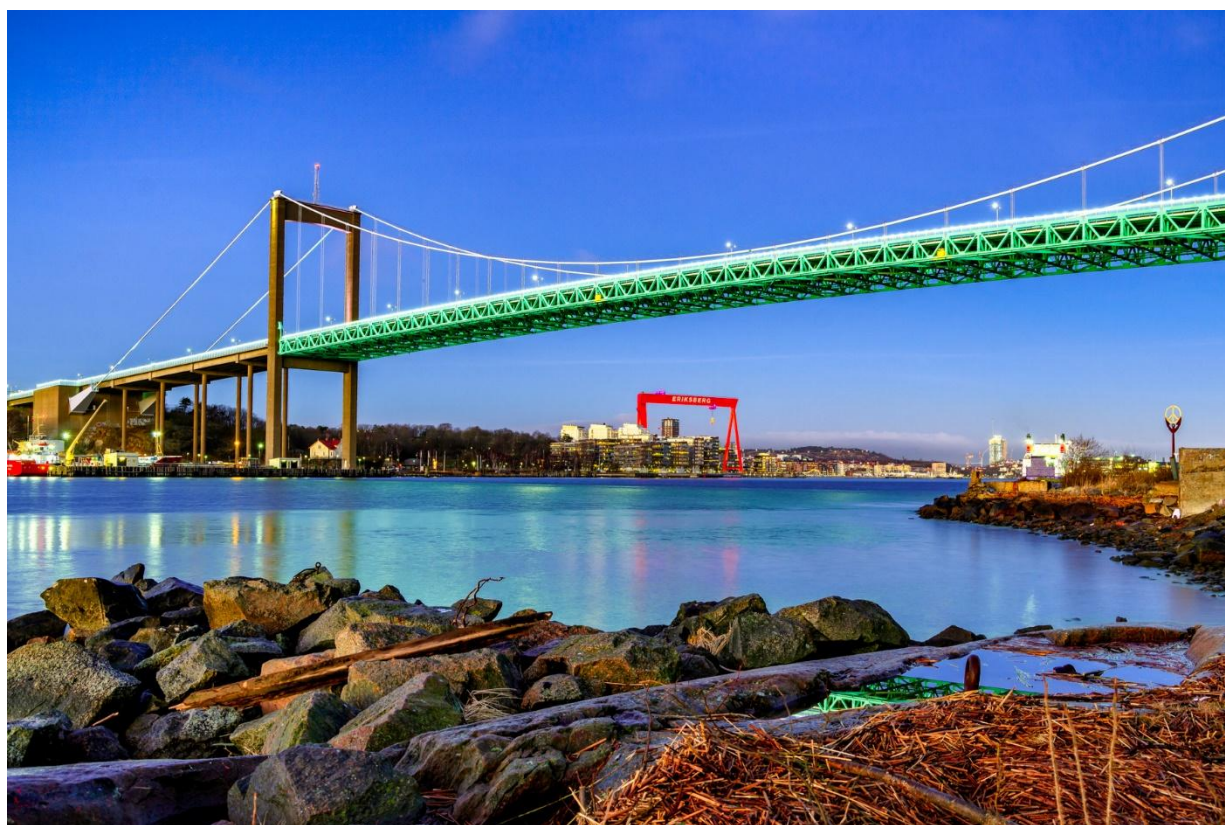


Högvattenhändelser i Göteborg idag och i framtiden

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



Pärmbild

Vy in mot Göteborg med Älvsborgsbron i förgrunden. Fotograf Carina Andreasson, Mostphotos

RAPPORT NR 2025-06**TITEL**

Högvattenhändelser i Göteborg 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
2025-03-25 Granskad

Utförd av
Sofia Åström, SMHI

Innehåll

1	Bakgrund	1
2	Sammanfattande resultat.....	2
2.1	Torshamnen till Eriksberg	3
2.2	Eriksberg till Tingstadstunneln	4
2.3	Tingstadstunneln till Lärjeholm	5
3	Metod och underlag	7
3.1	Introduktion	7
3.2	Vattenståndsmätningar i Göteborg.....	8
3.2.1	Jämförelse av vattenstånd Torshamnen och Eriksberg	11
3.2.2	Jämförelse av vattenstånd Torshamnen och Tingstadstunneln	13
3.2.3	Jämförelse av vattenstånd Torshamnen och Lärjeholm.....	15
3.2.4	Jämförelse av vattenstånd Torshamnen och Agnesberg	17
3.2.5	Sammanfattning av jämförelser	19
3.3	Medelvattenstånd i dagens klimat i Göteborg.....	19
3.4	Extremnivåer i dagens klimat i Göteborg	19
3.5	Medelvattenstånd i framtida klimat i Göteborg	21
3.6	Extremnivåer i framtida klimat i Göteborg	24
3.7	Kombinerade osäkerhetsintervall	24
4	Referenser	26
	Bilaga 1: Ordlista.....	27
	Bilaga 2: Översiktlig beskrivning Bayesiansk metod	29

1 Bakgrund

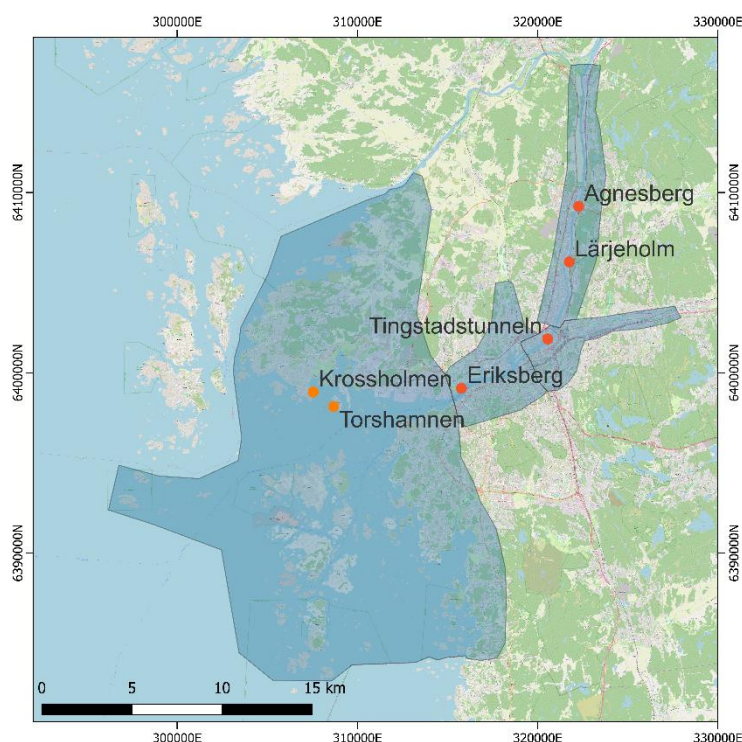
I Sverige genomförs översvämningdirektivet genom Förordning (2009:956)¹ om översvämningssrisker och MSBFS 2013:1² föreskrifter om länsstyrelsens planer för hantering av översvämningssrisker (riskhanteringsplaner). MSB är ansvarig myndighet och genomför arbetet i nära samarbete med länsstyrelserna. Arbetet 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 Göteborg. Eftersom området omfattar en relativ stor utbredning, särskilt långt uppströms i Göta älv där vattenståndet skiljer sig från vattenståndet utanför mynningen, redovisas resultat för Göteborg för tre olika delsträckor. Delsträckornas indelning utgår ifrån platser där mätningar finns att tillgå och som använts inom utredningen.



Figur 1. Geografiskt område vid Göteborg specificerat av MSB, samt mätstationerna i området som använts inom uppdraget. Bakgrundskarta: OpenStreetMap.

2 Sammanfattande resultat

Resultaten för Göteborg är uppdelade i tre olika delsträckor vars indelning utgörs av platser där mätningar finns att tillgå och som använts i analysen, se Figur 1 för ungefärliga positioner. De tre olika delsträckorna är följande:

1. Torshamnen till Eriksberg
2. Eriksberg till Tingstadstunneln
3. Tingstadstunneln till Lärjeholm

Mätstationen vid Eriksberg är belägen ungefär vid Älvsborgsbron så nivåerna för delsträckan Torshamnen till Eriksberg kan antas gälla för området väster om Älvsborgsbron. Mätstationen vid Tingstadstunneln ligger cirka 1300 meter uppströms Hisingsbron, vilken ersatt Götaälvbron. Ytterligare cirka 4,8 kilometer uppströms från Tingstadstunneln är mätstationen vid Lärjeholm belägen.

Beräknade återkomstnivåer i dagens och framtida klimat redovisas för delsträckan Torshamnen till Eriksberg i Avsnitt 2.1, för delsträckan Eriksberg till Tingstadstunneln i Avsnitt 2.2 och för delsträckan Tingstadstunneln till Lärjeholm i Avsnitt 2.3.

2.1 Torshamnen till Eriksberg

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, för sträckan Torshamnen till Eriksberg.

Tabell 1. Beräknade återkomstnivåer för Torshamnen till Eriksberg 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 13 är identisk med Tabell 1).

Återkomsttid (år)	Återkomstnivå rel. MV (cm)	Återkomstnivå RH 2000 (cm)
50	146 (141 till 151)	153 (148 till 158)
100	152 (146 till 158)	159 (153 till 165)
500	164 (156 till 172)	171 (163 till 179)

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. 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 Torshamnen till Eriksberg 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	197 (165 till 261)	216 (148 till 285)
500	209 (176 till 274)	228 (159 till 297)

Tabell 3. Beräknade återkomstnivåer för Torshamnen till Eriksberg 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	205 (160 till 259)	235 (148 till 322)
500	217 (172 till 272)	247 (159 till 334)

Tabell 4. Beräknade återkomstnivåer för Torshamnen till Eriksberg 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	216 (164 till 269)	253 (156 till 351)
500	228 (176 till 282)	266 (167 till 363)

2.2 Eriksberg till Tingstadstunneln

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, för sträckan från Eriksberg till Tingstadstunneln. Återkomstnivåerna i Tabell 5 fås genom att addera ett påslag på 6 centimeter för delsträckan Eriksberg till Tingstadstunneln till återkomstnivåerna i Tabell 1.

Tabell 5. Beräknade återkomstnivåer för Eriksberg till Tingstadstunneln 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 %.

Återkomsttid (år)	Återkomstnivå rel. MV (cm)	Återkomstnivå RH 2000 (cm)
50	152 (147 till 157)	159 (154 till 164)
100	158 (152 till 164)	165 (159 till 171)
500	170 (162 till 178)	177 (169 till 185)

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, samt addera ett påslag på 6 centimeter. 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 Eriksberg till Tingstadstunneln 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	203 (171 till 267)	222 (154 till 291)
500	215 (182 till 280)	234 (165 till 303)

Tabell 7. Beräknade återkomstnivåer för Eriksberg till Tingstadstunneln 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	211 (166 till 265)	241 (154 till 328)
500	223 (178 till 278)	253 (165 till 340)

Tabell 8. Beräknade återkomstnivåer för Eriksberg till Tingstadstunneln 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	222 (170 till 275)	259 (162 till 357)
500	234 (182 till 288)	272 (173 till 369)

2.3 Tingstadstunneln till Lärjeholm

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, för sträckan från Tingstadstunneln till Lärjeholm. Återkomstnivåerna i Tabell 9 fås genom att addera ett påslag på 18 centimeter för delsträckan Tingstadstunneln till Lärjeholm till återkomstnivåerna i Tabell 1.

Tabell 9. Beräknade återkomstnivåer för Tingstadstunneln till Lärjeholm 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 %.

Återkomsttid (år)	Återkomstnivå rel. MV (cm)	Återkomstnivå RH 2000 (cm)
50	164 (159 till 169)	171 (166 till 176)
100	170 (164 till 176)	177 (171 till 183)
500	182 (174 till 190)	189 (181 till 197)

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, samt addera ett påslag på 18 centimeter för delsträckan Tingstadstunneln till Lärjeholm. 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 Tingstadstunneln till Lärjeholm 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	215 (183 till 279)	234 (166 till 303)
500	227 (194 till 292)	246 (177 till 315)

Tabell 11. Beräknade återkomstnivåer för Tingstadstunneln till Lärjeholm 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	223 (178 till 277)	253 (166 till 340)
500	235 (190 till 290)	265 (177 till 352)

Tabell 12. Beräknade återkomstnivåer för Tingstadstunneln till Lärjeholm 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	234 (182 till 287)	271 (174 till 369)
500	246 (194 till 300)	284 (185 till 381)

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 på nya data, 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 Göteborg år 2100 och 2150 baseras på IPCC:s sammanställning AR6 Delrapport 1 – Den naturvetenskapliga grunden⁵, och utgår ifrån de tre utsläppsscenarier 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 området i Figur 1 men lokala variationer kan förekomma och kortperiodiska vågeffekter ingår ej. Mer detaljer kring beräknade värden finns i kapitlen 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, riskerar att orsaka översvämningar redan idag. I takt med att medelvattenståndet i havet stiger, till följd av den globala uppvärmningen, ändras utgångsläget för dessa högvattenhändelser och medför att händelser som är relativt ovanliga idag blir mer vanliga i framtiden. Risker för översvämning kan begränsas genom planering och implementering av riskreducerande strategier, där kännedom om sannolikheten för att extrema händelser med olika återkomstnivåer 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 hierarkiska modellen behöver vissa kriterier uppfyllas. I detta fall har mätseriernas längd och startår optimerats för att ge en robust modell och kriterierna har satts till att mätserien behöver vara minst 31 år lång, med startår 1926 eller senare, och med en tidsupplösning på en timme. I det dataset som använts för att träna den Bayesianska 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.

Göteborg stad ligger vid Göta älvs mynning i Kattegatt och sträcker sig från havet i väster, uppströms Göta älv mot förgreningen av älven vid Kungälv. Centrala delarna av staden är belägna mellan Älvsborgsbron i väster och Hisingsbron i öster, ungefär mellan Eriksberg och Tingstadstunneln, se Figur 1 för ungefärliga positioner. Vattenståndet i Göteborg påverkas både av vattenståndet i havet och flödet från älven, och vattenståndet ökar gradvis från havet och vidare uppströms älven.

Mätningar av vattenstånd sker idag på flertalet platser i Göteborgsområdet och utförs av Göteborgs Stad, SMHI och Sjöfartsverket. Mätserien från Göteborg Torshamnen är tillräckligt lång (längre än 31 år) för att ingå i det dataset som ingår i den Bayesianska modellen. Övriga tillgängliga mätserier i området är dessvärre antingen för korta eller har för låg upplösning i tiden för att ingå i datasetet till den Bayesianska modellen. Detta medför att lokala effekter från havet och vidare uppströms Göta älv inte kan förväntas fångas av den Bayesianska modellen.

Den Bayesianska modellen kan alltså förväntas representera återkomstnivåerna för Göteborg utanför Göta älvs mynning i havet, väster om Älvsborgsbron på ett robust sätt men däremot inte längre uppströms eftersom de mätserierna ej ingår i träningsdata. För att få representativa nivåer in mot stadens centrala delar och vidare uppströms har ytterligare analyser av tillgängliga och lämpliga mätserier utförts för att få olika mått på tillägg som adderas till beräknade extremnivåer från Torshamnen.

3.2 Vattenståndsmätningar i Göteborg

Vattenståndsmätningar i Göteborgsområdet har utförts och utförs på flera platser. Flera av mätserierna är dock för korta för att ingå i det dataset som använts för att träna den Bayesianska modellen, och är även relativt korta för att utgöra ett bra underlag statistiskt sett. Den äldre och nedlagda mätserien vid Ringön har endast dygnsvärden och har därför inte använts inom detta uppdrag. Inte heller den äldre nedlagda mätserien vid Klippan har använts eftersom den inte varit aktiv under en längre sammanhängande tidsperiod som sammanfaller med någon av de övriga stationerna.

Även om flera av mätserierna är relativt korta så utgör de ändå värdefullt underlag för att få förståelse för hur vattenståndet i centrala Göteborg och vidare uppströms Göta älv förhåller sig till vattenståndet vid Torshamnen. De mätserier som använts här för vidare analys är dels SMHI:s mätningar vid Torshamnen och Krossholmen, och dels Göteborg stads mätningar vid Eriksberg, Tingstadstunneln och Lärjeholm, samt i viss utsträckning även från Agnesberg, se Figur 1 för ungefärliga positioner. Mätningarna vid Torshamnen och Krossholmen har använts som referens och jämförts mot mätningar vid de övriga platserna för att få en uppskattning på eventuella påslag från Torshamnen och vidare uppströms Göta älv.

Mätningarna vid Torshamnen påbörjades i november 1967 och avslutades i januari 2023, och mätningarna vid Krossholmen påbörjades i augusti 2021, pågår idag och har ersatt mätstationen vid Torshamnen. En jämförelse av observationer för den överlappande mätperioden mellan de båda stationerna har utförts och visar att en sammanslagning av mätserierna är rimlig. Fram till 2002 mättes vattenståndet varje timme och har ökat successivt på senare tid, idag mäts vattenståndet på minutbasis. Mätstationen vid Krossholmen visas i Figur 2.

Mätstationen i Krossholmen består av en brunn i betong förbunden med havet via ett rör som mynnar några meter under havsytan. Konstruktionen gör att kortperiodiska vågrörelser dämpas och möjliggör

att mäta vattenståndet även vid is. Pegeln är vid upprepade tillfällen inmätt i rikets höjdsystem RH 2000 vilket betyder att nollpunkten är känd och verifierad. Vattenståndet mäts med två radargivare samt ett mekaniskt måttband.

Den sammanslagna mätserien Torshamnen-Krossholmen är i princip helt utan avbrott med en datatillgänglighet på över 99 procent baserat på timobservationer från november 1967 till oktober 2024. Den höga datatillgängligheten vid Torshamnen-Krossholmen medför att analysen inte påverkas av statistisk systematisk avvikelse.

Det högsta uppmätta vattenståndet vid Torshamnen-Krossholmen, sedan mätstarten i november 1967, uppnår cirka 149 centimeter relativt medelvattenståndet baserat på timvärden och noterades i november 1985.



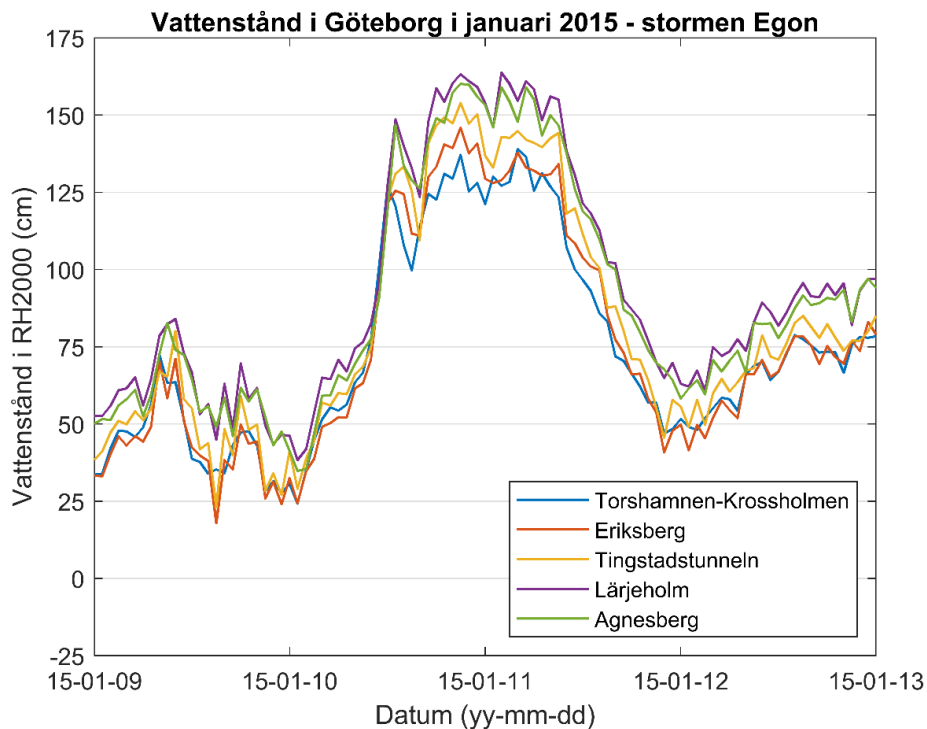
Figur 2. Mätstationen vid Göteborg Krossholmen. Foto: SMHI.

Göteborgs Stad och Sjöfartsverket utför mätningar på flera platser i Göteborgsområdet. De mätserier som varit aktuella att analysera inom detta uppdrag är Göteborgs Stads mätningar vid Eriksberg, Tingstadstunneln, Lärjeholm och Agnesberg, se Figur 1 för ungefärliga positioner. Mätserier från dessa stationer finns tillgängliga från januari 2013 fram till idag, med undantag för Lärjeholm där data finns tillgängliga från augusti 2010. Mätstationerna är inmätta i rikets höjdsystem RH 2000 och kortperiodiska vågrörelser dämpas till följd av att mätutrustningen är placerad inuti rör. Vattenståndet mäts idag på minutbasis med en tryckgivare och en radargivare, vilken är den primära givaren.

En översiktlig kvalitetsgranskning av data har gjorts inom uppdraget och data med låg kvalitet har flaggats som dålig, sorterats bort och ingår ej i fortsatta analyser. Kortare avbrott, samt perioder med lägre datakvalité förekommer i mätserierna, men mätserierna har ändå en datatillgänglighet från cirka 92 till 98 procent, baserat på timvärden från mätstart för respektive station fram till oktober 2024.

Mätserierna från dessa stationer har analyserats och jämförts med mätserien vid Torshamnen-Krossholmen med syftet att få representativa extremnivåer in mot stadens centrala delar och vidare uppströms. Analyser av vattennivåer baseras mätserier med en tidsupplösning på 1 timme och i höjdsystemet RH 2000.

I Figur 3 visas ett exempel på vattenståndet vid Torshamnen-Krossholmen, Eriksberg, Tingstadstunneln, Lärjeholm och Agnesberg vid högvattenhändelsen under stormen Egon i januari 2015. Vid detta tillfälle nådde vattenståndet vid Torshamnen som mest upp mot cirka 140 cm i RH 2000, och längre uppströms nådde vattenståndet upp mot cirka 165 cm i RH 2000. Utifrån figuren kan även utläsas att vattenståndet skiljer sig uppströms längs älven såväl före som efter högvattenhändelsen. Liknande mönster ses även vid andra högvattenhändelser.



Figur 3. Vattenstånd i RH 2000 under stormen Urd i december 2016 vid Torshamnen-Krossholmen (blå), Eriksberg (röd), Tingstadstunneln (orange), Lärjeholm (lila) och Agnesberg (grönt).

För att få ett mer robust mått på vilka nivåskillnader som förekommer mellan Torshamnen-Krossholmen och de övriga stationerna in mot centrala Göteborg och vidare uppströms Göta älv har samtidiga mätningar analyserats och linjära samband tagits fram. Eftersom höga flöden i älven samt högvattenhändelser i havet vanligen inträffar under vintern har samtidiga mätningar begränsats till månaderna från december till mars. Resultat från analyserna redovisas för de olika mätstationerna i Avsnitt 3.2.1 till 3.2.4.

3.2.1 Jämförelse av vattenstånd Torshamnen och Eriksberg

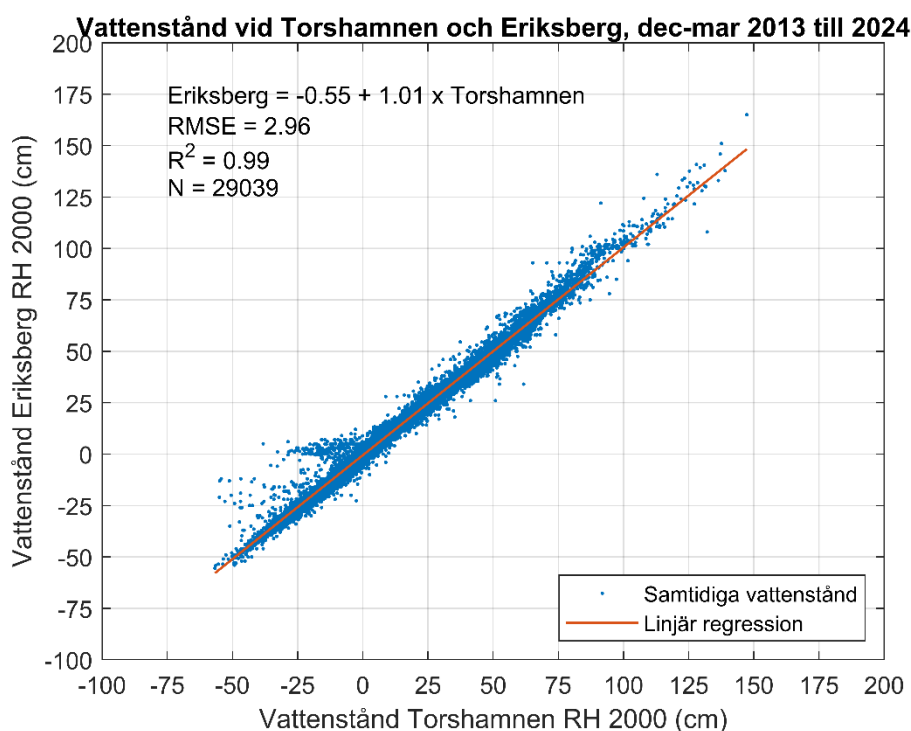
För att få förståelse för hur vattenståndet vid Eriksberg förhåller sig till vattenståndet vid Torshamnen har samtida vattenstånd vid de båda platserna analyserats och linjär regressionsanalys utförts. Vattenstånd vid Torshamnen mot samtida vattenstånd vid Eriksberg, från samtliga mätningar för månaderna från december till mars för tidsperioden 2013 till 2024, samt ett linjärt samband (linjär regression) visas i Figur 4.

Analysen visar att det är hög grad av samvariation, där determinationskoefficienten (R^2) anger hur stor del av variationen i den beroende variabeln, i detta fall vattenståndet vid Eriksberg, som kan förklaras av variationer i den oberoende variabeln, i detta fall vattenståndet vid Torshamnen, under förutsättning att sambandet är linjärt. I detta fall har determinationskoefficienten beräknats till 0,99 och visar att 99 procent av variationen av vattenståndet vid Eriksberg kan förklaras av vattenståndet vid Torshamnen.

Vidare visar det linjära sambandet att det är en skillnad på cirka -0,6 centimeter mellan Torshamnen och Eriksberg (skärningspunkt = -0,55). Eftersom skärningspunkten är nära noll betyder det att när vattennivån vid Torshamnen är nära noll, är nivån vid Eriksberg nästan densamma. Den lilla negativa skärningen tyder på att vattennivån vid Eriksberg generellt ligger något lägre än vid Torshamnen vid vattennivåer nära noll men skillnaden är väldigt liten.

Därtill kan utläsas att det linjära sambandet är nästintill proportionellt (1:1) med en regressionskoefficient på 1,01. Detta innebär att om vattenståndet höjs 100 centimeter vid Torshamnen så kan vattenståndet vid Eriksberg antas höjas 101 centimeter, en höjning på 1 procent, enligt det linjära sambandet.

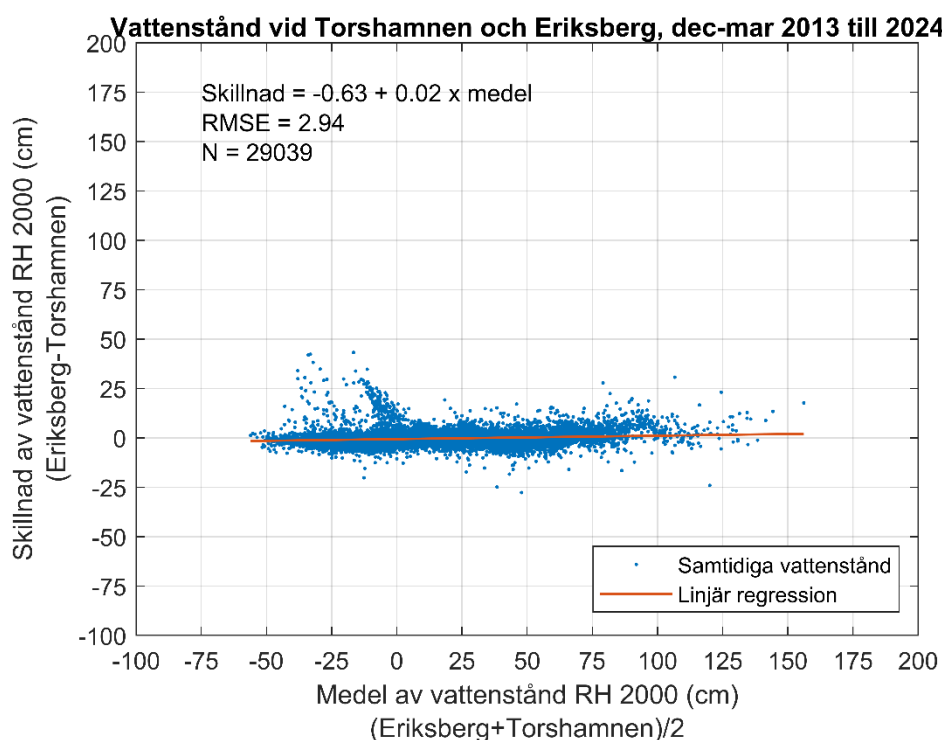
RMSE (Root Mean Square Error) ger ett mått på spridningen av avvikelserna, alltså som ett mått på det linjära sambandets prediktionsfel, som i detta fall är på knappt 3 centimeter. Antalet observationer som ingår i analysen anges av N.



Figur 4. Samtidiga vattenstånd vid Torshamnen och Eriksberg utifrån mätningar från december till mars 2013 till 2024, samt linjärt samband.

För att få ytterligare förståelse för hur vattenståndet vid Eriksberg förhåller sig till vattenståndet vid Torshamnen har det undersökts hur skillnaden i vattennivåer mellan platserna varierar med medelvärdet av vattenståndet. I Figur 5 visas medelvärdet av vattenståndet mellan Torshamnen och Eriksberg mot skillnaden av vattenståndet, Eriksberg minus Torshamnen, samt ett linjärt samband. Sambandet visar att skillnaden i vattennivån är cirka 0,6 centimeter lägre i genomsnitt än medelvärdet. Detta är en liten systematisk skillnad som visar att vattennivån vid Eriksberg vanligen ligger något lägre än vid Torshamnen vid nivåer nära noll. Om exempelvis medelvärdet av vattenståndet är 0 centimeter, är den förväntade skillnaden mellan platserna cirka -0,6 centimeter. Detta betyder att vattennivån vid Eriksberg i genomsnitt är cirka 0,6 centimeter lägre än vattennivån vid Torshamnen vid nivåer nära noll.

Vidare visar sambandet att det är en mycket svag positiv lutning med en regressionskoefficient på cirka 0,02 vilken innebär att om medelvärdet av vattenståndet höjs 100 centimeter, ökar skillnaden mellan vattenstånd vid Eriksberg och Torshamnen med cirka 2 centimeter. Eftersom lutningen är nära noll, är ökningen väldigt liten, vilket visar att skillnaden mellan platserna förändras lite när vattenståndet höjs. En lutning nära noll tyder på att skillnaden i vattennivå mellan platserna är konstant oavsett nivå. Om lutningen avviker från noll visar det att skillnaden i nivå förändras med vattenståndet.



Figur 5. Medel av vattenstånd mot skillnad av vattenstånd vid Torshamnen och Eriksberg utifrån mätningar från december till mars 2013 till 2024, samt linjärt samband.

Sammantaget visar jämförelserna att vattenståndet vid Eriksberg i princip är detsamma som vid Torshamnen. Den genomsnittliga skillnaden är mindre än RMSE, vilket betyder att eventuella skillnader ligger inom sambandets osäkerhet. Jämförelsen av samtidiga vattennivåer visar att vattennivåerna vid Eriksberg och Torshamnen följer varandra nästan exakt, med en minimal avvikelse, och jämförelsen av skillnad mot medelvärde bekräftar att skillnaderna är små och förändras marginellt vid höga vattenstånd. Analyserna visar att skillnaderna är marginella, i praktiken försumbara och lägre än RMSE. Detta innebär att vattenståndet vid Eriksberg kan betraktas som i princip identiskt som vattenståndet vid Torshamnen.

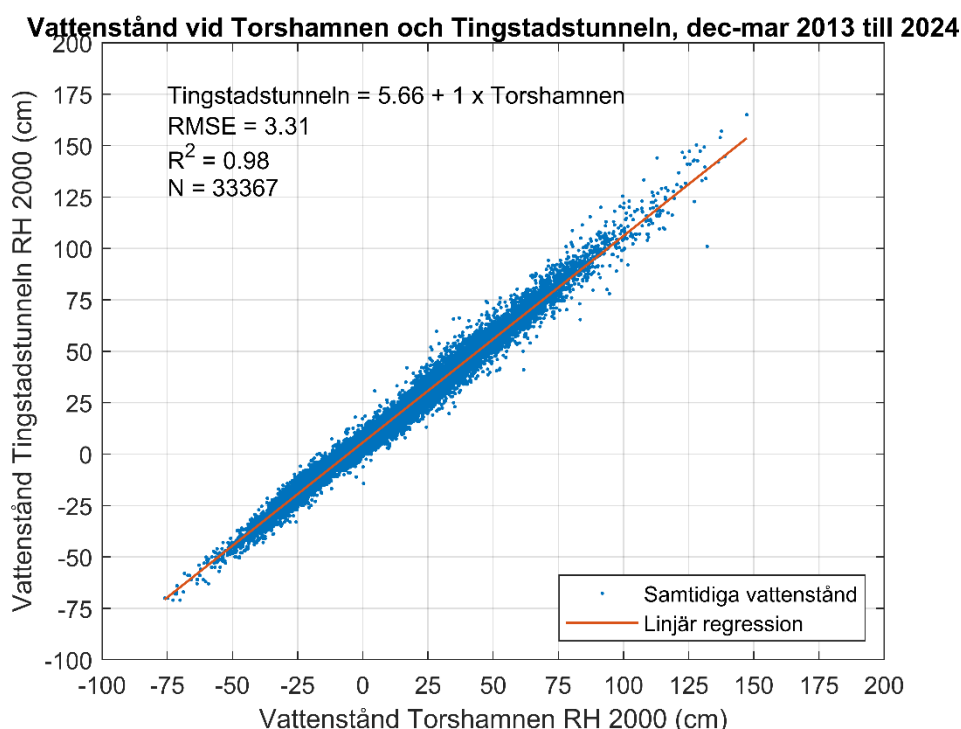
3.2.2 Jämförelse av vattenstånd Torshamnen och Tingstadstunneln

För att få förståelse för hur vattenståndet vid Tingstadstunneln förhåller sig till vattenståndet vid Torshamnen har samtidiga vattenstånd vid de båda platserna analyserats och linjär regressionsanalys utförts. Vattenstånd vid Torshamnen mot samtidiga vattenstånd vid Tingstadstunneln, från samtliga mätningar för månaderna från december till mars för tidsperioden 2013 till 2024, samt ett linjärt samband (linjär regression) visas i Figur 6.

Analysen visar att det är hög grad av samvariation, där determinationskoefficienten (R^2) anger hur stor del av variationen i den beroende variabeln, i detta fall vattenståndet vid Tingstadstunneln, som kan förklaras av variationer i den oberoende variabeln, i detta fall vattenståndet vid Torshamnen, under förutsättning att sambandet är linjärt. I detta fall har determinationskoefficienten beräknats till 0,98 och visar att 98 procent av variationen av vattenståndet vid Tingstadstunneln kan förklaras av vattenståndet vid Torshamnen.

Vidare visar det linjära sambandet att det är en skillnad på cirka 6 centimeter mellan Torshamnen och Tingstadstunneln (skärningspunkt = 5,66). Detta innebär att när vattennivån vid Torshamnen är nära 0 centimeter är vattenståndet vid Tingstadstunneln cirka 6 centimeter högre. Därtill kan utläsas att det linjära sambandet är i princip proportionellt (1:1) med en regressionskoefficient på 1,00 vilket innebär att om vattenståndet höjs 100 centimeter vid Torshamnen så kan vattenståndet vid Tingstadstunneln antas höjas 100 centimeter. Vattenståndet vid Tingstadstunneln är alltså nästan identiskt med vattenståndet vid Torshamnen, förutom en systematisk nivåskillnad på cirka 6 centimeter.

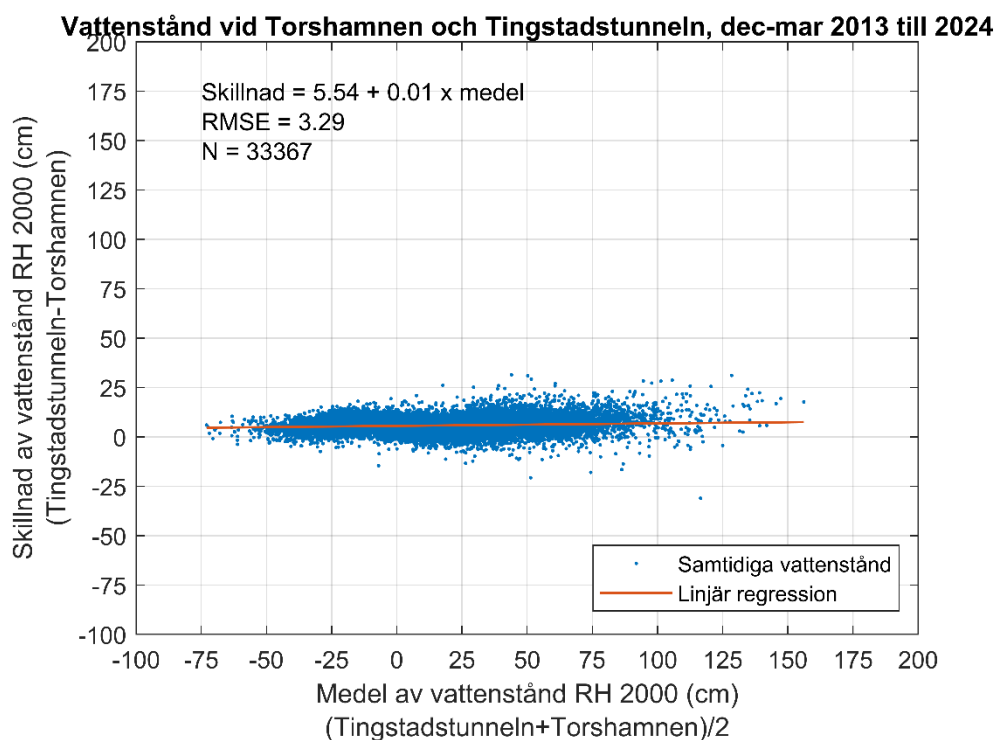
RMSE (Root Mean Square Error) ger ett mått på spridningen av avvikelserna, alltså som ett mått på det linjära sambandets prediktionsfel på cirka 3 centimeter. Antalet observationer som ingår i analysen anges av N.



Figur 6. Samtidiga vattenstånd vid Torshamnen och Tingstadstunneln utifrån mätningar från december till mars 2013 till 2024, samt linjärt samband.

För att få ytterligare förståelse för hur vattenståndet vid Tingstadstunneln förhåller sig till vattenståndet vid Torshamnen har det undersökts hur skillnaden i vattennivåer mellan platserna varierar med medelvärdet av vattenståndet. I Figur 7 visas medelvärdet av vattenståndet mellan Torshamnen och Tingstadstunneln mot skillnaden av vattenståndet, Tingstadstunneln minus Torshamnen, samt ett linjärt samband. Sambandet visar att skillnaden i vattennivån är cirka 6 centimeter högre i genomsnitt än medelvärdet. Detta är en systematisk skillnad som visar att vattennivån vid Tingstadstunneln vanligen är högre än vid Torshamnen vid nivåer nära noll. Om medelvärdet av vattenståndet är 0 centimeter, är den förväntade skillnaden mellan platserna cirka 6 centimeter. Detta betyder att vattennivån vid Tingstadstunneln i genomsnitt är cirka 6 centimeter högre än vattennivån vid Torshamnen vid nivåer kring noll.

Vidare visar sambandet att det är en mycket svag positiv lutning (svagare än vid Eriksberg) med en regressionskoefficient på cirka 0,01 vilken innebär att om medelvärdet av vattenståndet höjs 100 centimeter, ökar skillnaden mellan vattenståndet vid Tingstadstunneln och Torshamnen med cirka 1 centimeter. Eftersom lutningen är mycket liten, nära noll, är ökningen väldigt liten, vilket visar att skillnaden mellan platserna förändras lite när vattenståndet höjs.



Figur 7. Medel av vattenstånd mot skillnad av vattenstånd vid Torshamnen och Tingstadstunneln utifrån mätningar från december till mars 2013 till 2024, samt linjärt samband.

Sammantaget visar regressionsanalysen av samtidiga vattennivåer ett i princip proportionellt samband med en lutning på 1,00 mellan vattennivåerna vid Tingstadstunneln och Torshamnen. Analysen av skillnad mot medelvärde visar en mycket svag positiv lutning på 0,01, som innebär att skillnaden ökar marginellt vid högre nivåer. Båda analyser visar en systematisk skillnad på cirka +6 centimeter. Detta gör det rimligt att anta att vattenståndet vid Tingstadstunneln i genomsnitt är cirka 6 centimeter högre än vattenståndet vid Torshamnen.

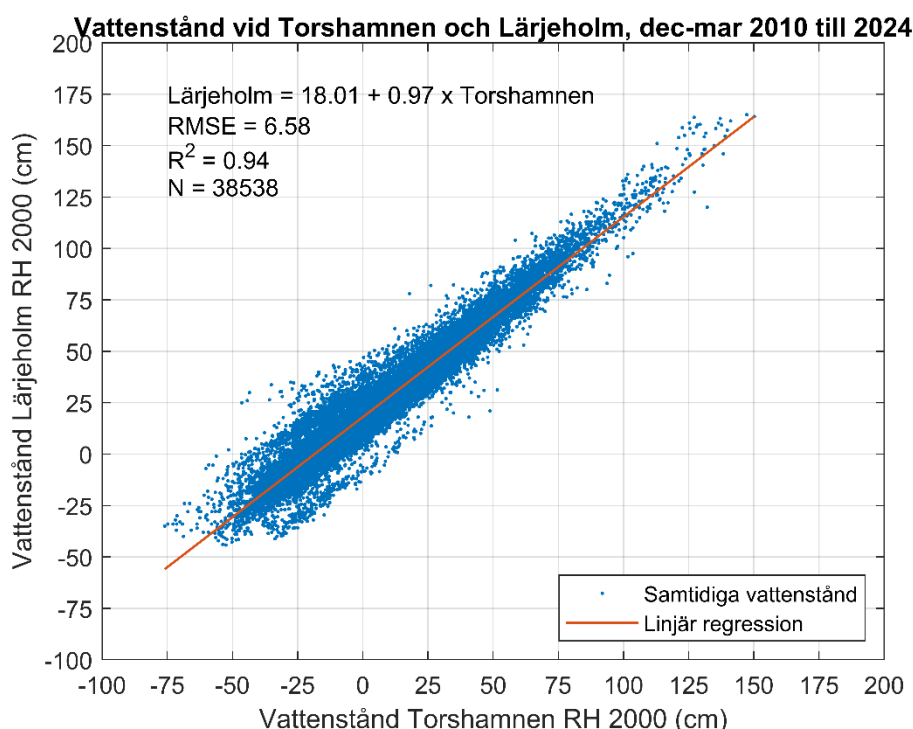
3.2.3 Jämförelse av vattenstånd Torshamnen och Lärjeholm

För att få förståelse för hur vattenståndet vid Lärjeholm förhåller sig till vattenståndet vid Torshamnen har samtida vattenstånd vid de båda platserna analyserats och linjär regressionsanalys utförts. Vattenstånd vid Torshamnen mot samtida vattenstånd vid Lärjeholm, från samtliga mätningar för månaderna från december till mars för tidsperioden 2013 till 2024, samt ett linjärt samband (linjär regression) visas i Figur 8.

Även för Lärjeholm visar analysen att det är hög grad av samvariation, där determinationskoefficienten (R^2) anger hur stor del av variationen i den beroende variabeln, i detta fall vattenståndet vid Lärjeholm, som kan förklaras av variationer i den oberoende variabeln, i detta fall vattenståndet vid Torshamnen, under förutsättning att sambandet är linjärt. Sambandet är något svagare än vid Tingstadstunneln och Eriksberg men fortfarande starkt. Determinationskoefficienten har beräknats till 0,94 och visar att 94 procent av vattenståndet vid Lärjeholm kan förklaras av vattenståndet vid Torshamnen.

Vidare visar det linjära sambandet att det är en konstant skillnad på cirka 18 centimeter mellan Torshamnen och Lärjeholm (skärningspunkt = 18,01). Därtill kan utläsas att det linjära sambandet är nästan proportionellt (1:1) med en regressionskoefficient på 0,97 vilket innebär att om vattenståndet höjs 100 centimeter vid Torshamnen så kan vattenståndet vid Lärjeholm antas höjas 97 centimeter, alltså 3 procent lägre. Till skillnad från Tingstadstunneln och Eriksberg fås det vid Lärjeholm en regressionskoefficient lägre än 1, vilket kan tolkas som att signalen från havet är något dämpad och fortplantar sig inte fullt ut hela vägen uppströms till Lärjeholm.

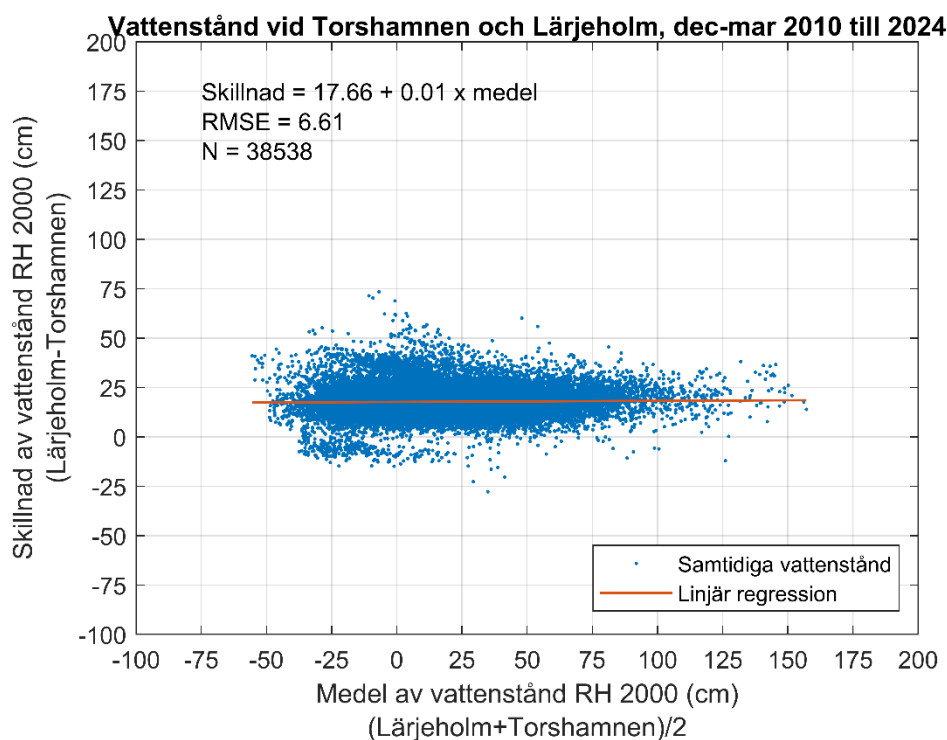
RMSE (Root Mean Square Error) ger ett mått på spridningen av avvikelserna, alltså som ett mått på det linjära sambandets prediktionsfel, som i detta fall är på cirka 7 centimeter (större osäkerhet än vid Eriksberg och Tingstadstunneln). Antalet observationer som ingår i analysen anges av N.



Figur 8. Samtidiga vattenstånd vid Torshamnen och Lärjeholm utifrån mätningar från december till mars 2013 till 2024, samt linjärt samband

För att få ytterligare förståelse för hur vattenståndet vid Lärjeholm förhåller sig till vattenståndet vid Torshamnen har det undersökts hur skillnaden i vattennivåer mellan platserna varierar med medelvärdet av vattenståndet. I Figur 9 visas medelvärdet av vattenståndet mellan Torshamnen och Lärjeholm mot skillnaden av vattenståndet, Lärjeholm minus Torshamnen, samt ett linjärt samband. Sambandet visar att skillnaden i vattennivå är cirka 18 centimeter högre i genomsnitt än medelvärdet. Detta är en systematisk skillnad som visar att vattennivån vid Lärjeholm vanligen är högre än vid Torshamnen vid nivåer nära noll. Om exempelvis medelvärdet av vattenståndet är 0 centimeter, är den förväntade skillnaden mellan platserna cirka 18 centimeter. Detta betyder att vattennivån vid Lärjeholm i genomsnitt är cirka 18 centimeter högre än vattennivån vid Torshamnen vid nivåer nära noll

Vidare visar sambandet att det är en mycket svag positiv lutning med en regressionskoefficient på cirka 0,01 vilken innebär att om medelvärdet av vattenståndet höjs 100 centimeter, ökar skillnaden mellan vattenståndet vid Lärjeholm och Torshamnen med cirka 1 centimeter. Eftersom lutningen är mycket liten, nära noll, är ökningen väldigt liten, vilket visar att skillnaden mellan platserna förändras lite när vattenståndet höjs. En lutning nära noll tyder på att skillnaden i vattennivå mellan platserna är konstant oavsett nivå. Om lutningen avviker från noll visar det att skillnaden i nivå förändras med vattenståndet.



Figur 9. Medel av vattenstånd mot skillnad av vattenstånd vid Torshamnen och Lärjeholm utifrån mätningar från december till mars 2013 till 2024, samt linjärt samband.

Sammantaget visar regressionsanalysen av samtidiga vattennivåer ett nästan proportionellt samband med en lutning på 0,97 mellan vattennivåerna vid Lärjeholm och Torshamnen. Detta kan tolkas som att signalen från havet är något dämpad och inte fortplantar sig fullt ut hela vägen uppströms till Lärjeholm. Analysen av skillnad mot medelvärde visar en mycket svag positiv lutning på 0,01 som innebär att skillnaden ökar marginellt vid högre nivåer. Båda analyser visar en systematisk skillnad på cirka +18 centimeter. Detta gör det rimligt att anta att vattenståndet vid Lärjeholm i genomsnitt är cirka 18 centimeter högre än vattenståndet vid Torshamnen.

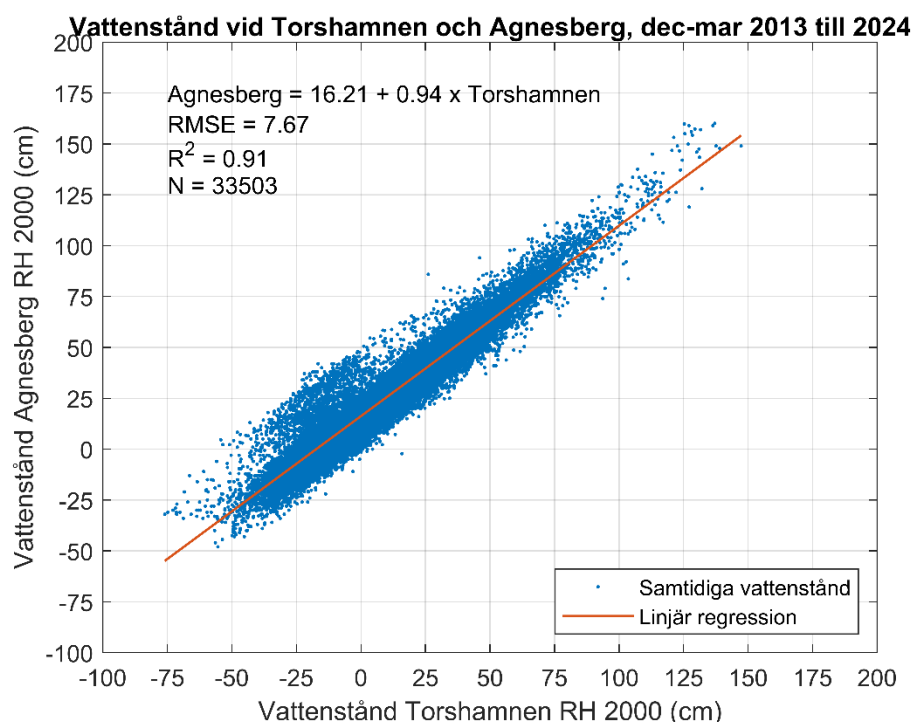
3.2.4 Jämförelse av vattenstånd Torshamnen och Agnesberg

Utav de mätningar av vattenstånd som finns tillgängliga i Göteborgsområdet ligger de från Agnesberg längst uppströms Göta älv, cirka 3 kilometer uppströms Lärjeholm. För att få förståelse för hur vattenståndet vid Agnesberg förhåller sig till vattenståndet vid Torshamnen har samtida vattenstånd vid de båda platserna analyserats och linjär regressionsanalys utförts. Vattenstånd vid Torshamnen mot samtida vattenstånd vid Agnesberg, från samtliga mätningar för månaderna från december till mars för tidsperioden 2013 till 2024, samt ett linjärt samband (linjär regression) visas i Figur 10.

Analysen visar att det fortsatt är relativt hög grad av samvariation, där determinationskoefficienten (R^2) anger hur stor del av variationen i den beroende variabeln, i detta fall vattenståndet vid Agnesberg, som kan förklaras av variationer i den oberoende variabeln, i detta fall vattenståndet vid Torshamnen, under förutsättning att sambandet är linjärt. Determinationskoefficienten har beräknats till 0,91 och visar att 91 procent av vattenståndet vid Agnesberg kan förklaras av vattenståndet vid Torshamnen. Jämfört med de övriga platserna är detta en lägre förklaringsgrad som visar att vattenståndet vid Agnesberg förklaras något sämre av vattenståndet vid Torshamnen, vilket kan bero på lokala faktorer som påverkar vattenståndet i större utsträckning.

Vidare visar det linjära sambandet att det är en skillnad på cirka 16 centimeter mellan Torshamnen och Agnesberg (skärningspunkt = 16,21). Därtill kan utläsas att det linjära sambandet har en regressionskoefficient på 0,94 vilket innebär att om vattenståndet höjs 100 centimeter vid Torshamnen så kan vattenståndet vid Agnesberg antas höjas 94 centimeter. Detta tyder på att vattenståndet vid Agnesberg reagerar långsammare på förändringar av vattenståndet i Torshamnen, jämfört med de övriga platserna där koefficienterna var högre. Signalen från havet är mer dämpad och fortplantar sig inte fullt ut hela vägen upp till Agnesberg.

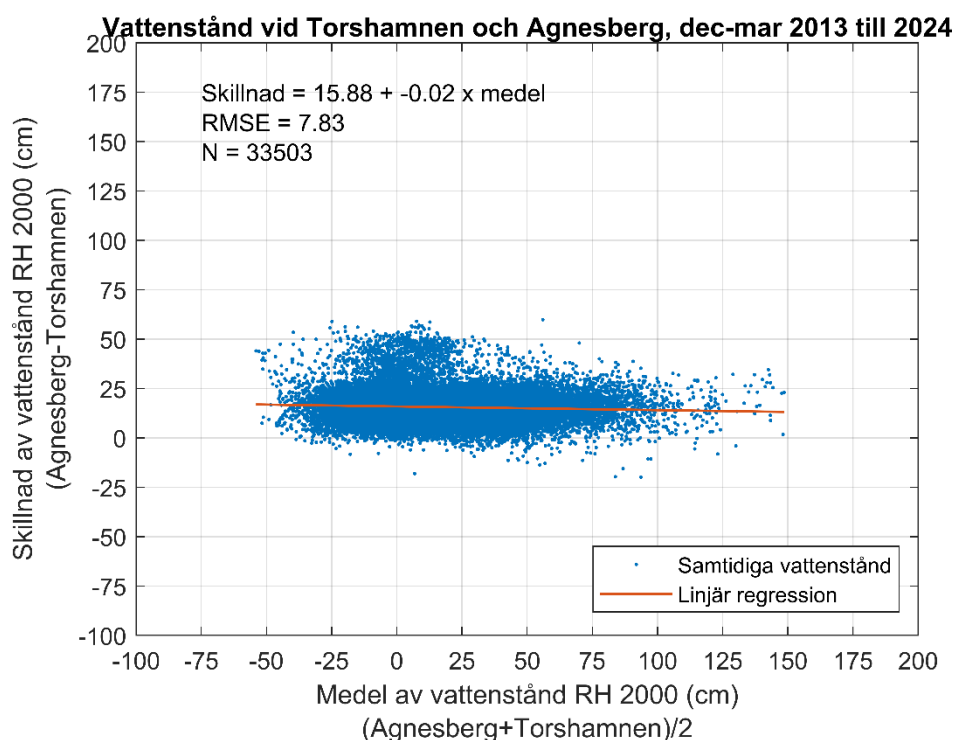
RMSE (Root Mean Square Error) som ger ett mått på det linjära sambandets prediktionsfel, på cirka 8 centimeter i detta fall, är högre än för de övriga platserna. Sambandet mellan vattenståndet vid Torshamnen och Agnesberg är alltså något mer osäkert än vid de övriga platserna och andra faktorer verkar påverka vattenståndet mer i Agnesberg jämfört med de övriga platserna. Antalet observationer som ingår i analysen anges av N.



Figur 10. Samtida vattenstånd vid Torshamnen och Agnesberg utifrån mätningar från december till mars 2013 till 2024, samt linjärt samband.

För att få ytterligare förståelse för hur vattenståndet vid Agnesberg förhåller sig till vattenståndet vid Torshamnen har det undersökts hur skillnaden i vattennivåer mellan platserna varierar med medelvärdet av vattenståndet. I Figur 11 visas medelvärdet av vattenståndet mellan Torshamnen och Agnesberg mot skillnaden av vattenståndet, Agnesberg minus Torshamnen, samt ett linjärt samband. Sambandet visar att skillnaden i vattennivå är cirka 16 centimeter högre i genomsnitt än medelvärdet. Detta är en systematisk skillnad som visar att vattennivån vid Agnesberg vanligen är högre än vid Torshamnen vid nivåer nära noll.

Vidare visar sambandet att det är en mycket svag negativ lutning med en regressionskoefficient på cirka -0,02 vilken innebär att om medelvärdet av vattenståndet höjs 100 centimeter, minskar skillnaden mellan vattenståndet vid Agnesberg och Torshamnen med cirka 2 centimeter. Agnesberg är den enda av platserna som analyserats som har en negativ lutning, vid de övriga platserna ökade skillnaden om än mycket litet. Den negativa lutningen kan bero på att vid höga vattennivåer i havet fås en mer dämpad respons vid Agnesberg, vilket i sin tur kan bero på att vattennivån i Agnesberg i högre grad påverkas av flödet i älven jämfört med de övriga platserna. Det kan även bero på att utbredningen sker över ett större område, att det finns en översvämningsszon eller att vattnet flödar annorlunda. Det skulle även kunna bero på systematiska skillnader i stationernas placering, att Agnesberg exempelvis ligger i en mer dämpad miljö tex. där vattendragsfåran är bredare eller i ett område med större vattenutbredning.



Figur 11. Medel av vattenstånd mot skillnad av vattenstånd vid Torshamnen och Agnesberg utifrån mätningar från december till mars 2013 till 2024, samt linjärt samband.

Sammantaget visar jämförelserna att vattenståndet vid Agnesberg ligger konstant högre än vid Torshamnen. Sambandet mellan vattennivån vid Torshamnen och Agnesberg är mer osäkert jämfört med sambanden till övriga platser och analysen tyder på att vattennivån vid Agnesberg påverkas av andra faktorer än vattenståndet i havet i större utsträckning. Eftersom resultaten för Agnesberg är mer osäkra och indikerar att signalen från havet kan ha börjat dämpas i större utsträckning så här långt uppströms har SMHI valt att inte gå vidare med ett konstant påslag för sträckan Lärjeholm till Agnesberg. För ett översiktligt resultat kan ett tillvägagångssätt vara att utgå från samma påslag som för Lärjeholm (+18 centimeter), men i de fall mer detaljerad eller exakt information behövs rekommenderas istället mer detaljerade analyser än vad som ryms inom detta uppdrag för att få en bättre förståelse för kombinationseffekter.

3.2.5 Sammanfattning av jämförelser

Utifrån jämförelserna av vattenståndet vid Torshamnen och respektive mätplats uppströms Göta älv används följande påslag för respektive delsträcka:

1. Torshamnen till Eriksberg: ± 0 centimeter
2. Eriksberg till Tingstadstunneln: + 6 centimeter
3. Tingstadstunneln till Lärjeholm: + 18 centimeter

3.3 Medelvattenstånd i dagens klimat i Göteborg

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 varje 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 befinner sig 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.

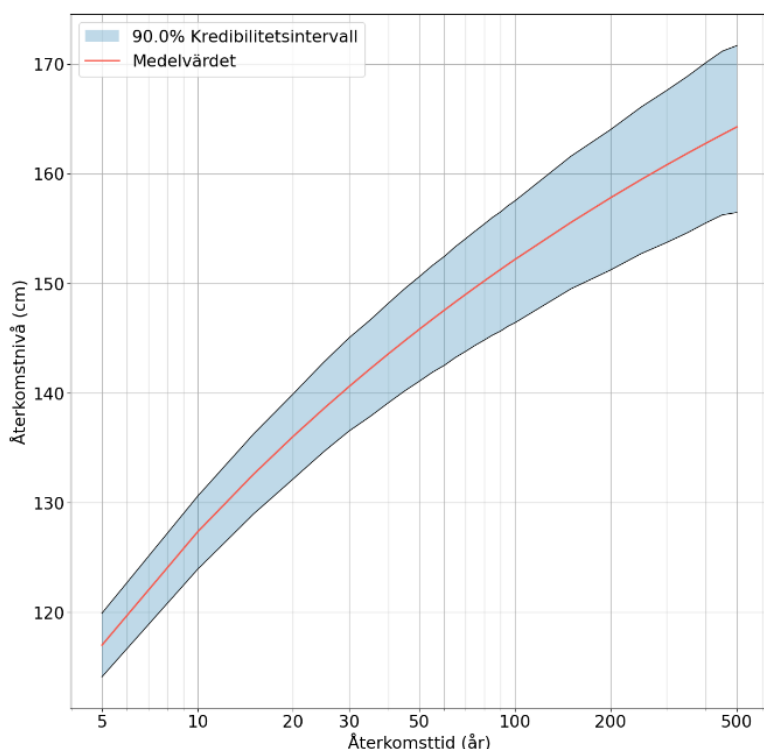
För Göteborg används i denna rapport den beräknade medelnivån för Göteborgs kommun under referensperioden 1995 till 2014, vilken har beräknats till 7 centimeter i RH 2000.

3.4 Extreminivåer i dagens klimat i Göteborg

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 extreminivåer 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 skattas 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 konfidensintervall.

Här har Latent, en Bayesiansk hierarkisk modell använts för att beräkna återkomstnivåer för Torshamnen (se Figur 12). 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 12. Återkomstnivå relativt medelvattenståndet (cm) mot återkomsttid (år) för Göteborg Torshamnen, 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 i Tabell 13 för delsträckan Torshamnen till Eriksberg. Återkomstnivåer i höjdsystemet RH 2000 i dagens klimat fås genom att addera den beräknade medelnivån i Göteborgs 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 skulle ge intervall som innehåller det sanna värdet i 90 procent av fallen. Kredibilitetsintervall är den Bayesianska motsvarigheten till konfidensintervall. Från tabellen kan exempelvis utläsas att det högsta noterade vattenståndet vid Torshamnen (från 1967 till 2024) på cirka 149 centimeter relativt medelvattenståndet motsvarar en återkomsttid på mindre än 100 år.

Tabell 13. Beräknade återkomstnivåer för Torshamnen till Eriksberg 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 13 är identisk med Tabell 1).

Återkomsttid (år)	Återkomstnivå rel. MV (cm)	Återkomstnivå RH 2000 (cm)
50	146 (141 till 151)	153 (148 till 158)
100	152 (146 till 158)	159 (153 till 165)
500	164 (156 till 172)	171 (163 till 179)

Motsvarande nivåer för delsträckan Eriksberg till Tingstadstunneln redovisas i Tabell 5 och fås genom att addera 6 centimeter till nivåerna för Torshamnen till Eriksberg i Tabell 13. Motsvarande återkomstnivåer för delsträckan Tingstadstunneln till Lärjeholm redovisas i Tabell 9 och fås genom att addera 18 centimeter till nivåerna angivna i Tabell 13 för Torshamnen till Eriksberg.

3.5 Medelvattenstånd i framtida klimat i Göteborg

Detta avsnitt redovisar beräknade framtida medelvattenstånd i Göteborgs kommun. Beräkningarna bygger på klimatscenarier från IPCC och har anpassats till lokala förhållanden.

Uppgifter för framtida medelvattenstånd i Göteborgs kommun 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 Göteborgs kommun är 0,288 centimeter per 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 (0,068 centimeter per år) som beror av dagens avsmältning från Grönland och större glaciärer.

I Tabell 14 redovisas framtida medelvattenstånd 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 även fördelningarnas 5:e och 95:e percentiler tillhandahålls, alltså ett intervall på 90 procent, vilket för de *troliga* projektionerna benämns av IPCC som ett *mycket sannolikt*¹² intervall. I Tabell 14 redovisas även det *mycket sannolika* intervallet inom parentes som begränsas av 5:e och 95:e percentilerna.

Tabell 14. Framtida medelvattenstånd 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	44 (27 till 66) (18 till 86)	53 (31 till 81) (19 till 104)	64 (41 till 95) (28 till 122)
2150	64 (31 till 108) (16 till 142)	83 (42 till 137) (22 till 180)	101 (56 till 163) (34 till 213)

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

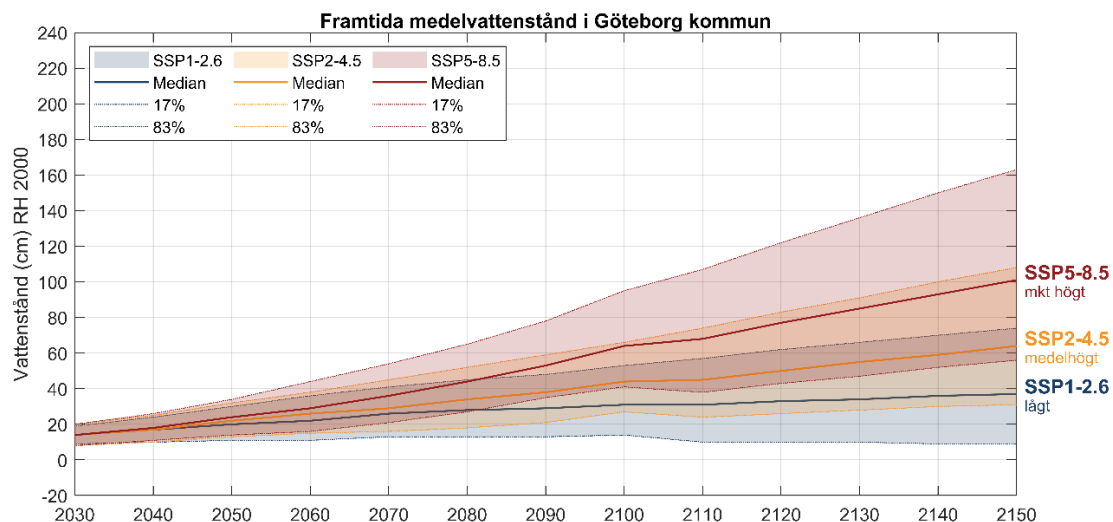
medelvattenstånden ovan finns beräkningar som utgår ifrån projektioner, vilka IPCC bedömer som *troliga*, från ytterligare två utsläppsscenarioer (SSP1-1,9 och SSP1-2,6) samt beräkningar baserade på projektioner som IPCC bedömer som *mindre troliga*¹³ (SSP1-2,6 *mindre troligt* och SSP5-8,5 *mindre troligt*), se Tabell 15. 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.

Tabell 15. Framtida medelvattenstånd i RH 2000 (cm) för år 2100 och 2150 enligt utsläppsscenarioerna 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.

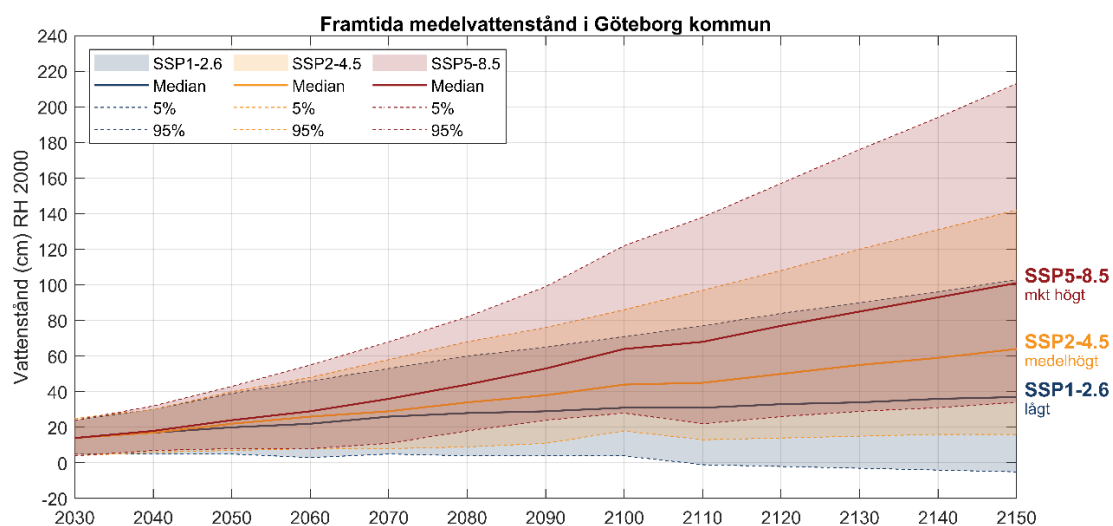
År	SSP1-1,9 (mycket lågt)	SSP1-2,6 (lågt)	SSP1-2,6 <i>mindre troligt</i> (lågt)	SSP5-8,5 <i>mindre troligt</i> (mycket högt)
2100	26 (3 till 53) (-15 till 75)	31 (14 till 53) (4 till 71)	30 (12 till 53) (-1 till 77)	73 (41 till 115) (25 till 191)
2150	33 (-5 till 78) (-32 till 112)	37 (9 till 74) (-5 till 103)	39 (9 till 77) (-8 till 116)	165 (56 till 467) (34 till 539)

I Figur 13 visas utvecklingen av framtida medelvattenstånd i Göteborgs 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 14 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 100 cm i RH 2000 nås cirka år 2090 enligt 95:e percentilen under det mycket höga scenariot SSP5-8,5 och strax efter år 2100 enligt 83:e percentilen under samma scenario. Ett medelvattenstånd på 100 cm i RH 2000 kan nås cirka 2140 enligt den 83:e percentilen och cirka 2110 enligt den 95:e percentilen under det medelhöga scenariot SSP2-4,5.



Figur 13. Utveckling av framtida medelvattenstånd i Göteborgs 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 14. Utveckling av framtida medelvattenstånd i Göteborgs 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 Göteborg

Här beskrivs hur extremnivåer i framtida klimat har tagits fram och vilka antaganden som har gjorts, se under Sammanfattande resultat i kapitel 2 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 utsläppsscenarier och tidshorisonter, är alltså något av en förenkling, men också etablerad praxis enligt rådande kunskapsläge.

Återkomstnivåer har beräknats för återkomsttiderna 100 och 500 år i ett framtida klimat år 2100 och 2150 under tre olika utsläppsscenarier, där extremnivåer kombinerats med det framtida medelvattenståndet i höjdsystemet RH 2000.

3.7 Kombinerade osäkerhetsintervall

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 nyttjas. 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 15. 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, 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 Bayesianiska 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] Bilio 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