

Sønderho Havn VVM undersøgelse

Analyse af gravet rende til Lundvig Løb –
understøttelse af VVM

Denne rapport er udarbejdet under DHI's ledelsessystem, som er certificeret af DNV
for overensstemmelse med ISO 9001 for kvalitetsledelse



DNV Business Assurance, Danmark A/S

Sønderho Havn VVM undersøgelse

Analyse af gravet rende til Lundvig Løb –
understøttelse af VVM

Udarbejdet for Fanø Kommune
Repræsenteret ved Jacob Bay

Projektleder	Klavs Eske Bundgaard
Kvalitetsansvarlig	Rolf Deigaard
Projektnummer	11815064
Godkendelsesdato	27. juni 2014
Revision	Final 1.0
Klassifikation	Åben



INDHOLDSFORTEGNELSE

1	Opsummering	1
2	Introduktion	3
3	Baggrund og generel beskrivelse af området	5
4	Metode	7
5	Målekampagne 2013 samt historiske data	9
6	Modelopsætning og modelvalidering	11
6.1	Modellen.....	11
6.2	Inputdata – batymetri og hydrografi	11
6.3	Validering af model	13
7	Analyse af kanalen i de intertidale områder samt dens indvirkning på omkringliggende flader	17
7.1	Generelt	17
7.2	Strøm i kanalen	17
7.3	Forskydningsspændinger i kanalen	20
7.4	Tidevandskanalens laterale dynamik.....	23
7.5	Tidsskala	25
7.6	Oprensningsbehov	25
7.7	Opgravet materiale	26
7.8	Effekt af storme	26
7.9	Effekt af klima.....	26
8	REFERENCER	27

1 Opsummering

Der er opstillet og kalibreret en model af Vadehavet fra Rømhø dæmningen og op til Ho Bugt.

Modellen er blevet kørt for en periode på ca. 2 måneder med og uden den gravede kanal.

Resultatet viste at:

- Der forventes markant stigende strømhastigheder i kanalen for begge de skitserede løsninger.
- Der forventes ændringer i de eksisterende strømhastigheder og retninger i kanalen for begge de skitserede løsninger.
- Der forventes ikke blivende deposition af fint materiale.
- Der må forventes større sedimenttransport (sand) i kanalen, end det ses i dag i begge løsninger.
- Der er et naturligt sedimenttransport minimum ved vandskellet (sand), og der vil derfor deponeres i dette område, og dette vil derved genskabe vandskellet over tid.
- Placering af opgravet sediment på kanten af kanalen er ikke hensigtsmæssigt, da en signifikant del af det må forventes at blive transporteret ned i kanalen igen. Sand bør derfor placeres mindst 100 m fra kanalen for at undgå umiddelbar tilbagefyldning.
- Der må forventes lokal oprensning hvert 1 - 3 år, når den gravede overdybde er opbrugt pga. de naturlige variationer samt pga. responset fra den udgravede kanal. På grund af overdybden vil der være længere til den første nødvendige oprensning. Tidspunktet for hvornår der bliver behov for lokal oprensning afhænger af overdybden. Omkring vandskellet kan man med fordel vælge en større overdybde end i resten af renden.
- Resultatet er behæftet med stor usikkerhed pga. den morfologiske aktivitet i området, men det anslås, at de årligt oprensede mængder vil ligge imellem 3000 m³ og 10000 m³, og materialet vil være sand.

Endvidere har Dybkjær (2014) i forbindelse med Bachelorprojekt i Geografi og Geoinformatik ved Institut for Geovidenskab og Naturforvaltning (IGN) ved Københavns Universitet (KU) undersøgt de primære tidevandskanalers laterale dynamik i området omkring Slagters Lo. Undersøgelsen viste, at først siden 2006 har den nordlige del af Slagters Lo haft det vestlige forløb parallelt med Fanøs østkyst, som den har i dag, hvorimod forløbet tidligere primært har været umiddelbart øst for det nuværende forløb, samt at den gennemsnitlige laterale forlægningsrate af Slagters Lo fra Sønderho i syd til udløbet i Lundvig Løb i nord har været ~6 m/år for perioden 2006-2012.

Det konkluderes derfor, at kanalen vil flytte sig fra år til år. Sømærker etc. skal derfor følge kanalens aktuelle placering.

2 Introduktion

Sønderho Havn Støtteforening og Fanø Kommune arbejder på at få uddybet adgangen til Sønderho Naturhavn. Sønderho Havn havde tidligere adgang til Vadehavet og Nordsøen gennem en rende mod syd, som er sandet til i løbet af de sidste 40 år.



Figur 2-1 Sønderho Naturhavn (postkort fra 1976).

Der arbejdes nu med et projekt, hvor der ønskes gravet en alternativ sejlrende, der omfatter uddybning af den nordlige forbindelse mellem Sønderho Naturhavn og Knudedyb, samt imod syd til Galgedyb, se Figur 2-2. Denne rende skærer igennem det eksisterende vandskel, der ligger nord for Sønderho Havn. Denne situation forudsætter et gennembrud af barrieren imod syd, hvilket objektivt bedømt er usandsynligt med Krumoddens nuværende udvikling. Denne situation benævnes scenarie 1. Der regnes derfor også på en situation, hvor der ikke er gravet igennem imod syd. Denne situation kaldes scenarie 2.

I en tidligere fase har man arbejdet med en løsning med en åbning imod syd gennem hønen ind til Sønderho Havn. Denne løsning blev vurderet til ikke at være bæredygtig, og derfor valgte man at undersøge indeværende løsning (DHI 2010).



Figur 2-2 Satellitfoto med indtegning af forbindelsesrender til Sønderho Naturhavn (COWI 2011).

Projektet er erklæret VVM pligtigt af Kystdirektoratet (KDI), hvilket bl.a. medfører, at en række punkter og aspekter i henhold til projektets konsekvenser og påvirkning på de hydrauliske og geomorfologiske processer i området skal nærmere belyses.

KDI har udtrykt, at det afgørende i den forbindelse er, at det vurderes, i hvilket omfang kanalen holder sig naturligt åben, eller om der skal foretages regelmæssige oprensninger. I VVM'en skal der således, ifølge KDI, redegøres for:

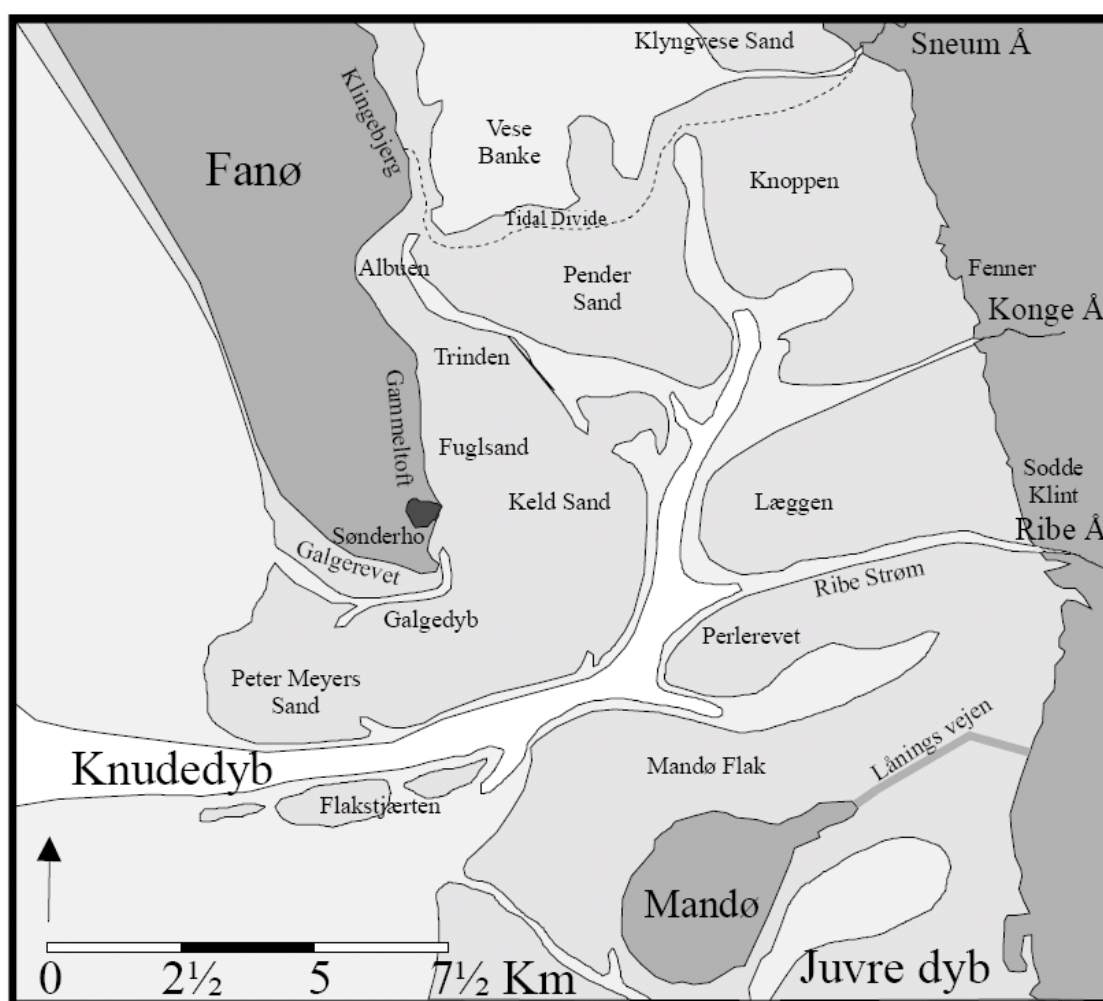
1. Udviklingen af kanalens tværprofil for hhv. 1 år, 5 år, 10 år og 20 år efter etableringen. Klimaændringer i form af havspejlsstigning skal indregnes.
2. Udviklingen af kanalens tværprofil og strømhastighederne i kanalen og ved Sønderho Naturhavn under en 20 års og 100 års storm.
3. Oprensningsomfanget (m³) og opretningsfrekvensen for kanalen på baggrund af undersøgelsen for den langvarige udvikling af kanalen (iht. pkt. 1) og ifølge stormhændelser (iht. pkt. 2).
4. Placering af udgravningsmaterialet i tidevandsbassinet.

Indeværende rapport omhandler ovenstående.

3 Baggrund og generel beskrivelse af området

Området er beliggende i det Danske Vadehav, der er den nordligste del af det Europæiske Vadehav. Et oversigtskort over Fanøs sydlige del og omliggende havområder er vist i Figur 3-1. Området er forbundet til Nordsøen gennem Knudedyb, og det nordlige tidevandsskel er beliggende fra Sneum Ås udløb til Klingebjerg/Albuen. Det sydlige vandskel er beliggende ved Låningsvejen mod Mandø.

Området er domineret af halvdøgntligt tidevand med et middel på ca. 1,5 m. Tidevandsprismet, dvs. forskellen i vandvolumen ved lavvande og højvande, er ca. $175 \times 10^6 \text{ m}^3$. Typiske maksimumshastigheder i Knudedyb er $1\text{--}1,5 \text{ m s}^{-1}$. Over de indre tidevandsflader kommer hastighederne sjældent over $0,15 \text{ m s}^{-1}$.



Figur 3-1 Oversigtskort over den sydlige del af Fanø samt omkringliggende havområde.

Sedimentologisk set er området domineret af intertidale flader, der tørlægges ved normalt lavvande. Dette område dækker omkring 67%. Fordelingen af sedimenttyper i området fremgår af Tabel 3-1.

Tabel 3-1 Oversigt over sedimenttyper i Knudedybs tidevandsområde.

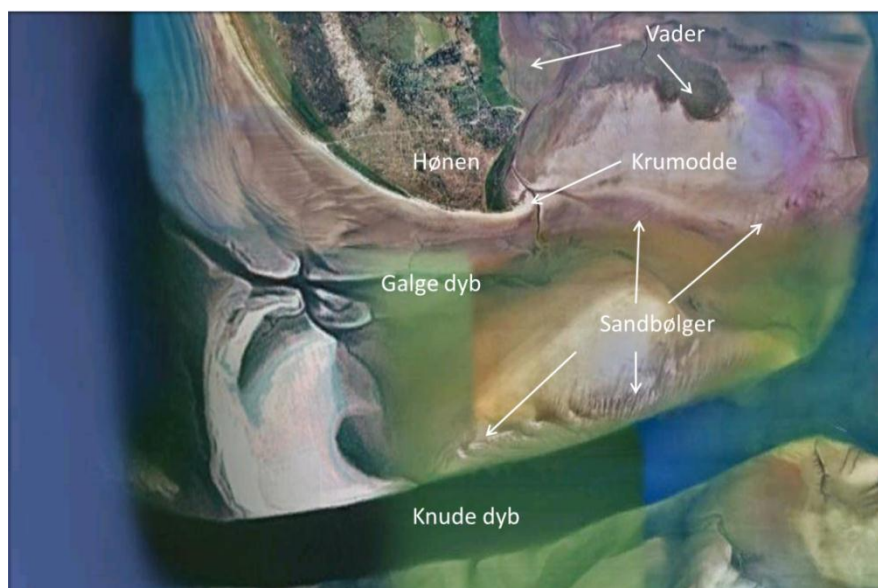
Sedimenttype	Andel af område i %
Finkonet materiale (ler- og siltindhold > 70%)	5%
Blandet sediment (ler- og siltindhold mellem 30% og 70%)	11%
Sand (ler- og siltindhold < 30%)	51%

Sedimentet i tidevandskanalerne er generelt fint sand iblandet op til 20% silt og ler /Cowi 2010/.

Sedimentdynamikken i et Vadehavsmiljø er kompleks både i kraft af den store spredning i sedimenttyper (kornstørrelser) og af den skiftende påvirkning i strømhastigheder og retninger. Bølgepåvirkningen spiller også en stor rolle.

Generelt transporteres en ganske stor mængde sediment ind fra Nordsøen gennem Knudedyb. Koncentrationen i vandet er som regel lille, i størrelsesordenen 5 mg l^{-1} . Da det på den anden side er store vandmængder, der flyttes, betyder det, at meget store mængder sediment tilføres området i hver tidevandsperiode. Tidligere studier har vist, at en lille andel (omkring 4–5%) af det tilførte sediment aflejres inde i området. Denne delikate balance betyder, at der årligt aflejres ganske store mængder i de indre områder af Vadehavet. Det totale årlige input til Knudedybs tidevandsområde er angivet til 38.500 tons pr. år. Heraf stammer 20% fra de tilløbende åer, 24% fra primærproduktion og 51% fra Nordsøen. De resterende 5% stammer fra kyst- og marskerosion samt atmosfærisk aflejring.

Området fra Hønen over Keld sand og ud til galgedyb består af store sandområder, som domineres af forskellige morfologiske formationer. Fra østsiden af Galgerevet starter en Krumodde som vandrer imod øst. På ydersiden af Galgerevet løber Galgedyb, som er en dyb tidevandsrende med lavvandede sandformationer på begge sider. Udenfor Galgedyb ligger et sand, som er et stort lavvandet sandområde, som langs kanterne er dækket af sandbølger. På toppen forefindes rent sand uden begroning, hvilket indikerer en hyppig omflytning af sandet. Nord for Krumodden op imod Hønen ligger et sandet område, som historisk set langsomt er siltet op i takt med Krumoddens langsomme fremrykning imod øst. I Figur 3-2 er givet en oversigt over de morfologiske formationer.



Figur 3-2 Oversigt over morfologiske formationer.

4 Metode

Analysen af de intertidale områder bygger på opsætning og anvendelse af en numerisk hydrodynamisk model med efterfølgende vurderinger. Den eksisterende numeriske model (MIKE 21 FM HD) er opstillet for perioden 20. August 2012 – 31. oktober 2013. Modellen dækker området fra Ho Bugt i nord til Mandø Ebbevej i syd. Desuden er et stykke af Nordsøen medtaget for at beskrive tidevandet korrekt. Modellen er opstillet for at få en korrekt repræsentation af strømningerne omkring den sydlige del af Fanø. Modellen beskriver alene de hydrodynamiske forhold. Det vil sige, at modelresultatet udelukkende indeholder vandstande og strømhastigheder. Herefter kan bundforskydningsspændinger beregnes til vurdering af sedimenttransport.

På grundlag af de beregnede strømhastigheder med og uden den uddybede kanal er det vurderet, om der vil ske ændringer i følgende forhold:

1. Flyttes vandskellet og påvirkes strømningsforholdene derved?
2. Ændres strømhastighederne tilstrækkeligt til at ændre sedimenttransport i kanalen?
3. Ændres transportkapaciteten af sediment i kanalen tilstrækkeligt til at påvirke sedimenttransporten på vaderne?

På grundlag af dette vurderes det, om der kan forventes sedimentation i renden, og om renden vil influere på den omkringliggende morfologi (vaderne). Det vurderes ligeledes, om storme vil kunne have en afgørende indflydelse på kanalens tværsnit.

Følgende to scenarier er defineret efter aftale med Sønderho Havn Støtteforening, ved Anders Bjerrum:

- Scenarie 1: Modelling af hele strækningen inkl. Nordkanal (Lundvig Løb fra Kalvekrog til Lundvig Dyb, se Figur 4-1 . Bredde 30 m, dybde min. 2 m (dybden beregnet fra MSL). De eksisterende vanddybder er angivet i Tabel 5-1. Ndr. Keldsand Løb uddybes ikke.
- Scenarie 2: Samme som scenarie 1 men der regnes på et scenarie, hvor området syd for Sønderho Havn ikke er uddybet relativt til i dag.

Scenarie 1 er valgt for at undersøge effekter af, at der etableres gennemstrømning fra Hønen til Lundvig Løb, som det blev anbefalet at undersøge i DHI's rapport fra 2010, i hvilken det blev konkluderet, at en større gennemstrømning sandsynligvis ville minimere risikoen for sedimentation af fint materiale.

Scenarie 2 er valgt som det scenarie, der svarer til den aktuelle projektbeskrivelse nemlig en oprensning af Slagters Lo fra Sønderho til Lundvig Løb.

I Figur 4-1 findes en oversigt over de anvendte stednavne.



Figur 4-1 Oversigt over sejltreder m.m. ved Sønderho Havn.

5 Målekampagne 2013 samt historiske data

Dybderne i den eksisterende Slagters Lo blev pejlet i 2013. Resultaterne er vist i Tabel 5-1.

Tabel 5-1 Oversigt over pejlede vanddybder relativt til DNN+1.

No	Bredde (Grad)	Længde (Grad)	Dybde (m)
1	55,3463	8,4739	1,3
2	55,3479	8,475	1,25
3	55,3502	8,4768	1,12
4	55,3528	8,4805	0,82
5	55,3543	8,4823	0,77
6	55,3553	8,4828	0,62
7	55,3564	8,4829	0,57
8	55,3573	8,4921	0,52
9	55,3579	8,4798	0,92
10	55,3592	8,4777	1,2
11	55,3617	8,4767	1,2
12	55,3645	8,4755	1,2
13	55,3675	8,4747	1,3
14	55,3698	8,4742	1,4
15	55,3742	8,4736	1,8
16	55,3771	8,472	2,4
17	55,3796	8,4709	2,9
18	55,3826	8,468	3,4
19	55,3846	8,4708	4,2
20	55,3859	8,4741	4,1

COWI lavede tilsvarende en sedimentanalyse, som viste, at materialet i bunden af kanalerne generelt var fint sand med et indhold af silt og ler, som hovedsageligt ligger omkring 5% med enkeltprøver op til 20%.

Sønderho Havn Støtteforening udførte i 2013 vandstandsmålinger med to stationer placeret for enderne af Lundby løb. Målingerne er lavet i perioden August – Oktober 2013. Desværre havde den nordlige måler visse vanskeligheder i måleperioden pga. mudder på trykcellen, så data fra

denne skal tages med et vidst forbehold. Data fra denne er korrigeret efter middelvandspejlet i modellen. Målingerne er angivet i Figur 5-1.



Figur 5-1 Vandstandsmålinger i begge ender af Lundby Løb.

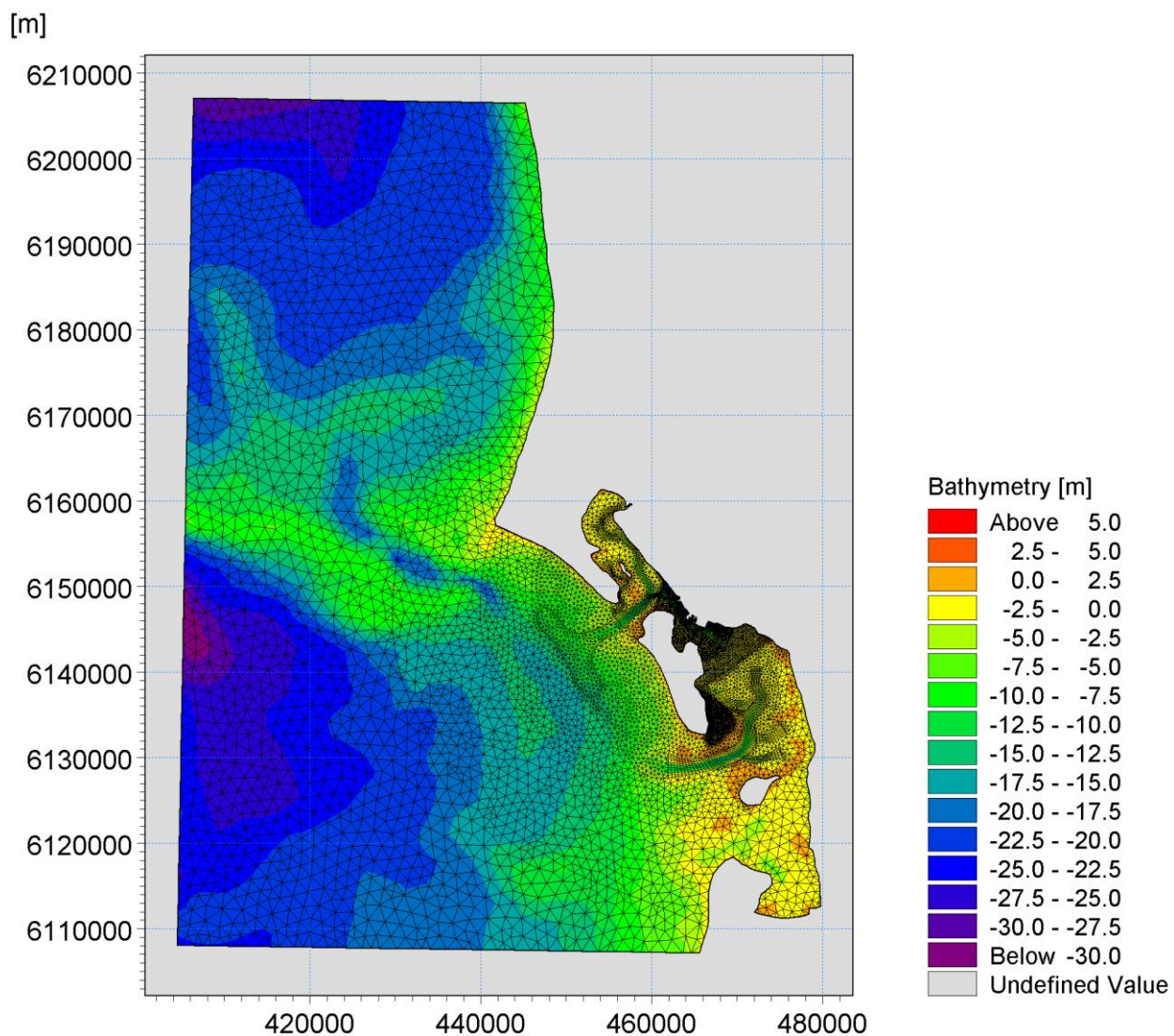
6 Modelopsætning og modelvalidering

6.1 Modellen

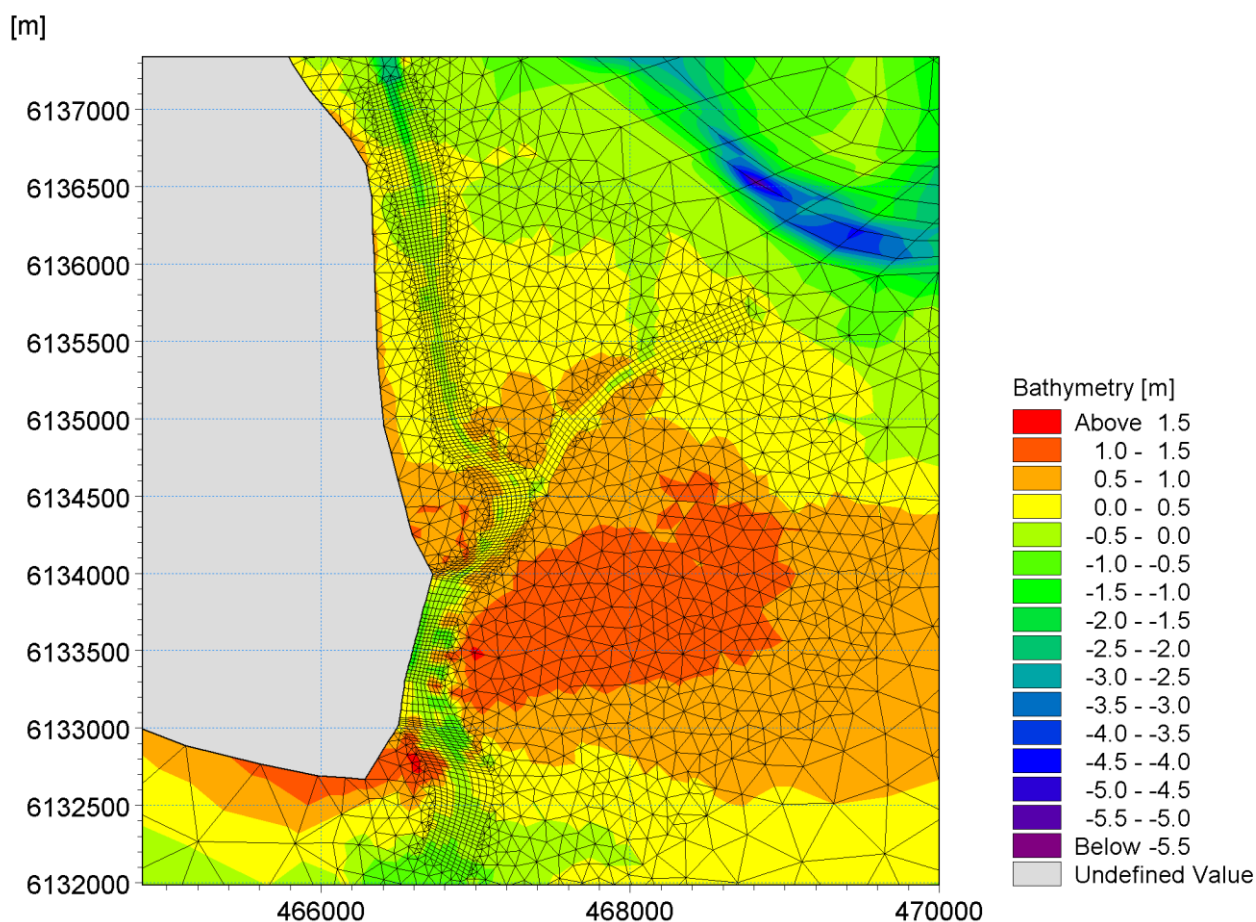
MIKE 21 FM HD er en hydrodynamisk model, der er baseret på et såkaldt fleksibelt net, hvilket vil sige, at nettet er opbygget af trekanter og firkanter af forskellig størrelse. Dette muliggør en meget detaljeret model i interesseområdet, samtidig med at beregningstiden (CPU-tiden) holdes på et rimeligt niveau. Modellen beskriver som udgangspunkt vandstand samt strømhastighed og -retning i samtlige punkter. Den tidlige opløsning justeres løbende for at opnå en numerisk stabil model, men resultatet er gemt med en tidlig opløsning på 15 minutter. Modellen er en 2D model, dvs., at vandsøjlen er repræsenteret som en dybdemidling.

6.2 Inputdata – batymetri og hydrografi

Modellens batymetriske grundlag (dybdeinformation) stammer fra et antal opmålinger, bl.a. informationer fra elektroniske søkort samt en større opmåling foretaget af Kystdirektoratet i 2002. De batymetriske rådata er meget detaljerede. Der er således benyttet mere end 500.000 punkter fordelt over modelområdet. Disse data er interpoleret til et beregningsnet bestående af omkring 4000 elementer af varierende størrelse. I nærområdet omkring Sønderho Havn er der valgt den fineste opløsning med ca. 20m mellem beregningspunkterne. I Figur 6-1 er vist et oversigtskort over batymetrien for hele området, mens et zoom på interesseområdet er vist i Figur 6-2.



Figur 6-1 Modelbatymetri for hele modelområdet. Det ses, at der er anvendt store trekanter langt fra interesseområdet og mindre elementer i området omkring Sønderho.

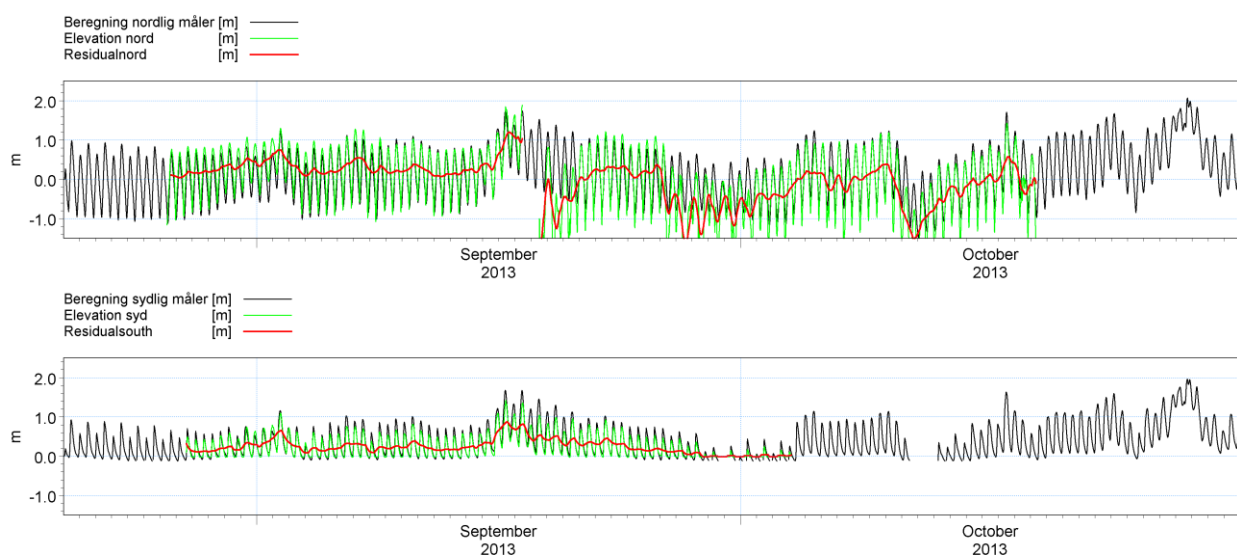


Figur 6-2 Modelbatymetri for interesseområdet omkring Sønderho. Den smalle kanal er opløst som firkanter for at simulere strømningerne igennem så korrekt som muligt.

Modellen drives af tidevand fra DHI's operationelle model af Nordsøen, som er påført modellens åbne rande. Som nævnt er opløsningen i de smalle kanaler ned til 20m, hvilket er det mindst mulige under hensyntagen til en rimelig afviklingstid.

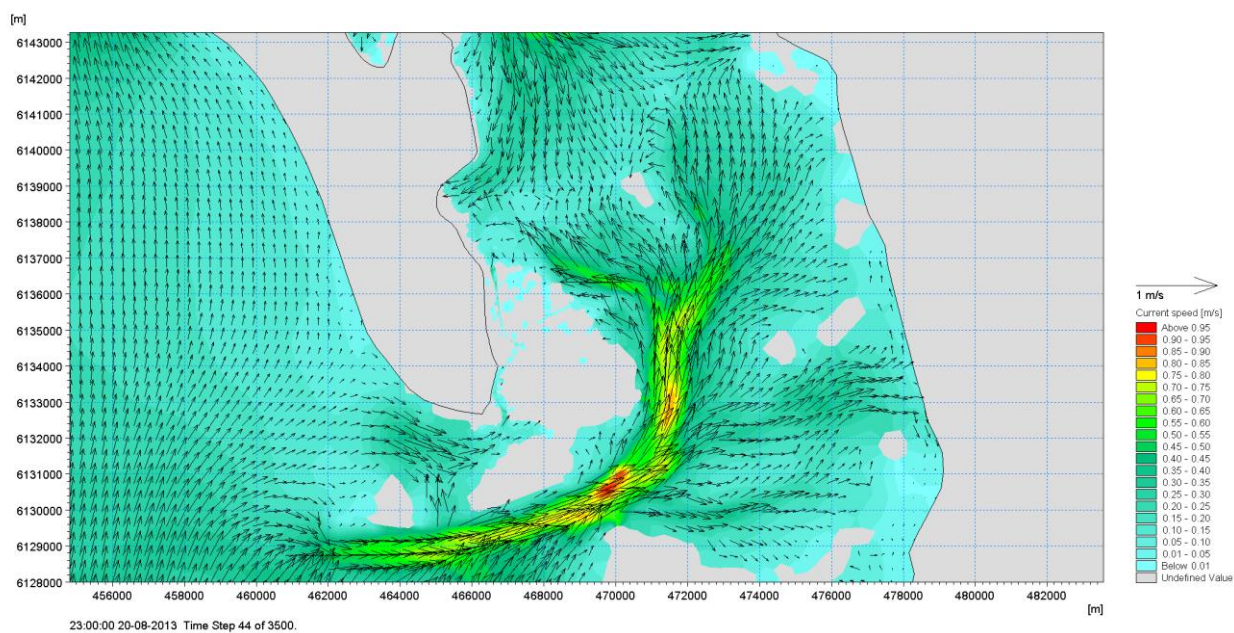
6.3 Validering af model

Den opsatte model er blevet valideret imod de målte data. Dette er vist i Figur 6-1.

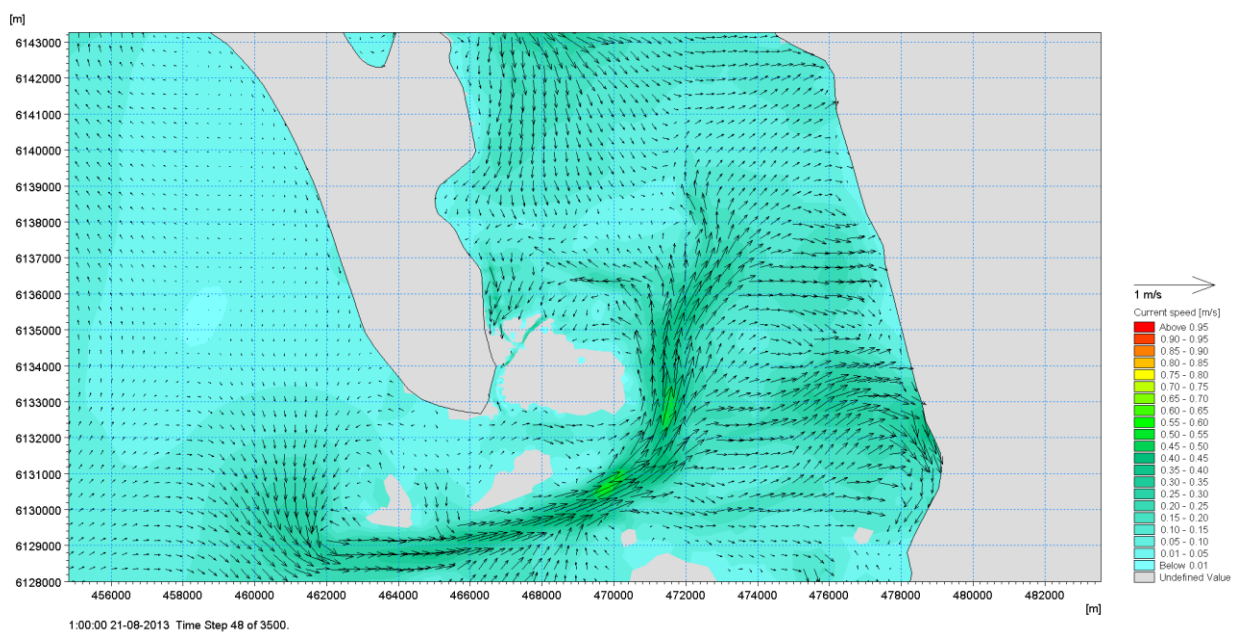


Figur 6-1 Validering af model

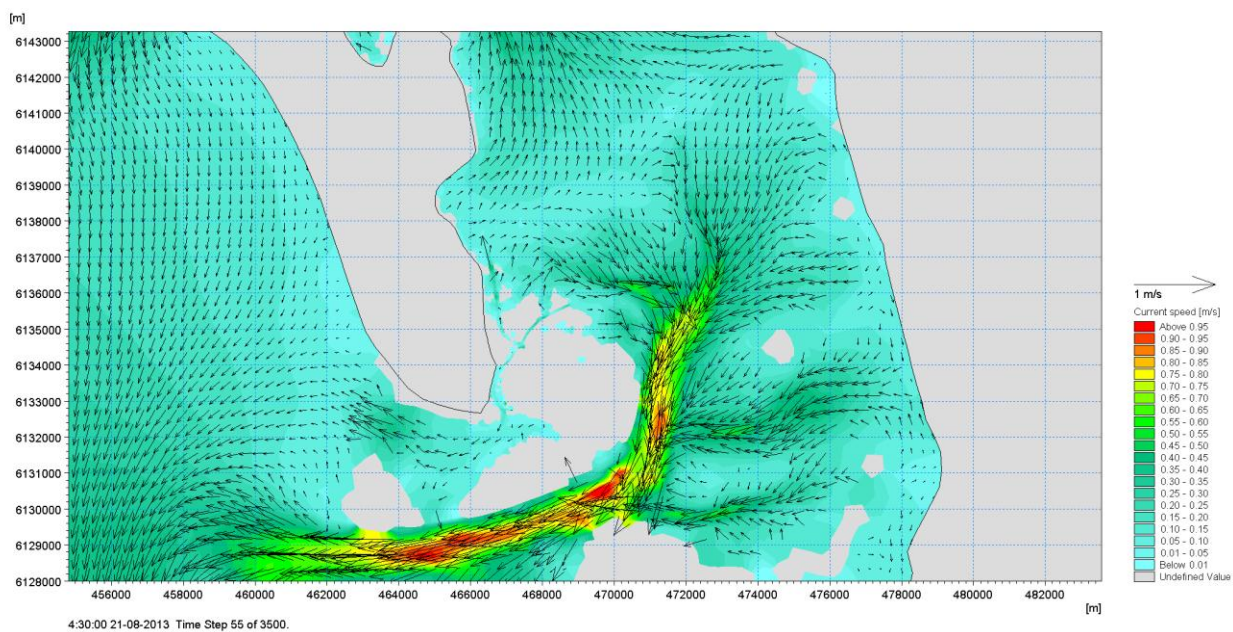
Det ses, at der er en god overensstemmelse imellem modelresultater og måling, og modellen anses herefter som færdigkalibreret. De følgende fire figurer illustrerer typiske ind- og udstrømningssituationer.



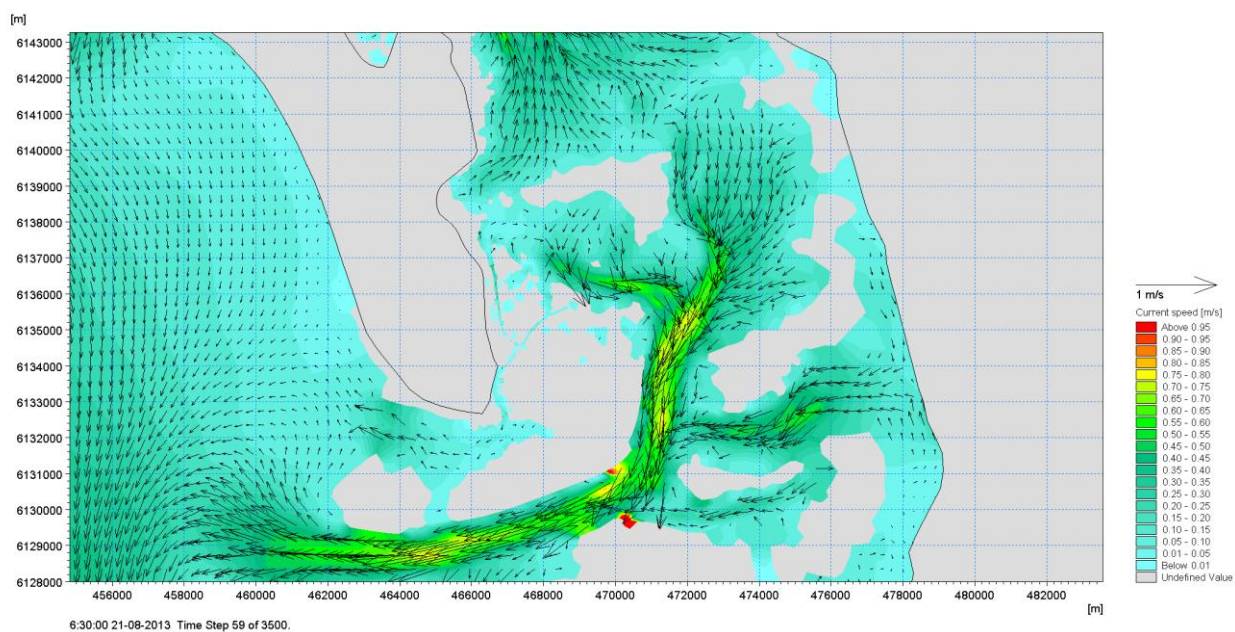
Figur 6-2 Strømmønster lavvande + 3 timer



Figur 6-3 Strømmønster lavvande + 5 timer



Figur 6-4 Strømmønster højevande + 3 timer

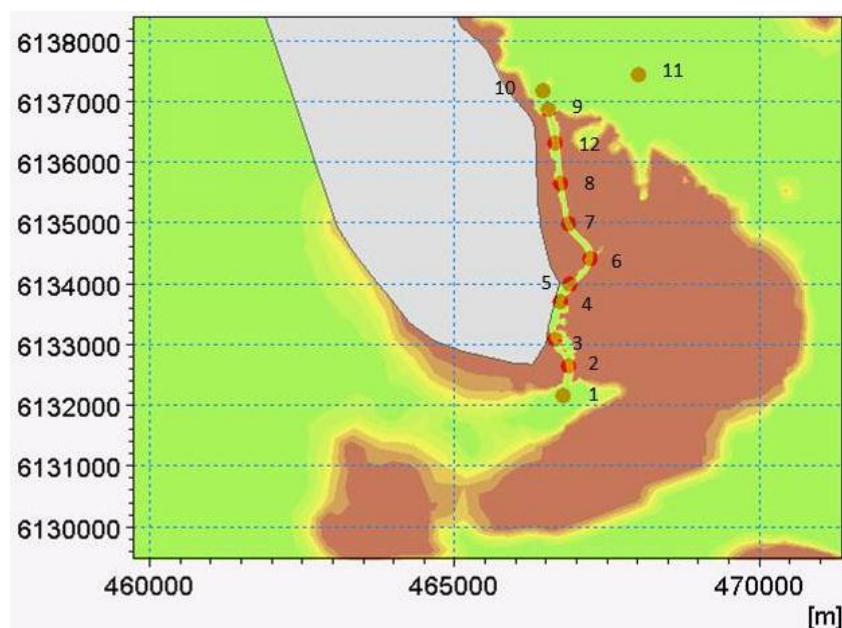


Figur 6-5 Strømmønster højvande + 5 timer

7 Analyse af kanalen i de intertidale områder samt dens indvirkning på omkringliggende flader

7.1 Generelt

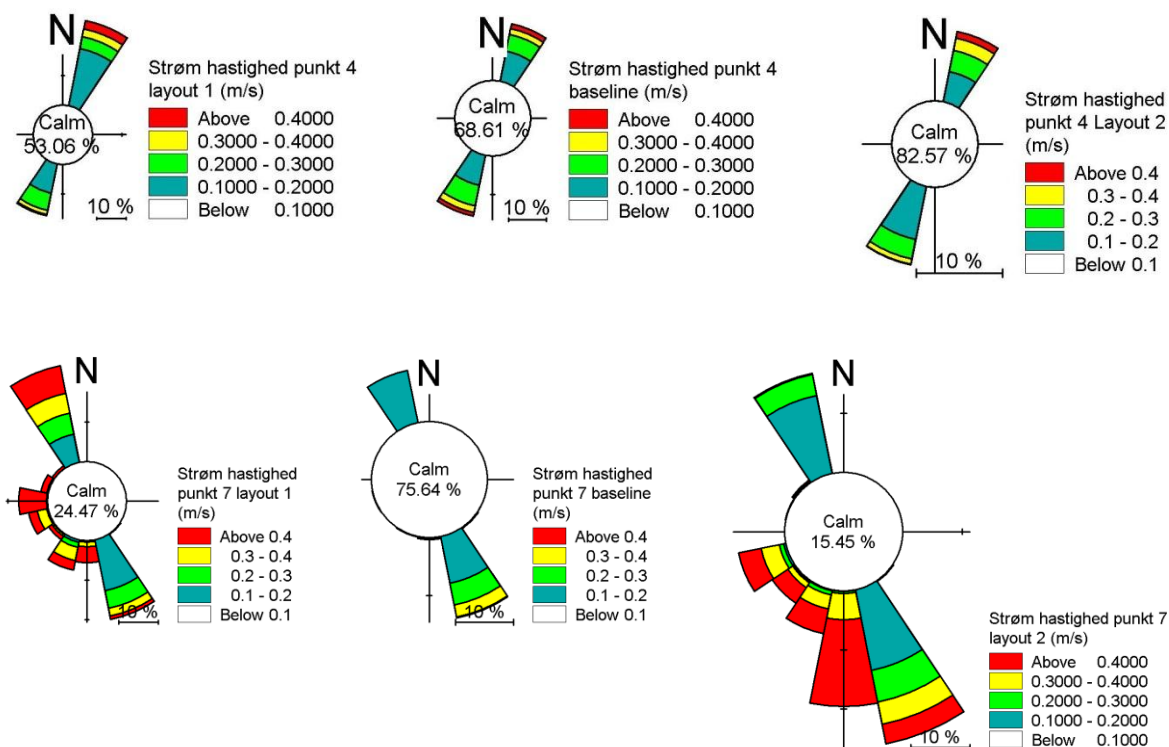
I det følgende sammenlignes situationen med og uden kanal for de to scenarier. Der lægges vægt på at vise, hvorledes strømmen og forskydningsspændingerne ændrer sig i 12 punkter langs kanalen. Disse punkter er vist i Figur 7-1.



Figur 7-1 Oversigt over analysepunkter

7.2 Strøm i kanalen

Strømmen i kanalen og ændringerne i strømmen i kanalen er angivet herunder i Figur 7-1.



Figur 7-1 Strømroser i punkt 4 syd for vandskellet (øverst) og punkt 7 nord for vandskellet (nederst).

Det ses, at der sker ret markante ændringer i strømstyrke og retninger, når kanalen udgraves. I dag er det således, at kanalen delvist udtørres ved lavvande, hvilket betyder, at hastighederne ved lavvande bliver ret begrænsede. Med en udgravet kanal vil der flyde vand i kanalen i hele tidevandscyklen, og man ser derfor væsentligt højere hastigheder generelt. Syd for vandskellet ses det, at strømhastighederne ikke ændres væsentligt. Til gengæld ses store ændringer på den nordlige side. Ændringerne er størst i scenarie 1, hvor der er hul hele vejen igennem fra Galgedyb til Lundvig løb. I punkt syv ses markante stigninger i strømhastighederne, og der noteres også en mindre skæv fordeling af strømroser. Dette underbygges yderligere i strømtabellerne.

De statistiske strømhastigheder i kanalen er vist i Tabel 7-1 og Tabel 7-2.

Tabel 7-1 Maksimale strømhastigheder i kanalen.

	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3	Punkt 4	Punkt 5	Punkt 6
Maksimal strømhastighed baseline (m/s)	0,68	0,63	0,45	0,82	0,70	0,64
Maksimal strømhastighed scenarie 1 (m/s)	0,70	0,73	0,62	0,79	0,89	0,78
Maksimal strømhastighed scenarie 2 (m/s)	0,70	0,68	0,79	0,78	0,82	0,63

	Punkt 7	Punkt 8	Punkt 9	Punkt 10	Punkt 11	Punkt 12
Maksimal strømhastighed baseline (m/s)	0,42	0,48	0,36	0,31	0,37	0,56
Maksimal strømhastighed scenarie 1 (m/s)	0,67	0,68	0,63	0,41	0,37	0,71
Maksimal strømhastighed scenarie 2 (m/s)	0,66	0,79	0,55	0,40	0,38	0,61

Tabel 7-2 Middel strømhastigheder i kanalen.

	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3	Punkt 4	Punkt 5	Punkt 6
Middel strømhastighed baseline (m/s)	0,12	0,14	0,11	0,10	0,14	0,16
Middel strømhastighed scenarie 1 (m/s)	0,13	0,31	0,26	0,14	0,31	0,25
Middel strømhastighed scenarie 2 (m/s)	0,11	0,10	0,16	0,06	0,23	0,20

	Punkt 7	Punkt 8	Punkt 9	Punkt 10	Punkt 11	Punkt 12
Middel strømhastighed baseline (m/s)	0,07	0,16	0,13	0,11	0,13	0,21
Middel strømhastighed scenarie 1 (m/s)	0,27	0,28	0,24	0,20	0,14	0,24
Middel strømhastighed scenarie 2 (m/s)	0,27	0,28	0,23	0,19	0,14	0,25

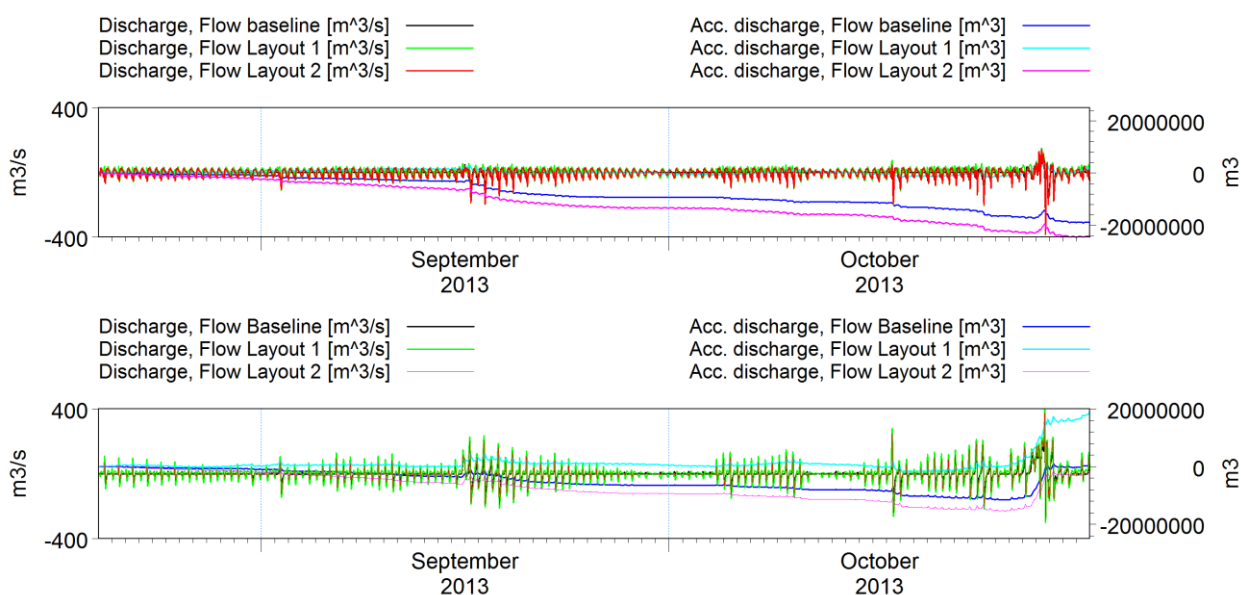
Tabel 7-3 Tid med strøm imod syd i kanalen.

	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3	Punkt 4	Punkt 5	Punkt 6
% Tid med strøm imod syd baseline	68	73	56	63	66	21
% Tid med strøm imod syd Scenarie 1	50	43	33	41	62	58
% Tid med strøm imod syd Scenarie 2	17	26	34	7	53	50

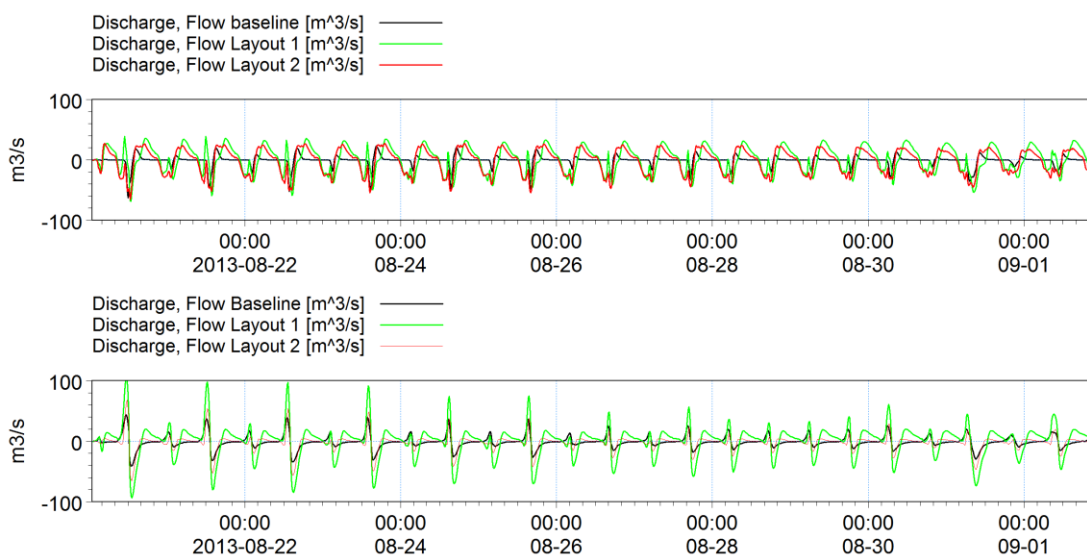
	Punkt 7	Punkt 8	Punkt 9	Punkt 10	Punkt 11	Punkt 12
% Tid med strøm imod syd baseline	38	36	60	64	61	55
% Tid med strøm imod syd Scenarie 1	65	54	59	54	61	56
% Tid med strøm imod syd Scenarie 2	54	73	64	43	14	69

I baseline situationen ses et markant dyk i tiden med strøm imod syd lige ved vandskellet. En tilsvarende opførsel ses ikke i scenarierne, hvilket indikerer, at der i baseline situationen findes et nodepunkt i kanalen, men at dette ikke i samme udstrækning synes at være tilfældet, efter at kanalen er gravet. I det tilfælde ligger et eventuelt nodepunkt udenfor kanalen.

Hvis man ser på vandføringen i kanalen, så tegner der sig et lignende billede. Hvis vi ser på to tværsnit, som er placeret henholdsvis opstrøms og nedstrøms det nuværende vandskel, så er vandgennemstrømningen som vist i Figur 7-2.



Figur 7-2 Vandgennemstrømning nord for eksisterende vandskel (øverst) og syd for eksisterende vandskel (nederst).



Figur 7-3 Vandgennemstrømning nord for eksisterende vandskel (øverst) og syd for eksisterende vandskel (nederst). Zoom

Discharges regnes positiv imod nord, og det ses derfor, at der er et nettoflow imod syd i baseline i begge snit (den akkumulerede discharge er negativ). Med den nye kanal ses det, at der er større variation i flowet, og at der i scenarie 1 ikke længere eksisterer et tydeligt nettoflow. Det ses endvidere, at vandmængderne i begge snit stiger kraftigt med den nye udgravning.

7.3 Forskydningsspændinger i kanalen

Til vurdering af den potentielle sedimenttransport er de forskydningsspændinger beregnet, som svarer til de simulerede strømhastigheder. Den kritiske forskydningsspænding, under hvilken deposition af fint materiale kan ske, ligger normalt i størrelsesordenen $0,07 \text{ N/m}^2$ til $0,1 \text{ N/m}^2$.

Tabel 7-4 % tid hvor deposition kan ske i kanalen (forskydningsspændning under $0,07 \text{ N/m}^2$)

	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3	Punkt 4	Punkt 5	Punkt 6
% Tid med bundforskydningsspændning under $0,07 \text{ N/m}^2$ baseline	44	36	58	60	53	74
% Tid med bundforskydningsspændning under $0,07 \text{ N/m}^2$ scenarie 1	42	4	7	35	6	10
% Tid med bundforskydningsspændning under $0,07 \text{ N/m}^2$ scenarie 2	56	60	61	83	19	24

	Punkt 7	Punkt 8	Punkt 9	Punkt 10	Punkt 11	Punkt 12
% Tid med bundforskydningsspændning under $0,07 \text{ N/m}^2$ baseline	58	17	20	36	27	13
% Tid med bundforskydningsspændning under $0,07 \text{ N/m}^2$ scenarie 1	19	10	11	14	26	9
% Tid med bundforskydningsspændning under $0,07 \text{ N/m}^2$ scenarie 2	16	9	13	17	35	11

For scenarie 1 ses det, at de tidsintervaller, hvor deposition af finkornet materiale kan forekomme, falder i alle dele af kanalen, om end forskellene er små i de ydre dele. I de centrale dele af kanalen (punkt 2 – 10) er faldet så markant, at der sandsynligvis ikke vil ske længerevarende deposition af finkornet materiale i større mængder, efter at kanalen er anlagt. Det betyder ikke, at der ikke kan ske en tilsiltning, men det betyder, at det er usandsynligt, at det sker på det korte sigt. I dag er der sand på bunden af kanalerne, hvilket indikerer, at forholdene allerede i dag ikke tillader deposition af fint materiale. Dette understøtter yderligere tesen om, at kanalen sandsynligvis ikke vil silte permanent op med finkornet materiale. Bundens nuværende sedimentsammensætning og de stigende strømhastigheder indikerer derimod, at der vil ske en stigning i transporten af sand i kanalerne. For scenarie 2 ses det, at der vil være et område omkring punkt 4, hvor der vil være mulighed for deposition af fint materiale i perioder. Det må dog forventes, at dette vil blive vasket ud igen i de korte perioder, hvor strømmen stiger igen.

Sand begynder at bevæge sig, når den såkaldte Shields parameter bliver overskredet. Det vil sige, når de drivende kræfter på et sandkorn overskrider de stabiliserende. For nemheds skyld har vi, lidt konservativt, sat dette tal til $0,3 \text{ N/m}^2$. Overskridelsestiden for denne værdi er givet i Tabel 7-5.

Tabel 7-5 % tid hvor sand kan flytte sig i kanalen.

	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3	Punkt 4	Punkt 5	Punkt 6
% time with shear stress above $0,3$ baseline	26	36	23	22	35	15
% time with shear stress above $0,3$ scenarie 1	36	89	84	25	81	74
% time with shear stress above $0,3$ scenarie 2	17	26	34	7	53	50

	Punkt 7	Punkt 8	Punkt 9	Punkt 10	Punkt 11	Punkt 12
% time with shear stress above $0,3$ baseline	12	59	35	13	24	67
% time with shear stress above $0,3$ scenarie 1	64	69	73	62	30	74
% time with shear stress above $0,3$ scenarie 2	54	73	64	43	14	69

Det ses, at de tidsrum, hvor sandtransport kan forekomme, stiger i alle punkter nord for vandskellet i begge scenarier. Og da bunden i dette område allerede i dag består af sand, må det konkluderes, at sandtransporten også stiger. Syd for vandskellet stiger tidsrummet for scenarie 1, imens det varierer noget for scenarie 2. Især ved punkt 1 og punkt 4 ses et dyk. Der

er ikke identificeret et nyt nodepunkt, så der er ikke umiddelbart nogen global tendens til, at vandskellet vil genskabes. Men de maksimale hastigheder og middel hastighederne varierer hen igennem kanalen, og derfor må sedimenttransport også gøre det. De områder, som har de lavest hastigheder, vil også have de laveste transportrater, og sandet vil derfor have en tendens til at samle sig der. I dette tilfælde er det punkt 4 og punkt 5, som har de lavest maksimale strømhastigheder og den korteste tid, hvor sandet kan bevæge sig. Da disse to punkter begge ligger lige der, hvor vandskellet ligger i dag, må man altså forvente, at naturen vil forsøge at genetablere det eksisterende vandskel.

Man kan yderligere underbygge denne tese ved at beregne bundtransporten af sand i kanalen. Dette kan gøres ved at benytte en af de klassiske bundtransportformler som f.eks. Meyer-Peter Müller formelen. Transporten er angivet som flux i m^3 sand pr. meters bredde af renden.

Tabel 7-6 Sedimenttransport i kanalen. Transport positiv imod nord.

	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3	Punkt 4	Punkt 5	Punkt 6
Transportscenarie 1 ($m^3/m/år$)	31	43	152	11	-70	2
Transportscenarie 2 ($m^3/m/år$)	24	-21	-61	13	-101	-36

	Punkt 7	Punkt 8	Punkt 9	Punkt 10	Punkt 11	Punkt 12
Transportscenarie 1 ($m^3/m/år$)	-127	162	-11	20	14	3
Transportscenarie 2 ($m^3/m/år$)	-189	-92	-61	-14	15	-27

For scenarie 1 ses det, at nettotransporten i punkt 1 – 4 er rettet ind imod vandskellet, altså nord, hvorimod transporten i punkterne 5 og 7 er rettet imod syd. Derudover er der et transportminimum i punkt 4. Der vil altså ske en ophobning af sand, som starter omkring punkt 4. Der er endvidere et kraftigt transportminimum ved punkt 6, hvorfor der også vil ske en ophobning her. Så alt i alt kan det konstateres, at der vil ske en ophobning af sand i området langs det eksisterende vandskel. For scenarie 2 ses et mere uklart billede, men transporterne imellem punkt 4 og punkt 5 konvergerer, og transporterne i punkt 5 – 7 er rettet ind imod vandskellet, hvilket viser, at der vil ske en ophobning der. Det er ikke umiddelbart muligt at beregne den tilsvarende bundændring uden at opsætte en egentlig model, idet dette afhænger af hvor meget sediment, som er til rådighed, kornstørrelsesfordeling og hvor meget der tilføres fra vaderne. Men hvis man foretager den rimelige antagelse, at sedimenttransporten ikke er begrænset af mængden af sand i kanalen, at sandet har samme diameter (0,1mm), og hydrodynamikken ikke påvirkes af bundændringerne, så kan et simpelt, men noget konservativt estimat, gennemføres. Resultatet af dette er vist i Tabel 7-7.

Tabel 7-7 Oversigt over erosion/deposition i m pr. år.

	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3	Punkt 4	Punkt 5	Punkt 6
Erosion/deposition/år scenarie 1 (m)	-	-0.20	0.05	0.37	0.01	0.09
Erosion/deposition/år scenarie 2 (m)	-	0.14	-0.06	0.07	0.08	0.15

	Punkt 7	Punkt 8	Punkt 9	Punkt 10	Punkt 11	Punkt 12
Erosion/deposition/år scenarie 1 (m)	-0.27	-0.22	-0.03	-0.02	-	0.29
Erosion/deposition/år scenarie 2 (m)	0.09	-0.27	-0.02	-0.03	-	-0.05

Heraf ses det, at kanalen generelt vil være ude af balance med store udsving imellem erosion og deposition i starten. Det kan konstateres, at der vil være generel deposition i punkterne 4, 5, og 6 langs vandskellet. I praksis vil der ske det, at kanalen ret hurtigt vil justere dybderne til

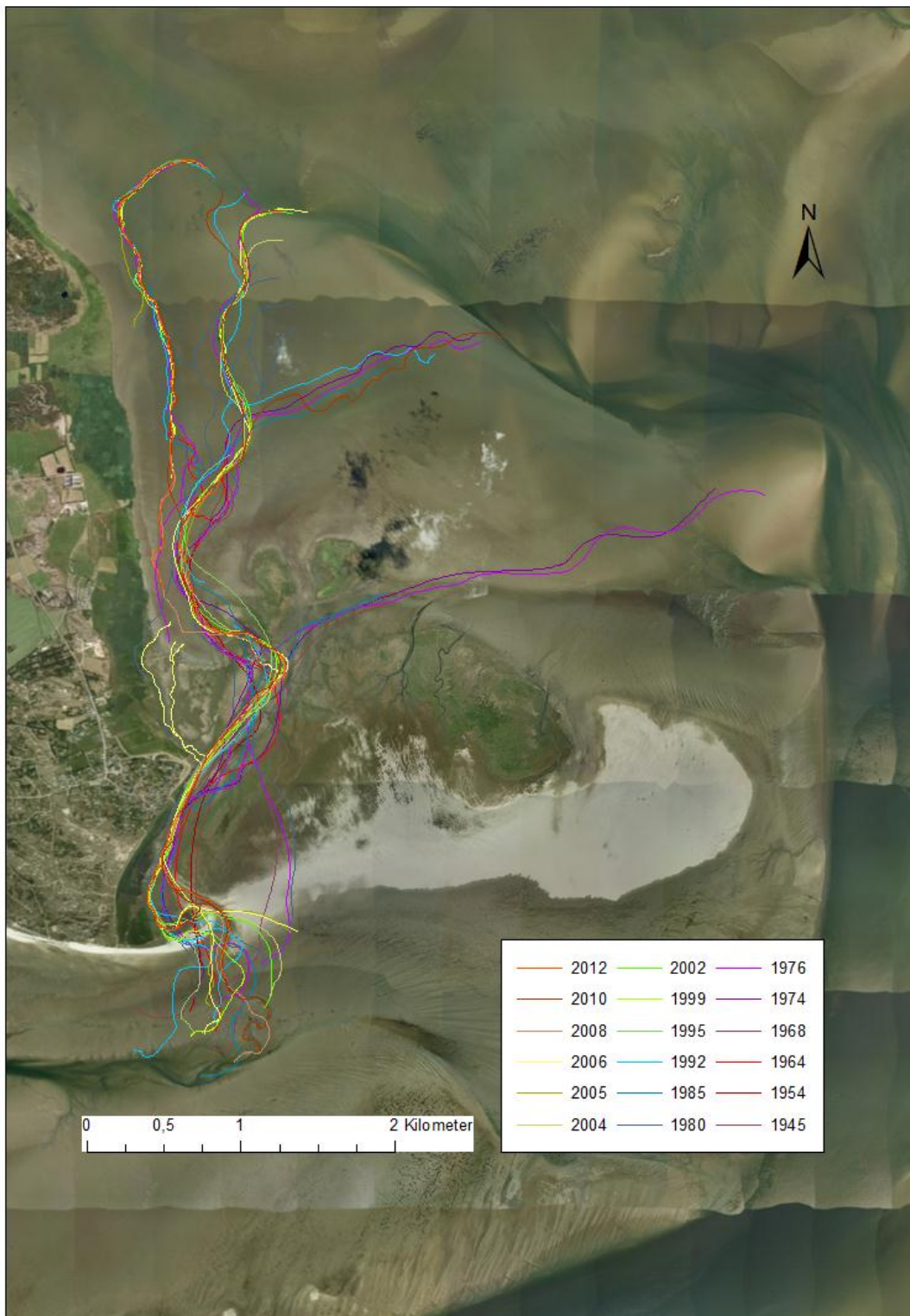
vanddybderne, således at man vil se væsentligt mindre udsving. Som nævnt er resultatet konservativt, idet sedimenttransporten må forventes at aftage, efterhånden som vanddybderne nærmer sig en ligevægtssituation. Så i realiteten må vanddybdeændringerne forventes at blive noget mindre efter det første år. Men slutresultatet bliver, at der vil ske en ophobning af sand langs vandskellet.

7.4 Tidevandskanalens laterale dynamik

Dybkjær (2014) har undersøgt de primære tidevandskanalers laterale dynamik i området omkring den nuværende Slagters Lo i perioden 1945-2012 på baggrund af en analyse af tilgængelige ortofoto for området. I den centrale del af undersøgelsesområdet omkring Sønderho og det nuværende vandskel har Slagters Lo i perioden 1945-2012 bevæget sig lateralt indenfor et spektrum i størrelsesordenen 300-400m (Figur 7-4). Først siden 2006 har den nordlige del af Slagters Lo haft det vestlige forløb parallelt med Fanøs østkyst, som den også har i dag, hvorimod forløbet tidligere primært har været umiddelbart øst for det nuværende forløb (Figur 7-4). Det nuværende vestlige forløb af den nordlige del af Slagters Lo har bevæget sig indenfor et lateralt spektrum i størrelsesordenen 30m i perioden 2006-2012 (Figur 7-4). Den gennemsnitlige laterale forlægningsrate af det nuværende forløb af Slagters Lo fra Sønderho i syd til udløbet i Lundvig Løb i nord er ~6 m/år for perioden 2006-2012 (efter Dybkjær, 2014).

Set i et historisk perspektiv kan det derfor ikke forventes, at en ny kanal vil have et fast forløb og en fast beliggenhed. Hvis ønsket er at opretholde en kanal med et fast forløb, en fast beliggenhed, en bestemt dybde og et bestemt tværsnit, må det påregnes, at der i perioder skal oprensnes betydelige mængder. En alternativ oprensningsstrategi kunne være at tillade kanalforlægning og blot oprense mht. dybde og tværsnit.

Med den nuværende bevægelse af krumodden ved Galgedyb forventes et eventuelt gennembrud under storm ikke at være af permanent karakter.



Figur 7-4 Beliggenheden af de primære tidevandskanaler i området omkring den nuværende Slagters Lo i perioden 1945-2012, baseret på analyse af ortofoto (Dybkjær, 2014).

7.5 Tidsskala

Ser vi på den udgravede kanal og dennes respons på den nye hydrodynamik, så ses det, at det giver anledning til relativt store transportrater og derfor også relativt store erosions- og depositions-rater. Da der er sand i bunden af kanalen, må man forvente, at der er tilstrækkeligt sediment til rådighed til, at kanalen vil forsøge at genoprette en ligevægtskondition. På grund af de relativt store transportrater må det forventes, at det, i starten, vil gå forholdsvist hurtigt. Man vil i starten også se et relativt kaotisk mønster, som over tid vil stabilisere sig i et mere glat mønster, efterhånden som de morfologiske ændringer nærmer sig en ligevægt. I Tabel 7-7 er angivet nogle erosions- og depositions-rater pr. år. Disse er formentligt konservative, idet de forudsætter konstant hydrodynamik over hele året. Men selv med dette i betragtning må der forventes et betydeligt respons i de første 1 – 2 år.

7.6 Oprensningsbehov

Oprensningsbehovet vil altid være en lokal vurdering fra år til år og i et system med så dynamisk en karakter som dette, vil de efterfølgende beregninger derfor være behæftet med en betydelig usikkerhed.

På grundlag af de naturlige variationer i kanalen samt transportforholdene i den udgravede kanal må der påregnes et lokalt oprensningsbehov hvert år. Hvis man benytter tværsnittet angivet i den tekniske projektbeskrivelse fra juli 2012 samt værdierne i Tabel 7-7, så kan man udregne de maksimale oprensningsrater, som er scenarie 1: 5762 m³ og scenarie 2: 2916 m³. Disse er angivet i Tabel 7-8. For det aktuelle projekt, som fremgår af projektbeskrivelsen, er det scenarie 2, der er relevant. Resultatet er, at der i det første år kan forventes en lokal sedimentation på i alt 3000 m³ i Slagters Lo. Det skal bemærkes, at der generelt er en stor usikkerhed på denne type beregninger, og at de virkelige værdier godt kan vise sig at afvige noget. Tendensen regnes dog sikker.

Tabel 7-8 Oversigt over oprensningsbehov i m³ pr. år efter at overdybden er opbrugt. De to scenarier er defineret på side 7.

	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3	Punkt 4	Punkt 5	Punkt 6
Gennemsnitlig nødvendig oprensning /år Scenarie 1 (m ³)	0	0	0	2786	109	708
Gennemsnitlig nødvendig oprensning /år Scenarie 2 (m ³)	0	0	0	503	617	1099

	Point 7	Point 8	Point 9	Point 10	Point 11	Point 12
Gennemsnitlig nødvendig oprensning /år (m ³)	0	2159	0	0	0	0
Gennemsnitlig nødvendig oprensning /år Scenarie 2 (m ³)	695	0	0	0	0	0

Da der generelt er udgravet 1m dybere end minimums sejldybden, kan man af Tabel 7-6 og Tabel 7-7 konkludere, at der i begge scenarier sker jævnlig oprensning efter de første 3 – 7 år. Hvis man medtager, at der er gravet 1m dybere end navigationsmæssigt nødvendigt, betyder dette, at frekvensen efter 3 -7 år vil stige til mere hyppige oprensninger. Som tidligere angivet, forventes sedimenttransporten at aftage, efterhånden som bundændringerne bevæger systemet tættere på ligevægt, og derfor kan de nødvendige oprensningsintervaller vise sig at blive længere end angivet. Hvis man laver den tilsvarende analyse på de historisk kendte opsiltninger som nævnt tidligere (6 cm/år), så får man en årlig oprensningsmængde på ca. 5000 m³ eller 418 m³ pr sektor.

7.7 Opgravet materiale

Pt. tænkes materialet opgravet og placeret på kanten af kanalen. Når vandet stiger, vil vandet starte med at løbe i kanalen, men på et tidspunkt vil det spilde over kanten og løbe henover det opgravede materiale og ud på vaden. Når det sker, vil sedimentet i første omgang spredes ud på vaden, men når vandet vender, vil det skulle henover det nu løse og udglattede opgravede sediment for at komme ned i kanalen. Her kan det forventes, at i hvert fald en del af det opgravede sediment vil blive trukket ned i kanalen igen, hvilket ikke er hensigtsmæssigt. Da der er tale om sand, som ikke vandrer langt i suspension, vil det være mere hensigtsmæssigt at placere det længere væk, hvor det ikke umiddelbart kan vandre ned i kanalen igen. Det vurderes, at 100 m eller mere vil være nok til at minimere transporten ned i kanalen.

7.8 Effekt af storme

I Danmark kommer de største storme fra vestlige retninger. Området ved Sønderho er afskærmet imod storme fra disse retninger, hvorfor man ikke vil se en større tilvækst i bølger. Men vandstanden kan stige markant. Det forventes imidlertid ikke at føre til voldsomme ændringer i kanalerne, idet der vil være tale om en relativt kortvarig påvirkning sammenlignet med de daglige tidevandsbevægelser.

Storme fra nord og fra syd forventes ligeledes heller ikke at kunne føre til markante ændringer, idet området også er beskyttet fra disse retninger.

Storme fra øst vil potentielt føre til bølger i området ved Slagters Lo. Men østlige storme vil også have en tendens til at føre til en sænket vandstand, hvilket vil blotlægge marsken og dermed afskærme kanalområdet.

Alle stormsituationer vil føre til en forøget baggrundsturbiditet i området. Men indeværende studie har vist, at dette ikke kan føre til blivende deposition i kanalen, hvorfor dette ikke har nogen betydning for kanalens depositionsforhold.

Vestlige og sydvestlige forhold vil influere forholdene ved Hønen, hvor Krumoddens lokalitet og området omkring Krumodden kan ændre sig markant under en storm. Men da kanalen føres nordpå, er dette ikke et problem. Pga krumoddens historiske bevægelser forventes et evt. gennembrud her ikke at blive af permanent karakter.

7.9 Effekt af klima

Klimaforandringerne i Sønderho ses primært i form af et stigende vandspejl. I øjeblikket hæves vaderne naturligt i samme hastighed som vandspejlsstigningen, hvorfor klimaeffekten pt. ikke er et problem. Vandsspejlsstigningerne forventes imidlertid at accelerere over de næste 100 år, hvor der på sigt kan komme væsentlige effekter. Disse effekter vil dog formentligt være effekter, som man også vil se på andre løb i området.

Tilsvarende forventes en højere stormfrekvens og mere nedbør. Effekten af storme er diskuteret i forrige kapitel, og denne vil ikke direkte påvirke området ved Slagters Lo. Men de ændrede vindmønstre kan måske ændre på marskdannelsen, hvilket kan få en betydning for kanalen. Overordnet vurderes det, at klimaændringer ikke bliver et problem de første 20 år, men at der på langt sigt kan komme en effekt.

8 REFERENCER

Lumborg, Ulrik. Madsen, Mads. Vurdering af rentabilitet for genåbning af Sønderho Havn. Sedimentologisk modellering og vurdering. DHI Rapport til foreningen Sønderho Havn, 2010.

Dybkær, Anne, Ulriksen. Undersøgelse af den laterale bevægelse for tidevandskanalen Slagters Lo i årene 1945 til 2012. Bachelor Projekt KU, 2014. Vejleder Verner Ernstsen.

Teknisk projektbeskrivelse: Oprensning af tilsandet rende ved Sønderho. Notat Sønderho støtteforening, juli 2012.

Reetablering af Sønderho havn. Udførelsesmuligheder og anlægsoverslag. COWI rapport for Fanø kommune, 2010.