

Strömmar och spridning av suspenderat sediment vid Björkö i Stockholms skärgård

Lasse Johansson

2007-12-12

Dokumenttyp	Dokumentidentitet	Rev. nr.	Rapportdatum	Uppdragsnummer
RAPPORT		9	2007-12-12	2521100
Författare	Uppdragsnamn			
Lasse Johansson, oceanograf	Sedimentspridning Björkö Stockholmsområdet			
Beställare	Granskad av			
Jenny Svärd, SWECO	Mattias Törnkvist, VPC Charlotte Gyllenhammar, SWECO Jenny Svärd, SWECO Stockholms Hamnar			
	Godkänd av			
	Mattias Törnkvist, VPC			
Delgivning	Antal sidor		Antal bilagor	
Jenny Svärd, SWECO Charlotte Gyllenhammar, SWECO	27		1	

Strömmar och spridning av suspenderat sediment vid Björkö i Stockholms skärgård

1 SAMMANFATTNING

1.1 Några ord om rapporten och projektet

I denna rapport beskriver vi strömmarna i anslutning till en planerad tipplats vid Björkö i Mysingen i Haninge kommun. I rapporten beskrivs också hur lerpartiklar sprids i vattnet i Mysingen vid Tippingen. Partiklarna slammas upp i vattnet när man tippas lera i djuphålan vid Björkö. Leran kommer från muddringarna för en ny hamn vid Norvikudden. Leran är så kallad glaciallera som avsattes ur smältvatten från inlandsisen vid den senaste avsmältningen. Sådan lera täcker även stora delar av Östersjöns botten, däribland Mysingens bottnar. Den lera som skall tippas vid Björkö är inte förorenad.

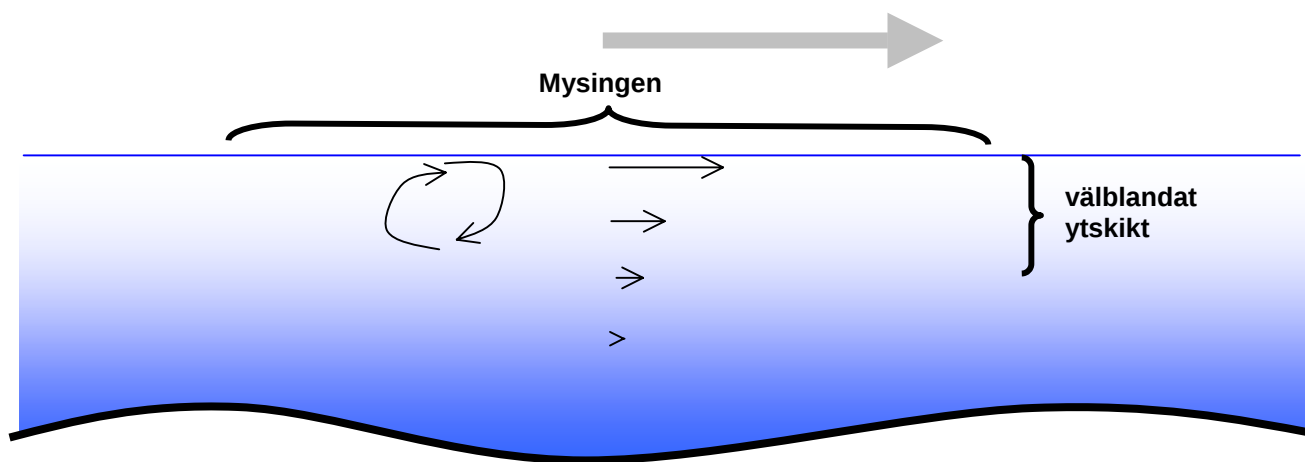
Ungefär en miljon kubikmeter lera kan komma att tippas i djuphålan vid Björkö på vinterhalvåret under maximalt tre vintersäsonger. Leran transporteras från muddringsplatsen till tipplatsen på pråm. Vid tipplatsen töms pråmen och nästan all lera faller snabbt, nästan som en sten, genom vattnet och hamnar i djuphålan. En liten del av leran slammas upp i vattnet som får en viss halt av lerpartiklar. Detta orsakar bland annat att vattnets täthet, dess vikt per liter, ökar och att vattnet blir grumligt. Ett sätt att minska grumlingen är att pumpa ner det lerhaltiga vatten som medförs på pråmen till ett större djup. I rapporten studerar vi den minskning av partikelhalten som kan fås om den lerhaltiga blandningen pumpas ner till 40 meters djup eller mer.

För att förstå hur lerpartiklarna sprids i vattnet måste vi ha en bild av strömmarna och vattnets skiktning i området. Låt oss börja med att studera vattnets egenskaper.

1.2 Mysingens strömmar och skiktning

Mysingen står i förbindelse med Östersjön via sund i norr och söder. Sundet i öster, mellan Ornö och Utö, är för smalt och grunt för att ha någon nämnvärd betydelse för vattenutbytet mellan Mysingen och Östersjön. Det finns inga större åar som mynnar i Mysingen eller anslutande vatten. Det gör att vattnet i Mysingen har ungefär samma salthalt som ute i Östersjön.

I Figur 1 kan vi se Mysingen i genomskärning. Vi tänker oss att vi ser området från öster. I norr och söder är det litet grundare och i mitten, där själva Mysingen ligger, är det något djupare. I bilden har den vertikala skalan överdrivits jämförts med verkligheten för att vi skall kunna se detaljerna.



Figur 1. Mysingen sedd från öster i genomskärning.

Bilden är starkt förenklad och vertikalskalan är överdriven jämfört med horizontalskalan. Den blå färgen antyder att tätheten är lägre i det välblandade ytskiktet än längre ner. De raka pilarna visar att strömmen avtar med djupet och att den är väldigt låg under det välblandade ytskiktet. Den översta pilen är vinden. De runda pilarna illustrerar omblandningen som gör att ytskiktet är välblandat. Omblandningen hänger ihop med att strömmen minskar så snabbt med djupet i ytskiktet.

Närmast ytan, där uppvärmning och avkylning sker och där vinden blandar om vattnet, finns det välblandade ytskiktet. Det kännetecknas av att alla egenskaper, temperaturen, salthalten och halten av andra ämnen, är densamma i hela skiktet, med ett undantag nämligen strömmarna – mer om det senare. Det välblandade ytskiktet kan bildas tack vare att det är lättare per liter än vattnet på större djup; dvs det har lägre täthet. Det flyter alltså ovanpå det undre vattnet.

Tidigt på våren, när solen värmer ytan och när vinden är svag, är det välblandade ytskiktet några få meter djupt. Under sommarhalvåret är det 10-20 meter, beroende på vädret. På

hösten, när havet kyla av, blir det djupare. Denna variation beror mest på temperaturskillnader, vilka i sin tur orsakas av uppvärmning från solen och avkylning från avdunstning och kall luft. Under vintern dominerar salthaltens skiktande verkan. Skiktningen är då svagare, det vill säga att skillnaden i täthet är mindre än under sommaren. Dessutom ligger gränsen mellan det välblandade ytskiktet och djupare vatten på större djup än på sommaren. (Gränsen kallas täthetssprångskikt eller pyknoklin.) I rapporten finns diagram som visar pyknoklinen och hur den varierar under året och mellan olika år.

Pyknoklinen fungerar som en barriär som kraftigt minskar utväxlingen av vatten, lösta ämnen och partiklar mellan ytskiktet och djupvattnet. Lerpartiklar som från början finns i ytskiktet tenderar därför att stanna kvar där, och lerpartiklar som släpps ut under pyknoklinen hindras att komma upp i ytskiktet.

Som nämntes är strömmen den enda egenskapen som varierar nämnvärt med djupet i det välblandade ytskiktet. Det gäller den vinddrivna strömmen närmare bestämt. I ett område som är så smalt och välavgränsat som Mysingen, tvingas vindströmmen att i stort sett följa dess huvudriktning, dvs nordost-sydväst. Eftersom sydvästlig vind är vanligast så kan man säga att den typiska ytströmmen i Mysingen går åt nordost. En genomsnittlig vindstyrka är omkring fem meter per sekund, litet högre på vintern och litet lägre på sommaren. Ytströmmen är ungefär tre procent av vindstyrkan vilket ger en typisk ytström i Mysingen på 15 cm/s. Med ytström menas här strömmen i den översta metern. Strömmen minskar med djupet, även i det välblandade ytskiktet. Som ett genomsnitt över hela det välblandade ytskiktet är strömmen en procent av vindhastigheten, alltså typiskt 5 cm/s nordostgående.

Väldigt litet rörelseenergi tränger ner genom pyknoklinen varför vattnet under det välblandade ytskiktet ner till botten karaktäriseras av svagare strömmar, några få centimeter per sekund, och svag turbulens/blandning. Djupet i Mysingen är grovt taget 50 meter. I den djuphåla där man planerar att tippa leran är strömmen och turbulensen praktiskt taget noll. Djuphålan går ner till 65 meters djup.

Efter denna genomgång av skiktningen och strömmen i Mysingen är vi nu redo att studera vad som händer när lerpartiklar släpps ut i vattnet.

1.3 Spridningen av lerpartiklar i det välblandade ytskiktet

När en klump med fast lera faller genom vattnet kommer en del lerpartiklar att lossna och blandas med vatten. En blandning av vatten och partiklar kallas suspension. Lerpartiklarna är små, mindre än 0,02 millimeter, vilket gör att de sjunker väldigt långsamt. Sjunkfarten är mindre än en meter per dygn. Partiklarnas nedsjunkning motverkas av de turbulenta rörelserna som blandar om och virvlar upp partiklarna. Det betyder att om turbulensen överstiger en viss nivå så kommer enstaka lerpartiklar inte att sjunka utan att ständigt virvlas upp. I det välblandade ytskiktet är turbulensen i detta sammanhang stark. I djuphålan vid Björkö däremot är både strömmen och turbulensen så svaga att partiklarna kan sjunka ner till botten i lugn och ro. Undersökningar av sedimenten visar att nettotillväxten av sediment är hög; uppåt 40 mm/år, vilket beror på att djuphålan vid Björkö är ett av få ställen i Mysingen där sediment ackumuleras, referens [1] avsnitt 5.4.2.

Slutsatsen är att nästan alla sedimentpartiklar som släpps ut i ytan i Mysingen kommer att stanna kvar i det välblandade ytskiktet, medan nästan alla partiklar som hamnar i vattnet i djuphålan kommer att sjunka ner på botten.

Beskrivningen ovan gäller starkt utspädda suspensioner där man kan betrakta partiklarna som ensamma och oberoende av varandra. Om lerhalten däremot är hög, ett gram lera per liter vatten exempelvis, så beter sig partiklarna annorlunda. Partiklarna kommer då att öka vattnets täthet och lersuspensionen faller som en tung vätska ner genom det lättare, sedimentfattiga vattnet. I rapporten analyserar vi denna situation och tar då hänsyn till att den sjunkande lersuspensionen blandas med omgivande vatten och späds medan den sjunker. Vi kan därigenom beräkna en övre gräns för den lerhalt som kan förekomma i ytskiktet utan att det lerhaltiga vattnet snabbt sjunker direkt ned i djuphålan. Vi kommer fram till en övre gräns (med marginal) på 500 milligram lera per liter vatten.

Vatten med en lerhalt under 500 mg/L kan alltså bli kvar i det välblandade ytskiktet efter tipptillfället. Man kan beskriva det lerhaltiga vattnet efter en tippning som ett moln av lerpartiklar i vattnet. Vi gör ytterligare en beräkning av hur detta moln driver iväg med den typiska ytströmmen och hur det samtidigt blandas med omgivande vatten till följd av turbulensen. När molnet blandas så sjunker dess lerhalt och på ökande avstånd från tipplatsen blir halten allt lägre. I Miljökonsekvensbeskrivningen för denna verksamhet sägs att sedimenthalten 25 mg/L inte påverkar växter och djur. I rapporten redovisar vi en beräkning som visar att halten minskar från tipplatsens 500 mg/L till 25 mg/L på ett avstånd av en kilometer. Även detta avstånd innehåller en marginal för de osäkerheter som finns beträffande lerans egenskaper, väderlek med mera.

Närmaste land, Björkö, ligger på 0,5 till 1,5 kilometers avstånd från tipplatsen, beroende på i vilken del av djuphålan tippningen sker. Det innebär att sannolikheten är låg att Björkö's stränder och vikar kommer att utsättas för sedimenthalter som överstiger 25 mg/L. Övriga stränder ligger längre bort från tipplatsen och exponeras i än mindre utsträckning för lerpartiklar från tippningen.

Vi har använt en enkel beräkningsmetod, anpassad till de data som finns tillgängliga idag. En exaktare beräkning sedimenthalten på en given plats kräver att sedimenthalten i vattnet mäts vid varje tipptillfälle, att strömmen och skiktningen samtidigt mäts samt att lerpartiklarnas storleksfördelning och benägenhet att klumpa ihop sig mäts.

1.4 Minskning av partikelhalten vid ytan genom nedpumpning av lersuspensionen

När den muddrade leran läggs på pråmen följer det alltid med en del vatten. Detta vatten kommer i närkontakt med leran under en längre tid och skvalpar omkring på pråmen när den rör sig. Vattnet blir alltså starkt lerhaltigt under transporten. Vid tippningen kan man pumpa bort detta vatten separat, innan den fasta leran tippas, och leda ner det till större djup. På så sätt minskas tillförseln av suspenderad lera till det välblandade ytskiktet. Om vattnet pumpas ner till 40 meters djup eller mer kommer det att sjunka ett kortare stycke genom omgivande vatten innan det når djuphålan. Under sjunkningen passerar det lugnare vatten än närmare ytan. Det kommer därför inte att blandas med omgivande vatten lika intensivt som om det släpps vid ytan. Det gör att mer av det lerhaltiga vattnet kommer att sjunka ner i djuphålan jämfört med om det släpps ut i ytskiktet. Till sist påpekar vi det som sades ovan, nämligen att pyknoklinen i stor utsträckning hindrar partiklar att transporteras uppåt genom den. Lerpartiklar som släpps ut under pyknoklinen kommer därför att hållas kvar där i stor utsträckning. Slutsatsen av detta är att halten av lerpartiklar i det välblandade ytskiktet kommer att bli mycket lägre om lersuspensionen leds ner till 40 meters djup eller mer, jämfört med om den släpps ut i ytan.

1.5 Diffus halt – halten under längre tid och större områden

Som vi sett blir molnet av lerpartiklar allt mer utspädd ju längre tid som gått efter tippningen och ju längre bort från tipplatsen det kommit. Tills slut blir partikelhalten så låg att det är svårt att skilja molnet från Mysingens övriga vattenmassa. Men det betyder också att vattnet i Mysingen får en långsamt ökande diffus lerpartikelhalt. I rapporten gör vi en överslagsberäkning av hur mycket lerpartiklar som tillförs Mysingens välblandade ytskikt under tippningssäsongen från den 15:e september till den 1:e maj. Som vi såg ovan så minskar partikelhalten i ytskiktet knappt alls genom att partiklarna sjunker, utan istället genom att ytskiktet i Mysingen byts ut mot "nytt" vatten från Östersjön. I rapporten fastställer vi en sorts budget för tillförsel och bortförsel av lerpartiklar och kommer fram till att den diffusa halten i Mysingen blir låg, under 1 mg/L.

1.6 Påverkan på ström och skiktning

Varken ström eller salthalt påverkas av verksamheten annat än mycket lokalt, ett tiotal meter i horisontalled från ytan till djuphållans botten, och endast under några minuter vid tippningstillfället. Djuphålan vid Björkö utfylls delvis vilket har obetydlig påverkan på strömmar och salthalt i resten av Mysingen.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

1	SAMMANFATTNING	1
1.1	Några ord om rapporten och projektet.....	1
1.2	Mysingens strömmar och skiktning.....	2
1.3	Spridningen av lerpartiklar i det välblandade ytskiktet.....	3
1.4	Minskning av partikelhalten vid ytan genom nedpumpning av lersuspensionen	4
1.5	Diffus halt – halten under längre tid och större områden.....	5
1.6	Påverkan på ström och skiktning.....	5
2	SYFTE	7
3	BAKGRUND.....	7
4	TOPOGRAFIN, SEDIMENTEN, SKIKTNINGEN OCH VINDEN.....	8
4.1	Topografiska förhållanden vid Björkö	8
4.2	Sedimentegenskaper i djuphålan vid Björkö.....	8
4.3	Skiktningen	8
5	DIFFUS HALT AV SEDIMENT I MYSINGEN	14
6	RESULTAT	15
6.1	Strömsituationen i området.....	15
6.2	Sedimentets spridning efter tippning	16
6.3	Möjligheter att förbättra dataunderlaget.....	18
7	NEDPUMPNING AV SEDIMENTSUSPENSION FRÅN TIPPNINGPRÅMEN	19
8	PÅVERKAN PÅ STRÖMMAR OCH SALTHALT.....	19
9	SLUTSATSER	20
10	REFERENSER	21
11	BILAGA: SPÄDNINGSFÖRLOPPET	22
11.1	Det suspenderade materialet.....	22
11.2	Begynnelsespädningen på tipplatsen	22
11.3	Spädningen efter tipptillfället.....	24

2 SYFTE

Syftet med rapporten är att

- Beskriva strömsituationen i området
- Beskriva hur grumlingen vid tippningen sprids geografiskt i området baserat på strömmarna
- Beräkna hur lång tid ungefär som grumlingen kommer att hålla i sig
- Generellt beskriva påverkan på strömmar och salthalt i området av tippningen

3 BAKGRUND

Muddermassor från Norvikudden planeras att tippas i en djuphåla vid Björkö. Frågan är hur det material som suspenderas i vattenpelaren, när sedimenten sjunker till botten, kommer att spridas och var det kommer att sedimentera.

4 TOPOGRAFIN, SEDIMENTEN, SKIKTNINGEN OCH VINDEN

4.1 Topografiska förhållanden vid Björkö

Björkö ligger i fjärden Mysingen nordost om Nynäshamn. Vattenområdet är orienterat i nordost-sydvästlig riktning och cirka 30 kilometer långt. Det avskiljs från Östersjön av Utö och Ornö, mellan vilka ett smalt sund förbinder området med utsjön.

Botten är kuperad med ryggar och djuphålor. Nordost om tipplatsen ligger Björkö som fortsätter söderut som en ås, väster om tipplatsen, på cirka 30 meters djup. Tipplatsen ligger i en 40-45 meter djup dalgång. Djuphålan har 50 till 65 meters djup och är drygt en kilometer lång och ett par hundra meter bred, ref [1] figur 5.4. Området avgränsas på ostsidan av en 25 meter hög bergvägg och på övriga sidor är bottenlutningen omkring 1:10.

4.2 Sedimentegenskaper i djuphålan vid Björkö

Vi noterar två egenskaper som ger ledning vid bedömning av bottenströmmarna i området. För det första är sedimentackumulationshastigheten hög, i genomsnitt 42 millimeter per år och för det andra är syreförhållandena "något ansträngda", se [1]. Båda dessa förhållanden visar att strömhastigheten är mycket svag nära botten under långa tidsperioder. (Detta gäller inte bottenarna kring djuphålan på 50 meter eller mindre där sedimentationshastigheten är låg eller noll och där strömhastigheterna är högre.)

Suspenderade partiklar av glaciallera antas inte klumpa ihop sig till större partiklar som faller snabbare [5]. Lerpartiklarna är 0,002 mm eller mindre och har en fallhastighet i absolut stilla vatten och vid stor utspädning på mindre än 0,01 mm/s eller mindre än en meter per dygn.

För att bestämma vilken grumling (ljusutsläckning och ljusreflexion) en viss sedimenthalt ger, måste sedimentets ljusabsorption mätas.

4.3 Skiktningen

4.3.1 Det välblandade ytskiktet

Det välblandade ytskiktet i havet är ett begrepp inom oceanografin som avser ett djupintervall nära vattenytan som har homogena egenskaper med avseende på temperatur, salthalt och halten av andra ämnen. Strömhastigheten avtar vanligen med djupet.

Det välblandade ytskiktet avgränsas uppåt av vattenytan och nedåt av ett täthetssprångskikt (pyknoklin) där tätheten ökar jämförelsevis snabbt med djupet. Det välblandade ytskiktet utväxlar endast sakta ämnen, värme och rörelse med underliggande vatten. Ytskiktets tjocklek är minst på våren eller nära en färskvattenkälla där flytkraft tillförs, dvs. vattnet blir lättare genom uppvärmning respektive utsötning. Senare på året

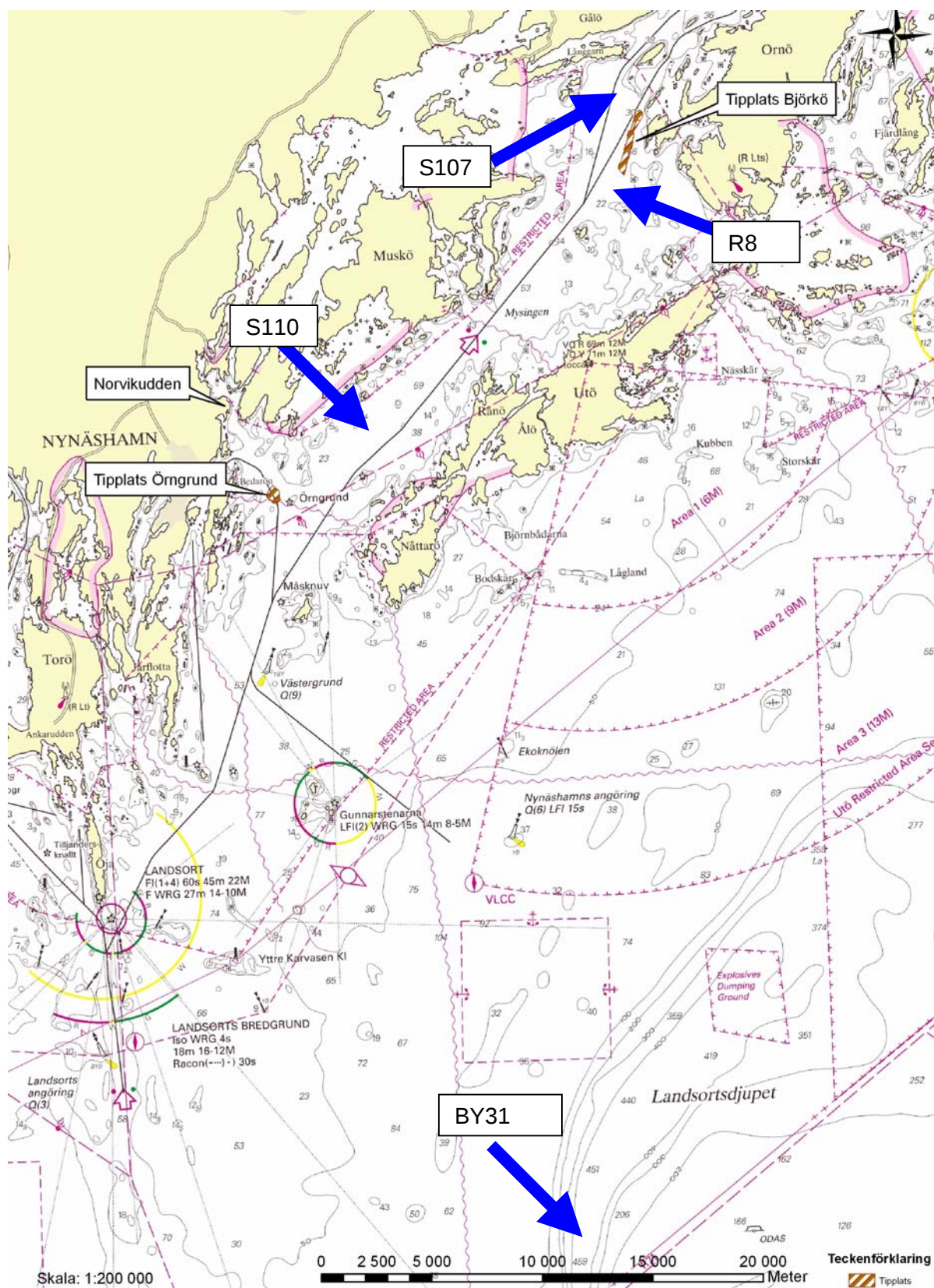
djupnar språngskiktet genom blandning uppifrån. En stark vind medför att det välblandade ytskiktet blir tjockare genom blandning uppifrån. Det kan även djupna genom avkylning.

Det viktiga är att det välblandade ytskiktets tjocklek *varierar över tid*. Man kan därför bara ange ett ungefärligt värde. För Mysingen kan man säga att tjockleken är 10 meter nära höst och vår och 20 meter eller mer under vintern. Observationerna beskrivs mer detaljerat i nästa avsnitt.

4.3.2 Observationer av skiktningen i området

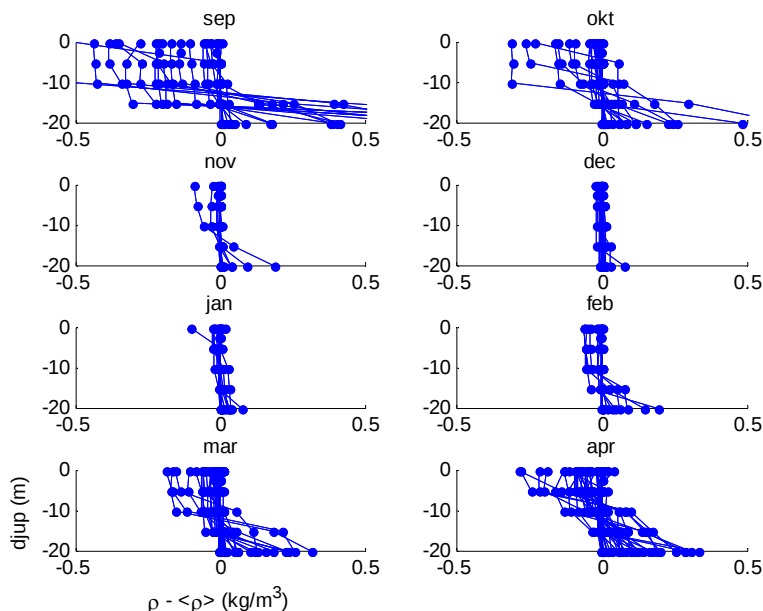
Blandningen i vertikalled och därmed spädningen av sedimentsuspensionen är effektivare ju svagare skiktningen är. Svealandskustens kustvattenvårsförbund har tre provpunkter nära Björkö: R8, S110, S107 se Figur 2. Mätningarna där, av bl.a. salthalt och temperatur, har endast utförts vid ett fåtal tillfällen, fyra gånger på två år, under den nu aktuella säsongen 15/9-1/5. Därför har vi även jämfört de få observationer som finns från Mysingen med observationer vid mätpunkten BY31, Figur 2, vid motsvarande tidpunkter.

Överensstämmelsen är tillräckligt bra för vårt ändamål, nämligen att studera pyknoklinens läge och styrka under tippningssäsongen. Vi kan då istället analysera skiktningen vid BY31 där det finns ett mycket bättre observationsmaterial; SMHI tillhandahåller mätningar av temperatur och salthalt månadsvis eller mer under många år.



Figur 2. Mätlokalernas position, muddrings- och tipplatser.

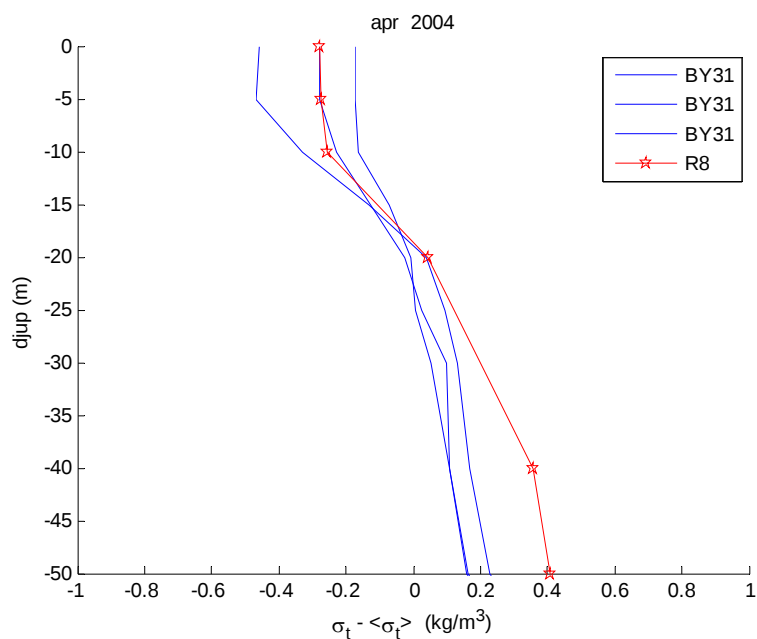
I Figur 3 visas skiktningen i form av månadsvisa täthetsprofiler. För varje profil har djupmedelvärdet subtraherats så att man kan jämföra skiktningens styrka enkelt. Som väntat är skiktningen som starkast närmast sommaren, det vill säga i början och slutet av tippningsperioden 15/9-1/5. Vid de flesta tillfällen är det dock någorlunda välblandat ner till åtminstone 10 meters djup.



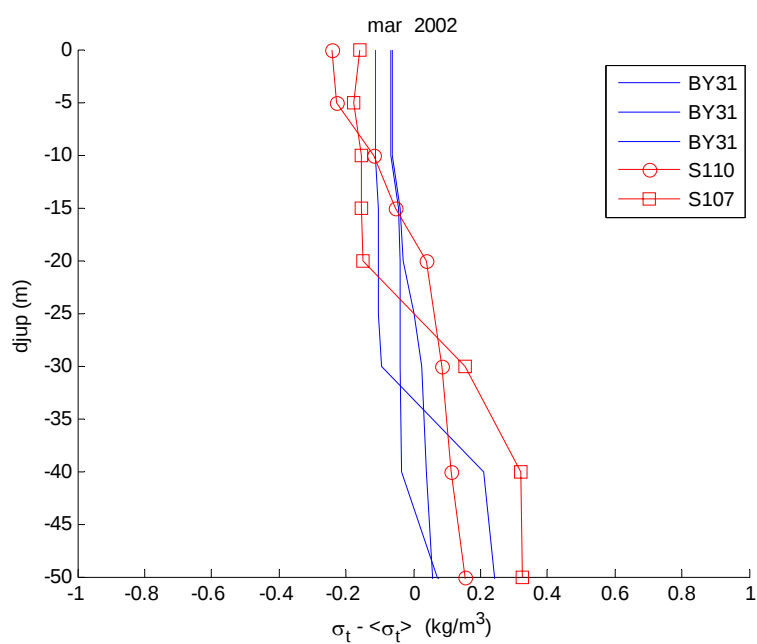
Figur 3. Täthetsprofiler månadsvis åren 1994-2006. Profilerna har ritats som täthet – medeltäthet ($\rho - \langle \rho \rangle$) vid resp. mättillfälle för att framhäva skiktningen. Datakälla: SMHI.

Förhållandena i Mysingen avviker oftast inte alltför mycket från BY31, vilket jämförelserna i Figur 4 till Figur 7 visar. För varje profil har djupmedelvärdet subtraherats (som i Figur 3) så att man kan jämföra skiktningens styrka enkelt. Mätningar gjorda samma månad har jämförts, men det kan då skilja upp till fyra veckor mellan exakt mättidpunkt. Detta är en orsak till skillnaden mellan profilerna i figurerna. Vi noterar att mätningarna i Mysingen gjorts under de månader då skiktningen är som starkast, förutom möjligen novembermätningen 2004. Data ägs av Svealandskustens vattenvårdsförbund och har levererats av Systemekologiska institutionen vid Stockholms Universitet.

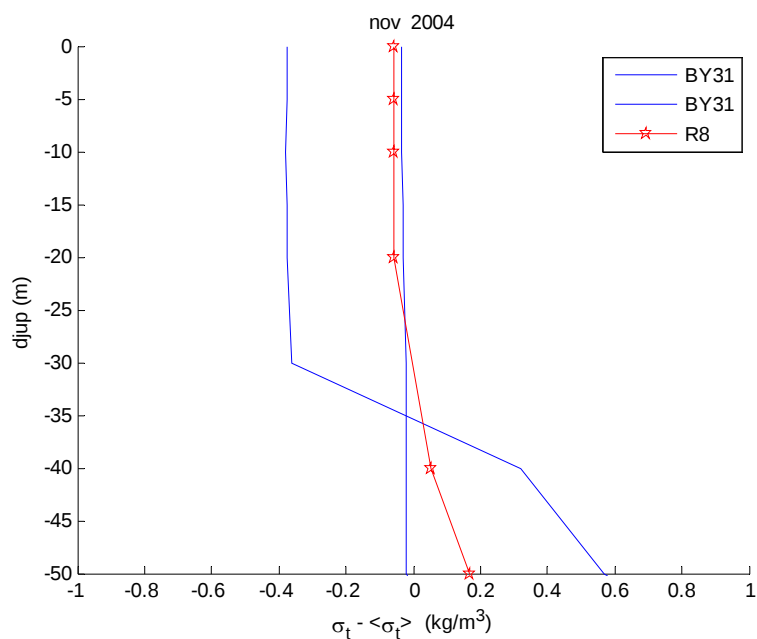
Vi drar slutsatsen att skiktningen vid BY31 liknar den i Mysingen. Vi kan då som sagt dra nytta av det mycket större observationsmaterialet vid BY31 jämfört med mätningarna i Mysingen.



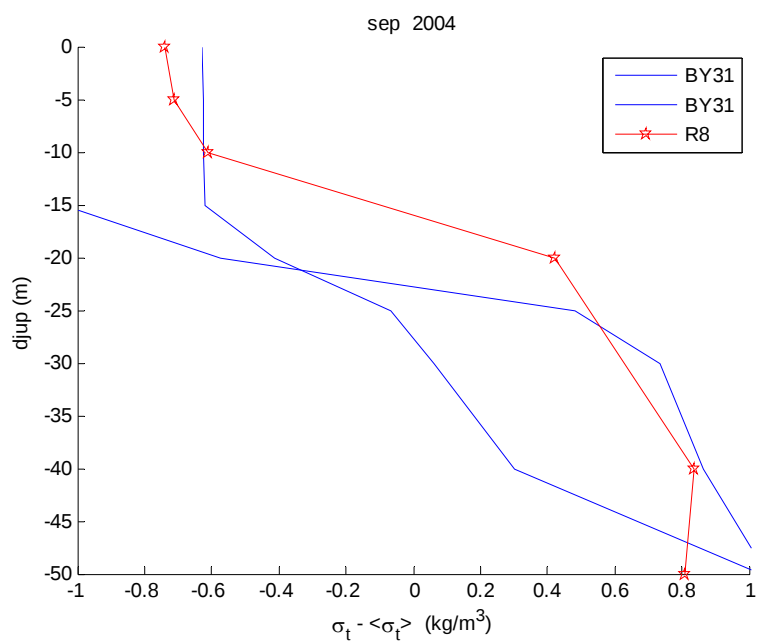
Figur 4. Jämförelse av täthetsprofiler i Mysingen och BY31. Datakälla: Svealandskustens vattenvårdsförbund och SMHI.



Figur 5. Jämförelse av täthetsprofiler i Mysingen och BY31. Datakälla: Svealandskustens vattenvårdsförbund och SMHI.



Figur 6. Jämförelse av täthetsprofiler i Mysingen och BY31. Datakälla: Svealandskustens vattenvårdsförbund och SMHI.



Figur 7. Jämförelse av täthetsprofiler i Mysingen och BY31. Datakälla: Svealandskustens vattenvårdsförbund och SMHI.

5 DIFFUS HALT AV SEDIMENT I MYSINGEN

Som visades i avsnitt 11.3 späds sedimentmolnet så mycket att det inte längre är spårbart efter ett eller ett par dygn. Istället sker en diffus ökning av sedimenthalten i hela eller delar av Mysingen. Vi vill beräkna den diffusa halten och antar följande:

- Mysingens välblandade ytskikt är 10 m tjockt. Dess volym är då $2,4 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ baserat på Mysingens yta i ref. [7]
- Vattnets uppehållstid i Mysingens välblandade ytskikt är 0,5 månad ref. [7]
- Suspenderat sediment med en begynnelsehalt över 500 mg/L sjunker till djuphållans botten, avsnitt 11.2
- Suspenderat sediment med en begynnelsehalt under 500 mg/L blir kvar i det välblandade ytskiktet och sprids i Mysingen, avsnitt 11.2.
- Vattenvolymen i det välblandade ytskiktet under mudderpråmen (antas ha volymen 3000 m^3) kommer att vara fyllt med vatten med sedimenthalten 500 mg/L efter varje tippning, vilket ger en sedimenttillförsel till Mysingens välblandade ytskikt på 1,5 ton suspenderat sediment per tippningstillfälle.
- 10^6 m^3 lermassor skall tippas under 3 år. Vi antar $333\,000 \text{ m}^3/\text{säsong}$ motsvarande en massa på 218 000 ton/säsong. Tätheten är ungefär $1,5 \text{ ton/m}^3$, ref [8].
- Mudderpråmen rymmer 750 m^3 vilket betyder att 444 tippningar sker under säsongens 30 veckor eller 14-15 tippningar per vecka.
- Tillförseln av sediment till Mysingens välblandade ytskikt är således $1,5 \cdot 14,5 \sim 22 \text{ ton/vecka}$ eller 87 ton/månad .
- Inga åtgärder för att hindra sedimentspridningen har vidtagits.

Om ingen vattenutväxling sker på en halv månad blir medelsedimenthalten, den diffusa, jämnt utblandade sedimenthalten $0,5 \cdot 87000 \text{ kg} / 2,4 \cdot 10^9 \text{ m}^3 = 18 \cdot 10^{-6} \text{ kg/m}^3 = 0,018 \text{ mg/L}$. Även om utblandningen begränsas till en tiondel av Mysingen är sedimenthalten således mycket låg.

6 RESULTAT

6.1 Strömsituationen i området

6.1.1 Strömmen nära ytan i Mysingen

Under tiden 15/9-1/5 då tippning planeras, är sydlig till västlig vind vanligast. En typvind är sydväst, 5 m/s. I ytan, den översta metern, är strömmen 3 % av vindhastigheten (15 cm/s) och i vindriktningen, alltså nordostgående, i stort sett parallell med Mysingens utsträckning. I det välblandade ytskiktet som är 10-20 meter tjockt under höst och vinter, är genomsnittsströmmen ungefär en procent av vindhastigheten, 5 cm/s, och nordostgående. (Det välblandade ytskiktet beskrivs mer i avsnitt 4.3.1.) Ett grovt värde på årsmedelströmmen i ytan vid Björkö är då 5 cm/s. Under vintern är värdet 25-50 % högre och under sommaren 25-50 % lägre. Observera att värdena gäller för strömstyrkan, alltså oavsett strömriktning. Om man tar hänsyn till strömriktningen blir årsmedelströmmen lägre eftersom vindriktningen och därmed strömriktningen växlar och motsatta riktningar tar ut varandra.

6.1.2 Strömmen under ytskiktet i Mysingen

I djupintervallet under det välblandade ytskiktet och ner till 30 meter, är strömmen svagare. Det är dock svårt att skatta strömmen utan några observationer. Uppskattningsvis är medelströmstyrkan 1-5 cm/s. Under kortvariga episoder kan strömmen vara starkare, till exempel då det finns en vattenståndsvariation längs Östersjökusten. Sådana episoder är inte ovanliga under de blåsiga årstiderna, ungefär oktober till april, och då kan strömmen vara över 10 cm/s under några timmar upp till några dygn.

Djupintervallet från 30 till 50 meter är en övergångszon från ett relativt väl genomströmmat område till i stort sett stillastående vatten längre ner. Det betyder att strömmen i genomsnitt är någon centimeter per sekund men att den kan uppgå till över 5 cm/s under episoder med blåsig väder, alltså ett tiotal gånger per år.

6.1.3 Strömmen i djuphålan vid tipplatsen

Under 50-55 meters djup är vattnet i princip stillastående den största delen av tiden. Mycket svaga strömmar med styrkor på någon millimeter per sekund orsakas av interna vågrörelser och turbulens.

Dessa rörelser innebär dock inte att vattnet förflyttas några längre sträckor. Vågrörelser innebär att vattnet flyttas fram och åter några centimeter till decimeter och turbulens är i princip virvelrörelser.

Då och då sker större rörelser i djuphållans vatten. Vid väderväxlingar, då vattenytans lutning och därmed även språngskiktets lutning ändras, så kan bottenvattnet långsamt flyttas runt. Dessa rörelser ger inte någon nettoström sett över några dygn.

Sannolikt förnyas djuphålans vatten någon eller några gånger per år. En sådan förnyelse är en kortvarig och intensiv händelse i detta sammanhang. Under några timmar eller något dygn fylls djuphålan med nytt vatten och det gamla trängs undan. Strömhastigheten är sannolikt 5-25 cm/s. Förnyelsen sker under höst och vinter när saltare vatten från Östersjön kommer in i Mysingen.

6.2 Sedimentets spridning efter tippning

Beräkningarna nedan gäller under förutsättning att inga åtgärder för att hindra sedimentspridning har vidtagits.

6.2.1 Halten omedelbart efter tippning av muddermassor – begynnelsehalten

- Endast sedimentsuspensioner med en halt under några hundra mg/L kommer att bli kvar i det välblandade ytskiktet.

Tippningen sker från pråmar som antas rymma 750 m³. Pråmen kan öppnas i botten varvid de fasta muddermassorna och det suspenderade materialet faller ner i vattnet. Det fasta materialet faller ner till djuphålans botten på 65 meters djup på ett tiotal sekunder. Det suspenderade materialet späds av omgivande sedimentfritt vatten och sjunker med en fart som bestäms av dess halt av sediment.

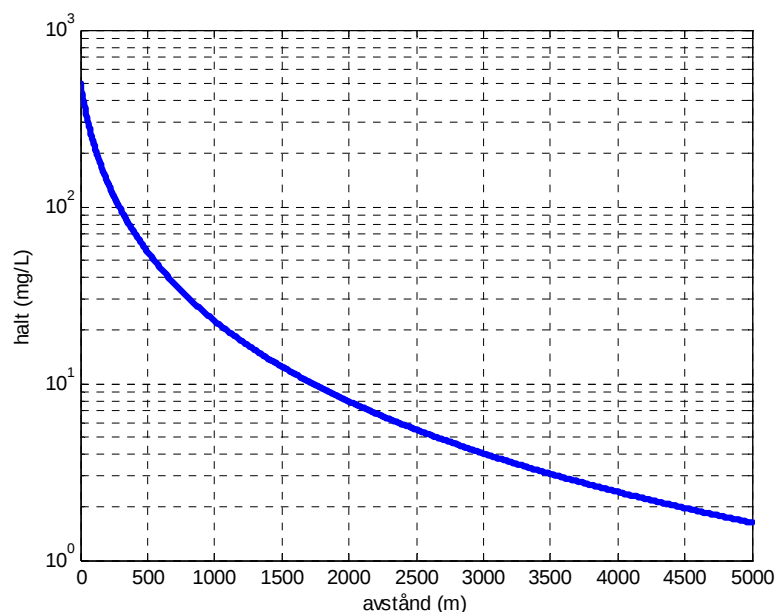
En överslagsberäkning, avsnitt 11.2, visar att vatten med en sedimenthalt på 1000 mg/L eller mer kommer att sjunka och lämna det välblandade ytskiktet på någon eller några minuter. Det kommer sedan att sjunka ner i djuphålan inom i storleksordningen 10 minuter. Det hinner inte flyttas i horisontalled av strömmen någon nämnvärd sträcka.

Om sedimenthalten är några hundra mg/L eller mindre kommer sedimentet däremot att kvarhållas i det välblandade ytskiktet och spridas i detta, vilket beskrivs i nästa avsnitt.

6.2.2 Sedimentets spridning i det välblandade ytskiktet

- Sedimenthalten i det sedimentmoln som bildas efter tippningen kommer att understiga 25 mg/L på cirka 1000 meters avstånd från tippningsplatsen givet en begynnelsehalt på några hundra mg/L, vilken redovisades i föregående avsnitt.
- Den vanligaste vindriktningen är kring sydväst. Därför kommer sedimentmolnet oftast att spridas åt nordost.
- Efter 0,5-1 dygn är sedimenthalten nere i under 10 mg/L i sedimentmolnet

En överslagsberäkning visar att det sedimentmoln som bildas i vattnet vid tippning kommer att spädas till 1/20-del av ursprungshalten på några timmar. Molnet hinner därvid flytta sig cirka en kilometer från tipplatsen, och det ökar samtidigt sin utsträckning i vindriktningen från tippmolnets 100 meter till ett någon kilometers längd. Om halten från början är 500 mg/L (se avsnitt 11.3 för detaljer) så avtar den till 25 mg/L på denna sträcka. Utsträckningen tvärs vindriktningen ökar till 200-300 meter. Resultatet är alltså att det från början uppifrån sett runda molnet med tiden blir starkt avlång.



Figur 8. Spädning mot avstånd till källan. Sedimentutsläppet sker i det välblandade ytskiktet med en begynnelsehalt på 500 mg/L och gäller under förutsättning att inga skyddsåtgärder vidtas. Halten är 25 mg/L på knappt 1000 meters avstånd. Skuggningen antyder osäkerheten i resultatet.

Ovanstående beskrivning gäller för

- ett ytskikt som är väl omblandat
- vindhastighet på 5 meter per sekund.
- glaciallera med mycket liten ($<0,01$ mm/s) sjunkhastighet

Vi har skäl att anta att detta är ganska vanliga förutsättningar under de planerade tippningarna vid Björkö.

Om vinden är svag och vädret soligt kan man vänta sig att spädningen av molnet blir lägre. Det beror på att under sådan väderlek bildas ett ytligt temperatursprångskikt som hindrar blandning.

6.2.3 Sedimentets spridning i djupintervallet under det välblandade ytskiktet ner till 50 meter

Sedimentet kommer att tillföras på samma sätt som nära ytan; Vid tippningstillfället tillförs sediment till en cylindrisk vattenvolym med en viss halt och spädningen sker därefter på samma sätt som närmare ytan. Dock är spädningen inte direkt vinddriven och dessutom så kan djupintervallet innehålla svagt skiktat vatten som motverkar blandning. Spädningen och transporten av sedimentmolnet kommer därför att ske långsammare än vid ytan.

I [1] rapporteras att sedimentationen på bottenarna i Mysingen ner till 50 meters djup är långsam. (Detta gäller inte djuphålan där sedimentationen är snabb och där strömmarna är svaga.) Det betyder att det suspenderade sedimentet inte alls eller bara i liten utsträckning

kommer att sedimentera i Mysingen på 50 meters djup eller mindre. Det kommer under dygn eller veckor efter avslutad tippning att finnas suspenderat i Mysingens välblandade ytskikt och exporteras till Östersjön av nettocirkulationen i området.

6.2.4 Sedimentet i djuphålan

Sedimenthalten i vattnet kommer att vara hög i djuphålan under tippningen och i flera veckor sedan den avslutats. Den höga halten leder till att suspensionen stannar kvar i djuphålan genom den täthetsökning som vattnet får genom förtynkning från sedimentet. De mycket svaga strömmarna tillåter sedimentpartiklarna att sjunka ner till botten.

6.2.5 Diffus halt i Mysingen

Sedimentmolnet späds alltmer och efter några dygn kan det inte urskiljas annat än som en diffus ökad sedimenthalt (grumling) av delar av eller hela Mysingens vattenmassa. Eftersom Mysingen utväxlar vatten med utsjön, framför allt i norr och söder, kommer detta sedimenthaltiga vatten att exporteras och ersättas med sedimentfattigt vatten. En jämvikt inställer sig. En överslagsberäkning visar att den diffusa halten av sediment i Mysingens välblandade ytskikt ökar till ett lågt värde, under 1 mg/L, under tippningssäsongen. Se avsnitt 5 för detaljer.

6.3 Möjligheter att förbättra dataunderlaget

Värden på halter, mängder, strömmar med mera i denna rapport är erfarenhetsvärden eller har skattats från kända fakta på det sätt som beskrivs. För att få säkrare värden kan vidare undersökningar företas. De är, i prioritetsordning:

- Mätning av den sedimenthalt och -mängd som finns i vattnet efter en tippning
- Sedimentets flockningstendens och sjunkhastighet

Följande bidrar till ytterligare kvalitetshöjning

- Mätning av strömmen i Mysingen
- Mätning av sedimentets grumling (turbiditet), alltså vilken ljusutsläckning som en viss sedimenthalt ger i Mysingens vatten

För noggrannare beräkning av spridningsförloppet krävs bland annat bättre uppgifter om strömmen. Sådana skaffas genom mätning på tipplatsen, djuphålan vid Björkö. Ett akustiskt bottenförlagt mätinstrument är lämpligast. Detta måste ha lämplig arbetsfrekvens (100 kHz-området) för att nå tillräckligt högt upp i vattenpelaren. Även övriga instrumentinställningar bör noggrant övervägas och anpassas tillämpningen. Om möjligt bör man mäta under den säsong som tippning skall pågå. Mätning under sommaren är olämplig. Instrumentet måste avlägsnas innan muddertippning inleds. Om mätningen utförs samtidigt med tippningen kan det placeras intill tippområdet.

Sannolikt krävs ett kontrollprogram. Det är sannolikt nödvändigt att grumlingen mäts och relateras till sedimenthalten. Mätningen sker lämpligen med ett båtburet profilerande instrument av typen transmissionsmätare eller reflexionsmätare som mäter hur mycket ljus

som släpps igenom respektive reflekteras av partiklar i vattnet. En kalibrering av instrumentet mot sedimentmängd i vattnet (gravimetrisk analys) krävs. Det är lämpligt med en intensivfas vid de första tippningarna där sedimentmolnets rörelse och spädning kartläggs och bakgrundsvärden fastställs. Därefter kan lågfrekventa mätningar göras för kvalitetssäkring av tippningsverksamheten.

7 NEDPUMPNING AV SEDIMENTSUSPENSION FRÅN TIPPNINGPRÅMEN

Som en metod att minska tillförseln av sediment till det välblandade ytskiktet föreslås i [8] att sedimentsuspensionen ovanpå den fasta leran i pråmen först pumpas ner till ett visst djup innan leran tippas. Denna metod blir effektivast om suspensionen pumpas ner till ett djup under täthetssprångskiktet. I Figur 4 till Figur 7 ser vi att språngskiktet oftast ligger grundare än 40 meter. Suspensionen bör således pumpas ner till ett djup på 40 meter eller mer om denna metod används.

Ju djupare ner sedimentsuspensionen släpps ut desto större är sannolikheten att den inte transporteras iväg någon längre sträcka utan sedimenterar i djuphålan.

Följande tre effekter gör att sedimenthalten i det välblandade ytskiktet blir låg:

När sedimentsuspensionen släpps ut på större djup är den vattenpelare som suspensionen har kontakt med innan den når botten kortare än vid ytutsläpp. Mängden sediment som kan blandas in i vattnet minskar därför jämfört med om suspensionen släppts nära ytan.

På 40 meters djup och mer kommer det suspenderade sediment som finns kvar i vattenmassan att flyttas i sidled av de strömmar på 1-5 cm/s som beskrevs i 6.1.2. Både strömmen och turbulensen är svagare i detta område än högre upp. Det medför att sedimentet blandas och späds långsammare än vid ytan. Det kommer därför att sjunka snabbare mot botten än motsvarande sedimentmängd vid ytan.

Täthetssprångskiktet (pyknoklinen) kommer under större delen av tiden att ligga grundare än 40 meter. Den fungerar som en spärr genom vilken suspenderat sediment endast långsamt kan passera upp till det välblandade ytskiktet. Den mängd som kan passera kommer att spädas ut starkt i ytskiktet.

Dessa effekter samverkar och gör att suspenderat sediment inte kommer att kunna påvisas i det välblandade ytskiktet om det släpps ut på 40 meters djup eller mer.

8 PÅVERKAN PÅ STRÖMMAR OCH SALTHALT

Varken ström eller salthalt påverkas under själva tippningsfasen annars än mycket lokalt; under några minuter över ett tiotal meter i horisontalled och från ytan till djuphålans botten.

Djuphålans volym minskar genom att den fylls ut med lermassor. I djuphålan finns under större delen av tiden en reservoar av något saltare och/eller kallare vatten än i övriga Mysingen. Denna reservoar har dock ingen nämnvärd funktion i Mysingens vattencirkulation eftersom vattnet i djuphålan vilar passivt där. Strömmarna i djuphålan är som nämnts tidigare mycket svaga; denna slutsats kan man dra med ledning av att sedimentationstakten är hög i djuphålan vilket den bara kan vara om vattnet är mycket stilla under stor del av tiden. Att strömmarna är svaga betyder att vattnet i djuphålan utväxlar

impuls med vattnet ovanför i liten utsträckning, det vill säga att strömmen i djuphålan varken påverkar eller påverkas av strömmar i vattnet ovanför. Vidare betyder det att utbytet av salt och andra ämnen, exempelvis syrgas, är en långsam process.

Om djuphålan vid Björkö utfylls helt eller delvis har det således obetydlig eller ingen påverkan på strömmar och salthalt i resten av Mysingen.

9 SLUTSATSER

Huvuddelen av det material som suspenderas vid tippning kommer att sjunka som en slamström ner i djuphålan vid Björkö. Eftersom det sedimenthaltiga vattnet har större täthet än omgivande vatten kommer det att stanna kvar i djuphålan. I denna håla är strömmarna så svaga att partiklarna kan sedimentera. Deras sjunkhastighet är så låg ($<0,02$ mm/s) att det tar mer än en månad innan huvuddelen av lerpartiklarna sjunkit ner till bottenytan i djuphålan.

Suspenderat material med en halt under 500 mg/L kan spridas som ett sedimentmoln bort från tippplatsen. På avståndet 1000 m från tippplatsen har halten sjunkit till under 25 mg/L genom blandning med omgivande vatten om inga skyddsåtgärder vidtas.

I det välblandade ytskiktet vid en typvind, sydväst 5 m/s, kommer molnet att röra sig åt nordost några hundra meter per timma.

Den högsta sedimenthalten vid land uppträder norr och öster om tippplatsen vid Björkö. Det beror på att land ligger närmast där och att strömmar kring sydväst är vanligast.

Efter i storleksordningen tio timmar har sedimenthalten genom blandning minskat till en hundradel av ursprungsvärdet.

Efter några dygn har sedimentmolnet späts kraftigt och exporterats ut ur Mysingen eller spridits i en betydande del av fjärden. Halterna är då mycket låga i ytskiktet. Sedimentet försvinner ur Mysingens ytskikt på i storleksordningen en månad och kommer inte att sedimentera i Mysingen.

Om det sedimenthaltiga vattnet som täcker de fasta lermassorna på tippråmen pumpas ner till 40 meters djup eller mer så kommer en mindre sedimentmängd att suspenderas i vattenmassan jämfört med om detta vatten släpps ut i ytan. Det suspenderade sediment som pumpas ner kommer huvudsakligen att stanna kvar på 40 meters djup och mer. Tack vare den svaga strömmen på 40 meters djup eller mer kommer sedimentet att sjunka snabbare än om det släpps i det välblandade ytskiktet där strömmen och turbulensen är starkare. Täthetssprångskiktet, som oftast ligger ovanför 40 meters djup, kommer att hindra sedimentpartiklarna att transporteras uppåt i vattenmassan. Sedimenthalten i det välblandade ytskiktet kommer därför knappast att bli mätbara om det sedimenthaltiga vattnet släpps ut på 40 meters djup eller djupare.

10 REFERENSER

- [1] Feldtmann, Evenhamre, Jonsson, 2006. Stockholm-Nynäshamn, Norvikudden – Nya föreslagna tipplatser för muddermassor. SWECO-VIAK, Örebro.
- [2] Ivarsson, 2006. Ström- och grumlingsförhållanden i Norviksfjärden och dess närområden. SWECO-VIAK, Göteborg.
- [5] Per Jonsson, marin sedimentolog. Personlig kommunikation.
- [6] Turner, 1973, Buoyance effects in fluids, Cambridge university press.
- [7] Engqvist, 2002, Vattenutbytet i Stockholms skärgård – en grafisk översikt. Svealandskustens vattenvårdsförbund, www.svealandskusten.se
- [8] van Groen, 2007, Norvikudden - Dredging and environment. Version 21 August 21 översänt av SWECO.
- [9] Anläggande och drift av hamn på Stockholm-Nynäshamn, Norvikudden, Miljökonsekvensbeskrivning, 2007. SWECO-VIAK, Stockholm.

11 BILAGA: SPÄDNINGSFÖRLOPPET

11.1 Det suspenderade materialet

Vi skall här studera ett suspenderat material som har så liten kornstorlek att sjunkhastigheten är mycket mindre än den turbulenta hastighetsskalan.

Egensjunkningen för oaggregerade lerpartiklar är några tusendels millimeter per sekund. Vi antar att den lera som suspenderas vid tippningen hålls suspenderad under mycket lång tid och att man kan bortse från dess egensjunkning. Lerpartiklar som inte är ihopklumpade uppför sig på detta sätt.

11.2 Begynnelsepådnningen på tipplatsen

Muddermassorna tippas vid ytan ovanför tipplatsen. Vi antar att tippningen tar någon minut. Vid tippning bildar det material som suspenderas ett "sedimentmoln" som är av samma storlek som det hål som pråmen muddermassorna tippas ut genom. Detta moln kan tänkas sammansatt av en mängd delmoln med olika sedimenthalt. Molnen sjunker olika fort beroende på vilken halt av sediment de har. Nedan beräknar vi ungefär hur stor sedimenthalt ett moln måste ha för att sjunka ner och ut ur det välblandade ytskiktet.

Sedimentmolnets sjunkkraft, F , kan skrivas

$$F = -gV\Delta\rho \quad (1)$$

där g är tyngdaccelerationen 10 m/s^2 , $\Delta\rho$ är täthetsskillnaden mellan sedimentmolnet och omgivande vatten och V är molnets volym. F ändrar molnets vertikalsimpuls p

$$F = dp/dt \quad (2)$$

och vi kan skriva

$$\dot{p} = \dot{m}u + \dot{u}m \quad (3)$$

där u är sjunkfarten (<0), m är molnets massa och prickar betecknar tidsderivator. Mass- och volyminflödena till molnet relateras med $\dot{m} = \rho_0 \dot{V}$, där ρ_0 är omgivande vattens täthet, vilken förutsätts konstant. Detta begränsar resultatet till djupintervall med små täthetsvariationer. Vi tillämpar Boussinesqapproximationer på uttryck med trög massa och får

$$-g \frac{\Delta\rho}{\rho_0} = \frac{\dot{V}}{V} u + \dot{u} \quad (4)$$

där flytkraftstermen står på vänster sida och där termerna på höger sida står för impulsändring till följd av svällning (inblandning av omgivande, stillastående vatten) respektive acceleration.

Vi urskiljer några olika balanser mellan termer i (4). Om sedimentmolnet från början har vertikalhastigheten $u=0$ så accelereras det nedåt av sin egen tyngd. Så småningom blir svällningstermen betydelsefull och medför att molnets acceleration minskar och till slut byter tecken; molnet börjar bromsas upp. Detta beror dels på att svällningen går långsammare ju större molnet är och på att sjunkkraften minskar eftersom molnets täthet minskar när det späds.

I det fall som nu skall studeras är begynnelsefarten dock inte noll utan stor och negativ; molnet lämnar pråmen genom dess botten och tillsammans med en stor mängd fast lera som sjunker med stor fart och drar med sig lersuspensionen – molnet – nedåt i en kraftig rörelse. Vi betraktar (4) och ser då att sjunkkraften (vänstersidan) är obetydlig och att balansen mellan högersidans termer innebär en stark svällning och en motsvarande stark inbromsning av molnet. Därefter sker en långsammare sjunkning och spädning på samma sätt som nyss beskrevs.

Vi beräknar sjunkfarten u under förutsättning att accelerationen är underordnad och kan försummas. Om sjunkfarten är av samma storleksordning som andra strömhastigheter – turbulenta rörelser eller medelströmmar – så antar vi att molnet inte sjunker utan istället sprids och förflyttas.

Observationer, ref. [6] §6.3.1, tyder på att molnet kommer att anta en rund form när det sjunker. Vi antar här att molnet är klotformigt och att inblandningen sker genom klotets undre hälft med sjunkfarten u . Inflödet $\dot{V}$ kan då beräknas

$$\frac{\dot{V}}{V} = uV^{-1/3} \frac{\pi}{2} \left(\frac{3}{4\pi} \right)^{2/3} \quad (5)$$

Vi sätter in detta i ekvation (4), och försummar $\dot{u}$ och får

$$u \approx 0,13 \sqrt{\Delta\rho V^{1/3}} \quad (6)$$

Med några olika värden på sedimenthalter och under antagandet att molnets volym är av storleksordningen 10^3 m^3 motsvarande ett klotformigt moln med en radie på drygt sex meter får vi följande värden på dess sjunkhastighet

C (mg/L)	$\Delta\rho$ (kg/m ³)	u (cm/s)
1000	1	40
100	0,1	10
10	0,01	4

Svällningen i djupled är i denna modell konstant och cirka $60V^{-1/3}$ procent av V per meter. Då $V=1000 \text{ m}^3$ blir det 6% per meter eller cirka 60% på 10 meter. Svällningen är alltså måttlig vilket styrker att slutsatserna i tabellen ovan är giltiga i vattenskikt som är några tiotal meter tjocka.

Vi ser i tabellen att ett sedimentmoln med halten 1000 mg/L sjunker med ungefär 40 cm/s. Det kommer således att lämna det välblandade ytskiktet på någon eller några minuter. Slutsatsen är att moln med denna sedimenthalt inte kommer att finnas i det välblandade ytskiktet tillräckligt länge för att spridas från tipplatsen.

En typisk täthetsprofil, se avsnitt 4.3.2, visar att täthetssprångskiktet (pyknoklinen) under det välblandade ytskiktet har en styrka på $0,1 \text{ kg/m}^3$. Det betyder att ett sedimentmoln med $\Delta\rho < 0,1$ inte kommer att sjunka genom pyknoklinen eftersom det har neutral eller positiv flytkraft jämfört med vattnet under. Det kommer istället att delvis blandas upp i det välblandade ytskiktet och delvis att skikta in sig i själva pyknoklinen.

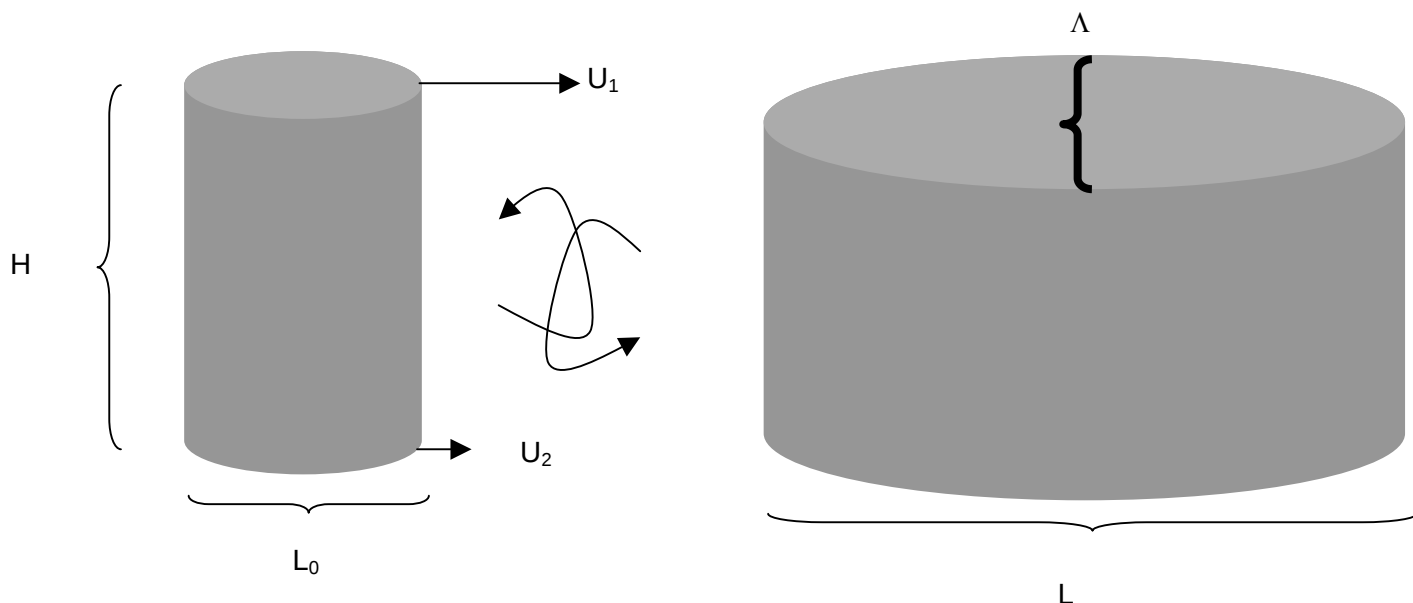
Moln med lägre halt sjunker inte alls utan blir kvar i det välblandade ytskiktet.

- En försiktig skattning är att ett sedimentmoln med sedimenthalt under 500 mg/L blir kvar i det välblandade ytskiktet.

11.3 Spädningen efter tippfallet

Spädningen av suspenderat sediment kan beskrivas med hjälp av en så kallad advektions-diffusionsekvation. Den tar hänsyn till förflyttning som, i detta fall med en vid begynnelsestidpunkten (tipptidpunkten) cylindrisk sedimenthaltfördelning innebär en sträckning av begynnelsefördelningen. Ekvationen tar även hänsyn till diffusionen av sedimentet. I detta fall är den "turbulenta diffusionen" den helt dominerande. För att kunna tillämpa en sådan ekvation krävs att vi känner strömfarten och den turbulenta diffusionen på olika djup. Denna är i sin tur starkt beroende av vinden och vattnets skiktning, alltså hur temperaturen och salthalten varierar med djupet. För spridningen i breddled krävs därtill ett värde på den horisontella diffusionen. Nedan genomförs en enkel överslagsberäkning som utnyttjar de egenskaper som är kända och som ger en generell bild av spridningsförloppet.

Antag att sedimentet efter tippningen finns uppslammat i vattnet i en cylinder med diametern L_0 belägen i vattnet ovanför tipplatsen vid Björkö, se figuren. Vattnet är välblandat ned till djupet H . En vind blåser. Den ger en strömfart vid ytan U_1 och vid djupet H är strömmen U_2 . Efter ett tag har sedimentet nära ytan förts längre än sedimentet närmare nivån H . Den ursprungligen rätta, cirkulär cylindriska sedimentfördelningen borde därför ha blivit en sned cylinder. Detta sker dock inte eftersom turbulent blandning flyttar vatten nerifrån och upp och omvänt och därmed även det uppslammade sedimentet. Cylinderns volym kommer därför att öka. Det sker på två sätt. Dels genom att storaxeln, som är parallell med strömmen, betecknad med L i figuren, sträcks. Dels genom att lillaxeln, Λ , sträcks. Sträckningarna orsakas alltså av vertikal respektive horisontell skjuvning och blandning.



Figur 8. Begynnelsefördelningen av sedimentet, till vänster, och fördelningen efter en viss tid, till höger. De krokiga pilarna i mitten antyder den turbulens

Vi kan skriva ner uttrycket för L nämligen

$$L = L_0 + t(U_1 - U_2).$$

Erfarenhetsmässigt vet man att en fläck av ett ämne i ett flöde med vertikal hastighetsgradient sprids mycket snabbare i längsled än i tvärsled; med andra ord växer Λ mycket långsammare än L . Vi antar att kvoten $k = \Lambda/L$ är konstant och lika med $1/10$ och vi skriver

$$\Lambda = L_0 + tk\Delta U$$

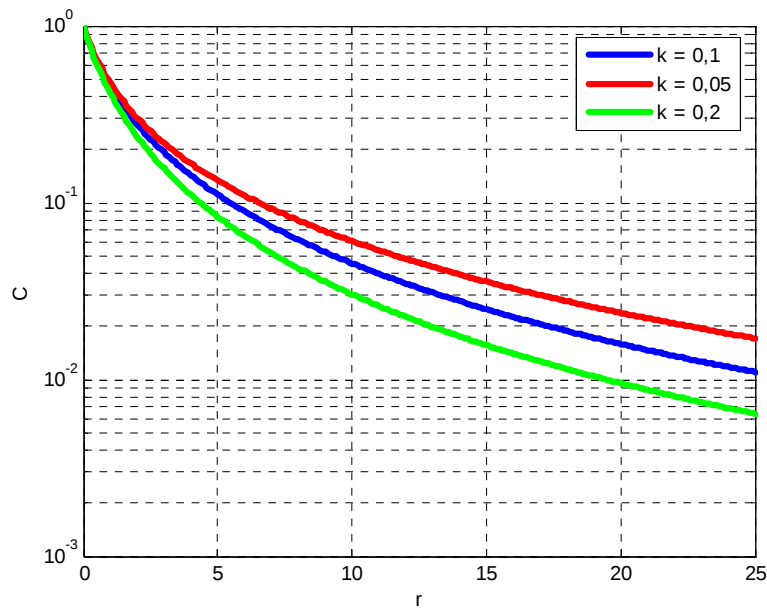
Volymen, V , av den elliptiska cylindern som innehåller sedimentet är alltså

$$V = HL\Lambda\pi = H(L_0 + t\Delta U)(L_0 + kt\Delta U)\pi$$

och medelhalten av sediment i den, C , är omvänt proportionell mot denna

$$C = \frac{C_0 V_0}{V} = C_0 \frac{1}{(1+r)(1+kr)}.$$

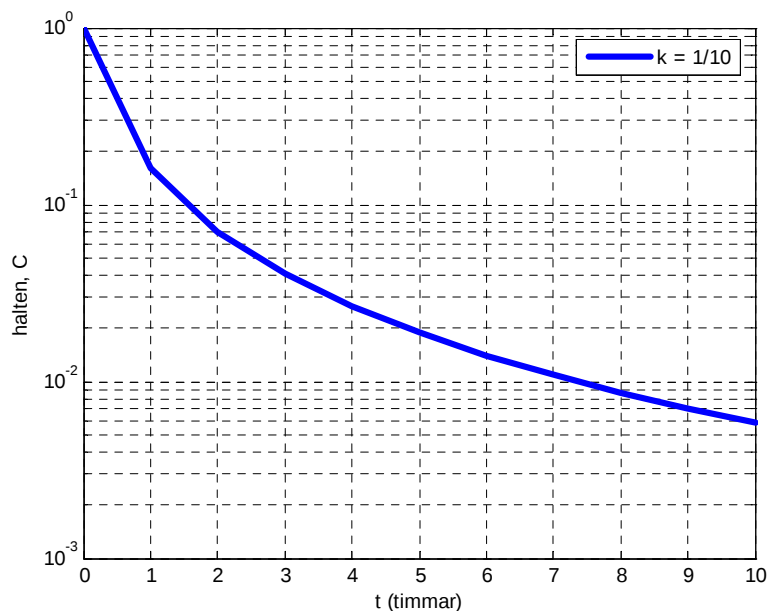
där $r = t\Delta U / L_0$. Utvecklingen av halten i tiden visas i Figur 9 för några olika värden på k nämligen $1/5$, $1/10$ resp. $1/20$.



Figur 9. Medelhalten mot r (dimensionslös tid) för några olika värden på k .

För att sätta siffror på detta kan vi nu använda oss av de antaganden som gjordes tidigare, nämligen att L_0 dvs. sedimentspridningen omedelbart efter tippningen är 100 meter och att vindhastigheten är 10 meter per sekund. Vi antar vidare att tippningen sker under en tid när det finns ett välblandat ytskikt. Begynnelsehalten i sedimentmolnet är 1.

Vi antar att ytskiktet har en medelfart på 5 cm/s eller 0,18 km/h. Vi antar vidare att $\Delta U = 5$ cm/s. Tidsutvecklingen av halten jämfört med begynnelshalten 1 visas i Figur 10.



Figur 10. Halten C mot tid. Vid $t=0$ är halten 1. Halten är 0,01 vid $t=7,5$ timmar.