

**Signild Nerheim och Johan Södling**

**RAPPORT NR 66**

## **Havsnivåer i Kalmar län**



*Pärbild.*

*Bilden föreställer Färjestaden på Öland. Foto: Sten Bergström, SMHI*

Författare:  
S. Nerheim, J. Södling

Uppdragsgivare:  
Länsstyrelsen i Kalmar län

Granskningsdatum:  
2014-12-19  
2014-05-12

Granskare:  
Håkan Persson  
Sofia Åström

Dnr:  
2014/1994/9.5

Version:  
1.2

## Havsnivåer i Kalmar län

---

Uppdragstagare

SMHI  
601 76 Norrköping

Projektansvarig

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

---

Uppdragsgivare

Länsstyrelsen Kalmar Län  
391 86 KALMAR

Kontaktperson

Lars Ljungström

---

Distribution

Länsstyrelsen i Kalmar län, Kalmar läns kustkommuner

---

Klassificering

Allmän  Affärssekretess

---

Nyckelord

Global havsnivåhöjning, extrema havsvattenstånd, planering

---

Övrigt

Uppdaterad version 2015-02-23: Observationer från stormen Egon har inkluderats, i övrigt förtydliganden kring återkomsttid och sannolikhet.

2015-05-12: Nytt kapitel 5.3, 6.1, samt tillägg i sammanfattningen. Sofia Åströms granskning gäller nya delar i rapporten.

---



# Innehållsförteckning

<b>1</b>	<b>SAMMANFATTNING .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>BAKGRUND OCH SYFTE .....</b>	<b>1</b>
2.1	Kort om höjdsystem .....	1
<b>3</b>	<b>VAD PÅVERKAR HAVSNIVÅERNA? .....</b>	<b>2</b>
3.1	Extrema vattenstånd .....	2
3.1.1	Vågor och vinduppstuvning .....	2
3.2	Uppmätt vattenstånd nära Kalmar län .....	2
3.3	Globala havsvattenståndet - IPCC AR4 till AR5 .....	5
3.4	Landhöjning .....	6
3.5	Havshöjning i Kalmar län.....	6
<b>4</b>	<b>METOD .....</b>	<b>6</b>
4.1	Statistisk extremvärdesanalys .....	6
<b>5</b>	<b>RESULTAT .....</b>	<b>7</b>
5.1	Förändring av medelvattenståndet i Kalmar län .....	7
5.2	Extrema vattenstånd i Kalmar län.....	9
5.3	Påverkan på land .....	11
<b>6</b>	<b>DISKUSSION OCH SLUTSATSER .....</b>	<b>11</b>
6.1	Planeringsnivåer – på 50 och 100 års sikt.....	12
<b>7</b>	<b>FÖRDJUPAD BESKRIVNING .....</b>	<b>13</b>
7.1	Global havshöjning.....	13
7.2	Statistiska metoder.....	16
7.2.1	Val av sannolikhetsfördelning .....	16
7.2.2	Konfidensintervall .....	16
7.2.3	Goodness-of-fit .....	16
7.3	Återkomsttider i ett framtida klimat .....	17
7.4	Erosion, vågor och vattenstånd.....	17
<b>8</b>	<b>REFERENSER.....</b>	<b>20</b>



# 1 Sammanfattning

Länsstyrelsen i Kalmar län har beställt en uppdatering av beslutsunderlag som rör havsnivåerna 2100. De senaste resultaten från IPCC:s femte rapport, AR5, används för den globala vattenståndshöjningen. Uppgifter om lokal landhöjning används för att beräkna höjningen av medelvattenståndet lokalt, och observerade havsvattenstånd används för att beräkna extrema vattenstånd lokalt i dag och 2100. Underlaget ska användas för att ta fram riktlinjer för planering nära havet.

Havsvattenståndets variation påverkar verksamheter och bebyggelse nära kusten. Översvämningsrisk vid höga havsvattenstånd förekommer vid passerande lågtryck där atmosfärstryck och vindar samverkar så att vatten trycker på mot land. Det extrema vattenståndets höjd relativt land påverkas av den ostörda vattenytans läge. I ett framtida klimat kommer medelvattenståndet att vara högre än i dag. SMHI har tagit fram extrema vattenstånd för Kalmar län för dagens och framtidens förhållanden.

Vid samma tillfällen påverkas kusten oftast även av vågor som slår mot land, och i vikar och sund kan också vattenståndet vara högre än vid öppna kusten.

Beräknade extrema vattenstånd för Kalmar län år 2100 varierar mellan 220 och 230 cm i RH2000. Resultatet gäller för den högsta globala havshöjningen enligt IPCC (+98 cm från 1990 till 2100), och för en statistisk fördelning motsvarande 100 respektive 300 års återkomsttid. En återkomsttid på 100 år motsvarar 1 % sannolikhet varje enskilt år. En återkomsttid på 300 år motsvarar 0,33 % sannolikhet varje enskilt år.

Planering för stigande havsnivåer gäller framförallt för det som händer på lång sikt. Riskerna för ökande översvämningsrisker på kort sikt är betydligt lägre.

- Stigande havsnivåer påverkar inte sannolikheten för översvämningar från havet väsentligt från nu och några decennier fram i tiden
- På 50 års sikt kan havsnivåns höjning lokalt komma att bli ca 20-30 cm högre än idag, med måttligt högre risker för översvämningar jämfört med idag
- För planering på längre sikt än 2100 är det viktigt att förstå att havshöjningen inte slutar år 2100

## 2 Bakgrund och syfte

I och med att IPCCs femte sammanställning (AR5) publicerades 2013 har Länsstyrelsen i Kalmar vänt sig till SMHI för att få beräknade extrema havsvattenstånd för Kalmar länbaserat på de senaste resultaten.

Syftet är att ge underlag för fysisk planering i Kalmar län.

Rapportens beskriver hur extrema vattenstånd förekommer i länet. Extrema vattenstånd med olika återkomsttider beräknas med hjälp av statistiska metoder. Analysen utförs för dagens klimat, och för framtidens klimat. Rapportens huvuddelar beskriver metoder och resultat relativt kortfattat, medan en mer detaljerad beskrivning av processer och metoder finns i senare stycken.

### 2.1 Kort om höjdsystem

SMHI mäter vattenståndet i ett lokalt höjdsystem, alltså i anknäytning till en fixpunkt vid själva mätaren. Sedan räknas vattenståndet om och relateras till årets beräknade medelvattenstånd. Här har betydelsen av landhöjningen tagits bort, så att det går att jämföra extremer mellan åren, även i områden där landhöjningen är stor.

För planering måste nivåerna anges relativt fasta höjder på land. Medelvattenytans höjd i år ligger vid något värde i till exempel RH2000, Rikets höjdsystem 2000. I Sverige har vi varit vana vid att medelvattenytans nivå i de fasta höjdsystemen har sjunkit, men i takt med att globala havshöjningen snabbar på, kommer detta att ändras.

### **3 Vad påverkar havsnivåerna?**

#### **3.1 Extrema vattenstånd**

Havsvattenståndet varierar i tid och rum längs med den svenska kusten. Höga havsvattenstånd inträffar när lufttryck och pålandsvindar samverkar i att lyfta och trycka vattenmassor upp och in mot kusten. Stora lokala variationer förekommer.

Östersjön fungerar till stor del som en badbalja. Svängningarna är störst nära baljans ändar, vilket betyder att det är högre extremer i norra Bottenhavet och i södra Östersjön än mitt på. Baljan kan också vara mer eller mindre full, eftersom det tar tid att fylla på och tömma Östersjön. Under blåsiga höstar brukar Östersjön långsamt att fyllas allt mer, och när det då förekommer stormar eller andra förhållanden som ger höga vattenstånd så startar dessa från ett högre utgångsläge vilket gör att vattnet når högre än om det hade startat från en lägre utgångsposition.

Kalmar län med sin belägenhet i södra delen av egentliga Östersjön upplever alltså oftare höga vattenstånd än vad Stockholm närmare mitten av bassängen gör, och många av Östersjöns rekord har inträffat under perioder där den generella vattennivån varit förhöjd.

##### **3.1.1 Vågor och vinduppstuvning**

Vid samma tillfällen som vattenståndet i havet är högt är det också vanligt med kraftiga vågor in mot kusten. Vågorna blir högst där det är djupt vatten nära kusten, och där det är öppet vatten. Det kan därför förväntas vara större vågor på ostsidan av Öland än i Kalmarsund vid östlig vind.

Kraftiga vindar kan också ge lokala effekter i vikar och sund då vattnet som trycker på inte har någonstans att ta vägen vilket ger högre vattenstånd inne i viken än utanför. Detta sker speciellt i grunda vikar eftersom vattnet i djupare områden tar sig ut igen längs botten. Man skulle kunna befara att effekten är vanligt förekommande i Kalmarsund, och det är det förmodligen också, men inte vid samma vindriktning som ger de mest extrema vattenstånden.

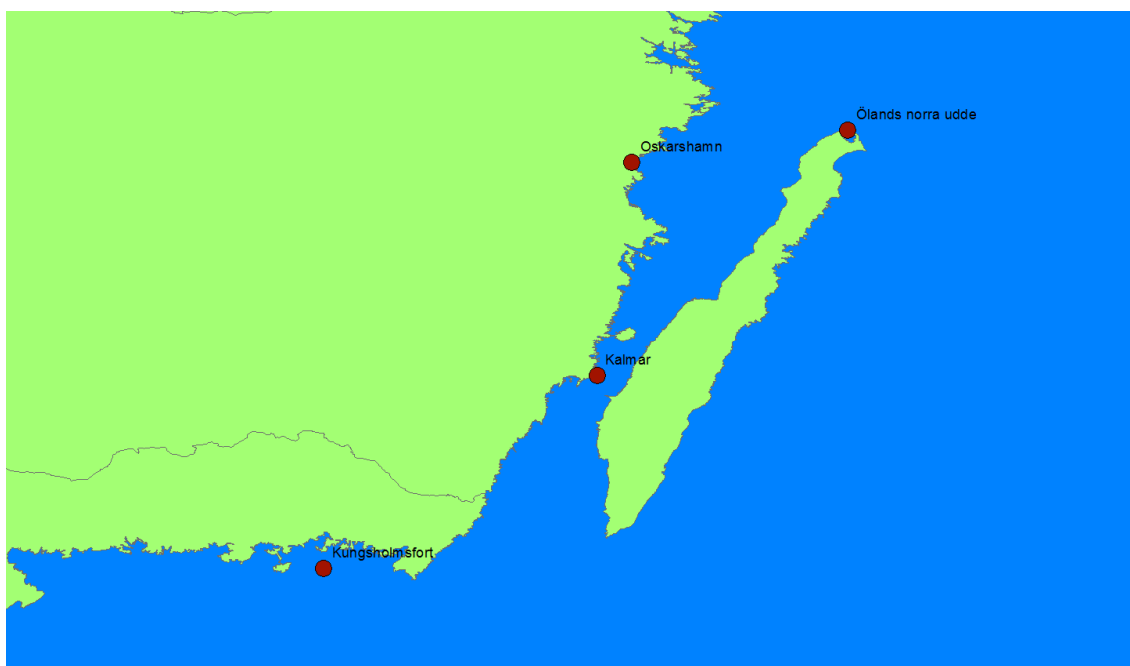
#### **3.2 Uppmätt vattenstånd nära Kalmar län**

När extrema vattenstånd ska beskrivas i detalj används statistiska metoder, och det är viktigt att ha en stor mängd data från en lång tidperiod med hög kvalitet som underlag för beräkningarna. Tre av SMHI:s mätstationer är relevanta att studera för att ta fram resultat för Kalmar län; Kungsholmsfort vid Karlskrona, Ölands norra udde och Oskarshamn. Figur 1 visar mätstationernas belägenhet, tillsammans med mätstationen från Sjöfartsverkets ViVa-nät i Kalmar.

Mätningarna från Kungsholmsfort ligger i Blekinge men är av speciellt stort intresse för södra länet då denna mätserie både är lång och håller hög kvalitet. Den är dessutom samlokaliserad med Lantmäteriverkets GPS-mätstation för landhöjning. Mätningarna vid Ölands norra udde startades 1851, men där är det dygnsvärden fram till 1961 så mätserien har inte lika hög kvalitet. Mätningar i Oskarshamn startade 1961.

SMHI har tillgång till Sjöfartsverkets ViVa-data från 2009 och framåt. Sjöfartsverkets data från Kalmar har använts för att illustrera samvariationen längs kusten. Återkomsttider har beräknats enbart på SMHI-stationerna eftersom Kalmar-data inte finns för tillräckligt många år för att utföra analysen.





Figur 1. Kartbild över de vattenståndsstationer som användes i analysen. Kungsholmsfort i Blekinge används för att ta fram resultat för södra länet.

Positioner för de tre SMHI-stationerna visas i Tabell 1 och för Sjöfartsverket i Tabell 2:

Tabell 1. SMHIs mätstationer i och nära Kalmar.

Namn	Stations-ID	Longitud	Latitud	Data från	Data till	Mängd data
Kungsholmsfort	2088	15,5894	56,1052	1886-12-31	Idag	127 år
Oskarshamn	2085	16,4779	57,2749	1960-09-15	Idag	53 år
Ölands norra udde	2083			1851-08-01	Idag	163 år

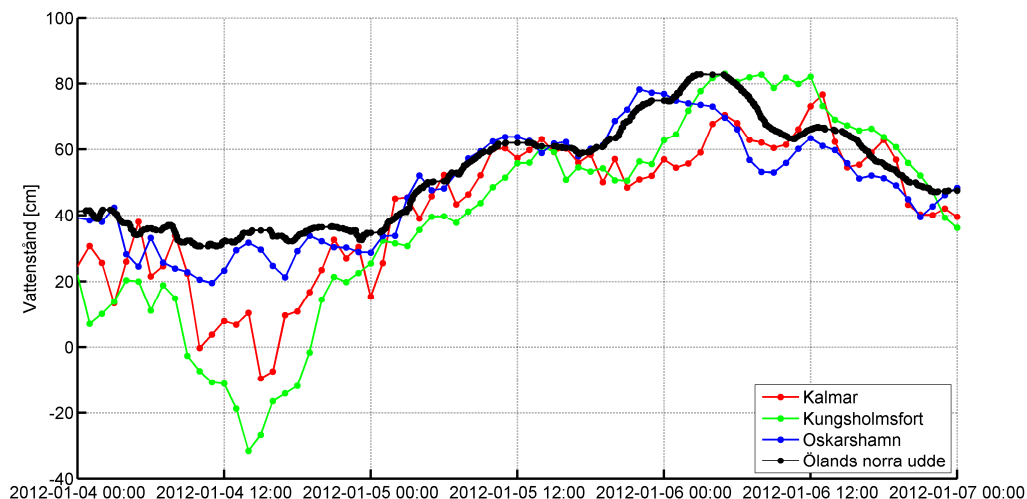
Tabell 2. Sjöfartsverkets mätstation i Kalmar.

Namn	Stations-ID	Longitud	Latitud	Data från	Data till	Mängd data
Kalmar	35105	16,3783	56,6593	2009-04-23	Idag	4 år

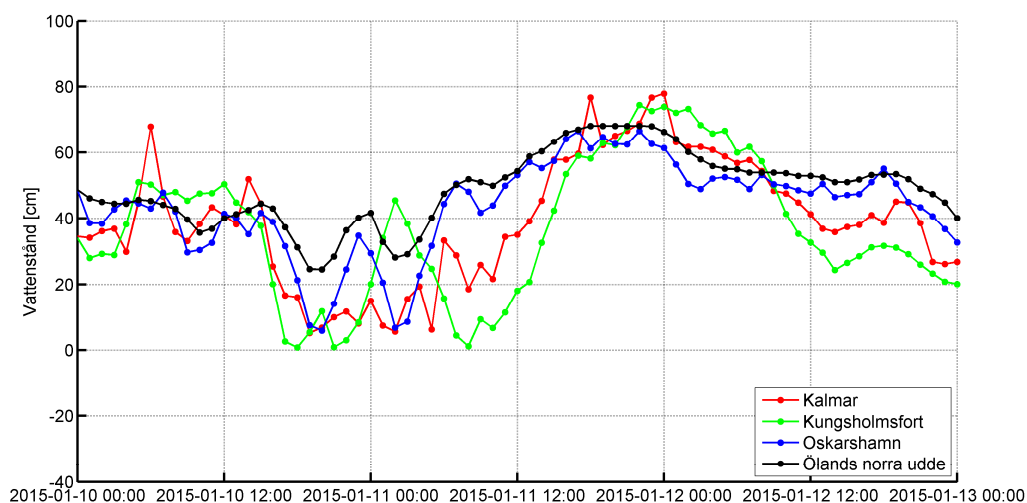
En viktig fråga att belysa är huruvida variationer i länet är relativt likartade, eller om någon mätstation oftast visar högre eller lägre vattenstånd än de andra vid ett högvattentillfälle. Om det är god samvariation kan man utgå ifrån att resultat från någon av mätstationerna är relativt representativt även för övriga länet.

Figur 2 visar ett tillfälle av höga vattenstånd för alla fyra stationer från ett tillfälle med högt vattenstånd under tidperioden som det finns data tillgängliga för. Vid vattenståndsmaximum är nivåerna identiska vid Kungsholmsfort och Ölands norra udde, men lite lägre utanför Kalmar och Oskarshamn. Den exakta fördelningen kommer att variera lite från fall till fall, men genomgående är samvariationen så god att årsmax från båda de två längsta mätserierna bedöms vara representativa för länet.

Figur 3 visar vattenståndet under stormen Egon som drog in över Sverige den 10 januari. Vattenståndet som uppnås är något lägre än i exemplet från 2012, och det är god samvariation när vattenståndet är högt. Innan vattenståndet når sitt maximum är det tydliga skillnader mellan stationerna vilket beror på var lågtrycket passerar och vilka vindar som då är förhärskande.



Figur 2. Ett exempel på att det är stor grad av samvariation i havsvattenståndet vid höga vattenstånd i Kalmar län. Vid låga vattenstånd är bassängeffekten mer utpräglad och utslaget är större i södra delarna.



Figur 3. Vattenståndet under stormen "Egon" januari 2015. Stormen Egon drog in över Sverige 10 januari, och den 11 januari passerade lågtrycket så att vattenståndet blev högt längs Kalmars kust.

Medelvärdet av alla årshögsta vattenstånd (jämfört med medelvattenståndet) är högst i Kungsholmsfort, 75 cm, vilket beror på att svängningen i bassängen påverkar mer i södra delen Östersjön. Medelvärdet för Oskarshamn är 68 cm och för Ölands norra udde 70 cm. Medelvärdet för Kungsholmsfort från 1961 fram till idag, alltså den period som är gällande för Oskarshamn, är 79 cm.

### 3.3 Globala havsvattenståndet - IPCC AR4 till AR5

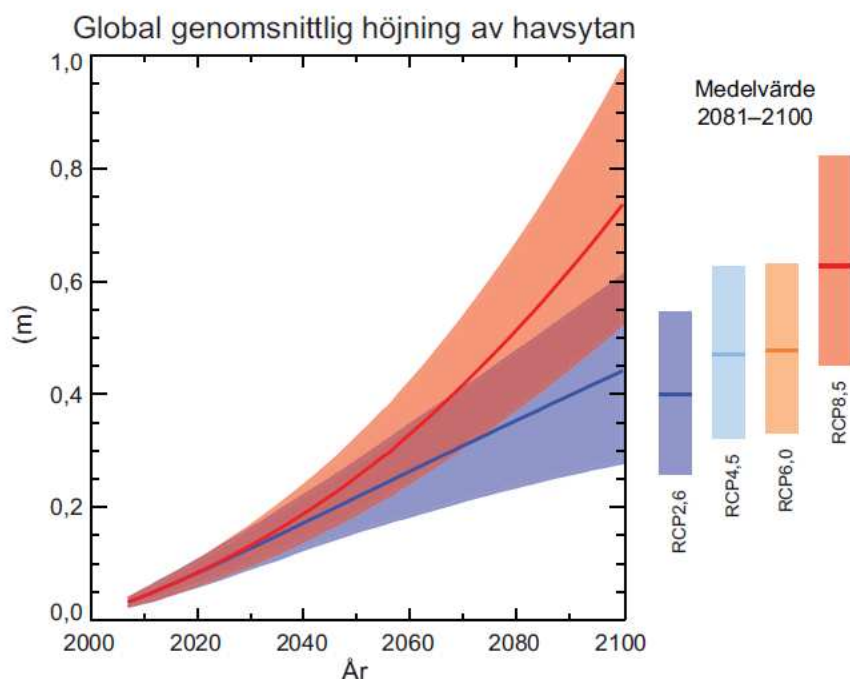
När havet stiger stiger också utgångsläget för alla sorters vattenståndsvariationer. En storm som har potentialen att höja vattenståndet +1 m idag har i framtiden samma potential att höja havsytan – skillnaden är att om medelvattenståndet är 50 cm högre än idag så kommer den resulterande nivån vara +150 cm jämfört med dagens medelvattenstånd.

Observationer visar att havet har börjat stiga snabbare än förut. I Sverige har havshöjningen inte varit kännbar i stora delar av landet, men nu börjar det bli allt tydligare.

Figur 4 visar den globala havshöjningen enligt fyra möjliga framtidsscenarion som ger olika stora utsläpp av växthusgasar. De fyra staplarna visar höjningen för åren 2081-2100. Den högsta höjningen återfinns för RCP8,5. För året 2100 är höjningen enligt RCP8,5 52 till 98 cm (tabell 13.5, IPCC AR5).

I resultaten har den högsta nivån från IPCC:s femte rapport, AR5, använts. Det innebär en global höjning om 98 cm från 1990 till 2100.

FIGUR SPM.9



Figur 4. Genomsnittliga globala havsnivåhöjning fram till 2100 jämfört med 1986-2005. Resultaten är från en kombination av globala modeller, och tidsförloppet visas för två utsläppsscenarier, RCP2,6 och RCP8,5, både som median och som 90 % av alla resultaten. Resultat för perioden 2081-2100 visas för alla RCP-scenarier som färgade vertikala staplar med motsvarande medianvärde som en horisontell linje. Det högsta scenariot, RCP8,5 leder till en höjning av havsytan på mellan 52 och 98 cm för 2100. Medianvärdet för åren 2081-2100 är 45-82 cm vilket visar att mycket av höjningen sker mot slutet av seklet. Källa: IPCC AR5, Summary for policy makers, figur 9.

### 3.4 Landhöjning

Redan i början på 1700-talet observerades att jorden höjde sig i Norden. Eftersom man trodde att det var havsvattnet som försvann kallades fenomenet då för vattuminskning. Idag vet vi att det är landet som höjer sig efter att ha varit tungt belastat av den kilometertjocka isen under senaste istiden. Landhöjningen varierar och är störst i norra Sverige vid Bottenvikskusten (cirka 1 cm/år) och minst i Skåne (cirka 0 cm/år). Mer exakt, vid Kungsholmsfort är landhöjningen 1,4 mm/år, vid Oskarshamn är den 2,0 mm/år och vid Ölands norra Udde är landhöjningen 2,5 mm/år.

### 3.5 Havshöjning i Kalmar län

Utifrån SMHI:s mätningar och uppgifter om den absoluta landhöjningen går det att beräkna vad den havshöjningen har varit lokalt i länet sedan mätningarna startades. Resultaten visar att havshöjningen i norra Kalmar län har varit strax under 0,2 cm/år för mätperioden, medan havsnivåhöjningen vid Kungsholmsfort har varit något lägre, strax under 0,15 cm/år. Analysen gäller för hela mätperioden, d.v.s. från 1851 för Ölands norra Udde, 1960 för Oskarshamn och 1889 för Kungsholmsfort. Det finns skillnader mellan Öland och Oskarshamn som visar att havshöjningen har varit snabbare efter 1960 också i Kalmar län.

Under de senare åren har en ny modell för den absoluta landhöjningen tillkommit som ger något andra siffror än beräkningen som gjordes 2008. Det finns ett behov av att utvärdera de två olika metoderna mot varandra så att osäkerheten i beräkningarna ovan kan uppskattas.

## 4 Metod

### 4.1 Statistisk extremvärdesanalys

Ett väl vedertaget sätt att modellera extrema vattenstånd är med *återkomsttider*.

Den vanligaste ansatsen man gör när man jobbar med återkomsttider, är att bygga en modell kring vattenståndstidsseriens årshögsta värden. Dessa värden antas vara oberoende och följa en och samma sannolikhetsfördelning. Utifrån denna fördelning får man kunskap om hur årets högsta vattennivå beter sig på den aktuella platsen.

Det är viktigt att tolka återkomsttider korrekt. T.ex. ska man tolka 100-årsvattenståndet som det vattenstånd som det varje år är 1 sannolikhet på 100 att detta värde överskrids. På samma sätt ska man tolka meningen "Vattenståndet 80 cm har återkomsttid 50 år" som att det varje år är 1 möjlighet på 50 att vattenståndet överskrider 80 cm.

I resultaten nedan är det återkomsttider på 100 år eller mer som är av intresse. En återkomsttid på 100 år motsvarar 1 % sannolikhet varje enskilt år. En återkomsttid på 300 år motsvarar 0,33 % sannolikhet varje enskilt år.

Sannolikheten under en längre period är inte densamma som för ett enskilt år. Exempelvis är sannolikheten 63 % för att en händelse med 100 års sannolikhet ska överskridas under en period på 100 år.

## 5 Resultat

### 5.1 Förändring av medelvattenståndet i Kalmar län

Med utgångspunkten att havet stiger enligt det högsta av IPCCs scenarier, och att landhöjningen är konstant, har förändringen av medelvattenytan beräknats för Kalmar län.

Figur 5 visar höjningen av havsvattenståndet lokalt förutsatt att havet stiger 30 cm fram till 2050 och totalt 1 m från 1990 till 2100 vid Ölands norra udde och Kungsholmsfort i Blekinge. Ölands norra udde är representativ för norra länet och Kungsholmsfort är representativ för södra länet. Det skiljer sig lite mellan de två bilderna, och landhöjningen kompenserar inte i någon större utsträckning för havshöjningen i området.

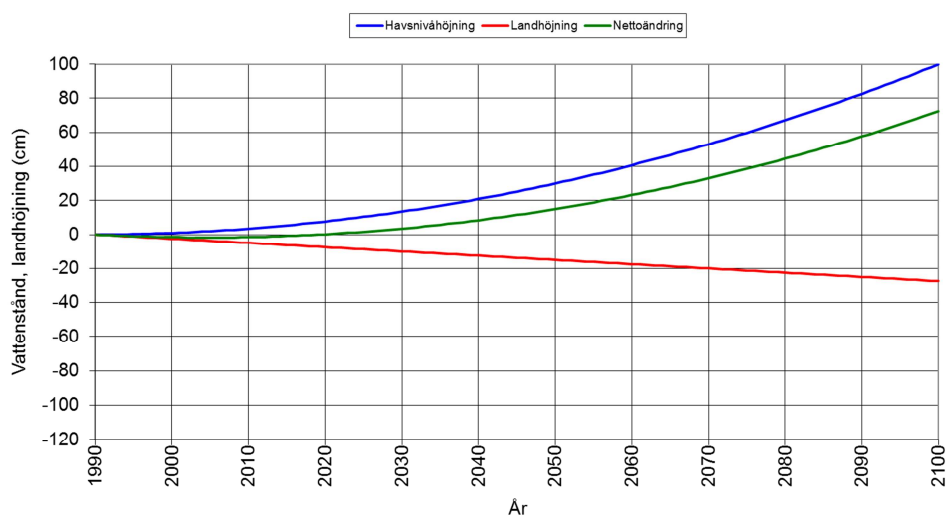
Medelvattenståndet år 2014 är 12-13 cm i höjdsystemet RH2000 för hela Kalmar län (Tabell 3). Eftersom landhöjningen varierar i länet kommer medelvattenytan höjas olika mycket relativt land fram till 2100. Tabell 3 visar medelvattenståndet i RH2000 för 2014 och 2100, samt nettoförändringen från 1990 fram till 2100 eftersom detta är referensperioden som används.

Figur 6 visar en vy från Kalmar mot Ölandsbron. När havet stiger kommer normalvattenståndet att vara betydligt högre än idag.

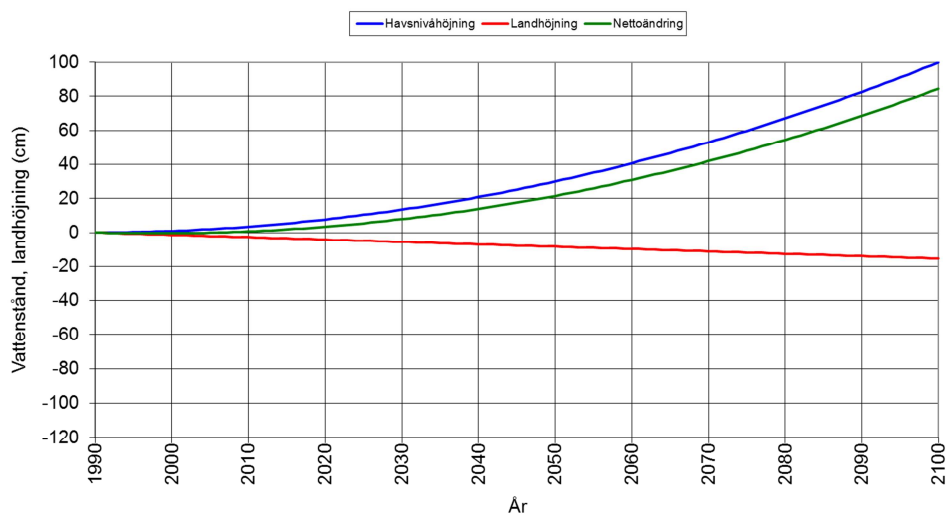
*Tabell 3. Medelvattenståndets nivå 2014 och 2100, samt beräknad höjning av medelvattenytan från 1990 till 2100.*

Station	Medelvatten- ståndet 2014 [cm i RH2000]	Medelvattenståndet 2100 [cm i RH2000]	Förändring i medelvattenstånd 1990-2100 [cm]
Kungsholmsfort	<b>13</b>	<b>96</b>	82,6
Oskarshamn	<b>13</b>	<b>91</b>	76
Ölands norra udde	<b>12</b>	<b>86</b>	70,5

## Ölands Norra Udde



## Kungsholmsfort



Figur 5. En tänkt höjning av havsvattenståndet (grön linje) förutsatt en global havsvattenståndshöjning om +1 m och lokal landhöjning vid Ölands norra udde och Kungsholmsfort.



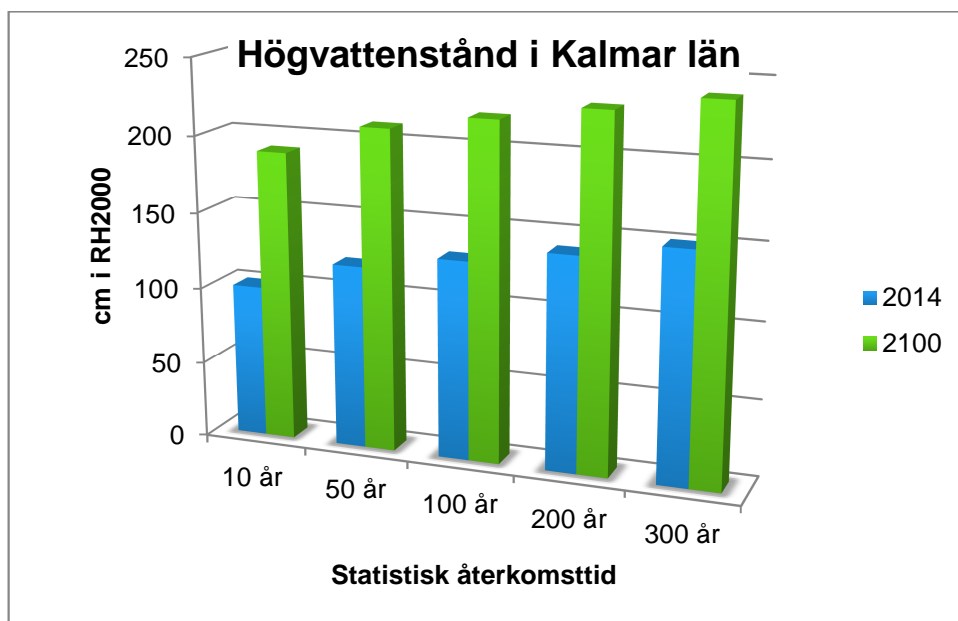
*Figur 6. När medelvattenytan stiger kommer den orörda vattenytan att flyttas högre upp, närmare bebyggelse och infrastruktur. Bilden är från Kalmar. Foto: Sten Bergström, SMHI.*

## 5.2 Extrema vattenstånd i Kalmar län

Extremvattenstånden har beräknats med statistisk extremvärdesanalys. Figur 7 visar vattenstånd med olika återkomsttider för Kalmar län, 2014 och idag. Resultatet bygger på en sammanvägd analys av resultat från Öland, Oskarshamn och Kungsholmsfort. Det är viktigt att märka sig att ett vattenstånd som idag har 300 års återkomsttid, 150 cm i RH2000, är lägre än ett vattenstånd som har 10 års återkomsttid år 2100, 190 cm i RH2000. Förutsättningen är att höjningstakten blir den som RCP8,5 representerar.

Tabell 4 visar havsvattenstånd med 10, 50, 100, 200 och 300 års återkomsttider för dagens klimat, i cm i RH2000. Konfidensintervallen visas i parantes. Tabell 5 visar havsvattenstånd med olika återkomsttider för 2100 förutsatt en global höjning om 98 cm, och kompensation för lokal landhöjning. I båda tabellerna visas bara upp till 100 års återkomsttid för Oskarshamn på grund av att serien är för kort.

En återkomsttid på 100 år motsvarar 1 % sannolikhet varje enskilt år. En återkomsttid på 200 år motsvarar 0,5 % sannolikhet varje enskilt år, och en återkomsttid på 300 år motsvarar 0,33 % sannolikhet varje enskilt år.



Figur 7. Vattenstånd med olika återkomsttider för Kalmar län för dagens (2014) klimat och för 2100. Figuren bygger på en kombination av resultaten från Kungsholmsfort och Öland norra udde.

Tabell 4. Extrema vattenstånd beräknade för dagens klimat, utifrån medelvattenstånd.

Återkomsttider i dagens klimat i RH2000	Kungsholmsfort	Oskarshamn	Ölands norra udde
<b>Återkomsttid</b>			
<b>10</b>	98 (91 - 105)	87 (80 - 93)	99 (91 - 107)
<b>50</b>	117 (104 - 128)	98 (87 - 104)	125 (108 - 142)
<b>100</b>	124 (107 - 138)	101 (88 - 107)	136 (113 - 158)
<b>200</b>	130 (109 - 148)		146 (117 - 175)
<b>300</b>	134 (110 - 153)		153 (118 - 186)

Tabell 5. Extrema vattenstånd beräknade för 2100 med en höjning av medelvattenståndet om 98 cm, och med kompensation från lokal landhöjning.

Återkomsttider 2100 i RH2000	Kungsholmsfort	Oskarshamn	Ölands norra udde
<b>Återkomsttid</b>			
<b>10</b>	194 (187 - 201)	178 (171 - 184)	185 (177 - 193)
<b>50</b>	213 (200 - 225)	189 (178 - 195)	211 (194 - 228)
<b>100</b>	220 (203 - 234)	192 (179 - 198)	222 (199 - 244)
<b>200</b>	226 (205 - 244)		232 (202 - 261)
<b>300</b>	230 (206 - 249)		238 (204 - 272)



### 5.3 Påverkan på land

Är det beräknade vattenståndet i havet den nivå som vi får på land i hela länet?

Som beskrivit i 3.1.1 kan både tilläggseffekter i vikar och sund och vågor leda till att vattennivån lokalt är högre än den som är beräknad för öppna kusten. I vikar och sund som har samma riktning som den vindriktning som ger de extrema vattenstånden kan vinduppstuvning göra att vatten inte kan ta sig tillbaka igen lika fort som det pressar på, och det gör att det längst in i sunden kan vara mycket högre nivåer än längre ut. Detta fenomen kommer inte att vara så betydelsefullt för Kalmar då Kalmarsund inte har samma riktning som de vindar som ger höga vattenstånd. Detta bekräftar också observationerna (se Figur 2). I resten av länet är Mönsterås den tätort som skulle kunna beröras av snedställning utifrån en översiktlig bedömning.

Vågor som förekommer samtidigt som det är högt vattenstånd bör beaktas. Våghöjden är störst vid en öppen kust, medan skärgård skyddar och bromsar upp vågenergi. Genom modellsimuleringar eller enklare metoder kan man ta fram någon form av dimensionerande våghöjd längs kusten. Det är viktigt att förstå att en våghöjd inte kan adderas till vattenståndets höjd för att få en planeringsnivå. Våghöjden gäller bara för vattendjupet utanför strandlinjen. När vågen sköljer upp på land gör friktionen att vågen dämpas ut. Vattnet som finns i vågen fortsätter dock upp på stranden någon höjd och längd. Vid planering av byggande nära vatten bör därför våghöjd och effekter från vågor huvudsakligen beaktas nära strandlinjen eller kajkanten.

Det är också viktigt att förstå underlagets påverkan på vattnet. I teorin kommer alla områden som ligger lägre än havsnivån vid översvämningstillfället att bli våta, men detta beror bland annat på hur land ser ut. Friktionsmotståndet är större över gräs, sand eller sten, än över hårdgjorda ytor, och det finns uppgifter om att vattennivåerna på land inte har blivit lika höga som vid observationspunkten. Detta skulle nog främst vara gällande för en flack kust med hög friktion (gräs, sand, sten). På hårdgjorda ytor kan vinden bidra till att blåsa in vatten längre in på land än den nivå som anges, även i svagt sluttande uppförsbacke. Detta kommer dock inte att gälla några stora vattenvolymer.

Uppsköljningshöjden (d.v.s. den höjd och längd som vattnet kan nå på land) kan beräknas för en sluttande kust om våghöjden vid stranden är känd. Eftersom vågor går in och ut är det inte en konstant nivå som nås. Det kan också vara relevant att beakta i vissa sammanhang.

Mer om detta finns att läsa i Kapitel 7.4

## 6 Diskussion och slutsatser

Vattenstånd med olika återkomsttider har beräknats för Kalmar län 2100 utifrån en global havshöjning på 98 cm mellan 1990 och 2100. När hänsyn tas till lokal landhöjning kommer medelvattenytan 2100 att vara mellan 80 och 95 cm i RH2000 i länet. Det är ca 70-80 cm högre än idag.

Vattenstånden har beräknats för tre av SMHI:s mätstationer i och nära Kalmar län. Den mätserie som är av högst kvalitet är Kungsholmsfort. Denna ligger i Blekinge men är representativ för södra Kalmar län, och vi rekommenderar att den huvudsakligen används för underlag. Resultaten från Ölands norra udde visar något högre extremvärden i dagens klimat, men resultaten är mindre tillförlitliga på grund av att det är sämre datakvalité i äldre data.

I ett framtida klimat blir det relativt likartade resultat både för Ölands norra udde och för Kungsholmsfort. Det beror på att landhöjningen är högre i norra länet vilket kompenserar för de något högre extremerna.

Resultaten visade att vattenståndet med 100-300 års återkomsttid år 2100 i Kalmar län kommer att vara 220-230 cm i RH2000 utifrån en global höjning som följer IPCC RCP8,5. Detta är den

snabbaste höjningstakten som har beräknats globalt, och med lägre utsläpp och en långsammare höjningstakt kan dessa nivåer visa sig att vara överskattade. En återkomsttid på 100 år motsvarar 1 % sannolikhet varje enskilt år medan en återkomsttid på 300 år motsvarar 0,33 % sannolikhet varje enskilt år.

Det finns förhållandevis få områden där lokala vinduppstuvningseffekter bedöms vara ett problem, men hänsyn kan behöva tas till detta i Mönsterås.

Yttre delarna av Öland är förmodligen starkt påverkade av vågor. Det har inte tagits fram några exakta våghöjder i rapporten som föreligger här, och våghöjderna är inte heller direkt tillämpningsbara för planeringshöjder, framförallt inte en bit in på land.

Länets kust på insidan av Öland bör vara relativt väl skyddad mot höga vågor.

## **6.1 Planeringsnivåer – på 50 och 100 års sikt**

Utmaningarna är många när det gäller att planera inför ett stigande vattenstånd. Vattennivåerna är bara en av aspekterna, såväl kostnader och risker måste vägas mot osäkerheterna i underlaget. En av de svåra osäkra aspekterna är att förhålla sig till att havshöjningen är ett rörligt mål. Hur ska vi planera idag för något som sker om 100 år?

De nivåer som anges här är gällande för den högsta höjningen utifrån IPCC:s beräkningar, för året 2100. Med lägre utsläpp av växthusgaser blir resultaten en mindre snabb havshöjning. Samtidigt slutar inte havshöjningen vid år 2100, och för planering på lång sikt så som för stadsdelar eller kritisk infrastruktur är det viktigt att beakta det.

Havsnivåhöjningen är mycket måttligare på 50 års sikt. Figur 5 visar en möjlig utveckling av vattenståndet lokalt utifrån en global höjning och den landhöjningen som finns. För 2060 kommer havshöjningen lokalt att vara ca 20-30 cm högre jämfört med 1990, alltså betydligt lägre nivåer än 2100. Under åren 2015-2060 kommer med andra ord översvämningsrisken från höga havsnivåer att vara ungefär som idag, eller marginellt högre.

Den samlade bilden är att havet stiger, men att det sker gradvis:

- Stigande havsnivåer påverkar inte sannolikheten för översvämnningar från havet väsentligt från nu och några decennier fram i tiden
- På 50 års sikt kan havsnivåns höjning lokalt komma att bli ca 20-30 cm högre än idag, med måttligt högre risker för översvämnningar jämfört med idag
- Nivåerna 2100 baseras på den högsta höjningen enligt IPCC. Vid lägre utsläpp kan höjningen komma att ske i långsammare takt
- För planering på längre sikt än 2100 är det viktigt att förstå att havshöjningen inte slutar år 2100
- Planering nära vatten bör alltid möjliggöra åtgärder längre fram när de blir aktuella

## 7 Fördjupad beskrivning

### 7.1 Global havshöjning

År 2007 kom IPCC "Assessment Report 4", AR4. Syftet med rapporten var att bedöma vetenskaplig, teknisk och socioekonomisk information om klimatförändringen, dess möjliga effekter, samt alternativ för anpassning. De huvudsakliga resultaten då var att havsvattenståndet förväntades stiga 18 cm i ett lågt scenario, och 59 cm i ett högt scenario. Därutöver förväntades havet att stiga mer i vissa regioner än andra. I analysen 2007 användes 18 och 59 cm samt det regionala bidraget för att beräkna höjningen av medelvattenytan.

Parallellt med att nya resultat har inkommit har SMHI arbetat med att uppdatera sin metodik utifrån den senaste forskningen. Ett viktigt resultat var Nederländernas Deltakommitté som angav som högst 130 cm global höjning 1990-2100. 2012 publicerades SMHIs kunskapssammanställning över forskningsresultat och olika nationella och internationella bedömningar (Bergström 2012). Rapporten var tänkt som ett underlag för bedömningar av hur framtidens havsnivåer påverkar Sveriges kustområden och syftade i första hand till att beskriva den vetenskapliga bakgrunden och att ge en bild av hur olika bedömningar varierar. För att rekommendera vilka nivåer som ska användas i samhällets planeringsprocess krävs både en ingående dialog med de som är ansvariga för konsekvenserna samt att andra faktorer vägs in, såsom acceptabel risk, vilka värden som står på spel, det planerade objektets livslängd samt framtida möjligheter att anpassa sig till nya förutsättningar. Utifrån detta underlag och med detta förbehåll har SMHI i flera utredningar och länsanalyser gjort bedömningen att 1 m är en trolig övre gräns för den globala havshöjningen, och utgått ifrån detta värde vid beräkning av extrema vattenstånd i framtidens klimat.

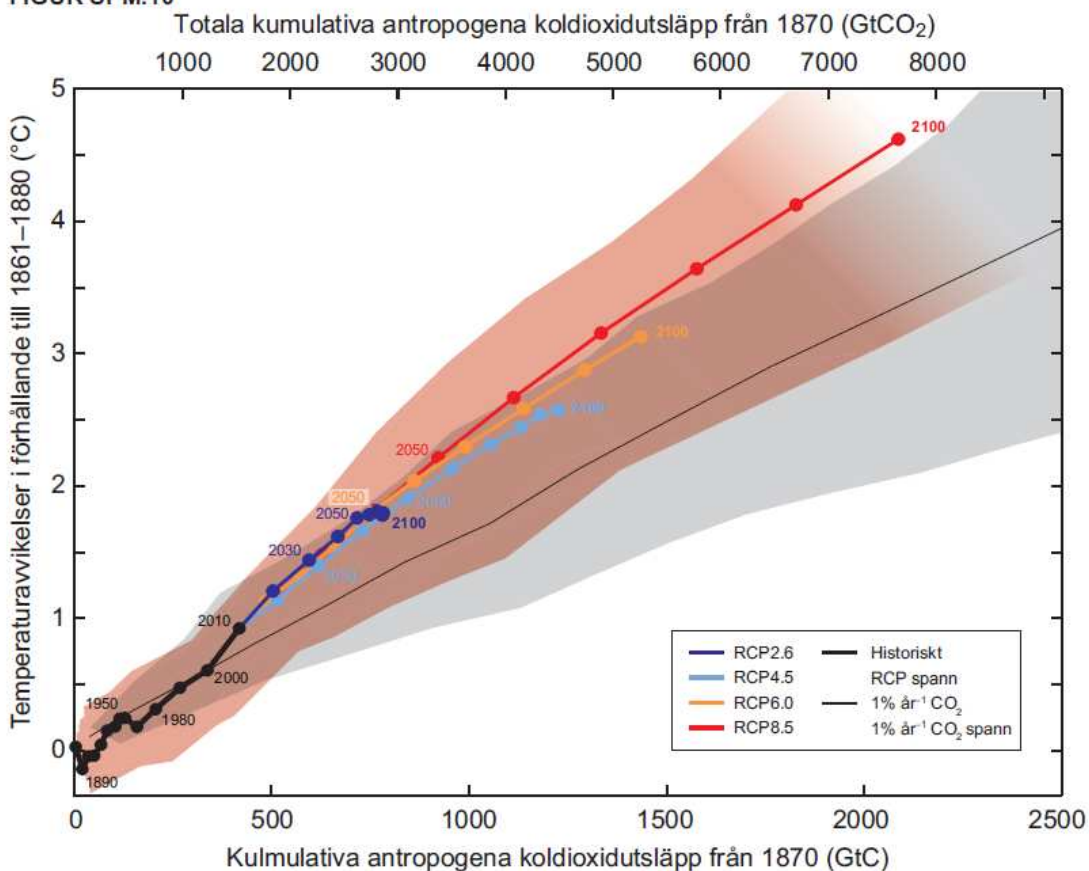
IPCC:s utvärdering 2013-2014 (AR5) omfattar de nya scenarier som idag används för att bedöma framtidens klimat, RCP-scenarier (Representative Concentration Pathways). RCP-scenarierna ersätter de tidigare SRES-scenarierna (Special Report on Emissions Scenarios).

I motsats till SRES-scenarierna är de nya RCP-scenarierna formulerade som stabiliseringsscenarier där hänsyn tas till effekten av klimatpolitiska beslut för att minska utsläppen. De olika RCP-scenarierna baseras på olika antaganden om växthusgasutsläppens utveckling. Hur mycket vi människor påverkar klimatet på sikt avgörs främst av de samlade utsläppen av växthusgaser över tid. Hur mycket temperaturen stiger avgörs i sin tur av när i framtiden de klimatpåverkande utsläppen når sin maxnivå, på vilken nivå de kulminerar och hur snabbt de kan fås att minska därefter.

Regionala skillnader i havsvattenståndet förekommer, och osäkerheterna i de olika globala klimatenssemblerna har i allmänhet minskat från AR4 till AR5. Enligt AR5 förväntas de regionala variationerna under de närmsta decennierna domineras av naturliga variationer, men mot slutet av seklet förväntas regionala mönster från de olika komponenterna av den klimatpåverkade havsnivåförändringen att träda fram och efterhand dominera över naturlig variabilitet. För Skandinavien förväntas havshöjningen vara något lägre än den globala vilket skiljer sig från AR4. Anledningen är att de stora glaciärernas egen gravitation attraherar stora mängder vatten. När Grönlandsisen smälter kommer denna effekt att klinga av i glaciärens påverkansområde och effekten av avsmältningen märks mer ju längre bort man kommer. Osäkerheterna är dock fortfarande så stora att vi i resultaten valt att bortse från eventuella regionala variationer.

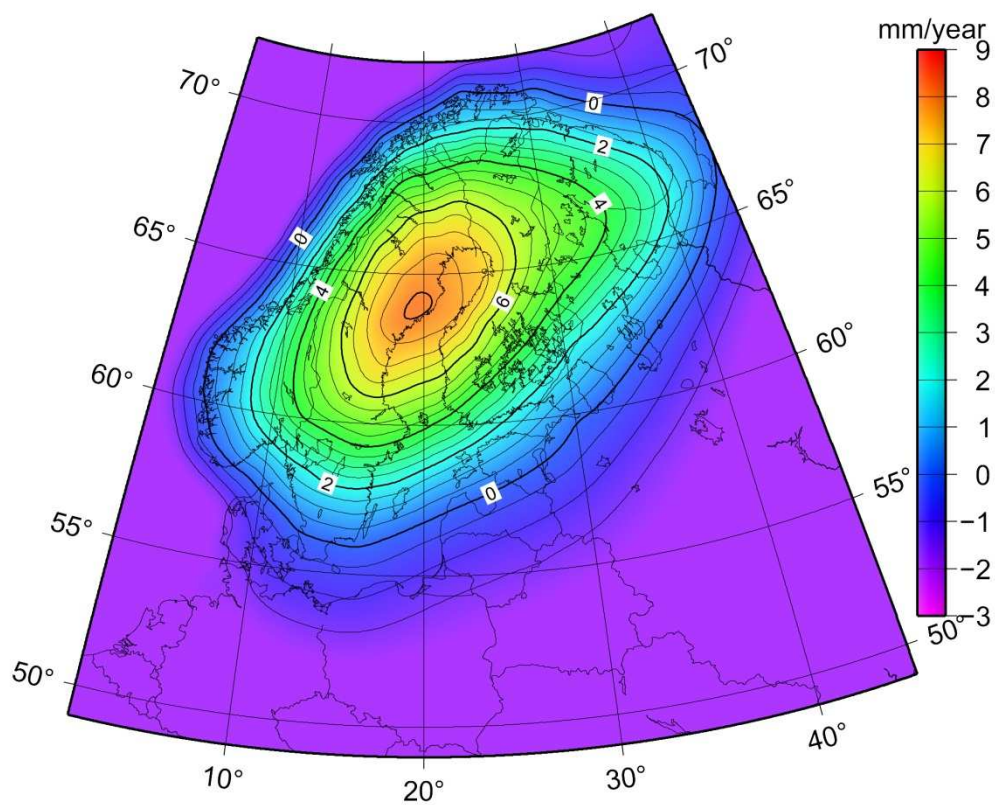
IPCC AR5 redovisar resultat från olika utsläppsscenarier. Resultaten i rapporten bygger på RCP8.5, det värsta scenariet, för att beräkna vattennivåer 2100. Övriga scenarier följer ungefär samma utveckling som RCP8.5 avseende temperaturhöjning och vattenstånd, men processen tar längre tid. Figur 8 visar temperaturförändringen i relation till koldioxidutsläpp, och den visar att förändringarna som sker är ungefär de samma, men de tar olika lång tid. Det är viktigt att poängtera att havshöjningen inte upphör 2100. Det kan alltså snarare vara en fråga om när havet når en viss nivå, och inte om hur hög nivån blir. Denna aspekt är viktig att beakta vid planering där livslängden till en byggnad eller ett område spelar roll.

FIGUR SPM.10



Figur 8. Temperaturökning (global medeltemperatur vid ytan) i de olika RCPerna. Källa: IPCC AR5, Summary for policy makers, figur 10.

Figur 9 visar den så kallade apparenta landhöjningen i Norden, det vill säga den effekten som vi kan observera från land. De angivna värdena gäller för den balans mellan land- och havshöjning som varit under större delarna av 1900-talet.



*Figur 9. Apparent landhöjning i Norden fram till ca 1990 (Källa: Lantmäteriet). Efter 1990 har den allt snabbare havshöjningen inneburit att denna balans inte längre gäller.*

## 7.2 Statistiska metoder

Den ackumulerade sannolikheten för att en händelse sker under en längre tidperiod visas för olika återkomsttider i Tabell 6

Tabell 6. Sannolikheten att en händelse med en viss återkomsttid överskrids minst en gång under en given period.

Återkomsttid (år)	Sannolikhet under 100 år (%)	Sannolikhet under 200 år (%)	Sannolikhet under 300 år (%)
50	87	98	100
100	63	87	95
200	39	63	78
300	28	49	63
1000	10	18	26
10 000	1	2	3

### 7.2.1 Val av sannolikhetsfördelning

Den statistikteori som återkomsttider bygger på kallas extremvärdesteori. Den viktigaste satsen inom denna är *extremvärdessatsen*, som, under vissa förutsättningar, tillåter oss att ansätta att årsmax-värdena följer en viss sannolikhetsfördelning. I princip måste årsmax-värdena vara oberoende och likafördelade (d.v.s. årsmax år 1900 bör ”bete sig” som årsmax år 1990).

Det finns ett flertal sannolikhetsfördelningar som är vanligt förekommande för återkomsttidsanalys i vetenskaplig litteratur. Extremvärdessatsen ger mest stöd åt *Generalized Extreme Value*, GEV, (Coles 2001) men även andra fördelningar kan vara aktuella. Det är viktigt att man verifierar att den valda sannolikhetsfördelningen passar till datat. För att avgöra detta kan man använda ett så kallat goodness-of-fit-test, t.ex. Kolmogorov-Smirnov, som ger ett numeriskt mått på hur väl sannolikhetsfördelningen passar till data. Om testet underkänner fördelningen bör man inte använda den i analysen. Ofta kan flera fördelningar passa till samma datamaterial, men ge olika återkomsttider, se avsnitt 7.2.3.

I denna analys har tre sannolikhetsfördelningar använts, men bara två redovisas: GEV och Lognormal. Lognormal och GEV är relativt lika varandra men ger olika konfidensintervall.

För vidare fördjupning se vidare *Blom et al (2005)* eller *Coles (2001)*.

### 7.2.2 Konfidensintervall

För varje återkomsttid beräknas även ett konfidensintervall omkring vattenståndet. Ett konfidensintervall ska tolkas som ett intervall som med en viss sannolikhet täcker det sanna värdet. Motivationen att använda ett konfidensintervall är att eftersom återkomsttiderna är beräknade på ett begränsat datamaterial så finns det en viss osäkerhet i de beräknade återkomsttiderna. Konfidensintervall speglar denna osäkerhet. I detta projekt valdes ett 95 % konfidensintervall av typ Wilson Score (Wilson 1927). Detta intervall har flera fördelar, t.ex. att det går att tillämpa på godtycklig sannolikhetsfördelning och återkomsttid, samt att det blir mindre ju längre dataserien är.

### 7.2.3 Goodness-of-fit

För att de återkomsttider som man beräknar ska gå att lita på krävs det att data passar sannolikhetsfördelningen man använder. För att avgöra detta kan man tillämpa ett goodness-of-

fit test. I detta projekt användes Kolmogorov-Smirnov (KS) testet (Corder 2009), som kan avgöra, med en viss statistisk signifikans, om ens data passar till ens fördelning. KS-testet ger ett värde mellan 0 och 1, där 0 betyder perfekt anpassning och 1 betyder att datat inte alls passar till fördelningen. Här har vi valt signifikansnivå 95 %, vilket innebär att om KS-testet överstiger 0.95 så anses sannolikhetsfördelning inte passa data tillräckligt bra, och därmed kan vi inte lita på de beräknade återkomsttiderna för denna fördelning. Till skillnad från konfidensintervall så ger KS-testet ett ”ja/nej”-svar, som med en viss sannolikhet är korrekt. Med signifikansnivå 0.95 kan vi med 95% säkerhet lita på KS-testets resultat.

### 7.3 Återkomsttider i ett framtida klimat

Alla återkomsttider som beräknas är relativt medelvattenståndet, MW. I detta projekt har vi antagit att stormfrekvensen i ett framtida klimat är densamma som idag. Antagandet stöds av att osäkerheterna i klimatmodellerna fortfarande är mycket stora beträffande stormar. För beräkningarna innebär det att relativt medelvattennivån så kommer återkomsttiderna inte att förändras i framtiden. Därmed kan vi använda historiskt beräknade återkomsttider för det framtida klimatet. För att avgöra hur mycket högre extrema vattenstånd är i ett framtida klimat så behöver man veta hur medelvattennivån ändras fram till 2100.

Havshöjningen anges oftast från någon referensperiod fram till antingen 2100 eller någon referensperiod som slutar med 2100. För att ta fram medelvattenståndet 2100 måste startvärdet för aktuellt år och höjdsystem tas fram Sedan lägger man på den globala havshöjningen för aktuell period, och drar bort landhöjningen från samma period.

I princip tar man alltså årets beräknade vattenstånd år 1990, adderar ens uppskattning av den globala vattennivåhöjning, och kompenserar för landhöjningen på platsen. Om landhöjningen och vattennivåhöjningen skulle bli lika så blir det i praktiken ingen förändring av återkomsttiderna.

AR5 har referensperiod 1984-2000, men för enkelhetens skull har vi använt 1990 som startår och räknat med 110 års landhöjning 1990-2100. Den osäkraste parametern är den globala vattennivåhöjningen. Värdet som använts här är den övre gränsen som anges i intervallet från de olika projektionerna, vid 2100, 98 cm. Felmarginalen i landhöjning i Kalmar på grund av fel startår är mindre än 1 cm.

### 7.4 Erosion, vågor och vattenstånd

Den totala vattennivån som påverkar land är inte bara havsvattenståndet utan vågor kan också påverka land. Vågor och högt vattenstånd i kombination är känt som ett stort problem för erosion. För översvämning eller skador på konstruktioner är våghöjden och vågkraften av intresse. Höga vågor mot land förekommer i allmänhet vid samma tillfälle som ger höga vattenstånd eftersom det är en kraftig vind som driver båda förhållandena.

Vågor (vindvågor) bildas när vind blåser över vattenytan. Så länge vinden står på är vågriktningen parallell med vindriktningen. Våghöjden bestäms av vindstyrkan, hur länge vinden har blåst och över hur stort område som vinden kan verka (stryklängd). När vågorna rör sig mot land och påverkas av botten ändras riktningen på vågorna och de vrider mot land. En våg som kommer från sydväst kommer t.ex. att vrida så att den kommer från väst om kusten (och botten topografi) har en nord-sydlig orientering.

Vågornas riktning påverkas av botten, och det är botten påverkan som gör att vågor faller in vinkelrätt mot stranden även när vindriktningen inte är direkt mot kusten.

Vågor till havs består av en kombination av olika vågor med olika våghöjd, våglängd och vågperiod, samtidigt. Våghöjder på öppet vatten kan uppskattas med enkla metoder utifrån vindhastighet och stryklängd. Beroende på hur kraftig vinden är kommer våghöjden att vara begränsad antingen av vindhastigheten, vindens varaktighet eller tillgänglig stryklängd. Figur 10 visar en översikt över kuststräckor i Sverige som har stor grad av samvariation vid höga

vattenstånd, och en vind (röd pil) som skapar höga vattenstånd i södra Kalmar. Samma vindförhållanden ger också vågor mot land.

I många analyser som rör vågor är  $H_s$ , signifikanta våghöjden, den nivå som anges. Denna är definierad som medelvärdet av den högsta tredjedelen vågor ( $H_{1/3}$ ). De högsta vågorna är högre än detta. Den högsta vågen,  $H_{max}$ , definieras ibland som 1%-percentilen ( $H_{1/100}$ ), ibland anges även 0,1%-percentilen ( $H_{1/1000}$ ). En sådan extrem våg uppträder ensam och med kort varaktighet, men kan göra stora skador.



Figur 10. Skiss över olika kuststräckor i Sverige där vattenståndet samvarierar. Den röda pilen representerar en vind som skapar höga vattenstånd, och de blå pilarna visar den ytström som genereras av vinden och som på grund av topografi rör sig norr- och västerut. Samma vind som ger höga vattenstånd ger också vågor in mot kusten.

Tabell 7 visar en uppskattning av vindvågors våghöjd för några vindhastigheter med hjälp av nomogram. Våghöjderna som bestäms enligt denna metod är den karaktäristiska våghöjden  $H_c$ , vilket är en våghöjd som liknar  $H_s$ . Skillnaden är att den senare tas fram från mätningar medan den förstnämnda tas fram från visuella observationer. Våghöjden gäller på djupt vatten. Som exempel ger en vind på 10 m/s under 6 timmar en våghöjd på ca 1,5 m. Denna våg har en period på ca 4,5 s och en våglängd på runt 30 m, och märker alltså av botten för ett bottendjup på 15 m. För en grupp vågor med olika våglängder och höjder är det de längsta vågorna som först påverkas av bottendjupet.

Högsta uppmätta signifikanta våghöjd på Ölands södra grund är över 7 m och våghöjder över 6 m har förekommit flera gånger vintertid under åren 1978-2004 som mätningar har pågått.



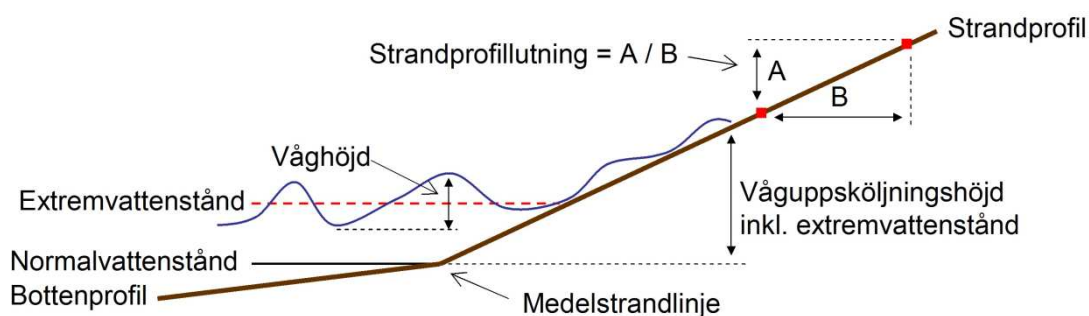
Sommartid är våghöjder under 2 m vanligare, men en detaljerad statistisk analys har inte utförts. Vågbojen vid Ölands södra grund låg på 18,5 m djup. För grundområden finns det enkla relationer som beskriver maximala våghöjden som funktion av bland annat bottendjupet. Dessa beaktar dock inte processer nära en kust och kan därför inte heller enkelt tillämpas här. För att beskriva vågor nära land bör en lämplig vågmodell nyttjas.

Tabell 7. Grov uppskattning av karaktäristiska våghöjder för en stryklängd på 100 km med hjälp av nomogram (Gröen och Dorrestein, 1976). Våghöjderna gäller för öppet vatten där vågorna inte påverkas av botten eller kust.

Vindhastighet (m/s)	Vindens varaktighet (timmar)	Begränsning	Våghöjd (Hc)	Kommentar
5	>12 timmar	Vindens varaktighet	Ca 0,6 m	
10	6 timmar	-	Ca 1,5 m	
10	>24 timmar	Vindens varaktighet	Ca 2,5 m	
15	6 timmar	-	Ca 3 m	
15	12 timmar	Stryklängd	Ca 3,2 m	För över 7-8 timmar är våghöjden stryklängdsbegränsad.

Det är lätt att låta sig förledas att tro att den totala översvämningen som havet kan åstadkomma är vattenståndet plus våghöjden. Detta stämmer dock inte då våghöjden bromsas upp betydligt när vågen kommer in över land. Två processer bör nämnas som påverkar översvämningsrisker, våguppsköljningen (engelska: runup) och vågöverspolningen.

Våguppsköljningshöjden beror på hur brant stranden är (dvs. strandprofilens lutning, se Figur 11), hur slät den är, samt dess materialegenskaper. Denna höjd är den höjd ovan vågens 0-läge som vattnet strömmar upp till enligt vissa tekniska definitioner.



Figur 11. Principskiss av en strandprofil. Våghöjden är överlagrad det aktuella (extrema) vattenståndet, och våguppsköljningen bestäms av våghöjd, strandprofilens lutning och strandens egenskaper. Betong ger exempelvis högre uppsköljningshöjd än gräs.

Våguppsköljning kan vara mest relevant för svagt sluttande konstruktioner, till exempel diken eller olika former av vågbrytare, eller för kusten i sig. Har man till exempel lägre liggande

områden bakom ett högre område kan det vara av intresse att beräkna om våguppsköljning kan leda till att vatten kommer bakom det högre området. Vågöverspolning är när vågorna skvalpar över en vägg eller en konstruktion. Beroende på hur konstruktionen ser ut och hur höga vågorna är kan en vattenvolym ta sig över och bakom konstruktionen. Överspolning kan också ske vid en vertikal eller brant vägg genom att det bildas "splash". Våghöjden i sig kan bli ett problem nära vattnet om det är kritiskt att vatten inte får komma upp på land här – till exempel om det kan ta sig bakom ett översvämningsskydd – men för vattennivåer längre upp på land slutar våghöjden att vara en relevant parameter relativt raskt.

## 8 Referenser

Bergström, S. 2012: Framtidens havsnivåer i ett hundraårsperspektiv - kunskapssammanställning 2012. SMHI Klimatologi Rapport Nr 5.

Blom et al, "Sannolikhetsteori och statistiskteori med tillämpningar", 2005. ISBN 91-44-02442-8

Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer and A.S. Unnikrishnan, 2013: Sea Level Change. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Coles, Stuart, "An Introduction to Statistical Modelling of Extreme values", 2001. ISBN 1-85233-459-2

Corder, G. W.; Foreman, D. I. (2009). *Nonparametric Statistics for Non-Statisticians: A Step-by-Step Approach*. Wiley. ISBN 978-0-470-45461-9.

Wilson, E. B. (1927), "Probable inference, the law of succession, and statistical inference". *Journal of the American Statistical Association* 22: 209–212.





**SMHI**

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