



# SINTEF RAPPORT

## SINTEF Materialer og kjemi

Postboks: 4760 Sluppen  
Postadresse: 7465 Trondheim  
Besøksadresse: Brattørkaia 17C,  
4. etg.  
Telefon: 4000 3730  
Telefaks: 930 70730

Foretaksregisteret: NO 948 007 029 MVA

TITTEL

**Oppvirvling av sediment fra skipstrafikk i Trondheim havn**

FORFATTER(E)

Ragnhild L. Daae  
Henrik Rye

OPPDRAGSGIVER(E)

NGI/Trondheim Havn

RAPPORTNR. SINTEF F19889	GRADERING Fortrolig	OPPDRAGSGIVERS REF. Mari Moseid, NGI	
GRADER. DENNE SIDE Fortrolig	ISBN	PROSJEKTNR. 80154300	ANTALL SIDER OG BILAG 19 + Vedlegg
ELEKTRONISK ARKIVKODE SINTEF RAPPORT Trh Havn Endelig	PROSJEKTLEDER (NAVN, SIGN.) Ragnhild L. Daae <i>R. Daae</i>	VERIFISERT AV (NAVN, SIGN.) Grim Eidnes <i>G. Eidnes</i>	
ARKIVKODE	DATO 4 juli 2011	GODKJENT AV (NAVN, STILLING, SIGN.) Tore Aunaas, Forskningsjef <i>T. Aunaas</i>	

### SAMMENDRAG

Det er foretatt en beregning av mulig oppvirvling av sediment som følge av propellersosjon i Trondheim havneområde.

Basert på innhentede data for trafikken i området (båttørrelser, motorkraft, hyppighet av anløp, med mer), er det foretatt beregninger av potensiell maksimal oppvirvling av sediment.

Vurderingene konkluderer med at det er Hurtigruta og Kystekspresen som representerer de største forventede kildene for spredning av oppvirvlet sediment på grunn av størrelser på båtene samt hyppighet av anløp. Cruisetrafikken representerer den største potensielle oppvirvlingen per anløp, men anløpshyppigheten av disse er vesentlig lavere enn for rutetrafikken.

STIKKORD	NORSK	ENGELSK
GRUPPE 1	Miljø	Environment
GRUPPE 2	Modellering	Modeling
EGENVALGTE	Forurensning	Pollution
	Sediment	Sediment
	Oppvirvling	Re-suspension

## INNHALDSFORTEGNELSE

<b>1</b>	<b>Introduksjon</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Lokasjoner</b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Modellen</b> .....	<b>3</b>
	3.1 Propellstråler .....	3
	3.2 Sedimentoppvirvling .....	4
<b>4</b>	<b>Resultat fra modellen</b> .....	<b>5</b>
	4.1 Propellstråler .....	5
	4.2 Sedimentoppvirvling .....	10
<b>5</b>	<b>Diskusjon av resultatene</b> .....	<b>14</b>
	5.1 Sammenligning med sjablongverdier i veileder TA-2230/2007 .....	14
	5.2 Usikkerheter i beregningene.....	15
	5.3 Erosjonsrater gitt i tonn/m <sup>2</sup> sedimentareal og år .....	17
<b>6</b>	<b>Referanser</b> <b>19</b>	
	<b>Vedlegg 1 – Oversikt over kaier, Trondheim Havn</b> .....	<b>20</b>
	<b>Vedlegg 2 – Tabell med kornfordeling, (fra NGI)</b> .....	<b>21</b>
	<b>Vedlegg 3 – Utsnitt av kart over sedimentprøver , (fra NGI)</b> .....	<b>22</b>

## 1 Introduksjon

I forbindelse med anbudskonkurransen for “*Helhetlig tiltaksplan. Opprydding i forurenset sjøbunn i Trondheim havnebasseng.*” leverte NGI tilbud til Trondheim kommune. NGI fikk tilslaget, og bruker SINTEF som underleverandør for beregning av oppvirvlet sediment fra skipstrafikk i havneområdet. Denne rapport viser resultatene av beregningen av potensialet for oppvirvlet sediment som følge av båttrafikken i havneområdet.

## 2 Lokasjoner

Utvalg av lokaliteter er basert på områder hvor det er størst havneaktivitet med større båter, samt rutetrafikk. Utvelgelse er utført i samspill med Trondheim havn. Syv forskjellige områder er valgt ut. *Tabell 2.1* gir nærmere informasjon om lokasjonene. Oversikt over de forskjellige kaiene er gitt i Vedlegg 1. Informasjon om hvilke fartøy som legger til ved de forskjellige kaiene er hentet inn, og utvalgte fartøy er brukt som et grunnlag for beregningene. Merk at det kun er beregnet propellerrosjon fra ett fartøy per lokasjon, og at det i virkeligheten kan være variasjon av hvilke typer fartøy som legger til ved de forskjellige kaiene.

*Tabell 2.1 Oversikt over hvilke steder det er beregnet propellerrosjon ved. For Ytre Basseng/Kystekspressen er det beregnet for lokasjon planlagt tatt i bruk i 2011.*

Sted	Kai	Delområde	Bunndyp [m]	Anløp	Fartøy	Lengde [m]
Pir 1	1 og 2	6	8	700	M/S Midnatsol	136
Ila	26 – 30	4	8,5	270	M/S Europa	199
Ytre Basseng	67	6	4,5	1500	Kystekspressen	39
Pir 2	10 – 13	8	9,2	300	With Junior	60
Nyhavna	41 – 43, 57	9	8	400	Nordvåg	89
Nyhavna	52 – 55	9	6		T/B Buster	28
Folldalskaia	59	2	9.5	15	Norsund	89

## 3 Modellen

Beregningsverktøyet som brukes her, er et alternativt opplegg for vurdering av oppvirvling fra skipstrafikk enn det som er beskrevet i veileder TA-2230/2007. Denne veilederen inneholder sjablongverdier for masser som virvles opp dersom størrelsen på fartøyet og type sediment er gitt. Modellen som SINTEF benytter seg av, angir mengde oppvirvlet masse, gitt egenskaper til fartøyet og sedimentet.

### 3.1 Propellstråler

Dersom maskinkrafta,  $P_d$ , til et fartøy og utgangsdiameteren,  $D_o$ , til strålen fra propellen er kjent, kan man beregne utgangshastigheten,  $U_o$ , fra skipspropeller. Utgangsdiameteren avhenger om propellen har dyse eller ikke. Dersom propellen har dyse, er  $D_o$  lik propelldiameteren  $D_p$ . For propeller uten dyse, er  $D_o$  lik  $0.7x D_p$ . Formelen for å beregne utgangshastigheten er beskrevet i PIANC (1997) og Verhagen (2001), og er gitt ved uttrykket:

$$U_0 = 1.15 \times \left( \frac{P_d}{\rho_w D_0^2} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (3.1)$$

der er  $\rho_w$  er tettheten til vann. I beregningene her er denne satt til  $1027 \text{ kg/m}^3$ .

Hastigheten ved bunnen kan beregnes når utgangshastigheten samt avstanden fra propellakselen til bunnen,  $z_b$ , er kjent. Her antas det at  $z_b = d - h + 0.5 x D_p$ , der  $d$  er lokalt vanddyb og  $h$  er dypgående til fartøyet. Hastigheten ved bunnen er gitt ved følgende formel:

$$U_b = 0.65 \times U_0 \frac{D_0}{z_b}. \quad (3.2)$$

Hastighetsfordelingen til frie propellstråler er beskrevet i Verhagen (2001), og kan uttrykkes ved følgende formel:

$$U = U_m e^{-0.69 \left( \frac{r}{b} \right)^2} \quad (3.3a)$$

Der  $b$  er halve bredden av strålen, uttrykt ved  $b = 0.21x$ , og  $x$  er avstanden nedstrøms langs propellaksen.  $r$  er avstanden fra  $x$ -aksen og  $U_m$  er hastigheten i senter av strålen.  $U_m$  er uttrykt ved:

$$U_m = 2.8 \frac{U_0}{x / D_0} \quad (3.3b)$$

### 3.2 Sedimentoppvirvling

Mengde sediment som blir resuspendert ved anløp, kan beregnes ut fra hastigheten til propellstrålen ved bunnen og fallhastigheten til sedimentet. Fallhastigheten til partiklene er beregnet ved hjelp av følgende ligning beskrevet i Ferguson & Church (2004):

$$w_s = \frac{Rgd_{50}^2}{C_1 v + (0.75 C_2 Rgd_{50}^3)}, \quad (3.4)$$

hvor  $g$  er tyngdens akselerasjon,  $d_{50}$  er median korndiameter,  $v$  er den kinematiske viskositeten til vann og  $C_1 (= 18)$  og  $C_2 (= 1)$  er konstanter som er relatert til formen av sedimentene. Det er valgt å bruke  $C_1$ - og  $C_2$ -verdiene for naturlig sediment (sil-diameter). Verdiene for naturlig sediment (nominell diameter) er 20 ( $C_1$ ) og 1,1 ( $C_2$ ). Forskjellen i fallhastigheten om man bruker disse parametrene istedenfor, ligger på om lag 0,1 mm/s.  $R$  er redusert tyngde for sediment i vann gitt av formelen:

$$R = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}, \quad (3.5)$$

hvor  $\rho_s (= 2650 \text{ kg/m}^3)$  og  $\rho_w (= 1027 \text{ kg/m}^3)$  er tettheten i henholdsvis sedimentet og sjøvann.

Det er brukt relasjoner for medrivning av sediment som er gitt i Parker m. fl. (1987) for å beregne mengde sediment som blir re-suspendert. Disse relasjonene er basert på laboratoriemålinger og felldata. Medrivningen av sediment er gitt som en funksjon av skjærhastigheten. Medrivningsraten  $q_{xy}$ , beregnes i kg per kvadratmeter per sekund over den delen av bunnen hvor

hastigheten overskrider kritisk hastighet for medrivning. For å finne medrivningsraten i kg/s for forskjellige fartøy med ulik motorpådrag, må man integrere  $q_{xy}$  over bunnarealet.

## 4 Resultat fra modellen

### 4.1 Propellstråler

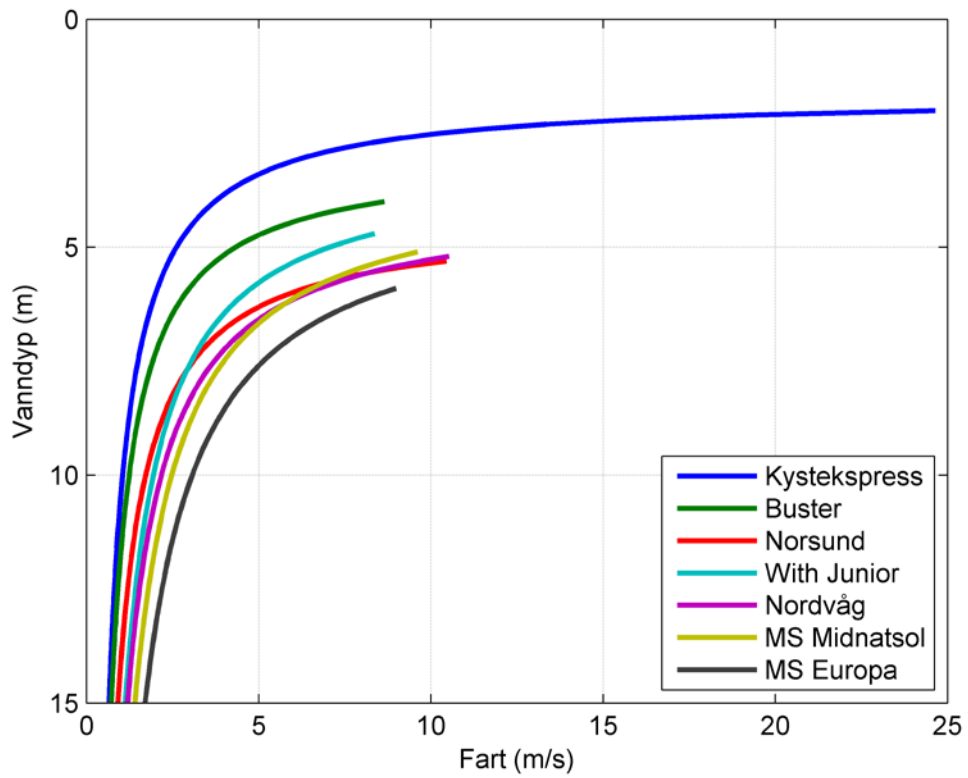
Tabell 4.1 viser utgangshastighet og diameter av propellstrålen for de fartøyene som er valgt. Merk at det er utgangshastighet ved maksimalt motorpådrag som er gitt.

Tabell 4.1. Maksimal utgangshastighet i propellstrålen fra forskjellige fartøy. Merk at for Kystekspresen brukes vannjet, hvilket medfører betydelig større utslippshastighet (19 m/s) enn for vanlig propellvann.

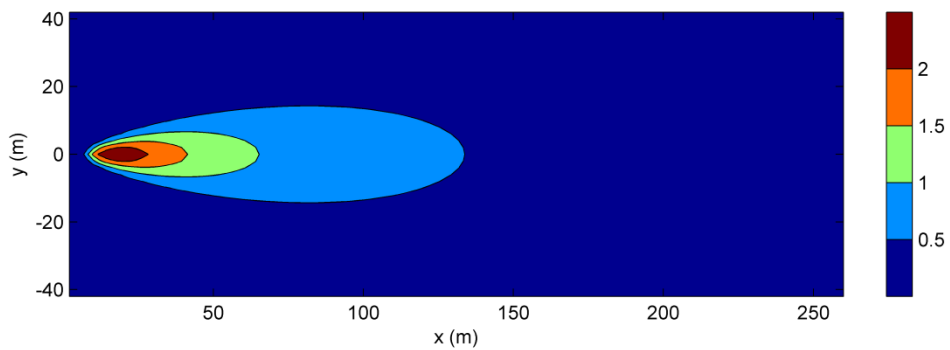
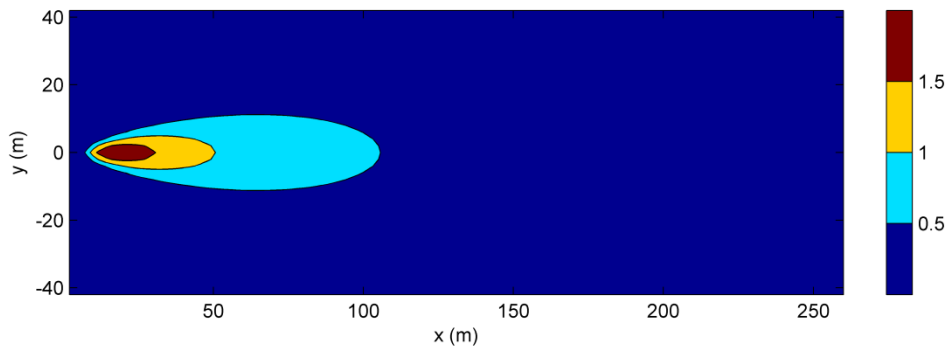
Sted	Fartøy	Del-område	Dyp-gående [m]	Motor-effekt [kW]	Antall pro-peller	Propell-dia-meter [m]	Stråle-diameter , D0 [m]	Stråle-hastighet, U0 [m/s]
Pir 1	M/S Midnatsol	6	5.1	2x4500	2	3.4	2.4	10.6
Ila	M/S Europa	4	5.9	2x5760	2	4.25	3	9.9
Ytre Basseng	Kyst-ekspresen	6	2	2x2320	2	0.71	0.71	19
Pir 2	With Junior	8	4.7	1840	1	3.2	3.2	6.4
Nyhavna	Nordvåg	9	5.2	2237	1	2.5	2.5	8.1
Nyhavna	T/B Buster	9	4	794	1	2	2	6.6
Folldalskaia	Norsund	2	5.3	1715	1	1.85	1.3	11.5

Fartøyene er valgt ut fra en vurdering av størrelse og hyppighet. For enkelhets skyld er valgt ett enkelt fartøy for hvert område. Dette valget er ment å representere en relevant størrelse. Det er valgt fartøy som kan være blant de største som manøvrerer i området, men ikke nødvendigvis de aller største. Dette skulle gi en rimelig grad av representativitet i beregningene.

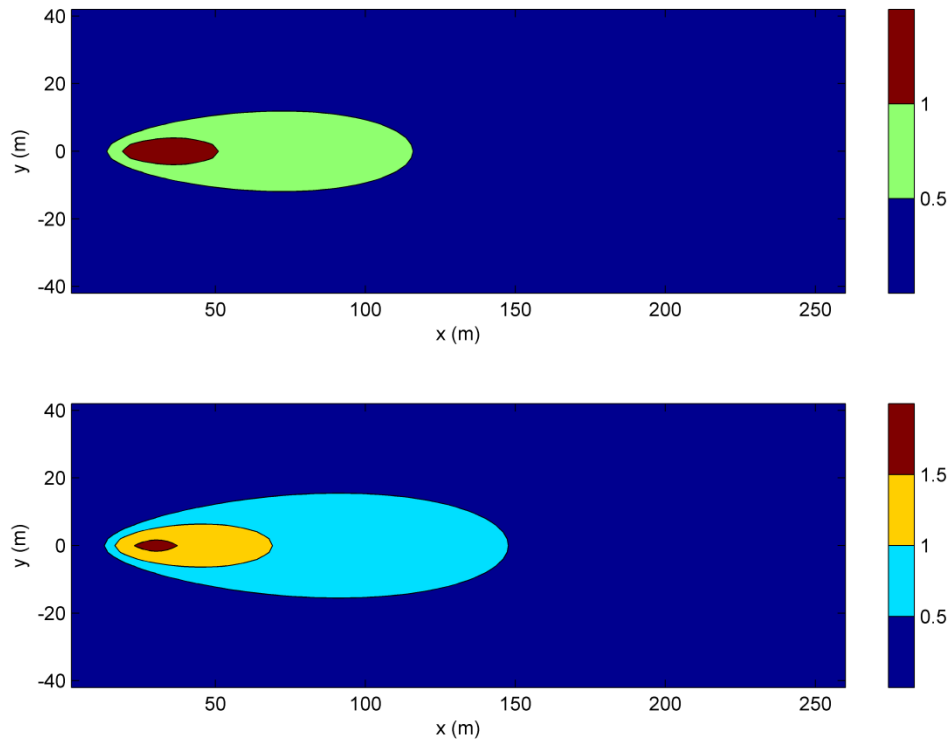
Maksimal hastighet ved bunnen som funksjon av vanddypet for de forskjellige fartøyene, er vist i *Figur 4.1*. Hastighetsfordelingen ved bunnen beregnet med ligning (3.3a) er vist i *Figur 4.2* – *Figur 4.8*.



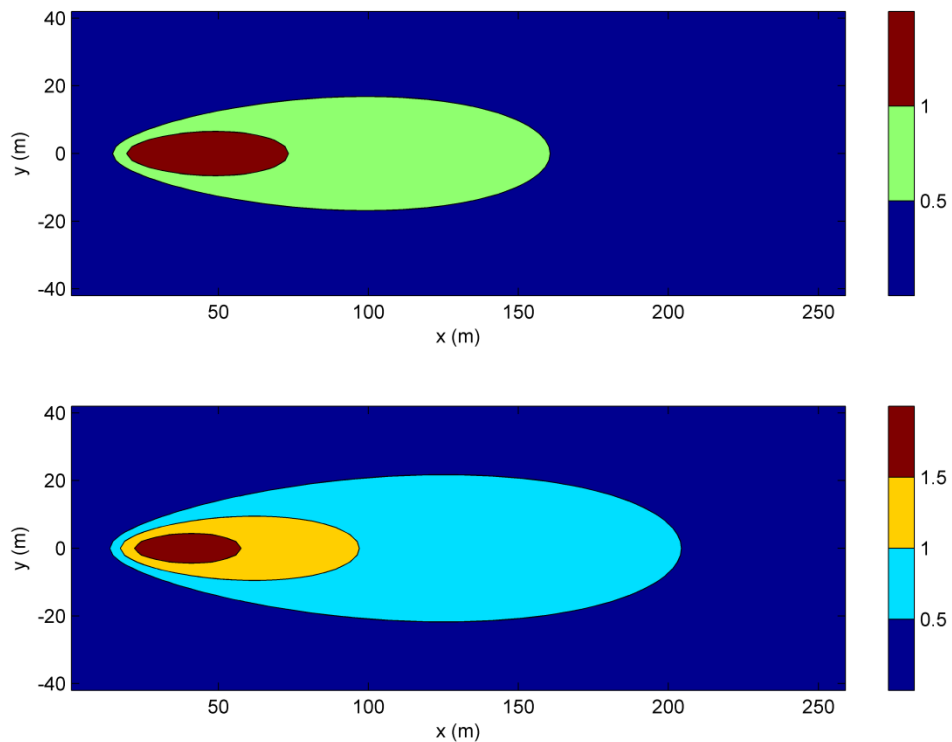
Figur 4.1 Maksimal hastighet ved bunnen som funksjon av lokal dybde. Beregnet med ligning (3.2).



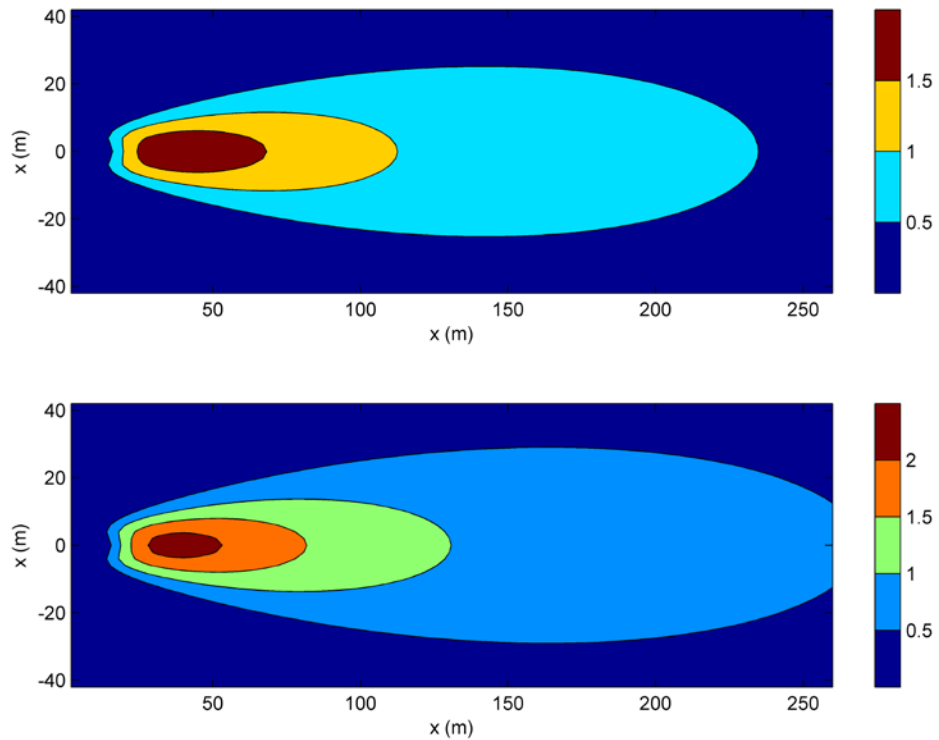
*Figur 4.2 Beregnet hastighet (m/s) ved bunnen for T/B Buster ved hhv 30 og 60 % motorpådrag. Nyhavna.*



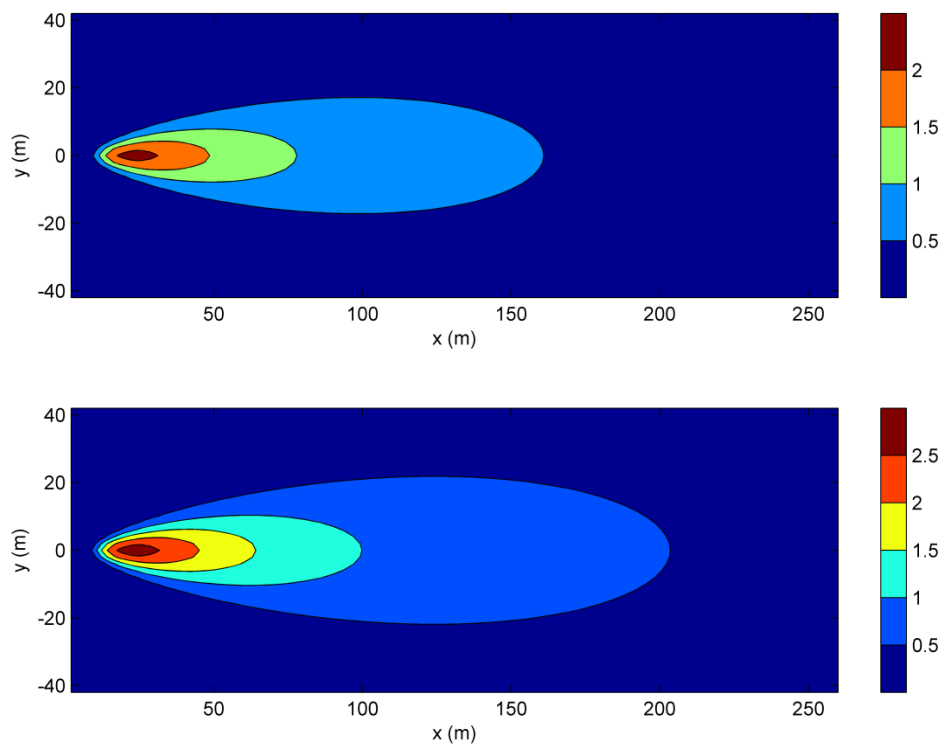
*Figur 4.3 Beregnet hastighet (m/s) ved bunnen for Norsund ved hhv 30 og 60 % motorpådrag. Folldalskaia.*



Figur 4.4 Beregnet hastighet (m/s) ved bunnen for With Junior ved hhv 30 og 60 % motorpådrag. Pir 2.

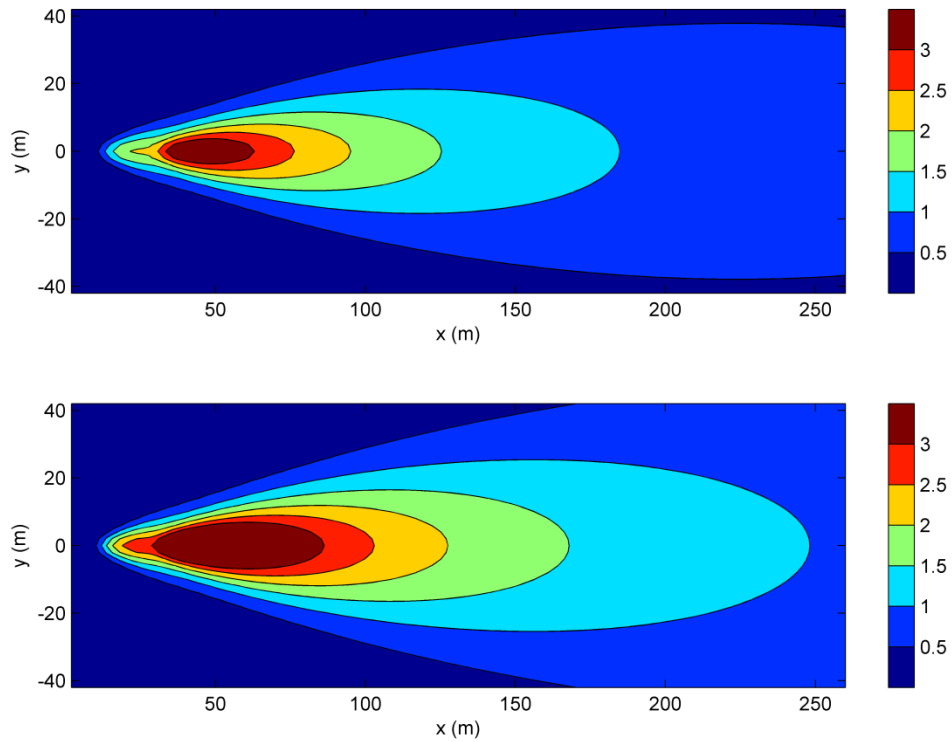


Figur 4.5 Beregnet hastighet (m/s) ved bunnen for Kystekspresen ved hhv 40 og 60 % motorpådrag. Ytre basseng.

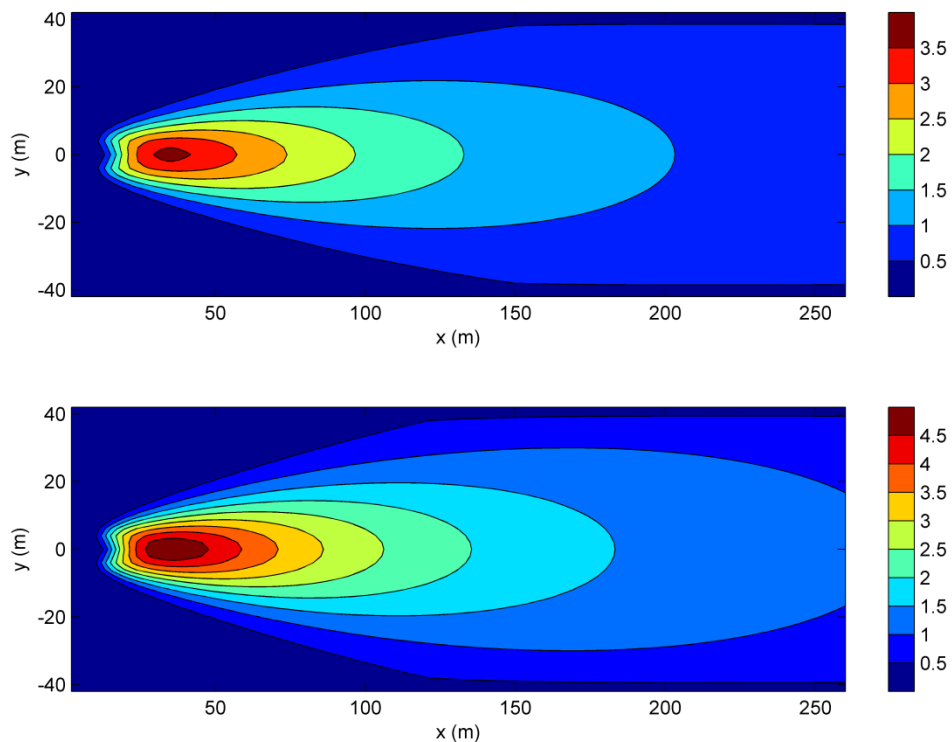




Figur 4.6 Beregnet hastighet (m/s) ved bunnen for Nordvåg ved hhv 30 og 60 % motorpådrag. Nyhavna.



Figur 4.7 Beregnet hastighet (m/s) ved bunnen for M/S Midnatsol ved hhv 20 og 50 % motorpådrag. Pir 1.



Figur 4.8 Beregnet hastighet (m/s) ved bunnen for M/S Europa ved hhv 20 og 50 % motorpådrag. Ila.

#### 4.2 Sedimentoppvirvling

Median korndiameter,  $d_{50}$ , for de forskjellige lokasjonene ble valgt ut fra kornfordelingen på det nærmeste tilgjengelige prøvepunktet. Midlere korndiameter samt fallhastigheten ved de forskjellige lokasjonene er gitt i *Tabell 4.2*. Dataene og kartet som er lagt til grunn for disse opplysningene, er gitt i henholdsvis Vedlegg 2 og 3.

Kornstørrelsesfordelingen kan gjennomgå store geografiske variasjoner fra målepunkt til målepunkt. Dette kan dels skyldes virkninger av propellerrosjon som har skapt et grovere sediment helt lokalt. Det kan derfor være vanskelig å finne representative stasjoner. Det er valgt nærmeste tilgjengelige målepunkt for vurderingene, selv om dette punktet kan være påvirket av tidligere propellerrosjon.

Tabell 4.2 Midlere korndiameter og fallhastighet til partikler med midlere (median) korndiameter for de forskjellige lokasjonene. Sediment prøvenummer refererer seg til Vedlegg 2.

Sted	Kainummer	Delområde	Sediment prøvenummer	Midlere korndiameter [ $\mu\text{m}$ ]	Fallhastighet [m/s]
Pir 1	1 og 2	6	T141	95	0,0066
Ila	26 – 30	4	T115	175	0,0183
Ytre Basseng	67	6	T132	63	0,0031
Pir 2	10 – 13	8	T151	95	0,0066
Nyhavna	41 – 43	9	T156	125	0,0106
Nyhavna	52 – 55	9	T155	45	0,0016
Nyhavna	57	9	T156	125	0,0106
Folldalskaia	59	2	T114	125	0,0106

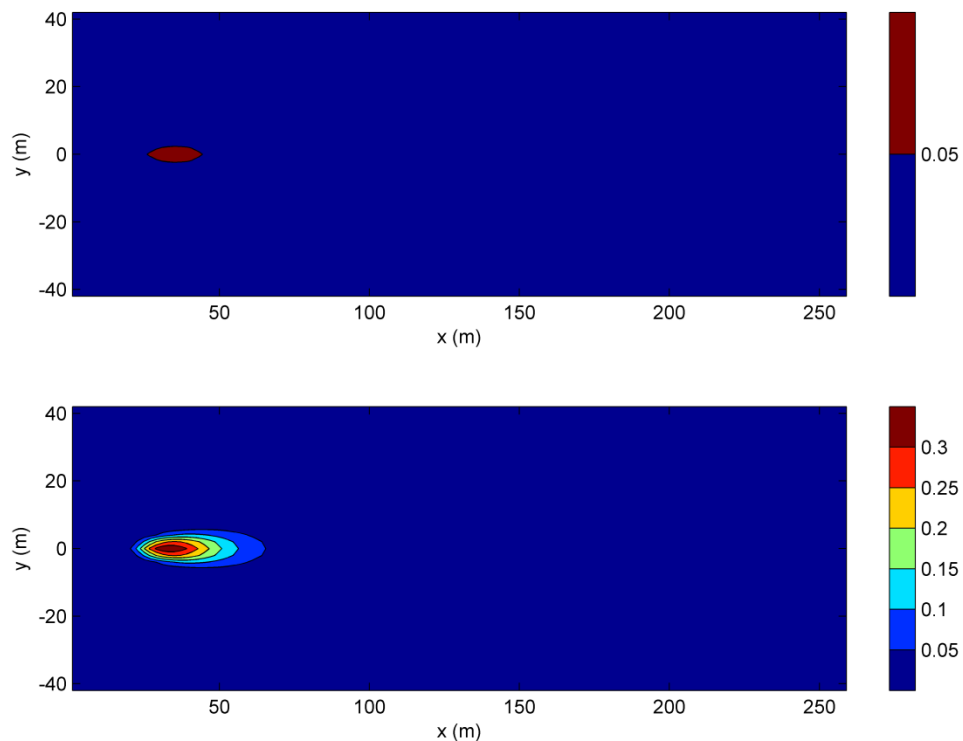
Total mengde sediment som blir re-suspendert i løpet av et år kan estimeres dersom man antar antall anløp og forløp for anløpene. Antall anløp ved de forskjellige kaiene er oppgitt av Trondheim Havn. Mønsteret for anløpene (grad av motorpådrag og tid) er valgt med bakgrunn fra Rye m. fl. (2005) og oppgitt i *Tabell 2.1*.

Grad av oppvirvlet sediment vil også være avhengig av dybdeforholdene samt grovheten av sedimentet. Dybden kan variere betydelig innenfor et område som er utsatt for propellerrosjon. Likeså grovheten av sedimentet. Derfor er beregningene som er foretatt mer indikative enn absolutte, på grunn av den høye variabiliteten i dybde- og sediment forhold. Allikevel ventes beregningene å angi noen proporsjoner.

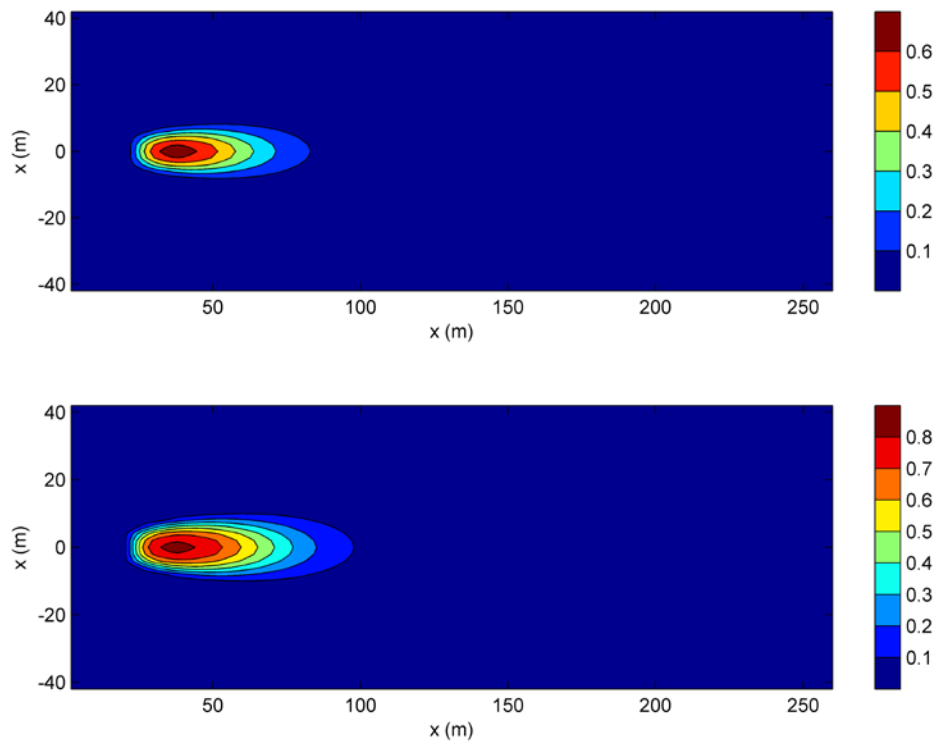
Tabell 4.3. Mønster for anløp. Antagelser for motorpådrag og varigheter av disse under manøvreringen.

Sted	Kai	Anløp	Fartøy	Lavt motorpådrag	Tid lavt motorpådrag	Høyt motorpådrag	Tid høyt motorpådrag
Pir 1	1 og 2	700	M/S Midnatsol	20 %	400 s	50 %	20 s
Ila	26 – 30	270	M/S Europa eller Norsund	20 %/ 30 %	600 s/ 300s	50 %/ 60%	20 s
Ytre Basseng	67	1500	Kystekspresen	40 %	120 s	60 %	20 s
Pir 2	10 – 13	300	With Junior	30 %	300 s	60 %	20 s
Nyhavna	41 – 43, 57	200	Nordvåg	30 %	300 s	60 %	20 s
Nyhavna	52 – 55	200	T/B Buster	30 %	300 s	60 %	20 s
Folldalskaia	59	15	Norsund	30 %	300 s	60 %	20 s

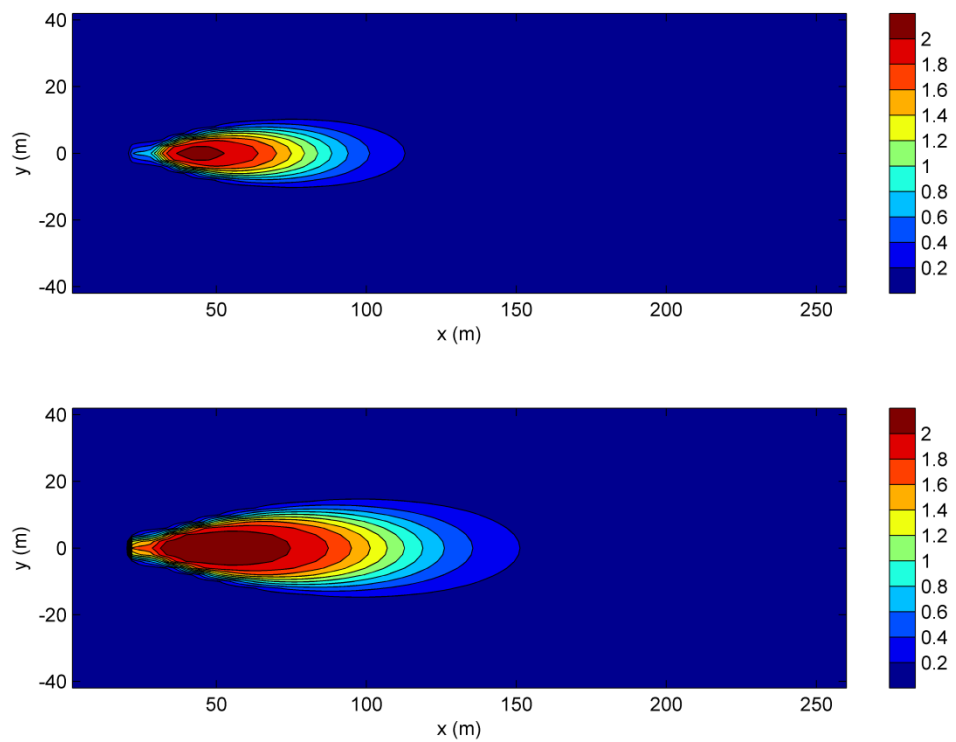
Figur 4.9 til Figur 4.11 viser den beregnede medrivningsraten  $q_{xy}$  for lavt og høyt motorpådrag for With Junior ved Pir 2, Kystekspresen i Ytre Havnebasseng og MS Midnatsol ved Pir 1, mens Tabell 4.4 viser integrerte medrivningsrater for de forskjellige lokasjonene.



Figur 4.9 Beregnet medrivningsrate  $q_{xy}$  ( $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) ved hhv 30 og 60 % motorpådrag forårsaket av With Junior ved Pir 2.



Figur 4.10 Beregnet medrivningsrate  $q_{xy}$  ( $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) ved hhv 20 og 50 % motorpådreg forårsaket av Kystekspressen i Ytre Havnebasseng.



Figur 4.11 Beregnet medrivningsrate  $q_{xy}$  ( $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) ved hhv 20 og 50 % motorpådreg forårsaket av MS Midnatsol ved Pir 1.

Tabell 4.4 Oppvirvling av sediment beregnet med uttrykk fra Parker m. fl (1987).  $Q$  angir fluks av opprevet sediment som følge av propellersjon basert på antagelsene gitt i Tabell 4.3.

Sted	Fartøy	Anløp	Q høyt (kg/s)	Q lavt (kg/s)	Pr anløp (1000 kg)	Masse pr år ( $10^6$ kg)
Pir 1	M/S Midnatsol	700	8611	3707	1655	1159
Ila	M/S Europa eller Norsund	10/ 260	16413/ 58	5639/ 11	3712/ 4,5	37/ 1,2
Ytre Basseng	Kystekspresen	1500	1402	779	122	182
Pir 2	With Junior	300	187	39	15	4,6
Nyhavna	Nordvåg	200	622	159	60	12
Nyhavna	T/B Buster	200	374	178	60	12
Folldalskaia	Norsund	15	29	6	2,4	0,04

Beregningene viser at det er hurtigruta og kystekspresen som representerer de største kildene for spredning av oppvirvlet sediment på grunn av størrelser på båtene samt hyppighet av anløp. Cruisetrafikken representerer den største potensielle oppvirvlingen pr anløp, men anløpshyppigheten av disse er vesentlig lavere enn for rutetrafikken.

## 5 Diskusjon av resultatene

Beregningene viser at det er meget store variasjoner mellom mengder oppvirvlet sediment for de forskjellige alternativene. Beregningsresultatene varierer fra 40 tonn/år (Folldalskaia) til over 1 mill. tonn/år (Hurtigrutekaia). Nå er nok tallet for Hurtigrutekaia svært høyt og neppe realistisk. Årsaken til dette er at ankomsthyppheten her er meget høy, slik at det meste som kan eroderes bort har nok gjort dette for lenge siden. Stasjonen som er valgt for å representere sedimentet (T141, se Tabell i Vedlegg 2) viser relativt fint sediment, som er neppe realistisk for de områdene hvor erosjonen er (har vært) størst.

Også beregnet oppvirvling av sediment pr. anløp viser meget store variasjoner, fra 2.4 tonn pr. anløp (Folldalskaia) til over 3000 tonn pr. anløp (M/S Europa, Ila). Dette er over en faktor av 1000 i forskjell.

### 5.1 Sammenligning med sjablongverdier i veileder TA-2230/2007

Det er utgitt en veileder av Klif/NIVA/NGI med sjablongverdier for oppvirvlet sediment (finfraksjon) pr anløp. Her er oppgitt en verdi (for symbol  $m_{sed}$  i veilederen) lik 4 tonn (anløp inkluderer både på vei ut og på vei inn) for kategori "stor havn" og for sediment kategori "silt og leire" (finfraksjon). For øvrig inngår bare antall skipsanløp pr. år som variabel, uavhengig av størrelsen på båtene. Det er derfor klart at veilederen, (slik den er i dag), er meget grov, noe som kan innebære betydelige avvik fra de reelle forhold for forskjellige skips kategorier.

Veilederen spesifiserer dessuten bare "finfraksjonen" av det oppvirvlete sedimentet. Dette er rimelig, da de grovere massene må forventes å deponere ganske raskt etter oppvirvlingen. Modellen som er benyttet i det foreliggende prosjekt beregner totalt oppvirvlet sediment, ikke bare finfraksjonen. Dersom vi antar at "finfraksjonen" består av silt og leire (dvs. "pelitt" fraksjonen med diameter mindre enn 0,063 mm), så er størrelsen på denne fraksjon for de utvalgte stasjoner i Trondheim havn blitt beregnet som vist i Tabell 5.1. Justeres anslaget ned slik at bare finfraksjonen regnes med (slik som i veilederen), fås resultat for oppvirvlet finfraksjon som vist i kolonnen til høyre i Tabell 5.1:

Tabell 5.1. Beregnet andel finfraksjon fra SINTEF's beregninger for oppvirvlet sediment pr. anløp. Pelitt fraksjonen (andel partikler med diametre mindre enn 0,063 mm) er gitt i Vedlegg 2. Stasjon for sediment valgt for å representere de forskjellige stedene som er vurdert er gitt i Tabell 4.2:

Sted	Del-område	Sediment Prøve-nummer	Andel pelitt fraksjon %	Oppvirvlet pr. anløp (tonn)	SINTEF beregnet for finfraksjon (tonn)
Pir 1	6	T141	43	1655	712
Ila	4	T115	5	3712/ 4,5	186/ 0,2
Ytre Basseng	6	T132	55	122	67
Pir 2	8	T151	40	15	6
Nyhavna	9	T156	23	60	14
Nyhavna	9	T155	56	60	34
Folldalskaia	2	T114	44	2,4	1.1

Kolonnen til høyre i tabellen blir dermed direkte sammenlignbar med veilederens ”sjablongverdi” på 4 tonn pr. anløp oppvirvlet finfraksjon. Forskjellen er nå redusert ned til en forskjell i området 178 – 0,05. Denne justering reduserer avvikene mellom veilederen og våre beregninger betraktelig.

Når man betrakter veilederens forenklinger (ett tall er ment å representere alle skipstyper) så er allikevel ikke forskjellene så overraskende. Man må forvente betydelige forskjeller i erosjon for forskjellige typer fartøy. Med utvikling av større motorkraft og med stor variasjon i fartøyenes størrelser er ikke ”antall skipsanløp pr år” tilstrekkelig til å karakterisere potensiell omfang av propellererosjon. Dessuten er det flere faktorer til stede som kan forsterke hverandre. Eksempelvis kan en cruisebåt i et grunt farvann skape en betydelig erosjon. Båtens dypgående (med propeller plassert dypt), kort avstand til bunn samt stor motorkraft kan i sum forårsake meget store erosjonsrater. At slike båter er meget tunge å manøvrere gjør ikke saken bedre. Derfor må betydelige forskjeller i samlet erosjon av masser forventes for et enkelt anløp, avhengig av skipstyper/størrelser, vanddyb og andre lokale forhold.

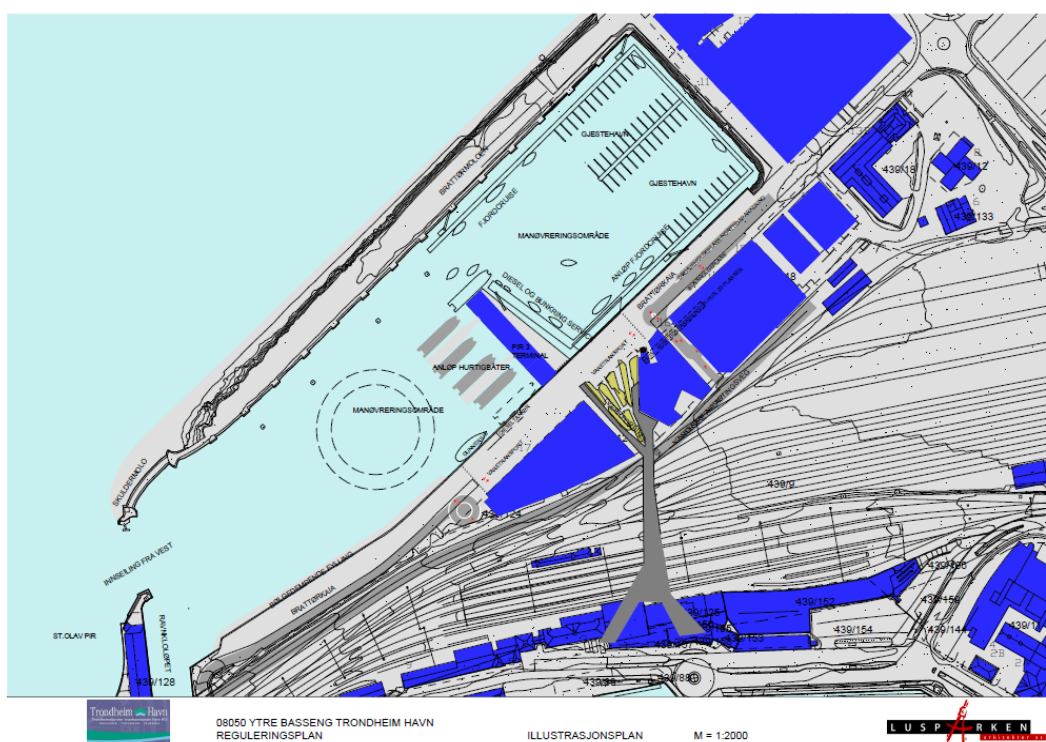
## 5.2 Usikkerheter i beregningene

Også vår beregningsmetode er heftet med usikkerhet. Grunnen til dette er at modellene som er brukt, baserer seg på en del forenklinger. De viktigste av disse er:

- Det er antatt at det er ubegrensede mengder sediment tilgjengelig for erosjon. Dette er ofte ikke tilfelle. Etter at den løse andelen av bunnen er blitt oppvirvlet til en viss dybde kan strålen møte fastere (konsolidert og/eller grovere) masse eller fjell, og erosjonen vil da bremses ned. Realistiske beregninger for denne situasjonen vil være vanskelig å gjennomføre, og vil kreve mer omfattende grunnundersøkelser.
- Det oppvirvlete sedimentet vil i stor grad deponere ganske raskt igjen (avhengig av sedimentets sammensetning). Dette vil også gjelde for sedimenter som er grovere enn pelittfraksjonen. Omfanget av dette er avhengig av fordeling av kornstørrelse som gitt i Vedlegg 2.

- Beregningene er foretatt under idealistiske antagelser om jevn bunn, hvilket oftest ikke er tilfelle. I Trondheim havn er det til stede mye skrånende bunn, hvilket også vil redusere omfanget av oppvirvlet sediment når dybde på sedimentet ligger dypere enn bunn dyppet brukt i beregningene (se Tabell 2.1).
- Omfang av oppvirvlet sediment vil ha en tendens til å avta over årene. Som et eksempel, ved hurtigrutekaia (som har eksistert i mange år) vil oppvirvlet sediment forventes å ha funnet sted over mange år allerede, slik at området her i stor grad er blitt ”blåst rent”. Ved den planlagte kaia for Kystekspresen i Ytre Havnebasseng vil sedimentet ikke være erodert bort initielt, så i dette området må det forventes et visst omfang av propell/vannjeterosjon når trafikken starter opp ved den nye kaia. Selve manøvreringsområdet her vil være utsatt, se Figur 5.1. Dyppet her er også relativt grunt, se Tabell 2.1 (Ytre havnebasseng).
- Beregningene er gjennomført under antagelse om at fartøyet ligger i ro. Under manøvreringen mot kaiplassen vil ikke denne betingelse være oppfylt. Manøvreringen fører til at den jetstråle som propellene (vannjeten) danner, ikke får tid til å utvikle seg til en fullt utviklet jetstråle. Utviklingen av denne strålen blir derfor avbrutt slik at erosjonen reduseres i forhold til resultatet for en fullt utviklet jet.

I sum peker disse momentene i retning av at metodikken som er benyttet, tenderer mot å overdrive størrelsen på de masser som virvles opp. Av grunner som nevnt over, vil overslag av denne type ligge på den konservative siden. Det er vanskelig å angi faktorer for dette, da en slik faktor vil være avhengig av relevansen av de forskjellige momentene nevnt over. Men det kan være snakk om størrelsesordener i enkelte tilfeller. Dette vil eksempelvis gjelde spesielt for hurtigruta. Her vil området rundt Pir 1 sannsynligvis være ”blåst rent” allerede. Men beregningene indikerer at større båter med hyppig ankomst må forventes å gi et betraktelig bidrag til utgraving og forflytning av løse sedimentmasser.



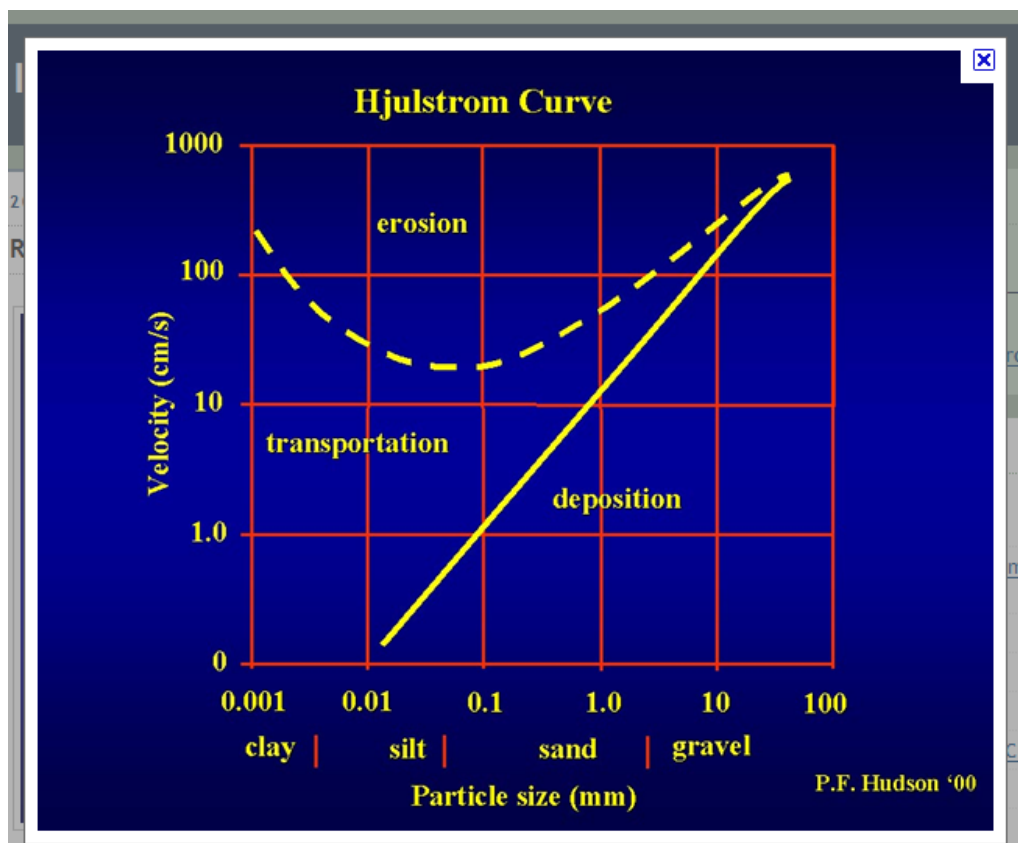


Figur 5.1 Manøvreringsområde for Kystekspresen ved den planlagte kaia i Ytre Havnebasseng.

### 5.3 Erosjonsrater gitt i tonn/m<sup>2</sup> sedimentareal og år

Resultatene i Tabell 4.4 er gitt i 1000 tonn (10<sup>6</sup> kg) pr. år. Det kan være hensiktsmessig å oppgi resultatet i enhet kg/m<sup>2</sup> per år. Dette vil da kunne antyde en slags "erosjonsrate" per år i den forstand at tallet indikerer en forventet mengde oppvirvlet i året, gitt per m<sup>2</sup>.

Det må da gjøres et anslag over areal som forventes å bli påvirket av erosjonsstrålen. Dette kan bestemmes fra topografiske kart som gir areal påvirket av erosjon (dvs dybder typisk mindre enn 15 – 20 m dyp). Sterkt skrånende bunn kan også medføre at arealet reduseres raskt med økende dyp, samtidig med at løsmassene har en tendens til å bevege seg ned mot større dyp. Dessuten må man se på arealer som kan bli utsatt for hastigheter som kan medføre erosjon av (finere) sediment. Settes som kriterium en kritisk hastighet for erosjon av finere materiale lik 0,3 m/s (se Figur 5.2), kan anslag over påvirket områder foretas basert på de beregnede hastighetsfelt gitt i Figurene 4.2 – 4.8. Her er gitt hastighet ved bunn fra propell- (vannjet-) stråle for samtlige 7 beregningstilfeller inkludert i denne rapporten. Dersom den beregnede oppvirvlede masse pr. år i Tabell 4.4 fordeles over dette arealet, fås et resultat som vist i Tabell 5.2.



Figur 5.2 Hjulstrøm kurve. (Referanse: Google "Hjulstrøm curve", som ofte benyttes innen klassisk sedimentlære). Figur som angir hastighetsgrense for erosjon av sediment som funksjon av kornstørrelse.

Tabell 5.2. Anslag over maksimalt oppvirvlet sediment, gitt som  $\text{kg/m}^2$  og år.

Sted	Fartøy	Delområde	Areal påvirkning [ $\text{m}^2$ ]	Masse pr år ( $10^6$ kg)	Masse pr. år ( $\text{kg/m}^2$ og år)
Pir 1	M/S Midnatsol	6	40 000	1159	$29 \times 10^3$
Ila	M/S Europa	4	50 000	37	740
Ytre Basseng	Kystekspresen	6	30 000	182	$6.1 \times 10^3$
Pir 2	With Junior	8	60 000	4,6	80
Nyhavna	Nordvåg	9	30 000	12	400
Nyhavna	T/B Buster	9	30 000	12	400
Folldalskaia	Norsund	2	10 000	0,04	4

Sannsynligvis er det Kystekspresen i Ytre Basseng som må forventes å ville bidra til vesentlige masseforflytninger når den nye kaia i Ytre Havnebasseng tas i bruk. Nå er dette er relativt lukket område, så det meste som virvles opp vil re-deponere innenfor selve bassenget. Men mer finpartikulært materiale vil kunne lekke ut gjennom åpningen mot SV. Dessuten må man regne med en viss omfordeling av massene i selve bassenget. Dette er forhold som vil kunne la seg observere ved overvåking av bunnforholdene.

Det anbefales på det nåværende tidspunkt ikke å bruke sedimentmengdene i Tabell 5.2 for videre spredningsberegninger, da en rekke forutsetninger for beregningene ikke alltid er til stede. Forutsetningene som er gjort, virker den vei at størrelsene på de eroderte massene jevnt over vil være for høye. Resultatene som er presentert her antas likevel å ha interesse, bl.a. fordi den *relative* virkningen av de forskjellige fartøytypene (kombinert med deres anløpshyppigheter) må antas å være realistisk. En måte å minske usikkerheten på vil være å foreta målinger av propellerrosjon under en aktuell etablering av en ny kai. Som et aktuelt eksempel her kan trekkes fram Kystekspresens planlagte nye lokalisering i Ytre Havnebasseng. Denne utbygging kan representere en mulighet til å sikre seg data som kan føre til forbedring av metodegrunnlaget brukt i denne rapporten.

## 6 Referanser

Ferguson, R., I., and Church, M. (2004): A Simple Universal Equation for Grain Settling Velocity. *Journal of Sedimentary Research*, 74 (6), 933 – 937.

Parker, G., Garcia, M., Fukushima, Y., and Yu, W. (1987): Experiments of turbidity currents over an erodible bed. *Journal of Hydraulic Research*, 25, Vol. 1, 123 – 147.

PIANC (1997): *Guidelines for the design of armoured slopes under open piled quay walls*. Report of Working Group No. 22 of the Permanent Technical Committee II. Supplement to Bulletin NO. 96. PIANC General secretariat, Brussels, Belgium, 38 pp.

Rye, H., Brørs, B. og Eidnes, G. (2006): *Hammerfest havn Risiko for spredning av forurenset sediment Revidert rapport januar 2006*. SINTEF-rapport nr STF80MK F05345.

SFT: Risikuvurdering av forurenset sediment. Veileder utgitt av SFT (nå Klif), sammen med NIVA og NGI. Veileder TA-2230/2007. ISBN 978-82-7655-537-0.

Verhagen, H. J. (2001): *Bowthrusters and the stability of riprap revetment*. Section of Hydraulic Engineering, Delft University of Technology, Netherlands. Available at <http://www.citg.tudelft.nl/live/pagina.jsp?id=71b5a2b8-23b7-474a-9f9b-5c37e622ac33&lang=en>



**Vedlegg 2 – Tabell med kornfordeling, (fra NGI)**

Prøvepunkt	<2 µm (% TS)	<16 µm (% TS)	<45 µm (% TS)	<63 µm (% TS)	<125µm (% TS)	<250µm (% TS)	<500µm (% TS)	<1000µm (% TS)	<2000µm (% TS)
T102	12.2	30.3	63.4	73.7	79	79.5	79.6	79.7	79.8
T104	1.8	5	7.4	9.6	19.5	36.4	45.1	53.9	81.1
T106	18.9	37.4	50.3	54.4	59.4	61.4	62.2	62.7	63.2
T108	2.1	7.3	16.5	22	30.3	32.3	34.8	48.2	84.8
T110	13.8	30	45.8	53.6	62.2	64.4	65.8	66.6	67.7
T111	12	29.5	50.4	57.6	65.6	69.9	72.2	73.7	75.6
T114	8.3	21.8	37.2	44.1	58.5	63.2	64.6	64.9	66
T115	1	2	2.4	4.6	30.6	79.4	91.5	92.7	93.4
T119	2.1	5.7	8.6	10.4	19.4	35	50.6	66.1	91.8
T121	4.9	14.4	21.4	24.1	34.7	48.8	63.7	76.7	87.3
T124	1	1	1.9	2.8	7.8	22.1	47.2	76.1	94.8
T125	4.4	13.5	24.2	31.3	51.1	69.8	79.3	83.7	85.4
T127	2	6.6	14.3	21.6	48.6	72.5	83.6	88	89.6
T130	7.5	23.8	45.3	49.6	64.9	70.8	74.3	76.1	76.5
T132	7.6	23.1	44.6	54.6	69.5	75.8	78.7	80.7	82.4
T134	1	2.3	4	5.7	16.1	52.3	81.8	89	90.3
T136	2.2	6.8	11.4	15	31.1	50.7	70.5	81.9	88.2
T138	4.8	12.5	23.5	34.9	67.7	82	85.1	86.3	87
T139	1.5	4.2	6.9	9.4	24.1	63.7	81.6	85.6	86.5
T141	6.9	17.5	32.2	43.4	65	76.8	81.1	83.2	84.1
T144	8.2	19.9	26.5	33.1	36.6	37.2	37.5	37.7	37.9
T146	9	24.4	37	43.1	47.9	49.2	49.9	50.4	50.9
T147	8.7	21.7	30.9	40.2	58.2	64.1	65.6	65.9	66.3
T150	6.1	16.9	28	37	63.7	78.8	80.6	81	81.1
T151	6.7	17.4	30.9	40.1	61.7	73.9	77.2	78.1	78.3
T154	7.6	17.3	27.8	40.4	65.2	72.5	73.8	74.8	75.9
T155	12.1	32.3	49.2	56.5	61.1	61.8	62.2	62.7	63
T156	3	9.2	14.3	22.9	52.5	80.3	83.7	84	84.3
T162	1	1.2	2.9	5.4	15	23.2	52.5	74.6	87.8
T163	2.9	9.4	23	34.8	58.4	74.4	80.3	82.7	84.1
T167	6.5	17.5	30.1	70.3	83.9	93.9	97.9	99.6	99.8
T169	1	1	1	0.6	3.2	14	42.7	75.4	94.3
T174	8.3	1	31.4	39.7	53.1	62.6	71.6	77.7	80.5
T175	11.7	28.7	50.4	59.6	64.4	65	65.8	66.4	66.6

**Vedlegg 3 – Utsnitt av kart over sedimentprøver , (fra NGI)**

