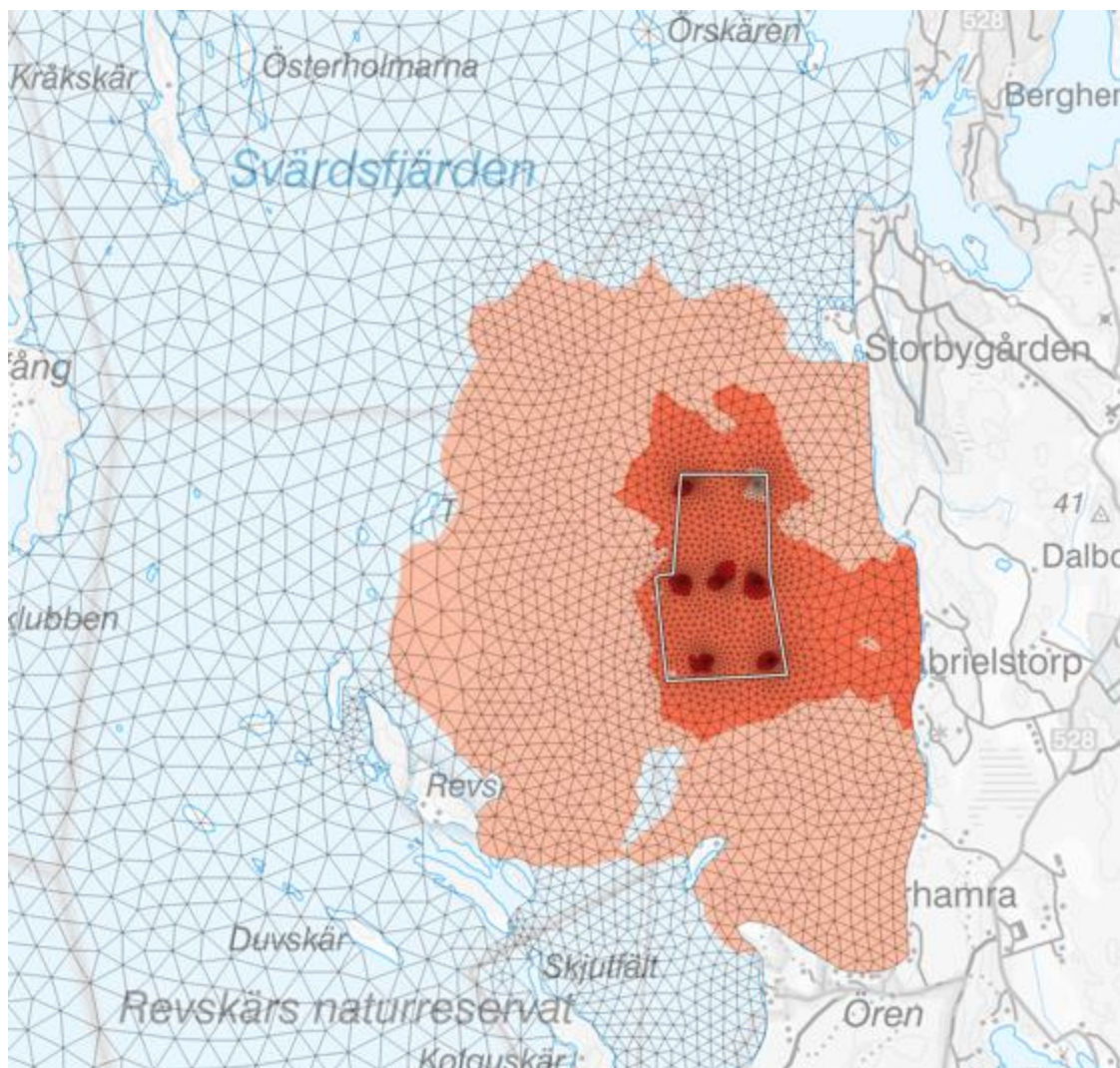


Beräkning av strömmar och sedimentspridning för Landsortsfarleden

Utredning av de dumpade massornas
påverkan på ackumulations-
förhållandena samt beräkning av
sedimentspridning från
dumpningsarbeten



Ändringsförteckning

Ver	Datum	Ändringsbeskrivning	Granskad	Godkänd av
0.1	2024-04-12	Utkast för extern granskning	Carsten Staub	Joakim Holmbom Tisell
0.2	2024-05-02	Reviderad rapport efter Sjöfartsverkets granskning	Carsten Staub	Joakim Holmbom Tisell
0.3	2024-05-08	Reviderad rapport efter Sjöfartsverkets granskning	Carsten Staub	Joakim Holmbom Tisell
1.0	2024-05-21	Slutgiltig version	Carsten Staub	Joakim Holmbom Tisell

Sweco Sverige AB

Uppdrag

Uppdragsnummer

Kund

Upprättad av

Granskad av

Godkänd av

Datum

Dokumentreferens

RegNo 556767-9849

Landsortsfarleden_Sjöfartsverket

30059542

Sjöfartsverket

Jurjen de Jong & Joakim Holmbom

Tisell

Carsten Staub

Joakim Holmbom Tisell

2024-05-21

Modellutredning dumpningsområdet Landsortsfarleden 2024-05-21.docx

Innehållsförteckning

1	Introduktion.....	5
1.1	Inledning.....	5
1.2	Syfte.....	5
1.3	Underlag.....	6
2	Bakgrund.....	6
2.1	Områdesbeskrivning Svärdsfjärden.....	6
2.2	Sedimentegenskaper.....	10
2.2.1	Muddermassor.....	10
2.2.2	Befintliga bottensediment i dumpningsområdet.....	11
3	Metodik.....	11
3.1	Programvara.....	11
3.2	Modellkonfiguration.....	11
3.3	Modellering av de dumpade massornas påverkan på ackumulationsbottenförhållandena.....	13
3.3.1	Definitioner ackumulationsbotten.....	13
3.3.2	Förutsättningar för erosion och transport av sedimentpartiklar.....	14
3.3.3	Effekt av vågor och fartygstrafik.....	15
3.3.4	De dumpade massornas utfyllning av botten.....	16
3.3.5	Beräkningsscenario.....	17
3.4	Modellering av sedimentspridning.....	17
3.4.1	Dumpningsmetod.....	17
3.4.2	Förutsättningar för sedimentspridning.....	19
3.4.3	Beräkningsscenario.....	20
4	Resultat.....	20
4.1	Bedömning av de dumpade massornas påverkan på ackumulationsbottenförhållandena.....	20
4.2	Sedimentspridningsberäkningar.....	24
4.2.1	Suspenderade sediment.....	25
4.2.2	Sedimentation.....	31
5	Slutsatser och diskussion.....	32
5.1	Bedömning av de dumpade massornas påverkan på ackumulationsbottenförhållandena.....	32
5.2	Spridning av suspenderade sediment och sedimentation från sedimentspill under dumpningsperioden.....	32
	Referenser.....	33
	Bilaga A: Kornstorleksdiagram.....	34

Muddringsmassor	34
Nuvarande material i dumpningsområdet	35
Bilaga B: Resultat beräkningsscenario 2.....	37

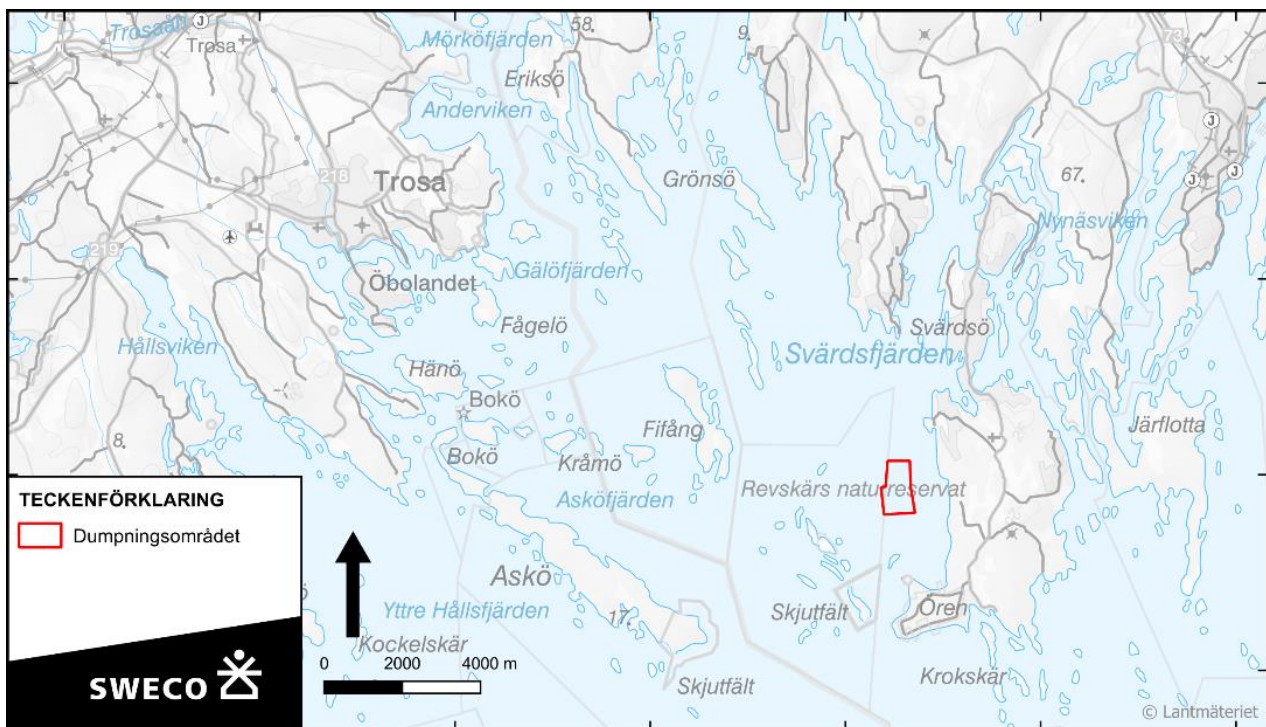
1 Introduktion

1.1 Inledning

Sjöfartsverket genomför en farledsutredning i syfte att öka säkerhet, kapacitet och tillgänglighet i farleden mellan Södertälje och Landsort. Åtgärderna omfattar bland annat muddring. Rena muddermassor planeras att dumpas i ett lämpligt område i havet.

Från den utförda utredningen om ackumulationsförhållandena för flera potentiella dumpningsområden (Sweco, 2024), framgår det att ett område uppfyller kriterierna för lämpliga dumpningsområden i avseende på ackumulationsbottenförhållanden (Figur 1). Detta område har studerats vidare med hjälp av en hydraulisk beräkningsmodell i 3D, vilken beskrivs i denna rapport. Området benämns i denna rapport som dumpningsområdet. Dumpningsområdet benämns dumpningsområde 2 av Sjöfartsverket.

I rapporten visas enbart öppen djupdata från EMODnet i figurer. Emellertid har även mer högupplöst data använts för beräkningarna.



Figur 1: Dumpningsområdet som studeras i denna rapport.

1.2 Syfte

I denna rapport studeras dumpningens effekter ur två aspekter:

- De dumpade massornas påverkan på ackumulationsbottenförhållandena i dumpningsområdet.
- Spridning av suspenderade sediment och sedimentation från sedimentspill ifrån dumpningen.

Studien kompletterar en tidigare studie av sedimentspridning från planerad muddring (DHI, 2019).

Syftet med studien är att utgöra underlag för bedömning av verksamhetens miljöpåverkan.

1.3 Underlag

Följande underlag används i denna rapport.

Batymetri:

- EMODnet 2022 (gitterupplösning på 1/16 * 1/16 bågminuter)¹
- Mätningar Sjöfartsverket runt undersökningsområde 2, 3 och 12.
- Mätningar inom undersökningsområde 2 och 3 (Sweco, 2024)

Tidserier över meteorologiska förhållanden (Figur 3):

- SMHI meteorologiska och oceanografiska mätningar
- SMHI Sharkweb mätningar (skiktning i temperatur och salinitet)
- Sjöfartsverkets vindmätningar

Modellresultaten:

- Hydrologisk avrinning från modell SMHI S-HYPE

Kornstorleksdiagram:

- Kornstorleksdiagram för muddringsområden (Bilaga A)
- Kornstorleksdiagram för dumpningsområdet (Bilaga A)

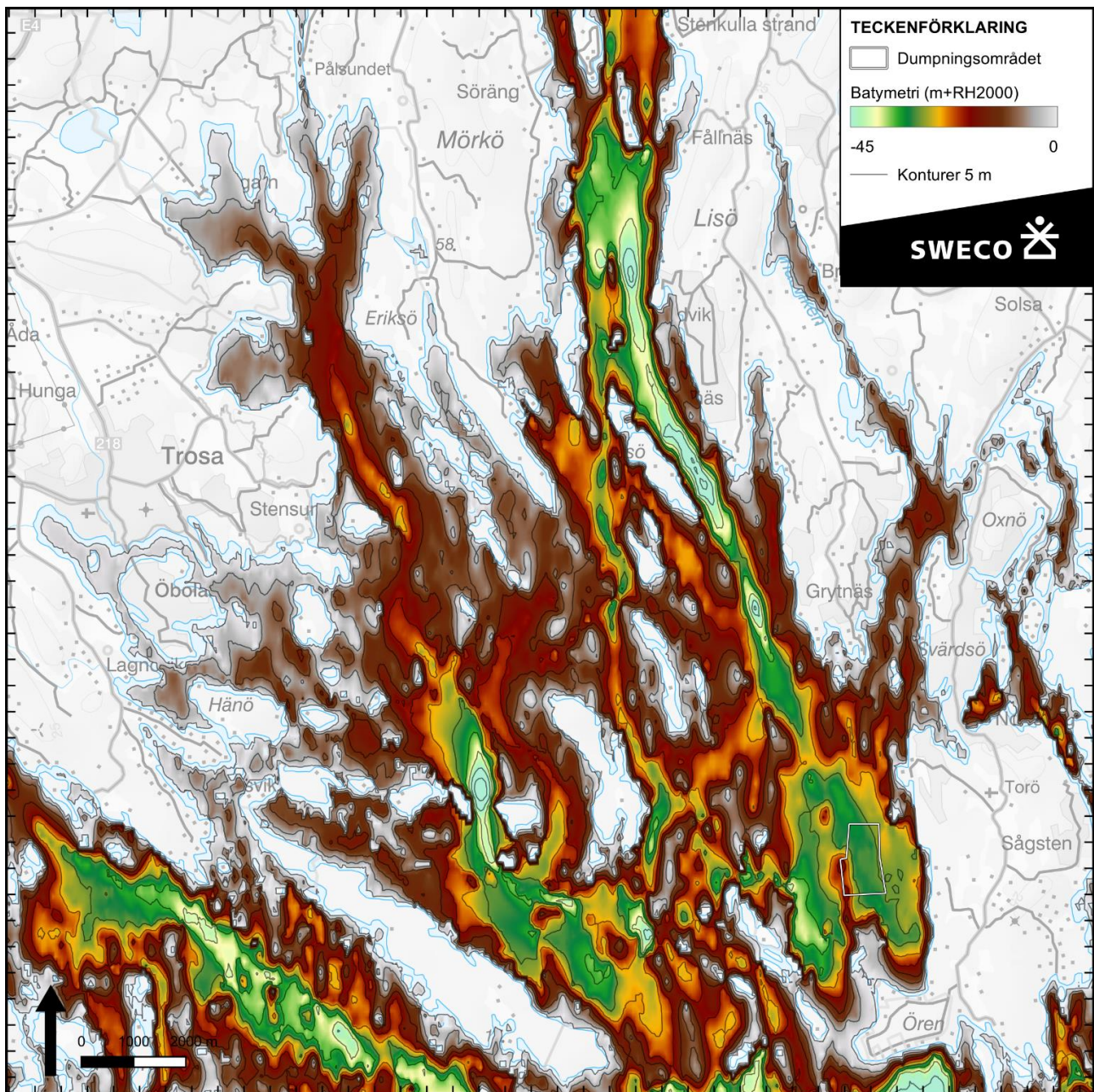
2 Bakgrund

2.1 Områdesbeskrivning Svärdsfjärden

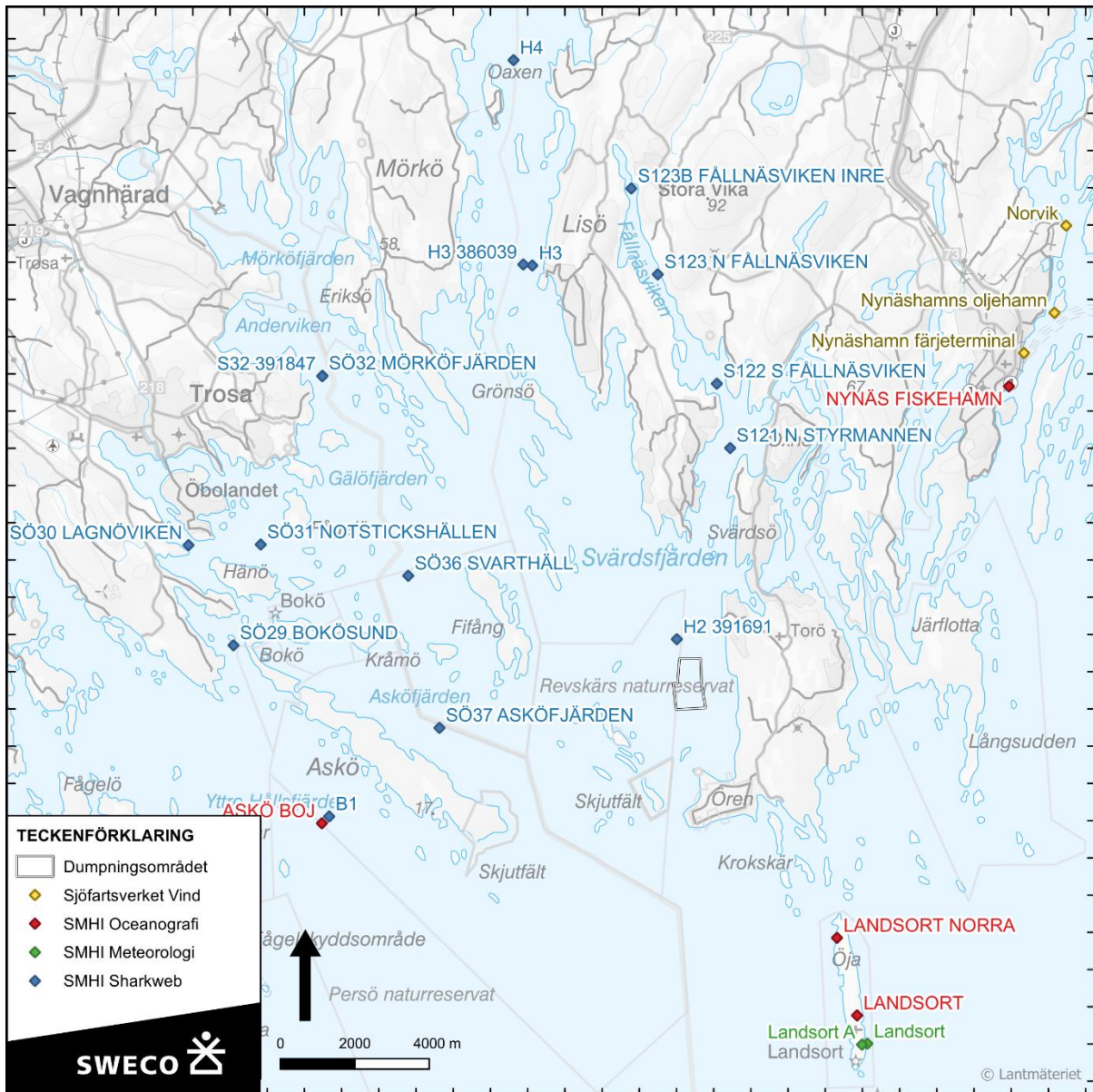
Det aktuella dumpningsområdet är beläget i en avskild del av Östersjön kallad Svärdsfjärden, som är en del av skärgården söder om Södertälje (Figur 2). Öster om dumpningsområdet sträcker sig Södertörns kustlinje, medan skärgården i väst och söder erbjuder skydd mot det öppna havet. De smala sunden mellan öarna är grunda (djup mindre än 5 m) och skapar en naturlig tröskel som begränsar vattenutbytet. Norr om dumpningsområdet ansluter djupare vatten som även ingår i Landsortsfarleden.

Meteorologiska och oceanografiska mätningar har analyserats för att förstå de processerna i området som påverkar vattenströmningen. En sammanställning av alla relevanta mätstationer presenteras i Figur 3.

¹ <https://emodnet.ec.europa.eu/en/bathymetry>

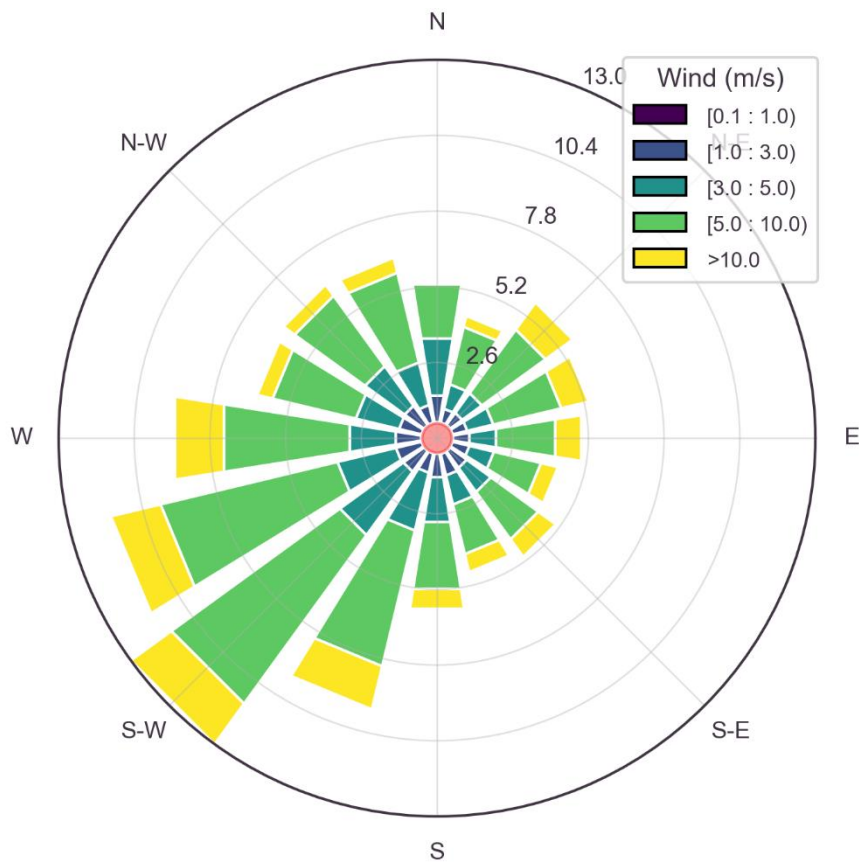


Figur 2: Batymetri (bottenivå) i berört område baserat på EMODnet med 100 m upplösning.



Figur 3: Mätningar runt projektområdet.

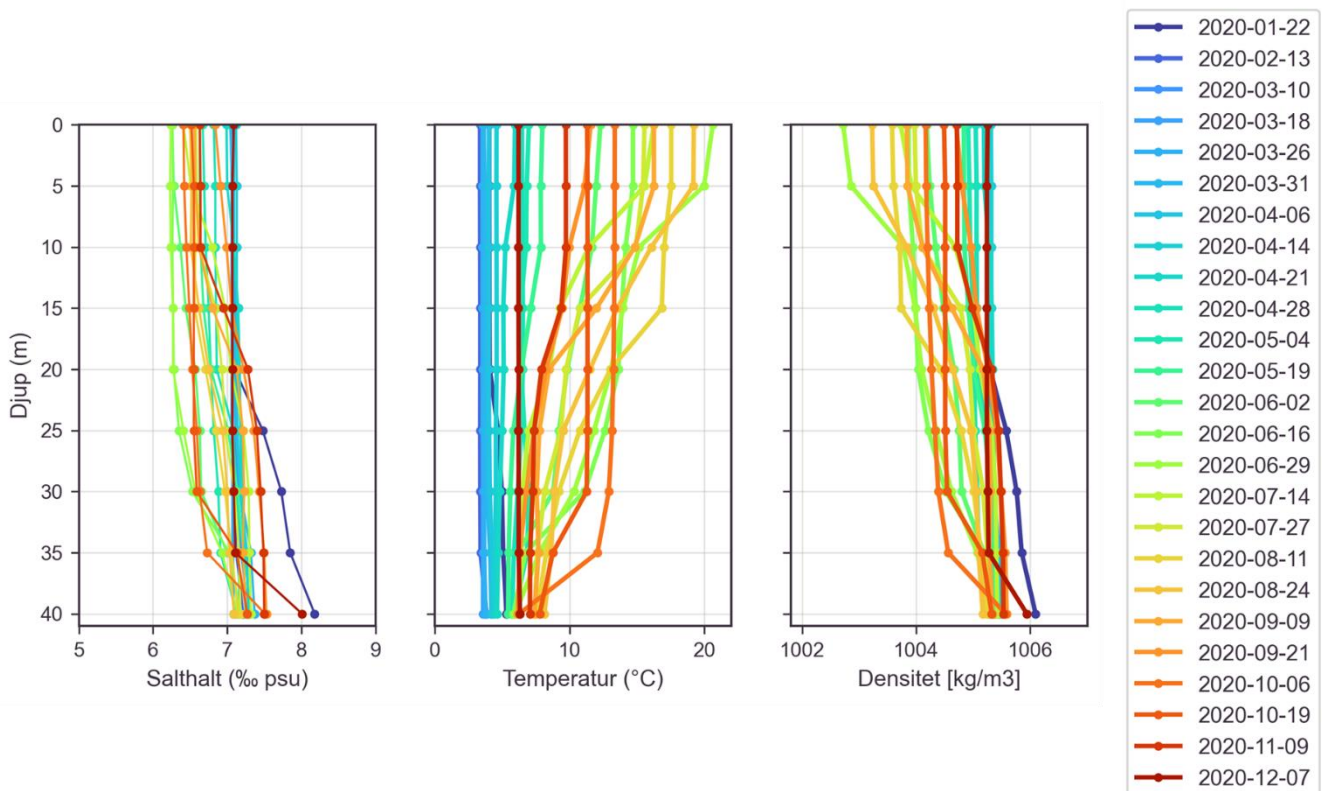
Den närmaste stationen för vindmätningar är Landsort (SMHI), och ytterligare stationer finns runt Nynäshamn. Eftersom stationerna vid Nynäshamn är mer skyddade från västliga vindar jämfört med projektområdet, används mätningar från Landsort som en konservativ uppskattning. En vindros baserad på mätningar från perioden 1995 till 2023 visas i Figur 4, vilken indikerar att den dominerande vindriktningen är sydväst. Den starkaste vindhastigheten under denna period uppmättes till 26 m/s den 17 november 1995.



Figur 4: Vindros av mätningar 1995 – 2023 vid SMHI-station Landsort

Inom området som den hydrauliska modellen omfattar har flera sötvatteninflöden identifierats. Enligt skattningar från SMHI:s hydrologiska modell S-HYPE är Trosaån det största vattendraget som mynnar i modellområdet med ett genomsnittligt flöde på ca 1 m³/s under sommaren och ca 5 m³/s under vintern. Mindre vattendrag i närliggande avrinningsområden bidrar med maximala flöden på mellan 0,2 och 1 m³/s.

Temperatur- och salinitetsmätningar genomförs kontinuerligt vid station B1, belägen strax söder om Askö. Som exempel på skiktningar presenteras data från 2020 i Figur 5. Figuren indikerar att saliniteten i området endast varierar marginellt under året, med ett genomsnittligt djupvärde omkring 7 promille. Temperaturvariationerna är däremot betydligt större. Vid ytan kan temperaturen variera från 2 till 21 °C, medan temperaturen vid botten aldrig överstiger 8 °C. En tydlig termoklin, där vattentemperaturen ändras snabbt med djupet, börjar utvecklas i maj vid cirka -5 m djup. Denna termoklin når sin största utsträckning i augusti vid ungefär -20 m djup. I september minskar termoklinens intensitet och djupet där den förekommer sjunker till omkring -30 m. Temperatur och salinitet tillsammans ger en djupvariation i densitet som styr skiktningen i området.



Figur 5: Skiktning i densitet till följd av salinitet och temperatur vid station B1 (söder om Askö) under 2020.

2.2 Sedimentegenskaper

2.2.1 Muddermassor

Den totala volymen muddermassorna som planeras att dumpas är ca 1,1 miljoner m³. Massorna har av Sjöfartsverket indelats i 3 grupper:

1. Löst material och kohesionsmaterial (41 procent),
2. friktionsmaterial (51 procent)
3. och berg (8 procent).

Representativa kornstorleksdiagram för dessa materialtyper finns i bilaga A.

Vid dumpning kommer endast finsediment (mindre än 125 µm) att vara i suspension tillräckligt länge för att riskera spridas. Grövre sediment faller så pass snabbt ner till botten att spridningen blir försumbar. Sedimenten mindre än 125 µm har delats in i fyra kategorier baserat på partikelstorlek, från lera till finsand, vilka specificeras i Tabell 1. Procentandelarna av sediment i tabellen avser andelen finsediment, vilket utgör 42 procent av den totala volymen muddringsmassor (1,1 miljoner m³).

Trots att det dumpade materialet innehåller en stor andel lera antas dessa partiklar bete sig som icke-kohesiva sediment, vilket är ett konservativt antagande ur spridningssynpunkt (dvs. lera faller inte som stora klumpar direkt till botten utan sprids som suspenderade sedimentpartiklar).

Tabell 1: Sedimentsammansättning finsediment, vilka ingår i sedimentspridningsberäkningen.

	Ler och Finsilt	Mellansilt	Grovsilt	Finsand
Diameter (μm)	< 6,3	6,3 – 20	20 – 63	63 – 125
Fallhastighet (mm/s)	0,0088	0,15	1,5	7,9
Sedimentsammansättning finsediment (procent)	51,0	23,2	22,4	3,4

2.2.2 Befintliga bottensediment i dumpningsområdet

Befintliga sediment i dumpningsområdet består i huvudsak av silt och lera. Kornstorleksdiagram för 8 provpunkter finns tillgängliga i bilaga A. I de 8 provpunkterna varierar den genomsnittliga diametern (D_{50}) mellan 2 och 5 μm .

3 Metodik

3.1 Programvara

För beräkningar av strömningsmönster och strömhastigheter har den numeriska modellen TELEMAC 3D använts (open TELEMAC-MASCARET, 2023).

Modellen löser de så kallade Navier-Stokes ekvationerna över ett tredimensionellt beräkningsnät som representerar vattenvolymen.

Beräkningsnätet består av ett antal celler och för varje cell i beräkningsnätet simuleras vattennivå, strömhastighet, strömriktning, turbulens, salthalt, vattentemperatur samt koncentration av fördefinierade ämnen utifrån meteorologiska, hydrologiska och oceanografiska drivdata (indata).

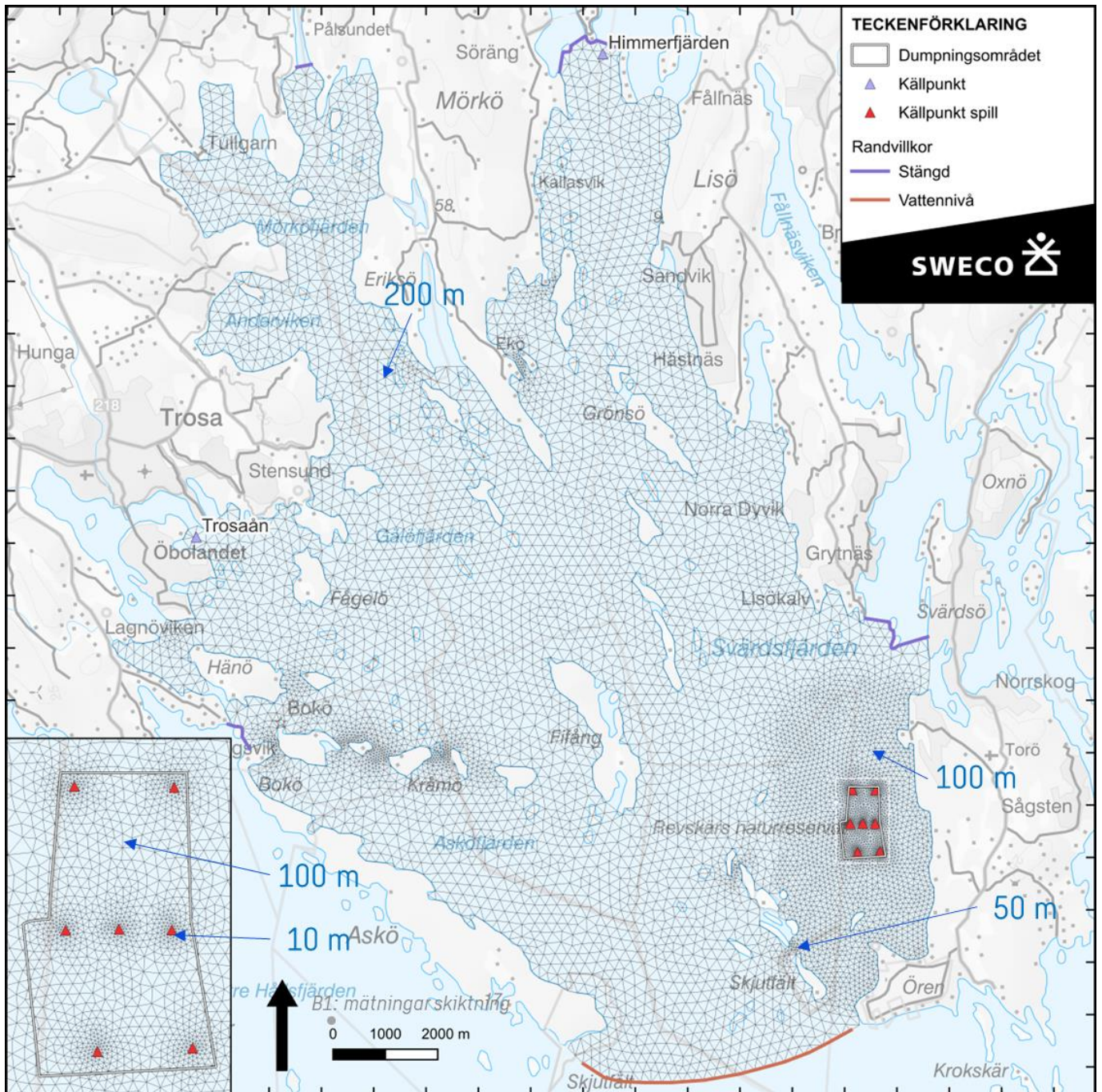
En tredimensionell modell kan, till skillnad från en tvådimensionell, ta hänsyn till skiktning i vattenkolumnen samt vertikala strömmar, vilka är av stor betydelse i Svärdsfjärden.

3.2 Modellkonfiguration

Modellen i Telemac är utformad för att beräkna strömningsmönster inom dumpningsområdet. Figur 6 visar en översikt av hela modellen. Modellens södra rand är belägen direkt söder om Askö, medan den norra randen är placerad vid Oaxen. Resten av modellens rand utgörs i huvudsak av kustlinjen, med undantag för vissa grunda områden nära Trosa och Svärdsö.

Endast vid den södra gränsen tillämpas randvillkor för skiktning och vattennivå, vilket baseras på observationer. Alla andra randvillkor är inställda så att de simulerar en stängd gräns, medan sötvatteninflöden vid Trosaån och Himmerfjärden modelleras som inflöden vid punktkällor.

Inom Svärdsfjärden har modellen en upplösning på 100 m. För övriga delar av modellen används en grövre upplösning på 200 m, förutom vid vissa trånga passager mellan öarna där en finare upplösning på ca 50 m används.



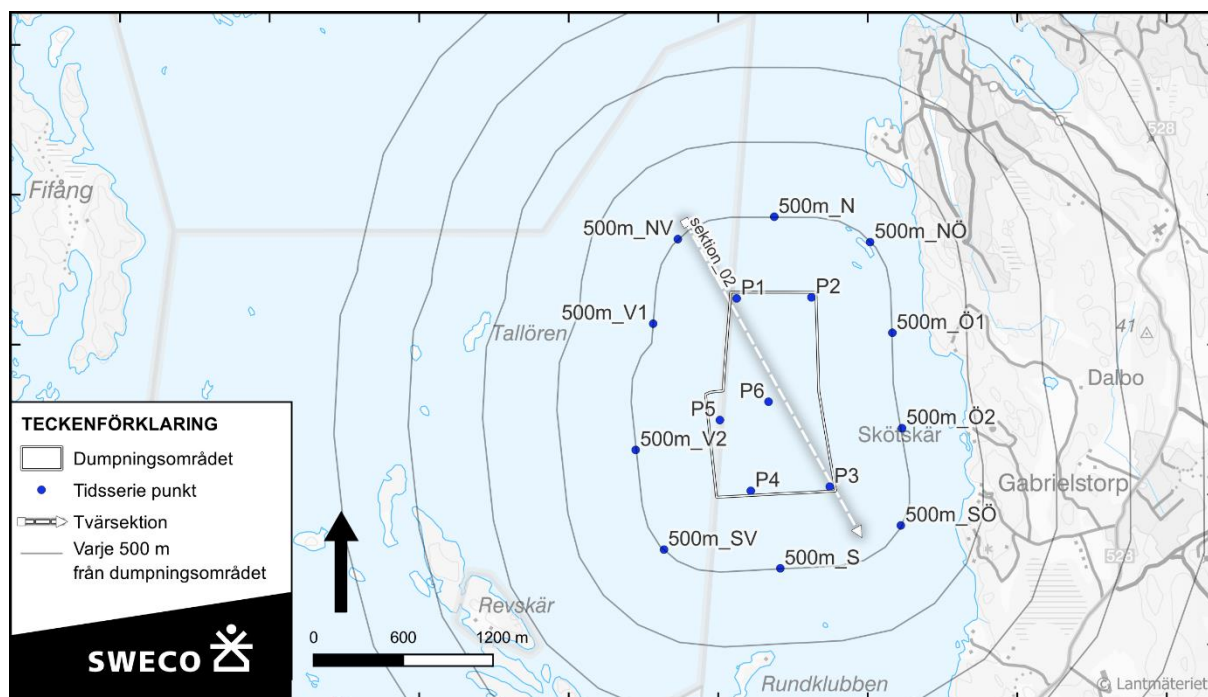
Figur 6: Modellkonfiguration: batymetri, modellupplösning, randvillkor, inflöde i källpunkter. Den förfinade upplösningen på 10 m runt källpunkterna för spill används bara i modellering av sedimentspridning.

I huvudsak används samma modell för bägge studierna, dock finns vissa skillnader i modellen för de två studierna:

- Simuleringarna för utvärdering av ackumulationsbotten använder en modell där skiktningen är stabil, vilket förväntas generera högst hastigheter vid botten. Som ett konservativt antagande antas samma skiktning bestå igenom hela simuleringsperioden.

- Simuleringarna för att utvärdera spridningen av sediment från spill använder en dynamisk uppdatering av skiktningen, både vid modellens rand vid Östersjön och i utbytet med atmosfären. I områden där sedimentutsläpp modelleras ökas modellens upplösning till 10 m.

Redovisning av modellresultaten sker i kartor, tvärsektionen och med tidsserier för några utvalda punkter placerade 500 m från dumpningsområdet (Figur 7).



Figur 7: Lokalisering av punkter och tvärsektion för redovisning av modellresultat i kapitel 4.

3.3 Modellering av de dumpade massornas påverkan på ackumulationsbottenförhållandena

3.3.1 Definitioner ackumulationsbotten

Som diskuterats i utredningen av ackumulationsområden (Sweco, 2024) finns det flera tillgängliga definitioner av vad som utgör en ackumulationsbotten. Centralt är att det inom en ackumulationsbotten förekommer en obruten sedimentation av finkorniga sediment, lerpartiklar samt i viss mån siltpartiklar, och att sådan sedimentation förekommit under lång tid.

Sveriges geologiska undersökning (SGU) definierar ackumulationsbotten enligt nedan:

"Varaktig recent (nutida) sedimentation – Område inom vilket en väl etablerad, kontinuerlig och fortgående ackumulation av finkorniga sediment och organiskt material förekommer så att sedimenten består av lera, gyttjelera, lergyttja eller gyttja (innehåll av silt kan också förekomma)."

Samt:

”Ett havsbottenområde inom vilket en ännu aktiv ackumulation av lera, gyttjeler, lerygttja, eller gyttja (innehåll av silt kan förekomma) kan bedömas ha fortgått obruten i mer än 150 år.”

Naturvårdsverket (NV) definierar ackumulationsbotten enligt nedan:

”Områden där finmaterial med en falldiameter mindre än 0,006 mm kontinuerligt kan sedimentera, och inte sprids vidare. Sedimentens översta centimeter består av löst finmaterial med hög vattenhalt och hög halt av organiskt material. Ackumulationsbottnar finns på djupare belägna bottnar med liten lutning så att utglidning inte förekommer. Om bottenlutningen överstiger ca 5 procent (det vill säga 5 m höjdskillnad på 100 m längdskillnad), kan inte finmaterial ligga stabilt.”

3.3.2 Förutsättningar för erosion och transport av sedimentpartiklar

De olika definitionerna av ackumulationsbotten i föregående avsnitt (3.3.1) indikerar att en kontinuerlig ackumulation måste ha skett under en lång tidsperiod. Definitionerna lämnar utrymme för tolkning om sediment kan förflytta sig under kortare perioder, som under en kraftig vinterstorm.

I denna rapport tillämpas definitionen att en viss rörelse av sediment är tillåten, men att detta endast får ske under extrema förhållanden och således bara sker under en mindre del av tiden.

Rörelse av sediment inträffar i det ögonblick då flödeskrafterna överstiger de gravitationella och sammanhållande krafterna som verkar på varje enskilt sedimentkorn. Flödeskrafterna beskrivs som bottenskjuvspänningen, och gränsvärdet för rörelse som den kritiska bottenskjuvspänningen. Bottenskjuvspänningen (τ) beräknas av Telemac, som en funktion av friktionshastigheten (u_*) och vattnets densitet (ρ).

$$\tau = -\rho u_*^2$$

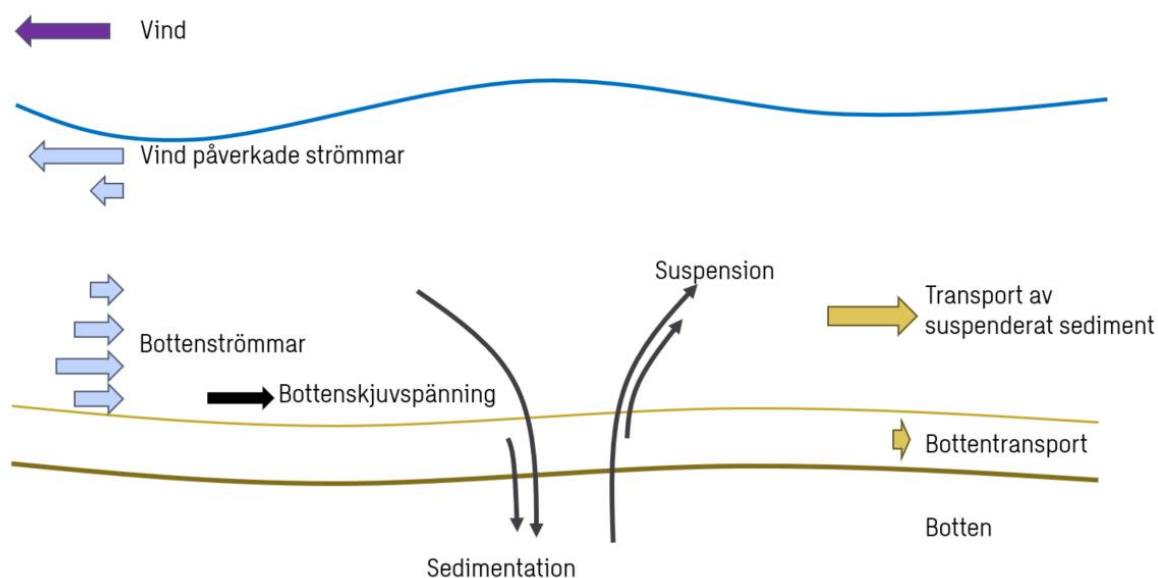
Den kritiska bottenskjuvspänningen uppskattas baserat på det nuvarande bottenmaterialet i området respektive det som dumpats, vilket i bägge fall utgörs av fint material (lera). Bottenmaterialet kan antas vara okonsoliderat eller svagt konsoliderat eftersom det antingen kontinuerligt ackumuleras eller inte har haft tid att konsolidera. Även om lerfraktionen är större än 10 procent, kommer det okonsoliderade bottenmaterialet att bete sig som icke-sammanhängande sediment. Detta förväntas ha en kritisk bottenskjuvspänning mellan 0,05 och 0,3 N/m² (Van Rijn, 2007), vilket medför en första rörelse som resulterar i att sediment rullar längs botten. Processen benämns som bottentransport (Figur 8). Om flödeshastigheten fortsätter att öka kommer sedimentet att lyftas upp i suspension, vilket förväntas ske vid ungefär dubbelt så stor kritisk bottenskjuvspänning (Van Rijn, 2013).

För det nuvarande bottenmaterialet varierar den genomsnittliga diametern (D50) mellan 2 och 5 μm (Bilaga A). När det gäller muddermassorna som planeras att dumpas antas finare material (gruppen *löst material och kohesionsmaterial*, se avsnitt 2.2.1) som är mest erosionskänsligt kunna hamna överst efter dumpningen. Den genomsnittliga diametern (D50) för gruppen löst material och kohesionsmaterial är ca 6 μm medan D50 är betydligt högre (ca 0,5 mm) för gruppen *friktionsmaterial* (Bilaga A).

Initiering av bottentransport för det befintliga bottenmaterialet antas ske när bottenskjuvspänningen överskrider 0,05 N/m², medan detta gränsvärde ligger

lite högre, men fortfarande omkring $0,05 \text{ N/m}^2$, för det dumpade materialet (antaget att de finare massorna hamnar överst). Den första suspensionen sker dock inte förrän bottenskjuvspänningen överstiger ca $0,10 \text{ N/m}^2$ för bägge material.

Slutsatsen är att använda en bottenskjuvspänning på $0,10 \text{ N/m}^2$ med en minsta period på 3 timmar som gränsvärde för när bottensediment riskerar att erodera i analyserna i denna studie. Överskridande av detta kriterium antas aldrig få inträffa under de förhållanden som inkluderas i denna studie, men kan fortfarande ske under mer extrema och sällsynta förhållanden.



Figur 8: Transport av sediment genom bottentransport och suspenderat material.

3.3.3 Effekt av vågor och fartygstrafik

Utöver påverkan från strömning, kan ackumulationsbotten också påverkas av stormvågor. Den totala bottenskjuvspänningen kan definieras som en kombination av skjuvspänning från strömning och vågor.

För att vågornas rörelse ska nå ner till botten behöver vattendjupet vara mindre än ca halva våglängden, på djupare vatten når vågornas rörelse inte ner till botten (Svedrup & Armbrust, 2009). I dumpningsområdet är djupet ca 30 m, vilket innebär att för vågor som är längre än ca 60 m kan vågens rörelse nå ner till botten. Så pass stora vindgenererade vågor bedöms inte förekomma i dumpningsområdet eftersom området ligger skyddat från vågor inkommande från öppet hav.

För att vindgenererade vågor ska bli så pass stora att de kan påverka på 30 m djup behöver blåssträckan (fetch) vara i storleksordningen av flera mil (Groen & Dorrestein, 1976). Även om de längsta blåssträckorna i Svärdsfjärden är flera kilometer och vågorna bli relativt höga är det inte tillräckligt för att vågrörelsen ska nå ner till 30 m djup.

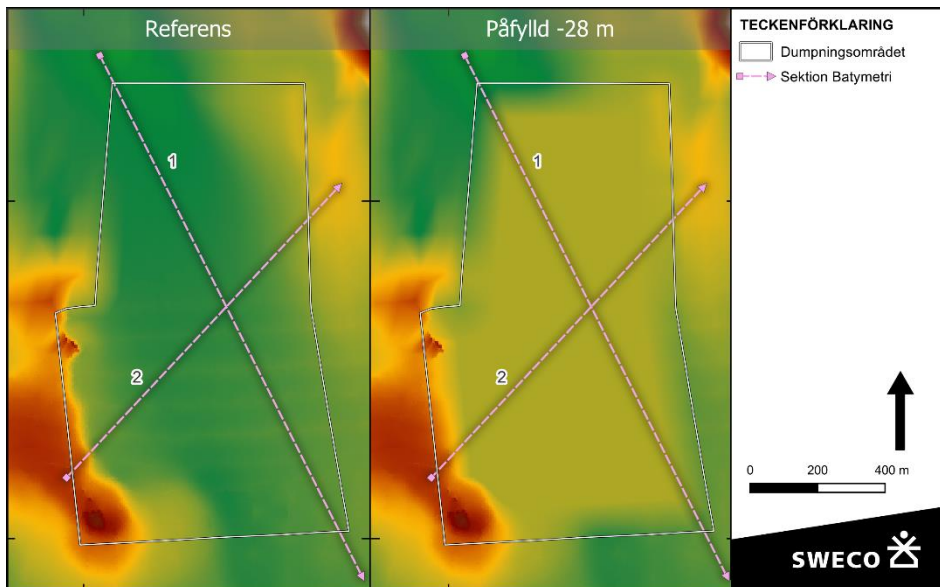
DHI har tidigare utrett påverkan från propellerströmmar och fartygsinducerade vågor för Landsortsfarleden (DHI, 2018). Bottenområden med större djup

(>15 m) är relativt okänsliga för påverkan från fartygstrafik och på djup större än 20 m bedöms påverkan vara försumbar. Eftersom djupet är större än 20 m i dumpningsområdet bedöms ingen påverkan på bottensedimenten från fartygstrafik där.

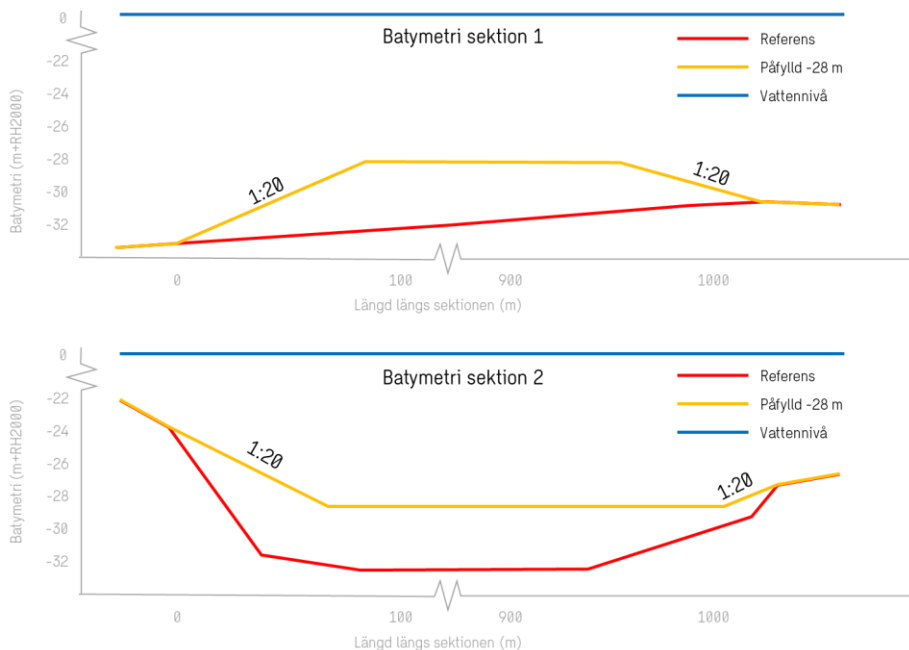
3.3.4 De dumpade massornas utfyllning av botten

Dumpningen planeras så att utfyllnaden på botten sker till en jämn nivå, vilket innebär att mest massor dumpas i de djupaste delarna av området. Ett scenario har utretts där dumpningsområdet fylls till en jämn nivå (-28 m) som med marginal inrymmer de massor som planeras att dumpas (Figur 9 och Figur 10). Detta innebär en maximal upphöjning av botten på 5 m i de djupaste delarna i dumpningsområdet. Vid kanten antas en maximal lutning av 1:20 för att få tillräcklig stabilitet. Upphöjningen skapar en volym av 2,3 miljoner m³. Det motsvarar en muddringsvolym av 1,8 miljoner tfm³ (teoretiskt fasta massor, antaget en svällningsfaktor på 1,3).

Modellerat scenario uppfyller med marginal erforderlig volym på ca 1,1 miljoner tfm³ inom projektet Landsortsfarleden.



Figur 9: Utfyllnad av dumpningsområdet före (till vänster) och efter dumpning (till höger).



Figur 10: Jämförelse av botten i dumpningsområdet innan (röd linje) och efter dumpning med fyllning till -28 m (gula linje). Observera att skalan är förställd så att utfyllnaden syns tydligare, vilket även medför att lutningarna ser betydligt brantare ut än vad de egentligen är.

3.3.5 Beräkningsscenario

För vind- och temperaturdata i modellberäkningen används en period från juli 2020 till december 2020. Perioden är lång nog för att simulera bottenhastigheter under olika säsonger. Modellperioden har valts utifrån att den bedöms vara representativ i avseende på vind, och temperaturskiktning samt att tillgängligheten av underlag under perioden är god. Under perioden finns en normal variation av vindförhållanden och inga extrema händelser.

3.4 Modellering av sedimentspridning

3.4.1 Dumpningsmetod

Beräknat scenario representerar ett värsta fall för höga sedimentkoncentrationer och baseras på intensiv dumpningsaktivitet över en längre tidsperiod. Muddring antas pågå parallellt med ett sugmudderverk och ett enskopeverk med pråm (Figur 11). Var fjärde timme dumpas sediment från båda muddringsredskapen samtidigt. Dumpningen sker genom bottentömning av sugmudderverket samt med en splitpråm/bottentömmande pråm inom dumpningsområdet där varje tömning uppskattas bestå av ca 4000 m³ från sugmudderverket och ca 750 m³ från pråmen. För modellberäkningarna antas att dumpningen sker dygnet runt, vilket innebär att det sker 6 dumpningar per dag och att allt material (1,1 miljoner m³) kommer att ha dumpats efter 40 dagar.

I verkligheten kommer dumpningsarbetet troligen bli mera utdraget, vilket i så fall innebär att koncentrationerna suspenderade sediment blir lägre.

Spillet från dumpningen ansätts i modellen på utspridda punkter inom dumpningsområdet (Figur 6) med ett avstånd på 50 m från dumpningsområdets gränser.



Figur 11: Metoder av muddring och dumpning. Bilder från Boskalis och (Becker, 2015)

Vid varje dumpningstillfälle faller merparten av sedimentet direkt till botten. En mindre del av sedimentet förblir dock som suspenderade partiklar i vattnet. Denna fraktion kallas för spill och dess andel av det totala fina sedimentet har definierats utifrån litteratur och empiriska mätningar (Figur 12). För dumpning med splitpråm används värden på spill mellan 1 procent och 5 procent i litteraturen (USCA, 2015) (Truitt, 1988) (Becker, 2015). Ett konservativt antagande på 5 procent spill används för att säkerställa en försiktig bedömning, vilket innebär att 5 procent av finmaterialet i de dumpade massorna (42 procent av 1,1 miljoner m³, se avsnitt 2.2.1) ansätts som suspenderade sediment i modellberäkningen. Varje dumpningstillfälle antas pågå under 10 minuter (Becker, 2015). Detta resulterar i ett momentant spill av suspenderade sediment på 260 kg/s under 10 minuter, vilket ansätts i modellen.

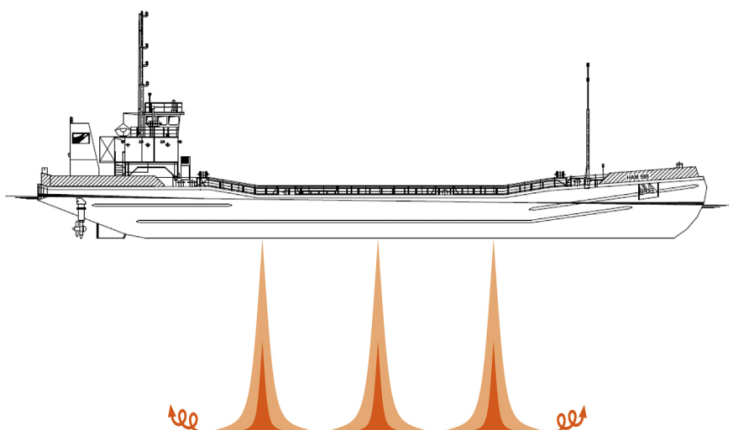


Fig. 9. Sources of a dredge plume for a Split Hopper Barge(SHB).

Figur 12: Källa till en muddringsplym för en splitpråm med botten tömning (Becker, 2015).

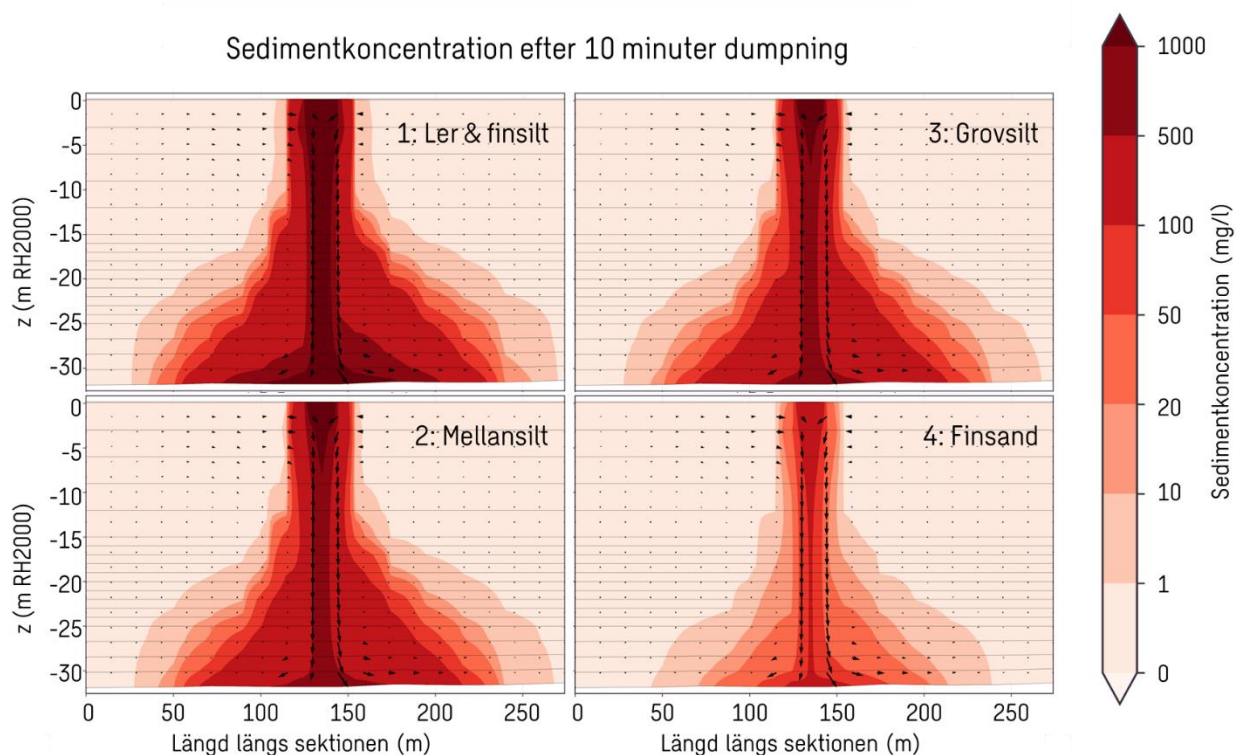
3.4.2 Förutsättningar för sedimentspridning

Av allt dumpat sediment antas endast spillandelen (5 procent av de dumpade massorna) suspenderas. Detta sediment transporteras av vinddrivna strömmar genom det modellerade området.

Som en indikativ illustration av hur denna sedimentspridning startar visas koncentrationen av alla modellerade klasser i Figur 13 direkt efter ett dumpningstillfälle. Tydligt synligt är kärnan med hög koncentration som drar med sig allt finare sediment ner till botten. Från botten av denna kärna sprider sig sedimentet i både horisontell och vertikal riktning, genom både diffusion och advektion. Eftersom sedimentspridningen framför allt sker vid botten (Figur 12) förväntas de högsta koncentrationerna nära botten, medan koncentrationerna nära ytan förväntas vara betydligt lägre.

I närområdet varierar koncentrationen av de olika klasserna mestadels baserat på den initiala procentandelen inom sedimentutsläppet. De grövre fraktionerna (grovsilt och finsand) kommer dock att sjunka till botten inom några timmar och därmed inte spridas några större sträckor. Ler och finsilt kan däremot förbli i suspension under veckor till månader och således spridas över större områden.

I resultaten kommer sedimentkoncentrationen att presenteras som summan av de fyra klasserna (Figur 13).



Figur 13: Illustration av sedimentspridning inom närområdet i slutskedet av dumpningen som då har pågått i 10 minuter.

De befintliga bakgrundskoncentrationerna är inte inkluderade i modellen, vilket innebär att den redovisade koncentrationen är den ökning av suspenderade sediment som dumpningsverksamheten bidrar med.

3.4.3 Beräkningsscenario

Två scenarion har beräknats med olika perioder med förhållanden som är representativa för respektive årstid:

1. En sensommarperiod med dumpning under 40 dygn i augusti och september 2020 där vindarna generellt är mildare.
2. En vinterperiod med dumpning under 40 dygn i februari och mars 2020 där vindarna generellt är lite starkare.

Modellperioderna har valts utifrån att de bedöms vara representativ i avseende på vind, och temperaturskiktning samt att tillgängligheten av underlag under perioderna är god. Under perioderna finns en normal variation av vindförhållanden men inga extrema händelser.

4 Resultat

Detta kapitel presenterar modellresultaten för studien av de dumpade massornas påverkan på ackumulationsbottenförhållandena samt för spridningen av spill från dumpningen. Båda avsnitten inleds med en kontroll av modellens tillförlitlighet.

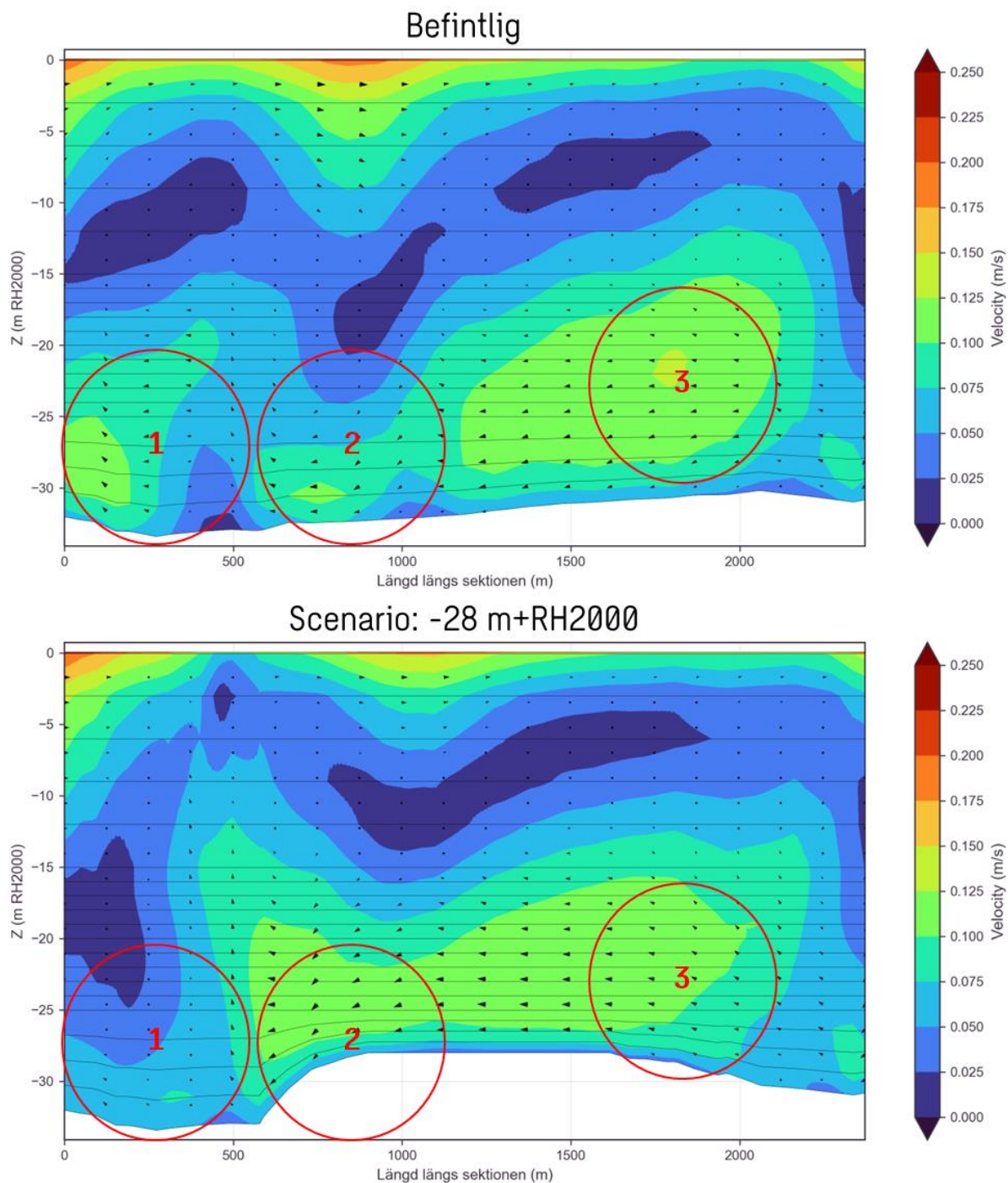
4.1 Bedömning av de dumpade massornas påverkan på ackumulationsbottenförhållandena

Som anges i avsnitt 3.3 sker utvärderingen av ackumulationsbotten efter dumpning av sediment genom att bedöma bottenskjuvspänningen utifrån flödes hastigheten. För att bättre förstå flödes hastigheterna i detta område kontrolleras hastigheterna i en längdsektion/tvärsektion genom dumpningsområdet vid ett specifikt ögonblick (Figur 14). Se Figur 7 för sektionens lokalisering.

I längdsektionen för den aktuella situationen (överst i Figur 14) framgår hur de högsta hastigheterna (ca 0,2 m/s i strömriktning mot höger) förekommer i ett tunt lager nära ytan, vilket är ett resultat av de krafter som vindarna utövar. Vid botten syns en ström i motgående riktning (0,1 m/s i strömriktning mot vänster), vilket är en returström som förstärks av termoklinen. Det är denna ström som eventuellt skulle kunna orsaka erosion inom dumpningsområdet.

När bottenskiktet i modellen justeras för att inkludera dumpningsmassorna framträder en tydlig förändring av botten i längdsektionen där djupet minskar med 5 m. I längdsektionen syns en ökning av hastighet vid markering 2, vilket var förväntat. Men resultaten visar även på en minskning av hastighet vid flera andra platser (markering 1 och 3). Detta tyder på att strömmen genom området har minskat något, och att returströmmen till viss del istället går runt dumpningsområdet.

Nära botten (Figur 14) minskar vattenhastigheterna marginellt efter dumpningen, vilket innebär att även bottenskjuvspänningen minskar något.

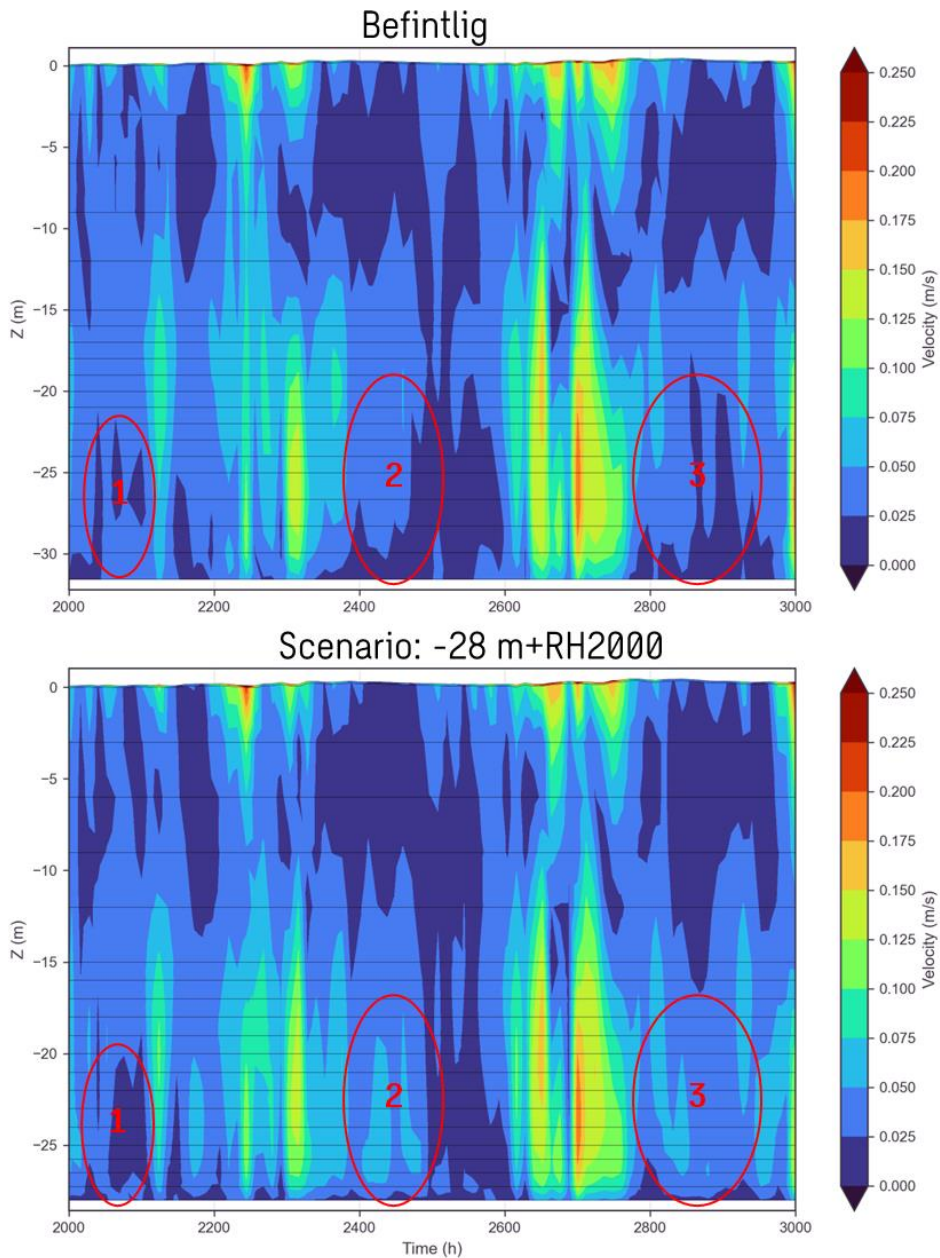


Figur 14: Hastigheter i en tvärsnitt som korsar dumpningsområdet från nordväst till sydöst (se Figur 7). Den övre figuren visar befintlig situation, medan den nedre figuren visar situationen efter dumpning till -28 m. Resultat från den 6 september 2020 vid en nordvästlig vind på 12 m/s. Observera att den vertikala skalan är överdriven och att den maximala lutningen vid 600 m fortfarande är maximalt 1:20.

Isopletdiagrammet (Figur 15) visar variationen över tid vid en specifik punkt på hela djupet i vattenpelaren. Av diagrammet framgår att för bägge fall (befintlig

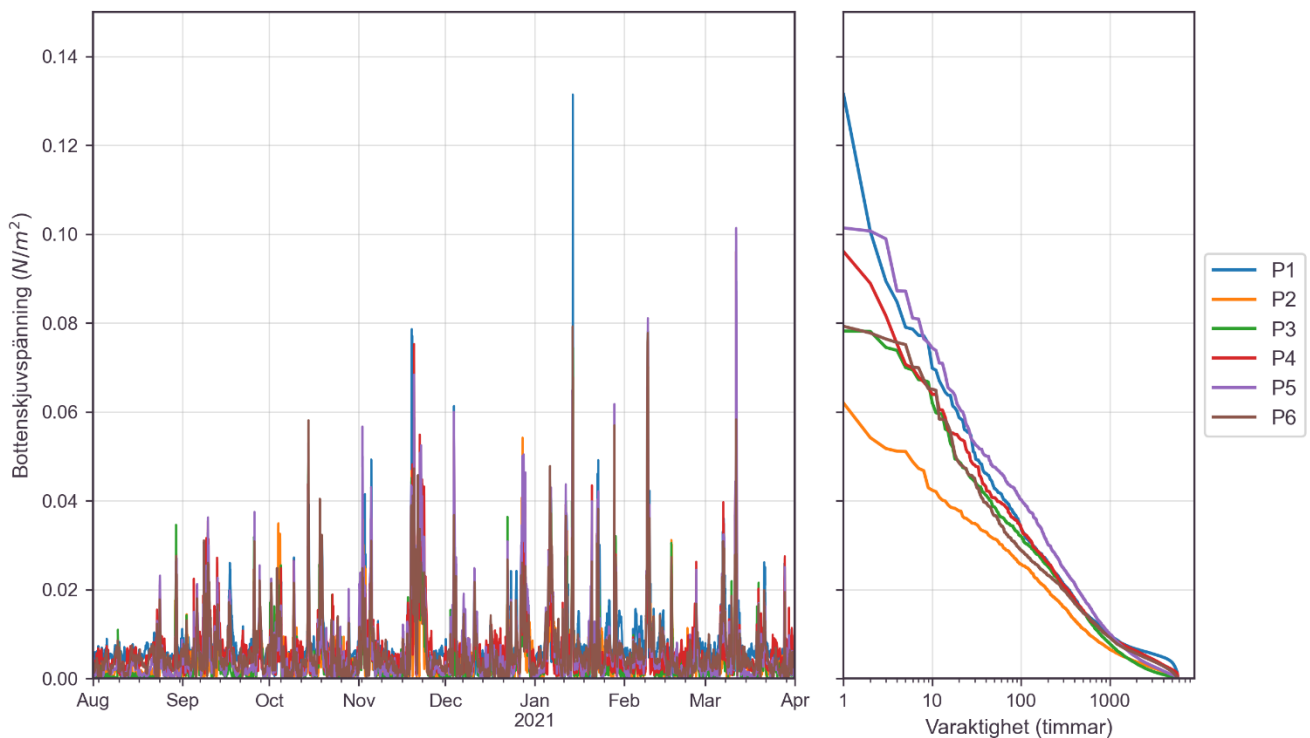
och efter dumpning) är hastigheterna nära botten vanligtvis under 0,05 m/s och överstiger 0,1 m/s endast under en kort period runt tidpunkten 2700 timmar. Även i denna figur framgår tider då en minskning av hastigheterna kan ses (markering 1), såväl som ökning (markering 2 och 3).

Utifrån isopletdiagrammet kan varken någon betydande ökning eller minskning av vattenhastigheterna mot botten observeras, vilket innebär att bottenskjuvspänningen inte förändras nämnvärt efter dumpning.



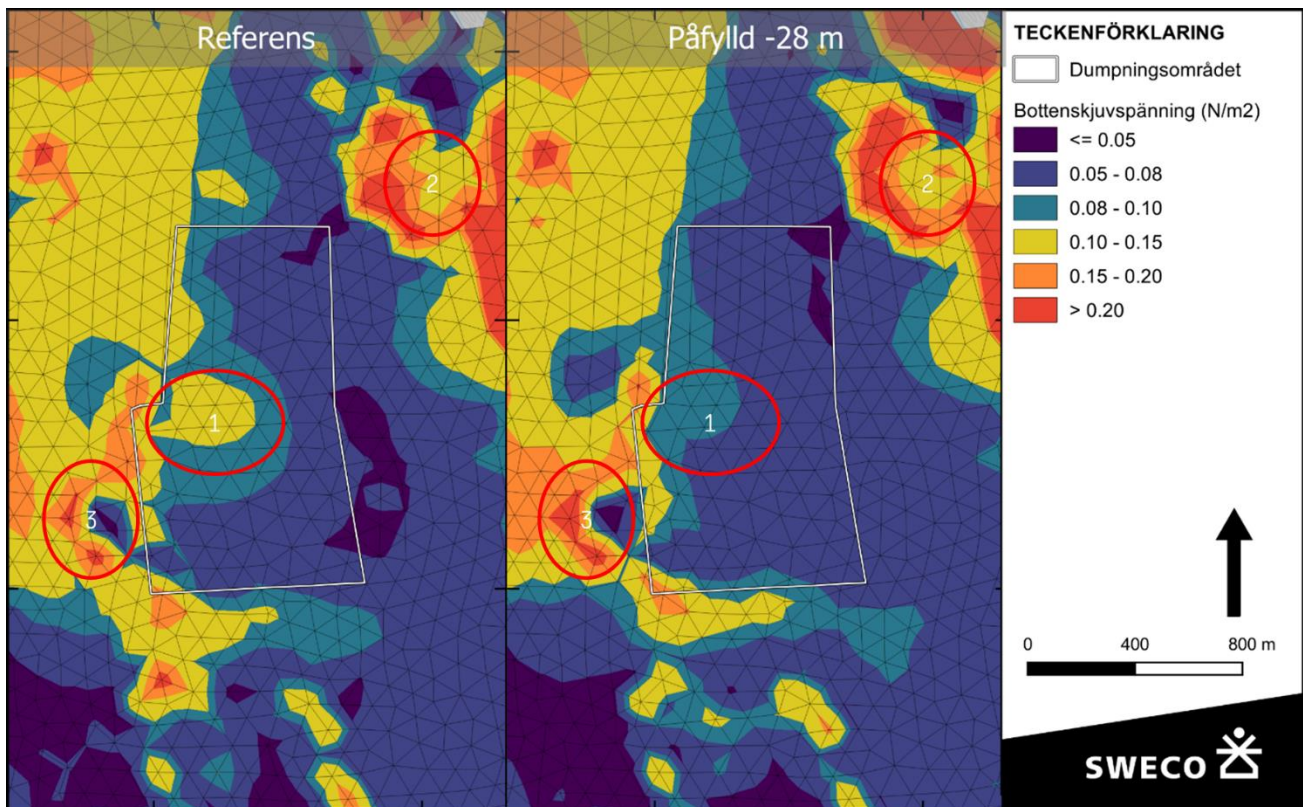
Figur 15: Hastigheter i en isopletdiagram för en punkt i mitten av dumpningsområdet. Den översta figuren visar befintlig situation, medan den nedre figuren visar situationen efter dumpning till -28 m. Detta diagram gäller punkt P6 (se Figur 7) som ligger ungefär vid 1300 m i tvärsnittet i Figur 14. Tidsperioden som visas i modellen är mellan den 23 oktober 2020 (timme 2000 i tidsaxeln) och den 4 december 2020 (timme 3000). Notera att bottennivån i det andra diagrammet är reducerad till -28 m.

Flöde hastigheterna kan omvandlas till bottenskjuvspänning genom att använda formeln som anges i avsnitt 3.3.2. Bottenskjuvspänningen ökar exponentiellt med hastigheten, vilket resulterar i en ännu större variation över tid. En tidsserie för 6 punkter inom dumpningsområdet ges i vänstra figuren av Figur 16. Den visar att gränsvärdet för erosion på $0,10 \text{ N/m}^2$ (se resonemang i avsnitt 3.3.2) endast överskrids vid 2 tillfällen under denna period och vid dessa 2 tillfällen endast under en mycket kort period. Tidsserien kan även presenteras som en varaktighetskurva (till höger i Figur 16), vilken visar att $0,10 \text{ N/m}^2$ endast överskrids under några timmar i perioden på åtta månader. Samtliga tillfällen då gränsvärdet överskrids är mycket korta (<3 timmar, vilket bedöms som minsta varaktighet för erosion). Under dessa korta perioder kan en begränsad omrörning av sediment förväntas, men eftersom dessa perioder är så korta kommer deponering snart att ske igen, vilket innebär att sedimentet knappt flyttas. Detta förväntas inte påverka ackumulationsförhållandena.



Figur 16: Tidsserier (till vänster) och varaktighetskurva (till höger) för bottenskjuvspänning vid 6 punkter i dumpningsområdet (se Figur 7). Varaktighetskurvan visar hur många timmar (logaritmisk skala x-axel) som en viss bottenskjuvspänning (y-axel, se värden i vänster figur) överskrids.

I Figur 17 visas en karta över den maximala bottenskjuvspänningen som är en kombinerad karta över alla maximala bottenskjuvspänningar i alla tidssteg i simuleringen. Av kartan framgår att den maximala bottenskjuvspänningen $0,10 \text{ N/m}^2$ inte överskrids i den större delen av dumpningsområdet efter dumpningen. Det kan observeras en minskning av bottenskjuvspänningen i vissa områden (markering 1). Viss ändring av strömningsmönstret utanför dumpningsområdet kan även observeras (markering 2 och 3). Den observerade påverkan är dock tämligen begränsad och i dumpningsområdet syns främst en minskning av bottenskjuvspänningen.



Figur 17: Maximala bottenskjuvspänningen som är en kombinerad karta över alla maximala bottenskjuvspänningar i alla tidssteg i simuleringen. Bottenskjuvspänning innan (t.v.) och efter (t.h.) påfyllning.

Sammanfattningsvis har utfyllnaden av dumpningsmassor till en ny nivå på -28 m (RH2000) en marginell effekt på strömningshastigheten både inom dumpningsområdet och i närområdet. De små skillnader som observeras består främst i att hastigheterna minskar något. Med minskande hastigheter kommer även bottenskjuvspänningarna inom dumpningsområdet minska marginellt efter utfyllnaden.

Muddermassorna som planeras att dumpas har en något större genomsnittlig kornstorlek (D50) än befintliga sediment i dumpningsområdet ifall de finare muddermassorna placeras överst (se bilaga A). Därmed kommer dumpningsmassorna att ge en marginellt ökad motståndskraft mot erosion, vilket innebär att högre skjuvspänning krävs för att sedimentet ska lyftas i suspension. Ifall de grövre muddermassorna placeras överst skulle sedimenten få en betydligt större motståndskraft mot erosion.

Baserat på resultaten som presenterats i detta avsnitt görs bedömningen att dumpningsområdet kommer att bibehålla sin funktion som en ackumulationsbotten även efter utfyllningen, vilket innebär att sediment även fortsättningsvis kan ackumuleras på botten i dumpningsområdet och således sedimentera ovanpå muddermassorna.

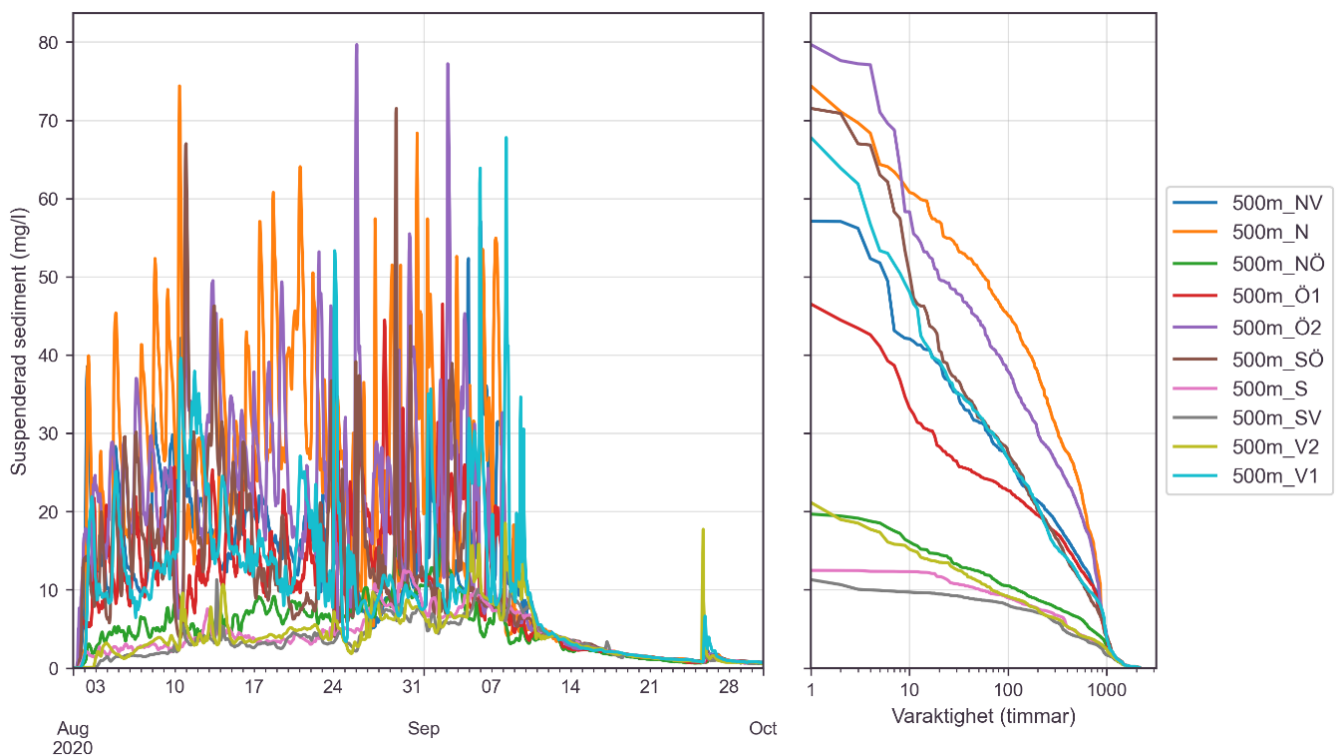
4.2 Sedimentspridningsberäkningar

I det här avsnittet presenteras resultat från sedimentspridningsberäkningarna. Modellresultaten från båda beräkningsscenarierna liknar varandra. Därför redovisas enbart resultaten från scenario 1 (sensommarperioden, se avsnitt

3.4.3) i huvudrapporten. Figurer med resultat från vinterperioden finns i Bilaga B.

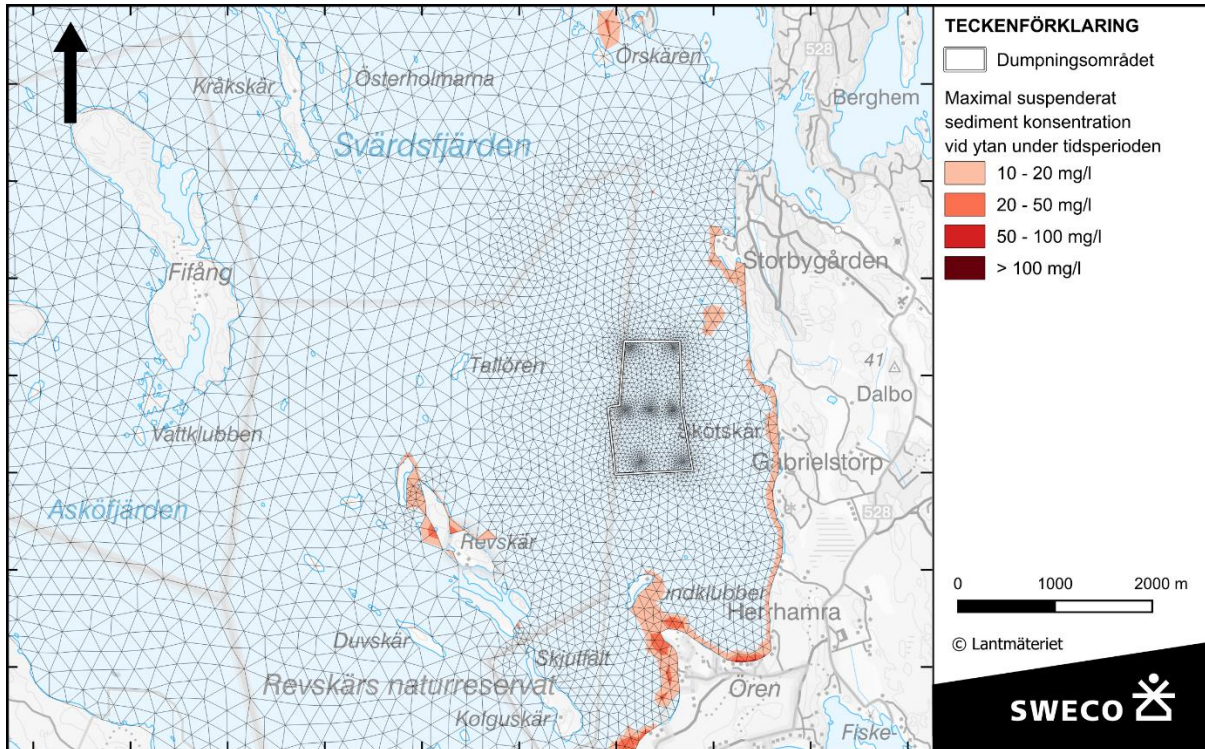
4.2.1 Suspenderade sediment

Det suspenderade sedimentet transporteras av strömmarna. I Figur 18 visas hur koncentrationen av suspenderade sediment (maximal koncentration över djupet) varierar över tid i punkter på 500 avstånd från dumpningsområdet. Av figuren framgår att koncentrationen går upp till 80 mg/l som mest och att höga koncentrationer bara inträffar under korta tillfällen (fåtal timmar), vilket förtydligas i varaktighetsdiagrammen till höger i figuren.

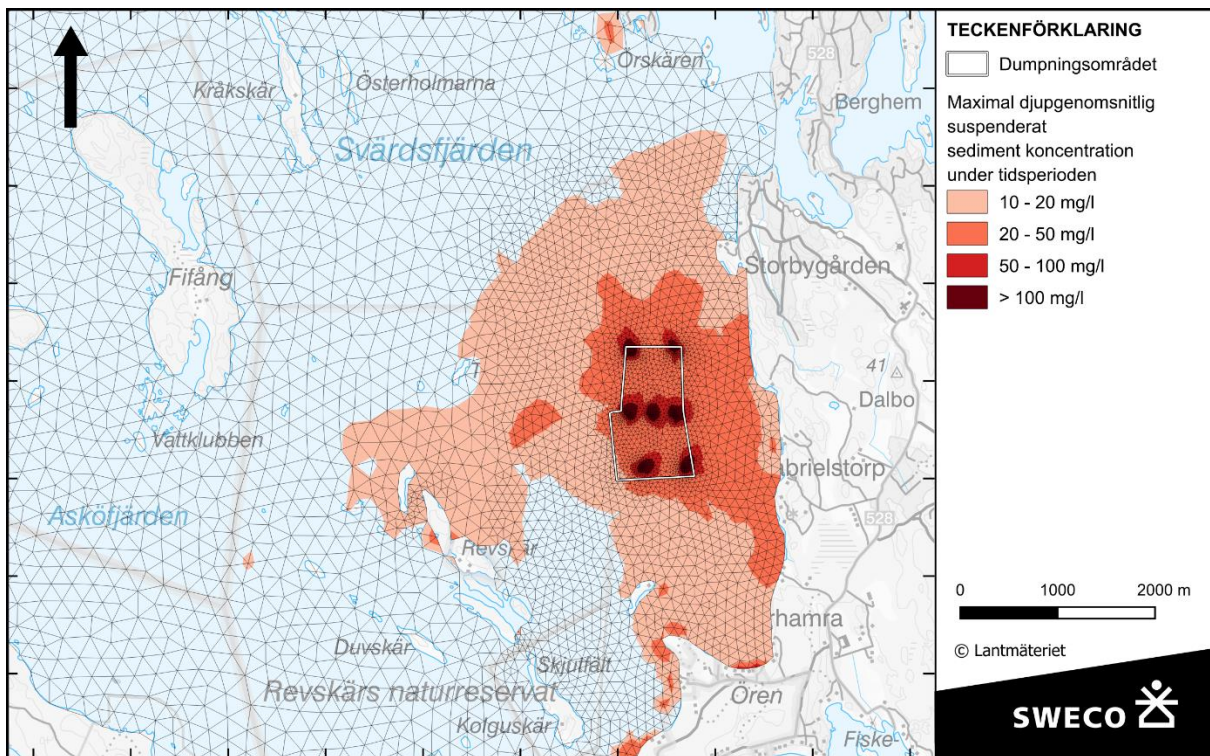


Figur 18: Tidsserier (till vänster) och varaktighetsdiagram (till höger) av suspenderad sedimentkoncentration (maximalt över djupet) vid 10 punkter på ett avstånd av 500 m från dumpningsområdet under de första två månaderna i simuleringen. Observera att varaktighetsdiagrammet använder logaritmisk x-axel och att y-axeln är samma som i figuren till vänster. Namnen på punkterna hänvisar till riktning (tex N=Norr), exakt lokalisering av punkterna framgår av Figur 7.

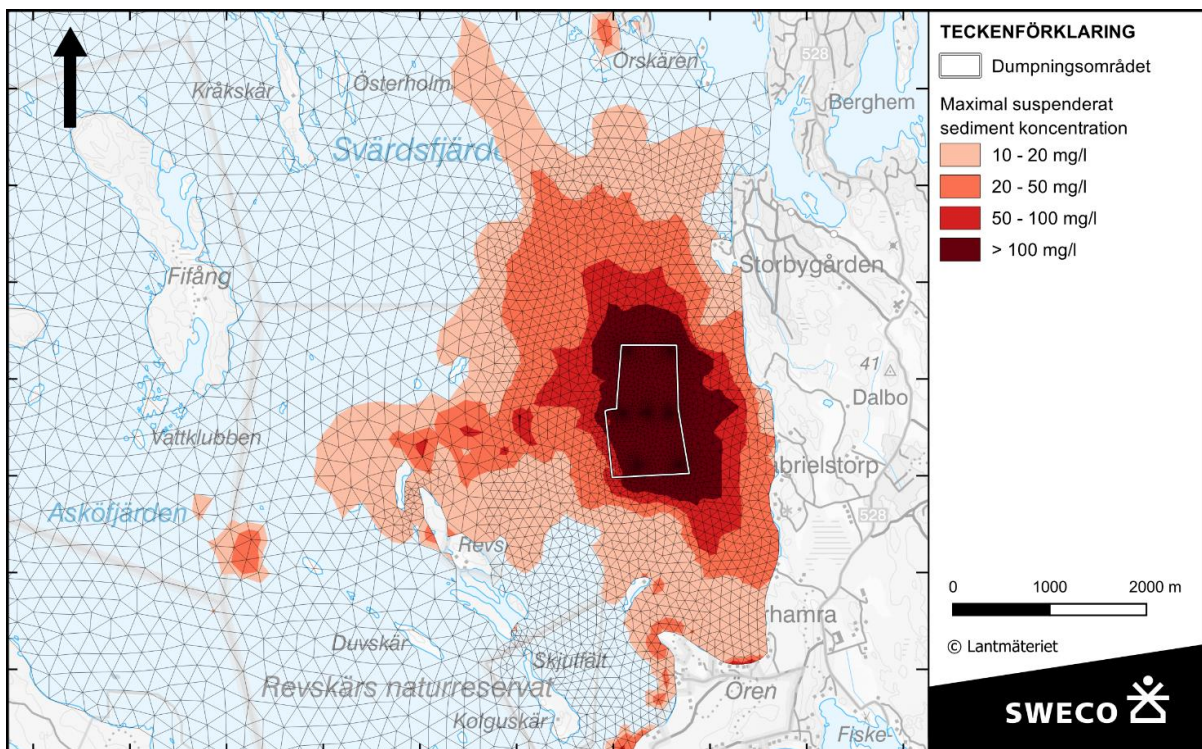
De maximala koncentrationerna under beräkningsperioden redovisas i följande kartor (vid ytan i Figur 19, genomsnitt över djupet i Figur 20 och maximalt över djupet i Figur 21).



Figur 19: Maximal koncentration av suspenderade sediment vid ytan under beräkningsperioden.



Figur 20. Maximal koncentration av suspenderade sediment, genomsnitt över djupet, under beräkningsperioden.



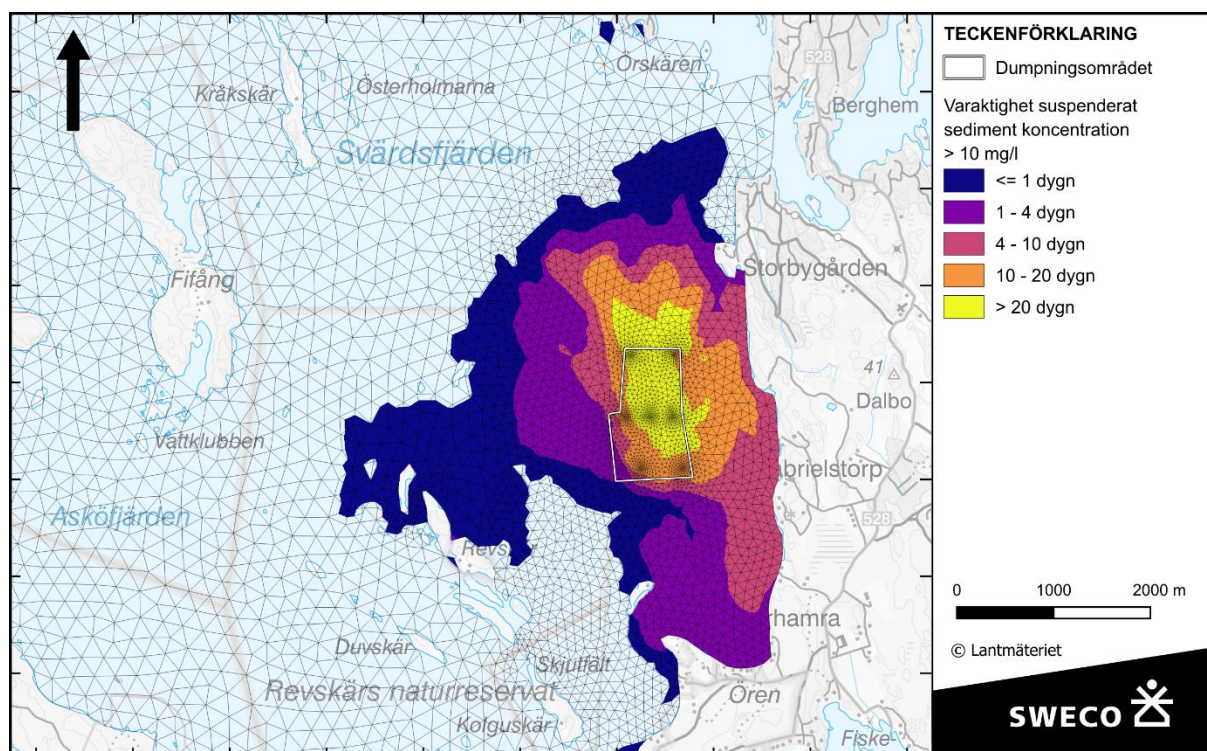
Figur 21: Maximal koncentration av suspenderade sediment, maximalt över djupet, under beräkningsperioden. Ytornas storlek förtydligas i Tabell 2.

Tabell 2: Sammanställning av resultaten i Figur 21 (maximal koncentration under beräkningsperiod och över djupet), total yta som koncentrationen av suspenderade sediment överskrider redovisad koncentration och längsta avstånd från dumpningsområdet.

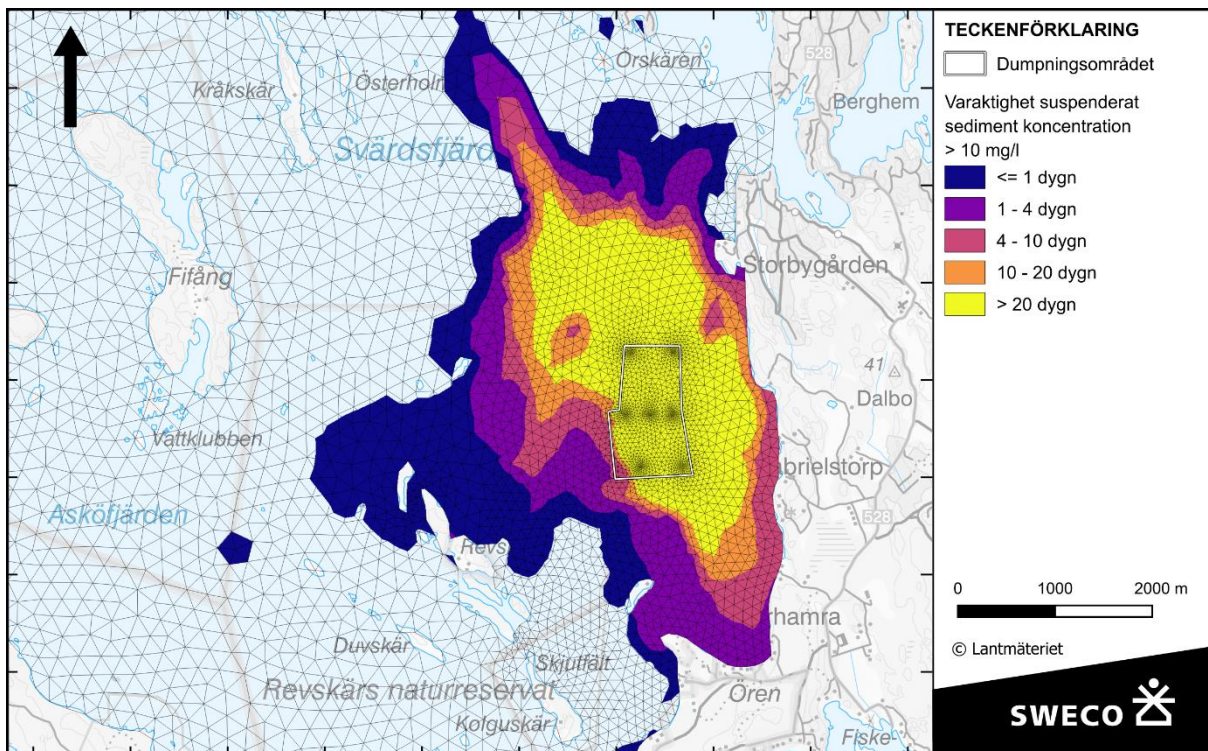
Koncentration suspenderade sediment	Yta (km ²)	Längsta avstånd från dumpningsområdet (m)
> 10 mg/l	17.0	3700
> 20 mg/l	8.7	2200
> 50 mg/l	3.9	900
> 100 mg/l	2.2	600

Tabell 2 visar att någon gång under beräkningsperioden överskrids en maximal koncentration över vattendjupet på 100 mg/l i ett område på 2,2 km² och med ett maximalt avstånd på 500 m från dumpningsområdet. Detta inkluderar själva dumpningsområdet som har en yta på 0,9 km².

För koncentrationerna 10 respektive 100 mg/l visas även kartor över varaktigheten (Figur 22 - Figur 25). Med varaktighet menas i detta fall den totala tiden i beräkningsperioden som värdet (10 respektive 100 mg/l) överskrids och kan således bestå av flera kortare perioder som adderats ihop.



Figur 22: Varaktighet under beräkningsperioden där den genomsnittliga koncentrationen över djupet av suspenderade sediment är större än 10 mg/l.

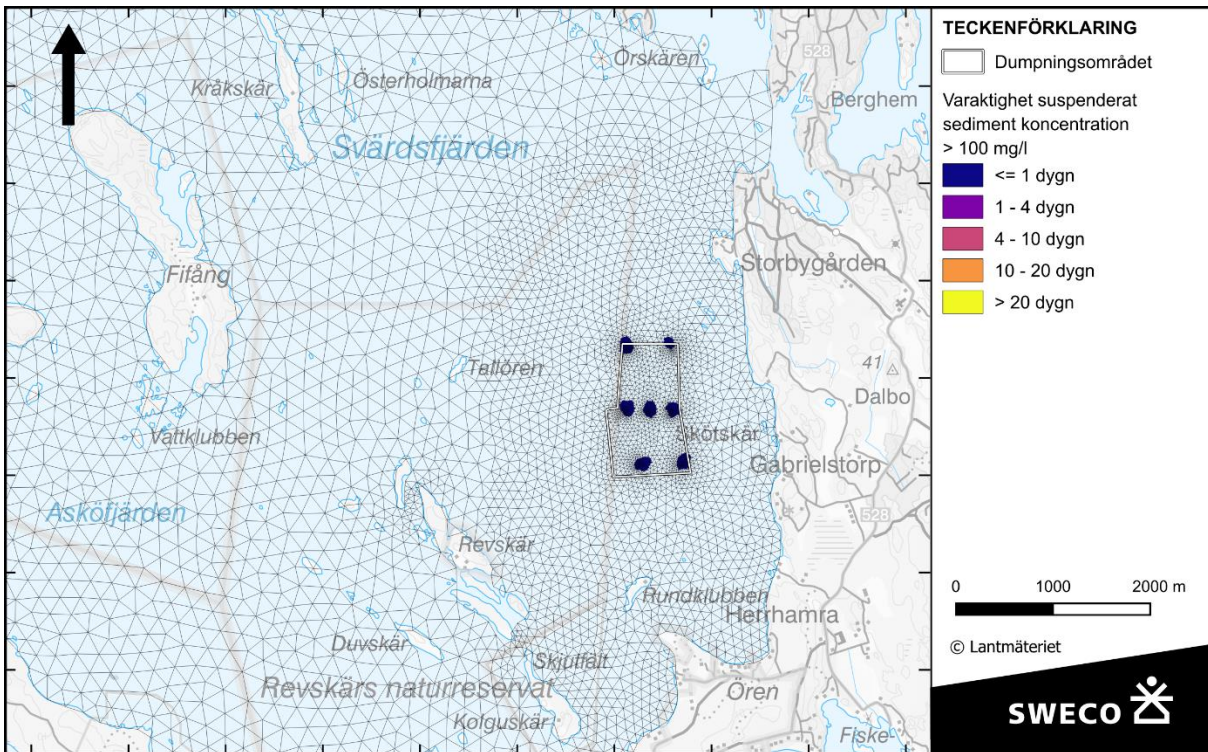


Figur 23: Varaktighet under beräkningsperioden där den maximala koncentrationen över djupet av suspenderade sediment är större än 10 mg/l. Yornas storlek förtydligas i Tabell 3.

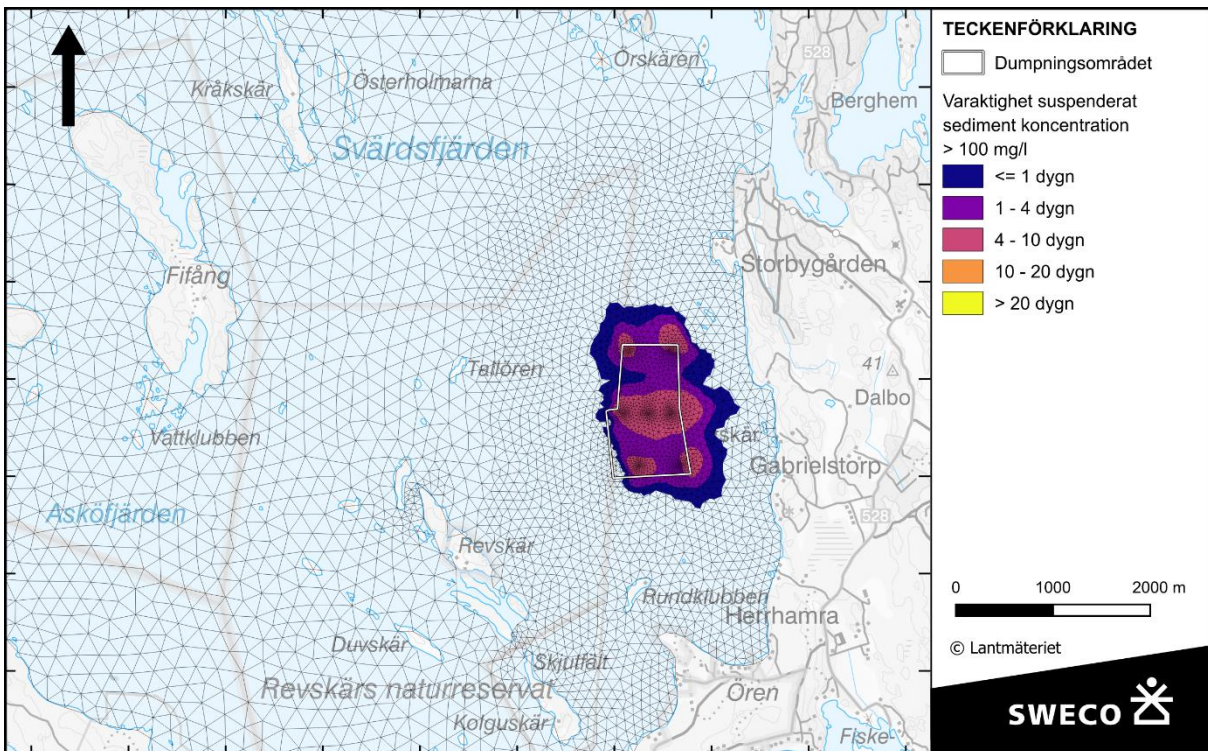
Tabell 3: Sammanställning av resultaten i Figur 23 (yta där koncentrationen suspenderade sediment överskrider 10 mg/l samt maximalt avstånd från dumpningsområdet).

Varaktighet	Ytan (km ²)	Längsta avstånd från dumpningsområdet (m)	Motsvarar område i Figur 23
> 20 dygn	4.6	1800	gult
> 10 dygn	6.2	2300	gult+orange
> 4 dygn	8.2	2900	gult+orange+rosa
> 1 dygn	11.5	3300	gult+orange+rosa+lila
> 0 timmar	17.0	3700	gult+orange+rosa+lila+blått

Av Tabell 3 framgår att ett område på 4,6 km² har koncentrationer högre än 10 mg/l någonstans i vattenpelaren under en period på minst 20 dagar. 20 dagar motsvarar hälften av tiden för den simulerade dumpningsperioden. Lite mer än dubbelt så stor yta (11,5 km²) utsätts för samma koncentration (10 mg/l) under en total period på minst 1 dygn (motsvarar 3 procent av dumpningsperioden).



Figur 24: Varaktighet under beräkningsperioden där den genomsnittliga koncentrationen över djupet av suspenderade sediment är större än 100 mg/l.



Figur 25: Varaktighet under beräkningsperioden där den maximala koncentrationen över djupet av suspenderade sediment är större än 100 mg/l. Ytomns storlek förtydligas i Tabell 4.

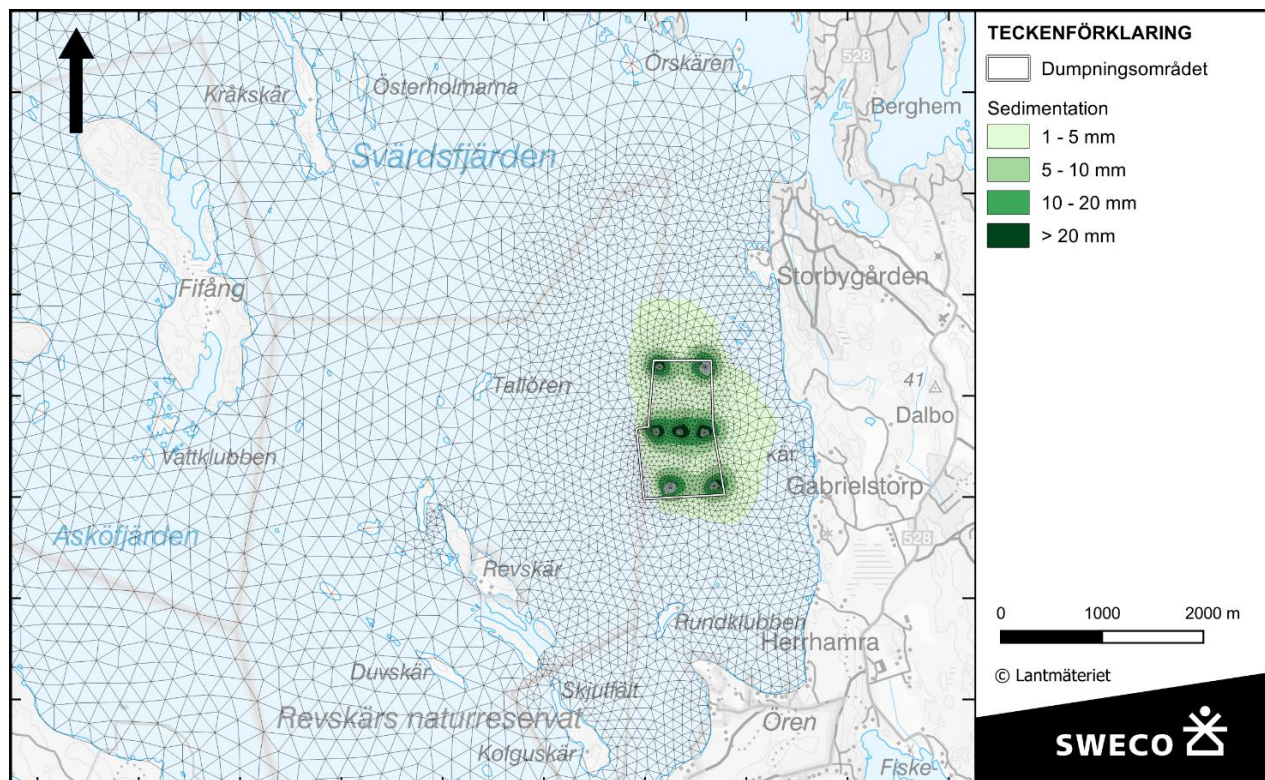
Tabell 4: Sammanställning av resultaten i Figur 25 (yta där koncentrationen suspenderade sediment överskrider 100 mg/l samt maximalt avstånd från dumpningsområdet).

Varaktighet	Ytan (km ²)	Längsta avstånd från dumpningsområdet (m)	Motsvarar område i Figur 25
> 20 dygn	0	0	gult
> 10 dygn	0	0	gult+orange
> 4 dygn	0.5	200	gult+orange+rosa
> 1 dygn	1.4	400	gult+orange+rosa+lila
> 0 timmar	2.2	600	gult+orange+rosa+lila+blått

Av Tabell 4 framgår att området där koncentrationen suspenderade sediment överstiger 100 mg/l under någon längre tid är mycket begränsat, ingenstans är varaktigheten längre än 10 dygn och endast i 0,5 km² inom dumpningsområdet eller i dess omedelbara närhet är varaktigheten större än 4 dygn. Ca 600 m bort från dumpningsområdet är det största avståndet där en koncentration på 100 mg/l överskrids, där är varaktigheten mindre än 1 dygn.

4.2.2 Sedimentation

Resultatet av beräknad sedimentation presenteras i Figur 26 och sammanställs i Tabell 5. Av sammanställningen framgår att området som täcks av sedimentation över 1 mm är maximalt 400 m från dumpningsområdet. Sedimentation på mer än 10 mm förekommer endast upp till 100 m från modellerade dumpningspunkter, vilket i huvudsak är inom dumpningsområdet. Sedimentationen inom dumpningsområdet kan bortses ifrån eftersom den befintliga botten ändå täcks av massorna som dumpas.



Figur 26: Sedimentation från spill efter genomförd dumpning. Ytan som täcks av varje klass anges i Tabell 5.

Tabell 5: Sammanställning av Figur 26 (yta där sedimentationen överskrider redovisad mäktighet samt maximalt avstånd från dumpningsområdet).

Mäktighet i sedimentation	Yta (km ²)	Längsta avstånd från dumpningsområdet (m)
> 1 mm	2.3	400
> 5 mm	0.8	100
> 10 mm	0.3	50
> 20 mm	0.0	0

5 Slutsatser och diskussion

5.1 Bedömning av de dumpade massornas påverkan på ackumulationsbottenförhållandena

Sammanfattningsvis görs bedömningen att dumpningsområdet kommer att bibehålla sin funktion som en ackumulationsbotten även efter dumpningen av muddermassor, vilket innebär att sediment även fortsättningsvis kan ackumuleras på botten i dumpningsområdet och således sedimentera ovanpå muddermassorna. Därutöver bedöms de dumpade massorna inte riskera att erodera och spridas efter att de lagts på plats i dumpningsområdet. Bedömningen baseras i huvudsak på följande resultat och resonemang:

- Utfyllnaden av dumpningsområdet till en ny nivå på -28 m (RH2000) har en marginell effekt på vattenhastigheterna i området. De små skillnader som observeras består främst i att hastigheterna minskar något vid botten. Med minskande hastigheter kommer även bottenskjuvspänningarna inom dumpningsområdet minska marginellt efter utfyllningen.
- Muddermassorna som planeras att dumpas har en något större genomsnittlig kornstorlek än befintliga sediment i dumpningsområdet, vilket innebär att högre skjuvspänning krävs för att sedimentet ska lyftas i suspension. Därmed kommer motståndskraften mot erosion att öka något.

5.2 Spridning av suspenderade sediment och sedimentation från sedimentspill under dumpningsperioden

Sedimentspridning från dumpningen har simulerats i två scenarier. Bägge scenarier ger liknande resultat. I avsnitt 4.2 presenteras resultat för scenario 1 (sensommarperiod) och i Bilaga B finns resultat för scenario 2 (vinterperiod).

Sammanfattningsvis konstateras att en spridning av suspenderade sediment kommer att ske i samband med att muddermassorna dumpas. Beräkningsresultaten för sedimentspridningen sammanfattas i följande punkter:

- Spridningen av suspenderade sediment förväntas främst ske längs botten.

- Nära botten kan suspenderade sediment med koncentrationer på 100 mg/l sprida sig upp till ca 500 m från dumpningsområdet. Varaktigheten i dessa händelser är dock kortvarig, överskridandet av 100 mg/l på 500 m avstånd sker enbart under några få timmar på enstaka platser.
- Nära botten kan suspenderade sediment med koncentrationer på 10 mg/l sprida sig upp mot 4 km från dumpningsområdet.
- Inom de närmsta kilometrerna från dumpningsområdet kan varaktigheten i överskridandet av 10 mg/l nära botten bli relativt långvarig och pågå under flera dygn i följd och inträffa flera gånger under dumpningsperioden.
- Vid ytan är spridningen betydligt mer begränsad och beräknas inte överstiga 10 mg/l.
- Sedimentation från sedimentspridningen underskrider i huvudsak 10 mm utanför dumpningsområdet. På 400 m avstånd från dumpningsområdet underskrider sedimentationen 1 mm.

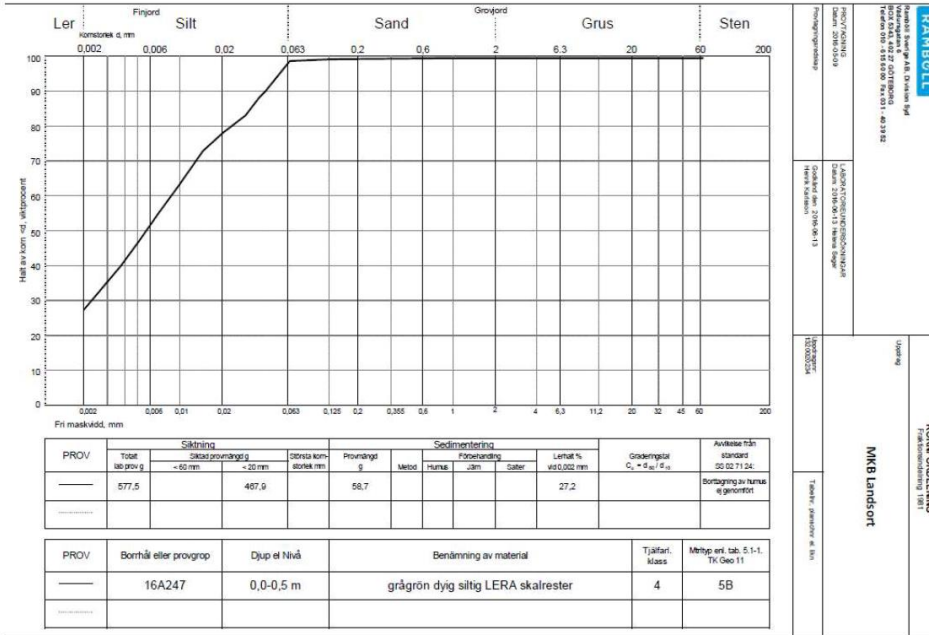
Referenser

- Becker, J. E. (2015). *Estimating source terms for far field dredge plume modelling*.
- DHI. (2018). *Farledsprojekt Landsort-Södertälje. Beräkning av potentiell påverkan från propellerströmmar*.
- DHI. (2019). *Farledsprojekt Landsort-Södertälje; Spridningsmodellering av spill från muddring och dumpning*.
- Groen, P., & Dorrestein, R. (1976). *Zeegolven. KNMI Opstellen op oceanografisch en maritiem meteorologisch Gebied No.11*.
- open TELEMAC-MASCARET. (2023). Hämtat från TELEMAC-MASCARET: <http://www.opentelemac.org/>
- Svedrup, K., & Armbrust, E. (2009). *An Introduction to the World's Oceans. McGraw-Hill. 508 p.*
- Sweco. (2024). *Utredning av ackumulationsförhållanden i potentiella dumpningsområden*.
- Truitt. (1988). *Dredged Material Behavior During Open-Water Disposal*.
- USCA. (2015). *USCA Dredging and dredged material management*.
- Van Rijn, L. (2007). *A Unified View Of Sediment Transport By Currents And Waves, Part 1: Initiation Of Motion, Bed Roughness And Bed Load Transport*.
- Van Rijn, L. (2013). *Simple General Formulae For Sand Transport In Rivers, Estuaries And Coastal Waters*.

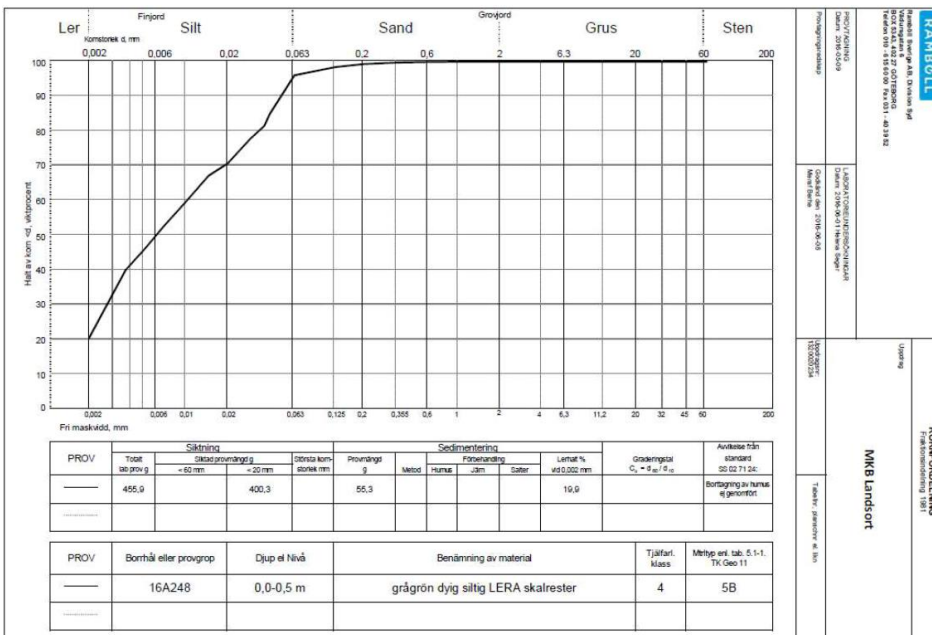
Bilaga A: Kornstorleksdiagram

Muddringsmassor

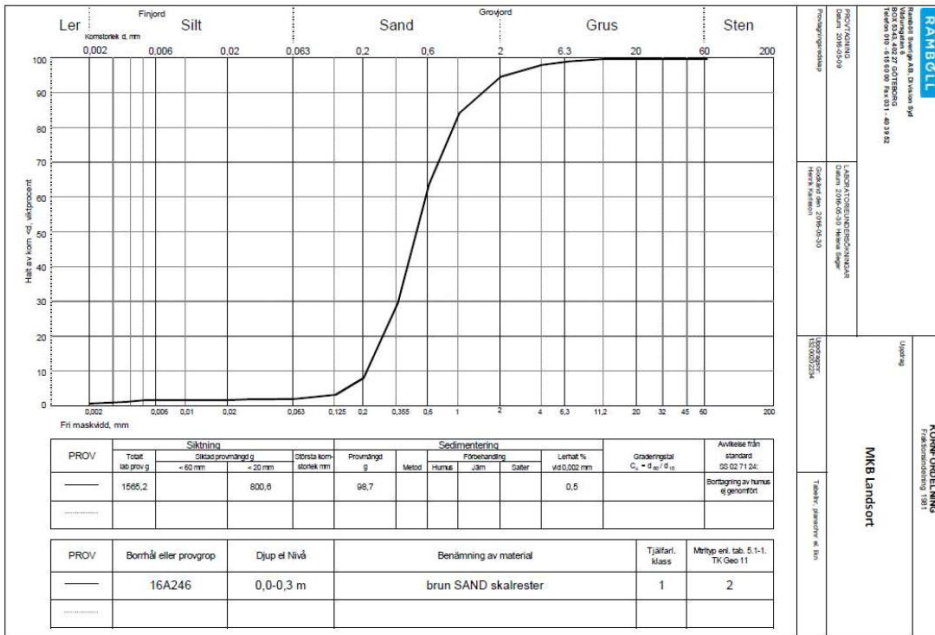
Sjöfartsverket har sammanställt indata till sedimentspridningsberäkningarna avseende de massor som planeras att dumpas inom projekt Landsortsfarleden. Kornstorleksdiagrammen är framtagna av Ramboll.



Figur A.1: Kornstorleksdiagram av löst material och kohesionsmaterial i Område 35 (16A 247).



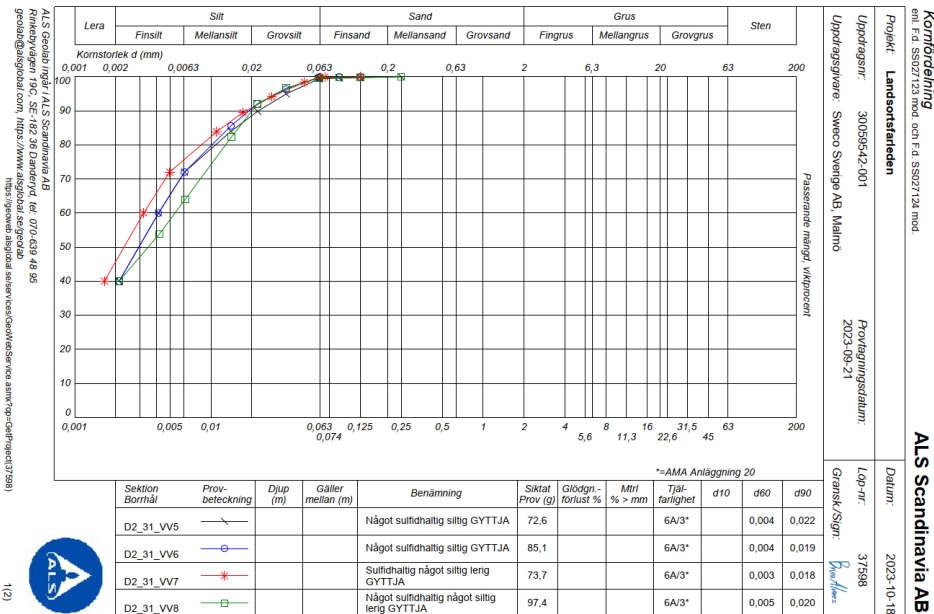
Figur A.2: Kornstorleksdiagram av löst material och kohesionsmaterial i Område 36S (16A 248).



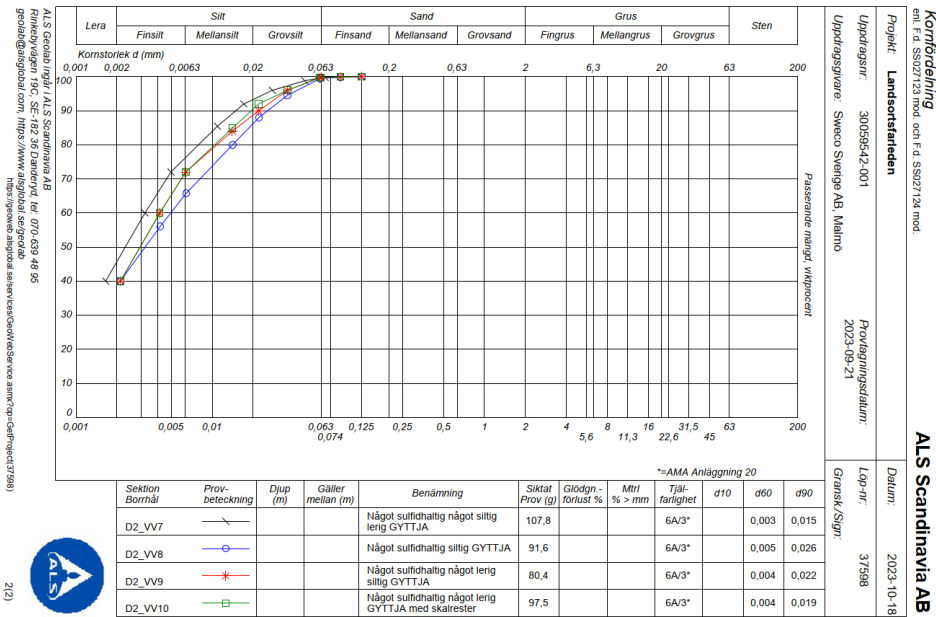
Figur A.3: Frictionsmaterial i området 34 (16A 246).

Nuvarande material i dumpningsområdet

Kornstorleksanalysen av nuvarande bottenmaterial i dumpningsområdet har utförts av Sweco (Sweco, 2024).



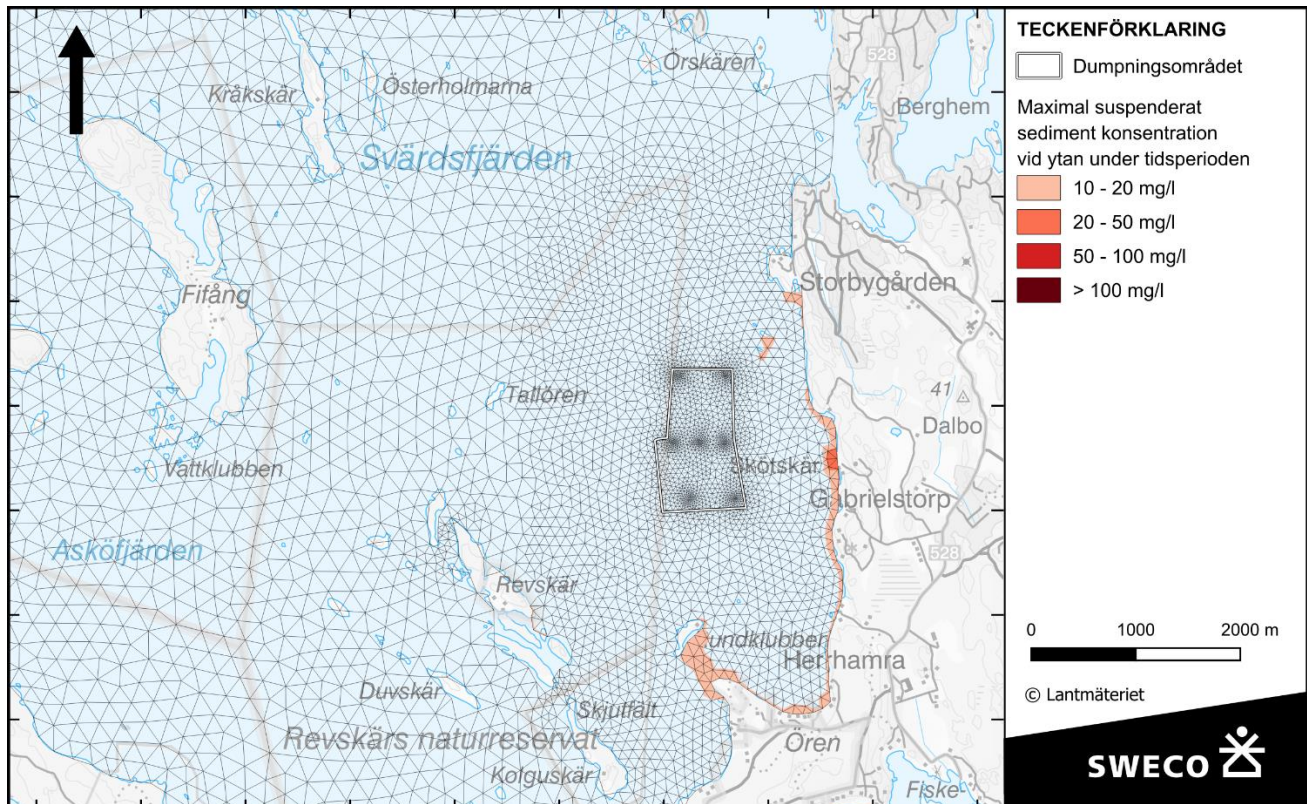
Figur A.4: Kornfördelning i undersökningsområde 2x (norra delen av dumpningsområdet).



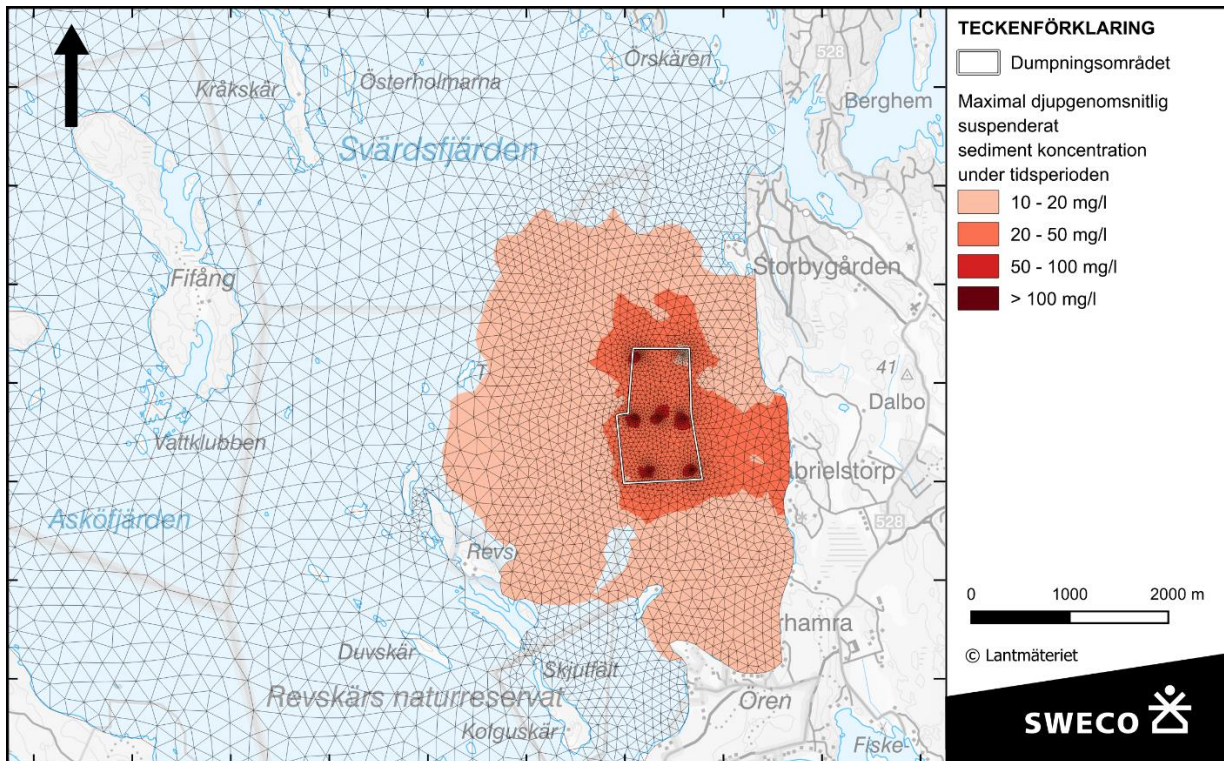
Figur A.5: Kornfördelning i undersökningsområde 2 (södra delen av dumpningsområdet).

Bilaga B: Resultat beräkningsscenario 2

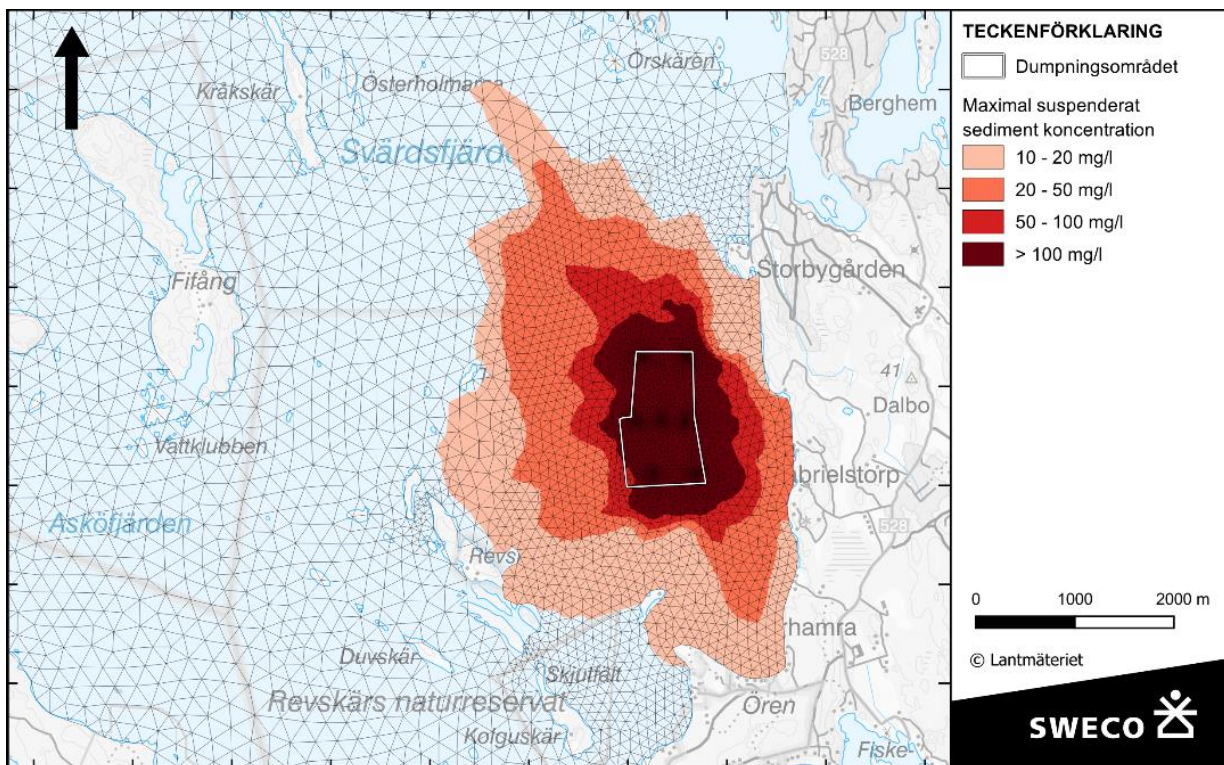
Spridning av suspenderade sediment och sedimentation under vinterperioden



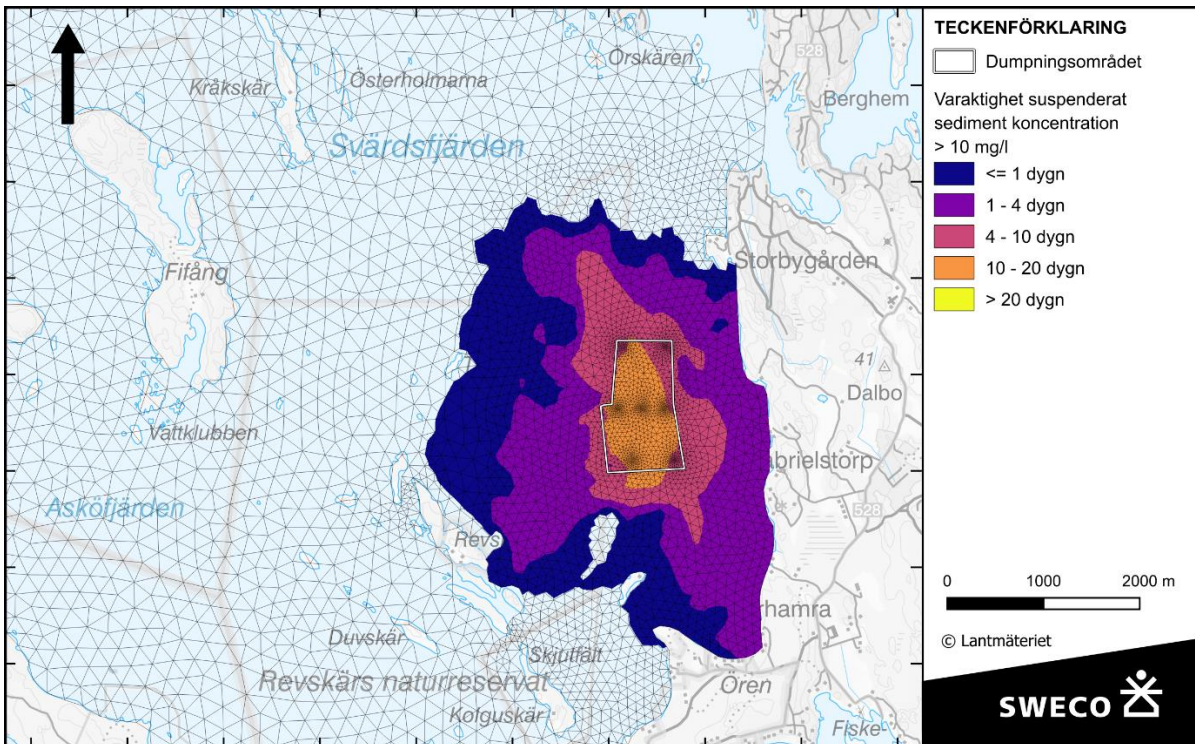
Figur B.1: Maximal koncentration av suspenderade sediment vid ytan under beräkningsperioden, scenario 2 (vinterperiod).



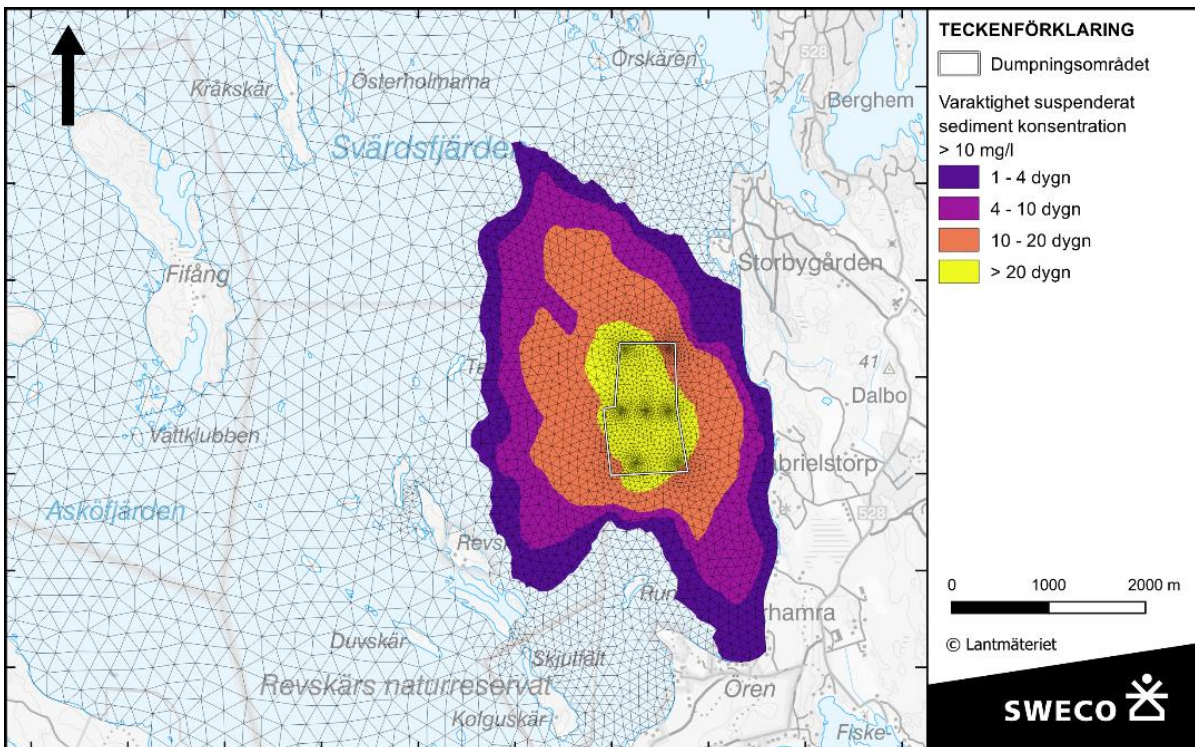
Figur B.2: Maximal koncentration av suspenderade sediment, genomsnitt över djupet, under beräkningsperioden, scenario 2 (vinterperiod).



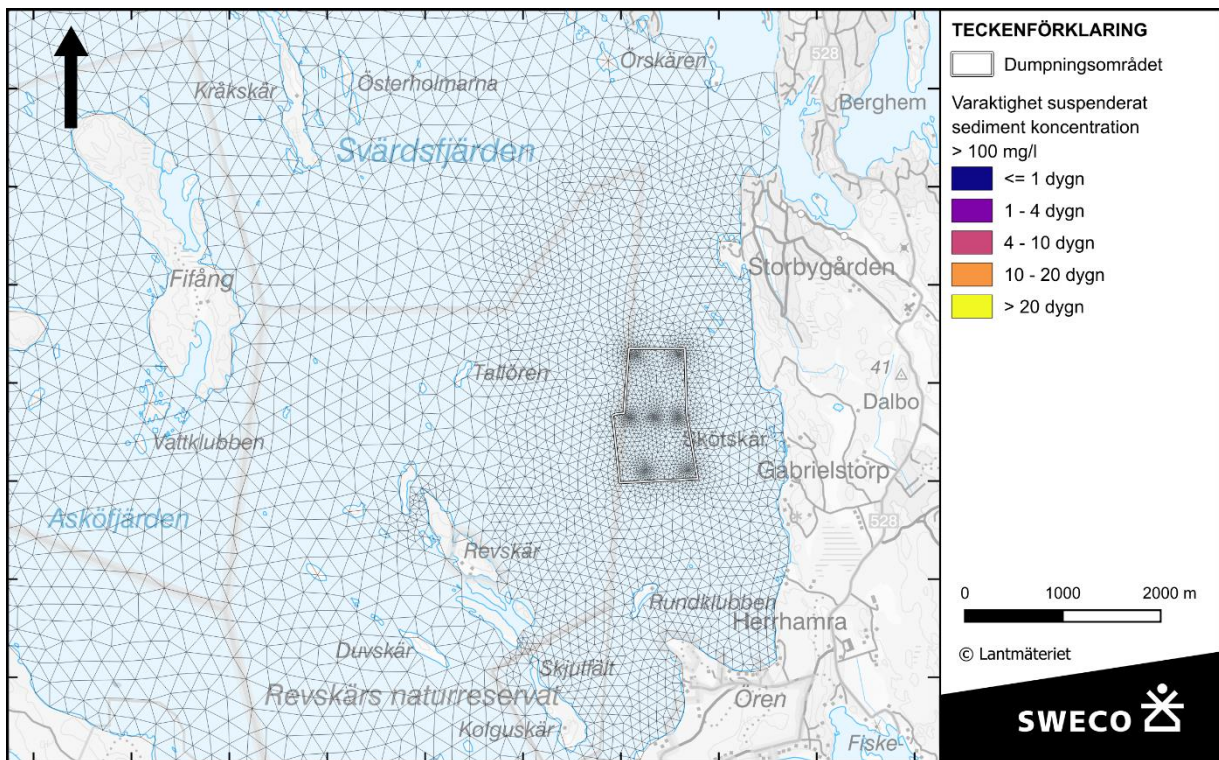
Figur B.3: Maximal koncentration av suspenderade sediment, maximalt över djupet, under beräkningsperioden, scenario 2 (vinterperiod).



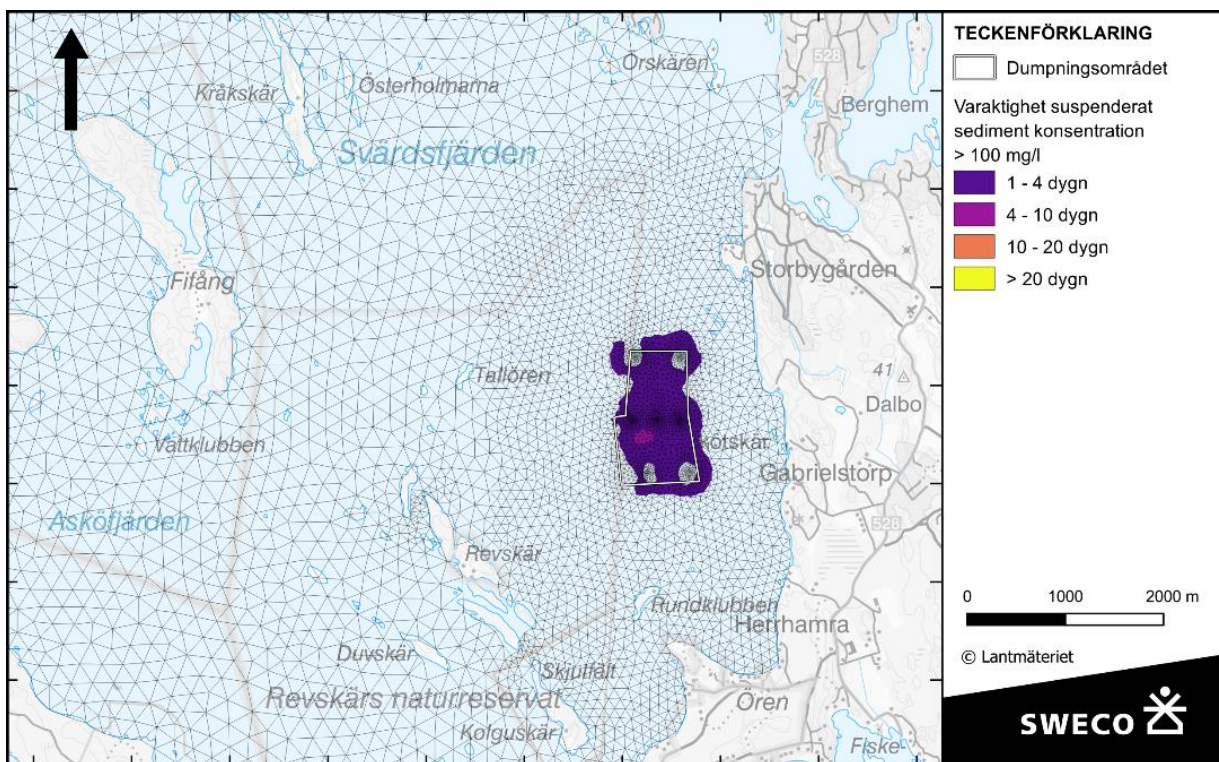
Figur B.4: Varaktighet under beräkningsperioden där den genomsnittliga koncentrationen över djupet av suspenderade sediment är större än 10 mg/l, scenario 2 (vinterperiod).



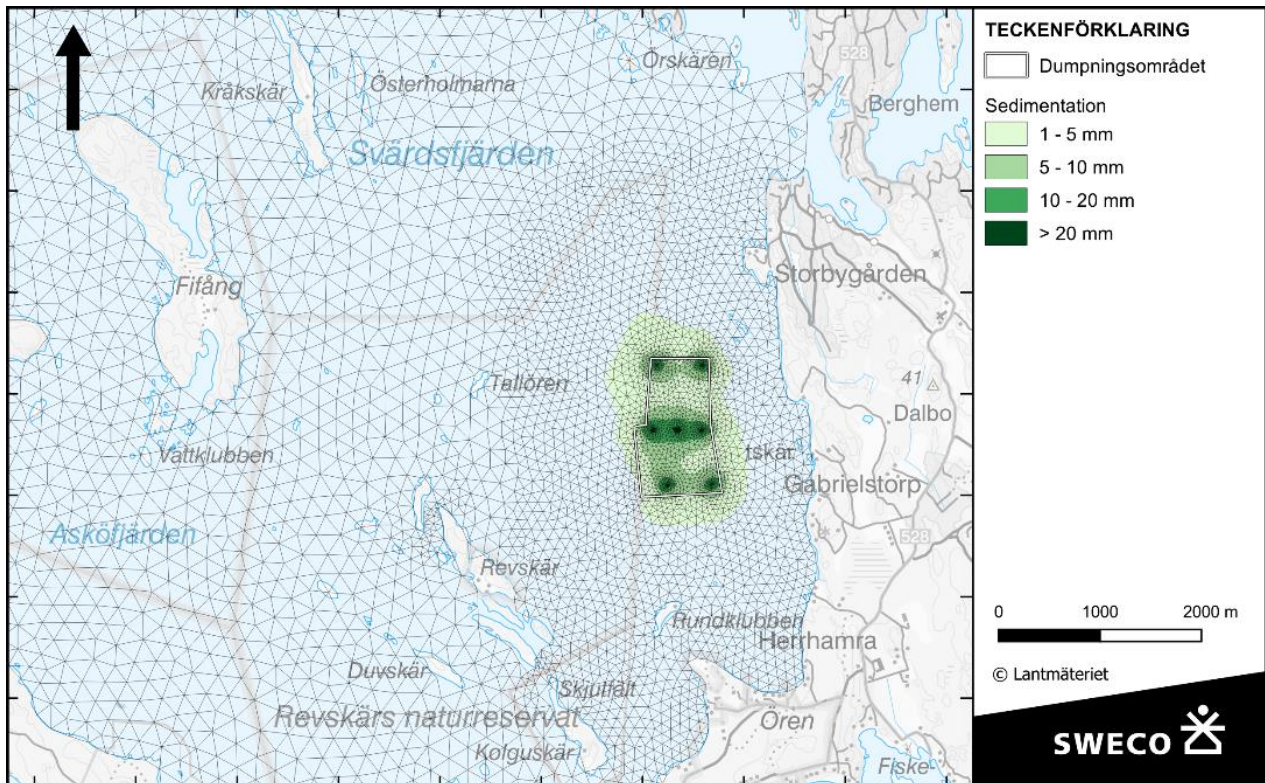
Figur B.5: Varaktighet under beräkningsperioden där den maximala koncentrationen över djupet av suspenderade sediment är större än 10 mg/l, scenario 2 (vinterperiod).



Figur B.6: Varaktighet under beräkningsperioden där den genomsnittliga koncentrationen över djupet av suspenderade sediment är större än 100 mg/l, scenario 2 (vinterperiod).



Figur B.7: Varaktighet under beräkningsperioden där den maximala koncentrationen över djupet av suspenderade sediment är större än 100 mg/l, scenario 2 (vinterperiod).



Figur B.4: Sedimentation från spill efter genomförd dumpning, scenario 2 (vinterperiod).