

Rapport

Handläggare
Gyllenram, Walter
Pettersson, Martin
Tel
+46105051935
Mobil
+46720837803
E-post
walter.gyllenram@afry.com

Datum
2026-01-16

Projekt ID
D0209279/D0213573

Kund
Sjöfartsverket och Fortifikationsverket

Sedimentspridning vid muddring i Kappelshamnsviken
samt förändrad vattenomsättning som följd av
ombyggnad av Kappelshamn

Rapportshistorik

Ver.	Checked status	Sign	Approval	Sign
#0 Utkast	2025-11-21	WG	2025-11-21	MN
#1	2025-12-22	WG	2025-12-22	AJ
#2	2026-01-16	WG	2026-01-16	MN

Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	3
1 Bakgrund	4
2 Syfte.....	4
3 Metod	4
3.1 Beräkningsnät.....	4
3.2 Drivning av modellen	6
3.3 Djupdata.....	6
3.4 Spårämne och sedimentdata	6
4 Beräkningsfall	8
4.1 Förändrad vattenomsättning	8
4.2 Sedimentspridning vid muddring och dumpning	9
5 Resultat	12
5.1 Vattenomsättning – resultat	12
5.2 Sedimentspridning – resultat	14
5.2.1 Utbredningsområden av suspenderat sediment	14
5.2.2 Pålagring.....	17
5.2.3 Varaktighet och frekvens av suspenderat sediment	19
6 Referenser.....	28

Sammanfattning

Fortifikationsverket och Sjöfartsverket avser att ansöka om tillstånd för miljöfarlig verksamhet och vattenverksamhet enligt 9 och 11 kapitlet miljöbalken för ut- och ombyggnation av Kappelshamns hamn på norra Gotland. Dispens för dumpning av muddermassor kommer att sökas.

I syfte att skapa underlag för bedömning av de miljöeffekter som uppstår till följd av muddring och ombyggnad av hamnen har AFRY beräknat vilken sedimentspridning som i värsta fall kan förväntas och vilken förändring av vattenomsättning utbyggnaden kan ge upphov till.

Beräkningarna utgår från ett antal konservativa antaganden kring ingående parametrar i syfte att inte underskatta koncentrationer av suspenderade sediment, varaktigheter av grumling och sedimentationens tjocklek.

Resultaten indikerar att koncentrationer överstigande 75 mg/l inte förekommer under längre tid än ett par dygn i sträck på avstånd större än 200 meter från muddringsområdet. Vid enstaka tillfällen kan en plym med suspenderade sediment av en halt högre än 50 mg/l sträcka sig någon kilometer från platsen där det muddras för tillfället. Den längsta enskilda varaktighet av koncentrationer överstigande 50 mg/l som noterats vid områden grundare än 2 meter är endast 5 dygn eller kortare. Längst varaktigheter av grumling utanför själva muddringområdet noteras i Kappelshamnvikens västra del strax söder om Kappelshamn. Detta förklaras främst av att den planerade piren begränsar den lokala vattenomsättningen i området.

Pålagring överstigande 20 millimeter kan förväntas på avstånd upp till cirka 800 meter från muddringsområde B, vilket är det område där det muddras under längst tid. Tjockleken av denna pålagring kommer att bli tunnare med tiden när kvarliggande material konsoliderar.

Koncentrationerna av suspenderat sediment vid den planerade dumpningsplatsen blir betydligt mindre än där det muddras. Suspenderat sediment sprids främst mot djupare vatten sydost om dumpningsplatsen. Pålagringen utanför dumpningsområdet beräknas understiga 20 mm. Bottnarna utanför buffertzonen påverkas i mycket liten grad.

Vattenomsättningen på vattenförekomstnivå för Kappelshamnvikens påverkas inte av den planerade utbyggnaden. Endast i den inre delen av viken söder om Kappelshamn kan omsättningstiden under lugna väderförhållanden öka med någon procent. Även i detta område förväntas dock den vertikala omblandningen av vattenmassan vara fortsatt god.

1 Bakgrund

Fortifikationsverket och Sjöfartsverket avser att ansöka om tillstånd för miljöfarlig verksamhet och vattenverksamhet enligt 9 och 11 kapitlet miljöbalken för ut- och ombyggnation av Kappelshamns hamn på norra Gotland. Arbetena avser ut- och ombyggnad av hamninfrastruktur med hamnplan, kajer, pir och vågbrytare. I samband med detta kommer även en muddringsåtgärd i hamnområde, vändzon och farled att utföras samt anpassning av farledsutmärkning. Dispens för dumpning av muddermassor kommer att sökas. Arbetet innebär också grävning i förorenad mark inom befintlig hamnplan och avfallsmassor, både från hamnplan och muddring, kan komma att återvinnas för anläggningsändamål i hamnens nya utformning och konstruktion. För hamnverksamheten finns ett gällande beslut och hamnverksamheten ingår därför inte i prövningen.

Projektet är ett samverkansprojekt mellan Fortifikationsverket och Sjöfartsverket, som arbetar på uppdrag av Försvarsmakten respektive Trafikverket.

Ansökan planeras att inges till Mark- och miljödomstolen under 2026.

2 Syfte

Syftet med denna utredning är att skapa underlag för bedömning av de miljöeffekter som uppstår till följd av muddring och ombyggnad av hamnen.

3 Metod

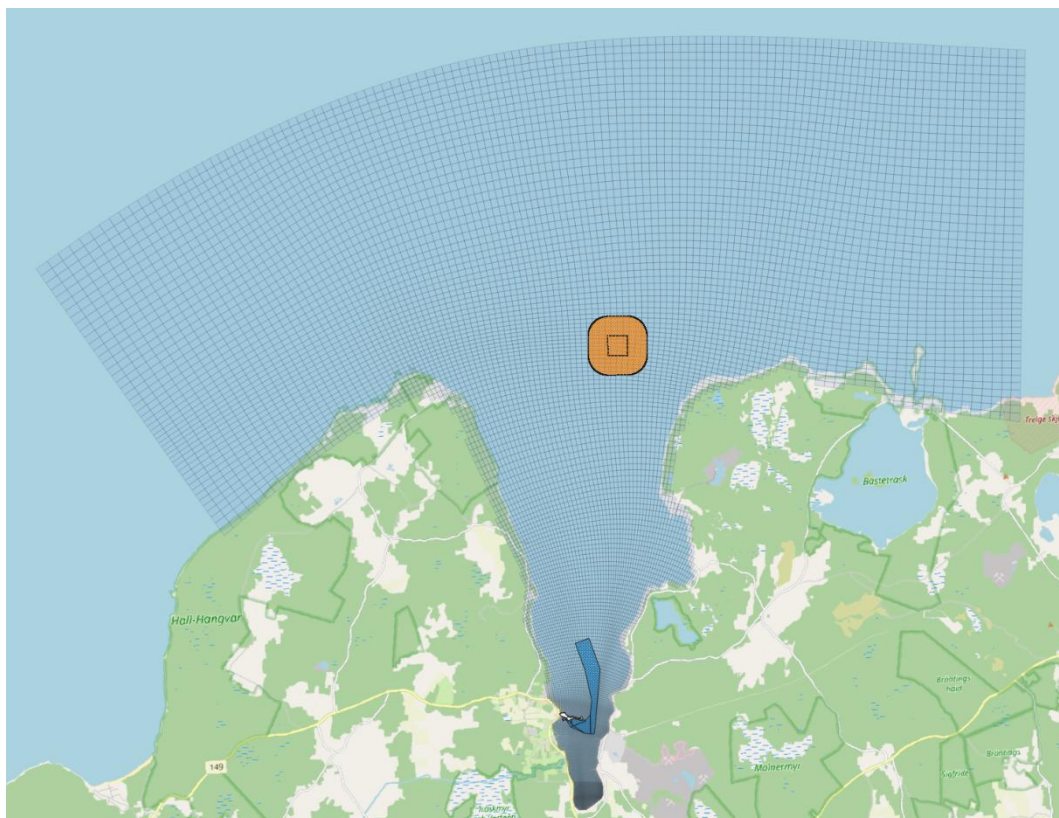
Den hydrodynamiska modellen Delft3D-FLOW har använts i kombination med den numeriska vågmodellen SWAN i syfte att beräkna sedimentspridning och förändrad vattenomsättning. Modellerna är kopplade så att vågornas effekt på strömmarna inkluderas i den hydrodynamiska modellen.

3.1 Beräkningsnät

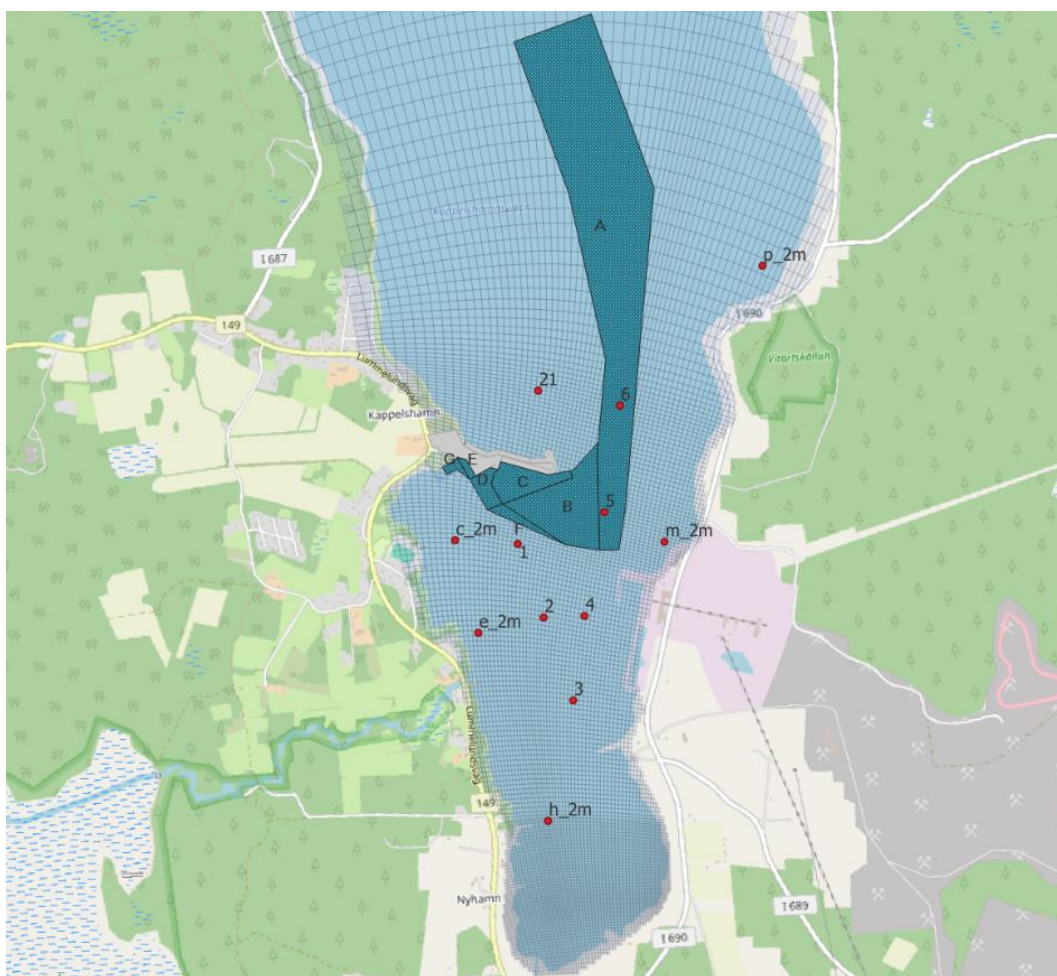
För Delft3D-FLOW används ett beräkningsnät med 40 celler vertikalt och 18 312 celler i planet vilket innebär totalt 732 480 beräkningsceller. Cellerna anpassar sig efter djupet så att den vertikala upplösningen på exempelvis 10 meters djup är 40 cm. Upplösningen i planet varierar från 10–20 meter längst in i viken och 200–300 meter ute på öppet vatten utanför viken.

Beräkningsnätet för SWAN är tvådimensionellt och har färre celler, totalt cirka 5 000. Även detta beräkningsnät är dock mer finmaskigt i de inre delarna av viken.

Beräkningsnätet för Delft3D-FLOW visas i Figur 3-1 (hela beräkningsområdet) och Figur 3-2 (området omkring Kappelshamn).



Figur 3-1: Beräkningsområde och beräkningsnät. Ytor inom vilka muddring helt eller delvis sker är markerade i blått och ytor som berörs av dumpning i orange. Dumpningsområdet är kvadratisk och visas tillsammans med en buffertzona som sträcker sig 500 meter från dumpningsområdets kanter.



Figur 3-2: Beräkningsnät i området omkring Kappelshamn. Ytor inom vilka muddring helt eller delvis sker är markerade i blått och den planerade piren är markerad i grått. Delområdena som berörs av muddring benämns som A–G. De röda punkterna visar positioner där tidsserier av koncentrationer av suspenderat sediment analyseras.

3.2 Drivning av modellen

Både Delft3D-FLOW och SWAN drivs av data hämtade från Copernicus Marine Data Store¹ och uppmätta vindar från SMHI:s mätstation vid Gotska sandön. Data hämtade från Copernicus är vattenstånd, strömhastigheter, information om skiktning, våghöjd, vågperiod och vågriktning.

3.3 Djupdata

Djupdata i modellen består av en kombination av data från EMODnet, Sjöfartsverkets allmänna sjökort samt information om muddringsområden, muddringdjup och den nya hamnens geometri som tillhandahållits av Fortifikationsverket.

3.4 Spårämne och sedimentdata

Omsättningstiden av vattnet i Kappelshamn viken bestäms genom att studera hur snabbt koncentrationerna av ett fiktivt spårämne klingar av. Spårämnet fyller initialt hela vattenmassan i beräkningsmodellen och tillförs kontinuerligt via havet under en månads uppstartsperiod av simuleringen, fram till en bestämd tidpunkt då tillförseln

¹ Baltic Sea Reanalysis and Forecast, <https://doi.org/10.48670/moi-00010>

från havet stängs av. Efter denna tidpunkt kommer koncentrationen av spårämnet gradvis att avta, beroende på hur snabb vattenomsättningen är.

Beräkningarna av sedimentspridning utgår från uppmätta kornstorleksfördelningar i muddringsområdet (*Resultatsammanställning av sedimentundersökningar vid Kappelshamn under perioden 2023-2025, 2025*). I syfte att inte underskatta sedimentspridningen och tjockleken av pålagringen har det prov som visat på störst andel finkorniga sediment valts ut för att representera hela muddringsvolymen. Detta prov är benämnt 25AF16 och är taget i den planerade vändzonen (delområde B). Materialet i detta prov klassas enligt internationell standard som sandig siltig lera. Det innehåller dock endast 18 % lerpartiklar (< 0,002 mm). I övrigt består provmaterialet av 29 % sand och resten silt. Bedömningar av sedimentsammansättning som gjorts i samband med provborringar i området indikerar att bortåt 50 % av materialet som ska muddras kan bestå av sand eller grövre material [*PM Geoteknik, 2024*]. Även om dessa bedömningar får anses vara grova består den valda kornstorleksfördelningen för modelleringen sannolikt av betydligt större andel finkornigt material än merparten av det befintliga materialet. Finkornigt material sjunker långsammare till botten än grovkornigt material. Det transporteras därför under längre tid i vattenmassan och bidrar därmed mer till grumling. Således bör beräkningarna under större delen av simuleringstiden visa en högre halt av suspenderat sediment än vad som kommer att ske i verkligheten.

Eftersom grovkornigt material (sand och grus) snabbt sjunker till botten utan att spridas fokuserar beräkningarna på de fraktioner av finsand, silt- och lerpartiklar som noterats vid sedimentprov inom det område som avses muddras. Tabell 1 visar vilka ingående fraktioner och sjunkhastigheter som har använts i modellen.

Sjunkhastigheterna har beräknats genom Stokes' lag. Partiklar mindre än 0,01 mm antas bilda aggregat (flockulera). För dessa beror sjunkhastigheten på både salthalt och koncentration, och det valda värdet har bestämts utifrån experimentella data (Portela, Ramos, & Teixeira, 2013).

Tabell 1: Tabellen visar de kornstorlekar och den kornstorleksfördelning som valts för att representera sedimentprovet 25AF16, samt de sjunkhastigheter som används i modellen. Kolumnen längst till höger sammanfattar torrdensitet för respektive fraktion när det nyligen sedimenterat på botten (innan konsolidering).

Kornstorlek i beräkning (mm)	Beskrivning	Fraktion (%)	Sjunkhastighet (mm/s)	Torrdensitet (kg/m ³)
<0,01	Flockulerande	40	0,03	300
0,011	Mellansilt	13	0,083	400
0,02	Fin grovsilt	9	0,275	500
0,037	Grovsilt	9	0,9	800
0,063	Finsand	29	2,7	1100

Skrymdensiteten av liggande material bedöms vara 2000 kg/ m³. Under antagande att densiteten av sedimentpartiklarna är 2650 kg/ m³ vilket är ett typiskt värde för kvarts (Larsson, 2008) och kalksten. Detta motsvarar väl packat (konsoliderat) sediment med en torrdensitet på cirka 1600 kg/ m³ och en vattenkvot på 25 %. Som jämförelse har optimalt packad siltig lera en torrdensitet på cirka 1700 kg/ m³ (Goldsmith, Silva, & Fischenich, 2001). Att anta en relativt hög torrdensitet av

liggande material är konservativt ur sedimentspridningssynpunkt, eftersom vikten av volymsandelen spill från muddringen är proportionell mot denna.

När suspenderat sediment fallit till botten kommer det på sikt att konsolidera. Inledningsvis kommer det dock att vara mycket löst lagrat, vilket innebär ett högt vatteninnehåll och därmed en låg torrdensitet. Antaganden av torrdensitet för respektive sedimentfraktion visas i Tabell 1. För fraktionerna sammanräknat ger detta en torrdensitet på cirka 600 kg/m^3 . Denna siffra ligger i linje med mätningar av torrdensitet för liknande nyligen sedimenterat liknande material (van Rijn & Barth, 2018). Kvoten mellan det liggande och det nyligen sedimenterade materialet är därmed cirka 2,7, vilket innebär att varje spilld volym av sediment kommer att ge upphov till 2,7 gånger större volym sedimenterat sediment innan detta konsoliderar. Med samma antagande om partikeldensitet som ovan kommer de nyligen sedimenterade materialet ha en skrymdensitet på knappt 1400 kg/m^3 och en vattenkvot på nästa 130 %, vilket innebär att sedimentet innehåller mer vatten än partiklar.

4 Beräkningsfall

Beräkningarna görs för två olika geometrier: befintliga förhållanden (befintlig hamn och vattendjup) och planerade förhållanden (framtida hamn och muddrat djup).

För studien av förändrad vattenomsättningen har befintlig och planerad geometri jämförts under en sommarperiod då vattenomsättningen generellt är låg. För studien av sedimentspridning vid muddring och dumpning har planerad geometri använts under en höstperiod.

4.1 Förändrad vattenomsättning

Omsättningstid för en vattenförekomst beskriver hur länge vattnet i genomsnitt stannar innan det har bytts ut mot nytt vatten från angränsande vattenförekomst. För att bedöma omsättningstiden beräknas vattenomsättningen över tid.

Vattenomsättningen för en havsvik varierar i tiden av flera faktorer. Den styrs generellt av aktuell vindstyrka och vindriktning över hela vattenytan i bassängen, skiktningförhållanden som påverkar vertikal omblandning, eventuella trösklar, variationer i vattenstånd, sötvattentillflöden och strömförhållanden utanför viken. Detaljer som kajer i anslutning till stränderna påverkar främst omsättningstiden i sitt absoluta närområde men även den lokala omsättningstiden drivs av krafter som verkar på en större skala. I det aktuella fallet är den planerade piren dock tillräckligt stor i förhållande till den inre delen av viken för att motivera en noggrann analys.

Vattenomsättningen i Kappelshamnsviken drivs främst av vågor och vind eftersom vattenståndsskillnaderna är relativt små och det inte finns några trösklar. Den planerade piren och muddringen kan påverka vattenomsättningen på två sätt. Den planerade piren är längre än den gamla och kommer att begränsa vattenutbytet i inre delen av viken i något högre grad än den nuvarande piren genom att den blockerar strömmarna och vågorna. Dessutom kommer vikens vattenvolym bli något större efter muddringen, vilket också kan leda till längre omsättningstid.

Vattenomsättningen är därför långsammast under perioder med lugna väder- och vindförhållanden. Eventuella negativa effekter på vattenomsättning av utbyggnaden av hamnen bör rimligen främst uppstå vid långvariga lugna väderförhållanden längst in i viken. Långvariga lugna förhållanden uppstår främst på sommaren, vilket förklarar valet av beräkningsperiod.

Variationen av vindhastigheter har undersökts. Utav de månader som ligger till grund för utredningen hade juni 2023 lugnast vindförhållanden. Av detta skäl har juni–augusti 2023 valts som tidsperiod för studien av påverkan på vattenomsättning. Den genomsnittliga vindhastigheten under denna period var 4 m/s med en standardavvikelse på 1,9 m/s. Under juni månad 2023 var den genomsnittliga vindhastigheten endast 3,1 m/s med en standardavvikelse på 1,4 m/s.

Simuleringens startdatum sätts till 1 maj för att ett fullt utvecklat strömförhållande ska hinna utvecklas innan den 1 juni 2023 då tillförseln av spårämne från havet stängs av. Därefter fortsätter simuleringen tills koncentrationerna av spårämnet är mycket låga.

4.2 Sedimentspridning vid muddring och dumpning

Muddring ger upphov till att ett visst spill av sedimentpartiklar sker i vattenmassan. För beräkningarna bedöms 5 % spill vara en konservativ men rimlig bedömning. Dessa partiklar sjunker mot botten med en hastighet som beror på deras storlek och densitet i förhållande till vattnets densitet. Om strömhastigheterna i recipienten är låga, kommer partiklarna att sjunka rakare mot botten och därmed spridas över ett mindre område än om strömhastigheterna är högre. Högre strömhastigheter leder till större spridning men samtidigt också till högre utspädning. Dessutom kommer pålagring av sediment på vikens botten bli tunnare om vattenomsättningen är snabb, vilket den i regel är om strömhastigheterna är höga.

Vilken årstid som ger ett *worst case* med avseende på sedimentspridning beror på vilken parameter som avses. Höga strömhastigheter i recipienten (som generellt är vanligare under höst och vinter än under vår och sommar) innebär att sediment transporteras längre från muddringsplatsen jämfört med låga strömhastigheter som ger högre koncentrationer i det absoluta närområdet men transporteras kortare sträckor. Av denna anledning kommer en större bottenarea att påverkas av pålagring vid höga strömhastigheter medan lägre strömhastigheter ger tjockare pålagring över mindre ytor.

Våren och sommaren bedömdes preliminärt att vara olämpliga alternativ ur biologisk synvinkel. Utifrån en analys av vindstatistik konstaterades hösten och vintern vara likvärdiga när det gäller strömförhållanden. Eftersom de lägre temperaturerna på vintern jämfört med hösten potentiellt kan innebära större risk för komplikationer under muddringsarbetet (exempelvis nedisning) bestämdes hösten vara en lämplig period att simulera.

Utav de tre höstperioder som finns tillgängliga i drivdata visade hösten 2023 högst andel vindar från nordlig sektor (18 %, jämfört med 15 % respektive 16 % för hösten 2022 och hösten 2024). Ytströmmar som drivs mot söder av nordliga vindar bedöms ge störst påverkan på grunda områden i den inre delen av Kappelshamnsviken. I syfte att inte underskatta grumlingens påverkan på grunda områden valdes hösten 2023 som simuleringsperiod. Under tremånadersperioden september–november 2023 var den genomsnittliga vindhastigheten cirka 5 m/s med en standardavvikelse på 2,6 m/s.

Strömförhållandena under en vintersäsong bedöms vara mycket lika strömförhållanden under en höstsäsong, eftersom vindstatistiken för dessa båda säsonger är snarlika. Således bedöms resultaten av beräkningarna vara representativa även om muddringen skulle ske under vintern.

Muddringen antas till största delen utföras av ett mudderverk med öppen skopa. I tre av delområdena (D, E och G) finns förorenade bottnar. Dessa planeras att muddras med stängd skopa (miljöskopa). De icke-förorenade muddrade massorna lastas på en

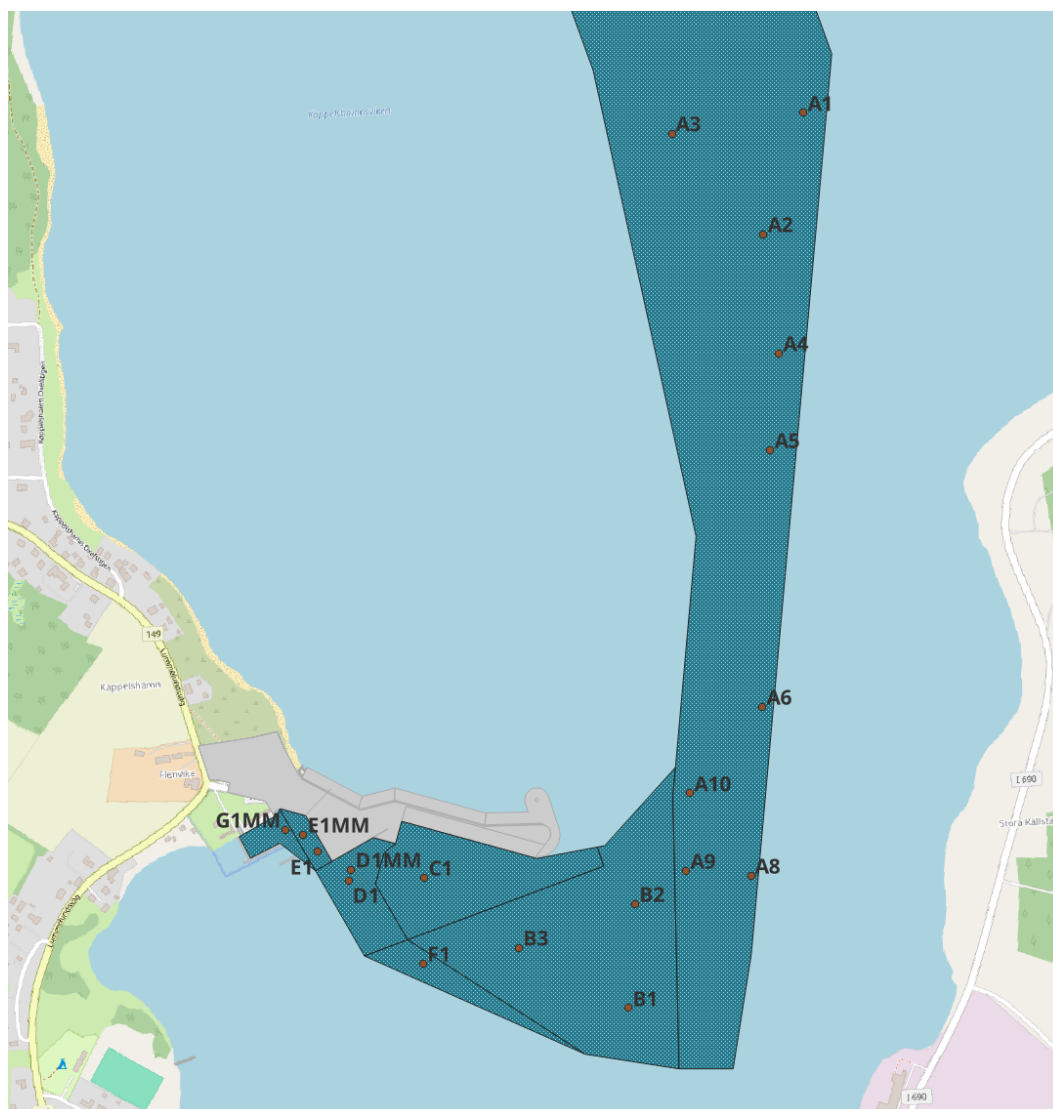
pråm för transport till dumpningsplatsen. Förorenade massor tas om hand på annat sätt, i första hand genom att återvinnas för anläggningsändamål i den nya hamnkonstruktionen.

I dialog med Sjöfartsverket, Fortifikationsverket och Port Engineering har följande scenario för muddringsarbetet tagits fram:

- Muddringskapacitet öppen skopa: 300 m³ per timme, 5 % spill
- Muddringskapacitet miljöskopa: 1500 m³ per dygn, 2 % spill
- Muddringsintensitet: 20 timmar per dygn (04:00–24:00)
- Pråmvolymer: 1000 m³
- Dumpningskapacitet: 1000 m³/minut, 5 % spill
- Dumpningsintervall: 4 timmar
- Muddrad volym öppen skopa: 508 000 m³ (delområde A–F, berg borträknat)
- Muddrad volym miljöskopa: 7 800 m³ (viss volym av delområde D och E samt hela volymen i G)
- Muddringsperiod: 85 dagar (1 september–24 november)
- Muddring startar i norra delen av farleden (delområde A) och fortskrider söderut
- Muddring med miljöskopa börjar samtidigt som muddring med öppen skopa i vändzonen (delområde B)

I de volymer som nämns ovan har hänsyn tagits till så kallad övermuddring, det vill säga att det i praktiken muddras till ett något större djup än det minsta djup som är nödvändigt för syftet med muddringen.

Figur 4-1 visar i punkterna där muddring sker i modellen. Punkterna inom delområde A (farleden) är placerade där muddringbehovet inom detta område är störst och där det följaktligen behöver muddras under längst tid.



Figur 4-1: Bilden visar i vilka punkter där muddring sker i modellen. Punktnamn med ändelsen "MM" avser miljömuddring med stängd skopa.

5 Resultat

Resultaten av beräkningarna har delats upp i två fristående för vattenomsättning respektive sedimentspridning.

5.1 Vattenomsättning – resultat

Vattenomsättningen har studerats för vattnet som är närmast botten, eftersom vattenomsättningen nära botten bedömdes vara mest relevant för biologiska och kemiska faktorer.

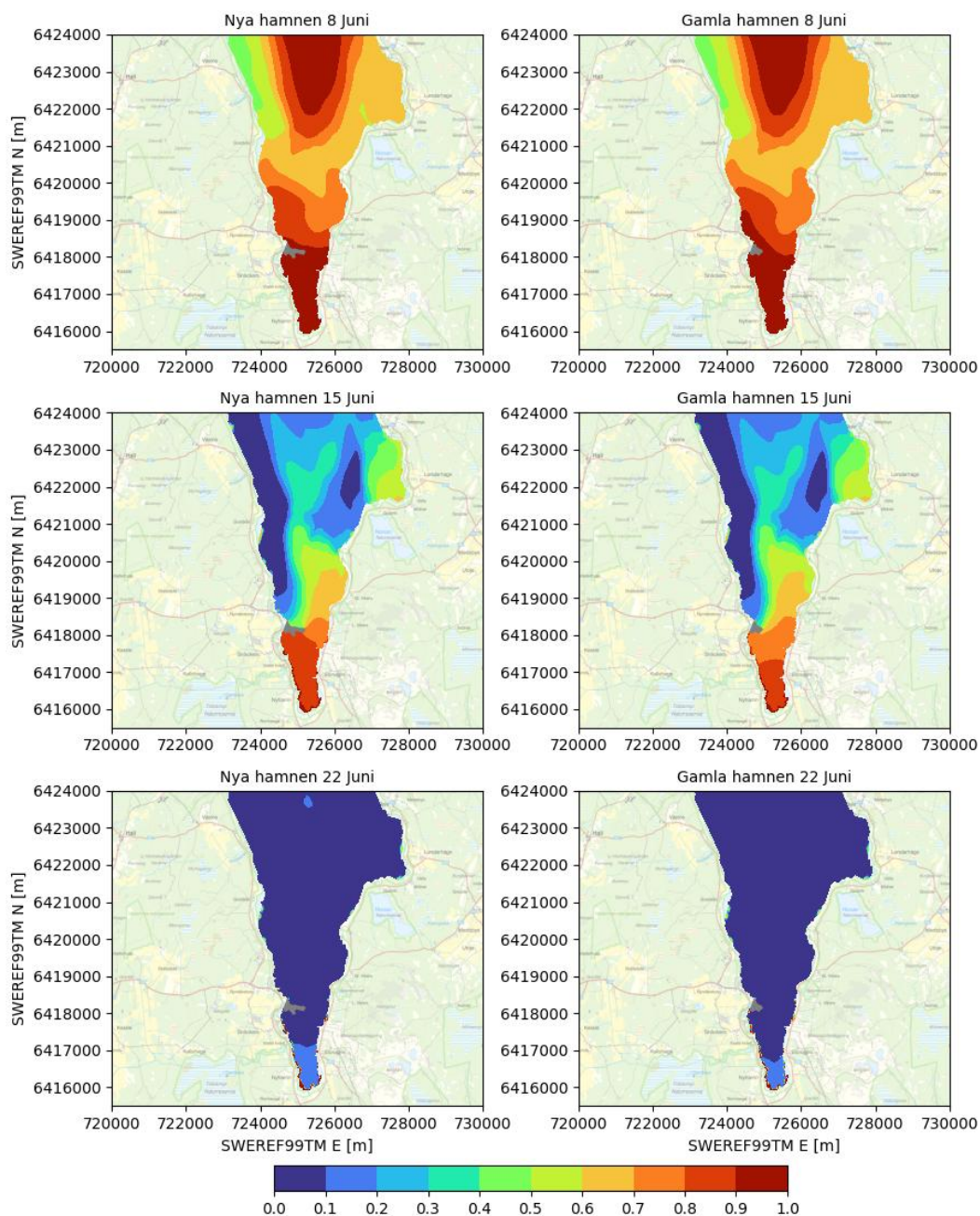
De sex kartbilderna i Figur 5-1 visar ögonblicksbilder av koncentrationen av ett spårämne nära botten i Kappelshamnsviken under lugna väderförhållanden. Den vänstra kolumnen visar koncentrationen för den nya hamngeometrin och efter muddring, medan den högra kolumnen visar koncentrationen för den gamla hamngeometrin och innan muddring. Bilderna på rad två i Figur 5-1 (15 juni) indikerar att cirkulationen i Kappelshamnsviken går moturs, åtminstone norr om hamnen.

Omsättningstiden varierar kontinuerligt beroende på de strömförhållanden som råder för stunden. Ungefär 1 vecka efter att spårämnet tillåts passera ut ur modellen har ungefär hälften av vattnet bytts ut i Kappelshamnsviken norr om Kappelshamn. Söder om hamnområdet har i princip inget bottenvatten hunnit bytas ut. Efter 2 veckor återstår fortfarande 80–90 % söder om hamnområdet och efter tre veckor endast 10–20 %.

Genom att volymsmedelvärdera koncentrationerna av spårämne och beräkna hur de klingar av, har omsättningstiden för bottennära vatten i Kappelshamnsviken som helhet beräknats till 17 dagar för tvåveckorsperioden 8–22 juni. Ökningen i omsättningstid efter muddring och ombyggnad av hamnen är mindre än en promille för Kappelshamnsviken som helhet.

Omsättningstiden i Kappelshamnsviken söder om Kappelshamn har genom samma metod beräknats till knappt 16 dagar. Denna omsättningstid är i samma storleksordning som omsättningstiden för Kappelshamnsviken som helhet. Det momentana vattenutbytet är dock betydligt lägre eftersom vattenvolymen i det södra delområdet är betydligt mindre. Efter muddring och ombyggnad av hamnen kan omsättningstiden bli cirka 1 % längre i den del av Kappelshamnsviken som ligger söder om Kappelshamn. Observera att de skillnaden i koncentrationer som visas på undre raden i Figur 5-1 gäller för en mycket liten del av vattenvolymen eftersom denna del av viken har ett mycket begränsat vattendjup.

Observera också att vattnet i södra delen av Kappelshamnsviken kan antas vara väl omblandad även om vattenutbytet är lågt. Eftersom området är relativt långgrund kommer vågor och strömmar i hög grad interagera med botten, vilket i sin tur leder till hög vertikal omblandning. Detta visar sig i resultaten genom att det inte är några betydande skillnader mellan koncentrationerna av spårämne i yt- respektive bottenlager.



Figur 5-1: Visualisering av vattenomsättningen nära botten i Kappelshamnsviken. Initialt ansattes ett spårämne med koncentrationen 1 i hela beräkningsområdet. Den vänstra kolumnen visar ögonblicksbilder för den nya hamngeometrin och efter muddring. Den högre kolumnen visar motsvarande ögonblicksbilder för den gamla hamngeometrin och innan muddring. Ungefär 1 vecka efter att spårämnet tillåts passera ut ur modellen har inget bottenvatten hunnit bytas ut söder om hamnområdet. Efter 2 veckor återstår 80–90 % och efter tre veckor endast 10–20 %. Omsättningstiden för den inre delen av viken (söder om hamnen) är cirka två veckor vid de väderförhållanden som simulerats. Bakgrundskarta © Lantmäteriet.

5.2 Sedimentspridning – resultat

Resultaten av sedimentspridning presenteras som kartor med utbredningsområden och pålagring i avsnitt 5.2.1 respektive 5.2.2 samt analys av tidsserier och varaktigheter i avsnitt 5.2.3

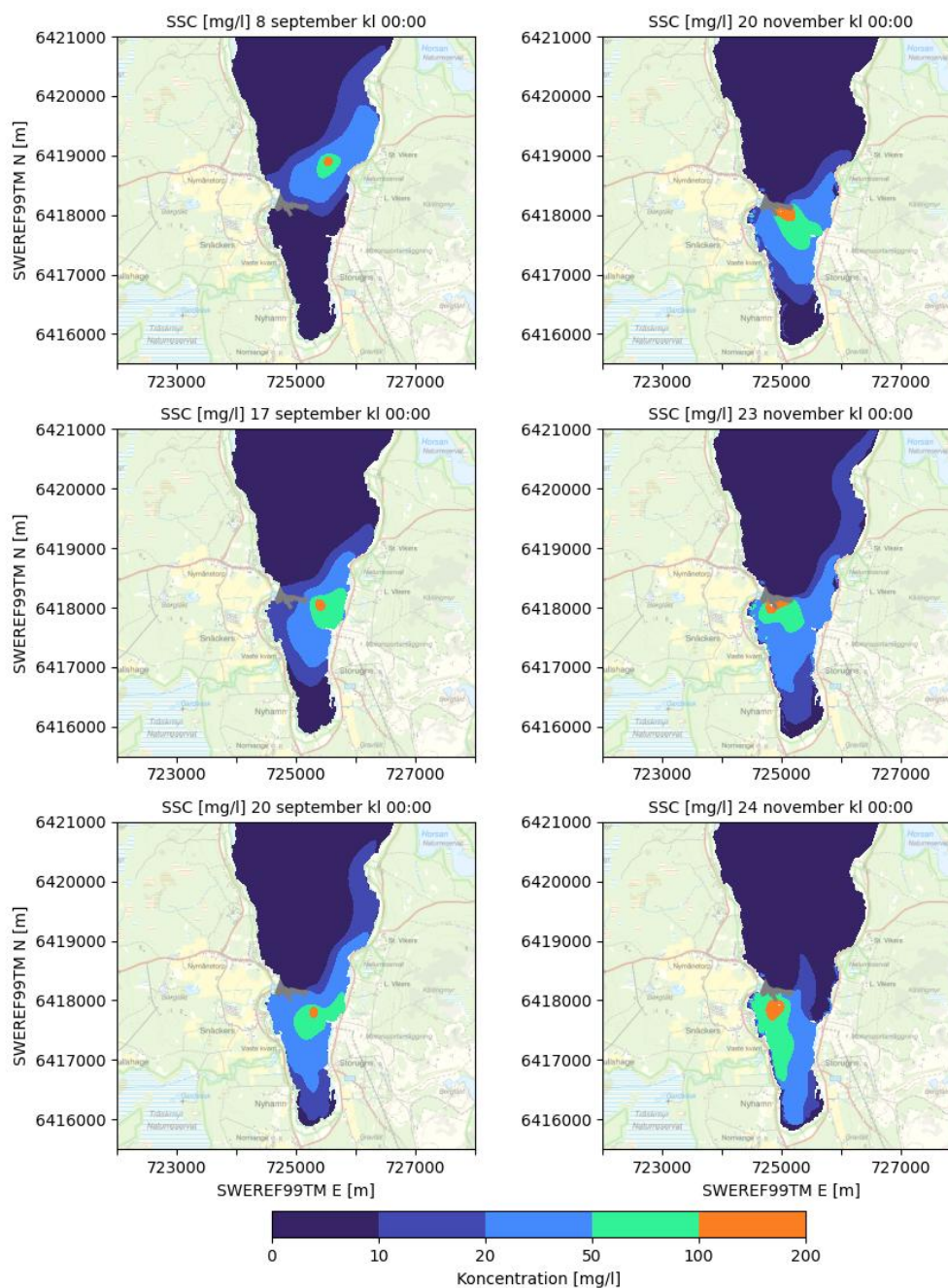
5.2.1 Utbredningsområden av suspenderat sediment

Figur 5-2 visar några utvalda ögonblicksbilder av koncentration av suspenderat sediment intill botten under muddringsperioden. Datum och klockslag anges vid respektive bild. De utvalda tidpunkterna representerar tillfällena under muddringsperioden då det blir relativt höga koncentrationer av suspenderade sediment längs olika delar av närliggande grundområden. Vilka grundområden som påverkas mest beror lika mycket på tillfälliga strömförhållanden som på den aktuella muddringspositionen. Generellt kan sägas att muddringen i farleden norr om hamnen och i östra delen av vändzonen har störst påverkan på grundområdena ost och nordost om hamnen. Exempel på detta visas i de två översta bilderna till vänster i Figur 5-2. Muddring i södra delen av vändzonen och i hamnområdet har störst påverkan på grundområdena sydväst om hamnen. Exempel på detta visas i den understa bilden till vänster i Figur 5-2, samt de tre högra bilderna i samma figur. Utredningarna av suspenderat sediment indikerar (liksom tidigare nämnt i avsnitt 5.1) att cirkulationen ofta går moturs i Kappelshamnsviken, åtminstone i vattenmassan norr om hamnen.

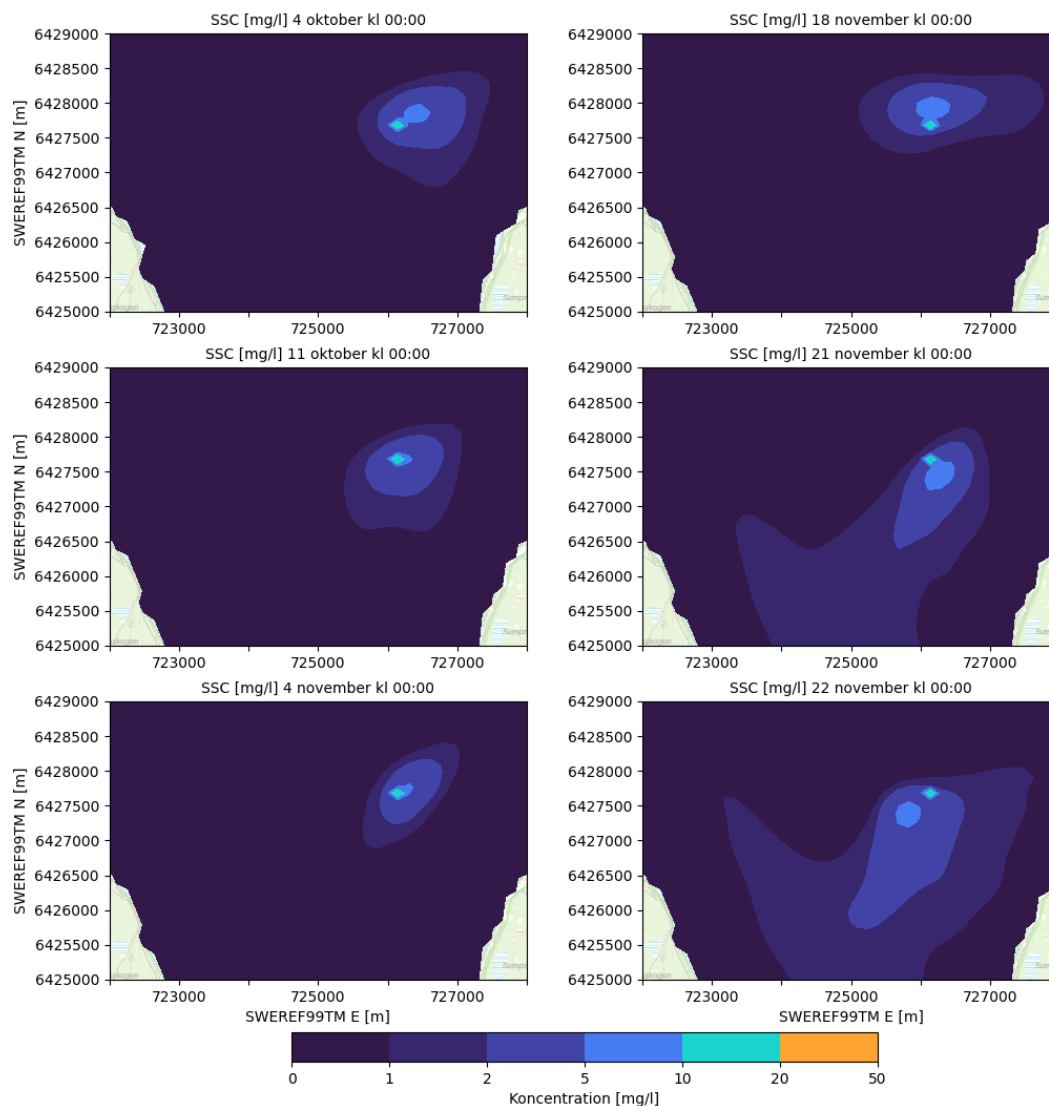
Koncentrationerna av suspenderat sediment blir alltid högst alldeles intill platsen där det muddras för tillfället, eftersom det alltid sker en utspädning när det suspenderade sedimenten transporteras iväg därifrån. Resultaten visar att koncentrationerna aldrig blir högre än cirka 200 mg/l, förutom alldeles intill platsen där det muddras. Koncentrationer över 50 mg/l kan i något enstaka fall överskridas på avstånd större än 1 km från muddringspositionen. Oftast blir dock koncentrationerna lägre än 50 mg/l på avstånd större än cirka 100 meter. Eftersom strömförhållandena ständigt varierar beroende på väder och vind finns det ingen område som kontinuerligt påverkas av höga koncentrationer av suspenderat sediment. Områden söder om hamnen påverkas dock av låga koncentrationer suspenderat sediment under en stor del av muddringsperioden.

Figur 5-3 visar sedimentspridningen nära botten vid den planerade dumpningsplatsen vid tillfällena under muddringsperioden då det är relativt höga koncentrationer av suspenderade sediment i närområdet. Koncentrationerna av suspenderade sediment blir här mindre jämfört med koncentrationerna nära muddringsplatsen. Detta beror dels på en högre tillgång på spädvatten, dels på att dumpningen sker intermittent i tiden. Vid de utvalda tillfällena som visas i bild sker dumpning samtidigt som en plym av suspenderade sediment från föregående dumpning fortfarande kan observeras.

Variationen av koncentrationer över tid analyseras mer i detalj i avsnitt 5.2.3.



Figur 5-2: Utvalda ögonblicksbilder av koncentration av suspenderat sediment (SSC) intill botten under muddringsperioden. Varje färg motsvarar ett intervall av koncentrationer, exempelvis motsvarar grön färg 50–100 mg/l. I bilderna sker muddring på den plats som uppvisar högst koncentrationer, dvs i de orangea fälten. Datum och klockslag anges vid respektive bild. Tidpunkterna representerar de tillfällen då det blir högst koncentrationer längs olika delar av närliggande stränder. Bakgrundskarta © Lantmäteriet.



Figur 5-3: Utvalda ögonblicksbilder av koncentration av suspenderat sediment (SSC) intill botten vid dumpningsplatsen under muddringsperioden. Varje färg motsvarar ett intervall av koncentrationer, exempelvis motsvarar grön färg 10–20 mg/l. Datum och klockslag anges vid respektive bild. Tidpunkterna representerar de tillfällen då det relativt höga koncentrationer i närheten av dumpningsplatsen. Dumpningen sker i den punkt i bilderna där koncentrationerna är högst. Plymerna som breder ut sig runt denna punkt härstammar från föregående dumpningstillfälle och har därmed hunnit spridas och spädas ut under fyra timmar. Bakgrundskarta © Lantmäteriet.

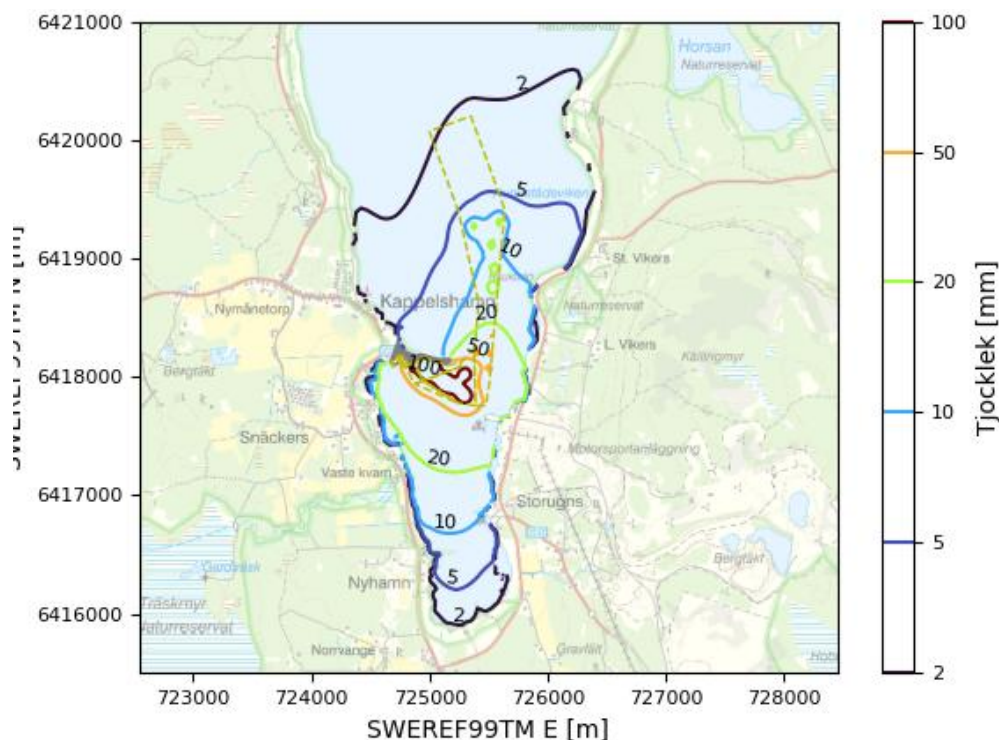
5.2.2 Pålagring

I beräkningarna tas inte hänsyn till att material som sedimenterar på grunt vatten kan komma att transporteras vidare under påverkan av vågor och vinddrivna strömmar. Sannolikt överskattas därmed tjockleken av pålagring längs med Kappelshamnsvikens stränder. Dessutom kan tjocklekarna av pålagring som visas i detta avsnitt på sikt bli betydligt lägre efter att materialets konsolideringsprocess fortskridit.

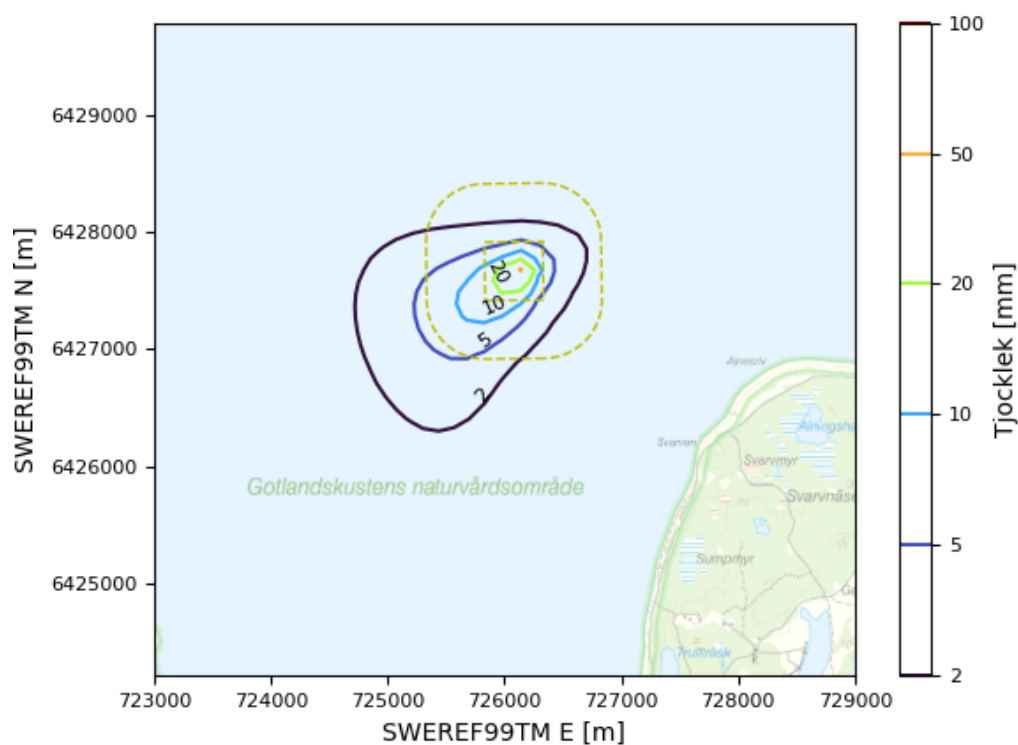
Pålagringens tjocklek efter primär konsolidering, det vill säga kort efter att sedimentspillat landat på botten, visas i Figur 5-4. Inom mycket begränsade ytor strax söder om hamnområdet och vändzonen kan sedimenterat sedimentspill ge upphov till pålagring överstigande 50 mm. Pålagring överstigande 20 millimeter kan förväntas på avstånd upp till cirka 800 meter från muddringsområde B. Den pålagring som sker inom muddringsområdet är irrelevant eftersom denna kommer att kompenseras av en viss övermuddring.

Pålagringen omkring dumpningsområdet visas i Figur 5-5. Bottnarna utanför buffertzonen påverkas i mycket liten grad.

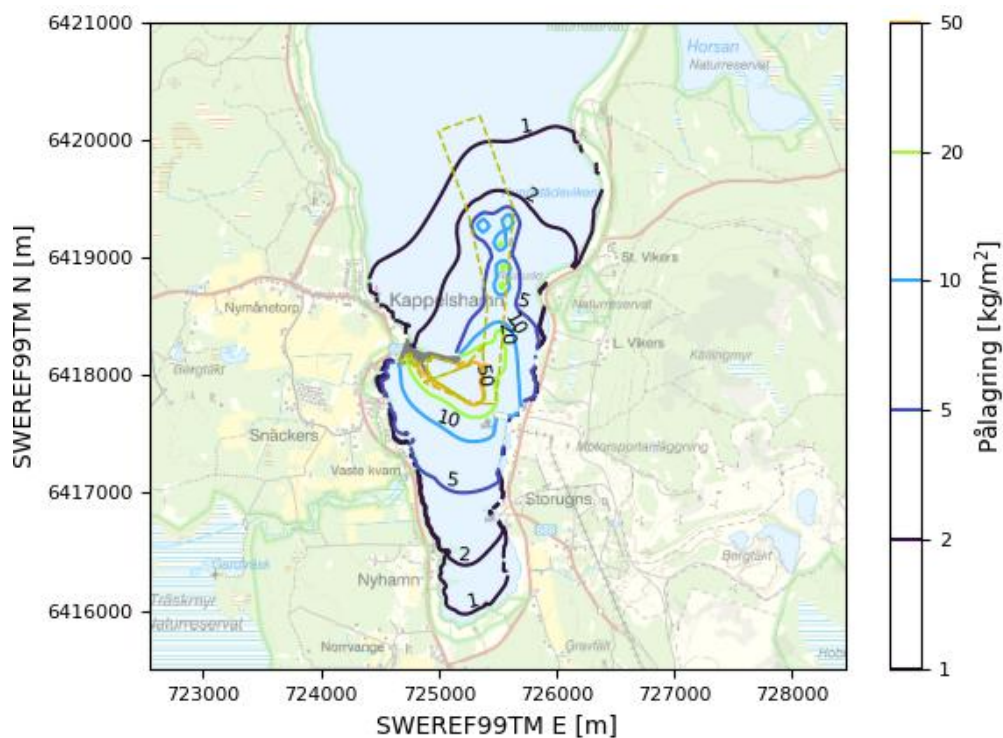
Figur 5-6 och Figur 5-7 visar pålagringens vikt per ytenhet i närheten av muddringsområdet respektive dumpningsområdet.



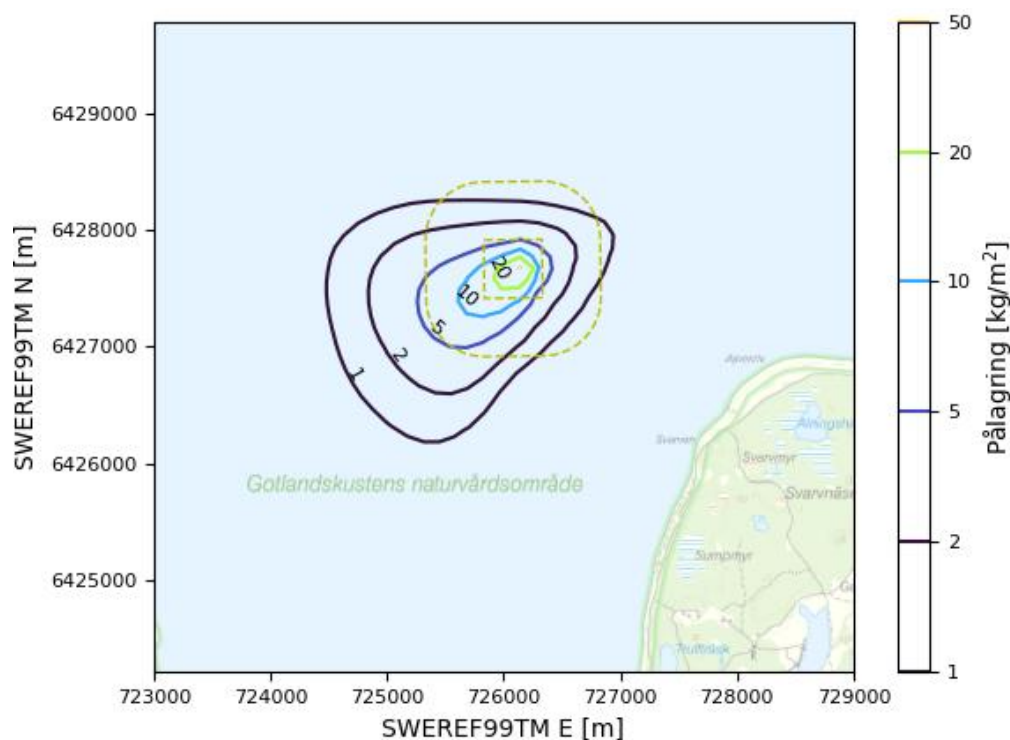
Figur 5-4: Tjocklek av pålagring omkring muddringsområdet något dygn efter sedimentering. Tjocklekarna kan förväntas vara omkring hälften så tjocka efter några månader när materialet konsoliderat. Muddringsområdet markerat i gulgrönt. Bakgrundskarta © Lantmäteriet.



Figur 5-5: Tjocklek av pålagring vid dumpningsområdet något dygn efter sedimentering. Tjocklekarna kan förväntas vara omkring hälften så tjocka efter några månader när materialet konsoliderat. Dumpningsområdet markerat som en gulgrön kvadrat inom en buffertzona som sträcker sig 500 meter från dumpningsområdet. Bakgrundskarta © Lantmäteriet



Figur 5-6: Pålagringens vikt per ytenhet omkring muddringsområdet. Muddringsområdet markerat i gulgrönt. Bakgrundskarta © Lantmäteriet.



Figur 5-7: Pålagringens vikt per ytenhet vid dumpningsområdet. Dumpningsområdet markerat som en gulgrön kvadrat inom en buffertzona som sträcker sig 500 meter från dumpningsområdet. Volymen av de dumpade massorna är inte inräknad i pålagringen från sedimentspillet. Bakgrundskarta © Lantmäteriet

5.2.3 Varaktighet och frekvens av suspenderat sediment

Varaktighet av grumling kan ses ur minst två synvinklar: dels den varaktighet som ett passivt flytande objekt upplever grumling, dels den varaktighet av grumling som råder på en viss plats.

Ett passivt objekt kan flyta in i ett område där det muddras och därefter följa med pplymen av suspenderat sediment ända till sedimentet landat på botten. Denna varaktighet bestäms av partiklarnas sjunkhastighet. Således kan ett objekt som flyter nära botten på exempelvis 10 meters djup utsättas för grumling lika länge som det tar för de minsta partiklarna att sedimentera. Utifrån de sjunkhastigheter som använts i dessa beräkningar kan detta röra sig om i storleksordningen 90 timmar, eller hälften så länge om objektet flyter nära botten på 5 meters djup. Under denna tid kommer koncentrationerna gradvis att avta. Ju högre upp i vattenmassan som objekten flyter, desto kortare tid kommer de att utsättas för grumling.

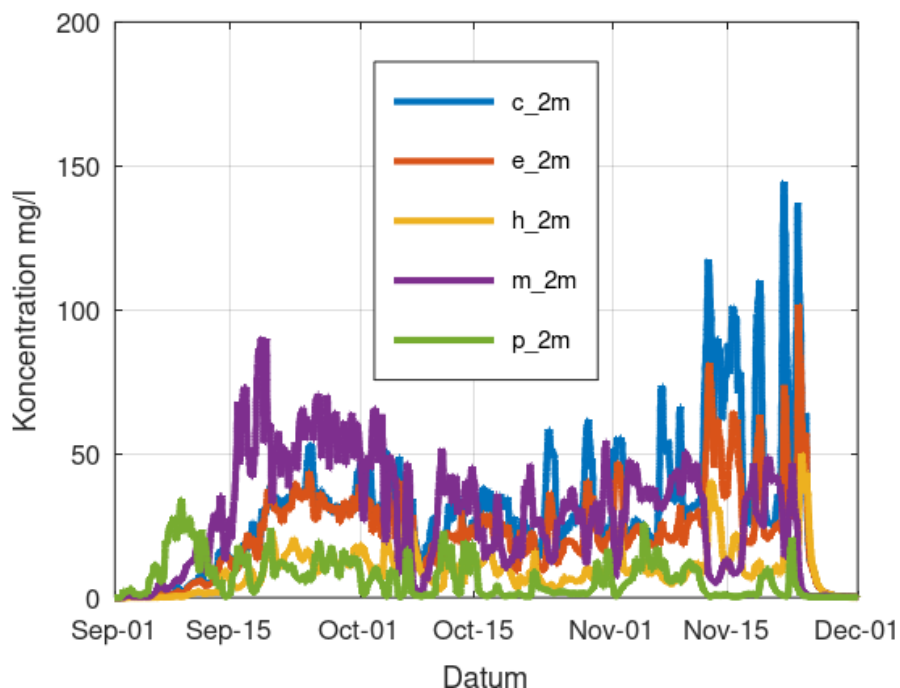
För att analysera varaktigheter av grumling för relevanta platser har tidserier av maximal koncentration av suspenderat sediment har analyserats i 12 utvalda punkter. Begreppet maximal koncentration syftar på att den högsta koncentrationen som påträffats mellan botten och vattenytan valts ut för varje punkt och ögonblick. För positionen av de 12 punkterna hänvisas till Figur 3-2.

Sex av dessa tidsserier visas i Figur 5-8. I punkterna c_2m, e_2m, h_2m, m_2m, p_2m ligger på platser och djup där det kan förekomma ålgräs i varierande omfattning (Länsstyrelsen Gotlands Län, 2022).

Den längsta enskilda sammanhängande tid (varaktighet) som koncentrationer överskridande några utvalda värden förekommer i respektive punkt sammanfattas i Tabell 2. Exempelvis överskrids 25 mg/l under som längst 18 dagar i punkt c_2m som ligger på 2 m djup strax sydväst om hamnområdet. Tabellen visar också att viss grumling (3–5 mg/l) i denna punkt förekommer under nästan hela muddringsperioden. De flesta tillfällena av koncentrationer överstigande 50 mg/l i punkt c_2m är dock betydligt kortare än 18 dagar.

Den genomsnittliga varaktigheten av maxkoncentrationer som överskrider de utvalda värdena har analyserats tillsammans med frekvensen av dessa överskridanden. Figur 5-9 till Figur 5-20 visar hur länge och hur ofta koncentrationen av suspenderat sediment överskrider värdena för respektive punkt. Genomsnittlig varaktighet för överskridanden av några utvalda värden visas med blåa ringar och läses av på den vänstra y-axeln i respektive figur. Antalet av respektive överskridande visas med orangea fyrkanter och läses av på den högra y-axeln. I exempelvis Punkt 1 (Figur 5-9), strax söder om hamnområdet, överskrids koncentrationen 50 mg/l 42 gånger under muddringsperioden. Den genomsnittliga varaktigheten av dessa överskridanden är ett dygn. Den längsta av dessa varaktigheter är dock cirka fyra dygn enligt Tabell 2.

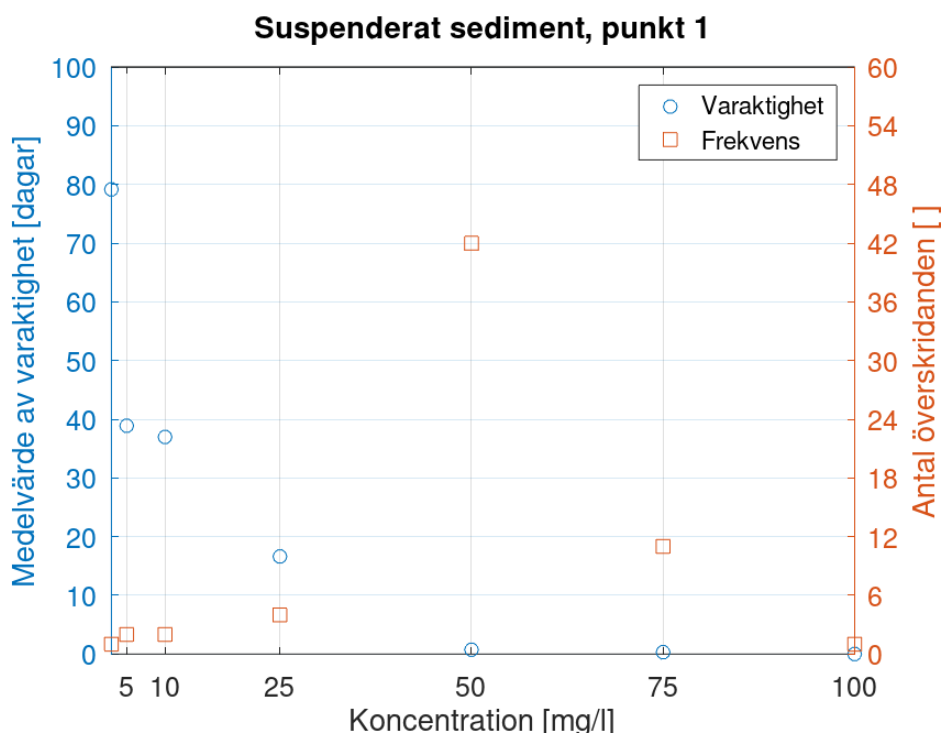
Varaktigheten av koncentrationerna överstigande 100 mg/l är nästan uteslutande kortare än ett dygn. Detta är en direkt följd av den muddringsschema som valts som utgångspunkt i beräkningarna. I ett mudderverks direkta närhet kan varaktigheten av koncentrationer överstigande 100 mg/l förväntas vara lika långa som den tid som mudderverket är i kontinuerlig drift. Följaktligen kan varaktigheterna av högra koncentrationer i punkt 1, 5 och 6 vara underskattade (samt övriga platser inom muddringområdet). På avstånd större än cirka 200 meter och/eller lägre koncentrationer bedöms denna känslighet dock vara mindre betydande, vilket exempelvis återspeglas av värdena i punkt c_2m där en varaktighet av relativt höga koncentrationer (75 mg/l) beräknats till cirka 2 dygn.



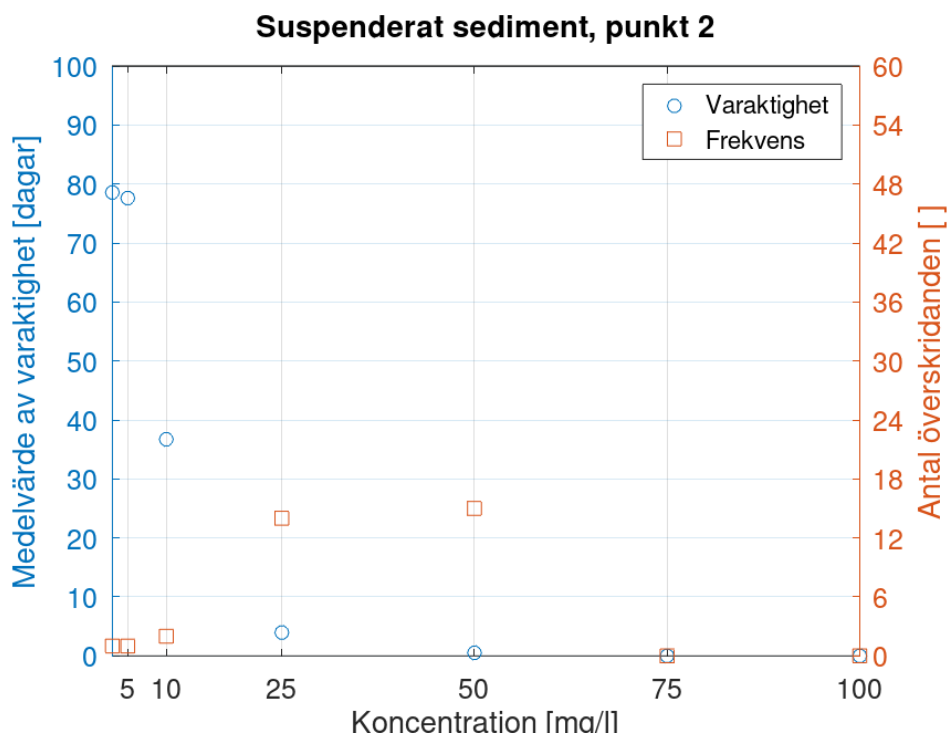
Figur 5-8: Tidserier av koncentrationer suspenderat sediment i sex utvalda punkter. För positionen av dessa punkter hänvisas till Figur 3-2.

Tabell 2: Tabellen visar den längsta varaktigheten (antal dagar i sträck) då koncentrationer av suspenderade sediment (SSC) överstiger utvalda värden i 12 utvalda punkter.

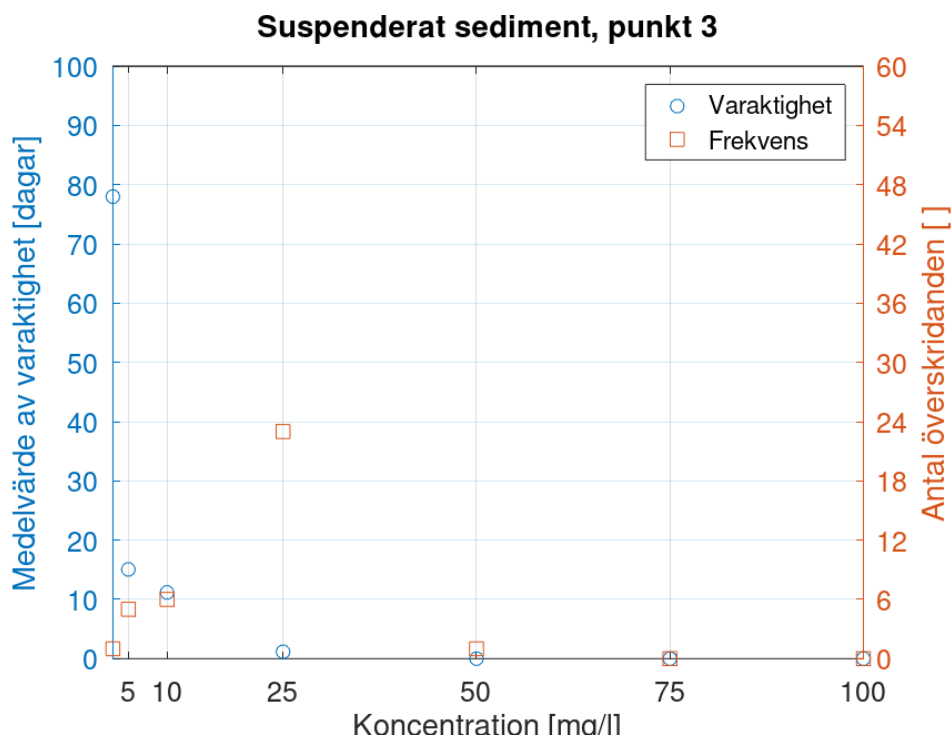
Punkt	Max antal dygn som SSC överskrider utvalda värden						
	3 mg/l	5 mg/l	10 mg/l	25 mg/l	50 mg/l	75 mg/l	100 mg/l
1	79	77	74	34	4	<1	<0,1
2	79	78	48	18	2	0	0
3	78	73	33	6	<0,1	0	0
4	79	78	47	18	3	0	0
5	80	79	46	21	3	<1	<1
6	46	34	18	6	<1	<1	<1
c_2m	78	74	73	18	5	2	<1
e_2m	77	74	3	13	1	<1	<1
h_2m	37	21	6	2	0	0	0
m_2m	46	46	23	19	3	<1	0
p_2m	13	13	4	<1	0	0	0
21	27	15	11	2	0	0	0



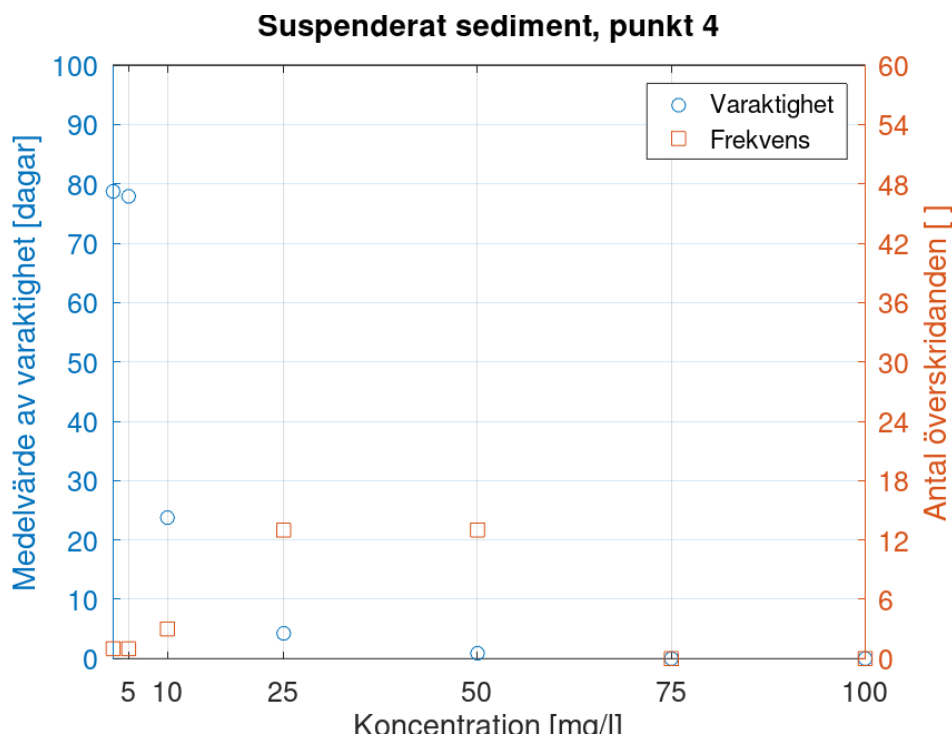
Figur 5-9: Figuren visar hur länge och hur ofta koncentrationen av suspenderat sediment överskrider några utvalda värden i Punkt 1, strax söder om hamnområdet. Värdet 3 mg/l är inte explicit utskrivet under x-axeln i figurerna av utrymmesskäl. Som exempel överskrids 50 mg/l 42 gånger under muddringsperioden med en genomsnittlig varaktighet på 1 dygn.



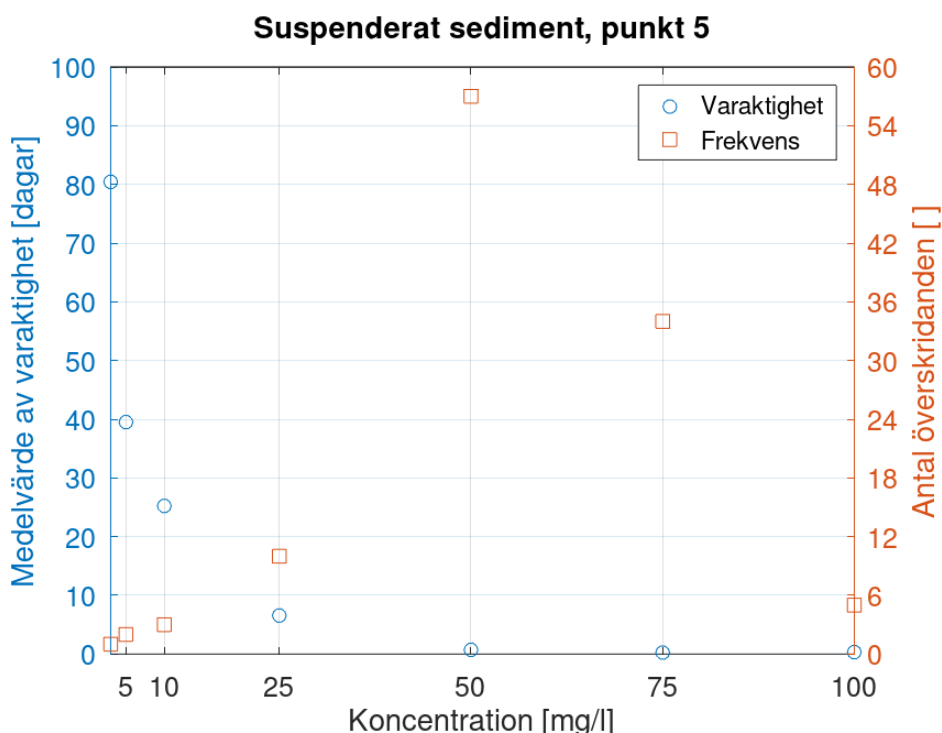
Figur 5-10: Figuren visar hur länge och hur ofta koncentrationen av suspenderat sediment överskrider några utvalda värden i Punkt 6, i farleden nordost om hamnområdet. Värdet 3 mg/l är inte explicit utskrivet under x-axeln i figurerna av utrymmesskäl. Som exempel överskrids 25 mg/l 14 gånger under muddringsperioden med en genomsnittlig varaktighet på 4 dygn.



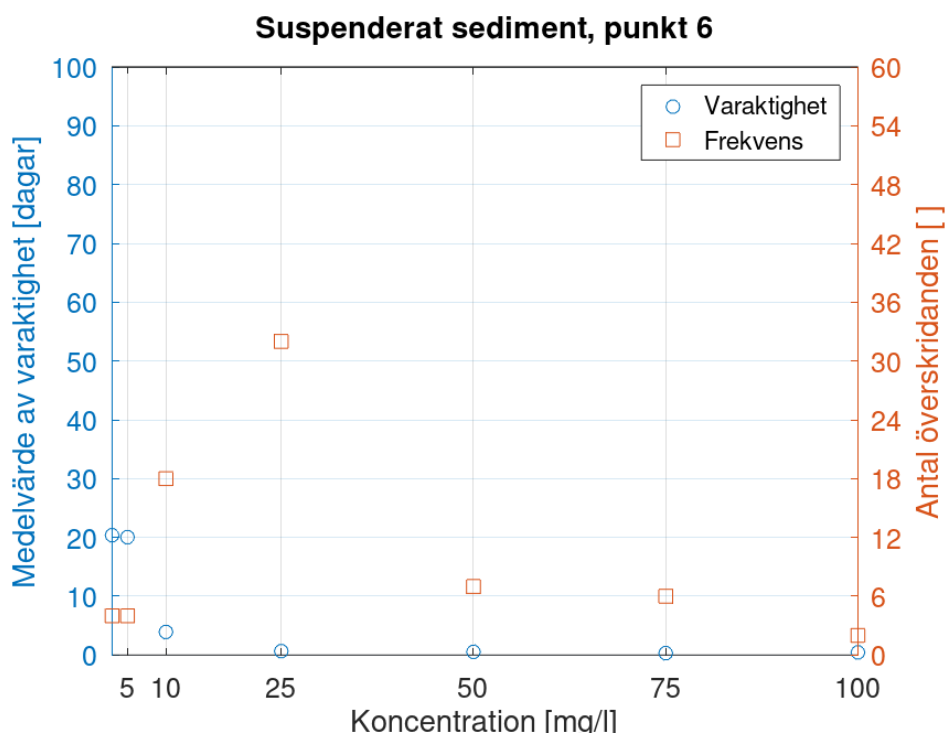
Figur 5-11: Figuren visar hur länge och hur ofta koncentrationen av suspenderat sediment överskrider några utvalda värden i Punkt 3, cirka 700 meter söder om hamnområdet. Värdet 3 mg/l är inte explicit utskrivet under x-axeln i figurerna av utrymmesskäl. Som exempel överskrids 25 mg/l 23 gånger under muddringsperioden med en genomsnittlig varaktighet på 2 dygn.



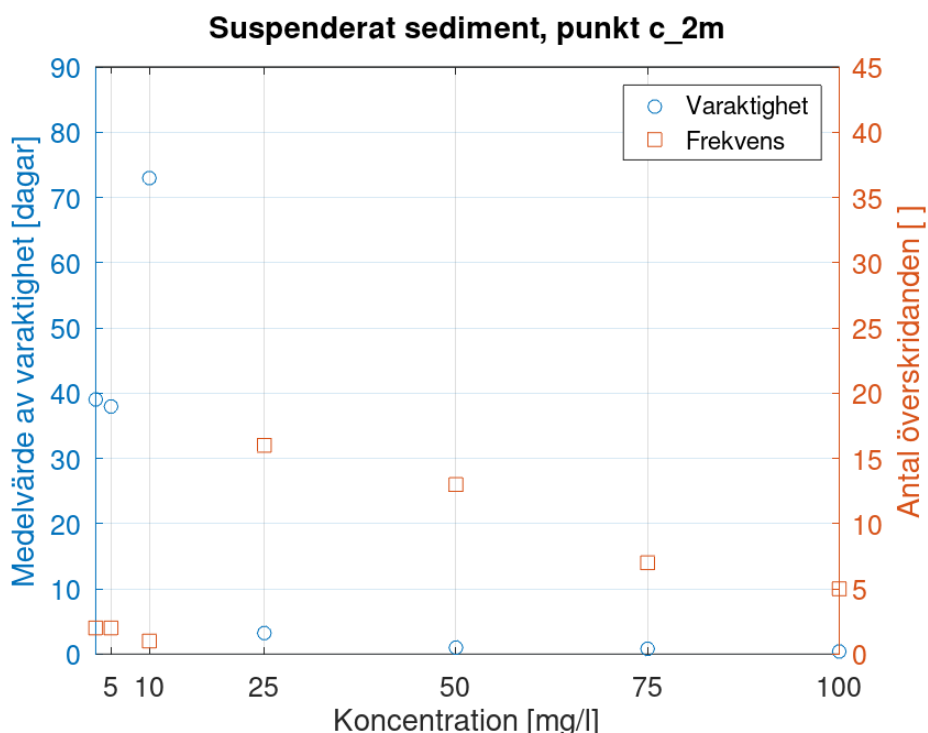
Figur 5-12: Figuren visar hur länge och hur ofta koncentrationen av suspenderat sediment överskrider några utvalda värden i Punkt 4, en bit sydost om hamnområdet. Värdet 3 mg/l är inte explicit utskrivet under x-axeln i figurerna av utrymmesskäl. Som exempel överskrids 25 mg/l 13 gånger under muddringsperioden med en genomsnittlig varaktighet på 4 dygn.



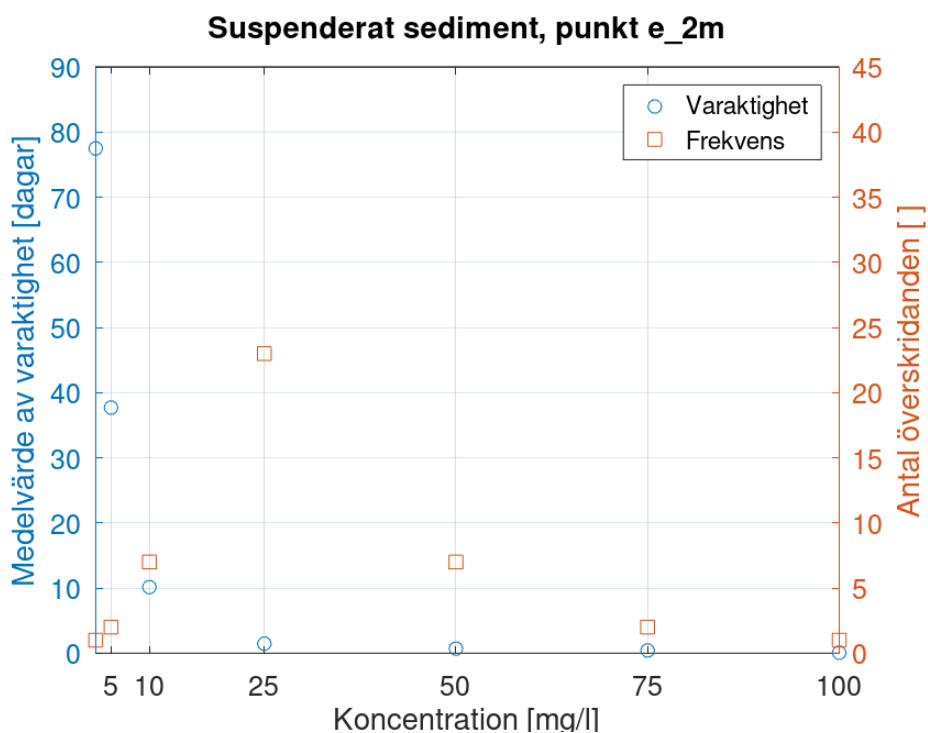
Figur 5-13: Figuren visar hur länge och hur ofta koncentrationen av suspenderat sediment överskrider några utvalda värden i Punkt 5, öster om hamnområdet. Värdet 3 mg/l är inte explicit utskrivet under x-axeln i figurerna av utrymmesskäl. Som exempel överskrids 10 mg/l 3 gånger under muddringsperioden med en genomsnittlig varaktighet på 26 dygn.



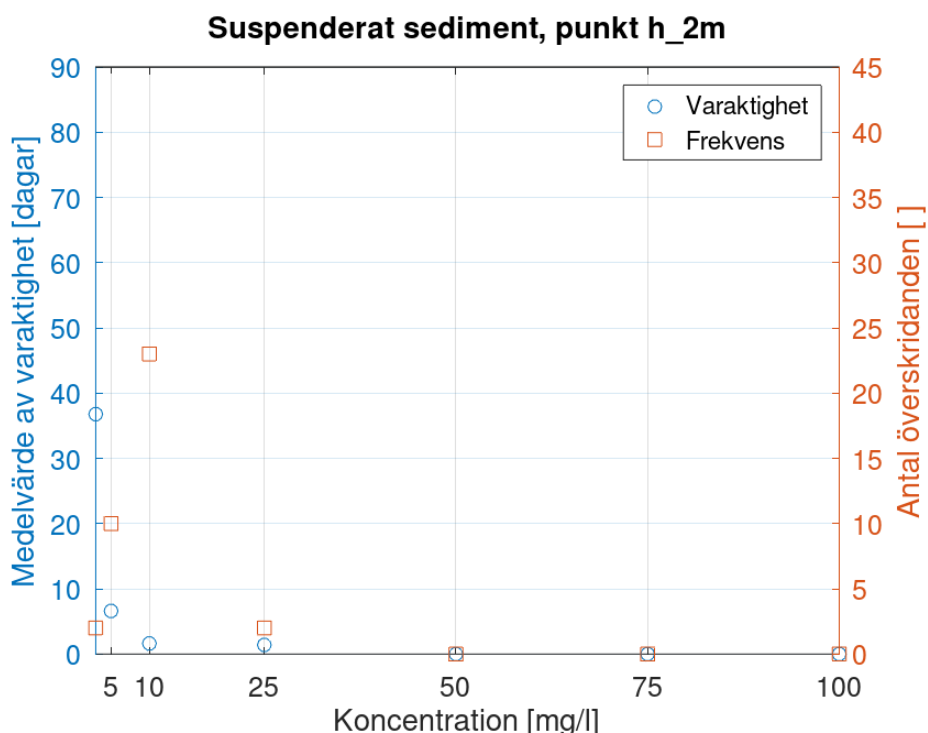
Figur 5-14: Figuren visar hur länge och hur ofta koncentrationen av suspenderat sediment överskrider några utvalda värden i Punkt 6, strax söder om hamnområdet. Värdet 3 mg/l är inte explicit utskrivet under x-axeln i figurerna av utrymmesskäl. Som exempel överskrids 10 mg/l 18 gånger under muddringsperioden med en genomsnittlig varaktighet på 3 dygn.



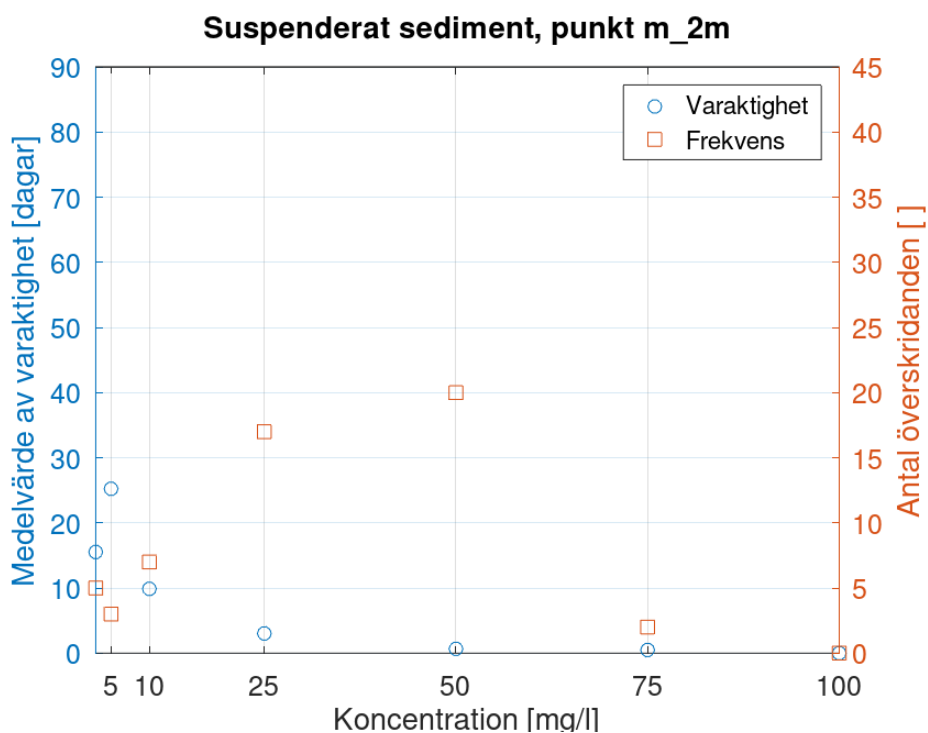
Figur 5-15: Figuren visar hur länge och hur ofta koncentrationen av suspenderat sediment överskrider några utvalda värden i Punkt c_2m, knappt 200 meter söder om muddringsområde D. Värdet 3 mg/l är inte explicit utskrivet under x-axeln i figurerna av utrymmesskal. Som exempel överskreds 25 mg/l 16 gånger under muddringsperioden med en genomsnittlig varaktighet på cirka 3 dygn.



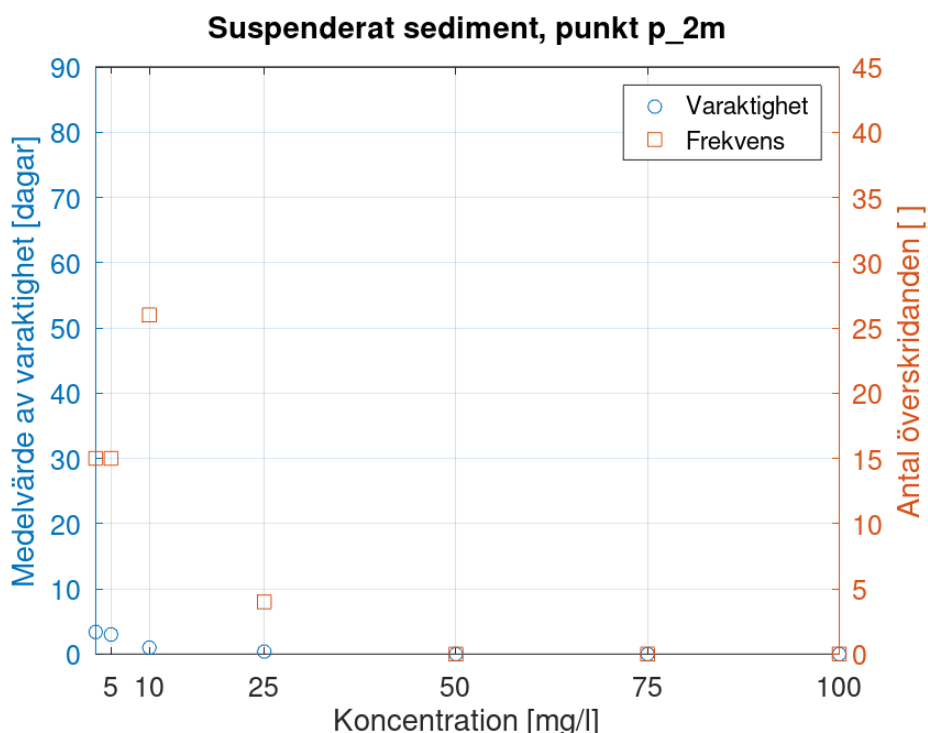
Figur 5-16: Figuren visar hur länge och hur ofta koncentrationen av suspenderat sediment överskrider några utvalda värden i Punkt e_2m, drygt 500 m söder om muddringsområde F. Värdet 3 mg/l är inte explicit utskrivet under x-axeln i figurerna av utrymmesskal. Som exempel överskreds 25 mg/l 23 gånger under muddringsperioden med en genomsnittlig varaktighet på cirka 2 dygn.



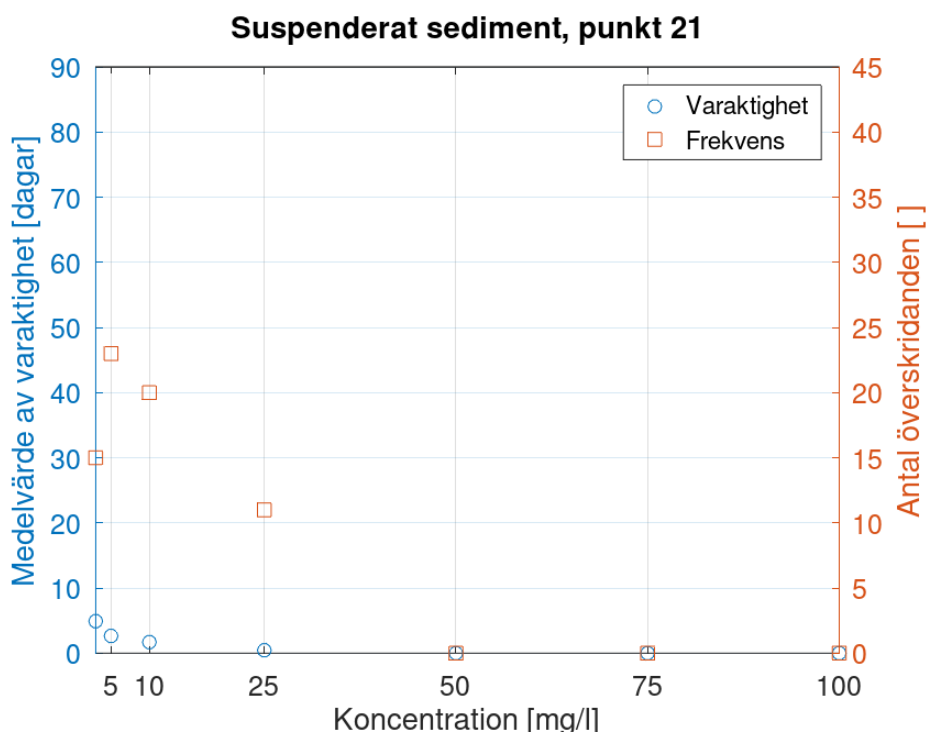
Figur 5-17: Figuren visar hur länge och hur ofta koncentrationen av suspenderat sediment överskrider några utvalda värden i Punkt h_2m, i södra delen av Kappelshamnsviken drygt 1 300 meter från muddringsområdet. Värdet 3 mg/l är inte explicit utskrivet under x-axeln i figurerna av utrymmesskal. Som exempel överskrids 10 mg/l 23 gånger under muddringsperioden med en genomsnittlig varaktighet på cirka 2 dygn.



Figur 5-18: Figuren visar hur länge och hur ofta koncentrationen av suspenderat sediment överskrider några utvalda värden i Punkt m_2m, knappt 200 meter öster om muddringsområde A. Värdet 3 mg/l är inte explicit utskrivet under x-axeln i figurerna av utrymmesskal. Som exempel överskrids 50 mg/l 20 gånger under muddringsperioden med en genomsnittlig varaktighet på cirka 1 dygn.



Figur 5-19: Figuren visar hur länge och hur ofta koncentrationen av suspenderat sediment överskrider några utvalda värden i Punkt p_2m, drygt 500 meter öster om muddringsområde A. Värdet 3 mg/l är inte explicit utskrivet under x-axeln i figurerna av utrymmesskal. Som exempel överskreds 10 mg/l 26 gånger under muddringsperioden med en genomsnittlig varaktighet på cirka 2 dygn.



Figur 5-20: Figuren visar hur länge och hur ofta koncentrationen av suspenderat sediment överskrider några utvalda värden i Punkt 21, knappt 300 meter väster om muddringsområde A. Värdet 3 mg/l är inte explicit utskrivet under x-axeln i figurerna av utrymmesskal. Som exempel överskreds 25 mg/l 11 gånger under muddringsperioden med en genomsnittlig varaktighet på cirka 1 dygn.

6 Referenser

Goldsmith, W., Silva, M., & Fischenich, C. (2001). *Determining Optimal Degree of Soil Compaction for Balancing Mechanical Stability and Plant Growth Capacity*. ERDC U.S. Army Engineer Research & Dev Center.

Larsson, R. (2008). *Jords egenskaper*. Linköping: SGI, Statens Geotekniska Institut.

Länsstyrelsen Gotlands Län. (2022). *Ålgräskartering runt Gotland 2019-2021*. Rapport nr 2022:4, Miljö och Vattenenheten. Länsstyrelsen i Gotlands Län.

Portela, L. I., Ramos, S., & Teixeira, A. T. (2013). Effect of salinity on the settling velocity of fine sediments of a harbour basin. (D. C. Conley, G. Masselink, P. E. Rusell, & T. J. O'Hare, Red.) *Proceedings 12th International Coastal Symposium, J., Coastal Research*(Special Issue No. 65), 1188-1193.

van Rijn, L. C., & Barth, R. (2018). Settling and Consolidation of soft Mud-Sand Layers. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*.