

R-09-06

Förväntade extremvattennivåer för havsytan vid Forsmark och Laxemar–Simpevarp fram till år 2100

Lars Brydsten, Umeå universitet

Anders Engqvist, Kungliga Tekniska Högskolan

Jens-Ove Näslund, Tobias Lindborg
Svensk Kärnbränslehantering AB

Januari 2009

Svensk Kärnbränslehantering AB

Swedish Nuclear Fuel
and Waste Management Co

Box 250, SE-101 24 Stockholm
Phone +46 8 459 84 00



ISSN 1402-3091

SKB Rapport R-09-06

Förväntade extremvattennivåer för havsytan vid Forsmark och Laxemar–Simpevarp fram till år 2100

Lars Brydsten, Umeå universitet

Anders Engqvist, Kungliga Tekniska Högskolan

Jens-Ove Näslund, Tobias Lindborg
Svensk Kärnbränslehantering AB

Januari 2009

Innehåll

1	Introduktion	5
2	Material och metod	7
2.1	Indata	7
2.2	Metodikgenomgång	7
2.2.1	Global havsnivå och trender	7
2.2.2	Isostasi	8
2.2.3	Årsextremer i dag och i framtiden	9
2.2.4	Oceanografiska synpunkter	10
2.2.5	Återkomsttider	11
2.2.6	Våguppsvall	11
3	Extrema lokala påverkansnivåer	13
3.1	Forsmark	13
3.2	Laxemar-Simpevarp	15
4	Diskussion	17
5	Referenser	19
Bilaga 1	Synpunkter på /Rahmstorf 2007/ samt svar på dessa synpunkter	21

1 Introduktion

I samband med förberedande arbete för lokalisering och design av ett slutförvar i Forsmark alternativt Laxemar-Simpevarp, utvärderas information som utgör underlag för förvarets så kallade konstruktionsförutsättningar. Denna rapport redovisar den högsta förväntade strandlinjen under slutförvarets operativa livstid (till ca år 2100 AD). Som underlag har använts information från platsbeskrivningarna (SDM-Site) samt övrig vetenskaplig litteratur i ämnet. Detta underlag listas i referenslistan. En avgörande faktor för strandlinjen är den globala havsnivån och de processer som påverkar dess förändring i framtiden. Den i dagsläget klart dominerande processen är den globala uppvärmningen.

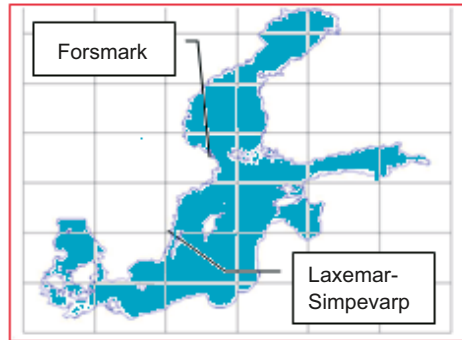
En stor del av vetenskapssamhället är överens om att en global uppvärmning nu pågår, och att ökande koncentrationer av växthusgaser i atmosfären spelar en avgörande roll i denna process, /IPCC 2007/. Andra forskare åberopar andra orsakssamband, som t.ex. variationer i solaktivitet, som viktiga. Oavsett orsaken till en global uppvärmning, får den två primära konsekvenser för havsytans vidkommande; i) att landbaserad is smälter, samt ii) att det sker en termisk expansion av främst världshavets ytlager. Båda dessa processer innebär en höjning av världshavens nivå. Denna höjning sker dock inte globalt utjämnat, bl.a. på grund av samtidiga förändringar av gravitationsfältet över jordens yta. Dessutom förväntas en regional påverkan av havsnivån orsakad av ökad nederbörd, förändrade vindmönster och landhöjning/landsänkning. En översikt av hur de olika processerna samverkar på global, regional och lokal nivå för att resultera i den lokala havsvattennivån ges i figur 1-2.

Tidigare utkast av denna rapport har granskats av Markus Meier SMHI, som har kommit med värdefulla synpunkter på sakinnehållet.



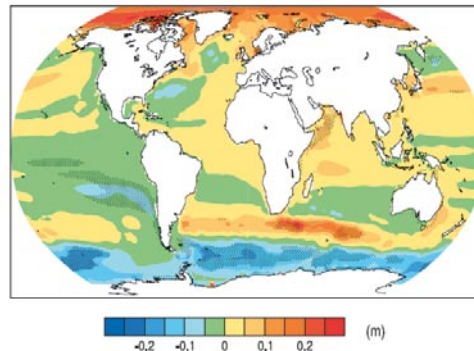
Figur 1-1. Karta över de två studieområdena Forsmark och Simpevarp/Laxemar.

c) Lokal nivå:



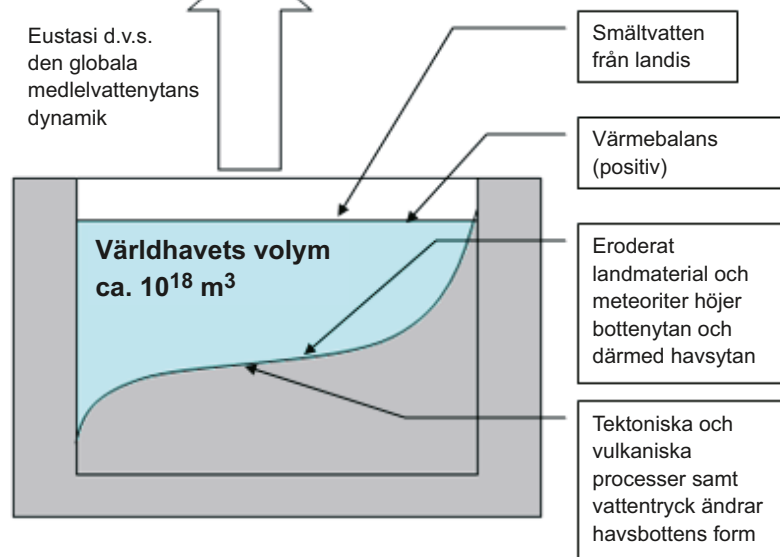
- Strandlinjeförskjutning
- Sötvattentillrinning
- Havsvattenstånd i Kattegat vid Nordsjön
- Salt- och vattenbalans via Bält-sundet
- Mindmönster
- Våggenerering
- Kustfångade vågor
- Seicher
- Vindgenererade vågor
- Kusteffekter för vågor

b) Regional nivå:



Vindmönster, havsströmmar och termohalin skiktning omfördelar den globala medelvattnytan, som även lokalt påverkas av anomalier i jordens tyngdkraftsfält. Nordsjön förväntas bli 20 cm högre än eustasinivån år 2100

a) Global nivå:



Figur 1-2. Schematisk uppdelning av processer i olika rumsskalors med påverkan på den lokala havsnivån. På den globala nivån påverkas världhavets vattenvolym. Det resulterande trycket påverkar tillsammans med andra processer geometrin av den sammantagna havsbassängen (isostasi). Resultatet ger i kvasi-stationär jämvikt (den eustasiska) världshavsnivån. **1-2b.** Denna fördelas olika mellan olika regioner p.g.a. variationer i gravitationsfält och atmosfärs- och havsströmmar. Figur 1-2b är hämtad från /IPCC 2007/ "Local sea level change (m) due to ocean density and circulation change relative to the global average (i.e., positive values indicate greater local sea level change than global) during the 21st century, calculated as the difference between averages for 2080 to 2099 and 1980 to 1999, as an ensemble mean over 16 AOGCMs forced with the SRES A1B scenario. Stippling denotes regions where the magnitude of the multi-model ensemble mean divided by the multi-model standard deviation exceeds 1.0." **1-2c.** På den lokala nivån tillkommer ytterligare en mängd processer som på den mindre geografiska skalan verkar omfördelande på Östersjöns havsvattennivå.

2 Material och metod

2.1 Indata

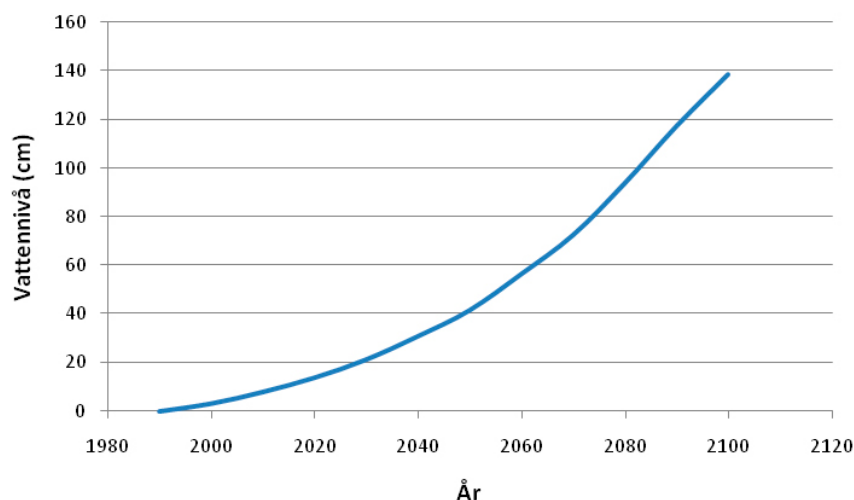
Som indata till föreliggande utredning har använts:

- Digitala höjdmodeller, SKB DEM 10x10 meter /Wiklund 2002/.
- Strandförskjutningsmodeller för Forsmark och Laxemar /Söderbäck (ed) 2008/.
- Fastighetskartan, Lantmäteriverket /SKB GIS/.
- Våghöjder vid extrema stormar /Brydsten 2009/.
- Litteraturuppgifter för den framtida förväntade globala vattennivån har hämtats från /Church 2001/, /Rahmstorf 2007/ samt /Pfeffer et al. 2008/. Rörande interregional omfördelning av den globala havsnivån till Östersjöns närmaste randhav d.v.s. Nordsjön, har uppgift från /IPCC 2007/ använts.
- Avseende påverkan på Östersjöns vattennivå har data från /Meier 2006/ använts. Detta data-underlag har bearbetats statistiskt och relaterats till höjdsystemet RH70 av /Nerheim 2008/, som även bidragit med uppskattning av den lokala uppskjuvningseffekten som den kopplade atmosfär-östersjömodellen inte förmår upplösa för Forsmarks del.

2.2 Metodikgenomgång

2.2.1 Global havsnivå och trender

I syfte att enligt ”värsta fallets princip” uppskatta den lokala havsnivån vid Forsmark och Laxemar/Simpevarp har utgått från det snabbast ökande scenario enligt /Rahmstorf 2007/. Dessa beräkningar baseras på korrelationsanalys (årlig vattenståndsförändringshastighet vs. uppmätt uppvärmning relativt perioden 1951–1980), se figur 2-1.



Figur 2-1. Förväntade globalhavsnivåhöjning 1990–2100 enligt det av /Rahmstorfs 2007/ snabbast ökande scenariot.

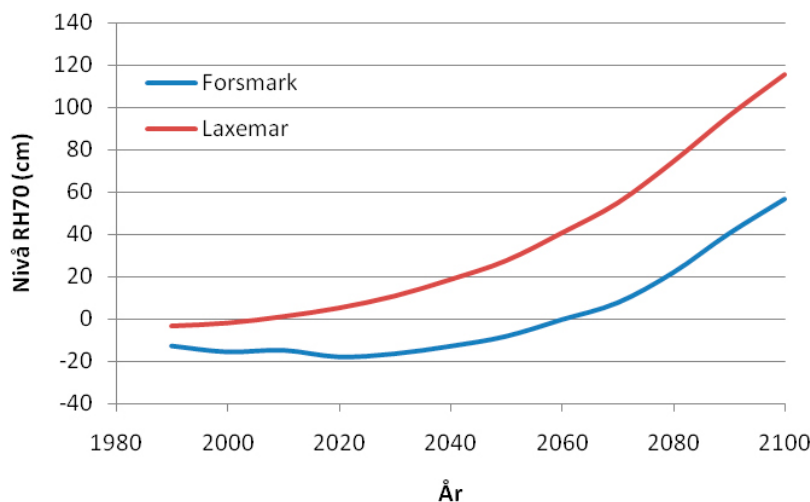
Enligt modellberäkningar redovisade av /IPCC 2007/ beräknas Nordsjön att stadigvarande få +20 cm högre nivå än det globala medelvärdet, vilket benämns mellanregional fördelning. Den inomregionala omfördelningen inom Nordsjöområdet har modellerats av /Woth et al. 2006/ och uppgår som högst till +7 cm i Skagerrak. För att konsekvent uppskatta det värsta fallet, medtas även detta episodiska bidrag, även om det måste bedömas som osannolikt att det skulle inträffa med en tillräcklig varaktighet och vid tidpunkter för att kunna accentuera extrema havsvattennivåer i Östersjön.

/Meier 2006/ har beräknat den lokala påverkan på vattenståndet utmed Östersjökusten utgående från det maxvärde som angavs av /Church et al. 2001/ och andra förväntade klimatfaktorer. Dessa resultat har i efterhand behandlats statistiskt av /Nerheim 2008/ så att de gjorda antaganden om global havsnivå och landhöjning har eliminerats. Kvar blir påverkan på vattennivån med avseende på förväntad atmosfärisk och hydrologisk drivning i framtiden. De i /Meiers 2006/ östersjömodell mest närliggande gridpunkterna för Forsmark och Laxemar/Simpevarp har analyserats med denna metod och statistik för extremvattennivåerna för de två 30-årsperioderna 1961–1990 samt 2071–2100 har tagits fram för jämförelse. Dessa har omräknats till 100-års återkomstvärden relativt medelvärdet för havsnivån för de två aktuella slutförvarplatserna. I de föreliggande uppskattningarna har denna statistik förflyttats tidsmässigt till att representera medelvärdet för havsnivån år 2100 och föreliggande 100-års återkomstvärden avser därför en period ± 50 år centrerad kring år 2100. Sannolikheten att de för Östersjön angivna lokala extremnivåerna kommer att uppnås eller överträffas någon gång under denna 100-års period anges med detta betraktelsesätt som 63% och att de inträffar före år 2101 blir då 40%.

2.2.2 Isostasi

Den globala höjningen av havsnivån motverkas lokalt av den isostatiska landhöjning, som förekommer vid Forsmark och Laxemar/Simpevarp. Med strandförskjutningsekvationerna för de två platserna /Söderbäck ed. 2008/ kan isostasins framtida förlopp beräknas genom att subtrahera eustasin från strandförskjutningen. Därigenom kan Rahmstorf's prediktion justeras lokalt för isostasin för respektive plats (figur 2-2).

Skillnaden i havsnivåutveckling för de två platserna (figur 2-2) beror på den snabbare landhöjningen i Forsmark. Figur 2-2 visar också att det mest extrema vattenståndet kommer att inträffa i slutet av undersökningsperioden varför det fortsättningsvis enbart är av intresse att beräkna vattenståndet för år 2100. För det mest extrema scenariot enligt /Rahmstorf 2007/ korrigerat för lokal isostasi är vattenståndet år 2100 maximalt +56 cm i Forsmark och +115 cm i Laxemar.



Figur 2-2. Prediktion av havsvattennivån enligt /Rahmstorf 2007/ justerat för isostasi och korrigerat till höjdsystemet RH70.

2.2.3 Årsextremer i dag och i framtiden

Förutom den långsamt föränderliga globala eustasin och lokala isostasin, förekommer kortvariga vattenståndsvariationer orsakade av det tillfälliga vädersystemet (lufttryck, vindar etc), figur 1-2c. Det högsta uppmätta vattenståndet i Forsmark inträffade år 2004 och uppgick till +144 cm över medelvattenstånd motsvarande +141 cm i höjdsystemet RH70. Motsvarande värde för Laxemar (Oskarshamn) är +100 cm i RH70. Dessa värden kan adderas till värdena ovan och ger då extremvärden uppgående till +200 cm för Forsmark och +215 cm för Laxemar.

Förutom höjda havsnivåer förväntas framtida klimatförändringar även innebära ökande vindhastigheter. Det innebär att de lokala vattenståndshöjningar som genereras av vädersystemen i framtiden kan bli högre än de värden som hitintills uppmätts. /Nerheim 2008/ har sammanställt dessa effekter för de två platserna (tabell 2-1).

De värden som anges i tabell 2-1 för ”Dagens klimat” skall alltså jämföras med de högsta uppmätta nivåerna. Värdet för Oskarshamn är något högre än det högst uppmätta, vilket är rimligt, däremot är värdet för Forsmark (+115 cm) klart lägre än den högst uppmätta (+144 cm). Orsaken är att de modellresultat som /Nerheim 2008/ analyserat inte motsvarar den upplösning som krävs för att korrekt belysa förhållandena inuti Öregrundsgrepen (Forsmark), utan det värde som anges gäller för öppna kusten norr om densamma. Den överslagsberäkning som anges för Forsmark uppgår till ca 20–30 cm över värdet vid öppna kusten, d.v.s. i intervallet +135 t.o.m. +145 cm för dagens klimat, d.v.s. värden som överensstämmer väl med uppmätt extremvärde.

I tabell 2-2 sammanfattas dessa beräkningar av extremvärdena för de två platserna för år 2100. Utöver /Rahmstorfs 2007/ prediktion av den globala eustasin finns även två andra uppskattningar som kan tas med för att belysa osäkerheten. Den första härrör från /IPCC 2007/ och ger en 79 cm lägre havsnivå jämfört med /Rahmstorfs 2007/; den andra svarar /Pfeffer et al. 2008/ för och innebär en motsvarande ökning med 62 cm. Med dessa värden har den resulterande totala havsnivån år 2100 med oförändrade värden för de övriga ingående processerna sammanställts i tabell 2-3.

Tabell 2-1. Beräknade återkomstnivåer (cm i RH70) med 100 års återkomsttid för höga vattenstånd vid öppna kusten. Med dagens klimat menas den meteorologiska referensperioden 1961–1990 /Nerheim 2008/. Framtida scenario för Forsmark måste korrigeras med tillägg av +30 cm p.g.a. lokal uppskjuvningseffekt, se text och tabell 2-2.

	Forsmark	Laxemar
Dagens klimat	115	109
Framtida scenario	141	137
Ökning	26	28

Tabell 2-2. Beräkning av de maximala havsnivåerna (cm i RH70) vid Forsmark och Laxemar/Simpevarp år 2100 utgående från /Rahmstorf 2007/.

Process	Forsmark	Laxemar	Källa
Global eustasi	138	138	Rahmstorf 2007
Lokal isostasi	-82	-23	Söderbäck ed. 2008
Global variation i Nordsjön	20	20	IPPC 2007
Lokal variation i Nordsjön	7	7	Woth et al. 2006
Lokal variation i Östersjön	171	137	Meier 2006 och Nerheim 2008
Totalt år 2100	254	279	

Tabell 2-3. De resulterande maximala havsnivåerna (cm i RH70) vid Forsmark och Laxemar/Simpevarp år 2100 utgående de tre angivna oberoende prediktionerna.

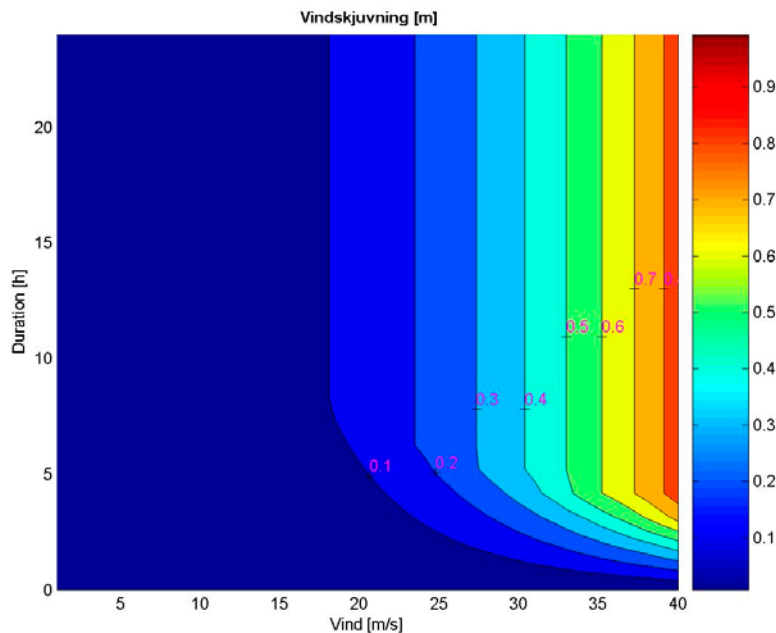
Källa	Forsmark	Laxemar
IPPC 2007	175	200
Rahmstorf 2007	254	279
Pfeffer et al. 2008	316	341

2.2.4 Oceanografiska synpunkter

På samma sätt som Östersjöns nivåer påverkas av vädersystemen, påverkas även Nordsjöns nivåer. En systematisk mellanregional förhöjning av havsnivån i Nordsjön påverkar Östersjöns nivå med i första approximation lika stor förhöjning förutsatt att densiteten i Nordsjövattnet inte samtidigt ändras. Den inomregionala förhöjningen i Nordsjön har modellerats av /Woth et al. 2006/ och uppgår till maximalt +7 cm. Den högsta höjningen beräknas ske vid den Danska västkusten. Vid Skagen uppgår höjningen till 5–7 cm men sjunker ytterligare mot Öresund och de Danska Bälten. Förmodligen kommer en lokal höjning av havsnivån i Nordsjön att få en reducerad amplitud i Östersjön då en sådan höjning bedöms ha en begränsad varaktighet i tiden. Detta gör att dess propagering genom de trånga och grunda sunden mellan Östersjön och Kattegatt innebär en dämpning. Dessutom måste de extrema nivåerna i Forsmark respektive Laxemar inträffa samtidigt (inom den tidsmarginal som propageringsfördröjningen från Nordsjöns motsvarar) för att dessa extremvärden skall samverka. I enlighet med att efterståva det värsta fallet har detta mindre bidrag ändå medtagits i tabell 2-2.

Under en årscykelns säsongsvariationer varierar det lokala vattenståndet utmed Östersjöns stränder bl.a med den sammantagna sötvattenavrinningen och dess densimetriska påverkan på täthetsskiktningen som i sin tur även bestäms av skiktningens förhållanden i Kattegatt. Vattenstånd och salinitet i det svenska västerhavet bestäms vidare i hög grad av drivningen via dess randområden d.v.s. Nordsjön gränsande till Atlanten. Att söka kvantifiera sådana externa drivningar faller utanför ramen för denna rapport. I stället är det av intresse att kunna relatera dessa till framtiden projicerade extremvattenstånd till oceanografiska processer som kan åstadkomma dem och som finns representerade i den modell som de åberopade statistiska data /Meier 2006/ grundas på. Det kan då direkt bortses från tidvatten som på de aktuella platserna uppskattas upp till maximalt +4 cm /Dietrich et al. 1975/. Inte heller förefaller de vattensvängningar (seicher) av långa ytvågor som lågtryckspassager kan komma att exitera av dominerande betydelse. En välkänd sådan seiche med en periodtid nära ett dygn är den med S:t Petersburg och södra Östersjön som ändpunkter (bukar). Forsmark och Laxemar/Simpevarp hamnar dock närmare dess nod och påverkas därför inte i någon beaktansvärd grad. Sådana seicher måste först exiteras av vindverkan och avklingar därefter p.g.a. friktion inom ett par periodtider om inte en ytterst osannolik ny vinddrivning i precis rätt fas ytterligare tillför energi.

Direkt vindverkan åstadkommer en uppskjuvning mot läkusten. Förutsatt att vindfetzen får tillräcklig tid att verka kommer en mättnadsfas att inträda vid vilken uppskjuvningen är direkt proportionell mot fetchlängden och kvadraten på vindstyrkan och omvänt proportionell mot medeldjupet utmed fetchen. I figur 2-3 visas den typ av lokal vindskjuvningsberäkning som /Nerheim 2008/ åberopar. De fetchlängder och medeldjup på östersjöskala som sammanhör med extrema vattenstånd skiljer sig inte avsevärt mellan Forsmark och Laxemar-Simpevarp. Med de 30% förväntade förhöjda vindar som enligt extremfallet (RCO-E/A2) /Meier 2006/ uppträder i östersjömodellen, kan de framräknade extremfallen till en dominerande del förklaras av sådana uppskjuvningseffekter. Annan påverkan på vattennivån såsom av lufttrycksvariationer inom Östersjön, Ekmandynamik, Kelvinvågor m.m. kan visserligen ge samverkande bidrag till incidenter med extremt förhöjda kustvattennivåer, men den dominerande enskilda faktorn är vinduppskjuvningen. Rekylen om vindskjuvningen abruptt upphör går radikalt snabbare med en lång ytvågs hastighet ca 25 m/s, vilket kan exitera seicher enligt ovan.



Figur 2-3. Uppskattning av vinduppskjuvning med avseende på vindfart och varaktighet. För att som enda process åstadkomma den av /Nerheim 2008/ framräknade uppskjuvningen +20 cm för Forsmark skulle alltså krävas t.ex. en stormvindstyrka av 24 m/s under minst 5 timmar. De ytterligare 10 cm som /Nerheim 2008/ anger, motsvarar en initial vågeffekt /Sture Lindahl (SMHI), pers. comm./.

2.2.5 Återkomsttider

De data som /Meier 2006/ räknar fram motsvarar återkomsttider av 100 år d.v.s. att under ett godtyckligt utvald år under 100-års perioden är sannolikheten *a priori* 1% att denna nivå tangeras eller överskrids. Sannolikheten att så kommer att ske någon gång under dessa 100 år blir då ca 63%. Detta bedöms ofta som en otillräcklig säkerhetsnivå.

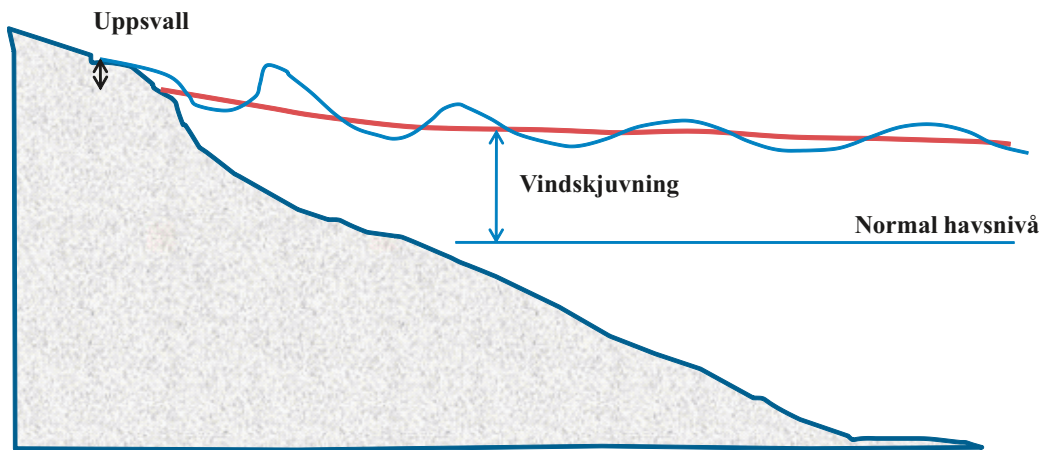
Om man utgår från teorin för extremvärdens statistiska fördelning /t.ex. Gumbel 2004/ och dubblar 100-års återkomstnivån, så erhålls en 10 000-års återkomstnivå. Det motsvarar 99% sannolikhet att detta värde *inte* kommer att överstigas under de 100 år som fördelningen gäller för, d.v.s. i vårt fall 2051–2150. Denna förhöjda säkerhetsnivå har inte tagits med i vår redovisning av förväntade vattennivåer år 2100, utan vi har i stället valt att redovisa osäkerheten som skillnaderna år 2100 mellan tre oberoende uppskattningar av den globala havsnivån.

2.2.6 Våguppsvall

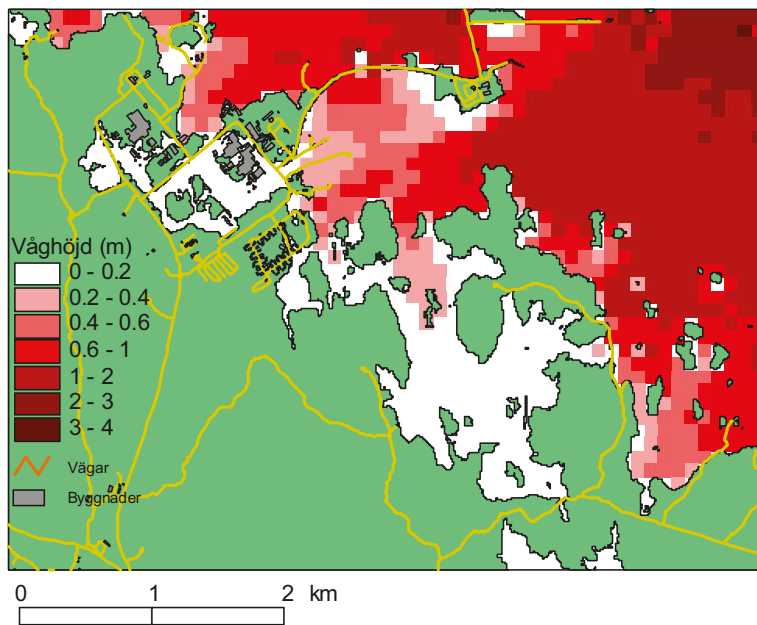
Ovanpå olika vattenståndshöjningar orsakade av eustasiska och isostasiska processer skall adderas kortvariga höjningar orsakade av vindgenererade vågor. Vid stormtillfällen höjs vattenytan dels av en ansamling av vatten längs stranden som exponeras mot vågorna (vindskjuvning) och dels av uppsvallet, d.v.s. den del av stranden som bara tidvis är våt (figur 2-4). Vindskjuvningen är inkluderat i de nivåvärden som anges i 2.2.3 men inte uppsvallet.

Uppsvallet beror av ett stort antal faktorer såsom vågens höjd vid stranden, strandlutningen, vågens vinkel mot stranden, strandmaterialens egenskaper m.m. /Silvester 1974/. I brist på andra data än våghöjd kan man grovt räkna med att uppsvallet på en naturlig strand mycket sällan överstiger höjden på den brytande vågen men kan ändå uppgå till flera meters höjd och bör därför ingå i en bedömning av sannolikheten för en översvämning.

Figur 2-5 visar modellerad våghöjd i Forsmark för en nordlig storm med en vindstyrka på 25 m s^{-1} . I Öregrundsgrepens nordliga del uppgår våghöjden till mer än 7 meter men sjunker snabbt ner mot Forsmark. Den pir som är byggd i anslutning till SFR läär stränderna söder om denna, varför våghöjderna här är måttliga ($< 0,4 \text{ m}$). Den högsta våghöjden i strandnära läge (1,15 m) återfinns vid udden rakt söder om SFR.



Figur 2-4. Havsnivåförändringar orsakade av vindgenererade vågor.

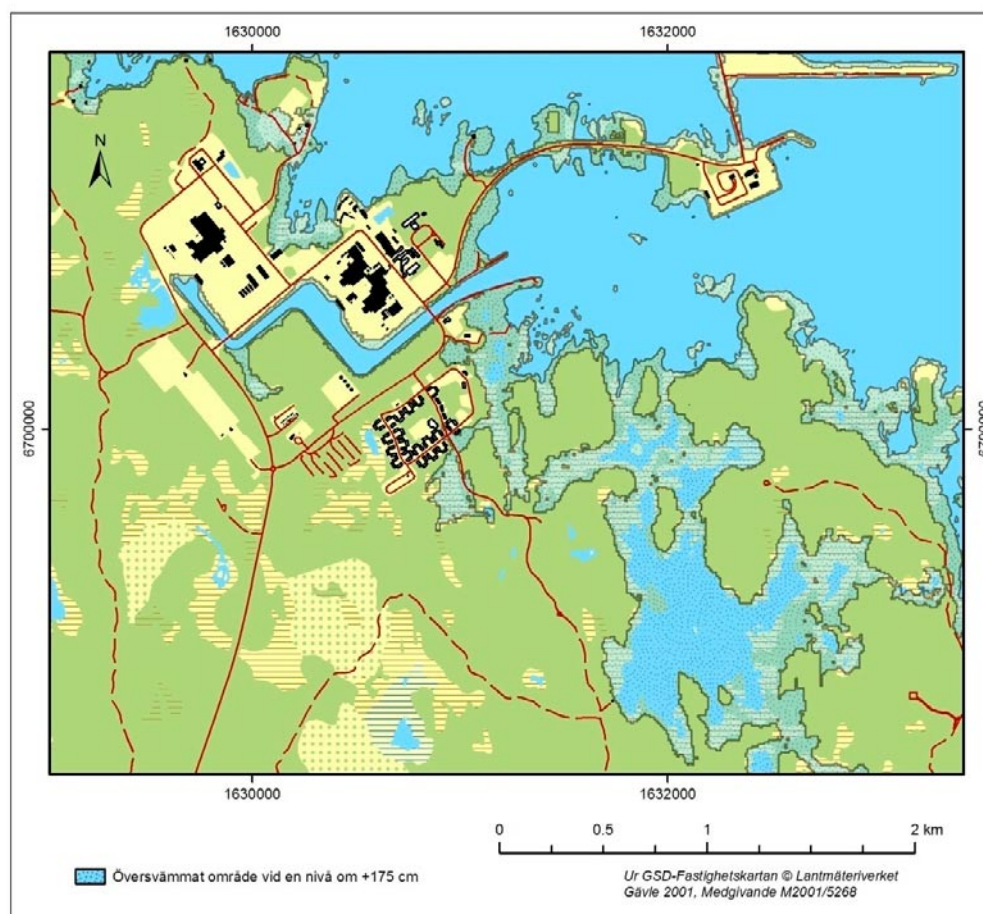


Figur 2-5. Beräknade våghöjder under stormstyrka år 2100 för Forsmark.

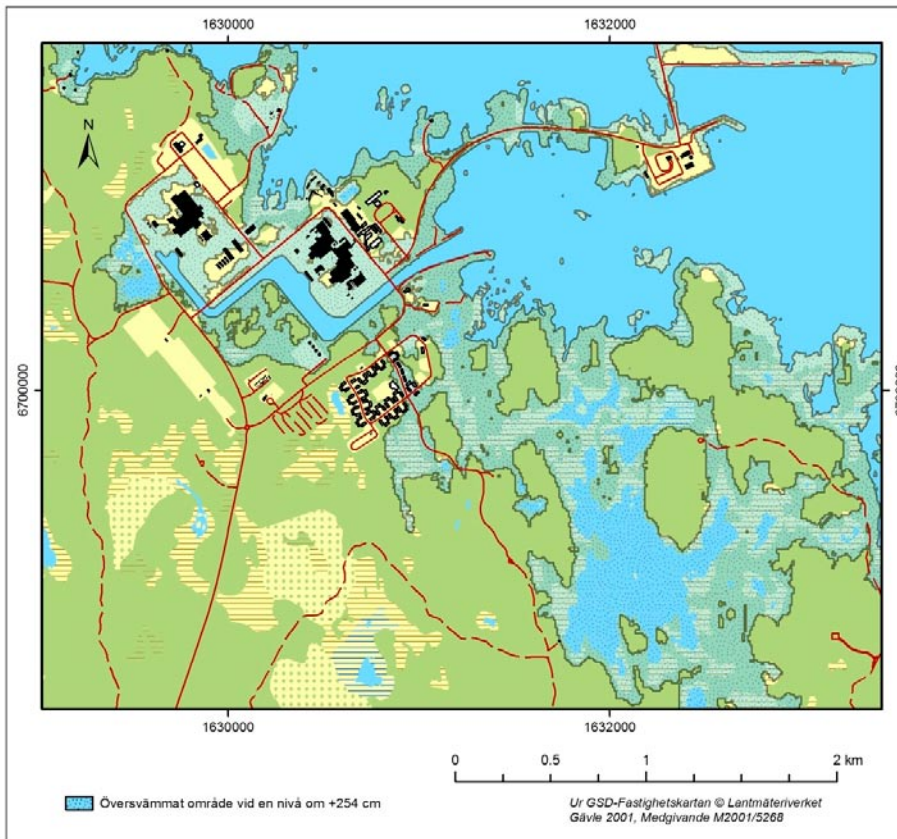
3 Extrema lokala påverkansnivåer

3.1 Forsmark

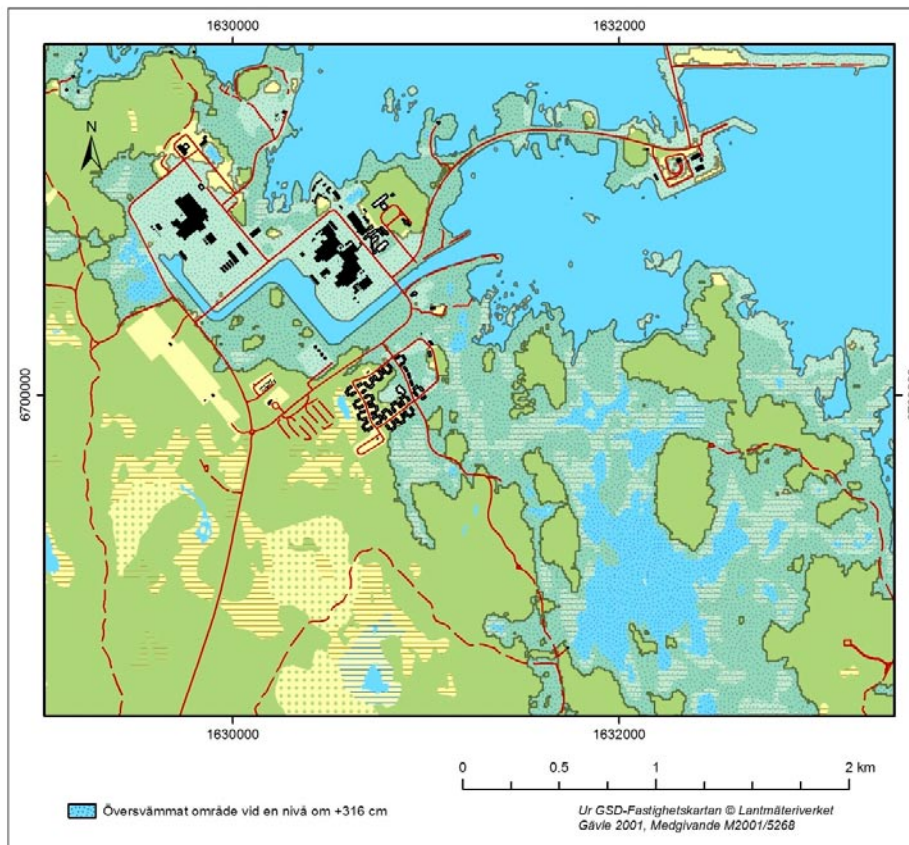
Figurerna 3-1-3-3 visar vilka områden som kommer att översvämmas om havsvattennivån uppgår till +175, 254 och 316 cm över referensnivån i höjdsystemet RH70 (tabell 2-3). Vid nivån +175 cm blir konsekvenserna förhållandevis små medan vid +254 cm är både vägar och kraftverket påverkade. Vid en havsnivå på +316 cm blir det mycket allvarliga konsekvenser.



Figur 3-1. Område som riskerar översvämmas vid en extremnivå om +175 cm i Forsmark år 2100.



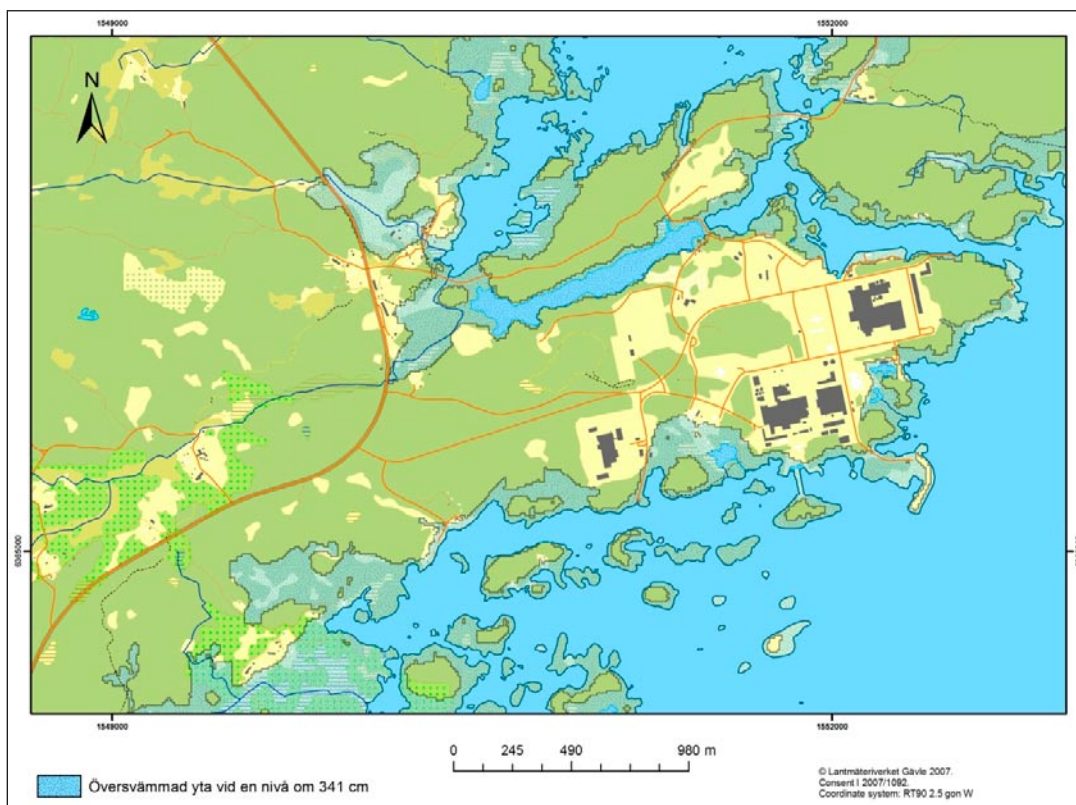
Figur 3-2. Område som riskerar översvämmas vid en extremnivå om +254 cm i Forsmark år 2100.



Figur 3-3. Område som riskerar översvämmas vid en extremnivå om +316 cm i Forsmark år 2100.

3.2 Laxemar-Simpevarp

Området i Laxemar-Simpevarp präglas av förhållandevis branta stränder vilket medför att även en stor vattenståndshöjning ger relativt små översvämmade areor. Figur 3-4 visar översvämmade areor vid en vattenståndshöjning på 341 cm (tabell 2-3) och att konsekvenserna på infrastrukturen skulle bli måttliga även för detta mest extrema fall.



Figur 3-4. Område som riskerar översvämmas vid en extremnivå om +341 cm i Laxemar år 2100.

4 Diskussion

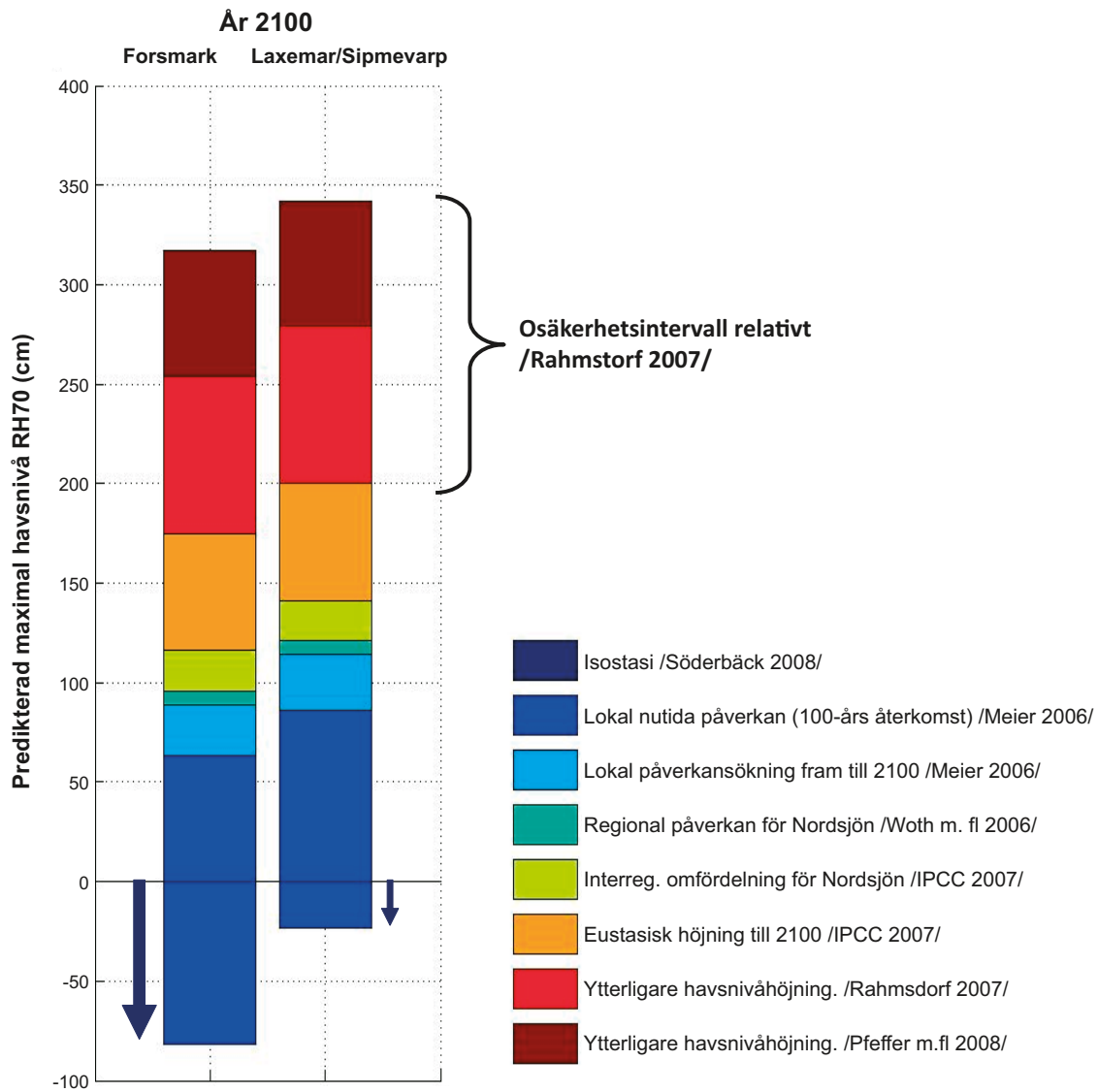
Den maximala globala havsnivåhöjningen som angavs av IPCC år 2001 baserades på en syntes av /Church et al. 2001/ och angavs till +88 cm år 2100 relativt ett referensår i början av 1950-talet. Denna maximala nivåhöjning modifierades senare till +59 cm /IPCC 2007/. Skillnaden mellan dessa uppskattade värden beror vid närmare granskning väsentligen på hur risker för extrema globala havsnivåförhöjningar värderas och hur de presenteras statistiskt med olika grader av konfidens /Markus Meier pers. medd./. Det maximala värdet från /IPCC 2007/ har relaterats till av /Rahmstorf 2007/ som dock ger en väsentligt högre prediktion av den globala havsnivåhöjningen fram till år 2100. Skillnaden mellan dessa två senare uppskattningar uppstår genom olika angreppsmetodik och ger därför både ett tydligare och mer rättvisande mått på de inneboende skattningsosäkerheterna än de två från IPCC med sex års tidsmellanrum. Den mellanregionala omfördelningen av den predikterade globala havsnivån år 2100 (se figur 1-2b) tillkommer utöver det mindre och osannolikt simultant samverkande bidraget av den inomregionala omfördelningen /Woth et al. 2007/.

Senare uppskattning av /Pfeffer et al. 2008/ visar på två sannolika fall med havsnivåhöjningar (relativt år 2000) uppgående till +79 cm resp. +83 cm. /Pfeffer et al. 2008/ beskriver även ett mindre sannolikt, men möjligt, fall där beräknade maximala isflöden för Grönländska och Västantarktiska inlandsisarna resulterar i en global havsnivåhöjning på +200 cm år 2100, d.v.s. +141 cm över /IPCC 2007/. Det bedöms här inte som meningsfullt att i nuläget tilldela *a priori*-sannolikheter åt dessa tre skiljaktiga prediktioner av den framtida globala havsnivåförändringen.

De presenterade uppskattningarna (tabell 2-3 och figurena 3-1–3-4) grundar sig alltså på i nuläget tillgängliga litteraturuppgifter. Rapporten redovisar vad som kan hända vid ackumulerade effekter av tänkbara framtida processer spännande över den globala, regionala och lokala skalan. Dessa utvalda processer kännetecknas av att de är ogynnsamma vad avser möjligt förhöjda vattenstånd på de två aktuella platserna vid Östersjökusten men kan ändå inte avfärdas som orealistiska. Dock bör man ha i åtanke att forskningsområdet kring hur stor den globala havsnivåhöjningen skulle kunna manifesteras sig år 2100 är inne i en mycket intensiv fas, och att stora osäkerheter ännu finns inom detta område. Relativt /Rahmstorfs 2007/ snabbaste ökningsfall fram till år 2100 (138 cm) utgör differensen till /IPCC:s 2007/ uppskattning ($59-138 = -79$ cm) en nära nog till beloppet lika stor differens till det extremvärde som /Pfeffer m.fl 2007/ anger ($200-138 = +62$ cm). Dessa differenser kan därför tjäna som ett mått på osäkerheten för dessa uppskattningar (se figur 4-1). Konsekvenserna för strandlinjerna vid dessa tre möjliga extrema havsvattennivåer år 2100 har åskådliggjorts i form av GIS-kartor.

Vi vill också påpeka att vågsvall inte är medräknade i de siffror som redovisas. Vågsvall redovisas endast som våghöjd vid strand och denna effekt får bedömas från fall till fall utifrån platsegenskaper. Modellerna visar att stora ytor kan komma att påverkas under en eller flera korta tidsperioder. Beroende på vilka beräkningsfall man väljer att utgå ifrån får man olika resultat. Den av /Meier 2006/ noterade icke-linjärt ökande effekten på extremnivåerna när medelvattennivån förhöjs, har inte försökts att kompenseras för i denna sammanställning. Om så görs blir ytterligare förhöjda nivåer mer sannolikt möjliga att realiseras fram till 2100.

Kritiska synpunkter på /Rahmstorf 2007/ finns i bilaga 1 nedan. Vår bedömning är att dessa invändningar nöjaktigt har besvarats av Stefan Rahmsdorf själv i form av kommentarer i den internet-referens som återfinns i samma bilaga. Den ytterligare accentuerade förhöjningen av havsnivå som /Pfeffer et al. 2008/ anför som det mest extrema fallet – baserat på maximalt uppmätta glaciärtransporthastigheter – utgör ett extremscenario som sannolikt kommer att begränsas av andra processer.



Figur 4-1. Grafisk presentation av den gjorda sammanställningen av predikterade bidrag som resulterar i havsnivåns möjliga extremläge för Forsmark och Laxemar/Sipmevarp år 2100 relativt höjdsystemet RH70. Isostasin har markerats med nedåtriktade pilar enligt färgskalan. Som ett primärt mått på osäkerheten rörande de tre eustasiska bidragen har detta angetts med en klammer centrerad kring /Rahmstorfs 2007/ prediktion, som motsvaras av den övre kanten för den röda stapeln.

5 Referenser

Brydsten L, 2009. Sediment dynamics in the coastal areas of Forsmark and Laxemar during an interglacial. SKB TR-09-07. Svensk Kärnbränslehantering AB.

Church J A, Gregory J M, Huybrechts P, Kuhn M, Lambeck K, Nhuan M T, Qin D och Woodworth P L, 2001. 'Changes in Sea Level', in *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, eds. Houghton and Ding, Cambridge Univ. Press, Cambridge.

Dietrich G, Kalle K, Krauss W och Siedler G, 1975. *Allgemeine Meereskunde*. Gebrüder Borntraeger. Berlin. ISBN 3 443 01016 4. 593 sid.

Fastighetskartan, SKB GIS database.

Gumbel E J, 2004. *Statistics of Extremes*. Dover. ISBN: 0486436047.

IPCC, 2007. Meehl G A, T F Stocker, W D Collins, P Friedlingstein, A T Gaye, J M Gregory, A Kitoh, R Knutti, J M Murphy, A Noda, S C B Raper, I G Watterson, A J Weaver and Z-C Zhao, 2007: Global Climate Projections (Chapter 10). In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon S, 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.

Meier M, 2006. Baltic Sea climate change in the late twenty-first century: a dynamical downscaling approach using two global models and two emission scenarios. *Climate Dynamics*, 27, 39–69.

Nerheim S, 2008. Extrema vattenstånd för ett högt klimatscenario perioden 2071–2100 för Forsmark och Oskarshamn. SMHI rapport 2008–80. 5 sid.

Pfeffer W T, Harper J T och O'Neet S, 2008. Kinematic constraints on glacier contributions to 21st-century sea-level rise. *Science*, 321, 1340–1343.

Rahmstorf S, 2007. A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science*, 315, 368–370.

Silvester R, 1974. *Coastal Engineering*, 1. Elsevier, Amsterdam.

Söderbäck (ed), 2008. Geological evolution, palaeoclimatology and historic development in the Forsmark and Laxemar /Simpevarp areas. Site descriptive modelling. SDM-Site. SKB R-08-19.

Wiklund S, 2002. Digitala ortofoton och höjdm modeller. Redovisning av metodik för platsundersökningsområdena Oskarshamn och Forsmark samt förstudieområdet Tierp Norra. SKB P-02-02 Svensk Kärnbränslehantering, Stockholm, Sverige.

Woth K, Weisse R och von Storch H, 2006. Climate change and North Sea storm surge extremes: an ensemble study of storm surge extremes expected in a changed climate projected by four different regional climate models. *Ocean Dynamics* (2006), 56: 3–15. DOI 10.1007/s10236-005-0024-3

Synpunkter på /Rahmstorf 2007/ samt svar på dessa synpunkter

COMMENT ON “A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise” Simon Holgate, Svetlana Jevrejeva, Philip Woodworth, Simon Brewer Rahmstorf (Reports, 19 January 2007, p. 368) presented an approach for predicting sea-level rise based on a proposed linear relation between global mean surface temperature and the rate of global mean sea-level change. We find no such linear relation. Although we agree that there is considerable uncertainty in the prediction of future sea level rise, this approach does not meaningfully contribute to quantifying that uncertainty. Full text at www.sciencemag.org/cgi/content/full/317/5846/1866b.

COMMENT ON “A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise” Torben Schmith, Søren Johansen, Peter Thejll Rahmstorf (Reports, 19 January 2007, p. 368) used the observed relation between rates of change of global surface temperature and sea level to predict future sea-level rise. We revisit the application of the statistical methods used and show that estimation of the regression coefficient is not robust. Methods commonly used within econometrics may be more appropriate for the problem of projected sea-level rise. Full text at www.sciencemag.org/cgi/content/full/317/5846/1866c.

RESPONSE TO COMMENTS ON “A Semi- Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise” Stefan Rahmstorf: Additional analysis performed in response to Holgate et al. and Schmith et al. shows that the semi-empirical method for projecting future sea-level rise passes the test of predicting one half of the data set based on the other half. It further shows that the conclusions are robust with respect to choices of data binning, smoothing, and detrending. Full text at www.sciencemag.org/cgi/content/full/317/5846/1866d 1866.