

Hydrologiska och meteorologiska förhållanden i Göta älvdalen

*Sten Bergström, Johan Andréasson,
Katarina Losjö, Björn Stensen och Lennart Wern*

GÄU - delrapport 27

Linköping 2011





STATENS GEOTEKNISKA INSTITUT
SWEDISH GEOTECHNICAL INSTITUTE

Göta älvutredningen - delrapport 27

Hydrologiska och meteorologiska förhållanden
i Göta älv dalen

*Hydrological and meteorological conditions in the Göta river
valley, Sweden*

Sten Bergström
Johan Andréasson
Katarina Losjö
Björn Stensen
Lennart Wern
SMHI

**Göta älvutredningen
delrapport 27**

Beställning

Dnr SGI

Uppdragsnr SGI

Statens geotekniska institut (SGI)
581 93 Linköping

SGI
Informationstjänsten
Tel: 013-20 18 04
Fax: 013-20 19 14
E-post: info@swedgeo.se
www.swedgeo.se

6-1001-0042

14100

FÖRORD

Göta älvutredningen (GÄU)

För att möta ett förändrat klimat och hantera ökade flöden genom Göta älv har Regeringen gett Statens geotekniska institut (SGI) i uppdrag att under en treårsperiod (2009-2011) genomföra en kartläggning av stabiliteten och skredriskerna längs hela Göta älv dalen inklusive del av Nordre älv. Tidigare utförda geotekniska undersökningar har sammanställts och nya undersökningar har utförts längs hela älven. Metoderna för analys och kartering av skredrisker har förbättrats. Nya och utvecklade metoder har tagits fram för att förbättra skredriskanalyser och stabilitetsberäkningar, förbättra kunskapen om erosionsprocesserna längs Göta älv, bedöma effekten av en ökad nederbörd på grundvattensituationen i området, utveckla metodiker för kartläggning och hantering av högsensitiv lera (kvicklera) samt utveckla metodik för konsekvensbedömning. Utredningen har genomförts i samverkan med myndigheter, forskningsinstitutioner samt nationella och internationella organisationer.

Denna delrapport är en del i SGI:s redovisning till Regeringen.

Hydrologiska och meteorologiska förhållanden i Göta älv dalen

SMHI har på uppdrag av SGI gjort en sammanställning av de hydrologiska och meteorologiska förhållandena längs Göta älv. I sammanställningen beskrivs såväl dagens klimatvariationer som konsekvenserna av ett framtida förändrat klimat, baserat på de senaste tillgängliga klimatanalyserna. Med Göta älv dalen avses i detta fall älvsträckan från Vänersborg till Göteborg och älvens närområde.

Arbetet med denna rapport har utförts i samråd med en expertgrupp där Länsstyrelsen i Västra Götalands län varit sammankallande. I gruppen har ingått Lennart Olofsson och Ulf Gustavsson, Länsstyrelsen i Västra Götalands län, Ingvar Dyberg, Sjöfartsverket, Claes-Olof Brandesten och Anna Östlund, Vattenfall AB Vattenkraft samt Carina Hultén, Marius Tremblay och Bengt Rydell, SGI. Expertgruppen har vid möte den 11 februari 2011 ställt sig bakom föreliggande rapport.

Linköping 2011

Marius Tremblay
Uppdragsledare, Göta älvutredningen



RAPPORT NR 2010-81

Författare:

Sten Bergström

Johan Andréasson

Katarina Losjö

Björn Stensen

Lennart Wern

Granskningsdatum:

2010-11-30

Uppdragsgivare:

Statens geotekniska institut

Granskare:

Sten Lindell

Dnr:

2009/2076/180

Version:

nr 1

Hydrologiska och meteorologiska förhållanden i Göta älvdalen – slutrapport

Uppdragstagare

SMHI

601 76 Norrköping

Projektansvarig

Sten Bergström

Tel: 011 4958292

E-post: sten.bergstrom@smhi.se

Uppdragsgivare

Statens geotekniska institut

581 93 Linköping

Kontaktperson

Bengt Rydell

Tel: 013 201824

Fax: 013-201914

E-post: bengt.rydell@swedgeo.se

Distribution

Klassificering

(x) Allmän

Nyckelord

Hydrologiska och meteorologiska förhållanden, Göta älvdalen, klimatförändringar

Övrigt

Innehållsförteckning

SAMMANFATTNING	1
1 BAKGRUND	1
2 SCENARIER FÖR ETT FÖRÄNDRAT KLIMAT	3
3 TEMPERATUR OCH NEDERBÖRD	5
3.1 Naturliga variationer i dagens klimat.....	5
3.2 Den framtida temperatur- och nederbördsutveckling i Göta älvdalen	9
3.3 Den mest extrema nederbördens utveckling	15
4 FLÖDEN TILL GÖTA ÄLV FRÅN VÄNERN OCH BIFLÖDEN	16
4.1 Vattenstånd i Vänern	16
4.2 Flöden från Vänern till Göta älv	17
4.3 Lokal tillrinning nedströms Vänersborg	23
5 MARKFUKTIGHET I VÄNERNS NÄROMRÅDE	25
5.1 Beräknad framtida markfuktighet för hela år	26
5.2 Beräknad framtida markfuktighet för årstider	28
6 HAVSNIVÅER.....	30
6.1 Nuvarande förhållanden	30
6.2 Havsnivåer i framtiden.....	32
6.3 Framtidens havsnivåer i Göteborg	34
6.4 Havsnivåer på längre sikt	34
7 SLUTSATSER OCH REKOMMENDATIONER	35
8 REFERENSER.....	35

BILAGA 1. Sammanfattning av olika vetenskapliga sammanställningar av framtida havsnivåhöjningar

Sammanfattning

Föreliggande rapport sammanfattar SMHIs arbete med att beskriva de hydrologiska och meteorologiska förhållandena längs Göta älv. Det har genomförts på uppdrag av SGI inom dess regeringsuppdrag att klarlägga stabilitetsförhållandena i Göta älvdalen med hänsyn tagen till klimatförändringar. I rapporten redovisas analyser av dagens klimat och regionala scenarier för framtidens klimat i Göta älvdalen. Dessutom redovisas beräknade ändringar i de framtida flödena i älven samt i dess biflöden.

Slutsatserna och rekommendationerna sammanfattas nedan:

1. Befintliga klimatberäkningar visar en gradvis ökning av såväl årsmedeltemperaturen som nederbörden under de kommande 90 åren. Men de visar också på stor spridning. Bedömningen av framtidens klimatförhållanden i Göta älvdalen bör även fortsatt baseras på resultat från de senaste regionala klimatberäkningarna från den internationella forskningen.
2. Det är rimligt att för Göta älvdalen tills vidare räkna med en framtida ökning av extrem dygnsnederbörd (återkomsttid 100 år) med 10 % vid mitten av seklet (2050) och med 20 % år 2100.
3. Resultaten visar tydligt att såväl höga som låga tappningar från Vänern kommer att bli vanligare om klimatet utvecklas så som det beskrivs av tillgängliga framtidsscenarier. Detta beror på att tillrinningen beräknas öka på vinter och höst och minska under vår och sommar.
4. Det är rimligt att anta att dagens beräknade 100-årsflöden i lokala biflöden till Göta älv i medeltal kommer att öka med 5-10 % fram till nästa sekelskifte (2100). Spridningen mellan beräkningarna är dock stor.
5. Antalet dagar med hög markfuktighet minskar på sikt oavsett vilken klimatmodell som ligger till grund för beräkningen. Sambandet mellan framtidens markfuktighetsförhållanden, portryck och grundvattenbildning i Göta älvdalen bör dock studeras vidare.
6. Baserat på dagens kunskapsläge är det för närvarande rimligt att anta en övre gräns för havets globala stigning på ca 30 cm år 2050 och omkring en meter år 2100 räknat från referensåret 1990. Men det är nödvändigt att omgärda dessa siffror med stora reservationer, eftersom nya uppgifter kan väntas efterhand som forskningen framskrider. Siffrorna bör reduceras med den lokala landhöjningen.
7. För närvarande finns inget underlag för att ta hänsyn till ändrad stormintensitet eller stormfrekvens och därmed sammanhängande höga vattennivåer i ett framtida klimat i göteborgsområdet.

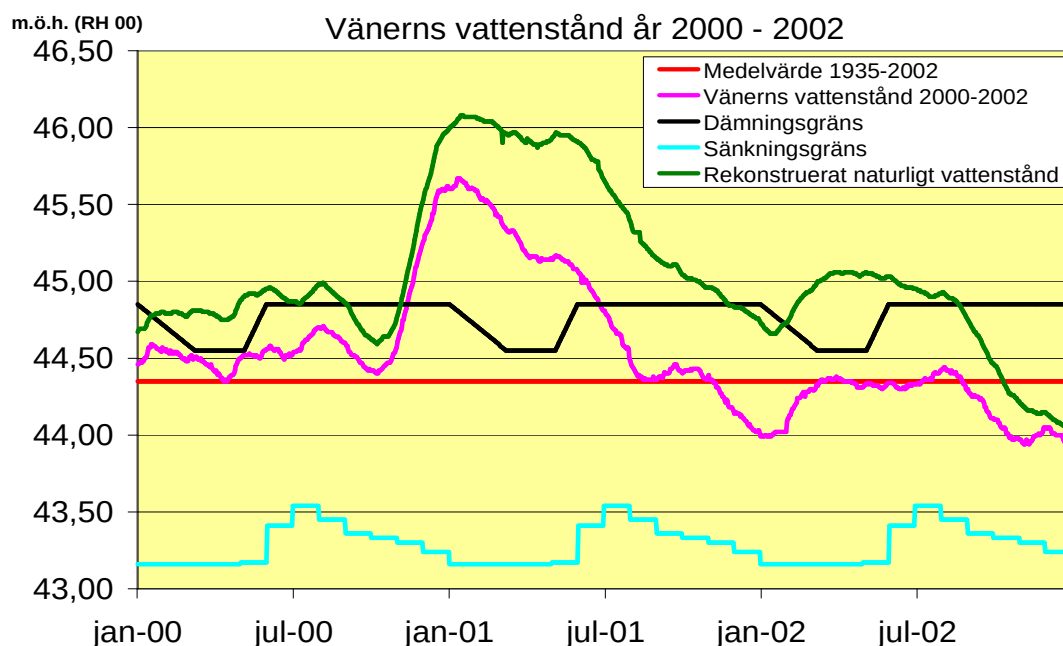
1 Bakgrund

Inom ramen för SGIs regeringsuppdrag att klarlägga stabilitetsförhållandena i Göta älvdalen med hänsyn tagen till klimatförändringar har SMHI fått i uppdrag att sammanfatta de hydrologiska och meteorologiska förhållandena längs Göta älv. Sammanfattningen skall beskriva såväl dagens klimatvariationer som konsekvenserna av ett framtida förändrat klimat, baserat på de senaste tillgängliga klimatanalyserna. Med Göta älvdalen avses i detta fall älvsträckan från Vänersborg till Göteborg och älvens närområde.

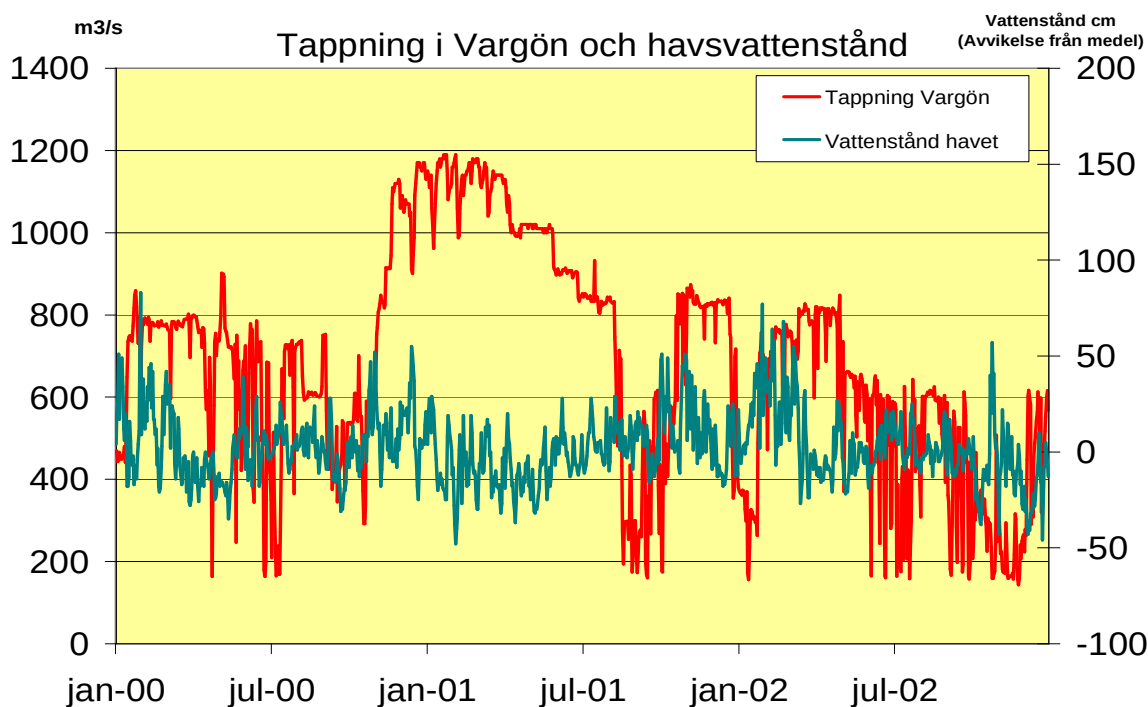
1.1 Översvämningarna hösten och vintern 2000-2001

I november 2000 – januari 2001 drabbades Dalsland och Värmland av kraftiga översvämningar. Nivåerna i Vänern kulminerade i mitten av januari 2001 på sin högsta nivå sedan år 1927. Omfattande förebyggande insatser fick genomföras runt stränderna, men skadorna blev ändå stora.

Figur 1.1 visar vattenståndsutvecklingen i relation till Vänerns dämning- och sänkingsgränser under flödet 2000-2001. Där visas också en rekonstruktionsberäkning av vattenståndet, som det hade utvecklats om Vänern inte varit reglerad. Figur 1.2 visar motsvarande figur för tappningen i Göta älv och vattenstånden i havet.



Figur 1.1. Vattenståndsutvecklingen i Vänern samt rekonstruerat naturligt vattenstånd under 2000-2002.



Figur 1.2. Tappning från Vänern och vattenstånd i havet under 2000-2002.

Rekonstruktionsberäkningen i figur 1.1 visar att nivåerna hade blivit ca 40 cm högre om Vänern inte varit reglerad under flödet. Det innebär att detta troligen var den mest extrema hydrologiska situationen i Vänern under den tid som regelbundna observationer finns tillgängliga, d.v.s. under nästan 200 år. Under den kritiska perioden hösten 2000 och vintern 2001 tog Länsstyrelsen tillfälligt över ansvaret för tappningen från Vänern och ålade Vattenfall att öka tappningen till mer än vad vattendomen medgav. Som framgår av figur 1.2 var tappningen tidvis då nästan 1200 m³/s vilket skall jämföras med vattendomens begränsning på 1030 m³/s.

1.2 Pågående utredningsarbete och forskning

SMHI har deltagit och deltar i ett flertal projekt som rör översvämningsriskerna runt Vänern och längs Göta älv. Grunden till arbetet lades under Klimat- och sårbarhetsutredningen och sammanfattas i en rapport av Bergström m.fl. (2006). Då prövades en ny metodik för analys av klimateffekterna på Vänern och för studier av en alternativ tappningsstrategi. Sedan dess har det tillkommit nya klimatberäkningar, nya internationella utvärderingar av riskerna för ett stigande världshav och en helt ny metodik för beräkning av de hydrologiska effekterna av ett förändrat klimat har utvecklats. Dessutom har en ny strategi börjat tillämpas för Vänerns vattenhushållning sedan hösten 2008.

Inom projektet *Dimensionerande flöden för dammanläggningar för ett klimat i förändring - Scenarier i ett 50-årsperspektiv* sker en metodutveckling, som utgör grunden för fortsatt arbete i mer tillämpade projekt i hela landet. Ett stort arbete har lagts ner på att utforma ett nytt sätt att hantera gränssnittet mellan klimatmodellerna och den hydrologiska modellen. Vänern är ett testområde i detta utvecklingsarbete. Projekt finansieras av Elforsk och avslutas under 2010.

SAWA (Strategic Alliance for integrated Water management Actions) är ett Interreg IVB-projekt, som handlar om att minska riskerna för översvämnningar i ett framtida klimatförändringsperspektiv. Projektet leds av Agency for Roads, Bridges and Waters at Ministry for Urban Development and Environment i Hamburg. Man skall titta på hur olika aspekter av hur EU:s översvämningsdirektiv kan tillämpas på lokal nivå, studera olika typer av lokala anpassningsåtgärder och fokusera på utbildning och kommunikation. Från Sverige deltar Länsstyrelserna i Värmlands och Västra Götalands län, Karlstads kommun, Karlstads universitet, SGI och SMHI, vilka också delfinansierar projektet.

Länsstyrelserna i Värmlands och Västra Götalands län har beställt en fördjupad studie med syftet att få underlag för kommunernas beslut och länsstyrelsernas ställningstaganden kring frågor om långsiktig markanvändning i form av detalj- och översiktsplaner, beredskapsplanering m.m. Resultatet av studien skall ge underlag för att fastställa lämpliga planeringsnivåer för bl. a. bebyggelseutveckling i strandnära miljöer kring Vänern. Speciellt kommer stora arbetsinsatser göras för att fastställa en dimensionerande nivå för Vänern, eftersom detta system utgör ett undantag i de svenska riktlinjerna för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar. Dessutom kommer nya regleringsstrategier att testas ytterligare och en ny sannolikhetsbedömning av kombinerade effekter av extremvärden kommer att genomföras. Därmed blir detta projekt i viss mån styrande för vilka antaganden man skall göra rörande framtida flöden i Göta älv.

2 Scenarier för ett förändrat klimat

För att få en översiktlig bild av framtidens klimat använder man sig av globala klimatmodeller (GCM). Dessa drivs bland annat med antaganden om framtidens utsläpp av växthusgaser, så kallade utsläppsscenarier. För mer detaljerade regionala analyser krävs en bättre beskrivning av detaljer som påverkar det regionala klimatet. Därför kopplas de globala klimatberäkningar till regionala klimatmodeller (RCM) med bättre upplösning och beskrivning av detaljer såsom exempelvis Östersjön och den Skandinaviska bergskedjan. Den regionala klimatmodellen drivs av resultat från den globala modellen på ränderna av sitt modellområde. Det gör att valet av global modell får stor betydelse för slutresultatet även regionalt. Regionala klimatmodeller finns bland annat vid forskningsenheten Rossby Centre på SMHIs forskningsavdelning.

För att kunna räkna på framtidens klimat krävs antaganden om framtida utsläpp av växthusgaser. Här brukar man använda utsläppsscenarier som utarbetats av FN:s klimatpanel, IPCC. Dessa bygger på antaganden världens utveckling fram till år 2100 (Nakićenović m.fl., 2000). Genom att köra

klimatmodellerna med växthusgaskoncentrationer som motsvarar dagens förhållanden respektive för framtida förhållanden får man en bild av den framtida förändringen av klimatet.

Det är viktigt att komma ihåg att resultatet från alla beräkningar av det framtida klimatet baseras på antaganden om världens utveckling som är ganska pessimistiska. Man räknar normalt inte med effekterna av eventuella lyckosamma politiska förhandlingar för att minska utsläppen globalt, det betyder att det så kallade 2-gradersmålet som diskuteras som en rimlig målsättning inte antas uppnås. Under senare tid har dock även sådana beräkningar börjat göras.

Under flera år användes huvudsakligen fyra regionala klimatscenarier för de flesta studierna av klimateffekter i Sverige inklusive av den statliga Klimat- och sårbarhetsutredningen (SOU, 2007). Dessa fyra klimatscenarier byggde på en global klimatmodell från Hadley Centre i England (HadCM3/AM3H) och en från Max-Planck-institutet i Tyskland (ECHAM4/OPYC3). Dessa globala modeller kördes med utsläppsscenario A2 respektive B2 som de beskrivs av Nakićenović m.fl. (2000). Den regionala klimatmodellen från Rossby Centre, som då användes för tolkning av de globala modellernas resultat till svenska förhållanden, benämndes RCAO-modellen.

Numera finns det tillgång till ett stort antal regionala klimatscenarier beräknade med nyare globala och regionala klimatmodeller. Det europeiska ENSEMBLES-projektet syftar till att utveckla ett system för samordnade beräkningar av klimatförändringar baserat på ett antal europeiska och några utomeuropeiska globala och regionala klimatmodeller. Rossby Centre deltar i ENSEMBLES-samarbetet med den regionala klimatmodellen RCA3. Dessutom finns det ytterligare regionala modellberäkningar tillgängliga vid Rossby Centre (se tabell 2.1).

Det utsläppsscenario som huvudsakligen används inom ENSEMBLES benämns A1B, men ett scenario med kraftigare utsläpp, A2, och ett med lägre utsläpp, B1, har också använts. B1-scenariet kan närmast tolkas som ett scenario där koncentrationerna av växthusgaser stabiliseras.

Den globala klimatmodellen ECHAM5 kommer från Max-Planck-institutet för meteorologi i Tyskland och HadCM3 från Hadley Center i England. Resultat baserade på ECHAM5 finns också från tre simuleringar som har startats från olika initialtillstånd i slutet på 1800-talet, vilka betecknas ECHAM5(1), ECHAM5(2) respektive ECHAM5(3). ECHAM5(3) är den simulering av de tre som har bäst överensstämmelse med faktisk klimatutveckling i Europa under slutet av 1900-talet och har därför pekats ut som huvudalternativ för ENSEMBLES-projektets beräkningar.

Även HadCM3 har använts med två olika initialtillstånd, men då har också modellen varit parametriserad med olika klimatkänslighet. En av dessa simuleringar refereras som Q0 och betraktas som mest trolig. Den version som har högre klimatkänslighet, Q16, ligger dock även den inom vad som klimatforskarna betraktar som rimliga gränser.

De följande analyserna bygger i de flesta fall på ett urval av klimatscenarierna i tabell 2.1. Eftersom fler scenarier blivit tillgängliga efterhand har dock senare delar av arbetet kunnat göras med hela materialet. Detta gäller speciellt beräkningarna av framtida årsmedeltemperatur, årsnederbörd samt extrem nederbörd. Tappningsberäkningarna är gjorda med 14 av dessa 16 scenarier. Observera att endast 12 av de 16 klimatscenarier i tabell 2.1 sträcker sig ända fram till år 2100.

Tabell 2.1. Sammanställning av använda klimatscenarier. Nationsflaggorna avser instituten som har genomfört den regionala nedskalningen (RCM). Den globala klimatmodellen ECHAM5 kommer från Max Planck Institute i Tyskland, ARPEGE från CNRM i Frankrike, HadCM3 från Hadley Centre i England och BCM från METNO i Norge. CCSM3 är en nordamerikansk modell som körts vid SMHI. De två nedersta gulmarkerade raderna avser nyare scenarier, som hittills bara använts för beräkning av nederbörd och temperatur (avsnitt 3.2.) och 100-års flöden (avsnitt 4.2).

Nation	Institut	Scenario	GCM	RCM	Upplösning	Period
	SMHI	A1B	ECHAM5(1)	RCA3	50 km	1961-2100
	SMHI	A1B	ECHAM5(2)	RCA3	50 km	1961-2100
	SMHI	A1B	ECHAM5(3)	RCA3	50 km	1961-2100
	SMHI	A1B	ECHAM5(3)	RCA3	25 km	1961-2100
	SMHI	B1	ECHAM5(1)	RCA3	50 km	1961-2100
	SMHI	A1B	CNRM	RCA3	50 km	1961-2100
	SMHI	A1B	CCSM3	RCA3	50 km	1961-2100
	CNRM	A1B	ARPEGE	Aladin	25 km	1961-2050
	KNMI	A1B	ECHAM5(3)	RACMO	25 km	1961-2100
	MPI	A1B	ECHAM5(3)	REMO	25 km	1961-2100
	C4I	A2	ECHAM5(3)	RCA3	25 km	1961-2050
	HC	A1B	HadCM3(Q0)	HadRM3	25 km	1961-2100
	C4I	A1B	HadCM3(Q16)	RCA3	25 km	1961-2100
	METNO	A1B	BCM	HIRHAM	25 km	1961-2050
	METNO	A1B	HadCM3(Q0)	HIRHAM	25 km	1961-2050
	DMI	A1B	ECHAM5(3)	HIRHAM	25 km	1961-2100

3 Temperatur och nederbörd

3.1 Naturliga variationer i dagens klimat

Figur 3.1 och 3.2 visar den långsiktiga utvecklingen av luftens årsmedeltemperatur uppmätt vid SMHIs stationer i Vänersborg och i Säve. I figur 3.3 och 3.4 visas motsvarande data för nederbörden. I några fall har saknade mätvärden fyllts i genom interpolation från närliggande stationer. Dessa år är markerade med staplar med avvikande färg.

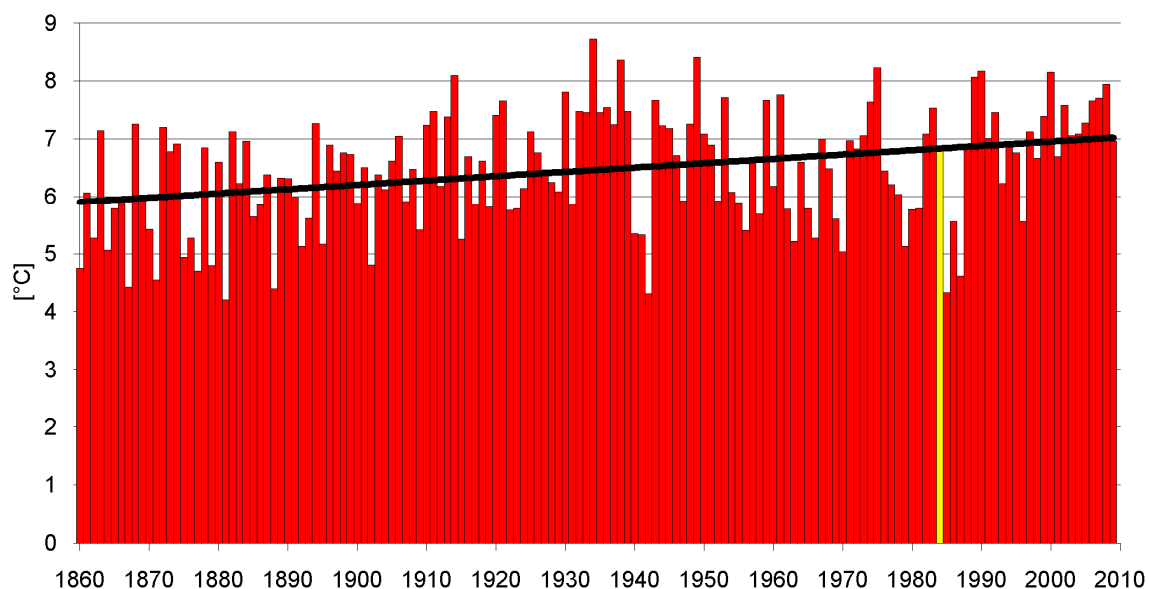


Fig. 3.1. Den långsiktiga utvecklingen av luftens årsmedeltemperatur uppmätt vid SMHI:s station i Vänersborg. Dataluckor som fyllts i med hjälp av interpolation av observationer från Skara är markerade med avvikande färg. Den heldragna svarta linjen är den beräknade trenden.

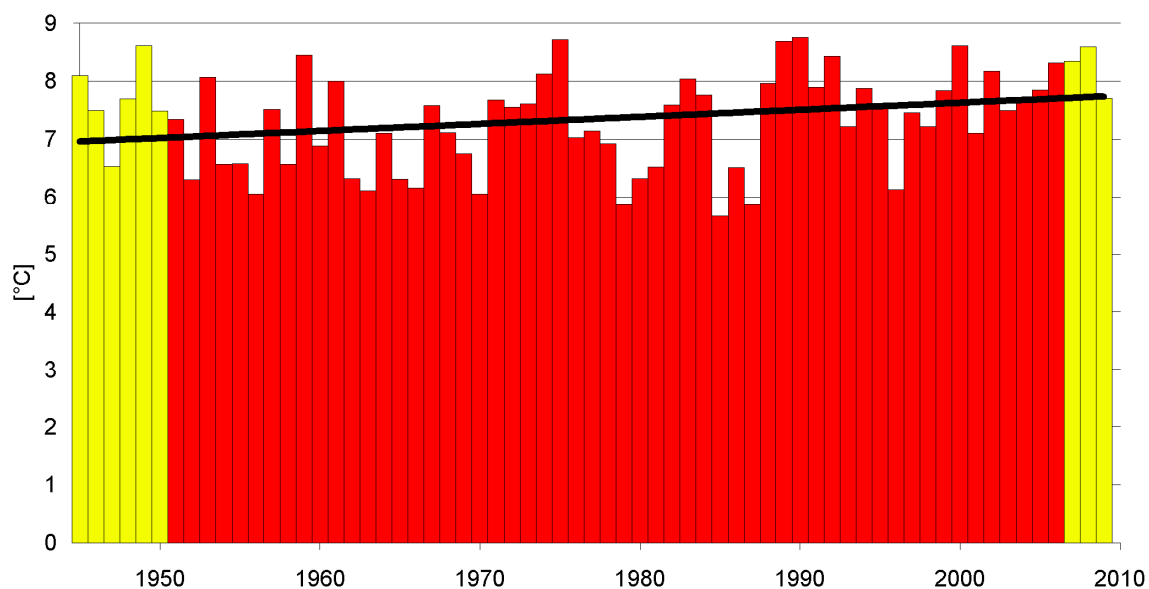


Fig.3.2. Den långsiktiga utvecklingen av luftens årsmedeltemperatur uppmätt vid SMHI:s station i Säve. Dataluckor som fyllts i med hjälp av interpolation av observationer från Göteborg är markerade med avvikande färg. Den heldragna svarta linjen är den beräknade trenden.

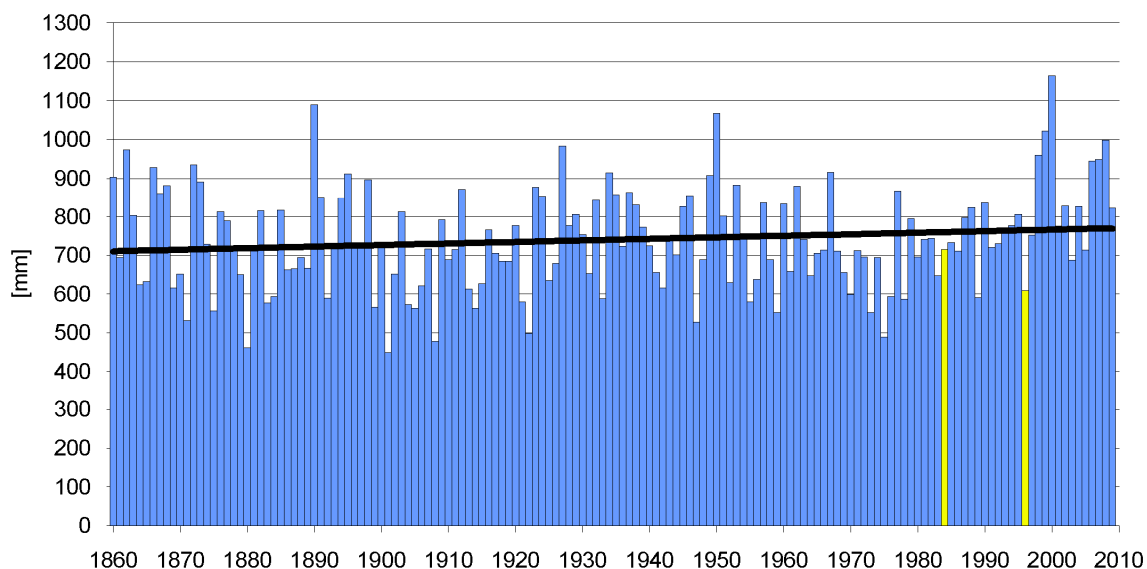


Fig. 3.3. Den långsiktiga utvecklingen av årsnederbörden uppmätt vid SMHIs station i Vänersborg. Dataluckor som fyllts i med hjälp av interpolation av observationer från Skara är markerade med avvikande färg. Den heldragna svarta linjen är den beräknade trenden.

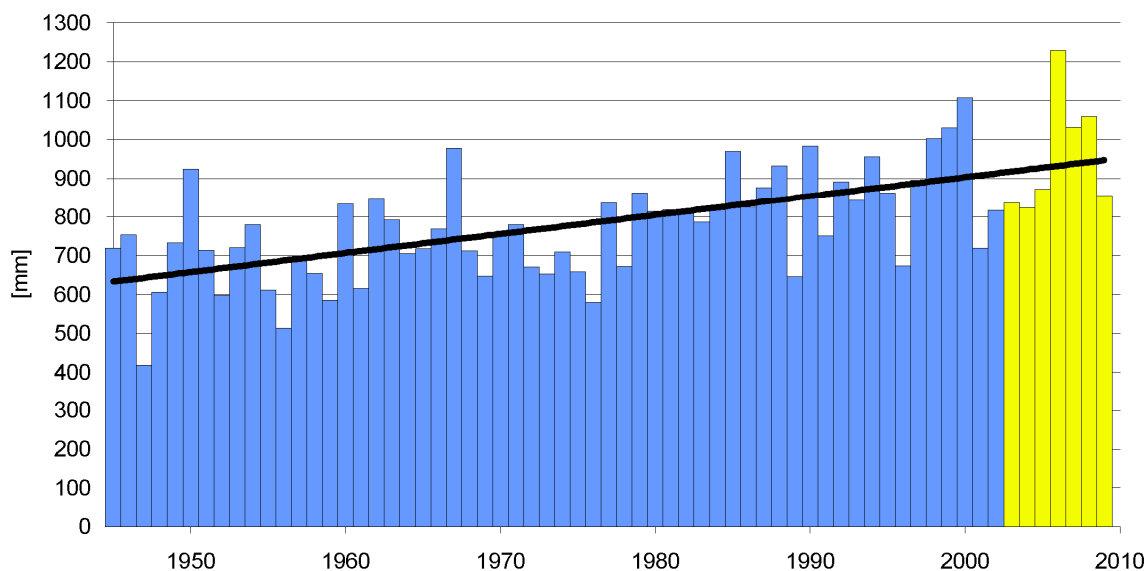


Fig. 3.4. Den långsiktiga utvecklingen av årsnederbörden uppmätt vid SMHIs station i Säve. Dataluckor som fyllts i med hjälp av interpolation av observationer från Göteborg är markerade med avvikande färg. Den heldragna svarta linjen är den beräknade trenden.

Såväl temperatur som nederbörd uppvisar en ökning under den redovisade perioden. Beträffande nederbörden bör dock denna trend tolkas med försiktighet, eftersom mätstandarden förbättrats efterhand. Detta kan betyda att exempelvis vindförlusterna vid nederbördsrör minskat. Dessutom är det viktigt att hålla i minnet att trendlinjernas lutning beror av längden på tidsserien. Detta gäller speciellt för nederbörd och medför att ökningen kan tyckas vara brantare för Säve än för Vänersborg. Denna skillnad är skenbar och beror på att serien för Säve är kortare än den för Vänersborg.

Figuren 3.5 respektive 3.6 visar beräknade dygnsnederbörds mängder med 20 respektive 100 års återkomsttider. Analysen bygger på data som avlästs vid fasta tider på dygnet vilket kan medföra en viss underskattning av de verkliga mängderna. Antalet år i underlaget är mellan 25 och 50 för de ingående stationerna. Den statistiska analysen är baserad på GEV-fördelningsfunktionen.

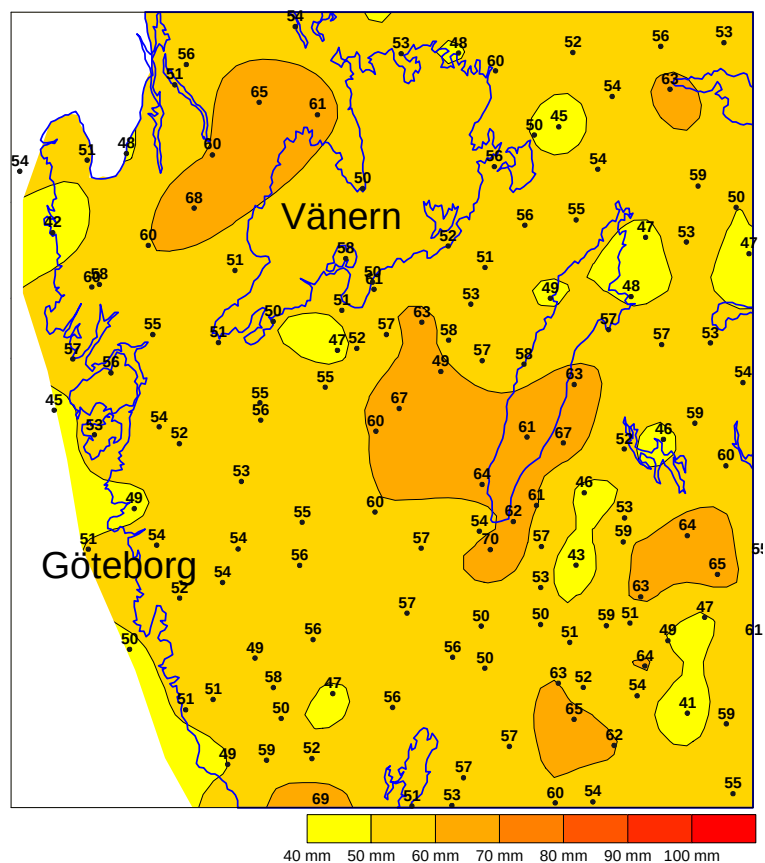


Fig. 3.5. Dygnsnederbörd med en återkomsttid av 20 år, baserad på fasta avläsningstillfällen och GEV-fördelningsfunktionen.

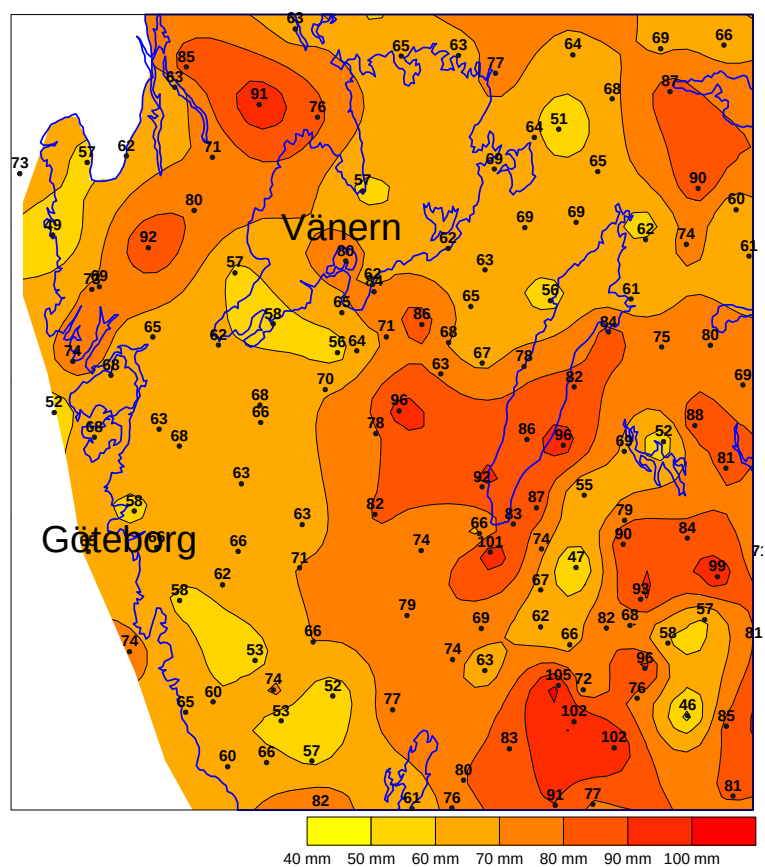


Fig. 3.6. Dygnsnederbörd med en återkomsttid av 100 år, baserad på fasta avläsningstillfällen och GEV-fördelningsfunktionen.

Figur 3.7 visar den långsiktiga utvecklingen av den mest extrema nederbörden i Västra Götalands län. Den är baserad på en griddad databas med en upplösning på 4 km x 4 km, den s.k. PTHBV-databasen. Figuren visar medelvärdet över regionen av årets högsta värde för varje gridruta. Den är inte helt jämförbar med tidigare redovisade observationer baserade på direkta avläsningar vid mätstationer. Figur 3.7 visar en tydlig ökning av nivån på de mest extrema regnen sedan början av 1960-talet.

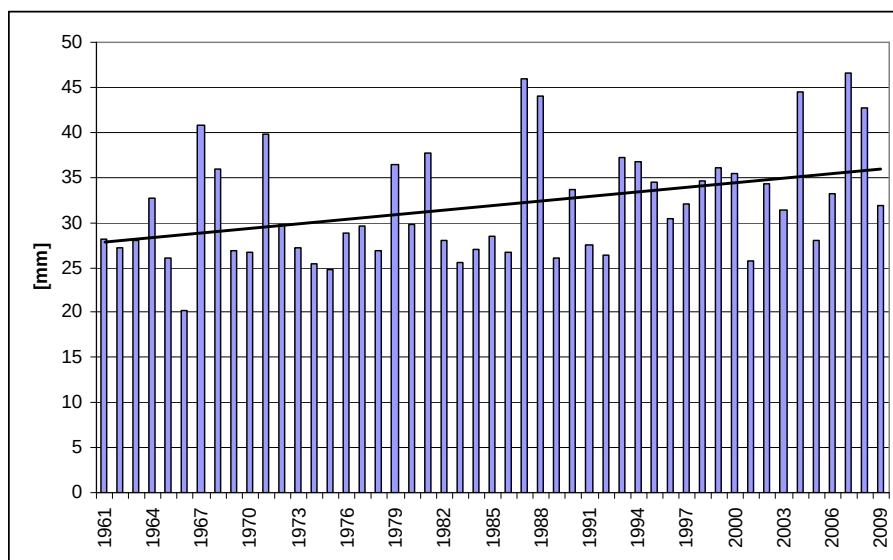


Fig. 3.7. Den långsiktiga utvecklingen av den mest extrema nederbörden i Västra Götalands län baserad på en griddad databas, den s.k. PTHBV-databasen. Figuren visar medelvärdet över regionen av årets högsta värde för varje gridruta. Den heldragna svarta linjen är den beräknade trenden.

Sammanfattningsvis kan man konstatera att vi har haft en långsiktig ökning av såväl nederbörd som temperatur i Göta älvdalen under det senaste århundradet. För extrem nederbörd gäller detta för de senaste 50 åren, men tiden dessförinnan har inte analyserats.

3.2 Den framtida temperatur- och nederbördsutveckling i Göta älvdalen

Med hjälp av den metodik som beskrivs i kapitel 2 har den framtida temperatur- och nederbördsutvecklingen i Göta älvdalen beräknats. Figur 3.8 visar den beräknade utvecklingen av årsmedeltemperaturen i Göta älvdalen baserat på samtliga klimatscenarier i tabell 2.1. I figuren finns även observationer för samma område hämtade från den tidigare beskrivna PTHBV-databasen. De olika skuggningarna avser uppifrån och nedåt, maximivärdet, 75% percentilen, medianvärdet, 25% percentilen och minimivärdet av samtliga klimatberäkningar. Referensperioden är 1961-1990. Dess medelvärde är redovisat som en horisontell linje. Figur 3.9-3.12 visar motsvarande data för de fyra årstiderna och figurerna 3.13-3.17 visar motsvarande nederbördsdata. Observera att figurerna har olika skalor på den vertikala axeln.

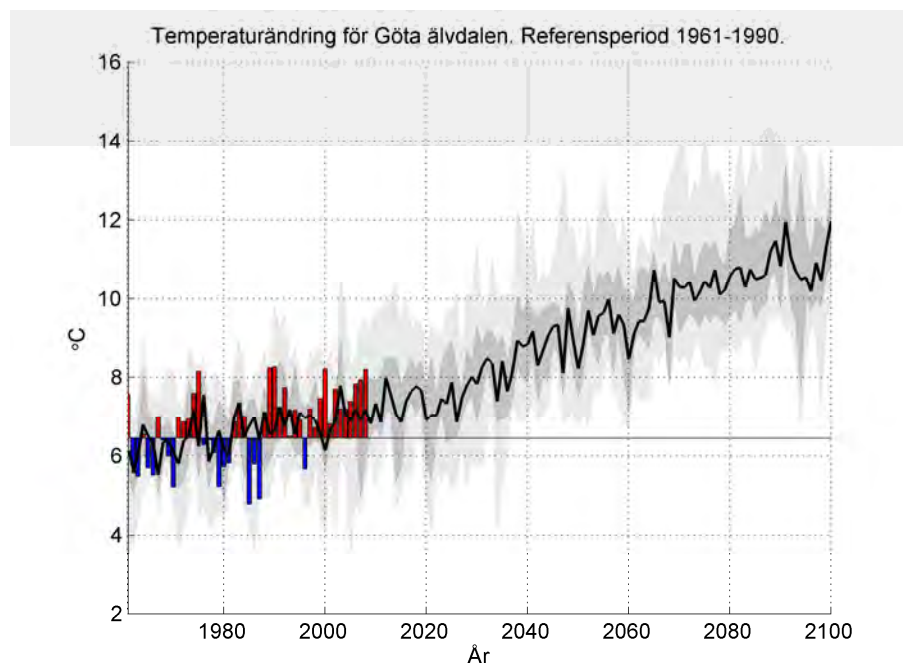


Fig. 3.8. Den framtida beräknade temperaturutvecklingen i Göta älvdalen för **hela året** baserat på samtliga klimatscenarier i tabell 2.1. I figuren finns även observationer för samma område hämtade från PTHBV-databasen. De olika skuggningarna avser uppifrån och nedåt, maximivärdet, 75% percentilen, medianvärdet (svart linje), 25% percentilen och minimivärdet av årsmedeltemperaturen från samtliga klimatberäkningar. Referensperiodens medelvärde visas med en horisontell linje.

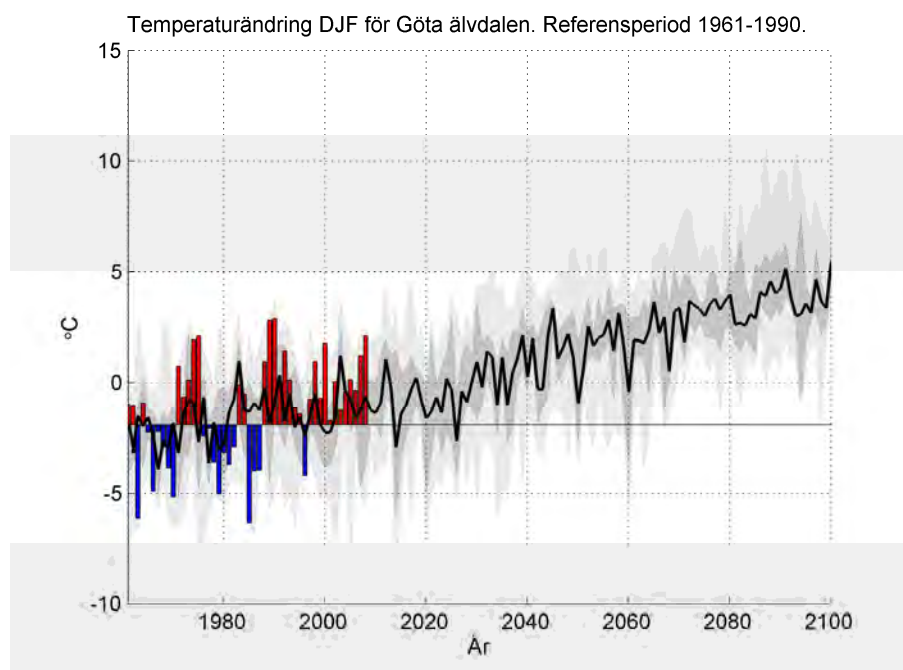


Fig. 3.9. Den framtida beräknade temperaturutvecklingen i Göta älvdalen för **vintermånaderna** (december, januari och februari) baserat på samtliga klimatscenarier i tabell 2.1. I figuren finns även observationer för samma område hämtade från PTHBV-databasen. De olika skuggningarna avser uppifrån och nedåt, maximivärdet, 75% percentilen, medianvärdet (svart linje), 25% percentilen och minimivärdet av vinterns medeltemperatur från samtliga klimatberäkningar. Referensperiodens medelvärde visas med en horisontell linje.

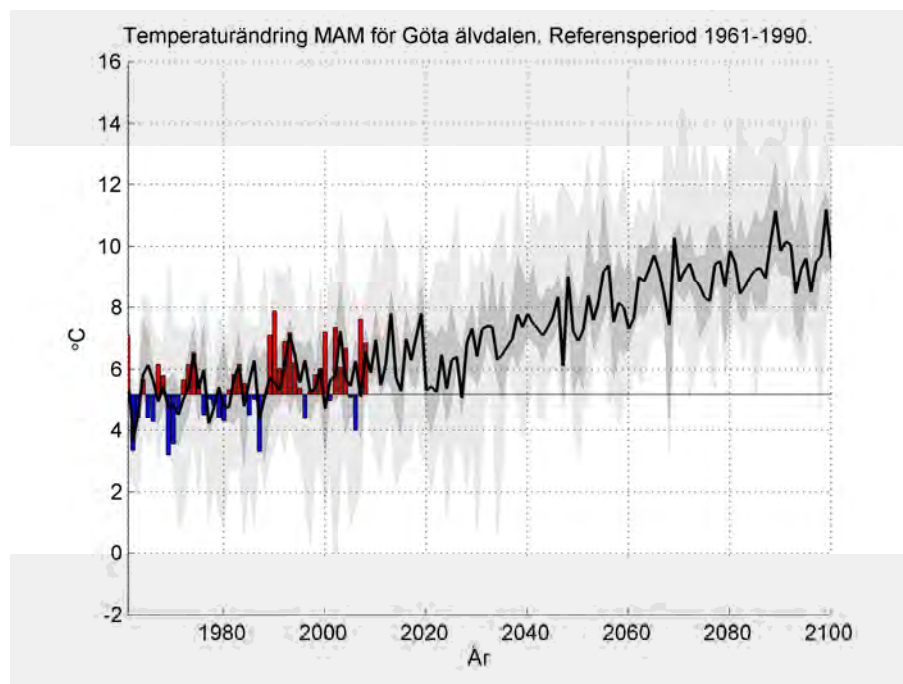


Fig. 3.10. Den framtida beräknade temperaturutvecklingen i Göta älvdalen för **vårmånaderna** (mars, april och maj) baserat på samtliga klimatscenarier i tabell 2.1. I figuren finns även observationer för samma område hämtade från PTHBV-databasen. De olika skuggningarna avser uppifrån och nedåt, maximivärdet, 75% percentilen, medianvärdet (svart linje), 25% percentilen och minimivärdet av vårens medeltemperatur från samtliga klimatberäkningar. Referensperiodens medelvärde visas med en horisontell linje.

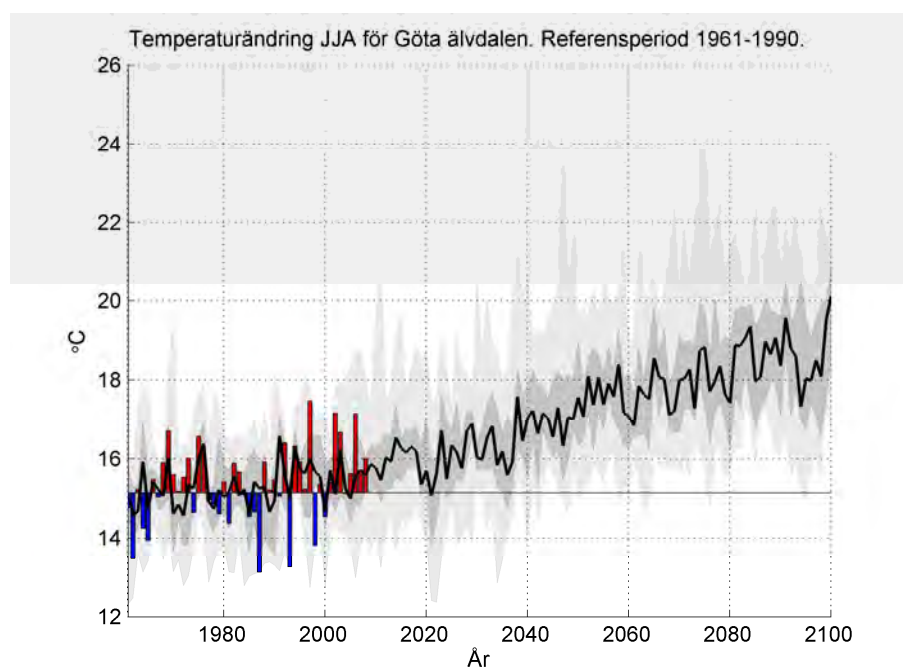


Fig. 3.11. Den framtida beräknade temperaturutvecklingen i Göta älvdalen för **sommarmånaderna** (juni, juli och augusti) baserat på samtliga klimatscenarier i tabell 2.1. I figuren finns även observationer för samma område hämtade från PTHBV-databasen. De olika skuggningarna avser uppifrån och nedåt, maximivärdet, 75% percentilen, medianvärdet (svart linje), 25% percentilen och minimivärdet av sommarens medeltemperatur från samtliga klimatberäkningar. Referensperiodens medelvärde visas med en horisontell linje.

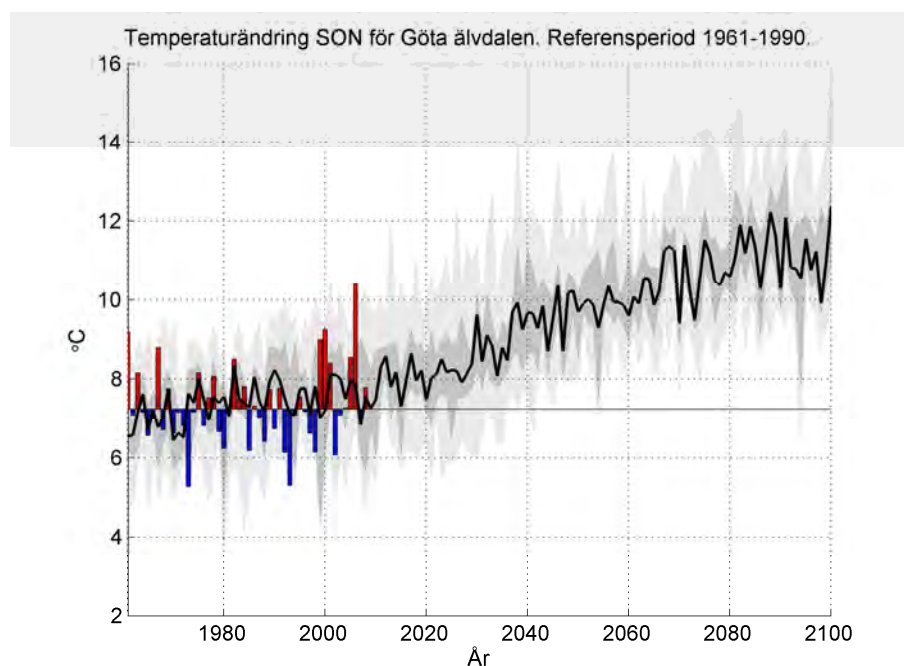


Fig. 3.12. Den framtida beräknade temperaturutvecklingen för **höstmånaderna** (september, oktober och november) i Göta älvdalen baserat på samtliga klimatscenarier i tabell 2.1. I figuren finns även observationer för samma område hämtade från PTHBV-databasen. De olika skuggningarna avser uppifrån och nedåt, maximivärdet, 75% percentilen, medianvärdet (svart linje), 25% percentilen och minimivärdet av höstens medeltemperatur från samtliga klimatberäkningar. Referensperiodens medelvärde visas med en horisontell linje.

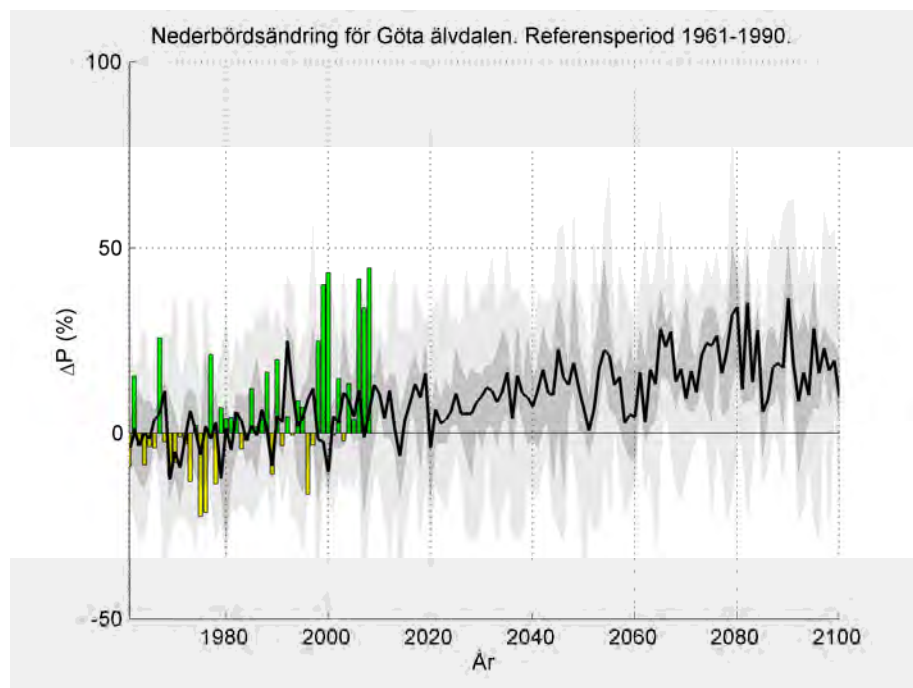


Fig. 3.13. Den framtida beräknade nederbördsutvecklingen i Göta älvdalen för **hela året** baserat på samtliga klimatscenarier i tabell 2.1. I figuren finns även observationer för samma område hämtade från PTHBV-databasen. De olika skuggningarna avser uppifrån och nedåt, maximivärdet, 75% percentilen, medianvärdet (svart linje), 25% percentilen och minimivärdet av årsnederbörden från samtliga klimatberäkningar.

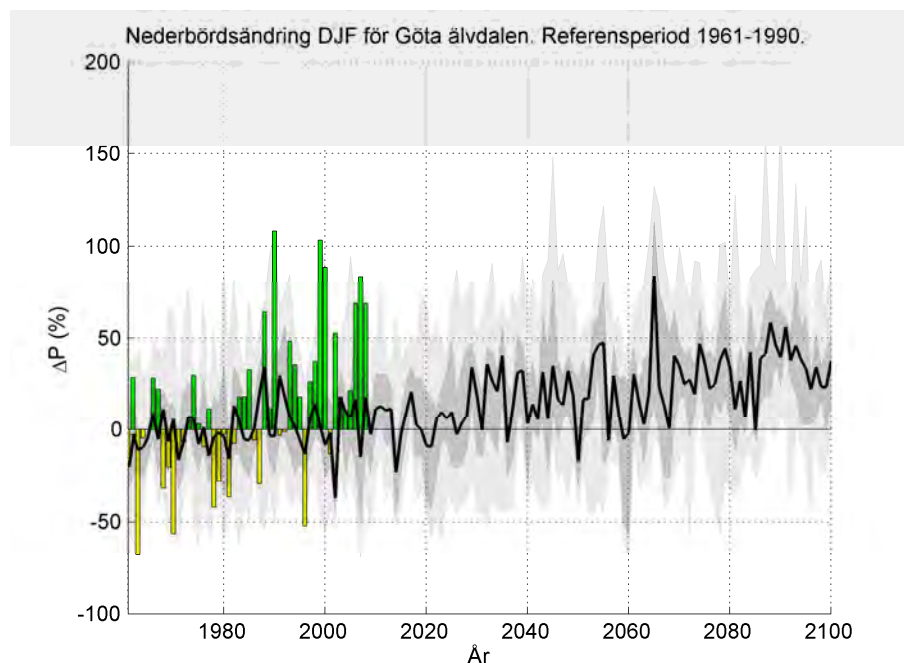


Fig. 3.14. Den framtida beräknade nederbördsutvecklingen för **vintermånaderna** (december, januari och februari) i Göta älvdalen baserat på samtliga klimatscenarier i tabell 2.1. I figuren finns även observationer för samma område hämtade från PTHBV-databasen. De olika skuggningarna avser uppifrån och nedåt, maximivärdet, 75% percentilen, medianvärdet (svart linje), 25% percentilen och minimivärdet av vinternederbörden från samtliga klimatberäkningar.

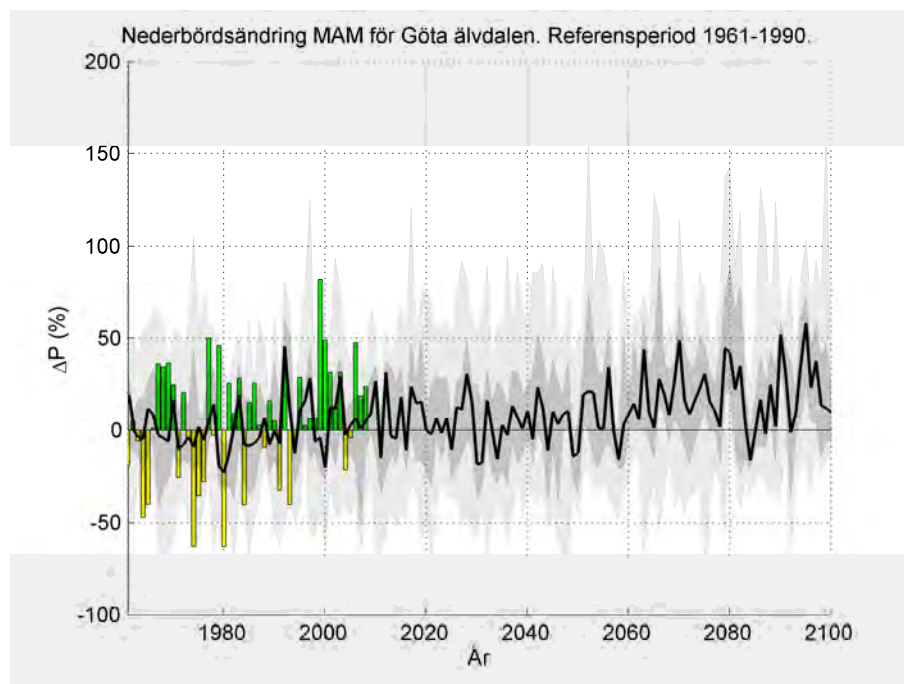


Fig. 3.15. Den framtida beräknade nederbördsutvecklingen för **vår månaderna** (mars, april och maj) i Göta älvdalen baserat på samtliga klimatscenarier i tabell 2.1. I figuren finns även observationer för samma område hämtade från PTHBV-databasen. De olika skuggningarna avser uppifrån och nedåt, maximivärdet, 75% percentilen, medianvärdet (svart linje), 25% percentilen och minimivärdet av vårnederbörden från samtliga klimatberäkningar.

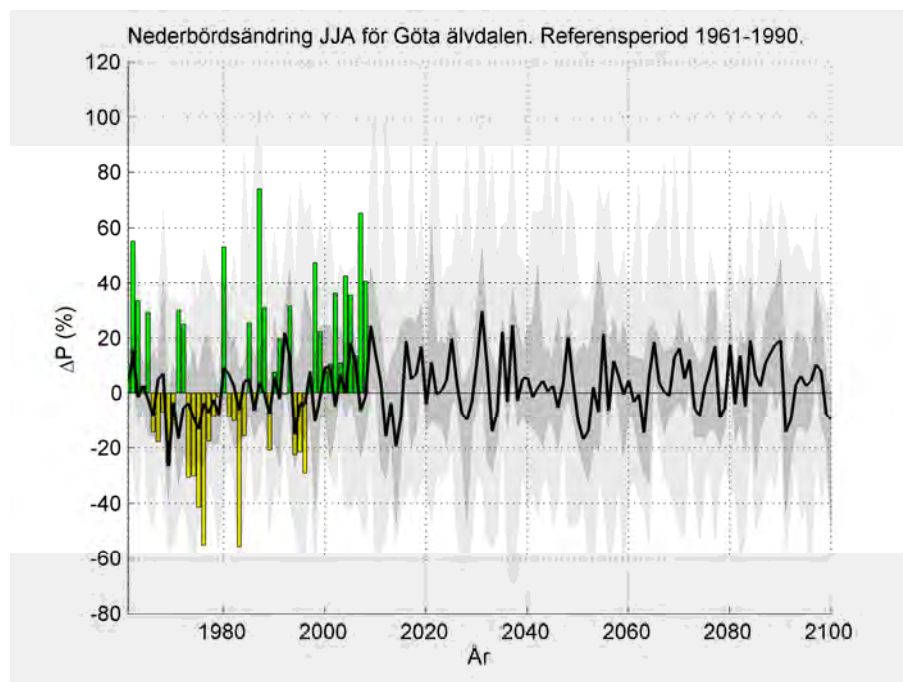


Fig. 3.16. Den framtida beräknade nederbördsutvecklingen för **sommarmånaderna** (juni, juli och augusti) i Göta älvdalen baserat på samtliga klimatscenarier i tabell 2.1. I figuren finns även observationer för samma område hämtade från PTHBV-databasen. De olika skuggningarna avser uppifrån och nedåt, maximivärdet, 75% percentilen, medianvärdet (svart linje), 25% percentilen och minimivärdet av sommarnederbörden från samtliga klimatberäkningar.

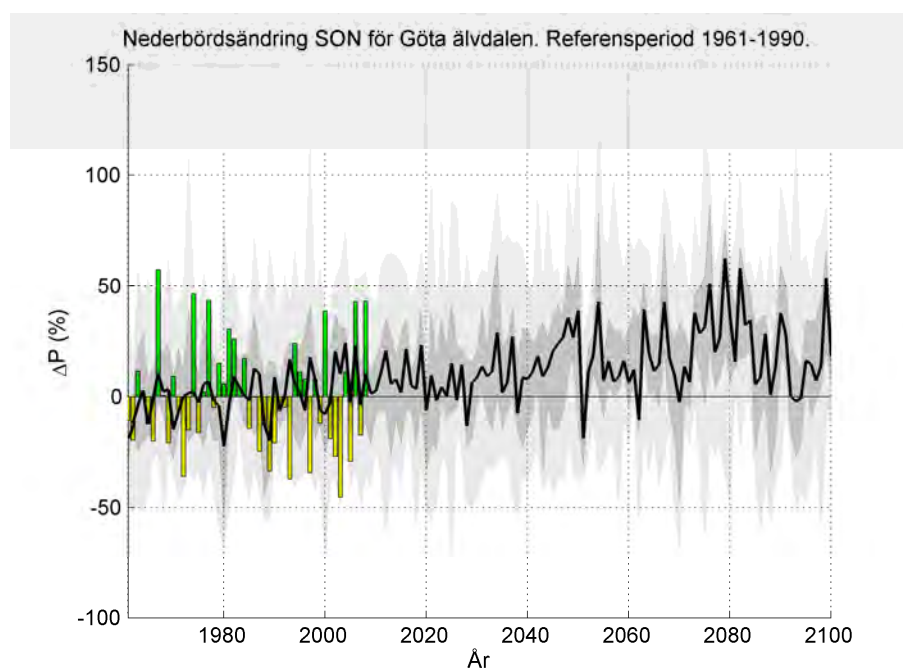


Fig. 3.17. Den framtida beräknade nederbördsutvecklingen för **höstmånaderna** (september, oktober och november) i Göta älvdalen baserat på samtliga klimatscenarier i tabell 2.1. I figuren finns även observationer för samma område hämtade från PTHBV-databasen. De olika skuggningarna avser uppifrån och nedåt, maximivärdet, 75% percentilen, medianvärdet (svart linje), 25% percentilen och minimivärdet av höstnederbörden från samtliga klimatberäkningar.

Figur 3.8 och 3.13 visar en gradvis ökning av såväl årsmedeltemperaturen som nederbörden under de kommande 90 åren. Men de visar också på stor spridning. Det kan exempelvis inte uteslutas att vi får ett kallt år en bra bit in på 2030-talet. Bland detaljerna som kan utläsas av årstidsdiagrammen är det speciellt intressant att vintertemperaturerna ökar mest och att det sker en omfördelning av nederbörden mot vinterhalvåret.

3.3 Den mest extrema nederbördens utveckling

För att analysera den mest extrema nederbördens framtida utveckling har den metodik som utvecklats inom projektet *Dimensionerande flöden för dammanläggningar för ett klimat i förändring - Scenarier i ett 50-årsperspektiv* utnyttjats. Det innebär att nederbörd med en viss återkomsttid beräknats regionvis enligt de 5 regioner som används vid flödesdimensionering enligt riktlinjer fastställda av Svensk Energi, Svenska Kraftnät och SveMin (2007). Dessa regioner redovisas i figur 3.18. Som framgår av figuren är de tre regionerna 3, 4 och 5, av intresse i detta sammanhang.

I analysen har såväl regionala 20-årsregn som regionala 100-årsregn beräknats i dessa regioner. Eftersom dessa avser *regionens* högsta värden är de inte helt jämförbara med de värden som visas i figur 3.5 och 3.6. De är i själva verket betydligt mer extrema. 100-årsvärdet avser i detta fall det högsta värdet under 100 år för hela regionen. Analysen ger dock en bild av utvecklingen av extrema regn i allmänhet och bör kunna överföras till punktvärden, åtminstone kvalitativt. Beräkningarna är baserade på de 12 scenarierna i tabell 2.1, som sträcker sig till slutet av århundradet. Resultaten sammanfattas i tabell 3.1 och 3.2.

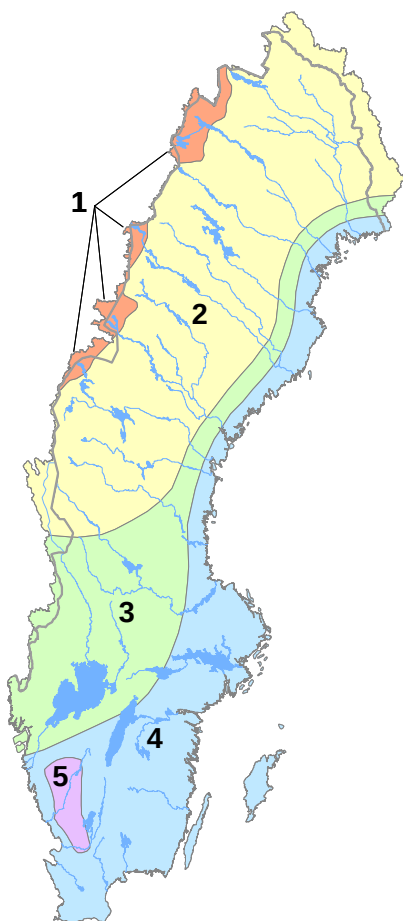


Fig. 3.18. Regionindelning för den dimensionerande nederbörden i de svenska riktlinjerna för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar i flödesdimensioneringsklass I.

Tabell 3.1. Sammanfattning av den beräknade utvecklingen av den mest extrema dygnsnederbörden uttryckt som regionala 20-årsregn i de regioner som definierats i de svenska riktlinjerna för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar. I tabellen anges procentuell förändring mellan perioderna 1961-1990 respektive 2068-2097.

% ändring 20-årsregn	Region 1	Region 2	Region 3	Region 4	Region 5
Maximum	+46	+56	+48	+47	+55
Medel	+14	+21	+20	+16	+21
Minimum	-6	+5	+9	-2	+2

Tabell 3.2. Sammanfattning av den beräknade utvecklingen av den mest extrema dygnsnederbörden uttryckt som regionala 100-årsregn i de regioner som definierats i de svenska riktlinjerna för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar. I tabellen anges procentuell förändring mellan perioderna 1961-1990 respektive 2068-2097.

% ändring 100-årsregn	Region 1	Region 2	Region 3	Region 4	Region 5
Maximum	+52	+67	+55	+54	+67
Medel	+16	+23	+20	+16	+23
Minimum	-11	+4	+5	-5	+1

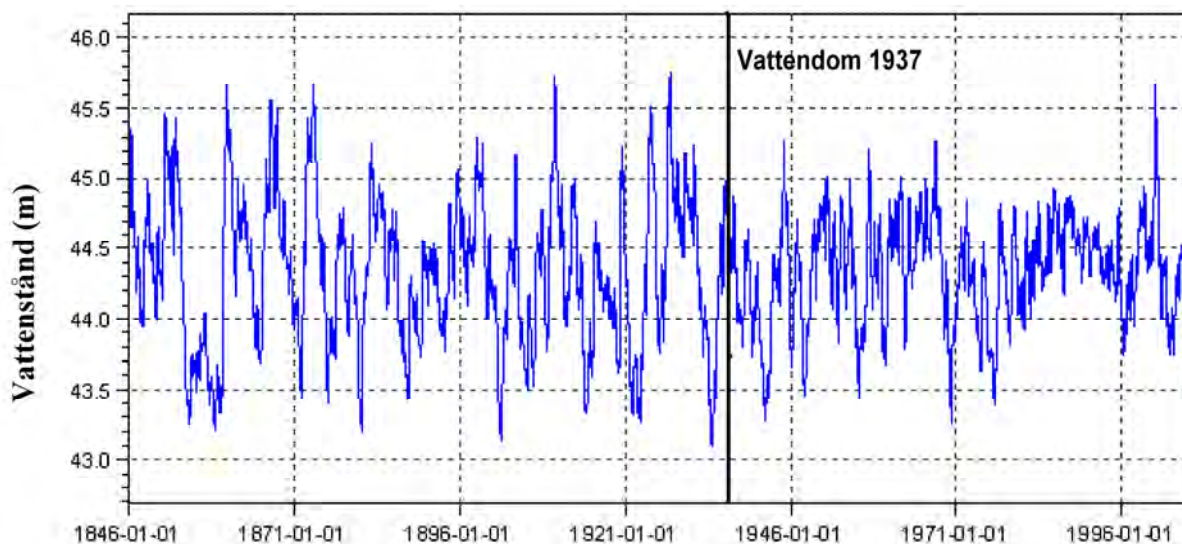
Som framgår av tabellerna är spridningen stor mellan extremvärden på nederbörden beräknad med klimatscenarier. Förändringarna av medelvärdena är dock förhållandevis stabila och skiljer sig inte åt mellan regionala 20-årsregn och motsvarande 100-årsregn. Det talar för att man även borde kunna använda dessa siffror som underlag för bedömningar av ändringar av framtidens extrema regn i Göta älvdalen. Med tanke på osäkerheter i bedömningarna av framtida extrem nederbörd bör dock inte beräkningarna i tabell 3.1 och 3.2 tolkas alltför bokstavligt.

Det är rimligt att för Göta älvdalen tills vidare räkna med att den framtida ökningen av den extrema dygnsnederbörden sker linjärt, vilket skulle innebära en ungefärlig ökning med 10 % till mitten av seklet och med 20 % till 2100 för en återkomsttid av 100 år.

4 Flöden till Göta älv från Vänern och biflöden

4.1 Vattenstånd i Vänern

I Vänern finns en av världens längsta kontinuerliga observationsserier av vattenstånd. Någorlunda tillförlitliga observationer finns sedan 1807 och dessförinnan finns en del sporadiska noteringar från högvattentillfällen. Vänerns vattenstånd har i stort sett varit opåverkat av mänskliga ingrepp fram till 1937, då sjön reglerades och dammarna i dess utlopp togs i bruk. Vattennivåerna för Vänern för perioden 1846-2005 visas i figur 4.1.



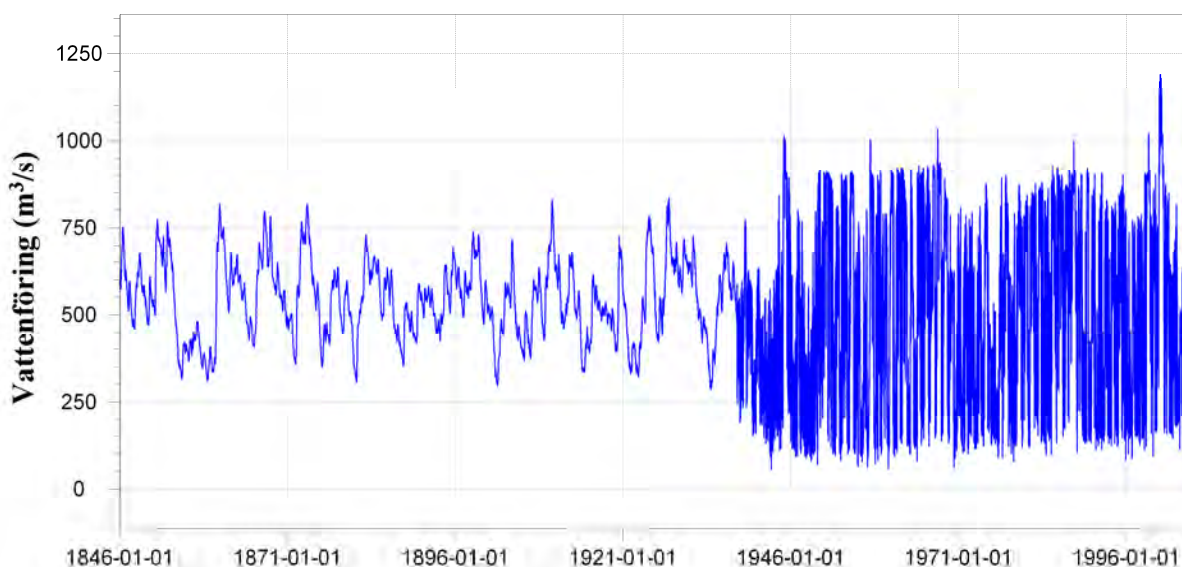
Figur 4.1. Vattenstånd för Vänern under perioden 1846-2005 (meter i höjdsystem RH00) i Vänern vid Vänersborg.

Vänerns framtida vattenstånd diskuterades utförligt av Klimat- och sårbarhetsutredningen och i underlagsrapporten av Bergström m.fl. (2006). Beräkningar redovisades som tydde på att de mest extrema nivåerna inom 100 år skulle kunna bli ungefär 50 cm högre än idag. Sedan dess har Vänerns reglering justerats genom en överenskommelse mellan Vattenfall och länsstyrelsen samtidigt som förnyade studier inletts baserade på senare tids klimatscenarier.

Vänerns framtida nivåer och tappningen till Göta älv studerades ingående under hösten 2010 på uppdrag av länsstyrelserna i Västra Götalands och Värmlands län, vänerkommunerna samt Länsförsäkringar AB. Detta arbete kommer att slutrapporteras i början av 2011 men har kunnat utnyttjas i föreliggande rapport för att beräkna frekvenser av framtida tappningar i älven.

4.2 Flöden från Vänern till Göta älv

Regleringen av Vänern enligt vattendomen 1937 utgör en avvägning mellan uppströms- och nedströmsintressen, baserad på den tidens kunskap. Den innebar en minskning av de högsta vattenstånden (se figur 4.1.). Mer dramatisk blev effekten på vattenföringen i Göta älv, som nu kom att utnyttjas för vattenkraftproduktion. Detta framgår av figur 4.2, som visar dygnsvärden på vattenföring i m^3/s för Vänerns utlopp under perioden 1846-2005.



Figur 4.2. Vattenföring i m^3/s vid Vänerns utlopp (Vargöns kraftverk) under perioden 1846-2005. Observera toppvärdet i januari 2001.

Vattendomen för Vänern innehåller en rad bestämmelser om hur vattenhushållningen skall skötas. Såväl dämningssgräns som sänkningsgräns varierar över året. En viktig regel är en begränsning av den högsta tappningen i Göta älv till drygt 1000 m³/s. Avsikten med tappningsbegränsningen är att undvika skador av skred och översvämningar längs älven. Detta är en unik bestämmelse, som gör att Vänerns vattenstånd kan stiga mycket högt under långvarig hög tillrinning. Det vanliga är att tappningsförmågan hos en sjö ökar efterhand som nivån stiger, men så är alltså inte fallet för Vänern.

För att undvika översvämningsproblem nedströms Lilla Edet finns det också bestämmelser som begränsar tappningen vid höga vattenstånd i havet. Det finns också regler vid lågvatten bl.a. för att säkerställa vattenstånden för sjöfartens behov och för att undvika saltvatteninträngning från havet upp i Göta älv.

Göta älvs medelvattenföring är ca 550 m³/s. Den högsta kända tappningen är från januari 2001 och uppgår till 1190 m³/s.

Sedan hösten 2008 tillämpar Vattenfall en ny strategi för tappningen från Vänern. Den bygger på en överenskommelse med länsstyrelsen som utarbetats i samråd med Sjöfartsverket och SMHI. Den nya strategin tillämpas på prov och väntas ge lägre vattenstånd speciellt under extrema flöden. Denna nya strategi förutsätter hydrologiska tillrinningsprognoser och ett system för detta har utvecklats och satts i drift vid SMHI.

Vänerns framtida nivåer och tappningen till älven studerades ingående under hösten 2010 på uppdrag av länsstyrelserna i Västra Götalands och Värmlands län, vänerkommunerna samt Länsförsäkringar AB. Beräkningarna baserades på samtliga klimatscenarioer i tabell 2.1 samt den hydrologiska HBV-modellen (Bergström, 1995, Lindström m.fl., 1997). Fig. 4.3 visar hur tillrinningen till Vänern gradvis förändras enligt dessa beräkningar efterhand som klimatet antas förändras enligt klimatscenarioerna.

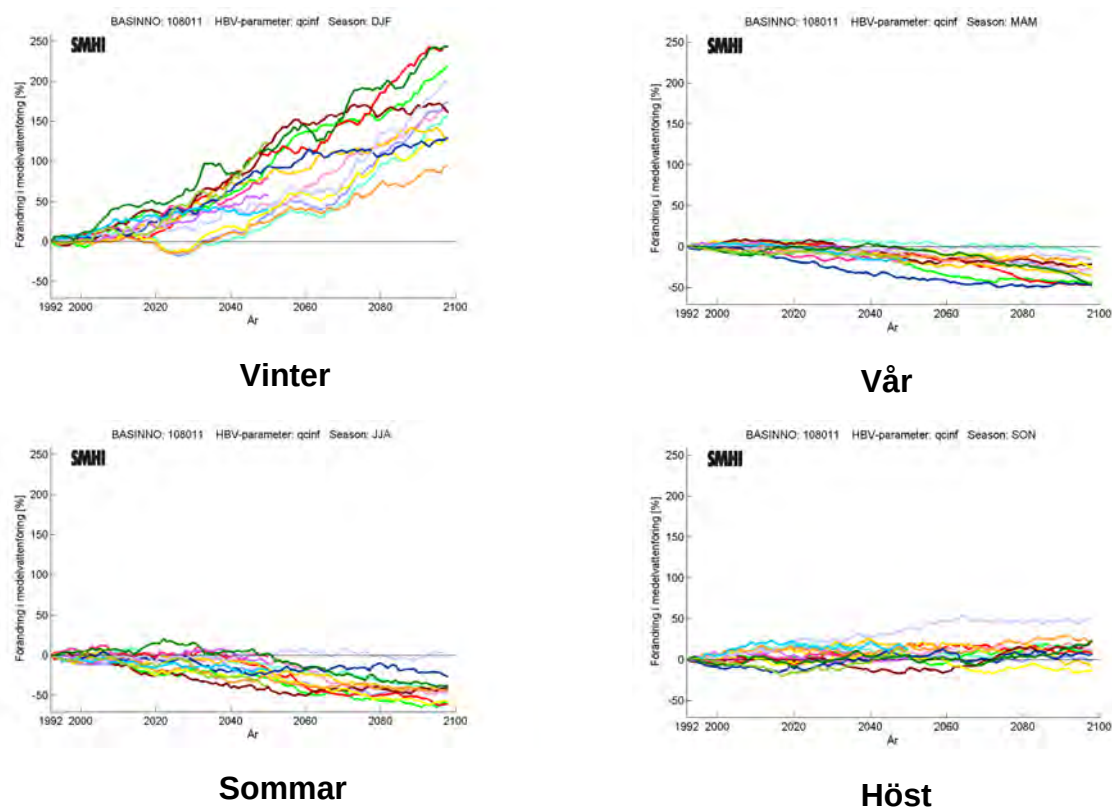


Fig. 4.3. Förändringen av tillrinningen till Vänern enligt klimatscenarioerna i tabell 2.1 och simuleringar med HBV-modellen för vinter, vår, sommar och höst. Förändringen anges i % för respektive årstid.

Figur 4.4 visar beräkningar av den förändrade årsrytmen av tillrinningen till Vänern för perioderna 2021-2050 och 2069-2098 i relation till referensperioden 1963-1992. Såväl figur 4.3 som 4.4 visar att de framtida klimatscenarierna medför stora förändringar för den framtida tillrinningen. Denna ökar alltmer under vinterhalvåret samtidigt som den minskar under sommaren och våren.

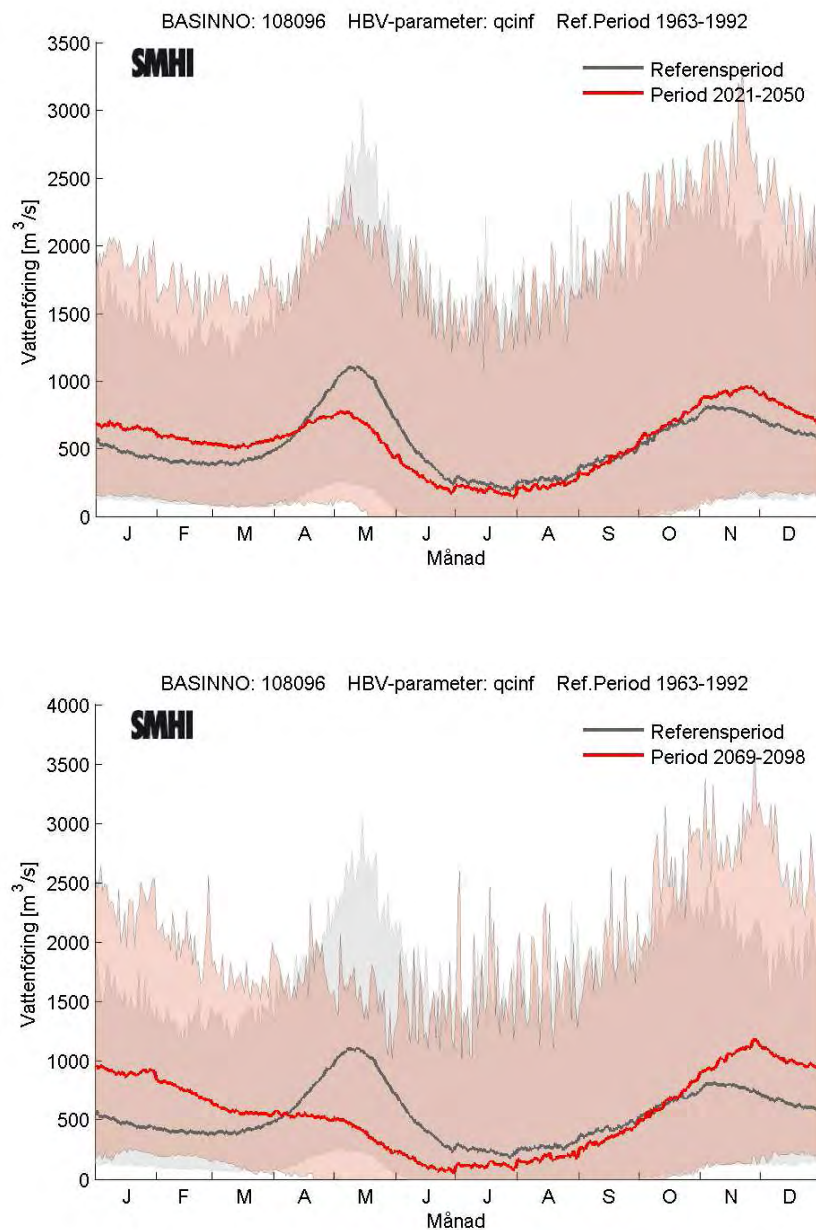


Fig. 4.4. Förändringen av tillrinningens årsrytm till Vänern enligt klimatscenarierna i tabell 2.1 och simuleringar med HBV-modellen för perioderna 2021-2050 och 2069-2098 i relation till referensperioden 1963-1992. Det grå skuggade området omfattar referensperiodens variationsbredd (75% percentilerna av maxvärdena respektive 25% percentilerna av minvärdena) och det rosa området avser motsvarande för klimatscenarierna. De heldragna linjerna representerar respektive medelvärde.

Baserade på de ändrade tillrinningar som visas i figur 4.3 och 4.4 har tappningsberäkningar genomförts för 14 av de 16 scenarierna i tabell 2.1, i stort sett enligt den tappningsstrategi som tillämpas sedan hösten 2008. Det har dock inte varit möjligt att ta hänsyn till tillgången till hydrologiska prognoser i dessa beräkningar, något som bedöms vara av relativt liten betydelse för det kvalitativa resultatet. Resultatet i form av antal dagar per år med hög respektive låg tappning redovisas som så kallade Box and whiskers-diagram i figur 4.5, 4.6 respektive 4.7. För hög tappning redovisas antal dagar per år högre eller lika med 870 m³/s respektive lika med 1030 m³/s separat. För

låg tappning redovisas antal dagar med en tappning av $170 \text{ m}^3/\text{s}$, vilket är den lägsta tappningen enligt den tillämpade tappningsstrategin.

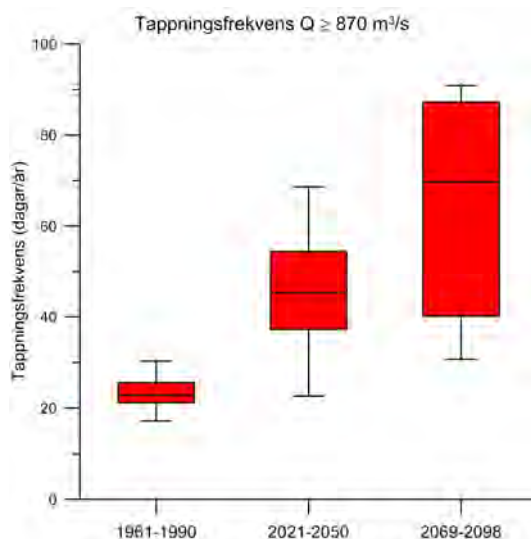


Fig. 4.5. Box and whiskers-diagram över antal dagar med tappning högre eller lika med $870 \text{ m}^3/\text{s}$ från Vänern enligt dagens vattendom och den tappningsstrategi som tillämpas sedan hösten 2008. Inom de färgade rektanglarna ligger 50 % av beräkningarna. Staplarna representerar max- och minimivärden. Strecket i mitten avser medianvärdet.

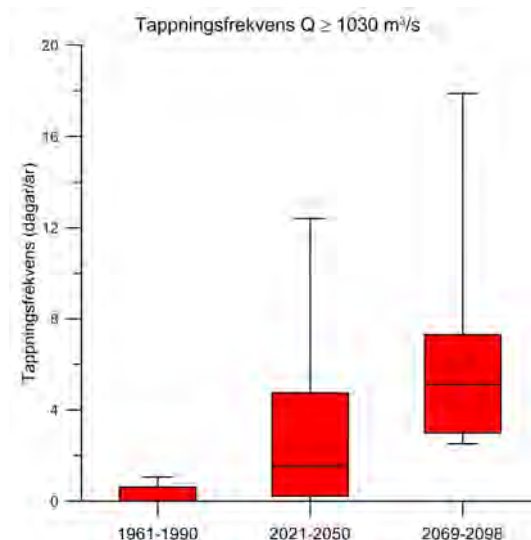


Fig. 4.6. Box and whiskers-diagram över antal dagar med tappning lika med $1030 \text{ m}^3/\text{s}$ från Vänern enligt dagens vattendom och den tappningsstrategi som tillämpas sedan hösten 2008. Inom de färgade rektanglarna ligger 50 % av beräkningarna. Staplarna representerar max- och minimivärden. Strecket i mitten avser medianvärdet.

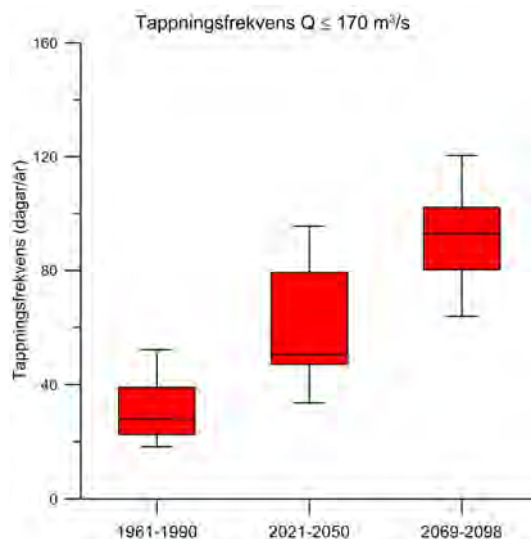


Fig. 4.7. Box and whiskers-diagram över antal dagar med tappning lika med $170 \text{ m}^3/\text{s}$ från Vänern enligt dagens vattendom och den tappningsstrategi som tillämpas sedan hösten 2008. Inom de färgade rektanglarna ligger 50 % av beräkningarna. Staplarna representerar max- och minimivärden. Strecket i mitten avser medianvärdet.

För att studera en eventuell effekt av en ändrad vattendom har även en hypotetisk modifierad tappning prövats. Den bygger på antagandet att den maximala tappningen ökas till $1200 \text{ m}^3/\text{s}$. Dessutom antas denna tappning tillämpas redan vid dämningssgränsen och inte, som domen föreskriver, först vid en nivå som ligger 30 cm över denna gräns. Resultaten från denna beräkning redovisas i figur 4.8, 4.9 respektive 4.10.

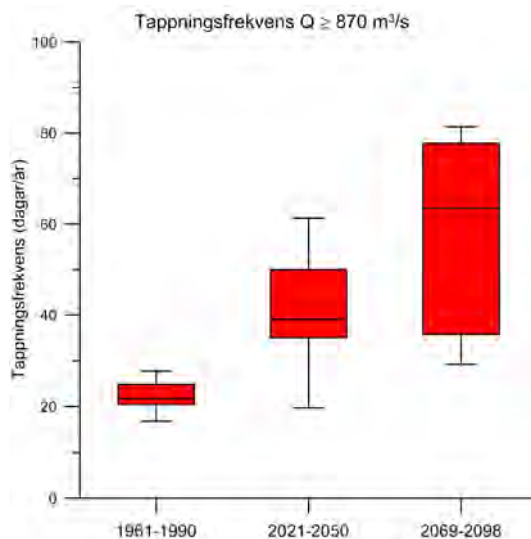


Fig. 4.8. Box and whiskers-diagram över antal dagar med tappning högre eller lika med $870 \text{ m}^3/\text{s}$ från Vänern enligt en hypotetisk ändrad vattendom och tappningsstrategi med en maxtappning på $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ redan vid dämningssgränsen. Inom de färgade rektanglarna ligger 50 % av beräkningarna. Staplarna representerar max- och minimivärden. Strecket i mitten avser medianvärdet.

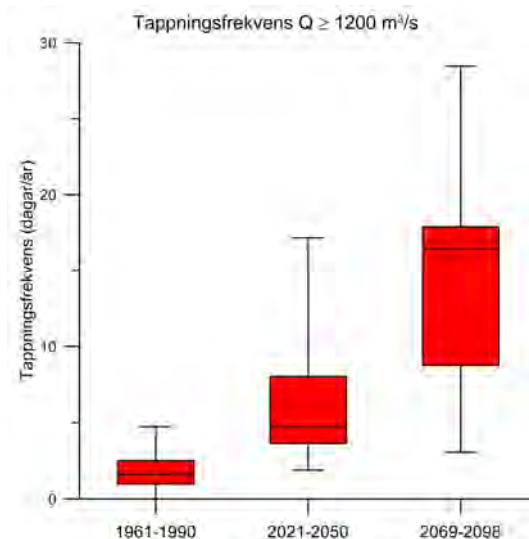


Fig. 4.9. Box and whiskers-diagram över antal dagar med tappning lika med $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ från Vänern enligt en hypotetisk ändrad vattendom och tappningsstrategi med en maxtappning på $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ redan vid dämningssgränsen. Inom de färgade rektanglarna ligger 50 % av beräkningarna. Staplarna representerar max- och minimivärden. Strecket i mitten avser medianvärdet.

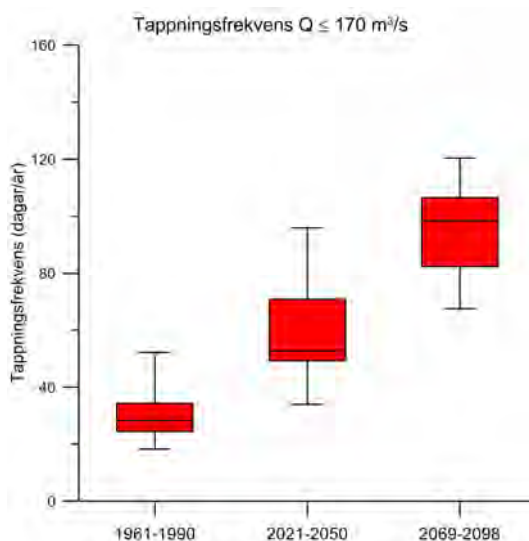


Fig. 4.10. Box and whiskers-diagram över antal dagar med tappning lika med $170 \text{ m}^3/\text{s}$ från Vänern enligt en hypotetisk ändrad vattendom och tappningsstrategi med en maxtappning på $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ redan vid dämningssgränsen. Inom de färgade rektanglarna ligger 50 % av beräkningarna. Staplarna representerar max- och minimivärden. Strecket i mitten avser medianvärdet.

De resultat som redovisas i figur 4.5, 4.6 och 4.7 visar tydligt att såväl höga som låga tappningar från Vänern kommer att bli vanligare om klimatet utvecklas så som det beskrivs av framtidsscenarierna i tabell 2.1. Detta är ganska logiskt med tanke på utvecklingen av tillrinningen såsom denna beskrivs i figur 4.3, d.v.s. ökad tillrinning på vinter och höst och minskad tillrinning under våren och sommaren. Slutsatsen gäller för såväl de beräkningar som avses representera den tappningsstrategi som avser dagens förhållanden som en hypotetisk strategi med betydligt ökad maximal tappning.

Avslutningsvis bör påpekas att det framtida klimatet, med mindre tillrinning under vår och sommar, kan komma att medföra fler dagar då Vänern ligger så lågt att sjöfarten påverkas negativt. Det kan

därför inte uteslutas att även detta kommer att bli ett argument för en framtida ändring av vattenhushållningen, något som i så fall också kommer att påverka de framtida tappningarna i älven.

4.3 Lokal tillrinning nedströms Vänersborg

Nedströms Vänersborg tillkommer ett antal mindre vattendrag och några medelstora (Säveån, Slumpån och Mölndalsån) innan Göta älv når havet. Några av de viktigaste av dessa redovisas i figur 4.11. Vid SMHI finns flödesstatistik för fem av dessa sju vattendrag. I de fall beräknad statistik saknats vid SMHI (gäller Stallbackaån och Sollumån) har översiktliga värden beräknats genom arealbaserad proportionering mellan aktuellt område och motsvarande uppgifter från Slumpån. Flödesstatistiken redovisas i tabell 4.1.

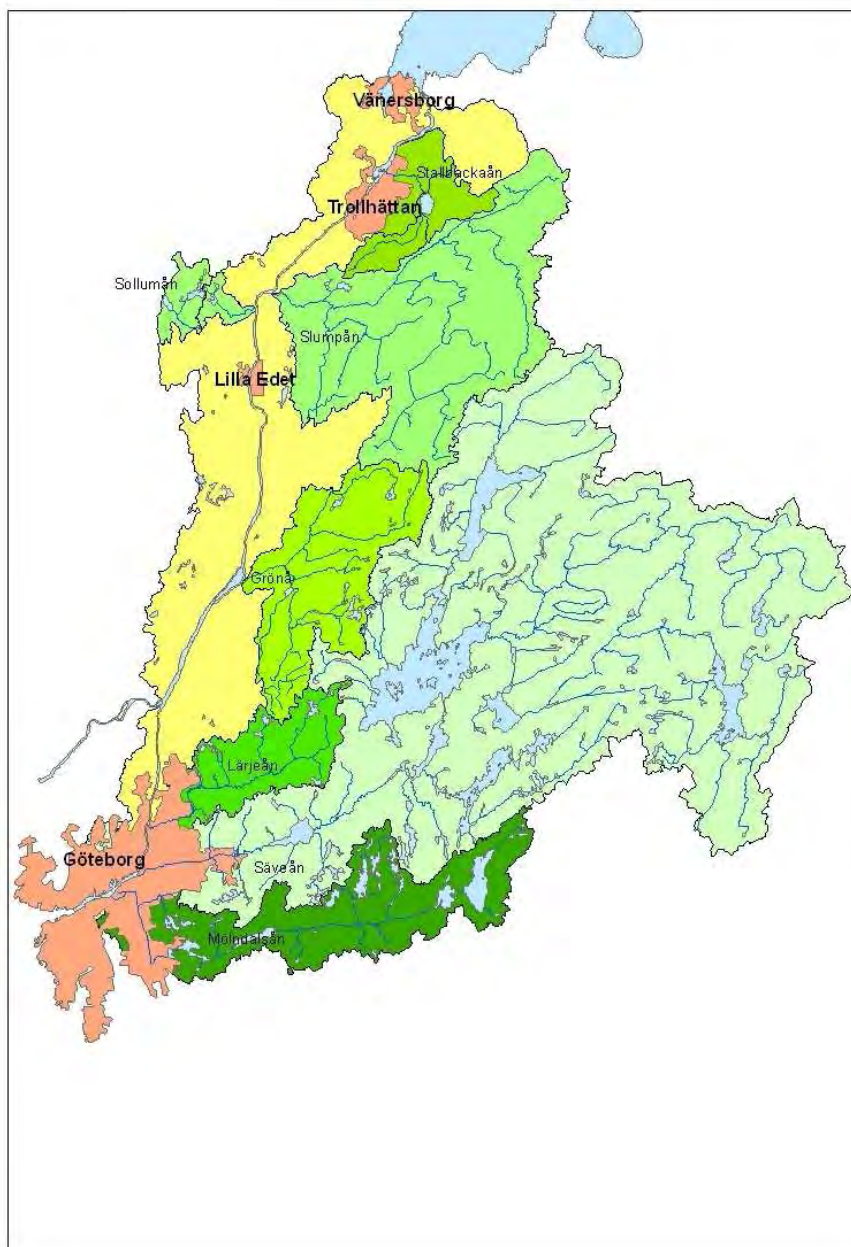


Fig. 4.11. De viktigaste vattendragen som rinner till Göta älv på sträckan från Vänersborg till havet.

Tabell 4.1. Flödesstatistik för de vattendrag som rinner till Göta älv på sträckan från Vänersborg till havet enligt figur 4.3. Värden inom parentes har tagits fram genom arealbaserad proportionering mellan aktuellt område och motsvarande uppgifter från Slumpån.

Vattendrag	Areal Km ²	MQ m ³ /s	MHQ m ³ /s	Q100 m ³ /s
Slumpån	396	4,9	32	66
Grönå	197	2,6	20	45
Lärjeån	113	1,8	13	33
Stallbackaån	79	(1,0)	(6,4)	(12,7)
Sollumån	36	(0,4)	(2,9)	(6,0)
Säveån	1750	25,1	81	165
Mölnålsån	267	4,7	19	40

För närvarande pågår ett omfattande arbete med att ta fram metoder för att beräkna de hydrologiska konsekvenserna av ett förändrat klimat för vattenkraftindustrins frågeställningar. Detta sker främst inom det av Elforsk finansierade projektet *Dimensionerande flöden för dammanläggningar för ett klimat i förändring - Scenarier i ett 50-årsperspektiv*. Arbetet beskrivs i en delrapport från november 2009 (Andréasson et al., 2009). Med stöd av metodutveckling från detta projekt har 100-års flöden i ett förändrat klimat beräknats för fyra av biflödena till Göta älv, Grönå, Slumpån, Säveån och Mölnålsån. Förändring av 100-årsflödet har beräknats löpande för varje 30-årsperiod efter 1961-1990 (t.ex. 1962-1991, 1963-1992 o.s.v.). 100-årsflödet beräknat för perioden 1961-1990 utgör startpunkt från vilken förändringarna beräknas. Resultaten redovisas i figur 4.12.

Som framgår av figur 4.12 är variationen betydande mellan olika scenarier i det aktuella området, samtidigt som en viss uppgång i de genomsnittliga 100-årsflödena kan skönjas i de flesta fall. Det är rimligt att utifrån detta material anta att storleken på 100-årsflödena ökar med i medeltal 5-10 % under ett sekel i det aktuella området. Spridningen är dock stor och det nu tillgängliga materialet tillåter inte större noggrannhet än så i bedömningen.

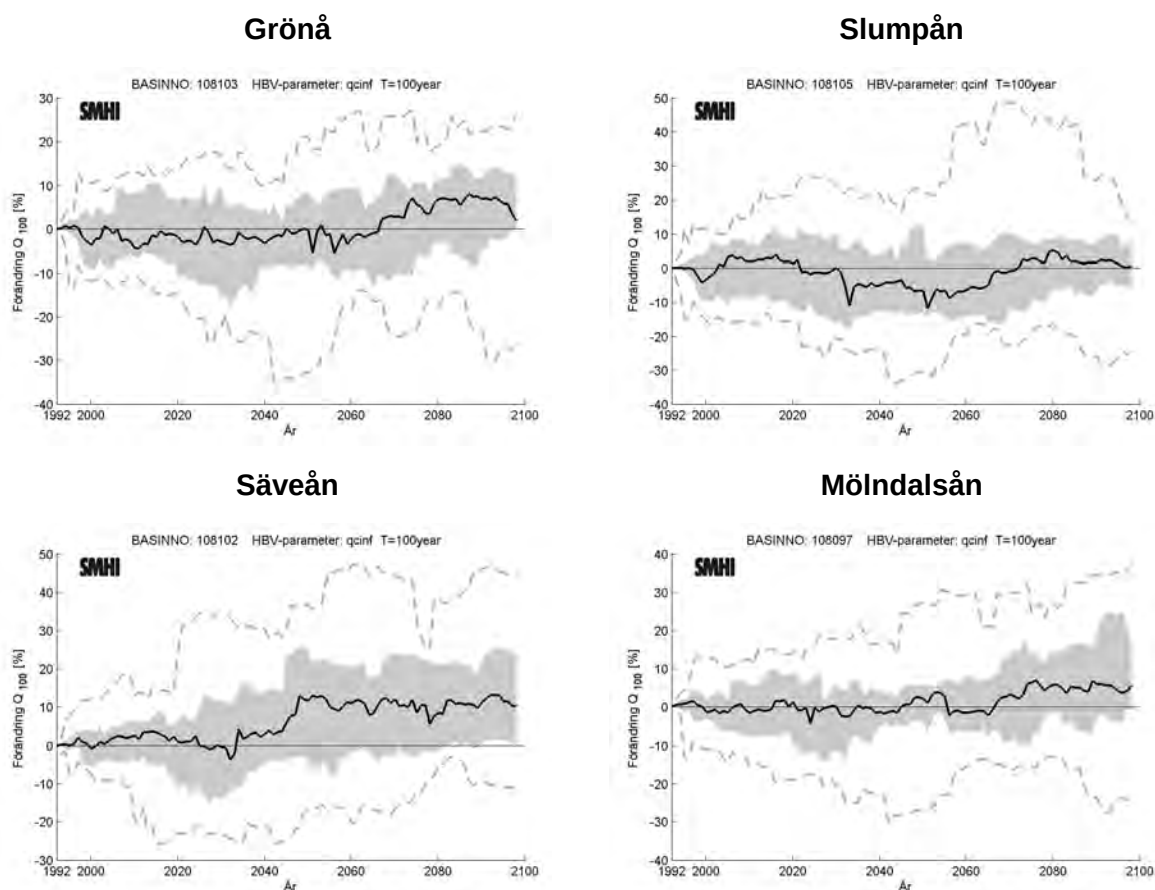


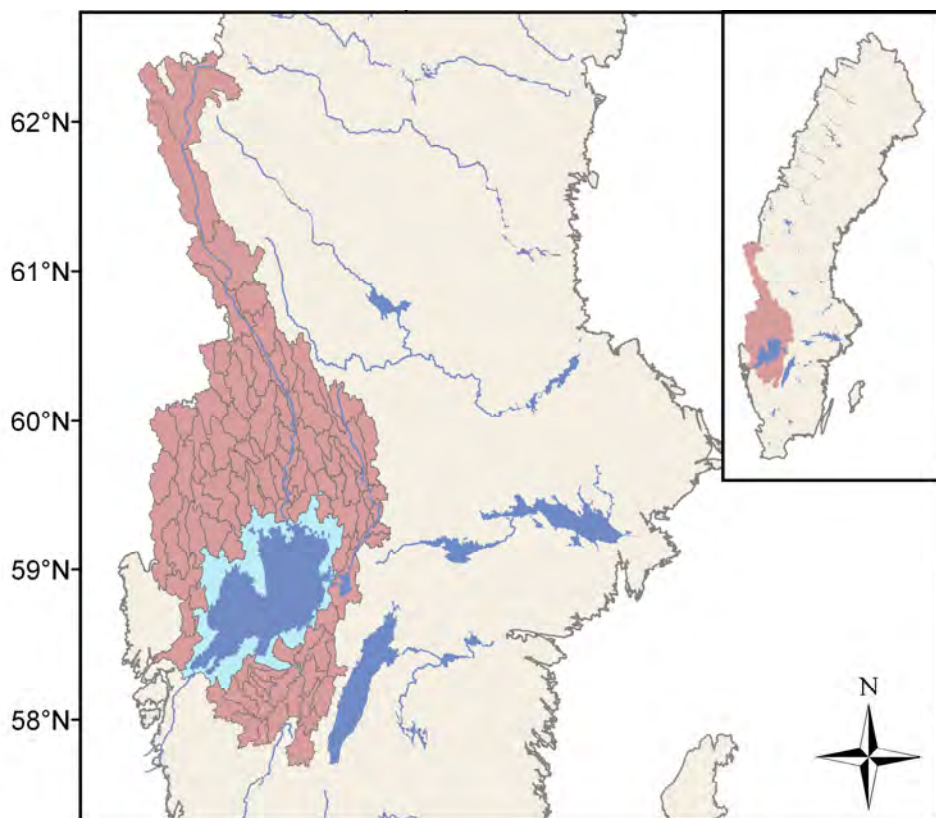
Fig. 4.12. Det beräknade 100-årsflödets utveckling för Grönå, Slumpån, Sävån och Mölndalsån under ett 100-års perspektiv under olika klimatscenarier. 50 % av scenarierna ligger inom det skuggade området, de streckade linjerna avser max- respektive minvärdena och den heldragna linjen representerar medianvärdet.

5 Markfuktighet i Vänerns närområde

HBV-modellen har en enkel struktur och är i grunden uppbyggd av tre huvudmoduler, en för beräkning av snöns ackumulation och avsmältning, en för beräkning av avdunstning och markfuktighet och en tredje rutin för beräkning av avrinningen. Det betyder att det finns möjligheter att extrahera uppgifter om markfuktigheten ur en modellberäkning av avrinningen. Visserligen är modellens beräknade markfuktighet i viss grad modellspecifik, men den ger ändå en god bild av hur blöt marken är från markytan ner till grundvattnet, d.v.s. den omättade zonen. Detta borde också kunna användas som ett index på portrycket i marken.

Avdunstning, eller mer noggrant uttryckt, evapotranspiration, är en viktig faktor vid beräkning av klimateffekter på vattentillgången. Ofta ägnar man betydligt mindre uppmärksamhet åt denna än åt temperatur och nederbörd. I befintliga klimatanalyser brukar man helt enkelt låta ökningen av avdunstningen bero på ökningen av lufttemperaturen och så görs även i de beräkningar som sker vid SMHI. Grovt sett kan man säga att avdunstningen ökar med storleksordningen 10 procent för varje grads ökning av lufttemperaturen. Detta motverkar effekten av ökad nederbörd och kan medföra att avrinningen minskar trots att nederbörden antas öka. Det kan också medföra att den beräknade markfuktigheten minskar trots att såväl nederbörd som avrinning beräknas öka.

I samband med utvecklingen av en ny regleringsstrategi för Vänern byggdes en HBV-modell upp för hela dess avrinningsområde. Detta har även skapat möjligheter att studera hydrologiska förhållanden i dess delområden. Modellberäknad markfuktighet har extraherats från hydrologiska simuleringar med HBV-modellen för närområdet runt Vänern som det beskrivs i figur 5.1.



Figur 5.1. Vänerns avrinningsområde som det indelats i delområden i HBV-modellen. Beräkningar för Vänerns närområde (ljusblå färg) har använts för beräkning av markfuktigheten.

Fuktigheten är i detta fall definierad som procentandel av fältkapaciteten i modellens omättade zon. Beräkningen har gjorts för dagens klimat liksom för framtidens förhållanden, beräknade med de klimatscenarier som presenteras i tabell 2.1.

5.1 Beräknad framtida markfuktighet för hela år

Resultatet av beräkningar av markfuktigheten i form av varaktighetsdiagram för hela året i olika framtidsperspektiv redovisas i figur 5.2 – 5.4. Dagens klimat avser perioden 1961-1990 och de framtida perioderna 2021-2050, 2041-2070 respektive 2068-2097.

Som synes minskar antalet dagar med hög markfuktighet i Vänerns närområde på sikt, oavsett vilken klimatmodell som ligger till grund för beräkningen. Detta beror på att den beräknade ökningen av avdunstningen blir så stor att dess effekt dominerar över nederbördsökningen.

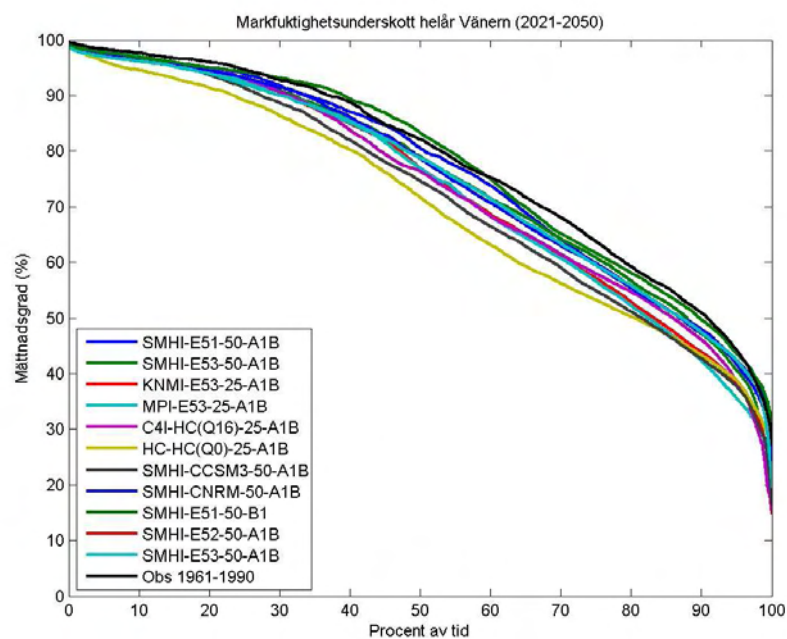


Fig. 5.2. Varaktighetsdiagram för markfuktigheten i Vänerns närområde beräknad med HBV-modellens markrutin för helår. Den övre svarta kurvan avser dagens förhållanden (referensperioden 1961-1990). Övriga kurvor avser olika klimatscenarier **för perioden 2021-2050**.

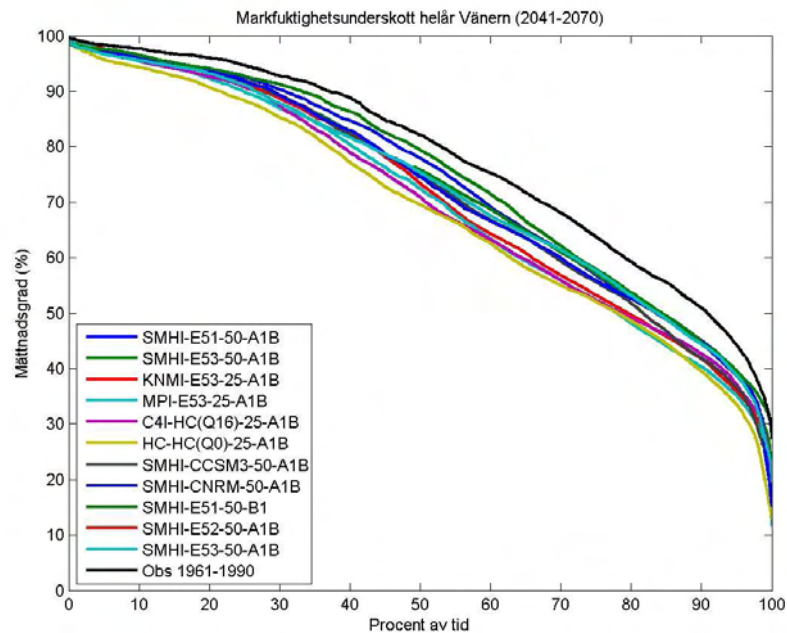


Fig. 5.3. Varaktighetsdiagram för markfuktigheten i Vänerns närområde beräknad med HBV-modellens markrutin för helår. Den övre svarta kurvan avser dagens förhållanden (referensperioden 1961-1990). Övriga kurvor avser olika klimatscenarier **för perioden 2041-2070**.

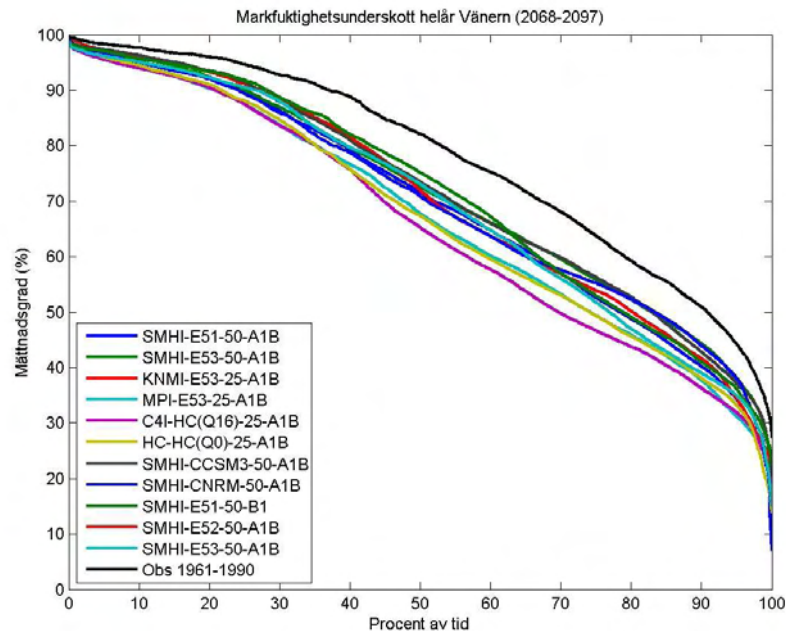


Fig. 5.4. Varaktighetsdiagram för markfuktigheten i Vänerns närområde beräknad med HBV-modellens markrutin för helår. Den övre svarta kurvan avser dagens förhållanden (referensperioden 1961-1990). Övriga kurvor avser olika klimatscenarier för perioden 2068-2097.

5.2 Beräknad framtida markfuktighet för årstider

För en bedömning av påverkan på riskerna för ras och skred är det av intresse att analysera klimateffektens betydelse för markfuktigheten årstidsvis. Därför redovisas motsvarande varaktighetsdiagram för vinter, vår, sommar och höst i figur 5.5 – 5.8. I detta fall redovisas bara perioden 2068-2097 i relation till referensperioden 1961-1990.

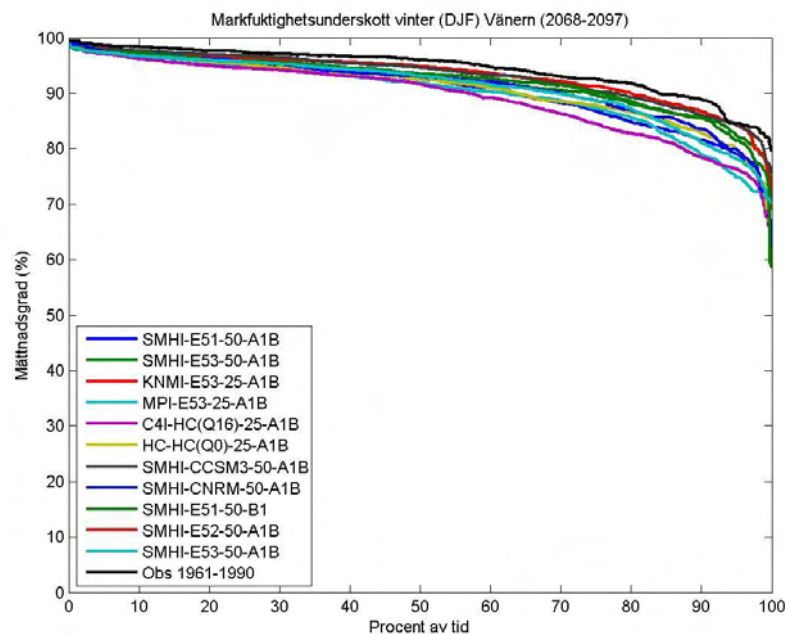


Fig. 5.5. Varaktighetsdiagram för markfuktigheten i Vänerns närområde beräknad med HBV-modellens markrutin för **vinter** (december-februari). Den övre svarta kurvan avser dagens förhållanden (referensperioden 1961-1990). Övriga kurvor avser olika klimatscenarier för perioden 2068-2097.

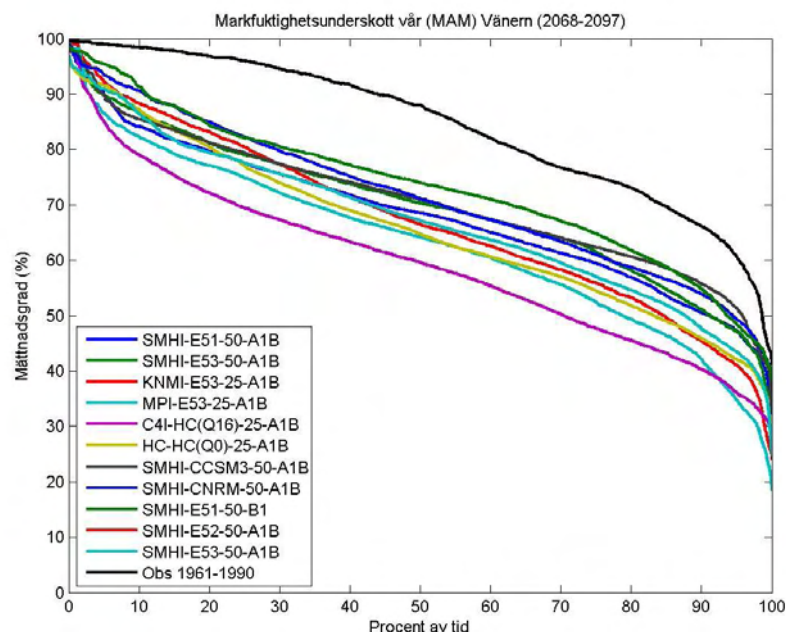


Fig. 5.6. Varaktighetsdiagram för markfuktigheten i Vänerns närområde beräknad med HBV-modellens markrutin för **vår** (mars-maj). Den övre svarta kurvan avser dagens förhållanden (referensperioden 1961-1990). Övriga kurvor avser olika klimatscenarier för perioden 2068-2097.

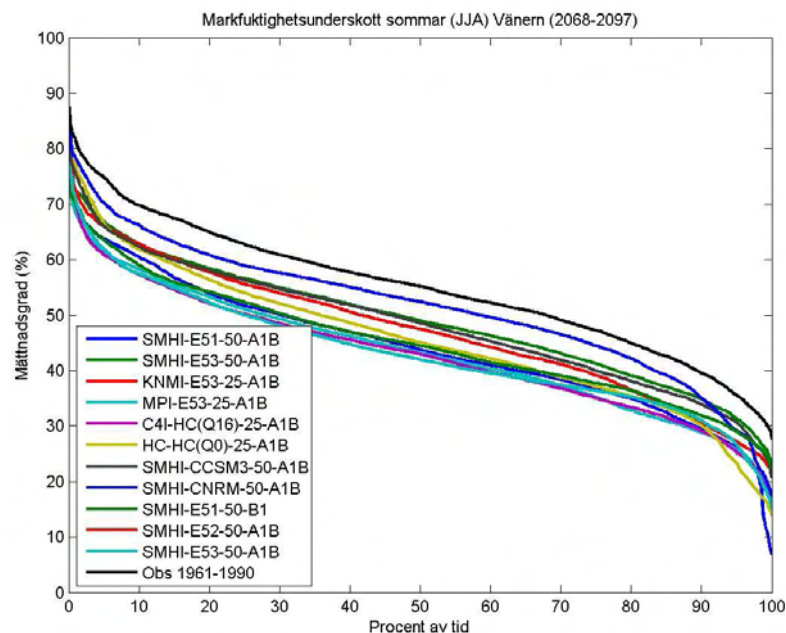


Fig. 5.7. Varaktighetsdiagram för markfuktigheten i Vänerns närområde beräknad med HBV-modellens markrutin för **sommar** (juni-augusti). Den övre svarta kurvan avser dagens förhållanden (referensperioden 1961-1990). Övriga kurvor avser olika klimatscenarier för perioden 2068-2097.

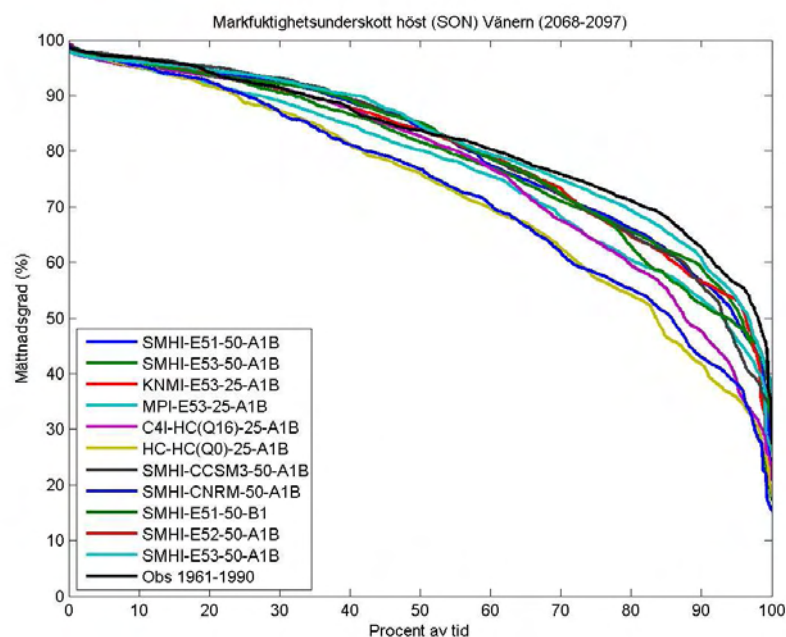


Fig. 5.8. Varaktighetsdiagram för markfuktigheten i Vänerns närområde beräknad med HBV-modellens markrutin för **höst** (september-november). Den svarta kurvan avser dagens förhållanden (referensperioden 1961-1990). Övriga kurvor avser olika klimatscenarier för perioden 2068-2097.

Som framgår av figurerna 5.5 – 5.8 blir det enligt beräkningarna genomgående torrare förhållanden i den omrättade zonen i framtidens klimat under alla årstider i Vänerns närområden, men mest markant blir effekten av den ökade avdunstningen under vår och sommar.

6 Havsnivåer

6.1 Nuvarande förhållanden

Havets nivåer är avgörande för säkerheten i Göta älvdalen. De påverkar översvämningsriskerna nedströms Lilla Edet och därmed tidvis även möjligheterna att tappa vatten från Vänern. Statistik över havsvattennivåerna i Göteborg redovisas i tabell 6.1. På grund av landhöjningen förändras hela tiden förhållandet mellan land och havsnivå. Medelnivån för ett år kallas för "årets medelvattenstånd" och är korrigerad för landhöjning. Denna nivå bestäms genom regressionsanalys av mer än 30 års medelvärden och fungerar som en referensnivå för det givna året.

Den globala havsnivån stiger för närvarande med nästan samma belopp som landhöjningen i Göteborg, d.v.s. med ca 3 mm/år. Man kan ana detta om man tittar på årsmedelvärdenas utveckling under de senaste 30 åren vid SMHIs mätstationer i Varberg/Ringhals och Göteborg (figur 6.1 och 6.2), även om mellanårsvariationerna är stora.

Tillfälliga extremvärden är oftast mer intressanta än medelvärden när det gäller skydd mot översvämnningar. I figur 6.3 visas de mest extrema vattenstånden från mätstationen i Varberg/Ringhals sedan 1900. Diagrammet visar att stormen Gudrun 2005 var verkligt extrem och medförde att havet steg till den högsta nivån under 100 år.

Tabell 6.1. Statistik över havsvattennivåerna i Göteborg.

Havsvattenstånd (cm)						
Karakteristiska värden (i förhållande till MW)						
Station: GBG-TORSHAMNEN (med stöd av GBG-KLIPPAN/RINGÖN)						
Lat:	N 57 °41 '					
Long:	E 11 °47 '					
Period:	1887 - 2010					
	MW	RH00	RH70	RH2000	år	datum
HHW	170	152	162	174	1914	1204
MHW	99	81	91	103		
LHW	52	34	44	56		
MW	0	-18	-8	4		
HLW	-40	-58	-48	-36		
MLW	-62	-80	-70	-58		
LLW	-112	-130	-119	-108	1976	0103
DW	281	281	281	281		
Medelvärdena avser år:					2011	
Landhöjningskoefficient*:					0,16	cm/år
* Apparent landhöjning (absolut landhöjning - havsnivåhöjning)						
HHW = Högsta högvattenstånd (Högsta av årens högsta W)						
MHW = Medelhögvattenstånd (Medel av årens högsta W)						
LHW = Lägsta högvattenstånd (Lägsta av årens högsta W)						
MW = Medelvatten stånd (=0)						
HLW = Högsta lågvattenstånd (Högsta av årens lägsta W)						
MLW = Medellågvattenstånd (Medel av årens lägsta W)						
LLW = Lägsta lågvattenstånd (Lägsta av årens lägsta W)						
DW = Differens mellan högsta och lägsta vattenstånd						
RH00 = Rikets höjdsystem 1900						
RH70 = Rikets höjdsystem 1970						
RH2000 = Rikets höjdsystem 2000						

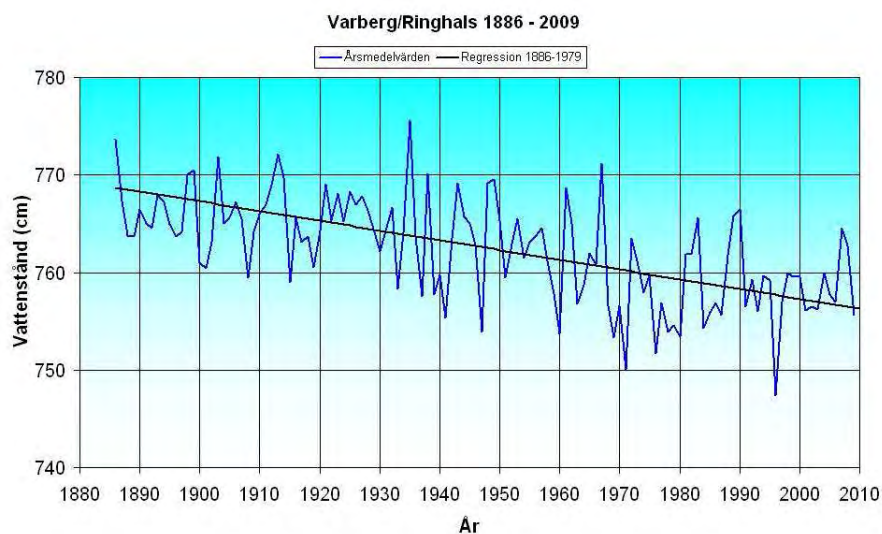


Fig. 6.1. Utvecklingen av årsmedelvattenstånden i havet mätt vid SMHI:s mätstation Varberg/Ringhals.

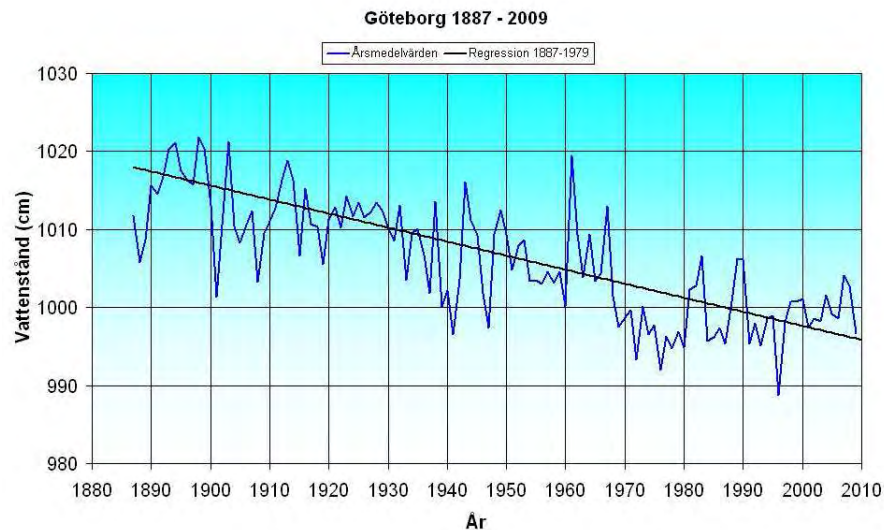
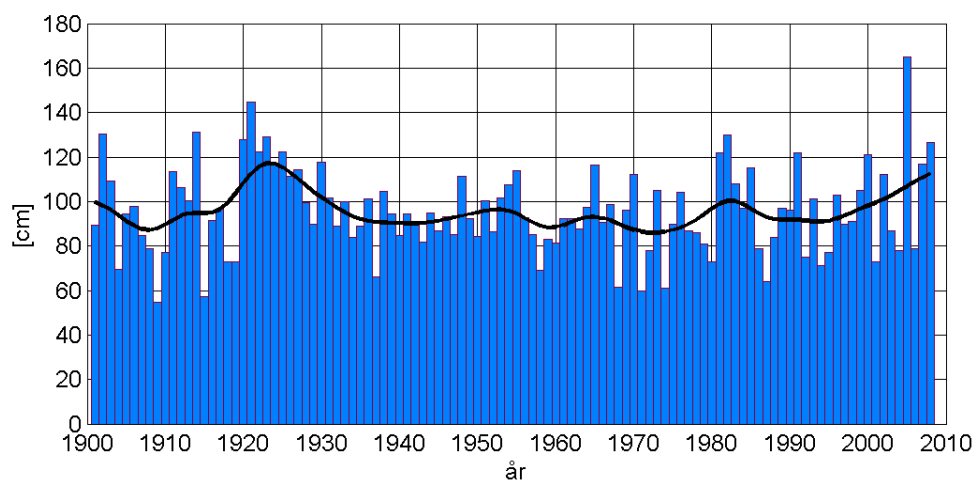


Fig. 6.2. Utvecklingen av årsmedelvattenstånden i havet mätt vid SMHI:s mätstation i Göteborg.



Figur 6.3. Årets högsta vattenstånd i Varberg/Ringhals (från Wern och Bärning, 2009).

6.2 Havsnivåer i framtiden

Den globala uppvärmningens effekter på havets framtida nivå beror av många faktorer. De viktigaste är den termiska expansionen (havets utvidgning vid uppvärmning) och bidrag från smältande glaciärer och de stora landisarna på Grönland och Antarktis. Men det finns stora lokala skillnader, som beror på ändrade salthaltsförhållanden, ändringar i det lokala vindklimatet, ändrade gravitationsfält när de stora isarna smälter och till och med ändrade landhöjnings- och landsänkingsförhållanden när belastningen på jordskorpan förändras om trycket från de stora isarna minskar. Eftersom de mest extrema vattennivåerna oftast är mest intressanta lokalt så betyder ändrad frekvens, intensitet och riktning hos stormar mycket.

Frågan om framtidens havsnivåer har blivit alltmer aktuell under de år som gått sedan IPCC presenterade sin fjärde Assessment Report (AR4) i januari 2007 (IPCC, 2007) och som utgick från den då tillgängliga klimatforskningen. Efter AR4 har flera vetenskapliga artiklar publicerats, som betonar risken för att isavsmältningen kan komma att ske snabbare och att världshavet kan komma att stiga mer än vad som tidigare antagits. Av speciellt intresse är också sammanställningar och bedömningar som rör framtida havsnivåer för specifika regioner.

Det är viktigt att notera att de flesta uppskattningar som förekommer rörande framtida havsnivåer bygger på något eller några av IPCC:s utsläppsscenarier. Det innebär att effekterna av eventuella utsläppsbegränsningar till följd av internationella avtal inte medräknats. Om man lyckas genomföra

utsläppsbegränsningar så minskar stigningstakten, men på grund av klimatsystemets stora tröghet upphör den inte helt.

I Bilaga 1 och i tabell 6.1 sammanfattas ett antal internationella bedömningar av den framtida utvecklingen av havets nivåer. Observera att siffrorna i tabellen inte är helt jämförbara eftersom de utgår från olika referensperioder. Därför har den aktuella referensperioden angivits i tabellen. En större svårighet är att nivåerna representerar olika sannolikheter och att detta ofta inte framgår klart av källmaterialet. De nedre gränserna är dessutom ofta baserade på helt skilda antaganden, varför de lägsta värdena inte är jämförbara. Ändå är tabellen intressant eftersom den återspeglar olika länders och organisationers syn på hotet från ett stigande hav.

Tabell 6.1. Sammanfattning av olika vetenskapliga sammanställningar av framtida havsnivåhöjningar. Se Bilaga 1 för mer information.

Datum	Källa	Referensperiod	Höjning till ungefär år 2100 (cm)
Januari 2007	IPCC	1980-1999	18-59 (exkl. isdynamik)
Hösten 2008	Holländska Deltakommittén	1990	55-120
April 2009	Rummukainen och Källén	2009	"det kan röra sig om en meter under de närmaste 100 åren"
Juni 2009	Ministry of Natural Resources and Environment, Vietnam	1980-1999	75 (65-100)
Juni 2009	UK Climate Projections science report	1980-1999	11,6 – 75,8 cm runt Storbritannien och Irland
November 2009	Copenhagen diagnosis	1980-1999	"at least twice as much as projected by Working Group1 of the IPCC AR4" "it may well exceed 1 m"
November 2009	NOAA	"by the end of this century"	3 – 4 fot (90-120 cm)
November 2009	Netherlands Environmental Assessment Agency PBL m.fl.	1990	55 -110 (40 -105 lokalt för Holland)

Man kan naturligtvis fråga sig varför senare bedömningar av havets framtida nivåer skiljer sig så mycket från IPCC:s siffror från 2007. En del av skillnaden är dock skenbar och kan till en del bero på att uppgifterna presenterats på ett annat sätt i AR4 än i IPCC:s tredje Assessment Report (TAR) från 2001. IPCC tolkas också ibland alltför bokstavligen utan att man tar hänsyn till att IPCC - som det uttryckligen skrivs i sammanfattningen för beslutsfattare - diskuterat dynamiska processer och effekterna av isflöden separat (Naturvårdsverket, 2007, sid. 33).

Ytterligare en orsak är att de olika källorna använder sannolikhetsnivåer som ofta skiljer sig åt. Jämförelsen mellan IPCC AR4 och den holländska Deltakommitténs bedömningar diskuteras ingående av Vellinga, et al. (2008) i ett underlagsdokument till Deltakommittén. Man betonar att man i det holländska arbetet fokuserat på den övre gränsen av tänkbara utvecklingar genom att använda A1F1-scenariet för framtida utsläpp och att en stor skillnad också ligger i bedömningarna av utvecklingen av isarna på Antarktis och Grönland. IPCCs högsta siffra (59 cm) och det högst värdet

från *UK Climate Projections science report* (75,8 cm) har det gemensamt att de representerar 95% percentilen, vilket i detta sammanhang alltså inte kan ses som en övre gräns.

6.3 Framtidens havsnivåer i Göteborg

Som framgår av den internationella översikten så varierar bedömningarna av havets framtida nivåer avsevärt. Dessutom är de regionala skillnaderna stora. Det förefaller dock av underlaget till tabell 6.1 som att en rimlig övre gräns för närvarande ligger omkring en meter år 2100 och på ca 30 cm år 2050 räknat från referensåret 1990. Men det är tyvärr nödvändigt att omgärda dessa siffror med stora reservationer, eftersom nya uppgifter kan väntas efterhand som forskningen framskrider.

Om de föreslagna uppskattningarna på 30 cm respektive en meters höjning anpassas till ett andragsuttryck och kompenseras för landhöjningen i Göteborg får man en nettoutveckling som redovisas i figur 6.4.

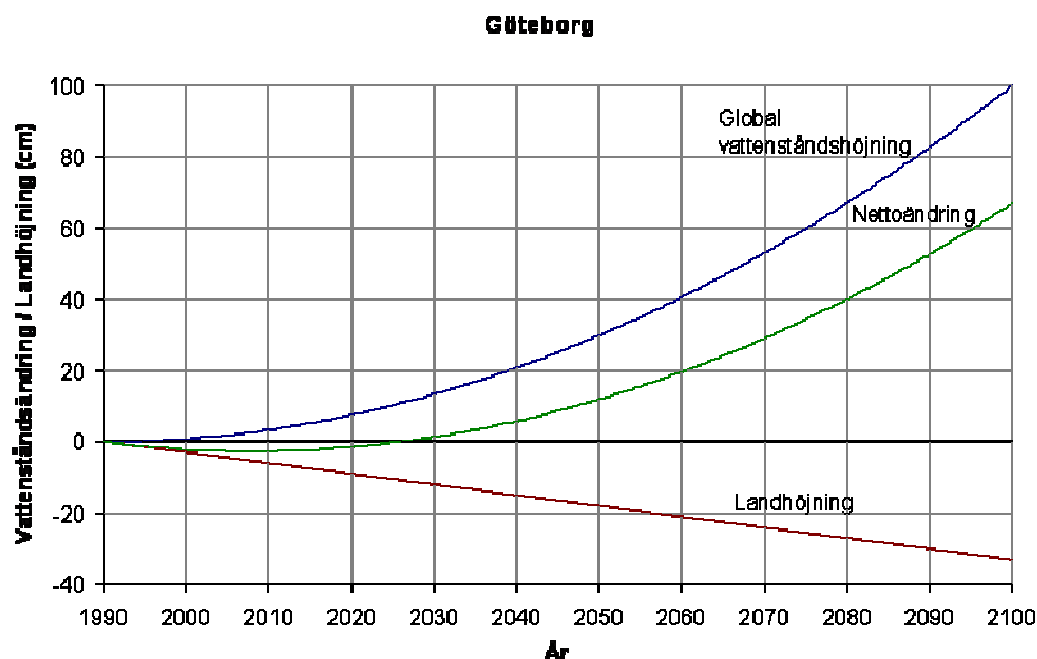


Fig. 6.4. Nettohöjning av havet i Göteborg fram till 2100 under antagande av en global havsnivåhöjning på 30 cm år 2050 respektive 1 meter år 2100 räknat från referensåret 1990. Den globala höjningen är beskriven med ett andragsuttryck.

Beträffande kortvariga extrema vattenstånd så är dessa oftast kopplade till stormar. Eftersom befintliga regionala klimatscenarier för Sverige inte ger någon entydig bild av hur dessa utvecklas så finns det för närvarande inget underlag för rekommendationer om hur hänsyn skall tas till ändrad stormintensitet eller stormfrekvens och därmed sammanhängande höga vattennivåer i ett framtida klimat i göteborgsområdet.

6.4 Havsnivåer på längre sikt

För den fysiska planeringen är perioden bortom år 2100 också av intresse. I några av de ovanstående internationella analyserna diskuterar man även havets fortsatta stigning. Siffror så höga som 2-4 meter anges t.ex. av den holländska Deltakommittén. Här är osäkerheten dock mycket stor eftersom framtida utsläpp och en rad återkopplingsmekanismer, som är lite kända, kommer in i bilden i hög grad.

I IPCC AR4 diskuterades kort också utsikter bortom 2100. Den termiska expansionen förväntas fortsätta att höja världshavets nivå hundratals år framöver. Den största frågan rör dock i vilken

utsträckning grönländsisarna och den västantarktiska shelfisen kommer att påverkas. Sammantaget kan den långsiktiga havsytenuvåshöjningen bli flera meter enligt IPCC.

7 Slutsatser och rekommendationer

De huvudsakliga slutsatserna och rekommendationerna till SGIs regeringsuppdrag att klarlägga stabilitetsförhållandena i Göta älvdalen med hänsyn tagen till klimatförändringar sammanfattas nedan:

1. Befintliga klimatberäkningar visar en gradvis ökning av såväl årsmedeltemperaturen som nederbörden under de kommande 90 åren. Men de visar också på stor spridning. Bedömningen av framtidens klimatförhållanden i Göta älvdalen bör även fortsatt baseras på resultat från de senaste regionala klimatberäkningarna från den internationella forskningen.
2. Det är rimligt att för Göta älvdalen tills vidare räkna med en framtida ökning av extrem dygnsnederbörd (återkomsttid 100 år) med 10 % vid mitten av seklet (2050) och med 20 % år 2100.
3. Resultaten visar tydligt att såväl höga som låga tappningar från Vänern kommer att bli vanligare om klimatet utvecklas så som det beskrivs av tillgängliga framtidsscenarier. Detta beror på att tillrinningen beräknas öka på vinter och höst och minska under vår och sommar.
4. Det är rimligt att anta att dagens beräknade 100-årsflöden i lokala biflöden till Göta älv i medeltal kommer att öka med 5-10 % fram till nästa sekelskifte (2100). Spridningen mellan beräkningarna är dock stor.
5. Antalet dagar med hög markfuktighet minskar på sikt oavsett vilken klimatmodell som ligger till grund för beräkningen. Sambandet mellan framtidens markfuktighetsförhållanden, portryck och grundvattenbildning i Göta älvdalen bör dock studeras vidare.
6. Baserat på dagens kunskapsläge är det för närvarande rimligt att anta en övre gräns för havets globala stigning på ca 30 cm år 2050 och omkring en meter år 2100 räknat från referensåret 1990. Men det är nödvändigt att omgärda dessa siffror med stora reservationer, eftersom nya uppgifter kan väntas efterhand som forskningen framskrider. Siffrorna bör reduceras med den lokala landhöjningen.
7. För närvarande finns inget underlag för att ta hänsyn till ändrad stormintensitet eller stormfrekvens och därmed sammanhängande höga vattennivåer i ett framtida klimat i göteborgsområdet.

8 Referenser

Andréasson, J., Bergström, S. och Gardelin, M. (2009) *Dimensionerande flöden för dammanläggningar för ett klimat i förändring - Scenarier i ett 50-årsperspektiv*. Delrapport från SMHI till Elforsk, November 2009

Bergström, S. (1995) The HBV Model. In: Singh, V.P. (ed.). *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources publications, Highlands Ranch, Colorado, pp. 443-476.

Bergström, S., Hellström, S.-S. och Andréasson, J. (2006). *Nivåer och flöden i Vänerns och Mälarens vattensystem – Hydrologiskt underlag till Klimat- och sårbarhetsutredningen*. SMHI Reports Hydrology, No. 20, Norrköping.

IPCC (2007) *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 (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M. and Bergström, S., 1997. *Development and test of the distributed HBV-96 model*. Journal of Hydrology 201, 272-288.

Nakićenović, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T.Y., Kram, T., La Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H.-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., Dadi, Z. (2000) *IPCC Special Report on Emission Scenarios*. Cambridge Univ. Press, 599 pp.

Naturvårdsverket (2007) *FN:s klimatpanel 2007: Den naturvetenskapliga grunden. Sammanfattning för beslutsfattare*. Bidraget från arbetsgrupp I (WG I) till den fjärde utvärderingsrapporten från

Svensk Energi, Svenska Kraftnät och SveMin (2007) *Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar*. Nyutgåva 2007.

Vellinga, P., Katsman C.A., A. Sterl and J.J. Beersma, (eds) (2008) *Exploring high end climate change scenarios for flood protection of the Netherlands: - an international scientific assessment*. International Scientific Assessment. Background document to Deltacommissie (2008).

Wern, L. och Barring, L. (2009) *Sveriges vindklimat 1901-2008 - Analys av förändring i geostrofisk vind*. SMHI Meteorologi nr 138. Norrköping.

Sammanfattning av olika vetenskapliga sammanställningar av framtida havsnivåhöjningar

Denna bilaga innehåller sammanfattningar av de viktigaste vetenskapliga sammanställningarna och bedömningarna av framtidens havsnivåer som nått SMHI fram till och med våren 2010.

IPCC AR4 (januari 2009)

I IPCC:s Assessment Report 4 (AR4) från 2007 presenteras uppskattningar av framtida vattenståndsnivåer som grundas på de senaste resultaten från klimatmodeller fram till och med ungefär 2006 (IPCC, 2007). För perioden 2090-2099 beräknas haven enligt IPCC ha stigit med 18-59 cm jämfört med 1980-1999. Osäkerhetsintervallet omfattar här 5 till 95-percentilen av beräkningarna med de använda klimatmodellerna. I AR4 noteras att isflöden från Grönland och Antarktis fortfarande är lite kända. IPCC säger vidare att om denna förändring ökar linjärt med ökande temperatur skulle vattenståndet fram till 2090-2099 kunna stiga med ytterligare 0,1-0,2 m utöver de redan angivna 0,18-0,59 m. Som mest skulle det alltså vara fråga om en sammanlagd stigning av omkring 0,8 m.

I IPCC AR4 redovisas också regionala variationer i havsnivåhöjningarna från perioden 1980-1999 till perioden 2080-2099. Man visar att ökningen av medelvattennivån i Nordsjön kan ligga upp mot 0,2 m över det globala medelvärdet.

Den holländska Deltakommittén (hösten 2008)

Den holländska Deltakommittén lät en internationell vetenskaplig kommitté göra en ny utvärdering av riskerna för ett stigande världshav, baserad på de senaste observationerna och den senast tillgängliga litteraturen. Resultatet presenterades hösten 2008 och ingick i Deltakommitténs rapport (Deltacommissie, 2008). Deltakommittén sammanfattade sina slutsatser rörande det mest extrema klimatalternativet på följande sätt:

"It is the Delta Committee's conclusion that a regional sea level rise of 0.65 to 1.3 meters should be expected for 2100, and from 2 to 4 meters in 2200. This includes the effect of land subsidence. These values represent plausible upper limits based on the latest scientific insights. It is recommended to take these into account so that the current decisions we make and the measures we take will be sustainable for a long time, set against the background of what we can expect."

Eftersom dessa siffror inkluderar effekten av en landsänkning på ca 10 cm under 100 år så motsvara de en havsnivåhöjning inom intervallet 0,55-1,20 meter som högsta höjning av havsnivån utanför Hollands kust. Man gör också en bedömning av den mest extrema höjningen fram till år 2200 och kommer fram till att en nivåökning på 2-4 meter under denna tid inte kan uteslutas om utsläppen inte hejdas.

Den största skillnaden mellan IPCC:s och Deltakommitténs uppskattning är beräkningen av bidragen från Grönland och Antarktis. Men man bör också hålla i minnet att de holländska rekommendationerna avser en skyddsnivå som är betydligt högre (lägre sannolikhet) än vad som representeras av de konfidensintervall som IPCC angav för nivåerna 18-59 cm.

En svensk uppdatering för Kommissionen för hållbar utveckling (april 2009)

På uppdrag av regeringens rådgivande kommission för hållbar utveckling gjorde Markku Rummukainen och Erland Källén en genomgång av forskning om klimatfrågans naturvetenskapliga grunder sedan IPCC AR4 (Rummukainen och Källén, 2009). Där berörs även havsnivåerna. Författarna sammanfattar sina slutsatser på följande sätt:

"Nya studier av landismassors känslighet för uppvärmning och därmed deras avsmältningshastighet pekar på att havsytan kan höjas mer än vad som angavs i AR4, det kan röra sig om en meter under de närmaste 100 åren. Studierna är dock behäftade med stora osäkerheter."

Rummukainen och Källén refererar till studier som dels pekar på att en havsnivåhöjning över 2 meter fram till år 2100 troligen är fysikaliskt orimlig och att en stigning på 2 meter skulle kräva att alla de

ingående osäkerheterna drar åt samma håll, dels att den minsta tänkbara havsyttnivåhöjningen, enligt dessa studier, skulle kunna handla om omkring 0,7 meter. Olika studier som baseras på olika metoder leder till uppskattningar mellan 0,7 och 1,5 m som tänkbara havsyttnivåhöjningar över en 100-årsperiod.

Ministry of Natural Resources and Environment, Vietnam (juni 2009)

Vietnams ministerium för naturresurser och miljö lade i juni 2009 fram en rapport om klimatförändringar och havsvattenstånd (Ministry of Natural Resources and Environment, 2009). Man rekommenderar en planeringsnivå på 75 cm för år 2100, dock med reservationen att dessa siffror kommer att uppdateras redan under 2010 och därefter 2015 på grund av osäkerheter i de vetenskapliga förutsättningarna.

UK Climate Projections science report: Marine and coastal projections (juni 2009)

Ett flertal myndigheter i Storbritannien står bakom denna rapport, som är speciellt intressant eftersom de presenterade analyserna inkluderar Skagerack och Kattegatt och därför även är relevanta för den svenska västkusten. Man har använt sig av såväl engelska som internationella klimatmodeller och gjort omfattande analyser av osäkerheterna i uppskattningarna (Lowe et al., 2009).

Tabell B.1 är central i rapporten. Den visar beräknad höjning av havsnivån runt Storbritannien och Irland under tre utsläppsscenarier. Siffrorna inkluderar bidrag från isavsmältning men är inte justerade för lokal landhöjning eller landsänkning. De är därför jämförbara med andra uppskattningar i regionen. Ändringarna avser perioden 2090-2099 i relation till perioden 1980-1999. I rapporten finns också diagram som visar utvecklingen under hela århundradet.

Tabell B.1. Beräknad höjning av havsnivån runt Storbritannien och Irland under tre utsläppsscenarier i cm. Siffrorna inkluderar bidrag från isavsmältning och är inte justerade för landhöjning eller landsänkning. Ändringarna avser från perioden 1980-1999 till perioden 2090-2099. Källa: Lowe et al. (2009).

	5th Percentile	Central estimate	95th Percentile
High emissions	15.4	45.6	75.8
Medium emissions	13.1	36.9	60.7
Low emissions	11.6	29.8	48.0

Rutan "High emissions, 95th Percentile", som visar 75,8 cm, är närmast jämförbar med de 59 cm som angavs av IPCC i AR4 men då exkluderade isdynamik. Värdena i *UK Climate Projections science report* ligger alltså ca 17 cm högre än i IPCC AR4 men kommer nära dessa om man lägger till 10-20 cm för isens bidrag.

På grund av den osäkerhet som råder kring de stora landisarnas stabilitet redovisar man även ett "High-plus-plus (H++)" scenario i *UK Climate Projections science report*. Övre gränsen på detta scenario ligger så högt som 2,5 meter för perioden 1990-2095. Denna nivå bygger på indirekta observationer av havsnivåer från tidigare värmeperioder, s.k. interglacialer. Man omgärdar dock dessa extremt höga värden med starka reservationer som formuleras på följande sätt (Lowe et al., 2009, p 10):

"The H++ range is not intended to replace our likely range of SLR and future surges, but rather it provides users with estimates of SLR and surge increase beyond the likely range but within physical plausibility. It is useful for contingency planning when a higher level of protection might be needed. H++ might also be used to justify a monitoring strategy. Unlike the other results presented in UKCP09 this range should not be interpreted as a likely range; the upper end of H++ is in fact very unlikely to occur by 2100".

På sidan 32 i samma rapport upprepas denna reservation med en annan formulering (Lowe et al., 2009, p 32):

"We reiterate that while we cannot rule out this amount of global sea level rise, recent observations and model projections do not provide any evidence to suggest it will occur. This amount of sea level

rise would require a massive increase in the current observed contribution of ice sheets to sea level rise.”

I *UK Climate Projections science report* diskuteras också lokala effekter. Där finns resultat som även är relevant för den svenska västkusten. Man betonar att riskerna för ökande flodvågor nu tonats ned något jämfört med tidigare bedömningar. Beträffande vindvågor drar man följande generella slutsats (Lowe et al., 2009, p 50):

“Seasonal mean and extreme waves are generally expected to increase slightly to the SW of the UK, reduce to the north of the UK and experience little change in the North Sea. There are large uncertainties especially with the projected extreme values.

Copenhagen diagnosis (november 2009)

Från Climate Change Research Centre vid University of New South Wales, i Sydney, Australien kom i november 2009 en uppdatering av klimatfrågan inför mötet med COP 15 i Köpenhamn i december (The Copenhagen Diagnosis, 2009). Man drar slutsatsen att havet kan stiga dubbelt så högt som IPCC anger och mycket väl kan stiga mer än en meter till år 2100. Den övre gränsen uppskattas till 2 meter.

NOAA:s svar på frågor i den amerikanska kongressen rörande klimatförändringar (uppdaterat i november 2009)

Vid en hearing i den amerikanska kongressen besvarade NOAA ett antal frågor rörande nyare klimatobservationer och modellberäkningar (NOAA, 2009). En av frågorna rörde de framtida havsnivåerna. NOAA:s svar avslutas på följande sätt:

“More recent research³ has provided additional insights into the potential contributions to sea level rise from the accelerated flow of ice sheets to the sea and to estimate sea level based on the observed relationship between sea level and temperature. Estimates of sea level rise based on these new scientific insights exceed those of the IPCC with the average estimates for sea level rise under higher emission scenarios at between 3 and 4 feet.

³Meier, M.F., M.B. Dyurgerov, U.K. Rick, S. O'Neel, W.T. Pfeffer, R.S. Anderson, S.P. Anderson, and A.F. Glazovsky, 2007: *Glaciers dominate eustatic sea-level rise in the 21st century.* , 317(5841), 1064-1067.

Pfeffer, W.T., J.T. Harper, and S. O'Neel, 2008: *Kinematic constraints on glacier contributions to 21st-century sea-level rise.* , 321(5894), 1340-1343.

Rahmstorf, S., 2007: *A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise.* 315(5810), 368-370.”

3-4 fot motsvarar 90-120 cm.

Netherlands Environmental Assessment Agency PBL, Royal Netherlands Meteorological Institute KNMI och Wageningen University and Research Centre WUR (november 2009)

Ytterligare en holländsk analys av utvecklingen av klimatfrågan sedan IPCC:s fjärde utvärdering publicerades i november 2009 (Netherlands Environmental Assessment Agency m.fl., 2009). Där gör man en bedömning som skiljer sig något från Deltakommitténs från 2008. Denna bedömning formuleras på följande sätt:

“ For 2100, a plausible and physically-based high-end projection for average global sea level rise is higher than the global estimates reported by the IPCC AR4, being 0.25 to 0.76 metres (for the A1FI scenario), relative to 1990 levels, versus 0.55 to 1.1 metres, implying a rise along the Dutch coast of 0.40 to 1.05 metres.”

Dessa 0,4-1,05 meter skall troligen jämföras med den holländska Deltakommisionens 0,55-1,2 meter. En anledning till att dessa skiljer sig åt är att man i den nyare rapporten försökt att ta hänsyn till att avsmältningen av de stora landisarna även påverkar det lokala gravitationsfältet och jordens lokala deformation.

Sammanfattning av olika vetenskapliga sammanställningar av framtida havsnivåhöjningar

I tabell B.2 visas en sammanställning av de ovan beskrivna analyserna och sammanställningarna av den framtida havsnivån gällande fram till ungefär år 2100.

Tabell B.2. Sammanfattning av olika vetenskapliga sammanställningar av framtida havsnivåhöjningar.

Datum	Källa	Referensperiod	Höjning till ungefär år 2100 (cm)
Januari 2007	IPCC	1980-1999	18-59 (exkl. isdynamik)
Hösten 2008	Holländska Deltakommittén	1990	55-120
April 2009	Rummukainen och Källén	2009	"det kan röra sig om en meter under de närmaste 100 åren"
Juni 2009	Ministry of Natural Resources and Environment, Vietnam	1980-1999	75 (65-100)
Juni 2009	UK Climate Projections science report	1980-1999	11,6 – 75,8 cm runt Storbritannien och Irland
November 2009	Copenhagen diagnosis	1980-1999	"at least twice as much as projected by Working Group1 of the IPCC AR4" "it may well exceed 1 m"
November 2009	NOAA, USA	"by the end of this century"	3 – 4 fot (90-120 cm)
November 2009	Netherlands Environmental Assessment Agency PBL m.fl.	1990	55 -110 (40 -105 lokalt för Holland)

Man kan naturligtvis fråga sig varför senare bedömningar av havets framtida nivåer skiljer sig så mycket från IPCC:s siffror från 2007. En del av skillnaden är dock skenbar och kan till en del bero på att uppgifterna presenterats på ett annat sätt i AR4 än i IPCC:s tredje Assessment Report (TAR) från 2001. IPCC tolkas också ibland alltför bokstavligt utan att man tar hänsyn till att IPCC - som det uttryckligen skrivs i sammanfattningen för beslutsfattare - diskuterat dynamiska processer och effekterna av isflöden separat (Naturvårdsverket, 2007, sid. 33).

Ytterligare en orsak är att de olika källorna använder sannolikhetsnivåer som ofta skiljer sig åt. Jämförelsen mellan IPCC AR4 och den holländska Deltakommitténs bedömningar diskuteras ingående av Vellinga, et al. (2008) i ett underlagsdokument till Deltakommittén. Man betonar att man i det holländska arbetet fokuserat på den övre gränsen av tänkbara utvecklingar genom att använda A1F1-scenariet för framtida utsläpp och att en stor skillnad också ligger i bedömningarna av utvecklingen av isarna på Antarktis och Grönland. IPCCs högsta siffra (59 cm) och det högst värdet från *UK Climate Projections science report* (75,8 cm) har det gemensamt att de representerar 95% percentilen, vilket i detta sammanhang alltså inte kan ses som en övre gräns.

Baserat på dagens kunskapsläge som det återspeglas i det redovisade materialet är en rimlig övre gräns för havets globala stigning för närvarande ca 30 cm år 2050 och omkring en meter år 2100. Men det är tyvärr nödvändigt att omgärda dessa siffror med stora reservationer, eftersom nya uppgifter kan väntas efterhand som forskningen framskrider. Siffrorna bör reduceras med den lokala landhöjningen vid lokala tillämpningar.

Referenser till Bilaga 1

Copenhagen Diagnosis (2009) *Updating the World on the Latest Climate Science*.

I. Allison, N.L. Bindoff, R.A. Bindshadler, P.M. Cox, N. de Noblet, M.H. England, J.E. Francis, N. Gruber, A.M. Haywood, D.J. Karoly, G. Kaser, C. Le Quéré, T.M. Lenton, M.E. Mann, B.I. McNeil, A.J. Pitman, S. Rahmstorf, E. Rignot, H.J. Schellnhuber, S.H. Schneider, S.C. Sherwood, R.C.J. Somerville, K. Steffen, E.J. Steig, M. Visbeck, A.J. Weaver. The University of New South Wales Climate Change Research Centre (CCRC), Sydney, Australia, 60pp.

Deltacommissie (2008) *Working together with water - A living land builds for its future*
Findings of the Deltacommissie 2008. www.deltacommissie.com/doc/summary.pdf

IPCC (2007) *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 (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

Lowe, J. A., Howard, T. P., Pardaens, A., Tinker, J., Holt, J., Wakelin, S., Milne, G., Leake, J., Wolf, J., Horsburgh, K., Reeder, T., Jenkins, G., Ridley, J., Dye, S., Bradley, S. (2009) *UK Climate Projections science report: Marine and coastal projections*. Met Office Hadley Centre, Exeter, UK.
http://ukclimateprojections.defra.gov.uk/images/stories/marine_pdfs/UKP09_Marine_report.pdf

Ministry of Natural Resources and Environment (2009) *Climate Change, Sea Level Rise Scenarios for Vietnam*. Report from the Ministry of Natural Resources and Environment of Vietnam, Hanoi.

Naturvårdsverket (2007) *FN:s klimatpanel 2007: Den naturvetenskapliga grunden. Sammanfattning för beslutsfattare*. Bidraget från arbetsgrupp I (WG I) till den fjärde utvärderingsrapporten från Intergovernmental Panel on Climate Change. Rapport 5677, februari 2007, Stockholm.

NOAA (2009) *NOAA Response to Congressional Questions Regarding Climate Change*
The Honorable Joe Barton and the Honorable Fred Upton. *Questions for the Record from the March 25, 2009 Hearing on Climate Adaptation. Response Updated November 2009 to Include Additional Graphic* (www.noaa.gov/images/climate_cooling_testimony111909.pdf)

Netherlands Environmental Assessment Agency, Royal Netherlands Meteorological Institute and Wageningen University and Research Centre (2009) *News in Climate Science and Exploring Boundaries - A Policy brief on developments since the IPCC AR4 report in 2007*. Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL), Bilthoven, November 2009
PBL publication number 500114013

Rummukainen, M. och Källén, E. (2009). *Ny klimatvetenskap 2006-2009. En kort genomgång av forskningen om klimatfrågans naturvetenskapliga grunder sedan IPCC AR4/WG I från 2007*. Rapport till Kommissionen för hållbar utveckling. Stockholm.

Vellinga, P., Katsman C.A., A. Sterl and J.J. Beersma, (eds) (2008) *Exploring high end climate change scenarios for flood protection of the Netherlands: - an international scientific assessment*. International Scientific Assessment. Background document to Deltacommissie (2008).

Göta älvutredningen, GÄU delrapporter 1-34

- 1 Erosionsförhållanden i Göta älv
- 2 Fördjupningsstudie om erosion i vattendrag
- 3 Hydrodynamisk modell för Göta älv. Underlag för analys av vattennivåer, strömhastigheter och botten-skjuvspänningar
- 4 Transport av suspenderat material i Göta älv
- 5 Ytgeologisk undersökning med backscatter - Analys för Göta älv och Nordre älv
- 6 Bottenförhållanden i Göta älv
- 7 Bedömning av grundvattenförhållanden för slänter längs Göta älv - Allmän vägledning
- 8 Känslighetsanalys för variationer i grundvattennivå och val av maximala portryck i slänter längs Göta älv – Exempel från en slänt
- 9 Bedömd förändring av maximala grundvattennivåer i Göta älvdalen till följd av förändrat klimat
- 10 Studie av portryckens påverkan från nederbörd och vattenståndsvariation i tre slänter längs Göta älv
- 11 Analys av uppmätta portryck i slänterna vid Äsperöd och Åkerström
- 12 Metodik för inventering och värdering av konsekvenser till följd av skred i Göta älvdalen
- 13 Metodik konsekvensbedömning - Känslighetsanalys, klassindelning och applicering av metodik i hela utredningsområdet
- 14 Metodik konsekvensbedömning - Bebyggelse
- 15 Metodik konsekvensbedömning - Kartläggning, exponering, sårbarhet och värdering av liv
- 16 Metodik konsekvensbedömning - Sjöfart
- 17 Metodik konsekvensbedömning - Väg
- 18 Metodik konsekvensbedömning - Järnväg
- 19 Metodik konsekvensbedömning - Miljöfarliga verksamheter och förorenade områden
- 20 Metodik konsekvensbedömning - Naturmiljö
- 21 Metodik konsekvensbedömning - Energi och ledningsnät
- 22 Metodik konsekvensbedömning - VA-system
- 23 Metodik konsekvensbedömning - Näringsliv
- 24 Metodik konsekvensbedömning - Kulturarv
- 25 Metodik konsekvensbedömning - Känslighetsanalyser
- 26 Metodik konsekvensbedömning - Bebyggelse och kartläggning, exponering, sårbarhet och värdering av liv - Fallstudie Ale kommun
- 27 Hydrologiska och meteorologiska förhållanden i Göta älvdalen
- 28 Metodbeskrivning sannolikhet för skred: kvantitativ beräkningsmodell
- 29 Kartering av kvicklereförekomst för skredriskanalyser inom Göta älvutredningen. Utvärdering av föreslagen metod samt preliminära riktlinjer
- 30 Quick clay mapping by resistivity – Surface resistivity, CPTU-R and chemistry to complement other geotechnical sounding and sampling
- 31 Inverkan av förändringar i porvattnets kemi, främst salturlakning, på naturlig leras geotekniska egenskaper – Litteraturstudie
- 32 Hantering av kvicklereförekomst vid stabilitetsbedömning för Göta älv – Riktlinjer
- 33 Metodbeskrivning för SGI:s 200 mm diameter "block-provtagare" - Ostörd provtagning i finkornig jord
- 34 Sjömätning - Göta älv och Nordre älv



Statens geotekniska institut
Swedish Geotechnical Institute
SE-581 93 Linköping, Sweden
Tel: 013-20 18 00, Int + 46 13 201800
Fax: 013-20 19 14, Int + 46 13 201914
E-mail: sgi@swedgeo.se Internet: www.swedgeo.se