	0,75
Torneträsk, absolut temp. (proxy/CRU)	**1901-2004**	7,88/ 3,34	0,83/ 0,99	0,75

3.1.1 French Alps/CRU

Medelvärden och standardavvikelser för temperaturanomalier i proxyserien från French Alps skiljer sig från i CRU-serien från samma plats, under perioden 1901-2008. Medelvärdet för för proxyserien/CRU-serien under perioden 1901-2008 är -0,02/0,20 och standardavvikelsen för proxyserien/CRU-serien är 0,48/0,97. Korrelationen mellan serierna är 0,68, dvs. relativt stark (Fig. 7, Tabell 3). Proxyseriens avvikelse från CRU-data skulle kunna förklaras av att trädringar som klimatarkiv generellt sett är bristfälliga för det senaste seklet, dels på grund av bristande tillgång till data, dels på grund av träds förändrade känslighet mot temperatur (Grudd 2008).

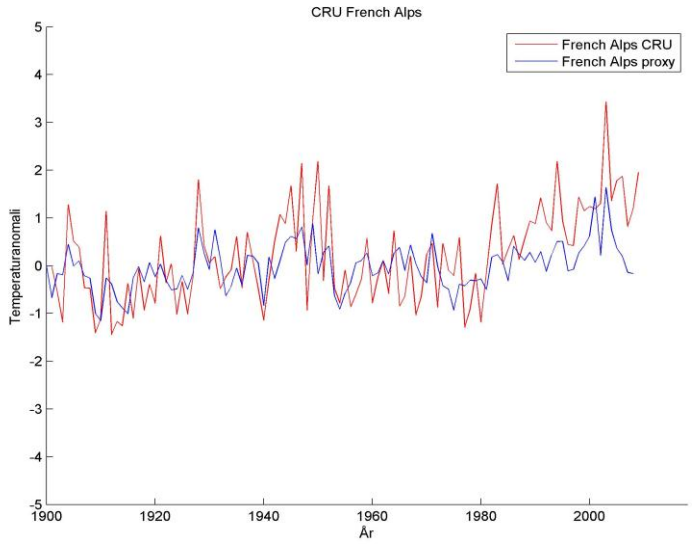


Fig. 7: Proxyserien från French Alps för perioden 1901-2008, plottad tillsammans med CRU-serien.

3.1.2 Lake Silvaplana/CRU

För proxyserien från Lake Silvaplana skiljer sig medelvärdet och standardavvikelsen markant från CRU-seriens värden. Medelvärdet för proxyserien under perioden 1901-1995 är 0,37 och standardavvikelsen är 0,75. Medelvärdet för CRU-serien under perioden 1901-2009 är -0,02 och standardavvikelsen är 1,34. Korrelationen mellan serierna är 0,44, dvs. svag (Fig. 8, Tabell 3). De stora skiljaktigheterna mellan proxydata och observationsdata från Lake Silvaplana skull kunna relateras till de att tidsupplösningen i de två tidsserierna inte överensstämmer, vilket diskuteras vidare i kapitel 3.1.6.

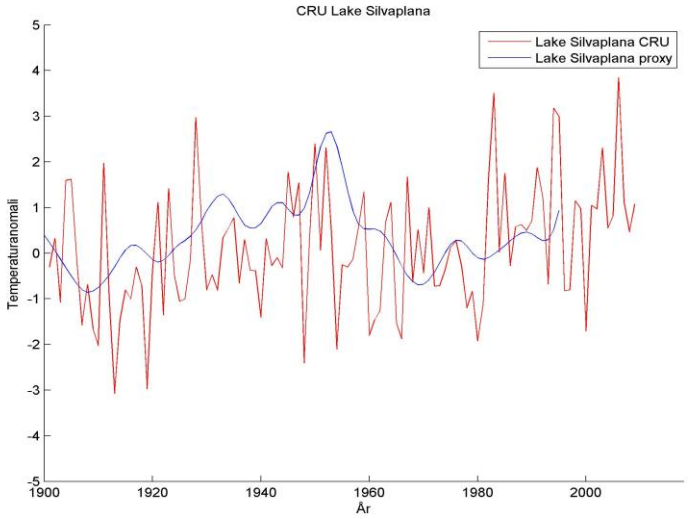


Fig. 8: Proxyserien från Lake Silvaplana för perioden 1901-1995, plottad tillsammans med CRU-serien.

3.1.3 Stockholm/CRU

Under det senaste seklet har proxyserien från Stockholm baserats på temperaturdata från ett gammalt astronomiskt observatorium i Stockholm, där temperaturmätningar har gjorts sedan 1756 (Leijonhufvud m.fl. 2010). Denna del av serien representerar därmed inte den rekonstruktion av islossningsdatum som baserats på dokumentationsdata, varför jämförelsen mellan dessa observationsdata och observationsdata från CRU är inte helt relevant. I Tabell 3 kan ses att medelvärdena av temperaturanomalier/standardavvikelse är identiska/näst intill identiska i de två serierna, medan korrelationen är fullständig. De små skillnader som finns mellan serierna verkar i huvudsak uppstå under de senaste två decennierna (Fig. 9), vilket skulle kunna förklaras med att mätningarna som använts i proxyserien (men inte CRU) har korrigerats för den artificiella uppvärmningen som orsakats av stadens tillväxt; detta för att serien ska representera de mer naturliga förändringarna. Mätstationen i Stockholm låg nämligen på en lantlig plats på 1750-talet, en plats som idag ligger på Odenplan i centrala staden.

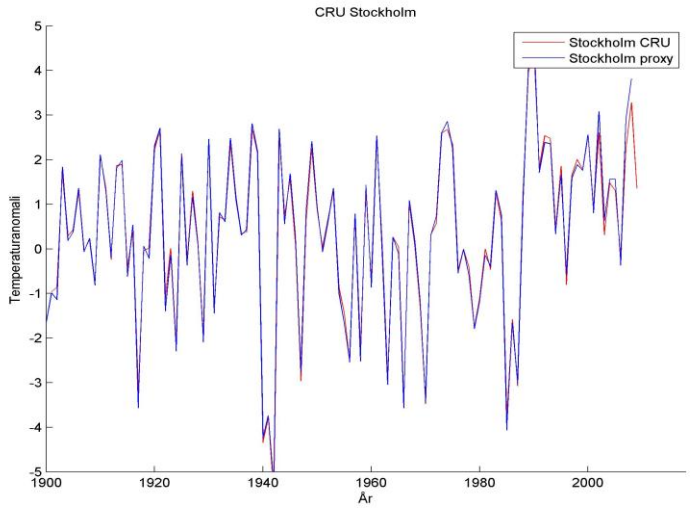


Fig. 9: Proxyserien från Stockholm för perioden 1901-2008, plottad tillsammans med CRU-serien.

3.1.4 Swiss Plateau/CRU

För proxyserien från Swiss Plateau och CRU-serien från motsvarande plats, är medelvärdena under perioden 1901-2006 så gott som överensstämmande (0,23 respektive 0,18), medan standardavvikelsen är markant lägre för proxyserien än för CRU-serien; 0,63 respektive 0,91 (Fig.10, Tabell 3). Den största skillnaden mellan proxy- och CRU-serierna finns under seklets första två decennier, vilket förklarar en del av skillnaden i standardavvikelse. Korrelationsgraden är 0,74, dvs. relativt stark (Fig. 10, Kap. 3.1.7, Tabell 3).

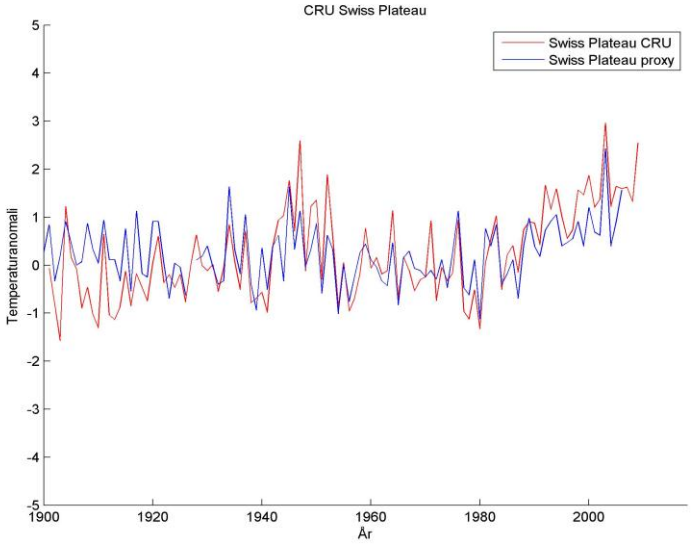


Fig. 10: Proxyserien från Swiss Plateau för perioden 1901-2006, plottad tillsammans med CRU-serien.

3.1.5 Torneträsk /observationsdata

Korrelationsgraden för temperaturanomalier från Torneträsk är 0,75, dvs. relativt stark (Fig. 11, Kap. 3.1.7, Tabell 3). Standardavvikelsen för de båda serierna är likvärdig (proxy:0,83, CRU: 0,99), medan medelvärdena skiljer sig åt (proxy:-0,21, CRU: -0,04) under perioden 1901-2004. Skillnader mellan serierna skulle kunna förklaras med att trädtillväxtens känslighet till temperatur förändrats under andra halvan av 1900-talet, vilket betyder att trädringsdata avviker från instrumentella data. Dessutom tar Torneträsk-data för trädringsdensitet slut på 1980-talet, dvs. före 1900-talets ”extrema” temperaturökning,

varefter proxyserien byggs upp av enbart data för trädringsvidd, vilket innebär en större osäkerhet (Grudd 2008).

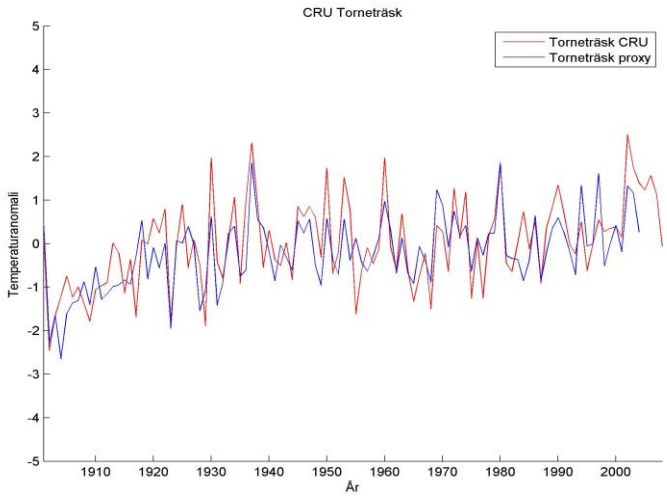


Fig. 11: Proxyserien från Torneträsk för perioden 1901-2004, plottad tillsammans med CRU-serien.

Observationsdata från CRU ger för perioden 1901-2004 medelvärdet av april-augustitemperaturer 3,34˚C (Fig. 12, Tabell 3), vilket överensstämmer väl med medelvärdet från modellen, för hela millenniet (Tabell 4b), medan värdet för proxyserien under det senaste seklet är markant högre, 7,88 ˚C (Fig. 12, Tabell 3).

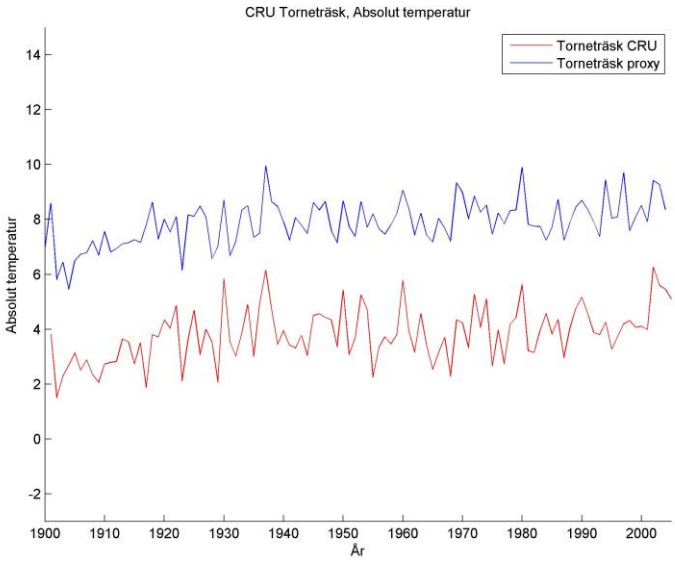


Fig. 12: Proxyserien från Torneträsk, absolut temperatur för perioden 1901-2004, plottad tillsammans med absolut temperatur från CRU.

Värden för medeltemperaturen för månaderna april-augusti under observationsperioden 1966-01-01–2011-11-01 vid observationsstationen i Abisko, är markerade med röda ringar i Fig. 13 (ej i tabell). Dessa värden är: april: -2,17˚C; maj: 3,33˚C; juni: 8,69˚C; juli: 11,50˚C och augusti: 10.08˚C. Medelvärdet april-augusti/maj-augusti är ca 6,6 ˚C/8.4˚C (Fig. 13).

Temperaturdata från SMHIs observationsstation i Abisko visar lägre medeltemperatur (april-augusti) under perioden 1966-2011 än proxyserien från Torneträsk under perioden 1901-

2004. Värt att notera är att medelvärdet för maj-augusti beräknat utifrån temperaturdata från observationsstationen (1901-1966), däremot liknar medelvärdet för april-augusti baserat på proxyserien från Torneträsk (1901-2004). Det verkar därmed inte rimligt att göra en sträng jämförelse mellan proxy och modell.

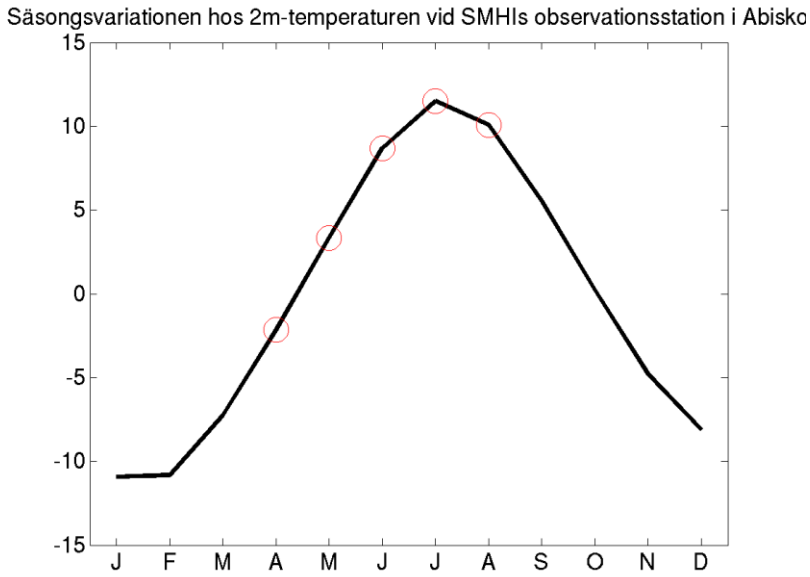


Fig. 13: Medeltemperaturen vid SMHIs observationsstation i Abisko för varje månad under perioden 1966-01-01–2011-11-01. Röda ringar markerar medelvärden för månaderna april, maj, juni, juli och augusti.

3.1.6 Proxyseriernas användbarhet

Resultaten av jämförelserna mellan proxyserier och observationsdata
från de senaste ca 100 åren, visar inget generellt mönster för alla proxyplatserna. I jämförelsen mellan proxyserien från Lake Silvaplana och CRU är skiljaktigheten stor. Detta skulle kunna förklaras med att proxyseriens data har interpolerats och filtrerats, vilket har resulterat i upplösningen 1-20 år. Det skiljer sig från CRU-dataseriens årliga upplösning och serierna verkar därmed inte jämförbara. Att jämföra proxyserien med modelldata, på ett längre tidsperspektiv, anses ändå meningsfullt, eftersom data då filtreras ytterligare, vilket innebär att mellanårsvariabilteten kommer spela mindre roll. I jämförelsen mellan observationsdata från CRU och proxyserierna från Swiss Plateau och French Alps noteras markanta skillnader i medelvärden och standardavvikelser i delar av tidsserien. Korrelationen för tidsperioden är relativt stark, varför fortsatta analyser anses meningsfulla. Det är emellertid viktigt att ha i åtanke att en förklaringsgrad är korrelationskoefficienten i kvadrat (angiven i procent). I proxyserien från French Alps är förklaringsgraden därmed ca 46 % (0,68*0,68*100%), dvs. 46 % av variabiliteten kan förklaras av temperatur – resten av någonting annat. Proxyserien från Torneträsk uppvisar markanta skillnader jämfört med observationsdata från CRU, vilket blir allra tydligast då absoluta temperaturer analyseras. Även skillnader mellan medelvärden från Torneträsk-serien och temperaturdata från SMHIs observationsstation i Abisko är stora. Dessa resultat är uppseendeväckande; och fortsatta analyser av proxyserien är av intresse; inte minst för att noggrannare studera dessa markanta skiljaktigheter. Då proxyserien från Stockholm under det senaste seklet baserats på observationsdata säger jämförelsen mellan denna och CRU ingenting om seriens användbarhet. En jämförelse mellan denna vinterproxyserie och modelldata är ändå av intresse, inte minst för att proxyserien är en av få långa rekonstruktioner av vintertemperaturer.

3.2 Jämförelser mellan proxydata och modelldata

Resultaten i tabellerna 4a, 4b, 5, 6a och 6b (nedan) presenteras och diskuteras i kapitel 3.2.1-3.2.6. Då medelvärden och standardavvikelser anges i texten, avses värdet av Filter 30.

Medelvärde, standardavvikelse och korrelation för ofiltrerade/filtrerade data avseende samtliga proxyserier och motsvarande modellseriers temperaturanomalier under det senaste millenniet presenteras i Tabell 4a.

Tabell 4 a: Medelvärde av temperaturanomalier för samtliga proxyserier och motsvarande modellserier, avseende det senaste millenniet för data filtrerade med ett löpande medelvärde på 30 år (Filter30) samt standardavvikelser för dessa dataserier för Filter1 och Filter30. Korrelation avser korrelationskoefficient av proxy/modell för data filtrerat med ett löpande medelvärde på 30- respektive 100 år (Filter30 resp. Filter100). För Swiss Plateau, Filter100, saknas värde, pga. att det finns många luckor i serien.

Filter	Plats	Medelvärde, anomalier (proxy/RCA3)	Standardavvikelse, anomalier (proxy/RCA3)	Korrelation (proxy/RCA3)
1	French Alps	-	0,48/ 0,76	-
1	Lake Silvaplana	-	1,1/ 1,19	-
1	Swiss Plateau	-	0,72/ 0,69	-
1	Stockholm	-	1,9/ 2,02	-
1	Torneträsk	-	0,93/ 1,06	-
30	French Alps	-0,06/ -0,88	0,18/ 0,27	-0,12
30	Lake Silvaplana	-0,27 / -1,27	0,75/ 0,37	0,63
30	Swiss Plateau	-0,06/ -0,68	0,25/ 0,23	0,20
30	Stockholm	-0,57/ -1,42	0,68/ 0,50	0,35
30	Torneträsk	0,09/ -1,18	0,53/ 0,33	-0,39
100	French Alps	-	-	-0,14
100	Lake Silvaplana	-	-	0,92
100	Swiss Plateau	-	-	-
100	Stockholm	-	-	0,52
100	Torneträsk	-	-	-0,53

I Tabell 4b visas medelvärde och standardavvikelse för absoluta temperaturer under det senaste millenniet avseende proxyserien från Torneträsk, samt från modellserier från två olika gridrutor; detta för data filtrerat med ett löpande medelvärde på 30 år.

Tabell 4 b: Medelvärde och standardavvikelse av absoluta temperaturer för proxyserien från Torneträsk och från modellseriens gridruta där höjden över havet bäst motsvarar den i proxyserien (bästa höjd), samt den gridruta som geografiskt motsvarar proxyserien (geografisk motsvarighet); avseende det senaste millenniet, för data filtrerade med ett löpande medelvärde på 30 år (Filter30).

	Medelvärde: proxy/ RCA3 ”bästa höjd”/ RCA3 ”geografisk motsvarighet”	Standardavvikelse: proxy/ RCA3 ”bästa höjd”/ RCA ”geografisk motsvarighet”
Torneträsk, Filter30	8,19/3,58/1,84	0,53/0,33/0,33

De varmaste/kallaste 100-årsperioderna under det senaste millenniet enligt proxyseriernas och modellseriernas definitioner presenteras i Tabell 5. Perioderna illustreras i Figur 14-19.

Tabell 5: Millenniets varmaste/kallaste 100-årsperioder definierade av proxy- respektive modellserierna. Modellens varmaste 100-årsperiod (inom parentes) analyseras inte vidare. Fokus ligger istället på den näst varmaste perioden, som infaller i början av millenniet. I de fall då definitionen av den varmaste 100-årsperioden saknas, är proxyserien för kort för att innefatta början av millenniet.

	Varmaste 100-årsperioder		Kallaste 100-årsperioder	
Region	Proxy (år)	RCA3 (år)	Proxy (år)	RCA3 (år)
French Alps	1398-1497	1082-1181 (1899-1998)	1812-1911	1582-1681
Lake Silvaplana	-	-	1616-1715	1606-1705
Stockholm	-	-	1567-1666	1590-1689
Swiss Plateau	-	-	1739-1838	1610-1709
Torneträsk	1009-1108	1213-1312 (1899-1998)	1833-1932	1660-1759

Statistik för det senaste millenniets varmaste/kallaste 100-årsperioder perioder, enligt proxyseriernas definitioner, finns i Tabell 6a.

Tabell 6a: Medelvärde och standardavvikelse under det senaste millenniets varmaste/kallaste 100-årsperioder (definierade av proxyserien) baserade på temperaturanomalier. Statistiken avser data filtrerade med ett löpande medelvärde på 30 år (F30). För de tre kortaste serierna saknas här definition av en varm 100-årsperiod.

	Varma 100-årsperioder		Kalla 100-årsperioder	
Region	Medelvärde (proxy/RCA3)	Standardavvikelse (proxy/RCA3)	Medelvärde (proxy/RCA3)	Standardavvikelse (proxy/RCA3)
French Alps, F30	0,16/-0,98	0,07/0,09	-0,32/-0,68	0,11/0,22
Lake Silvaplana, F30	-	-	-1,20/-1,90	0,67/0,12
Swiss Plateau, F30	-	-	-0,29/-0,75	0,17/0,08
Stockholm, F30	-	-	-1,60/-1,62	0,20/0,58
Torneträsk, F30	1,07/-1,48	0,12/0,19	-0,66/-0,97	0,23/0,19

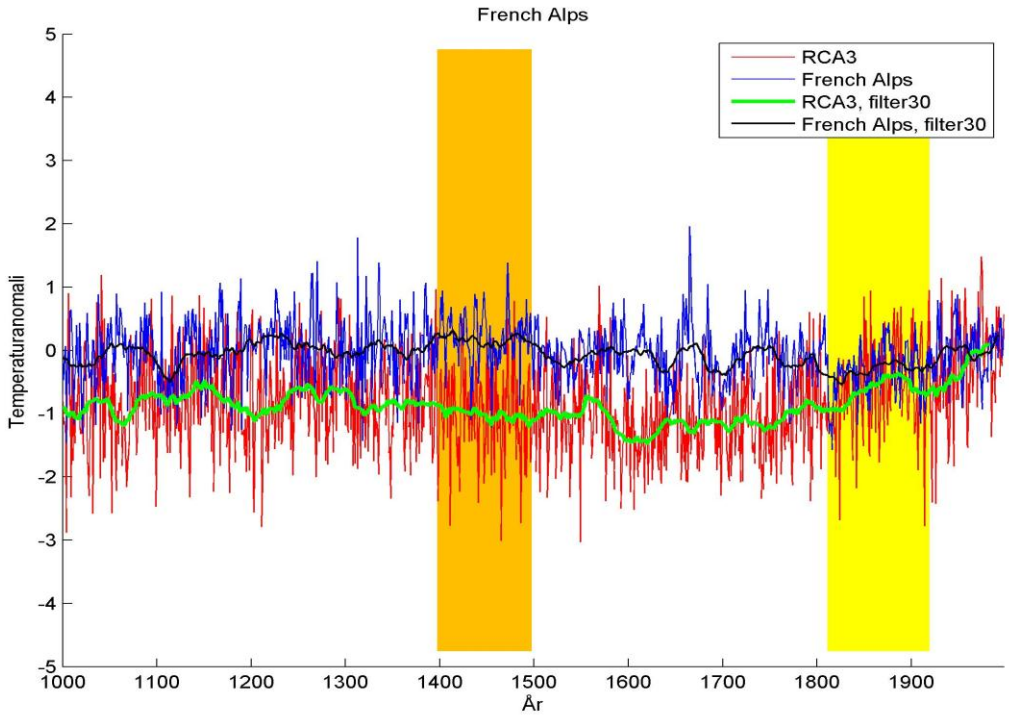
I Tabell 6b presenteras statistik för 100-årsperioderna, enligt absoluta temperaturer för proxyserien från Torneträsk samt från två olika gridrutor från modellen; de som geografiskt/höjdmässigt bäst motsvarar proxyserien.

Tabell 6 b: Medelvärde och standardavvikelse för det senaste millenniets varmaste/kallaste 100-årsperioder för absoluta temperaturer för proxyserien från Torneträsk och den gridruta från modellen där höjden över havet bäst motsvarar den i proxyserien (bästa höjd), samt den gridruta som geografiskt motsvarar proxyserien (geografisk motsvarighet); detta för data filtrerat med ett löpande medelvärde på 30 år (Filter 30).

	Varm 100-årsperiod		Kall 100-årsperiod	
Region	Medelvärde: proxy/ RCA3 ”bästa höjd”/ RCA3 ”geografisk motsvarighet”	Standard-avvikelse: proxy/ RCA3 ”bästa höjd”/ RCA3 ”geografisk motsvarighet”	Medelvärde: proxy/ RCA3 ”bästa höjd”/ RCA3 ”geografisk motsvarighet”	Standard-avvikelse: proxy/ RCA3 ”bästa höjd”/ RCA3 ”geografisk motsvarighet”
Torneträsk, Filter 30	8,49/ 3,31/1,59	1,57/0,19/0,20	7,44/3,80/2,05	0,23/0,22/0,19

3.2.1 French Alps/RCA3

I figur 14 illustreras temperaturutvecklingen i proxyserien från French Alps och motsvarande modellserie under det senaste millenniet (år 1000-2008) samt den varmaste och den kallaste 100-årsperioden enligt proxyseriens definition.



Figur 14: Rekonstruerad vår- och sommartemperatur för varje år under perioden 1000-2008 utifrån trädringsvidd i lärkträd från de franska Alperna, framtaget av Corona m.fl. (2011). Kurvan visar avvikelser från medeltemperaturen 1961-1990; ofiltrerade data/filtrerade data med ett löpande medelvärde på 30 år: blått/svart. Motsvarande data för RCA3 visas med rött/grönt. Den varmaste/ kallaste 100-årseperioden enligt proxyseriens definition visas med brandgult/gult.

På millennieskala är variabiliteten av temperaturer likvärdig hos proxy- respektive modellserie från French Alps (standardavvikelse 0,18 resp. 0,27), medan medeltemperaturen enligt modellserien var markant lägre än medeltemperaturen enligt proxyserien (modell: -0,88 och proxy: -0,07) och markant kallare än referensperioden 1961-90. I proxyserien var medeltemperaturen under det senaste millenniet lik den under referensperioden (Fig. 14,

Tabell 4a).

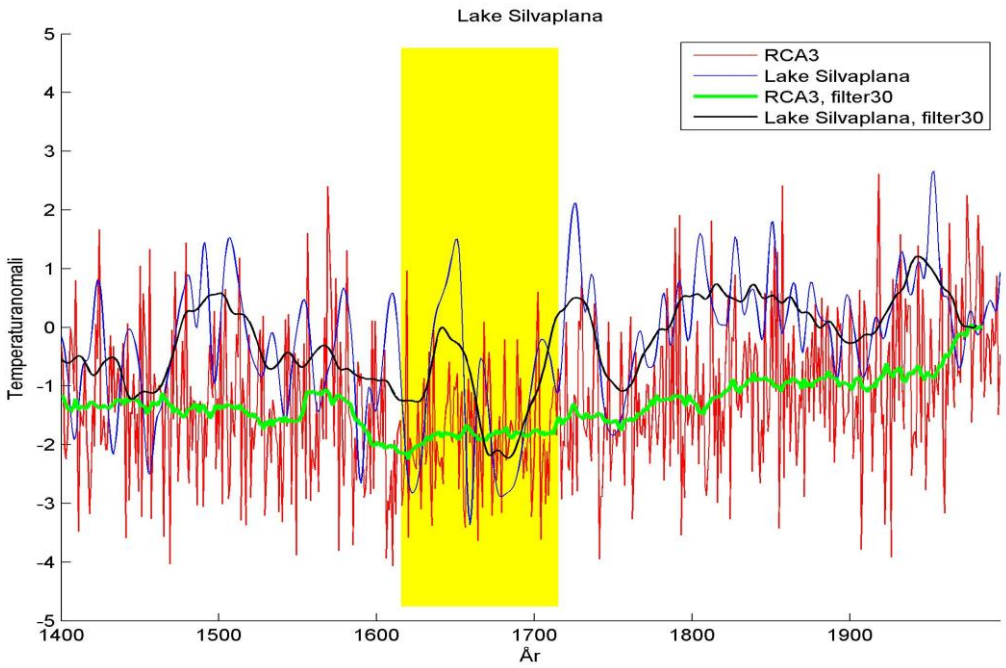
Under proxyseriens varmaste 100-årsperiod visar proxy varmare temperaturer än under referensperioden, medan modellserien under samma period visar kallare temperaturer. Detta är dock inte modellseriens varmaste period. Den varmaste 100-årsperioden, definierad av proxyserien från French Alps (1398-1497, Tabell 5), börjar ca 300 år efter den varmaste 100-årsperiodens enligt modellens definition (1082-1181, undantaget 1900-talets varma period, Tabell 5). Att infallandet av den varma 100-årsperioden inte sammanfaller i de två serierna, skulle eventuellt delvis kunna förklaras av brister i proxyserien; förmodligen av brist på trädringsdata i början av rekonstruktionen. Från och med 1650 är dock temperaturen i proxyserien från French Alps i stort sett i fas med andra rekonstruktioner (Corona m.fl. 2011). Proxyseriens varma 100-årsperiod sammanfaller inte med någon period av hög solaktivitet, utan däremot sammanfaller den delvis med en period av låg solaktivitet, Spörer minimum; en period då det tydligt var kallt i hela Europa (Guoit m.fl 2010). Modellseriens varma 100-årsperiod däremot sammanfaller med en period då solaktiviteten var hög och då temperaturerna var höga i centrala Europa enligt Guiot m.fl. (2010).

Under proxyseriens kallaste period (1812-1911) visar både proxy och modell lägre medeltemperaturer än under referensperioden (-0,32 respektive -0,68), men modellen är återigen markant kallare än proxy. Detta är dock ingen kall period enligt modellens resultat, vari den kallaste 100-årsperioden infaller 1582-1681 (Tabell 5), vilket sammanfaller med tidigare uppfattningar om att det var allra kallast runt år 1600 (Guiot m.fl. 2010). Noterbart är att proxyseriens kallaste period är en period av markant stigande temperaturer enligt modellen, där temperaturerna närmar sig temperaturerna under referensperioden (Fig. 14). Enligt proxyserien börjar temperaturen falla i början av 1500-talet (Fig. 14) och uppvisar en generellt sett kallare period mellan 1500 och 1920, vilket sammanfaller med tidigare föreställningar om ”Lilla istiden”, mellan 1350 och 1850. Den ”Lilla istiden” är dock tämligen mild i proxyserien fram till 1660 i förhållande till andra rekonstruktioner från Alperna (Corona m.fl. 2011). Den kalla 100-årsperioden enligt proxyserien inträffade under en av perioderna av låg solaktivitet, Dalton minimum, medan den kalla perioden enligt modellserien endast under ett tiotal år sammanfaller med Maunder minimum (Tabell 1).

Under den kallaste 100-årsperioden enligt proxyserien inträffade två mycket explosiva vulkanutbrott, nämligen 1815 (Tambora, Indonesien) och 1883 (Krakatoa, Indonesien) (Guiot m.fl. 2010; The Global Volcanism program 2012). Proxyserien har sitt allra lägsta värde av temperaturanomalier under året 1816 och låga värden 1883/1884, vilket eventuellt kan tolkas som att proxyserien har registrerat dessa händelser. Tolkningen bör dock göras med försiktighet, då en annan temperaturrekonstruktion av trädringar från Alpområdet inte visar någon nedkylning året/åren efter ett vulkanutbrott (Büntgen m.fl. 2006). Modellen visar, trots avsaknaden vulkaners effekt, en hög variabilitet, med omväxlande varma och kalla somrar.

3.2.2 Lake Silvaplana/RCA3

I figur 15 illustreras temperaturutvecklingen i proxyserien från Lake Silvaplana under perioden 1400-1995 och för motsvarande modellserie under samma tid, samt den kallaste 100-årsperioden enligt proxyseriens definition.



Figur 15: Rekonstruerad sommartemperatur för perioden 1400-1995 utifrån analyser av sjösediment med en upplösning på 1-20 år, från den varvade sjön Lake Silvaplana i Schweiz, framtaget av Larocque-Tobler m.fl. (2010). Kurvan visar avvikelser från medeltemperaturen 1961-1990; ofiltrerade data/filtrerade data med ett löpande medelvärde på 30 år: blått/svart. Motsvarande data för RCA3 visas med rött/grönt. Den kallaste 100-årseperioden enligt proxyseriens definition visas med ett gult fält.

För Lake Silvaplana är både proxy- och modellserien kallare under hela perioden 1400-1995 än under referensperioden 1961-90. Medeltemperaturanomalin från modellserien visar markant lägre värde än proxyserien (-1,27 respektive -0,27), medan variabiliteten är större i proxyserien än i modellserien (standardavvikelse 0,75 jämfört med 0,37; Fig. 15, Tabell 4a).

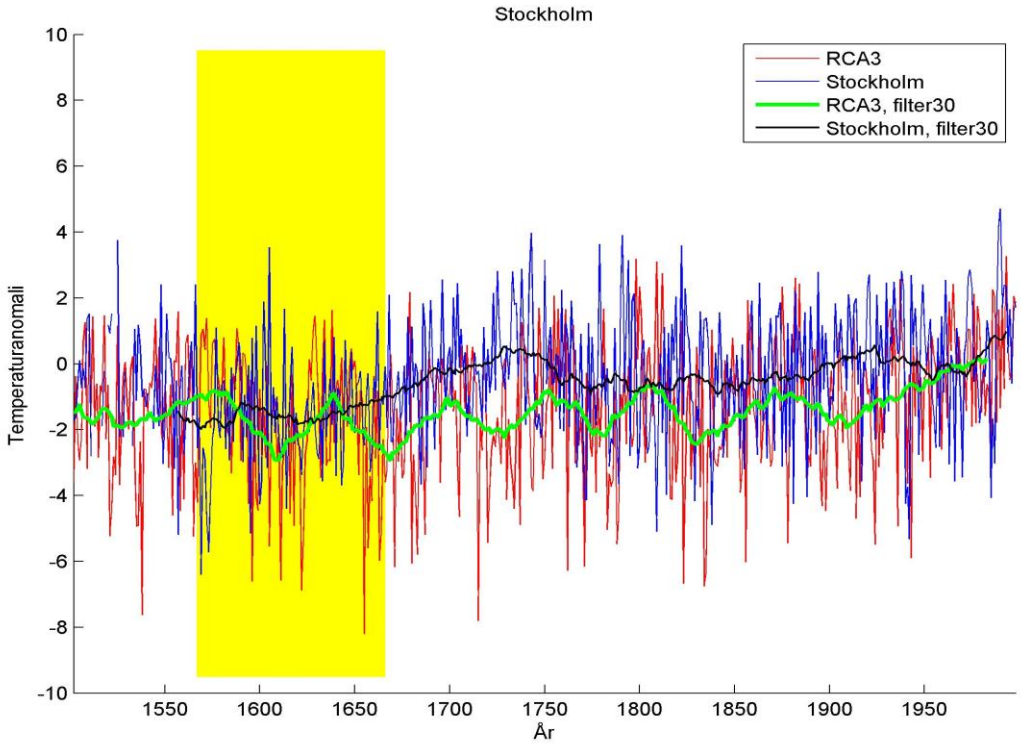
Den kallaste 100-årsperioden i proxyserien från Lake Silvaplana uppträdde mellan 1616-1715, vilket sammanfaller till stor med den kallaste perioden enligt modellserien, 1606-1705 (Tabell 5). Under denna period är medelvärdet av temperaturanomalier markant lägre för båda serierna än under referensperioden; även här med lägre medelvärde i modellserien (-1,90 respektive -1,20; Tabell 6a). Skillnaden i standardavvikelse är stor; med markant högre variabilitet i proxyserien (standardavvikelse 0,67 jämfört med 0,12), vilket kan ses tydligt Fig. 15, t.ex. i det mycket låga värdet av temperaturanomalin runt år 1659. Detta stämmer väl överens med den maximala framryckningen av Aletsch-glaciären i Schweiz (Larocque-Tobler m.fl. 2010). I likhet med tidigare uppfattningar om en mycket kall period runt år 1600 (Guiot m.fl. 2010) har modellen sitt lägsta värde vid denna tid, vilket även sammanfaller med en kall period enligt proxyserien (Fig.15). Den kallaste 100-årsperioden enligt båda temperaturanomaliserierna stämmer väl överens med Maunder Minimum; en period av extremt låg solaktivitet (Tabell 1). Tiden för infallandet av proxyseriens kallaste 100-årsperioden stämmer överens med den tidigare föreställningen om att den Lilla Istiden inträffade mellan 1350 och 1850 (Tabell 1).

Enligt Global Volcanism program (2012) hade en vulkan på Long Island (Nya Guinea) ett stort utbrott 1660, dock med +/- 20 år i felmarginal. Vulkanen skulle eventuellt kunna vara en möjlig förklaring till minimivärdet i proxyserien runt 1659. Vulkanen Huaynaputina i Peru hade utbrott år 1600 (Guoit m.fl. 2010), vilket var en kall period enligt modellen. Då

påverkan av vulkaner inte finns med i modellen, betyder det här att dess temperaturvariabilitet har andra orsaker än vulkanism.

3.2.3 Stockholm/RCA3

I figur 16 illustreras temperaturutvecklingen i proxyserien från Stockholm och motsvarande modellserie under perioden 1502-2008, samt den kallaste 100-årsperioden enligt proxyseriens definition.



Figur 16: Rekonstruerad vintertemperatur under perioden 1502-1995 utifrån dokumentationsdata som vittnar om islossningen i Stockholms hamn, framtaget av Leijonhufvud m.fl. (2010). Kurvan visar avvikelser från medeltemperaturen 1961-1990; ofiltrerade data/filtrerade data med ett löpande medelvärde på 30 år: blått/svart. Motsvarande data för RCA3 visas med rött/grönt. Den kallaste 100-årseperioden enligt proxyseriens definition visas med ett gult fält.

Både enligt proxyserien och enligt modellserien från Stockholm var perioden 1502-2008 kallare än referensperioden 1961-1990. Medeltemperaturanomalin i modellserien var markant lägre än i proxyserien (modell:-1,42 respektive proxy: -0,57), medan standardavvikelsen i de två serierna på millennieskala är likvärdig (0,68 respektive 0,50) (Fig. 16, Tabell 4a).

För proxyserien från Stockholm sammanfaller den kallaste 100-årsperioden enligt proxyserien (1567-1666) och modellserien (1590-1689) till stor del (Tabell 5). Den kalla 100-årsperioden enligt proxyseriens och modellens definitioner infaller inte under någon period av låg solaktivitet enligt definitionerna i Guiot m.fl. (2010). Dessutom är medelvärdena enligt de två serierna under proxyseriens kallaste period så gott som identiska (proxy: -1,60 och modell: -1,62, Tabell 6a). Detta tolkas här som att modell och rekonstruktionen återger temperaturklimatet likvärdigt under denna period, medan de skiljer sig åt markant under resterande del av millenniet. Variabiliteten är dock större hos modellserien än hos

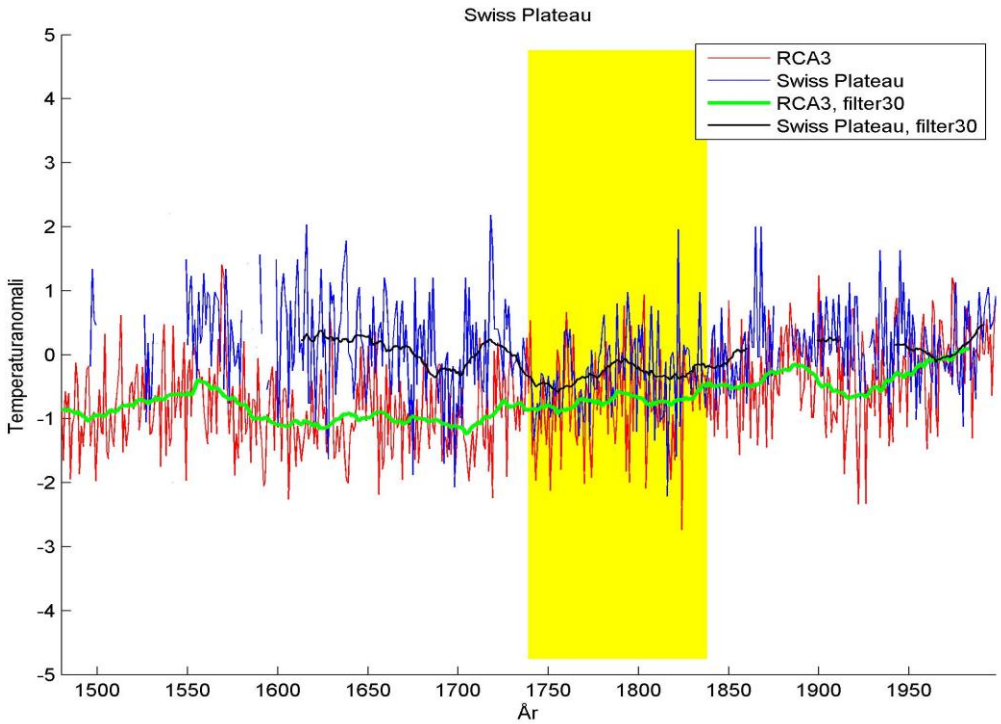
proxyserien under proxyseriens kallaste period (Fig. 16, Tabell 6a). Den kallaste perioden enligt både proxyseriens och modellseriens definitioner, sammanfaller med tidigare uppfattningar att Lilla istiden inträffade mellan 1350-1850 (Fig. 16, Tabell 1).

Vulkanutbrottet Huaynaputina i Peru år 1600 (Guoit m.fl. 2010) inträffade under den kallaste 100-årsperioden enligt både proxyseriens och modellseriens definitioner. Det berömda tåget över Stora Bält ägde rum år 1658 (Forskning och framsteg 2012). Detta var ett tydligt kallt år enligt proxyserien, och sammanfaller med vulkanutbrottet på Long Island (Alaska) som inträffade år 1660 (+/- 20 år).

Värt att notera är att skillnaden i temperaturanomalier mellan det kallaste och varmaste året under proxyseriens kallaste 100-årsperiod är stor i rekonstruktionen av vintertemperaturer från Stockholm. Proxyseriens (modellseriens) amplitudskillnad i temperaturanomalier under den kallaste 100-årsperioden var 9,9˚C (10,8 ˚C). Detta tolkas som att modellen återger den stora amplitudskillnaden i vintertemperaturer väl.

3.2.4 Swiss Plateau/RCA3

I figur 17 illustreras temperaturutvecklingen i proxyserien från Swiss Plateau och motsvarande modellserie under perioden 1480-2006, uttryckt som avvikelser från medeltemperaturen 1961-1990, samt den kalla 100-årsperioden enligt proxyseriens definition.



Figur 17: Rekonstruerad vår- och sommartemperatur under perioden 1480-2006 utifrån vindruvors skördedatum i Schweiz, framtaget av Meier m.fl. (2007). Kurvan visar avvikelser från medeltemperaturen 1961-1990; ofiltrerade data/filtrerade data med ett löpande medelvärde på 30 år: blått/svart. Motsvarande data för RCA3 visas med rött/grönt. Den kallaste 100-årseperioden enligt proxyseriens definition visas med ett gult fält.

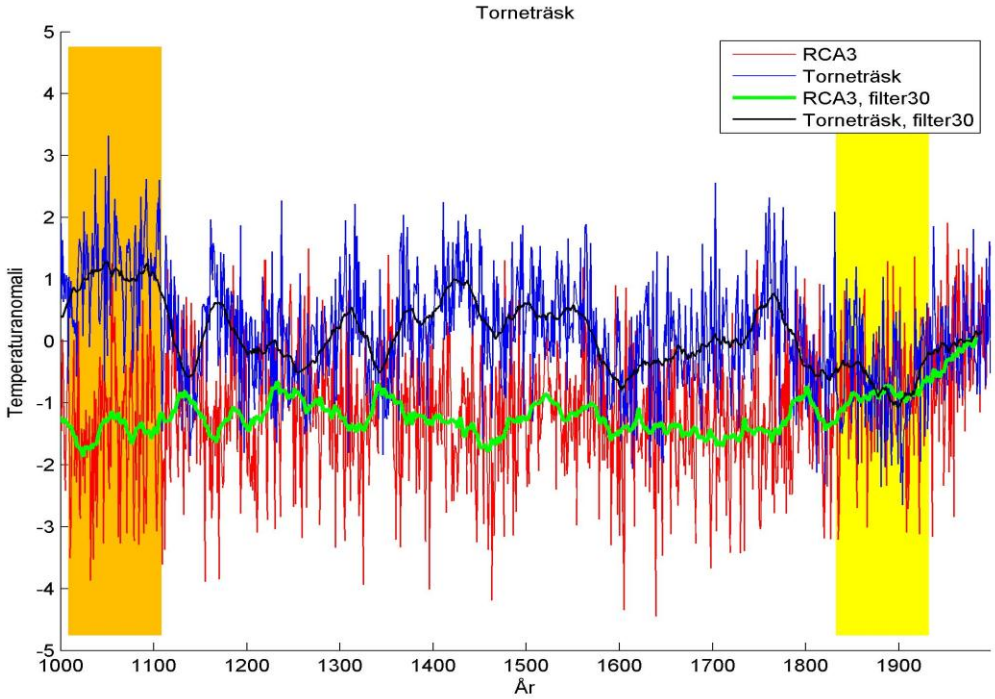
Medeltemperaturen under de senaste 500 åren var enligt proxyserien från Swiss Plateau ungefär lika hög som den under referensperioden 1961-1990, medan modellseriens resultat visar lägre temperaturer under de senaste 500 åren än under referensperioden (proxy: -0,06; modell: -0,68). Variabiliteten mellan de två serierna är mycket likvärdiga (standardavvikelse proxy: 0,25 och modell: 0,23; Filter 30)(Fig. 17, Tabell 6a).

Enligt studien från Swiss Plateau (Meier m.fl. 2007) inträffade de kallaste åren på decennieskala (årlig skala) på 1740-talet (1816). Det kallaste året på båda dessa skalor ryms inom de 100-kallaste åren enligt proxyseriens definition, 1739-1838 (Tabell 5). Proxyseriens kallaste 100-årsperiod sammanfaller inte med den som definieras enligt modellen, 1610-1709 (Tabell 5), men däremot med tidigare definitioner av Lilla istiden, 1350-1850. Den kallaste 100-årsperioden enligt proxyserien inträffar delvis under Dalton minimum (Tabell 1), medan modellens kallaste 100-årsperiod inträffar delvis under Maunder minimum. Under proxyseriens kallaste 100-årsperiod var temperaturen lägre än under referensperioden enligt båda serierna; även här med liknande variabilitet mellan de två serierna och lägre temperaturer enligt modellserien (Fig. 17, Tabell 6a).

Låga sommartemperaturer år 1816, ”året utan sommar”, ledde till att vindruvsskörden på den schweiziska platån blev sen detta år, vilket representeras av ett lågt värde av temperaturen i proxyserien (Meier m.fl 2007). Året dessförinnan hade vulkanen i Tambora (Indonesien) ett explosivt utbrott (Guiot m.fl. 2010, Global Volcanism Program 2012). Majoriteten av sena skördedatum inträffade till följd av stora vulkanutbrott (Meier m.fl. 2007), vilket det sena skördedatumet år 1816 här tolkas som. Det kan noteras att modellen, trots avsaknaden av vulkanpåverkan producerar liknande kraftiga kalla anomalier vid denna tid.

3.2.5 Torneträsk/RCA3

Temperaturutvecklingen i proxyserien från Torneträsk och motsvarande modellserie under det senaste millenniet (år 1000-2004) illustreras i figur 18, uttryckt som avvikelser från medeltemperaturen 1961-1990, samt den varma och den kalla 100-årsperioden under denna tid enligt proxyseriens definition.



Figur 18: Rekonstruerad vår- och sommartemperatur var för varje år under perioden 1000-2004 utifrån analyser av vidden och densiteten i sommarveden hos fossila och levande tallar, i området kring Torneträsk, framtaget av Grudd (2008). Kurvan visar avvikelser från medeltemperaturen 1961-1990; ofiltrerade data/filtrerade data med ett löpande medelvärde på 30 år: blått/svart. Motsvarande data för RCA3 visas med rött/grönt. Den varmaste/kallaste 100-årseperioden enligt proxyseriens definition visas med brandgult/gult.

Enligt proxyserien från Torneträsk var medelvärdet av temperatur för hela millenniet likt temperaturen som var under referensperioden 1961-1990 medan det enligt modellserien var markant kallare (temperaturanomali proxy: 0,09 respektive modell: -1,18). Standardavvikelsen för proxyserien/modellserien var 0,53/0,33 (Fig. 18, Tabell 4a).

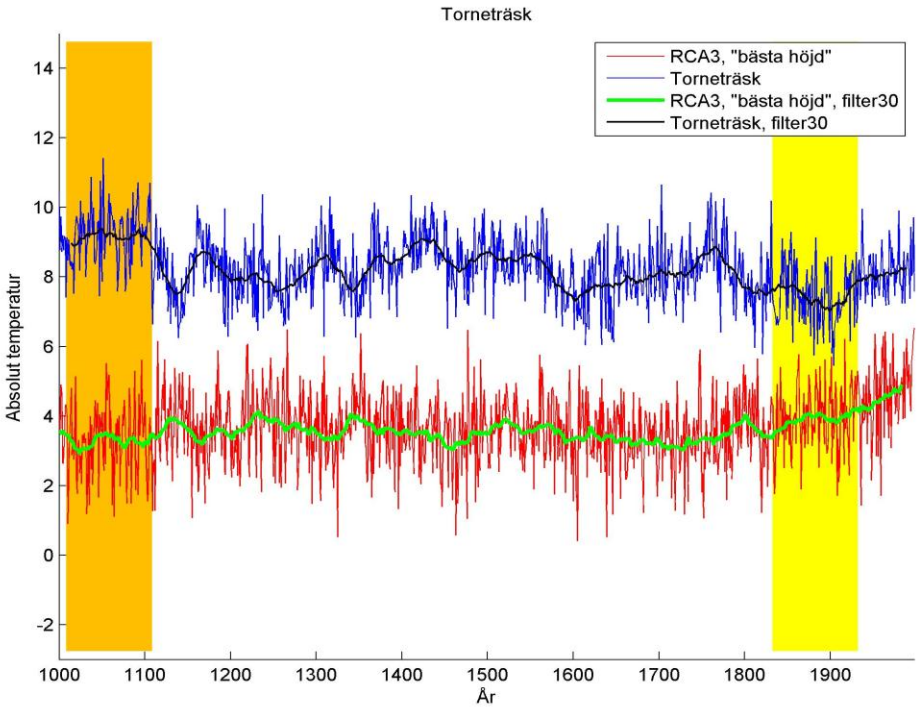
De varmaste somrarna i proxyserien under det senaste millenniet, inträffade under 100-årsperioden 1009-1108 (Fig. 18, Tabell 5), vilket här tolkas som en medeltida varm period. Denna tolkning görs även i studien som ligger bakom data från Torneträsk av Grudd (2008). Enligt proxyseriens definition av 100-årsperioderna var medelvärdet för proxyseriens/modellseriens temperaturanomalier under den varma perioden 1,07/-1,48 och standardavvikelsen 0,12/0,19 (Tabell 6a). Enligt modelldata inträffade den varmaste 100-årsperioden under det senaste millenniet 1213-1312 (undantaget den varma perioden under det senaste seklet).

Den kallaste 100-årsperioden enligt proxyserien från Torneträsk inträffade 1833-1932 (Fig. 18, Tabell 5), och då var temperaturerna var markant lägre än under referensperioden 1960-1990. Detta sammanfaller inte med tidigare uppfattningar om den Lilla istiden (Tabell 1). Under den kallaste perioden enligt proxyserien var medelvärdet för proxyserien/modellserien -0,66/-0,97 och standardavvikelsen 0,23/0,19 (Tabell 6a).

Under den kallaste 100-årsperioden enligt proxyserien inträffar några av de mest explosiva vulkanutbrotten under det senaste millenniet, nämligen det 1883 (Krakatoa, Indonesien), 1902 (Santa Maria, Guatemala) och 1912 (Novarupta, Alaska) (Guiot m.fl 2010). Särskilt året

för och åren efter de senare två utbrotten kan mycket låga temperaturer noteras i proxy, vilket inte återfinns i modellserien. Det mycket explosiva utbrottet i Krakatoa noteras däremot inte i proxyserien.

I figur 19 illustreras temperaturutvecklingen av absoluta temperaturer i proxyserien från Torneträsk (år 1000-2004). Modellserien som illustreras kommer från den närliggande gridruta, där höjden över havet i modellen bättre motsvarar proxyseriens höjd över havet.



Figur 19: Rekonstruerad vår- och sommartemperatur för varje år under perioden 1000-2004 utifrån analyser av densiteten i sommarveden hos fossila och levande tallar, i området kring Torneträsk, framtaget av Grudd (2008). Kurvan visar absoluta temperaturer; ofiltrerade data/filtrerade data med ett löpande medelvärde på 30 år: blått/svart. Motsvarande data för RCA3 visas med rött/grönt. Den varmaste/ kallaste 100-årseperioden enligt proxyseriens definition visas med brandgult/gult. "Bästa höjd" avser den gridruta i modellen där höjden över havet bäst motsvarar höjden över havet i modellen.

Medelvärdet av absoluta temperaturer under det senaste millenniet enligt proxyserien/den gridruta i modellen där höjden bäst motsvarar proxyseriens höjd över havet/modellens gridruta som geografisk bäst motsvarar proxyserien var 8,19/3,58/1,84, vilket visar att analyser av absoluta temperaturer tillför viktig information (Tabell 4b).

I den varmaste 100-årsperioden definierad av proxyserien var medelvärdet av absoluta temperaturer för proxyserien/gridrutan i modellen där höjden bäst motsvarar proxyseriens höjd över havet/modellens gridruta som geografisk motsvarar proxyserien 8,49/ 3,31/1,59 (Tabell 6b). Standardavvikelsen skiljer sig åt markant mellan de tre serierna (1,57/0,19/0,20). Att medelvärdet från gridrutan som motsvarar proxyseriens geografiska punkt är mycket olikt det från proxyserien, tolkas här som att det inte nödvändigtvis är den gridruta som geografiskt motsvarar proxyserien, som ger det mesta korrekta värdet av medeltemperaturen. Att skillnaden i medelvärden från proxyserien och gridrutan med "bäst höjd" ändå skiljer sig med ca 5,2°C är uppseendeväckande. Under den kallaste 100-årsperioden definierad av proxyserien syns samma mönster i medelvärdena (7,44/3,80/2,05)

men inte i standardavvikelsen (0,23/0,22/0,19), som för alla dataserier är likvärdig (Tabell 6b).

3.2.6 Korrelation och autokorrelation av proxy och modell

För data som filtrerats med ett löpande medelvärde på 30 år, är korrelationen på millennieskala stark endast för Lake Silvaplana (Tabell 3a). Resultatet av korrelation för Lake Silvaplana bör dock tolkas med försiktighet, eftersom serien i utgångsläget hade upplösningen 1-20 år. För övriga serier är korrelationen svag (Stockholm och Swiss Plateau), eller svagt antikorrelerande (French Alps och Torneträsk). Då data filtrerats med ett löpande medelvärde på 100 år syns ett förstärkt mönster av korrelationen, förutom för Swiss Plateau där Filter100 inte är meningsfullt, pga. att det finns många luckor i serien. Det här betyder alltså att modellens variabilitet inte är i fas med den observerade variabiliteten, på vare sig årsbasis, decennieskala eller sekelskala.

Då serierna filtrerats med ett löpande medelvärde, kommer det finnas ett samband mellan intilliggande värden i de nya tidsserierna. Analyser av autokorrelation visade att detta samband inte finns för ofiltrerade data. För proxy- och modellserierna från French Alps, Stockholm, Swiss Plateau och Torneträsk översteg autokorrelationen aldrig 0,4; medan graden av autokorrelation var högre för Lake Silvaplana (ej i tabell). Att autokorrelationen i proxyserierna visade sig vara svag, betyder att korrelationen mellan ett år och nästa är liten. Den höga autokorrelationen i den ofiltrerade proxyserien från Lake Silvaplana, visade med andra ord på ett undantag till detta. Detsamma gällde även för filtrerade data, som uppvisade hög grad av autokorrelation. Att autokorrelationen för ofiltrerat data är svag, medan den för filtrerade data är stark, betyder att korrelationen mellan filtrerade data blir förvrängd och att de därmed bör analyseras med försiktighet. Modellens mellanårsvariabilitet liknar i det här avseendet den rekonstruerade, vilket innebär att vad som händer under en säsong inte nämnvärt påverkar motsvarande säsong under nästa år.

3.3 Korrelationsanalys av proxy-, CRU- och modellserier från geografiskt närliggande/spridda platser

Tabell 7 visar att korrelationen mellan proxyserier från geografiskt närliggande platser (i Alpområdet) under det senaste seklet är mycket svag eller till och med antikorrelerande (-0,07-0,20); detta för ofiltrerade data. Även korrelationen mellan proxyserier från geografiskt *spridda* platser (Torneträsk respektive Alpområdet) är svag (0,07-0,18; Tabell 7). Korrelationen mellan CRU-serier från närliggande platser är däremot stark (0,65–0,90), medan korrelationen mellan CRU-serier från geografiskt spridda platser är svag (0,11-0,37), men inte så svag som mellan proxyserierna. Att korrelationerna mellan proxyserierna inte överensstämmer med dem mellan motsvarande CRU-serier, antyder att den sammantagna bilden av den rumsliga variationen i mellanårsvariabiliteten inte representeras på ett realistiskt sätt av proxyserierna. Det här antyder att någon eller några av proxyserierna till stor del styrs av annat än just den temperatur som de förmodas avspegla. Detta framgick ju också av korrelationsanalyserna i Kap. 3.1, som ju visade att den förklarade variabiliteten jämfört med temperaturobservationer inte översteg 56 % på någon av platserna.

Tabell 7: Korrelation mellan proxyserier från regioner med liten geografisk spridning (Alpområdet: French Alps, Lake Silvaplana och Swiss Plateau) och regioner med stor geografisk spridning (Torneträsk respektive Alpområdet) samt korrelation mellan CRU-serier från motsvarande regioner. Detta visas för ofiltrerade data, för den period från vilken data är tillgänglig från både proxyserierna och CRU.

Filter	Regioner och tidsperiod	Korrelation, proxy/proxy	Korrelation, CRU/CRU
1	French Alps/ Lake Silvaplana, 1901-1995	0,16	0,75
1	French Alps/ Swiss Plateau, 1901-2006	-0,07	0,90
1	Lake Silvaplana/ Swiss Plateau, 1901-1995	0,20	0,65
1	Torneträsk/ French Alps, 1901-2004	0,07	0,32
1	Torneträsk/ Lake Silvaplana, 1901-1995	0,18	0,11
1	Torneträsk/ Swiss Plateau, 1901-2004	0,12	0,37

Korrelationsgraden mellan proxyserierna från regioner med liten geografisk spridning är för data filtrerade med ett löpande medelvärde på 30 år 0,64-0,81 (Tabell 8), dvs. mycket högre än för de ofiltrerade serierna (Tabell 7). Korrelationen mellan CRU-serierna för motsvarande platser, var stark redan i de ofiltrerade dataserierna, men är ännu starkare (0,88-0,96) i Filter30-serierna (Tabell 7, Tabell 8). För proxyserierna med stor geografisk spridning, dvs. Torneträsk respektive Alpområdet är korrelationen av de ofiltrerade data låg, medan den för Filter30-data är relativt stark (0,67-0,85, med undantag för Torneträsk/Swiss Plateau, som saknar värde). Anmärkningsvärt är att korrelationen av CRU-data, filtrerad med ett löpande medelvärde på 30 år är stark (0,78-0,81, med undantag för Torneträsk/Swiss Plateau), medan korrelationen av ofiltrerade CRU-data är svag.

Tabell 8: Korrelation mellan proxyserier från regioner med liten geografisk spridning (Alpområdet: French Alps, Lake Silvaplana och Swiss Plateau) och regioner med stor geografisk spridning (Torneträsk respektive Alpområdet) samt korrelation mellan CRU-serier från motsvarande regioner. Detta visas för data filtrerade med ett löpande medelvärde på 30 år, för perioden 1901-1995. För Torneträsk/Swiss Plateau saknas värde, pga. att serien från Swiss Plateau innehåller många luckor.

Filter	Regioner och tidsperiod	Korrelation, proxy/proxy	Korrelation, CRU/CRU
30	French Alps/Lake Silvaplana, 1901-1995	0,72	0,93
30	French Alps/Swiss Plateau, 1901-1995	0,81	0,96
30	Lake Silvaplana/Swiss Plateau, 1901-1995	0,64	0,88
30	Torneträsk/ French Alps, 1901-1995	0,85	0,81
30	Torneträsk/Lake Silvaplana, 1901-1995	0,67	0,78
30	Torneträsk/Swiss Plateau, 1901-1995	-	-

I Tabell 9 framgår att korrelationen mellan proxyserierna från de närliggande platserna i Alpområdet under de senaste 500 åren är svag (-0,18-0,34); detta för data filtrerade med ett löpande medelvärde på 30 år, medan korrelationen mellan modellserier från motsvarande platser är mycket stark (0,91-0,95). Även mellan proxyserier från de geografiskt spridda platserna Torneträsk respektive Alpområdet är korrelationen svag eller antikorrelerande (-0,41-0,26) medan korrelationen mellan motsvarande modellserier är stark (0,73-0,86), men inte lika stark som mellan modellserier från närliggande platser. De proxyserier från Alpområdet som används i detta arbete visar med andra ord mycket olika tidsutveckling av temperaturerna för de senaste 500 åren. Den starka korrelationen mellan modellserierna från närliggande platser, visar tvärtom en stor geografisk samstämmighet. Både korrelationerna mellan proxyserier och mellan modellserier är svagare för platserna med stor

geografisk spridning än för de närliggande platserna, vilket var väntat. Proxyserierna visar inte på något samband mellan norra Skandinavien och Alperna, medan modellen antyder en relativt stark samvariation. Då rekonstruktionerna inte är i fas med varandra, bör resultaten från dem tolkas med försiktighet.

Tabell 9: Korrelation mellan proxyserier från regioner med liten geografisk spridning (Alpområdet: French Alps, Lake Silvaplana och Swiss Plateau) och regioner med stor geografisk spridning (Torneträsk respektive Alpområdet) samt mellan RCA3-serier från motsvarande regioner. Detta visas för data filtrerade med ett löpande medelvärde på 30 år, för den period från vilken data är tillgängliga. Här används den gridruta från modellen som motsvarar vardera proxyseries centrala punkt.

Filter	Regioner och tidsperiod	Korrelation, proxy/proxy	Korrelation, RCA3/RCA3
30	French Alps/ Lake Silvaplana, 1400-1995	-0,18	0,93
30	French Alps/ Swiss Plateau, 1480-1998	0,34	0,95
30	Lake Silvaplana/ Swiss Plateau, 1480-1995	0,17	0,91
30	Torneträsk/ French Alps, 1000-1998	0,26	0,73
30	Torneträsk/ Lake Silvaplana, 1400-1995	-0,16	0,78
30	Torneträsk/ Swiss Plateau, 1480-1998	-0,41	0,86

3.4 Svårigheter i jämförelser av proxydata och modelldata

En jämförelse mellan proxydata och data från RCA3, utförs inte utan svårigheter; dels på grund av att klimatmodellen har sina fel och brister och innehåller förenklingar av det verkliga klimatet, dels grund av att proxyserier från olika typer av arkiv, har olika felkällor, felmarginaler och andra brister. I kapitel 3.4.1 och 3.4.2 presenteras och diskuteras dessa svårigheter.

3.4.1 Svårigheter relaterade till proxyserierna

Geografiskt läge
Data som ligger till grund för proxyserier är ibland hämtade från stora områden, men anges som ett värde i en specifik geografisk punkt. Detta värde är inte specifikt för just den punkten, utan är en approximation av värden från det stora området. Att jämföra detta värde med ett värde från en specifik punkt från modellserien kan därmed bli missvisande. Proxyserierna från French Alps, Torneträsk och Swiss Plateau, som används i det här arbetet, innehåller data från stora områden, approximerade till en specifik punkt vardera (Tabell 2a). I dessa proxyserier är området inte bara stort, utan terrängen är dessutom mycket varierad och därmed känslig för klimatförändringar, vilket kan försvåra jämförelsen med modelldata ytterligare. I proxyserien från Lake Silvaplana är all data hämtat från en sjö. Data i proxyserien från Stockholm hämtats mestadels från ett relativt litet område i Stockholms närhet (Tabell 2a).

Korrelationen mellan proxyserier från geografiskt närliggande respektive geografiskt spridda platser, de senaste 100/500 åren, är mycket svag. Korrelationen mellan CRU-serier och mellan modellserier för motsvarande platser är i det flesta fall stark, varför resultaten från rekonstruktionerna bör tolkas med försiktighet.

Tidsupplösning
Modelldata finns på hög upplösning ner till ett par timmar. Någon motsvarighet i proxydata

finns inte och här har valts proxydata med årsupplösning för alla serier, utom den som baserats på sjösediment från Lake Silvaplana. Där hade data upplösningen 1-20 år (Tabell 2a), och hade interpolerats och jämnats ut, för att anpassas till ett slags årlig upplösning, vilket gjorde jämförelsen med modelldata komplicerad. I analysen av autokorrelation var det direkt nödvändigt med en överensstämmande upplösning, likaså i jämförelsen mot CRU, vilket innebar att proxyseriens från Lake Silvaplana inte kunde analyseras väl i dessa avseenden. I övriga jämförelser med modelldata, utfördes analysen på filtrerade data. Trots att Lake Silvaplana-serien innehöll interpolerade/utjämnade data, filtrerades den på samma vis som övriga proxyserier, vilken kan ha lett till något missvisande resultat (t.ex. Tabell 4a).

Dataseriernas längd
De två proxyserier som var baserade på trädringsdata; de från French Alps och Torneträsk, sträcker sig ca 1000 år tillbaka (Tabell 2b), vilket möjliggör den jämförelse mellan modell- och proxydata, med avseende på den Medeltida Värmeperioden och Lilla Istiden, som var av intresse i detta arbete. De övriga tre proxyserierna, som representeras av dokumentationsdata och sjösediment, sträcker sig ca 500 år tillbaka i tiden (Tabell 2b), vilket innebär att den varma perioden under den tidiga delen av millenniet inte kan analyseras med hjälp av dessa. Att finna långa, kontinuerliga tidsserier med hög tidsupplösning utan luckor verkar vara problematiskt.

Säsong
Att olika typer av proxy representerar olika säsonger innebär att jämförelserna mellan modell och proxy, inte är helt jämförbara med varandra. Det kan dessutom vara så att modellen reproducerar klimatet olika bra under olika säsonger (Samuelsson m.fl. 2011). Endast en av de proxyserier som använts i detta arbete representerade vintertemperaturer (Stockholm), medan övriga proxyserier representerade sommartemperaturer (Tabell 2b). Den generella bristen på vinterproxydata gör det svårt att utvärdera vinterklimatet, särskilt som variabiliteten är större under vintern. Detta framgår t.ex. av den kallaste 100-årsperioden enligt proxyserien från Stockholm, där man kan se att amplitudskillnaden mellan det varmaste och det kallaste året är markant större än den än amplitudskillnaden mellan det varmaste och det kallaste året under den kallaste 100-årseperioden enligt de övriga proxyserierna (jämför Fig. 16 med t.ex. Fig. 18).

Att proxyserierna från French Alps och Torneträsk, som båda representerar sommartemperaturer med hjälp av trädringsdata, representerar olika månader, är intressant. I jämförelsen av absoluta temperaturer från proxyserien från Torneträsk (april-augusti) och motsvarande modelldata, visade det sig att medeltemperaturen mellan serierna skiljer sig åt markant (Fig. 19, Tabell 4b och Tabell 6b). Jämförelsen mellan proxydata från Torneträsk (april-augusti) och observationsdata från SMHIs observationsstation i Abisko (maj-augusti) visar en god överensstämmelse (Kap. 2.3.1). Huruvida rekonstruktionen från Torneträsk bättre återspeglar maj-augustitemperaturer än april-majtemperaturer är en fråga som väcks.

Klimatvariabler och andra variabler som påverkar proxy
Proxyserierna kan ha påverkats av andra klimatvariabler än just temperatur. I proxyserien från Swiss Plateau påverkade nederbörden vindruvornas skördedatum i många av skördarna. Nederbörd kan vara en begränsande faktor även vid trädringars tillväxt. Främst de naturliga proxyserierna, dvs. de från French Alps, Torneträsk och Lake Silvaplana, samt dokumentationsdata från Swiss Alps, kan ha påverkats av andra miljövariabler än klimat.

Även om serierna till stor del påverkas av variabeln temperatur, kan analyserna ge missvisande resultat om endast denna analyseras. Detta kan ses av korrelationerna mellan proxy och CRU (Tabell 3), där exempelvis korrelationsgraden 0,75 (för Torneträsk) betyder att 0,75*0,75*100%, dvs. 56 % av variabiliteten i proxyserien kan förklaras av temperatur – resten av någonting annat. Mer utförliga analyser låg dock utanför omfattningen av det här arbetet.

Tillgång till data och överföring till klimat
På grund av bristen på högkvalitativ proxydata är en sträng jämförelse mellan modell och proxy svår att utföra. Eftersom modellen har relativt hög upplösning skulle många proxyserier behövas om de skulle motsvara alla gridrutor för hela Europa. Att som här använda sig av endast fem proxyserier vid jämförelser med modellen ger naturligtvis inte en fullständig bild av klimatet under det senaste millenniet, varken geografiskt eller tidsmässigt. I de proxyserier som har använts i detta arbete kan man dessutom se att tillgången till användbar data varierar med tiden. Dessutom är osäkerheterna i data större längre tillbaka i tiden (t.ex. Meier m.fl. 2007 och Grudd 2008). Data av absoluta temperaturer tillför viktig information, men tillgången till sådana data är bristfällig.

Att överföra proxydata till klimat är svårt. Olika proxydata dateras och kalibreras på olika sätt, varför man ska vara försiktig med tolkningar vid jämförelser mellan proxy och modell.

3.4.2 Svårigheter relaterade till modellen

Modellens kalender
På grund av att variabiliteten i temperatur i modellen inte följer samma tidsutveckling som den man kan se i observationer, och modelldata därmed inte bör analyseras avseende mellanårsvariabilitet, har merparten jämförelser mellan modell och proxy i detta arbete baserats på mer långsiktiga trender, på hundraårsskala och millennieskala, med dataserierna filtrerade med löpande medelvärden på 30 år. Modellens tidsutveckling beror dels på tidsvariationer i strålningsdrivningen men är också ett utslag av naturlig variabilitet som också simuleras i modellen. Eftersom modellens starttillstånd skiljer sig från tillståndet i det verkliga klimatsystemet, kommer det att vara skillnad mellan de två. Med vetskap om detta bör denna begränsning dock inte vara en källa till feltolkningar. Huruvida en filtrering med 30 års löpande medelvärde är tillräcklig för att återge den långsiktiga trenden är en fråga som återstår. Tänkbart är att en grövre filtrering hade gett bättre resultat av den långsiktiga trenden.

Höjd över havet
Modellen representerar höjden över havet som ett medelvärde av amplituden i terrängen i varje gridruta, här ett område av 2500 km^2. Många proxyserier representerar temperaturen från den verkliga höjden över havet. I proxyserierna som använts i detta arbete anges höjden antingen inom ett intervall, som ett specifikt värde, eller så saknas värde för att området som representeras i proxyserien är för stort (Tabell 2b). På grund av modellens upplösning kan inte lokala detaljer simuleras och skillnaderna mellan modell och proxy kan bli stora, vilket t.ex. Strandberg m.fl. (2011) visar detta gällande nederbörd i bergiga områden; i deras fall under den senaste istiden. Skillnaderna mellan modell och proxy kan med avseende på höjden över havet vara mer av ett representationsproblem än en faktiskt bias.

I jämförelsen mellan proxyserien och modelldata från Torneträsk visade det sig att den gridruta i modellen som bäst motsvarade höjden över havet i proxyserien, inte var den som bäst motsvarade proxypunkten geografiskt, utan det gjorde en av de intilliggande gridrutorna, varför båda dessa gridrutor användes i jämförelser av absoluta temperaturer mellan proxy och modell (Tabell 2a, 4b och 6b, Figur 19). Detta kan eventuellt förklaras med att serierna representerar medelvärden över stora områden. Även för proxyserien från French Alps är skillnaderna i höjd över havet mellan modell och proxy stora. Detta har dock inte analyserats vidare pga. att det inte fanns tillgång till absolut temperaturdata.

Vulkanism och solaktivitet
Att påverkan från vulkaner inte finns med i beräkningarna för modellen medför en del problem i jämförelse mellan modell och proxy. Vissa vulkanutbrott var mycket explosiva och syns tydligt i vissa men inte alla proxy, och vid tiden för dessa kommer man därför att få ett oundvikligt bias i modellen. Samtidigt bör påpekas att den simulerade mellanårsvariabiliteten i de flesta fall är väl så stor som de rekonstruerade, vilket tyder på att kraftiga anomalier för enstaka år kan genereras även utan inverkan av vulkaner. Ett alternativ för att kunna jämföra modell mot proxy med utgångspunkt i att vulkaners inverkan saknas i modellen, skulle möjligen kunna vara att ta bort åren för kända vulkanutbrott från proxyserierna, och uföra beräkningarna med utgångspunkt i de nya dataserierna.

Generellt var överensstämmelsen i infallandet av proxyseriernas varmaste 100-årsperioder och de tidigare kända perioderna av hög solaktivitet låg; likaså överensstämmelsen i infallandet av proxyseriens kallaste 100-årsperioder och de tidigare kända perioderna av låg solaktivitet. Enligt modelldata infaller den kallaste 100-årsperioden i fyra av de fem proxyplatserna under den period av låg solaktivitet som brukar kallas Maunder minimum. Modellen, som har drivits med solstrålningsparametern på ett ca 9000-årigt perspektiv, återger variabiliteten i solstrålningen väl. Endast i ett fall är detta i överensstämmelse med proxyserien på samma plats (Kap. 3.2.1-3.2.5). Det här antyder att antingen är modellens känslighet för variationer i solstrålning för stor, eller så är urvalet av proxyserier inte representativt.

Jämförelse med medelvärde 1961-90
Att modellens medelvärde alltid är lägre än proxyseriernas, skulle till viss del kunna förklaras med att temperaturanomalierna är baserade på referensperioden 1961-90. På grund av att temperaturökningen under denna period i modellserien var större än hos proxyserierna, kommer temperaturanomalierna få lägre värden i modellserien än i proxyserierna. Att modellen har så stor temperaturökning under slutet av 1900-talet beror troligen på avsaknaden av sulfataerosoler vilken medför en viss dämpning av den globala uppvärmningen.

3.5 Slutsats och framtida studier

Överensstämmelsen mellan modelldata och data från de fem olika proxyserierna från olika delar av Europa är dålig med avseende på medelvärde, standardavvikelse och korrelation; detta både på millennieskala och under proxyseriernas varmaste/kallaste 100-årsperioder. Modellen visar generellt lägre medeltemperaturer än alla proxyserier. Mellanårsvariabiliteten är likvärdig i de flesta modell- och proxyserier, medan variabiliteten i data som filtrerats med ett löpande medelvärde på 30 år inte uppvisar någon entydig bild. Korrelationsgraden mellan

modell och proxy i de 30-årsfiltrerade serierna är generellt mycket låg för respektive plats, vilket indikerar att tidsutvecklingen dem emellan skiljer sig år. Då data filtreras med ett löpande medelvärde på 100 år blir korrelationsgraden högre för några serier, men inte för alla. Dessutom sammanfaller den kallaste 100-årsperioden enligt var och en av de fem proxyserierna endast i två fall med de kallaste 100-årsperioderna enligt modellen. Med tanke på att det finns fel och brister i proxyserierna och att det finns begränsningar i modellen är frågan förstås vad man egentligen kan dra för slutsatser av dessa resultat.

Till proxyserierna kopplas en rad osäkerheter. Olika proxyserier har olika kvalitet, avseende t.ex. vilken säsong, klimatvariabel och plats de representerar, samt sättet på vilket de dateras och kalibreras. Korrelationsanalys mellan de proxyserier från Alpområdet som används i detta arbete visar på mycket olika tidsutveckling av temperaturerna på 30-årsskalan under de senaste 500 åren. Det här verkar orimligt då motsvarande variabilitet på 30-årsskalan under 1900-talet enligt CRU är i hög grad korrelerad mellan de olika platserna. Även proxyserierna har på 30-årsskalan högre överensstämmelse på 1900-talet, men det betyder alltså inte att man kan använda dem helt okritiskt för längre tidsskalor. Dessutom visar jämförelsen mellan proxyserierna och observationsdata att en betydande andel av mellanårsvariabiliteten i proxyserierna inte förklaras av temperatur, som de ju utger sig för att förklara, utan av någonting annat. Givet det här dataunderlaget kan man inte säga så mycket om utvecklingen av temperaturklimatet under det senaste millenniet.

För de 30-årsfiltrerade proxyserierna från norra Skandinavien och Alpområdet är korrelationen stark för 1900-talet, medan den är mycket svag för de senaste 500 åren. För 30-årsfiltererade modelldata från dessa platser är korrelationen mycket stark för de senaste 500 åren. Motsvarande 30-årsfiltrerade CRU-data för 1900-talet uppvisar en hög korrelationsgrad. Det här antyder att de här proxyserierna ger en delvis felaktig bild av den geografiska variabiliteten på den här tidsskalan. Däremot antyder en mycket svag korrelation av mellanårsvariabiliteten i CRU-data från norra Skandinavien och Alpomårdet för 1900-talet att den geografiska variabiliteten av temperaturen är stor. Modellen verkar alltså visa för lite geografisk variabilitet, vilket troligen beror på de begränsningar i regionala modellen som relateras till att den har fått värden från en global klimatmodell. Andra osäkerheter i modellen är kopplade till de data som representerar solaktivitet och hur modellen svarar på dem. Dessutom finns påverkan av vulkaner inte med i modellen.

Resultaten i detta arbete antyder att om modellens representation av temperaturklimatet under det senaste millenniet ska kunna utvärderas genom jämförelser med proxydata, måste kvalitén av proxydata var högre. Många proxyserier med hög tidsupplösning, som ger en entydig bild av klimatets utveckling behöver utvecklas. Analysen bör göras mot ett större antal proxyserier, gärna bestående av data för absoluta temperaturer, samt med avseende på flera klimatvariabler än temperatur. Intressant vore även att studera sambandet mellan den storskaliga cirkulationen och marknära temperatur/nederbörd i olika delar av Europa där proxydata och/eller instrumentella data finns och jämföra detta med modellen. När klimatmodeller används för att testa hypoteser om scenarier av dåtida- och framtida klimat, är det viktigt att de återger det verkliga klimatet så bra som möjligt. Att den här utvärderingen inte kan ge några tydliga svar på hur väl modellen kan reproducera Europas temperaturklimat under det senaste millenniet, antyder att fortsatt utvärdering– samt utveckling av utvärderingsmetoder - är mycket viktig.

4 Referenser

Berger, A., 1977: Long-term variations of earth's orbital elements. *Celestial Mechanics*, 15(1), 53–74.

Bergman, N. och Gustafsson, F. 2003. MATLAB for engineers explained. Springer-verlag, London, 218 sid.

Bigler, C., Hall, R. 2003. Diatoms as quantitative indicators of July temperature: a validation attempt at century-scale with meteorological data from northern Sweden. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 189: 147-160.

Bogren, J., Gustavsson, T. och Loman, G. 1999. Klimatologi och meteorologi, Studentlitteratur, Lund, 275 sid.

Büntgen, U., Frank, D.C., Nievergelt, D., och Esper, J. 2006. Summer temperature variations in the European Alps, AD 755-2004, *Journal of Climate* 19: 5606-5623.

Camuffo.D och Jones, P.D (redaktörer). 2002. Improved understanding of past climate variability from early daily European instrumental sources. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 392 sid.

Christensen, J.H., Kjellström, E., Giorgi, F., Lenderink, G., Rummukainen, M. 2010. Weight assignment in regional climate models. *Climate Research*, 44(2-3), 179-194.

Corona, C., Edouard, J.-L., Guibal, F., Guiot, J., Bernard, S., Thomas, A. och Denelle, N. 2011. Long-term summer (AD751-2008) temperature fluctuation in the French Alps based on tree-ring data. *Boreas,* 40:351-366.

CRU, Climate research unit, 2012 A, http://www.cru.uea.ac.uk/ 2012-01-24.

CRU, Climate research unit, 2012 B, http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/ 2012-01-24.

Fischer, E.M., Luterbacher, J., Zorita, E., Tett, S.F.B., Casty, C. och Wanner, H. 2007. European climate response to tropical volcanic eruptions over the last half millennium. *Geophysical research letters*, 34:L05707.

Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D.W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D.C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R, Raga, G, Schulz, M. och Van Dorland, R. 2007. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. I: Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M, Averyt, K.B., Tignor, M. och Miller, H.L. (redaktörer)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom och New York, NY, USA.

Forskning och framsteg 2012: 500 års väder I Stockholm, http://fof.se/tidning/2008/5/500-ars-vader-i-stockholm 2012-01-24.

Global Volcanism Program 2012: Large Holocene eruptions, http://www.volcano.si.edu/world/largeeruptions.cfm 2012-01-24.

Grudd, H. 2008. Torneträsk tree-ring width and density AD 500-2004: a test of climatic sensitivity and a new 1500-year reconstruction of north Fennoscandian summers. *Climate dynamics*: 31:843-857.

Guiot, J., Corona, C., ESCARSEL members. 2010. Growing season temperatures in Europe and climate forcings over the past 1400 years. *PloS ONE*:5(4):e9972, 1-15.

Hegerl, G.C., Zwiers, F.W, Braconnot, P., Gillett, N.P., Luo, Y., Marengo Orsini, J.A., Nicholls, N., Penner, J.E. och Stott, P.A. 2007. Understanding and Attributing Climate Change. I: Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working

Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (redaktörer)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

HISTALP, Historical Instrumental Climatological Surface Time Series Of The Greater Alpine Region, 2012: Home, http://www.zamg.ac.at/histalp/index.html 2012-01-24.

Hünicke, B., Zorita, E., och Haeseler, S., Baltic Holocene climate and regional sea-level change: A statistical analysis of observations, reconstructions and simulations within present and past analogues for future changes, Final report of the DFG research unit SINCOS-2, GKSS, Geesthacht, Germany, 2010.

IPCC 2007: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis,M., Averyt, K.B., Tignor, M. and Miller, H. (redaktörer)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jansen, E., Overpeck, J., Briffa, K.R., Duplessy, J.-C., Joos, F., Masson-Delmotte, V., Olago, D., Otto-Bliesner, B., Peltier, W.R, Rahmstorf, S., Ramesh, R., Raynaud, D., Rind, D., Solomina, O., Villalba, R. Och Zhang, D. 2007. Palaeoclimate. I: Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M, Averyt, K.B., Tignor, M. och Miller, H.L. (redaktörer)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Jones, P.D. och Moberg, A. 2003. Hemispheric and large-scale surface air temperature variations: an extensive revision and an update to 2001. *Journal of climate,* 16:206-223.

Jones, C.G., Samuelsson, P., Kjellström, E. 2011. Regional climate modelling at the Rossby Centre. *Tellus,* 63A(1), 1-3.

Jouzel, J., Masson-Delmotte, V., Cattani, O., Dreyfus, G., Falourd, S., Hoffmann, G., Minster, B., Nouet, J., Barnola, J., Chappellaz, J., Fischer, H., Gallet, J., Johnsen, S., Leuenberger, M., Loulergue, L., Luethi, D., Oerter, H., Parrenin, F., Raisbeck, G., Raynaud, D., Schwander, J., Spahni, R., Souchez, R., Selmo, E., Schilt, A., Steffensen, J., Stenni, B., Stocker, T., Tison, J., Werner, M. och Wolff, E. 2007. Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years. *Science* 317(793-796).

Kjellström, E., Nikulin, G., Hansson, U., Strandberg, G. och Ullerstig, A., 2011. 21st century changes in the European climate: uncertainties derived from an ensemble of regional climate model simulations. *Tellus,* 63A(1), 24-40.

Larocque, I. och Bigler, C. 2004. Similarities and discrepancies between chironomid and diatom-inferred temperature reconstructions through the Holocene at Lake 850, northern Sweden. *Quaternary International,* 122:109-121.

Larocque-Tobler, I., Grosjean, M., Heiri, O., Trachsel, M., Kamenik, C. 2010. Thousand years of climate change reconstructed from chironomid subfossils preserved in varved Lake Silvaplana, Engadine, Switzerland. *Quartenary Science Reviews,* 29:1940-1949.

Legutke, S., and R. Voss, the Hamburg Atmosphere-Ocean Coupled Circulation Model ECHO-G, DKRZ-Report, 1999.

Leijonhufvud, L., Wilson, R. Moberg, A. Söderberg, J. Retsö, D. 2010. Five centuries of Stockholm winter/spring temperatures reconstructed from documentary evidence and instrumental observations. *Climate Change,* 101:109-141.

Manley, G. 1974. Central England temperatures: monthly means 1659 to 1973. *Quarterly*

Journal of the Royal Meteorological Society, 100:389–405.
Mann, M.E., Zhang, Z., Hughes, M.K., Miller, R.S., Rutherford, S., Ni, F. 2008. Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. *The national academy of sciences of the USA*, 105:13252-13257.
MathWorks 2012: MATLAB – the language of technical computing, http://www.mathworks.se/products/matlab/index.html 2012-01-24
Meier, N., Rutishauser, T., Pfister, C., Wanner, H. Och Luterbacher, J. 2007. Grape harvest dates as a proxy for Swiss April to August temperature reconstructions back to AD 1480. *Geophysical research letters,* 34:L20705, 1-6.
Mitton, J.F, Knowles, P., Sturgeon, P.B., Linhart, Y.B., Davis, M. 1981. Associations between heterozygosity and growth rate variables in three western forest trees. Proceedings of the symposium on isozymes of North American forest trees and forest insects, General technical report PSW-48: 27-34, Pacific southwest forest and range experiment station.
Moberg, A., Gouirand, I., Kjellström, E., de Jong, R., Linderholm, H., Zorita, E. 2006. Climate in Sweden during the past millennium – evidence from proxy data, instrumental data and model simulations, *Technical report* TR-06-35, SKB.
NOAA, National Oceanic and Atmospheric administration 2011 A: Paleoclimatology http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/why-paleo.html, 2011-11-24.
NOAA, National Oceanic and Atmospheric administration 2011 B: Tree ring, extending a chronology based on living trees further back in time through crossdating http://www.ncdc.noaa.gov/paleo/slides/slideset/18/18_355_slide.html 2011-10-31
Randall, D.A., Wood, R.A., Bony, S., Colman. R., Fichefet, T., Fyfe, J., Kattsov, V., Pitman, A., Shukla, J., Srinivasan, J., Stouffer, R.J., Sumi, A. och Taylor,K.E., 2007: Climate Models and Their Evaluation. I: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M.Tignor and H.L. Miller (redaktörer)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
Rummukainen, M. 2010. State-of-the-art with regional climate models. *WIRE (Wiley Interdisciplinary Reviews): Climate Change Advanced Review* 1:82–96.
Samuelsson, P., Jones, C., Willén, U., Ullerstig, A., Gollvik, S., Hansson, U., Kjellström, E., Nikulin, G. och Wyser, K. 2011. The Rossby Centre Regional Climate Model RCA3: Model description and performance. *Tellus*, 63A(1):4-23.
SCB, Statistiska centralbyrån 2012: Statistikskolan: Stokastiska processer och tidsserier, http://www.scb.se/Grupp/Klassrummet/_Dokument/sto.pdf 2012-01-24.
Smol, J.P. Och Cumming, B.F. 2000. Tracking long-term changes in climate using algal indicators in lake sediments. *Journal of Phycology,* 36(6):986-1011.
Shimanke, S., Kjellström, E., Strandberg, G., Meier, M.H.E. 2011. A regional climate model simulation over the Baltic Sea region for the last Millennium. *Reports Oceanography 111*, SMHI.
SMHI, Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut 2009: Rossby Centre Newsletter May 2009 http://www.smhi.se/polopoly_fs/1.2923!RCnews_may_2009.pdf, 2012-01-24.
SMHI, Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut 2012 A: Hur fungerar en klimatmodell http://www.smhi.se/kunskapsbanken/klimat/hur-fungerar-en-klimatmodell-1.470, 2012-01-24.
Stockholms universitet 2012: Håkan Grudd: Min forskning http://people.su.se/~hgrud/research.htm 2012-01-24.

Strandberg, G., Brandefeldt, J. och Kjellström, E. 2011. High-resolution regional simulation of last glacial maximum climate in Europe. *Tellus*, 63A(1):107-125.

Wanner, H., Beer, J., Bütikofer, J., Crowley, T.J., Cubasch, U., Flückiger, J., Goosse, H., Grosjean, M., Joos, F., Kaplan, J.O., Küttel, M., Müller, S.A., Prentice, I.C., Solomina, O., Stocker, T.F., Tarasov, P., Wagner, M. och Widmann, M. 2008. Mid- to late Holocene climate change: an overview, Quaternary *Science Reviews*, 27:1791-1828.

Institutionen för ekologi, miljö och geovetenskap (EMG)
901 87 Umeå, Sweden
Telefon 090-786 50 00
Texttelefon 090-786 59 00
www.umu.se