

Master Thesis
TVVR 17/5023

Dynerosion vid kraftiga stormar i Skanör-Falsterbo

– simulering med hjälp av modellen XBeach

Mikael Dunér
Axel Flodin Vacher



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

Dynerosion vid kraftiga stormar i
Skanör-Falsterbo
– simulering med hjälp av modellen
XBeach

Mikael Dunér
Axel Flodin Vacher

Master Thesis

Division of Water Resources Engineering
Department of Building & Environmental Technology
Lund University
Box 118
221 00 Lund, Sweden

Water Resources Engineering
TVVR-17/5023
ISSN 1101-9824

Lund 2017
www.tvrl.lth.se

Master Thesis
Division of Water Resources Engineering
Department of Building & Environmental Technology
Lund University

Swedish title:	Dynerosion vid kraftiga stormar i Skanör- Falsterbo – simulering med hjälp av modellen XBeach
English title:	Dune erosion during storms in Skanör- Falsterbo – simulations with the help of XBeach
Author(s):	Mikael Dunér Axel Flodin Vacher
Supervisor:	Magnus Larson, Björn Almström
Examiner:	Hans Hanson
Language	Swedish
Year:	2017
Keywords:	Dune erosion, Skanör-Falsterbo, Modelling, Beach, Storms and high-water levels, XBeach.

Förord

Vi skulle vilja börja med att tacka alla de som hjälpt oss i detta arbete, med allt från stöttande ord när arbetet varit segt till utlåning av bil för transporter. Stort som smått så har ni gjort det till en både rolig och lärorik vår. Ni har alla haft en betydande roll i att denna rapport har blivit vad den är och att vi kunnat få dessa resultat. Tack!

Vi vill rikta ett särskilt tack till följande personer:

Magnus Larson och Björn Almström, våra handledare som har stöttat oss med allt från att förklara teorier och problem till att hjälpa oss med kontakter eller bara uppmuntrande historier.

Caroline Fredriksson, doktorand vid TVRL som hjälpte oss hitta detta spännande examensarbete och intresset för kustfrågor.

Sebastian Irminger-Street, vår kontakt hos SWECO Malmö. Tack för all feedback och att du har tagit dig tid att förklara och hjälpa oss när vi stött på problem.

Patrik Björnsson, från Vellinge kommun. Tack för en trevlig och solig dag på Falsterbo näsets kuster, var både spännande och lärorikt att göra fältmätningar. De var till stor hjälp för vårt arbete och gav oss en större insikt i hur området faktiskt såg ut.

Per Juhlin, från Vellinge kommun. Tack för att vi fick besöka dig och fick en genomgång av hur ni arbetar med kustfrågor i dagsläget samt de problem ni har angående översämningar i Skanör-Falsterbo.

Klavs Bundgaard, från Sweco DK. Ditt stöd i vår jakt på användbar data har varit guld värd.

Abstract

Title:

Dune erosion during storms in Skanör-Falsterbo - simulations with the help of XBeach

Authors:

Mikael Dunér and Axel Flodin Vacher

Supervisors:

Professor Magnus Larson and Doctoral Student Björn Almström, Division of Water Resources Engineering at Lund Institute of Technology, Lund University.

Presentation of problem:

With a rising sea-level, because of the climate change, the risk of flooding in coastal regions is increasing. Specially effected is areas like Skanör-Falsterbo that is located at a low level above the sea-level and along a long coastline. To be able to handle the problems with a rising sea-level it is a demand for an understanding of how the climate will change and how this will affect the coast. To create an understanding of how the coast might change, different models are used to simulate predicted climate scenarios.

Objectives:

In this report, the focus has been to study how the model XBeach works and how well it can be used to simulate a storm in the Skanör-Falsterbo area. Simultaneously the result from the simulations are analysed to help the Municipality of Vellinge to understand how well the sand dunes will work as flood protection during different storm scenarios.

Procedure:

By connecting data collected by the Municipality of Vellinge, the Swedish Meteorological and Hydrological Institute SMHI, and SWECO a Swedish consultant company, with measured profiles of the coast made by the authors, simulations are created with the help of the program Matlab and a toolbox named Open Earth Toolbox. ArcGIS has also been used for the creation of bathymetry from topography data and naval charts. The simulations have been done with XBeach and the result has then been processed with the program Quickplot.

Conclusions:

During the work with XBeach, both strengths and weaknesses in the model has been found. The code for the model is open so the possibility to specify it for a specific use is good. This freedom also means that the user will need a better understanding of the model and programming in general, to be able to get the most out of the model. There is no user interface that helps the user so the need of external programs like Matlab is a good help to avoid writing text files yourself.

In the results from the simulations you can see that the sand dunes are sensitive to big storms and that a change in the profile of the coast is to be expected during this century. There are different methods to limit the erosion but they will lead to recurrent costs. The results also point out the need of a good city planning so that the municipality can avoid the high-risk areas.

Keywords:

Dune erosion, Skanör-Falsterbo, Modelling, Beach, Storms and high-water levels, XBeach.

Sammanfattning

Titel:

Dynerosion vid kraftiga stormar i Skanör-Falsterbo - simuleringar med hjälp av modellen XBeach

Författare:

Mikael Dunér och Axel Flodin Vacher

Handledare och Bihandledare:

Prof. Magnus Larson och Doktorand Björn Almström, Avdelning för Teknisk Vattenresurslära vid Lunds Tekniska Högskola.

Frågeställning:

Genom en stigande vattennivå till följd av klimatförändring ökar risken för högvattenstånd och översvämningar i kustområden. Särskilt drabbade blir områden som Skanör-Falsterbo som har en lågt liggande bebyggelse samt med en lång kustremsa. För att kunna hantera dessa problem krävs god förståelse i hur klimatet kommer ändras men även hur kusten kommer att utvecklas av det nya klimatet. För att skapa sig en bild av hur kusten kan förändras används modeller där man kan simulera olika scenarier, detta kräver dock att modellen kan återskapa de lokala förhållandena och att data som modellen kräver finns tillgänglig.

Syfte:

Denna rapport har som fokus att studera hur modellen XBeach fungerar och hur väl den kan simulera stormsituationer i Skanör-Falsterbo. Samtidigt analyseras även resultaten från simuleringarna för att kunna hjälpa Vellinge kommun att få en bild av hur väl deras sanddyner längs med kustlinjen fungerar som ett översvämningsskydd under olika stormscenarier.

Metod:

Under projektet har strandprofiler från Skanör-Falsterbo studerats och hur dessa påverkas av högvatten samt vågor. Detta har gjorts genom att bearbeta data från Vellinge kommun, SMHI, Sweco och från en fältstudie under projektet. Denna data har sedan använts för att sätta upp en modell i XBeach för att simulera olika stormscenarier som skapats med hjälp av vind och vågdata.

Slutsats:

Från de resultat som har fåtts fram i rapporten kan man se att dagens dyner kommer vara känsliga för kraftiga stormar i framtiden och att en förändring i strandprofilen är att vänta under det kommande århundrandet. Med olika metoder kan man motverka erosionen men med återkommande kostnader ifall det skall tillämpas längs med hela kustremsan. Resultatet visar även på vikten av en god stadsplanering för att undvika framtida riskområden.

Under arbetet med XBeach har både styrkor och svagheter i modellen uppdagats. Då modellens kod finns öppen så är möjligheter att specificera modellen för särskilda behov goda och med ett stort antal personer som jobbar med modellen finns det även mycket hjälp att få vid behov. Denna frihet leder dock till att det krävs större förståelse hos användaren för modellen och för programmering så att man ska få ut det mesta av modellen. Det finns heller inget gränssnitt som hjälper användaren utan man får använda sig av exempelvis program som Matlab eller textbehandlare för att skapa sina simuleringar.

Nyckelord:

Dynerosion, Skanör-Falsterbo, Modellering, Strand, Stormar och Högvatten, XBeach.

Innehållsförteckning

1	Introduktion	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	2
1.3	Frågeställningar	2
1.3.1	Metod	2
1.3.2	Resultatanalys	2
1.4	Avgränsningar	2
1.5	Studieområde	2
1.5.1	Falsterbobukten	3
1.5.2	Kämpingebukten	4
1.5.3	Skanör-Falsterbos västkust	4
1.6	Planerade översvämningsåtgärder i området	4
2	Teori	7
2.1	Vågor	7
2.2	Sedimenttransport	8
2.3	Beskrivning av sandiga kuster	9
2.4	Bildandet av sandiga kuster	9
2.4.1	Naturlig bildning av dyner	9
2.4.2	Bildning av dyner med artificiell hjälp	11
2.5	Sanddyner som skydd mot översvämning	12
2.6	Klimatförändring och dess påverkan på sanddyner	13
2.6.1	Följder av en stigande vattennivå	13
2.6.2	Följder av en ökad stormfrekvens	14
3	Beskrivning av XBeach	15
3.1	Introduktion	15
3.2	XBeach:s struktur	16
3.2.1	Hydrodynamik	16
3.2.2	Morfologi	19
3.2.3	Randvillkor	20
3.2.4	Vegetation	22
4	Utvärdering av data	23
4.1	Erhållen data	23
4.1.1	Batymetri	23
4.1.2	Kustprofiler	24
4.1.3	Kornstorlek	24
4.1.4	Vattenstånd	26
4.1.5	Vågdata	26
4.1.6	Vinddata	28
4.1.7	Vegetation	28

5	Implementering av modellen	31
5.1	Inledning	31
5.2	Scenarier	31
5.3	Batymetri och höjddata	32
5.4	Kalibrering av modellens parametrar	34
5.5	Simulering av vegetation	36
5.6	Motståndssimulering av sanddynerna vid Falsterbobukten	36
6	Resultat	39
6.1	Resultat från den uppmätta batymetrin	39
6.1.1	Scenario 1 - Högvatten från stormen 4-5 januari 2017	39
6.1.2	Scenario 2 - 100-årshögvatten	40
6.1.3	Scenario 3 - 100-årshögvatten + 100cm	41
6.1.4	Scenario 4 - Backafloden	43
6.2	Resultat från den sammansatta batymetrin	44
6.2.1	Resultat för de olika profilerna	45
6.3	Test med vegetation	47
6.4	Test av dynens motståndskraft	47
7	Analys	53
7.1	XBeach	53
7.2	Modeller	53
7.3	Kalibreringen av modellen	54
7.4	Vegetation	54
7.5	Vattennivå	54
7.6	Vindar	54
7.7	Erosion	55
7.8	Överspolning	56
8	Slutsats	57
8.1	Metod	57
8.2	Resultat	57
8.3	Förslag för framtida studier	58
	Bibliografi	59
A	Simuleringsresultat	63
A.1	Resultat av simuleringar med den sammansatta batymetrin	64
A.1.1	Scenario 1	64
A.1.2	Scenario 2	65
A.1.3	Scenario 3	66
A.1.4	Scenario 4	67
A.2	Resultat av simuleringar med de uppmätta strandprofilerna	68
A.2.1	Scenario 1	68
A.2.2	Scenario 2	69
A.2.3	Scenario 3	70
A.2.4	Scenario 4	71

B	Exempel av en parameter-fil	73
C	Uppmätning av strandprofiler	77
C.1	Falsterbobukten	77
C.2	Västra stranden	78
C.3	Kämpingebukten	78

1

Introduktion

1.1. Bakgrund

Skanör-Falsterbo är ett kustnära samhälle beläget på Skånes sydvästra udde. Folk har bott här sedan medeltiden och samhället var länge ett viktigt nav för sillhandeln i södra Östersjön. Idag har samhället istället blivit ett populärt bostadsområde med både åretrunt- och sommarboende. Totalt bor strax under 7 000 personer i Skanör-Falsterbo där utöver bostäder finns där även viktiga naturskyddsområden samt två golfbanor (Vellinge kommun 2017a).

Historiskt sett har bebyggelsen varit lokaliserad runt höjdpunkter på udden men med en ökad exploatering de senaste decennierna har även de låga områdena bebyggts vilket har resulterat i att runt 800 bostäder ligger lägre än 2 m över dagens normalvattenstånd. Enligt Persson et al. (2011) beräknas havsnivån runt Skanör-Falsterbo stiga, på grund av klimatförändringar, med ca 1 meter fram tills 2100 och kan därefter komma att fortsätta stiga ytterligare.

Den stigande vattennivån tillsammans med risken för kraftigare stormar har lett till att Vellinge kommun tagit beslut om att skapa ett översvämningsskydd runt bebyggelsen. Planen är att bygga ett skydd i form av vallar och murar längs med samhället. Vallen skall skydda bebyggelsen mot översvämning och planeras efter en rad olika intressen så som boendemiljö, säkerhet och hälsa, landskapsbild, natur- och kulturmiljö mm. Man har valt en krönnivå på +3 m (RH2000) som troligtvis kommer minska risken för översvämning kraftigt samtidigt som man bevarar kopplingen mellan land och hav i stor utsträckning (Sweco 2017). Man har alltså inte designat skyddet efter en specifik händelse eller vattenstånd utan ser det som en del av det totala kustskyddet som utöver vallarna kommer bestå av olika evakueringsplaner samt ett planerat yttre skydd i form av sanddyner. Detta skydd kommer studeras noggrannare i denna rapport med fokus på dess motståndskraft mot erosion vid stormar. Med historiska data från en storm, Backaflo den, som slog till 1872 och som uppskattas ha nått en vattennivå på 2,4 m över normalvattenståndet, har man kunnat studera i vilken omfattning udden skulle översvämmas idag samt hur man bäst ska kunna evakuera området ifall det skulle vara risk för liv. Enligt SMHI kommer normalvattenståndet att öka på grund av klimatförändringen vilket kommer leda till en större risk för översvämning i samband med stormar rent generellt (Nerheim 2007).

Det yttre skyddet planeras bestå av naturliga dyner längs med kusten som man hoppas ska kunna skydda de viktiga naturområdena och golfbanor som ligger i området. Sanddynerna tros därför behöva underhållas med hjälp av strandfodring för att kunna klara av framtida stormerosion. Denna form av åtgärder fungerar även som ett skydd mot den kusterosion som kan bli en effekt av klimatförändringen. I denna studie kommer dessa framtida sanddyner studeras med hjälp av modellen XBeach utifrån höjdmmodell och batymetri från Vellinge kommun samt SGU.

1.2. Syfte

Studiens syfte är att studera om sanddynerna i Skanör-Falsterbo har en betydande funktion som översvämningsskydd samt i vilken grad de påverkas av de klimatförändringar som presenteras av SMHI. Rapporten har även som mål att testa modellen XBeach för svenska förhållanden.

1.3. Frågeställningar

Detta examensarbete ämnar svara på följande frågeställningar:

1.3.1. Metod

- Kan XBeach kvantitativt reproducera de dynbeteenden som förekommer i Vellinge kommun?
- Vilka begränsningar kan förekomma vid användningen av en 1D- modell i jämförelse med en 2D-modell?
- Hur påverkar olika modellparametrar det slutgiltiga resultatet?

1.3.2. Resultatanalys

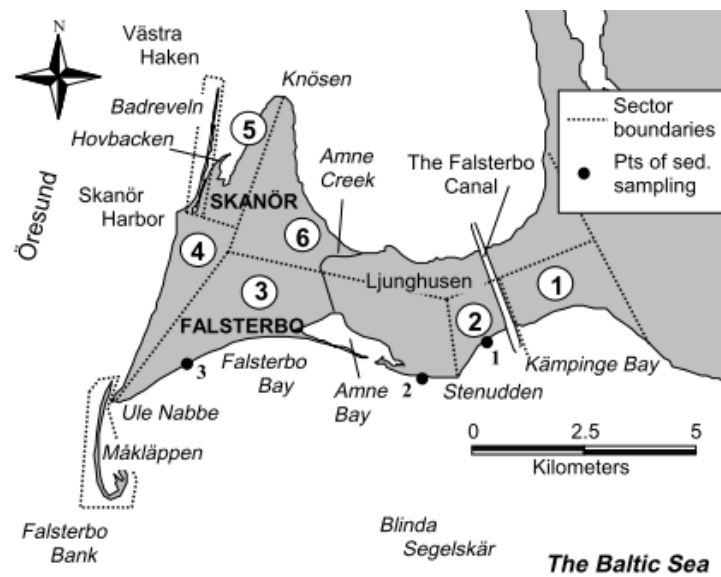
- Hur påverkas dagens dyner av vattennivåhöjningen och hur väl kommer de skyddas mot stormar?
- Vilket krav ställs på sanddyner om ett krav är att de ska kunna stå emot en storm dimensionerad för år 2100? Hur skiljer sig detta mot dagens dimensionerande stormar?

1.4. Avgränsningar

- Studien är avgränsad till tre delområden längs näset, Falsterbobukten, Kämpingebukten och delar av näsets västra kust.
- I denna studie har vegetationen inte inkluderats i simuleringarna. Det har dock gjorts ett försök att simulera vegetationen där den uppskattats från bilder av strandprofilen tagna under en fältmätning gjord under projektet.
- Simuleringen har skett runt skapade extremscenarier och bygger alltså inte på verkliga stormar.
- Simuleringar har även gjorts efter historiska data från Backafloeden som ägde rum 1872.
- Några simuleringar har gjorts med 2D-modeller men rapportens fokus har varit på 1D-profiler och dess resultat.

1.5. Studieområde

Skanör-Falsterbo näset beräknas vara ca 6000-7000 år gammalt, där dess nuvarande form är betydligt yngre. Udden är formad efter tre lerryggar där sedan sand ansamlats. Udden består i huvudsak av en kalkstensgrund med ett lager av ler och morän som slutligen är täckt av ett lager med marin kvarts-sand. Sandlagret varierar normalt mellan 2-15 m i tjocklek och är som tunnast vid lerryggarna (Blomgren 1999). Udden har en väldigt låg topografi där den yttersta västra delen av näset till stora delar består av våtmarker som till viss del är omgjorda till golfbanor. Bebyggelsen på udden är placerad vid dess yttre västra del med de idag två sammanvuxna



Figur 1.1: Benämningar på platser vid Falsterbo-näset. Bild hämtad från "Hydrographic and Morphologic Processes at Falsterbo Peninsula. Present Conditions and Future Scenarios" av [Blomgren \(1999\)](#).

samhällena Skanör och Falsterbo. Sedan finns bebyggelse vid uddens koppling till fastlandet vid Ljunghusen och Höllviken. De två tätorterna skiljs åt av ett naturområde som till största delen är ett lågbeläget våtmarksområde.

1.5.1. Falsterbobukten

Falsterbobukten har en lång kuststräcka längs med näsets sydvästra del som sträcker sig mellan Måkläppen och Stenudden. I denna rapport är det studerade området begränsat till två profiler vid Falsterbo golfklubb och två profiler vid Strandbaden. Sanddynerna som finns här har en höjd som för det mesta ligger mellan 4 och 6 meter. I jämförelse med de andra studerade kuststräckorna är dessa de högsta dynerna vid Falsterbonäset.



Figur 1.2: En bild över Falsterbobukten. Den breda stranden övergår till branta sanddyn till vänster i bilden. Överraskande nog har träd lyckats växa direkt på dessa dyn (bortsett från de sanddyn som ligger längre västerut, förbi Falsterbos golfklubb). Bild tagen av Axel Flodin Vacher.

1.5.2. Kämpingebukten

Kämpingebukten är belägen vid Ljunghusen och Höllvikens södra kust. Bukten delas av Falsterbokanalen och dess inlopp som är omgärdat av stora vågbrytare. Två profiler på var sida om kanalen har studerats i rapporten.



Figur 1.3: En bild över Kämpingebukten. Här befinner sig sanddynen väldigt nära inpå den oöväxta delen av stranden. Bild tagen av Axel Flodin Vacher.

1.5.3. Skanör-Falsterbos västkust

Från Måkläppen upp till Skanörs hamn går en nästintill kontinuerlig sanddyn som skyddar naturskyddsområdet Flommen och låglandet bakom. Detta är en väldigt unik miljö med ett rikt djurliv. Det är även ett område med golfbana som besöks ofta samt en populär badplats särskilt längs den norra delen. De sanddynen som befinner sig längs Falsterbonäsets västkust har en höjd som vanligtvis ligger mellan 2 och 4 meter.



Figur 1.4: En bild över Skanörs västkust. Havet och stranden ligger till höger i bilden. En stor del av stranden är beväxt av tät halm-liknande vegetation. Även sanddynen och den mark som befinner sig mer inåt land är beklädd av grönska. Utöver den halm-liknande vegetationen återfinns här många snår, speciellt vid dynen. Bild tagen av Axel Flodin Vacher.

1.6. Planerade översvämningssåtgärder i området

Vellinge kommun är i processen att söka tillstånd för att anlägga översvämningsskydd. Detta är planerat att vara ett så kallat hårt skydd i form av vallar och murar. Figur 1.5 visar vart dessa förändringar kommer att ske och under vilka perioder som de är tänkta att förverkligas. Som en

del av detta skydd planeras även delar av dynerna längs med Falsterbobukten att användas vilka kommer simuleras som en del av detta projekt (Helgeson 2013).



Figur 1.5: Karta med de planerade översvämningsskydden inritade. Röda detaljer är åtgärder som ska implementeras inom 10 år, svarta mellan 20-40 år och blåa mellan 40-80 år (Vellinge Kommun 2017b).

2

Teori

Inledningsvis ges en beskrivning av vågor. Därefter beskrivs sedimentens transportbeteende och hur detta ger upphov till de kustfenomen som är av intresse i examensarbetet. Då sand är den viktigaste beståndsdelan bland Skanör-Falsterbos sanddyner kommer fokus att ligga på detta material och inga andra korntyper.

2.1. Vågor

De vågor som beaktas i detta projekt är vindgenererade vågor. Egenskaperna hos vågorna (höjd, period och hastighet) beror främst av tre influenser; den sträcka som vindarna påverkar vågorna under (stryklängden), det lokala vattendjupet samt vindens egenskaper (riktning, styrka och varaktighet). Generellt gäller det att vågornas höjd och period ökar med vindens hastighet och begränsas av antingen vindens varaktighet eller stryklängd. (Bosboom & Stive 2015)

När vågor rör sig in mot kusten blir de påverkade av uppgrundning och växer i höjd. Vid en viss höjd börjar vågorna att brytas (kollapsar på sig själv) och frigör en stor andel av den energi som vågen innehåller. På detta vis leder vågbrytning ute till havs till att vågorna har en lägre påverkan när de anländer till kusten. Ett långgrundt havsparti vid kusten, likt det som finns vid Falsterbonäset, ger därmed ett mycket bra kustskydd mot högre vågor. Vid närmare studier på de enskilda vågorna, istället för på våggrupper, kan det skådas att korta vågor är, i jämförelse med långa vågor, mer benägna att brytas innan de anländer till stranden. Anledningen till detta är deras allmänt högre våghöjder. Detta resulterar i att långa, energirika vågor vanligtvis har en dominerande effekt för kusterosionen.

Under vågornas färd mot kusten spelar även stryklängden en mycket stor roll i hur vågorna utformas. En lång stryklängd innebär att vågorna kan färdas längre och ha mer tid på sig för att bygga upp energi innan de anländer mot kusten. Det kräver dock att vinden kontinuerligt blåser i samma riktning som vågorna färdas mot. Efter ett visst antal timmar av kontinuerlig vindpåverkan kan vågorna uppnå ett stadium då deras våghöjd inte kan öka utan att vindarna blir starkare. När detta sker kallas det att man har erhållit en fullt utvecklad sjö.

För att beräkna de våghöjder som når Falsterbonäset har SBM-metoden använts. Denna metod bygger på att man beräknar våghöjden och perioden för två förhållanden antingen att stryklängden eller varaktigheten är begränsade (US Army Corps of Engineers 1984). Detta görs med tre ekvationer för vardera förhållandet. Därefter väljs det förhållande som ger lägst värde för våghöjden, i denna rapport valdes stryklängden som den begränsande faktorn eftersom man ville studera extrema scenarier.

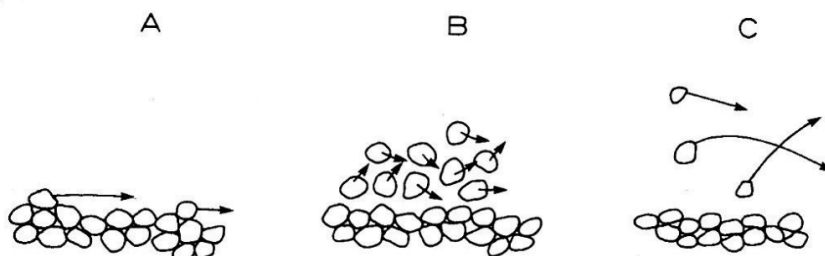
Vindhastigheten är i dessa ekvationer en justerad hastighet där man tagit hänsyn till friktion-skrafter mellan luft och vattenytan.

2.2. Sedimenttransport

Kustliggande sanddyner är en vanlig förekommande formation som byggts upp av vindrelaterad transport av sediment, vanligtvis i form av sand från havet. (Luna et al. 2011). Denna sand har i sin tur förflyttats till kusten med hjälp av strömmar och vågor. Alla dessa processer beror starkt på hur lättflyktiga sedimenten är. Centralt för denna förståelse är hur tungt materialet är, alltså vilken densitet och volym som det har. Sand, som består till största delen av kvarts (vars densitet är 2650 kg/m³), brukar således ha en densitet som antas vara densamma som kvartsen (Bosboom & Stive 2015, p. 258-259). Andra vanligt förekommande mineraler i sand, såsom fältspater, har en tyngre densitet och brukar därmed kallas tunga mineraler. Sedimentets volym brukar antas vara sfärisk, något som betydligt förenklar volymberäkningar. Sedimentets diameter spelar därmed en stor roll i hur tungt sedimentet är och på så vis även hur det karaktäriseras. Genom siktning erhålls kornstorleksfördelningen för sedimentet, något som ofta brukar presenteras som D_{50} , alltså den diameter som står för sedimentets median (50% snittet i kornstorleksfördelningen). Detta värde kommer att representera den kornstorlek vilket XBeach använder för att simulera erosion utifrån. Det är därmed viktigt att kornstorleksfördelningen inte har allt för stor fördelning mellan stora och låga värden så att det bidrar till en skev representation av D_{50} . Ett lågt värde på kvoten av de övre och undre kornrepresentationerna D_{90}/D_{10} är alltså önskvärt (ett exempel på ett lågt värde är 1.5).

Det som den vindrelaterade och kustrelaterade sedimenttransporten därmed försöker att åstadkomma är att påverka sedimenten så pass mycket att de överkommer de krafter som håller den på plats, i de flesta fallen dominerat av gravitationskraften och tröghet. Denna påverkan uppkommer i vanliga fall i form av skjuvspänning (τ_b) på de individuella kornen och den gräns vid vilken sedimenten börja röra på sig kallas för kritisk skjuvspänning ($\tau_{b,c,r}$). Den skjuvspänning som förkommer på sediment på havsbotten, botten-skjuvspänning, beskrivs i vissa fall som skjuvhastighet (u_*), vilket är direkt relaterad till skjuvspänningen via $\tau_b = \rho u_* |u_*|$ (Bosboom & Stive 2015, p. 191-197).

När skjuvspänningen väl är uppnådd börjar de enskilda kornen att röra på sig. Hur denna rörelse ser ut skiljer sig till stor del på storleken av skjuvspänningen som påverkar kornen och hur turbulent vattnet är. Med låg skjuvspänning rör sig kornen längs med varandra under kontinuerlig kontakt med botten, likt det som visas i figur 2.1-A. Vid högre skjuvspänningar börjar ett helt lager av sediment att samtidigt förflytta sig (figur 2.1-B). När fluiden i vilket sedimenten befinner sig i är turbulent finns den en möjlighet att en del partiklar börjar röra sig direkt ovanför de andra partiklarna och faller tillbaka till botten något senare. Denna rörelse, som är den vanligaste rörelsen när det gäller förflyttning med vind, kallas för suspenderad transport och visualiseras i figur 2.1-C.



Figur 2.1: Olika typer av sediment transporter. A visar bottentransport med låg skjuvspänning, B med hög skjuvspänning och C suspenderad transport. (Fredsoe & Deigaard 1992)

Alla dessa transportsätt leder så småningom till att partiklarna kolliderar med varandra och

på så vis överför rörelseenergi mellan varandra. När detta sker mellan partiklar i rörelse och stillastående partiklar sänker det tröskeln för rörelse hos den stillastående partikeln och leder till att den kan röra sig under tillstånd den annars inte skulle kunna. Beroende på marklutningen som partikeln befinner sig på kan denna effekt amplifieras eller dämpas.

Andra parametrar som har betydelse för transportprocessernas takt hos både de enskilda kornen och för deras bulkeegenskaper, är kornens form, sedimentationshastighet, porositet, sedimentkoncentration och rasvinkel (Bosboom & Stive 2015, Woodroffe 2002). Utöver detta har de fysiska och mekaniska egenskaperna för fluiden, i vilket sedimenten befinner sig i, enorm betydelse för dessa processer. På grund av detta finns det stora skillnader mellan sedimentens beteende i luft och vatten.

2.3. Beskrivning av sandiga kuster

Vid sandiga kuster representerar sanddynen det sista skyddet mot erosion genom att förse stranden med ett stort lager av sand som kan användas vid behov (NSW Department of Land and Water Conservation 2001). Att bibehålla dessa sanddynen är således viktigt för att inte utsätta det bakomliggande området för en betydlig översvänningsrisk under kraftiga stormar. Den främre sanddynen, frontdynen, fungerar som kustens barriär och har det väsentliga ansvaret för att stoppa havets intrång mot land. Frontdynen definierar även vart kustlinjen finns samt vart kusten börjar (USACE 2008). En typisk strandprofil med opåverkad omliggande natur ges av figur 2.3. I Sverige, och i stora delar av Europa, är sanddynen klassificerade enligt Natura 2000 naturtyperna. De flesta typer av sanddynen som finns i Sverige kan återfinnas i Skåne och Halland. Dessa omfattar de kustnära embryonala vandrande sanddynerna (fördynen), vita dynen, grå dynen, sandvidedyner, träklädda dynen, dynvätmarker och grässandhedar (Naturvårdsverket 2011). Figur 2.2 visar hur vissa av dessa dyntyper kan se ut. (Doody 2009)

2.4. Bildandet av sandiga kuster

Sanddynen är uppdelade i två grupper, naturliga och artificiella sanddynen.

2.4.1. Naturlig bildning av dynen

De två principiella krafterna som formar dynen är vind och vågor.

Vindrelaterad bildning Naturliga sanddynen är formade främst av vindar i riktning mot kusten som för sediment från strandplanet in över de kustnära områdena. För att sanden ska stanna på plats vid början av kusten krävs det att det antingen finns något som hindrar sanden från att föras vidare inåt land eller sänker momentant vindhastigheten tillräckligt mycket för att den suspenderade sanden ska hinna falla tillbaka ner på marken. Detta kan förekomma i samband med diskreta eller relativt diskreta klumpar av vegetation, drivved, vrakgods och annat liknande. Det ger upphov till individuella sandformationer som så småningom har en möjlighet att växa samman med andra närliggande formationer för att bilda en någorlunda kontinuerlig sanddyn, vilket i detta fall kallas för en begynnande frontdyn. Dessa bildas i de flesta fall vid den övre strandzonen men kan även förekomma längre in mot land (Hesp 2002, p. 1-4). De begynnande frontdynerna är en vital del i bildandet av de etablerade frontdynerna då de skyddar de sistnämnda från bland annat kraftigare vindar. Detta ger möjligheter för vedartade och medelstora växtarter att gro, vilket i sin tur skapar bättre förutsättningar för att sand ska avlagras i denna zon. Utöver dessa faktorer spelar även sandtillgång, strandbredd, vegetationens yttäckning samt återkomsttider för kraftiga vindar och vågor en viktig roll i frontdynens tillväxt. Med tiden formas en etablerad sanddyn som i förhållande till den begynnande frontdynen brukar vara högre, äldre och mer morfologiskt komplicerad. Vissa frontdynen kan i extrema fall växa sig



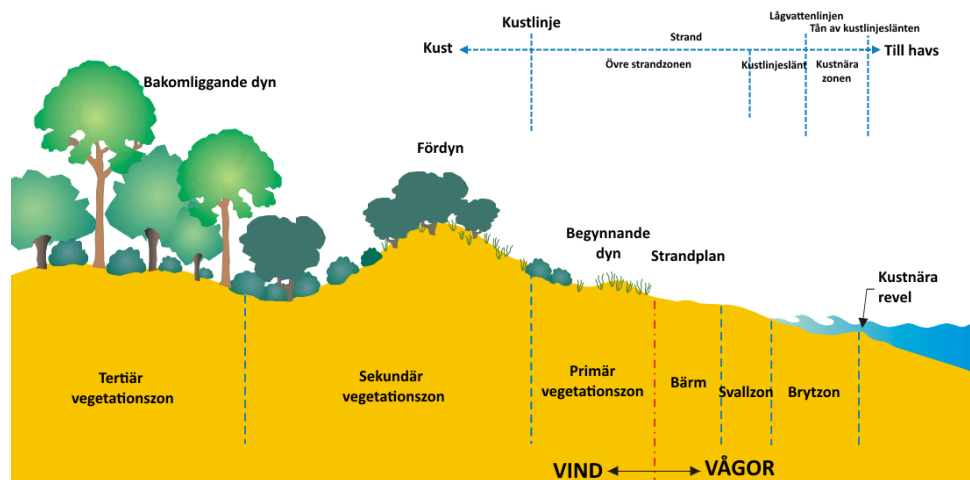
Figur 2.2: Två typer av sanddyner som kan skådas i Skåne. Det övre fotot visar en frontdyn vid Falsterbobukten (fotot är taget av en av författarna). Det undre visar ett grådyn vid Burnham Overy Staithe i östra England och är taget av Hugh Venables (Venables 2007).

högre än 30 m i höjd såsom Stora Sandkullen i Halland som vuxit sig 36 m hög (Länsstyrelsen i Hallands Län 2017). I jämförelse har sanddynerna vid Skanör-Falsterbo en genomsnittlig höjd på omkring 2,5 m.

Ett vanligt förekommande fenomen vid sanddyner är urblåsningsrännor vilket kan liknas vid ovala sänkor i strandprofilen (Hesp 2002). Deras ursprung är ofta anknutet till en störning i morfologin och den befintliga vegetationen, orsakad av t.ex. vågor eller speciellt starka vindar. När denna störning väl uppstår har vindarna möjlighet att erodera bort mer och mer sediment och med tiden skapa en ränna i dynen. På grund av rännans lägre luftmotstånd ökar vindens hastighet i denna jämförelsevis med närliggande ytor och främjar på så vis en kontinuerlig erosion. Detta hämmar även växters möjlighet att gro i rännan eftersom fröna lättare blåser bort. Med tiden kan urblåsningsrännorna formas på ett sådant sätt att vindhastigheten i rännan sänks och möjligheten för att stabiliserande vegetation kan ta fäste ökar.

Vågrelaterad bildning Till skillnad från vindens roll att transportera sand inåt land har de hydrodynamiska processerna, i synnerhet strömmar, tidvatten (har dock väldigt låg eller ingen inverkan i Sverige) och vågor, en central roll i tillförseln av sand mot strandprofilen (Van Rijn 2013). Vågornas påverkan på strandprofilen kan klassificeras i fyra kategorier, även kallade stormregimer:

- Vågsvall - Vågorna som når kusten orsakar endast måttlig erosion på kustlinjeslätten. Strandprofilen återhämtar sig i de flesta fallen vid nästkommande storm.
- Kollision - Frontdynens slänt börjar utsättas för vågöverspolning och drabbas av erosion. Den eroderade volymen transporteras ut till havs.



Figur 2.3: Terminologi för en naturlig strandprofil. De olika typerna av sanddyner befinner sig för det mesta i den del av figuren som kallas för kust, där vindarna har mest betydelse för sedimenttransporten. Stranden med dess lägre höjd är å andra sidan dominerad av de mer energirika vågorna. Bilden är anpassad från [NSW Department of Land and Water Conservation \(2001\)](#) och [USACE \(2008\)](#) och är översatt med hjälp av [Hanson \(2017\)](#).

- Överspolning - Stormfloden och dess vågor har blivit så pass stora att de börjar skölja över den främre dynraden. Detta resulterar i att en stor del av den eroderade sandvolymen sköljs bakom dynen och ackumuleras där.
- Översvämning - Hela strandprofilen översvämmas av vatten och den eroderade massan försvinner in mot land. ([Sallenger 2000](#))

Ett av de stora sandlagren som bildas utifrån de havsriktade erosionsprocesserna är den kustnära reveln. Denna revel flyttar sig generellt mot land vid låg-energirika vågklimat (lugnt väder) och bort från land under mer energirika vågklimat ([Bosboom & Stive 2015](#)). Reveln, och den sand som den består av, rör sig långsamt ut från kusten och försvinner så småningom ut till sjös. Strandprofilen kan omfatta flera revlar samtidigt. Denna cykel är dock långsam, åtminstone 4 år för atlantiska kuster, och är troligtvis ännu långsammare för stränder längs Skånes kust på grund av det låga tidvattnet.

Sammanfattat finns de bästa förutsättningarna för sanddyner vid klimat där det finns starka vindar mot kusten, en god tillförsel av välsorterad fin- eller mellansand och rikligt med kustnära vegetation ([Woodroffe 2002](#)).

2.4.2. Bildning av dyner med artificiell hjälp

Även ifall de flesta av världens sanddyner är skapade av naturliga processer är det nu fler och fler av dessa som påverkas av artificiella medel eller till och med skapas från grunden av människan.

Dynformande staket

Ett sätt att minska sandtransporterna som orsakas av vind är att installera dynformande staket vid utsatta delar av dynen. Staketet är oftast uppbyggda av träpålar som hänger ihop med varandra med hjälp ståltråd eller träplankor. Andra alternativ kan vara att sätta upp ett nät av plast eller stål mellan pålarna. Syftet med staketet är att minska vindhastigheten på dess läsida. På grund av den sänkta vindhastigheten kommer de sandkorn som transporteras av vinden att avlagras bakom staketet. Under en längre period bidrar detta till att en sanddyn byggs upp vid staketets läsida. ([CERC 1984](#)). För att vinden ska kunna ta sig igenom staketet och på så vis tillåta den suspenderade sanden att avlagras krävs det att öppningarna i staketet är av rätt storlek. De ska

vara tillräckligt stora för att vinden ska kunna blåsa tillräckligt med sand genom öppningarna men även tillräckligt små för att skapa tillräckligt mycket lä så att sanden kan avlagras. Staketen har många användningsområden och kan användas för både stora och små sanddyner. I och med att staketen har en väldigt låg inverkan på naturen och är lätta att installera passar de speciellt bra för kultur- och naturområden med känslig miljö och för platser där det inte är möjligt att ta sig fram med maskinfordon. Installerandet av dynformande staket kan göras under perioder då plantering av vegetation ej är möjligt. Detta kan vara till stor nytta för långvariga projekt som syftar till att stabilisera eller forma dyner året runt. En stor nackdel med staketen är att de fungerar bäst vid befintliga sanddyner med rik vegetation och sämre med mindre vegetation. Därför används dynformande staket främst för att hjälpa till med en stadig och långvarig tillväxt av sanddynen. (NSW Department of Land and Water Conservation 2001).

Temporär dynstabilisering

Vissa scenarier kan uppvisa ett behov för en omedelbar men temporär dynstabilisering för att skydda kusten mot vindorsakad erosion. Detta kan till exempel ske vid förberedandet av en inkommande storm eller efter och under ett pågående dynformningsarbete. Flera olika metoder finns tillgängliga och är enligt (NSW Department of Land and Water Conservation 2001, p. 49-51) uppdelade i fyra kategorier:

Trädgrenar och spån Dessa biologiska material har för avsikt att på ett snabbt och enkelt sätt bygga upp ett vindskyddande lager ovanpå de berörda sanddynerna samt även fungerar som en sandfälla. Detta lager bidrar till att skapa ett bättre mikroklimat för växter att gro i vilket i sin tur medför en bättre tillväxt av de berörda sanddynerna.

Flytande sprej Flytande sprej av emulgerad bitumen eller dispergerande organiska polymer kan användas för att aggregera eller cementera det yttersta lagret av sandkorn så att de ej blåser bort. Till skillnad från andra temporära lösningar bidrar denna metod inte till en större fångst av sand utan medför istället till att sand snabbt blåser förbi det hårda lagret.

Täckgrödor Genom att plantera snabbväxande täckgrödor, oftast som frön istället för hela plantor, kan en del av strandprofilen temporärt förankras. Dessa grödor är dock väldigt känsliga för starka vindar och skvättar av saltvatten och kan på så vis ha en mycket kort livstid på den kust de planteras vid. Därför är de också dåligt lämpade för frontdyner. Deras uppgift är således oftast att bidra med ett bättre klimat åt annan önskad vegetation.

Geotextiler Geotextil avses likt andra täckmaterial att skapa en gynnsam omgivning för tillväxten av vegetation och förhindra sand från att blåsa bort från sanddynen. Geotextil, som kan bestå av allt från kokosnötsfibrer till syntetiskt material, är dyrare än de ovan nämnda metoderna men kan tillämpas enkelt vid behov. På grund av dess flexibilitet kan det även användas vid platser som andra metoder inte skulle kunna klara av. Till skillnad från flytande sprej kan sand avlagras utan problem på geotextilen vilket har både fördelar och nackdelar beroende på dess slutgiltiga ändamål. Denna karaktär medför till att biologiskt nedbrytbara material oftast är att rekommendera vid tillverkan av geotextil för temporärt användande.

2.5. Sanddyner som skydd mot översvämning

Översköljning uppstår när vattennivån når dynens topp, detta resulterar då i att sediment följer med flödet ner till andra sidan av dynen vilket resulterar i en kraftigare erosion. Det får även till följd att sediment transporteras in i landet och bildar så kallade överspolningskoner, dessa kan sedan med hjälp av vinden hjälpa till i uppbyggandet av nya sanddyner. Detta är en naturlig rörelse hos dynen och är inga problem om det finns utrymme för den att röra på sig. Problemet uppkommer när området bakom dynen är exploaterat och behöver skyddas från översvämningar, om man därför leder bort vattnet och då även sedimenten från området och på så sätt rubbar

balansen.

Att använda sanddyner som kustskydd mot översvämning är ett bra alternativ då det både skyddar det bakomliggande låglandet samtidigt som man bevarar värdet av stranden, för både turism och lokal ekologi. Det kan dock innebära en hög driftkostnad då man kan behöva göra återkommande utfyllningar efterhand som sanden eroderar ifall inte den naturliga tillförseln är tillräcklig. Idag är det vanligt att man kombinerar sanddyner med ett hårt skydd för att skydda sig mot översvämningar då det ofta finns delar av sanddynerna som är lägre på grund av naturliga faktorer eller mänsklig inverkan.

2.6. Klimatförändring och dess påverkan på sanddyner

Vellinge kommun har tagit beslutet att skapa en plan för hur man skall hantera framtida klimatscenarier framtagna av SMHI för Sverige. I Skanör-Falsterbo är den stora utmaningen att skydda bebyggelsen mot översvämningar då stora delar ligger på en marknivå mindre än 2 m över medelhavsnivån. SMHI förutspår en höjning av medelhavsnivån med 1 m fram till år 2100 på grund av klimatförändringen (SMHI och Naturvårdsverket 2014).

Enligt SMHI är det svårt att se hur stormarna i Norden kommer att påverkas då olika klimatmodeller ger olika svar. En av förändringarna är att lågtryckssystemen som genererar stormarna kommer minska i det varmare klimatet, en varmare vattenyta kan i sin tur leda till att det genereras kraftigare stormar (SMHI 2017a). Det är alltså svårt att säga hur mycket stormar som kommer ske i framtiden dock kan skadorna bli allvarigare tillsammans med den ökade havsnivån då det kan ge kraftiga översvämningar i kustområden. Detta tillsammans med möjliga förändringar i vindriktningar kan leda till förändringar på kustens utformning. Det är alltså viktigt att studera de olika förändringarna för att förstå dess inverkan på sanddynerna och stränderna för att på så sätt dimensionera sanddynerna eller tillgodose att dynernas storlek är tillräcklig för att fungera som översvämningsskydd.

Det har inte gjorts några studier på hur vindriktningen kommer förändras fram till år 2100 men utifrån historisk information så kan man se att riktningen har ändrats från huvudsakligen östlig och sydöstlig till dagens västliga och sydvästliga (Fredriksson et al. 2016). Skulle vindriktningen ändras skulle detta påverka riktningen på de våginducerade strömmarna längs med kusten vilka har en stor inverkan på sedimenttransporten till och från stränderna.

Klimatet kan alltså komma att genomgå stora förändringar de kommande decennierna vilket gör att det är svårt att planera ett kustskydd enbart utifrån den uppmätta data från 1900-talet. Därför används prognoser av olika framtidsscenarier där det i denna rapport valts att fokusera på högriskscenarierna från SMHI.

Rapporten fokuserar i första hand på att studera effekterna på sanddynerna under extrema stormar samt sammanfallande högvatten. Detta betyder dock inte att de är de enda faktorerna som har en inverkan på dynerna. I och med att den befintliga data för andra faktorer är begränsade eller helt obefintliga har de inte prioriterats utan de har behandlats utifrån dagens förhållanden.

2.6.1. Följder av en stigande vattennivå

Östersjön är nästintill ett slutet system och kopplas till Kattegatt och Nordsjön endast genom Danska Bält och Öresund. Detta begränsar vattenflödet mellan de två haven och kan medföra att vattennivåerna i sundet skiljer sig helt från vattennivån i södra Östersjön under särskilda vindförhållanden. Under vinterstormar 2011 och 2013 skiljde sig vattennivån med 2 m mellan Limhamn och Klagshamn (Fredriksson et al. 2016).

Hög- och lågvatten längs med södra Skåne har setts sammanfalla med olika vindriktningar

där nordliga och nordöstliga vindar ofta orsakar högvatten och där västliga och sydvästliga vindar resulterar i lågvatten. Vinden kan även påverka vattennivån under kraftiga och långa västliga stormar som kan trycka in nytt vatten till Östersjön genom sundet och därmed öka vattennivån med upp till 0,5 m. Västliga vindar kan även skapa seicher i hela Östersjön vilket kan påverka vattenytan med några decimeter åt båda hållen. Låg- och högtryck över Östersjön kan också påverka stillvattennivån med upp till 25 cm (Fredriksson et al. 2016).

Tidvattnets påverkan på vattennivån är väldigt begränsad i Sverige och den som finns beror på en tidvattensvåg från Nordsjön. Då öppningen till Östersjön är smal och grund gör friktionen att denna våg reduceras till att bli nästintill obefintlig. Förändringen av vattennivån blir endast någon centimeter i södra Östersjön vilket är obefintligt i jämförelse med de andra faktorerna (SMHI 2017b). Därför kommer inte effekten av tidvattnet analyseras djupare i denna studie.

Med en långsam stigning av medelvattennivån kommer det ske en förändring av kustprofilen, detta kommer ha en stor inverkan på erosionen och leda till ökad erosion fram tills det skapats en ny balans längs med profilen efter den nya vattennivån. Enligt Bruuns lag kommer stranden att flytta sig inåt landet med följande förenklade förhållande,

$$L = h/m \quad (2.1)$$

där L är kustens tillbakadragning, h är vattenhöjningen och m är lutningen av havsbottenen.

Bruuns Lag är en förenklad beskrivning av verkligheten då den inte tar hänsyn till faktorer så som erosion längs med kusten på grund av strömmar. Den ger dock en bra indikation av vilket förhållande vattennivån har i relation till kustprofilen samt sandvolymen och den lokala topografi m.m.

Vid plötsliga och kraftiga förändringar i vattennivån översvämmas ofta hela eller delar av strandplanet vilket gör att erosion sker längre upp längs profilen. Sammanfaller dessa vattennivåer med kraftiga vågor kommer dynerna behöva stå emot den vågenergi som vanligtvis bryts vid strandplanet, det kan även ske översvämning, detta leder till att dynen då eroderar kraftigare.

SMHI har gjort flera scenarion för vattenståndet där de har hög- och lågriskscenarion. I deras prognos beräknas återkomsttiden för dagens 100-årshögvatten ändras så att för lågriskscenariot kan det ske 2-10 gånger så ofta och för högrisk scenariot upp till 50 gånger så ofta som idag. Även nivån på dessa högvattenstånd förväntas öka kraftigt vilket kommer ge stora förändringar på kustlandskapet (Nerheim 2007).

2.6.2. Följder av en ökad stormfrekvens

Prognoser pekar på att vindens styrka kommer öka samt att återkomsttiden för kraftiga stormar kommer minska och skapa ett mer oregelbundet kustklimat. Detta tillsammans med en ökad havsnivå är huvudfaktorer för en ökad översvämningsrisk då det kan resultera i att vattennivån under stormar i framtiden når uppemot 3 m över dagens medelvattenstånd.

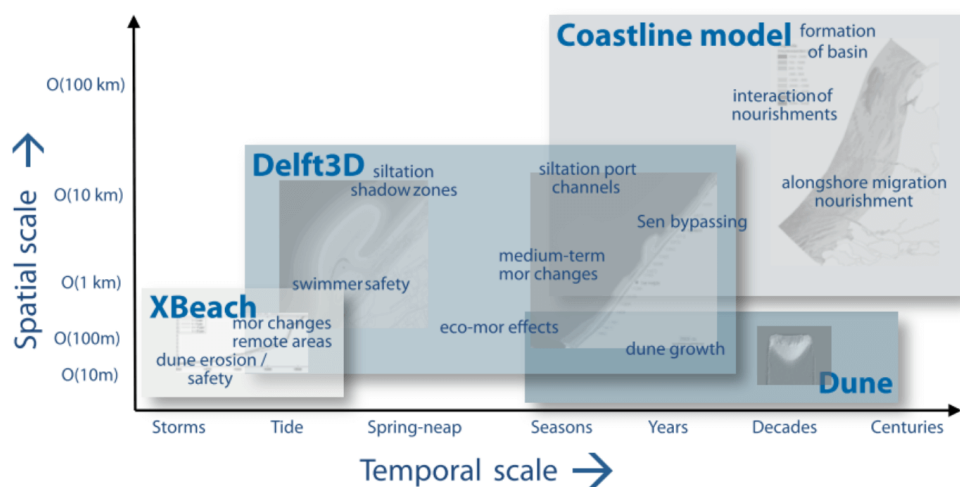
Då stora delar av Skanör-Falsterbo ligger på lägre än 2 m över dagens medelvattenstånd skapar detta möjliga problem för både bebyggelse och infrastruktur inom området. För att skydda bebyggelsen hjälper hårda skydd i form av vallar och murar, för att minska höjden på vällen vill man dock använda de befintliga sanddynerna då de reducerar eller helt tar bort vågenergi. Det finns även stora ekonomiska värden i form av golfbanor och själva stranden i sig, så intresset är stort för att behålla dagens kustlinje även i framtiden. Detta betyder att man med hjälp av sandfodringar behöver skapa en kustprofil som klarar av de nya klimatförhållandena. Detta innebär i sin tur kostnader samt även ekologiska problem som måste tas i beaktning.

3

Beskrivning av XBeach

3.1. Introduktion

Den morfologiska utvecklingen av sanddynerna runt Falsterbonäset har studerats med den numeriska modellen XBeach. XBeach är en open-source modell som har tagits fram genom ett samarbete mellan Deltares, Delft University of Technology, UNESCO IHE och The University of Miami. Anledningen till modellens uppkomst var att kunna bedöma sårbarheten av USA:s östkust och undersöka potentiella kustskydd som skulle kunna klara av de kraftiga orkanerna som passerar området då och i framtiden. Modellen skulle därmed kunna klara av att simulera de morfologiska, och i viss mån de hydrologiska, processerna förknippade med de stormregimerna beskrivna i kapitel 2.4 för sandiga kuster. Med tiden har modellen utvecklats till att även kunna simulera flera andra kusttyper som t.ex. grusdominerande kuster och korallrev (van Dongeren 2017). Modellen tar inte hänsyn till den vind-relaterade sedimenttransporten men kan göra det via koppling med andra modeller. I och med att XBeach har ett fokus på konsekvenserna av stormar är modellen i första hand avsedd för småskaliga områden med relativt kort tidsspann. En jämförelse med andra modeller från Deltares visas i figur 3.1. (Roelvink et al. 2009)

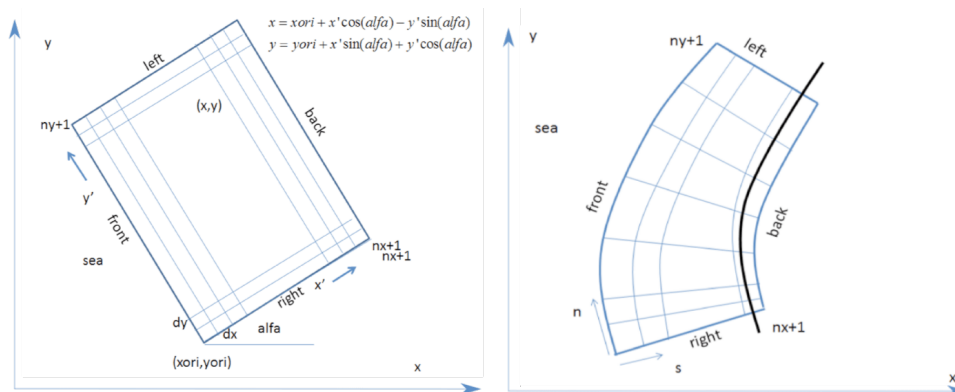


Figur 3.1: En jämförelse av flera olika modellers användningsområden med tanke på deras spatiala och tidsmässiga fokus (Huisman 2012).

3.2. XBeach:s struktur

XBeach är en numerisk modell som ursprungligen utvecklades för att simulera hydrodynamiska och morfologiska processer och dess påverkan på sandiga kuster (Hoonhout 2015). Modellen har support för rutnät i 1D och 2DH (där H:et innebär att de använda ekvationerna är vertikalin-tegrerade). Koordinatsystemet som rutnätet använder sig av har en x-axel som är riktad mot kusten och en y-axel som beskriver kustens bredd (se figur 3.2). För ett endimensionellt rutnät sätts y-axeln till noll ($ny = 0$). Rutnätet måste på grund av detta vara kurvlinjärt eller rektangulärt (ett specialfall av kurvlinjeritet). Varje enskild cell i rutnätet innehåller information om vattennivåer, bottenivåer, vattendjup och koncentrationer och dess ränder innehåller information om vattenhastigheter och sedimenttransporter. I vågenergibalansen är den totala energin, rollerenergin och strålningsspänningen definierad i cellens centrum medan strålningsspänningens gradienter är definierade vid ränderna.

XBeach använder sig av flera olika moduler för att beräkna vågornas och sedimentens beteende. Dessa moduler presenteras i figur 3.3. Under varje tidssteg anropas alla moduler med start hos kortvågsmodulem som ger ett värde på strålningsspänningen som output. Tillsammans med outputen från flödesmodulem skickas dessa värden till sedimenttransportmodulem. Till slut kan ett värde på bottenivån erhållas som står som bas för det nästkommande beräkningssteget. De randvillkor som modellen kräver används endast under den första cykeln. (Daly 2009)



Figur 3.2: Ett rektangulärt (till vänster) och ett kurvlinjärt (till höger) koordinatsystem. (Hoonhout 2015)

I de följande underavdelningarna beskrivs de processer samt deras tillhörande ekvationer som har störst påverkan i de fyra nämnda modulerna.

3.2.1. Hydrodynamik

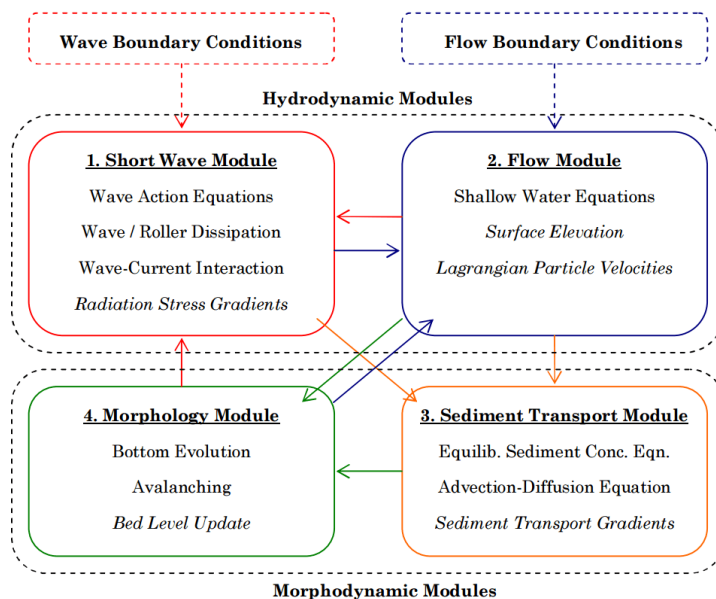
Vågverkanbalans

För grunt vatten är de korta vågornas transformation härledd från den tidsberoende version av jämviktsekvationen för vågverkan som ges av ekvation 3.1 (även kallad "wave action balance equation") (Holthuijsen et al. 1989). Vågverkan (A) beror på den riktade distributionen av energi (S_w) och vågens egenfrekvens (σ). Vågdisipationen (wave dissipation) i XBeach sköts av tre olika processer: Vågbrytning (D_w), bottenfriktion (D_f) och vegetation (D_v). Vågverkanbalansen är given av:

$$\frac{\delta A}{\delta t} + \frac{\delta c_x A}{\delta x} + \frac{\delta c_y A}{\delta y} + \frac{\delta c_\theta A}{\delta \theta} = -\frac{D_w + D_f + D_v}{\sigma} \quad (3.1)$$

där vågverkan beräknas av:

$$A(x, y, t, \theta) = \frac{S_\omega(x, y, t, \theta)}{\sigma(x, y, t)}. \quad (3.2)$$



Figur 3.3: De moduler som XBeach använder sig av. Pilarna visar hur modulerna är kopplade och de kursiva termerna är de relevanta utgående parametrarna. (Daly 2009)

Inom dessa ekvationer representerar θ vågornas infallsvinkel med hänsyn till x-axeln. Både egenfrekvensen σ och våggruppshastigheten c_g kan erhållas från den linjära vågdispersionsrelationen. Utifrån detta ges vågens egenfrekvens av:

$$\sigma = \sqrt{gk \tanh kh}. \quad (3.3)$$

Våghastigheten i x- och y-led fås av:

$$\begin{aligned} c_x(x, y, t, \theta) &= c_g \cos(\theta), \\ c_y(x, y, t, \theta) &= c_g \sin(\theta) \end{aligned} \quad (3.4)$$

Rollerenergibalans

När vågor bryts skapar de ett moln-lager av luft och vatten på den övre delen av vattenytan. Detta lager kallas för ytroller (surface roller) och bevarar temporärt en del av den energi och den rörelsemängd som vågbrytningen dissiperar. Detta lager försvinner så småningom på grund av en snabbt ökande turbulens (Bosboom & Stive 2015). XBeach tar denna effekt i hänsyn genom att införa rollerbalans ekvationen:

$$\frac{dE_r}{dt} = \frac{\partial E_r}{\partial t} + \frac{\partial E_r c \cos \theta}{\partial x} + \frac{\partial E_r c \sin \theta}{\partial y} = S - D \quad (3.5)$$

där S är förlusten av vågriktad energi på grund av vågbrytning och D är dissiperingen.

Samverkan mellan strömmar och vågor

När vatten rör på sig sker det konstantt ett energiutbyte mellan olika partiklar. XBeach använder sig av den formulering som presenteras av ekvationerna 3.6 och 3.7 för att korrigera det utbytet av energi som sker mellan vattenströmmar och vågor under en simulering. Dessa ekvationer justerar vågnumret k med hjälp av korrigeringsvärdena k_x^{n-1} och k_x^i .

$$\begin{aligned} k_x &= k_x^{n-1} + k_x^i, \\ k_y &= k_y^{n-1} + k_y^i \end{aligned} \quad (3.6)$$

där $n - 1$ refererar till vågnumret i det föregående tidssteget.

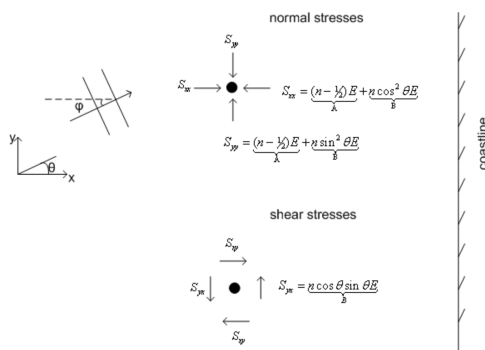
$$k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2}. \quad (3.7)$$

Strålningsspänningsgradienter

När vatten rör på sig ger det ett utbyte av rörelsemängd. Vågor kan påverka detta utbyte genom förflyttandet av rörande partiklar alternativt med hjälp av vågrelaterade tryckskillnader. Detta flux av rörelsemängd, som härstammar från vågor, kallas för strålningsspänning. Strålningsspänningen är uppdelad i normalspänningar och skjuvspänningar likt det som visas av figur 3.4. På grund av ytrollernas påverkan på rörelsemängden beräknas denna ibland med i strålningsspänningen. Enligt [Bosboom & Stive \(2015\)](#) finns det flera modeller som kan tillämpas för införandet av denna term som alla har varierande påverkan på advektion- och tryck-delen av strålningsspänningen. De horisontella gradienterna av strålningsspänningen ger upphov till riktade krafter på vattnet. Dessa krafter beskrivs i XBeach av de två nedanstående ekvationerna ([Roelvink et al. 2009](#));

$$\begin{aligned} F_x(x, y, t) &= -\left(\frac{\delta S_{xx,waves} + \delta S_{xx,roller}}{\delta x} + \frac{\delta S_{xy,waves} + \delta S_{xy,roller}}{\delta y}\right), \\ F_y(x, y, t) &= -\left(\frac{\delta S_{yx,waves} + \delta S_{yx,roller}}{\delta y} + \frac{\delta S_{xy,waves} + \delta S_{xy,roller}}{\delta x}\right) \end{aligned} \quad (3.8)$$

där den första termen i parentesen beskriver följden av variationer i de enkelriktade normala strålningsspänningarna och den andra termen följden av variationer i de x- och y-riktade skjuvstrålningsspänningarna.



Figur 3.4: Strålningsspänningens normalspänningar och skjuvspänningar samt deras komponenter. I beskrivningen av $S_{y,y}$ visar 'A' den del som härstammar från tryck och 'B' den del som härstammar från advektion av vattenpartiklarnas horisontella hastighet ([Bosboom & Stive 2015](#)).

Shallow water equations

För att simulera låg-frekvens vågor och medelflöden använder XBeach sig av shallow water equations. Som tillägg utöver de normala shallow water equations implementeras "the Generalized Lagrangian Mean" (GLM) formuleringen i modellen ([Hoonhout 2015](#)). Vad detta innebär är att kontinuitets- och rörelsemängd-ekvationerna istället är formulerade med hjälp av Lagrange's hastighet u^L . Detta innebär att ekvationerna nu kommer att fokuseras på de enskilda partiklarnas beteende istället för att bevaka en specifik koordinat (vilket är fallet vid beräkandet av Euler's hastighet). Lagrange's hastighet fås därmed av den sträcka som den enskilda partikeln färdas under en vågperiod delat med denna vågperiod. Denna implementering görs av följande ekvationer med hänsyn till x- respektive y-riktningarna;

$$\begin{aligned} u^L &= u^E + u^S, \\ v^L &= v^E + v^S \end{aligned} \quad (3.9)$$

där u^E och v^E är Euler's hastighet och u^S och v^S är Stoke's drift (den resulterande rörelsen som en vattenpartikel följer på grund av en inte helt slutet cirkulär omloppsbanan (Bosboom & Stive 2015)). Stoke's drift kan beräknas av de nedanstående ekvationerna:

$$u^S = \frac{E_w \cos \theta}{\rho h c} \quad \text{and} \quad v^S = \frac{E_w \sin \theta}{\rho h c}. \quad (3.10)$$

Den resulterande GLM-rörelsemängdekvationen fås av ekvationerna 3.11 och 3.12:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial u^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial u^L}{\partial y} - f v^L - \nu_h \left(\frac{\partial^2 u^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u^L}{\partial y^2} \right) &= \frac{\tau_{sx}}{\rho h} - \frac{\tau_{bx}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{F_x}{\rho h} + \frac{F_{v,x}}{\rho h} \\ \frac{\partial v^L}{\partial t} + u^L \frac{\partial v^L}{\partial x} + v^L \frac{\partial v^L}{\partial y} + f u^L - \nu_h \left(\frac{\partial^2 v^L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v^L}{\partial y^2} \right) &= \frac{\tau_{sy}}{\rho h} - \frac{\tau_{by}^E}{\rho h} - g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{F_y}{\rho h} + \frac{F_{v,y}}{\rho h} \end{aligned} \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial h u^L}{\partial x} + \frac{\partial h v^L}{\partial y} = 0 \quad (3.12)$$

där f är en term för corioliseffekten, τ_{sx} och τ_{sy} är vindskjuvspänningar, τ_{bx} och τ_{by} är botten-skjuvspänningar samt att η är vattennivån. Bottenskjuvspänningarna härstammar från strömmar och långa vågor och kan formuleras på flera olika sätt. Manning-formulering, som medför att bottenskjuvspänning är beroende av Manningkoefficienten (n), är den som har använts under de simuleringar som senare kommer att presenteras. När modellparametrarna presenteras kommer valet att använda Manning-formulering att se ut på följande vis: *bedfriction = Manning*.

Vågbrytning

XBeach kan simulera vågbrytning med hjälp av något av de 5 olika formuleringarna i tabell 3.1. 'Roelvink (1993a) extended' är den formulering som används som default i XBeach vilket även är den formulering som används i detta examensarbete.

Table 3.1: De formuleringar som XBeach kan använda sig av för att simulera beteendet av vågbrytning. Tabellen är anpassad från den som kan återfinnas i Hoonhout (2015)

Vågbrytningsformulering	Typ av vågor	Nyckelord
Roelvink (1993a)	Instationary	roelvink1
Roelvink (1993a) extended	Instationary	roelvink2
Daly et al. (2010)	Instationary	roelvink_daly
Baldock et al. (1998)	Stationary	baldock
Janssen & Battjes (2007)	Stationary	janssen

3.2.2. Morfologi

Jämviktsekvationer för sedimentkoncentrationer

För att beräkna hur sediment transporteras i en modell använder XBeach sig av sedimentkoncentrationer. I den senaste versionen av XBeach (oktober 2015 'King's Day' release) är sedimentkoncentrationer i vattenpelaren modellerade med hjälp av en "depth-averaged" advektion-diffusion ekvation av Galappatti & Vreugdenhill (1983)

$$\frac{\partial hC}{\partial t} + \frac{\partial hC u^E}{\partial x} + \frac{\partial hC v^E}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[D_h h \frac{\partial C}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[D_h h \frac{\partial C}{\partial y} \right] = \frac{hC_{eq} - hC}{T_s} \quad (3.13)$$

där C är den "depth-averaged" sedimentkoncentrationen som beror på våggruppens tidsomfattning samt D_h som representerar koefficienten för sedimentdiffusion. T_s beskriver hur snabbt

sedimenten reagerar vid flödesförändringar i vattnet. Ett lågt värde innebär att reaktionstiden är mycket liten, om inte näst intill omedelbar. Denna parameter beror på hastighet som sedimenten sjunker med w_s samt det lokala vattendjupet h . Depositionen eller "entrainment" av partiklar beror på hur mycket som skiljer sig från den aktuella sedimentkoncentrationen C och jämviktsskoncentrationen C_{eq} . Jämviktsskoncentrationen kan för tillfället formuleras på 2 sätt i XBeach; endera med hjälp av 'Soulsby-Van Rijn'-ekvationerna eller av 'Van Thiel-Van Rijn'-ekvationerna. Dessa formuleringar har två ekvationer var för beräkningen av bottensediment och suspenderad sediment. Båda paren av ekvationer är sig lika, dock skiljer sig 'Van Thiel-Van Rijn'-ekvationerna sig med att de inte beräknar koefficienten för vattenmotstånd och att den kritiska hastigheten för strömmar U_{crc} och för vågor U_{crw} är beräknande var för sig. Oavsett vilket par av ekvationer som väljs kommer den totala sedimentkoncentrationen att i slutändan beräknas med hjälp av ekvation 3.14.

$$C_{eq} = \max \left(\min \left(C_{eq,b}, \frac{1}{2} C_{\max} \right) + \min \left(C_{eq,s}, \frac{1}{2} C_{\max} \right), 0 \right) \quad (3.14)$$

Förändringar av bottennivån

För att uppdatera bottennivåerna i en XBeach simulering används ekvation 3.15. Denna ekvation beror på gradienterna av sedimenttransporterna för x- och y-axeln ($\frac{\partial q_x}{\partial x}$ respektive $\frac{\partial q_y}{\partial y}$).

$$\frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{f_{mor}}{(1-p)} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) = 0 \quad (3.15)$$

I denna ekvation står f_{mor} (representeras av parametern *morfac* i XBeach) för den morfologiska acceleration som önskas för modellen. Vad denna parameter innebär för simuleringen är att den morfologiska tidsskalan påskyndas i jämförelse den hydrodynamiska tidsskalan. Detta sker genom att simuleringstiden delas med *morfac*. En *morfac* på 10 skulle därmed simulera 10 minuter av morfologisk utveckling för varje minut som simuleras i hela modellen.

Avalanching

Avalanching, eller sandskred som det heter på svenska, är en process i XBeach som ser till att ta till hänsyn den förändring som sker när sand eroderas från en frontdyn, eller annan skarplutad och kornbaserad dyn, och hamnar vid kustlinjeslätten på grund av kraftfulla vågor. Enligt XBeach sker denna överföring av sand när lutningen på frontdynen uppnår en viss vinkel, i detta fall den 'kritiska bottenlutningen' m_{cr} (critical bed slope). Den kritiska bottenlutningen skiljer sig om en del av frontdynen ligger över vattenytan eller inte. XBeach skiljer dessa tillstånd åt med benämningen torr och blöt bottenlutning (dry and wet bed slope). Detta görs på grund av antagandet att blötlagd sand är mycket mer benägen att deformeras i jämförelse med torr sand. Avalanching's påverkan på bottennivån z_b representeras av följande ekvationer:

$$\begin{aligned} \Delta z_b &= \min \left(\left(\left| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right| - m_{cr} \right) \Delta x, v_{av,max} \Delta t \right), \quad \frac{\partial z_b}{\partial x} > 0 \\ \Delta z_b &= \max \left(- \left(\left| \frac{\partial z_b}{\partial x} \right| - m_{cr} \right) \Delta x, -v_{av,max} \Delta t \right), \quad \frac{\partial z_b}{\partial x} < 0 \end{aligned} \quad (3.16)$$

där $v_{av,max}$ är en hastighetsbegränsning av uppdateringshastigheten för bottennivån. Detta införs för att undvika att större chockvågor genereras vid plötsliga ändringar av bottennivån.

3.2.3. Randvillkor

I XBeach återfinns randvillkor för vågor, vattenflöden, tidvatten och svall, floder och punktflöden samt sedimenttransporter. Endast randvillkoren för vågor och vattenflöden kan justeras

i större utsträckning. Av denna anledning kommer det största fokuset i denna del att ligga på dessa två randvillkor.

Randvillkor för vågor

Randvillkoren för vågorna till havs kan definieras på två olika sätt i XBeach, nämligen med hjälp av vågspektrum eller utan vågspektrum. I de fall där vågspektrum används kallas randvillkoren för "spectral conditions". Detta randvillkor är även det populäraste randvillkoret enligt Hoonhout (2015) och används även i detta examensarbete. Utöver randvillkoren för vågornas beteende till havs krävs det att ett sido-randvillkor är definierat.

Spectral conditions Det vågspektrum som används för "spectral conditions"-randvillkor kan läsas på tre olika sätt av XBeach (Hoonhout 2015). Den första metoden baseras på att definiera spektrumet som ett parametriserat invärde med parametrar som representerar vågornas spektrala form (våghöjder bl.a.), dess vågperiod samt dess vågutbredning. De två andra metoderna tillgodoser möjligheten för att använda 2-dimensionella variance density spektrum med ursprung från vågmodellen "SWAN" alternativt från annan härkomst.

Non-spectral conditions XBeach kan även sätta upp randvillkor för vågor där vågspektrumet är okänt och när vågornas tidsserier och våggrupper saknas eller ej önskas användas. För dessa fall finns det två alternativ för den sorts data som kan användas. Båda alternativen fokuserar på att beräkna modellens vågenergi. Det första alternativet utgår ifrån en enformig och konstant vågenergi som beräknas med hjälp av H_r -våghöjden, den representativa vågperioden T_{m01} , medelvärdet på vågriktningen samt storleken på funktionen för riktningsdistribution. För att kunna variera vågenergin med tiden kan det andra alternativet användas. Detta alternativ använder sig av olika tidsserier av vågor alternativt genom att bestämma vågornas horisontella och vertikala hastighet samt höjden på den fria vattenytan.

Randvillkor för vattenflöden

För att kunna köra en simulering i XBeach krävs det att randvillkoren för vattenflöden är definierade i alla fyra sidor av modellens omfattning. Randvillkoren till havs och mot land skiljer sig från de som sträcker sig längs med kustprofilen. Dessa två grupper av randvillkor kommer därmed att beskrivas var för sig.

Randvillkor mot land och till havs Ett randvillkor till havs har generellt sett ingen fysisk mening. Dess syfte är istället att återskapa naturliga vattenstånd och vattenflöden och att dessa endast påverkas av en marginell reflektion när de korsar randen. Detta kan uppfyllas av ett svagt reflekterande randvillkor som annars absorberar alla inkommande vågor (betecknat " abs_1d " eller " abs_2d " i XBeach). Den betydligaste skillnaden mellan dessa varianter är att " abs_1d " kan endast absorbera vågor som inkommer vinkelrätt mot randen, därav dess begränsning till endimensionella modeller. Hoonhout (2015) rekommenderar dessa randvillkor för de allra flesta simuleringar vilket har resulterat i att dessa randvillkor nu väljs som standard när XBeach-modellen skapas. Andra randvillkor som kan sättas ute till havs är följande:

- "wall" som förhindrar alla ändringar av flux vid randen.
- "wlevel" som sätter vattennivån vid randen till ett konstant värde som har möjligheten att ändras med tiden.
- " $nonh_1d$ " som tillåter en extern tidsserie att bestämma vattenhastigheterna vid randen.
- "waveflume" som ser till att alla vattenflöden som har sitt ursprung utanför modellens domän inte orsakar en netto-ökning av vattenvolymen.

Alla alternativ som hittills har nämnts kan användas som randvillkor både vid land och till havs med undantag för ”*nonh₁d*” och ”*waveflume*” som endast är möjliga ute till havs.

Randvillkor i sidled XBeach använder sig av två olika typer av variabler för randvillkoren längs med kustprofilen, ett för vågor (”*lateralwave*”) och ett för vattenflöden (”*right*” och ”*left*”). Randvillkor på sidan av modellen med avseende på vågor krävs för att kunna åter skapa de vågrelaterade processerna som i verkligheten sker längs kusten men som inte kan få plats i modellens begränsade omfattning (t.ex. vågor som rör sig in eller ut från det område som simuleras). Ett av de randvillkor som kan sättas är randvillkoret vid namn ”Neumann” vilket ser till att gradienterna för vattennivån och våghastigheter vid randen är noll. ”Neuman”-randvillkoret fungerar för både vågor och vattenflöden. Detta är även det randvillkor som är satt i alla delar av modellen för sedimenttransporter. Alternativt kan gradienten i vågenergin längs med vågkrönet sättas till noll (Wavecrest-randvillkor). Det finns även tre randvillkor med fokus på vattenflöden: en som sätter vattenhastigheten till noll i randen, en som endast sätter negativa vattenaccelerationer vid randen och en som kopierar vattenhastigheterna för de närliggande cellerna och använder det vid randen. I XBeach kan varje sido-randvillkor väljas enskilt (höger från vänster) vilket möjliggör att de ovanstående villkoren kan blandas utifrån behov. (Hoonhout 2015)

3.2.4. Vegetation

XBeach har möjligheter att hantera kortvågiga och långvågiga förluster på grund av vegetation men även dess inverkan på flödet.

Modellen har möjlighet att hantera flera typer av vegetation samtidigt där antalet bestäms med hjälp av nyckelordet *nveg*. Utöver det skapas två filer en som beskriver vegetationens karaktär, *veggiefile*, och en som specificerar dess placering, *veggiemapfile*

XBeach använder sig av följande numeriska parametrar för att förenklat beskriva vegetationens egenskaper.

- ah: höjden på vegetationen jämfört med strandplanet
- Cd: friktionskoefficienten
- bv: stamtjockleken
- N: Vegetationens täthet

4

Utvärdering av data

Här beskrivs den data som används under simuleringen och hur den tagits fram.

4.1. Erhållen data

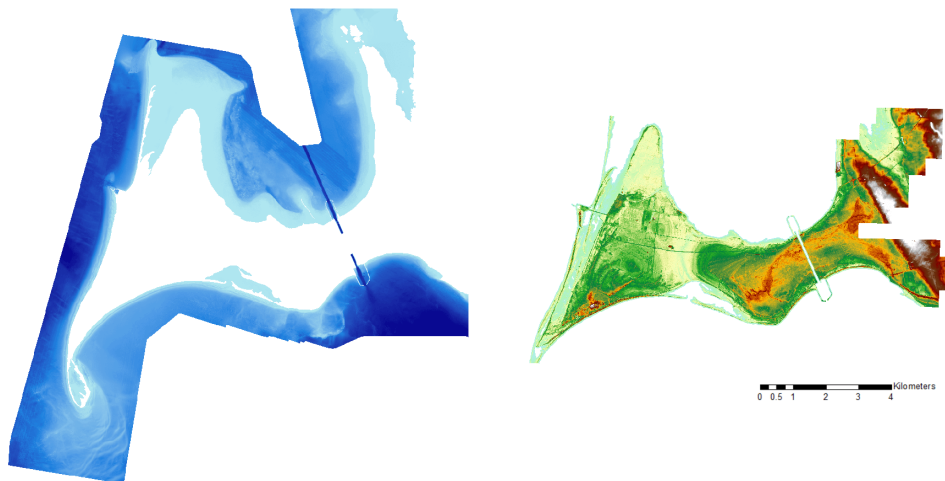
Data som har blivit använd i denna uppsats är följande:

- Batymetri över Falster-Skanör erhållen från SGU, Sjöfartsverket och Falsterbo kommun.
- Kustprofiler mätta mellan åren 2005 och 2017 erhållna från Vellinge kommun (via Sebastian. I. Street) och genom egna inmätningar.
- Kornstorleksfördelningar ämnade för strandfodringar i Vellinge kommun samt kornstorleksfördelningar gjorda utifrån egna prover. De tidigare nämnda fördelningarna gavs av Sebastian. I. Street under februari 2017.
- Vattenståndsdata mellan åren 1992 och 2017 erhållna från SMHI.
- Vågdata framräknad med hjälp av SPM-metoden och fyra vindscenarier.

4.1.1. Batymetri

Batymetrin (bottnens topografiska utformning) som har använts för modelleringen i detta projekt är en sammanställning av tre batymetrier i raster-format. Den ena batymetrin kommer från SGU och är en havsfokuserad terrängmodell med cellupplösningen 2x2m som omfattar vattendjupen från -10m upp till -0.3m (baserat på den svenska höjdsystemet RH2000). Avståndsmässigt sträcker sig batymetrin omkring 2km ut från kustlinjen. Figur 4.1 visar batymetrins omfattning. SGU's batymetri är en sammanslagning av djupdata som SGU har mätt med hjälp av ekolod och sonar samt av djupdata insamlad med flugburen LIDAR (Light Detection and Ranging) av kommuner inom Skåne för de delar av batymetrin som ligger vid grunt vatten där de andra metoderna inte är möjliga (Malmberg Persson et al. 2014). Batymetri mättes in i samband av ett landsskapstäckande projekt där hela Skånes kust kartlades för att bedöma erosionsrisker och som underlag för kustzonsplanering. Den andra batymetrin kommer från Vellinge kommun och täcker nästan hela topografien för Falsterbonäset, dock endast till ett djup några centimeter under 0m-gränsen. Denna har Vellinge kommun från eget initiativ skannat in med upplösningen 1x1m. På grund av avsaknaden av batymetridata vid övergångszonen (en zon som är omkring 40m bred som sträcker sig runt hela Falsterbo-Skanör) är den slutgiltiga batymetrin ej en perfekt avbildning av verkligheten. Denna felkälla ligger dock på en väldigt viktig del av batymetrin

för den simulering som görs i detta projekt. Ytterligare en felkälla är att en del av batymetri-datan från båda batymetrierna överlappar varandra med olika värden trots det att de har samma höjdmodell. Anledningen till detta fel är hittills oklart men kan möjligtvis ha orsakats av att LIDAR-mätningen hade ett minimi-djup som automatiskt skrevs in vid kustlinjen. Oavsett orsak kan det vid närmare undersökning i SGU's batymetri skådas en rand av värden på -0.3 med en bredd på omkring 30-80m längs stora delar av kustlinjen. Tredje delen av batymetrin är gjord efter en interpolering av höjdkurvor från Sjöfartsverkets sjökort. Denna är en förlängning av batymetrin ner till ett djup på mellan 15-25 meters djup beroende på kuststräcka. Denna förlängning har sedan korrigerats med mellan 0.5-1.5m i höjd för att passa in med batymetrin från SGU.



Figur 4.1: De batymetrier som använts under projektets gång. Till vänster syns den batymetri som erhållits från SGU och till höger den från Vellinge kommun.

4.1.2. Kustprofiler

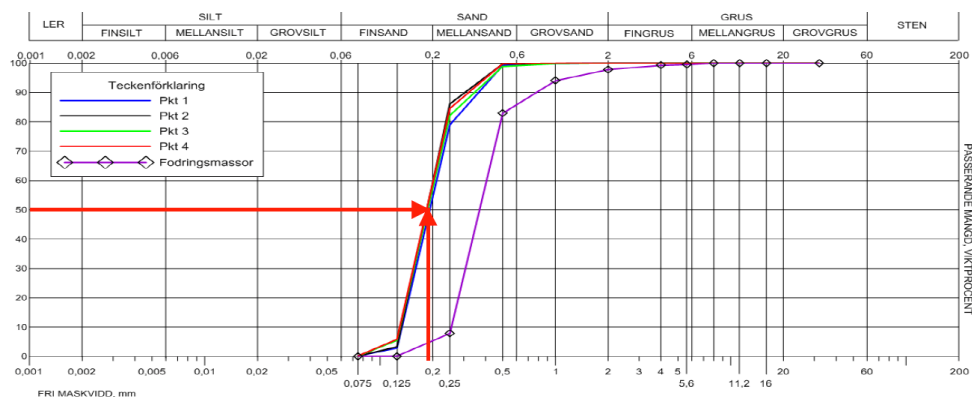
Under åren 2010-2016 har 10 stycken kustprofiler mätts i Kämpingebukten (Street 2011). Inmätningen utfördes i koordinatsystemet SWEREF 991330 och höjdsystemet RH2000 med hjälp av en GPS. Mätningen gjordes ut till midjedjupt vatten för att inte riskera att vågor blötte ner ryggsäcken med instrumentet. De flesta mätningar går över klitterna utom några som följer stigar och som därmed är riskpunkter för översvämning. Dessa profiler användes inte i de slutgiltiga simuleringarna utan enbart under projektets gång för att testa modellen. Anledningen till detta var att profilerna var begränsade till Kämpingebukten och att en egen fältmätning gjordes senare i projektet samt att Vellinge kommun delade med sig av en detaljerad höjdmodell för området.

Under projektet har även en fältmätning utförts med stöd från Vellinge kommun där 15 profiler mättes in med hjälp av GPS. Profiler längs med stigar och byggnation undveks för att efterliknar de naturliga sanddynerna i den mån som gick samt för att undvika att simulera efter skapta svagheter då dessa behöver tas bort ifall dynerna ska användas som översvämningsskydd. Inmätningen beskrivs i detalj i appendix C.

4.1.3. Kornstorlek

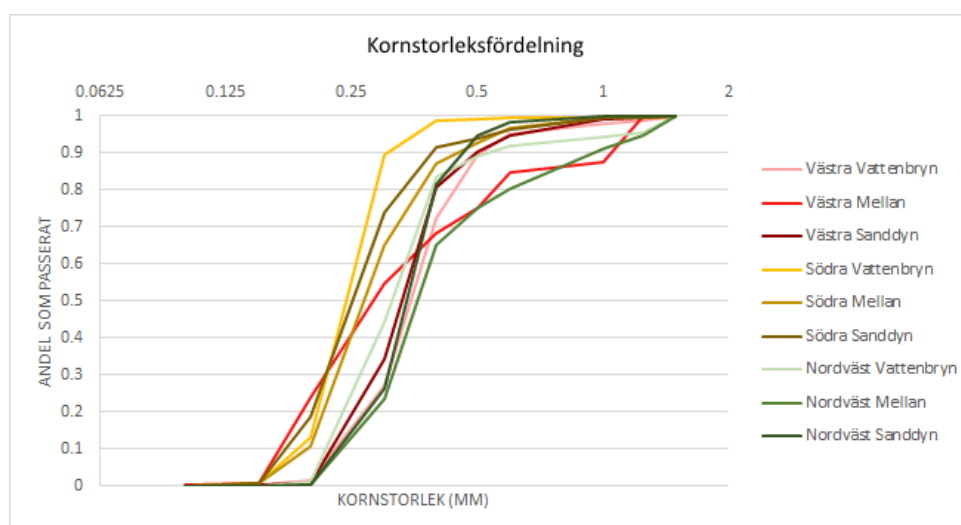
Kornstorleken som använts i simuleringarna är ursprungligen kornstorleksfördelningar framtagna av Vellinge kommun. Dessa fördelningar är gjorda utifrån ett sandprov från fodringssasor som planeras att användas i närområdet samt fyra sandprover tagna ute till havs vid västra delen av Höllviken (viken och inte staden) upp till 250m ut i vattnet. Både fodringssmassan och

proverna klassificeras som sand och har en låg variation av kornstorlekar. Likheterna mellan båda sandtyperna skapar goda förutsättningar för att bibehålla samma bottenegenskaper som innan. 4.2



Figur 4.2: Kornstorleksfördelning för de sandproverna tagna utanför sandfodringsdeponin samt för den sandfodring som är planerad att användas som fodringssand. D_{50} för sandproverna är utritat med röda pilar.

För att kunna jämföra kornstorleken i Höllviken med de kornstorlekar som finns i västra och södra Falsterbonäset, de delar som detta examensarbete studerar, föreslogs det att en egen kornstorleksfördelning skulle tas fram. Prover från tre strandprofiler i Falsterbo-Skanör hämtades in i samband med strandprofilmätningen som utfördes den 31 mars 2017. Vid varje strandprofil togs tre prover; ett vid vattenbrynet, ett vid dynkrönet och ett någonstans där emellan. Varje grupp av prover togs i närheten av något av de strandprofiler som Vellinge kommun har mätt med gps under åren. De valda profilerna blev V1, V4 och S3 (figur 5.2 visar vart dessa strandprofiler är placerade i Falsterbonäset). Dessa prover analyserades sedan med hjälp av siktar vid LTH. De valda sorteringsmått bland siktar valdes från 1.25mm till 0.1mm. Genom att skaka sikterna för hand erhöles de kornstorleksfördelningar som visas i figur 4.3. Utifrån dessa fördelningar kan det uppskattas att D_{50} för alla strandprofiler ligger mellan gränsvärdena 0.25 och 0.32mm. Skillnaden mellan dessa sandkorn och de som analyserades av Vellinge kommun är omkring 0.1mm, vilket är ganska mycket. Denna avvikelse härstammar troligtvis från det att båda provgrupperna kommer från två helt olika områden, en från havsbotten och en från land.



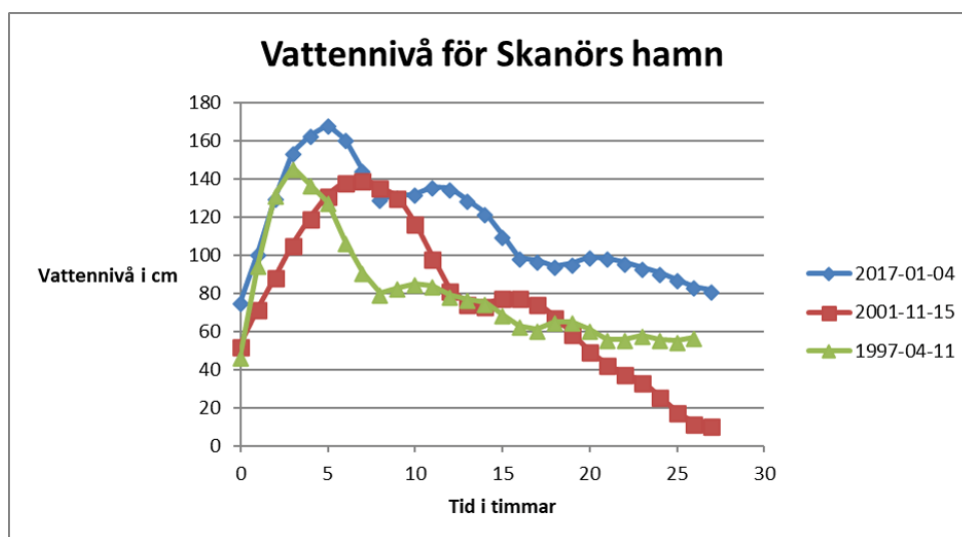
Figur 4.3: Kornstorleksfördelning för de sandproverna tagna vid strandprofilerna V1 (grön), V4 (röd) och S3 (gul).

4.1.4. Vattenstånd

Datan för vattennivåerna är tagna från SMHI's webbsida och är en del av "SMHI's Öppna Data". Den dataserie som finns tillgänglig har mätningar från den 17 februari 1992 fram till dagens datum (data hämtades sista gången den 10 maj 2017). Vattennivån mäts i centimeter och en mätning görs varje timme. Dessa mätningar förhåller sig till höjdsystemet RH2000 och behöver på så vis inte korrigeras.

Då vattennivåerna varierar längs med näset är data från mätstationen i Skanörs hamn missvisande för vattennivån i Falsterbo och Kämpingebukten. Detta är en viktig felkälla då vattennivån har stor betydelse på erosionen men då SMHI för närvarande inte har en mätstation längs Skånes södra kust samt att mätstationen i Skanör och den i Ystad inte var i drift samtidigt saknas data för att göra en bedömning hur stor nivåskillnaden är.

I rapporten har vattennivåerna för 4-7 januari 2017 använts som grund för de scenarier som studerats. Vattennivån för 4-7 januari 2017 jämfördes mot vattennivån för 15-16 november 2001 och 11-12 april 1997 genom att göra kurvor för vattennivån över tiden. Dessa tillfällen valdes då de alla innefattade kraftiga högvattenstånd och därmed kunde visa hur vattennivån förändrades övertiden. Detta gjordes för mätstationen i Skanör och Klagshamn (se figur 4.4 och figur 4.5) vilket visar ifall januaridata var avvikande eller följde mönstret av hur vattennivåerna brukar bete sig under ett högvatten.

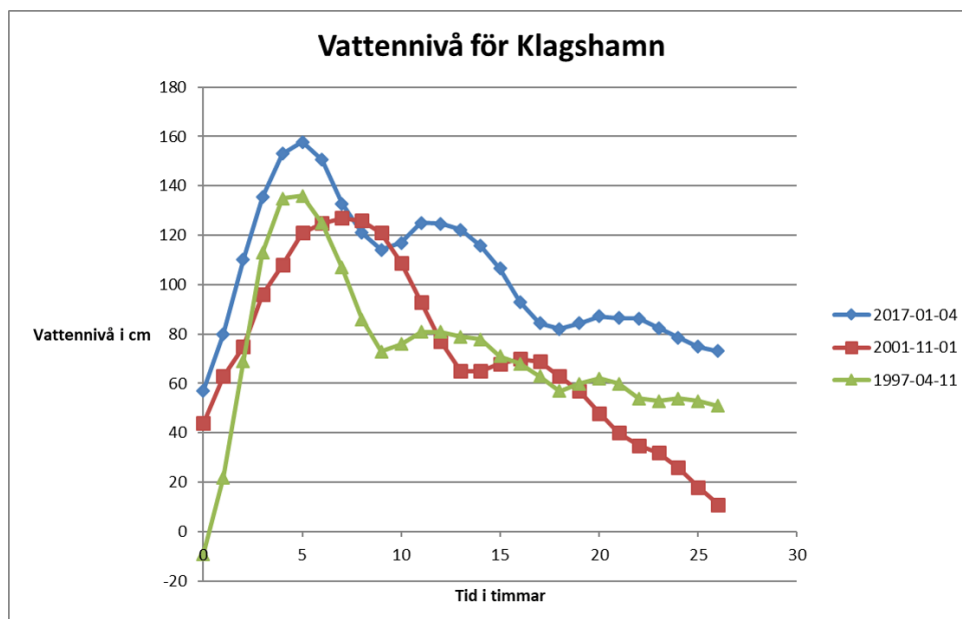


Figur 4.4: Vattennivåer vid Skanörs hamn mätstation under tre olika högvattenstånd över tid.

Januarinivåerna avvek inte märkbart bortsett från att det tog lite längre tid för vattnet att gå tillbaka till normala nivåer. Detta beror antagligen på att det var betydligt högre vatten under detta tillfälle, januarinivåerna var de högsta nivåerna som man uppmätt sedan man började mätningen av vattennivån i Skanör 1992.

4.1.5. Vågdata

De stryklängder som sträcker sig mot Falsterbo-Skanör presenteras av figur 4.6. Mätning av dessa längder har gjorts med hjälp av Google Maps den 17 april 2017. I rapporten studeras stryklängder från ost-syd-ost, syd-syd-väst och väst-nord-väst då dessa är de minst gynnsamma riktningar för de olika kuststräckorna. Dessa längder har förkortats med mellan 5-7km beroende på hur stor del av sträckan som är grund. Detta har gjorts för att exkludera de områdena med försumbar våggenerering, vilket vanligtvis uppkommer vid grunt vatten nära kusten. Vattendjupet är ett uppskattat medel för respektive stryklängd som gjorts utifrån Navionics webbaserade



Figur 4.5: Vattennivåer vid Klagshamns mätstation under tre olika högvattenstånd över tid.

sjökort.



Figur 4.6: Stryklängder för Falsterbo-bukten.

Vågdatan som är beräknad för denna rapporten är baserade utifrån SPM-metoden där man med hjälp av stryklängden och ljustrade vindhastigheten kan beräkna våghöjden samt perioden.

$$U_A = 0.71U^{1.23} \quad (4.1)$$

$$H_{m_0} = 1.615 \times 10^{-2} U_A F^{(\frac{1}{2})} \quad (4.2)$$

$$T_m = 6.238 \times 10^{-1} (U_A F)^{(\frac{1}{3})} \quad (4.3)$$

$$T_p = 0.95 T_m \quad (4.4)$$

Stryklängderna är valda för att vara så ogynnsamma och generera så höga vågor som möjligt för respektive kuststräcka. I rapporten har vinden antagits blåsa konstant och våghöjden vara begränsad av stryklängden. Stryklängden valdes till begränsande i rapporten för att skapa extrema scenarier, perioderna studerades dock för att se så det inte blev för långa. Perioderna för Kämpinge- och Falsterbobukten blev något långa men ansågs vara inom gränsen för vad som var acceptabelt.

Table 4.1: Stryklängd och vattendjupets medelvärde för de riktningar som studeras i denna rapport.

Riktning	Stryklängd (km)	Vattendjup (m)
VNV	38	15
SSV	139	20
OSO	245	40

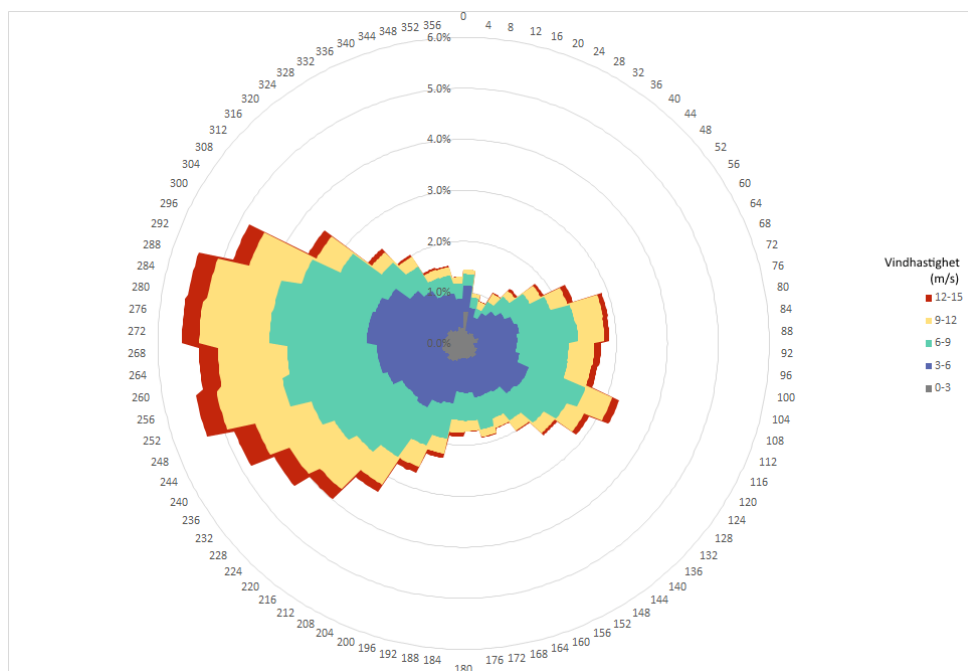
4.1.6. Vinddata

Vinddatan som används i denna rapporten är valda för att studera hur styrkan på en storm påverkar erosionen.

Fyra vindscenarier har valts att studeras i rapporten 10, 15, 20 och 30 m/s.

Vindriktningarna är utifrån de riktningar som valts för strykländan och är alltså inte baserad på uppmätt statistik utan valda för att skapa värsta tänkbara scenarier.

Utifrån figur 4.7 kan man se att det är väldigt få vindar med stormstyrka från andra vindriktningar utöver de mellan västsydväst och västnordväst. Detta gör att Falsterbo- och Kämpingebukten, där endast vågor från syd når, sällan utsätts för stora vågor i dagens förhållande. Stormen som ägde rum 1872, Backafloeden, hade orkanbyar i sydostlig riktning vilket orsakade kraftiga översvämningar (Fredriksson et al. 2016).



Figur 4.7: En vindros över den sammanfattade vinddatan som Klavs Bundgaard från SWECO DK har delat med sig av.

4.1.7. Vegetation

I denna rapport har vegetationen endast studerats ytligt för att visa på hur den stabiliserar kustprofilen mot erosion. Då ingen studie av den lokala faunan gjorts fick sjögräs representera vegetationen. Detta för att den behövda data för sjögräs fanns att tillgå genom XBeachs manual. Bilder från fältmätningen studerades för att bedöma hur stor del av profilen ovanför vattenlinjen som var täkt av vegetation.

Följande värde användes för sjögräs.

- ah: 0.2
- Cd: 1.0
- bv: 0.02
- N: 1200

5

Implementering av modellen

I detta kapitlet beskrivs arbetsgången för projektet och hur man valt att lösa olika problem.

5.1. Inledning

XBeach har använts i detta projekt för att simulera kusterosion i en dimension. Modellen i en dimension är testad på de uppmätta strandprofilerna (se appendix C) och på två profiler skapade med hjälp av den sammansatta batymetrin. Områdena som studerats är västra stranden, södra stranden i Falsterbo-bukten samt Kämpingebukten. Fyra scenarier har simulerats med modellen utifrån olika vindriktningar och styrkor. Simuleringen har gjorts för en tidsperiod motsvarande 3 dygn där vattennivån ändras varje timme men våghöjden är konstant över hela simuleringen.

5.2. Scenarier

Syftet med projektet är att ge en uppfattning av hur väl sanddynerna runt näset kan fungera som översvämningsskydd mot framtida stormar samt studera hur mycket erosion som sker under ett stormscenario. För att studera detta skapas olika scenarier utifrån antingen uppmätt data eller framtidsprognoser. Tyvärr är osäkerheten väldigt hög när man skapar framtidsscenarier och särskilt när det rör sig om klimatförändringar. Detta beror på att forskningen inte är helt säker på i vilken grad de olika faktorerna kommer förändras samt i vilken omfattning. Då strandprofilen påverkas av en stor mängd olika faktorer gör det att man måste göra många begränsningar vid skapandet av scenarier för simuleringar. Vågdatan för scenarierna är framräknade med hjälp av SPM-metoden där de minst gynnsamma vindriktningarna har valts. Simuleringar har gjorts för vindhastigheter på 10, 15, 20 och 30 m/s.

Vattennivåerna för scenarierna följer en tidsutveckling skapad efter översvämningen i Skanör som skedde i januari 2017. Detta för att skapa en mer verklighetstrogen utveckling av vattennivån över simuleringstiden. Tillägget har gjorts så att toppnivån under januari har ökat så att den når högsta nivån för de valda scenarierna. Därefter har skillnaden adderats till de andra mätvärdena längs tidserien.

- Scenario 1: Scenariot är gjort med hänsyn till högvattnet som ägde rum den 4-5 januari 2017 med data från SMHI:s mätstation i Skanörs hamn. Vattennivån når en topp på +168 cm. Högvattnet orsakade översvämningar i Skanör-Falsterbo men det blåste inte mycket vilket gjorde att vågorna var små. Inga mätningar av dynerosion i samband med stormen har hittats.

- Scenario 2: Scenariot är gjort med hänsyn till 100-årshögsvatten för Skanör där högsta vattennivån är satt till +181 cm över normala vattenståndet (Fredriksson et al. 2016).
- Scenario 3: Scenariot är gjort efter 100-årshögsvattnet fast med ett tillägg på 100 cm för att simulera SMHIs prognos för år 2100 medelvattennivå vilket ger den en topp på +281 cm. Den beräknas öka med ca 1 m fram till år 2100 till följd av den globala uppvärmningen (SMHI och Naturvårdsverket 2014).
- Scenario 4: Vellinge kommun har vid tidigare skede studerat hur bebyggelsen klarar av ett scenario baserat på den historiska stormen år 1872 (Backafloden). Man har noteringar som visar på en vattennivå på +240 cm över normalvattenståndet i Skanör-Falsterbo (Fredriksson et al. 2016).

Scenarierna har simulerats utifrån både uppmätta strandprofiler från fältmätningen samt utifrån den scannade batymetrien som skapats av Vellinge kommun.

En simulering med vegetation utfördes på profilen V1 utifrån scenario 2 där en bevuxen profil jämfördes mot en bar.

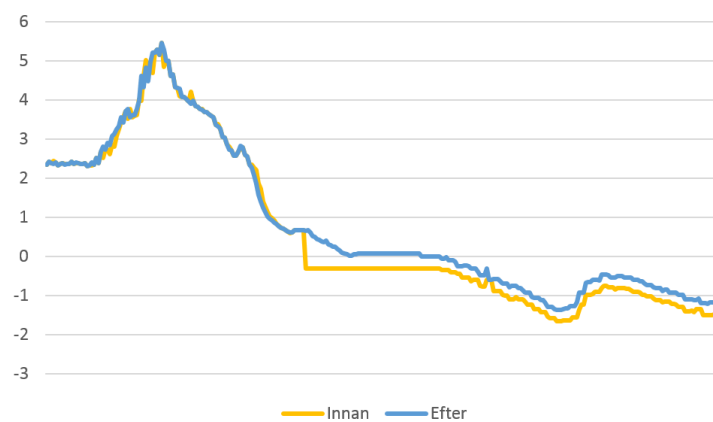
5.3. Batymetri och höjddata

Profilerna som krävs för simuleringarna i detta examensarbete härstammar från två olika typer av batymetrier; batymetrier som har höjdvärden endast längs en riktning (1D) och batymetrier som har höjdvärden i både x- och y-led (2D). De endimensionella batymetrierna är det som brukas kustprofiler, alltså vertikala tvärsnitt som sträcker sig från havet till kusten. Dessa batymetrier är på så vis direkt tillämpbara vid endimensionella modeller. Detta skiljer sig från de tvådimensionella batymetrierna som behöver bearbetas för att användbara profiler ska kunna utvinnas. Som nämnt i kapitel 4.1.1 har endast en (1) tvådimensionell batymetri framtagits för skapandet av ytterligare profiler. Denna batymetri skapades med hjälp av de batymetrier som erhöles från SGU och Vellinge kommun. Dessa var dessvärre inte helt kompatibla med varandra. En ojämn övergång mellan de båda batymetrierna var väl synlig (detta kan skådas av den gula linjen i figur 5.1). I och med att denna avvikelse befann sig nära inpå kustlinjen bestämdes det att en justering av något av rastera skulle göras. För att lösa detta gjordes en höjning av SGU-batymetrien med 0.3 m. Åtgärden rättade till den skarpa övergången från 0 m till -0.3 m mellan de båda batymetrierna genom att låta batymetrien från Vellinge kommun överlappa SGU's batymetri fram till 0 m-gränsen. Resultatet är en kustlinje som i de flesta fallen får ett realistiskt utseende. Dessvärre erhåller stora delar av Amnebukten, lagunen på södra sidan av Skanör-Falsterbo, ett djup på 0m vilket inte anses vara helt korrekt. För att fullständigt åtgärda de problem som finns med batymetrien krävs det att en ny batymetrimätning genomförs, förslagsvis av Vellinge kommun. Då många av de problem som finns med batymetrien befinner sig vid övergången mellan land och vatten bör mätningen genomföras med verktyg som kan klara av att mäta grunt vatten.

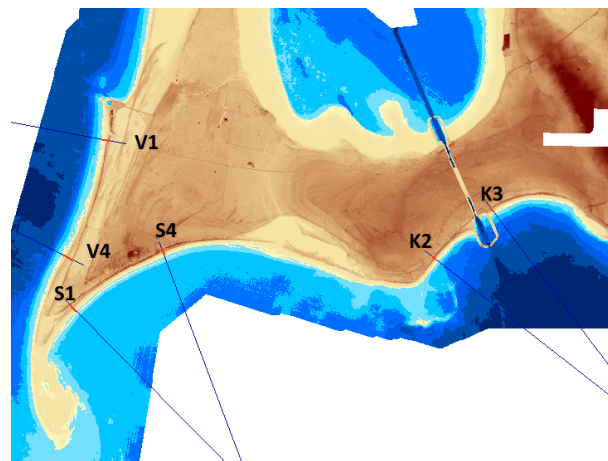
På grund av att SGU:s batymetri inte sträcker sig längre ut mot sjöss än till ett djup av 10 m krävs det att ytterligare en batymetri introduceras så att ett djup av omkring 20 m uppnås. Detta önskas för att i alla tänkbara scenarion tillfredsställa modellen med ett begynnelse djup vid $x = 0$ (längst ut till havs) som kan definieras som djupt vatten. Djupt vatten definieras av sambandet $h/L > 0.5$, där h är vattendjupet och L är våglängden (Holthuijsen 2009). I detta examensarbete skapades den förlängande batymetrien utifrån en interpolering av höjdkurvor ritade med hjälp av Sjöfartsverkets sjökort. Interpoleringen gjordes av Björn Almström vid avdelningen för Teknisk Vattenresurslära (TVRL) på LTH med hjälp av programmet "ArcGis". De ritade höjdkurvorna följer inte alltid en väl angiven referens vilket kan leda till att vissa osäkerheter finns inom denna batymetrien. Resultatet (se figur 5.4) av interpoleringen tycks stämma så pass väl överens med

Sjöfartsverkets sjökort att det anses lämpligt att fortsätta användas. Några justeringar har dock utförts för att få en jämn övergång mellan den interpolerade och den sammanslagna batymetrien. Detta har inneburit att den interpolerade batymetrien har höjts med upp till 1.2 m i vissa delar av dess utsträckning.

Denna batymetri har legat som grund för de XBeach simuleringar som gjorts i detta examensarbete. För endimensionella simuleringar skapades tvärsnitt i batymetrien med vilka x- och y-kordinaterna kunde utvinnas längs dess utsträckning. Dessa koordinater användes därefter till att bygga upp det rutnät som krävs för att få XBeach-1D att fungera. En kopia av detta rutnät har sedan sammanvävts med de strandprofiler som mättes av författarna för att skapa den andra gruppen av endimensionella batymetriker som har använts i simuleringarna. I figur 5.2 visas vart alla de använda profilerna ligger och vilka förkortningar de har blivit tilldelade. I figur 5.3 visas vart de uppmätta profilerna (färgade i rött) ligger i förhållande till de befintliga sanddynen och till stranden.



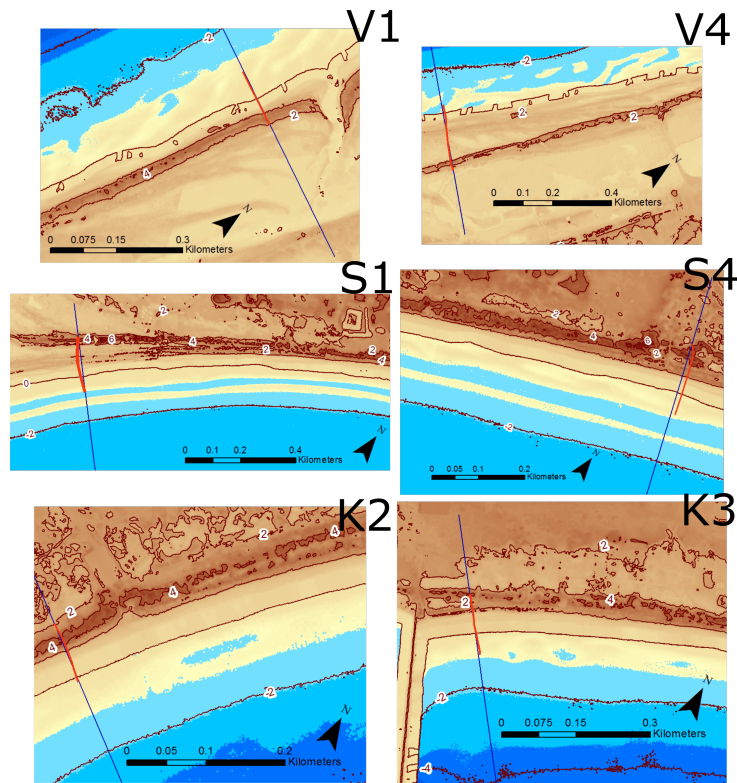
Figur 5.1: Den sammanslagna batymetriprofilen innan (gul linje) och efter (blå linje) att den havsfokuserade batymetrien från SGU blev förhöjd med 0.3m.



Figur 5.2: En karta över Falsterbonäset där de profiler som har modellerats är inritade och namngivna.

De två använda batymetrierna kan sammanfattas till följande:

- Den batymetri som skapades utifrån Vellinge kommuns batymetri, SGU's batymetri samt det arbete som Björn Almström genomförde. Denna batymetri kommer framöver att benämnas som den "sammansatta" batymetrien.



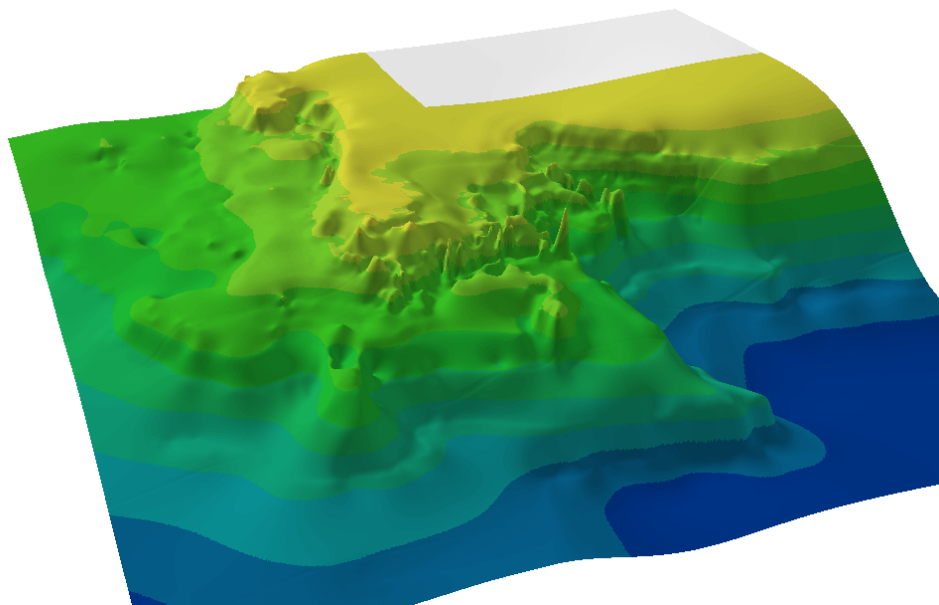
Figur 5.3: I denna figur visas de strandprofiler som använts i de simuleringar som gjorts. De blåa linjerna visar vart tvärsnittet har gått hos de modellerna med en batymetri från den sammansatta batymetrin. De röda linjerna visar vart de uppmätta strandprofilerna ligger och hur långt ut till havs och in mot land de sträcker sig.

- Den batymetri som skapades genom att förlänga de egna uppmätta strandprofilerna med tvärsnitt av den sammansatta batymetrin, kommer att kallas för den ”uppmätta” batymetrin härnå.

5.4. Kalibrering av modellens parametrar

Det fanns ej någon uppmätt dynerosion för området så en platspecifik kalibrering av modellparametrarna var ej möjlig att göra, dock gjordes en känslighetsanalys av ett antal parametrar för att se hur de påverkar resultatet. Parametrarna valdes utifrån en känslighetsanalys som gjorts av Deltares baserat utifrån förhållanden längs med den nederländska kusten (Deltares 2017). I första steget användes XBeachs standardvärden på alla parametrar för simuleringarna.

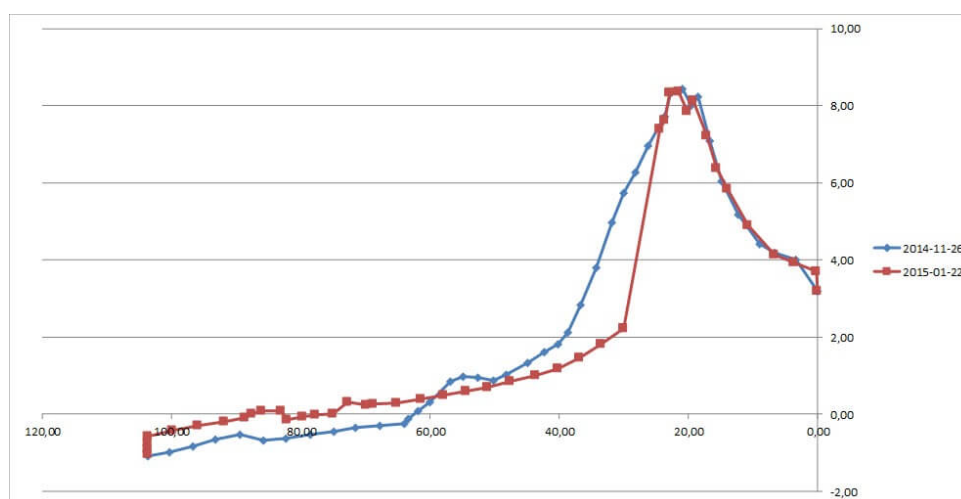
- wetslp: Beskriver den kritiska lutning då skred kan ske längs profilen under vattenytan.
- dryslp: Beskriver den kritiska lutningen då skred kan ske längs profilen över vattenytan
- gamma: Brytparametern i antingen Baldock eller Roelvink funktionen
- fw: Bottenfriktionsfaktor
- beta: Koefficienten för brytlutningen i roller modellen
- alpha: Vågspridningskoefficienten i Roelvink formeln
- gammax: Maximala förhållandet mellan våg höjd och vattenhöjd



Figur 5.4: Det slutgiltiga utseendet av den sammansatta batymetrin, presenterat med hjälp av mjukvaran ArcScene. Det gula området innebär en höjd på mer än 0m och det mörkblå området ett djup på mer än -20m.

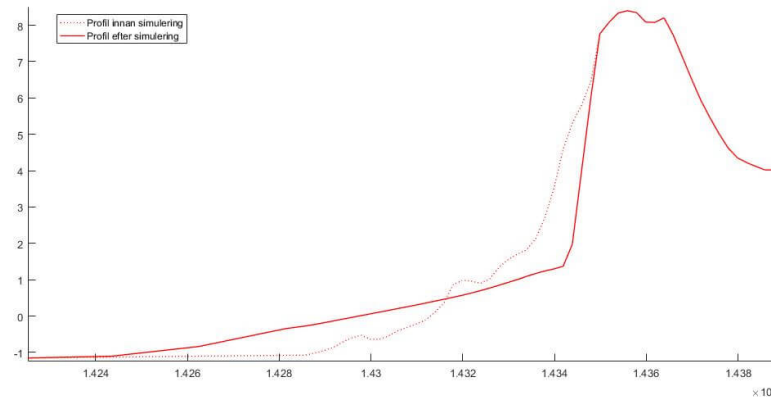
- cf: Friktionskoefficient för flödet.

I ett andra steg för att ytterligare kontrollera modellen testades den mot uppmätta strandprofiler från Skälderviken (gjorda av Caroline Fredriksson, TVRL) där modellen fick simulera 3 profiler från 26 november 2014. Profilerna utsattes för uppmätta förhållanden från stormen Egon som ägde rum den 10-11 januari 2015. Den simulerade profilen jämfördes med en uppmätt profil från 22 januari 2015 varefter vissa av parametrarna kalibrerades för att få simuleringen att passa bättre (se se figur 5.5 och 5.6). Då vegetation inte var inräknad i modellen så ger simuleringen en kraftigare erosion för två av profilerna jämfört vad det borde vara i verkligheten, där med valdes att kalibrera efter profil J då den hade minst vegetation av de tre.



Figur 5.5: Stormerosion av profilen J utifrån mätningar gjorda av Caroline Fredriksson.

Utifrån denna kalibrering valdes värden på följande parametrar som listas nedan och för de övriga parametrarna användes modellens originalvärden. Värdet på c_f används för att beräkna bottenkjuvspänningen (beskriven i kapitel 3.2.1).



Figur 5.6: Simulerad erosion av profilen J med hjälp av XBeach efter kalibrering av parametrar.

- *wetslp*: 0.1
- *dryslp*: 0.66
- *cf*: 0.001

De parametrar som studerades mest var *dryslp* och *wetslp* då dessa har stor påverkan på dynens utformning eftersom dynen hamnar under vatten vid de högre vattenstånden. Profilerna från Skälderviken täckte endast några meter ut i vattnet och då en korrekt batymetri ej tagits fram för området i detta examensarbete användes en schablonmässig batymetri uträknad med en konstant lutning ner till ett djup på 20 m. Denna lutning togs fram med hjälp av Eniros sjökort men är alltså inte representativ för området.

Även kornstorleken ändrades för att passa den fördelning som tagits fram utifrån de sandprover som togs under fältstudien. Dessa låg runt 0.2-0.3 mm vilket vid testerna inte gav någon märkbar skillnad i resultat så 0.2 mm valdes för alla simuleringar.

5.5. Simulering av vegetation

Simuleringarna av profilerna V4 och S4 skapades utifrån den sammansatta batymetrin för att studera hur vegetationen påverkar erosionen och sandtransporten över profilen. Eftersom data för vegetationen var bristfällig valdes simuleringar för två profiler för att på så sätt visa hur vegetationen påverkar sandtransporten över profilen. Detta test har gjorts utifrån scenario 2 med en vind på 15 m/s, vegetationen täcker stora delar av profilerna både i strandplanet och dynen.

Det stora problemet med simuleringarna är dessvärre att de parametrar som XBeach använder för att beskriva växtligheten kräver en egen studie och kan inte tolkas enbart från den utförda fältmätningen.

5.6. Motståndssimulering av sanddynerna vid Falsterbobukten

Vid planerandet av det framtida kustskyddet för Falsterbonäset har det bestämts att vissa av de sanddynerna som befinner sig vid Falsterbobukten ska fungera som naturligt kustskydd. Dessa sanddynerna ska med andra ord kunna motstå de framtida klimatförändringarna som det hårda översvämningsskyddet kommer att dimensioneras för. Ett av de scenarion som kan uppstå i

framtiden är att vattennivån höjs ganska ordentligt under några timmar i samband med stormvindar. En viktig fråga under dessa situationer är om sanddynen klarar av ett högt och ganska konstant vattenstånd i samband med kraftiga vågor.

Genom att simulera med en konstant vattennivå går det att se hur lång tid dynen kan motstå högvattnet innan genombrott. Detta gjordes för scenario 1 och 2 på profil S4 och scenario 3 och 4 för profil S1, båda profilerna var tagna från den sammansatta batymetrin.

6

Resultat

I detta kapitel presenteras de resultat som erhållits från de simuleringar som genomförts med XBeach. Dessa delas upp i fyra fall. De två första fallen visar strandprofilernas förändring under de olika scenarierna. Det tredje fallet visar på vegetationens betydelse för erosion och det fjärde på dynernas motståndskraft för genombrott. Även i detta kapitel har strandprofilernas beteckning förkortats till V1 och V4 för de som ligger längs den västra kusten av Falsterbonäset, S1 och S4 för de profiler som ligger vid Falsterbobukten och K3 och K4 för de profiler som ligger vid Kämpingebukten. En karta över profilernas geografiska placering finns att hitta i figur 5.2 på sida 33.

En kort beskrivning av de fyra scenarier från ?? som används i simuleringarna:

- Scenario 1: Scenariot är gjort för en högsta vattennivån på +168 cm över normala vattenståndet.
- Scenario 2: Scenariot är gjort efter dagen 100-årshögvatten med en högsta vattennivå på +181 cm över normala vattenståndet (Fredriksson et al. 2016).
- Scenario 3: Scenariot är gjort för att simulera SMHIs prognos för år 2100 vattennivå vilket ger en högsta vattennivå på +281 cm över normala vattenståndet.
- Scenario 4: Scenario är baserat på den historiska stormen Backafloden med en högsta vattennivå på +240 cm över normala vattenståndet (Fredriksson et al. 2016).

6.1. Resultat från den uppmätta batymetrin

Följande resultat är baserade på den uppmätta batymetrin.

6.1.1. Scenario 1 - Högvatten från stormen 4-5 januari 2017

Detta scenario använder sig av den uppmätta vattennivån för översvämningen som skedde i början av januari 2017. I dessa simuleringar har dock ogynnsamma vindar använts som ger höga vågor. Under den verkliga händelsen var våghöjden låg och man uppmätte ingen större dynerosion efter stormen. Simuleringsresultaten som ges av figur 6.1 visar på en stark koppling mellan erosionen och våghöjden där särskilt dynerna för K2 och V1 är utsatta. Dessa har båda ett lågt strandplan samt saknar en fördyn likt det som finns i S1 och S4. De utsätts därför för en kraftig dynerosion under stora delar av simuleringen. Det sker även överspolning av dessa profiler redan vid de lägre vågorna, då överspolning medför en ökad erodering av dynen gör detta att den snabbt minskar i volym.

Studerar man istället dynerna S1 och V4 i samma figur ser man att dessa klarar sig bra även vid kraftiga stormar. Detta beror till stor del på en större ursprunglig dynvolym som medföra att dynhöjden fortsätter vara hög trots erodering av den främre delen av dynen, därmed sker det inte någon eller väldigt låg överspolning. Då överspolningen är låg för dessa profiler försvinner mindre sediment från profilen utan dynen breder istället ut sig över strandplanet vilket resulterar i att fler vågor bryts innan de når dynen och därmed ger mindre dynerosion.

Resultat för de olika profilerna

- S1: Det sker inget genombrott av dynen utan den klarar sig genom hela scenariot. Vid en vindstyrka på 30 m/s sker en dynerosion på runt $2 \text{ m}^3/\text{m}$. Dynen har en ursprungsvolym på ca $20 \text{ m}^3/\text{m}$ så ca 10% eroderar bort.
- S4: Genombrott sker efter 14 timmar vid en vindstyrka på 30 m/s. Det sker en dynerosion på omkring $4 \text{ m}^3/\text{m}$. Den ursprungliga dynvolymen ligger på ca $30 \text{ m}^3/\text{m}$ så 14% eroderas bort av dynen. Dynhöjden sänks från 6 m till en 4,9 m och krönet backar närmare 0,3 m.
- V1: Simuleringen visar på ett genombrott efter 17 timmar vid en vindstyrka på 30 m/s men det kan även ske översköljning vid en vindstyrka på 20 m/s. Det sker en erosion på runt $1 \text{ m}^3/\text{m}$ vilket resulterar i en minskning av höjden från 3,5 m till strax över 3 m och dynens krön backar även 1 m. Dynens volym innan simuleringen var omkring $7 \text{ m}^3/\text{m}$ så ca 14% eroderas bort.
- V4: Det sker inget genombrott i detta scenario men simuleringen med en vind på 30 m/s resulterar i en erosion på $1,4 \text{ m}^3/\text{m}$. Dynens volym innan simuleringen ligger på ca $14 \text{ m}^3/\text{m}$ så erosionen motsvarar en 10% av dynen
- K2: Från resultaten kan man se att profilen kollapsar när den utsätts för vågor vid en vindstyrka på 20 m/s men den verkar klara av vågor från en vindstyrka på 15 m/s. Genombrottet sker efter 14 timmar då $7,5 \text{ m}^3/\text{m}$ eroderar av. Den ursprungliga volymen är ungefär $10 \text{ m}^3/\text{m}$ så 75% av dynen eroderar bort. Då dynen sköljs bort sprider sig sanden längs med profilen bakom dynen och höjden sänks från 4,2 m till strax under 2,5 m.
- K3: Profilen får ett genombrott efter 15 timmar vid en vindstyrka på 30 m/s. Under simuleringen sker en erosion av dynen med $4 \text{ m}^3/\text{m}$ vilket motsvarar en 20% av dynens ursprungliga volym på $20 \text{ m}^3/\text{m}$. Höjden på dynen sänks från cirka 4,1 m till strax under 4 m.

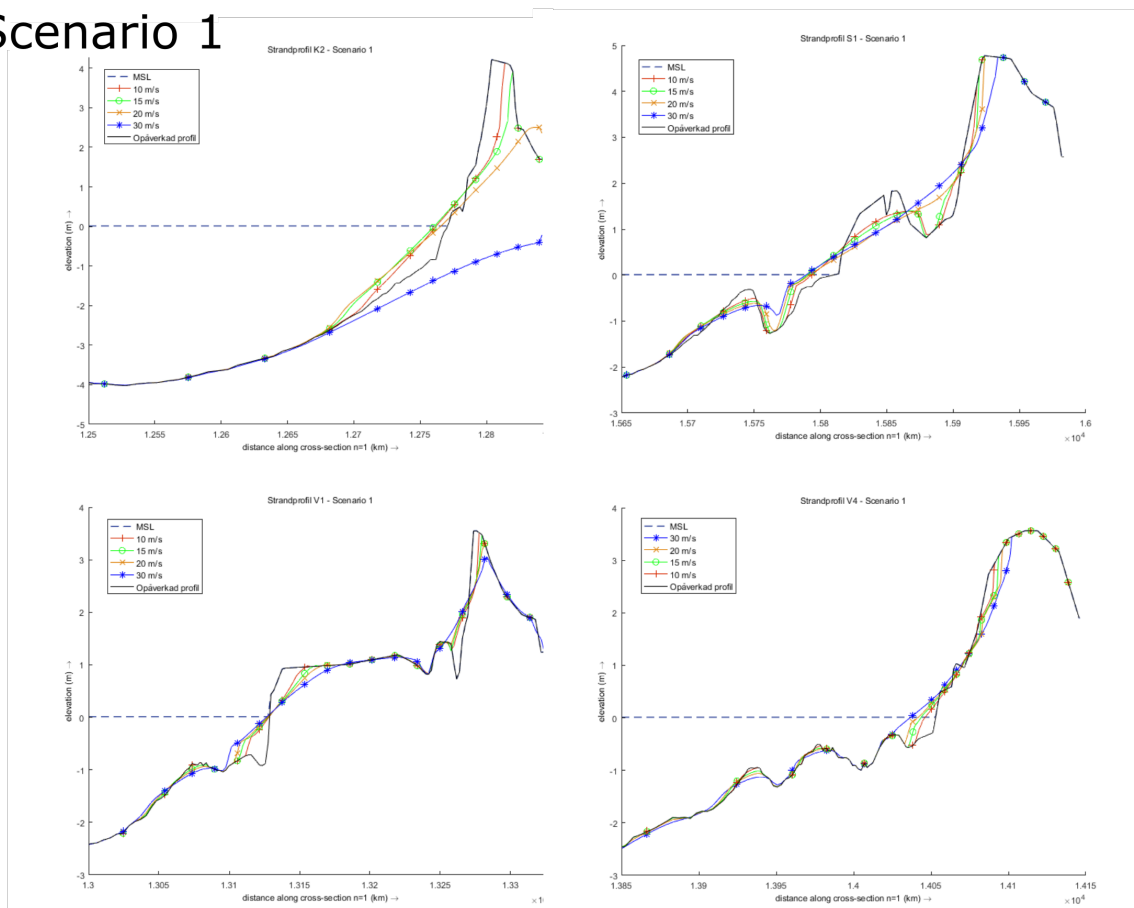
6.1.2. Scenario 2 - 100-årshögvatten

I denna simulering är vattennivån satt till ett 100-årshögvatten event vilket resulterar i att vattenlinjen går högre upp på dynen än under scenario 1. Detta har som följd att det sker en större dynerosion på samtliga profiler och att översköljning inträffar vid lägre våghöjder. Det är enbart S1 och V4 i figur 6.2 som inte har någon översköljning i detta scenario. För profil K3 i samma figur sker nu översköljning redan vid 20 m/s och för V1 kollapsar nu dynprofilen vid 30 m/s.

Resultat för de olika profilerna

- S1: Det sker inget genombrott av dynen utan resultatet motsvarar väldigt väl det från scenario 1.
- S4: Resultatet blir det samma som i scenario 1 med ett genombrott efter 14 timmar vid en vindstyrka på 30 m/s.

Scenario 1



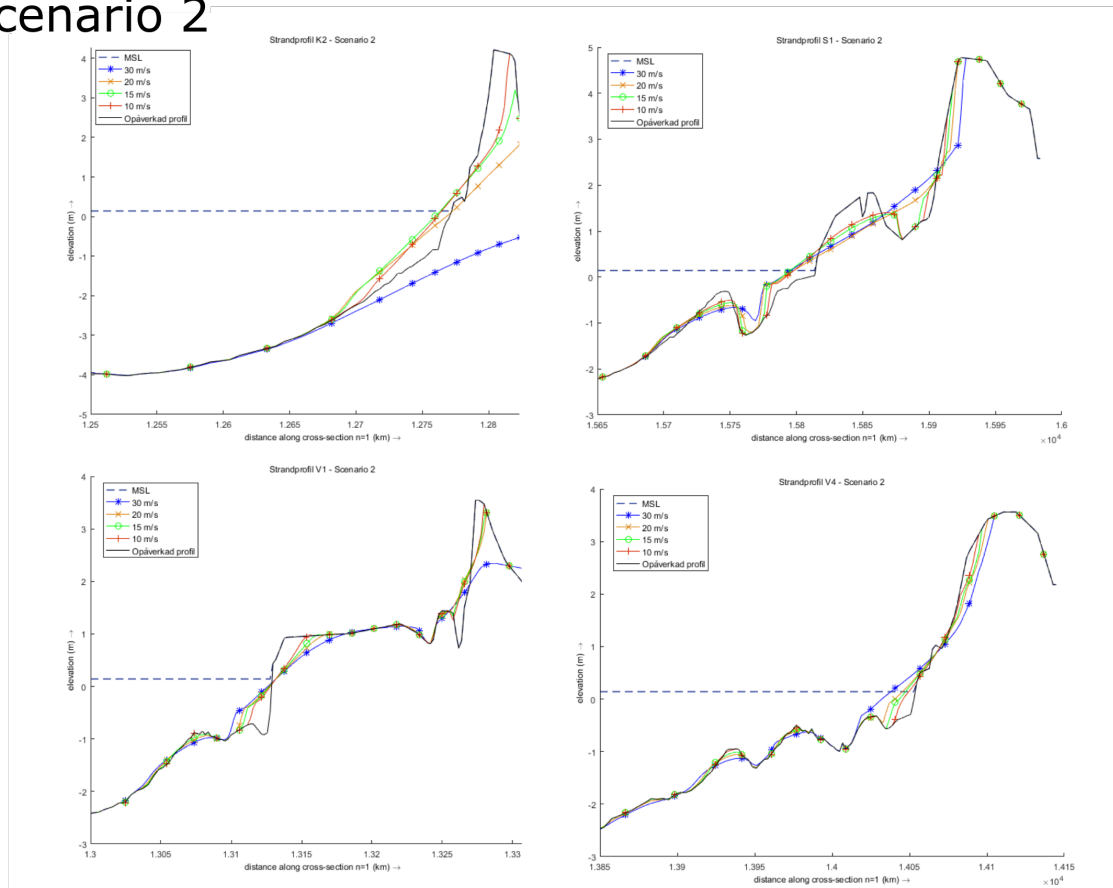
Figur 6.1: Resultande strandprofiler för K2, S1, V1 och V4 efter scenario 1. De färgade och markerade heldragna linjerna visar strandprofilens utformning efter de vågor som skapats av stormvindar med hastigheten 10 m/s (röd +), 15 m/s (grön O), 20 m/s (gul X) och 30 m/s (blå *).

- V1: Även här är resultatet väldigt likt de i scenario 1 med den enda stora skillnaden att dynen nästan helt kollapsar vid 30 m/s vilket ger en erosion på $2 m^3/m$. Det motsvarar en volymminskning av dynen med nästan 30%.
- V4: Inget genombrott sker för profilen under scenario 2. Erosionen är dock lite högre än vid scenario 1 och är närmare $2 m^3/m$, vilket ger en volymminskning av dynen på 14%.
- K2: Det sker ett genombrott efter 20 timmar vid 15 m/s ca $4,5 m^3/m$ eroderar bort av dynen. Den ursprungliga volymen är ungefär $10 m^3/m$ så ca 45% av dynens volym eroderar bort. Höjden sänks från 4,2 m till strax under 3,2 m och krönet backar cirka 2 m.
- K3: Det är ingen märkbar skillnad mellan resultaten för scenario 1 och 2 utan det sker ett genombrott efter 15 timmar vid vindstyrka på 30 m/s.

6.1.3. Scenario 3 - 100-årshögvatten + 100cm

I simuleringsresultatet som ges av figur 6.3 ser man tydligt hur vattennivån påverkar dynerosionen då största delen av strandplanet är översvämmat och dynen ständigt utsätts för vattenrörelser. Man kan nu se att alla strandprofiler utsätts för översköljning vid 30 m/s och där S4 är den enda profil som klarar 20 m/s.

Scenario 2



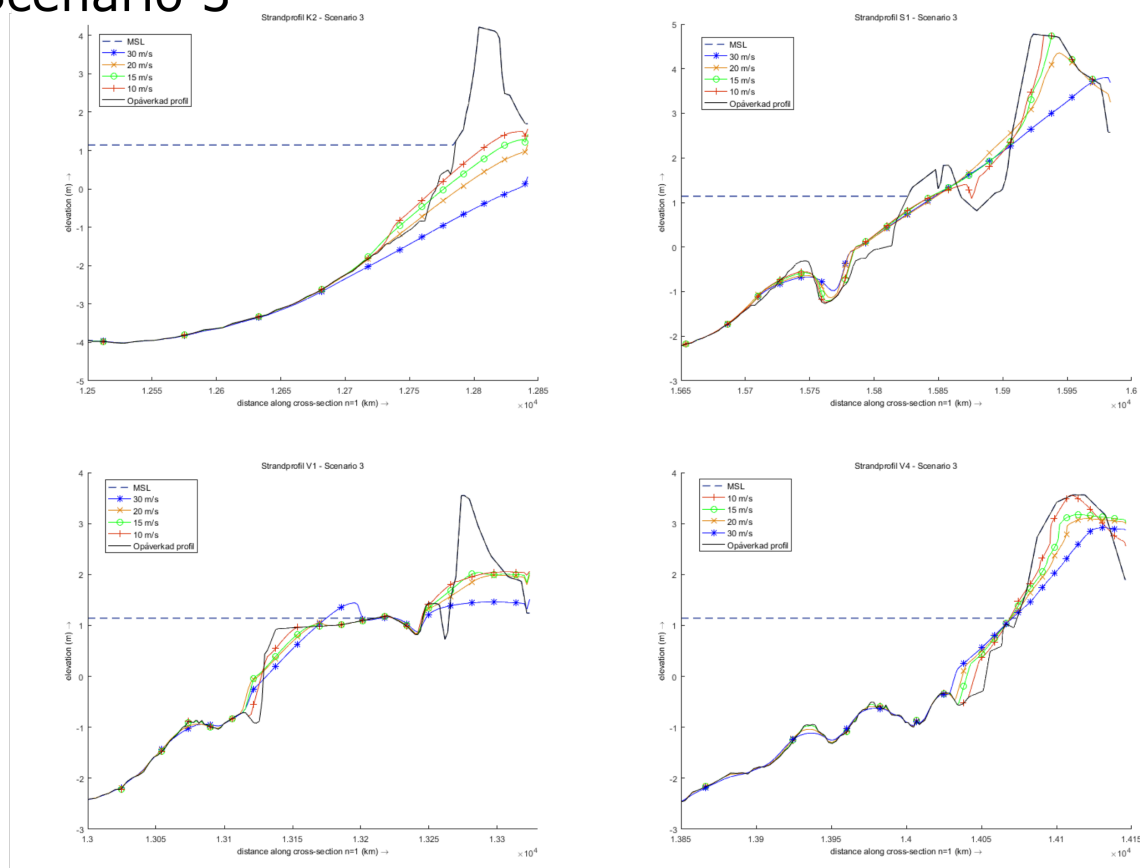
Figur 6.2: Resultande strandprofiler för K2, S1, V1 och V4 efter scenario 2. De färgade och markerade heldragna linjerna visar strandprofilens utformning efter de vågor som skapats av stormvindar med hastigheten 10 m/s (röd +), 15 m/s (grön O), 20 m/s (gul X) och 30 m/s (blå *).

Resultat för de olika profilerna

- S1: Genombrott sker efter 16 timmar vid en vindstyrka på 20 m/s. Det sker en dynerosion på omkring $4 \text{ m}^3/\text{m}$, den ursprungliga dynvolymen ligger på ca $20 \text{ m}^3/\text{m}$ så en 20% av dynen eroderas. Dynhöjden sjunker från 4,8 m till en 4,35 m och krönet backar ca 2 m.
- S4: Genombrott sker efter 6 timmar med en vindstyrka på 30 m/s. Därefter sköljs hela dynen bort. Redan vid de första vågorna blir det ett genombrott vilket visar att scenariot är för extremt för dynen. Vid 20 m/s sker inget genombrott men en erosion på ca $10 \text{ m}^3/\text{m}$ vilket motsvarar en tredjedel av dynens ursprungliga volym.
- V1: Genombrottet sker efter 14 timmar vid en vindstyrka på 10 m/s. Därefter kollapsar dynen nästan helt. Erosionen från dynen är runt $2,5 \text{ m}^3/\text{m}$ vilket är 35% av den ursprungliga volymen. Höjden på dynen sjunker från 3,5 m till 2 m.
- V4: Genombrott sker efter 16 timmar vid en vindstyrka på 10 m/s. Erosionen från dynen är strax under $1,5 \text{ m}^3/\text{m}$ vilket är 11% av den ursprungliga volymen. Höjden förändras inte men krönet blir smalare under simuleringen.
- K2: Genombrott sker efter 14 timmar vid en vindstyrka på 10 m/s. Därefter sköljs hela dynen bort och det bildas ett nytt strandplan med en höjd strax under 1 m.

- K3: Genombrott sker efter 14 timmar vid en vindstyrka på 10 m/s. Under simuleringen sker en erosion av dynen med $5,5 \text{ m}^3/\text{m}$ vilket motsvarar 27% av dynens ursprungliga volym på $20 \text{ m}^3/\text{m}$. Höjden på dynen sänks från 4,1 m till strax under 4 m.

Scenario 3



Figur 6.3: Resultande strandprofiler för S4 efter scenario 3. De färgade och markerade heldragna linjerna visar strandprofilens utformning efter de vågor som skapats av stormvindar med hastigheten 10 m/s (röd +), 15 m/s (grön O), 20 m/s (gul X) och 30 m/s (blå *).

6.1.4. Scenario 4 - Backaflo den

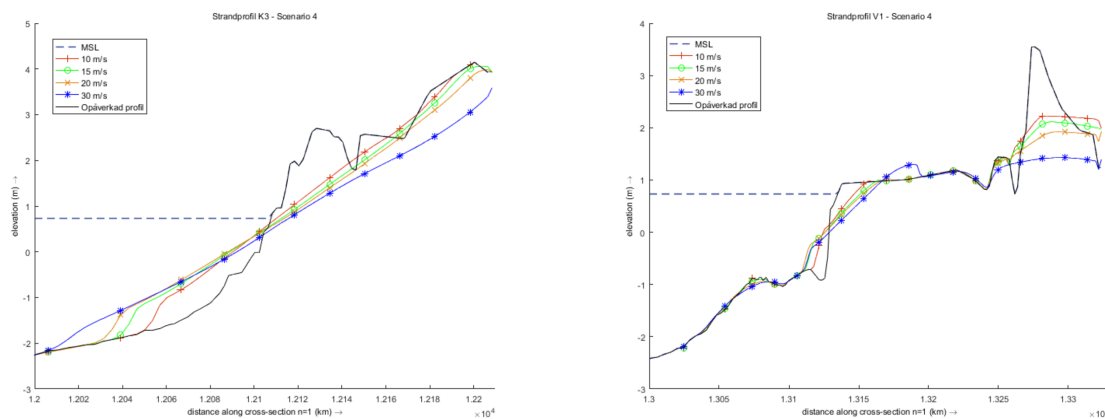
Även här som i scenario 3 är strandplanet på profilerna i figur 6.4 översvämmade under största delen av simuleringen. Detta gör att erosionen blir kraftig på dynen och vid profilerna V1 och K3 kan vi se att dynen inte klarar av vattnet utan sköljs bort. Detta beror till stor del på att de har en betydligt mindre volym sand vilket gör att höjden blir så låg att det ständigt sker översköljning.

Resultat för de olika profilerna

- S1: Genombrott sker efter 10 timmar vid en vindstyrka 30 m/s. Det sker en dynerosion på omkring $4,5 \text{ m}^3/\text{m}$, den ursprungliga dynvolymen ligger på ca $20 \text{ m}^3/\text{m}$ så en 22% av dynen eroderades. Dynhöjden sjunker från 4,8 m till strax under 4 m.
- S4: Genombrott sker efter 7,5 timmar vid en vindstyrka på 30 m/s, därefter sköljs hela dynen bort. Under simuleringen eroderas ca $20 \text{ m}^3/\text{m}$ av dynen vilket är 66% av den ursprungliga dynen. Höjden på dynen sänks från 6 m till 4,2 m.

- V1: Genombrott sker efter 15 timmar för en vindstyrka på 10 m/s. Därefter kollapsar dynen nästan helt. Erosionen från dynen är runt $2,2 \text{ m}^3/\text{m}$ vilket är 31% av den ursprungliga volymen. Höjden på dynen sjunker från 3,5 m till 2 m.
- V4: Genombrott sker efter 16 timmar vid en vindstyrka på 10 m/s. Erosionen från dynen är $3 \text{ m}^3/\text{m}$ vilket är en 21% av den ursprungliga volymen. Höjden sjunker från strax under 3,6 m till 3,2 m.
- K2: Resultatet blir som i scenario 3 med genombrott efter 14 timmar med en vindstyrka på 10 m/s, erosionen blir dock lägre och hamnar på en $6 \text{ m}^3/\text{m}$ vilket motsvarar 60%.
- K3: Genombrott sker efter 15 timmar vid en vindstyrka på 15 m/s. Under simuleringen sker en erosion av dynen med $3,3 \text{ m}^3/\text{m}$ vilket motsvarar 16% av dynens ursprungliga volym på $20 \text{ m}^3/\text{m}$. Höjden på dynen sänks från en 4,15 m till strax under 4,05 m.

Scenario 4



Figur 6.4: Resultande strandprofiler för K3 och V1 efter scenario 4. De färgade och markerade heldragna linjerna visar strandprofilens utformning efter de vågor som skapats av stormvindar med hastigheten 10 m/s (röd +), 15 m/s (grön O), 20 m/s (gul X) och 30 m/s (blå *).

6.2. Resultat från den sammansatta batymetrin

I de resultat som ges av figur 6.5 kan man se att erosionen är kraftigare i Falsterbobukten än vad den var vid de uppmätta profilerna. Detta beror mycket på att dynen är smalare för profilen som är tagen ur den sammansatta batymetrin än den uppmätta. Dessa är dock inte tagna på exakt samma ställe (de blåa och röda linjerna i figur 5.3 visar den variation som finns mellan dessa två batymetrier) eller vid samma tidpunkt så det visar på den lokala variationen längs med dynen.

För dynen vid Falsterbos golfklubb ser man att erosionen är kraftig redan i scenario 1 och att dynen kollapsar vid 30 m/s för alla scenarier. För scenario 1 och 2 klarar den resterande vindstyrkor men därefter blir det översköljning under flera tillfällen. Något man ser här jämfört med den uppmätta profilen är att dynen försvinner helt vid 30 m/s. Man kan även se att sedimenten snabbt lägger sig längs med strandplanet och höjer detta med nästan en halvmeter.

Vid översköljningen sker även en sedimenttransport bakåt i profilen vilket medför att det kommer hamna sediment över den golfbana som är belägen direkt bakom dynen.

6.2.1. Resultat för de olika profilerna

Scenario 1

- S1: Från simuleringen ser man att det sker genombrott efter 22 timmar med vindstyrka på 20 m/s, denna simulering ger en dynerosion på runt 1 m^3/m och minskar dynhöjden från 4,9 m till 4,1 m och toppen backar 0,4 m. Dynen har en ursprungsvolym på runt 8 m^3/m vilket ger en erosion på ca 12% av dynen. Stor del av sanden lägger sig dock längst med profilen nära dynen så det försvinner inte så stora mängder sand från stranden.
- S4: Från simuleringen ser man att det sker ett genombrott efter 15 timmar vid vindstyrka på 30 m/s, denna simulering ger en dynerosion på runt 4 m^3/m . Dynhöjden sänks från 5,9 m till 4,9 m och toppen backar 0,7 m. Dynen har en ursprungsvolym på runt 25 m^3/m vilket ger en erosion på ca 16% av dynen.
- V1: Enligt simuleringen sker det inget genombrott men det är troligt att det kan finnas någon form av översköljning vid en vindstyrka på 30 m/s efter 17 timmar, denna simulering ger en dynerosion på runt 1,5 m^3/m och minskar dynhöjden från 3,65 m till 3,5 m och toppen backar 1 m. Dynen har en ursprungsvolym på runt 12 m^3/m vilket ger en erosion på ca 13% av dynen.
- V4: Det är svårt att se ifall det sker genombrott vid en vindstyrka på 15 m/s men det är väldigt troligt och så fall sker detta efter 15 timmar, vid 20 m/s är dynen helt bortsköljd. Simuleringen med 15 m/s ger en dynerosion på runt 0,6 m^3/m och minskar dynhöjden från 3,3 m till 2,9 m och toppen backar 0,5 m. Ursprungsvolym är 7 m^3/m så erosionen motsvarar 8% av dynen.
- K2: Från simuleringen ser man att det sker genombrott vid en vindstyrka på 15 m/s efter 16 timmar. Under simuleringen sker en erosion av dynen på 1,7 m^3/m vilket sänker dynhöjden från 4,1 m till strax under 3,75 m och toppen backar 0,6 m. Dynen har en ursprungsvolym på runt 8 m^3/m vilket ger en erosion på ca 20% av dynen.
- K3: Från simuleringen ser man att det sker genombrott vid en vindstyrka på 20 m/s efter en 15 timmar. Under simuleringen sker en erosion av dynen på 1,2 m^3/m vilket sänker dynhöjden från 4 m till strax under 3,5 m och toppen backar 0,4 m. Dynen har en ursprungsvolym på runt 11 m^3/m vilket ger en erosion på ca 11% av dynen.

Scenario 2

- S1: Från simuleringen ser man att det sker genombrott efter 15 timmar för en vindstyrka på 20 m/s, denna simulering ger en dynerosion på runt 0,9 m^3/m och minskar dynhöjden från 4,9 m till 3,9 m och toppen backar 0,5 m. Dynen har en ursprungsvolym på runt 8 m^3/m vilket ger en erosion på ca 11% av dynen.
- S4: Från simuleringen ser man att det sker genombrott efter 14 timmar för en vindstyrka på 30 m/s, denna simulering ger en dynerosion på runt 5 m^3/m , dynhöjden sänks från 5,9 m till 4,6 m och toppen backar 0,6 m. Dynen har en ursprungsvolym på runt 25 m^3/m vilket ger en erosion på ca 20% av dynen.
- V1: Enligt simuleringen sker det inget genombrott men det är troligt att det kan finnas någon form av översköljning för en vindstyrka på 30 m/s efter 17 timmar, denna simulering ger en dynerosion på runt 1,5 m^3/m . Dynhöjden minskar från 3,65 m till 3,3 m och toppen backar 1 m. Dynen har en ursprungsvolym på runt 12 m^3/m vilket ger en erosion på ca 13% av dynen. Skillnaden mellan scenario 1 och 2 är väldigt liten för profilen.

- V4: Här sker genombrott redan vid en vindstyrka på 10 m/s efter 14 timmar och dynen spolats nästan helt bort vid 15 m/s. Simuleringen med 10 m/s ger en dynerosion på runt $0,7 \text{ m}^3/\text{m}$. Dynhöjden minskar från 3,3 m till 2,8 m och toppen backar 0,6 m. Dynen har en ursprungsvolym på runt $7 \text{ m}^3/\text{m}$ vilket ger en volymminskning på ca 10%, mycket av den eroderade sanden lägger sig vid dynfoten.
- K2: Från simuleringen ser man att det sker ett genombrott vid en vindstyrka på 15 m/s efter 16 timmar. Under simuleringen sker en erosion av dynen på $2 \text{ m}^3/\text{m}$ vilket sänker dynhöjden från 4,1 m till strax under 3,5 m och toppen backar 0,6 m. Dynen har en ursprungsvolym på runt $8 \text{ m}^3/\text{m}$ vilket ger en erosion på 25% av dynen.
- K3: Från simuleringen ser man att det sker genombrott vid en vindstyrka på 15 m/s efter en 15 timmar. Under simuleringen sker en erosion av dynen med $1,2 \text{ m}^3/\text{m}$ vilket sänker dynhöjden från 4 m till strax under 3,65 m och toppen backar 0,4 m. Dynen har en ursprungsvolym på runt $11 \text{ m}^3/\text{m}$ vilket ger en erosion på ca 11% av dynen.

Scenario 3

- S1: Från simuleringen ser man att det sker genombrott efter 12 timmar för en vindstyrka på 10 m/s därefter kollapsar dynen helt efter 14 timmar. Simuleringen ger en dynerosion på runt $5,5 \text{ m}^3/\text{m}$ och minskar dynhöjden från 4,9 m till 1,64 m då dynen i princip helt försvinner så skapas inte ett nytt krön utan formas ett högre strandplan. Dynen har en ursprungsvolym på runt $8 \text{ m}^3/\text{m}$ vilket ger en erosion på 69% av dynen, stor del av sanden sprider ut sig bakom dynen.
- S4: Från simuleringen ser man att det sker ett genombrott efter 16 timmar för en vindstyrka på 15 m/s, simuleringen ger en dynerosion på runt $4 \text{ m}^3/\text{m}$. Dynhöjden sänks från 5,9 m till 5 m och toppen backar 0,6 m. Dynen har en ursprungsvolym på runt $25 \text{ m}^3/\text{m}$ vilket ger en erosion på ca 16% av dynen.
- V1: Simuleringen ger ett genombrott efter 12 timmar vid en vindstyrka på 10 m/s efter genombrottet kollapsar dynen helt, det ger en dynerosion på runt $4,4 \text{ m}^3/\text{m}$, då dynen i princip försvinner helt bildas istället ett nytt strandplan som ligger på 1,5 m höjd. Dynen har en ursprungsvolym på runt $12 \text{ m}^3/\text{m}$ vilket ger en erosion på ca 36% av dynen.
- V4: Simuleringen ger ett genombrott efter 10 timmar vid en vindstyrka på 10 m/s, efter 15 timmar kollapsar dynen helt. Simuleringen ger en dynerosion på $2,4 \text{ m}^3/\text{m}$ och minskar dynhöjden från 3,3 m till 1,3 m det går dock inte riktigt att säga att det finns en dyn kvar efter simuleringen. Dynen har en ursprungsvolym på runt $7 \text{ m}^3/\text{m}$ vilket ger en erosion på 34% av dynen.
- K2: Från simuleringen ser man att det sker genombrott vid en vindstyrka på 10 m/s efter 14 timmar då även dynen kollapsar och spolats bort. Under simuleringen sker en erosion av dynen på $3,6 \text{ m}^3/\text{m}$ vilket sänker dynhöjden från 4,1 m till 2,4 m och dynen backar 2 m. Dynen har en ursprungsvolym på runt $8 \text{ m}^3/\text{m}$ vilket ger en erosion på 45% av dynen.
- K3: Från simuleringen ser man att det sker genombrott vid en vindstyrka på 10 m/s efter en 14 timmar, vid genombrottet kollapsar även dynen och stora delar sköljs bakåt i profilen. Under simuleringen sker en erosion av dynen på $3,5 \text{ m}^3/\text{m}$ vilket sänker dynhöjden från 4 m till strax under 2,4 m och toppen backar omkring 1,5 m. Dynen har en ursprungsvolym på runt $11 \text{ m}^3/\text{m}$ vilket ger en erosion på 32% av dynen.

Scenario 4

- S1: Från simuleringen ser man att det sker genombrott efter 17 timmar för en vindstyrka på 10 m/s, denna simulering ger en dynerosion på runt $0,9 \text{ m}^3/\text{m}$ och minskar dynhöjden från 4,9 m till 3,9 m och toppen backar 0,6 m. Dynen har en ursprungsvolym på runt $8 \text{ m}^3/\text{m}$ vilket ger en erosion på 11% av dynen.
- S4: Från simuleringen ser man att det sker genombrott efter 17 timmar för en vindstyrka på 20 m/s, denna simulering ger en dynerosion på runt $3,6 \text{ m}^3/\text{m}$ dynen. Dynhöjden sänks från 5,9 m till 4,9 m och toppen backar 0,7 m. Dynen har en ursprungsvolym på runt $25 \text{ m}^3/\text{m}$ vilket ger en erosion på 14% av dynen.
- V1: Det sker inget genombrott för 10 m/s utan där eroderas en $1,3 \text{ m}^3/\text{m}$ bort från dynen och den behåller en höjd på strax under 3,5 m. Vid en vindstyrka på 15 m/s sker genombrott strax efter 15 timmar och dynen kollapsar och det blir motsvarande resultat som för scenario 3.
- V4: Simuleringen ger motsvarande resultat som för scenario 3 med skillnaden att det dröjer 14 timmar innan genombrott.
- K2: Resultatet blir i princip samma som i scenario 3 med skillnaden att det blir mindre erosion detta rör sig om en skillnad på en $0,2\text{--}0,3 \text{ m}^3/\text{m}$. Då även scenario 4 resulterar i en bortsköljning av dynen så är det ej en betydande skillnad mellan scenarierna.
- K3: Resultatet från simuleringen är väldigt lik det i scenario 3 med undantag att erosionen är $2,7 \text{ m}^3/\text{m}$ men den nya höjden är även här 2,4 m vilket betyder att dynen behåller mer av sin volym men blir bredare. Genombrottet sker även här efter 14 timmar vid en vindstyrka på 10 m/s.

6.3. Test med vegetation

Ett flertal simuleringar har körts för att undersöka hur stor påverkan på modellen som vegetationen skulle kunna ha. Viktigt att påmärka är att ingen fullständig analys av vegetationen vid Falsterbonäset har gjorts. Detta på grund av att det saknas användbar data och kunskap för att göra en korrekt tolkning om hur den befintliga vegetationen ska översättas till modellparametrar. Därmed bör de nedan presenterade resultaten endast ses som olika försök till att förstå hur ett lager av vegetation kan stärka dynerna.

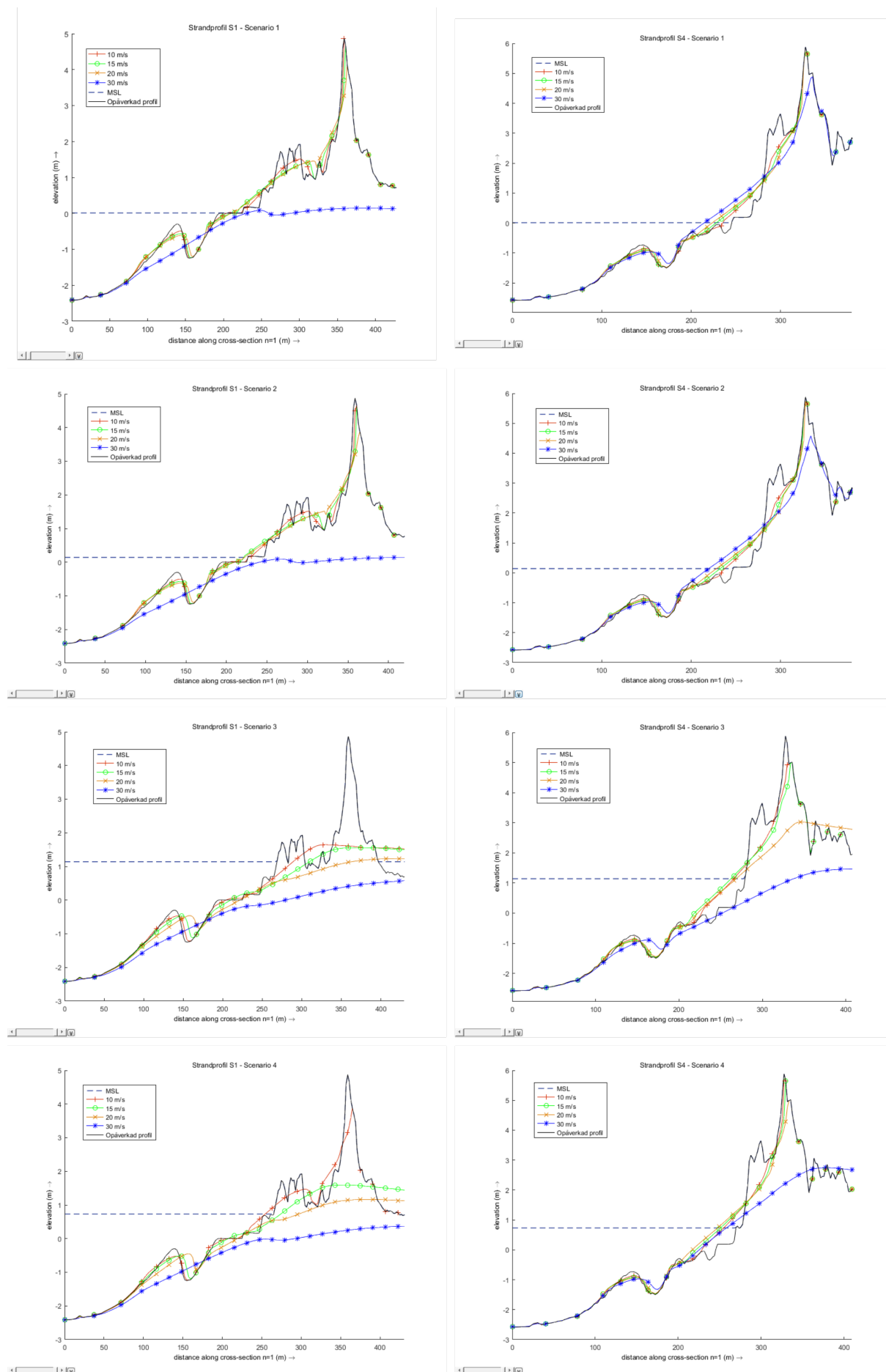
Figur 6.6 visar hur vegetationen kan påverka en av Falsterbobuktens strandprofiler. Dynen med vegetation har klarat sig avsevärt mycket bättre än den utan (det råder en meter skillnad mellan dynernas höjd) samt har bevarat det mesta av den ursprungliga profilens utformning. I och med att strandprofilen bakom fördynen är sig lik med den ursprungliga profilen kan det även antas att ingen större overtopping eller erosion av bakomliggande slänter har skett för scenariot med vegetation.

6.4. Test av dynens motståndskraft

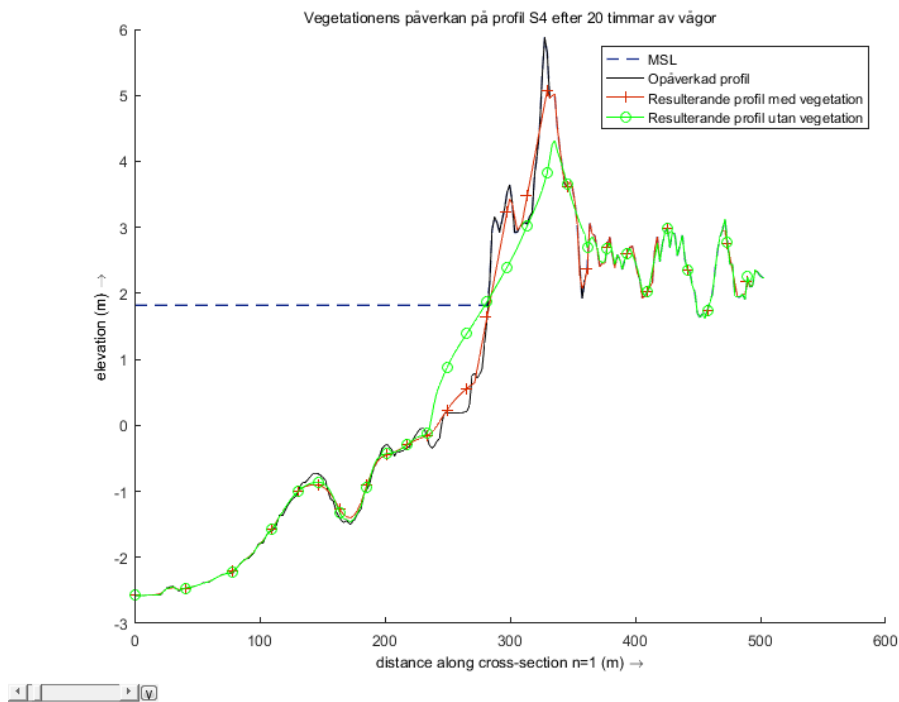
De genomförda motståndssimuleringarna av Falsterbobuktens sanddyner ges av figurerna 6.7-6.10. Viktigt att anmärka om dessa figurer är (1) att vattennivån är satt till ett statistiskt värde, det högsta värdet för respektive scenario, och (2) att den första stora vågen anländer till kusten efter 5 timmar på grund av hur batymetrin är skapad för att ge verklighetstrogna vågförhållanden. Detta innebär att de tidsansvisningar som är satta i figurerna inte representerar sanddynernas

verkliga uthållighet eftersom vattnet vid dynen har stått stilla under fem av simuleringens timmar. Precis intill dynen är vattennivån förhöjd på grund av ”wave setup”. Detta medför att även för strandprofil S4 kommer all mark bakom sanddynen vara översvämmad efter omkring 40 timmar trots att den märkta vattennivån ligger väl under dynens topp vid det tillfället.

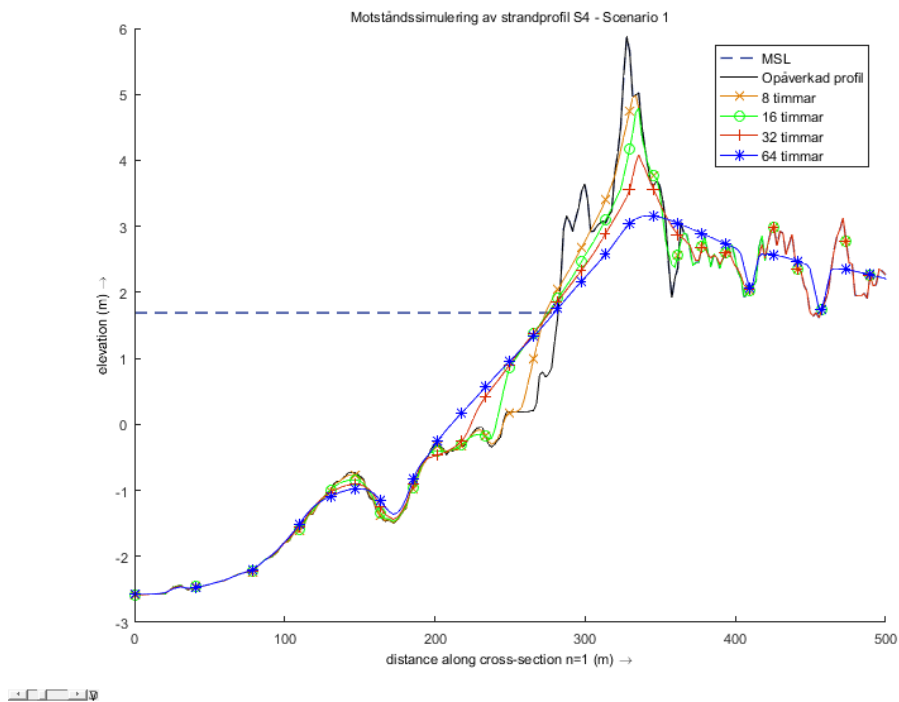
Gemensamt för alla dessa profiler är att de ej klarar av deras respektive scenarion för 32 simuleringstimmar. Alla röda profiler som visar profilernas utveckling vid detta stadie har en utjämnad och eroderad utformning som antyder till att stora mängder vatten har sköljts över fördynen och transporterats innåt land. Alla dynen förutom den i figur 6.9 visar dock tecken på att de lyckats stå emot de dimensionerande stormarna under 18 simuleringstimmar. Det har dock skett overtopping vid profil S4 i både figur 6.7 och 6.8. Detta kan märkas vid att en mängd sand har satt sig i sänkan som befinner sig precis bakom fördynen.



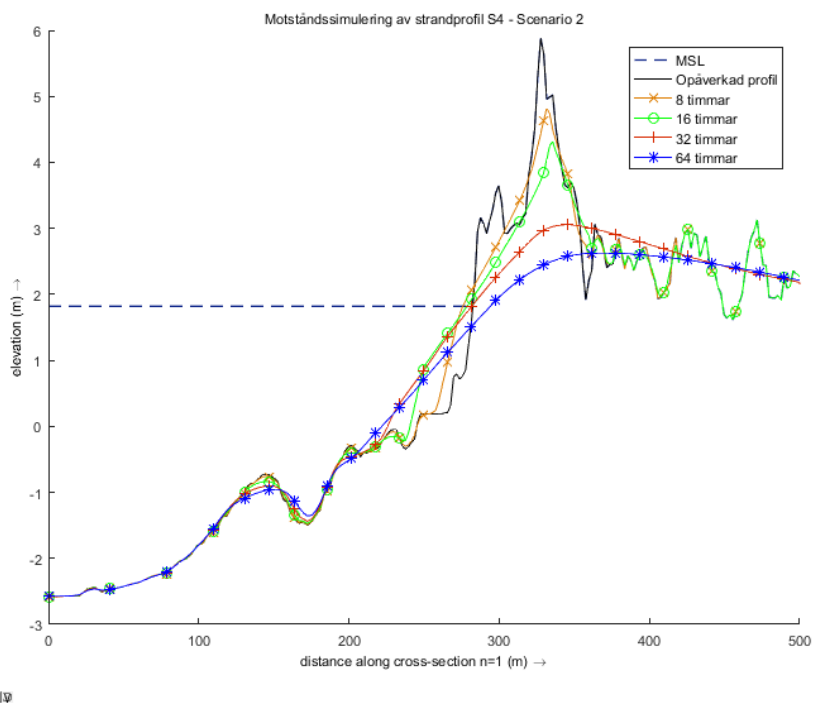
Figur 6.5: Resultande strandprofiler för profilerna S1 och S4 med den sammansatta batymetri. De färgade och markerade heldragna linjerna visar strandprofilens utformning efter de vågor som skapats av stormvindar med hastigheten 10 m/s (röd +), 15 m/s (grön O), 20 m/s (gul X) och 30 m/s (blå *).



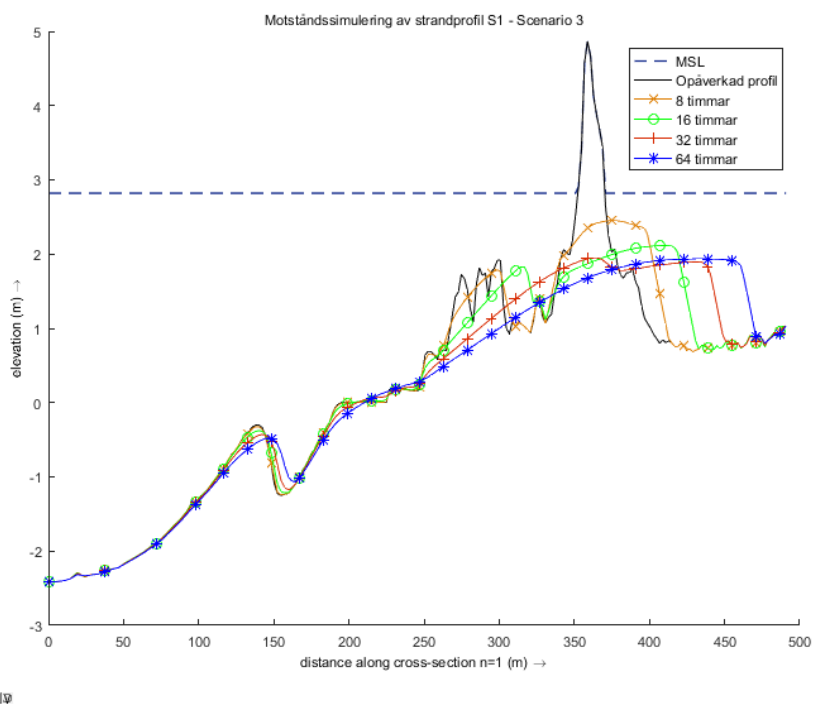
Figur 6.6: Resultatet av en 20-timmars simulering under scenario 2 vid strandprofil S4. Den röda (+) linjen visar den slutgiltiga profilen då vegetation har lagts till och den gröna (o) linjen visar samma profil utan någon befintlig vegetation.



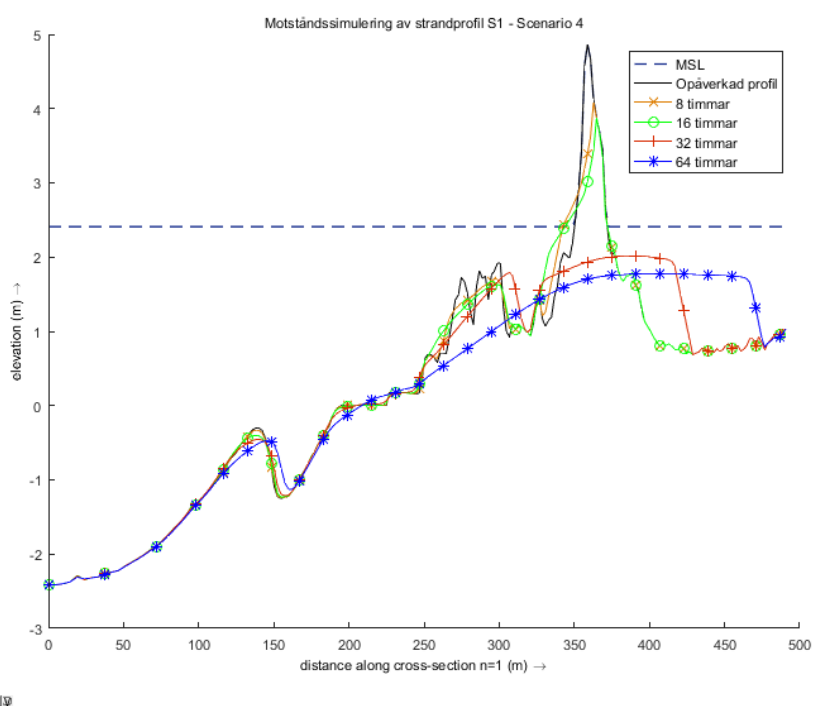
Figur 6.7: Resultatet av en 64-timmars simulering under scenario 1 vid strandprofil S4. De färgade och markerade heldragna linjerna visar strandprofilens utformning efter 8 (gul X), 16 (grön O), 32 (röd +) och 64 timmar (blå *).



Figur 6.8: Resultatet av en 64-timmars simulering under scenario 2 vid strandprofil S4. De färgade och markerade heldragna linjerna visar strandprofilens utformning efter 8 (gul X), 16 (grön O), 32 (röd +) och 64 timmar (blå *).



Figur 6.9: Resultatet av en 64-timmars simulering under scenario 3 vid strandprofil S1. De färgade och markerade heldragna linjerna visar strandprofilens utformning efter 8 (gul X), 16 (grön O), 32 (röd +) och 64 timmar (blå *).



Figur 6.10: Resultatet av en 64-timmars simulering under scenario 4 vid strandprofil S1. De färgade och markerade heldragna linjerna visar strandprofilens utformning efter 8 (gul X), 16 (grön O), 32 (röd +) och 64 timmar (blå *).

7

Analys

I detta kapitel analyseras och diskuteras de olika resultaten från simuleringarna. Även slutsatser om för- och nackdelar med att använda XBeach presenteras. Resultaten jämförs mot andra liknande studier.

7.1. XBeach

XBeach är i första hand en modell för att simulera stormar vilket gör att längre simuleringsperioder snabbt ger bristande resultat.

Detta gör att modellen är svår att använda ensam för att simulera framtidsscenarier då förändringar som exempelvis vattennivåökningen sker under en så pass lång period. Man måste därför kombinera simuleringen med andra modeller och antaganden. Ett tydligt exempel på detta är hänsynen till Bruuns Lag och den långsamma vattenstigningen som kommer att ske det kommande seklet. Det är alltså väldigt viktigt att man är väl medveten om vad det är för förhållande man vill simulera och att indata är korrigerad för detta.

Då XBeach är en förhållandevis enkel modell gör detta att den är väldigt populär, dock är den baserad på hydrodynamiska teorier med få valideringar mot verkliga mätningar, utan den följer i första hand labbexperiment. Detta gör att den är lätt att förstå och det är tydligt hur parametrarna förhåller sig till varandra. Det är dock viktigt att man anpassar modellen för det lokala området för att resultaten skall vara givande.

På grund av att modellen är gjord i open-source finns all kod tillgänglig och man kan därmed få modellen väl anpassad för sina ändamål. Denna frihet ställer även högre krav på användaren då man behöver mer kunskap i programmering än vad man behövt för ett program med ett mer lättanvänt användargränssnitt. Det krävs även en god insikt i de ekvationer och fysikaliska processer som XBeach använder sig av i simuleringarna.

7.2. Modeller

De modeller som har använts i simuleringarna har skapats med en relativt förenklad metod, nämligen att endast använda de funktioner som hörde till Open Earth Tools, den toolkit som används för att arbeta med XBeach i Matlab. Vad gäller skapandet av modellerna finns det många förbättringar att åstadkomma om man besitter rätt kunskap. Ett annat program som kan användas för att skapa batymetrin och modellens rutnät är Delft-3D och dess moduler RFGRID och Quickin. Ett antal försök har gjorts för att tyda hur dessa moduler skulle kunna tillämpas på den befintliga data. Dessvärre kunde vissa av modulernas principiella funktioner inte begripas och arbetet med Delft-3D utvecklades inte vidare.

7.3. Kalibreringen av modellen

Kalibreringen mot Skälderviken betyder att modellens parametrar är testade mot uppmätta resultat. Modellen skulle dock stärkas av att testas mot uppmätta värden i Skanör-Falsterbo samt kontrolleras ifall vegetation ska läggas till i modellen. Då mätningarna från Skälderviken inte var gjorda för detta projektet så saknas en batymetri för området vilken skulle ha förbättrat simuleringen. Även en validering av modellen genom att simulera andra uppmätta profiler hade varit bra då det hade stärkt modellen ytterligare. Resultaten blir dock rimliga och det sker inga konstigheter i simuleringen vilket gör att de avvikelser som kan finnas troligtvis inte är så stora.

7.4. Vegetation

I detta arbete bestämdes det att inte skapa en fullständig simulering av vegetationens inverkan på sanddynen. Detta beslut påverkar resultaten då vegetationen förstärker dynen genom att göra det svårare för sanden att förflytta sig i profilen vilket leder till minskad erosion. XBeach klarar av att ta hänsyn till vegetation och har även använts i andra studier för att undersöka hur erosionen påverkas av vegetation. Eftersom typen av växtlighet och dess utbredning skiljer sig mycket från område till område krävs det att man studerar hur just områdets specifika växter binder samman kornen och på så sätt stabiliserar profilen.

Även om ingen djupare studie gjorts av vegetationen så har det noterats i fältmätningsrapporten ifall dynen och strandplanet var bevuxet eller ej. Detta för att underlätta för framtida studier och simuleringar. Undersökningen som har gjorts är för två strandprofiler, V4 och S4, där simuleringar med och utan vegetation har jämförts.

I resultatet från V4 kan man se en stor skillnad där strandplanet inte påverkas av vattenrörelserna under simuleringarna utan behåller sin form. Den enda erosionen sker runt dynen där vattnen gräver sig in i dynen, här sker dock även ett ras av dynen vilket leder till att toppen av dynen faller ner och lägger sig vid dynfoten.

Detta resultat stämmer väl överens med de slutsatser som Lindell (2017) dragit utifrån sitt arbete "Vegetationens betydelse för dyners morfologi". Lindell visar att frontdynen med reducerad vegetation eroderar mellan 2 till 4 gånger mer än de bevuxna dynerna. Hon betonar även vegetationens betydelse för att hindra dynen att sprida ut sig med vinden vilket kommer ha en stor betydelse om man skulle välja att förstärka dynerna i framtiden.

7.5. Vattennivå

Bristen på data för vattennivåerna i området är också ett stort problem som påverkar säkerheten i resultaten, då mätstationen inte varit igång under särskilt lång tid och det ej finns andra längs med sydkusten att jämföra med, efter att man lämnat stationen i Ystad 1986. Detta gör att det är svårt att få en detaljerad bild av hur vattennivån förändras under ett högvatten eller vilken återkomsttid dessa har. I denna rapport har vi jämfört 3 högvatten scenarier i Skanör och format våra egna högvatten scenarier efter dessa. Tyvärr har ingen detaljerad studie av dynerosionen under dessa högvatten gjorts vilket gör att det ej finns någon möjlighet att jämföra de simulerade resultaten mot en verklig händelse.

7.6. Vindar

I rapporten har de mest utsatta vindriktningarna studerats, dessa är dock inte så ofta förekommande idag och ger därför väldigt extrema resultat. Då det ej studerats så detaljerat hur klimatförändringen kommer förändra vindriktningen är det svårt att säga något om sannolikheten att dessa scenarier skulle kunna inträffa det kommande århundradet. De visar dock på händelser

där riskerna ökar då vattennivån stiger eftersom stormarna då kommer orsaka större skador än om de skulle inträffa idag.

7.7. Erosion

Man kan se att det är stora skillnader mellan de olika scenarierna i hur mycket dynen eroderar vilket visar på den inverkan vattennivåerna har. Det är dock viktigt att man har i beaktning att scenario 3 och 4 visar på scenarier med en lång återkomsttid. Det är därmed många antaganden som måste göras, för klimatet samt om hur strandprofilens förändring över tid kommer se ut. En viktig slutsats från dessa scenarier är att man inte skall förlita sig på dynerna som ensamt översvämningsskydd då överspolning kommer vara både dyrt och svårt att garantera sig mot. De visar även på det utsatta läge som Skanör-Falsterbo har vilket gör att det är ett viktigt underlag för det långsiktiga planerandet och beslutfattandet för området.

Resultaten från scenario 1 och 2 är intressanta då de kan inträffa lite närmare i tiden, de är även scenarier som kan förväntas hända oftare till följd av klimatförändringen. Här visar resultaten på att dynerna längs med Falsterbobukten samt norra Västkusten har en hög motståndskraft även under 100-årshögvattnet och klarar vågor från vindar upp till 20 m/s utan översköljning. Dynen på båda sidorna av kanalen i Kämpingebukten och vid den södra delen av Västkusten sker genombrott redan vid 15 respektive 10 m/s för scenario 2 och här kollapsar dynerna helt för de högre vågorna. Dessa två platser är alltså väldigt känsliga och är i dagsläget inte till någon större hjälp som översvämningsskydd. I östra delen av Kämpingebukten sker även erosion över tid vilket inte förbättrar läget, dessa kuststräckor kan därför vara bra att fokusera en första sandfodring på då de kommer ge mer direkta resultat vilket även kan göra att det blir lättare att studera hur väl insatserna fungerar. Längs med den södra Västkusten är inte området bakom dynen i någon riskzon för översvämning av bebyggelse då det mest är våtmarker. Dessa marker har dock ett högt miljövärde som gör att det kan vara värt att investera i dynernas motståndskraft.

Det man kan se från dessa två kuststräckor är att mycket av svagheten ligger i deras strandplan då det antingen är väldigt kort och brant eller väldigt lågt vilket resulterar att mycket av vågorna bryts direkt mot dynen när vattennivån stiger. Enligt en studie som gjorts på dynerosionen i Ystad under ett mastersarbete drog man slutsatsen att profiler var som mest känsliga för erosion när de hade ett lågt strandplan med låg lutning samt en lågt belägen dynfot och en brant dynvägg (Dahlerus, Carl-Johan och Egermayer, Daniel 2005). Detta stämmer väl överens med de resultat som tagits fram i denna rapport och beskriver väl Kämpingebukten och södra Västkusten.

Enligt en studie gjord av Hanson & Larson (1993) ”Sandtransport och kustutveckling vid Skanör/Falsterbo” undersöker de hur mycket erosion som skulle bli till följd av en ökad vattennivå på 50 cm. De använder sig av Bruuns antagande att 1 cm vattenstigning motsvarar ett tillbakadragande av stranden med 1 m. En stigning skulle alltså motsvara en tillbakadragning av 50 m vilket över näsets 35 km långa kust skulle leda till en förlust på 175 ha mark. Detta skulle motsvara 85 m³ sand per löpmeter. För att motverka denna erosion skulle man behöva fylla på stränderna med ca 210 000 m³ sand per år för hela näset (Hanson & Larson 1993).

Hanson & Larson studie visar alltså på vilka stora volymer sand det skulle behövas för att bevara dagens kust. Resultaten i föreliggande rapport visar dock hur känslig dagens kustlinje är för framtida stormar och att de skulle behöva förstärkas ytterligare för att fungera som ett bra översvämningsskydd. Kostnaden för sandfodring ligger på omkring 100 kr/m³ vilket ger en kostnad på närmare 21 miljoner kronor per år för att motverka konsekvenserna av vattenhöjningen och utöver detta ser man enligt resultaten från simuleringarna i detta arbetet att det även skulle tillkomma kostnader för stormreparationer. Detta är ett av de stora problemen som kustnära områden behöver ta hänsyn till, där man kanske behöver låta vissa markområden erodera och

finna en ny balans så att man kan fokusera resurserna på de mest värdefulla områdena.

7.8. Överspolning

Man kan se att det vid överspolningen sker sedimenttransport bakåt i profilen vilket resulterar att sediment kommer lägga sig över låglandet bakom dynen. Skadan av detta varierar för de olika platserna kring näset men vid Flommen skulle en överspolning resultera i att sediment skulle fylla igen de känsliga våtmarkerna och vid Falsterbos golfklubb skulle golfbanorna täckas av sediment då dessa ligger direkt bakom dynen. Detta skulle skada gräset samt var svåra att få bort utan att behöva lägga om gräset. Det finns alltså stora kostnader kopplade till en möjlig överspolning bortsett från att byggnader skulle riskera att översvämmas.

Enligt en studie gjord av [Hanson & Larson \(1993\)](#) "Sandtransport och Kustutveckling vid Skanör/Falsterbo" skulle en ökad vatten nivå på +2 m orsaka stora översvämningar i bebyggelsen Skanör/Falsterbo vilket skulle orsaka stora faror för liv i området och skador på infrastrukturen.

Man kan se från simuleringarna att om det sker ett högvattenstånd i samband med en storm orsakar det snabbt en överspolning av dynen och har den redan smalnat av på grund av erosion kollapsar dynen väldigt snabbt där efter.

Genom att köra simuleringen med en konstant högvattenstånd kan man även se hur lång tid dynen klarar av att stå emot innan det sker överspolning och brott. Att studera denna tiden tillsammans med att studera erosionsmängden från de tidigare simuleringarna gör att man får en ganska god uppfattning om hur motståndskraftiga sanddynerna är mot stormar.

Man kan se utifrån simuleringen på S1 att dynen kollapsar efter ungefär ett dygn, det finns alltså tid för åtgärder så som evakuering av området bakom innan det översvämmas.

8

Slutsats

Här sammanfattas författarnas tankar om arbetet och rapportens frågeställningar besvaras.

8.1. Metod

Under arbetets gång har vi fått en större förståelse av XBeach och hur modellering av kusterosion fungerar i allmänhet. XBeach har väldigt många funktioner så möjligheten att skraddarsy den för just ens egna område och problem är väldigt god. Detta tillsammans med en öppen kod gör att man har många friheter i användningen av modellen. Denna frihet gör dock att man behöver en god kunskap om modellen och om de problem som ska modelleras. Detta gav svårigheter under projektet då många problem bestod av oklarheter i XBeachs olika funktioner. Detta till trots fungerade modellen väl och gav bra resultat. Det finns kurser att gå i XBeach vilket skulle rekommenderas ifall man skall arbeta med modellen mer grundligt, även kunskap i Delft3D underlättar då dessa två modeller överlappar varandra mycket och har funktioner som underlättar arbetet i respektive modell.

Då XBeach är gjord med hänsyn främst till den nederländska kusten har tidvattnet en stor betydelse i modellen vilket gör att det är integrerat i många funktioner. Eftersom tidvattnet i Sverige och speciellt i Östersjön är nästan obefintligt krävdes en del arbete med att få vattennivåerna att röra sig som önskat trots avsaknaden av tidvatten. Utöver detta finns det inga lokala faktorer som skulle tala för att modellen inte passar för simuleringar av svenska förhållanden. Två rapporter från Polen hittades där de använt XBeach för just kusterosion. Tyvärr fanns det ingen beskrivning av metoden i dessa rapporter men det visar att modellen använts även för kusterna kring Östersjön.

8.2. Resultat

Från resultaten kan man se att det sker kraftig dynerosion längs de tre kuststräckorna för scenario 3 och 4 vilket visar på det utsatta läge som näset är i. Detta styrker Vellinges beslut om behovet av ytterligare översvämningsskydd i form av vallar och murar för att klara framtida klimat. Det visar även på behovet av en plan för underhåll av kuststräckan i form av sandfodring ifall man vill dra nytta av dynernas egenskaper som översvämningsskydd dock krävs en mer detaljerad studie över hur strandprofilen förändras över lång tid för att kunna ge en mer exakt beskrivning över storleken på dessa åtgärder.

Från de mer närliggande scenarierna 1 och 2 får man en bild av storleken av dynerosionen som sker under en kraftig storm och de visar även hur stor påverkan vågorna har på erosionen. Resultaten visar också vilka delar av kusten som är extra svaga och som därmed kan behöva de

största insatserna. Här sticker Kämpingebukten ut då dynen här har väldigt låg motståndskraft även för scenarier med en återkomsttid på 100 år.

Vi hoppas att dessa resultat ska kunna vara en del av ett underlag för framtida användning för bevarande av dynerna kring Skanör-Falsterbo. Förhoppningsvis skall de även ge en förståelse för en del av de problem som man måste hantera för att klara klimatförändringar och problem som blir till följd av dem. Vår rekommendation från vad vi lärt oss under arbetet är därför att studera Kämpingebukten och södra Västkusten och använda dessa för ett pilotprojekt då de kommer ge mer direkta resultat och man lättare kan studera hur stor effekt åtgärderna ger. Även en mer omfattande studie av den långsiktiga förändringen kan hjälpa mycket då man från denna studie kan se att det är viktigt att ta hänsyn till längre återkomstperioder när det kommer till bevarande av kusten. Det krävs även ett stort arbete med att täcka igen gångar och andra genombrytningar som gjorts genom dynen eftersom dessa annars kommer bli svaga punkter där vattnet kommer tränga igenom, detta kommer försvåra tillgängligheten till stranden men det finns en rad exempel på lösningar för hur denna inverkan skall bli så liten som möjligt.

8.3. Förslag för framtida studier

Under detta examensarbete har en stor del av tiden spenderats till att försöka förstå modellen och hur man skapar en fungerande simulering med hjälp av de verktyg som finns tillgängliga. En ambition med projektet var att visa svagheter och styrkor med modellen. Ett av de genomgående problemen var just modellens oklarheter. I kommande arbeten med XBeach rekommenderar vi därför att man går en kurs i hur modellen fungerar. Det finns en manual samt gammalt kursmaterial att tillgå men dessa kan vara svåra att förstå då de i många fall förutsätter att du redan har gått deras kurser.

Då det är en öppen kod finns det säkert möjligheter att få modellen ännu mer anpassad för Skanör-Falsterbo, det kräver dock en stor programmeringskunskap.

För att skapa mer korrekta resultat skulle en studie av hur en verklig storm eroderat dynerna behövas för att på så sätt få en bättre kalibrering. Även en studie av den lokala vegetationen behövs för att få en mer korrekt simulering.

Det hade även varit bra att göra en studie av sandförflyttningen i området och se hur denna kan tänkas förändras av klimatförändringen. Detta skulle ge en djupare förståelse i hur mycket sediment som kommer röra sig till och från kusterna.

Alla de presenterade simuleringsresultaten är skapade av endimensionella simuleringar. Endimensionella simuleringar begränsas dock till stor del av vad de kan omfatta. Till skillnad från en tvådimensionell simulering, som simulerar ett geografiskt område, kan endimensionella simuleringar endast simulera en utvald linje i planet. Detta medför bl.a. till att vissa samverkans effekter mellan vågor och kusten inte kan beaktas i resultaten. Det vore på så vis fördelaktigt att skapa en tvådimensionell modell för att kunna analysera de resultat som annars inte är möjliga att studera. Ett flertal försök har genomförts för att lyckas med detta under den tid som detta examensarbete har pågått. Trots det att flera fungerande modeller framtoogs var batymetrien aldrig tillräckligt anpassad för att ge resultat som tycktes vara av värde. Utöver detta var modellen dåligt optimerad och krävde många fler timmar att köras igenom i jämförelse med den tid som beskådades för andra likartade projekt. På grund av bristande kunskap i batymetri- och rutnätsmanipulering slopades den tvådimensionella modellen till fördelen av att kunna fokusera på de resultat som de endimensionella modellerna skapade. På grund av denna erfarenhet kan det vara fördelaktigt att bjuda in några personer som kan de programvaror som detta slags arbete omfattar för att kunna agera som vägledare i de initiala delarna av arbetet och t.ex. förklara hur skapandet av modellen bör initieras.

Bibliografi

- Blomgren, S. (1999), Hydrographic and Morphologic Processes at Falsterbo Peninsula. Present Conditions and Future Scenarios, PhD thesis.
- Bosboom, J. & Stive, M. J. (2015), *Coastal dynamics 1*, 0.5 edn, VSSD, Delft.
- CERC (1984), *Shore protection manual volume II*, Vol. 2, 4th edn, Department of the army corps of engineerings, Washington, D.C.
- Dahlerus, Carl-Johan och Egermayer, Daniel (2005), Uppspolning och klittererosion längs ystadkusten -situation idag och framtida scenarier, Master's thesis, LTH.
- Daly, C. (2009), Low Frequency Waves in the Shoaling and Nearshore Zone A Validation of XBeach, PhD thesis.
- Deltares (2017), 'Default settings - XBeach'.
URL: <https://publicwiki.deltares.nl/display/XBeach/Default+settings>
- Doody, P. (2009), 'Sand Dunes in Europe'.
URL: http://www.coastalwiki.org/wiki/Sand_Dunes_in_Europe
- Fredriksson, C., Tajvidi, N., Hanson, H. & Larson, M. (2016), 'Statistical analysis of extreme sea water levels at the Falsterbo peninsula, South Sweden.', pp. 129–142.
- Fredsoe, J. & Deigaard, R. (1992), *Mechanics of Coastal Sediment Transport*, World Scientific Publishing Co Pte Ltd.
- Galappatti, R. & Vreugdenhill, C. (1983), 'A depth integrated model for suspended transport', *Journal for Hydraulic Research* **23**(4), 359–377.
- Hanson, H. (2017), 'Kustordlistan'.
URL: <http://kustordlistan.se/ordlistan.html>
- Hanson, H. & Larson, M. (1993), *Sandtransport och kustutveckling vid Skanör/Falsterbo*, Rapport - Institutionen för teknisk vattenresurslära, Lunds tekniska högskola.
- Helgeson, J. (2013), Handlingsplan till skydd mot stigande havs- nivåer vid Falsterbonäset samt områdena vid Höllviken / Kämpinge, Technical report.
- Hesp, P. (2002), 'Foredunes and blowouts: initiation, geomorphology and dynamics', *Geomorphology* **48**(1-3), 245–268.
- Holthuijsen, L. H. (2009), *Waves in Oceanic and Coastal Waters*, Cambridge University Press.
- Holthuijsen, L. H., Booij, N. & Herbers, T. H. C. (1989), 'A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents', *Coastal Engineering* **13**(1), 23–54.

Hoonhout, B. (2015), 'XBeach manual'.

URL: <http://XBeach.readthedocs.io/en/latest/index.html>

Huisman, B. (2012), 'XBeach usage'.

URL: <https://www.google.se/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=0ahqhs6lWCMwpj1oUdOuAw&sig2=j6SxtZJ717vHCN2eN6d0Pw>

Länsstyrelsen i Hallands Län (2017), 'Haverdal (Halmstad)'.

URL: <http://www.lansstyrelsen.se/Halland/Sv/djur-och-natur/skyddad-natur/naturreservat/halmstad/haverdal>

Lindell, J. (2017), Vegetationens betydelse för dyners morfologi, Master's thesis, LTH.

Luna, M. C. d. M., Parteli, E. J. R., Durán, O. & Herrmann, H. J. (2011), 'Model for the genesis of coastal dune fields with vegetation', *Geomorphology* **129**(3-4), 215–224.

URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.01.024>

Malmberg Persson, K., Nyberg, J., Ising, J. & Persson, M. (2014), 'Skånes känsliga stränder – ett geologiskt underlag för kustzons planering och erosionsbedömning'.

Naturvårdsverket (2011), Sanddynor 2110-2330, Technical report.

Nerheim, S. (2007), 'Framtida medel- och högvattenstånd i skåne och blekinge', (Nr. 2007-53).

NSW Department of Land and Water Conservation (2001), Coastal Dune Management: A Manual of Coastal Dune Management and Rehabilitation Techniques, Technical report, NSW Department of Land and Water conservation, Newcastle.

URL: <http://www.environment.nsw.gov.au/resources/coasts/coastal-dune-mngt-manual.pdf>

Persson, G., Sjökvist, E., Åström, S., Eklund, D., Andréasson, J. & Johnell, A. (2011), 'Klimatanalys för Skåne län'.

Roelvink, D., Reniers, A., van Dongeren, A., van Thiel de Vries, J., McCall, R. & Lescinski, J. (2009), 'Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands', *Coastal Engineering* **56**(11-12), 1133–1152.

URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2009.08.006>

Sallenger, A. H. (2000), 'Storm Impact Scale for Barrier Islands', *Journal of Coastal Research* **16**(3), 890–895.

SMHI (2017a), 'Stormskador'.

URL: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/klimat/stormskador-i-framtiden-1.7080>

SMHI (2017b), 'Tidvatten'.

URL: <https://www.smhi.se/kunskapsbanken/oceanografi/tidvatten-1.321>

SMHI och Naturvårdsverket (2014), 'Framtidens havsnivåer 2014', pp. 2–3.

Street, S. I. (2011), Wave atlas along the south-eastern coast of Sweden, Master's thesis, LTH.

Sweco, Street, S. I. (2017), 'Samtal med sweco, maj 2017'.

US Army Corps of Engineers (1984), *Shore protection manual*, US Army Corps of Engineers.

USACE (2008), Part IV: Chapter 1 - Coastal Terminology and Geologic Environments, *in* 'Coastal engineering manual', Vol. 1100, pp. IV-1-1 to IV-1-49.

van Dongeren, A. (2017), 'XBeach'.

URL: <https://www.deltares.nl/en/software/XBeach/>

Van Rijn, L. C. (2013), 'Basic Hydrodynamic Processes in the Coastal Zone'.

Vellinge kommun (2017a), 'Kommunfakta och statistik'.

URL: <http://www.vellinge.se/kommun-politik/kommunfakta/statistik>

Vellinge Kommun (2017b), 'Vellinge_skydd'.

URL: [http://www.vellinge.se/Global/Bygga_bo_miljo/Planer_pa_remiss_just_nu/Åtgärder_för_höjda_havsnivåer_-_Etapp_3_\(grön-röd-svart-blå\).jpg](http://www.vellinge.se/Global/Bygga_bo_miljo/Planer_pa_remiss_just_nu/Åtgärder_för_höjda_havsnivåer_-_Etapp_3_(grön-röd-svart-blå).jpg)

Venables, H. (2007), 'Grey dunes'.

URL: <http://www.geograph.org.uk/photo/733431>

Woodroffe, C. D. (2002), *Coasts*, Cambridge.

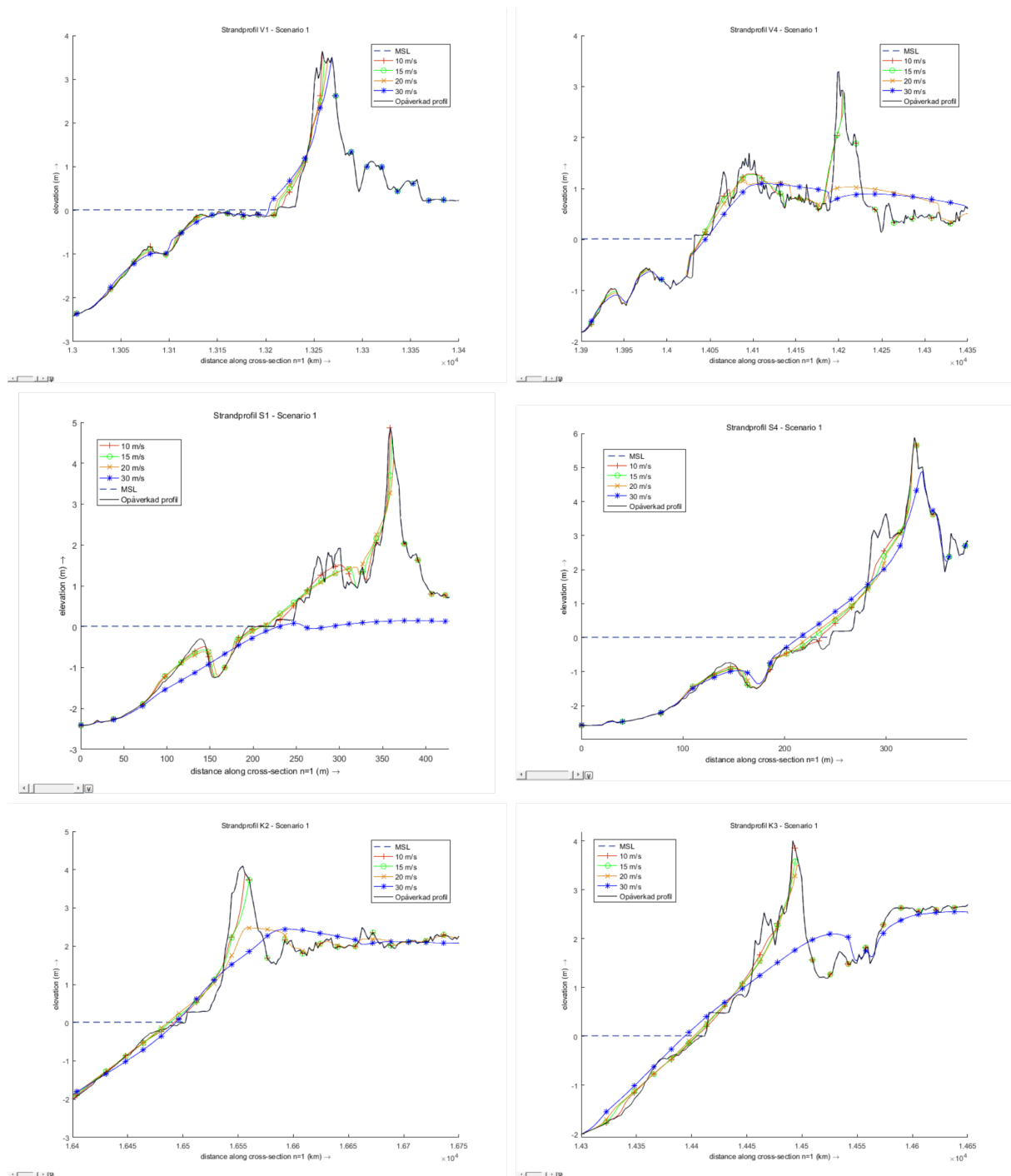
A

Simuleringsresultat

I detta appendix redovisas de resultat som härstammar från de simuleringar som har körts för de använda scenariena.

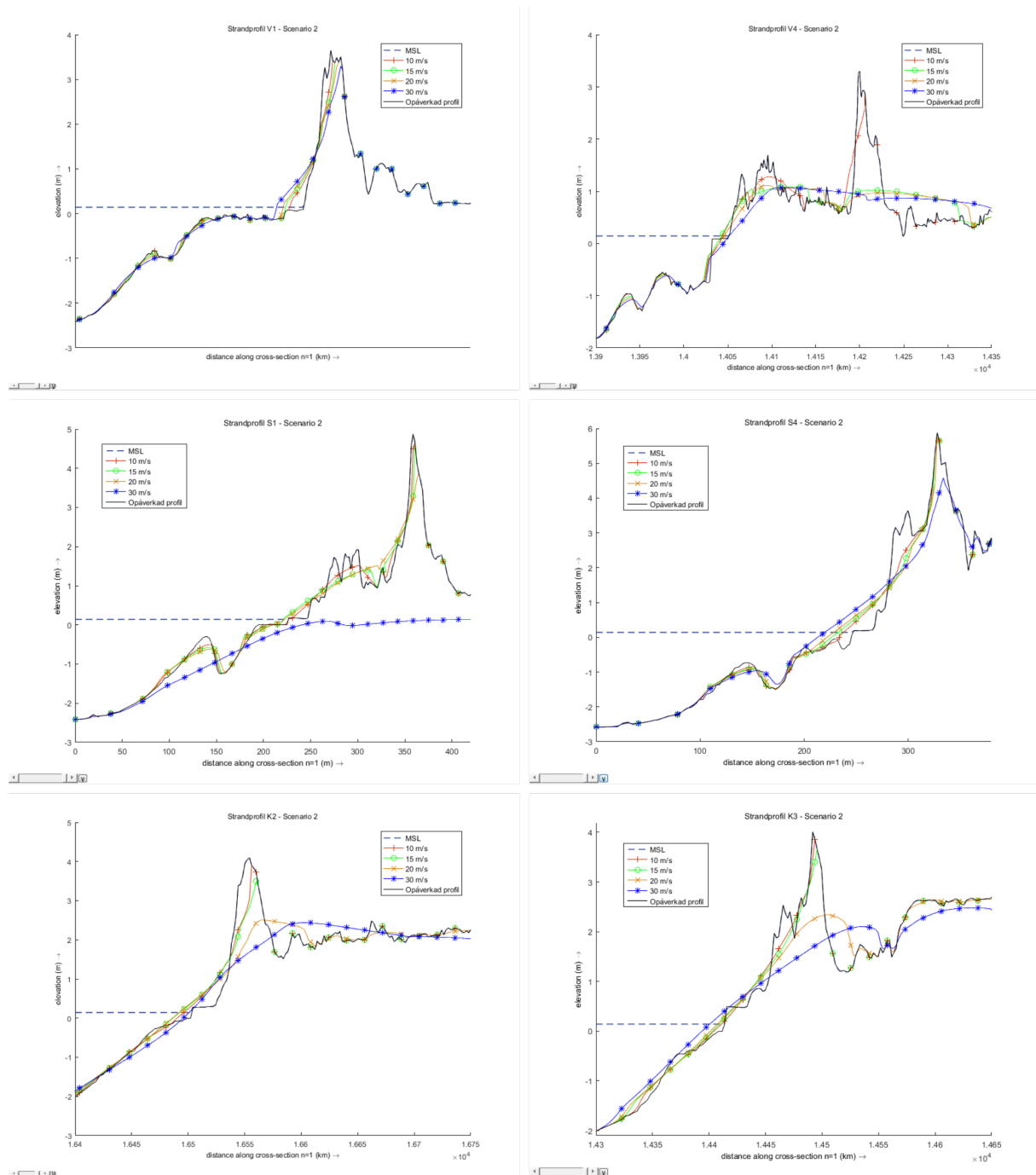
A.1. Resultat av simuleringar med den sammansatta batymetrin

A.1.1. Scenario 1



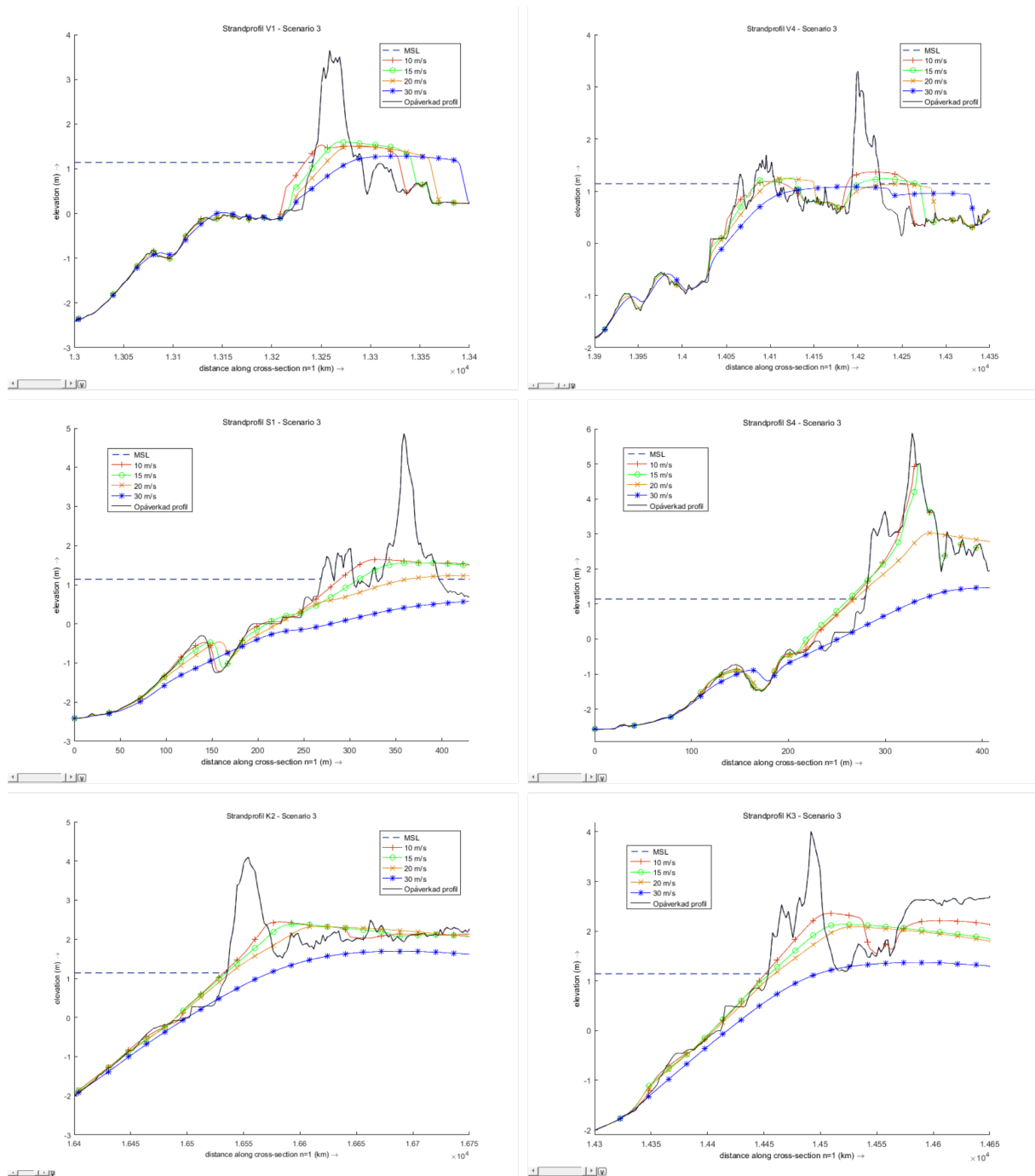
Figur A.1: Resultande strandprofiler för V1, V4, K2, K3, S1 och S4 efter scenario 1. De färgade och markerade heldragna linjerna visar strandprofilens utformning efter de vågor som skapats av stormvindar med hastigheten 10 m/s (röd +), 15 m/s (grön O), 20 m/s (gul X) och 30 m/s (blå *).

A.1.2. Scenario 2



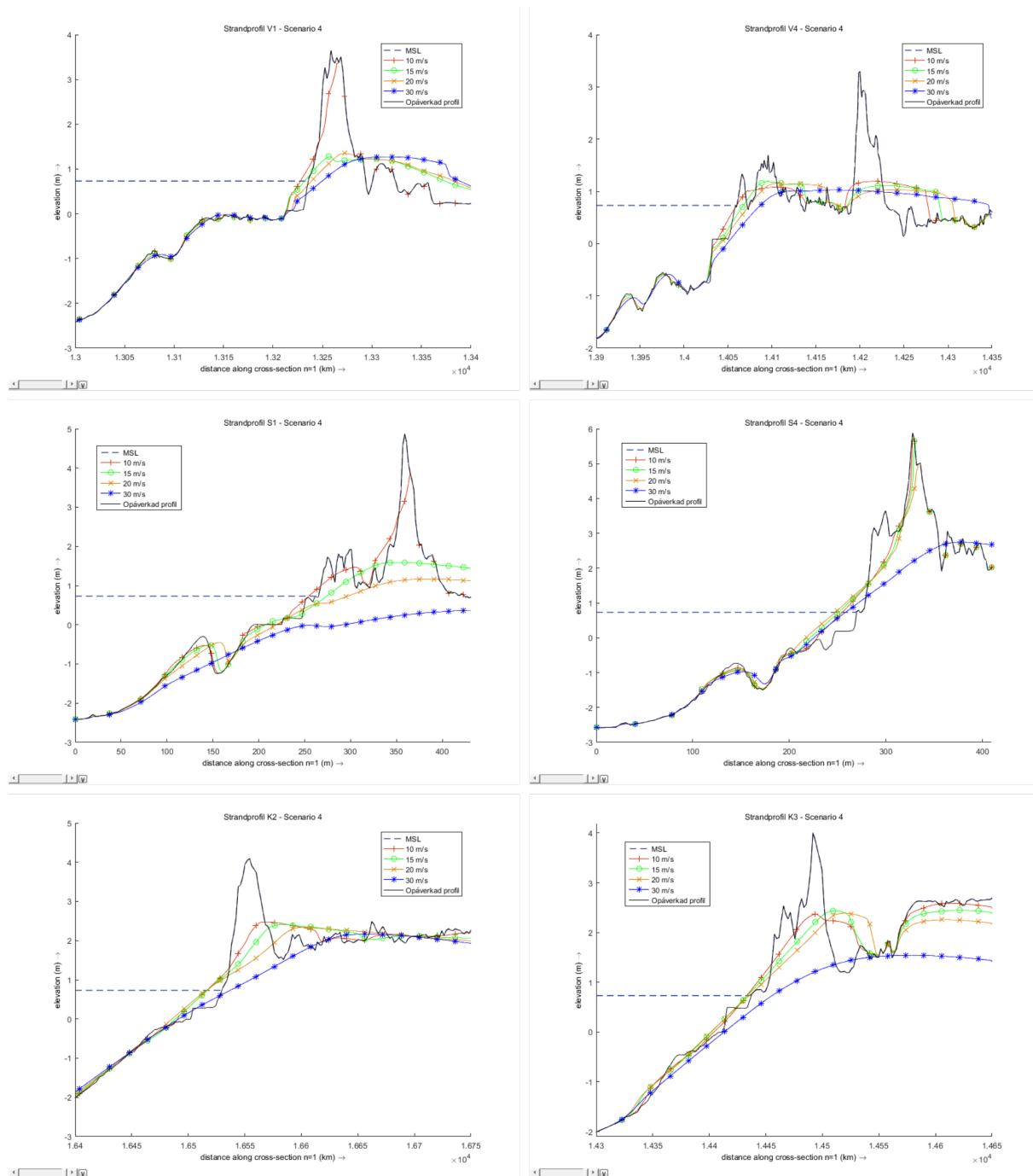
Figur A.2: Resultande strandprofiler för V1, V4, K2, K3, S1 och S4 efter scenario 2. De färgade och markerade heldragna linjerna visar strandprofilens utformning efter de vågor som skapats av stormvindar med hastigheten 10 m/s (röd +), 15 m/s (grön O), 20 m/s (gul X) och 30 m/s (blå *).

A.1.3. Scenario 3



Figur A.3: Resultande strandprofiler för V1, V4, K2, K3, S1 och S4 efter scenario 3. De färgade och markerade heldragna linjerna visar strandprofilens utformning efter de vågor som skapats av stormvindar med hastigheten 10 m/s (röd +), 15 m/s (grön O), 20 m/s (gul X) och 30 m/s (blå *).

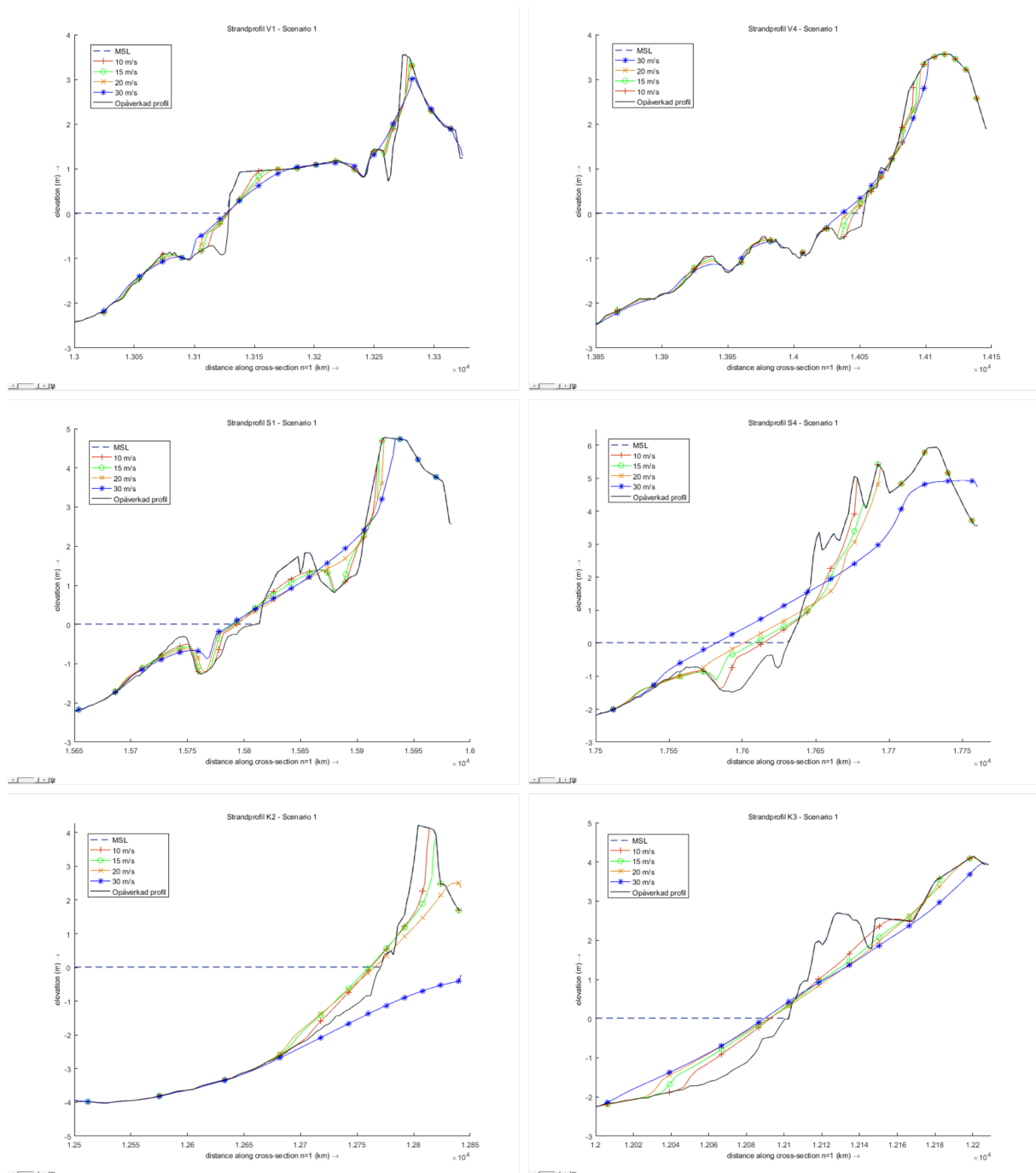
A.1.4. Scenario 4



Figur A.4: Resultande strandprofiler för V1, V4, K2, K3, S1 och S4 efter scenario 4. De färgade och markerade heldragna linjerna visar strandprofilens utformning efter de vågor som skapats av stormvindar med hastigheten 10 m/s (röd +), 15 m/s (grön O), 20 m/s (gul X) och 30 m/s (blå *).

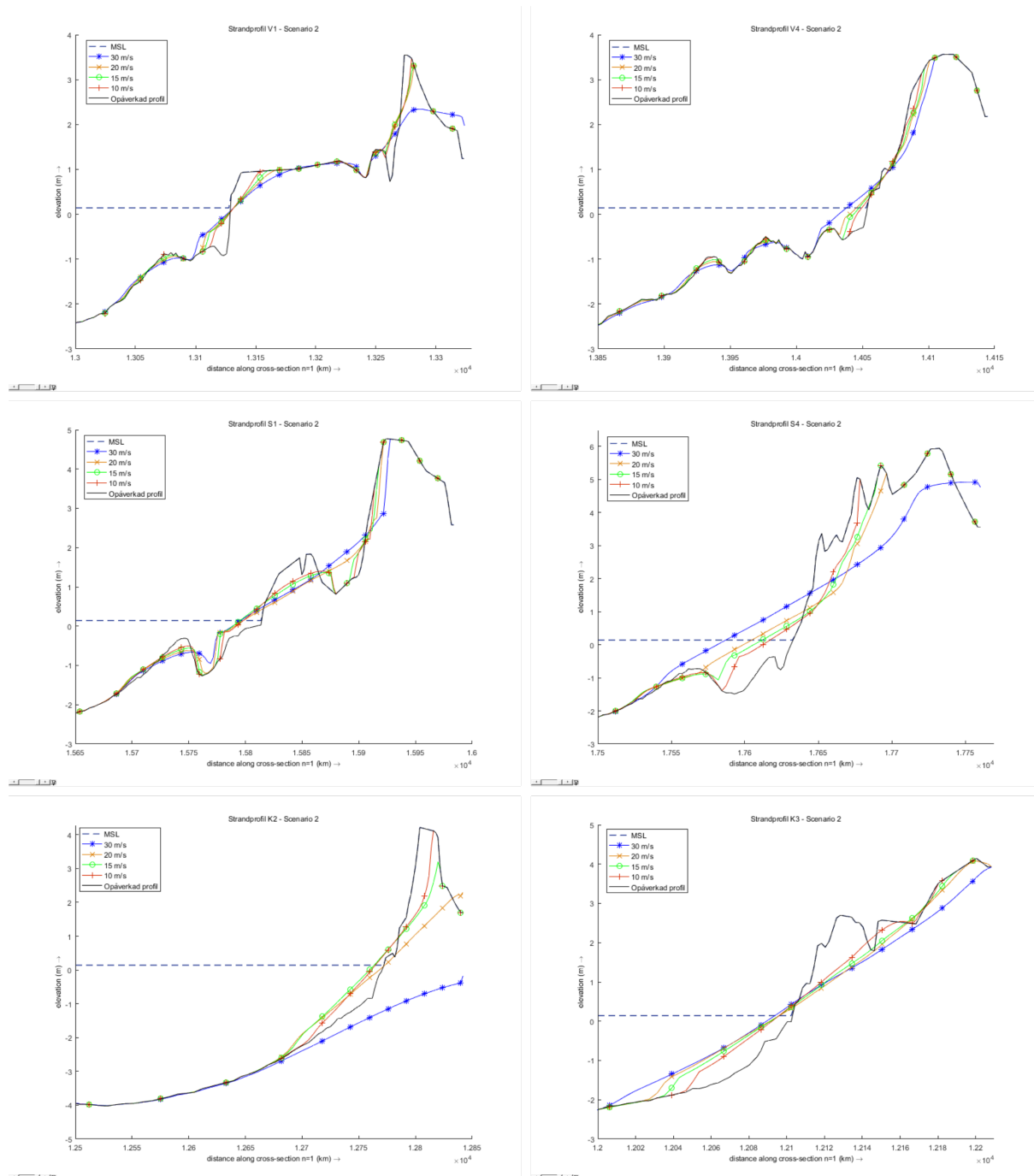
A.2. Resultat av simuleringar med de uppmätta strandprofilerna

A.2.1. Scenario 1



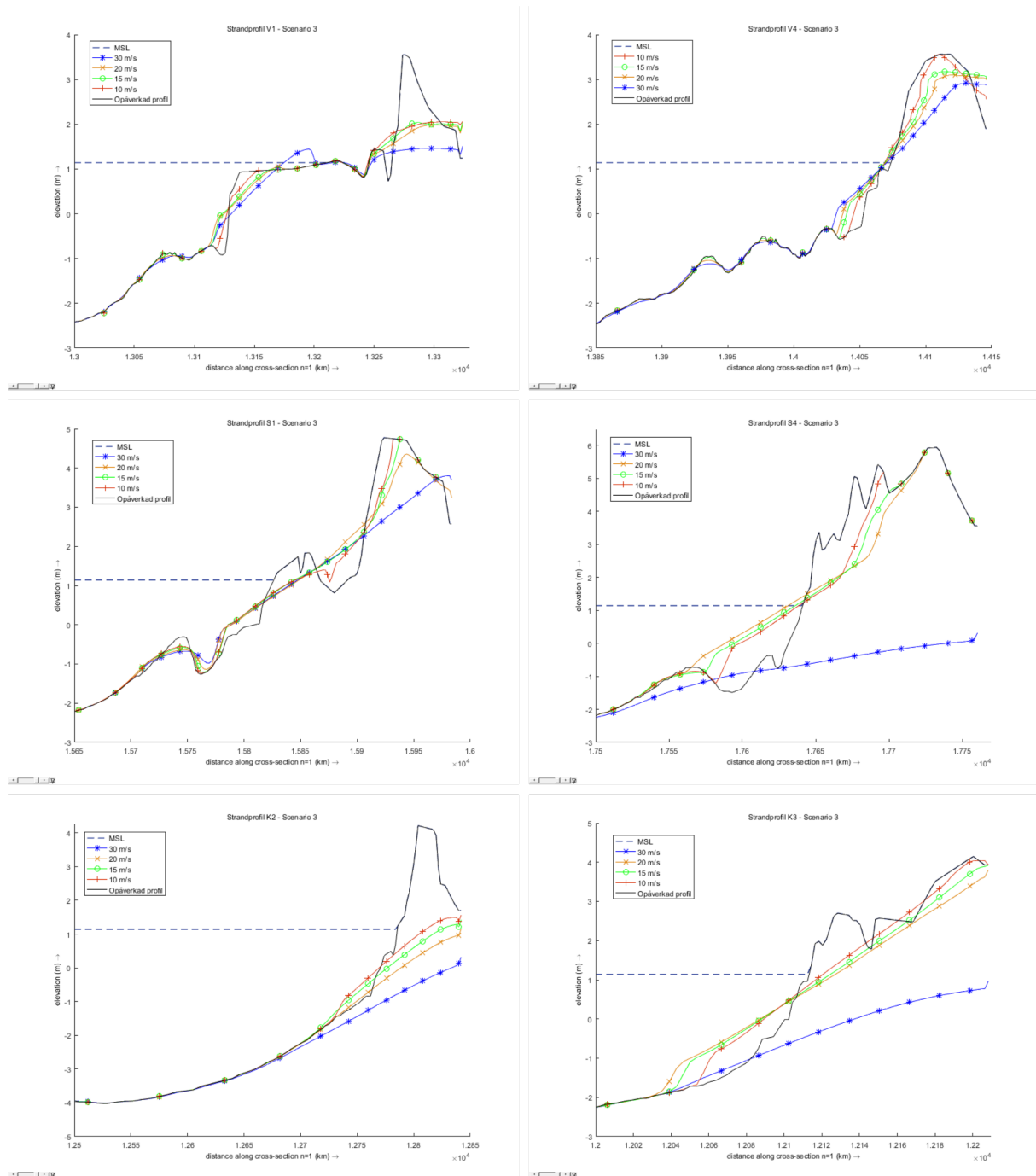
Figur A.5: Resultande strandprofiler för V1, V4, K2, K3, S1 och S4 efter scenario 1. De färgade och markerade heldragna linjerna visar strandprofilens utformning efter de vågor som skapats av stormvindar med hastigheten 10 m/s (röd +), 15 m/s (grön O), 20 m/s (gul X) och 30 m/s (blå *).

A.2.2. Scenario 2



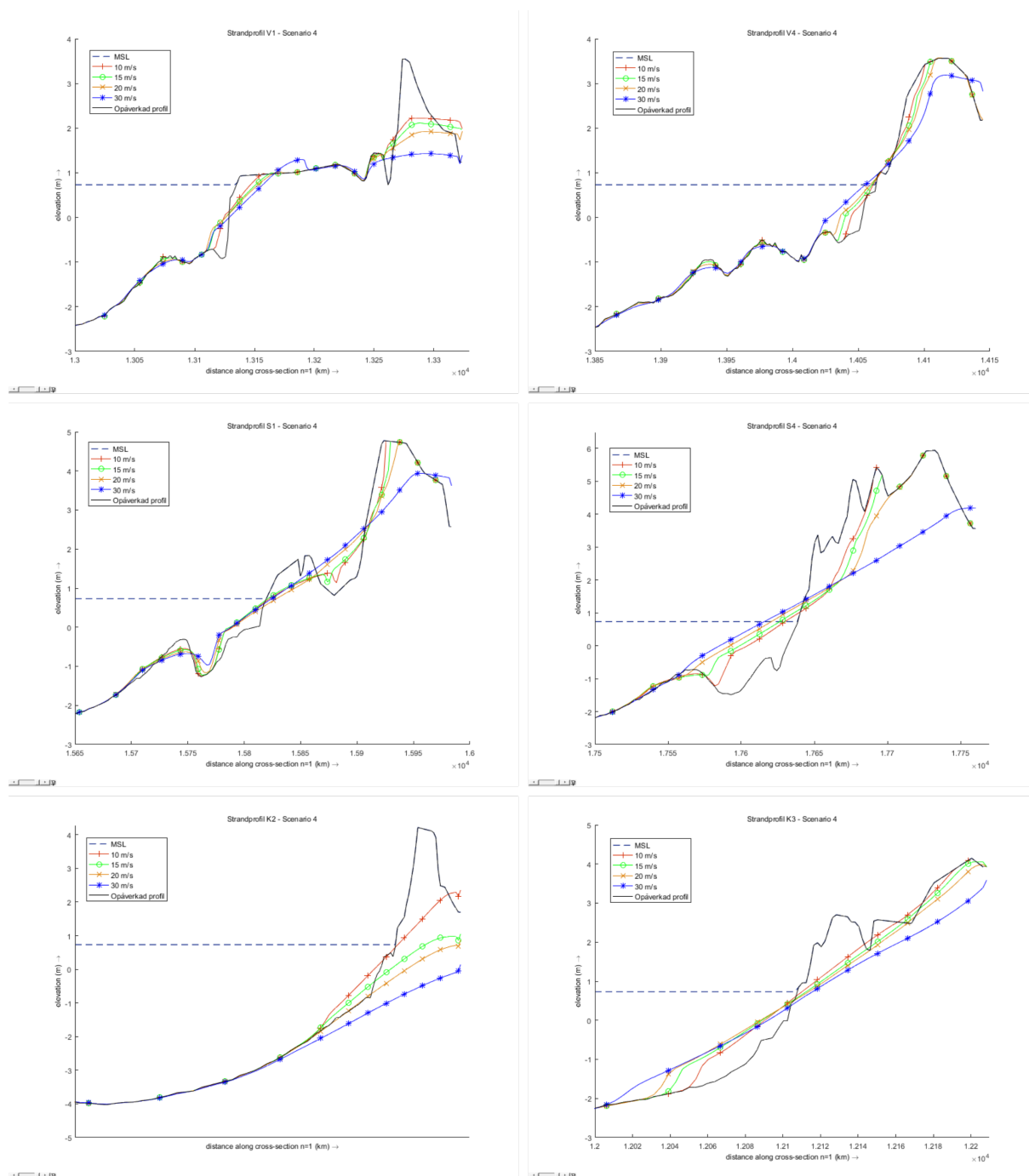
Figur A.6: Resultande strandprofiler för V1, V4, K2, K3, S1 och S4 efter scenario 2. De färgade och markerade heldragna linjerna visar strandprofilens utformning efter de vågor som skapats av stormvindar med hastigheten 10 m/s (röd +), 15 m/s (grön O), 20 m/s (gul X) och 30 m/s (blå *).

A.2.3. Scenario 3



Figur A.7: Resultande strandprofiler för V1, V4, K2, K3, S1 och S4 efter scenario 3. De färgade och markerade heldragna linjerna visar strandprofilens utformning efter de vågor som skapats av stormvindar med hastigheten 10 m/s (röd +), 15 m/s (grön O), 20 m/s (gul X) och 30 m/s (blå *).

A.2.4. Scenario 4



Figur A.8: Resultande strandprofiler för V1, V4, K2, K3, S1 och S4 efter scenario 4. De färgade och markerade heldragna linjerna visar strandprofilens utformning efter de vågor som skapats av stormvindar med hastigheten 10 m/s (röd +), 15 m/s (grön O), 20 m/s (gul X) och 30 m/s (blå *).

B

Exempel av en parameter-fil

För att kunna köra simuleringar i Xbeach krävs det att en parameter-fil finns närvarande. Här under följer parameter-filen för den motståndssimulering som utfördes på ett av Falsterbobuktens strandprofiler.

XBeach parameter settings input file

date: 20-Jun-2017 11:51:42

function: xb_write_params

Bed composition parameters

- D50 = 0.002000

Flow boundary condition parameters

- front = abs_1d (-1D-modell därav abs_1d)
- left = wall
- right = wall
- back = abs_1d
- ARC = 1
- order = 2

Flow parameters

- bedfriction = manning
- cf = 0.001000

General

- tidelen = 1501

Grid parameters

- depfile = bed.dep -Den använda batymetrin
- posdwn = -1
- nx = 1424 -Antal celler i rutnätet
- ny = 0
- alfa = 0
- vardx = 1
- xfile = x.grd -Batymetrins rutnät
- xori = 0
- yori =
- thetamin = -90
- thetamax = 90
- dtheta = 10

Model time

- tstop = 2592000

Morphology parameters

- morfac = 10 -Den morfologiska försnabbningsfaktorn
- morstart = 0
- wetslp = 0.100000
- dryslp = 0.660000

Physical constants

- rho = 1000
- depthscale = 1

Physical processes

- sedtrans = 1
- morphology = 1

Roller parameters

- roller = 1

Sediment transport parameters

- facua = 0.100000

Tide boundary conditions

- zs0file = tide.txt
- tideloc = 2

Wave boundary condition parameters

- instat = jons

Wave-spectrum boundary condition parameters

- bcfile = jonswap.txt
- random = 0
- rt = 1800
- dtbc = 1

Output variables

- ncfilename = S4_100årsvatten_30ms
- outputformat = netcdf
- tintg = 900
- tstart = 0
- nglobalvar = 5 -De valda utvärdena från simuleringen
- H
- zs
- u
- zb
- sedero

C

Uppmätning av strandprofiler

Alla mätningar gjordes under dagen den 31 mars 2017. Mätningarna gjordes av Axel och Mikael med hjälp av mätteknikern Patrik Björnsson från Vellinge kommun. Tekniken som användes var lånad av Vellinge kommun och var en CS20 fältdator tillsammans med en GS16 GNSS antenn (båda kan ses i figur C.1, båda från märket Leica).

De flesta profilerna är tagna utifrån hur området såg ut och har valts för att ge en så generell bild av stranden som möjligt. Några av profilerna är ommätningar av tidigare mätningar, gjorda vid två tillfällen av Sweco samt av Magnus Larsson och Hans Hansson, för att kunna se om man kan se någon förändring i av profilerna. Dessa profiler har utgått från deras startkoordinat bakom sanddynen för att sedan gå i riktning mot slutkoordinaten ute i vattnet. Det har även tagits sandprover vid tre platser för att studera kornstorleken, dessa prover är tagna i vattenbrynet mitt i strandprofilen och uppe på sanddynen. Proverna har sedan använts för att studera kornfördelningen vilket gjordes vid ett senare tillfälle på LTH.

Under dagen mättes 13 strandprofiler varav 5 av dessa på västra kusten, 4 vid Falsterbobukten och 4 vid Kämpingebukten. De uppmätta strandprofilerna kan finnas i figur C.2.

C.1. Falsterbobukten

Startade dagen vid Falsterbo Golfklubb där vi mätt in vår första profil S1. Denna inmätning gjordes av Patrik för att visa oss hur man använde verktyget sedan tog Axel över för punkterna i vattnet.

Första punkten togs bakom dynen precis i kanten av golfbanan och är sedan mätt ut till ett djup så att verktyget inte riskerade att bli blött. Små variationer längs med stranden är inte inmätta då dessa varierar väldigt längs med stranden och därför inte ger en bra representation av hur stranden ser ut generellt. Andra profilen S2 mättes in ca 300 m åt sydväst längs med stranden. Här var själva dynen lite lägre än vid den första mätningen men detta såg ut att vara en trend när man följde stranden västerut. Här startade vi mätningen ute i vattnet för att sen mäta in över stranden och dynen, även här var sista mätpunkten i kanten till golfbanan.

Profilerna S3 och S4 mättes i närheten av Havsbadet. Profilerna är väldigt lika med en hög bakre dyn med varierande växtlighet sedan går det en promenadstig i sänkan mellan den bakre och främre dynen, stigen är dock ej belagd utan enbart rensad från växtlighet. Den främre dynen är betydligt lägre än den bakre och slutar i en brant ner till strandplanet. Strandplanet är i sin tur väldigt städad och brett med en svag sluttning mot vattenbrynet. Det dominerande i dessa profiler är bredden på dynen samt att det även är mer utrymme bakom dynen med träd som står i sand.

C.2. Västra stranden

Vi började med att mäta profilen V1 där vi utgick efter start- och slutkoordinater från en tidigare profilmätning från Magnus Larsson och Hans Hansson. Vi parkerade vid Flommens golfklubb och gick därifrån ca 1 km åt söder längs stranden för att nå V1. Här var det ett långt och plant strandplan där höjden låg under 1 möh ända fram till dynfoten. Själva dynen var dock hög och bred. Största delen av stranden var täckt av en växtlighet som kan ses på bilderna.

V2 togs ca en 400 m längre söderut men var annars väldigt likt V1 bortsett från en högre sanddyn.

Profil V3 mättes strax norr om Flommens parkering, här fanns det badhytter uppe på dynen så mätningen fick ske mellan dessa. Även här var dynen täckt med växtlighet dock mycket mindre och strandplanet var nästan helt burtroligen till följd av att man rensar bort för att skapa en trevligare badstrand.

Där efter körde vi upp till Skanörs hamn för att mäta in två strandprofiler där den första var söder om flommen och utgick även denna från tidigare mätningars start- och slutkoordinater. Dynen vid profil V4 hade väldigt mycket växtlighet men strandplanet var väldigt rent vilket även det antagligen beror på att den utnyttjas mycket som badplats, det var även en tydlig nivåskillnad framme vid vattenbrynet.

Profilen V5 gjordes mellan flommen och hamnen, här fanns det många badhytter vilka påverkade dynens utformning samt växtligheten. Dynen var dock bred men väldigt varierande i höjd, även här var strandplanet väldigt plant och rent från växtlighet.

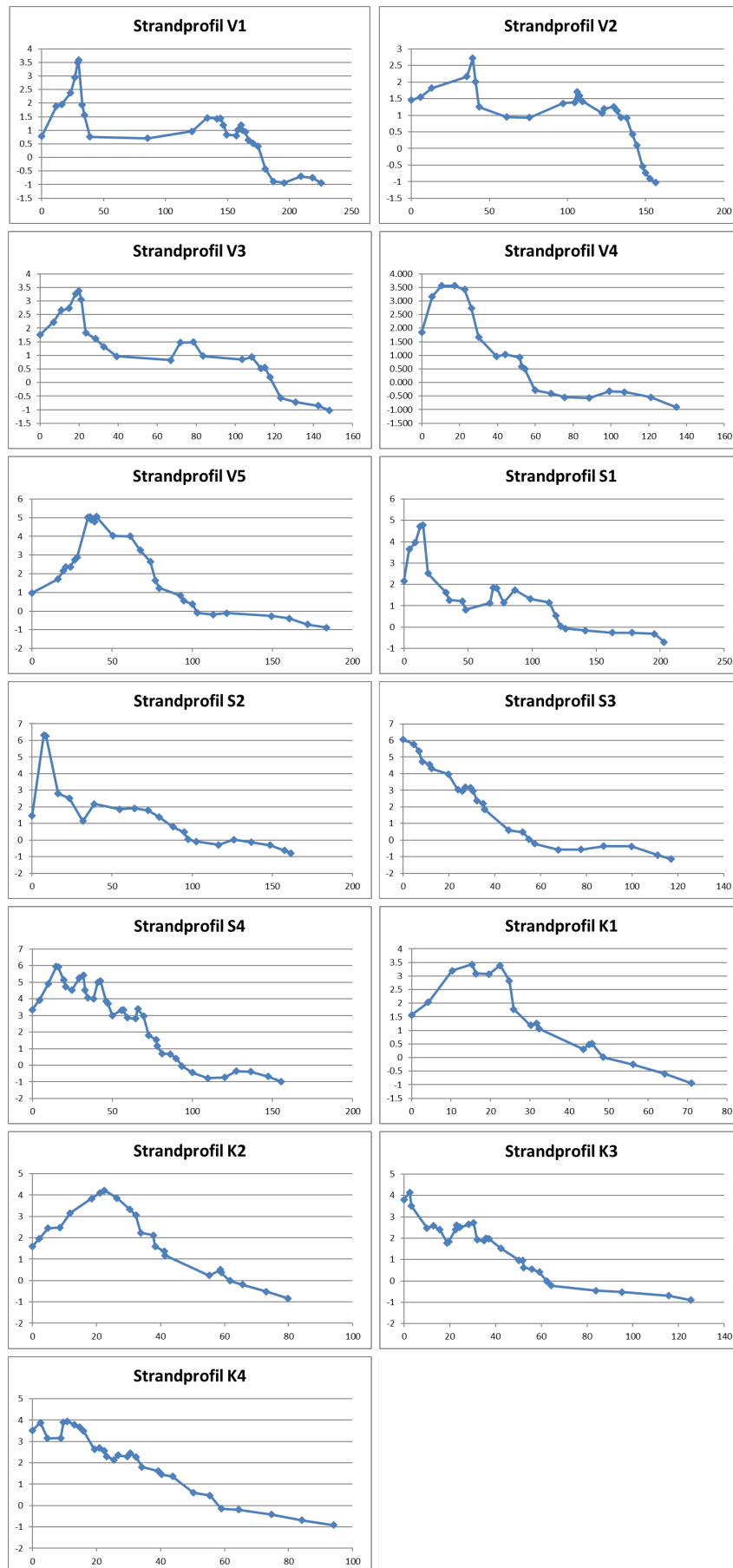
C.3. Kämpingebukten

Profilerna K3 och K4 gjordes längs med stranden öster om kanalen. K1 mättes in en 400 m öster om vågbrytaren och K2 ytterligare en 500 m bort. Profilerna var ganska lika dock skilde sig växtligheten åt där K1 hade rätt mycket tång längst strandplanet samt även snåriga buskar växte längst med dynkrönet. Profilen K2 var istället betydligt renare från växtlighet på strandplanet och hade en gräsbevuxen dyn.

Profilerna K1 och K2 gjordes väster om kanalens södrainlopp och utgick från Ljungskogens strandbad. Strandedynen var även här täckt av växtlighet men denna var helt borta från strandplanet bortsett från lite tång.



Figur C.1: Den fälldator och dess tillhörande antenn som användes för mätningarna gjorda den 31 mars 2017.



Figur C.2: De uppmätta strandprofilerna i meter. Beteckningen "V" innebär att profilen är uppmätt längs västra kusten av Falsterbonäset, "S" att profilen är mätt vid Falsterbobukten (söder om Falsterbonäset) och "K" att profilen är mätt vid Kämpingebukten.

