

Högvattenhändelser i Stockholm idag och i framtiden

Ola Kalén, Sofie Schöld, Seuri Basilio, Maria Andersson och Magnus Hieronymus



Pärmbild

Vy över Stockholms skärgård. Fotograf Gaid Phitthayakornsilp, Mostphotos

RAPPORT NR 2025–17**TITEL**

Högvattenhändelser i Stockholm idag och i framtiden

FÖRFATTARE

Ola Kalén, Sofie Schöld, Seuri Basilio, Maria Andersson och Magnus Hieronymus, SMHI

UPPDRAGSGIVARE

Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, MSB
651 81 Karlstad

KONTAKTPERSON

Maja Coghlan
MSB
651 81 Karlstad
E-post: maja.coghlan@msb.se

PROJEKTANSVARIG

Sofie Schöld
SMHI
601 76 Norrköping
E-post: sofie.schold@smhi.se

KLASSIFICERING

Allmän

SMHI DIARIENUMMER

SMHI23:1 2024/2213/6.1.1

Version
01

Datum
2025-03-31 Granskad

Granskad av
Sofia Åström, SMHI

Innehåll

1	Bakgrund	1
2	Sammanfattande resultat.....	2
2.1	Stockholm norra.....	2
2.2	Stockholm.....	3
2.3	Stockholm södra.....	4
3	Metod och underlag	5
3.1	Introduktion	5
3.2	Vattenståndsmätningar i Stockholm	7
3.3	Medelvattenstånd i dagens klimat i Stockholm	8
3.4	Extremnivåer i dagens klimat i Stockholm	9
3.5	Medelvattenstånd i framtida klimat i Stockholm	11
3.6	Extremnivåer i framtida klimat i Stockholm	15
3.7	Kombinerade osäkerhetsintervall	15
4	Referenser	17
	Bilaga 1: Ordlista.....	18
	Bilaga 2: Översiktlig beskrivning Bayesiansk metod	20

1 Bakgrund

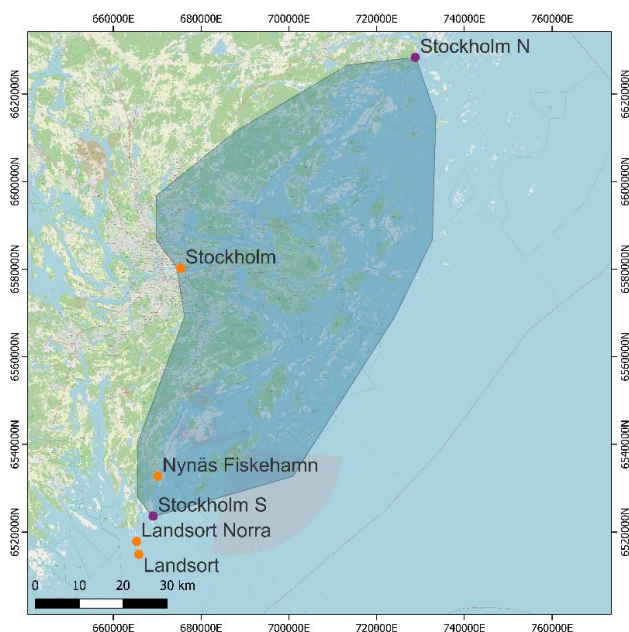
I Sverige genomförs översvämningdirektivet genom Förordning (2009:956)¹ om översvämningssrisker och MSBFS 2013:1² föreskrifter om länsstyrelsens planer för hantering av översvämningssrisker (riskhanteringsplaner). MSB är ansvarig myndighet och genomför arbetet i nära samarbete med länsstyrelserna. Arbetet sker i cykler om sex år och inkluderar en bedömning av översvämningssrisker i syfte att identifiera områden med betydande översvämningssrisk, framtagande av hot- och riskkartor över de områden som har identifierats samt framtagande av riskhanteringsplaner.

Hotkartor över de områden som har identifierats ska, i enlighet med paragraf 7 i översvämningssförordningen, utarbetas av MSB och omfatta de geografiska områden som kan komma att drabbas vid översvämningshändelser inom tre olika sannolikhetskategorier:

1. Översvämningar som med låg sannolikhet förväntas inträffa, eller som endast förväntas inträffa i extrema situationer,
2. Översvämningar som med medelhög sannolikhet³ förväntas inträffa, och, om det är lämpligt,
3. Översvämningar som med hög sannolikhet förväntas inträffa.

Arbetet med översvämningssdirektivets tredje cykel inleddes under 2022 och MSB bedömde i februari 2024 att tjugosex områden i landet kan få betydande konsekvenser om en omfattande översvämning inträffar⁴. Sjutton av dessa områden ligger längs kusten och för dessa har MSB gett SMHI i uppdrag att beräkna en högvattenhändelse med 50-års återkomsttid utifrån dagens klimat samt händelser med 100- respektive 500-års återkomsttid utifrån ett medelvattenstånd år 2100 och 2150 under utsläppsscenarierna SSP2-4,5, SSP3-7,0 samt SSP5-8,5 från FN:s klimatpanel IPCC:s sammanställning AR6⁵. Effekten av landhöjningen ska vara inkluderad i framtida nivåer och nivåerna ska anges i höjdsystemet RH 2000.

I Figur 1 visas det område som specificerats av MSB för Stockholm, tillsammans med positioner för tillgängliga mätningar av havsvattenstånd i området, samt de positioner för vilka återkomstnivåer har beräknats och utvärderats.



Figur 1. Geografiskt avgränsat område vid Stockholm specificerat av MSB. I kartan visas även mätstationerna vid Stockholm, Nynäs Fiskehamn, Landsort Norra och Landsort (orange) samt de positioner för vilka återkomstnivåer har beräknats med den Bayesianska modellen (orange och lila). Bakgrundskarta: OpenStreetMap.

2 Sammanfattande resultat

Det av MSB utpekade området för Stockholm sträcker sig från Kapellskär i Norrtälje kommun i norr till Nynäshamns kommun i söder. Vattenståndets nivå under högvattenhändelser blir högre i norr än i söder. De framtida medelvattenstånden blir tvärtom något högre i söder än i norr, främst på grund av att landhöjningens hastighet varierar längs kuststräckan. På grund av detta har området för Stockholm delats in i tre delar, Stockholm norra, Stockholm och Stockholm södra (Stockholm N, Stockholm och Stockholm S i Figur 1) och beräknade återkomstnivåer för dagens och för framtidens klimat ges för dessa tre platser.

2.1 Stockholm norra

Beräknade återkomstnivåer för dagens klimat⁶ för återkomsttiderna 50, 100 och 500 år, dels relativt medelvattenståndet och dels i höjdsystemet RH 2000, redovisas i Tabell 1 med ett kredibilitetsintervall (Bayesiansk motsvarighet till konfidensintervall) på 90 procent.

Tabell 1. Beräknade återkomstnivåer för Stockholm norra med 50-, 100-, respektive 500-års återkomsttid i dagens klimat, dels relativt medelvattenståndet (MV) och dels i höjdsystemet RH 2000. Siffrorna inom parentes anger ett kredibilitetsintervall på 90%. (Tabell 1 är identisk med Tabell 13).

Återkomsttid (år)	Återkomstnivå rel. MV (cm)	Återkomstnivå RH 2000 (cm)
50	104 (97 – 112)	118 (111 – 126)
100	110 (102 – 118)	124 (116 – 132)
500	121 (111 – 131)	135 (125 – 145)

Återkomstnivåer i framtida klimat fås genom att kombinera beräknade återkomstnivåer relativt medelvattenståndet (Tabell 1) med projektioner för framtida medelvattenstånd i RH 2000 för den aktuella platsen, i detta fall Norrtälje kommun. Återkomstnivåer för framtida klimat år 2100 och 2150 under tre olika utsläppsscenarioer visas i Tabell 2 till Tabell 4 med ett kombinerat konfidensintervall på 90 procent.

Tabell 2. Beräknade återkomstnivåer för Stockholm norra med 100-, respektive 500-års återkomsttid i framtida klimat under SSP2-4,5 år 2100 och 2150. Nivåerna anges i höjdsystemet RH 2000, siffrorna inom parentes anger ett konfidensintervall på 90%.

Återkomsttid (år)	Återkomstnivå år 2100 RH 2000 (cm)	Återkomstnivå år 2150 RH 2000 (cm)
100	134 (93 - 175)	139 (69 - 208)
500	145 (103 - 186)	150 (80 - 220)

Tabell 3. Beräknade återkomstnivåer för Stockholm norra med 100-, respektive 500-års återkomsttid i framtida klimat under SSP3-7,0 år 2100 och 2150. Nivåerna anges i höjdsystemet RH 2000, siffrorna inom parentes anger ett konfidensintervall på 90%.

Återkomsttid (år)	Återkomstnivå år 2100 RH 2000 (cm)	Återkomstnivå år 2150 RH 2000 (cm)
100	142 (93 - 191)	157 (67 - 247)
500	153 (103 - 202)	168 (78 - 258)

Tabell 4. Beräknade återkomstnivåer för Stockholm norra med 100-, respektive 500-års återkomsttid i framtida klimat under SSP5-8,5 år 2100 och 2150. Nivåerna anges i höjdsystemet RH 2000, siffrorna inom parentes anger ett konfidensintervall på 90%.

Återkomsttid (år)	Återkomstnivå år 2100 RH 2000 (cm)	Återkomstnivå år 2150 RH 2000 (cm)
100	154 (100 - 208)	175 (78 - 273)
500	165 (111 - 219)	187 (89 - 285)

2.2 Stockholm

Beräknade återkomstnivåer för dagens klimat⁶ för återkomsttiderna 50, 100 och 500 år, dels relativt medelvattenståndet och dels i höjdsystemet RH 2000, redovisas i Tabell 5 med ett kredibilitetsintervall (Bayesiansk motsvarighet till konfidensintervall) på 90 procent.

Tabell 5. Beräknade återkomstnivåer för Stockholm med 50-, 100-, respektive 500-års återkomsttid i dagens klimat, dels relativt medelvattenståndet (MV) och dels i höjdsystemet RH 2000. Siffrorna inom parentes anger ett kredibilitetsintervall på 90%. (Tabell 5 är identisk med Tabell 14).

Återkomsttid (år)	Återkomstnivå rel. MV (cm)	Återkomstnivå RH 2000 (cm)
50	97 (93 – 101)	112 (108 – 116)
100	103 (98 – 107)	118 (113 – 122)
500	113 (106 – 120)	128 (121 – 135)

Återkomstnivåer i framtida klimat fås genom att kombinera beräknade återkomstnivåer relativt medelvattenståndet (Tabell 5) med projektioner för framtida medelvattenstånd i RH 2000 för den aktuella platsen, i detta fall Stockholms kommun. Återkomstnivåer för framtida klimat år 2100 och 2150 under tre olika utsläppsscenarioer visas i Tabell 6 till Tabell 8 med ett kombinerat konfidensintervall på 90 procent.

Tabell 6. Beräknade återkomstnivåer för Stockholm med 100-, respektive 500-års återkomsttid i framtida klimat under SSP2-4,5 år 2100 och 2150. Nivåerna anges i höjdsystemet RH 2000, siffrorna inom parentes anger ett konfidensintervall på 90%.

Återkomsttid (år)	Återkomstnivå år 2100 RH 2000 (cm)	Återkomstnivå år 2150 RH 2000 (cm)
100	133 (99 - 185)	139 (71 - 208)
500	144 (107 - 193)	150 (81 - 219)

Tabell 7. Beräknade återkomstnivåer för Stockholm med 100-, respektive 500-års återkomsttid i framtida klimat under SSP3-7,0 år 2100 och 2150. Nivåerna anges i höjdsystemet RH 2000, siffrorna inom parentes anger ett konfidensintervall på 90%.

Återkomsttid (år)	Återkomstnivå år 2100 RH 2000 (cm)	Återkomstnivå år 2150 RH 2000 (cm)
100	141 (93 - 189)	158 (69 - 248)
500	151 (103 - 200)	169 (78 - 258)

Tabell 8. Beräknade återkomstnivåer för Stockholm med 100-, respektive 500-års återkomsttid i framtida klimat under SSP5-8,5 år 2100 och 2150. Nivåerna anges i höjdsystemet RH 2000, siffrorna inom parentes anger ett konfidensintervall på 90%.

Återkomsttid (år)	Återkomstnivå år 2100 RH 2000 (cm)	Återkomstnivå år 2150 RH 2000 (cm)
100	152 (100 - 205)	177 (80 - 274)
500	163 (110 - 216)	187 (90 - 284)

2.3 Stockholm södra

Beräknade återkomstnivåer för dagens klimat⁶ för återkomsttiderna 50, 100 och 500 år, dels relativt medelvattenståndet och dels i höjdsystemet RH 2000, redovisas i Tabell 9 med ett kredibilitetsintervall (Bayesiansk motsvarighet till konfidensintervall) på 90 procent.

Tabell 9. Beräknade återkomstnivåer för Stockholm södra med 50-, 100-, respektive 500-års återkomsttid i dagens klimat, dels relativt medelvattenståndet (MV) och dels i höjdsystemet RH 2000. Siffrorna inom parentes anger ett kredibilitetsintervall på 90%. (Tabell 9 är identisk med Tabell 15).

Återkomsttid (år)	Återkomstnivå rel. MV (cm)	Återkomstnivå RH 2000 (cm)
50	90 (86 – 94)	104 (100 – 108)
100	95 (90 – 100)	109 (104 – 114)
500	104 (97 – 111)	118 (111 – 125)

Återkomstnivåer i framtida klimat fås genom att kombinera beräknade återkomstnivåer relativt medelvattenståndet (Tabell 9) med projektioner för framtida medelvattenstånd i RH 2000 för den aktuella platsen, i detta fall Nynäshamns kommun. Återkomstnivåer för framtida klimat år 2100 och 2150 under tre olika utsläppsscenarioer visas i Tabell 10 till Tabell 12 med ett kombinerat konfidensintervall på 90 procent.

Tabell 10. Beräknade återkomstnivåer för Stockholm södra med 100-, respektive 500-års återkomsttid i framtida klimat under SSP2-4,5 år 2100 och 2150. Nivåerna anges i höjdsystemet RH 2000, siffrorna inom parentes anger ett konfidensintervall på 90%.

Återkomsttid (år)	Återkomstnivå år 2100 RH 2000 (cm)	Återkomstnivå år 2150 RH 2000 (cm)
100	128 (98 - 189)	140 (69 - 207)
500	137 (109 - 200)	149 (79 - 218)

Tabell 11. Beräknade återkomstnivåer för Stockholm södra med 100-, respektive 500-års återkomsttid i framtida klimat under SSP3-7,0 år 2100 och 2150. Nivåerna anges i höjdsystemet RH 2000, siffrorna inom parentes anger ett konfidensintervall på 90%.

Återkomsttid (år)	Återkomstnivå år 2100 RH 2000 (cm)	Återkomstnivå år 2150 RH 2000 (cm)
100	137 (88 - 186)	158 (67 - 249)
500	147 (97 - 196)	168 (77 - 258)

Tabell 12. Beräknade återkomstnivåer för Stockholm södra med 100-, respektive 500-års återkomsttid i framtida klimat under SSP5-8,5 år 2100 och 2150. Nivåerna anges i höjdsystemet RH 2000, siffrorna inom parentes anger ett konfidensintervall på 90%.

Återkomsttid (år)	Återkomstnivå år 2100	Återkomstnivå år 2150
	RH 2000 (cm)	RH 2000 (cm)
100	148 (95 - 200)	176 (80 - 272)
500	157 (104 - 210)	185 (89 - 282)

Resultaten är beräknade återkomstnivåer för återkomsttiderna 50, 100 och 500 år där osäkerheten i de beräknade nivåerna uttrycks med ett 90-procentigt konfidensintervall. Konfidensintervallet är framtaget med en metod som, om den upprepades många gånger, skulle ge intervall som innehåller det sanna värdet i 90 procent av fallen. Observera att samtliga värden behöver justeras i takt med att kunskapsläget förändras och mer mätdata samlas in.

Som utgångsläge för medelvattenståndet i dagens klimat har medelvärden under referensperioden 1995 till 2014 använts, se kapitel 3.3 för mer information. Projektioner för medelvattenståndet i Norrtälje, Stockholm och Nynäshamn år 2100 och 2150 baseras på IPCC:s sammanställning AR6 Delrapport 1 – Den naturvetenskapliga grunden⁵, och utgår ifrån de tre utsläppsscenarioer som MSB har specificerat, SSP2-4,5, SSP3-7,0 och SSP5-8,5. Samtliga projektioner är av SMHI nedskalade till kommunnivå och tar hänsyn till storskaliga regionala variationer i havsnivåhöjning samt till den lokala landhöjningen. Resultaten gäller för det markerade området i Figur 1 men lokala variationer kan förekomma och kortperiodiska vågeffekter ingår ej. Mer detaljer kring beräknade värden finns i kapitlet nedan.

3 Metod och underlag

I detta kapitel beskrivs de beräkningsmetoder som använts i uppdraget, samt underlag för beräkningar av extrema vattenstånd i dagens och framtida klimat. En mer detaljerad beskrivning av den Bayesianska metoden finns i Bilaga 2.

3.1 Introduktion

Högvattenhändelser, tillfällen då vattenståndet stiger kraftigt men kortvarigt, kan orsaka översvämningar redan idag. När havsnivån stiger till följd av den globala uppvärmningen så förändras medelvattenståndet, själva utgångsläget för dessa högvattenhändelser. På de platser där medelvattenståndet i havet stiger, förflyttas utgångsläget för högvattenhändelserna uppåt, vilket medför att händelser som varit relativt ovanliga blir mer vanliga i framtiden. Risken för översvämning kan begränsas genom planering och implementering av riskreducerande strategier, där kännedom om sannolikheten för att extrema händelser med olika återkomsttider ska inträffa är centralt.

Vanligtvis beräknas dessa sannolikheter genom att anpassa en statistisk fördelning till mätdata, exempelvis årshögsta noteringar. Beräkningarna begränsas dock till platser där det finns tillförlitliga mätningar och kan också vara osäkra på grund av att få extrema händelser ingår i den underliggande mätserien. Flertalet av de av MSB utpekade områdena saknar långa tillförlitliga mätserier med en tidsupplösning på en timme eller tätare.

Kustområdet vid närliggande mätstationer utsätts emellertid för likartade väderparametrar ungefär samtidigt, vartefter omgivande vattenmassa reagerar på ett sammanhängande vis. Även om undantag finns, exempelvis i vikar och bukter där lokala effekter kan ha en stor inverkan, så samvarierar vattenståndet längs olika kuststräckor alltså storskaligt. Den här samvariationen innebär att extrema havsnivåer har liknande egenskaper över stora områden, ett rumsligt beroende. Dessa likheter kan

nyttjas för att få information om extrema havsnivåer på platser som saknar långa mätserier och bidrar också till att minska osäkerheterna i beräkningarna⁷.

Inom detta uppdrag har mätserier av havsvattenstånd från flera platser i hela Östersjön och Västerhavet slagits samman till ett stort dataset som använts i en så kallad Bayesiansk hierarkisk modell (se Bilaga 2 för mer information). Modellen beskriver hur fördelningen av extrema vattenstånd varierar i tid och rum. Mätserierna används för att träna modellen vilken därefter beräknar extremnivåer med hjälp av viktning baserat på avstånd till intilliggande mätstationer. Mätserier från en plats som ligger nära målplatsen har större inverkan i den Bayesianska modellen, medan mätserier från platser längre bort har mindre eller ingen inverkan.

För att observationer från en plats ska ingå i datasetet till den Bayesianska modellen behöver mätserien vara tillräckligt lång. I det dataset som använts för att träna modellen ingår data från 44 mätstationer varav 28 är belägna i Sverige. För att få ett homogent underlag har endast data med en upplösning på en timme använts till analyser eftersom det bara är under senare år som vattenståndet har mätts oftare än varje timme. Dessa högupplösta data visar emellertid att variationer på kortare tidsskala än en timme förekommer.

Även om den Bayesianska modellen ger oss möjlighet att nyttja ett dataunderlag som är betydligt större i både tid och i rum än observationer från en enskild mätstation så finns det fortfarande osäkerheter i beräkningarna som bör beaktas. Återkomstnivåerna från modellen är beroende av det dataunderlag som används, vilket är begränsat till de platser och perioder då det finns systematiska och tillförlitliga observationer. På en handfull platser längs Sveriges kust påbörjades timvis registrering av havsvattenstånd i slutet av 1800-talet och början av 1900-talet. Nya mätstationer har sedan tillkommit över tid, vilket gör att dataunderlaget från vissa stationer endast täcker ett fåtal decennier och andra är för korta för att ingå i modellens träningsdataset. Extremvärden i dataunderlaget kan vara under- eller överrepresenterade, exempelvis genom att mätserierna huvudsakligen representerar perioder då det förekommit färre eller fler extremer än normalt. Det finns också platser där lokala variationer kan förväntas vilka inte alltid finns representerade i dataunderlaget.

Extremnivåer framtagna med den Bayesianska modellen har utvärderats och en bedömning av rimligheten i värdena har gjorts för varje område genom att exempelvis jämföra med uppmätta rekord. Vid platser där långa mätserier finns att tillgå har resultaten från den Bayesianska modellen jämförts med resultat från extremvärdesberäkningar baserade på enskilda mätserier.

3.2 Vattenståndsmätningar i Stockholm

Stockholm har en lång historia av vattenståndsmätningar. Faktiskt är mätserien för havsvattenstånd i Stockholm den längsta ännu pågående serien i världen. Mätningarna här startade redan år 1774 med registrering av vattenståndet vid Slussen en gång per dygn (1774 till 1967). År 1889 startade mätningarna vid mareografen på Skeppsholmen som är aktiv än idag (Figur 2). Vid Skeppsholmen mättes vattenståndet en gång per timme till en början och i dagsläget finns mätvärden upp till minutbasis. Vattenståndet mäts i två brunnar mellan vilka det finns en förbindelse. Brunnarna står i sin tur i förbindelse med havet genom ett långt rör, en konstruktion som effektivt dämpar effekten av kortperiodiska vågor. Mättekniken vid stationen har uppgraderats över tid och idag mäts vattenståndet med två radargivare i den yttre brunnen och i den inre mäts vattenståndet med en tryckgivare, en vinkelgivare samt ett mekaniskt måttband. Det högsta uppmätta vattenståndet vid stationen är 117 centimeter över medelvattenstånd, vilket noterades i januari 1983. Det näst högsta vattenståndet är nästan 15 centimeter lägre, omkring 104 centimeter över medelvattenstånd (2007-01-21).



Figur 2. SMHIs mätstation Stockholm Skeppsholmen. Foto: SMHI.

Längre söderut, i Nynäshamns kommun, finns SMHIs mätstation Landsort Norra. Här finns högupplöst data ner till minutbasis sedan stationen etablerades 2004. Vattenståndet mäts med två radargivare samt med ett mekaniskt måttband och sensorerna är placerade inuti rör som i sin tur är belägna inuti en trumma, vilket också dämpar effekten av kortperiodiska vågor. Mätstationen Landsort Norra är en förlängning av SMHIs station Landsort som mellan åren 1886 till 2006 var placerad på en närliggande plats på ön Landsort. Här mättes vattenståndet automatiskt varje timme, till en början med hjälp av en flottör i en brunn vars rörelser överfördes mekaniskt på ett diagrampapper. Med tiden uppgraderades den tekniska utrustningen och SMHI gick över till att ha tre olika flottörer i brunnen. Det högsta uppmätta vattenståndet vid Landsort är 95 centimeter över medelvattenstånd vilket inträffade i januari 1983, vid samma tillfälle som rekordet vid Stockholm Skeppsholmen.

Mätserierna från Stockholm Skeppsholmen och Landsort ingår i träningsdatasetet till den Bayesianska modellen från 1926 och framåt (se Bilaga 2 för mer information). I Norrtälje saknas längre mätdataserier av vattenståndet.

Ytterligare längre norrut finns SMHIs mätstationer i den södra delen av Bottenhavet, exempelvis Björn (1891 till 1974) och Forsmark (1975 – pågående) som ingår i datasetet till den Bayesianska modellen. En jämförelse av dataserierna vid Landsort, Stockholm Skeppsholmen, Forsmark och Björn indikerar att högvattenhändelser generellt sett blir högre i norr än i söder längs denna kuststräcka, även om det inte alltid är samma väder och vindriktning som ger de höga vattenstånden vid dessa platser. Exempelvis är de högsta uppmätta vattenstånden 143 centimeter över medelvattenstånd vid Forsmark

(2007-01-14) och 137 centimeter över medelvattenstånd vid Björn (1914-01-09). I datasetet till den Bayesianska modellen ingår även mätdata från Degerby på Åland.

Förutom SMHIs mätstationer finns också ett antal stationer i området som tillhör Sjöfartsverket och Stockholms Hamnar och som har avlöst varandra över tid. Dessa mätserier är tyvärr för korta än så länge för att kunna nyttjas i den Bayesianska modellen men har, när så har varit relevant, använts inom detta uppdrag som en del i att utvärdera modellens prestation. I Stockholmsområdet finns exempelvis mätstationerna Loudden (2009 till 2020) samt Frihamnen (2023 – pågående) och i Nynäshamn finns stationerna Norvik (2023 – pågående), Nynäshamn (2009 till 2019) samt Nynäs Fiskehamn (2019 – pågående).

Inom detta uppdrag har vattenståndets nivå vid olika återkomsttider beräknats med den Bayesianska modellen för olika positioner längs den geografiska utbredning som MSB har specificerat för Stockholm (se Figur 1). Skillnaderna i återkomstnivå från norr till söder är så pass markant att det motiverar en finare indelning och området har delats in i tre delområden, Stockholm norra, Stockholm och Stockholm södra. Mellan dessa delområden finns ingen exakt eller skarp gräns utan det handlar snarare om att återkomstnivåer successivt blir lägre från norr till söder. De återkomstnivåer som redovisas i kapitel 2 har hämtats för positionerna Stockholm N, Stockholm och Stockholm S i Figur 1.

Inom uppdraget har bedömningen gjorts, baserat på tillgängliga mätdata, att de nivåer som beräknats med den Bayesianska modellen kan sägas vara representativa för respektive delområde. Notera att det specificerade området spänner över en mycket lång kuststräcka med varierande morfologi, varför lokala variationer inom respektive delområde kan förekomma.

3.3 Medelvattenstånd i dagens klimat i Stockholm

Här beskrivs hur medelvattenståndet i dagens klimat har beräknats utifrån mätdata från vattenståndsstationer. Detta används som utgångspunkt i senare beräkningar.

Medelvattenståndet i dagens klimat representeras här av vattenståndets medelnivå under referensperioden 1995 till 2014. Detta är den period som används i IPCC:s sammanställning AR6 Delrapport 1⁵ och denna medelnivå utgör således även utgångsläge för beräkningarna av framtida medelvattenstånd.

Baserat på mätdata från 23 vattenståndsstationer längs Sveriges kust har ett medelvärde för perioden 1995 till 2014 beräknats för respektive station. Dessa har sedan interpolerats för att skapa ett dataset bestående av gridrutor på 1×1 kilometer längs hela kusten. Från detta dataset har sedan medelvärden för respektive kustkommun beräknats baserat på de gridrutor som ligger inom beräkningsområdet för den aktuella kommunen. Medelnivån under perioden kan variera inom en kommuns kustområde, men det handlar om mindre variationer på upp till cirka 4 centimeter.

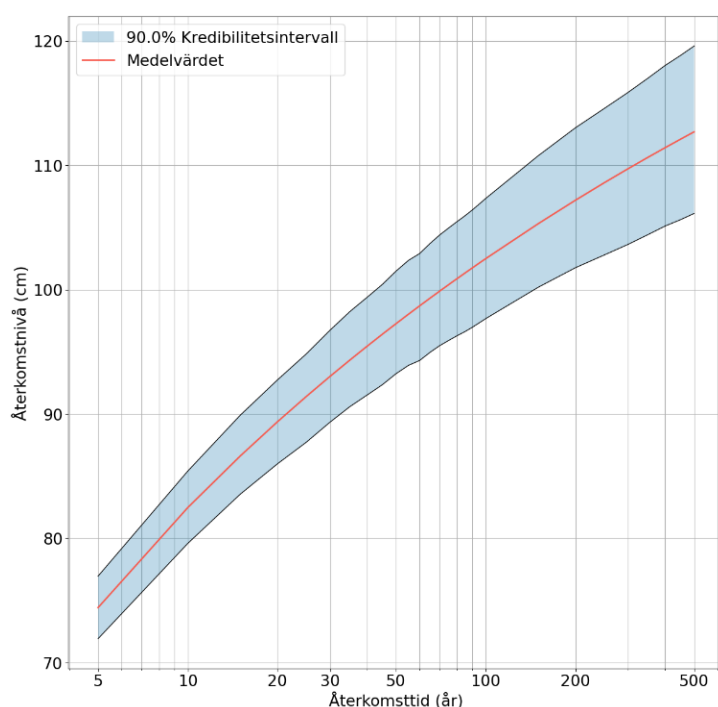
- För Stockholm norra används här den beräknade medelnivån för Norrtälje kommun under referensperioden 1995 till 2014, vilken har beräknats till 14 centimeter i RH 2000.
- För Stockholm används här den beräknade medelnivån för Stockholms kommun under referensperioden 1995 till 2014, vilken har beräknats till 15 centimeter i RH 2000.
- För Stockholm södra används här den beräknade medelnivån för Nynäshamns kommun under referensperioden 1995 till 2014, vilken har beräknats till 14 centimeter i RH 2000.

3.4 Extremnivåer i dagens klimat i Stockholm

I detta avsnitt redovisas beräkningar av extrema vattenstånd i dagens klimat. Beräkningarna bygger på den Bayesianska metod som förklaras i Bilaga 2.

Beräkningar av återkomstnivåer eller extremnivåer baseras ofta på extremvärdesanalys, vilket är en gren inom statistisk probabilitetsteori där extrema värden antas följa en annan fördelning än resterande observationer⁸. Genom extremvärdesanalys kan återkomstnivåer beräknas för händelser med längre återkomsttid än mätseriens längd. En begränsning vid beräkning av återkomstnivåer utifrån statistisk analys av observationer är emellertid att endast händelser som har observerats under mätperioden påverkar de beräknade återkomstnivåerna. Återkomstnivåer med låg sannolikhet kan alltså sägas vara mer osäkra eller otillförlitliga än återkomstnivåer med hög eller medelhög sannolikhet, något som generellt också speglas av bredden i tillhörande konfidens- eller kredibilitetsintervall.

Här har Latent, en Bayesiansk-hierarkisk modell använts för att beräkna återkomstnivåer för Stockholm (se Figur 3 för exempel). De mätserier som har använts för att träna den Bayesianska modellen är mellan omkring 30 och 100 år långa, varför de 50- och 100 årsvärden som redovisas kan anses vara tämligen robusta. Den osäkerhet som föreligger avseende dessa värden kommer sig av exempelvis mätosäkerhet och geografisk osäkerhet. De 500-årsvärden som redovisas i rapporten är förknippade med en större osäkerhet som även orsakas av de underliggande mätseriernas längd. Under en relativt kort mätperiod är det lägre sannolikhet att en händelse med lång återkomsttid ska ha inträffat eller överskridits.



Figur 3. Återkomstnivå relativt medelvattenståndet (cm) mot återkomsttid (år) för den centrala positionen Stockholm, beräknat med den Bayesianska modellen. Medelvärde visas med röd linje och kredibilitetsintervall (Bayesiansk motsvarighet till konfidensintervall) med blå skuggning.

Beräknade återkomstnivåer med 50-, 100-, respektive 500-års återkomsttid relativt medelvattenståndet redovisas för Stockholm norra i Tabell 13, Stockholm i Tabell 14 och Stockholm södra i Tabell 15. Återkomstnivåer i höjdsystemet RH 2000 i dagens klimat fås genom att addera den beräknade medelnivån i respektive kommun under referensperioden 1995 till 2014 (kapitel 3.3) till de beräknade återkomstnivåerna relativt medelvattenståndet. Nivåerna redovisas som medelvärden tillsammans med ett kredibilitetsintervall på 90 procent vilket har tagits fram med en metod som, om den upprepades många gånger på nya data, skulle ge intervall som innehåller det sanna värdet i 90 procent av fallen. Kredibilitetsintervall är Bayesiansk motsvarighet till konfidensintervall.

Utifrån tabellerna kan exempelvis utläsas att återkomstnivån med 100 års återkomsttid har beräknats till 110 (102 – 118) centimeter relativt medelvattenståndet för Stockholm norra (se Tabell 13), och motsvarande nivå för Stockholm södra har beräknats till 95 (90 – 100) centimeter relativt medelvattenståndet (se Tabell 15).

Stockholm norra

Tabell 13. Beräknade återkomstnivåer för Stockholm norra med 50-, 100-, respektive 500-års återkomsttid i dagens klimat, dels relativt medelvattenståndet (MV) och dels i höjdsystemet RH 2000. Siffrorna inom parentes anger ett konfidensintervall på 90%. (Tabell 13 är identisk med Tabell 1).

Återkomsttid (år)	Återkomstnivå rel. MV (cm)	Återkomstnivå RH 2000 (cm)
50	104 (97 – 112)	118 (111 – 126)
100	110 (102 – 118)	124 (116 – 132)
500	121 (111 – 131)	135 (125 – 145)

Stockholm

Tabell 14. Beräknade återkomstnivåer för Stockholm med 50-, 100-, respektive 500-års återkomsttid i dagens klimat, dels relativt medelvattenståndet (MV) och dels i höjdsystemet RH 2000. Siffrorna inom parentes anger ett konfidensintervall på 90%. (Tabell 14 är identisk med Tabell 5).

Återkomsttid (år)	Återkomstnivå rel. MV (cm)	Återkomstnivå RH 2000 (cm)
50	97 (93 – 101)	112 (108 – 116)
100	103 (98 – 107)	118 (113 – 122)
500	113 (106 – 120)	128 (121 – 135)

Stockholm södra

Tabell 15. Beräknade återkomstnivåer för Stockholm södra med 50-, 100-, respektive 500-års återkomsttid i dagens klimat, dels relativt medelvattenståndet (MV) och dels i höjdsystemet RH 2000. Siffrorna inom parentes anger ett konfidensintervall på 90%. (Tabell 15 är identisk med Tabell 9).

Återkomsttid (år)	Återkomstnivå rel. MV (cm)	Återkomstnivå RH 2000 (cm)
50	90 (86 – 94)	104 (100 – 108)
100	95 (90 – 100)	109 (104 – 114)
500	104 (97 – 111)	118 (111 – 125)

3.5 Medelvattenstånd i framtida klimat i Stockholm

Detta avsnitt visar beräkningar av framtida medelvattenstånd inom det geografiska område som MSB har specificerat för Stockholm. Beräkningarna bygger på klimatscenarier från IPCC och har anpassats till lokala förhållanden.

Det område som MSB har specificerat spannar över ett stort antal kustkommuner för vilka beräknade framtida medelvattenstånd finns tillgängliga på SMHI:s hemsida⁹. I detta kapitel redovisas framtida medelvattenstånd för tre av dessa kommuner, Norrtälje kommun i norr, Stockholms kommun i mitten av området och Nynäshamns kommun i söder, motsvarande de positioner för vilka återkomstnivåer har beräknats (Figur 1). Uppgifter för framtida medelvattenstånd baseras på IPCC:s sammanställning AR6 Delrapport 1 – Den naturvetenskapliga grunden⁵ som släpptes 2021 och har hämtats från SMHI:s hemsida⁹. Beräkningarna utgår från projektioner, vilka IPCC bedömer som *troliga*, från tre olika utsläppsscenarier (SSP2-4,5, SSP3-7,0 samt SSP5-8,5). Alla projektioner tar hänsyn till storskaliga regionala variationer i havsnivåhöjning som gör att havet inte stiger lika mycket överallt på jorden samt till den lokala landhöjningen. Uppgifter om landhöjning har hämtats från modellen NKG2016LU¹⁰ (avvägd landhöjning) samt från en senare studie av Kierulf o.a.¹¹.

Den totala landhöjningen i Norrtälje kommun är 0,584 cm/år. Motsvarande värden för Stockholm och Nynäshamn är 0,534 och 0,484 cm/år. Den totala landhöjningen beror av den långsiktiga landhöjningen till följd av det minskade trycket på jordskorpan då inlandsisen från den senaste istiden smälte bort för cirka 10 000 år sedan. Den långsiktiga landhöjningens hastighet kommer vara praktiskt taget oförändrad de närmaste tusen åren. Den totala landhöjningen innehåller även en så kallad elastisk komponent som beror av dagens avsmältning från Grönland och större glaciärer. Den är 0,067 cm/år för Norrtälje och Stockholm, samt 0,066 cm/år för Nynäshamn.

I Tabell 16, 17 och 18 redovisas nivåer i centimeter i RH 2000 på formatet median med nedre gräns för det *sannolika* intervallet till övre gräns för det *sannolika* intervallet inom parentes. Det *sannolika* intervallet begränsas av den 17:e och 83:e percentilen. Det här är alltså ett intervall på 66 procent som innebär att det bedöms vara 17 procents sannolikhet för nivåer under intervallet och 17 procents sannolikhet för nivåer över intervallet för ett visst SSP-scenario. Dessa nivåer utgör således varken en nedre eller en övre gräns för medelvattenståndets möjliga nivå de valda åren.

Sannolikhetsfördelningen för framtida medelvattenstånd har emellertid, precis som andra fördelningar, fler percentiler än just den 17:e och den 83:e. Exakt hur fördelningen för de framtida medelvattenstånden ser ut är okänt, vi känner alltså inte till alla percentiler. Det finns däremot tydliga indikationer på att det rör sig om en skev fördelning med en förskjutning mot högre havsnivåhöjningar. Denna skevhet indikerar att mycket stora havsnivåhöjningar relativt medianvärdet är mera sannolika än mycket små, särskilt under scenarier med höga utsläpp av växthusgaser.

En nyhet i IPCC:s sammanställning AR6 Delrapport 1⁵ är att IPCC här även tillhandahåller fördelningarnas 5:e och 95:e percentiler, alltså ett intervall på 90 procent, vilket för de *troliga* projektionerna benämns av IPCC som ett *mycket sannolikt*¹² intervall. I Tabell 16, 17 och 18 redovisas även det *mycket sannolika* intervallet inom parentes som begränsas av den 5:e och 95:e percentilen.

Stockholm norra

Tabell 16. Framtida medelvattenstånd för Norrtälje kommun i RH 2000 (cm) för år 2100 och 2150 enligt utsläppsscenarierna SSP2-4,5, SSP3-7,0 samt SSP5-8,5, 17:e till 83:e respektive 5:e till 95:e percentil inom parentes.

År	SSP2-4,5 (medelhögt)	SSP3-7,0 (högt)	SSP5-8,5 (mycket högt)
2100	24 (6 till 47) (-4 till 67)	32 (11 till 60) (-2 till 83)	44 (21 till 75) (7 till 102)
2150	29 (-4 till 73) (-19 till 107)	47 (5 till 102) (-16 till 144)	66 (21 till 128) (-1 till 177)

Stockholm

Tabell 17. Framtida medelvattenstånd för Stockholms kommun i RH 2000 (cm) för år 2100 och 2150 enligt utsläppsscenarierna SSP2-4,5, SSP3-7,0 samt SSP5-8,5, 17:e till 83:e respektive 5:e till 95:e percentil inom parentes.

År	SSP2-4,5 (medelhögt)	SSP3-7,0 (högt)	SSP5-8,5 (mycket högt)
2100	30 (12 till 53) (2 till 73)	38 (17 till 66) (4 till 89)	50 (27 till 81) (13 till 107)
2150	37 (5 till 81) (-10 till 116)	56 (14 till 110) (-7 till 152)	75 (30 till 136) (8 till 185)

Stockholm södra

Tabell 18. Framtida medelvattenstånd för Nynäshamns kommun i RH 2000 (cm) för år 2100 och 2150 enligt utsläppsscenarierna SSP2-4,5, SSP3-7,0 samt SSP5-8,5, 17:e till 83:e respektive 5:e till 95:e percentil inom parentes.

År	SSP2-4,5 (medelhögt)	SSP3-7,0 (högt)	SSP5-8,5 (mycket högt)
2100	33 (16 till 56) (6 till 76)	42 (20 till 70) (7 till 93)	53 (30 till 84) (16 till 111)
2150	44 (11 till 88) (-4 till 122)	63 (20 till 117) (-1 till 159)	81 (36 till 143) (14 till 192)

I många planeringssituationer kan det vara värdefullt att utvärdera flera olika utfall. För objekt med låg risktolerans kan det exempelvis vara intressant att analysera möjliga konsekvenser vid ett *mindre troligt* scenario eller havsnivåhöjning utifrån en högre percentil. Utöver de beräknade framtida medelvattenstånden ovan finns beräkningar som utgår ifrån projektioner, vilka IPCC bedömer som *troliga*, från ytterligare två utsläppsscenarier (SSP1-1,9 och SSP1-2,6) samt beräkningar baserade på projektioner som IPCC bedömer som *mindre troliga*¹³ (SSP1-2,6 *mindre troligt* och SSP5-8,5 *mindre troligt*), se Tabell 19, 20 och 21. Dessa *mindre troliga* projektioner inkluderar processer förknippade med djup osäkerhet relaterade till inlandsisarnas instabilitet. Nivåer för *troliga* samt för *mindre troliga* projektioner redovisas i centimeter i RH 2000 på formatet median med 17:e till 83:e respektive 5:e till 95:e percentil inom parentes. För de *troliga* projektionerna motsvarar dessa percentiler ett *sannolikt*

respektive ett *mycket sannolikt* intervall. De nivåer som baseras på projektioner som är *mindre troliga* redovisas för samma percentiler men här har inte intervallet bedömts som *sannolikt* eller *mycket sannolikt* av IPCC.

Stockholm norra

Tabell 19. Framtida medelvattenstånd för Norrtälje kommun i RH 2000 (cm) för år 2100 och 2150 enligt utsläppsscenarierna SSP1-1,9, SSP1-2,6, SSP1-2,6 *mindre troligt* samt SSP5-8,5 *mindre troligt*, 17:e till 83:e respektive 5:e till 95:e percentil inom parentes.

År	SSP1-1,9 (mycket lågt)	SSP1-2,6 (långt)	SSP1-2,6 <i>mindre troligt</i> (långt)	SSP5-8,5 <i>mindre troligt</i> (mycket högt)
2100	7 (-12 till 30) (-26 till 50)	10 (-8 till 33) (-19 till 51)	9 (-10 till 33) (-23 till 56)	52 (21 till 95) (5 till 170)
2150	0 (-32 till 38) (-53 till 68)	1 (-32 till 41) (-49 till 71)	3 (-32 till 43) (-49 till 83)	129 (21 till 429) (-1 till 501)

Stockholm

Tabell 20. Framtida medelvattenstånd för Stockholms kommun i RH 2000 (cm) för år 2100 och 2150 enligt utsläppsscenarierna SSP1-1,9, SSP1-2,6, SSP1-2,6 *mindre troligt* samt SSP5-8,5 *mindre troligt*, 17:e till 83:e respektive 5:e till 95:e percentil inom parentes.

År	SSP1-1,9 (mycket lågt)	SSP1-2,6 (långt)	SSP1-2,6 <i>mindre troligt</i> (långt)	SSP5-8,5 <i>mindre troligt</i> (mycket högt)
2100	13 (-8 till 37) (-23 till 57)	16 (-2 till 39) (-13 till 56)	15 (-4 till 39) (-17 till 62)	58 (27 till 101) (11 till 176)
2150	8 (-25 till 48) (-48 till 79)	9 (-23 till 48) (-39 till 78)	11 (-23 till 51) (-40 till 91)	138 (30 till 437) (8 till 508)

Stockholm södra

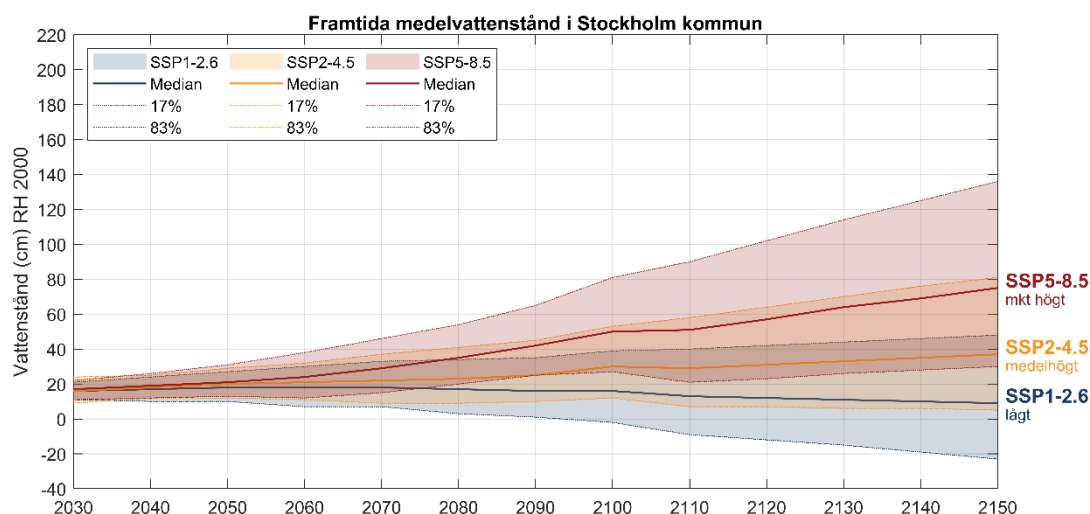
Tabell 21. Framtida medelvattenstånd för Nynäshamns kommun i RH 2000 (cm) för år 2100 och 2150 enligt utsläppsscenarierna SSP1-1,9, SSP1-2,6, SSP1-2,6 *mindre troligt* samt SSP5-8,5 *mindre troligt*, 17:e till 83:e respektive 5:e till 95:e percentil inom parentes.

År	SSP1-1,9 (mycket lågt)	SSP1-2,6 (långt)	SSP1-2,6 <i>mindre troligt</i> (långt)	SSP5-8,5 <i>mindre troligt</i> (mycket högt)
2100	16 (-5 till 41) (-21 till 61)	19 (1 till 42) (-10 till 60)	18 (0 till 42) (-13 till 65)	62 (30 till 105) (14 till 180)
2150	14 (-21 till 55) (-44 till 87)	15 (-16 till 54) (-33 till 83)	17 (-16 till 57) (-33 till 97)	145 (36 till 444) (14 till 516)

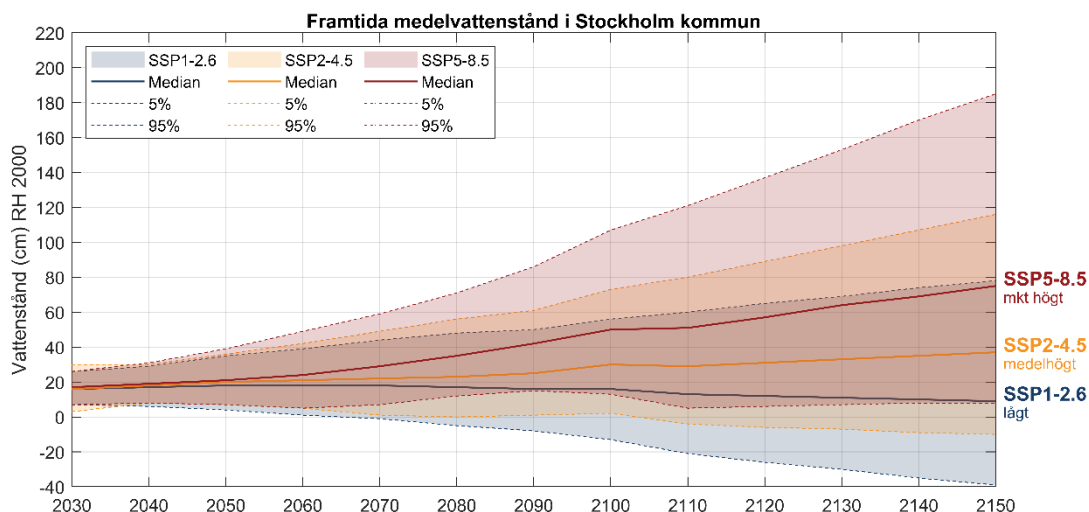
I Figur 4 visas utvecklingen av framtida medelvattenstånd i Stockholms kommun under det låga (SSP1-2,6), medelhöga (SSP2-4,5) och det mycket höga (SSP5-8,5) scenariot utifrån median och *sannolika* intervall dvs. från 17:e till 83:e percentilerna, och i Figur 5 visas motsvarande men för det *mycket*

sannolika intervallet, dvs. från 5:e till 95:e percentilerna. Från figurerna kan exempelvis utläsas att intervallen för de olika scenarierna överlappar varandra vilket visar att ett framtida medelvattenstånd kan nås under olika scenarier och olika percentiler. Exempelvis ger den övre percentilen av det sannolika intervallet (83:e percentilen) under det medelhöga scenariot SSP2-4,5 något högre nivåer än medianen (50:e percentilen) under det mycket höga scenariot SSP5-8,5.

Från figurerna kan även utläsas när i tiden ett visst framtida medelvattenstånd skulle kunna nås. Exempelvis skulle ett framtida medelvattenstånd på 60 centimeter i RH 2000 nås cirka år 2070 enligt 95:e percentilen under det mycket höga scenariot SSP5-8,5 och vid ungefär år 2085 enligt 83:e percentilen under samma scenario. Under det medelhöga scenariot SSP2-4,5 kan ett medelvattenstånd på 60 centimeter i RH 2000 nås cirka 2090 enligt den 95:e percentilen och under det låga scenariot (SSP1-2,6) kommer ett medelvattenstånd på 60 centimeter i RH 2000 nås cirka 2110 enligt den 95:e percentilen.



Figur 4. Utveckling av framtida medelvattenstånd i Stockholms kommun under tre olika scenarier, lågt (SSP1-2,6), medelhögt (SSP2-4,5) och mycket högt (SSP5-8,5). Medianvärden visas som heldragna linjer och de skuggade fälten täcker de sannolika intervallen (17:e till 83:e percentil).



Figur 5. Utveckling av framtida medelvattenstånd i Stockholms kommun under tre olika scenarier, lågt (SSP1-2,6), medelhögt (SSP2-4,5) och mycket högt (SSP5-8,5). Medianvärden visas som heldragna linjer och de skuggade fälten täcker de mycket sannolika intervallen (5:e till 95:e percentil).

3.6 Extremnivåer i framtida klimat i Stockholm

Här beskrivs hur extremnivåer i framtida klimat har tagits fram och vilka antaganden som har gjorts. Se kapitel 2 (Tabell 2 till 4, 6 till 8 samt 10 till 12) för beräknade nivåer.

Extremnivåer i ett framtida klimat fås genom att kombinera beräknade extremnivåer relativt medelvattenståndet med projektioner för framtida medelvattenstånd för den aktuella platsen. Resultaten bygger på antagandet att fördelningen av extrema vattenstånd är stationär, det vill säga densamma i framtiden som den har varit historiskt. En studie för Östersjöområdet baserad på nedskalade klimatscenarier från globala klimatmodeller indikerar att trender i vattenståndens årsmax förefaller vara oberoende av utsläppsscenario¹⁴ och stödjer alltså ett sådant tillvägagångssätt.

Bra att ha i åtanke är emellertid att vi i dagsläget inte vet säkert hur klimatförändringen kan komma att påverka det väder som ger högvattenhändelser längs våra kuster, särskilt inte på lång sikt. Beräkningar som gjorts visar inte entydiga resultat och det är ännu osäkert hur exempelvis lågtrycksbanor, stormars frekvens eller stormstyrka kommer att förändras i norra Europa. Förändringar i medelvattenstånd och därmed vattendjup kan också ha effekter på havsbassängers resonansegenskaper och förhållanden vid kustlinjen. Även vågklimat och tidvattenamplituder kan komma att förändras i viss utsträckning i framtiden.

Det tillvägagångssätt som resultaten i rapporten bygger på, att extremnivåer, skattade utifrån historiska mätdata, överlagras framtida medelvattenstånd utifrån valda utsläppsscenarioer och tidshorisonter, är alltså något av en förenkling, men också etablerad praxis enligt rådande kunskapsläge.

Återkomstnivåer har beräknats för positionerna Stockholm N, Stockholm och Stockholm S (Figur 1) för återkomsttiderna 100 och 500 år i ett framtida klimat år 2100 och 2150 under tre olika utsläppsscenarioer, där extremnivåer kombinerats med det framtida medelvattenståndet för respektive kommun (Norrtälje, Stockholm och Nynäshamn) i höjdsystemet RH 2000. Ett tillhörande kombinerat konfidensintervall på 90 procent anges inom parentes.

3.7 Kombinerade osäkerhetsintervall

I detta avsnitt beskrivs hur osäkerheter i resultaten hanteras. Metoden bygger på att kombinera osäkerheter från både extremnivåer och framtida medelvattenstånd.

Både beräknade extremnivåer och framtida medelvattenstånd är behäftade med osäkerheter, och som ett mått på dessa osäkerheter anges nivåer med tillhörande konfidensintervall (kredibilitetsintervall, sannolika intervall etc.). Beräknade extremnivåer i framtida klimat anges tillsammans med konfidensintervall, vilka innehåller osäkerheten i extremvärdet och osäkerheten i projektionen av medelvattenståndet.

Återkomstnivåer av höga havsvattenstånd i dagens klimat har beräknats med hjälp av den Bayesianska modellen. För att få ett mått på osäkerheter och skapa en mer robust beräkning har, för varje återkomstnivå, ett stickprov på 20 000 värden genererats.

För att beskriva hela fördelningen av framtida medelvattenstånd har en skev-normalfördelning använts. Skevheten i fördelningen är mot högre havsnivåhöjning och indikerar att högre havsnivåhöjningar relativt medianvärdet är mer sannolika än lägre havsnivåhöjningar, särskilt under scenarier med höga utsläpp av växthusgaser. Utifrån nivåerna för de kända percentilerna (5, 17, 50, 83 och 95), framtagna av IPCC och nedskalade av SMHI, för ett givet årtionde och under ett givet scenario har skev-normalfördelningens parametrar tagits fram. När en passande skev-normalfördelning erhållits har ett stort antal slumpmässiga värden (20 000) dragits för att skapa ett representativt stickprov av framtida medelvattenstånd för givet årtionde och scenario.

Återkomstnivåer av höga havsvattenstånd i framtida klimat har beräknats genom att kombinera de två stickproven från de tidigare stegen; ett för återkomstnivå i dagens klimat och ett för framtida medelvattenstånd för givet år och scenario. Genom att summera varje värde i de två stickproven erhålls 20 000 nya värden. Därefter anpassas flera olika fördelningar till det nya stickprovet och den fördelning väljs som uppfyller vissa kriterier bäst. Utifrån den valda fördelningen genereras ett nytt slumpmässigt stickprov (500 000 värden) och därefter beräknas återkomstnivåer i framtida klimat med tillhörande konfidensintervall genom att beräkna medianvärdet samt 5 och 95 percentilerna, det vill säga ett kombinerat konfidensintervall på 90 procent.

Se Bilaga 2 för mer detaljer om de beräkningar som har genomförts utifrån den Bayesianska modellen.

4 Referenser

- [1] https://www.riksdagen.se/sv/dokument-och-lagar/dokument/svensk-forfattningssamling/forordning-2009956-om-oversvamningsrisker_sfs-2009-956/ [2025-03-17]
- [2] <https://www.msb.se/sv/regler/gallande-regler/skydd-mot-olyckor/msbfs-20131/> [2025-03-17]
- [3] Enligt artikel 8 paragraf 2 i Förordning (2009:956) om översvänningsrisker: översvämningar som sannolikt återkommer med minst 100 års intervall.
- [4] <https://www.msb.se/sv/publikationer/forordningen-om-oversvamningsrisker--sveriges-genomforande-av-eus-oversvamningsdirektiv-2024/> [2025-03-17]
- [5] IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- [6] Medelvärde över FN:s klimatpanel IPCC:s referensperiod 1995 till 2014
- [7] Calafat, Francisco & Marcos, Marta. (2020). Probabilistic reanalysis of storm surge extremes in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 117. 201913049. 10.1073/pnas.1913049117.
- [8] Coles, S. (2001). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. Berlin: Springer Verlag. doi:<http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4471-3675-0>
- [9] <https://www.smhi.se/klimat/stigande-havsnivaer/framtida-medelvattenstand-1.165493> [2025-03-17]
- [10] Vestøl, O., J. Ågren, H. Steffen, H. Kierulf, and L. Tarasov. 2019. NKG2016LU: A new land uplift model for Fennoscandia and the Baltic region. *Journal of Geodesy* 93: 1759–1779. <https://doi.org/10.1007/s00190-019-01280-8>.
- [11] Kierulf, H., H. Steffen, V. R. Barletta, M. Lidberg, J. Johansson, O. Kristiansen, L. Tarasov. 2021. A GNSS velocity field for geophysical applications in Fennoscandia. *Journal of Geodynamics* 146, 2021
- [12] Fullständig lista över konfidensnivåer och bedömda sannolikheter som används i IPCC:s rapporter hittas i fotnot 4 på sidan 4 i Klimat i förändring 2021 - Den naturvetenskapliga grunden.
- [13] Sidan 1308 i Fox-Kemper, B., H.T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S.S. Drijfhout, T.L. Edwards, N.R. Golledge, M. Hemer, R.E. Kopp, G. Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I.S. Nurhati, L. Ruiz, J.-B. Sallée, A.B.A. Slangen, and Y. Yu, 2021: Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1211–1362, doi:10.1017/9781009157896.011.
- [14] Hieronymus, M., & Hieronymus, F. (2023). A novel machine learning based bias correction method and its application to sea level in an ensemble of downscaled climate projections. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 75(1).

Bilaga 1: Ordlista

Extremnivå

En extremnivå är en högvattenhändelse som återkommer med en beräknad sannolikhet. Sannolikheten uttrycks ofta som en återkomsttid, exempelvis 100-år, vilket betyder att händelsen i genomsnitt inträffar en gång under en hundraårsperiod.

Högvattenhändelse

När det blåser mycket kan havet stiga kraftigt över medelvattenståndet under en kort tid. Detta kallas för en högvattenhändelse.

Klimatscenario

För att kunna göra beräkningar av framtida klimat behövs antaganden om framtida utsläpp av växthusgaser. Vanligtvis används utsläppsscenarioer som utarbetats av FN:s klimatpanel, IPCC. I utvärderingsrapporten AR6 2021 används fem scenarier för att beräkna framtida klimatförändringar, SSP, "Shared Socioeconomic Pathways". De beskriver det framtida klimatet utifrån olika samhällsutvecklingar som är kopplade till mängd växthusgasutsläpp, från låga scenarier som motsvarar överenskommelserna i Parisavtalet (SSP1-1.9) till höga scenarier (SSP5-8.5) med en stor klimatförändring.

Konfidensintervall och kredibilitetsintervall

Ett konfidensintervall är ett statistiskt beräknat intervall som används för att uttrycka osäkerhet i ett resultat. Exempelvis innebär ett 90-procentigt konfidensintervall att om samma analys upprepades många gånger, skulle det sanna värdet ligga inom intervallet i 90 procent av fallen. Intervall i denna rapport är dubbelsidiga, vilket betyder att det är 5 procents sannolikhet för värden under och 5 procents sannolikhet för värden över intervallet. Ett kredibilitetsintervall är motsvarigheten till konfidensintervall inom Bayesiansk statistik och har samma innebörd som konfidensintervallet. Konfidensintervallen tar hänsyn till de statistiska osäkerheter som ingår i underlagen men däremot inte till andra typer av osäkerhet, exempelvis eventuella lokala variationer eller mätosäkerheter.

Percentil

Percentiler anger de värden under vilka en viss procentandel av värdena i en datamängd finns. Till exempel är den 75:e percentilen ett tal som 75 procent av värden ligger under, och övriga 25 procent ligger över. Ett specialfall av percentiler är medianen, som är den 50:e percentilen.

Projektion

En projektion är en uppskattning av framtida förändringar, i denna rapport kan det handla om klimat eller havsnivåer. Projektionen baseras på klimatmodeller och antaganden om framtida utsläpp av växthusgaser. En projektion visar alltså vad som kan hända under olika scenarier, inte vad som med säkerhet kommer att hända i framtiden. Projektioner skiljer sig från prognoser genom att de inte syftar till att förutsäga det mest troliga framtida utfallet, utan att visa möjliga utvecklingsvägar beroende på vilka antaganden som görs. Tidsskalan för en projektion är generellt också avsevärt längre än för en prognos. En projektion bygger alltid på ett klimatscenario, som i sin tur beskriver en tänkt framtid med vissa utsläppsnivåer och samhällsförhållanden. Scenariot är ett antagande – projektionen är det modellerade resultatet av det antagandet.

Sannolikhetsfördelning

Sannolikhetsfördelning är ett begrepp som används inom sannolikheteori och statistik. Det är en matematisk funktion som i detta fall ger sannolikheterna för att olika höga vattenstånd ska inträffa. Det finns flera sannolikhetsfördelningar som används vid extremvärdesanalys och det är viktigt att verifiera att vald fördelning passar till dataunderlaget. En vanlig fördelning som används i samband med Blockmaximum-metoden är Generalized Extreme Value (GEV).

Återkomsttid

Hur vanlig eller ovanlig en händelse är kan beskrivas med hjälp av begreppet återkomsttid.

Återkomsttid är ett mått på hur ofta naturliga händelser, såsom höga havsvattenstånd, kan förväntas förekomma. Med en händelses återkomsttid menas att händelsen i genomsnitt överskrids en gång under denna tid.

Återkomsttiden (eller återkomstperioden) definieras som inversen av sannolikheten att en viss nivå överskrids under en given period. Ett vattenstånd med en återkomsttid på exempelvis 100 år överskrids i genomsnitt en gång på 100 år. Det innebär att sannolikheten är 1 procent att händelsen överskrids varje enskilt år.

Över tid ackumuleras sannolikheten för att händelsen ska överskridas. För en konstruktion med en beräknad livslängd på 100 år, blir den ackumulerade sannolikheten hela 63 procent att 100-årshändelsen överskrids någon gång under 100 år. Det är alltså mer troligt att konstruktionen kommer att utsättas för en sådan händelse under sin beräknade livslängd på 100 år än att den inte gör det. En mer ovanlig händelse, såsom en 1000-års händelse, har en årlig sannolikhet på 0,1 procent och den ackumulerade sannolikheten under 100 år är 10 procent.

Bilaga 2: Översiktlig beskrivning Bayesiansk metod

Inledning

Extrema vattenstånd utgör en stor risk för människor, egendom och miljö. För att planera skyddsåtgärder krävs tillförlitliga uppskattningar av sannolikheten för dessa händelser. Traditionella metoder bygger på extremvärdesfördelningar från mätdata, men har begränsningar då de kräver långa mätserier och har svårt att uppskatta sällsynta händelser.

För att övervinna dessa begränsningar användes en Bayesiansk hierarkisk modell¹, där rumsliga samband mellan observationer utnyttjas. Denna studie är inspirerad av tidigare forskning² om probabilistiska analyser av extremhändelser och tillämpades på Östersjön och delar av Nordsjön. Fyra olika modeller testades, varav den modell som beskrivs här, Latent, valdes för sin förmåga att bättre minska osäkerheter och möjliggöra skattningar även vid platser utan mätstation. Till skillnad från traditionella metoder som analyserar varje plats separat, möjliggör denna modell en integrerad analys av extrema vattenstånd över ett större geografiskt område.

Mätdata

Data från 44 olika mätstationer användes för att skapa en så komplett bild som möjligt av tidigare extrema vattenstånd, från platser runt om hela Östersjön och Västerhavet. Data har hämtats från följande källor:

- Vattenståndsdata från SMHI³ och den internationella databasen GESLA 3⁴.
- Vattenståndsdata från Copernicus Marine Environment Monitoring Service⁵.



Figur 1. Karta över inkluderade mätstationer i den Bayesianska modellen.

Efter empiriska tester i form av modellsimuleringar gjordes valet att använda data från tidsperioden 1926–2024 samt att endast inkludera stationer med minst 31 observerade årsmax under den perioden, vilket resulterade i 44 stationer. Detta säkerställer att modellen blir robust samtidigt som mätserierna är långa.

Data avtrendades med hjälp av medelvärdesbildning med ett glidande centrerat 20-årsmedel för att ta bort långsiktiga trender i vattenståndsserien, såsom landhöjning och havsnivåhöjning, och en översiktlig kvalitetskontroll av data gjordes. Årshögsta vattenstånd identifierades genom att välja det högsta observerade värdet per år, där ett år definierades enligt ett förskjutet kalenderår från den 1 juli till den 30 juni nästföljande år. Detta val gjordes för att minimera påverkan av säsongsmässiga variationer.

Beskrivning av den Bayesianiska hierarkiska modellen Latent

Modellen bygger på blockmaximametoden, där de högsta observerade vattenstånden varje år användes för att uppskatta framtida extrema händelser. En Generalized Extreme Value (GEV) fördelning användes för att modellera dessa extremvärden.

Latent-modellen är en Bayesianisk hierarkisk modell där det rumsliga sambandet mellan mätstationer utnyttjas genom Gaussiska processer. En Gaussisk process är en stokastisk process, vilket innebär att den beskriver en mängd slumpmässiga variabler som förändras över ett kontinuerligt område, exempelvis tid eller rum. Processen definieras av två funktioner: en medelfunktion, som beskriver det förväntade värdet vid varje punkt, och en kovariansfunktion, som beskriver hur starkt olika punkter samvarierar. Dessa funktioner bestämmer tillsammans processens egenskaper och gör det möjligt att modellera och interpolera data, där varje uppskattat värde åtföljs av en sannolikhetsfördelning som beskriver osäkerheten i värdet.

Genom att använda information från närliggande stationer minskar osäkerheten i beräkningarna då datasetet blir större och modellen möjliggör högdimensionell delning av information mellan stationer. De tre parametrarna i GEV-fördelningen, den rumsliga parametern (μ), skalparametern (σ) och formparametern (ξ) modelleras alla som summan av en Gaussisk process och en slumpmässig normalfördelad felterm. Varje parameter följer en distinkt rumslig Gaussisk process med en unik felterm.

För att uppskatta parametrarna användes Markov Chain Monte Carlo-simuleringar⁶, där 20 000 iterationer genomförs för att säkerställa robusta uppskattningar. Resultatet används för att beräkna sannolikhetsfördelningar för återkomstnivåer och för att kvantifiera osäkerheter.

Antaganden

För att genomföra beräkningarna gjordes vissa antaganden:

1. Extrema vattenstånd följer vissa statistiska mönster och förändras på ett förutsägbart sätt.
2. Parametrarna i modellen (såsom genomsnittligt extremt vattenstånd och variationer) behandlas som slumpvariabler.
3. Vattenståndsdata varierar beroende på geografisk plats (latitud och longitud).
4. Framtida extrema vattenstånd antas följa en av flera fördelningar: normal, skev-normal, ex-Gaussisk, lognormal, Gumbel, Student-t eller Weibull.
5. Klimatscenarier (SSP-scenarier) används för att ta hänsyn till framtida klimatförändring.

Beräkning av återkomstnivåer i framtida klimat

Beräkningen av återkomstnivåer i framtida klimat sker i flera steg. Först valdes en geografisk plats, ett klimatscenario (SSP2-4.5, SSP3-7.0 eller SSP5-8.5) för medelvattenstånd och en framtida tidpunkt (2100 eller 2150). Givet statistiken för respektive medelvattenstånd valdes den skev-normalfördelning som gav mest spridning (entropi) i sannolikhetsfördelningen. Därefter genererades 20 000 slumpmässiga värden från den fördelning, där varje värde representerar ett möjligt medelvattenstånd.

Dessa värden adderades till de av Latent estimerade värdena för extremnivåerna, vilket ger återkomstnivåer under ett klimatscenario. Därefter identifierades den sannolikhetsfördelning som bäst representerar återkomstnivåerna, baserat på prediktionsfelet och modellens kvalitet enligt Akaikes informationskriterium⁷. Slutligen genererades 500 000 slumpmässiga värden från den valda fördelningen som sedan användes för att beräkna percentiler samt median för återkomstnivåer i framtida klimat.

Osäkerheter

Viktigt att vara medveten om är att modellen, precis som traditionell extremvärdesanalys, fortfarande är beroende av data. Även om ett större dataset med bättre rumslig och tidsmässig upplösning ligger till grund för analyserna och används för att träna modellen så finns det fortfarande brister som beror på den begränsade mängden mätningar. Osäkerheterna minskar till följd av det utökade datasetet, men modellen har inte möjlighet att representera processer som saknas i underliggande data. Därför kan den inte förväntas beskriva lokala variationer som orsakas av t.ex. bottenförhållanden, kustgeometri eller tillflöden från land om dessa inte finns representerade i träningsdatasetet. Även nivåer med längre återkomsttid är förknippade med osäkerhet eftersom de underliggande dataserierna fortfarande som mest är omkring 100 år långa. Därför behöver resultat från modellen utvärderas för varje enskild plats eller kusträcka och jämföras med närliggande platser och områden. I vissa fall kan osäkerhetsmarginaler behöva adderas eller mer detaljerade analyser av exempelvis lokal vinduppstuvning vara nödvändiga.

Slutsats

Den Bayesianska hierarkiska modellen ger en mer heltäckande uppskattning av extrema vattenstånd än traditionella metoder. Genom att använda rumsliga samband och probabilistiska metoder möjliggörs bättre uppskattningar av extremvärden även vid platser som saknar mätdata. Resultaten kan användas för planering och beslutsfattande i syfte att minska riskerna för framtida översvämningar.

Referenser

- [1] Basilio Kuosmanen, S and Hieronymus, M (2025). A probabilistic view of extreme sea level events in the Baltic Sea (submitted to Natural Hazards and Earth System Sciences).
- [2] Calafat, F. M., & Marcos, M. (2020). Probabilistic reanalysis of storm surge extremes in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(4), 1877-1883.
- [3] <https://www.smhi.se/data/hav-och-havsmiljo/havsvattenstand/sealevelrh2000/35119> [2024-11-05]
- [4] Haigh, I. D., Marcos, M., Talke, S. A., Woodworth, P. L., Hunter, J. R., Hague, B. S., ... & Thompson, P. (2023). GESLA version 3: A major update to the global higher-frequency sea-level dataset. *Geoscience Data Journal*, 10(3), 293-314.
- [5] <https://data.marine.copernicus.eu/products> [2024-11-05]
- [6] Vehtari, A., Gelman, A., Simpson, D., Carpenter, B., & Bürkner, P. C. (2021). Rank-normalization, folding, and localization: An improved $\hat{R}$ for assessing convergence of MCMC (with discussion). *Bayesian analysis*, 16(2), 667-718.
- [7] Bozdogan, H. (1987). Model selection and Akaike's information criterion (AIC): The general theory and its analytical extensions. *Psychometrika*, 52(3), 345-370.



SMHI – SVERIGES METEOROLOGISKA OCH HYDROLOGISKA INSTITUT

601 76 Norrköping • Besöksadress Folkborgsvägen 17 • Telefon 011-495 80 00 • E-Post smhi@smhi.se • www.smhi.se