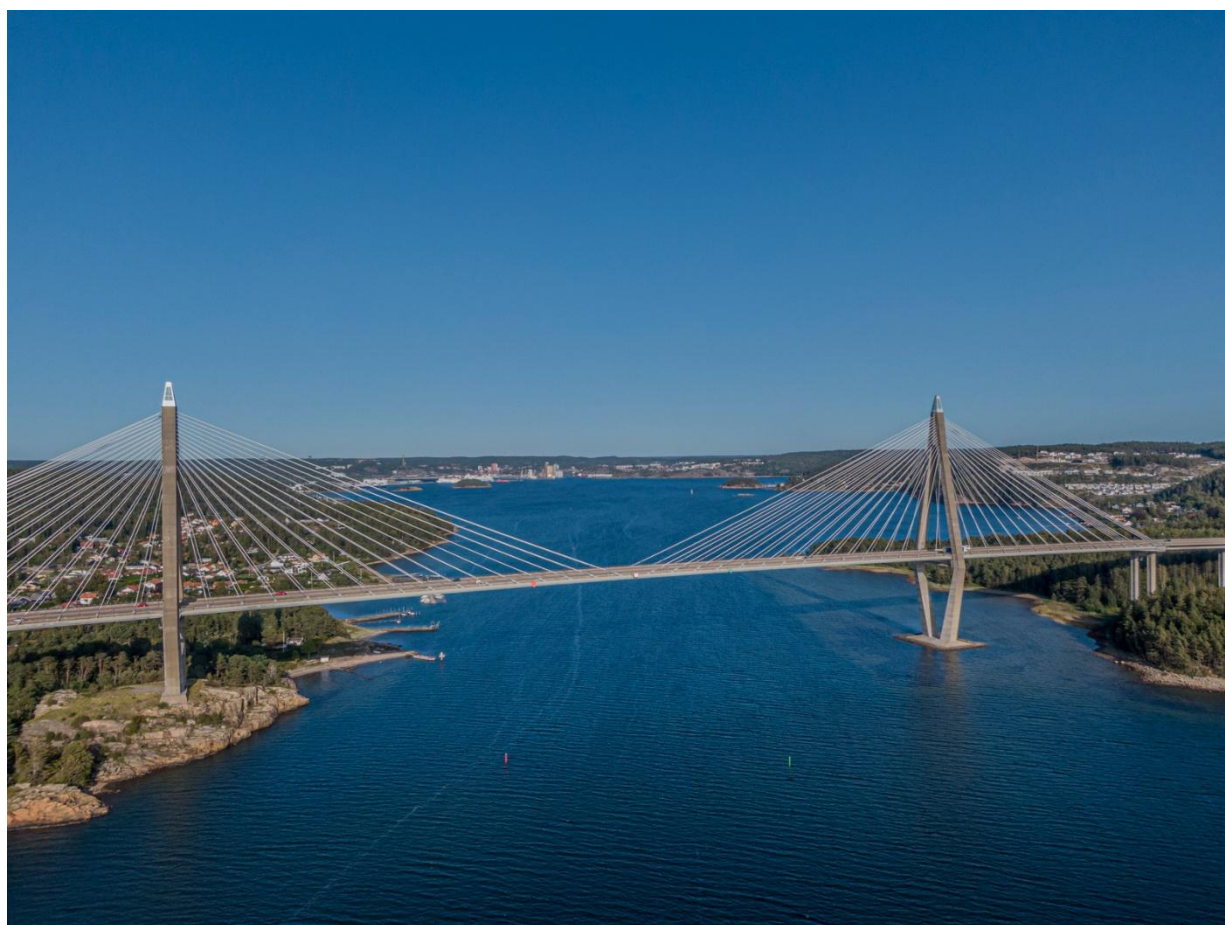


Högvattenhändelser i Uddevalla idag och i framtiden

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



Pärmbild

Uddevallabron med Uddevalla i bakgrunden. Fotograf Staffan Lundgren, Mostphotos

RAPPORT NR 2025-19**TITEL**

Högvattenhändelser i Uddevalla idag och i framtiden

FÖRFATTARE

Ola Kalén, Sofie Schöld, Maria Andersson, Seuri Basilio 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
2025-03-13 Granskad

Utförd av
Lisa Lind, SMHI

Innehåll

1	Bakgrund	1
2	Sammanfattande resultat.....	2
3	Metod och underlag	4
3.1	Introduktion	4
3.2	Vattenståndsmätningar i Uddevalla.....	5
3.3	Medelvattenstånd i dagens klimat i Uddevalla.....	8
3.4	Extremnivåer i dagens klimat i Uddevalla	8
3.5	Medelvattenstånd i framtida klimat i Uddevalla	11
3.6	Extremnivåer i framtida klimat i Uddevalla.....	14
3.7	Kombinerade osäkerhetsintervall	14
4	Referenser	16
	Bilaga 1: Ordlista.....	18

1 Bakgrund

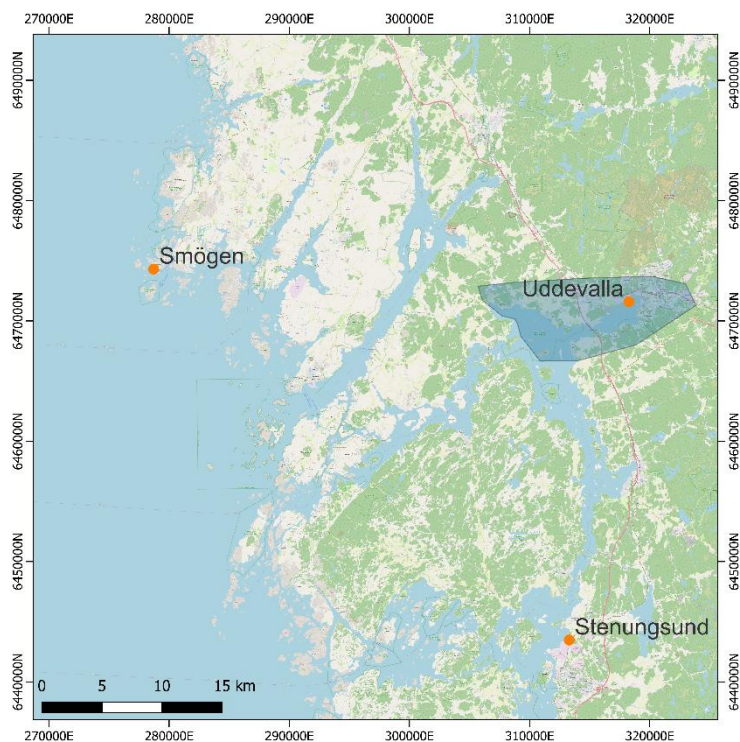
I Sverige genomförs översvämningsdirektivet genom Förordning (2009:956)¹ om översvämningsrisker och MSBFS 2013:1² föreskrifter om länsstyrelsens planer för hantering av översvämningsrisker (riskhanteringsplaner). MSB är ansvarig myndighet och genomför arbetet i nära samarbete med länsstyrelserna. Arbetet sker i cykler om sex år och inkluderar en bedömning av översvämningsrisker i syfte att identifiera områden med betydande översvämningsrisk, 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 översvämningsförordningen, utarbetas av MSB och omfatta de geografiska områden som kan komma att drabbas vid översvämningshändelser inom tre olika sannolikhetskategorier:

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

Arbetet med översvämningsdirektivets tredje cykel inleddes under 2022 och MSB bedömde i februari 2024 att tjugosex områden i landet kan få betydande konsekvenser om en omfattande översvämningsinträffar⁴. 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 Uddevalla, tillsammans med positioner för tillgängliga mätningar av havsvattenstånd i området.



Figur 1. Geografiskt område vid Uddevalla specificerat av MSB, samt mätstationerna vid Uddevalla, Smögen och Stenungsund. Bakgrundskarta: OpenStreetMap.

2 Sammanfattande resultat

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 konfidensintervall på 90 procent.

Tabell 1. Beräknade återkomstnivåer 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	177 (164 till 190)	178 (165 till 191)
100	187 (171 till 204)	188 (172 till 205)
500	207 (182 till 234)	208 (183 till 235)

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 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	218 (187 till 263)	234 (182 till 316)
500	239 (201 till 288)	255 (198 till 338)

Tabell 3. Beräknade återkomstnivåer 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	227 (189 till 280)	253 (188 till 353)
500	247 (204 till 305)	273 (205 till 375)

Tabell 4. Beräknade återkomstnivåer 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	239 (197 till 297)	270 (200 till 384)
500	259 (213 till 321)	291 (216 till 405)

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 Uddevalla 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.

3.1 Introduktion

Högvattenhändelser, tillfällen då vattenståndet stiger kraftigt men kortvarigt, kan 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. Risken 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. 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 ha en tidsupplösning på minst en timme. I det dataset som använts för att träna den Bayesianska modellen ingår data från 44 mätstationer varav 28 är belägna i Sverige.

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.

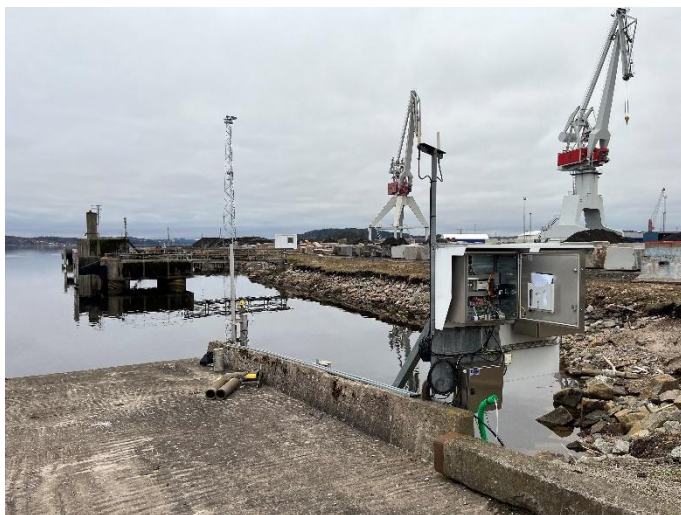
Uddevalla stad är belägen längst in i Byfjorden, innanför fjordsystemet vid Orust och Tjörn. Det finns en mätserie av havsvattenstånd vid Uddevalla men den är dessvärre för kort (kortare än 31 år) för att ingå i det dataset som ingår i den Bayesianska modellen. Även om vattenståndet samvarierar storskaligt finns det undantag längs mer komplexa kuststräckor där lokala effekter av exempelvis vinduppstuvning kan förväntas. Uddevalla, längst in i Byfjorden, är ett exempel på en sådan plats och eftersom mätdata från Uddevalla inte ingår i träningsdatasetet får inte den Bayesianska modellen en rimlig chans att kunna beskriva effekterna på extrema havsvattenstånd längst in i Byfjorden. Mätserien vid Stenungssund, belägen i Havstensfjorden utanför Byfjorden, ingår i träningsdata så viss effekt av fjordsystemet kan förväntas fångas av den Bayesianska modellen, dock ej hela effekten in mot Uddevalla, se Figur 1 för mätstationernas ungefärliga positioner.

Med anledning av detta används inte resultat av extrema havsnivåer från den Bayesianska modellen för Uddevalla, utan vidare analys och extremvärdesberäkningar har utförts baserade på enskilda mätserier från Uddevalla och intilliggande plats, vilket beskrivs mer i detalj i följande kapitel.

3.2 Vattenståndsmätningar i Uddevalla

Mätningar av havsvattenstånd i Uddevalla påbörjades i december 2010 och pågår idag. Till en början var det en mobil pegel men idag ingår mätstationen i SMHI:s grundnät för vattenståndsobservationer, se Figur 2. Några kortare uppehåll i mätserien förekommer men serien har ändå en datatillgänglighet på 97,5 procent, baserat på timvärden från december 2010 till oktober 2024. Mätstationen vid Uddevalla är inmätt i rikets höjdsystem RH 2000 och kortperiodiska vågrörelser dämpas till följd av att mätutrustningen är placerad inuti rör som i sin tur är belägna inuti en trumma. Vattenståndet mäts på minutbasis med en tryckgivare och en radargivare, vilken är den primära givaren.

Mätserien i Uddevalla är cirka 14 år lång och är således relativt kort för att utgöra ett bra underlag statistiskt sett vid extremvärdesanalys. Därför har även mätserien från den intilliggande mätstationen vid Smögen analyserats och jämförts med mätserien från Uddevalla, se Figur 1 för ungefärliga positioner.



Figur 2. Mätstationen i Uddevalla. Foto: SMHI.

SMHI:s mätningar av havsvattenstånd vid Smögen påbörjades i juni 1910 och pågår än idag, Figur 3. Observationsserien är näst intill utan avbrott med en datatillgänglighet på 99,7 procent baserat på timobservationer från juni 1910 till oktober 2024. Den höga datatillgängligheten vid både Smögen och Uddevalla medför att analysen inte påverkas av statistisk systematisk avvikelse.

Mätstationen i Smögen 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. Mätstationen är vid upprepade tillfällen inmätt i rikets höjdsystem RH 2000 vilket betyder att nollpunkten är känd och verifierad. Till en början mättes vattenståndet varje timme men i dagsläget finns värden upp till minutbasis och vattenståndet mäts med två radargivare samt ett mekaniskt måttband.



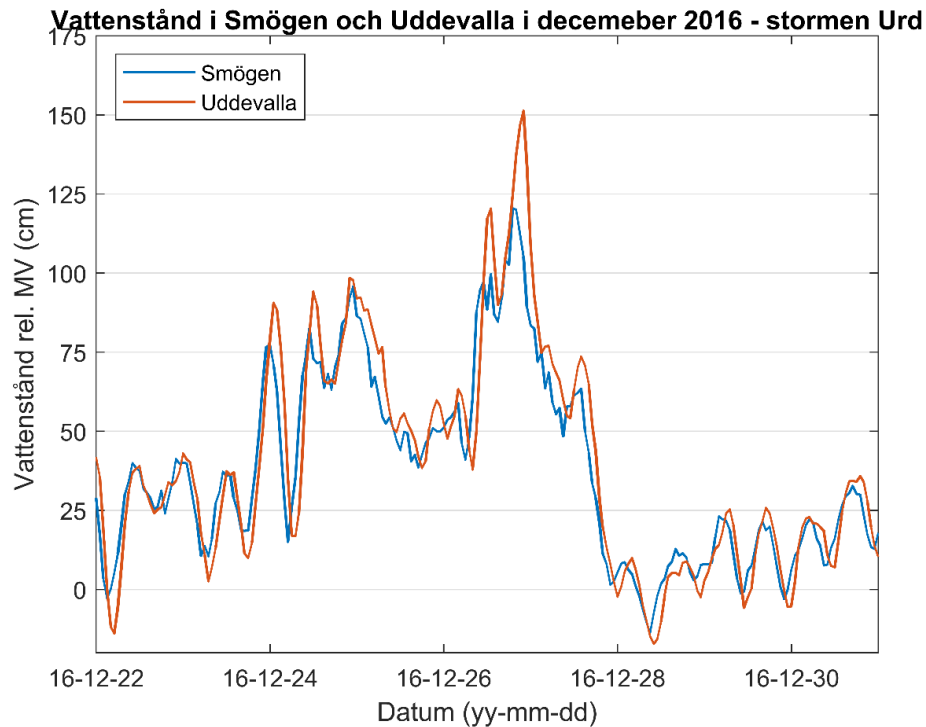
Figur 3. Mätstationen vid Smögen. Foto: SMHI.

Det högsta uppmätta vattenståndet vid Uddevalla, sedan mätstarten i december 2010, uppnår cirka 151 centimeter relativt medelvattenståndet baserat på timvärden och noterades under stormen Urd den 26 december 2016. Vid samma tillfälle noterades ett vattenstånd på cirka 119 centimeter relativt medelvattenståndet utifrån timvärden vid Smögen, alltså cirka 30 centimeter lägre än vid Uddevalla, se Figur 4. Det högsta uppmätta vattenståndet vid Smögen noterades dock långt tidigare, redan i november 1920 och nådde upp till cirka 150 centimeter relativt medelvattenståndet, alltså cirka 30 centimeter högre än under stormen Urd. Denna historiska rekordnotering vid Smögen indikerar att betydligt högre händelser skulle kunna inträffa i Uddevalla än vad som noterats under den relativt korta mätperioden.

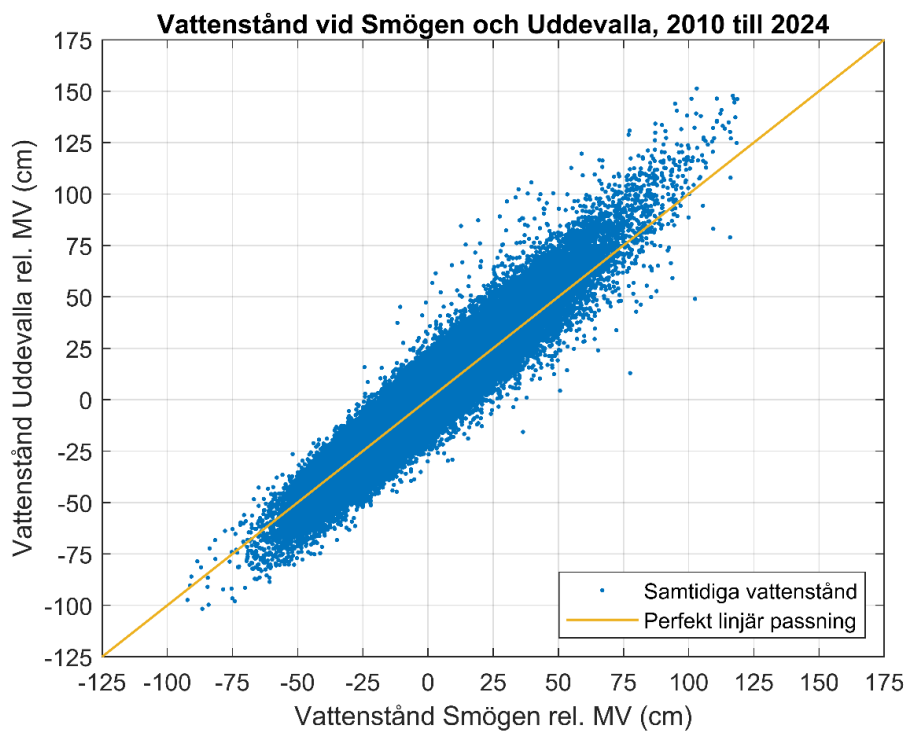
I Figur 5 visas samtidiga vattenståndsobservationer vid de båda platserna. Utifrån figurerna (4 och 5) kan utläsas att det är en stor grad av samvariation mellan vattenståndet vid Smögen och Uddevalla. Därtill syns att vattenståndet i Uddevalla vanligen blir något högre än i Smögen vid högvattenhändelser. Mätserien från Smögen kan alltså inte användas rakt av för att beräkna återkomstvärden gällande för Uddevalla.

Beräkningarna som ligger till grund för återkomstnivåer är behäftade med osäkerheter. Exempelvis är beräknade återkomstnivåer beroende av det dataunderlag som används, vilket är begränsat till de 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, såsom vid Smögen. Nya mätstationer har sedan tillkommit över tid, vilket gör att dataunderlaget från vissa stationer endast täcker ett fåtal decennier. Extremvärden i dataunderlaget kan vara under- eller överrepresenterade, exempelvis genom att mätserien huvudsakligen representerar en period då det förekommit färre eller fler extremer än normalt.

För att få ett homogent underlag har endast data med en upplösning på en timme använts till analyser. Variationer på kortare tidsskala än en timme förekommer, exempelvis uppnår rekordnoteringen vid Uddevalla cirka 163 centimeter relativt medelvattenståndet baserat på minutvärden under stormen Urd i december 2016, och upp mot 134 centimeter vid Smögen under samma tillfälle, alltså 12 till 15 centimeter högre än timvärdena.



Figur 4. Observerat vattenstånd relativt medelvattenståndet (MV) vid Smögen (blå) och vid Uddevalla (röd) under stormen Urd i december 2016.



Figur 5. Vattenståndet vid Uddevalla mot samtidiga vattenstånd vid Smögen från juni 2010 till oktober 2024. Händelser med exakt samma vattenstånd vid båda mätplatserna ligger på den orange linjen.

3.3 Medelvattenstånd i dagens klimat i Uddevalla

Medelvattenståndet i dagens klimat representeras i denna rapport 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 Uddevalla används i denna rapport den beräknade medelnivån för Uddevalla kommun under referensperioden 1995 till 2014, vilken har beräknats till 1 centimeter i RH 2000.

3.4 Extremnivåer i dagens klimat i Uddevalla

I detta avsnitt redovisas beräkningar av extrema vattenstånd i dagens klimat.

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 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.

Extremvärdesanalys har utförts baserat på enbart den relativt korta mätserien från Uddevalla, cirka 14 år lång, och olika så kallade sannolikhetsfördelningar har testats. För den vanligt förekommande sannolikhetsfördelningen Generalized Extreme Value (GEV) konvergerar inte resultaten. För andra testade fördelningar fås förhållandevis stabila resultat men med relativt stora osäkerheter. Därför har extremvärdesanalys även utförts med hjälp av den längre mätserien från Smögen, cirka 114 år lång.

För att ta hänsyn till att vattenståndet i Uddevalla vanligen blir högre än i Smögen vid högvattenhändelser har simultana höga nivåer, över en tröskelnivå, analyserats och ett linjärt samband mellan dessa högvattenhändelser har tagits fram, se Figur 6. En tröskelnivå motsvarande 99,7:e percentilen har använts⁹, vilket i fallet Uddevalla motsvarar händelser högre än cirka 76 centimeter relativt medelvattenståndet. Därefter har detta linjära samband applicerats på alla årshögsta observationer från Smögen, vilket gör att dessa kan antas bli gällande för Uddevalla. De anpassade årshögsta vattenstånden från Smögen har använts vid fortsatt extremvärdesanalys för att skatta återkomstnivåer gällande för Uddevalla.

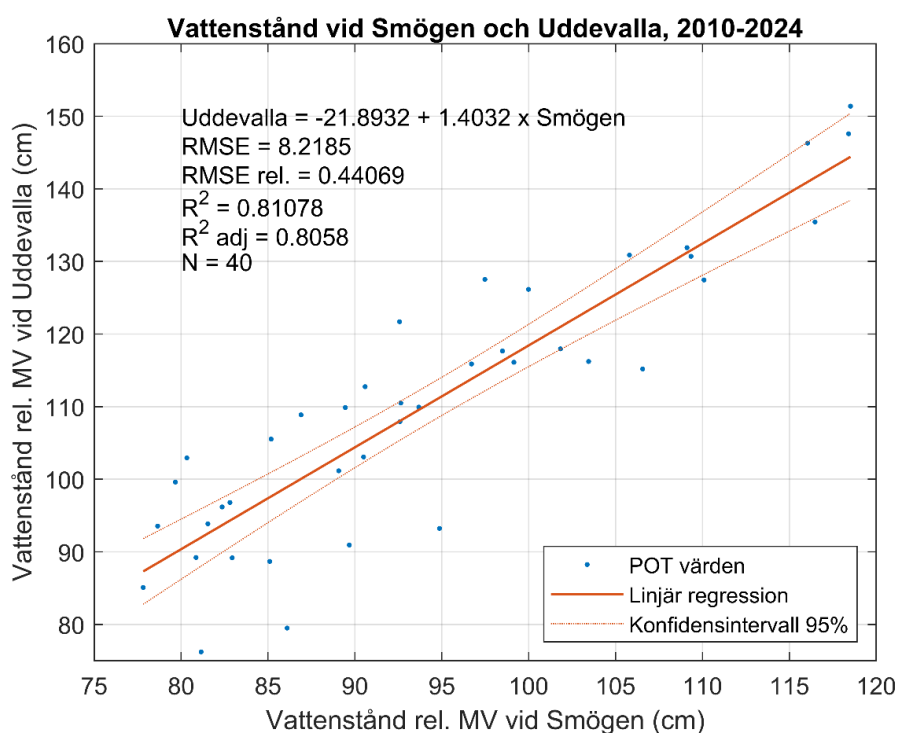
I Figur 7 visas beräknade återkomsvärden relativt medelvattenståndet mot återkomsttid för höga vattenstånd gällande för Uddevalla. Den fördelningsfunktion som bedömts passa bäst till observationerna är en GEV-fördelning med tre parametrar. Vid bestämning av årshögsta observationer har brutet år använts, dvs. från juli till juni. För att högvattenhändelser ska vara jämförbara över tid har de underliggande vattenståndsserierna avtrendats linjärt. På så vis tas långsiktiga trender i vattenståndsserien bort, såsom landhöjning och havsnivåhöjning.

Den mätperiod av havsvattenstånd vid Smögen som har använts till analyserna som redovisas i denna rapport är drygt 100 år lång, en i sammanhanget lång mätdataserie. Längden på mätserien innebär att de 50- och 100-årsvärden som redovisas kan anses vara tämligen robusta. Den osäkerhet som föreligger

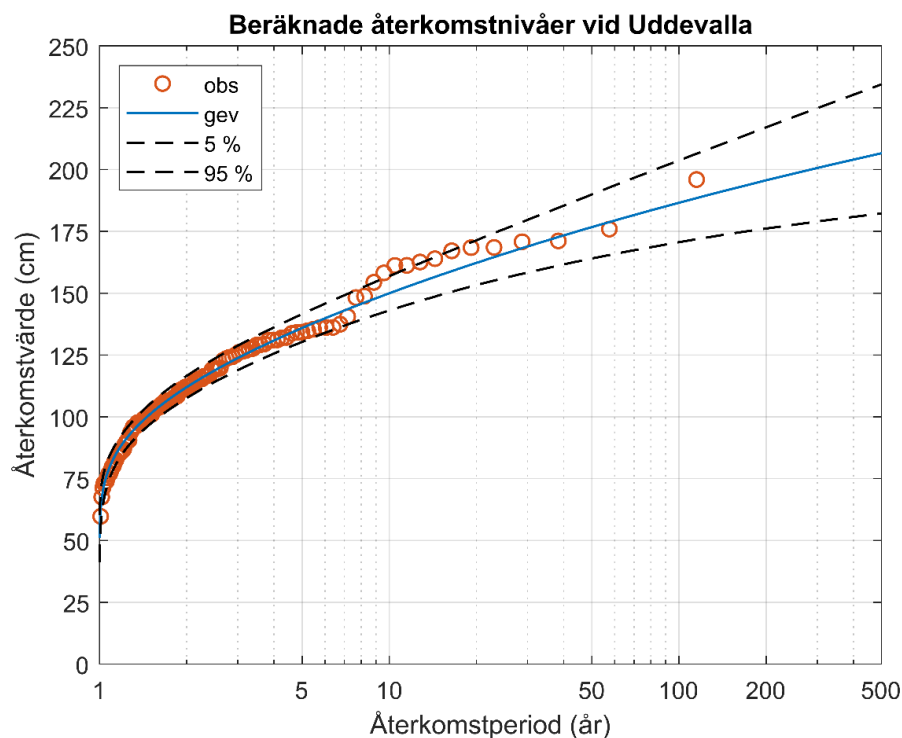
avseende dessa värden kommer sig av exempelvis val av sannolikhetsfördelning, mätosäkerhet och osäkerhet kopplad till det framtagna linjära sambandet mellan Smögen och Uddevalla och som applicerats på samtliga årshögsta observationer från mätserien vid Smögen. De 500-årsvärden som redovisas i rapporten är förknippade med en större osäkerhet som även orsakas av den underliggande mätseriens längd. Under en relativt kort mätperiod är det lägre sannolikhet att en händelse med lång återkomsttid ska ha inträffat eller överskridits.

Utöver osäkerheterna förknippade med den underliggande mätseriens längd finns det en osäkerhet gällande det linjära sambandet mellan högvattenhändelser vid Smögen och Uddevalla. I denna rapport har sambandet tagits fram utifrån samtidiga högvattenhändelser över en viss tröskelnivå. Genom att använda ett sådant urval istället för samtidiga årshögsta observationer baseras det linjära sambandet på fler händelser och blir i detta fall mer robust. Osäkerheten av beräknade återkomstnivåer baserat på mätserien vid Smögen, anpassad till Uddevalla, blir lägre än osäkerheterna utifrån enbart mätserien vid Uddevalla.

För att få ett mått på osäkerheter och skapa en mer robust extremvärdesberäkning har en återsamplingsteknik kallad bootstrapping använts. Genom återsamplingstekniken dras ett nytt slumpmässigt stickprov från den aktuella sannolikhetsfördelningen av extrema havsnivåer och utifrån stickprovet beräknas medelvärde samt 5 och 95 percentilerna. Percentilerna utgör ett konfidensintervall på 90 procent. I denna rapport har ett stickprov på 10 000 värden använts. 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.



Figur 6. Tillfälliga högvattenhändelser över en tröskelnivå vid Uddevalla mot samtidiga händelser vid Smögen (blå prickar), och regressionslinjen (röd heldragen linje) samt regressionslinjens konfidensintervall på 95 % (röda streckade linjer).



Figur 7. Beräknade återkomstsnivåer relativt medelvattenståndet vid olika återkomsttider (blå linje) baserat på årshögsta observationer från Smögen vilka anpassats till Uddevalla med den framtagna regressionsmodellen (röda cirkelar). Streckade linjer (svart) anger tillhörande konfidensintervall på 90 %.

Utifrån Figur 7 kan exempelvis utläsas att återkomstsnivån med 50 års återkomsttid har beräknats till 177 centimeter relativt medelvattenståndet med ett tillhörande konfidensintervall på 90 procent från 164 till 190 centimeter. Det kan även utläsas att det högsta noterade vattenståndet vid Uddevalla sedan mätstarten 2010 på cirka 151 centimeter relativt medelvattenståndet motsvarar en händelse med cirka 10 års återkomsttid.

Beräknade återkomstsnivåer med 50-, 100-, respektive 500-års återkomsttid relativt medelvattenståndet redovisas i Tabell 5. Återkomstsnivåer i höjdsystemet RH 2000 i dagens klimat fås genom att addera den beräknade medelnivån i Uddevalla kommun under referensperioden 1995 till 2014 (kapitel 3.3) till den beräknade återkomstsnivån relativt medelvattenståndet. Nivåerna redovisas som medelvärden tillsammans med ett konfidensintervall på 90 procent.

Tabell 5. Beräknade återkomstsnivåer 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 5 är identisk med Tabell 1).

Återkomsttid (år)	Återkomstsnivå rel. MV (cm)	Återkomstsnivå RH 2000 (cm)
50	177 (164 till 190)	178 (165 till 191)
100	187 (171 till 204)	188 (172 till 205)
500	207 (182 till 234)	208 (183 till 235)

Det finns ett flertal sannolikhetsfördelningar som är vanligt förekommande i extremvärdesanalys inom vetenskaplig litteratur. Här har Generalized Extreme Value (GEV) använts, en fördelning som får stöd av extremvärdessatsen⁸ och som är vanligt förekommande vid beräkning av extremvärden. Valet av vilken fördelning som används är subjektivt, det är bra att vara medveten om att även andra extremvärdesfördelningar kan vara aktuella och ge ett något annorlunda resultat.

3.5 Medelvattenstånd i framtida klimat i Uddevalla

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

Uppgifter för framtida medelvattenstånd i Uddevalla kommun baseras på IPCC:s sammanställning AR6 Delrapport 1 – Den naturvetenskapliga grunden⁵ som släpptes 2021 och har hämtats från SMHI:s hemsida¹⁰. Beräkningarna utgår från projektioner, vilka IPCC bedömer som *troliga*, från tre olika utsläppsscenarioer (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 NKG2016LU¹¹ (avvägd landhöjning) samt från en senare studie av Kierulf o.a.¹².

Den totala landhöjningen i Uddevalla kommun är 0,358 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 (0,069 centimeter per år) som beror av dagens avsmältning från Grönland och större glaciärer.

I Tabell 6 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*¹³ intervall. I Tabell 6 redovisas även det *mycket sannolika* intervallet inom parentes som begränsas av 5:e och 95:e percentilerna.

Tabell 6. 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	31 (14 till 54) (5 till 74)	40 (18 till 68) (6 till 91)	51 (28 till 82) (14 till 109)
2150	47 (14 till 91) (-1 till 126)	66 (25 till 120) (5 till 163)	84 (38 till 146) (16 till 196)

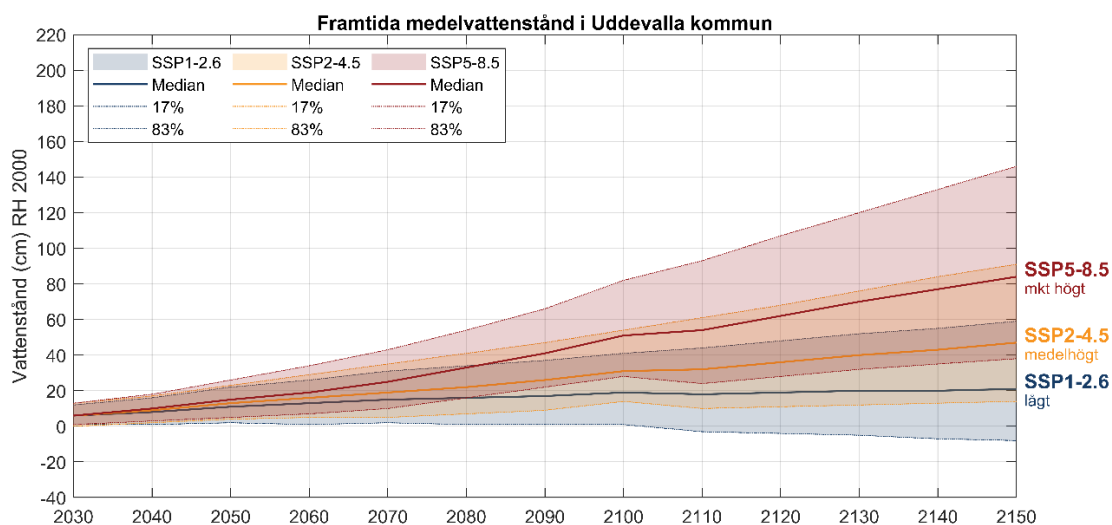
I många planeringssituationer kan det vara värdefullt att utvärdera flera olika utfall. För objekt med låg risktolerans kan det exempelvis vara intressant att analysera möjliga konsekvenser vid ett *mindre troligt* scenario eller havsnivåhöjning utifrån en högre percentil. Utöver de beräknade framtida 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*¹⁴ (SSP1-2,6 *mindre troligt* och SSP5-8,5 *mindre troligt*), se Tabell 7. 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 7. Framtida medelvattenstånd 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.

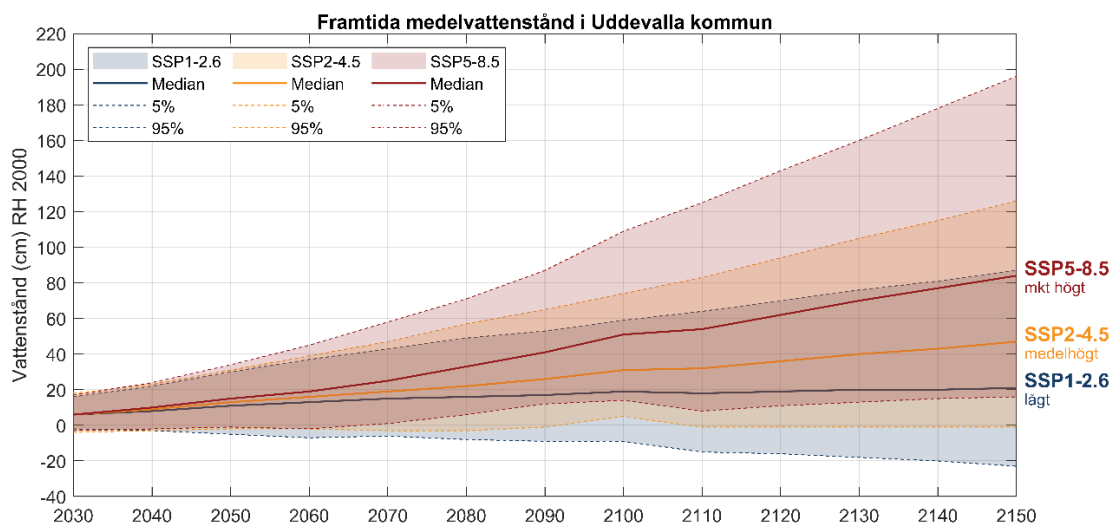
År	SSP1-1,9 (mycket lågt)	SSP1-2,6 (lågt)	SSP1-2,6 <i>mindre troligt</i> (lågt)	SSP5-8,5 <i>mindre troligt</i> (mycket högt)
2100	13 (-10 till 41) (-28 till 62)	19 (1 till 41) (-9 till 59)	18 (-1 till 41) (-14 till 64)	59 (28 till 102) (11 till 177)
2150	17 (-22 till 61) (-48 till 95)	21 (-8 till 59) (-23 till 87)	23 (-8 till 61) (-25 till 99)	147 (38 till 450) (16 till 522)

I Figur 8 visas utvecklingen av framtida medelvattenstånd i Uddevalla 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 9 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 centimeter i RH 2000 nås cirka år 2095 enligt 95:e percentilen under det mycket höga scenariot SSP5-8,5 och cirka år 2115 enligt 83:e percentilen under samma scenario. Ett medelvattenstånd på 100 centimeter i RH 2000 kan nås cirka 2125 enligt den 95:e percentilen under det medelhöga scenariot SSP2-4,5.



Figur 8. Utveckling av framtida medelvattenstånd i Uddevalla 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 9. Utveckling av framtida medelvattenstånd i Uddevalla 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 Uddevalla

Här beskrivs hur extremnivåer i framtida klimat har tagits fram och vilka antaganden som har gjorts, se Tabell 2 till Tabell 4 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.

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 utsläppsscenario¹⁵ 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 resonansgenskaper 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 återkomsttiderna 100 och 500 år i ett framtida klimat år 2100 och 2150 under tre olika utsläppsscenarioer, 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. 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 extremvärdesanalys. För att få ett mått på osäkerheter och skapa en mer robust extremvärdesberäkning har en återdragningsteknik använts, vilken innebär att ett nytt slumpmässigt stickprov (10 000 värden) har dragits från den aktuella sannolikhetsfördelningen av extrema havsnivåer.

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 (2021) och nedskalade av SMHI, för ett givet årtionde och under ett givet scenario har skev-normalfördelningens parametrar tagits fram. Parametrarna till denna fördelning har estimerats genom en metod som minimerar skillnaden mellan nivåerna för de fem kända percentilerna, så att skillnaden som mest uppgår till cirka ± 1 centimeter, och motsvarande nivåer beräknade från den framtagna skev-normalfördelningen. När en passande skev-normalfördelning erhållits har ett stort antal slumpmässiga värden (10 000) dragits för att skapa ett representativt stickprov av framtida medelvattenstånd för givet årtionde och scenario.

För att få ett mått på extrema havsnivåer i framtida klimat kombineras de två stickproven från de tidigare stegen; ett för dagens extrema havsnivåer och ett för framtida medelvattenstånd. Genom att summera varje värde i de två stickproven erhålls 10 000 nya värden som representerar extrema havsnivåer i framtida klimat. Extremnivåer i framtida klimat med tillhörande konfidensintervall har därefter tagits fram genom att beräkna medianvärdet samt 5 och 95 percentilerna.

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] Arns, A., Wahl, T., Haigh, I.D., Jensen, J. and Pattiaratchi, C. (2013) Estimating Extreme Water Level Probabilities: A Comparison of the Direct Methods and Recommendations for Best Practice. Coastal Engineering, 81, 51-66.
- [10] <https://www.smhi.se/klimat/stigande-havsnivaer/framtida-medelvattenstand-1.165493> [2025-03-17]
- [11] 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>.
- [12] 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
- [13] 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.

[14] 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.

[15] 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.



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