

Hydrografisk undersøgelse af Als-Fyn forbindelsen

Beregning af gennemstrømningsmindskelsen for en bro-
og for en bro-ø-tunnel løsning

Teknisk rapport
Projektnummer: 117.01.04.02.17

7 marts 2024

Sund & Bælt
Sund & Bælt

Udarbejdet for Sund & Bælt Holding A/S



Hydrografisk undersøgelse af Als-Fyn forbindelsen

Beregning af gennemstrømningsmindskelsen for en bro- og for en bro-ø-tunnel løsning

Teknisk rapport

Projektnummer: 117.01.04.02.17

Udarbejdet for: Sund & Bælt Holding A/S

Repræsenteret ved: Kasper Anias Møller, Sund & Bælt

This report has been prepared under the DHI Business Management System certified by Bureau Veritas to comply with ISO 9001 (Quality Management)

ISO 9001
Management System Certification

BUREAU VERITAS
Certification Denmark A/S



Godkendt af

DHI Projektleder

Bo Brahtz Christensen



Kontaktperson: Kasper Anias Møller, Sund & Bælt
Projektleder: Bo Brahtz Christensen
Kvalitetsansvarlig: Nicholas Grunnet
Udarbejdet af: Flemming Jakobsen og Bo Brahtz Christensen
Projektnr.: DHI no.: 11829498-01
Godkendt af: Bo Brahtz Christensen
Godkendelsesdato: 7 marts 2024
Revision: 1.1
Klassifikation:

Begrænset: Dette dokument er tilgængeligt for personer ansat i DHI-koncernen men må ikke deles med andre udenfor DHI-koncernen uden kundens forhåndsgodkendelse.

Filnavn: 11829498-01 Als-Fyn - Hydrografisk undersøgelse af Als-Fyn forbindelsen - Rev 1.1.docx

Indholdsfortegnelse

1	Sammenfatning og konklusion	6
1.1	Baggrund	6
1.2	Konklusion	6
2	Introduktion	8
2.1	Baggrund	8
2.2	Formål	8
2.3	Metode	8
2.3.1	Opdeling i aktiviteter	8
2.3.2	Aktivitet 1: Beskrivelse af den lokale hydrografi	8
2.3.3	Aktivitet 2: Beregning af modstand fra løsningerne	10
2.3.4	Aktivitet 3: Afrapportering	10
3	Data og information	11
3.1	Introduktion	11
3.2	Hydrografi	11
3.2.1	Hydrografiske målinger	11
3.2.2	Hydrografiske model og udtrukne resultater	12
3.3	Als-Fyn forbindelsen	13
3.3.1	Oversigt	13
3.3.2	Bro	14
3.3.3	Kombination af en sænketunnel, kunstig ø og bro	15
3.4	Marin begroning	16
4	Hydrografien	18
4.1	Introduktion	18
4.2	Analyse af vandstandsmålinger	18
4.3	Sammenligning af målte og modellerede vandstande	19
4.4	Hydrografisk beskrivelse af området	22
4.4.1	Strøm og saltprofiler	22
4.4.2	Strømroser	24
4.4.3	Eksempler	26
4.4.4	Blokeringseffekt og cirkulationsstrømme	28
5	Løsningernes modstand	30
5.1	Introduktion	30
5.2	Overordnet strømforøgelse fra bro	30
5.3	Bropiller og pyloner	31
5.4	Funderingsplade	32
5.5	Pæleværk	33
5.6	Ø og tunnel	34
5.7	Blokeringsberegning	35
5.8	Blokering fra Als-Fyn bro	36
5.9	Blokering fra Als-Fyn bro-Ø-tunnel	37
6	Sammenligning med andre broer	40
6.1	Blokering fra udvalgte broer	40
6.2	Acceptabel blokering	41
7	Referencer	42

Figurer

Figur 2.1	Kort der viser placeringen af Als-Fyn forbindelsen.	9
Figur 2.2	Forundersøgelingsområdet.	9
Figur 2.3	Oversigtstegning der viser begge løsningsforslag for Als-Fyn forbindelsen.	10
Figur 3.1	Vandstandsmålestationer.	11
Figur 3.2	Målte vandstande ved Fynshav, Bagenkop, Assens og Bogense i perioden 2019-2021.	12
Figur 3.3	Delområde fra DKBS2-HD75 modellen anvendt i analysen.	13
Figur 3.4	Tegning der viser bro-løsningsforslaget for Als-Fyn forbindelsen.	14
Figur 3.5	Principtegning af bro-pille. Principtegningen er kun vist for en af de tre anvendte funderingsplader.	15
Figur 3.6	Tegning der viser kombinationsløsningsforslaget for Als-Fyn forbindelsen.	15
Figur 3.7	Tegning af bro-løsning for Als-Fyn forbindelsen.	17
Figur 3.8	Tegning af kombinationsløsning for Als-Fyn forbindelsen.	17
Figur 4.1	Faseforskelle i målte vandstande i en periode domineret af tidevand.	19
Figur 4.2	Sammenligning af målte og modellerede vandstande ved Rødby, Bagenkop, Sønderborg og Fynshav i perioden 2019-2021.	20
Figur 4.3	Sammenligning af målte og modellerede vandstande ved Fåborg, Assens, Fredericia og Bogense i perioden 2019-2021.	21
Figur 4.4	Isoplethplot af saltholdighed og strøm i 2019 i området for Als-Fyn forbindelsens krydsning.	23
Figur 4.5	Isoplethplot af saltholdighed og strøm i 2020 i området for Als-Fyn forbindelsens krydsning.	23
Figur 4.6	Isoplethplot af saltholdighed og strøm i 2021 i området for Als-Fyn forbindelsens krydsning.	24
Figur 4.7	Strømfordelingen (2019-2021) i øvre lag ved broforbindelsens krydsning.	25
Figur 4.8	Strømfordelingen (2019-2021) i nedre lag ved broforbindelsens krydsning.	25
Figur 4.9	Eksempel på indstrømning af saltholdigt vand igennem Lillebælt og Storebælt.	26
Figur 4.10	Målt vind og vindretning i Langeland kommune 02-01-2019.	26
Figur 4.11	Eksempel på udstrømning af brakvand gennem Lillebælt og Storebælt.	27
Figur 4.12	Målt vind og vindretning i Langeland kommune 15-04-2019.	27
Figur 4.13	Eksempel på indstrømning af højsalint vand gennem Lillebælt.	28
Figur 4.14	Målt vind og vindretning i Langeland kommune 16-09-2019.	28
Figur 5.1	Vinkel korrektionsfaktor (VK) for C_D inklusive breddekorrektio. 0° er for parallel strøm og bro-pille.	32
Figur 5.2	Bidrag til broens blokering fra øvre lag (blå punkter er bestemte modstande og rød linje er median modstand).	38
Figur 5.3	Bidrag til broens blokering fra nedre lag (blå punkter er bestemte modstande og rød linje er median modstand).	38
Figur 5.4	Bidrag til bro-ø-tunnelens blokering fra øvre lag (blå punkter er bestemte modstande og rød linje er median modstand).	39
Figur 5.5	Bidrag til bro-ø-tunnelens blokering fra nedre lag (blå punkter er bestemte modstande og rød linje er median modstand).	39

Tabeller

Tabel 4.1	Statistiske mål for målte vandstande i perioden 2019-2021.....	18
Tabel 4.2	Statistiske mål for modellerede vandstande og forskelle i forhold til målte vandstande i perioden 2019-2021.	19
Tabel 4.3	Nettodrift. Positiv værdi indikerer nettoudstrømning, negativ værdi nettoindstrømning.	24
Tabel 5.1	Strømmodstandskoefficienter (fra Ref. /6/). Rød = parallel strøm på bropille. Blå = parallel strøm på pylon.	31
Tabel 5.2	Længdekorrektions (fra Ref. /6/).	33

Forkortelser

DMI Danmark Meteorologiske Institut

1 Sammenfatning og konklusion

1.1 Baggrund

Nærværende tekniske rapport omhandler hydrografien ved og gennemstrømningsmindskelsen (blokeringen) af en Als-Fyn forbindelse.

Blokeringen for Als-Fyn forbindelsen beregnes for to løsningsforslag:

- En broforbindelse (ALA02); og
- En kombination af bro, kunstig ø og sænketunnel (ALA05).

Beregningen af modstanden fra de to løsningsforslag bestemmes ud fra:

- Løsningsforslagernes udformning; og
- Strømhastighedsfordelingen langs med løsningsforslagernes linjeføring.

Til blokeringsanalysen er der benyttet 3 års modeldata dækkende perioden 2019-2021.

Området omkring Als-Fyn forbindelsen er påvirket af vandudvekslingen mellem Kattegat og den Centrale Østersø gennem både Storebælt og Lillebælt. En eventuel blokering fra Als-Fyn forbindelsen vil mindske vand-, salt-, og iltudvekslingen m.m. mellem den Centrale Østersø og Kattegat.

1.2 Konklusion

Modstanden fra de to løsningsforslag er beregnet i henholdsvis øvre- og nedre strømningslag. Øvre lag er fra havoverfladen til 14 m dybde og nedre lag er fra 14 m dybde til havbunden. Blokeringen i øvre og nedre kan adderes, hvor summen da er den totale modstand fra løsningsforslaget. De to blokeringer (i øvre og nedre lag) får ikke lov til at opveje hinanden, hvis strømmingen i de to lag er modsatrettet. Kun hvis blokeringen er 0 i begge lag, fås en blokering på 0. Derfor er den totale modstand en maksimal værdi for modstanden.

Broens blokering i øvre lag, nedre lag og totalt er bestemt til:

- $B_{LØ} = 0,023\%$;
- $B_{LN} = 0,011\%$; og
- $B_L = 0,034\%$.

For at kunne sammenligne broløsning med en kombineret bro-ø-tunnel løsning er blokeringerne givet med 3 decimaler.

Bro-ø-tunnelens blokering i øvre lag, nedre lag og totalt er ligeledes bestemt til:

- $B_{LØ} = 0,028\%$;
- $B_{LN} = 0,008\%$; og
- $B_L = 0,036\%$.

Blokering fra både bro- og bro-ø-tunnel løsning er lille.

Blokeringen af en kombineret bro-ø-tunnel er ubetydeligt større end for broen.

For Øresundsforbindelsen blev der accepteret en blokering fra forbindelsen på gennemstrømning i Øresund i intervallet -0.18% til $+0.18\%$. Hvis den samme ændring i vandudvekslingen kan accepteres i Lillebælt, da skal blokeringen i Lillebælt være i intervallet -0.54% til $+0.54\%$. Blokeringerne af Als-Fyn

Løsningerne er bestemt til at være mindre end 0,04%. Det er klart inden for acceptintervallet.

Det bemærkes i denne sammenhæng, at ordet 'blokering' er et meget stærkt ord, i forhold til den størrelsesorden og påvirkning det drejer sig om. Blokeringen er meget begrænset og burde mere korrekt benævnes en gennemstrømningsmindskelse.

Ovenstående blokeringsprocenter er for transporten gennem Lillebælt, som udgør en 1/11 af den samlede transport gennem de danske bæltter.

De to Als-Fyn løsningsforslags blokering er lille. Overvejes det alligevel at mindske blokeringerne ved optimering af design, så er det muligt. For eksempel ved at afrunde hjørner på funderingspladerne, ved at flytte funderingspladerne længere ned i vandsøjlen, og ved at optimere orienteringen af bropiller i forhold til hovedstrømningsretninger med mere.

2 Introduktion

2.1 Baggrund

Nærværende tekniske rapport, vedrørende hydrografien ved og blokeringen af Als-Fyn forbindelsen, er udarbejdet af DHI A/S for Sund & Bælt Holding A/S.

Den tekniske rapport er et bidrag til forundersøgelsen for Als-Fyn forbindelsen.

Forundersøgelsen for Als-Fyn forbindelsen løber fra 2022 til 2024.

Placeringen af Als-Fyn forbindelsen er vist i Figur 2.1 og Figur 2.2. Linjeføringer løber fra Fynshav på Als til spidsen af Horne land på Fyn.

2.2 Formål

Hovedformålet med arbejdet beskrevet i denne rapport er at beregne blokeringen for Als-Fyn forbindelsen for to typer af løsningsforslag for forbindelsen, se Figur 2.3:

- En bro (ALA02); og
- En kombination af en bro, kunstig ø og sænketunnel (ALA05).

2.3 Metode

2.3.1 Opdeling i aktiviteter

Arbejdet opdeles i følgende aktiviteter:

- Aktivitet 1: Beskrivelse af den lokale hydrografi.
- Aktivitet 2: Beregning af modstand fra løsningerne.
- Aktivitet 3: Afrapportering.

Aktiviteterne beskrives separat i det følgende.

2.3.2 Aktivitet 1: Beskrivelse af den lokale hydrografi

Den lokale hydrografi beskrives på baggrund af litteratur og modelresultater fra DHI's DKBS2-HD75 model, som dækker den centrale Østersø, indre danske farvande (en del af Østersøen) og dele af Skagerrak.

Der benyttes tre års data fra DKBS2-HD75 modellen (2019-2021), for et område der dækker Als-Fyn forbindelsen.

Ud fra modelresultaterne bestemmes bl.a. fordelingen af strømhastigheder og strømretninger langs linjeføringerne (hastighedsfordelingen bestemmes til hvert tidsskridt i simuleringresultaterne). Disse er en del af grundlaget til at beregne modstanden fra broen og den kunstige ø (blokeringen i øvre og nedre lag beregnes til hvert tidsskridt):

- Fordelingen af strømhastigheden giver en relativ 'vægt' til hver bropille; og
- Fordelingen af strømretning giver vinkel mellem bropille og strøm, og dermed angrebsvinklen på pillen.

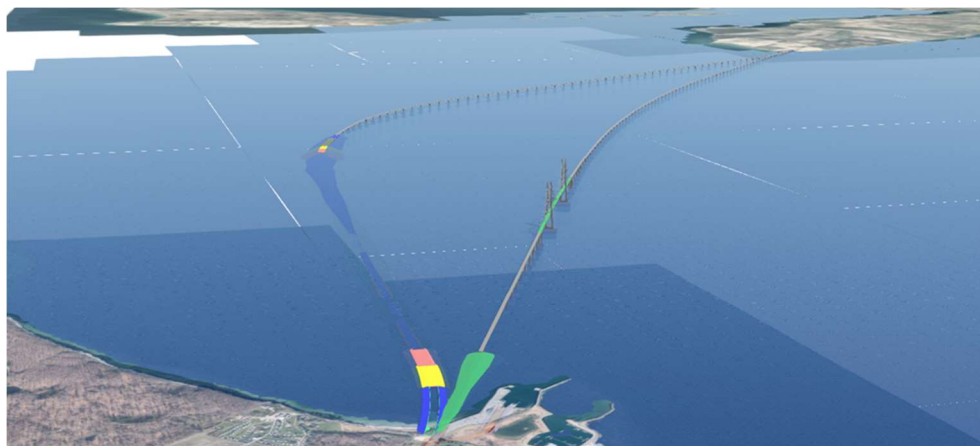
Vanddybde, strømhastighed og strømretning ved hver bropille og den kunstige ø lægges ind i et regneark.



Figur 2.1 Kort der viser placeringen af Als-Fyn forbindelsen.



Figur 2.2 Forundersøgsområdet.



Figur 2.3 Oversigtstegning der viser begge løsningsforslag for Als-Fyn forbindelsen.

2.3.3 Aktivitet 2: Beregning af modstand fra løsningerne

Bropillerne beskrives og analyseres.

Hver brospille inddeles i en række intervaller over dybden, hvori brospillens geometri kun varierer i begrænset omfang. For hvert interval bestemmes strømmodstands-koefficienten og det blokerede areal af brospillen.

Disse informationer lægges også ind i regnearket, sammen med informationerne om strømhastighed og retning.

Modstanden af broen beregnes vha. den kombinerede information om strømmen og brospillerne.

Modstanden fra broen kombineres med informationen om modstanden for strømmingen gennem de indre danske farvande til at beregne blokeringseffekten af broen. En tidligere beregning af denne type er vist i:

- Jakobsen, Fl., N.H. Petersen, H.M. Petersen, J.S. Møller, T. Schmidt & T. Siefert (1996). Hydrographic investigations in the Fehmarn Belt in connection with the planning of the Fehmarn Belt link. Proceedings of the Baltic Marine Science Conference 1996 (Rønne, Denmark), 10 pp. Published in ICES Cooperative Research Report 257, 2003, 179-189.

Modstanden fra den kunstige ø beregnes som et Carnot tab, hvor det antages at øen påvirker strømmingen en halv ø-bredde væk på hver side af øen. Modstandsbidraget fra den kunstige ø lægges sammen med modstanden fra broen. Det antages, at sænketunnellen er fuldt nedgravet og ikke bidrager til en blokering.

Endelig vurderes blokeringen af broløsningen og kombinationsløsningen for en Als-Fyn forbindelse med blokering af de øvrige større forbindelser i de indre danske farvande.

2.3.4 Aktivitet 3: Afrapportering

Resultaterne fra analysen beskrives i en rapport (nærværende rapport), der beskriver den lokale hydrografi, broen og brospillerne og angiver en beregnet værdi for blokeringen af løsningerne for Als-Fyn forbindelsen.

3 Data og information

3.1 Introduktion

I dette afsnit beskrives indsamlede data og informationer for hydrografi og løsningsforslagene.

Data og informationer vedrørende løsningerne analyseres ikke i dette afsnit, men beskrives i de efterfølgende afsnit.

3.2 Hydrografi

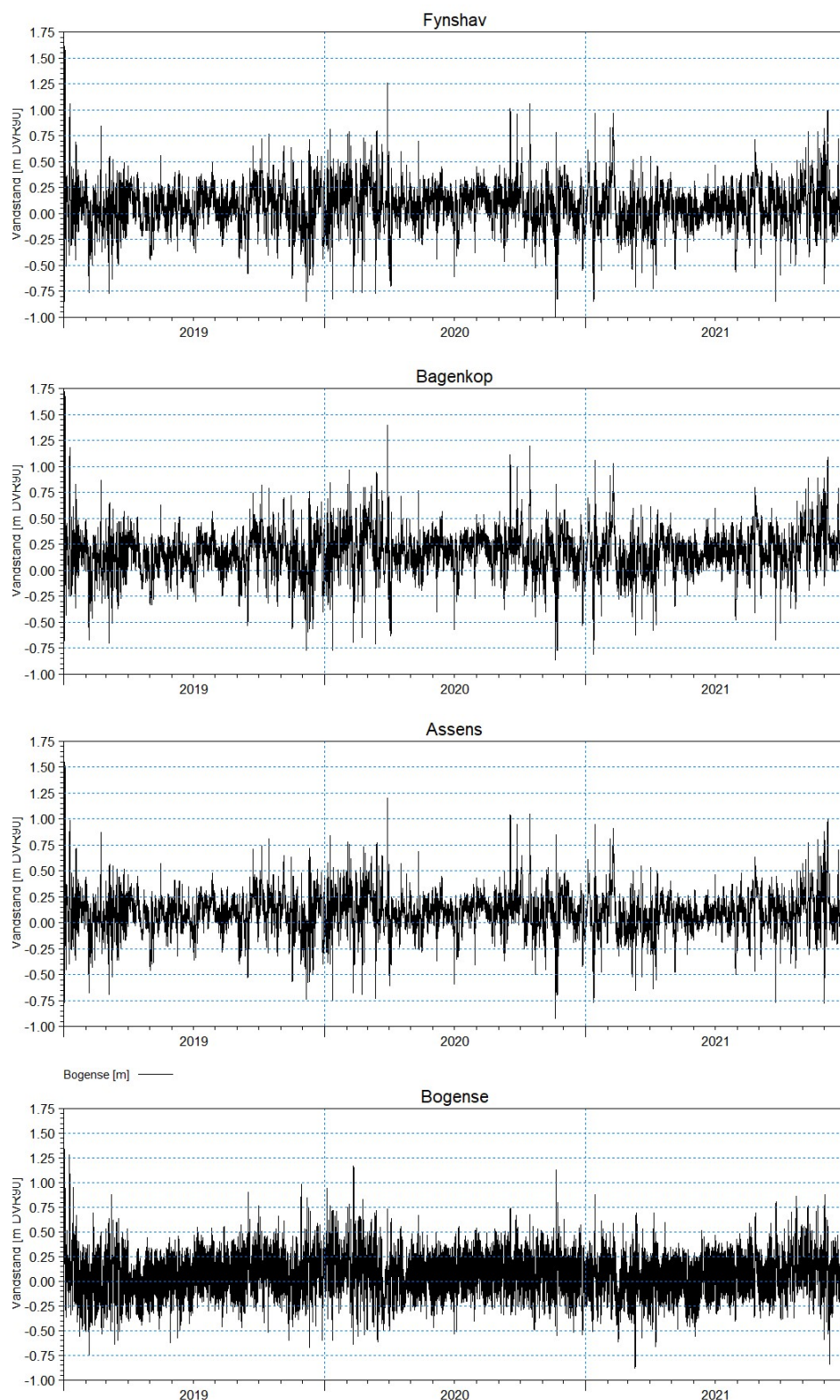
3.2.1 Hydrografiske målinger

Målinger af vandstande foregår kontinuert over tid på en lang række stationer og er derfor en velegnet parameter til at vurdere den hydrografiske models evne til at beskrive dynamikken i området. Strømmen gennem Lillebælt drives af vandspejlsforskelle og der er derfor indhentet vandstandsmålinger for perioden 2019-2021 (3 år) fra hver af de 8 stationer vist i Figur 3.1.



Figur 3.1 Vandstandsmålestationer.

Indhentede vandstandsdata, som er nedtaget fra DMI via Vandportalen, er ikke kvalitetssikrede data, og indeholder derfor åbenlyse fejlregistreringer. Disse er filtreret væk før anvendelse i projektet. Ligeledes er der i nogle tilfælde perioder uden målinger. Dækningsgraden er derfor ikke 100%, men større end 98% for samtlige 8 målestationer. Vandstanden registreres på alle stationer hvert 10. minut. Målte vandstande i perioden 2019-2021, rensset for fejlregistreringer, er vist for stationerne; Fynshav, Bagenkop, Assens og Bogense i Figur 3.2.

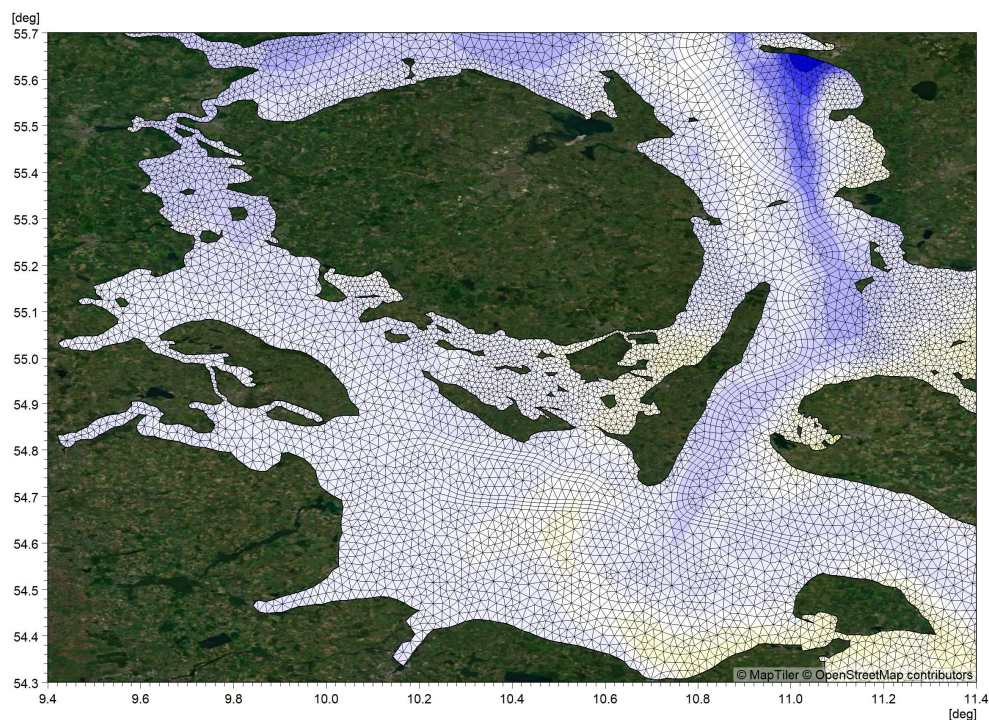


Figur 3.2 Målte vandstande ved Fynshav, Bagenkop, Assens og Bogense i perioden 2019-2021.

3.2.2 Hydrografiske model og udtrukne resultater

Til grundlag for blokeringsanalysen er det valgt at tage udgangspunkt i DKBS2-HD75 modellen, som er DHI's hydrodynamiske model, der dækker Skagerrak, de indre danske farvande og den centrale Østersø. Til undersøgelsen er der for

et delområde udtrukket 3 års modeldata dækkende perioden 2019-2021. Delområdet udstrækning og beregningsnettets opløsning er vist i Figur 3.3. Modellens vertikale opløsning er 1 meter. Modeldata er indeholdt i 2D- og 3D-filer. 2D-filerne indeholder informationer om vandstand og dybde-integrerede strømhastigheder og retninger. 3D-filerne indeholder informationer om strømhastigheder og retninger i forskellige niveauer, saltholdighed og vandtemperatur.



Figur 3.3 Delområde fra DKBS2-HD75 modellen anvendt i analysen.

Følgende data er udtrukket fra modellen og anvendt i analyserne:

- Vandstands niveauer ved linjeføringen til fastlæggelse af vanddybder over fundamentpladerne.
- Strømhastigheder (u , v) over profilet og langs med linjeføringen til fastlæggelse af strømforhold ved de enkelte bropiller.
- Saltprofiler over dybden til beskrivelse af strømningsdynamikken og sæsonvariationer ved brug af isoplethplot.
- Strømp profiler over dybden til beskrivelse af strømningsdynamikken og skillefladens placering ved hjælp af isoplethplot.

3.3 Als-Fyn forbindelsen

3.3.1 Oversigt

Linjeføringerne løber fra Fynshav på Als til spidsen af Horne land på Fyn.

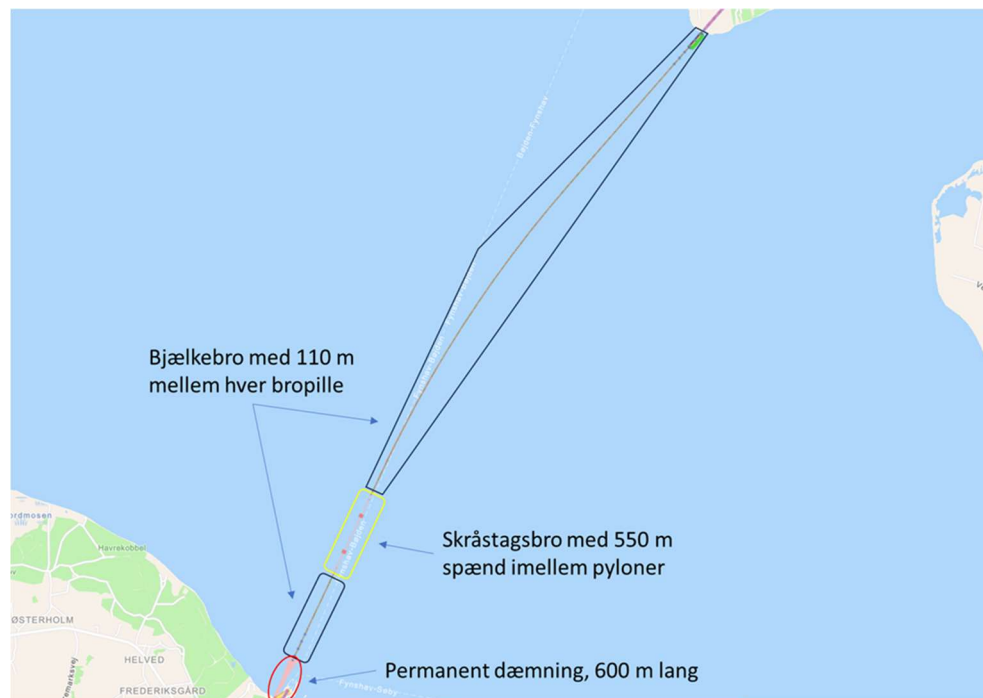
En oversigtstegning, der viser begge løsningsforslag, er vist i Figur 2.3. De to løsningsforslag behandles særskilt i det følgende.

Detaljerede tegninger af begge løsningsforslag er vist i Figur 3.7 og Figur 3.8.

3.3.2 Bro

Broen er en bjælkebro på størstedelen af strækningen med en skråstagsbro ved et sydligt gennemsejlingsfag, se Figur 3.4 og Figur 3.7.

Ved Als-siden er der en dæmning, som forbinder land til broen.



Figur 3.4 Tegning der viser bro-løsningsforslaget for Als-Fyn forbindelsen.

Bropillerne står på en funderingsplade på et højt pæleværk, og har kun de nederste 2 m under havoverfladen.

Alle bropillerne har et tværsnit på 3 m x 6 m og de to pyloner har et tværsnit på 10 m x 10 m.

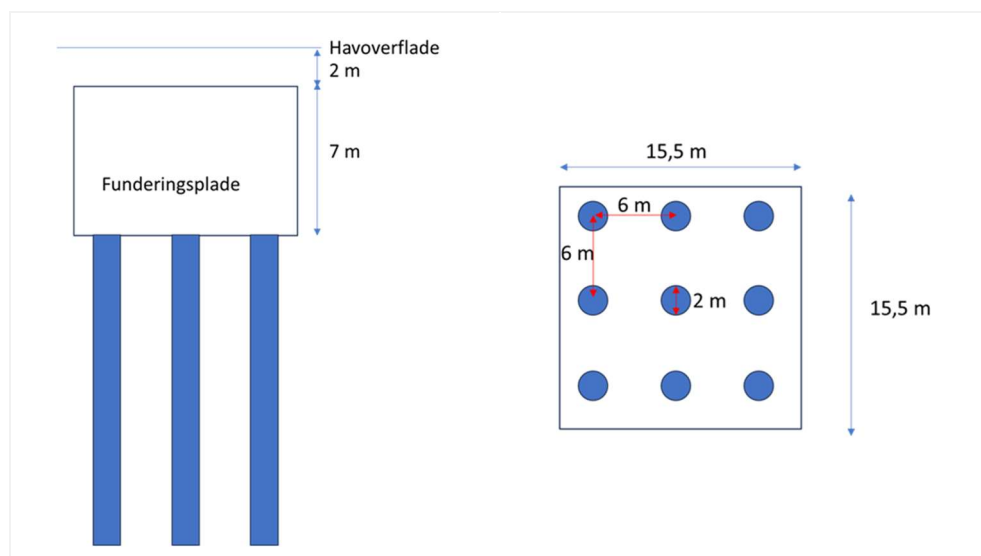
For de fleste bropiller er funderingspladens bredder 15,5 m x 15,5 m og højden 7 m med overside 2 m under havoverfladen (kote -2 m DVR90), se Figur 3.5. Pæleværket underneden har 9 pæle i et 3 x 3 mønster med en afstand på 6 m fra centrum af en pæl til centrum af nærmeste pæl. Pælene har en diameter på 2 m.

Følgende bropiller afviger fra ovenstående beskrivelse:

- De 18 bropiller umiddelbart nord for den nordlige pylon er med en funderingspladebredde på 21,5 m x 21,5 m og højden 7 m med overside 2 m under havoverfladen (kote -2 m DVR90). Pæleværket har 16 pæle i et 4 x 4 mønster med en afstand på 6 m fra centrum af en pæl til centrum af nærmeste pæl. Pælene har en diameter på 2 m.
- De første 4 bropiller fra Als-siden er direkte funderet og har en funderingsplade med bredderne 20 m x 12 m og som stikker 1,5 m op over havbunden.
- De sidste 6 bropiller ved landfæstet på Fyn er også direkte funderet og har en funderingsplade med bredderne 20 x 12 m, hvor kun de sidste 2 stikker ca. 1 m op over havbunden.

For de to pyloner ved skråstagsbroen er funderingspladens bredder 59,4 m x 50,4 m og højden 10 m med overside 2 m under havoverfladen. Pæleværket har

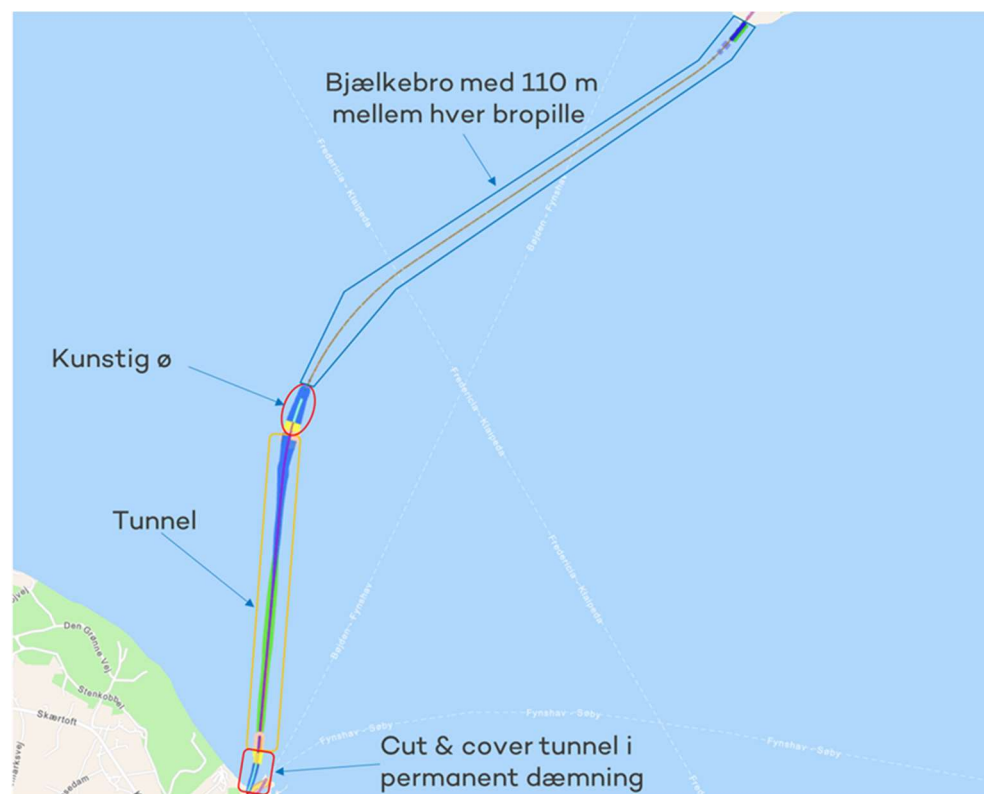
42 pæle i et 7 x 6 mønster med en afstand på 9 m fra centrum af en pæl til centrum af nærmeste pæl. Pælene har en diameter på 3 m.



Figur 3.5 Principtegning af bropille. Principtegningen er kun vist for en af de tre anvendte funderingsplader.

3.3.3 Kombination af en sænketunnel, kunstig ø og bro

Kombinationsløsningen består af en bjælkebro, en ø og en sænketunnel, se Figur 3.6 og Figur 3.8.



Figur 3.6 Tegning der viser kombinationsløsningsforslaget for Als-Fyn forbindelsen.

Bjælkebroen er meget lig den for den rene broløsning, dvs. for bropiller, funderingsplader og højt pæleværk.

Øen er i placeret i et område med cirka 20 m vanddybde. Diameter af øen er cirka 600 m.

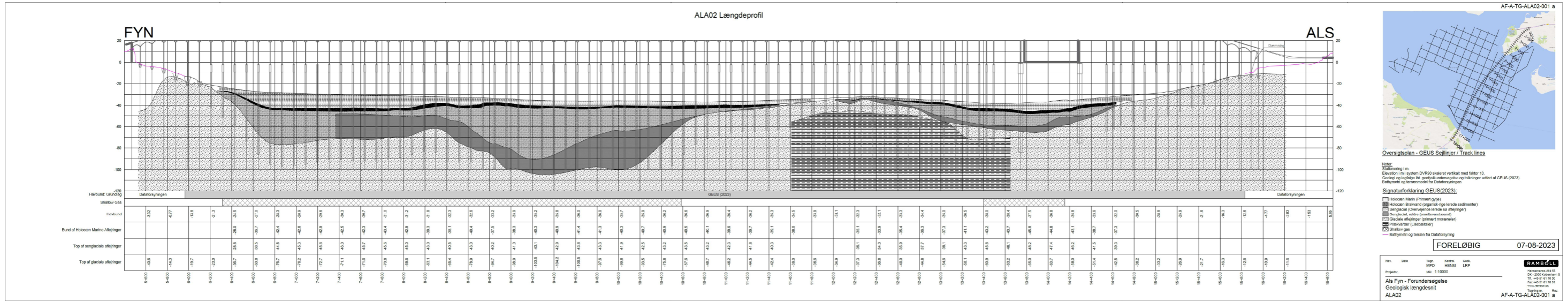
Sænketunnelen er 4 km lang, hvor den første 1 km fra øen er over bunden og faldende, hvorefter sænketunnelen er helt nedgravet de næste 3 km.

3.4 Marin begroning

Under -2 m DVR90 kan der efter ca. 2 år være marin begroning med en tykkelse på 100 mm (Ref. /5/). Ruheden af den marine begroning antages at være omkring 30 mm (Nikuradse ruhed, afhænger ikke af lagets tykkelse).

Således vil funderingspladerne og pælene dækkes af marin begroning og funderingspladernes bredder og højde og pælenes diameter øges med 2 x 100 mm.

Den marine begroning skal tages i regning i bestemmelsen af løsningernes modstand.



4 Hydrografien

4.1 Introduktion

Med baggrund i indsamlet data og information, se kapitel 3, gives der i det følgende en beskrivelse af hydrografien i området. Der fokuseres på forhold, som er af betydning for Als-Fyn forbindelsens påvirkning.

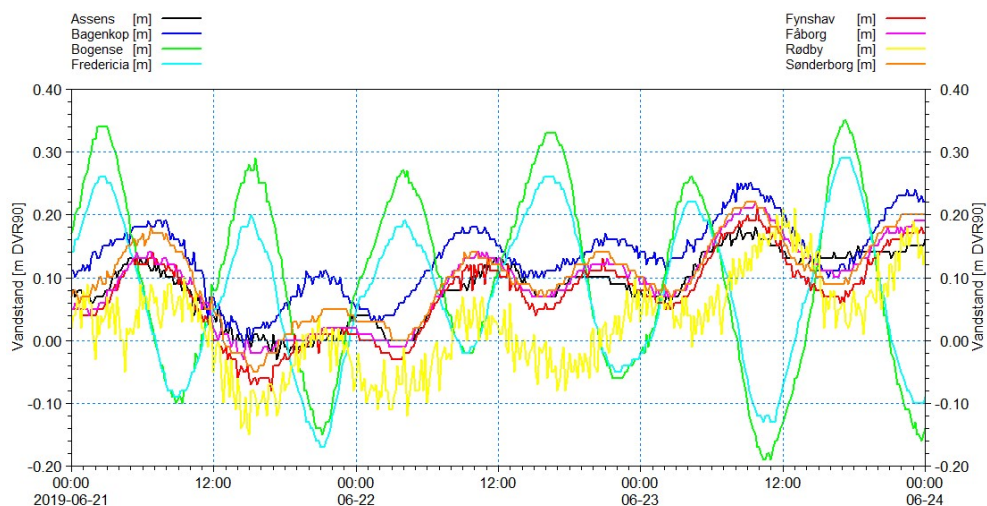
4.2 Analyse af vandstandsmålinger

Vandstandsmålingerne fra de 8 stationer indikeret på Figur 3.1 er analyseret statistisk med henblik på at finde dækningsprocenter, middelvandstande, minimum vandstande, maksimum vandstande og spredninger. Sidstnævnte parameter kan opfattes som et mål for områdets dynamik. Dækningsprocenten er et mål for hvor stor en del af perioden, der er datadækning. De statistiske mål for perioden 2019-2021 er sammenfattet i Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Statistiske mål for målte vandstande i perioden 2019-2021.

Station	Middel [m DVR90]	Minimum [m DVR90]	Maksimum [m DVR90]	Spredning [m]	Antal målinger	Dækningsgrad [%]
Assens	0,093	-0,92	1,55	0,201	157.386	99,722
Bagenkop	0,170	-0,86	1,72	0,220	155.395	98,460
Bogense	0,065	-0,88	1,34	0,225	157.394	99,727
Fredericia	0,059	-0,76	1,16	0,190	155.924	98,796
Fynshav	0,072	-1,00	1,61	0,223	155.887	98,772
Fåborg	0,097	-0,95	1,6	0,213	157.384	99,721
Rødby	0,098	-1,07	1,61	0,219	156.204	98,973
Sønderborg	0,104	-1,00	1,62	0,223	157.391	99,725

Det ses af tabellen, at dækningsgraden er større end 98% på samtlige 8 stationer og der dermed er et godt grundlag for beskrivelse af vandstandsdynamikken i området. Spredningen er nogenlunde ens for alle stationer med undtagelse af Fredericia, som er beliggende i den smalle del af Lillebælt, hvor dynamikken er lidt mere afdæmpet. Dette afspejles også i forskellen mellem maksimum og minimum vandstand (variationsbåndet), som er klart mindre end for de øvrige stationer. Variationsbåndet er også mindre for Bogense end for de 6 sydligt beliggende stationer. Her skyldes den større spredning påvirkning af tidevand. Tidevandspåvirkningen i Bogense og mangel på samme ved de sydlige stationer, ses også på vandstandskurverne vist i Figur 3.2. Ved de 6 sydlige stationer er tidevandseffekten lille, hvorfor vandstandsvariationerne primært er drevet af metrologiske vejrfænomener. I Figur 4.1 er målte vandstande plottet for alle 8 stationer i en periode med rolige vindforhold og vandstandsvariationer domineret af tidevand. Det ses, at tidevandsamplituderne er væsentlig kraftigere for de to nordlige stationer Bogense og Fredericia end for de 6 sydlige. Det ses ligeledes, at vandstandssignalet ved de 6 sydlige stationer er i modfase, hvilket bevirker, at der optræder "kraftige" gradienter i Lillebælt og Storebælt i forbindelse med henholdsvis flod og ebbe.



Figur 4.1 Faseforskelle i målte vandstande i en periode domineret af tidevand.

4.3 Sammenligning af målte og modellerede vandstande

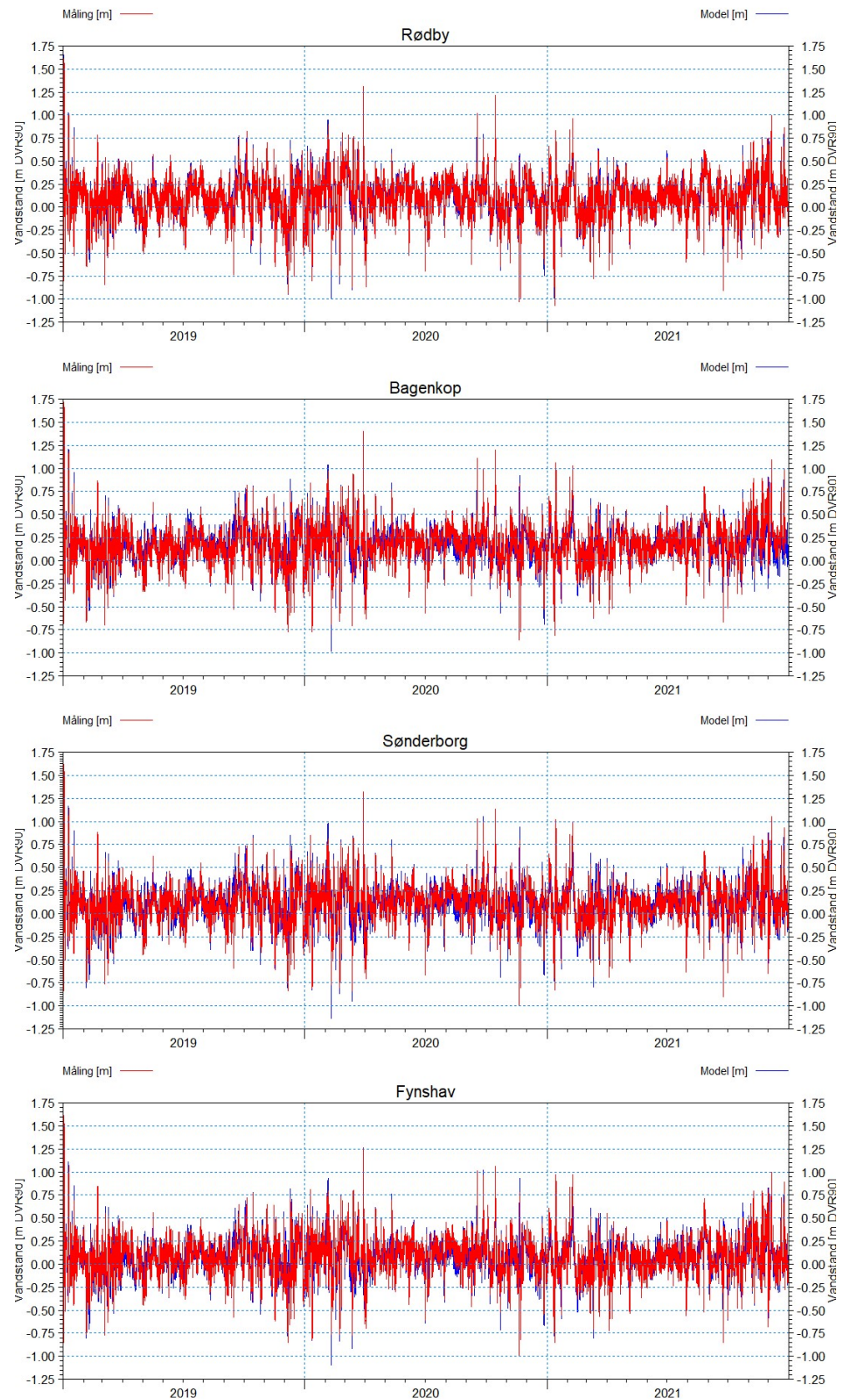
Områdets dynamik og de hertil tilknyttede strømhastigheder er drevet af vandspejlsforskelle og bestemt af området batymetri og geometri. Det er derfor af væsentlig betydning for den i dette studie beregnede blokering, at der er en god overensstemmelse mellem målte og modellerede vandstande i området. I Figur 4.2 og Figur 4.3 er der vist en sammenligning mellem målte og modellerede vandstande i perioden 2019-2021 for hver af de 8 stationer. Målingerne er registreret med en opløsning på 10 minutter, mens modellens vandstande er vist med en opløsning på 30 minutter.

Det ses af plottene, at der generelt set er en god overensstemmelse mellem målte og modellerede vandstande. Ligeledes ses tidevandets betydning for vandstandsvariationen i plottene for Fredericia og Bogense. I Tabel 4.2 er der angivet en række statistiske mål for de modellerede vandstande, samt forskelle i forhold til målingerne.

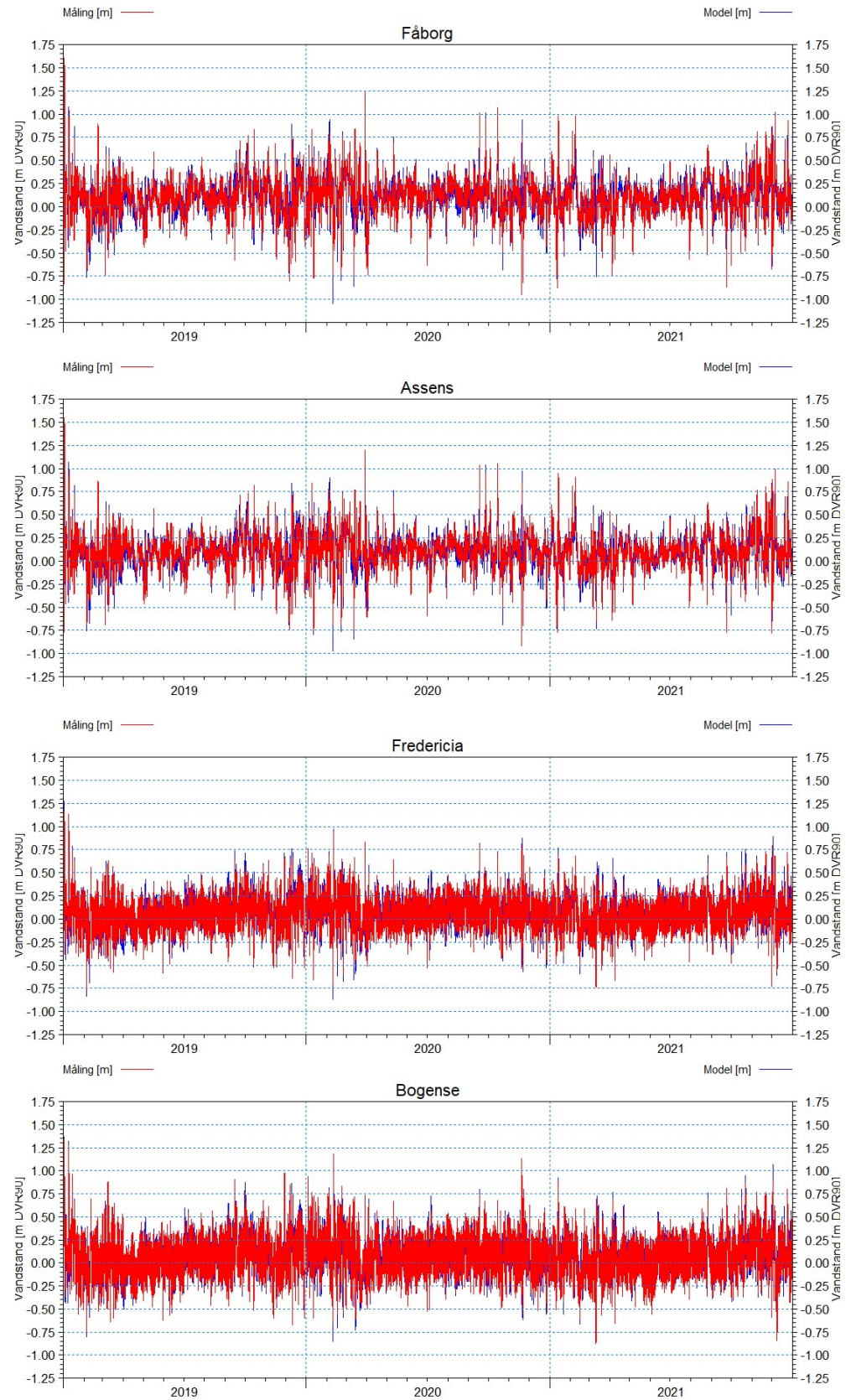
Det ses, at forskellene i spredning mellem model og måling er meget lille. Det vurderes derfor, at modellens vandstandsdynamik afspejler strømforholdene i området ganske godt og dermed er anvendelig som grundlag for blokeringsanalysen.

Tabel 4.2 Statistiske mål for modellerede vandstande og forskelle i forhold til målte vandstande i perioden 2019-2021.

Station	Minimum [m VR90]	Forskel [m]	Maksimum [m DVR90]	Forskel [m]	Spredning [m]	Forskel [m]
Assens	-0,98	0,06	1,48	0,07	0,216	-0.003
Bagenkop	-0,99	0,13	1,67	0,05	0,205	0.012
Bogense	-0,85	-0,03	1,37	-0,03	0,208	0.005
Fredericia	-0,87	0,11	1,27	-0,11	0,220	-0.003
Fynshav	-1,10	0,10	1,55	0,06	0,193	0.007
Fåborg	-1,05	0,10	1,53	0,07	0,216	0.002
Rødby	-1,00	-0,07	1,65	-0,04	0,224	-0.005
Sønderborg	-1,14	0,14	1,59	0,03	0,225	-0.001



Figur 4.2 Sammenligning af målte og modellerede vandstande ved Rødby, Bagenkop, Sønderborg og Fynshav i perioden 2019-2021.



Figur 4.3 Sammenligning af målte og modellerede vandstande ved Fåborg, Assens, Fredericia og Bogense i perioden 2019-2021.

4.4 Hydrografisk beskrivelse af området

Ind- og udstrømning til og fra Østersøen sker gennem de 3 danske bæltter; Lillebælt, Storebælt og Øresund. I store træk er ind- og udstrømningen fordelt med en 1/11 af vandføringen gennem Lillebælt, 7/11 gennem Storebælt og 3/11 gennem Øresund. Tværsnittet ved Als-Fyn linjeføringerne er bredt og dybt, hvorfor tværsnitsarealet er betragteligt større end i den snævre del af Lillebælt. Strømme og vandudveksling drives af vandspejlsforskelle samt vindens påvirkning på vandoverfladen. Den store strømningsmodstand i den snævre del af Lillebælt bevirker, at de vandmasser som typisk sættes i bevægelse i det Sydfynske Øhav i forbindelse med en kraftig udstrømningshændelse ikke er i stand til fuldt ud at trænge igennem Lillebælt og derfor i stedet fører til dannelsen af en modsatrettet bundstrøm.

4.4.1 Strøm og saltprofiler

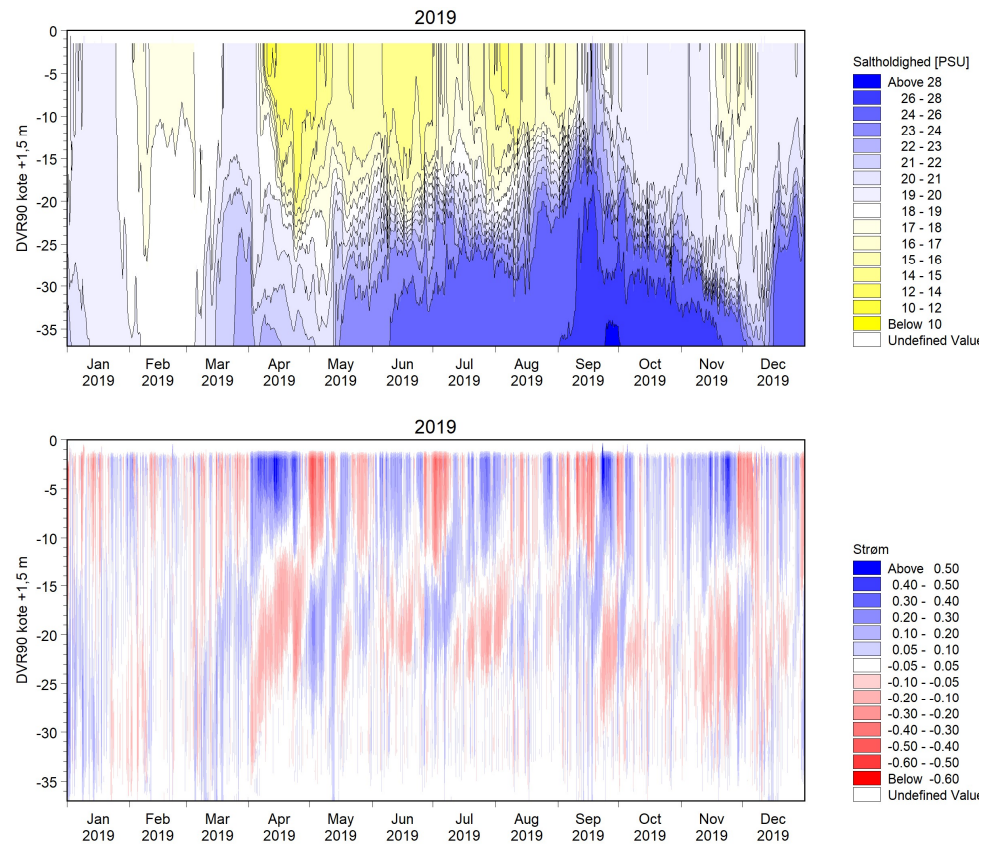
Til at opnå en forståelse af vandområdet dynamik er der udtrukket strøm og saltprofiler i området for Als-Fyn forbindelsernes krydsning. Informationen herfra er vist i en række isoplethplot, Figur 4.4, Figur 4.5 og Figur 4.6, som viser, hvordan profilerne ændres hen gennem året for hver af de tre modelår.

Det ses af isoplethplottene for salt, at der er en god opblanding i årets første 3 måneder, hvorefter der gradvist bygges en lagdeling op hen over sommeren. En lagdeling som bevirker, at der i hovedreglen er store områder i det sydfynske øhav med iltsvind i sensommeren og de første efterårsmåneder. I plottene indikerer de blå farver saltvand med ophav fra Kattegat/Nordsøen, mens de gule farver indikerer brakvand fra Østersøen.

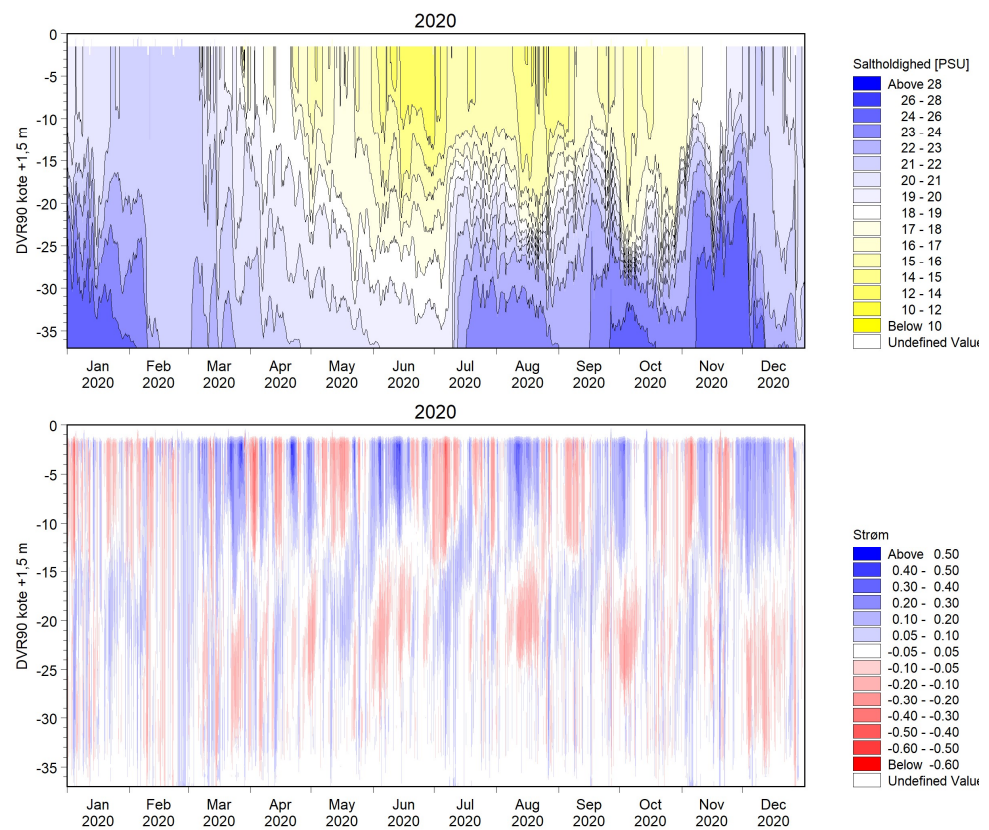
Isoplethplottene for strøm viser, at der stort set altid er modsatrettet strømning i øvre og nedre lag i området for Als-Fyn forbindelsernes krydsning. De blå farver indikerer udstrømning fra Østersøen, mens de røde farver indikerer indstrømning til Østersøen.

Skillefladens beliggenhed (niveau) ses at variere over tid, men i hovedreglen omkring kote -14 m DVR90. Den vertikale strømcirkulation bevirker, at vandføringerne i henholdsvis øvre og nedre lag er større end den resulterende vandføring i hele tværsnittet. Denne dynamik er relevant at inddrage i blokeringsberegningerne og kan inkluderes ved at udføre separate beregninger for henholdsvis øvre og nedre strømningslag.

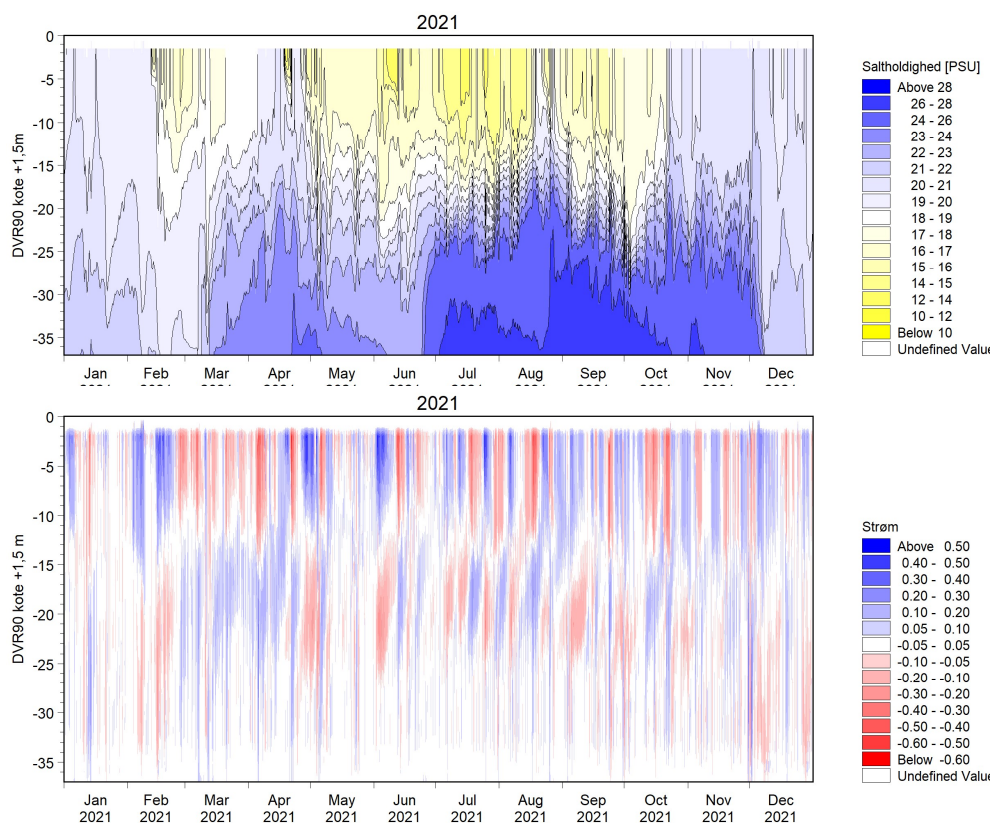
Med udgangspunkt i isoplethplottene for strømmen er det også klart, at man kan opnå en mindre blokerings effekt ved at flytte de 7 meter høje fundamentplader med topkote i -2 m DVR90 længere ned, så de placeres i overgangsområdet mellem øvre og nedre lag, hvor strømhastighederne er mindre og modsatrettede.



Figur 4.4 Isoplethplot af saltholdighed og strøm i 2019 i området for Als-Fyn forbindelsens krydsning.



Figur 4.5 Isoplethplot af saltholdighed og strøm i 2020 i området for Als-Fyn forbindelsens krydsning.



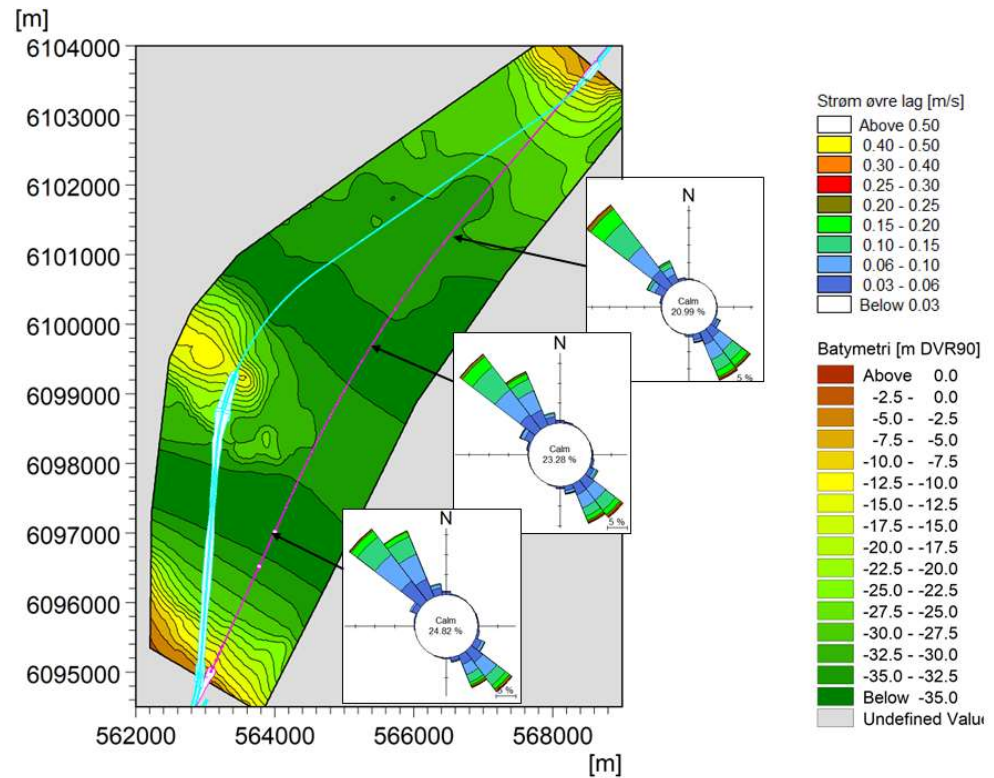
Figur 4.6 Isoplethplot af saltholdighed og strøm i 2021 i området for Als-Fyn forbindelsens krydsning.

4.4.2 Strømroser

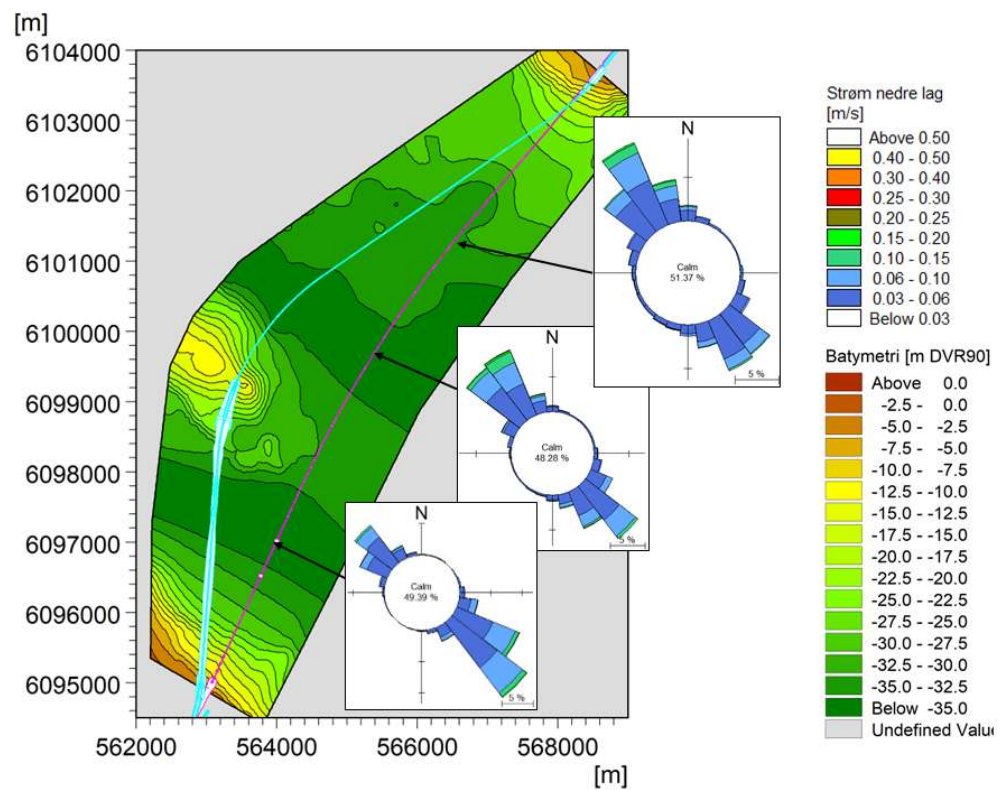
Defineres øvre lag som den del af vandsøjlen, der befinder sig over kote -14 m DVR90 og nedre lag, som den del af vandsøjlen under kote -14 m DVR90, kan der etableres strømroser for hvert af de to lag. Dette er gjort på 3 positioner langs med broløsningens linjeføring. Disse er plottet for det øvre lag på Figur 4.7 og for det nedre lag på Figur 4.8. Det ses, at de største strømhastigheder optræder i det øvre lag, både i forbindelse med udstrømning og indstrømning. Strømhastighederne i nedre lag (dybdemiddel) overstiger stort set ikke 0,2 m/s (<0,1% af tiden), hvor det i øvre lag sker i op til 4% af tiden. Generelt set er middelstrømhastighederne små i både øvre og nedre lag. Nettodriften er beregnet og angivet i Tabel 4.3. Det ses, at der er en nettoindstrømning i det nedre lag i den sydlige del, mens der i den centrale og nordlige del er en svag udstrømning. I det øvre lag er der nettoudstrømning i hele tværsnittet. Tabellen indikerer også, at den kraftigste vertikale cirkulation finder sted i den sydlige del af tværsnittet.

Tabel 4.3 Nettodrift. Positiv værdi indikerer nettoudstrømning, negativ værdi nettoindstrømning.

Strømrose	Øvre lag	Nedre lag
Nordlig [mm/s]	10,4	5,8
Central [mm/s]	15,1	3,9
Sydlig [mm/s]	16,2	-11,3



Figur 4.7 Strømfordelingen (2019-2021) i øvre lag ved broforbindelsens krydsning.

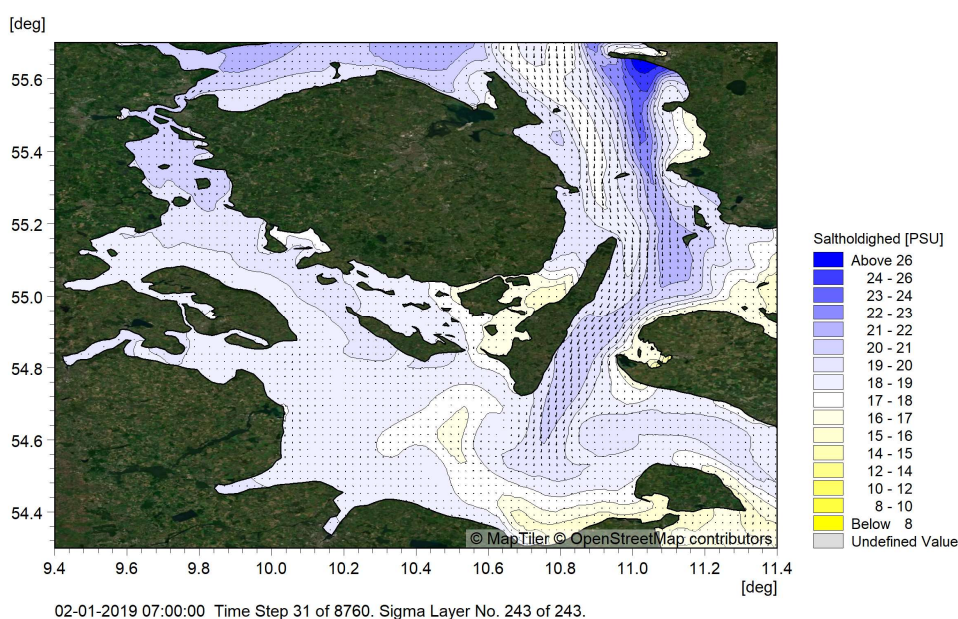


Figur 4.8 Strømfordelingen (2019-2021) i nedre lag ved broforbindelsens krydsning.

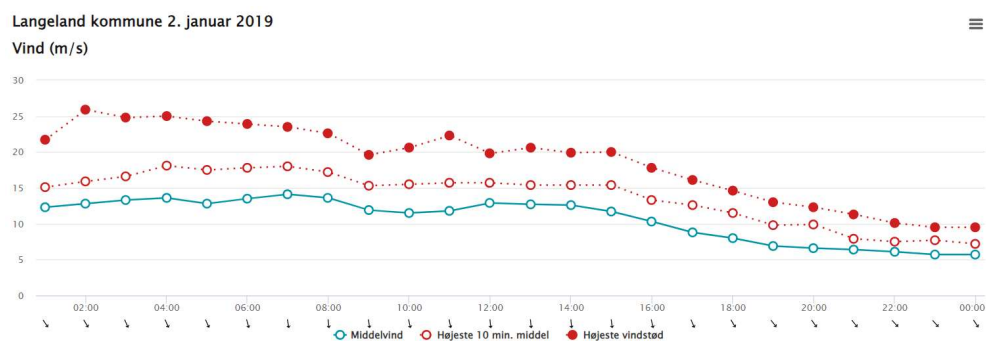
4.4.3 Eksempler

I det følgende er der vist tre eksempler på vindens betydning for overfladesaltholdigheden i tre forskellige strømningssituationer.

I vintermånederne er der som det fremgår af isoplethplottene en kraftigere opblanding, som bevirker at gradienter i saltholdighed over dybden er mindre udtalte. I Figur 4.9 er der vist et eksempel på saltholdighed i overfladelaget i forbindelse med en højvandshændelse og kraftig vind fra nord (2. januar 2019). Det ses, at der presses vand fra Kattegat med en saltholdighed omkring 20‰ ind igennem Lillebælt og Storebælt i en sådan grad, at Østersøens brakvand er skubbet øst for Darss tærsklen. Vindens styrke og retning i området er angivet i Figur 4.10 ved hjælp af plot fra DMIs vejarkiv. Vinden i plottet er angivet som timemiddelvind, største 10 minutter middelvind og kraftigste vindstød. Endelig er vindretningen indikeret i bunden af plottet ved hjælp af pile.

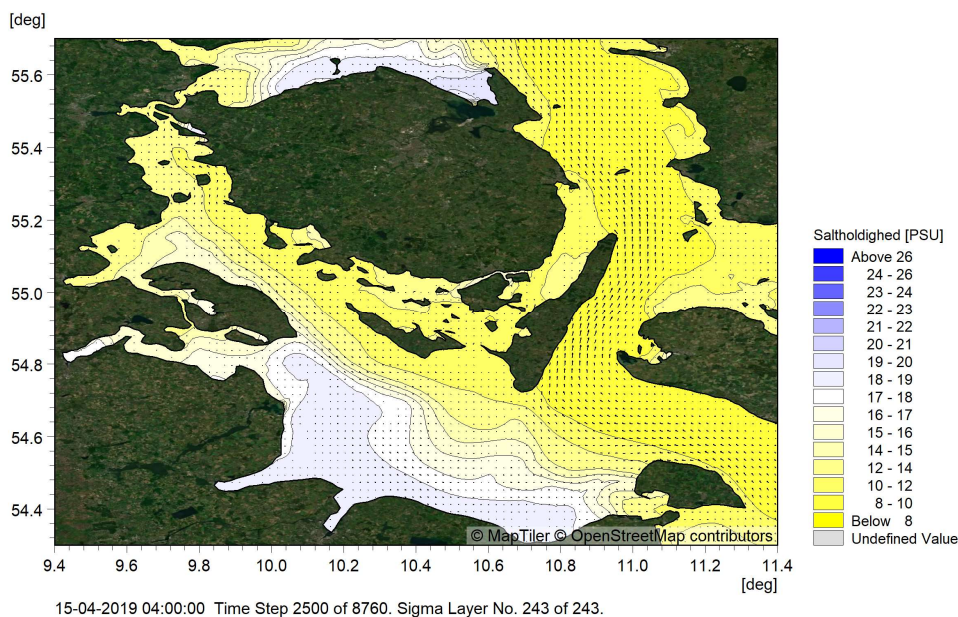


Figur 4.9 Eksempel på indstrømning af saltholdigt vand igennem Lillebælt og Storebælt.

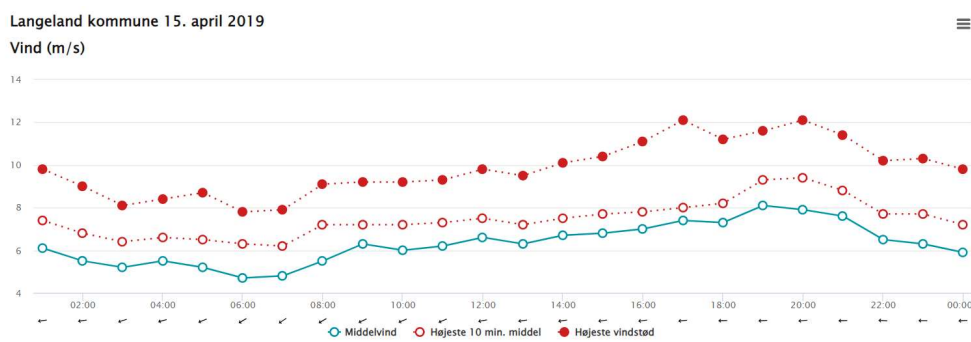


Figur 4.10 Målt vind og vindretning i Langeland kommune 02-01-2019.

I Figur 4.11 er der vist et eksempel på en kraftig udstrømningshændelse gennem Lillebælt og Storebælt (15. april 2019) for en situation med vind fra øst (Påskeøsten). Det ses, at der dannes lommer (idvande) med lidt højere saltholdighed i Kielerbugten og på nordsiden af Fyn. Saltholdigheden i det øvre lag i Storebælt, sydfynske øhav og Lillebælt er klart domineret af Østersøens brakvand. Vind og vindretning den pågældende dag er angivet i Figur 4.12 i form af plot fra DMIs vejarkiv.

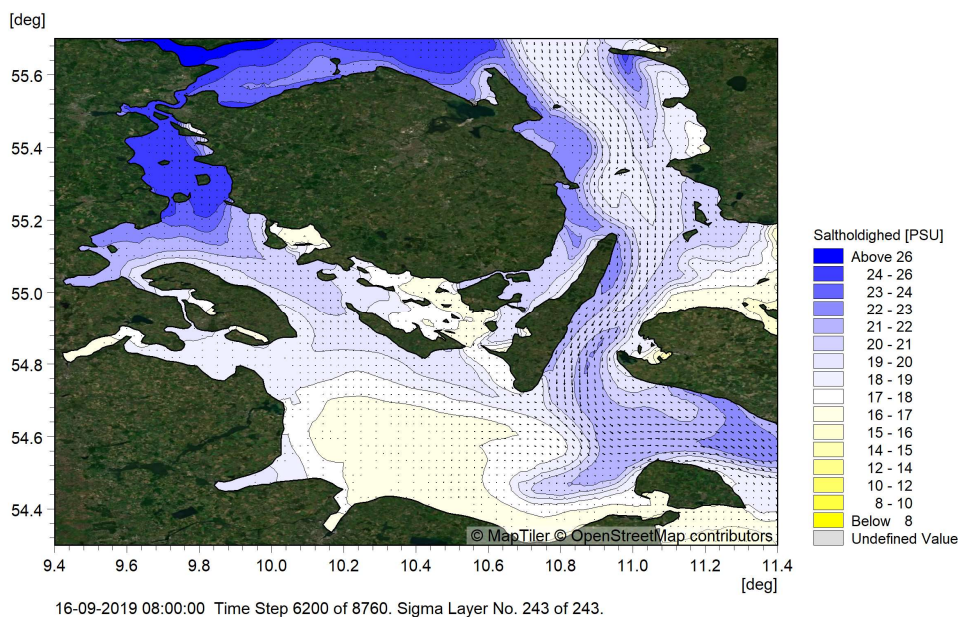


Figur 4.11 Eksempel på udstrømning af brakvand gennem Lillebælt og Storebælt.

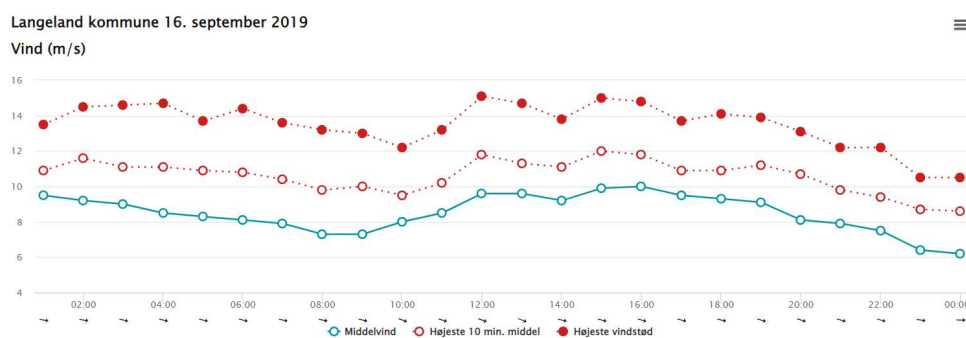


Figur 4.12 Målt vind og vindretning i Langeland kommune 15-04-2019.

Hen over sommeren og det tidlige efterår opstår der en mere udtalt lagdeling og dermed større forskelle i saltholdighed mellem øvre og nedre lag. I Figur 4.13 er der vist et eksempel på saltholdighed i overfladelaget i forbindelse med en indstrømningshændelse og kraftig vind fra vest i det tidlige efterår (16. september 2019). Det ses, at der presses højsalint vand fra Kattegat med en saltholdighed omkring 25‰ ind igennem Lillebælt. I Storebælt er saltholdigheden af det indstrømmende vand noget lavere. Vindens styrke og retning i området er angivet i Figur 4.14 ved hjælp af plot fra DMIs vejrarkiv. Det ses at vinden kommer fra vest, hvilket bevirker, at det mindre saltholdige vand i overfladelaget skubbes ind mod den sjællandske kyst og det mere saltholdige nedre lag presses ind mod den jyske kyst. Med andre ord at skillefladen presses ned i Storebælt og op i Lillebælt. Med hændelse tilføres der via Lillebælt meget salt til området for Als-Fyn forbindelsens krydsning.



Figur 4.13 Eksempel på indstrømning af højsalint vand gennem Lillebælt.



Figur 4.14 Målt vind og vindretning i Langeland kommune 16-09-2019.

4.4.4 Blokerings-effekt og cirkulationsstrømme

Als-Fyn forbindelsens krydsninger er beliggende på et sted, hvor tværsnittet er bredt og relativt dybt. Strømforholdene i det givne område er derfor i mange af de forekommende situationer ikke friktionsbestemt. Dette fører blandt andet til, at der i hovedreglen er modsatrettet strømning i et øvre og nedre lag, men også at der kan være perioder med en horisontal cirkulation, hvor strømmen på Als siden er modsatrettet strømmen på Fyns siden. Ydermere er vandcirkulationen i området bestemt af udvekslingen med Lillebælt, Storebælt og Femern bælt.

Af denne årsag kan en beregnet blokerings-effekt principielt set ikke overføres direkte til en betydning for udvekslingen med Østersøen. En sådan analyse kan kun udføres med en hydrodynamisk 3D-model, hvor blokerings-effekten af Als-Fyn forbindelsen vurderes for en påvirkning af udvekslingen ved Gedser-Darss tærsklen, som kan opfattes som det regulerende tværsnit for udvekslingen med Østersøen. Idet den analytisk beregnede blokerings-effekt lille er forskellen dog uvæsentlig.

Da vandområdet udveksler med både Lillebælt, Storebælt og Femern bælt vil en Als-Fyn forbindelse i højere grad virke dæmpende på cirkulationsstrømmene (horisontalt og vertikalt) end for den egentlige drift igennem systemet og som er den del, der har betydning for udvekslingen med Østersøen. Det er derfor vigtigt

at gøre sig klart, at den i dette notat analytisk beregnede blokering for de undersøgte løsningsforslag ikke uden videre kan overføres til blokeringsmål for udvekslingen med Østersøen. Den analytisk beregnede blokering er konservativ i forhold til denne udveksling.

Den analytisk udførte blokeringsberegning kan anvendes til at optimere udformning og opbygning i forhold til at opnå en reduceret blokering. For eksempel kan de store fundamentplader som bærer vejbanens bropiller placeres mere hensigtsmæssigt i overgangen mellem øvre og nedre lag, hvor strømhastighederne er mere afdæmpede. Ligeledes kan en mere strømlinjet udformning med afrundede kanter på eksempelvis piller, pyloner og fundamentplader resultere i en formindsket formmodstand (C_D -koefficient).

5 Løsningernes modstand

5.1 Introduktion

Beregningen af modstanden fra de to løsninger bestemmes ud fra:

- Udformning og geometri af løsningerne, dvs. geometri af bropiller, funderingsplader, pæleværk med mere, se kapitel 3.3;
- Hastighedsfordelingen ved løsningerne, dvs. på lavt og dybt vand og over dybden, se kapitel 4;
- Strømodstandskoefficienter for bropiller, funderingsplader, pæleværk med mere. Disse bestemmes i dette afsnit. Grundlaget for koefficienterne findes i Ref. /6/; og endelig
- En bestemmelse af modstand for løsninger, hvilket involverer en integration af geometrien, hastighedsfordelingen og strømodstandskoefficienterne over løsningerne. Dette beskrives også i dette afsnit.

Til grundlag for blokeringsanalysen er det valgt at tage udgangspunkt i DKBS2-HD75 modellen. Til undersøgelsen er der udtrukket 3 års modeldata. Disse er benyttet til at beregne løsningsforslagenes blokering. Der er ikke gennemført simuleringer med Als-Fyn løsningerne implementeret i DKBS2-HD75 modellen. Dermed er forbindelsernes påvirkning af randbetingelser og lokale strømme ikke taget i regning, men påvirkningen vurderes også at være ubetydelig (den beregnede blokering er lille). Af denne årsag giver det ikke anledning til en væsentlig større usikkerhed i de beregnede blokeringer, end der ville være i en beregning med en numerisk model. Til gengæld kan den analytiske beregning ikke kvantificere betydningen for transporten (vand, salt og ilt) over Darss tærsklen ved indgangen til den centrale Østersø.

5.2 Overordnet strømforøgelse fra bro

Den overordnede strøm forøges i brotværsnittet (i standarder på engelsk benævnes det blockage), som følge af den geometriske indsnævring skabt af pæle, fundamentplader, bropiller og pyloner.

Den geometriske blokering og forstærkning af strømmen kan findes ved at se på ændringen af strømningstværsnittet imellem to bropiller i henholdsvis øvre og nedre lag. I øvre lag (cirka 14 m) findes den geometriske betingede strømforstærkningsfaktor ub_{\emptyset} som (de fleste funderingsplader er 15,5 m bredde og er derfor benyttet her):

$$ub_{\emptyset} = 1 + \frac{3m \cdot 2m + 15,5m \cdot 7m + 3 \cdot 2m \cdot 5m}{110m \cdot (2m + 7m + 5m)} = 1,09$$

Således øges kraften på bropillerne i øvre lag med $1,09 \cdot 1,09 = 1,19$, svarende til kvadratet på strømforstærkningsfaktoren. I ovenstående beregning er der ikke taget hensyn til de detaljerede strømninger omkring de enkelte dele, det indgår i strømodstandskoefficienterne.

I nedre lag (cirka 16 m) er strømforstærkningsfaktoren ub_N cirka:

$$ub_N = 1 + \frac{3 \cdot 2m \cdot 16m}{110m \cdot 16m} = 1,05$$

Således øges kraften på bropillerne i nedre lag med $1,05 \cdot 1,05 = 1,10$.

5.3 Bropiller og pyloner

Alle bropillerne har et tværsnit på 3 m x 6 m og de to pyloner har et tværsnit på 10 m x 10 m, se kapitel 3.3. De står vinkelret på broen. De antages være lidt afrundede ved hjørnerne ud fra referenceprojekt i Kroatien (Ref. /7/): $R/D = 1/6$ for både bropiller og pyloner. De er uden marin begroning.

For en parallel strøm med bropille og pylon haves, se Tabel 5.1:

- For bropille $C_{D0} = 0,7$ (se røde bokse i tabellen).
- For pylon $C_{D0} = 1,2$ (se blå bokse i tabellen).

Hvis de ikke er afrundede, skal koefficienten fordobles.

Ud fra Tabel 5.1 er der beregnet en vinkelkorrektionsfaktor for den hældende firkant, se Figur 5.1 (bemærk, at koefficienten er nær den samme i de grønne bokse). Denne korrektion skal benyttes sammen med bropillernes og pylonernes areal vinkelret på strømmingen (lysarealet) i strømmodstandsberegningen (altså ikke som vist øverst i Tabel 5.1). Denne korrektion er kun korrekt for pylonen uden afrunding, men bruges for både pylonerne og bropillerne med afrunding.

Bropillen står på funderingspladen, omkring hvilken der vil opstå en lokalt forøget strømhastighed. Strømningen over funderingspladen vurderes at øges med en faktor 2:

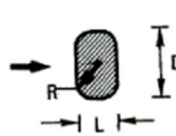
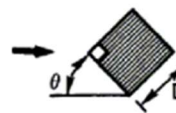
$$ub_f = 2$$

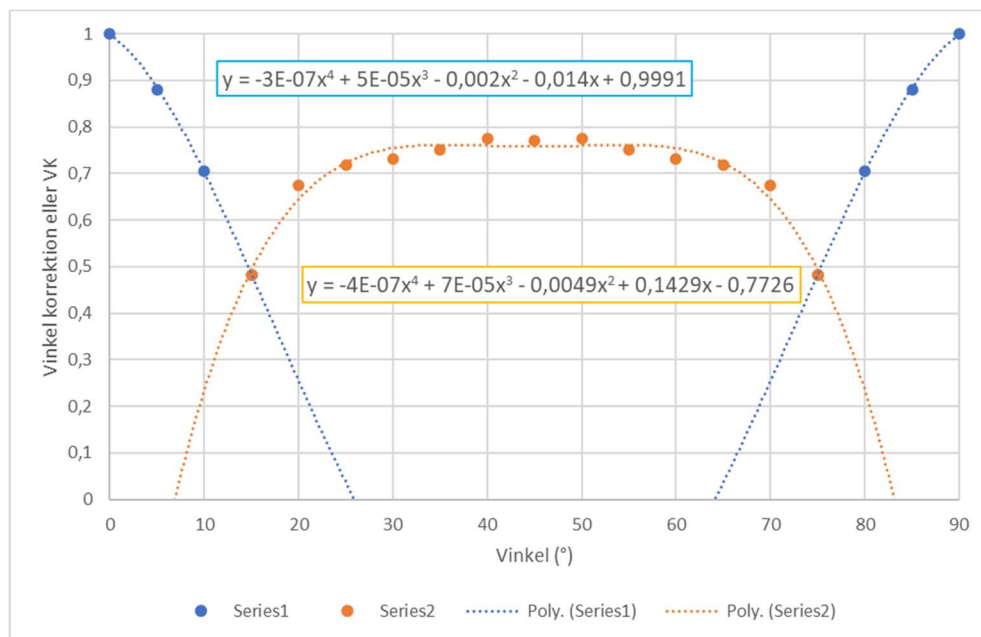
Den effektive strømmodstandskoefficient for pyloner og bropiller bestemmes hermed ved udtrykket:

$$C_{De} = ub_\theta^2 \cdot ub_f^2 \cdot VK \cdot C_{D0}$$

Tabel 5.1 Strømmodstandskoefficienter (fra Ref. /6/). Rød = parallel strøm på bropille. Blå = parallel strøm på pylon.

Drag force per unit length of slender element is $f = \frac{1}{2}\rho C_{D0} Du^2$. D = characteristic width [m]. $Re = uD/\nu$ = Reynolds number. Adopted from Blevins, R.D. (1984) Applied Fluid Dynamics Handbook. Krieger Publishing Co. Reference is also made to Sec.5 for drag coefficients on I-profiles and to Sec.6 for drag coefficients on circular cylinders.

Geometry	Drag coefficient, C_D										
	L/D	R/D	C_D	L/D	R/D	C_D					
4. Rectangle with rounded corners 	0.5	0	2.5	2.0	0	1.6					
		0.021	2.2		0.042	1.4					
		0.083	1.9		0.167	0.7					
		0.250	1.6		0.50	0.4					
	1.0	0	2.1	6.0	0	0.89					
		0.021	2.0		0.5	0.29					
			0.167	1.2							
			0.333	1.0							
	$Re \sim 10^5$										
	5. Inclined square 	θ	0	5	10	15	20	25	30	35	40
C_D		2.2	2.1	1.8	1.3	1.9	2.1	2.2	2.3	2.4	2.4
$Re \sim 4.7 \times 10^4$											



Figur 5.1 Vinkel korrektionsfaktor (VK) for C_D inklusive breddekorrektion. 0° er for parallel strøm og bropille.

5.4 Funderingsplade

Funderingspladernes geometri er beskrevet i afsnit 3.3. Funderingspladerne er kvadratiske eller nær kvadratiske med overside 2 m under overfladen.

- Bropille – længde og bredde 15,5 m x 15,5 m og højden 7 m;
- Bropille – længde og bredde 21,5 m x 21,5 m og højden 7 m; og
- Pylon – længde og bredde 50,4 m x 59,4 m og højden 10 m.

Der vil over tid opstå marin begroning på siderne og undersiden, men dette er ikke vist i beregningerne, da det ikke betyder noget for strømmodstandskoefficienterne bestemt her.

De antages, at $R/D \approx 0$, se Tabel 5.1. L/D er:

- 15,5 m / 15,5 m = 1;
- 21,5 m / 21,5 m = 1; og
- 59,4 m / 50,4 m = 1,18 \approx 1.

For en uendelig høj 'funderingsplade' haves således:

- Bropille - $C_{D\infty} = 2,1$ (se gul boks i tabellen);
- Bropille - $C_{D\infty} = 2,1$ (se gul boks i tabellen); og
- Pylon - $C_{D\infty} = 2,1$ (se gul boks i tabellen).

Ved afrunding kan koefficienten halveres.

En længdekorrektion bestemmes fra Tabel 5.2. l/d er:

- 7 m / 15,5 m = 0,5 < 2;
- 7 m / 21,5 m = 0,3 < 2; og
- 10 m / 50,4 m = 0,2 < 2.

Korrektionerne er alle omkring 0,62 (se blå boks i Tabel 5.2). Dermed findes strømningkoefficienterne at være:

- Bropille - $C_{D0} = 0,62 \cdot 2,1 = 1,3$;

- Bropille - $C_{D0} = 0,62 \cdot 2,1 = 1,3$; og
- Pylon - $C_{D0} = 0,62 \cdot 2,1 = 1,3$.

Funderingspladerne er omstrømmet langs fire sider (venstre, højre, over og under), hvor strømmingen langs overside og underside vurderes at være vigtige for strømmodstandskoefficienten (mindste længde er højden) og derfor benyttes der ikke en vinkel korrektion.

Den effektive strømmodstandskoefficient for pyloner og bropiller bestemmes hermed ved:

$$C_{De} = ub_{\emptyset}^2 \cdot C_{D0}$$

Tabel 5.2 Længdekorrektion (fra Ref. /6/).

<i>A - Circular cylinder - subcritical flow</i>							
<i>B - Circular cylinder - supercritical flow</i>							
<i>C - Flat plate perpendicular to flow</i>							
<i>l/d</i>	2	5	10	20	40	50	100
A	0.58	0.62	0.68	0.74	0.82	0.87	0.98
B	0.80	0.80	0.82	0.90	0.98	0.99	1.00
C	0.62	0.66	0.69	0.81	0.87	0.90	0.95

De bestemte strømmodstandskoefficienter for funderingspladerne er behæftet med usikkerhed, da der ikke er taget hensyn til, at der kun er 2 m mellem overside og havoverfladen og at der er et pæleværk underneden. Hvis det for eksempel antages, at der ikke er strømmende vand på oversiden, øges koefficienten maksimalt med få procent (vurderet ud fra Ref. /6/, Tabel 5-5).

5.5 Pæleværk

Pæleværkernes geometri er beskrevet i afsnit 3.3. Pæleværkerne er som følger:

- Bropille - 9 pæle i et 3 x 3 mønster med en afstand på 6 m fra centrum af en pæl til centrum af nærmeste pæl. Pælene har en diameter på 2 m.
- Bropille - 16 pæle i et 4 x 4 mønster med en afstand på 6 m fra centrum af en pæl til centrum af nærmeste pæl. Pælene har en diameter på 2 m.
- Pylon - 42 pæle i et 7 x 6 mønster med en afstand på 9 m fra centrum af en pæl til centrum af nærmeste pæl. Pælene har en diameter på 3 m.

Et pæleværks strømmodstandskoefficient opdeles i flere bidrag:

- En enkelt pæls strømmodstandskoefficient;
- Formændring, når pæle står tæt (på engelsk solidification). Når for eksempel flere pæle står meget tæt på en linje, virker de samlet mere som én plade end som flere enkelte pæle;
- Omstrømning af pæleværk (på engelsk blockage). Strømmen tilpasser sig modstanden fra pæleværket og passerer rundt om pæleværket hvorved pæleværket udsættes for en mindre strøm;
- Strømlæ fra de forreste pæle (på engelsk shielding). De forreste pæle skygger for de bagvedliggende pæle, hvor de udsættes for en mindre strøm.

Disse bidrag betragtes i det følgende.

Bølgerne i området er små og korte (Ref. /8/) og påvirker ikke de hydrodynamiske forhold fra underside af funderingsplader og til havbunden. Af

denne årsag kan strømodstandskoefficienten for strøm uden bølger benyttes for pæle og pæleværk.

Pælene er (hydraulisk) ru og hver enkel pæl har en koefficient på:

- Pæl - $C_{Dp0} = 1,05$;

Effekten fra formændring, når pælene står tæt (solidification), er mindre. Strømodstandskoefficienten for pælene med diameter på 2 m, når de står lige ved siden af hinanden, er cirka 1,75. For første opstrøms række af pæle med afstand er koefficienten beregnet til 1,18. Fordeles dette på alle pæle i pæleværk og tages der en kvadratrodd findes korrektionen, der skal ganges på i anden potens, at være mindre end 1,03. Dette bidrag ignoreres.

Omstrømning og strømlæ for pæleværket (blockage og shielding) kan beregnes fra (se Ref. /6/, afsnit 6.10.2.2):

$$u_{spv} = \left(1 + \frac{n \cdot C_{Dp0} \cdot D}{4 \cdot D_p} \right)^{-1}$$

Hvor n er antal pæle, D er pælediameter og D_p pælegruppens bredde. Bemærk, at denne korrektion skal anvendes for de enkelte pæle i anden potens.

For de tre pæleværker fås (marin begroning ignoreres her, da det kun har lille betydning):

$$u_{spv} = \left(1 + \frac{9 \cdot 1,05 \cdot 2m}{4 \cdot (2 \cdot 6m + 2 \cdot 1m)} \right)^{-1} = 0,75$$

$$u_{spv} = \left(1 + \frac{16 \cdot 1,05 \cdot 2m}{4 \cdot (3 \cdot 6m + 2 \cdot 1m)} \right)^{-1} = 0,70$$

$$u_{spv} = \left(1 + \frac{42 \cdot 1,05 \cdot 3m}{4 \cdot (5,5 \cdot 9m + 2 \cdot 1,5m)} \right)^{-1} = 0,61 < 0,70 \rightarrow 0,70$$

I Ref. /9/ beregnes blockage og shielding hver for sig, men giver tilsammen cirka samme reduktion, som fundet i ovenstående.

Den effektive strømodstandskoefficient for hver pæl i pæleværk bestemmes hermed ved:

$$C_{De} = ub_{\emptyset,N}^2 \cdot u_{spv}^2 \cdot C_{Dp0}$$

5.6 Ø og tunnel

Enkelttab fra ø og tunnel er beregnet og omregnet til en strømodstandskoefficient, der kan benyttes i ligningen for strømkraft (sammenstilling af energi og impuls ligning, som ofte gjort i klassisk hydraulik). Dermed fås strømodstandskoefficienterne til:

- For ø $C_{D0} = 0,6$.
- For tunnel $C_{D0} = 1,8$.

Den effektive strømodstandskoefficient for ø og tunnel bestemmes hermed ved:

$$C_{De} = ub_{\emptyset,N}^2 \cdot C_{D0}$$

Øens længde antages at være cirka 600 m i øvre lag og cirka 900 m i nedre lag (med bidrag fra tunnel der blokerer nedre lag).

Tunnellens længe i øvre lag antages at være cirka 300 m og dens længde i nedre lag at være cirka 500 m. I begge tilfælde antages højden at være 5 m.

5.7 Blokeringsberegning

Als-Fyn forbindelsen er placeret i Lillebælts udveksling mellem Kattegat og den Centrale Østersø.

Sammenhængen mellem: A) vandstandsforskellen mellem Kattegat og den Centrale Østersø; og B) gennemstrømning i Lillebælt (Als-Fyn tværsnittet); kan skrives som (se Refs. /10/ og /11/):

$$\Delta H = K_L \cdot Q_L^2$$

Hvor

ΔH Vandstands forskel mellem Kattegat og Centrale Østersø

Q_L Gennemstrømning i Lillebælt (og Als-Fyn snittet)

K_L Hydrauliske modstand for Lillebælt (og nærliggende områder)

Den hydrauliske modstand for Lillebælt er bestemt til (se Refs. /10/ og /11/):

$$K_L = 1830 \cdot 10^{-12} s^2 / m^5$$

Blokeringen af forbindelsen er defineret ved:

$$B_L = \frac{Q_L - Q_{LF}}{Q_L}$$

Hvor

B_L blokering fra forbindelse

Q_{LF} gennemstrømning med forbindelse

Det bemærkes, at ordet 'blokering' er et meget stærkt ord, i forhold til den størrelsesorden det drejer sig om. Blokeringen er meget begrænset og burde mere korrekt benævnes en gennemstrømningsmindskelse (som ingen betydning har for vandstandsforskellen ΔH).

Ved at kombinere overstående to ligninger kan blokeringen tilnærmet omskrives til (idet højre side er lineariseret og det er udnyttet at $K_{LF} \ll K_L$):

$$B_L = \frac{Q_L - Q_{LF}}{Q_L} = \frac{\Delta Q_L}{Q_L} \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{K_{LF}}{K_L}$$

Hvor

K_{LF} hydrauliske modstand fra forbindelse

Dette udtryk omskrives til:

$$B_L \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{K_{LF\emptyset} + K_{LFN}}{K_L} = \frac{1}{2} \cdot \frac{K_{LF\emptyset}}{K_L} + \frac{1}{2} \cdot \frac{K_{LFN}}{K_L} = B_{L\emptyset} + B_{LN}$$

Hvor

$B_{L\emptyset}$ Bidraget fra blokeringen i øvre lag til den totale blokering (dette er ikke blokering i øvre lag, som er mindre)

B_{LN} Bidraget fra blokeringen i nedre lag til den totale blokering (dette er ikke blokering i nedre lag, som er mindre)

Der tages i beregningen ikke hensyn til, at strømmingen i øvre og nedre lag kan være modsatrettet, hvilket resulterer i en beregning af maksimal blokering. Dermed opnås, at kun hvis blokeringen i begge lag er 0 fås en blokering på 0.

Strømkraften på løsningernes enkelte dele bestemmes ved:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_{De} \cdot A_l \cdot U^2$$

Hvor

F_D Strømkraften på de enkelte dele (bropille, funderingsplade, pæleværk, dæmning, kunstig ø)

ρ Vandets densitet

C_{De} Modstandskoefficienten

A_l Arealet vinkelret på strømmingen (lysarealet)

U Strømhastigheden ved hver del

Energitalbet (per tid) fra forbindelsen kan skrives som:

$$\Delta e = \rho g \cdot Q_L \cdot \Delta H_{LF} = \rho g \cdot K_{LF} \cdot Q_L^3$$

Hvor

Δe Energitalbet per tid (effekt)

ΔH Ændring i energihøjde

Ved at benytte strømkraften, kan den hydrauliske modstand fra forbindelse bestemmes ved:

$$K_{LF} = \frac{1}{\rho g \cdot Q_L^3} \cdot \sum_F (F_D \cdot U)$$

Ved brug og analyse af tidsserier er definitionen af blokering baseret på sammenligning af A) integreret tidserie for vandføring uden bro med B) integreret tidserie for vandføring med bro. Der fås således netop én værdi for blokeringen. Altså ikke sammenligning af øjeblikkelige værdier. Hvis de øjeblikkelige værdier sammenlignes, fås en stor variation, størst ved mindre små vandføringer, hvor blokeringen kan blive uendelig stor (grundet division med 0).

I nærværende analyse betragtes tidsserierne uden tidsmidling. Dermed fås en øjeblikkelig blokering af broen til hvert tidsskridt i tidsserierne. Dette giver mange værdier for blokeringen med en spredning i resultaterne, ikke mindst ved små vandføringer. Den benyttede metode er også baseret på langsomt varierende, lidt kraftigere strømninger. Af denne årsag fjernes resultater for små vandføringer, som er mere usikre.

5.8 Blokering fra Als-Fyn bro

Bidrag til broens blokering i øvre lag (ned til -14 m) og i nedre lag (fra -14 m til bunden) er vist i Figur 5.2 og Figur 5.3.

Blokeringerne i øvre og nedre lag og totalt er bestemt til (middel- og median værdier er nær de samme):

- $B_{L\emptyset} = 0,023\%$;
- $B_{LN} = 0,011\%$; og
- $B_L = 0,034\%$.

For at kunne sammenligne bro-løsning med bro-ø-tunnel løsning er blokeringerne givet med 3 decimaler.

Blokeringen af broen er begrænset.

Det bemærkes, at blokeringen sammenlignes med blokeringen fra tidligere broer i kapitel 6, som også er begrænsede.

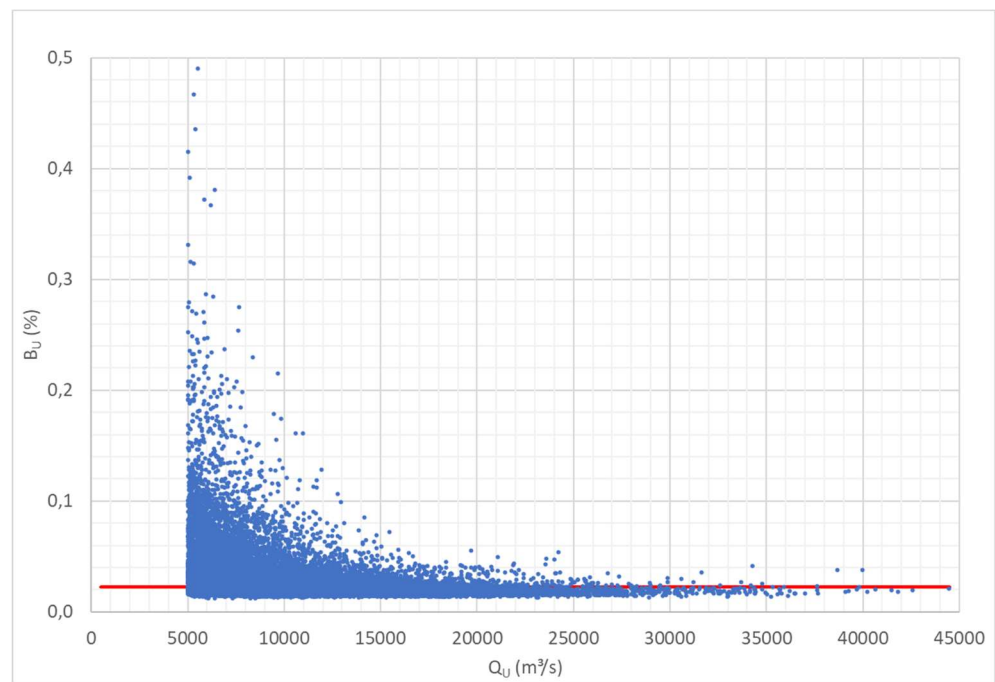
5.9 Blokering fra Als-Fyn bro-ø-tunnel

Bidrag til bro-ø-tunnels blokering i øvre lag (ned til -14 m) og i nedre lag (fra -14 m til bunden) er vist i Figur 5.4 og Figur 5.5.

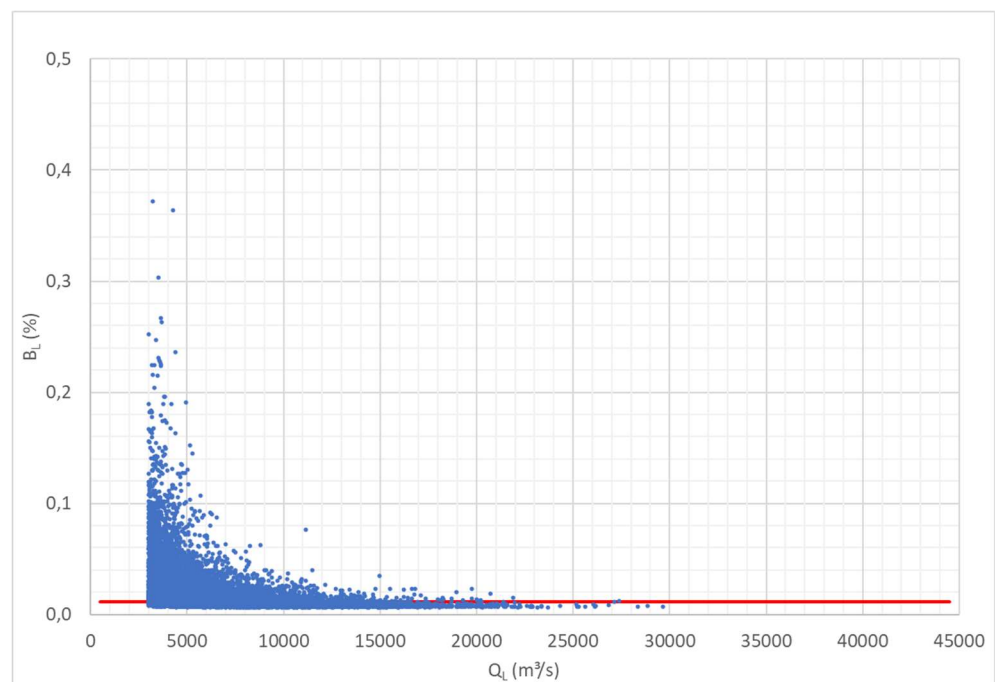
Bro-ø-tunnel blokeringerne i øvre og nedre lag og totalt er bestemt til (middel- og median værdier er nær de samme):

- $B_{L\emptyset} = 0,028\%$;
- $B_{LN} = 0,008\%$; og
- $B_L = 0,036\%$.

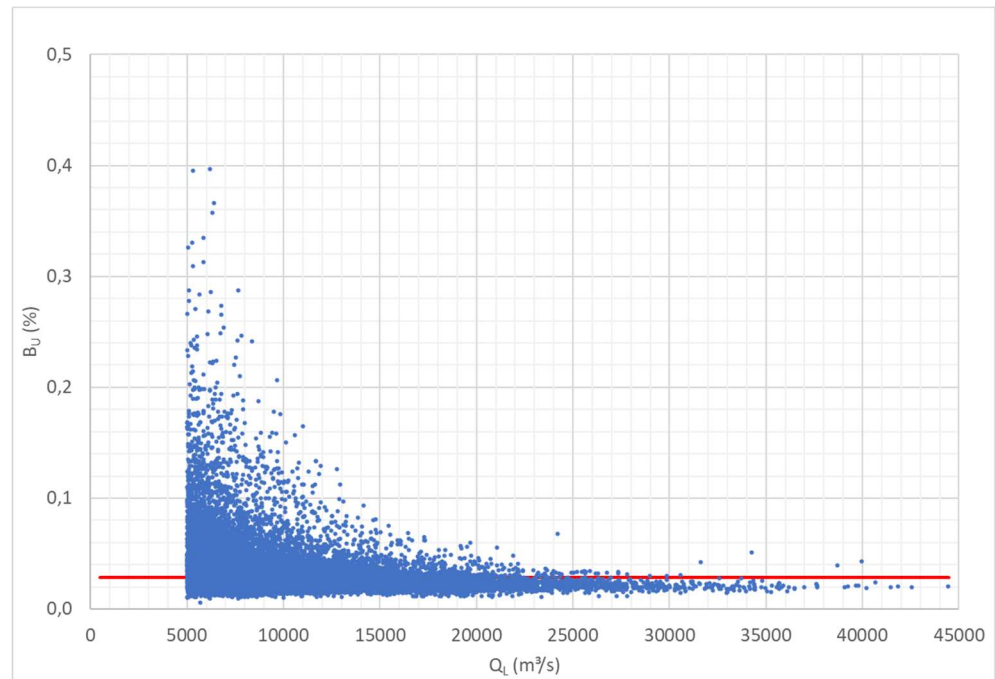
Blokeringen af bro-ø-tunnel er begrænset. Den er ganske ubetydeligt større end for broen.



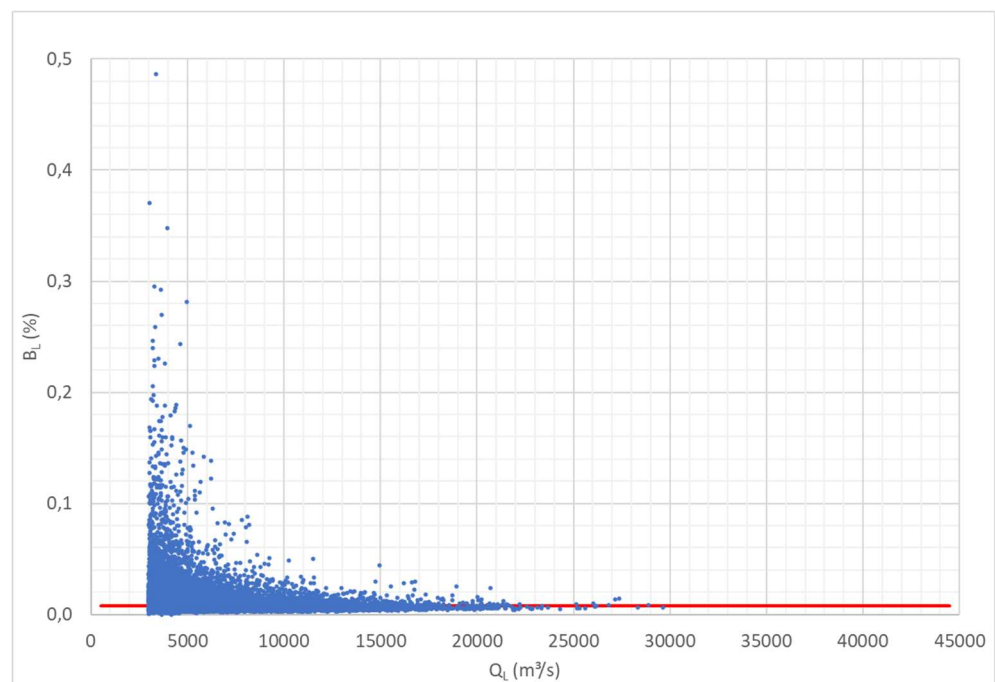
Figur 5.2 Bidrag til broens blokering fra øvre lag (blå punkter er bestemte modstande og rød linje er median modstand).



Figur 5.3 Bidrag til broens blokering fra nedre lag (blå punkter er bestemte modstande og rød linje er median modstand).



Figur 5.4 Bidrag til bro-ø-tunnelens blokering fra øvre lag (blå punkter er bestemte modstande og rød linje er median modstand).



Figur 5.5 Bidrag til bro-ø-tunnelens blokering fra nedre lag (blå punkter er bestemte modstande og rød linje er median modstand).

6 Sammenligning med andre broer

6.1 Blokering fra udvalgte broer

Storebæltsforbindelsen og en tidligere analyseret Femern broforbindelsen betragtes i det følgende. Disse to forbindelser er i tværsnit, der minder om tværsnittet ved Als-Fyn forbindelsen (bredde, dybe og lagdeling). Hermed perspektiveres den beregnede modstand fra Als-Fyn forbindelsen, har de tre forbindelser den samme modstand eller er Als-Fyn forbindelsens modstand (meget) større eller (meget) mindre. Blokeringen fra den gamle og nye Lillebæltsbroen betragtes også, igen som en perspektivering af blokeringen fra den betragtede Als-Fyn forbindelse.

Baseret på data præsenteret i Ref. /2/ er blokeringen af:

- Lillebæltsbroerne (gamle og nye) på minimum 0,7% for gennemstrømningen i Lillebælt;
- Storebæltsforbindelsen uden kompensationsafgravninger på (centralt estimat) 0,75% for gennemstrømningen i Storebælt; og
- Femern broforbindelsen uden kompensationsafgravninger på 0,5% for gennemstrømningen i Femernbælt.

Lillebæltsbroerne blokerer gennemstrømningen gennem Lillebælt / Als-Fyn tværsnittet mere end den undersøgte Als-Fyn forbindelse. Dette skyldes, at broerne befinder sig i det snævre tværsnit i Lillebælt og at deres design ikke er optimeret til at give en begrænset modstand.

Blokeringen af Storebæltsforbindelsen og af Femernbælt broforbindelsen omregnes til de blokeringer, de vil have givet i Als-Fyn tværsnittet for gennemstrømningen i Lillebælt / Als-Fyn tværsnittet. Disse to broer har begge en størrelse, der er sammenlignelig med Als-Fyn forbindelsen. Til dette benyttes til illustration den approksimative fordeling mellem Storebælt : Øresund : Lillebælt på 7 : 3 : 1.

Hvis Storebæltsforbindelsen (ikke kompenseret) lå i Als-Fyn tværsnittet ville den give en blokering for gennemstrømningen i Lillebælt / Als-Fyn tværsnittet på:

$$B_L = \frac{1}{2} \cdot \frac{K_{FS}}{K_L} = \left(\frac{Q_L}{Q_S}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{K_{FS}}{K_S}\right)$$

Hvor

K_{FS} Hydrauliske modstand fra Storebæltsforbindelsen

K_S Hydrauliske modstand for Storebælt (og nærliggende områder)

Q_L Vandføringen gennem Lillebælt

Q_S Vandføringen gennem Storebælt

Dette giver:

$$B = \left(\frac{1}{7}\right)^2 \cdot 0,75\% = 0,015\%$$

Tilsvarende ville Femern broforbindelsen (ikke kompenseret), hvis den lå i Als-Fyn tværsnittet, give en blokering for gennemstrømningen i Lillebælt / Als-Fyn tværsnittet på:

$$B = \left(\frac{1}{7+1}\right)^2 \cdot 0,5\% = 0,008\%$$

Det bemærkes, at:

- Blokeringen af de to forbindelser for gennemstrømningen i Lillebælt / Als-Fyn tværsnittet mindskes betragteligt sammenlignet med den oprindelige blokering i henholdsvis Storebælt og Femernbælt;
- Blokeringen fra Storebæltsforbindelsen er sammenlignelig med blokeringen fundet for Als-Fyn forbindelsen; og
- Blokeringen fra Femern broforbindelsen er mindre end blokeringen fundet for Als-Fyn forbindelsen. For Femern broforbindelsen blev der gjort en del for at optimere broudformningen og mindske blokeringen.

6.2 Acceptabel blokering

For Øresundsforbindelsen blev der accepteret en blokering fra forbindelsen på gennemstrømning i Øresund i intervallet -0.18% til +0.18%, se Ref. /12/.

Østersøen påvirkes af ændringen i udvekslingen gennem de danske farvande, og dermed må det antages, at vandføringen må ændres lige meget i Øresund og Lillebælt: $\Delta Q_L = \Delta Q_S$.

Ved at benytte formulering af blokering i afsnit 5.7 fås:

$$B_L = \frac{Q_S}{Q_L} \cdot B_S = \frac{3}{1} \cdot 0,18\% = 0.54\%$$

Dvs. at hvis den samme ændring i vandudvekslingen kan accepteres i Lillebælt, som i Øresund, da skal blokeringen i Lillebælt være i intervallet -0.54% til +0.54%.

Blokeringerne af Als-Fyn løsningerne er bestemt til at være mindre end 0,04%. Det er klart inden for acceptintervallet.

7 Referencer

- /1/ Als-Fyns hjemmeside: <https://als-fyn.dk/>.
- /2/ Jakobsen, Fl., N.H. Petersen, H.M. Petersen, J.S. Møller, T. Schmidt & T. Siefert (1996). Hydrographic investigations in the Fehmarn Belt in connection with the planning of the Fehmarn Belt link. Proceedings of the Baltic Marine Science Conference 1996 (Rønne, Denmark), 10 pp. Published in ICES Cooperative Research Report 257, 2003, 179-189.
- /3/ Als Fyn – Forundersøgelse. Geologisk længdesnit. ALA02. Tegning nr. AF-A-TG-ALA02-001 Rev. a. Foreløbig dateret 07-08-2023. File navn: AF-A-TG-ALA02-001.PDF.
- /4/ Als Fyn – Forundersøgelse. Geologisk længdesnit. ALA05. Tegning nr. AF-A-TG-ALA05-001 Rev. a. Foreløbig dateret 07-08-2023. File navn: AF-A-TG-ALA05-001.PDF.
- /5/ DNV-ST-0437, Amended November 2021. Loads and site conditions for wind turbines.
- /6/ DNV-RP-C205, Amended September 2021. Environmental conditions and environmental loads.
- /7/ Email fra Mikkel Sønderstrup Randløv (misr@SBF.DK) til DHI den 13 oktober 2023 vedrørende linjeføring.
- /8/ Fehmarnbelt Fixed Link. Hydrographic Services (FEHY). Marine Water – Baseline. Hydrography of the Fehmarnbelt Area. E1TR0057 Volume II. Year 2012.
- /9/ ISO 19902, 2007. Petroleum and natural gas industries – Fixed steel offshore structures.
- /10/ Jakobsen, Fl. & J.S. Møller (1996). Transporten gennem Lillebælt. Vand & Jord, No. 6, pp. 252, 253 & 259.
- /11/ Jakobsen, Fl. & J. Ottavi (1997). Transport through the contraction area in the Little Belt. Estuarine, Coastal and Shelf Science, Vol. 45, No. 6, pp. 759-767.
- /12/ Øresundsforbindelsen. Sammenfattende redegørelse for nulløsningen. Maj 2000.