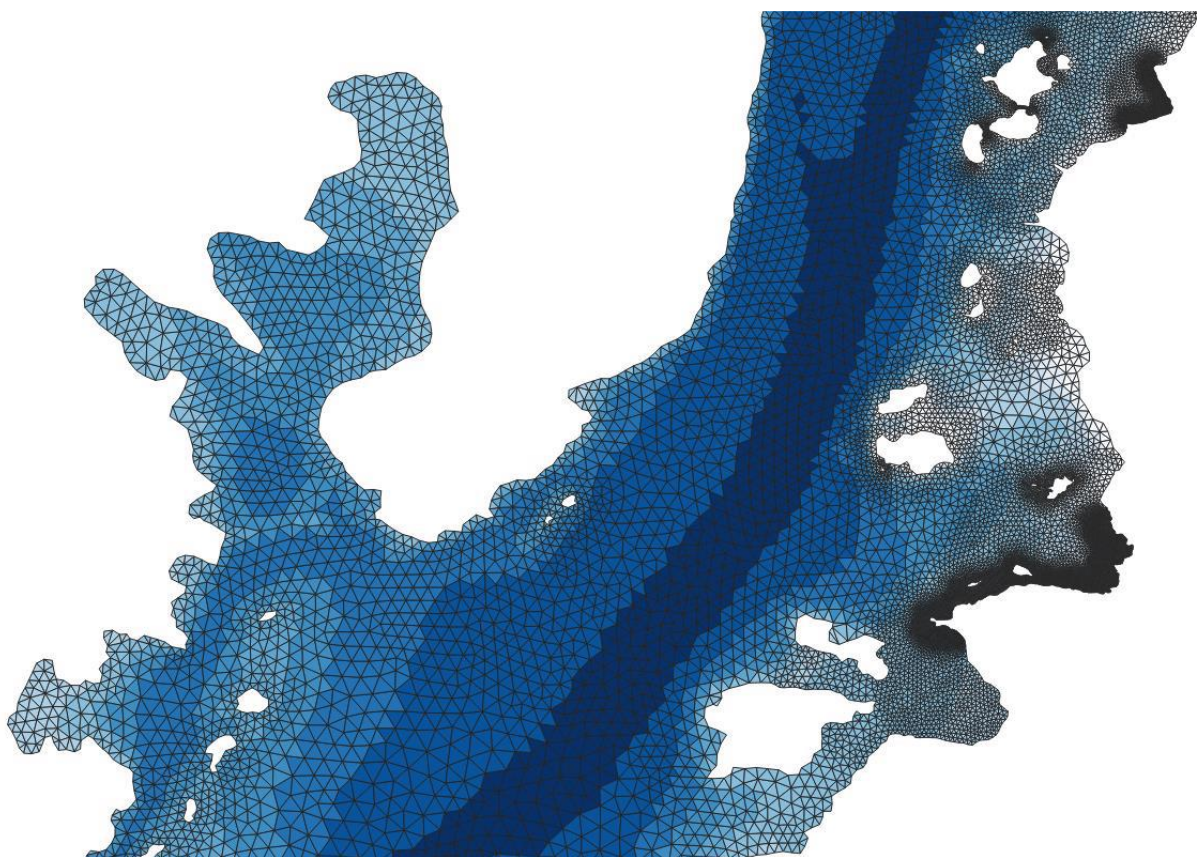


Hydrodynamisk modellering av vågor och strömmar

Modelldokumentation för återsimulering av
tidsperioden 2011–2022 i södra Bohuslän



Hydrodynamisk modellering av vågor och strömmar

Titel: Hydrodynamisk modellering av vågor och strömmar
Författare: Emanuel Schmidt, Sweco
Utgivningsår: 2024
Omslagsbild: Ett utklipp av beräkningsnätet för den hydrodynamiska modellen. Figuren visar hur upplösningen blir finare och finare in mot studieområdena. Kartans färg återspelar djupförhållandena där mörkare färg symboliserar ett större vattendjup.

Begreppslista

I denna rapport förekommer begrepp och terminologi som kan vara främmande för läsaren. Dessa begrepp förklaras i nedanstående lista.

Diffraktion

Fenomen som påverkar vågornas storlek och riktning. Diffraktion innebär transport av energi längs vågkammen vilket medför att vågen utbreder sig in i ett läområde bakom ett hinder (ö, rev, pir eller liknande).

Refraktion

Fenomen som påverkar vågors storlek och riktning. Refraktion innebär en förändring av vågens riktning och storlek p.g.a. förändrat vattendjup. När bottnar grundar upp leder refraction till att våghöjderna minskar och att vågorna slutligen faller in vinkelrätt mot kusten.

Kartesisk riktning

Att strömhastighet- och riktning definieras genom kartesisk riktning innebär att de är i vektorformat. Strömhastigheten uttrycks alltså x och y-koordinater i ett kartesiskt koordinatsystem. Exempelvis ger vektorn (1,1) en strömhastighet på $1,4 \text{ m/s}$ ($\sqrt{2}$) riktad åt nordväst.

Fasupplöst vågmodell

En fasupplöst vågmodell beräknar propageringen av varje enskild våg, där fasförskjutningar till följd av uppgrundning, reflektion, diffraction och liknande fenomen upplöses. Denna modell kräver hög rumslig upplösning och är inte framtagen för att simulera stora områden eller långa tidsserier.

Spektral vågmodell

En spektral vågmodell tar inte hänsyn till enskilda vågor, vågorna parametreras i stället till ett spektrum (kombination av vågriktning, -höjd och -period). En spektral vågmodell används ofta för att beskriv uppbyggnad och avklingning av vågor.

Signifikant våghöjd

Statistisk term som avser medelhöjden hos den högsta 1/3-delen av vågorna i en vågserie.

Bottenskjuvspänning

Bottenskjuvspänning är ett mått på de skjuvkrafter som verkar på botten till följd av vattenrörelser, vilka kan vara både strömmande vatten och orbitalrörelser från vågor. Inom kusthydrauliken används begreppet främst för att beskriva om det föreligger risk för erosion av bottenmaterialet och brukar benämnas τ .

Kritisk bottenskjuvspänning

Den bottenskjuvspänning som krävs för att åstadkomma resuspension brukar benämnas kritisk bottenskjuvspänning, τ_{cr} , och beror bland annat av sedimentets kornstorlek och densitet.

Innehåll

BEGREPPSLISTA	3
1. INLEDNING OCH SYFTE.....	6
2. MODELLUPPBYGGNAD	7
2.1 Geografisk utbredning	7
2.2 Batymetri	8
2.3 Randvillkor och drivdata	10
2.3.1 Vind.....	10
2.3.2 Vattenstånd.....	11
2.3.3 Vågor.....	12
2.3.4 Vattenföring.....	13
2.4 Simulerad tidsperiod	13
3. MODELLINSTÄLLNINGAR.....	14
3.1 Strömningsmodellering i Telemac2D	14
3.2 Vågmodellering i Tomawac.....	14
3.2.1 Diskretisering.....	14
3.2.2 Våguppbyggnad i områden med kort stryklängd	14
3.3 Kalibrering och validering	15
4. RESULTATPARAMETRAR	16
5. RESULTATBEARBETNING	17
5.1 Programvaran BlueKenue.....	17
5.2 Beräkning av bottenskjuvspänning	19
5.2.1 Ekvationer för beräkning av bottenskjuvspänning	19
5.2.2 Data för beräkning av bottenskjuvspänning	20
5.2.3 Kritisk bottenskjuvspänning	20
6. DISKUSSION	22
6.1 Tvådimensionell strömningsmodell	22
6.2 Spektral vågmodell	22
6.3 Indata	23
7. REFERENSER.....	23
BILAGA 1 – FÖRTECKNING AV MODELLFILER.....	24

1. Inledning och syfte

Inom ramen för EU-projektet *Manabas Coast* arbetar Länsstyrelsen i Västra Götaland tillsammans med SGI, Länsstyrelsen Skåne och flera internationella partners i Europa med att testa och utvärdera naturbaserade åtgärder mot stranderosion.

I pilotområdena Bärby (Stenungsund), Kyrkeby kile (Stenungsund) och Glose (Kungälv) planeras olika typer av åtgärder för att förhindra erosion av låglänta strandängar som upplevt ett stort erosionstryck det senaste decenniet. Åtgärderna innefattar bland annat uppbyggnad av slystaket, utfyllnad av grus- och stenrevlar, förstärkning av hövder¹, plantering av ålgräs och anläggande av blåmusselbankar.

För att optimera åtgärdernas kusttekniska funktioner har Sweco på uppdrag av Länsstyrelsen i Västra Götaland upprättat en hydrodynamisk modell över det berörda området. Modellen syftar till att beskriva bland annat strömning och vågklimat i de grunda vikarna. Data från modellen har använts vidare i fördjupade studier i de olika intresseområdena, och beskrivs i tre plats-specifika PM.

Denna rapport syftar till att beskriva den hydrodynamiska modellens uppbyggnad, drivdata, modellinställningar och resultatfilernas uppbyggnad. Vidare redovisas även hur resultaten kan användas för att beräkna bottenkjuvspänning till följd av vågor och strömmar, samt hur dessa resultat kan tolkas.

¹ Våg- eller strömbrytare, ofta vinkelräta mot stranden. Hövder är avsedda att förändra sedimentationsmönster och är en vanlig kustskydds metod mot erosion.

2. Modelluppbyggnad

Den hydrodynamiska modellen har upprättats i programvaran Telemac.

Telemac är en uppsättning open source-programvaror för numerisk simulering av hydrodynamik, sedimenttransport och vattenkvalitet. I Telemac-systemet finns bland annat både strömningsmodeller och vågmodeller. De delar av Telemac-systemet som använts i föreliggande projekt är Telemac2D (strömningsmodell) och Tomawac (spektral vågmodell).

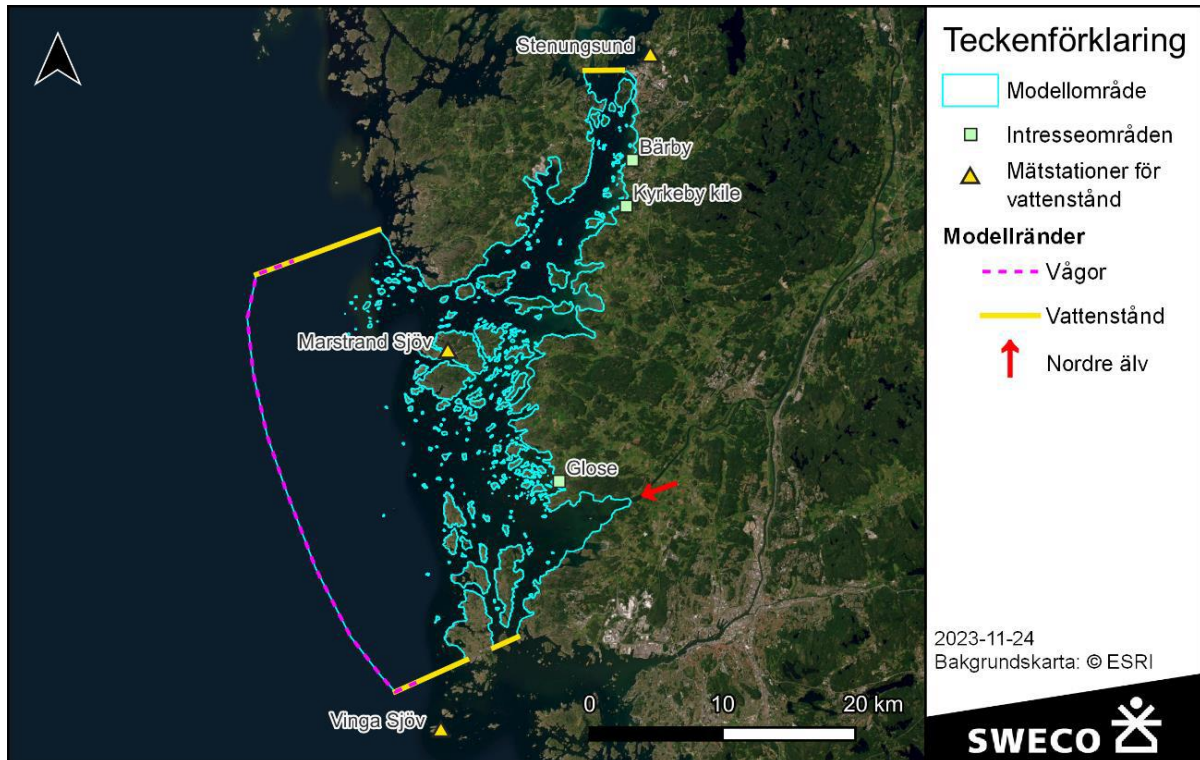
Telemac2D är en tvådimensionell strömningsmodell som använder Saint-Venant ekvationerna för att simulera vattenrörelser. I en tvådimensionell modell beräknas alla parametrar som genomsnitt över vattendjupet och ingen information om exempelvis skiktning skapas.

Vågklimatet utgörs av en komplex blandning av olika våghöjder, -längder och -riktningar, ett vågspektrum. Att göra beräkningar på samtliga vågor i detta spektrum blir beräkningsmässigt krävande. Vid vågmodellering av stora områden och långa tidsserier används därför ofta så kallade spektrala vågmodeller. Spektrala vågmodeller gör alltså beräkningar på ett statistiskt definierat vågspektrum i stället för att beräkna varje enskild vågrörelse.

I detta projekt har den spektrala vågmodellen Tomawac använts kopplad med Telemac2D, detta för att även kunna ta hänsyn till växelverkan mellan strömmar och vågor.

2.1 Geografisk utbredning

Det geografiska område som modellen innefattar presenteras i Figur 1. Kartan visar även vilka öar som inkluderats i modellen, och var förenklingar av landskapet gjorts. Modellen har tre ränder för vattenstånd; vid Stenungssund, norr om Marstrandsfjorden, samt omkring Hönö i söder. Längs modellens västra sträckning finns en öppen rand genom vilken djupvattenvågor kan röra sig in mot kusten. I kartan går det även att utläsa placeringen av de tre intresseområdena (Bärby, Kyrkeby kile och Glose), samt placeringen av de mätstationer för vattenstånd som presenteras senare i denna rapport.



Figur 1. Beskrivning av modellens tekniska uppbyggnad samt dess geografiska utbredning.

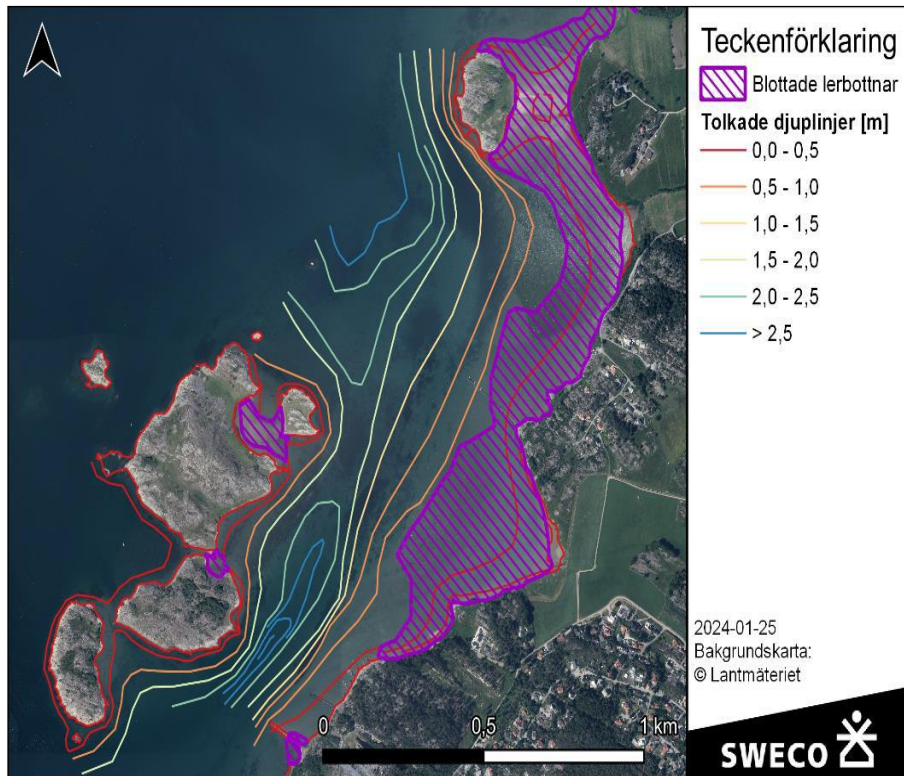
2.2 Batymetri

Modellens djupinformation har baserats på ett antal olika underlag, men utgörs huvudsakligen av digitaliserade sjökort. Djupkonturer i sjökorten har använts för att interpolera fram en heltäckande batymetri.

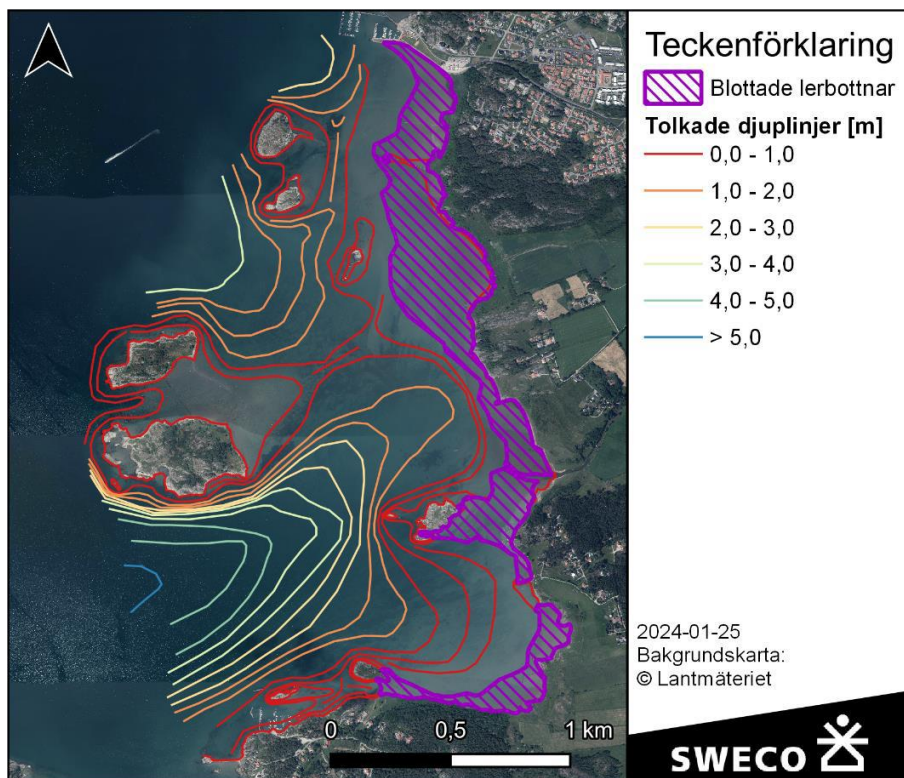
I de tre intresseområdena, där modellens upplösning är särskilt hög, har heltäckande batymetrisk information tagits fram genom interpolation av underlag från:

- Kartlager över naturtypen *Blottade lerbottnar*, vilka bedömts ha ett djup mindre än 50 cm.
- Digitaliserade sjökort från Sjöfartsverket.
- Kvalitativa bedömningar av bottendjup utifrån flyg- och drönarfotografi.

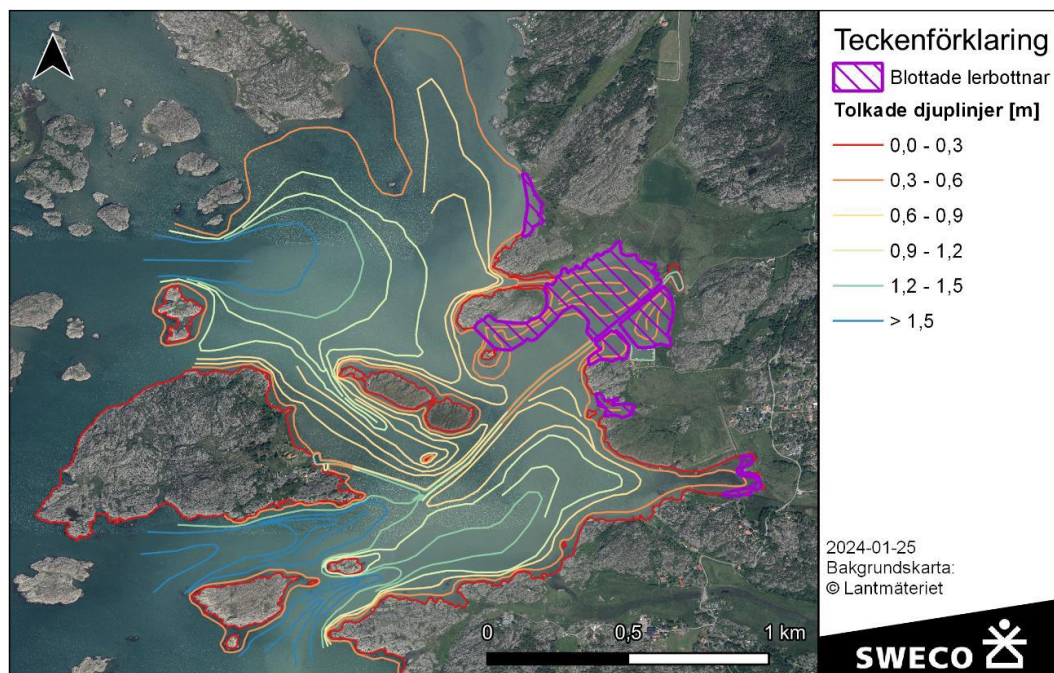
I Figur 2 - Figur 4 presenteras djupdata och tillhörande kartlager som nyttjats vid bedömning för samtliga tre intresseområden. I figurerna visas även de tolkade djuplinjer som ritats ut och som använts för att interpolera fram en heltäckande djupdata.



Figur 2. Tillgänglig djupinformation, tillsammans med de tolkade djuplinjer som använts vid framtagandet av heltäckande batymetri i Bärby.



Figur 3. Tillgänglig djupinformation, tillsammans med de tolkade djuplinjer som använts vid framtagandet av heltäckande batymetri i Kyrkeby kile.



Figur 4. Tillgänglig djupinformation, tillsammans med de tolkade djuplinjer som använts vid framtagandet av heltäckande batymetri i Glose.

2.3 Randvillkor och drivdata

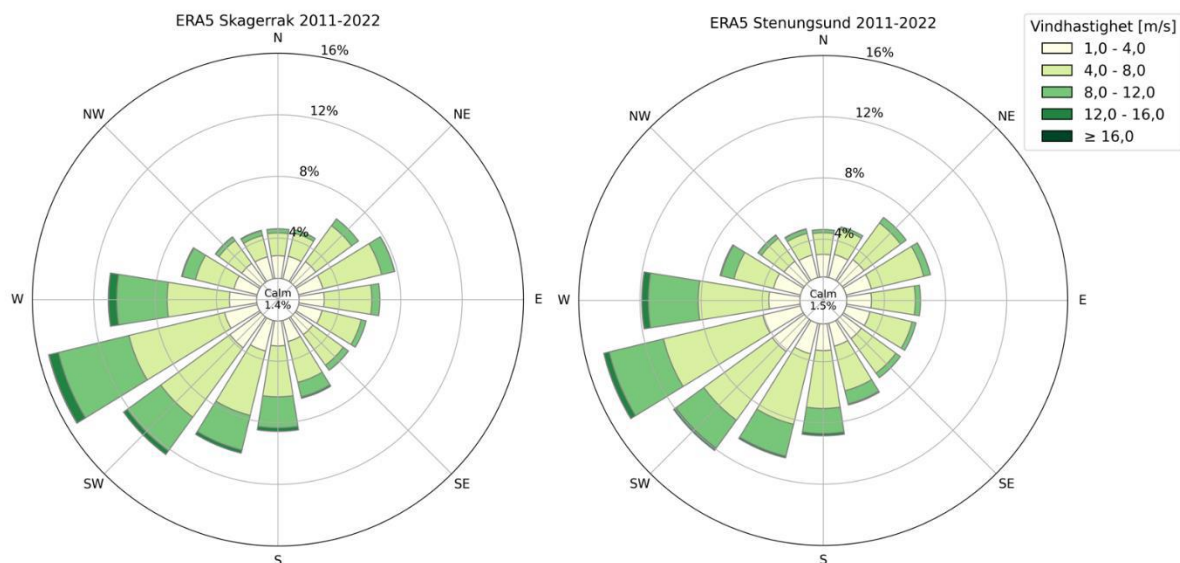
I följande underkapitel presenteras modellens randvillkor och de drivdata som ligger till grund för utförda simuleringar. Denna drivdata utgörs huvudsakligen av tidsvarierande vindar, vattenstånd och vågor.

2.3.1 Vind

Vinden har en central betydelse i föreliggande studie då vindeffekter ger upphov till vinduppstuvning (lokal snedställning av vattenytan), orsakar vindinducerad strömning och samtidigt genererar vågor inom modellområdet.

Tids- och rumsvarierande vind har hämtats från datasetet ERA5. ERA5 är ett dataset framtaget genom historisk återsimulering av klimatet. Datasetet omfattar bland annat variabler som atmosfärstemperatur, lufttryck, nederbörd och vindar. Modellen utvecklades av European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) och är baserad på en kombination av observationer och modellsimuleringar. ERA5 är en av de mest omfattande och högupplösta dataseten av sitt slag, och används ofta för forskning inom meteorologi, klimat och miljö (Hersbach et. al, 2023).

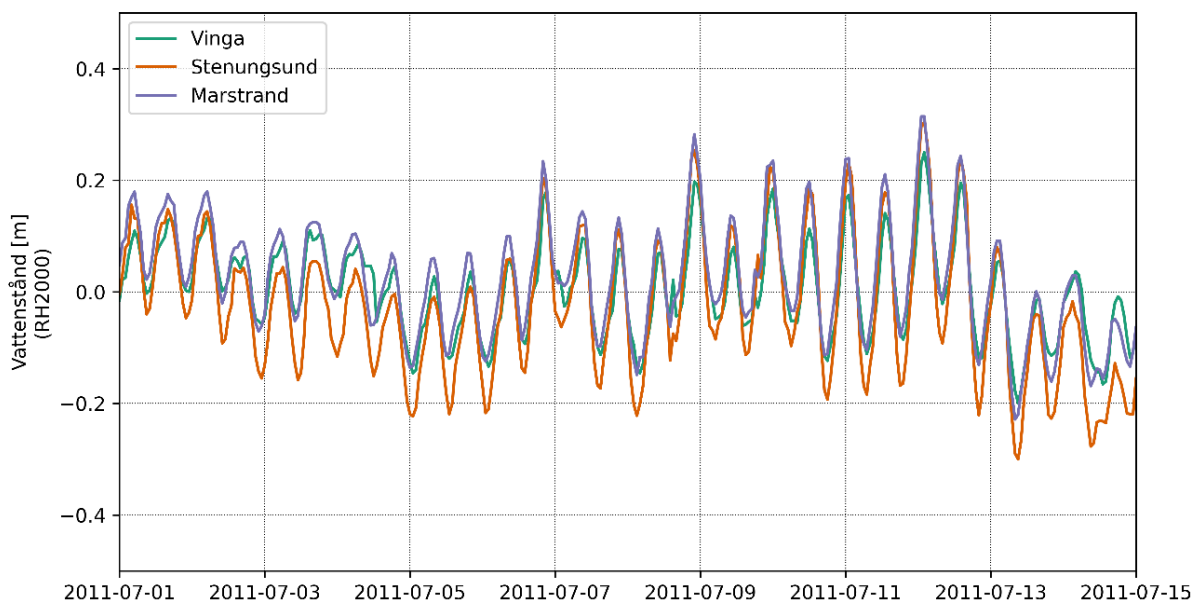
I Figur 5 presenteras vinddata från Skagerrak och Stenungssund för perioden 2011–2022 i form av vindrosor. Genom att nyttja flera datapunkter inom intresseområdet har ett vindfält interpolerats fram. Vindhastigheten varierar således inom intresseområdet, både i tid- och rum och är starkare i ytterskärgården än i innerskärgården till följd av friktionseffekter av topografien.



Figur 5. Vindrosor för Skagerrak och Stenungsund för perioden 2011–2022. Data är hämtad från ERA5.

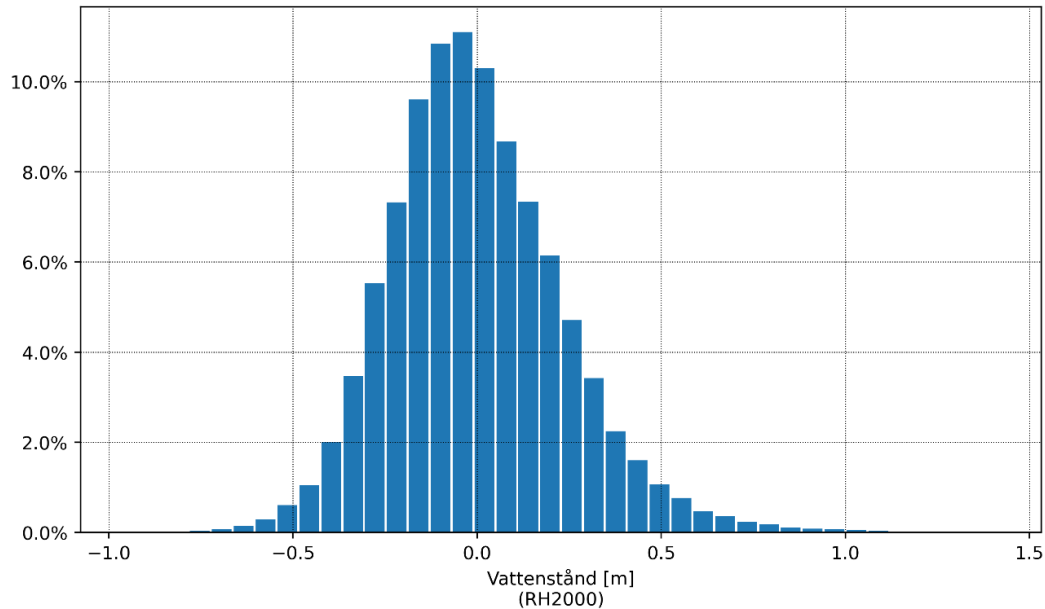
2.3.2 Vattenstånd

Tidsserier av vattenstånd har hämtats från SMHI:s tre stationer vid Vinga, Stenungsund och Marstrand. Från dessa stationer finns timupplösta vattenståndsdata under hela den simulerade perioden. Stationernas geografiska läge redovisas i Figur 1, där även vattenståndsranderna (gula linjer) redovisas. I Figur 6 visas ett exempel på vattenståndsvariationen vid de inkluderade stationerna under en tvåveckorsperiod i 2011.



Figur 6. Vattenstånd i de tre använda mätstationerna, skillnaderna mellan vattenstånden vid de olika stationerna samt deras tidsförskjutning i förhållande till varandra bidrar till att driva vattenrörelserna i modellområdet. Diagrammet visar en tvåveckorsperiod.

Vattenståndsdata från Stenungssund för den simulerade perioden redovisas även som ett histogram i Figur 7. Av figuren framgår att simulerad tidsperiod innefattar både höga (>+1,0 meter) och låga (<-0,5 meter) vattenstånd, men att vattenståndet i merparten av tiden varierar med ett par decimeter kring medelvattenytan.

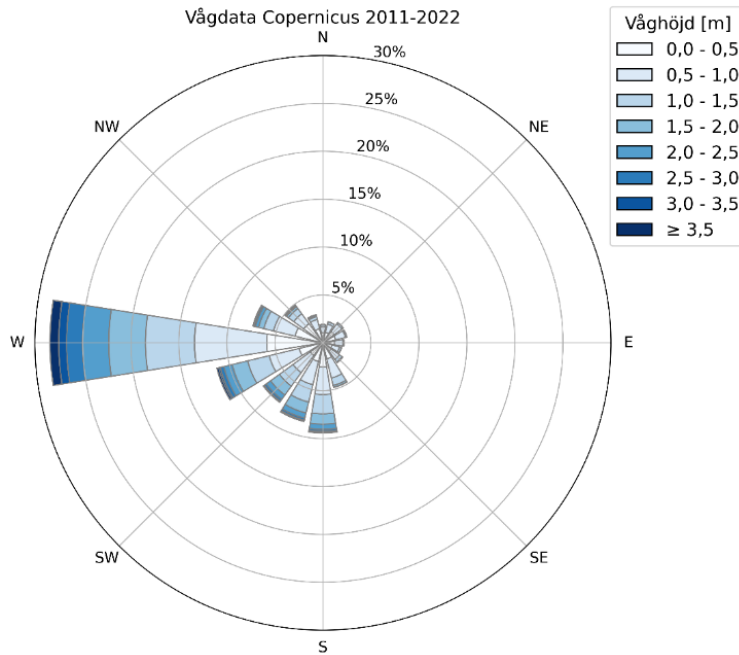


Figur 7. Histogram över vattenstånd för Stenungssund (för hela perioden 2011–2022).

2.3.3 Vågor

För att inkludera utsjövågor i kustmodellen har tidsserier av vågklimatet hämtats från dataserien *Baltic Sea Wave Hindcast* från Copernicus Marine Environment Monitoring Service. Dataserien utgör en återsimulering av vågklimatet baserat på vind från ERA5 (se kapitel 2.3.1), vågspektrum från Nordsjön och istäckningskartor från SMHI (CMEMS, 2023). Vågklimatet har hämtats från en punkt centralt på den vågrand längs modellområdets västra gräns som ses i Figur 1.

I Figur 8 visas vågdata för tidsperioden 2011–2022 i form av en vågros, som visar förhärskande riktningar och våghöjder under hela tidsperioden.



Figur 8. Vågklimat från CMEMS (2023) från modellens öppna havsrand.
Figuren visar signifikant våghöjd.

2.3.4 Vattenföring

Endast ett vattendrag, Nordre älv, har inkluderats i strömningsmodellen. Nordre älv bedöms vara det enda vattendrag i området som har en betydande påverkan på strömningsmönstren, och mindre vattendrag har därmed inte inkluderats. Timupplöst data över vattenföring har hämtats från SMHI:s hydrologiska modell S-HYPE.

2.4 Simulerad tidsperiod

Den kopplade våg- och strömningsmodellen (Telemac2D-Tomawac) har använts för att återsimulera en tidsperiod på totalt fem år, juli 2011 – juli 2016.

Utöver denna tidsperiod har ytterligare 6 år, augusti 2016 – juli 2021 vågmodellering utförts med Tomawac.

3. Modellinställningar

I nedanstående kapitel redovisas kortfattat val av modellinställningar i det fall att de avviker från de rekommenderade grundinställningarna i programvaran. Vid upprättande av hydrodynamiska modeller behöver användaren alltid göra val och antaganden som passar det enskilda intresseområdet.

Tillsammans med denna rapport levereras körfiler för de modeller som utvecklats. Dessa filer kan tillsammans med användarmanualer läsas för att fördjupa bilden av de antaganden, begränsningar och möjligheter som finns med modellerna.

3.1 Strömningsmodellering i Telemac2D

- Under hela den simulerade tidsperioden har vattnet ansatts en konstant densitet. Inga densitetsskillnader uppstår därmed i modellen.
- Vid drivning av strömningsmodeller med vattenstånd och vindar uppstår ofta problem med orealistiskt höga strömhastigheter kring randen. För att på ett realistiskt sätt återskapa strömningsförhållanden har en lokal friktionsförlust introducerats vid vattennivå-ränderna. Detta antagande har ingen inverkan på strömhastigheterna i intresseområdena.

3.2 Vågmodellering i Tomawac

3.2.1 Diskretisering

Vågmodellens riktningar har diskretiserats i totalt 24 olika riktningar, vilket ger intervall av 15° grader.

Vågperioden har diskretiserats i 20 perioder mellan 1,48 – 10,00 sekunder.

3.2.2 Våguppbyggnad i områden med kort stryklängd

I en studie av Delft Hydraulics från 2001 beskrivs styrkor och svagheter med olika empiriska formler och spektrala vågmodeller under förhållanden med begränsade stryklängder. I studien konstateras bland annat att energiförluster genom "white capping" (sv. förluster genom bildandet av "vita gäss") kan överskattas i områden med korta stryklängder och hög vågbranthet (Delft Hydraulics, 2001).

Andra studier av spektrala vågmodellens prestanda i områden med korta stryklängder och starka vindar har visat att på ett behov av att begränsa våghöjdernas tillväxt med en metodik som avviker från ursprungliga WAM4- modellen. Denna modifikation finns även med i ECMWF:s² vågmodell sedan 2019 och har använts i föreliggande projekt för att i bättre utsträckning beskriva vågtillväxten i intresseområdet (Hersbach & Janssen, 1999) (ECMWF, 2019).

Modifikationen beskrivs i körfilerna genom nyckelordet:

WAVE GROWTH LIMITER = 2

3.3 Kalibrering och validering

Inom studieområdet saknas mätningar över både strömmar och vågor, och ingen kalibrering eller validering av modellerade värden har kunnat utföras.

Vågmodellens prestanda har undersökts genom en serie av känslighetsanalyser för att kunna avgöra huruvida modellinställningarna får stort utslag på simulerade våghöjder. Som nämnt i ovanstående kapitel har modellens våguppgögnad därefter justerats för att i viss mån anpassas till områdets förutsättningar. Som riktmärke för våghöjdsberäkningar har empiriska samband enligt Wilson (1965) nyttjats, då den underliggande data utgörs av våghöjder från områden med begränsad stryklängd.

² European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

4. Resultatparametrar

Resultatfilerna från modelleringen levereras i ett TELEMAC-format med ändelsen **.sif** och innehåller en mängd olika modellparametrar. Samtliga modellparametrar beskrivs i följande tabeller, där Tabell 1 beskriver parametrar från strömningsmodellen och Tabell 2 från vågmodellen. Resultatfilerna är indelade årsvis för att förenkla hanteringen av stora filer.

Tabell 1. Modellparametrar för strömningsmodellen.

Modellparameter	Enhet	Beskrivning
VELOCITY UV	m/s	Strömhastighet och -riktning. Medelvärde över djup. (kartesisk riktning, vektorformat)
WATER DEPTH	m	Vattendjup.
FREE SURFACE	m	Vattenytans läge i RH2000.
BOTTOM	m	Havsbottens läge i RH2000.
SCALAR FLOWRATE	m ² /s	Vattenflöde per horisontell meter. Beräknad enligt: vattendjup*sqrt(u ² +v ²) Kan användas för att beräkna flöde över givna tvärsnitt.
WIND ALONG XY	m/s	Vindhastighet och -riktning. (kartesisk riktning)
COURANT NUMBER	-	Couranttal (även känt som CFL-tal)

Tabell 2. Modellparametrar för vågmodellen.

Modellparameter	Enhet	Beskrivning
WAVE HEIGHT HMO	m	Signifikant våghöjd.
MEAN DIRECTION	°	Medelvågriktning, riktningen är definierad som "rör sig mot".
BOTTOM	m	Havsbottens läge i RH2000
WATER DEPTH	m	Vattendjup.
VELOCITY UV	m/s	Strömhastighet och -riktning, kommer från strömningsmodellen. Medelvärde över djup. (kartesisk riktning)
WIND ALONG XY	m/s	Vindhastighet och -riktning. (kartesisk riktning)
FORCE FXY	m/s ²	Vågdrivkraft på strömmar. (kartesisk riktning)
MEAN PERIOD TMOY	s	Medelvågperiod
BREAKING RAT	-	Andel av vågor som bryter.

5. Resultatbearbetning

5.1 Programvaran BlueKenue

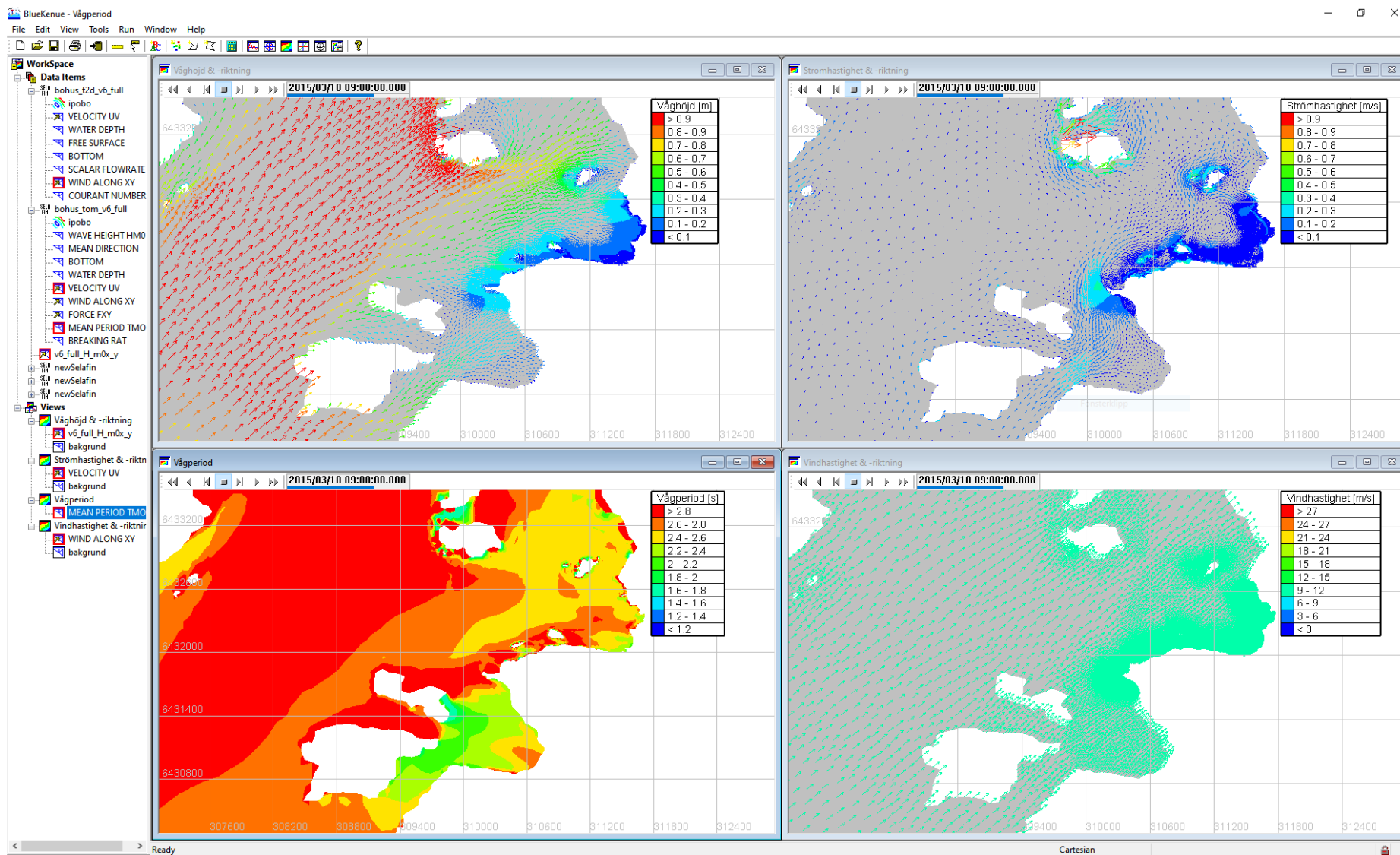
För att visualisera och bearbeta de modellresultat som levereras används med fördel programvaran BlueKenue™. BlueKenue är ett så kallat *Open access*-program som kan användas för för- och efterbearbetning av data till eller från TELEMAC-simuleringar. Programmet kan laddas ned kostnadsfritt³.

I programmet kan användaren exempelvis:

- Visualisera beräkningsnät
- Visualisera de modellparametrar som beskrivs i Tabell 1 och Tabell 2.
- Detaljstudera de hydrauliska förutsättningarna vid olika tidpunkter i dataserien, t.ex. stormar som haft betydande effekt.
- Ta ut tidsserier av data i specifika punkter av särskilt intresse.
- Göra statistiska analyser av data, både över stora geografiska områden och i specifika punkter av särskilt intresse.

³<https://nrc.canada.ca/en/research-development/products-services/software-applications/blue-kenuetm-software-tool-hydraulic-modellers>

Hydrodynamisk modellering av vågor och strömmar



Figur 9. Exempel på visualisering av modelldata i BlueKenue från tiden 2015-03-10 09:00.

5.2 Beräkning av bottenskjuvspänning

Föreliggande utredning syftar till att tillskapa underlag för optimering av åtgärder i kustzonen. En betydande aspekt vid utformning av dessa åtgärder är att utreda vilka krafter som verkar på bottenarna och hur förutsättningarna för resuspension av bottensediment varierar inom studieområdet. För att fördjupa denna kunskap har beräkningar av bottenskjuvspänning utförts baserat på modellresultaten.

Bottenskjuvspänning är ett mått på de skjuvkrafter som verkar på botten till följd av vattenrörelser, vilka kan vara både strömmande vatten och orbitalrörelser från vågor. Inom kusthydrauliken används begreppet främst för att beskriva om det föreligger risk för erosion av bottenmaterialet och brukar benämnas τ .

Storleksordningen av bottenskjuvspänningen beror på vattnets hastighet, flödesdjup och bottenens råhet, våghöjd och vågperiod. Bottenråheten kan definieras både genom ytfriktion från bottenmaterialet (korn) och ytformer på botten (till exempel ripplar och liknande). Generellt sett används endast ytfriktion vid beräkning av risk för erosion av bottenmaterialet.

5.2.1 Ekvationer för beräkning av bottenskjuvspänning

I föreliggande studie har bottenskjuvspänningen från strömmande vatten beräknats utifrån metodik beskriven i CHC (2006) och för vågor har metodik beskriven i (Camenen & Larson, 2007) använts. Den ströminducerade bottenskjuvspänningen, τ_{cs} , beräknas utifrån följande samband:

$$\tau_{cs} = (u_m^2 \rho_w) / C' s^2$$

Där u_m betecknar djupmedelströmshastighet vilket hämtas från den hydrodynamiska modellen och ρ_w är vattnets densitet. C' betecknar dimensionslös Chézy-friktionskoefficient⁴ som beror av bottenens råhet och därigenom sedimentets kornstorlek samt av vattendjupet.

Den våginducerade bottenskjuvspänningen, τ_{ws} , beräknas utifrån följande samband:

$$\tau_{ws} = (\rho_w f_{ws} u_0^2) / 2$$

Där ρ_w är vattnets densitet, u_0 betecknar den maximala orbitalhastigheten och f_{ws} är en friktionsfaktor vilken har beräknats enligt metoden i Swart (1974):

$$f_{ws} = \min \left\{ \exp \left[-5,977 + 5,213 \cdot \left(\frac{u_0 \cdot T}{k_s} \right)^{-0,194} \right], 0,3 \right\}$$

⁴Denna kan beräknas på olika sätt, några exempel framgår i PSED manualen sid 8.

Där T betecknar vågperioden och k_s betecknar vågrelaterad bottenråhet, vilken har satts till D^{50} hos sedimentet, vilket motsvarar en kornstorlek av 0,063 mm.

För en kombination av strömmar och vågrörelser beräknas den kombinerade bottenskjuvspänningen till följd ytfriktion genom följande samband:

$$\tau_{cw,max} = \sqrt{\tau_{cs}^2 + \tau_{ws}^2 + 2\tau_{cs}\tau_{ws}|\cos \varphi|}$$

Där φ betecknar vinkeln mellan strömriktning och vågriktning.

5.2.2 Data för beräkning av bottenskjuvspänning

Bottenskjuvspänningen har beräknats för den totala tidsperiod av 5 år (2011-07-01 – 2016-08-01) där det finns samtida data över strömmar och vågor.

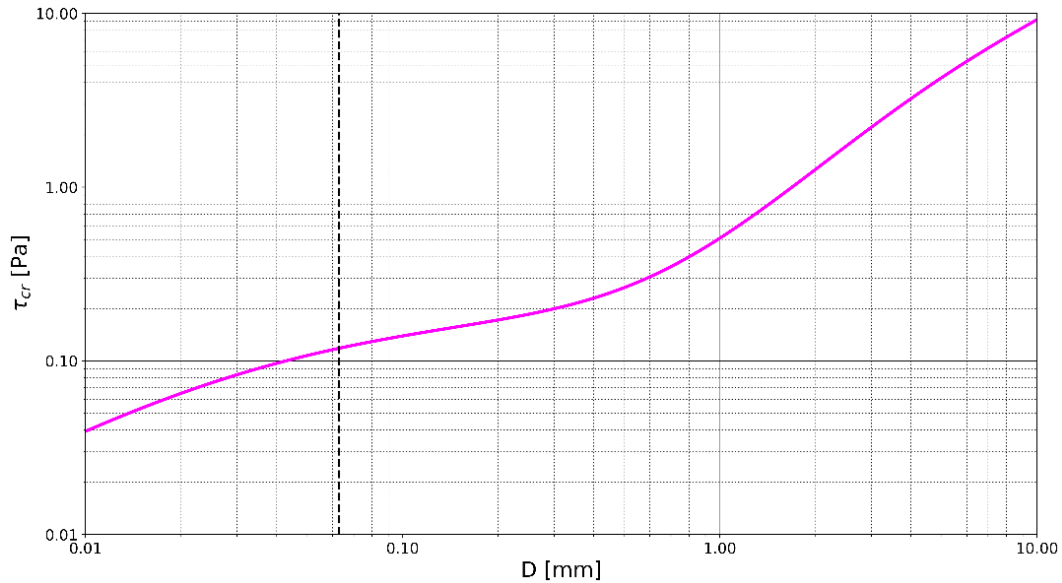
Bottenskjuvspänningen har beräknats för kornstorleken 0,063 mm, vilket motsvarar gränsen för definitionen mellan sand och silt. Kornstorleken varierar inom studieområdet men denna kornstorlek har tagits fram kvalitativt baserat på sedimentprovtagning i Bärby, Glose och Kyrkeby kile.

5.2.3 Kritisk bottenskjuvspänning

Med ökande bottenskjuvspänning ökar krafterna på botten och möjligheterna för resuspension av sediment. Den bottenskjuvspänning som krävs för att åstadkomma resuspension brukar benämnas kritisk bottenskjuvspänning, τ_{cr} , och beror bland annat av sedimentets kornstorlek och densitet. En av de mest relevanta studierna över kritisk bottenskjuvspänning är *Threshold of Sediment Motion in Coastal Environments* av Soulsby & Whitehouse (1997). Studien föreslår ett analytiskt samband för att beräkning kritisk bottenskjuvspänning baserat på sedimentets kornstorlek till följd av såväl strömmar som vågor.

I Figur 10 redovisas sambandet mellan kornstorlek och kritisk bottenskjuvspänning givet följande:

- Tyngdacceleration $g = 9,81 \text{ m}^2/\text{s}$
- Vattnets kinematiska viskositet, $\nu = 1,2 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
- Sedimentets relativa densitet = 2,65



Figur 10 Kritisk bottenskjuvspänning, enligt Soulsby & Whitehouse (1997).

Som nämnt i kapitel 5.2.1 beror bottenskjuvspänningen av bottenens råhet, och därigenom kornstorleken. Vid beräkning av dessa krafter behöver således en given kornstorlek anges och jämförelser av beräknad bottenskjuvspänning bör därmed endast ske mot den kritiska bottenskjuvspänningen för vald kornstorlek.

Det dataunderlag som Soulsby & Whitehouse (1997) utgår från är begränsat och innefattar endast i viss utsträckning mindre kornstorlekar (silt - ler). Vad gäller just dessa fina fraktioner så är dataunderlaget främst kopplat till studier av bottenskjuvspänning från strömmande vatten, och ej från vågor eller kombinerade effekter.

Det ska sammanfattningsvis poängteras att den kritiska bottenskjuvspänningen för kohesiva material är mycket komplex och beror bland annat på materialets vattenhalt, saltinnehåll och konsolideringsgrad. Bottensediment med samma kornstorlek kan variera kraftigt, från "fluffiga" vattenhaltiga sediment till hårt konsoliderade leror, vilka båda har mycket olika benägenhet för resuspension. Stor försiktighet bör därför iaktas vid tolkning av kritisk bottenskjuvspänning, särskilt för fina fraktioner.

6. Diskussion

I följande avsnitt beskrivs översiktligt de begränsningar som de hydrodynamiska modellerna har. Vidare diskuteras även hur val av modelltyp och indata påverkar resultat och efterföljande analyser.

Inledningsvis ska det understrykas att de hydrodynamiska modeller som upprättats och använts för simuleringar i föreliggande uppdrag har utvecklats för att i så stor utsträckning som möjligt beskriva strömning- och vågförhållanden i grunda havsvikar. Det är således i dessa miljöer som modellens tillförlitlighet bedöms vara som störst, och i andra delar av modellområdet ska resultaten användas med försiktighet.

Modellerna har specialanpassats med en högupplöst djupinformation och beräkningsnät i de vikar som är av särskilt intresse. I områden med lägre upplösning eller sämre djupinformation kommer således även återgivningen av de hydrodynamiska förhållandena vara mer osäker.

6.1 Tvådimensionell strömningsmodell

I ett tidigt skede bedömdes en tredimensionell hydrodynamisk modell kräva för hög beräkningskraft i förhållande till projektets ramar, och skulle således leda till en oacceptabel tidsåtgång och stort behov av beräkningskraft. En 2D-modell har mycket kortare beräkningstid men kan inte beskriva hur strömmar påverkas av temperatur- och salinitetsskiktning. I de för studien mest relevanta naturtyperna, grunda havsvikar med tidvattenvariationer, kan strömningen oftast beskrivas väl med 2D-modeller eftersom skiktningen är låg. Storskaliga strömningsmönster i de djupare fjordarna och i öppet hav kan dock anses ha betydande osäkerheter till följd av detta antagande.

6.2 Spektral vågmodell

För att beskriva uppbyggnad av vågor och kopplingen mellan vågor och kustnära strömmar behövs en spektral vågmodell utnyttjas. Spektrala vågmodeller saknar förmågan att beskriva lokala vågfenomen som komplicerad diffraktion runt öar och reflektion av vågor mot objekt, öar och pirar.

I geografiska områden där diffraktion och reflektion är av betydelse behöver en annan typ av vågmodeller (fasupplösta) användas för att kunna beskriva vågornas egenskaper. I detaljerade studier av vågklimatet i studieområdets grunda vikar har således resultat från den spektrala vågmodellen använts för modellering med fasupplösta modeller.

6.3 Indata

Kvaliteten av den vinddata som använts för att driva strömning och våguppbbyggnad har en stor betydelse för resultaten. I föreliggande fall har en tid- och rumsvarierande vind från ERA5 nyttjats, se kapitel 2.3.1. Denna dataserie ger lägre vindhastigheter längre in i fjordarna, men har inte tillräcklig noggrannhet för att beskriva lokala vindmönster. Lokala vindfenomen som förstärkning längs dalgångar och läande till följd av topografisk variation kan ha stor påverkan på exempelvis våguppbbyggnad (Christakos, Furevik, & Aarnes, 2020).

7. Referenser

- Wilson, B. (1965). Numerical prediction of ocean waves in the North Atlantic for December 1959.
- Camenen, B., & Larson, M. (2007). A Unified Sediment Transport Formulation for Coastal Inlet Application. U.S. Army Engineer Research and Development Center.
- CHC. (2006). PSsed4.3 - A Langrarian Sediment Transport Model . Ottawa: Canadian Hydraulics Center.
- Christakos, K., Furevik, B., & Aarnes, O. (2020). The importance of wind forcing in fjord wave modelling. *Ocean Dynamics*, 57-75.
- CMEMS. (2023). BALTICSEA_REANALYSIS_WAV_003_015. Copernicus Marine Environment Monitoring Service.
- Delft Hydraulics. (2001). Deep water wave growth at short fetches - A desk study on deep water fetch-limited wave growth using.
- ECMWF. (2019). IFS DOCUMENTATION – Cy46r1. PART VII: ECMWF WAVE MODEL. Reading, England: European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.
- Hersbach et. al. (den 20 12 2023). Hämtat från ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS): <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>
- Hersbach, & Janssen. (1999). Improvement of the Short-Fetch Behavior in the Wave Ocean Model (WAM). *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 884-892.
- Soulsby, R., & Whitehouse, R. (1997). Threshold of Sediment Motion in Coastal Environments. *Proc. Pacific Coasts and Ports ' , (ss. 149-154). University of Christchurch.*
- Swart, D. (1974). Offshore sediment transport and equilibrium beach profiles. *Delft Hydraul. Lab. Publ. 131.*

Bilaga 1 – Förteckning av modellfiler

Förteckning av modellfiler, kopplad modell:

Fil	Beskrivning
bohus_t2d_coupled.cas	Styrfil för telemac2d. I denna definieras kopplingen mellan alla andra filer samt alla modellinställningar för strömningsmodellen. Kopplingen till vågmodellen görs också i denna fil.
bohus_tom_coupled.cas	Styrfil för tomawac. I denna definieras kopplingen mellan alla andra filer samt alla modellinställningar för vågmodellen.
bohus_mesh_231108_BC_T2D.cli	I denna fil definieras randvillkoren för strömningsmodellen.
bohus_mesh_231108_BC_TOM.cli	I denna fil definieras randvillkoren för strömningsmodellen.
bohus_mesh_231108.slf	Beräkningsnät för både strömningsmodellen och vågmodellen. I denna fil ligger även en användardefinierad variabel, "DRAG", som lägger på en lokal hastighetsförlust på de öppna vattennivåändarna.
wind_ERA5_2011-2022.txt	Indatafil för vind.
bohus_liq_2011-2022.bnd	Indatafil för de öppna ränderna i strömningsmodellen.
bnd_waves_NEMO_2011-2016.wave	Indatafil för vågor.
'./fortran_t2d'	I denna mapp ligger subrutiner som behövs för att få strömningsmodellen att använda indata på rätt sätt och hur den användardefinierade variabeln, "DRAG", ska användas.
'./fortran_tom'	I denna mapp ligger en subrutin som behövs för att få vågmodellen att köra med en tidsserie av vågor på en rand.

Förteckning av modellfiler, okopplad modell:

Fil	Beskrivning
bohus_tom_okopplad.cas	Styrfil för tomawac. I denna definieras kopplingen mellan alla andra filer samt alla modellinställningar för vågmodellen.
bohus_mesh_231108_BC_TOM.cli	I denna fil definieras randvillkoren för strömningsmodellen.
bohus_mesh_231108.slf	Beräkningsnät.
bnd_waves_NEMO_2016-2022.wave	Indatafil för vågor.
'./vindsimulering'	I denna mapp ligger alla filer som behövs för att generera en vindfil (.slf) som används som indata till vågmodellen. Vindfilen tar upp mycket lagring och denna har därför uteslutits.
'./fortran_tom'	I denna mapp ligger en subrutin som behövs för att få vågmodellen att köra med en tidsserie av vågor på en rand.

