

RAPPORT
SKANDIAPORTEN
BERÄKNING AV SPRIDNING AV SPILL VID
MUDDRING OCH DUMPNING,
HYDRODYNAMISK MODELLERING



SKANDIAPORTEN

V 1.0
2020-07-07

UPPDRAG

295289

Titel på rapport: Skandiaporten, Beräkning av spridning av spill vid muddring och dumpning, Hydrodynamisk modellering

Omslagsfoto Skandiahamnen. Foto: Anna Karlsson

Status: V 1.0

Datum: 2020-07-07

MEDVERKANDE

Beställare: Skandiaporten (Sjöfartsverket och Göteborgs Hamn AB)

Kontaktperson: Kristina Bernstén (Göteborgs Hamn AB)

Konsult: Tyréns AB

Uppdragsansvarig: Martin Hörngren

Rapportförfattare: Anna Karlsson

Kvalitetsgranskare: Olof Liungman

SAMMANFATTNING

Tyréns har på uppdrag av projekt Skandiaporten genomfört en numerisk modelleringsstudie med MIKE 3 FM MT av sedimentspill från muddring i Göteborgs skärgård och dumpning vid en föreslagen dumpningsplats i Kattegatt. Muddring och dumpning förväntas pågå under ca två år och omfattar totalt ca 12 miljoner kubikmeter lösa sediment (fast volym).

I samband med muddring och dumpning uppkommer sedimentplymer då fina fraktioner av sediment spills till omgivande vatten och sprids vidare med strömmarna. Utvecklingen av dessa plymer har modellerats med hjälp av en numerisk modell för att beskriva hur spädning, deposition och resuspension sker. Som ett konservativt antagande har modelleringen utförts med en hög muddringskapacitet. Det innebär att i denna studie genomförs muddringen av lösa massor på bara 8 månader för att inte underskatta grumling och varaktighet. Spridningsberäkningarna har utförts för perioden september till och med april med väder och hydrografi från 2017-2018.

Spridningsberäkningarna visar vilka koncentrationer av suspenderat material utöver bakgrundnivå som kan uppstå under en sådan muddringsperiod, var sedimentation av spill sker och hur stor denna är.

Beräkningarna visar att koncentrationerna som uppkommer till följd av spill är relativt låga i ytvattnet. Utanför muddrings- och dumpningsområdena är koncentrationen av suspenderat sediment, SSC, i medeltal under 5 mg/l. Vid botten är SSC högre men i medeltal överstiger halterna inte 5 mg/l utanför muddrings- och dumpningsområdena.

De maximala halterna spill i ytan är höga i direkt anslutning till muddringen och vid dumpningsområdena under den tid som dumpningen pågår (2-10 min tömning av pråm). Vid botten är grumlingen mer utbredd och med högre koncentrationer. Även här är de allra högsta koncentrationerna begränsade till muddrings- och dumpningsområdena. Varaktigheten av grumlingen är också relativt begränsad utanför muddrings- och dumpningsområdena. Detta beror delvis på att strömmarna i området transporterar och späder ut spillet relativt fort samt att större partiklar och klumpar snabbare sedimenterar.

Det spill som transporteras med strömmarna i vattenmassan och sedimenterar utanför farlederna och dumpningsplatsen har en sedimenttjocklek på som mest någon centimeter efter all dumpning genomförts, vilket i praktiken inte är mätbart. De koncentrationer som räknas ut i rapporten är s.k. överkoncentrationer och visar koncentrationen utöver naturlig bakgrundskoncentration.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	INLEDNING.....	5
1.1	BAKGRUND	5
1.2	FRÅGESTÄLLNING	5
2	OMRÅDESBESKRIVNING.....	7
3	MUDDRING OCH DUMPNING.....	9
3.1	ALLMÄNT	9
3.1.1	SEDIMENTPLYMER	9
3.1.2	MODELLERING AV SEDIMENTPLYMER.....	9
3.2	SPILL VID MUDDRING	10
3.2.1	TSHD – TRAILING SUCTION HOPPER DREDGER.....	10
3.2.2	BHD – BACK HOE DREDGER	10
3.3	SPILL VID DUMPNING	11
4	DATA OCH METODER.....	12
4.1	BAKGRUNDSKONCENTRATIONER.....	12
4.2	MUDDRAT MATERIAL.....	12
4.3	MUDDRINGS- OCH DUMPNINGSFÖRFARANDE.....	14
4.4	MODELLERING AV SPILL.....	15
4.4.1	STRÖMNINGSMODELLERING	15
4.4.2	SPRIDNINGSMODELLERING	19
4.5	MODELLERADE SCENARIER.....	20
4.6	STATISTISK ANALYS	21
5	RESULTAT	22
5.1	STRÖMMAR OCH CIRKULATION	22
5.1.1	GÖTEBORGS INSEGLING.....	22
5.1.2	UTREDNINGSMOMRÅDET FÖR DUMPNINGSPLOTS.....	24
5.2	SEDIMENTSPILL OCH SEDIMENTATION.....	26
5.2.1	VID MUDDRING	26
5.2.2	VID DUMPNING.....	30
6	DISKUSSION OCH SLUTSATSER	34
7	REFERENSER.....	35

1 INLEDNING

1.1 BAKGRUND

Projekt Skandiaporten syftar till att framtidssäkra den strategiska funktion som transocean direktsjöfart i Skandiahamnen i Göteborg utgör. För detta krävs dels åtgärder som ska resultera i ökad kapacitet och säkerhet i farleden, dels förstärkning och fördjupning vid Skandiahamnens södra kaj. Projektet planeras och genomförs i samverkan mellan Sjöfartsverket och Göteborgs Hamn AB.

Inom ramen för projektet planeras omfattande muddring av farleden in till Skandiahamnen inklusive området närmast kaj. Tyréns har fått i uppdrag att genomföra en numerisk modelleringsstudie av sedimentspill i samband med muddring och dumpning samt utreda risk för erosion av dumpade muddermassor

1.2 FRÅGESTÄLLNING

Projekt Skandiaporten syftar bl.a. till att fördjupa farlederna in till Skandiahamnen i Göteborg. Torshamnsleden samt områden inne i hamnen ska fördjupas och breddas. Totalt beräknar man att ca 12 miljoner fasta kubikmeter (t_{fm}³) lösa sediment skall muddras. I Figur 1 visas de områden som skall muddras och var dumpningsområdena ligger.

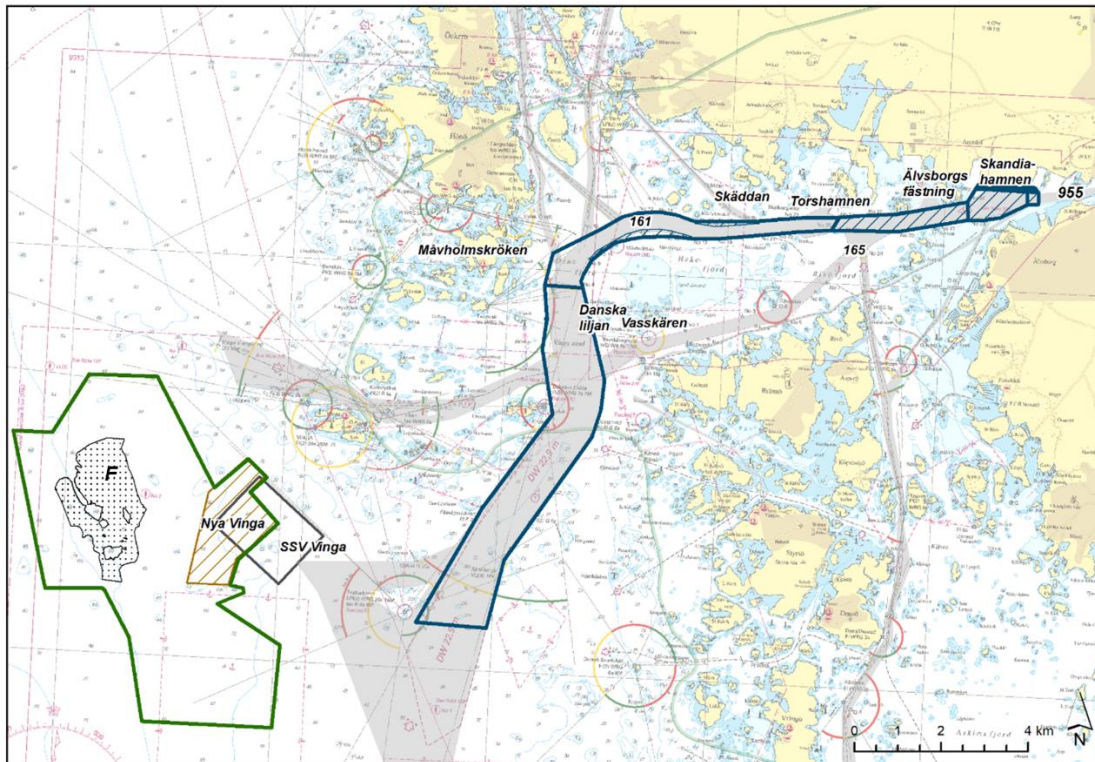
Muddringen planeras pågå under ca två år och huvudsakligen ske under perioden september/oktober till och med april/maj. Enligt uppgifter från Sjöfartsverket avser man använda i huvudsak två typer av mudderverk; enskopeverk och sugmudderverk. Flera verk kan komma att muddra samtidigt. De uppkomna muddermassorna avses dumpas till havs väster om Vinga utanför Göteborgs skärgård. Som ett konservativt antagande i denna rapport utförs muddringen med en hög muddringskapacitet. Det innebär att i denna studie genomförs muddringen av lösa massor på bara 8 månader.

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 spridning i vattenmassan bestäms av materialets sammansättning, mängden spill och de hydrodynamiska förhållandena i området runt dumpningsområdet.

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

I föreliggande rapport har spridning av spill som uppkommer i samband med muddring och dumpning modellerats för en hög muddringskapacitet och följande parametrar utvärderas:

- Förhöjning av koncentrationen av suspenderat material, s.k. överkoncentration.
- Förhöjning av sedimentationen av suspenderat material.

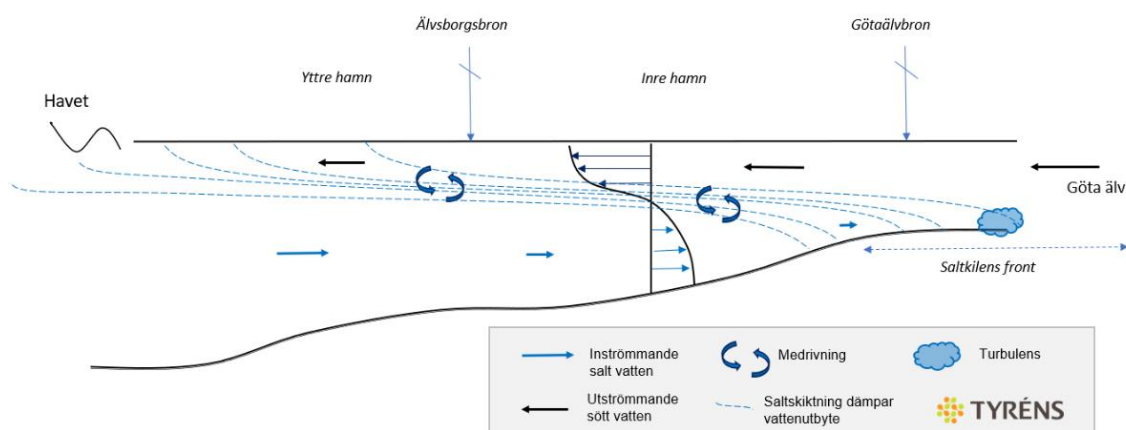


Figur 1 Göteborgs skärgård med muddringsområdet (blåskrafferat), utredningsområdet för dumpplats (grönt område) och dumpningsplats Skandiaporten (F).

2 OMRÅDESBESKRIVNING

Området där muddring planeras är en del av Göteborgs inre skärgård – Danafjord och Rivö fjord – där Göta älv mynnar i havet. Göta älv sträcker sig från Vänerens utlopp vid Vänersborg och är Sveriges vattenrikaste älv med en medelvattenföring på 565 kubikmeter per sekund. Vid Kungälv delar sig älven i två delar: Nordre älv som mynnar norr om Hisingen och Göteborgsgrenen som mynnar i havet vid Göteborg. Cirka två tredjedelar av älvflödet går ut genom Nordre älv och en tredjedel genom Göteborgsgrenen.

När älven mynnar i havet uppstår ett så kallat saltkilestuarie, där sött älvvatten möter salt havsvatten och där tidvattenvariationerna är relativt små. Eftersom sött vatten är lättare än salt vatten flyter älvvattnet ovanpå saltvattnet som i sin tur bildar en kompensationsström i motsatt riktning mot ytvattnet. Salt vatten från saltkilen blandas upp i det utströmmande ytvattnet som ökar i salthalt ju längre ut mot havet man befinner sig. En relativt skarp salthaltgradient, haloklin, utvecklas. Haloklinens läge och salthalten i ytvattnet respektive djupvattnet varierar med regional vind, vattenstånd och vattenföring i älven. Se Figur 2.

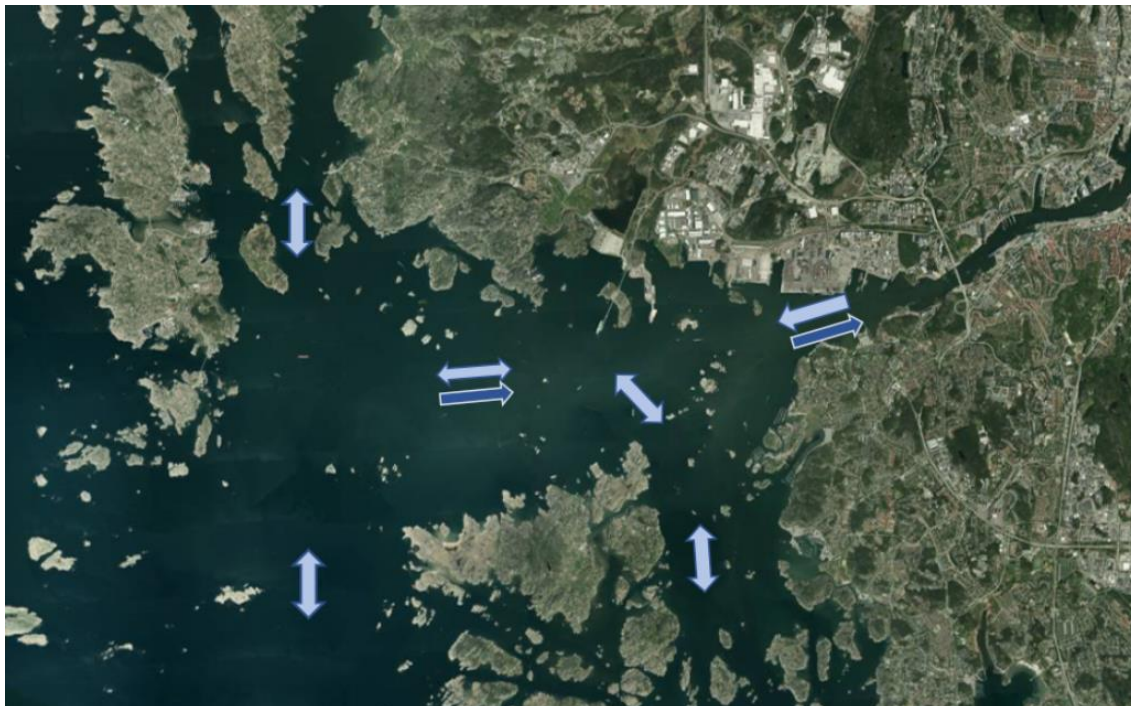


Figur 2 Principskiss för saltkilestuariet Göta älv.

Densiteten i kustvattnet i Danafjord och Rivö fjord varierar till följd av den estuarina cirkulationen både över djupet och i horisontalled. Den estuarina cirkulationen styr också strömmarna i området tillsammans med den Baltiska strömmen. Detta innebär att älvvatten uppblandat med saltvatten strömmar utåt i ytan i höjd med Skandiahavnen med en motriktad returström av salt vatten under ytvattnet. Strömmarna i inre skärgården växlar mellan att vara nordgående och sydgående men nettoströmningen är riktad norrut till följd av den Baltiska strömmen. Figur 3 illustrerar ytströmmarnas (ljusblå pilar) och djupströmmarnas (mörkblå pilar) riktning i farledsområdet.

I Kattegatt domineras cirkulationen av utflödet av bräckt Östersjövatten som blandas med saltare havsvatten. En ytström som kallas den Baltiska strömmen bildas och följer den svenska kusten norrut. Under denna ytström finns en sydgående nettoström av salt Skagerackvatten. Kattegatts vatten utanför Göteborg är därmed vanligtvis skiktat i två lager. Salthaltsskillnaden mellan ytvattnet och djupvattnet är relativt stor och skiktningen är stabil och skarp. Gränsskiktet mellan vattenmassorna ligger i medeltal på runt 15 meters djup men kan variera över året.

Den Baltiska strömmen påverkas av vindförhållanden och mängden utflödande Östersjövatten. Strömmarna kan därmed variera över tid men är i huvudsak nordgående i ytan och sydgående i djupvattnet. Då vattendjupet i utredningsområdet i huvudsak är över 50 meter innebär det att den dominerande strömriktningen vid botten är sydlig.



Figur 3 Ytströmmarnas (ljusblå pilar) och djupströmmarnas (mörkblå pilar) riktning i farledsområdet

3 MUDDRING OCH DUMPNING

3.1 ALLMÄNT

Kunskap om hur spill sker i samband med muddring och dumpning samt hur en sedimentplym bildas är nödvändig för att kunna specificera källtermer av spill i numeriska modeller. Världen över sker muddring och dumpning i samband med infrastrukturprojekt som exempelvis vid anläggande och utbyggnad av hamnar och farleder. Genom åren har därför vetenskapliga studier baserade på fältundersökningar, laborieförsök och numeriska modelleringar byggt upp en kunskapsbas kring sedimentprocesser i samband med muddring och dumpning. I detta avsnitt sammanfattas kunskap som är relevant för projektet.

3.1.1 SEDIMENTPLYMER

Sedimentplymer uppkommer då fina fraktioner av sediment spills till omgivande vatten i samband med muddring eller dumpning och sprids vidare med strömmarna. Sedimentplymerna kan klassificeras som dynamiska eller passiva (Kemps & Masini 2017).

Dynamiska plymer uppkommer då sediment uppblandat med vatten bildar en mix som är signifikant tyngre än omgivande vatten. De fina partiklarna i en sådan blandning tenderar att röra sig tillsammans som en tung slamström med en vertikal hastighet som typiskt är mycket större än sjunkhastigheten hos enskilda partiklar (Dankers 2002). Den dynamiska plymen har en begränsad utbredning och övergår till slut i en passiv plym.

Passiva plymer består av lägre halter suspenderat sediment som har samma densitet som omgivande vatten och som sprids och späds med omgivningsförhållandena och sjunkhastigheten hos enskilda partiklar. Denna typ av plym uppstår vid spill av fina sediment i anslutning till sughuvudet vid sugmudderverk, genom propellerinducerad ström, vid muddring med enskopeverk samt vid dumpning av muddermassor. Utvecklingen av dessa plymer kan modelleras med hjälp av numeriska modeller för att beskriva hur spädning, deposition och resuspension sker.

3.1.2 MODELLERING AV SEDIMENTPLYMER

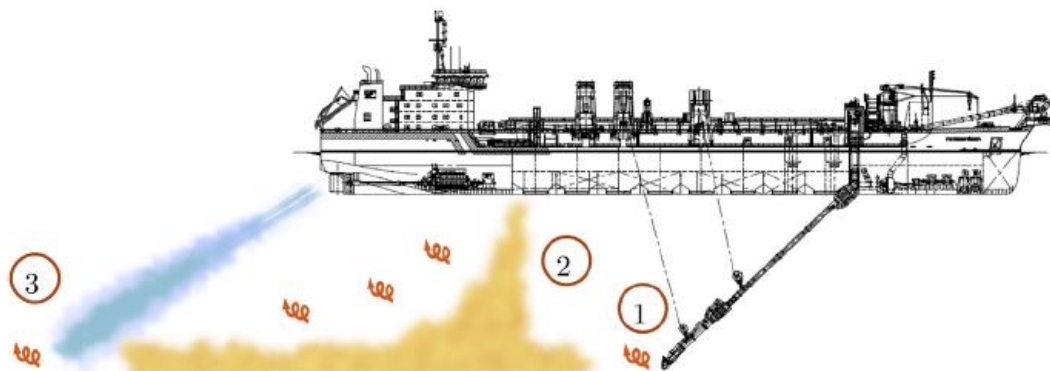
Modellering av passiva plymer, d.v.s. spill, inkluderar transport, turbulent diffusion, sjunkhastighet hos partiklarna och deposition/resuspension vid botten. För att beskriva omfattningen av grumling och nettodeposition krävs att mängden material som går i spill kan uppskattas. Dynamiska plymprocesser kan inte modelleras på ett tillförlitligt sätt utan hanteras istället som en källa där mängden spill uppskattas (Kemps & Masini 2017).

För att kunna uppskatta mängden spill krävs kunskap om det muddrade materialet, lokala strömförhållanden, djupförhållanden samt en rad projektspecifika uppgifter som typ av muddringsmetod, muddringsstrategi och muddringsschema. Fältmätningar, laborieförsök och numerisk modellering har under årens lopp använts för att undersöka de olika källorna till spill i samband med muddring och dumpning. I följande avsnitt ges en beskrivning av de resultat som framkommit.

3.2 SPILL VID MUDDRING

3.2.1 TSHD – TRAILING SUCTION HOPPER DREDGER

Källorna till spill från ett sugmudderverk är i huvudsak tre stycken: spill vid sughuvudet, overflow¹ och resuspension till följd av propellerströmmar, se Figur 4. Sedimentspillet vid sughuvudet är begränsat till det djup som sughuvudet befinner sig på men kan blandas upp i vattenmassan till följd av propellerströmmar. Denna effekt är svår att beskriva kvantitativt men kan innebära att delar eller hela mängden spill från sughuvudet blandas om helt från ytan till botten.



Figur 4 Källor till spill vid sugmuddring med TSHD. 1. Sughuvudet, 2.overflow och 3. Propellerströmmar. Från Becker m.fl. (2015)

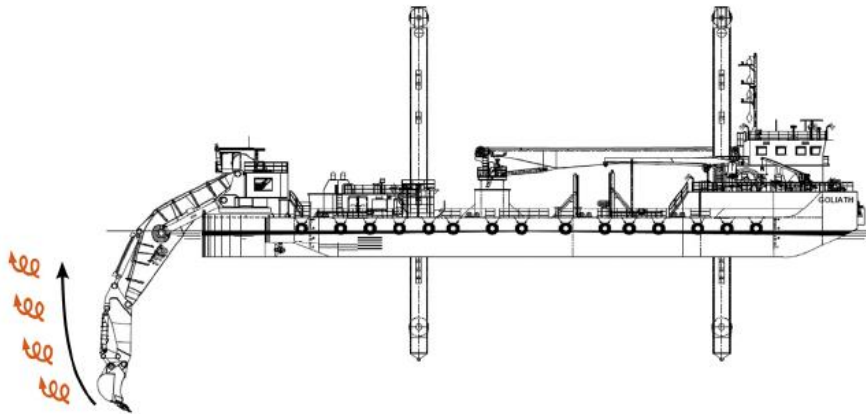
Då overflow inte kommer att tillåtas inom ramen för detta projekt är det enbart spill i anslutning till sughuvudet som kan uppkomma och därefter en omblandning till följd av propellerströmmar. Litteraturen (sammansatt av Kemp & Masini, 2017) visar att vid sugmuddring av fina kohesiva sediment ligger storleken på spillet runt 3 % av andelen fina sediment (<63 µm) i det muddrade sedimentet vid sughuvudet. Storleken på spillet kan också kopplas till storleken på sugmudderverket där andelen spill minskar med ökad storlek. Även Becker m.fl. (2015) antar ett spill på 3 % av total mängd fina sediment i sugmuddrade massor.

3.2.2 BHD – BACK HOE DREDGER

Muddring med enskopeverk är s.k. mekanisk muddring. Vid grävuddring bibehålls sedimentets egenskaper i skopan och detta minimerar mängden spill av fina sediment. Nackdelen är att muddringskapaciteten är låg jämfört med sugmudderverk. Denna typ av muddringsmetod används bl.a. då krav på precision är hög och i områden där ett sugmudderverk inte kan röra sig på ett säkert sätt.

Figur 5 illustrerar hur spill sker från skopan genom hela vattenkolumnen från botten till ytan. Vid muddring av kohesiva sediment som leror tenderar materialet att hålla ihop mycket väl och spillet blir litet. I samband med projektet Säkrare Farleder genomfördes detaljstudier i Göteborgs hamn som visade på spill i storleksordningen 0.4-2.5 % vid muddring (Scandiaconsult 2000). Vid byggandet av Öresundsbron fastställdes en gräns för spill på max 5 % som inte fick överskridas och som man vid projektets slut bedömde hade hållits. Becker m.fl. (2015) anger att spillet kan uppgå till 4 % av andelen fina partiklar i icke kohesiva sediment. Om exempelvis den andel av det muddrade materialet som inte håller ihop i klumpar uppgår till 30 % blir andelen spill 1.2 % av den totala muddrade mängden sediment.

¹ Overflow – benämning av överskottsvatten från sugmuddring som tillåts rinna ut från prämen/mudderverket under muddring och som kan innehålla större eller mindre mängder av fina sediment i suspension.



Figur 5 Källa till spill vid muddring med ensopeverk (BHD). Från Becker m.fl. (2015).

3.3 SPILL VID DUMPNING

Det muddrade materialet består främst av kohesiva sediment (lera). Vid grävuddring håller detta material ihop väl i större klumpar. Under transporten ut till dumpningsplatsen kan klumparna delvis slås sönder i mindre klumpar vid hårt väder men faller inte isär i enskilda partiklar. Det sugmuddrade sedimentet blir till viss del uppblandat i vatten, i större och mindre klumpar samt partiklar. Till följd av den höga densiteten och de kohesiva krafterna klumpar partiklarna lätt ihop sig till större aggregat som snabbt sjunker till botten av pråmen.

Både gräv- och sugmuddrat sediment transporteras till dumpningsplatsen i pråmar. Dumpning sker vanligtvis genom att pråmen öppnas i botten, s.k. *split barge*. Stora klumpar och grövre partiklar som sand och grus faller direkt mot botten. Även majoriteten av det fina sedimentet sjunker snabbt till botten i form av en dynamisk plym där den vertikala hastigheten är i storleksordningen 1 m/s, vilket är mycket större än enskilda partiklars sjunkhastighet (Mills & Kemp 2016, Van Rijn 2019). När plymen når botten bildas en tung ström av suspenderat sediment som sprider sig radiellt utåt längs botten. Hastigheten avtar snabbt varpå sedimentet deponerar på botten inom några hundra meter från nedslagsplatsen (Van Rijn 2019).

På vägen ner genom vattenkolumnen suspenderas en del av sedimentet i det omgivande vattnet genom s.k. medrivning. Det suspenderade materialet, spillet, består främst av enskilda små fina partiklar som bildar en passiv plym vars spridning och spädning beror av omgivningsförhållandena och sjunkhastigheten hos de enskilda partiklarna. Hur mycket som går i spill beror på sedimenttyp, muddringsförfarande, bulkvolym, omgivande strömförhållanden m.m.

Spillet som genereras genom dumpning är vanligtvis mellan 0-10 % enligt en rad uppskattningar från litteraturen (Mills & Kamps 2016) och gäller för alla typer av sediment. Van Rijn (2019) anger att mellan 3-5 % av de finare fraktionerna i det dumpade materialet som sjunker mot botten övergår i en passiv plym. Spillet från kohesiva sediment kan förväntas vara mindre än spill från icke-kohesiva sediment vilket innebär att dumpning av leror i marina miljöer genererar mindre spill än exempelvis sjösediment.

4 DATA OCH METODER

4.1 BAKGRUNDSKONCENTRATIONER

Transport, erosion och deposition av sediment är naturligt förekommande i varierande grad i sjöar, vattendrag och hav och 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. Skyddade vikar eller djupa vattenområden är exempel på detta.

Det finns relativt få uppgifter om bakgrundshalter av suspenderat sediment i Sveriges kustvatten under skiftande väderförhållanden, vare sig det är från mätningar eller litteraturen. Från Göteborgsområdet finns en del uppgifter, främst från projektet Säkrare Farleder till Göteborg (avslutat 2004) och från Göta älv-utredningen (2009–2011). Öresund är ett relativt väl undersökt område, inte minst i samband med byggandet av Öresundsbron och här finns en del information att utgå ifrån. Nedan sammanfattas de värden som är relevanta för denna rapport.

- Inom projektet Säkrare Farleder i Göteborg gjordes turbiditets- och suspensionsmätningar 2001–2002 (Karlsson m.fl. 2002). Mätningar av SSC (eng. Suspended Sediment Concentration) genomfördes vid 14 tillfällen mellan september 2001 och augusti 2002 vid olika positioner i Göteborgs skärgård. De flesta mätningarna gjordes i ytvattnet, 0–5 m, och ett fåtal på lite större djup, 15–50 m. Resultaten uppvisar ett spann på 1–6 mg/l med medelvärdet 3 mg/l för området från Rivö fjord ut till Vinga. I Göta älv i höjd med Älvsborgsbron uppmättes SSC mellan 2–10 mg/l med medelvärdet 4 mg/l.
- I Göta älv varierar SSC normalt mellan 10–20 mg/l men kan vid nederbörd vara över 50 mg/l (SGI 2011).
- I norra Öresund ligger normala värden mellan 1–2 mg/l (Pejrup 1994). Vid kraftiga vindar och lokalt i kustområden kan koncentrationer på 20–40 mg/l förekomma (Valeur & Pejrup 1993 och Valeur m.fl. 1996).

Mätningarna inom projektet Säkrare Farleder utfördes under relativt lugna väderförhållanden och representerar inte den normala variabilitet som finns för olika väderförhållanden. Det finns därmed inga uppgifter om SSC från Göteborgs skärgård under perioder med hårt väder. Ett rimligt antagande är dock att det vid blåsigt väder även här kan förekomma koncentrationer mellan 20 och 40 mg/l eller kanske till och med högre.

4.2 MUDDRAT MATERIAL

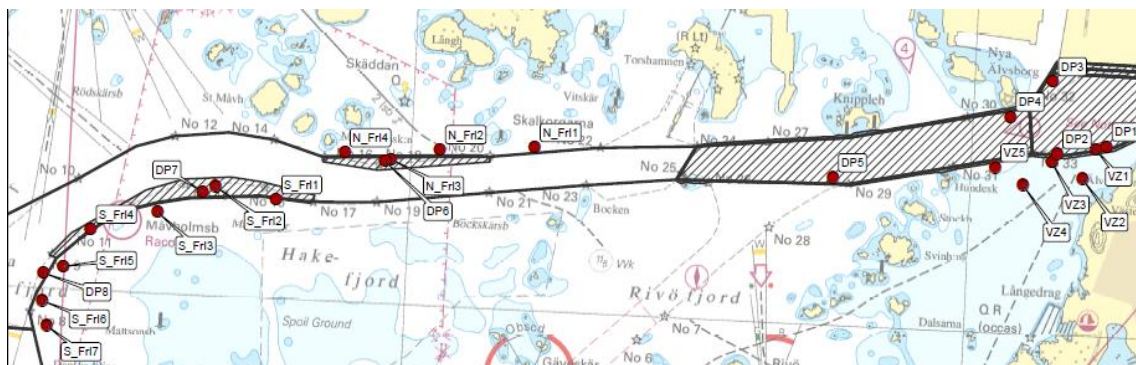
De områden som skall muddras i samband med breddning och fördjupning består främst av postglacial lera. Bulkdensiteten ligger mellan 1.6–1.7 ton/m³ och leran klassificeras som medelsensitiv (Golder 2020). Materialet bedöms därför hålla ihop i större klumpar under muddring och transport till dumpningsplatsen.

Det har gjorts sedimentanalyser från ett antal provpunkter i området (Figur 6). I flera av dessa har även kornstorleksanalyser utförts och en sammanställning visas i Tabell 1. Analyserna visar på homogena förhållanden i området med några avvikelser i vissa punkter. Största andelen av sedimenten utgörs av finsediment med fraktion mindre än 63 µm, som silt och lera. Andelen finsediment varierar mellan 57–94 %. Endast fyra av delproverna innehåller finsediment med en lägre andel än 90 %. Den dominerade

fraktionen är mellansilt (6.3-20 µm). Andelen ler (<2 µm) varierar inom intervallet 1.3-20 %. Andelen sand och grövre fraktioner (63 µm) varierar mellan 6-43 %. I 11 av de 15 delproverna är andelen sand och större fraktioner strax under 10 %. Generellt är andelen grus (>2 mm) lägre än en (1) procent.

Tabell 1 Sammanställning av kornstorleksfördelning utifrån analyser i muddringsområdet.

	Sediment djup	Vatten djup	Sand och grövre >63 µm	Grov silt 20-63 µm	Mellansilt 6.3-20 µm	Finsilt 2-6.3 µm	Ler <2 µm	Fina sediment <63 µm
	m	m	%	%	%	%	%	%
VZ3A	0-0.52	5.1	8.9	30.4	40.1	19.3	1.3	91.1
N_Fri2A	0-0.55	11.8	7.1	28.3	41.3	21.5	1.9	93.0
N_Fri3	0.45-0.50	12.5	11.9	28.6	35.7	21.2	2.6	88.1
DP1	1.1-1.5	4.8	8.2	36.5	36.4	17.4	1.3	91.7
DP2	0.5-1	5.3	6.3	29.4	38.8	22.5	3.0	93.7
DP2	1.5-2	5.3	9.5	30.2	37.3	20.4	2.6	90.5
DP4	1-1.4	14.7	6.1	26.0	38.8	25.3	3.8	93.9
DP6	1.1-1.5	12.2	21.6	14.7	25.7	24.2	11.9	76.5
DP6	1.9-2.0	12.2	6.9	13.0	31.1	32.0	15.9	92.0
DP6	2.3-2.4	12.2	7.9	13.6	30.7	32.0	15.7	92.0
DP7	0-0.5	14.4	9.9	25.9	35.3	23.6	5.3	90.1
DP7	0.5-1	14.4	43.0	17.4	23.0	14.4	2.2	56.9
DP7	1-1.4	14.4	17.2	14.9	25.1	26.3	15.5	82.0
DP7	2-2.2	14.4	6.1	13.2	27.7	31.4	20.0	92.3
DP8	0-0.35	21.3	9.7	29.7	37.6	21.0	2.1	90.4



Figur 6 Karta över provpunkter för sediment. Kornstorleksanalys har inte utförts i alla punkter.

För spillmodelleringen har en representativ medelvärdesbildad kornstorleksfördelning tagits fram för det muddrade materialet. Denna fördelning visas i Tabell 2. Finsilt och ler har slagits ihop till en fraktion i modellen.

Tabell 2 Fördelning av kornstorlekar i modellen för det muddrade sedimentet baserat på Tabell 1.

Benämning Kornstorlek [µm]	Sand >63	Grovsilt 6.3-20	Mellansilt 2-6.3	Finsilt & Ler <2
Andel [%]	8.8	29.4	38.2	23.6

4.3 MUDDRINGS- OCH DUMPNINGSFÖRFARANDE

Enligt uppgifter från Sjöfartsverket avser man använda två olika typer av mudderverk, sugmudderverk (Trailing Suction Hopper Dredger, TSHD) och enskopeverk (Backhoe dredger, BHD), se Figur 7.

Enskopeverken kan jobba dygnet runt eftersom muddermassorna lastas på separata pråmar som transporteras till dumpningsplatsen. Sugmudderverken alternerar mellan att muddra och att transportera till och från dumpningsområdena. För transport och dumpning av muddrat material med enskopeverk används bottenöppnande pråmar (Figur 8). Sugmudderverken har samma funktion med skillnaden att de är kompletta fartyg. Vid dumpning kommer större delen av materialet falla direkt ner på botten, medan en mindre del, till följd av medrivning, kommer att hålla sig svävande i vattenmassan. Det senare är det som man vanligtvis refererar till som spill.



Figur 7 Exempel på sugmudderverk t.v. och enskopeverk t.h.



Figur 8 Bottentömmande pråm, s.k. split barge. Källa Boskalis (boskalis.se).

För att beskriva vilka koncentrationer av suspenderat sediment som kan uppkomma i samband med muddring och dumpning har Tyréns tillsammans med Port Engineering satt ihop ett muddrings- och dumpningsschema med hög muddringskapacitet. Två verk muddrar lösa massor samtidigt; en BHD och en TSHD, dvs. ett enskopeverk och ett sugmudderverk med en sammanlagd muddringskapacitet på drygt 48 000 m³/dygn. I simuleringarna har verken placerats så att de skall ge upphov till så mycket

sammanlagd grumling som möjligt men under förutsättning att de verkar i olika delområden. I Figur 9 visas muddringsschemat som använts i modellsimuleringarna. Dumpning sker kontinuerligt vid dumpningsplatsen 11 gånger per dygn.

Område	Månad							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1 Mävholmskröken								
2 Mävholmskären-Skalkorgarna								
3 Dynan-Älvsborgs fästning	TSHD							
41a Vändyta yttre fördjupning								
41b Vändyta yttre breddning								
522 Skandiahavnen Öst	BHD							

Figur 9 Muddringsschema för simuleringarna. Skandiahavnen öst 521 är här inbakad i 41a. Månadsnumrering avser inte kaldermånad utan relativt startmånad.

Enskopeverken spiller över hela kolumnen vid muddring vilket innebär att dessa ger upphov till grumling även i ytan. Kapaciteten är dock avsevärt lägre än för ett sugmudderverk så den totala andelen spill är mindre. Sugmudderverken spiller endast vid botten och därför påverkar dessa ytvattnet i mycket mindre utsträckning, trots den högre kapaciteten och mängden spill. Sugmudderverkets propellerrörelser kan dock blanda om vattnet bakom fartyget och medverka till att spillets sprids över hela vattenpelaren. I denna utredning har därför även spillet från sugmudderverket ansatts i hela vattenkolumnen, för att inte riskera att underskatta grumlingen i ytvattnet och spridningen av spill till grunda, känsliga områden. Spillet vid muddring antas i denna rapport uppgå till ca 3 % för båda verken. Detta antagande baseras bl.a. på studier av Kemps & Masini (2017), Becker (2015) och Van Rijn (2019) (se även avsnitt 3.2).

Vid dumpning av sediment muddrat med enskopeverk används pråmar som rymmer 1000 m³. Dessa pråmar dumpar muddermassor fem ggr/dygn. Sugmudderverken gör sex stycken muddrings- och dumpningscykler per dygn och rymmer 12 000 m³. För grävuddrat sediment antas att all volym på pråmen är sediment medan för sugmudderverken antas att 60 % är sediment och 40 % är vatten som blandats in vid muddringen². Själva dumpningen antas pågå under 10 min. Spillet av fina sediment som vid dumpning bildar en passiv muddringsplym har ansatts till 4 % (Van Rijn 2019) (se även avsnitt 3.3) eftersom det muddrade sedimentet kan antas hålla ihop i klumpar.

4.4 MODELLERING AV SPILL

4.4.1 STRÖMNINGSMODELLERING

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 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 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

² Källa Port Engineering

exakt som beräkningsnätets upplösning, noggrannheten i de drivande krafterna och andra indata tillåter. MIKE 3 HD 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 samt de meteorologiska förhållandena. DHI har en operationell hydrodynamisk modell för haven runt Sverige och Danmark ur vilken drivdata avseende vattenstånd, skiktning, strömning och meteorologi extraheras för det lokala modellområdet.

Modelluppsättningar

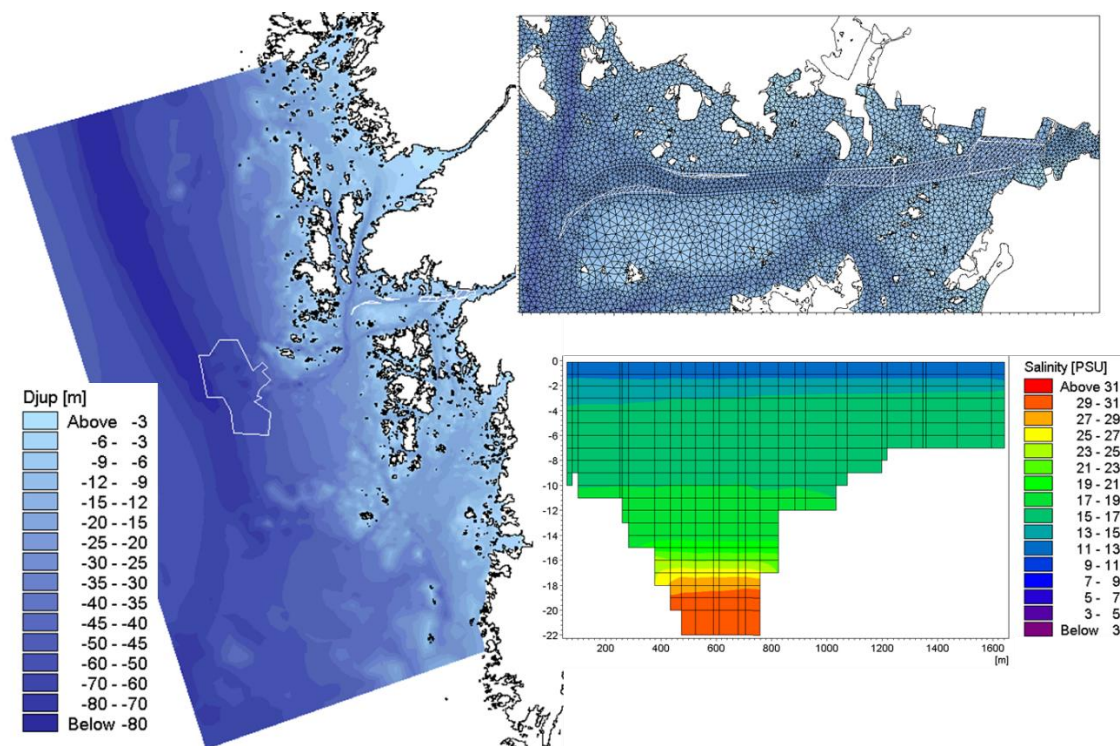
Två modelluppsättningar har satts upp för att beskriva spridning och spädning av spill. De täcker båda in samma område på ca 30x50 km från Marstrand i norr till Onsala i söder och från Lärjeholm i Göta älv till väster om djupa rännan (se Figur 10), men har olika upplösning på beräkningsnätet. Den ena modelluppsättningen har hög upplösning i den inre skärgården och används för mudderspillsberäkningarna medan den andra har högre upplösning utanför kusten i området för dumpningsplatsen för att beskriva spridningen av spill där.

För att på ett tillförlitligt sätt kunna modellera strömmarna i Göteborgs inseglingsområde och kusten utanför har modellen alltså gjorts relativt stor. Detta beror på att vattnets rörelser i ett område är beroende av vad som sker i angränsande havsområden. En annan orsak till modellens utbredning är att den skall passa till de regionala prognosmodeller som levererar randvillkoren på de öppna gränserna mot hav i modellen.

Modellerna beräknar strömmen i området i ett beräkningsnät som på ett detaljerat sätt beskriver djup och strandlinje. I beräkningsnätet delas vattenvolymen upp i beräkningsceller. Dessa celler kan vara rektangulära eller triangulära sett från ovan och skiljer sig åt i storlek. Beräkningsnätets högsta upplösning finns i farleden in till Torshamnen där de rektangulära cellerna är ca 100m × 70m. Varje cell är ca 1 m tjock. I dumpningsområdet är cellerna ca 150 m i sidan och ca 1-2 m tjock. Delar av beräkningsnäten visas i Figur 10.

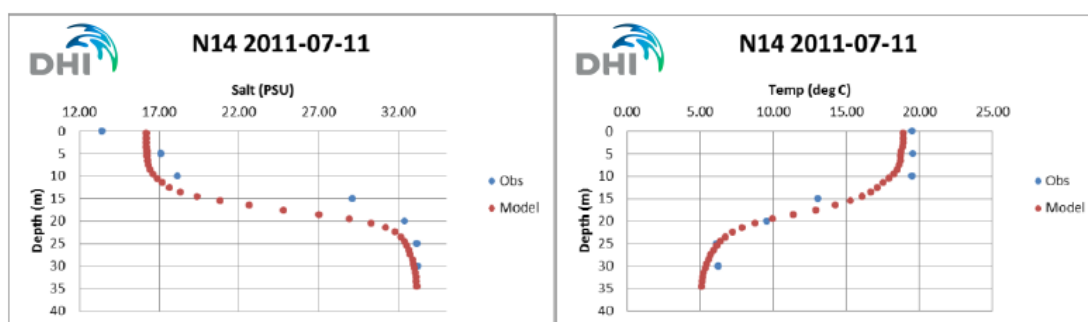
Drivning

DHI har operationella modeller som beräknar hydrografi (strömmar, vattenstånd, etc.) över hela världen. En regional modell för Östersjön, Öresund och Bälten, Kattegatt och Skagerak ger två gånger per dygn, året runt, prognoser av strömmar för några dagar framåt i tiden. Denna modell har använts för att leverera randvillkor till modellen för Göteborgsområdet under augusti 2017 till och med maj 2018.



Figur 10 Till vänster modellområdet med djupbeskrivning i blå skala. Överst till höger beräkningscellerna sedda från ovan och nederst till höger från sidan i ett snitt över Torshamnleden, där skalan visar salthalt.

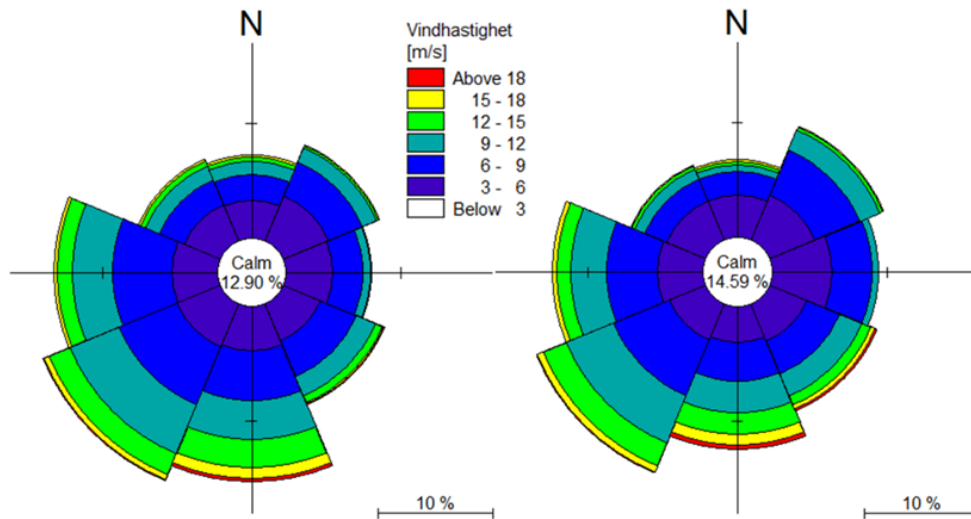
För att kunna räkna fram korrekta strömmar i göteborgsområdet krävs att den regionala operationella modellen kan leverera tillräckligt bra hydrografisk information på ränderna till öppet hav. Det finns inte mycket mätdata (strömmar, vattenstånd, salt eller temperatur) på bra platser som kan användas för att validera modelldata. En jämförelse mellan månadsmätningar av salt och temperatur från Bohuskustens vattenvårdsförbund och modellberäknade data för samma tidpunkt visar att den regionala modellen kan beskriva de salthaltskiktningar som uppmätts (Figur 11). Skiktningen i havet är av stor betydelse för hur det strömmar vid kusten.



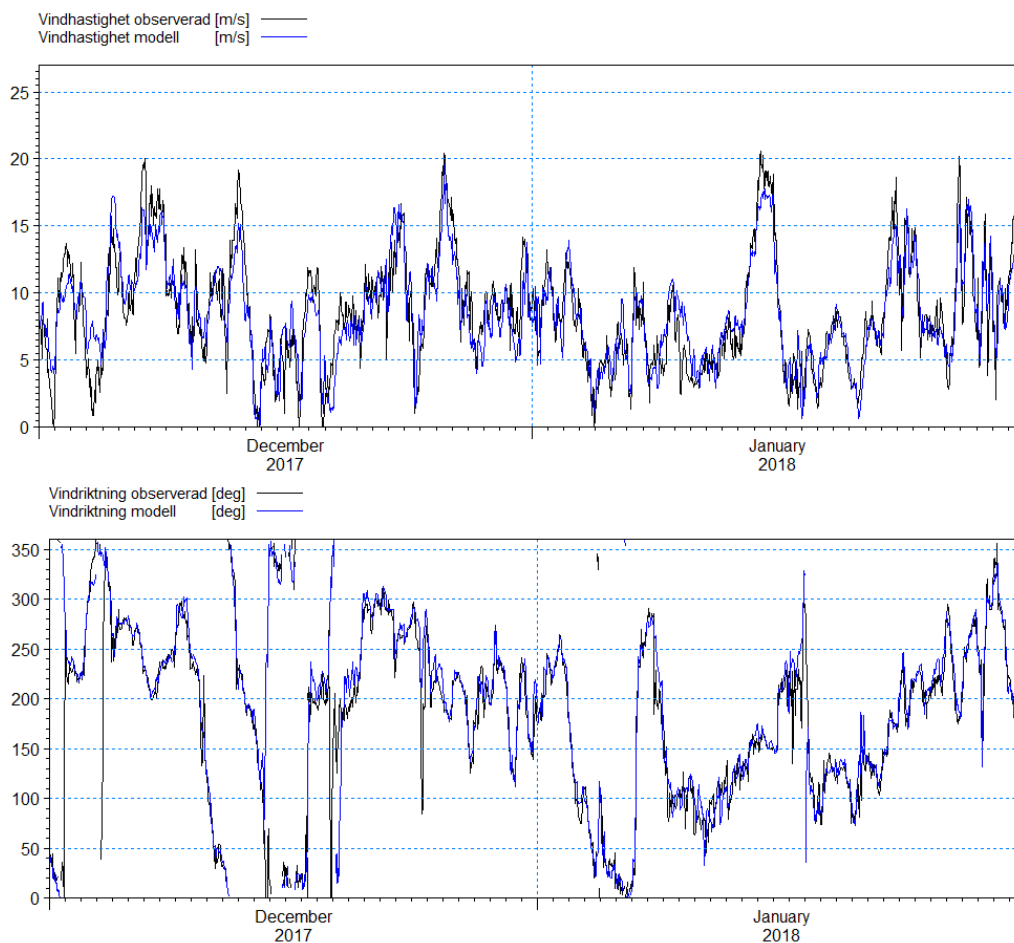
Figur 11 Jämförelse av salt (vänster) och temperatur (höger) mellan den regionala modellen och mätningar i en punkt utanför Hallandskusten.

SMHI mäter sedan 1800-talet vind vid väderstationen Vinga A (stationsnummer 71380). Figur 12 visar observationerna från Vinga A som vindrosor för de två perioderna augusti 2007 till augusti 2019 samt augusti 2017 till augusti 2018. De dominerande vindriktningarna är mellan väst och syd. Den kortare perioden augusti 2017 till augusti

2018 har använts som underlag för strömmodelleringen vid dumpningsplatsen (Tyréns 2020b) och speglar förhållandena under den längre perioden väl.



Figur 12 Vindrosor från station Vinga A för perioden 2007-08 till 2019-08 (vänster) och 2017-08 till 2018-08 (höger).



Figur 13 Jämförelse mellan modellerad och uppmätt vindhastighet (överst) och vindriktning (nederst) vid Vinga. Exempel från två månader av simuleringsperioden.

De meteorologiska data (vind och lufttryck) som ligger till grund för både den regionala och lokala strömningsmodellen är modellberäknade. En jämförelse mellan uppmätt vind från Vinga och modellberäknad vind i samma punkt visar på en mycket god överensstämmelse, se Figur 13. Alla större sötvattentillflöden, Göta och Nordre älv samt Sävån, finns beskrivna i modellen som tidsserier för aktuell simuleringsperiod. Data har inhämtats från SMHI:s vattenwebb.

4.4.2 SPRIDNINGSMODELLERING

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 resuspendera när den bottennära strömmen och därmed bottenskjuvspänningen överskrider ett kritiskt gränsvärde. Sandfraktioner och klumpar av sediment sedimenterar fort och kommer därmed att förbli i muddrings- respektive dumpningsområdet.

För simulering av spridningen av fina sediment som silt och ler är de viktigaste parametrarna:

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

Modelluppsättning

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

- Det faktiska spillet av sediment under muddring och dumpning som en funktion av tid, position, typ av muddrat material och muddringsmetod.
- Advektion och dispersion 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 spridningen av spill. Här har ytvågor liten betydelse för resultaten och kan därför uteslutas. Beräkningarna av SSC (halten suspenderat sediment) görs för 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.

Det muddrade sedimentet består av en fördelning av kornstorlekar (Tabell 1). Dessa kornstorlekar representeras av fyra fraktioner i modellen. Varje fraktion representerar ett kornstorleksintervall och karaktäriseras av en fallhastighet samt kritiska bottenskjuvspänningar (Tabell 3). I modellen antas att de finaste lerpartiklarna inte flockulerar då sedimentet tippats. Detta antagande görs för att inte överskatta sjunkhastigheten vilket i sin tur skulle kunna underskatta spridningen. Minsta partikelstorleken i modellen har satts till 8 µm.

Tabell 3 Fallhastighet och kritisk bottenskjuvspänning för de fraktioner som ingår sedimentet.

Fraktion nr	1	2	3	4
Typ av sediment	Sand	Grovsilt	Mellansilt	Finsilt/Ler
Kornstorlek [µm]	63	32	16	8
Fallhastighet [mm/s]	2.5	0.66	0.16	0.04
Kritisk bottenskjuvspänning för sedimentation [N/m ²]	0.1	0.07	0.07	0.07

Generellt sett ligger det kritiska värdet för sedimentation mellan 0.06-0.1 N/m², men kan variera beroende på sedimentets egenskaper (Whitehouse m.fl. 2000). Den kritiska bottenskjuvspänningen för erosion ligger mellan 0.1 och 0.5 N/m² för nyligen avsatta sediment (Van Rijn 2007a,b och Whitehouse m.fl. 2000). I t.ex. Öresund ligger den kritiska bottenskjuvspänningen på ca 0.3 N/m² (Lumborg 2005). För beräkningarna i denna rapport har 0.2 N/m² ansatts, ett något lägre och därmed konservativt valt värde, för att inte underskatta grumlingen.

Representativa fallhastigheter

Fallhastigheten för varje fraktion måste vara känd för att spridningen 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.

$$W_s = \frac{\rho_s - \rho_w}{18 \nu} g (fd)^2$$

Här är ρ_s sedimentets densitet, ρ_w vattnets densitet, g gravitationen, d kornstorleken, f en flockuleringsfaktor och ν den kinematiska viskositeten.

4.5 MODELLERADE SCENARIER

Den hydrodynamiska modellen har satts upp för en sammanhängande period om drygt nio månader, 2017-08-24 till 2018-05-31, för att kunna beskriva normala förhållanden i kustvattnet under olika säsonger. Tre huvudsakliga modelluppsättningar har tagits fram baserat på följande antaganden om djupförhållandena:

1. Nuvarande djupförhållanden i farleden och hamnområdet,
2. framtida djupförhållanden med fördjupad farled (19.2 m) och breddning av vändyta samt
3. dagens djupförhållanden i utredningsområdet för dumpningsplats.

Modelluppsättning 2 har använts för att modellera spill i samband med muddring och modelluppsättning 3 för spill i samband med dumpning. Modellering av spill med modelluppsättning 2 har genomförts för två olika spillscenarier:

- a. spillet från både sugmuddring och grävuddring fördelas jämnt från ytan till botten i vattenpelaren, samt
- b. spillet från sugmuddring ansätts vid botten och spillet från grävuddring fördelas jämnt från ytan till botten i vattenpelaren.

4.6 STATISTISK ANALYS

Resultaten från modellberäkningarna av suspenderat sediment är 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 cell välja ut den maximala koncentrationen under hela simuleringsperioden. Koncentrationerna under två tidssteg kombineras genom att det maximala värdet i varje beräkningscell sparas i en ny fil. När samma procedur utförs för alla tidssteg får man till slut en karta över de maximala koncentrationer som uppstått i samtliga beräkningsceller, oavsett när de inträffade under perioden.

Medelvärde räknas helt enkelt ut genom att man tar tidsmedelvärdet av alla beräknade koncentrationer i en cell under den simulerade perioden.

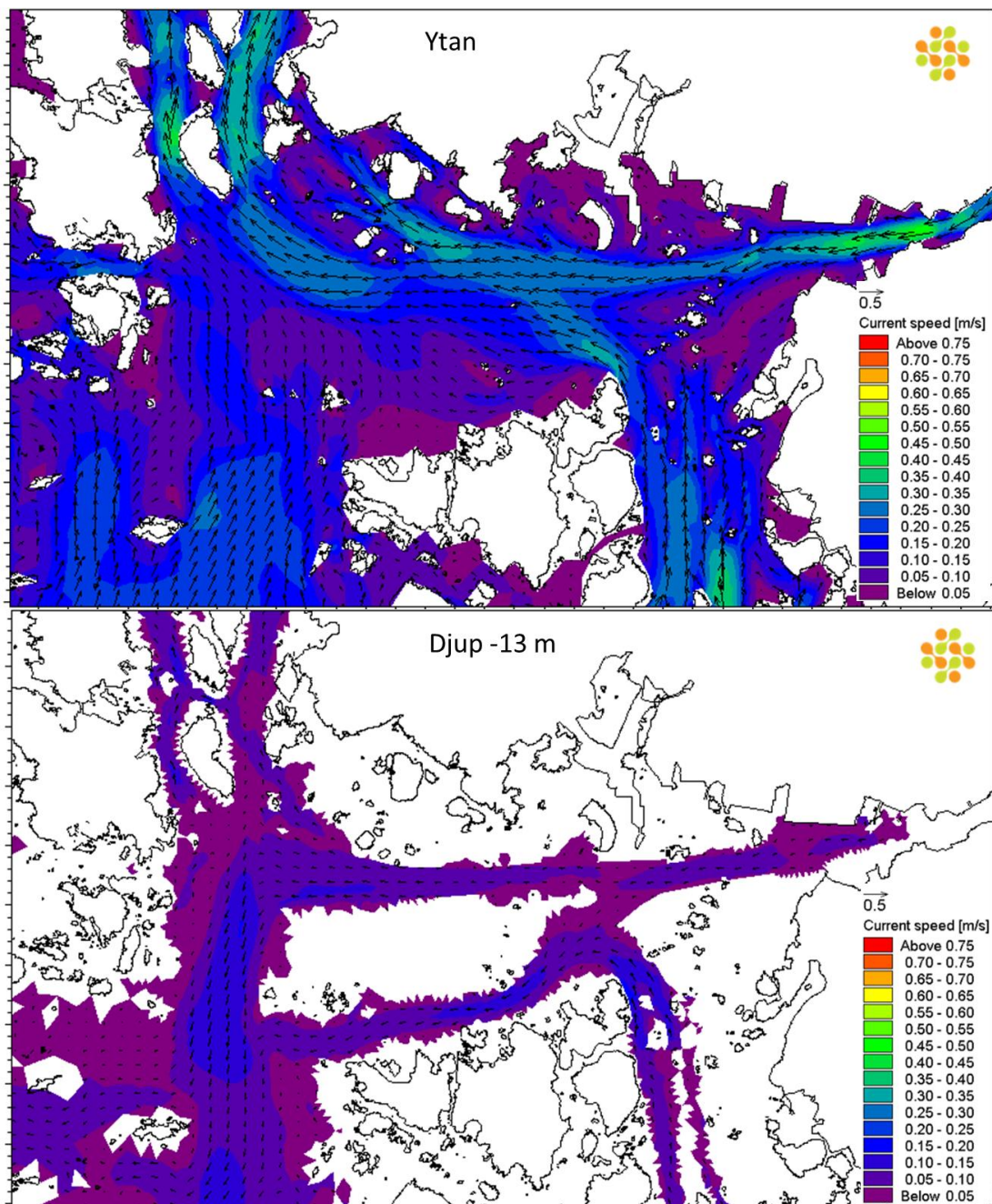
För att kunna värdera miljöpåverkan beräknas också varaktigheten för att en viss koncentration överstigs. Detta ger alltså ett mått på hur ofta koncentrationen är över en viss nivå i olika områden. För varje beräkningscell räknas ut under hur många tidssteg som koncentrationen överstiger ett givet värde. Antalet tidssteg då värdet överskrids divideras sedan med det totala antalet tidssteg för perioden och räknas om till dygn. Varaktigheten innebär här den sammanlagda tid som ett vist värde överskrids, sett till hela muddringsperioden.

5 RESULTAT

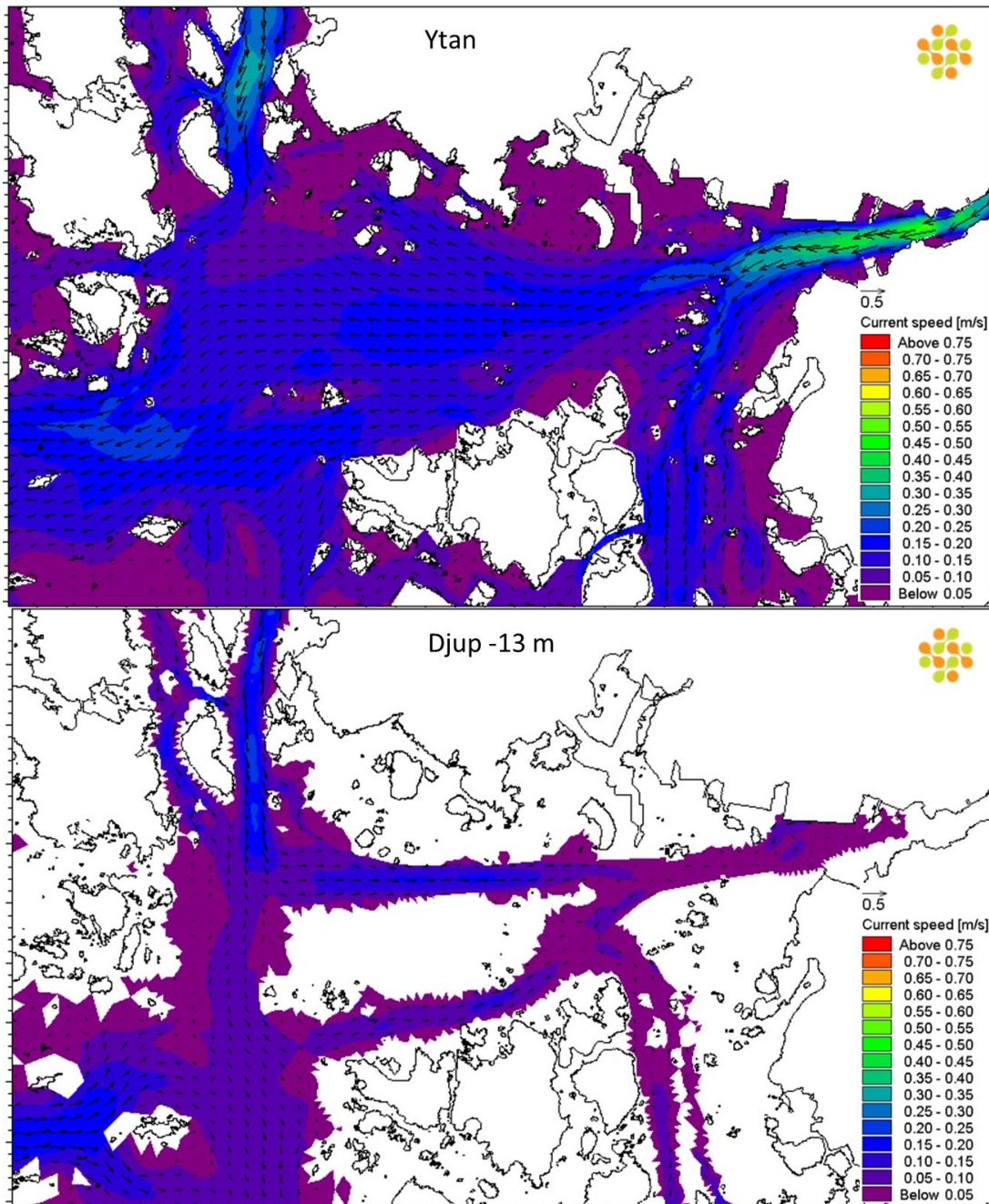
5.1 STRÖMMAR OCH CIRKULATION

5.1.1 GÖTEBORGS INSEGLING

Strömmarna i skärgården och havet utanför varierar i styrka och riktning. I Figur 14 och Figur 15 visas två typiska strömbilder från modellsimuleringarna, i ytan och på 13 m djup, i Göteborgs skärgård. Det ena tillfället visar nordgående ström i ytan och det andra sydgående. I djupvattnet är strömmen på sina ställen motriktad ytströmmen.



Figur 14 Strömmar i Göteborgs skärgård, ögonblicksbild 2018-05-29 kl 11. Överst i ytan och nederst på 13 m djup.

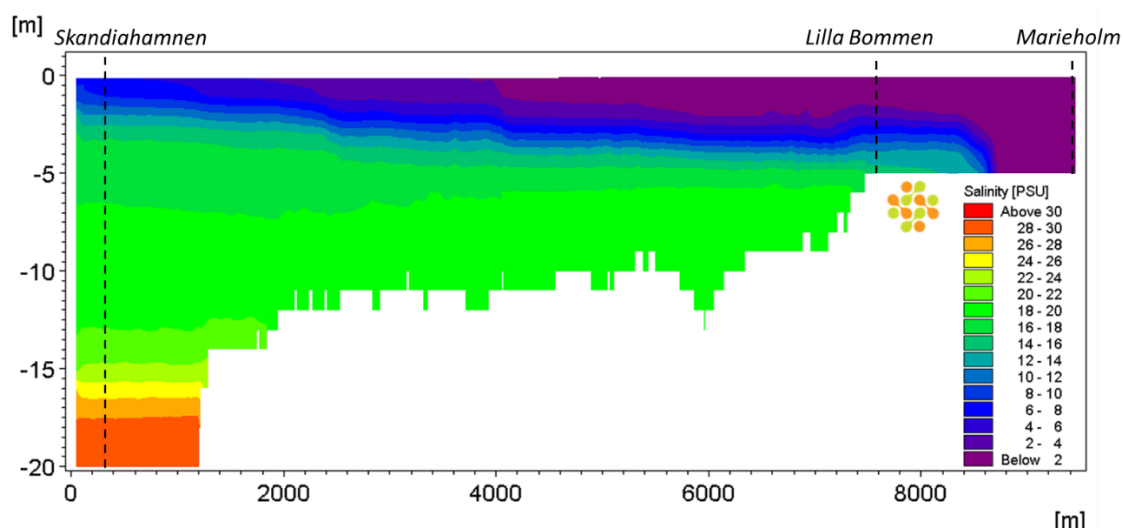


Figur 15 Strömmar i Göteborgs skärgård, ögonblicksbild 2018-05-27 kl 05. Överst i ytan och nederst på 13 m djup.

Göta älvs utflöde i Kattegatt resulterar i en estuarin cirkulation med sötare ytvatten och saltare bottenvatten. I älvfåran en bit upp i älven finns en permanent saltkil från några meters djup ner till botten. Hur långt upp i älven som saltkilen når beror på djupförhållandena i älven i kombination med storleken på älvflödet och havsvattenståndet. Under normala förhållanden når saltkilens front en liten bit upp i älven norr om Lilla Bommen där den rör sig fram och tillbaka i takt med tidvattenvariationen och variationer i älvflödet. Ju högre flöde i älven desto längre ut mot havet återfinns fronten i älven.

I Figur 16 visas ett tvärsnitt i älven över simulerad salthalt från Skandiahammen upp till Marieholm efter muddring. Där djupet minskar till 6 m smalnar även älven av och saltkilen hålls tillbaka av älvflödet. Saltkilens front rör sig normalt mellan Lilla Bommen och Marieholm.

De modellberäknade strömmarna före och efter muddring visar att fördjupningen av farleden och breddningen av vändytan inte påverkar strömningsförhållandena annat än i området där muddringarna utförs. I och med fördjupningen kommer botten djupet att öka och salthalten vid den nya botten att vara högre eftersom djupet blir större jämfört med före muddringen. Modellberäkningarna visar att varken saltkilens läge i vattenmassan eller hur långt upp i älven den når påverkas av fördjupning och breddning av farleden till Skandiahammen. Saltkilens läge och förmåga att tränga upp i Göta Älv beror enbart av storleken på älvflödet och havsvattennivån i kombination med djupförhållanden i själva älvfåran uppströms Lilla Bommen.

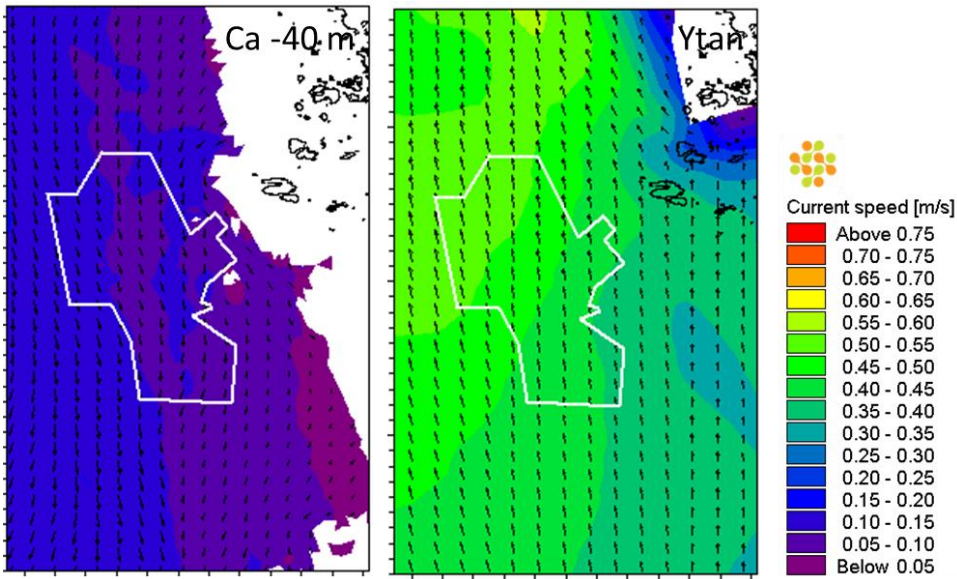


Figur 16 Tvärsnitt i älven över salthalt från Skandiahammen till Marieholm.

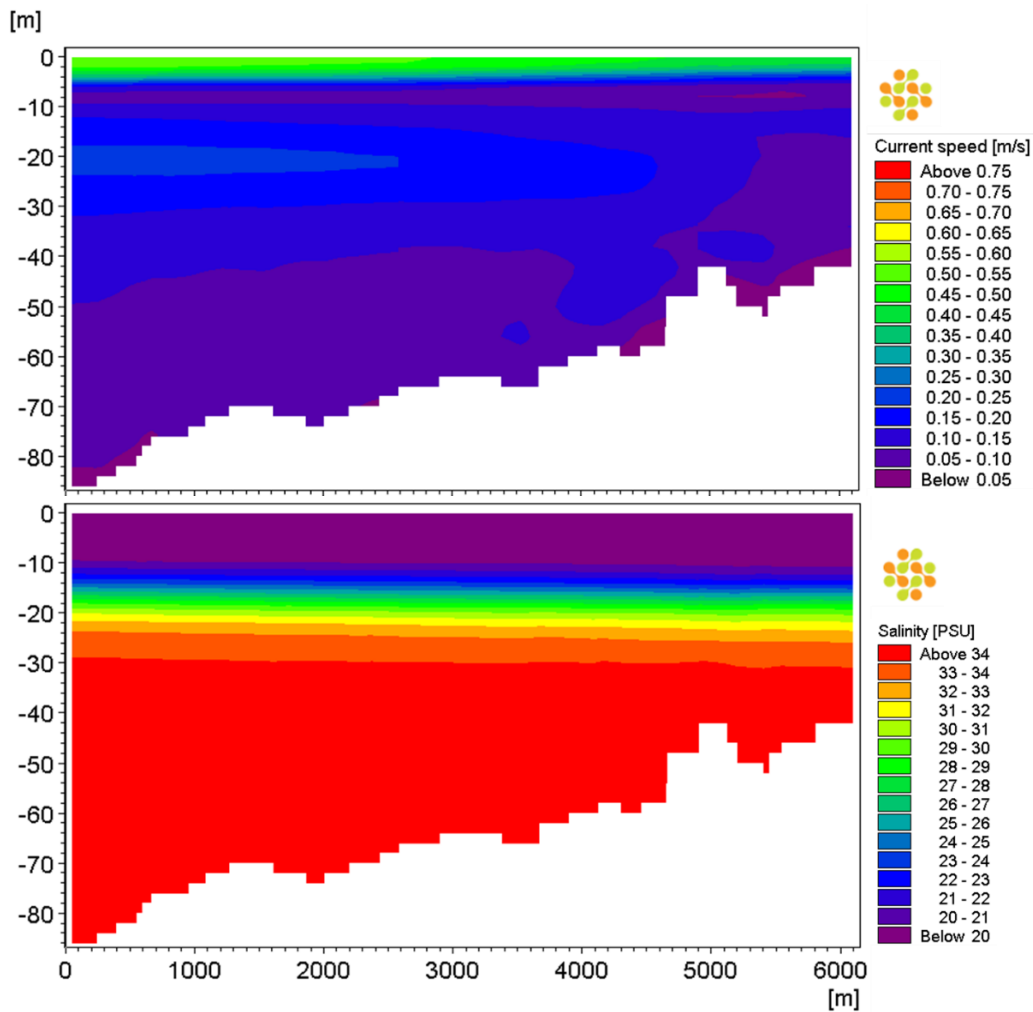
5.1.2 UTREDNINGSMRÅDET FÖR DUMPINGSPLATS

I Figur 17 visas en ögonblicksbild av strömmarna i ytan och på ca 45 m djup i området utan för Vinga där utredningsområdet för dumpningsplats ligger. Bilderna visar den typiska strömbilden utanför kusten med relativt starka strömmar i ytan som är nordgående samtidigt som det finns en svagare kompensationsström på större djup som är motriktad ytströmmen. Över tid varierar strömmarna i riktning och styrka men har två huvudriktningar; sydlig respektive nordlig. Strömmens tendens att följa dessa huvudriktningar är topografiskt styrd, d.v.s. strömmen följer kustens och djupkonturernas huvudriktning.

I Figur 18 visas strömhastigheten och salthalten i ett tvärsnitt över norra delen av utredningsområdet väster om Vinga vid samma tidpunkt som i Figur 17. I ytan strömmar vattnet norrut i ett tunt skikt, ca 5 meter tjockt. På 10-40 m djup syns den motriktade strömmen med den högsta hastigheten på ca 20 m djup. Vid detta tillfälle låg haloklinen (salthaltssprångskiktet) på 10 m djup. Haloklinens läge varierar bland annat med storleken på flödet ut från Östersjön.



Figur 17 Strömmar i utredningsområdet för dumpningsplats, ögonblicksbild 2018-05-28 kl 03. T.h. i ytan och t.v. på ca 40 m djup.



Figur 18 Tvärsnitt över utredningsområdet väster om Vinga. Övers strömshastigheten och underst salthalten. Ögonblicksbild 2018-05-28 kl 03.

5.2 SEDIMENTSPILL OCH SEDIMENTATION

I följande avsnitt redovisas resultaten från modelleringen av spridningen av spill vid muddring och dumpning. Det muddringsscenario som redovisas i denna rapport är 3a (se avsnitt 4.5) då detta scenario ger stort påverkan på grunda områden.

Koncentrationen av suspenderade sediment (SSC), här även benämnt grumlingen, anges i mg/l. De beräknade koncentrationerna är överkoncentrationer, d.v.s. koncentration utöver bakgrundshalt. Koncentrationerna visas på två nivåer, ytan och botten. Observera att medan ytan är en fix nivå (0-1 m) så varierar bottendjupet. Färgskalan i figurerna relaterar i viss mån till vad som kan antas ligga i linje med de naturliga variationerna i området.

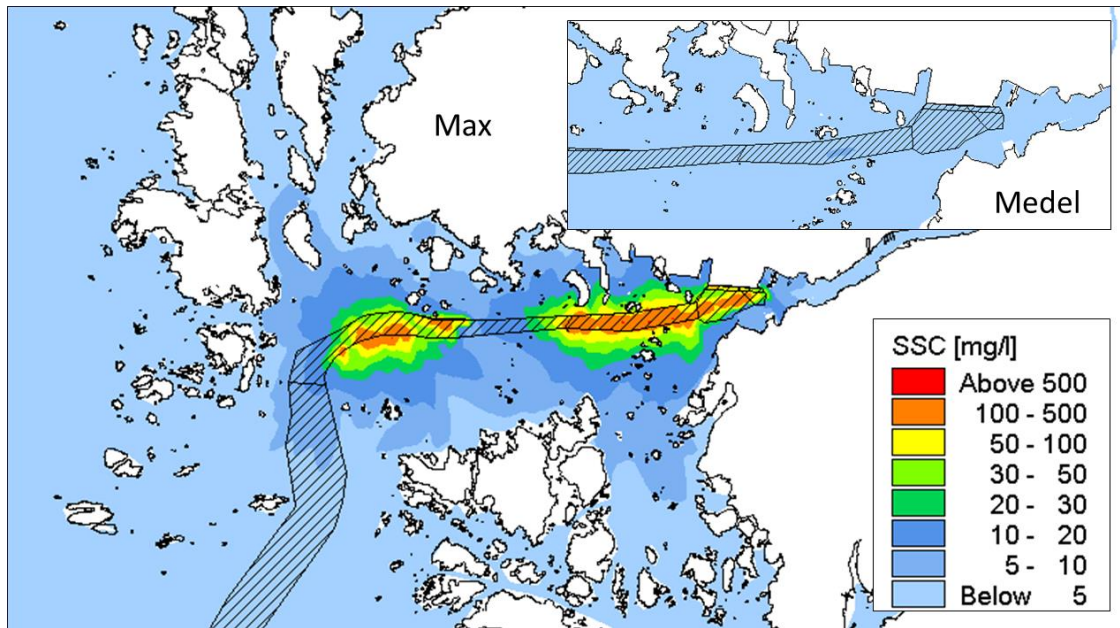
Koncentrationer under 20 mg/l anges i blått då dessa förväntas ligga i nivå med de naturliga variationerna under lugna till måttliga väderförhållanden. Intervallet 20-50 mg/l visas i grönt och är halter som enligt litteraturen kan förekomma naturligt i samband med stormar. Över 50 mg/l visas med färgskalan gult till rött.

Varaktigheten redovisas för referensnivåerna 5 och 10 mg/l, samt där det är relevant, för 50 och 100 mg/l, i ytan och vid botten. Enheten är dygn och om en referensnivå inte överskrids mer än totalt ett dygn redovisas detta som "ingen påverkan". Ett dygn motsvarar 4 % av ca 8 månader (motsvarande muddringsperioden med den ansatta muddringskapaciteten om nästan 50 000 m³/dygn).

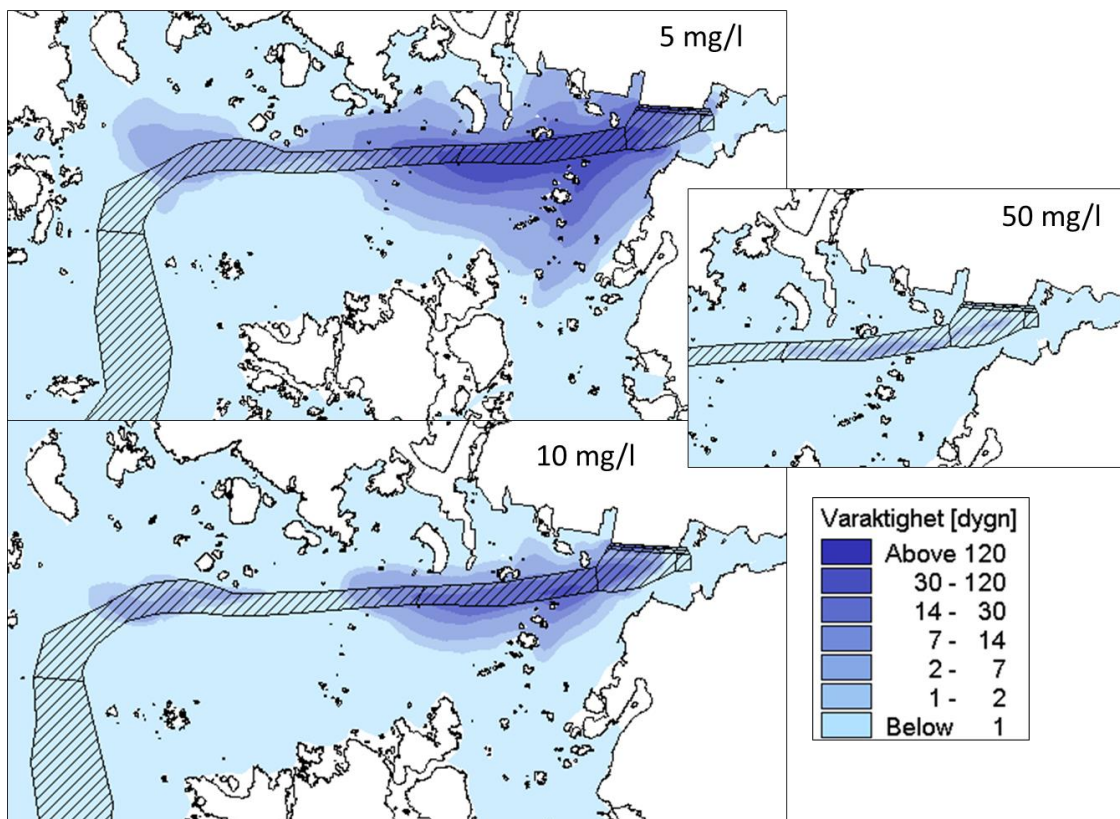
5.2.1 VID MUDDRING

Ytan

Den sammanslagna maximala koncentrationen och medelkoncentrationen i ytan för hela muddringsperioden visas i Figur 19. De högsta koncentrationerna, över 100 mg/l, är begränsade till arbetsområdena och därmed farleden. Utanför farleden, mer än 200 m från arbetsområdet, är de högsta koncentrationerna generellt sett lägre än 20 mg/l. I medeltal är grumlingen i ytan lägre än 5 mg/l utanför farleden. Även om de maximala koncentrationerna kan överskrida 100 mg/l så är varaktigheten låg, se Figur 20. Under muddringsperioden är varaktigheten för 100 mg/l i storleksordningen timmar i ytvattnet. För de lägre koncentrationerna är varaktigheten längre.



Figur 19 Simulerad max- och medelgrumling i ytan under muddringsperioden.



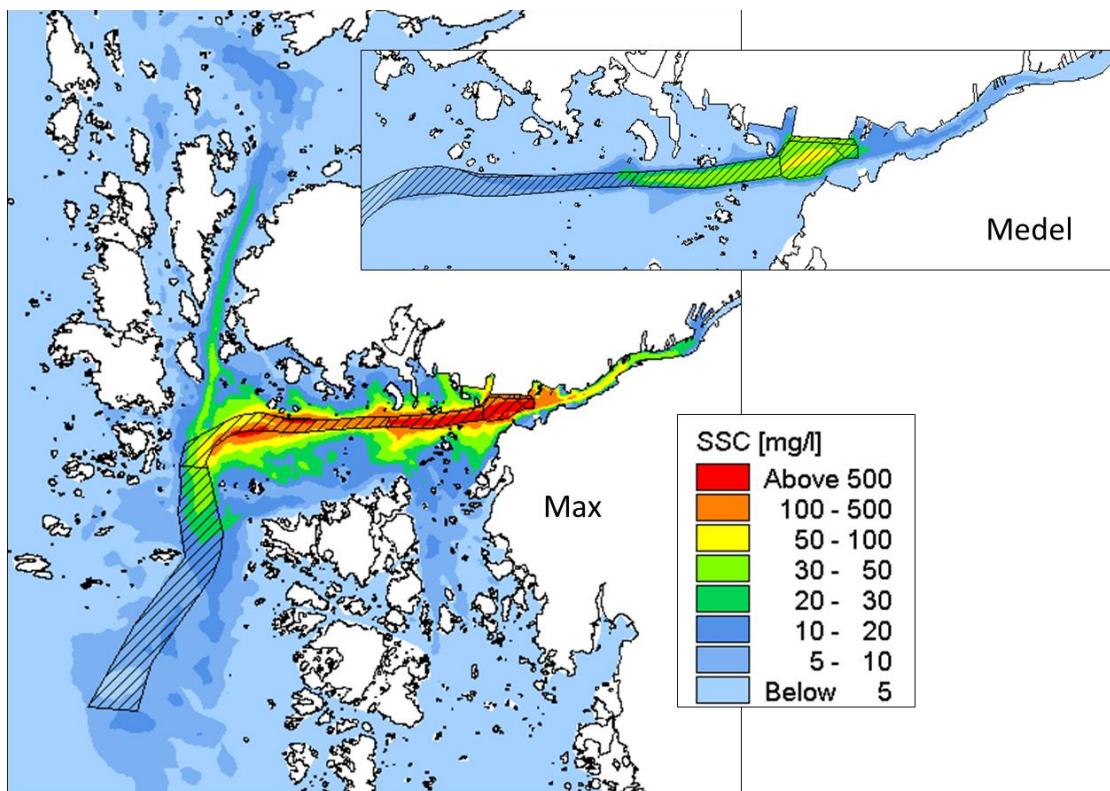
Figur 20 Simulerad varaktighet i ytan för grumlingsnivåerna 5, 10 och 50 mg/l.

Botten

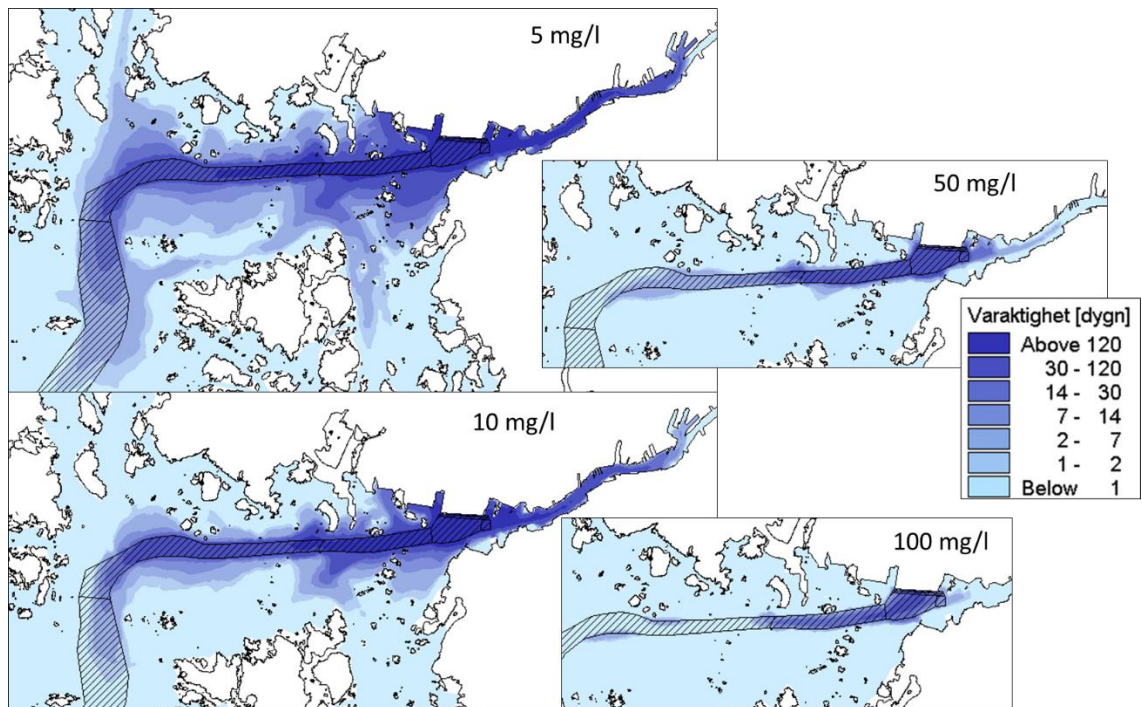
Vid botten är den maximala grumlingen och medelgrumlingen högre än i ytan (Figur 21). Detta beror delvis på att en del av partiklarna sjunker mot botten och sedimenterar redan i närområdet men är också en effekt av att strömmarna här är svagare och utspädningen därmed lägre. Dessutom fångas spillet i farledsfördjupningarna och naturligt djupa områden vilket begränsar både spridning och spädning.

Varaktigheten för olika grumlingsnivåer vid botten visas i Figur 22. Under hela muddringsperioden på åtta månader förekommer halter högre än 50 mg/l under mindre än ett dygn utanför farledsområdet. Låga koncentrationer, i storleksordningen 10 mg/l och lägre, förekommer oftare. De grunda vikarna i närområdet påverkas mycket lite eller inte alls av spill vid botten jämfört med de djupare delarna av farleden.

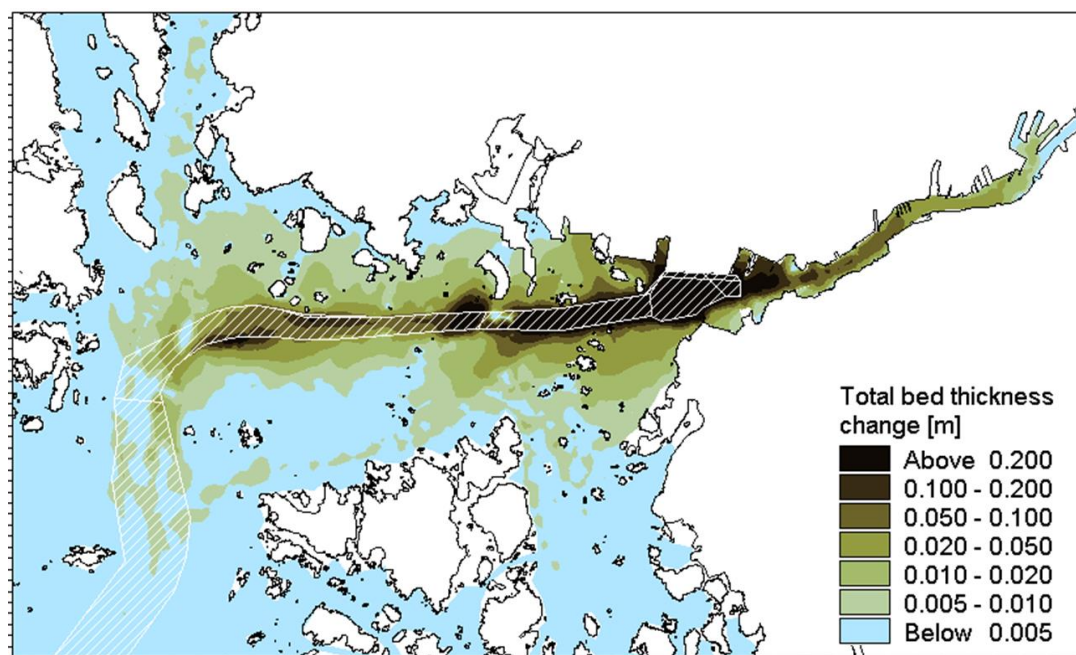
I Figur 23 visas depositionen (mängd som sedimenterat, uttryckt i sedimenttjocklek) av spill efter att muddringen upphört. Den största depositionen sker i de djupare delarna av farledsområdet. Utanför farleden på djup grundare än 6 m är den beräknade depositionen efter åtta månaders muddring som mest runt 5 cm. I stora delar av området är dock sedimentationen omätbar. Eftersom effekten av vågor inte är med sker ingen resuspension av sediment i grunda områden på grund av vågor (vind- eller fartygsgenererade). Depositionen i grunda områden är därmed överskattad.



Figur 21 Simulerad max- och medelgrumling vid botten under muddringsperioden.



Figur 22 Simulerad varaktighet vid botten för grumlingsnivåerna 5, 10, 50 och 100 mg/l.

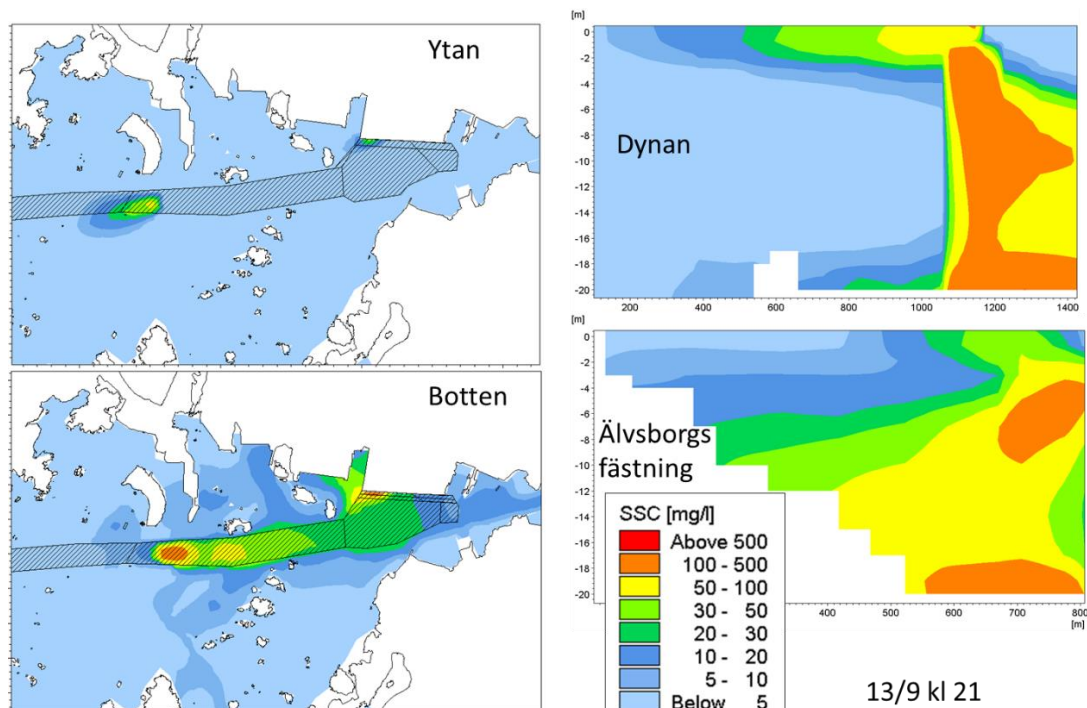


Figur 23 Simulerad mängd spill som sedimenterat, uttryckt i sedimenttjocklek, efter att muddringen upphört.

Ögonblicksbild

Den statistiska presentationen av grumlingen ovan i detta avsnitt visar inte enskilda plymer. Plymernas utbredning och halten suspenderat material varierar med

strömmarna. En ögonblicksbild av plymutbredningen i ytan, vid botten och i två snitt över vattenmassan visas därför i Figur 24, som komplement till de statistiska bilderna.



Figur 24 Ögonblicksbild av plymutbredningen vid muddring vid Dynan och i Skandiahamnen.

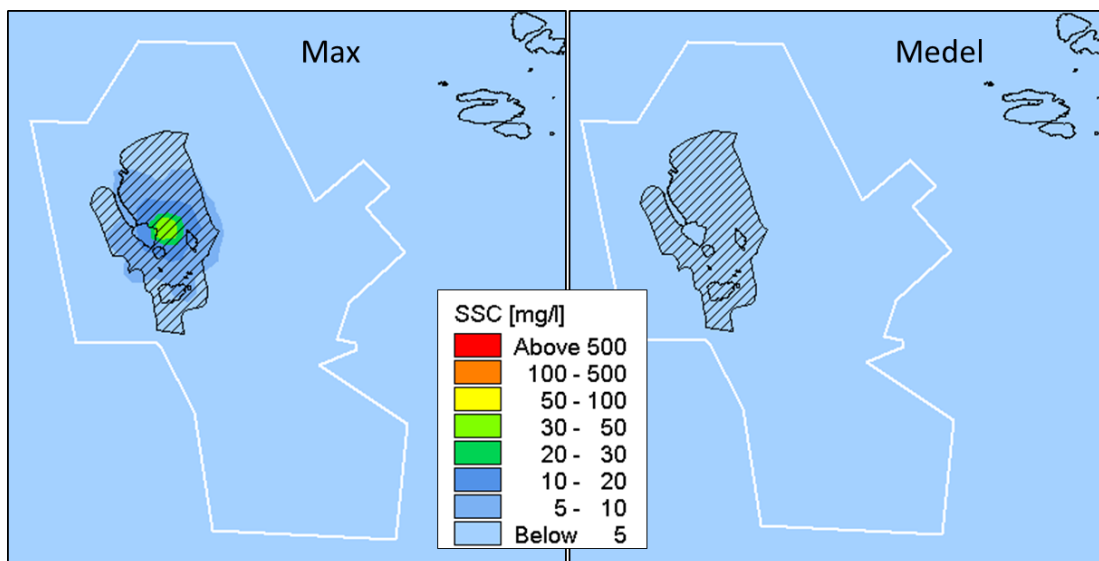
I ytan följer grumlingsplymen ytströmmen ut mot havet genom skärgården. Vid botten följer plymen de svagare bottenströmmarna som ofta är motriktade ytströmmen och topografisk styrda. Utspädningen är således högre i ytan än på större djup och spridningen snabbare. Vid botten finns sedimentplymer från tidigare muddringscykler kvar i närområdet medan de i ytan relativt snabbt synbart försvinner.

I tvärsnitten i Figur 24 som visar muddringsplymen vid Dynan respektive Skandiahamnen, syns fördelningen av grumling över vattenmassan och spridningen i olika riktningar.

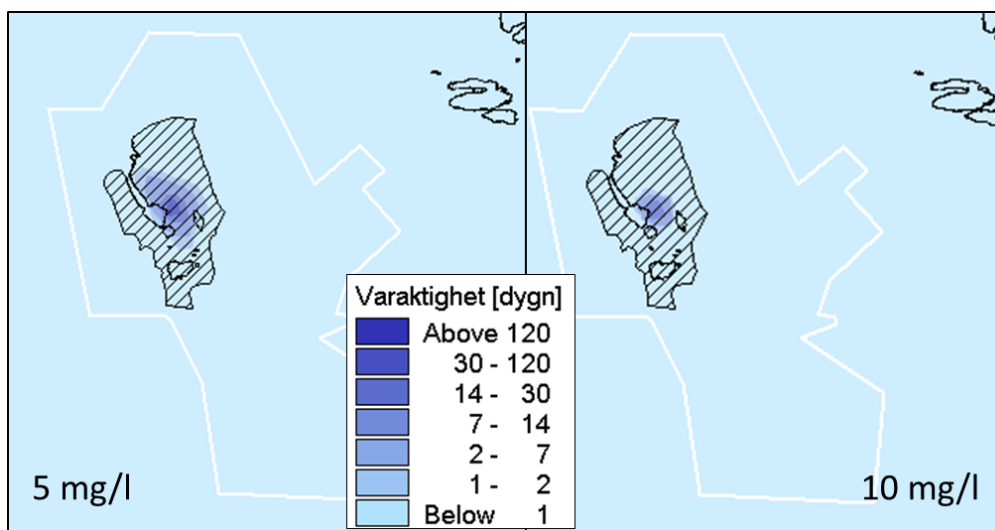
5.2.2 VID DUMPNING

Ytan

Den sammanlagda maximala grumlingen samt medelgrumlingen i ytan i samband med dumpning visas i Figur 25. Spillet spridning i ytan kan tyckas begränsad och beror till viss del på att spädningen ofta är stor då vattenomsättningen är hög. Sedimentplymen späds då relativt snabbt ut till lägre halter. Medelhalterna är lägre än 5 mg/l för hela dumpningsperioden (ca 8 månader). Varaktigheten för halter upp till 10 mg/l är därmed mycket låg (Figur 26) och begränsad till totalt några timmar (av åtta månader) för högre halter.



Figur 25 Simulerad max- och medelgrumling i ytan under dumpningsperioden.



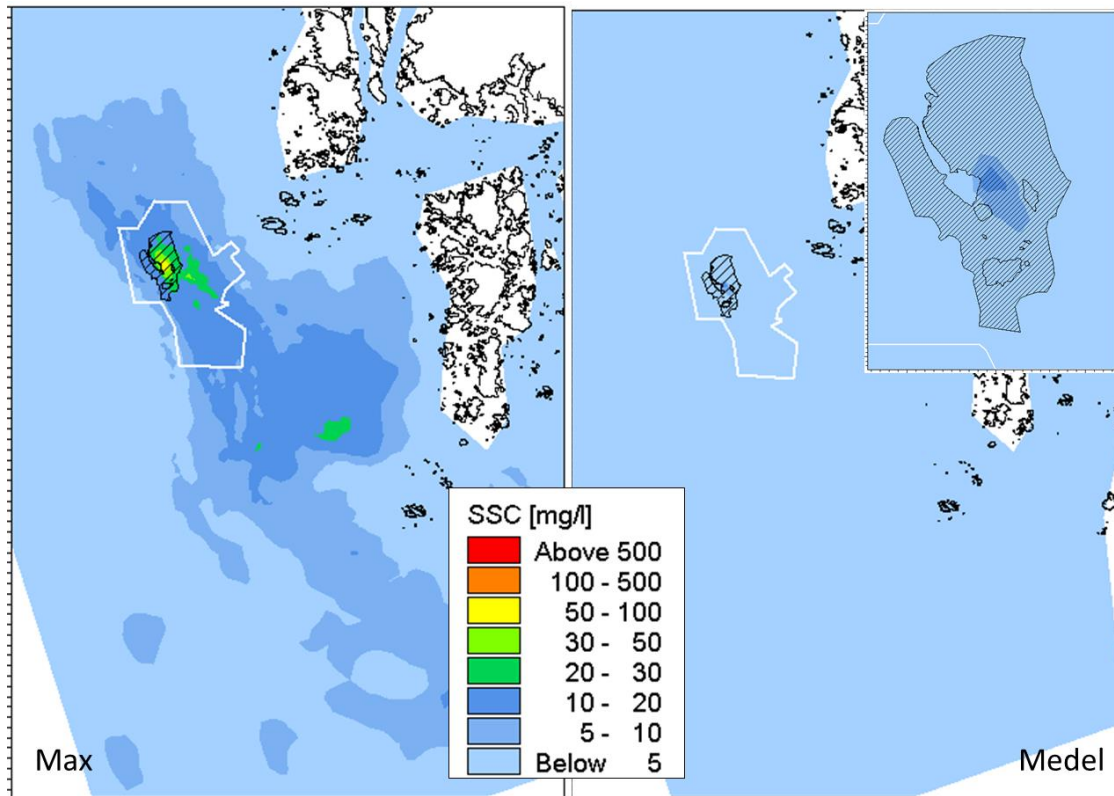
Figur 26 Simulerad varaktighet i ytan för grumlingsnivåerna 5 och 10 mg/l.

Botten

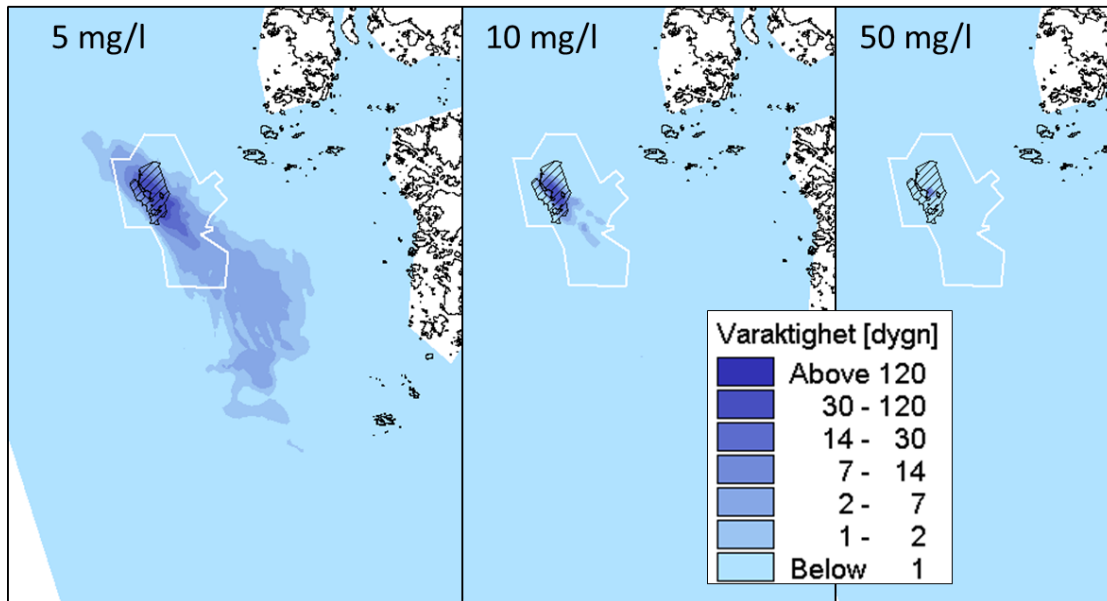
Vid botten är grumlingen högre dels beroende på att partiklarna sjunker och dels för att strömmarna är svagare och spädningen därmed är lägre. De maximala koncentrationerna och medelkoncentrationerna visas i Figur 27. I medeltal är grumlingsnivåerna mycket låga utanför dumpningsplatsen. Vid enstaka tillfällen kan högre koncentrationer förekomma utanför dumpningsplatsen och då främst sydsydost om denna. Varaktigheten (Figur 28) för koncentrationer över 50 mg/l är i storleksordningen några timmar utanför dumpningsområdet, sett över hela dumpningsperioden.

I Figur 29 visas nettodepositionen av spill efter det att dumpningen upphört. Den största depositionen per ytenhet uppstår inom dumpningsområdet. Utanför

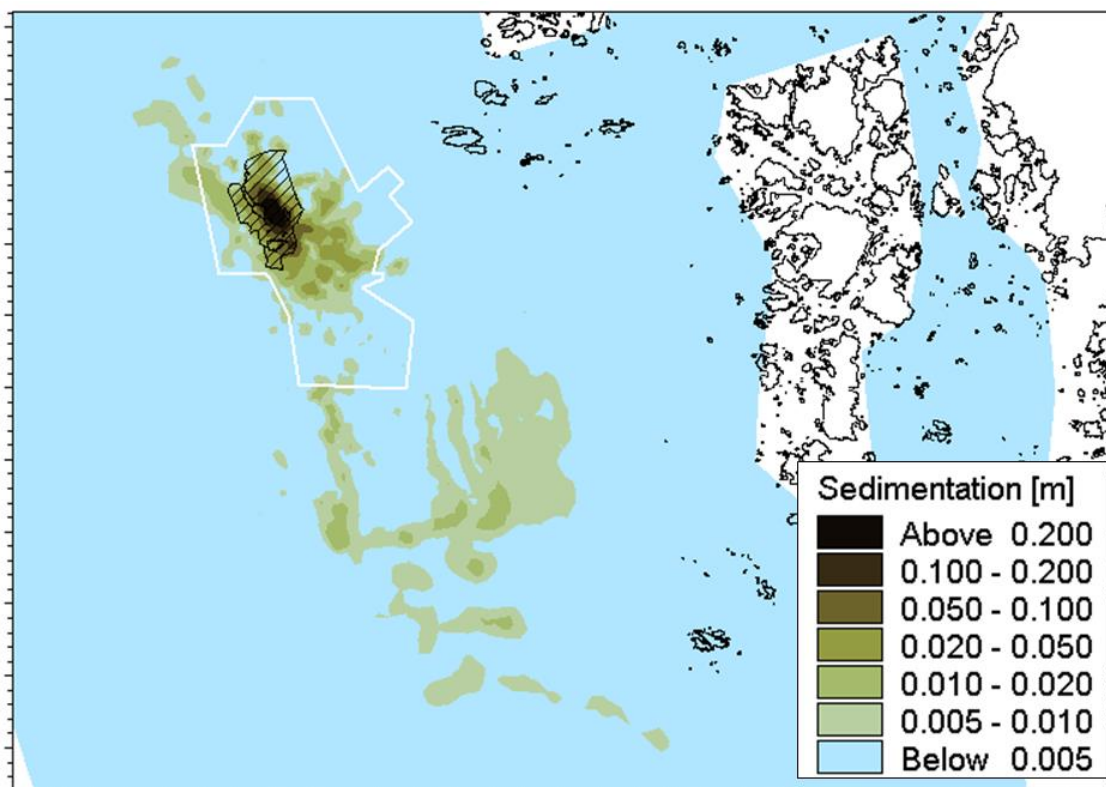
utredningsområdet (vit markering) är depositionen som mest i storleksordningen några centimeter. Eftersom bottenströmmarna oftast är sydgående är depositionen störst i denna riktning.



Figur 27 Simulerad max- och medelgrumling vid botten under dumpningsperioden



Figur 28 Simulerad varaktighet vid botten för grumlingsnivåer 5, 10 och 50 mg/l.



Figur 29 Simulerad mängd spill som sedimenterat, uttryckt i sedimenttjocklek, efter att dumpningen upphört.

6 DISKUSSION OCH SLUTSATSER

De simulerade sedimentplymerna i denna rapport visar hur sedimentspillet i samband med muddring och dumpning sprids och sedimenterar. Förutsättningarna för beräkningarna har varit de uppgifter som projektet tillhandahållit kring material och muddrings- samt dumpningsförfarande. I litteraturen finns gott om uppgifter kring spill och utgångspunkten för denna rapport har varit att inte underskatta mängden spill och risk för spridning till grunda och känsliga områden. De spillvolymerna som ansatts är därmed något konservativa, framför allt med hänsyn till det muddrade materialets förmåga att hålla ihop i större klumpar.

De huvudsakliga spridningsvägarna i ytvattnet (0-5 m) styrs av det utflödande älvvattnet i kombination med regionala väderförhållanden och strömriktningen i den Baltiska strömmen. Beräkningarna visar att spillet i ytan sprids med ytströmmarna i farlederna och späds relativt snabbt. Detta innebär att utanför farledsområdet är koncentrationer av spill relativt begränsade i ytvattnet. Medelkoncentrationen är här lägre än 5 mg/l. På större djup, i farleden, återfinns de högsta koncentrationerna och här är grumlingen i medeltal upp mot 100 mg/l i närheten av mudderverken. Den stora skillnaden i grumling mellan ytvattnet och djupvattnet beror på att strömmarna i djupvattnet är mycket svagare samt det faktum att spillet sjunker mot botten och utbredningen därmed begränsas av topografien i området. Strömmarna i djupvattnet är generellt sett motriktade strömmen i ytvattnet.

Det spill som transporteras i ytvattnet och som kan påverka grunda områden (0-5 m) sedimenterar till viss del i närområdet. Sedimentationshastigheten är dock låg, någontiondels millimeter per dygn under muddringsperioden, och är under 2 cm i hela området förutom i farlederna. I projekt Säkrare Farleder 2003-2004 muddrades motsvarande volymer som avses muddras i projekt Skandiaporten och i samma områden. När projektet var slutfört kunde man konstatera att inga tydliga förändringar i bottenmiljön pga av muddringen kunde observeras.

I samband med dumpning sjunker merparten av muddermassorna till botten. En mindre del bildar en passiv plym i vattenmassan som sprids och späds med strömmarna i området. Beräkningarna visar att grumlingen snabbt avtar i vattenmassan och i medeltal är under 1 mg/l för hela dumpningsperioden. Vid botten där strömmarna är svagare är grumlingen något högre men i medeltal under 5 mg/l för hela dumpningsperioden.

Vid sugmuddring bildas ryggar och fåror av sugmunstycket. För att effektivisera muddringen samt släta ut botten, används en s.k. "plog" som plöjer ner ryggar och fåror. "Plogen" var i projektet Säkrare Farleder en ca 20 tons balk som hänger ner från en pråm och släpas längs havsbotten. Denna process genererar en uppgrumling av sediment från botten som är svår att kvantifiera och därmed svår att beräkna spridningen från. Till skillnad från muddring sker dock plogning vid enstaka tillfällen. Vid dessa tillfällen ökar grumlingen temporärt vid botten men kan genom propellerrörelser blandas om i hela vattenmassan (jfr sugmuddring). Plogningen bedöms ske några tillfällen/vecka vilket innebär att förhöjda halter suspenderat sediment kopplat till denna aktivitet är mycket kortvariga och inte bidrar till spridning av större mängder sediment. Själva plogningen bedöms således inte påverka grumlingsbilden i stort men kan ge upphov till grumlingstoppar vid enstaka tillfällen som motsvarar nivåer vid muddring.

7 REFERENSER

Becker, J., et.al. (2015) *Estimating source terms for far field dredge plume modelling*. Journal of Environmental Management, nr 149, s. 282-293.

Dankers, P. (2002) *The behavior of fines released due to dredging. A literature review*. Faculty of Civil Engineering and Geosciences, TU Delft.

FEHY (2013). Fehmarnbelt Fixed Link EIA. *Marine Soil – Impact Assessment. Sediment Spill during Construction of the Fehmarnbelt Fixed Link*. Report No. E1TR0059 – Volume II.

Golder (2020) *Skandiahavnen – Farledsfördjupning och kajätgärder*. PM Geoteknik, Tillståndsansökan.

Havs- och vattenmyndigheten (2018) *Muddring och hantering av muddermassor - Vägledning och kunskapsunderlag för tillämpningen av 11 och 15 kap. miljöbalken*. Havs- och vattenmyndighetens rapport 2018:19, 143 sid.

Karlsson, A., Wickström, K., Ambjörn, C. (2002) *Turbiditets- och suspensionsmätningar inom projekt Säkrare Farleder*. SMHI Rapport nr. 28.

Karlsson, M., Kraufvelin, P. & Östman, Ö. (2020). *Kunskapssammanställning om effekter på fisk och skaldjur av muddring och dumpning i akvatiska miljöer. En syntes av grumlingens dos och varaktighet*. Aqua reports 2020:1. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för akvatiska resurser, Drottningholm Lysekil Öregrund. 73 s.

Kemps, H., Masini, R. (2017) *Estimating dredge source terms – a review of contemporary practice in the context of Environmental Impact Assessment in Western Australia*. Report of Theme 2 – Project 2.2, prepared for the Dredging Science Node, Western Australian Marine Science Institution (WAMSI). Perth, Western Australia, 29 pp.

Lumborg, U. (2005) *Modelling the deposition, erosion and flux of cohesive sediment through Öresund*. Journal of Marine systems, 56:179-193.

Mills, D., Kemps, H. (2016) *Generation and release of sediments by hydraulic dredging: a review*. Report of Theme 2 - Project 2.1 prepared for the Dredging Science Node, Western Australian Marine Science Institution, Perth, Western Australia. 97 pp.

Naturvårdsverket (2009) *Miljöeffekter vid muddring och dumpning*. En litteratursammanställning. Rapport 5999.

Pejrup, M., Larsen, B. (1994) *Natural sediment transport through Öresund*. Report no. 7170. DHI/LIC Joint Venture.

Scandiaconsult (2000). *Säkerhetshöjande åtgärder i farlederna till Göteborgs Hamn. PM Provmuddring*.

SGI (2011) *Transport av suspenderat material i Göta älv. Göta älvutredningen – delrapport 4*.

SGU (2019) *Muddring och deponering av muddermassor i havet*. Rekommendationer. PM 2019-12-18

Valeur, J.R., Pejrup, M. (1993) *Hydrographic investigations in Öresund*. Turbidity in Öresund. Report no. 7057. DHI/LIC Joint Venture.

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.

Van Rijn, L.C. (2007a). *Unified view of sediment transport by currents and waves*. Part I: Initiation of Motion, Bed Roughness and Bed-Load Transport. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 133, No 6, 649-667.

Van Rijn, L.C. (2007b). *Unified view of sediment transport by currents and waves*. Part II: Suspended Transport. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 133, No. 6, 668-689.

Van Rijn, L.C. (2019) *Turbidity due to dredging and dumping of sediments*. Notes.

Whitehouse, R., Soulsby, R., Roberts, W., Mitchener, H. (2000). *Dynamics of Estuarine Muds*. HR Wallingford.