Til Sund & Bælt

Dokumenttype Baggrundsrapport

Dato Januar 2022

# FORUNDERSØGELSER FOR KATTEGATFORBINDELSEN HYDROGRAFISK MODEL-LERING



RAMBOLL Bright ideas. Sustainable change.

# FORUNDERSØGELSER FOR KATTEGATFORBINDELSEN HYDROGRAFISK MODELLERING

ProjektnavnForundersøgelser for KattegatforbindelsenProjektnr.1100041633ModtagerSund & BæltDokumenttypeBaggrundsrapportVersion6Dato25-01-2022Udarbejdet afHSN, DMONT, PEFKontrolleret afMIBRGodkendt afMIBR

Rambøll Hannemanns Allé 53 DK-2300 København S

T +45 5161 1000 F +45 5161 1001 https://dk.ramboll.com

Rambøll Danmark A/S CVR NR. 35128417

# INDHOLD

1.	Indledning	2
2.	Baggrund	3
2.1	Datakilder	3
2.2	Dybdedata	3
2.3	Vandstand	3
2.4	Vind	4
2.5	Geologiske grundlag	4
2.6	Anlægstekniske forundersøgelser	5
2.7	Blokering af vandføring	5
2.8	Spildprocenter	6
2.9	Sedimenttyper	7
3.	Modelopsætning	8
3.1	Hydrodynamisk model	8
3.1.1	Modelvalidering	8
3.2	Bathymetri	10
3.3	Model til bestemmelse af blokering	12
3.3.1	Modelrepræsentation af bro	14
3.3.2	Modelrepræsentation af tunnel	14
3.3.3	Modelrepræsentation af kunstige øer	15
3.4	Sedimentspredningsmodel	16
3.4.1	Beregningsperiode for sedimentspredningsmodel	16
4.	Bestemmelse af blokering	17
4.1	Scenarier	17
4.2	Saltflux	18
4.3	Resultater	19
5.	Sedimentspredning	23
5.1	Scenarier	23
5.2	Resultater	23
5.2.1	KKV - 1.2 - Sænketunnel/Lavbro	24
5.2.2	KKV - 2.1 - Højbro/Lavbro	27
5.2.3	KKV - 2.3 - Højbro/Lavbro	30
5.2.4	KKV - 3.1 - Højbro/Lavbro	33
5.2.5	KKV - 3.2 - Højbro/Lavbro	36
5.2.6	KKV - 3.4 - Højbro/Lavbro	39
5.2.7	KKØ - 2.1 – Hængebro	42
5.2.8	KKØ - 2.1 – Sænketunnel	45
5.2.9	KKØ - 2.1 – Sænketunnel; Miljøoptimeret	48
5.2.10	KKØ - 2.6 – Sænketunnel	51
5.2.11	KKØ - 3.3 - Sænketunnel/Lavbro	54
5.2.12	KKØ - 4.3 - Sænketunnel/Lavbro	57
6.	Referencer	60

# **1. INDLEDNING**

Nærværende notat er et baggrundsnotat, der beskriver den modellering, der er gennemført til bestemmelse af blokering af vandgennemstrømningen i driftsfasen samt sedimentspredning ved mulig etablering af en Kattegatforbindelse. Modelleringen er gennemført for det skitsedesign, der er udarbejdet som en del af de anlægstekniske forundersøgelser. Informationer, der grundlag for modelleringen, er formidlet i et anlægsteknisk notat /3/.

Der er i nærværende notat præsenteret resultater for de gennemførte modelleringer af såvel blokering som sedimentspredning for udvalgte scenarier.

# 2. BAGGRUND

## 2.1 Datakilder

Som grundlag for gennemførelse af forundersøgelserne er der indhentet information og data fra flere forskellige kilder (Tabel 2-1). Datakilderne er beskrevet i afsnittene herunder.

#### Tabel 2-1: Oversigt over datakilder.

Туре	Beskrivelse	Kilde
Dybdedata	Interpoleret dybdeinformation i 50x50 m opløsning	Geodatastyrelsen
Kystlinje	Kystlinje i målestoksforholdet 1:1.000.000	Kortforsyningen
Vandstand	Målt vandstand hvert 10. minut i perioden 2008-2020	DMI
Vind	Storskala vindinformation i perioden dec. 2010 og for perioden aprsep. 2014	NOAA
Havbundsgeologi	Regional geologisk tolkningsmodel	GEUS
Anlægsudformning	Geometrisk beskrivelse af bro- og tunnelelementer	COWI
Sediment	Rumlig fordeling af overfladesedimenter	GEUS
Strømdata	Modelresultater af strømforhold produceret af DHI	DHI

## 2.2 Dybdedata

Bathymetrien i projektområdet er dannet på baggrund af dybdedata fra Geodatastyrelsen /8/. Dybdedataen har en opløsning på 50 x 50 m og blev modtaget i rasterformat for to områder: Kattegat Nord og Kattegat Syd. Bathymetrien benyttes som input til den hydrodynamiske modellering af projektområdet. Modellen kræver dybdedata i xyz-format. Dybdedataen blev omdannet fra rastertil xyz-format ved hjælp af nedenstående funktioner:

- ArcMap: Arc Toolbox Conversion Tools From Raster to Point
- MIKE Zero: New File MIKE Zero Toolbox GIS Shp2Xyz

Danmarks kystlinje udgør projektområdets afgrænsning til land. Kystlinjen er indhentet fra Kortforsyningen i målestoksforholdet 1:1.000.000 /9/.

#### 2.3 Vandstand

Projektområdet er afgrænset mod nord imellem Grenå og Hornbæk, mod sydvest i Lillebælt ved Assens og mod sydøst i Storebælt ved Slipshavn. Målte vandstandsdata er indhentet fra DMI's hjemmeside. Data er indhentet for Assens, Grenå, Hornbæk og Slipshavn (randdata), samt Ballen, Kalundborg og Korsør (kalibreringsdata) for perioden 2008 til 2020 (Figur 2-1). Eftersom vandstanden er baseret på målte data, forekommer der udfald og anomalier i målingerne. De benyttede datasæt er manuelt gennemgået og renset for anomalier.



Figur 2-1: Havne i projektområdet, hvor vandstandsdata er indhentet.

## 2.4 Vind

Vindhastigheder og retninger er indhentet i storskala fra NOAA for perioden 01-12-2010 til 31-12-2010 og for perioden 01-04-2014 til 30-09-2014 /11/. Der anvendes et konstant lufttryk i modellen på 1013 hPa.

#### 2.5 Geologiske grundlag

GEUS har udarbejdet en geologisk model for de overfladenære lag i forbindelse med forundersøgelser af en fast kattegatforbindelse /19/.

GEUS' tolkning viser, at den geologiske udvikling i projektområdet i store træk er sammenlignelig med den geologiske udvikling i området omkring storebæltsforbindelsen. Det er altså de samme overfladenære geologiske enheder, der er til stede i dette område.

Som en del af resultatet har GEUS udtrukket data for de tolkede horisonter langs udvalgte korridorer, indeholdende tykkelse og type af de øverste geologiske lag, der er genstand for afgravning ved anlæg af en forbindelse. GEUS har for disse geologiske enheder, leveret en beskrivelse af de fysiske egenskaber, herunder specielt kornstørrelsesfordeling, der er bestemmende for afgravet sediments faldhastighed og dermed vigtig for spredning af sediment.

Et eksempel på topglaciale aflejringer fra GEUS' rapport ses på Figur 2-2. For fuld beskrivelse af geologien henvises til /19/.



Figur 2-2. Oversigt der viser "top glacialflade" aflejringer /19/.

#### 2.6 Anlægstekniske forundersøgelser

Der er gennemført anlægstekniske forundersøgelser. Dette arbejde er udført af Cowi, som har udarbejdet en række konceptuelle projektforslag for anlæg og anlægsteknik. Det nødvendige anlægstekniske grundlag for Rambølls miljøvurderinger er formidlet i /3/ med tilhørende bilag.

#### 2.7 Blokering af vandføring

Det forventes, at bro- og tunnelløsningerne vil skabe en blokerende effekt for vandføringen igennem projektområdet. Blokeringen beregnes som den procentvise forskel i vandføring på tværs af linjeføringen for en referencesituation og for de forskellige scenarier, når bro- og tunnelløsninger er implementeret. Forskellen beregnes ved at lave lineær regression imellem reference- og scenarievandføringen. Hvis regresionskoefficientens værdi er under værdien 1, betyder det, at der forekommer en blokering af vandføringen i forhold til referencesituationen. Den aktuelle blokering beregnes ved at trække værdien 1 fra den beregnende regresionskoefficient (ændring med fortegn svarende til at negative værdier svarer til blokering). Samme metode benyttes til at beregne blokering af vandføring i forbindelse med forundersøgelserne til Femern Bælt forbindelsen (/7/, s. 65). Konceptet er illustreret herunder (Figur 2-3).



Figur 2-3: Eksempel på beregning af blokering af vandføring (/6/).

I eksemplet herover vil blokeringen være regresionskoefficientens værdi (0,9589) minus værdien '1' svarende til referencesituationen, dvs. 0,9589 - 1,0000 = -0,0411 = -4,1%.

Det er vigtigt, at de to tidsserier af vandføring for situationen hhv. uden og med en blokering er fundet i det tværsnit, hvor blokeringen findes. Det skyldes, at metoden baserer sig på en svækkelse af vandføringen. Hvis tidsserierne er fundet i tværsnit, det ligger langt fra bro-/tunnellinjen, kan det medføre en tidslig forskydning af signalet, som kan overestimere blokeringens størrelse. Det er derfor uhensigtsmæssigt at anvende denne metode til bestemmelse af blokeringen i tværsnit langt væk fra bro-/tunnellinjen som for eksempel i tværsnit ved Storebælt eller Lillebælt.

#### 2.8 Spildprocenter

Spildprocenter er fastsat til hhv. 3,5% for afgravning /3/ og 5% for indfyldning i rev /6/. Ved øerne vil der ikke være noget spild, da de er omgivet af en tæt perimeter, /6/. Disse tal er i bred forstand baseret på forudsætninger og forventede krav til anlægsaktiviteterne i forbindelse med Femern Bælt projektet, da det må forventes, at anlæggelse af en Kattegatforbindelse vil blive mødt med sammenlignelige restriktioner for sedimentspild og spildprocenter. Realisering af disse spildprocenter skal sikres gennem valg af gravemetode og kontrahering herunder restriktioner på arbejdets udførelse i forhold til fx hydrografi (gravning stoppes under specifikke forhold), produktionsrate (afgravningen begrænses til en specifik mængde pr. døgn) eller lignende.

Hvis lokale forhold medfører, at sedimentspildets miljøpåvirkning når et uacceptabelt niveau, vil det være muligt at implementere foranstaltninger til reduktion af spildet eller direkte dokumentation af spildet ved monitering. Disse foranstaltninger kan omfatte, men er ikke begrænset til, nedenstående liste:

- Valg af udstyr, fx miljøgrab for at reducere spild i graveprocessen.
- Anvendelse af delfyldte pramme for at begrænse spild i overløb.
- Anvendelse af siltgardiner for at begrænse spredning i miljøet.
- Sæsonmæssig begrænsning til graveaktivitet for at skåne receptorer i sårbare tidsrum.
- Monitering for direkte bestemmelse af spild evt. med feedback rutiner til justering af anlægsaktiviteten.

Der er gennemført modellering for et "miljøoptimeret" scenarie af KKØ-2.1, hvor spildprocenten er reduceret fra 3,5% til 2,0% under antagelse af passende, men ikke nærmere specificerede spildbegrænsende tiltag jf. ovenstående. Desuden er linjeføringen i dette scenarie rykket 400 m mod til korridorens nordlige afgrænsning, for at opnå større afstand til et beskyttet stenrev.

#### 2.9 Sedimenttyper

Der gennemføres modellering af spredningen af de fine sedimentfraktioner, hvorimod grove sedimentfraktioner som groft sand og grus vil sedimentere i umiddelbar nærhed af anlægsaktiviteterne, og derfor ikke medtages. Der inkluderes tre sedimentfraktioner i modellen: Fint sand, silt og ler. Hver af disse sedimentfraktioner defineres på baggrund af deres faldhastighed og kritiske bundforskydningsspænding. Den kritiske bundforskydningsspænding er et udtryk for, hvor meget energi det kræver for partiklerne at blive frigivet fra bunden. Værdierne for bundforskydningsspændingen er vurderet på baggrund af tidligere erfaring fra lignende projekter.

Fint sand og silt defineres som individuelle partikler og har en faldhastighed bestemt ud fra partiklernes størrelse igennem Stoke's Lov /17/. Faldhastigheden for silt vurderes i dette projekt til at være 0,3 mm/s, mens faldhastigheden for fint sand vurderes til at være 7,0 mm/s.

Lerpartikler har kohæsive egenskaber og forventes at flokkulere, hvorved flere partikler koagulerer og danner større partikler (såkaldte "flokke"). Sådanne partikel har en lavere densitet end ikkekohæsive partikler med den samme diameter, hvilket kan komplicere forudsigelserne af partikeldynamikken og bestemmelsen af faldhastigheden. Danske feltundersøgelser i områder med finkornet sediment, bl.a. i Horsens Fjord, har vist faldhastigheder for flokke ned til 0,02 mm/s /15/. Denne værdi anses for at være konservativ, da værdien er blandt de laveste observerede faldhastigheder, og anvendes derfor som faldhastighed for partikler i ler-fraktionen i modellen (Tabel 2-2).

Kohesiv materiale som ler og silt kan resuspenderes, når en kritiske bundforskydningsspænding overskrides, der blandt andet baserer sig på, hvor fast partiklerne er lejret på bunden (konsolideringsgrad). Den kan bl.a. beregnes ud fra bulk densiteten efter nedenstående /18/.

$$\tau_c = 0.015(pb - 1000)^{0.73}$$
.

Der antages en bulkedensitet på respektiv 1200 kg/m<sup>3</sup> for ler og 1500 kg/m<sup>3</sup> for silt, og beregnede værdier ses i Tabel 2-2. Det antages, at der kan ske resuspension over hele modelområdet. Dette er konservativt, da resuspension vil være fraværende eller stærkt reduceret i områder med vegetation.

Sedimenttype	Typisk kornstørrelse (mm) (/16/)	Faldhastighed (mm/s)	Kritisk bundforskydningsspænding (N/m²)
Fint sand	0,06 - 0,2	7,0	-
Silt	0,002 - 0,06	0,3	1,4
Ler	<0,002	0,02	0,7

 Tabel 2-2: Karakterisering af de partikeltyper der implementeres i modellen.

# 3. MODELOPSÆTNING

#### 3.1 Hydrodynamisk model

Projektområdets hydrodynamik modelleres i MIKE 3 FM. Modellen er opløst i vertikale lag af 2,5 m. Strømmen drives af vandstandsdata langs de åbne rande og vind på vandoverfladen. Vandstandsdata indsættes i tidsserieformat langs tre rande i nord, sydvest og sydøst (afsnit 2.3). Vandstanden for den nordlige rand er interpoleret imellem Grenå og Hornbæk. Bundruheden i marine områder er erfaringsmæssigt i størrelsesordenen 0,05 m. Vind er inkluderet over hele området (afsnit 2.4).

#### 3.1.1 Modelvalidering

Modellens resultater valideres imod tilgængelige data. Der er således foretaget validering mod målte vandstandsdata fra Ballen Havn på Samsø og Kalundborg Havn. Da der ikke findes målte strømdata at validere modellens resultater imod, anvendes strømtidsserier hhv. øst og vest for Samsø fra tidligere modelresultater produceret af DHI /10/.

Resultaterne sammenlignes vest og øst for Samsø i koordinaterne 593000E, 6185000N (Kolby) og 612000E, 6175000N (Rute T) (Figur 3-3). Som eksempel vises valideringen imod modeldata øst for Samsø i Storebælt. Resultaterne viser, at modelresultaterne for strømhastighed følger den samme variation, men at værdierne er underestimerede ved høje strømhastigheder, sammenlignet med modelresultaterne fra DHI. Strømretningen stemmer godt overens med en primær strømretning mod nord og mod syd, som forventet (Figur 3-1). Det skal påpeges, at valideringen - i mangel af målte data - er foretaget mod modellerede data, der ikke nødvendigvis repræsenterer de faktisk forhold. Flerårige tidsserier af modelleret strøm viser nemlig en nettoindstrømning til Østersøen, hvilket ikke er i overensstemmelse med, at der forekommer en nettoudstrømning fra Baltikum pga. ferskvandsafstrømning. På den baggrund vurderes resultaterne at være acceptable på trods af, at værdierne er underestimerede ved høje strømhastigheder i forhold til sammenligningsmodellen.



Figur 3-1: Sammenligning imellem egne modelresultater af strømhastighed og retning, og modelresultater fra DHI (øst for Samsø).

Modelresultaterne sammenlignes også med de målte vandstande fra Ballen Havn og Kalundborg Havn (Figur 2-1). Der ses en god overensstemmelse imellem de målte og modellerede vandstande (Figur 3-2).



Figur 3-2: Sammenligning imellem modelresultater og målt vandstand (se geografisk beliggenhed i Figur 2-1).

#### 3.2 Bathymetri

Projektområdets bathymetri er dannet i et net (mesh) bestående af trekantede beregningselementer med værktøjet Mesh Generator, der er en del af MIKE Zero. Fremgangsmetoden er beskrevet herunder:

- Lav en ny bathymetri: MIKE Zero New File Mesh Generator
- Lav et baggrundskort i GIS: File Add data Add basemap  $\rightarrow$  File Export map (bitmap)
- Georeferér kort: File MIKE Zero toolbox File Converter Geo Referencing Image
- Tilføj baggrundskortet: Options Import graphic layers Image manager
- Tilføj kystlinje: MIKE toolbox GIS Shape2XYZ → Data Import boundary- Land.xyz
- Ret kystlinjen til, hvis der er uoverensstemmelser ift. baggrundskortet 🏃 🄌 💅
- Rens kystlinjens for overskudspunkter: Højreklik kystlinjen 🚣 Redistribute Vertices
- Generer et beregningsnet (mesh): Definer mesh (højreklik)  $\stackrel{>}{>}$  Mesh Generate mesh
- Tjek at der ikke er meget små elementer: Mesh Analyse mesh
- Importer dybdedata: Data Manage Scatter Data... Add
- Interpoler dybdedata: Mesh Interpolate ("Natural Neighbor")

Der genereres således først et beregningsnet (mesh bestående af trekanter), hvorefter de enkelte beregningselementer tildeles en vanddybde ved at interpolere de indhentede dybdedata. Den resulterende bathymetri er illustreret herunder (Figur 3-3).



Figur 3-3: Bathymetri i projektområdet og placering af to valideringspunkter.

Der anvendes en fin opløsning af beregningsnettet indenfor projektområdet, mens elementerne stiger i størrelse ud mod randene for at optimere modellens beregningstid. Områder, der ikke forventes at påvirke projektområdet, udelades, fx Roskilde Fjord. Tæt ved projektets linjeføringer, hvor man ønsker en højere nøjagtighed, har elementerne et areal svarende til en sidelængde på ca. 500 m. Elementernes størrelse øges mod modellens rand til en sidelængde på ca. 1000 m (Figur 3-4). Elementernes størrelse kan forfines lokalt i nettet, hvis bathymetrien har behov for at blive ændret, fx i forbindelse med opfyldning af et dybt område. Dette er tilfældet ved implementering af en tunnel.



Figur 3-4: Model mesh.

#### 3.3 Model til bestemmelse af blokering

Blokering af vandføringen er bestemt vha. den hydrodynamiske model, hvor bro/tunnelløsninger er inkluderet. Vandføringen er bestemt på tværs af linjeføringerne for anlægsscenarierne.

Blokeringen er bestemt på baggrund af en udvalgt beregningsperiode på en uge, hvor hydrodynamikken er repræsentativ. Blokeringen beregnes ved lineær regression imellem vandføringerne for en referencesituation uden bro/tunnel og scenariesituationer med bro/tunnel (afsnit 2.7). Ved bestemmelse af blokeringen med lineær regression, vil resultatet være relativt upåvirket af den valgte tidsperiode. Der opnås dog et mere robust resultat, hvis beregningsperioden indeholder høje vandføringer, da høje vandføringer bestemmer de yderste punkter på regresionskurven (Figur 2-3).

Der er udvalgt en egnet beregningsperiode fra 07-12-2010 00:00 til 14-12-2010 00:00 (Figur 3-5). Der anvendes en opstartsperiode forud for beregningerne fra 04-12-2010 11:00. Scenarieperioden er karakteriseret ved en indledende periode med tidevandsdomineret strøm med skiftevis nord- og sydgående strøm. Denne periode efterfølges af en periode med et meteorologisk signal, der først forårsager en indstrømning til og derefter en udstrømning fra Østersøen.



Figur 3-5: Tidsserie af strømhastighed i Rute-T øst for Samsø (se Figur 3 1) for en opstartsperiode og for den egentlige scenarieperiode, hvor blokeringen bestemmes. Data er modellerede data indkøbt hos DHI.

Fordelingen af strømhastigheder for scenarieperioden er sammenlignelig med strømhastighederne for en referenceperiode på ti år (Figur 3-6). Specielt ses det, at der inden for den korte scenarieperiode forekommer strømhastigheder på mere end 0,5 m/s i både nordgående og sydgående retning, ligesom i referenceperioden.



Figur 3-6: Fordeling af strømhastigheder for scenarieperioden og en referenceperiode på ti år.

#### 3.3.1 Modelrepræsentation af bro

Bropiller, der etableres som en del af en bro, vil medføre en forøget strømningsmodstand. Bropillerne repræsenteres i modellen som strukturer ("Piers"). Piers defineres som bokse eller cylindre der stables ovenpå hinanden (Figur 3-7). Strukturerne defineres ud fra information omkring:

- Geografisk placering
- Orientering af bropille ift. nord
- Antal af sektioner
- Geometri af sektioner (cirkulær, rektangulær)
- Sektionernes højde, bredde og længde



Figur 3-7: Definition af bropillesektioner, hvor vanddybden (H) og bropillernes højde (Hp) er illustreret /12/.

Bropillerne implementeres generelt enkeltvis i modellen. Da der skal implementeres et stort antal bropiller i dette projekt, er der udarbejdet en metode til at implementere bropillerne automatisk /13/.

#### 3.3.2 Modelrepræsentation af tunnel

Tunnelelementer er langs hovedparten af strækningen nedgravet i havbunden, således at tunneltoppen flugter med den eksisterende havbund. Der kan forekomme strækninger, hvor tunneltoppen ligger lavere end den skitserende havbund, fordi tunnelen må følge en blød vertikal kurve. Der anvendes i modellen ikke vanddybder, der er dybere end den eksisterende havbund, da det forudsættes, at eventuelle fordybninger i havbunden forårsaget af tunnelen, fyldes enten ved aktiv- eller naturlig tilbagefylding. Dette anses for at være en konservativ antagelse, idet forøget vanddybde vil reducere strømmodstanden og dermed blokeringen.

Den dybeste strækning øst for Samsø er næsten 60 m dyb og har en 6% hældning af siderne mod lavpunktet. Det er derfor i forbindelse med skitseringen af anlægsprojektet besluttet at etablere tunnelen på en undersøisk dæmning tværs over den dybeste del af Rute-T i Storebælt.

Tunnelen og dæmningen repræsenteres i modellen som en lokal ændring i bathymetrien, så der på et område svarende til tunnelens areal over havbunden er en reduceret vanddybde. Samme metode benyttes, hvis der ønskes en opfyldning af et område fx i forbindelse med etableringen af et beskyttelsesrev eller lignende.

Bathymetrien ændres lokalt ved at definere et mesh med elementer i en størrelse, der svarer til tunnelens areal over havbunden. Hvert element har knudepunkter, hvori dybden defineres. Alle knudepunkter har en unik kode, et såkaldt "Node Id". Det er igennem disse koder, at bathymetrien ændres. De nye dybdeværdier, dvs. den eksisterende vanddybde minus højden af tunnelen over havbunden, indsættes i knudepunkterne for de elementer, der definerer tunnelen. Dette gøres direkte ved at editere i mesh-filen med en teksteditor:

- Åbn mesh-filen, der ønskes ændret i MIKE Zero Data Manager
- Noter de unikke kodeværdier for knudepunkterne, der ønskes ændret: højreklik på kort

   vælg knudepunkter med "Select area" kode og dybdeværdi vises til højre (Figur 3-8)
- Åben den samme mesh-fil i Notepad: højreklik "Edit with Notepad"
- Søg efter de noterede knudepunkterne og opdater de tilhørende dybdeværdier

På denne måde ændres bathymetrien til at inkludere en tunnel, der ligger højere end havbunden (Figur 3-8).



Figur 3-8: Eksempel på udvælgelse af specifikke elementers knudepunkter og deres unikke kode ("Node Id").

#### 3.3.3 Modelrepræsentation af kunstige øer

Enkelte undersøgte scenarier inkluderer både en bro og en tunnel. Overgangen mellem broen og en tunnel er planlagt til at blive bygget på en kunstig ø. Kunstige øer er inkluderet i modellen ved at definere en polygon, der har samme udstrækning som den kunstige ø. Der gennemføres modellering for både en referencesituation uden ø og et anlægsscenarie med ø. I referencemodellen anvendes naturlige vanddybder indenfor øens polygon svarende til, at vandet frit kan strømme. I scenariemodellen er området indenfor denne polygon ekskluderes fra beregningsnettet, svarende til, at det er land. Herved sikres det, at der anvendes samme numeriske net både til reference- og scenarieberegning. Analysen fokuseres derved på effekten af de kunstige øer og ikke forstyrres af forskelligheder i beregningsnettet. Et eksempel på bathymetri med inklusion af kunstig ø ses i Figur 3-9.



Figur 3-9: Eksempel på en kunstig ø repræsenteret i beregningsnettet.

#### 3.4 Sedimentspredningsmodel

Modellering af sedimentspredning er gennemført vha. den hydrodynamiske model, der er beskrevet ovenfor, og som leverer strømfelter, der medvirker til transporten af frigivet sediment.

Den hydrodynamiske model er kombineret med en stoftransportermodel, som er Mike 3 PT. Stoftransportmodellen beskriver transport- og sedimentprocesserne. Det er processer, som advektion, dispersion, sedimentation og resuspension. Advektionen er transporten af partikler med middelstrømmen, mens dispersionen er en spredning af sedimentet, der er forårsaget af hastighedsvariationer, der ikke er opløst i den hydrodynamisk model, og som udtrykkes ved et diffusivt bidrag til transporten. Sedimentationen udtrykker, at sedimentpartikler synker gennem vandsøjlen, da de har højere densitet end vand og til sidst sedimentere på havbunden. Resuspension er en proces, der kan medføre ophvirvling af allerede sedimenteret materiale, når de hydrodynamiske forhold tillader det.

#### 3.4.1 Beregningsperiode for sedimentspredningsmodel

Der er udvalgt en beregningsperiode til gennemførelse af spredningsberegninger for materialespild i forbindelse med anlægsaktiviteter.

Det er indledningsvist vurderet, at sedimentspild er mest kritisk i forbindelse med sommersituationer. Sommersituationer er karakteriseret ved et mindre dynamisk strømdomæne hovedsageligt præget af tidevand. Kraftig og vedvarende strøm i samme retning (indstrømning eller udstrømning fra Østersøen) forsaget af meteorologiske fænomener (storme) forekommer mindre hyppigt om sommeren end i efteråret/vinteren.

Der er gennemført beregninger for perioden 1. juni til 30. juli 2014. Denne periode repeteres som grundlag for beregninger af sedimentspredning ved anlægsscenarier med en længere varighed. Dette betragtes som konservativt, idet anlægsaktiviteter modelleres for en sommersituation, der anses for at være den mest sårbare periode.

# 4. BESTEMMELSE AF BLOKERING

#### 4.1 Scenarier

Blokeringen af vandføringen på tværs af linjeføringerne i Kattegat bestemmes for en række anlægstekniske løsningsmodeller, som beskrevet i afsnit 2.6, og inkluderer forskellige bro- og tunnelløsninger. De undersøgte løsningsmodeller omfatter også kunstige øer ved overgang mellem tunnel/bro og kunstige rev til sikring mod skibsstød. En oversigt og indgående elementer ses i Tabel 4-1.

#### Tabel 4-1: Undersøgte scenarier.

Nr.	кку	ккø
1	KKV-2.1 Højbro/lavbro	KKØ-2.1 Hængebro, uden kunstige rev
2	KKV-3.1 Højbro/lavbro	KKØ-2.1 Hængebro, uden kunstige rev
3	KKV-3.1 Højbro/lavbro	KKØ-2.1 Sænketunnel
4	KKV-3.1 Højbro/lavbro	KKØ-2.1 Hængebro, omfattende nordligt og sydligt rev
5	KKV-2,1 Højbro/lavbro	KKØ-2.5 Boret tunnel/lavbro, omfattende nordligt rev og kunstig ø
6	KKV-1.2 Sænketunnel/lavbro inkl. kunstig ø	KKØ-2.5 Boret tunnel/lavbro, omfattende nordligt rev og kunstig ø
7	KKV-2.1 Højbro/lavbro	KKØ-4.3 Sænketunnel/ lavbro, omfattende nordligt rev og kunstig ø

Der gennemføres scenarieberegninger for hvert af ovenstående scenarier. Scenarieberegningerne analyseres mod referencevandføringen, som beskrevet i afsnit 2.7.

For at eliminere fejlkilder er det vigtigt, at både scenarie- og referenceberegningen foretages i det samme beregningsnet. Tunnelen i Scenarie 3 placeres på en undersøisk dæmning, hvilket betyder, at der foretages opfyldning under den dybeste strækning, hvorved vejbanen i den færdige tunnel bliver mindre stejl. Dette gøres ved at ændre bathymetrien lokalt, som beskrevet i afsnit 3.3.2.

Cowi har i anlægsscenarierne inkluderet forskellige typer of bropiller /4/. Herunder vises eksempler på en lavbro og en højbro. Lavbro-typen består af fire sektioner (caisson) med to pilleskafter oven på (Figur 4-1). Højbro-typen består af tre sektioner (Figur 4-2).



Figur 4-1: Lavbro-typens generelle sektionsinddeling /4/.



Figur 4-2: Højbro-typens generelle sektionsinddeling /4/.

#### 4.2 Saltflux

Der er gennemført beregninger til bestemmelse af blokering af gennemstrømningen efter etablering af en Kattegat-forbindelse. Formålet er at bestemme blokeringen for et større antal anlægsvarianter. Vurderingen af anlægsvarianter er nødt til at tage udgangspunkt i en specifik kombination af en østlig og en vestlig forbindelse, da der sker en omfordeling af gennemstrømningen hhv. øst og vest om Samsø. Da der er undersøgt 15 forbindelser øst for Samsø og 9 forbindelser vest for Samsø er der altså tale om et meget betydeligt antal kombinationer (potentielt 135 kombinationer, hvoraf ikke alle er relevant). Ligeledes vil repræsentation af undersøiske dæmninger og kunstige øer medføre ændringer i modellens beregningsnet, der kræver en genberegning af referencetilstanden for at eliminere modeltekniske ændringer og sikre mere præcise og sammenlignelige resultater. Det betyder samtidig, at der skal gennemføres to simuleringer for hver bestemmelse af blokering. Der er derfor på dette stadie af projektet med den tilrådeværende tid og økonomi foretaget nogle forsimplinger og antagelser, herunder udeladelse af salt.

Der er derfor antaget, at effekter på saltfluxen omtrentligt korrelerer med effekten på vandgennemstrømningen. Denne tilgang understøttes af erfaringer opnået i forbindelse med andre bro- og anlægsprojekter. I Tabel 4-2 vises resultaterne for vandgennemstrømning og saltgennemstrømning gennem danske farvande, der er gennemført som en del af VVM-grundlaget for den faste forbindelse over Femernbælt og Lynetteholm. Resultaterne viser, at der er en tydelig korrelation mellem blokering for vandgennemstrømning og den tilsvarende blokering for saltgennemstrømningen (saltfluxen).

Tabel 4-2: Sammenstilling af resultater fra baggrundsdokumentationen for hhv. Femern Bælt [23] og Lynetteholm [24]. For Femernbælt vises resultaterne for dels en lokal model og dels en regional model. Ligeledes vises resultater gennemført med brug af forskellige typer af model-software (MIKE, GETM, MOM). For Lynetteholm er der gennemført modellering med et enkelt modelset-up.

Projekt og model	Blokering for vand	Blokering for salt
Femernbælt, Local models (MIKE) /7/	-0,50 %	-0,52 %
Femernbælt, Local models (GETM) /7/	-0,42 %	-0,37 %
Femernbælt, Regional models (MIKE) /7/	-0,70 %	-0,95 %
Femernbælt, Regional models (MOM) /7/	-0,22 %	-0,20 %
Lynetteholm, Øresund (MIKE) <sup>1</sup> /21/	-0,25 %0,23 %	-0,23 %0,21 %

<sup>1</sup> Det angivne interval for Lynetteholmen skyldes, at blokeringen er bestemt ved forskellige metoder, men baseret på de samme modelresultater.

Resultaterne af de forskellige modelresultater, der er vist i Tabel 4-2, er evalueret ved brug af flere forskellige metoder. Det ses, at variationen over de anvendte evalueringsmetoder er i samme størrelsesorden som forskellen mellem blokering af hhv. vand og salt. Det ses desuden, at der er en betydelig variation over resultater opnået med forskellig model-software og gennemført for forskellige modelområder. Inden for resultaterne, der er opnået med samme model-software og samme modelområde, er der kun en lille variation mellem blokeringen for vand og salt. Der ses ikke ud fra resultaterne af de undersøgte løsninger, at der er en ensidig større elle mindre blokering for salt end for vand. Der er derfor en god overensstemmelse mellem blokeringen for vandgennemstrømning og saltgennemstrømning. Det betyder, at et anlæg, der medfører en stor blokering for vand også vil medføre en stor blokering for salt og visa versa. Derfor er er det anvendt modelset-up både hensigtsmæssig og effektiv til screening af forskellige anlægsprojekter.

#### 4.3 Resultater

Resultaterne af de numeriske beregninger analyseres, som beskrevet i afsnit 2.7. Resultaterne af analyserne er vist i Tabel 4-3. Resultaterne er angivet som procentuel ændring af vandføringen med fortegn. Negative værdier betyder en reduktion af vandføringen og dermed en blokering. Positive værdier betyder en lokal forøgelse af vandføringen, som følge af omfordelinger af vandstrømme.

Tabel 4-3: Resultater af blokeringsberegningerne. Der er angiver relativ blokering for forskellige kombinationer af løsningsmodeller. KKV angiver blokering vest for Samsø mens KKØ angiver blokering Øst for Samsø, Desuden er den samlede blokeringseffekten gennem tracéet angivet.

Nr.	Kombination af løsningsmodeller	кки	ккø	Total
1	KKV-2.1 (højbro/lavbro) KKØ-2.1 (hængebro) (Ex. Rev)	0,1 %	-0,2 %	-0,1 %
2	KKV-3.1 (højbro/lavbro) KKØ-2.1 (hængebro) (Ex. Rev)	0,1 %	-0,2 %	-0,1 %
3	KKV-3.1 (højbro/lavbro) KKØ-2.1 (sænketunnel)	-0,1 %	0,0 %	0,0 %
4	KKV-3.1 (højbro/lavbro) KKØ-2.1 (hængebro inkl. nordligt og sydligt rev)	0,2 %	-0,3 %	-0,2 %
5	KKV-2,1 (højbro/lavbro) KKØ-2.5 (boret tunnel/lavbro inkl. kunstig ø og nordligt rev,)	0,9 %	-0,7 %	-0,3 %
6	KKV-1.2 (sænketunnel/lavbro inkl. kunstig ø) KKØ-2.5 (boret tunnel/lavbro inkl. kunstig ø og nordligt rev)	0,7 %	-0,7 %	-0,3 %
7	KKV-2.1 (højbro/lavbro) KKØ-4.3 (sænketunnel/lavbro inkl. kunstig ø og nordligt rev)	0,4 %	-0,4 %	-0,2 %

Resultaterne i Tabel 4-3 viser, at der for broløsningerne sker en omfordeling af strømmen hhv. øst og vest for Samsø. Reduktionen af gennemstrømningen af vand er mindre øst end vest for Samsø, hvilket betyder, at den største blokering af vandføringen forekommer øst for Samsø. Det kan skyldes to forhold:

- 1. Brodesignet øst for Samsø indeholder nogle meget store og dermed blokerende strukturer i form af pyloner og ankerblokke, mens brodesignet vest for Samsø har et mere "slankt" design. Vand vil typisk finde den passage igennem et farvand, der giver den mindste samlede strømningsmodstand.
- 2. Der er generelt større strømhastigheder i det dybe område øst for Samsø end i det mere lavvandede område vest for Samsø. Strømningsmodstanden på en bropille er proportional med kvartratet på strømhastigheden. Det betyder, at modstanden firdobles, når strømhastigheden fordobles. Derfor vil en bropille placeret øst for Samsø give en relativt større strømningsmodstand, end når bropillen er placeret vest for Samsø.

Det skal desuden påpeges, at forskellene på vandgennemstrømningen hhv. øst og vest for Samsø betyder, at det ikke er muligt at summere de relative ændringer for at bestemme den samlede ændring. Den samlede ændring er fundet ved selvstændige analyser af summerede modeltidsserier.

Det ses, at scenarierne for rene broløsninger både øst og vest for Samsø medfører en blokering på op til 0,2% (nr. 1,2,4). Den største blokering forårsages af tilstedeværelsen af en bro øst for Samsø.

Analyserne viser, at løsningsmodeller, der omfatter en kunstig ø mellem bro og tunnel, udgør de mest blokerende løsningsmodeller. Der ses ved disse løsningsmodeller en samlet blokering på op til 0,3%, og en omfordeling af vandskiftet øst og vest om Samsø (nr. 5-7).

Erstattes broen øst for Samsø med en tunnelløsning i kombination med en bro vest for Samsø vil det samlede projekt være tæt på en nulløsning, da den blokering reduceres til 0,0% (nr. 3).

Resultaterne i Tabel 4-3 viser, at der ved denne løsning sker en blokering vest for Samsø, mens der ikke er identificeret nogen effekt øst for Samsø, hvor tunnelen er placeret.

Resultaterne i Tabel 4-3 viser, at der for den kombinerede bro- og tunnelløsning sker en blokering vest for Samsø, mens der er en marginal større strømning øst for Samsø, hvor tunnelen er placeret. Øst for Samsø passerer tunnelen den dybeste del af Storebælt (Route-T) på en strækning, hvor vanddybden er op til 58 m. Tunnelrøret er over en ca. 600 m lang strækning hævet over havbunden og understøttet af en undersøisk dæmning. Oversiden af tunnelrøret er på denne strækning beliggende i ca. 32-35 m vanddybde. Figur 4-3 viser dybdeforholdene, hvor intervalet mellem 30 og 35 m er fremhævet med sort.

Dæmningen vil principielt udgøre en forhindring for gennemstrømningen, men tunnelen ligger i et lokalt bassin, der mod både nord og syd omkranses af tærskler med lavere vanddybde. Vand, der strømmer gennem området, skal således passere naturlige tærskler, der er højere end tunnelen. Tunnelen kan således betragtes som en underinddeling af et eksisterende lokalt bassin. Vandvolumenet i bassinet vil - speciel i tilfælde af lagdeling - være relativt stillestående, og det er derfor ikke særlig aktivt i forhold til vandgennemstrømning og salttransport hverken før eller efter en eventuel etablering af en tunnel. Etableringen forventes derfor kun at have en ringe indflydelse på blokeringen, hvilket bekræftes af modelleringsresultaterne.



Figur 4-3: Dybdeforhold (modelbathmetri) mellem Samsø og Sjælland. Vanddybder mellem 30 og 35 m er fremhævet (sort), hvilket svarer til tærskelniveauet ved tunnelrørerets krydsning af Route-T. Det ses, at tunnelrøret krydser et lokalt bassin, der mod både nord og syd omkranses af tærskler med lavere vanddybde.

De fundne resultater i Tabel 4-3 kan sammenlignes med den blokering, der er beregnet ved andre projekter gennemført i de danske farvande. I forbindelse med forberedelse af Femern Bælt projektet er der således tidligere beregnet, at en broløsning medfører en blokering på 0,22%-0,70%, mens en tunnelløsning medfører en blokering på 0,00%-0,02% /7/.

Disse værdier er alle på niveau med eller højere end blokeringer fundet for nærværende projekt. Dette kan skyldes, at Femernbælt forbindelsen udføres i et mere snævert farvand end Kattegatforbindelsen, der udføres i et relativt åbent farvand med passage både øst og vest om Samsø. Kattegatforbindelsen kan derfor også forventes, at medfører en mindre grad af hydrauliske kontrol (blokering) end en tilsvarende udformet løsning i Femernbælt.

Det samlede strømningsareal gennem brotværsnittet ved Kattegatforbindelsen er ca. 50% større end det tilsvarende tværsnit ved den undersøgte broversion af Femernbæltforbindelsen. Det betyder, at ved en given gennemstrømning vil strømhastigheder ved Femernbælt være ca. 50% større end strømhastigheder ved Kattegatforbindelsen ved den samme gennemstrømning. Da strømningsmodstanden er proportional med kvadratet på strømhastigheden, vil modstanden for en given bropille – alt andet lige - ved den undersøgte broversion af Femernforbindelsen være mere end dobbelt så stor som hvis den tilsvarende bropille lå i Kattegat. På baggrund af disse meget overordnede betragtninger er det derfor forventeligt, at en forbindelse i Kattegat vil forårsage mindre blokering end en tilsvarende forbindelse i Femernbælt. Resultaterne fra modelleringen udført i nærværende rapport vurderes derfor at angive en retvisende størrelsesorden

Som det er forklaret i afsnit 4.2 er lagdelingen udeladt af modellen for at sikre en mere "agil" model til gennemregning af en stort antal varianter. Denne tilpasning af modellen kan have en effekt på resultatet. Det er dog ikke muligt entydigt at konkludere om blokeringen påvirkes i opadgående eller nedadgående retning. Modelleringerne er lavet på samme grundlag for de undersøgte varianter, og metoden er derfor særlig robust til en indbyrdes sammenligning mellem de enkelte løsninger.

# 5. SEDIMENTSPREDNING

#### 5.1 Scenarier

Sedimentspredningen forårsaget af anlægsaktiviteter bestemmes for en række anlægstekniske løsningsmodeller, som beskrevet i afsnit 2.6, og inkluderer forskellige bro- og tunnelløsninger. De undersøgte løsningsmodeller omfatter også kunstige øer ved overgang mellem tunnel/bro og kunstige rev til sikring mod skibsstød samt adgangskanaller, der er nødvendige for anlægsarbejdets udførelse. Det er gennemført modellering for scenarier angivet i Tabel 5-1. Anlægsscenarier er modtaget fra Cowi /4//5/.

Variant	Land	dfa	æste	Forbindelsestype	Andre elementer	Samlet volumen Mio. m <sup>3</sup>
KKV-1.2	Onsbjerg Syd	-	Hou	Sænketunnel /Lav- bro	Kunstig ø	16,4
KKV-2.1	Onsbjerg Syd	-	Hou	Højbro/Lavbro		2,1
KKV-2.3	Fogedmark	-	Hou	Højbro/Lavbro		1,8
KKV-3.1	Kolby Kås	-	Gylling Næs	Højbro/Lavbro		1,1
KKV-3.2	Samsø Syd	-	Gylling Næs	Højbro/Lavbro		1,2
KKV-3.4	Fogedmark	-	Gylling	Højbro/Lavbro		1,0
KKØ-2.1	Nyby Vest	-	Hjalmarsgård	Hængebro	Nordligt + sydligt rev	4,1
KKØ-2.1	Nyby Vest	-	Hjalmarsgård	Sænketunnel		30,1
KKØ-2.1 Optimeret	Nyby Vest	-	Hjalmarsgård	Sænketunnel	Ruten er forskudt 400 m mod nord. Spild øst for rute-T er reduceret til 2%.	30,1
KKØ-2.6	Nyby Øst	-	Hjalmarsgård	Sænketunnel		32,5
KKØ-3.3	Asnæs Syd	-	Samsø Syd	Sænketunnel /Lav- bro	Kunstig ø + nordligt rev	24,3
KKØ-4.3	Asnæs Syd	-	Hjalmarsgård	Sænketunnel /Lav- bro	Kunstig ø + nordligt rev	27,4

Tabel 5-1: Løsningsmodeller for hvilke der e	gennemført modellering	af sedimentspredning.
--	------------------------	-----------------------

#### 5.2 Resultater

Resultatet af modelleringen er tidsvarierende 3-dimmensionelle felter af koncentration samt tidsvarierende 2-dimmensionelle felter af sedimentation. Disse resultater indeholder data, der er bearbejdet og analyseret for at sikre et brugbart overblik over data.

Der beregnes varighed af overskridelse af karakteristiske koncentrationsniveauer. Ved et koncentrationsniveau på 5-10 mg/l vil sedimenter være synlige, hvis de forekommer nær vandoverfladen. En koncentration på 10 mg/l svarer desuden til en ca. 20% svækkelse af lyset gennem vandsøjlen /20/. Resultatet er angivet i antal dage, hvor koncentrationer på 5 ml/l og 10 mg/l overskrides.

Der er desuden vist den samlede sedimentation ved afslutningen af hvert af de modellerede gravescenarier. Den samlede sedimentation er angivet i gram per m<sup>2</sup>. Den resulterende lagtykkelse vil afhænge af, hvor tæt det sedimenterede materiale konsolideres og dermed af lagets densitet. Som eksempel svarer 1000 g/m<sup>2</sup> til ca. 1 mm aflejring (under antagelse af en densitet på 1000 kg/m<sup>3</sup>).



## 5.2.1 KKV - 1.2 - Sænketunnel/Lavbro

Figur 5-1: Varighed hvorunder koncentrationen 5 mg/l er overskredet. Enheden af varighed er 'dage'.



Figur 5-2: Varighed hvorunder koncentrationen 10 mg/l er overskredet. Enheden af varighed er 'dage'.



Figur 5-3: Resulterende sedimentation efter anlægsarbejdernes afslutning. 1 mm ukonsolideret, finkornet havbundssediment svarer til ca. 1 kg/m2 havbundsoverflade.



# 5.2.2 KKV - 2.1 - Højbro/Lavbro

Figur 5-4: Varighed hvorunder koncentrationen 5 mg/l er overskredet. Enheden af varighed er 'dage'.



Figur 5-5: Varighed hvorunder koncentrationen 10 mg/l er overskredet. Enheden af varighed er 'dage'.



Figur 5-6: Resulterende sedimentation efter anlægsarbejdernes afslutning. Enheden er g/m<sup>2</sup>. 1 mm ukonsolideret, finkornet havbundssediment svarer til ca. 1 kg/m2 havbundsoverflade.





Figur 5-7: Varighed hvorunder koncentrationen 5 mg/l er overskredet. Enheden af varighed er 'dage'.



Figur 5-8: Varighed hvorunder koncentrationen 10 mg/l er overskredet. Enheden af varighed er 'dage'.



Figur 5-9: Resulterende sedimentation efter anlægsarbejdernes afslutning. Enheden er g/m<sup>2</sup>. 1 mm ukonsolideret, finkornet havbundssediment svarer til ca. 1 kg/m2 havbundsoverflade.



## 5.2.4 KKV - 3.1 - Højbro/Lavbro

Figur 5-10: Varighed hvorunder koncentrationen 5 mg/l er overskredet. Enheden af varighed er 'dage'.



Figur 5-11: Varighed hvorunder koncentrationen 10 mg/l er overskredet. Enheden af varighed er 'dage'.



Figur 5-12: Resulterende sedimentation efter anlægsarbejdernes afslutning. Enheden er g/m<sup>2</sup>. 1 mm ukonsolideret, finkornet havbundssediment svarer til ca. 1 kg/m<sup>2</sup> havbundsoverflade.



## 5.2.5 KKV - 3.2 - Højbro/Lavbro

Figur 5-13: Varighed hvorunder koncentrationen 5 mg/l er overskredet. Enheden af varighed er 'dage'.



Figur 5-14: Varighed hvorunder koncentrationen 10 mg/l er overskredet. Enheden af varighed er 'dage'.



Figur 5-15: Resulterende sedimentation efter anlægsarbejdernes afslutning. Enheden er g/m<sup>2</sup>. 1 mm ukonsolideret, finkornet havbundssediment svarer til ca. 1 kg/m<sup>2</sup> havbundsoverflade.



# 5.2.6 KKV - 3.4 - Højbro/Lavbro

Figur 5-16: Varighed hvorunder koncentrationen 5 mg/l er overskredet. Enheden af varighed er 'dage'.



Figur 5-17: Varighed hvorunder koncentrationen 10 mg/l er overskredet. Enheden af varighed er 'dage'.



Figur 5-18: Resulterende sedimentation efter anlægsarbejdernes afslutning. Enheden er g/m<sup>2</sup>. 1 mm ukonsolideret, finkornet havbundssediment svarer til ca. 1 kg/m<sup>2</sup> havbundsoverflade.

#### 5.2.7 KKØ - 2.1 – Hængebro



Figur 5-19: Varighed hvorunder koncentrationen 5 mg/l er overskredet. Enheden af varighed er 'dage'.



Figur 5-20: Varighed hvorunder koncentrationen 10 mg/l er overskredet. Enheden af varighed er 'dage'.



Figur 5-21: Resulterende sedimentation efter anlægsarbejdernes afslutning. Enheden er g/m<sup>2</sup>. 1 mm ukonsolideret, finkornet havbundssediment svarer til ca. 1 kg/m<sup>2</sup> havbundsoverflade.

#### 5.2.8 KKØ - 2.1 – Sænketunnel



Figur 5-22: Varighed hvorunder koncentrationen 5 mg/l er overskredet. Enheden af varighed er 'dage'.



Figur 5-23: Varighed hvorunder koncentrationen 10 mg/l er overskredet. Enheden af varighed er 'dage'.



Figur 5-24: Resulterende sedimentation efter anlægsarbejdernes afslutning. Enheden er g/m<sup>2</sup>. 1 mm ukonsolideret, finkornet havbundssediment svarer til ca. 1 kg/m<sup>2</sup> havbundsoverflade.



## 5.2.9 KKØ - 2.1 – Sænketunnel; Miljøoptimeret

Figur 5-25: Varighed hvorunder koncentrationen 5 mg/l er overskredet. Enheden af varighed er 'dage'.



Figur 5-26: Varighed hvorunder koncentrationen 10 mg/l er overskredet. Enheden af varighed er 'dage'.



Figur 5-27: Resulterende sedimentation efter anlægsarbejdernes afslutning. Enheden er g/m². 1 mm ukonsolideret, finkornet havbundssediment svarer til ca. 1 kg/m² havbundsoverflade.





Figur 5-28: Varighed hvorunder koncentrationen 5 mg/l er overskredet. Enheden af varighed er 'dage'.



Figur 5-29: Varighed hvorunder koncentrationen 10 mg/l er overskredet. Enheden af varighed er 'dage'.



Figur 5-30: Resulterende sedimentation efter anlægsarbejdernes afslutning. Enheden er g/m<sup>2</sup>. 1 mm ukonsolideret, finkornet havbundssediment svarer til ca. 1 kg/m<sup>2</sup> havbundsoverflade.

#### 5.2.11 KKØ - 3.3 - Sænketunnel/Lavbro



Figur 5-31: Varighed hvorunder koncentrationen 5 mg/l er overskredet. Enheden af varighed er 'dage'.



Figur 5-32: Varighed hvorunder koncentrationen 10 mg/l er overskredet. Enheden af varighed er 'dage'.



Figur 5-33: Resulterende sedimentation efter anlægsarbejdernes afslutning. Enheden er g/m². 1 mm ukonsolideret, finkornet havbundssediment svarer til ca. 1 kg/m2 havbundsoverflade.



# 5.2.12 KKØ - 4.3 - Sænketunnel/Lavbro

Figur 5-34: Varighed hvorunder koncentrationen 5 mg/l er overskredet. Enheden af varighed er 'dage'.



Figur 5-35: Varighed hvorunder koncentrationen 10 mg/l er overskredet. Enheden af varighed er 'dage'.



Figur 5-36: Resulterende sedimentation efter anlægsarbejdernes afslutning. Enheden er g/m<sup>2</sup>. 1 mm ukonsolideret, finkornet havbundssediment svarer til ca. 1 kg/m<sup>2</sup> havbundsoverflade.

# 6. **REFERENCER**

- /1/ Mail fra S&B (Titti Kopp) 02-04-2020, "Modellering af blokkering"
- /2/ Mail fra S&B (Titti Kopp) 11-23-2020, "Udvalgte løsninger til modelkørsler"
- /3/ Sund & Bælt Holding A/S Kattegatforbindelse kyst-kyst,
   Anlægstekniske forundersøgelser, interfaceinformation til miljøundersøgelser,
   Teknisk notat, version 0.12, 29. Oktober 2020, Foreløbig version.
- /4/ Mail fra Cowi (Peter Reinholdt) 21-03-2020 "Udvalgte løsninger til modelkørsler" [Vedhæftede filer definerer KKØ-2.1-Bro, KKV-2.1-Bro, KKV-3.1-Bro]
- /5/ Mail fra Cowi (Peter Reinholdt) 23-03-2020 "RE: Udvalgte løsninger til modelkørsler" [Vedhæftede filer definerer KKØ-2.1-Tunnel]
- /6/ Mail fra Cowi (Peter Reinholdt) 18-11-2020 " RE: Forudsætninger for modellering af spild fra sænketunnel"
- /7/ FEHY (2013). Fehmarnbelt Fixed Link EIA.
   Marine Water. Baltic Sea Hydrography, Water Quality and Plankton -Impact Assessment.
   Report No. E1TR0058 Volume I
   Report: 108 pages Appendix included: 4 pages
   May 2013
   ISBN 978-87-92416-30-8
- /8/ Mail fra Geodatastyrelsen (Mogens Friis Hansen) 07-04-2020 "SV: Dybdedata" [Link til dybdedatafiler]
- /9/ Hjemmeside for *Kortforsyningen* tilgået 30-04-2020 "Danmark 1:1.000.000, vektor" <u>https://download.kortforsyningen.dk/content/danmark-11000000-vektor</u>
- /10/ Mail fra DHI (Ole Svenstrup Petersen) 18-03-2020 "RE: metocean" [Link til tidserier af vandstand i to punkter fra DHI model]
- /11/ Intern Rambøll mail (Jørgen Quvang Harck Nørgaard) 04-05-2020, "RE: Kattegat"
- /12/ DHI (2017). MIKE 3 FM User Guide HD module.
- /13/ Intern Rambøll mail (Pernille Louise Forsberg) 02-06-2020, "Bropiller, MIKE model" [Link til baggrundsfiler og forklaring]
- /14/ Leth, J.O. (ed.) et al. (2014). Danmarks digitale havbundssedimentkort 1:250.000
- /15/ Mikkelsen, O. & Pejrup, M. (2001). The use of a LISST-100 laser particle sizer for in-situ estimates of floc size, density and settling velocity. Geo-Marine Letters. 20. 187-195. 10.1007/s003670100064.
- /16/ Geoviden (2014). Den danske havbund. <u>https://www.geocenter.dk/wp-content/uplo-ads/2018/07/Geoviden 2 2014.pdf</u>

- /17/ Soulsby, R. (1997). Dynamics of marine sands.
- /18/ Harris JM, Whitehouse RJS. Scour Development around Large-Diameter Monopiles in Cohesive Soils: Evidence from the Field. J Waterw Port, Coastal, Ocean Eng 2017;143:04017022. <u>https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000414</u>.
- /19/ Prins L. T., M. Owen og J. B. Jensen, Kattegatforbindelse kyst-kyst anlægstekniske forundersøgelser, Overfladenær geologisk delmodel (GEUS) Desk Study, GEUS rapport 2020/XX (Foreløbig).
- /20/ M.J. Devlin, J. Barry, D.K. Mills, R.J. Gowenc, J. Foden, D. Sivyerb, P. Tett, 2008, Relationships between suspended particulate material, light attenuation and Secchi depth in UK marine waters. Estuarine, Coastal and Shelf Science 79 (2008) 429–439.
- /21/ DHI/LIC JV. The Øresund Link, Modelling of Flow Reduction, Blocking Calculations, 2000.