

Sedimentspridning: Hydrodynamisk modellering

Sedimentspridning från arbeten vid Heidelberg
Materials fabrik i Slite



Sweco AB	RegNo 556542-9841
Uppdrag	Vattenrecipientbedömning
Uppdragsnummer	30052100-001
Kund	Heidelberg Materials Cement
Ver	2
Datum	2024-05-06
Upprättad av	Charlie van Houwelingen
Dokumentreferens	\\semmafs001\projekt\21228\30052100_cementa_ccs_mkb\001_ recipientbedömning\07_arbetsmaterial_dok\02_hydrodynamisk modellering\rapport\sedimentspridning_240506.docx

Innehållsförteckning

1.	Inledning och syfte.....	5
2.	Områdesbeskrivning.....	6
3.	Modell.....	8
3.1	Övergripande om modelleringen.....	8
3.2	Beräkningsnät.....	8
3.3	Batymetri.....	9
3.4	Vinddata.....	10
3.5	Randvillkor.....	12
3.5.1	Vattenstånd.....	12
3.5.2	Flöden.....	12
3.5.3	Temperatur och salinitet.....	13
3.6	Simulerade förhållanden för dumpning.....	14
3.7	Programvara.....	15
4.	Sediment, muddring och dumpning.....	16
4.1	Sediment.....	17
4.1.1	Tidigare muddring.....	17
4.1.2	Sedimentprovtagning.....	17
4.1.3	Kornstorleksfördelning.....	18
4.2	Muddringsmetoder och förfarande.....	20
4.2.1	Muddringsmetoder.....	20
4.2.2	Muddringsförfarande.....	22
4.3	Dumpning av muddermassor.....	23
4.3.1	Dumpningsförfarande.....	23
5.	Resultat.....	25
5.1	Generella strömningsmönster.....	25
5.2	Muddring.....	27
5.2.1	Sedimentkoncentration.....	27
5.2.2	Halter i utvalda punkter.....	29
5.2.3	Varaktighet.....	32
5.2.4	Sedimentpålagring.....	35
5.3	Dumpning av muddermassor.....	36
5.3.1	Sedimentkoncentration.....	36
5.3.2	Varaktighet.....	41
6.	Diskussion.....	44
6.1	Begränsningar i dataunderlag.....	44
6.2	Begränsningar i metodiken.....	44
7.	Slutsatser.....	46
	Referenser.....	47
	Bilaga 1.....	48

1. Inledning och syfte

Heidelberg Materials planerar att bygga ut sin hamn vid fabriken i Slite. I samband med detta avser bolaget muddra hamnområdet samt inseglingsrännan till Slite ner till 10 m djup. Muddringen medför miljöpåverkan i form av grumling och sedimentpålagring under muddringens genomförande samt vid dumpning av muddermassor.

För att utreda påverkan på recipienten i samband med muddring och dumpning har Sweco upprättat en tredimensionell hydrodynamisk modell, som använts för att simulera muddrings- och dumpningsförloppet. Syftet med modelleringen är att skapa ett underlag för bedömningen av konsekvenser i recipienten.

I föreliggande rapport beskrivs modellens uppbyggnad, hydrodynamiska förhållanden i området, vilka förhållanden som har simulerats, samt generella resultat från modellen.

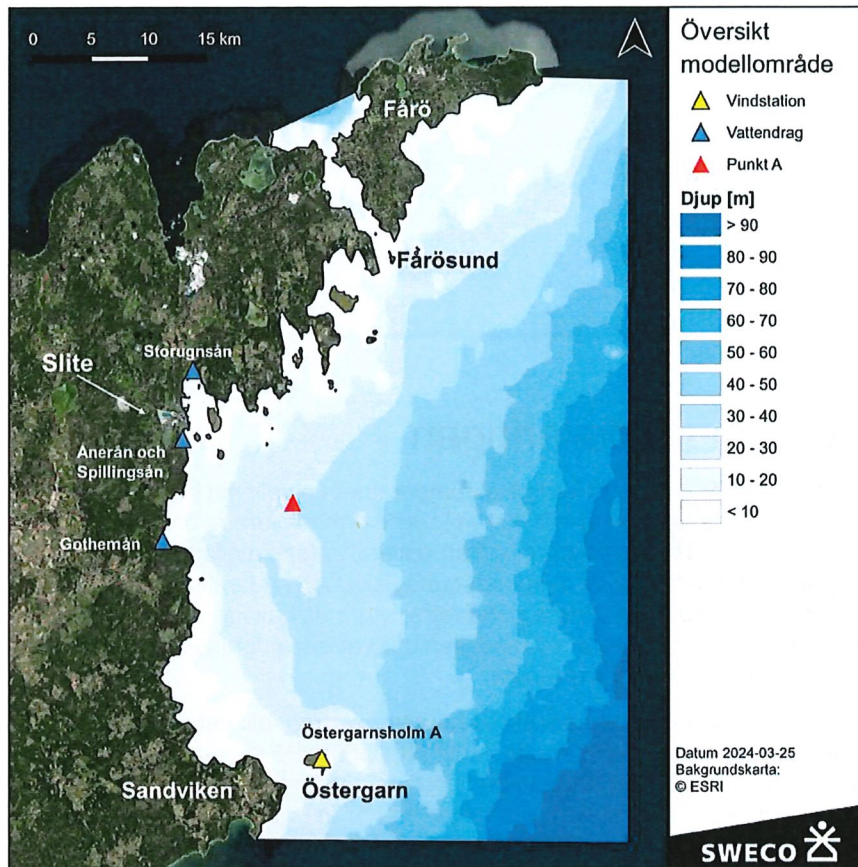
2. Områdesbeskrivning

Heidelberg Materials verksamhet är belägen vid kusten i Slite på östra Gotland. För att på ett korrekt vis beskriva strömmar och spridning av sediment i området krävs att ett tillräckligt stort område omfattas av modellen. Valt modellområde visas i Figur 2-1. Området begränsas i norr av Fårös östligaste spets och i syd av udden öster om Sandviken. I öster består modellen av öppna ränder mot havet. Fårösund har även inkluderats, liksom de öar och skär som är av betydande storlek.

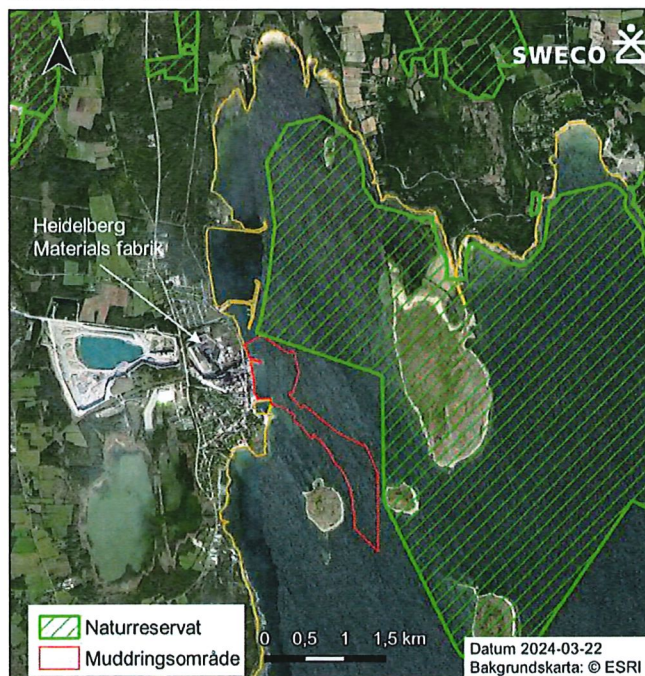
Inför modelluppbyggnaden har preliminära undersökningar av hydrodynamiken i området gjorts genom analys av data från den oceanografiska modellen NEMO Nordic. NEMO Nordic beskriver olika fysikaliska parametrar i havet, bland annat riktning och hastighet av strömmar, temperatur och salinitet. Modellen visar att det i bukten mellan Östergarn och Fårösund tidvis uppstår strömvirvar, det vill säga tillfällen med cirkulära, storskaliga, roterande strömmar. Då dessa är av vikt för vattenmassors rörelse i området har modellområdets storlek bestämts så att dessa strömvirvar kan fångas upp av modellen.

Figur 2-1 visar även djupförhållanden i området. Havsbotten sluttar generellt från de grundare områdena i väst till djupare områden i östra delen av modellområdet. Större del av området är 40 m djupt eller grundare. Den djupaste delen utgörs av det sydöstra hörnet där djupet uppgår till cirka 90 m.

I närheten av verksamhetsområdet finns även skyddad natur i form av naturreservat, Slite skärgårds naturreservatet. Naturreservatets läge visas i Figur 2-2. I figuren visas även det område som använts vid modelleringen. Observera att modellerat muddringsområde inte helt överensstämmer med ansökt muddringsområde. Skillnaden mellan det modellerade och ansökta muddringsområdet är dock marginell och bedöms dock påverka utfallet av modelleringen. Övriga kartor i rapporten som visar muddringsområde visar det ansökta muddringsområdet.



Figur 2-1 Område som omfattas av modellen samt djupförhållanden i modellområdet. Punkt A används för visualisering av strömdata, se avsnitt 3.6.



Figur 2-2 Modellerat muddringsområde samt naturreservat i närheten av verksamhetsområdet. Kartunderlag från Naturvårdsverket (skyddadnatur.naturvardsverket.se). Observera att modellerat muddringsområde inte helt överensstämmer med ansökt muddringsområde.

3. Modell

3.1 Övergripande om modelleringen

En hydrodynamisk modell beräknar strömmar, omblandning, temperatur och salinitet i vattenmassan. Grunden för beräkningarna är modellens beräkningsnät, som täcker det modellerade området och som kan varieras med avseende på upplösning för att uppnå en optimal balans mellan noggrannhet och nödvändig beräkningskapacitet. Modellen drivs med meteorologiska och hydrauliska data såsom vind, vattenstånd, flöde, temperatur och salinitet. Dessa parametrar utgör så kallade randvillkor för modellens beräkningar och ansätts i bestämda delar av modellen där vatten flödar in eller ut ur modellområdet. Sådana delar av modellen benämns ränder.

Modellberäkningarna utgår ifrån ett fördefinierat initialtillstånd (av temperatur, salinitet och likande) och därefter utförs beräkningarna stegvis under en förutbestämd tidsperiod. På så sätt kan en dynamisk variation av strömmar och transport av olika ämnen i ett område simuleras för en given period. Följande avsnitt beskriver hur den hydrodynamiska modellen har upprättats, vilka data som använts som randvillkor samt utgående flöden från verksamheten som använts för att simulera olika utsläppsförhållanden.

3.2 Beräkningsnät

Inom modellens geografiska utbredning har ett triangulärt beräkningsnät upprättats. Trianglars storlek kan varieras så att områden av extra intresse kan få högre beräkningsnoggrannhet.

I modellområdet varierar den horisontella upplösningen mellan 20 – 600 m (Figur 3-1). Modellens finaste upplösning (20 m) återfinns i muddringsområdet. I djupled har modellen 15 lager vilka är tätare vid ytan och genom sötvattenslagret för att upprätthålla en stabil skiktning.

Modellen har två öppna ränder mot Östersjön med havsvattenstånd, temperatur och salthalt. Tre flödesränder inkluderas i modellen för vattendragen Gothemån, Storugnsån samt Anerån och Spillingsån. De två senare vattendragen representeras med en flödesrand då båda flödar ut i bukten vid Slite genom Sjuströmmar (se Figur 2-1).



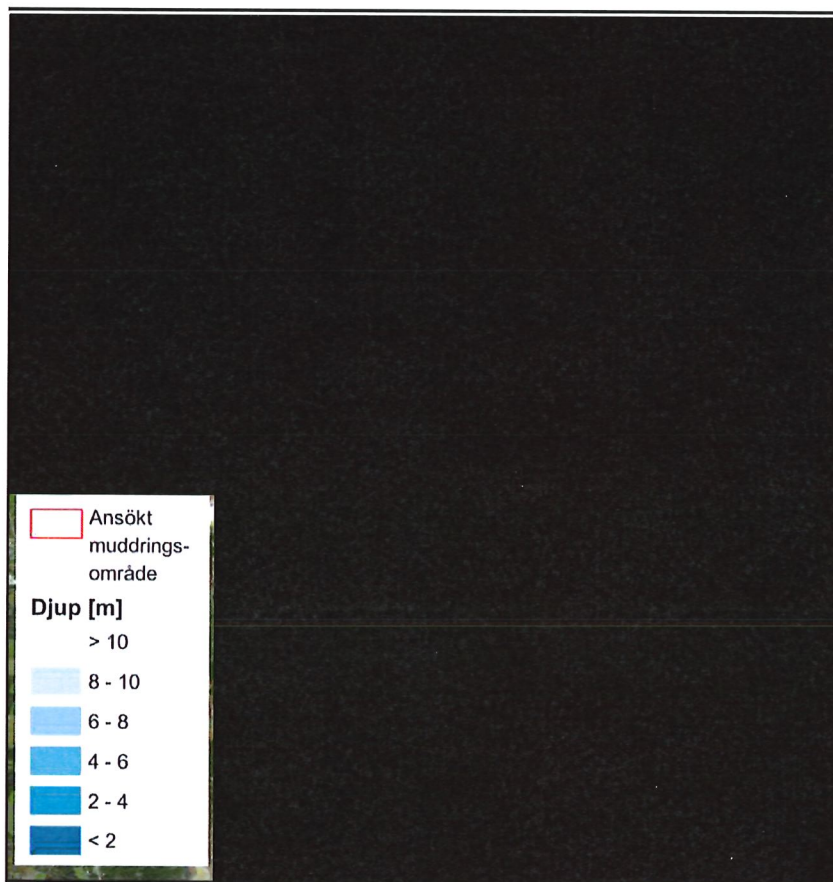
Figur 3-1 Modellområde med beräkningsnät, vattendrag och öppna ränder mot havet. Ansökt muddringsområde visas i den mindre kartan.

3.3 Batymetri

Batymetri är topografins motsvarighet under vattenytan och är således en beskrivning av djupförhållanden i ett område. Modellområdets batymetri visas i Figur 2-1 och har övergripande beskrivits i kapitel 2.

Flera datakällor har använts för att skapa den batymetri som använts. För grunda områden längs stränder, öar och på djup under 20 m har sjökort från Navionics digitaliserats. För djupare områden har data hämtats från Baltic Sea Bathymetry Database (BSBD). Närmast Slite hamn och i muddringsområdet har data från en botten scanning använts som utfördes av Medins år 2023.

Batymetrin i närheten av Slite hamn visas i Figur 3-2.



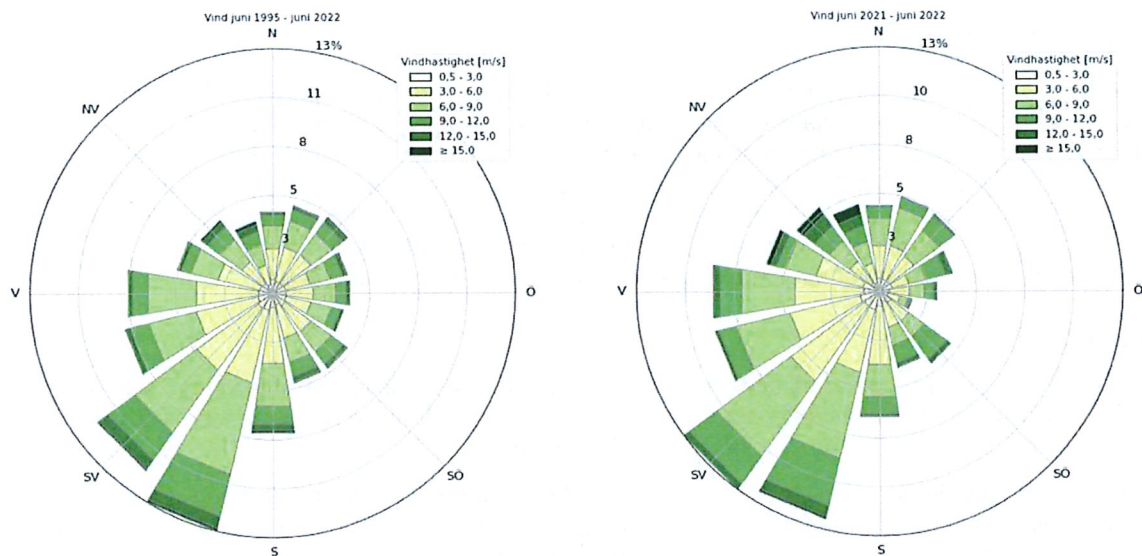
Figur 3-2 Batymetri i närheten av Slite hamn.

3.4 Vinndata

Vinndata är av stor betydelse för modellering av strömförhållanden och omblandning av vattenmassan. I följande kapitel beskrivs hur urvalet av mätstation har gjorts samt vilka perioder som valts för simulering av sommar- och vinterförhållanden.

Val av station för vinndata

SMHI har flera vindstationer på östra Gotland som kan användas för modellering. Samtliga stationer har undersökts. För modellområdet har stationen Östergarnsholm A bedömts vara mest representativ. Vindros för denna station visas för åren 1995 – 2022 i Figur 3-3 (till vänster). Ur figuren går att utläsa att den förhärskande vindriktningen är sydvästlig, starka vindar kan dock förekomma i samtliga riktningar.



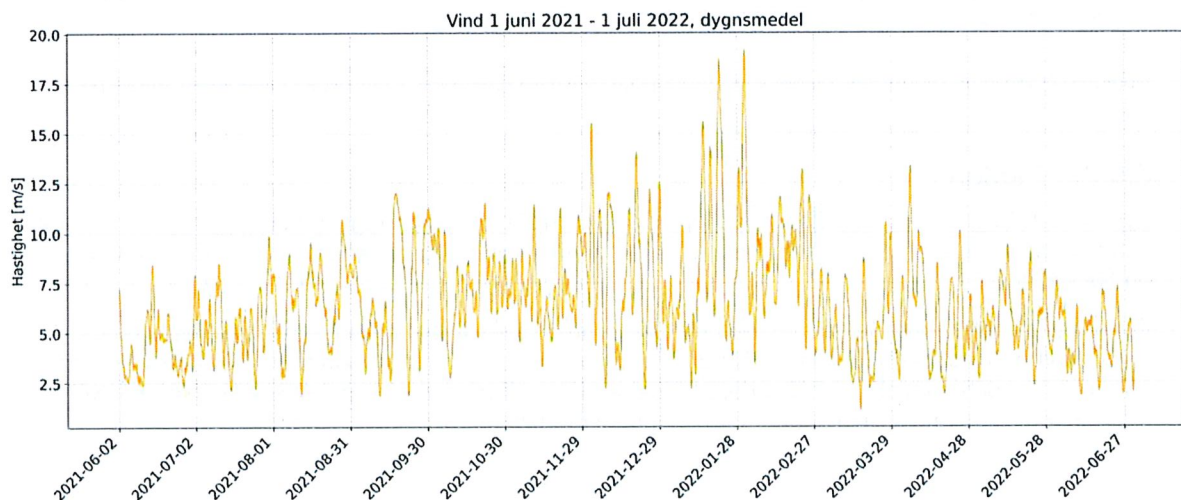
Figur 3-3 Vindros för åren 1995 – 2022 (vänster) samt vindros för valt år (höger).

Val av år för vinddata

Vindförhållanden är av stor betydelse för vattenståndet i området, därför är det av vikt att vindperioden som används i simuleringarna överensstämmer med vald period för havsvattenstånd. Högupplösta tidsserier av modellerade havsvattenstånd finns tillgängliga från 2019 och framåt (se kapitel 3.5.1).

Genom att jämföra vindrosor för flertalet år har året 2021 – 2022 valts ut som indata av vind till modellen. Figur 3-3 visar en vindros för den simulerade perioden (till höger), medan en vindros för samtliga år mellan 1995 och 2022 även visas för jämförelse (till vänster). Vald vindperiod bedöms fånga områdets variation väl, med huvudsakliga vindar från sydväst medan västliga och nordostliga vindar även förekommer, om än i mindre utsträckning.

Figur 3-4 visar dygnsmedelvärden av vindhastighet under den simulerade perioden. Högst vindhastigheter uppstår under vinterhalvåret, där dygnsmedelvärdet av vindhastigheten vanligen ligger mellan 5 – 12,5 m/s och som mest uppgår till cirka 18 – 19 m/s. Sommaren uppvisar lägre vindhastigheter än vintern. Under sommaren är dygnsmedelhastigheten mellan 2,5 – 7,5 m/s, som mest knappt 10 m/s.



Figur 3-4 Dygnsmedel av vindhastigheten under juni 2021 – juni 2022.

3.5 Randvillkor

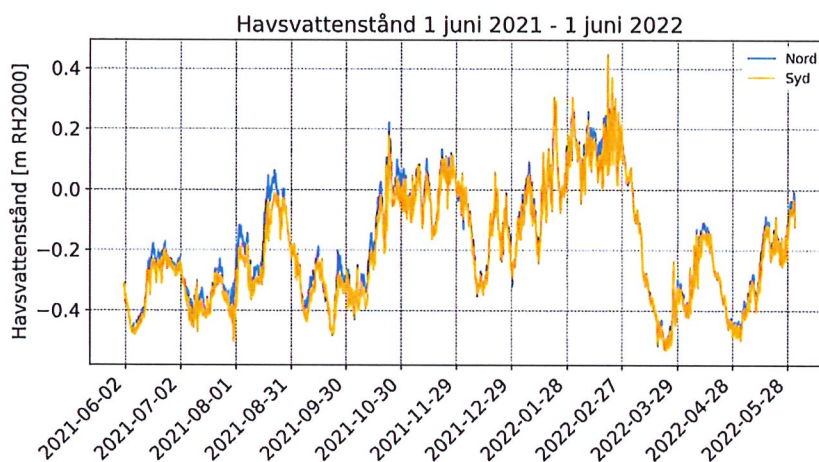
Det viktigaste randvillkoret som påverkar strömmar i det modellerade området är skillnader i havsvattenstånd längs modellens öppna ränder. Dessa beror i sin tur bland annat på vindförhållanden. Därmed har även vinden betydelse för strömningsmönstren, speciellt vid höga vindhastigheter (se avsnitt 3.4). I modellens öppna ränder samt i vattendragen definieras även temperatur och salinitet så att skiktningen återges på ett korrekt sätt. Likaså definieras initiala värden på temperatur och salinitet i modellområdet som modellen utgår från vid uppstart. Följande kapitel beskriver randvillkoren samt dataunderlaget som använts för att upprätta dem.

3.5.1 Vattenstånd

Vattenståndet i Östersjön har hämtats från den oceanografiska modellen NEMO-Nordic (se SMHI (2021)). Tidsserier över havsvattenstånd har hämtats i punkter längs de öppna ränderna som visas i Figur 3-1, där avståndet mellan punkterna är cirka 500 m.

Det valda året utgörs av perioden juni 2021 – juni 2022. Detta år har valts ut eftersom vindförhållanden för denna period bedömts vara representativ för området (se kapitel 3.4) samtidigt som dataunderlaget i NEMO-Nordic är av tillfredsställande kvalitet.

Figur 3-5 visar havsvattenståndet under simuleringsperioden vid två punkter i modellens norra och södra rand (*Nord* respektive *Syd* i figuren). Vattenståndet varierar på liknande vis i övriga punkter, de två ränder som visas har valts för att illustrera hur vattenståndet varierar mellan modellområdets norra och södra del. Figuren visar att de säsongsmässiga variationerna i vattenstånd är betydligt större än variationen mellan ränderna.



Figur 3-5 Vattenstånd i två punkter i modellens havsrand under simulerad period. Dataunderlag har hämtats från NEMO-Nordic.

3.5.2 Flöden

Fyra vattendrag har inkluderats i modellen: Gothemån, Anerån, Spillingsån och Storugnsån. Anerån och Spillingsån har ett gemensamt utlopp till Östersjön vid Sjuströmmar och har därför slagits ihop till en flödeskälla.

För samtliga vattendrag har flödesdata hämtats från SMHI:s hydrologiska modell S-Hype via webbtjänsten vattenweb (SMHI, 2022). Flödesdata har använts för att sammanställa medelflöden under vinter- och sommar-förhållanden. Flödena antas därmed vara konstanta under respektive meteorologiskt scenario. De flöden som använts i modellen redovisas i Tabell 3-1.

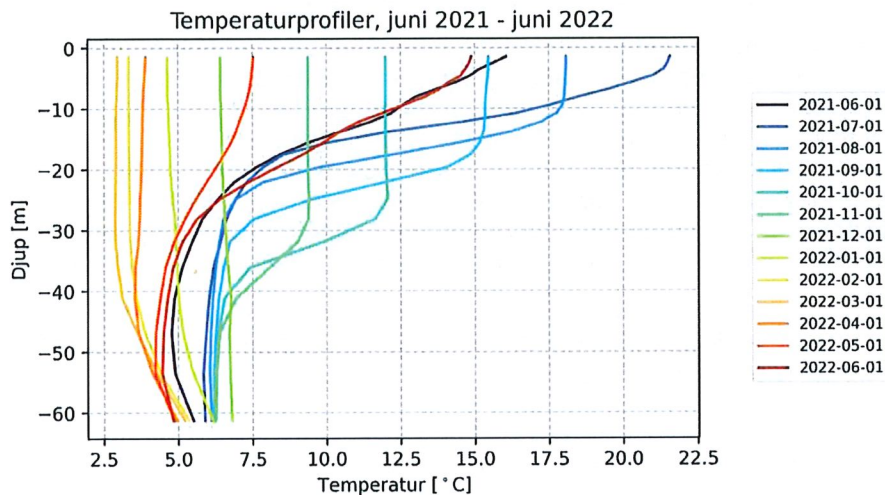
Tabell 3-1 Medel-, min- och maxflöde för vattendragen som inkluderats i modellen under simulerad period.

Vattendrag	Medelflöde [m ³ /s]	Min [m ³ /s]	Max [m ³ /s]
Gothemån	3,16	0,38	6,93
Sjuströmmar	0,25	0,05	0,52
Storugnsån	0,24	0,06	0,51

3.5.3 Temperatur och salinitet

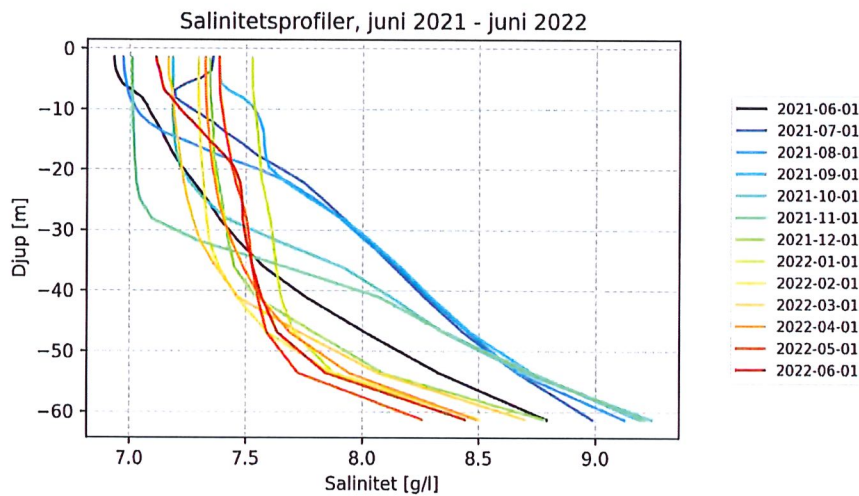
För temperatur och salinitet i havet har data hämtats från NEMO-Nordic. Samma punkter har använts som för havsvattenståndet (se kapitel 3.5.1).

Figur 3-6 och visar temperaturprofiler i en punkt på randen under simulerad period. Värderna visas för första dagen varje månad. Under sommaren syns en tydlig termoklin vars läge varierar mellan cirka 15 – 25 m djup. Under hösten försvagas termoklinen och under vintern och våren är den nästan obefintlig. Sent på våren återgår termoklinen till ett liknande läge som under sommaren med högre temperaturer i ytan än i botten.



Figur 3-6 Temperaturprofiler i havsränderna under simulerad period.

Figur 3-7 visar salinitetsprofiler under simulerad period, även här visas värden för första dagen varje månad under juni 2021 – juni 2022. Precis som för temperaturprofilerna syns en grundare skiktning på sommaren jämfört med vintern. Skiktningen är dock mindre tydlig än för temperaturen och generellt varierar salinitet inte mer än 0,5 – 1 psu på givet djup.

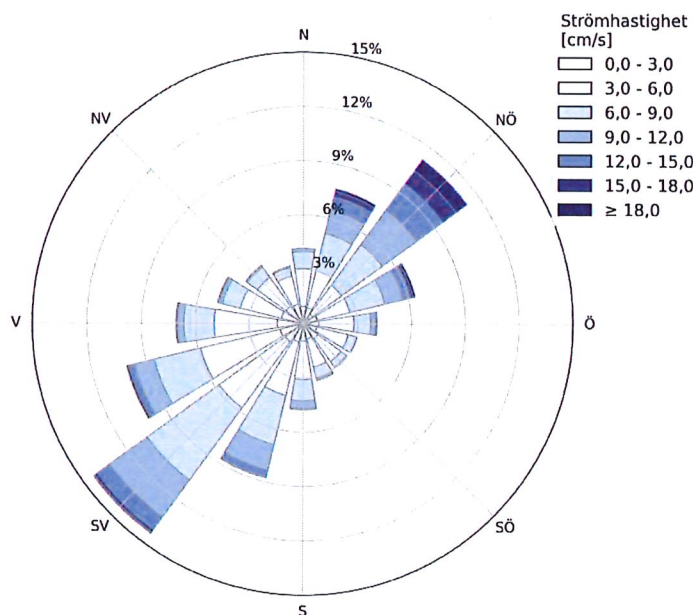


Figur 3-7 Salinitetsprofiler i havsränderna under simulerad period.

3.6 Simulerade förhållanden för dumpning

Då dumpningen sker stötvis finns möjlighet för suspenderat sediment att sjunka till botten mellan dumpningstillfällena. Eftersom ingen koncentrationsstegring då sker blir sedimentspridningen oberoende av strömförhållandena före och efter dumpning och enbart beroende av strömförhållandena vid dumpningstillfället. Därför bedömdes att simulering av hela dumpningsförloppet inte är nödvändigt för att göra bedömningar av påverkan från dumpningen. Istället har fem olika veckor med olika representativa strömförhållanden simulerats för att fånga variationen i sedimentspridningen som kan uppstå vid dumpning av muddermassor. Nedan beskrivs de fem meteorologiska scenarier som simulerats med avseende på strömriktning och strömhastighet.

I Figur 3-8 visas en strömros baserad på data från NEMO-Nordic från *Punkt A*, se Figur 2-1. I en strömros visar de enskilda staplarnas längd och färgnyans hur ofta en viss strömriktning förekommer och staplarnas riktning representerar vilken riktning strömmen rör sig mot.



Figur 3-8 Strömros från *Punkt A*, se Figur 2-1. Riktningen är definierad som "rör sig mot".

Strömmarna i området är tydligt dominerade av sydvästlig och nordostlig transport och det är endast i undantagsfall som strömmen är nordvästgående. Nordvästgående ström vid ett dumpningstillfälle hade inneburit större risk för att suspenderat sediment från dumpningen skulle transporteras in mot naturreservaten närmare kusten, se Figur 2-2.

Utifrån strömrosen i Figur 3-8 bestämdes att ett högströmsscenario och ett lågströmsscenario för nordostgående och sydvästgående ström samt ett strömsscenario med nordvästgående ström skulle simuleras. Dessa scenarier valdes från den tidsserie som simulerats för muddringen och sammanfattas i Tabell 3-2.

Tabell 3-2 Meteorologiska dumpningsscenarier

Scenario	Period
Högström, nordostgående	2023-01-08 – 2023-01-15
Lågström, nordostgående	2022-11-25 – 2022-12-02
Högström, sydvästgående	2022-12-12 – 2022-12-19
Lågström, sydvästgående	2022-12-02 – 2022-12-09
Nordvästgående	2023-01-23 – 2023-01-30

3.7 Programvara

Modellering av hydrodynamiken har skett med mjukvaran TELEMAC 3D, som bland annat beräknar strömmar, temperatur, spridning och sedimentation grundat på Navier-Stokes ekvationer. Ekvationerna beräknar vattnets rörelse som en funktion av gravitations-, friktions-, och tryckkrafter.

Sedimentrelaterade processer såsom sedimentering och pålagring har modellerats med Telemac-modulen GAIA, som kopplas till spridningsmodellen. En del av muddermassorna hamnar i suspension och följer sedan vattnets rörelser. Suspenderade sediment sjunker efterhand till botten och sedimenterar. Sjunkhastigheten beräknas från sedimentens kornstorlek och densitet.

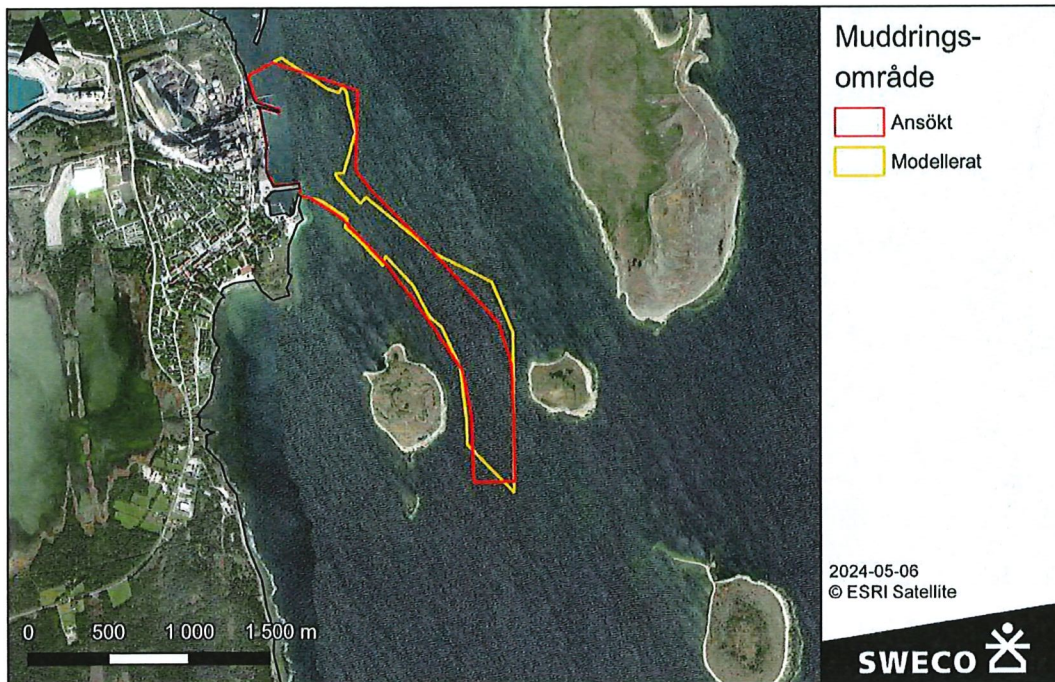
4. Sediment, muddring och dumpning

Muddringen av hamnen och farleden planeras öka djupet till 10 m i muddringsområdet. Volymen av resulterande muddermassor uppskattas därvid uppgå till totalt cirka 1,5 miljoner m³. I området finns både lösa sediment såsom lera, silt och sand, och fast material i form av kalkstensberggrund. Modellerat muddringsområde visas i Figur 4-1. Notera att ansökt muddringsområde, som visas i samma figur, skiljer sig något från modellerat muddringsområde. Ansökt muddringsvolym är dock densamma. Resultaten från simuleringarna bedöms därmed inte påverkas nämnvärt av skillnaden i områdenas utbredning.

Sedimentets egenskaper är av stor betydelse vid beräkning av spridning och pålagring av muddrade sediment. I detta kapitel beskrivs områdets sedimenttyper, muddringsmetoder och framdrift, samt vilka antaganden som gjorts för simulering av sedimentspridning.

I avsnitt 4.1 beskrivs vilka typer av sediment som provtagningarna har påvisat i området, vilka kornstorleksfördelningar de har samt vilka antaganden som gjorts med avseende på spill, densitet, porositet och dyligt. Med spill menas andelen av muddermassorna som hamnar i suspension i samband med muddringen eller dumpningen och som ger upphov till grumling. I avsnitt 4.2 beskrivs muddringsförfarandet, det vill säga vilka metoder som har antagits för de olika muddringsområdena, hur framdriften av muddringen simulerats samt antaganden kopplat till spillfraktioner, sedimentkoncentrationer som kan uppstå vid muddring samt hur ställtid (tider då ingen muddring sker på grund av exempelvis väderförhållanden) har inkluderats i modellen. Avslutningsvis behandlar avsnitt 4.3 antaganden och metodik kopplat till simulering av dumpning av muddermassor.

Det bör påpekas att modelleringen endast tar hänsyn till sediment som uppstår vid planerad muddring och dumpning. Naturliga bakgrundshalter av suspenderat material är komplexa och osäkra och oftast finns inga data av erforderlig kvalitet att tillgå för att inkludera i en sedimentmodell. Bakgrundshalter av suspenderat material inkluderas därför inte i modellen, vilket är vanligt förekommande vid modellering av sedimentspridning från muddring i Sverige. Sedimentkoncentrationer i modellresultaten ska därför tolkas som haltpåslag utöver eventuella bakgrundskoncentrationer.



Figur 4-1 Modellerat och ansökt muddringsområde.

4.1 Sediment

I detta avsnitt beskrivs tidigare muddring som gjorts i Slite hamn, sedimentprovtagning som gjorts av Medins år 2023 samt kornstorleksfördelningar för relevanta sedimentprover.

4.1.1 Tidigare muddring

I samband med en tidigare utbyggnad av Slite hamn på 70-talet gjordes en studie av bottenmaterialets beskaffenhet, dels genom sedimentprover, dels genom akustisk profilering. Hamnen byggdes ut i två etapper där den första etappen utgjordes av muddring av farleden in till Slite hamn och en fördjupning av hamnbassängens norra del, medan den andra bland annat utgjordes av en fördjupning av hamnbassängens södra del. I den första etappen uppskattades muddringsvolymen till 465 000 m³, huvudsakligen bestående av kohesionsmaterial. För den andra etappen uppskattades muddringsvolymen till 85 000 m³, varav cirka 30 % bedömdes bestå av kalksten, och resten av lösa sediment, både kohesions- och friktionsmaterial¹.

4.1.2 Sedimentprovtagning

Inför den utbyggnad av hamnen som nu planeras av Heidelberg Materials har sedimentprover tagits av Medins under sommaren 2023. Analys av kornstorleksfördelning av sedimentproverna gjordes av SGS Analytics.

Prover togs i planerat muddringsområde samt längre ut i havet vid planerade dumpningsområden. Ett urval av provtagningspunkterna visas i Figur 4-2. Punkt 01 – 10 ligger inom det planerade muddringsområdet. Färgskalan indikerar den huvudsakliga sedimentfraktionen för respektive punkt utifrån utförda kornstorleksanalyser.

¹ Kohesionsmaterial: finkornigt material, såsom lera, där materialet hålls ihop genom kohesionskrafter mellan kornen.
Friktingsmaterial: grovkornigt material, såsom sand och grus, där materialet främst hålls ihop genom friktion mellan kornen.



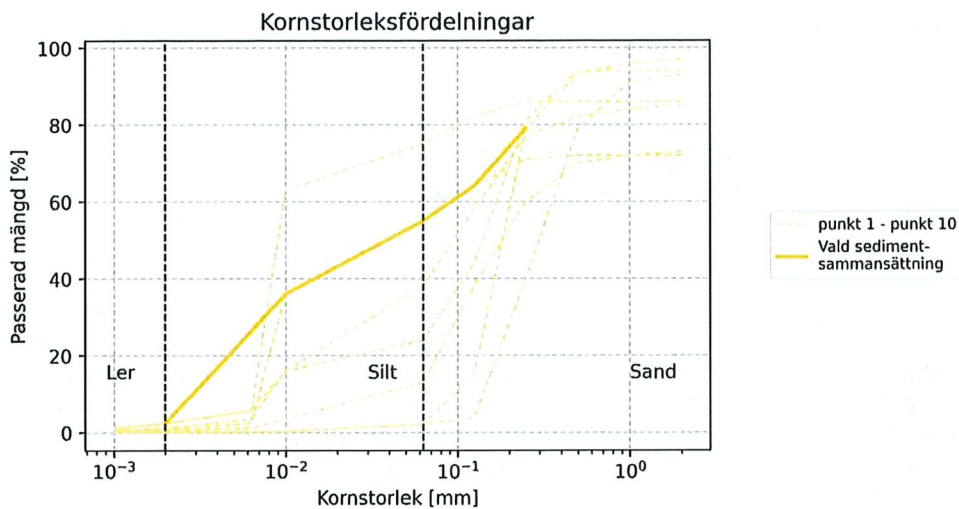
Figur 4-2 Punkter för sedimentprovtagning i närheten av muddringsområdet.

4.1.3 Kornstorleksfördelning

Kornstorleksfördelningen av muddrat material är av stor vikt för grumling och sedimentation vid muddring. Fina material såsom ler och silt hålls i suspension längre och sprids därför över större område, medan grövre material såsom sand sedimenterar relativt snabbt.

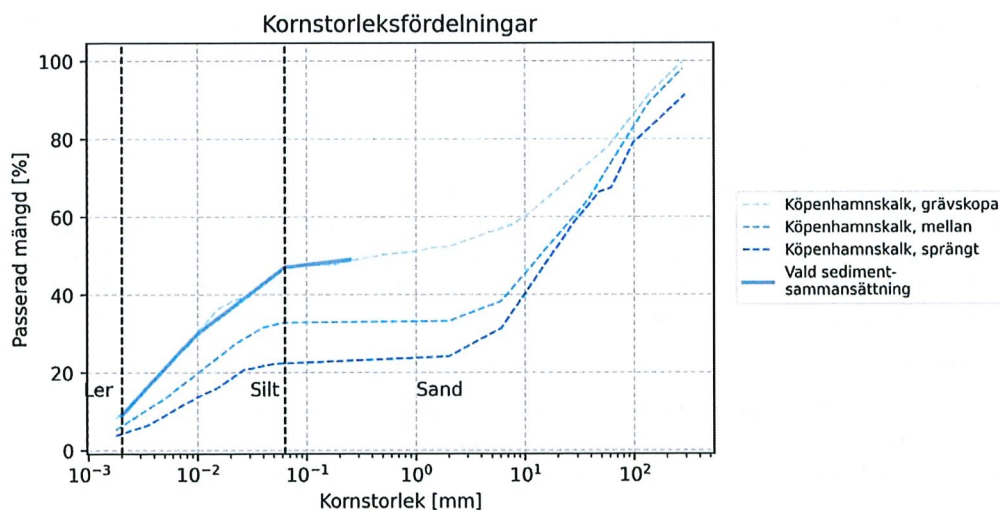
Då det muddrade materialet består av många olika sedimentfraktioner utgår simuleringarna ifrån en förenkling där muddrat material delats in i två huvudsakliga sedimenttyper: lösa sediment och sediment från fräst kalksten. Detta grundar sig dels på att tidigare muddring har påvisat att bottensubstratet huvudsakligen består av lösa sediment men att det även finns kalksten i området. Dessa två typer av material bedöms ha betydligt skilda egenskaper i form av kornstorleksfördelning, andelen spill som uppkommer vid muddring samt förväntad sedimentkoncentration omedelbart i närheten av muddringen. Därför lämpar de sig väl som huvudsakliga sedimenttyper.

Figur 4-3 visar kornstorleksfördelningarna för provpunkterna 1 – 10, samt vilken sedimentsammansättning som valts för att representera dessa punkter i simuleringarna. Sammansättningen har valts så att en konservativ uppskattning av mängden fina material fås. Totalt antas fem olika kornfraktioner, med kornstorlekar mellan 0,002 mm och 0,25 mm. Kornstorleksfördelningen sammanfattas i Tabell 4-1. Material som är grövre än 0,25 mm antas sedimentera direkt och utesluts därför ur kornstorleksfördelningen.



Figur 4-3 Kornstorleksfördelningar av sedimentprovtagningar i muddringsområdet och av vald sammansättning för simulering av lösa sediment i Slite hamn.

Vid muddring av kalksten används olika tekniker som ger upphov till olika kornfraktioner. Generellt innebär metoderna att materialet bryts, krossas, sprängs, eller på annat sätt finfördelas, vilket ger upphov till många olika kornfraktioner. Den kornstorlek som uppstår vid olika typer av muddringsförfarande kan variera och det finns begränsat med referensdata för olika metoder. Generellt gäller dock att metoder som fräsning ger upphov till mindre fraktioner än brytning och sprängning. I Figur 4-4 redovisas kornstorleksfördelningar som uppkommit vid muddring av kalksten i Öresund i samband med anläggningen av Öresundsbron. Flera olika metoder användes, vilket gav upphov till olika kornstorleksfördelning av muddrat material. I Figur 4-4 visas även vald sedimentsammansättning för kalksten som använts i simuleringarna i föreliggande utredning. Vald sammansättning utgör en konservativ kornstorleksfördelning baserat på tillgängligt underlag från muddring vid Öresundsbron. Fem olika kornstorlekar antas för sedimentspillet, där kornstorlekar grövre än 0,25 mm uteslutits då detta material antas sedimentera omedelbart. Kornstorleksfördelningen av resterande klasser sammanfattas i Tabell 4-1.



Figur 4-4 Kornstorleksfördelning av Köpenhamnskalk och av vald sammansättning för simulering av fräst kalksten i Slite hamn.

Tabell 4-1 Kornstorleksfördelning (%) i lösa sediment och fräst kalksten när grova sediment (kornstorlek > 0,25 mm) har exkluderats.

Kornstorlek [mm]	<0,002	<0,01	<0,063	<0,125	<0,25
Sediment	3	43	24	11	19
Kalksten	18	43	35	2	2

Utöver kornstorleksfördelning har muddrat material andra egenskaper som också är av vikt vid simulering, nämligen densitet, porositet, spill och sedimentkoncentration som antas uppstå direkt intill mudderverken. Detta sammanfattas i Tabell 4-2. Densitet och porositet av de två sedimenttyperna har hämtats från (SGU, 2009). Med densitet avses kornens kompaktdensitet. Andelen spill av lösa sediment har hämtats från riktlinjer från Naturvårdsverket (2009). För kalksten finns begränsade underlag för bedömning av andelen spill, värdet som används här baseras på tidigare modelluppdrag och ska ses som en konservativ uppskattning. Koncentrationen vid muddringen syftar på den koncentration av suspenderat material som kan förväntas uppstå i direkt anslutning till muddringen. Koncentrationen baseras på en kunskaps-sammanställning gjord av SLU (SLU, 2020).

Tabell 4-2 Antaganden som gjorts kopplade till sedimenttypernas egenskaper.

Parameter	Lösa sediment	Fräst kalksten
Kompaktdensitet	2650 kg/m ³	2650 kg/m ³
Porositet	60 %	10 %
Spill	5 %	10 %
Koncentration invid mudderverk	5000 mg/l	2000 mg/l

4.2 Muddringsmetoder och förfarande

Följande kapitel redovisar de antaganden som gjorts i samband med simulering av muddringen, dels med avseende på metoder, dels med avseende på muddringschema och framdrift. Kapitlet behandlar även hur dumpning av muddermassor har simulerats.

4.2.1 Muddringsmetoder

På grund av att materialet på havsbotten varierar krävs olika typer av mudderverk. För lösa sediment antas enskopeverk användas, vilket innebär att muddringen sker med en grävmaskin som står på en ponton och lastar muddermassor på en pråm, se Figur 4-5. För kalkstensberggrund har antagits att muddringen sker med ett så kallat *cutter suction*-mudderverk, se Figur 4-6. Detta innebär fräsning av berggrunden med ett munstycke, varefter krossat material sugas upp genom en ledning till en pråm.

De olika muddermetoderna innefattar olika muddringshastighet. Detta sammanfattas i Tabell 4-3.

Det kan inte uteslutas att andra utrustningar används under muddringsarbetena. De utrustningar och övriga antaganden som använts i denna modellering bedöms utgöra ett konservativt och resultaten motsvarar således vad kan förväntas från andra utrustningsalternativ, t.ex. brytningsutrustning för kalksten.



Figur 4-5 Enskopeverk. Bild från Duncan Seawall²



Figur 4-6 Cutter suction-mudderverk. Bild från Royal IHC³

Det är okänt hur stor andel av bottenmaterialet i muddringsområdet som utgörs av lösa sediment respektive fast berggrund. I föreliggande utredning antas 70 % av den totala muddringsvolymen utgöras av lösa sediment medan resterande 30 % utgörs av fast berggrund. Detta sammanfattas i Tabell 4-3, tillsammans med den totala muddrade volymen per sedimenttyp.

Tabell 4-3 Muddringsmetod, framdriftshastighet, volymandel och total muddrad volym för respektive sedimenttyp.

Sedimenttyp	Typ av mudderverk	Hastighet	Andel av muddervolym	Total volym
Lösa sediment	Enskopeverk	208 m ³ /h	70 %	1 050 000 m ³
Kalksten	Cutter suction-mudderverk	42 m ³ /h	30 %	450 000 m ³

² <https://blog.duncanseawall.com/what-is-the-process-for-a-commercial-dredging-project-in-florida>

³ <https://www.royalihc.com/news/royal-ihc-sells-eu-100-million-worth-dredgers>

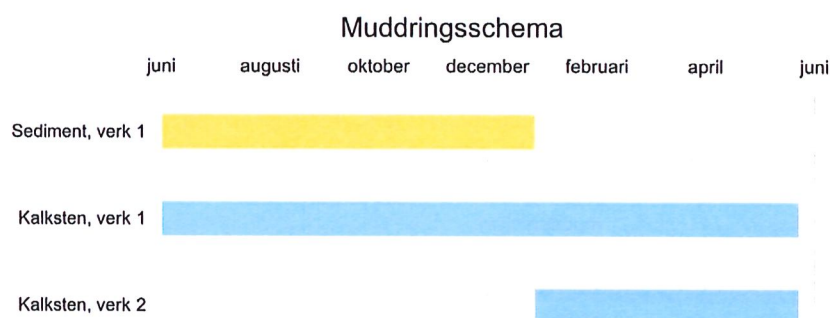
4.2.2 Muddringsförfarande

Framdriften av muddringen har i simuleringarna utgått från ett antagande om att två mudderverk arbetar samtidigt och börjar muddra närmast kajkanten och rör sig ut mot havet. Baserat på tidigare muddring i området antas att all kalksten återfinns närmast kajkanten och att resterande del av muddringsområdet endast innehåller lösa sediment. Detta visas i Figur 4-7, där *Sediment* innebär lösa sediment och *Kalksten* innebär fast berggrund.

Muddringsförfarandet sker på så sätt att ett *cutter suction*-mudderverk påbörjar muddring av kalksten samtidigt som ett enskopeverk påbörjar muddringen av lösa sediment. Det senare går betydligt snabbare än det första. När muddringen av sediment är färdig utgår enskopeverket och ett andra *cutter suction*-mudderverk tillkommer för att färdigställa muddring av kalksten. Muddringsförfarandet sammanfattas i Figur 4-8.



Figur 4-7 Muddringsförfarande i modellen. Inledningsvis muddras delsektionerna *Kalksten 1* och *Sediment*. När den senare är färdig påbörjas muddring av *Kalksten 2*.



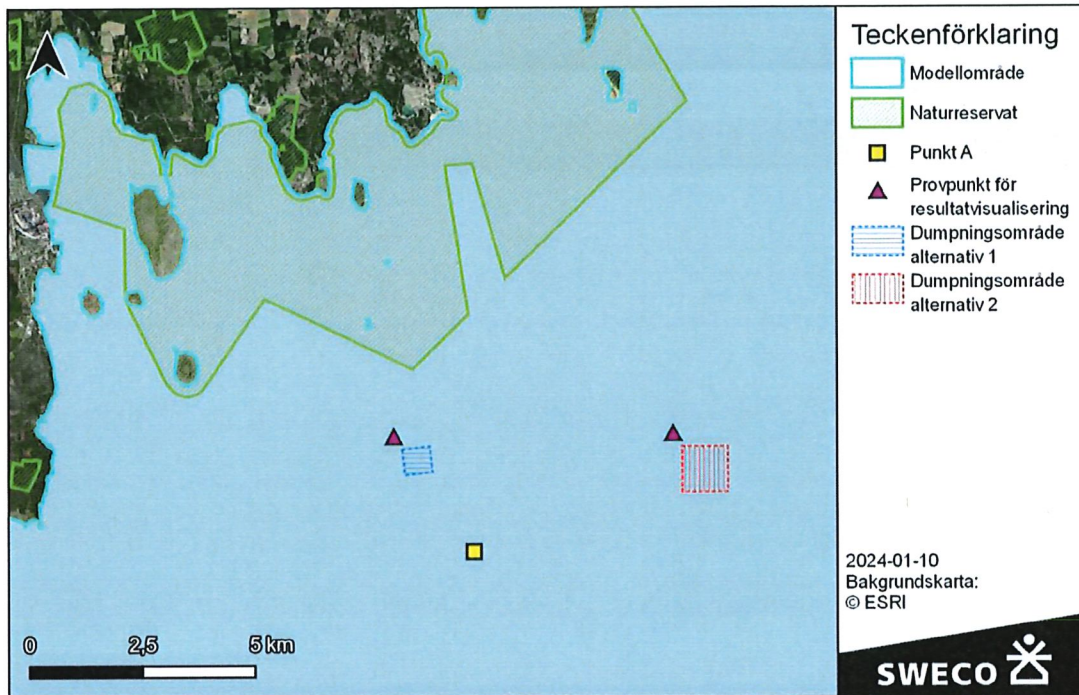
Figur 4-8 Schema över muddringens framdrift.

Simuleringens resultat påverkas av antaganden om ställtidens omfattning. Ställtid är tider då muddring inte sker på grund av väderförhållanden eller andra orsaker. Detta innebär att uppgrumlade sediment kan sedimentera, vilket minskar grumlingen. För att ta hänsyn till ställtid och samtidigt inte

underskatta miljöpåverkan, så har endast väderförhållanden tagits i beaktande vid ställtid. Under tider då medelvindhastigheten per dygn överstiger 15 m/s sker därför ingen muddring i simuleringarna.

4.3 Dumpning av muddermassor

Det muddrade materialet planeras att dumpas till havs. Vid dumpning sker, precis som vid muddring, sedimentspill när delar av de dumpade massorna blir suspenderat i vattenkolumnen och rör sig med strömmarna. Två alternativa dumpningsområden har undersökts, se Figur 4-9.



Figur 4-9 Översiktskarta över dumpningsområdena. I kartan visas även naturreservat i närheten av dumpningsområdena samt Punkt A som har använts för analys av strömförhållandena.

4.3.1 Dumpningsförfarande

Dumpningen planeras ske med botten tömmande pråmar. Ett dumpningstillfälle antas vara i 10 minuter och ske längs en cirka 50 m lång linje 2 meter under havsytan. Allt dumpat sediment blir inte suspenderat utan en stor andel faller direkt ned till botten. Detta gäller såväl fina sediment som på grund av kohesiva krafter kan hålla ihop i större aggregat (klumpar) med hög sjunkhastighet, som grövre sediment i form av grus eller stenar. Mot denna bakgrund har det antagits att 10 % av allt dumpat sediment blir suspenderat och kan röra sig med strömmarna och det är enbart denna del av sedimentet som har inkluderats i modellen. Det dumpade sedimentet antas ha samma kornstorleksfördelning som det muddrade sedimentet.

Eftersom ingen lagring av muddrat sediment planeras är dumpningshastigheten (massflöde) samma som muddringshastigheten. Denna blir därför olika för muddring av kalkberg respektive lösa sediment. Vid muddring sker generellt stor inblandning av vatten i muddermassorna. I föreliggande studie antas 60 % av muddermassorna utgöras av vatten då de placerats på pråmen. Tillsammans med antagandet om en pråmvolym av 1 000 m³ leder detta till två olika dumpningsperioder (tid mellan två på varandra följande dumpningstillfällen), om cirka 5 respektive 25 h. I dumpningsscenarioet sker därför, för att få konservativa resultat, simultan dumpning av muddermassor från både berg och lösa sediment.

Tabell 4-4 Sammanfattade antaganden om pråm- och dumpningsegenskaper.

Parameter	Värde
Pråmvolymin	1 000 m ³
Tömningsperiod	10 min
Dumpningsdjup	2 m
Vattenhalt	60 %
Spillprocent	10 %
Dumpningsperiod, sediment	5 h
Dumpningsperiod, berg	25 h

5. Resultat

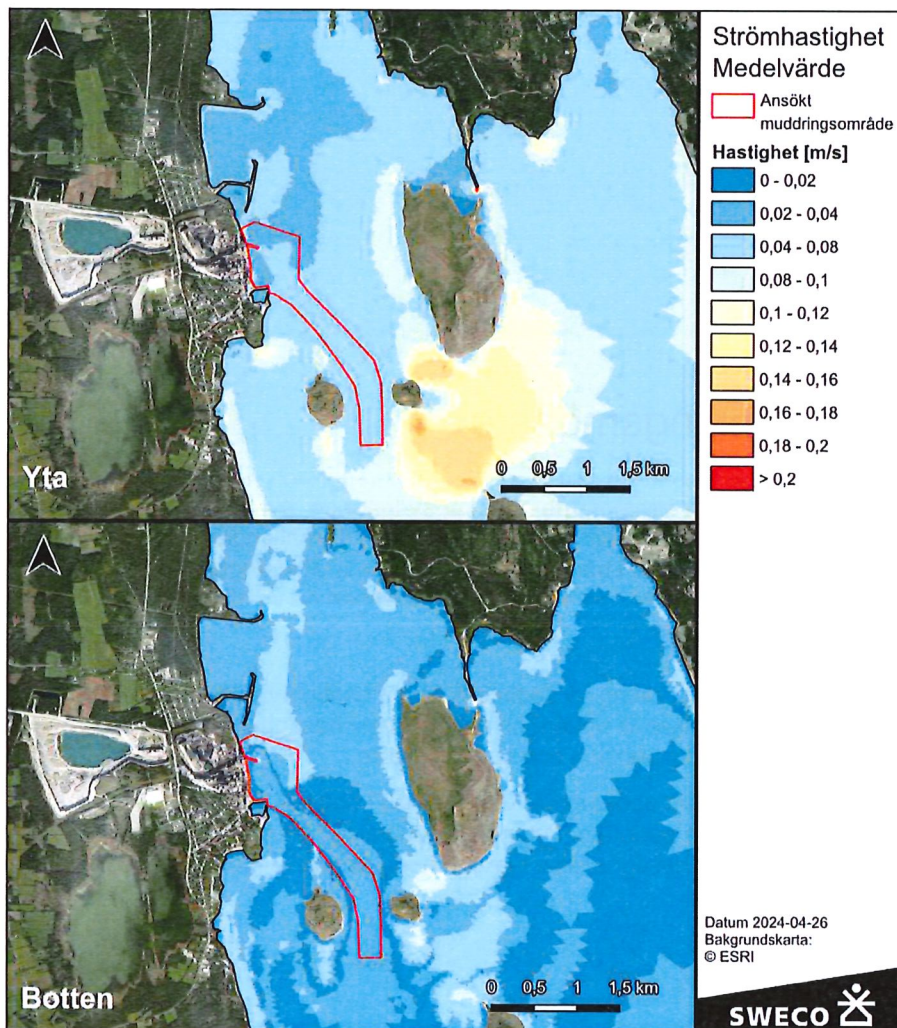
5.1 Generella strömningsmönster

Generellt varierar strömförhållandena i havet vid östra Gotland med väder och vind utan några fasta strömmar. Modellresultaten visar dock att strömmarna oftast är sydgående, även om riktningarna varierar mycket beroende på vattenstånd i ränderna mot havet och vindförhållanden. Modellen indikerar att strömvirvar tidvis uppstår i bukter i både liten och stor skala. Riktningen på strömvirvarna och hastigheterna som uppstår i dem beror huvudsakligen på vindförhållanden.

Strömhastigheter

Strömhastigheter har stor betydelse för spridning av sediment. Höga hastigheter kan transportera sedimenten längre sträckor innan de sjunker till botten, och höga bottenhastigheter kan förmå sedimenterade massor att åter hamna i suspension och spridas vidare.

Figur 5-1 visar medelströmhastigheter som uppkommer vid ytan och i botten i närheten av muddringsområdet under den simulerade perioden. I ytan är medelhastigheterna cirka 4 – 8 cm/s, som mest cirka 30 – 40 cm/s. I botten är hastigheterna lägre, i medel cirka 2 – 4 cm/s och som mest 20 – 30 cm/s.



Figur 5-1 Medelhastigheter i ytlagret (överst) och bottenlagret (nederst).

Modellresultaten tyder på årstidsmässiga variationer med högre strömhastigheter under vintern än under sommaren. Detta beror på de högre vindhastigheterna som uppkommer under vinterhalvåret under stormar och gäller såväl i ytan som på botten.

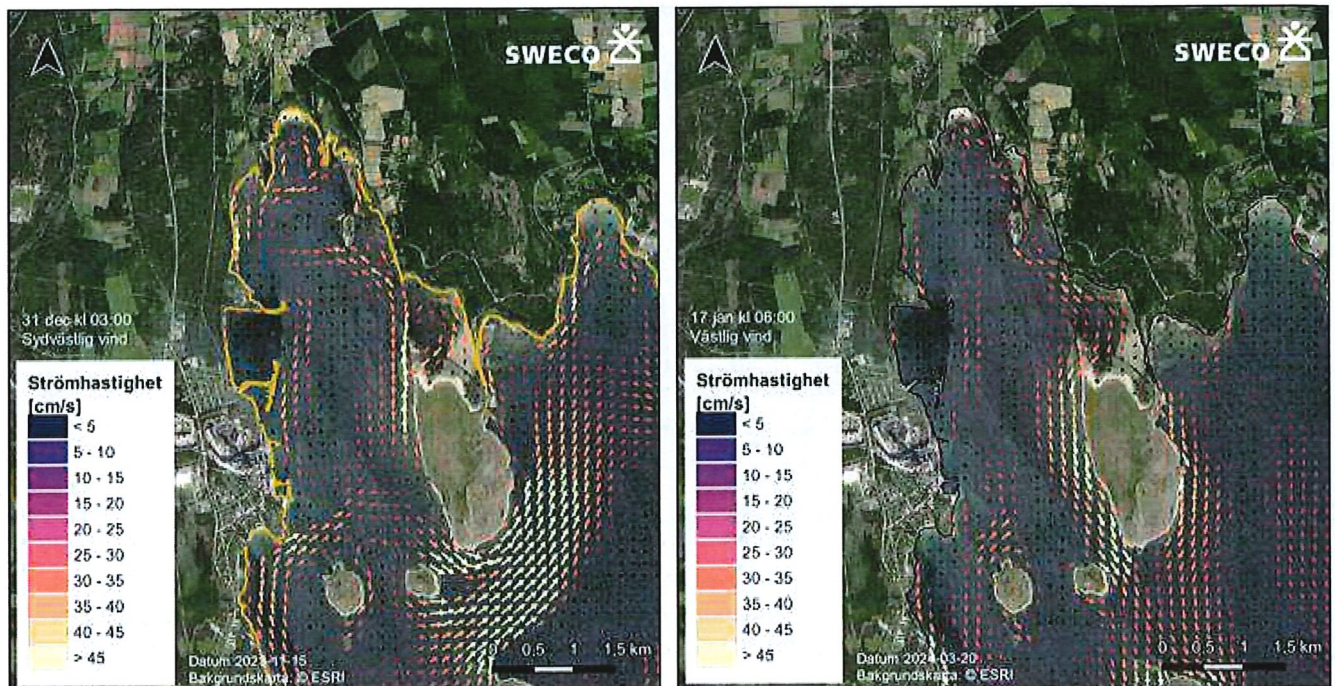
Utöver den säsongsmässiga variationen finns även en variation i rummet som beror på bottendjupet. I grunda områden påverkas bottenhastigheter i högre utsträckning av vindens inverkan vid ytan, vilket leder till högre bottenhastigheter jämfört med djupare områden.

Strömvirvlar

Modellen indikerar att det tidvis uppstår strömvirvlar i Slitebukten, vilket är av betydelse för spridning av suspenderade sediment. Beroende på vindens hastighet och riktning kan det innebära att vatten söderifrån förs norrut in mot Slitebukten som sedan stannar där med relativt långa uppehållstider. Det sker vid strömvirvlar som går moturs, vilket i simuleringarna uppstår vid sydvästliga eller sydostliga vindar och är tydligast när vindhastigheten överstiger cirka 10 m/s. Ett exempel visas i Figur 5-2 (till vänster) i en ögonblicksbild under simuleringen. Vindriktningen under detta tillfälle är sydvästlig och uppgår till cirka 12 m/s. Resultater beräknade strömhastigheter är i storleksordningen 15 – 45 cm/s.

Stundtals antyder modellen även att omvända strömvirvlar kan uppstå, med snabbare omsättning av vattenmassan som följd. Till höger i Figur 5-2 visas en ögonblicksbild av dessa strömförhållanden under en tidsperiod med västlig vind. Dessa strömningsförhållanden tycks även kunna uppstå vid nordvästliga vindar.

Figurerna visar simulerade strömmar under vintern, där dessa strömmar ofta är starkare på grund av högre vindhastigheter. Liknande situationer uppträder däremot även under resten av året vid liknande vindriktningar.



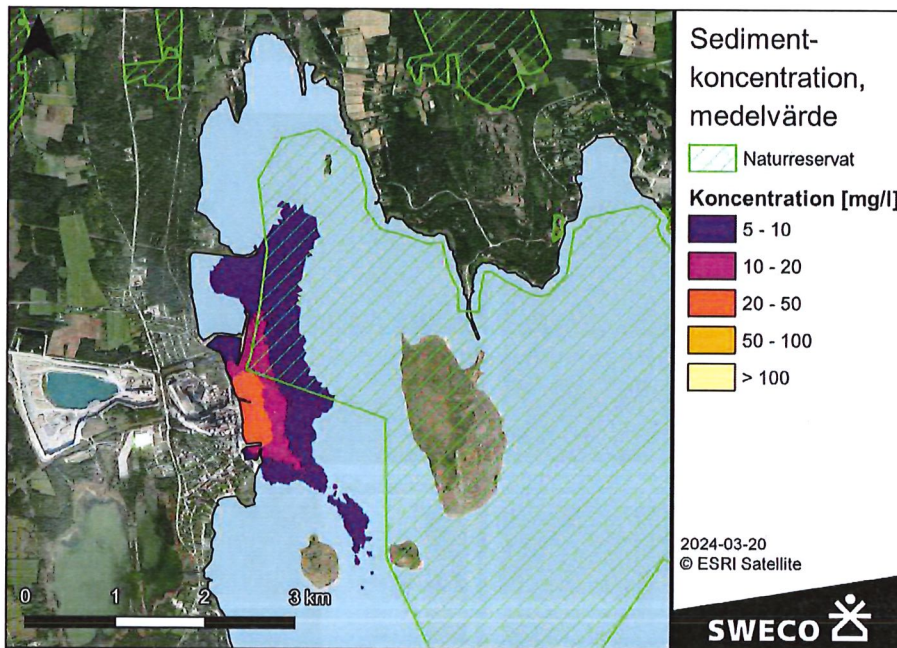
Figur 5-2 Strömvirvel moturs i Slitebukten. Sydvästlig vind. Strömshastigheter är medelvärde över djupet.

5.2 Muddring

Detta avsnitt beskriver resultaten från simulering av muddring av hamnen och farleden in till Slite hamn, med avseende på halter av suspenderat material, varaktigheten av förhöjda halter samt sedimentpålagring.

5.2.1 Sedimentkoncentration

Figur 5-3 visar medelhalter av suspenderade sediment som uppstår under den simulerade perioden. Högst medelhalter beräknas uppstå närmast hamnen, där medelhalten uppgår till 20 – 50 mg/l. I naturreservatet beräknas medelhalten vara runt 5 – 10 mg/l i ett område i västra delen av reservatet nära Slite hamn. I ett mindre område nära småbåtshamnen beräknas medelhalter uppgå till mellan 10 – 20 mg/l.

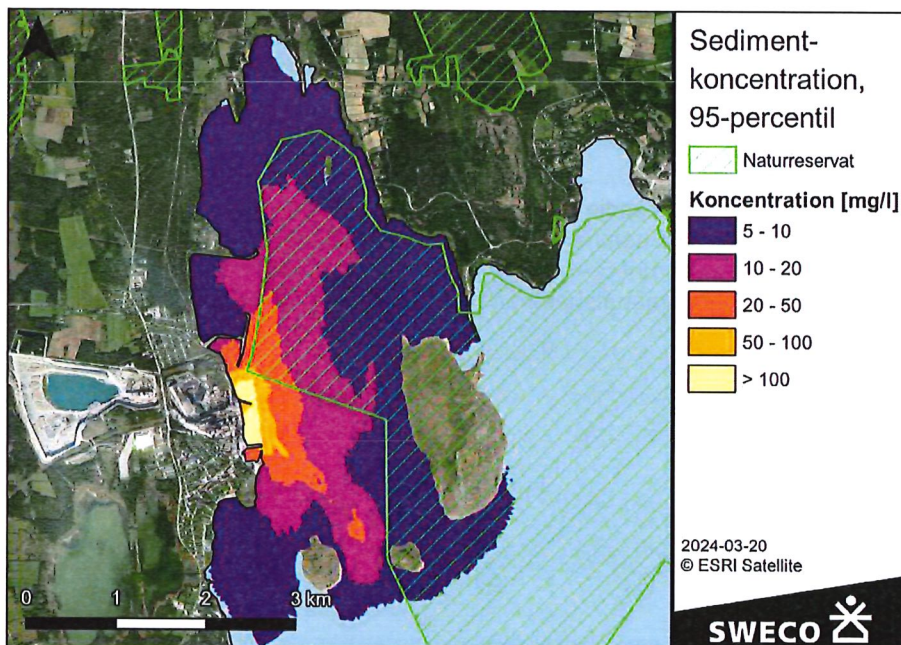


Figur 5-3 Koncentration av suspenderade sediment. Medelvärde.

Figur 5-4 visar 95-percentilen av sedimentkoncentrationen under den simulerade perioden. Med andra ord visas halter som överskrider under 5 % av tiden som simulerats, vilket är 344 dygn.

Modellresultaten visar att 95-percentilen av sedimentkoncentrationen är minst 5 – 10 mg/l för hela Slitebukten väster om Asunden och norr om Enholmen. Påverkan sträcker sig som mest 1 km söder om Enholmen och Grunnet. Högst halter uppstår i området söder om småbåtshamnen ner till Slite hamn, här är 95-percentilen över 100 mg/l, med ett maxvärde på cirka 240 mg/l.

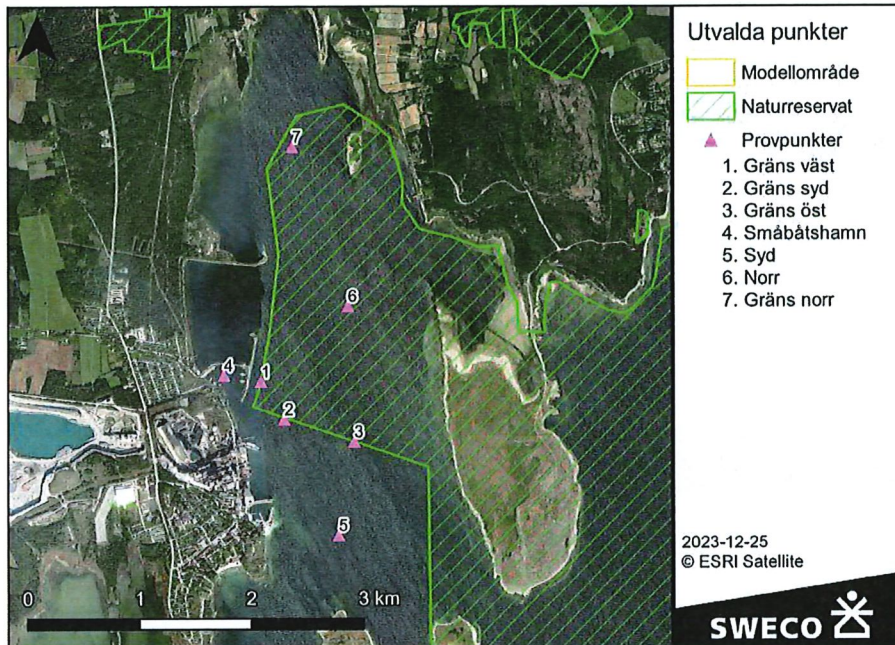
I naturresevatet beräknas 95-percentilen till som mest 20 – 50 mg/l.



Figur 5-4 Koncentration av suspenderade sediment. 95-percentil.

5.2.2 Halter i utvalda punkter

För att illustrera hur sedimentkoncentrationen varierar i tid och över djupet har ett antal utvalda punkter i området undersökts. Punkternas lägen visas i Figur 5-5 och har valts dels för att få en uppfattning om påverkan på naturreservatet, dels för att se påverkan på småbåtshamnen och området direkt öster om kajområdet. Punkternas lägen visas i Figur 5-5.



Figur 5-5 Utvalda punkter i området för vilka tidsserier och varaktighetsdiagram har producerats.

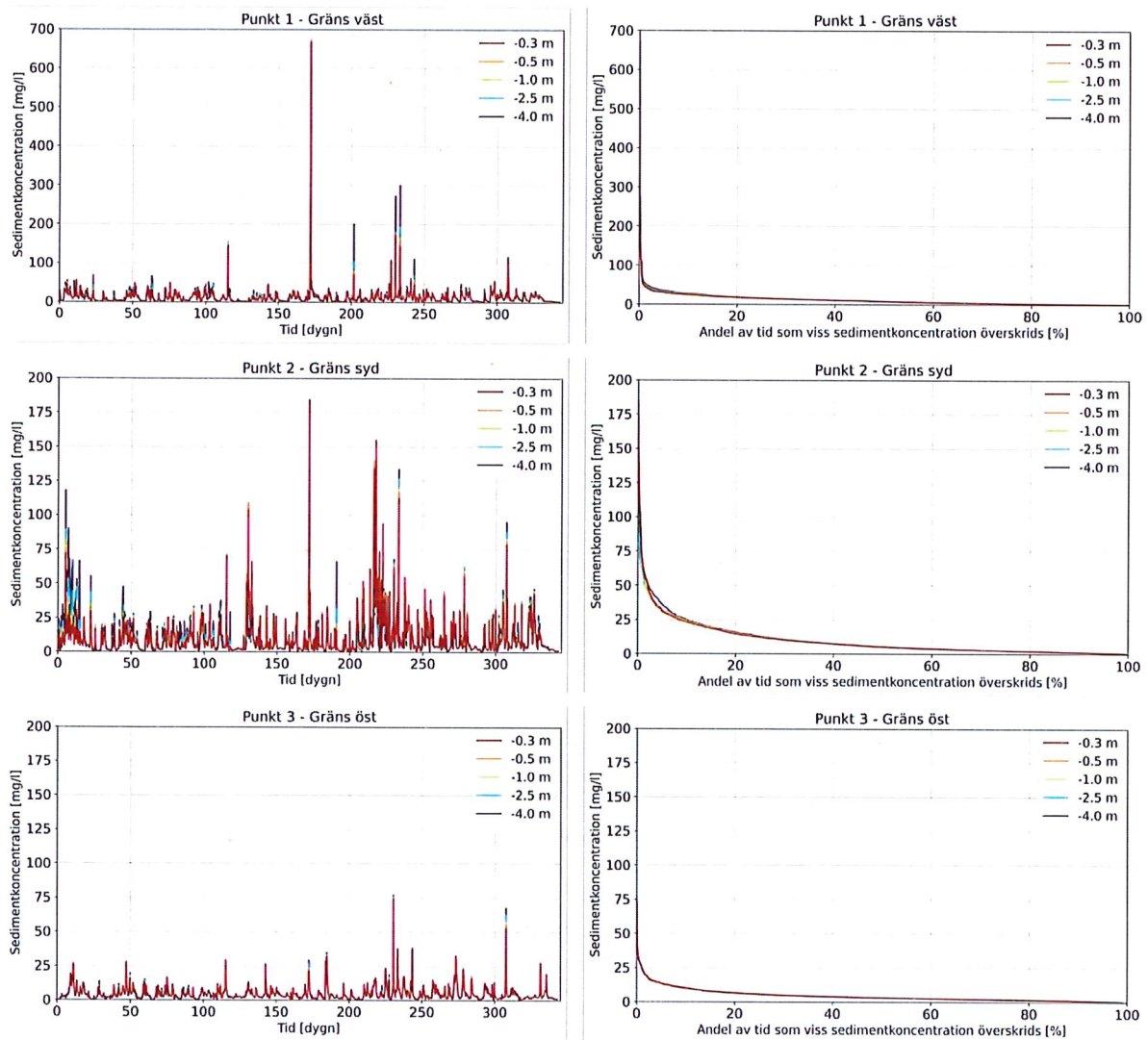
Figur 5-6 och Figur 5-7 visar tidsserier och varaktighetsdiagram i punkterna som visas i Figur 5-5. De vänstra graferna visar tidsserier av koncentrationen av sediment i olika djup. Diagrammen till höger visar hur stor andel av tiden som en viss koncentration överskrids, även dessa diagram visar resultaten för olika djup.

Generellt pekar modellresultaten mot halter under 50 mg/l i samtliga punkter, men halten varierar mycket och ibland uppstår enskilda toppar med halter uppemot 700 mg/l (Punkt 1 i Figur 5-6). Varaktigheten av halter över 50 mg/l är enstaka procent av den totala simulerade perioden, cirka 2 % av tiden i punkt 2 och mindre än det i övriga punkter.

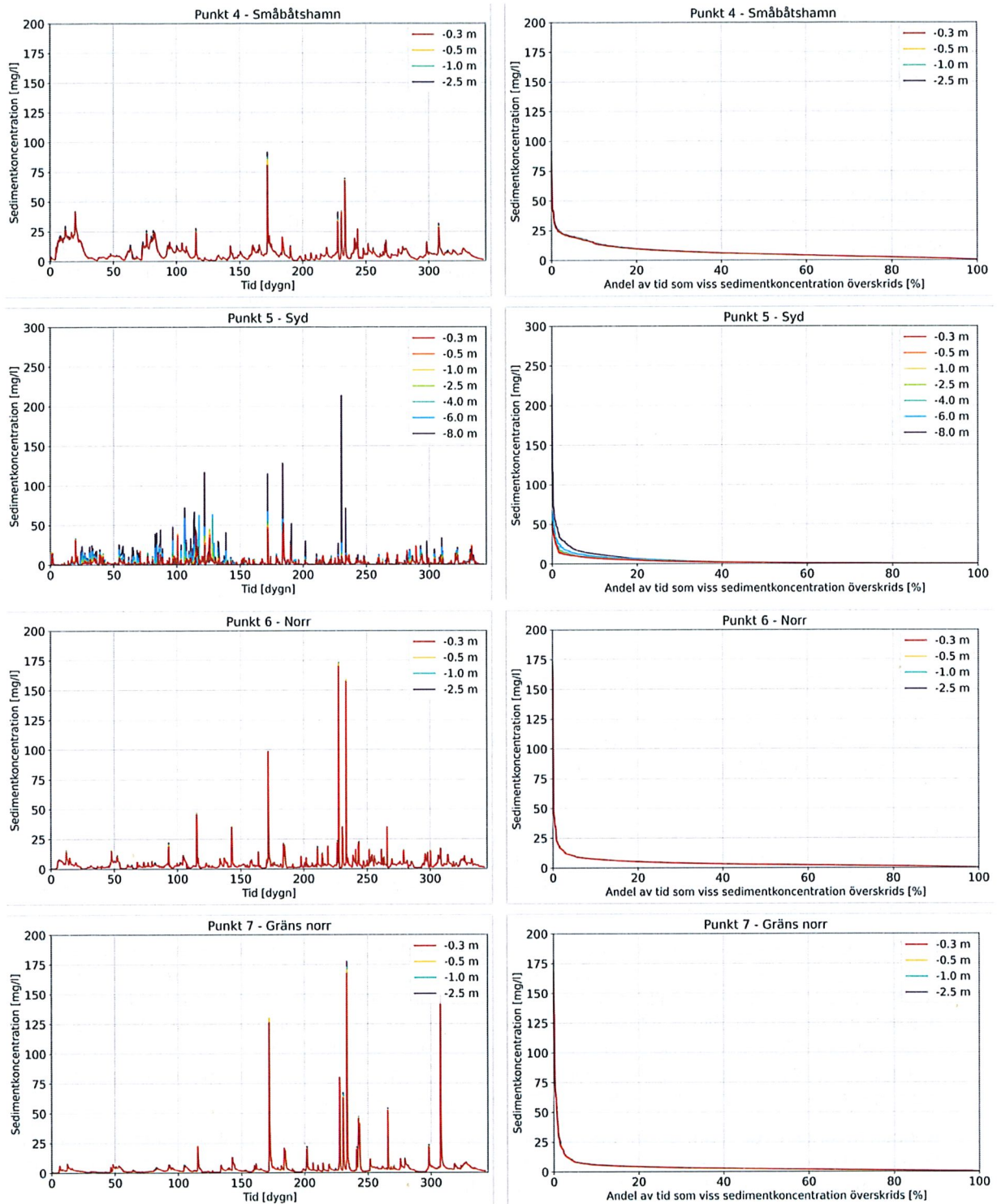
Även i punkt 2 uppstår förhållandevis höga koncentrationer, jämfört med övriga punkter. Punkt 2 ligger närmast kajområdet där muddringen börjar och där resultaten i avsnitt 5.2.1 visar att medelkoncentrationer och 95-percentilen av suspenderat material är som högst. Punkt 5 ligger i farleden som muddras, här är dock koncentrationerna lägre än i punkt 2. Det kan förklaras av att punkt 5 ligger längre ut i recipienten där strömhastigheterna generellt är högre, samtidigt som muddringen fortgår under kortare tid i punkt 5 jämfört med området närmast land.

Vid naturreservatets norra gräns och i mitten av Slitebukten (punkt 7 respektive punkt 6 i Figur 5-5) är koncentrationerna generellt under 25 mg/l. Även här syns dock enstaka tillfällen med betydligt högre koncentrationer. Modellresultaten indikerar att detta sker när sedimenterat material resuspenderas av höga bottenhastigheter, och sedan sprids i Slitebukten. Detta fenomen har även observerats i andra punkter.

Det bör även påpekas att resuspendering av botten sediment troligen sker även i dagsläget vid tillfällen med höga bottenhastigheter, såsom under stormar. Framtida frekvens och omfattning av sådan resuspendering bedöms inte påverkas av muddringen.



Figur 5-6 Tidsserier och varaktighetsdiagram i punkterna 1 – 3. Notera att den vertikala skalan för Punkt 1 skiljer sig från övriga punkter.

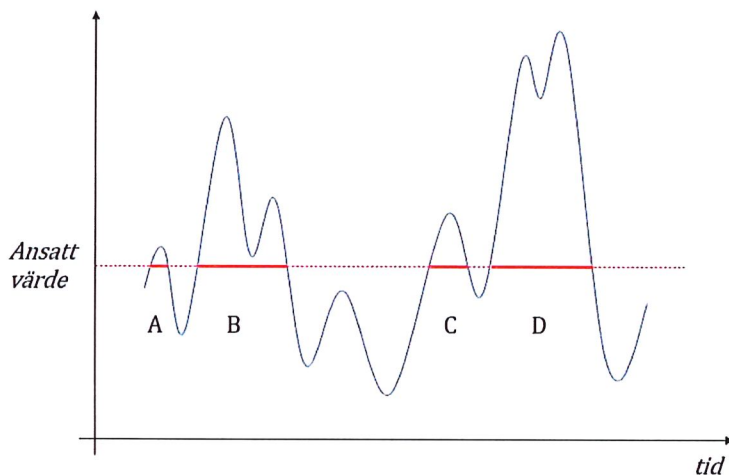


Figur 5-7 Tidsserier och varaktighetsdiagram i punkterna 1 – 3. Notera att den vertikala skalan för Punkt 5 skiljer sig från övriga punkter.

5.2.3 Varaktighet

Nedan följer redovisningar av varaktigheter då vissa sedimentkoncentrationer överskrider. Dels visas total varaktighet, med andra ord den totala tiden då en viss sedimentkoncentration överskrider, dels visas sammanhängande varaktighet, vilket innebär den längsta sammanhängande perioden då en viss koncentration överskrider.

För att tydliggöra skillnaden mellan dessa två sätt att redovisa varaktigheten kan Figur 5-8 användas. Figuren visar en schematisk bild av hur koncentrationen av ett ämne kan variera i en recipient. Den röda streckade linjen visar ansatt värde för vilket varaktigheten ska undersökas, heldragna linjer visar perioder (A, B, C och D) då värdet överskrider. Med *total varaktighet* menas alltså summan av samtliga tillfällen då värdet överskrider, medan *sammanhängande varaktighet* hänvisar till det tillfälle som under längst tid har koncentrationer som överskrider ansatt värde, i detta fall period D.

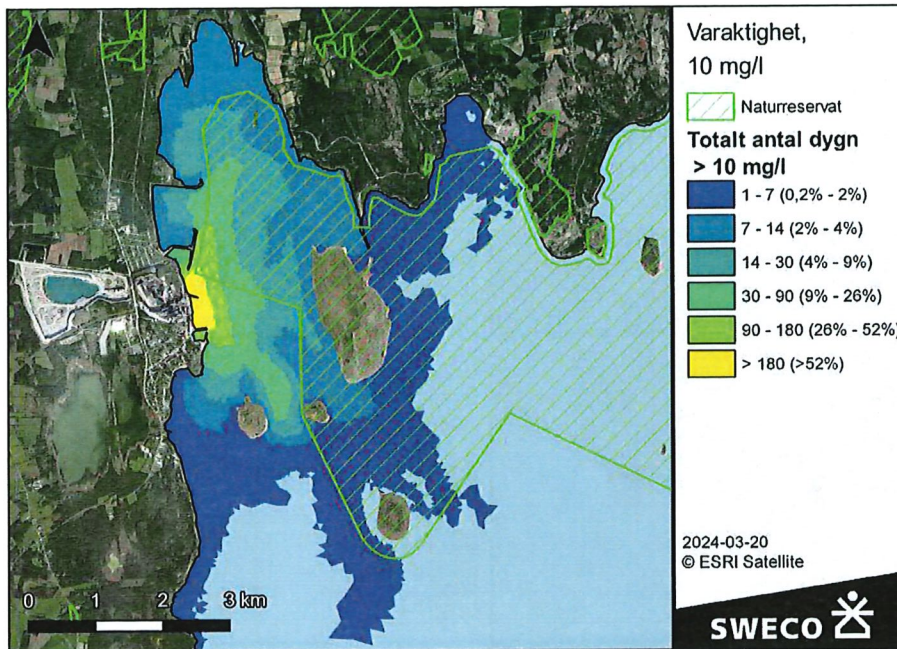


Figur 5-8 Illustration av skillnaden mellan total varaktighet (summan av A, B, C och D) och längsta sammanhängande varaktighet (längsta enskilda period, i detta fall D).

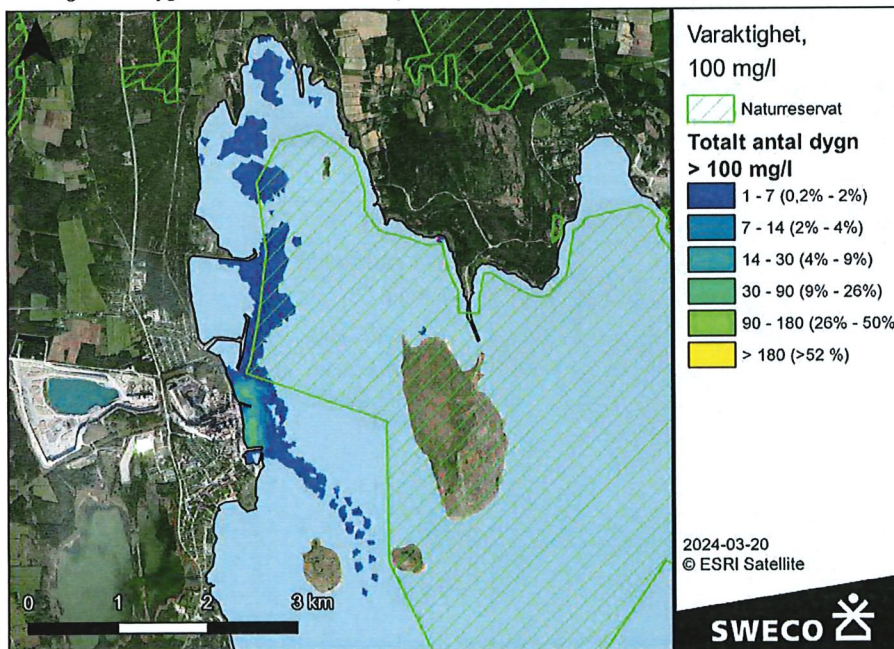
Figur 5-9 och Figur 5-10 beskriver det totala antalet dygn samt procentuell andel av den simulerade perioden som sedimentkoncentrationer över 10 respektive 100 mg/l uppstår. Varaktighet för koncentrationer över 50 mg/l har också undersökts. Resultaten för 50 mg/l är snarlika resultaten för 100 mg/l och har därför infogats i Bilaga 1.

I ett område som sträcker sig cirka 500 m ut från kajen är den totala varaktigheten av koncentrationer över 10 mg/l över 180 dygn (52 % av tiden) under det simulerade året, som mest 257 dygn (75 % av tiden). I detta område sker kontinuerlig muddring under hela den simulerade perioden, vilket bidrar till den höga totala varaktigheten. I farleden och längs kusten är varaktigheten mellan 9 – 180 dygn totalt, i ett område som i nordlig-sydlig riktning sträcker sig cirka 4 km och 1 – 1,5 km i västlig-östlig riktning. I hela Slitebukten tyder simuleringarna på 30 – 90 dygn där koncentrationen överstiger 10 mg/l, vilket motsvarar cirka 9 % – 26 % av den simulerade perioden.

Koncentrationen över 100 mg/l har en varaktighet på 1 – 7 dygn längs den västra kusten i Slitebukten, figuren tyder på fragmenterade områden där dessa varaktigheter uppstår. Som mest är varaktigheten av 100 mg/l 43 dygn totalt (cirka 13 % av tiden), detta sker närmast kajen.



Figur 5-9 Totalt antal dagar av simulerad period då sedimentkoncentrationen överstiger 10 mg/l. Färgskalan visar både varaktigheten i dygn under den simulerade perioden samt i procentuell andel av simulerad tid.

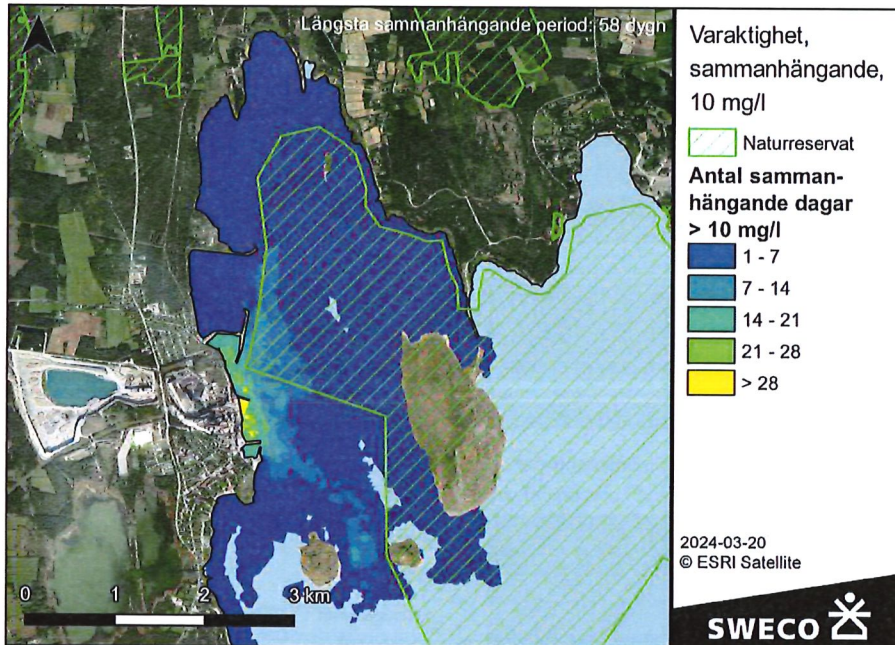


Figur 5-10 Totalt antal dagar av simulerad period då sedimentkoncentrationen överstiger 100 mg/l. Färgskalan visar både varaktigheten i dygn under den simulerade perioden samt i procentuell andel av simulerad tid.

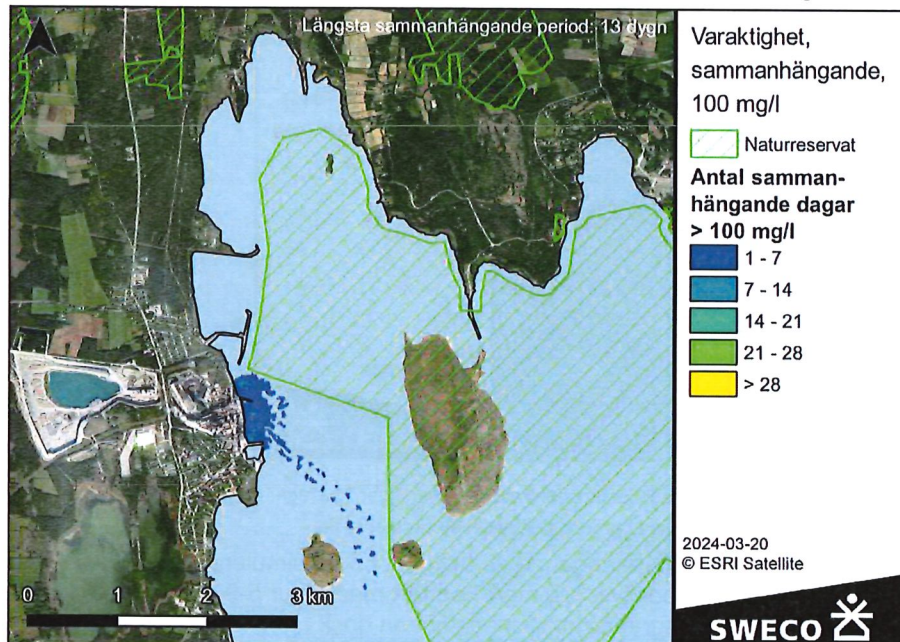
Figur 5-11 och Figur 5-12 visar längst sammanhängande varaktighet under simulerad period där sedimentkoncentrationen överstiger 10 respektive 100 mg/l. Jämfört med Figur 5-9 och Figur 5-10 är denna varaktighet som förväntat betydligt lägre. Samma mönster kan dock urskönjas, med generellt längre varaktighet nära kajen land och i farleden och länge varaktighet för 10 mg/l jämfört med 100 mg/l. Sammanhängande varaktighet för koncentrationer över 50 mg/l har också undersökts. Resultaten för 50 mg/l är snarlika resultaten för 100 mg/l och har därför infogats i Bilaga 1.

För 10 mg/l är den sammanhängande varaktigheten i hela Slitebukten minst 1 – 4 dygn, som mest uppemot 58 dygn nära kajen. I naturreservatet är den sammanhängande varaktigheten i Slitebukten som mest cirka 7 – 14 dygn.

För 100 mg/l är sammanhängande varaktigheter på mer än 1 dygn begränsat till muddringsområdet. Varaktigheter över 7 dygn uppstår i ett begränsat område inom 200 m från land. Den längsta sammanhängande perioden är 13 dygn lång.



Figur 5-11 Längst sammanhängande varaktighet av sedimentkoncentrationer över 10 mg/l.



Figur 5-12 Längst sammanhängande varaktighet av sedimentkoncentrationer över 100 mg/l.

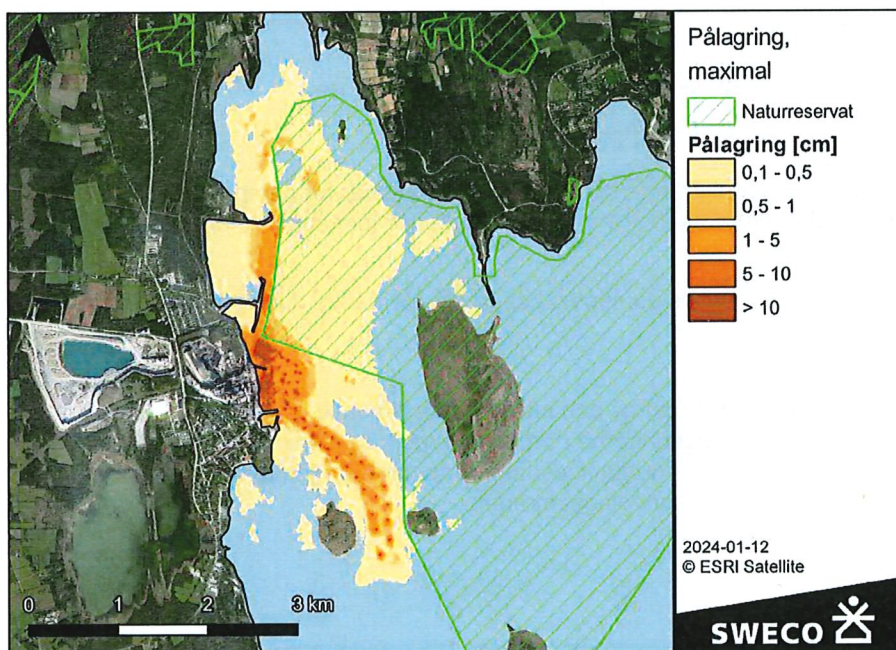
5.2.4 Sedimentpålagring

Modellresultaten visar att sedimentpålagringens utbredning och mäktighet varierar under simuleringen. Vid tillfällena med mycket höga vindhastigheter uppstår höga strömhastigheter vid botten, vilket kan röra upp material från muddringen som redan har sedimenterat. Därför visas i detta kapitel dels den maximala sedimentpålagringen som uppstår under simuleringen (Figur 5-13), dels sedimentpålagringen så som den ser ut efter att all muddring har slutförts, det vill säga efter 344 dygn (Figur 5-14).

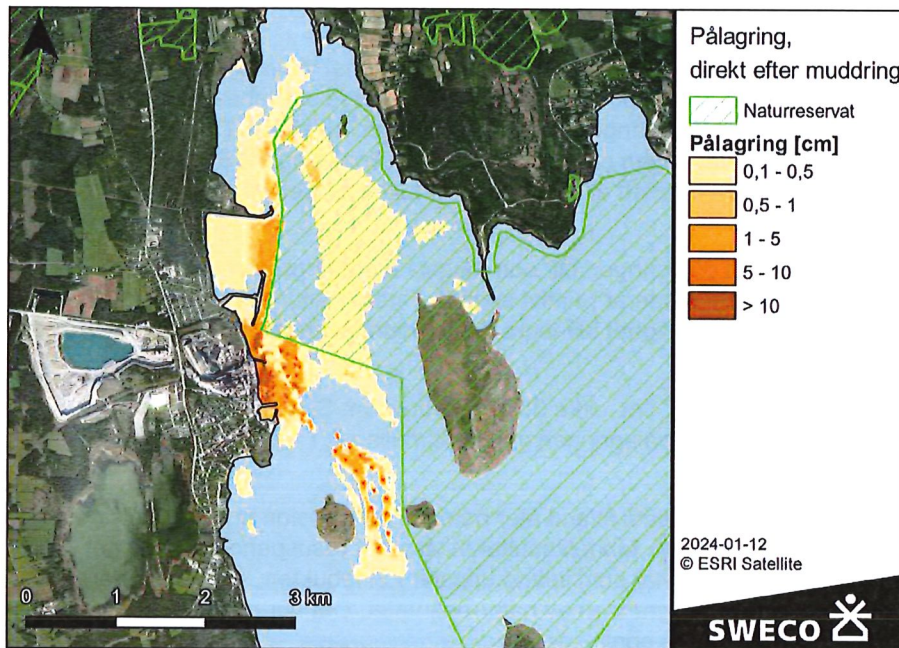
Generellt tyder modellresultaten på att pålagringen blir som högst i muddringsområdet. Detta förklaras av att grovkornigt material sedimenterar relativt snabbt. Finare material sprids över ett större område, vilket medför att pålagringens mäktighet blir lägre än i muddringsområdet men på en större yta.

Pålagringen beräknas som mest bli cirka 67 cm, cirka 300 m nordost om Slite hamn. I den del av naturreservaten som ligger i Slitebukten är pålagringen generellt mellan 0,1 – 0,5 cm, närmast Slite hamn upp emot 1 – 5 cm.

Som tidigare nämnts kan sedimenterat material ibland åter hamna i suspension under tider med höga bottenhastigheter, exempelvis under stormar. Modellresultaten visar att resuspenderat material tenderar att spridas norrut med de strömvirvlar som ibland uppstår i Slitebukten, vilket förklarar den relativt höga pålagringen som längs västra gränsen av naturreservatet. Det bör påpekas att denna effekt troligen sker även om ingen muddring görs.



Figur 5-13 Maximal pålagring under simulerad period.



Figur 5-14 Pålagring efter avslutad muddring.

5.3 Dumpning av muddermassor

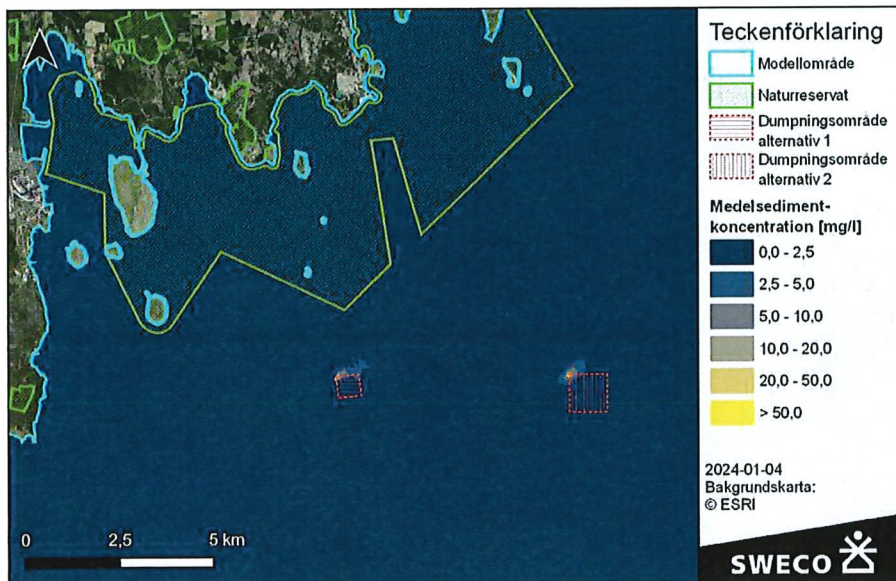
I följande avsnitt presenteras först resulterande sedimentkoncentrationer för dumpning vid olika meteorologiska förhållanden, därefter presenteras varaktighetskartor för samma meteorologiska scenarier.

Observera att i samtliga resultatkartor visas dumpning i båda de alternativa dumpningsområdena.

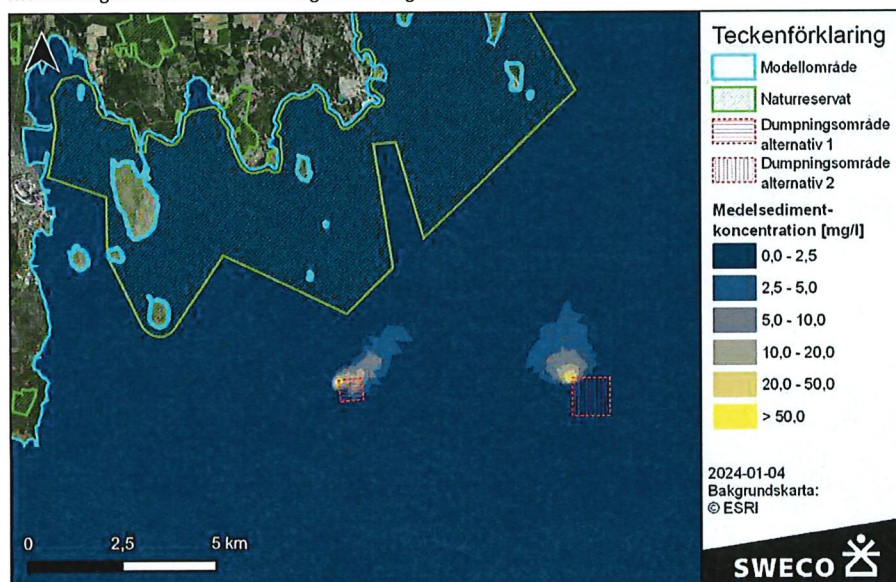
5.3.1 Sedimentkoncentration

I Figur 5-15 och Figur 5-16 visas medelvärdet av den maximala sedimentkoncentrationen⁴ i vattenpelaren under de meteorologiska scenarierna nordostgående högström respektive nordostgående lågström. De två alternativa dumpningsområdena uppvisar jämförbara sedimentkoncentrationer samt tillhörande spridningsområden.

⁴ Sedimentkoncentrationen varierar kraftigt över djupet. Den sedimentkoncentration som avses här är medelvärdet över tid av den högsta sedimentkoncentrationen över djupet i varje horisontell punkt. Kartorna visar således inte medelkoncentrationen vid ett djup, utan medelvärdet av den högsta koncentrationen i vattenpelaren.



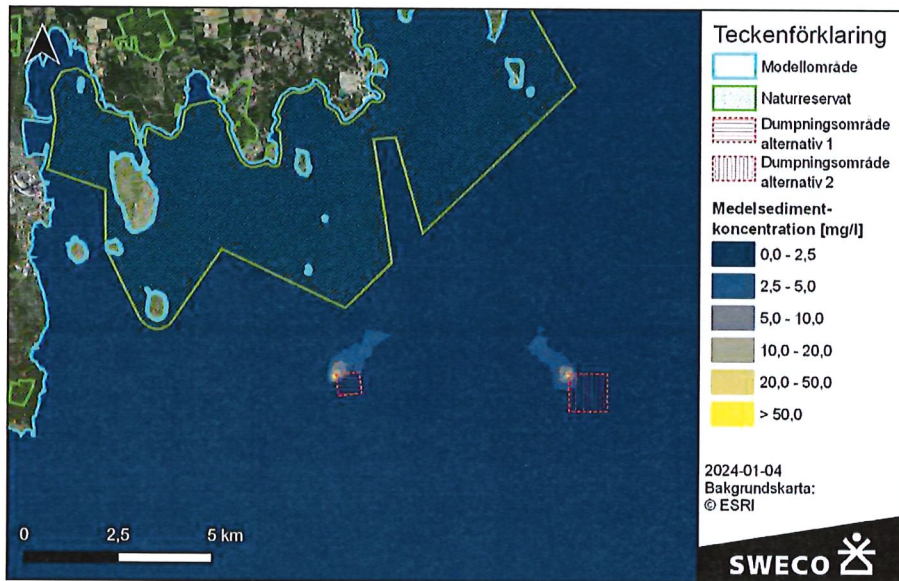
Figur 5-15 Medelvärdet av den maximala sedimentkoncentrationen i vattenpelaren under den simulerade veckan för det meteorologiska scenariot nordostgående högström.



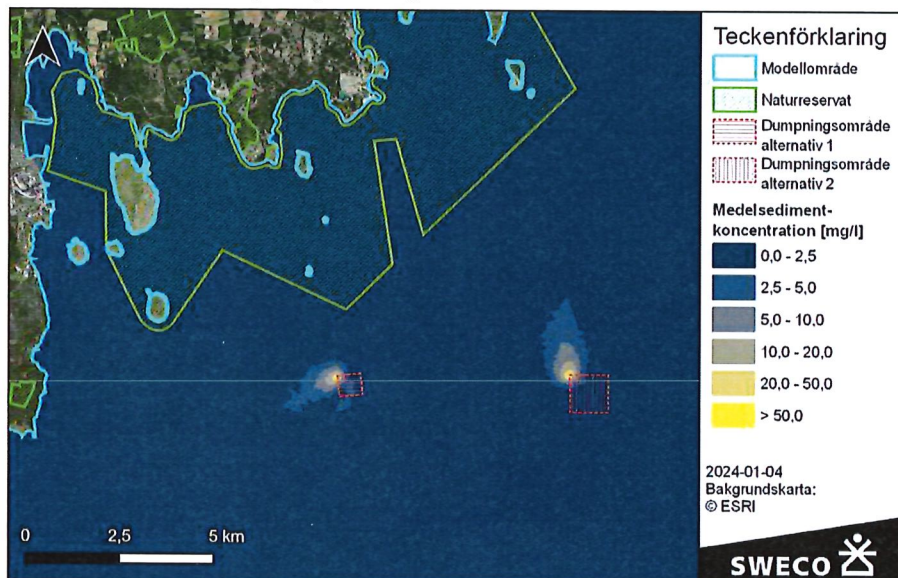
Figur 5-16 Medelvärdet av den maximala sedimentkoncentrationen i vattenpelaren under den simulerade veckan för det meteorologiska scenariot nordostgående lågström.

Vid jämförelse av Figur 5-15 och Figur 5-16 framgår att vid lågströms scenariot erhålls betydligt högre koncentrationer. Detta är på grund av att vid ett högströms scenario sker större utspädning av det spillda sedimentet. Detta innebär också att spridningsområdet är större vid högflödesscenariot, även om halterna är mycket låga. Detta samband gäller inte bara de nordostgående strömmarna utan även generellt för perioder av höga respektive låga strömhastigheter.

I Figur 5-17 och Figur 5-18 visas medelvärdet av den maximala sedimentkoncentrationen i vattenpelaren under den simulerade veckan för de meteorologiska scenarierna sydvästgående högström respektive sydvästgående lågström.



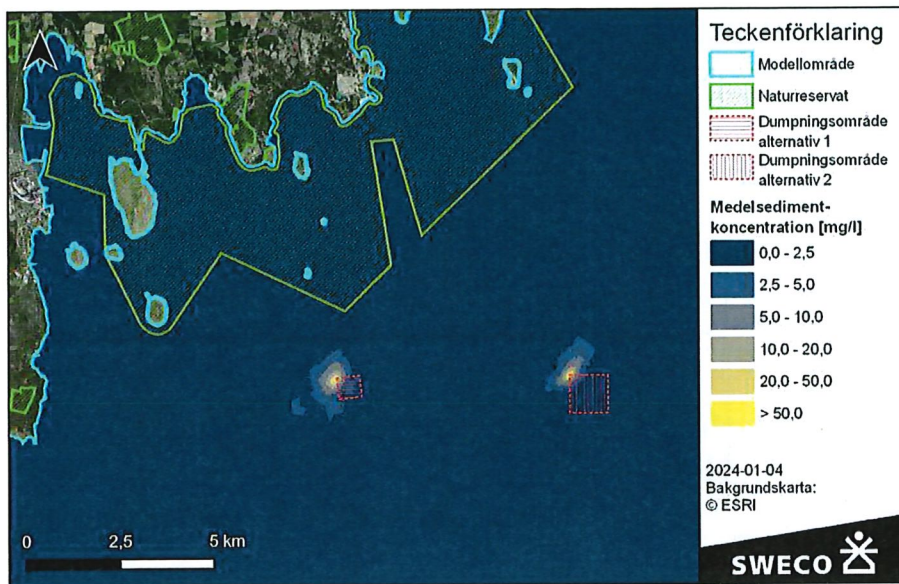
Figur 5-17 Medelvärdet av den maximala sedimentkoncentrationen i vattenpelaren under den simulerade veckan för det meteorologiska scenariot sydvästgående högström.



Figur 5-18 Medelvärdet av den maximala sedimentkoncentrationen i vattenpelaren under den simulerade veckan för det meteorologiska scenariot sydvästgående lågström.

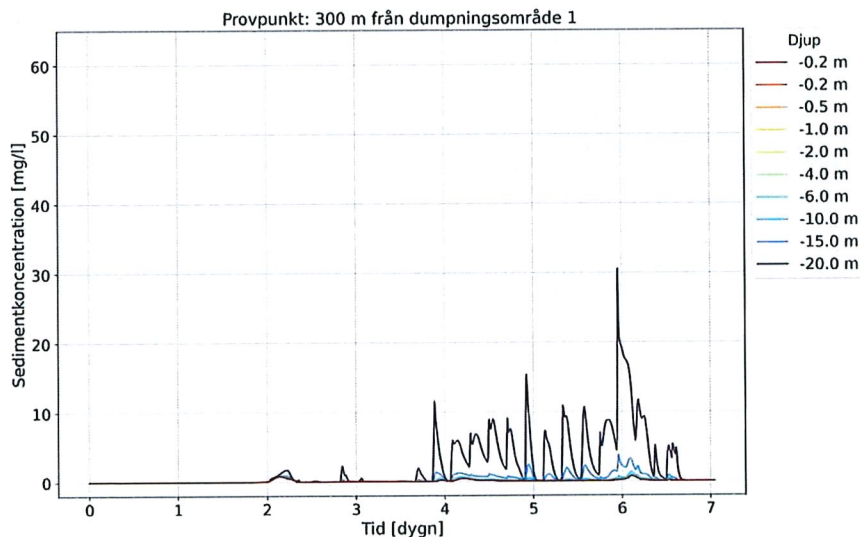
Vid jämförelse av Figur 5-17 och Figur 5-18 framgår samma mönster som vid jämförelse av de nordostgående strömscenarierna, låg strömshastighet leder till högre sedimentkoncentrationer.

Figur 5-19 visar medelvärdet av den maximala sedimentkoncentrationen i vattenpelaren under den simulerade veckan för det meteorologiska scenariot nordvästgående ström. Under detta scenario råder generellt låga strömshastigheter.

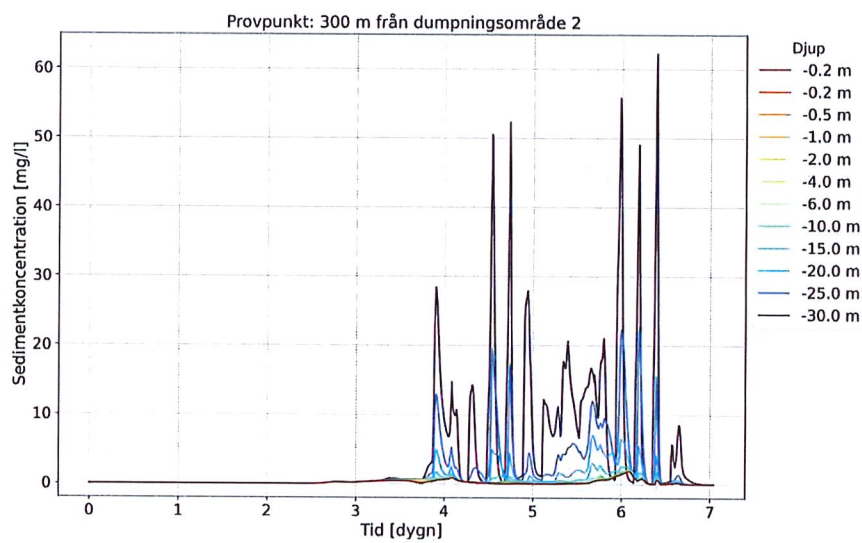


Figur 5-19 Medelvärde av den maximala sedimentkoncentrationen i vattenpelaren under den simulerade veckan för det meteorologiska scenariot nordvästgående ström.

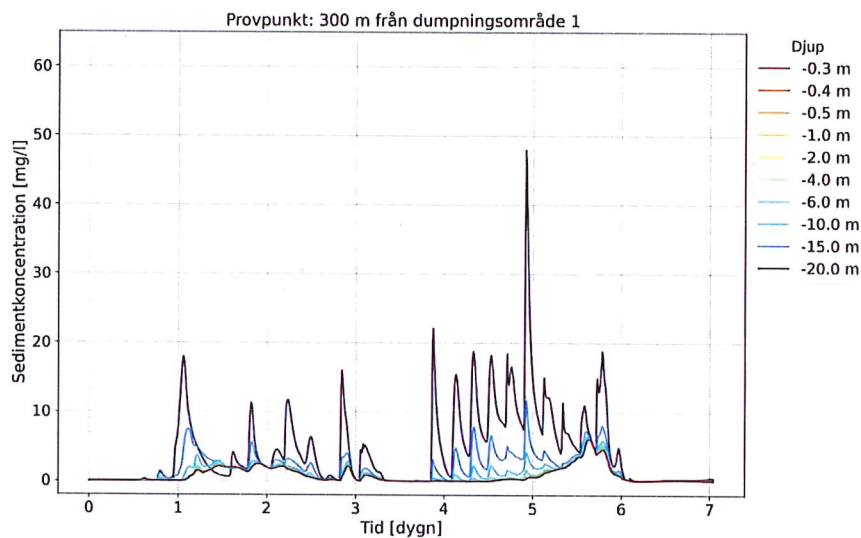
I Figur 5-20 – Figur 5-23 visas tidsserier av sedimentkoncentrationen på olika djup vid de triangelmarkerade punkterna i Figur 4-9. I samtliga tidsserier kan sedimentkoncentrationens kraftiga tidsvariation ses. Kraftig variation över tid är ett mönster som inte enbart gäller dessa punkter och meteorologiska scenarier utan gäller sedimentkoncentrationen generellt. Även en kraftig variation över djupet kan ses, där de högsta koncentrationerna uppstår närmast havsbotten. Ur tidsserierna kan också utläsas att det är vid lågströmsscenerierna som de högsta koncentrationerna uppnås. De högsta koncentrationerna uppstår i samband med simultan dumpning från två pråmar.



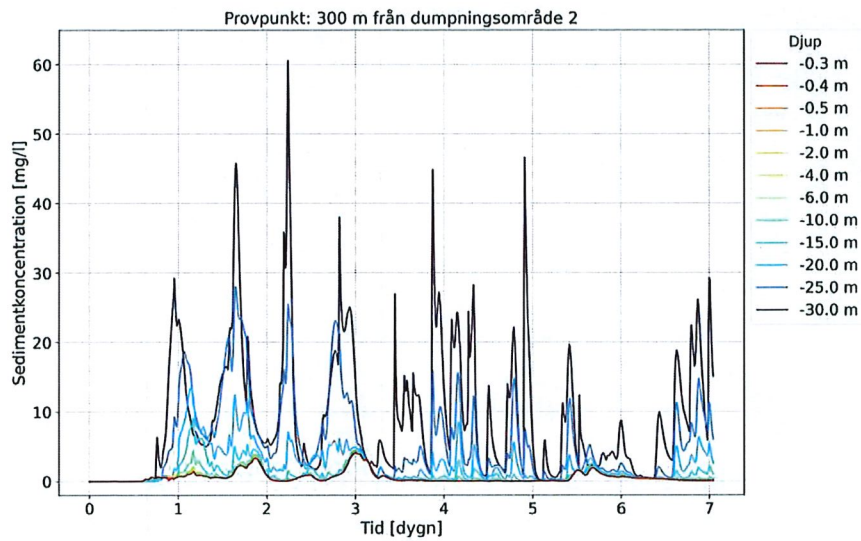
Figur 5-20 Tidsserie av sedimentkoncentrationen vid olika djup under det meteorologiska scenariot sydvästgående högström från provpunkten 300 m från dumpningsområde 1, se Figur 4-9.



Figur 5-21 Tidsserie av sedimentkoncentrationen vid olika djup under det meteorologiska scenariot sydvästgående högström från provpunkten 300 m från dumpningsområde 2, se Figur 4-9.



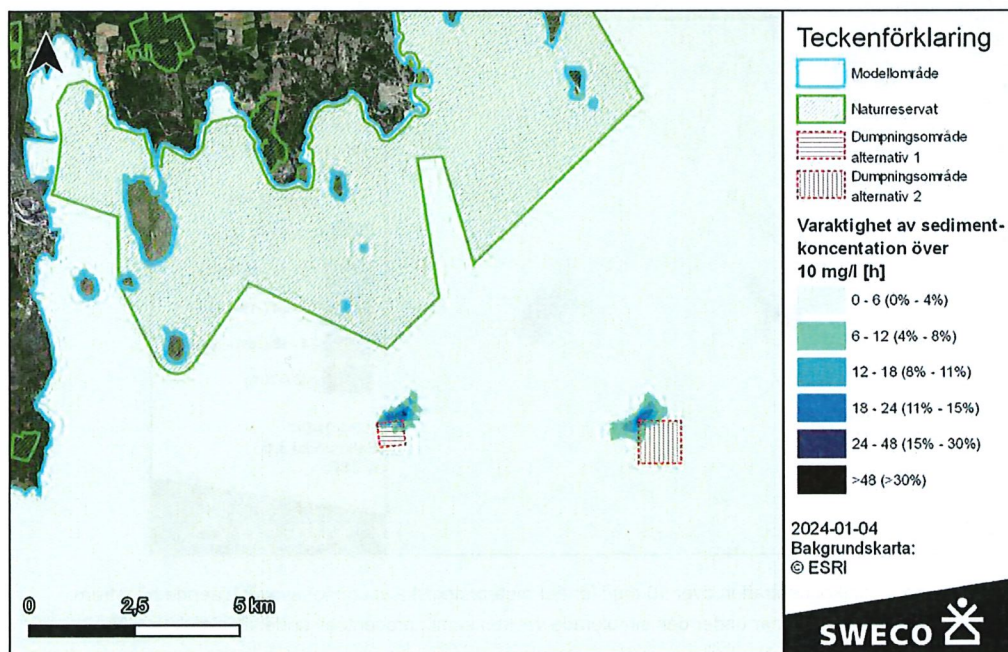
Figur 5-22 Tidsserie av sedimentkoncentrationen vid olika djup under det meteorologiska scenariot nordostgående högström från provpunkten 300 m från dumpningsområde 1, se Figur 4-9.



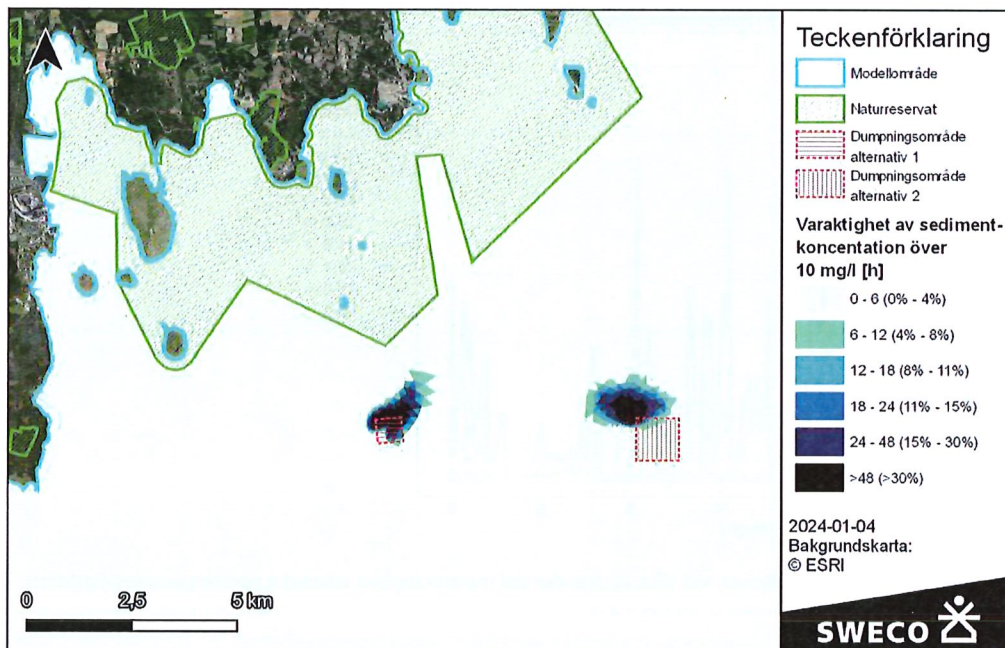
Figur 5-23 Tidsserie av sedimentkoncentrationen vid olika djup under det meteorologiska scenariot nordostgående högström från provpunkten 300 m från dumpningsområde 2, se Figur 4-9.

5.3.2 Varaktighet

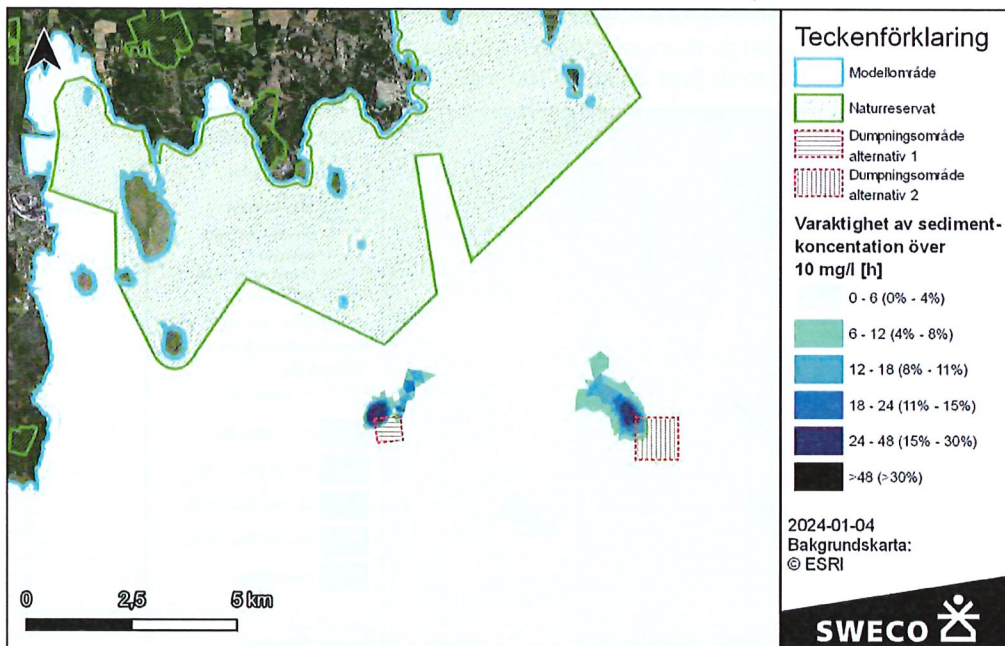
I detta avsnitt presenteras totala varaktigheter av koncentrationer över 10 mg/l. Detta visas i Figur 5-24 – Figur 5-28 för de olika meteorologiska scenarierna. Varaktigheterna presenteras både i timmar per vecka och som procentuell andel av dumpningstiden. I Bilaga 1 redovisas även kartor med varaktigheter av sedimentkoncentration över 50 samt 100 mg/l.



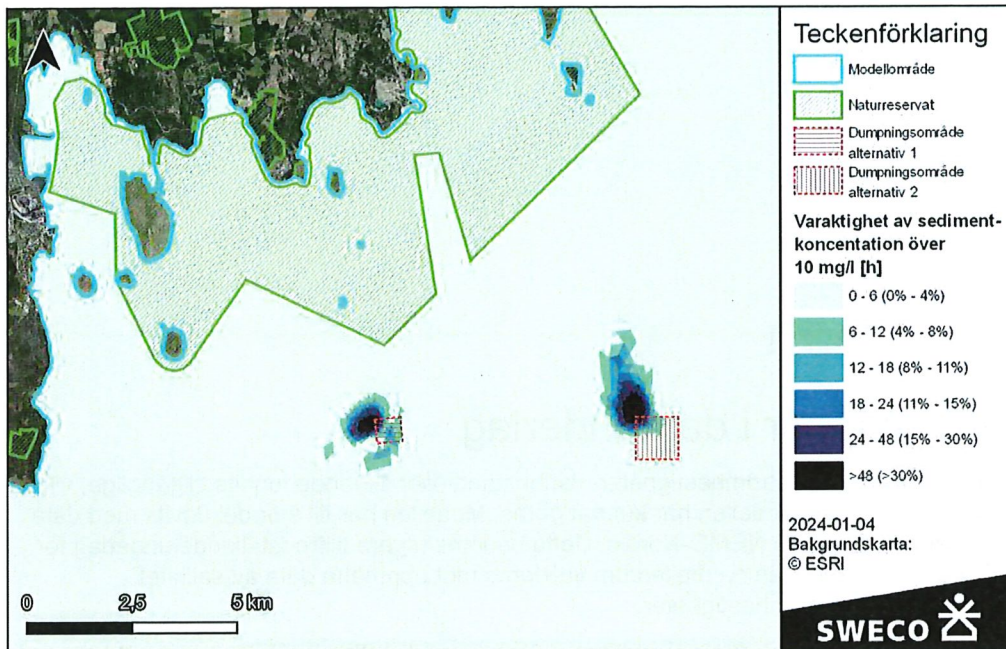
Figur 5-24 Varaktighet av sedimentkoncentration över 10 mg/l för det meteorologiska scenariot nordostgående högström. Färgskalan visar både varaktigheten i timmar under den simulerade veckan samt i procentuell andel av simulerad tid.



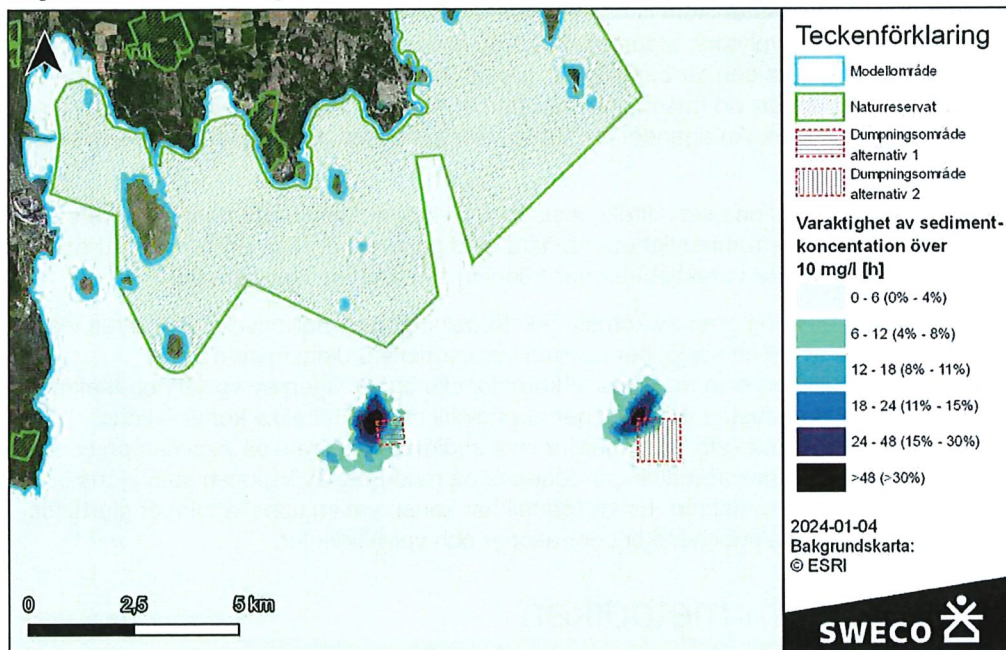
Figur 5-25 Varaktighet av sedimentkoncentration över 10 mg/l för det meteorologiska scenariot nordostgående lågström. Färgskalan visar både varaktigheten i timmar under den simulerade veckan samt i procentuell andel av simulerad tid.



Figur 5-26 Varaktighet av sedimentkoncentration över 10 mg/l för det meteorologiska scenariot sydvästgående högström. Färgskalan visar både varaktigheten i timmar under den simulerade veckan samt i procentuell andel av simulerad tid.



Figur 5-27 Varaktighet av sedimentkoncentration över 10 mg/l för det meteorologiska scenariot sydvästgående lågström. Färgskalan visar både varaktigheten i timmar under den simulerade veckan samt i procentuell andel av simulerad tid.



Figur 5-28 Varaktighet av sedimentkoncentration över 10 mg/l för det meteorologiska scenariot nordvästgående ström. Färgskalan visar både varaktigheten i timmar under den simulerade veckan samt i procentuell andel av simulerad tid.

6. Diskussion

6.1 Begränsningar i dataunderlag

I området har inga mätningar av strömhastigheter, vattenstånd eller liknande funnits tillgängliga, vilket innebär att ingen kalibrering av modellen har kunnat göras. Modellen har till stor del drivits med data från den oceanografiska modellen NEMO-Nordic. Detta bedöms utgöra tillfredställande underlag för modellen då NEMO-Nordic med jämna mellanrum valideras mot uppmätta data av salinitet, temperatur, vattenstånd och strömhastigheter.

En viktig aspekt av simulering av sedimentspridning vid muddring är vilket material som muddras. Olika material ger upphov till olika mängder spill, som i sin tur har olika kornstorleksfördelningar. Detta påverkar hur mycket sediment som kan spridas och sedimentera. I området finns troligen kalksten, men exakt var och hur mycket kalksten som finns i området är okänt. I simuleringarna har antagandet gjorts att 30 % av den muddrade volymen utgörs av kalksten enligt bedömningar från Heidelberg Materials. Detta medför att muddringen tar betydligt längre tid än om det endast hade varit sediment eftersom framdriften av muddringen vid fräsning av kalksten är relativt långsam. Det medför i sin tur längre varaktigheter av grumlingen. Antagandet om 30 % kalksten anses därmed vara en konservativ uppskattning.

Vidare har all kalksten antagits befinna sig i direkt anslutning till kajen. Även detta bedöms vara ett konservativt antagande eftersom strömhastigheterna nära land generellt är låga vilket medför högre sedimentkoncentrationer och längre varaktigheter när fräsning av kalksten sker nära land.

Sedimentspridningen påverkas i hög grad av kornstorleksfördelningen av spillet som genereras vid muddring. För lösa sediment antas att spillet har samma kornstorleksfördelning som muddermassorna, men för kalksten som muddras är kornstorleksfördelningen av spillet behäftat med osäkerheter, då fräsningen av det fasta materialet ger upphov till en mängd olika kornfraktioner. I föreliggande utredning har kornstorleksfördelningar för lösa sediment baserats på sedimentprover i området. För kalksten har kornstorleksfördelningar baserats på muddring av kalksten som gjorts i samband med byggandet av Öresundsbron. I samtliga fall har konservativa uppskattningar gjorts för att minimera risken att underskatta sedimentkoncentrationer och varaktigheter.

6.2 Begränsningar i metodiken

Simulering av muddringsarbetet utgår ifrån att muddringen sker i ett begränsat antal punkter som fördelats över muddringsområdet. I verkligheten sker muddringen kontinuerligt över hela området. Att simulera ett diskret antal punkter bedöms endast ha begränsad påverkan på simuleringens tillförlitlighet då det framför allt är massflödet och kornstorleksfördelningen som avgör hur mycket sediment som kan spridas.

Kornstorleksfördelningen har också den avgränsats till fem kornfraktioner vilket bedöms vara tillräckligt för att spegla variationen av kornstorlekar i det muddrade materialet. Av större vikt är att andelen av de olika fraktionerna överensstämmer väl med det muddrade materialet. Här finns en osäkerhet som diskuterats i föregående avsnitt och som är mer kopplat till dataunderlagets kvalitet än till själva modelleringsmetodiken.

I muddringsförfarandet antas att all kalksten befinner sig närmast land, så att ett mindre område antas bestå av enbart kalksten medan övriga områden antas bestå av lösa sediment. I själva verket överlagras kalkstenen högst troligen av sediment med varierande mäktighet. Att förlägga all kalksten till början av muddringsområdet nära land bedöms ge en konservativ uppskattning av sedimentkoncentrationer eftersom kalkstenen bedöms ha en relativt stor andel finkorniga sediment och tar lång tid att muddra jämfört med lösa sediment.

Muddringssimuleringen har gjorts med en ställtid på totalt 7 dygn. I verkligheten är ställtiden troligen längre på grund av reparation av utrustning eller andra orsaker som leder till att muddringen en kortare eller längre tid behöver pausas. När muddringen pausas så sedimenterar suspenderat material, en längre ställtid minskar därför varaktigheten av uppkomna sedimentkoncentrationer. Den relativt korta ställtiden som antas i simuleringen utgör därmed ett konservativt antagande med avseende på koncentrationer och varaktigheter.

Till skillnad från muddringen har inte hela dumpningsförloppet simulerats, därför blir bedömning av sedimentpålagring från dumpningsspillet behäftat med större osäkerhet. Detta bedöms dock inte vara av stor vikt eftersom dumpningen i sig genererar en pålagring. Dumpningsspillet pålagring inom dumpningsområdet bedömdes alltså försumbar i förhållande till dumpningens pålagring. Vidare utgår simuleringarna från att dumpningen sker från ett av hörnen av dumpningsområdena, medan den i praktiken huvudsakligen sker längre in i dumpningsområdena. Modellresultaten hade således enbart visat pålagring i anslutning till det nordvästra hörnet av dumpningsområdena, vilket bedömdes vara missvisande. Därför har dessa modellresultat uteslutits från rapporten.

7. Slutsatser

Resultaten från muddringssimuleringen visar att högst halter av suspenderat sediment uppstår i den del av muddringsområdet som ligger i närmast anslutning till land, mellan småbåtshamnen och Slite hamn. Här beräknas även varaktigheter av förhöjda sedimentkoncentrationer vara som högst. Halter närmast hamnen uppgår i medel till 20 – 50 mg/l under den simulerade perioden. 95-percentilen i samma område beräknas till cirka 100 – 240 mg/l, vilket innebär att dessa koncentrationer överskrider cirka 5 % av tiden under den simulerade perioden. I resten av Slitebukten är medelkoncentrationen generellt 5 – 20 mg/l eller lägre. 95-percentilen i bukten uppgår till mellan 5 – 50 mg/l.

Tidsserier och varaktighetsdiagram över sedimentkoncentrationer påvisar en stor tidsmässig variation. Generellt är halterna relativt låga, ibland uppstår dock kortvariga höga toppar under situationer med höga strömhastigheter som en följd av starka vindar. Detta leder till att muddermassor som sedimenterat på botten kan röras upp och åter hamna i suspension. Dessa händelser är relativt ovanliga och är även mycket kortvariga, i storleksordningen <1 dygn. Att bottensediment rörs upp ibland sker troligen även i dagsläget, exempelvis under stormar, och är inte en direkt konsekvens av muddringen. Modellen beskriver endast suspension av sediment från muddringen, och ingen hänsyn tas till bakgrundskoncentrationer av suspenderat material.

Sedimentpålagringen beräknas bli störst inom muddringsområdet. Detta beror på att grovkornigt material sedimenterar relativt snabbt, medan finkornigt material sprids över ett större område med mindre mäktighet. Resultaten visar även att mäktigheten och utbredningen av pålagringen förändras över tid eftersom en viss del av sedimenterat material under vissa väder-förhållanden resuspenderas. Resuspenderat material transporteras norrut och sedimenterar längs den västra delen av Slitebukten. Pålagringen blir där som mest cirka 1 – 5 cm, på enstaka platser upp emot 5 – 10 cm.

De två alternativa dumpningsområdena som har undersökts har visats vara jämförbara vad gäller både hur höga sedimentkoncentrationer som uppnås samt spridningsområdenas storlek.

Lågströms scenarierna visades generera högst sedimentkoncentrationer. Detta beror på att högre strömhastigheter också leder till större utspädning av det spillda sedimentet. Samtidigt innebär det också att under högströms scenarier sprids sedimentet över större områden, detta sker dock med låga sedimentkoncentrationer.

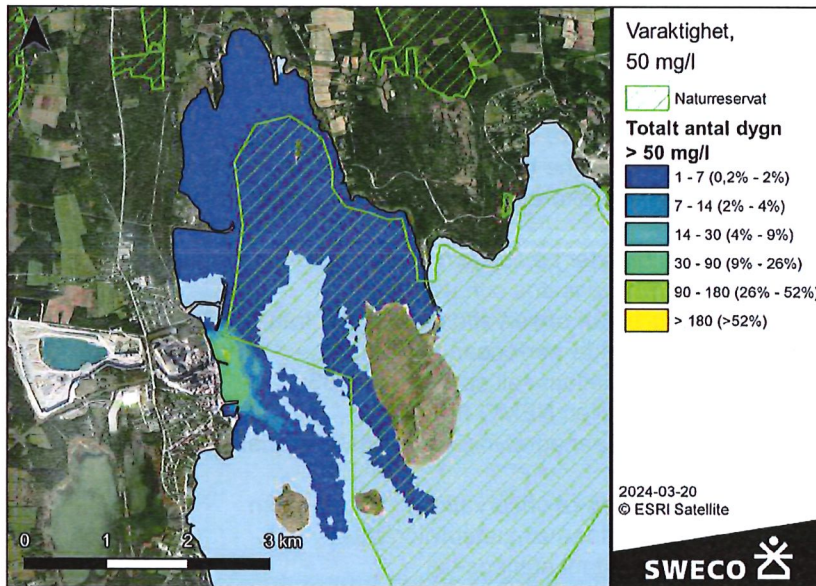
Sammanfattningsvis tyder simulering av muddring och dumpning på följande:

- Högst koncentrationer och varaktigheter uppstår inom 400 – 500 m från land i området mellan småbåtshamnen och Slite hamn.
- Medelkoncentrationer i Slitebukten i övrigt är i storleksordningen 5 – 10 mg/l eller lägre.
- Vid resuspension av sedimenterat material uppstår ibland mycket förhöjda halter (upp emot 700 mg/l) med mycket kort varaktighet (<1 dygn).
- Högst pålagring förväntas ske inom muddringsområdet. I Slitebukten är pålagringen efter slutförd muddring 1 – 5 mm inom naturreservatet, i övriga bukten är det som mest upp emot 1 – 5 cm.
- Lågströmförhållanden under dumpning leder till högst koncentrationer men även att det spillda sedimentet stannar närmare dumpningsplatsen i högre utsträckning.
- De två alternativa dumpningsområdena är jämförbara vad gäller sedimentkoncentrationer och spridningsområde.

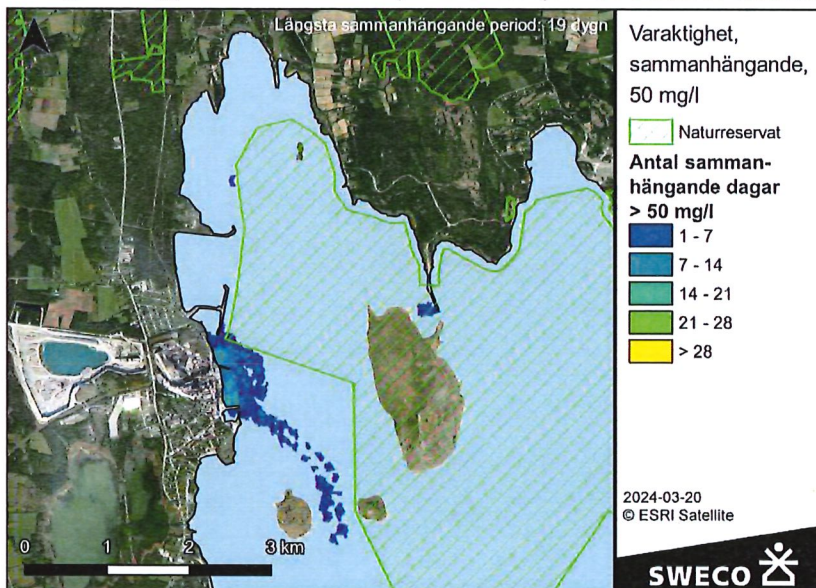
Referenser

- Naturvårdsverket. (2009). *Miljöeffekter vid muddring och dumpning - En litteratursammanställning*.
- Navionics. (2022). *Acknowledgements*. Hämtat från
<https://www.navionics.com/fin/legal/acknowledgements>
- SGU. (2009). *Beskrivning till regional berggrundskarta över Gotlands län*.
- Sjöfartsverket. (2023). *Sjöfartsverket*. Hämtat från The Baltic Sea Bathymetry Database:
<https://www.sjofartsverket.se/sv/tjanster/sjokortsprodukter/projekt-och-samarbeten/the-baltic-sea-bathymetry-database/>
- SLU. (2020). *Kunskapssammanställning om effekter på fisk och skaldjur av muddring och dumpning i akvatiska miljöer - En syntes av grumlingens dos och varaktighet*.
- SMHI. (den 1 Maj 2020). *Ladda ner oceanografiska observationer*. Hämtat från
<https://www.smhi.se/data/oceanografi/ladda-ner-oceanografiska-observationer#param=seatemperature,stations=all,stationid=35183>
- SMHI. (2021). Hämtat från Oceanografiska modellen NEMO-Nordic:
<https://www.smhi.se/kunskapsbanken/oceanografi/oceanografiska-modeller/oceanografiska-modellen-nemo-nordic-1.169170>
- SMHI. (den 29 Juni 2022). *Ladda ner meteorologiska observationer*. Hämtat från
<https://www.smhi.se/data/meteorologi/ladda-ner-meteorologiska-observationer/#param=airtemperatureInstant,stations=all>
- SMHI. (den 25 Juli 2022). *Ladda ner oceanografiska observationer*. Hämtat från
<https://www.smhi.se/data/oceanografi/ladda-ner-oceanografiska-observationer#param=seatemperature,stations=core>
- SMHI. (den 20 06 2022). *Vattenwebb: modelldata per område*. Hämtat från
<https://vattenwebb.smhi.se/modelarea/>

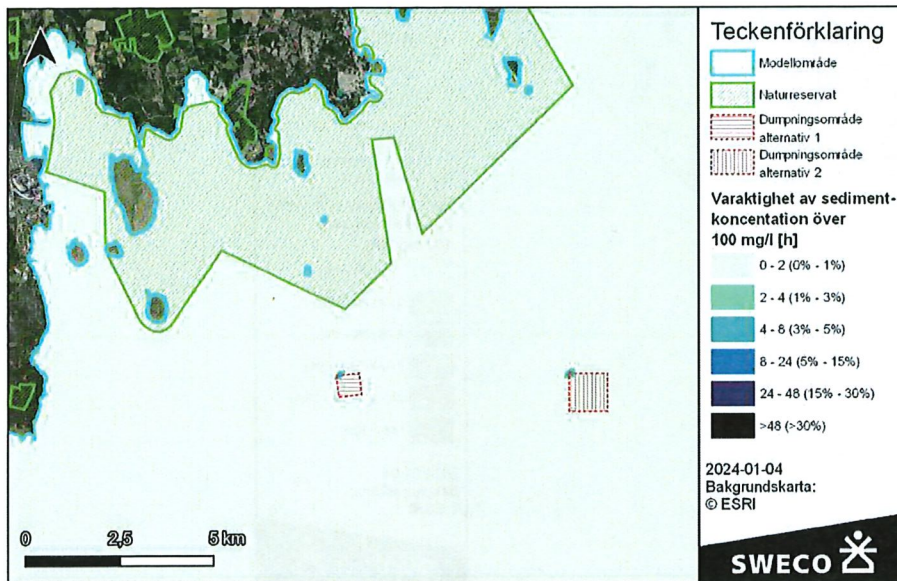
Bilaga 1



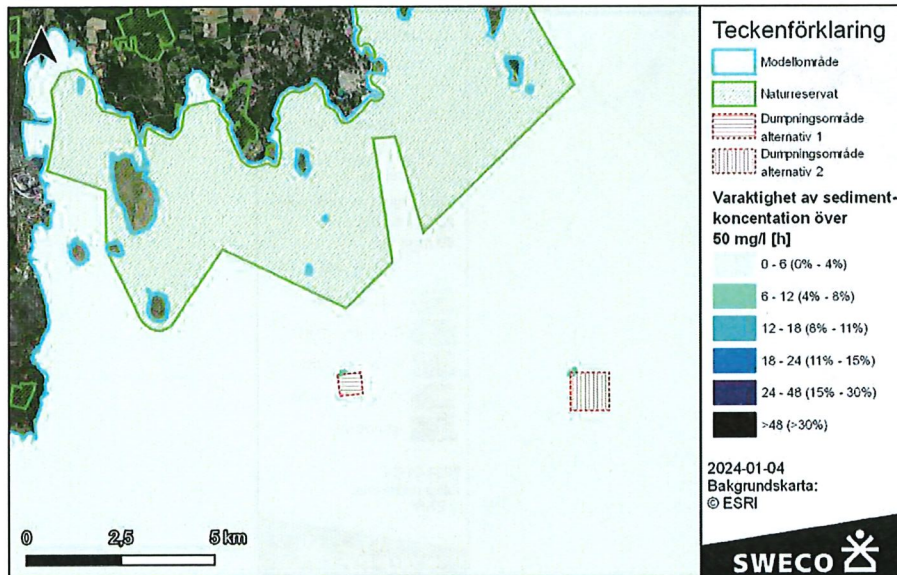
Figur 0-1 Totalt antal dagar av simulerad period då sedimentkoncentrationen överstiger 50 mg/l. Färgskalan visar både varaktigheten i dygn under den simulerade perioden samt i procentuell andel av simulerad tid.



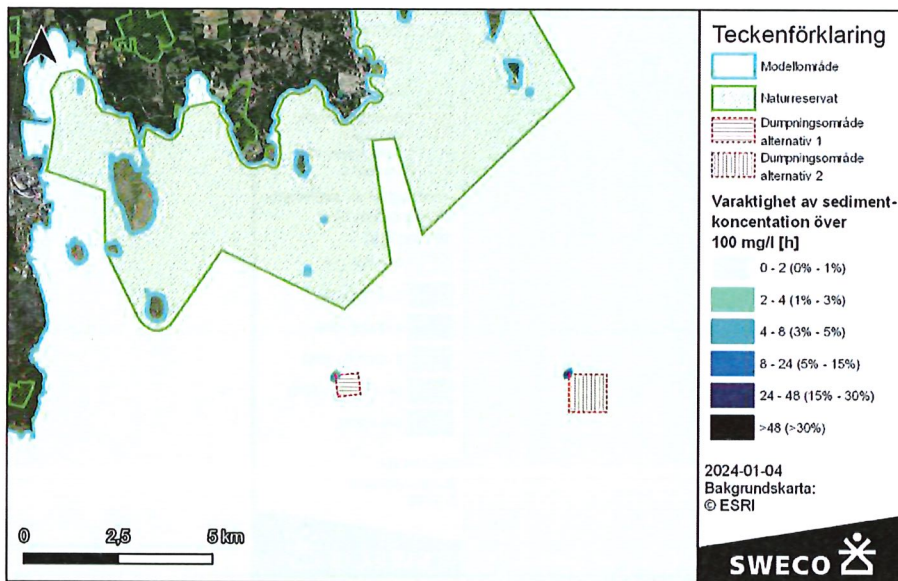
Figur 0-2 Längst sammanhängande varaktighet av sedimentkoncentrationer över 50 mg/l.



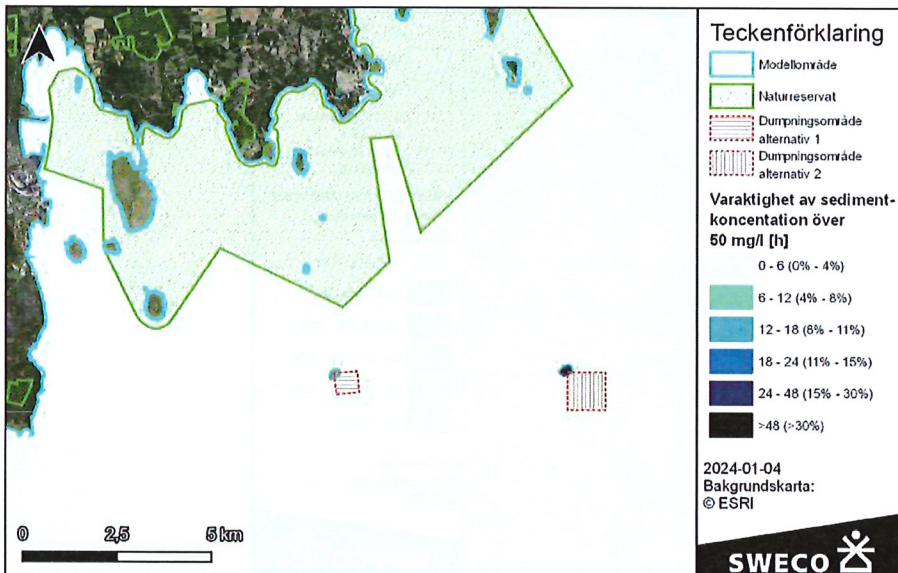
Figur 0-3 Varaktighet av sedimentkoncentration över 100 mg/l för det meteorologiska scenariot nordostgående högström.



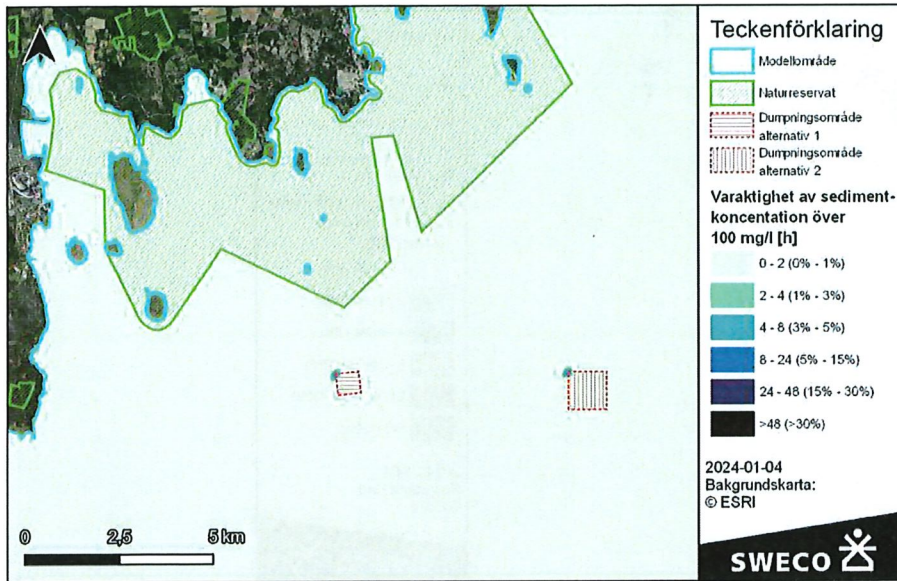
Figur 0-4 Varaktighet av sedimentkoncentration över 50 mg/l för det meteorologiska scenariot nordostgående högström.



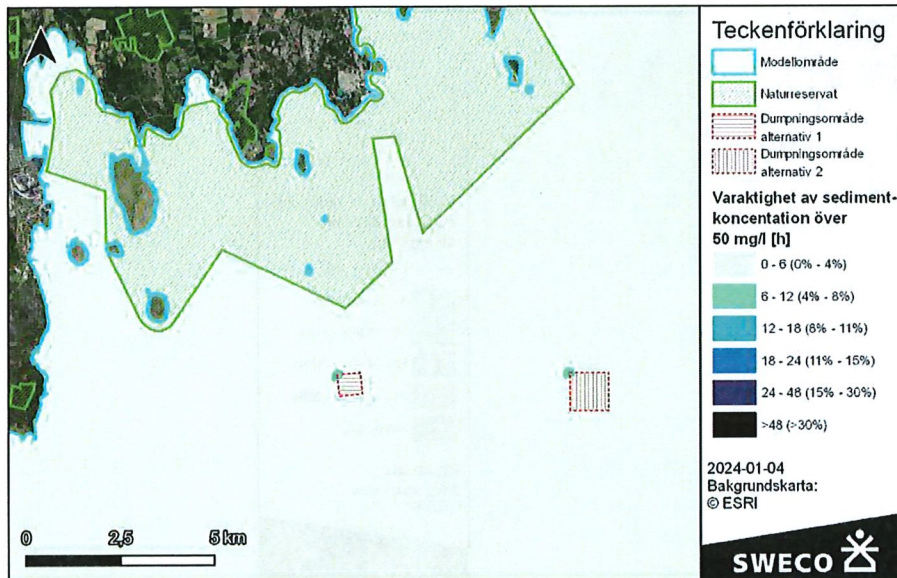
Figur 0-5 Varaktighet av sedimentkoncentration över 100 mg/l för det meteorologiska scenariot nordostgående lågström.



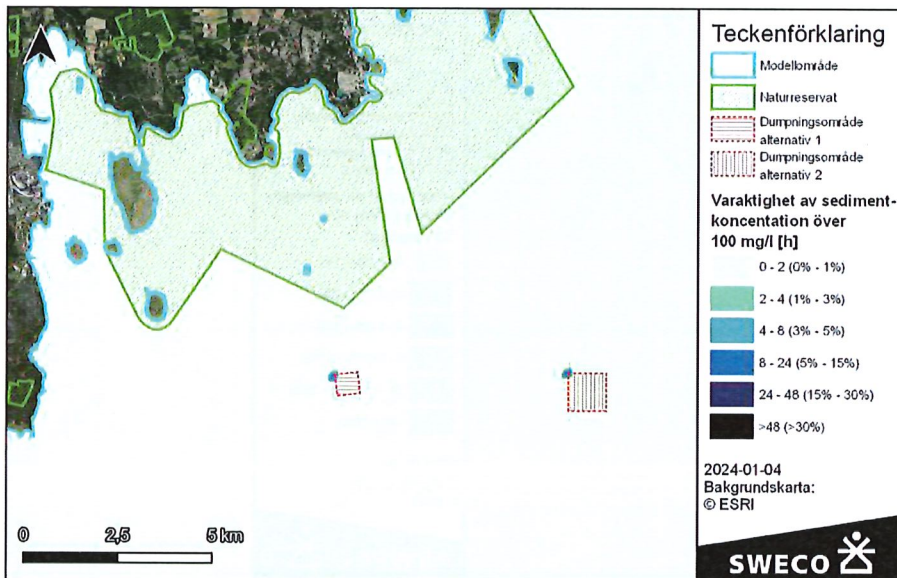
Figur 0-6 Varaktighet av sedimentkoncentration över 50 mg/l för det meteorologiska scenariot nordostgående lågström.



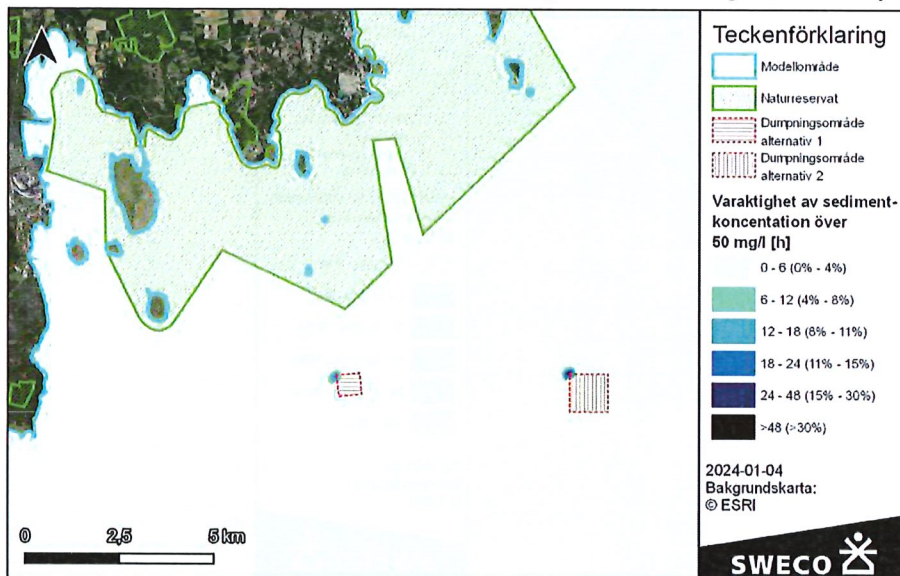
Figur 0-7 Varaktighet av sedimentkoncentration över 100 mg/l för det meteorologiska scenariot sydvästgående högström.



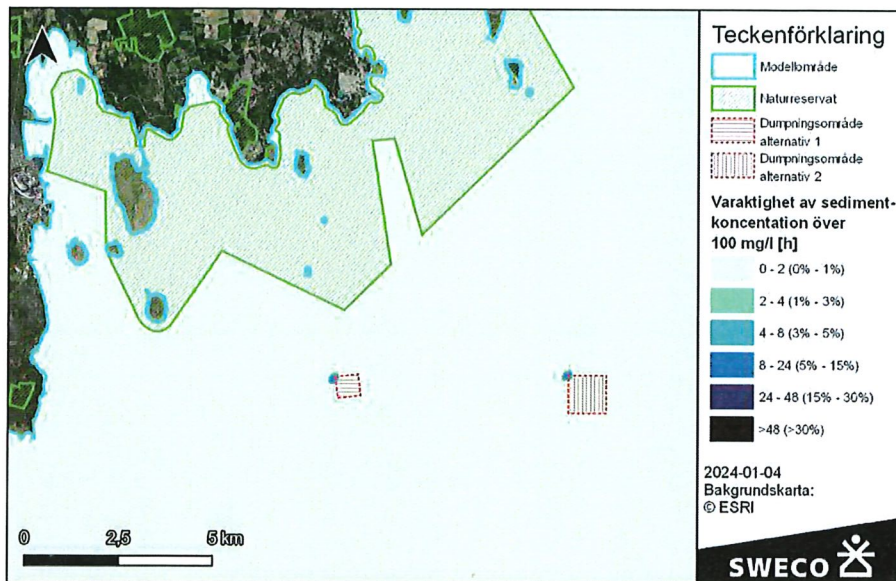
Figur 0-8 Varaktighet av sedimentkoncentration över 50 mg/l för det meteorologiska scenariot sydvästgående högström.



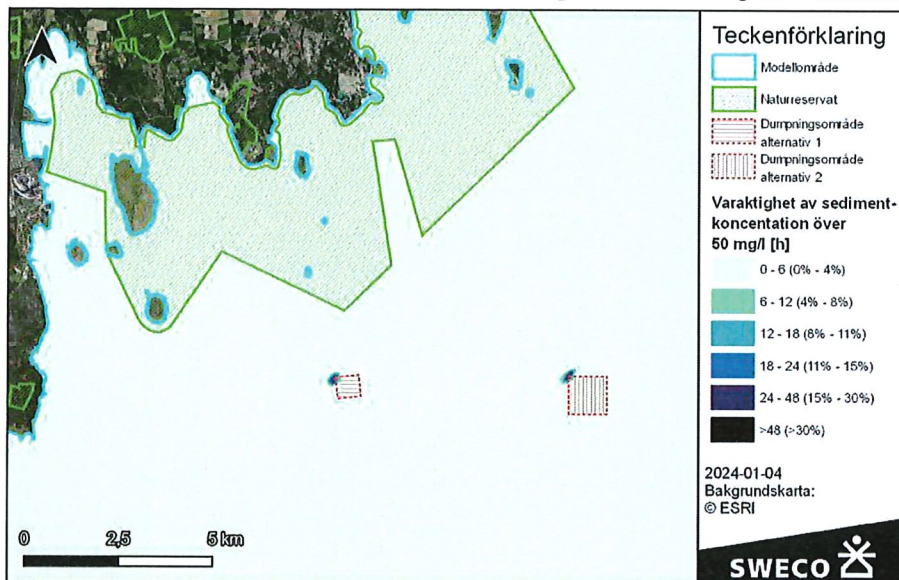
Figur 0-9 Varaktighet av sedimentkoncentration över 100 mg/l för det meteorologiska scenariot sydvästgående lågström.



Figur 0-10 Varaktighet av sedimentkoncentration över 50 mg/l för det meteorologiska scenariot sydvästgående lågström.



Figur 0-11 Varaktighet av sedimentkoncentration över 100 mg/l för det meteorologiska scenariot nordvästgående ström.



Figur 0-12 Varaktighet av sedimentkoncentration över 50 mg/l för det meteorologiska scenariot nordvästgående ström.