

Johan Andréasson, Gunn Persson, Sten Bergström och Sofia Åström

RAPPORT NR 2014-3

Mälarens nivå vid olika höjning av havets medelnivå i tidsperspektivet fram till år 2200



*Pärmbilden visar Mälaren vid Riksdagshuset
Foto: Gunn Persson, SMHI*



RAPPORT NR 2014-3

Författare:
Andréasson J. m.fl.

Uppdragsgivare:
Länsstyrelsen Stockholm

Granskningsdatum:
2014-01-24

Granskare:
Lennart Larsson

Dnr:
2012/2170/9.5

Version:
v1

Mälarens nivå vid olika höjning av havets medelnivå i tidsperspektivet fram till år 2200

Uppdragstagare

SMHI
601 76 Norrköping

Projektansvarig

Lennart Larsson
011-495 8430
lennart.larsson@smhi.se

Uppdragsgivare

Länsstyrelsen Stockholm
Box 22067
104 22 Stockholm

Kontaktperson

Johanna Gauffin
08-785 54 16
johanna.gauffin@lansstyrelsen.se

Distribution

Klassificering

(x) Allmän

Nyckelord

Mälaren, vattennivå, vattenstånd, klimatförändringar, havsnivå

Övrigt

Sammanfattning

Länsstyrelserna i Stockholms, Södermanlands, Västmanlands och Uppsala län har uppdragit åt SMHI att göra en bedömning av vilka effekter på Mälarens nivåer som stigande havsnivåer kan få om havet stiger med 2-4 m fram till år 2200.

Internationell rapportering visar att det råder samstämmighet om att stigande havsnivåer är ett långsiktigt problem, men få studier behandlar ett så långt tidsperspektiv som fram till år 2200. Flera meters höjning av havet under de kommande århundradena nämns dock i flera rapporter.

Utifrån antaganden om framtida havsnivåhöjningar, mätdata från Stockholm-Skeppsholmen och med hänsyn till landhöjningen har framtida havsvattenstånd i Stockholm beräknats. För bedömningar av Mälarens framtida nivå har utgångspunkten varit de beräkningar som gjorts för Projekt Slussen i tidsperspektivet fram till år 2100. En förutsättning för bedömningarna är att den av Projekt Slussen föreslagna tappningskapaciteten och regleringsstrategin gäller, vilket även innebär att luckor kan stängas. Samtliga i rapporten förekommande nivåer anges i höjdsystem RH2000.

Medelvattenstånd vid Skeppsholmen är idag 11 cm. Med 1 m (3 m) global havsnivåhöjning fram till år 2100 (år 2200) beräknas medelvattenståndet till 63 cm (211 cm). Havsvattenstånd med återkomsttid 100 år är idag ca 116 cm. Med 1 m (3 m) global havsnivåhöjning fram till år 2100 (år 2200) beräknas havsvattenstånd med 100 års återkomsttid vara ca 168 cm (316 cm).

Den genomsnittliga vattenståndsskillnaden mellan Mälaren och havet är idag drygt 70 cm. Denna skillnad kommer att minska. Det blir svårare att få ut vattnet från Mälaren och vattenstånden kommer oftare att vara i den övre delen av det tillåtna nivåintervallet. Det blir också vanligare att havets nivå kortvarigt överstiger nivån i Mälaren och då behöver alla förbindelser mellan havet och Mälaren kunna stängas, för att förhindra saltvatten att tränga in i Mälaren.

Ett högsta högvattenstånd i havet varar kort tid. En begränsad tappningsförmåga under en kortare period påverkar inte Mälarens nivå nämnvärt i jämförelse med ett långvarigt förhöjt medelvattenstånd i havet.

Resultaten visar att en havsnivåhöjning i tidsperspektivet 2200 kan komma att få stor påverkan på Mälarens vattenstånd, vilket i sin tur kommer att leda till stora konsekvenser för hela Mälardalen.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
2	FRAMTIDENS HAVSNIVÅER	1
2.1	IPCCs fjärde vetenskapliga utvärderingsrapport AR 4 (januari 2007)	2
2.2	Den holländska Deltakommittén (hösten 2008).....	3
2.3	Copenhagen diagnosis (november 2009)	4
2.4	Uppdatering av den vetenskapliga grunden för klimatarbetet på uppdrag av regeringen (september 2011)	4
2.5	Några senare resultat från den vetenskapliga litteraturen (2011 - 2012)	5
2.6	Report for the World Bank by the Potsdam Institute for Climate Impact Research and Climate Analytics (november 2012)	6
2.7	IPCCs femte vetenskapliga utvärderingsrapport AR 5 (september 2013).....	6
2.8	Sammanfattning – global havsnivå 2200.....	7
3	HAVSVATTENSTÅND I STOCKHOLM.....	7
3.1	Landhöjningens påverkan	8
3.2	Årets beräknade medelvattenstånd och Rikets höjdsystem	8
3.3	Metodik	10
3.4	Karaktäristiska och extrema vattenstånd.....	10
3.5	Sannolikhet och risk	11
3.6	Framtida havsvattenstånd i Stockholm.....	11
4	MÄLAREN	14
4.1	Mälarens nivåer i dagens klimat	14
4.2	Framtida tillrinning	15
4.3	Vilken vattenståndsskillnad behövs mellan Mälaren och havet?.....	17
4.4	Mälarens nivåer vid förhöjda havsvattenstånd	18
5	SLUTSATSER	19
6	REFERENSER.....	20

1 Inledning

Länsstyrelserna runt Mälaren arbetar för närvarande med att ta fram gemensamma råd och rekommendationer för bebyggelseplanering kring Mälaren med avseende på risken för översvämning. Länsstyrelsernas planering i detta hänseende sträcker sig till år 2200. Länsstyrelserna i Stockholms, Södermanlands, Västmanlands och Uppsala län har därför uppdragit åt SMHI att hjälpa till med en bedömning av vilka effekter på Mälarens nivåer som stigande havsnivåer kan få om havet stiger med 2-4 m fram till 2200.

I föreliggande rapport redogörs för vad som kan utläsas i den internationella litteraturen avseende framtida havsnivåer med tidsperspektivet 200 år (se kapitel 2). Därefter presenteras havsvattenståndet i Stockholm, landhöjningens påverkan och begreppet medelvattenstånd diskuteras (se kapitel 3.1-3.2). I kapitlen 3.3-3.5 beskrivs sedan metodik och antaganden för beräkningar av framtida vattenstånd i Stockholm samt statistiska mått. Utifrån detta presenteras sedan de beräknade framtida havsvattenstånden i Stockholm i kapitel 3.6.

Mälarens nivåer avhandlas i kapitel 4. Först visas nivåerna i dagens klimat (kapitel 4.1) och därefter diskuteras förändring i den framtida tillrinningen samt dess betydelse för vattenståndet i Mälaren (kapitel 4.2). Skillnader mellan nivåer i Mälaren och havsvattenstånd beskrivs i kapitel 4.3 och därefter redovisas högsta nivåer i Mälaren utifrån olika antagna framtida havsnivåhöjningar.

Slutligen sammanfattas rapportens huvuddrag punktvis i kapitel 5.

2 Framtidens havsnivåer

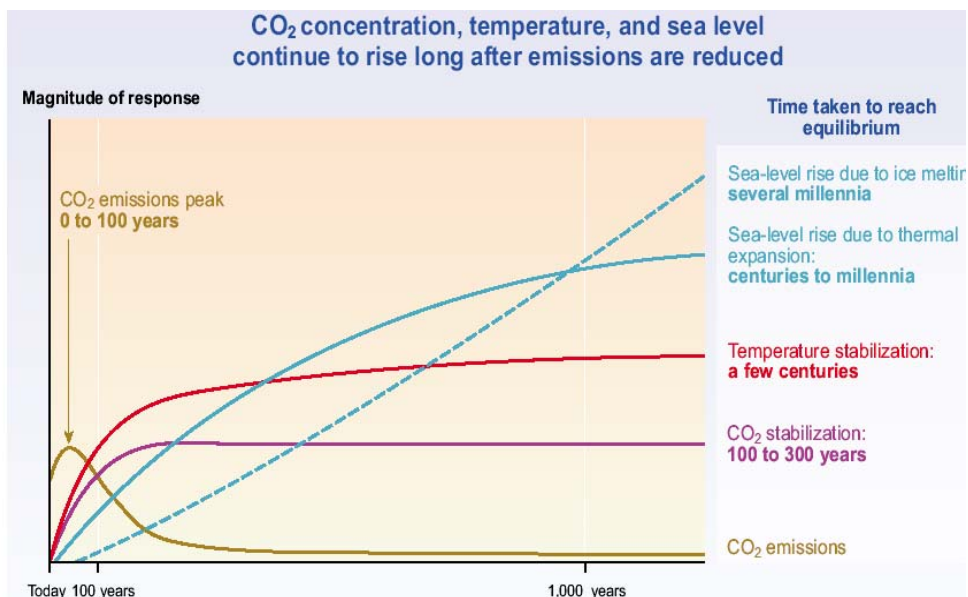
Hittills har diskussionen om framtidens havsnivåer oftast begränsats till de kommande 100 åren. Det är också den tidsperiod som studerats mest ingående i den tillgängliga vetenskapliga litteraturen och som dominerat vid internationella klimatanpassningsstudier. I en nyligen publicerad rapport från SMHI med titeln *Framtidens havsnivåer i ett hundraårsperspektiv - kunskapssammanställning 2012* görs en genomgång av internationell forskning och kunskapsunderlag från olika institut och organisationer världen över rörande havsnivåen i just detta tidsperspektiv (Bergström, 2012).

Det finns olika trögheter i de naturliga systemen och för havens del är det ett betydligt långsammare system än landytorna. Det gör att havsnivåhöjningen kommer att pågå under betydligt längre tid än de nästkommande 100 åren. För den fysiska planeringen och andra långsiktiga projekt är perioden bortom år 2100 också av stort intresse.

Den globala uppvärmningens effekter på havets framtida nivå beror av många faktorer. De viktigaste är den termiska expansionen (havets utvidgning vid uppvärmning) samt bidrag från smältande glaciärer och de stora landisarna på Grönland och Antarktis. Förändring av nederbördsförhållandena och magasineringen av vatten på land har också betydelse. Beräkningar utifrån s.k. stabiliseringsscenarier visar att havsnivån fortsätter stiga under många hundratals år efter att den globala temperaturen stabiliserats. Ett principiellt exempel över tidsaspekter i de olika systemen visas i figur 1. Efter att CO₂-utsläppen drastiskt minskats sker en stabilisering av CO₂-halter i atmosfären, vilket kan pågå under ett par hundra år. Stabiliseringen av temperaturen sker under ytterligare några århundraden och för havet är tidsskalan ännu längre.

Hur stor den lokala ändringen av havsnivån blir beror också på ändrade salthaltsförhållanden, ändringar i det lokala vindklimatet, ändrade gravitationsfält när de stora isarna smälter och landhöjnings- och landsänkningsförhållanden. Eftersom extrema vattennivåer oftast är mest intressanta lokalt så betyder ändrad frekvens, intensitet och riktning hos stormar också mycket.

Om inget annat anges avses dock med havsnivå i denna rapport havsytan räknad som ett globalt medelvärde.



Figur1. Principiell relation mellan CO₂-utsläpp (emissions), CO₂-halter i atmosfären, temperaturutveckling och havsnivåhöjning i längre tidsperspektiv. CO₂-utsläppen antas nå en toppnivå och därefter minska till låga värden. (Källa: IPCC,2001)

I det följande redovisas ett antal studier av framtidens havsnivåer som sträcker sig till 2200. Sammanställningen utgår från det omfattande material som samlades in i samband med framtagandet av rapporten *Framtidens havsnivåer i ett hundraårsperspektiv-kunskapssammanställning 2012* med vissa kompletteringar. Det bör dock betonas att betydligt mindre tid lagts ner på föreliggande sammanställning varför den i ännu mindre grad gör anspråk på att vara fullständig. För mer detaljer om de metoder som ligger bakom de olika studierna hänvisas också till den tidigare rapporten eller till dess originalreferenser.

Liksom i den nämnda rapporten har här i huvudsak tre typer av underlag använts för sammanställningen:

1. Vetenskapligt granskade artiklar.
2. Vetenskapliga sammanställningar och bedömningar.
3. Nationella tolkningar av kunskapsunderlag avsedda som underlag för klimatanpassning i olika länder.

Eftersom det totala antalet referenser är begränsat så redovisas dock hela materialet i ett sammanhang. Redovisning är gjord i kronologisk ordning efter publiceringsdatum.

2.1 IPCCs fjärde vetenskapliga utvärderingsrapport AR 4 (januari 2007)

I IPCCs fjärde utvärderingsrapport (Assessment Report 4, AR4) från 2007 presenteras uppskattningar av framtida vattenståndsnivåer som grundas på resultaten från klimatmodeller fram till och med ungefär 2006 (IPCC, 2007). För perioden 2090-2099 beräknas havsnivåen enligt IPCC ha stigit med 18-59 cm jämfört med 1980-1999. Osäkerhetsintervallet omfattar här 5 % till 95 % -percentilerna av beräkningarna (det betyder att det finns möjliga utfall som ligger utanför intervallet) som bygger på flera olika utsläppsscenarioer och klimatmodeller. I AR4 betonas att isflöden från Grönland och Antarktis fortfarande är lite kända och har därför inte

medräknats i ovanstående intervall. IPCC formulerade detta på följande sätt i ”*Summary for Policymakers*” (Översatt till den svenska sammanfattningen för beslutsfattare, Naturvårdsverket, 2007, sid. 33):

”Dynamiska processer i samband med isflöden som inte har tagits med i dagens modeller, men som antyds av observationer på senare tid, skulle kunna öka inlandsisarnas känslighet för uppvärmning, vilket skulle kunna öka den framtida höjningen av havsyttnivån.”

I IPCC AR4 diskuterades också utsikter bortom år 2100. Den största frågan rör i vilken utsträckning inlandsisarna på Grönland och i Antarktis kommer att påverkas. Här är osäkerheten mycket stor eftersom framtida utsläpp och en rad återkopplingsmekanismer, som är lite kända, kommer in i bilden. Sammantaget kan den långsiktiga nivåhöjningen bli flera meter enligt IPCC.

2.2 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). Deltakommitténs ”upper limit scenario” (ungefär ”högsta scenario”) är en havsnivåhöjning på 0,55-1,10 meter fram till år 2100 som ett globalt medelvärde (0,55-1,20 lokalt för Holland). Förutsättningarna beskrivs på följande sätt (Deltacommissie, 2008, sid 111):

”The upper limit scenario for global sea level rise assumes a global temperature increase of 2 to at most 6°C, in agreement with the IPCC assessment report 4 (AR4) emission scenario A1FI (2007). An estimate has also been made of the possible effects of rapid ice dynamics on the contribution of the Greenland and Antarctic icecaps to global sea level rise.”

Deltakommittén gör också en bedömning av en möjlig höjning fram till år 2200 och kommer fram till ett intervall på 1,5 - 3,5 meter gällande för den globala havsnivån (*global mean upper limit scenario*). Lokalt för den holländska kusten lägger man till effekten av ändrad havscirkulation och anger ett högsta scenario (*local upper limit scenario*) till 2,0 – 4,0 meter, exklusive effekten av ett ändrat gravitationsfält på grund av att grönlandsisen minskar. (Deltacommissie, 2008, tabell 3, sid 114).

Kring ovanstående siffror resonerar Deltakommittén på följande sätt:

”The upper limit scenarios for 2200 presented here give an indication of the possible sea level rise, not the most probable. The scenarios for the 21st century are bounded because we know the current rate of sea level rise from observations and because a rapid acceleration of this rate is unlikely on a time scale of several decades. No such limits exist for the 22nd century.”

Det vetenskapliga underlaget till detta scenario finns redovisat i ett underlagsdokument till Deltakommittén (Vellinga m.fl., 2008).

2.3 Copenhagen diagnosis (november 2009)

Climate Change Research Centre vid University of New South Wales, i Sydney, Australien publicerade i november 2009 en uppdatering av kunskapsläget om klimatfrågan inför FN:s klimatförhandlingar (COP 15) i Köpenhamn i december (The Copenhagen Diagnosis, 2009). Beträffande havsnivåer sammanfattades slutsatserna på följande sätt:

“Sea-level predictions revised: By 2100, global sea-level is likely to rise at least twice as much as projected by Working Group1 of the IPCC AR4; for unmitigated emissions it may well exceed 1 meter. The upper limit has been estimated as ~ 2 meters sea level rise by 2100. Sea level will continue to rise for centuries after global temperatures have been stabilized, and several meters of sea level rise must be expected over the next few centuries.”

De drar alltså slutsatsen att havet kan stiga dubbelt så högt som IPCC anger i AR4 och kommer att fortsätta att stiga under århundraden till flera meter även om den globala temperaturen stabiliseras.

2.4 Uppdatering av den vetenskapliga grunden för klimatarbetet på uppdrag av regeringen (september 2011)

I september 2011 publicerade SMHI en uppdatering av den vetenskapliga grunden för klimatarbetet, gjord på uppdrag av regeringen (Rummukainen, m.fl., 2011). Rapporten var en genomgång av kunskapsläget för klimatarbetet ur ett naturvetenskapligt perspektiv och byggde på IPCC:s kunskapssammanställningar, senaste publicerade forskningsresultat och genomgångar av expertgrupper som samlat vetenskapligt material. Det huvudsakliga syftet med genomgången var att belysa hur ny kunskap och nya forskningsresultat påverkar slutsatserna i tidigare sammanställningar om klimatförändringar och climateffekter samt de vetenskapliga förutsättningarna för det så kallade tvågradersmålet och för ett 1,5-gradersmål.

Beträffande havets framtida nivåer konstaterade SMHI i rapporten att:

”Sammanfattningsvis kvarstår betydande osäkerheter om hur stor den globala havsnivåhöjningen blir till år 2100, och osäkerheterna är förstås stora också på längre sikt. Senare resultat om de landbaserade isarna visar ändå att de kommer att ge ett bidrag som gör de högre värdena i intervallet 0,18–0,59 meter i AR4 mer tänkbara än de lägre värdena.”

En intressant fråga är hur havsnivån skulle stiga om den globala uppvärmningen begränsades till två grader. I rapporten utvecklades detta på följande sätt:

”Det råder osäkerhet kring vilka climateffekter som uppstår vid olika temperaturmål, men det är väletablerat att climateffekter i vissa regioner, bland annat i Arktis, kan bli stora även omtvågradersmålet uppnås. En begränsad global uppvärmning minskar riskerna med climateffekter, men även om tvågradersmålet uppnås, stiger havsnivån, havsförsurningen ökar och det kan bli olika betydande effekter på den biologiska mångfalden.”

2.5 Några senare resultat från den vetenskapliga litteraturen (2011 - 2012)

Ett antal nyare beräkningar för tidsperioder efter år 2100 finns publicerade i den vetenskapliga litteraturen. Katsman m.fl. (2011) genomförde en fysikaliskt baserad studie med inriktning mot skyddet av den holländska kusten. I artikelns sammanfattning formuleras resultatet på följande sätt:

“We develop a plausible high-end scenario of 0.55 to 1.15 m global mean sea level rise, and 0.40 to 1.05 m rise on the coast of the Netherlands by 2100 (excluding land subsidence), and more than three times these local values by 2200.”

I artikelns huvudtext utvecklar man resultaten för år 2200 på följande sätt:

“The sum of the contributions yields a crude estimate for global mean sea level rise in 2200 of 1.5 to 3.5 m (rounded off to the nearest 0.5 m because of the large uncertainties).”

Jevrejeva m.fl. (2012) genomförde beräkningar med en fysikaliskt baserad modell och den nya generationens klimatscenarier baserade på de så kallade Representative Concentration Pathways (Moss, 2010) för beräkningar av havsnivåerna så långt som fram till år 2500. Man drar bland annat följande slutsats:

“Simulation shows that sea level will continue to rise for many centuries after stabilisation of radiative forcing, eventually reaching 1.84–5.48 m by 2500 for all scenarios, except the RCP3PD low emission scenario.”

RCP3PD är ett mycket lågt scenario som i praktiken kräver att man minska atmosfärens koncentration av växthusgaser med ingenjörsmässiga metoder (s.k. geoengineering)

I en nyligen utkommen artikel av Schaeffer m.fl. (2012) redovisas beräkningar av havets nivå ifall mänskligheten lyckas uppnå klimatmålen att begränsa uppvärmningen till 1,5 respektive 2 grader. Enligt den semi-empiriska modellen som används i studien skulle även en stabilisering av klimatet vid två grader över förindustriella temperaturer innebära en havsnivåhöjning på mellan 1,6 - 4 meter fram till år 2300 ($\approx 50\%$ probability 2°C scenario, Schaeffer m.fl., 2012). Slutsatsen av studien är att även uppfyllandet av detta ambitiösa klimatmål kommer att leda till en avsevärd höjning av havets nivåer under kommande århundraden. Författarna avslutar sin artikel på följande sätt:

“A 2°C warming limit, if interpreted either as a temperature-stabilization level, or as holding temperature below this level, would probably lead to many metres of SLR in the coming few centuries and would maintain rates of SLR higher than today for many centuries.”

Meehl m.fl. (2012) genomförde en studie av effekten av minskande utsläpp på framtidens havsnivåer. Man utgick ifrån de så kallade Representative Concentration Pathways (Moss, 2010) och beräknar utvecklingen av havsnivåerna fram till år 2300 under förutsättning av en stabilisering av jordens temperatur på 2 respektive 3 graders uppvärmning jämfört med förindustriell nivå. Slutsatserna sammanfattas på följande sätt:

” However, even as temperatures stabilize, sea level would continue to rise. With little mitigation, future sea-level rise would be large and continue unabated for centuries. Though sea-level rise cannot be stopped for at least the next several hundred years, with aggressive mitigation it can be slowed down, and this would buy time for adaptation measures to be adopted.”

2.6 Report for the World Bank by the Potsdam Institute for Climate Impact Research and Climate Analytics (november 2012)

I november 2012 utkom en rapport från Världsbanken som skrivits av en grupp vid Potsdam Institute for Climate Impact Research and Climate Analytics (PIK), med stöd av flera vetenskapliga granskare (World Bank, 2012). Rapporten belyser riskerna med en global temperaturhöjning på 4 grader. I rapporten finns ett avsnitt om framtidens havsnivåer där såväl semi-empiriska som fysikaliskt baserade metoder diskuteras. Dessutom inkluderar den resultat med den nya generationens klimatscenarier baserade på de så kallade Representative Concentration Pathways som tidigare nämnts (Moss, 2010).

I rapportens Executive Summary sammanfattar man riskerna för ett stigande hav på följande sätt:

” Warming of 4°C will likely lead to a sea-level rise of 0.5 to 1 meter, and possibly more, by 2100, with several meters more to be realized in the coming centuries. Limiting warming to 2°C would likely reduce sea-level rise by about 20 cm by 2100 compared to a 4°C world. However, even if global warming is limited to 2°C, global mean sea level could continue to rise, with some estimates ranging between 1.5 and 4 meters above present-day levels by the year 2300. Sea-level rise would likely be limited to below 2 meters only if warming were kept to well below 1.5°C.”

2.7 IPCCs femte vetenskapliga utvärderingsrapport AR 5 (september 2013)

Den 27 september 2013 offentliggjorde IPCCs arbetsgrupp WG I sin Summary for Policymakers av den kommande femte utvärderingsrapporten (AR5) (Naturvårdsverket, 2013). I rapporten redovisas ett stort antal beräkningar av havsnivåstigning till år 2100. För alternativet med de högsta utsläppen av växthusgaser anger man ett intervall på 52-98 cm. Detta stämmer väl med bedömningen att havet stiger som högst en meter, vilket hittills tillämpats i många sammanhang.

I den svenska översättningen av IPCCs rapport från september 2013 (Naturvårdsverket, 2013) formuleras utvecklingen fram till år 2300 på följande sätt:

”Det är praktiskt taget säkert att höjningen av den genomsnittliga globala havsnivån fortsätter efter 2100, och att höjningen på grund av termisk expansion fortsätter i många hundra år. De få tillgängliga modellresultat som sträcker sig bortom 2100 indikerar att den genomsnittliga globala havsnivåhöjningen jämfört med den förindustriella nivån till år 2300 blir mindre än 1 meter med en strålningsdrivning som motsvarar koldioxidkoncentrationen som kulminerar, minskar och ligger kvar under 500 ppm, som i scenariot RCP2,6. För en strålningsdrivning som motsvarar en koldioxidkoncentration på över 700 ppm men under 1 500 ppm, som i scenariot RCP8,5, är den beräknade höjningen från 1 till över 3 meter (troligt)”.

2.8 Sammanfattning – global havsnivå 2200

Hittills har de flesta studier av framtidens havsnivåer som publicerats varit begränsade till de kommande 100 åren. Det finns ett mindre antal studier som sträcker sig 200 år eller längre fram i tiden. Detta material är ganska inhomogent, vilket gör det svårt att dra generella slutsatser. De sifferuppgifter som redovisas är omgärdade med stora reservationer och är ofta inte jämförbara, eftersom de utgår från olika förutsättningar och kan representera olika tidsperioder. Forskarna betonar också den mycket stora osäkerheten som råder kring de sifferuppgifter som man publicerar.

Gemensamt för det material som studerats är dock en samstämmighet om att stigande havsnivåer är ett långsiktigt problem som troligen kommer att förvärras under de kommande århundradena. Detta är något som IPCC också betonar i sin senaste rapport från 2013 (se avsnitt 2.7, ovan). Flera rapporter talar om risker för flera meters höjning av havet de kommande århundradena.

3 Havsvattenstånd i Stockholm

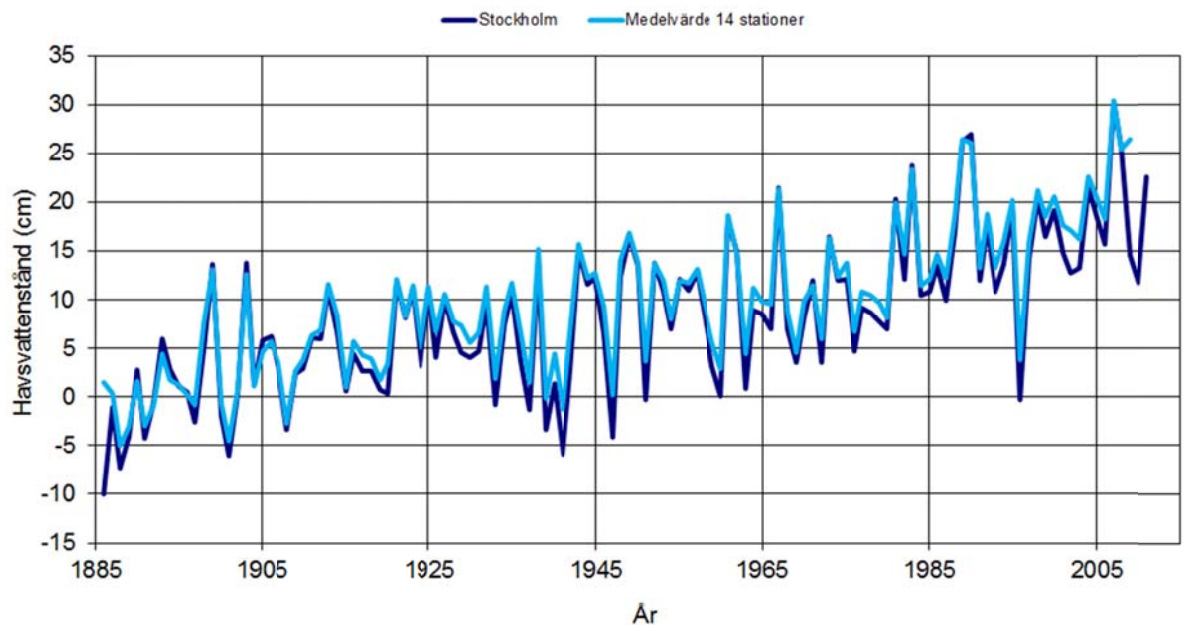
Sammantaget pekar de internationella sammanställningar och bedömningar, som SMHI tagit del av, på att ett rimligt antagande av en övre gräns för hur mycket havsytan kan komma att stiga är ungefär 1 m under perioden 1990-2100, sett som ett globalt medelvärde.

Utifrån detta och antaganden över lokala effekter, gällande att stormfrekvensen inte kommer att förändras väsentligt jämfört med det historiska klimatet, har framtida medelnivåer och extremnivåer beräknats för Stockholm. Beräkningar av framtida medelnivåer och extremnivåer har också gjorts för fem olika antaganden om det globala havsvattenståndet mellan år 2100 och 2200 och med samma antaganden om lokala effekter. De olika antagandena om framtida globala havsvattenstånd har tagits fram av länsstyrelserna.

Mätningar av havsvattenståndet startade i Stockholm redan 1776 vilket gör den till en av världens längsta vattenståndsserier. Timvis registrering av vattenståndet startade 1886 på Skeppsholmen i Stockholm.

Vid, eller nära, många av SMHIs havspegel finns GPS-stationer för mätning av absolut landhöjning, bland annat i Stockholm. Samlokalisering av mätstationerna gör att såväl den globala havsnivåhöjningen som den lokala landhöjningen kan följas med stor noggrannhet.

Analysen av långa tidsserier av havsvattenstånd visar att havet stigit i Stockholm och som helhet för Sverige. Figur 2 visar årsmedelvärden av havsvattenstånd i Stockholm och medelvärden för Sverige baserat på 14 stationer perioden 1886-2011. I figuren är effekten från landhöjningen borttagen, och man kan dels se att medelvärdet varje enskilt år varierar, samtidigt som en stigande trend är väl synlig. Höjningen i Sverige har varit ungefär 1,5 mm/år under perioden 1886-2011 (Hammarklint, 2013). Sedan 1980 har den varit ungefär 3 mm/år. Satellitobservationer visar på en global höjning av vattenståndet på ca 3 mm/år från 1993-2005, och en något lägre höjning efter 2005 på 2,5 mm/år.



Figur 2. Havsvattenstånd (årsmedelvärden) från Stockholm och för Sverige 1886-2011 när effekten av landhöjningen är borträknad. Medelvärden för Sverige baseras på mätningar från 14 stationer.

3.1 Landhöjningens påverkan

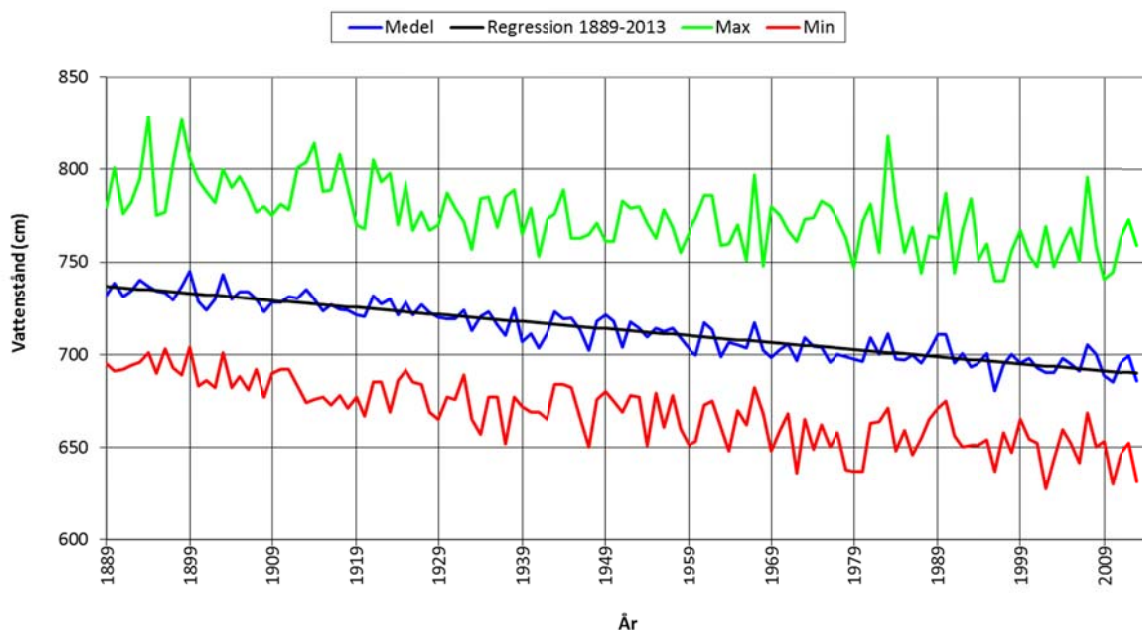
I Sverige pågår en landhöjning som är störst i norra Sverige och avtar succesivt söderut för att i södra Skåne vara obefintlig. I dagligt tal förväxlas ofta landhöjningen med den synbara landhöjningen som är en relation mellan havets höjning och landets höjning/sänkning. Eftersom landhöjningen i norra Sverige är stor tar det längre tid där innan effekterna av den globala vattenstandsökningen kommer att märkas. I områden där landhöjningen är liten höjs vattenståndet relativt land (en synbar landsänkning).

I Stockholm är landhöjningen 5,2 mm/år och är således högre än havens stigningstakt idag. Därför har vi nu en synbar landhöjning i Stockholm. Den kommer att fortsätta till dess att medelvattenståndets höjningstakt överskrider landhöjningen. Den synbara landhöjningen i Stockholm är 3,8 mm/år.

3.2 Årets beräknade medelvattenstånd och Rikets höjdsystem

Vattenstånd mäts i ett lokalt höjdsystem som är specifikt för varje mätstation. I figur 3 visas årsmedelvärden och årets högsta och lägsta vattenstånd i det lokala höjdsystem som gäller för Stockholm-Skeppsholmen. Det havsvattenstånd som SMHI redovisar officiellt anges relativt den beräknade medelvattenytan som bestäms genom regression av många års medelvärden. Årets beräknade medelvattenstånd är per definition alltid 0, och det värde som trendlinjen (regressionslinjen) har i det lokala höjdsystemet är det värde som dras bort från de uppmätta värdena. Regressionslinjen (i figur 3) visar tydligt att landhöjningens bidrag är större än havsnivåhöjningen från 1889 till 2013. Variationen mellan år är större för de högsta och lägsta vattenstånden än för medelvattenståndet.

Havsvattenstånd Stockholm-Skeppsholmen 1889 - 2013



Figur 3. Den mörkblå linjen visar Stockholms medelvattenstånd för varje år 1889-2013. Den svarta regressionslinjen är beräknad för hela tidsperioden. Den gröna visar årets högsta vattenstånd och den röda visar årets lägsta vattenstånd.

Svårigheten med det beräknade medelvattenståndet är att det förändrar sin relation till land. Fördelen är att effekten av den synbara landhöjningen tas bort så att alla mätdata blir jämförbara. Detta gör att statistiken över extrema vattenstånd är ändamålsenlig för dagens förhållanden trots att den beräknats med 150 år gamla data.

För att kunna beskriva havets relation till land används fasta höjdsystem. Alla konstruktioner eller platser på land har samma förhållande eller höjd relativt referensnivån men medelvattenytans förhållande till referensytan och därmed till fast konstruktioner på land kan förändras på grund av land- och havshöjning. Höjdsystemen som används av Sveriges kommuner idag är RH00, RH70 och RH2000. Dessa tre har tagits fram genom lantmätning och referensnivån (0-nivån) bestämdes 1900, 1970 respektive 2000 för de tre systemen. Nollnivån i Rikets Höjdsystem 2000 (RH2000) definieras av Normaals Amsterdams Peil (NAP), vilket är en punkt i Amsterdam som används som 0-punkt även i andra europeiska länder. Som nollnivå i RH00 valdes medelvattenytan i Stockholm år 1900, representerad av en markerad punkt på Riddarholmen i centrala Stockholm.

Tabell 1. Medelvattenstånd (cm) i Stockholm uttryckt i höjdsystemen RH2000, RH00 och RH70 för referensåret 1990 och idag (2013).

	MW i RH2000	MW i RH00	MW i RH70
1990	20	-32	4
2013	11	-41	-5

Årets medelvattenstånd i Stockholm 2013 är 11 cm i RH2000, -41 cm i RH00 och -5 cm i RH70 (tabell 1). Också denna relation förändras med tiden på grund av den synbara landhöjningen: 1990 års medelvattenstånd enligt den regressionslinje som vi har idag är 20 cm i RH2000, -32

cm i RH00 och 4 cm i RH70. Detta beror på att den synbara landhöjningen, 0,38 cm per år, leder till att havet sjunker relativt land (figur 3). Med stigande havsnivåer kommer inte den synbara landhöjningen att fortsätta som idag, utan havet stiger relativt land.

3.3 Metodik

De internationella sammanställningar och bedömningar, som SMHI tagit del av, pekar mot att ett rimligt antagande av en övre gräns för hur mycket havsytan kan komma att stiga är ungefär 1 m under perioden 1990-2100, sett som ett globalt medelvärde. Utifrån detta värde och antagande över lokala effekter, gällande att stormfrekvensen inte kommer att förändras väsentligt jämfört med det historiska klimatet har framtida medelnivåer och extremnivåer beräknats.

Att beräkna framtida havsvattennivåer i tidsperspektivet fram till år 2200 är en idag alltför komplex uppgift för att det ska vara fullt genomförbart. Osäkerheterna kring havets nivå är väldigt stor i tidsperspektivet fram till år 2100 och ännu större längre in i framtiden. Länsstyrelserna vill titta på effekterna av ett stigande hav i ett längre tidsperspektiv. De antaganden om framtida globala havsnivåhöjningar som länsstyrelserna tagit fram och som behandlas i denna rapport är:

- 1 m global havsnivåhöjning fram till år 2100
- 2 m global havsnivåhöjning fram till år 2200
- 3 m global havsnivåhöjning fram till år 2200
- 4 m global havsnivåhöjning fram till år 2200
- 2 m global havsnivåhöjning fram till år 2150
- 3 m global havsnivåhöjning fram till år 2150

Samtliga nivåer avser ett globalt medelvärde. De ovan angivna havsnivåhöjningarna som sträcker sig längre än 2100 är föreslagna av länsstyrelserna och SMHI lägger ingen värdering i dessa. Utifrån dessa nivåer beräknas framtida medel- och extremnivåer för Stockholm med hänsyn till landhöjningens effekt i olika tidsperspektiv.

Då vattenståndshöjningen beskrivs relativt år 1990 är alla framtida nivåer beräknade utifrån 1990. Ekvationen nedan visar hur medelvattenytan 2100 beräknats. Tillvägagångssättet är detsamma för att beräkna medelvattenytan för längre tidsperspektiv.

$$MW_{2100} = MW_{1990} + SLR_{1990-2100} \cdot LH_{1990-2100}$$

MW avser medelvattenståndet, *SLR* (Sea Level Rise) är havsnivåhöjning och *LH* är landhöjning.

3.4 Karaktäristiska och extrema vattenstånd

Karaktäristiska vattenstånd från SMHIs mätstation i Stockholm-Skeppsholmen beräknas i dagens klimat och för de olika scenarierna om global havsnivåhöjning. De karaktäristiska vattenstånd som beräknas är högsta högvattenstånd (HHW) och medelvattenstånd (MW).

För beräkningar av extrema vattenstånd i dagens klimat har statistiska återkomsttider beräknats från årshögsta vattenstånd av data från Stockholm-Skeppsholmen från 1889 till 2012. För beräkningen av extrema vattenstånd i framtiden adderas medelvattenytans höjning innan den statistiska beräkningen görs för framtidens klimat. Metodiken bygger på ett antagande om att fördelningen av extrema vattenstånd är densamma som idag och att hela höjningen av vattenståndet beror på medelvattenytans höjning. Forskningsresultat från det internationella forskningsprojektet ENSEMBLES visar ingen tendens till att stormar blir vanligare eller mer ovanliga, vilket ger stöd för antagandet om extremer. Vattenstånd med 100 års återkomsttid har beräknats för Stockholm i dagens klimat och med de olika antagandena om framtida global havsnivåhöjning.

3.5 Sannolikhet och risk

Som mått på översvämningssrisker används ofta begreppet återkomsttid, vilket betecknar den genomsnittliga tiden mellan två översvämningar av samma omfattning. I själva verket uttrycker begreppet en procentuell sannolikhet för att en händelse inträffar varje enskilt år. En återkomsttid på 100 år är egentligen en förenklad beskrivning av ett vattenstånd som har 1 % sannolikhet att inträffa varje enskilt år. En återkomsttid på 50 år motsvarar en sannolikhet på 1/50 eller 2 % varje enskilt år. Begreppet återkomsttid ger därför en falsk känsla av säkerhet, eftersom det anger sannolikheten för ett enda år och inte den sammanlagda sannolikheten för en period av flera år. Tabell 2 visar den sammanlagda sannolikheten för att ett vattenstånd med en viss återkomsttid skall överskridas under en längre tidsperiod. Ett vattenstånd med återkomsttiden 100 år har t.ex. 5 % sannolikhet att inträffa under 5 år, 39 % sannolikhet att inträffa under en 50-årsperiod och en sannolikhet på 63 % att inträffa under en 100-årsperiod.

Beräknade nivåer med återkomsttider på flera hundra år innehåller stora osäkerheter, men är det bästa som kan göras med statistisk extremvärdesanalys. I Flödeskommitténs ”Riktlinjer för bestämning av dimensionerande flöden för dammanläggningar” (Svensk Energi m.fl., 2007) anges tumregeln att den beräknade återkomsttiden inte bör vara mer än dubbelt så lång som den underliggande tidsserien. Om återkomsttider långt utöver detta beräknas blir osäkerheten i beräkningen mycket stor.

Tabell 2. Sannolikheten för ett visst vattenstånd uttryckt i procent under en period av år.

Återkomst-tid (år)	Sannolikhet under 5 år (%)	Sannolikhet under 10 år (%)	Sannolikhet under 20 år (%)	Sannolikhet under 50 år (%)	Sannolikhet under 100 år (%)
5	67	89	99	100	100
10	41	65	88	99	100
20	23	40	64	92	99
50	10	18	33	64	87
100	5	10	18	39	63

3.6 Framtida havsvattenstånd i Stockholm

I tabell 3 presenteras medelvattenstånd (MW) och högsta högvattenstånd (HHW) i Stockholm i RH2000 i dagens klimat och för olika antaganden om global havsnivåhöjning. Högsta högvattenstånd är det högsta observerade vattenståndet.

Figur 4 visar förändringen av medelvattenståndet 1990-2100 för Stockholm förutsatt att havet stiger 30 cm fram till 2050 och 100 cm fram till 2100, med kompensation för lokal landhöjning. Figuren visar att mellan 1990 till idag råder nästan balans mellan landhöjning och havshöjning med en sådan utveckling, och att havshöjningen tar fart mot seklets slut. Nettoändringen är ca 40 cm för Stockholm från 1990 till 2100.

Figur 5 visar förändringen av medelvattenståndet 1990-2150 för Stockholm förutsatt att havet stiger 200 och 300 cm fram till 2150, med kompensation för lokal landhöjning. Figuren visar att nettoändringen är ca 120 cm förutsatt att havet stiger 200 cm fram till 2150 och 220 cm förutsatt att havet stiger 300 cm fram till 2150.

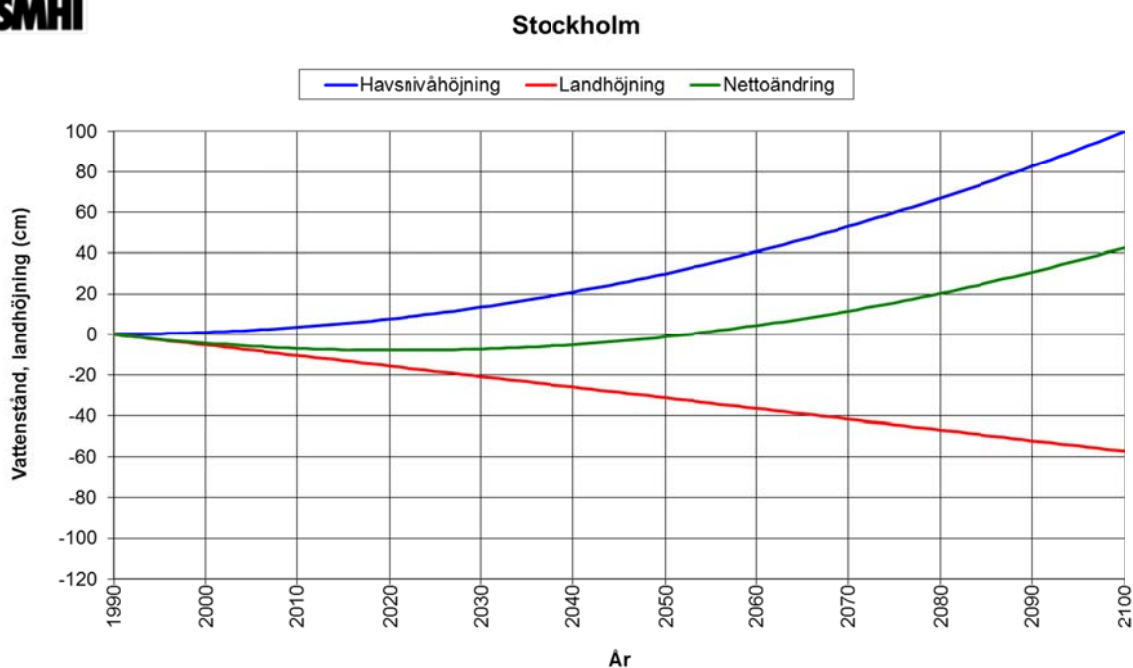
Figur 6 visar förändringen av medelvattenståndet 1990-2200 för Stockholm förutsatt att havet stiger 200, 300 och 400 cm fram till 2200, med kompensation för lokal landhöjning. Figuren visar att nettoändringen är ca 90 cm förutsatt att havet stiger 200 cm fram till 2200, ca 190 cm

om havet stigit 300 cm fram till 2200 och ca 290 cm förutsatt att havet stiger 400 cm fram till 2200.

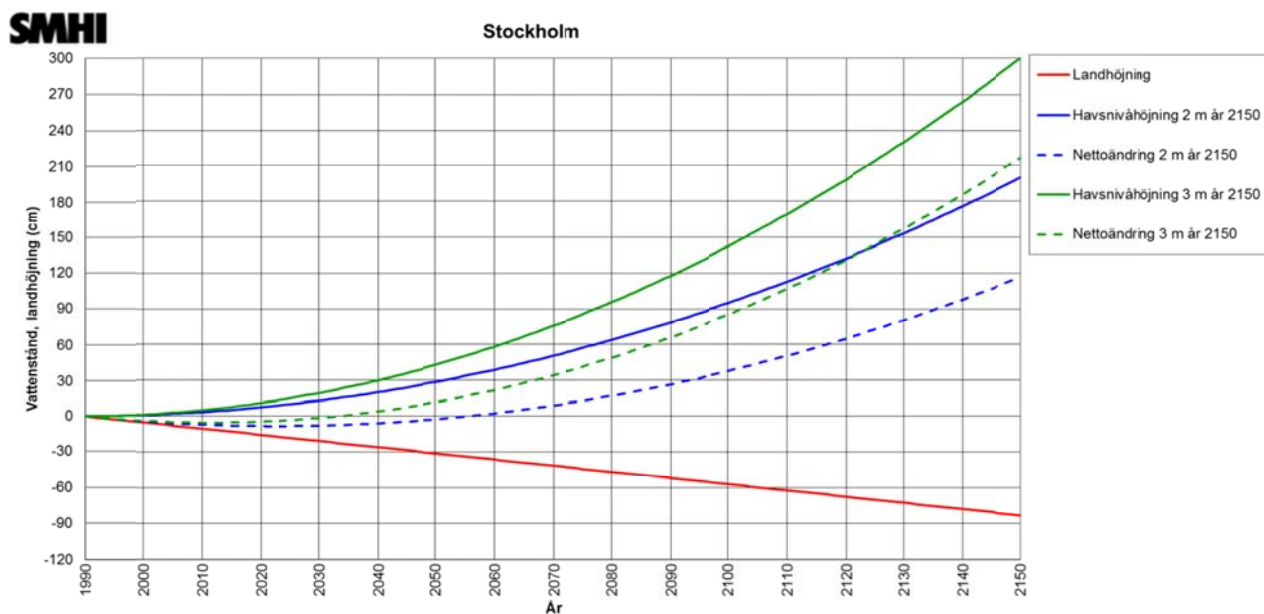
Tabell 3. Medelvattenstånd (MW) och högsta högvattenstånd (HHW) i höjdsystemet RH2000 vid Stockholm-Skeppsholmen i dagens klimat och för de olika antagandena om framtida global havsnivåhöjning med hänsyn tagen till landhöjningen.

	MW i RH2000 (cm)	HHW i RH2000 (cm)
2013 (dagens klimat)	11	128
1 m år 2100	63	180
2 m år 2200	111	228
3 m år 2200	211	328
4 m år 2200	311	428
2 m år 2150	137	254
3 m år 2150	237	354

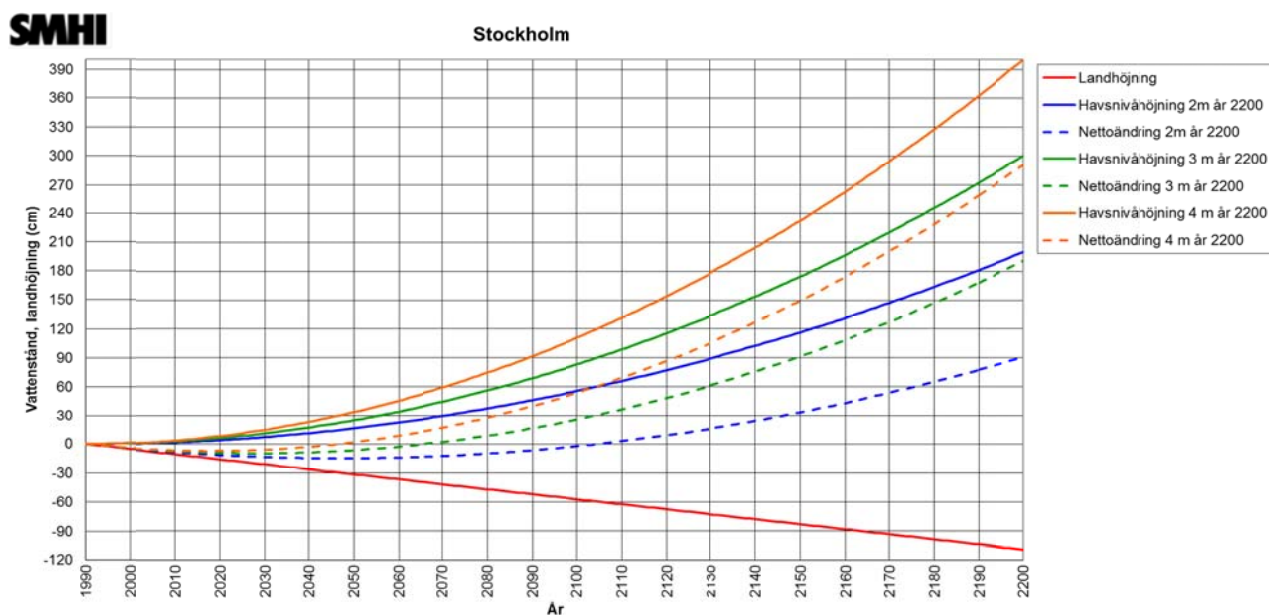
SMHI



Figur 4. Relativ förändring av medelvattenståndet från 1990 till 2100 för Stockholm, under antagande av en global havsnivåhöjning på + 1 m till 2100. Blå linjen visar en tänkt utveckling av medelvattenytan som förutsätter 30 cm höjning fram till 2050 och 1 m fram till 2100. Den röda linjen är den absoluta landhöjningen i Stockholm. Nettoändringen visas som grön linje och den blir ca 40 cm från 1990 till 2100.



Figur 5. Relativ förändring av medelvattenståndet från 1990 till 2150 för Stockholm, under antagande av en global havsnivåhöjning på + 2 m respektive + 3 m. Blå och grön heldragen linje visar en tänkt utveckling av medelvattenytan som förutsätter 2 m (blå) och 3 m (grön) höjning fram till 2150. Den röda linjen är den absoluta landhöjningen i Stockholm. Nettoändringen visas som blå respektive grön streckad linje, och som visar ca 120 cm respektive ca 220 cm år 2150 relativt 1990.



Figur 6. Relativ förändring av medelvattenståndet från 1990 till 2200 för Stockholm, under antagande av en global havsnivåhöjning på + 2 m, + 3 m respektive + 4 m. Blå, grön och orange heldragen linje visar en tänkt utveckling av medelvattenytan som förutsätter 2 m (blå), 3 m (grön) och 4 m (orange) höjning fram till 2200. Den röda linjen är den absoluta landhöjningen. Nettoändringen visas som blå, grön och orange streckad linje, och som visar ca 90 cm, ca 190 cm respektive ca 290 cm år 2200 relativt 1990.

I tabell 4 presenteras vattenstånd med 100 års återkomsttid beräknade för dagens klimat och anpassade till de olika antagandena om framtida global havsnivåhöjning. Resultaten visar att år 2100 kommer vattenstånd med 100 års återkomsttid vara ca 50 cm högre än idag. År 2150 kommer vattenstånd med 100 års återkomsttid vara mellan 126 och 226 cm högre än idag,

beroende på vilket av Länsstyrelsens scenarier för havsnivåhöjning som avses. År 2200 kommer vattenstånd med 100 års återkomsttid vara mellan 100 och 300 cm högre än idag, beroende på vilket av de tre antagandena för havsnivåhöjning som avses.

Tabell 4. Vattenstånd med 100 års återkomsttid i dagens klimat och för de olika scenarierna för havsnivåhöjning. Siffrorna inom parantes anger 90 % konfidensintervall. Scenarierna bygger på olika antaganden om global höjning av vattenytan och reduktion för landhöjning.

	Vattenstånd (cm) med 100 års återkomsttid i RH2000
2013 (dagens klimat)	116 (107-136)
1 m år 2100	168 (158-188)
2 m år 2200	216 (206-236)
3 m år 2200	316 (306-336)
4 m år 2200	416 (406-436)
2 m år 2150	242 (232-262)
3 m år 2150	342 (332-362)

4 Mälaren

Stockholms stad har under flera års tid utrett en ombyggnad av Slussen (se Projekt Slussens hemsida www.stockholm.se/slussen). I samband med ombyggnaden avser man att öka tappningskapaciteten för att minska översvämningsriskerna runt Mälaren. I mars 2012 lämnade Stockholm stad in en tillståndsansökan till Miljödomstolen för nya avtappningskanaler i Slussen i Stockholm och en ny reglering av Mälaren. Ett av underlagsdokumenten till ansökan är en beskrivning av det nya förslaget till reglering efter att tappningskapaciteten har byggts ut (Andréasson m.fl., 2011). Den utformning av tappningskapacitet och förslag till reglering som beskrivs i rapporten utgör utgångspunkt för resonemanget i denna rapport om framtida nivåer i Mälaren. För de nivåer som anges förutsätts därmed att tappningskapaciteten redan har utökats till mer än det dubbla jämfört med dagens utformning.

4.1 Mälarens nivåer i dagens klimat

Utbyggnaden av Mälarens tappningskapacitet, som planeras av Stockholms stad, kommer kraftigt att minska översvämningsriskerna längs Mälarens stränder under dagens klimat (Andréasson m.fl., 2011). Enligt gällande vattendom ska Mälaren hållas mellan nivåerna 0,69 m - 1,39 m (RH2000). Mälarens medelvattenstånd är ca 0,88 m (RH2000). Den genomsnittliga vattenståndsskillnaden mellan Mälaren och havet är drygt 70 cm. De nivåer som här kommer att behandlas har samtliga hämtats från Andréasson m.fl. (2011).

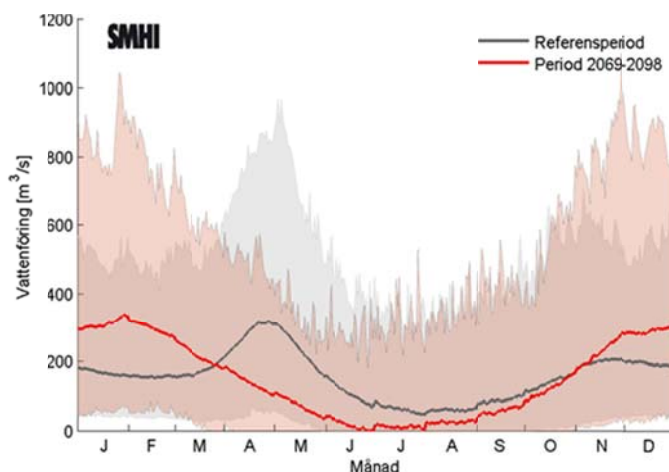
Under normala förhållanden och även vid tillrinningar av storleksordningen 100 års återkomsttid kommer Mälarens nivåer efter utbyggnaden att enkelt kunna hållas under nivån 1,29 m (RH2000). Även vid tillrinningar av storleksordningen 1000 års återkomsttid kommer Mälarens nivåer att kunna hållas inom intervallet som ges av vattendomen. För de allra mest extrema flödena i Flödesdimensioneringskategori I enligt de svenska riktlinjerna för dammar (Svensk Energi m.fl., 2007) uppnås det övergripande målet att hålla Mälarens nivåer under 1,39 m vid normala saltsjövattenstånd. Vid en situation med ett långvarigt högt havsvattenstånd samtidigt som tillrinningen är extremt hög (Flödesdimensioneringskategori I) kommer dock den

av vattendomen givna högsta nivån att överskridas. Enligt de beräkningar som gjorts blir nivån då 1,48 m, dvs. 9 cm över vattendomens högsta nivå.

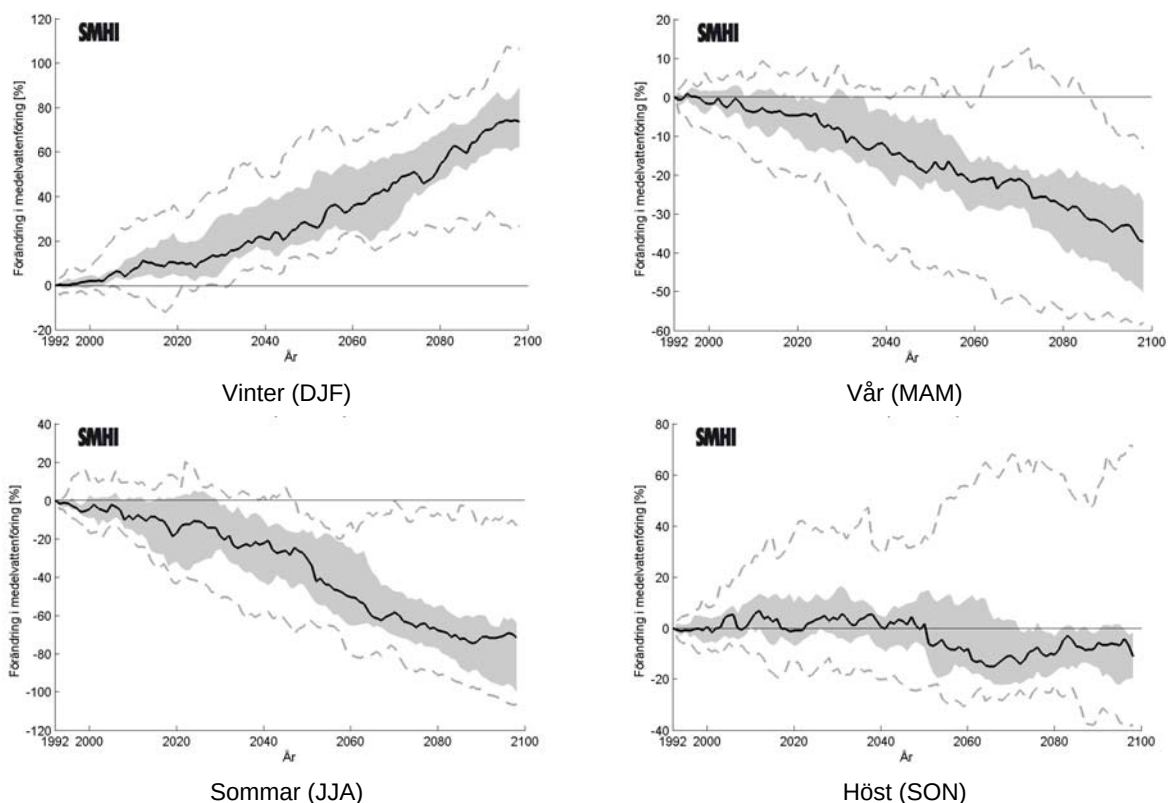
Eftersom vattenståndsskillnaden mellan Mälaren och havet är liten, drygt 70 cm i genomsnitt, varierar förmågan att avbörda vatten från Mälaren med vattenståndet i havet. Vid en översvämningssituation i Mälaren är det framförallt medelvärdet av havets nivå under en något längre period (några dagar upp till en vecka) som är avgörande för tappningskapaciteten under förloppet. En högvattensituation i Mälaren har ett tidsförlopp av veckor, medan extrema havsvattenstånd oftast råder under några timmar. En begränsad avtappningsförmåga under kortare tidsperioder, orsakad av extrema havsvattenstånd, har därför inte samma påverkan på Mälarens vattenstånd som ett mer långvarigt förhöjt havsvattenstånd. Det gäller även om det senare är betydligt lägre än de extrema havsvattenstånden. Redan idag förekommer det att havets nivå ibland stiger till nivåer över Mälarens nivå (när Mälaren ligger relativt lågt).

4.2 Framtida tillrinning

I arbetet med utformningen av Mälarens framtida reglering så har förändringar av tillrinningsmönstret till Mälaren studerats i tidsperspektivet fram till 2100. Framtida tillrinningar studerades även i den regionala klimatanalys som har tagits fram för Stockholms län (Stensen m.fl., 2010). Tillrinningen har beräknats med utgångspunkt från 16 regionala klimatscenarier, vilka har använts som underlag för beräkningar med den hydrologiska HBV-modellen. I figur 7 visas beräknad variationen i Mälarens tillrinning under året. Den idag tydliga årtidskaraktärstiken med låga vinterflöden och en betonad vårflood ersätts av en flödesregim med högre flöden under höst och vinter och en lägre vårflood. Nederbörden ökar vintertid men samtidigt blir temperaturen högre. Det gör att nederbörden i mindre grad än idag kommer att lagras som snö. Vegetationsperioden börjar tidigare vilket ger större avdunstning och därmed mindre tillrinning. Sommartid minskar medeltillrinningen till följd av ökande temperatur och därmed ökad avdunstning.



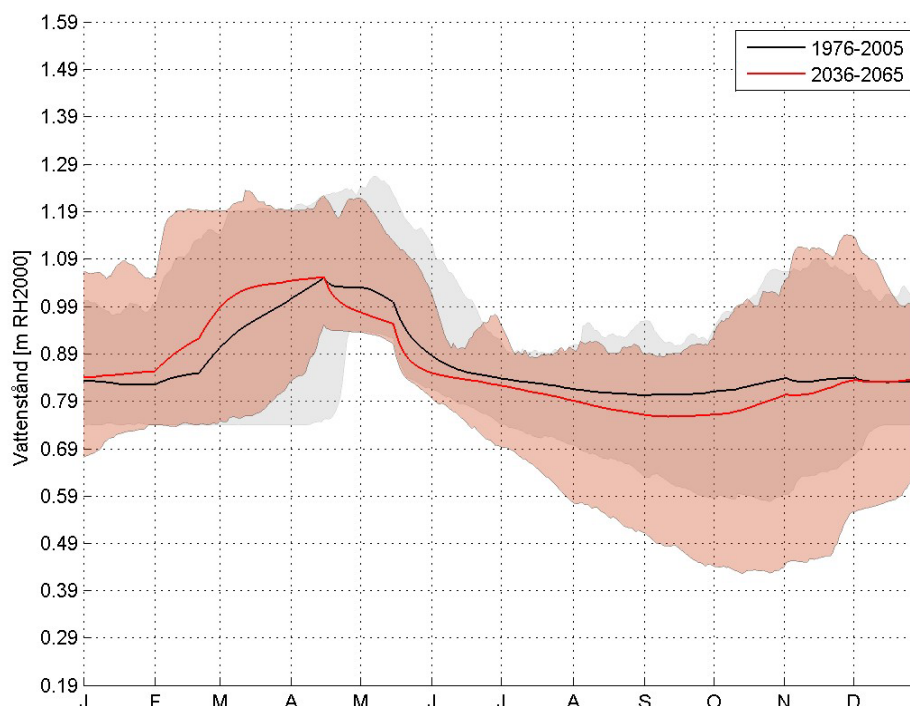
Figur 7. Ändring av säsongsdynamik för tillrinning till Mälaren för perioden 2069-2098 jämfört med referensperioden 1963-1992. Figuren är en sammanfattning från 12 klimatsimuleringar. Heldragen svart linje visar medeltillrinning för referensperioden och heldragen röd linje visar medeltillrinning för den framtida tidsperioden. Det grå fältet visar variationen mellan 75:e percentilen av alla scenariers maxvärde och 25:e percentilen av alla scenariers minvärde under referensperioden. Det ljusröda fältet visar motsvarande för de framtida tidsperioderna. (Källa: Stensen m.fl., 2010).



Figur 8. Procentuell förändring av Mälarens totala säsongsmedeltillrinning enligt 16 klimatsimuleringar (12 efter 2050) relativt referensperioden 1963-1992. Varje års värde utgörs av ett medianvärde (svart linje) taget över de 30 föregående åren (exempelvis är värdet 2050 medelvärdet av perioden 2021-2050 jämfört med medelvärdet 1963-1992). Det grå fältet visar variationen mellan 25:e och 75:e percentilen. De streckade linjerna visar max- och minvärde av samtliga klimatscenarier (Källa: Stensen m.fl., 2010).

Figur 8 visar förändringen av medeltillrinningen säsongsvis relativt referensperioden 1963-1992. Årsmedelvattenföringen förändras inte i någon större grad. Säsongsvis syns däremot en tydlig ökning vintertid och en minskning under vår och sommar. Resultatet är en följd av den förändrade flödesregimen under året.

Inom Projekt Slussen har dessa framtida tillrinningar använts för att studera effekten på Mälarens vattenstånd baserat på den utbyggda tappningskapaciteten och den föreslagna nya regleringsstrategin. I figur 9 visas hur tillrinningsförändringarna påverkar Mälarens vattenstånd fram till mitten på seklet (2036-2065). Havets nivå har antagits variera kring samma medelvattenstånd som 1976-2005. Beräkningarna visar att de högsta nivåerna kan hanteras likvärdigt med simuleringen för dagens klimat. För de lägsta vattenstånden visar beräkningarna att de successivt kan komma att bli lägre, med storleksordningen 1 till 1,5 dm framemot mitten på seklet.



Figur 9. Beräknat vattenstånd från en ensemble om 12 klimatscenarier för perioden 1976-2005 (svart linje) och för den framtida perioden 2036-2065 (röd linje). Förutom medelvärden så visas 25:e percentilen av varje dags minsta vattenstånd respektive 75:e percentilen av varje dags största vattenstånd för de 12 klimatscenarierna (grått respektive rosa fält). (Källa: Andréasson m.fl. 2011).

Det finns inget klimatscenariounderlag idag som gör det möjligt att studera tillrinningsförändringar i ett längre tidsperspektiv än till slutet på det innevarande seklet. Går det ändå att säga något om hur tillrinningarna kan komma att förändras i ett ännu längre tidsperspektiv?

Det finns ingen tydlig trend i årsmedeltillrinningens storlek fram till 2100, möjligen minskar den något mot slutet av seklet. De tydligaste förändringarna är att vårfloden har försvunnit och ersatts av höga vintertillrinningar. Det är en följd av att vinternederbörden mot slutet av seklet inte längre faller som snö. Nederbörden under vintern bidrar istället direkt till Mälarens tillrinning. Mängden nederbörd vintertid kan komma att öka även efter 2100. Den förändringen är dock troligen inte lika omfattande som den förändring som då redan har skett, på grund av det ändrade temperaturklimatet. Den stadigt minskade tillrinningen under sommarhalvåret är en direkt följd av att avdunstningen ökar med ökande temperatur (nederbörden under sommaren uppvisar ungefär samma storlek som under dagens förhållanden). Om temperaturen fortsätter stiga efter 2100 fortsätter även denna trend av minskad tillrinning sommartid.

4.3 Vilken vattenståndsskillnad behövs mellan Mälaren och havet?

För att kunna hålla Mälaren på en önskad nivå krävs det en vattenståndsskillnad mellan Mälaren och havet. För arbetet inom projekt Slussen har tidsperspektivet varit det innevarande seklet. De vattenståndsförändringar av havets nivå som har beaktats i arbetet har begränsats till en global havsnivåhöjning på + 1 m som en ungefärlig övre gräns. I kombination med landhöjningen i Stockholm har detta antagande approximerats konservativt till en relativ ökning av havets nivå på + 50 cm (nettohöjning) från 1990-2100. Förhållandet mellan medelnivå i havet och i Mälaren för dagens situation och utifrån antagandet om en nettohöjning med +50 cm illustreras i figur 10. Denna ökning av havets nivå i kombination med förändrat tillrinningsmönster ligger nära

vad den utökade kapaciteten kan klara om Mälaren ska hållas inom de nivåer som ges av vattendomen (Andréasson m.fl, 2011).

Även denna ökning innebär svårigheter att reglera Mälaren inom de gränser som är acceptabla, om inte regleringen justeras för att fokusera mer mot översvämningssäkring. Syftet med strategin är att den ska fungera väl för de behov som har identifierats för de nuvarande klimatvariationerna. En förändring av strategin, som fokuserar mer på risk för översvämningar, kommer troligt att göras först då behovet uppstår.



Figur 10. Principiell skiss över medelnivå och högsta nivå i Mälaren. Till vänster ses dagens situation och till höger vid nästa sekelskifte, utifrån antagande om en nettohöjning av havsnivån på + 50cm.

I dag har vi, som beskrivits tidigare, en nivåskillnad mellan Mälarens medelnivå och havets medelnivå på drygt 70 cm (se figur 10). Gränsen för vad som kan hanteras med Mälarens nivåer fortsatt inom acceptabla gränser är minst ca 20-30 cm nivåskillnad i medelvattenstånd (dagens nivåskillnad på drygt 70 cm - knappt 50 cm), enligt resonemanget ovan. Då erhålls högstanivåer i Mälaren på ca 50-60 cm över Mälarens medelvattenstånd baserat på genomförda beräkningar inom projekt Slussen. Med hänsyn till osäkerheterna i denna uppskattning motsvarar detta grovt räknat ca 70-90 cm över havets medelvattenstånd som högsta nivå i Mälaren. Detta är en nyckel för att kunna skatta Mälarens framtida högstanivåer i förhållande till förändringar i havets nivå.

Vartefter vattenståndsskillnaden mellan Mälaren och havet minskar blir det allt svårare att reglera Mälarens vattennivåer så att dagens variationer i vattenstånd tillåts. Det blir svårare att få ut vattnet från Mälaren och mer fokus hamnar automatiskt på att hålla nere nivåerna, eftersom vattenståndet i Mälaren oftare kommer att vara i den övre delen av det tillåtna nivåintervallet (vilket idag är 0,69 – 1,39 m). När skillnaden i medelvattenstånd mellan Mälaren och havet minskar kommer det också att bli vanligare att havets nivå kortvarigt överstiger nivån i Mälaren. Det är därför mycket viktigt att det går att stänga alla förbindelser mellan havet och Mälaren så att inte saltvatten vid dessa tillfällen tränger in i Mälaren.

4.4 Mälarens nivåer vid förhöjda havsvattenstånd

I tabell 5 redovisas högsta nivåer i Mälaren för olika framtida havsnivåhöjningar baserat på uppskattningen att Mälaren, efter utökning av avbördningskapaciteten, kan hanteras inom 70-90 cm över havets medelvattenstånd som övre gräns. Antagandet baseras på det resonemang som förs i kap 3.3.

Vid en jämförelse av resulterande högsta nivåer i Mälaren och HHW (högsta högvattenstånd) i havet (tabell 5 och tabell 3) ses att havets högsta nivå är högre än den högsta nivån i Mälaren. Detta kan förefalla underligt, men har att göra med varaktigheterna på händelserna. Ett högsta högvattenstånd i havet har en ganska kort varaktighet (timmar) medan en högflödessituation i Mälaren pågår under veckor. En begränsad tappningsförmåga under en kortare period (del av dygn till dygn) påverkar inte i så stor grad nivån i Mälaren, det vill säga Mälaren hinner inte stiga så mycket under ett dygn. Av denna anledning kommer det vara möjligt att begränsa Mälarens nivåer till en lägre nivå än den högsta nivån i havet, förutsatt att alla förbindelser

mellan Mälaren och havet går att stänga och att eventuella framtida invallningar är tillräckligt höga.

Tabell 5. Medelvattenstånd (MW) och högsta högvattenstånd (HHW) i höjdsystemet RH2000 vid Stockholm-Skeppsholmen i dagens klimat och för de olika antagandena om framtida global havsnivåhöjning med hänsyn tagen till landhöjningen (samma som i tabell 3), samt resulterande högstänivå i Mälaren förutsatt antagandet att denna är 70-90 cm högre än MW i havet.

	MW i havet RH2000 (cm)	HHW i havet RH2000 (cm)	Högsta nivå i Mälaren RH2000 (cm)
<i>2013 (dagens klimat)</i>	11	128	136-148*
<i>1 m år 2100</i>	63	180	133-153
<i>2 m år 2200</i>	111	228	181-201
<i>3 m år 2200</i>	211	328	281-301
<i>4 m år 2200</i>	311	428	381-401
<i>2 m år 2150</i>	137	254	207-227
<i>3 m år 2150</i>	237	354	307-327

* Dimensionerande vattenstånd från Andréasson m.fl. (2011)

5 Slutsatser

Länsstyrelserna i Stockholms, Södermanlands, Västmanlands och Uppsala län har uppdragit åt SMHI att göra en bedömning av vilka effekter på Mälarens nivåer som stigande havsnivåer kan få om havet stiger med 2-4 m fram till 2200. De antaganden om framtida globala havsnivåhöjningar (i relation till 1990) som länsstyrelserna tagit fram och som behandlas i denna rapport är:

- 1 m global havsnivåhöjning fram till år 2100
- 2 m global havsnivåhöjning fram till år 2200
- 3 m global havsnivåhöjning fram till år 2200
- 4 m global havsnivåhöjning fram till år 2200
- 2 m global havsnivåhöjning fram till år 2150
- 3 m global havsnivåhöjning fram till år 2150

Utifrån dessa antaganden, mätdata från Stockholm-Skeppsholmen och med hänsyn till landhöjningen har framtida havsvattenstånd i Stockholm beräknats. För bedömningar av Mälarens framtida nivå har utgångspunkten varit de beräkningar som gjorts för Projekt Slussen i tidsperspektivet fram till 2100 och den regionala klimatanalys som SMHI utfört för Stockholms län, kompletterat med de framtagna havsvattenstånden för Stockholm. En förutsättning för bedömningarna är att den av Projekt Slussen föreslagna tappningskapaciteten och regleringsstrategin gäller, vilket även innebär att luckor kan stängas. En sammanställning av ett antal studier om havsnivåer fram till 2200 har också gjorts. Följande huvuddrag framgår av föreliggande rapport, med nivåer angivna i höjdsystem RH2000:

- Samstämmighet råder om att stigande havsnivåer är ett långsiktigt problem, men få studier behandlar ett så långt tidsperspektiv som fram till år 2200.
- Siffror över framtida havsnivåer i ett så långt tidsperspektiv omges av stor osäkerhet. Flera meters höjning av havet under de kommande århundradena, nämns dock i flera rapporter.
- Medelvattenstånd vid Skeppsholmen är idag 11cm (i RH2000). Med 1m (3 m) global havsnivåhöjning fram till år 2100 (år 2200) beräknas medelvattenståndet till 63 cm

(211 cm). Havsvattenstånd med återkomsttid 100 år är idag ca 116 cm. Med 1m (3 m) global havsnivåhöjning fram till år 2100 (år 2200) beräknas havsvattenstånd med 100 års återkomsttid vara ca 168 cm (316 cm).

- Idag är den genomsnittliga vattenståndsskillnaden mellan Mälaren och havet drygt 70 cm. Vattenståndsskillnaden mellan Mälaren och havet kommer att minska. Det blir svårare att få ut vattnet från Mälaren och vattenstånden i Mälaren kommer oftare att vara i den övre delen av det tillåtna nivåintervallet.
- Det i denna rapport förda resonemanget ger att Mälarens högsta vattenstånd i framtiden grovt räknat blir ca 70-90 cm över havets medelvattenstånd om havet stiger mer än 50 cm netto (dvs. landhöjningen inkluderad).
- Det blir också vanligare att havets nivå kortvarigt överstiger nivån i Mälaren. Därför behöver alla förbindelser mellan havet och Mälaren kunna stängas, för att förhindra saltvatten att tränga in i Mälaren.
- Ett högsta högvattenstånd i havet varar kort tid medan en högflödessituation i Mälaren pågår under flera veckor. En begränsad tappningsförmåga under en kortare period påverkar inte Mälarens nivå nämnvärt.
- Resultaten visar att en havsnivåhöjning i tidsperspektivet 2200 kan komma att få stor påverkan på Mälarens vattenstånd, vilket i sin tur kommer att leda till stora konsekvenser för hela Mälardalen.

6 Referenser

Andréasson J., Gustavsson H. och Bergström S. (2011) Projekt Slussen – Förslag till ny reglering av Mälaren. *SMHI-rapport* 2011:64.

Bergström, S. (2012) Framtidens havsnivåer i ett hundraårsperspektiv – kunskapssammanställning 2012. *SMHI Klimatologi* nr 5, Norrköping

Copenhagen Diagnosis (2009) Updating the World on the Latest Climate Science. I. Allison, N.L. Bindoff, R.A. Bindaschadler, 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, Australian, 60pp.

Deltacommissie (2008) Working together with water – A living land build for its future. Findings of the Deltacommissie 2008. <http://www.deltacommissie.com/doc/summary.pdf>

Hammarklint, T. (2013) Svenska havsvattenståndsserier - En klimatindikator. SMHI Januari 2013. http://www.smhi.se/polopoly_fs/1.19877!Svenska_havsvattenstandsserier_-_En_klimatindikator.pdf

IPCC (2001) Third Assessment Report - Climate Change 2001. Online version. http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/

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.

Jevrejeva, S., Moore, J. C. och Grinsted, A. (2012) Sea level projections to AD2500 with a new generation of climate change scenarios. *Global and Planetary Change* 80-81, 14-20.

Katsman, C.A., Sterl, A., Beersma, J.J., van den Brink, H.W., Hazeleger, W. and 15 co-authors (2011) Exploring high-end scenarios for local sea level rise to develop flood protection strategies for a low-lying delta - the Netherlands as an example, *Climatic Change*, 2011, doi:10.1007/s10584-011-0037-5.

- Meehl, G.A., Hu, A., Tebaldi, C., Arblaster, J.M., Washington, W.M., Teng, H., Sanderson, B.M., Ault, T., Strand, W.G. och White III, J.B. (2012) Relative outcomes of climate change mitigation related to global temperature versus sea-level rise. *Nature Climate Change*, Vol 2, August 2012, www.nature.com/natureclimatechange
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., van Vuuren, D.P., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchell, J.F.B., Nakicenovic, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thomson, A.M., Weyant, J.P. och Wilbanks, T.J. (2010) The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463 (7282), 747-756.
- 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.
- Naturvårdsverket (2013) *FN:s klimatpanel Klimatförändring 2013. Den naturvetenskapliga grunden*. Sammanfattning för beslutsfattare. Bidrag från arbetsgrupp I (WG I) till den femte utvärderingen från Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. Rapport 6592.
- Pardaens, A.K., Lowe, J.A., Bernie, D. and Reis, L. (2012) What are the consequences of temperature overshoot on future sea-level rise? *AVOID*, Met Office, Tyndall Centre, Walker Institute and Grantham Institute.
http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/r/s/AVOID_WS2_D1_30_SLR_report.pdf
- Rummukainen, M., Johansson, D.J.A., Azar, C., Langner, J., Döscher, R. and Smith, H. (2011) Uppdatering av den vetenskapliga grunden för klimatarbetet. En översyn av naturvetenskapliga aspekter. *SMHI Klimatologi* Nr. 4, ISSN: 1654-2258.
http://www.smhi.se/polopoly_fs/1.17826!RAPPORT_klimatologi%20nr%204.pdf
- Schaeffer, M., Hare, W., Rahmstorf, S. and Vermeer, M. (2012) Long-term sea-level rise implied by 1,5 °C and 2 °C warming levels. *Nature Climate Change* DOI: 10.1038/NCLIMATE1584 www.nature.com/natureclimatechange. Macmillan Publishers Limited.
- Stensen, B., Andréasson, J., Bergström, J., Dahné, J., Eklund, D., German, J., Gustavsson, H., Hallberg, K., Martinsson, S., Nerheim, S. och Wern, L. (2010). Regional klimatsammanställning – Stockholms län. *SMHI-rapport 2010-78*.
- 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).
- World Bank* (2012) Turn Down Heat the Heat – Why a 4° warmer World Must be Avoided. A Report for the World Bank by the Potsdam Institute for Climate Impact Research and Climate Analytics. November 2012, Washington DC.



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