

Anlæg af Lynetteholm

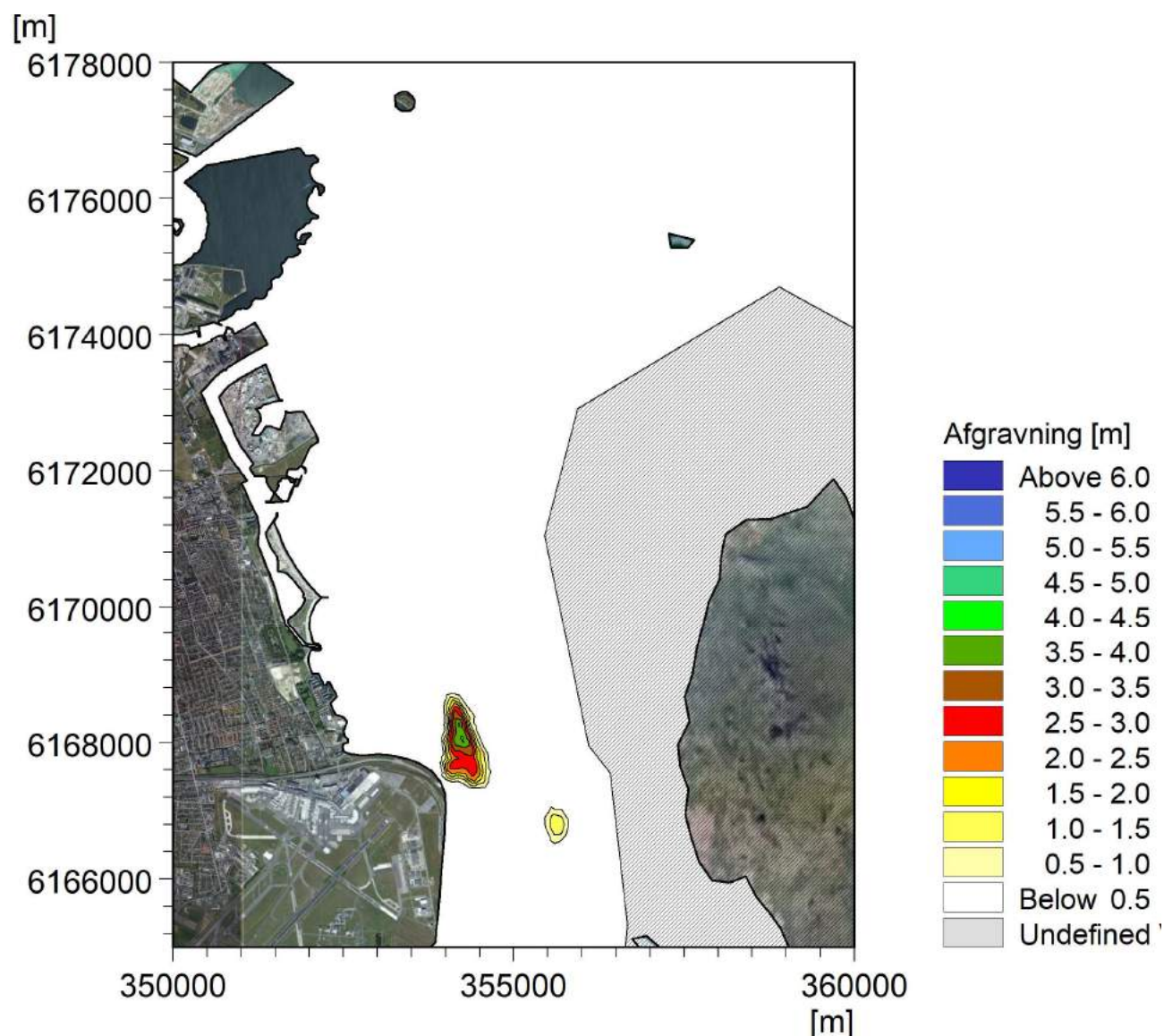
Screeningsberegninger af muligheden for kompensation af den blokerende effekt på vandudvekslingen med Østersøen

Rapport 1.0

Projektnummer: 11823523-09

Dato 06-07-2022

Udarbejdet for Udviklingsselskabet By & Havn I/S



Anlæg af Lynetteholm

Screeningsberegninger af muligheden for kompensation af den blokerende effekt på vandudvekslingen med Østersøen

Rapport 1.0

Projektnummer: 11823523-09

Udarbejdet for: Udviklingsselskabet By & Havn I/S
Repræsenteret ved: Hans Vasehus

Kontaktperson: Hans Vasehus
Projektleder: Bo Brahtz Christensen
Kvalitetsansvarlig: Ian Sehested Hansen
Udarbejdet af: Bo Brahtz Christensen
Projektnummer.: 11823523-09
Godkendt af: Nicholas Grunnet
Godkendelsesdato: 06-07-2022
Revision: Endelig version 1.0
Klassifikation: Begrænset

Filnavn: Kompensationsafgravning-final.docx

Indholdsfortegnelse

1	Indledning.....	5
2	Sammenfatning.....	6
3	Baggrund og metode	7
3.1	Baggrund	7
3.2	Metode.....	8
3.3	Blokeringsmål og undersøgte tværsnit.....	11
3.3.1	Blokeringsmål	11
3.3.2	Tværsnit.....	11
4	Scenarier og resultater	13
4.1	Afgravningsområder og scenarier	13
4.2	Estimeret blokering i screeningsperiode	18
4.2.1	Påvirkning af middelstrøm	25
4.3	Estimeret blokering efter et kalenderår	31
5	Diskussion og konklusion.....	34
6	Referencer	35

Figurer

Figur 3-1	Den faste forbindelse samt indikation af områder med opfyld og afgravning, fra ref. /2/.	8
Figur 3-2	Statistisk beregnet fordeling af årsmidlet strøm (dybdemidlet) for situationen med Lynetteholm og uden kompensationsafgravning.	9
Figur 3-3	Statistisk beregnet fordeling af maksimalstrøm (dybdemidlet) for situationen med Lynetteholm og uden kompensationsafgravning.	10
Figur 3-4	Tværsnit analyseret for blokering. 1: Øresund, 2: Peberholm (øst + vest).....	12
Figur 4-1	Pejlinger af Kongedybet, Middelgrunden, Hollænderdybet og de tre knolde øst for Hollænderdybet.	13
Figur 4-2	Afgravningsområder i scenarie 1 og 2.	14
Figur 4-3	Afgravningsområder i scenarie 3 og 4.	14
Figur 4-4	Batymetri og interesseområder for kompensationsafgravning nord for Øresundsforbindelsens tunnel.	15
Figur 4-5	Søkort visende søkabler, Nordre Røse Fyr, den Blå Planets vandindtag og Tårnby renseanlægs havledning.	16
Figur 4-6	Afgravningsområder i scenarie 5 og 6.	16
Figur 4-7	Afgravningsområder i scenarie 7 og 8.	17
Figur 4-8	Afgravningsområder i scenarie 9.	17
Figur 4-9	Tidslig udvikling af blokeringsfaktor for vandføring i Øresund tværsnit med og uden kompensationsafgravning.	19
Figur 4-10	Tidslig udveksling af blokeringsfaktor for salt i Øresund tværsnit med og uden kompensationsafgravning.	21
Figur 4-11	Tidslig udvikling af blokeringsfaktor for vandføring i Øresund tværsnit ved tærskel (Peberholm) med (scenarie 1-9) og uden kompensationsafgravning (scenarie 0).	23
Figur 4-12	Tidslig udvikling af blokeringsfaktor for salt i Øresund tværsnit ved tærskel (Peberholm) med (scenarie 1-9) og uden kompensationsafgravning (scenarie 0).	24
Figur 4-13	Statistisk beregnet middelstrøm (dybdemidlet) i perioden 1. januar - 1. maj 2018 for baseline forhold og med Lynetteholm uden kompensationsafgravning (scenarie 0). ...	25

Figur 4-14	Statistisk beregnet dybdemidlet maksimalstrøm i perioden 1. januar - 1. maj 2018 for baseline forhold og med Lynetteholm uden kompensationsafgravning.	26
Figur 4-15	Ændring af middelstrøm i forhold til baseline i scenarie 0 og 1 (dybdemidlet).	26
Figur 4-16	Ændring af middelstrøm i forhold til baseline i scenarie 2 og 3 (dybdemidlet).	27
Figur 4-17	Ændring af middelstrøm i forhold til baseline i scenarie 4 og 5 (dybdemidlet).	27
Figur 4-18	Ændring af middelstrøm i forhold til baseline i scenarie 6 og 7 (dybdemidlet).	28
Figur 4-19	Ændring af middelstrøm i forhold til baseline i scenarie 8 og 9 (dybdemidlet).	28
Figur 4-20	Ændring af maksimalstrøm i forhold til baseline i scenarie 0 og 1 (dybdemidlet).	29
Figur 4-21	Ændring af maksimalstrøm i forhold til baseline i scenarie 2 og 3 (dybdemidlet).	29
Figur 4-22	Ændring af maksimalstrøm i forhold til baseline i scenarie 4 og 5 (dybdemidlet).	30
Figur 4-23	Ændring af maksimalstrøm i forhold til baseline i scenarie 6 og 7 (dybdemidlet).	30
Figur 4-24	Ændring af maksimalstrøm i forhold til baseline i scenarie 8 og 9 (dybdemidlet).	31
Figur 4-25	Tidslig udvikling af blokeringsfaktor for vandføring i Øresund tværsnit og tværsnit ved Peberholm med scenarie 8 for det fulde kalenderår.	32
Figur 4-26	Tidslig udvikling af blokeringsfaktor for transport af salt i Øresund tværsnit og tværsnit ved Peberholm med scenarie 8 for det fulde kalenderår.	33

Tabeller

Tabel 4-1	Kompensationsafgravningsvolumener i hver af de 9 undersøgte scenarier.	18
Tabel 4-2	Blokeringseffekt af de undersøgte scenarier af vandføring i Øresund tværsnittet (gældende for den korte scenarieperiode).	19
Tabel 4-3	Blokeringseffekt af de undersøgte scenarier af salttransport i Øresundtværsnit (gældende for den korte scenarieperiode).	22
Tabel 4-4	Blokeringseffekt af de undersøgte scenarier af vandføring ved tærskel (Peberholm) (gældende for den korte scenarieperiode).	23
Tabel 4-5	Blokeringseffekt af de undersøgte scenarier af salttransport ved tærskel (Peberholm) (gældende for den korte scenarieperiode).	24
Tabel 4-6	Blokeringseffekt for vandføring af de undersøgte scenarier i Øresund tværsnit og ved tærskel (Peberholm) for det fulde kalenderår.	32
Tabel 4-7	Blokeringseffekt for salttransport af de undersøgte scenarier i Øresund tværsnit og ved tærskel (Peberholm) for det fulde kalenderår.	33

1 Indledning

Lynetteholm er en halvø planlagt som en 2,75 km² stor opfyldning forbundet til Refshaleøen i området øst for Trekroner lige uden for Københavns Havn. Opfyldningen afblænder Kongedybet og er i ref. /1/ estimeret til at have en blokerings effekt på transporten af vand og salt gennem Øresund på ~0,25% når øen er færdiggjort.

Anlæggets blokerings effekt vil kunne afbødes ved hjælp af kompensationsafgravninger af havbunden andre steder i Øresund, således at anlægget og kompensationsafgravningerne totalt set udgør en nulløsning for gennemstrømningen i Øresund.

Kompensationsafgravning har ikke tidligere været undersøgt, idet det i MKR af miljørådgiver, ref. /3/, er vurderet, at Lynetteholms påvirkning af vand- og saltgennemstrømningen er ubetydelig i både anlægsfase og driftsfase.

Eventuelle kompensationsafgravninger bør foretages tæt på Lynetteholm for at opnå uændrede strømforhold i så stort et område som muligt. Dog er udfordringen for lokale kompensationsafgravninger, at Øresunds strømningstværsnit er ganske stort i snittet øst-vest gennem Lynetteholm, hvorfor strømhastighederne er beskedne. Kompensationsafgravning i dette område vil derfor være mere omfattende for at opnå nulløsningen end ved uddybning i områder med generelt kraftigere strøm.

Hovedformålet med dette studie er, gennem en række screeningsberegninger, at identificere behovet for kompensationsafgravning med henblik på at kunne opnå en nulløsning for gennemstrømningen. De udførte screeningsberegninger dækker en langtidsrepræsentativ periode på 4 måneder (1. januar - 1. maj 2018) med henblik på hurtigere at kunne spore sig ind på omfanget for kompensationsafgravning.

I den indledende screening fokuseres der primært på uddybning af områder i den østlige del af Hollænderdybet, men da et sådan tiltag viste en utilstrækkelig effektivitet, blev fokusområdet efterfølgende rettet mod områder i Drogden renden nord for Øresundstunnellen.

For et af de mest lovende scenarier gennemføres beregningen for et helt kalenderår, således at alle sæsonvariationer er inkluderet i estimatet. Den herved fundne blokeringsforskelle efter 4 og 12 måneder anvendes efterfølgende til at korrigere de i screeningsscenerierne fundne estimater.

2 Sammenfatning

Lynetteholm har en mindre blokerings effekt ($\sim 0,25\%$) på udvekslingen af vand og salt med Østersøen. Blokerings effekten vil kunne reduceres eller elimineres helt ved at foretage kompensationsafgravning. Ved fuld kompensation vil Lynetteprojektet være en nulløsning for udvekslingen af vand og salt med Østersøen.

Da kompensationsafgravning er en ekstra omkostning for projektet, er det formålstjenstligt med en screeningsanalyse, hvis hovedformål er at indkredse, hvad der skal til for at opnå en nulløsning, samt optimere effekten af kompensationsafgravning. Effekten af kompensationsafgravning kan vurderes ved at sammenholde den ændrede blokering (i %) per afgravet 1 million kubikmeter (Mm^3) i de undersøgte scenarier. I kompensationsafgravningerne for Øresundsforbindelsen blev der opnået en effektivitet på $0,19\%$ per Mm^3 .

Screeningsanalysen har anvendt samme modelværktøj som i den oprindelige analyse af blokeringen fra Lynetteholm projektet.

Der er blevet undersøgt ni kompensationsafgravningsscenarier. De første scenarier var fokuseret omkring Hollænderdybet, men effektiviteten var her blot omkring $0,02\%$ per Mm^3 . Fokus blev derfor rettet mod Drogden i området lige nord for tunneltraceet for Øresundsforbindelsen. Her er det lykkedes at opnå en effektivitet på $0,14\%$ per Mm^3 . For at udligne blokerings effekten må man derfor forvente at skulle kompensationsafgrave et sted mellem $1,5 - 2,0 \text{ Mm}^3$.

Screeningen viser, at der er et potentiale ved at afgrave i to områder lige nord for tunneltraceet for Øresundsforbindelsen. Det vil dog være nødvendigt med yderligere undersøgelser, såfremt der skal afgraves i området omkring Nordre Røse. Dels er Nordre Røse Fyr beliggende på lokaliteten, men der er også en række søkabler, som kan indsnævre området, hvori der reelt kan kompensationsafgraves. Endelig har den Blå Planet sit vandindtag beliggende i området. Ligeledes vil der være risiko for at gravespild fra uddybningen vil kunne påvirke Amager Strandpark, samt de to Natura 2000 områder ved Saltholm og Amager syd.

3 Baggrund og metode

3.1 Baggrund

I forbindelse med de store marine broprojekter i Storebælt og Øresund har der været stillet krav om at opnå en nulløsning for gennemstrømningen, i den forstand at projektet ikke må blokere for Østersøens udveksling af vand, salt og ilt med Kattegat. For Femern Bælt forbindelsen er tunnelprojektet også uden påvirkning på gennemstrømningen.

Der eksisterer dog ikke et fastlagt kriterie for, hvor lille blokeringseffekten kan være for at den kan betegnes som neglignel og dermed kategoriseres som en nulløsning.

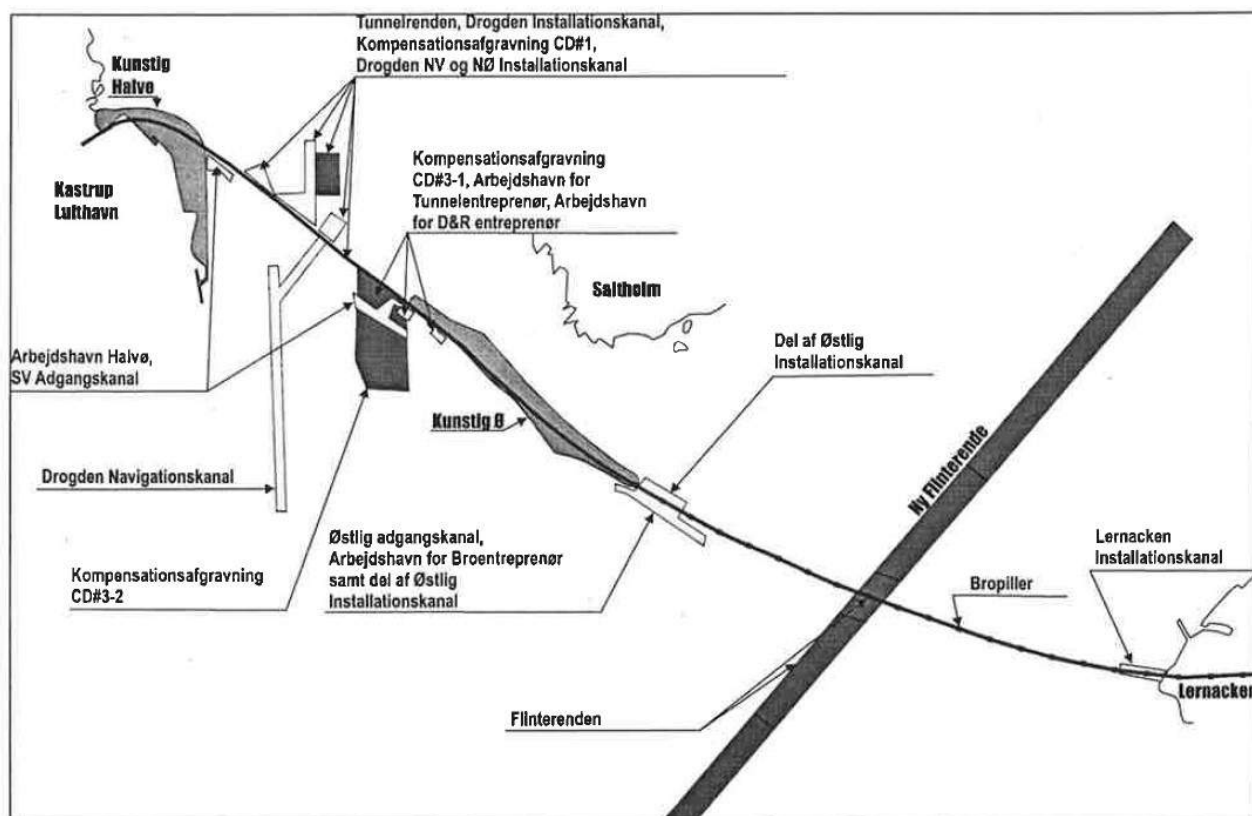
Udvekslingen af vand mv. med Østersøen sker gennem de tre danske bæltter: Lillebælt, Storebælt og Øresund. Som en tommelfingerregel vil vandudvekslingen være fordelt med 1/11 i Lillebælt, 7/11 i Storebælt og 3/11 i Øresund. En lokal blokerings-effekt på 0,5% i Storebælt vil derfor være mere signifikant for den samlede udveksling for Østersøen end en lokal blokering på 0,5% i Lillebælt eller Øresund.

Fordelingsnøglen betyder også at en estimeret lokal blokering i et af de tre bæltter som en tilnærmelse kan skaleres med ovenstående fordelingsnøgle, når der vurderes på betydningen for den samlede udveksling af vand og salt med Østersøen.

I forbindelse med Øresundsforbindelsen blev der udført kompensationsafgravning med henblik på at opnå en nulløsning. Øresundsforbindelse var et ganske komplekst projekt, hvor der ud over tunnel og bro også blev skabt en ny kunstig ø Peberholmen, opfyldt i et område omkring lufthavnen og uddybet i en række adgangsrender i anlægsområdet. Endelig blev der uddybet i navigationsrenderne Drogden og Flinterenden. Den samlede afgravningsmængde for etablering af Øresundsforbindelsen udgjorde cirka 7,9 Mm³, hvoraf "direkte" kompenserende uddybninger på to lokaliteter i Drogden udgjorde cirka 1,5 Mm³, ref. /1/. I Figur 3-1 er der vist et oversigtskort af den faste forbindelse, samt opfyldningsområder og uddybningsområder.

Efter kompensationsafgravning blev den resulterende blokering reduceret fra -0,5% gældende for opfyldningerne og bropillerne, til 0,14/0,16%¹ for vand og salttransport (svag overkompensation, ref. /2/), idet der også blev indregnet nødvendige adgangskanaler og udretning af skibsruten i Flinterenden. Den resulterende blokering på 0,14/0,16% var inden for den vurderede usikkerhed på beregningen, og nulløsningskravet var derfor opfyldt. Effektiviteten af de 1,5 Mm³ kompensationsafgravning var 0,19% per afgravede Mm³.

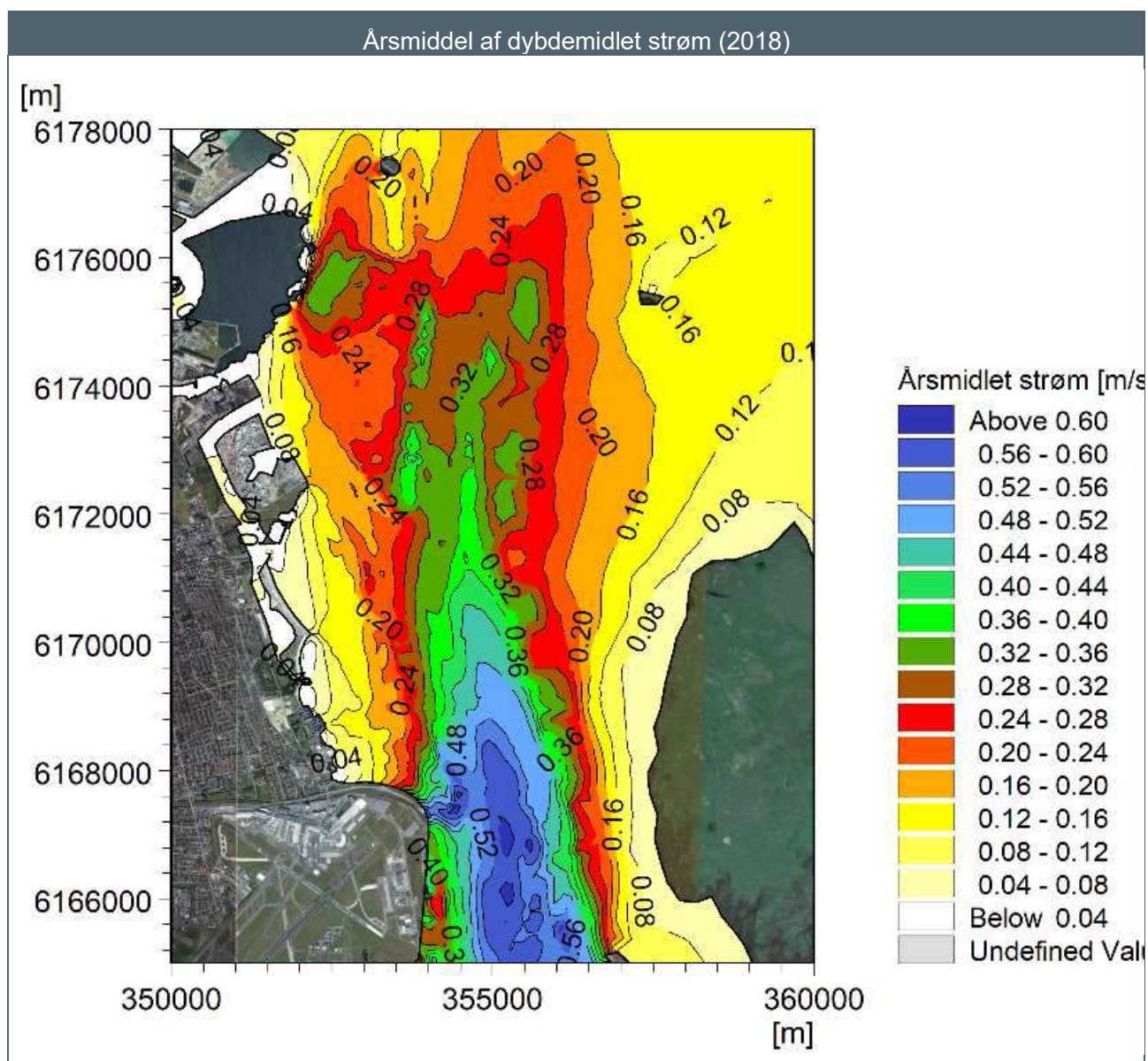
¹ Bemærk, at det her anvendte blokeringsmål har modsat fortegn i forhold til det i ref. /2/ benyttede.



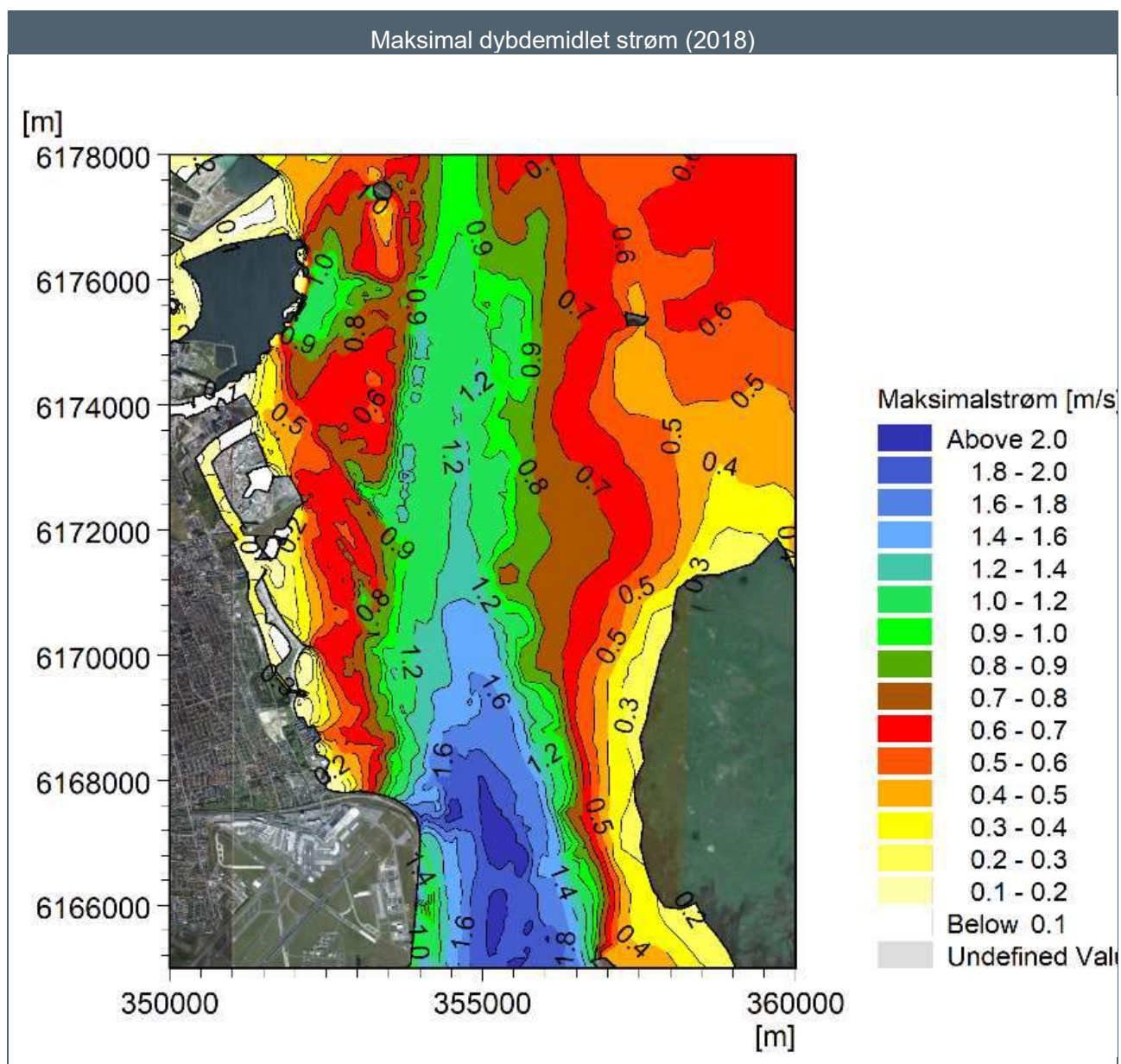
Figur 3-1 Den faste forbindelse samt indikation af områder med opfyld og afgravning, fra ref. /2/.

3.2 Metode

Såfremt at der skal udføres kompensationsafgravning for Lynetteholm, er det mest effektivt at identificere et eller flere områder, hvor man opnår størst muligt effekt med mindst mulig afgravning. Områderne må dog ikke være reserveret til andre formål. Den letteste måde at identificere sådanne områder, er ved at kombinere viden om strømhastigheder og batymetri. Det lokale energitab er proportional med kvadratet på strømhastigheden. En lokal uddybning vil derfor føre til en svækkelse af strømhastigheden og dermed mindske energitabet. I Figur 3-2 og Figur 3-3 er årsmiddel og maksimum af dybdemidlet strøm beregnet for år 2018 med Lynetteholm. Det fremgår klart, at der ud fra strømhastighederne alene er et større perspektiv i at kompensationsafgrave i området omkring Øresundstunnelen (Drogden) fremfor i Hollænderdybet. Da vanddybden yderligere er større i Hollænderdybet end i Drogden vil en uddybning her ligeledes have en mindre påvirkning på strømhastigheden. Den bedste effekt vil derfor kunne opnås ved afgravning i områder, hvor årsmidlet strøm er kraftig og batymetrien desuden er knoldet, hvilket giver ekstra strømodstand. De batymetriske forhold samt områder af interesse er vist i Figur 4-4.



Figur 3-2 Statistisk beregnet fordeling af årsmidlet strøm (dybdemidlet) for situationen med Lynetteholm og uden kompensationsafgravning.



Figur 3-3 Statistisk beregnet fordeling af maksimalstrøm (dybdemidlet) for situationen med Lynetteholm og uden kompensationsafgravning.

Modelberegningerne udføres med den samme numeriske model, som anvendt i ref. /1/, hvor blokeringen af Lynetteholm er estimeret. De her undersøgte kompensationsafgravninger er implementeret via justering af batymetrien (vanddybden) i de pågældende områder.

Beregningerne er gennemført som en række screeningsberegninger med henblik på at bestemme effektiviteten for kompensationsafgravning, som kan sikre en nulløsning for gennemstrømningen. Effektiviteten er defineret som effekten på blokeringen i forhold til den gravede mængde. De udførte screenings-beregninger dækker en langtidsrepræsentativ periode på 4 måneder (1. januar - 1. maj 2018).

I den indledende screening fokuseres der primært på uddybning af områder i den østlige del af Hollænderdybet, men da et sådan tiltag viser en utilstrækkelig effektivitet, er fokusområdet efterfølgende rettet mod områder i Drogden renden nord for Øresundstunnelen.

For et af de mest lovende scenarier gennemføres beregningen for et helt kalenderår, således at alle sæsonvariationer bliver inkluderet i estimatet. Den fundne blokeringsforskel efter 4 og 12 måneder anvendes efterfølgende til at korrigere de i screeningsscenarioerne fundne estimater, så de som en første ordens approksimation også repræsenterer et fuldt kalenderår.

3.3 Blokeringsmål og undersøgte tværsnit

I dette afsnit er blokeringsmålet forklaret og ligeledes er der angivet, hvilke strømningstværsnit der er analyseret for.

3.3.1 Blokeringsmål

Blokeringsmålet er defineret med henblik på at estimere påvirkningen af landopfyldningen (Lynetteholm) på den dynamiske udveksling af vand og salt i stræder som eksempelvis Øresund, hvor strømningen skifter over tid som følge af tidevand og passage af meteorologiske vejrsystemers påvirkning. Det her anvendte blokeringsmål, er defineret ved en blokeringsfaktor dq ²:

$$dq = \frac{\sum(|Q_L| - |Q_B|)}{\sum|Q_B|}$$

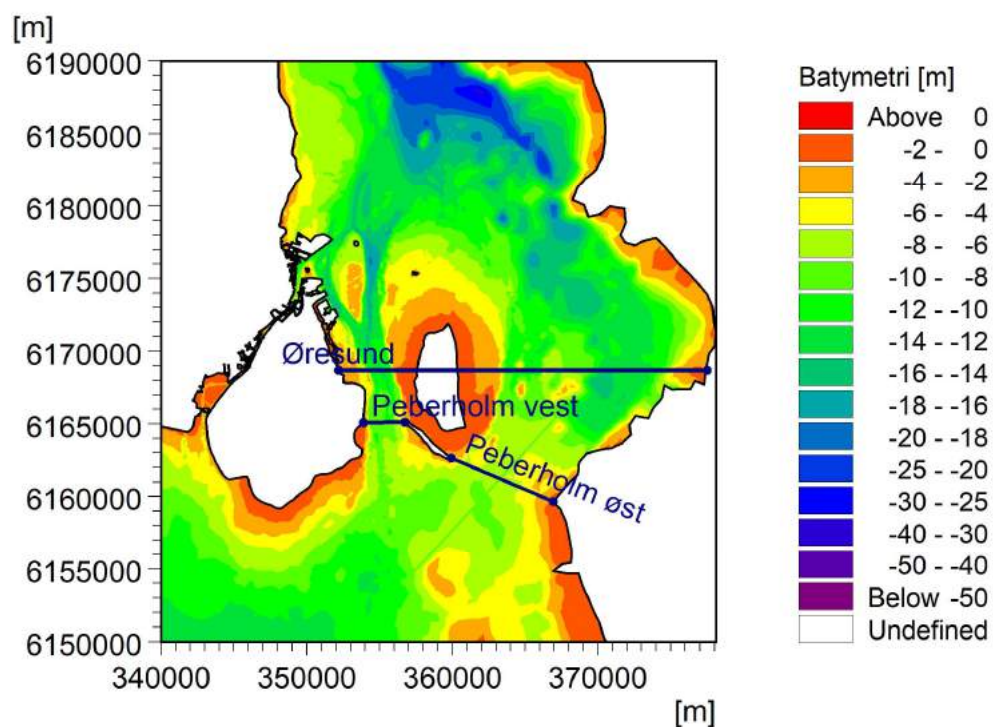
hvor Q enten relaterer til vandføringen eller salttransporten gennem et prædefineret tværsnit. Q_B refererer her til baseline situationen uden Lynetteholm, mens Q_L refererer til situationen med Lynetteholm (med eller uden kompensationsafgravning). Det ses, at blokeringsmålet giver den relative påvirkning af projektet i forhold til baseline forholdene. Med ovenstående definition repræsenterer et negativt tal en blokering og en dæmpet dynamik, mens et positivt tal er udtryk for en forstærket dynamik. Ideen med at bruge den numeriske værdi uafhængigt på begge størrelser er, at man får elimineret betydningen af en faseforskel mellem de 2 situationer, samt får et fortegn på blokeringen.

3.3.2 Tværsnit

Blokeringen af vand og salt er undersøgt for de to tværsnit vist i Figur 3-4 nedenfor. Tværnittene er identiske med de tværsnit som blev analyseret i ref.

² Det her angivne blokeringsmål har modsat fortegn i forhold til det, som anvendes i ref. /2/.

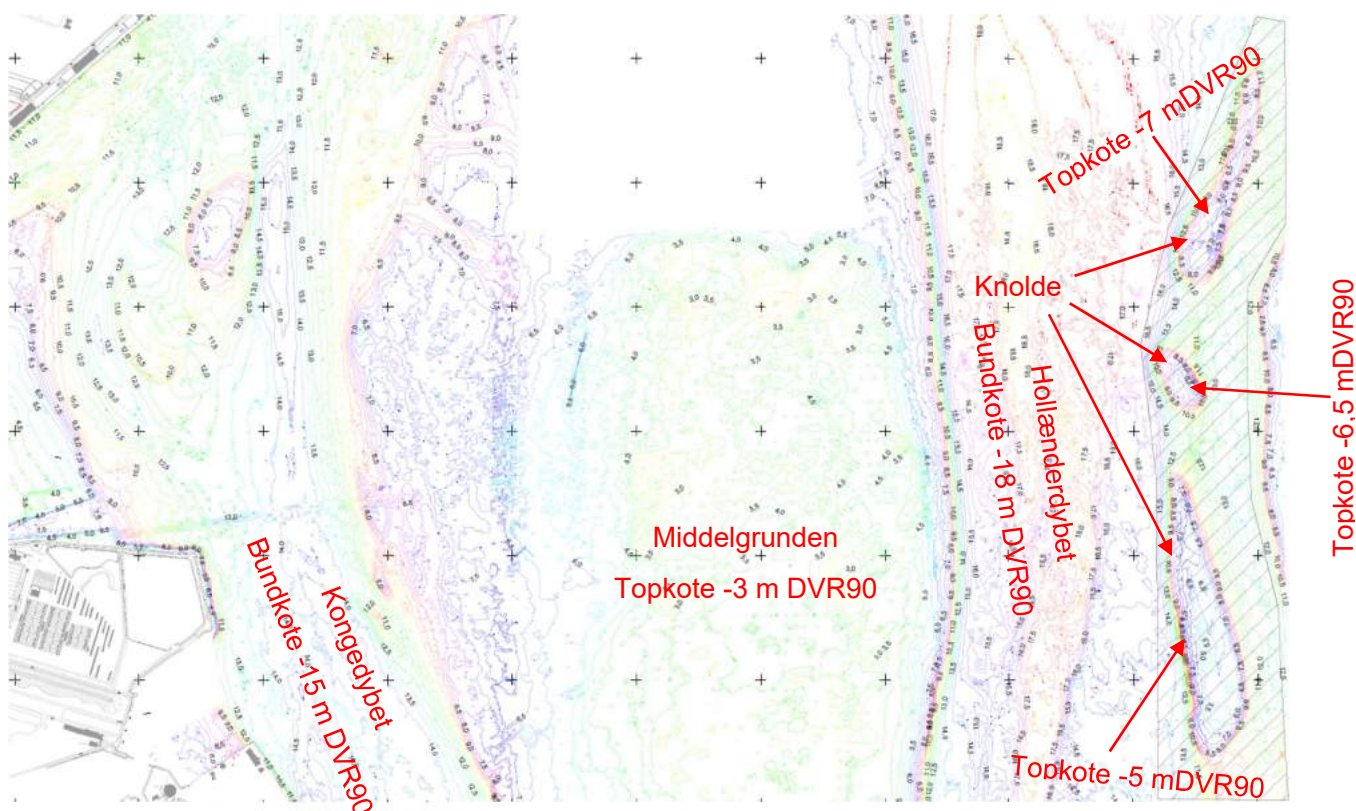
/1/, dog med den forskel at de to Peberholm tværsnit blev undersøgt uafhængigt af hinanden. I denne analyse er det, det kombinerede tværsnit som analyseres.



Figur 3-4 Tværsnit analyseret for blokering. 1: Øresund, 2: Peberholm (øst + vest).

4 Scenarier og resultater

I det følgende er de forskellige kompensationsafgravningsscenarier gennemgået. De første scenarier er fokuseret på Hollænderdybet, som er beliggende i samme tværsnit som Lynetteholm opfyldningen. Øst for Hollænderdybet ind mod flakket er der tre knolde. I de følgende scenarier er uddybningsområderne gradvist flyttet tættere på Øresundsforbindelsen, idet effekten af kompensationsafgravning er væsentlig større i dette område på grund af den højere strømhastighed der. Pejlinger af knoldene vest for Hollænderdybet er vist i Figur 4-1. På kortet er der angivet den højeste topkote på den enkelte knolde.



Figur 4-1 Pejlinger af Kongedybet, Middelgrunden, Hollænderdybet og de tre knolde øst for Hollænderdybet.

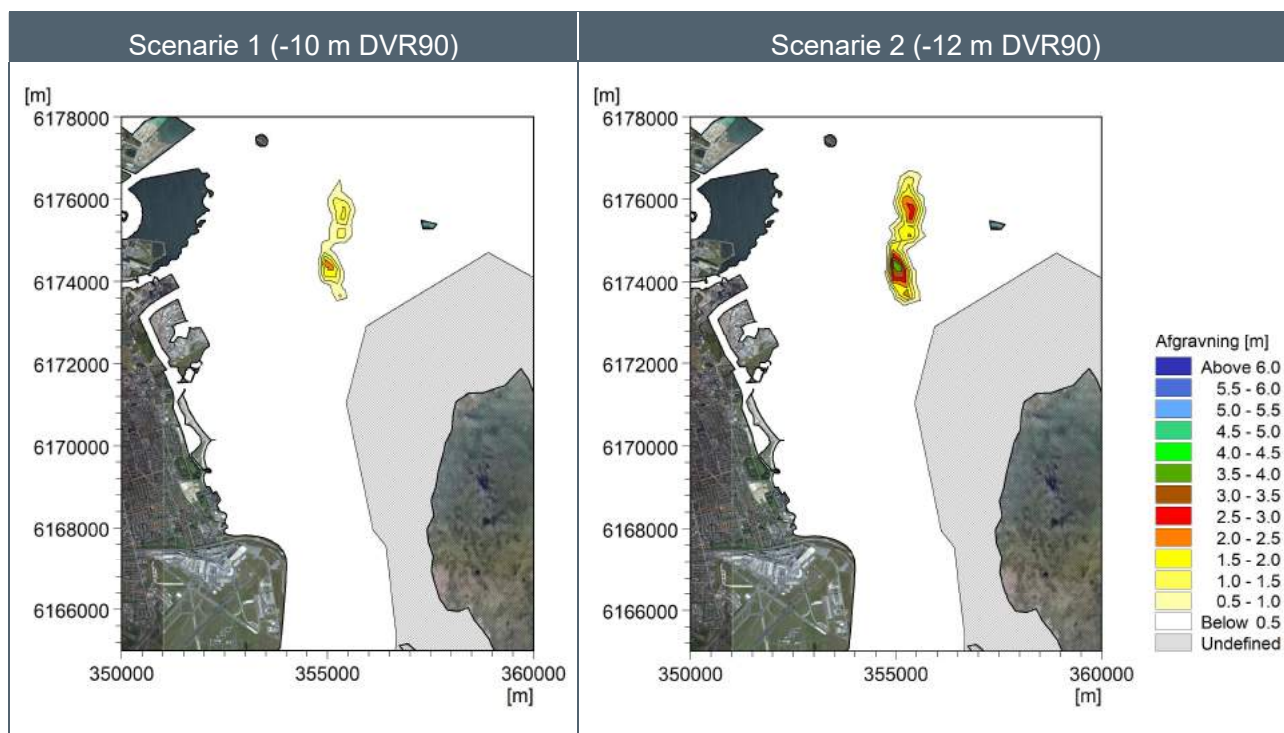
4.1 Afgravningsområder og scenarier

I screeningsprocessen er der i alt analyseret 9 kompensationsafgravninger. Afgravningstykkelser og områder er indikeret i de følgende figurer. I scenarie 1 afgraves der til kote -10 mDVR90 og i scenarie 2 til -12 mDVR90 i området med de tre knolde øst for Hollænderdybet.

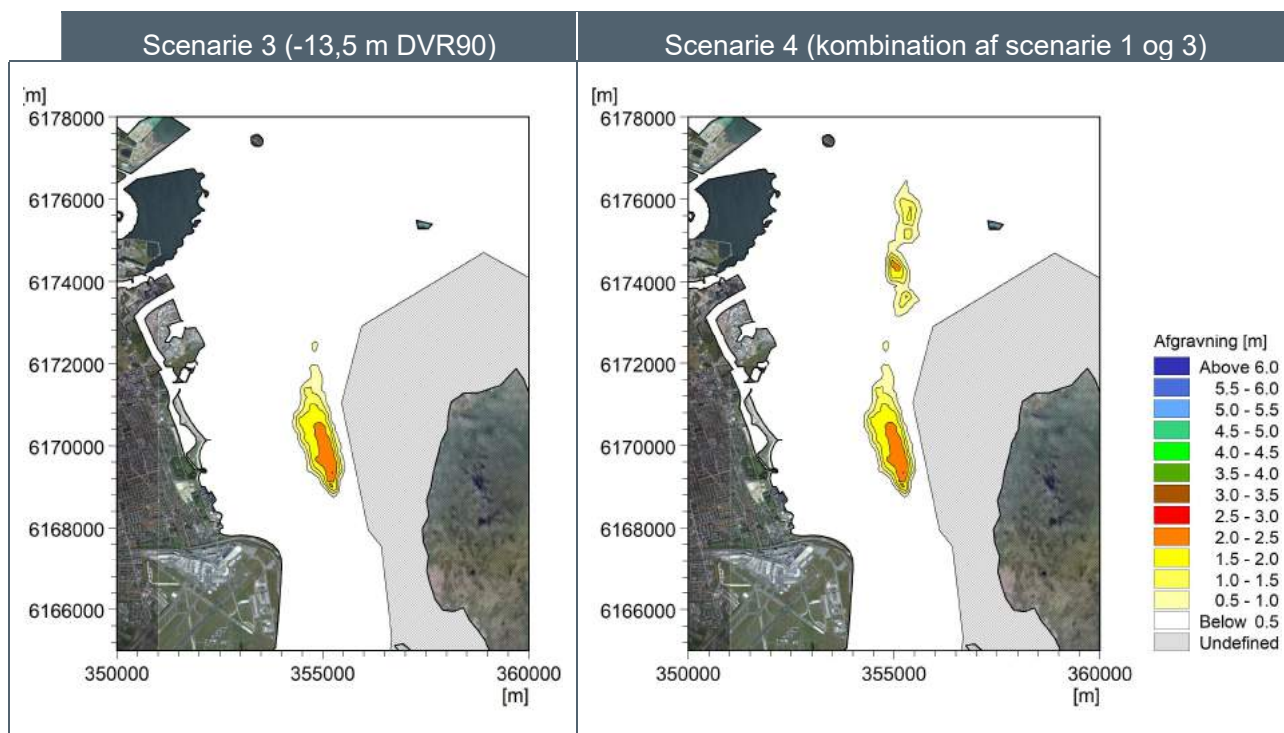
I scenarie 3 er uddybningsområdet fortsat i øst for Hollænderdybet, men flytte flyttet længere mod syd. Der uddybes til kote -13,5 mDVR90. I scenarie 4 er scenarie 1 og 3 kombineret (med en lille udvidelse syd for scenarie 1 området).

Undersøgelsen af de fire første områder viste en forholdsvis beskeden effektivitet af kompensationsafgravningen. I de følgende scenarier blev undersøgelsesområdet derfor rykket længere mod syd til området lige nord for

Øresundsforbindelse, idet dette område er karakteriseret ved kraftigere strøm og større energitab.

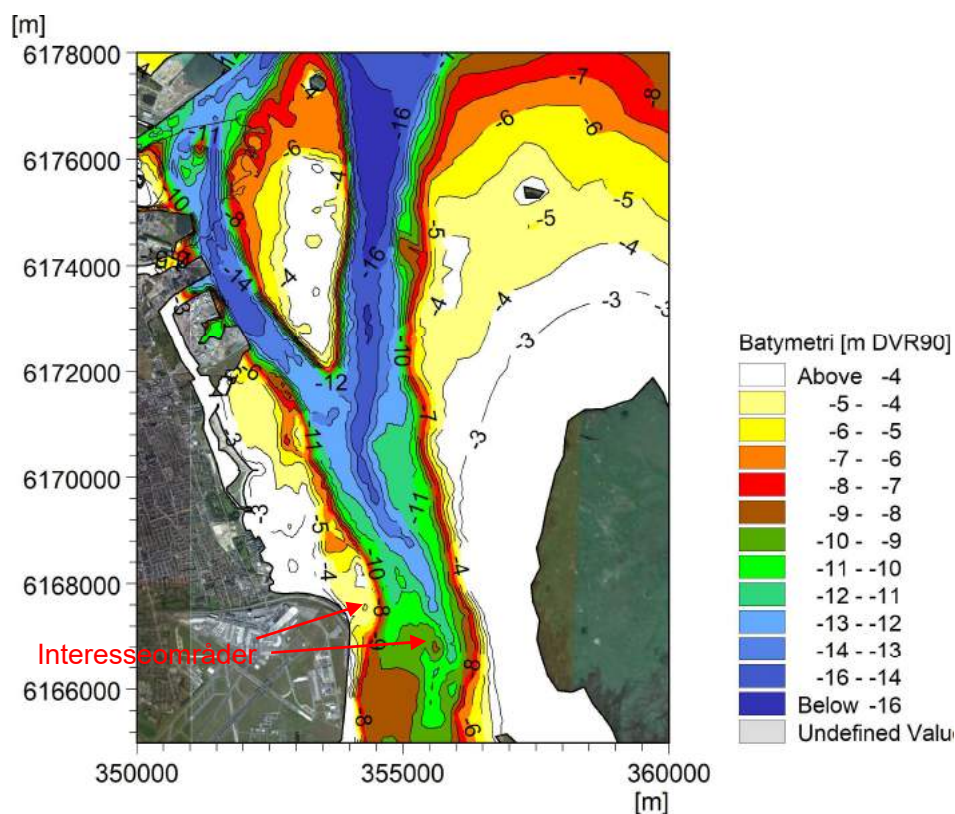


Figur 4-2 Afgravningsområder i scenarie 1 og 2.



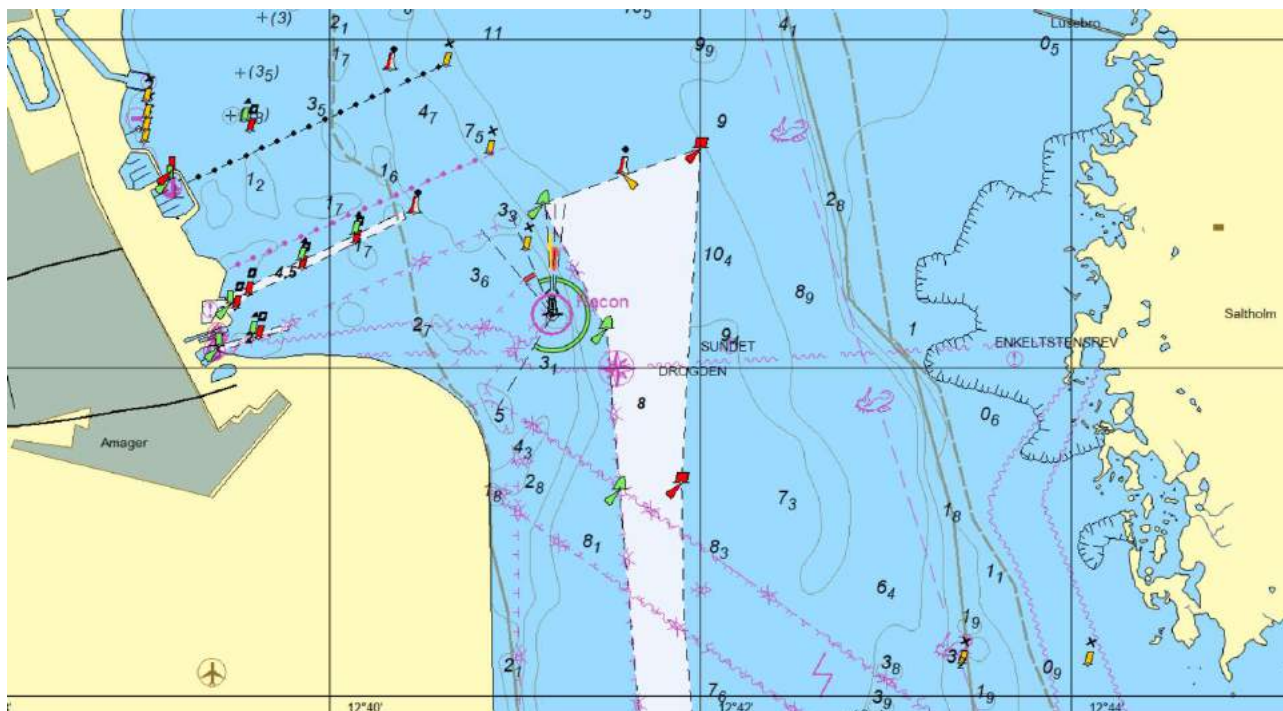
Figur 4-3 Afgravningsområder i scenarie 3 og 4.

I Figur 4-4 er der på batymetrikortet indikeret to interesseområder lige nord for Øresundsforbindelsens tunneltrace, hvor der vil kunne opnås en større effektivitet af kompensationsafgravning.

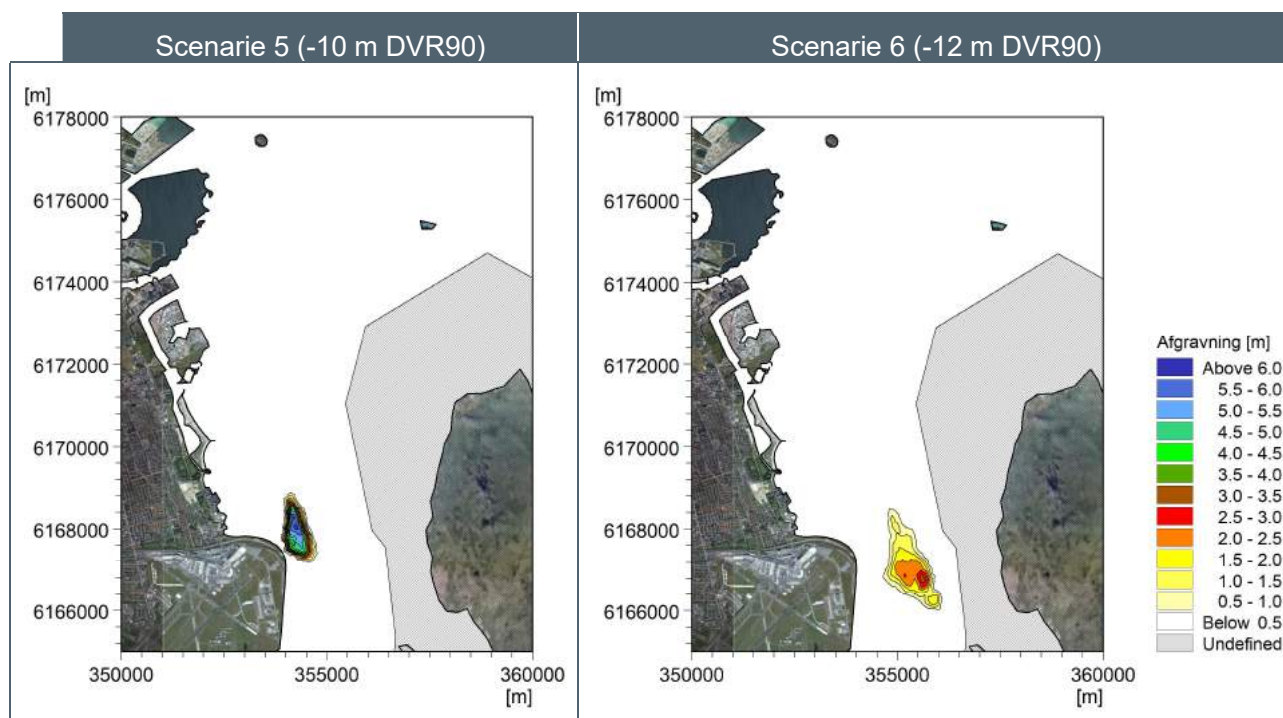


Figur 4-4 Batymetri og interesseområder for kompensationsafgravning nord for Øresundsforbindelsens tunnel.

I scenarie 5 afgraves der ned til kote -10 m DVR90 i det indikerede område. I screeningen er der alene taget hensyn til hvilken effektivitet der kan opnås. Der er ikke taget hensyn til at den Blå Planets vandindtag og Nordre Røse Fyr er beliggende i samme område. Ligeledes er der en række søkabler i området, der vil kunne vanskeliggøre en uddybning. I scenarie 6 er afgravningen flyttet mere ud i løbet. Her afgraves der til kote -12 m DVR90. Søkortet i Figur 4-5 viser de mange anlæg i området, som en kompensationsafgravning vil skulle forholde sig til.

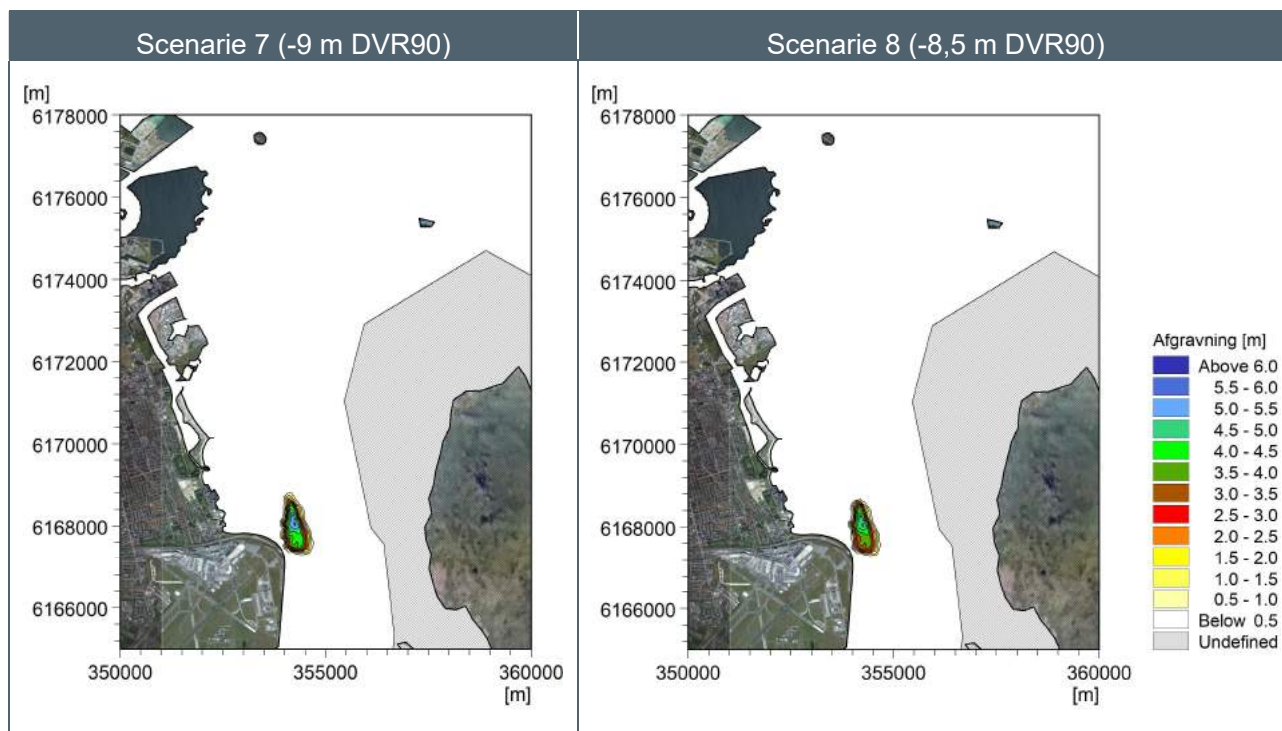


Figur 4-5 Søkort visende søkabler, Nordre Røse Fyr, den Blå Planets vandindtag og Tårnby renseanlægs havledning.

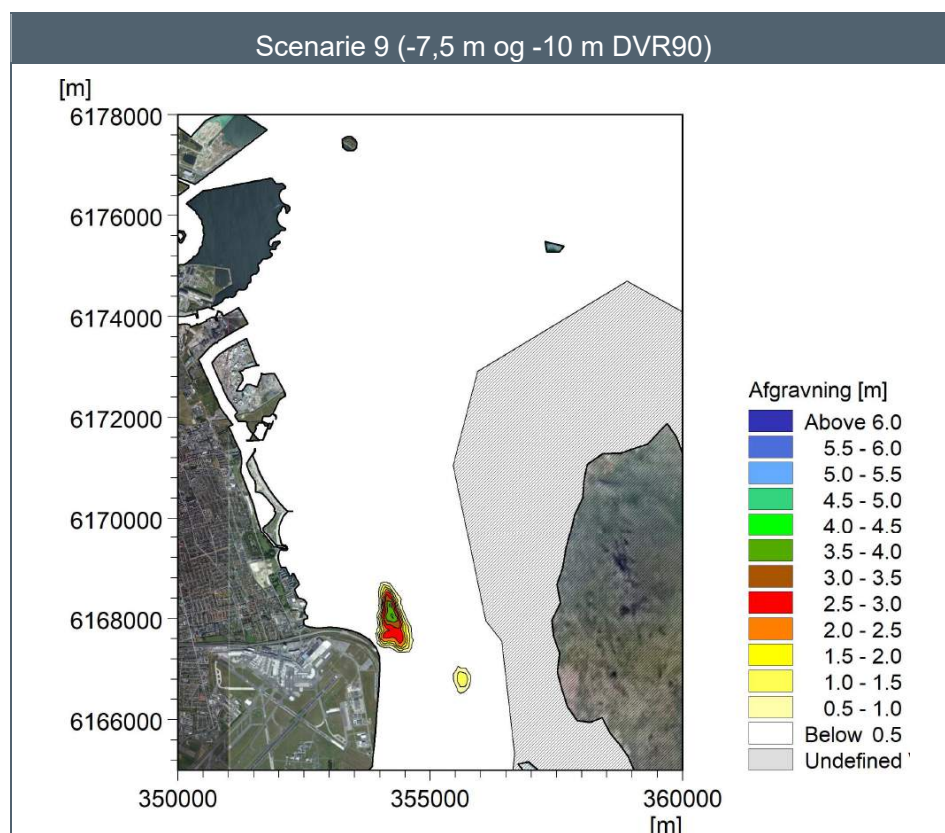


Figur 4-6 Afgravningsområder i scenarie 5 og 6.

I scenarie 7 og 8 afgraves der i samme område som i scenarie 5. I scenarie 7 afgraves der til kote -9 m DVR90, mens der i scenarie 8 afgraves til kote -8,5 m DVR90. Scenarie 9 er en kombination af scenarie 8 og scenarie 6 områderne. I den vestlige del uddybes der til kote -7,5 m DVR90, mens der i den centrale del uddybes til kote -10 m DVR90.



Figur 4-7 Afgravningsområder i scenarie 7 og 8.



Figur 4-8 Afgravningsområder i scenarie 9.

I Tabel 4-1 er de beregnede kompensationsvolumener angivet for hver af de ni scenarier. En nylig pejling af området med de tre knolde viser at afgravningsvolumenerne i scenarie 1 og 2 (og dermed også scenarie 4) er

overvurderede med cirka 50 % i forhold til en volumenberegning baseret på den nye opmåling med 1 m x 1m opløsning. Det overvurderede estimat relaterer til at knolde er beliggende, hvor beregningsnettet ændres fra en finere til en grovere opløsning, samt at det anvendte batymetrigrundlag for området har mindre opløsning. I de her udførte screeningsberegninger er der ikke gjort en indsats for at forbedre modelopløsningen i dette område, idet det ikke vil ændre på konklusionen om, at man opnår for lille en effektivitet af kompensationsafgravning i dette område. Fokus har i stedet været i området i Drogden nord for tunnelen, hvor modelberegningsnettet er finere og effekten på gennemstrømningen er mere signifikant og kan estimeres med større nøjagtighed.

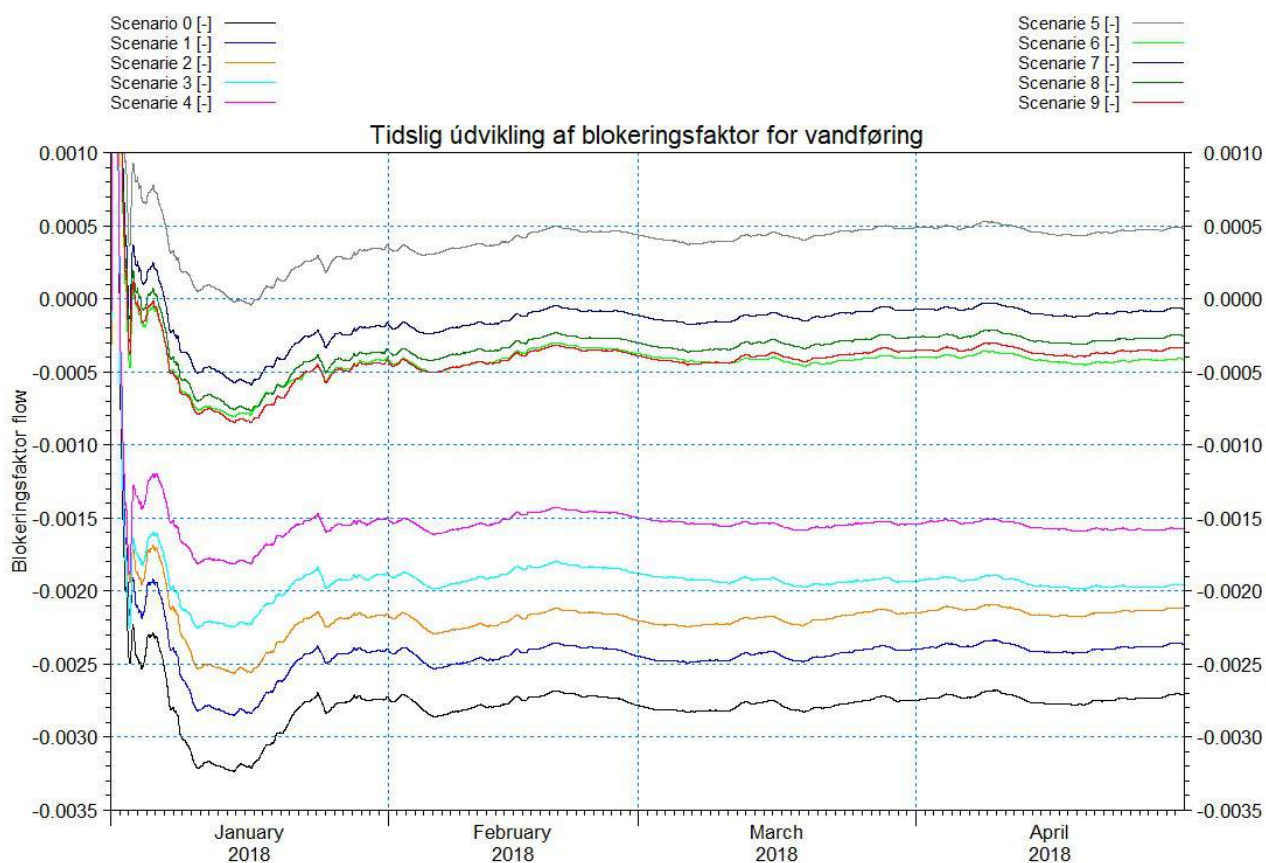
Tabel 4-1 Kompensationsafgravningsvolumener i hver af de 9 undersøgte scenarier.

Scenarie	Afgravningsvolumen [Mm ³]
1	1,635
2	3,493
3	3,409
4	5,300
5	2,888
6	2,678
7	2,298
8	1,951
9	1,687

4.2 Estimeret blokering i screeningsperiode

I screeningsanalyserne er blokeringen estimeret på baggrund af en fire måneder lang periode strækkende sig fra 1. januar 2018 til 1. maj 2018. I vinterhalvåret er der generelt set mere dynamik, hvorfor den estimerede blokering for særligt vandføringen er en smule overvurderet. De i screeningsberegningerne fundne blokeringer skal derfor korrigeres for at blive repræsentative for et fuldt kalenderår, hvor alle sæsonvariationer er repræsenteret.

I Figur 4-9 er den tidlige udvikling af blokeringsfaktoren for vandføringen gennem Øresundstværsnittet (se Figur 3-4) angivet for de 9 kompensationsafgravningsscenarier, samt Scenarie 0, hvor der ikke afgraves. Det ses meget tydeligt, at der er stor forskel på om der kompensationsafgraves i Drogden fremfor Hollænderdybet. Kurverne giver umiddelbart indtryk af, at blokeringen har stabiliseret sig, men beregningen af det fulde år viser, at der er en sæsoneffekt i sommerhalvåret og som bevirker at de i Tabel 4-2 fundne blokeringer skal justeres en smule for at blive repræsentative for et fuldt kalenderår. I Tabel 4-2 er effektiviteten af kompensationsafgravningen også angivet. Det ses, at der i scenarie 9 er opnået en effektivitet på ~0,14% per Mm³.



Figur 4-9 Tidlig udvikling af blokeringsfaktor for vandføring i Øresund tværsnit med og uden kompensationsafgravning.

Tabel 4-2 Blokeringseffekt af de undersøgte scenarier af vandføring i Øresund tværsnittet (gældende for den korte scenarieperiode).

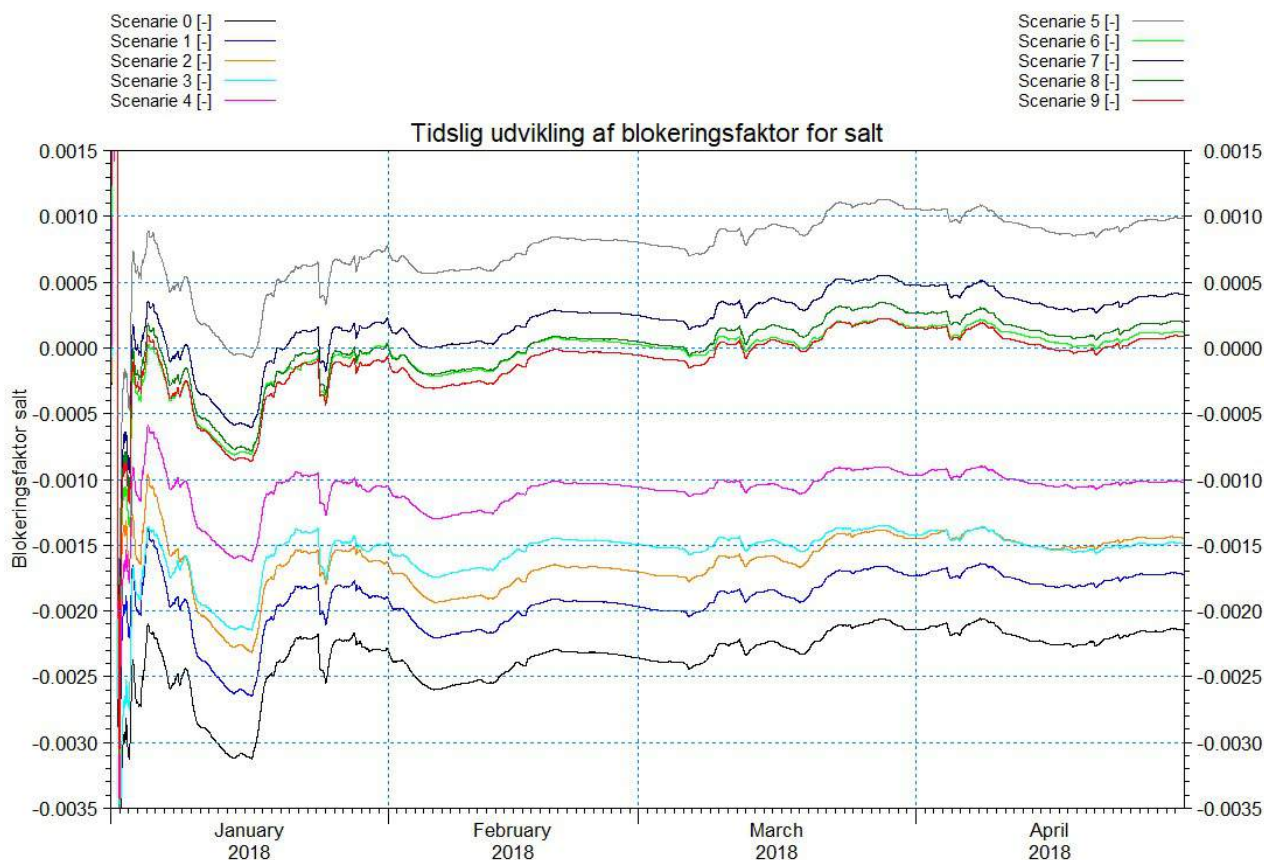
Scenarie	Blokering [%]	Reduktion i forhold til scenarie 0 [%]	Effektivitet [%/Mm ³]
1	-0,236	0,035	0,021
2	-0,212	0,059	0,017
3	-0,196	0,075	0,022
4	-0,157	0,114	0,021
5	0,048	0,319	0,111
6	-0,041	0,230	0,086
7	-0,007	0,264	0,115
8	-0,025	0,246	0,126
9	-0,033	0,238	0,141

I

Figur 4-10 er den tidlige udvikling af blokeringsfaktoren for salttransporten gennem Øresundstværsnittet angivet for de 9 kompensationsafgravnings-

scenarier, samt Scenarie 0, hvor der ikke afgraves. Det ses igen meget tydeligt, at der er stor forskel på om der kompensationsafgraves i Hollænderdybet eller i Drogden. Den tidlige udvikling er mindre stabil end for vandføringen, men blokeringsmålene er nogenlunde identiske med det den blokering som findes for det fulde kalenderår. Der er derfor kun behov for en beskedne justering af de i

Tabel 4-3 fundne blokeringer, for gøre dem repræsentative for det fulde kalenderår. I Tabel 4-3 er effektiviteten af kompensationsafgravningen på transporten af salt angivet. Det ses, at der i scenarie 9 er opnået en effektivitet for salttransporten på 0,13% per Mm^3 , hvilket er lidt lavere end, hvad der blev opnået for Øresundsforbindelsen (0,19 % per Mm^3).

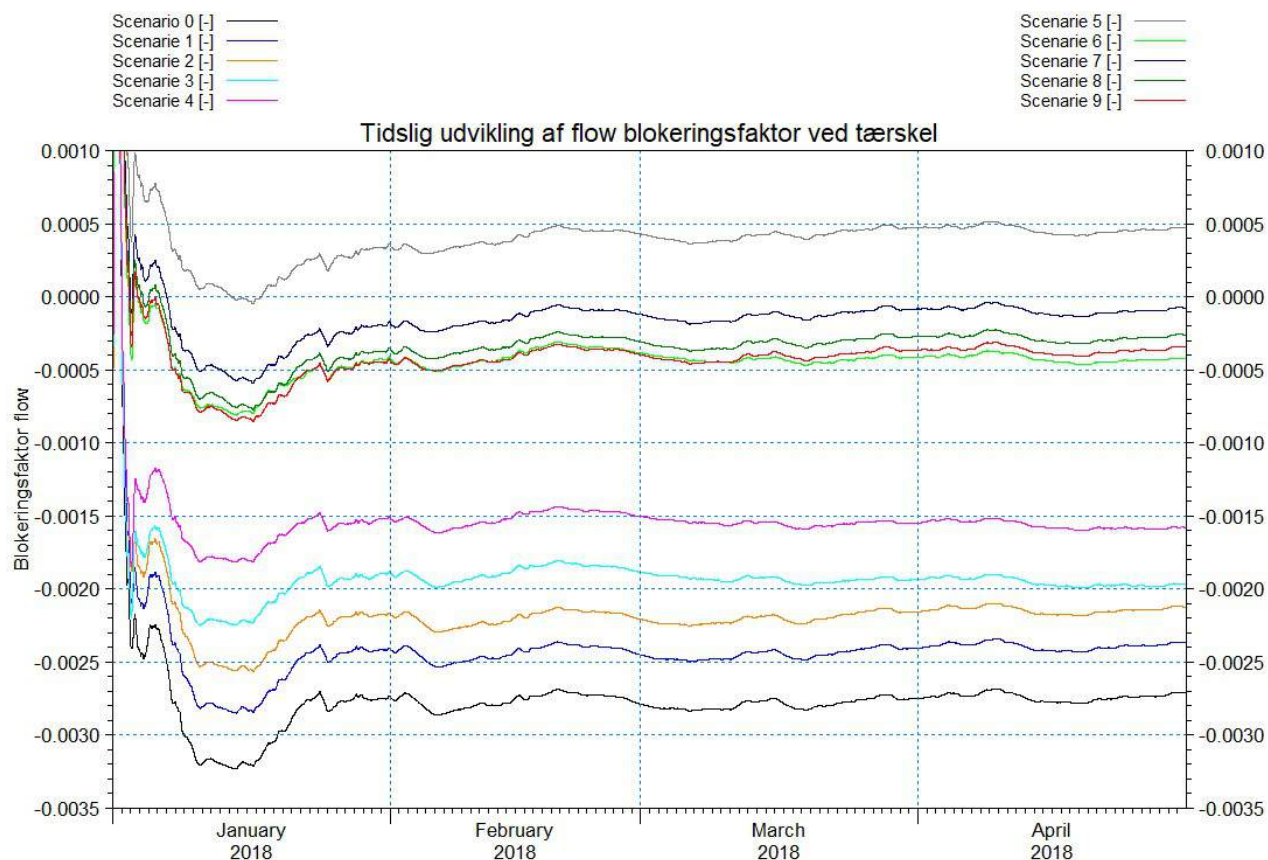


Figur 4-10 Tidslig udveksling af blokeringsfaktor for salt i Øresund tværsnit med og uden kompensationsafgravning.

Tabel 4-3 Blokeringseffekt af de undersøgte scenarier af saltransport i Øresundtværsnit (gældende for den korte scenarieperiode).

Scenarie	Blokeringsfaktor [%]	Reduktion i forhold til scenarie 0 [%]	Effektivitet [%/Mm ³]
1	-0,172	0,043	0,026
2	-0,145	0,070	0,020
3	-0,149	0,066	0,019
4	-0,102	0,112	0,021
5	0,098	0,313	0,108
6	0,012	0,227	0,085
7	0,041	0,255	0,111
8	0,020	0,234	0,120
9	0,009	0,223	0,132

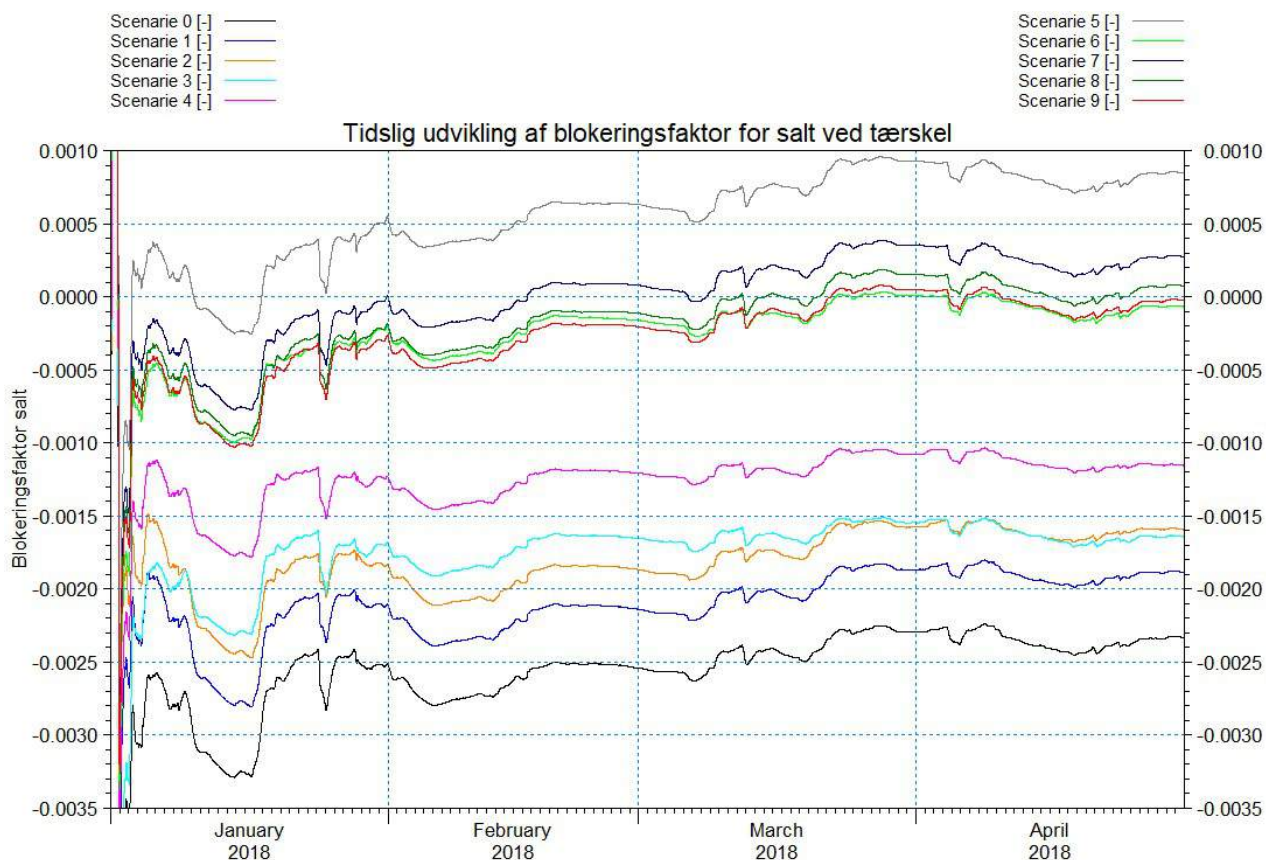
Drogden tærsklen anses som det regulerende tværsnit for udvekslingen af vand med Østersøen. Blokeringsmålet er derfor også beregnet for det kombinerede Peberholm tværsnit indikeret på Figur 3-4. Resultatet af denne analyse er vist i Figur 4- for vandføringen og i Figur 4- for salttransporten. Ligeledes er de i screeningen fundne blokeringer angivet i Tabel 4-4 og Tabel 4-5. Blokeringsmålene for vandføringen afviger ikke væsentligt fra de i Øresundtværsnittet beregnede værdier. For transporten af salt er der en forskel på lidt mindre end 0,02% i de to tværsnit.



Figur 4-11 Tidslig udvikling af blokeringsfaktor for vandføring i Øresund tværsnit ved tærskel (Peberholm) med (scenarie 1-9) og uden kompensationsafgravning (scenarie 0).

Tabel 4-4 Blokeringseffekt af de undersøgte scenarier af vandføring ved tærskel (Peberholm) (gældende for den korte scenarieperiode).

Scenarie	Blokeringsfaktor [%]	Reduktion i forhold til scenarie 0 [%]	Effektivitet [%/Mm ³]
1	-0,237	0,035	0,021
2	-0,212	0,059	0,017
3	-0,197	0,075	0,022
4	-0,158	0,113	0,021
5	0,047	0,318	0,110
6	-0,042	0,229	0,085
7	-0,008	0,264	0,115
8	-0,026	0,245	0,126
9	-0,034	0,237	0,140



Figur 4-12 Tidlig udvikling af blokeringsfaktor for salt i Øresund tværsnit ved tærskel (Peberholm) med (scenarie 1-9) og uden kompensationsafgravning (scenarie 0).

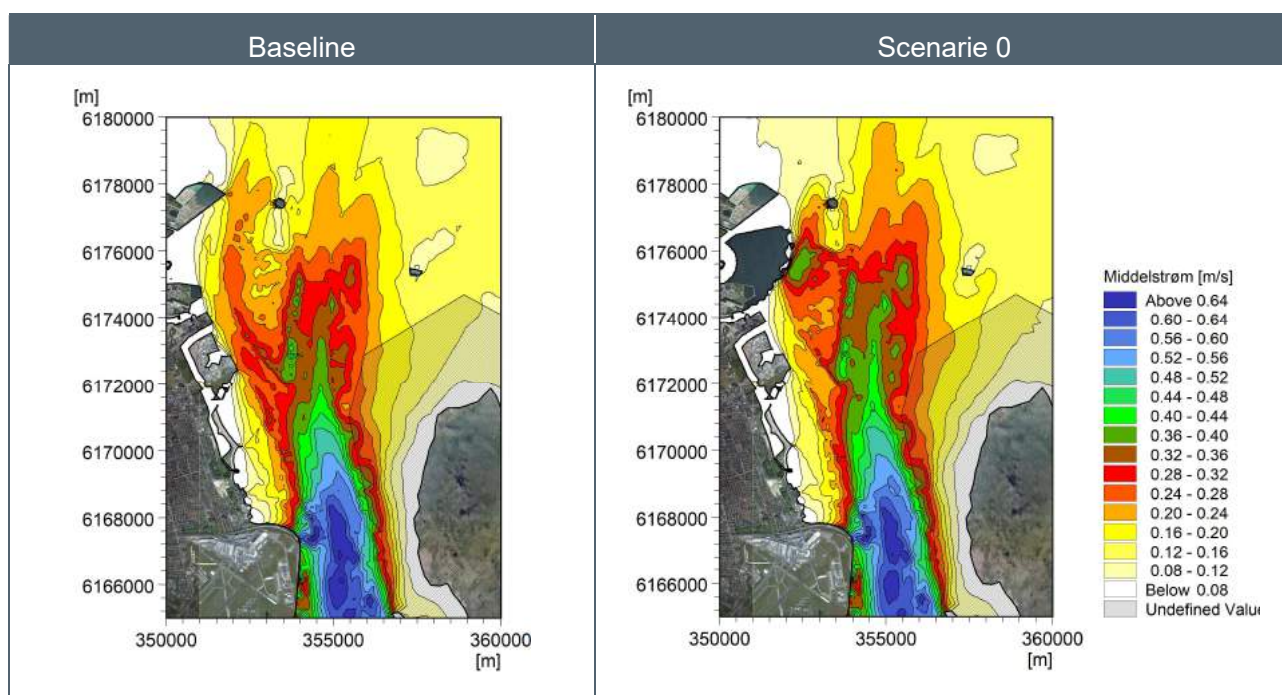
Tabel 4-5 Blokeringseffekt af de undersøgte scenarier af salttransport ved tærskel (Peberholm) (gældende for den korte scenarieperiode).

Scenarie	Blokeringsfaktor [%]	Reduktion i forhold til scenarie 0 [%]	Effektivitet [%/Mm ³]
1	-0,189	0,045	0,027
2	-0,159	0,074	0,021
3	-0,164	0,069	0,020
4	-0,115	0,118	0,022
5	0,085	0,318	0,110
6	-0,007	0,227	0,085
7	0,027	0,261	0,113
8	0,007	0,241	0,123
9	-0,002	0,231	0,137

4.2.1 Påvirkning af middelstrøm

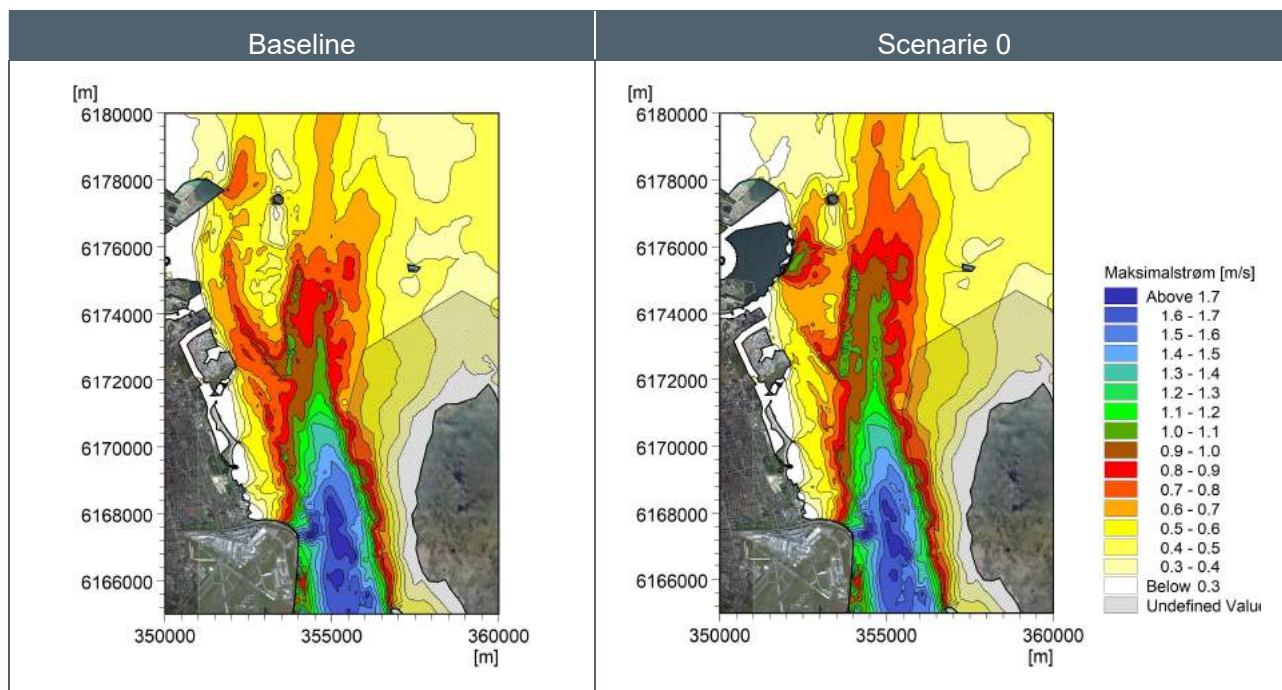
Middelstrømmen betegner middel af den numeriske strøm (bruttostrøm), dvs. uden hensyntagen til retning. Ændringer i middelstrømmen kan bruges til at identificere område, hvor der kan være en øget tendens til erosion eller aflejring. I det følgende er der derfor beregnet og vist en række plots, som illustrerer ændringerne i middelstrømmen og maksimalstrømmen, som følge af Lynetteholm og kompensationsafgravning.

For at opnå en kompenserende virkning af Lynetteholms blokering er det nødvendigt at reducere strømningens energitab. Energitabet er størst i de områder, hvor strømningen er kraftigst. Det vil derfor være i området omkring Drogden, at man kan opnå den største effekt. Figur 4- viser den statistisk beregnede middelstrøm i screeningsperioden (1. januar – 1. maj 2018) for baseline samt for scenarie 0, som er med Lynetteholm men uden kompensationsafgravning. Det ses, at dybdemidlet strøm gradvist tiltager i retning ned mod Øresundsforbindelsen, hvorfor dette område er mest interessant i forbindelse med at minimere det kompenserende afgravningsvolumen.



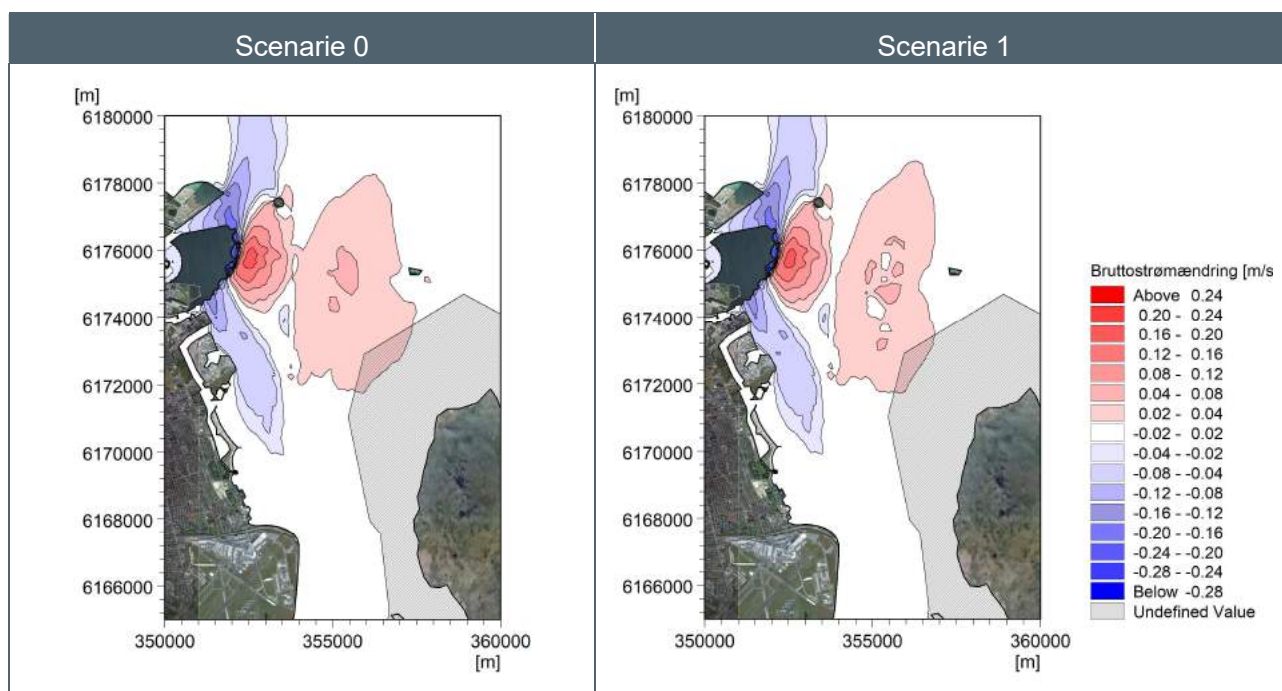
Figur 4-13 Statistisk beregnet middelstrøm (dybdemidlet) i perioden 1. januar - 1. maj 2018 for baseline forhold og med Lynetteholm uden kompensationsafgravning (scenarie 0).

Figur 4-14 viser den statistisk beregnede maksimalstrøm (dybdemidlet) i screeningsperioden for baseline og scenarie 0. Strømmønsteret ligner middelstrømmens men værdierne er del højere.



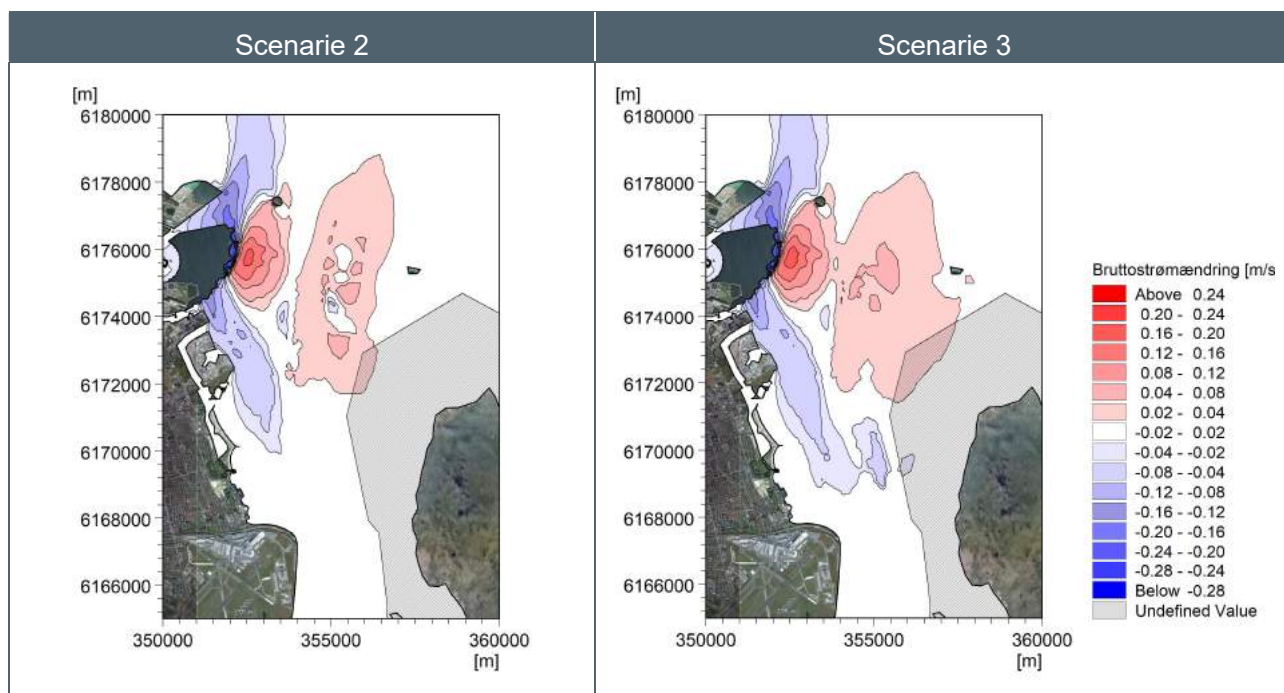
Figur 4-14 Statistisk beregnet dybdemidlet maksimalstrøm i perioden 1. januar - 1. maj 2018 for baseline forhold og med Lynetteholm uden kompensationsafgravning.

Lynetteholms blokering af Kongedybet medfører, at strømmen presses øst om Lynetteholm, hvorfor der finder en strømforstærkning sted i dette område. Ligeledes finder der en strømforstærkning sted i Hollænderdybet øst for Middelgrunden, som kompensation for den manglende transport gennem Kongedybet. Lynetteholms blokerende effekt og påvirkning af middelstrømmen er vist i Figur 4-15 (Scenarie 0). Påvirkningen af middelstrømmen er ligeledes vist for scenarie 1. Det ses, at påvirkningen er ganske beskeden, hvilket er i fin overensstemmelse med den relativt beskeden ændring af blokeringen.

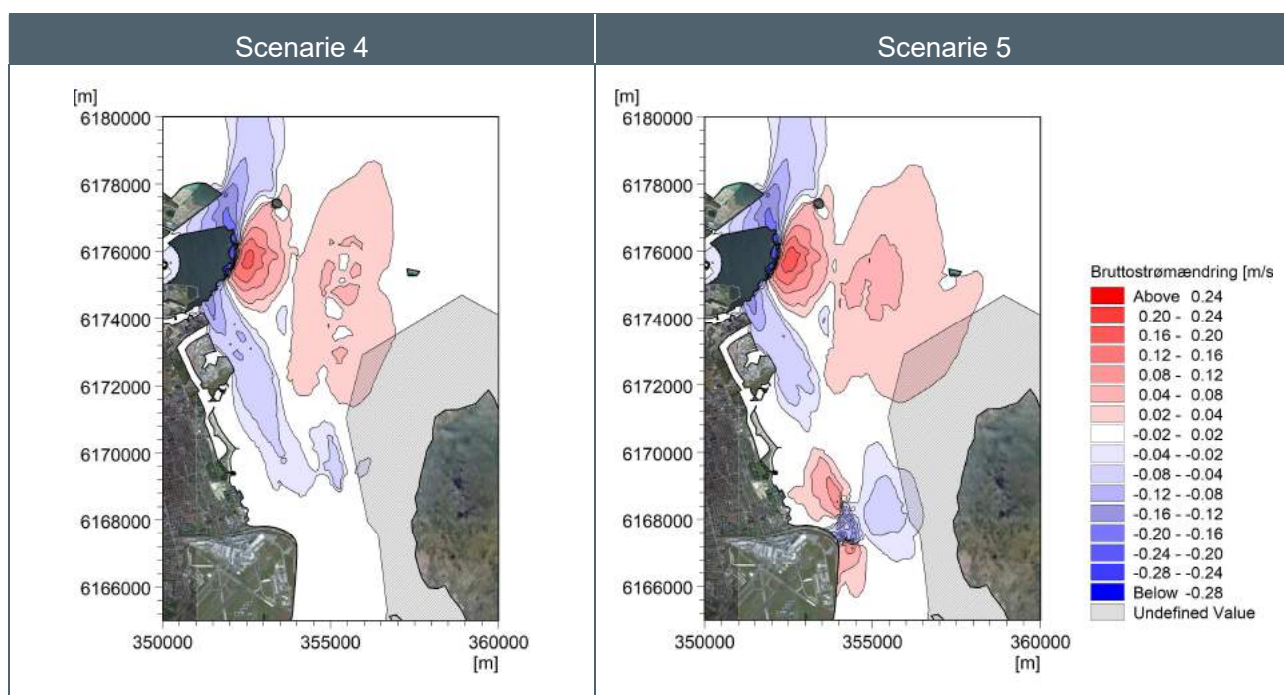


Figur 4-15 Ændring af middelstrøm i forhold til baseline i scenarie 0 og 1 (dybdemidlet).

Tilsvarende plots er vist for de øvrige scenarier i Figur 4-16 til Figur 4-19. Det ses af figurerne, at den største kompensationseffekt opnås for de scenarier, hvor ændringen af middelstrømmen i afgravningsområdet er størst. I scenarierne med afgravning omkring Nordre Røse falder middelstrømmen i afgravningsområdet, men forstærkes opstrøms og nedstrøms herfor, idet den nedsatte strømningsmodstand tiltrækker passage af mere vand.

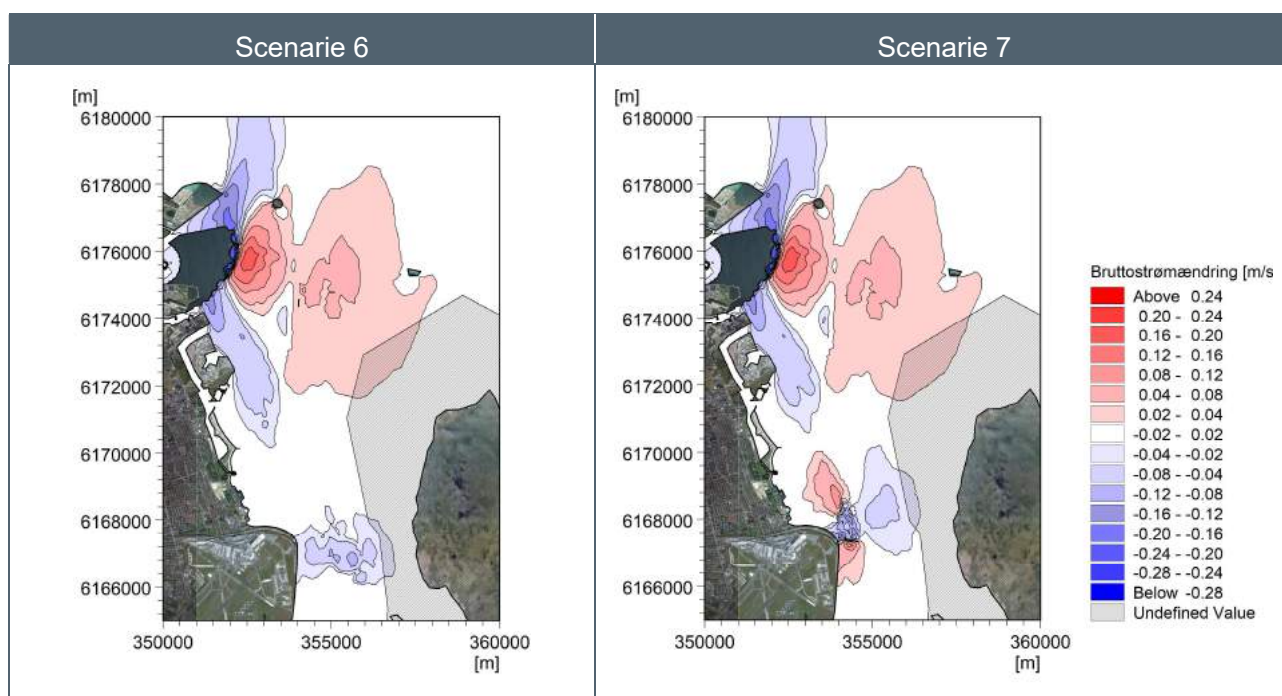


Figur 4-16 Ændring af middelstrøm i forhold til baseline i scenarie 2 og 3 (dybdemidlet).

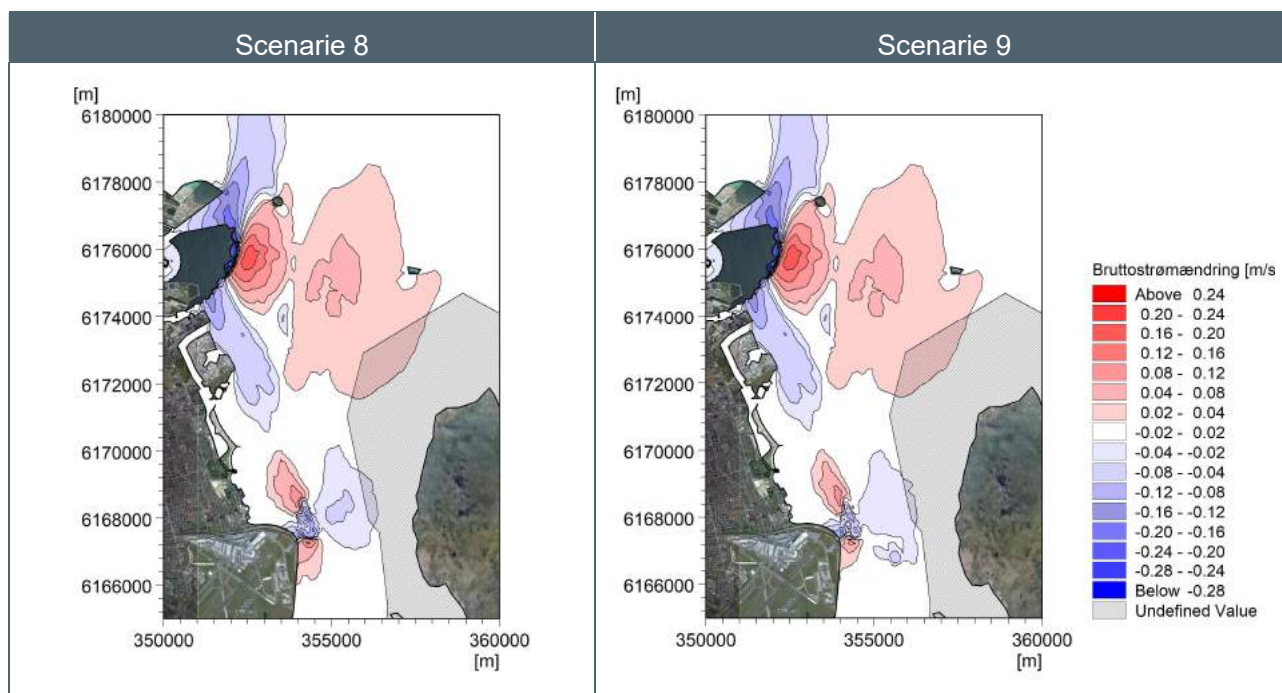


Figur 4-17 Ændring af middelstrøm i forhold til baseline i scenarie 4 og 5 (dybdemidlet).

I områder hvor der opleves en strømforstærkning vil der potentielt være risiko for erosion, såfremt bunden tillader dette. I områder med stærk strøm er der i hovedreglen hård bund. Det er dog vigtigt at sikre sig, at underliggende lag i områder hvor der kompensationsafgraves har samme egenskaber, som den eksisterende havbund, da der ellers på trods af en reduktion af middelstrømmen vil kunne optræde erosion af den nye havbund. I områder med svækkelse af middelstrømmen vil der potentielt kunne aflejres materiale.



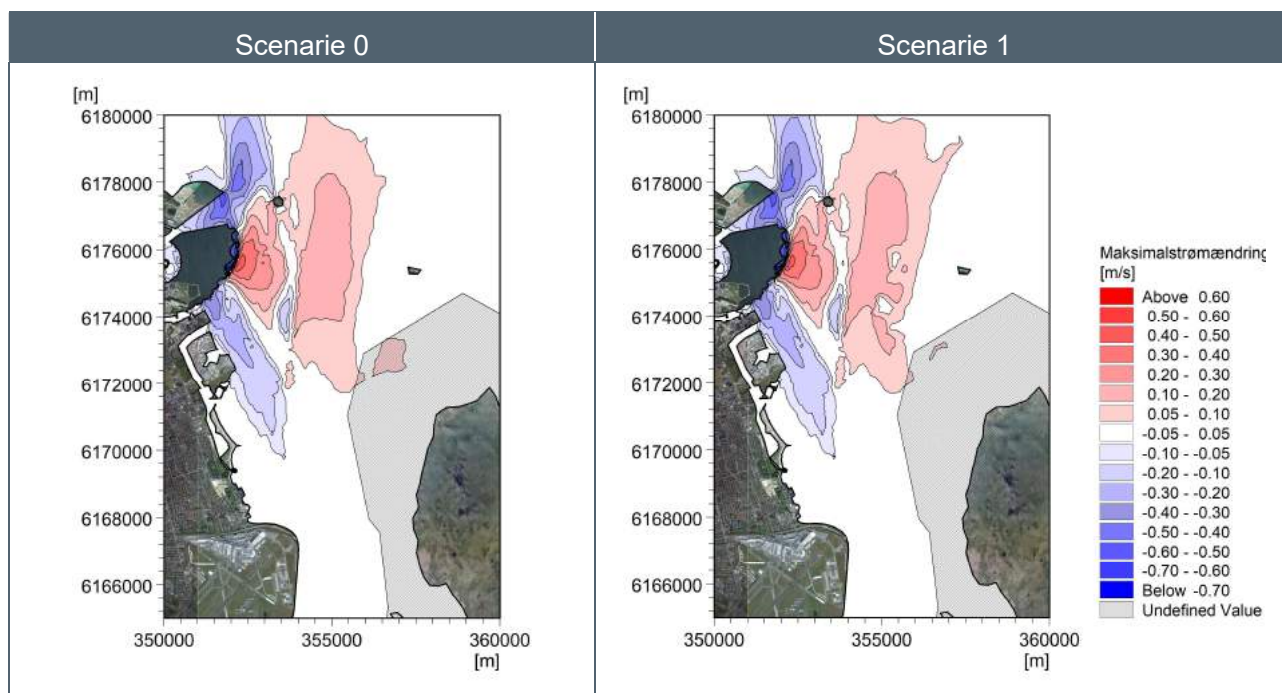
Figur 4-18 Ændring af middelström i forhold til baseline i scenarie 6 og 7 (dybdemidlet).



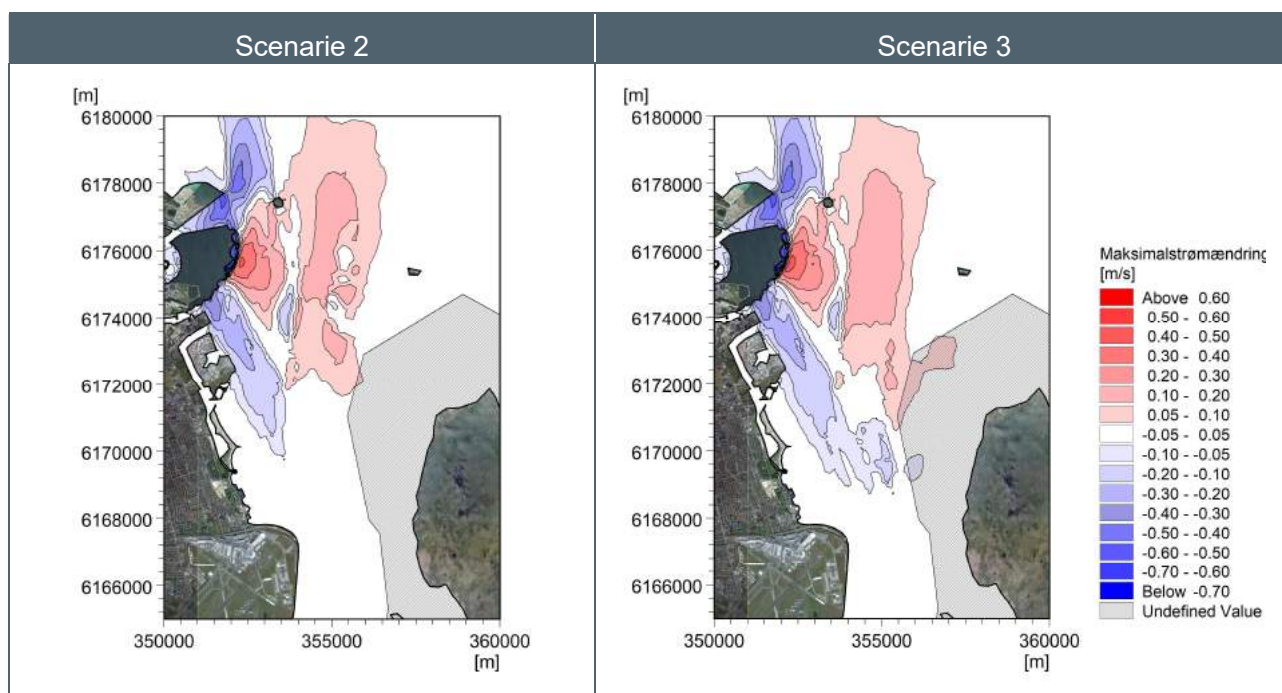
Figur 4-19 Ændring af middelström i forhold til baseline i scenarie 8 og 9 (dybdemidlet).

Lynetteholms blokerende effekt og påvirkning af maksimalstrømmen er vist i Figur 4- (Scenarie 0). Påvirkningen af maksimalstrømmen er ligeledes vist for scenarie 1. Det ses, at påvirkningen er ganske beskeden, hvilket er i fin overensstemmelse med den relativt beskeden ændring af blokeringen. Bemærk at der anvendes et andet palette interval end for middelstrømmen.

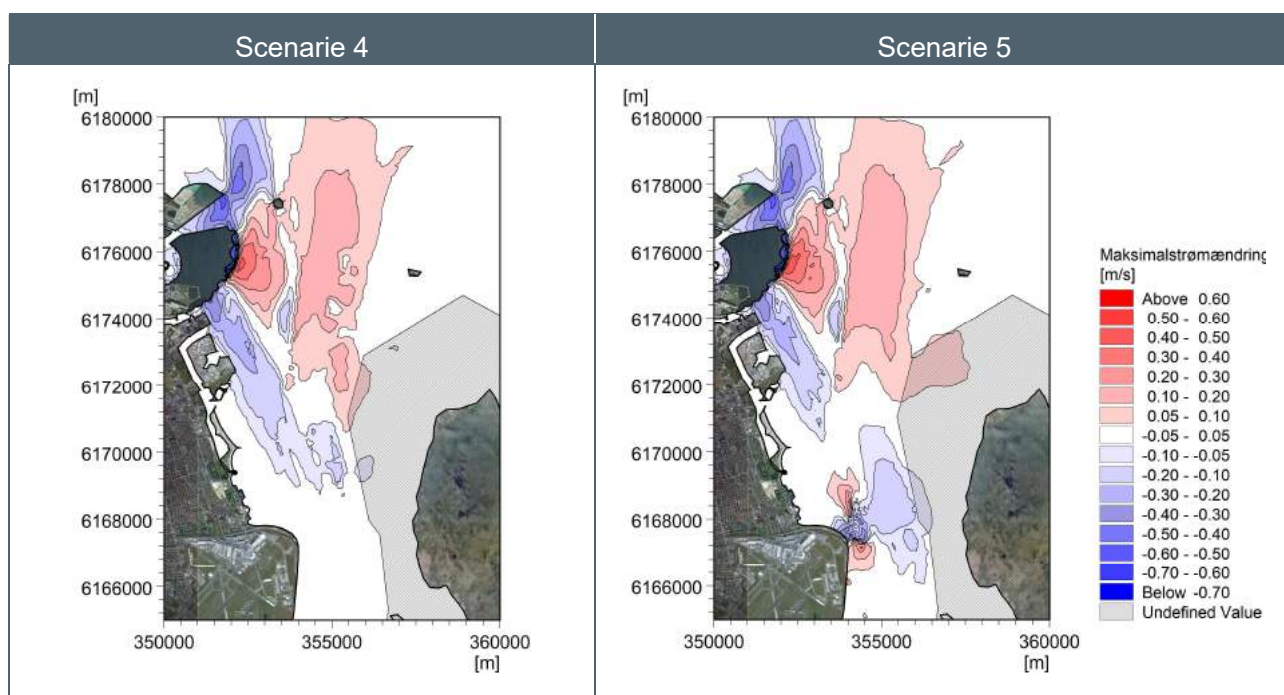
Tilsvarende plots er vist for de øvrige scenarier i Figur 4- til Figur 4-.



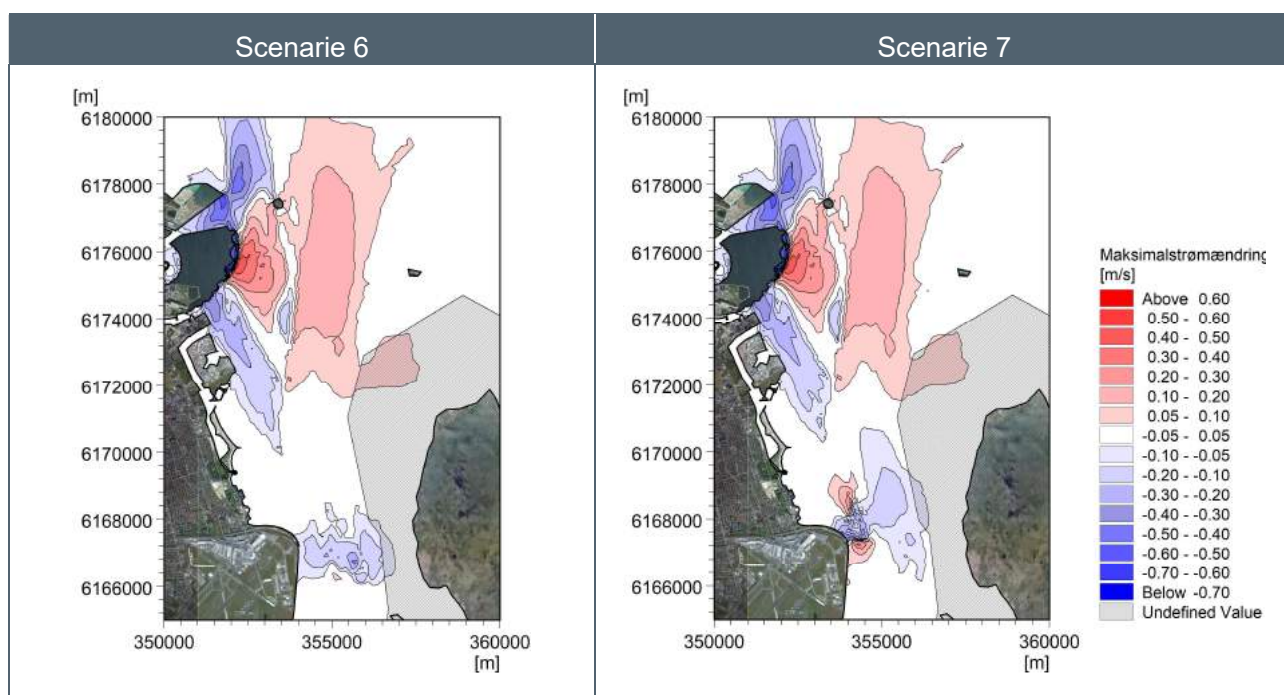
Figur 4-20 Ændring af maksimalstrøm i forhold til baseline i scenarie 0 og 1 (dybdemidlet).



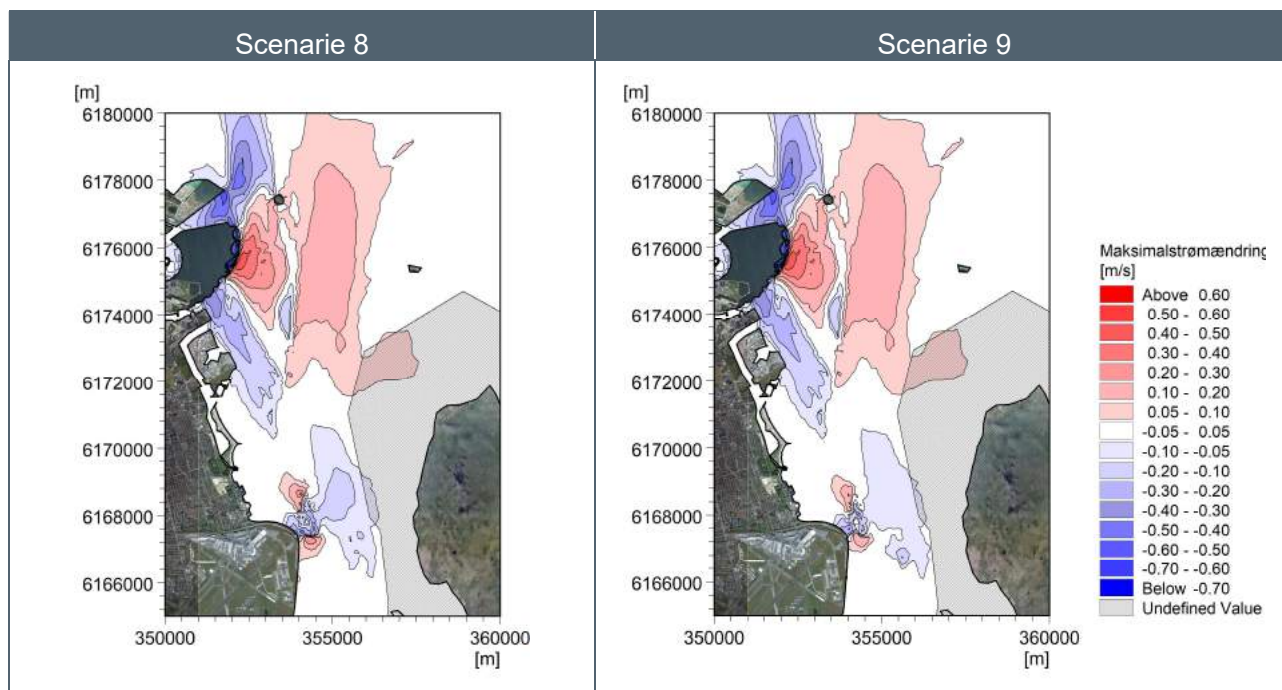
Figur 4-21 Ændring af maksimalstrøm i forhold til baseline i scenarie 2 og 3 (dybdemidlet).



Figur 4-22 Ændring af maksimalstrøm i forhold til baseline i scenarie 4 og 5 (dybdemidlet).



Figur 4-23 Ændring af maksimalstrøm i forhold til baseline i scenarie 6 og 7 (dybdemidlet).



Figur 4-24 Ændring af maksimalstrøm i forhold til baseline i scenarie 8 og 9 (dybdemidlet).

4.3 Estimeret blokering efter et kalenderår

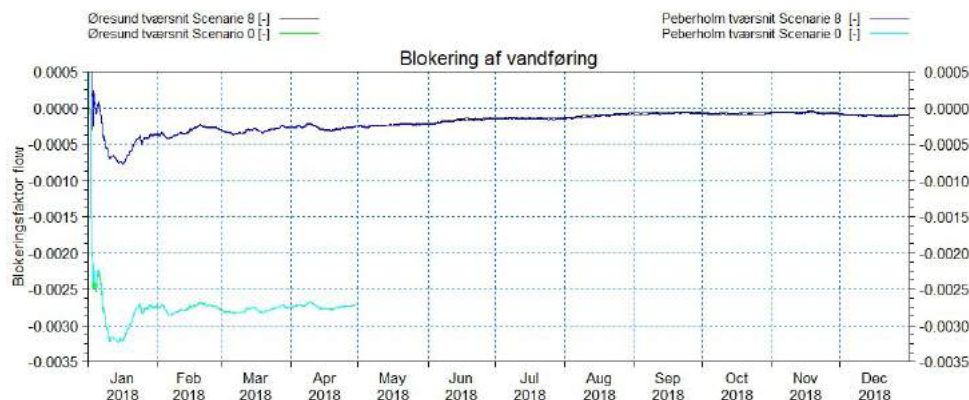
Blokeringsestimatet er påvirket af sæsonvariationer. I sommerhalvåret er der mindre dynamik end i vinterhalvåret. Vandtemperaturen varierer ligeledes igennem året. Blokeringen for en endelig dimensionering af kompensationsafgravninger bør derfor udregnes baseret et helt kalenderår, således at det sikres at alle sæsonvariationer er repræsenteret.

I den her præsenterede analyse er der kun gennemført en fuld blokeringsberegning for scenarie 8. Den fundne forskel fra 1. maj 2018 til 1. januar 2019 anvendes til at korrigere de ved screeningen i afsnit 4.2 fundne blokeringer.

Figur 4-25 viser den i scenarie 8 fundne tidlige udvikling af blokeringsfaktoren for vandføringen beregnet for henholdsvis Øresundstværsnittet og Peberholmtværsnittet, jf. Figur 3-4. Det ses, at der er en sæsoneffekt, som følge af en nedsat dynamik i sommerhalvåret. Det ses af de to kurver for de to tværsnit er næsen sammenfaldne for vandføringen, så valg af tværsnit ikke har nogen større betydning for blokeringsestimatet. Sæsonvariationen er af større betydning.

Det ses endvidere, at blokeringseffekten for vandføring er lidt mindre efter det fulde år end efter 4 måneder. I Øresundstværsnittet er blokeringen mindsket med 0,016%, mens den for Peberholmtværsnittet er fundet til 0,015%. Disse tal anvendes som en første ordens approksimation til at korrigere alle de fundne screeningsestimater. De herved fundne estimater er angivet i Tabel 4-6 for de to undersøgte tværsnit. De korrigerede værdier har ikke nogen afgørende betydning for effektiviteten, så hvad denne parameter angår refereres der til afsnit 4.2

Det ses også, at der i scenarie 5 og 7 er en mindre overkompensation, mens der i de øvrige scenarier er en underkompensation. For scenarierne 6-9 er afvigelsen fra en nulløsning mindre end 0,03%.



Figur 4-25 Tidslig udvikling af blokeringsfaktor for vandføring i Øresund tværsnit og tværsnit ved Peberholm med scenarie 8 for det fulde kalenderår.

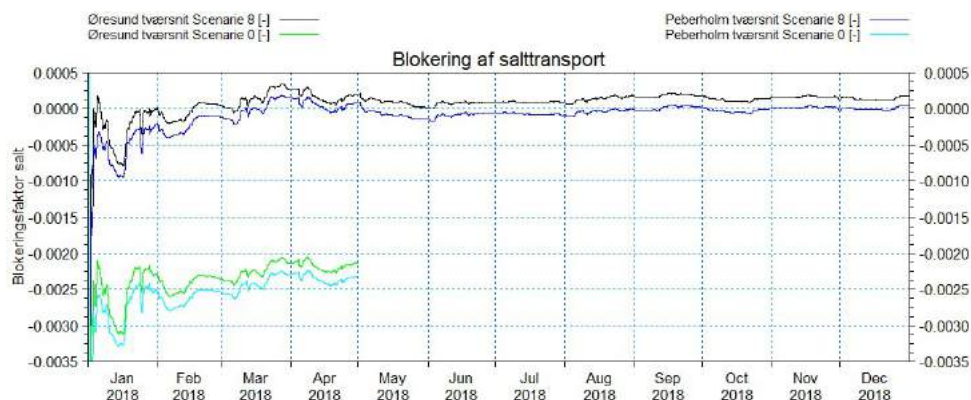
Tabel 4-6 Blokeringseffekt for vandføring af de undersøgte scenarier i Øresund tværsnit og ved tærskel (Peberholm) for det fulde kalenderår.

Scenarie	Blokering Øresund tværsnit [%]	Blokering Peberholm tværsnit [%]
1	-0,220	-0,222
2	-0,196	-0,197
3	-0,180	-0,182
4	-0,141	-0,143
5	0,064	0,062
6	-0,025	-0,027
7	0,009	0,007
8	-0,009	-0,011
9	-0,017	-0,019

Figur 4-26 viser den i scenarie 8 fundne tidslige udvikling af blokeringsfaktoren for salttransporten beregnet for henholdsvis Øresundstværsnittet og Peberholm tværsnittet, jf. Figur 3-4. Det ses, at der ikke er en egentlig sæsoneffekt, men en række hændelsesdrevne fluktuationer. Det ses af de to kurver, at valg af tværsnit har en mindre betydning for blokeringsestimatet for salt. Da Drogden tærsklen udgør det regulerende tværsnit for udvekslingen med Østersøen, bør blokeringen vurderes med udgangspunkt i Peberholm tværsnittet. Blokeringsestimatet ændres ikke væsentligt i de sidste 8 måneder (1. maj 2018 til 1. januar 2019). For begge tværsnit forøges blokeringen for det fulde år med 0,003%. Disse tal anvendes som en første ordens approksimation til at korrigere

alle de tidligere fundne screeningsestimater. De herved fundne estimater er angivet i Tabel 4-7 for begge undersøgte tværsnit.

Tages der udgangspunkt i Peberholm tværsnittet, ses det, at der i scenarie 5, 7 og 8 er en overkompensation, mens der i de øvrige scenarier er en underkompensation. For scenarierne 6-9 er afvigelsen fra en nulløsning mindre end 0,03%.



Figur 4-26 Tidlig udvikling af blokeringsfaktor for transport af salt i Øresund tværsnit og tværsnit ved Peberholm med scenarie 8 for det fulde kalenderår.

Tabel 4-7 Blokeringseffekt for salttransport af de undersøgte scenarier i Øresund tværsnit og ved tærskel (Peberholm) for det fulde kalenderår.

Scenarie	Blokering Øresund tværsnit [%]	Blokering Peberholm tværsnit [%]
1	-0,175	-0,192
2	-0,148	-0,162
3	-0,152	-0,167
4	-0,105	-0,118
5	0,095	0,082
6	0,009	-0,010
7	0,038	0,024
8	0,017	0,004
9	0,006	-0,005

5 Diskussion og konklusion

De i screeningsberegningerne undersøgte scenarier har vist, at det ikke vil være hensigtsmæssigt at foretage kompensationsafgravning i Hollænderdybet. Den opnåede effektivitet på blokeringen i dette område er blot omkring 0,02% per Mm^3 afgravet havbund.

Et langt større udbytte kan opnås ved at grave i to områder i Drogden lige nord for Øresund tunneltraceet. I dette område er der opnået en effektivitet på 0,14% per Mm^3 for vandføring og for salttransport for scenarie 9. Dette er lidt lavere end hvad der blev opnået for Øresundsforbindelse (0,19% per Mm^3 , både for vandføring og salttransport), hvilket skyldes at Øresundtunnellens trace sætter en begrænsning for, hvor der nu må afgraves, samt at de mest egnede områder til kompensationsafgravning allerede er udnyttet.

For at udligne blokeringseffekten af selve Lynetteholm må man derfor forvente at skulle kompensationsafgrave et sted mellem 1,5 – 2,0 Mm^3 i dette sydligere område.

De udførte beregninger har haft som hovedfokus at estimere hvor stort et afgravningsvolumen, der er nødvendigt for at kunne sikre en nulløsning. I beregningerne er der ikke taget hensyn til, at det kan være problematisk at afgrave i dele af de identificerede områder. I området ved Nordre Røse skal der tages hensyn til beliggenheden af Nordre Røse Fyr, samt en række søkabler. Ydermere har Den Blå Planet sit vandindtag i dette område.

Det vil derfor være nødvendigt med yderligere undersøgelser, såfremt man ønsker at forfølge en nulløsning og kompensationsafgravning i dette område. Et første skridt vil være at få gennemført en detaljeret batymetrisk opmåling (pejling) med henblik på at bekræfte/forbedre modellens nuværende batymetriske grundlag. Dernæst bør der defineres en række respektafstande i forhold til de enkelte søkabler, vandindtag, Nordre Røse Fyr og tunneltraceet for Øresundsforbindelsen. Herefter vil det være muligt mere præcist at identificere, hvor der må kompensationsafgraves, samt gennemføre nye beregninger med henblik på at optimere effektiviteten af afgravningerne.

Det skal også undersøges i hvilket omfang selve graveaktiviteten i forbindelse med uddybningen med dens sedimentspild og spredningen heraf kan påvirke Den Blå Planets vandindtag, Amager Strandpark samt de to Natura 2000 områder ved Saltholm og Amager syd.

En effektiv kompensationsafgravning i form af en uddybning vil typisk resultere i en strømforstærkning både opstrøms og nedstrøms uddybningsområdet. I disse områder vil der derfor være en forøget risiko for erosion. Det er derfor vigtigt at sikre sig, at der ikke vil ske erosion i områder med følsomme anlæg, eksempelvis søkabler. I områder hvor der uddybes, vil der i udgangspunktet ske en strømsvækkelse. Strømsvækkelsen er dog ingen garanti for, at der ikke sker erosion, idet dette vil være bestemt af den ny havbunds sediment-sammensætning. Er eksisterende havbund eksempelvis karakteriseret ved at indeholde et armeringslag, kan de underliggende lag eksempelvis være langt mere mobile og eksponerede for erosion.

6 Referencer

- /1/ DHI: Anlæg af Lynetteholm. VVM – Teknisk Baggrundsrapport nr. 1. Hydrauliske undersøgelser. Version endelig 1.6.2, november 2020.
- /2/ Øresundsforbindelsen: Sammenfattende redegørelse for nulløsningen. Maj 2000.
- /3/ Rambøll: Lynetteholm – Miljøkonsekvensrapport, november 2020.