

Malmporten Luleå

Bedömning av erosionsrisk på dumpningsplatserna



Samfinansierat av EU

Transeuropeiska transportnätet (TEN-T)

Ramböll Sverige AB

Rapport

Oktober 2015

Denna rapport har tagits fram inom DHI:s ledningsystem
för kvalitet certifierat enligt ISO 9001 av DNV



Malmporten Luleå

Bedömning av erosionsrisk på dumpningsplatserna

Framtagen för Ramböll Sverige AB
Kontaktperson Mattias Bååth



© Jens Carsten Rosemann

Projektledare	Anna Karlsson
Kvalitetsansvarig	Anna Karlsson
Handläggare	Olof Liungman, Anna Karlsson
Uppdragsnummer	12802687
Godkänd datum	2015-10-09
Version	2.2
Klassificering	Öppen



INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	Sammanfattning	3
2	Inledning	4
2.1	Bakgrund	4
2.2	Frågeställning.....	4
3	Dataunderlag	5
3.1	Vind	5
3.2	Skiktning.....	7
3.3	Dumpningsplatser	7
3.4	Bottentopografin.....	7
4	Metodik	10
4.1	Övergripande beskrivning	10
4.2	Havsströmmar	10
4.3	Vindvågor	12
4.4	Interna vågor	13
5	Resultat.....	15
5.1	Havsströmmar	15
5.2	Vindvågor	15
5.3	Interna vågor	17
6	Slutsatser.....	19
7	Referenslista.....	20

FIGURER

Figur 3-1	Vindrosor från station Rödkallen A för 1965-1980 (vänster) och 1996-2015 (höger).....	6
Figur 3-2	Vindhastighet från sydost. 100-års vind.....	6
Figur 3-3	Karta över de utpekade dumpningsplatserna	7
Figur 3-4	Modellerad bottentopografi före (ovan) och efter (nedan) dumpning. Dumpningsplatserna är markerade med svarta konturer.....	9
Figur 4-1	Karta över modellens beräkningsnät. Djupen avser nuvarande förhållanden.	11
Figur 4-2	Modellens beräkningsnät i närheten av Luleå hamn. Djupen avser nuvarande förhållanden.	12
Figur 5-1	Diagram som visar teoretisk risk för erosion vid olika fyllnadsnivåer och vindstyrkor vid SV Vitfågelskär.	17

TABELLER

Tabell 3-1	Vindhastigheten som överstigs för olika återkomsttider för riktningsintervallet 135-165° (sydostliga till sydsydostliga vindar).....	5
Tabell 3-2	Djupnivåer efter dumpning på de sex dumpningsplatserna (referensnivå RH2000), samt den area över vilken djupet förändras.	8

Tabell 5-1	Modellerad maximal och medelbottensskjuvspänning på grund av havsströmmar för de två dumpningsplatserna före och efter dumpning.	15
Tabell 5-2	Beräknad bottensskjuvspänning på grund av vindvågor för de två dumpningsplatserna före och efter dumpning för tre olika vindstyrkor.	16

1 Sammanfattning

Denna rapport avser del C inom DHI:s uppdrag för Ramböll gällande projekt Malmporten i Luleå, med syfte att ta fram en preliminär bedömning av risken för erosion på dumpningsplatserna före och efter dumpning.

Tre olika mekanismers effekt på bottenskjuvspänningen på dumpningsplatserna har undersökts: havsströmmar (genererade av vind, vattenståndsvariationer och densitetsgradienter), vindvågor och interna vågor. Den första mekanismen har beräknats med hjälp av resultaten från den numeriska strömningsmodell som använts för att simulera spridningen av spill vid muddring och dumpning (deluppdrag A). Vindvågornas effekt på bottenskjuvspänningen har också simulerats numeriskt, men med en förenklad spektral vågmodell under konstanta förhållanden. Den sistnämnda mekanismen, interna vågor, har uppskattats analytiskt utifrån befintliga mätdata. Två dumpningsplatser har beaktats för de olika mekanismerna, nämligen Ost Vitfågelskäret och Sörbrändöfjärden. Dessutom har erosionsrisken från vindvågor för olika fyllnadsdjup och vindstyrkor analyserats närmare för SV Vitfågelskär – en djuphåla där det tidigare sugits sand.

Resultaten visar att bottenskjuvspänningar som uppstår på grund av havsströmmar inte förväntas överstiga det kritiska värdet för erosion, vare sig före eller efter dumpning har skett. Inte heller eventuella interna vågrörelser förväntas ge upphov till erosion av de dumpade massorna. Beräkningarna av interna vågrörelser är visserligen överslagsmässiga men dumpningsplatserna ligger dessutom i en skärgård, vilket kan förväntas hindra storskaliga interna vågor i området.

När det gäller vindvågor visar resultaten att under normala förhållanden så ger dessa inte upphov till någon erosion på dumpningsplatserna, vare sig före eller efter dumpning. Den enda mekanism som skulle kunna ge upphov till erosion på dumpningsplatserna efter dumpning, är vindvågor i samband med sydostlig storm. Återkomsttidsberäkningar av vind från sektorn sydost visar att vindstyrkor över 15 m/s har en återkomsttid på 1 år och 20 m/s har en återkomsttid på 25 år. Materialet kan eroderas vid vindstyrkor som ligger någonstans mellan 15 och 20 m/s men dessa tillfällen kommer att vara få och uppstå någon gång var 5e till 25e år

För att ev. erosion skall innebära en påverkan på omgivningen måste det dock finnas strömmar som transporterar bort materialet. Befinner man sig i en djuphåla som SV Vitfågelskär, är sannolikheten att borttransport av det eroderade materialet sker mycket liten. Vid en extrem stormhändelse kan det ytligaste materialet sättas i rörelse men antagligen sedimenterar det tillbaka på plats igen när vågorna avtar.

2 Inledning

DHI har fått uppdraget att simulera strömningsförhållanden och spridning av spill i samband med muddring och dumpning i Luleå hamn och skärgård. Syftet med modellstudien är att visa vilka grumlingsnivåer som kan förekomma och ge underlag för att bedöma miljöpåverkan från verksamheten. Det deluppdrag som presenteras här – deluppdrag C – syftar till att göra en första preliminär bedömning av risken för erosion av de dumpade massorna genom att undersöka ström- och vågförhållandena på två av de föreslagna dumpningsplatserna, samt hur denna kan förändras då djupet minskar till följd av dumpningen. Dessutom har dumpningsplatsen SV Vitfågelskär analyserats m.a.p. risk för erosion vid olika vindhastigheter och varierande fyllnadsdjup.

2.1 Bakgrund

Sjöfartsverket, Luleå hamn och Trafikverket driver tillsammans projektet Malmporten. Projektet omfattar en utökning och förbättring av Luleå Hamn, farlederna till hamnen och anslutande järnväg i syfte till att förbättra säkerheten och tillgängligheten för sjöfarten till Luleå.

I projektet föreslås omfattande muddring av farlederna in till Luleå hamn inklusive områden i själva hamnen. DHI har fått i uppdrag av Ramböll att genomföra en numerisk modelleringsstudie av sedimentspill i samband med muddring och dumpning (deluppdrag A), samt att bedöma sannolikheten för ökad erosion på grund av förändrad fartygstrafik (deluppdrag B) och förändrade bottenförhållanden på dumpningsplatserna (deluppdrag C).

2.2 Frågeställning

Nästan alla stora infrastrukturprojekt i vatten innebär muddring av sediment och därmed behov av en lämplig deponi. I Sverige anses den viktigaste egenskapen hos en deponi vara att det dumpade materialet ligger kvar. Därför väljs ofta djupa ackumulationsbottnar med svaga bottenströmmar, för att undvika erosion och transport av det dumpade materialet. Detta val baseras oftast på provtagning och analys av de naturliga bottensedimenten och djupförhållanden, snarare än direkt observation av strömförhållandena på platsen.

I samband med dumpning förändras djupförhållandena. Vad som tidigare var en djuphåla med ackumulationsbotten kan då potentiellt förändras och utsättas för starkare bottenströmmar än före dumpningen, vilket kan medföra erosion av det dumpade materialet. Denna förändring kan man inte mäta sig till innan dumpningen skett och den behöver därför modelleras.

För att bedöma risken för erosion – både före och efter dumpning – presenteras i denna rapport en bedömning baserad på numeriska och analytiska beräkningar av bottenströmmarna på deponierna. Följande processer beaktas:

1. Havsströmmar drivna av vind, vattenståndsvariationer och densitetsgradienter.
2. Strömning alstrade av vindvågor.
3. Strömning alstrade av interna vågrörelser, särskilt på språngskiktet.

För en allmän beskrivning av projektet och området hänvisas läsaren till ref. /1/.

3 Dataunderlag

Nedan följer en sammanställning av det dataunderlag som är av särskild vikt för denna delstudie. För ytterligare information se ref. /1/.

De data som framför allt är viktiga för att bedöma bottenströmsförhållandena på dumpningsplatserna är:

- Vinden som ger upphov till vindvågor i området.
- Skiktningen som bestämmer de interna vågorna i området.
- De tilltänkta dumpningsplatsernas lokalisering.
- Bottentopografin och dess förändring i samband med dumpning.

Dessa fyra datamängder beskrivs kortfattat nedan.

3.1 Vind

SMHI har under en längre tid mätt vinden på station Rödkallen A (nummer 162790) som ligger på Rödkallen i södra änden av Luleås skärgård (N 65,31°, O 22,37°). Vindobservationer finns för två långa tidsperioder: 1965-1980 samt 1996 till idag. Under den första perioden mättes vindhastighet och riktning först med sex-timmarsintervall (kl. 6, 12 och 18) och sedan med tre-timmarsintervall (kl. 3, 9, 12, 15 och 18). Under pågående period finns observationer varje timme dygnet runt.

Figur 3-1 visar observationerna från Rödkallen A som vindrosor för de två perioderna. Det är tydligt att sydliga och nordliga vindar är vanligast, samt att vindstyrkan endast i undantagsfall överstiger 15 m/s. Medelvinden för båda perioderna är 5,3 m/s. En närmare analys visar på vindstyrkor upp till ca 26 m/s under perioden 1965-1980, med totalt 94 mättilfällen då en vindstyrka över 20 m/s uppmätts. Dessa starka vindar kommer företrädesvis från mellan ostnordost och sydsydväst, d.v.s. pålandsvind.

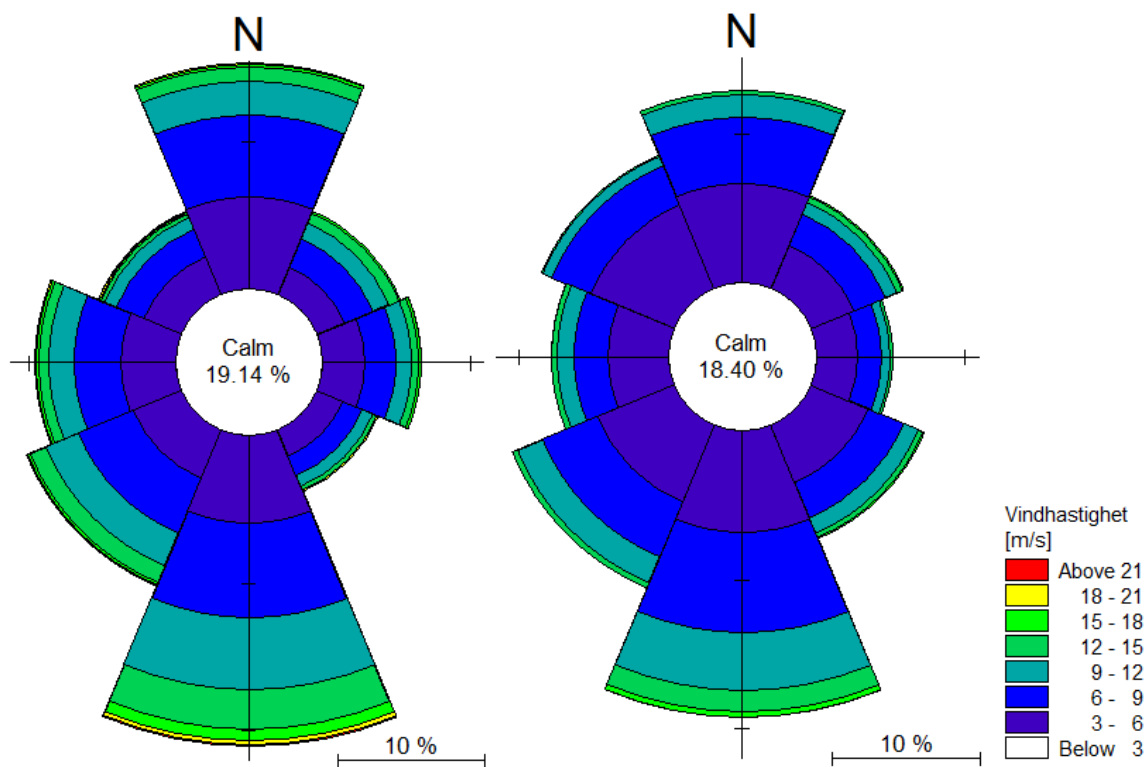
Under perioden som börjar 1996 är den högsta uppmätta vindstyrkan något lägre (24 m/s) och vindstyrkor över 20 m/s har endast uppmätts vid 19 tillfällen.

Sammanfattningsvis kan vi säga att starka vindar ligger mellan ca 5 och 25 m/s, men att vindstyrkor över 15 m/s är ovanliga. En analys av perioden 1996-2014 visar att återkomsttiden för en vindstyrka på minst 15 m/s är ett år. En sammanställning av vindhastigheten för olika återkomsttider inom riktningsintervallet 135-165° visas i Tabell 3-1.

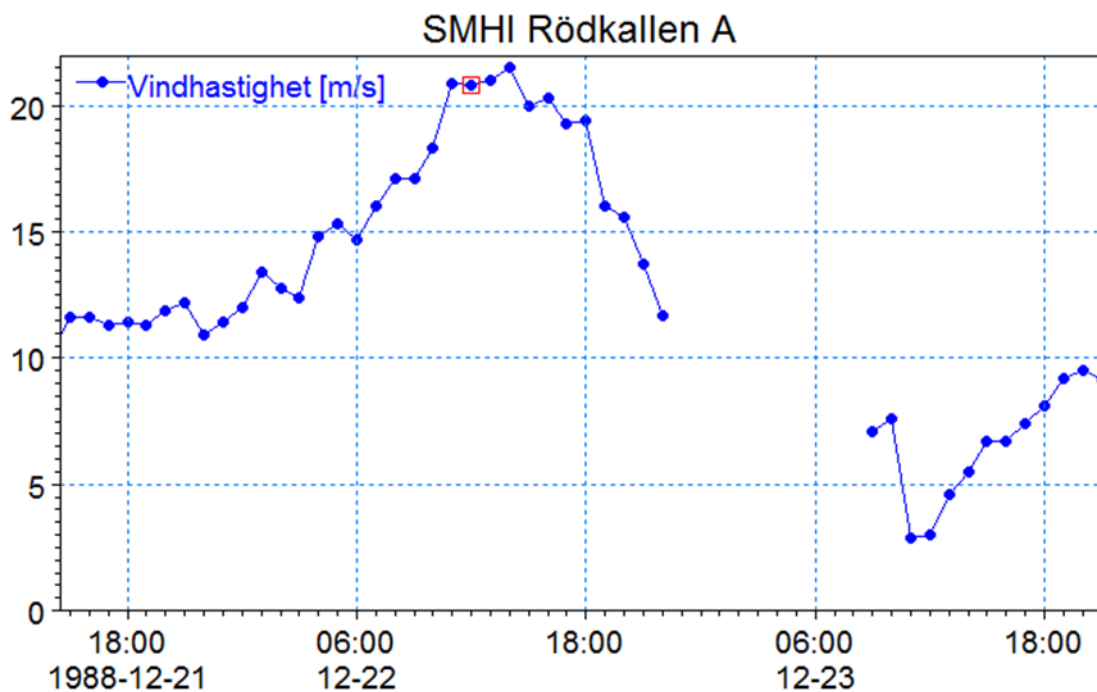
Återkomsttidsberäkningen bygger på timvärden vilket betyder att vindhastigheten som anges i princip har varaktigheten en (1) timma. I Figur 3-2 kan vi dock se att vinden i samband med en extremhändelse är hög under ett några timmar totalt. Observera att det skiljer väldigt lite i vindstyrka mellan t.ex. en 25-års händelse och en 100-års händelse.

Tabell 3-1 Vindhastigheten som överstigs för olika återkomsttider för riktningsintervallet 135-165° (sydostliga till sydsydostliga vindar).

Återkomsttid (år)	1	5	10	25	50	100
Vindhastighet (m/s)	15.4	17.8	18.9	20.3	21.4	22.4



Figur 3-1 Vindrosor från station Rödskallen A för 1965-1980 (vänster) och 1996-2015 (höger).



Figur 3-2 Vindhastighet från sydost. 100-års vind.

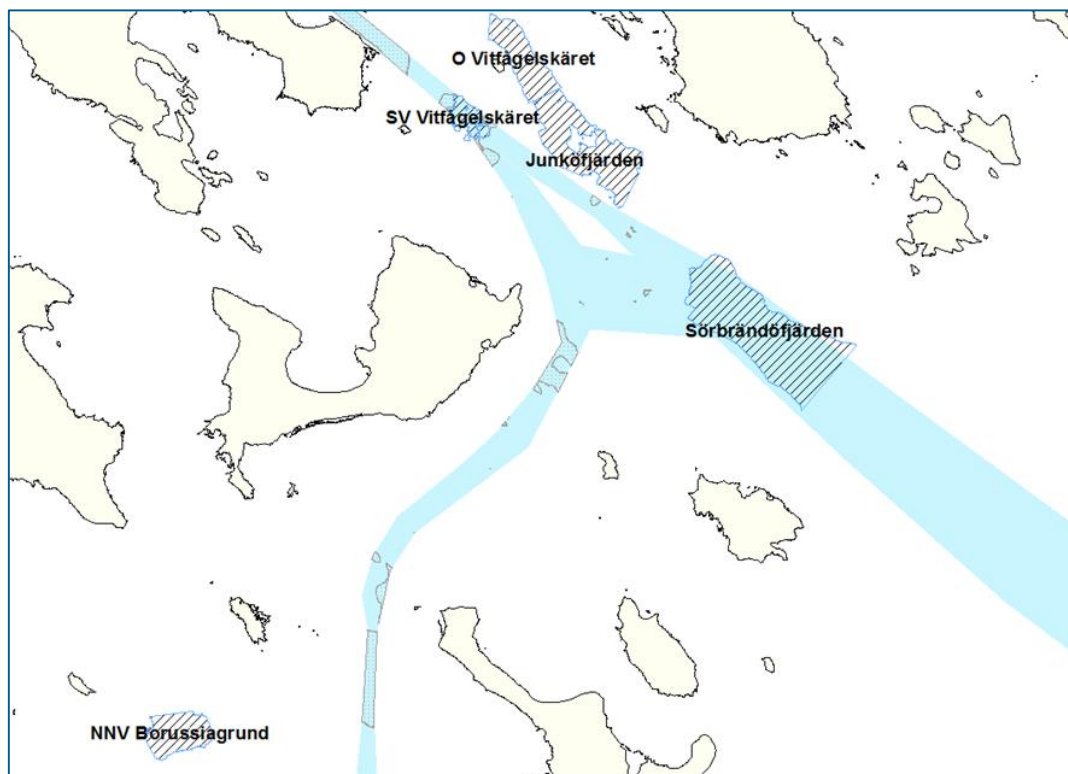
3.2 Skiktning

Tillgången på observationer av salthalt och temperatur från Luleå skärgård är tyvärr begränsad, särskilt när det gäller profilmätningar med hög upplösning i tid. I denna delstudie har mätningar från station A5 inom SMHI:s utsjöprogram använts (se även ref. /1/).

3.3 Dumpningsplatser

Två av de fem utpekade dumpningsplatserna har först analyserats i denna delstudie: Ost Vitfågelskäret samt Sörbrändöfjärden (se Figur 3-3). Dessa två har valts ut eftersom de representerar två olika typer av dumpningsplatser. Dumpningsplatsen Ost Vitfågelskäret ligger längst in i skärgården och är grundare medan Sörbrändöfjärden ligger längst ut av alla dumpningsplatserna och är också den djupaste.

SV Vitfåleskär har också undersökts, då med avseende på att hitta de kombinationer av djup och vindar där ingen risk för erosion från vindvågor föreligger. Denna plats är en djuphåla där man tidigare har sugit sand och största djupet är ca -32 m.



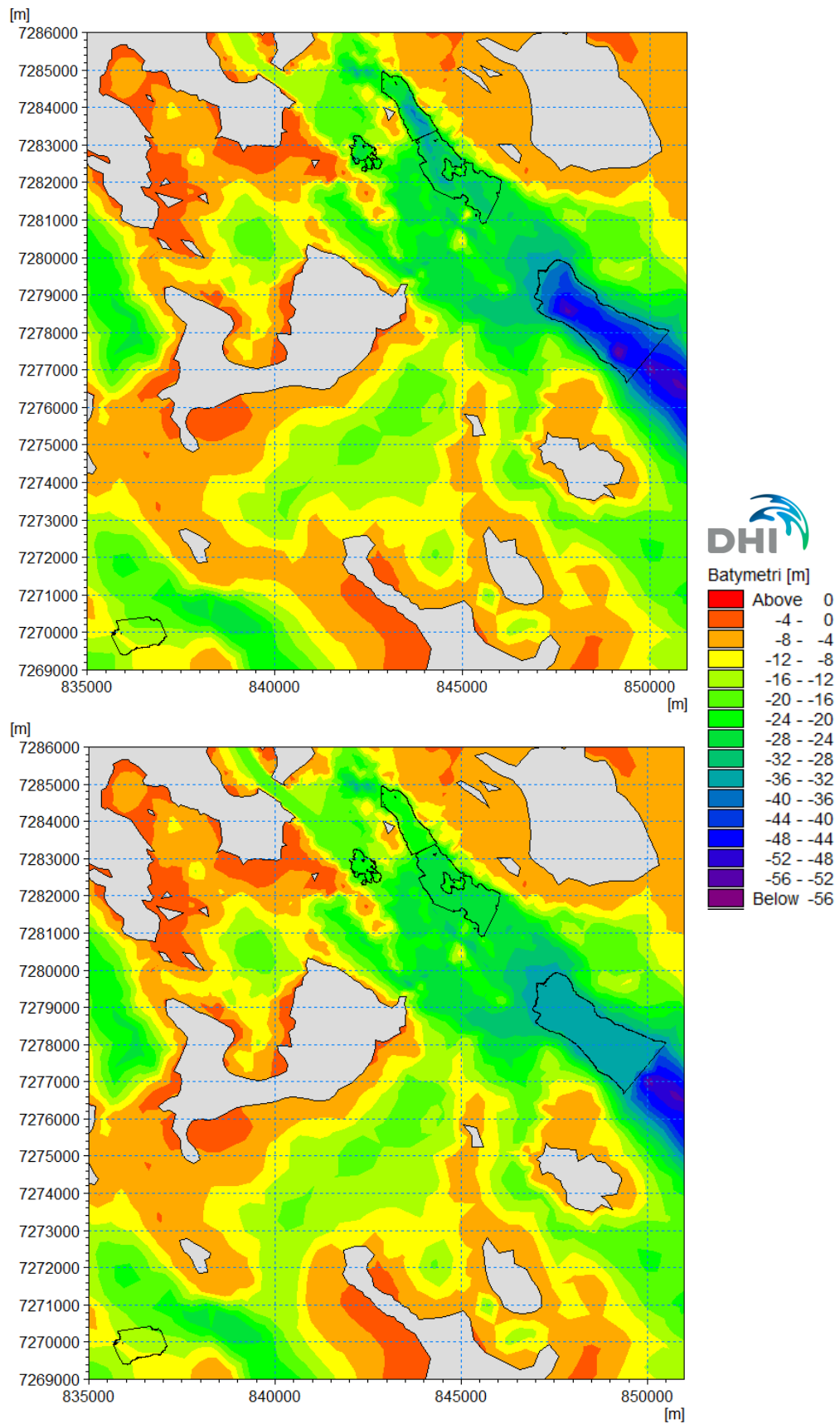
Figur 3-3 Karta över de utpekade dumpningsplatserna.

3.4 Bottentopografin

Djupinformationen har tillhandahållits från Sjöfartsverket som gjort detaljerade sjömätningar i farlederna in till Luleå hamn. Utanför farlederna har sjökortsdata använts. Den modellerade bottentopografin presenteras i Figur 3-4. Efter dumpning förändras djupförhållandena på så sätt att samtliga dumpningsplatser fyllts upp till de nivåer som anges i Tabell 3-2. Dessa uppgifter har tillhandahållits av Ramböll.

Tabell 3-2 Djupnivåer efter dumpning på de sex dumpningsplatserna (referensnivå RH2000), samt den area över vilken djupet förändras.

Dumpningsplats och skede	Nivå (m)	Area (m²)
O Vitfågelskäret	20	1 096 624
Junköfjärden	25	2 288 024
SV Vitfågelskäret	20	397 500
Sörbrändöfjärden	35	4 500 832
NNV Borussiagrund	15	992 100



Figur 3-4 Modellerad bottenografi före (ovan) och efter (nedan) dumpning. Dumpningsplatserna är markerade med svarta konturer.

4 Metodik

4.1 Övergripande beskrivning

För att bedöma risken för erosion på dumpningsplatserna har bottenskjuvspänningen, d.v.s. vattnets friktion mot botten, uppskattats. För att erosion ska ske måste bottenskjuvspänningen överstiga ett kritiskt värde. Om den uppskattade bottenskjuvspänningen säkert understiger detta värde kan vi anta att ingen erosion bör uppstå. I ref. /1/ har ett rimligt kritiskt värde för erosion av nyligen avsatta sediment tagits fram, vilket uppgår till ca 0,2 N/m².

Bottenskjuvspänningen beror på hur fort vattnet precis över botten rör sig. Dessa rörelser kan alstras genom flera olika mekanismer, t.ex. vinddrivna strömmar men också propellerströmmar. De naturliga mekanismer som dominerar i havet är:

1. Havsströmmar drivna av vind, vattenståndsvariationer och densitetsgradienter.
2. Strömning alstrade av vindvågor.
3. Strömning alstrade av interna vågrörelser, särskilt på språngskiktet.

Havsströmmarna har beräknats som en del av den delstudie som avser spridningen av sedimentspill (ref. /1/), med hjälp av en tre-dimensionell numerisk strömningsmodell (se avsnitt 4.2). De periodiska strömmar som uppstår under vattenytan på grund av vindvågor har beräknats med hjälp av en två-dimensionell numerisk vågmodell (se avsnitt 4.3) under utvalda, idealiserade förhållanden. Slutligen har eventuella strömmar som uppstår på grund av interna vågfenomen, framför allt vågrörelser på språngskiktet, uppskattats analytiskt.

Bottenskjuvspänningen beräknas automatiskt av den numeriska modellen som använts för att simulera hur sedimenten transporteras, eroderas och deponeras. När det gäller havsströmmarna har därmed bottenskjuvspänningen redan beräknats i samband med modelleringen av sedimentspill (se ref. /1/). På samma sätt har sedimentmodellen använts för att beräkna bottenskjuvspänningen som uppstår som ett resultat av bottenströmmar alstrade av vindvågor, genom att mata in vågmodellens resultat som indata till sedimentmodellen. Bottenskjuvspänningen som alstras av strömmar på grund av interna vågor har uppskattats analytiskt.

Slutligen har bottenskjuvspänningen på dumpningsplatserna extraherats ur modellresultaten och jämförts med den kritiska bottenskjuvspänningen för erosion.

4.2 Havsströmmar

Havsströmmarna har beräknats med hjälp av en hydrodynamisk strömningsmodell som satts upp i MIKE 3 FM, ett tredimensionellt numeriskt modellsystem för beräkning av strömning och transport i vatten. FM står för Flexible Mesh, vilket innebär att området beskrivs med ett ostrukturerat beräkningsnät av trianglar och fyrkanter vars storlek kan variera mellan olika delar av modellområdet. På så sätt kan modellens upplösning vara detaljerad i de områden som är av störst intresse och grövre där detaljer inte är lika viktiga. I varje element i beräkningsnätet beräknas strömmarna till riktning och styrka, densiteten (som funktion av temperatur och salthalt), den turbulenta blandningen, lösta ämnens koncentrationer och andra parametrar som efterfrågas.

MIKE 3 FM kan ta hänsyn till alla de viktigaste processerna, vilka är:

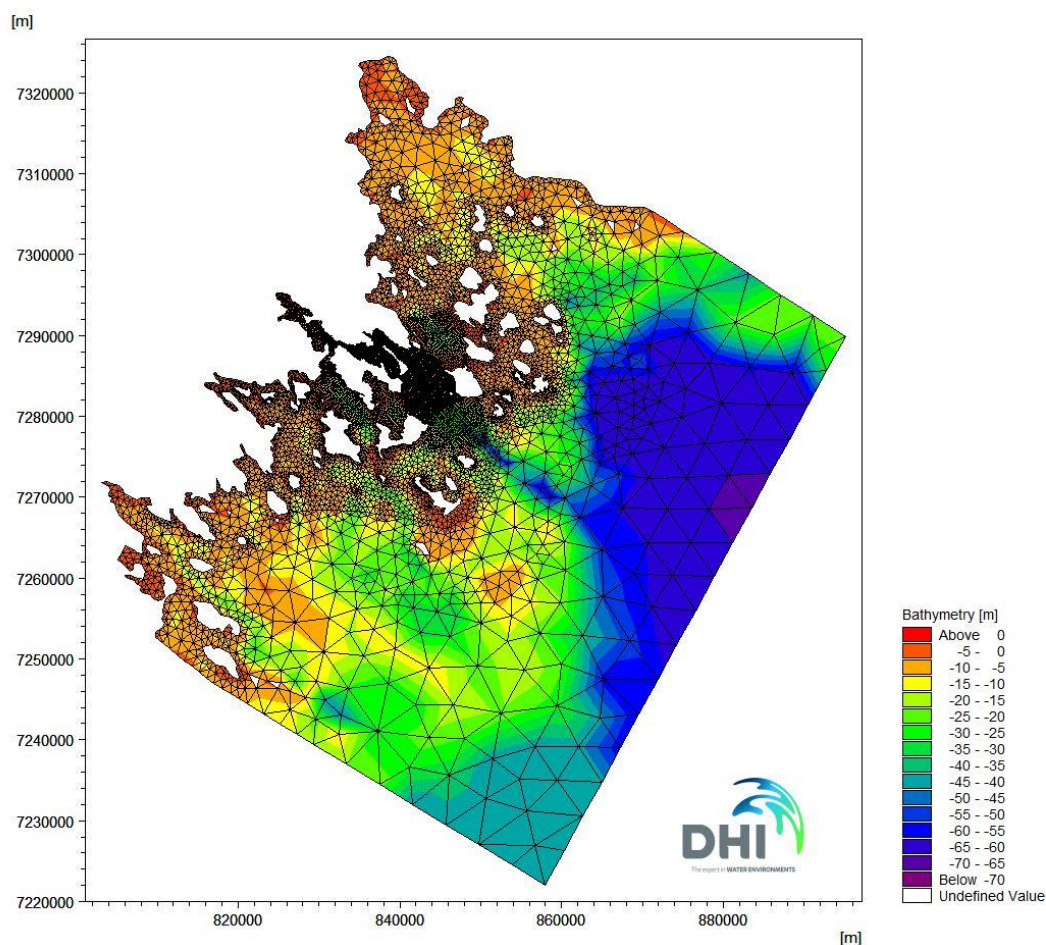
- Transport av salt och värme
- Drivning på grund av variationer i densitet
- Bottenfriktion
- Vindens drivning på ytan

- Drivning på grund av vattenståndsvariationer
- Tillflöden och utsläpp från land
- Värmeutbyte med atmosfären
- Turbulens
- Corioliseffekten

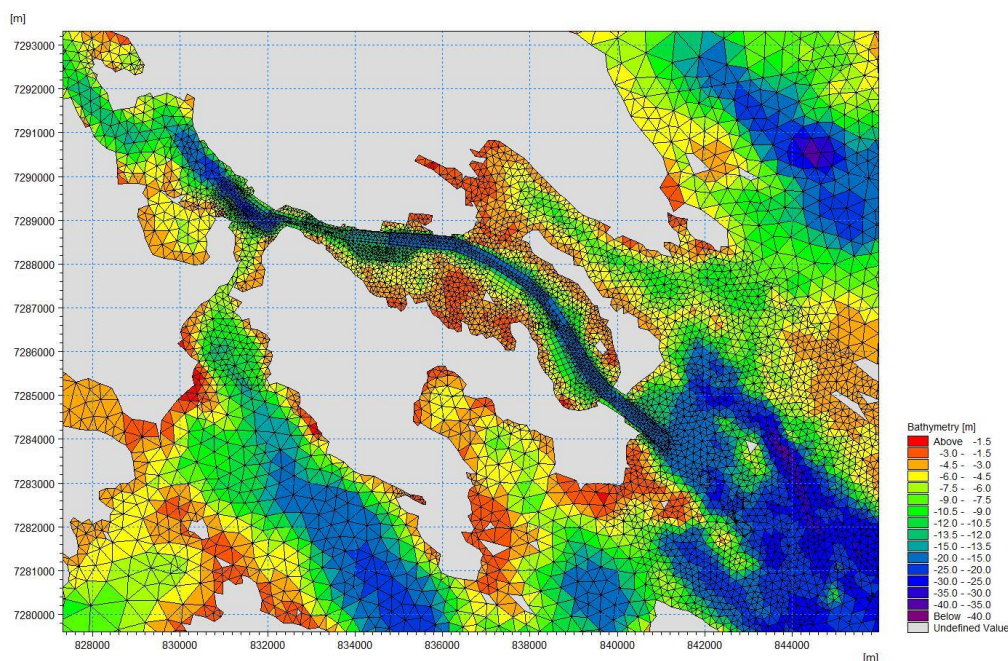
Strömningsmodellen drivs av vattenståndsvariationer, skiktning och strömning i havet utanför modellområdet, avrinning från land samt de meteorologiska förhållandena.

Modellen som satts upp täcker in ett område från Bocköfjärden i norr till Kallfjärden i söder och österut till djup på omkring 50-70 m, se Figur 4-1. För att på ett tillförlitligt sätt kunna modellera strömmarna i Luleås inseglingsområde har modellen gjorts relativt stor. Detta beror på att vattnets rörelser i farledsområdet är beroende av vad som sker i havet utanför och hur vattnet strömmar i norra och södra skärgården. En annan orsak till modellens utbredning är att den skall passa till de regionala prognosmodeller som DHI kör operationellt och som levererar randvillkor för de öppna gränserna mot utsjön i modellen. Beräkningsnätets högsta upplösning finns i farleden in till Luleå där de rektangulära cellerna är ca 50m x 50m. Varje cell är ca 1 m tjock. Delar av beräkningsnätet visas i Figur 4-2.

Modellen har använts för att simulera perioden april-oktober 2012 för två olika fall avseende bottenprofilen: före planerad muddring (nuvarande förhållanden) samt efter avslutad dumpning. För mer information se ref. /1/.



Figur 4-1 Karta över modellens beräkningsnät. Djupen avser nuvarande förhållanden.



Figur 4-2 Modellens beräkningsnät i närheten av Luleå hamn. Djupen avser nuvarande förhållanden.

Utifrån de beräknade strömmarna har spridningen av mudderspill beräknats med hjälp av MIKE 3 FM MT (*Mud Transport*), såsom beskrivs i ref. /1/, vilket också innebär att bottenskljvspänningen beräknats för hela den simulerade perioden.

4.3 Vindvågor

För att beräkna den periodiska strömning som vindvågor kan ge upphov till vid botten har en spektral vågmodell satts upp i modellsystemet MIKE 21 FM SW, där beteckningen SW står för *Spectral Wave*. Vågmodellen har satts upp på exakt samma beräkningsnät som det som använts för strömningsmodellen (se avsnitt 4.2). Vågmodellen har körts med en kvasi-stationär formulering, vilket betyder att för varje tidssteg så itererar modellen tills den finner ett vågfält som motsvarar den drivning som gäller för det tidsteget. Vågförhållandena ställer alltså in sig efter omgivningsförhållandena under ett tidssteg.

Modellen drivs av vågförhållandena på den östra randen mot utsjön. De vågor som byggs upp lokalt av vinden inne i modellområdet är små i jämförelse med de vågor som vinden byggt upp ute i Bottenviken. De infallande vågorna på den östra randen har uppskattats utifrån stryklängden (den längd över vilken vinden har kunnat bygga upp vågfältet), den aktuella vindstyrkan och vattendjupet med hjälp av analytiska formler från ref. /2/¹. Stryklängden har uppskattats till 100 km, då detta ungefär motsvarar avståndet till finska kusten i sydostlig riktning. Djupet har skattats till ca 70 m ur svenska sjökort. Utifrån analysen av historiska vindobservationer (se avsnitt 3.1) har följande vindstyrkor valts ut: 10, 15 och 20 m/s. Vindriktningen har satts till 140°, då detta representerar ogynnsamma men ändå realistiska förhållanden där vinden blåser rätt in mot dumpningsområdena mellan Storbrändön och Junkön. Vindstyrkor över 20 m/s har en återkomsttid på minst 25 år och påverkar vågfältet under ett fåtal timmar.

I övrigt har varken variationer i vattenståndet eller havsströmmar tagits med, utan modellen simulerar det vågfält som skapas av de infallande vågorna från utsjön.

¹ Här har följande verktyg använts:

http://woodshole.er.usgs.gov/staffpages/csherwood/sedx_equations/RunSPMWave.html.

Vad gäller övriga processer så ingår följande i vågmodellen:

- Icke-linjär energitransfer mellan olika vågkomponenter.
- Brytande vågor (både på djupt och grunt vatten).
- Bottenfriktion.

För mer information se ref. /3/.

Vågmodellen har körts för en kort period uppdelad i fyra tidpunkter. För varje tidpunkt har signifikanta våghöjden och vågperioden för de infallande vågorna på modellens östra rand ökats, så att varje tidpunkt representerar vågfältet för den vindstyrkan.

Den beskrivna vågmodellen har använts för att simulera vågfältet före och efter dumpning, d.v.s. före och efter att dumpningsområdena fyllts upp till de planerade djupen (se avsnitt 3.4).

För att få fram bottenskjuvspänningen har en förenklad uppsättning av MIKE 3 FM MT använts där den enda drivningen utgörs av de simulerade vågfälten. De parametrar som används är signifikanta våghöjden, vågperioden för de vågor som har högst energiinnehåll och medelvågriktningen. Utifrån dessa vågparametrar beräknas bottenskjuvspänningen och sparas för varje tidpunkt, och därmed för de fyra vågfälten som representerar olika vindstyrkor. Återigen har beräkningarna gjorts både för bottenprofilerna före och efter dumpning.

4.4 Interna vågor

Eftersom det saknas mätningar av skiktningsskikt med tillräckligt hög upplösning i tiden för att kunna identifiera interna vågrörelser, d.v.s. snabba språngskiktvariationer, har vi istället gjort en grov uppskattning av bottenströmmar alstrade av interna vågrörelser med hjälp av analytiska formler. För detta krävs ett antal antaganden:

- Den interna vågen är lång i förhållande till bottendjupet, vilket innebär att strömhastigheterna alstrade av vågen inte varierar med djupet.
- För att inte underskatta effekten antar vi en hög frekvens, d.v.s. en så kort våg som möjligt men som ändå är lång i förhållande till djupet, samt en maximal amplitud.
- Vi utgår ifrån skiktningförhållandena under sommaren, eftersom skiktningen är som starkast då, samt att skiktningen kan approximeras som en tvålayerskiktning med ett språngskikt.

Ett exempel på den typ intern våg som kan tänkas ge upphov till starka bottenströmmar är en s.k. Kelvinvåg, vilket är en lång svängning på språngskiktet som på grund av jordens rotation fortplantar sig längs kusten och vars amplitud avklingar ut från kusten. Sådana vågor återfinns i Östersjön (ref. /4/) även om den relativt svaga skiktningen och skärgården utanför Luleå innebär att dessa vågrörelser antagligen har begränsad påverkan på strömningen i farledsområdet. Att interna vågor kan ge upphov till sedimenttransport i kustområden även i Östersjön är däremot mycket troligt (se t.ex. ref. /5/).

Utifrån de mätningar som presenteras i ref. A kan vi uppskatta salthalten i det övre lagret till ca 2,5 PSU och temperaturen till ca 15 °C. I det undre lagret finner vi en salthalt på knappt 3,5 PSU och en temperatur på ca 2 °C. Detta är den starkaste skiktningen som observerats under sommaren 2012. Det är oklart exakt var språngskiktet ligger, men uppenbarligen måste det ligga mellan mätningen på 10 m och mätningen på 40 m. I brist på bättre information antar vi ett språngskikt mitt emellan dessa två nivåer, d.v.s. på 25 m djup.

En rimlig uppskattning av bottendjupet i den yttre skärgården är ca 50 m. En lång våg måste därmed ha en våglängd som är en storleksordning större än djupet, d.v.s. minst 500 m. Den maximala amplituden är densamma som lagertjockleken, d.v.s. 25 m, men detta utgör sannolikt ett realistiskt extremfall. Låt oss därför anta en hög amplitud på ca 10 m, vilket kan jämföras med det intervall på 11-15 m som omnämns i ref. /5/.

Med hjälp av dispersionsrelationen för en lång våg på ett språngskikt mellan två grunda lager kan vi beräkna vågens frekvens. Utifrån frekvensen och amplituden kan vi sedan beräkna den maximala strömhastigheten som alstras av vågen. Utifrån uttrycket för en kvadratisk bottenfriktion kan vi slutligen uppskatta den högsta bottenskjuvspänningen som vågen ger upphov till. Dessa beräkningar presenteras i avsnitt 5.3.

5 Resultat

I detta avsnitt presenteras de beräknade bottenskjuvspänningar som uppstår på grund av de olika mekanismerna, och en jämförelse görs mellan före och efter dumpning för de två utvalda dumpningsplatserna.

5.1 Havsströmmar

Bottenskjuvspänningen som uppstår på grund av havsströmmar nära botten har extraherats i två positioner på varje dumpningsplats, en i sydöstra delen och en i nordvästra, eftersom områdena är något utdragna längs denna axel. Därefter har för varje tidpunkt det högsta värdet av de två tidserierna beräknats, för att försäkra oss om att vi inte underskattar bottenskjuvspänningen och därmed risken för erosion.

Som framgår av Tabell 5-1 ligger bottenskjuvspänningen alltid under 0.1 N/m² på båda dumpningsplatserna, d.v.s. värdena ligger väl under det kritiska värdet för att erosion kan förväntas ske. Visserligen ökar bottenskjuvspänningen efter dumpning, som ett resultat av det reducerade bottendjupet, men inte så mycket att det bör finnas någon risk för erosion på grund av havsströmmarna i området.

Tabell 5-1 Modellerad maximal och medelbottenskjuvspänning på grund av havsströmmar för de två dumpningsplatserna före och efter dumpning.

Dumpningsplats och skede	Max bottenskjuvspänning (N/m ²)	Medelbottenskjuvspänning (N/m ²)
O Vitfågelskäret före dumpning	0.06 (0.0625)	<0.01 (0.0054)
O Vitfågelskäret efter dumpning	0.09 (0.0879)	0.01 (0.0090)
Sörbrändöfjärden före dumpning	0.05 (0.0485)	<0.01 (0.0027)
Sörbrändöfjärden efter dumpning	0.08 (0.0848)	0.01 (0.0092)

5.2 Vindvågor

Bottenskjuvspänningen som uppstår på grund av vindvågor har extraherats i två positioner på varje deponi, en i sydöstra delen och en i nordvästra, på samma sätt som i avsnitt 5.1. Därefter har för varje vindstyrka värdet i den punkten med det högsta värdet identifierats, för att försäkra oss om att vi inte underskattar bottenskjuvspänningen och därmed risken för erosion.

Tabell 5-2 visar den beräknade bottenskjuvspänningen på de båda deponierna O Vitfågelskäret och Sörbrändöfjärden före och efter dumpning. Bottenskjuvspänningen ökar efter dumpningen, som ett resultat av det reducerade bottendjupet. Detta beror på att de våginducerade vattenrörelserna inte når ned till botten före dumpning såvida inte vågorna är riktigt stora. Efter dumpningen kan även vågor vid något lägre vindhastigheter än tidigare ge upphov till vattenrörelser vid botten, vilket därmed innebär en generell ökning av bottenskjuvspänningen vid dumpningsplatsen.

På båda platserna ligger dock bottenskjuvspänningen vid 10 och 15 m/s efter dumpning under det kritiska värdet för att erosion ska uppstå. Vid 20 m/s överstiger däremot bottenskjuvspänningen efter dumpning det kritiska värdet vilket innebär att det finns en risk att

erosion kan uppstå. Sammanfattningsvis kan vi säga att under extrema förhållanden, såsom en sydostlig storm med vindar över 20 m/s, är det möjligt att stormvågorna kan ge upphov till kortvarig erosion av de dumpade massorna.

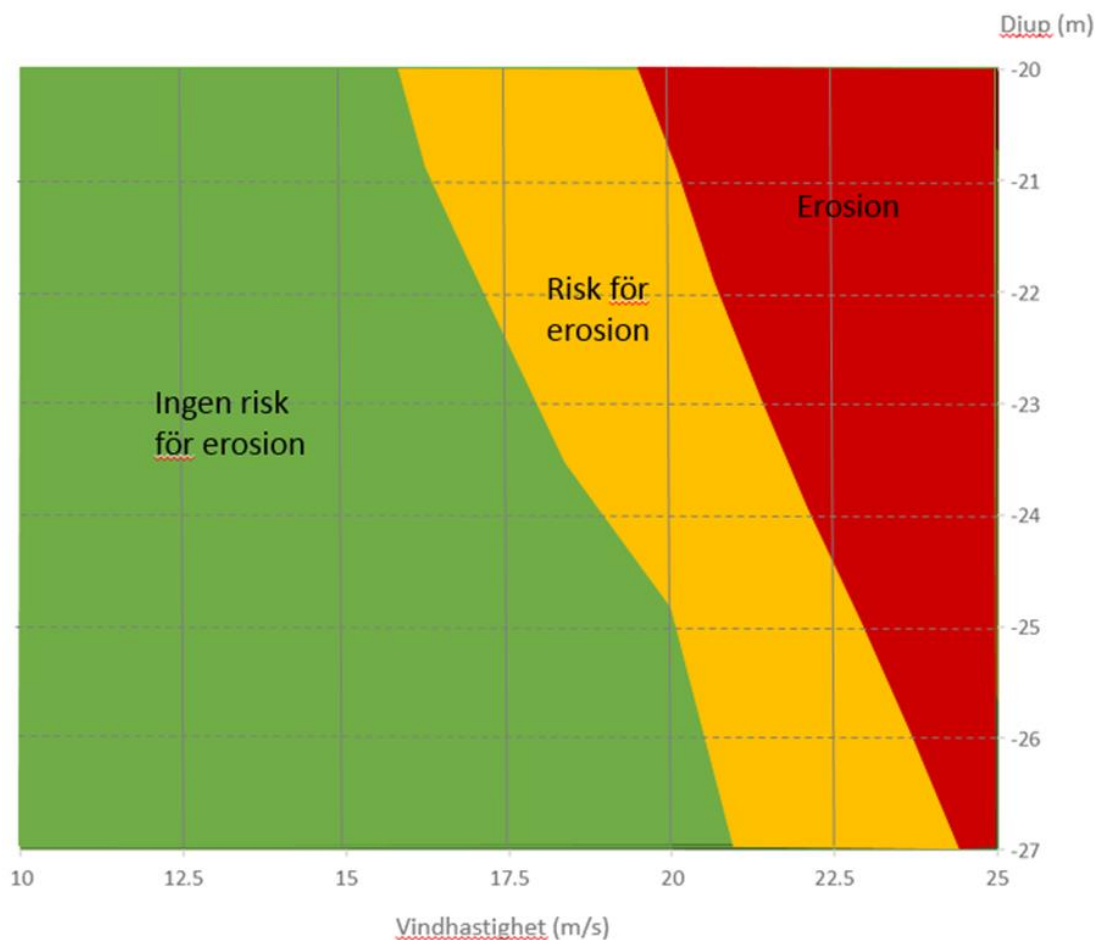
Tabell 5-2 Beräknad bottenskjuvspänning på grund av vindvågor för de två dumpningsplatserna före och efter dumpning för tre olika vindstyrkor.

Dumpningsplats och skede	Bottenskjuvspänning (N/m ²)		
	10 m/s	15 m/s	20 m/s
O Vitfågelskäret före dumpning	0.021	0.009	0.086
O Vitfågelskäret efter dumpning	0.086	0.104	0.402
Sörbrändöfjärden före dumpning	0.001	0.022	0.096
Sörbrändöfjärden efter dumpning	0.013	0.131	0.401

I Figur 5-1 visas resultaten från beräkningarna vid SV Vitfågelskär. På den horisontella axeln anges vindstyrkan och på den vertikala axeln fyllnadsdjupet. Från litteraturen vet vi att risken för erosion för silt/sand material uppstår då bottenskjuvspänningen ligger mellan 0.2-0.4 N/m². I diagrammet är detta området markerat med gult. Under 0.2 N/m² finns ingen risk för erosion, detta är grönt i diagrammet. Över 0.4 N/m² vet vi att materialet eroderar och detta område är rödmarkerat.

Hur stor risken för erosion är i det gula området kan man inte säga närmare, bara att risken ökar med ökat värde. Det är fullt möjligt att dumpat material, då det har stabiliserats, inte börjar erodera förrän vid närmare 0.3-0.4 N/m²

Det bör noteras att för att det skall bli någon effekt av erosionen måste det finnas strömmar som transporterar bort materialet. Befinner man sig i en djuphåla är sannolikheten att borttransport av det eroderade materialet sker mycket liten. Vid en extrem stormhändelse kan det ytligaste materialet sättas i rörelse men antagligen sedimenterar det tillbaka på plats igen när vågorna avtar.



Figur 5-1 Diagram som visar teoretisk risk för erosion vid olika fyllnadsnivåer och vindstyrkor vid SV Vitfågelskår.

5.3 Interna vågor

Utifrån tillståndsekvationen kan vi beräkna densiteten utifrån salthalt och temperatur och får då ca 1001,0 kg/m³ i det övre lagret och ca 1002,8 kg/m³ i det undre. Fashastigheten c ges av

$$c = \frac{\omega}{k}$$

där $\omega = 2\pi/T$ och $k = 2\pi/\lambda$. T är vågens period och λ dess våglängd. För en lång våg på språngskiktet mellan två tunna lager gäller att (se t.ex. ref. /6/)

$$c = \sqrt{g \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2} \frac{H_1 H_2}{H_1 + H_2}}$$

Här är g tyngdkraftsaccelerationen (9,81 m/s²), ρ densiteten och H lagertjockleken. Index 1 står för övre lagret och index 2 för det undre. Vi kan därmed beräkna ω vilket ger ca 0,006 s⁻¹. Detta motsvarar en period på ca 1100 s eller knappt 20 minuter, vilket ligger inom det intervall på 0,1-1 timme som lyfts fram i ref. /5/. Den maximala strömhastigheten alstrad av vågen blir då ca

$$u_{max} \approx a\omega \approx 0,06 \text{ m/s}$$

där a är vågens amplitud. Denna hastighet framstår som rimlig jämfört med de 3-8 cm/s som nämns i ref. /5/.

Bottenskjuvspänningen τ kan uppskattas utifrån uttrycket

$$\tau = C_D u_{max}^2 \rho$$

där C_D är bottenfriktionskoefficienten. Ett typiskt värde på C_D är ca 0,003. Vi får då en bottenskjuvspänning på ca 0,01 N/m². Detta är mer än en tiopotens under det kritiska värdet för erosion och vi kan därför dra slutsatsen att det är osannolikt att interna långa vågor skulle kunna ge upphov till erosion på dumpningsplatserna på grund av de bottenströmmar som vågorna alstrar.

6 Slutsatser

Resultaten visar tydligt att bottenskjuvspänningen på dumpningsplatserna ökar efter att dumpning skett, som en effekt av att djupet minskar. Detta är som förväntat, då strömningen i detta område framför allt drivs av ytnära processer vilket innebär att strömhastigheterna avtar med djupet.

När det gäller bottenskjuvspänningen som uppstår på grund av havsströmmar så visar beräkningarna att den knappast kan nå upp till det kritiska värdet för erosion av nyligen avsatta sediment (0.2 N/m^2). Medelvärdena på båda dumpningsplatserna samt både före och efter dumpning ligger mer än en tiopotens under det kritiska värdet. De maximala värdena är väsentligt högre – närapå 0.1 N/m^2 – men förutom att dessa värden samtliga är mindre än det kritiska värdet så torde de uppstå väldigt sällan och endast under kort tid.

Vindvågor är ofta den mekanism som dominerar erosionen i kustnära områden. Den bottenskjuvspänning som kan uppstå på grund av vindvågor beror framför allt på djupet men även vågornas period och våghöjd. Det är därför uppenbart att bottenskjuvspänningen på grund av vindvågor ökar efter dumpning, samt ökar med ökande vindstyrka. För normala vindstyrkor, maximalt 10 m/s , så hamnar bottenskjuvspänningen under det kritiska värdet på båda dumpningsplatserna både före och efter dumpning. Vid vindstyrkan 15 m/s hamnar bottenskjuvspänningen efter dumpning något över 0.1 N/m^2 på båda dumpningsplatserna, vilket fortfarande är under det kritiska värdet men börjar närma sig det. Vid 20 m/s överskrider bottenskjuvspänningen det kritiska värdet på båda dumpningsplatserna efter dumpning, med värden strax över 0.4 N/m^2 . Slutsatsen blir därmed att i samband med mycket hård vind från sydost som varar tillräckligt länge för att stora vindvågor ska byggas upp på vägen från finska kusten till Luleå skärgård, så är det risk för erosion av de dumpade massorna. I vilken omfattning och vilken sedimenttransport detta ger upphov till har inte utretts inom ramen för uppdraget.

Påverkan på bottenskjuvspänningen från interna vågor har uppskattats utifrån ett antal antaganden och resultaten bör tolkas med viss försiktighet. Dock är det framräknade värdet mer än en tiopotens under det kritiska värdet och det framstår därför som osannolikt att interna vågor skulle kunna ge upphov till erosion på dumpningsplatserna. Dessutom borde skärgården utgöra ett skydd mot längre interna vågor som rör sig längs kusten. Möjligen om det av någon anledning uppstod interna vågor som rörde sig rätt in i farleden och bröt nära dumpningsplatserna skulle man kunna tänka sig att erosion skulle kunna uppstå, men sådana händelser torde vara mycket ovanliga.

Slutsatserna från denna studie är att den enda mekanism som skulle kunna ge upphov till erosion på dumpningsplatserna efter dumpning, är vindvågor i samband med sydostlig storm. Återkomsttidsberäkningar av vind från sektorn sydost visar att vindstyrkor över 15 m/s har en återkomsttid på 1 år och 20 m/s har en återkomsttid på 25 år. Materialet kan eroderas vid vindstyrkor som ligger någonstans mellan 15 och 20 m/s men dessa tillfällen kommer att vara få och uppstå någon gång var 5e till 25e år.

För att det skall bli någon effekt av erosionen måste det dock finnas strömmar som transporterar bort materialet. Befinner man sig i en djuphåla som SV Vitfågelskär är sannolikheten att borttransport av det eroderade materialet sker mycket liten. Vid en extrem stormhändelse kan det ytligaste materialet sättas i rörelse men antagligen sedimenterar det tillbaka på plats igen när vågorna avtar.

7 Referenslista

- /1/ Karlsson, A., Eriksson, C. och Liungman, O. *Malmporten Luleå – Beräkning av spridning av spill vid muddring och dumpning*. DHI, uppdragsnummer 12802687, oktober 2015.
- /2/ Coastal Engineering Research Center: *Shore Protection Manual*. U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg Mississippi, 1984.
- /3/ Short description of MIKE 21 SW FM: http://mikepoweredbydhi.com/-/media/shared%20content/mike%20by%20dhi/flyers%20and%20pdf/product-documentation/short%20descriptions/mike21_sw_fm_short_description.pdf.
- /4/ Fennel, W. och Seifert, T. *Kelvin wave controlled upwelling in the western Baltic*. J. of Marine Systems, Vol. 6, Issue 4, 289-300, 1995.
- /5/ Kurkina, O., Talipova, T., Pelinovsky, E. och Soomere, T. *Mapping the internal wave field in the Baltic Sea in the context of sediment transport in shallow water*. J. of Coastal Research, Special Issue 64, 2042-2047, 2011.
- /6/ Kundu, P. *Fluid Mechanics*. Academic Press, Inc., 1990 (ISBN 0-12-428770-0).