

UPTEC STS13 022 Examensarbete 30 hp Juni 2013

Risken för översvämningar vid de svenska kärnkraftverken

En statistisk och historisk extremvärdesanalys

Gustaf Klinga



Teknisk- naturvetenskaplig fakultet UTH-enheten

Besöksadress: Ångströmlaboratoriet Lägerhyddsvägen 1 Hus 4, Plan 0

Postadress: Box 536 751 21 Uppsala

Telefon: 018 - 471 30 03

Telefax: 018 - 471 30 00

Hemsida: http://www.teknat.uu.se/student

Abstract

Risken för översvämningar vid de svenska kärnkraftverken - en statistisk och historisk extremvärdesanalys

The risk of flooding at the Swedish nuclear power plants - a statistical and historical extreme value analysis

Gustaf Klinga

This thesis investigates the overall risks of flooding over the Design Basis Flooding Level (DBFL) at the Swedish nuclear power plants (Oskarshamn, Ringhals and Forsmark), using statistical data and methods, but also considers historical events which might affect the overall risk of flooding at the specified sites.

Considering the nuclear accident which happened in Fukushima in conjunction with the earthquake and tsunami which struck eastern Japan on 11 March 2011, operators and licensors of nuclear power plants all over the world conducted reviews and investigations on the overall risks posed to the plants from external events. One important such event is extreme water level.

One part of the thesis includes an extreme value analysis (using Generalized Extreme Value distribution and Generalized Pareto distribution) of water level data from SMHI (Sweden's Meteorological and Hydrological Institute) measured at stations close to the Swedish nuclear power plants. The results of the statistical studies indicate that considering the return period used in the thesis (100 000 years), the water levels at the Swedish nuclear power plants are not expected to exceed DBFL.

The other part of the thesis consists of a historical study of extreme weather-related events. The results of this study indicate that no historical events seem to have occurred which would indicate a higher risk of flooding than the one suggested by the statistical study.

Handledare: Tomas Öhlin - Westinghouse Electric Sweden AB Ämnesgranskare: Jesper Rydén Examinator: Elísabet Andrésdóttir ISSN: 1650-8319, UPTEC STS13 022

Populärvetenskaplig sammanfattning

Detta examensarbete undersöker den övergripande risken för översvämningar över *Design Basis Flooding Level* (DBFL), den konstruktionsstyrande översvämningsnivån, vid de svenska kärnkraftverken Oskarshamn, Ringhals och Forsmark. För att bedöma risken för översvämning har både statistiska data och metoder använts, men även historiska extrema väderhändelser har analyserats för att bedöma den övergripande risken.

Med anledning av kärnkraftsolyckan som skedde i Fukushima i samband med den jordbävning och tsunami som drabbade östra Japan den 11 mars 2011 har kärnkraftsoperatörer och -tillståndsgivare över hela världen genomfört många studier för att utreda hur stor risken för yttre händelser som kan påverka säkerheten på verken är. En viktig sådan typ av händelse är extremt högt vattenstånd. En av anledningarna till att händelseförloppet blev så pass katastrofalt som det blev på kärnkraftverket Fukushima I var att operatörerna inte hade räknat med att kunna drabbas av havsvågor högre än 6 meter, och därför ej hade kostat på sig att bygga skyddsvallar mot havet som var högre än denna nivå. Den tsunamivåg som drabbade verket i mars 2011 var dock över 14 meter hög, vilket översvämmade verket och slog ut viktig säkerhetsutrustning, vilket i slutändan ledde till härdsmältor i verkets reaktorer.

I bedömningen av risken för naturkatastrofer är det dock viktigt att försöka få ett så brett informationsmaterial som möjligt, och inte enbart ta i beaktande den mest uppenbara informationen. I fallet med Fukushima fanns det exempelvis nedtecknade historiska vittnesmål, bland annat genom stentavlor uppsatta längs med den drabbade kusten, som varnade om att tsunamivågor högre än 12 meter inträffat tidigare i regionens historia. Vare sig kärnkraftsoperatörerna eller myndigheterna tog dock uppenbarligen dessa historiska vittnesmål i beaktande.

Den ena delen av denna uppsats inkluderar en extremvärdesanalys av vattenstånddata från SMHI, vilka uppmätts vid mätstationer i närheten av de svenska kärnkraftverken. I denna analys har de statistiska metoderna generaliserad extremvärdedistribution (GEV-distribution) och generaliserad Paretodistribution (GP-distribution) använts. GEV-distributionen går ut på att man delar upp sin tillgängliga datamängd i block, oftast med storleken ett år, och därefter väljer ut de högsta värdena från varje block. Därefter anpassar man sina distributionsparametrar efter dessa datavärden. GP-distributionen går ut på att man väljer ut alla värden som är högre än ett visst högt tröskelvärde, och därefter anpassar sina distributionsparametrar efter dessa tröskelöverskridande värden.

Den faktiska statistiska analysen genomfördes med hjälp av datorprogrammen MATLAB och R. Utifrån behandlingen av mätdatat från SMHI återficks så kallade återkomstnivåplottar. Detta är grafer som visar de förväntade högsta vattenstånden för olika återkomsttider. Återkomsttid definieras som den tid som det i genomsnitt förväntas förflyta mellan två inträffanden av ett visst vattenstånd. Detta kan också enkelt omformuleras som sannolikheten att en viss händelse inträffar under ett år. Om sannolikheten för en händelse är 10⁻³ per år är

det samma sak som att återkomsttiden är 1000 år. I denna uppsats har sannolikhetsnivån 10⁻⁵/år undersökts. Analys av de av de extremvärdesstatistiska distributionerna givna återkomstnivåplottarna och vattenstånden för de aktuella återkomstperioderna har genomförts. Resultaten av den statistiska undersökningen indikerar att med avseende på den återkomstperiod som använts i uppsatsen (100 000 år) förväntas vattenstånden vid de svenska kärnkraftverken ej stiga över DBFL.

Den andra delen av uppsatsen består av en historisk studie av extrema väderrelaterade händelser. Flertalet olika historiska händelser som bedömdes vara relevanta för undersökningen identifierades. En av de händelser som studerades var Backafloden. Detta var en stormflod som inträffade i sydvästra Östersjön i november 1872, och som ledde till extremt höga vattenstånd på flera platser. Bland annat observerades 3,6 meter över medelvattenståndet i Abbekås i Skåne. En annan extrem historisk händelse som identifierades i rapporten var Storeggaraset. Detta var ett undervattensras som skedde cirka 6100 år f.kr. utanför den norska atlantkusten. Raset skapade enorma tsunamivågor som bland annat drabbade den norska och skotska kusten. Resultaten av den historiska studien visade dock att vare sig dessa båda händelser, eller några av de andra historiska händelser som det redogjorts för, indikerade på en högre risk för översvämning än de som påvisades av den statistiska undersökningen.

Detta innebär att för att avgöra den övergripande risken för översvämningar vid de svenska kärnkraftverken borde man först och främst ha i beaktande de statistiska resultaten av denna undersökning. Som redan nämnt visar den statistiska undersökningen på att vid den använda sannolikhetsnivån (10^{-5} /år) riskerar de svenska kärnkraftverken inte att översvämmas över den konstruktionsstyrande översvämningsnivån.

Förord

Denna rapport är resultatet av författarens examensarbete, och avslutar dennes civilingenjörsutbildning System i Teknik och Samhälle (STS) vid Uppsala Universitet. Studien utfördes i samarbete med företaget Westinghouse Electric Sweden i Västerås. Tack riktas till min handledare på Westinghouse, Tomas Öhlin, och till resten av avdelningen SEI, som jag varit en del av under vårterminen 2013. Ni har gjort min exjobbstid till en fröjd. SMHI skall också ha tack för att ha bidragit med det mätdata som varit ovärderlig för denna undersökning. Slutligen vill jag tacka min ämnesgranskare vid Uppsala Universitet, Jesper Rydén, för mycket hjälp och många råd under arbetets gång.

Gustaf Klinga

Uppsala, juni 2013

Innehållsförteckning

1.	Inle	edning	3
	1.2	Syfte	4
	1.3	Fr ågest ällningar	4
	1.4	Avgr änsning	4
	1.5	Disposition	5
2.	Me	toder	6
	2.1	Statistiska studier	6
	2.2	Historiska studier	6
3.	Tid	igare studier	8
4.	Bak	xgrund1	17
	4.1	Meteorologiska och hydrologiska fenomen i svenska farvatten 1	17
	4.1	.1 Lufttryck, vind, tidvatten och vattnets densitet	18
	4.1	.2 V ågor	19
	4.1	.3 Långsiktiga fenomen	20
	4.2	Vattenst åndsm ätning	21
	4.3	Placeringen av och vattenst åndsm ätning vid de svenska kärnkraftsverken 2	23
	4.4	Händelseklassning inom kärnkraftsbranschen	26
5	Тоо	sri .	20
3	5 1	Statistisk extremy ädesteori	20 28
	5.1	1 Kort om extremy ädesteori	20
	5.1	2 Tröckelmetoden och GP-fördelning	20
	5.1		50
6	Stat	tistiska resultat och analys	33
	6.1	Metodik	33
	6.2	Allm änna resultat och observationer	36
	6.2	2.1 De fem högsta uppmätta vattenst ånden vid de svenska kärnkraftslägena 3	36
	6.2	2.2 Lådagram för mätdata	38
	6.3	Resultat f ör de olika k ärnkraftsl ägena	40
	6.3	3.1 Oskarshamn	10
	6.3	3.2 Ringhals	13
	6.3	3.3 Forsmark	15
	6.4	Resultat – sammanfattning	18
	6.4	1.1 Sammanfattning av resultat i tabellform	18
	6.4	.2 Konfidensintervall f ör resultaten i tabellform	19
	6.5	Slutsatser utifr ån statistiska studier	50
	6.5	5.1 Oskarshamn	50
	6.5	5.2 Ringhals	50
	6.5	5.3 Forsmark	51

7	His	toriska resultat och analys	52		
	7.1	Exempel p åextrema historiska vattenst åndsfenomen	52		
	7.1	1.1 Extrema vattenst åndsfenomen i Sverige	52		
	7.1	.2 Extrema vattenst åndsfenomen i Norden	56		
	7.1	.3 Extrema vattenst åndsfenomen i resten av v ärlden	58		
	7.2	Slutsatser utifr ån historiska studier	60		
8	Öv	ergripande analys och diskussion	62		
	8.1	Oskarshamn	63		
	8.2	Ringhals	63		
	8.3	Forsmark	64		
9	Slu	tsatser	65		
	9.1	Förslag påvidare forskning	65		
1() Kä	llf örteckning	66		
	10.1	Tryckta k ällor	66		
	10.2	Elektroniska källor	66		
	10.3	Internetk ällor	69		
	10.4	Mejlintervjuer	70		
A	ppend	ix	71		
	Apper	ndix 1: Matlabfunktion för ber äkning av årliga blockmaximum	71		
	Appendix 2 – Figurer från tester över autokorrelationen av den undersökta datam ängden				
	Appendix 3 – Figurer från tester genomförda med hjälp av funktionen qqplot i $R = 74$				
	Appendix 4 – koden till R-rutinen gtest				

1. Inledning

Vi lever i ett samh äle som ständigt går mot ökande komplexitet och oföruts ägbarhet. Den ökande globaliseringen och förekomsten av informationsteknologi i ständigt fler samh älen och sektorer gör att problem som uppst år i en del av världen kan fåglobala konsekvenser. Detta stäler ständigt högre krav påatt både kunna förutspåoch motverka de risker som kan uppst å i samh älet. En bransch inom vilket riskhantering är helt essentiell är kärnkraftsbranschen. Kärnkraften kan sägas vara det mest komplicerade tekniska system som mänskligheten någonsin skapat. Vid riskhantering inom denna bransch behandlas inte bara sådana fel som kan uppstå inuti verken på grund av fallerande tekniska komponenter, utan även sådana skador som verket kan åsamkas av yttre fenomen, både naturliga och människoskapade sådana.

Medan det g år att argumentera att de tv å tidigare mest k ända k ärnkrafthaverierna, de i Tjernobyl och i Harrisburg utlöstes av mänskliga fel (b åde handhavandefel och designfel), kan den utlösande orsaken till k ärnkraftkatastrofen i Fukushima s ägas vara en naturkatastrof. En av anledningarna till det katastrofala h ändelsef örloppet vid detta verk var att man ber äknat risken att drabbas av en flodv åg högre än 6 meter som s ål åg att man ej kostat p å sig att bygga sina skyddsvallar mot havet högre än denna niv å Den tsunami som uppstod i samband med jordb ävningen som drabbade Japan den 11 mars 2011 kom dock att producera en över 14 meter hög flodv åg, vilket slog ut stora delar av utrustningen för reservkraft till s äkerhetssystemet (system som behövdes för s äker drift d åden jordb ävningen som tidigare inträffat först ört elledningarna som sammankopplade verket med det yttre eln ätet), och i förlängningen ledde till härdsmältor i anläggningens k ärnkraftsreaktorer.

Kärnkraftskatastrofen i Fukushima fick som resultat att kärnkraftoperatörer och ansvariga myndigheter över hela världen gjorde nya utvärderingar av riskerna med driften av sina kärnkraftsverk. Detta gälde speciellt risken för externa händelser som kan påverka driften, såsom exempelvis översvämningar. Bland annat gjorde samtliga EU-länder under 2011 en samlad risk- och säkerhetsbedömning av sina kärnkraftverk, såkallade stresstester. (OKG AB, 2011). I sammanhanget är det mer specifikt intressant att undersöka risken att vattenståndet stiger över den nivå som kärnkraftverken designats för att klara, den så kallade *Design Basis Flooding Level* (DBFL), den konstruktionsstyrande översvämningsnivån. (NRC, 1976)

I bed ömningen av risken för naturkatastrofer s åsom översv ämningar är det dock viktigt att förs öka få ett så brett informationsmaterial som möjligt, och inte enbart ta i beaktande den mest uppenbara informationen. I fallet med Fukushima fanns exempelvis nedtecknade historiska vittnesm å, bland annat genom hundratals uppsatta stentavlor (s å kallade tsunamistenar), en del över 600 år gamla, vilka varnade om att historiska tsunamis högre än 12 meter inträffat tidigare i regionens historia. De japanska myndigheterna och operatörerna vid Fukushimaverket tog uppenbarligen ej denna information i beaktande i sin bedömning av risken för katastrofalt höga flodv ågor. (Fackler, 2011)

Id én att använda även historiska vittnesm å i beräkningen av risken för extrema yttre händelser för kärnkraftverk är dock ej ny. I IAEA-guiden "*Meterological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations*" skrivs bland annat att sådan typ av information ofta ger viktig och i annat fall ej tillgänglig information, nödvändig för att ge en så pass heltäckande och pålitlig grund för riskanalysen för anläggningen som möjligt. (IAEA, 2011)

1.2 Syfte

Syftet med denna uppsats är att, med beaktande av händelserna vid kärnkraftverket i Fukushima i mars 2011, försöka bedöma den övergripande risken för katastrofala översvämningar vid de svenska kärnkraftsverken. I bedömningen kommer inte enbart beaktande tas till statistisk mätdata och statistiska analysmetoder, utan även sådana historiska källor vilka kan bidra till den övergripande bilden.

Jämfört med den tidigare studien som gjorts inom området (se *kapitel 3: tidigare studier*) bidrar denna uppsats till forskningen genom att även mätdata från tiden mellan 2005 till 2013 har analyserats. Vidare har mätdata från havspegelstationen vid Björns fyr använts för att få ett mer omfattande datamaterial till analysen över risken för översvämningar vid Forsmarks kärnkraftsverk. Slutligen har även historiska händelser analyserats i den historiska delen av examensarbetet, vilket bidragit till en mer fullständig analys över den övergripande risken för översvämningar över marknivån vid de svenska kärnkraftsverken.

1.3 Frågeställningar

- 1. Hur stor är den statistiska risken för yttre översvämningar över *Design Basis Flooding Level* (DBFL) vid de tre de idag aktiva svenska kärnkraftverken, Oskarshamn, Ringhals och Forsmark, utifrån relevanta statistiska data och metoder?
- 2. Vilka historiska händelser kan bidra till bilden av risken för yttre översvämningar över DBFL för de tre aktuella kärnkraftsverken?
- 3. Vad blir i slut änden den övergripande bed ömningen av risken för yttre översv ämningar över DBFL vid de tre svenska kärnkraftsverken?

1.4 Avgränsning

Rapporten kommer enbart att behandla statistiska data fr ån mästationer vid de svenska kärnkraftsverkens absoluta närhet. För Oskarshamns kärnkraftverk gäler det stationen i staden Oskarshamn (söder om verket). För Ringhals gäler det stationen i Varberg (aktiv 1886-1982) och därefter en station närmare verket, av SMHI kallad Ringhals havspegel. För kärnkraftverket i Forsmark gäler det stationen vid Björns fyr (aktiv 1891-1978) och därefter en station närmare verket, av SMHI kallad Forsmarks havspegel.

D å v ågh öjd ej har uppm äts i svenska farvatten under n ågon längre tid, och d å v ågors beteende är mycket beroende av de specifika förh ålandena p å den plats man studerar, kommer enbart SMHI-m ätdata relaterat till havsvattenst ånd, och ej v ågh öjd, att analyseras statistiskt. Uppkomsten av och p åverkan fr ån extremt höga havsv ågor kommer dock att inkluderas i den historiska delen av rapporten.

Vidare har ej heller eventuell framtida påverkan från klimatförändringarna tagits i beaktande i rapportens slutsatser, då rapportens historiska och statistiska delar har baserats på historiska observationer. Det kan dock vara lämpligt för kraftbolagen att periodiskt utvärdera om klimatförändringarna kan påverka sannolikheten för vattenst ånd över DBFL vid de svenska kärnkraftslägena.

Denna rapport har koncentrerat sig till två huvudsakliga familjer av extremv ärdesf ördelningar för att genomföra statistiska unders ökningar och analyser av mätdata från SMHI. Dessa två är generaliserad extremvärdesfördelning (inklusive specialfallet Gumbelfördelningen) och generaliserad paretofördelning. Anledningen till att valet har fallit pådessa bägge funktioner är för att de är välkända och ofta använda för undersökningar av återkomsttider för extrema händelser. (Coles, 2001) Vidare har de använts tidigare vid flera tillfällen för den specifika typ av analys som kommer genomföras i denna undersökning: riskanalys av extrema väderhändelser relaterade till kärnkraftssäkerhet. De båda metoderna finns bland annat nämnda i den tidigare omnämnda IAEA-guiden (IAEA, 2011). Ett ytterligare argument för användande av dessa modeller är deras relativa enkelhet och att det inom statistiken ej är rekommenderat att använda sig av mer komplicerade modeller än vad som är nödvändiga för att beskriva aktuella data påett adekvat sätt.

1.5 Disposition

Detta inledande kapitel kommer att följas av ett kapitel där studiens genomförande, inklusive använda data och metoder, kommer att beskrivas. Efter detta kommer kapitel 3, där tidigare studier inom området kommer beskrivas. Kapitel 4 kommer att inneh åla en översiktlig genomgång av meteorologiska och hydrologiska fenomen som kan ge upphov till extremt höga vattenst ånd vid de svenska kärnkraftslägena. Anledningen till att det enbart är en översiktlig genomgång är att det redan finns mycket information inom området på annat håll, och en alltför genomgående beskrivning bidrar ej till syftet med denna rapport. I kapitel 4 kommer även bakgrund till vattenst åndsmätning och en beskrivning av händelseklassning inom kärnkraftsbranschen att ges.

Därefter kommer kapitel 5, där relevant statistisk teori kommer att presenteras. Kapitel 6 kommer inneh åla en genomg ång av resultaten från den statistiska studien. I kapitel 7 redovisas resultaten av den historiska studien. I kapitel 8 görs en övergripande analys av risken för översvämningar över de svenska kärnkraftsverkens DBFL. I kapitel 9, slutsatser, sammanfattas studiens resultat. Kapitel 10 inneh åler referenser. I appendix återfinns bland annat figurer som kompletterar uppsatsen.

2. Metoder

Examensarbetet är utfört på avdelningen SEI (Safety and Licensing) vid Westinghouse Väster åskontor under vårterminen 2013. Under arbetets gång samlades data in, båle i form av text från rapporter och böcker och i form av mätdata från SMHI. Vidare studerades teori från böcker och vetenskapliga artiklar. Därefter analyserades insamlad data både utifrån den teoretiska bakgrunden och med hjälp av datorprogram. Slutligen drogs slutsatser utifrån detta, vilka användes för att besvara de tidigare uppstälda frågestälningarna. Nedan förklaras varje moment mer ing ående.

2.1 Statistiska studier

Den statistiska delen av rapporten bestod till att börja med av analys av tidigare utförda studier påsamma eller liknande områden, och försöka se hur dessa kunde vara relevanta för att besvara arbetets frågeställningar. Rapporterna som studerades gällde både svenska farvatten specifikt, men även rapporter rörande farvattnen i andra delar av Östersjön studerades.

Vidare genomfördes en egen statistisk studie över extrema havsvattenst ånd vid de svenska kärnkraftslägena. Data till den undersökningen kom ifr ån fem mätstationer för havsvattenst ånd vilka är eller varit aktiva i närheten av Sveriges tre nuvarande kärnkraftsanläggningar. För Oskarshamns kärnkraftverks del kom datan fr ån station i staden Oskarshamn (söder om verket). För Ringhals kom mätdatan både fr ån stationen i Varberg (aktiv 1886-1982) och både en station närmare verket som är aktiv än idag. För kärnkraftverket i Forsmark kom mätdatan både fr ån stationen vid Björns fyr (aktiv 1891-1978) och både fr ån stationen närmare verket, vilken är aktiv i dagsläget.

Datamaterialet fr ån SMHI levererades i form av separata Excel-dokument för de olika mästationerna. Mätdata var presenterat i form av högsta dagliga mävärden fr ån alla de dagar fr ån vilka data fanns tillgängligt. Datat i Excel-dokumenten fördes därefter över i datorprogrammet MATLAB, där viss dataanalys och databehandling genomfördes. Efter detta exporterades behandlad mätdata ut ur MATLAB i form av .txt-filer och importerades därefter i datorprogrammet R. I R genomfördes därefter större delen av de extremvärdesstatistiska studierna. De olika momenten och programvaran som användes i de statistiska studierna finns beskrivna i mer detalj under kapitel 6.

Vid sidan av det ovan beskrivna har även studium av extremvärdesstatistisk teori genomförts. Den viktigaste tryckta kälan för att få en god grund inom det statistiska ramverket för uppsatsen har varit Coles "An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values" (Coles, 2001). Vid sidan av denna har även statistisk teori i form av uppsatser och kursmaterial tillgängliga påinternet studerats.

2.2 Historiska studier

Eftersom en viktig del av syftet med examensarbetet var att få en så pass helt äckande bild över risken för katastrofalt höga vattenst ånd vid de svenska kärnkraftslägena, har även en historisk studie över extrema meterologiska och hydrologiska väderfenomen genomförts. Informationen för denna del av undersökningen har kommit både från tryckta kälor och även från rapporter tillgängliga på nätet. De händelser som bedömts relevanta och senare kommer redovisas i kapitel 7 härrör både från svenska farvatten, och även från andra delar av Norden och Europa. I valet av vilka historiska händelser som skulle inkluderas i studien utgick jag främst från att händelserna skulle antingen ha skett inom svenska farvatten, eller i alla fall ha skett så pass nära svenska farvatten att de gav eller kunde ha gett påverkan på den svenska kusten. Det enda undantaget från detta kriterium är en händelse ifrån Sankt Petersburg i Ryssland. Denna händelse är inkluderad i den historiska studien som en illustration av hur magnituden på vattenst åndet på en viss plats är väldigt beroende av de lokala förhållandena påplatsen.

3. Tidigare studier

Ingen forskning sker i ett vakuum, och detta gäller även denna undersökning. En viktig del av arbetet bestod därför i att undersöka vad tidigare rapporter inom samma eller liknande forskningsområden kommit fram till. Nedan kommer därför ett antal, av författaren bedömda som för rapporten relevanta rapporter och de viktigaste slutsatserna som drogs från dem av redovisas.

SMHI gjorde år 2005 en studie med liknande syfte och inneh åll som denna, d är man tog vattenst åndsm ätdata fr ån havspegelstationerna vid de svenska k ärnkraftsverken och genomf örde en extremv ärdesstatistisk analys av dessa. Detta i syfte att utreda risken f ör översv ämningar över markniv ån vid k ärnkraftsverken ifr åga. Författarna skrev i den aktuella rapporten att i normala fall till åter tidsserier över havsvattenst ånd en extrapolation till dubbla m ätperiodens längd, vilket f ör Ringhals motsvarade ett par hundra år, men f ör Forsmark och Oskarshamn mindre än hundra år. (SMHI, 2005a) Man skrev dock vidare att

"en extrapolation av data för att bedöma nivåer med återkomsttider på 1000 till 1000 000 år är i princip inte ogiltig. Däremot ökar os äkerheten drastiskt när sannolikheten minskar, dvs. för "mycket extrema" värden. För att få en uppfattning om hur stora dessa os äkerheter är skulle man kunna gå vidare och beräkna och visa konfidensintervallens utveckling för några typiska beräkningar." (SMHI 2005-69 s. 9)

I sin unders ökning anv ände man alla tillg ängliga data fr ån Oskarshamn (fr ån starten 1960-2005) och fr ån Forsmark (1975-2005), men för Ringhals även mätdata fr ån Varbergstationen (1886-1982) tillsammans med data fr ån stationen vid verket (1967-2005). I sin extremv ärdesstatistiska unders ökning av havsvattenst åndet anv ände man sig både av Generalized Extreme Value (GEV)-fördelningen, men även av Gumbelfördelningen (ett specialfall av GEV). (SMHI, 2005a).

I rapporten erhölls för alla verken högre havsvattenniv år för Gumbelanpassningen än för den mer allmänna GEV-anpassningen. Med Gumbelanpassningen gavs niv år över markniv ån (ca 300 cm över medelvattenst åndet) för Ringhals och Forsmark vid sannolikhetsniv ån 10^{-6} / år, medan marginal till DBFL-niv ån fanns för sannolikhetsniv ån 10^{-5} / år.

En intressant aspekt av undersökningen var att när man plottade upp kurvorna för förväntade återkomstniv åer för olika tidslängder var Gumbelanpassningen allmänt bäst lämpad för att prediktera extrema händelser, medan den allmänna GEV-anpassningen var bättre lämpad för mer frekventa händelser. Vidare pekar författarna av SMHIrapporten på den stora påverkan som stormen Gudrun (9 januari 2005) och det extremt höga havsvattenst åndet (164 cm över medelvattenst åndet) det orsakade hade för återkomstniv åerna för Ringhals kraftverk. Enligt SMHI:s beräkningar gav ett havsvattenst ånd av samma magnitud som uppstod i samband med stormen Gudrun för GEV-fördelningen en återkomstperiod på cirka 1000 år, medan Gumbelfördelningen gav en återkomstperiod på cirka 150 år. Detta är enligt författarna till SMHI-rapporten en indikation på resultatets stora känslighet för dataunderlag och metod. SMHI pekar vidare på det faktum att en tidigare utredning indikerat på att ett värde liknande det som uppmättes vid Ringhals samband med stormen Gudrun bedömts till storleksordningen 100 år. (SMHI, 2005a)

En annan studie som utförts är "Analyses of Variations in Water Level Time-Series at the Southern Baltic Sea Coastline", utförd av Jensen och Muderbach år 2004. Huvudsyftet med rapporten var att unders öka trenden för medelvattenst åndet vid den

tyska östersjökusten respektive nordsjökusten, och vidare att jämföra de båda trenderna med varandra. Dock undersöktes även de årliga låg- och högvattenstånden. (Jensen, 2004)

De havspeglar vid Östersjökusten som används låg i Travemünde, Warnemünde, Wismar och Sassnitz (se figur 5). Data fr ån dessa fyra mätstationer kombinerades för att skapa ett medelvärde. Detta för att kunna dra mer allmänna slutsatser om variationerna för vattennivån i Östersjön. En slutsats som drogs av undersökningen var att tidsvattensdynamiken i Nordsjön, och därav även vattennivåerna i Östersjön, har för ändrats eller för ändras fortfarande. De normaliserade högvattenst åndstidsserierna (se figur 6 nedan) påverkas speciellt av den extrema händelsen år 1872 vid pegeln i Travemünde. (Jensen, 2004)



Figur 1: Tidserie over medelvärdet för årliga högvattenstånd från fyra havspeglar vid tyska östersjökusten. (Jensen, 2004)

Ännu en tysk undersökning inom området är "Hochwasserschutzmanagement an der Deutschen Ostseek üste" (Koppe, 2002). Syfet med rapporten var att undersöka den övergripande risken med översvämningar vid den tyska Östersjökusten, och vidare på vilket sätt de dåvarande byggda skydden och rutinerna mot dessa kunde förbättras. En viktig del av uppsatsen bestod i en statistisk analys av vattenst ånddata uppmätt vid havspeglar längs med den tyska Östersjökusten. Uppsatsen inbegrep dock även historiska studier, för att även undersöka extrema vattenst åndshändelser utanför tidsperioden med vetenskapligt uppmäta värden.

Det högsta uppmätta vattenst åndet längs med den tyska Östersjökusten uppmättes i samband med den stora stormen 1872 (se kapitel 7.1.1) vid pegeln vid Eckernförde (i närheten av Kiel). Värdet som uppmättes låg på 3,76 meter över medelvattenst åndet. I den historiska delen konstaterades att det skett sju stora stormfloder totalt (vad man känner till) som varit på liknande eller till och med högre niv åer än det som skedde 1872. Dessa skedde år 1044, 1134, 1320, 1449, 1625, 1694 och självklart även 1872.

(Hochwasserschutzmanagement s. 44). Enligt rapporten är det högsta högvattenst åndet som observerats vid den södra Östersjökusten det som skedde 10 februari 1625. Vid detta datum inträffade ett vattenst ånd som var cirka 3,85 meter över medelvattenst åndet. Utifr ån de historiska resultaten drar författarna slutsatsen att man som en första approximation kan förvänta sig en återkomstperiod för vattenst åndsniv åer för sådana liknande de som uppstod 1872 till en g ång var 150:e år. (Koppe, 2002)

I den senare delen av rapporten genomfördes en extremvärdesstatistisk undersökning av mätdata uppmätta vid de tyska havspegelstationerna i Östersjön. I valet av vilka extremvärdesstatistiska fördelningsfunktioner som skulle användas har man utgåt från en lista av fördelningar rekommenderade av "Deutschen Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V." (Tyska förbundet för Vatten- och markanvändning). Två av de fördelningar som användes var den allmänna extremvärdesfördelningen (GEV) och Gumbelfördelningen. En komplett lista över de fördelningar som rekommenderas av DVWK återfinns i tabell 20 i den aktuella rapporten. (Koppe, 2002)

I figur 2 nedan ses normerade årliga maximala högvattenst ånd för havspegeln vid Travem ünde fr ån 1826 till år 2000. Det utliggande värdet är fr ån stormen 1872, d å 3,30 meter över medelvattenst åndet uppm ättes.



Figur 2: Normerade årliga högvattenst ånd från 1826 till år 2000 för havspegeln vid Travem inde. (Koppe, 2002)

Utifr ån de extremv ärdesstatistiska funktioner som tidigare beskrev i rapporten gjordes sedan en extremv ärdesstatistisk analys. I figur 3, nedan, ses resultatet av denna unders ökning. P å y-axeln st år vattenst ånd, p å x-axeln återkomstperiod. Det som ses är kurvanpassningen f ör de olika funktionerna, tillsammans med utsatta verkliga uppm ätta data.



Figur 3: Återkomstperioden (Wiederkehrperiode) mot högvattenst ånd (Wasserstand) för havspegeln i Travem ünde (alla mätvärden) (Koppe, 2002)

Som syns i figuren ovan är det sv årt att "inkludera" extremvärdet fr ån år 1872 i fördelningen. Även den fördelningen med högsta förväntade högvattenst åndet, GEV (benämnd AE i figuren), kommer ej ens i närheten till att få in detta värde. Gumbelfördelningen är utmärkt som E i figuren.

D ärför gjordes en till kurvanpassning där man tog bort detta extremvärde för att se hur mycket det aktuella värdet påverkade de slutliga kurvanpassningarna. Resultatet av dessa undersökningar ses i figur 4 nedan.



Figur 4: Återkomstperioden (Wiederkehrperiode) för högvattenstånd (Wasserstand) från havspegeln i Travem ünde (mätvärdet från 1872 exkluderat). (Koppe, 2002)

Man kan se att när man tog bort värdet från år 1872 gav Gumbelfördelningen (E) de högsta förutspådda vattenst ånden för högre återkomstperioder. Vidare kan man även se att denna fördelning har ungefär samma förlopp både med och utan det extrema mätvärdet från år 1872. (Koppe, 2002)

I rapporten finns även en tabell (Tabell 22), d är man redovisar de olika förväntade högvattenst ånden för olika återkomstperioder och olika modellanpassningar. För Gumbelfördelningen ber äknas en niv å p å 3,01 m med värdet fr ån 1872 inkluderat, och p å 2,82 m utan det värdet. För GEV gäller 3,23 (med) m respektive 2,43 m (utan). (Koppe, 2002)

Man diskuterar i rapporten slutligen det faktum att man utifr ån de historiska resultaten skulle kunna dra slutsatsen att återkomstperioden för vattenniv åer av den magnitud som uppm ättes 1872 skulle vara betydligt kortare (uppskattningsvis cirka 150 år som tidigare nämnts) än vad som framg år av den statistiska undersökningen. Man konstaterar dock vidare att det rör sig om tv å olika typer av datamaterial (historiska data och statistiska data), och att det inte är möjligt att göra en extremvärdesstatistisk analys av sådana historiska uppm ätta datamängder. (Koppe, 2002)

En annan, huvudsakligen historisk, studie över extrema vattenst ånd vid den tyska kusten är "*Hochwasser an Nord- und Ostsee: Geschichte und Maßnahmen zum Schutz*". I denna unders ökning konstateras att det under de senaste århundradena skett många stormfloder längs med den tyska kusten. Dock återfinns information om de flesta av dessa enbart i krönikor eller genom muntliga traditioner. Först sedan 1500-talet finns mätdata över vattenst ånden nedtecknade. (Stummer, 2007)

Rapporten beskriver de flesta av de extrema vattenst ånden fr ån den tyska kusten som man k änner till. Vid sidan av de extrema vattenst ånd år 1044, 1134, 1320, 1449, 1625,

1694 och 1872 som omnämns i rapporten av Koppe (se ovan) nämner rapporten händelser år 1304 och år 1835. År 1304 skall vattenst åndet ha varit av liknande magnitud som extremvattenst åndet år 1872, och år 1835 var vattenst åndet i Flensburg 2,54 m över medelvattenst åndet. (Stummer, 2007)



Figur 5. Karta över de i ovan nämnda unders ökningar omnämnda havspeglar utmärkta. Figuren skapad av författaren med hjälp av Google Maps.

I likhet med i Sverige och andra EU-länder med kärnkraftverk genomförde Finland, som ett resultat av händelserna i Fukushima, så kallade stresstester av sina kärnkraftsanläggningar. I rapporten "*CNS – Extraordinary Meeting National Report*" sammanfattas dessa resultat. För denna undersöknings del är det av mest intresse att se vad de kom fram till angående risken för översvämningar över DBFL vid de två kärnkraftanläggningar som är i drift i Finland idag: Loviisa och Olkiluoto kärnkraftverk (indikerade påkartan i figur 7). (STUK, 2012)

Det högsta observerade vattenst ånd vid Loviisa kärnkraftverk är 1,77 meter över medelvattenst åndet. DBFL för verket är ca 3 meter över medelvattenniv ån. Baserad på statistisk extremv ärdesanalys av tillgängliga data konstateras att den årliga risken att överskrida den niv ån till att ligga påungef är $4*10^{-7}$. (STUK, 2012)

Det högsta vattenst åndet som observerats vid Olkiluoto är +1 meter. DBFL för kärnkraftverket ligger på 3,5 meter över medelvattenst åndet. Baserat på extremvärdesstatistiska unders ökningar bedöms sannolikheten att vattenst åndet skall överskrida denna niv å att ligga på $1*10^{-9}$ / år. (STUK, 2012)

En studie som har unders ökt extrema havsvattenst ånd i Estland är "*Extreme sea level events in the coastal waters of western Estonia*". Till skillnad fr ån de tidigare n ämnda studierna bestod dock denna studie i huvudsak av datasimuleringar med hjälp av datormodeller (hydrologiska och meterologiska) av de aktuella kustomr ådena. (Suursaar, 2003)

Vattenst åndsmätningar har utförts vid den estländska kusten med små luckor sedan 1842 (i Tallinn). Man konstaterar i rapporten att enligt den historiska statistiken är risken för b åde extremt l åga och höga vattenst ånd som högst under vinterm ånaderna. Man konstaterar vidare att trots att vattenst åndet i Östersjön kan öka med omkring 1 meter under stormiga höstar och vintrar så är extrema högvattenst ånd oftast korta och lokala. Bland annat kan extrema vattenst ånd uppstå i Rigabukten, om vinden är tillräckligt stark och ligger på åt rätt hål, relativt oberoende av vad vattenst ånden i resten av Östersjön är. Detta beror påatt Rigabukten är relativt avsk ärmad fr ån resten av Östersjön, och därför fungerar som en mindre version av Östersjön själv. (Suursaar et al., 2003)

Vidare drar rapportförfattarna slutsatsen att de högsta vattenst ånden inom estländska vatten sker vid sydliga eller sydvästliga vindar, inom de vikar som konstaterats som mest utsatta för extremvattenst ånd. En av de vikar som nämns är Pärnubukten, där lokala högvattenst ånd kan nå upp till 1,5 meter över vattenst åndet på öppna havet i Östersjön. De historiskt högsta och lägsta havsvattenst ånden i Estland kan återfinnas i Pärnubukten. (Suursaar et al., 2003)

En annan studie över vattenst ånden i estländska farvatten är "Decadal variations in mean and extreme sea level values along the Estonian coast of the Baltic sea" (Suursaar, 2007). I denna studie unders öktes variationer i tidsserierna för årliga medel-, max-, och mininiv åerna för vattenst ånden i estländska farvatten, inklusive standardavvikelserna för dessa, med hjälp av linjär regressionsanalys, inklusive statistisk extremvärdesanalys. Man konstaterar i rapporten att Pärnubukten är en av de platser längs med hela Östersjökusten vari de högsta vattenst ånden kan observeras. (Suursaar, 2007)

Författarna gör i rapporten en extremv ärdesstatistisk unders ökning av vattenst åndsdata fr ån fyra mätstationer (Tallinn, Pärnu, Narva och Ristna) längs den estländska kusten med hjälp av Gumbelfördelningen. Man konstaterar dock att det är sv årt att få fram en lämplig statistisk anpassning av mätdatat. Detta gäller speciellt för uppmätta vattenst åndet i Pärnu. Pärnus läge i Estland ses i figur 7 nedan. Författarna har ej kunnat hitta en passande statistisk fördelning som passar mätdata fr ån år 1961 till slutet av januari 2005 på ett sådant sätt att hela datamängden, både huvudmängden och de utliggande värdena (*outliers*), beskrivs på ett adekvat sätt. 12 värden (vilka härrör fr ån tv å stormar runt 18 oktober 1967 respektive 9 januari 2005) framst år som *outliers*. För en figur över Gumbelanpassningen för vattenst åndsmätdata fr ån stationen i Pärnu se figur 6 nedan. Man drar slutsatsen att ingen statistisk extremvärdesfördelning troligen skulle kunna beskriva eller förutsp å de tv å extrema vattenst ånden på 253 cm (fr ån år 1967) och 275 cm (fr ån år 2005) över medelvattenst åndet. (Suursaar, 2007)



Figur 6. En extremvärdesanpassning med hjälp av Gumbelfördelningen för mätdata från havspegeln i Pärnu. Tre olika anpassningar har gjorts: 1. Alla data från 1923-2005 (röd linje (empirisk data), översta linjen (Gumbelanpassningen)), 2. Alla data mellan 1923-2004 (blålinje (empirisk data), mellersta linjen (Gumbelanpassningen)), 3. Alla data mellan 1923-2004 förutom data från år 1967 (grön linje (empirisk data), nedersta linjen (Gumbelanpassningen)). (Suursaar, 2007)

Vidare konstateras att enligt den statistiska anpassningen till Gumbelfördelningen som gjordes av datamängden tillgänglig fram till slutet av år 2004 skulle värdet på 253 cm från år 1967 ses som ett väldigt osannolikt sådant. Med Gumbelanpassningen får den en återkomstperiod på ca 300 år. Om det skulle funnits en lucka i mätdata från år 1967 så att detta värde skulle saknats, hade niv ån 253 cm fåt en återkomstniv ån högre än 1000 år. I själva verket skulle det extrema vattenst åndet från 1967 komma att uppn ås och överskridas bara 38 år senare. (Suursaar, 2007)

Författarna frågar sig därför hur man skall kunna förklara de två extremt höga vattenst ånden vid Pärnu, som trots att de framst år som oföruts ägbara outliers, har orsakats av "normala" stormar. Den slutsats man drar är att de extrema niv åerna har orsakats av de specifika föruts ättningarna påplatsen, och att det vid tillfällen var precis rät vindhastigheter och -riktningar, samtidigt som vattenst åndet var högre än normalt till att börja med. Av denna anledning, och med anledning av ökande vattenniv åer orsakade av klimatförändringarna, drar man slutsatsen att vattenst åndet vid Pärnu i framtiden till och med kan överskrida 350 cm över medelvattenst åndet. (Suursaar, 2007)



Figur 7. Karta med de i ovan nämnda undersökningar omnämnda havspeglarna utmärkta. Figuren skapad av författaren med hjälp av Google Maps.

4. Bakgrund

4.1 Meteorologiska och hydrologiska fenomen i svenska farvatten

Det finns flera olika meteorologiska och hydrologiska fenomen som inverkar på vattenst ånden längs med den svenska kusten. I detta delkapitel kommer n ågra av dessa fenomen att diskuteras. Diskussionen kommer dock ej vara uttömmande. För mer detaljer ang ående de fenomen som diskuteras hänvisas läsaren till boken "Västerhavet och Östersjöns oceanografi" av Stig Fonselius (Fonselius, 1997). En studie av källhänvisningarna till detta kapitel kan ge uppslag till ytterligare litteratur inom omr ådet för den som är intresserad av detta.

Sverige gränsar längs med sin kust till Skagerrak, Kattegatt, Öresund, egentliga Östersjön och Bottniska viken. I dagligt tal talar man om Skagerrak, Kattegatt och Bäthavet (de svensk-danska sunden) som "Västerhavet". Östersjön, Bottniska viken, Finska viken och Rigabukten buntas ofta i dagligt tal ihop som "Östersjön". (Fonselius, 1997) I figur 8 nedan ses en karta över de hav som Sverige gränsar till.



Figur 8. Politisk karta över Östersjöområdet. (Wikimedia Commons, 2010)

Niv åerna på specifika platser längs med kusten är till att börja med starkt beroende av den lokala topografin, både över och under vattenytan. Flera fenomen, vilka var för sig inte skulle vara tillräckliga för att medföra en större påverkan, kan samverka för att tillsammans ge upphov till extremt höga havsvattenniv åer. (Scandpower AB, 2011) Variationen av vattenst åndsniv ån för Östersjön styrs dock till stor del av in- och utflödet genom Öresund och de danska bälten samt av tillflödet fr ån floderna. (OKG AB, 2011) De ovan nämnda fenomenen kommer beskrivas i mer detalj nedan.

4.1.1 Lufttryck, vind, tidvatten och vattnets densitet

Ju högre lufttrycket är påen plats desto lägre blir vattenst åndet. Ber äkningar från SMHI visar att en lufttrycks ökning på 1 hektopascal (hPa) sänker vattenst åndet med cirka 1 cm. Vattenst åndet påverkas särskilt av variationer i lufttrycket vid lågtryckspassager. (SMHI, 2009a). Högtryck över Östersjön pressar ut vatten genom de danska sunden och vattenst åndet i Östersjön sjunker därför. Vid lågtryck sker en motsatt process. (Fonselius, 1997) I samband med byggandet av Öresundsbron fanns oro för att den skulle kunna påverka vattenflödet in och ut ur Östersjön. Den så kallade "nollösningen", vilken innebar att vattengenomströmningen i Öresund ej skulle påverkas, fanns därför med som en del i den proposition som den svenska regeringen lade fram inför byggandet av bron. Både SMHI och DHI (dess danska motsvarigheten) har i separata undersökningar var för sig kommit fram till att nollösningen har uppn åtts. (Håkansson, 2005)

Det är framf ör allt vindf örh ållanden som best ämmer vattenst åndet längs Sveriges kuster. Under perioder med långvariga och kraftiga västliga vindar kan vattenst åndet vid västkusten öka med mer än 1 meter. (Fonselius, 1997). Med vindens hjälp pressas vatten mot kusterna och höjer vattenniv ån vid land. Höga vattenst ånd p å västkusten orsakas av att vinden och/eller lufttrycket gör att vatten rinner in till Östersjön via Öresund och Bälten. Detta kan höja Östersjöns vattenst ånd med flera decimeter. P åverkan fr ån vinden kommer även fr ån de kortvariga variationerna i havsvattenst åndet som uppkommer i samband med vågor och dyningar. (SMHI, 2009a)

Vid kraftiga lågtryck och ih ålande vind från väst eller sydväst pressas vattnet i Nordsjön in mot Västerhavet (Skagerrak och Kattegatt) vilket höjer vattenniv ån där. Höjningen av vattenniv ån i Västerhavet medför i sin tur att mer vatten strömmar in i Östersjön, vilket ger ett högre vattenst ånd även där. Detta fenomen benämns *vindfyllning*. Ett annat vindrelaterat fenomen som påverkar vattenst åndet är *vindstuvning*. Vindstuvning uppst år när starka vindar in mot kusten pressar upp vattnet dit, vilket ger högre vattenst ånd. Detta fenomen påverkar främst västkusten. (SMHI, 2009a) Det svenska vattenst åndet är därför ofta som högst under hösten och vintern, då det är många lågtryck och västvindar, men lågt under våren och sommaren, då det ofta är högtryck och svaga vindar. Det högsta vattenst åndet som registrerats vid någon av SMHI:s stationer inträffade under en januaristorm 1984 då 177 cm över medelvattenst åndet uppmätes i Kalix. (SMHI, 2009a)

Periodiska svängningar orsakade av månens och solens dragningskraft kallas tidvatten. Effekten från tidvatten syns i att havsvattenst åndet pendlar mellan låga och höga vattenst ånd några gånger per dygn, kallat ebb respektive flod. Längs med den svenska kusten är tidvattnet dock relativt svagt pågrund av att tidvattnet dämpas över Nordsjön. Den är som störst vid norra västkusten, med en variation på nästan 60 cm. (SMHI, 2009a) I Östersjön är påverkan mycket liten, som mest cirka 10 cm. (OKG AB, 2011)

Även vattnets densitet kan ut öva en påverkan på havsvattenst åndet. Havsvattenst åndet är generellt högre ju sötare vattnet är, beroende på att sötvatten har lägre densitet än saltvatten. Vattnet temperatur påverkar också densiteten. (Scandpower AB, 2011)

Vattendragen som mynnar ut i havet tillf ör sötvatten och minskar salthalten i Östersjön. I Bottenviken är salthalten 3-4 promille, i Bottenhavet 5-6 promille, i Egentliga Östersjön 6-9 promille och i Västerhavet 15-30 promille. Eftersom sötare vatten är lättare behövs mera volym i form av högre vattenst ånd för att systemet skall vara i balans. Bottenvikens vattenst ånd är på grund av detta alltid 35-40 cm högre än Skagerraks. Denna effekt syns i årsmedelvattenst ånden då dessa relateras till ett landbaserat höjdsystem, exempelvis "Rikets Höjdsystem 2000" (RH2000). (SMHI, 2009a)

4.1.2 Vågor

Vattenst åndet kan ocks å kortvarigt höjas på grund av vindgenerade vågor. Vid stormtillfällen höjs vattenytan dels av en ansamling av vatten längs den strand som exponeras mot vågorna (*vindskjuvning*) och dels av uppsvallet (den del av strand som bara tidvis är våt). Uppsvallets storlek beror på ett stort antal faktorer, s åsom vågens höjd vid stranden, strandlutningen, vågens vinkel mot stranden, strandmaterialets egenskaper med mera. I brist på andra data än våghöjden kan man grovt räkna med att uppsvallet på en naturlig strand mycket sällan överstiger höjden på den brytande vågen. Men den kan ändock uppg å till flera meters höjd. (SKB AB, 2009). Extrema våghöjder uppmäts i Sverige oftast under vintermånaderna. (Fonselius, 1997) Den högsta observerade vågen i Östersjön var 14 meter mellan vågdal och vågtopp. Denna våg registrerades av Finska Havsforskningsinstitutet vid södra Åland den 22 december 2004. Den högsta våg som registrerats längs den svenska kusten var 13 meter. Denna våg registrerades utanför Väderöarna (i Skagerrak, mellan Lysekil och Strömstad) den 14 januari 2007. (SMHI, 2009b)

Sjöspr ång är plötsliga för ändringar av vattenst åndet. De uppkommer nästan alltid i samband med extrema vädersituationer, främst för ändringar i vindstyrka eller lufttryck. De kan både vara långperiodiska (flera timmar) och kortperiodiska (5-20 minuter). De har en höjdskala pån ågon decimeter till 1-2 meter, i enstaka fall flera meter. (Fonselius, 1997) Sjöspr ång mycket sv åra att förutse. Detta beror på att flera villkor måste vara uppfyllda samtidigt för att de skall uppst å Förenklat kan sägas att sjöspr ång uppst år när en lokal tryckför ändring rör sig med samma hastighet som en lång våg. En lång vågs hastighet best äms av havsdjupet i området. Det är tryckför ändringen som från börjar orsakar vågen och om tryckför ändringens och vågens hastighet kommer i resonans uppst år en kraftig vattenst åndsför ändring. (SMHI, 2009a)

Det mest extrema fallet av sjösprång uppmätt i närheten av något av de svenska kärnkraftsverken uppmätes den 22 maj 1979 i Kallrigafjärden, mellan Öregrund och Forsmark. Under detta sjösprång observerades 123 centimeters skillnad mellan hög- och lågvatten. Troligen gynnade den lokala bottentopografin resonanseffekter, vilket gjorde sjösprånget mer extremt än vad som är vanligt. (SMHI, 2009a). Ett annat extremt sjösprång inträffade i Ystads hamn 11-12 juli 1959. Perioden för svängningarna var cirka 10 minuter och den största skillnaden mellan hög- och lågvatten var 132 cm. (SMHI, 2009c)

Tsunamis har i princip mycket gemensamt med sjösprång, men orsakas av underjordiska jordbävningar eller undervattenskred. Stora djup krävs för att tsunamis skall uppst å Störningar av den typ som orsakar tsunamiv ågor bedöms av SMHI inom svenska farvatten ej kunna ge upphov till några större effekter på grund av att vattendjupen är såpass ringa. Medeldjupet i Östersjön är ca 60 meter, varför hastigheten hos dessa v ågor endast skulle bli ca 25 m/s. Detta g ör att v ågorna ej skulle kunna bygga upp n ågra st örre h öjder som kan st älla till med st örre skador. (SMHI, 1998)

I samband med de stresstester som gjordes med anledning av kärnkraftsolyckan i Fukushima utreddes risken för tsunamis vid alla de svenska kärnkraftsverken. För Forsmark bedömdes risken för tsunamis täckas in av risken för extremt höga vattenst ånd. Detta b åde för att signifikanta tsunamier ej finns registrerade för Östersjön, och för att anläggningsplatsen i de flesta riktningar är skyddad av en skärg ård. Dessutom har det globalt sett skett endast en tsunami i ett innanhav som Östersjön. Detta var efter en stor jordbävning med magnituden 7,4 på Richterskalan, vilken inträffade i Turkiet 1999. Den flodvåg som den jordbävningen orsakade i Svarta havet var 2,5 meter hög. (Forsmarks Kraftgrupp, 2011) I rapporten för de stresstester som gjordes på Ringhals kärnkraftsverk skrivs att tsunamis likt den som inträffade i Fukushima pågoda grunder ej bedöms kunna inträffa. Detta både pågrund av bristen på seismisk aktivitet i området och relativt grunda hav. (Ringhals AB, 2011). Slutligen bedöms även i stresstestrapporten för Oskarshamns kärnkraftsverk risken för tsunamis ej vara relevant, av samma anledningar som nämnts ovan. (OKG AB, 2011)

Det finns dock författare som menar att risken finns för tsunamis längs alla världens kuster. I "*Tsunami – the underrated hazard*" menar Bryant att det är möjligt att beräkna risken för tsunamis orsakade av meteoritnedslag vid valfri punkt längs en punktsträcka. Riskniv ån har att göra med storleken på den havsyta vid vilken punkten är placerad. Därför blir enligt författaren risken för en meteoritorsakad tsunami större i San Francisco än i New York, då San Francisco ligger vid Stilla havet som är större än Atlanten. Bryant skriver vidare att "tsunamis är en underskattad och utbredd riskfaktor. Varje kust ligger i riskzonen". Påverkan från händelser av denna typ kommer dock ej att beaktas i denna rapport då inte tillräckligt med information finns tillgänglig för att kunna göra en rimlig riskbedömning. (Bryant, 2008)

Ett liknande fenomen som de tv å ovan nämnda är vattenpendling, även känt som en *seiche*. Efter perioder med kraftiga vindar kan vattnet i Östersjön komma i svängning, likt vattnet i ett badkar som skvalpar fram och tillbaka. Perioden mellan tv å högvattenst ånd best äms av vattendjupet och havsomr ådets längd. Pendlingarna avtar efterhand på grund av friktion. Pendling i hela Östersjön fr ån norr till söder har en period p å4 dygn och kan fortg åi flera veckor. Amplituden kan som högst vara cirka 50 cm (i Kalix). En annan pendling kan bildas mellan Finska viken och sydv ästra Östersjön. Perioden för denna pendling är 27 timmar. Svängningarna ger minst utslag mitt i Östersjön. (SMHI, 2009a)

4.1.3 Långsiktiga fenomen

Den så kallade "landhöjningen" orsakas av att landet varit tungt belastat av den kilometertjocka isen under den senaste istiden för 10 000 år sedan. Effekterna från landhöjningen varierar och är som störst i norra Sverige vid Bottenvikskusten (cirka 1 cm/ år) och minst (i princip 0 cm/ år). (SMHI, 2009a)

Ett annat mer långsiktigt fenomen som ändock påverkar det svenska vattenst åndet är den globala havsniv åhöjningen. I de svenska vattenst åndm ätningsserierna, tillg ängliga ända bak till 1774, kan man se den globala havsniv åhöjningen. I vattenst åndsserien ses summan av landhöjningseffekten (se ovan), och havsniv åhöjningen, som ger en motsatt effekt. Tar man bort landhöjningseffekten från mätserierna kan man beräkna havsniv åhöjningen. Analys av data från 1886 visar att havsniv åhöjningen ökar mer ju längre in på 1900-talet man kommer. En ber äkning som gjorts för perioden 1978-2007 visar att ökningen låg pån ästan 3 mm per år. SMHI menar att denna höjning inte enbart kan förklaras av ett för ändrat vindklimat över Nordsjön. Man menar ist ället att den bakomliggande orsaken är ett för ändrat globalt klimat, där den globala havsniv å öjningen beror på stigande havstemperaturer och smältande glaci ärer. (SMHI, 2009a)

Det finns flera olika scenarier över hur ökningen av havsniv ån som ett resultat av den globala uppvärmningen kan komma att se ut. En övre uppskattning innebär mellan 20-200 cm global ökning av havsniv ån. Detta skulle enligt rapporten "*Extreme weather and nuclear power plants – sea level scenarios and extreme weather events*", sammanst älld av Meteorologiska Institutet i Finland för att utreda den eventuella ökade risken för översvämningar vid de finska kärnkraftsverken orsakade av den globala uppvärmningen, att vattenst åndet höjdes 30-150 cm vid den finska kusten fram till år 2100. Den globala uppvärmningen skulle även kunna påverka in- och utflödet genom Bälten, vilket skulle påverka vattenbalansen i Östersjön. Rapportförfattarna är os äkra på vilken påverkan som klimatför ändringarna skulle kunna ha på den kortsiktiga vattenst åndsvariabiliteten. Den kortsiktiga variabiliteten förväntas vara liknande den i dagsläget. Man skriver dock att klimatför ändringarna skulle kunna ändra på sannolikheten för extrema väderrelaterade händelser. (Meteorologiska Institutet, 2011)

Rörande vilken påverkan klimatförändringarna skulle kunna ha på de svenska vattenstånden skrivs i rapporten "*SKB - förväntade extremvattennivåer för havsytan vid Forsmark och Laxemar-Simpevarp fram till år 2100*" som togs fram av Svensk Kärnbränslehantering AB inför valet av slutförvaringsplats för det svenska kärnbränslet, att "förutom höjda havsnivåer förväntas framtida klimatförändringar även innebära ökande vindhastigheter. Det innebär att de lokala vattenståndshöjningar som genereras av vädersystemen i framtiden kan bli högre än de värden som hitintills uppmätts". (SKB AB, 2009). Den påverkan som klimatförändringarna kan tänkas ha på vattenstånden vid de svenska kärnkraftverken kommer dock, som tidigare nämnts, inte att inkluderas i analysen i detta arbete. Denna fråga bör istället behandlas i framtida studier, vilka kan dra nya slutsatser efterhand som nya forskningsresultat om klimatförändringarnas påverkan presenteras.

4.2 Vattenståndsmätning

I detta avsnitt kommer en kort historik över vattenst åndsmätning i Sverige först att redovisas. Därefter kommer en översiktlig genomg ång över hur vattenst åndsmätning går till rent tekniskt. Slutligen kommer de mest extrema, inom Sverige uppmätta, vattenst åndsvärdena, att redovisas.

Världens havsvattenniv å har varierat mycket genom åren. Under den senaste istiden, för cirka 10 000 år sedan, var en del av havsvattnet bundet i inlandsisar och havsniv ån var 100 meter lägre än i dagsläget. När isen smälte steg havsvattenniv ån. Vattenst åndet har mätts i Sverige sedan år 1774, med början i Slussen i Stockholm. Under 1840-talet tillkom fler stationer. SMHI mäter i dagsläget havsvattenst åndet på 23 platser runt den svenska kusten, med hjälp av så kallade *havspeglar*. Alla data granskas enligt fasta rutiner och sparas sedan i en databas för framtida bruk. (SMHI, 2009a)

Vid avvägningen av SMHI:s peglar används ett lokalt höjdsystem. En så kallad utgångsfix har tilldelats värdet 10,000 meter. Ifrån denna avvägs och beräknas övriga höjder. Med W menas den aktuella nivån för vattenytan. Eftersom varje havspegelstation har ett eget lokalt höjdsystem är det uppmäta värdet på W ej jämförbart med det uppmäta värdet på W för någon annan station. Oftast anges ist älet vattenst åndet relaterat till medelvattenst åndet, MW. Om MW för en viss station är 7,68 och W för en viss tidpunkt är uppmät till 7,83 anges därför vattenst åndet som +15 cm. Man talar om begreppet "årets medelvattenstånd". Detta är ett beräknat medelvattenst ånd från vilket man subtraherat de isostatiska och eustatiska för ändringarna. Rätelser införs även för landhöjningens påverkan. (Fonselius, 1997) "Årets medelvattenstånd" bestäms genom regressionsanalys av mer än 30 års medelvärden och fungerar som en slags referensniv å (SMHI, 2009a) I figur 9 nedan ses en principskiss över hur vattenst åndsmäning går till.



Figur 9. Principskiss över de grundläggande principerna bakom vattenståndsmätning med såkallad havspegel. (SMHI, 2009a)

Inuti huset (även kallat pegeln, eller havspegeln) finns diverse olika utrustning. Pegelns brunn är förbunden med havet via ett rör som mynnar ut några meter under havsytan. Denna lösning gör att vågrörelserna dämpas och gör det även möjligt att mäta vattenst åndet under is. Vattenniv ån registreras automatiskt med hjälp av flottörer som sitter ihop med mätutrustningen med en tunn vajer. En skrivare registrerar vattenst åndet grafiskt påett diagram. Dessa diagram jämförs sedan de digitalt insamlade värdena från stationen. Om stationen saknar digital mätutrustning digitaliseras diagrammen så att datan blir tillgänglig i digital form. (SMHI, 2009a). I figur 11 nedan ses SMHI:s havspegelstation i Oskarshamn. I tabell 1, nedan, presenteras de högsta vattenst ånd som uppmäts i olika svenska havsomr åden.

Havsomr åde	H ögsta	Station	Datum
	vattenst ånd		
Bottenviken	+177 cm	Kalix	1984-01-14
Norra Kvarken	+142 cm	Ratan	2002-02-23
Norra Bottenhavet	+132 cm	Skagsudde	2002-02-22
Södra Bottenhavet	+146 cm	Forsmark	2007-01-14
Norra Östersjön	+117 cm	Stockholm	1983-01-18
Mellersta Östersjön	+135 cm	Ölands norra udde	1914-01-09
S ödra Östersj ön	+169 cm	Ystad	1904-12-31
Öresund	+166 cm	Viken	1985-11-06
Kattegatt	+170 cm	Göteborg (Ringön)	1914-12-04
Skagerrak	+157 cm	Stenungsund	1990-02-27

Tabell 1. Högsta observerade havsvattenst ånd för Sveriges olika havsområden. De hav som ligger vid de studerade kärnkraftslägena är fetmarkerade. (SMHI, 2009a)

4.3 Placeringen av och vattenståndsmätning vid de svenska kärnkraftsverken

I detta kapitel kommer kortfattade beskrivningar av placeringen av de idag aktiva svenska kärnkraftverken att redovisas. Detta inkluderar beskrivningar av förhålandena på de aktuella platserna. Vidare ges en kort historik över vattenståndsmätning genomförd av SMHI vid de svenska kärnkraftslägena.

En vanlig metod för att skydda en kärnkraftsreaktor mot extremt höga havsvattenniv år är att placera anläggningen ovanför den maximala havsvattenniv ån som man bedömer kan uppst å på platsen, det så kallade *Design Basis Flooding Level* (DBFL), enligt exempelvis Regulatory Guide 1.102 från USA. Denna metod kallas för "*dry site*"konceptet. (NRC, 1976)

De svenska kärnkraftsverken är alla placerade på stabil berggrund och längs med kustlinjen för att kunna utnyttja havet som värmes änka. (OKG AB, 2011) I figur 10 nedan är de svenska kärnkraftsverken utmarkerade påen karta över södra Sverige.



Figur 10. Karta över södra Sverige med de svenska kärnkraftsverken markerade. Figuren skapad av författaren med hjälp av Google Maps.

Svenska kärnkraftsverk är dimensionerade för havsvattenniv år påmellan 2 och 3 meter över medelvattenst åndet. Alla kan dock motst å en havsvattenniv å på 3 meter över medelvattenst åndet utan härdskador som följd. Denna niv å är bedömd av tillst åndshavarna att ha en sannolikhet under 10^{-5} / år (Str åls äkerhetsmyndigheten, 2011)

SMHI mäter vattenst åndet vid alla vid kusten placerade i Sverige aktiva, tidigare aktiva och planerade kärnkraftverk. Nedan ses en lista av dessa havspegelstationer, inklusive deras uppstarts år.

Tabell 1. SMHI:s vattenst åndsmätningsstationer vid de svenska kärnkraftverken; aktiva, nedlagda och planerade. "Startår" indikerar starten för mätstationen, ej för det kärnkraftverk som stationen är placerad i närheten av. (SMHI, 2009a)

Stationsnamn	Start år
Oskarshamn	1960
Ringhals	1967
Forsmark	1975
Barseb äck	1937
Marviken	1964

Forsmarks kärnkraftverk ligger i Östhammars kommun, vid den uppländska kusten i närheten av Öregrund. Konstruktionsstyrande översvänning (Design Basis Flood, DBF) för samtliga reaktorer i Forsmark är markniv ån. År 2011 motsvarade markniv ån 3 meter över medelvattenst åndet. Ang ående hur denna niv å togs fram skrivs i "F1-F3 stresstest för Forsmark":

"Ursprunglig dimensioneringsniv å baserades det maximala vattenst ånden vid Forsmark med hjälp av uppmäta vattenst ånd vid Björns fyr under åren 1895-1975, med tillagda marginaler."

(Forsmarks Kraftgrupp, 2011)

I Forsmarksverkets närhet beräknas relativt höga våghöjder kunna uppstå (speciellt i Öregrundsgrepens nordliga del). Anläggningsplatsen är dock i de flesta riktningar skyddad av en skärgård. Den pir som är byggd i anslutning till "Slutförvaret för kortlivat radioaktivt avfall" (SFR) i närheten av Forsmarks kärnkraftsverk läar dessutom stränderna söder om denna, varför möjliga högsta vågor vid verket enbart beräknas komma upp till omkring 0,5 meter. (SKB AB, 2009)

Oskarshamns kärnkraftverk ligger i Oskarshamns kommun i Sm åland, på Simpevarphalvön vid Östersjön. Anläggningen är belägen cirka 30 km norr om orten Oskarshamn. Markniv ån för reaktor 1 och 2 i Oskarshamn ligger på 6 meter över normala vattenst åndet. Reaktor 3 ligger 3 meter över det normala vattenst åndet. Cirka 100 meter utanför verkets havsvattenintag finns öarna Tallsk är och Gloholmen, vilka tillsammans med hamnpiren utgör en skyddande barri är mot havsv ågor. (OKB AB, 2011). Dessutom är stränderna runt verket förh ållandevis branta, vilket inneb är ytterligare ett skydd mot höga havsv ågor. (SKB AB, 2009). I figur 11 nedan ses SMHI:s havspegelstation i Oskarshamn.

Ringhals kärnkraftsverk ligger i Varbergs kommun, vid den halländska kusten mot Skagerrak. I rapporten "R1-R4 stresstest – sammanfattande rapport" skrivs att gällande risker från översvämningar bedömer man att havsnivåhöjningar på upp till 3,3 meter, vilket skulle innebära att vattnet stod ca 30 cm över marknivån vid verket, är hanterbara ur en säkerhetssynpunkt. (Ringhals AB, 2011)



Figur 11. SMHI:s Havspegelstation i Oskarshamn. (SMHI, 2010a)

4.4 Händelseklassning inom kärnkraftsbranschen

I detta kapitel redovisas hur statistisk teori appliceras inom kärnkraftsbranschen, inklusive ned till vilka sannolikhetsniv åer som man vanligtvis utreder risken för att externa händelser inträffar.

SSMF 2008:17 (Strålsäkerhetsmyndighetens föreskrifter och allmänna råd om kärnkraftsreaktorer) konstruktion och utf örande av st äller krav рå att händelser. k ärnkraftsreaktorer skall utformas för extrema yttre (Str ås äkerhetsmyndigheten, 2008) Svenska s äkerhetskrav för kärnkraftsbranschen har i stor utsträckning påverkats av de krav som satts upp för den amerikanska kärnkraftsindustrin. (Str ås äkerhetsmyndigheten, 2013) Inom kärnkraftsbranschen används så kallad "händelseklassning", vilket innebär att man definierar händelser som är relevanta för anläggningens säkerhet efter hur stor sannolikheten för deras inträffande är. I tabell 2 nedan beskrivs de olika händelseklasserna.

Tabell	2.	Händelseklasser	anv ända	vid	s äkerhetsanalys	i	den	svenska
k ärnkraj	ftsbra	anschen. (Strålsäke	rhetsmyndig	gheten,	2008)			

H ändelseklass	Beskrivning
Normal drift (H1)	Störningar som bemästras av ordinarie drift- och reglersystem utan driftavbrott.
Förv äntade h ändelser (H2)	Händelser som förväntas inträffa under en kärnkraftsreaktors livstid.
Ej förv äntade h ändelser (H3)	Händelser som inte förväntas inträffa under en kärnkraftsreaktors livstid, men som kan förväntas inträffa om ett flertal reaktorer beaktas.

Osannolika händelser (H4)	Händelser som inte förväntas inträffa. Här inkluderas även ett antal övergripande händelser som oberoende av händelsefrekvens analyseras för att verifiera kärnkraftsreaktorns robusthet. Dessa händelser benämns ofta konstruktionsstyrande händelser.
Mycket osannolika händelser (H5)	Detta är ocks å händelser som inte förväntas inträffa. Om händelsen änd å skulle inträffa kan den leda till stora härdskador. Dessa händelser utgör grunden för kärnkraftsreaktorns konsekvenslindrande system vid sv åra haverier.

Olika länder anv änder olika intr äffandefrekvenser (hur stor sannolikhet per år alternativt hur lång återkomsttid händelsen i fråga bedöms ha) för att definiera den magnitud hos yttre händelser som skall beaktas. I Sverige beaktas vanligen yttre händelser ned till niv ån 10^{-5} /år (med andra ord händelser med en återkomstperiod på 100 000 år, vilket exempelvis ses i rapport SKI TR 92:3 från Statens Kärnkraftsinspektion (föregångaren till nuvarande Stråls äkerhetsmyndigheten). (Statens Kärnkraftsinspektion, 1992) Av denna anledning kommer denna rapport främst att behandla risken för översvämning över DBFL vid denna sannolikhetsniv å

5 Teori

I detta kapitel kommer för rapporten relevant statistisk teori att beskrivas. Större delen av informationen baseras på Stuart Coles bok "An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values" (Coles, 2001). En annan käla som använts är "Probability and Risk Analysis – An Introduction for Engineers". (Rychlik och Rydén, 2006)

5.1 Statistisk extremvärdesteori

Extremv ärdesanalys anv änds prim ärt för att kvantifiera det stokastiska beteendet för olika typer av processer vid ovanligt stora (eller sm å) värden. S ådan analys kräver ofta att man uppskattar sannolikheten för händelser som är mer extrema än det mest extrema tidigare observerade värdet. Bland omr åden inom vilket statistisk extremvärdesteori anv änds kan nämnas meteorologi, hydrologi, finansbranschen och havsv ågsmodellering.

5.1.1 Kort om extremvärdesteori

Generaliserad extremvärdesteori är uppbyggd runt behovet av att kunna beskriva beteendet hos

$$M_n = \max\{X_1, \dots, X_n\} \tag{1}$$

d är M_n är en sekvens av oberoende slumpmässiga variabler med den gemensamma fördelningsfunktionen F. X_i representerar vanligtvis värden från en process som mäts regelbundet, exempelvis vattenståndet varje timme eller medeltemperaturen under en hel dag. På detta sätt representerar M_n maximum av processen över n antal observationer. Om n är antalet observationer under ett år motsvarar M_n det årliga maxvärdet (annual maximum). (Coles, 2001)

I teorin kan fördelningen av M_n hittas för alla värden av n:

$$Pr\{M_n \le z\} = Pr\{X_1 \le z, ..., X_n \le z\}$$
$$= Pr\{X_1 \le z\} \times \cdots \times Pr\{X_n \le z\}$$
$$= \{F(z)\}^n.$$
(2)

Detta är dock ej anv ändbart i praktiken, d å fördelningsfunktionen F är ok änd. Ett s ät att fr ång å detta problem är att acceptera att F är ok änd, och ist ället leta efter fördelningar som kan approximera F^n enbart utifr ån ens m ätdata.

I exempelvis Rychlik och Rydén (2006) presenteras ett överskådligt sätt hur fördelningen av M_n väl kan approximeras med hjälp av den så kallade generaliserade extremvärdesfördelningen (Generalized Extreme-Value distribution, GEV). Exaktheten för denna approximation ökar för högre värden av n. Sats 1 nedan visar hur detta går till.

Sats 1.

Om det finns parametrar $a_n > 0$, b_n och en icke-degenererande sannolikhetsfördelning G(x) så att

$$Pr\left(\frac{M_n - b_n}{a_n}\right) \le x = [F(a_n x + b_n)]^n \to G(x)$$
(3)

så är G den generaliserade extremv ärdesfördelningen

$$GEV: G(x; a, b, c) = \begin{cases} exp(-\left(1 + \frac{c(x-b)}{a}\right)^{-\frac{1}{c}}), \ om \ c \neq 0\\ exp\left(-exp\left(-\frac{(x-b)}{a}\right)\right), \ om \ c = 0, \end{cases}$$
(4)

där a kallas för skalparametern, bär lägesparametern och cär formparametern.

(Rychlik och Ryd én, 2006)

Specialfallet då c = 0, kallad *Gumbelfördelningen*, tolkas som limes när $c \rightarrow 0$. Gumbelfördelningen är ofta ett naturligt val vid undersökningar av maxvärden i en process. Detta både då fördelningen av maximum av oberoende variabler ofta väl approximeras av Gumbelfördelningen, och då ett konstant värde på en parameter gör estimering av de resterande parametrarna enklare.

Med hjälp av sats 1 har man utvecklat en metodik ofta använd för att kunna modellera extremvärden i en serie av oberoende observationer. Först delas datat in i block av längden n, vilket ger en serie av blockmaximum $M_{n,1}, \ldots, M_{n,m}$, till vilken man kan anpassa GEV-fördelningen. Ofta väljs blocklängden så att ett block motsvarar ett år, vilket innebär att när antalet observationer under ett år och blockmaximum är detsamma som årsmaximum.

Uppskattningar av de extrema kvantilerna av årmaximumfördelningen ges därefter genom att invertera ekvation (4), vilket visas av Coles (2001). Denna invertering ger oss z_p , återkomstnivån. Vidare visas att $G(z_p) = 1 - p$, och att z_p hör samman med återkomstperioden 1/p. Niv ån z_p förväntas överskridas i genomsnitt var 1/p:te år. Ett annat sätt att uttrycka det är att z_p överskrids av årsmaximum för valfritt år med sannolikheten p.

För att kunna beskriva GEV-modellen definieras $y_p = -\log(1-p)$. Om z_p plottas mot y_p på en logaritmisk skala kommer kurvan bli linjär för fallet c = 0. Om c < 0 är kurvan konvex, och om c > 0 är kurvan konkav och saknar övre gräns. Dessa plottar kallas för *återkomstniv åplottar*. Tack vare att det är så pass enkelt att tolka sådana och eftersom den logaritmiska skalan gör att effekterna av extrapolering framhävs, är återkomstniv åplottar passande både för modellpresentation och för modellvalidering.

Som vi såg ovan ger GEV-fördelningen en modell för fördelningen av blockmaximum. Valet av blockstorlek är mycket viktigt och inneb är en kompromiss mellan systematiska fel (*bias*) och varians. För sm åblock inneb är att approximation enligt teorem 1 ovan blir dålig, vilket ger systematiska fel i skattningen och extrapolationen. För stora block inneb är få blockmaximum, vilket leder till stor skattningsvarians. Av pragmatiska sk äl väljs ofta blocklängder påett år. Denna längd kan motiveras speciellt väl för mävärden som beror på väderrelaterade fenomen. Exempelvis kan den dagliga maximala utomhustemperaturen påen viss plats antas variera stort beroende på årstiden, vilket går emot antagandet att X_i har samma fördelning. Om ens data skulle delas upp i block med längder pårunt 3 månader skulle maximum av sommarblocket med största sannolikhet vara mycket högre än det för vinterblocket, och en inferens som ej tog denna inhomogenitet i beaktande skulle troligen ge felaktiga resultat. Om man ist ället väljer blocklängd på ett år blir antagande att alla blockmaximum har samma fördelning mer troligt.

Det finns olika tekniker för att skatta parametrarna i extremvärdesmodeller. Coles presenterar *Maximum Likelihood*-estimering som en av de mest använda metoderna för att göra detta, och visar hur detta går till. Maximering av de givna maximum-likelihood-uppskattningen för hela GEV-familjen. Ingen analytisk lösning existerar för dessa ekvationer, men för varje given datamängd är maximeringen enkel om rätt numeriska optimeringsalgoritmer används. Genom att substitutera maximum likelihood-uppskattningen för återkomstniv ån (1/p). Coles presenteras vidare att så kallad *profile likelihood* kan användas för att beräkna konfidensintervallen både för ens *a*-, *b*- och *c*-parametrar och för en viss återkomstniv å För en mer ing ående beskrivning hur detta går till hänvisas till (Coles, 2001).

5.1.2 Tröskelmetoden och GP-fördelning

Att enbart modellera utifr ån blockmaximum kan dock anses vara ett slösaktigt sät att använda sin datamängd. Detta eftersom det ofta kan finnas flera extrema värden i ett block, och dessa andra värden i sådana fall kommer att förkastas och ej påverka ens slutliga fördelningsparametrar. Coles menar därför att det ofta kan vara bätre att helt och hålet undvika att använda blockmaximum. Istället presenteras en metodik som bygger påtröskelöverskridanden (*threshold exceedance*). Metodiken beskrivs nedan:

L åt $X_1, X_2, ...$ vara en sekvens av oberoende och likafördelade slumpvariabler, med marginalfördelningen *F*. Det är naturligt att definiera de värden som överskrider en viss hög tröskelniv å *u* som en extrem händelse. Om man betecknar en godtycklig term i X_i sekvensen som *X*, följer att en beskrivning av det stokastiska beteendet av extrema händelser ges av den betingade sannolikheten

$$Pr\{X > u + y \mid X > u\} = \frac{1 - F(u + y)}{1 - F(u)}, y > 0$$
(5)

Om fördelningen F var känd skulle fördelningen av tröskel överskridandena i ekvation (5) ocks å vara känd. Eftersom F dock i praktiken oftast är okänd, försöker man ist ället hitta lämpliga sätt att approximera fördelningen av tröskel överskridanden. En ofta använd fördelning för det syftet är den generaliserade paretofördelningen (*Generalized Pareto distribution*). (Coles, 2001) Den generaliserade paretofördelningen (hädanefter kallad GP-fördelningen) uppträder i sats 2 nedan:

Sats 2.

Låt X_1 , X_2 ,... vara en sekvens av oberoende slumpvariabler med den gemensamma fördelningsfunktionen F, och låt

$$M_n = \max\{X_1, \dots, X_n\} \tag{1}$$

Beteckna en godtycklig term i X_i -sekvensen med X, och anta att F uppfyller sats 1, såatt för stora n,

$$Pr\{M_n \leq z\} \approx G(z),$$

där den s.k. GP-fördelningen ges av

$$G(z) = exp(-\left(1 + \frac{c(z-b)}{a}\right)^{-\frac{1}{c}})$$

för vissa a > 0, b och c. D å är, för tillr äckligt stora u, fördelningsfunktionen för (X - u), betingat att X > u, approximativt

$$H(y) = 1 - (1 + \frac{cy}{a^*})^{-\frac{1}{c}}$$
(6)

där

$$a^* = a + c(u - b) \tag{7}$$

(Coles, 2001)

Denna metod är känd som Peaks Over Threshold (POT)-metoden, dåden används för att modellera överskridandena över ett visst tröskelvärde. Satsen ovan visar att om blockmaxima har den approximativa fördelningen G så har tröskelöverskridanden en motsvarande approximativ fördelning inom den generaliserade Paretofördelningsfamiljen. Parametrarna för GP-fördelningen är dessutom entydigt definierade av dem för den associerade GEV-fördelningen. Speciellt viktigt är att parametern c i ekvation 6 är lika med c-parametern i motsvarande GEV-fördelningen. Om man väljer en annorlunda, men fortfarande stor blockstorlek n skulle det påverka värdena påGEV-parametrarna, men ej dem påden motsvarande GP-fördelningen.

I likhet med i GEV-fördelningen kommer *c*-parametern (den såkallade formparametern) att spela störst roll i det kvalitativa beteendet hos GP-fördelningen. Om c < 0 har fördelningen av tröskelöverskridanden en övre gräns, om c > 0 saknas en sådan. För c = 0 saknas också en övre gräns. Vid beräkningar för detta parametervärde skall man återigen beräkna limes när $c \rightarrow 0$, vilket ger

$$H(y) = 1 - exp(-\frac{y}{a^*}), \quad y > 0,$$
(8)

vilket motsvarar en exponentialfördelning med parametern $1/c^*$.

Liknande problem som vid valet av blockstorlek för GEV uppkommer vid valet av tröskelvärde för anpassning av ens data till GP-fördelningen. En för låg tröskel leder till systematiska fel (bias), medan en för hög tröskel leder till hög varians dåman får för få överskridanden att basera sin modell på Coles redogör för två olika grafiskt baserade
metoder som ofta används vid val av tröskelvärden vid modellanpassningar till GPfördelningen. Den ena metoden innebär att man tar fram en såkallad *mean residual life plot*. Kortfattat kan sägas att denna graf skall vara linjär över det värde u_0 som Paretofördelningen ger en giltig approximation till ens data. Den andra tekniken går ut påatt man gör modellanpassningar till GP-fördelningen för ett antal olika tröskelvärden och därefter undersöker stabiliteten för de olika parameteruppskattningar som detta ger upphov till. Typiskt ser man att konfidensintervallen för parameteruppskattningarna blir bredare för högre tröskelvärden. För mer ingående beskrivningar av båla dessa tekniker hänvisas till Coles. (Coles, 2001)

När man valt en tröskelniv åkan parametrarna för GP-fördelningen skattas med hjälp av maximum-likelihood. En analytisk lösning av maximum-likelihood-ekvationerna går ej att fås, varför numeriska tekniker återigen måste användas. Standardavvikelser och konfidensintervall för GP-fördelningen återfås påliknande sätt som i fallet med GEV-fördelningen.

Som tidigare nämnts är det ofta lämpligare att tolka extremvärdesmodeller i termer av kvantiler eller återkomstniv år snarare än individuella parametervärden. Coles (2001) redogör hur man kan fåfram återkomstniv åplottar för GP-fördelningen, påliknande sät som detta gjordes för GEV-fördelningen (se kapitel 5.1.1).

6 Statistiska resultat och analys

I detta kapitel kommer resultaten från de statistiska undersökningarna av mädatat från SMHI att redovisas. Först kommer ett avsnitt kallat "metodik" där de tillvägagångssätt gälande databehandling, datorprogram med mera som användes redogörs för. Därefter kommer ett avsnitt där allmänna resultat och observationer gälande datamaterialet redovisas. Efter detta kommer tre avsnitt där observationer specifikt gälande de olika undersökta kärnkraftslägena redovisas. Därefter följer ett avsnitt där de statistiska resultaten för de olika kärnkraftslägena sammanfattas och redovisas i tabellform, för att göra dem så överblickbara som möjligt. Slutligen kommer ett avsnitt där slutsatser av uppsatsens frågeställning enbart utifrån de statistiska undersökningarna dras. Dessa slutsatser kommer senare att kombineras med slutsatserna från den historiska delen av arbetet.

6.1 Metodik

Mädata från SMHI levererades i form av Excel-filer, en fil för varje i denna undersökning använd mätstation. Filerna innehöll dagliga maxvärden, med datumen som de samlades in i vänsterkolumnen och mätvärdena i högerkolumnen. För att underlätta dataanalys och -behandling importerades informationen från filerna in i MATLAB. MATLAB är ett datorprogram och programspråk som huvudsakligen används för matematiska och tekniska beräkningar. I denna undersökning användes MATLAB-version 2010a. I MATLAB kombinerades därefter tidsserierna för de gamla och nya mätstationerna vid Ringhals och Forsmarks kärnkraftverks närhet. I fallet Ringhals kombinerades tidsserien från Varberg (år aktiv 1886-1982) med tidsserien från den nyare mätstationen med samma namn som kraftverket (aktiv 1967-nutid). Då Ringhals havspegelstation hade stora luckor under de första åren som den var i drift användes dock mätvärden från Varbergstationen för att fylla i luckor från Ringhalstidsserien. Detta var sjävklart möjligt enbart för den tidsperiod som båda mätstationerna var ig ång parallellt.

Tidsserien från Björns havspegel (aktiv 1891-1978) kombinerades med Forsmarks havspegel, för att påsås ät skapa en längre tidsserie för Forsmarks kärnkraftverk (aktiv 1975-nutid). I det fallet behövdes dock ingen ifyllning av luckor i tidsserien, då Forsmarks havspegelstation har fungerat utan problem sedan starten. I båda fallen då tidsserier kombinerades användes mätvärden från den nya stationen i den kombinerade tidsserien från och med den första dagen som den nya stationen var i drift.

Under undersökningens gång identifierades ännu en mätstation i närheten av Oskarshamns kärnkraftverk. Mätstationen i fråga heter Ölands norra udde och har varit i drift sedan 1851. (SMHI, 2010b) Kontakt togs med en hydrolog på SMHI för att undersöka huruvida det vore möjligt att förlänga tidsserien från Oskarshamn med tidsserien från Ölands norra udde. Detta var dock inget som rekommenderades, då det enligt hydrologen i fråga råder så pass olika förhålanden på respektive plats att kombination enbart vore möjligt efter en noggrann analys och omräkning av mätvärden. (Lindow, 2013)

Efter detta gjordes ett antal andra behandlingar i MATLAB. Bland annat skapades årliga blockmaximum-kolumner med hjälp av en funktion skriven av författaren (se appendix 1). Vektorerna för de kompletta tidsserierna formaterades dessutom om så att de skulle kunna användas i de POT-baserade analysmetoder som användes i den senare delen av undersökningen. Därefter exporterades både blockmaximum-vektorerna och de kompletta tidsserierna i form av .txt-filer. Dessa .txt-filer importerades därefter in i datorprogrammet R (programversion 2.15.3). R är en fri programvara och ett programmeringsspr åk utvecklad med hjälp av så kallad öppen källkod och grundar sig på programmeringsspr åket S. Det är mycket använt av bland annat statistiker för att utveckla statistisk mjukvara och för statistisk dataanalys. Den statistiska mjukvara som utvecklats inom programmeringsspr åket R finns både tillgänglig genom så kallade "paket" (*packages*) och både genom ett antal "rekommenderade" paket, vilka är en del av standarddistributionen av R (tillgänglig genom webbsidan http://www.r-project.org/) och genom cirka 400 ytterligare paket, tillgängliga för enkel och snabb nedladdning och installation. (Andersen och Fox, 2005) I denna undersökning har två R-paket använts: *ismev¹* och *extRemes*². Ismev-paketet baseras på funktioner skrivna i programmeringsspr åket S av Stuart Coles (se kapitel 5), vilka därefter har översatts till R. extRemes-paketet kan sägas vara en vidarebyggnad av ismev-paketet, då många av dessa funktioner kan användas tillsammans med ismev-funktioner.

Först gjordes modellanpassningar av de årliga blockmaximatidsserierna till allmän GEV-fördelning och till Gumbelfördelning. Detta gjordes med hjälp av funktionerna *gev.fit* respektive *gum.fit* från ismev-paketet. För kurvanpassning med hjälp av GP-fördelningen genomfördes först tester för att utröna vilka tröskelvärden som var passande för respektive tidsserie. De tester som gjordes var att ta fram mean residual life plot (med hjälp av funktionen *mrl.plot* från ismev-paketet) och att ta fram maximum-likelihood-anpassningarna (inklusive deras konfidensintervall) för ett antal olika tröskelvärden (med hjälp av funktionen *gpd.fitrange* från ismev-paketet). Med hjälp av dessa tester valdes sedan för varje tidsserie ut de tre tröskelvärden som bedömdes som mest passande.

När kurvanpassningarna enligt GEV-, Gumbel och GP-fördelningarna skapats genomfördes därefter analyser över vilka återkomstniv åer som, utifr ån de ber äknade parametrarna, kunde förväntas för den i rapporten aktuella återkomstperioden (10^5 år) . För att få en indikation om vilka värden som kunde förväntas för ännu lägre sannolikhetsniv åer undersöktes även återkomstperioden 10^6 år. Återkomstniv åplottar skapades för GEV- och GP-modellanpassningarna med hjälp av funktionen *rlplot* i extRemes. Eftersom funktionen rlplot ej accepterar R-objekt skapade av funktionen gum.fit skapades återkomstniv åplottar för dessa modellanpassningar genom att besk ära de diagnostiska plottarna som återficks med hjälp av *gum.diag* i ismev. Vidare återfanns numeriska värden på de beräknade vattenst ånden för de aktuella återkomsttiderna (inklusive konfidensintervall) med hjälp av funktionen *return.level* fr ån extRemespaketet. Återkomstniv åplottarna för de olika tidsserierna återfinns i kapitel 6.3, medan de numeriska värdena på de beräknade vattenst ånden som hör samman med de i denna rapport intressanta återkomsttiderna återfinns i kapitel 6.4.

Det existerar flera olika metoder för att utvärdera hur pass väl ens modellanpassningar passar till ens empiriska datam ängd. I denna rapport kommer dock lämpligheten hos de olika metoderna för att beskriva mätdata som SMHI mät upp vid de olika kärnkraftslägena främst att utvärderas med hjälp av de ovan nämnda återkomstniv åplottarna. I dessa plottar ses först och främst de teoretiska graferna över förväntade högvattenst ånd för olika återkomstperioder (inklusive konfidensintervall), men även de faktiska uppmäta extrema mätvärdena. Då denna undersöknings syfte är

¹ http://cran.r-project.org/web/packages/ismev/index.html

² http://www.assessment.ucar.edu/toolkit/

att unders öka risken för översvämningar över DBFL för de olika kärnkraftsverken anses den viktigaste egenskapen hos de olika modellanpassningarna hur väl de beskriver tidigare extrema vattenst ånd vid de aktuella platserna. Detta då ett bra beskrivande av tidigare högvattenst ånd på en viss plats hos en modell tyder på att modellen även kan beskriva och förutspåframtida extrema vattenst ånd på den aktuella platsen.

Vid sidan av att utv ärdera modellanpassningarna grafiskt skrevs även en rutin i R för att se hur väl datat över årliga maxv ärden passade till Gumbelfördelningen. Metoden presenterades först av Hosking et al. år 1985 och är en statistisk hypotesprövning som producerar ett p-värde, vilket är samma som sannolikheten att erhåla ett värde på teststorheten minst lika extremt som det faktiskt observerade, antaget att ens nollhypotes är sann. (Hosking et al., 1985) Oftast förkastar man nollhypotesen om p-värdet är mindre än ens förbest ända signifikansnivå (vilket ofta har satts till 5 procent). I rutinen *gtest* i R var nollhypotesen att Gumbelfördelningen gälde för ens datam ängd (med andra ord att formparametern hade värdet noll). I de fall då testet gav p-värden lägre än 0,05 (5 procent) fick nollhypotesen förkastas, och man fick ist ället anta att GEV-fördelningen råde. Koden till testet ses i appendix 4.

Analys och databehandling gjordes även av de separata tidsserierna (Varberg, Ringhals, Björn, Forsmark). Det mest anm ärkningsv ärda resultatet fr ån dessa unders ökningar var hur pass mycket bredare konfidensintervall som gavs för återkomstniv åerna för tidsserier fr ån Forsmarks mätstation. Detta torde bero p å hur pass mycket kortare denna tidsserie var jämfört med den kombinerade tidsserien (den kombinerade tidsserien hade mätdata fr ån år 1891, medan den kortare tidsserien hade data enbart fr ån år 1975). Av utrymmessk äl, och eftersom den statistiska analysen av de separata tidsserierna inte bed ömdes bidra till besvarandet av unders ökningars fr ågest ällningar har graferna och de numeriska resultaten fr ån dessa unders ökningar ej inkluderats i rapporten.

Test gjordes även över autokorrelationen för datamängden med hjälp av den i R inbyggda funktionen *acf.* Autokorrelationen beskriver korrelationen mellan processens olika tidpunkter. Som förväntat var autokorrelationen mycket hög för korta avstånd på tidsaxeln (eftersom vattenståndet är en trög process som oftast inte förändras särskilt snabbt). För avstånd på uppemot ett år var autokorrelationen betydligt lägre, cirka 0,2. Optimalt hade man velat se en lägre grad av autokorrelationen för data, men graden av autokorrelation för mätvärden på ett års avstånd från varandra bedömdes ändock vara acceptabla. Figurerna från testen över autokorrelationen ses i appendix 2.

Analys gjordes även för att utröna om det var acceptabelt att kombinera de separata tidsserierna (Varberg-Ringhals, Björn-Forsmark) till längre, gemensamma sådana. Dessa undersökningar gjordes genom den inbyggda funktionen *qqplot* i R, och innebar att kvantilerna för de tidsserier uppmätta vid mätstationsparen Varberg-Ringhals och Björn-Forsmark under de tidsperioder som respektive stationspar var i drift parallellt plottades upp mot varandra. Undersökningarna visade att det var försvarligt att slåihop tidsserierna då graferna som skapades tillräckligt väl följde en rät linje. Figurerna från dessa tester ses i appendix 3.

Slutligen skapades även såkallade lådagram (boxplots) av de olika tidsseriernas årliga blockmaximum med hjälp av den inbyggda funktionen *boxplot* i R. Ett lådagram är ett diagram som används för att åskådliggöra ett statistiskt material i form av en låda. Materialet sammanfattas i lådagrammet med hjälp av fem olika värden: medianvärdet (det tjocka strecket i mitten av lådan), den undre och övre kvartilen (kanterna pålådan) samt minimum och maximum (de yttre strecken). Kvartilavståndet är avståndet mellan den undre och övre kvartilen, med andra ord längden pålådan. I de tester som gjordes för denna undersökning kom alla värden som låg mer än 1,5 gånger kvartilavståndet från lådan att hamna utanför maximum och minimum-strecken. Dessa betecknades istället som utliggare (outliers) och illustreras i figurerna med en ring. Figurerna över de framtagna lådagrammen ses i kapitel 6.2.2 nedan.

6.2 Allmänna resultat och observationer

Stor statistisk os äkerhet r åder i de resultat som ficks fram med hjälp av de statistiska metoder och metodik som denna unders ökning utgick ifr ån. Os äkerheten ses till att börja med i konfidensintervallen för ber äkningarna (se kapitel 6.4.2), vilka för vissa stationer och vissa kurvanpassningar kan vara v äldigt breda. En annan stor os äkerhet ligger i resultaten för de generaliserade Paretofördelningarna. Beroende på vilka tröskelv ärden som valdes (se kapitel 5) återficks olika resultat för GP-fördelningarna.

I slut ändan kommer i detta kapitel ges ett slututl åtande om vilken eller vilka kurvanpassningar jag anser vara mest passande för de olika kärnkraftslägena (eller snarare för mätdatan som SMHI samlat in från de olika platserna) och därefter ange det högre värdet inom det intervall som värdet förväntas hamna inom.

6.2.1 De fem högsta uppmätta vattenstånden vid de svenska kärnkraftslägena

I tabellerna nedan redovisas de fem högsta uppmätta värdena för de i denna rapport använda havspeglarna. Det högsta värdet för respektive kärnkraftsläge har fetmarkerats. Studie av både dessa tabeller och de kurvanpassningar som gjorts för mätdata från de olika verken ger en indikation på vilka stormar som orsakat mätvärden så pass höga att de i vissa fall svårligen kan anpassas till de i denna rapport använda statistiska metoderna.

M ätv ärde	Datum	Notering
100,1	1983-01-18	Orkan över Sydsverige 18 januari 1983. Sydvästliga vindar. (PeO's Weatherpage, 2013)
99,1	1983-02-02	
98,9	1973-11-24	
95,3	1993-02-21	
94,1	1983-01-19	

6.2.1.2 Ringhals

M ätv ärde	Datum	Notering
144,2	1921-12-17	Orkan inträffade på västkusten 17-18
		december 1921. Västliga vindar. (PeO's
		Weatherpage, 2013)
138,2	1921-12-21	
122.6	1905 12 06	
132,0	1895-12-00	
130,5	1914-12-04	
129,3	1902-12-26	

6.2.1.2.1 Varbergstationen

6.2.1.2.2 Ringhalsstationen

M ätv ärde	Datum	Notering
165,1	2005-01-08	Stormen Gudrun (se kapitel
		7.4.1)
144,3	2011-12-10	
135,3	2011-12-09	
129,6	1982-12-16	
127	2008-02-22	

6.2.1.3 Forsmark

6.2.1.3.1 Björnstationen

M ätv ärde	Datum	Notering
137,4	1914-01-09	
118,6	1894-02-12	
113,6	1894-02-13	
111,4	1914-01-08	
108,6	1969-11-01	

M ätv ärde	Datum	Notering
145,74	2007-01-14	Stormen Per (se kapitel
		7.4.1)
137,3	1986-12-02	
129,14	1992-01-16	
115,38	1983-01-18	
112,86	1990-03-09	

6.2.1.3.2 Forsmarkstationen

6.2.2 Lådagram för årsmaxima från de olika kärnkraftverken

I detta avsnitt redovisas de lådagram som togs fram för de tre i denna undersökning analyserade tidsserierna: den för Oskarshamn och de kombinerade tidsserierna för Ringhals (Varberg-Ringhals) respektive Forsmarks (Björn-Forsmark) kärnkraftverk. Viktigt att påpeka är att lådagrammen är skapade utifrån tidsserierna över årsmaxima från de olika kärnkraftslägena. För den intresserade läsaren finns de kompletta tidsserierna över årsmaxima från de olika kärnkraftsverken att studera i appendix 5.

I figur 12, nedan, ses lådagrammet för Oskarshamnsverkets mätdata. Som synes är det högsta värdet enbart påstrax över 100 cm, och inga utliggande värden finns.



Figur 12. Lådagram för Oskarshamns mätdata.

I figur 13, nedan, ses l ådagrammet för Ringhals kärnkraftsverk. Tv å utliggande värden kan identifieras. Den övre punkten är det extrema värdet uppmätes i samband med stormen Gudrun (se kapitel 7.1.1.2) och den andra torde vara en kombination av det n äst högsta värdet som uppmätts vid Ringhalsstationen (144,3 cm) och det högsta värdet som uppmätes vid Varbergstationen (144,2 cm).



Figur 13. Lådagram över det kombinerade Ringhalsmätdatat.

Slutligen ses i figur 14 nedan lådagrammet över det kombinerade Forsmarksdatat. Den övre utliggande punkten är det värde som uppmättes i samband med stormen Per (se kapitel 7.4.1.1). Den andra punkten torde vara en kombination av det näst högsta värdet som uppmätts vid Forsmarks havspegelstation (137,3 cm) och det högsta värdet som uppmättes vid Björns havspegelstation (137,4 cm).



Figur 14. Lådagram över det kombinerade Forsmarksmätdatat.

6.3 Resultat för de olika kärnkraftslägena

I detta kapitel kommer plottarna för de olika kurvanpassningar som gjordes för respektive tidsserie att presenteras och deras lämplighet för att hjälpa att besvara unders ökningens frågeställningar kommer att diskuteras. Som nämndes i kapitel 6.1 gjordes anpassning enligt GP-fördelningen för tre olika tröskelvärden för vardera tidsserien. De olika GP-kurvanpassningarna har fått namn efter vilka olika tröskelvärden som de skapades ifrån. Detta innebär att GP-kurvanpassningar med exempelvis tröskelvärdet 50 cm nedan kommer benämnas "GP 50-fördelningen", alternativt "GPD 50-kurvanpassningen".

I dem återkomstniv åplottar som presenteras i detta kapitel är de övre och undre gränserna för de 95-procentiga konfidensintervallen för vattenst ånden markerade genom tv å bl åa kurvor. Kurvorna för punktskattningarna av vattenst ånden enligt de olika fördelningarna illustreras genom den svarta kurvan som ligger mellan de tv å bl åa konfidensintervallkurvorna. De cirklar som syns i figurerna är de av SMHI faktiskt uppm äta vattenst ånden.

6.3.1 Oskarshamn

Som ses i figur 15 följde den allmänna GEV-fördelningens kurvanpassning de årliga maximala vattenst ånden relativt väl. Som tidigare nämnts borde hur väl kurvanpassningen följer de extrema vattenst ånden vara den viktigaste mätaren på hur pass adekvat kurvanpassningen är.





Som syns i figur 16 nedan var anpassning enligt Gumbelfördelningen inte helt adekvat för denna tidsserie. Fördelningen förutspår vattenst ånd som är så pass höga att det högsta uppmätta värdet vid platsen hamnar nedanför det 95-procentiga konfidensintervallet. Vidare producerade även rutinen *gtest* i R (se avsnitt 6.1) ett pvärde betydligt lägre än signifikansniv ån 0,05 (0,007), vilket ocks å visade på att Gumbelfördelningen ej passade till datamängden. Av dessa anledningar antas att Gumbelfördelningen inte passar särskilt bra för datamängden fr ån Oskarshamn.





Figur 16. Gumbel-kurvanpassningen.

Som syns i figurerna 17-19 nedan blev kurvanpassningarna enligt Paretof ördelningen ocks å adekvata, enligt det tidigare uppst älda kriteriet att kurvanpassningarna inklusive det 95-procentiga konfidensintervallet skulle följa de faktiskt uppmätta högvattenst ånden väl. De tre kurvanpassningar som gjordes var för tröskelvärdena 50, 55 och 60 cm. Utifrån vidare analys av graferna verkar GPD 55-fördelningen var bäst lämpad att beskriva datam ängden.

Av denna anledning kommer i den senare analysen de uppmäta vattenst ånden fr ån GEV och GPD, och då speciellt GPD 55-kurvanpassningen, anv ändas. Då måste givetvis även konfidensintervallen inkluderas i analysen och lyftas in i den övergripande risken för översv ämning.



Figur 17. GPD 50-kurvanpassningen.





Figur 18. GDP 55-kurvanpassningen.



Return Level Plot

Figur 19. GDP 60-kurvanpassningen.

6.3.2 Ringhals

I detta kapitel kommer resultaten fr ån unders ökningarna av den kombinerade dataserien för Ringhals kärnkraftsläge att presenteras. Denna kombinerade tidsserie bestod av data både fr ån den äldre havspegeln vid Varberg, och dess ers ättare alldeles vid Ringhals kärnkraftverk. För en beskrivning hur de båda tidsserierna kombinerades hänvisas till avsnitt 6.1.

Som ses i återkomstniv ågrafen för GEV-fördelningen (se figur 20 nedan) är det sv årt att fådet extrema värdet från stormen Gudrun år 2005 att passa in i kurvanpassningen. Inte ens inom det 95-procentiga konfidensintervallet passar värdet in, utan kommer ovanför detta. Detta visar p å att GEV-anpassningen ej torde vara helt passande för detta syfte.



Figur 20. GEV-kurvanpassningen.

Som syns nedan verkar Gumbelanpassningen (figur 21) passa bättre för att beskriva de mer extrema vattenst ånden som kan förväntas för längre återkomstperioder. Det maximala vattenst åndet fr ån år 2005 ligger båda nära kurvanpassningen, och dessutom väl inom konfidensintervallet. Rutinen *gtest* gav dock för datavektorn inneh ålande årliga maxvärden ifr ån Varberg och Ringhals ett p-värde på 0,04, vilket var lägre än signifikansniv ån 0,05. Detta visar på att Gumbelfördelningen enligt detta test ej är passande för datat. Eftersom GEV-fördelningen i slut ändan änd å ej lyckades inkludera datavärdet ifr ån stormen Gudrun inom konfidensintervallet bedömdes änd å Gumbelfördelningen vara mest passande. **Return Level Plot**



Figur 21. Gumbel-kurvanpassningen.

Nedan kommer de tre GPD-anpassningarna (figur 22-24). Som synes verkar alla de tre kurvanpassningarna vara väl anpassade för datamängden. Med andra ord borde i den slutliga analysen både Gumbelanpassningen och de tre GPD-anpassningarna kunna användas.



Figur 22. GPD 60-kurvanpassningen.





Figur 23. GPD 65-kurvanpassningen.



Figur 24. GPD 70-kurvanpassningen.

6.3.3 Forsmark

I detta kapitel kommer resultaten fr ån unders ökningarna av den kombinerade dataserien för Forsmarks kärnkraftsläge att presenteras. Denna kombinerade tidsserie bestod av data både fr ån den äldre havspegeln vid Björns fyr, och dess ers ättare alldeles vid Forsmark kärnkraftverk. För en beskrivning hur de båda tidsserierna kombinerades hänvisas till avsnitt 6.1 i denna uppsats.

GEV-fördelningen (figur 25) verkar vara någorlunda väl anpassad för dataserien med årliga högvattenst ånd uppmätta i Forsmark kärnkraftverks närhet. Då två av de högsta värdena ligger alldeles vid det 95-procentiga konfidensintervallets kanter verkar uppskattningen dock vara för låg.



Figur 25. GEV-kurvanpassningen.

Vi ser påkonfidensintervallet för kurvanpassningen enligt Gumbelfördelningen, se figur 26 nedan, att det högsta årliga vattenst åndet både ligger inom det 95-procentiga konfidensintervallet och samtidigt väldigt nära kurvanpassningslinjen. Rutinen *gtest* gav ocks å värdet 0,29, betydligt högre än signifikansniv ån (0,05). Detta visade allts å att nollhypotesen att datam ängden inneh ålande årliga maxvärden från Björn och Forsmark var Gumbelfördelad ej kunde förkastas. Detta stärks dessutom av det faktum att värdet noll för formparametern i GEV-anpassningen för datat låg inom det 95-procentiga konfidensintervallet för denna parameter.



Figur 26. Gumbel-kurvanpassningen.

G älande GP-f ördelningarna (figur 27-29) ligger ett av högvattenst ånden utanf ör det 95procentiga konfidensintervallet för GPD-kurvanpassningarna med tröskelvärdena 65 respektive 70 cm, och alldeles på den övre gränsen till det för GPD-kurvanpassningen med tröskelv ärdet 60 cm. Konfidensintervallen, vilket allts å skall ses som ett numeriskt värde påos äkerheten i ber äkningarna för dessa anpassningar, blir dessutom väldigt stora för dessa kurvanpassningar. Av denna anledning borde enbart Gumbel-kurvanpassningen användas för att avgöra den statistiska sannolikheten för översvänningar över DBFL vid Forsmark kärnkraftsverk.



Figur 27. GPD 60-kurvanpassningen.



Figur 28. GPD 65-kurvanpassningen.





Figur 29. GPD 70-kurvanpassningen.

6.4 Resultat - sammanfattning

I detta avsnitt kommer numeriska resultat för de tidigare presenterade kurvanpassingarna att presenteras. Presentationen sker i tabellform för att öka överblickbarheten. Alla resultat är angivna i centimeter. Resultaten för de kurvanpassningar som i avsnitt 6.3.1–6.3.3 identifierats som mest passande för respektive kärnkraftsläge har fetmarkerats. De resultat som redovisas för Ringhals och Forsmark gäller de kombinerade tidsserierna från dessa verk.

6.4.1 Sammanfattning av resultat i tabellform

	GPD 50	GPD 55	GPD 60	GEV	Gumbel
10 ⁻⁵ / år	122.0	133.5	126.8	112.8	242.5
10 ⁻⁶ / år	124.7	138.7	130.5	113.5	279.4

6.4.1.1 Oskarshamn

6.4.1.2 Ringhals

	GPD 60	GPD 65	GPD 70	GEV	Gumbel
10^{-5} / år	217.0	216.9	231.9	192.3	288.5
10 ⁻⁶ / år	233.6	233.4	253.9	200.1	329.3

6.4.1.3 Forsmark

	GPD 60	GPD 65	GPD 70	GEV	Gumbel
10^{-5} / år	231.6	211.2	203.7	210.4	267.8
$10^{-6}/{\rm ar}$	264.0	234.1	223.3	228.1	308.0

6.4.2 Konfidensintervall för resultaten i tabellform

6.4.2.1 Oskarshamn

		GPD 50	GPD 55	GPD 60	GEV	Gumbel
10 ⁻⁵ /år	-	142.2	169.5	161.5	137.4	281.2
övre						
10 ⁻⁵ /år	-	101.8	97.4	92.2	88.2	203.7
undre						
10 ⁻⁶ /år	-	147.9	182.6	172.0	139.9	325.5
övre						
10 ⁻⁶ /år	-	101.6	94.9	89.1	87.1	233.3
undre						

6.4.2.2 Ringhals

		GPD 60	GPD 65	GPD 70	GEV	Gumbel
10 ⁻⁵ /år	-	261.4	265.9	300.0	233.5	316.0
övre						
10^{-5} / år	-	172.7	167.8	163.8	151.2	261.0
undre						
$10^{-6}/ar$	-	290.7	296.9	345.7	250.4	361.9
övre						
$10^{-6}/ar$	-	176.6	169.8	162.1	149.9	296.6
undre						

6.4.2.3 Forsmark

		GPD 60	GPD 65	GPD 70	GEV	Gumbel
10^{-5} / år	-	314.4	284.3	277.3	290.4	296.2
övre						
$10^{-5}/{\rm ar}$	-	148.8	138.1	130.1	130.4	239.5
undre						
$10^{-6}/ar$	-	382.7	335.6	324.5	333.6	341.8
övre						
$10^{-6}/ar$	-	145.4	132.6	122.0	122.6	274.2
undre						

6.5 Slutsatser utifrån statistiska studier

I detta kapitel presenteras vilka slutsatser man kan dra utifrån de statistiska studierna som utfördes. Jämfört med den studie som utfördes av SMHI år 2005 (beskriven i kapitel 3) återficks huvudsakligen liknande numeriska resultat vid sannolikhetsniv ån 10^{-5} /år. Kurvanpassning enligt Gumbelfördelningen gav i båda undersökningarna liknande resultat för Ringhals och i denna undersökning något högre värde för Oskarshamn. Gällande Forsmark återficks något lägre resultat i denna undersökning jämfört med i SMHI:s undersökning. Om man gjorde kurvanpassningen enbart med data fr ån Forsmarkstationen, och allts å utan tidsserien fr ån havspegeln vid Björns fyr, unders ökning dock betydligt högre vattenst ånd återficks i denna enligt Gumbelfördelningen. Som tidigare nämnts har jag dock valt att basera min statistiska analys enbart påde kombinerade tidsserierna och har därför ej använt mig av resultaten fr ån de separata tidsserierna i mina slutsatser.

Kurvanpassning enligt GEV-fördelningen gav i denna undersökning ett något högre värde för Ringhalsverket, och nära identiska värden för Oskarshamn och Forsmark. Intressant att notera är att det beräknande vattenståndet i Forsmark enligt GEVfördelningen var nära identiskt i denna undersökning både då mätdatat från Björn användes som dådet inte användes.

Nedan kommer de statistiska slutsatserna för respektive kärnkraftsläge att presenteras.

6.5.1 Oskarshamn

Som sågs ovan verkar Gumbelfördelningen ge för höga uppskattningar för data från Oskarshamn, alltså borde GEV-fördelningen användas för att försöka beskriva den aktuella datamängden. GPD-anpassningarna verkade ocksåpassa bra för detta syfte.

De statistiska undersökningarna ger därför resultatet att punkskattningen av det förväntade högvattenst åndet som högst ligger på 133 centimeter för återkomsttiden 10⁵ år (GPD-55-kurvanpassningen), medan GEV-anpassningen, som ocks å beskriver datan väl, ligger på 113 cm för återkomsttiden 10⁵ år. Beräkningarna av konfidensintervallen för dessa båda kurvanpassingar ger en övre gräns för vattenst åndet för denna återkomsttid till 169 cm (GPD-55) respektive 137 cm (GEV). Av denna anledning bedöms att översvänningar över DBFL vid Oskarshamn inte är sannolika vid den sannolikhetsniv å som beaktats i denna uppsats.

6.5.2 Ringhals

Gumbelfördelningen, tillsammans med de generaliserade Paretofördelningarna, verkar vara de mest passande för att beskriva extrema högvattenst ånd vid Ringhalsverket. På sannolikhetsniv ån 10^{-5} / år får vi punktskattningarna 288 cm (Gumbel) respektive 232 cm (GPD-70). Konfidensintervallen för dessa punktskattningar ger 315 (Gumbel) respektive 300 cm (GDP-70) som övre gränser för det vattenst ånd som kan förväntas vid den aktuella återkomstperioden. Som nämnts i kapitel 4.3 bedöms i stresstestrapporten för Ringhalsverket att höjningar upp till över 3,3 meter över medelvattenst åndet är hanterbara ur säkerhetssynpunkt. Av denna anledning bedöms risk ej föreligga för översvämningar över DBFL. Dock är marginalen till det vattenst ånd som bedöms som problematisk ej särskilt stor, varför ytterligare studier för att vidare utreda sannolikheten för extremt höga vattenst ånd vid verket bör genomföras.

6.5.3 Forsmark

Som sågs ovan torde de mest tillförlitliga resultaten från de statistiska undersökningarna av mätdatat från Forsmarks kärnkraftverk komma ifrån Gumbelfördelningen. GEVfördelningen framstår som ej pålitlig för dessa data, då värdena blir för låga. Kurvanpassningarna enligt den generaliserade paretofördelningen ger som tidigare nämnts väldigt breda konfidensintervall samtidigt som inte alla högvattenst ånd ligger inom dessa intervall. Av denna anledning har valet gjorts att enbart utgå ifrån de nivåer som Gumbelfördelningen ger för detta kärnkraftsläge.

Gumbelfördelningen ger för riskniv ån 10^{-5} / år en niv å p å 268 cm. Konfidensintervallet för denna kurvanpassning ger ett övre värde p å 296 cm. Av denna anledning bedöms, enligt den valda riskniv ån, DBFL ej att riskera att överstigas för verket ifr åga. Dock är liksom i fallet med Ringhalsverket marginalen ej särskilt stor, varför ytterligare statistiska studier av mädata fr ån detta verks närhet bör genomföras.

7 Historiska resultat och analys

I detta kapitel kommer ett antal historiska händelser som bedömts vara relevanta i bedömningen av risken för översvänningar över DBFL vid de svenska kärnkraftverken att beskrivas och därefter analyseras.

7.1 Exempel på extrema historiska vattenståndsfenomen

I SMHI:s arkiv finns väderuppgifter från och med år 1848. Detta avser iakttagelser vid fyrstationer vilka insamlats genom "Kungliga Förvaltningen av Sjöärenden". År 1858 inrättades ursprunget till det nationella observationsnät som är i drift än idag. (SMHI, 2009e) Av denna anledning finns det anledning att gåbortom enbart det data som finns tillgängligt från SMHI och även ta hänsyn till nedtecknade historiska extrema väderhändelser.

Gällande vattenst ånden vid de svenska kärnkraftverken är den mest extrema havsvattenniv ån som uppmätts 164 cm över medelvattenniv ån (se kapitel 6). Som tidigare nämnts uppmättes detta mätvärde i samband med stormen Gudrun år 2005.

7.1.1 Extrema vattenståndsfenomen i Sverige

7.1.1.1 Stormen Per, 2007

Under stormen Per, vilken intr äffade den 14 januari 2007, slogs flera vattenst åndsrekord i Sverige. Bland annat noterades +144 cm vid havspegeln vid Forsmark, vilket är rekord sedan mäningarna startades i omr ådet (vid Björns fyr) år 1891. (SMHI, 2009a) Det intensiva lågtrycket som kom att drabba Sverige i samband med stormen bildades väster om Skottland dagen innan och kom att fördjupas alltmer på resa österut mot skandinaviska halvön. Tidigt på förmiddagen den 14 januari befann sig lågtryckets centrum över svensk-norska gränsen. Samtidigt uppmätes orkanstyrkor över Skagerrak. När lågtrycket befann sig med sitt centrum över Bottenhavet uppmätes den absolut högsta byvinden på40 m/s påHanöutanför Karlshamn kl 14. (SMHI, 2009d)

Mitt på dagen uppmättes de högsta vindbyarna i det svenska inlandet i Nässjö och Växjö med 29 m/s och i Malexander och Gladhammar med 28 m/s. Under kvälen blåste det som mest i östra Svealand och på Gotland där vinden på Gotska Sandön nådde upp till 34 m/s i byarna. Förutom höga vindhastigheter gav stormen upphov till nya vågrekord på 7,4 meter (signifikant våghöjd) vid Väderöarna i Skagerrak. Stormen bidrog även till extremt höga vattenst ånd runt den svenska kusten. (SMHI, 2009d)

Sett till mängden fälld skog är Per den 4:e värsta stormen som drabbat Sverige sedan 1930-talet. Lågtrycket var som lägst 965 hPa, vilket var extremt lågt, men änd å inte lika lågt som stormen Gudrun tv å år tidigare (960 hPa). (SMHI, 2009d)



Figur 30. Läget för lågtrycket som låg bakom stormen Per för var tredje timme från 01 den 13:e januari till kl 04 den 15 januari 2007. (SMHI, 2009d)

7.1.1.2 Stormen Gudrun, 2005

Stormen Gudrun, som inträffade i 8-9 januari 2005, hade en stor påverkan på vattenst åndet på den svenska västkusten. Lågtrycket som låg bakom stormen bildades nordväst om Irland kvällen den 7 januari och nådde Sverige den 8:e januari. (SMHI, 2011) I samband med stormen steg vattnet till rekordniv å på västkusten och orsakade översvämningar på många hål. Bland annat hade Smögen 128 cm, Göteborg 155 och Ringhals 165 cm över medelvattenst åndet. (SMHI, 2005b) Stormen Gudrun skulle enligt SMHI bli det mest förödande ovädret gälande trädfälning, el- och teleavbrott och inställda tågtrafik, som man känner till i Sverige. (SMHI, 2011)

Efter att ha bl åst över Gotland fortsatte ov ädret vidare över Östersjön och n ådde Finland, Estland och Ryssland 9 januari. I Helsingfors steg vattenniv ån till 151 cm över medelvattenst åndet. Även andra delar av den sydfinska kusten drabbades. (Meteorologiska Institutet, 2011) Även Sankt Petersburg (i Ryssland) och Tallinn och Pärnu (i Estland) drabbades av ov ädret. Havspegeln i Pärnu uppmätte som högst ett havsvattenst ånd p å +275 cm, det högsta som dittills observerats p å platsen sedan mätningarna p åb örjades 1923. För en karta över Pärnus läge vid Östersjön hänvisas till figur 7. B åde Pärnu och Haapsalu översvämmades kraftigt och stora ekonomiska och materiella skador uppstod. (Lagemaa et al., 2011)

Den explosionsartade fördjupningen av lågtrycket berodde främst på att kall luft hade strömmat ner från Grönlandsområdet och stött på mycket mild och fuktig luft nordväst om de brittiska öarna. Lufttrycket var som lägst cirka 960 hPa nära gränsen mot Norge under kvälen till den 8:e januari. Samtidigt rasade stormen som värsta i södra och mellersta Götaland. Miljontals träd slets upp med rötterna, el- och telefonledningar slogs ut, järnvägstrafik fick stälas in. Sammanlagt sju människor miste livet i samband med stormen och som mest saknade 415 000 hush ål el. (SMHI, 2011)



Figur 31. Kartan visar en översiktlig analys av maximala byvindar på 10 meters höjd, i tänligen öppen terräng, den 8-9 januari 2005. (SMHI, 2011)

7.1.1.3 Backafloden, 1872

I november 1872 inträffade en extrem stormflod som kom att kallas för Backafloden. Vattenst ånd 3,6 meter över medelvattenst åndet noterades d åi Abbek ås i Sk åne (se figur 33) och delar av hamnen i orten ödelades. Även norra Tyskland drabbades och flera människor omkom d är i samband med stormen. (SMHI, 2009a) För information ang ående de undersökningar som har gjorts av de vattenst ånd som uppstod i norra Tyskland samband med den aktuella stormen hänvisas till kapitel 3 i denna rapport.

I stormens början täcktes norra Skandinavien av ett högtryck som bredde ut sig mot norra Ryssland, samtidigt som ett djupt lågtryck rörde sig långsamt åt nordväst över Centraleuropa. Kontrasten mellan högtrycket i norr och lågtrycket i syd var stor. Över Östersjön, södra Skandinavien och södra Nordsjön rådde den 12 november hårda vindar, ända upp till stormstyrkor från nordost eller ost. Stormen skulle komma att kulminera mitt på dagen den 13 november, varpå den nådde nära orkanstyrkor över södra Östersjön. (SMHI, 1998)

Stormen medförde omfattande skador i de drabbade områdena, speciellt på byggnader och hamnanläggningar. Många fartyg ute till sjöss påverkades: ungefär ett tjugotal förliste och i ett par fall omkom nästan hela bes ätningen. Det var dock främst från översv ämningar som de största skadorna uppstod. Utg ångsläget för vattenst åndet var att vattenmängden i Östersjön var mycket större än normalt, orsakat av en västlig storm som några dagar tidigare medfört högvatten i Kattegatt och därmed en kraftig sydg ående ström in i Öresund och Bälten. Den nordostliga stormen drev därefter stora mängder vatten från norra, mellersta och sydöstra Östersjön mot de relativt trånga farvattnen mellan de danska öarna och Tyskland. Vattenst åndet var extremt högt vid skånska ost- och sydkusten: i Simrishamn, Ystad och Falsterbo trängde vattnet in i många hus, och några förstördes helt. På vissa håll vid den tyska Östersjökusten, och även på de danska öarna, var skadorna ännu större. I figur 32 nedan ses en graf över tidsserien över årliga maximala vattenst ånd fr ån havspegeln vid Travem ünde i Tyskland. För att se Travemündes placering vid den tyska Östersjökusten, se figur 33 nedan. Det extrema värdet som uppmätes i samband med stormen i november 1872 avviker klart fr ån de resterande v ärdena i tidsserien. (SMHI, 1998)

Allra värst drabbades den danska ön Lolland (se figur 32 nedan): en stor del av öns låglänta södra hälft översvämmades i och med att vattnet steg till mellan tre och fyra meter över medelvattenst åndet. Många vägar och bostäder kom dessutom att helt förstöras och tjugo människor drunknade. Med bakgrund av detta beslöt den danska riksdagen att det skulle byggas höga vallar till skydd för bland annat södra Lolland. SMHI skriver att det inte någon gång sedan stormen 1872 har förekommit en vädersituation som i lika hög grad gett upphov till extremt högt vattenst åndet högre upp i Östersjön. (SMHI, 1998) Backafloden verkar dock ej ha påverkat vattenst åndet högre upp i Östersjön. Vare sig vid Ölands norra udde eller i Stockholm uppmätte havspeglarna några extrema vattenst ånd. (Ekman, 2003) Inte heller på västkusten, eller på Jylland finns extrema vattenhändelser noterade från i samband med Backafloden.



Figur 32. Årliga maximala vattenst ånd från havspegeln i Travem ünde. Extremvärdet 3,30 meter från år 1872 syns tydligt i tidsserien. (Weisse, 2010)

Den tyska federala myndigheten *Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie* (Federala myndigheten för sjöfart och hydrografi, BSH) har studerat Backaflodens påverkan på tyska farvatten. Studien utfördes med hjälp av BSH:s hydrologiska och meteorologiska operationella modell, vilken inte bara täcker Östersjön utan även Nordsjön och nordöstra Atlanten. Utifrån sina datormodeller och studium och anpassning av tillgängliga historiska data har man försökt simulera lufttrycken och vindarna över de påverkade områdena. Det konstateras att enbart mindre ändringar i styrkan och riktningen för vindfält över Östersjön är tillräckligt för att vattenstånden skall gåfrån högt till extremt högt i västra Östersjön. (BSH, 2009)

Rapportförfattarna nämner att en teori till de extremt höga vattenst ånden som uppstod i samband med stormen är att vattenst åndet i Östersjön ökat innan stormen, och att denna ovanligt stora vattenmängd skall ha orsakat stormfloder när den flödade tillbaka genom de danska sunden i samband med stormen. Utifr ån sina datorsimuleringar anser sig de forskare som utförde studien redo att förkasta denna teori. Deras simuleringar visar ist ället att de extremt höga vattenst ånden som uppmättes längs med den tyska östersjökusten under november 1872 kan förklaras enkom med hjälp av de vindförhållanden som rådde i samband med stormen (rätt styrka, riktning och utbredning av vinden). Påverkan från det vattenst ånd som rådde i Östersjön innan stormen var enligt forskarna bakom studien ej stor: även vid simuleringar då man ökat vattenst åndet i Östersjön till artificiellt höga niv ær kom denna variabel änd å inte att påverka de slutliga vattenst ånd som uppkom vid den tyska kusten. (BSH, 2009)



Figur 33. Karta med för den historiska händelsen relevanta platser utmärkta. (källa: skapad av författaren med hjälp av Google Maps)

7.1.2 Extrema vattenståndsfenomen i Norden

7.1.2.1 Draupnervågen, 1995

Så kallade "monstervågor", höga som tiovåningshus, har länge avfärdats som enbart myter. På senare år har dock studier med hjälp av bland annat ESA:s ERS-satelliter påvisat existensen av s ådana extrema vågor, inklusive deras roll som en ledande orsak till sänkningar av stora fartyg. Det är dock inte bara fartyg som drabbas. Oljeplattformen Draupner drabbades under en storm den 1 januari 1995 av en monsterv åg som av ett laserinstrument på plattformen uppmätes till nära 26 meter. De högsta vågorna omkring denna våg uppmätes till 12 meter. (ESA, 2013). Plattformen är placerad väter om Norges sydspets, mittemellan Norge och Skottland. Denna händelse var den första gången som existensen av monsterv ågor kunnat påvisas med hjälp av moderna mätinstrument. (Haver, 2005)

7.1.2.2 Storeggaraset, ca 6100 f.kr.

Storeggaraset är egentligen en serie på tre stycken ras. Det första raset skedde för 30 000 år sedan och de senaste två relativt nära varandra, mellan 6000 och 8000 år sedan. Det finns mest arkeologiska och geologiska spår efter förstörelse orsakad av det andra raset, vilket skedde cirka år 6100 f.kr. Denna tsunami involverade 1700 kvadratkilometer sediment. Den modellerade höjden på vågen som raset av denna mängd sediment gav upphov till är 8 till 12 meter vid ursprungsplatsen och 2-3 meter när den svepte vidare in i Nordsjön och Atlanten. (Bryant, 2008)

Den första vågen nådde de nordöstra kusterna på Island och Skottland på strax under 2 timmar, och tog ytterligare 8 timmar att transportera sig genom resten av Nordsjön. Uppsvallet på grund tsunamiv ågen ber äknas ha legat på runt 10 meter vid Skottlands nordpunkt och mellan 10 och 11 meter vid längs med kusten närmast raset, och 4 meter längre ifrån. Värst drabbat var Shetlandsöarna. Där nådde vågen 19 meter över dåvarande havsnivån. Påverkan från Storeggarasen och under vilka tidsperioder de inträffade har kunnat fastställas av geologer genom studier av sandlager i marken längs med de kuster som drabbades av rasen. (Bryant, 2008)

Det finns även indikationer för att Storeggareset påverkade den svenska kusten. Man har funnit stora stenblock längs den svenska Skagerrakkusten, placerade på linjer riktade mot skredet. Det är os äkert vad som utlöste Storeggarasen, men en teori som lagts fram är att de orsakats av jordbävningar och nedbrytning av gashydrater inuti sediment påbottnen. (Bryant, 2008)



Figur 34. Del av figur över Storeggaraset. (Bryant, 2008)

Som en del av förberedelserna inför exploateringen av gasfältet Ormen Lange, lokaliserat i närheten av rasområdet, gjordes omfattande utredningar om huruvida ett liknande ras skulle kunna ske igen. Speciellt ville man se om naturgasexploatering i området skulle kunna öka risken för en sådan händelse. Om något sådant hade konstaterats skulle detta ha kunnat stoppa hela projektet. Efter att ha spenderat en halv miljard norska kronor på geologiska undersökningar kom man fram till att något sådant var i princip helt uteslutet, och att det skulle krävas en ny istid för att ett liknande ras skulle kunna ske igen. (NRK, 2002)

Det finns indikationer på att fler tsunamis av denna typ kan ha skett i Nordsjön även efter det senaste Storeggaraset. En studie av torvmarker på Shetlandsöarna har identifierat ytterligare sandavlagringar, vilka indikerar att öarna drabbas av ytterligare två, dock mindre, tsunamis. En skedde för runt 5000 år sedan och den andra under romartiden eller tidiga medeltiden. Båda dessa hade enligt forskarna som utförde studien med all säkerhet sitt ursprung ur ytterligare undervattenskred i Nordatlanten. (McGuire, 2012)

7.1.3 Extrema vattenståndsfenomen i resten av världen

Som s ågs i kapitel 4.1.2 uppst år tsunamis antingen p å grund av undervattenskred, eller av jordb ävningar p å havsbottnen. Enligt k älor redovisade i samma kapitel finns dock ej de f öruts ätningar (tillr äckligt h ög seismisk aktivitet och stora havsdjup) som kr ävs f ör att stora tsunamis skall uppst å inom svenska farvatten. Det är dock m öjligt, som antyds i kapitel 7.4.2.2, att tsunamiv ågor som skapats utanf ör svenska farvatten ändock kan p åverka den svenska kusten. Detta ses genom exemplet p å hur Storeggaraset verkat ha p åverkat även den svenska Skagerrakkusten. Fr ågan är d ärf ör om tsunamis orsakade av andra fenomen än undervattensras har f örekommit eller kan t änkas f örekomma. Det är d ärf ör intressant att unders öka risken f ör st örre jordb ävningar i Nordsj ön, vilket skulle kunna skapa tsunamis som i slut ändan p åverkar även den svenska v ästkusten.

En rapport som unders ökte historisk data rörande jordbävningar i Storbritannien, och utifr ån dessa data förs ökte se om risken är större än vad som hittills antagits, är "*The case for large (M>7) historical earthquakes felt in the UK in historical times*", utgiven av British Geological Survey, en brittisk statlig myndighet. Denna unders ökning konstaterar att det förutom ett antal stora jordbävningar som verkar ha uppst åt strax efter förra istidens slut, så har inga jordbävningar högre än runt 5,7 på Richterskalan nedtecknats i Storbritannien under den tidsperiod som man har historiska data ifr ån. Författarna menar dock att i tidigare unders ökningar av sådana data har man ej tagit i beaktande att uppmätta historiska jordbävningar skulle kunna ha skapats av större och mer omfattande sådana som inträffade ute i havet. (Musson, 2008)

Utifr ån tillg ängliga historiska data identifierades ett antal jordb ävningar som i sj älva verket skulle kunna tänkas ha varit större s ådana som inträffat p å havsbottnen utanför den brittiska kusten. Man p åpekar dock att i inget av fallen är detta den enda möjliga tolkningen. Slutligen konstateras att medan det å ena sidan inte finns n ågra entydiga bevis för att större jordb ävningar inträffat p å den nordvästra europeiska kontinentalsockeln under historisk tid, g år möjligheten ej heller att avfärda. Studier av historiska data identifierade speciellt en händelse, en jordb ävning som inträffade år 1508 och kändes över hela England och Skottland, möjligen orsakad av en jordb ävning p å havsbottnen utanför kusten. Av denna anledning drar man slutsatsen att den högsta regionala magnituden för jordb ävningar kan vara högre än vad som hittills antagits. (Musson, 2008)

Man pekar i rapporten ocks å p å det faktum att en större mängd vittnesm ål fr ån ett visst omr åde, och den samtidiga bristen p å vittnesm ål fr ån ett annat omr åde, snarare kan bero p å bristen p å l äskunnighet och litter är tradition i det ena omr ådet, än att det faktiskt uppstod mindre effekter d är. Ett exempel p å detta som redovisas är en jordb ävning som intr äffade i Skottland den 8 november 1608. Medan det finns m ånga vittnesm ål fr ån s ödra Skottland om denna jordb ävning, finns inga fr ån norra Skottland rapporterade. F örfattaren konstaterar dock att detta har ingenting att g öra med bristen p å effekter fr ån jordb ävningen i norra Skottland, utan p å vilken befolkning som levde d är vid den tiden. Innan 1700-talet bestod befolkningen i norra Skottland av sj älvhush ålande jordbrukare, med g äliska som modersm ål och utan kunskaper i engelska. De var dessutom analfabeter. Kommunikationerna med resten av Storbritannien var dessutom d åliga; inte förr än p å 1700-talet byggdes v ägar som kopplade samman lands änden med resten av landet. Av denna anledning kan man inte förv änta sig att vittnesm ål om möjlig förstörelse eller annan påverkan, som behövs för att kunna uppskatta styrkan på jordbävningen, skall komma från området. (Musson, 2008)

Vidare konstateras att vittnesm ål tidigare än slutet av 1600-talet enbart kan förväntas ge allm än information om att en jordbävning kändes över ett större område, utan några beskrivningar av vilka skador som uppstod (eftersom inga större effekter skulle uppst å inom de områden vari vittnesm ål förväntas ha nedtecknats). Det är möjligt att vittnesm ålet rapporterar att jordbävningen var starkare i Skottland, men generellt sett är historieskrivningen från Skottland sämre än den i England, delvis på grund av den förlust av historiska dokument som skedde i samband med de oroligheter som skapades av den skotska reformationen. Författaren pekar även på att man även måste ha i beaktande att vittnesm ål från denna tidsperiod kan förväntas vara både inexakta och partiska. (Musson, 2008)

7.1.3.1 Översvämningskatastrof i S:t Petersburg, 1824

Seiches (vattenpendlingar) mellan sydvästra Östersjön och Finska viken kan orsaka stora vattenst åndsvariationer i Finska vikens innersta del. När detta sker uppst år vattenst åndshöjningar och -sänkningar turvis vid den danska östersjökusten och i S:t Petersburg i Finska viken. Vid den relativt djupa danska kusten är fenomenet inte särskilt dramatiskt, men i S:t Petersburg, som ligger inne i Finska vikens innersta grunda och smala del, kan vattenst åndshöjningarna bli katastrofala genom att stora mängder vatten pressas in i viken som en flodvåg. Den största katastrofen av denna typ inträffade 18-19 november 1824. Vattnet steg då på enbart några timmar 4,21 meter över medelvattenst åndet. Omkring 300 hus förstördes och 569 människor omkom. (Fonselius, 1997)

7.1.3.2 Jordbävningen i Lissabon 1755

Tidigt påmorgonen den 1 november 1755 skedde en stor jordbävning i Atlanten väster om Lissabon i Portugal. Jordbävningen, uppskattad till att ha legat på runt 9 på Richterskalan, orsakade stor förstörelse i staden. Runt en timme efter jordbävningen svepte en första tsunamiv åg på cirka 15 meter in över Lissabon. Denna v åg skulle komma att följas av ytterligare tv åstycken, vilka tillsammans ökade den förstörelse som jordbävningen redan orsakat. Uppskattningsvis 60 000 människor omkom och runt 80 procent av staden Lissabon förstördes som ett resultat av både jordbävningens och tsunamiv ågornas kraft. (Smith, 2006) Jordbävningen påverkade till och med Norden, genom att jordbävningens efterverkningar orsakade seiches (se kapitel 4.1.2) i sjöar ända uppe i Sverige och Finland. (Bryant, 2008)



Figur 35. Fortplantningstiden för den tsunami som uppstod på grund av jordbävningen i Lissabon 1755, beräknad med mjukvaran "Tsunami Travel Times". Röd färg = 1-4 timmar, gul = 5-6 timmar, gröna 7-14 timmar, blå = 15-21 timmar. (Wikimedia Commons, 2009)

7.2 Slutsatser utifrån historiska studier

Som sågs i kapitel 3 har det tidigare inträffat vattenst ånd på upp emot och över 3 meter vid minst 6 tillfälen på 1000 år vid den tyska Östersjökusten. Detta tyder på kortare återkomsttider än vad som tidigare beräknats statistiskt för sådana niv åer. Dock kan det tilläggas att detta troligen är mest aktuellt för den södra delen av Östersjön. Då Backafloden ej verkar ha påverkat vattenst åndet högre upp i Östersjön till en niv å som är relevant för denna undersöknings syfte kan händelser av denna typ (extremt högt vattenst ånd i sydvästra Östersjön orsakade av starkt utflöde) anses vara en icke bidragande orsak till den övergripande risken för översvänningar vid de svenska kärnkraftslägena. Detta underbyggs av att inga extrema vattenst ånd noterades i vare sig Stockholm eller Ölands norra udde i samband med Backafloden. (Ekman, 2003) Ej heller på västkusten, eller på Jylland på andra sidan Kattegatt, finns några extrema vattenst ånd noterade från i samband med denna händelse.

Vi s åg i detta kapitel att starka jordb ävningar kan skapa tsunamiv ågor med p åverkan p å omr åden ej omedelbart vid skalvets epicentrum (se avsnitt 7.4.3.2). Jordb ävningen utanf ör Portugals kust visar p å att tsunamis orsakade av jordb ävningar kan uppst å och orsaka stor skada i Europa. Storeggaraset är ett exempel p å att detta fenomen även kan uppst å av andra orsaker i Nordsjön. Exemplet med Draupnerv ågen visar vidare att andra extrema v ågfenomen kan uppst å i Nordsjön även utan p åverkan fr ån vare sig jordb ävningar eller jordskred. D å v ågor av denna typ enbart kunnat m ätas och observeras vetenskapligt först p å senare år torde de dock ej ut öva en större risk mot infrastruktur placerad l ängs med kusten. Slutligen visar den brittiska unders ökningen p å att jordb ävningsrisken p å havsbottnen, som allts å skulle kunna orsaka jordb ävningar, kan vara högre än vad som tidigare antagits. Dock kan man anta att extrema havsv ågor fr ån Nordsjön ej bidrar till den övergripande risken för översv ämningar över DBFL för de svenska kärnkraftslägena. Detta eftersom Storeggaraset, den mest kraftiga havsvåg från Nordsjön man känner till, enbart verkar ha påverkat den svenska Skagerrakkusten. Dåkärnkraftverket Ringhals är placerat vid Kattegatt, längre ned längs med den svenska västkusten, torde den vara skyddad mot påverkan från vågor med ursprung från Nordsjön.

Studien av de svenska stora stormarna från modern tid; Gudrun och Per, visar att extrema vattenst ånd kan uppst åinom svenska farvatten av helt "normala" stormar, dock med "onormal" styrka. Det högsta värdet uppmätt för Forsmark uppmättes under stormen Per, medan det högsta värdet från Ringhals uppmätes i samband med stormen Gudrun. Eftersom effekterna från dessa stormar finns med i den statistiska mätdatan från SMHI kan dock de mekanismer som orsakade de extrema vattenst ånden anses vara inkluderade i den statistiska unders ökningen.

Översvämningskatastrofen i S:t Petersburg år 1824 visar, som nämndes i kapitel 4, att de lokala förhålandena på platsen kan ha stor påverkan på hur högt vattenst åndet blir, minst lika stora som hur förhålandena i närheten av platsen är. I fallet med S:t Petersburg först ärks effekterna av exempelvis en seiche av att staden är placerad längst in i en lång och smal vik (Finska viken). Med andra ord behöver stor försiktighet vidtas vid förs ök att dra generella slutsatser utifr ån specifika händelser påspecifika platser.

8 Övergripande analys och diskussion

Det lokala vattenst åndet är extremt beroende av just de lokala förh ålandena på platsen, speciellt de topografiska sådana. Detta sågs både rent allm änt i kapitel 4 (meterologisk och hydrologisk bakgrund), men även i kapitel 3 (tidigare studier) genom de i detta kapitel omn ämnda estl ändska rapporterna, vari det konstaterades att extrema vattenst ånd kunde uppst å i Rigabukten generellt och Pärnubukten specifikt trots avsaknad av ovanligt höga vattenst ånd i resten av Östersjön, om "rätt" vindriktningar och vindstyrkor uppst år.

Som nämndes i kapitel 6.1 måste man i analysen av de resultat som åstadkoms ta hänsyn till hur väl den de aktuella kurvanpassningarna faktiskt passar den aktuella datamängden. Det viktigaste i det sammanhanget kan anses vara hur pass väl kurvanpassningen över beräknade maximala vattenst ånd för olika återkomsttider passar in i den empiriska datamängden över extrema vattenst ånd.

En av de frågeställningar som uppdragsgivaren var intresserad av att få besvarade i arbetets början var hur extrema väderfenomen av typen Backafloden (se kapitel 7.4.1.3) skulle kunna påverka den övergripande riskbed ömningen för översvämningar över DBFL för de idag aktiva svenska kärnkraftverken. Det är ej möjligt att få fram ett numeriskt värde påhur Backafloden bidrar till den övergripande risken för vattenst ånd över DBFL vid de svenska kärnkraftverken. Precis som gjordes i den tyska rapporten Hochwasserschutzmanagement an der Deutschen Ostseeküste, omnämnd i kapitel 3, måste konstateras att det historiska datat och de mätdata som tillhandah ållits av SMHI tillhör två skilda dataklasser som ej går att kombinera på statistisk/matematisk väg. Det g år dock att konstatera att utifr ån de historiskt nedtecknade extrema vattenst ånden fr ån tyska Östersjökusten, verkar vattenst ånd av den magnitud som uppmätes i samband med Backafloden ha en återkomstperiod påuppskattningsvis 1 gång per 150 år. Det är vidare möjligt att göra en uppskattning av magnituden och den eventuella påverkan på de svenska kärnkraftslägena som en ny stormflod i södra Östersjön liknande Backafloden skulle kunna ha. Detta gjordes i kapitel 7.5, vari det konstaterades att vare sig vid havspegeln i Stockholm eller havspegeln vid Ölands norra udde uppmätes ovanligt höga värden i samband med Backafloden. Som sågs i tabell 1 i kapitel 4.2 är det högsta värdet som uppmätts vid Ölands norra udde sedan starten av mätningar år 1851 enbart +135 cm (mätvärde från januari 1914), vilket är cirka 35 cm över det högsta värde som uppmäts vid Oskarshamns havspegel (se kapitel 6.2.1.1). Av denna anledning kan man dra slutsatsen att även om en händelse av typen Backafloden skulle ske igen skulle påverkan på vattenst åndet vid Oskarshamn troligen ej bli särskilt stor. Som sågs i kapitel 4.1.1 har, enligt undersökningar från SMHI och dess danska motsvarighet, vattengenomströmningen genom Öresund ej påverkats av Öresundsbrons byggande. Allts å torde Öresundsbron ej heller påverka den framtida magnituden av stormfloder av "Backafloden-typ".

En prelimin är slutsats av den historiska studien och studium av de i kapitel 3 redovisade tyska extremv ärdesstatistiska unders ökningarna ger därför att trots att stormfloder av samma magnitud som Backafloden verkar ske oftare i sydvästra Östersjön än vad statistiska unders ökningar av mätdata från området har givit såtorde magnituden även i framtiden ej bli mycket högre än tidigare uppmätta maxvärden och påverkan på vattenst ånden vid de svenska kärnkraftverken vara marginell.

8.1 Oskarshamn

Gälande Oskarshamn kan man, som sågs i kapitel 6.2.1 ovan, observera att inga extrema mätdata uppmäts i samband med tidpunkter under vilka extrema mätvärden uppmätes vid något av de andra verken (Stormen Gudrun, Stormen Per, etc.).

Gälande de i denna rapport presenterade historiska händelserna verkar Backafloden vara mest relevant för Oskarshamnsverkets del. Som redan nämnts bedöms dock Backafloden ej ha p åverkat vattenst åndet vid Oskarshamn i n ågon större grad. Av denna anledning bör den övergripande bedömningen av risken för översvämning över DBFL vid Oskarshamns kärnkraftverk huvudsakligen baseras på den statistiska undersökningen av vattenst åndsmätdata från SMHI. Denna undersökning visade att vid den sannolikhetsnivå som betraktats och för de statistiska fördelningar som användes ges en bred marginal mot DBFL. Med andra ord förefaller ingen risk för vattenst ånd över DBFL föreligga.

8.2 Ringhals

Gälande den övergripande risken för översvämningar vid Ringhalsverket kan konstateras att stormen Gudrun, vilket skapade det högsta uppmätta vattenst åndet vid Ringhals kärnkraftsverks närhet, finns med i den statistiskt undersökta datan. Gälande fenomen som ej finns inkluderade i den inkluderade datamängden, utan måste sökas i denna uppsats historiska undersökning, torde den största risken ligga i vågfenomen av olika typ, med ursprung i Nordsjön.

I avsnitt 7.1.2.2 gavs en beskrivning av händelsen Storeggaraset. Som konstaterades där har geologiska undersökningar bedömt risken att något liknande skall hända igen som väldigt låg. I kapitel 7 sågs även att extrema vågor kan uppstå på Nordsjön även utan undervattensras, om flera vågor samverkar och förstärker varandra. Dock verkar extrema vågor av typen Draupnervågen mest uppstå påstora öppna hav, där vågorna har mycket utrymme att bygga upp stora styrkor. Ringhalsverket är dessutom relativt skyddat i och med sitt läge längre söderut längs den svenska västkusten. I figur 34 sågs att Storeggaraset verkar ha gett påverkan på västkusten, men enbart Skagerakkusten, ej kusten till Kattegatt. Allts å borde man kunna dra slutsatsen att även utifall en händelse av typen Storeggaraset skulle ske igen, torde enbart den norra delen av svenska västkusten i värsta fall påverkas.

Vi s åg vidare i avsnitt 7.1.3 en unders ökning rörande att risken för jordbävningar på havsbottnen utanför brittiska kusten eventuellt skulle kunna vara högre än vad som tidigare antagits. Om större jordbävningar skulle ske på havsbottnen i Nordsjön är det möjligt att detta skulle kunna skapa tsunamis. Dock kan sägas att även om tsunamis orsakade av jordbävningar skulle uppst å torde samma resonemang som applicerades på Storeggaraset i stycket ovan kunna användas, och med andra ord borde Ringhalsverket vara skyddad även mot sådana händelser.

Av denna anledning kan den övergripande bed ömningen av risken för översvämningar över DBFL vid Ringhals kärnkraftverk huvudsakligen baseras på den statistiska undersökningens resultat. Denna undersökning visade att vattenst ånd över DBFL ej förväntades vid den sannolikhetsnivå som betraktats i denna uppsats.

8.3 Forsmark

Stormen Per, vilket skapade det högsta uppmätta vattenst åndet vid Forsmark kärnkraftsverks nähet, finns med i den statistiskt undersökta datamängden. Utifr ån den historiska information som undersökts, inklusive mätdata och historisk data fr ån SMHI, verkar värdet på 146 cm, uppmätt i samband med stormen Per år 2007, vara det högsta observerade vattenst åndet fr ån området. Som sågs i tabell 1 i kapitel 4.2 är detta mätvärde det högsta som observerats längs hela svenska kusten mot södra Bottenhavet. Vidare såg vi att i att den extremvärdesstatistiska undersökningen över högsta teoretiska vattenst åndet i Olkiluoto (se kapitel 3), lokaliserat vid finska kusten på andra sidan Bottenhavet, konstaterades att det högsta vattenst åndet som observerats vid verket är 1 meter över medelvattenst åndet, och risken för att vattenst åndet skulle överskrida +3,5 meter bed ömdes ligga på $1*10^{-9}/$ år.

Förutom de tv å senaste händelserna (stormarna Per respektive Gudrun) återfinns i den historiska unders ökningen inga händelser som bedöms kunna påverka risken för extrema vattenst ånd vid Forsmark i någon nämnvärd grad. Av denna anledning torde svaret över vilket vattenst ånd man kan förvänta sig vid Forsmark återfinnas i denna uppsats statistiska del (kapitel 6). Som redovisades i det avsnittet bedöms vattenst ånd över DBFL ej uppst å vid Forsmarksverket vid den sannolikhetsniv å som betraktas i denna unders ökning.

9 Slutsatser

Utifr ån de statistiska studier som utfördes i arbetet med denna rapport kan konstateras att risken för översvämningar över DBFL (*Design Basis Flooding Level*), vilket ligger påcirka 3 meter över medelvattenst åndet för de tre svenska kärnkraftverken, är lägre än den frekvens inom vilken man vanligtvis behandlar externa händelser inom kärnkraftsbranschen i Sverige ($10^{-5}/a^{\circ}$). Marginalerna mot DBFL för kärnkraftverken i Ringhals och Forsmark är dock ej särskilt stora.

Inga av de i denna rapport presenterade och analyserade historiska händelser som skett utanför den tidsperiod som det statistiska mädatat i undersökningen samlats in bedöms kunna påverka risken för översvämningar över DBFL vid de svenska kärnkraftslägena i någon nämnvärd grad. Av denna anledning bör den övergripande bedömningen av risken för översvämningar vid de svenska kärnkraftverken huvudsakligen baseras på de statistiska resultat som redovisats i denna rapport.

9.1 Förslag på vidare forskning

Som tidigare nämnts gjordes ingen sammanslagning av tidsserien från Oskarshamn med den som fanns tillgänglig för Ölands norra udde, vilken varit i drift sedan år 1851. I det fall man i framtiden vill göra en ny extremvärdesstatistisk undersökning av risken för översvämning vid Oskarshamn, och dåsöker en längre tidsserie, är det dock teoretiskt möjligt försöka sammanfoga dessa båda tidsserier. Innan detta görs måste dock en statistisk analys liknande den som beskrevs i kapitel 6.2.3 genomföras, för att se huruvida det är statistiskt försvarbart att försöka sammanfoga de båda tidsserierna.

Denna undersökning har ej tagit hänsyn till den eventuella påverkan på risken för översvämningar över DBFL vid de svenska kärnkraftverken som skulle kunna komma från klimatförändringarna. I takt med att fler resultat från forskningen om klimatförändringarnas påverkan presenteras borde det vara möjligt att inom ett antal års tid kunna inkludera detta fenomen i framtida undersökningar inom denna rapports ämnesområde.

Då forskningen inom statistisk extremvärdesanalys är ett dynamiskt område med ständigt nya forskningsresultat borde det vara möjligt att i framtida undersökningar använda sig av andra statistiska metoder och funktioner än de som det redogjorts för i denna rapport, vilket skulle kunna ge bättre underbyggda statistiska resultat.

Vidare är det möjligt att det finns nedtecknade historiska händelser som skulle kunna påverka den övergripande risken för översvämningar över DBFL vid de svenska kärnkraftverken som har förbisetts i denna undersökning. På grund av detta finns anledning att i framtiden genomföra ännu mer ing ående historiska studier inom denna rapports ämnesområde.

10 Källförteckning

10.1 Tryckta källor

Bryant, Edward (2008). *Tsunami: The Underrated Hazard (Second Edition)*. Berlin: Springer-Verlag

Coles, Stuart (2001). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. London: Springer-Verlag.

Fonselius, Stig (1997). Västerhavet och Östersjöns oceanografi. Västra Frölunda: SMHI, Oceanografiska laboratoriet.

McGuire, Bill (2012). Waking the giant: how a changing climate triggers earthquakes, tsunamis, and volcanoes. Oxford: Oxford University Press.

Rychlik, Igor och Ryd én, Jesper (2006). *Probability and Risk Analysis – An Introduction for Engineers*. Berlin: Springer-Verlag

Smith, Craig B. (2006). Extreme waves. Washington, D.C.: Joseph Henry.

Stummer, Bernd (2007). *Hochwasser an Nord- und Ostsee: Geschichte und Maßnahmen zum Schutz.* München: Grin Verlag.

Weisse, Ralf (2010). *Marine climate and climate change: storms, wind waves and storm surges*. Berlin: Springer-Verlag.

10.2 Elektroniska källor

Andersen, Robert och Fox, John (Deparment of Sociology, McMaster University) (2005). Using the R statistical computing environment to teach social statistics courses. Tillgänglig: http://www.unt.edu/rss/Teaching-with-R.pdf> [2013-05-26]

BSH (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydropgrahie) (2009). The Baltic Sea Surge 1872: Testing some hypotheses. Tillgänglig:

<http://www.loicz.org/imperia/md/content/loicz/stormsurges/posterd/p52_bork_etal.pdf > [2013-05-26]

Ekman, Martin (2003). "The world's longest sea level series and a winter oscillation index for Northern Europe 1774-2000". Small Publications in Historical Geophysics No. 12. Tillg änglig: http://www.historicalgeophysics.ax/sp/12.pdf> [2013-05-26]

Fackler, Martin (2011). "Tsunami Warnings, Written in Stone". New York Times, 20 april, 2001. Tillg änglig:

<http://www.nytimes.com/2011/04/21/world/asia/21stones.html?pagewanted=all&_r=0 > [2013-05-23]

Forsmarks Kraftgrupp (2011). Forsmark 1, 2 och 3 - Offentlig sammanfattningsrapport förnyade säkerhetsvärderingar av tåigheten mot vissa händelser – stresstest. Tillgänglig: <http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Global/Pressmeddelanden/2011/Stresstester na/sammanfattning_forsmark.pdf> [2013-05-26]

Haver, Sverre (2005). A Possible Freak Wave Event Measured at the Draupner Jacket January 1 1995. Tillg änglig:

http://www.ifremer.fr/webcom/stw2004/rw/fullpapers/walk_on_haver.pdf> [2013-05-26]

Hosking et al. (1985). "Estimation of the Generalized Extreme-Value distribution by the method of probability-weighted moments", Technometrics 27, 251-261.

H åkansson et al. (2005). Öresundsbron – en bro till b ätre milj öarbete? - En kvalitetsgranskning av uppf öljningsarbetet av Öresundsbron. Institutionen för landskapsplanering vid Sveriges Landsbruksuniversitet. Tillg änglig: http://www.slu.se/Documents/externwebben/centrumbildningar-projekt/mkb-centrum%20dokument/studentarbeten/projarb/oresund.pdf> [2013-05-23]

IAEA (International Atomic Energy Agency) (2011). Meterological and Hydrological Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations – Specific Safety Guide No. SSG-18. IAEA Safety Standards. Tillg änglig:

http://www.pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1506_web.pdf [2013-05-23]

Jensen, Jürgen och Mudersbach, Christoph (2004). "Analyses of Variations in Water Level Time-Series at the Southern Baltic Sea Coastline". Coastline Reports 2 (2004). ISSN 0928-2734. Tillg änglig:

<http://www.bau.unisiegen.de/fwu/wb/forschung/publikationen/baltcoast_wasserst%C3 %A4nde.pdf> [2013-05-23]

Koppe, B ärbel (2002). Hochwasserschutzmanagementan der deutschen Ostseek üste. Institut für Wasserbau, Fachbereich Bauingenieurwesen, Universit är Rostock. Tillg änglig: http://www.ikzm-

d.de/infos/pdfs/151_Hochwasserschutz_ostseek_ste.pdf> [2013-05-23]

Lagemaa et al. (2011). "Operational sea level forecasting in Estonia". Estonian Journal of Engineering, 2011, 17, 4, 301–331. Tillg änglig:

<http://www.kirj.ee/public/Engineering/2011/issue_4/eng-2011-4-301-331.pdf> [2013-05-26]

Meteorologiska Institutet (2011). Extreme weather and nuclear power plants (EXWE) -Sea level scenarios and extreme weather events. Tillg änglig: <http://virtual.vtt.fi/virtual/safir2010/vasenpalkki/finalseminar/Presentations/Friday/Are a_8/EXWE_SAFIR2010.pdf> [2013-05-26]

Musson, Roger (2008). "The case for large (M >7) earthquakes felt in the UK in historical times". Historical seismology : interdisciplinary studies of past and recent earthquakes. Springer, 187-207. Tillg änglig: < http://nora.nerc.ac.uk/5356/> [2013-05-26]

NRC (U.S. Nuclear Regulatory Commission) (1976). Regulatory Guide 1.102 – Flood Protection for Nuclear Power Plants – Revision 1. Tillg änglig: http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0037/ML003740308.pdf>

OKG AB (2011). Projekt Kent – Sammanfattning av stresstester p åOKG. Tillg änglig: <http://www.eon.se/upload/eon-se-2

0/dokument/om_eon/om_energi/energikallor/karnkraft/Sammanfattning-av-stresstesterpa-OKG.pdf> [2013-05-23]
Ringhals AB (2011). R1-R4 ENSREG stresstest - Sammanfattande rapport. Tillg änglig: <http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Global/Pressmeddelanden/2011/Stresstester na/V%C3%A4der/1%20R1-R4%20ENSREG%20stresstest%20-%20Sammanfattande%20rapport.pdf> [2013-05-26]

Scandpower AB (2011). Utredningar efter Fukushima Yttre händelser - Extrema högvattenst ånd i Östersjön och Skagerack. [Ej offentlig rapport]

SKB AB (Svensk K ärnbr änslehantering AB) (2009). Förv äntade extremvattenniv åer för havsytan vid Forsmark och Laxemar–Simpevarp fram till år 2100. ISSN 1402-3091. Tillg änglig: http://www.skb.se/upload/publications/pdf/R-09-06.pdf> [2013-05-23]

SMHI (1998). Rapport över extrema väder och vattenhändelser i Sverige. [Ej offentlig rapport]

SMHI (2005). Vissa extrema v äderrelaterade h ändelser vid svenska k ärnkraftsl ägen. [Ej offentlig rapport]

SMHI (2009). Havsvattenst ånd vid svenska kusten. SMHI Faktablad nr 41, juli 2009. Tillg änglig: http://www.smhi.se/publikationer/havsvattenstand-vid-svenska-kusten-1.6389 [2013-05-23]

Statens K ärnkraftsinspektion (1992). Project Seismic Safety - Characterization of seismic ground motions for probabilistic safetyanalyses of nuclear facilities in Sweden – Summary report. Tillg änglig:

<http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Global/Publikationer/Rapport/Sakerhet-vid-karnkraftverken/1992/SKI-Rapport-1992-03.pdf> [2013-05-26]

Str åls äkerhetsmyndigheten (2008). Str åls äkerhetsmyndighetens föreskrifter och allm änna r åd om konstruktion och utförande av kärnkraftsreaktorer (SSMFS 2008:17). ISSN: 2000-0987. Tillg änglig:

<http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Global/Publikationer/Forfattning/SSMFS/20 08/SSMFS2008-17.pdf> [2013-05-26]

Str ås äkerhetsmyndigheten (2011). Delredovisning - Uppf öljning av erfarenheter fr ån kärnkraftsolyckan i Fukushima 15 december 2011. SSM2011-2052-2. Tillg änglig: http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/Global/Publikationer/Myndighetshandling/G ranskningsrapport/Rapporter%20till%20webben/delredovisning-uppfoljning-av-erfarenheter-fran-karnkraftsolyckan-i-fukushima.pdf> [2013-05-26]

STUK (2012). CSN Second Extraordinary Meeting National Report. Tillg änglig: http://www.stuk.fi/ydinturvallisuus/en_GB/convention/_files/88226697572781275/def ault/CNS-ExtraordinaryMeeting-NationalReport-Finland-May2012.pdf> [2013-05-23]

Suursaar et al. (2003). "Extreme sea level events in the coastal waters of western Estonia". Journal of Sea Research 49 (2003) 295-303. Tillg änglig: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385110103000224> [2013-05-23]

Suursaar, Ülo och Sooäär, Jekaterina (2007). "Decadal variations in mean and extreme sea level values along the Estonian coast of the Baltic Sea". Tellus A, Volume 59, Issue 2, pages 249-260, March 2007. Tillg änglig: <

http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1600-0870.2006.00220.x/abstract> [2013-05-23]

Wikimedia Common (2009). "Travel times of the tsunami from the 1755 earthquake, calculated with the Tsunami Travel Times (TTT) software. Red contours are for 1-4 hour arrival times, yellow (5-6 hrs.), green (7-14 hrs.), and blue (15-21 hrs.). NOTE: These maps do not provide information on the height or the strength of the wave. Skapad av: NOAA's National Geophysical Data Center (NGDC)". Tillg änglig: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Lisbon_1755_tsunami_travel_times.jpg> [2013-05-23]

Wikimedia Common (2010). Figurbeskrivning: "Map of the Baltic Sea. Created by NormanEinstein, May 25, 2006". Tillgänglig: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Baltic Sea map-sy.png> [2013-05-23]

10.3 Internetkällor

NRK (2002). *Liten fare for undersjøiske ras utenfor Norge*. Tillgänglig: http://www.nrk.no/programmer/tv/schrodingers_katt/1758511.html [2013-05-26]

PeO's Weatherpage (2013). *Svåra stormar i Sverige sedan 1900*. Tillgänglig: http://www.weatherpage.se/orkantab3.htm> [2013-05-26]

SMHI (2005). *Januari 2005 - Vattenst ånd och v ågor*. Tillg änglig: <http://www.smhi.se/klimatdata/Manadens-vader-och-vatten/Sverige/januari-2005vattenstand-och-vagor-1.5323> [2013-05-26]

SMHI (2009). *Extrema v ågor*. Tillg änglig: <http://www.smhi.se/kunskapsbanken/oceanografi/extrema-vagor-1.3081> [2013-05-26]

SMHI (2009). *Sj öspr ång*. Tillg änglig: <http://www.smhi.se/kunskapsbanken/oceanografi/sjosprang-1.4200> [2013-05-26]

SMHI (2009). *Per – Januaristormen 2007*. Tillg änglig: <http://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/per-januaristormen-2007-1.5287> [2013-05-26]

SMHI (2009). *Historiskt väder*. Tillg änglig: <http://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/historiskt-vader-1.7110> [2013-05-26]

SMHI (2010). *Havspegel Oskarshamn*. Tillg änglig: <http://www.smhi.se/kunskapsbanken/oceanografi/havspegel-oskarshamn-1.13881> [2013-05-26]

SMHI (2010). *Havspegel Ölands norra udde*. Tillg änglig: <http://www.smhi.se/kunskapsbanken/oceanografi/havspegel-olands-norra-udde-1.13883> [2013-05-26]

SMHI (2011). *Gudrun – Januaristormen 2005*. Tillg änglig: <http://www.smhi.se/kunskapsbanken/meteorologi/gudrun-januaristormen-2005-1.5300> [2013-05-26] Str åls äkerhetsmyndigheten (2013). *Nedslag i svensk kärnkraftshistoria*. Tillg änglig: <<u>http://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/start/Karnkraft/Historik/> [2013-05-26]</u>

10.4 Mejlintervjuer

Lindow, Helma; SMHI; 2013-03-21.

Appendix

Appendix 1: Matlabfunktion för beräkning av årliga blockmaximum

%NIVABLOCKMAX Find Blockmaxima vectors.
% NIVABLOCKMAX(INPUTNIVA) returns the BLOCKMAX vector given by
INPUTNIVA.
% INPUTNIVA defines which data vector will be used.

function blockmax = nivablockmax(inputniva)

niva=inputniva; %defines the "niva"-vector
years=(length(niva))/365; %finds out how many years of data the
"niva"-vector contains
wholeyears=floor(years); %rounds down to the nearest integer
%restyear=years-wholeyears;
vectorlength=wholeyears*365; %calculates the vector length

```
firstvektor=niva(1:vectorlength); %creates a vector containing only
full years
restvector=niva((vectorlength+1):end); %creates a vector containing
the remaining data
```

newmatrix=reshape(firstvektor,365,[]); %reshapes the vector containing
only the full years to a matrix with organized with years on the
columns and days on the rows

nivamaxvector=zeros(wholeyears,1); % creates an empty vector of length
"wholeyears"

```
for i=1:wholeyears
    nivamaxvector(i)=max(newmatrix(:,i));
    i=i+1;
    %calculates the maximum values for every column, i.e.: the maximum
    %annual values, i.e.: the block maxima
end
```

restvectormax=max(restvector); %calculates the maximum value for "restvector" nivamaxvector(i)=restvectormax; %add this value to "nivamaxvector"

blockmax=nivamaxvector; %defines the final result

Appendix 2 – Figurer från tester över autokorrelationen av den undersökta datamängden



Figur 1. Autokorrelationen för mätdatat från Oskarshamns kärnkraftverk.



Figur 2. Autokorrelationen för mätdatat från Ringhals kärnkraftverk (den kombinerade tidsserien).





Figur 3. Autokorrelationen för mätdatat från Forsmarks kärnkraftverk (den kombinerade tidssserien).

Appendix 3 – Figurer från tester genomförda med hjälp av funktionen qqplot i R



Figur 1. Tidsserierna Varberg och Ringhals plottade mot varandra med hjälp av funktionen qqplot i R.



Figur 2. Tidsserierna Björn och Forsmark plottade mot varandra med hjälp av funktionen qqplot i R.

Appendix 4 – koden till R-rutinen gtest

library(ismev) library(evd) #setwd("C:/Documents and Settings/jesper/Mina dokument/Research/ExpGumb/")

```
#:::::: PWM function, called PWM.#:::::: Returns a vector with elements location, scale, shape
```

```
pwm <- function(data){</pre>
n = length(data);
  sortdata = matrix(sort(data),1,n);
  \#koeff1 = ((1:n)-1)/(n-1);
  \#koeff2 = koeff1.*((1:n)-2)/(n-2);
  k1 = matrix((c(1:n)-1)/(n-1),1,n);
  k2 = k1 * (c(1:n)-2)/(n-2);
  b2 = k2 \%^{*}\% t(sortdata)/n;
  b1 = k1 \% \% t(sortdata)/n;
  b0 = mean(sortdata);
  z = (2*b1-b0)/(3*b2-b0)-log(2)/log(3);
  shape = 7.8590^{*}z+2.9554^{*}z^{2};
  scale = (2*b1-b0)*shape/(gamma(1+shape)*(1-2^(-shape)));
  location = b0+scale*(gamma(1+shape)-1)/shape;
  return(c(location,scale,shape))
}
gtest <- function(data){
pw <- pwm(data)
z = pw[3]*(length(data)/0.5633)^0.5;
p = 1-pnorm(abs(z))
return(p)
}
```

Appendix 5 – Tidsserier över årsmaxima för Oskarshamn, Ringhals och Forsmark



Oskarshamn

Figur 1. Årsmaxima från tidsserien för Oskarshamns kärnkraftverk.

Varberg-Ringhals



Figur 2. Årsmaxima från tidsserien för Ringhals kärnkraftverk.

Björn-Forsmark



Figur 3. Årsmaxima från tidsserien för Forsmarks kärnkraftverk.