

Farledsprojekt Landsort-Södertälje

Beräkning av potentiell påverkan från propellerströmmar
och fartygsinducerade vågor i en framtida Landsortsfarled,
DHI 2018-02-27



Ramböll Sverige AB

Rapport

Februari 2018

Denna rapport har tagits fram inom DHI:s ledningssystem
för kvalitet certifierat enligt ISO 9001 (kvalitetsledning) av Bureau Veritas

ISO 9001
Management System Certification

BUREAU VERITAS
Certification Denmark A/S



Farledsprojekt Landsort-Södertälje

Beräkning av potentiell påverkan från propellerströmmar
och fartygsinducerade vågor i en framtida Landsortsfarled,
DHI 2018-02-27

Framtagen för Ramböll Sverige AB
Kontaktperson Mattias Bååth



Projektledare	Christin Eriksson
Kvalitetsansvarig	Christin Eriksson
Handläggare	Martin Johnsson, Christin Eriksson, Peter Sloth, Bo Brahtz Christensen, Stefan Leschka, Uwe Stöber, Timothy James Womersly
Uppdragsnummer	12803195
Godkänd datum	2017-06-30
Reviderad datum	2018-02-27
Version	Slutlig: 3.0,
Klassificering	Begränsad



INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1.	Sammanfattning	4
1.1	Bakgrund.....	4
1.2	Resultat	4
1.3	Påverkan längs farledssträckningen	5
2.	Bakgrund och syfte.....	7
3.	Data och metoder	9
3.1	Fartygsegenskaper	9
3.2	Modellering av vindvågor	10
3.3	Propellerströmmar från fartyg	12
3.4	Modellering av fartygsinducerade vågor	13
4.	Resultat.....	20
4.1	Vindvågor	22
4.2	Propellerströmmar från fartyg	27
4.3	Fartygsvågor – Svallvågor	29
4.4	Fartygsvågor – Avsänkingsvågor.....	37
5.	Diskussion.....	44
5.1	Landsort – Fifång	44
5.2	Fifång – Regarn	45
5.3	Regarn – Oaxen.....	46
5.4	Oaxen – Skansundet.....	47
5.5	Skansundet – Brandalsund	49
5.6	Brandalsund – Södertälje.....	50
6.	Referenser	51

FIGURER

Figur 2-1	Inrättande av ny farled (lila) respektive fördjupning av befintlig farled (blått).	8
Figur 3-1	Områdets utbredning (färglagt) som vindvågor har modellerats för år 2015. Färgskalan anger djupet i meter.	11
Figur 3-2	Vänster bild: Beräkningsnätet för hela vindvågsmodellen. Höger bild: Inzoomning på beräkningsnätet (området i den röda rektangeln på vänstra bilden)	12
Figur 3-3	Illustration av propellerström bakom ett fartyg.....	13
Figur 3-4	Illustration av sekundära vågor (svall) från ett fartyg	14
Figur 3-5	Initial vågbildning från tankfartyg som kan trafikera farleden idag (TANKER1) och i framtiden (TANKER2). Fartygen passerar över ett bestämt djup och i hastigheten 9 respektive 12 knop. Ur de blåa kurvorna utläses vågbildningen på olika vattendjup för 9 knop och i de röda kurvorna för 12 knop.	15
Figur 3-6	Avklingning av en 1m hög svallvåg, oberoende av vattendjupet, på olika avstånd från ett fartyg.	16
Figur 3-7	Exempel på modellbatymetri för norra (övre bild) och södra (nedre bild) delen av Brandalsund vid beräkning av svallvågens utbredning.	17
Figur 3-8	Exempel på beräkningsnätet (övre bild) och den ingående djupdatan (nedre bild) för samma område.	18

Figur 4-1	Områden känsliga för svall och avsänkning längs befintlig farled samt nya farledsavsnitt.....	21
Figur 4-2	Modellerad våghöjd under år 2015. Maximal våghöjd (vänster). Medelvärde av den signifikanta våghöjden, H_s , (höger).....	23
Figur 4-3	Den fraktion av tiden på ett år som H_{max} överstiger 0.1 m, 0.25 m och 0.7 m.....	25
Figur 4-4	Exempel på vågros från Brandalsund (överst), Skansundet (mitten) och Oaxen (nederst).	26
Figur 4-5	Propellerströmmens storlek (U) bakom ett 135m långt tankfartyg som färdas med 7 knop. På x-axeln visas det horisontella avståndet till propellern bakom fartyget på 10.5m djup.	27
Figur 4-6	Propellerströmmens storlek (U) bakom ett 235m långt containerfartyg som färdas med 7 knop. På x-axeln visas det horisontella avståndet till propellern bakom fartyget på 12.65m djup.	28
Figur 4-7	Propellerströmmens storlek (U) bakom ett 229m långt tankfartyg som färdas med 7 knop. På x-axeln visas det horisontella avståndet till propellern bakom fartyget på 12.65m djup.	29
Figur 4-8	Höjden på svallvågorna, som träffar Oaxens östra strand, från ett framtida tankfartyg vid 9 knops fart i nordlig riktning (överst) och sydlig riktning (underst) i sundet mellan Oaxen och Regarn längs en bit av farleden. Bilderna är inte en ögonblicksbild utan en sammanfattning av hela förloppet då svallet genereras tills det träffar stranden.	30
Figur 4-9	Höjden på svallvågorna, som träffar Regarns västra strand, från ett framtida tankfartyg vid 9 knops fart i nordlig riktning (överst) och sydlig riktning (underst) i sundet mellan Oaxen och Regarn längs en bit av farleden. Bilderna är inte en ögonblicksbild utan en sammanfattning av hela förloppet då svallet genereras tills det träffar stranden.	31
Figur 4-10	Höjden på svallvågorna, som träffar norra stranden, från ett framtida containerfartyg vid 7 knops fart i nordvästlig riktning (överst) och sydöstlig riktning (underst) i Skansundet längs en bit av farleden. Bilderna är inte en ögonblicksbild utan en sammanfattning av hela förloppet då svallet genereras tills det träffar stranden.	33
Figur 4-11	Höjden på svallvågorna, som träffar södra stranden, från ett framtida containerfartyg vid 7 knops fart i nordvästlig riktning (överst) och sydöstlig riktning (underst) i Skansundet längs en bit av farleden. Bilderna är inte en ögonblicksbild utan en sammanfattning av hela förloppet då svallet genereras tills det träffar stranden.	34
Figur 4-12	Höjden på svallvågorna, som träffar norra stranden, från ett framtida containerfartyg vid 7 knops fart i nordöstlig riktning (överst) och sydvästlig riktning (underst) i Brandalsund längs en bit av farleden. Bilderna är inte en ögonblicksbild utan en sammanfattning av hela förloppet då svallet genereras tills det träffar stranden.	35
Figur 4-13	Höjden på svallvågorna, som träffar södra stranden, från ett framtida containerfartyg vid 7 knops fart i nordöstlig riktning (överst) och sydvästlig riktning (underst) i Brandalsund längs en bit av farleden. Bilderna är inte en ögonblicksbild utan en sammanfattning av hela förloppet då svallet genereras tills det träffar stranden.	36
Figur 4-14	Skillnad i lägsta möjliga vattenstånd, mellan ett nutida och ett framtida fartyg, vid passage mellan Oaxen och Regarn (framtid - nutid).	37
Figur 4-15	Skillnad i högsta möjliga vattenstånd, mellan ett nutida och ett framtida fartyg, vid passage mellan Oaxen och Regarn (framtid - nutid).	38
Figur 4-16	Skillnad i högsta möjliga strömhastighet, mellan ett nutida och ett framtida fartyg, vid passage mellan Oaxen och Regarn (framtid - nutid).	39
Figur 4-17	Lägsta möjliga vattenstånd från avsänkningseffekten, för ett framtida tankfartyg, vid passage längs Himmerfjärdens östra kust.	40
Figur 4-18	Högsta möjliga vattenstånd från avsänkningseffekten, för ett framtida tankfartyg, vid passage längs Himmerfjärdens östra kust.	41
Figur 4-19	Ögonblicksbild av vattenståndsförändringen orsakad av avsänkningen kring fartyget.	41
Figur 4-20	Skillnad i lägsta möjliga vattenstånd till följd av avsänkningseffekter, mellan ett nutida och ett framtida fartyg, vid passage genom Brandalsund (framtid - nutid).	42
Figur 4-21	Skillnad i högsta möjliga vattenstånd, mellan ett nutida och ett framtida fartyg, vid passage genom Brandalsund (framtid - nutid).	43
Figur 4-22	Skillnad i högsta möjliga strömhastighet, mellan ett nutida och ett framtida fartyg, vid passage genom Brandalsund (framtid - nutid).	43
Figur 5-1	Områdesbild söder om Askö	44
Figur 5-2	Nordöstra delen av Oaxen.	46
Figur 5-3	Foto från södra Oaxen. Till vänster i bild syns en iskjuten vall, orsakad av isrörelser.	47
Figur 5-4	Östra sidan av Himmerfjärden.	48

Figur 5-5 Brandalsund50

TABELLER

Tabell 3-1 Fartygsegenskaper använda i denna rapport9

BILAGA A

STRÄNDERS ERODERBARHET

1. Sammanfattning

1.1 Bakgrund

Projekt Landsortsfarleden syftar till att förbättra sjösäkerheten i den allmänna farleden mellan Landsort och Södertälje samt anpassa farleden för framtida fartygstrafik genom ökad kapacitet och tillgänglighet. Projektet innebär inrättande av de två nya farledsavsnitten Fifång-Regarn och Oaxen-Skanssundet samt viss justering, breddning och fördjupning av befintlig farled.

Landsortsfarleden trafikeras idag av fartyg med det maximala djupgåendet 9 m, längden 200 m och bredden 32 m. Sjöfartsverket har konstaterat att farleden bör dimensioneras för fartygsstorlekar med ett maximalt djupgående om 10,5 m, bredden ca 32 m och längden ca 220 m.

Som underlag för att bedöma miljöeffekter av förändringarna av Landsortsfarleden har modelleringar och beräkningar utförts av fartygsinducerade vågor (svall och avsänkning) och propellerströmmar från framtida fartygstrafik. För att jämföra med naturliga förhållanden har modellering även gjorts av naturliga vindvågor i området.

Inför tillståndsansökan kan rapporten komma att uppdateras med kompletterande utredningar för att mer ingående beskriva risk för effekter längs hela farleden inklusive de nya avsnitten. För de två nya farledsavsnitten anses effekterna tillräckligt beskrivna i nuvarande rapport. Att rapporten ändå innehåller delar som kräver ytterligare fördjupning grundar sig i att det finns ett värde redan i detta läge att belysa vilka effekter som en farledsfördjupning kan få längs hela sträckan.

1.2 Resultat

1.2.1 Vindvågor

För att bedöma det naturliga vågklimatet i utredningsområdet har en vågmodell tagits fram som beräknar de naturligt förekommande vindvågorna. Områden med naturlig vågpåverkan är bättre rustade för en förändring av vågklimatet från ökad eller förändrad fartygstrafik. Den förhärskande vindriktningen visar att den östra stranden av utredningsområdet generellt utsätts för en kraftigare vindpåverkan än den västra.

Resultaten från vindvågssimuleringarna visar att medelvärdet av den signifikanta våghöjden ligger runt 0.4 m i den yttre delen av utredningsområdet för att succesivt avta till 0.15 - 0.20 m i Himmerfjärden, undantaget den västra stranden där våghöjden är betydligt lägre och hamnar mellan 0.05 - 0.10 m. Detta lägre värde dominerar i stort sett hela vägen från Skanssundet (genom Brandalsund) upp till Södertälje i norr. I större delen av systemet förekommer vågor av samma storleksordning som svallvågorna från de nya fartygen. I de inre delarna av farleden, innanför Skanssundet, är såväl vindgenererade vågor som fartygssvallet begränsat till en decimeters våghöjd. Vågor av den storleksordningen bedöms inte orsaka någon större erosion på stranden.

1.2.2 Propellerströmmar

Effekten av propellerströmmar från dagens och framtida fartyg och deras påverkan på bottenerosion har uppskattats utifrån gängse formler. Beräkningarna har utförts för det minsta farledsdjupet idag och i framtiden och med en antagen hastighet av 7 knop.

Propellerströmmar vid botten från den större fartygstyp som kan trafikera en framtida Landsortsfarled förväntas, med givna antaganden, efter muddring inte kunna ge upphov till någon större erosion i farleden annat än på de djup som är grundare än 16 m. Den begränsade erosion och uppvirvling av bottenmaterial som kan ske under kort tid över ett begränsat område akter om fartygen förväntas inte ha någon märkbar effekt på bottenpografien. Då de grundaste delarna av området innanför Skansundet består av mycket lerpartiklar finns det en risk att grumlighetsnivåerna i området påverkas vid fartygspassager. Med tanke på det begränsade antalet anlöp av fartyg av den större storleken är det inte en permanent effekt.

1.2.3 Fartygsvågor

För att beskriva vågbilden från framtida fartyg har såväl svallvågor som avsänkingsvågor beräknats.

Effekten av svallvågsgenerering från fartyg samt dess effekt på strandkanten har beräknats för framtida fartygspassager genom teoretiska samband. Kompletterande detaljerade svallvågsmodelleringar har dessutom utförts i de trångsta passagerna för att beskriva den maximala påverkan som fås vid en fartygspassage. Storleken på den svallvåg som genereras för ett bestämt fartyg bestäms av hastigheten det framförs i och över vilket djup det färdas. Det genereras därför störst svallvågor över grunda partier där fartygen håller hög hastighet. De svallvågor som genereras kommer dock att avta på sin väg från fartyget och efter ca 300 m från fartyget har våghöjden halverats.

Effekter av avsänkning har modellerats i de trånga passagerna samt längs den nya tänkta farledssträckningen i Himmerfjärden där farleden passerar som närmast land. De största effekterna av avsänkningen kommer att ses i de grundaste områdena och kan vid platser med smala passager ge upphov till erosion om botten är känslig.

1.3 Påverkan längs farledssträckningen

De två nya farledsavsnitten Fifång-Regarn och Oaxen-Skansundet bedöms inte ge upphov till några större effekter från fartygstrafiken i form av vågbildning. De nya farledsavsnitten ligger mestadels i naturligt djupa och öppna vattenområden och dessutom med ett större avstånd till land än befintlig farled.

1.3.1 Landsort – Fifång

Denna sträcka är utsatt för vindgenererade vågor och ett allmänt hårt klimat till följd av sitt oskyddade läge och skiljer sig markant från de inre delarna av farleden. Här kan det tidvis gå höga vågor och den naturliga variabiliteten är stor.

Det finns längs denna sträcka passager som ligger nära farleden och kan nås av svallvågor, dock av begränsad amplitud. Avsänkningseffekter bedöms inte kunna ge någon effekt i denna del av farledssträckan då det inte finns passager med starkt begränsande sektioner, som smala och grunda sund.

Sammantaget bedöms inte fartygsinducerade vågor ge stor påverkan i denna del av farleden då systemet redan har en viss motståndskraft mot vågor och strömmar till följd av en stor naturlig variabilitet i våg- och strömmönstret.

1.3.2 Fifång – Regarn

På denna sträcka föreslås farleden få en ny östligare sträckning. Den nya farledssträckningen kommer att innebära en mindre påverkan på områden där den nuvarande farleden passerar nära land, som Fifång, västra Grönsö och östra sidan av södra Mörkö.

Längs den nya farledssträckningen är det naturligt djupt och vågbildningen från fartygsrörelser blir därför liten. Varken avsänkningseffekter eller svallvågor bedöms ge någon påverkan av betydelse då systemet redan har en motståndskraft mot vågor och strömmar. Den nya farledssträckningen passerar på ett avstånd på 500 m eller mer från stranden, vilket inte är tillräckligt nära land för att kunna påverka erosionen på stränderna. På östsidan om Grönsö, där den nya farledssträckningen är som närmast land, finns områden utpekade med viss potentiell eroderbarhet. Då dessa områden består av sandig morän, som är svåreroderad av fartygsinducerat påverkanstryck vid detta avstånd, bedöms det inte bli påverkade av den nya farledssträckningen. De mindre områdena med mer lätteroderade sediment vid Dyvik, Kättholmarna, Hästnäs, Bastholmen och Västervik är så skyddade att de inte bedöms påverkas.

1.3.3 Regarn – Oaxen

Längs västra Regarn återfinns de mest erosionskänsliga jordarterna. Längs denna sträcka kommer framförallt effekten av avsänkingsvågor att öka med en större fartygstyp och det finns en risk att avsänkningen påverkar bottenerosionen i den smalaste passagen. Då farleden är nära strandkanten når svallvågor från fartyg ofta land utan att ha avtagit speciellt mycket. Vid en fartygspassage med de nya större fartygen om 9 knop kommer det att genereras svallvågor med en höjd av 0.1 m, vilka dessutom hinner avta ytterligare innan de når strandkanten. Om fartygen framförs med denna hastighet bedöms därför effekten från svallet att vara försumbar jämfört med de naturliga vindvågorna.

1.3.4 Oaxen- Skansundet

På denna sträcka föreslås farleden få en ny östligare sträckning. Den föreslagna östra sträckningen har förutom en strandlinje på längre avstånd från farleden också en kustlinje som karakteriseras av urberg samt mindre erosionskänsliga jordarter. Här bedöms det därför inte att bli någon märkbar påverkan från fartygstrafiken. Längs den östra sidan av Himmerfjärden är den naturliga vågbildningen större och bättre rustad för en ökning av svallvågor och avsänkningseffekter än den västra sidan. Då den nya farledssträckningen ligger i ett naturligt djupt område kommer de största svallvågorna som genereras i denna del, baserat på dagens och framtida fartyg, vara små, under 0,6 m. Resultaten från avsänkingsmodelleringen pekar på att det inte blir några effekter från avsänkingsvågen längs strandlinjen på det avstånd som fartygen normalt passerar, vilket är ca 500 m eller mer.

Det nuvarande västra farledsavsnittet i Himmerfjärden ligger närmare strandlinjen och är betydligt mindre vindpåverkat än vad den östra föreslagna farledssträckningen är och således mer känslig för ökad fartygstrafik. Längs den västra sidan av Himmerfjärden finns det dessutom fler platser med erosionskänsliga jordarter.

1.3.5 Skansundet — Södertälje

Denna sträcka karakteriseras mestadels av en liten naturlig vågbildning och är därmed sämre utrustad för en förändring i vågklimatet. Av fartygsvågorna är det framförallt avsänkingsvågen i de smala sunden som ger en påverkan och som kan komma att ge upphov till strömhastigheter som kan påverka bottensedimenten och leda till erosion. Svallvågorna som modellerats bedöms inte ge någon påverkan på strandkanten utifrån de hastigheter som är modellerade. Längs de grunda delarna av farleden kan även en viss uppvirvling av bottensediment förekomma från propellerpåverkan, men utan att leda till permanent förändring av topografin.

2. Bakgrund och syfte

DHI har fått i uppdrag att simulera vågförhållandena, naturliga som fartygsinducerade, samt uppskatta propellerströmmar vid botten för nutida och framtida fartygstrafik. Syftet med modellstudien är att ge underlag för att bedöma miljöpåverkan från den planerade framtida Landsortsfarleden. Underlaget ska användas i både miljökonsekvensbeskrivning (MKB) för inrättande av nya farledsavsnitt samt i MKB för vattenverksamhet avseende förbättringsåtgärder i befintlig farled.

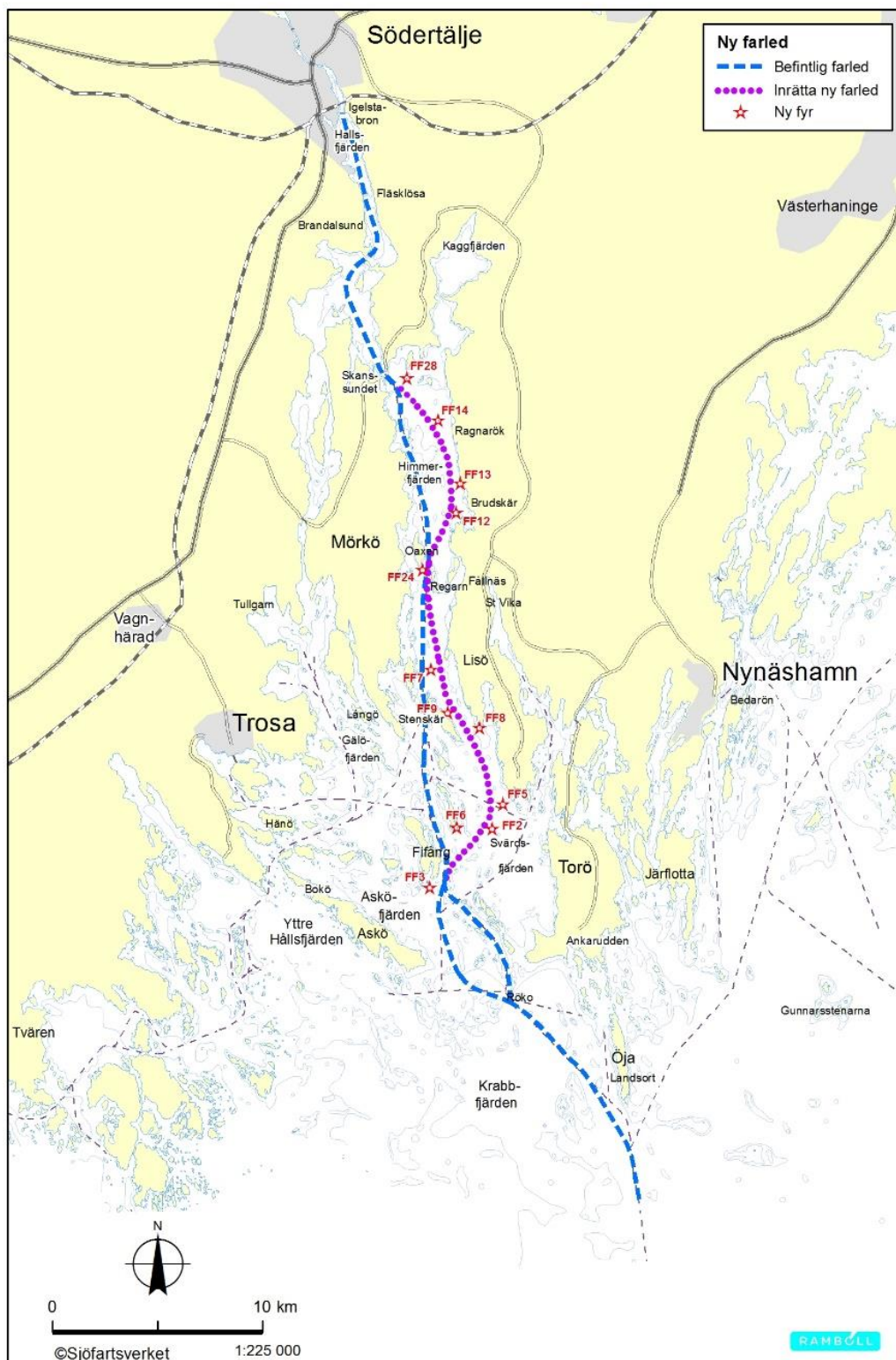
Projekt Landsortsfarleden syftar till att öka säkerheten samt förbättra kapaciteten och tillgängligheten i den allmänna farleden mellan Landsort och Södertälje. En första studie som gjordes var den åtgärdsvalsstudie för Landsortsfarleden som färdigställdes under 2015 (Trafikverket 2015-02-20). Åtgärdsvalsstudien konstaterar att farleden bitvis är trång med begränsningar i tillgänglighet och kapacitet, samt är olycksdrabbad. Utifrån åtgärdsvalsstudien har Trafikverket gett Sjöfartsverket i uppdrag att genomföra en farledsutredning. Syftet med projektet är därför att utreda möjligheterna för att öka kapaciteten för Landsortsfarleden och därigenom tillgängligheten till Södertälje hamn samt att förbättra sjösäkerheten i farleden. Sjöfartsverket konstaterar i pågående farledsutredning att det bästa alternativet är att för delar av Landsortsfarleden inrätta två nya farledsavsnitt samt att för övriga delar utöka den befintliga farleden, se Figur 2-1.

Två nya farledsavsnitt föreslås på sträckorna Fifång-Regarn och Oaxen-Skanssundet. Farleden föreslås fördjupas så att den kan trafikeras av fartyg med längden 220 meter, bredden 32 meter och ett djupgående av 10,5 meter. För de två nya farledsavsnitten krävs mycket lite muddring för att uppfylla kraven på farleden, ca 30 000 m³. För förbättring av övriga farledsavsnitt, främst sträckan norr om Skanssundet, krävs mer omfattande muddring i de grunda och trånga sunden.

I samband med muddring av en farled förändras djupförhållanden och tvärsnittsareor, vilket kan innebära att strömmönster och strömhastigheter förändras. Dessutom är ofta syftet med muddring att tillåta större fartyg att trafikera farleden, vilket i sin tur skulle kunna ge större svallvågor, avsänkningseffekter och kraftigare propellerströmmar. Alla dessa faktorer påverkar risken för erosion i farleden och kringliggande områden.

För att bedöma eventuella förändringar i erosionsförhållanden till följd av nya farledssträckningar samt framtida muddring presenteras i denna rapport en analys baserad på numeriska och analytiska uppskattningar av tre mekanismer som kan ge upphov till erosion:

1. Vindvågor (naturligt förekommande).
2. Propellerströmmar från större fartyg
3. Fartygsinducerade vågor från framtida fartyg (svall och avsänkning)



Figur 2-1 Inrättande av ny farled (lila) respektive fördjupning av befintlig farled (blått).

3. Data och metoder

Nedan följer en sammanställning av de beräkningar samt det dataunderlag som är av särskild vikt för denna studie. I de delar av området där platsspecifika modelleringar inte har utförts har bedömningar gjorts. Bedömningarna grundar sig dels på de modellerade resultat som framkommit längs övriga sträckor och dels på en kombination av de teoretiska samband som presenteras tillsammans med tidigare erfarenhet.

Processer har undersökts enligt följande i området.

- Vindvågor: Modellering i hela området.
- Propellerströmmar: Teoretiska beräkningarna har tagits fram för givna fartyg över det minsta farledsdjupet och med en antagen hastighet av 7 knop. För övriga områden, med andra djup/hastigheter görs bedömningar.
- Fartygsinducerade vågor – svallvågor: Platsspecifika modelleringar längs sträckorna Regarn-Oaxen, Skansundet och Brandalsund. För övriga sträckor görs bedömningar utifrån teoretiskt samband mellan djup och fartygshastighet.
- Fartygsinducerade vågor – avsänkning: Platsspecifika modelleringar längs sträckorna Regarn-Oaxen, Himmerfjärdens östra del samt Brandalsund. För övriga sträckor görs bedömningar utifrån djup och vattenområdets utseende.

De data som framför allt är viktiga för att bedöma förändringar i vågförhållandena är:

- Digital nutida bottenpografi samt dess förändring i samband med muddring och dumpning [från Sjöfartsverket].
- Farledens nutida och framtida sträckning [från Sjöfartsverket].
- Typiska egenskaper för de fartyg som trafikerar farleden idag och för de som förväntas trafikerar efter muddring och farledsömläggning [från Sjöfartsverket].
- Fartygshastigheter längs de sträckor som modellerats.
- Uppmätt vinddata från två olika stationer (Brandalsund och Landsort) för vindvågsmodellering för år 2015 [från Sjöfartsverket ViVa-data].

3.1 Fartygsegenskaper

I detta projekt har tre olika fartygstyper använts för att bedöma deras påverkan i form av svallvågor och propellerströmmar. De valda fartygstyperna är: ett typiskt tankfartyg som trafikerar farleden idag (TANKER1), ett framtida tankfartyg (TANKER2) och ett framtida containerfartyg (CONTAINER). Deras egenskaper finns summerade i Tabell 3-1 nedan. Viss information har kommit från Sjöfartsverket andra har uppskattats utifrån litteraturen för ett typiskt fartyg av den storlek som specificerats (se ref. /1/, /2/, /3/ och /4/)

Tabell 3-1 Fartygsegenskaper använda i denna rapport

Symbol	Egenskap	TANKER1	TANKER2	CONTAINER
L [m]	Längd	143.9	229	235
L_e [m]	Bow entry length	25	40	65
B [m]	Fartygsbredd	21.8	32	32
D [m]	Djupgående	9.2	11.5	10.9
C_b [-]	Block coefficient	0.72	0.74	0.62

H_p [m]	Propellerns höjd över kölen	3.1	3.8	3.7
D_p [m]	Propeller diameter	5.0	5.9	8.0
K_p [m]	Propeller thrust coefficient	0.35	0.35	0.35

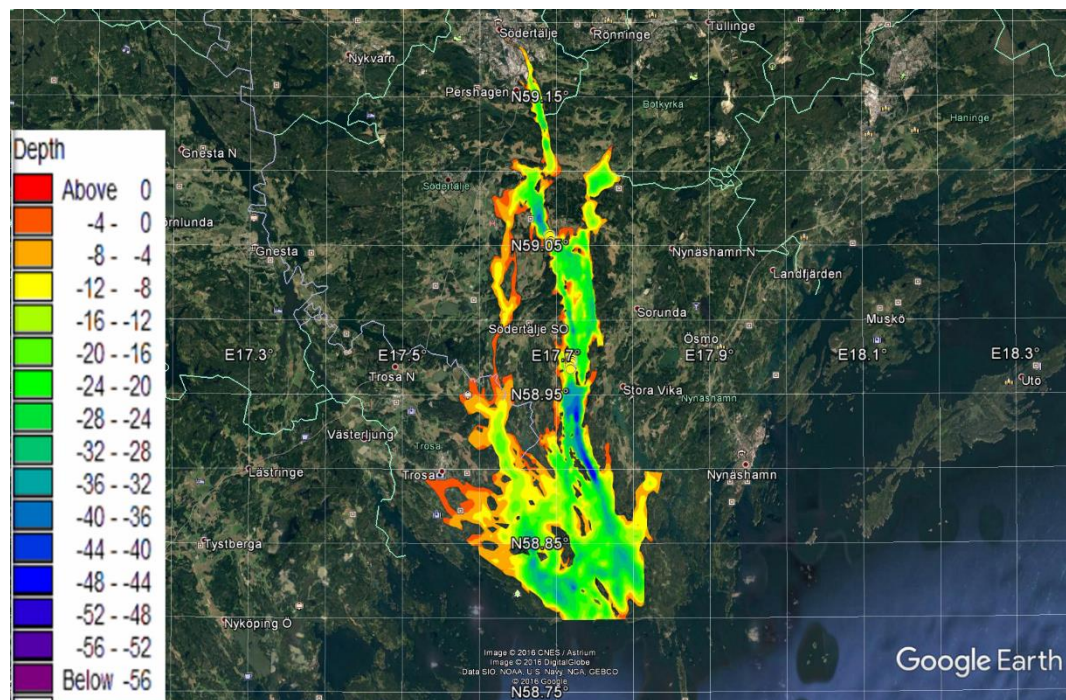
3.2 Modellering av vindvågor

För att bedöma det naturliga vågklimatet i uredningsområdet har en lokal vågmodell tagits fram som beräknar vindvågorna för år 2015. Områden med naturlig vågpåverkan kommer att vara bättre rustade för en förändring av vågklimatet från ökad eller förändrad fartygstrafik.

Modelleringen av vindvågor har utförts med DHI's numeriska vind-vågmodell, MIKE 21 SW. MIKE 21 SW är en spektral vind-vågmodell, som simulerar gällande vågförhållanden och tar hänsyn till faktorer som:

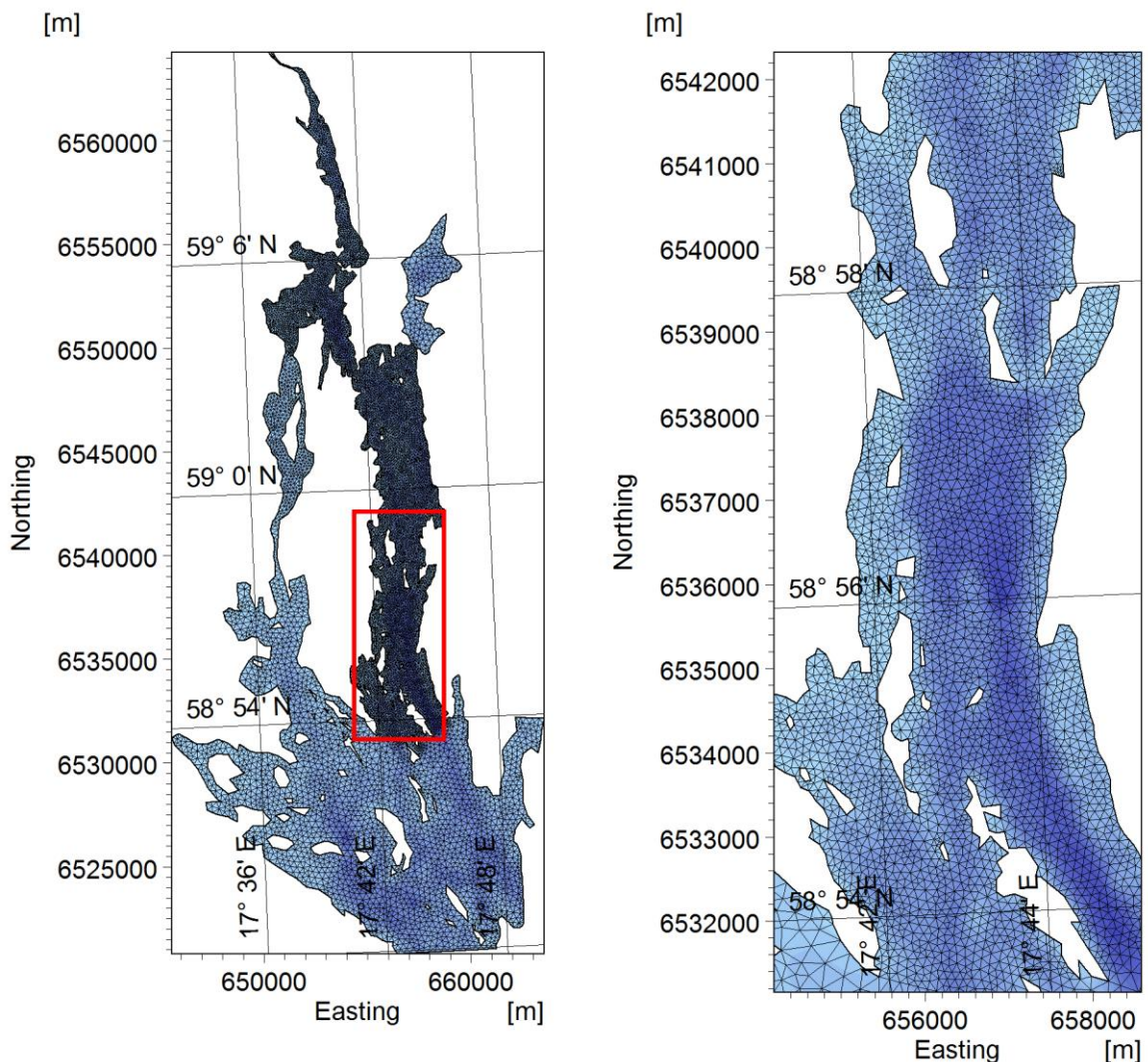
- Vindens friktion mot vattenytan
- Refraktion med varierande djup
- Uppgrundning
- Brytande vågor
- Bottenfriktion
- Interaktion mellan vågor

För beräkningen av vågorna har en komplett spektral och icke-linjär formulering använts. Detta innebär att vi för en bestämd vindriktning och vindhastighet har beräknat vågornas tillväxt och transformation över hela området från längst i söder till Södertälje i norr (se Figur 3-1). Vinddata för att driva modellen är linjärinterpolerade stationsdata från vindstationerna Brandalsund och Landsort. Simuleringarna har utförts med hänsyn tagen till en generell bottenfriktion som motsvarar en råhet på ca 5 mm. Detta tillvägagångssätt är något konservativt och valdes eftersom vågdata inte fanns tillgängliga för kalibrering.



Figur 3-1 Områdets utbredning (färglagt) som vindvågor har modellerats för år 2015. Färgskalan anger djupet i meter.

Modellens batymetri (bottentopografi) har byggts upp från aktuella sjökort för området samt lokala djupmätningar utförda av Sjöfartsverket. Modellbatymetrin och beräkningsnätet för hela området kan ses nedan i vänster bild i Figur 3-2. I modellen används ett oregelbundet beräkningsnät, där djupen definieras i de triangulära hörn-punkterna och resultaten beräknas i cellernas mittpunkt. Ju mindre trianglar desto högre upplösning på modellresultatet. I Himmerfjärden och norröver är beräkningsnätet som mest detaljerat, med 80 - 120 m bredd, för att ge bra beräkningsresultat. En närbild på beräkningsnätet visas i höger bild i Figur 3-2. Beräkningsnätet har utformats för att ta hänsyn till strandlinjernas utformning, vattendjupet i området där vågorna genereras och vindförhållandena (hastighet och riktningar) i området.



Figur 3-2 Vänster bild: Beräkningsnätet för hela vindvägsmodellen. Höger bild: Inzoomning på beräkningsnätet (området i den röda rektangeln på vänstra bilden)

3.3 Propellerströmmar från fartyg

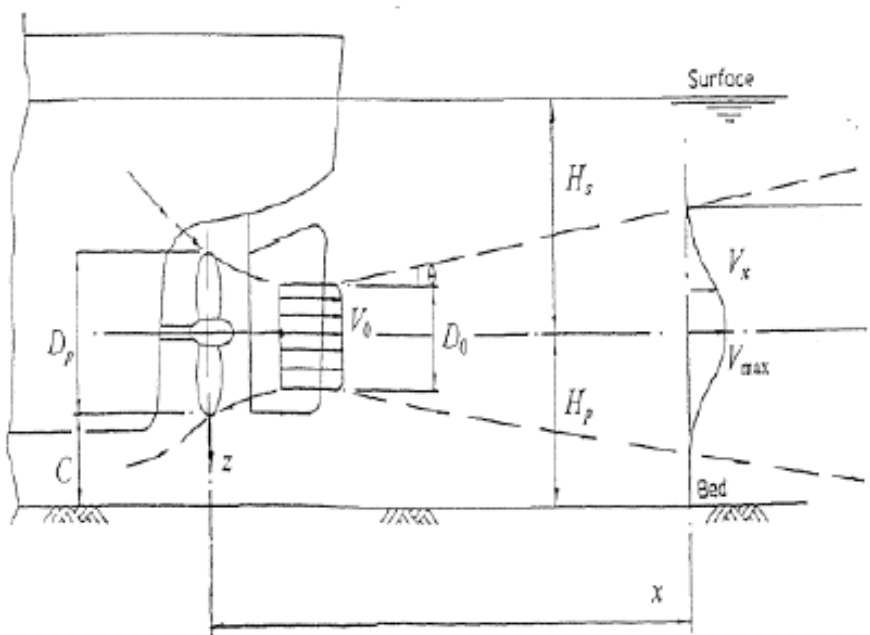
För att bedöma om de större fartyg som förväntas trafikera farleden efter muddringen kan ge upphov till bottenerosion på grund av kraftigare propellerströmmar, har propellerströmmarnas hastighet nära botten uppskattats. Propellerströmmarna har uppskattats från fartyg under gång och representerar hastigheterna som genereras akter om fartyget.

Då de grunda områden som kan påverkas av propellerströmmar framförallt finns innanför Skansundet har minsta djup och hastighetsbegränsningen här fått styra beräkningarna och resultaten gäller därmed under dessa antaganden. De övriga grunda områden som finns har bedömts under samma förutsättningar även om hastigheten kan vara större. Detta bedöms dock inte ge upphov till någon större osäkerhet i bedömningarna.

För att göra detta krävs ytterligare information om fartygets egenskaper utöver de som tillhandahållits i Tabell 3-1:

- Fartygets hastighet: 7 knop (över minsta djup)
- Minsta djup i farleden 12.65 m
- Propellerns varvtal vid given fart från dokumentation

Denna analys fokuserar på erosionseffekterna i farleden under fartygets gång. Den tar inte hänsyn till de hastigheter som kan uppstå i samband med manövrering nära kaj vid låga hastigheter. Det finns flera metoder för att uppskatta den första effekten (se t.ex. ref. /7/) men den senare effekten har inte analyserats. Här använder vi den analysmetod som redovisas i ref. /8/ och som schematiskt visas i Figur 3-3 för en propellerström bakom ett fartyg.



Figur 3-3 Illustration av propellerström bakom ett fartyg

3.4 Modellering av fartygsinducerade vågor

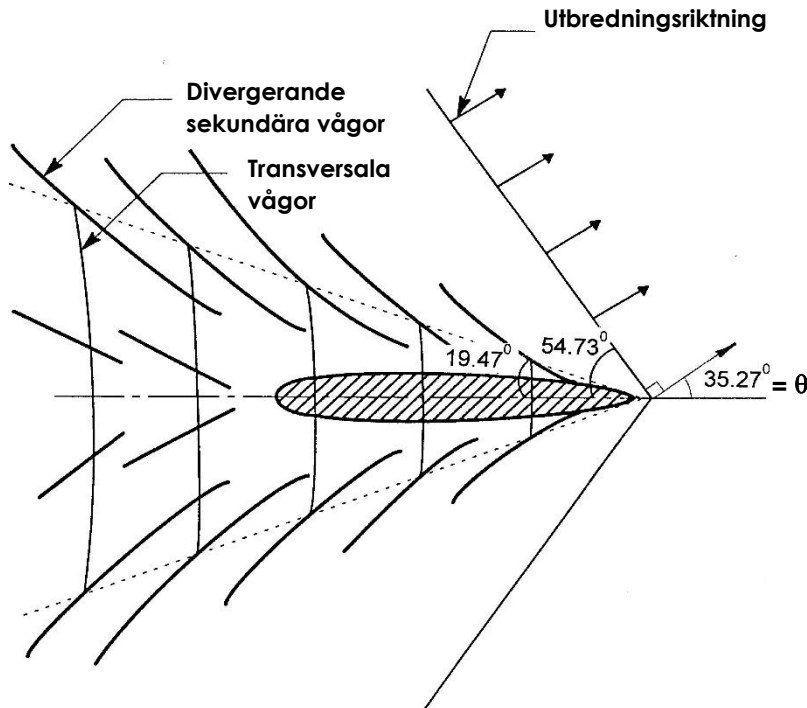
3.4.1 Uppskattning av svallvågorna från empiriska formler

När ett fartyg rör sig genom vattnet bildas vågor, vilka kan ge upphov till erosion när de ger upphov till höga strömhastigheter på botten eller bryter mot strandlinjen. Det finns i huvudsak två typer av vågor från fartyg: primära och sekundära. De primära vågorna beror på att fartyget tränger undan en vattenvolym (s.k. avsänkningseffekt). Detta ger upphov till tillfälliga långperiodiska vågor och utgör ofta det dominerande problemet i smala sund och fartygsleder. Denna effekt har modellerats detaljerat. De sekundära vågorna skapas av tryckgradienter runt fartygsskrovet och benämns svallvågor. De är ofta kortare vågor som utgår från bogen och aktern och de kan påverka på längre avstånd från fartyget. I det aktuella fallet rör sig fartyget med subkritisk hastighet, d.v.s. långsammare än fashastigheten för en lång våg \sqrt{gh} (där g är accelerationen på grund av gravitationen och h är djupet). Då uppstår de sekundära vågorna i ett mönster enligt Figur 3-4. De divergerande vågorna rör sig i en vinkel om ca 35° relativt rörelseriktningen. De transversella vågorna är inte relevanta när det gäller påverkan på strandlinjen och kommer inte att beaktas i den fortsatta analysen.

För att uppskatta de primära och sekundära svallvågornas våghöjd utgår vi ifrån den modell som beskrivs i ref. /9/ Denna empiriska modell bygger på data från försök med ett stort antal

fartygstyper av olika storlek. Den maximala våghöjden för de sekundära vågorna beräknas utifrån:

1. Fartygets dimensioner: längd (L), djupgående (D), *ship block coefficient* (C_b) samt avståndet från bogen till där fartygsskrovet når sin maximala bredd (L_e)
2. Vattendjupet (h) i farleden
3. Fartygets hastighet V i knop
4. Avståndet vinkelrätt ut från fartyget, y



Figur 3-4 Illustration av sekundära vågor (svall) från ett fartyg

För de sekundära vågorna föreslås följande formel för den maximala modifieringen av vattenytan H som sker nära fartyget (ref./9/):

$$H = \frac{V^2 \beta}{g} (F^* - 0.1) \left(\frac{y}{L}\right)^{-1/3}$$

Här är F^* det modifierade Froude-talet

$$F^* = \frac{V}{\sqrt{gL}} e^{\alpha \frac{D}{h}}$$

Där α och β är dimensionslösa koefficienter och är beroende av C_b , L och L_e .

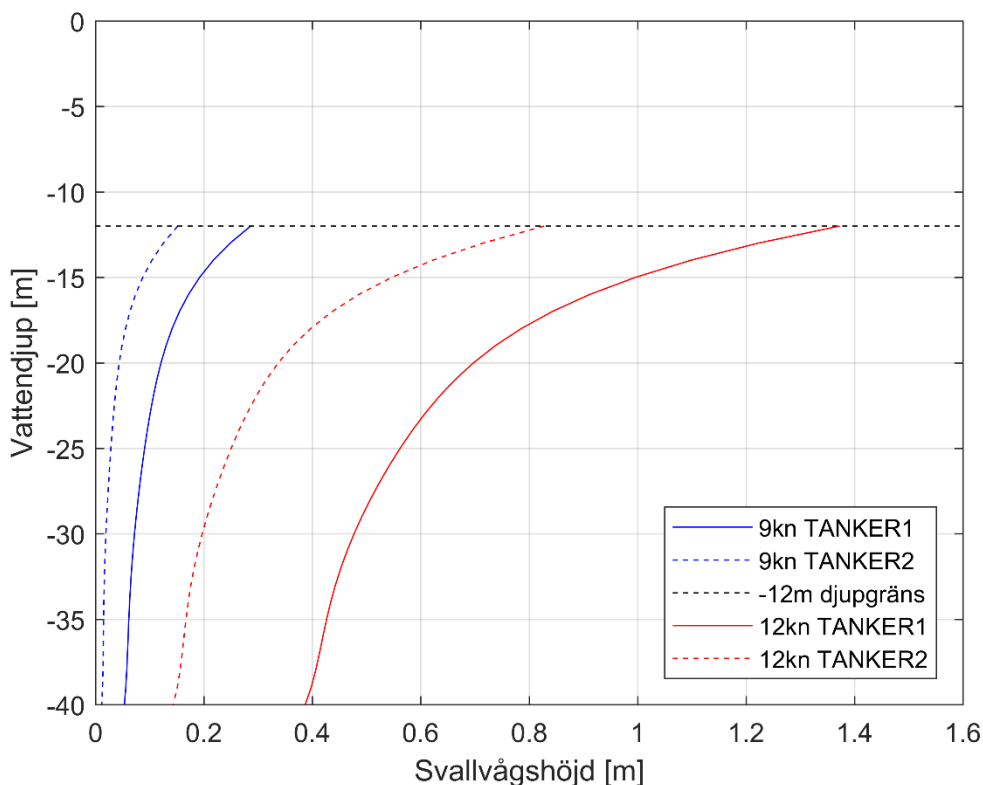
De sekundära vågornas period T kan uppskattas med formeln

$$T = \frac{2\pi V \cos \theta}{g}$$

där θ är vågornas utbredningsriktning relativt fartygets rörelseriktning (se Figur 3-4). Resultatet blir att $T \approx 0.27V$.

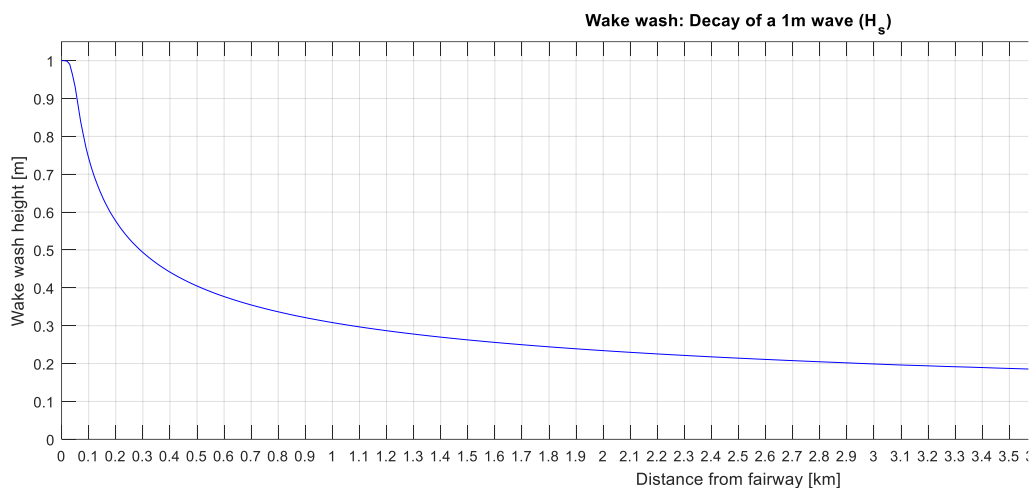
Då ett fartyg rör sig i konstant hastighet över ett varierande vattendjup kommer den svallvåg som genereras variera beroende på över vilket djup som fartyget passerar. En passage över

grunda områden genererar en högre svallvåg jämfört med en passage över djupare områden. Likaså kommer svallvågen som genereras direkt att svara mot den hastighet varmed fartyget framförs, där högre hastigheter leder till större vågbildning. För att illustrera vad som skulle kunna hända i en framtida farled har exempel på fartyg som trafikerar farleden idag och i framtiden modellerats. I se Figur 3-5 beskrivs beroendet av såväl vattendjup som hastighet för valda fartyg. Observera att detta samband endast gäller för de fartygstyper som vi räknat på, i detta fall ett nutida (TANKER1) och ett framtida (TANKER2) tankfartyg (se detaljer i Tabell 3-1). Ur denna illustration är det tydligt att en sänkt fart ger en mindre vågbildning oavsett val av fartyg. Det nya tankfartyget har i detta exempel en mindre svallvågshöjd än vad det nuvarande tankfartyget får. Orsaken till detta är att det nya tankfartyget har en "slankare" form vilket direkt avspeglas i våggenereringen. Förklaringen finns i ett större längd mot bredd förhållande och ett större avstånd från bog till starten av fartygets mittensektion. Då det förekommer en stor variation på fartyg som trafikerar en farled är det rimligt att anta att våggenereringen kommer att variera. Storleksordningen kommer dock att vara jämförbar med vad som visas i figuren nedan.



Figur 3-5 Initial vågbildning från tankfartyg som kan trafikerar farleden idag (TANKER1) och i framtiden (TANKER2). Fartygen passerar över ett bestämt djup och i hastigheten 9 respektive 12 knop. Ur de blåa kurvorna utläses vågbildningen på olika vattendjup för 9 knop och i de röda kurvorna för 12 knop.

När den fartygsgenererade svallvågen rör sig bort från fartyget kommer den att avklinga, av sig själv, och våghöjden minskar betydligt. För att visualisera detta förlopp illustreras i nästkommande figur hur en våg med våghöjden 1 meter avklingar på sin väg bort från fartyget. Ur denna graf kan man förutsäga vilken våghöjd som kommer att träffa stranden förutsatt att inga andra effekter, såsom interaktion med botten t.ex. sker, som gör att vågen förlorar ytterligare energi. Detta är ett konservativt antagande och därmed den maximala våghöjden som kan uppstå vid olika avstånd till fartyget.



Figur 3-6 Avklingning av en 1m hög svallvåg, oberoende av vattendjupet, på olika avstånd från ett fartyg.

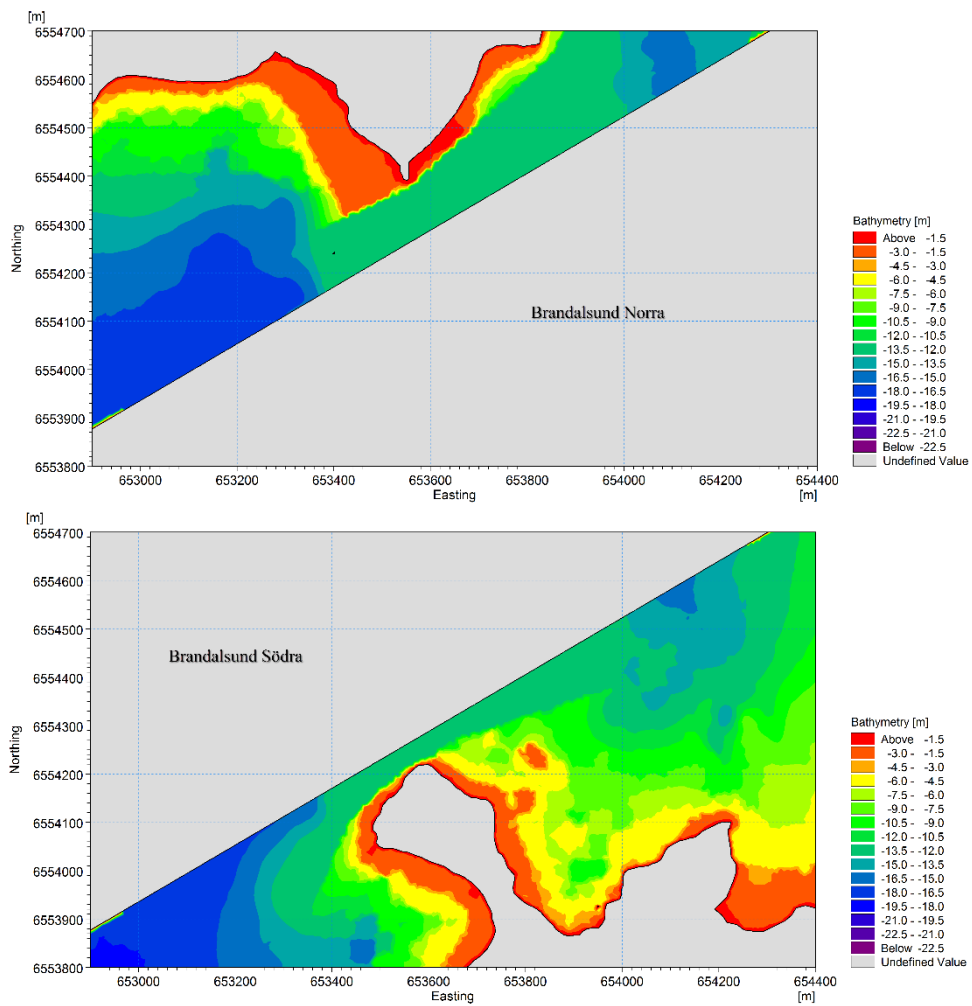
3.4.2 Transformering av svallvågor mot strandlinjen

För svallvågor har tre områden modellerats: Brandalsund, Skansundet och sundet mellan Oaxen och Regarn.

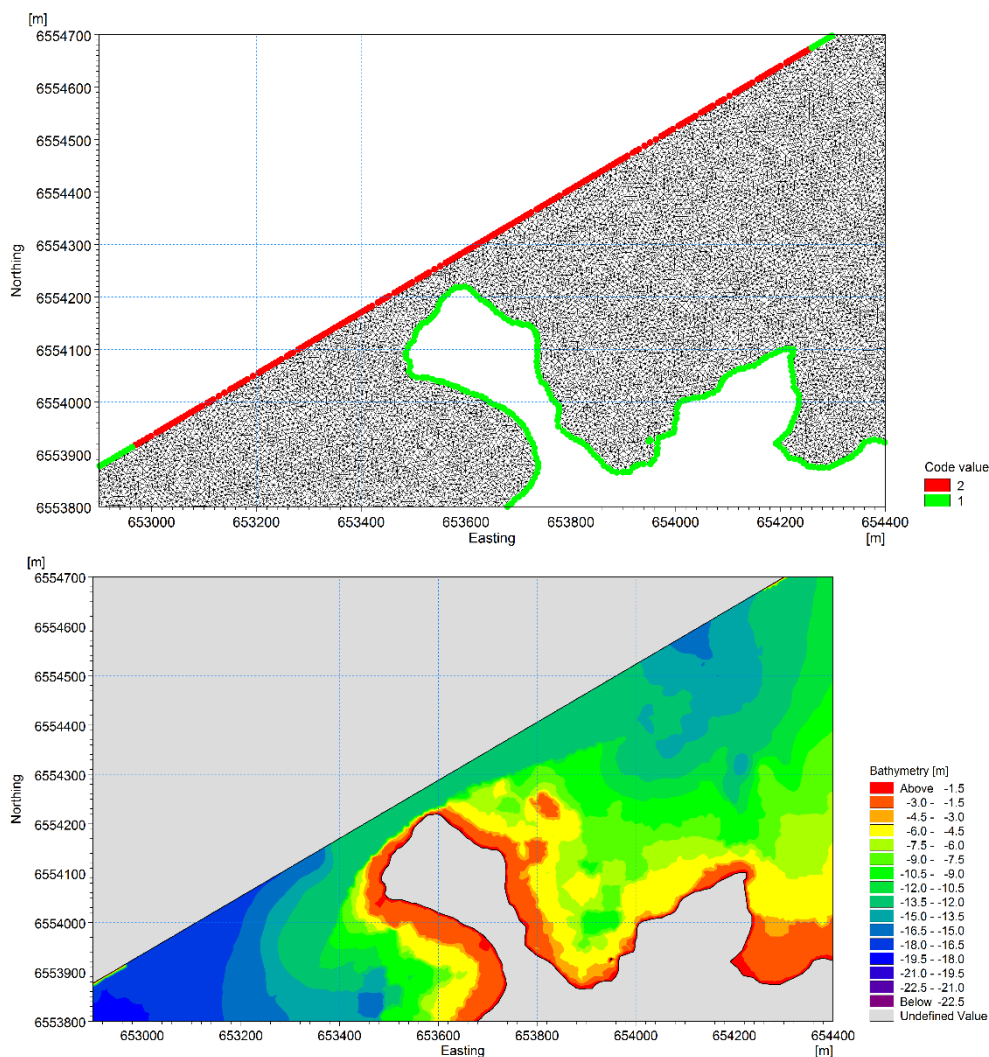
Beräkningen av hur svallvågen transformeras på sin väg från att den genereras vid fartyget tills den når strandlinjen har gjorts med DHI's numeriska modellverktyg MIKE 21 SW. Denna typ av modell kan inkludera effekter som refraktion över varierande djup och avledning av energi pga. bottenfriktion och vågbrytning. Även om den valda typen av transformationsmodell inte tar hänsyn till tidsberoende effekter förutsägs den rumsliga variationen av den karaktäristiska våghöjden, vågperioden och vågriktningen över stora områden. Den beskriver därmed svallvågornas styrka på grunt vatten och vid kustlinjen.

MIKE 21 SW har också använts för att beräkna vindvågornas utveckling i hela området under år 2015 i kapitel 3.2.

Nedan visas ett beräkningsnät för Brandalsund, som har sin högsta upplösning med gridcellernas storlek (kantens längd) på ca 5-10 m. Varje område har delats i två delar då svallet modelleras på en sida av farleden åt gången för både ingående och utgående trafik. I Figur 3-7 nedan visas djupdata från Brandalsunds norra respektive södra modellområde och i Figur 3-8 visas beräkningsnätet för det södra området jämte den överliggande djupdata som använts.



Figur 3-7 Exempel på modellbathymetrier för norra (övre bild) och södra (nedre bild) delen av Brandalsund vid beräkning av svallvågens utbredning.



Figur 3-8 Exempel på beräkningsnätet (övre bild) och den ingående djupdaten (nedre bild) för samma område.

3.4.3 Modellering av avsänkingsvågor

Avsänkningseffekten har modellerats längs sträckorna Regarn-Oaxen, Himmerfjärdens östra sida samt Brandalsund. Hastighetsbegränsningen för respektive farledssträcka har använts i modelleringen.

Den primära, eller undanträngda, vågen är inducerad genom olika vattenflöden runt fartygets skrov. Detta ger i sin tur förändringen av vattenståndet runt fartyget, speciellt längs sidorna på fartyget, och kallas avsänkning. Denna effekt är i huvudsak bestämd av fartygets hastighet och displacement samt eventuella begränsningar i vattenflödet som t.ex. orsakas av en kanal eller ett sund. Områden med grunda bottenar (0-15 m) löper framför allt en risk att påverkas av avsänkningseffekter från fartyg. Risken för påverkan från avsänkning ökar med minskad bredd på vattenområdet då den undanträngda volymen från fartyget får en större relativ effekt och därmed ger upphov till starkare strömmar.

I modellen som är använd i denna studie, en MIKE 21 Flow Model FM hydrodynamisk modell som är baserad på den numeriska lösningen av de två-dimensionella Navier-Stokes ekvationerna, är det bl.a. antaget att vattnet är inkompressibelt. Denna modell använder också ett flexibelt beräkningsnät bestående av trianglar eller fyrkanter för att beskriva den rumsliga upplösningen.

Fartyget introduceras i modellen som ett rörligt tryckfält där själva tryckfältet är proportionellt till fartygets djupgående. Skrovets form är specificerad genom att använda ett oberoende beräkningsnät som generellt är mycket finare än det nät som beskriver vattenmassan. Detta numeriska tillvägagångssätt för att beskriva avsänkningseffekterna har validerats mot fysiska modellförsök (ref /10/, /11/ and /12/)

4. Resultat

I utredningsområdet förekommer flera olika typer av vattenområden med olika inneboende känslighet för fysiska processer som strömmar och vågor. De känsligaste områdena är de grunda bottenarna (0-15 m) nära farleden samt de sträckor av kustlinjen som ligger nära farledsspåret och består av eroderbara jordarter, se Figur 4-1 och bilaga A. Dessa områden kan påverkas av såväl naturliga processer som av fartygstrafik, vilket presenteras nedan.

Områden med grunda bottenar (0-15 m) löper framför allt en risk att påverkas av avsänkningseffekter från fartyg men även av propellerströmmar från fartyg. Propellerströmmar kan påverka grunda bottenar precis i anslutning till den konformade strömprofil som utbreder sig bakom propellern på fartyget och bör beaktas då större fartyg tas i bruk.

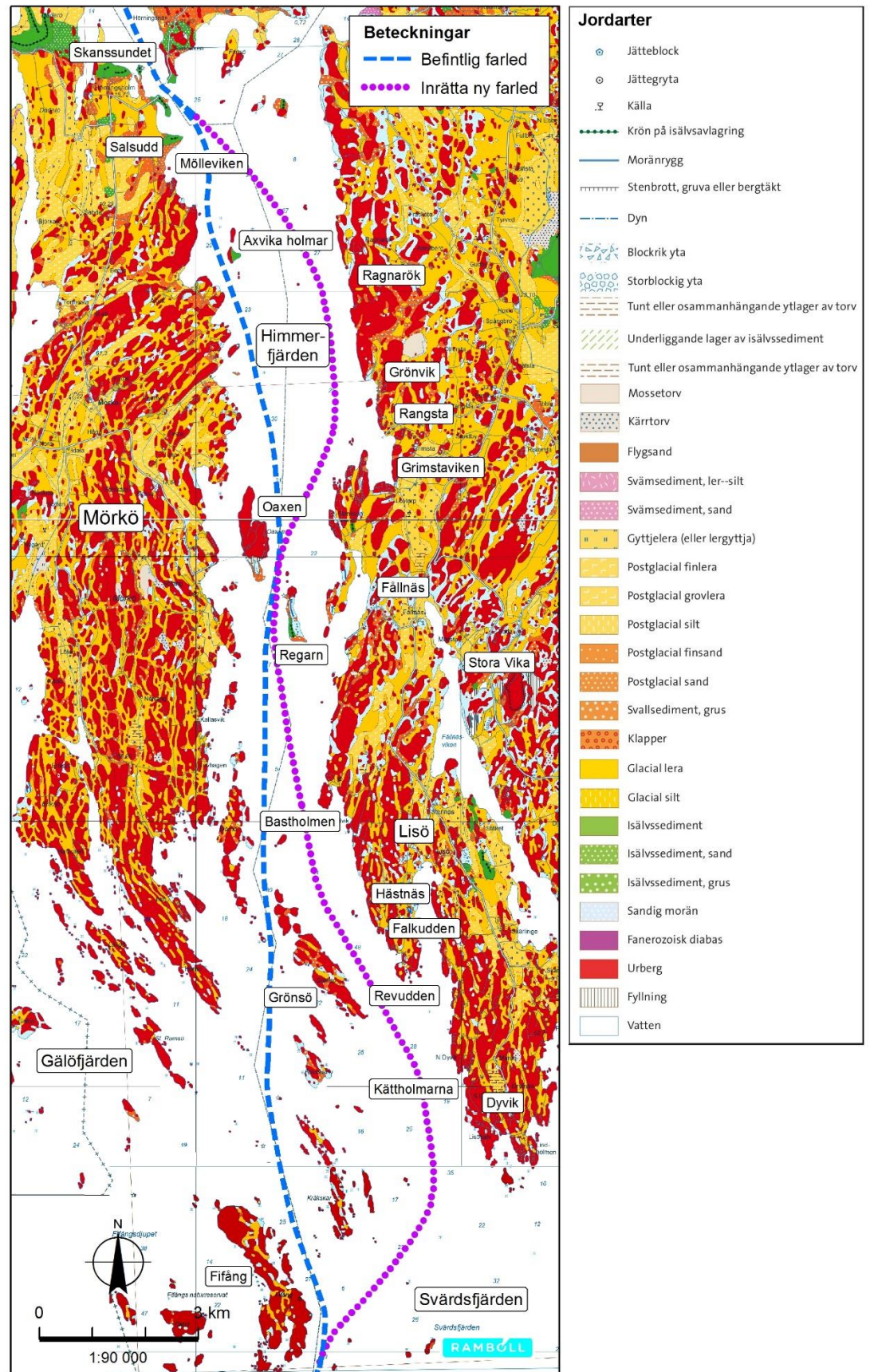
Bottenområden med större djup (>15 m) är relativt okänsliga för påverkan från fartygstrafik då energin som når botten från passerande fartyg bedöms vara försumbar på djup större än 20 m.

I de områden där strandlinjen är belägen nära fartygsspåret i farleden kan svallvågor från passerande fartyg utgöra en påverkan på strandkanten när svall från fartyg slår in mot stranden. Denna effekt kan få en stor betydelse i områden som är naturligt skyddade från vindvågor, eller i de fall då fartygsvågen är väsentligt större än vindvågorna.

I strandkanten kan erosion vara orsakad av isrörelser och bildandet av isskjutna vallar kan förekomma. Detta sker ofta naturligt och kommer framför allt från vattenståndsvariationer, förflyttning av isen vid starka vindar eller perioder med stor utströmning i vattendrag. Vid sådana tillfällen kan isen dras loss från strandkanten och orsaka skador på den och fastväxt vegetation men också skrapas av när is skjuvas upp mot strandkanten.

Erosion från is orsakad av fartygsrörelser anses generellt vara mycket begränsad och endast ske i de fall då farleden ligger mycket nära land. Med tanke på att den nya farleden ligger på ett stort avstånd från land bedöms inte denna effekt ha någon betydelse. Det tryck som fartyget utgör på isen under sin framfart kommer att bryta isen närmast kölen om det är fast is och övrigt tryck fördelas ut i fastisen. Vid uppbruten is kommer svallvågen att passera i isen men dämpas fortare än i fritt vatten. Visst horisontellt tryck kan fortplantas i isen under tillfällen med svag is men det sker oregelbundet och är svårt att kvantifiera. Att isrelaterad erosion orsakad av fartyg skulle uppstå annat än där farleden går väldigt nära strandkanten bedöms inte troligt. Denna påverkan måste också relateras mot det naturliga referensförhållandet med årlig påverkan av isrörelser.

Generellt kan sägas att ett större avstånd till strandlinjen ger en mindre påverkan från fartygstrafik och är något som rekommenderas att man tar hänsyn till vid en farledsdragning enligt PIANC (/12/).



Figur 4-1 Områden känsliga för svall och avsänkning längs befintlig farled samt nya farledsavsnitt

4.1 Vindvågor

Nedan presenteras vågklimatet för år 2015 vilket har modellerats för hela området (från 58° 48'N i söder till 59 11.5'N i norr).

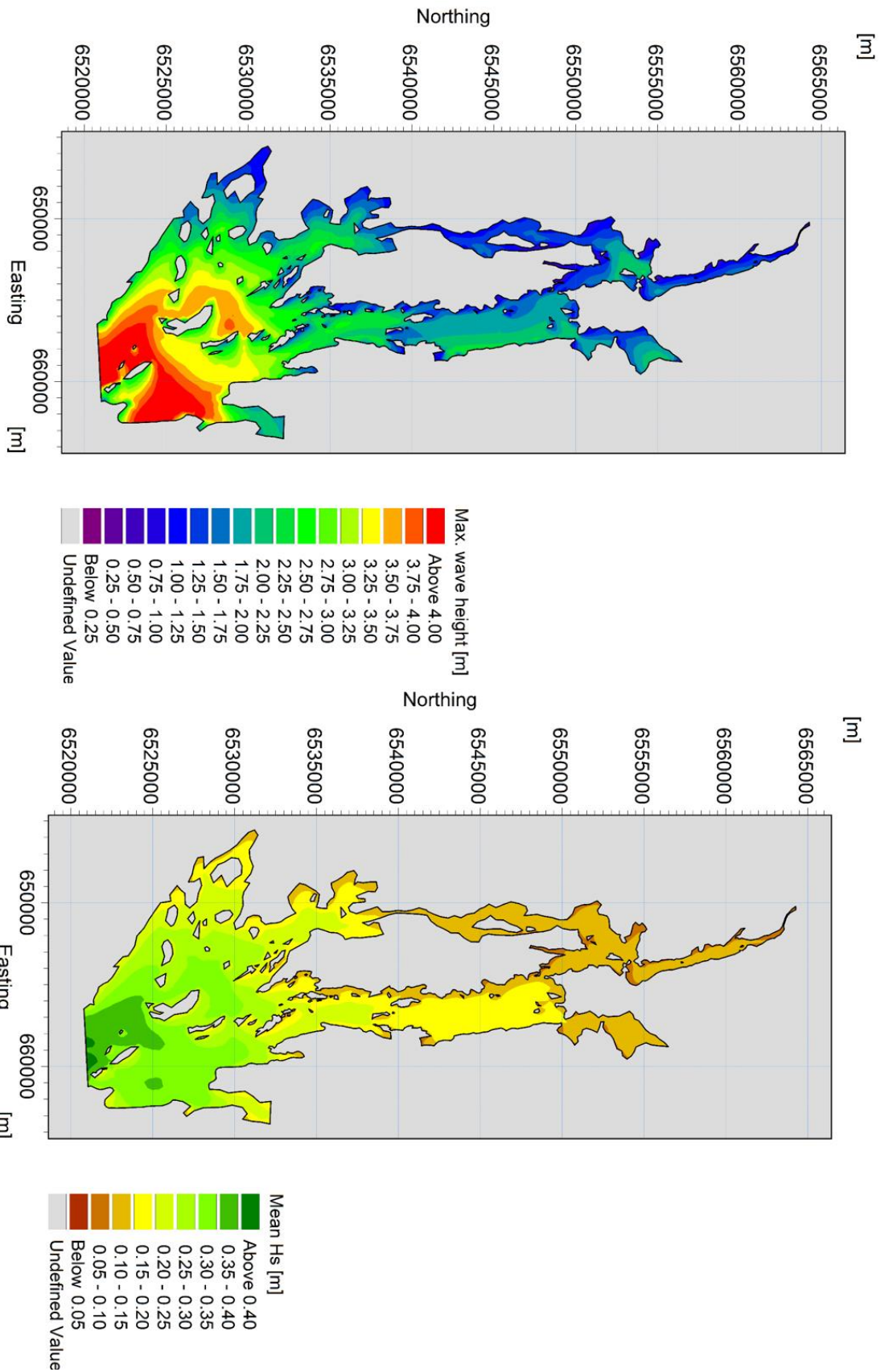
Från Figur 4-2 kan utläsas att de absolut högsta vågorna under 2015 (H_{\max}) blir närmare 4 m och återfinns i den nedre (södra) delen av området vilket är mest utsatt för hårda vindar från öppna havet söderifrån.

Att de hårdaste vindarna i huvudsak kommer från syd till sydväst kan ses i Figur 4-2 då H_{\max} fortfarande är relativt hög (2 till 2.5 m) söder om Oaxen och väster om Regarn samt Himmerfjärdens östra kustlinje och vid Brandalsunds sydvästra del.

I Figur 4-2 visas även årsmedlet av den signifikanta våghöjden (H_s). Signifikant våghöjd anses vara den parameter som bäst beskriver vågfältet /13/. Signifikant våghöjd är medelvärdet av alla de 30% högsta individuella vågorna under ett kortare tidsintervall (30 min), jämfört med H_{\max} ovan som är den momentant högsta uppmätta vågen för ett vågfält. H_s är därför en över tid mera förekommande våghöjd än H_{\max} .

Resultatet för H_{\max} visar ett liknande mönster som H_s med de högsta värdena i söder och avtagande norrut. Denna medelbild är dock något mer utslätad för H_s jämfört med H_{\max} .

De högsta värdena för H_s återfinns längst ned i söder och ligger runt 0.4 m för att succesivt avta till mellan 0.15 - 0.20 m i större delen av Himmerfjärden. Längs den västra stranden i Himmerfjärden är vågorna betydligt lägre och ligger snarare mellan 0.05 - 0.10 m. Detta värde dominerar i stort sett hela vägen från Skansundet (genom Brandalsund) upp till Södertälje i norr.



Figur 4-2 Modellerad våghöjd under år 2015. Maximal våghöjd (vänster). Medelvärdet av den signifikanta våghöjden, H_s , (höger).

För att uppskatta hur stor del av tiden en viss våghöjd överstiger en viss nivå har en s.k. exceedance-analys gjorts på all våghöjdsdata för 2015 för tre nivåer 0.10, 0.25 och 0.70 m. Resultaten för hela området presenteras i Figur 4-3 för respektive nivå.

Som väntat minskar den fraktion av tiden som H_{max} är över en viss nivå med stigande våghöjd. Från Figur 4-3 ses att för större delen av det modellerade området överstiger våghöjden 0.1 m med över 90% av tiden (under 1 år).

För en våghöjd som överstiger 0.25 m finns det bara ett område längst i söder som har denna våghöjd 90% av tiden eller mer. Andelen av tiden med denna våghöjd sjunker då man rör sig norrut. I de centralare delarna av området som t.ex. Himmerfjärden är denna siffra mellan 60 - 80% beroende på positionen i fjärden. I Skanssundet sjunker andelen av tiden ytterligare till 40-50% för att sedan öka igen strax söder om Brandalsund till 55 - 65%.

För den tid då H_{max} överstiger 0.7 m har bilden förändrats mycket. I större delen av området återfinns dessa vågor mindre än 25% av tiden. Endast i de mest södra delarna är det vanligt med vågor i den här storleksordningen och här förekommer de ca 40% av tiden.

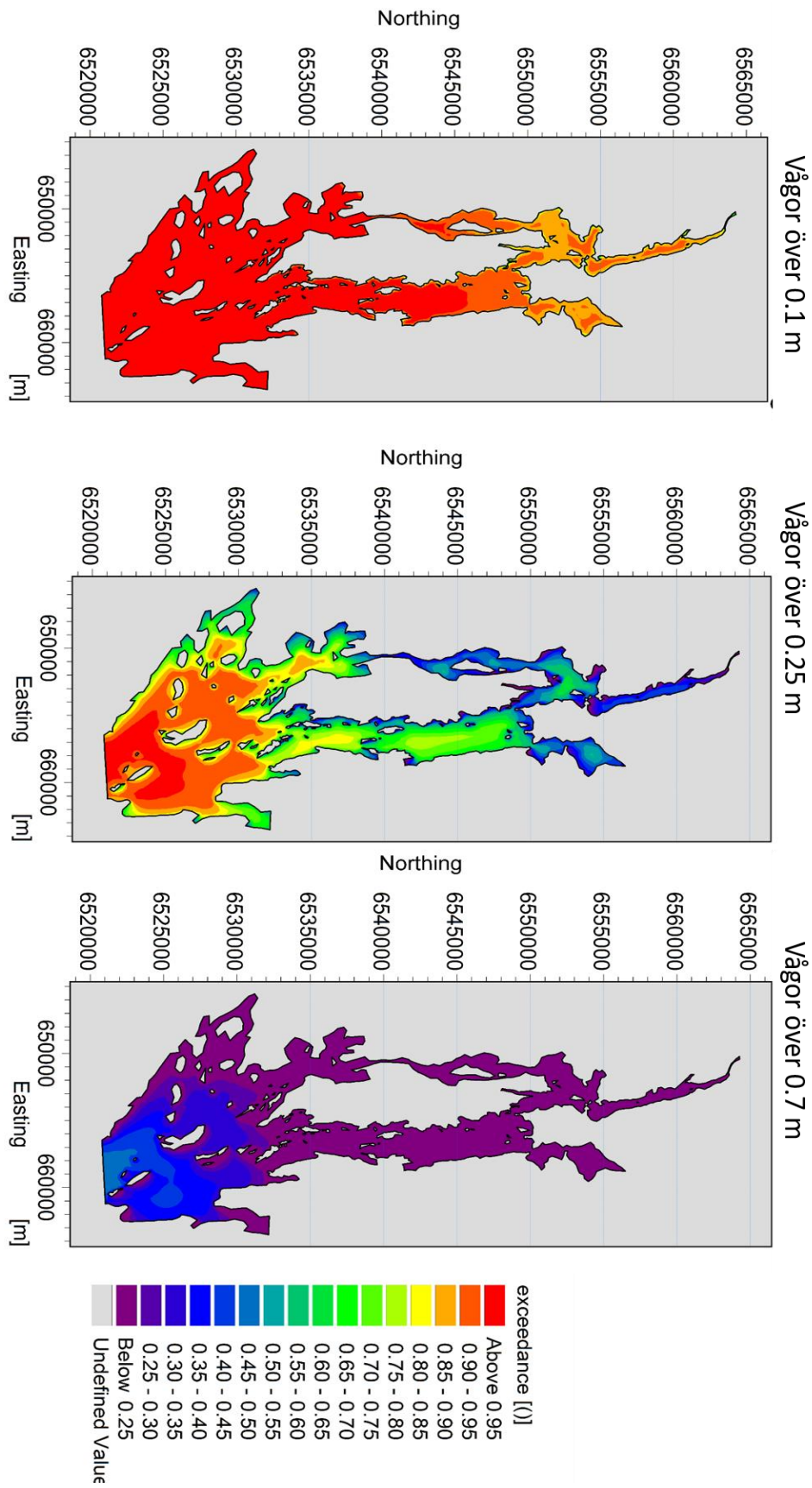
För att få en uppfattning om hur vågornas riktning och storlek fördelar sig under modellåret (2015) har figurer på vågrosor tillverkats för de smalaste sunden. I vågrosorna, i Figur 4-4, visas förekomsten och den procentuella fördelningen av den signifikanta våghöjden för alla riktningar samlade i cirkelsektorer med 15° bredd. Då det är i de trånga sunden som fartygen kommer att passera närmast land är det intressant att se vilken naturlig vågbildning som redan finns vid dessa positioner.

Ur vågrosorna framgår det att det förekommer vågor från alla väderstreck i de tre sunden. Den dominerande vågriktningen är längs sundens riktning, det är även här de högsta vågorna återfinns. Detta är naturligt då det är härifrån den största stryklängden finns.

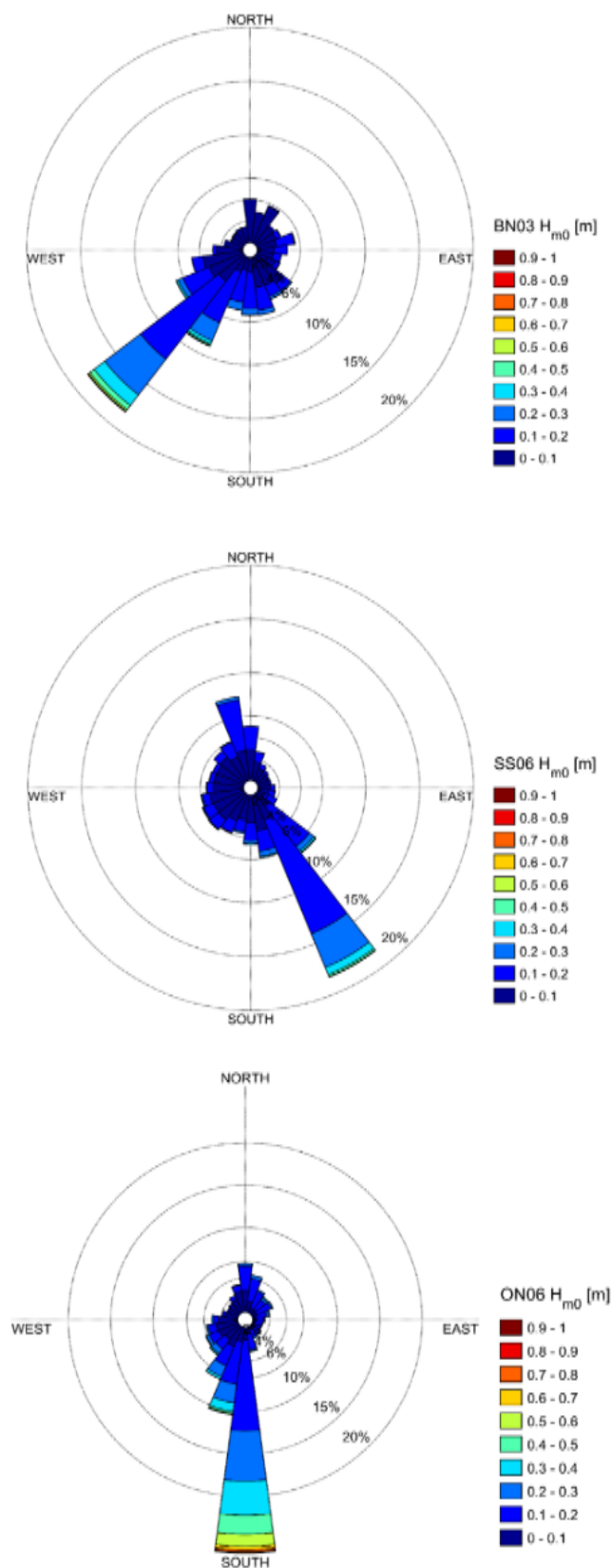
Oaxen – För denna position, som ligger strax söder om Oaxen, är den dominerande vågriktningen i huvudsak från syd där från vilket uteslutande de högsta signifikanta våghöjderna också uppstår. Här håller sig vågorna oftast till en våghöjd mindre än 0.3 m.

Skanssundet – För denna position, som ligger strax norr om sundet, är den dominerande vågriktningen i huvudsak från sydost där från vilket de högsta signifikanta våghöjderna också uppstår. Även i detta sund är det ovanligt med vågor större än 0.2 m.

Brandalsund – För denna position, som ligger i sundet, är den dominerande vågriktningen i huvudsak från sydväst, och det är även där ifrån de högsta signifikanta våghöjderna uppstår. Det framgår tydligt att den större delen av vågorna har en våghöjd mindre än 0.2 m.



Figur 4-3 Den fraktion av tiden på ett år som H_{max} överstiger 0.1 m, 0.25 m och 0.7 m.



Figur 4-4 Exempel på vågros från Brandalsund (överst), Skansundet (mitten) och Oaxen (nederst).

4.2 Propellerströmmar från fartyg

Propellerströmmarnas effekt på havsbotten om ett djup av 10.5 m har beräknats för ett typiskt fartyg som trafikerar farleden idag. För det nya föreslagna farledsdjupet om 12.65 m har två olika typer av större fartyg beräknats. Som referens hålls det typiska fartyg som idag trafikerar farleden vilket jämförs med de två tilltänkta framtida fartygstyperna (ett container- och tankfartyg), vars egenskaper presenteras i Tabell 3-1.

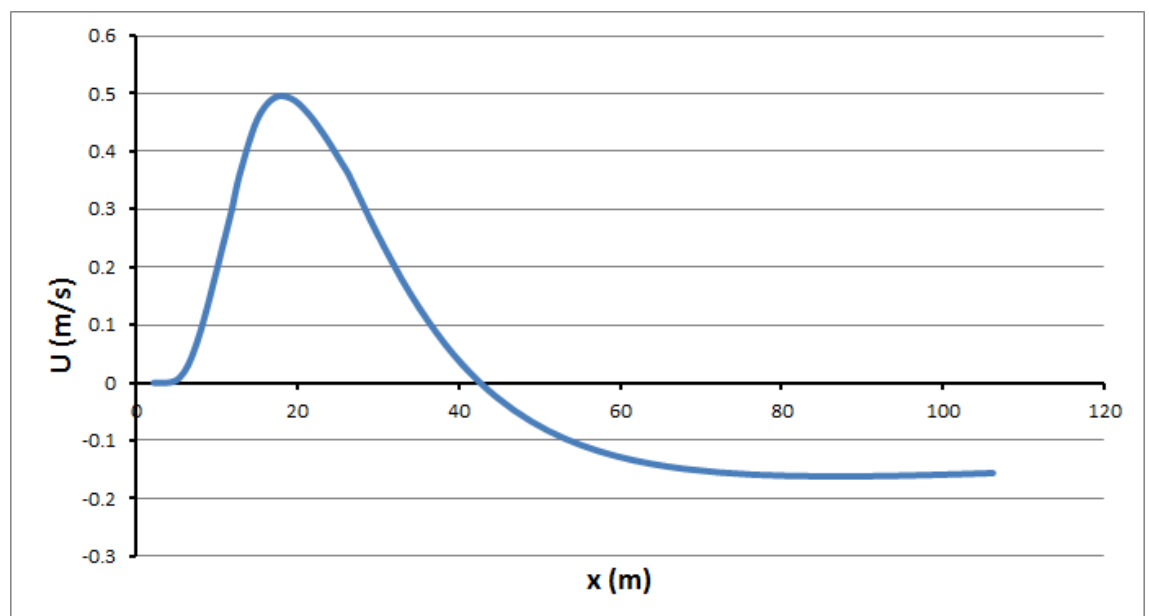
En strömhastighet på 0.26 m/s, direkt över botten, bedöms vara den undre gränsen för när propellerströmmen börjar påverka botten sediment av typen lermaterial /5/ och /6/. Denna strömhastighet är relaterad till den kritiska bottenkjuvspänningen på 0.2 N/m² som även beskrivs i ovan referenser.

Resultaten visar att det för såväl dagens som framtidens fartyg kommer att genereras bottenströmmar tillräckligt stora för att erodera botten sediment. Då det sker under en begränsad tid och akter om fartyget bedöms det inte ge några morfologiska förändringar.

4.2.1 Dagens fartyg: Tankfartyg, Uppskattning av påverkan

Propellerströmmen bakom ett typiskt tankfartyg av idag som färdas med 7 knop över ett djup på 10.5 m visas i Figur 4-5. Fartyget har en längd på 143.9 m och ett djupgående på 9.2 m (TANKER1 i Tabell 3-1).

Från Figur 4-5 kan utläsas att på ett avstånd mellan cirka 10 – 32m bakom fartyget är propellerströmmarna större än 0.2 m/s. Med denna sträcka på 22 m innebär det att havsbotten exponeras för strömmar över 0.2 m/s på en tidperiod på max 7 s.

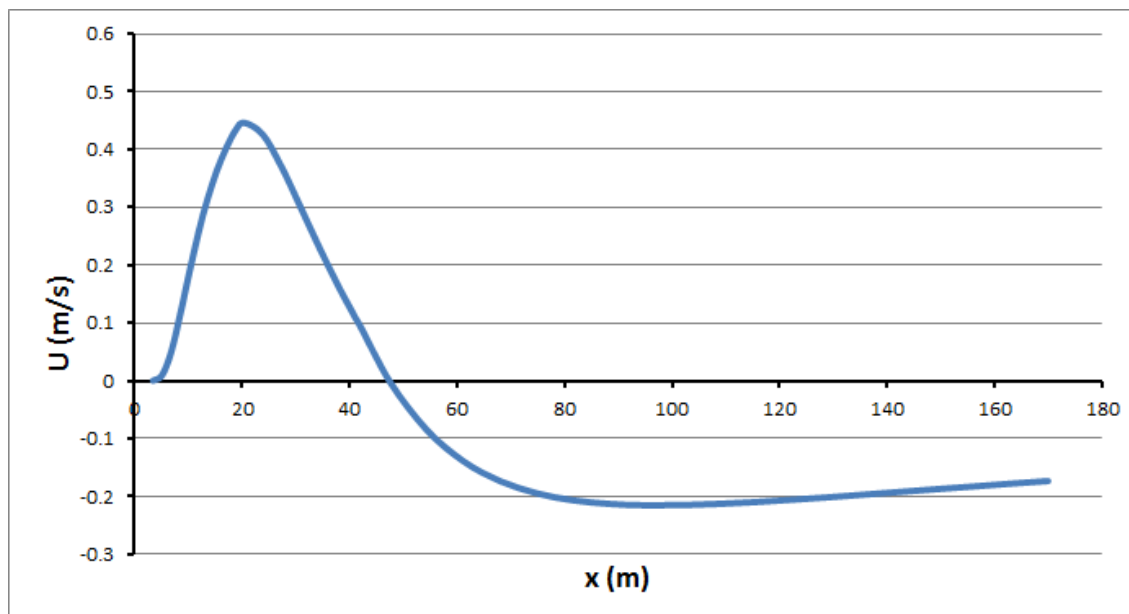


Figur 4-5 Propellerströmmens storlek (U) bakom ett 135m långt tankfartyg som färdas med 7 knop. På x-axeln visas det horisontella avståndet till propellern bakom fartyget på 10.5m djup.

4.2.2 Framtida fartyg: Containerfartyg

Propellerströmmen bakom ett framtida containerfartyg som färdas med 7 knop över ett djup på 12.65m visas i Figur 4-6. Fartyget har en längd på 235 m och ett djupgående på 10.9 m (CONTAINER i Tabell 3-1).

Från Figur 4-6 kan utläsas att på ett avstånd mellan cirka 11 – 35 m och 81 – 129 m bakom fartyget är propellerströmmarna större än 0.2 m/s. Med denna sträcka på 72 m innebär det att havsbotten exponeras för strömmar över 0.2 m/s på en tidperiod på max 21 s. 65 % av tiden ligger hastigheten just strax över gränsvärdet.



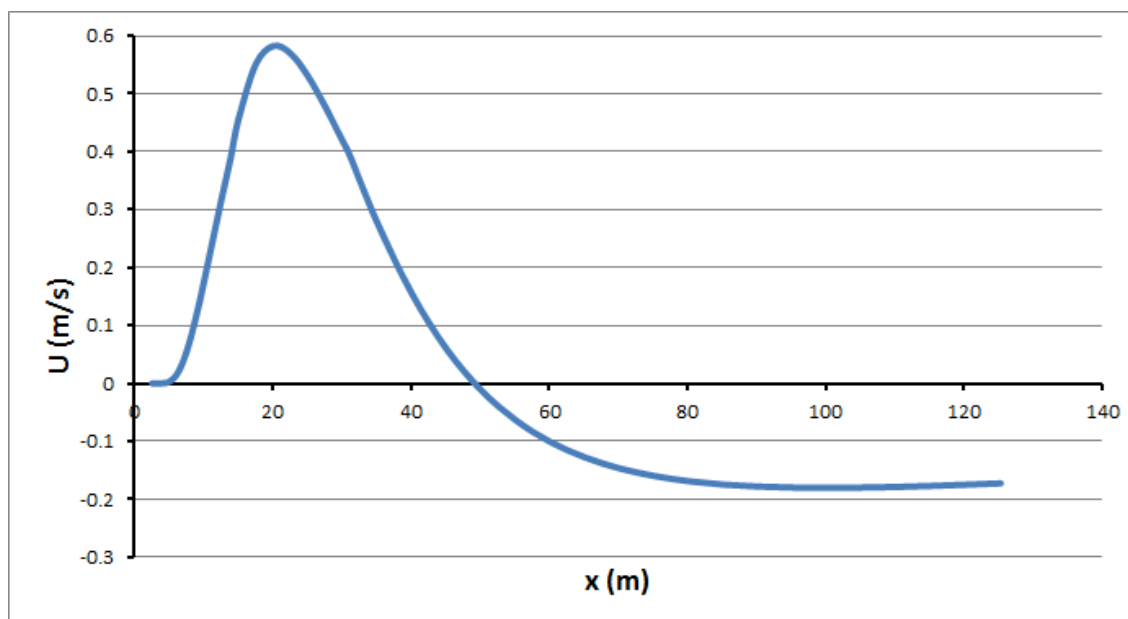
Figur 4-6 Propellerströmmens storlek (U) bakom ett 235m långt containerfartyg som färdas med 7 knop. På x-axeln visas det horisontella avståndet till propellern bakom fartyget på 12.65m djup.

4.2.3 Framtida fartyg: Tankfartyg

Propellerströmmen bakom ett framtida tankfartyg som färdas med 7 knop över ett djup på 12.65 m visas i Figur 4-7. Fartyget har en längd på 229 m och ett djupgående på 11.5 m (TANKER2 i Tabell 3-1).

Från Figur 4-7 kan utläsas att på ett avstånd mellan cirka 11 – 38 m bakom fartyget är propellerströmmarna större än 0.2 m/s. Med denna sträcka på 27 m innebär det att havsbotten exponeras för strömmar över 0.2 m/s på en tidperiod på max 8 s.

För detta fartyg och hastighet har även en känslighetsanalys för djupberoendet genomförts för att undersöka vid vilket botten djup som propellerpåverkan avtar. Från dessa beräkningar framkommer det att påverkan är försumbar vid vattendjup som är >16 m.



Figur 4-7 Propellerströmmens storlek (U) bakom ett 229m långt tankfartyg som färdas med 7 knop. På x-axeln visas det horisontella avståndet till propellern bakom fartyget på 12.65m djup.

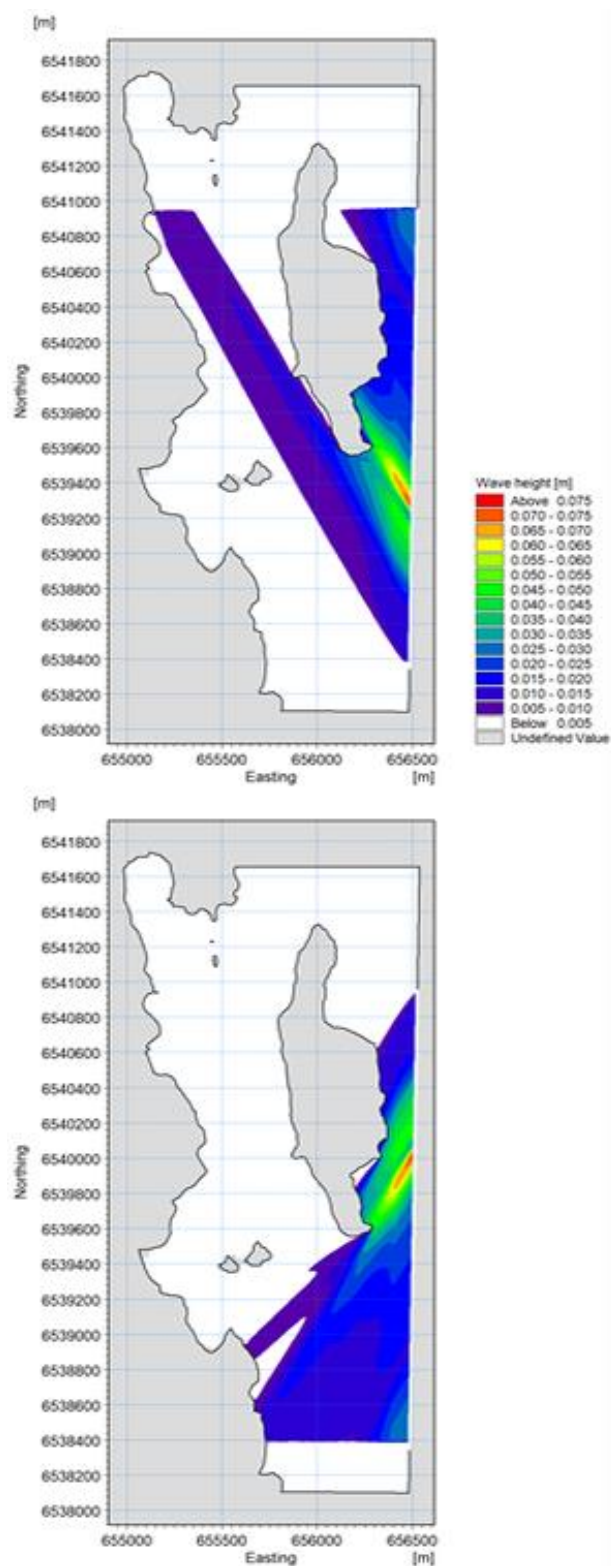
4.3 Fartygsvågor – Svallvågor

Nedan presenteras resultat från modellerade svallvågor för framtida fartyg längs farleden i tre områden: Brandalsund, Skansundet och sundet mellan Oaxen och Regarn. Både ett container- och ett tankfartyg har modellerats. De inledande beräkningarna av svallvågsgenerering visar att störst våg ges av containerfartyget för 7 knops fart medans det vid 9 knop är tankfartyget som ger störst svallvåg. I Brandalsund och Skansundet (Figur 4-11 till Figur 4-12) modelleras därför svallvågen för ett container fartyg som framförs i 7 knop. I Oaxen-Regarn modelleras istället tankfartyget (TANKER2) som framförs i 9 knops fart (Figur 4-8 till Figur 4-9). Både ingående och utgående trafik längs farleden har simulerats.

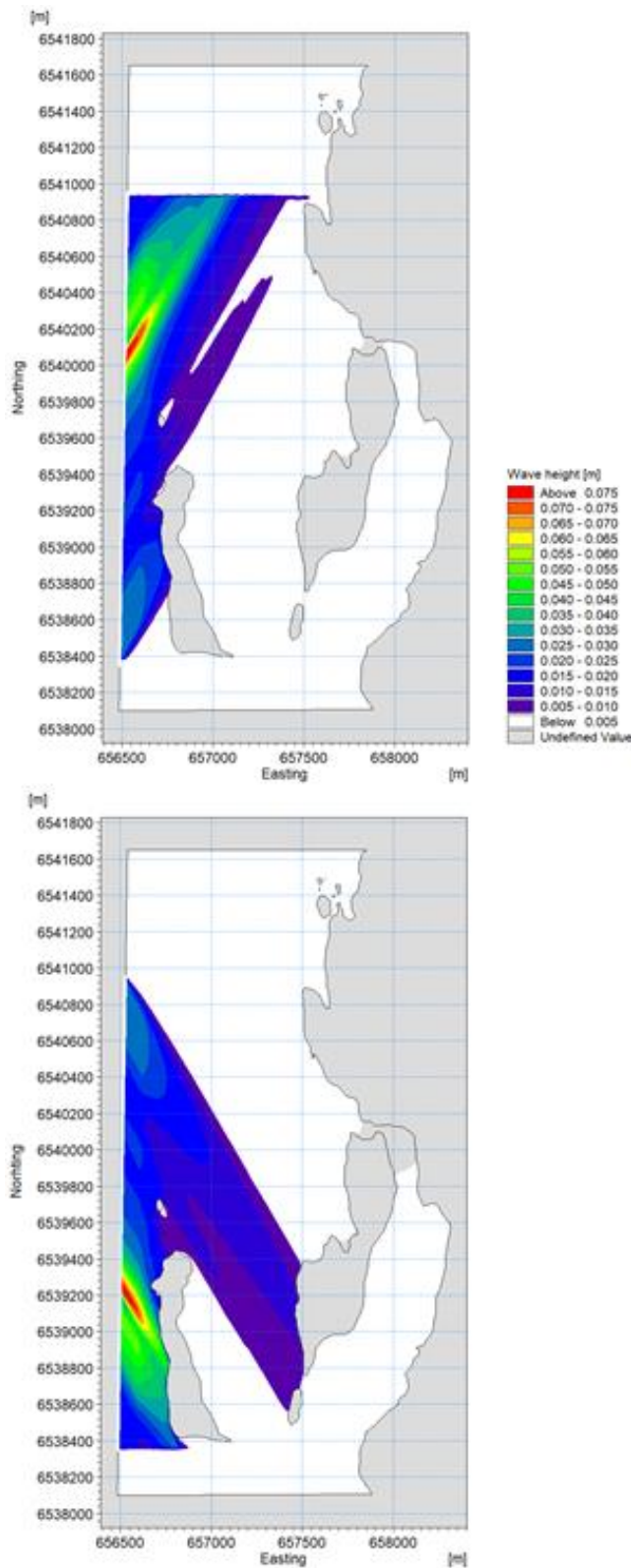
Höjden på svallvågen minskar på sin väg bort från fartyget förutom på de platser där det är som kortast avstånd mellan fartyget och stranden. Även fartygets färdriktning har betydelse för hur vågornas höjd avklingar och hur stort strandområde som blir utsatt för de högsta vågorna. Vågorna dämpas mindre längs de avsnitt av stranden där den är mer eller mindre vänd mot den riktningen som svallet kommer ifrån. Vid korta avstånd till stranden, eller med en strandlinje parallell med svallvågen, kan svallet i stort sett behålla sin ursprungshöjd hela vägen till stranden.

4.3.1 Oaxen-Regarn

Tankfartyget genererar en svallvåg på strax under 0.1 m höjd vid ett djup på 15 m med 9 knops fart. Dessa resultat för Oaxen och Regarn presenteras i Figur 4-8 till Figur 4-9 och de områden med högst våghöjd har rödaktig färg. När vågen når stranden har våghöjden redan halverats och oftast mer än så. Detta sker på stora delar av Oaxens och Regarns strandlinje som vetter mot farleden. På Oaxen är det framförallt sydgående passager av stora fartyg som påverkar den södra udden och en större del av den sydöstra strandlinjen. Nordgående passager påverkar mest den yttersta sydspetsen. För Regarn är det de sydgående passagera som påverkar mest. När vågorna från dessa passager når strandlinjen har de störst amplitud och träffar den mellersta strandlinjen. De nordgående passagera genererar inte alls vågor på samma sätt. I båda fall är våghöjderna små och bedöms inte ge upphov till erosion.



Figur 4-8 Höjden på svallvågorna, som träffar Oaxens östra strand, från ett framtida tankfartyg vid 9 knops fart i nordlig riktning (överst) och sydlig riktning (underst) i sundet mellan Oaxen och Regarn längs en bit av farleden. Bilderna är inte en ögonblicksbild utan en sammanfattning av hela förloppet då svallet genereras tills det träffar stranden.



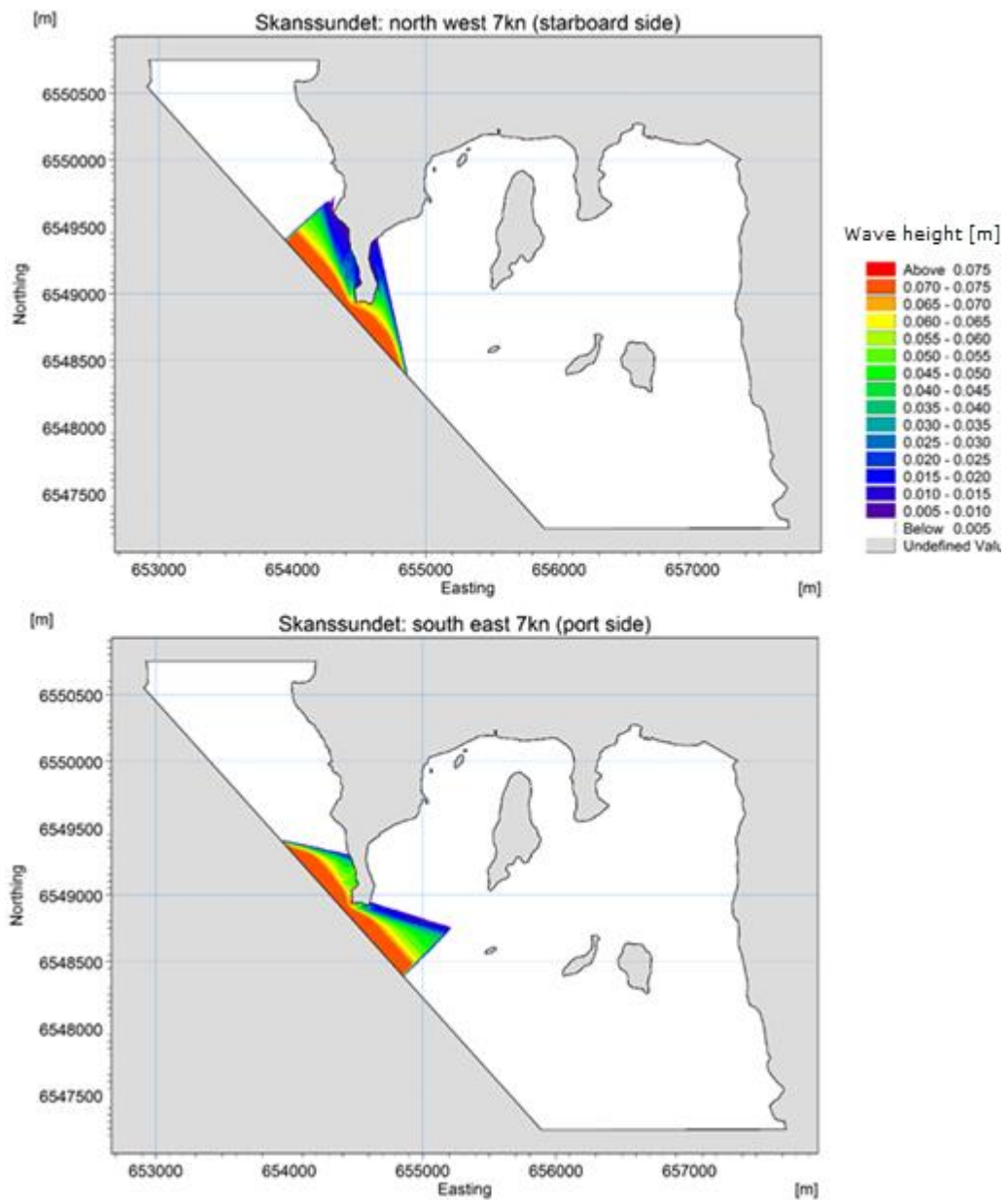
Figur 4-9 Höjden på svallvågorna, som träffar Regarns västra strand, från ett framtida tankfartyg vid 9 knops fart i nordlig riktning (överst) och sydlig riktning (underst) i sundet mellan Oaxen och Regarn längs en bit av farleden. Bilderna är inte en ögonblicksbild utan en sammanfattning av hela förloppet då svallet genereras tills det träffar stranden.

4.3.2 Skanssundet

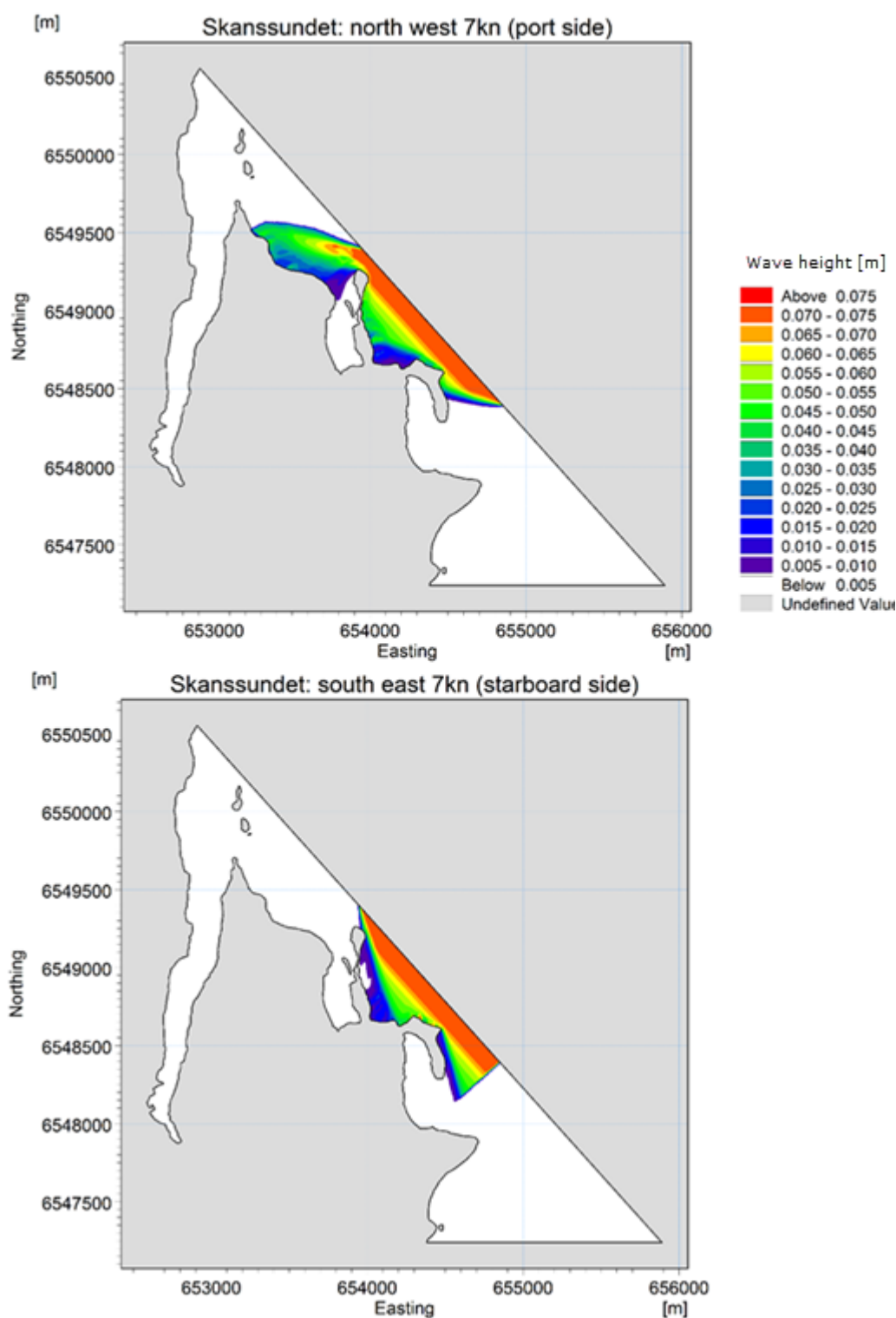
Containerfartyget genererar en svallvåg strax under 0.1m höjd vid ett djup på 13 m med 7 knops fart. Dessa resultat för Skanssundet presenteras i Figur 4-10 till Figur 4-11 och de områden med högst våghöjd har rödaktig färg. Den norra delen av Skanssundet mot Sandviken exponeras väldigt olika vid in och utgående fartygstrafik. Vid ingående färd är den yttersta udden på Sandvikensidan mest exponerad medan den västra stranden på samma sida får störst påverkan vid utgående trafik. Inte i något av fallen påverkas den östra stranden på Sandvikensidan. Längs den södra sidan av Skanssundet är det framförallt de sidor som vetter mot farleden av Notholmen och Skansholmen som blir exponerade. Den läande effekten av de båda uddarna syns tydligt i jämförelsen mellan utgående och ingående fartygstrafik. I båda fall är våghöjderna små och bedöms inte ge upphov till erosion.

4.3.3 Brandalsund

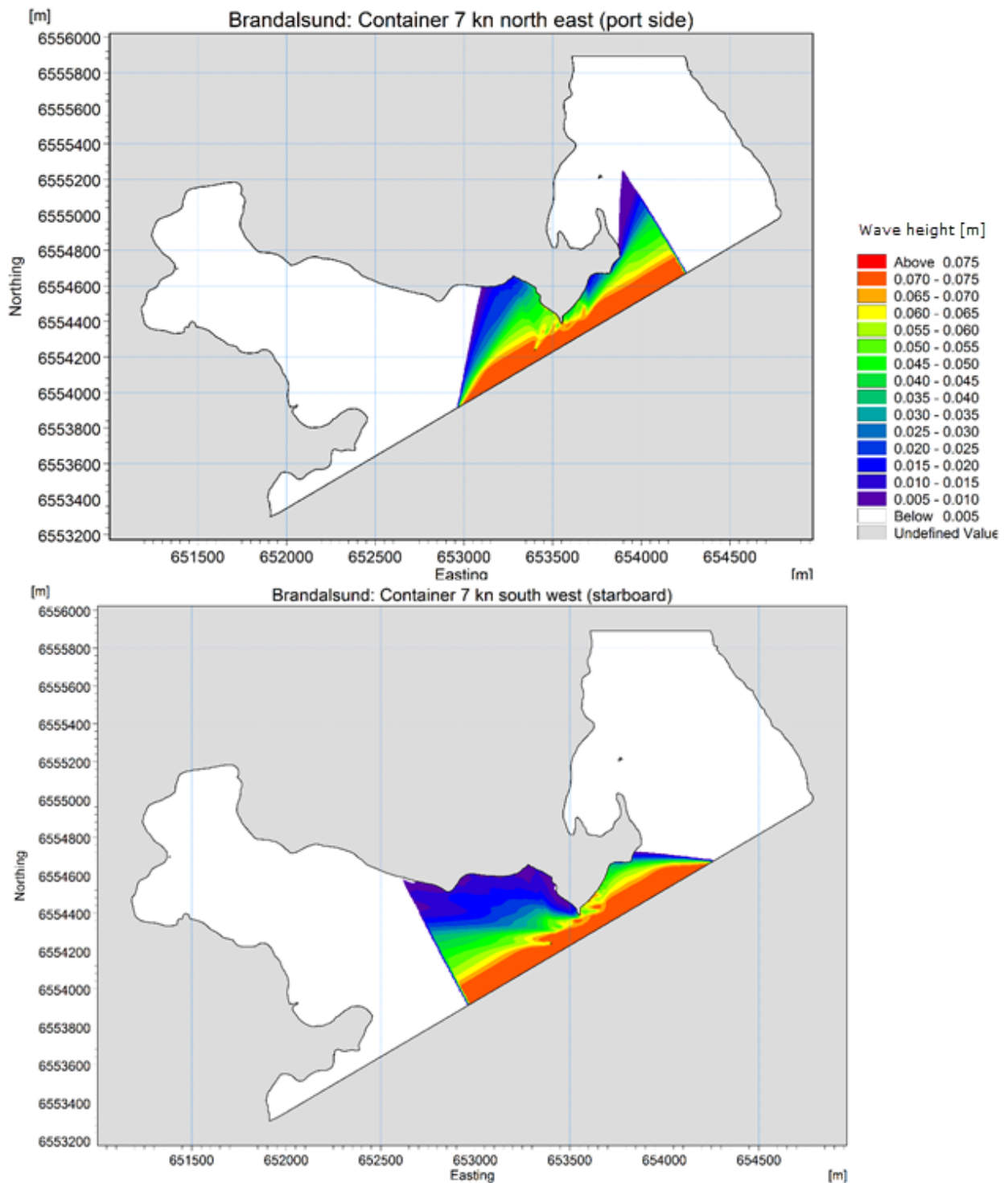
Containerfartyget genererar en svallvåg strax under 0.1 m höjd vid ett djup på 13 m med 7 knops fart. Dessa resultat för Brandalsunds norra respektive södra strand presenteras i Figur 4-12 till Figur 4-13 och de områden med högst våghöjd har röd färg. Det område som är mest exponerat för fartygssvall är stranden mitt i Brandalsund på Gettryggssidan (östra sidan), oavsett fartygets riktning i farleden. Vid ingående passage dämpas vågorna minst på den södra sidan om Gettryggen till följd av svallriktningen och vice versa. På den norra stranden i sundet, mot Trindborgen, är vågorna som högst när fartygen passerar ut genom farleden då de får lå av udden. På ingående rutt är det istället den västra stranden som vetter mot Sjöstugan strax innan sundet passerar som är mest exponerad. I båda fall är våghöjderna små och bedöms inte ge upphov till erosion.



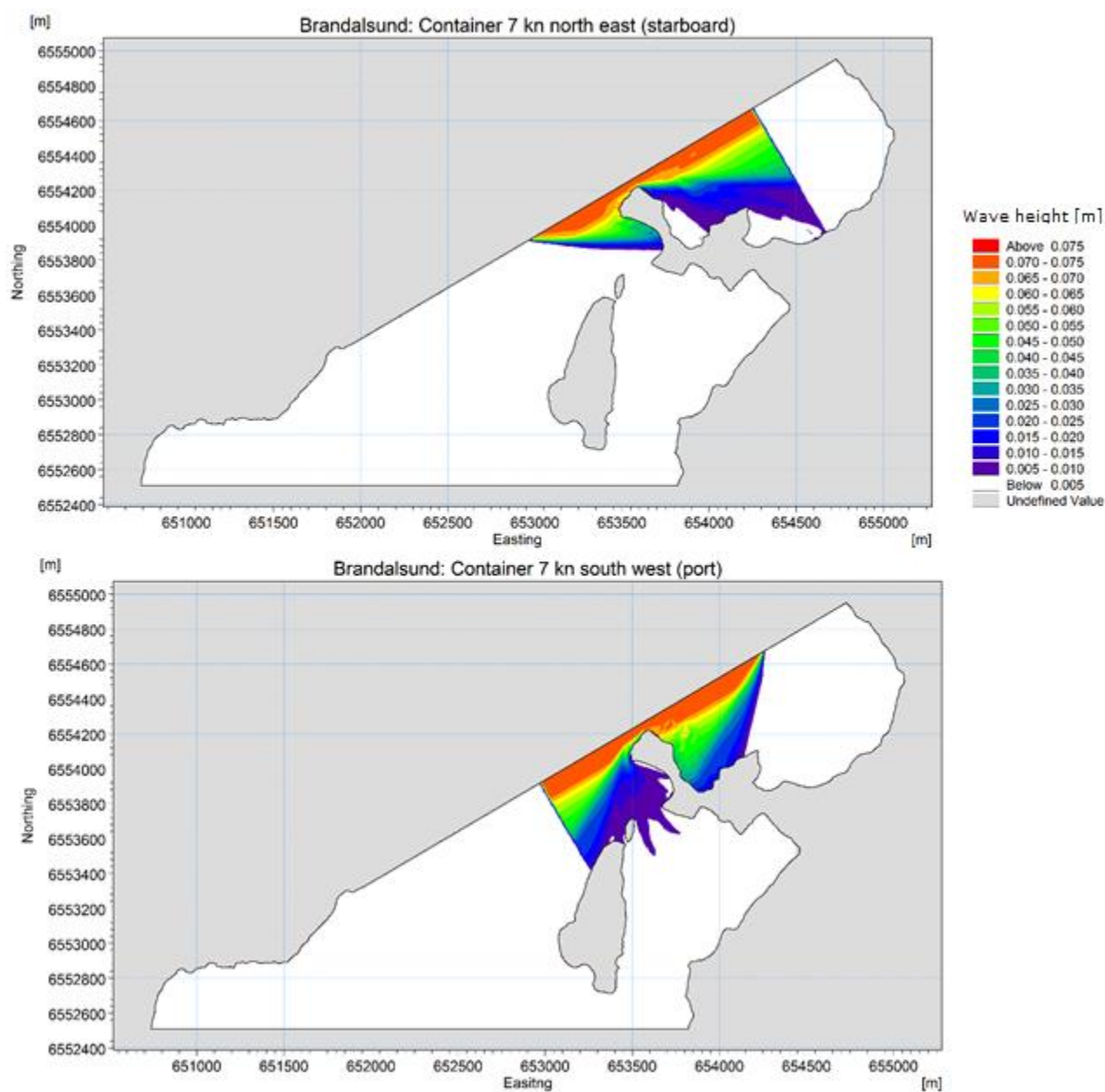
Figur 4-10 Höjden på svallvågorna, som träffar norra stranden, från ett framtida containerfartyg vid 7 knops fart i nordvästlig riktning (överst) och sydostlig riktning (underst) i Skansundet längs en bit av farleden. Bilderna är inte en ögonblicksbild utan en sammanfattning av hela förloppet då svallet genereras tills det träffar stranden.



Figur 4-11 Höjden på svallvågorna, som träffar södra stranden, från ett framtida containerfartyg vid 7 knops fart i nordvästlig riktning (överst) och sydostlig riktning (underst) i Skansundet längs en bit av farleden. Bilderna är inte en ögonblicksbild utan en sammanfattning av hela förloppet då svallet genereras tills det träffar stranden.



Figur 4-12 Höjden på svallvågorna, som träffar norra stranden, från ett framtida containerfartyg vid 7 knops fart i nordostlig riktning (överst) och sydvästlig riktning (underst) i Brandalsund längs en bit av farleden. Bilderna är inte en ögonblicksbild utan en sammanfattning av hela förloppet då svallet genereras tills det träffar stranden.



Figur 4-13 Höjden på svallvågorna, som träffar södra stranden, från ett framtida containerfartyg vid 7 knops fart i nordostlig riktning (överst) och sydvästlig riktning (underst) i Brandalsund längs en bit av farleden. Bilderna är inte en ögonblicksbild utan en sammanfattning av hela förloppet då svallet genereras tills det träffar stranden.

4.4 Fartygsvågor – Avsänkingsvågor

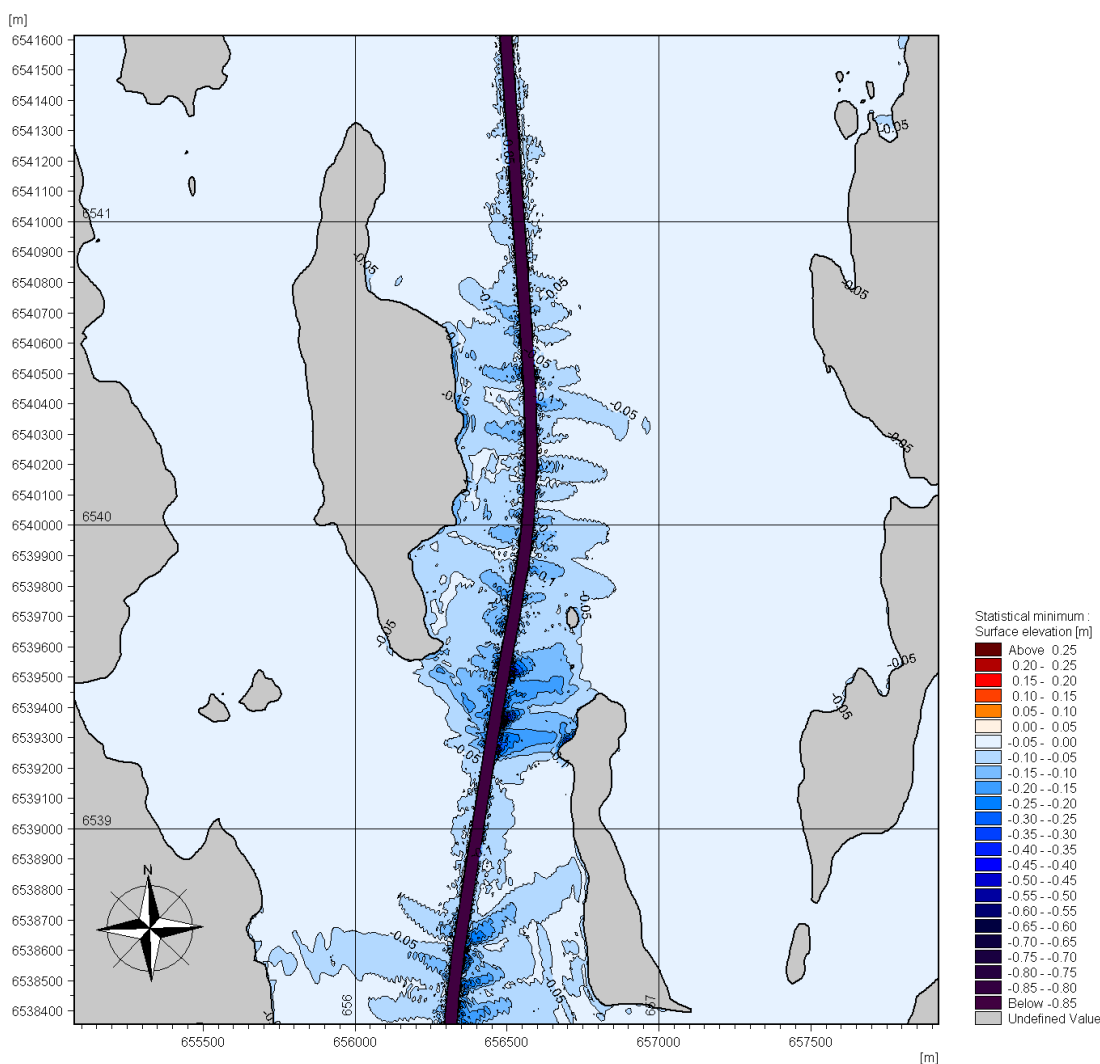
Resultaten från modellering av avsänkningseffekter (lokalt förändrat vattenstånd och strömfält) på omgivningen från förbipasserande fartyg presenteras nedan. För Brandalsund och Oaxen-Regarn jämförs resultat mellan ett typiskt tankfartyg som trafikerar farleden idag och ett i framtiden tilltänkt större tankfartyg. För Himmerfjärden, där fartyget följer en ny tilltänkt sträckning av farleden, presenteras resultat endast för avsänkning för det framtida fartyget.

4.4.1 Oaxen-Regarn

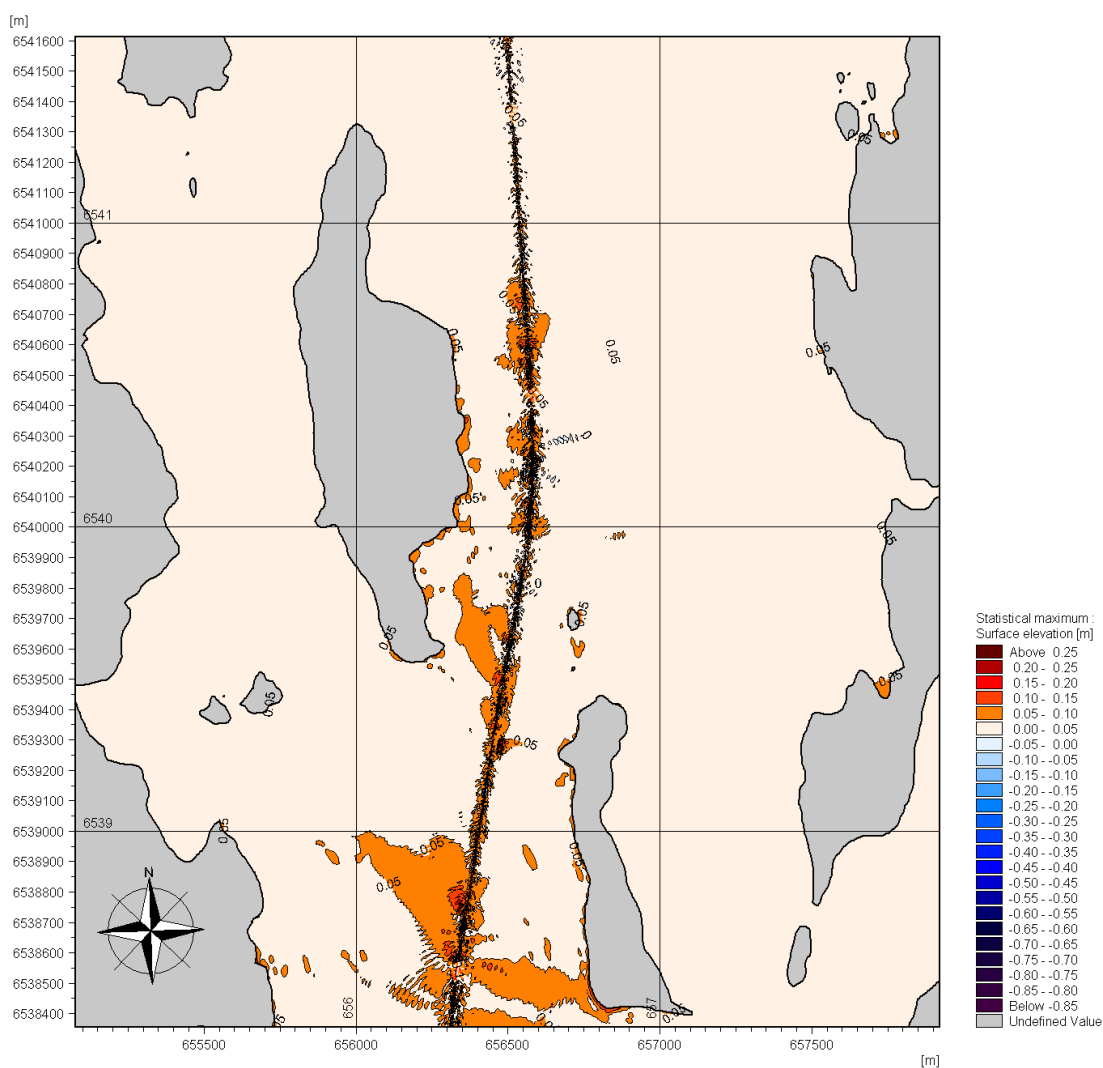
Skillnaden mellan två fartyg, som framförs med en hastighet av 9 knop, med avseende på maximal vattenståndsskillnad och strömstyrka mellan två fartygspassager (nutida och framtida) presenteras nedan (se TANKER1 och TANKER2 i Tabell 3-1).

Modelleringarna indikerar en ökad avsänkningseffekt framförallt vid den nordvästra delen av Regarn och längs den östra delen av Oaxen.

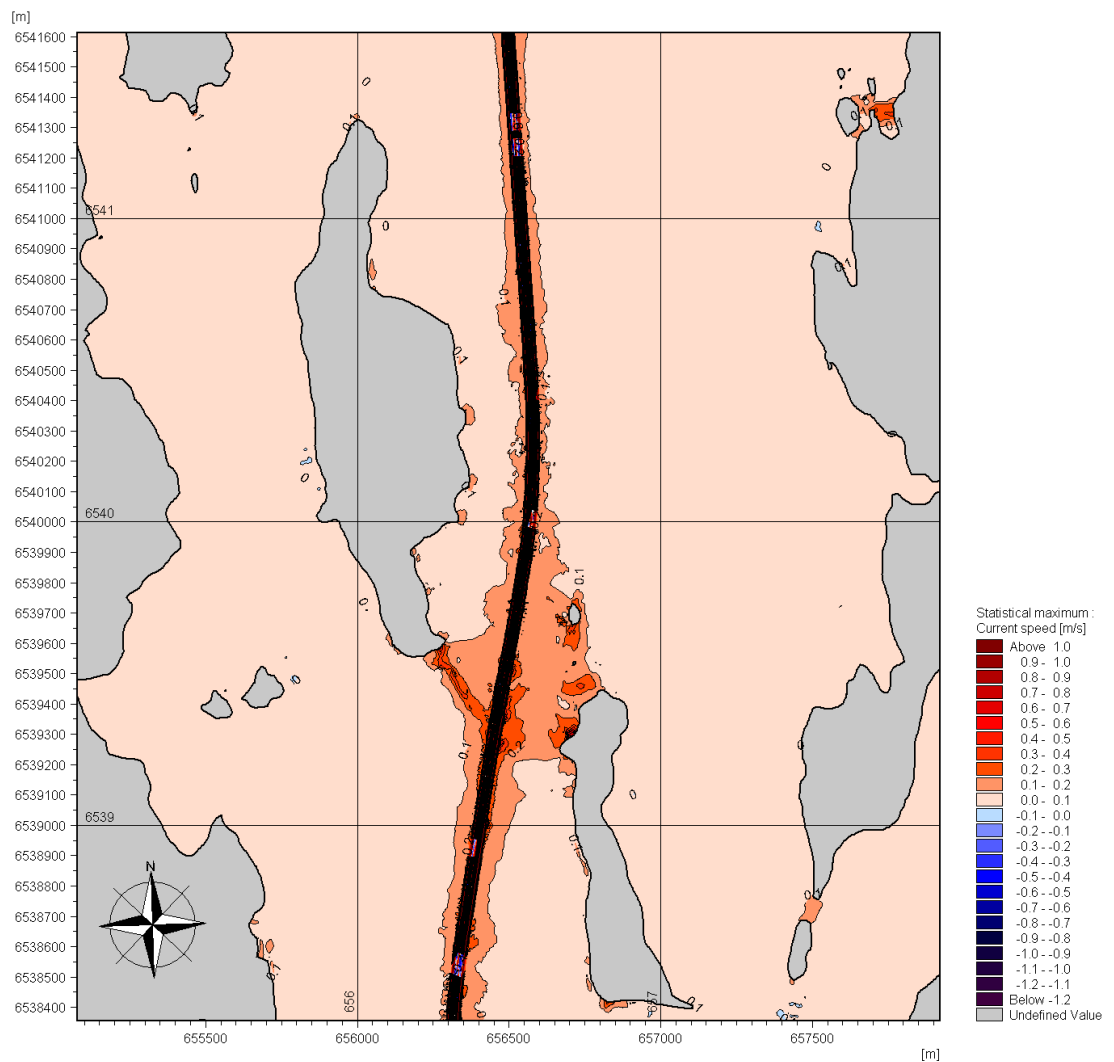
Morfologiska förändringar, kan ske i den smalaste farledsdelen där avståndet mellan Oaxen och Regarn är som minst.



Figur 4-14 Skillnad i lägsta möjliga vattenstånd, mellan ett nutida och ett framtida fartyg, vid passage mellan Oaxen och Regarn (framtid - nutid).



Figur 4-15 Skillnad i högsta möjliga vattenstånd, mellan ett nutida och ett framtida fartyg, vid passage mellan Oaxen och Regarn (framtid - nutid).

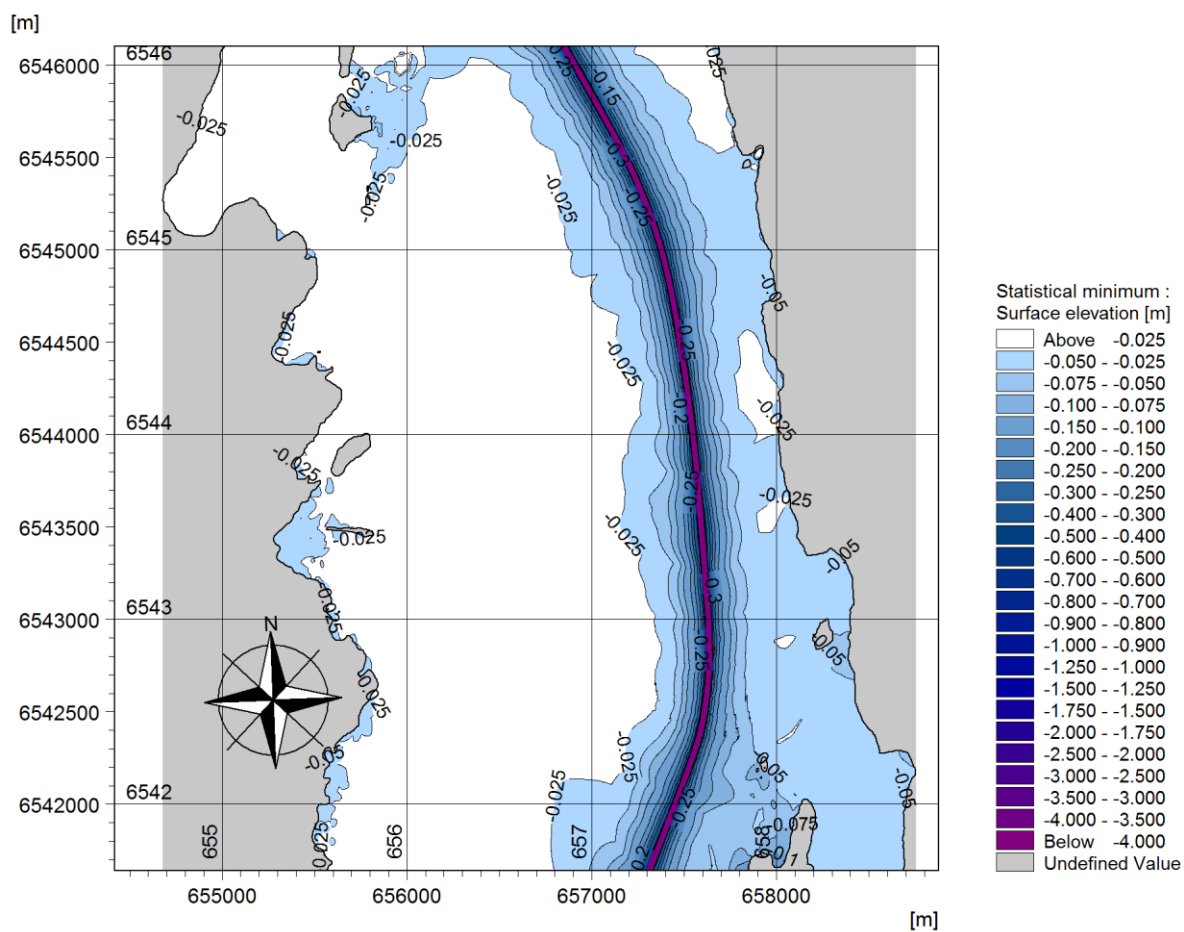


Figur 4-16 Skillnad i högsta möjliga strömhastighet, mellan ett nutida och ett framtida fartyg, vid passage mellan Oaxen och Regarn (framtid - nutid).

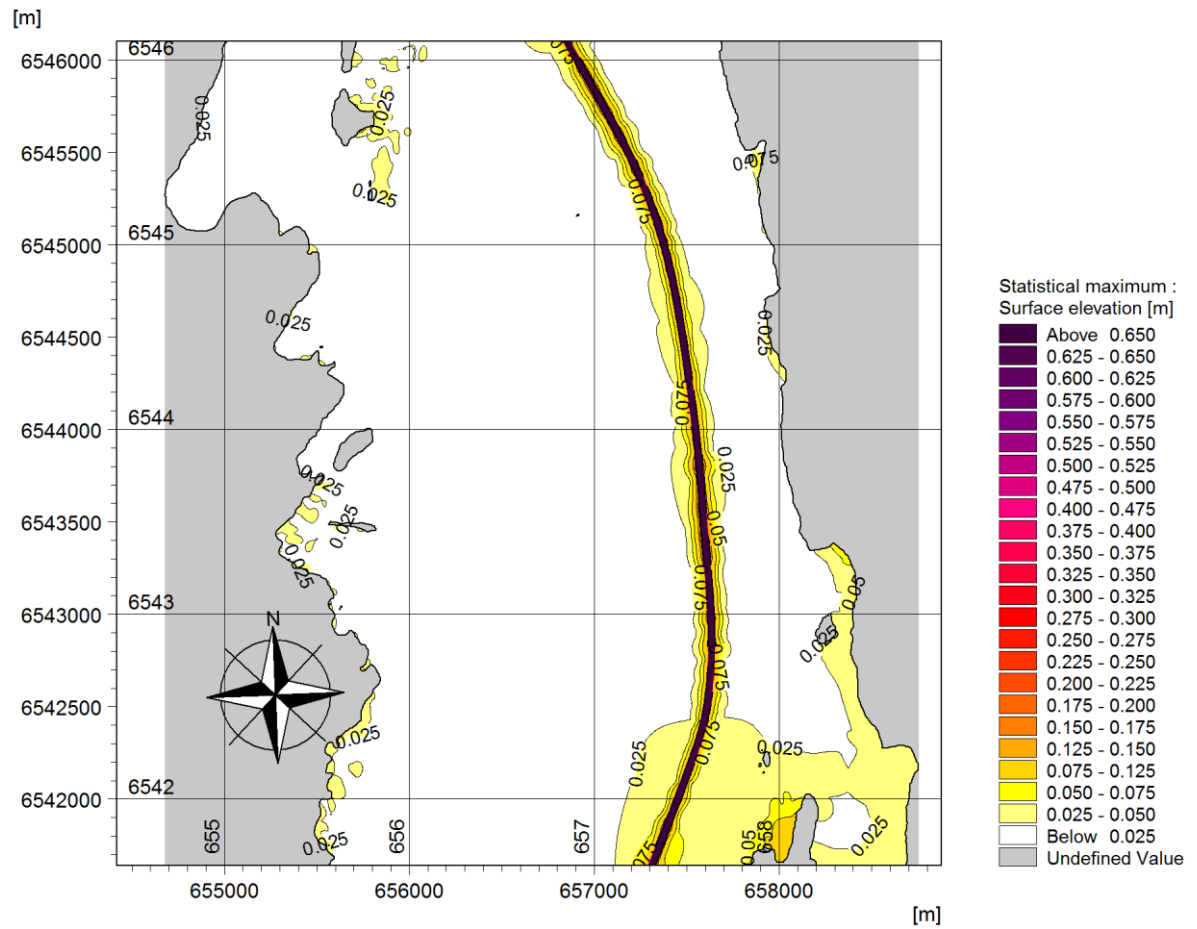
4.4.2 Himmerfjärden

Effekten av ett framtida fartyg (TANKER2 från Tabell 3-1) framfört i 12 knop, längs en ny föreslagen farled, med avseende på maximal vattenståndsskillnad presenteras nedan. Avsänkningseffekterna är väldigt små och kommer inte att påverka strandlinjen på någon sida om fartyget.

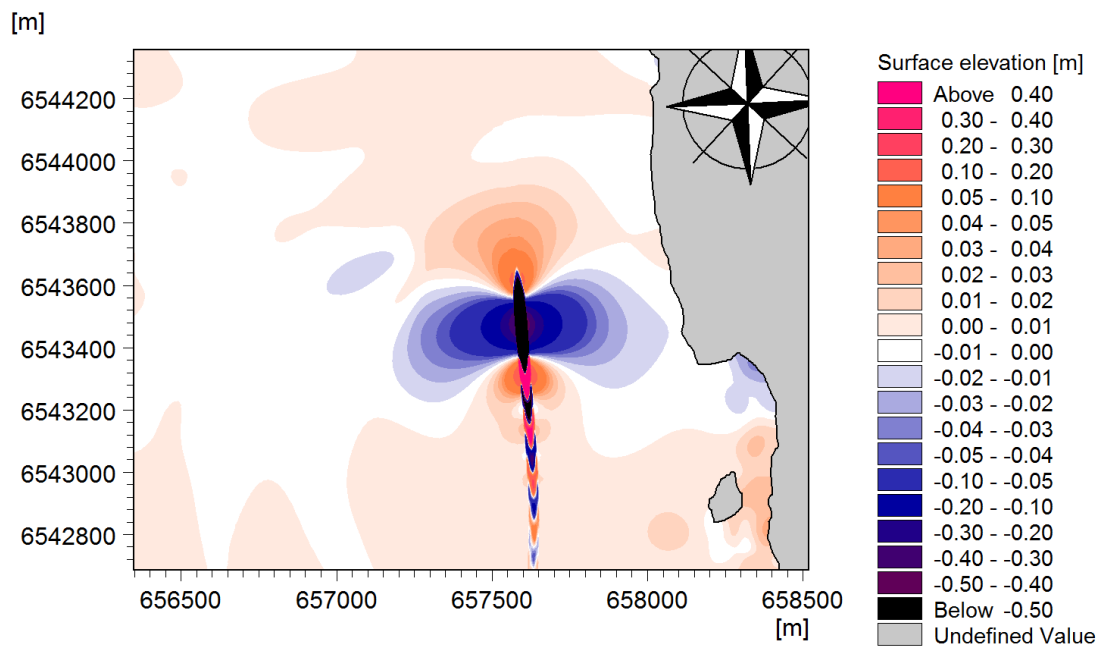
För att ytterligare illustrera hur avsänkningsvågen betar sig runt fartyget har en ögonblicksbild av vattenståndsvariationen runt fartyget tagits fram och visas nedan.



Figur 4-17 Lägsta möjliga vattenstånd från avsänkningseffekten, för ett framtida tankfartyg, vid passage längs Himmerfjärdens östra kust.



Figur 4-18 Högsta möjliga vattenstånd från avsänkningseffekten, för ett framtida tankfartyg, vid passage längs Himmerfjärdens östra kust.



Figur 4-19 Ögonblicksbild av vattenståndsförändringen orsakad av avsänkningen kring fartyget.

4.4.3 Brandalsund

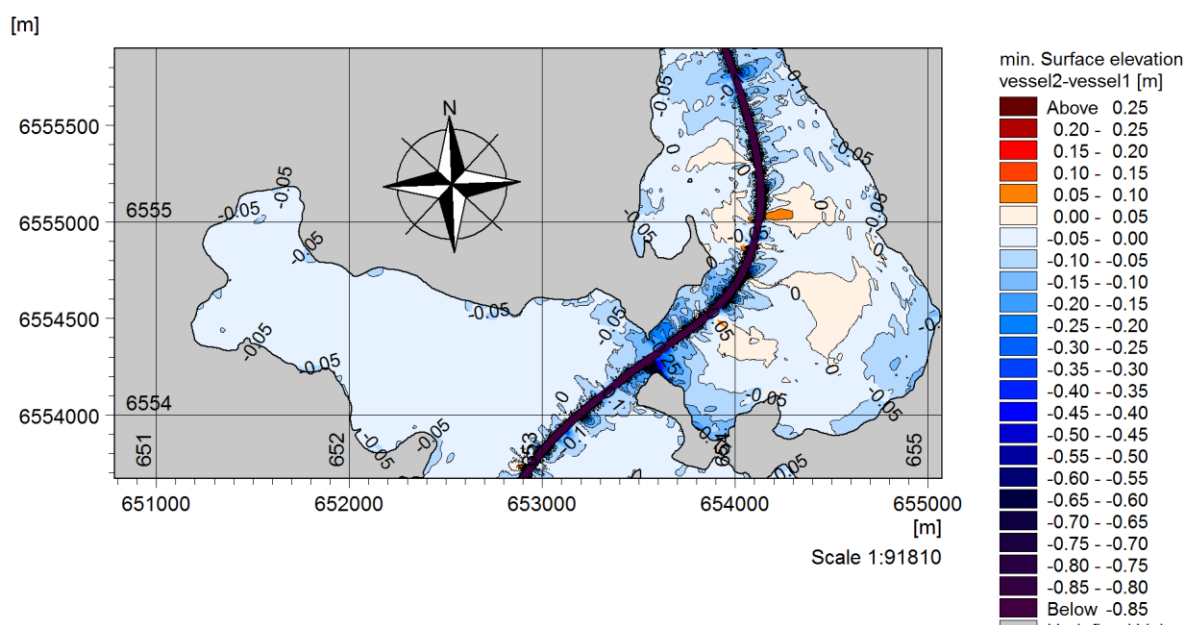
Skillnaden mellan två fartyg, som framförs med en hastighet av 7 knop, med avseende på maximal vattenståndsskillnad och strömstyrka mellan två fartygspassager (nutida och framtida) presenteras nedan (se TANKER1 och TANKER2 i Tabell 3-1).

I sundet, där farleden är som smalast, ökar den maximala avsänkningseffekten med mellan 0.2 och 0.7 m. På övriga sträckor är maximala effekten 0.15 m.

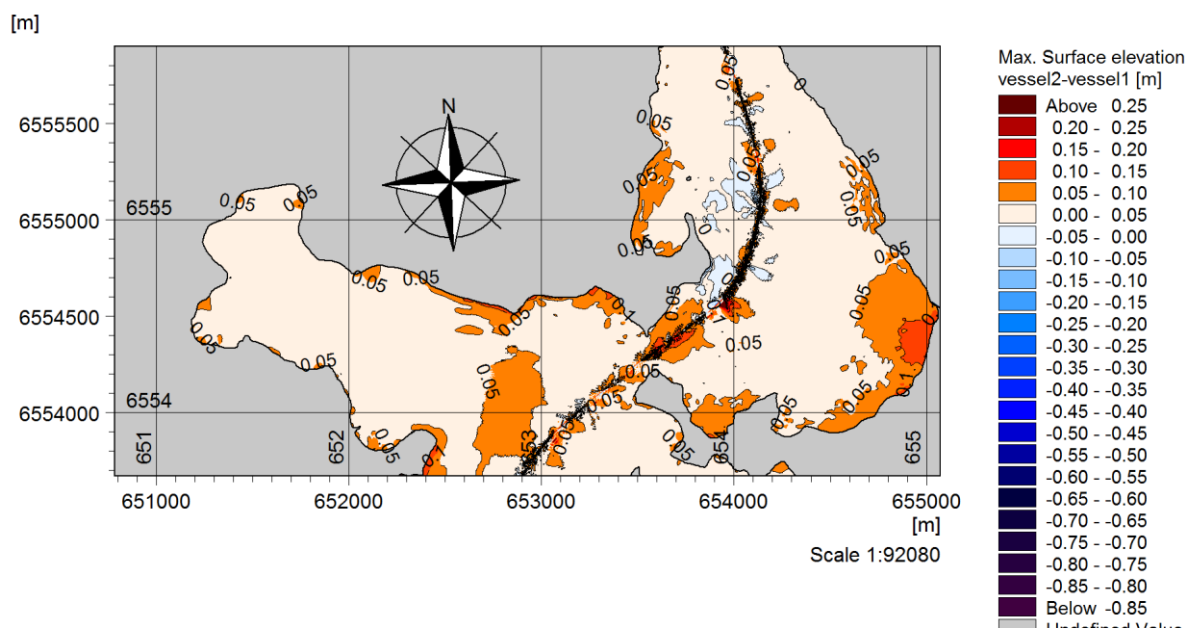
Den maximala vattenhöjningen ökar inte mer än 0.1 m i sundet, medan den i den östra delen kan öka 0.2 m.

Återigen, nu för strömhastigheten, i sundet vid den smalaste delen av farleden förekommer de största skillnaderna och uppgår till 0.8 m/s. I den östra bukten kan strömhastigheterna variera upp till 0.3 m/s, inga högre strömhastigheter förekommer längs övriga strandlinjen.

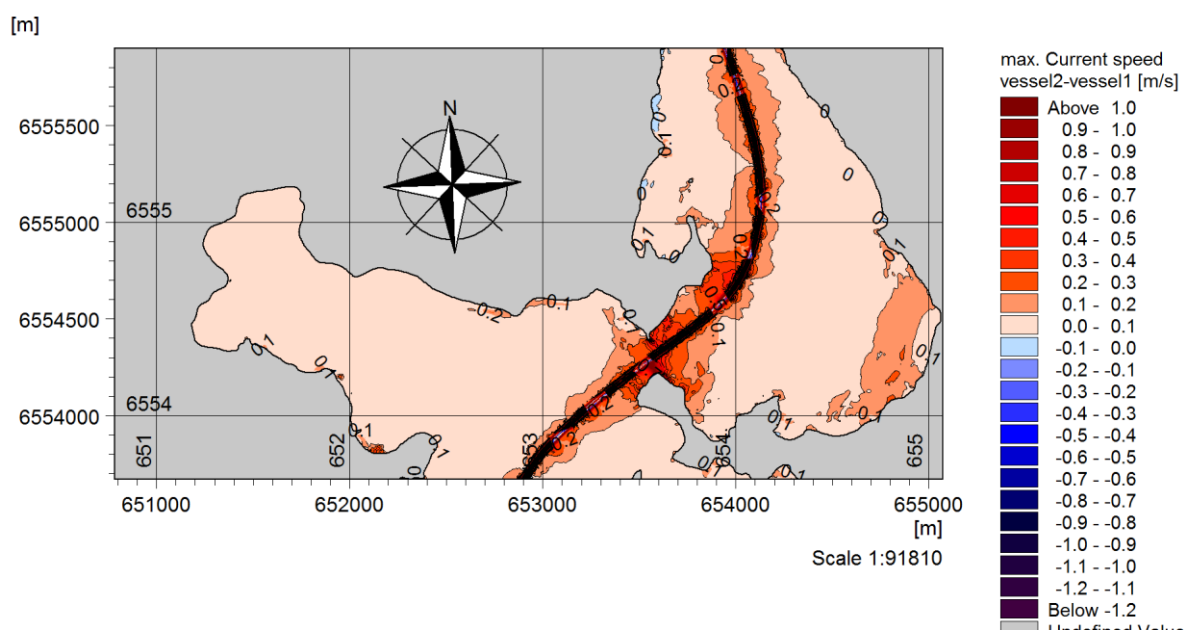
I sundet kan erosionseffekter på såväl strandkanten som botten inte uteslutas till följd av avsänkningen av vattenytan och tillhörande strömhastigheter. Morfologiska förändringar, processer som påverkar former och strukturer i hav, sjöar och vattendrag, kan förväntas ske där farleden är som smalast då denna strömhastighet är tillräcklig för att förflytta även större sedimentpartiklar.



Figur 4-20 Skillnad i lägsta möjliga vattenstånd till följd av avsänkningseffekter, mellan ett nutida och ett framtida fartyg, vid passage genom Brandalsund (framtid - nutid).



Figur 4-21 Skillnad i högsta möjliga vattenstånd, mellan ett nutida och ett framtida fartyg, vid passage genom Brandalsund (framtid - nutid).



Figur 4-22 Skillnad i högsta möjliga strömhastighet, mellan ett nutida och ett framtida fartyg, vid passage genom Brandalsund (framtid - nutid).

5. Diskussion

Nedan diskuteras den sammanvägda bedömningen av hur de olika delsträckorna påverkas av de naturliga förutsättningarna samt den tillkommande fartygstrafiken längs den föreslagna farledssträckningen.

De två nya farledsavsnitten innebär att farleden kommer närmare den östra stranden samtidigt som fartygstrafiken nära den västra stranden minskar. De två nya farledsavsnitten är generellt inte så känsliga för avsänkningsvågor då vattenområdet är väldigt öppet. Längs den nuvarande farleden finns det ett par mindre inestängda vikar nära farleden som eventuellt påverkas av små avsänkningseffekter idag. Dessa effekter kommer vid en ny farledssträckning att upphöra.

De nya farledsavsnitten blir bredare än befintlig farled, vilket innebär att fartyg kan mötas längs farledsavsnitten. När två fartyg möts innebär det att fartygen passerar något närmare farledsyttans gränser men det bedöms inte ge någon ytterligare påverkan längs de föreslagna avsnitten, då sådana möten sällan sker och avståndet till strandlinjen fortfarande är stort.

5.1 Landsort – Fifång



Figur 5-1 Områdesbild söder om Askö

Denna sträcka är utsatt för vindgenererade vågor och ett allmänt hårt klimat till följd av sitt oskyddade läge och skiljer sig markant från de inre delarna av farleden. Här kan det tidvis gå höga vågor och den naturliga variabiliteten är stor. Det finns längs denna sträcka passager som ligger nära farleden och kan nås av svallvågor, dock av begränsad amplitud. Erosion från fartygspassager som passerar nära strandlinjen kan uppstå då det finns jordarter i strandlinjen som kan erodera. I de aktuella farledsavsnitten finns det framförallt urberg som inte påverkas av fartygsvågor. På några platser finns det markerat sandig morän, inte heller det en jordart som bedöms kunna påverkas av fartygspassager. Enligt SGUs kartering över potentiella erosionskänsliga områden, bilaga A, finns det väldigt få områden som skulle kunna vara känsliga för erosion om de utsätts för tillräckligt stort påverkanstryck.

Avsänkningseffekter bedöms inte kunna ge någon effekt i denna del av farleden då det inte finns passager med starkt begränsande sektioner, som smala och grunda sund. Dessa effekter bedöms inte ge stor påverkan i denna del av farleden då systemet redan har en viss motståndskraft mot vågor och strömmar till följd av en stor naturlig variabilitet i våg och strömmönstret.

5.2 Fifång – Regarn

På denna sträcka föreslås farleden få en ny östligare sträckning. Generellt kan sägas att ett större avstånd till strandlinjen ger en mindre påverkan från fartygstrafik och är något som rekommenderas att man tar hänsyn till vid en farledsdragning enligt PIANC (/12/). Den nya farledssträckningen kommer därför att innebära en mindre påverkan på områden där den nuvarande farleden passerar nära land, som Fifång, västra Grönsö och östra sidan av södra Mörkö.

Svallvågor har möjlighet att påverka på ett längre avstånd från fartyget, se Figur 3-6, även om avklingningen går fort. En ostörd våg har enligt sambandet redan efter 500 m tappat 60 % av sin ursprungshöjd. Då den nya farledssträckningen ligger i ett naturligt djupt område kommer de svallvågor som genereras, baserade på dagens och framtida fartyg, att vara i storleksordningen 0.5-0.6 m. Med ett avstånd till strandlinjen på mellan 500-1000 m kommer vågorna som träffar stranden vara 0.2 – 0.15 m höga, vilket är litet jämfört med de naturliga vindvågorna och bedöms därmed inte ge någon negativ effekt genom erosion.

På östsidan om Grönsö, där den nya farledssträckningen är som närmast land, finns två delområden utpekade med viss eroderbarhet (se bilaga A). Då dessa områden består av sandig morän, som är svåreroderad av fartygsinducerat påverkanstryck vid detta avstånd, bedöms det inte bli påverkade av den nya farledssträckningen. De mindre områdena med mer lätteroderade sediment vid Dyviken, Kättholmarna, Hästnäs, Bastholmen och Västervik är så skyddade att de inte bedöms påverkas.

5.3 Regarn – Oaxen



Figur 5-2 Nordöstra delen av Oaxen.

Passagen mellan Regarn och Oaxen utgör befintlig farled. Med hänsyn till de angränsande nya farledsavsnitten och att dessa närmar sig passagen mellan Regarn och Oaxen i ny vinkel kan delar av passagen påverkas av de nya farledsavsnitten. Längs denna sträcka passerar fartyg redan idag men större fartyg kan innebära ett ökat erosionstryck på en erosionskänslig sträcka.

För denna sträcka finns de mest erosionskänsliga jordarterna längs större delen av västra Regarn, undantaget den norra delen, samt på södra delen av Oaxen. Dessa delar påverkas av viss erosion idag, och är sannolikt en kombination av naturliga processer och fartygsvågor. Förekomst av iserosion i form av isskjutna vallar kunde ses vid ett platsbesök i april 2017 se Figur 5-3.

Då endast en kort del av denna sträcka har ett djup som bedöms kunna påverkas av propellerströmmar har effekten av dessa inte beräknats särskilt. Påverkan från propellerströmmar bedöms inte ge någon mätbar effekt.



Figur 5-3 Foto från södra Oaxen. Till vänster i bild syns en isskjuten vall, orsakad av isrörelser.

Vågmodelleringarna som gjorts visar att fartygspassage med framtida fartyg i 12 knop genom sundet mellan Oaxen och Regarn kan generera svallvågor med en höjd av upp mot 0,8 m. Detta kan komma att ha en effekt på strandlinjen. Motsvarande modelleringar för 9 knop genererar däremot endast svallvågor med en höjd av ca 0,1-0,2 m se Figur 3-5. Höjden på svallvågen hinner minska markant på sin väg bort från fartyget förutom på de sträckor där det är som kortast avstånd mellan fartyget och stranden. Med hastigheten 9 knop blir de vågor som genereras mindre än de naturliga vindvågorna och kommer sannolikt inte att påverka stranden. Den norra delen av Oaxen kommer utsättas för mindre svallvågor med den nya farledsdragningen medan den nord-västra delen av Regarn bedöms få en ökad påverkan. Då båda platserna består mestadels av urberg kommer det inte att få några konsekvenser för erosionen. De i bilaga A utpekade potentiellt eroderbara sträckorna på Mörkösidan samt sydvästra Oaxen bedöms inte få ett ökat påverkanstryck av den nya farledssträckningen.

Vid den nordvästra delen av Regarn och längs östra sidan av Oaxen kommer avsänkningseffekterna att öka vid ökad fartygsstorlek vid en jämförelse mellan två fartygsstorlekar i 9 knop. Detta kan leda till erosion i den smalaste passagen mellan de båda öarna. Effekten av dagens fartygspassager vid 12 knop har inte jämförts.

5.4 Oaxen – Skanssundet

På denna sträcka föreslås farleden få en ny östligare sträckning. De naturliga förutsättningarna i Himmerfjärden avseende jordarter och påverkan i form av vindvågor på stränderna avspeglas i dagens jordartskarta, se Figur 4-1. Den framgår också av SGUs kartering av stränders eroderbarhet, som redovisas i bilaga A. Karteringarna visar att den västra sidan har fler områden med lätteroderade jordarter än den östra även om båda sidorna till stor del består av urberg. Den av vindvågor mer påverkade östra sidan består i dagsläget av svåreroderad sandig morän på de platser som inte är urberg, sannolikt ett tecken på att de mer lätteroderade fraktionerna redan har svallats bort genom naturliga processer. Längs den västra sidan återfinns

de mest erosionskänsliga jordarterna, isälvsediment och postglacial finsand, söder om Skanssundet på Mörkösidan. Längs den östra stranden finns dock mindre områden med lera, sand och morän i mer skyddade vikar. Norr om Oaxen finns mindre områden med mer lätteroderade jordarter vid Grimstaviken, Rangsta, Grönvik och Ragnarök. Längs den västra sidan återfinns de mest erosionskänsliga jordarterna, isälvsediment och postglacial finsand, söder om Skanssundet på Mörkösidan. Erosionskänsliga områden finns också längs Regarn och Oaxen.



Figur 5-4 Östra sidan av Himmerfjärden.

Den naturliga vågbildningen längs den östra stranden är större jämfört med den västra sidan dock har östra delen av Axvika holmar ett lugnare vågklimat än Himmerfjärden i stort.

Då den nya farledssträckningen ligger i ett naturligt djupt område >500 m från stranden kommer även svallvågorna som genereras från fartygen i denna del vara små, under 0.5 m. När svallvågorna når strandlinjen har de dämpats avsevärt och är mindre än 0.2 m. Den östra stranden är därmed bättre rustad för en ökning av svallvågor. För den nuvarande farledssträckningen är avståndet till strandlinjen på många ställen mindre än 300 m från stranden och i flera fall mindre än 200 m från stranden. Sannolikt skulle en ökad storlek på fartygen samt en flytt av dagens fartygstrafik, från framförallt området nära Salsudd och Mölleviken, ge en positiv påverkan i de grundaste områdena både i termer av svall och avsänkningseffekter.

Den nya farledssträckningen går betydligt längre österut och innebär därmed en minskad risk för fartygsinducerad erosion längs den västra stranden. Vid den sydöstra delen av den södra av Axvika holmar finns en liten förekomst av isälvsediment. Den nya farledssträckningen bedöms dock inte kunna orsaka någon märkbar erosion här då avståndet till farleden är stort och vågbildningen från fartygen är liten. Dessutom visar svallvågsberäkningarna att de framtida "slankare" tankfartygen, vars passage möjliggörs med en ny farledssträckning, ger mindre svallvågor än dagens tankfartyg. Att förlägga farleden närmare den östra sidan ger därför positiva effekter i jämförelse med befintlig farled.

Resultaten från avsänkingsmodelleringen pekar på att det inte blir några effekter av avsänkingsvågen längs strandlinjen på det avståndet som fartygen är tänkta att passera. Den

största vattenståndsförändringen bortanför fartygsspåret är upp till 0.1 m och syns vid Grimstaviken och Granholmen (nederst i Figur 4-17 och Figur 4-18). Denna vattenståndsförändring torde inte ge upphov till märkbar erosion då påverkanstrycket är litet och området inte ligger i den högsta klassen för eroderbarhet.

De mindre områdena utpekade som potentiellt eroderbara vid Grimstaviken, Rangsta, Grönvik och Ragnarök bedöms vara så skyddade att risken för erosion är liten då det av fartygen tillförda påverkanstrycket är för litet för att ge upphov till erosion. Detta kommer att studeras mer ingående inför ett genomförande av åtgärder. Detsamma gäller stranden längs Granholmen, som ligger ca 300 meter från farledsspåret.

5.5 Skanssundet – Brandalsund

Denna farledssträcka karaktäriseras av liten naturlig vågbildning. Naturligt högre vågbildning förekommer dock i den norra änden strax öster om ingången till Brandalsund och denna sträcka är naturligt bättre rustad för större fartygspassager.

Längs de grunda delarna av farleden kan även en viss uppvirvling av bottensediment förekomma från propellerpåverkan längs sträckor grundare än 16 m, men utan att leda till permanent förändring av topografin.

Sammantaget ger svallvågsberäkningarna att det inte kommer att bli någon större svallvåg som genereras vid de hastigheter om 7 knop som fartygen framförs med.

Längs den övriga delen som är norr om Skanssundet kan effekter av avsänkningen sannolikt förväntas med härledning av de resultat som sågs i Brandalsund. Effekterna torde dock bli mindre i denna del, än norr om Brandalsund, då vattenytan är bredare.

5.6 Brandalsund – Södertälje



Figur 5-5 Brandalsund

Denna farledssträcka karaktäriseras av små naturliga vågor som inte i sig leder till erosion.

Längs de grunda delarna av farleden kan även en viss uppvirvling av bottensediment förekomma från propellerpåverkan längs sträckor grundare än 16 m, men utan att leda till permanent förändring av topografin. Förekomsten av högre svallvågor vid de större fartygspassagerna kommer att öka men de är fortfarande små till följd av fartygens hastighet och bedöms inte ge någon effekt på strandlinjen. Effekterna av avsänkning kommer sannolikt att leda till erosion i de smalaste passagerna, främst då i Brandalsund, och till viss del i den östra bukten norr om Getryggen. Fördjupade studier för att undersöka effekterna av avsänkning norr om Brandalsund föreslås.

6. Referenser

- /1/ Kristensen, H.O. och Lützen, M.: *Prediction of resistance and propulsion power of ships*. Projekt 2010-56, Emissionsbeslutningsstøttesystem, WP 2, Report No. 4, Tech. Univ. Of Denmark och Univ. Of Southern Denmark, 51 pp., 2013.
- /2/ *Basic principles of ship propulsion*. MAN Diesel & Turbo, 43 pp.
- /3/ *Propulsion trends in bulk carriers*. MAN Diesel & Turbo, 23 pp.
- /4/ Kristensen, H.O.: *Determination of regression formulas for main dimensions of tankers and bulk carriers based on IHS Fairplay data*. Project 2010-56, Emissionsbeslutningsstøttesystem, WP 2, Report No. 2, Tech. Univ. Of Denmark och Univ. Of Southern Denmark, 35 pp., 2012.
- /5/ Soulsby et al 2000, *Dynamics of Estuarine Muds*, HR Wallingford
- /6/ van Rijn L. C. 2007, *Unified view of sediment transport by current and waves I: Initiation of motion, bed roughness and bed load transport*. Journal of Hydraul. Eng, 133:649-667.
- /7/ PIANC: *Guidelines for protecting berthing structures from scour caused by ships*. PIANC report No. 180. 129 pp. plus appendices, 2015.
- /8/ Verhey, H.: *The Stability of Bottom and Banks Subjected to the Velocities in the Propeller Jet behind Ships*. Proc. 8th Int. Harbour Congress, Antwerp, Belgium, 11 pp., 1983.
- /9/ Kriebel, D.L. och Seeling, W.N.: *An empirical model for ship-generated waves*. I Proceedings of the Fifth International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis - WAVES 2005, 3-7 july 2005, Madrid, Spanien.
- /10/ DHI (2008). Vessel Interaction Study, Quarantine Flats Reach. Port of Brisbane, Stage 2. Final Report. DHI Water and Environment, October 2008. See also <http://www.dhigroup.com/News/2008/11/21/AdvancedNumericalModelingOfMooredVesselMotions.aspx>
- /11/ Mortensen, S B, C Alley, J Kirkegaard and R Hancock (2009): Numerical Modelling of Moored Vessel Motions caused by Passing Vessels. Ports and Coastal Conference 2009
- /12/ PIANC Considerations to reduce environmental impacts of vessels. PIANC report No 99. 105pp. 2008
- /13/ Holthuijsen, L. (2007). Description of ocean waves. In *Waves in Oceanic and Coastal Waters* (pp. 24-55). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9780511618536.004

BILAGA A

Stränders eroderbarhet

A Stränders eroderbarhet

