

Examensarbete
ISRN LU:2005:11

Uppspolning och klittererosion längs Ystadkusten

- Situation idag och framtida scenarier

Carl-Johan Dahlerus
Daniel Egermayer



Division of Water Resources Engineering
Department of Building and Environmental Technology
Lund University

Uppspolning och klittererosion längs Ystadkusten

Situationen idag och framtida scenarier

Carl-Johan Dahlerus
Daniel Egermayer

Förord

Uppspolning och klittererosion längs Ystadkusten – Situationen idag och framtida scenarier är ett examensarbete som har utförts, från november 2004 till maj 2005, i samarbete med Avdelningen för Teknisk vattenresurslära vid Lunds Tekniska Högskola.

Eftersom denna studie utreder kustprocesser i Ystad, har vi fått stor hjälp från Ystad kommun och vill därför tacka Tekniska chefen Erling Alm, civ.ing. Ann-Sofi Eriksson och alla inblandade på mätavdelningen för den exkursion som gavs i initialskedet, samt för all hjälp vi fått under arbetets gång.

Vi vill tacka Håkan Rosqvist, Regionschef för SGI, för den introduktion vi fick i erosionsproblematiken som råder i Ystad kommun.

Vid insamling och analys av klimatdata har vi fått hjälp av Markus Flarup och Barry Broman på SMHI, samt Margareta Ohlsson på Ystad Hamn Logistik AB och vill därför rikta ett tack till er.

För de fältinmätningar som genomförts vill vi rikta ett stort tack till Lars Ollvik, forskningsingenjör Geodetisk Mätningsteknik samt Lars Gustafson och Annika Ljungberg från Caliterra HB, som ställt upp för oss i vått och torrt.

Tack även till alla er som lånat ut era bilar till oss, vilket möjliggjort studiebesök, exkursioner mm. Även om bilarna har varierat i kvalité och komfort har resornas mål alltid uppnåtts.

Sist, men absolut inte minst, vill vi rikta ett stort tack till våra handledare, professor Hans Hanson, och professor Magnus Larson, för all den hjälp vi fått under arbetets gång. Ni har lärt oss otroligt mycket, som vi hoppas kunna ta nytta av i framtida projekt.

Carl-Johan Dahlerus och Daniel Egermayer

Lund, maj 2005

Sammanfattning

- Titel:** Uppspolning och klittererosion längs Ystadkusten
Situationen idag och framtida scenarier
- Författare:** Carl-Johan Dahlerus och Daniel Egermayer
- Handledare:** Prof. Hans Hanson, Avdelning för Teknisk Vattenresurslära vid Lunds Tekniska Högskola
- Problemformulering:** Ystad, som är beläget längs Skånes sydkust, har länge varit utsatt för kusterosion. När det blåser över Östersjön genereras vågor som orsakar uppspolning och direkt erosion av klitterna på stranden. Ett av de mest utsatta områdena är Ystads Sandskog, beläget öster om Ystads centrum. Här karakteriseras strandprofilen av en relativt kort strand med klitter som skyddar den låglänta bakomliggande terrängen. Vid en eventuell framtida klimatförändring med högre vågor och vattenstånd riskerar den redan utsatta kuststräckan att drabbas ännu hårdare. Detta innebär i sin tur att populära turist- och rekreationsområden riskerar att delvis eller helt försvinna.
- Syfte:** Syftet med denna studie är att analysera vågor och vattenstånd, utifrån befintlig klimatdata, för att kunna dra slutsatser om hur stranden, speciellt klitterna, i Ystads Sandskog har påverkats av kustklimatet fram till idag. Tillsammans med befintliga prognoser kommer även möjliga scenarier för framtiden att ställas upp för området. Vidare kommer en kartläggning göras över kritiska kustavsnitt med tanke på uppspolning, överspolning och klittererosion.
- Metod:** I det initiella skedet av denna studie samlades vind- och vattenståndsdata in. Utifrån dessa data gjordes analyser av hur klimatet ser ut i södra Östersjön, för att sedan beräkna vågor, uppspolning och klittererosion i Ystad. Klimatdatan bearbetades för framtida situationer, dels med olika statistiska fördelningar som underlag och dels genom simuleringar med hjälp av existerande prognoser som modellerats av SWECLIM (Swedish Regional Climate Modelling Programme). Avslutningsvis gjordes en profil-

inmätning i det studerade området för att kunna identifiera kritiska sektioner längs kusten samt för att kunna uppskatta vilken inverkan havets krafter kan komma att ha på stranden i framtiden.

Slutsatser:

De analyser som gjorts visar att uppspolning och erosion har varit påtaglig under de senaste decennierna. De kustavsnitt som är mest känsliga karakteriseras av ett strandplan med liten lutning, en lågt belägen klitterfot och en brant klittervägg. Dessa partier återfinns systematiskt i mitten av de kustavsnitt, som ligger mellan två hövder i det studerade området.

Vid ett eventuellt ökat vattenstånd beräknades att både strandplan och klittervolym kommer att minska drastiskt. Utifrån befintliga prognoser beräknades även den direkta klittererosionen öka med upp till 75% fram till år 2100. Detta medför att det promenadstråk som löper längs klittertoppen idag, inom ett 100-års perspektiv bitvis kan försvinna. Vidare visar studien att en uppspolninghöjd som idag har en återkomsttid på 100 år, i framtiden kan komma att inträffa upp till 13 gånger oftare.

Ystad kommun har upprättat flera erosionsskydd på kritiska områden. Det finns dock sektioner där erosionen befaras öka men inga åtgärder är vidtagna. Här anses sandutfyllnad vara en effektiv åtgärd för att bibehålla strand och klitter. Metoden är kostsam och underhållskrävande men estetiskt tillfredställande för den attraktiva och ekonomiskt viktiga stranden.

Nyckelord:

Ystad, vind, vattenstånd, vågor, uppspolning, erosion, klitter, framtida scenarier

Abstract

- Title:** Runup and sand dune erosion along the coast of Ystad - *Present conditions and future scenarios*
- Authors:** Carl-Johan Dahlerus and Daniel Egermayer
- Supervisor:** Prof. Hans Hanson, Department of Water Resources Engineering, Lund University
- Presentation of problem:** Ystad, which is located along the south coast of Skåne, has for a long time been subject to coastal erosion. Winds over the Baltic Sea generate waves which cause runup and direct erosion of the sand dunes on the beach. One of the most exposed areas is Ystad Sandskog, east of Ystad city. Here, the beach profiles are characterized by a relatively, narrow beach with sand dunes protecting low-lying areas behind the dunes. In case of possible future climate change, with increasing wave heights and water levels, the exposed coastline will suffer from greater impact. This implies that popular areas, for tourists and recreation, are in risk of, partly or entirely, disappearing.
- Objectives:** The main objectives of this study are to analyze waves and water levels, from existing climate data, to make conclusions about how the beach, particularly the sand dunes, at Ystad Sandskog has been influenced by the coastal climate up to today. Based on available forecasts, possible scenarios will be developed for this area, making it possible to map critical sections on the beach with respect to runup, overtopping and erosion of the dunes.
- Procedure:** In the initial phase of this study, wind and water level data were collected. Analyses of these data were made to see what the climate in the south part of the Baltic Sea looks like, in order to calculate waves, runup and sand dune erosion in Ystad. The climate data were then processed, on the one hand by simulations based on statistical distributions, on the other hand by simulations using existing forecasts modeled by SWECLIM (Swedish Regional Climate Modelling Programme), for future scenarios. Finally, profile measurements in the area were made, to identify

critical sections along the coast and to make estimates of the effects the forces of the sea may have on the coastline in the future.

Conclusions:

The analyses that were made show that runup and sand dune erosion have had great effect on the beach during the last decades. The most sensitive sections are characterized by a small foreshore slope, a low-lying dune foot, and a steep dune face. These sections are typically found in-between two groins.

In case of a sea level rise, the foreshore and the sand dune volumes are expected to decrease drastically. From existing forecasts, the direct sand dune erosion was calculated to increase by up to 75% by the year 2100. This implies that the pedestrian path located on top of the dunes may partly disappear within 100 years. The study also indicates that the runup, with a 100-year return period today, in the future may occur up to 13 times more frequent.

The municipality of Ystad has established shore protection measures at some of the critical sections. Nevertheless there are some areas without shore protection where sand dune erosion is expected to increase in the future. Sand nourishment is considered as a good and efficient alternative to preserve the beach and the sand dunes. Although this method is costly and demands maintenance, it is esthetically satisfying for the attractive and economically important beach.

Keywords:

Ystad, wind, water level, waves, runup, erosion, sand dunes, future scenarios

Innehållsförteckning

<i>1</i>	<i>Inledning</i>	<i>1</i>
1.1	Bakgrund.....	1
1.2	Syfte.....	2
1.3	Avgränsningar.....	2
1.4	Metod.....	2
1.5	Disposition.....	3
<i>2</i>	<i>Kustprocesser</i>	<i>5</i>
2.1	Processer i djupvattenzonen.....	5
2.2	Processer i den kustnära zonen.....	6
2.3	Processer i strandzonen.....	6
<i>3</i>	<i>Områdesbeskrivning</i>	<i>7</i>
3.1	Historisk utveckling av kustlinjen.....	8
3.2	Befintliga erosionskydd.....	9
<i>4</i>	<i>Profilinmätning</i>	<i>13</i>
4.1	Inmätningförfarande.....	13
4.2	Typprofiler.....	14
4.3	Profildata.....	15
<i>5</i>	<i>Vindklimat</i>	<i>17</i>
5.1	Standardiserad vind.....	17
5.2	Vinddata.....	17
5.3	Vindstyrkor.....	19
5.4	Vindriktning.....	21
<i>6</i>	<i>Vågklimat</i>	<i>25</i>
6.1	Vågor på djupt vatten.....	25
6.2	Vågklimat i södra Östersjön.....	26
6.3	Beräkning av kustnära klimat.....	30
6.4	Kustnära vågklimat i Ystadbukten.....	31

7	<i>Vattenstånd</i>	33
7.1	Vattenståndsfluktuationer	33
7.2	Tillgängliga vattenståndsdata	34
7.3	Vattenståndsförändringar 1887-1986	34
7.4	Vattenstånd i Simrishamn, Skanör och Ystad	35
7.5	Förlängning av 100-årsserien	37
7.6	Sannolikhet för olika vattenstånd	39
7.7	Samverkan mellan vind och vattenstånd	40
7.7.1	Samtidiga vindriktningar och vattenstånd i Ystad	41
7.7.2	Sannolikhet för höga vattenstånd och starka vindar	41
7.8	Samtidiga höga vågor och högt vattenstånd	41
8	<i>Uppspolning</i>	43
8.1	Beräkning av uppspolningshöjder	43
8.2	Uppspolning vid Ystadkusten	45
8.3	Överspolning	48
9	<i>Erosion av klitter</i>	51
9.1	Analytisk erosionsmodell	51
9.2	Erosion längs Ystads kust	52
9.3	Simulering av erosion	54
9.4	Kriterier för klitterbrott	56
10	<i>Framtida klimatförhållanden</i>	59
10.1	Bakgrund klimatförändringar	59
10.2	Klimatmodeller	60
10.2.1	Globala klimatmodeller	61
10.2.2	Regionala klimatmodeller	61
10.3	SWECLIM:s resultat av framtida klimatscenarioer	61
10.3.1	Framtida vindar	61
10.3.2	Framtida vattenstånd	62
10.4	Trender i befintliga data	63
10.4.1	Framtida vindar	63
10.4.2	Framtida vattenstånd	63
10.4.3	Återkomsttid för vattenstånd	66
10.4.4	Återkomsttid för våghöjder	66
10.4.5	Återkomsttid för uppspolningshöjd	66

11	<i>Framtida scenarier</i>	69
11.1	Vattenståndets inverkan på kustprofilen	69
11.2	Förändring av strandprofiler i Ystad vid ökat vattenstånd	70
11.3	Uppspolning och överspolning	72
11.4	Förändringar av återkomsttiden avseende uppspolning	74
11.5	Erosion av klitter	74
11.6	Kritiska områden i Ystads Sandskog	75
12	<i>Översiktlig analys</i>	77
13	<i>Slutsatser</i>	81
14	<i>Referenslista</i>	83
	<i>Appendix I – Tillgängliga dataserier</i>	87
	<i>Appendix II – Översikt av inmätta profiler</i>	91
	<i>Appendix III – Klimatårsindelning</i>	98
	<i>Appendix IV – Beauforts vindskala</i>	101
	<i>Appendix V – Vindstatistik</i>	102
	<i>Appendix VI – Vågberäkningar</i>	103
	<i>Appendix VII – Samtidiga vågor och vattenstånd</i>	107
	<i>Appendix VIII – Härledning av erosionsmodell</i>	108
	<i>Appendix IX – Framtida vindklimat</i>	111
	<i>Appendix X – Återkomsttider</i>	115
	<i>Appendix XI – Ordförklaringar</i>	118
	<i>Appendix XII – Förteckning över variabler</i>	119

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Det sker en ständig förändring av kustlinjerna runt om i världen. Effekterna av vindar, vågor, strömmar samt isostatiska, och eustatiska processer påverkar kusternas utseende. Vindar har ett stort inflytande på våra kuster, dels genom en direkt materialtransport till och från stranden, dels genom generering av vågor och strömmar som i sin tur transporterar sediment längs botten i direkt närhet till stränderna. Genom vågorna sker även materialtransport till och från stranden. Eustatiska processer beskriver vattenståndets fluktuationer medan isostatiska processer beskriver höjdförändringar av landmassorna till följd av den senaste landisens tillbakadragande. Beroende på hur processerna förhåller sig till varandra bidrar dessa med en direkt förändring av den exponerade strandzonen men även med en viss materialtransport.

Kusterosion beskriver de processer som orsakar en materialtransport från stranden och från områden i direkt närhet till stranden. Fenomenet, som länge varit känt, har under de senaste decennierna blivit allt mer aktuellt.

En anledning till detta är de stora förändringar i det globala klimatet som uppmärksammas. Klimatet på jorden har alltid varierat, mellan istider och varmare perioder. Frågan är nu huruvida människan, genom utsläpp av bl.a. fossila bränslen, bidrar till en global uppvärmning. Oberoende om människan ligger bakom den senaste drastiska klimatförändringen eller om det är normala cykler, har förändringarna en stor betydelse för våra kuster. Om den globala temperaturen fortsätter att stiga kommer smältning av polarisar och glaciärer öka samtidigt som en termisk expansion av vattnet i oceanerna kommer att ske. En förändring av det globala vädersystemet kan också ge ett stormigare klimat som följd, vilket medför att högre vågor och starkare strömmar kan genereras. Om detta blir fallet kan konsekvenserna bli förödande utmed stora delar av världens kuster.

Ytterligare en anledning till att kusterosionen blivit så uppmärksam är den pågående urbaniseringen vid kusterna. Längs Sveriges 1 150 mil långa kuststräcka återfinns idag majoriteten av den svenska befolkningen (SCB, 2005).

I norra Sverige karakteriseras kusten av den landhöjning som pågått sedan den senaste landisens tillbakadragande. I södra Sverige är landskapet däremot mycket låglänt och karakteriseras av långa sandstränder. På många platser är nivå-skillnaden mellan havsytan och markytan marginell. Dessutom pågår det en land-sänkning i södra Skåne, som nu är mest drabbat av erosionen. (SMHI, 2005)

I dag är Ystad en av de mest utsatta kommunerna där bebyggelse och infrastruktur ligger i riskzonen. Stränder och andra områden för friluftsliv och turism har redan drabbats. Problemet har uppmärksammas sedan mitten av 1950-talet och åtgärder

har vidtagits för att minimera den gradvis ökande erosionen. Ystad har blivit en försöksstad för olika metoder mot erosion. Olika erosionskydd har uppförts på ett antal utsatta kustavsnitt, en del med större framgång än andra.

1.2 Syfte

Syftet med denna studie är att analysera vågor och vattenstånd, utifrån befintlig klimatdata, för att kunna dra slutsatser om hur stranden, speciellt klitterna, i Ystads Sandskog har påverkats av kustklimatet fram till idag. Fokus riktas främst mot situationer som uppstår vid stormtillfällen. Tillsammans med befintliga prognoser ställs även möjliga scenarier för framtiden upp för området. Vidare görs en kartläggning över kritiska kustavsnitt med hänsyn till uppspolning, överspolning och klittererosion.

1.3 Avgränsningar

I denna studie studeras hur kusten påverkas med tanke på havets inverkan. Ingen hänsyn tas till andra faktorer, såsom nederbörd eller mänskliga aktiviteter. Kustparallell sedimenttransport behandlas inte i studien och ingen hänsyn tas heller till strandens naturliga återhämtning. Det studerade området begränsas till Ystads Sandskog, öster om Ystad centrum, ett av de mest låglänta partierna i kommunen. Tidsramen för studiens framtidsscenarier har satts till 100 år, eftersom detta är en tid som kan innebära stora förändringar av kuststräckan, samtidigt som det är en överskådlig period. Tidsramen har även begränsats av befintliga historisk data.

1.4 Metod

Detta examensarbete inleddes i november 2004. I initialskedet gjordes studiebesök vid Ystads kommun och Statens Geotekniska Institut (SGI), för att få bakgrundsfakta om den situation som råder i Ystad idag och de kustprocesser som är av betydelse. Med dessa fakta som grund gjordes en litteraturstudie om kustprocesser och befintliga prognoser. Parallellt med litteraturstudien samlades vind- och vattenståndsdata in dels från avdelningen för Teknisk Vattenresurslära och dels genom beställning från SMHI. Den begränsade mängden data som erhöles från Ystad kompletterades med data från bl.a. Simrishamn, Skanör, Falsterbo och Hanö, se Figur 1.1 och Appendix I.

Utifrån denna data gjordes analyser om hur klimatet ser ut i södra Östersjön, för att sedan beräkna vågor, uppspolning och stranderosion i Ystad. Klimatdatan bearbetades för framtida situationer, dels med olika statistiska fördelningar som underlag och dels genom simuleringar med hjälp av existerande prognoser som modellerats av SWECLIM (Swedish Regional Climate Modelling Programme). Avslutningsvis gjordes en profilmätning i det studerade området för att kunna

identifiera kritiska sträckor längs kusten samt för att kunna uppskatta vilken effekt havets krafter kan ha på kusten i framtiden.



Figur 1.1 Karta över Skåne, där Ystads geografiska läge i förhållande till de andra orterna där klimatologisk data har hämtats, är markerade.

1.5 Disposition

Denna rapport inleds med en översiktlig beskrivning av de kustprocesser som behandlas i studien (kapitel 2). Kapitel 3 utgör en beskrivning av det detaljstuderade området. Här görs även en utredning om befintliga erosionsskydd och deras funktion. I kapitel 4 görs en beskrivning av den GPS-inmätning som gjorts. Här redovisas även resultaten från profilmätningarna i Ystads Sandskog.

I kapitel 5 görs en analys av vindklimatet i södra Östersjön. Vindklimatet används sedan i kapitel 6 för beräkning av vågklimatet, utifrån de förutsättningar som råder i Ystad.

Kapitel 7 utgör en analys av vattenståndsdata. Dessa vattenståndsdata används tillsammans med vågdatan för att beräkna uppspolningshöjder längs kusten i kapitel 8. Utifrån uppspolningshöjderna beräknas i kapitel 9 den pågående erosionen av klitter.

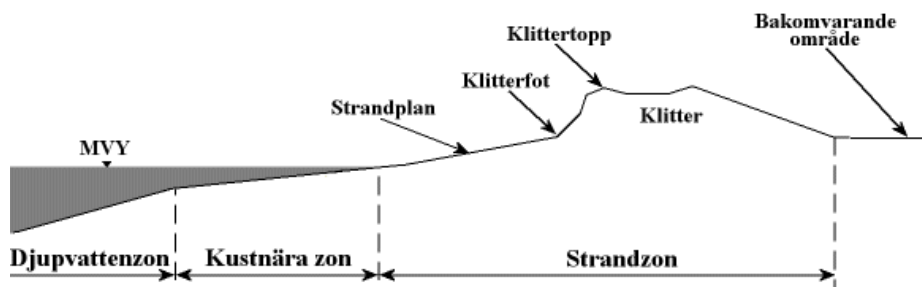
I kapitel 10 presenteras möjliga förändringar av klimatet inom ett 100-års perspektiv, baserat dels på litteraturstudien och dels på trendanalyser av erhållen

klimatdata. Dessa klimatförändringar används sedan i kapitel 11 för att simulera framtida scenarier i Ystadbukten. Framtida scenarier följs upp av en diskussion och sammanfattning av resultaten i kapitel 12. Rapporten avslutas i kapitel 13 med de slutsatser som dragits under studiens gång.

I Appendix redovisas olika beräkningsmetoder som används i studien och här återfinns även en ordförklaring samt en förteckning över alla variabler som används.

2 Kustprocesser

I detta kapitel görs en översiktlig beskrivning av de kustprocesser som är av betydelse i denna studie. Detta för att ge läsaren en förståelse för de resonemang som förs och de beräkningsmetoder som används i kommande kapitel. De processer som studeras har kategoriserats efter den zon där aktiviteten sker; djupvattenzon, kustnära zon och strandzon, se Figur 2.1. Processerna beskrivs utifrån SPM (US Army Corps of Engineers, 1984).



Figur 2.1 Översikt av zonindelning i kustprofilen, samt viktiga begrepp som används i studien.

2.1 Processer i djupvattenzonen

Djupvattenzonen karakteriseras av att ingen interaktion sker mellan vågor och havsbotten. I denna zon sker uppbyggnaden av vågor där vindar är den huvudsakliga energikällan. Vindar ger även upphov till förändringar i vattenståndet (WL). När vattenytan utsätts för vind uppstår friktion mellan vind och ytvatten varpå ytliga vattenströmmar uppstår. Dessa vattenströmmar ger upphov till storskaliga förändringar i vattenståndet. Eftersom Ystad är beläget i södra delen av Östersjön ger nordliga vindar upphov till höga vattenstånd i Ystadbukten, beroende på att vattenmassor förflyttas från den norra delen av Östersjön ner mot den södra delen.

Vid generering av vågor har förutom vindstyrkan även vindens varaktighet och stryklängd samt vattendjupet betydelse. Varaktighet är den tid som det blåser med en viss vindstyrka från en viss riktning. Stryklängd, som är det avstånd över vilket vinden verkar på vattenytan, varierar beroende på vindriktning. I Ystad har kusten en öst-västlig orientering med Östersjön beläget rakt söderut. Härav kan vågor endast genereras när det blåser från sydliga riktningar varför dessa är av störst intresse i denna studie.

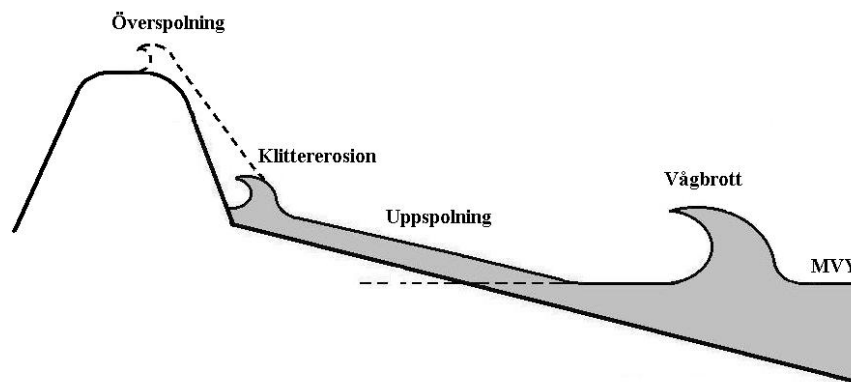
2.2 Processer i den kustnära zonen

När vågor närmar sig grundare vatten sker en interaktion med botten. Vid uppgrundning bromsas vågen upp på grund av friktion mot botten. Om vågen närmar sig kusten under en vinkel kommer den att sträva efter att böja av vinkelrätt mot strandlinjen, så kallad refraktion. Även reflektion mot kusten samt s.k. diffraktion, då vågen strävar efter att breda ut sig mot lugnare ytor, påverkar dess egenskaper. En tillräcklig uppgrundning gör vågen instabil varpå den bryter. Vågbröttet innebär att vågens energi frigörs. Denna process är av stor betydelse ur erosionssynpunkt, då den frigjorda energin kan mobilisera och transportera botten-sediment. Härigenom kan sediment transporteras in mot eller ut från kusten.

Om vågen infaller med en vinkel mot kusten ger denna upphov till strömmar som kan föra med sig sediment längs kusten, s.k. kustparallell sedimenttransport.

2.3 Processer i strandzonen

Efter att vågen har brutit fortsätter vattenmassorna in mot strandzonen, se Figur 2.2. Om vågen har tillräcklig kraft spolar den upp på stranden. Hur högt vågen når, s.k. uppspolning, beror på vågens energiinnehåll, aktuellt vattenstånd samt strandens utformning. Om uppspolningen når klitterna sker en direkt erosion av dessa. Vid extrema förhållanden kan även en överspolning ske, då vatten tar sig in över klitterna till bakomliggande terräng. För alla processer i strandzonen har vattenståndet en stor betydelse, eftersom höga vattenstånd innebär att vågorna når högre.



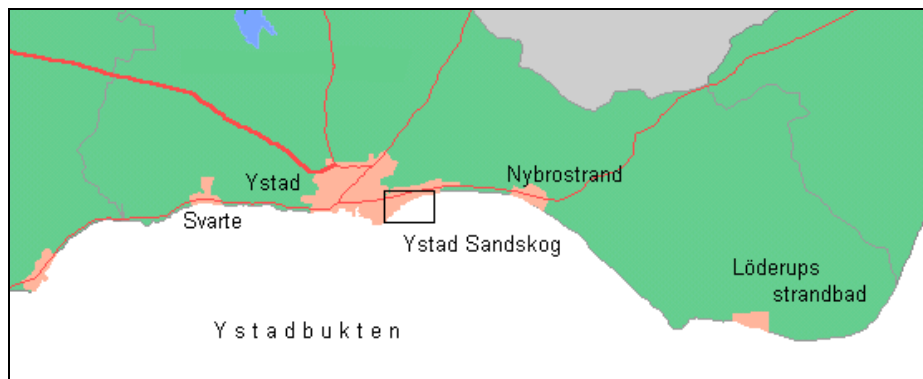
Figur 2.2 Översikt av processer som är av betydelse näras kusten

Effekterna av ovannämnda kustprocesser är som störst i samband med stormar. Normalt finner man majoriteten av stormtillfällen under vinterhalvåret.

3 Områdesbeskrivning

Ystads Sandskog är beläget strax öster om Ystad centrum, se Figur 3.1. Området utgörs till största del av tallskog men även bok, ek och gran förekommer. Mycket av skogen planterades under 1800-talet, främst för att binda sanden. I västra delen av sandskogen finns en del bebyggelse, framförallt sommarboende, där flertalet hus har stort kulturhistoriskt värde. Den obebyggda östra delen är ett naturreservat. Parallellt med strandlinjen följer sanddynen som utgör gränsen mellan skog och fin sandstrand. Sandstranden utgör en populär badplats på somrarna. Längs toppen av sanddynen sträcker sig ett populärt promenad- och cykelstråk. (Ystad kommun, 2004)

Bakom sanddynerna har ett temporärboende delvis utvecklats till ett permanentboende på låglänt mark. Cirka 300 meter norr om stranden går Österleden och precis norr om denna landsväg finns ett villaområde och en campingplats. Utöver detta planeras ytterligare bebyggelse öster om den befintliga. Precis väster om den första hövden ligger konferensanläggningen Ystad Saltsjöbad.



Figur 3.1 Ystad kommun med det studerade området öster om Ystad centrum inramad. (Hanson, 2003)

Det studerade området, se Figur 3.2 och Figur 3.3, avgränsas av första och sista hövden i öst-västlig riktning, av Östersjön mot söder och strax bakom sanddynerna mot norr, se Figur 3.4. Öster och väster om området har stora partier med stenskonig anlagts och är därmed inte av intresse ur erosionssynpunkt i denna studie.



Figur 3.2 *Det studerade område österut från hövd 1.*



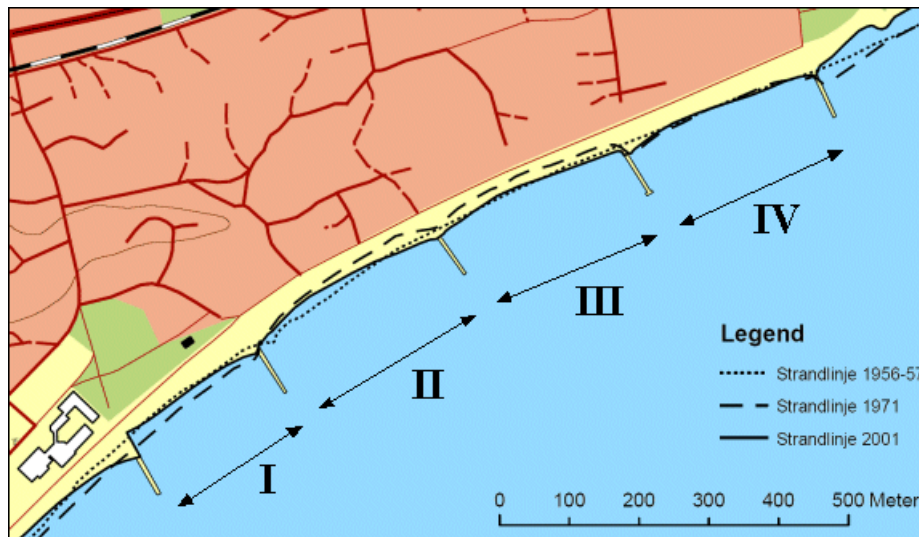
Figur 3.3 *Det studerade området västerut från badvaktstornet mellan hövd 3 och 4. Vinkelrätt ut från stranden syns hövderna 0-2 sträcka sig.*

3.1 Historisk utveckling av kustlinjen

SGI har på uppdrag av staten gjort en utredning vad gäller den historiska utvecklingen av kustremsan mellan Ystad och Sandby Strand. Bland annat har man tittat på flygbilder över området tagna under tre tillfällen, 1956-57, 1971 och 2001, och studerat strandlinjerna. Figur 3.4 visar resultatet för området.

För sektion I har det skett en ackumulation av stranden mellan 1956 och 1971 för att mellan 1971 och 2001 åter erodera till sitt ursprungsläge. Beträffande sektion II

ägde en erosion rum mellan 1956 och 1971. Mellan 1971 och 2001 har strandlinjen för den västra delen varit fix, medan den för östra delen har återhämtat sig något. Vid sektion III hade strandlinjen 2001 återfått sitt ursprungliga läge efter att ha dragit sig tillbaka mellan 1956 och 1971. För sektion IV har strandlinjen i princip varit fix under hela perioden. Observera att ingen hänsyn har tagits till avvikelser i medelvattenståndet och därmed finns en viss osäkerhet i analysen av strandlinjens läge. (Hågeryd *et al*, 2005)

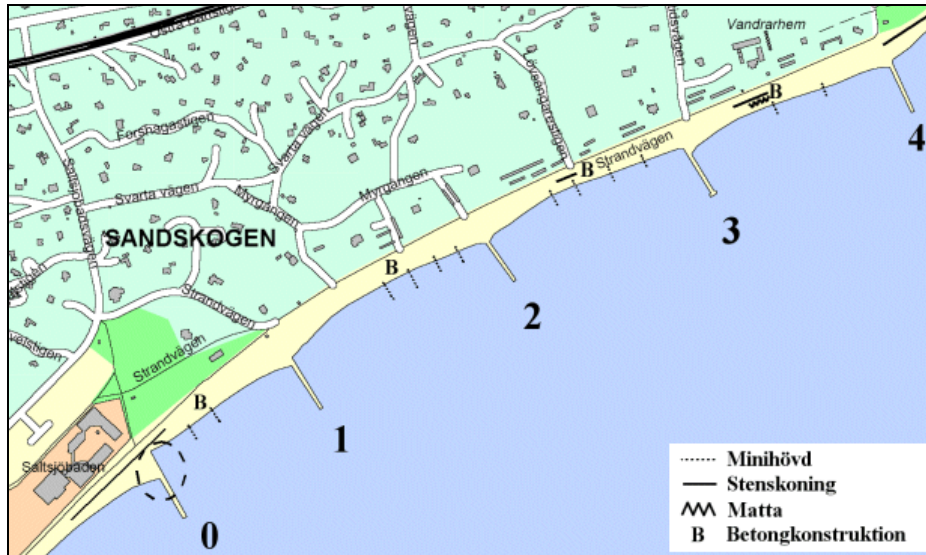


Figur 3.4 De historiska kustlinjerna, indelat i sektion I-IV, i Ystads Sandskog som de utvecklats enligt flygfoton tagna 1956-57, 1971 och 2001. (Hågeryd *et al*, 2005, modifierad)

3.2 Befintliga erosionskydd

Ystad har på grund av den rådande erosionen i kommunen fungerat som en försöksstad för diverse erosionskydd. Längs kuststräckan i Ystads Sandskog har flera olika typer av skydd anlagts. En översikt av de erosionskydd som anlagts i Ystad kommun har gjorts av Nilsson (2004) och redovisas kort nedan.

Närmast Ystad Saltsjöbad har erosionskydd såsom hövder och dräneringsrör anlagts. Hövdens funktion är att förhindra kustparallell sedimenttransport. Vid hövderna har därför en karakteristisk strandlinje skapats, med eroderad strand på ena sidan av hövden och ackumulerad sandstrand på motsatt sida, se Figur 3.5. En estetisk och praktisk funktion som hövderna har är att de under sommaren används som badbryggor, se Figur 3.6. Hövderna anlades i mitten av 90-talet.



Figur 3.5 Översikt av erosionskydd anlagda inom det aktuella området. Den inringade hövden, hövd 0, visar ett exempel på den karakteristiska strandlinjen som uppkommit - med ackumulerad sand på ena sidan av hövden och eroderad sand på motsstående sida - efter uppförandet av hövderna 0 – 4. Minihövderna anlades på 60-talet och fyller idag ingen funktion som erosionskydd. (Svensson, 2005; modifierad)

Dräneringsrör, s.k. UDC-rör, har anlagts parallellt med strandlinjen. Dess funktion är att minska det hydrostatiska trycket i strandzonen så att vågorna förlorar massa genom infiltration. I rören pumpas vattnet tillbaka till havet. Rören kräver kontinuerligt underhåll och är för tillfället ej i bruk på grund av att sand har skadat pumpstationen.



Figur 3.6 Två erosionskydd i det studerade området. En hövd som sträcker sig vinkelrätt ut från stranden samt stenskoning längs klittret.

Mellan hövderna, parallellt med kusten har man anlagt släntskydd i form av stenskoning (Figur 3.6) som ska förhindra vattnets attack mot sandvallarna. Man har även inplanterat växtlighet i en matta täckt med sand, se Figur 3.5.

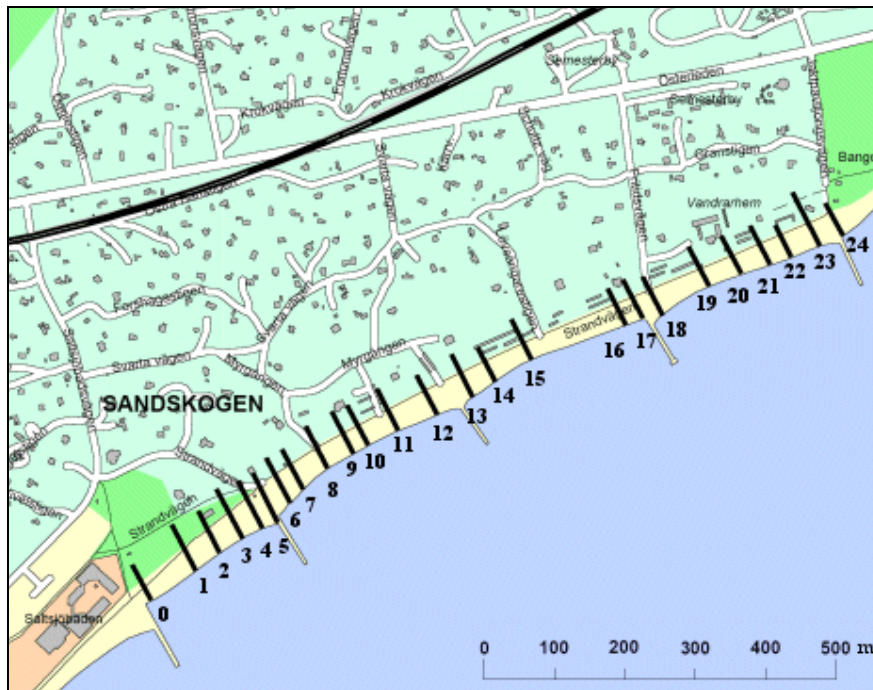
Andra åtgärder som har vidtagits mot stranderosion i Ystad är:

- Gabioner, vilka består av stenmaterial större än 100 mm, inlagda i nät. Dessa förekommer ofta vid brovingar och i vägslänter, men uppfyller även en funktion som strandskydd. Genom att placera gabioner längs klitterna förhindras den direkta erosionen av dessa.
- Betongmadrass, även kallat foreshore protection, är en strandskoning som skräddarsys för ändamålet. Stora madrasser placeras på klitterna och fylls därefter med betong. Denna madrass skyddar sedan klittret från vågor. Madrassen är försedd med filter och därmed dränerande.
- Flexplattor är mindre betongplattor som, genom en sk legokonstruktion, sammanlänkas till större mattor. Dessa fyller samma funktion som gabioner och betongmadrasser.
- Inplanterad vegetation används specifikt mot vinderosion. Utan kombination med annat erosionskydd utgör den inplanterade vegetationen ofta ett dåligt skydd mot vågpåverkan.
- Sandutfyllnad är en kostsam och underhållskrävande metod, men ökar attraktionsvärdet på stranden då denna kortsiktigt byggs på. Sanden måste hämtas från ett område där ackumulation av sand pågår, för att sedan läggas ut i strandplanet, där erosion har varit påtaglig. Sandutfyllnad måste upprepas kontinuerligt.

Ett annat sätt att minska erosion är att påverka brytpunkten av vågen, det vill säga avståndet från stranden där vågen bryter. Ju längre från stranden en våg bryter desto lägre är dess energi när den når stranden. Därmed reduceras uppspolningshöjder och klittererosion. Detta kan man påverka genom tröskelinvallning, som utgörs av en under vattnet anlagd höjd så att vattendjupet blir så litet att brytning av vågen påtvingas. Däremot tillåts överspolning över tröskeln så att vattnet innanför ej förblir stillastående. Båda sidorna av vågbrytaren byggs ihop med stranden för att förhindra att sanden, som fylls på innanför, inte ska läcka ut. Materialet på vågbrytare som används vid en sådan invallning kan t.ex. vara stenblock.

4 Profilinmätning

För att få en god uppfattning av topografin i det studerade området, utfördes profilinmätningar i april 2005. Totalt mättes 25 profiler in och mätningarnas lägen åskådliggörs i en översikt i Figur 4.1. Profil 0 är uppmätt strax öster om Ystad Saltsjöbad och profil 24 strax öster om den östligaste hövden. Tvärsnitt av samtliga profiler redovisas i Appendix II.



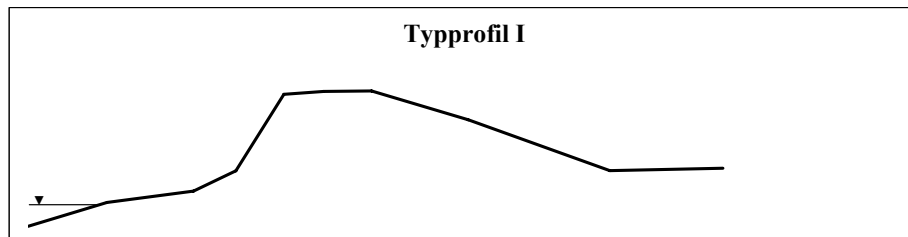
Figur 4.1 Översikt på uppmätta profiler i Ystad Sandskog och dess numrering. (Svensson, 2005; modifierad)

4.1 Inmätningförfarande

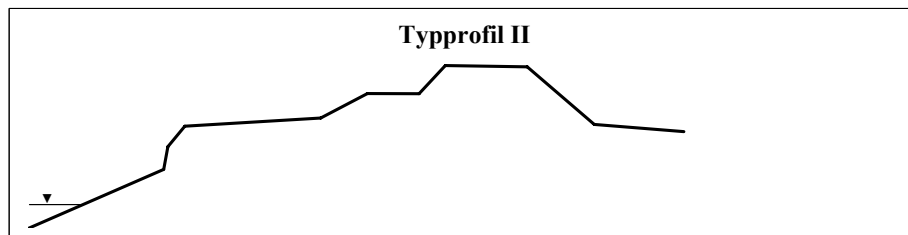
Profilinmätningarna gjordes med en totalstation. Totalstationen är ett optiskt instrument med en inbyggd lasermätare. Denna utgör en fast punkt som kalibreras mot två kända referenspunkter, med kända koordinater i tre dimensioner, så kallade bakåtojekt. När totalstationen kalibrerats, det vill säga basens koordinater är kända, beräknas avstånd samt horisontal- och vertikalvinklar till ett rörligt instrument, s.k. rover, som förflyttas till de punkter som ska koordinatbestämmas. Dessa punkter utgör de uppmätta profilerna.

4.2 Typprofiler

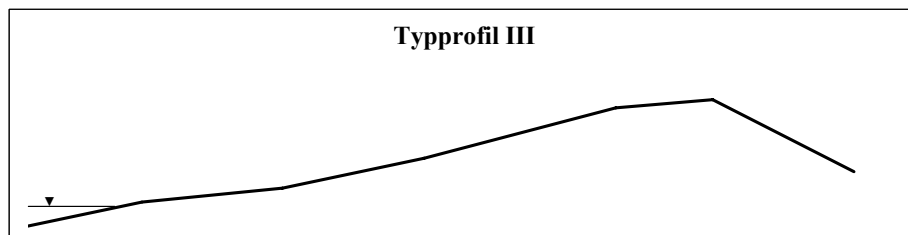
De 25 profiler som mätts in kan generaliseras till tre typprofiler. Typprofil I, se Figur 4.2, som är vanligast förekommande, karakteriseras av en liten lutning på strandplanet, en lågt belägen klitterfot samt en brant klittervägg. Denna typprofil ligger oftast beläget mitt emellan två hövder. Typprofil II, se Figur 4.3, karakteriseras av ett bredare klitter som byggs upp i etapper. Det främre klitterpartiet är lågt och brett, och verkar som ett skydd för huvudklittret. Klitterfoten är belägen nära vattenytan med ett brant strandplan. Typprofil III, se Figur 4.4, där strandplanet har en konstant lutning från vattenytan till toppen av klittret, förekommer inte någon väldefinierad klittervägg. Typprofilen finner man i anslutning till en hövd.



Figur 4.2 Förenklad bild av typprofil I (ej skalenlig) och dess läge längs det studerade området.



Figur 4.3 Förenklad bild av typprofil II (ej skalenlig) och dess läge längs det studerade området.



Figur 4.4 Förenklad bild av typprofil III (ej skalenlig) och dess läge längs det studerade området.

4.3 Profildata

För samtliga inmätta profiler har en approximerad volym, klitterfotshöjd, högsta klitterpunkt samt lutningen på strandplanet uppskattats. Resultatet redovisas i Tabell 4.1 och utgör som underlag för kommande beräkningar av uppspolningshöjder och klittererosion.

Tabell 4.1 Profildata och typprofilnummer för inmätta profiler i Ystads Sandskog. Profilerna 5, 18 och 24 utgörs av passager mellan klitterna.

Profil	Volym [m ³ /m]	Höjd av klitterfot [m]	Högsta punkt [m]	Strandlutning	Typprofil
0	19	0.51	3.20	0.20	I
1	46	1.40	3.92	0.15	I
2	37	1.49	4.23	0.16	II
3	56	1.12	4.60	0.15	II
4	60	1.32	4.53	0.13	II
5	21	1.83	3.35	0.06	III
6	18	2.29	3.79	0.10	I
7	31	1.74	3.87	0.13	I
8	44	1.18	3.97	0.16	I
9	39	1.25	4.36	0.16	I
10	39	1.46	3.53	0.17	I
11	38	1.23	4.38	0.21	I
12	41	1.52	4.21	0.13	II
13	66	0.72	4.39	0.11	I
14	22	2.00	3.64	0.12	I
15	40	1.16	3.89	0.20	I
16	41	1.38	4.52	0.17	II
17	16	2.05	3.71	0.12	III
18	31	1.71	3.21	0.06	III
19	27	0.98	4.13	0.14	I
20	27	2.05	4.71	0.17	I
21	36	1.57	4.46	0.20	I
22	33	1.38	4.11	0.18	I
23	48	1.35	4.36	0.15	III
24	43	1.03	2.86	0.07	III

5 Vindklimat

Vindar är den huvudsakliga energikällan till våggenerering. Eftersom det inte föreligger några vågmätningar i Ystad görs här en analys av vindklimatet i södra Östersjön, som underlag för beräkning vågklimatet i det studerade området.

Vindar är luftrörelser, huvudsakligen i det horisontella planet, som orsakas av tryckskillnader i atmosfären som i sin tur beror på skillnader i temperatur. Temperaturskillnaderna beror på solens oregelbundna uppvärmning av land och hav. När varma luftmassor stiger bildas ett undertryck som ”suger” in omkringliggande luft, vilket sätter luftmassorna i rörelse. Luftrörelserna påverkas sedan av ett antal olika faktorer, tex corioliseffekten som uppkommer på grund av jordens rotation. Detta medför att vindsystemet ofta är mycket komplicerat. I föreliggande studie studeras enbart uppmätta vindars egenskaper (styrka, riktning och varaktighet), utan att närmare gå in på varför de ser ut som de gör.

5.1 Standardiserad vind

Vid analys av vindar över öppet vatten måste ett antal hänsynstagande göras med tanke på de förutsättningar som råder. Vindar som rör sig lägre än en kilometer upp i atmosfären påverkas av friktionskrafter varpå vindstyrkan blir direkt beroende av nivån. Analyser av vindar refererar ofta till en standardiserad vind på 10 m höjd. Om neutrala förhållanden råder i atmosfären och temperaturskillnader i det vertikala planet anses vara försumbara ges en approximerad vindstyrka på 10 m, enligt,

$$U(10) = U(z) \left(\frac{10}{z} \right)^{1/7} \quad (5.1)$$

där z är nivå där vinden mäts och $U(z)$ är vindstyrkan på samma nivå.

Normalt är vinddata från havet inte tillgängliga utan data från närliggande land måste utnyttjas. I detta fall måste lokala effekter tas i beaktande. Lokala effekter innefattar bl.a. avståndet till kusten och den omgivande terrängens utformning. Även skillnader i temperaturer över land och hav har betydelse vid omräkning till en standardiserad vind över öppet vatten.

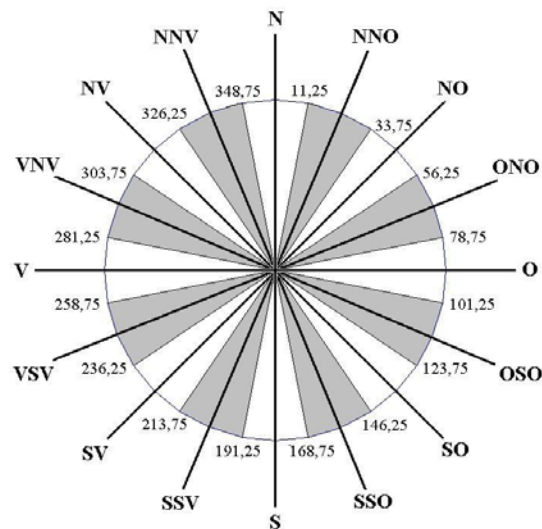
5.2 Vinddata

Vid analys av vindklimatet vid Ystads kust har data från SMHI:s väderstationer använts. Eftersom ingen komplett mätserie från Ystad fanns tillgänglig har även data från Falsterbo och Hanö använts för att dra slutsatser om vindklimatet i södra

Östersjön. Falsterbodatan är uppmätt 10 m över havet och behöver därför inte korrigeras med avseende på nivån. Cirka 300 m inåt land från väderstationen finns hög vegetation som möjligen reducerar nordliga vindar. Denna eventuella reduktion har inte tagits i beaktning. I Hanö är väderstationen placerad 14 m upp i en fyr, vars fot är belägen 50 m.ö.h. (Flarup, 2004). Vinddatan är därför omräknad från 64 m till 10 m, enligt ekvation 5.1.

Mätserierna sträcker sig över 44 år (1961-2004). Mellan åren 1961 och 1972 har mätningar gjorts var tredje timme mellan kl. 03.00 och kl. 18.00. Från och med 1973 fram till 2004 har mätningar även gjorts kl. 21.00 och kl. 00.00. Vid behandling av datan har alla mätvärden använts.

Vindstyrkan är given med en precision på 1 m/s, medan vindriktningen har en precision på 10°. Vindriktningarna har, för den fortsatta analysen, delats in i 16 väderstreck enligt Figur 5.1, där varje väderstreck upptar 22.5°. Indelningen innebär en ojämn fördelning (t.ex. tillhör 350°, 0° och 10° sektionen N i den nya indelningen medan endast 20° och 30° tillhör NNO), varför en slumpgenerator har använts för att variera vindriktningen kring det upmätta värdet. Slumpgeneratoren ger varje värde på vindriktningen ett nytt värde med en upplösning på en grad inom ett intervall $\pm 5^\circ$, vilket innebär en mer rimlig fördelning av de olika riktningarna.



Figur 5.1 Kompassriktningsindelning efter en 16-gradig skala.

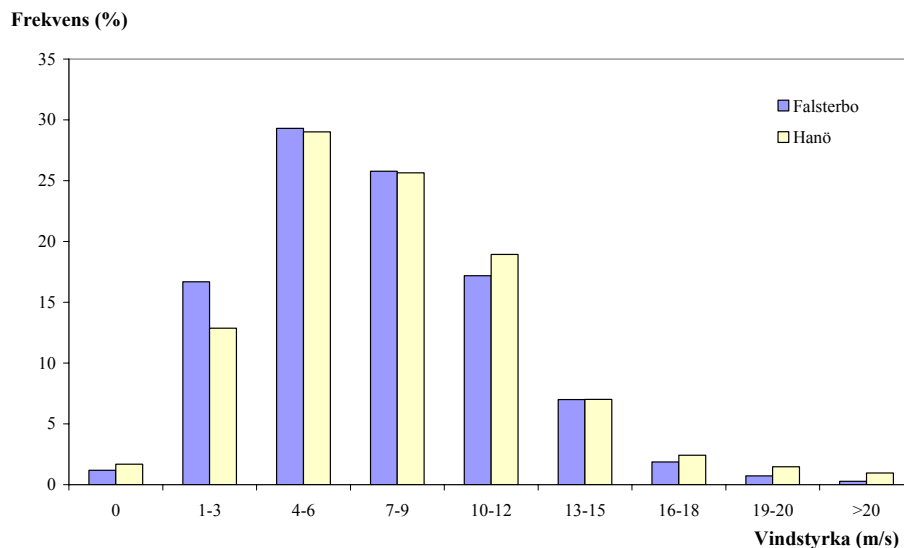
Jämförelser har gjorts av vinddatan från Falsterbo och Hanö för en femårsperiod (1976-1980) eftersom mätserierna är kompletta och innehåller exakt lika många mätvärden under denna period. Riktning och styrka har analyserats var för sig för att kunna dra slutsatser om hur vindklimatet ser ut i södra Östersjön.

Extrema vindtillfällen återfinns oftast under vinterhalvåret. För att undvika att ett stormtillfälle vid årsskiftet påverkar extremvärden för två år, har i denna studie valts att redovisa data efter klimatår. Klimatår sträcker sig från juli – juni, jämfört med kalenderår som sträcker sig från januari – december. För vidare resonemang se Appendix III.

5.3 Vindstyrkor

Vid analys av vindstyrkor har Beauforts vindskala använts som underlag, se Appendix IV. Beaufortskalan är en tolvgradig skala där indelningen från början inte bygger på vindstyrka, utan på hur segelbåtar betar sig till havs och hur de bör riggas vid olika vindar. Idag har skalan översatts till hastigheter och är ett vanligt sätt att kategorisera vindstyrkor efter effekter (Segar, 1998).

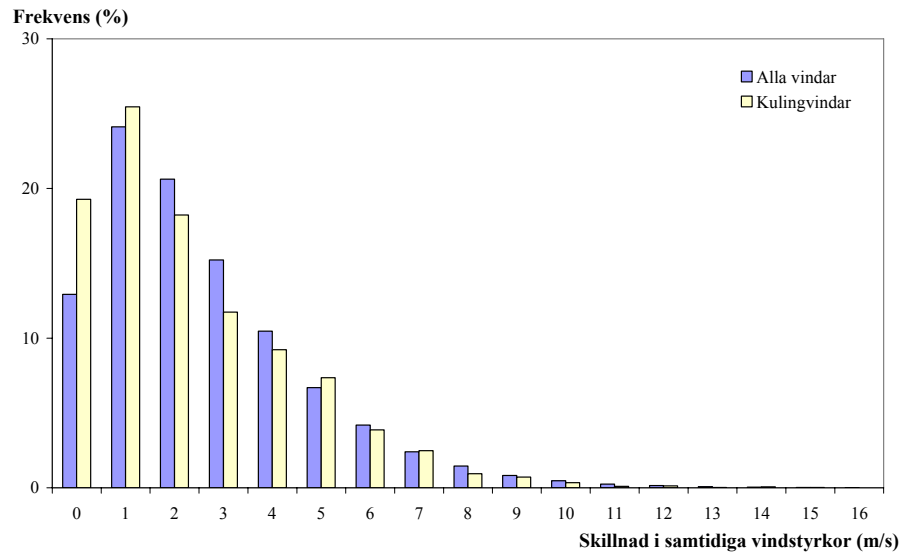
En jämförelse mellan de två aktuella väderstationerna har gjorts. I Figur 5.2 har den procentuella fördelningen av alla vindstyrkorna för mätserien, 1976-1980, i Falsterbo och Hanö plottats i ett stapeldiagram. Diagrammet visar att fördelningen av vindstyrkor från Falsterbo och Hanö är mycket lika, vilket styrker ett antagande att dessa mätserier ger en bra beskrivning av vindstyrkor i södra Östersjön.



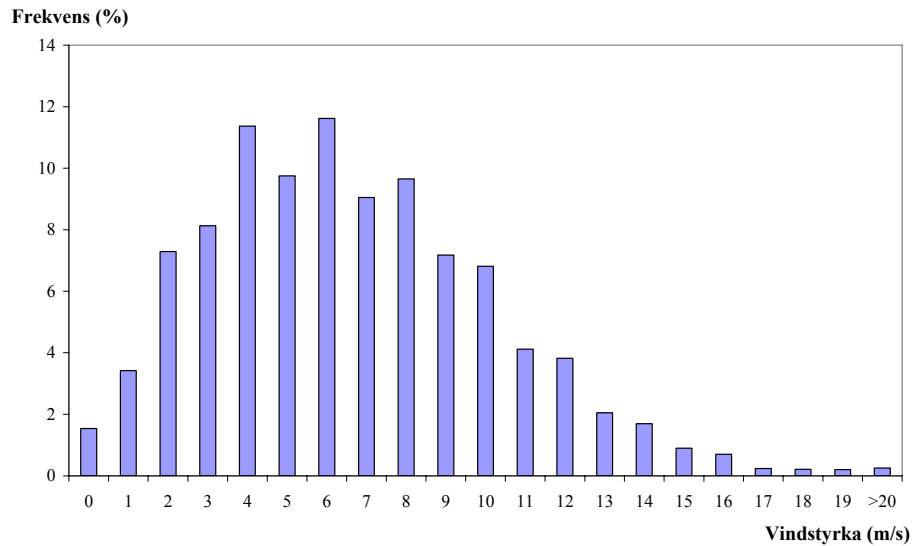
Figur 5.2 Fördelning av vindstyrkor från alla riktningar 1961-2004 i Falsterbo och Hanö.

För att ytterligare visa likheten mellan vindserierna från de två orterna har vindregistreringar för samma tillfälle jämförts. Figur 5.3 visar frekvensen av skillnaden i samtidiga vindstyrkor mellan Falsterbo och Hanö. Två serier finns representerade i figuren; en avseende alla registrerade vindar samt en avseende kulingvindar (>13 m/s). För båda serierna gäller att över 80 % av vindarna från de

två orterna skiljer sig mindre än 4 m/s. Tittar man endast på vindar som skiljer sig mellan 0 och 1 m/s tenderar serien för kulingvindar uppnå en högre frekvens (45 %) än serien för alla vindar (35%).



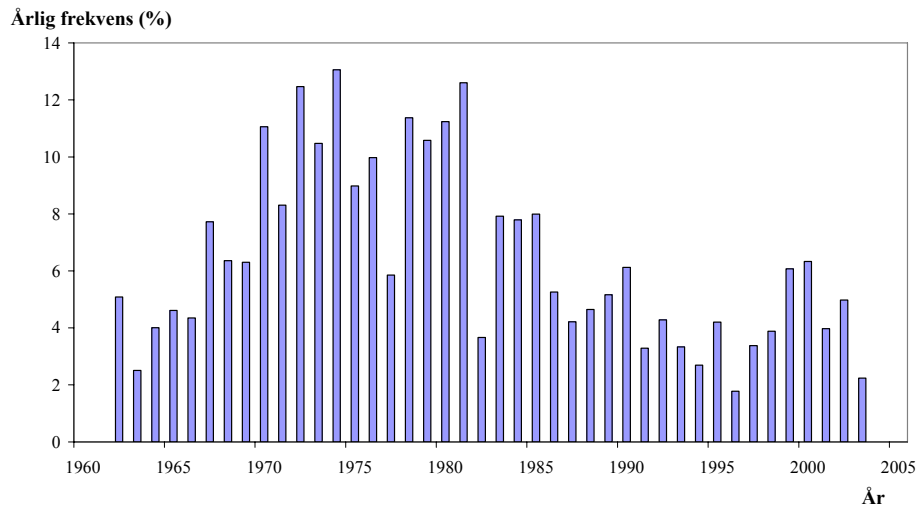
Figur 5.3 Frekvensen av skillnaden på samtida vindstyrkor i Hanö och Falsterbo avseende alla vindar och kulingvindar (>13 m/s) under perioden 1961-2004. Serien för alla vindar bygger på 113 556 registreringar. Motsvarande siffra för kulingvindar är 2 947.



Figur 5.4 Fördelning av alla vindstyrkor i Falsterbo 1961-2004.

Fördelningen av alla vindstyrkor i Falsterbo, 1961-2004, åskådliggörs i Figur 5.4. Utifrån dessa data kan en medelvind för hela perioden beräknas till 6.8 m/s. Stiltje råder under knappt 2.0 % av tiden och den maximala vindstyrkan är uppmätt till 28 m/s.

För analys av förändringar av vindstyrkor ur ett längre perspektiv, har den årliga frekvensen av kulingvindar beräknats och presenteras i Figur 5.5. Antalet kulingtillfällen har varit markant högre mellan åren 1965-1985. Mätserien verkar dock vara för kort för att kunna avgöra om någon trend existerar. Det finns ingen tendens att vindstyrkan har tilltagit under perioden 1962-2004.



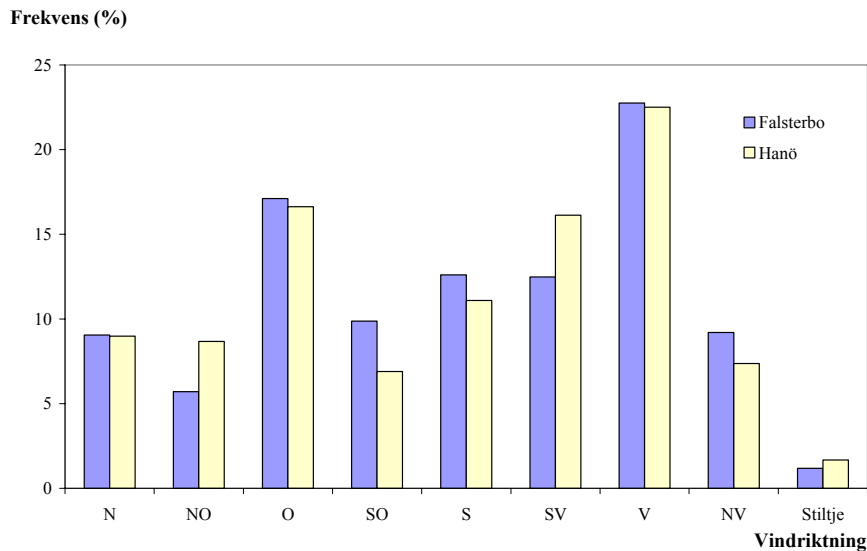
Figur 5.5 Årlig frekvens av kulingvindar i Falsterbo 1961-2004

5.4 Vindriktning

En jämförelse avseende vindriktningar mellan de två mätserier från Falsterbo och Hanö har gjorts. Figur 5.6 visar fördelningen mellan de två orterna. För bättre översikt har indelningen gjorts i åtta vindriktningar. Även om avvikelser förekommer så kan stora likheter ses mellan mätserierna. Västliga vindar dominerar medan vindar från de nordliga riktningarna är klart färre. Denna fördelning kan förklaras med att vindar från norr färdas över kuperat land jämfört med de från söder, som rör sig ohindrat över öppet vatten.

En analys av samtidiga vindriktningar från de två orterna åskådliggörs i Figur 5.7. Här har jämförelse gjorts av sektorer. En sektor täcker in 22.5° , se Figur 5.1. En skillnad på en sektor innebär alltså att två samtidiga observationer skiljer sig mellan $0 - 45^\circ$. Två serier presenteras i Figur 5.7 en för alla vindar och en för

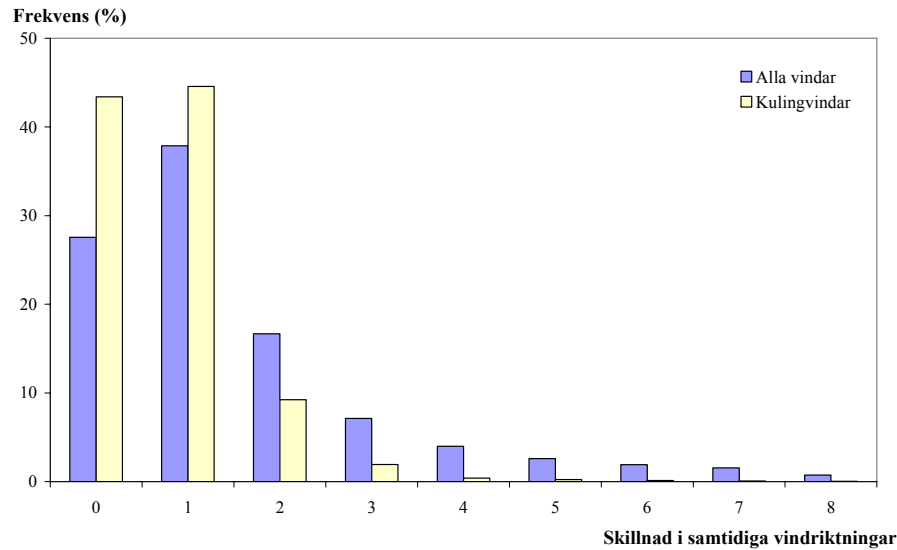
kulingvindar (>13 m/s). För serien med alla vindar observeras att 75 % av vindarna kommer från samma sektor eller skiljer på max en sektor. Motsvarande siffra för kulingvindarna ligger på 90 %. Starkare, samtidiga vindar tenderar alltså inneha samma vindriktning i Falsterbo och Hanö oftare än de svagare.



Figur 5.6 Fördelning av samtliga observerade vindriktningar i Falsterbo och Hanö 1961-2004.

Vindmätarens placering är också av stor betydelse. Vindmätarna är normalt placerade så att de ger bäst resultat för vindar som kommer från havet, eftersom dessa vindar oftast är av större vikt. I denna studie har endast vindar ifrån sydliga riktningar tagits i beaktning, eftersom dessa kommer till användning vid beräkning av våghöjder och inga våghöjder genereras vid nordliga vindar.

Även riktningsanalysen visar stora likheter vilket styrker antagandet om att dessa mätserier är en god beskrivning av vindklimatet i södra Östersjön. Eftersom Falsterbodatan direkt relaterar till en vind på tio meter kommer dessa att användas för att beräkna våghöjder och uppspolningshöjder vid Ystadkusten. Dessutom är förutsättningarna i Falsterbo mer lika de som råder i Ystad med tanke på kustens orientering.

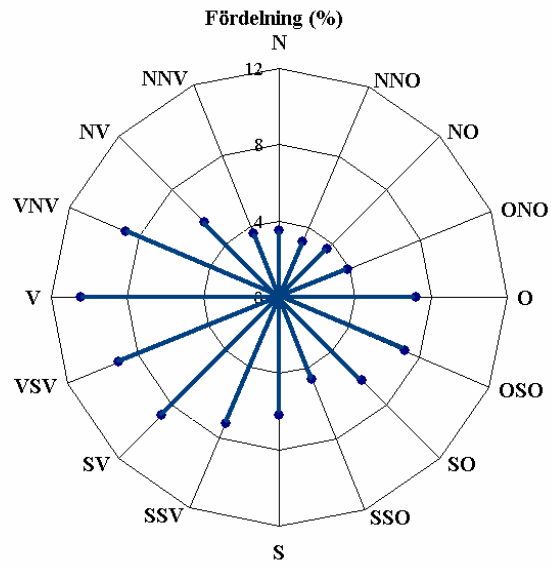


Figur 5.7 Frekvensen av skillnaden på vindriktningar vid samtidiga vindregistreringar i Falsterbo och Hanö 1961-2004. Serien för alla vindar bygger på 113 556 registreringar. Motsvarande siffra för kulingvindar (>13 m/s) är 2 947.

I Figur 5.8 ges en mer detaljerad beskrivning av vindriktningarna i Falsterbo. Figuren visar att vindar från SV till VNV är dominerande och vindar från de nordliga väderstrecken är mycket färre till antalet. En vidare analys av hur vindriktningar varierar med tiden visar att variationen från år till år är relativt liten (ej i figur). Det finns således inte någon tendens till att vindriktningarna förändras med tiden.

I Appendix V redovisas även hur vindstyrkorna varierar med vindriktning i Falsterbo.

Vindarna kommer att användas för att simulera vågklimatet utanför Ystads Sandskog.



Figur 5.8 Fördelning av alla vindriktningar i Falsterbo 1961-2004.

6 Vågklimat

För att få en uppfattning om havets inverkan på kuststräckan vid Ystad är en bestämning av vågklimatet av största vikt. Genom en uppskattning av våghöjder kan slutsatser göras gällande uppspolning, kusterosion och sedimenttransport.

6.1 Vågor på djupt vatten

Vågornas egenskaper bestäms huvudsakligen av:

- Vindarnas styrka, riktning och varaktighet
- Stryklängden, den sträcka över vilket vindarna från en riktning rör sig över vatten
- Vattendjup över vilket vågorna färdas

Vågor genereras när vindar blåser över en vattenyta. Vindarna bildar skjuvspänningar som fortplantas ner i vattnet som då sätts i rörelse. Vid en konstant vind, under en mycket lång tid, över en lång stryklängd ökar energin i vågorna successivt tills ett maximum uppnås. Detta jämviktstillstånd kallas fullt utvecklade sjö (FUS). Om våghöjden inte längre ökar, trots att det fortfarande blåser och FUS ännu inte uppnåtts, sägs stryklängden vara begränsande. Om det slutar blåsa medan våghöjden fortfarande ökar, är varaktigheten begränsande.

Begreppet ”djupvattenvåg” beskriver en våg som rör sig på ett sådant djup att interaktion med botten inte förekommer. Detta antas ske när vattendjupet är större än halva våglängden. När vågen närmar sig grundare vatten sker en interaktion med botten, vilket medför att vågens egenskaper förändras.

Vid bestämning av vågkaraktistika utifrån vind har våghöjd, period och våglängd beräknats enligt SPM (US Army Corps Of Engineers, 1984). Formler och tillvägagångssätt redovisas i Appendix VI.

Eftersom vågens egenskaper är direkt beroende av vindstyrkan, skulle en plötslig förändring av vinden innebära en förändring av vågens egenskaper. När det har blåst från samma riktning under en längre tid och det sker en förändring i vindstyrkan, bevaras energin från föregående vindtillfälle i vågen. Om vindstyrkan tilltar har vågen redan en viss energi som fortsätter att öka. På samma sätt fås en avklingande effekt om vindstyrkan avtar. I denna studie har två metoder använts för att kunna avgöra hur denna ackumulation respektive avklingning av energi bäst kan beskrivas. Beräkningsmetodiken för metoderna redovisas i Appendix VI.

Metod 1 bygger på att all energi i vågen bevaras från föregående vindtillfälle. Denna metod utgår ifrån SPM:s beräkningsmetodik, där den gamla vindstyrkan U_1

och varaktigheten t_1 , räknas om till den nya vindstyrkan U_2 med en motsvarande varaktighet t_2 genom en energibalans. Den gamla vinden summeras med den nya vinden och vågens nya egenskaper beräknas. Denna metod tar enbart hänsyn till ackumulation.

Metod 2 är en matematisk metod som genom en utvecklingsfunktion beskriver hur våghöjden förändras med tiden utifrån tidigare våghöjd, H_{in} , ny varaktighet t , samt ett jämviktstillstånd, H_{eq} , som beror på det nya vindtillfället. Denna metod bygger på en anpassning till SPM:s vågutveckling och kan användas för beräkning av både ackumulation och avklingning.

6.2 Vågklimat i södra Östersjön

Vid vågberäkningarna har vinddata från Falsterbo använts, eftersom dessa data anses vara representativa för södra Östersjön, se kapitel 5.4. Dataserien sträcker sig över en 45-årsperiod, 1961-2004, vilket omfattar drygt 106 000 mättillfällen.

De aktuella stryklängderna för Ystadbukten har mätts in med hjälp av kartprogrammet *Microsoft MapPoint 2004 Europe* och åskådliggörs i Figur 6.1 och Tabell 6.1 för olika kompassriktningar. Varje stryklängd har förkortats med tre kilometer, för att undvika de grundaste partierna längs kusten där generering av vågor är försumbar. Tre kilometer förklaras med att det enligt sjökortet är grunt 1 – 2 km från kusten på vardera sidor av Östersjön. Det är endast kompassriktningar från Ö – V i sydlig riktning som har stryklängder och därmed är det bara under tillfällen när det blåser från dessa riktningar som vågor genereras. Vattendjupet har angetts som ett medelvattendjup för respektive stryklängd. Medelvattendjupet har uppskattats utifrån sjökort över Östersjön (Larson *et al*, 1992).



Figur 6.1 Stryklängder för olika kompassriktningar utanför Ystads kust.

Tabell 6.1 Aktuella stryklängder och medelvattendjup för olika kompassriktningar utanför Ystads kust

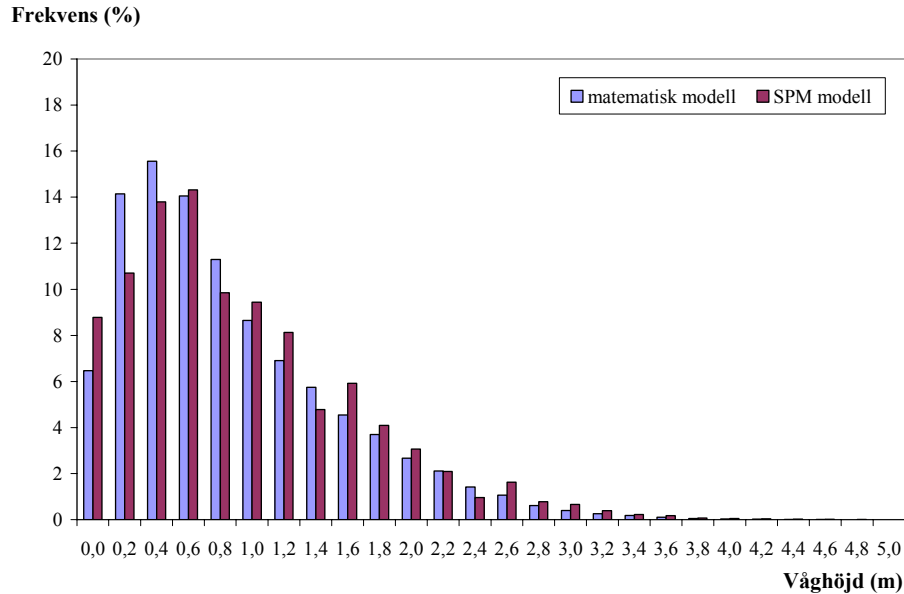
Kompassriktning	Stryklängd (km)	Vattendjup (m)
N	-	-
NNO	-	-
NO	-	-
ONO	-	-
O	10	20
OSO	58	30
SO	179	35
SSO	160	25
S	140	35
SSV	85	45
SV	191	25
VSV	104	30
V	15	15
VNV	-	-
NV	-	-
NNV	-	-

Eftersom det inte föreligger några mätningar av våghöjder i området har en enkel modell använts för våggenerering. Modellen som tidigare har använts för vågberäkningar i Lomma (Brännlund *et al*, 2005) har modifierats och anpassats till de förhållanden som råder utanför Ystadkusten. En stor skillnad mellan Lomma och Ystad är att stryklängden i Lomma nästan uteslutande är den begränsande faktorn, vilket inte är fallet i Ystad. Den modifierade modellen tar hänsyn till ackumulation och avklingning av vågor, när man har en tilltagande eller avtagande vind från samma riktning för flera påföljande mätobservationer, enligt de två metoderna som diskuterats ovan.

Eftersom en förändring i vindriktning mellan två påföljande vindtillfällen ofta är försumbar har ingen hänsyn tagits till denna avvikelse. Antaganden har gjorts att de kommer från samma riktning. Vinddata är uppmätt var tredje timme och under denna period ses vindstyrkan som konstant.

Beräkningar har gjorts både med och utan hänsyn till ackumulation, i rapporten presenteras enbart resultat som bygger på beräkningar med ackumulation eftersom dessa anses vara mer rättvisande.

I Figur 6.2 jämförs resultatet för de två metoderna. Grafen visar den procentuella fördelningen av olika våghöjder, med 0.2 m upplösning, som uppstår från vindriktningar som anses generera vågor som rör sig in mot kusten, d.v.s. från öst till väst. Av det totala antalet mättillfällen blåser det ca 67 % från dessa riktningar. För övriga riktningar sätts våghöjden till noll.



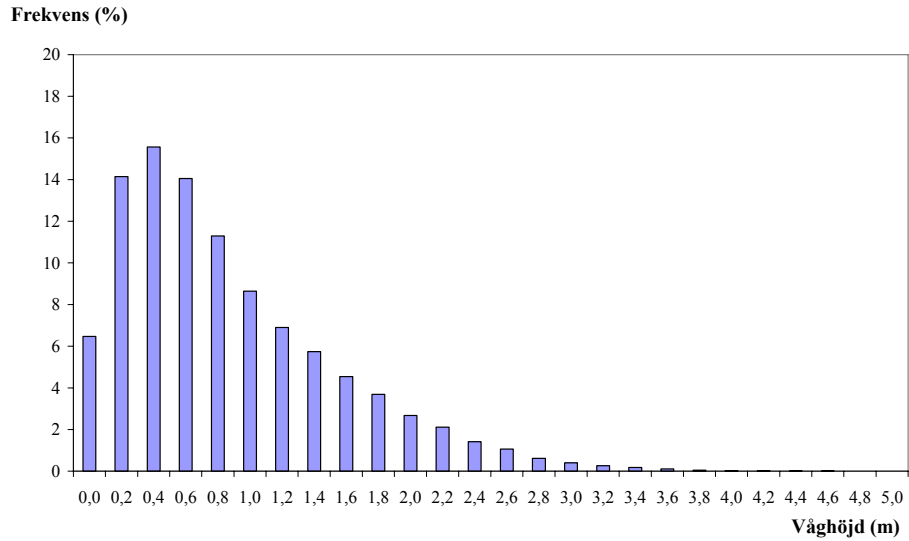
Figur 6.2 Procentuell fördelning av olika våghöjder utanför Ystad, för två olika vågmodeller under perioden 1961-2004.

Resultaten från de två olika modellerna är mycket lika. Den matematiska modellen av ackumulation och avklingning ger något högre förekomst av de mindre vågorna medan SPM-modellen ger något högre förekomst av större vågor. Detta stämmer väl överens med den anpassningskurva som beskriver den matematiska funktionen (Appendix VI). Utifrån detta ges indikation på att avklingningseffekten inte har någon större betydelse för resultatet, utan att skillnaden troligtvis främst är beroende av funktionsanpassningen.

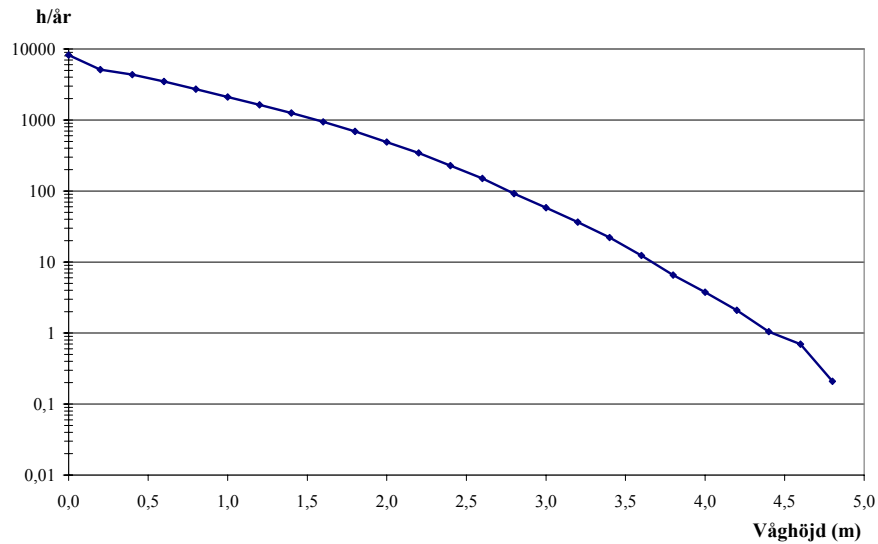
För vidare beräkningar och analys kommer de våghöjder som genererats med den matematiska modellen att användas. Dessa åskådliggörs separat i Figur 6.3. För mätperioden 1961-2004 beräknades ett medelvärde på alla våghöjder från de våg-genererande riktningarna till 0,87 m. Den maximala våghöjden på 4,8 m uppkom vid sydlig och västsydvästlig vind.

Genom en ackumulerad frekvens åskådliggörs i Figur 6.4 antal timmar per år som vågor uppnår en viss höjd eller högre.

Vid en analys av framtida scenarier är det intressant att undersöka maximala våghöjder som kan uppstå utanför Ystad. I Tabell 6.2 redovisas våghöjder som skulle kunna uppstå utanför Ystads kust om det blåser under en mycket lång period, d.v.s. så att stryklängden blir begränsande eller att FUS uppstår. Dessa våghöjder har alltså inte inträffat men skulle kunna uppstå vid stormtillfällen med mycket lång varaktighet.



Figur 6.3 Procentuell fördelning av genererade våghöjder från våggenererande vindriktningar utanför Ystad, för perioden 1961-2004.



Figur 6.4 Antal timmar/år som vågor uppnår en viss höjd eller högre, utanför Ystad

Tabell 6.2 Maximala våghöjder (m) som kan uppstå utanför Ystads kust när stryklängden är begränsande eller när fullt utvecklad sjö uppstår

Riktning	Vindstyrka (m/s)				
	15	20	25	30	35
O	0.98	1.39	1.81	2.23	2.67
OSO	2.23	3.09	3.95	4.79	5.61
SO	3.48	4.71	5.86	6.93	7.92
SSO	3.08	4.07	4.97	5.79	6.55
S	3.21	4.38	5.49	6.54	7.53
SSV	2.73	3.81	4.9	5.98	7.05
SV	3.22	4.23	5.13	5.94	6.68
VSV	2.8	3.82	4.8	5.73	6.61
V	1.16	1.62	2.08	2.55	3.00

6.3 Beräkning av kustnära klimat

När vågorna närmar sig kusten förändras deras karaktär på grund av interaktionen med botten. Vid uppgrundning bromsas vågen upp på grund av friktion mot botten. Vågen komprimeras genom att våglängden minskar medan våghöjden ökar. Om vågen närmar sig kusten under en vinkel kommer den att sträva efter att böja av vinkelrätt mot strandlinjen. Fenomenet kallas refraktion och orsakas av att olika delar av vågen befinner sig på olika djup och därmed har olika hastigheter. Även reflektion mot kusten samt s.k. diffraktion, innebärande att vågen strävar efter att breda ut sig mot skyddade områden, påverkar dess egenskaper. Beräkningar av förändringar i vågkaraktäristika på grunt vatten, som görs utifrån SPM (US Army Corps of Engineers, 1984), underlättas genom att anta raka parallella bottenkonturer.

Refraktionen beskrivs av Snell's lag, enligt,

$$\frac{\sin \alpha_1}{C_1} = \frac{\sin \alpha_2}{C_2} \quad (6.1)$$

där C och α är vågens hastighet respektive infallsvinkel för de studerade djupen.

Vidare är våglängden en direkt funktion av vattendjupet h , enligt,

$$L = L_0 \tanh\left(\frac{2\pi h}{L}\right) \quad (6.2)$$

där L_0 är våglängden på djupt vatten, medan L är våglängden på djupet h . När vågen transporteras in mot allt grundare vatten ökar våghöjden i förhållande till våglängden. Vågen blir brantare, mer instabil och slutligen kommer vågen att bryta. Vågbröttet är ett kritiskt ögonblick eftersom större delen av vågens energi då

frigörs. Förhållanden som råder vid vågbrott har stor betydelse för bl.a. sedimenttransport, uppspolning och erosion av kuststräckor. Vanligen antas att en våg bryter när djup och våghöjd förhåller sig enligt,

$$\gamma_b = \frac{h_b}{H_b} = 0.78 \quad (6.3)$$

där h_b är vattendjupet där vågen bryter och H_b är våghöjden när vågen bryter.

Om man utgår från en djupvattenvåg kan brytförhållanden beräknas genom att lösa Snell's lag och kontinuitetsekvationen för energiflödet i vågen (Larson *et al*, 2002) enligt,

$$H_0^2 C_{g0} \cos \alpha_0 = H_b^2 C_{gb} \cos \alpha_b \quad (6.4)$$

där C_g är vågornas grupphastighet på respektive djup.

Genom en kombination av ekvation 6.1 och 6.4, med en förutsättning att vinkeln för den brytande vågen är liten, ges ett approximativt uttryck för brytdjupet enligt:

$$\frac{h_b}{L_0} = \left(\left(\frac{H_0}{L_0} \right)^2 \frac{\cos \alpha_0}{\gamma_b^2 2\sqrt{2\pi}} \right)^{2/5} \quad (6.5)$$

Infallsvinkeln för den brytande vågen beräknas utifrån Snell's lag enligt:

$$\alpha_b = \arcsin \left(\sqrt{2\pi} \alpha_0 \sqrt{\frac{h_b}{L_0}} \right) \quad (6.6)$$

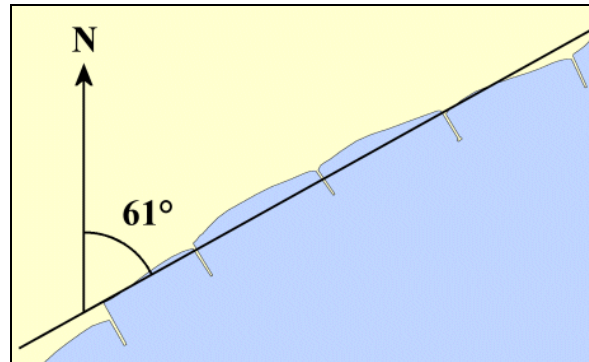
Brytvinkeln beskriver hur den brytande vågen förhåller sig till kustlinjen och är viktig för vidare analys av uppspolning och erosion av strandzonen.

6.4 Kustnära vågklimat i Ystadbukten

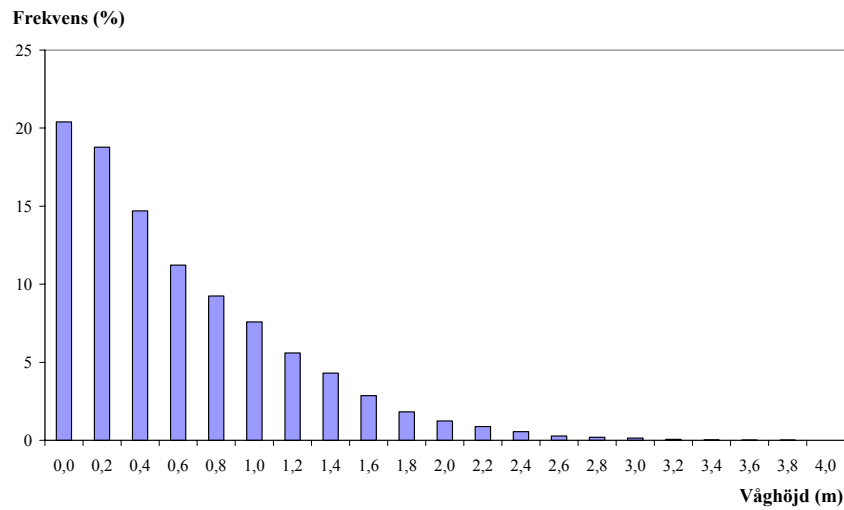
Ystad, som är beläget i Ystadbukten, ligger i lä för nordliga vindriktningar. Strandlinjen i Ystads Sandskog har en något konkav form med en ONO-, till SV-lig orientering. Detta medför att det bara är vindar som blåser från öst till sydväst som genererar vågor i den kustnära zonen. I denna studie har den studerade strandremsan generaliserats med en rät linje, enligt Figur 6.5, för att lättare kunna studera de förhållanden som råder. Linjen har en lutning på 61° mot norr.

Brytande våghöjder har beräknats och redovisas för de våggenererande riktningarna i Figur 6.6. Av alla vågor från Ö – VSV, vilka utgör 61 % av alla

mätvärden, är medelhöjden på en brytande våg 0.62 m och den största brytande våghöjden 4.6 m.



Figur 6.5 Kustens orientering i Ystads Sandskog. (Svensson, 2005; modifierad)



Figur 6.6 Frekvens av brytande våghöjder från sydliga riktningar vid Ystadkusten för perioden 1961-2004.

7 Vattenstånd

Vattenståndet beskriver var havsytan befinner sig i förhållande till angränsande landmassor och bestäms av en rad olika faktorer som ständigt förändras. Vattenståndet är en av de viktiga parametrar som styr uppspolning samt klitterosion och analyseras därför i detalj i detta kapitel.

7.1 Vattenståndsfluktuationer

Fluktuationer i vattenståndet orsakas av flera faktorer. Tidsmässigt rör det sig om både långvariga och kortvariga förändringar. Fluktuationerna beror dels på förändringar i vattnets egenskaper, såsom densitet och saltinnehåll, dels på omgivande omständigheter, såsom vindar, tektoniska förändringar, förändringar i bottenpografien, och masstransporter. Chao (2002) har delat upp vattenstånds-förändringar i fyra huvudsakliga kategorier:

- Volymförändringar:** Orsakas av termiska variationer och densitetsskillnader i det vertikala planet. Det är främst vid interaktionen mellan luft och vatten som den termiska förändringen sker men även på grund av oceaniska strömmar såsom den nord-atlantiska strömmen.
- Massförändringar:** Förändringar som orsakas av olika geofysiska och hydrologiska processer som t.ex. av polarisens och glaciala volymförändringar, snösmältningar och nederbörd.
- Bassängförändringar:** Förändringar som uppstår på grund av den aktivitet som pågår i kontinentalplattorna, den postglaciala återhämtningen och mindre lokala förändringar som bottensedimentering och kusterosion. Påverkar medelvattenförändringen.
- Dynamiska förändr.:** Orsakas av yttre krafter, som vågor, tidvatten, strömmar som uppstår på grund av vindar, variationer i lufttrycket och variationer på geoiden.

Av dessa svarar de dynamiska förändringarna för den kortsiktiga variationen medan de övriga sker mycket gradvis över långa tidsperioder.

7.2 Tillgängliga vattenståndsdata

För analys av vattenståndet i Ystad har en mätserie från Simrishamn, en mätserie från Skanör och två mätserier från Ystad använts. Vattenståndsdatan har tillhandahållits från SMHI och Ystads Hamnkontor.

Den längsta serien från Ystad sträcker sig från 1887-1986 och består av dagliga min-, max- och medelvärden. Den kortare Ystadserien (1996-2004) innefattar observationer 1 gång/tim. För vidare analys av uppspolning och klittererosion behövs längre och mer detaljerade vattenståndsserier, varför även serierna från Skanör (1992-2004) och Simrishamn (1982-2004) med observationer 1 gång/tim analyseras

Mätningarna från de olika stationerna har gjorts utifrån lokala referensnivåer. Inför analysen av vattenstånden har en korrigering gjorts så att alla serier utgår från samma referensnivå. I denna studie har RH70 valts, som är ett rikstäckande höjdreferenssystem. De korrigeringar som gjorts för respektive serie redovisas i Tabell 7.1.

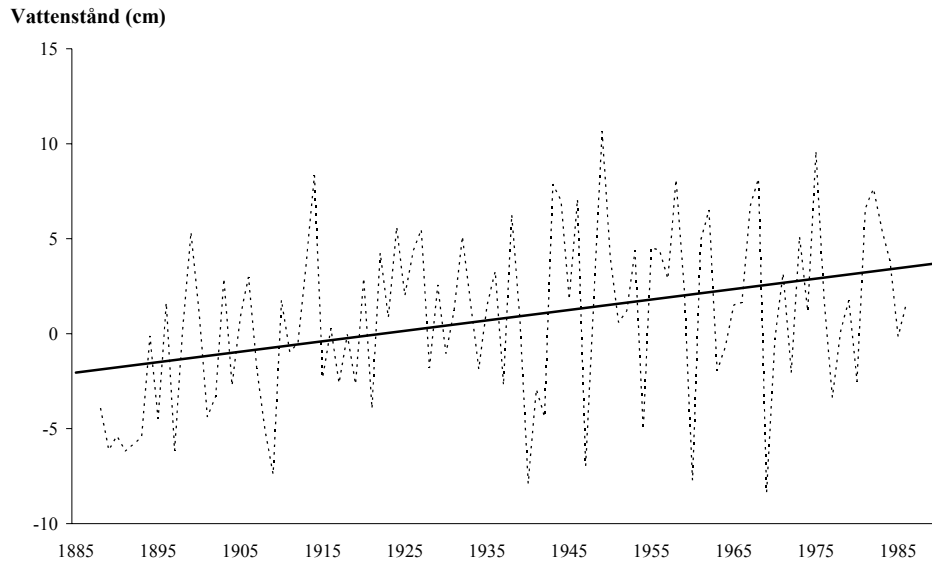
Tabell 7.1 En översikt av korrigeringsfaktorer (cm) från lokalt höjdsystem till RH70, för olika orter.

Mätstation	Ort	Korrigering för RH70
SMHI	Ystad	-199
	Simrishamn	-760
	Skanör	-1838
Ystad Hamn	Ystad	+8

Liksom för extrema vindstyrkor återfinns extrema vattenstånd oftast under vinterhalvåret. För att undvika en uppdelning av en stormperiod vid årsskiftet enligt kalenderår används i denna studie, såsom för vindanalysen, en årsindelning enligt klimatår, d.v.s. en årsindelning som sträcker sig mellan juli och juni. Se Appendix III för vidare resonemang.

7.3 Vattenståndsförändringar 1887-1986

Vattenståndsdatan som sträcker sig från 1887 till 1986 från Ystad, åskådliggörs i Figur 7.1 och visar hur årsmedelvärdet varierar över perioden. Utifrån mätdatan har en linjär trend applicerats. Enligt trenden ökar medelvattenståndet med 0.549 mm/år. Det årliga medelvattenståndet varierade under perioden mellan -8 och +13.7 cm i förhållande till det totala medelvärdet för hela perioden.



Figur 7.1 Årsmedelvärde för vattenståndet i Ystad. Data uppmätta mellan 1887 och 1986. Den heldragna linjära trenden visar en genomsnittlig vattennivåhöjning på 0.549 mm/år.

7.4 Vattenstånd i Simrishamn, Skanör och Ystad

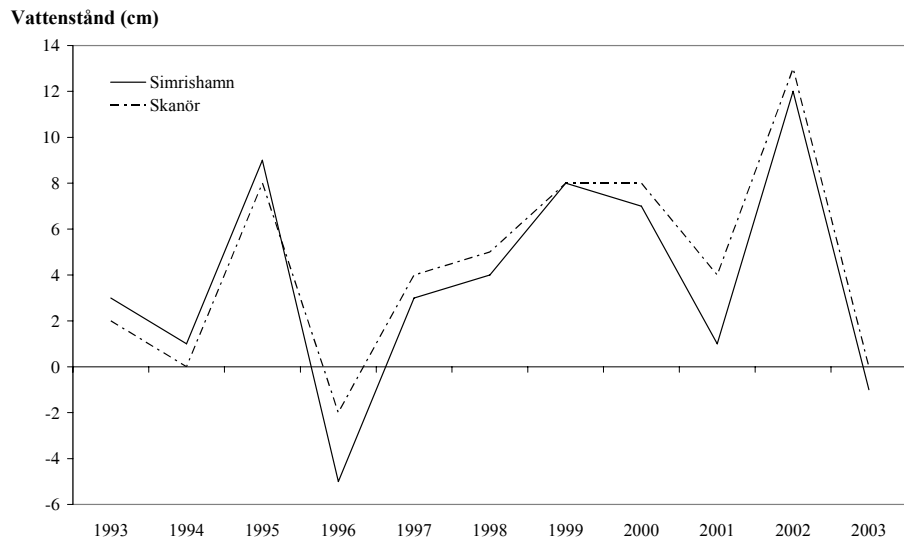
SMHI lade ner sin mätstation i Ystad 1986. För att kunna se de senaste decenniernas förändringar i vattenståndet har därför serierna från Simrishamn och Skanör analyserats.

Figur 7.2 visar en jämförelse av årsmedelvattnet för Simrishamn och Skanör, där tydliga likheter kan ses. Eftersom Ystad geografiskt ligger mellan Skanör och Simrishamn görs antagandet att vattenståndet för Ystad är likvärdigt.

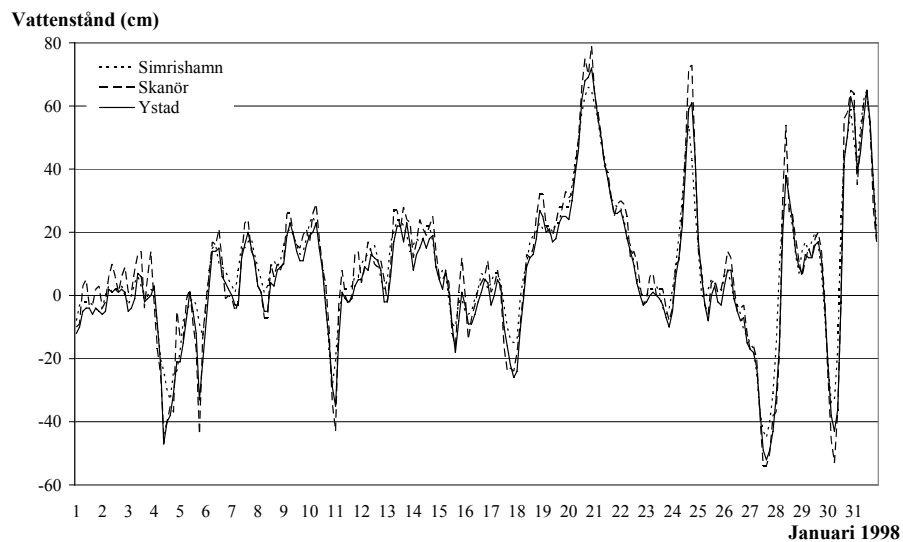
För att avgöra vilken av Skanör och Simrishamn bäst kan representera vattenståndet i Ystad har en kortare serie, tillhandahållen av Ystads Hamnkontor, använts. Figur 7.3 och Figur 7.4 visar samtidiga vattenstånd registrerade vart tredje timme, för två godtyckliga månader. Jämförelserna har gjorts dels för en månad under vinterhalvåret och dels för en under sommarhalvåret. Ett villkor har även varit att serierna ska vara kompletta för dessa två månader.

Likheterna för vattenståndet i de tre städerna är tydlig. Vid extrema vattenstånd tenderar vattenståndet i Skanör vara av extremare karaktär än i Ystad och Simrishamn. Simrishamn och Ystad är de serier som följer varandra bäst, varför antagande görs att vattenståndet för Simrishamn bäst representerar vattenståndet i Ystad. Sålunda kommer den fortsatta analysen av tillgängliga vattenståndsdata

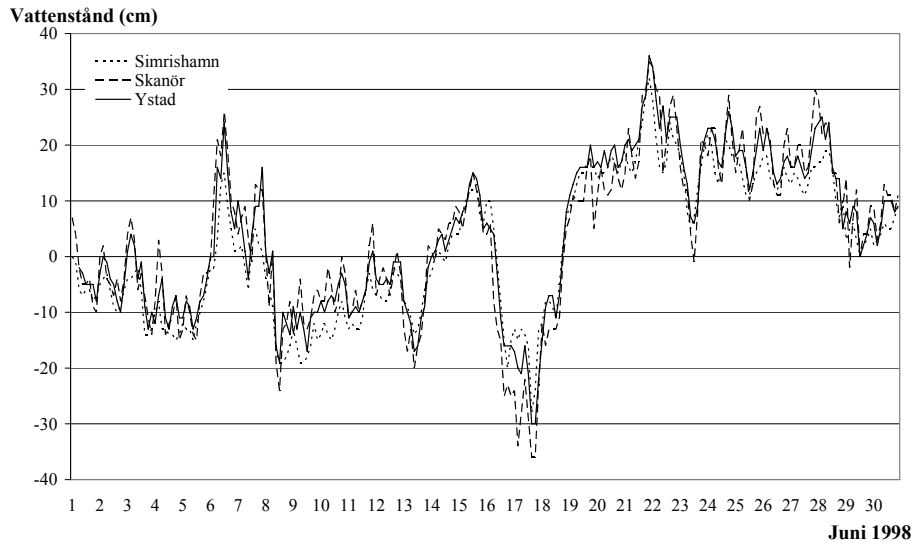
ifrån Ystad 1887 till 1986 att kompletteras med data ifrån Simrishamn 1987 till 2004.



Figur 7.2 En jämförelse av årsmedelvatten mellan Simrishamn och Skanör. Största skillnaden är 2.67cm (2001).



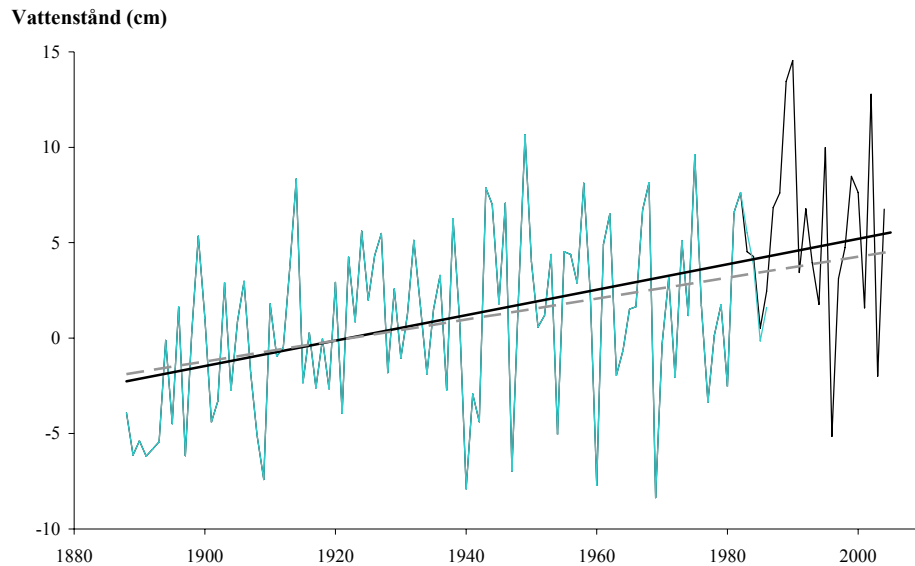
Figur 7.3 Samtidiga vattenstånd i Ystad, Simrishamn och Skanör under december 1998. Registreringar gjorda vart tredje timme.



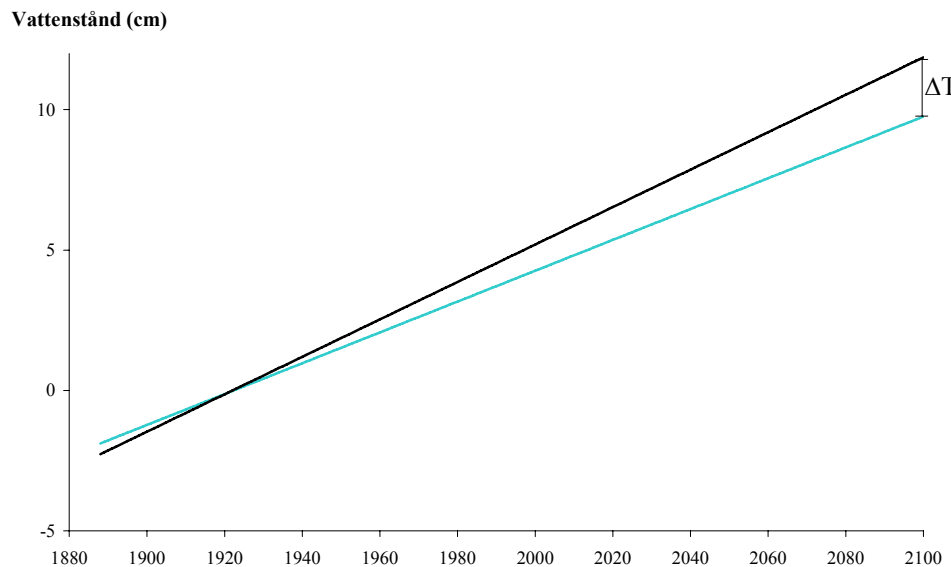
Figur 7.4 Samtidiga vattenstånd i Ystad, Simrishamn och Skanör under juni 1998. Registreringar gjorda vart tredje timme.

7.5 Förlängning av 100-årsserien

Med utgångspunkt från hypotesen att vattenståndet i Simrishamn är representativt för Ystad kan den befintliga 100-årsserien förlängas. Figur 7.5 visar att skillnaden mellan trenden för den ursprungliga och den förlängda serien är försumbar. Om de olika trenderna skulle hålla en konstant ökning fram till år 2100 skulle medelvattenståndet år 2100 skilja på 2.11 cm, se Figur 7.6. Detta anses vara en marginell skillnad. Vattenståndsökningen uppgår enligt Figur 7.5 till 0.667 mm/år. Denna trend kommer att ligga till grund för extrapolering av medelvattenståndet fram till år 2100 i kapitel 11.



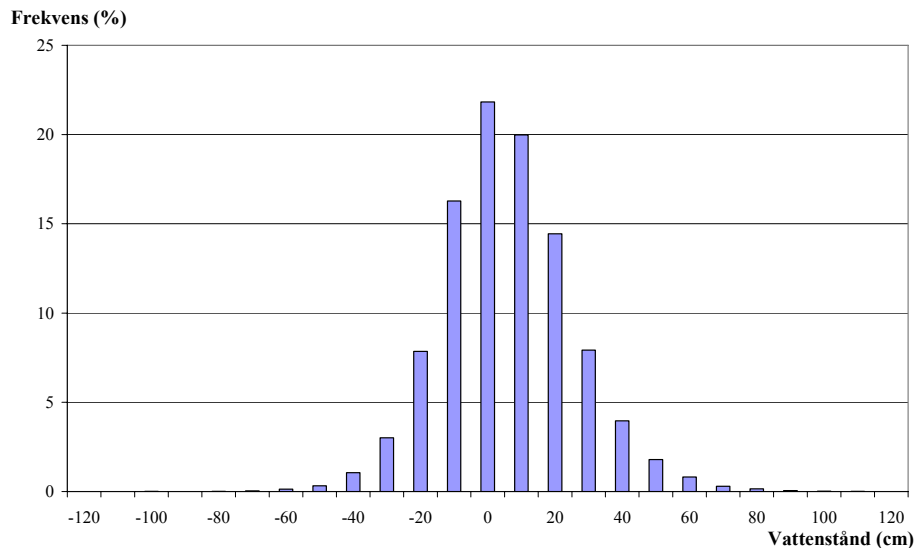
Figur 7.5 Den förlängda Ystadserien. Simrishamnsserien, den mörka delen av grafen beskriver Ystads vattenstånd väl enligt överlappningsperioden, 1982-1986. Enligt den nya linjära trenden (heldragen linje) ökar vattenytan med 0.667 mm/år, vilket skiljer sig något från Ystads originaltrend (streckad linje), som ökar med 0.549 mm/år.



Figur 7.6 Jämförelse mellan trenden av årsmedelvattenstånd enligt den förlängda serien och den enligt grundserien, när den extrapoleras till år 2100. Skillnad mellan de olika årsmedelvattnen, ΔT , år 2100 är 2.11 cm.

7.6 Sannolikhet för olika vattenstånd

För att se hur vanliga olika vattenstånd är kan man plotta ett frekvensdiagram. Ett sådant diagram visar även sannolikheten för extremvärden. Frekvensen av uppmätta vattenstånd i Simrishamn under perioden 1983-2004 framgår av Figur 7.7 och Tabell 7.2. Frekvensfördelningen är relativt symmetrisk, d.v.s. med högsta värde nära medelvärdet, med största sannolikhet för vattenstånd på 0 cm, vilken refererar till medelvattenytan. Vattenstånd över 50 cm har förekommit vid 3.1 % av alla mättillfällen, emedan det för vattenstånd lägre än -50 cm har förekommit vid 0.5 % av alla mättillfällen.



Figur 7.7 Frekvens av uppmätta vattenstånd i Simrishamn 1983-2004. Antal mätvärden: 192 863.

Tabell 7.2 Relativ frekvens (%) av uppmätta vattenstånd i Simrishamn 1983-2004. Antal mätvärden: 192 863.

Vattenstånd	Frekvens	Vattenstånd	Frekvens
-120	0.001	0	21.830
-110	0.003	10	19.978
-100	0.005	20	14.447
-90	0.002	30	7.925
-80	0.009	40	3.963
-70	0.042	50	1.792
-60	0.132	60	0.823
-50	0.324	70	0.294
-40	1.058	80	0.148
-30	3.014	90	0.055
-20	7.852	100	0.018
-10	16.277	110	0.007
0	21.830	120	0.001

7.7 Samverkan mellan vind och vattenstånd

När vattenytan utsätts för vind uppstår friktion mellan vind och vattenytan, varpå ytliga vattenströmmar uppstår. Vid konstant vindhastighet kan man i allmänhet förutsätta att de genererade havsströmmarna har en hastighet på 1-3 % av vindstyrkan. Dessa strömmar påverkar vattenståndet med några centimeters skillnad på 100-tals eller 1000-tals kilometers avstånd. (Segar, 1998)

Tabell 7.3 Antal observationer av vattenstånd vid olika vindriktningar samt vid stiltje (STL) baserad på totalt 66 481 mättillfällen under perioden 1983-2004.

Vattenstånd (cm)	N	NO	O	SO	S	SV	V	NV	STL
<-120	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-110	0	0	0	0	0	1	0	0	0
-100	0	0	0	0	0	1	5	0	0
-90	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-80	0	0	0	0	0	1	7	0	0
-70	0	0	0	0	0	8	16	3	0
-60	1	0	0	0	1	35	39	4	1
-50	12	1	1	2	18	73	94	10	5
-40	24	31	47	44	87	211	206	38	12
-30	102	86	148	214	255	492	524	120	38
-20	275	235	663	714	653	1014	1074	436	77
-10	732	498	1532	1431	1305	1964	2088	1074	208
0	1046	764	1987	1734	1777	2591	2796	1607	248
10	1099	783	1752	1511	1549	2268	2499	1576	286
20	890	673	1123	1096	1148	1489	1732	1296	190
30	629	551	536	489	597	825	851	734	94
40	422	330	255	179	222	354	393	400	42
50	234	183	97	64	98	125	171	203	19
60	160	103	40	30	22	33	53	86	9
70	74	33	8	11	9	8	22	34	3
80	33	27	1	2	3	3	7	17	0
90	20	6	0	0	0	1	2	7	0
100	5	2	0	0	0	0	1	4	0
110	3	0	0	0	0	0	0	1	0
>120	0	0	0	0	0	0	0	0	0

7.7.1 Samtidiga vindriktningar och vattenstånd i Ystad

Vid analys av samverkan mellan vind och vattenstånd har vindserien från Falsterbo och vattenståndsserien från Simrishamn använts. Den hopslagna serien sträcker sig från 1983 till 2004 och innehåller 66 481 mätvärden uppmätta var 3:e timme. Tabell 7.3 visar vattenståndet vid olika vindriktningar. Det framgår tydligt att låga vattenstånd uppstår vid sydvästliga och västliga vindar och att höga vattenstånd uppstår vid nordvästliga, nordliga och nordostliga vindriktningar.

7.7.2 Sannolikhet för höga vattenstånd och starka vindar

Vindar som genererar vågor kommer från riktningar inom den nedre kompassdelen, det vill säga östliga-, sydliga- och västliga vindar. En analys har gjorts för att se hur frekventa de sydliga kuling- och stormvindarna är och hur höga vattenstånden är vid sådana tillfällen.

Antalet mätvärden för vågenererande vindar uppgår till 42 469 stycken uppmätta vart 3:e timme mellan åren 1983 och 2004. En översikt av antalet uppmätta värden för vågenererande kulingvindar och stormvindar ges av Tabell 7.4 respektive Tabell 7.5. Vid kulingvindar och starkare vindar ligger vattenståndet mellan -110 cm och +80 cm. Vid stormvindar ligger det mellan -40 cm och +40 cm.

7.8 Samtidiga höga vågor och högt vattenstånd

Ett värsta scenario som skulle kunna uppstå, ur erosionssynpunkt, vore om nordliga vindriktningar får bygga upp ett högt vattenstånd i södra Östersjön varpå vindarna slår om till sydliga riktningar när vågor genereras.

Den kombinerade vattenstånds- och vindserien innehåller totalt 64 130 mättillfällen mellan åren 1983 och 2004. Av dessa genereras vågor vid drygt 62 % av mättillfällena. För en översikt för samtidiga vågor och vattenstånd, se Appendix VII.

Den högsta uträknade vågen på djupt vatten, H_0 , uppgår till 4.8 m. Vid denna våghöjd är det största uppmätta vattenståndet +20 cm. Det högsta vattenståndet varvid märkbara vågor äger rum ligger på +100 cm. De högsta uträknade våghöjderna vid detta vattenstånd ligger på 0.8 m. Detta visar att höga vågor kombinerat med högt vattenstånd inte förekommer med hög frekvens. Oftast uppstår höga vågor vid vattenstånd runt 0 m, se Appendix VII.

Tabell 7.4 Antal uppmätta vattenstånd i Simrishamn med samtida vindar över 13m/s i Falsterbo 1983-2004. Endast våggenererande vindar presenteras.

Vattenstånd	O	SO	S	SV	V
<-110	0	0	0	0	0
-100	0	0	0	0	3
-90	0	0	0	0	0
-80	0	0	0	0	3
-70	0	0	0	1	3
-60	0	0	0	1	8
-50	0	0	0	4	15
-40	0	0	1	17	35
-30	0	1	5	39	49
-20	5	15	14	50	72
-10	12	14	15	74	84
0	16	22	33	73	84
10	19	23	29	51	70
20	18	23	29	39	30
30	21	12	12	23	29
40	18	5	8	12	13
50	6	4	3	6	8
60	5	1	2	2	5
70	0	0	1	0	3
80	0	0	1	0	0
>90	0	0	0	0	0
Totalt antal värden: 1299					

Tabell 7.5 Antal uppmätta vattenstånd i Simrishamn med samtida vindar över 20m/s i Falsterbo 1983-2004. Endast våggenererande vindar presenteras.

Vattenstånd	O	SO	S	SV	V
<-50	0	0	0	0	0
-40	0	0	0	1	2
-30	0	0	0	0	2
-20	1	0	0	0	5
-10	0	0	0	2	3
0	0	0	2	1	2
10	0	0	1	1	3
20	0	0	1	1	0
30	0	0	0	3	0
40	0	0	0	1	0
>50	0	0	0	0	0
Totalt antal värden: 32					

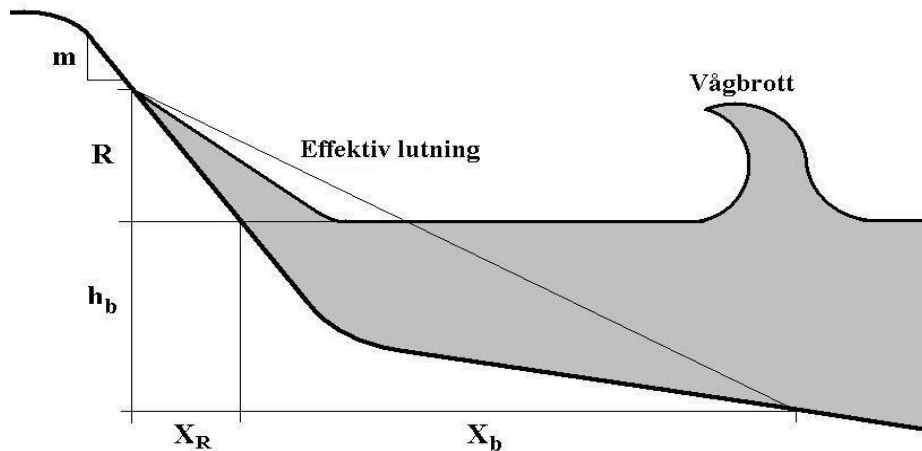
8 Uppspolning

När vågorna närmar sig kusten bromsas de upp, blir instabila och bryter. Efter vågbrott fortsätter vattenmassorna sin färd mot strandzonen. Om vågen har tillräcklig energi fortsätter den upp på stranden, vilket innebär risk för erosion och överspolning av klitter. Genom beräkningar av uppspolningshöjder ges en uppfattning om hur högt vågorna når upp på stranden och därmed hur stor risken är att klitterna blir överspolade och hur stor den direkta stranderosionen blir.

8.1 Beräkning av uppspolningshöjder

För att kunna göra tillförlitliga beräkningar på uppspolningshöjder behövs vetskap om inkommande vågor samt strandens och kustnära bottenens utformning. Vattenståndet är ytterligare en parameter som är avgörande för uppspolningshöjder. Ju högre vattenstånd, desto större är risken för höga uppspolningshöjder. I Ystad är dock risken för högt vattenstånd samtidigt med höga vågor liten, p.g.a. orienteringen av kuststräckan, se kapitel 7.8.

Flera metoder har utvecklats för uppspolningsberäkningar. Två av de mest använda är Hunts formel (1959), för regelbundna och likformiga vågor där endast lutningen på strandzonen tas i beaktning, och Savilles metod (1958) som tar hänsyn till lutning på både strandzon och den kustnära zonen (Mayer *et al*, 1990).



Figur 8.1 Definition av uppspolningshöjd och effektiv lutning, enligt Hunt och Saville.

Hunts formel tecknar,

$$\frac{R}{H_0} = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_0 / L_0}} \quad (8.1)$$

medan Savilles formel inkluderar en effektiv lutning som ges av,

$$\tan \beta_e = \frac{R + h_b}{X_R + X_b} \quad (8.2)$$

där R är den vertikala uppspolningshöjden, $\tan \beta$ lutningen på strandzonen, β_e effektiv lutning, X_R avståndet från strandlinje till uppspolningshöjden och X_b avståndet från vågbrytpunkten till strandlinjen.

Genom en kombination av Hunts och Savilles formel erhålls en analytisk ekvation, Mayer-Kriebels metod, som beskriver uppspolningshöjden, där hänsyn tas både till strandzonens och bottenens lutning,

$$R = \frac{m}{2} (X_b - \sqrt{H_0 L_0}) \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{4h_b \sqrt{H_0 L_0}}{m(X_b - \sqrt{H_0 L_0})^2}} \right) \quad (8.3)$$

där m är medellutningen i strandzonen från lugnvattenytan till maximal uppspolningshöjd, se Figur 8.1.

Dean (1967) utarbetade en metod som beskriver en strandprofil i jämvikt och som anger avståndet till strandlinjen från ett visst djup. Metoden bygger på antaganden om att bottenprofilen ställer in sig i ett jämviktsläge som beror på en parameter, A , enligt,

$$h = Ax^{2/3} \Leftrightarrow x = \left(\frac{h}{A} \right)^{3/2} \quad (8.4)$$

där h är aktuellt vattendjup och x är avståndet från djupet h till strandlinjen.

Parametern A är beroende av partikelfallhastigheten w och kan approximeras enligt,

$$A = 2.25 \left(\frac{w^2}{g} \right)^{1/3} \quad (8.5)$$

Fallhastigheten är i sin tur beroende av kornstorlek och vattentemperatur (Kriebel *et al*, 1991).

Vid laboratorieförsök som genomfördes av Mayer och Kriebel (1990) bevisades att Hunts formel, med avseende på strandzonens lutning, ger en grov och något överdimensionerande uppskattning av uppspolningshöjden. Bäst resultat erhöles då genom den kombinerade metoden av Hunts och Savilles formler.

8.2 Uppspolning vid Ystadkusten

Vid beräkning av uppspolningshöjder har simulerade vågdata, som bygger på vindar från Falsterbo använts, se kapitel 6.2 och 6.4. Uppspolningshöjder har beräknats dels med Hunts formel och dels med Hunts och Savilles kombinerade metod för att kunna göra en jämförelse och sedan dra slutsatser om vilken metod som beskriver uppspolningen i Ystad bäst.

Eftersom Hunts metod främst används i designsyfte, är denna något överdimensionerande. En orsak till denna överskattning är att ingen hänsyn tas till vågens infallsvinkel, θ . I denna studie eftersträvas att efterlikna en verklig situation, varför våghöjden, H_0 , har omräknats till en ekvivalent våghöjd (H'_0) som infaller vinkelrät mot kusten, genom att ta hänsyn till energiinnehållet i vågens komponent enligt:

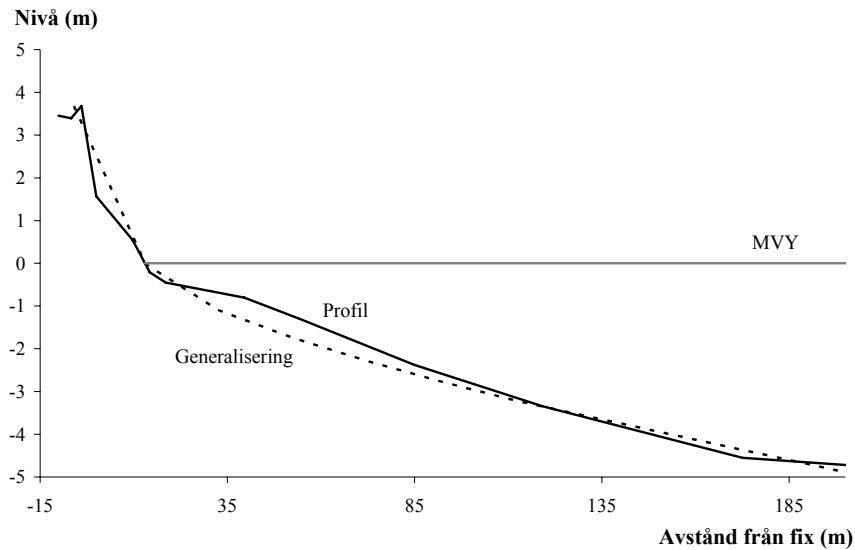
$$H'_0 = H_0 \sqrt{\cos \theta} \quad (8.6)$$

Även Mayer-Kriebels metod beräknas utifrån H'_0 .

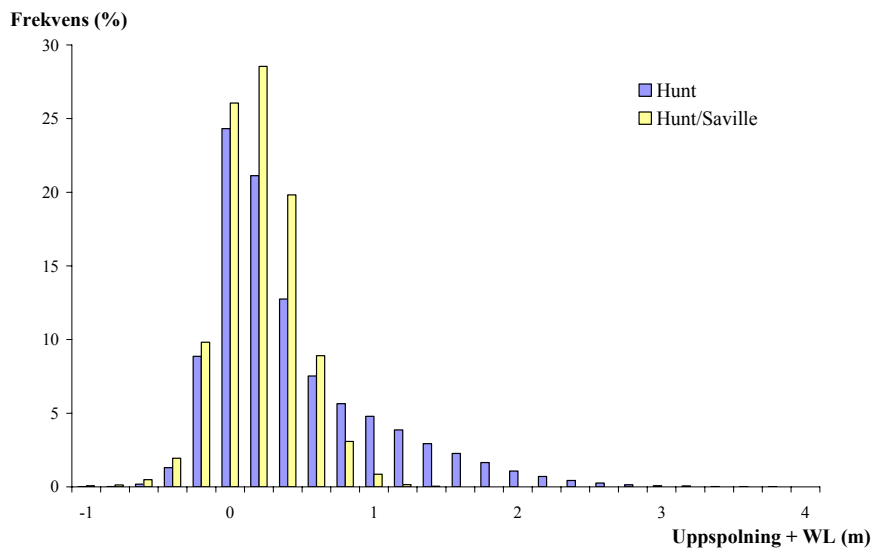
Sedan ett antal år tillbaka har det gjorts profilinmätningar längs kusten i Ystads Sandskog för bestämmande av sedimentbalansen i området (Hanson, 2004). Den senaste inmätningen gjordes i september 2004 och ligger nu till grund, tillsammans med profilinmätningar som gjorts 2005, för antaganden om rådande utformning av botten och kustzon. Eftersom kusten utanför sandskogen länge har varit utsatt för erosion och det idag finns ett antal erosionskydd i området, varierar både strandprofilerna och bottenprofilerna längs sträckan.

För att få en uppfattning om storleken på uppspolningen, har en profil på mitten av den aktuella kuststräckan valts ut och detaljstuderats, se Figur 8.2. Den generaliserade bottenprofilen har anpassats med hjälp av Deans metod med $A = 0.16$. A -värdet motsvarar en kornstorlek på 0.40 – 0.45 mm, vilket är rimligt för området. Strandzonen generaliseras med en rät linje med en lutning på 11.3°. Detta motsvarar ett $m = 0.20$, vilket i strandzonen ser ut att stämma väl överens med profilen. Den observerade lutningen är i överensstämmelse med typiska strandprofiler som består av sand (Larson, 2005).

Utifrån lutningen i strandzonen och på botten, kan uppspolningshöjder uppskattas. Genom att utnyttja Hunts metod samt Hunts och Savilles kombinerade metod, beräknades uppspolningshöjderna för perioden 1983-2004 med hänsyn till vattenståndet. Beräkningarna innefattar alla mätvärden, se Figur 8.3.



Figur 8.2 Schematisering av strandprofil i sandskogen. Nollnivån representerar medelvattenytan 2004, enligt RH70.



Figur 8.3 Frekvens av uppspolningshöjder mellan åren 1983-2004, utifrån Hunts metod och Hunts och Savilles kombinerade metod.

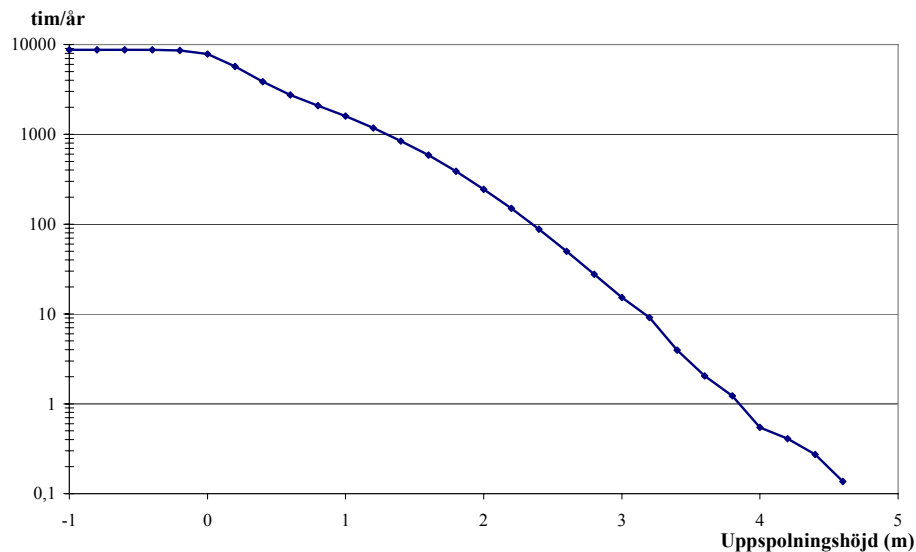
Resultaten från uppspolningsberäkningar visar för Hunts metod ett max på 4.6 m och min på -1.0 m. För den kombinerade metoden är max 2.4 m och min -1.0 m. Anledningen till negativa minimum är att inga vågor har förekommit utan enbart ett lågt vattenstånd.

Enligt Figur 8.3 är uppspolningen generellt mycket lägre för den kombinerade metoden än för Hunts metod. Den stora skillnaden beror på att bottenens lutning har en avgörande betydelse för den kombinerade metoden. Här erhålles värden som inte är rimliga. Efter en analys görs antaganden om att Hunts metod bättre beskriver uppspolningshöjderna i Ystadbukten. Dessa slutsatser dras efter analys av historik på hur högt uppspolningen har nått vid olika stormtillfällen samt efter fältstudier där strandprofilerna har studerats visuellt.

Vidare visar analysen att höga uppspolningshöjder i Ystad främst beror på höga vågor. För alla uppspolningshöjder över tre meter ligger vattenståndet runt nollnivån medan våghöjderna på djupt vatten varierar mellan 2.5 - 4.5 m.

I Figur 8.4 åskådliggörs antal timmar/år som uppspolningen uppnår en viss höjd eller högre, enligt Hunts metod. Uppspolningshöjd på 0 m sker vid 25% av alla simulerade tillfällen och 65% ligger över 0. Uppspolningshöjder över 2 m inträffar i genomsnitt 250 tim/år.

Uppspolningshöjderna ger en uppfattning om hur högt vattnet har nått de senaste 25 åren. Utifrån dessa resultat kan uppskattningar om klittererosion, framtida uppspolningar samt risk för överspolning göras.



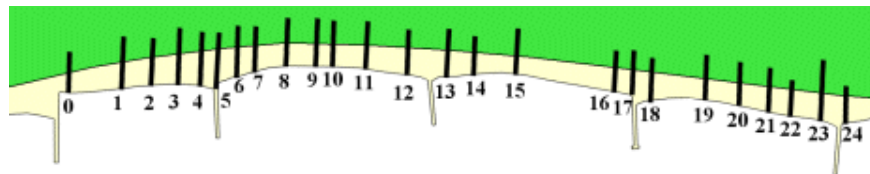
Figur 8.4 Antal timmar/år som uppspolningen i genomsnitt uppnår en viss höjd eller högre enligt simuleringar från Ystad 1983-2004.

8.3 Överspolning

Om uppspolningen skulle nå upp till högsta punkten på klittret sker en överspolning, vilket innebär att vatten tar sig in till bakomliggande terräng. Utifrån beräknade uppspolningshöjder, för perioden 1983 – 2004, har antalet tillfällen som överspolning har varit möjlig registrerats för var och en av de 25 inmätta profilerna. På så sätt har områden där risken för överspolningen är stor lokaliserats. I Tabell 8.1 redovisas antalet tillfällen som överspolning beräkningsmässigt har skett för profilerna. Profilerna åskådliggörs i Figur 8.5. För att knyta an till verkligheten har man vid konferensanläggningen Ystad Strandbad rapporterat om översvämningar i mitten på 80-talet (Nebrelius, 2005). Denna anläggning ligger precis i anslutning till profil 0. Djupare analyser för överspolningar vid denna profil har gjorts och beräkningar har visat att överspolningar skett med en högre frekvens under denna period jämfört med andra år, vilket ger antydningar på att beräkningarna som gjorts stämmer med verkligheten.

Tabell 8.1 Antalet tillfällen som överspolning har varit möjlig för inmätta profiler i Ystads Sandskog, 1983-2004. Värden inom parentes anger profiler försedda med stenskonung.

Profil	Antal	Profil	Antal	Profil	Antal	Profil	Antal	Profil	Antal
0	(45)	5	0	10	3	15	4	20	0
1	(0)	6	0	11	2	16	0	21	1
2	0	7	0	12	0	17	0	22	1
3	0	8	0	13	0	18	0	23	0
4	0	9	0	14	0	19	(0)	24	0



Figur 8.5 Översikt av läget för inmätta profiler i Ystads Sandskog.

Risken för överspolning är störst för profil 0. Denna profil karakteriseras av en kort strand framför ett brant klitter med högsta höjd på 3.2 m. Kombinationen av den korta stranden, den branta slutningen och klittrets höjd gör överspolningsrisken påtaglig. Idag har erosionsskydd i form av stenskonung placerats vid profilen, vilket förändrar situationen, men resultaten visar ändå att profilens utformning är kritisk vid uppspolning och överspolning.

Även vid profilerna 10, 11, 15, 21 och 22 (typprofil I enligt kapitel 4.2), finns risk för överspolning. Dessa profiler utmärks framförallt av en brant lutning, men även av en lägre höjd på klittret.

Intressant är att de profiler som är inmätta vid passager genom klitterna (profil 5, 18 och 24; typprofil III enligt kapitel 4.2), som karakteriseras av mycket låga maxhöjder och en liten strandlutning, inte löper någon risk för överspolning. Överspolningen måste därför vara mer beroende av släntlutningen än av höjden på klitterna i dessa fall.

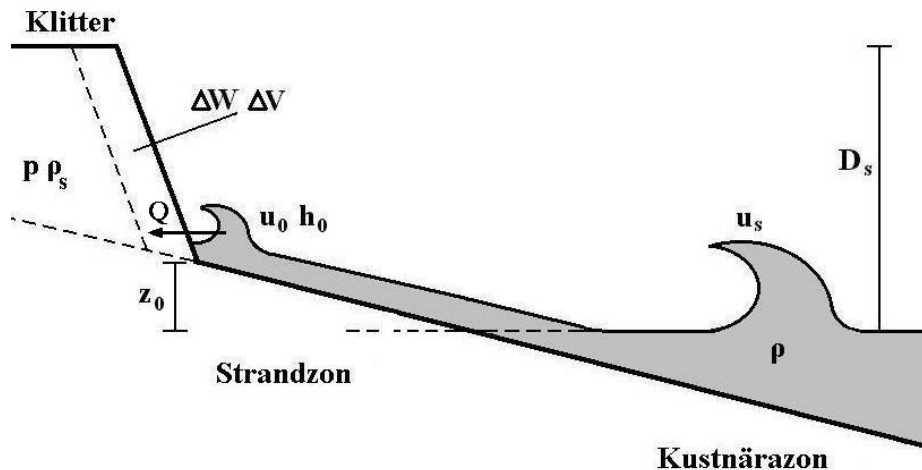
9 Erosion av klitter

När uppspolning sker i strandzonen uppstår tillfällen då vattenmassorna når upp till klitterna, vilket medför en direkt erosion av dessa. Ett kritiskt läge kan uppstå om erosionen pågår tillräckligt länge så att uppspolningen nöter igenom dynerna och ett brott uppstår. Detta medför risk för översvämning av bakomliggande terräng.

Syftet med denna analys är att kartlägga hur erosionen har fortskridit under de senaste åren, samt utifrån en analytisk modell simulera erosionens storlek. Utifrån modellen och de profilinmätningar som gjorts kommer även en uppskattning göras av vilka våghöjder och varaktigheter som krävs för att ett brott i klitterna ska uppstå. Ingen hänsyn tas till den återhämtning som sker när sediment transporteras tillbaka upp på klitterna från stranden med vindar.

9.1 Analytisk erosionsmodell

Vid beräkning av erosion i strandzonen har en analytisk modell (Larson *et al*, 2004) använts. Modellen beräknar hur stora volymer sediment som eroderas bort vid en viss uppspolning och varaktighet. I Appendix VIII redovisas härledningar av de formler som används i modellen. En förklaring till de parametrar som är aktuella vid klittererosion ges i Figur 9.1.



Figur 9.1 Definition av parametrar som har betydelse vid klittererosion

Modellen bygger på antaganden om att det råder ett linjärt samband mellan vikten på den eroderade volymen, ΔW , och kraften, Q , som är resultatet av den rörelsemängdsförändring som uppstår när vågpaketet sammanstöter med sanddynen.

Utifrån en given strandprofil med ett vertikalt avstånd från lugnvattenytan till foten av sanddynen, z_0 och kända sedimentegenskaper samt vetskap om den inkommande vågen kan erosionsprocessen beskrivas enligt,

$$\frac{dV}{dt} = -4C_S \frac{(R_{ms} - z_0)^2}{T} \quad (9.1)$$

där dV är volymen på det borteroederade materialet under tiden dt , och C_S är en empirisk koefficient som beräknas enligt,

$$C_S = \frac{1}{2} \frac{C_E}{C_u^2} \frac{\rho}{\rho_s} \frac{1}{(1-p)} \quad (9.2)$$

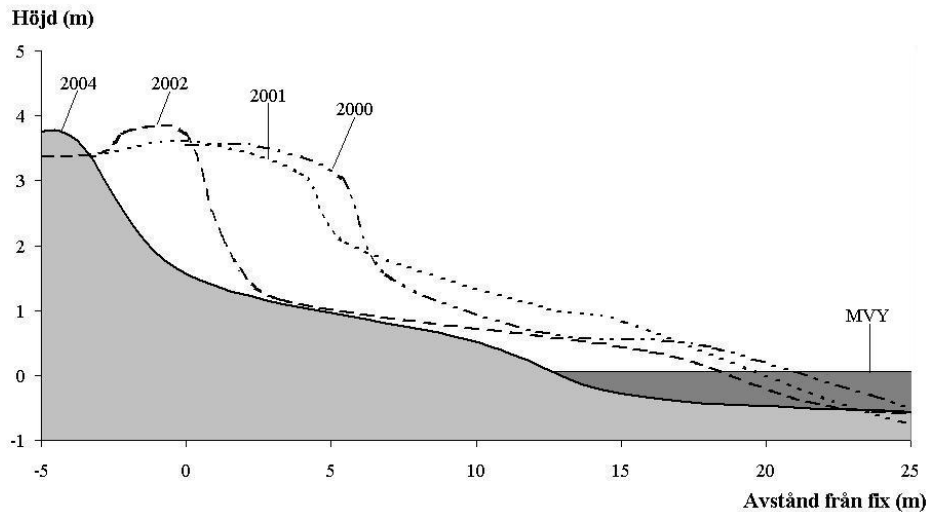
i vilket C_E är en empirisk koefficient som beskriver förhållandet mellan kraften som träffar ett klitter och tyngden av den volym som eroderas. C_u är en empirisk koefficient som beskriver hur våghastigheten beror av våghöjden, ρ (index s för sediment) och ρ_s är vattnets respektive sedimentets densitet och p är porositet för sedimentet.

Uppspolningshöjden R_{ms} , beräknas utifrån följande formel, som är en minsta-kvadratanpassning av Hunts formel, till tillgängliga data på klittererosion (se Larson *et al*, 2004):

$$R_{ms} = 0.158\sqrt{H_0 L_0} \quad (9.3)$$

9.2 Erosion längs Ystads kust

Erosionen av klitter har varit påtaglig längs kusten i sandskogen under de senaste åren. För att få en uppskattning om hur erosionen har sett ut har profilmätningar från 1997 (Hanson, 2004) studerats. I Figur 9.2 åskådliggörs hur strandplanet har förändrats mellan åren 2000 – 2004. Den profil som valts ut ligger i mitten av den studerade kuststräckan, mellan hövd 2 och hövd 3 (se Figur 3.3).



Figur 9.2 Förändringar i strandplanet mellan åren 2000 – 2004 i Ystads Sandskog.

Det är tydligt att det under de senaste åren har skett en stor förändring av strandzonen. På grund av erosionen har både strandlinjen och foten av sanddynen dragit sig tillbaka ca. åtta meter på fyra år. Dessutom har tjockleken på stranden framför sanddynen minskat ungefär en meter, vilket har medfört att det vertikala avståndet från vattenytan till klitterfoten (z_0) har minskat.

Den största förändringen har inträffat mellan åren 2001 och 2002. Vid närmare studie av våg- och uppspolningsberäkningar från den aktuella perioden ges indikationer på att höga uppspolningar har större betydelse när de sker vid separata tillfällen, än flera på varandra följande händelser. Detta tycks vara rimligt eftersom eroderat sediment lägger sig framför klitterfoten, vilket ökar z_0 och på så sätt skyddar klittret från uppspolning.

Nämnvärt är att mellan åren 1997 och 2000, vilket ej framgår av Figur 9.2, har strandprofilen varit stabil med relativt små förändringar. En anledning till den ökade erosionen av klitterna de senare åren (2000-2004) borde vara minskningen av z_0 , som i sin tur har medfört att vattenlinjen har flyttats närmre klitterna så att vågorna kan träffa dessa med större kraft. Ingen hänsyn har tagits till eventuella effekter orsakat av de hövder som byggts, främst för att motverka kustparallell sedimenttransport.

9.3 Simulering av erosion

Utifrån förändringar av strandprofilen från Ystad Sandskog (Figur 9.2), har volymförändringar ΔV och avståndet mellan lugnvattenytan och klitterfoten, z_0 , bestämts empiriskt för olika år. Med hjälp av ekvation 9.1, bestämdes sedan koefficienten C_S analytiskt och redovisas i Tabell 9.1. Eftersom z_0 varierar mellan inmätningstillfällena, har denna satts till medelvärdet för aktuellt år.

Tabell 9.1 Parametrar som beskriver förändringar i strandplanet 2000 – 2004.

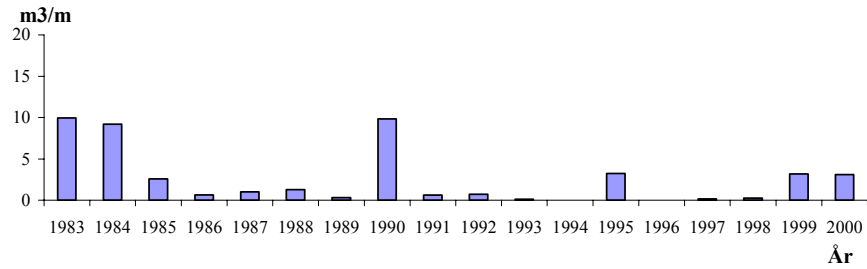
År	Z_0 (m)	ΔV (m ³ /m)	C_S (*10 ⁻⁴)
2000 – 2001	1.75	1.48	3.5
2001 – 2002	1.60	6.16	3.2
2002 – 2004	1.40	5.88	3.4

För vidare beräkningar har C_S satts till $3.3 \cdot 10^{-4}$, vilket är medelvärdet för åren 2000-2004.

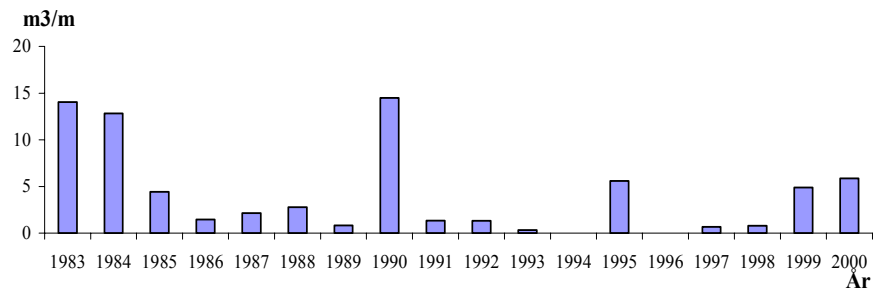
Utifrån det beräknade värdet på C_S har klittererosionen simulerats, med hjälp av den analytiska erosionsmodellen, för åren 1983-2000. Eftersom uppgifter om z_0 saknas för den studerade perioden har simuleringarna gjorts för ett par schematiserade profiler. Profilerna antages bibehålla sin form under perioden, d.v.s. att de inte anpassar sig efter en eventuell vattennivåförändring eller aktuell erosion. Följderna av detta blir att resultaten inte direkt beskriver den verkliga erosionen, utan ger en indikation på hur erosionen beror av profilen samt ger simulerade värden som senare kan jämföras med framtida scenarier. I Figur 9.3-9.5 redovisas hur erosionen ser ut för profiler med $z_0 = 1.6 - 1.8$ m.

För åren 1983-1984 samt 1990 ger simuleringarna mycket omfattande erosion. Orsaken är att det under dessa år förekommit stormtillfällen med höga vindstyrkor och lång varaktighet (2-3 dygn). Resultaten är något missvisande för dessa perioder, eftersom eroderat sediment vid längre stormtillfällen placeras framför klitterna som ett tillfälligt skydd, vilket minskar erosionen. Ingen hänsyn tas till denna process i simuleringarna.

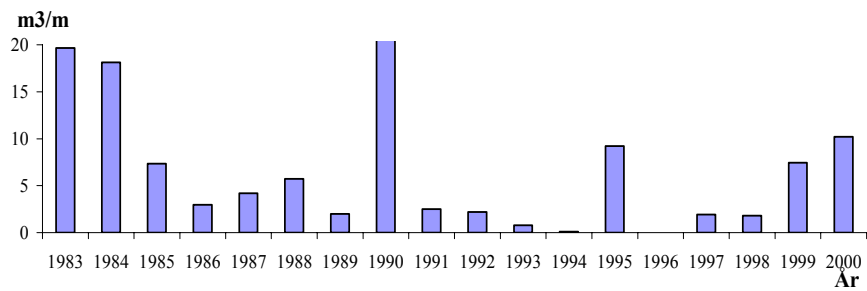
Av figurerna att döma, är erosionsprocessen starkt beroende av det vertikala avståndet mellan klitterföt och vattenytan (z_0). En minskning av z_0 med ett par decimeter kan innebära att den årliga erosionen ökar med flera kubikmeter. Av denna anledning är osäkerheten i resultaten stor och det är svårt att uppskatta den verkliga erosionen för den aktuella perioden. Dock ger de en indikation av erosionsbenägenheten under olika år.



Figur 9.3 Simulerad erosion per breddenhet för en schematiserad profil med $z_0 = 1.8$ m



Figur 9.4 Simulerad erosion per breddenhet för en schematiserad profil med $z_0 = 1.7$ m



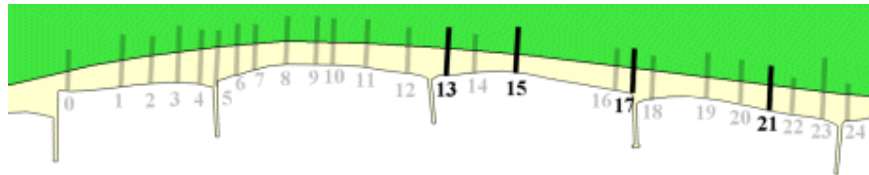
Figur 9.5 Simulerad erosion per breddenhet för en schematiserad profil med $z_0 = 1.6$ m

9.4 Kriterier för klitterbrott

Ett kritiskt läge uppstår om erosionen är så påtaglig att den eroderade volymen motsvarar den totala volymen av klittret. Detta skulle innebära ett brott, vilket medför att vatten kan transporteras in till bakomliggande terräng. Nedan beräknas antalet tillfällen som krävs för en specifik situation för att ett brott ska uppstå (TFB), utifrån ekvation 9.1. Profiler som valts ut är tagna från profilinmätningarna, se Appendix II och presenteras i Tabell 9.2 nedan.

Tabell 9.2 Data om profiler som används vid beräkning av kriterier för klitterbrott.

	Profil 13	Profil 15	Profil 17	Profil 21
z_0 (m):	0.72	1.16	2.05	1.57
Volym (m ³ /m):	66	40	16	36



Figur 9.6 Profiler som detaljstuderats i klitterbrottsanalysen. (Svensson, 2005; modifierad)

Profil 13 har valts ut eftersom avståndet mellan klitterföt och vattenytan är liten, medan profil 17 har valts ut eftersom volymen på klittret är liten. Profil 15 och 21 representerar ett medel av de två ovannämnda.

Utifrån varierande våghöjder och vattenstånd (WL) har TFB, med en varaktighet på tre timmar, beräknats och redovisas i Tabell 9.3. I tabellen redovisas även hur ofta varje specifik händelse inträffar per år.

Tabell 9.3 Antal tillfällen som krävs för att brott i klitter ska uppstå (TFB), för olika profiler vid olika samtidiga händelser, H_0 och WL. Även återkomsttiden för händelsen redovisas. "-" innebär att ingen risk för TFB föreligger.

H_0 / WL	Återkomsttid	TFB för respektive profil			
		Profil 13	Profil 15	Profil 17	Profil 21
4.0 / 0.0	7 år	6	6	7	8
3.5 / 0.0	3 år	9	9	18	14
3.0 / 0.0	7 mån	11	12	49	23
2.5 / 0.0	2 mån	16	21	-	61
2.5 / 0.5	2 år	9	9	25	16

Eftersom strandens naturliga återhämtning på grund av transport av sediment, genom vind, inte tas i beaktning är resultaten enbart en indikation på områden där klitterna är svaga. Det beräknade antalet tillfällen som krävs är indirekt ett mått på

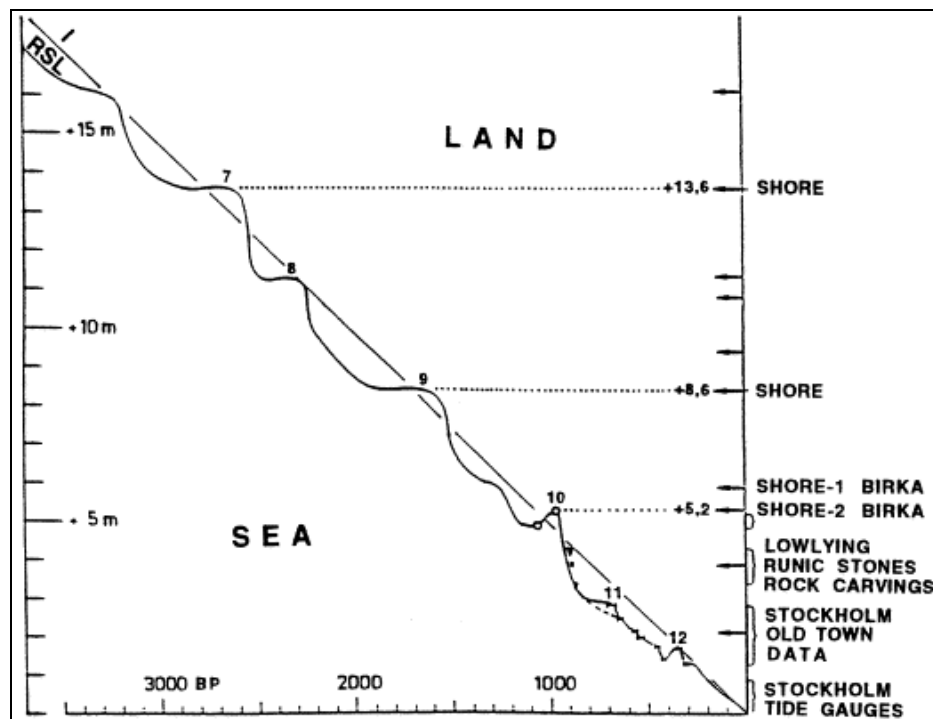
hur känsliga klitterna är för olika stormtillfällen. Ju fler tillfällen som krävs desto starkare är klitterna.

Som nämnts tidigare är erosionen starkt beroende av z_0 . Denna analys ger även en indikation på att z_0 har större betydelse än volymen på klitterna ur brottssynpunkt. Profil 13 innehåller idag det mäktigaste klittret (se Tabell 9.2) längs den studerade sträckan men är samtidigt den profil som löper störst risk att utsättas för brott, p.g.a. det låga vertikala avståndet från klitter till vattenyta. Profil 17 inkluderar idag det klenaste klittret men kompenseras med ett högt avstånd till klitterfoten.

10 Framtida klimatförhållanden

10.1 Bakgrund klimatförändringar

Det globala klimatet är ett komplext system som genomgår ständiga förändringar. Klimatet beskrivs dels av dygnsvariationer och dels av säsongsväxningar samt variationer sett ur ett mycket längre perspektiv. En aktuell fråga är huruvida ökade mänskliga bidrag av förorenade ämnen i luft och vatten kan vara orsaken till de klimatförändringar, som enligt en del klimatforskare håller på att accelerera. Klimatförändringarna som i första hand avser en ökning av den globala medeltemperaturen, befaras bl.a. orsaka en snabbare smältning av polarisarna, en ökning av medelvattennivån och förändringar i de oceaniska och atmosfäriska strömmarna.



Figur 10.1 Vattenståndskurvan för Stockholmsregionen sträcker sig från 3000 år sedan till idag. PTM 7, 9 och 10 är markerade med tydliga förändringar i kustlinjen. Perioden efter PTM 10 är väldokumenterad från arkeologiska data och stratigrafiska undersökningar. RSL = Relative Sea Level, BP=Before Present, Shore=kust. (Mörner, 1999)

Det finns dock kritiker som anser att den klimatförändring man tycks se antydningar till är en naturlig process med cykler på 1 000 - 10 000-tals år. Bland annat har Mörner (1999) tittat på vattennivåer i Stockholmsregionen daterade från

mer än 3000 år tillbaka, se Figur 10.1. Man kan under hela perioden se klara svängningar i vattennivån. I denna serie förekommer tre tydliga perioder av vattennivåsänkningar, det Mörner kallar PTM7, PTM9 och PTM10 (Postglacial Transgression Maximum). De ägde rum för cirka 2600, 1600 respektive 900 år sedan. Mörner (2003) menar att det inte finns något som tyder på att medelvattenhöjningen accelererar.

Men den teknologiska utvecklingen kan ha rubbat den naturliga processen med ökade emissioner av förorenande partiklar. Alltsedan industrialiseringen som startade under 1700-talet har föroreningar i luft och vatten ökat. Enligt registrerad data gällande medeltemperaturer kan man se en ökning mellan år 1900 och 2000 på 0.8°C, vilket man tror bland annat kan bero på industrialiseringens ökade emissioner (Bernes, 2003).

Med utgångspunkt från utsläppsförändringar under 1800-talet och hur ökningen av koncentrationen av växthusgaser under 1900-talet har sett ut, har IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), på uppdrag av FN, gjort simuleringar av möjliga klimatförändringar inom en nära framtid.

För simulering av framtida klimatförhållanden används avancerade klimatmodeller. I modellerna ingår variabler som matematiskt beskriver olika processer som pågår i atmosfären och oceanerna. Simuleringarna kan styras utifrån möjliga framtida utvecklingsscenarier.

Klimatmodellen, som ligger till grund för framtidsscenarier i denna studie, bygger dels på globala klimatmodeller, som gör övergripande uppskattningar av klimatförändringar med en sämre noggrannhet och dels på regionala modeller som noggrannare beskriver klimatförändringar över den aktuella regionen. De globala modellerna har tagits fram av IPCC och de regionala modellerna över Skandinavien har tagits fram inom SWECLIM, som var ett forskningsprojekt, finansierat av SMHI och Mistra, 1997-2003.

10.2 Klimatmodeller

Resultatet från de globala klimatmodellerna bygger på möjliga utvecklingar för t.ex. befolkning, BNP, energianvändning, markanvändning och antropogena emissioner. De framtida scenarierna som använts, fram till år 2100, för de globala och regionala simuleringarna som presenteras i den här rapporten är de så kallade A2- och B2-scenarierna.

A2-scenariet förutsätter att jordens befolkning uppgår till 15 miljarder år 2100, en långsam ekonomisk och teknologisk utveckling samt snabbare ökning av utsläpp av växthusgaser (Nakićenović *et al*, 2000). Ökning av medeltemperaturen uppgår till 3.7°C jämfört med 2000 (Bernes, 2003).

B2-scenariet förutsätter att jordens befolkning uppgår till 10.4 miljarder, en snabb ekonomisk utveckling med tonvikt på miljöskydd och därmed en mindre ökning av utsläpp av växthusgaser jämfört med A2-scenariet (Nakićenović *et al*, 2000). Ökning av medeltemperaturen uppgår till 2.6°C jämfört med 2000 (Bernes, 2003).

10.2.1 Globala klimatmodeller

Beräkningarna i de globala klimatmodellerna har gjorts utifrån en tysk och en engelsk modell, ECHAM4/OPYC3 respektive HadAM3H. Den tyska modellen är en kombinerad atmosfärs- och oceanmodell, d.v.s. där processer i både oceanerna och atmosfären ingår i beräkningarna. I den engelska modellen ingår däremot endast processer i atmosfären (Meier *et al*, 2004). Båda modellerna har en vertikal upplösning på 19 lager. Den horisontella upplösningen är ungefär dubbelt så hög i den engelska modellen (1.25° latitud x 1.875° longitud) som i den tyska modellen (2.8° latitud x 2.8° longitud). (Karoly *et al*, 2003 och Hudson *et al*, 2002)

10.2.2 Regionala klimatmodeller

SWECLIM:s regionala simuleringar, gjorda med RCAO (Rossby Centre regional Atmosphere-Ocean model) utgår från resultat framtagna med en engelsk och en tysk modell. Resultat med den engelska modellen som grund har beteckningen RCAO-H och för den tyska är beteckningen RCAO-E.

RCAO-modellen är en kombinerad atmosfärs- och oceanmodell. Atmosfärsdelen har en horisontell och vertikal upplösning på 49 km x 49 km respektive 24 nivåer. För oceandelen är motsvarande upplösning 11.1 km x 11.1 km och som mest 41 lager, beroende på vattendjupet.

Regionaliseringen har gjorts för att förbättra upplösningen för Skandinavien och för att anpassa modellen till det lokala klimatet.

En kontrollperiod (1961-1990) har använts för att kunna validera de två scenarierna, A2 och B2. Simuleringarna visade sig stämma väl överens med kontrollperioden. Dock visar jämförelser att vattennivåförändringar i västra Östersjön underskattats (Meier *et al*, 2004).

10.3 SWECLIM:s resultat av framtida klimatscenarier

10.3.1 Framtida vindar

Enligt SWECLIM:s simuleringar ökar vindstyrkorna mest dramatiskt under vinterperioderna, d.v.s. under december, januari och februari. I Appendix IX finns en översikt för de framtida vindförändringarna över hela året för respektive scenario.

Tabell 10.1 visar att vindstyrkorna under vintermånaderna för Ystadregionen enligt den tyska modellen kan komma att öka med 5-10 % enligt scenariot EB2, men dubbelt så mycket enligt EA2. Enligt den engelska modellen verkar vindstyrkorna dock endast öka med mellan 1-5 %. Tabell 10.1 visar en översikt för de olika årstiderna enligt SWECLIM.

Vindförändringarna kommer alltså i värsta fall under vintermånaderna att öka med 20 %, men i bästa fall endast 1 %. Medelförändringen viktas till 5 %. Resultaten i kapitel 11 kommer att grunda sig i dessa tre scenarier, EA2, HB2 och ett medel av dessa två.

Tabell 10.1 Simulerade framtida förändringar (%) av vindstyrkorna för Ystad enligt SWECLIM. Data enligt figurer i Appendix IX.

	RCAO-E				RCAO-H			
	A2		B2		A2		B2	
	max	min	max	min	max	min	max	min
<i>Vinter</i>	20	10	10	5	5	3	2	1
<i>Vår</i>	10	5	3	2	1	0	-2	-3
<i>Sommar</i>	-5	-10	-5	-10	-2	-3	1	0
<i>Höst</i>	3	2	5	3	-3	-5	2	1

10.3.2 Framtida vattenstånd

Den långsiktiga vattennivåförändringen påverkas dels av Östersjöns vattenbalans, som beror på flödet mellan Östersjön och Kattegatt via Öresund, där ytvattentrycket har betydelse (Meier, 2004). Vattennivåförändringen påverkas även av eustatiska egenskaper, d.v.s. det termiska klimatet, förhållandet vid polerna och dess istäcke samt av förändringar i bottenpografien (t.ex. strandlinje, sedimentering och tektoniska förändringar) (Chao *et al*, 2002).

Lokalt och kortsiktigt förändras vattenståndet över året beroende på lokala vindstyrkor och vindriktningar som påverkar vattencirkulationen, tidvatten samt vågrörelser (Chao *et al*, 2002).

Meier (2004) redogör för resultaten av SWECLIM:s simuleringar med de olika klimatmodellerna gällande framtida förändringar för årsmedelvattenståndet. De största vattennivåförändringarna kommer att ske under vintermånaderna (december, januari och februari). Tre faktorer ingår i resultatet. Dels är det landhöjningen, som för Ystad är -0.5 mm/år, dels förändringar i vindkaraktistika, som framgår av kapitel 5, och dels den globala vattenståndsförändringen, som beror på modell och scenario.

Figur 10.2 visar SWECLIM:s resultat efter de olika simuleringarna för år 2100. I bästa fall (HB2) kommer medelvattenståndet för Ystad att sjunka med ca. 0.05 m. För det värsta scenariet (EA2) är motsvarande medelvattenförändring en höjning på

0.85 m. För ett scenarier som bygger på viktning av HB2 och EA2 förändras medelvattenytan med +0.38 m inom ett 100-års perspektiv.

10.4 Trender i befintliga data

Utifrån de data som analyserats i kapitel 5, 6 och 7, har trender studerats och återkomsttider beräknats för att få en uppfattning om hur klimatet i Ystad kan se ut i ett 100-årsperspektiv. I dessa analyser har det inte tagits någon hänsyn till några miljöförändringar.

Vid analysen har trender utöver befintlig data extrapolerats. Vid beräkning av återkomsttid har Weibulls och Gringortens metod använts, se Appendix X. Resultaten har plottats i en graf varefter en trendlinje för punkterna har dragits för att sedan extrapoleras. Trendlinjens anpassning till datan är en skattning på hur väl metoden beskriver återkomsttiderna. En korrelationskoefficient, R^2 , anger hur välanpassad denna trendlinje är. Den kan få ett värde mellan 0 och 1, och ju närmre 1 R^2 är, desto bättre beskriver trenden datan. En återkomsttid på 100 år innebär inte att händelsen inträffar vart 100:e år, men att den i genomsnitt inträffar en gång varje 100-årsperiod.

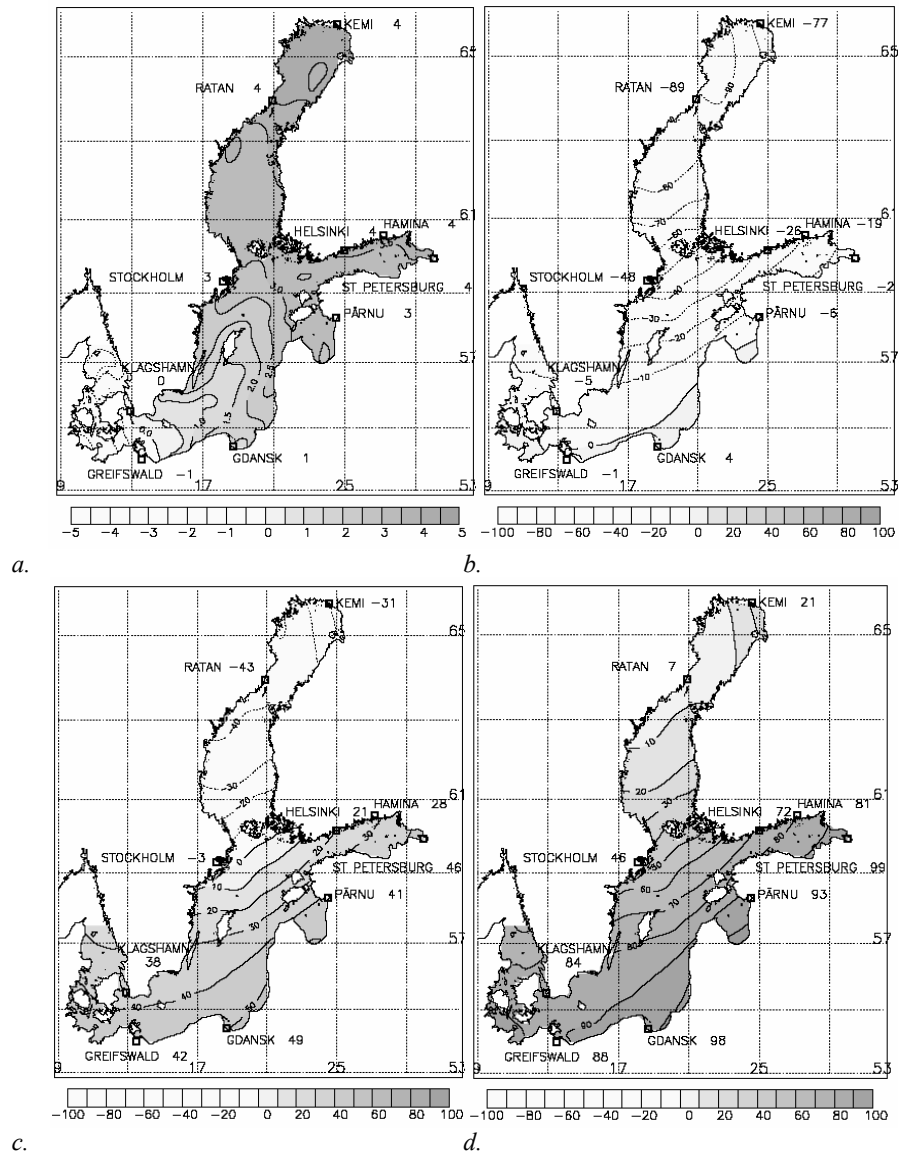
10.4.1 Framtida vindar

För trendanalys av framtida vindar har befintlig data för vindar registrerade vart 3:e timme 1963-2004 i Falsterbo använts. Analysen blir komplicerad eftersom vindar karakteriseras av tre parametrar: styrka, riktning och varaktighet. I Figur 10.3 åskådliggörs den årliga frekvensen av sydliga (VSV-OSO) kulingvindar (>13m/s) i Falsterbo. Man kan i figuren inte se någon tydlig trend.

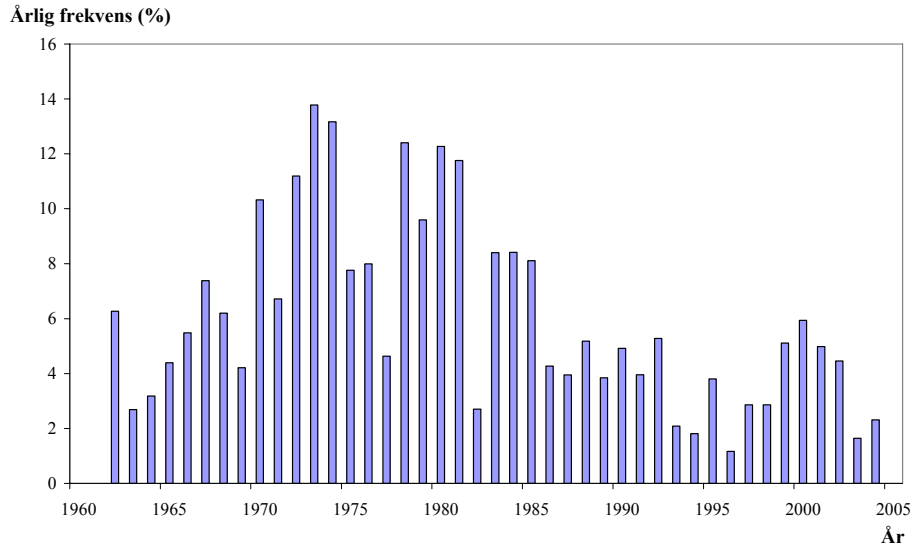
Även om en linjär trend inte kan ses i datan är det möjligt att vindar kan ha cykliska trender (Hanson, 2005). Dessa cykler kan dock inte heller påvisas i Figur 10.3, vilket kan bero på den begränsade mätperioden förhållande till cyklernas längd.

10.4.2 Framtida vattenstånd

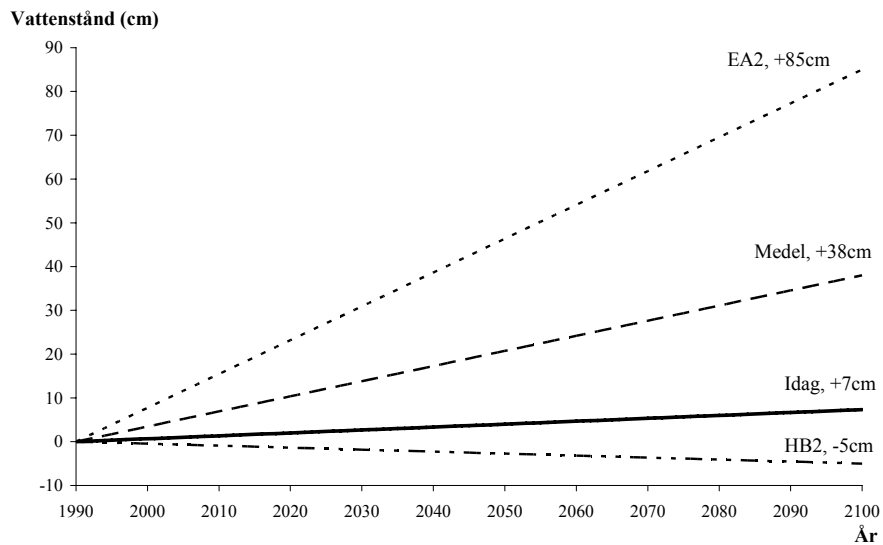
För vattenståndet kan trendlinjen utifrån 100-årsserien (kapitel 7), extrapoleras till år 2100. Antagandet bygger på förutsättningen att trenden är linjär under det kommande seklet. Figur 10.4 illustrerar en jämförelse mellan denna trend och de prognostiserade vattenståndsscenerierna från SWECLIM. Enligt den existerande serien kommer medelvattenståndet att öka med 7 cm. I bästa fall enligt SWECLIM minskar vattenståndet med 5 cm. Detta att jämföra med det värsta scenariot med en ökning på 85 cm relativt medelvattenståndet för 1990. Ett genomsnitt på bästa och värsta scenario, såsom SWECLIM presenterar det, visar en ökning av medelvattenytan på 38 cm.



Figur 10.2 Förändringen av vattenstånd mellan kontrollperiod, 1961-1990, och tre simulerade framtidsscenarioer, 2071-2100, under vinterperioden december, januari och februari. Landhöjningen är inräknad. a: RCAO-E, kontroll; b: RCAO-H, B2, Best Case Scenario, global vattenståndshöjning på 0.09 m; c: Medel av RCAO-H, B2 och RCAO-E, A2, global vattenståndshöjning på 0.48 m; d: RCAO-E, A2, Worst Case Scenario, global vattenståndshöjning på 0.88 m. (Meier et al, 2004)



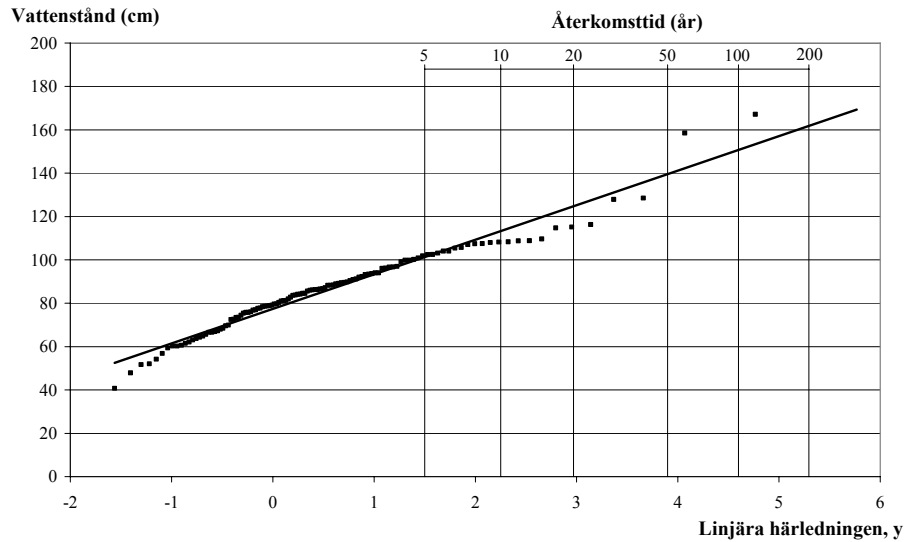
Figur 10.3 Årlig frekvens för kulingvindar från sydliga vindriktningar i Falsterbo. Vindarna har registrerats vart 3:e timme mellan 1962-2004.



Figur 10.4 En jämförelse mellan SWECLIMs prognoser och den trend som bygger på uppmätta vattenstånd i Ystad mellan 1886 – 2004. Trenderna visar medelvattenståndet. Seriernas referensnivå utgår från medelvattenståndet 1990.

10.4.3 Återkomsttid för vattenstånd

För återkomsttid av vattenstånd har Weibulls metod utnyttjats. Figur 10.5 visar resultatet och visar att 100-årsvattenståndet uppgår till drygt 150 cm. R^2 -värdet ligger på 0.9634, vilket kan anses som ett tillfredsställande värde.



Figur 10.5 Den extrapolerade linjära anpassningen av återkomsttiden för årsextrem av vattenståndsnivå enligt Weibull. $R^2=0.9634$. Period 1887-2004.

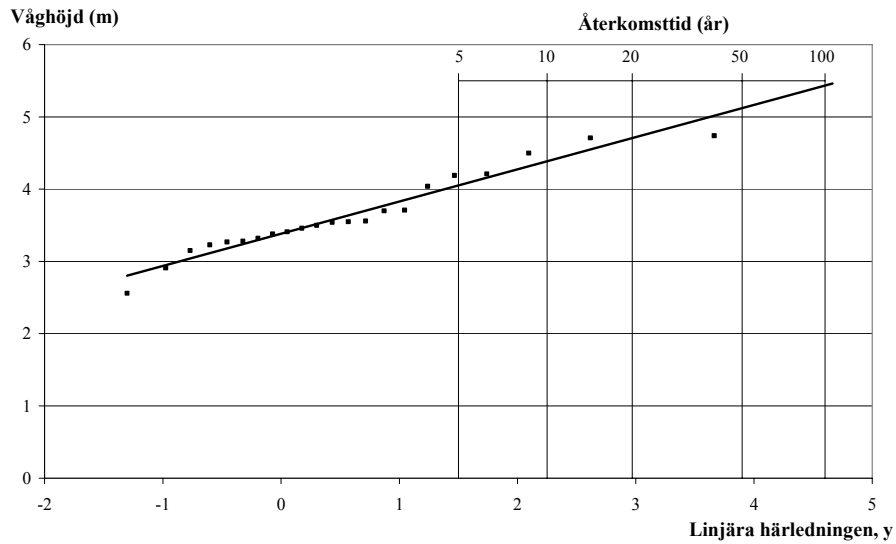
10.4.4 Återkomsttid för våghöjder

Gringortens metod har använts för beräkning av återkomsttider för våghöjder. Figur 10.6 visar att 100-årsvågen uppgår till 5.5 m. R^2 -värdet för den anpassade linjen är 0.9507, något sämre än det för vattenståndet.

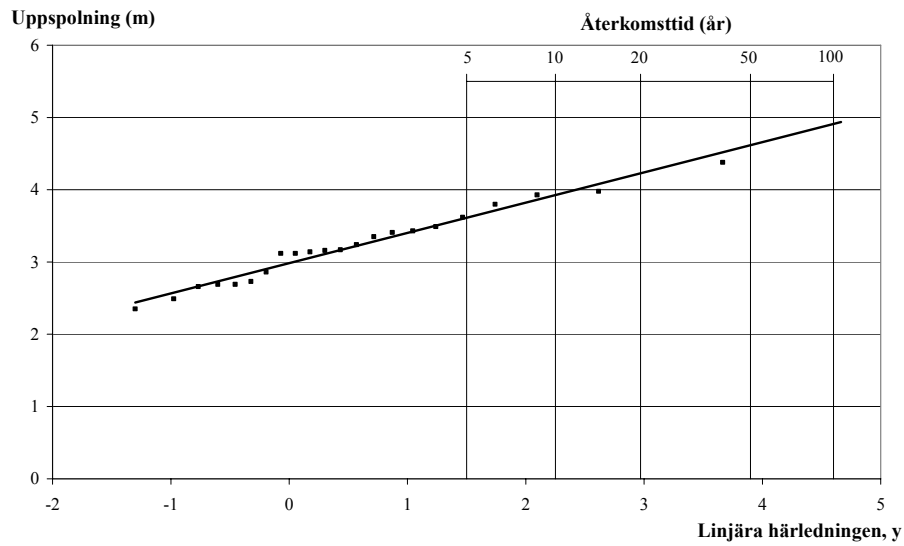
10.4.5 Återkomsttid för uppspolningshöjd

För återkomstanalysen av uppspolningshöjder har Gringortens metod använts. Figur 10.7 visar att 100-årsuppspolningen uppgår till 4.9 m. R^2 -värdet är 0.9746.

Vid simulering av framtida scenarier, kommer återkomstanalysen för uppspolningshöjder att användas. Detta val bygger på två argument. Dels korrelerar den dragna trendlinjen för uppspolningshöjder bäst ($R^2=0.9746$) med befintlig data jämfört med resultaten avseende vågor ($R^2=0.9507$) och vattenstånd ($R^2=0.9634$). Dels är det svårt att kombinera två separata återkomstserier för att anta en gemensam sannolikhet för en samtidig händelse. Uppspolningshöjderna är en kombination av samtidiga våghöjder och vattenstånd.



Figur 10.6 Den extrapolerade linjära anpassningen av återkomsttiden för årsextrermer av våghöjden enligt Gringorten. $R^2=0.9507$. Period 1983-2004.



Figur 10.7 Den extrapolerade linjära anpassningen av återkomsttiden för årsextrermer av uppspolningshöjder enligt Gringorten. $R^2=0.9746$. Period 1983-2004.

11 Framtida scenarier

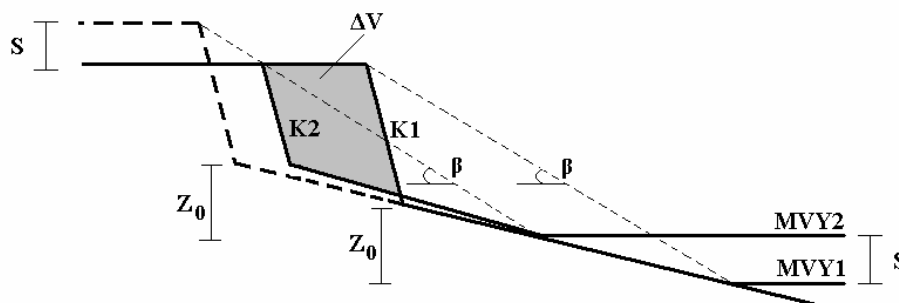
Rapporten har hittills behandlat hur kustklimatet längs stranden i Ystads Sandskog har sett ut under de senaste decennierna. Utifrån den situation som råder idag, tillsammans med de klimatförändringar som förväntas i framtiden görs i detta kapitel en analys av vad som kan förväntas av det kustnära klimatet i det studerade området inom ett 100-årsperspektiv. Vidare kommer analysen innefatta vilka konsekvenser klimatförändringarna kan få på den redan utsatta kuststräckan.

Scenarier kommer att sättas upp utifrån SWECLIM:s prediktioner och sedan jämföras med trender i historisk data, se kapitel 10. Eftersom det inte har hittats några trender i den analyserade vinddatan kommer enstaka händelser som bygger på återkomsttidsanalyser att behandlas.

Den 20-årsperiod som tidigare har använts för simulering av uppspolning och klittererosion har modifierats efter de förutsättningar som kan uppstå inom ett 100-årsperspektiv.

11.1 Vattenståndets inverkan på kustprofilen

En viktig aspekt för framtida scenarier är hur kusten påverkas av en förändring i vattenståndet. Bruun (1962) gjorde en enkel modell som beskriver hur strandprofilen anpassar sig efter långsiktiga vattenståndsförändringar. Modellen bygger på en sedimentbalans mellan strandzonen och den kustnära zonen. Vid en vattenståndshöjning transporteras sediment från strandplan och klitter till den kustnära botten så att ett jämviktsläge uppstår. Modellen har testats, tolkats och modifierats av flertalet forskare (Silenzi *et al*, 2002).



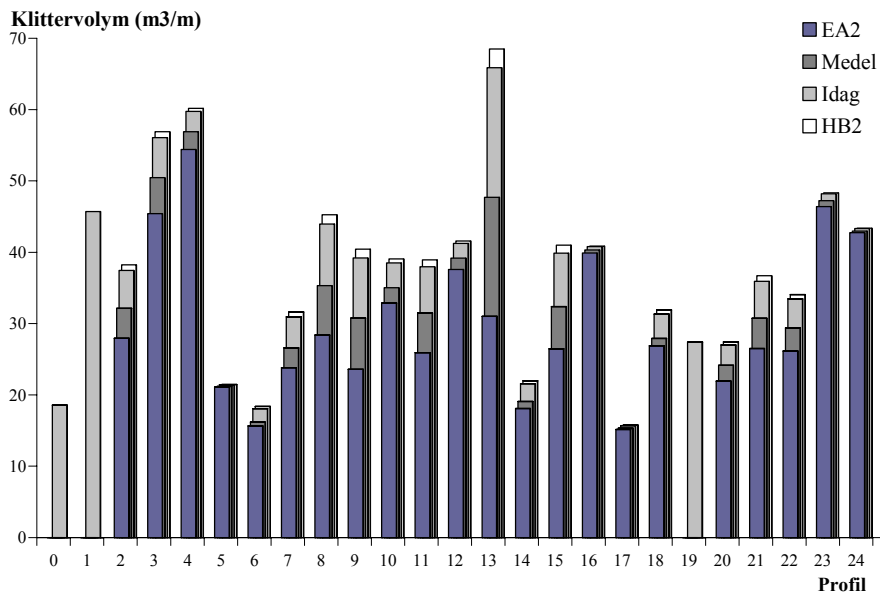
Figur 11.1 Översikt av förenklad modell som beskriver retardation av strandprofil vid en vattenstånds förändring. K1 är klittret vid MVY1 och K2 är klittret vid MVY2.

Utifrån Bruuns lag har i denna studie en enkel modell satts upp, som bygger på att strandzonen, vid en vattenståndshöjning (S), retarderar så att den effektiva lutningen (β) på strandprofilen och det vertikala avståndet från vattenyta till klitterfot (z_0) hålls konstant. Höjden på klittret bibehålls, se Figur 11.1

I realiteten kommer detta att innebära att då vattenståndet ökar, kommer klittervolymen liksom den horisontella bredden av strandplanet att minska, medan lutningen i strandplanet ökar.

11.2 Förändring av strandprofiler i Ystad vid ökat vattenstånd

Enligt resonemang ovan kommer strandprofilens utseende att förändras vid en förändring av vattenståndet. I Figur 11.2 redovisas de förändringar av klittervolymerna som kan förväntas för olika profiler utifrån SWECLIM:s scenarier: Scenario HB2 motsvarar en sänkning av medelvattenytan på 5 cm, EA2 och medel scenariet motsvarar en ökning på 85 cm respektive 38 cm, jämfört med idag.

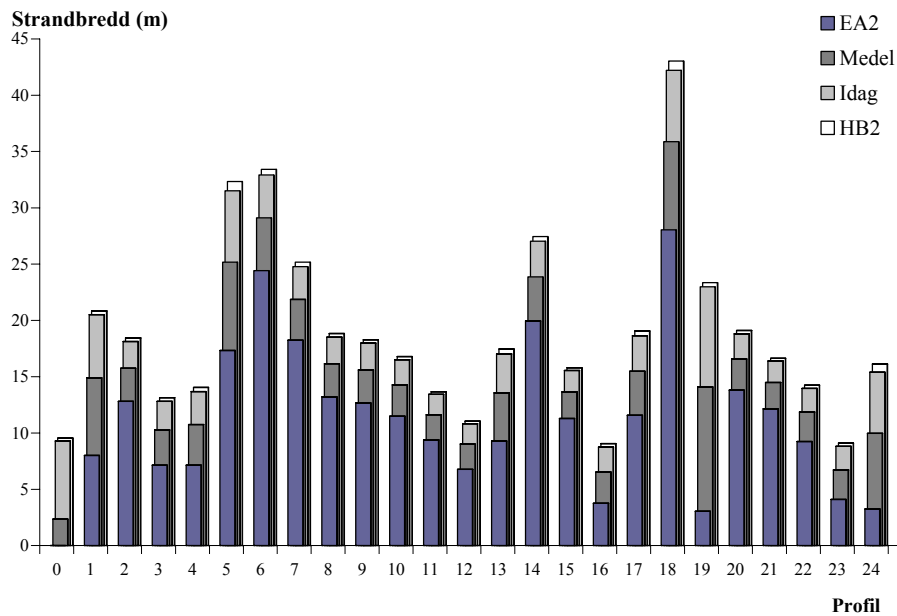


Figur 11.2 Klittervolymerna för inmätta profiler i Ystads Sandskog, till följd av förändring i medelvattenståndet. Profil 0, 1, och 19 beskriver enbart klittervolymerna idag eftersom dessa är beklädda med stenskonning.

Vattenståndets inverkan på strandzonen varierar märkbart inom det studerade området. Profil 13 påverkas kraftigast, med en halvering av klittervolymen vid det värsta klimatscenarioet (EA2). Detta beror främst på det lågt belägna strandplanet. Övriga profiler som påverkas, kan beskrivas med ett lågt strandplan och ett

väldefinierat klitter, det vill säga att gränsen mellan strandplanet och klittret är tydlig. De profiler som påverkas minst karakteriseras av ett jämnt strandplan med en konstant lutning från vattenyta till klittertopp. Förhållandet mellan vattenståndsökningen och klitternas retardation är ca 1:20. Profil 0, 1 och 19 beskriver bara dagens klittervolym. Dessa är beklädda med stenskoning och är därför inte intressanta ur erosionssynpunkt.

En långsiktig förändring av vattenståndet skulle även innebära en minskning av bredden på strandplanet. I Figur 11.3 åskådliggörs hur bredden kan se ut för de inmätta profilerna, utifrån olika scenarier. Strandplanet minskar i genomsnitt med 7.5 meter per meter vattenståndsökning. För profilerna 0, 1 och 19 är förändringen än mer kritisk. Orsaken är att dessa profiler är beklädda med stenskoning, varför klitterna inte kan anpassa sig efter ökning av medelvattenytan.

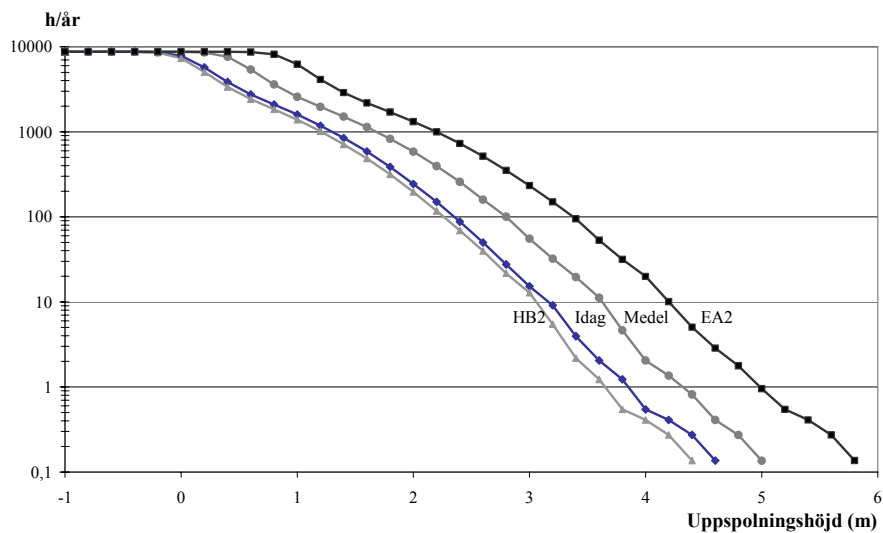


Figur 11.3 Strandbredden för inmätta profiler utifrån SWECLIM:s olika scenarier, jämfört med idag.

11.3 Uppspolning och överspolning

Med de generella förutsättningar som tidigare antagits på strandprofilen (lutning $m = 0.2$) har antalet timmar/år som en viss uppspolningshöjd uppnås, beräknats för SWECLIM:s scenarier och åskådliggörs i Figur 11.4. Beräkningarna inkluderar både en förändring av medelvattenytan och ett förändrat vindklimat. Uppspolningen relaterar till medelvattenytan 2004, enligt RH70, för att få en uppfattning om hur eventuella klimatförändringar påverkar dagens situation.

Utifrån scenarierna gavs även max- och medelvärden på uppspolningshöjder som kan förväntas för respektive simulering, se Tabell 11.1. Värderna för den situation som råder idag har tagits med så att en jämförelse kan göras.



Figur 11.4 Antal timmar/år som en viss uppspolningshöjd uppnås i genomsnitt. Uppspolningshöjder utgår från medelvattenytan enligt RH70.

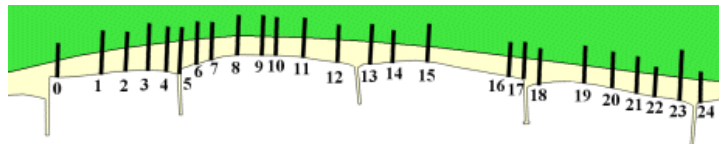
Tabell 11.1 Max- och medelvärden på uppspolningshöjder som kan förväntas, utifrån SWECLIM:s simuleringar.

Uppspolning	Idag	HB2	Medel	EA2
Max (m):	4.6	4.4	5.2	5.8
Medel (m):	0.42	0.35	0.8	1.3

Med hjälp av beräknade uppspolningshöjder gjordes även en överspolningsanalys. I överspolningsanalysen simulerades antalet tillfällen som överspolning är möjlig för en 20-årsperiod om 100 år. Utifrån samma antaganden som ovan, gjordes beräkningarna för samtliga inmätta profiler. Antalet tillfällen som överspolning är möjlig redovisas i Tabell 11.2

Tabell 11.2 Antalet tillfällen som överspolning är möjlig under en 20-års period för SWECLIM:s scenarier, jämfört med idag. Profiler med värden inom parentes är skyddade med stenskoning.

Profil	Idag	HB2	Medel	EA2
0	(45)	(26)	(184)	(594)
1	(0)	(0)	(1)	(10)
2	0	0	0	6
3	0	0	0	1
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	0	3
8	0	0	2	12
9	0	0	0	3
10	3	2	12	114
11	2	2	9	54
12	0	0	0	0
13	0	0	0	0
14	0	0	0	3
15	4	3	17	151
16	0	0	0	3
17	0	0	0	2
18	0	0	0	1
19	(0)	(0)	(0)	(2)
20	0	0	0	3
21	1	0	3	22
22	1	0	3	24
23	0	0	0	2
24	0	0	0	1



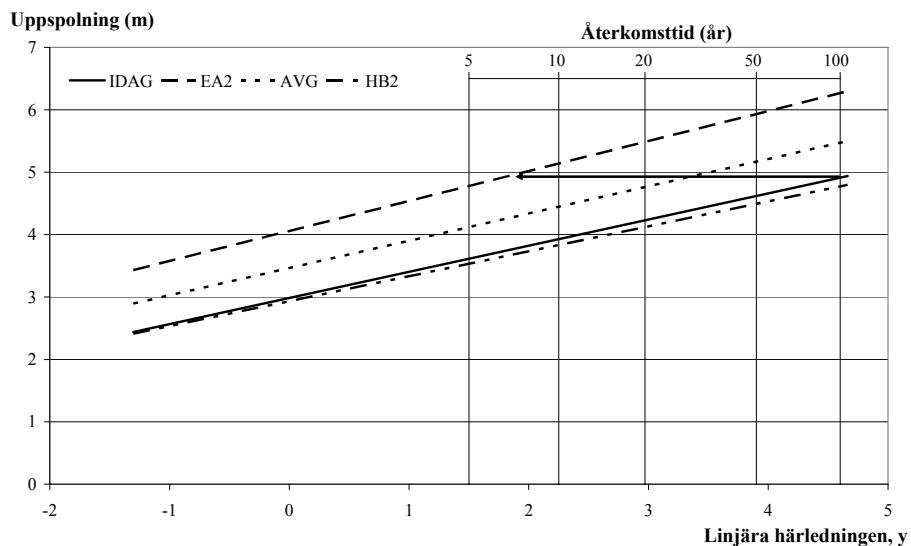
Figur 11.5 Översikt av profilmätningar i Ystads Sandskog. (Svensson, 2005; modifierad)

Enligt Tabell 11.2 är det samma profiler i framtiden som idag, som är mest utsatta för överspolning. För det värsta scenariet, EA2, ökar risken för överspolning dramatiskt för de flesta profiler. Även många av de profiler som idag inte löper risk för överspolning riskerar att överspolas inom ett 100-årsperspektiv.

11.4 Förändringar av återkomsttiden avseende uppspolning

En jämförelse av återkomsttiden för uppspolningsnivåer mellan serien som bygger på dagens klimatförhållande med de framtagna av SWECLIM, se Figur 11.6. För serien som bygger på dagens klimat är återkomsttiden för en 100-årsuppspolning 4.9 m. En motsvarande 100-årsuppspolning för scenarierna HB2, medel och EA2 ligger på 4.8, 5.5 respektive 6.2 m, det vill säga i värsta fall en ökning med 1.3 meter.

Man kan se hur återkomsttiden förändras för respektive scenario. Dagens 100-årsuppspolning uppgår till 4.9 m. För HB2-scenariet har samma uppspolningshöjd en återkomsttid på cirka 200 år (visas ej i figur), alltså till det bättre ur erosionssynpunkt. För medel- och EA2-scenariet reduceras återkomsttiden för denna uppspolning anmärkningsvärt. För medelscenariet blir återkomsttiden ca. 30 år, d.v.s. 1/3 av dagens. För EA2-scenariet skulle återkomsttiden bli så liten som ca 8 år. Detta innebär att en uppspolningshöjd på 4.9 m i värsta fall skulle inträffa cirka 13 gånger oftare än vad den gör idag.



Figur 11.6 En jämförelse av återkomsttider på uppspolningshöjder mellan de olika scenarierna.

11.5 Erosion av klitter

Med utgångspunkt från SWECLIM:s prognoser uppskattas även hur en klimatförändring skulle påverka den direkta klittererosionen. En stor osäkerhet i denna analys är hur det vertikala avståndet mellan vattenytan och klitterfoten (z_o) kommer

att variera i framtiden. Beräkningarna bygger på de antaganden som tidigare gjorts, att strandprofilen anpassar sig efter en vattenståndsförändring, se kapitel 11.1.

Den genomsnittliga klittererosionen per år för de olika scenarierna redovisas som en procentuell förändring utifrån hur erosionen ser ut idag:

HB2:	-15 %
Medel:	+22 %
EA2:	+75 %

Utifrån den förväntade framtida erosionen beräknades antalet tillfällen som krävs, av en specifik händelse, för att brott i klitterna ska uppstå (TFB). Resultaten redovisas i tabeller nedan och kan jämföras med samma beräkningar för den situation som råder idag, gjorda i kapitel 9.4.

Skillnaden är stor mellan dagens situation och de scenarier som satts upp för framtiden. Förändringen av TFB beror främst på volymminskningen av klitterna, till följd av ett ökat vattenstånd. På grund av förändringar i vindklimatet har dessutom sannolikheten för att en av dessa händelser ska inträffa ökat.

Även för den värsta vågen som befaras inträffa inom den simulerade perioden har TFB beräknats och redovisas i Tabell 11.6. Simulerat vattenstånd för samma tillfälle används.

Om den värsta simulerade vågen skulle inträffa inom ett 100-års perspektiv skulle detta medföra att klittret vid profil 15 skulle erodera ner under en händelse. Detta skulle i sin tur innebära att området bakom denna profil löper stor risk för översvämning.

11.6 Kritiska områden i Ystads Sandskog

Kritiska områden har lokaliserats utifrån simuleringar av vattenstånd, uppspolningshöjder och klittererosion.

Samtliga profiler kommer att drabbas av ett eventuellt ökat vattenstånd. Mest kritiskt för klitterna kommer det att vara vid profil 13, där en halvering av volymen kommer att ske. Även profilerna 8, 9, 11 och 15 kommer att drabbas. Minskningen av bredden på strandplanet är relativt jämn längs hela det studerade området och förväntas vara ca 2.5 m respektive 5 m för medel- och EA2-scenariet. Uppspolningen blir mest påtaglig på de profiler som ligger i mitten mellan två hövder, profil 10, 11, 15, 21 och 22. Dessa profiler karakteriseras av ett lågt strandplan med en brant klittervägg, samt relativt låga klitter. I dagsläget löper dessa ingen större risk för överspolning men vid framtida scenarier ökar sannolikheten drastiskt. EA2-scenariet ger kritiska resultat, där majoriteten av de inmätta strandprofilerna riskerar att överspolas. Klittererosionen är mest påtaglig

vid profil 8, 9, 11,13, 15 och 17. Även dessa profiler karakteriseras av ett lågt strandplan, där det vertikala avståndet mellan vattenyta och klitterfot är litet.

Tabell 11.3 Antal tillfällen som krävs för att brott i klitter ska uppstå (TFB), för olika profiler vid olika händelser enligt HB2-scenariet. Även återkomsttid för händelsen redovisas.

H ₀ / WL	Återkomsttid	TFB för respektive profil			
		Profil 13	Profil 15	Profil 17	Profil 21
4.0 / 0.0	10 år	6	6	7	8
3.5 / 0.0	4 år	9	9	18	14
3.0 / 0.0	9 mån	11	12	49	23
2.5 / 0.0	2 mån	17	22	-	62
2.5 / 0.5	4 mån	9	9	25	16

Tabell 11.4 Antal tillfällen som krävs för att brott i klitter ska uppstå (TFB), för olika profiler vid olika händelser enligt medel-scenariet. Även återkomsttid för händelsen redovisas.

H ₀ / WL	Återkomsttid	TFB för respektive profil			
		Profil 13	Profil 15	Profil 17	Profil 21
4.0 / 0.0	7 år	4	5	7	7
3.5 / 0.0	3 år	6	7	18	12
3.0 / 0.0	6 mån	8	10	48	20
2.5 / 0.0	1.5 mån	12	17	-	52
2.5 / 0.5	2 år	6	7	24	13

Tabell 11.5 Antal tillfällen som krävs för att brott i klitter ska uppstå (TFB), för olika profiler vid olika händelser enligt EA2-scenariet. Även återkomsttid för händelsen redovisas.

H ₀ / WL	Återkomsttid	TFB för respektive profil			
		Profil 13	Profil 15	Profil 17	Profil 21
4.0 / 0.0	4 år	3	4	7	6
3.5 / 0.0	2 år	4	6	17	10
3.0 / 0.0	4 mån	5	8	47	17
2.5 / 0.0	1mån	8	14	-	45
2.5 / 0.5	1.5 år	4	6	24	12

Tabell 11.6 Antal tillfällen som krävs för klitterbrott för den största simulerade vägen

Scenario	H ₀ / WL	TFB för respektive profil			
		Profil 13	Profil 15	Profil 17	Profil 21
HB2	4,38 / 0,14	5	4	4	6
AVG	4,70 / 0,14	3	3	3	4
EA2	5,02 / 0,14	2	1	2	3

12 Översiktlig analys

Utifrån den klimatdata som analyserats anses vattenstånd i Simrishamn och vindar i Falsterbo representera klimatet längs Skånes sydkust väl. Klimatserierna anger inte absoluta värden för Ystad, men precisionen anses ändå ge en tillräcklig tillförlitlighet för att uppfylla studiens syfte.

Med tanke på Ystads geografiska orientering, med angränsning till havet söderut, förekommer inte ”worst case scenario”, som karakteriseras av en kombination av högsta vågor och högsta vattenstånd. Detta eftersom höga vattenstånd uppstår vid nordliga vindar och höga vågor genereras vid sydliga vindar. Dessutom ligger Ystad längst in i Ystadbukten och skyddas därför från vindgenererande vågor från nordliga riktningar. Däremot genererar sydliga vindar höga vågor, på grund av att Östersjön ger relativt stora medelvattendjup och långa stryklängder.

Vågberäkningarna visade att medräkning av ackumulation av våghöjder vid tilltagande vind har stor betydelse för resultatet, medan en eventuell avklingningseffekt vid avtagande vind inte påverkade resultatet nämnvärt. Vidare visade resultaten att medelvåghöjden på djupt vatten mellan 1961 och 2004 var 0.87 m, för de våggenererande vindriktningar. Den maximala beräknade våghöjden beräknades till 4.8 m.

En stor del av de genererade vågorna orsakar tillsammans med samtidiga vattenstånd en uppspolning i strandzonen. Tack vare den goda noggrannheten på mätserierna, med observationer var tredje timme, har det kustnära klimatet kunnat beskrivas väl. Eftersom strandprofilens form varierar längs den studerade sträckan, varierar även effekten av uppspolningen. För en schematiserad profil beräknades en maximal uppspolning på 4.6 m. En uppspolningshöjd på 2 m inträffar i genomsnitt 250 timmar per år och en uppspolning med en återkomsttid på 100 år uppgår till 4.9 m.

Överspolningsrisken är idag störst vid profil 0, som är lokaliserad precis intill hövd 0. Eftersom denna profil idag är täckt med en genomsläpplig stenskoning blir inte effekten den samma som beräknats. Däremot finns det även en viss risk för överspolning vid profilerna 10, 11, 21 och 22, där det idag inte finns några erosionsskydd.

Det har inte gått att med säkerhet fastställa en absolut hastighet på klittererosionen i Ystads Sandskog, på grund av bristfällig bakgrundsdata om strandprofilernas utveckling. Istället har kritiska områden lokaliserats, där störst risk för brott i klitterna föreligger. För den situation som råder idag finns det inga klitter som direkt riskerar att erodera ner helt vid ett stormtillfälle. Däremot visar analysen att erosionen är som störst i områden där klitterfoten är lågt beläget, d.v.s. för profilerna 0, 8, 9, 13, 15 och 19. Profil 0 och 19 är idag beklädda med stenskoning, varför erosion här kan försummas. Vidare visar analysen att en förändring av z_0 har

större betydelse än en motsvarande förändring av klittervolymen ur brottsynpunkt. En anledning till detta kan dock vara att den erosionsmodell som används är känslig för variationer i z_0 .

Fram till idag har erosionen varierat längs kusten i Ystads Sandskog. Generellt har kustlinjen retarderat från 1950-talet fram till 70-talet, därefter har en ackumulation skett fram till år 2000. En förklaring till den ackumulation som skett kan vara uppförandet av de fem hövderna under 90-talet. Eftersom profilinmätningar mellan 2000-2004 visar att kusten nu åter har börjat erodera (Hanson, 2004), är frågan om kusten nu har anpassat sig efter de nya förutsättningar som råder så att erosionen åter kan ta vid. Hövderna förhindrar framförallt den kustparallella sedimenttransporten. Eftersom de farligaste vågorna kommer från sydliga riktningar och dessutom refrakteras så att infallsriktningen är parallell med hövderna när de närmar sig kusten, hindrar inte hövderna uppspolningen och klittererosionen.

Vid analyser av framtida klimat är det viktigt att ha i åtanke att de prognoser som utnyttjas endast är indikationer på hur framtida scenarier kan se ut. Klimatmodellerna är komplicerade och innehåller ett stort antal parametrar, vilka har stor betydelse för resultatet. Den validering som gjorts pekar dock på att modellerna stämmer relativt väl överens med verkligheten. Resultatet av SWECLIM:s simuleringar är starkt beroende av de förutsättningar som läggs fram. Genom att utnyttja historiska klimatserier för framtida analyser, inkluderas samspillet mellan vågor och vattenstånd, vilket annars är svårt att simulera.

EA2-scenariet bygger på att jordens befolkning fördubblas och att miljömedvetenheten inte kommer förändras. Scenariet skulle innebära en medelvattenståndsökning på 85 cm, vilket inte verkar sannolikt, med hänsyn till historiska data. Studier av medeltemperaturen visar dock att den globala temperaturen kan öka med 3.7°C inom 100 år, innebärande att ett sådant scenario mycket väl kan inträffa, eftersom stora delar av pol- och glacialisarna smälter. Scenariet skulle vidare innebära en förändring av vindstyrkorna på 20 % för vintermånaderna, vilket skulle medföra extremvindar upp emot 35 m/s.

EA2-scenariet kommer enligt beräkningsmodellerna innebära en kraftig minskning av både strandplanet och klittervolymen för majoriteten av profilerna, till följd av ett ökat vattenstånd. Det promenadstråk som idag sträcker sig längs kusten uppe på klitterna kommer på flera ställen erodera bort. Dessutom kommer de ökade vindstyrkorna medföra högre uppspolningar och mer påtaglig erosion. Återkomsttiden för en uppspolning på 4.9 m, som idag är 100 år, kan reduceras till 8 år, vilket innebär att händelsen kan komma att inträffa 13 gånger oftare.

För de profiler som idag inte överspolas kommer risken i framtiden för EA2-scenariet öka markant. Dessutom kommer den eventuella vindökningen innebära att den direkta erosionen av klitter kan öka med upp till 75 % om 100 år, jämfört med idag. Eftersom erosionsberäkningarna bygger på att strandprofilens form bibehålls är det de profiler som är känsligast idag, även känsligast i framtiden,

d.v.s. profil 0, 8, 9, 13, 15 och 19. Profil 15 löper dessutom stor risk för brott vid den värsta simulerade händelsen, med ett vattenstånd på 0.14 m över medelvattentytan och vågor på 5.8 m.

HB2-scenariet, som bygger på att världens befolkning uppgår till 10.4 miljarder och en större miljömedvetenhet än för EA2-scenariet, skulle innebära en minskning av medelvattenståndet på 5 cm, samtidigt skulle vindstyrkorna inte förändras nämnvärt, -3 – 2 % jämfört med dagens vindstyrkor.

HB2-scenariet ger ett kustklimat som är mycket likt dagens situation, där medelvattenståndet och vindkaraktäristika kan beskrivas som näst intill oförändrade. Scenariet resulterar i en förlängning av strandplanet på grund av vattenståndssänkningen och en knappt märkbar minskning av uppspolningshöjder. Vidare kommer en uppspolning på 4.9 m ha en återkomsttid på 200 år. Överspolningar sker mer sällan och risken för brott i klitter är i stort sett samma som idag.

Enligt medelscenariet kommer strandplanet och klittervolymen att minska i mindre omfattning än för EA2-scenariet. En uppspolning på 4.9 m kommer ha en återkomsttid på 30 år, jämfört med 100 år enligt dagens situation. Samma profiler som idag överspolas, riskerar även i framtiden att överspolas, men upp till 4 gånger oftare. Den direkta klittererosionen orsakad av vindökning kan öka med upp till 22 % jämfört med idag.

Frågan är vilka förutsättningar som är mest trovärdiga. Enligt SIDA (2005) har världens befolkning ökat från 2.5 miljarder till drygt 6 miljarder sedan 1950. Skulle denna ökning fortskrida räknar SIDA med att befolkningsmängden uppgår till 9.4 miljarder år 2050 (SIDA, 2005), vilket talar för EA2-scenariet. Huruvida mer kraft kommer att läggas på att minska utsläppen av bl.a. fossila bränslen, är svårt att avgöra, men med tanke på den fortskridande industriella utvecklingen är en minskning av utsläpp svår att föreställa sig.

Utifrån analyser av befintlig vattenståndsdata kommer medelvattenståndet att öka med 7 cm inom ett 100-års perspektiv enligt befintlig trend. För vindarna har inga trender kunnat påvisas, varken linjära eller cykliska. Det är därför svårt att se likheter mellan de prediktioner som gjorts utifrån historiska data och de simuleringar som SWECLIM presenterar. En förklaring till detta är även att prediktionerna utifrån historiska data bygger på linjära trender där inga miljöpåverkande faktorer har tagits i beaktande, såsom förändringar i medeltemperaturen.

Stranden har historiskt sett haft ett bredare strandplan, och därmed utrymme för retardation. Stranden, som successivt har minskat med åren, har nu kommit till ett kritiskt läge där utrymme för ytterligare retardation inte är möjlig utan omfattande konsekvenser. Generellt, vid ett ökat medelvattenstånd, kommer släntlutningen att bli brantare. Strandgräset som växer på klitterna hjälper till att binda sanden men

samtidigt tillåts en mycket brant släntlutning vilket kan öka uppspolningshöjderna samt risken för överspolning.

Ett tänkbart sätt att minska den eventuellt ökande erosionen i framtiden är att bekläda klitterna med stenskonning eller gabioner. Detta är effektiva metoder för att minska erosionen av klitterna, men däremot skulle en snabbare reduktion av strandplanet ske vid en ökning av vattenstånd. Stenskonningen kan dessutom, till skillnad från gabioner, ses som en mindre lyckad åtgärd ur ett estetiskt perspektiv, då strandkänslan går förlorad.

En annan tänkbar åtgärd är utfyllnad av strandplanet. Detta skulle öka höjden mellan vattenytan och klitterfoten, vilket skulle medföra mindre erosion av klitterna. Strandplanet blir då även mindre känsligt för en eventuell vattenståndsökning. Metoden skulle kräva ett kontinuerligt och kostsamt underhåll, men med tanke på strandens ekonomiska värde gällande turistnäringen kan det dock vara värt att göra en satsning på utfyllnad för att på så vis bibehålla stranden.

Även om åtgärder vidtas kommer ett ökat vattenstånd påverka stranden. Det är svårt att undkomma naturens krafter.

Vissa av de modeller och beräkningar som används i denna studie bygger på både empiriska och analytiska antaganden. Ju fler osäkra antaganden som görs, ju mindre pålitligt blir resultatet. Eftersom det alltid finns en viss osäkerhet i prognoser anses ändå resultatet tillräckligt pålitligt för att kunna avgöra kustens respons till eventuella förändringar i det framtida klimatet. Syftet med denna studie är inte att förse läsaren med absoluta prognoser vilket är omöjligt vid en framtidsanalys, utan peka på möjliga trender.

Ännu en viktig aspekt är strandens naturliga återhämtning som inte har täckts in i denna studie. Denna process har framförallt betydelse för den direkta erosionen av klitter.

13 Slutsatser

Fram till idag har uppspolning och klittererosion haft påtaglig effekt på kusten i Ystads Sandskog. Risken är nu stor att kustprocessernas inverkan kommer att öka i framtiden. Enligt SWECLIM:s scenarier finns antydningar på att medelvattenståndet kan stiga upp till 85 cm samtidigt som vindklimatet ökar inom ett 100-års perspektiv. Ett eventuellt ökat vattenstånd kommer orsaka en minskning av bredden på strandplanet och volymen på klitterna. Ökade vindstyrkor kommer att medföra en ökad klittererosion och ökad risk för överspolning. Detta kan i sin tur innebära att områden som idag är populära promenadstråk, badplatser och rekreationsområden, delvis eller helt kommer att försvinna.

De modeller och beräkningsmetoder som använts har visat att både uppspolning och klittererosion är starkt beroende av strandprofilens utseende. Strandområden som karakteriseras av en liten lutning och smal bredd på strandplanet samt har en brant klittervägg är mest känsliga för klittererosion och uppspolning. Dessa profiler återfinns idag systematiskt i mitten av kustavsnitt som är beläget mellan två hövder. För det värsta scenariot som satts upp kan återkomsttiden för en uppspolningshöjd på 4.9 m komma att reduceras från 100 år till 8 år. I värsta fall befaras även klittererosionen öka med upp till 75 % jämfört med idag.

Ystads kommun har under åren uppfört ett antal erosionsskydd längs den studerade sträckan. Många av dessa är placerade i områden som enligt beräkningsmodellerna är mest kritiska ur överspolnings- och erosionssynpunkt. Exempel på detta är en stenskonung direkt öster om hövd 0 och en stenskonung väster om badvaktstornet mellan hövd 3 och 4. Erosionsskydden har här uppfyllt sina syften. Däremot är inga åtgärder vidtagna direkt öster om betongfundamentet mellan hövd 1 och 2, mittemellan hövd 2 och 3 eller öster om badvaktstornet mellan hövd 3 och 4. På dessa platser befaras klittererosionen och uppspolningen ha störst effekt i ett 100-årsperspektiv.

En tänkbar åtgärd i dessa kritiska områden är sandutfyllnad som skulle höja strandplanet och då reducera den direkta klittererosionen. Metoden kräver kontinuerligt och kostsamt underhåll men är utseendemässigt mer tillfredställande än andra metoder. Investeringen kan vara väl värd, för att bibehålla den attraktiva och ekonomiskt viktiga stranden.

Det finns alltid en viss osäkerhet i prognoser, varför de resultat som presenteras i denna rapport endast bör ses som en indikation, på strandzonens respons till eventuella förändringar i det framtida klimatet.

För den intresserade föreslås att en vidare studie i strandens naturliga återhämtning görs. Denna process är av stor vikt vid erosion ur ett längre tidsperspektiv men har inte kunnat täckas i föreliggande arbete.

14 Referenslista

Litteratur

Bernes, C. 2003, "A Warmer World – the greenhouse effect and climate change", Swedish Environmental Protection Agency

Brännlund, I., Svensson, L. 2005, "Kusterosion i Bjärred, Lomma kommun", Department of Water Resources Engineering, Lund University, Lund

Chao, B.F., Farr, T., LaBrecque, J., Bindchandler, R., Douglas, B., Rignot, E., Shum, C.K., Wahr, J. 2002, "Understanding the Sea Level", Geoscience and Remote Sensing Symposium, vol 1, pp 125-127

Hamill, L. 2002, "Understanding Hydraulics", Kapitel 13, Palgrave

Hanson, H. 2004. "Profile Measurements at Löderups Strandbad and Ystad Sandskog," Dept. of Water Resources Eng., Lund Inst. of Tech./Univ. of Lund.

Hudson, D.A., Jones, R.G. 2002, "Simulations of present-day and future climate over southern Africa using HadAM3H", Hadley centre technical, note 38

Hågeryd, A-C., Rankka, K., Rankka, W., Rosqvist, H. 2005, "Strandmorfologi. Studie av kuststräckan från Ystad till Sandhammaren.", Swedish Geotechnical Institute, SGI, Varia 554

IPCC 2001, "Climate Change 2001: The Scientific Basis - Contribution of Working Group I to the third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", Cambridge University Press, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.

Karoly, D.J., Braganza, K., Stott, P.A., Arblaster, J.M., Meehl, G.A., Broccoli, A.J., Dixon, K.W. 2003, "Detection of a Human Influence on North American Climate", Science, Vol 302, Issue 5648, pp 1200-1203

Kriebel, D.L., Kraus, N., Larson, M., 1991, "Engineering methods for predicting beach profile response", Proceedings from Coastal Sediments-91, ASCE, pp 558-559

Larson, M., Erikson, L., Hanson, H. 2004, "An analytical model to predict dune erosion due to wave impact", Coastal Engineering 51

Larson, M., Hanson, H. 1992, "Analys av klimatologiska och hydrografiska data för Ystadbukten", Institutionen för Teknisk Vattenresurslära, Lunds Tekniska Högskola, Lunds Universitet

Larson, M., Kraus, N.C., Hanson, H. 2002, "Simulation of regional longshore sediment transport and coastal evolution – The "Cascade" model", Proc. 28th Int. Coastal Eng. Conf., ASCE

Mayer, R.H., Kriebel, D.L. 1994, "Wave runup on composite-slope and concave beaches", Proc. 24th Int. Coastal Eng. Conf., ASCE, pp 2325-2339

Meier, M., Broman, B., Kjellström, E. 2004, "Simulated sea level in past and future climates of the Baltic Sea", Rossby Centre, Clim. Res., vol 27: 59-75

Mörner, N-A. 2003, "Estimating future sea level changes from past records", Global and Planetary Change, vol 40, pp 49-54

Mörner, N-A. 1999, "Sea level and climate: rapid regressions at local warm phases", Quaternary International 60, pp 75-82

Nakićenović, N., Davidson, O., Davis, G. 2000, "Summary for Policymakers: Special Report on Emission Scenarios", IPCC

Nilsson, L. 2004, "Erosionsrapport över kusten i Ystad kommun – En nulägesbeskrivning av erosionssituationen i Ystad kommun.", Ystad kommun – Teknik o Fastighet, sid 11-17

Segar, D.A. 1997, "Introduction to Ocean Science", Wadsworth Publishing Company

Silenzi, S., Devoti, S., Nisi, F. M., De Donatis, M., Gallerini, G., Aminti, P., Pranzini, E., Rossi, L., Gabellini, L. 2002, "Integrated Hazard of Italian Coastal Plains with Respect to relative Sea Level Rise: A Case Study in Versilia Plain", Littoral 2002, The Changing Coast, pp 115-124

US Army Corps Of Engineers 1984, "Shore Protection Manual", Coastal Engineering Research Center, Department of the army, Washington, USA

Ystad kommun 2004, "Översiktsplan 2005 för Ystad kommun – Bilaga underlag", Ystad, sid 55-56

Opublicerade skrifter

Larson, M. 2005, "En enkel modell för att beskriva vind-genererade vågors uppbyggnad och avklingning", Avdelningen för Teknisk Vattenresurslära, LTH

Internet

SMHI 2005, "Havsvattenstånd 2005 – Beräknade medelvattenstånd för 2005 i olika höjdsystem", http://www.smhi.se/hfa_coord/InfoC/mwreg/mwreg.pdf, 2005-01-12

SCB 2005, "Kust och stränder i Sverige", Statistiska centralbyrån, <http://www.scb.se/Statistik/MI/MI0812/2000I02/MI50SM0201.pdf>, 2005-05-10

SIDA 2005, "Befolkning och utveckling"
<http://www.sida.se/sida/jsp/polopoly.jsp?d=131&a=6375>, 2005-05-17

Bildreferenser

Hanson, H. 2003, <http://aqua.tvrl.lth.se/hh/atlas/index.htm>, 2005-05-23

Hågeryd, A-C., Rankka, K., Rankka, W., Rosqvist, H. 2005, "Strandmorfologi. Studie av kuststräckan från Ystad till Sandhammaren.", Swedish Geotechnical Institute, SGI, Varia 554; fig 2

Meier, M., Broman, B., Kjellström, E. 2004, "Simulated sea level in past and future climates of the Baltic Sea", Rossby Centre, Clim. Res., vol 27: 59-75
Figure 7, sid 8

Mörner, N-A. 1999, "Sea level and climate: rapid regressions at local warm phases", Quaternary International 60, pp 75-82; fig 4, sid 78

SMHI, 2005-04-26, <http://www.smhi.se/>

Svensson, R. 2005, Ystad kommun

Muntliga

Hanson, H. 2005, Angående cykliska trender i vindstyrkor, Avdelningen för Teknisk Vattenresurslära, LTH, 2005-05-11

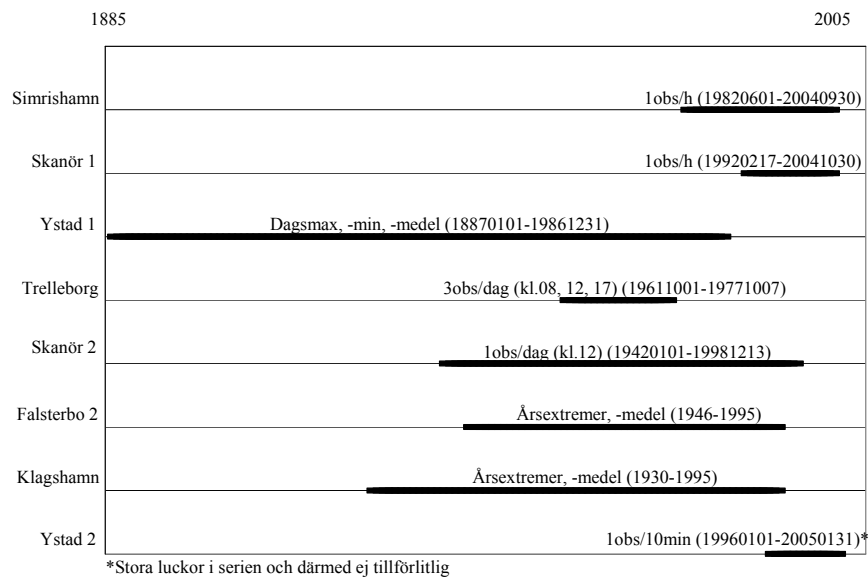
Flarup, M. 2005, SMHI, email 2005-01-15

Larson, M. 2005, Angående strandprofilers utseende utifrån kornstorlek, Avdelningen för Teknisk Vattenresurslära, LTH, 2005-02-02

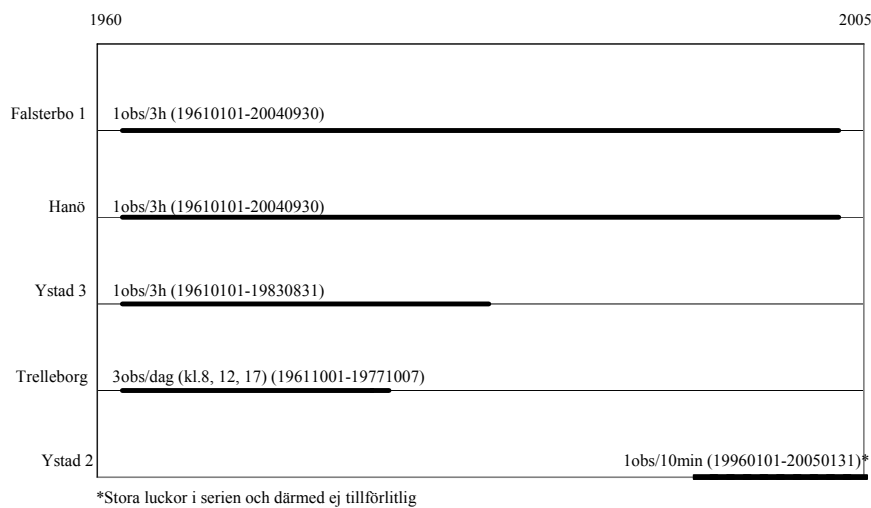
Nebrelius, B-A., 2005, Angående översvämningar i konferensanläggningen Ystad Strandbad, Räddningsverket, email 2005-05-16

Appendix I – Tillgängliga dataserier

Inför studien har en mängd data samlats in för bestämning av vilka som relevanta för studien. Figur AI.1 och AI.2 visar en översikt av de serier som analyserats avseende vattenstånd respektive vinddata. I följande underkapitel görs en kortfattad sammanfattning av tillgänglig data.



Figur AI.1 Översikt över tillgängliga dataserier avseende vattenstånd 1885 - 2005.



Figur AI.2 Översikt över tillgängliga dataserier avseende vinddata 1960 - 2005.

Simrishamn

Källa: SMHI
Typ av data: Vattenstånd
Period: 19820601-20040930
Registreringsintervall: 1 timme
Gjorda korrekationer: Från lokalt -766 för RH70

Kommentar: Serien är komplett. Används för analys av simultana vattenstånd med Ystad och Skanör. Får beskriva Ystads vattenstånd under 1980-, 1990- och början av 2000-talet, när sådana data för Ystad saknas. Kompletterar Ystad 1 serien, när årsmedelvatten under överlappningsperioden liknar varandra.

Skanör 1

Källa: SMHI
Typ av data: Vattenstånd
Period: 19920217-20041030
Registreringsintervall: 1 timme
Gjorda korrekationer: Från lokalt -1838 för RH70

Kommentar: Serien är komplett. Används för analys av simultana vattenstånd med Ystad och Simrishamn.

Ystad 1

Källa: SMHI
Typ av data: Vattenstånd
Period: 18870101-19861231
Registreringsintervall: 1 per dag, dagsmax, dagsmin respektive dagsmedel

Kommentar: Kompletteras med Simrishamnsserien och sträcker sig därmed till år 2004. Används för analys av trenden för medelvatten, varur en extrapolation av trenden görs och jämförs med resultat framtagen av SWECLIM. Används även för analys av återkomstperioder för extremvärden.

Ystad 2

Källa: Ystad Hamn
Typ av data: Vattenstånd och vinddata
Period: 19960101-20050131
Registreringsintervall: 1obs/10min
Gjorda korrekationer: Från lokalt +8 för RH70

Kommentar: Vattenståndsserien används vid analys av likheten mellan Simrishamn och Skanör under månader då Ystadserien är komplett. Gällande vinddata har mätinstrumentets position ej kunnat bekräftas. Därför är ingen korrektion möjlig att göra. För längre perioder uppfyller inte Ystadserien sitt syfte eftersom registreringar periodvis saknas helt.

Falsterbo 1

Källa: SMHI
Typ av data: Vinddata
Period: 19610101-20040930
Registreringsintervall: 3 timmar

Kommentar: Används för jämförelse med vindar i Hanö. Visar att vindar i södra Östersjön verkar vara lika. Ingen korrektion krävs eftersom registreringar gjorts på 10 m. Simrishamn ligger närmre Ystad än vad Hanö gör. Den icke-störande (av exempelvis land) cirkelsektorn (för vindriktningen) är densamma för Falsterbo som för Ystad. Därför används denna vinddata vid analys av uppspolning.

Hanö

Källa: SMHI
Typ av data: Vinddata
Period: 19610101-20040930
Registreringsintervall: 3 timmar

Kommentar: Används för jämförelse med vindar i Simrishamn. Visar att vindar i södra Östersjön verkar vara lika. Används ej för vidare analys eftersom registreringar är gjorda på 64 m.ö.h, vilket medför att korrektioner för vinddatan krävs, och därmed en felkälla förestående.

Trelleborg

Källa: Trelleborgs Hamn ur loggbok via Institutionen för Teknisk Vattenresurslära, Lunds Tekniska Högskola
Typ av data: Vattenstånd och vinddata
Period: 19611001-19771007
Registreringsintervall: 3obs/dag (kl. 08, 12, 17)

Kommentar: Mätserien är något kort och registreringar har inte gjorts under hela dygnet, varför ingen vidare analys har gjorts.

Skanör 2

Källa: Brovakten, Falsterbokanalen ur loggbok, via Institutionen för Teknisk Vattenresurslära, Lunds Tekniska Högskola
Typ av data: Vattenstånd
Period: 19420101-19981213
Registreringsintervall: 1obs/dag (kl. 12.00)

Kommentar: Endast en registrering per dag, vilket innebär att den inte är tillräcklig för vidare analys.

Falsterbo 2

Källa: Brovakten, Falsterbokanalen ur loggbok, via Institutionen för Teknisk Vattenresurslära, Lunds Tekniska Högskola
Typ av data: Vattenstånd
Period: 1946-1995
Registreringsintervall: Årsmax

Kommentar: Endast årsmax enligt kalenderår. Årsmax enligt klimatår omöjliga att finna. Ingen vidare analys har gjorts.

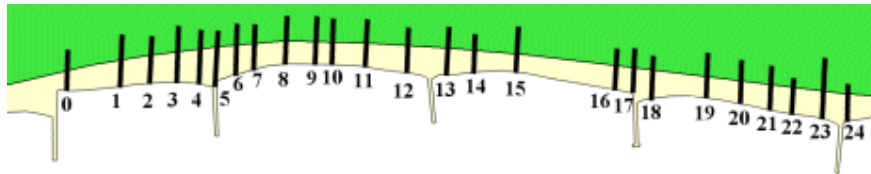
Klagshamn

Källa: SMHI via Institutionen för Teknisk Vattenresurslära, Lunds Tekniska Högskola
Vad: Vattenstånd
Period: 1930-1995
Registreringsintervall: Årsmax, årsmin, årsmedel

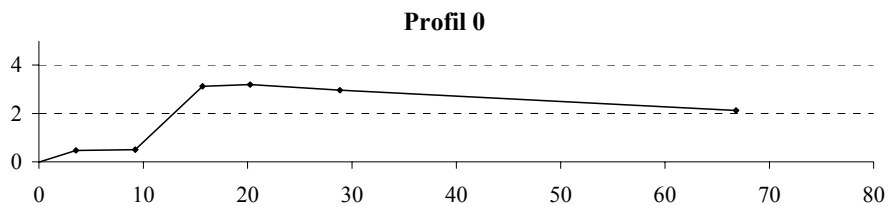
Kommentar: Årsvärde enligt kalenderår. Går ej att transformera till klimatår och därmed görs ingen vidare analys av serien.

Appendix II – Översikt av inmätta profiler

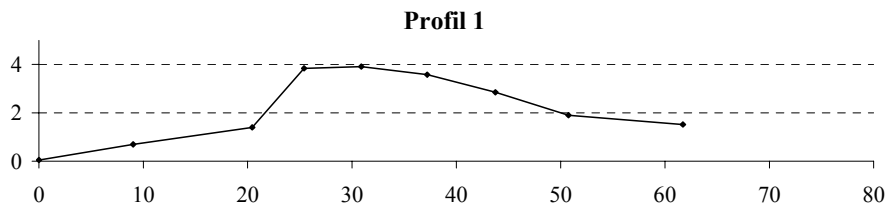
Nedan redovisas tvärsnitt av de profilmätningar som utförts i Ystads Sandskog, under april 2005. Figur AII. visar en översikt av det studerade området. Alla avstånd i meter.



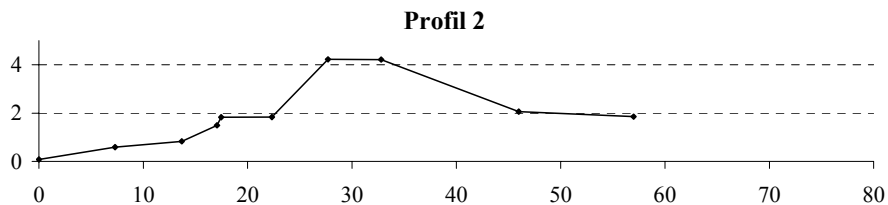
Figur AII.1 Översikt av det område där profilmätningar utförts



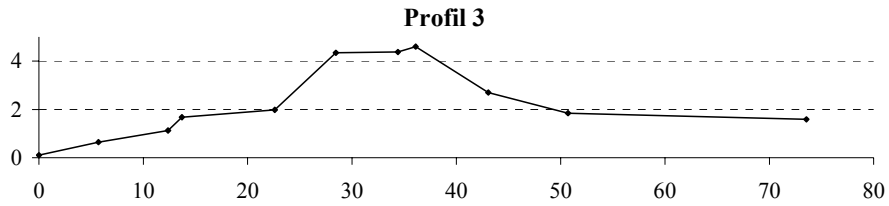
Figur AII.2



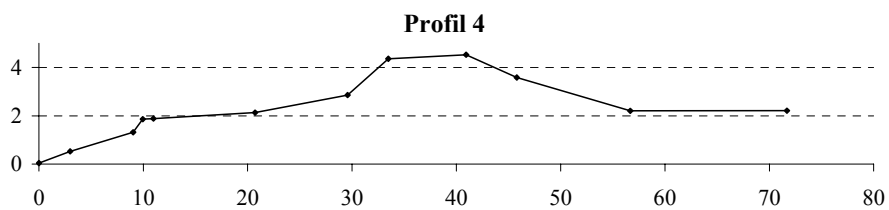
Figur AII.3



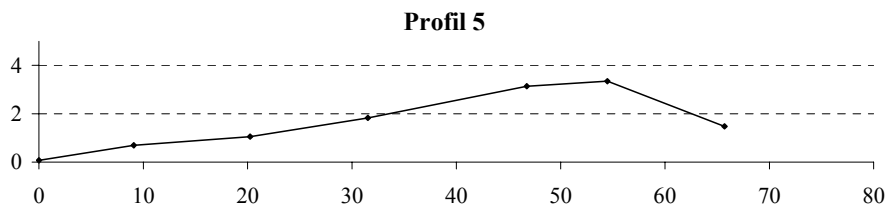
Figur AII.4



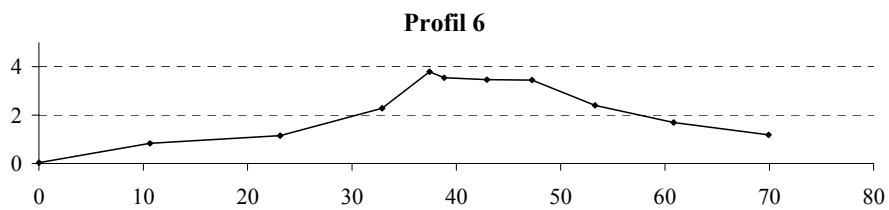
Figur AII.5



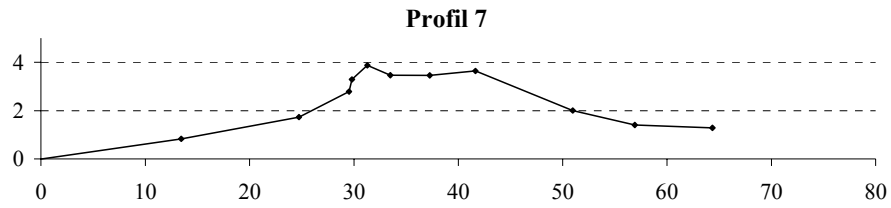
Figur AII.6



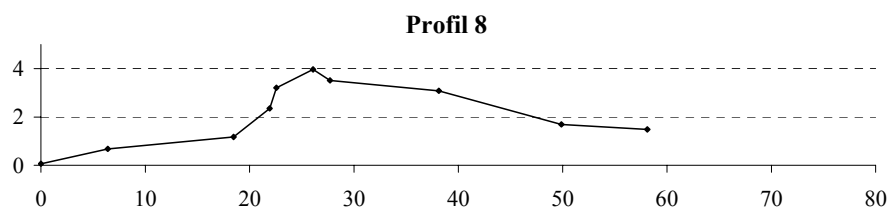
Figur AII.7



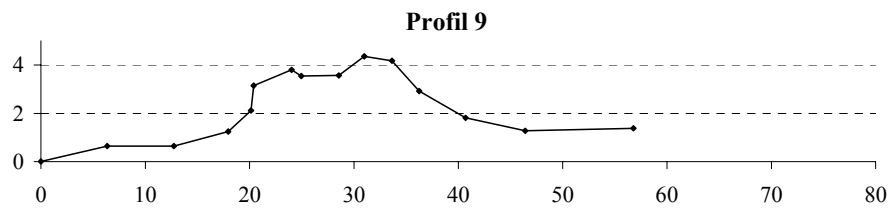
Figur AII.8



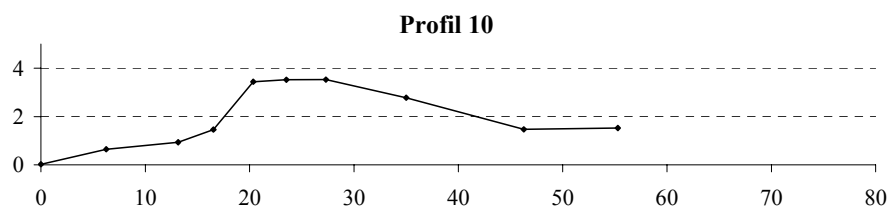
Figur AII.9



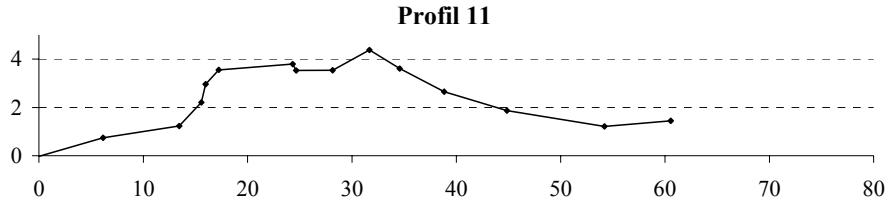
Figur AII.10



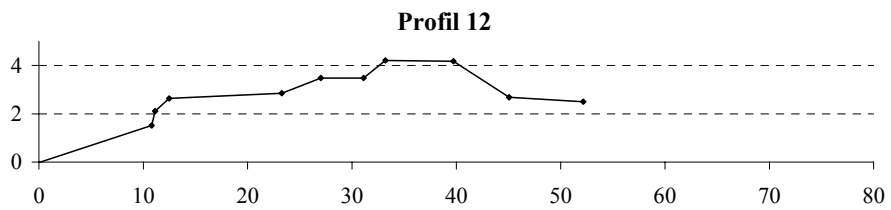
Figur AII.11



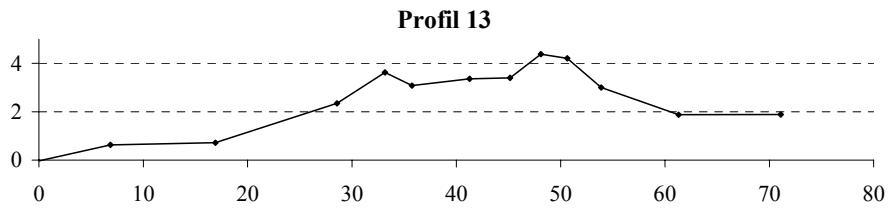
Figur AII.12



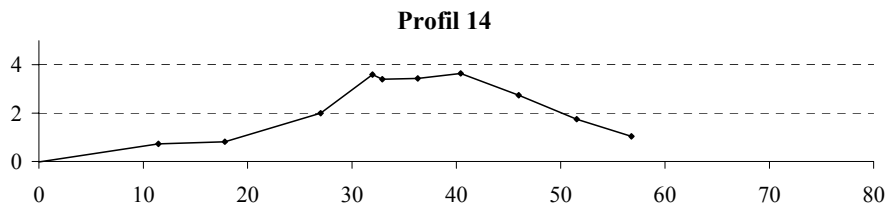
Figur AII.13



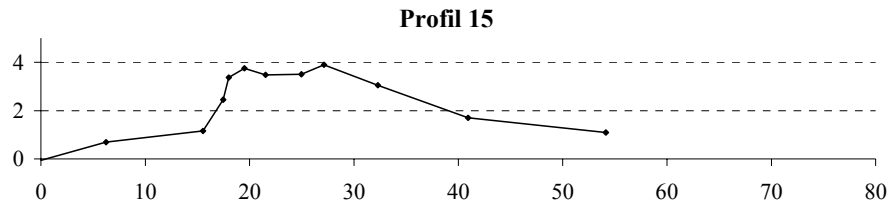
Figur AII.14



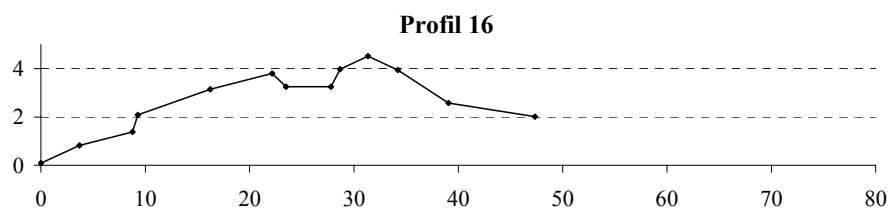
Figur AII.15



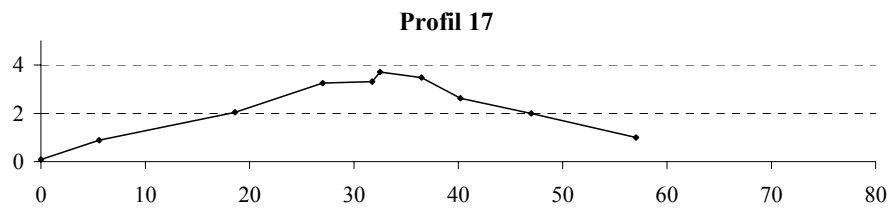
Figur AII.16



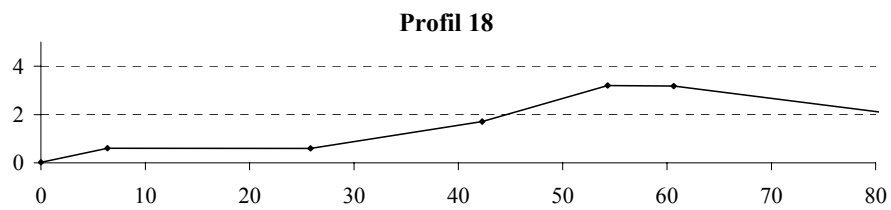
Figur AII.17



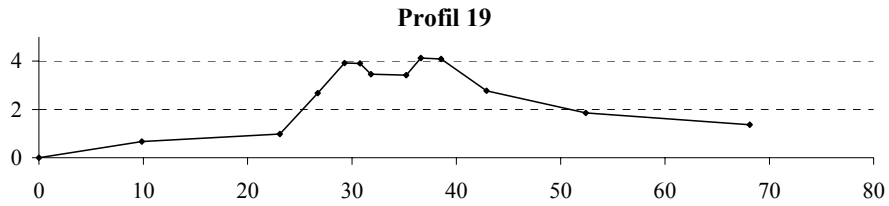
Figur AII.18



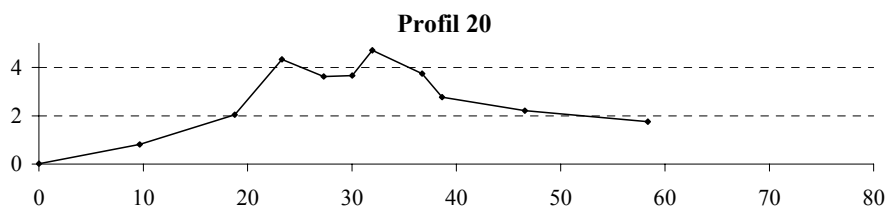
Figur AII.19



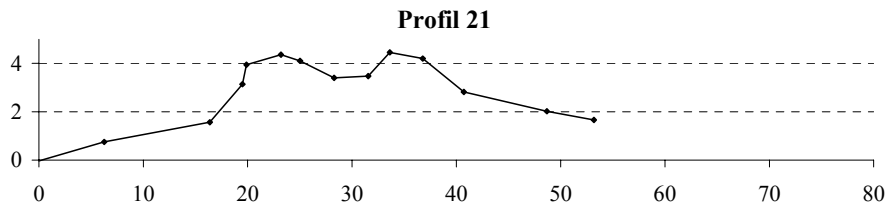
Figur AII.20



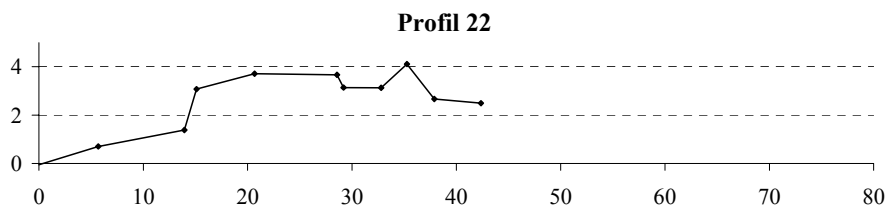
Figur AII.21



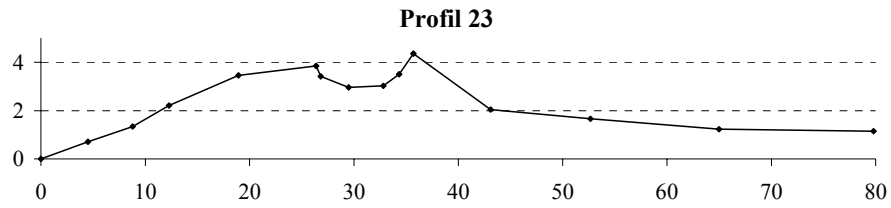
Figur AII.22



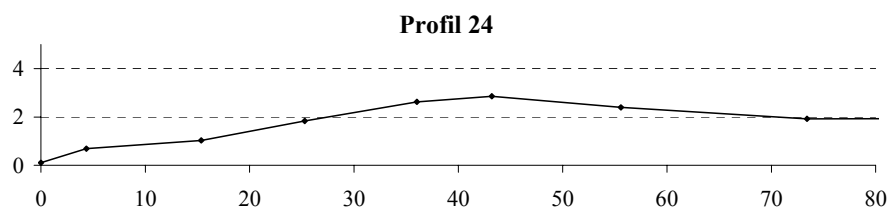
Figur AII.23



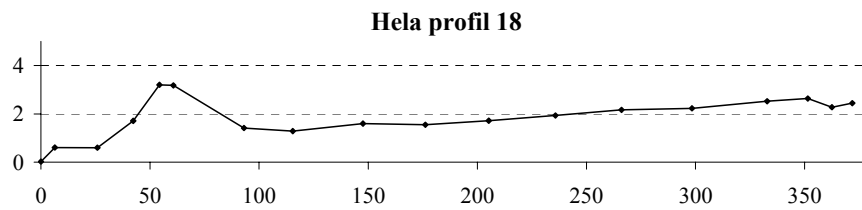
Figur AII.24



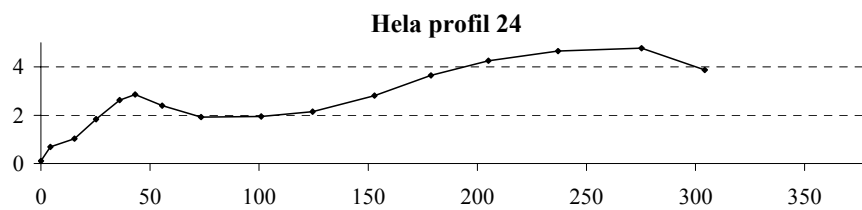
Figur AII.25



Figur AII.26



Figur AII.27



Figur AII.28

Appendix III – Klimatårsindelning

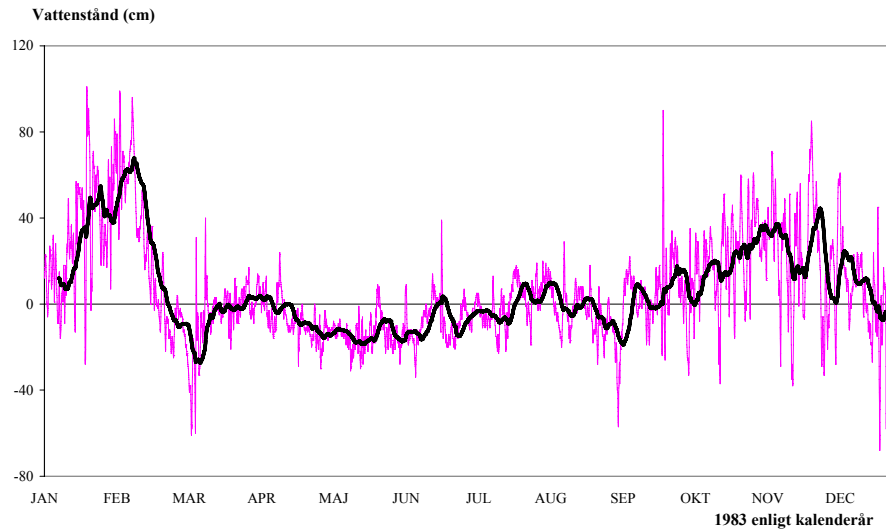
Den största meteorologiska aktiviteten äger rum under vinterhalvåret, när de flesta stormtillfällena och de högsta vattenstånden inträffar. Figur AIII. - Figur AIII. visar tydliga toppar mellan oktober och februari. Tabell AIII. visar även att högre vattennivåer än +100 cm under vintermånaderna har registrerats vid 38 tillfällena, men endast vid ett tillfälle under sommarmånaderna. Liknande fördelning föreligger gällande höga vindstyrkor med 84 uppmätta tillfällena över 20 m/s under vintermånaderna respektive 2 tillfällena under sommarmånaderna.

Vid årsindelning enligt kalenderår (januari – december) finns alltså risk att man bryter ett stormtillfälle till två skilda år och på så sätt kan missa den absoluta toppen för denna specifika stormperiod.

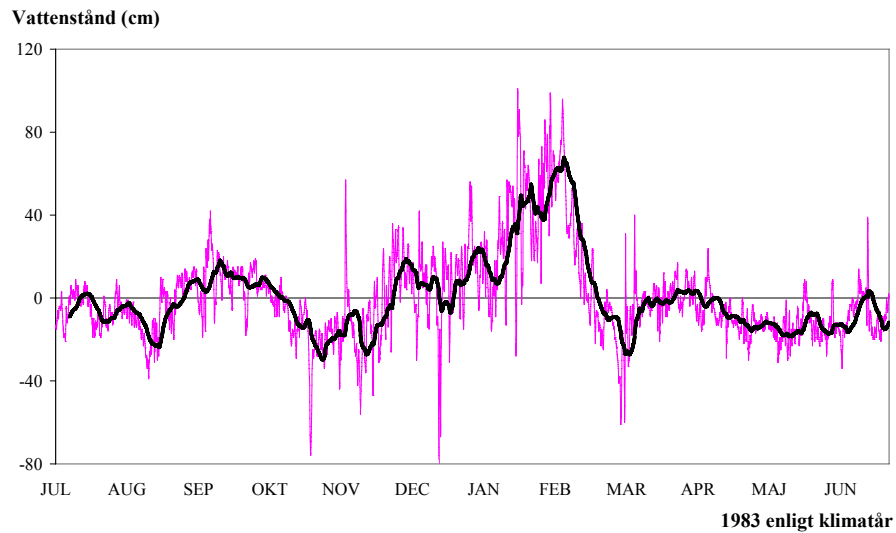
För att komma åt de absoluta extremerna för varje stormperiod delades året i den här rapporten in i så kallat klimatår. Ett klimatår startar 1 juli föregående år och slutar 30 juni det aktuella året. Om inget annat anges innebär alltså till exempel 1983 i den här rapporten perioden 1 juli 1982 – 30 juni 1983.

Tabell AIII.1 Antal uppmätta värden och när på året de inträffar. DJF = december, januari, februari o.s.v. Under perioden JJA sker årsskiftet enligt klimatår. För vattennivåerna har SMHI:s 100-årsserie använts och för vindstyrkan har serien från Falsterbo använts.

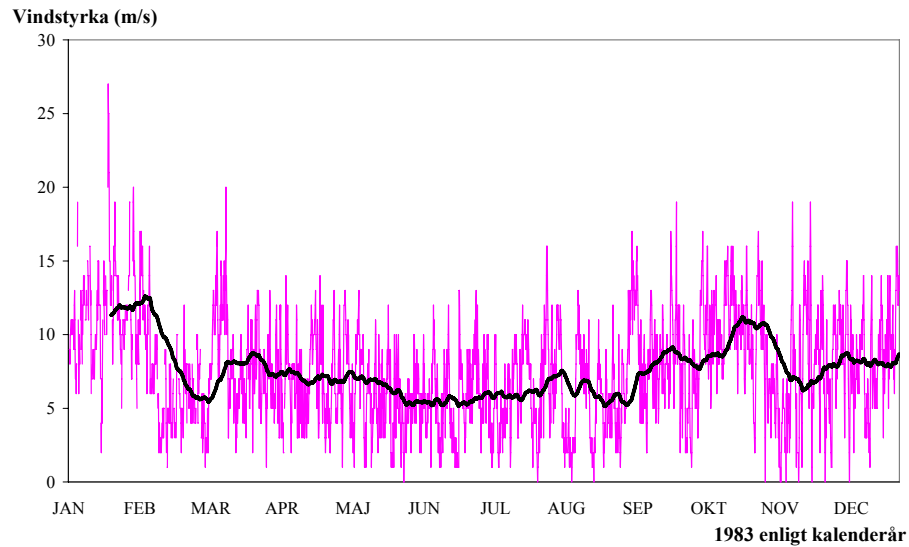
	DJF	MAM	JJA	SON
Vattennivåer (cm)				
>100	38	2	1	7
Vindstyrka (m/s)				
>20	84	13	2	66



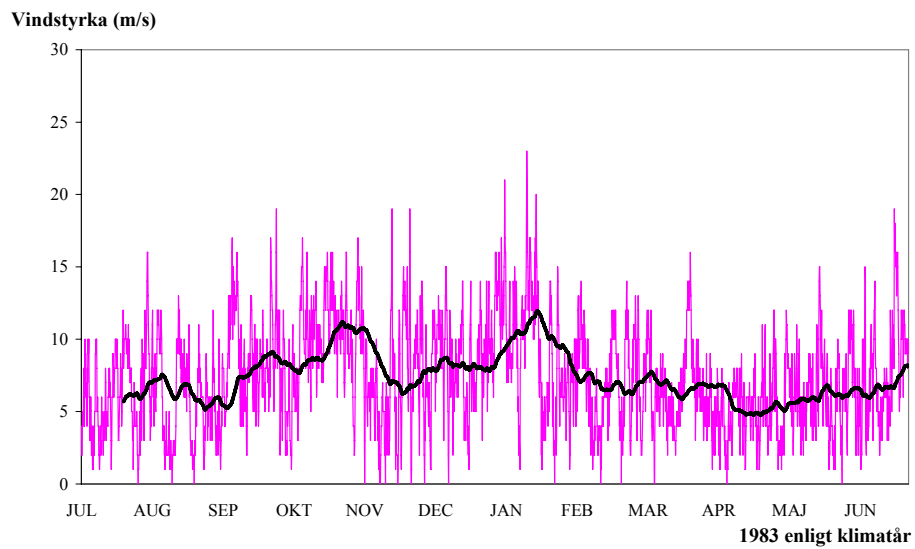
Figur AIII.1 Uppmätta vattenstånd i Simrishamn under kalenderåret 1983. Den mörkare linjen anger ett rörligt medelvärde med 150 mätvärden.



Figur AIII.2 Uppmätta vattenstånd i Simrishamn under klimatåret 1983. Den mörkare linjen anger ett rörligt medelvärde med 150 mätvärden.



Figur AIII.3 Uppmätta vindstyrkor i Falsterbo under kalenderåret 1983. Den mörkare linjen anger ett rörligt medelvärde med 150 mätvärden.



Figur AIII.4 Uppmätta vindstyrkor i Falsterbo under klimatåret 1983. Den mörkare linjen anger ett rörligt medelvärde med 150 mätvärden.

Appendix IV – Beauforts vindskala

Tabell AIV.1 Översättning av Beauforts vindskalatill vanliga benämningar

Land- benämning	Beaufort	Knop	m/s	km/h	Sjö- benämning
lugnt	0	< 1	0 - 0,2	< 1	stiltje
svag vind	1	1 - 3	0,3 - 1,5	1 - 5	bris
svag vind	2	4 - 6	1,6 - 3,3	6 - 11	bris
måttlig vind	3	7 - 10	3,4 - 5,4	12 - 19	bris
måttlig vind	4	11 - 15	5,5 - 7,9	20 - 28	bris
frisk vind	5	16 - 21	8,0 - 10,7	29 - 38	bris
frisk vind	6	22 - 27	10,8 - 13,8	39 - 49	bris
hård vind	7	28 - 33	13,9 - 17,1	50 - 61	kuling
hård vind	8	34 - 40	17,2 - 20,7	62 - 74	kuling
hård vind	9	41 - 47	20,8 - 24,4	75 - 88	kuling
storm	10	48 - 55	24,5 - 28,4	89 - 102	storm
storm	11	56 - 63	28,5 - 32,6	103 - 117	storm
orkan	12	63 <	32,7 <	117 <	orkan

Appendix V – Vindstatistik

Tabell AV.1 Antal tillfällen som det blåst med en viss vindstyrka från olika vindriktningar

Vindstyrka (m/s)	N	NO	O	SO	S	SV	V	NV
1	454	725	529	421	484	442	528	440
2	911	1377	1117	925	1164	1056	1142	894
3	941	1354	1258	1080	1416	1267	1282	979
4	1213	1366	1942	1694	2040	1911	1950	1274
5	919	852	1687	1447	1751	1680	1918	1237
6	1000	695	2105	1728	1936	2201	2518	1499
7	662	413	1626	1234	1439	1767	2362	1152
8	669	301	1717	1242	1383	2056	2748	1252
9	526	139	1296	908	945	1486	2254	895
10	442	97	1112	791	864	1516	2342	860
11	262	55	659	454	489	925	1431	575
12	242	41	561	394	431	932	1395	506
13	139	24	304	192	262	477	729	289
14	98	14	231	159	208	350	702	233
15	58	3	112	70	104	184	379	146
16	39	5	55	59	87	160	302	118
17	16	2	18	20	23	64	86	48
18	15	1	20	9	34	44	93	35
19	7	0	24	10	17	33	108	38
20	6	0	13	5	11	19	55	27
21	5	0	9	2	6	14	37	13
22	0	0	1	2	1	4	24	5
23	1	0	0	2	3	1	12	5
24	0	0	0	0	1	1	6	1
25	0	0	0	1	0	0	5	0
26	1	0	0	0	0	0	2	0
27	0	0	0	0	0	0	1	0
28	0	0	0	0	0	0	1	0

Appendix VI – Vågberäkningar

Nedan redovisas formler och tillvägagångsätt för beräkning av vågkaraktistika enligt SPM (US Army Corps Of Engineers, 1984).

Som ingångsparameter används en sk effektiv vindstyrka U_A som ges av,

$$U_A = 0.71U^{1,23} \quad (\text{AVI.1})$$

där U är den uppmätta vindstyrkan korrigerad för höjd, läge etc. Utifrån en given stryklängd, vindstyrka och varaktighet kan en våghöjd och vågperiod på djupt vatten beräknas, enligt :

$$H_{mo} = 5.112 \cdot 10^{-4} U_A F^{1/2} \quad (\text{AVI.2})$$

$$T_m = 6.238 \cdot 10^{-2} (U_A F)^{1/3} \quad (\text{AVI.3})$$

Där H_{mo} är våghöjden på djupt vatten, T_m är vågperioden, F är stryklängd. För aktuell stryklängd beräknas en motsvarande varaktighet (t_m) som jämförs med vindens varaktighet (t_v), enligt:

$$t_m = 3.215 \cdot 10^1 \left(\frac{F^2}{U_A} \right)^{1/3} \quad (\text{AVI.4})$$

Om förhållandet $t_v < t_m$ råder, är vindens varaktighet begränsande och den motsvarande stryklängen (F_v) kan beräknas genom en omskrivning av ekvation AVI.4 där t_m ersätts med t_v .

Förhållanden som råder vid fullt utvecklad sjö beräknas enligt:

$$H_{\max} = 2.482 \cdot 10^{-2} U_A^2 \quad (\text{AVI.5})$$

$$T_{\max} = 8.30 \cdot 10^{-1} U_A \quad (\text{AVI.6})$$

Våghöjd och period kan inte överskrida förhållanden som råder vid fullt utvecklad sjö, där vindstyrkan är den enda begränsande faktorn.

Våglängden på djupt vatten L_0 beskrivs enligt:

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (\text{AVI.7})$$

När vågorna rör sig över grundare vatten sker en interaktion med havsbotten. Vågorna bromsas upp och tappar energi på grund av friktion och perkolation. Vågens höjd, H , och period, T , varierar med vattendjupet, d , enligt:

$$\frac{gH}{U_A^2} = 0.283 \tanh \left[0.530 \left(\frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/4} \right] \tanh \left\{ \frac{0.00565 \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/2}}{\tanh \left[0.530 \left(\frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/4} \right]} \right\} \quad (1.8)$$

$$\frac{gT}{U_A} = 7.54 \tanh \left[0.833 \left(\frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/8} \right] \tanh \left\{ \frac{0.0379 \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/3}}{\tanh \left[0.833 \left(\frac{gd}{U_A^2} \right)^{3/8} \right]} \right\} \quad (1.9)$$

Eftersom vågens egenskaper är direkt beroende av vindstyrkan, skulle en plötslig förändring av vinden innebära en förändring av vågkaraktistika. När det har blåst från samma riktning under en längre period och det sker en förändring i vindstyrkan, bevaras energin från föregående vindtillfälle i vågen. Om vindstyrkan tilltar har vågen redan en viss energi som fortsätter att öka. På samma sätt fås en avklingande effekt om vindstyrkan avtar. Energitätheten beskriver den energi som finns i en våg per ytenhet enligt:

$$\bar{E} = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (\text{AVI.10})$$

Energien över en hel våglängd L fås då som,

$$E = \bar{E}L = \frac{1}{8} \rho g H^2 L \quad (\text{AVI.11})$$

där ρ är vattnets densitet och g är tyngdaccelerationen. Två metoder har använts för att beskriva denna energiöverföring.

Metod 1

Genom att göra ett antagande om att all energi E_1 som svarar mot vindstyrkan U_1 bevaras vid vindstyrkan U_2 och uppgår till E_2 . På detta sätt räknas den gamla vindstyrkan och varaktigheten om till den nya vindstyrkan med en motsvarande varaktighet genom en energibalans (AVI.12), med hjälp av ekvation AVI.2-4.

$$E_1 = E_2 \Rightarrow \frac{1}{8} \rho g H_1^2 L_1 = \frac{1}{8} \rho g H_2^2 L_2 \quad (\text{AVI. 12})$$

Eftersom våglängden L är proportionell mot T^2 , där T är vågperioden, kan detta skrivas som:

$$H_1^2 T_1^2 = H_2^2 T_2^2 \quad (\text{AVI.13})$$

Utifrån den nya vindstyrkan U_2 summeras sedan den motsvarande varaktigheten med den nya varaktigheten och vågegenskaper beräknas för nya förhållanden. Beräkningarna tar endast hänsyn till en ackumulation vid tilltagande vindhastighet från samma vindriktning. Ingen hänsyn tas till vågornas avklingning.

Metod 2

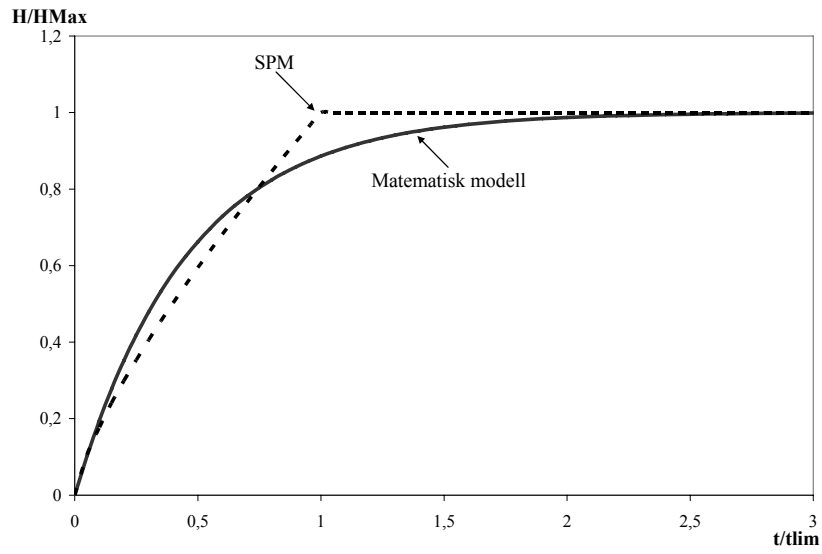
En enkel matematisk modell av vågutvecklingen som beskriver hur våghöjden förändras, utifrån en konstant φ , med tiden utifrån tidigare våghöjd H_{in} , ny varaktighet t samt nytt jämviktstillstånd H_{eq} , (Larson, 2005):

$$\frac{dH}{dt} = \varphi(H_{eq} - H_{in}) \quad (\text{AVI.14})$$

Genom vidare utveckling av ekvation AVI.14 ges ett uttryck för våghöjden vid det nya vindtillfället, enligt:

$$H = H_{eq} - (H_{eq} - H_{in}) e^{-\mu \frac{t}{t_{lim}}} \quad (\text{AVI.15})$$

Där t_{lim} är en begränsande varaktighet och μ är en konstant som bestäms genom en minsta kvadratanpassning till SPMs vågutvecklingsfunktion. I modellen görs antaganden om att en avklingning sker på samma sätt som en ackumulation. Med samma samband som för våghöjden beräknas även vågperioden.



Figur AVI.1 Anpassning av matematisk funktion till SPMs vågutvecklingskurva.

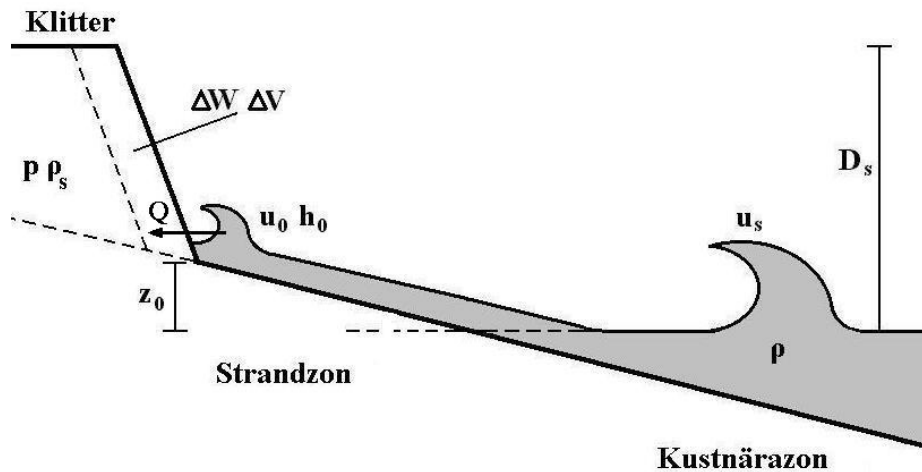
Appendix VII – Samtidiga vågor och vattenstånd

Tabell AVII.1 Samtidiga vågor, H_0 och vattenstånd, WL

H_0 \ WL	-120	-110	-100	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,2	0	0	0	0	0	0	0	7	40	163	564	1182	1385	1447	897	339	146	46	8	2	1	0	0	0	0
0,4	0	0	0	0	1	1	2	10	59	165	618	1332	1713	1475	958	412	165	61	14	3	2	1	0	0	0
0,6	0	0	0	0	1	4	7	16	65	178	525	1159	1504	1322	840	438	171	70	25	7	4	0	0	0	0
0,8	0	0	0	0	2	6	7	23	53	185	448	867	1077	952	607	335	125	47	23	3	1	2	1	0	0
1	0	0	0	0	0	0	5	17	71	120	308	583	775	642	503	256	121	42	9	10	1	0	0	0	0
1,2	0	0	0	0	1	2	9	16	52	132	218	511	709	565	433	216	102	38	16	6	0	0	0	0	0
1,4	0	0	0	3	0	3	6	12	35	105	181	381	480	426	283	226	95	38	14	4	0	0	0	0	0
1,6	0	0	0	0	0	1	13	14	26	86	152	306	418	332	270	140	62	43	8	0	1	0	0	0	0
1,8	0	0	0	0	0	1	8	14	40	86	155	227	336	273	213	130	59	19	7	1	1	0	0	0	0
2	0	0	0	0	1	0	4	11	38	70	98	163	234	159	129	85	44	23	5	0	1	0	0	0	0
2,2	0	0	0	1	0	0	2	17	20	47	90	137	151	149	101	51	25	9	2	4	0	0	0	0	0
2,4	0	1	0	0	0	1	6	8	18	29	62	86	92	85	54	34	15	5	0	0	0	0	0	0	0
2,6	0	0	0	0	0	2	1	4	8	38	49	58	77	50	52	19	7	8	3	0	1	0	0	0	0
2,8	0	0	0	0	0	0	1	1	5	23	29	32	33	32	15	13	6	3	3	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	1	1	1	1	6	9	12	17	27	17	15	4	6	3	1	1	0	0	0	0	0
3,2	0	0	0	0	0	0	0	1	4	2	10	11	14	8	7	2	0	4	1	0	0	0	0	0	0
3,4	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	8	6	7	1	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3,6	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	3	5	3	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
3,8	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	2	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0
4,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
4,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Appendix VIII – Härledning av erosionsmodell

Nedan redovisas härledningar och formler till den modell (Larson *et al*, 2004) som använts vid beräkning av erosion av klitter längs Ystads kust. I Figur AVIII.1 ges en förklaring till de parametrar som används.



Figur AVIII.1 Definition av parametrar som har betydelse för erosion av klitter

Modellen bygger på antaganden om att det råder ett linjärt samband mellan tyngden (ΔW) på den eroderade volymen (ΔV), och kraften, Q , som är resultatet av den rörelsemängdsförändring som uppstår när vågpaketet sammanstöter med sanddynen enligt,

$$\Delta W = C_E Q \quad (\text{AVIII.1})$$

där C_E är en koefficient. Tyngden av den eroderade volymen beror i sin tur på densiteten, ρ_s , och porositeten av sedimentet, p , enligt:

$$\Delta W = \Delta V \rho_s (1 - p) g \quad (\text{AVIII.2})$$

Kraften som ett enstaka vågpaket träffar sandbanken med uppskattas utifrån förändringen av vågpaketets massa (m_0) och hastighet (u_0) under en tid (t), enligt,

$$Q_0 = \frac{d}{dt} (m_0 u_0) \quad (\text{AVIII.3})$$

där massan, per breddenhet, i sin tur uppskattas utifrån höjd (h_0), längd (s_0) och densitet på vågpaketet (ρ), enligt:

$$m_0 = \frac{1}{2} \rho h_0 s_0 \quad (\text{AVIII.4})$$

Retardationen av vågpaketet uppskattas, enligt:

$$\frac{du_0}{dt} \approx \frac{u_0}{T} \quad (\text{AVIII.5})$$

där T antas vara perioden för vågpaketet på djupvatten. Vidare görs antagande om att hastigheten kan uppskattas utifrån våghöjden, enligt,

$$u_0 = C_u \sqrt{gh_0} \quad (\text{AVIII.6})$$

där C_u är en empirisk koefficient. Eftersom våglängden kan antas vara produkten av vågperioden och våghastigheten kan sammanstötningskraften för ett vågpaket skrivas om, enligt,

$$Q_0 = \frac{1}{2} \rho u_0^2 h_0 = \frac{1}{2} \rho \frac{u_0^4}{g C_u} \quad (\text{AVIII.7})$$

För flera vågpaket som sammanstötter med sandbanken under en tid (Δt), kan den totala kraften beräknas som:

$$Q = \frac{1}{2} \rho \frac{u_0^4}{g C_u} \frac{\Delta t}{T} \quad (\text{AVIII.8})$$

Genom en kombination av ekvation AVIII.2 och AVIII.8, ges ett uttryck för den eroderade volymen under tiden, Δt , enligt:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{1}{2} \frac{C_E}{C_u^2} \frac{\rho}{\rho_s} \frac{u_0^4}{g^2 T} \frac{1}{(1-p)} \quad (\text{AVIII.9})$$

Eftersom erosionsprocessen mer eller mindre är diskret, beroende på förhållandet mellan kraft och materialtransport, ges ett medelvärde av erosionshastigheten genom derivatan, enligt:

$$q_D = \frac{dV}{dt} = -\frac{1}{2} \frac{C_E}{C_u^2} \frac{\rho}{\rho_s} \frac{u_0^4}{g^2 T} \frac{1}{(1-p)} \quad (\text{AVIII.10})$$

Minustecknet i ekvationen beskriver minskningen av volym i sandbankarna. Vidare behövs ett uttryck, med kända variabler, för vågpaketets hastighet vid foten av sandbanken och uppskattas till,

$$u_0^2 = u_S^2 - 2gz_0 \quad (\text{AVIII.11})$$

där u_S är vågpaketets hastighet precis innan uppspolning och z_0 är avståndet från vattenytan till foten på sandbanken. Med villkoren att hastigheten är noll vid maximal uppspolning, d.v.s. $u_0 = 0$ då $z_0 = R$, ges ett uttryck för u_S , enligt:

$$u_S^2 = 2gR_{ms} \quad (\text{AVIII.12})$$

Om z_0 antas vara konstant under en tid, vilket är relevant när erosionen av sandbanken är liten, kan ekvation AVIII.10 förenklas till:

$$\frac{dV}{dt} = -4C_S \frac{(R_{ms} - z_0)^2}{T} \quad (\text{AVIII.13})$$

Där C_S är en empirisk koefficient som beräknas enligt:

$$C_S = \frac{1}{2} \frac{C_E}{C_u^2} \frac{\rho}{\rho_s} \frac{1}{(1-p)} \quad (\text{AVIII.14})$$

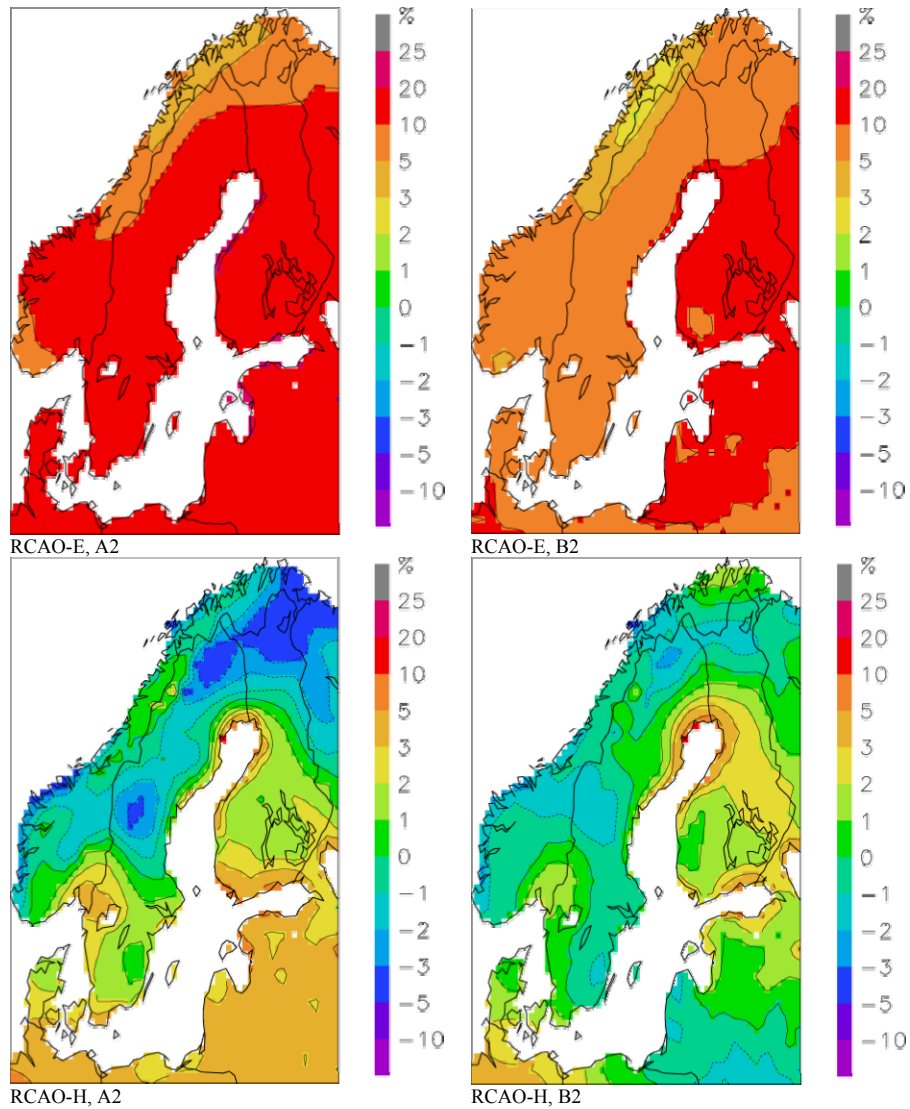
Uppspolningshöjden R_{ms} , beräknas utifrån en minstakvadrat anpassning till Hunts formel baserad på data enligt,

$$R_{ms} = 0.158 \sqrt{H_0 L_0} \quad (\text{AVIII.15})$$

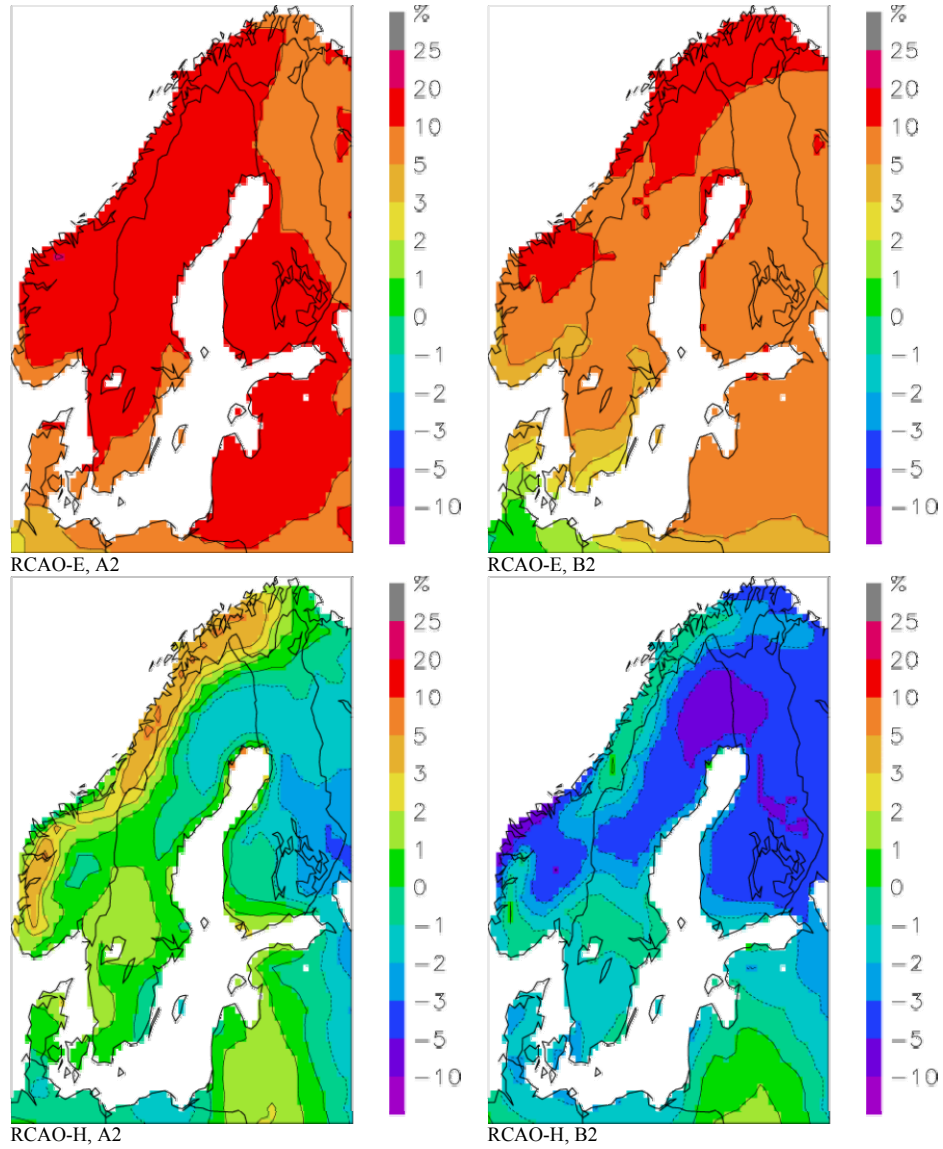
där H_0 och L_0 är våghöjd respektive våglängd på djupt vatten.

Appendix IX – Framtida vindklimat

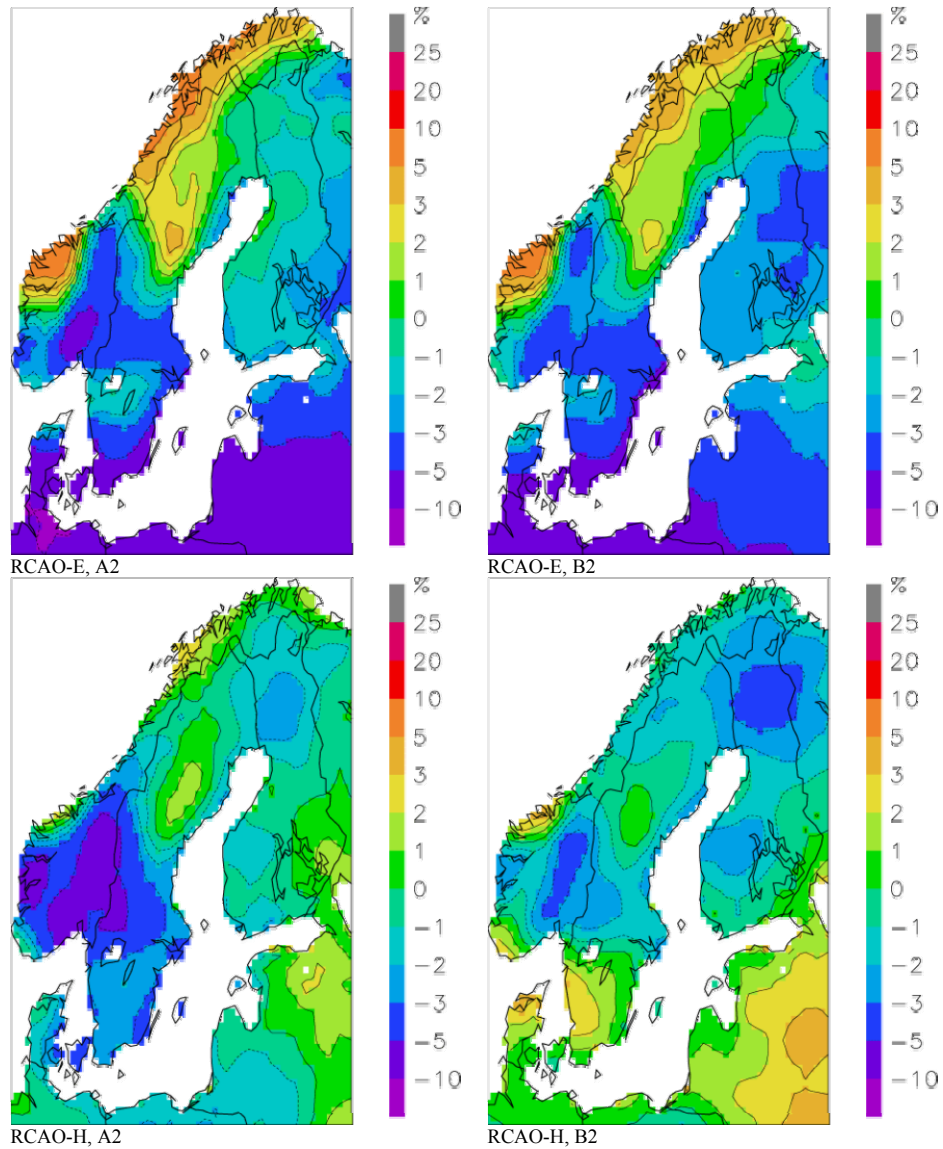
Resultaten av SWECLIM:s regionala klimatmodell avseende framtida vindar.



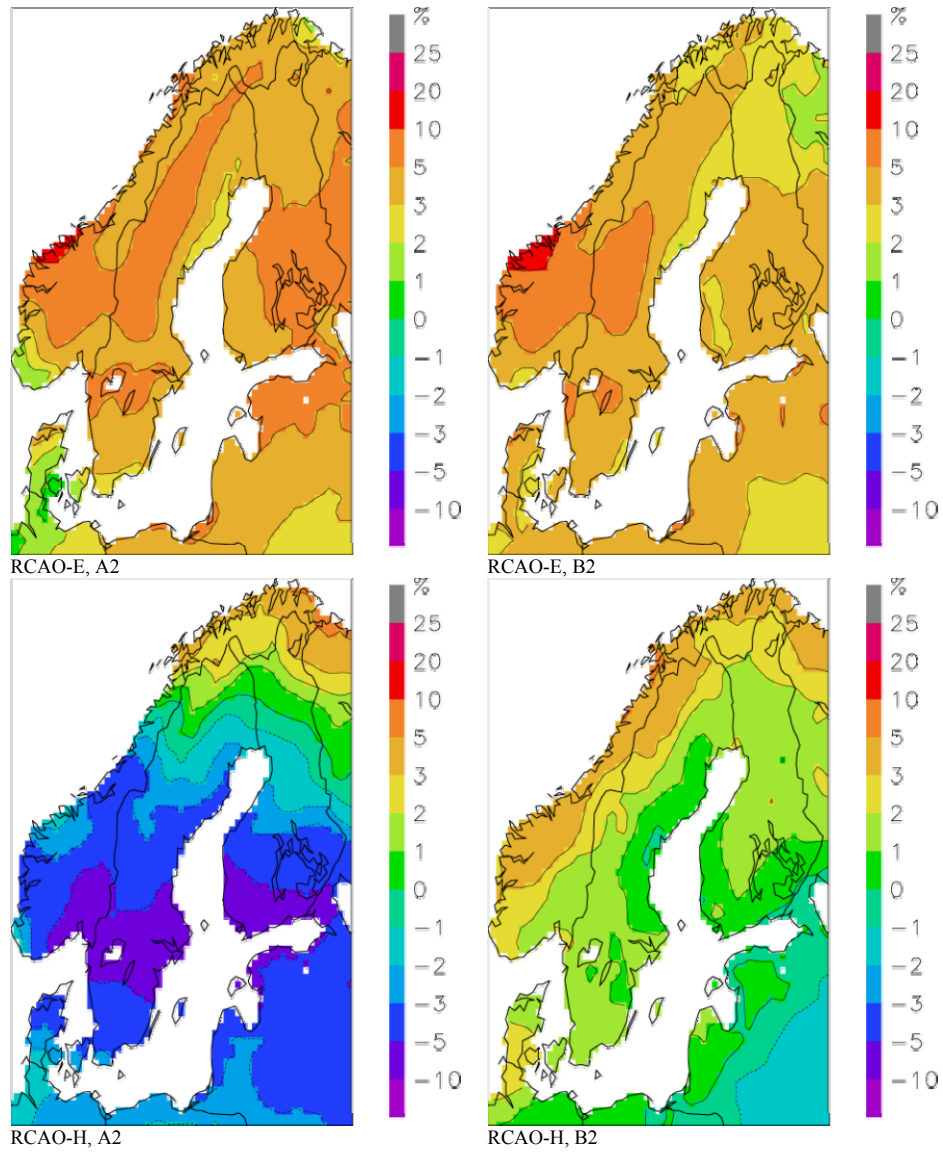
Figur AIX.1 Förändring av vindstyrka beräknat på simulerat framtidsscenario, 2071-2100, och kontrollperiod, 1961-1990, under vinterperioden december, januari och februari. (SMHI, 2005)



Figur AIX.2 Förändring av vindstyrka beräknat på simulerat framtidsscenario, 2071-2100, och kontrollperiod, 1961-1990, under vårperioden mars, april, maj. (SMHI, 2005)



Figur AIX.3 Förändring av vindstyrka beräknat på simulerat framtidsscenario, 2071-2100, och kontrollperiod, 1961-1990, under sommarperioden juni, juli, augusti. (SMHI, 2005)



Figur AIX.4 Förändring av vindstyrka beräknat på simulerat framtidsscenario, 2071-2100, och kontrollperiod, 1961-1990, under höstperioden september, oktober, november. (SMHI, 2005)

Appendix X – Återkomsttider

Vid design av konstruktioner som ska ha en viss hållbarhetslängd är det relevant att studera återkomsttider för vissa parametrar, i det här fallet vattenstånd, våghöjd eller uppspolningsnivå. En allmänt erkänd metod för uppskattning av återkomsttider bygger på årsextremer, d.v.s. högsta värdet för vardera år, om serier längre än 15 år finns tillgängliga (Hamill, 2002).

En återkomsttid på t.ex. 100 år innebär inte att den motsvarande händelsen inträffar vart 100:e år, utan att det i genomsnitt under en längre tidsperiod inträffar en gång varje 100-årsperiod.

Beräkning av återkomsttid

Det finns ett flertal olika metoder att skatta återkomsttider. Två av dem är Weibulls och Gringortens. Tillvägagångssättet för uppskattningen av återkomsttid är att först rangordna alla extremvärden med den högsta årsextremen på rang 1 och det lägsta på rang N . Med detta som utgångsläge kan återkomsttiden för vardera årsextrem beräknas empiriskt enligt de två metoderna, Weibulls enligt ekvation AX.1, respektive Gringortens enligt ekvation AX.2,

$$T_R = \frac{N+1}{r} \quad (\text{AX.1})$$

$$T_R = \frac{N+0.12}{r-0.44} \quad (\text{AX.2})$$

där

T_R är återkomsttiden,
 r är rangnumret och
 N är antal värden

En återkomstserie plottas lämpligast i en speciell logaritmisk skala, t.ex. en så kallad Gumbelplot. Vid avsaknad av sådant papper kan en linjär härledning från Gumbels fördelning göras via:

$$y = -\ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{T}\right)\right] \quad (\text{AX.3})$$

När de y -värdena har räknats ut för respektive T_R , plottas dessa mot t.ex. uppspolninghöjden enligt Figur Figur AX.1 och Figur Figur AX.2. En rät linje anpassas till dessa punkter, en s.k. trendlinje (den heldragna linjen i figur), för att extrapoleras. För att avgöra hur rättvisande trendlinjen är beräknas en korrelationskoefficient, R^2 , enligt ekvation AX.4. R^2 -värdet kan anta ett värde mellan 0 och 1. Ju närmre 1 det är, desto bättre överensstämmelse.

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (\text{AX.4})$$

där:

$$SSE = \sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (\text{AX.5})$$

$$SST = \left(\sum Y_i^2 \right) - \frac{\left(\sum Y_i \right)^2}{n} \quad (\text{AX.6})$$

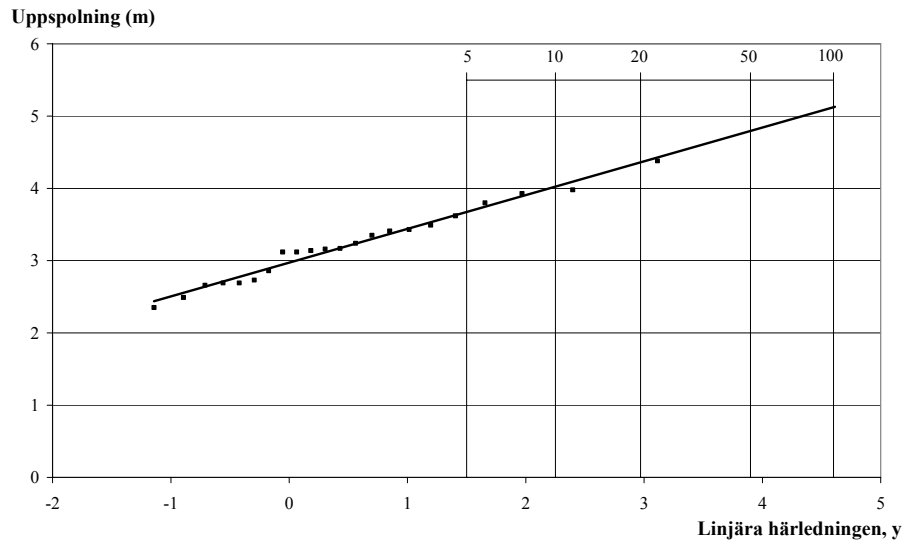
där

Y_i är det aktuella Y -värdet

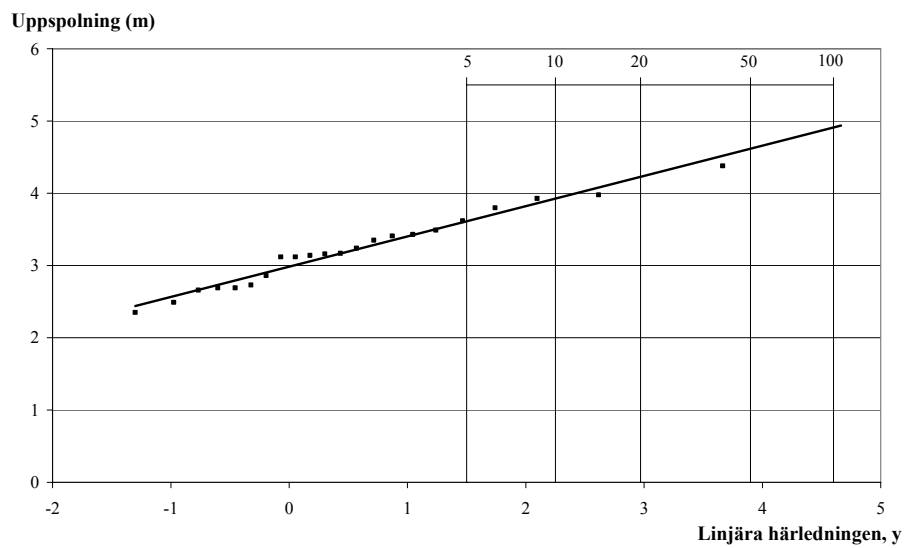
\hat{Y}_i är differensen mellan Y_i och trendlinjens Y -värde för samma X -värde

Skillnaden mellan de två metoderna är att det för Weibulls metod antas att det högsta extremvärdet har en återkomsttid på $N+1$, medan Gringortens metod gör en viktning som är lämplig för serier på mellan 10 och 25 år (Hamill, 2002). Som ett exempel får en uppspolningshöjd på 4.38 m (den högsta uppspolningshöjden i den befintliga serien) en återkomsttid på 23 år enligt Weibulls metod, medan den för Gringortens metod blir 39.5 år. En jämförelse mellan de två metoderna har gjorts och finns att beskådas i Figur och Figur . Den visar att en 100-års uppspolning för Weibull uppskattas till cirka 5.1 m, medan den för Gringorten uppskattas till cirka 4.9 m. Alltför stora skillnader på resultatet föreligger alltså inte mellan de två metoderna.

Gringortens viktning för serier mellan 15 och 25 år är vida använt och kommer även att användas i denna studie för beräkning av återkomsttider för parametrarna uppspolning och våghöjder, eftersom dessa är 22 år långa (Hamill, 2002), och R^2 -värdet är något högre. Gällande vattenstånd kommer Weibulls metod att användas av samma anledning, men även eftersom serien är 117 år lång.



Figur AX.1 Återkomsttid för uppspolningshöjder enligt Weibulls metod. R^2 -värde: 0.9705



Figur AX.2 Återkomsttid för uppspolningshöjder enligt Gringortens metod. R^2 -värde: 0.9746

Appendix XI – Ordförklaringar

Antropogena emissioner	Utsläpp orsakade på grund av mänsklig aktivitet
Diffraktion	Vågor som böjer av vid en skarp kant
Djupvattenvåg	Djup där vågor inte interagerar med botten
Eustatiska processer	Globala förändringar av havsytans nivå orsakade av förändringar i den totala vattenmängden i världshaven
FUS	Fullt utvecklad sjö
GPS	Global Positioning System, satellitnavigationssystem för bestämning av positioner
Hydrostatiskt tryck	Vattentryck
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change, ett organ inom FN med uppdrag att göra prognoser på framtida klimat
Isostatiska processer	Jordskorpans jämviktsförhållande
Klitter	Sanddyn
Mistra	Miljöstrategiska forskningsstiftelsen
PTM	Postglacial Transgression Maximum – Efterglaciala Transgressionsmaxima
Reflektion	Återkastande våg
Refraktion	Ändring av riktning för våg som går mot grundare vatten och eftersträvar vinkelrät riktning mot strandlinjen
Regression	Strandförsjutning som innebär torrläggning av land
RH70	Rikets Höjdsystem 1970, vars nollnivå definieras av den holländska normalhöjdpunkten Normaal Amsterdam Peil (NAP)
SIG	Statens Geotekniska Institut
SMHI	Svenska Meteorologiska och Hydologiska Institut
STL	stiltje
Stryklängd	den sträcka över vilket vindarna från en riktning rör sig över vatten
SWECLIM	Swedish Regional Climate Modelling Programme
TFB	Antal tillfällen som krävs för att brott i klitter ska uppstå
Transgression	Strandförsjutning som innebär att land översvämmas av vatten p.g.a. ytvattenhöjning eller landsänkning
Vågens brytpunkt	Ett djup till botten eller avstånd till strandlinjen där en våg bryter

Appendix XII – Förteckning över variabler

A	Parameter som beskriver hur bottenprofilen inställer sig vid jämviktsläge enligt Dean (1967).
C	Vågens hastighet (m/s).
C_E	Empirisk koefficient som beskriver förhållandet mellan kraften som träffar ett klitter och den volym som eroderas.
C_g	Vågornas gruppshastighet (m/s).
C_S	Empirisk koefficient som beskriver hur eroderad volym beror av inkommande våg och strandprofilens karaktär.
C_u	Empirisk koefficient som beskriver hur våghastigheten beror av våghöjden på djupt vatten.
d	Vattendjupet (m).
dV	Volymen på det bortroderade materialet (m ³).
E	Energi över en hel våglängd, L .
\bar{E}	Energi per ytenhet som finns i en våg.
F	Stryklängd (km).
F_v	Stryklängd som motsvaras av vindens varaktighet då denna är begränsande (km).
g	Tyngdacceleration, 9.82 (m/s ²).
H	Våghöjd.
h	Aktuellt vattendjup (m).
h_0	Höjden på det brutna vågpaketet då det träffar klittret.
H_0	Våghöjden på djupt vatten (m).
H_0'	Komponent av H_0 som infaller vinkelrätt mot kusten (m).
h_b	Vattendjupet där vågen bryter (m).
H_b	Våghöjden då vågen bryter (m).
H_{eq}	Våghöjd vid jämviktstillstånd (m).
H_{in}	Våghöjd från föregående vindtillfälle (m).
H_{max}	Våghöjden vid fullt utvecklade sjö (m).
H_{mo}	Våghöjden på djupt vatten (m).
L	Våglängden på aktuellt djup (m).
L_0	Våglängden på djupt vatten (m).
m	Medellutningen i strandzonen från lugnvattenytan till maximal uppspolningshöjd.
m_0	Massan i ett vågpaket då det träffar klittret.
N	Antal värden i en serie.
p	Porositet för sedimentet (%).
Q	Den kraft som uppstår då vågpaket sammanstöter med sanddynen (N).
Q_0	Kraften med vilken ett enstaka vågpaket träffar klittret.
q_d	Medelvärde av erosionshastigheten.
r	Rangnummer.

R	Vertikala uppspolningshöjden (m).
R_{ms}	Uppspolningshöjd, enligt en minstakvadratanpassning till Hunts formel utifrån tillgänglig data
R^2	Korrelationskoefficient.
S	Vattenståndshöjning (m).
s_0	Längden på det brutna vågpaketet då det träffar klittret.
t	Varaktighet.
T	Vågperiod.
$\tan \beta$	Lutningen på strandzonen.
t_{lim}	Begränsad varaktighet (s).
T_m	Vågperioden (s).
T_{max}	Vågperiod vid fullt utvecklad sjö (s).
T_R	Återkomstperiod.
t_v	Vindens varaktighet (s).
U	Korrigerad vindstyrka (m/s).
$U(10)$	Standardiserad vind på 10 meters höjd (m/s).
$U(z)$	Vindstyrkan uppmätt på höjden z (m/s).
u_0	Hastigheten i ett vågpaket då det träffar klittret.
U_A	Effektiv vindstyrka (m/s).
u_s	Vågpaketets hastighet precis innan uppspolning.
w	Partikelfallhastigheten (m/s).
x	Avståndet från vattendjupet h till strandlinjen (m).
X_b	Horisontella avståndet från brytpunkt till strandline (m).
X_R	Horisontellt avstånd från strandlinjen till uppspolningsgräns (m).
y	Linjära härledning ur Gumbels fördelning.
Y_i	Aktuella Y -värdet.
\hat{Y}_i	Skilnaden mellan Y_i och trendlinjens Y -värde för samma X -värde.
z	Den höjd från marken som vindmätningar gjorts (m).
z_0	Vertikalt avstånd mellan lugnvattenyta och klitterfot (m).
α	Infallsvinkel för en våg vid aktuellt djup.
β_e	Effektiv lutning.
γ_b	h_b/H_b
Δt	Den tid då flera vågpaket sammanstöter med klittret.
ΔT	Skilnaden mellan två årsmedelvattenstånd.
ΔV	Eroderad vikt (kg/m).
ΔW	Eroderad volym (m ³ /m).
WL	Aktuellt vattenstånd i referenssystemet RH70 (m)
θ	Vågens infallsvinkel.
μ	Konstant som beskriver vågutvecklingsfunktionen i den matematiska metoden.
ρ	Vattnets densitet (kg/m ³)
ρ_s	Sedimentets densitet (kg/m ³)
φ	Konstant som beskriver våghöjden enligt den matematiska metoden