

**FÖRSÄTTSBLAD TILL
UNDERLAGSRAPPORT****Projekt Landsortsfarleden**

Försättsblad till följande rapport: Farledsprojekt Landsort-Södertälje. Spridningsmodellering av spill från muddring och dumpning, Bilaga 3e.

Författare: DHI

Rapport daterad: April, 2019.

Kommentar 2024-10-15: Underlagsrapporten inkluderar modellering av spridning av suspenderade sediment och sedimentation från muddring och ett antal tillänkta dumpningsområden. Efter dessa modelleringar valde Sjöfartsverket att gå vidare med ett dumpningsområde (nr 2). Utbredningen av dumpningsområde 2 har dock förändrats och det tillsammans med att övriga dumpningsområden utgått gör att modelleringarna av samtliga dumpningsområden i denna rapport ej längre är relevanta. Spridningen av suspenderade sediment i det valda dumpningsområdet simuleras i utredningen som redovisas i Bilaga 3m. Resultaten är dock fortfarande relevanta med avseende på muddringsområdena.

Farledsprojekt Landsort-Södertälje

Spridningsmodellering av spill från muddring och dumpning



Ramböll Sverige AB

Rapport

April 2019

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 spridning av spill vid muddring och dumpning

Framtagen för Ramböll Sverige AB
Kontaktperson Terese Billberg



Projektleddare	Hanna Corell
Kvalitetsansvarig	Hanna Corell
Handläggare	Maria Hammarbäck

Uppdragsnummer	12803195
Godkänd datum	2019-04-09
Version	Slutgiltig 1.1
Klassificering	Öppen



INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	Sammanfattning	1
2	Inledning	1
2.1	Bakgrund	1
2.2	Miljöpåverkan	2
2.3	Områdesbeskrivning	2
3	Dataunderlag och metod	3
3.1	Hydrodynamisk modellering	3
3.2	Grumlingsmodellering	3
3.3	Erosion på botten på grund av ändrade strömhastigheter	5
4	Resultat	6
4.1	Sedimentspill och sedimentation	6
4.1.1	Max- och medelkoncentrationer av suspenderat material	6
4.1.2	Varaktighet av koncentration suspenderat material över 50 mg/l	14
4.1.3	Varaktighet av koncentration suspenderat material över 100 mg/l	14
4.1.4	Sedimentation av spill från muddring och dumpning	14
4.2	Erosion vid botten före och efter muddring och dumpning	20
5	Begränsningar i modelleringen	23
6	Slutsatser	24
7	Referenslista	25
A	Data och metoder	1
A.1	Bakgrundshalter av suspenderat material	1
A.2	Muddrings- och dumpningsförfarande	1
A.3	Geotekniska data och sammansättning av muddrat material	2
A.4	Grumlingsmodellering	4
A.4.1	Beskrivning av hydrodynamiken	4
A.4.1.1	Beräkningsnät	4
A.4.1.2	Drivning till den hydrodynamiska modellen	6
A.4.1.3	Resultat från den hydrodynamiska modelleringen	7
A.4.2	Grumlingsmodellering	9
A.4.2.1	Modellerade scenarier	10
A.4.3	Statistisk analys	11
A.4.4	Förändrade strömhastigheter och erosion	12
B	Muddrings- och dumpningsvolymerna för respektive område	1

TABELLER

Tabell 3-1	Mudder- och dumpningsschema från Sjöfartsverket, som användes som grund för grumlingsmodelleringen DHI har lagt till muddring och dumpning söder om Oaxen, vilket inte ingick från början.....	4
Tabell 4-1	Medel- och maxhastigheter vid botten i de trånga passagerna och på dumpningsplatserna innan respektive efter muddring och dumpning. Tröskelvärde för erosion 0,26 m/s, se Avsnitt A.4.4.....	20
Tabell A-1	Andel i [%] av den fina fraktionen (upp till 125 µm) i varje sedimentprov som består av ler och finsilt, mellansilt, grovsilt och finsand. Sammanställning av kornstorleksfördelningen utifrån analyser i de provpunkter som visas i Figur 3–3. Nedersta raden visar den medelfördelning mellan fraktionerna som används i grumlingsmodellen.....	3
Tabell A-2	Fallhastighet och kornstorlek för de fyra fraktioner (sedimenttyper) som ingår i grumlingsmodelleringen.....	10
Tabell A-3	Mudder- och dumpningsschema från Sjöfartsverket, som användes som grund för grumlingsmodelleringen DHI har lagt till muddring och dumpning söder om Oaxen, vilket inte ingick från början. Tabellen finns även som tabell 3-1 i huvudtexten.	11

1 Sammanfattning

DHI har på uppdrag av Ramböll utfört en numerisk modelleringsstudie av grumling och sedimentation av spill i samband med muddring och dumpning vid fördjupning av befintlig farled, samt anläggandet av en ny farled, mellan Södertälje hamn och Landsort. Modellsimuleringarna är gjorda med hjälp av en hydrodynamisk strömningsmodell för området kopplat till en sedimentmodell, MIKE 3 FM MT, och omfattar perioden augusti – oktober, med väder och hydrografi från 2015. Spridningsberäkningarna visar vilka koncentrationer av suspenderat material utöver bakgrunds nivå som kan uppstå vid muddring och dumpning under en sådan period, och var sedimentation av spill sker och hur stor denna sedimentation är.

Modellresultaten visar att Hallsfjärden och Näslandsfjärden (norr om Skansundet) är de områden som påverkas mest av grumling under muddring- och dumpningsperioden, vilket sammanfaller med att de största mängderna material muddras och dumpas i de områdena. Den södra delen av undersökningsområdet påverkas mindre av grumling, främst beroende på att mängderna fint material är små i den här delen av farleden.

Grumlingen är väldigt styrd av användandet av sugmudderverket, eftersom det har störst kapacitet och därmed ger mest påverkan både vid muddring och dumpning, särskilt i de fall där dessa områden ligger nära varandra. Maxhalterna av suspenderat material utanför områden direkt påverkade av muddring- och dumpning överskrider sällan 100 mg/l. Varaktigheten för halter över 100 mg/l är som mest upp till två veckor för områden som inte är i direkt anslutning till muddring eller dumpning. Generellt klingar halterna av inom något dygn efter att muddring eller dumpning upphört.

Det spill som transporteras i vattenmassan sedimenterar i huvudsak i direkt anslutning muddrings- och dumpningsplatserna. Både för grumlingen och spillet är påverkan koncentrerade till Hallsfjärden och Näslandsfjärden.

Det är låga hastigheter överlag i undersökningsområdet och strömhastigheterna vid botten påverkas väldigt lite av muddringen. Medelhastigheterna på dumpningsplatserna är inte i närheten av gränsvärdet för erosion, varken innan eller efter muddring och dumpning, vilket innebär att massorna som dumpas förväntas ligga kvar.

2 Inledning

2.1 Bakgrund

Projekt Landsortsfarleden innebär inrättande av två nya farledsavsnitt på sträckorna Fifång till Regarn och Oaxen till Skanssundet. Även breddning och fördjupning av befintlig farled samt förbättrad farledsutmärkning ingår i projektet. Syftet är att förbättra sjösäkerheten i den allmänna farleden mellan Landsort och Södertälje samt att anpassa farleden för framtida fartygstrafik genom ökad kapacitet och förbättrad tillgänglighet. Den nya farledsdragningen redovisas i Figur 2-1. Som ett led i genomförandet avser Sjöfartsverket att muddra på ett flertal platser och dumpa massorna i utpekade dumpningsområden längs farleden. Denna rapport utgör underlag till utredningen om den miljöpåverkan som muddringen och dumpningen har på vattenmiljön i form av grumling samt sedimentation av detta spill.



Figur 2-1 Planerad farledsdragning (blått) med nya farledsavsnitt mellan Fifång och Regarn samt Oaxen och Skanssundet. Karta från Ramböll.

Farleden planeras att fördjupas till som mest 11,65 m i de inre delarna och från Hallsfjärden och söderut fördjupas till 12,7 m. Fördjupningen kommer medföra en omfattande muddring, framförallt i Brandalsund, Fläsklösa och Skansundet. De muddrade massorna ska dumpas på ett antal utvalda dumpningsområden. DHI har fått i uppdrag av Ramböll att utreda effekterna av muddring och dumpning, och har utfört en numerisk modelleringsstudie av strömförhållanden och grumling av sedimentspill.

Inför miljökonsekvensbeskrivningen testas i modellen effekterna av en mudderperiod mellan augusti till och med oktober. Sjöfartsverket räknar med att man kommer att använda två typer av muddringsverk; enskopeverk och sugmudderverk, samt ett enskopeverk med miljökopa för att hantera förorenat material.

2.2 Miljöpåverkan

Nästan alla stora infrastrukturprojekt i vatten innebär muddring av sediment och därmed behov av ett lämpligt dumpningsområde för massorna. Vid muddring och dumpning är det oundvikligt att det sker ett visst spill av sediment i vattenmassan. Spillet omfattning beror på muddringsmetoden, sammansättningen av det muddrade materialet samt dumpningsförfarandet. Spillet kommer att spridas i vattenmassan till följd av materialets sammansättning, mängden spill och de hydrodynamiska förhållanden som råder i området runt dumpningsområdet.

Spillet transporteras i vattenmassan tills det slutligen deponeras i ett område från vilket det inte resuspenderas. Innan detta sker kan sedimentet komma att sedimentera och resuspendera många gånger och bidra till en förhöjning av den bakgrundskoncentration som finns naturligt i området.

I denna rapport kommer följande parametrar att utvärderas:

- Förhöjning av koncentrationen av suspenderat material, s.k. överkoncentration
- Förhöjning av sedimentationen från suspenderat material
- Risken för erosion på dumpningsplatserna till följd av bottenströmmar

2.3 Områdesbeskrivning

Området som undersöks sträcker sig från Södertälje hamn i norr till Landsort i söder. Det är en långsträckt fjärd längs en förkastningsspricka och en stor del av stränderna är branta. Området avgränsas mot ytterskärgården genom trösklar på 18 - 28 meters djup mellan Askö och Torö. Detta begränsar inflödet av saltare djupvatten från Östersjön, ref. /1/. Hydrografen i området styrs till stor del av vinden och av den två-lagers cirkulation som skapas av balansen mellan sydgående vatten med stort inslag av sötvatten från land och saltare vatten från större djup i Östersjön som trycks in i systemet längs botten. Det dominerande sötvattentillflödet är genom slussen i Södertälje, vars utflöde är reglerat. De vattenförekomster i undersökningsområdet som i huvudsak påverkas av muddring och dumpning är Igelstaviken, Hallsfjärden, Näslandsfjärden, Himmerfjärden, Svärdsfjärden och Asköfjärden.

3 Dataunderlag och metod

I detta kapitel presenteras dataunderlag och metod kortfattat. En grundlig beskrivning av genomförandet finns i appendix A.

3.1 Hydrodynamisk modellering

Systemet från Landsort in till Södertälje består av ett antal sammanhängande bassänger som sinsemellan begränsas av trängre passager och grunda sund. Systemet drivs dels av vattenståndsväxlingar i Östersjön, vilket trycker in vatten som sedan rinner ut igen när vinden vänder, dels av en direkt vindpåvekan på ytvattnet samt av en estuarin komponent. Den estuarina cirkulationen styrs av densitetsskillnaden mellan färskvattnet som rinner till systemet genom Södertälje kanal och andra färskvattentillflöden, och det saltare Östersjövattnet. Färskvattnet transporteras i ytan ut mot Östersjön och driver då en motström av saltare vatten längs botten som rinner in i systemet. Bottenvattnet blandas långsamt upp i bassängerna, vilket tillsammans med färskvatten-tillrinningen leder till att den maximala salthalten sjunker ju längre in man kommer.

För att kunna beskriva hur spill från muddring och dumpning sprids, och vilka bottenströmmar som verkar på dumpningsområdena, ställdes först en hydrodynamisk modell upp över området från Landsort till Södertälje. Modellen är byggd i programvaran MIKE3 FM, med ett flexibelt beräkningsnät. Det innebär att upplösningen kan anpassas till det som ska undersökas. I den här modelleringen krävdes hög upplösning kring muddrings- och dumpningsplatser, samt vid och runt de sund där tröskeldjupet skulle förändras, dvs Brandalssund, Skanssundet och sundet mellan Oaxen och Regarn.

Modellen beskriver flöden, temperatur och salthalt i tre dimensioner under ett helt år. På ränderna drivs modellen av dynamiska data från en operativ Östersjömodell, och med griddad meteorologiska data. Högupplöst djupdata levererades av sjöfartsverket, och modellen är körd dels för nuvarande förhållanden, och dels för de djupförhållanden som kommer att råda efter muddring och dumpning.

För en detaljerad beskrivning av den hydrodynamiska modellen, inklusive validering, se Appendix A.

3.2 Grumlingsmodellering

Med hjälp av beskrivningen av vattnets rörelser och skiktning från den hydrodynamiska modellen kunde spridningen av spill från muddring och dumpning modelleras. Spillet kommer att spridas med strömmarna. Finkorniga sediment som silt och lera har mycket låga fallhastigheter och kommer därför att förbli i suspension under en lång tid och kan transporteras långa sträckor.

Spridningen av spill från muddring och dumpning har modellerats med en beräkningsmodul till MIKE3 FM som heter "Mud Transport". Den beskriver transporten av ett material, uppdelat i flera kornstorleksfraktioner, och resultatet redovisas bland annat i form av koncentration suspenderat material i vattnet i tre dimensioner, och mängden pålagring på botten. I Appendix A beskrivs modelluppställningen i detalj.

Ett mudderschema för modelleringen, baserat på muddringsvolym och kapacitet på mudderverken, sattes upp av Sjöfartsverket, se Tabell 3-1. Modelleringen sträcker sig från augusti till och med oktober. Muddrings- och dumpningsvolymerna på redovisas i tabell i appendix B. Totalt planeras 1 100 000 m³ material muddras.

3.3 Erosion på botten på grund av ändrade strömhastigheter

När ett sund fördjupas eller när ett dumpningsområde fylls med material kan strömmönster komma att ändras. För att det dumpade materialet på en tilltänkt dumpningsplats ska ligga kvar krävs att erosionen på botten inte är så stor att materialet resuspenderas och driver iväg.

Genom att jämföra de två modellsimuleringar av hydrodynamiken, med rådande djupförhållanden och med djupen efter muddring och dumpning, kan skillnaderna i strömhastigheter vid botten kvantifieras. Medelhastigheter och maximala hastigheter vid botten för hela det modellerade året beräknades. Vid hastigheter större än 0,2 m/s blir skjuvspänningen vid botten tillräckligt hög för att erosion kunna uppstå. För teknisk beskrivning se A.4.4

4 Resultat

4.1 Sedimentspill och sedimentation

Resultaten från modelleringen av spridningen av spill vid muddring och dumpning redovisas i Avsnitt 4.1.1 – 4.1.4. Koncentrationen av suspenderade sediment anges i mg/l. De beräknade koncentrationerna är överkoncentrationer, dvs. koncentration utöver den naturliga. Färgskalan i figurerna relaterar i viss mån till vad som kan antas ligga i linje med de naturliga variationerna i området. Koncentrationer under 20 mg/l anges i blått då dessa förväntas ligga i nivå med, eller strax över, de naturliga variationerna inomskärs under lugna till måttliga väderförhållanden. Intervallet 20 – 50 mg/l visas i grönt och är halter som enligt litteraturen kan förekomma under naturliga förhållanden vid stormar, se A.1 och /2/-/4/. Över 50 mg/l visas med färgskalan gult till orange.

Halten suspenderat material redovisas för ytan och vid botten. Observera att ytan är en fix nivå, översta 0 – 2 m, medan bottennivån varierar pga. olika djup vilket återspeglas i figurerna.

Varaktighet redovisas för referensnivåerna 50 och 100 mg/l i ytan och vid botten i en färgskala med "andel av tiden" i antal dagar. Maxvärdet representerar den maximala halten som uppstått *någon gång* under perioden och medelvärde påverkan från muddring och dumpning i hela systemet.

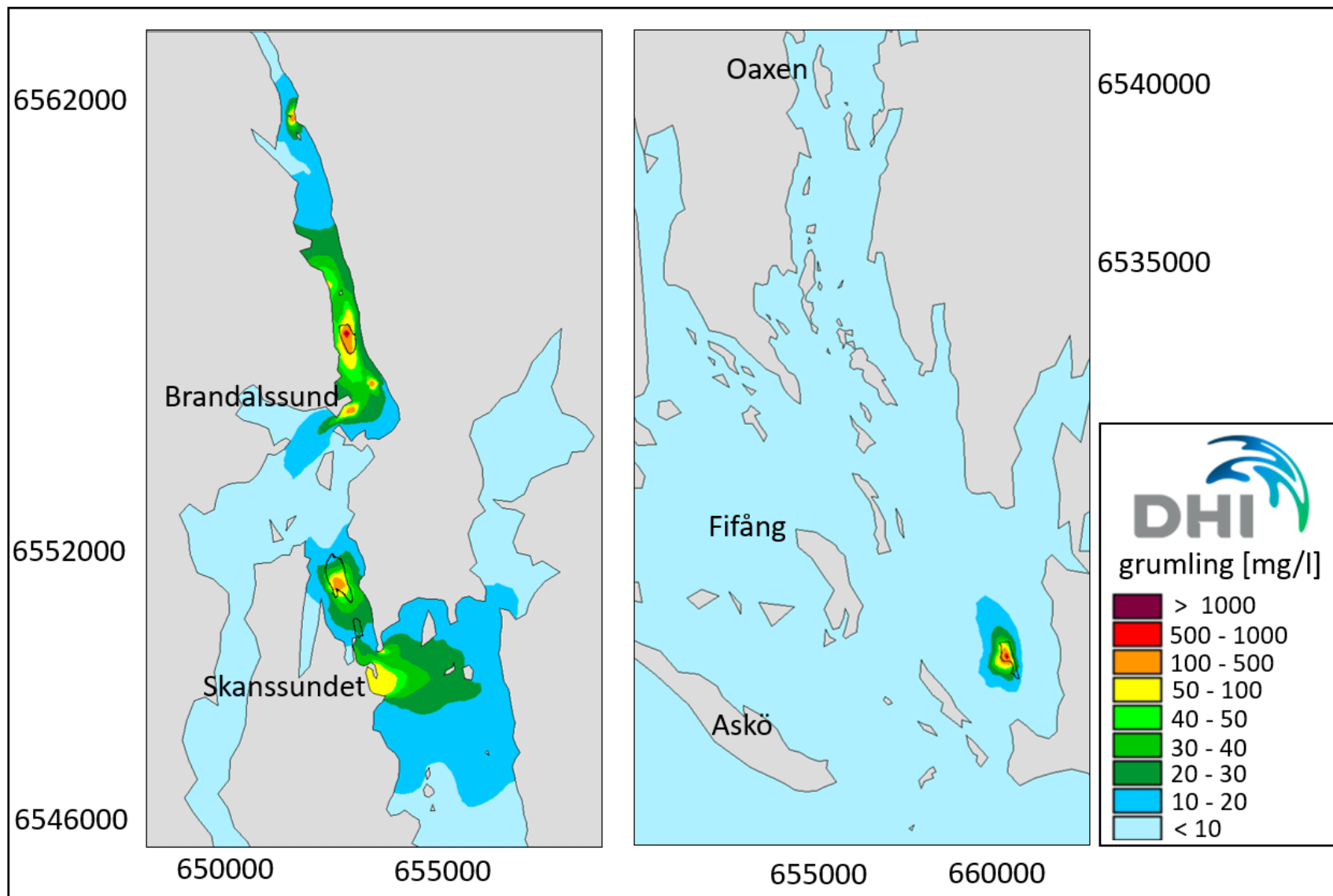
4.1.1 Max- och medelkoncentrationer av suspenderat material

De maximala koncentrationerna av suspenderat material under muddringsperioden visas i Figur 4-1 (ytlaget, översta 0 – 2 m) och Figur 4-2 (gridcellen närmast botten). Figurerna visar den högsta halt som uppmätts i varje enskild beräkningscell under modellperioden augusti till oktober, och tillfället som detta inträffar kan vara helt olika för olika celler. Figurerna visar med andra ord inte en maximal ögonblicksbild, utan det enskilt högsta värdet som uppmätts i varje cell.

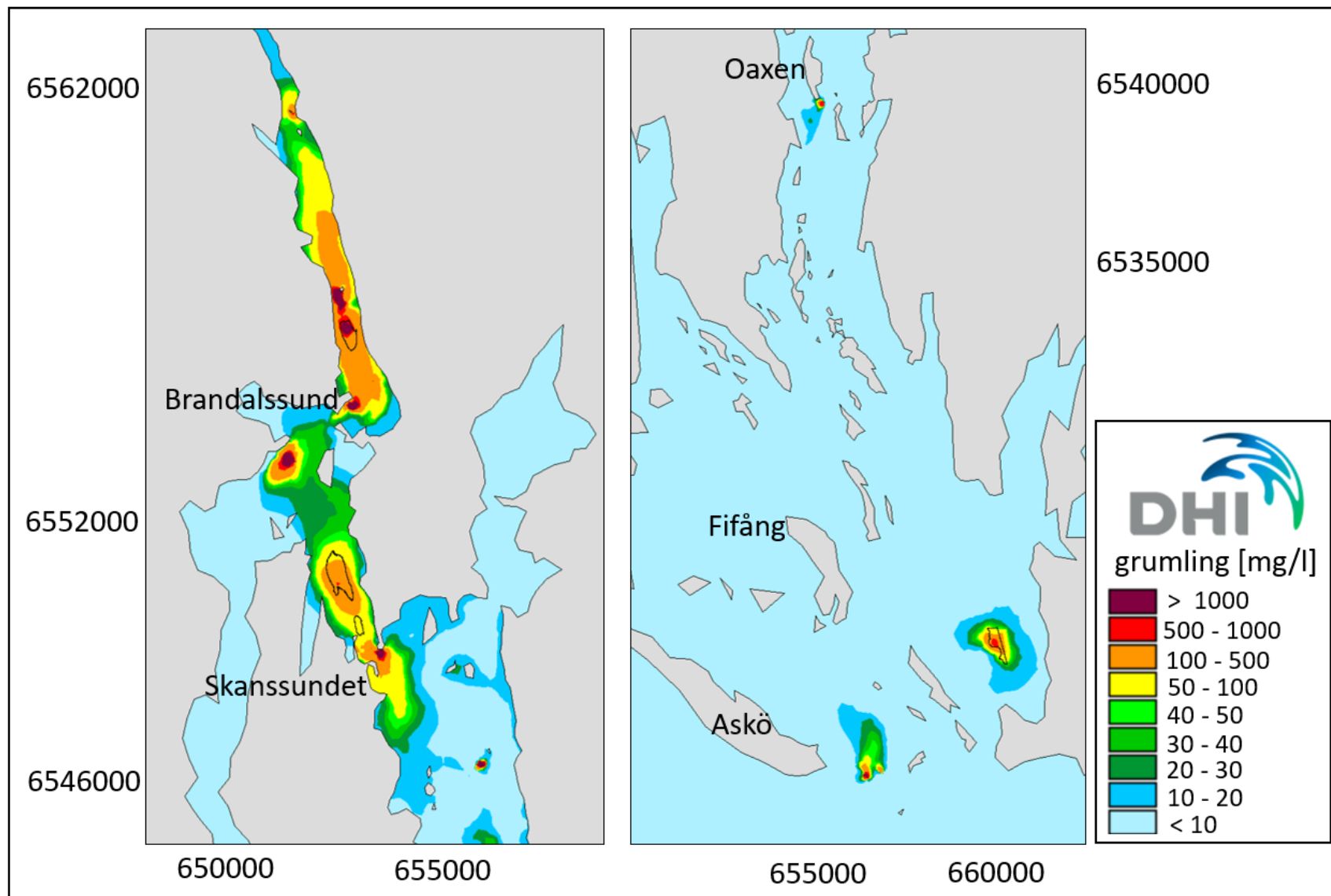
Områdena norr om Brandalsund och runt Skansundet är de som påverkas mest av grumlingen. Detta är en konsekvens av de stora mängderna som muddras här, och den höga andelen fint material i muddermassorna. Grumlingen blir betydligt större vid botten jämfört med ytan, främst beroende på att trailern endast spiller vid botten under muddring samtidigt som den har störst kapacitet. De högsta halterna utanför områden som är direkt påverkade av muddring och dumpning är runt 100 mg/l. I områden för sugmuddring och i dumpningsområdena 6 och 7 kan halterna väldigt lokalt (någon enstaka gridcell) och tillfälligt vara mycket höga vid botten, som högst strax över 3000 mg/l vid Farstanäs. Generellt kan man säga att områden där det sugmuddras stora mängder fint material riskerar att ha tillfälligt mycket höga koncentrationer av suspenderat material vid botten i det absoluta närområdet av muddringen. Detta sker då precis i samband med att muddringen pågår.

För det norra området (Fräckstahäll och norrut) är figurerna för medelhalt baserade på medelvärdet av suspenderat material under hela muddrings- och dumpningsperioden, dvs 1 augusti till 1 november. För området Oaxen och söderut är figurerna med medelhalt baserade på den period i början av september då muddring och dumpning pågår där, se tabell 3-1.

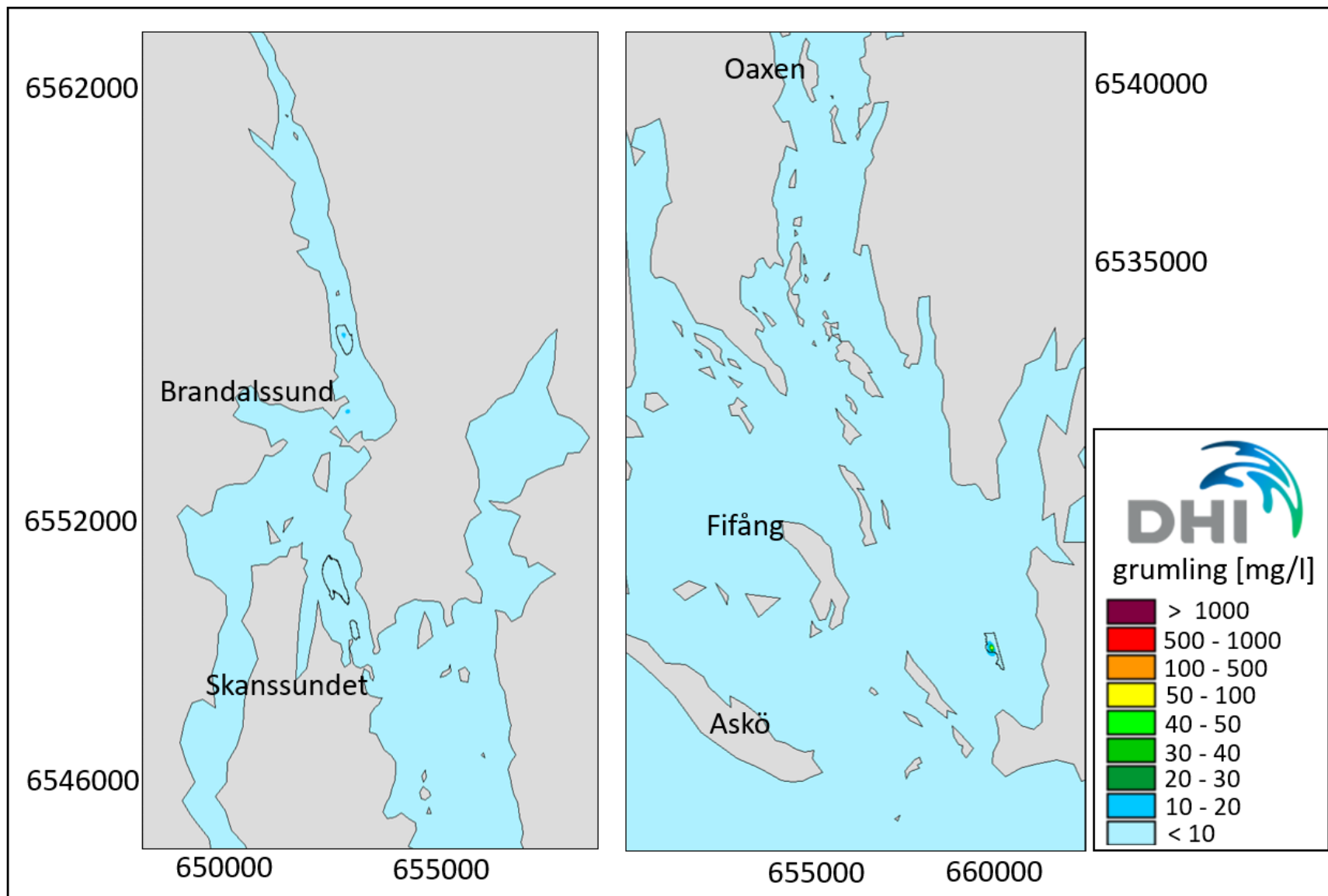
För att undersöka ett enskilt områdes faktiska medelhalt måste detta område modelleras separat, så att en medelhalt där inget suspenderat material från andra områden räknas med, och tidsperioden kan anpassas till den aktiva muddrings- eller dumpningstiden. Detta är gjort för dumpområde 7, (se 4.1.1.1, Figur 4-5). Eftersom detta är det mest påverkade området under muddringsarbetet är det rimligt att anta att inga andra faktiska medelhalter för något annat område kommer att överstiga de som uppkommer för dumpområde 7.



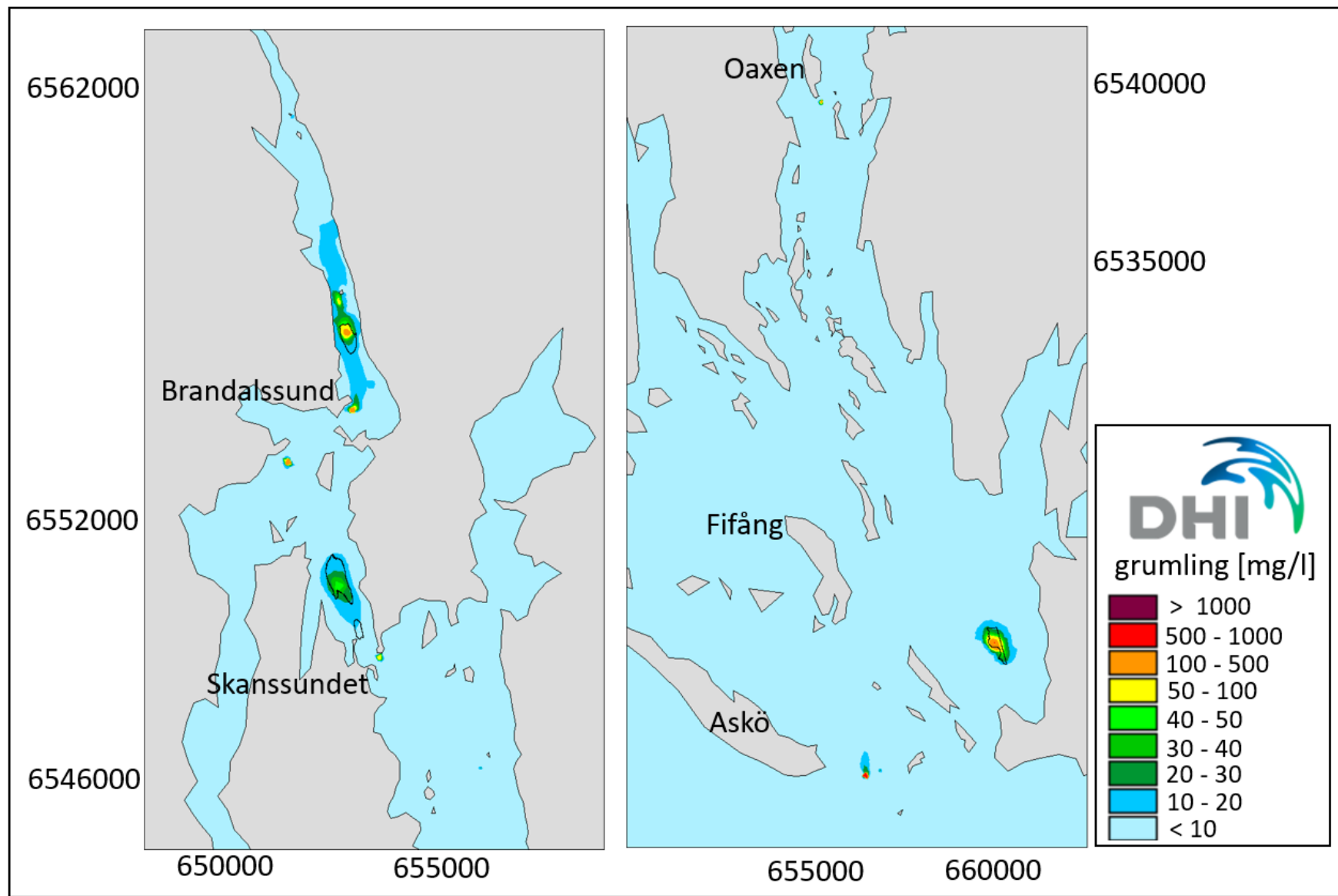
Figur 4-1 Maximal koncentration suspenderat material i ytan (översta 0 – 2 m) under muddringsperioden augusti – oktober. Områden där dumpning sker är indikerade med en polygon i svart. Notera att detta är de högsta halter som uppstått i varje individuell gridcell under hela modellperioden och de behöver inte ha inträffat samtidigt. Koordinater i SWEREF 99 TM.



Figur 4-2 Maximal koncentration suspenderat material vid botten under muddringsperioden augusti – oktober. Områden där dumpning sker är indikerade med en polygon i svart. Notera att detta är de högsta halter som uppstått i varje individuell gridcell under hela modellperioden och de behöver inte ha inträffat samtidigt. Koordinater i SWEREF 99 TM.



Figur 4-3 Medelkoncentration suspenderat material i ytan (översta 0 – 2 m) under muddringsperioden augusti – oktober i norra och enbart 4–12 september i södra . Områden där dumpning sker är indikerade med en polygon i svart. Koordinater i SWEREF 99 TM.

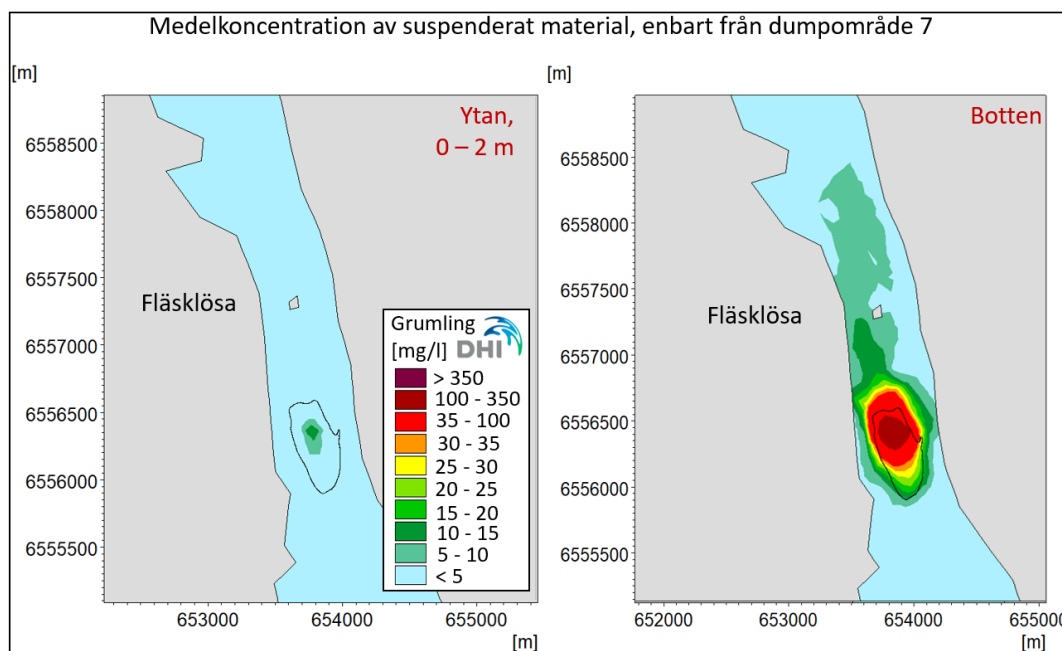


Figur 4-4 Medelkoncentration suspenderat material vid botten under muddringsperioden augusti – oktober i norra och enbart 4–12 september i södra. Områden där dumpning sker är indikerade med en polygon i svart. Koordinater i SWEREF 99 TM.

4.1.1.1 Grumling orsakad av dumpning i område 7

För att kunna ge ett medelvärde av hur stor grumling som uppstår av enbart av den dumpning som sker i område 7 (Hallsfjärden) modellerades detta även i en separat simulering och analyserades utifrån medelvärdet under de två perioder som dumpningen pågår (se Tabell 3-1).

Halterna vid botten i det tilltänkta dumpningsområdet kommer att vara relativt höga under den period som dumpningen aktivt sker. Den högsta medelkoncentrationen (utsläppspunkten exkluderad) vid ytan är 18 mg/l och 350 mg/l vid botten. Medelhalterna vid botten sjunker sedan till nivåer kring 10–20 mg/l direkt utanför dumpningsområdet (200 m väst och öst om dumpningskoordinaten och 300 m söder och norr om). Medelvärdet är här framtaget enbart under de aktiva dumpningsperioderna för område 7 (augusti-september och september-oktober). Notera att intervallen i färgskalan anpassades till dumpningsområdet och är de som är annorlunda än i de övriga medelhalts-figurerna. Eftersom detta är det mest påverkade området under muddringsarbetet är det rimligt att anta att inga andra faktiska medelhalter för något annat område kommer att överstiga de för dumpningsområde 7.



Figur 4-5 Medelkoncentration suspenderat material i ytan (vänster) och vid botten (höger) från dumpning i område 7 (söder om Fläsklösa) under perioden augusti – oktober. Den högsta medelhalten uppstår vid botten närmast utsläppspunkten. Koordinater i SWEREF 99 TM.

4.1.1.2 Tidsutveckling av koncentrationen suspenderat material

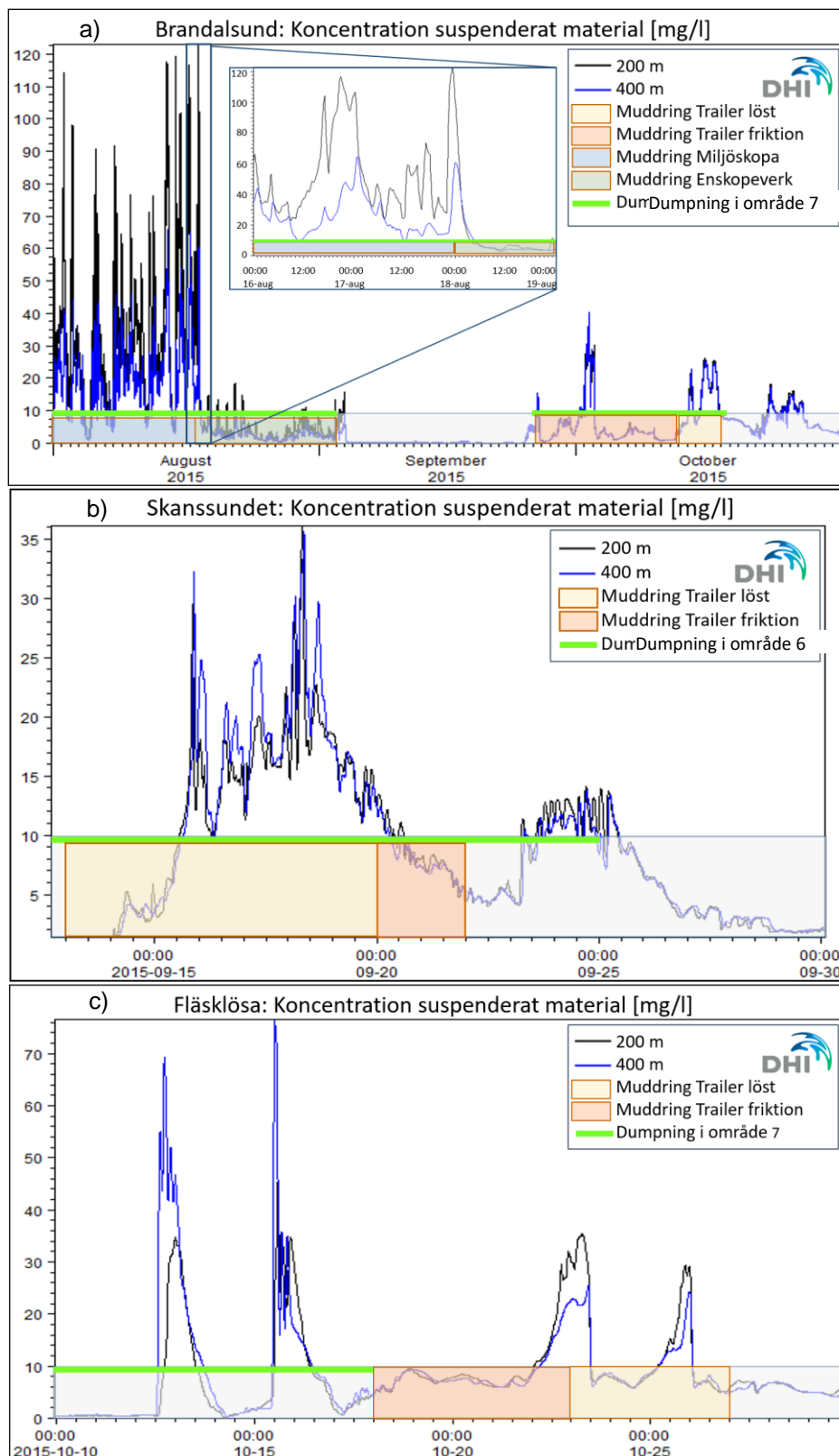
För att beskriva tidsutvecklingen av halterna suspenderat material, och hur koncentrationen varierar och avtar med tiden, analyserades tidsserier vid Brandalsund, Skanssundet och Fläsklösa (område 36, 34 respektive 38), i två punkter vardera med avstånd om 200 respektive 400 m från de modellerade muddringspositionen. Punkterna är placerade medströms (söderut) utmed plymen och presenteras i Figur 4-6. De svarta och blå linjerna visar halterna suspenderat material (SSC) på 200 m respektive 400 m nedströms muddringspositionerna och illustrerar koncentrationens avtagande från muddringspositionen.

Infällt i nederkant i figurerna är tidsperioderna för muddring av olika material på platsen samt dumpningen som sker i närliggande områden, markerat med färg i form av boxar (motsvarar respektive muddringsmetod) och heldragen, grön linje (dumpning). En linje och skuggning markerar halten 10 mg/l, vilket är halten som representerar bakgrundsvärdet. Det aktuella dumpningsområdet för respektive muddringsområde specificeras i legenden. Figurerna ger en överblick av hur mängden suspenderat material varierar med tiden, i relation till när muddring och dumpning sker i närområdet. Halterna blir tidvis höga, men klingar av fort när muddringen eller dumpningen upphört.

Figur 4-6a) visar koncentrationen SSC i Brandalsund under hela muddrings- och dumpningsperioden 1 augusti till 31 oktober, och med en mer detaljerad graf över perioden 16 – 18 augusti (infälld) då den maximala halten inträffar. Dumpningen i område 7 har stor inverkan på koncentrationen SSC, bäst illustrerat i första halvan av augusti där maxhalterna är över 100 mg/l, trots att det under denna tid är det spillsnålaste muddringsverket (miljöskopa) som används i Brandalssund. Under andra halvan av augusti dumpas främst sandigt material i område 7 (se figur 3-1) varvid grumlingen minskar.

Figur 4-6b) visar koncentrationen SSC i Skanssundet under september då muddring med trailer förekommer parallellt med dumpning i område 6. Positionerna är placerade söder om både muddringspositionen och dumpningsområdet (motsvarar 200 och 400 m nedströms från muddringspositionen i modelleringen).

Figur 4-6c) visar koncentrationen SSC i Fläsklösa under oktober då muddring med trailer sker. Positionerna är placerade söder om muddringspositionen och norr om dumpningsområde 7 (motsvarar 200 och 400 m nedströms från muddringspositionen). De högsta koncentrationerna inträffar när löst och kohesionsmaterial dumpas i område 7 (12-17 oktober) och vinden ligger på norrut. Halterna som uppstår när det senare muddras i området är lägre. Resultaten indikerar att det kan vara en bra ide att dumpa materialet från muddringen i Fläsklösa i dumpområde 6 så som gjordes i modelleringen, för att undvika effekter från muddring i Fläsklösa samtidigt som effekter av dumpning i område 7.



Figur 4-6 Tidsserier av medelkoncentration suspenderat material vid ytan (0–2 m) i två punkter (200 m respektive 400 m) söderut från muddringspositionen i a) Brandalsund under hela muddringsperioden, augusti – oktober, b) Skansundet under mitten av muddringsperioden i september och c) Fläsklösa under slutet av muddringsperioden i oktober. Notera olika skalor på koncentrationen (y-axeln). Linje och skuggning markerar bakgrundshalten 10 mg/l.

4.1.2 Varaktighet av koncentration suspenderat material över 50 mg/l

Koncentrationer över 50 mg suspenderat material per liter förekommer som längst upp till 30 dagar vid botten inne i dumpområdena 6 och 7. Eftersom varaktigheten skiljer sig mellan ytan och botten presenteras dessa separat för ytan (översta 0 – 2 m) i Figur 4-7 och botten i Figur 4-8.

I ytan överskrids 50 mg/l som längst i Brandalsund, ungefär en vecka, och i Hallsfjärden (dumpningsområde 7) totalt fyra dagar (Figur 4-7). Vid dumpningsområde 6 och dumpningsområde 2 överstigs 50 mg/l två dagar.

Vid botten överskrids 50 mg/l under som mest en månad i Hallsfjärden (dumpningsområde 7 och öster om muddringsområdet i Brandalsund), följt av Näslandsfjärden (dumpningsområde 6) under 25 dagar (Figur 4-8). I dumpningsområde 2 (Svärdsfjärden) överstigs 50 mg/l under sammanlagt 10 dagar, 6 dagar i Skansundet, 3 dagar i Farstanäs och Örsakan samt knappt 1 dag i Södra Oaxen.

4.1.3 Varaktighet av koncentration suspenderat material över 100 mg/l

I Figur 4-9 och Figur 4-10 visas varaktigheten för koncentrationer av suspenderat material som överstiger 100 mg/l för ytan respektive botten. Den norra delen av domänen är den som påverkas mest av halter över 100 mg/l, vilket förklaras av att huvuddelen av all muddring och dumpning av finare material sker här

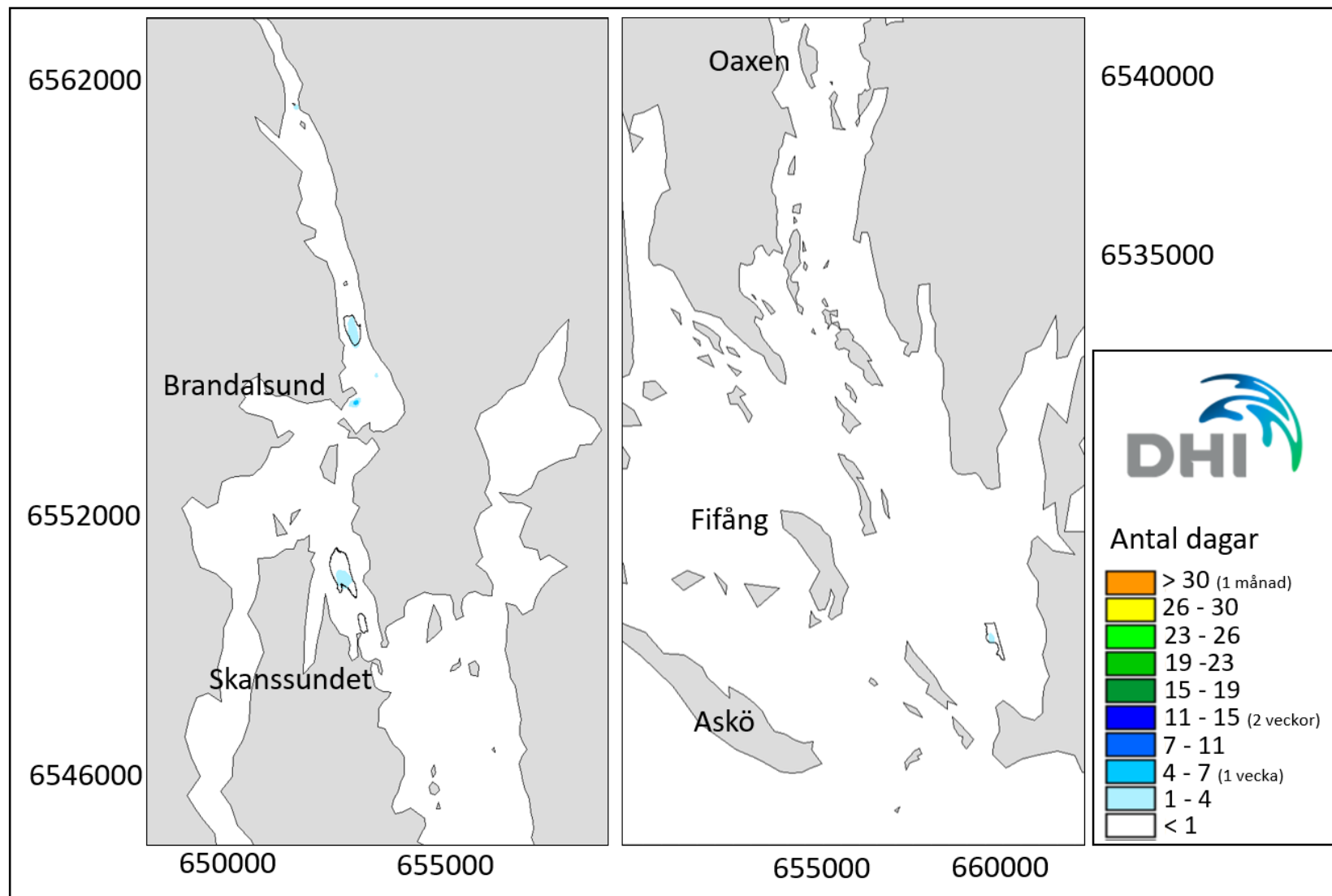
I ytan, definierad som de översta 0 – 2 m, är utbredningen av koncentrationer överstigande 100 mg/l mycket begränsad (Figur 4-9). Den totalt längsta varaktighet som inträffar är 3 dagar i Brandalsund, följt av 2 dagar i Hallsfjärden och Näslandsfjärden (vid dumpningsområde 7 och 6). I dumpningsområde 2 (i Svärdsfjärden, öster om Askö) överstigs 100 mg/l totalt 1 dag.

Vid botten är tillfällena med över 100 mg/l fler och har större utbredning än i ytan. Den totalt längsta varaktighet inträffar i Hallsfjärden (i Brandalsund och i dumpningsområde 7) med runt 20 dagar över ett litet område och runt 30 dagar som ett mycket lokalt maximum (Figur 4-10). Då områdena med det absolut högsta antalet dagar ofta är begränsat till en enstaka gridcell syns dessa maxvärden inte alltid i figurerna. I Näslandsfjärden (i närmast angränsande område till utsläppspunkten i dumpningsområde 6) är den totala varaktigheten 18 dagar och i Skansundet enbart 6 dagar. I den södra delen av domänen överstiger halterna 100 mg/l som mest 1 vecka i Svärdsfjärden (dumpningsområde 2, öster om Askö), 2 dagar i Örsankan och 1 dag Södra Oaxen.

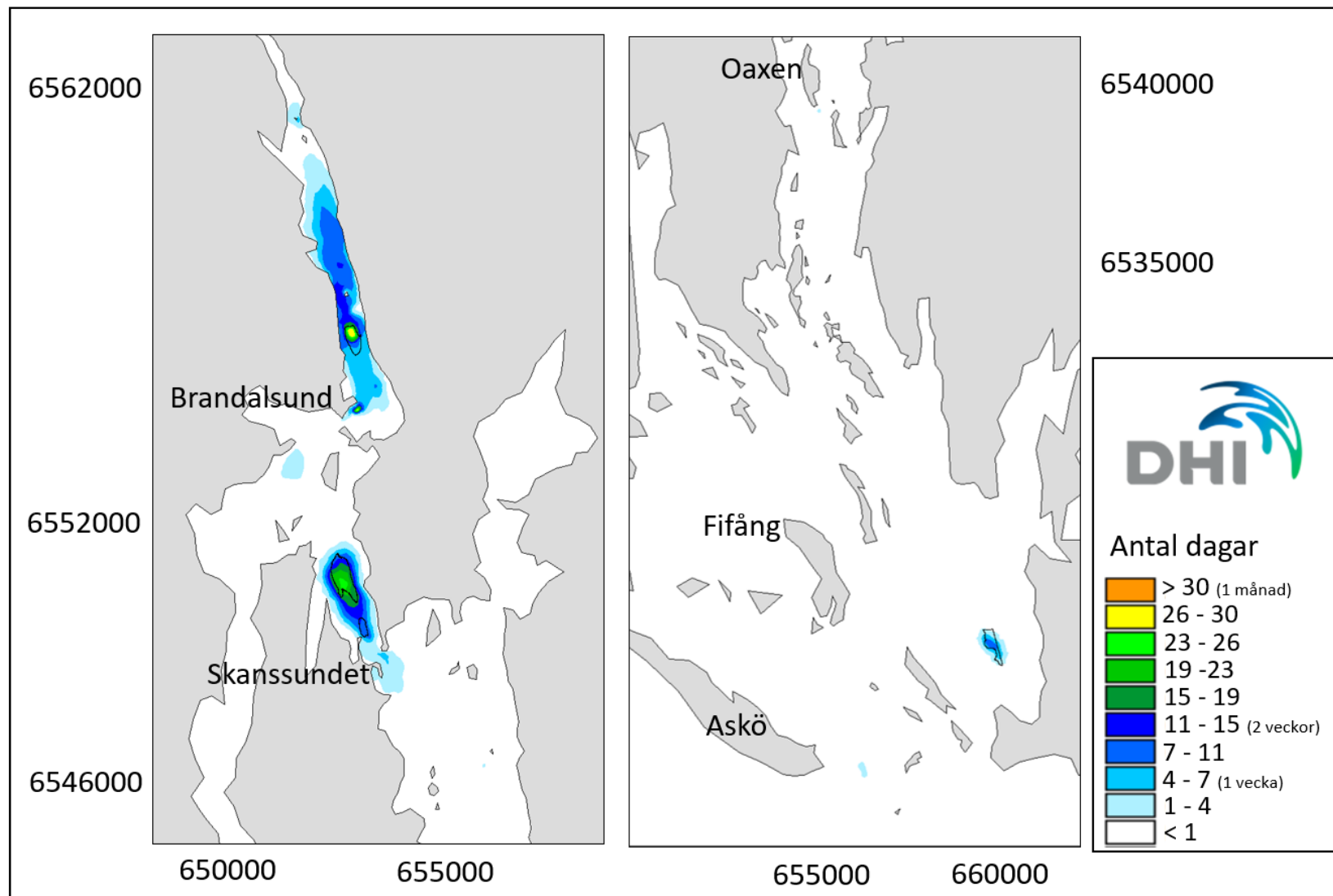
4.1.4 Sedimentation av spill från muddring och dumpning

Den mängd sediment som spills vid muddring och dumpning och sprids med strömmarna kommer så småningom att sedimentera. I Figur 4-11 visas mängden spill (i mm) som sedimenterat den första december, efter att muddring och dumpning pågått under tre månader följt av en extra månad för att ge det allra finaste materialet en chans att sedimentera. Sedimentation av spill förekommer i hela Hallsfjärden, Näslandsfjärden och Igelstaviken. Den största sedimentationen sker i anslutning till dumpningsområde 7 i Hallsfjärden, och i direkt anslutning till muddringsplatserna. Mängden uppgår till som mest 10 mm utanför de områden som muddras eller dumpas.

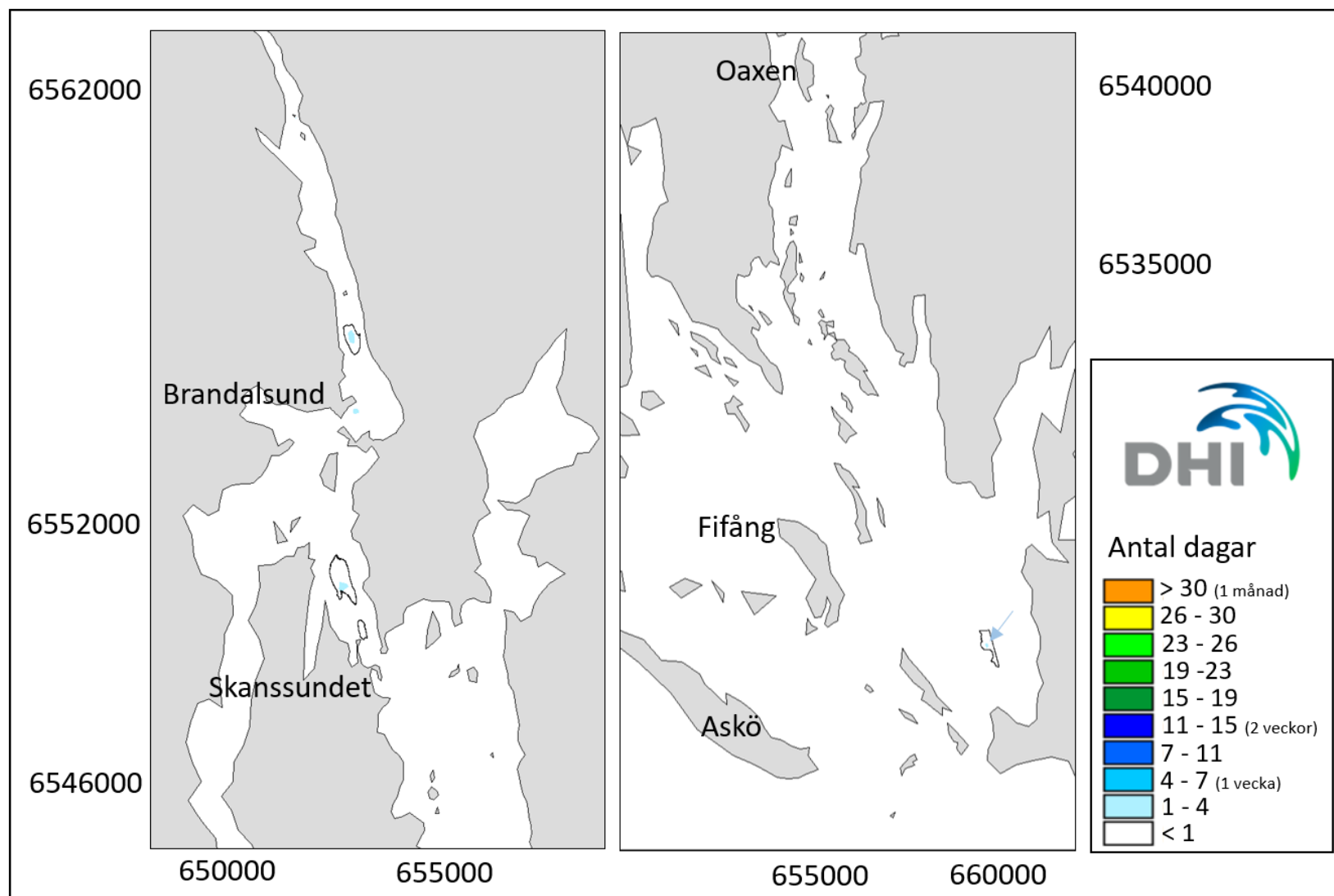
I södra delen av domänen muddras och dumpas mycket mindre mängd finkornigt material och utbredningen är begränsad till precis runt muddrings- och dumpningsplatserna. Den största utbredningen med högst sedimentation är i Svärdsfjärden (dumpningsplats 2), följt av Örsankan (öster om Askö) och sist Södra Oaxen. Mängden uppgår till som mest 5 mm utanför de områden som muddras eller dumpas.



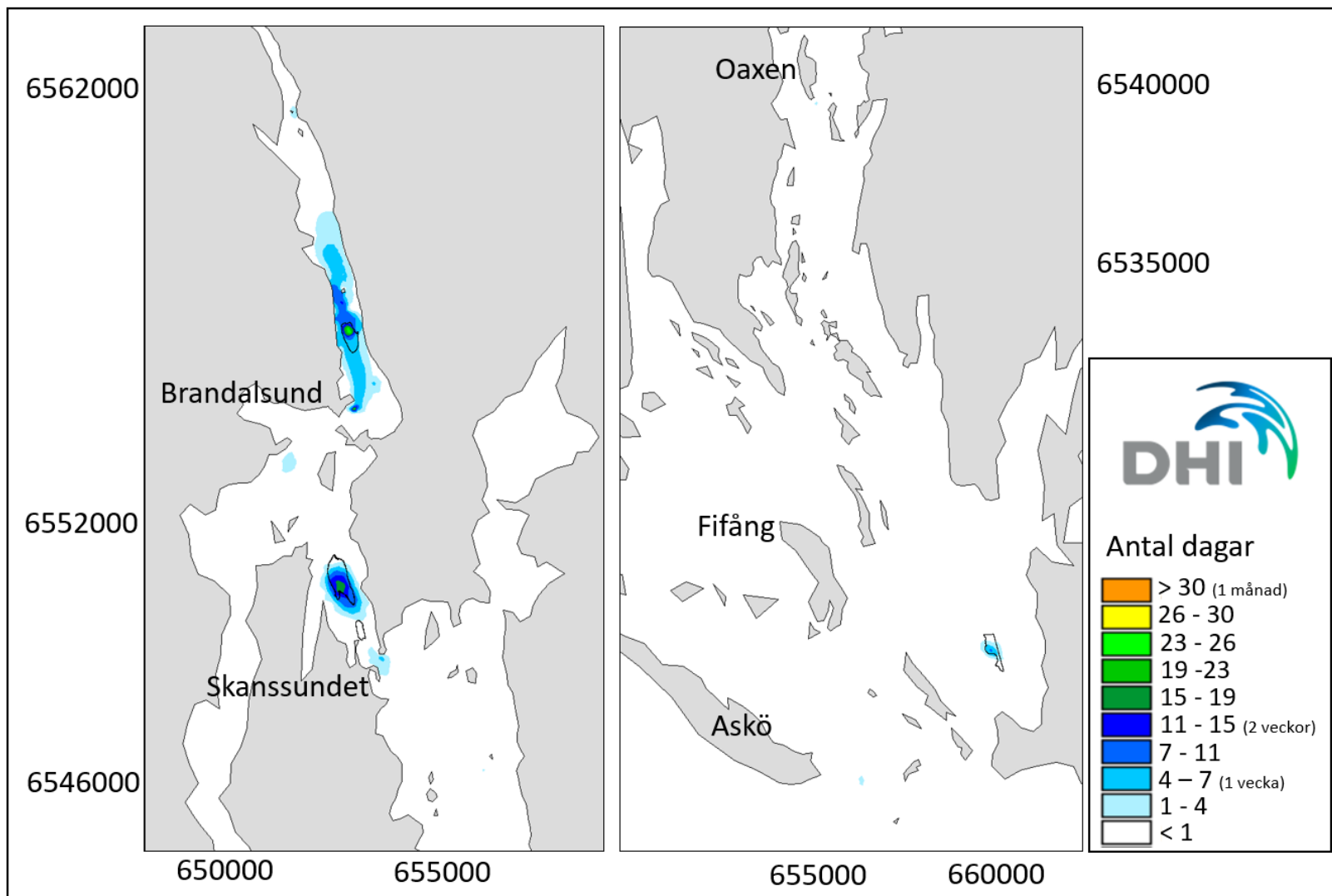
Figur 4-7 Varaktighet för koncentrationer suspenderat material större än **50 mg/l i ytan** under muddringsperioden augusti – oktober, angivet i totalt antal dagar. Områden där dumpning sker är indikerade med en polygon i svart. Längsta varaktigheten vid ytan är totalt en vecka i Brandalsundet och några dagar i dumpningsområde 6 (norr om Skanssundet) och dumpningsområde 7 (Hallsfjärden). Koordinater i SWEREF 99 TM.



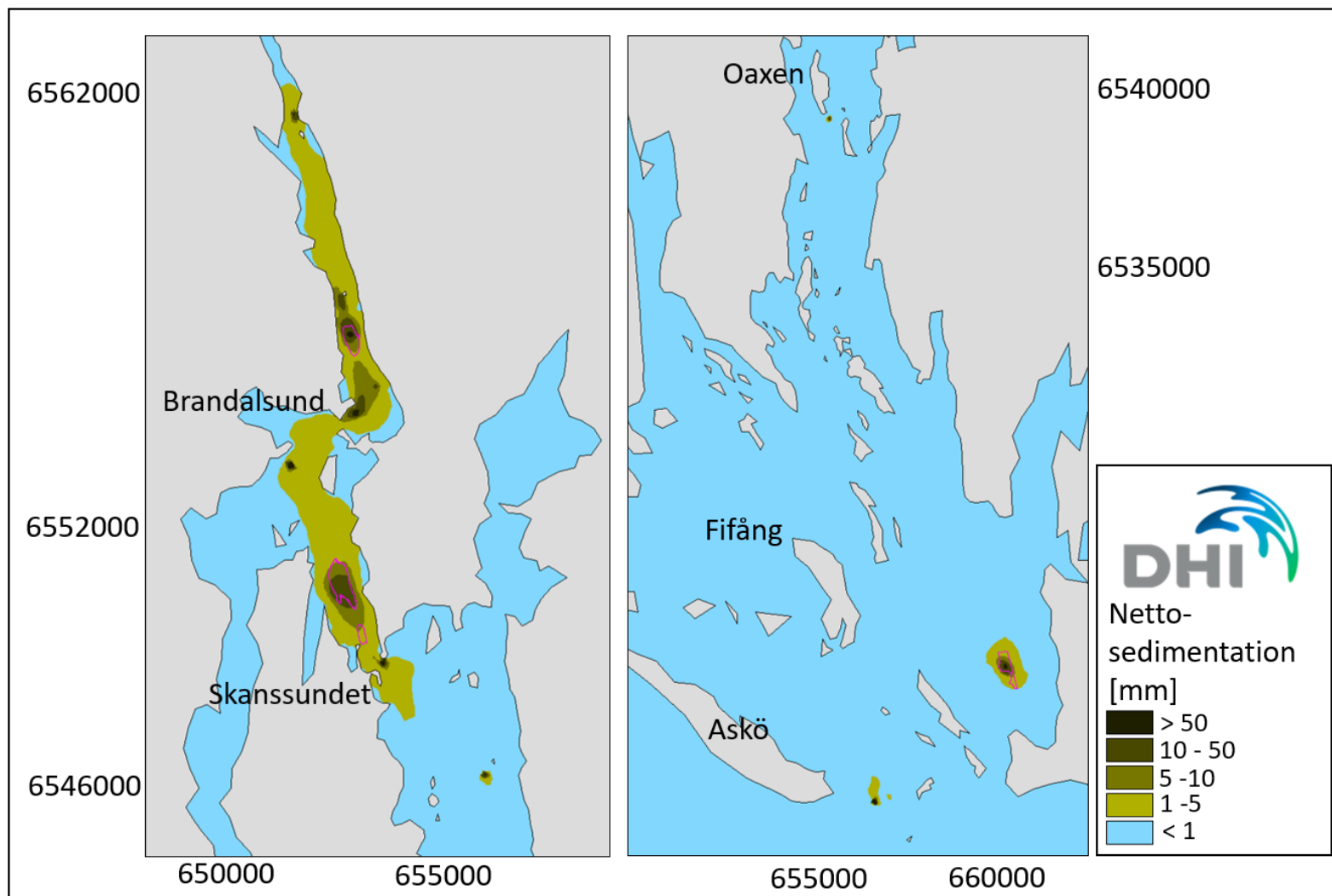
Figur 4-8 Varaktighet för koncentrationer suspenderat material större än **50 mg/l vid botten** under muddringsperioden augusti – oktober, angivet i antal dagar. Områden där dumpning sker är indikerade med en polygon i svart. Den totalt längsta varaktigheten är 1 månad i dumpningsområde 7 (Hallsfjärden), 25 dagar i dumpningsområde 6 (norr om Skanssundet) och 10 dagar i dumpningsområde 2 (Svärdsfjärden, öster om Askö). Koordinater i SWEREF 99 TM.



Figur 4-9 Varaktighet för koncentration suspenderat material större än **100 mg/l i ytan** under muddringsperioden augusti – oktober. Områden där dumpning sker är indikerade med en polygon i svart. Längst varaktighet vid ytan är 3 dagar i Brandalsund, 2 dagar i Näslandsfjärden och Hallsfjärden (norr om Skansundet – dumpningsområde 6 respektive nordost om Brandalsund – dumpningsområde 7). I dumpningsområde 2 inträffar det totalt 1 dag och indikeras med en hjälppil pga. liten utbredning. Koordinater i SWEREF 99 TM.



Figur 4-10 Varaktighet för koncentration suspenderat material större än **100 mg/l vid botten** under muddringsperioden augusti – oktober. Områden där dumpning sker är indikerade med en polygon i svart. I Hallandsfjärden inträffar det mest, totalt 30 dagar (nordost om Brandalsund). I Näslandsfjärden under totalt 18 dagar (vid dumpningsområde 6) och 6 dagar i Skanssundet. I Svärdsfjärden (dumpningsområde 2, öster om Askö) och vid Örsankan inträffar det en vecka respektive 1 dag. Koordinater i SWEREF 99 TM.



Figur 4-11 Nettosedimentation (i mm) av spill efter tre månaders muddring och dumpning samt en extra månad för sedimentering av de allra finaste partiklarna. Områden där dumpning sker är indikerade med en polygon i magenta. Koordinater i SWEREF 99 TM.

4.2 Erosion vid botten före och efter muddring och dumpning

Strömhastigheten vid botten påverkas väldigt lite av muddring och dumpning. Hastigheter tillräckligt höga för att ge upphov till erosion uppstår endast vid ett enstaka tillfälle vid hårt väder, och detta sker både i fallet innan och efter muddring (Figur 4-12 respektive Figur 4-13, tröskelvärde för potentiell erosion 0,26 m/s, se Avsnitt A.4.4). Hela undersökningsområdet är inomskärs och medelhastigheten överskrider inte någonstans 0,10 m/s varken innan eller efter muddring och dumpning. Huvuddelen av den erosion som sker i området sker sannolikt på grund av en kombination av strömhastighet och vågpåverkan. Då hastigheterna på dumpningsplatserna är så pass låga kommer inte erosion ske under normalförhållanden även när vågverkan läggs på. Erosionen till följd av vindvågor och svallvågor från fartyg redovisas i separat rapport; Landsortsfarleden -Vågor (DHI rapport 12803195-1).

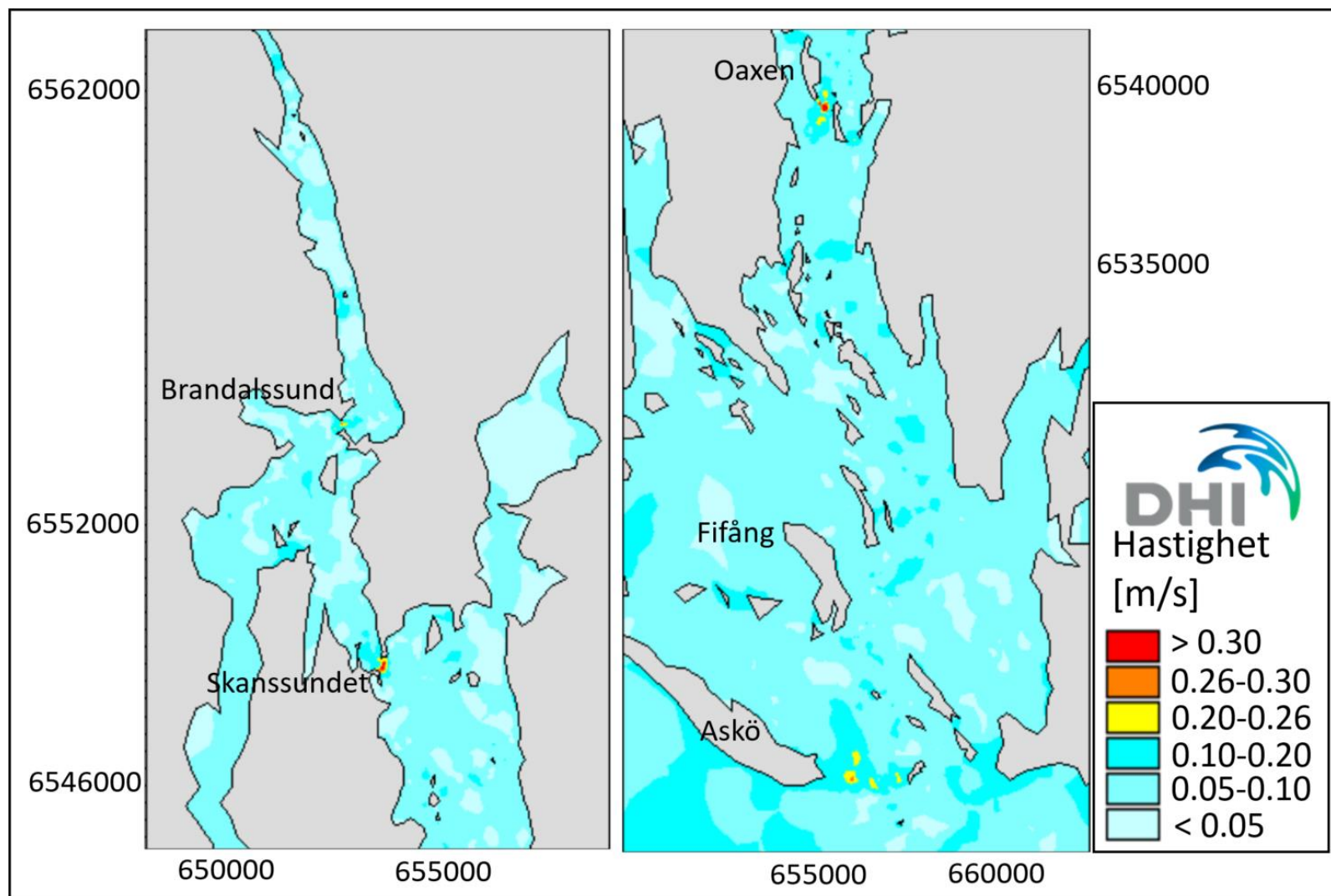
I Skansundet och Södra Oaxen överskrider maxhastigheterna både innan och efter muddring tröskelvärdet för erosion, i Brandalsund enbart innan muddring. Även i ett område sydost om Askö kan erosion uppstå. Notera att maxhastigheterna som presenteras i Figur 4-12 och Figur 4-13 visar de maximala hastigheterna som *någon gång* under perioden har uppstått i varje enskild cell, dvs de har nödvändigtvis inte uppstått samtidigt och varaktigheten kan vara mycket kort.

I Tabell 4-1 nedan redovisas de max- och medelhastigheter innan respektive efter muddring och dumpning i de trånga sunden samt på dumpningsplatserna. Både max- och medelhastigheterna sjunker på muddringsplatserna efter muddring, utom vid Skansundet där hastigheterna ökar något efter muddringen. Maxhastigheterna i Skansundet och Södra Oaxen efter muddring är högre än gränsvärdet och är en indikation på att erosion kan förekomma i sunden.

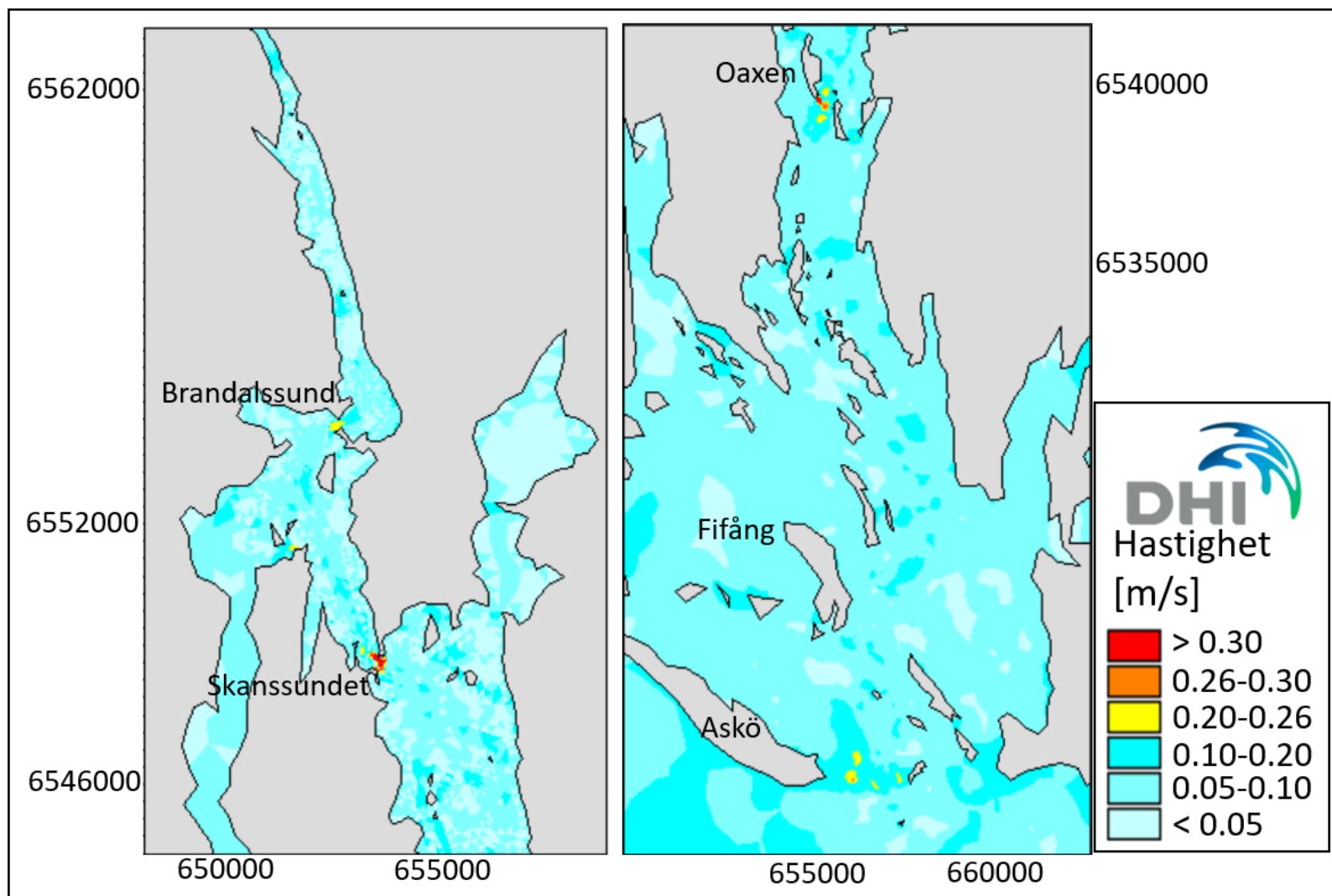
På dumpningsplatserna förändras både medel- och maxhalterna efter dumpning, men inga hastigheter är över gränsvärdet för erosion varken innan eller efter dumpning.

Tabell 4-1 Medel- och maxhastigheter vid botten i de trånga passagerna och på dumpningsplatserna innan respektive efter muddring och dumpning. Tröskelvärde för erosion 0,26 m/s, se Avsnitt A.4.4

	Medel innan [m/s]	Max innan [m/s]	Medel efter [m/s]	Max efter [m/s]
Branddalsund	0,072	0,318	0,053	0,253
Skansundet	0,056	0,458	0,072	0,468
Oaxen (södra)	0,100	0,566	0,095	0,460
Dump 7	0,011	0,071	0,006	0,043
Dump 6	0,020	0,177	0,017	0,162
Dump 2	0,014	0,077	0,015	0,092



Figur 4-12 Maximala hastigheter vid botten **innan** muddring och dumpning. Erosion bedöms inte uppstå vid strömhastigheter lägre än 0,26 m/s (Se avsnitt A4.2) och överskrids vid enstaka tillfällen vid Skansundet, Södra Oaxen och sydost om Askö. Notera att de maximala hastigheter som presenteras i figuren är den högsta hastigheten som förekommit i varje enskild cell någon gång under perioden. Koordinater i SWEREF 99 TM.



Figur 4-13 Maximala hastigheter vid botten **efter** muddring och dumpning. Erosion bedöms inte uppstå vid strömhastigheter lägre än 0,26 m/s (Se avsnitt A4.2) och överskrids vid enstaka tillfällen vid Skansundet, Södra Oaxen och sydost om Askö. Notera att de maximala hastigheter som presenteras i figuren är den högsta hastigheten som förekommit i varje enskild cell någon gång under perioden. Koordinater i SWEREF 99 TM.

5 Begränsningar i modelleringen

I grumlingsmodelleringen har beräkningarna baserats på en representativ kornstorleksfördelning och en representativ andel fint material i de muddrade massorna. Den är vald utifrån de mätdata som fanns tillgängliga, och på ett sätt så att grumlingen inte skulle underskattas. Det innebär att grumlingen på vissa ställen i sannolikt överskattas något.

Både muddring och dumpning är av tekniska skäl modellerad i en punkt per område. Det innebär tex att all muddring i Brandalssund är modellerad i en punkt och allt material som ska dumpas i område 2, 6 och 7 släpps i en punkt i området, trots att muddring och dumpning i verkligheten kommer ske över större. Punkterna är valda så att de ligger mitt i det aktuella området. För dumpområde 6 innebär detta att inget material har dumpats i modelleringen i den lilla separata södra ytan, utan allt dumpning förlades mitt i det stora norra området. Effekten av detta är att i de stora områdena kommer modelleringen innebära en viss överskattning av grumlingen lokalt, eftersom arbetet i verkligheten inte kommer ske i samma punkt hela tiden.

6 Slutsatser

Modellresultaten visar att Hallsfjärden och Skansundet – Näslandsfjärden är de områden som påverkas mest av grumling under muddringsperioden. Det är här de största mängderna material muddras och dumpas. Den södra delen av undersökningsområdet påverkas mycket mindre än de norra och den grumling som sker är begränsad till lokalt runt de områden som muddras eller dumpas. Grumlingen är väldigt styrd av trailerns verksamhet eftersom den har störst kapacitet och därmed ger mest påverkan vid både muddring och dumpning, särskilt där dessa områden ligger nära varandra.

De högsta halterna av suspenderat material uppstår vid botten på grund av att trailern enbart spiller vid botten. Maxhalterna av suspenderat material vid botten ligger vid eller strax över 100 mg/l i närområdet till muddrings- och dumpningsplatserna. Mycket lokalt i direkt anslutning till muddringen och dumpningen kan maxhalterna bli högre, som allra högst strax över 3000 mg/l vid Farstanäs. Vid ytan är maxhalterna generellt betydligt lägre. Medelhalter för hela muddringsperioden som överstiger bakgrundshalten, satt till 10 mg/l, är begränsade till Hallsfjärden, Näslandsfjärden och sydöstra dumpningsområdet, och enbart vid botten. I en separat modellering undersöktes medelhalterna för enbart dumpområde 7, och då enbart för den period då dumpningen skedde. Medelhalten vid botten i själva dumpningsområdet låg då på ca 350 mg/l men avtog mycket fort till 10–15 mg/l utanför dumpningsområdet.

Det spill som transporteras i vattenmassan sedimenterar i huvudsak i direkt anslutning muddrings- och dumpningsplatserna. I Hallsfjärden och Näslandsfjärden sker majoriteten av all muddring och dumpning vilket medför en sedimentation på mellan en halv och en centimeter, lokalt över fem centimeter precis runt dumpningsplats 6 och 7. Eftersom den resuspenderande effekten av ytvågor inte är medräknad så är sedimentationen delvis överskattad. Dock är Hallsfjärden förhållandevis sluten, och med de mängder som ska muddras och dumpas där kommer området att påverkas av en viss sedimentation av spillet.

Det är låga hastigheter överlag i undersökningsområdet, och strömhastigheterna vid botten påverkas väldigt lite av muddringen. På dumpningsplatserna är medelhastigheterna inte i närheten av gränsvärdet för erosion, varken innan eller efter muddring och dumpning. De låga medelhastigheterna och de få och korta tillfällena som bottenströmhastigheterna överstiger det kritiska värdet visar att höga, eroderande hastigheter vid botten är synnerligen ovanliga, både före och efter muddring. Medelhastigheterna i de trånga sunden Brandalsund och Södra Oaxen sjunker efter muddring på grund av den ökade tvärsnittsytan. I Skansundet ökar medelhastigheterna något efter muddring och dumpning.

7 Referenslista

- /1/ Elmgren R., Larsson U., 1997. *Himmerfjärden. Förändringar i ett näringsbelastat kustekosystem i Östersjön*. Naturvårdsverkets rapport no 4565.
- /2/ Pejrup, M., Larsen, B., 1994. *Natural sediment transport through Öresund*. Report no. 7170. DHI/LIC Joint Venture.
- /3/ Valeur, J.R., Pejrup, M., 1993. *Hydrographic investigations in Öresund. Turbidity in Öresund*. Report no. 7057. DHI/LIC Joint Venture.
- /4/ Valeur, J.R., Pejrup, M., Jensen, A., 1996. *Particle Dynamics in the sound between Denmark and Sweden*. Coastal Dynamics '95: International conference on coastal Research in Terms of Large-Scale Experiments, s. 951-962.
- /5/ Becker, J., et.al. 2015. *Estimating source terms for far field dredge plume modelling*. Journal of Environmental Management, nr 149, sid 282-293.
- /6/ Soulsby, R.et. al., 2000. *Dynamics of Estuarine Muds*. HR Wallingford.
- /7/ van Rijn, L.C., 2007. Unified view of sediment transport by currents and waves. I: Initiation of Motion, Bed Roughness and Bed-Load Transport. J. of Hydraul. Eng., 133:649-667.
- /8/ Lumborg, U., 2005. Modelling the deposition, erosion and flux of cohesive sediment through Öresund. Journal of Marine systems, 56:179-193
- /9/ DHI, 2018. Water Forecast. Hämtad från Forecast models and data products: <http://www.waterforecast.com/waterforecasttechnology/forecastmodels> & <http://www.waterforecast.com/hindcastdataproducs> den 5 december 2018.

BILAGOR

BILAGA A – Data och Metoder

A Data och metoder

A.1 Bakgrundshalter av suspenderat material

Transport, erosion och deposition av naturligt förekommande sediment eller muddrat sediment styrs av de hydrodynamiska förhållandena. Under perioder med hårt väder, stora vågor och starka strömmar kommer sediment att eroderas, hållas i suspension och transporteras med strömmarna. Under lugna perioder kommer sedimenten att deponeras. Med skiftande väder kommer därmed sediment att fortsätta att resuspendera och sedimentera tills det når ett område där de hydrodynamiska förhållandena är sådana att sedimenten inte kan resuspenderas igen.

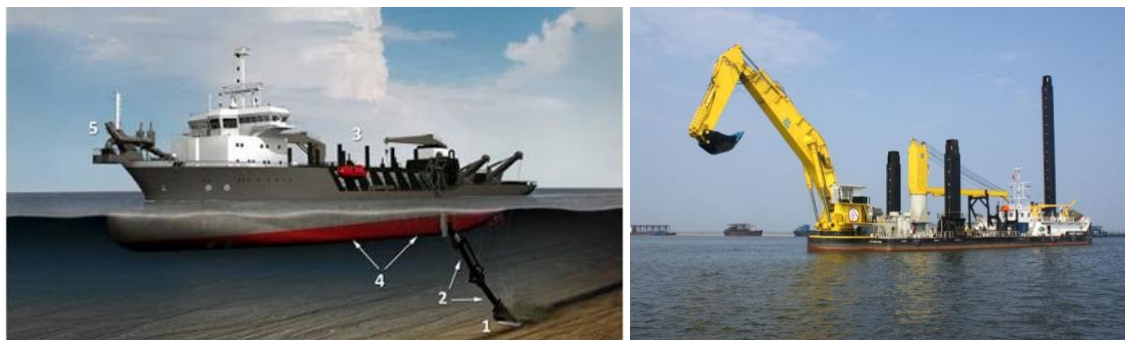
Det finns mycket få uppgifter om naturliga bakgrundshalter av suspenderat sediment i Sveriges kustvatten. Öresund är ett relativt väl undersökt område, inte minst i samband med byggandet av Öresundsbron, och här finns en del information att utgå ifrån. I norra Öresund ligger normala värden mellan 1–2 mg/l, ref. /2/. Vid kraftiga vindar och lokalt i kustområden kan koncentrationer på 20–40 mg/l förekomma, ref. /3/ och /4/. Mätdata från Sjöfartsverket tyder på att halterna suspenderat material i området varierar mellan < 2 – 5,1 mg/l. Vi har i figurerna i resultatdelen valt att sätta lägsta halt som visas till 10 mg/l.

A.2 Muddrings- och dumpningsförfarande

Beräkningarna utgår från ett möjligt genomförande som Sjöfartsverket tagit fram, där två olika typer av mudderverk kommer användas; sugmudderverk ("trailer") och enskopeverk, Figur A-1. På ett av enskopeverken kommer en s.k. miljöskopa att användas för att minimera mängden spill. Den kommer att muddra i områden där den geotekniska undersökningen säger att det muddrade materialet klassas som förorenat.

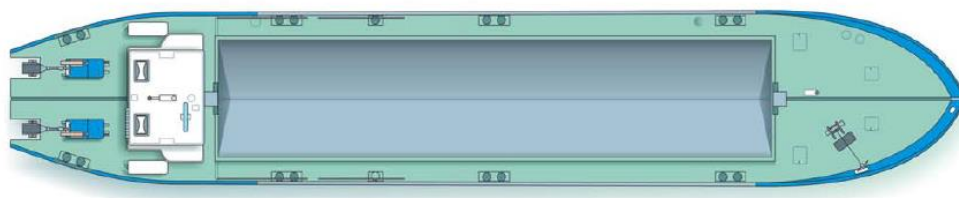
En trailer spiller sediment endast vid sughuvudet, dvs. vid botten, förutsatt att man slutar muddra när verket är fullt och därmed inte tillåter s.k. *overflow* vid ytan. Enskopeverken spiller däremot sediment i hela vattenkolumnen, från botten till ytan. En miljöskopa är ett enskopeverk med mindre kapacitet och mer tätslutande skophuvud, där mängden spill bättre kan begränsas.

Trailern alternerar mellan att muddra och att transportera massorna till och från dumpningsområdena. För transport och dumpning av muddrat material med enskopeverk används bottenöppnande pråmar (Figur A-2). Trailern har samma funktion med skillnaden att den är ett komplett fartyg. Vid dumpning kommer större delen av materialet falla direkt ner på botten, medan resterande del, till följd av medrivning, kommer att hålla sig svävande i vattenmassan. Det senare är det som man vanligtvis refererar till som spill.



Figur A-1 Exempel på sugmudderverk t.v. och enskopeverk t.h.

Studier med den amerikanska mjukvaran STFate¹ visar att spillet från en bottenöppnande pråm generellt sett är i intervallet 5–10 procent, och är relativt oberoende av fördelningen mellan partikelstorlekar, men baseras främst på studier med friktionsmaterial. Studier som räknar med spill från muddring av lerigare material sätter ofta spillprocenten lägre, på 4–5% (/5). Då vi i modelleringen i huvudsak sprider mer finkornigt material har vi för beräkningarna i denna rapport ansatt 5 % spill för både muddring och dumpning,. Detta värde baserar sig på erfarenhet från tidigare stora projekt med liknande muddrings- och dumpningsteknik.



Figur A-2 Botten tömmande pråm, s.k. *split barge*. Källa Boskalis (boskalis.se).

- De mudderverk som Sjöfartsverket planerar att använda är en trailer med kapacitet på 25000 m³/dygn, enskopeverk med kapacitet på 3000 m³/dygn och ett enskopeverk med miljökopa, kapacitet 1500 m³/dygn. Enskopeverken kommer att dumpa det muddrade materialet med hjälp av pråmar som ofta har en volym på 500 m³. En trailer kan t.ex. rymma 5000 m³ men kommer gå med 50% fyllnadsgrad för muddermassorna, och antas därmed dumpa ca 2500 m³ per resa.

A.3 Geotekniska data och sammansättning av muddrat material

Bottenmaterialet i de områden som skall muddras består av berg, friktionsmaterial och kohesivt material. I den södra delen av domänen, från Oaxen och söderut, är det främst berg som muddras (sprängas). Eftersom det i huvudsak är de finkorniga delarna av muddermassorna som kommer att bidra till grumling under muddring och dumpning så är det detta som modelleras i grumlingsmodelleringen. De av Sjöfartsverket planerade dumpningsplatserna för muddermassorna presenteras i Figur A-3.

Som indata till grumlingsmodellen behövs information om mängden fint material som ska muddras. Utifrån denna mängd räknas mängden spill fram, baserat på kornstorleksfördelningen på materialet som ska muddras och på vilka typer av mudderverk som ska användas. Det är detta spill som står för grumlingen.

För att ta fram ett representativt medelvärde av mängderna av fint material i området, samt räkna fram hur fraktionsfördelningen av detta fina material, användes resultaten från sedimentanalyser från ett antal provpunkter i området (Figur A-3). Proven A249 och A246 var sandiga, och andelen fint material (<125 µm) i dessa prov varierade mellan 4 – 7 %. Proven

¹ <http://el.erdcd.usace.army.mil>

A255, A248 och A243 var leror med en andel fint material på 97 %. Provet A253 hade 58 % fint material. Baserat på detta valdes att i modelleringen räkna med att friktionsmaterialet hade en halt av fint material på 7 % och det kohesiva materialet bestod av 97 % fint material. Volymerna som skulle muddras i varje mudderområde skalades med dessa procentsatser för att få fram de volymer som skulle spridas i grumlingsmodelleringen.

Eftersom det endast är de fina fraktionerna som sprids i grumlingsmodelleringen beräknades andelen av ler/finsilt (sammanslagna till en fraktion), mellansilt, grovsilt och finsand av kornstorlekarna upp till 125 µm, se Tabell A-1. (Fraktionerna grövre än 125 µm är inte med i tabellen). Även partiklar som är större än 125 µm kan hålla sig svävande i vattnet tillfälligt, men eftersom de sedimenterar fort och inte resuspenderar i samma utsträckning som finare partiklar anses de ha försumbar betydelse för grumlingen jämfört med de finare partiklarna. Den representativa fördelningen av de fina fraktionerna (sista raden, Tabell A-1) baseras mest på provet A248, vilket är lera i Brandalsund, var en majoritet av det kohesiva materialet som ska muddras kommer ifrån. Ju finare partiklar desto längre tid kan de potentiellt stanna i suspension. Fördelningen är medvetet konservativt vald, men speglar den höga andel lerpartiklar som proverna visar finns i området.

Tabell A-1 Andel i [%] av den fina fraktionen (upp till 125 µm) i varje sedimentprov som består av ler och finsilt, mellansilt, grovsilt och finsand. Sammanställning av kornstorleksfördelningen utifrån analyser i de provpunkter som visas i Figur 3–3. Nedersta raden visar den medelfördelning mellan fraktionerna som används i grumlingsmodellen.

Prov och plats	Ler & Finsilt <6µm	Mellansilt 6-20 µm	Grovsilt 20-63 µm	Finsand 63-125 µm
A255 Hamnen	28,4	29,5	39,8	2,2
A253 Fläsklösa	13,8	8,6	24,1	53,4
A248 Brandalsund	50	22,4	24,5	3,1
A249 Brandalsund	14,3	14,3	28,6	42,9
A246 Skansundet	50	0	16,7	33,3
A243 Fräckstahäll	83	9	5	2
Representativ fördelning [%]	50	25	23	2

A.4 Grumlingsmodelleringen

Den hydrodynamiska modellen och grumlingsmodelleringen är uppställd och körd för året 2015. Under detta år förekommer ingen särskild storm men året innehåller tillräckliga variationer i vind och strömmar för att motsvara påverkan som potentiellt sker under ett normalår.

A.4.1 Beskrivning av hydrodynamiken

För att kunna beräkna spridningen av suspenderat material behövs en beskrivning av hydrodynamiken i området. En hydrodynamisk strömningsmodell har satts upp i MIKE 3 FM, ett tredimensionellt numeriskt modellsystem för beräkning av strömning och transport i vatten. FM står för *Flexible Mesh*. Detta innebär att området beskrivs med ett beräkningsnät av trianglar 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 består av flera delmoduler. Den grundläggande modulen är den som beräknar de hydrodynamiska processerna (HD), d.v.s. hur vattnet rör sig utifrån de drivande krafterna. Denna modul bygger på välkända hydrodynamiska ekvationer som löses så exakt som beräkningsnätets upplösning, noggrannheten i de drivande krafterna och andra indata tillåter. MIKE 3 HD tar hänsyn till alla de viktigaste processerna;

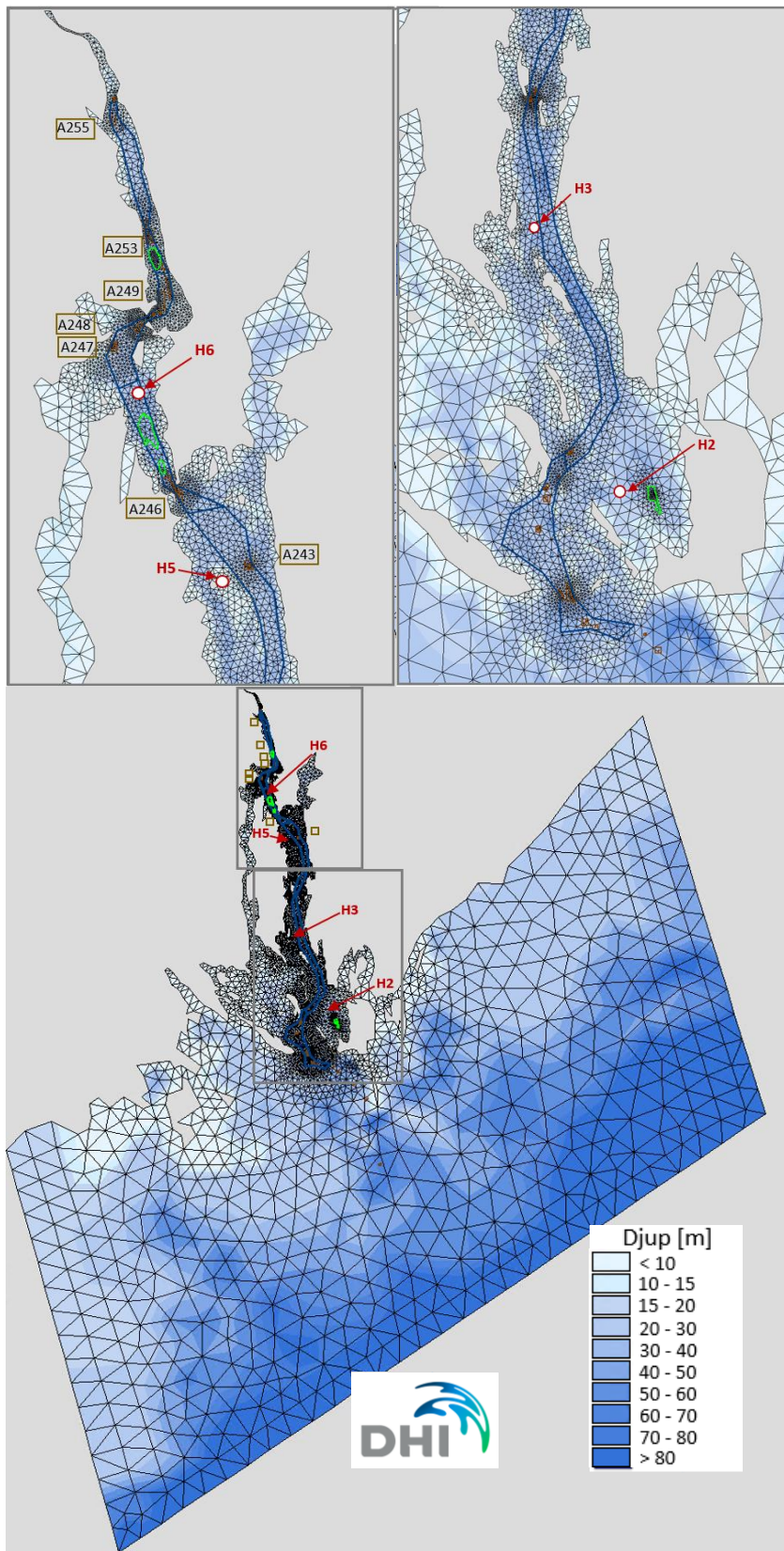
- Transport av salt och värme
- Drivning på grund av variationer i densitet
- Bottenfriktion
- Vindens drivning på ytan
- Drivning på grund av vattenståndsvariationer
- Tillflöden och utsläpp från land
- Värmeutbyte med atmosfären
- Turbulens
- Corioliseffekten

MIKE 3 HD utgör grundbulten i DHI:s svit av programvaror för marina och kustnära områden och används vid projekt världen över.

A.4.1.1 Beräkningsnät

Modellen som satts upp täcker in ett område från Södertälje hamn i norr ned till söder om Landsort i söder, se Figur A-3. Beräkningsnätets högsta upplösning finns i och i anslutning till områdena som ska muddras, med gridceller på ca 30-40 m. I de delar av farleden som inte muddras ligger upplösningen på 100 – 200 m, och ut mot de öppna ränderna i Östersjön är upplösningen upp emot 3 km. Den vertikala upplösningen är 0,5 m i den ytligaste metern, 1 m ned till 16 meters djup, 2 m ned till 30 m djup och sedan succesivt grövre lager. Största djup är 100 m längst ute vid de öppna ränderna. Högupplöst djupdata över området har levererats av Sjöfartsverket. Stockholms universitets mätstationer H2, H3, H5 respektive H6 presenteras i Figur A-3 (med röd pil och stationsnamn).

För att kunna undersöka förändringen efter muddring och dumpning gjordes en "efter"-version av den hydrodynamiska modelleringen, där beräkningsnätet korrigerades för de nya djupen på muddringplatserna och dumpningsplatserna. Muddringsdjup och fyllnadsdjup på dumpningsplatserna levererades av Sjöfartsverket.

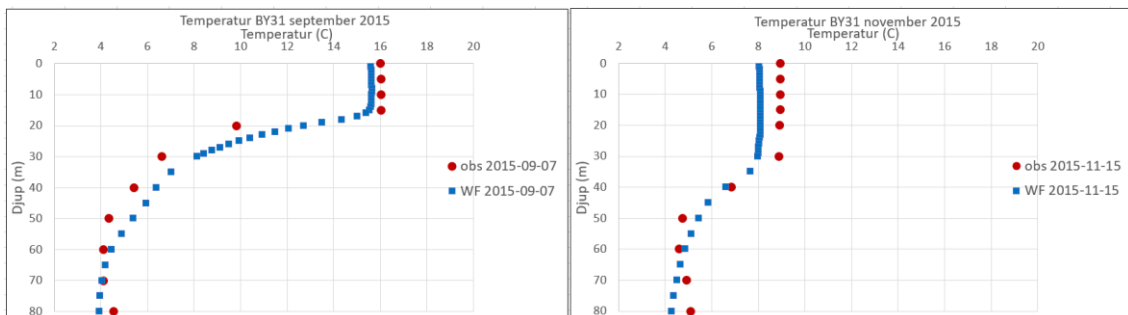


Figur A-3 Beräkningsnät och domän för den hydrodynamiska modellen inklusive mudd- och dumpningsytor (brunt respektive grönt) och farleden (i marinblått). Positionerna för mätstationerna H2, H3, H5 och H6 (rött) varifrån valideringsdata för den hydrodynamiska modellen tagits (se Avsnitt A4.1.3) samt de utmärkta sedimentprovpunkterna A243, A246- A249, A253 och A255 (brun box) som presenteras i Tabell A-1.

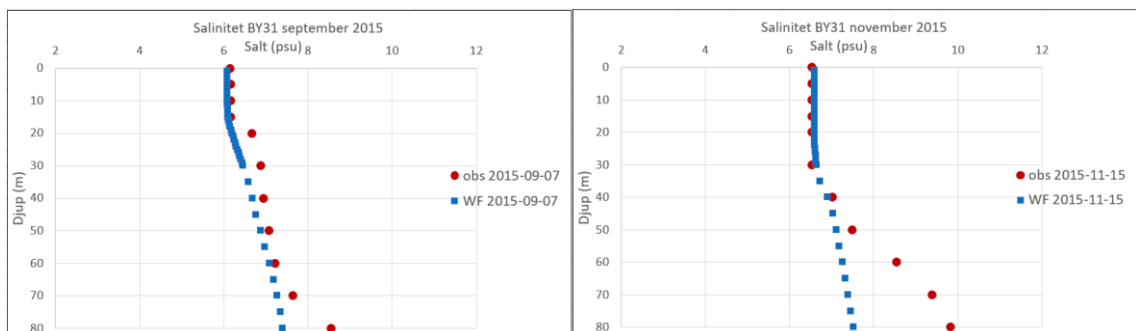
A.4.1.2 Drivning till den hydrodynamiska modellen

Den hydrodynamiska modellen drivs av vattenståndsvariationer, skiktning och strömning i havet utanför modellområdet, samt de meteorologiska förhållandena. DHI har en operationell hydrodynamisk modell för haven runt Sverige och Danmark ur vilken drivdata på ränderna avseende vattenstånd, skiktning, strömning och meteorologi har extraherats för det lokala modellområdet.

För att kunna räkna fram korrekta strömmar i modellområdet krävs att den regionala operationella modellen som levererar randdata kan leverera tillräckligt bra hydrografisk information på ränderna. Det finns dock begränsat med mätningar av strömmar, vattenstånd, salthalt och temperatur som kan användas för att validera modelldata. Den jämförelse som kunnat göras är mellan ett fåtal månadsmätningar av salt och temperatur från SMHI:s utsjöprogram och modellberäknade data för samma tidpunkter. Dessa presenteras i Figur A-4 och A-5 (mätningar indikeras med röda cirklar och modelldata med blåa kvadrater). Jämförelsen visar att de randdata som driver modellen beskriver de salthalts- och temperaturprofiler som uppmätts på ett bra sätt ned till ca 50–60 m (data från mätning respektive modell följs åt parallellt). Under detta djup visar observationerna på ett saltare vatten under den senare delen av modellperioden än vad den regionala modellen återskapar (Figur A-5). Djupet där den lokala modellen börjar är ca 80 m och blir snabbt grundare när man rör sig inåt i modellen, och vi har därför bedömt att denna salthalts-skillnad på djupet för rand-data har marginell betydelse för resultaten av sedimentspridningen.



Figur A-4 Observationsdata för temperatur från utsjöstation BY31 (röd cirkel) jämfört mot modellerade data från den regionala modellen (blå kvadrat).



Figur A-5 Observationsdata för salinitet från utsjöstation BY31 (röd cirkel) jämfört mot modellerade data från den regionala modellen (blå kvadrat).

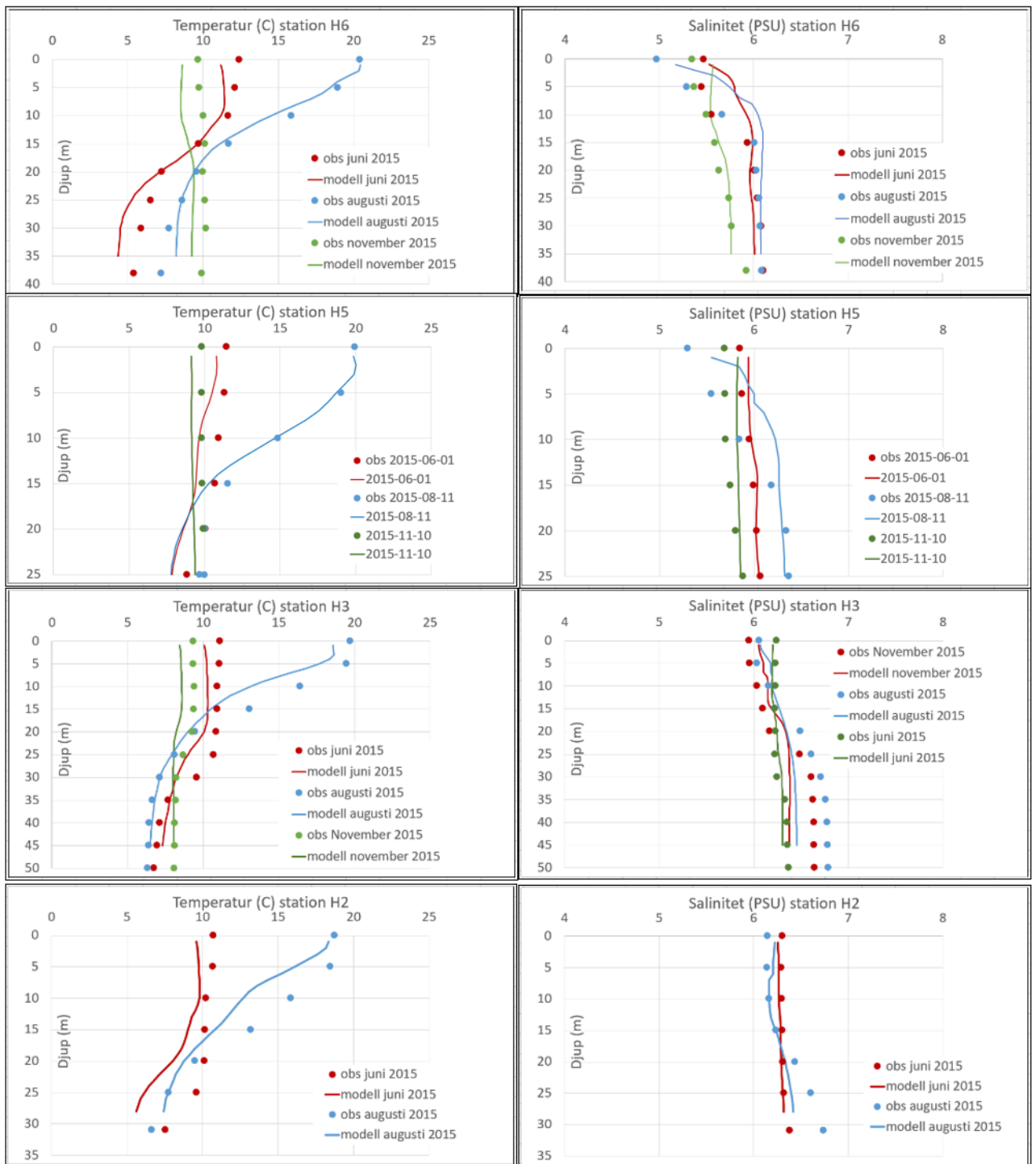
Utöver drivning på ränderna så drivs också hydrodynamiska modeller med meteorologiska data, främst vind, lufttemperatur och lufttryck. De meteorologiska data som ligger till grund för både den regionala och den lokala strömningsmodellen kommer från företaget StormGeo.

Slutligen drivs den lokala modellen också av den färskvattentillrinningen genom Södertälje kanal. Denna är hämtad från SMHI:s Vattenwebb och bygger på modellberäknade data för total vattenföring. Den pågående breddningen av slussen i Södertälje kommer inte ha någon påverkan på hydrodynamiken i området eftersom flöden och vattennivåer regleras. De finns en mängd små vattendrag som rinner in till modellområdet, men baserat på deras storlek och placering har de bedömts vara utan betydelse för den övergripande cirkulationen i intresseområdet.

A.4.1.3 Resultat från den hydrodynamiska modelleringen

Den hydrodynamiska modellen kördes för hela året 2015. Temperatur- och salinitetsprofiler från modellen validerades mot observationsdata från Himmerfjärdens övergödningsstudie (<http://www2.ecology.su.se/dbhfj/index.htm>), vilket är ett samarbete mellan Stockholms Universitet och avloppsreningsverket SYVAB, där temperatur och salthalt mäts månatligen vid ett antal stationer, Figur A-6. Observationerna visas i figurerna som fyllda ringar för juni, augusti och november för stationerna H6, H5, H3 och H2 (se Figur A-3 för positioner), djup på y-axeln och temperatur respektive salt på x-axeln. Man kan se från observationerna att det är ett väl omblandat system under både försommar och höst, med en viss skiktning under sensommaren.

Generellt fångar modellen den rådande temperaturen och salthalten väl. De avvikelser som går att se är att det tidvis är lite för låg salthalt på djupet i den södra delen av domänen, främst på sommaren. Skillnaden ligger på ca 0,5 PSU eller mindre (PSU: practical salinity unit, saltkoncentration i havsvatten i g/kg). Station H3 är den som modellen har svårast att fånga. Orsakerna bakom det är kopplade till att stationen ligger i en djuphåla något vid sidan av den rådande strömfåran och skiktningen bestäms därför väldigt lokalt. Att språngskiktet i en fjord varierar i höjdlängd tvärs fjordens riktning är inte ovanligt men svårt att fånga i den här typen av modeller. Detta har ingen påverkan på slutresultatet då modellen fångar variationer på övriga stationer väl.



Figur A-6 Observationsdata (ringar) mot modelldata (heldraget) från juni (röd), augusti (blå) och november (grön) från fyra mätstationer från norr (översta panelerna) till söder (understa panelerna) i domänen.

A.4.2 Grumlingsmodellering

Sedimentspill från muddring och dumpning kommer att spridas med strömmarna. Silt- och lerfraktioner har mycket låga fallhastigheter och kommer därför att förbli i suspension under en lång tid och kan transporteras över långa sträckor. Finkorniga sediment kan sedimentera om strömhastigheterna minskar men kommer att resuspenderas när den botten nära strömmen och därmed bottenskjuvspänningen överskrider ett kritiskt gränsvärde. Sandfraktioner sedimenterar fort och kommer därmed att förbli i området kring dumpningsområdet.

För sedimenttransport är de viktigaste parametrarna för spridning av finkornigt bottenmaterial som silt och ler:

- Fallhastighet
- Kritisk bottenskjuvspänning för sedimentation (under vilken sediment deponeras)
- Kritisk bottenskjuvspänning för erosion (över vilken sediment resuspenderas)

Spridningen av fina sediment har beräknats med den tredimensionella modellen MIKE 3 FM MT (*Mud Transport*). Modellen är integrerad med den hydrodynamiska modellen och tar hänsyn till:

- Det beräknade spillet av sediment under dumpning som en funktion av tid, position, typ av muddrat material och muddringsmetod.
- Advektion² och dispersion³ av suspenderat sediment i vattenkolumnen som en funktion av de tredimensionella strömmarna beräknade med MIKE 3 HD.
- Sedimentation av spill.
- Erosion av spill.

Bidraget från ytvågor till bottenskjuvspänningen har inte inkluderats i dessa beräkningar. Huvudsyftet med modellstudien har varit att beräkna spridning av spill. Här har ytvågor en liten betydelse för resultaten och kan därför uteslutas. Beräkningarna av halten suspenderat sediment baseras enbart på spillet vid muddring och dumpning. De naturliga bakgrundsvärdena är inte inkluderade i modellberäkningarna och resultaten visar därmed koncentrationer och förändringar utöver bakgrundsförhållandena, s.k. överkoncentrationer.

Den fina fraktionen av det muddrade materialet i de olika områdena är inte homogent utan består av en fördelning av kornstorlekar (Tabell A-1). Dessa kornstorlekar representeras av fyra fraktioner i modellen (Tabell A-2). Varje fraktion representerar ett kornstorleksintervall och karakteriseras av en fallhastighet som beräknas för varje fraktion (Ekvation A1) och måste därmed vara känd för att spridning av spill skall kunna simuleras. Fallhastigheten W_s har beräknats med hjälp av Stokes lag och kräver att man vet kornstorlek, densitet och vattnets viskositet.

$$W_s = \frac{(\rho_s - \rho_w)g(fd)^2}{18\nu} \quad (\text{A.1})$$

Här är ρ_s sedimentets densitet, ρ_w vattnets densitet, g gravitationen, d kornstorleken, f en flockuleringsfaktor som sattes till 1 för att försumma flockuleringen, vilket är ett konservativt antagande. Den kinematiska viskositeten ν valdes för 10 °C vatten och därmed ansattes $\nu=1.3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.

Det kritiska värdet för deposition ligger generellt sett på mellan 0,06 - 0,1 N/m², men kan variera beroende på sedimentets egenskaper (ref. /6/). I den här modelleringen användes 0,07 N/m². Den kritiska bottenskjuvspänningen för erosion ligger mellan 0,15 och 0,35 N/m² för nyligen

² Fysisk transport, fysikalisk process

³ Spridning (utspädning), kemisk process

avsatta sediment, ref. /6/ och /7/. I t.ex. Öresund ligger den kritiska bottenskjuvspänningen på ca 0,3 N/m², ref. /8/. För beräkningarna i denna rapport har vi valt att ansätta 0,2 N/ m², ett något konservativt värde (dvs liten kraft behövs för att resuspendera sedimenten), för att inte underskatta grumlingen. I modelleringen distribueras spillet olika i vattenpelaren beroende på metod. Vid muddring med trailer sker spillet vid botten medan resterande mudderverk samt tömning med trailer och pråmar sker i hela vattenkolumnen.

Tabell A-2 Fallhastighet och kornstorlek för de fyra fraktioner (sedimenttyper) som ingår i grumlingsmodelleringen.

	Finsand	Grovsilt	Mellansilt	Finsilt/ler
Kornstorlek	63-125 µm	20-63 µm	6-20 µm	<6µm
Fallhastighet [mm/s]	6,3	1,0	0,1	0,02

A.4.2.1 Modellerade scenarier

Med hjälp av kartor från den geotekniska undersökningen och beräkningar av totalvolym som ska muddras har andelen kohesivt material på varje plats i Tabell A-1 räknats fram. I de geotekniska beräkningarna fanns också siffror på hur stora volymer på varje mudderposition som utgjordes av släntberedning och erosionsskydd. Miljömuddringen sker i mudderområde 36, 37 och 41 (Tabell A-3). Utifrån kapaciteten på de mudderverk som är tänkta att användas så beräknades den sammanlagda muddringstiden som skulle komma att krävas för att muddra det kohesiva materialet på respektive muddringsplats. Om denna tid var mindre än sex timmar exkluderades muddringplatsen ur modelleringen med motiveringen att dess bidrag till grumlingen i området är försumbart. De positioner som inkluderas i grumlingsmodelleringen från såväl muddring som dumpning är listade i Tabell A-3 (inklusive de södra områdena).

Sjöfartsverket hade specificerat att i modelleringen skulle allt material som muddras från område 36 (Brandalsund), 37 (Hallsfjärden) och 41 (Hamnen) dumpas på dumpningsplats 7. Muddermaterial från områdena 28 (Södra Oaxen), 11 (Granklubben) och 12 (Örsankan, sand), d.v.s. alla områden från Oaxen och söderut, dumpas på dumpningsplats 2. Materialet från de resterande områdena 30, 34, 35 och 38 (Fräckstahäll, Skansundet, Farstanäs och Fläsklösa) på dumpningsplats 6. Mudderområde 39 (Halls holme), 12 (Örsankan), 17 (Kalkhällen) och 18 (Åsgrund) exkluderades i grumlingsmodelleringen pga. att grumlingen de små mängderna muddermassor kommer att bidra med ansågs försumbara i relation till de övriga områdena. Muddring i område 41 inkluderas trots liten volym med anledning av placeringen i hamnen samt att materialet är delvis förorenat.

Det är inte allt material som planeras muddras i projektet som sprids i grumlingsmodelleringen, utan enbart volymerna av material med kornstorlek <125 µm. Det grövre materialet som också muddras kommer att sedimentera "fort" och i direkt anslutning till mudder- och dumpningsplatserna, och antas inte bidra till spridningen av suspenderat material i samma utsträckning som det fina materialet. Baserat på mätdata har uppskattningen gjorts att det som i mudderschemat (tabell A3, tabell B1) benämns som friktionsmaterial innehåller 7% material med korndiameter på 125 µm eller finare, och kohesionsmaterial och löst material innehåller 97% material med korndiameter på 125 µm eller finare, se A3. Det innebär att när det muddras friktionsmaterial så sprids motsvarande 7% av mudderverkets kapacitet i modelleringen under den tid som muddringen pågår, se tabell A3. Grumlingsmodelleringen sträcker sig över perioden 1 augusti till 1 december. Simulering av själva muddringen pågår till slutet av oktober och den resterande simuleringstiden är till för att allt fint material ska hinna sedimentera.

Tabell A-3 Mudder- och dumpningsschema från Sjöfartsverket, som användes som grund för grumlingsmodelleringen DHI har lagt till muddring och dumpning söder om Oaxen, vilket inte ingick från början. Tabellen finns även som tabell 3-1 i huvudtexten.

	Trailer friktion	Trailer koh+löst	Miljöskopa, löst	Enskopeverk	AUGUSTI																															SEPTEMBER																															OKTOBER																														
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
MUDDRING	Antal dagar																																																																																																
30 Fräckstahäll			1																																																																																														
34 Skansundet	1.8	6.3		8																																																																																													
35 Farstanäs	1.1	2.1		0.05																																																																																													
36 Brandalsund	18	7	17	17																																																																																													
37 Hallsfjärden			4																																																																																														
38 Fläsklösa	6	2.3		9																																																																																													
39 Halls holme		0.35		0.04																																																																																													
41 Hamnen			4																																																																																														
28 Södra Oaxen	1.5	0.3																																																																																															
11 Granklubber	0.3	3																																																																																															
12 Örsankan	0.6																																																																																																
DUMPNING	Volym, m3																																																																																																
Område 6 Friktion																																																																																																	
Område 6 Kohesion																																																																																																	
Område 7 Friktion																																																																																																	
Område 7 Kohesion																																																																																																	
			49.3																																																																																														
Område 2 Friktion																																																																																																	
Område 2 Kohesion																																																																																																	

A.4.3 Statistisk analys

Resultaten från modellberäkningarna av suspenderat sediment presenteras i form av koncentrationsfält som varierar i tid och rum. För att på ett tydligt sätt åskådliggöra vilka koncentrationer av spill som uppstår bearbetas resultaten statistiskt. Tre typer av statistiska variabler har tagits fram för simuleringsperioden; den maximala koncentrationen, medelkoncentrationen och varaktigheten för att en viss koncentration överskrids.

Den maximala koncentrationen beräknas genom att för varje gridcell på varje djup plocka ut den maximala koncentrationen under hela simuleringsperioden. Som resultat får man kartor över de maximala koncentrationer som uppstått i samtliga beräkningsceller på varje djup, oavsett när under perioden de inträffade. I den här rapporten redovisas de maximala värdena vid botten och vid ytan, där "ytan" motsvarar översta 0 – 2 m, och "botten" representeras av de två meter närmast botten. Det är viktigt att notera att max-halterna inte behöver ha uppstått vid samma tillfälle och att kartan inte visar en ögonblicksbild vid ett visst tillfälle, utan enbart de maximala värdena som uppstått *någon gång* under hela den modellerade perioden. I tillägg presenteras dessa kartor utifrån interpolerade färgskalor vilket medför att höga värden i små områden kanske inte går att läsa ut. Kartorna representerar en överblick över hela området.

Medelvärden erhålls från tidsmedelvärdet av alla beräknade koncentrationer i var och en av alla gridceller, och redovisas för botten respektive ytan (översta 0 – 2 m). För det norra området (områdena 30-41) är medelvärdet taget över hela muddringperioden augusti till oktober, men i det södra området (områdena 11-28) är det enbart taget över tiden då det pågår muddring där, i början av september. Medelvärdena motsvarar alltså inte alltid det enskilda områdets egna medelpåverkan eftersom allt suspenderat material från alla områden blandas i vattnet. Av den anledningen räknades också ett separat medelvärde ut för grumlingen från dumpområde 7, vilket tar emot de största mängderna material. Området modellerades då separat.

Som underlag för den bedömning av miljöpåverkan som görs i projektet beräknas också den totala tiden (varaktigheten) som en viss koncentration överstigs. Detta ger ett mått på hur länge koncentrationen är över en viss nivå i olika områden. För varje beräkningscell räknar vi ut under hur många tidssteg som koncentrationen överstiger två nivåer, 50 mg/l respektive 100 mg/l. Varaktigheten redovisas i antal dagar av den planerade muddringsperioden (Tabell A-3). Notera att om varaktigheten blir till exempel ett dygn betyder det att gränsvärdet överskridits under sammanlagt ett dygn och inte nödvändigtvis under ett dygn i sträck.

Vidare presenteras tidsutvecklingen av koncentrationen suspenderat material (avklingningen) vid ytan (0 – 2 m) i närheten av muddringspositionen och i utsläppsplymens riktning för att visa

hur lång tid eventuell påverkan varar och avtar. Detta analyserades för Skansundet, Brandalsund samt Hallsfjärden (strax söder om Fläsklösa) 200 m och 400 m söder om positionen för muddringsspill. Utifrån hela modelleringsområdets muddringsperiod augusti – oktober valdes delperioder relevanta för respektive plats för att visa avklingningen.

A.4.4 Förändrade strömhastigheter och erosion

Två hydrodynamiska modellsimuleringar gjordes för att kunna bedöma skillnaderna i strömhastigheter före och efter muddring och dumpning; en med befintlig batymetri och en med batymetrin justerad med de nya muddrade djupen och fyllda dumpningsplatserna. Samma statistiska metod som användes för halterna med suspenderat material (Avsnitt A.4.3) används även för att ta fram medel- och maxhastigheter vid botten i respektive område för muddring och dumpning. Den kritiska strömhastigheten för erosion uppskattades utifrån bottenskjuvspänningen τ , Ekvation A2:

$$\tau = \rho C_D U^2 \quad (\text{A.2})$$

Här är ρ vattnets densitet ($\approx 1000 \text{ kg/m}^3$), C_D är friktionskoefficienten ($\approx 0,003$) och U är strömhastigheten i bottenlagret. Om den kritiska bottenskjuvspänningen för erosion är ca $0,2 \text{ N/m}^2$ (avsnitt A.4.2) så blir den kritiska strömhastigheten för erosion vid botten ca $0,26 \text{ m/s}$.

B Muddrings- och dumpningsvolym för respektive område

Tabell B 1 Volym [m³] kohesivt och löst, respektive friktionsmaterial, för varje muddrings- och dumpningsområde som modellerats. I kolumnerna för muddringen (överst) står också i vilket dumpområde materialet dumpats i modelleringen. I modelleringen muddrar miljöskopan kohesionsmaterial och enskopeverket (slänterna) friktionsmaterial. Data från John Sternbeck, Sjöfartsverket.

Område	Plats	Muddringsdjup	Trailer friktion		Trailer koh + löst		Miljöskopa		Enskope (slänter exkl förör. sl.)		Total volym
Omr_30	Fräckstahäll	12.2			22653	D6					22653
Omr_34	Skansundet	12.2	35126	D6	131263	D6			20837	D6	187226
Omr_35	Farstanäs	12.2	20918	D7	41842	D7			140	D7	62900
Omr_36	Brandalsund	12.2	363341	D7	136253	D7	24017	D7	48077	D7	523611
Omr_37	Hallsfjärden	11.65					4876	D7			4876
Omr_38	Fläsklösa	11.65	126493	D6	47245	D6			25808	D6	199546
Omr_39	Halls holme	11.65			2741	D7			127	D7	2868
Omr_41	Hamnen	11.65					5747	D7			5747
Omr_11	Granklubben	12.7	7078	D2	40108	D2			882	D2	48068
Omr_12	Örsankan	12.7	8414	D2	948	D2			574	D2	9936
Omr_28	Södra Oaxen	12.2	28315	D2	5434	D2			3637	D2	37386
D6	Näslandsfjärden		161619		201161				46645		409425
D7	Hallsfjärden		384259		180836		34640		48344		648078
D2	Svärdsfjärden		51137		69854						120991

