

Statistisk metodik för beräkning av extrema havsvattenstånd

Johan Södling och Signild Nerheim



Pärmbild.

Bilden föreställer Hoburgens mätplats onsdag den 4 januari 2012 under stormen Emil med byvindar på 30 m/s. Foto: Arendt Engström (observatör).

OCEANOGRAPHI Nr 124, 2017

**Statistisk metodik för beräkning av extrema
havsvattenstånd**

Johan Södling och Signild Nerheim

Förord

Ett projekt startade år 2015 på SMHI för att beskriva havsnivåer längs svenska kusten i dagens och framtidens klimat, medelvattenstånd såväl som höga nivåer. Projektet avslutades år 2017 och finansierades med medel från anslag 1:10 klimatanpassning.

Projektets syfte var att öka kunskapen om klimatförändringarnas påverkan på havets nivå runt Sveriges kust, och att tillhandahålla underlag för beslut i frågor som påverkas av nutida och framtida havsnivåer, med särskilt fokus på höga nivåer.

Projektet levererade beräkningar av framtida medelvattenstånd för Sveriges kust, en metod för att beräkna högsta havsvattenstånd samt analyser av vattenståndsdynamiken längs kusten och lokala effekter.

Resultaten redovisas i rapporter och som webbtjänster på smhi.se, där även data och GIS-skikt finns för nedladdning. När resultaten används är det viktigt att förstå dess syften och begränsningar. De förklaras i följande SMHI-rapporter som ingår i redovisningen av projektet:

Klimatologi nr 41. Karttjänst för framtida medelvattenstånd längs Sveriges kust

Klimatologi nr 45. Beräkning av högsta vattenstånd längs Sveriges kust

Klimatologi nr 48. Framtida havsnivåer i Sverige

Oceanografi nr 123. Vattenståndsdynamik längs Sveriges kust

Oceanografi nr 124. Statistisk metodik för beräkning av extrema havsvattenstånd

Oceanografi nr 125. Lokala effekter på extrema havsvattenstånd

Sammanfattning

Som ett led i arbetet att förbättra metoderna för planeringsunderlag gällande extrema havsvattenstånd har SMHI gjort en inventering av statistiska metoder för extremvärdesanalys. Metoderna är vanligt förekommande när olika dimensioneringsunderlag tas fram. För att ta fram statistik med hög tillförlitlighet för händelser som har låg sannolikhet (hög återkomsttid) har dock metoderna begränsad användning.

Tre huvudsakliga metoder har applicerats på SMHI:s havsvattenståndsdata. Den mest vanliga, Blockmaximum-metoden, används vanligtvis på årshögsta vattenstånd. POT – metoden (*Peak Over Threshold*), använder fler data och är inte lika vanlig. I Norge används en variant av POT – metoden, den så kallade ACER-metoden (*Average Conditional Exceedance Rate*). Den är mycket lämplig för att ta fram värden för lägre återkomsttider, och är förhållandevis robust när data läggs till vartefter.

Metodernas lämplighet och känslighet utvärderades för extrema havsvattenstånd, alltså havsvattenstånd med höga återkomsttider (låg sannolikhet). Slutsatsen är att det inte går att välja en metod som överlägsen den andra, och att kunskap om den aktuella platsens oceanografiska förhållanden behövs för att utvärdera resultatens rimlighet. I alla analyser av extrema havsvattenstånd är det viktigt att beakta datakvalité och dataseriens längd. Resultat bör redovisas med konfidensintervall.

Blockmaximum-metoden testades med olika fördelningar. Gumbel-fördelning visar sig kunna ge orimliga nivåer för vattenståndsextremer och rekommenderas därför inte. GEV (*Generalized Extreme Value*) och Log-normal fördelning används med fördel i kombination. POT-metoder tar till vara fler händelser än de riktigt extrema, men resultaten som ges har väldigt stora konfidensintervall som växer för låg sannolikhet. Om tröskeln sätts för låg är det inte extremvattenstånd som utvärderas.

Som en följd av denna analys bestämdes att andra metoder behöver tas fram för att studera de högsta havsvattenstånden längs Sveriges kust. I Schöld m.fl. (2017) redovisas hur man kan gå till väga för att ta fram högsta beräknade havsvattenstånd utifrån befintliga data.

Summary

As part of an ongoing work, aimed on improving the current knowledge on extreme sea level around Sweden, SMHI has carried out an assessment of statistical extreme value analysis applied on data from long time series. The methods are commonly used for design values. However, for extreme sea levels with long return times (low likelihood), these methods have their limitations.

Three different statistical methods were applied on SMHI observations of sea water levels, both Block maximum methods and two different Peak over Threshold (POT) methods were applied to the data sets. Focus was on extreme values and the methods fitness to observed data and sensitivity. It was concluded that no method was better than the other and that knowledge on extreme sea level is needed to assess results from different methods. In order to better estimate extreme sea levels along the Swedish coastline, other methods are needed. In Schöld *et al.* (2017), an assessment of highest calculated sea level extremes is carried out from empirical data.

Innehållsförteckning

1	SYFTE	1
2	BAKGRUND	1
2.1	Hur SMHI historiskt beräknat extrema havsvattenstånd	1
2.2	SMHI:s stationsnät för havsvattenstånd	2
2.3	Extrema havsvattenstånd i Sverige	4
2.3.1	Bottenhavet.....	4
2.3.2	Östersjön	4
2.3.3	Öresund	4
2.3.4	Västkusten	5
3	STATISTISKA METODER.....	5
3.1	Konfidensintervall.....	6
3.2	Parameterskattning.....	6
3.3	Val av sannolikhetsfördelning.....	6
3.4	Goodness-of-fit	7
3.5	Blockmaximum-metoden.....	8
3.6	Peak over threshold – metoden	8
3.7	ACER – metoden	9
4	RESULTAT.....	11
4.1	Blockmaximum – metoden.....	11
4.1.1	GEV-fördelning	11
4.1.2	Log-normal-fördelning.....	12
4.1.3	Gumbel-fördelning	13
4.1.4	Utvärdering av val av sannolikhetsfördelning	14
4.2	Peak over threshold – metoden	14
4.3	ACER – metoden	16
5	KÄNSLIGHETSANALYS.....	17
5.1	Känslighet av tillkommande värden på återkomsttider.....	17
5.2	Osäkerhet i mätdata.....	18
5.3	Kombinerade osäkerheter	19
6	DISKUSSION.....	20
7	SLUTSATSER	22
8	REFERENSER	23

9	APPENDIX	24
9.1	Anpassningsmått	24
9.2	Sannolikhetsfördelningar	24

1 Syfte

Denna tekniska rapport har syftet att dokumentera hur SMHI arbetar med statistisk bearbetning av extrema havsvattenstånd, och hur SMHI rekommenderar att statistisk bearbetning av extremvattenstånd bör ske.

2 Bakgrund

2.1 Hur SMHI historiskt beräknat extrema havsvattenstånd

SMHI har en lång historik av bearbetning av data över extrema havsvattenstånd. En av de vanligaste metoderna är statistisk frekvensanalys, där sannolikheter för att en nivå passeras beräknas för olika återkomsttider. Metoden är välkänd och lämpar sig för att ta fram statistik med hög och moderat sannolikhet, men det är svårare att beräkna sannolikheter för händelser som förekommer mer sällan och som därför inte ens finns med i dataunderlaget. En tumregel för statistisk bearbetning är att man inte bör ta fram återkomsttider på mer än dubbla mätseriens längd. För havsvattenstånd finns mätserier som är runt 130 år långa, vilket innebär att det går att ta fram återkomsttider strax under 300 år.

Statistiska återkomsttider för upp till 300 år har av SMHI tagits fram i flera analyser, bland annat för Blekinge och Kalmar län (Södling och Nerheim, 2014).

SMHI gjorde på uppdrag av MSB¹ en utvärdering av huruvida det var möjligt att ta fram extrema vattenstånd med mycket låg sannolikhet (Nerheim m.fl., 2013). Betydelsen av att ta bort data från en känd fördelning testades. Analysen visade att de statistiska egenskaperna till fördelningen låg inom ramen av konfidensintervallet till den ursprungliga serien, tills halva datasetet kvarstod. Om mer än halva datasetet togs bort förändrades de statistiska egenskaperna kvalitativt och resultaten hamnade utanför det ursprungliga konfidensintervallet. Innebörden av detta är att det krävs en tillräckligt stor mängd händelser för att beskriva det statistiska beteendet till händelsen under lång tid, och att andra metoder behöver tas fram för att beräkna vattenstånd med större återkomsttider än det som dataunderlaget erbjuder.

Dataunderlaget spelar en betydande roll för resultatet. Från 2012 och framåt har SMHI huvudsakligen använt observationsdata (exempelvis Södling och Nerheim, 2014). I tidigare analyser (Nerheim och Lindow, 2008; Stensen m.fl., 2010), användes data från en griddad oceanografisk modell för att beräkna återkomsttider. Utöver skillnaden i datakälla så är den statistiska metodiken densamma som i senare rapporter.

Det finns både fördelar och nackdelar med att analysera modelldata framför stationsdata. Fördelarna inkluderar att man kan beräkna återkomsttider för godtycklig punkt inom modellområdet, och att man är garanterad datatäckning för modellens analysperiod. Å andra sidan är modelldata känsligt för eventuella systematiska fel och osäkerheter i själva modellen. Modellens rums- och tidsupplösning påverkar också kvalitén i data. En genomgång av skillnaderna mellan data och resultat från RCO²-modellen för Stockholm finns i Nerheim (2012).

¹ MSB= Myndigheten för samhällsskydd och beredskap

² RCO= Rossby Centre Ocean model = en oceanografisk cirkulationsmodell

Gemensamt för alla dessa arbeten är att de använder en statistisk frekvensanalys på tidsserier av årshögsta vattenstånd för att beräkna återkomsttider. För att uppskatta fördelningen av årets högsta vattenstånd för aktuell plats används data från en närliggande och representativ mätstation.

2.2 SMHI:s stationsnät för havsvattenstånd

Havsvattenstånd observeras av SMHI med 25 havspeglar längs Sveriges kuster idag (figur 1). Kontinuerliga observationer av havsvattenstånd startade vid Slussen i Stockholm redan år 1774. Mätningarna fortsatte senare på Skeppsholmen och Stockholms havsvattenståndsserie är numera den längsta havsvattenståndsserien i världen. Information om stationerna listas i tabell 1. En heltäckande lista över SMHI:s samtliga vattenståndsdata finns på smhi.se.



Figur 1. SMHI:s vattenståndsstationer. De som används i analyserna visas i svart, övriga stationer visas i rött.

De stationer som har längst mätserier med hög kvalitet har använts i analyserna (figur 1 svarta prickar). Det är god geografisk spridning på de stationer som inkluderats, och samtliga har många år med datatäckning (ca 120 år).

Vissa stationer ligger nära varandra geografiskt, och har jämförbara oceanografiska förhållanden vilket gör att deras dataserier kan slås ihop till en längre dataserie. SMHI brukar kombinera mätserierna Spikarna och Draghällan, Landsort och Landsort Norra, respektive Ringhals och Varberg. De sistnämnda ligger ganska långt ifrån varandra men har mycket lika oceanografiska förhållanden, vilket motiverar sammanslagningen.

För området kring Göteborg är det inte lämpligt att kombinera de olika stationernas mätserier. Stationerna ligger visserligen nära varandra geografiskt, men har inte helt jämförbara oceanografiska förhållanden. Mätstationen var till en början placerad vid Ringön som ligger en bit upp i Göta älvs mynning, därefter flyttades den en bit ut till Klippan och är idag placerad strax utanför älvens mynning vid Torshamnen. Nivåerna längst in vid Ringön är ofta några decimeter högre än nivån vid Torshamnen vid höga vattenstånd.

Tabell 1. Svenska mätstationer som registrerar havsvattenstånd. Blå rader markerar de stationer som ingår i analysen. Draghällan har slagits ihop med Spikarna, Landsort Norra med Landsort och Varberg med Ringhals. Dessa respektive mätserier betraktas som en och samma vid analys av extremvärden.

Stationsnamn	Startår/period	Antal år med data
Kalix	1974	42
Furuögrund	1916	100
Ratan	1891	125
Skagsudde	1982	34
Spikarna	1968	119
Draghällan	1897-1969	
Forsmark	1975	41
Stockholm	1889	127
Landsort Norra	2004	130
Landsort	1886-2006	
Marviken	1964	52
Visby	1960	56
Ölands Norra Udde	1961	55
Oskarshamn	1960	56
Kungsholmsfort	1886	130
Simrishamn	1982	34
Skanör	1992	24
Klagshamn	1929	87
Barsebäck	1982	34
Viken	1976	40
Ringhals	1967	130
Varberg	1886-1982	
Onsala	2013	3
Göteborg - Torshamnen	1967	49
Göteborg - Klippan	1959-1969	10
Göteborg - Ringön	1887-1958	71
Stenungsund	1962	54
Smögen	1910	106
Kungsvik	1973	43

För att säkerställa att det enbart är svängningar ovanpå medelvattenståndet analyseras vattenståndet relativt årets beräknade medelvattenstånd. Det innebär att påverkan av såväl landhöjningen som havshöjningen tas bort i dataserierna innan den statistiska bearbetningen sker.

2.3 Extrema havsvattenstånd i Sverige

Vattenståndsvariationerna skiljer sig åt för olika delar av Sverige. För en detaljerad beskrivning, se Schöld m.fl. (2017). Nedan följer en övergripande beskrivning som baseras på den indelning i områden som beskrivs i Schöld m.fl.(2017)

2.3.1 Bottenhavet

Bottenhavet, med Bottenviken i norr, har en stor grad av samvariation, med högst extremer längst i norr och något förhöjda nivåer i södra Bottenhavet. Längst i norr stiger vattenståndet då sydliga eller sydvästliga vindar över Östersjön pressar vatten norrut. Samtidigt sjunker vattenståndet i de södra delarna av Östersjön. Det högsta havsvattenståndet som SMHI har observerat inträffade i Kalix med +177 cm över medelvattenstånd i januari 1984. Vid det tillfället blåste sydliga stormbyar.

2.3.2 Östersjön

Mätserier från de mätstationer som befinner sig i Egentliga Östersjön visar lägst extrema värden i jämförelse med de övriga svenska vattenståndsstationerna. Det beror, bland annat, på att endast ett fåtal lågtryck rör sig på det sätt som stuvar upp vatten nära kusten (läs mer om uppstuvningseffekter i Johansson m.fl. (2017).

En viktig förutsättning för höga vattenstånd i Östersjön är förhärskande sydvästliga vindar som successivt höjer vattenståndet. Vatten pressas då in genom Bälten och Öresund och vattenståndet höjs långsamt i Östersjön. Medelnivån i Östersjön beskrivs väl av det observerade vattenståndet i de centrala delarna, exempelvis vid stationen Landsort Norra. Medelnivån kan efter en blåsig höst med kraftiga sydvästliga vindar stiga till omkring 60 cm över medelvattenståndet. När ett lågtryck sedan passerar, ofta från sydväst, kan kraftiga nordostliga vindar efter lågtryckspassagen omfördela vattenmassorna och höja vattenståndet längs med ostkusten. I Stockholm observerades +117 cm i januari 1983 i samband med en sådan storm.

I södra Östersjön blir de extrema vattenstånden högre, både på grund av områdets placering nära havsbassängens ända och på grund av det väderläge som kan skapa höga vattenstånd. Högsta observerade havsvattenstånd vid Kungsholmsfort är +133 cm över medelvattenståndet 9 januari 1914.

2.3.3 Öresund

Vattenståndsskillnaden mellan norra och södra Öresund kan vara stor, beroende på variationer i vindens riktning. I norra Öresund stiger vattenståndet då kraftiga nordvästliga vindar är i fas med tidvattnet från Kattegatt pressar vatten söderut och "stänger inne" vatten i sundet. Skillnaden mellan Viken i norr och Skanör i söder kan uppgå till drygt två meter vid de mest extrema tillfällena, vilket resulterar i stora inflöden till Östersjön. I södra Öresund stiger vattenståndet vid tillfällena med kraftiga nordliga vindar över Östersjön som pressar vattnet söderut samtidigt som vattenståndet är relativt högt i Kattegatt. Variationerna i tid kan vara stora och vattenståndet kan stiga från ca -1.5 meter till +1.5 meter på bara sex timmar (en halv tidvattenperiod).

2.3.4 Västkusten

Längs med västkusten kan vattenståndet stiga snabbt till extremt höga nivåer (ca 1.5 meter över det normala) då kraftiga västliga och sydvästliga vindar pressar upp vattnet mot kusten. Just norr om Öresund kan vattenståndet stiga till över två meter när kraftiga nordvästliga vindar pressar vatten söderut där vattnet möter topografiska förhållanden som bidrar till höjningen. Dessa händelser är oftast kortlivade och pågår endast under några timmars tid. Tillfällena föregås oftast av en period med kraftiga sydvästliga vindar som höjer vattenståndet till över det normala.

3 Statistiska metoder

Ett vedertaget sätt att modellera extrema vattenstånd är med *återkomsttider* (Coles, 2001). Återkomsttider är ett mått på hur ofta förekomsten av extrema naturliga händelser kan förväntas. Med en händelses återkomsttid menas att händelsen i genomsnitt inträffar eller överträffas en gång under denna tid. Händelsens återkomsttid kan också ses som ett mått på hur pass extrem den är. En händelse med återkomsttiden 20 år är mindre extrem än en händelse med återkomsttiden 100 år. För en vald plats är vattenståndet med återkomsttiden 100 år högre än vattenståndet med en lägre återkomsttid.

I princip kan en 100-årshändelse inträffa två år i rad, men i långa loppet är det alltså i genomsnitt 100 år mellan dessa händelser. En mer detaljerad beskrivning av hur återkomsttider bör tolkas finns i Johansson m.fl. (2017).

Den vanligaste ansatsen vid arbete med återkomsttider, är att bygga en statistisk modell kring vattenståndstidsseriens årsmax-värden (årsmax= högsta värdet under året). Ansatsen har även tillämpats i denna studie. Värdena antas vara oberoende och följa en och samma sannolikhetsfördelning. Utifrån denna fördelning får man kunskap om hur årets högsta vattennivå betar sig på den aktuella platsen.

Statistikteorin som återkomsttider bygger på kallas extremvärdesteori. Den viktigaste satsen inom denna är *extremvärdessatsen* som, under vissa förutsättningar, tillåter antagandet att årsmax-värdena följer en viss sannolikhetsfördelning. I princip måste årsmax-värdena vara oberoende och likafördelade (det vill säga att årsmax år 1900 bör "bete sig" som årsmax år 1990).

Det är inte nödvändigt att använda kalenderår då de mest extrema händelserna extraheras. Generellt behöver tidsperioden indelas i lika stora block och sedan hämtas det högsta värdet inom varje block. Blocken konstrueras så att det högsta värdet inom varje block är oberoende av de andra blockens högsta värden, och att de alla följer samma fördelning. Exempelvis kan varje år delas i block som går från juli till juni istället för januari till december.

Sannolikheten under en längre period är inte densamma som för ett enskilt år. Den ackumulerade sannolikheten för att en händelse sker under en längre tidsperiod visas för olika återkomsttider i tabell 2. Sannolikheten under 100 år för att en händelse med återkomsttiden 100 år ska inträffa är 63%. Det betyder att om säkerhetsnivån för en konstruktion väljs till 100-årsvärdet är det troligare att det värdet överskrider någon gång under 100 år, än att det aldrig inträffar. För vidare fördjupning av sannolikhetsteori se Blom m.fl. (2005) eller Coles (2001).

10-, 100- och 200-årsvattenståndet har tagits fram för dagens klimat med olika statistiska metoder. Metoderna är Blockmaximum-metoden, POT (*Peak over Threshold*), och ACER (*Average Conditional Exceedance Rate*). De är beskrivna i respektive delavsnitt nedan.

Tabell 2. Sannolikheten att en händelse med en viss återkomsttid överskrids minst en gång under en given period.

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

3.1 Konfidensintervall

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

Blockmaximum- och POT-metoden (som beskrivs i avsnitt 3.3 respektive 3.4) använder detta Wilson Score som konfidensintervall. ACER-metoden (som beskrivs i avsnitt 3.5) använder ett eget konfidensintervall, se Naess *et al.* (2013) för detaljer.

3.2 Parameterskattning

För varje sannolikhetsfördelning behöver dess parametrar skattas utifrån datamaterialet. I princip kalibreras fördelningens parametrar så att den ”passar” till data. Det finns flera metoder som kan användas.

En populär metod är *Maximum Likelihood (ML)* (Coles, 2001; Blom m.fl., 2005), som maximerar den så kallade likelihoodfunktionen. En intuitiv tolkning av denna metod är att den optimerar fördelningens parametrar så att sannolikheten att få de observationer man faktiskt har fått blir så stor som möjligt. Denna metod förutsätter oberoende och likafördelade datavärden. Med likafördelade menar vi att värdena antas vara slumpmässiga dragningar från samma sannolikhetsfördelning.

3.3 Val av sannolikhetsfördelning

Det finns ett flertal sannolikhetsfördelningar som är vanligt förekommande för återkomsttidsanalys i vetenskaplig litteratur. Extremvärdessatsen ger mest stöd åt *Generalized Extreme Value*, GEV, (Coles, 2001) men även andra fördelningar kan vara

aktuella. Det är viktigt att verifiera att den valda sannolikhetsfördelningen passar till datat. För att avgöra detta kan man använda ett så kallat goodness-of-fit-test, till exempel Kolmogorov-Smirnov, som ger ett numeriskt mått på hur väl sannolikhetsfördelningen passar till data (se kap.3.4). Om testet underkänner fördelningen bör man inte använda den i analysen. Ofta kan flera fördelningar passa till samma datamaterial enligt testet men ge olika återkomsttider.

I denna analys har tre sannolikhetsfördelningar använts: GEV, Log-normal och Gumbel. Log-normal och Gumbel är relativt lika varandra men ger olika konfidensintervall. Det finns andra fördelningar, exempelvis Weibull och Generaliserad Pareto-fördelning, men dessa har inte använts för Blockmaximum-metoden då de har överlag sämre anpassning till extrema vattenstånd.

Utöver en bra statistisk anpassning till datamaterialet är det också viktigt, för fördelningen, att extrapolera på ett rimligt sätt för höga återkomsttider. Statistiska tester kan endast avgöra hur bra fördelningen i fråga förklarar det datamaterial som föreligger, men kan inte beskriva hur rimligt fördelningen beter sig långt bortom dataunderlaget som modellen baseras på. I vissa fall går det att förkasta vissa modeller med hjälp av förståelse för den parameter som analyseras, i detta fall vattenstånd.

3.4 Goodness-of-fit

För att avgöra om en viss teoretisk sannolikhetsfördelning passar det dataunderlag som används kan ett så kallat goodness-of-fit test tillämpas. Vi har här använt Kolmogorov-Smirnovs (KS) anpassningstest (Marsaglia *et al.*, 2003). Detta kan avgöra, med en viss statistisk signifikans, om dataunderlaget passar till en viss sannolikhetsfördelning.

KS-testet ger ett värde mellan 0 och 1, och kan, lite grovt, tolkas som sannolikheten att data inte kommer från fördelningen vi använder. Ett värde på 0 betyder perfekt anpassning och ett värde på 1 betyder att dataunderlaget inte alls passar till fördelningen. Måttet kan tolkas som sannolikheten att data inte följer fördelningen. Så om KS-värdet är 0.4 så är det sannolikhet 40 % att data inte följer fördelningen. För att inte fatta ett felaktigt beslut så brukar man vilja ha relativt hög säkerhet innan man säger att fördelningen inte passar till data. En vanlig ”tumregel” är att man vill vara 95 % säker på det man säger, vilket motsvarar att KS-värdet måste vara ≥ 0.95 för att vi ska kunna säga att data inte passar till fördelningen.

Notera att konfidensnivån vi väljer är en avvägning mellan risken att få falskt negativt respektive falskt positivt resultat. Med en väldigt hög signifikansnivå, till exempel om vi bara accepterar fördelningen om KS-värdet är > 0.999 , så krävs en väldigt hög säkerhet på att data inte följer fördelningen. Konsekvensen kan då bli att fördelningen inte passar till data, men att anpassningen inte är ”tillräckligt” dålig för att fördelningen ska förkastas. Samtidigt vill vi heller inte ha för lågt värde, eftersom då ökar risken för att anpassningar accepteras som i själva verket inte är särskilt bra.

KS-testet tittar på största avvikelsen mellan datamaterialets empiriska fördelningsfunktion, och fördelningsfunktionen för den teoretiska fördelning man vill se om data passar till.

Anpassningsmått, som KS-testet, används för att kunna avgöra om den fördelning som används passar till dataunderlaget. Om testet underkänner anpassningen bör inte fördelningen användas för att beräkna återkomsttider. Om KS-testet inte är uppfyllt är det sannolikt att dataunderlaget inte ger ett tillräckligt bra urval för en statistisk bearbetning. Se appendix för tekniska detaljer kring detta mått.

3.5 Blockmaximum-metoden

I Blockmaximum-metoden delas tidsserien i "block", vanligen om ett kalenderår per block, och det högsta värdet extraheras från varje block. Då erhålls en dataserie med årsmax-värden. Sedan anpassas en sannolikhetsfördelning till dessa värden.

Metoden kallas även ofta för *årsmax*-metoden, eftersom block om ett år används.

Dataserien behöver inte nödvändigtvis indelas i block över kalenderår. Blocken ska konstrueras på sådant sätt att det högsta värdet inom varje år oberoende av de andra blockens högsta värden, och att de alla följer samma fördelning (Coles, 2001).

För havsvattenstånd längs Sveriges kust är det lämpligt att hämta det högsta värdet inom varje period 1:a juli till 30:e juni. Orsaken är att det vanligtvis inte inträffar så många extremer under sommaren. Om kalenderår används finns risk att två på varandra följande årsmax inträffar kring årsskiftet, och är därmed inte oberoende av varandra. Med tidsblock som går från juli till juni så undviks dessa tillfällen.

Låt den sannolikhetsfördelning som anpassats till data ha fördelningsfunktion $F(x; \theta)$, där x är datavektorn (här årsmax-värden), och θ är fördelningens parametervektor.

Återkomstnivån R för återkomsttid T år kan beräknas genom

$$R = F^{-1}\left(1 - \frac{1}{T}; \theta\right)$$

Med andra ord är R det värde där fördelningsfunktionen F antar värdet $1 - \frac{1}{T}$.

Vi kan kasta om lite i ekvationen ovan för att få ett uttryck för återkomsttiden givet nivån R :

$$T = \frac{1}{1 - F(R; \theta)}$$

3.6 Peak over threshold – metoden

Peak over threshold (POT) är en metod för att beräkna återkomsttider från en tidsserie (Coles, 2001). Grundprincipen är att oberoende händelser extraheras över en viss tröskel, och de anpassas sedan till en sannolikhetsfördelning som återkomsttider kan beräknas utifrån.

För de utvalda tidsserierna har en POT-analys utförts. Först extraherades händelser över en viss fix tröskel. Enligt Pickands-Balkema-de Haans sats (Pickands, 1975) gäller att om händelserna över tröskeln är oberoende och likafördelade, vilket de bör vara om tröskeln valts på ett klokt sätt, så kommer de att följa en Generaliserad Pareto (GP) fördelning. Denna fördelning kan sägas vara skräddarsydd för POT-metoden. Parametrarna av denna fördelning har skattats med *Maximum Likelihood*-metoden (se avsnitt 3.2).

Hur tröskeln i POT-analysen väljs är ett aktivt forskningsområde och det finns ofta inget uppenbart svar. Om tröskeln väljs för hög är man mer garanterad att händelserna är oberoende och verkligen relevanta för extremvärdesanalysen, men man kan då gå miste om relevanta händelser. Om tröskeln väljs för låg får man in mycket brus i data, det vill säga att händelser som inte är extrema och därmed inte av intresse för analysen. Dessutom ökar risken att få in icke-oberoende händelser.

Två vanliga sätt att välja tröskeln är att ansätta ett fixt värde eller en hög percentil av rådata, exempelvis 95:e eller 99:e percentilen. Om 95:e percentilen används sorteras först rådata i stigande ordning, och sedan väljs tröskeln så att 95 % av värdena i listan är mindre än denna tröskel. Se (Coles, 2001) för mer information om hur man bäst väljer tröskel.

Fördelningsfunktionen för GP-fördelningen är

$$F(\xi, \sigma)(x) = \begin{cases} 1 - \left(1 + \frac{\xi x}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\xi}} & \text{for } \xi \neq 0 \\ 1 - e^{-\frac{x}{\sigma}} & \text{for } \xi = 0 \end{cases}$$

För att verifiera att data följer denna fördelning har vi skattat anpassningen med KS-testet (se avsnitt 3.4).

Återkomsttider med POT-metodik beräknas på följande sätt:

Låt F vara fördelningsfunktionen av den skattade GP-fördelningen. Denna funktion är inverterbar (då den är strängt växande), och vi kan kalla dess invers F^{-1} . Antag att T -årsnivån söks, där T är återkomsttiden i år (till exempel 100-årsnivån).

För att kunna uttrycka återkomsttider i denna enhet behöver hänsyn tas till antalet händelser per år. Därför skalas sannolikheten för överskridande, $1 - \frac{1}{T}$, med genomsnittligt antal händelser per år enligt ekvationen

$$P = \left(1 - \frac{1}{T}\right)^{1/(\text{genomsnittligt antal händelser per år})}$$

Genomsnittligt antal händelser per år är $\frac{\text{Totalt antal händelser över tröskeln}}{\text{Antal år med data}}$.

Återkomstnivån R för återkomsttid T är sedan $R = F^{-1}(P)$.

3.7 ACER – metoden

ACER (Average Conditional Exceedance Rate) (Naess et al., 2013) är en metod för att beräkna återkomsttider från en tidsserie. Den är konstruerad som en generalisering av POT, och kan i viss mån ta hänsyn till beroende mellan händelser. Efter att ha valt en tröskel på samma sätt som i POT-metoden så kan parameter k användas för att styra hur många händelser bakåt i tiden som händelsen anses signifikant beroende av.

Utöver funktionaliteten med beroende mellan händelser kan ACER även hantera icke-stationära processer (processer som ändras med tiden).

ACER har ett antal fria parametrar som manuellt behöver anges när man kör modellen. De fria parametrarna är (se Naess et al. (2013) för detaljer):

1. Parametern k , som styr hur många steg bakåt i tiden som varje händelse är beroende av tidigare händelser. Med exempelvis $k=3$ är varje händelse beroende av de 3 föregående händelserna.
2. Tröskel över vilken händelser hämtas. Detta är samma typ av tröskel som POT – metoden använder, se avsnitt 3.4.
3. Om processen är stationär eller inte. Se (Coles, 2001) för detaljer kring stationära processer.
4. Straffad målfunktion, vilket påverkar optimeringsrutinen. Målfunktionen straffas om man rör sig utanför det tillåtna parameterrummet.

Punkt 3 och 4 är båda ja/nej beslut, vilket ger $2 \times 2 = 4$ möjligheter. Parametern k är ett positivt heltal, så här finns det fler valmöjligheter. För tillräckligt stort k konvergerar de beräknade återkomsttiderna. I Roaldsdotter och Sande Borck (2016) framförs förslag för parameterintervall för dessa fria parametrar för studier av extrema vattenstånd längs norska kusten.

En fördel med ACER-metoden är att den går att kombinera med andra osäkerheter, t ex osäkerheter i klimatscenarier. Detta gjordes i en rapport som presenterar förslag på hur dimensionerande vattenstånd bör beräknas för Norge (Simpson *et al.*, 2015). Slutresultatet är en återkomsttid som har inbyggd osäkerhet både från den statistiska analysen samt klimatsceniernas osäkerhet.

Utvärderingen gjord på norska data (Dahlen, 2010) pekar på att ACER-metoden är bättre på att modellera extremvärden än den klassiska POT-metoden, vilket ger oss incitament att utvärdera den på vattenståndsdata.

ACER-metoden är mycket lämplig för att ta fram vanligare förekommande återkomsttider, och är förhållandevis robust för nytillkommande data. (Det betyder att när tiden går och nya mätdata tillkommer så förändras inte beräkningarna av återkomsttider särskilt mycket, värdena är robusta.) Detta har stor betydelse just i Norge där 20 års återkomsttid är en brytpunkt för ersättning för skador och där det är viktigt att värdet är förutsägbart.

4 Resultat

Nedan presenteras beräknade återkomstnivåer för respektive metod. Varje återkomstnivå presenteras med ett tillhörande 95 % konfidensintervall beräknat enligt avsnitt 3.1. Resultaten skiljer sig beroende på val av metod vilket innebär att en utvärdering av resultatens rimlighet krävs innan de används i planeringssyften.

4.1 Blockmaximum – metoden

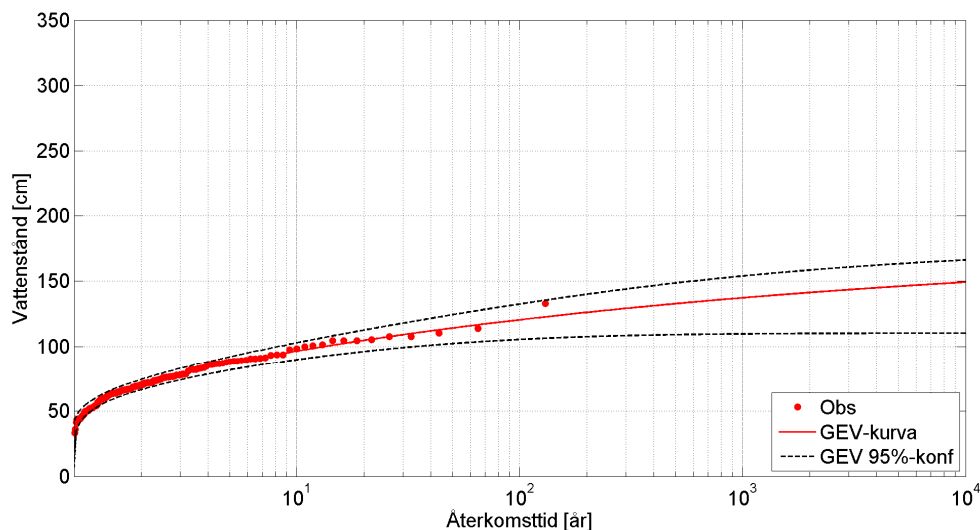
Nedan presenteras resultat av Blockmaximum – metoden så som den beskrivits i avsnitt 3.3 för de tre sannolikhetsfördelningarna GEV, Log-normal och Gumbel.

4.1.1 GEV-fördelning

Beräknade återkomstnivåer och konfidensintervall enligt Blockmaximum-metoden med GEV-fördelning listas i tabell 3, för nio stationer. I figur 2 visas beräknade återkomsttider och konfidensintervall med GEV-fördelning för Kungsholmsfort. Nivåerna anges i cm relativt medelvattenståndet (MW).

Tabell 3. Beräknade återkomstnivåer i cm relativt medelvattenståndet (MW) enligt Blockmaximum – metoden med GEV-fördelning. Siffrorna inom parentes anger 95-% konfidensintervall.

Station / återkomsttid (år)	10	100	200
Furuögrund	113 (103 - 122)	145 (122 - 165)	153 (125 - 176)
Ratan	104 (97 - 111)	130 (113 - 143)	136 (116 - 152)
Spikarna + Draghällan	94 (86 - 101)	120 (103 - 134)	126 (105 - 143)
Stockholm	81 (75 - 86)	102 (88 - 113)	107 (90 - 120)
Landsort + Landsort norra	72 (67 - 77)	92 (80 - 104)	98 (81 - 111)
Kungsholmsfort	96 (90 - 103)	120 (105 - 133)	126 (108 - 140)
Klagshamn	116 (108 - 123)	135 (122 - 142)	138 (123 - 144)
Ringhals + Varberg	122 (114 - 129)	149 (132 - 163)	155 (134 - 171)
Smögen	122 (115 - 128)	142 (128 - 152)	147 (130 - 158)



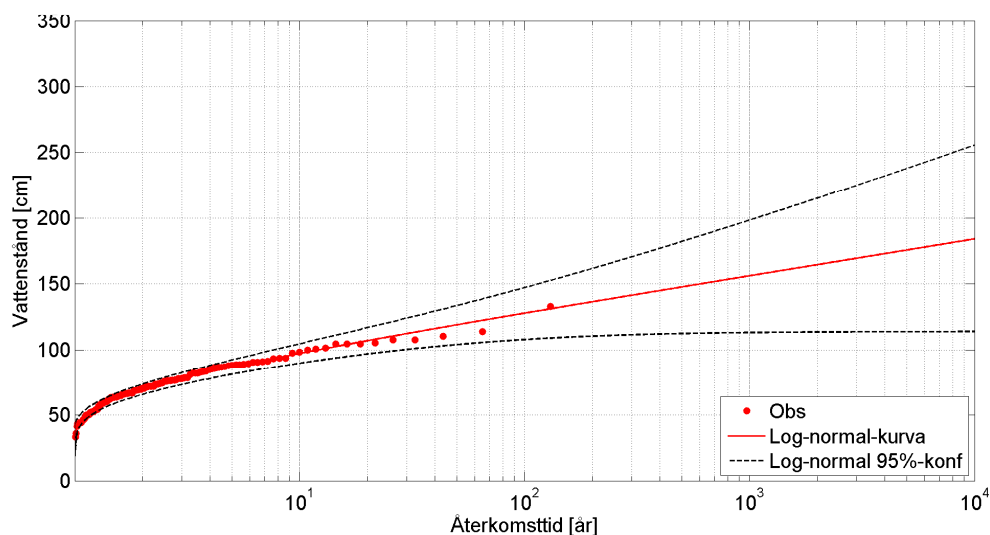
Figur 2. Återkomsttider och konfidensintervall för maximala årsvärden av havsvattenstånd (cm) med GEV-fördelning för Kungsholmsfort. Data från perioden 1887-2015 (129 årsvärden).

4.1.2 Log-normal-fördelning

Beräknade återkomstnivåer och konfidensintervall enligt Blockmaximum-metoden med Log-normal-fördelning listas i tabell 4, Tabell för nio stationer. I figur 3 visas beräknade återkomsttider och konfidensintervall med Log-normal-fördelning för Kungsholmsfort. Nivåerna anges i cm relativt medelvattenståndet (MW).

Tabell 4. Beräknade återkomstnivåer i cm relativt medelvattenståndet (MW) enligt Blockmaximum – metoden med Log-normal-fördelning. Siffrorna inom parentes anger 95-% konfidensintervall.

Station / återkomsttid (år)	10	100	200
Furuögrund	114 (103 - 125)	154 (125 - 182)	165 (128 - 202)
Ratan	105 (97 - 112)	136 (115 - 156)	144 (118 - 170)
Spikarna + Draghällan	94 (86 - 103)	127 (105 - 149)	137 (108 - 165)
Stockholm	81 (75 - 87)	105 (89 - 121)	112 (91 - 132)
Landsort + Landsort norra	72 (67 - 78)	93 (80 - 107)	99 (82 - 116)
Kungsholmsfort	97 (90 - 105)	128 (108 - 147)	136 (110 - 162)
Klagshamn	120 (108 - 133)	163 (130 - 195)	175 (133 - 216)
Ringhals + Varberg	122 (114 - 130)	153 (133 - 172)	162 (136 - 186)
Smögen	122 (114 - 130)	150 (131 - 168)	158 (133 - 181)



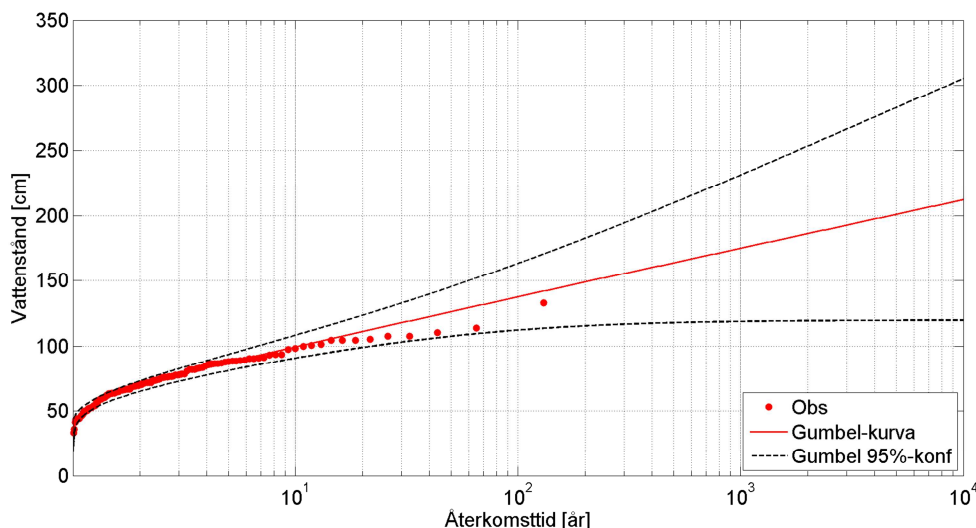
Figur 3. Återkomsttider och konfidensintervall för maximala årsvärden av havsvattenstånd (cm) med Log-normal-fördelning för Kungsholmsfort. Data från perioden 1887-2015 (129 årsvärden).

4.1.3 Gumbel-fördelning

Beräknade återkomstnivåer och konfidensintervall enligt Blockmaximum-metoden med Gumbel-fördelning listas i tabell 5 för nio stationer. I figur 4 visas beräknade återkomsttider och konfidensintervall med Gumbel-fördelning för Kungsholmsfort. Nivåerna anges i cm relativt medelvattenståndet (MW).

Tabell 5. Beräknade återkomstnivåer i cm relativt medelvattenståndet (MW) enligt Blockmaximum – metoden med Gumbel-fördelning. Siffrorna inom parentes anger 95-% konfidensintervall.

Station / återkomsttid (år)	10	100	200
Furuögrund	116 (104 - 128)	162 (128 - 197)	176 (131 - 221)
Ratan	107 (98 - 117)	147 (120 - 174)	159 (123 - 194)
Spikarna + Draghällan	97 (88 - 106)	136 (109 - 164)	148 (112 - 184)
Stockholm	83 (76 - 90)	114 (93 - 135)	123 (96 - 151)
Landsort + Landsort norra	74 (68 - 80)	100 (83 - 118)	108 (85 - 132)
Kungsholmsfort	99 (91 - 108)	138 (112 - 163)	149 (115 - 183)
Klagshamn	123 (109 - 137)	173 (134 - 213)	188 (137 - 239)
Ringhals + Varberg	126 (116 - 136)	169 (140 - 197)	181 (144 - 219)
Smögen	129 (118 - 140)	173 (141 - 204)	185 (145 - 226)



Figur 4. Återkomsttider och konfidensintervall för maximala årsvärden av havsvattenstånd (cm) med Gumbel-fördelning för Kungsholmsfort. Data från perioden 1887-2015 (129 årsvärden).

4.1.4 Utvärdering av val av sannolikhetsfördelning

Figurerna 2-4 illustrerar hur de tre olika sannolikhetsfördelningarna, GEV, Log-normal och Gumbel, skiljer sig åt. GEV-fördelningen planar ut på grund av sin krökningsparameter, medan Log-normal, och Gumbel-fördelningen fortsätter stiga för ökande återkomsttid. Gumbel-fördelningen tenderar i allmänhet att öka linjärt med logaritmen av återkomsttiden. Enklare uttryckt så ökar återkomstnivån med en approximativt fix nivå för varje nolla som adderas till återkomsttiden. Det gör att GEV och Gumbel kan skilja sig åt väldigt mycket för höga återkomsttider.

Inledningsvis diskuterades tumregeln ”dubbla mätseriens längd”, det vill säga att tillförlitligheten sjunker för återkomsttider längre än dubbla mätseriens längd. Detta illustreras väl av att de tre fördelningarna skiljer sig åt så mycket, och visar svårigheten med att extrapolera till återkomsttider långt bortom vad data täcker. Sannolikhetsfördelningarna har ingen information om vad som är ”rimligt” eller fysiskt möjligt utan extrapolerar enbart utifrån informationen i datamaterial som ingått i analysen. Om punktmolnet studeras utan vetskap om att det är vattenstånd, kan det nästan tolkas som att trenden är fortsatt ökning utan stopp för högre återkomsttider.

Det är inte heller trivialt att bedöma vad som är fysiskt rimligt eller inte. Förutsättningarna för extrema vattenstånd beror på havsbassängens utformning. De beror också på vad som är en möjlig stormhändelse, eftersom det är stormar som alstrar de värsta vattenstånden. Till exempel är det inte fysiskt möjligt att det blir orkanvindar med samma vindriktning under lång tid eftersom orkanvindar sker i samband med lågtryck som i sig inte ligger stilla på samma ställe. Vi finner att kunskaper om såväl meteorologiska som oceanografiska processer är nödvändiga för att kunna värdera resultatens rimlighet.

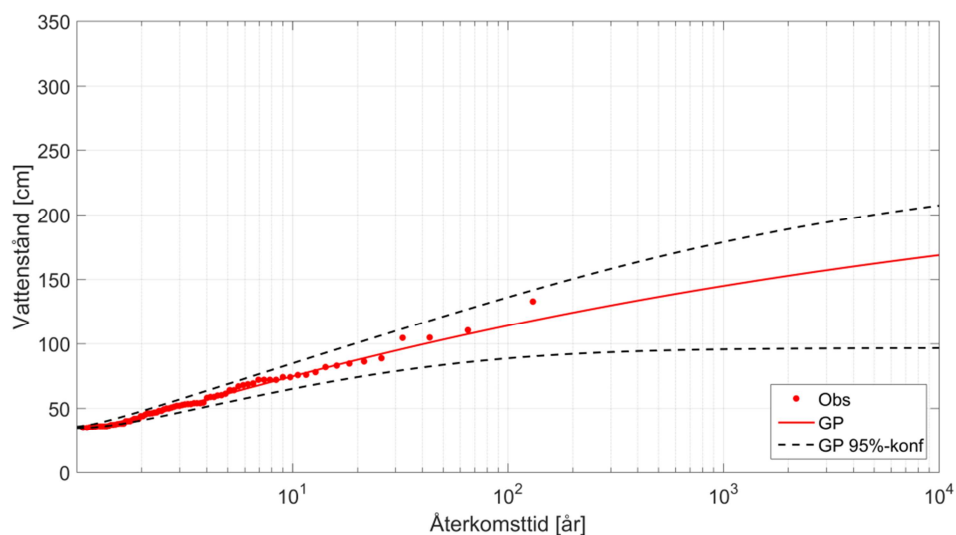
4.2 Peak over threshold – metoden

Beräknade återkomstnivåer och konfidensintervall enligt POT - metoden med GP-fördelning listas i tabell 6 för nio stationer. I figur 5 visas beräknade återkomsttider och konfidensintervall enligt POT - metoden med GP-fördelning för Kungsholmsfort. Nivåerna anges i cm relativt medelvattenståndet (MW).

Antalet händelser som ligger till grund för analysen varierar från station till station och är som lägst 52 vid Ratan och som mest 289 vid Smögen.

Tabell 6. Beräknade återkomstnivåer i cm relativt medelvattenståndet (MW) enligt POT – metoden med 90-percentil som tröskel. Siffrorna inom parentes anger 95% konfidensintervall.

Station / återkomsttid (år)	10	100	200
Furuögrund	102 (88 - 115)	150 (115 - 180)	163 (119 - 198)
Ratan	75 (64 - 88)	121 (91 - 146)	133 (95 - 161)
Spikarna + Draghällan	79 (67 - 92)	126 (95 - 154)	138 (99 - 170)
Stockholm	73 (64 - 82)	105 (85 - 119)	111 (88 - 126)
Landsort + Landsort norra	74 (70 - 79)	92 (81 - 102)	97 (82 - 108)
Kungsholmsfort	75 (65 - 85)	114 (89 - 136)	124 (92 - 150)
Klagshamn	100 (86 - 115)	158 (112 - 208)	176 (116 - 244)
Ringhals + Varberg	109 (96 - 121)	160 (127 - 190)	174 (132 - 209)
Smögen	114 (102 - 125)	155 (126 - 178)	165 (130 - 192)



Figur 5. Återkomsttider och konfidensintervall för havsvattenstånd i cm relativt medelvattenståndet (MW) med POT – metoden och GP-fördelning för Kungsholmsfort. Observationer är de vattenstånd som hämtas ur dataserien med POT-metoden.

4.3 ACER – metoden

Beräknade återkomstnivåer och konfidensintervall enligt ACER-metoden listas i tabell 7 för nio stationer. I figur 6 visas beräknade återkomsttider och konfidensintervall med ACER-metoden för Kungsholmsfort. Nivåerna anges i cm relativt medelvattenståndet (MW).

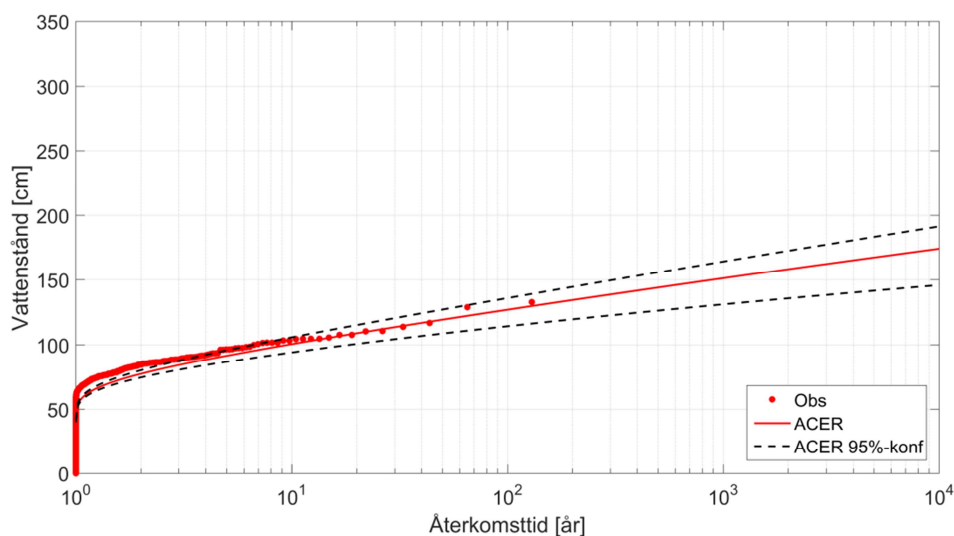
Tröskeln för ACER-metoden har valts som 95:e percentilen av rådata. Detta är konsistent både med tröskelvalet för POT samt så som i Roaldsdotter och Sande Borck (2016).

Som synes så skiljer sig ACER-resultaten från POT, trots att de båda använder händelser över en viss tröskel. Den främsta orsaken torde vara att ACER modellerar processen som icke-stationär samt att den tar hänsyn till beroende mellan händelser. Dessutom är optimeringsrutinen för att skatta ACER-parameterna annorlunda än både Blockmaximum och POT.

Antalet händelser som ingår i analysen med ACER-metoden är betydligt fler än för både Blockmaximum- och POT-metoden. Som lägst är det ca 58 000 händelser som använts.

Tabell 7. Beräknade återkomstnivåer i cm relativt medelvattenståndet (MW) enligt ACER – metoden. Siffrorna inom parentes anger 95 % konfidensintervall.

Station / återkomsttid (år)	10	100	200
Furuögrund	115 (108 - 121)	138 (125 - 148)	145 (130 - 155)
Ratan	105 (100 - 109)	123 (115 - 129)	127 (119 - 135)
Spikarna + Draghällan	95 (90 - 100)	117 (107 - 125)	123 (111 - 132)
Stockholm	83 (79 - 87)	100 (93 - 107)	104 (97 - 112)
Landsort + Landsort norra	78 (73 - 82)	93 (86 - 100)	97 (89 - 105)
Kungsholmsfort	101 (94 - 106)	127 (114 - 136)	134 (120 - 144)
Klagshamn	123 (112 - 133)	167 (146 - 188)	180 (155 - 206)
Ringhals + Varberg	122 (114 - 128)	155 (139 - 165)	164 (145 - 176)
Smögen	120 (113 - 126)	145 (133 - 155)	152 (138 - 163)



Figur 6. Återkomsttider och konfidensintervall för havsvattenstånd i cm relativt medelvattenståndet (MW) med ACER-metoden för Kungsholmsfort. Observationer är alla lokala maximumvärden i dataserien.

5 Känslighetsanalys

De statistiska analyserna utförs traditionellt på stationsdata. I synnerhet är det varje års högsta uppmätta vattenstånd som är av intresse. Osäkerheten i dessa århögsta värdena kommer att propagera igenom de statistiska analyserna och ge en osäkerhet i de beräknade återkomsttiderna. Därför är det viktigt att förstå och modellera osäkerheten i mätningarna.

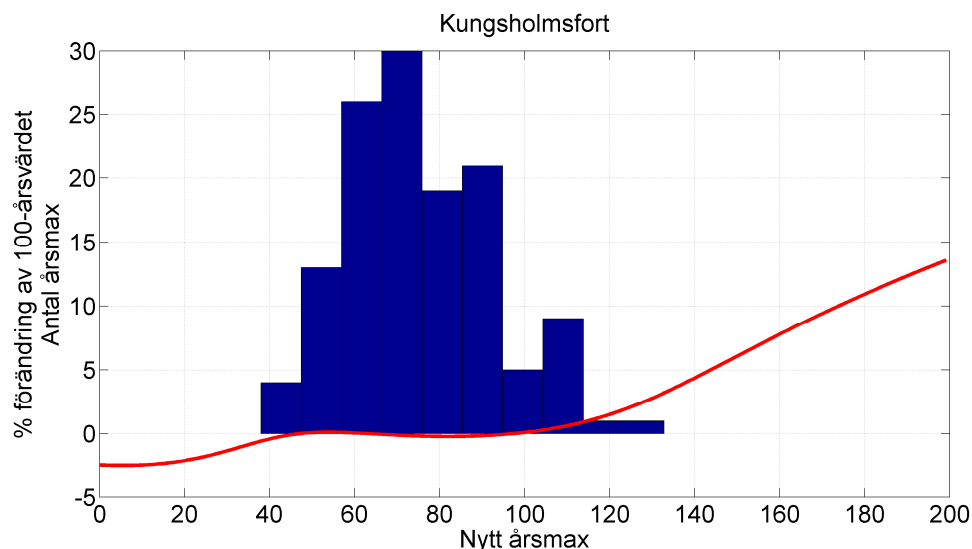
En relaterad fråga är hur långa återkomsttider man, med någon säkerhet, kan uttala sig om för en given station. Dataunderlaget är begränsat till en viss tidsperiod och därmed har vi inte tillgång till alla händelser som kan uppstå vid mätstationerna. Det finns därför en osäkerhet i parameterskattningarna som gjorts med ML-metoden för vald sannolikhetsfördelning. Dessa osäkerheter finns med i de återkomsttider som extraheras från fördelningen.

5.1 Känslighet av tillkommande värden på återkomsttider

När återkomsttider beräknas beror resultatet på det dataunderlag som används. En frekvensanalys baserad på årsmax som utförts 2014 och sedan görs om 2015, får ytterligare ett årsmax-värde tillgängligt. Därför är det relevant att veta hur mycket ett nytt årsmax-värde kan påverka värdet för 100 års återkomsttid.

En analys utfördes av känsligheten i återkomstnivåerna då ett årsmax-värde tillfördes tidsserien. Analysen avser arbete med årsmax enligt avsnitt 3.1.

Återkomsttiderna har beräknats med en GEV-fördelning och Blockmaximum-metoden beskriven i avsnitt 3.3. I figur 7 presenteras analysen för Kungsholmsfort. Kurvan i diagrammet visar hur många procent som 100-årsvärdet ändras då det tillkommer ett nytt årsmax. Som exempel kan utläsas att om det tillkommer ett årsmax på 140 cm till årsmax-tidsserien för Kungsholmsfort ökar 100-årsvattenståndet med ca 5 %.



Figur 7. Illustration av hur 100-årsvattenståndet påverkas av nyttillkommet årsmax-värde. Blå staplar anger antalet årsmaxima inom respektive intervall. Röd linje visar procentuell förändring av 100-årsvärdet då det tillkommer nytt årsmax

Allmänt påverkas återkomstnivån (i detta fall 100-årsvärdet) mest när det tillkomna årsmax-värdet i någon mening "sticker ut" från de värden som hittills uppträtt. Om det tillkomna årsmax-värdet är vanligt förekommande, i detta fall värden kring 50-90 cm, så påverkas inte det beräknade 100-årsvärdet nämnvärt.

För övriga stationer framträder samma bild, med en minskning av 100-årsvärdet för årsmax under de som hittills observerats, och en ökning för årsmax som är större än observerade årsmax.

5.2 Osäkerhet i mätdata

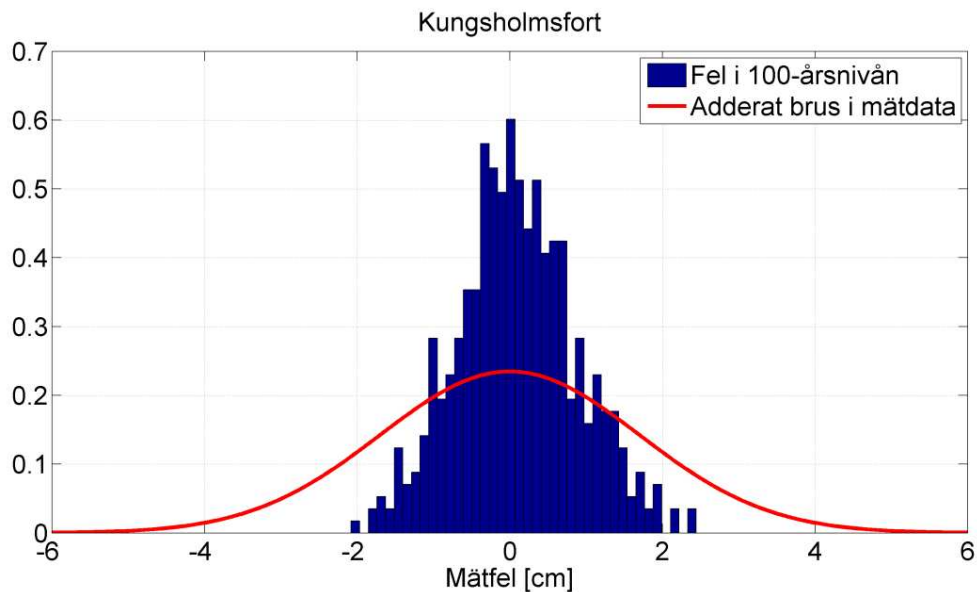
Osäkerhet i mätvärden kommer att propagera igenom återkomsttidsberäkningarna och resultera i ökad osäkerhet i återkomsttiderna. Därför är det viktigt att förstå hur mycket ett visst mätfel i uppmätta vattenstånd kan påverka de beräknade återkomsttiderna.

Figur 8 illustrerar hur mätfel i årsmax propagerar till fel i beräknad 100-årsnivå. Först togs en tidsserie fram med årsmax-värden för Kungsholmsfort. Sedan adderades ett slumpmässigt normalfördelat brus med standardavvikelsen 1.7 cm (vilket bedömdes vara ett rimligt mätfel för vattenståndsmätningar) på varje årsmax. Detta gjordes 1000 gånger, och resultatet är då 1000 tidsserier med årsmax som alla har ett unikt litet brus adderat. För var och en av dessa 1000 tidsserier beräknades 100-årsnivån med en GEV-fördelning, och histogrammet för differensen mellan dessa beräknade värden och den 100-årsnivå som erhålls för Kungsholmsfort utan något adderat brus är presenterat i figur 8. Mer formellt är histogrammet resultatet av

$$(100 - \text{årsnivån beräknad från årsmax med brus}) - \\ (100 - \text{årsnivån beräknad från årsmax utan brus})$$

Den röda kurvan illustrerar täthetsfunktionen för den normalfördelning som bruset drogs ifrån.

Slutsatsen är att ett fel i mätdata fortplantar sig (linjärt) i den statistiska analysen. Om mätfelet i rådata, och därmed årsmax-värdena, är ungefär ± 2 cm så kommer det resulterande felet i 100-årsnivån att vara i storleksordning ± 2 cm.



Figur 8. Fel i 100-årsnivån beroende av brus i mätdata. Skalan är vald så att arean under kurvan och arean av staplarna blir densamma, nämligen 1.

5.3 Kombinerade osäkerheter

Eftersom flera osäkerheter påverkar resultaten har en kombinerad bootstrap³ (Efron och Tibshirani, 1994) utförts där samtliga relevanta osäkerheter har vägts samman. Detta innebär att slumpmässiga dragningar av årsmax har gjorts från den för stationen skattade GEV-fördelningen. Därefter har dessa årsmax fått gå igenom de steg som presenteras i avsnitt 3.1 innan man slutligen beräknat 100-årsnivån från tidsserien. Resultaten speglar den totala osäkerheten i återkomsttiderna med hänsyn till samtliga relevanta felfaktorer, givet en GEV-fördelning.

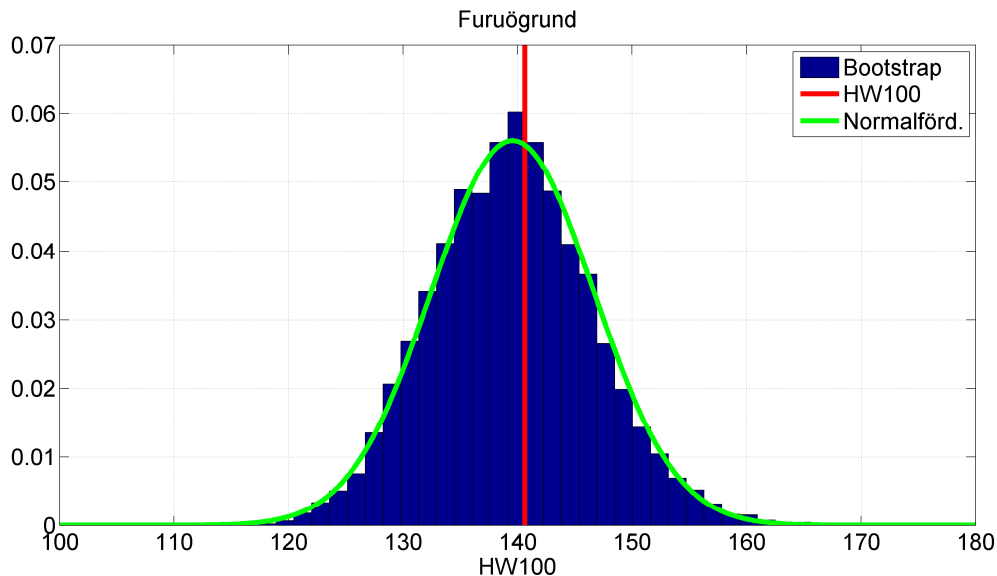
De osäkerheter som tagits hänsyn till är:

- Osäkerhet i mätningar, i form av ett normalfördelat brus, se avsnitt 5.2.
- Avrundning av mätningar till hela millimetrar.
- Den statistiska osäkerheten, i och med själva bootstrappingen.

Den i särklass största osäkerheten av dessa punkter är den statistiska osäkerheten, alltså osäkerheten i att dataunderlaget som återkomsttider skattas ifrån är begränsat.

Totalt 10 000 samplingar utfördes för varje station. 100-årsvattenståndet beräknades för varje sample, och ett histogram över värdena plottades.

³ Bootstrapping innebär att man gör många slumpmässiga dragningar med återläggning av existerande data, och sedan gör analyser på det uttagna dataunderlaget.



Figur 9. Kombinerade osäkerheter för 100-årsvattenståndet (HW100) för Furuögrund.

De bootstrappade resultaten följer som synes en normalfördelning väldigt väl (figur 9). Utifrån denna normalfördelning går det att uttala sig om den totala osäkerheten i det beräknade 100-årsvattenståndet, exempelvis i form av konfidensintervall.

6 Diskussion

Resultaten visar på skillnaderna mellan metoderna. I tabell 8 listas för- och nackdelar för de tre testade statistiska metoderna Blockmaximum, POT och ACER.

POT - metoden tenderar att för låga återkomsttider ge lägre värden på havsnivåer. Det framgår till exempel av 10-årsnivån i de presenterade tabellerna. Vid högre återkomsttider kommer punkterna ifatt kurvan. Detta kan troligen till stor del förklaras av att GP-fördelningen som används vid POT-analysen skiljer sig från den i Blockmaximum-metoden använda GEV-fördelningen. Medan GEV tenderar att plana ut pga. sin krökningsparameter så fortsätter POT att stiga utan noterbar avtagning.

En annan orsak till att metoderna skiljer sig åt är att de använder olika dataunderlag för att beräkna återkomsttider. Blockmaximum-metoden använder ett värde per år, medan POT - metoden kan utnyttja flera händelser vissa år, medan andra år kanske inga alls. Om man har ett mycket stor antal händelser ska resultaten i teorin likna varandra allt mer. I verkligheten skiljer de sig åt även om dataunderlaget ganska väl uppfyller kraven på oberoende och likafördelning.

Utöver att metoderna skiljer sig åt så skiljer sig resultaten i Blockmaximum-metoden beroende på vilken fördelning som används. Som beskrivits ovan så tenderar GEV att plana ut för högre återkomsttider, medan Gumbel och Lognormal oftast ligger nära varandra och stiger stadigt med ökande återkomsttider. Denna skillnad mellan fördelningarna beror på fördelningens krökning. GEV-fördelning har en krökningsparameter som kan kalibreras för att passa till dataunderlaget, medan Gumbel och Lognormal inte har denna möjlighet.

Tabell 8. Fördelar och nackdelar med de tre olika statistiska metoderna, Blockmaximum, POT och ACER.

	Fördelar	Nackdelar
Blockmaximum - metoden	• Enkelt att använda och implementera • Inga fria parametrar som behöver väljas av användaren	• Information kan missas eftersom endast ett värde extraheras per år • Förutsätter oberoende och likafördelning för årsmaxvärdena, vilket inte alltid är uppfyllt • Inte helt trivialt att välja vilken sannolikhetsfördelning som ska användas
POT - metoden	• Kan ta hänsyn till godtyckligt många extrema händelser inom ett och samma år, vilket innebär att ingen information "går förlorad"	• Användaren väljer själv tröskelvärde, vilket inte är trivialt och kan ha stor effekt på beräknade återkomsttider • Användaren anger minsta avstånd i tid mellan händelser för att de ska räknas som oberoende. Det kan vara svårt, och kan ha stor effekt på beräknade återkomsttider
ACER - metoden	• Kan ta hänsyn till beroende mellan extrema händelser • Presterar lite bättre än övriga metoder på att skatta återkomsttider från syntetisk data⁴ (Naess <i>et al.</i>, 2013) • Kan hantera icke-stationaritet i data	• Användaren väljer själv tröskelvärde, vilket inte är trivialt och kan ha stor effekt på beräknade återkomsttider • Valet av parametern k, som styr beroende mellan händelser, väljs i viss mån subjektivt och kan ha stor effekt på beräknade återkomsttider

ACER - metoden har ett flertal fria parametrar som inte är helt triviala att sätta värden på. För att få trovärdiga resultat från ACER bör användaren dels ha goda kunskaper om tidsserien som analyseras. Exempelvis behöver användaren veta om processen kan anses stationär⁵, vad som är ett rimligt extremt värde (för att sätta en tröskel för extrema händelser), samt hur många steg bakåt som beroende ska antas för (parameter k). Den ACER-rutin som använts ger användaren visst stöd i valet av parametern k , vilket dock också ger en ökad osäkerhet då två olika personer kan komma att göra olika val av denna parameter.

Med allt detta sagt så är ACER en stark metod för att beräkna osäkerheter, och kan ta hänsyn till faktorer såsom beroende och icke-stationaritet, vilket övriga metoder inte klarar av. Den är dock väldigt komplicerad och har många fria parametrar som är svåra att välja.

⁴ Syntetisk data = data som skapas av vädergenerator

⁵ Stationär= att den inte ändras med tiden

7 Slutsatser

Metodernas lämplighet och känslighet utvärderades för återkomsttider med låg sannolikhet. SMHI har hittills föredragit Blockmaximum-metoder, framförallt med GEV-fördelning. Med POT-metoden är det svårare att tolka resultaten, eftersom konfidensintervallet blir väldigt stort för återkomsttider större än 100-150 år. Inom Blockmaximum-metoden testades olika fördelningar; GEV, Log-normal och Gumbel. Gumbel-fördelningen förefaller ge en kurvanpassning som inte är fysikaliskt rimlig. SMHI anser att GEV och Log-normal fördelning ofta ger en kompletterande bild av fördelningen. Upp till 100 års återkomsttid visar fördelningarna ofta samma värde, men konfidensintervallet är oftast större för Log-normal fördelning. POT-metoder tar till vara fler händelser än de riktigt extrema, vilket kan vara en fördel. De ger ofta väldigt stora konfidensintervall för långa återkomsttider, och metoderna är känsliga för val av tröskel.

Olika statistiska modeller ger, med andra ord, olika resultat utifrån samma dataunderlag. Det är inget oväntat resultat, utan beror på att den sanna fördelningen inte är känd. Det är även välbekant att värdet för en given återkomsttid ändras när nya data tillkommer. I känslighetsanalysen visades hur ett tillkommande värde påverkade 100 års återkomsttid. Det är viktigt att förstå att ett beräknat värde med en given återkomsttid inte är en exakt nivå, utan en skattning utifrån de data och de modeller som finns. Vår slutsats är att det inte går att säga att en statistisk modell är överlägsen en annan, utan det krävs en kvalitativ utvärdering utifrån analyserna som görs.

I statistiska analyser av extrema havsvattenstånd vill vi lyfta följande:

- Data bör ha hög kvalitet, representera oberoende händelser, och tillhöra samma urval. Mätstationer som flyttats kan ibland kombineras, men med försiktighet. Ett exempel på stationer som inte bör kombineras är Göteborg, där data från Göteborg Ringön och data från Göteborg Torshamnen representerar olika oceanografiska förhållanden. Dataserier som ändrar mätfrekvens från dygn till timvärde, eller till högupplöst, kan inte heller hanteras på samma sätt.
- Dataseriens längd är viktig. Nyttillkommande maximala årsvärden kan påverka värdena för 100 års återkomsttid med upp till 5 %, till och med för långa tidsserier (Kungsholmsfort). Vissa kortare serier förkastas av de statistiska testerna, exempelvis mätserien från Barsebäck.
- Resultat som inte uppfyller de statistiska testerna behöver utvärderas noga och i värsta fall förkastas.
- Konfidensintervall måste redovisas tillsammans med återkomsttider. Det speglar osäkerheterna bättre än om endast återkomsttiderna redovisas.
- För att utvärdera rimligheten av resultaten, till exempel en viss statistisk modellens lämplighet, krävs kunskap om den aktuella platsens oceanografiska förhållanden.
- POT-metoder tar till vara fler händelser än de riktigt extrema, vilket kan vara en fördel. Om tröskeln sätts för låg är det dock inte längre extremvattenstånd som utvärderas.

I Nerheim m fl. (2013) analyserades betydelsen av att använda färre mätdata. Det gav stöd för tumregeln om att återkomsttider inte bör tas fram för mer än dubbla mätseriens längd. I innevarande rapport har vi inte hittat några nya indikationer på att resultaten för längre återkomsttider är tillförlitliga. Framförallt avviker resultaten som tagits fram med olika metodik alltmer från varandra för ökande återkomsttider. Kompletterande metodik behövs således för att studera potentialen för de mest extrema havsvattenstånden längs Sveriges kust. En metod för att beräkna högsta havsvattenstånd framtogs därför inom projektet och är rapporterad i Schöld m.fl. (2017).

8 Referenser

- Blom, G., Enger, J., Englund, G., Grandell, J., och Holst, L. (2005). *Sannolikhetsteori och statistiskteori med tillämpningar*. Studentlitteratur, Lund. ISBN 91-44-02442-8.
- Coles, S. (2001). *An Introduction to Statistical Modelling of Extreme Values*. Springer Verlag, London. ISBN 1-85233-459-2
- Dahlen, K. E. (2010). *Comparison of ACER and POT Methods for estimation of Extreme Values*. Master thesis. Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Department of Mathematical Sciences, Trondheim.
- Efron, B., and Tibshirani, R. (1994). *An Introduction to the Bootstrap*. Chapman & Hall/CRC. Monographs on Statistics and Applied Probability 57. ISBN 9780412042317
- Johansson, L., Gyllenram, W., Andersson, M. och Nerheim, S. (2017). *Lokala effekter på extrema havsvattenstånd*. SMHI Oceanografi Nr 125.
- Marsaglia, G., Tsang, W., and Wang, J. (2003). *Evaluating Kolmogorov's Distribution*. Journal of Statistical Software. DOI:10.18637/jss.v008.i18
- Naess, A., Gaidai, O., and Karpa, O. (2013). *Estimation of Extreme Values by the Average Conditional Exceedance Rate Method*. Journal of Probability and Statistics, Volume 2013, 15.
- Nerheim, S. (2012). *Förtydligande om havsnivåer*. SMHI PM 2012-03-08. Dnr 2009/2254/204
- Nerheim, S., och Lindow, H. (2008). *Vattenstånd vid Södertäljes Östersjökust - nu och i framtiden*. SMHI Rapport Nr 2008-18.
- Nerheim, S., Asp, M., Eklund, D. och Södling, J. (2013). *Pilotstudie: Metoder för att ta fram extrema havsvattenstånd med låg sannolikhet*. SMHI Rapport Nr 2013-46 .
- Pickands, J. (1975). *Statistical inference using extreme order statistics*. The Annals of Statistics, 3, 119–131.
- Roaldsdotter, O., och Sande Borck, H. (2016). *Ekstremveridianalyse av vannstandsdata langs norskekysten*. Norska Kartverket.
- Simpson, M.J.R., Nilsen, J.E.Ø., Ravndal, O.R., Breili, K., Sande, H.P., Kierulf, H., Steffen, H., Jansen, E., Carson, M., and Vestøl, Ø. (2015). *Sea Level Change for Norway*. Norwegian Centre for Climate Services, NCCS report no 1/2015.
- Stensen, B., Andréasson, J., Bergström, S., Dahné, J., Eklund, D., German, J., Gustavsson, H., Hallberg, K., Martinsson, S., Nerheim, S. och Wern, L. (2010). *Regional klimatsammanställning - Stockholms län*. SMHI Rapport Nr 2010-78.
- Schöld, S., Ivarsson, C.-L., Nerheim, S. och Södling, J. (2017). *Metod för att bedöma högsta vattenstånd längs Sveriges kust*. SMHI Klimatologi Nr 45.
- Södling, J., och Nerheim, S. (2014). *Extrema vattenstånd i Blekinge*. SMHI Rapport Nr 2014-11.
- Wilson, E. B. (1927). *Probable inference, the law of succession, and statistical inference*. Journal of the American Statistical Association 22: 209–212.

9 Appendix

9.1 Anpassningsmått

Kolmogorov – Smirnov test

KS-testet använder det maximala avståndet mellan fördelningens teoretiska fördelningsfunktion och datamaterialets empiriska fördelningsfunktion. Metoden beskrivs formellt nedan.

Låt n vara antal datavärden, till exempel antal årsmåx. Definiera den empiriska fördelningsfunktionen som

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{x_i \leq x} = \text{"andel värden } \leq x\text{"}$$

Låt $F(x)$ vara fördelningens fördelningsfunktion.

KS-statistikan definieras som

$$D_n = \max(|F(x) - F_n(x)|)$$

Definiera

$$t = \sqrt{n} * D_n$$

P-värden för sannolikheten att data ej följer vald fördelning kan nu extraheras från uttrycket

$$P = 1 - 2 \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k-1} e^{-2k^2 t^2}$$

9.2 Sannolikhetsfördelningar

Nedan presenteras fördelningsfunktioner för de sannolikhetsfördelningar som har använts i rapporten.

Fördelningsfunktionen betecknas med $F(x)$ och ger sannolikheten att observera ett värde $\leq x$.

Generalized Extreme Value (GEV)

$$F(x; \mu, \sigma, \xi) = \exp\left(-\left(1 + \xi * \left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)^{-1/\xi}\right)\right)$$

Stödet är $x \in \mathbb{R}$

Log-normal

$$F(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{\ln(x) - \mu}{\sqrt{2}\sigma}\right)$$

Stödet är $x > 0$

Här är erf “error function”:

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

Gumbel

$$z = \frac{(x - \mu)}{\sigma}$$

$$F(x; \mu, \sigma) = 1 - \exp(-\exp(z))$$

Stödet är $x \in \mathbb{R}$

Generalized Pareto (GP)

Tröskelparametern μ är satt till 0:

$$\begin{cases} F(x; \sigma, \xi) = 1 - \left(1 + \frac{\xi x}{\sigma}\right)^{-1/\xi} & \text{if } \xi \neq 0 \\ F(x; \sigma, \xi) = 1 - \exp\left(-\frac{x}{\sigma}\right) & \text{if } \xi = 0 \end{cases}$$

Stödet är $x > 0$

Weibull

$$F(x; \lambda, k) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{\lambda}\right)^k\right)$$

Stödet är $x > 0$

SMHIs publiceringar

SMHI ger ut sju rapportserier. Tre av dessa, R-serierna är avsedda för internationell publik och skrivs därför oftast på engelska. I de övriga serierna används det svenska språket.

Seriernas namn	Publiceras sedan
RMK (Report Meteorology and Climatology)	1974
RH (Report Hydrology)	1990
RO (Report Oceanography)	1986
METEOROLOGI	1985
HYDROLOGI	1985
OCEANOGRAFI	1985
KLIMATOLOGI	2009

I serien OCEANOGRAFI har tidigare utgivits:

- | | | | |
|---|--|----|--|
| 1 | Lennart Funkquist (1985)
En hydrodynamisk modell för
spridnings- och
cirkulationsberäkningar i Östersjön
Slutrapport | 10 | <i>Vakant – kommer ej att utnyttjas!</i> |
| 2 | Barry Broman och Carsten Pettersson.
(1985)
Spridningsundersökningar i yttre
fjärden Piteå | 11 | Cecilia Ambjörn (1987)
Spridning av kylvatten från
Öresundsverket |
| 3 | Cecilia Ambjörn (1986)
Utbyggnad vid Malmö hamn; effekter
för Lommabuktens vattenutbyte | 12 | Bo Juhlin (1987)
Oceanografiska observationer utmed
svenska kusten med kustbevakningens
fartyg 1986 |
| 4 | Jan Andersson och Robert Hillgren
(1986)
SMHIs undersökningar i
Öregrundsgrepen perioden 84/85 | 13 | Jan Andersson och Robert Hillgren
(1987)
SMHIs undersökningar i
Öregrundsgrepen 1986 |
| 5 | Bo Juhlin (1986)
Oceanografiska observationer utmed
svenska kusten med kustbevakningens
fartyg 1985 | 14 | Jan-Erik Lundqvist (1987)
Impact of ice on Swedish offshore
lighthouses. Ice drift conditions in the
area at Sydostbrotten - ice season
1986/87 |
| 6 | Barry Broman (1986)
Uppföljning av sjövärmepump i Lilla
Värtan | 15 | SMHI/SNV (1987)
Fasta förbindelser över Öresund -
utredning av effekter på vattenmiljön i
Östersjön |
| 7 | Bo Juhlin (1986)
15 års mätningar längs svenska kusten
med kustbevakningen (1970 - 1985) | 16 | Cecilia Ambjörn och Kjell Wickström
(1987)
Undersökning av vattenmiljön vid
utfyllnaden av Kockums varvsbassäng.
Slutrapport för perioden
18 juni - 21 augusti 1987 |
| 8 | Jonny Svensson (1986)
Vågdata från svenska kustvatten 1985 | 17 | Erland Bergstrand (1987)
Östergötlands skärgård - Vattenmiljön |
| 9 | Barry Broman (1986)
Oceanografiska stationsnät - Svenskt
Vattenarkiv | 18 | Stig H. Fonselius (1987)
Kattegatt - havet i väster |

- 19 Erland Bergstrand (1987)
Recipientkontroll vid Breviksnäs
fiskodling 1986
- 20 Kjell Wickström (1987)
Bedömning av kylvattenrecipienten för
ett kolkraftverk vid Oskarshamnsverket
- 21 Cecilia Ambjörn (1987)
Förstudie av ett nordiskt modellsystem
för kemikaliespridning i vatten
- 22 Kjell Wickström (1988)
Vågdata från svenska kustvatten 1986
- 23 Jonny Svensson, SMHI/National
Swedish Environmental Protection
Board (SNV) (1988)
A permanent traffic link across the
Öresund channel - A study of the
hydro-environmental effects in the
Baltic Sea
- 24 Jan Andersson och Robert Hillgren
(1988)
SMHIs undersökningar utanför
Forsmark 1987
- 25 Carsten Peterson och Per-Olof
Skoglund (1988)
Kylvattnet från Ringhals 1974-86
- 26 Bo Juhlin (1988)
Oceanografiska observationer runt
svenska kusten med kustbevakningens
fartyg 1987
- 27 Bo Juhlin och Stefan Tobiasson (1988)
Recipientkontroll vid Breviksnäs
fiskodling 1987
- 28 Cecilia Ambjörn (1989)
Spridning och sedimentation av tippat
lermaterial utanför Helsingborgs
hamnområde
- 29 Robert Hillgren (1989)
SMHIs undersökningar utanför
Forsmark 1988
- 30 Bo Juhlin (1989)
Oceanografiska observationer runt
svenska kusten med kustbevakningens
fartyg 1988
- 31 Erland Bergstrand och Stefan
Tobiasson (1989)
Samordnade kustvattenkontrollen i
Östergötland 1988
- 32 Cecilia Ambjörn (1989)
Oceanografiska förhållanden i
Brofjorden i samband med
kylvattenutsläpp i Trommekilen
- 33a Cecilia Ambjörn (1990)
Oceanografiska förhållanden utanför
Vendelsöfjorden i samband med
kylvatten-utsläpp
- 33b Eleonor Marmefelt och Jonny Svensson
(1990)
Numerical circulation models for the
Skagerrak - Kattegat. Preparatory study
- 34 Kjell Wickström (1990)
Oskarshamnsverket - kylvattenutsläpp i
havet - slutrapport
- 35 Bo Juhlin (1990)
Oceanografiska observationer runt
svenska kusten med kustbevakningens
fartyg 1989
- 36 Bertil Håkansson och Mats Moberg
(1990)
Glommaälvens spridningsområde i
nord-östra Skagerrak
- 37 Robert Hillgren (1990)
SMHIs undersökningar utanför
Forsmark 1989
- 38 Stig Fonselius (1990)
Skagerrak - the gateway to the North
Sea
- 39 Stig Fonselius (1990)
Skagerrak - porten mot Nordsjön
- 40 Cecilia Ambjörn och Kjell Wickström
(1990)
Spridningsundersökningar i norra
Kalmarsund för Mönsterås bruk
- 41 Cecilia Ambjörn (1990)
Strömningsteknisk utredning avseende
utbyggnad av gipsdeponi i Landskrona
- 42 Cecilia Ambjörn, Torbjörn Grafström
och Jan Andersson (1990)
Spridningsberäkningar - Klints Bank
- 43 Kjell Wickström och Robert Hillgren
(1990)
Spridningsberäkningar för EKA-
NOBELs fabrik i Stockviksverken

- 44 Jan Andersson (1990)
Brofjordens kraftstation -
Kylvattensspridning i Hanneviken
- 45 Gustaf Westring och Kjell Wickström
(1990)
Spridningsberäkningar för Höganäs
kommun
- 46 Robert Hillgren och Jan Andersson
(1991)
SMHIs undersökningar utanför
Forsmark 1990
- 47 Gustaf Westring (1991)
Brofjordens kraftstation -
Kompletterande simulering och analys
av kylvattensspridning i Trommekilen
- 48 Gustaf Westring (1991)
Vågmätningar utanför Kristianopel -
Slutrapport
- 49 Bo Juhlin (1991)
Oceanografiska observationer runt
svenska kusten med kustbevakningens
fartyg 1990
- 50A Robert Hillgren och Jan Andersson
(1992)
SMHIs undersökningar utanför
Forsmark 1991
- 50B Thomas Thompson, Lars Ulander,
Bertil Håkansson, Bertil Brusmark,
Anders Carlström, Anders Gustavsson,
Eva Cronström och Olov Fäst (1992).
BEERS -92 Final edition
- 51 Bo Juhlin (1992)
Oceanografiska observationer runt
svenska kusten med kustbevakningens
fartyg 1991
- 52 Jonny Svensson och Sture Lindahl
(1992)
Numerical circulation model for the
Skagerrak - Kattegatt
- 53 Cecilia Ambjörn (1992)
Isproppsförebyggande muddring och
dess inverkan på strömmarna i
Torneälven
- 54 Bo Juhlin (1992)
20 års mätningar längs svenska kusten
med kustbevakningens fartyg (1970 -
1990)
- 55 Jan Andersson, Robert Hillgren och
Gustaf Westring (1992)
Förstudie av strömmar, tidvatten och
vattenstånd mellan Cebu och Leyte,
Filippinerna
- 56 Gustaf Westring, Jan Andersson,
Henrik Lindh och Robert Axelsson
(1993)
Forsmark - en temperaturstudie.
Slutrapport
- 57 Robert Hillgren och Jan Andersson
(1993)
SMHIs undersökningar utanför
Forsmark 1992
- 58 Bo Juhlin (1993)
Oceanografiska observationer runt
svenska kusten med kustbevakningens
fartyg 1992
- 59 Gustaf Westring (1993)
Isförhållandena i svenska farvatten
under normalperioden 1961-90
- 60 Torbjörn Lindkvist (1994)
Havsområdesregister 1993
- 61 Jan Andersson och Robert Hillgren
(1994)
SMHIs undersökningar utanför
Forsmark 1993
- 62 Bo Juhlin (1994)
Oceanografiska observationer runt
svenska kusten med kustbevakningens
fartyg 1993
- 63 Gustaf Westring (1995)
Isförhållanden utmed Sveriges kust -
isstatistik från svenska farleder och
farvatten under normalperioderna
1931-60 och 1961-90
- 64 Jan Andersson och Robert Hillgren
(1995)
SMHIs undersökningar utanför
Forsmark 1994
- 65 Bo Juhlin (1995)
Oceanografiska observationer runt
svenska kusten med kustbevakningens
fartyg 1994
- 66 Jan Andersson och Robert Hillgren
(1996)
SMHIs undersökningar utanför
Forsmark 1995

- 67 Lennart Funkquist och Patrik Ljungemyr (1997)
Validation of HIROMB during 1995-96
- 68 Maja Brandt, Lars Edler och Lars Andersson (1998)
Översvämningar längs Oder och Wisla sommaren 1997 samt effekterna i Östersjön
- 69 Jörgen Sahlberg SMHI och Håkan Olsson, Länsstyrelsen, Östergötland (2000)
Kustzonmodell för norra Östergötlands skärgård
- 70 ***Vakant – kommer ej att utnyttjas!***
- 71 ***Vakant – kommer ej att utnyttjas!***
- 72 Fourth Workshop on Baltic Sea Ice Climate Norrköping, Sweden 22-24 May, 2002 Conference Proceedings
Editors: Anders Omstedt and Lars Axell
- 73 Torbjörn Lindkvist, Daniel Björkert, Jenny Andersson, Anders Gyllander (2003)
Djupdata för havsområden 2003
- 74 Håkan Olsson, SMHI (2003)
Erik Årnefelt, Länsstyrelsen Östergötland
Kustzonssystemet i regional miljöanalys
- 75 Jonny Svensson och Eleonor Marmefelt (2003)
Utvärdering av kustzonmodellen för norra Östergötlands och norra Bohusläns skärgårdar
- 76 Eleonor Marmefelt, Håkan Olsson, Helma Lindow och Jonny Svensson, Thalassos Computations (2004)
Integrerat kustzonssystem för Bohusläns skärgård
- 77 Philip Axe, Martin Hansson och Bertil Håkansson (2004)
The national monitoring programme in the Kattegat and Skagerrak
- 78 Lars Andersson, Nils Kajrup och Björn Sjöberg (2004)
Dimensionering av det nationella marina pelagialprogrammet
- 79 Jörgen Sahlberg (2005)
Randdata från öppet hav till kustzonmodellerna (Exemplet södra Östergötland)
- 80 Eleonor Marmefelt, Håkan Olsson (2005)
Integrerat Kustzonssystem för Hallandskusten
- 81 Tobias Strömgren (2005)
Implementation of a Flux Corrected Transport scheme in the Rossby Centre Ocean model
- 82 Martin Hansson (2006)
Cyanobakterieblomningar i Östersjön, resultat från satellitövervakning 1997-2005
- 83 Kari Eilola, Jörgen Sahlberg (2006)
Model assessment of the predicted environmental consequences for OSPAR problem areas following nutrient reductions
- 84 Torbjörn Lindkvist, Helma Lindow (2006)
Fyrskepsdata. Resultat och bearbetnings-metoder med exempel från Svenska Björn 1883 – 1892
- 85 Pia Andersson (2007)
Ballast Water Exchange areas – Prospect of designating BWE areas in the Baltic Proper
- 86 Elin Almroth, Kari Eilola, M. Skogen, H. Søiland and Ian Sehested Hansen (2007)
The year 2005. An environmental status report of the Skagerrak, Kattegat and North Sea
- 87 Eleonor Marmefelt, Jörgen Sahlberg och Marie Bergstrand (2007)
HOME Vatten i södra Östersjöns vattendistrikt. Integrerat modellsystem för vattenkvalitetsberäkningar
- 88 Pia Andersson (2007)
Ballast Water Exchange areas – Prospect of designating BWE areas in the Skagerrak and the Norwegian Trench

- 89 Anna Edman, Jörgen Sahlberg, Niclas Hjerdt, Eleonor Marmefelt och Karen Lundholm (2007)
HOME Vatten i Bottenvikens vatten-distrikt. Integrerat modellsystem för vattenkvalitetsberäkningar
- 90 Niclas Hjerdt, Jörgen Sahlberg, Eleonor Marmefelt och Karen Lundholm (2007)
HOME Vatten i Bottenhavets vattendistrikt. Integrerat modellsystem för vattenkvalitets-beräkningar
- 91 Elin Almroth, Morten Skogen, Ian Sehsted Hansen, Tapani Stipa, Susa Niiranen (2008)
The year 2006
An Eutrophication Status Report of the North Sea, Skagerrak, Kattegat and the Baltic Sea
A demonstration Project
- 92 Pia Andersson editor and co-authors¹, Bertil Håkansson¹, Johan Håkansson¹, Elisabeth Sahlsten¹, Jonathan Havenhand², Mike Thorndyke², Sam Dupont² *Swedish Meteorological and Hydrological Institute¹ Gothenburg University, Sven Lovén, Centre of Marine Sciences²* (2008)
Marine Acidification – On effects and monitoring of marine acidification in the seas surrounding Sweden
- 93 Jörgen Sahlberg, Eleonor Marmefelt, Maja Brandt, Niclas Hjerdt och Karen Lundholm (2008)
HOME Vatten i norra Östersjöns vatten-distrikt. Integrerat modellsystem för vattenkvalitetsberäkningar
- 94 David Lindstedt (2008)
Effekter av djupvattenomblandning i Östersjön – en modellstudie
- 95 Ingemar Cato¹, Bertil Håkansson², Ola Hallberg¹, Bernt Kjellin¹, Pia Andersson², Cecilia Erlandsson¹, Johan Nyberg¹, Philip Axe² (2008)
¹*Geological Survey of Sweden (SGU)*
²*The Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)*
A new approach to state the areas of oxygen deficits in the Baltic Sea
- 96 Kari Eilola, H.E. Markus Meier, Elin Almroth, Anders Höglund (2008)
Transports and budgets of oxygen and phosphorus in the Baltic Sea
- 97 Anders Höglund, H.E. Markus Meier, Barry Broman och Ekaterina Kriezi (2009)
Validation and correction of regionalised ERA-40 wind fields over the Baltic Sea using the Rossby Centre Atmosphere model RCA3.0
- 98 Jörgen Sahlberg (2009)
The Coastal Zone Model
- 99 Kari Eilola (2009)
On the dynamics of organic nutrients, nitrogen and phosphorus in the Baltic Sea
- 100 Kristin I. M. Andreasson (SMHI), Johan Wikner (UMSC), Berndt Abrahamsson (SMF), Chris Melrose (NOAA), Svante Nyberg (SMF) (2009)
Primary production measurements – an intercalibration during a cruise in the Kattegat and the Baltic Sea
- 101 K. Eilola, B. G. Gustafson, R. Hordoir, A. Höglund, I. Kuznetsov, H.E.M. Meier T. Neumann, O. P. Savchuk (2010)
Quality assessment of state-of-the-art coupled physical-biogeochemical models in hind cast simulations 1970-2005
- 102 Pia Andersson (2010)
Drivers of Marine Acidification in the Seas Surrounding Sweden
- 103 Jörgen Sahlberg, Hanna Gustavsson (2010)
HOME Vatten i Mälaren
- 104 K.V Karmanov., B.V Chubarenko, D. Domnin, A. Hansson (2010)
Attitude to climate changes in everyday management practice at the level of Kaliningrad region municipalities
- 105 Helén C. Andersson., Patrik Wallman, Chantal Donnelly (2010)
Visualization of hydrological, physical and biogeochemical modelling of the Baltic Sea using a GeoDomeTM
- 106 Maria Bergelo (2011)
Havsvattenståndets påverkan längs Sveriges kust – enkätsvar från kommuner, räddningstjänst, länsstyrelser och hamnar

- 107 H.E. Markus Meier, Kari Eilola (2011)
Future projections of ecological patterns in the Baltic Sea
- 108 Meier, H.E.M., Andersson, H., Dieterich, C., Eilola, K., Gustafsson, B., Höglund, A., Hordoir, R., Schimanke, S (2011)
Transient scenario simulations for the Baltic Sea Region during the 21st century
- 109 Ulrike Löptien, H.E. Markus Meier (2011)
Simulated distribution of colored dissolved organic matter in the Baltic Sea
- 110 K. Eilola¹, J. Hansen⁴, H. E. M. Meier¹, K. Myrberg⁵, V. A. Ryabchenko³ and M. D. Skogen² (2011)
¹Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Sweden, ² Institute of Marine Research, Norway, ³ St. Petersburg Branch, P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russia, ⁴ National Environmental Research Institute, Aarhus University, Denmark, ⁵ Finnish Environment Institute, Finland
Eutrophication Status Report of the North Sea, Skagerrak, Kattegat and the Baltic Sea: A model study
Years 2001-2005
- 111 Semjon Schimanke, Erik Kjellström, Gustav Strandberg och Markus Meier (2011)
A regional climate simulation over the Baltic Sea region for the last Millennium
- 112 Meier, H. E. M., K. Eilola, B. G. Gustafsson, I. Kuznetsov, T. Neumann, and O. P. Savchuk, (2012)
Uncertainty assessment of projected ecological quality indicators in future climate
- 113 **Vakant – kommer ej att utnyttjas!**
- 114 Domnina, Anastasia¹. Chubarenko, Boris¹ (2012) *Atlantic Branch of P.P. Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Kaliningrad, Russia.*¹
“Discussion on the Vistula Lagoon regional development considering local consequences of climate changes
Interim report on the ECOSUPPORT BONUS+project No. 08-05-92421
- 115 K. Eilola¹, J.L.S. Hansen⁴, H.E.M. Meier¹, M.S. Molchanov³, V.A. Ryabchenko³ and M.D. Skogen² (2013)
¹Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Sweden. ²Institute of Marine Research, Norway.
³St. Petersburg Branch, P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russia. ⁴Department of Bioscience, Aarhus University, Denmark
Eutrophication Status Report of the North Sea, Skagerrak, Kattegat and the Baltic Sea: A model study. Present and future climate
- 116 **Vakant – kommer ej att utnyttjas!**
- 117 Kari Eilola¹, Elin Almroth-Rosell¹, Moa Edman¹, Tatjana Eremina³, Janus Larsen⁴, Urszula Janas², Arturas Razinkovas-Basiukas⁶, Karen Timmermann⁴, Letizia Tedesco⁵, Ekaterina Voloshchuk³ (2015)
¹Swedish Meteorological and Hydrological Institute, Norrköping, Sweden. ²Institute of Oceanography, Gdansk University, Poland. ³Russian State hydrometeorological University, Sankt-Petersburg, Russia. ⁴Aarhus University, Roskilde, Denmark. ⁵Finnish Environment Institute, Helsinki, Finland. ⁶Coastal and Planning Research Institute, Klaipeda, Lithuania.
Model set-up at COCOA study sites
- 118 Helén C. Andersson, Lena Bram Eriksson, Niclas Hjerdt, Göran Lindström Ulrike Löptien och Johan Strömqvist. (2016)
Översikt av beräkningsmodeller för bedömning av fiskodlingars näringsämnesbelastning på sjöar, vattendrag, magasin och kustvatten
- 119 Ivan Kuznetsov, Kari Eilola, Christian Dieterich, Robinson Hordoir, Lars Axell, Anders Höglund and Semjon Schimanke. (2016)
Model study on the variability of ecosystem parameters in the Skagerrak - Kattegat area, effect of load reduction in the North Sea and possible effect of BSAP on Skagerrak - Kattegat area
- 120 Johannes Johansson, Martin Hansson (2016)
Slutrapport 2015 för uppdraget
”Databaslagring av historiska fys/kemdata från Stockholm Vatten
”Datavärdskapet Oceanografi och Marinbiologi

- 121 Arnold Andreasson, Patrik Strömberg,
Maria Prager, Nils Nexelius (2016)
Automatisering av nationellt dataflöde
till ICES genom skördning - en
förstudie
- 122 Anders Höglund (2016)
Invasive species in the Baltic Sea A
model study of plankton transport
- 123 Sofie Schöld, Sverker Hellström,
Cajsa-Lisa Ivarsson, Per Kållberg,
Helma Lindow, Signild Nerheim,
Semjon Schimanke, Johan Södling och
Lennart Wern (2017)
Vattenståndsdynamik längs Sveriges
kust



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

ISSN 0283-7714