SUND & BÆLT HOLDING A/S

KATTEGATFORBINDELSEN KYST-KYST - ANLÆGSTEKNISKE FORUNDERSØGELSER

KKØ – SEJLADSFORHOLD OG RISIKO FOR SKIBSKOLLISION

FAGNOTAT

ADRESSE COWI A/S
Parallelvej 2
2800 Kongens Lyngby

TLF +45 56 40 00 00
FAX +45 56 40 99 99
WWW cowi.dk

INDHOLD

1	Introduktion	2
2	Generelle forudsætninger	2
3	Skibstrafik og aktuelle sejladsforhold	3
4	Navigationsarrangement for KKØ broløsninger	5
4.1	Rene broløsninger	7
4.2	Kombinerede bro- og tunnelløsninger	12
4.3	Sammenfatning af navigationsforhold	14
5	Kollisionsrisiko	16
5.1	Modellering	16
5.2	Skibstrafik	19
5.3	Referenceprojekter	22
5.4	Risikoberegning for udvalgte KKØ broløsninger	26
5.5	Risikoevaluering af øvrige korridorer og løsninger	45
5.6	Varsling	50
5.7	Sammenfatning af kollisionsrisiko	52
6	Sammenfatning	54
7	Referencer	55

PROJEKTNR.	DOKUMENTNR.
A134385	A134385-GS-NOT-001

VERSION	UDGIVELSESDATO	BESKRIVELSE	UDARBEJDET	KONTROLLERET	GODKENDT
1.1	26. marts 2021		HEGLX	PTR	PTR

1 Introduktion

Dette fagnotat er et bidrag til de anlægstekniske forundersøgelser af kyst-til-kyst delen af en Kattegatforbindelse. Notatet fokuserer alene på løsninger imellem Sjælland og Samsø (KKØ), der helt eller delvist er baseret på brokonstruktioner – se Figur 4-1 og Tabel 4-1.

En fast broforbindelse vil kræve ændringer i sejladsens arrangement og påvirke sejladssikkerheden, og disse ændringers omfang og karakter vil have betydning for skibsfartens og søfartsmyndighedernes indstilling overfor etablering af en fast forbindelse. For at belyse dette perspektiv præsenterer og diskuterer notatet skibstrafikkens nuværende omfang og arrangement i området, og beskriver, hvordan de enkelte løsninger kan eller vil ændre dette arrangement, og vurderer i hvilken udstrækning disse ændringer vil influere på sejladssikkerheden.

Skibstrafikkens tilstedeværelse vil omvendt lede til en risiko for påsejling og beskadigelse af brokonstruktionerne i den faste forbindelse, og størrelsen og karakteren af denne risiko vil have betydning for, om den faste forbindelse vurderes at udgøre et tilstrækkelig sikkert og pålideligt infrastrukturprojekt. Notatet belyser og evaluerer denne risiko dels ved konkrete risikoberegninger og afledte approksimative evalueringer for løsningerne, og dels ved at sammenholde de bestemte risikoniveauer med den tilsvarende risiko for andre tilsvarende broprojekter.

Efter en kort beskrivelse af skibstrafikken i området i afsnit 3, gives i afsnit 4 en kvalitativ introduktion og diskussion af de navigationsmæssige forhold og af sejladsens arrangement omkring broløsningerne.

I afsnit 5 behandles risikoen for kollision mod brodelen af de betragtede løsninger. Fagområdet og den aktuelle modelleringspraksis introduceres i afsnit 5.1 og relevante projekter i Danmark diskuteres i afsnit 5.3 med henblik på at definere et referenceniveau for risikoen på KKØ. I afsnit 5.4 præsenteres detaljerede risikoberegninger for 3 udvalgte broløsninger for KKØ og i afsnit 5.5 anvendes resultaterne fra disse analyser til kvalitativ og approksimativ evaluering af risikoen for de øvrige løsninger for KKØ, der helt eller delvist er baseret på brokonstruktioner.

Fordele og udfordringer for de enkelte løsninger evalueres i afsnit 4.3 for navigationsforhold og i afsnit 5.7 for kollisionsrisiko i forhold til den forventede accept, gennemførlighed og heraf følgende projektrisiko. På grundlag af disse evalueringer samt af løsningernes forudsætninger gives i afsnit 6 en samlet vurdering af projektrisikoen for de enkelte løsninger.

2 Generelle forudsætninger

En velvalgt placering og et passende design af en bro over besejlet farvand er primære faktorer i forhold til dels at begrænse risikoen for skibskollisioner mod broforbindelsen og dels at begrænse den risiko for skibstrafikken, som broforbindelsen kan udgøre. For yderligere begrænsning af begge risikoelementer kan det være relevant at overveje en strammere organisering af skibstrafikken omkring broen – f.eks. ved separering af skibstrafikken, der skal passere broen, i

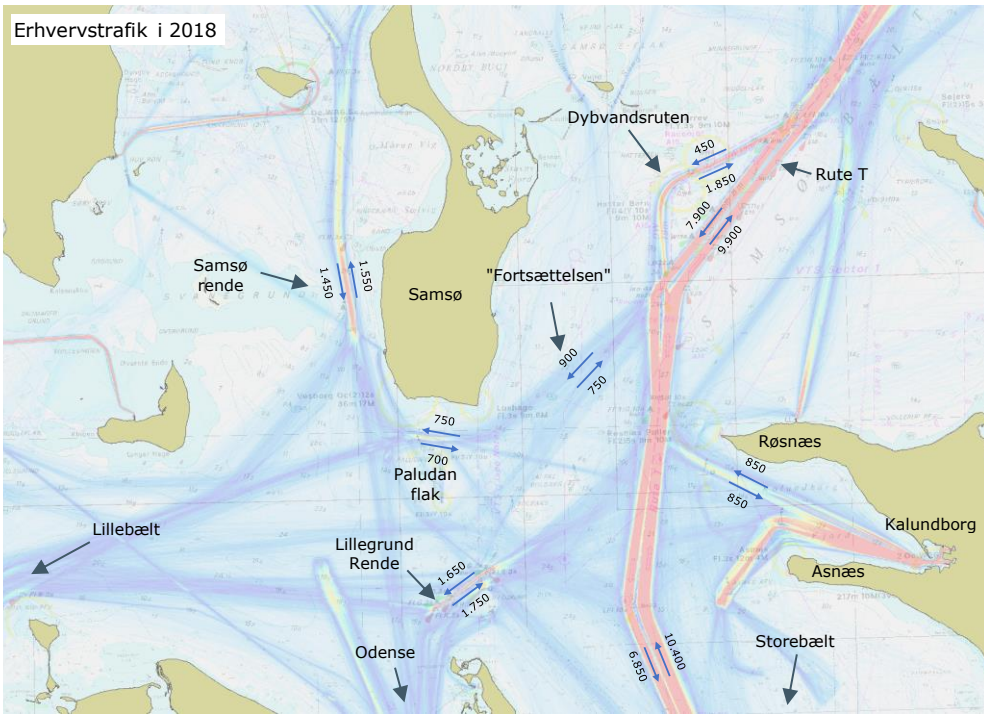
separate spor for hver retning – samt overvågning og vejledning af skibstrafikken i farvandet omkring broen. Begge sikkerhedsforanstaltninger er indført omkring Storebæltsforbindelsens i form af: begrænsning af skibe, der må passere Vestbroen, en trafikseparering ved passage af Østbroen, samt konstant overvågning og vejledning af trafikken med Storebælt VTS.

Samme niveau af forholdsregler forudsættes for alle KKØ-løsninger, der helt eller delvist er baseret på brokonstruktioner:

- at der indføres en passende begrænsning på type og størrelse af skibe, der må passere broen udenfor gennemsejlingen ved Rute T,
- at Storebælt VTS' overvågning og vejledning af skibstrafikken udvides til at omfatte farvandene omkring en broløsning i KKØ

3 Skibstrafik og aktuelle sejladsforhold

Tætheden af den erhvervsmæssige skibstrafik i området er vist i Figur 3-1 sammen med omtrentlige angivelser af erhvervstrafikken på de mere trafikerede ruter. Trafikbilledet i KKØ-området domineres af den store og fokuserede trafik på Rute T og af trafikken, der går imellem Rute T og lokale destinationer i området.



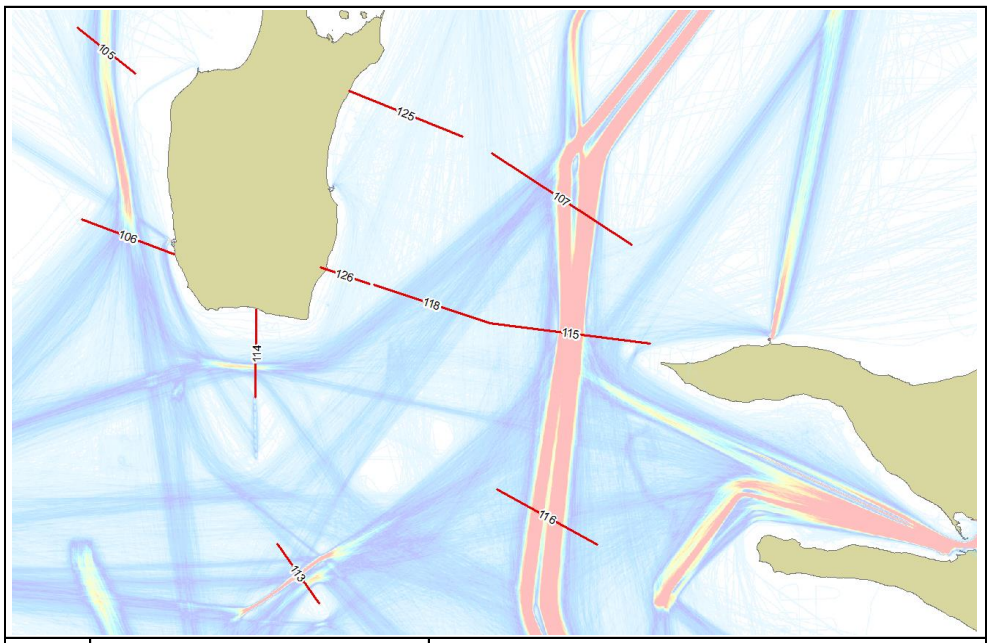
Figur 3-1 Erhvervstrafik – passager pr år i hver retning – på hovedruterne i området. Baseret på AIS data for 2018.

De trafikstrømme, der i tillæg til Rute T kan få betydning for planlægning af en KKØ-broløsning, omfatter:

- Trafikken i direkte forlængelse af Rute T øst for Samsø (benævnt "Fortsættelsen" i Figur 3-1),
- Trafikken mellem Paludan Flak og Samsø i forlængelse af "Fortsættelsen",
- Trafikken igennem Lillegrund rende med forbindelse til Rute T mod Kattegat via en rute sydøst for Bolsaks og Falske Bolsaks (se Figur 3-2),
- Trafikken imellem Kalundborg Fjord og Rute T

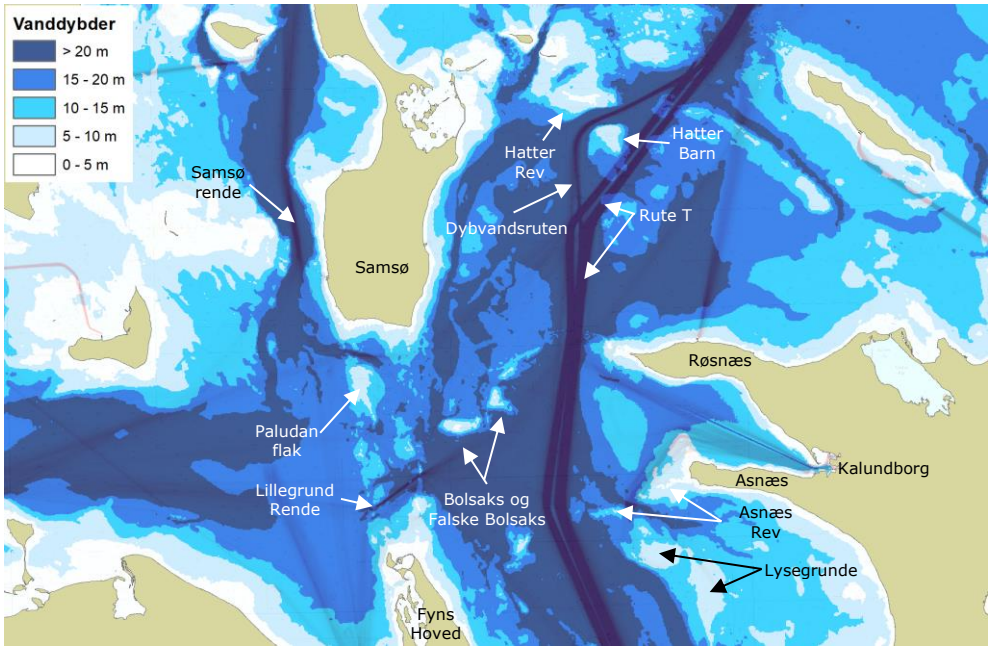
Trafikkens størrelsesmæssige sammensætning er angivet Tabel 3-1, hvor trafikken med de helt store skibe (L_{OA}=300-400 m) primært foregår i Rute T, med nogle få årlige passager igennem Lillegrund Rende.

Tabel 3-1 Erhvervstrafik i området ved udvalgte tællelinjer baseret på AIS data for 2018.



Linie	Passager i 2018					Størrelsesfordeling (L_{OA})						
	Retning 1		Retning 2		Samlet	0 - 25 m	25 - 50 m	50 - 100 m	100 - 150 m	150 - 200 m	200 - 300 m	300 - 400 m
105	S	1.200	N	1.300	2.500	60	360	1.290	640	150	30	
106	S	1.450	N	1.550	3.000	420	420	1.330	650	150	30	
107	S	8.400	N	11.800	20.200	180	650	3.390	3.710	6.460	5.430	370
113	SV	1.650	NØ	1.750	3.400	500	440	1.060	800	420	160	10
114	V	750	Ø	700	1.450	70	110	570	380	300	10	
115	S	8.050	N	11.650	19.700	680	690	2.750	3.520	6.230	5.420	370
116	S	6.750	N	10.150	16.900	250	680	1.880	2.560	5.940	5.240	370
118	S	900	N	750	1.650	70	160	950	210	260	30	
125	S	100	N	100	200	80	50	50				
126	S	50	N	50	100	60	30	30				

Batymetrien i Figur 3-2 illustrerer hvordan ruterne og trafikstrømmene igennem området er indrettet efter de lavvandede områder, som farvandet byder på: Dybvandsrutens adskillelse fra Rute T til det snævre dybe løb imellem Hatter Rev og Hatter Barn; samling af trafikken i Rute T pga. af indsnævringen ud for Røsnæs; T-rutens knæk ved Asnæs Rev osv. Den ikke uvæsentlige øst- og vestgående trafik syd for Samsø, begrænser sig i stor udstrækning til at anvende løbet nord for Paludan flak eller den aktivt vedligeholdte rende gennem Lillegrund. Farvandet øst for disse passager er begrænset af en række rev (Bolsaks og Falske Bolsaks) og trafikken må gå enten nord eller syd om disse forhindringer. Denne begrænsning i farvandet vil/kan have betydning for hvordan trafikken omkring en fast forbindelse kan arrangeres.



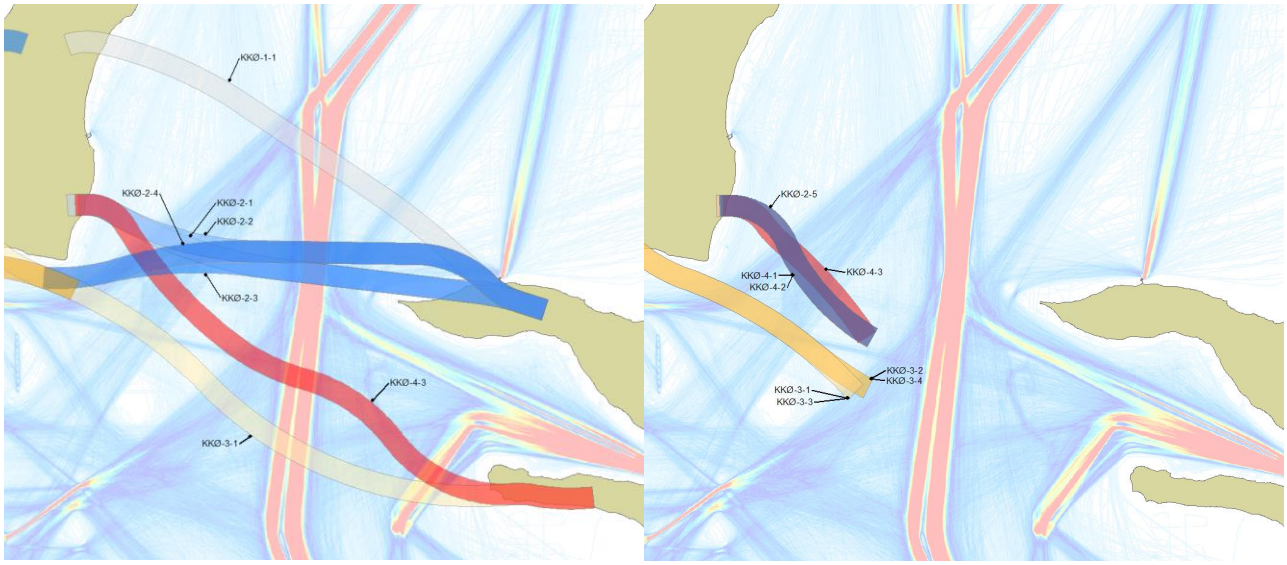
Figur 3-2 Vanddybderne i området med samtidig indikation af trafikintensiteten.

4 Navigationsarrangement for KKØ broløsninger

En broforbindelse vil – i større eller mindre udstrækning – begrænse skibstrafikkens mulige rutevalg, og forbindelsen kan dermed påvirke både trafikkens effektivitet og selve sikkerheden ved sejladsen. Den kvalitative diskussion af navigationsarrangementet omkring broløsningerne givet i dette afsnit har fokus på den fortsatte afvikling af den nuværende trafik og på elementer i arrangementet, der kan få betydning for sejladssikkerheden.

Sammen med analysen af kollisionsrisikoen i afsnit 5 vurderes denne kvalitative evalueringen af navigationsarrangementet og af sejladssikkerheden at være tilstrækkeligt til at varetage hensynet sejladssikkerheden for denne forundersøgelse. Når et færre antal korridorer og løsninger er udpeget, vil det være relevant og nødvendigt at gennemføre en mere formel analyse af sejladssikkerheden forbundet med løsningerne – i IMO-regi benævnt en Formal Safety Assessment (FSA) – for at afklare om broens tilstedeværelse og den tilhørende omlægning af skibstrafikken har en acceptabel indflydelse på sejladssikkerheden.

KKØ-korridorerne, hvortil der er foreslået projektløsninger helt eller delvist baseret på brokonstruktioner, er vist i Figur 4-1 sammen med skibstrafikkens intensitet. Syv forskellige korridorer svarende til syv forskellige rene broløsninger, samt fire vestlige korridorafsnit, hvori brodelen for forskellige kombinationer af bro- og tunnelkonstruktioner er placeret. De konstruktionsmæssige kombinationer, der ligger til grund for den grafiske oversigt, er vist i Tabel 4-1.



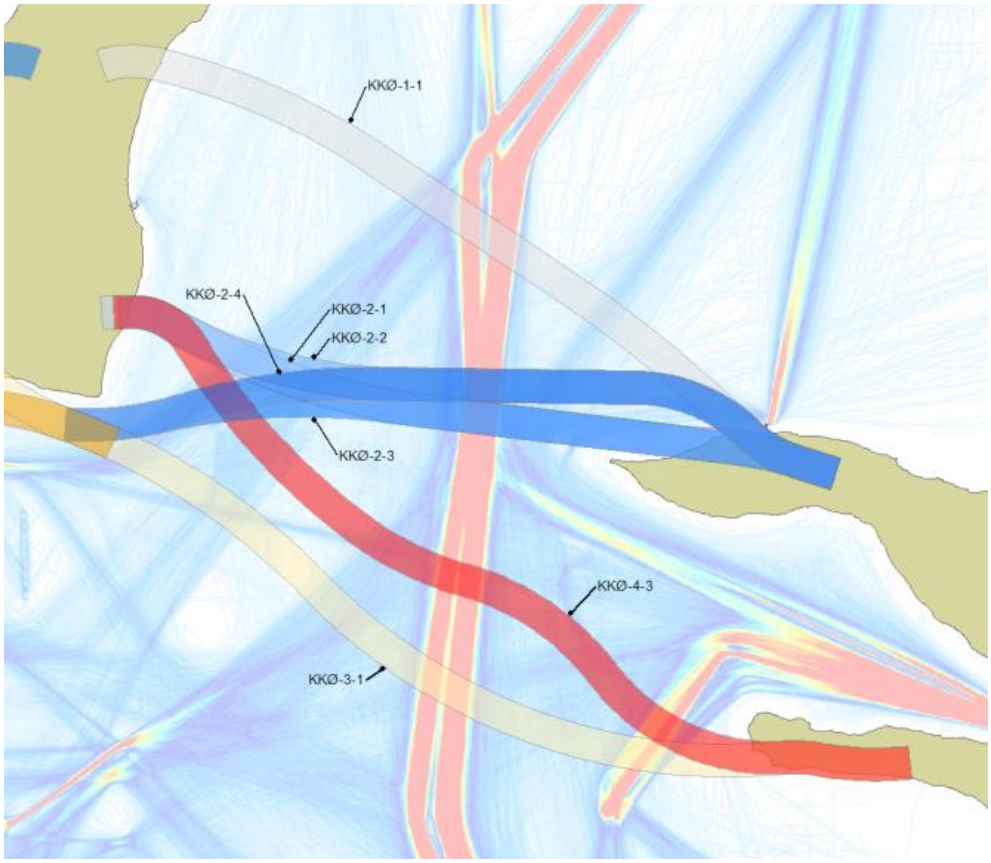
Figur 4-1 *KKØ-korridorer med brokonstruktioner vist sammen med intensiteten af skibstrafikken for 2018. Til venstre er vist korridorerne med løsninger baseret på rene brokonstruktioner, og til højre er vist bro-delen af de korridorer, hvor der er betragtet en kombineret bro- og tunnelløsning.*

Tabel 4-1 *Betragtede løsninger for KKØ korridorer imellem Sjælland og Samsø.*

Korridor og ilandføringspunkter	Bro	Sænketunnel	Boret tunnel
KKØ-1.1 Nyby Øst - Besser	x		
KKØ-2.1 Nyby Vest - Hjalmarsgård	x		
KKØ-2.1 Nyby Vest - Hjalmarsgård	Ren tunnelløsning	x	
KKØ-2.2 Nyby Øst - Hjalmarsgård	x		
KKØ-2.5 Røsnæs Syd - Hjalmarsgård	x		x
KKØ-2.3 Nyby Vest - Samsø Syd	x		
KKØ-2.4 Nyby Øst - Samsø Syd	x		
KKØ-3.1 Asnæs Syd - Vesborg Fyr	x		
KKØ-3.1 Asnæs Syd - Vesborg Fyr	x	x	
KKØ-3.2 Asnæs Nord - Vesborg Fyr	x		x
KKØ-3.3 Asnæs Syd - Samsø Syd	x	x	
KKØ-3.4 Asnæs Nord - Samsø Syd	x		x
KKØ-4.1 Asnæs Nord - Hjalmarsgård	Ren tunnelløsning		x
KKØ-4.1 Asnæs Nord - Hjalmarsgård	x		x
KKØ-4.2 Asnæs Forskov - Hjalmarsgård	x		x
KKØ-4.3 Asnæs Syd - Hjalmarsgård	x		
KKØ-4.3 Asnæs Syd - Hjalmarsgård	x	x	

4.1 Rene broløsninger

De 7 rene broløsninger for KKØ vist i Figur 4-2 krydser Rute T på 4 forskellige lokationer. Rute T er omfattet af en international aftale, der forbyder Danmark at hindre skibstrafikkens fri passage ind og ud af Østersøen igennem de Danske bælter - Lillebælt, Storebælt og Øresund. Denne aftale betinger, at alle de betragtede broløsninger, via en eller flere navigationsåbninger, skal sikre uhindret passage for trafikken på Rute T.



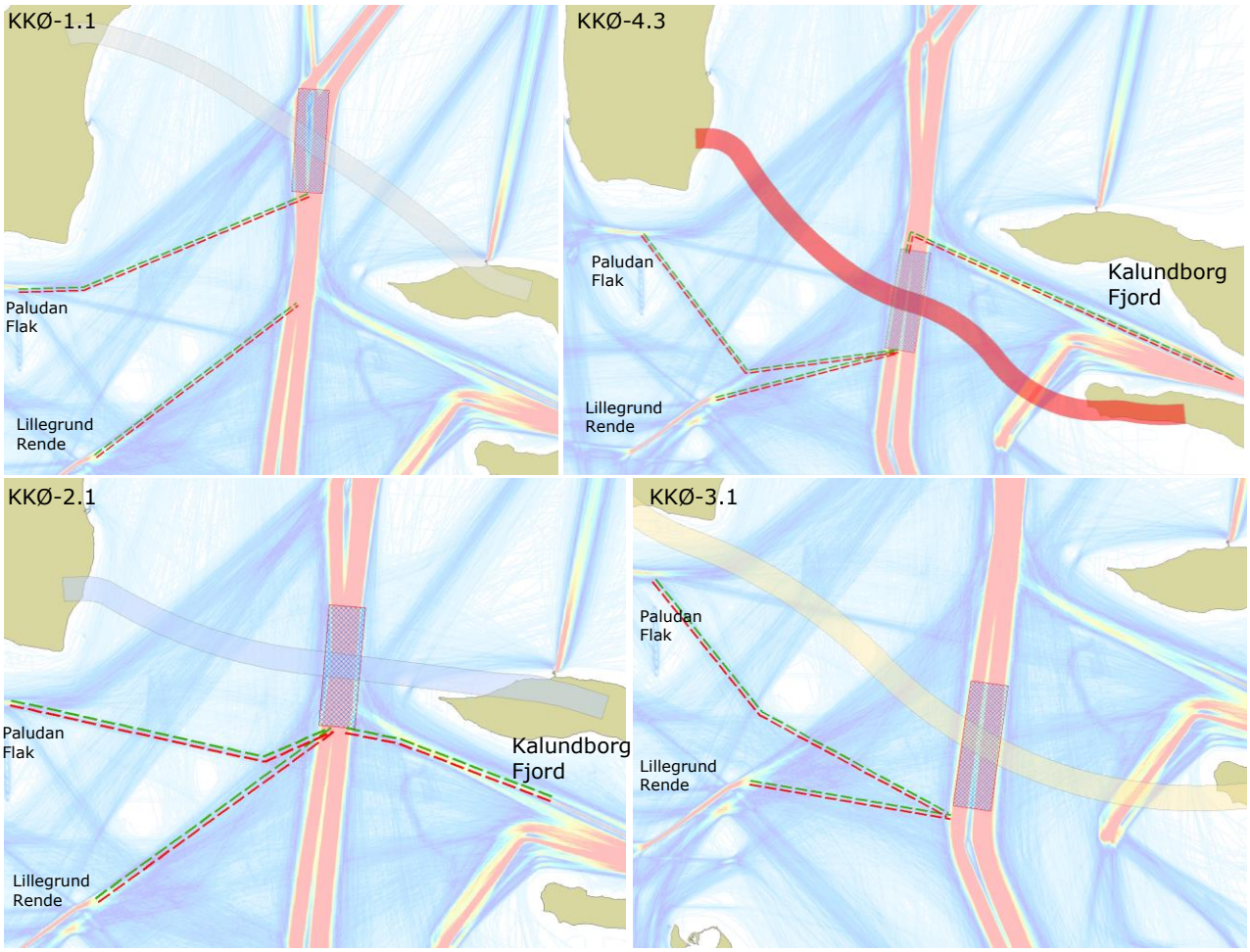
Figur 4-2 KKØ-korridorer for rene broløsninger vist sammen med intensiteten af skibstrafikken i 2018.

Broerne i Lillebælt og Storebælt er accepteret/tolereret under aftalen om fri passage og definerer dermed mindstekravet til en broløsning for KKØ. Den skal tilbyde mindst de samme betingelser for sikker passage som Østbroen over Storebælt. Østbroens navigationsåbning er 1.384 m bred og 65 m høj, men da Østbroen danner en vinkel på 78° med Rute T, er den effektive bredde af åbningen lidt mindre: 1.384 m × sin(78°) = 1.353 m. Så en broløsning i KKØ skal tilbyde en navigationsåbning vinkelret på sejlretningen, der er mindst 1.353 m bred og 65 m høj.

Trafikkens omfang, og navnlig mængden af større skibe på Rute T, gør det nødvendigt at etablere en trafikseparation (TSS) ved rutens passage af broen. En trafikseparation vil omfatte 1-2 sømil af ruten på hver side af broen og indenfor denne del af ruten, skal sejlads ind i eller på tværs af separationen undgås. Hensigten med separationen er, at trafikken sejler ind i det relevante spor ved separationens start, holder sit spor under passage af broen, og først forlader separationen ved dennes afslutning i den modsatte ende efter at broen er passeret.

Trafikken i området skal arrangeres i overensstemmelse med disse generelle hensigter for separationen. Figur 4-3 viser udstrækning og placering af trafikse-pareringen for de fire placeringer af krydsningen af Rute T, og det illustreres hvordan trafikken til/fra tilstødende farvande må omlægges for at kunne passere brolinjen igennem trafikseparationen for Rute T.

Krydsning og arrangementet for KKØ-2.3 er identisk med KKØ-2.1, mens den lidt nordligere placering af KKØ-2.2 og KKØ-2.4 betyder at trafikken til/fra Ka-lundborg Fjord kan bibeholde sin nuværende rute ud til Rute T. Ellers er der ikke forskel på arrangementet omkring de fire KKØ-2 korridorer.



Figur 4-3 Placering af en trafikseparation på ca. 5 km ved Rute Ts gennemsejling af de rene broløsninger med indikation af ruterne for trafikken gennem renderne ved Paludan Flak og Lillegrund samt til og fra Ka-lundborg (se Figur 3-1 og Tabel 3-1), der må omlægges til at benytte trafikseparationen ved passage af brolinjen.

Hvor KKØ-1.1 kun fordrer en beskeden omlægning af trafikken vest for Rute T, vil den sydligere placering af KKØ-2.1 tvinge trafikken i passagen mellem Palu-dan Flak og Samsø længere sydover mod Falske Bolsaks, for at denne trafik kan nå ud til starten af separationen. Med KKØ-4.3 bliver denne omlægning endnu mere uhensigtsmæssig og trafikken, der skal passere broen, vil formentligt finde det mere hensigtsmæssigt at anvende Lillegrund Rende i stedet for passagen nord for Paludan Flak. Trafikken fra Kalundborg Havn til destinationer syd for broen vil tillige slutte til Rute T lige nord for separationen og under en uhen-sigtsmæssig vinkel. I 2018 var denne sydgående trafik dog begrænset (230

passager af skibe på mere end 100 meters længde) og da denne tilslutning til Rute T ikke er nær eller indebærer andre uhensigtsmæssigheder, vurderes den ikke at udgøre en væsentlig udfordring for denne korridor.

Den sydligst placerede korridor KKØ-3.1 vil i tillæg til forlægning af trafikken ved Paludan Flak også kræve en omlægning af trafikken gennem Lillegrund Rende. Den resulterende vinkelrette tilslutning til Rute T lige syd for separationen er ikke optimal. Og at dette kommer til at foregå umiddelbart nord for en 40° kurs-ændring på Rute T gør arrangementet endnu mere problematisk. Batymetrien omkring Lillegrund Rende – se Figur 3-2 – giver ikke umiddelbare muligheder for at justere renden, så der kan opnås en bedre tilslutning til Rute T med KKØ-3.1.

En ren broløsning for KKØ vil medføre en generel koncentration og fokusering af skibstrafikken imellem Samsø og Sjælland ind i Rute T. For de mere sydlige placeringer af korridoren (Alle KKØ-2 korridorer samt KKØ-3.1 og KKØ-4.3) kan trafikken syd om Samsø til/fra Odense, Fredericia, Vejle og Lillebælt vælge alene at anvende Lillegrund Rende. I 2018 androg trafikken nord om Paludan Flak og gennem Lillegrund Rende ca 5.000 årlige passager, så i evalueringen af de sydlige korridorer skal det medtages, at Lillegrund Rende skal sikres tilstrækkelig kapacitet til at håndtere denne samling af trafikken.

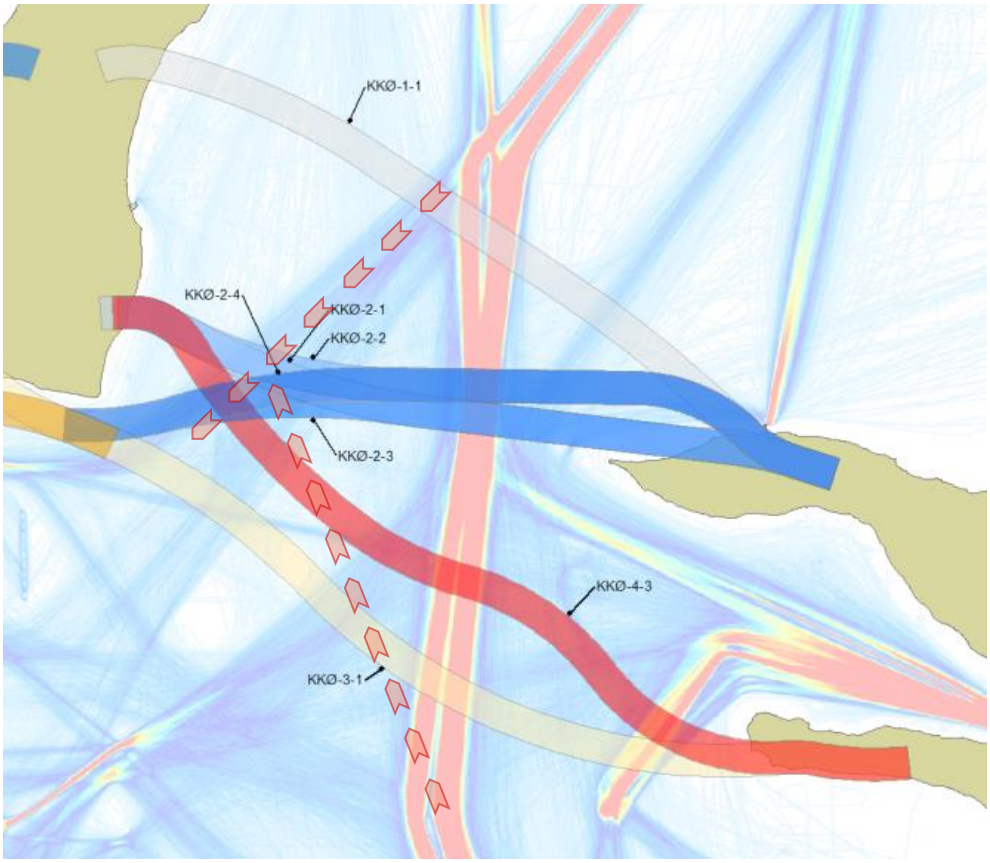
Siden Lillegrund Rende er den primære forbindelse for store skibe imellem de vestlige destinationer i regionen (Fredericia, Lillebælt, Vejle) og Storebælt hhv. Kattegat, er det vigtigt at forbindelsen imellem denne rende og Rute T ikke forringes. For den del af den faste forbindelse, der planlægges imellem Samsø og Jylland (KKV), overvejes broløsninger, der vil begrænse størrelsen af skibe, der kan passere vest om Samsø. Det vil være en relevant forudsætning for disse broløsninger på KKV, at Lillegrund Rende forbliver en sikker og effektiv alternativ rute for de (større) skibe, der tidligere er sejlet vest om Samsø. Med en broløsning i KKØ-3.1 vil forbindelsen gennem Lillegrund Rende og nordpå til Kattegat ikke være optimal, og det kunne indirekte begrænse projektets optioner for broløsninger på KKV. Af den grund vurderes det navigationsmæssige arrangement for KKØ-3.1 at medføre en potentiel, uønsket binding og dermed en mulig risiko for det samlede projekt.

Med den nordligste korridor KKØ-1.1 ses separationen nord for broen at overlappe knækket på Rute T og sammenfletningen af Rute T og Dybvandsruten. Rutearrangementet nord for broen byder således allerede på flere opmærksomhedskrævende forhold for sejladsen, og broens tilstedeværelse og behovet for en stringent trafikseparation til at lede trafikken sikkert igennem broen, vil gøre arrangementet yderligere kompliceret og vil begrænse skibenes muligheder for at vige for eller undvige hinanden. Af disse grunde forventes det at løsningen kunne møde modstand fra Søfartsstyrelsen og fra søfartens parter, og dette har betydning for projektrisikoen.

4.1.1 Undersøiske beskyttelsesrev

Muligheden for kollisioner mod en broløsning opstår bl.a. ved at et skib ikke ændrer kurs, som det skal, i henhold til dets planlagte ruteforløb (se også afsnit 5.1). Knækkene på Rute T nord og syd for de betragtede korridorer kræver en

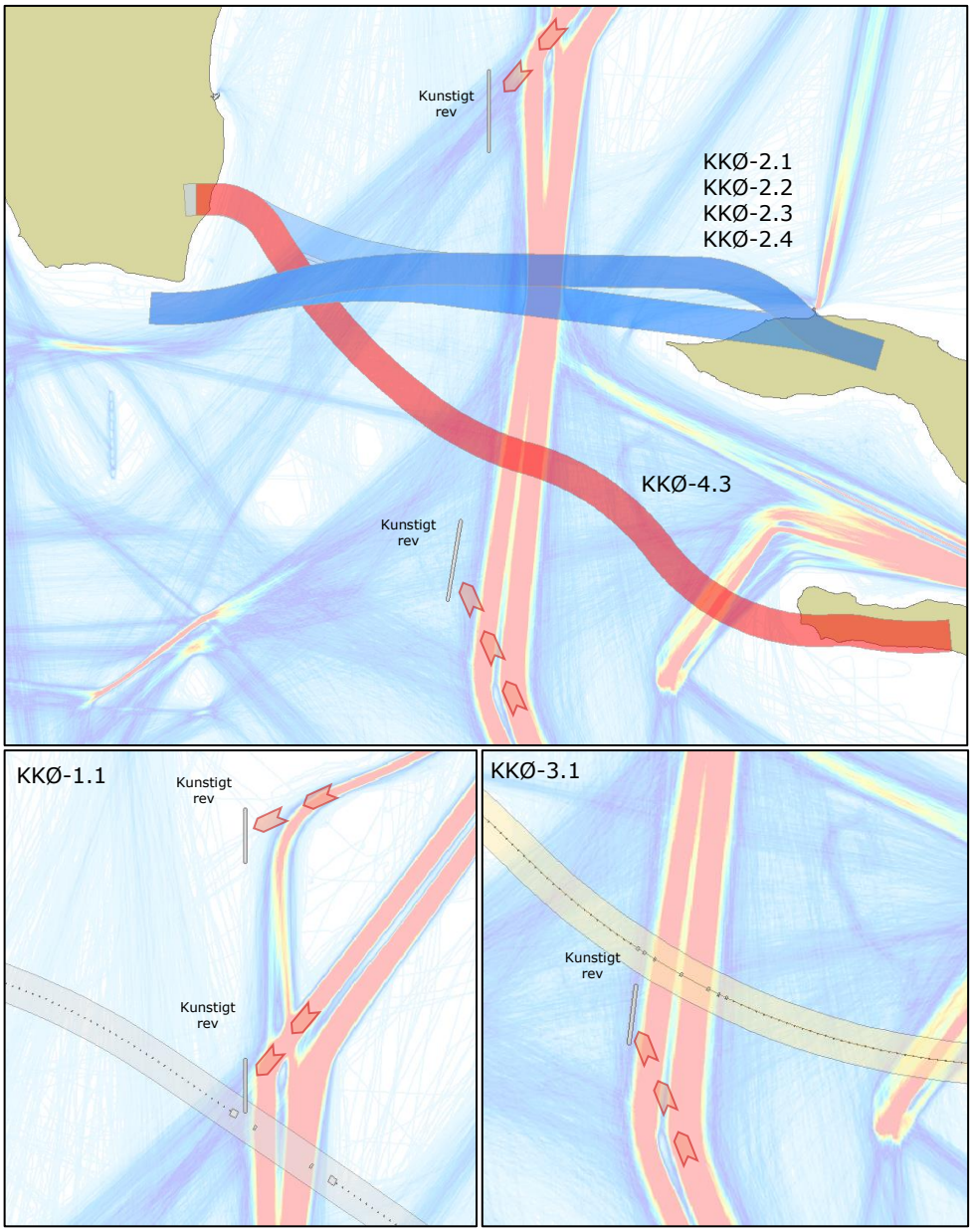
kursændring, og hvis den udebliver og skibet fortsætter med uændret kurs, vil det være på kollisionskurs mod broen – se Figur 4-4.



Figur 4-4 Muligheden for kollisioner mod en broløsning, fordi et skib ikke foretager den nødvendige kursændring for at følge Rute T.

Beregningen i afsnit 5 af risikoen forbundet med dette scenarie leder til en uacceptabel høj risiko for påsejling og længerevarende afbrydelse af broen. Derfor vil broløsningerne for KKØ have behov for en ekstraordinær beskyttelse mod denne form for kollision.

Den overvejede løsning til at opnå denne beskyttelse er at opføre et undersøisk rev på tværs af rutens forlængelse, som et skib på afveje vil grundstøde på, inden det når frem til broen. I forhold til sejladsens arrangement vil disse rev udgøre en lokal risiko for grundstødninger for al skibstrafik – også de mindre skibe – og vil dermed blive betragtet som en fare, som skibene vil/skal holde god afstand til. Placeringen af revene skal derfor tilgodese sejladsens generelle behov for at kunne vige ved mødesituationer og havarier i den rutelagte trafik, og bør ikke placeres for tæt på ruterne. Og omvendt vil revene være mere effektive jo tættere på ruteknækket, de er placeret. De foreløbige placeringer af revene (se Figur 4-5), der er antaget til den aktuelle evaluering af broløsningerne, er primært valgt ud fra deres effektivitet som beskyttelsesværker, med et sekundært hensyn til den fare og ulempe, de vil udgøre for den sædvanlige – ikke fejlramte – sejlads i området. Denne balance skal naturligvis undersøges nærmere for korridorer og broløsninger, der vælges som relevante muligheder for KKØ.



Figur 4-5 Foreløbig placeringer af de kunstige beskyttelsesrev.

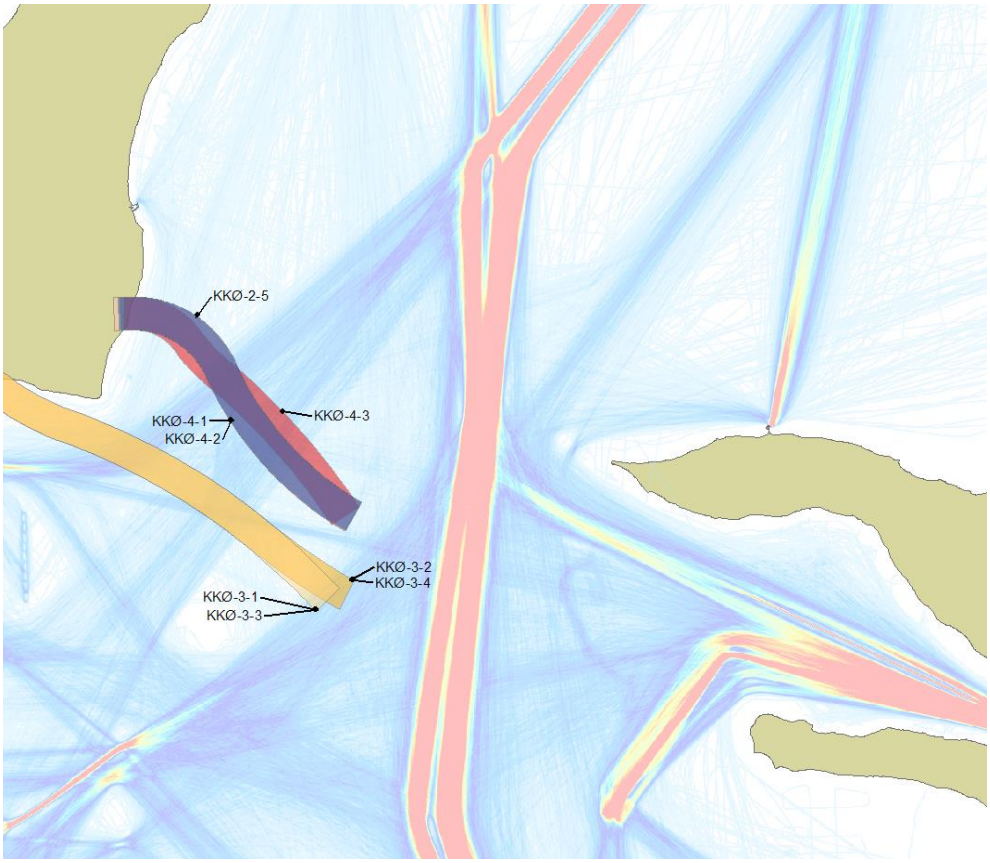
For de 4 centrale korridorer er der rigeligt med plads imellem knækket på Rute T og korridorerne til at placere de kunstige rev med god afstand til skibstrafikken, men for de yderligste korridorer KKØ-1.1 og KKØ-3.1 bliver afstanden imellem knækket på Rute T og korridoren så begrænset, at det kunstige rev må placeres ret tæt på Rute T for at kunne beskytte broen. Det er navnlig uhensigtsmæssigt for KKØ-1.1 hvor revet bliver en grundstødningsfare i et område hvor Rute T drejer sydover, Dybvandsruten støder til Rute T og den sydgående trafik skal passere gennemsejlingsfaget på KKØ-1.1. Revet tilføjer dermed en navigationsmæssig begrænsning til et område, der i forvejen har en stor koncentration af sejladsmæssige udfordringer, og det samlede arrangement forekommer ikke umiddelbart at være acceptabelt.

Den i Figur 4-5 foreslåede placering af revet for de centrale korridorer er i konflikt med arrangement af trafikken ind i trafikseparationen for KKØ-4.3 (se Figur 4-3). Om end effektiviteten af revet kan blive reduceret, er der plads til at det

kan rykkes tættere på korridoren, så det i Figur 4-3 viste navigationsarrangement er muligt.

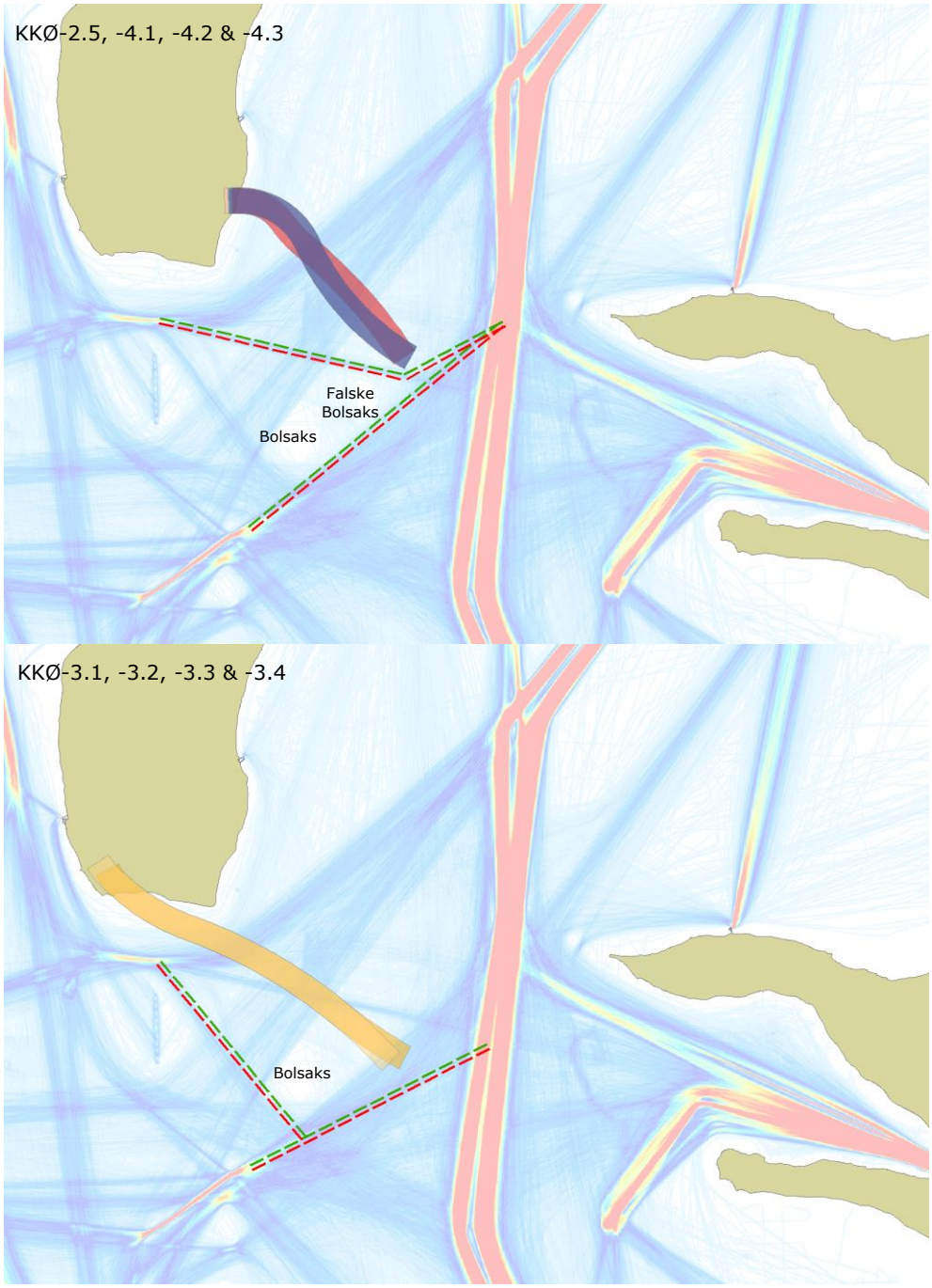
4.2 Kombinerede bro- og tunnelløsninger

For de kombinerede bro- og tunnelløsninger vil det kun være dele af korridoren – brodelen og den kunstige ø hvor brodelen overgår til tunnel – der udgør forhindringer for skibstrafikken. Disse dele af korridorerne for de kombinerede løsninger er vist sammen med trafiktætheden i Figur 4-6 til at illustrere hvilke dele af skibstrafikken, der vil blive berørt af disse løsninger.



Figur 4-6 KKØ-korridorer for brodelen af kombinerede bro- og tunnelløsninger vist sammen med intensiteten af skibstrafikken for 2018.

Brodelen for alle løsningerne er en lavbro med 100m spænd og en generelt begrænset frihøjde, der kun øges lokalt i en gennemsejlingsåbning der primært er tiltænkt fritidssejlads. Dermed bliver det nødvendigt for den erhvervstrafik, der nu anvender "Fortsættelsen" (se Figur 3-1) i deres passage syd om Samsø, at følge Rute T længere mod syd til de kan passere syd om den kunstig ø, der vil blive etableret i den østlige ende af korridoren - se Figur 4-7. For de fire nordligste af disse korridorer (KKØ-4.1, -4.2, -4.3 og -2.5) vil det fortsat være realistisk at anvende passagen nord om Paludan Flak, hvis skibets dybgang tillader passage nord om Falske Bolsaks – se Figur 4-7 (øverst). For de sydlige KKØ-3 korridorer vil det være mest fordelagtig for trafikken mod Odense, Fredericia, Vejle og Lillebælt at anvende Lillegrund Rende – se Figur 4-7 nederst. Som nævnt for de rene broløsninger, skal evalueringen af disse sydlige korridorer derfor medtage at Lillegrund Rende skal sikres tilstrækkelig kapacitet til at håndtere den samlede trafik mellem Rute T og disse vestlige destinationer.



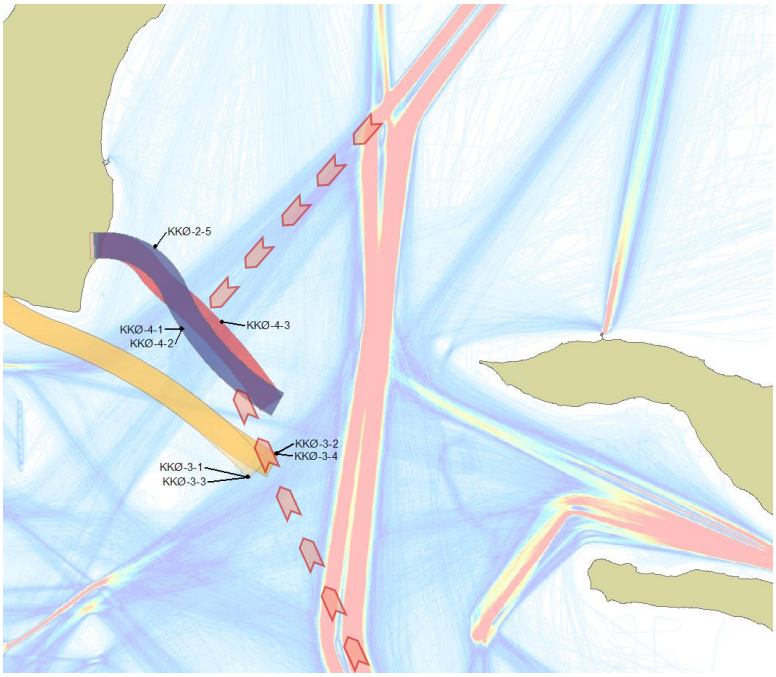
Figur 4-7 Arrangement af skibsfarten omkring brodelen af de kombinerede løsninger for KKØ.

Selvom brodelene på de kombinerede løsninger ikke selv krydser Rute T, vil disse broer – i lighed med de rene broløsninger i Figur 4-4 – være eksponerede for kollision af skibe, der ikke har ændret kurs ved knækkene på Rute T – se Figur 4-8. Den nordlige side af alle korridorerne er eksponeret for kollisioner fra sydgående trafik, mens skibstrafikken sydfra primært eksponerer enden af brodelen, den kunstige ø og den højest liggende del af tunnelen.

Da brodelen er en lavbro med lille pilleafstand og en lav overbygning vil den rent geometrisk set være ekstremt eksponeret overfor kollisioner nordfra. Det vil derfor være nødvendigt at etablere et kunstigt rev til beskyttelse imod

kollisioner nordfra i lighed med det rev, der er vist Figur 4-5 for de rene broløsninger i KKØ-2 korridorerne.

Ved en kollision sydfra vil skibet ramme mere langs med end på tværs af broen, og for løsninger med sænketunnel (KKØ-3.1, KKØ-3.3, KKØ-4.3) vil det kræve en omfattende beskyttelse over sænketunnelen eller en forstærkning af tunneltaget, at beskytte tunnelen imod et skib, der grundstøder i tunnellens længderetning. Den reducerede dybde ved de kunstige øer gør det opportunt at bygge et let fremskudt beskyttelsesrev sydøst for øen for at forhindre beskytte imod sådanne grundstødninger, og dette fremskudte rev kunne passende gøres bredere, så det tillige beskytter lavbroen.



Figur 4-8 Eksponering af brodelen af kombinerede bro- og tunnelløsninger for kollisioner af skibe, der ikke drejer ved knækkene på Rute T.

Eksponeringen overfor kollisioner både syd- og nordfra og det affødte behov for ydre beskyttelsesværker til at beskytte både den sårbare bro og den udsatte del af tunnellen, er imod hensigten med en løsning, der netop søger at undgå eksponering fra skibstrafikken, ved at anvende en tunnelløsning under Rute T.

4.3 Sammenfatning af navigationsforhold

Tabel 4-2 giver en sammenfatning af fordele og udfordringer ved de navigationsarrangementer, som de betragtede broløsninger og deres underliggende forudsætninger giver mulighed for. På basis af antallet og karakteren af løsningens ulemper er det vurderet, i hvilken grad arrangementet forventes at udfordre skibsfarten og om arrangementet forventes at kunne vinde accept hos Søfartsstyrelsen og blandt skibsfartens repræsentanter. På grundlag heraf er det angivet, i hvilken grad disse forhold vurderes at udgøre en risiko for accept og gennemførsel af projektet.

Tabel 4-2 Evaluering af navigationsarrangement omkring KKØ-korridorer og deres broløsninger. ("Bro": ren broløsning, "Bro+ST": bro og sænketunnel, "Bro+BT": bro og boret tunnel)

Korridor og løsning	Fordele og udfordringer ved navigationsarrangementet hørende til korridoren og den betragtede løsning.	Evaluering og projektrisiko
KKØ-1.1 Bro	+ Uvæsentlige trafikomlægninger syd for korridoren + Uændret anvendelighed af renderne ved Paludan Flak og Lillegrund + Uændret sejlads til/fra Kalundborg ÷ Trafik, der skal krydse korridoren, omlægges ind i Rute T ÷ Skæv vinkel ved krydsning af Rute T ÷ Sammenfald af navigationsmæssige udfordringer nær gennemsejling ÷ Beskyttelsesrevet er klemt inde mellem bro og Rute T, og begrænser dermed manøvrerummet for den sydgående trafik	Giver omfattende udfordringer for skibsfarten. Stærke indsigelser er forventelige. Forhøjet til uacceptabel projektrisiko
KKØ-2.1 Bro KKØ-2.2 Bro KKØ-2.3 Bro KKØ-2.4 Bro	+ Krydser hvor Rute T er mest fokuseret + Korridoren er placeret omtrent midt imellem de to knæk på Rute T + God vinkel i krydsningen af Rute T + Uændret anvendelighed af Lillegrund Rende + Beskyttelsesrev kan placeres frit ÷ Trafik, der skal krydse korridoren, omlægges ind i Rute T ÷ Rende over Paludan Flak bliver uhensigtsmæssig for trafik, der skal krydse korridoren ÷ Let påvirket sejlads til/fra Kalundborg	Forventes at være acceptabel for skibsfarten Acceptabel Projektrisiko
KKØ-3.1 Bro	+ Uændrede betingelser for trafik mellem Kalundborg og farvande nord for korridoren ÷ Trafik, der skal krydse korridoren, omlægges ind i Rute T ÷ Renderne over både Paludan Flak og Lillegrund Rende bliver meget uhensigtsmæssige for trafik, der skal krydse korridoren ÷ Skæv vinkel i krydsningen af Rute T ÷ Det sydlige beskyttelsesrev ligger klemt inde mellem bro og Rute T, og begrænser manøvrerummet for den sydgående trafik	Giver omfattende udfordringer for skibsfarten. Stærke indsigelser er forventelige. Forhøjet til uacceptabel projektrisiko
KKØ-4.3 Bro	+ God afstand fra begge knæk på Rute T + Gunstig vinkel i krydsningen af Rute T + Beskyttelsesrev kan placeres frit ÷ Trafik, der skal krydse korridoren, omlægges ind i Rute T ÷ Rende over Paludan Flak bliver uhensigtsmæssig for trafik, der skal krydse korridoren ÷ Let påvirket sejlads til/fra Kalundborg	Forventes at være acceptabel for skibsfarten Acceptabel projektrisiko
KKØ-3.1 Bro+ST KKØ-3.2 Bro+BT KKØ-3.3 Bro+ST KKØ-3.4 Bro+BT	+ Uberørt navigation øst for korridoren dvs. øst for den kunstige ø + Uændret anvendelighed af Lillegrund Rende ÷ Rende over Paludan Flak bliver uhensigtsmæssig for trafik, der skal krydse korridoren	Forventes at være acceptabel for skibsfarten Acceptabel projektrisiko
KKØ-2.5 Bro+BT KKØ-4.1 Bro+BT KKØ-4.2 Bro+BT KKØ-4.3 Bro+ST	+ Uberørt navigation øst for korridoren dvs. øst for den kunstige ø + Uændret anvendelighed af Lillegrund Rende ÷ Rende over Paludan Flak bliver lettere uhensigtsmæssig for trafik, der skal krydse korridoren	Forventes at være acceptabel for skibsfarten Acceptabel projektrisiko

5 Kollisionsrisiko

Etablering af en broforbindelse over besejlet farvand indebærer den umiddelbart indlysende risiko, at et skib påsejler og beskadiger brokonstruktionen. Denne risiko er sædvanligvis af primær betydning for valg af linjeføring og for designet af broens konstruktioner, og det er derfor relevant at estimere denne risiko på et relativt tidligt tidspunkt i vurderingen af mulige broforbindelser. Etablerede modeller for beregning af denne risiko samt adgangen til en detaljeret beskrivelse og forståelse af skibstrafikken via AIS data gør det muligt at foretage en indledende kvantificering af denne risiko i forbindelse med evalueringen af korridorerne og de tilhørende løsninger.

Risikoen for skibskollisioner mod brokonstruktionen beskrives dels ved hyppigheden af kollisioner og dels ved det estimerede omfang af skade på konstruktionen ved kollisionen. Hyppigheden af kollisioner er i sig selv en indikativ størrelse for hensigtsmæssigheden af en foreslået broløsnings placering og udformning. Men i beslutningsprocessen omkring en broløsning vil fokus normalt være på hyppigheden af kollisioner, der medfører en skade på konstruktionen, der betinger at broforbindelsen må lukkes i et længere tidsrum – typisk mere end 100 dage eller 3 måneder. Risikomålet i den aktuelle forundersøgelse er derfor valgt som hyppigheden af kollisioner, der forventes at forårsage en afbrydelse af forbindelsen af denne størrelsesorden. Det samme risikomål er anvendt i referenceprojekterne diskuteret i afsnit 5.3.

Kollisionen kan tillige være til fare for brugerne på broen, men det vil også forudsætte en vis alvorlighed af kollisionen og den resulterende skade på konstruktionen. I den aktuelle evaluering sidestilles en længerevarende afbrydelse derfor med, at brugernes liv også kan være i fare ved kollisionen. At skibstrafikken, som forudsat i afsnit 2, vil være under konstant overvågning, giver mulighed for at evakuere den del af broen, der er truet af en kollision, og dermed forhindre at kollisionen bringer brugerne på broen i fare. Analyse af og erfaringer med overvågning og varsling på Storebæltsforbindelsen viser, at evakuering af Østbroen for trafik kun lige er mulig, hvis det er muligt at træffe beslutning om evakuering, når skibet er ca. 3 km eller 4-5 minutters sejlads fra broen. Denne afstand bruges derfor som mindsteafstand i en indledende vurdering af, om bidrag til risikoen for længerevarende afbrydelse kan undgås også at have konsekvens for brugernes sikkerhed. Når varsling ikke vurderes mulig for et risikobidrag, vejes dette bidrag tungere i den samlede vurdering af den beregnede/estimerede risiko for broløsningen. Vurderingen af muligheden for varsling gøres i afsnit 5.6.

5.1 Modellering

Modellerne for estimering af hyppigheden af en skibskollision er udviklet med udgangspunkt i enkle, enten observerbare eller indlysende logiske sammenhænge, der betinger at risikoen for en kollision mod en bro er afhængig af:

- volumenet og sammensætningen af skibstrafikken,
- navigationsåbningens størrelse i forhold til skibenes dimensioner,
- arrangementet af sejladsen op til gennemsejlingen,
- skibenes manøvrenøjagtighed i farvandet,
- særlige navigationsmæssige betingelser og udfordringer,

- navigationsmæssige hjælpeforanstaltninger eller støtte

I Danmark er modellerne etableret igennem et større udviklingsarbejde i relation til etablering af Storebæltsforbindelsen, og modellerne er anvendt og modnet ved anvendelse på efterfølgende broprojekter og ved opfølgning på eksisterende broforbindelser.

Beskrivelsen af kollisionsrisikoen er oprindeligt delt op i fire komponenter:

- **Kategori I**: kollision i forbindelse med den faktiske passage som følge af mindre afvigelser i umiddelbar nærhed af navigationsåbningen,
- **Kategori II**: kollision fordi et skib ikke foretager den/de kursændringer, der er nødvendige for at følge ruten frem til gennemsejlingen,
- **Kategori III**: kollision forårsaget af undvigemanøvre ved to eller flere skibes møde i nærheden af broen,
- **Kategori IV**: kollision af anden årsag

Kategori I og II er baseret på gentagne, observerbare hændelser og er derfor funderet på en kombination af et solidt statistisk grundlag og et umiddelbart forståeligt hændelsesforløb. Kategori III har vist sig vanskeligt at forfølge med en kausal model og bliver sædvanligvis betragtet som en del af Kategori I. Endelig udgør Kategori IV en restkategori, til at repræsentere de observerede hændelser, som Kategori I og II ikke kan redegøre for. Enten fordi kollisionerne er sket langt fra den forventede lokation for Kategori I og II kollisioner, eller fordi hændelsesforløbet ikke svarer definitionen af disse. Skibe, der har mistet motorkraft og driver for vind, strøm og bølger, er et oplagt scenarie for Kategori IV kollisioner, men den begrænsede fart af et drivende skib gør disse situationer mindre kritiske end hvor et skib under motorkraft har mistet orienteringen og er på afveje langt fra de etablerede ruter.

Diskussion af Kategori IV

Om end Kategori IV er etableret som følge af faktisk observerede hændelser, er der tale om sjældne hændelser, der ikke giver et tilstrækkeligt statistisk grundlag til en nuanceret modellering. Modellen er derfor den simplest tænkelige, nemlig at risikoen er proportional med trafikken i området, og at kollisionerne kan ske et hvilket som helst sted langs med broen, som vanddybden tillader skibet at nå. Der er hverken grundlag for eller metoder til at bestemme den underliggende proportionalitets- eller risikofaktor i afhængighed af de lokale forhold og betingelser. Faktoren har derfor karakter af at være en passende konservativ antagelse som ikke eksplicit afspejler de faktiske betingelser og forhold omkring forbindelsen.

Modellen for Kategori IV kollisioner giver samme eksponering for kollisioner i hele broens længde, men eksponeringen er normeret, så den samlede risiko for Kategori IV kollisioner ikke – i sin definition – bliver større for en længere bro. Den uniforme eksponering af hele broen betyder dog, at broen skal sikres tilstrækkeligt mod kollisioner i hele sin længde, uanset hvor langt fra skibstrafikken den enkelte pille eller drager er. Dermed vil omkostningerne forbundet med kollisionssikring af en bro overfor Kategori IV kollisioner typisk øges proportionalt med broens længde. De øvrige kollisionskategorier giver kun anledning til lokaliserede behov for skibsstødssikring – omkring gennemsejlingen for Kategori

I og III og i forlængelse af en rute før et ruteknæk for Kategori II – så omfanget af skibsstødssikring for disse bidrag vil ikke afhænge af broens længde.

Kategori IV kollisioner medfører ofte en lokaliseret risiko ved landfæsterne, hvor brodrageren sædvanligvis ligger lavere og dermed muliggør kollision af skibenes dækshus eller anden overbygning mod brodrageren. Brodragerens langsgående udstrækning giver en stor geometrisk eksponering i sammenligning med bropillerne, og en strukturelt større sårbarhed overfor kollisioner gør, at risikoen ved kollisioner mod dragerne nær landfæsterne kan blive betydelig i forhold til kollision mod pillerne. For en længere broforbindelse, hvor de udsatte dele af broen ved landfæsterne ligger langt fra skibstrafikken, kan en sådan betydende risiko langt fra gennemsejlingen forekomme urealistisk.

Trods de ovenfor nævnte begrænsninger og de til tider lidt tvivlsomme konsekvenser for kravene til brodesignet, repræsenterer modellen det nuværende vidensniveau for repræsentation af denne resterende kollisionsrisiko. Og modellen udgør gængs praksis og er anvendt på større broprojekter i ind- og udland.

De overordnede forhold ved broens linjeføring og design, der er bestemmende for den absolutte størrelse af risikoen ved Kategori IV kollisioner, er:

- den relative andel af broens linjeføring, der er placeret på vanddybder, der tillader skibene i farvandet at nå frem til broen,
- den relative andel af broens linjeføring, hvor frihøjden under brodrageren er lille nok og vanddybden samtidig er stor nok til, at overbygningen på skibene i farvandet kan nå i kontakt med og beskadige brodrageren,
- balancen imellem pillernes og dragernes kollisionskapacitet og de kollisionskræfter, som skibene i farvandet kan mobilisere

For et brokoncept kan Kategori IV risikoen således reduceres ved at: placere færre piller på dybere vand, øge dragerens frihøjde over områder med dybere vand, og ved at øge kollisionskapaciteten (eller ekstern beskyttelse) for piller og brodragere.

Siden alle KKØ-korridorerne med løsninger, der helt eller delvist er baseret på brokonstruktioner, krydser større sammenhængende områder med store vanddybder, vil risikoen fra Kategori IV kollisioner give et betydende bidrag for alle løsningerne. Den aktuelle anvendte nuancering af Kategori IV modellen påvirker risikoestimatet for alle løsninger, og en eventuel usikkerhed om modellens relevans for meget lange broer, vil dermed gælde for alle løsninger, og ikke påvirke en direkte sammenligning af risikoen for de forskellige løsninger. Når løsningernes risikoniveau sammenlignes med udvalgte referenceprojekter (se afsnit 5.3) er risikoen for disse referenceprojekter også bestemt med samme overordnede modeldannelse for Kategori IV, og med passende justeringer for forskelle i parametervalg, vil en direkte sammenligning med risikoestimaterne for disse projekter også have relevans for denne forundersøgelse.

Modelparametre

Kollisionsrisikoen for broløsningerne i KKØ er i det følgende beregnet med udgangspunkt i de tre kollisionskategorier I, II og IV. De centrale modeltekniske elementer og parametre for disse risikobidrag er:

KAT I	Kollision ved passage af gennemsejlingen
$P_{G\,I}(x)$	Sandsynlighedsfordeling for skibets afvigelse fra idealruten i skibets sejlads hen mod broen.
$P_{C\,I}$	Sandsynligheden for at et skib fastholder afvigelsen fra idealruten helt frem til brolinjen. Denne sandsynlighed vil være afhængig af skibets type, om skibet har lods ombord, og af tilstedeværelsen af et VTS der overvåger og vejleder trafikken.
KAT II	Kollision fordi skibet ikke ændrer kurs ved knæk på ruten
$P_{G\,II}(x)$	Sandsynlighedsfordeling for skibets afvigelse fra idealruten i skibets sejlads hen mod ruteknækket.
$P_{C\,II}$	Sandsynligheden for at skibet ikke drejer ved rutens knæk. Denne sandsynlighed vil være afhængig af skibets type, om skibet har lods ombord, og af tilstedeværelsen af et VTS der overvåger og vejleder trafikken.
$P_R(x)$	Sandsynligheden for at besætningen opdager fejlen og fører skibet tilbage på ruten. Denne sandsynlighed vil normalt øges med hvor langt skibet har sejlet eller hvor lang tid skibet har sejlet siden kursændringen skulle være foretaget.
KAT IV	Kollision af anden årsag
$P_{C\,IV}$	Sandsynligheden for at et skib i trafikken mod broen er ramt af en ikke-specifik fejlsituation, der kan føre til kollision på et hvilket som helst sted langs med brolinjen. Denne sandsynlighed udtrykkes sædvanligvis som en brøkdel α af $P_{C\,I}$ bestemt for Kategori I. Sandsynligheden kan afhænge af skibets type, om skibet har lods ombord, og af tilstedeværelsen af et VTS, der overvåger og vejleder trafikken.

Kollisioner i KAT I eksponerer broens i nærheden af gennemsejlingsfaget, og med det store navigationsspænd, som er nødvendigt for broprojekter over en international sejlrute, vil de eksponerede konstruktionsdele (pyloner og ankerblokke) være store, robuste konstruktioner, der i kraft af deres primære strukturelle funktion, automatisk besidder en stor modstandsevne overfor skibskollisioner. Derfor er det sædvanligvis KAT II og KAT IV kollisioner, der kan ramme de mindre robuste konstruktionsdele længere fra gennemsejlingen, der giver de kritiske bidrag til kollisionsrisikoen. Og af den grund er der størst opmærksomhed i forhold til at understøtte, bekræfte og udbygge modelleringen af KAT II og KAT IV kollisioner. Dette drøftes yderligere i afsnit 5.3 i relation til relevante referencer til modellering og risikoniveau for KKØ broløsninger.

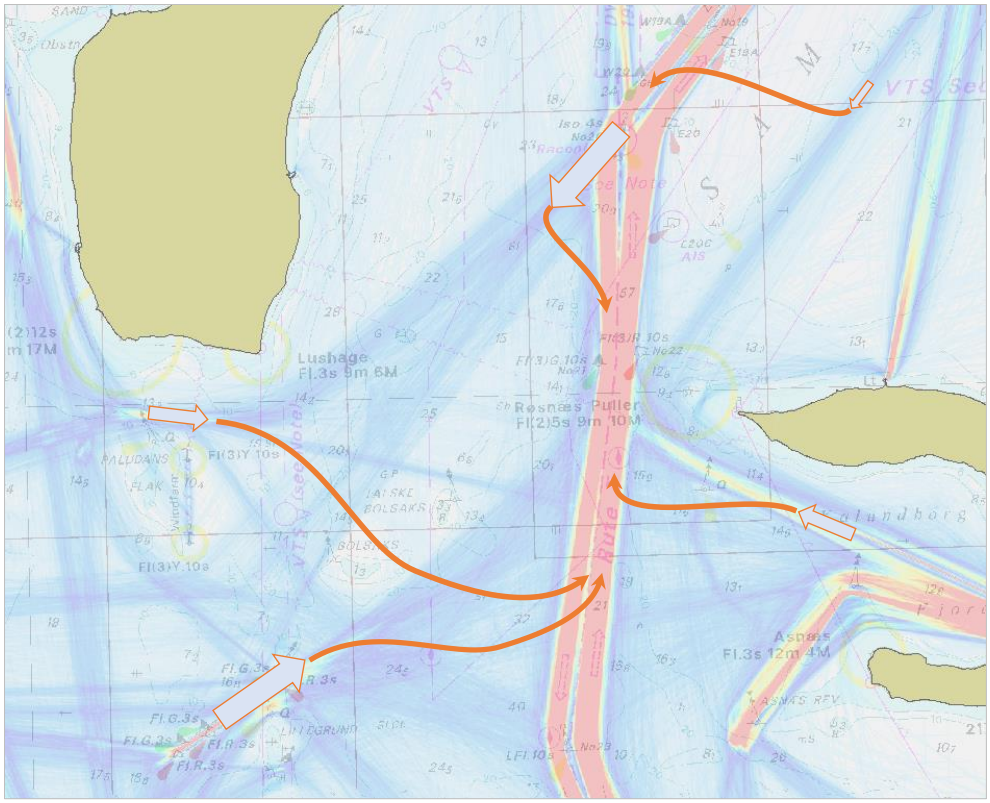
KKØ-korridorerne ligger helt eller i stor udstrækning indenfor melde-området for Storebælt VTS (sektor 1), der overvåger og vejleder trafikken omkring Storebæltsforbindelsens broer. Den risikoreduktion, som assistancen fra et VTS-system medfører, er medtaget i modelberegningerne. Dette forudsætter at overvågningsområdet for Storebælt VTS udvides til også at omfatte de relevante farvande nord og syd for en Kattegatforbindelse.

5.2 Skibstrafik

Risikomodellen tager udgangspunkt i en beskrivelse af skibstrafikken baseret på en eller flere ruter igennem og/eller i nærheden af broen. Som beskrevet i

afsnit 4 vil trafikken, der krydser KKØ-korridorerne, skulle omlægges til at passere broen igennem det centrale navigationsspænd over Rute T. Dermed bliver Rute T den primære rute i farvandet omkring broen og modelleringen fokuserer derfor på forløbet af denne.

Nord for korridoren skal den sydgående trafik, der på nuværende tidspunkt anvender "Fortsættelsen" syd om Samsø, forblive på Rute T indtil broen er passeret – se Figur 5-1. Den øvrige – ret begrænsede – trafik i farvandet skal tillige søge ind i og følge Rute T. Modelleringen af trafikken nord for korridoren vil dermed kunne baseres på det aktuelle forløb af Rute T og Dybvandsruten, og baseres på den kombinerede trafikmængde og sammensætning, når trafikken på "Fortsættelsen" lægges til trafikken på Rute T.



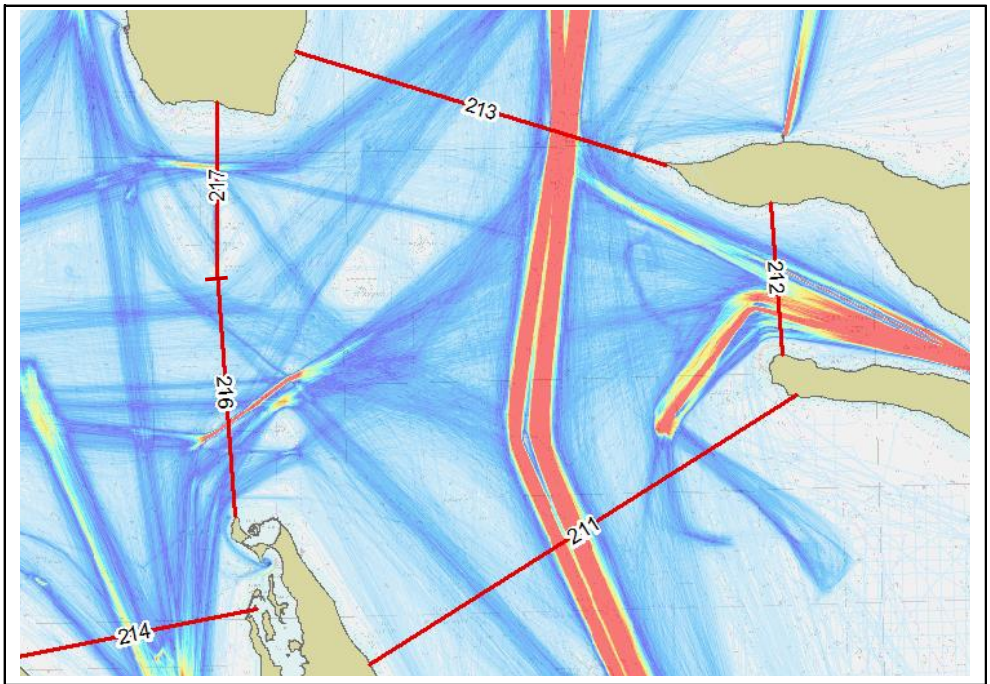
Figur 5-1 Forudsat omlægning af trafikken ved etablering af en broløsning over KKØ.

Trafikken syd for korridoren er ligeledes domineret af trafikken på Rute T, men trafikken fra vest (Fredericia, Vejle, Lillebælt), der vil blive ledt ind i Rute T før passage af korridoren, kan tillige udgøre en risiko for kollisioner under passagen over mod Rute T. Som vist i Figur 4-3 vil ruterne, der leder trafikken ind i Rute T, indeholde kursændringer, der giver grundlag for KAT II kollisioner op mod korridorerne. Denne risiko vil afhænge af det faktiske arrangement syd for korridoren og af den/de faktiske ruter, som trafikken vælger ind i Rute T.

Ifølge Figur 3-1 udgjorde denne trafik tilsammen omkring 2.400 østgående passager i 2018, hvilket ikke ubetydelig i forhold til trafikken på Rute T. Imidlertid er det ikke alle disse passager, der fortsætter nordover mod KKØ, så trafikbilledet vist i Figur 3-1 må nuanceres for at afklare, hvor meget af den angivne trafik, der passerer nordover. Basis for og resultatet af denne analyse er vist i Tabel 5-1. Det fremgår at det kun er ca. 1.500 af de samlede 3.550 østgående

passager igennem linjerne 216 og 217, der sejler nordpå igennem 213 op mod KKØ. Desuden ses det, at kun 900 af de 4.350 vestgående passager ud af Kalundborg Fjord sejler nordover mod KKØ.

Tabel 5-1 Analyse af erhvervstrafikkens passage ind og ud af området omkranset af krydsningslinjerne vist i figuren. (Tallene er afrundede, hvorfor totalen ikke i alle tilfælde passer)



		Udgående via linie				
		213	217	216	211	212
	Total	12.450	900	2.650	8.600	4.350
Indgående via linie 213	9.050	100	550	1.050	6.400	900
Indgående via linie 217	850	450	100		200	100
Indgående via linie 216	2.700	1.050		450	1.000	200
Indgående via linie 211	12.000	9.900	150	1.000	50	950
Indgående via linie 212	4.350	900	100	150	950	2.200

Det noteres at en relativ stor andel af trafikken omkring Lillegrund Rende (linje 216) og ud af Kalundborg Fjord (linje 212) sejler tilbage igennem den samme linje. Dette skyldes trafik med udgravningsfartøjer, der vedligeholder og uddyber havn og sejlrender, og som sejler ud for at dumpe det opgravede materiale. Denne trafik manifesterer sig tydeligt på trafiktætheden ved Kalundborg Fjord med en tæt trafik, der går ud af den sydlige del af fjorden og stopper efter ca. 6 km sejlads mod sydvest. Det noteres desuden at de fleste af trafikstrømmene er symmetriske – dvs. at der er talt lige mange passager i begge retninger imellem to krydsningslinjer. Den primære undtagelse for denne symmetri er trafikken imellem Storebælt (211) og Kattegat (213), hvor tallene angiver en nettotrafik nordpå på 9.900-6.400=3.500 årlige passager. Dette stemmer overens med den generelle observation, at trafikken på Rute T er større nordpå, fordi en

del af trafikken til Østersøen kan benytte Øresund, når de sejler ind i tom eller partlastet tilstand, men er nødt til at benytte Rute T, når de forlader Østersøen i lastet tilstand.

Trafikken fra vest (linje 216 og 217) og fra Kalundborg Fjord (linje 212) vil blive inddraget i den nordgående trafik på Rute T, og denne trafik vil bidrage til kollisionsrisikoen for alle tre kollisionskategorier: Kat I og Kat IV kollisioner ved Rute Ts passage af KKØ og Kat II kollisioner i forlængelse af knækket på Rute T lidt nord for linje 211. De faktiske ruter op mod KKØ for trafikken fra vest og fra Kalundborg Fjord vil som illustreret i afsnit 4 afhænge af den betragtede korridor. Det er ikke sikkert at de illustrerede omlægninger af trafikken vinder accept hos søfartsmyndigheder og hos erhvervstrafikkens operatører og det er forventeligt, at en del af trafikken vælger en anden rute end i dag. Endelig er det faktiske trafikbillede for KKØ afhængig af valget af løsning for KKV. Med disse afhængigheder og usikkerheder vil det derfor være præmaturt for den aktuelle fase at etablere en detaljeret modellering i risikoanalysen af trafikken fra vest og fra Kalundborg Fjord. Men som tidligere nævnt er trafikken lagt ind i trafikken for Rute T, og vil derigennem bidrage til kollisionsrisikoen for en broløsning for KKØ.

Trafikmodellen i beregningen af kollisionsrisikoen for KKØ vil dermed i alle tilfælde tage udgangspunkt i den aktuelle ruteplacering for Rute T og for Dybvandsruten ved Hatter Rev og Hatter Barn. Trafikvolumen og -sammensætning bestemmes ved trafiktællinger på passende valgte krydsningslinjer, så den samlede trafik bliver repræsenteret. Der henvises til de individuelle redegørelser for de udvalgte modelberegninger i afsnit 5.4.

5.3 Referenceprojekter

Storebæltsforbindelsens Østbro og projektet for en bro over Femern Bælt fra 2010 udgør to relevante projektreferencer for så vidt angår brokonstruktioner, navigationsåbninger, sejladsforhold og risikoen for skibskollisioner.

5.3.1 Storebælts Østbro

Østbroen krydser stort set den samme trafik på Rute T som KKØ og er beliggende blot 40-50 km syd for de betragtede korridorer. Men med sine godt 6 km fra kyst til kyst er den væsentligt kortere end løsningerne for KKØ og er beliggende på lavere vand. Hvor KKØ-korridorerne har vanddybder på mere end 10 m langs en samlet strækning fra 12 til 20 km, overstiger vanddybden kun 10 m langs en 2.2 km lang (central) del af Østbroen. Med de større længder af korridorerne og med generelt større vanddybder vil KKØ-broløsningerne i udgangspunktet være mere eksponerede for skibskollisioner end Østbroen.

I forbindelse med opdatering af risikoanalysen for Storebæltsforbindelsen i 2014-2016 blev risikoen for skibskollisioner gennemgået og opdateret – se ref. [3]. Risikomodellerne blev revurderet baseret på ændringer i den observerede skibstrafik og på Storebælt VTS' observationer og registreringer fra deres overvågning af trafikken. Trafikken blev opgjort til ca. 18.000 passager per år baseret på AIS data for 2013-14, og på det grundlag blev der til opdateringen af risikoanalysen udarbejdet en prognose for året 2025 med en samlet trafik på ca. 21.000 passager per år.

Observerede hændelser, hvor skibe ikke fik foretaget den sidste kursændring op mod broen i rette tid, gav anledning og data til en revurdering af modellen for KAT II kollisioner. Den opdaterede model betyder at en større del KAT II kandidaterne betragtes at forblive uopmærksomme og dermed fortsætter den fejlagtige sejlads trods forsøg på radiokontakt og retledning fra Storebælt VTS. På Østbroen er afstanden mellem bøjen, hvor drejet skal være foretaget, og broen ca. 3 km, og dermed har den opdaterede model ikke basis i observationer for større distancer. Siden KAT II kandidater på KKØ-broløsningerne skal tilbagelægge væsentlig større afstande inden de når frem til broen, er den opdaterede model for KAT II på Østbroen justeret, så der tilføjes en vis sandsynlighed for at opmærksomheden generhverves for KAT II situationer over de større distancer på KKØ. Så med denne tilføjelse er den opdaterede model anvendt i risikoberegningerne beskrevet i afsnit 5.4.

I den opdaterede risikoanalyse blev den samlede frekvens for afbrydelse af Østbroen i året 2025 bestemt til 5.9×10^{-4} per år, hvilket er indenfor acceptkriteriet for afbrydelser etableret for Storebæltsforbindelsen[1]. Men i modsætning til broløsningerne på KKØ vil afbrydelse af Østbroen ikke afbryde hele Storebæltsforbindelsen, idet togdriften gennem Storebæltstunnelen og over Vestbroen vil forblive operativ. Den acceptable frekvens for samtidig afbrydelse af både vej og bane er væsentlig lavere og det ville i princippet være det lavere niveau, der skulle bruges for KKØ; i hvert fald hvis KKØ bliver forbindelse for både vej og bane. Omvendt kan det med rette anføres, at der med Storebæltsforbindelsen er en redundans i forhold til en afbrydelse af KKØ, og det kan motivere en højere acceptabel frekvens for afbrydelse af KKØ, end den der oprindeligt blev sat for Storebæltsforbindelsen.

Uanset disse forbehold omkring sammenligneligheden af Østbroen og en broløsning for KKØ, så er den rapporterede frekvens på 5.9×10^{-4} per år for Østbroen et accepteret risikoniveau for en bekostelig og betydningsfuld broforbindelse i det danske transportsystem. Det bør derfor påvirke evalueringen og anbefalingen af en KKØ-løsning negativt, hvis den beregnede frekvens for afbrydelse for løsningen ligger væsentlig over dette niveau.

Beregningen for Østbroen anvender en 2 procents andel af KAT I som KAT IV kandidater og der har ikke været tilstrækkeligt grundlag i observationer af trafikken eller fra faktiske hændelser til at ændre på denne oprindelige forudsætning. Men den fremførte konklusion for Østbroen er, at statistikken ikke giver belæg for, at risikobidraget med en 2 procents andel skulle undervurdere risikoen for KAT IV kollisioner. Denne konklusion forholder sig ikke til om de 2 procent overvurderer risikoen ved KAT IV.

Siden andelen af KAT IV kandidater er så betydende for kollisionsrisikoen, som den er, og siden grundlaget for at sætte den til netop 2 procent ikke er overbevisende, er det oprindelige udgangspunkt på 2 procent blevet justeret ned på andre projekter – herunder er andelen blevet sat ned til 1 procent for broprojektet for Femern Bælt. En tilsvarende nedjustering i risikoberegningen for Østbroen vil betyde en halvering af frekvensen for afbrydelse til 3×10^{-4} per år. I

[1] Det bemærkes at acceptkriteriet på 6×10^{-4} per år dækker afbrydelser fra andre ulykkeshændelser end skibskollision.

fald der ved risikoberegningen på KKØ anvendes 1 procent for KAT IV, er det denne reducerede frekvens for afbrydelse af Østbroen, som resultatet for KKØ skal sammenholdes med.

5.3.2 Broprojekt for Femern Bælt

Broprojektet for Femern Bælt fra 2010, der er overordnet beskrevet i ref. [8] og [9], har flere lighedspunkter med broløsninger for KKØ: kyst-til-kyst afstanden er stor (ca. 18 km), vanddybden er omkring 20 m langs det meste af linjeføringen og broen skal krydse en stor international skibstrafik.

En væsentlig pointe i forhold til dette projekt er dog, at Femern A/S i sit oplæg til den videre projektmodning med en VVM-redegørelse (ref. [6]), anbefalede en tunnelløsning frem for denne bro-løsning, og anførte risikoen for skibskollisioner og sejladsforholdene omkring broløsningen som betydende faktorer i denne anbefaling.

Denne beslutning omkring et broprojekt, hvor kollisionsrisikoen og sejladsforholdene omkring broen er medvirkende til at projektet – efter mange års detaljerede undersøgelser og designudvikling – ikke bliver gennemført, udgør en vigtig reference og benchmark for tilsvarende broprojekter. En enkel, direkte og frem for alt kvantitativ måde at bringe dette i anvendelse på, er at sætte den beregnede frekvens for afbrydelse af broløsningen over Femern Bælt pga. skibskollision, som en øvre grænse for den tilsvarende afbrydelsesfrekvens for KKØ-broløsninger. Og således acceptere at løsninger for KKØ med en afbrydelses frekvens, der overstiger dette niveau, ikke anbefales.

Beregningen af frekvensen for afbrydelse af broløsningen for Femern Bælt blev rapporteret i 2010 – se ref. [8] – og er baseret på prognoser af skibstrafikken for såvel 2018 som 2038. Siden undersøgelserne af sejladsforhold og kollisionsrisiko for KKØ er baseret på AIS data for 2018, er det oplagt og ligetil at bruge kollisionsrisikoen for Femern for 2018, som referenceniveau for evaluering af KKØ-broløsninger. Denne frekvens er i ref [8] rapporteret til 9×10^{-4} per år.

Frekvensen for afbrydelser er 50% større end den rapporterede frekvens for afbrydelse af Østbroen over Storebælt for 2025, og 3 gange større end frekvensen for Østbroen, hvis andelen af KAT IV kandidater reduceres fra de oprindelige 2 procent til de 1 procent, der er antaget på Femern Bælt projektet.

De i afsnit 5.4 beregnede afbrydelsesfrekvenser for de analyserede korridorer er indledningsvist tænkt som grundlag for en relativ sammenligning og en deraf afledt anbefaling af korridorerne. Men det beskrevne forløb i beslutningsprocessen for Femern Bælt projektet og konstateringen om, at sejladsforhold og risikoen for skibskollisioner havde betydning for fravalget af broløsningen, forpligter dog til at tage dette fravalg til indtægt i det aktuelle arbejde med at evaluere og anbefale broløsninger for KKØ. Den rapporterede frekvens for afbrydelse af broløsningen på Femern Bælt for 2018 betragtes derfor som fravalgskriterium for en broløsning for KKØ:

Fravalgskriterie	
Afbrydelse på grund af skibskollision overstiger	9×10^{-4} per år

Afbrydelsesfrekvensen for Østbroen er på 3×10^{-4} per år, når beregningen er harmoniseret med Femern for så vidt angår andelen af KAT IV kollisioner, og denne risiko ligger langt under fravalgskriteriet. Da Østbroen repræsenterer et accepteret risikoniveau, giver fravalgskriteriet således en stor tolerance overfor risikoniveauer, der er væsentlig højere end det acceptable niveau for Østbroen. Denne margin giver sikkerhed for, at der med kriteriet fravælges løsninger, det vil være meget vanskeligt at modne og udvikle til et acceptabelt risikoniveau.

5.3.3 Harmonisering af risikomodeller

Gennemgang af beregningsmodeller og parametervalg for Østbroen og Femern Bælt viser kun få forskelle og de findes på modelleringen af KAT II og KAT VI. Men resultaterne for de to projekter viser samtidig, at det er disse bidrag, der har afgørende betydning for risikoen for både Østbroen og Femern. Så det er nødvendigt at forholde evaluere betydningen af forskellene i modelleringen.

Risikomodellen for KKØ er valgt med udgangspunkt i den opdaterede model for Østbroen, fordi den indeholder en opdatering af KAT II baseret på den seneste analyse af observationer af KAT II "nærved" hændelser, og dermed repræsenterer den aktuelt akkumulerede viden og erkendelse om denne risiko. En væsentlig forskel i forhold til modellen på Femern er, at sandsynligheden for at besætningen slet ikke er opmærksom – og dermed ikke jævnligt checker kurs og position – er øget fra 10% til 20% med den opdaterede Østbro model, hvor Femern modellen anvender 10%. Det betyder i realiteten en fordobling af bidraget fra KAT II, når der er tale om større afstande fra ruteknæk til brolinjen. I tillæg er der på Femern indført en reduktionsfaktor på 0,45 på KAT II bidraget fra det sidste – og mest betydningsfulde – ruteknæk inden broen. At det foregående ruteknæk skal være gennemført uden fejl for at nå frem til det sidste ruteknæk, har motiveret en faktor 0,5, og at KAT II kandidaterne skal krydse den stærkt trafikerede modgående rute, har motiveret en sandsynlighed på 10%, for at den modgående trafik får advaret skibet på afveje. Samlet giver dette en reduktion på $0{,}5\times(1-0{,}1)=0{,}45$. Der er ved opdateringen af Østbromodellen ikke fundet belæg for disse reduktioner, og det er derfor valgt ikke at medtage modifikationerne fra Femern Bælt i modellen for KKØ.

Som nævnt i afsnit 5.3.1 er den opdaterede model for Østbroen ikke egnet hvis afstanden fra ruteknækket er større end 3 km. Siden flere KKØ broløsninger giver væsentlige større afstande fra ruteknæk til korridoren en 3 km, er der i modellen for KKØ tilføjet en sandsynlighed for, at besætningen genvinder opmærksomheden og korrigerer kursen efter længere sejlads. Sandsynligheden er tilføjet som en funktion af tiden, der er passeret, siden kursændringen skulle være foretaget. Dermed bliver denne del af modellen for KAT II på KKØ – at skibet gives mulighed for at genvinde opmærksomheden – i bedre overensstemmelse med modellen for Femern Bælt.

Ved de store afstande fra ruteknæk til brolinje, som findes både for Femern og for KKØ, vil det styrende element være sandsynligheden for at skibet slet ikke er

opmærksom, og ikke genvinder opmærksomheden, inden det når frem til broen. Samlet set er dette bidrag med Femern modellen 4.4 gange mindre end den opdaterede Østbro model og end den anvendte model for KKØ.

At der med modelleringen fra 2010 af kollisionsrisikoen for Femern opnås en så meget lavere risiko for KAT II kollisioner end med den senest opdaterede model for Østbroen, ændrer ikke på legitimiteten i at bruge risikoestimatet for Femern som fravalgskriterie. Anbefalingen af en tunnelløsning blev truffet på baggrund af det dengang rapporterede risikoniveau for broen.

Den anden betydningsfulde forskel imellem Østbro og Femern modellen er, at andelen af KAT IV kandidater er sat til 2% for Østbroen og kun til 1% på Femern Bælt. Siden værdien for Østbroen er et oprindeligt estimat/valg, som ikke i alle tilfælde bliver videreført på nyere broprojekter, og siden KAT IV kollisioner pga. kortere længde og hurtigt aftagende vanddybder mod landfæsterne giver en mindre risiko for Østbroen end de længere broløsninger for Femern og KKØ, er det valgt at anvende den lavere værdi fra Femern i KKØ-modellerne.

En sådan ændring ville halvere frekvensen for afbrydelser for Østbroen til 3×10^{-4} per år. Ved en sammenligning imellem KKØ og Østbroen, vil det således være denne værdi, som den beregnede risiko for KKØ skal holdes op imod.

5.4 Risikoberegning for udvalgte KKØ broløsninger

Med den omfattende og tunge skibstrafik i farvandet, med de lange broløsninger og de store vanddybder i farvandet, er det forventeligt at risikoen for beskadigelse og afbrydelse af en broforbindelse over KKØ pga. skibskollisioner er signifikant. Alle korridorerne er i stort set samme grad eksponeret for kollisionsrisikoen, men detaljer i korridorens placering og forløb, og i den foreslåede broløsnings design kunne have betydning for den resulterende risiko. Derfor er tre broløsninger udvalgt til en detaljeret beregning af risikoen – KKØ-1.1, KKØ-2.1 og KKØ-3.1. Disse korridorer repræsenterer en sydlig, en central og en nordlig placering og broløsningerne for disse korridorer omfatter både en hængebro (KKØ-1.1 og KKØ-2.1) og en tofags skråstagsbro (KKØ-3.1). Resultaterne fra disse beregninger har givet indsigt i hvilke problemstillinger og forhold, der er udslagsgivende for risikoniveauet, og denne indsigt kan overføres på broløsningerne i de øvrige KKØ-korridorer.

I forbindelse med de indledende linjeføringsovervejelser for en Kattegatforbindelse – se ref. [1] og [2] – blev der gennemført en indledende kollisionsanalyse for KKØ-2.1, der viste et uacceptabelt risikobidrag fra KAT II og KAT IV. Analysen demonstrerede nødvendigheden dels af en ekstern beskyttelse imod KAT II kollisioner og dels af at gennemgå modelleringsbetingelserne for de lange broløsninger i KKØ. Risikoberegningen for broløsningerne i de tre udvalgte korridorer anvender den tilpassede model for KAT II kollisioner og antager reduceret andel af KAT IV kollisioner i forhold til Østbroen – se afsnit 5.3.3. Sammenligningen af den beregnede risiko for KKØ broløsninger med risikoniveauet for de to referenceprojekter (Østbroen og Femern Bælt) diskuteret i afsnit 5.3 vil give tungtvejende bidrag til den samlede evaluering af projektrisikoen for de rene broløsninger i korridorerne for KKØ.

5.4.1 Fælles antagelser

På nuværende stade af undersøgelserne er broløsningerne skitseret med udgangspunkt i kendte projekter. Der er ikke foretaget kapacitetsberegninger, designtilpasning eller -optimering af løsningerne. Løsningerne dermed endnu ikke tilstrækkelig detaljerede til at kunne udlede alle de detaljerede specifikationer for konstruktionernes geometri, styrke og masse, der er nødvendige for en analyse af skibsstødsrisikoen. For at gøre analyserne for de tre korridorer sammenlignelige, antages en række af de centrale designparametre at være ens for de tre løsninger, selvom denne antagelse ikke i alle tilfælde er lige oplagt. Følgende generaliseringer er anvendt alle med udgangspunkt i globale kapaciteter og masser antaget for Femern Bælt projektet (se ref [9]):

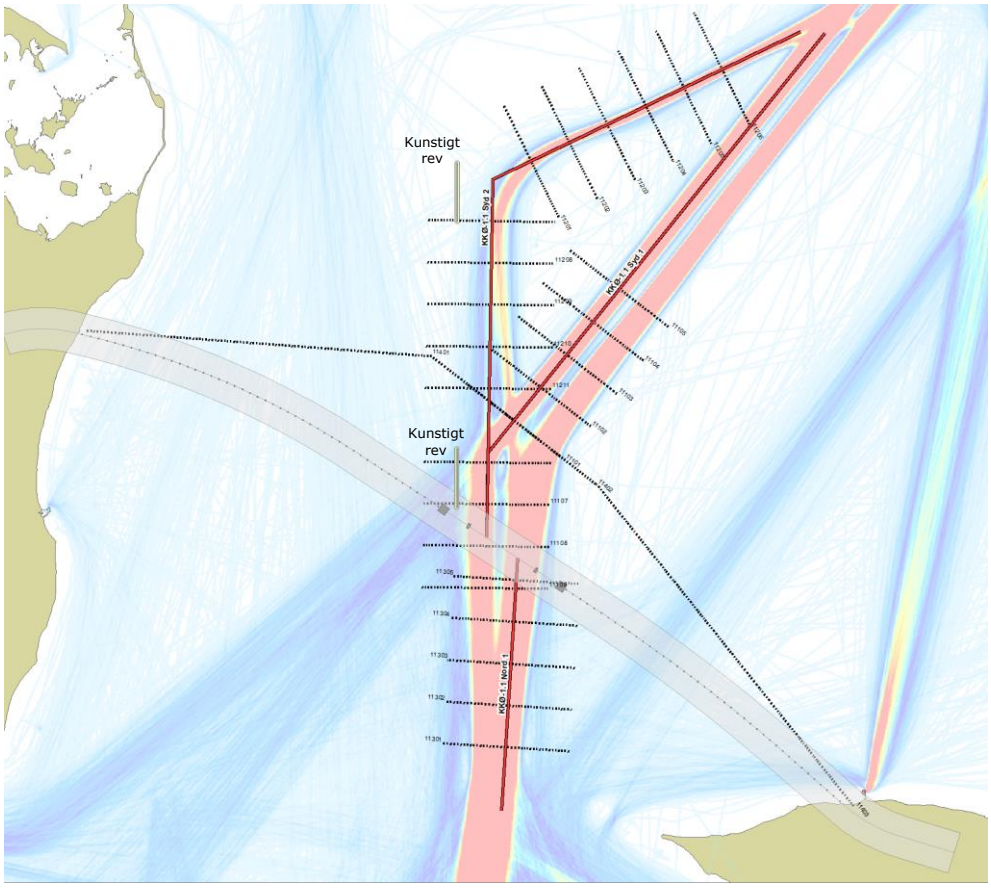
Konstruktionsdel	Modstandsevne	Masse
Brodrager	55 MN	ej relevant
Pyloner	690 MN	350.000 t
Ankerblok	690 MN	350.000 t
Anker- og overgangspiller (skråstagsbro)	690 MN	350.000 t
Pille, tilkørselsbro	130 MN	17700 t

Ankerpillen og overgangspillen på en skråstagsbro er normalt langtfra så stærk og robust som pylonen, men for ikke at gøre sammenligningen af risikoen for korridorerne afhængig af broløsningen, antages det at ankerpillen kan gøres lige så stærk og robust som pylonen. Det kunne gøres med ekstern beskyttelse i form af en separat, bundfast konstruktion eller en kunstig ø. Alternativt kan skråstagsbroen erstattes af en hængebro som i løsningerne for KKØ-1.1 og KKØ-2.1.

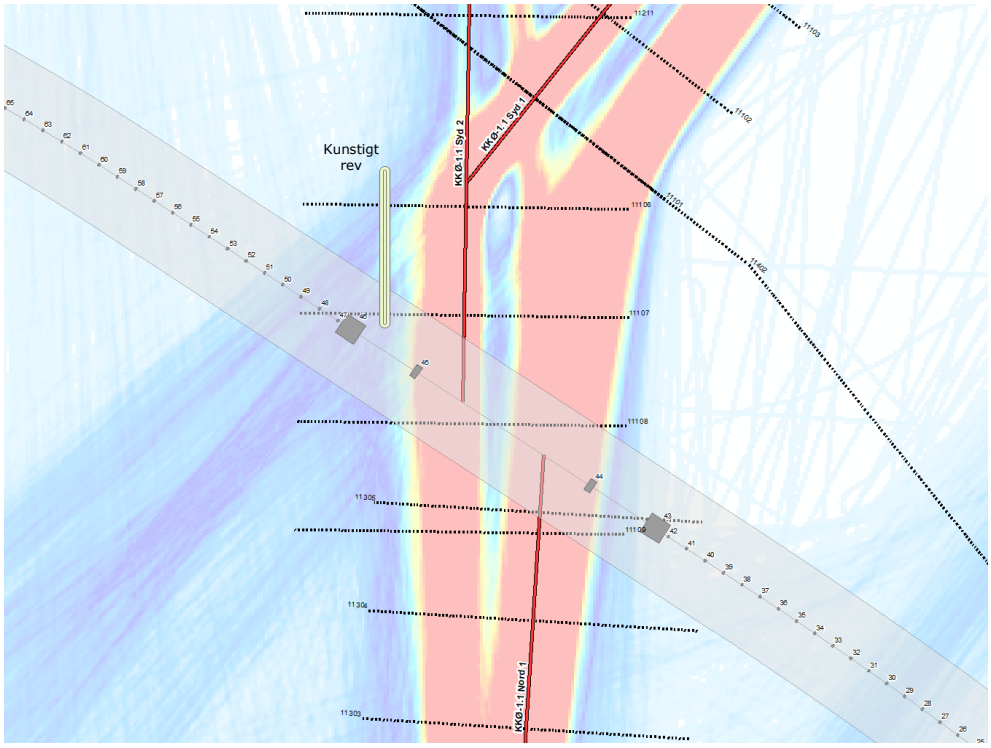
KAT II kollisioner viser sig for alle de tre beregnede løsninger at udgøre et uacceptabelt stort bidrag til kollisionsrisikoen. Det er derfor nødvendigt at indføre særskilt beskyttelse af broen imod disse kollisioner. Pga. den lokaliserede karakter af denne risiko, er det vurderet muligt og relevant at anlægge eksterne, undersøiske beskyttelsesrev til at beskytte broen mod denne risiko. I analysen antages revet at standse alle skibe, med en dybgang, der overstiger vanddybden over revet med en halv meter. Den nødvendige udstrækning og relevante placering af revene er skønsmæssigt vurderet før analysen. Selvom resultaterne indikerer, at yderligere optimering af revene ville være relevant, giver de forudsatte rev en tilstrækkelig indikation for den nærværende forundersøgelse af revenes betydning for kollisionsrisikoen. Analyseresultaterne for de tre løsninger rapporteres indledningsvist uden og dernæst med effekten af disse eksterne beskyttelsesværker.

5.4.2 Model og resultater for KKØ-1.1

Den foreslåede broløsning for KKØ-1.1 er 21.6 km lang og består af en højbro med 200 m spændvidde og en hængebro over Rute T med et hovedspænd på 1.900 m – se planoversigten i Figur 5-2. Til analysen er der valgt en central linjeføring i korridoren, men analyseresultatet vil ikke ændres med en anden linjeføring indenfor korridoren.



Figur 5-2 *Model for broløsning i KKØ-1.1: Korridoren med en linjeføring placeret i midten, pilleplaceringer, geometri af ruterne hen mod broen, og krydsningslinjerne langs ruterne anvendt i analyse af skibstrafikken.*



Figur 5-3 *Geometri omkring gennemsejlingen og de definerede ruters passage af brolinjen.*

Modellens 3 ruter – 2 sydgående og 1 nordgående – er centreret i den observerede skibstrafik, men er ved krydsningen af linjeføringen placeret svarende til at trafikken efter broens opførelse vil placere sig centralt i hver sin halvdel af hovedspændet – se Figur 5-3. Som også bemærket i afsnit 4.1.1 vil et eventuelt kunstigt rev til beskyttelse imod sydvestgående trafik på Rute T være klemt inde imellem broen og Rute T. Med konfigurationen vist i Figur 5-3 vil revet ligge omkring 700 m fra rutecenteret og dette vurderes ikke at give sejladsen tilstrækkelig plads til undvigemanøvrer eller fejl. Begge rev er antaget 1.400 m lange og med en kronebredde på 30 m.

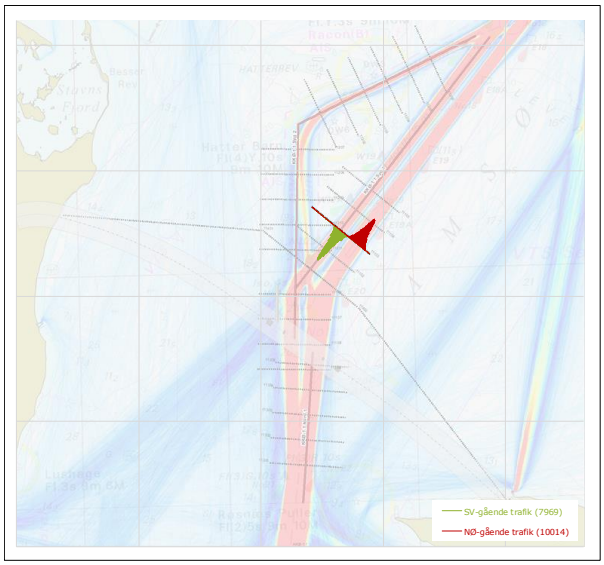
Skibenes geometriske fordeling i de nuværende ruter er inspiceret ved krydsningslinjerne antydet i Figur 5-2 og Figur 5-3, og baseret på de observerede fordelinger er trafikkens variation omkring modelruterne beskrevet som normalfordelinger med følgende spredninger:

<u>Rute T, Sydgående ("KKØ-1.1 Syd 1")</u>
inden ruteknækket: σ = 150 m
op imod broen: σ = 200 m

<u>Dybvandsruten, Sydgående ("KKØ-1.1 Syd 2")</u>
inden ruteknækket: σ = 100 m
op imod broen: σ = 300 m

<u>Rute T, Nordgående ("KKØ-1.1 Nord 1")</u>
op imod broen: σ = 200 m

Volumen og sammensætning af skibstrafikken er baseret på optællinger svarende til linjerne i Figur 5-4 til Figur 5-6.



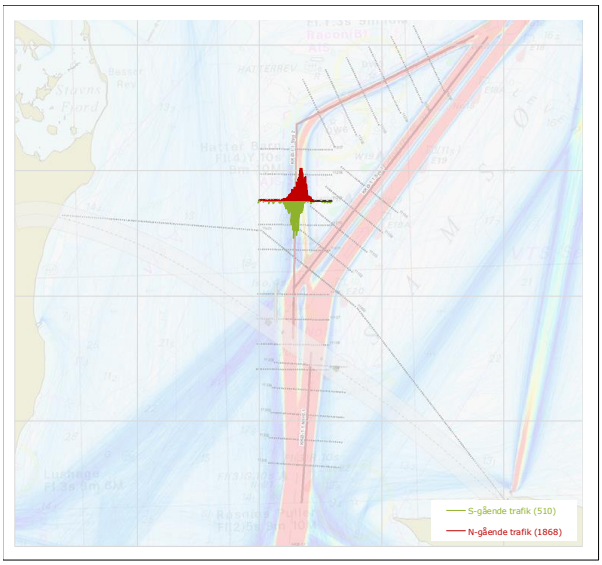
Samlet skibstrafik i 2018 - Linje 11103 (Rute 111 snit 03)

SV-gående trafik			Fordeling på skibslængde (L_{OA}) 0 m – 25 m	25 m – 50 m	50 m – 100 m	100 m – 150 m	150 m – 200 m	200 m – 300 m	300 m – 400 m
Erhvervstrafik	**7.864**	**99%**	62	304	1.592	1.768	2.070	1.944	124
Cargo	2.036	26%		3	1.241	471	287	33	1
Container	1.223	15%			1	208	639	330	45
Tanker	2.069	26%		4	167	911	407	575	5
Bulk	721	9%			34	51	468	167	1
Pass/RORO	1.180	15%	2	3	9	26	238	830	72
Fiskeri	23	0%	5	6	11		1		
Øvrige	612	8%	55	288	129	101	30	9	
Lystsejlads	**105**	**1%**	81	5	6	12			
Samlet	**7.969**		143	309	1.598	1.781	2.070	1.944	124

NØ-gående trafik			0 m – 25 m	25 m – 50 m	50 m – 100 m	100 m – 150 m	150 m – 200 m	200 m – 300 m	300 m – 400 m
Erhvervstrafik	**9.923**	**99%**	37	298	1.537	1.809	4.315	1.777	150
Cargo	2.090	21%		2	1.170	526	358	33	1
Container	1.449	14%			4	252	829	307	56
Tanker	2.966	30%		4	212	809	1.691	232	18
Bulk	1.567	16%			30	80	1.149	308	
Pass/RORO	1.271	13%		2	6	38	263	887	75
Fiskeri	12	0%	5	3	2		1		
Øvrige	568	6%	31	287	113	104	24	9	
Lystsejlads	**91**	**1%**	67	3	8	13			
Samlet	**10.014**		104	301	1.545	1.821	4.315	1.777	150

Samlet trafik			0 m – 25 m	25 m – 50 m	50 m – 100 m	100 m – 150 m	150 m – 200 m	200 m – 300 m	300 m – 400 m
Erhvervstrafik	**17.787**	**99%**	99	602	3.129	3.577	6.385	3.721	274
Cargo	4.126	23%		5	2.411	997	645	66	2
Container	2.672	15%			5	460	1.468	638	101
Tanker	5.035	28%		8	379	1.720	2.098	807	23
Bulk	2.288	13%			64	131	1.617	475	1
Pass/RORO	2.451	14%	2	5	15	64	501	1.717	147
Fiskeri	35	0%	10	9	13		2		
Øvrige	1.180	7%	86	574	241	205	55	18	
Lystsejlads	**196**	**1%**	148	8	15	25			
Samlet	**17.983**		247	610	3.143	3.602	6.385	3.721	274

Figur 5-4 Modelgrundlag for den sydgående trafik på Rute T ("KKØ-1.1 Syd 1")



Samlet skibstrafik i 2018 - Linje 11209 (Rute 112 snit 09)

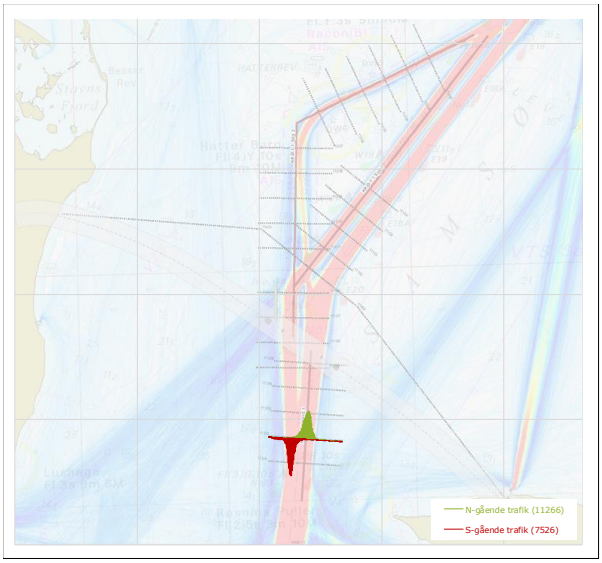
Fordeling på skibslængde (L_{OA})

S-gående trafik			0 m – 25 m	25 m – 50 m	50 m – 100 m	100 m – 150 m	150 m – 200 m	200 m – 300 m	300 m – 400 m
Erhvervstrafik	**453**	**89%**		11	1	2	24	306	109
Cargo	9	2%				1	1	6	1
Container	110	22%					2	17	91
Tanker	156	31%					1	142	13
Bulk	161	32%					20	141	
Pass/RORO	3	1%		1					2
Fiskeri									
Øvrige	14	3%		10	1	1			2
Lystsejlads	**57**	**11%**	56	1					
Samlet	**510**		56	12	1	2	24	306	109

N-gående trafik			0 m – 25 m	25 m – 50 m	50 m – 100 m	100 m – 150 m	150 m – 200 m	200 m – 300 m	300 m – 400 m
Erhvervstrafik	**1.838**	**98%**	5	8	4	4	106	1.643	69
Cargo	10	1%		1	1	1	1	5	1
Container	108	6%			2		2	38	67
Tanker	850	46%				2	27	820	1
Bulk	854	46%					76	778	
Pass/RORO	4	0%	1			1		2	
Fiskeri	1	0%	1						
Øvrige	11	1%	3	7	1				
Lystsejlads	**30**	**2%**	28	2					
Samlet	**1.868**		33	10	4	4	106	1.643	69

Samlet trafik			0 m – 25 m	25 m – 50 m	50 m – 100 m	100 m – 150 m	150 m – 200 m	200 m – 300 m	300 m – 400 m
Erhvervstrafik	**2.291**	**96%**	5	19	5	6	130	1.949	178
Cargo	19	1%		1	1	2	2	11	2
Container	218	9%			2		4	55	158
Tanker	1.006	42%				2	28	962	14
Bulk	1.015	43%					96	919	
Pass/RORO	7	0%	1	1		1		2	2
Fiskeri	1	0%	1						
Øvrige	25	1%	3	17	2	1			2
Lystsejlads	**87**	**4%**	84	3					
Samlet	**2.378**		89	22	5	6	130	1.949	178

Figur 5-5 Modelgrundlag for den sydgående trafik på Dybvandsruten ("KKØ-1.1 Syd 2")



Samlet skibstrafik i 2018 - Linje 11302 (Rute 113 snit 02)

Fordeling på skibslængde (L_{OA})

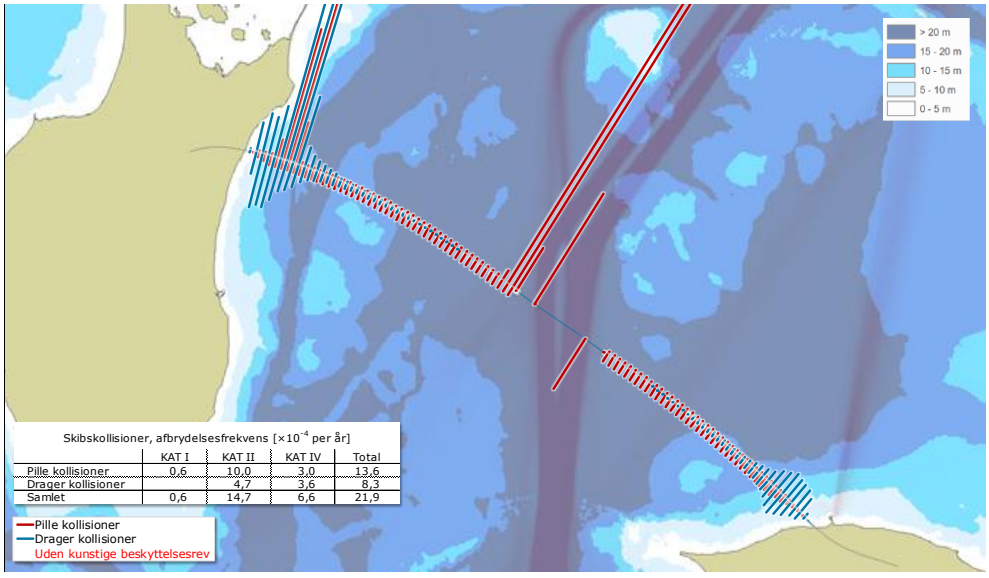
N-gående trafik			0 m – 25 m	25 m – 50 m	50 m – 100 m	100 m – 150 m	150 m – 200 m	200 m – 300 m	300 m – 400 m
Erhvervstrafik	**11.167**	**99%**	84	293	1.133	1.731	4.337	3.396	192
Cargo	1.688	15%	1	10	793	483	361	38	2
Container	1.527	14%			4	234	853	339	96
Tanker	3.779	34%		3	197	799	1.719	1.042	19
Bulk	2.392	21%			15	80	1.222	1.075	
Pass/RORO	1.169	10%		2	5	37	157	893	75
Fiskeri	10	0%	4	3	2		1		
Øvrige	602	5%	79	275	117	98	24	9	
Lystsejlads	**99**	**1%**	77	7	3	11			
Samlet	**11.266**		162	300	1.136	1.742	4.337	3.396	192

S-gående trafik			0 m – 25 m	25 m – 50 m	50 m – 100 m	100 m – 150 m	150 m – 200 m	200 m – 300 m	300 m – 400 m
Erhvervstrafik	**7.430**	**99%**	97	267	1.011	1.633	1.987	2.242	193
Cargo	1.463	19%		3	722	410	287	39	2
Container	1.309	17%			1	207	656	349	96
Tanker	2.119	28%		3	132	852	400	714	18
Bulk	857	11%			19	50	480	307	1
Pass/RORO	1.063	14%		2	6	23	134	824	74
Fiskeri	22	0%	3	6	12		1		
Øvrige	597	8%	94	253	119	91	30	9	2
Lystsejlads	**96**	**1%**	76	4	3	12			
Samlet	**7.526**		173	271	1.014	1.645	1.987	2.242	193

Samlet trafik			0 m – 25 m	25 m – 50 m	50 m – 100 m	100 m – 150 m	150 m – 200 m	200 m – 300 m	300 m – 400 m
Erhvervstrafik	**18.597**	**99%**	181	560	2.144	3.364	6.324	5.639	386
Cargo	3.151	17%	1	13	1.515	893	648	77	4
Container	2.836	15%			5	441	1.508	688	193
Tanker	5.898	31%		6	329	1.651	2.119	1.756	37
Bulk	3.249	17%			34	130	1.702	1.382	1
Pass/RORO	2.232	12%		4	11	60	291	1.717	149
Fiskeri	32	0%	7	9	14		2		
Øvrige	1.199	6%	173	527	236	188	54	18	2
Lystsejlads	**195**	**1%**	154	11	6	24			
Samlet	**18.792**		335	571	2.150	3.387	6.324	5.639	386

Figur 5-6 Modelgrundlag for den nordgående trafik på Rute T ("KKØ-1.1 Nord 1")

Resultatet af risikoberegningen uden effekten af de eksterne beskyttelsesrev er sammenfattet i Figur 5-7 og den estimerede afbrydelsesfrekvens på 22×10^{-4} per år er væsentligt over fravalgskriteriet på 9×10^{-4}. Fordelingen langs med broen viser en særlig høj risiko for pillerne lige vest for hængebroen, i den direkte forlængelse af Rute T, og nær kysten i forlængelse af dybvandsruten. I begge tilfælde er der tale om bidrag fra KAT II kollisioner. Derudover ses en jævn fordelt risiko langs hele broen fra KAT IV. Niveauet for KAT IV ses at være lidt større på broens sydside end på nordsiden og det skyldes, at den nordgående trafik har et større volumen og at skibene generelt er tungere lastede. Kollisioner mod overbygningen forekommer kun inde mod land, hvor brodrageren er langt nok nede til at blive ramt af skibenes overbygning. Men her bidrager KAT IV kollisionerne ret betragteligt til den samlede risiko.



Skibskollisioner, afbrydelsesfrekvens [$\times 10^{-4}$ per år]

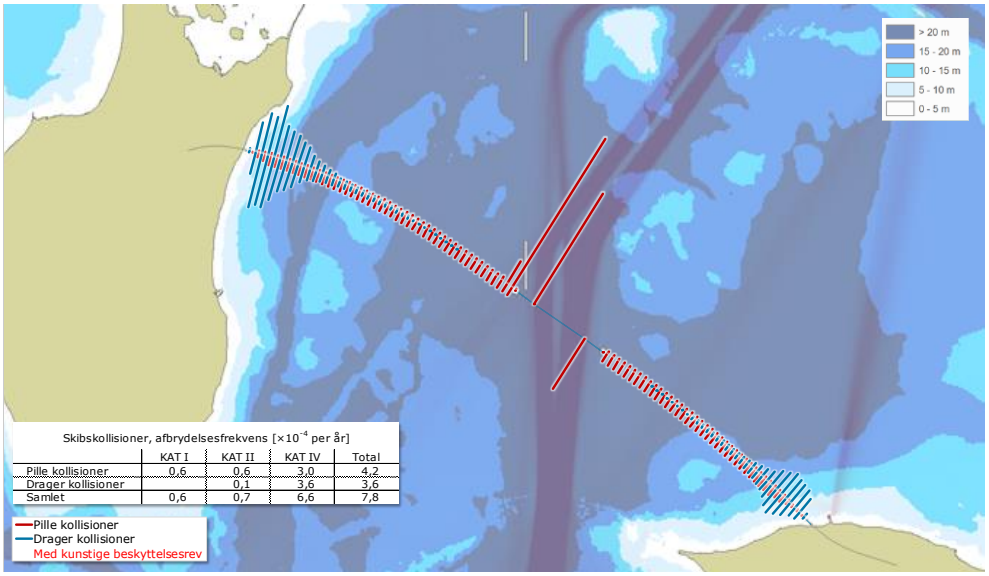
	KAT I	KAT II	KAT IV	Total
Pille kollisioner	0,6	10,0	3,0	13,6
Drager kollisioner		4,7	3,6	8,3
Samlet	0,6	14,7	6,6	21,9

Figur 5-7 *Sammensætning og geografisk fordeling af risikoen for afbrydelse af* ***KKØ-1.1 uden ekstern beskyttelse****. De tabellerede resultater angiver frekvensen for afbrydelse med enheden [$\times 10^{-4}$ pr år].*

Det dominerende risikobidrag er den lokalt forøgede risiko fra KAT II i forlængelse af Rute T's ruteben op mod broen. Disse kan i princippet håndteres i det strukturelle design ved at indbygge en større modstandsevne i de udsatte piller. Men den modstandsevne, der er behov for, vil være meget bekostelig at bygge ind i en struktur, hvor skaden ved en kollision ikke må skabe usikkerhed om strukturens integritet eller fortsatte holdbarhed. Baseres modstandsevnen i stedet på eksterne beskyttelsesværker, vil det være acceptabelt, at der opstår større skade/ødelæggelse på beskyttelsen for at standse skibet. Men det betinger at omkostningen forbundet med udbedring af de forventede skader på beskyttelsesværket er meget lavere end at bygge kapaciteten ind i brokonstruktionen.

På trods af de store vanddybder i projektområdet, betragtes et kunstigt, undersøisk rev som en relevant ekstern beskyttelse for de udsatte dele af broen. Et undersøisk rev kan placeres tæt på kilden – dvs. tæt på rutens knæk – og topkoten på revet kan tilpasses, så revet standser de virkeligt farlige skibe, der bidrager til risikoen uden at være til gene eller urimelig fare for anden skibstrafik herunder fritidssejlads.

To sådanne eksterne beskyttelsesrev er indføjet i Figur 5-8 ved de to steder på Rute T, hvor KAT II kollisionsfaren udspringer. Begge er 1.400 m lange og har en kronebredde på 30 m. Under forudsætning af at revet standser alle skibe med en middeldybgang på mere end 4,5 m sænkes den samlede frekvens for afbrydelser fra 22×10^{-4} til 8×10^{-4} per år og er dermed bragt ned lige under fravalgsniveauet. Den resulterende fordeling af kollisionsrisikoen er vist i Figur 5-8. De store lokale bidrag lige vest for hængebroen er nu modereret om end stadig betydelige, mens det lokalt høje bidrag nær kysten er gjort ubetydeligt. Forudsættes det sydlige rev hævet yderligere 1 m, vil det lokale bidrag vest for hængebroen stort set kunne elimineres og den estimerede frekvens for afbrydelser vil falde til 7.3×10^{-4} per år.



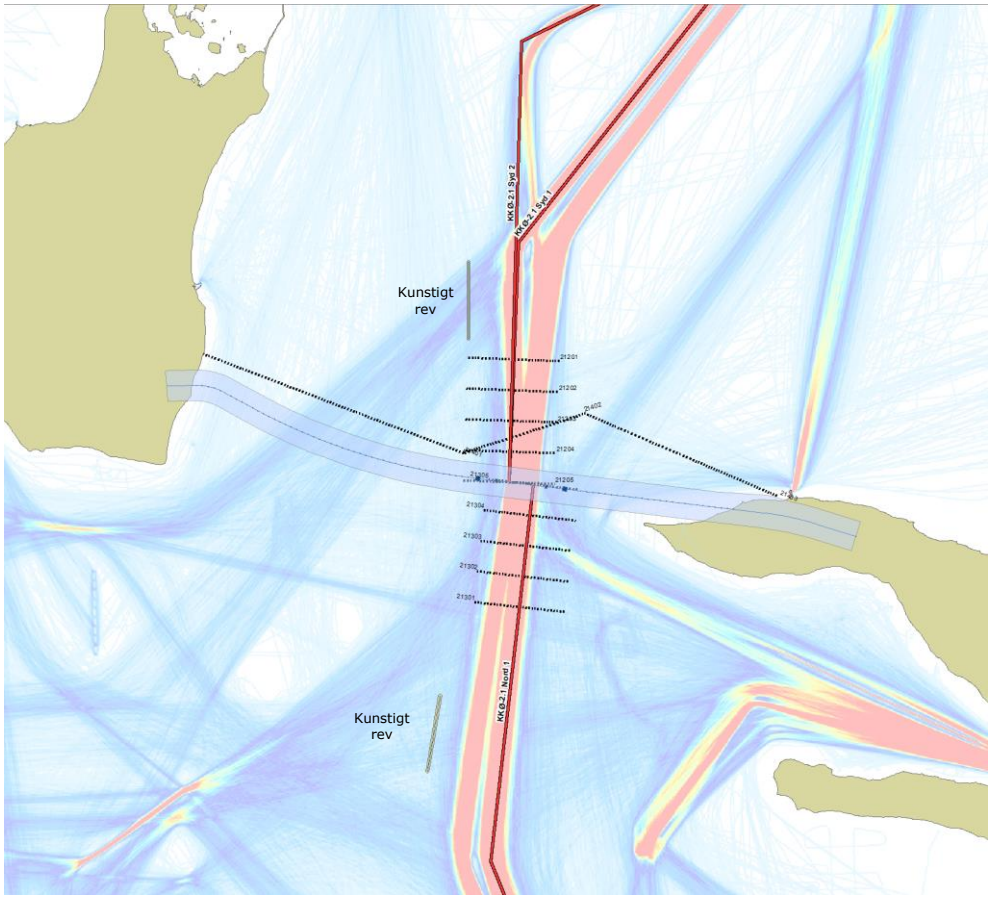
Figur 5-8 *Sammensætning og geografisk fordeling af risikoen for afbrydelse af* ***KKØ-1.1 med ekstern beskyttelse****. De tabellerede resultater angiver frekvensen for afbrydelse med enheden [×10⁻⁴ pr år].*

Med de eksterne rev er den tilbageværende risiko hovedsageligt fra KAT IV kollisioner, som dels er jævnt fordelt på alle pillerne og dels giver lokale bidrag på overbygningen nær kysterne. Bidraget fra kollision mod dragerne kunne begrænses ved at hæve brodækket og/eller ved at etablere kystnære beskyttelsesværker. Men det vil være ekstremt bekosteligt at reducere den resterende risiko på pillerne, da det vil kræve enten forstærkning af alle piller eller lokale beskyttelsesværker ved alle piller. Det viste risikobillede er en direkte konsekvens af korridorens længde, af trafikkens omfang i området og af de store vanddybder langs med korridoren, og karakteriserer dermed en broløsning i KKØ-1.1 korridoren.

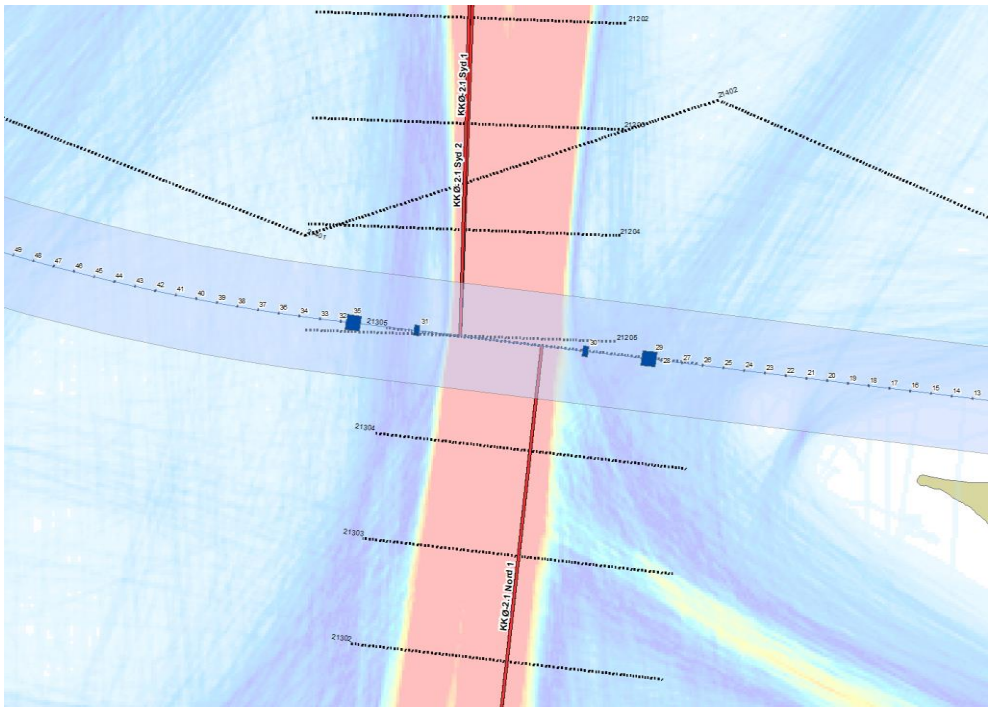
5.4.3 Model og resultater for KKØ-2.1

Den foreslåede broløsning for KKØ-2.1 er 18,5 km lang og består af en højbro med 200 m spændvidde og en hængebro over Rute T med et hovedspænd på 1.630 m – se Figur 5-9. Til analysen er der antaget en central linjeføring i korridoren, men analyseresultatet vil ikke ændres med en anden linjeføring indenfor korridoren.

Modellens 3 ruter – 2 sydgående og 1 nordgående – er centreret i den observerede skibstrafik, men er ved krydsningen af linjeføringen placeret svarende til at trafikken efter broens opførelse vil placere sig centralt i hver sin halvdel af hovedspændet – se Figur 5-10. Modellen kan medtage effekten af de to undersøiske beskyttelsesrev vist i Figur 5-9 som beskyttelse imod KAT II kollisioner med udgangspunkt i Rute T's knæk syd og nord for korridoren. Disse er begge 2.500 m lange med en kronebredde på 30 m og er placeret 1.300 hhv. 1.500 m fra centerlinjen af den nærmeste rute. Viser revene med deres placering sig at være til gene for sikker afvikling af trafikken kan de rykkes længere væk.



Figur 5-9 *Model for broløsning i KKØ-2.1: Korridoren med en linjeføring placeret i midten, pilleplaceringer, geometri af ruterne hen mod broen, og krydsningslinjerne langs ruterne anvendt i analyse af skibstrafikken.*



Figur 5-10 *Geometri omkring gennemsejlingen og de definerede ruters passage af brolinjen.*

I modellen specificeres information om batymetrien omkring broen, så den naturlige beskyttelse, der opnås ved at skibene standses hvis de støder på grund på vej mod broen, kan repræsenteres. I de aktuelle beregninger (for alle korridorer) er vanddybden ved pillen anvendt som begrænsning for hvilke skibe, der kan nå frem til pillen. Men en mere detaljeret evaluering af batymetrien nord og syd for broen kan retfærdiggøre specifikation af en lavere vanddybde, hvis skibe på kollisionskurs passerer områder med lavere vanddybder inden de når frem til pillen. For KKØ-2.1 ses den yderste østlige del af broen at være skærmet imod kollisioner sydfra af Røsnæs Rev og Røsnæs. Tilsvarende vil de lavere vanddybder omkring Bolsaks og Falske Bolsaks standse skibe fra syd med stor dybgang. Disse specifikke forhold er ikke repræsenteret i denne aktuelle modelberegning. Den forventelige effekt af at medtage denne naturlige beskyttelse diskuteres senere i relation til effekten af et kunstigt rev syd for broen – se side 38.

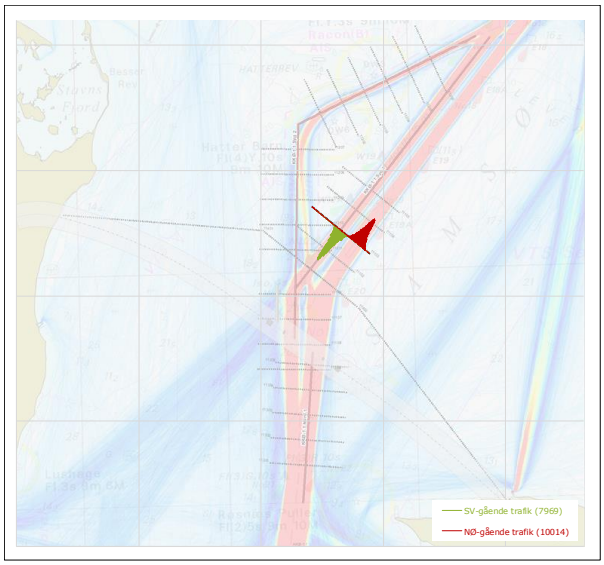
Skibenes geometriske fordeling i de nuværende ruter er inspiceret ved de definerede krydsningslinjer, og baseret på disse fordelinger er trafikkens variation omkring modelruterne beskrevet som normalfordelinger med følgende spredninger:

<u>Rute T, Sydgående ("KKØ-2.1 Syd 1")</u>
inden ruteknækket: σ = 150 m
op imod broen: σ = 150 m

<u>Dybvandsruten, Sydgående ("KKØ-2.1 Syd 2")</u>
inden ruteknækket: σ = 100 m
op imod broen: σ = 150 m

<u>Rute T, Nordgående ("KKØ-2.1 Nord 1")</u>
inden ruteknækket: σ = 220 m
op imod broen: σ = 120 m

Volumen og sammensætning af skibstrafikken er baseret på optællinger svarende til linjerne i Figur 5-11 til Figur 5-13. (Modelleringen af den sydgående trafik er baseret på optællingerne for KKØ-1.1, og derfor er Figur 5-11 og Figur 5-12 gentagelser af Figur 5-4 og Figur 5-5).



Samlet skibstrafik i 2018 - Linje 11103 (Rute 111 snit 03)

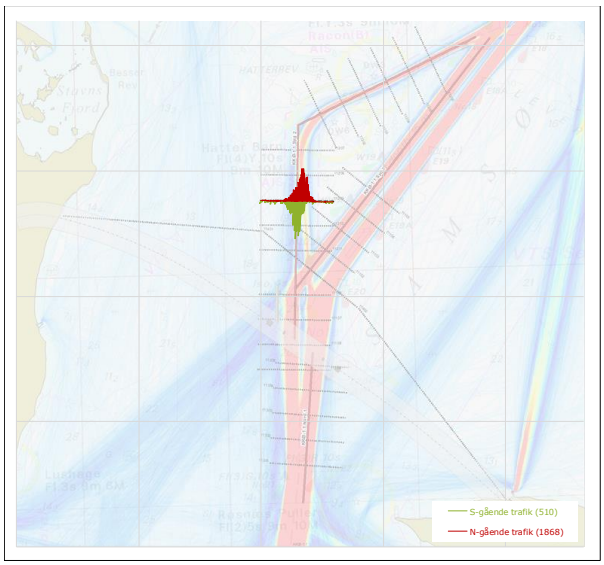
Fordeling på skibslængde (L_{OA})

SV-gående trafik			0 m 25 m	25 m 50 m	50 m 100 m	100 m 150 m	150 m 200 m	200 m 300 m	300 m 400 m
Erhvervstrafik	**7.864**	**99%**	62	304	1.592	1.768	2.070	1.944	124
Cargo	2.036	26%		3	1.241	471	287	33	1
Container	1.223	15%			1	208	639	330	45
Tanker	2.069	26%		4	167	911	407	575	5
Bulk	721	9%			34	51	468	167	1
Pass/RORO	1.180	15%	2	3	9	26	238	830	72
Fiskeri	23	0%	5	6	11		1		
Øvrige	612	8%	55	288	129	101	30	9	
Lystsejlads	**105**	**1%**	81	5	6	12			
Samlet	**7.969**		143	309	1.598	1.781	2.070	1.944	124

NØ-gående trafik			0 m 25 m	25 m 50 m	50 m 100 m	100 m 150 m	150 m 200 m	200 m 300 m	300 m 400 m
Erhvervstrafik	**9.923**	**99%**	37	298	1.537	1.809	4.315	1.777	150
Cargo	2.090	21%		2	1.170	526	358	33	1
Container	1.449	14%			4	252	829	307	56
Tanker	2.966	30%		4	212	809	1.691	232	18
Bulk	1.567	16%			30	80	1.149	308	
Pass/RORO	1.271	13%		2	6	38	263	887	75
Fiskeri	12	0%	5	3	2		1		
Øvrige	568	6%	31	287	113	104	24	9	
Lystsejlads	**91**	**1%**	67	3	8	13			
Samlet	**10.014**		104	301	1.545	1.821	4.315	1.777	150

Samlet trafik			0 m 25 m	25 m 50 m	50 m 100 m	100 m 150 m	150 m 200 m	200 m 300 m	300 m 400 m
Erhvervstrafik	**17.787**	**99%**	99	602	3.129	3.577	6.385	3.721	274
Cargo	4.126	23%		5	2.411	997	645	66	2
Container	2.672	15%			5	460	1.468	638	101
Tanker	5.035	28%		8	379	1.720	2.098	807	23
Bulk	2.288	13%			64	131	1.617	475	1
Pass/RORO	2.451	14%	2	5	15	64	501	1.717	147
Fiskeri	35	0%	10	9	13		2		
Øvrige	1.180	7%	86	574	241	205	55	18	
Lystsejlads	**196**	**1%**	148	8	15	25			
Samlet	**17.983**		247	610	3.143	3.602	6.385	3.721	274

Figur 5-11 Modelgrundlag for den sydgående trafik på Rute T ("KKØ-2.1 Syd 1")



Samlet skibstrafik i 2018 - Linje 11209 (Rute 112 snit 09)

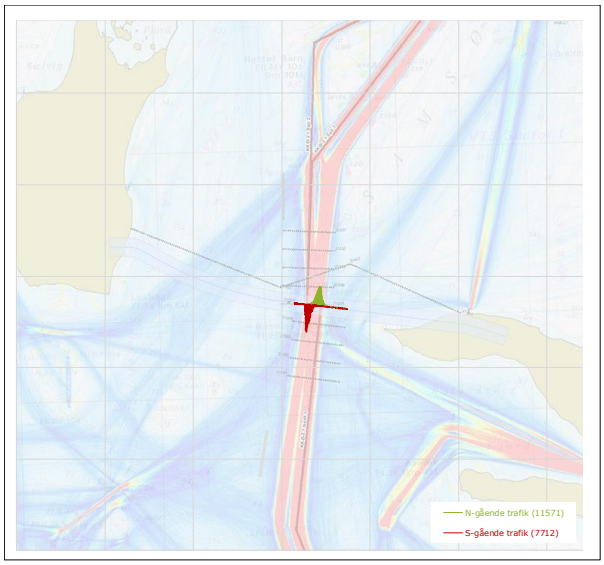
Fordeling på skibslængde (L_{OA})

S-gående trafik			0 m 25 m	25 m 50 m	50 m 100 m	100 m 150 m	150 m 200 m	200 m 300 m	300 m 400 m
Erhvervstrafik	**453**	**89%**		11	1	2	24	306	109
Cargo	9	2%				1	1	6	1
Container	110	22%					2	17	91
Tanker	156	31%					1	142	13
Bulk	161	32%					20	141	
Pass/RORO	3	1%		1					2
Fiskeri									
Øvrige	14	3%		10	1	1			2
Lystsejlads	**57**	**11%**	56	1					
Samlet	**510**		56	12	1	2	24	306	109

N-gående trafik			0 m 25 m	25 m 50 m	50 m 100 m	100 m 150 m	150 m 200 m	200 m 300 m	300 m 400 m
Erhvervstrafik	**1.838**	**98%**	5	8	4	4	106	1.643	69
Cargo	10	1%		1	1	1	1	5	1
Container	108	6%			2		2	38	67
Tanker	850	46%				2	27	820	1
Bulk	854	46%					76	778	
Pass/RORO	4	0%	1			1		2	
Fiskeri	1	0%	1						
Øvrige	11	1%	3	7	1				
Lystsejlads	**30**	**2%**	28	2					
Samlet	**1.868**		33	10	4	4	106	1.643	69

Samlet trafik			0 m 25 m	25 m 50 m	50 m 100 m	100 m 150 m	150 m 200 m	200 m 300 m	300 m 400 m
Erhvervstrafik	**2.291**	**96%**	5	19	5	6	130	1.949	178
Cargo	19	1%		1	1	2	2	11	2
Container	218	9%			2		4	55	158
Tanker	1.006	42%				2	28	962	14
Bulk	1.015	43%					96	919	
Pass/RORO	7	0%	1	1		1		2	2
Fiskeri	1	0%	1						
Øvrige	25	1%	3	17	2	1			2
Lystsejlads	**87**	**4%**	84	3					
Samlet	**2.378**		89	22	5	6	130	1.949	178

Figur 5-12 Modelgrundlag for den sydgående trafik på Dybvandsruten ("KKØ-2.1 Syd 2")



Samlet skibstrafik i 2018 - Linje 21305 (Rute 213 snit 05)

Fordeling på skibslængde (L_{OA})

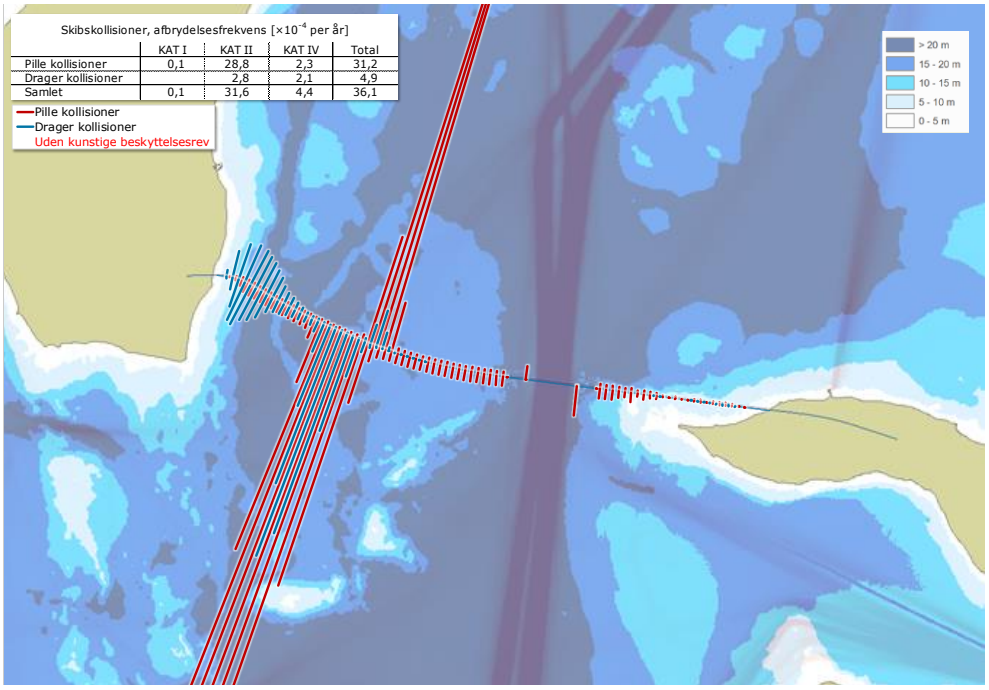
N-gående trafik			0 m 25 m	25 m 50 m	50 m 100 m	100 m 150 m	150 m 200 m	200 m 300 m	300 m 400 m
Erhvervstrafik	**11.417**	**99%**	178	319	1.260	1.730	4.340	3.397	194
Cargo	1.709	15%	1	10	816	479	363	38	2
Container	1.533	13%			4	236	854	342	96
Tanker	3.779	33%		3	197	799	1.719	1.042	19
Bulk	2.389	21%			14	80	1.222	1.073	
Pass/RORO	1.171	10%		3	6	37	156	893	76
Fiskeri	18	0%	11	3	2		1		
Øvrige	818	7%	166	299	220	99	25	9	
Lystsejlads	**154**	**1%**	131	7	4	12			
Samlet	**11.571**		309	326	1.264	1.742	4.340	3.397	194

S-gående trafik			0 m 25 m	25 m 50 m	50 m 100 m	100 m 150 m	150 m 200 m	200 m 300 m	300 m 400 m
Erhvervstrafik	**7.569**	**98%**	178	286	1.077	1.629	1.986	2.220	193
Cargo	1.440	19%		5	708	403	284	38	2
Container	1.309	17%			1	205	657	350	96
Tanker	2.118	27%		3	129	858	398	712	18
Bulk	856	11%			19	50	481	305	1
Pass/RORO	1.045	14%		3	4	23	135	806	74
Fiskeri	29	0%	10	6	12		1		
Øvrige	772	10%	168	269	204	90	30	9	2
Lystsejlads	**143**	**2%**	123	4	3	12			
Samlet	**7.712**		301	290	1.080	1.641	1.986	2.220	193

Samlet trafik			0 m 25 m	25 m 50 m	50 m 100 m	100 m 150 m	150 m 200 m	200 m 300 m	300 m 400 m
Erhvervstrafik	**18.986**	**98%**	356	605	2.336	3.359	6.325	5.618	387
Cargo	3.149	16%	1	15	1.524	882	647	76	4
Container	2.842	15%			5	441	1.510	693	193
Tanker	5.897	31%		6	326	1.657	2.117	1.754	37
Bulk	3.245	17%			33	130	1.703	1.378	1
Pass/RORO	2.216	11%		6	10	60	291	1.699	150
Fiskeri	47	0%	21	10	14		2		
Øvrige	1.590	8%	334	568	424	189	54	18	2
Lystsejlads	**297**	**2%**	254	12	8	24			
Samlet	**19.283**		610	617	2.344	3.383	6.325	5.618	387

Figur 5-13 Modelgrundlag for den nordgående trafik på Rute T ("KKØ-2.1 Nord 1")

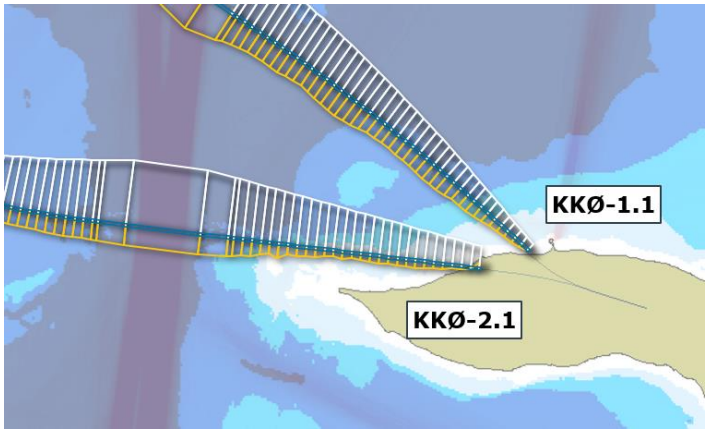
Resultatet af risikoberegningen uden de eksterne beskyttelsesrev er sammenfattet i Figur 5-14, og den estimerede afbrydelsesfrekvens på 36×10^{-4} per år er væsentligt over fravalgskriteriet på 9×10^{-4}. Fordelingen langs med broen markerer en fokuseret høj risiko for pillerne på både nord- og sydsiden af broen ca. halvvejs mellem hængebroen og Samsø. I begge tilfælde er der tale om bidrag fra KAT II kollisioner, der udspringer fra knækkene på Rute T nord og syd for korridoren. De koncentrerede risikobidrag for pylonerne er mindre end for KKØ-1.1 og er ikke markant større end den jævnt fordelte risiko langs hele broen fra KAT IV. Niveauet er lidt større på broens sydside end på nordsiden, hvilket skyldes at den nordgående trafik er større, at skibene er større og at de generelt er tungere lastede.



Figur 5-14 *Sammensætning og geografisk fordeling af risikoen for afbrydelse af* ***KKØ-2.1 uden ekstern beskyttelse****. De tabellerede resultater angiver frekvensen for afbrydelse med enheden [×10⁻⁴ pr år].*

Risikobidragene på pylonerne af KKØ-2.1 er markant mindre end for KKØ-1.1, og forklaringen herpå ligger i den skæve skæring, som korridoren KKØ-1.1 har med Rute T. Selvom brospændet for broløsningen i KKØ-1.1 er øget fra 1.630 m til 1.900 m for at kompensere for krydsningsvinklen på ca. 60°, er det altså ikke tilstrækkeligt til at pylonbidragene for KKØ-1.1 kommer ned på sammen niveau som for KKØ-2.1.

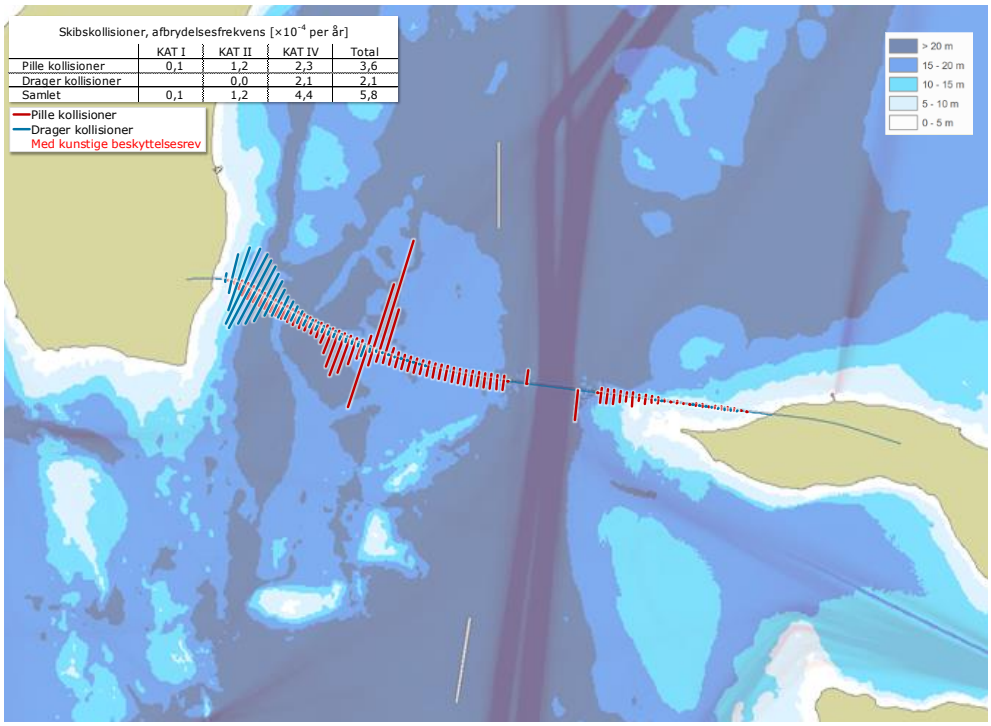
Kollisioner mod overbygningen sker kun inde mod land, hvor brodrageren er langt nok nede til at blive ramt af skibenes overbygning. Men her bidrager KAT IV kollisionerne ret betragteligt til risikoen. Hvor der for KKØ-1.1 var signifikante bidrag fra dragerkollisioner til risikoen ved begge landfæster, så ses bidragene ved det østlige landfæste af KKØ-2.1 at være negligerbart.



Figur 5-15 Illustration af vanddybde og dragerhøjde ved det østlige landfæste af KKØ-1.1 og KKØ-2.1.

Figur 5-15 illustrerer forskellene på de to korridorer og løsninger: KKØ-1.1 går mere ret ind på kysten og når derfor hurtigere ud til store vanddybder end KKØ-2.1, der løber mere parallelt med kysten. I tillæg ligger drageren på KKØ-2.1 højere ved landfæstet end for KKØ-1.1, så der skal større skibe til for at skibets overbygning kan nå drageren; og den begrænsede vanddybde i korridoren forhindrer disse skibe at nå frem til brolinjen.

Som for KKØ-1.1 vurderes undersøiske beskyttelsesrev at være en relevant foranstaltning for at beskytte broløsningen mod KAT II kollisioner. Placeringen og udstrækningen af sådanne rev for KKØ-2.1 er indikeret i Figur 5-9. Under forudsætning af, at revene standser alle skibe med en middeldybgang, der overstiger 4,5 m, sænkes det samlede risikoniveau med en faktor 6 fra 36×10^{-4} per år til 6×10^{-4} per år.



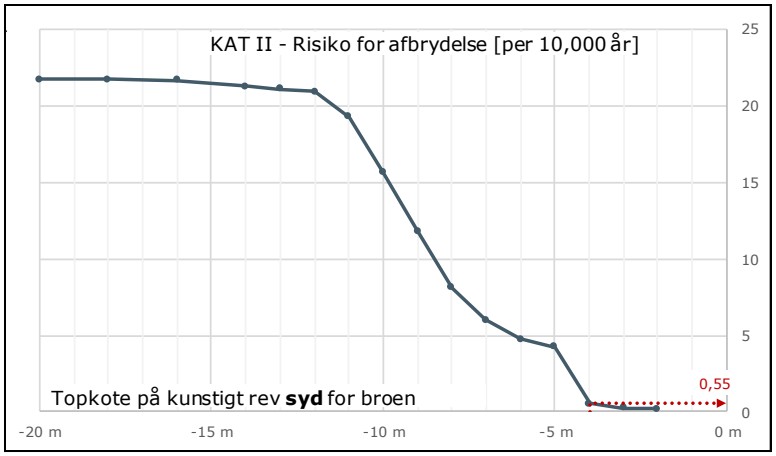
	KAT I	KAT II	KAT IV	Total
Pille kollisioner	0,1	1,2	2,3	3,6
Drager kollisioner		0,0	2,1	2,1
Samlet	0,1	1,2	4,4	5,8

*Figur 5-16 Sammensætning og geografisk fordeling af risikoen for afbrydelse af **KKØ-2.1 med ekstern beskyttelse**. De tabellerede resultater angiver frekvensen for afbrydelse med enheden [$\times10^{-4}$ pr år].*

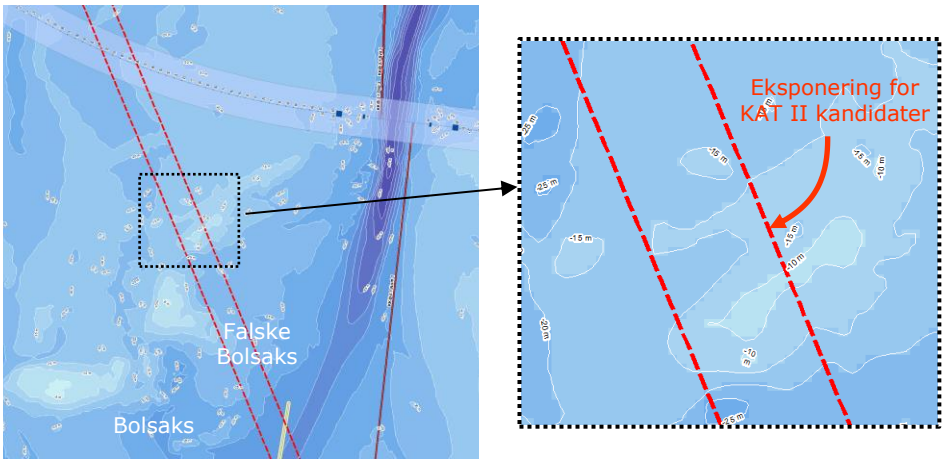
Den ændrede risikofordeling i Figur 5-16 viser stadig lokaliserede bidrag fra KAT II mellem hovedbroen og Samsø, men ellers er der opnået en jævn fordeling af risikoen i forhold til det ubeskyttede udgangspunkt.

Den tilbageværende risiko er primært fra KAT IV kollisioner (76%) og bidraget fra pillekollisioner udgør godt halvdelen. Siden bidraget fra kollision mod dragerne er lokaliseret inde mod kysten, kunne den begrænses ved at hæve brodækket og/eller ved at etablere kystnære beskyttelsesværker. Men en tilsvarende reduktion af risikobidraget for pillerne vil kræve forstærkning af eller lokale beskyttelsesværker ved alle piller, og vil derfor blive ekstremt bekostelig. Denne tilbageværende risiko er en direkte konsekvens af trafikkens størrelse i området og af de store vanddybder langs med korridoren, og karakteriserer dermed den undersøgte korridor.

Effekten af det kunstige beskyttelsesrev er illustreret i Figur 5-17 i form af den tilbageværende KAT II kollisionsrisiko som funktion af revets topkote. Den endeligt valgte topkote på -4 m, som svarer til at alle skibe med en middeldybgang over 4,5 m bliver standset, leder til en restrisiko på $0{,}55\times10^{-4}$ per år. Denne direkte sammenhæng imellem tilgængelig vanddybde og KAT II risiko giver mulighed for en approksimativ vurdering af betydningen af de naturlige rev syd for broen – se Figur 5-18.



Figur 5-17 Risikobidrag fra KAT II kollisioner sydfra som funktion af topkoten af det kunstige beskyttelsesrev.

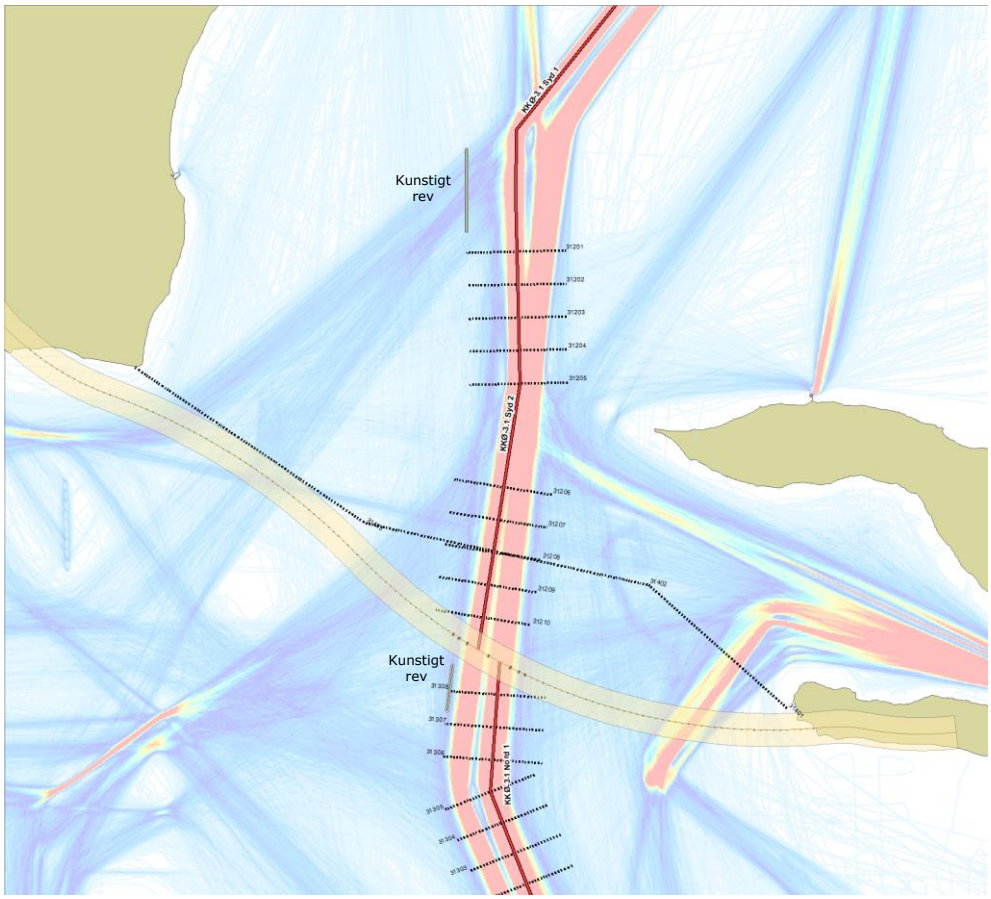


Figur 5-18 Batymetri omkring de naturlige rev Bolsaks og Falske Bolsaks med markering af området eksponeret for KAT II kollisioner sydfra.

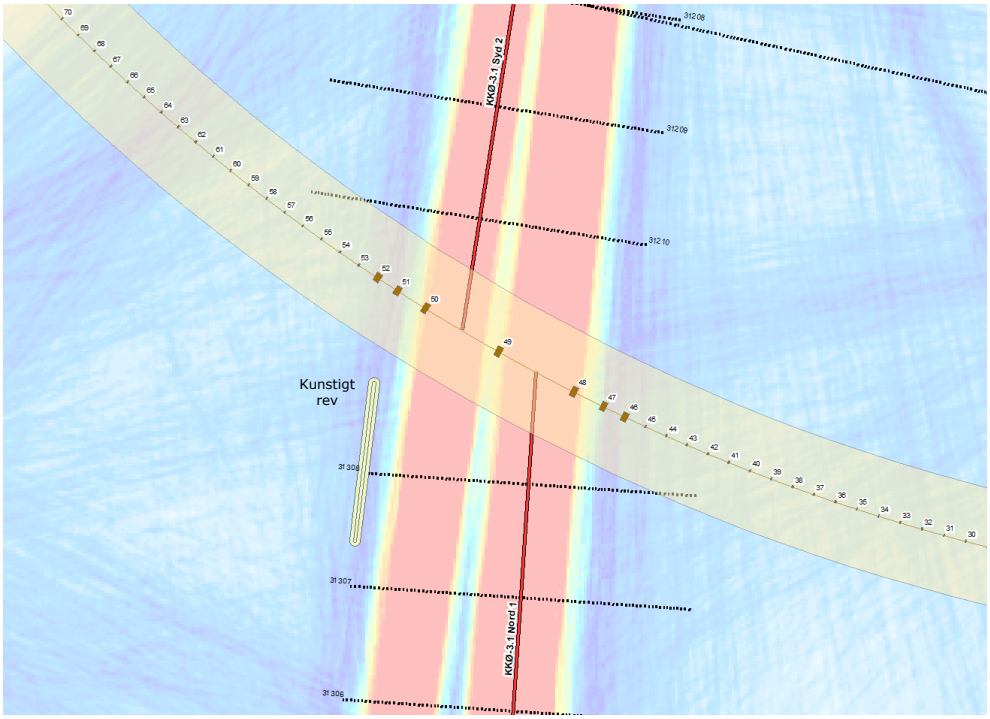
Den naturlige beskyttelse er ikke medtaget i risikobilledet vist i Figur 5-14 for situationen uden de kunstige rev, som vist på batymetrien i Figur 5-18 vil KAT II kollisionskandidater sydfra passere et område med en vanddybde, der er begrænset til 10-15 m. Kurven i Figur 5-17 viser, at selv hvis det naturlige rev antages at beskytte svarende til en vanddybde på 10 m, vil risikoen fra KAT II kollisioner sydfra overstige 15×10^{-4} per år. De naturlige rev giver dermed ikke tilstrækkelig beskyttelse og må erstattes eller eventuelt suppleres med et kunstigt beskyttelsesrev svarende til beskyttelsen sydfra antaget i Figur 5-16.

5.4.4 Model og resultater for KKØ-3.1

Den foreslåede broløsning for KKØ-3.1 er 27,5 km lang og består, som de øvrige løsninger, af en højbro med 200 m spændvidde og en hovedbro over Rute T. Denne løsning anvender en dobbelt skråstagsbro over Rute T med et spænd for hver gennemsejling på 750 m – se Figur 5-19. Broen er valgt svarende til at linjeføringen skærer Rute T i en vinkel på ca. 66°, hvilket giver et noget mindre effektivt brospænd – ca. 685 m – hvilket er en del mindre end den gennemsejlingsåbning på 724 m, som Femern A/S ville tage udgangspunkt i for en broløsning over Femern Bælt – se ref [6].



Figur 5-19 Model for broløsning i KKØ-3.1: Korridoren med en linjeføring placeret i midten, pilleplaceringer, geometri af ruterne hen mod broen, og krydsningslinjerne langs ruterne anvendt i analyse af skibstrafikken.



Figur 5-20 Geometri omkring gennemsejlingen og de definerede ruters passage af brolinjen.

Modelleringen af trafikken afviger fra de andre to modeller på to principielle punkter: 1) dybvandsruten ligger for nordligt til at KAT II kollisioner fra denne rute udgør en fare for broen, så denne rute er udeladt, og 2) knækket på Rute T ud for Røsnæs udgør en kilde til KAT II kollisioner, som vil ramme den østlige ende af hovedbroen. Denne KAT II risiko vil eksponere ankerpillen og overgangspillen på skråstagsbroen.

Et sydgående skib, der ikke ændrer kurs ved passage af Røsnæs Rev, vil gradvist trække over i den modsatte side af ruten og sejle ned mod broen i det modgående spor af Rute T. Det er derfor taget til indtægt, at hvis denne KAT II kandidat møder et modgående skib, kan dette skib – enten passivt ved sin fysiske tilstedeværelse, eller aktivt ved radioopkald eller signalgivning med horn – gøre KAT II kandidaten klar over sin fejl og foranledige at kursen bliver korrigeret. I værste fald kan situationen foranledige en kollision mod det modgående skib, hvorved kollisionen mod broen forhindres. Med den givne afstand fra ruteknækket til broen (8,9 km), en gennemsnitlig fart i trafikken på 15 knob og en modgående trafik svarende til ca. 10.000 passager per år, vil sandsynligheden for ikke at møde et modgående være 48%. Antages det at KAT II kollisionen vil blive afværget hvis skibet på afveje møder et eller flere modgående skibe inden broen, vil et KAT II scenarie kun lede til en kollision mod broen med en sandsynlighed på 48%.

Som de to andre korridorer er KKØ-3.1 eksponeret for KAT II kollisioner fra det nordlige knæk på Rute T ved Hatter Barn, og fra det sydlige knæk på Rute T umiddelbart syd for korridoren. Det overvejes at beskytte imod disse kollisioner med kunstige undersøiske rev nord og syd for korridoren som vist i Figur 5-19. Det fremgår af Figur 5-20, at det sydlige rev vil være klemt inde mellem Rute T's sydgående spor og korridoren; med den viste placering er revet kun 700 m fra centerlinjen af det sydgående spor. Med henvisning til Figur 4-3 vil

revet faktisk ligge indenfor den del af Rute T, der vil blive reguleret af trafikse-pareringen. Med den tætte placering op mod ruten vil revet være en fordelagtig skærm overfor eventuel tværgående trafik og andre forstyrrelser, der kunne kræve vige- og undvigemanøvrer af den sydgående trafik efter passage af broen. Revet vil omvendt udgøre en forhindring for undvigemanøvrer imellem sydgående skibe – f.eks. ved overhaling af et stort og langsomtgående skib. Men fordi revet udgør en begrænsning efter passage under broen og ikke før, og fordi ruten først knækker længere sydpå, udgør den tætte placering af revet ved KKØ-3.1 ikke samme kritiske begrænsning, som revet tæt inde ved KKØ-1.1.

Som for KKØ-1.1 og KKØ-2.1 placeres også et rev ved Rute T's knæk nord for korridoren. Dette er 2.500 m langt, mens det sydlige rev pga. den klemte place-ring kun er 1.400 m langt. Begge rev har en kronebredde på 30 m.

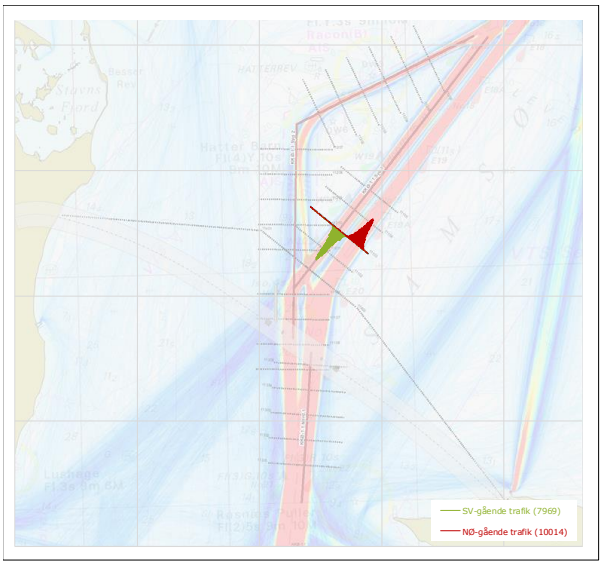
Skibenes geometriske fordeling i de nuværende ruter er inspiceret ved krydsningslinjerne indikeret i Figur 5-19 og Figur 5-20 samt på de krydsningslinjer, der er etableret for de øvrige to beregningsmodeller. Baseret på de observerede fordelinger er trafikkens variation omkring modelruterne beskrevet som normal-fordelinger med følgende spredninger:

<u>Rute T, Sydgående via det nordlige knæk ("KKØ-3.1 Syd 1")</u>
inden ruteknækket: σ = 150 m
op imod broen: σ = 200 m
NB: denne rute modellerer kun KAT II kollisioner

<u>Rute T, Sydgående forbi Røsnæs ned til broen ("KKØ-3.1 Syd 2")</u>
inden Røsnæs Rev: σ = 150 m
op imod broen: σ = 180 m

<u>Rute T, Nordgående ("KKØ-3.1 Nord 1")</u>
op imod broen: σ = 220 m

Volumen og sammensætning af skibstrafikken er baseret på optællinger sva-rende til linjerne vist i Figur 5-21 til Figur 5-23. (Den sydgående trafik på Rute T før rutens knæk er baseret på samme data som for KKØ-1.1 og derfor er Figur 5-21 en gentagelse af Figur 5-4.)



Samlet skibstrafik i 2018 - Linje 11103 (Rute 111 snit 03)

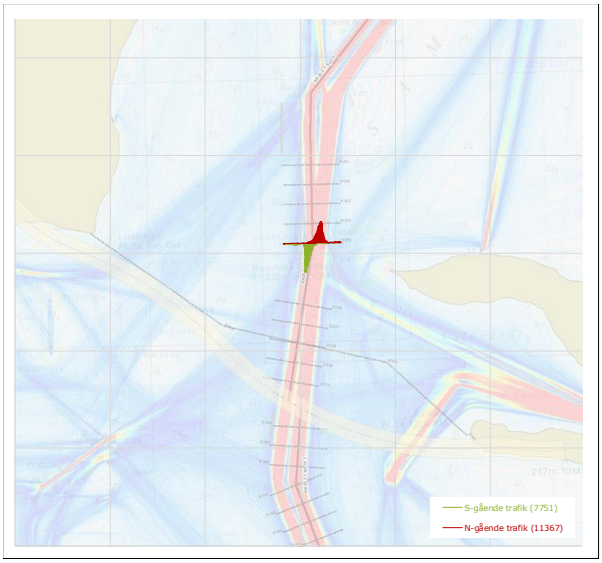
Fordeling på skibslængde (L_{OA})

SV-gående trafik			0 m – 25 m	25 m – 50 m	50 m – 100 m	100 m – 150 m	150 m – 200 m	200 m – 300 m	300 m – 400 m
Erhvervstrafik	**7.864**	**99%**	62	304	1.592	1.768	2.070	1.944	124
Cargo	2.036	26%		3	1.241	471	287	33	1
Container	1.223	15%			1	208	639	330	45
Tanker	2.069	26%		4	167	911	407	575	5
Bulk	721	9%			34	51	468	167	1
Pass/RORO	1.180	15%	2	3	9	26	238	830	72
Fiskeri	23	0%	5	6	11		1		
Øvrige	612	8%	55	288	129	101	30	9	
Lystsejlads	**105**	**1%**	81	5	6	12			
Samlet	**7.969**		143	309	1.598	1.781	2.070	1.944	124

NØ-gående trafik			0 m – 25 m	25 m – 50 m	50 m – 100 m	100 m – 150 m	150 m – 200 m	200 m – 300 m	300 m – 400 m
Erhvervstrafik	**9.923**	**99%**	37	298	1.537	1.809	4.315	1.777	150
Cargo	2.090	21%		2	1.170	526	358	33	1
Container	1.449	14%			4	252	829	307	56
Tanker	2.966	30%		4	212	809	1.691	232	18
Bulk	1.567	16%			30	80	1.149	308	
Pass/RORO	1.271	13%		2	6	38	263	887	75
Fiskeri	12	0%	5	3	2		1		
Øvrige	568	6%	31	287	113	104	24	9	
Lystsejlads	**91**	**1%**	67	3	8	13			
Samlet	**10.014**		104	301	1.545	1.821	4.315	1.777	150

Samlet trafik			0 m – 25 m	25 m – 50 m	50 m – 100 m	100 m – 150 m	150 m – 200 m	200 m – 300 m	300 m – 400 m
Erhvervstrafik	**17.787**	**99%**	99	602	3.129	3.577	6.385	3.721	274
Cargo	4.126	23%		5	2.411	997	645	66	2
Container	2.672	15%			5	460	1.468	638	101
Tanker	5.035	28%		8	379	1.720	2.098	807	23
Bulk	2.288	13%			64	131	1.617	475	1
Pass/RORO	2.451	14%	2	5	15	64	501	1.717	147
Fiskeri	35	0%	10	9	13		2		
Øvrige	1.180	7%	86	574	241	205	55	18	
Lystsejlads	**196**	**1%**	148	8	15	25			
Samlet	**17.983**		247	610	3.143	3.602	6.385	3.721	274

Figur 5-21 Modelgrundlag for den sydgående trafik på Rute T før knækket ("KKØ-3.1 Syd 1")



Samlet skibstrafik i 2018 - Linje 31205 (Rute 312 snit 05)

Fordeling på skibslængde (L_{OA})

S-gående trafik			0 m – 25 m	25 m – 50 m	50 m – 100 m	100 m – 150 m	150 m – 200 m	200 m – 300 m	300 m – 400 m
Erhvervstrafik	**7.647**	**99%**	163	280	1.087	1.667	2.006	2.250	193
Cargo	1.485	19%		3	743	411	287	39	2
Container	1.318	17%			1	211	660	350	96
Tanker	2.156	28%		3	138	874	409	714	18
Bulk	863	11%			20	51	484	307	1
Pass/RORO	1.073	14%		3	6	24	135	831	74
Fiskeri	22	0%	3	6	12		1		
Øvrige	730	9%	160	265	167	95	31	9	2
Lystsejlads	**104**	**1%**	83	4	3	13			
Samlet	**7.751**		247	285	1.090	1.680	2.006	2.250	193

N-gående trafik			0 m – 25 m	25 m – 50 m	50 m – 100 m	100 m – 150 m	150 m – 200 m	200 m – 300 m	300 m – 400 m
Erhvervstrafik	**11.249**	**99%**	132	297	1.159	1.732	4.340	3.396	193
Cargo	1.672	15%	1	10	778	481	362	38	2
Container	1.531	13%			5	234	854	341	96
Tanker	3.781	33%		3	197	800	1.720	1.042	19
Bulk	2.392	21%			14	80	1.223	1.075	
Pass/RORO	1.166	10%		3	4	37	156	890	76
Fiskeri	10	0%	4	3	2		1		
Øvrige	697	6%	127	278	159	99	25	9	
Lystsejlads	**118**	**1%**	96	6	4	11			
Samlet	**11.367**		228	303	1.163	1.743	4.340	3.396	193

Samlet trafik			0 m – 25 m	25 m – 50 m	50 m – 100 m	100 m – 150 m	150 m – 200 m	200 m – 300 m	300 m – 400 m
Erhvervstrafik	**18.896**	**99%**	295	577	2.246	3.398	6.347	5.646	387
Cargo	3.157	17%	1	13	1.521	892	649	77	4
Container	2.849	15%			6	446	1.513	691	193
Tanker	5.937	31%		6	335	1.674	2.129	1.756	37
Bulk	3.255	17%			34	131	1.707	1.382	1
Pass/RORO	2.239	12%		6	10	61	291	1.721	150
Fiskeri	32	0%	7	9	14		2		
Øvrige	1.427	7%	287	543	326	195	56	19	2
Lystsejlads	**222**	**1%**	179	11	7	25			
Samlet	**19.118**		475	588	2.254	3.423	6.347	5.646	387

Figur 5-22 Modelgrundlag for den sydgående trafik på Rute T ("KKØ-3.1 Syd 2")

Samlet skibstrafik i 2018 - Linje 31305 (Rute 313 snit 05)

Fordeling på skibslængde (L_{OA})

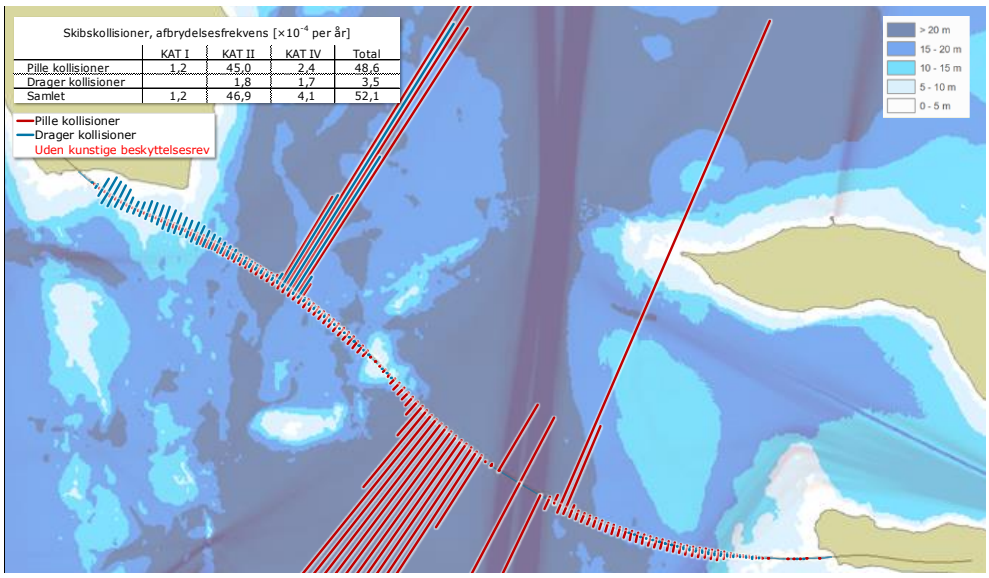
N-gående trafik			0 m – 25 m	25 m – 50 m	50 m – 100 m	100 m – 150 m	150 m – 200 m	200 m – 300 m	300 m – 400 m
Erhvervstrafik	**10.167**	**99%**	68	215	772	1.415	4.218	3.285	193
Cargo	1.361	13%		18	527	423	353	38	2
Container	1.598	16%			4	335	829	335	96
Tanker	3.247	32%		1	136	462	1.667	962	19
Bulk	2.339	23%			9	73	1.189	1.068	
Pass/RORO	1.151	11%			4	38	160	873	76
Fiskeri	21	0%	14	3	3		1		
Øvrige	450	4%	54	193	90	84	20	10	
Lystsejlads	**110**	**1%**	88	5	5	11			
Samlet	**10.277**		156	220	777	1.426	4.218	3.285	193

S-gående trafik			0 m – 25 m	25 m – 50 m	50 m – 100 m	100 m – 150 m	150 m – 200 m	200 m – 300 m	300 m – 400 m
Erhvervstrafik	**6.660**	**98%**	76	253	896	1.258	1.855	2.130	190
Cargo	1.347	20%		21	670	342	272	40	2
Container	1.289	19%				228	625	339	97
Tanker	1.629	24%		1	93	536	349	632	18
Bulk	808	12%			19	42	445	301	1
Pass/RORO	1.045	15%		2	7	22	135	809	70
Fiskeri	30	0%	8	8	14		1		
Øvrige	512	8%	69	222	94	88	28	10	2
Lystsejlads	**126**	**2%**	105	3	4	13			
Samlet	**6.786**		182	256	901	1.271	1.855	2.130	190

Samlet trafik			0 m – 25 m	25 m – 50 m	50 m – 100 m	100 m – 150 m	150 m – 200 m	200 m – 300 m	300 m – 400 m
Erhvervstrafik	**16.827**	**99%**	144	468	1.669	2.673	6.074	5.416	384
Cargo	2.708	16%		39	1.197	765	625	78	4
Container	2.887	17%			4	562	1.454	673	194
Tanker	4.876	29%		2	229	998	2.016	1.594	37
Bulk	3.147	18%			28	115	1.634	1.369	1
Pass/RORO	2.196	13%		2	11	60	295	1.682	146
Fiskeri	51	0%	22	10	16		3		
Øvrige	962	6%	122	415	183	172	48	20	2
Lystsejlads	**236**	**1%**	194	8	9	24			
Samlet	**17.063**		338	476	1.678	2.697	6.074	5.416	384

Figur 5-23 Modelgrundlag for den nordgående trafik på Rute T ("KKØ-3.1 Nord 1")

Resultatet af risikoberegningen uden effekten af de eksterne beskyttelsesrev er illustreret i Figur 5-24 og den estimerede afbrydelsesfrekvens på 52×10^{-4} per år antyder, at denne løsning har helt særlige udfordringer. Godt halvdelen af denne risiko (36×10^{-4}) skyldes KAT II kollisioner sydfra og mens KAT II hændelser nordfra tilsammen udgør knap en fjerdedel af den samlede risiko. I forhold til KKØ-2.1 er bidraget fra KAT I kollisioner mod hovedbroen noget forhøjet, mens risikobidraget fra KAT IV kollisioner er af samme størrelse.

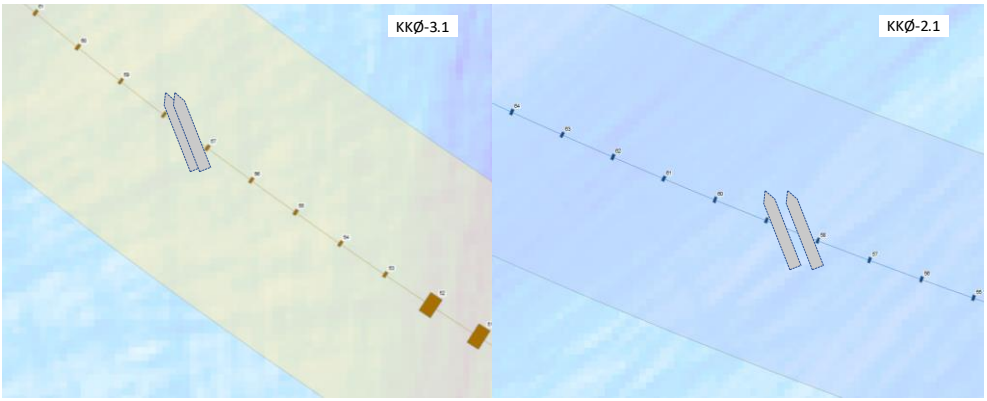


Skibskollisioner, afbrydelsesfrekvens [$\times10^{-4}$ per år]

	KAT I	KAT II	KAT IV	Total
Pille kollisioner	1,2	45,0	2,4	48,6
Drager kollisioner		1,8	1,7	3,5
Samlet	1,2	46,9	4,1	52,1

*Figur 5-24 Sammensætning og geografisk fordeling af risikoen for afbrydelse af **KKØ-3.1 uden ekstern beskyttelse**. De tabellerede resultater angiver frekvensen for afbrydelse med enheden [$\times10^{-4}$ pr år].*

Det højere KAT II bidrag sydfra kan i nogen udstrækning skyldes den kortere afstand fra knækket hen til broen; det giver en mindre sandsynlighed for at skibet genvinder opmærksomheden. En anden årsag til forskellen er, at vinklen imellem linjeføringen og KAT II kandidaternes retning er mindre for KKØ-3.1, og det har betydning for hvor stor en åbning, der er imellem pillerne. Figur 5-25 illustrerer betydningen af den forholdsvis lille forskel vinklen for KKØ-3.1 og KKØ-2.1: det samme størrelse skib har på KKØ-3.1 en væsentligt mindre åbning imellem pillerne end på KKØ-2.1. Og det vil afspejle sig i en højere beregnet risiko for KKØ-3.1.

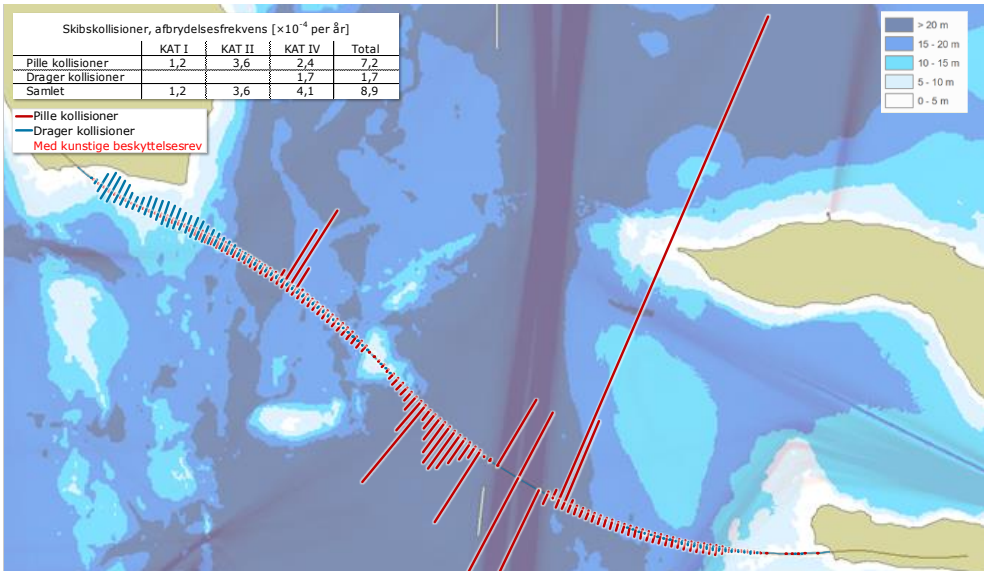


Figur 5-25 Betydningen af vinklen imellem det kolliderende skib og linjeføringen. Den mindre vinkel for KKØ-3.1 giver mindre åbning, som skibet kan komme igennem.

En anden konsekvens af den lille vinkel imellem skibets kollisionskurs og linjeføringen er, at skibet rammer pillen i den strukturelt svage retning, hvor en kollision vil give anledning til større skade. I den anvendte beregningsmodel er pillens kapacitet overfor en kollision vinkelret på linjeføringen antaget at gælde for alle kollisionsretninger, så skadeestimatet for de skæve KAT II kollisioner er generelt undervurderet for alle korridorer.

Det større KAT I bidrag for KKØ-3.1 skyldes, at der med en skråstagsbro med to separate navigationsfag er flere eksponerede komponenter på hovedbroen (3 pyloner) og at de er placeret tættere på skibstrafikken, end ved en hængebro med et enkelt stort gennemsejlingsfag.

Det vurderes muligt at beskytte broen med undersøiske rev for KAT II kollisioner fra det sydlige og nordlige knæk på Rute T, men ikke fra det lille knæk ved Røsnæs Rev. Under forudsætning af, at de kunstige rev standser alle skibe med en middeldybgang, der overstiger 4,5 m, sænkes det samlede risikoniveau med over 80% til 9×10^{-4} per år - se oversigten i Figur 5-26. KAT II bidragene langs den sydlige side af den vestlige højbro er tydeligt modereret, og det er nu primært bidraget for KAT II kollisioner på de to første almindelige piller øst for hovedbroen, der dominerer risikobilledet.



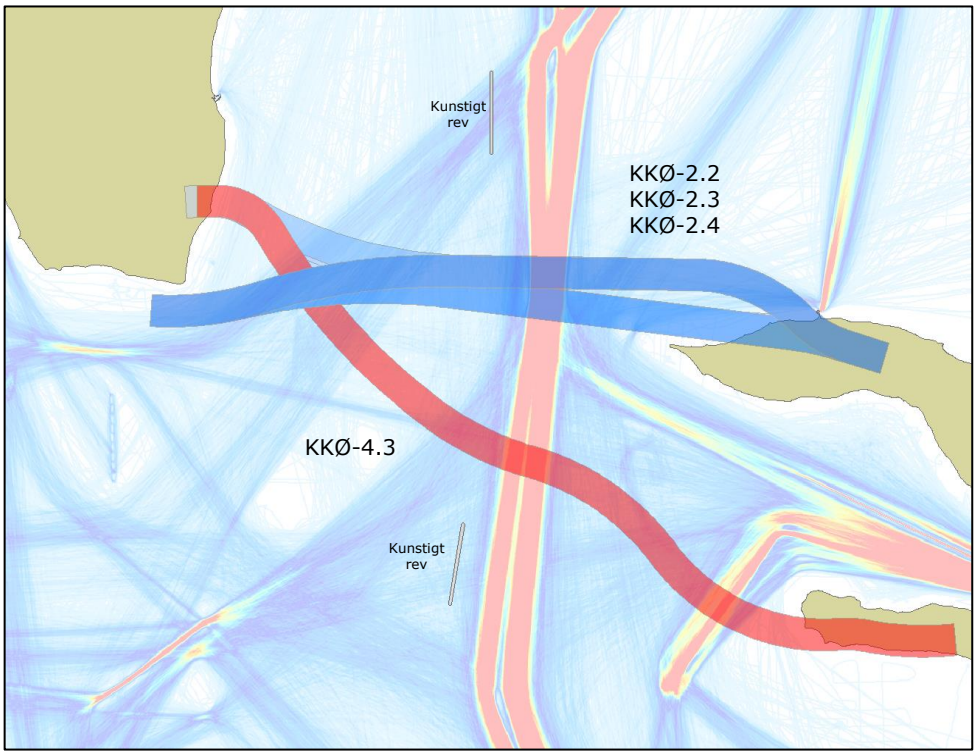
Figur 5-26 *Sammensætning og geografisk fordeling af risikoen for afbrydelse af* ***KKØ-3.1 med ekstern beskyttelse****. De tabellerede resultater angiver frekvensen for afbrydelse med enheden [×10⁻⁴ pr år].*

Knækket på Rute T ved Røsnæs Rev, der giver et lidt uventet bidrag til KAT II risikoen nordfra, findes kun på det sydgående spor; det nordgående spor er retlinet mellem det nordlige og sydlige knæk på Rute T. Vanddybderne langs Rute T på denne strækning kunne give mulighed for at rette de to spor, så det alene bliver det nordgående spor, der har et knæk. Det lokale KAT II bidrag for KKØ-3.1 vil dermed blive elimineret. Men inden dette overvejes bør det undersøges, om dette lokalt store KAT II bidrag er en reel fare eller blot repræsenterer en lidt for stringent og systematisk anvendelse af de (teoretiske) risikomodeller. Alternativt kunne de 2-3 mest udsatte piller øst for hovedbroen beskyttes af et rev eller med lokaliserede beskyttelsesøer nord for brolinjen.

5.5 Risikoevaluering af øvrige korridorer og løsninger

5.5.1 Rene broløsninger

De kvantitative beregninger for de tre udvalgte korridorer og de tilhørende broløsninger forudser en risiko for afbrydelse på grund af skibskollision, der er stor sammenholdt med de relevante referenceprojekter. For alle tre korridorer og tilhørende broløsninger vil reduktion af risikoen nødvendiggøre eksterne beskyttelsesværker, der i art og navnlig omfang er usædvanlige, og som ikke tidligere er set anvendt til sikring af en fast forbindelse. Af de ikke beregnede korridorer og tilhørende rene broløsninger – se Figur 5-27 – er de 3 (KKØ-2.2, KKØ-2.3 og KKØ-2.4) umiddelbart ækvivalente med KKØ-2.1. I forhold til skibstrafikken og kollisionsrisikoen afviger korridorerne ubetydeligt og alle løsninger anvender samme broløsning – en højbro med 200 m spænd og en central hængebro over Rute T. Kollisionsrisikoen vurderes derfor at være den samme som beregnet for KKØ-2.1.



Figur 5-27 KKØ-korridorer med tilhørende rene broløsninger, hvor kollisionsrisikoen ikke er specifikt beregnet med en kvantitativ analysere.

Den sidste korridor (KKØ-4.3) ligger længere mod syd (mellem KKØ-2.1 og KKØ-3.1) og anvender en dobbelt skråstagsbro over Rute T. I relation til sejladsforhold og kollisionsrisiko er løsningen sammenlignelig med KKØ-3.1. Korridorens forløb vest for Rute T går længere nordover end KKØ-3.1 og det giver en mindre vinkel imellem KAT II kollisioner sydfra og korridoren, og som illustreret for KKØ-3.1 giver det en større eksponeret flade af pillerne og dermed en større kollisionsrisiko. I modsætning til KKØ-3.1 giver KKØ-4.3 god plads til at indlægge et eksternt beskyttelsesrev overfor KAT II kollisioner sydfra, og risikobidraget herfra forventes dermed at blive let reduceret i forhold til KKØ-3.1. Som vist i Figur 4-3 giver KKØ-4.3 plads til et mere hensigtsmæssigt arrangement af trafikken omkring trafikseparationen, men dette arrangement vil være i konflikt

med den i Figur 5-27 viste placering af det sydlige beskyttelsesrev. Revet må derfor rykkes længere mod nordvest for at give plads til det forudsatte trafikarrangement.

Baseret på den kvalitative sammenligning af korridorerne vurderes kollisionsrisikoen for de resterende korridorer med rene broløsninger til:

Korridor med ren broløsning	frekvens for afbrydelse
KKØ-2.2, KKØ-2.3, KKØ-2.4	~6×10^{-4} per år
KKØ-4.3	~7×10^{-4} per år

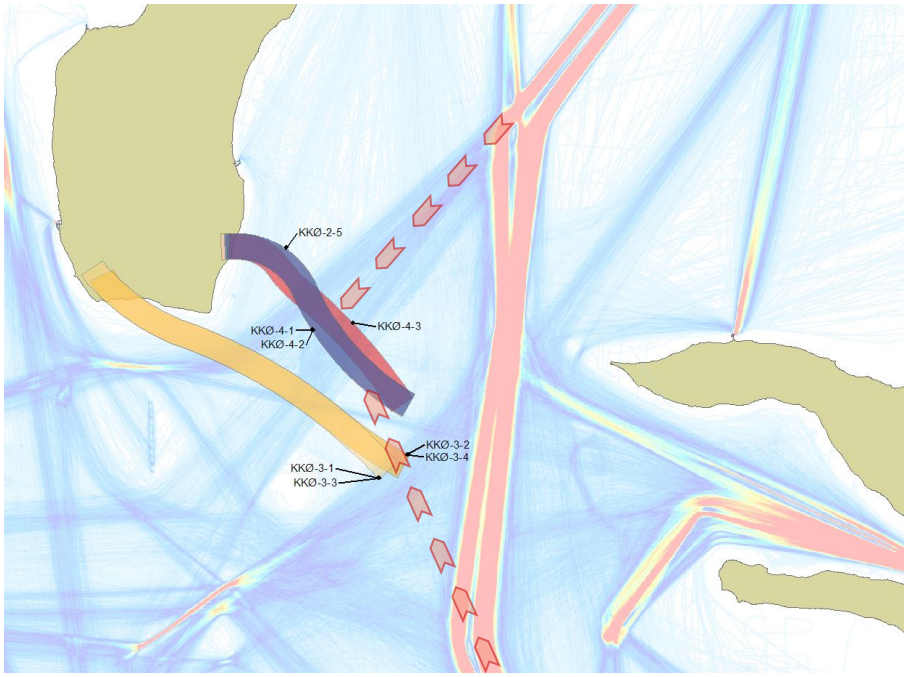
Disse risikoniveauer er under forudsætning af, at der anlægges de omtalte eksterne beskyttelsesværker (rev) til beskyttelse imod KAT II kollisioner med samme effekt, som for de beregnede rene broløsninger.

5.5.2 Kombinerede bro- og tunnelløsninger

De kombinerede bro- og tunnelløsninger forudsætter alle en boret eller en sænketunnel under Rute T, imellem Sjælland og en kunstig ø enten ved Bolsaks eller ved Falske Bolsaks. Efter øen overgår løsningerne til en lavbro med 100 m spænd ind mod Samsø. Med de foreslåede placeringer af en kunstig ø vil lavbroen for alle korridorer være fuldt eksponeret for KAT II kollisioner fra det nordlige knæk på Rute T, men kun delvist eksponeret for KAT II kollisioner fra det sydlige knæk – se Figur 5-28. Med et spænd, der kun er halvt så stort som for de rene broløsninger, med en generelt lavere frihøjde under brodrageren, og med en kollisionskapacitet af pillerne, der er mindre end de 130 MN antaget for de rene broløsninger, vil risikoen for afbrydelse forbundet med disse KAT II kollisioner blive (væsentligt) højere for disse lavbroer, end beregnet for den samme strækning af de rene broløsninger. Det samme vil gøre sig gældende for bidraget fra KAT IV kollisioner.

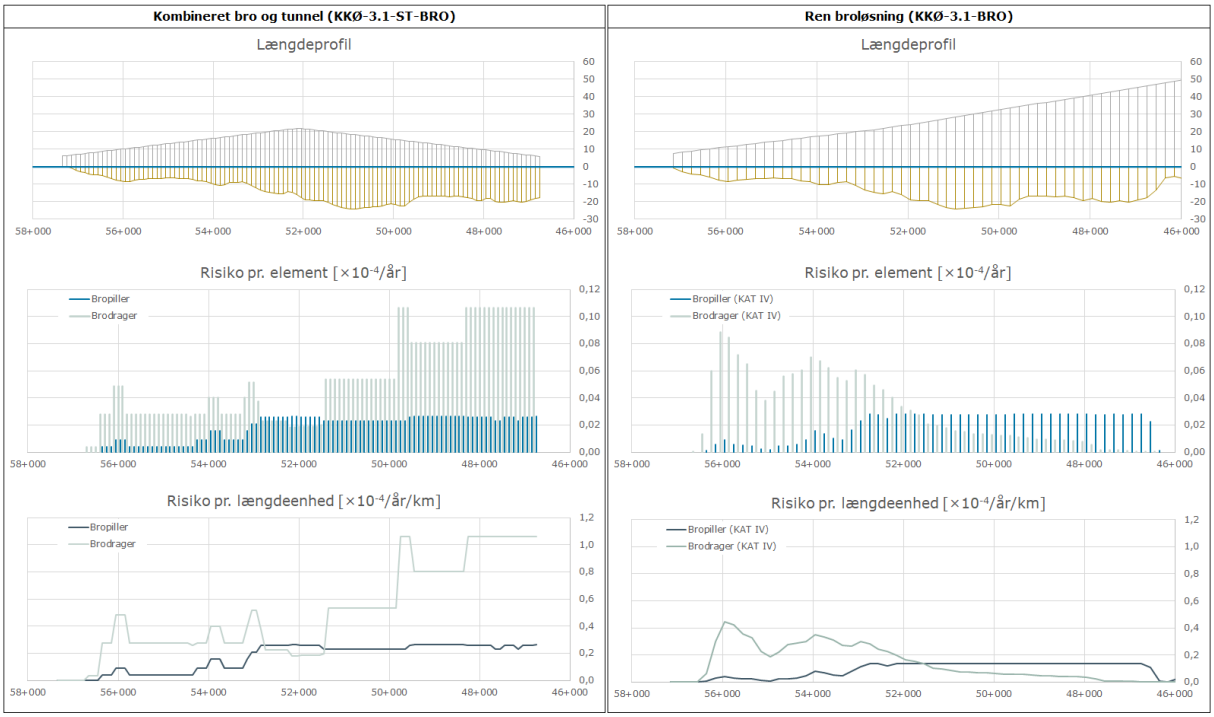
Lavbroen vil være eksponeret for Kategori II kollisioner nordfra, i begrænset omfang fra Kategori II kollisioner sydfra, og for Kategori IV kollisioner både nord- og sydfra. Risikoen fra Kategori IV kollisioner forventes at være dominerende på grund af den lavere dragerhøjde med en lavbro.

Ved en systematisk generalisering af Kategori IV analyseresultaterne for de rene broløsninger beskrevet i afsnit 5.4 er der skabt grundlag for en approksimativ beregning af risikoen, der afspejler lavbroens mindre pilleafstand, den mindre frihøjde under drageren og de faktiske vanddybder langs med korridoren. Estimatet tager ikke højde for, at kollisionskapaciteterne for piller og dragere for lavbroen vil være mindre end for højbroen. Risikoen vil dermed blive underestimeret med approksimationen i forhold til en fuldt detaljeret risikoberegning af lavbroerne.



Figur 5-28 Eksponering af brodelen af kombinerede bro- og tunnelløsninger for kollisioner af skibe, der ikke drejer ved knækkene på Rute T.

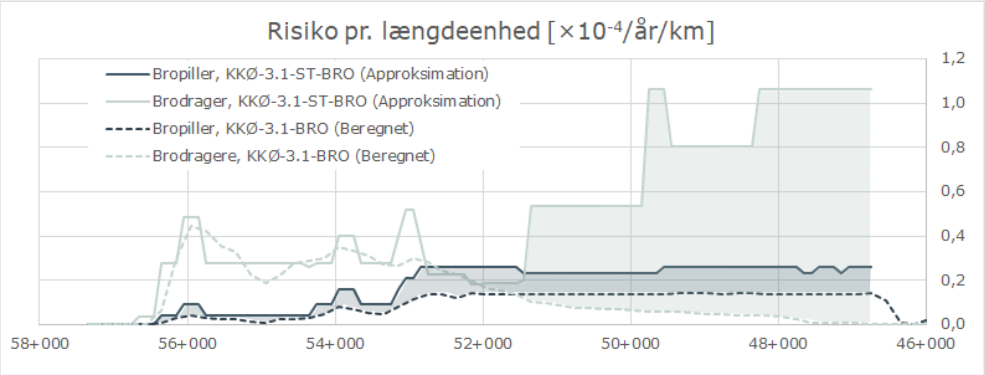
Risikobidraget for bropillerne stiger fra kysten ved Samsø i takt med den stigende vanddybde, og stabiliseres ved st 53+000, hvor vanddybden ikke længere forhindrer nogen skibe at nå frem til broen. Med de gjorte simplificerende antagelser i den approksimative beregning vil risikoen for en pille på samme stationering være den samme for de to løsninger. Ved sammenligning af niveauet og variationen af pillernes risikobidrag ses den approksimative beregning af lavbroen at reproducere resultatet fra den detaljerede beregning af højbroen med god nøjagtighed. For det samlede risikobidrag for pillerne vil den væsentligste forskel på de to løsninger dermed skyldes, at der er dobbelt så mange piller på lavbroen og samlede risiko for pillerne vil dermed blive dobbelt så stor.



Figur 5-29 Resultat af den approksimative estimering af KAT IV risiko for brodelen i en kombineret løsning (KKØ-3.1-ST-BRO) til venstre. Den beregnede KAT IV risiko for en ren broløsning (KKØ-3.1) i samme del af korridoren, er vist til højre til sammenligning.

Resultaterne for risikoen per dragersektion i Figur 5-29 kan ikke sammenlignes direkte, idet dragerne på lavbroen kun er halvt så lange som på højbroen, hvorved risikoen pr. drager alene derfor vil være halvt så stor. Ses bort fra denne forskel i risikoniveauet ses den approksimative beregning – indenfor den valgte diskretisering – at fange de væsentligste variationer i risikoen for højbroen mellem Samsø og til gennemsejling ved st 52+000. Herefter divergerer resultaterne markant, fordi lavbroens drager skal ned til den kunstige ø, mens højbroen fortsat stiger ud mod hovedbroen over Rute T. Risikoen per. drager når et maksimalt niveau på den sidste kilometer af lavbroen inden den kunstige ø. Men siden den approksimative metode er baseret på resultater fra analysen af de tre fulde broløsninger, og da disse løsninger ikke omfatter lave dragersegmenter over så dybt vand, er risikoen for denne del af lavbroen baseret på ekstrapolation af approksimationens basis, og vil sandsynligvis være underestimeret.

Omregnes risikoen per pille og per drager til en risiko per længdeenhed, kan resultaterne for de to beregninger sammenlignes direkte – se Figur 5-30. Sammenligningen underbygger, at den approksimative beregning fanger risikovariationen i den detaljerede beregning for højbroen med rimelig nøjagtighed. Arealet under kurverne i Figur 5-30 repræsenterer den samlede risiko, og de systematiske forskelle imellem lav- og højbroens kurver, der er skraveret i Figur 5-30, indikerer hvor meget lavbroens risiko overstiger højbroens: knapt en faktor 2 for pillerne og en faktor 3 for dragerne.



Figur 5-30 *Sammenligning af risikoen pr. længdeenhed for lavbroen (KKØ-3.1-ST-BRO) og højbroen (KKØ-3.1-BRO). De skraverede områder indikerer hvor lavbroens risiko er systematisk større end højbroens.*

Akkumulering af KAT IV risikoen indenfor lavbroens del af korridoren, er sammenlignet for de to løsninger i Tabel 5-2. Denne sammenligning tager ikke højde for at lavbroen ikke kan/vil have samme robusthed overfor kollisioner, som højbroen, og at risikoen for lavbroen dermed vil være en nedre-værdi.

Tabel 5-2 *Samlet KAT IV kollisionsrisiko for lavbroen i KKØ-3.1-ST-BRO, baseret på en approksimativ nedre-værdi, sammenholdt med risikoen for højbroen i KKØ-3.1-BRO i den samme del af korridoren.*

KAT IV risikobidrag	Lavbro KKØ-3.1-ST-BRO	Højbro KKØ-3.1-BRO	Forhold
Bropiller	1,8	1,0	1,8
Brodragere	5,3	1,6	3,4
Samlet	7,1	2,6	2,8

Der er ikke samme enkle grundlag for generalisering af resultaterne for KAT II kollisioner, og som en simpel approksimation, der alene tager højde for at pilleafstanden er halvt så stor, antages Kategori II risikoen for lavbroen at være dobbelt så stor som for højbroen i den rene broløsning. Dette estimat medtager hverken betydningen af en lavere kollisionskapacitet for lavbroen eller at Kategori II kollisioner for lavbroen også kan medføre dragerkollisioner. Så denne approksimation vil dermed også underestimere kollisionsrisikoen for lavbroen.

Taget i betragtning af, at lavbroen kun omfatter ca. 1/3 af korridorens samlede længde og at der også for disse lavbroer forudsættes anlagt et kunstigt rev nord for korridoren, som beskyttelse imod Kategori II kollisioner fra sydgående skibe, er de approksimative resultater for risikoen vist i Tabel 5-3 ganske betydelige i forhold til den beregnede risiko for de rene broløsninger. Estimaterne i Tabel 5-3 er anført med ">" da de vides at undervurderer den risiko, en detaljeret modellering af disse lavbroer ville give.

Tabel 5-3 Approksimative estimater for frekvensen af afbrydelse pga. skibskollisioner for 4 kombinerede løsninger.

Korridor og løsning	Frekvens for afbrydelse [$\times 10^{-4}$ per år]			
	KAT I	KAT II	KAT IV	Total
KKØ-3.1 ST BRO	-	>1,1	>7,0	>8,1
KKØ-3.2 BT BRO	-	>1,1	>7,2	>8,2
KKØ-3.3 ST BRO	-	>1,1	>7,5	>8,6
KKØ-3.4 BT BRO	-	>1,1	>7,8	>8,8

Foruden risikoen for broen, er den kunstige ø, der skal etableres i den østlige ende af de viste korridorafsnit, eksponeret for KAT II kollisioner fra det sydlige knæk på Rute T. Disse kollisioner eller grundstødninger vil foregå i lille vinkel med linjeføringen, og vil dermed kunne grundstøde på øen nærmest parallelt med tunneldelen. Denne eksponering udgør en risiko for en sænketunnel, der kun vil være beskyttet af grusfyld og stenbeskyttelse. Kraften fra et stort og lastet tank-, bulk- eller containerskib, der grundstøder direkte oven over tunneltaget, vil blive betragtelig og sandsynlig prohibitivt at designe for. Så en ekstern beskyttelse med et kunstigt beskyttelsesrev, som foreslået for de rene broløsninger, vurderes at være nødvendig af hensyn til tunnelen, men potentielt også af hensyn til den bagvedliggende lavbro.

Baseret på ovenstående diskussion og den approksimative (lavt) estimerede risiko for brodelen af de fire kombinerede løsninger bro- og tunnelløsninger, skønnes risikoen for afbrydelser for de kombinerede løsninger til:

Korridor med delvis broløsning	**frekvens for afbrydelse**
KKØ-3.1, KKØ-3.2, KKØ-3.3, KKØ-3.4	>9×10^{-4} per år
KKØ-2.5, KKØ-4.1, KKØ-4.2, KKØ-4.3	>9×10^{-4} per år

Disse risikoniveauer er under forudsætning af, at der anlægges de omtalte eksterne beskyttelsesværker (rev) til beskyttelse imod KAT II kollisioner nord for korridoren med samme effekt, som antaget for de rene broløsninger.

5.6 Varsling

De estimerede frekvenser af kollisioner, der kan forårsage en afbrydelse af forbindelsen, vil være forbundet med en uacceptabel høj risiko for tab af menneskeliv, hvis ikke trafikken på broen kan varsles og evakueres fra den truede del af broen, før kollisionen. Kontinuert overvågning af skibstrafikken er en forudsætning for at kunne varsle af trafikken på broen og er derfor forudsat for alle løsninger – se afsnit 2. Foruden overvågningen kræver varsling tillige, at et muligt kollisionsscenarie kan detekteres via et sejladsforløb, der afviger tilstrækkeligt fra det normalt forventelige, og/eller fordi kommunikationen med skibet giver anledning til at forvente/frygte en kollision. Og denne detektion skal kunne gøres i tilstrækkelig tid før kollisionen til at effektuere evakuering af den truede del af broen.

Beregningsmodellens tre kategorier af kollisioner giver meget forskelligt grundlag for varsling. KAT I kollisioner opstår ved fejl og afvigelser i umiddelbar nærhed af gennemsejlingsåbningen, og den korte afstand imellem skib og konstruktion giver typisk ikke grundlag for varsling i tide. KAT II kollisioner kan detekteres ved at den forventede kursændring ikke foretages, og hvis afstanden imellem punktet for den forventede kursændring og broen tilstrækkelig stor, kan varsling være mulig. Endelig vil den sejlads, der leder til en KAT IV kollision, samt et eventuelt kendskab til situationen ombord via radiokommunikation eller mangel på samme, give overvågningen flere indikationer, der kan anvendes til at iværksætte varsling og evakuering. En stærk indikator vil være, at skibet er langt fra de sædvanlige sejladsområder, så det vurderes generelt muligt at varsle KAT IV kollisioner, der sker langt fra broens gennemsejling og langt fra sædvanlige ruteforløb i broens nærhed.

Muligheden for varsling vurderes dermed at være bedst for KAT II kollisioner, hvor der er stor afstand imellem ruteknækket og kollisionsstedet på broen, samt for KAT IV kollisioner, der rammer broen langt fra gennemsejlingen og langt fra andre sædvanlige ruteforløb.

Anvendes betingelserne for varsling på Østbroen over Storebælt som minimum – dvs. at der skal kunne varsles når skibet er 3 kilometers sejlads fra broen – viser de omtrentlige afstande i Tabel 5-4, at varsling ikke er mulig for KAT II kollisioner mod KKØ-1.1 for sydgående trafik på Rute T.

Tabel 5-4 Afstand fra ruteknæk på Rute T hen til korridoren for rene broløsninger.

Korridor med ren broløsning	Kategori II kollisioner udgående fra Rute T	
	Sydgående trafik	Nordgående trafik
KKØ-1.1 Rute T Dybvandsruten	1,5 km 9 km	25 km
KKØ-2.1	8 km	15 km
KKØ-3.1	13 km	6 km
KKØ-4.3	10 km	13 km

Hvis den større længde af en broløsning for KKØ skulle betinge, at varslingen skal initieres tidligere end det er nødvendigt på Østbroen over Storebælt, kunne KKØ-3.1 med en afstand på 6 km og KKØ-2.1 med en afstand på 8 km tillige blive kritiske i forhold til varsling af KAT II kollisioner.

Muligheden for varsling af KAT IV kollisioner vurderes at have de bedste betingelser for KKØ-1.1. Der vil være meget begrænset trafik omkring broen udenfor Rute T, og derfor vil skibe, der ikke holder sig i Rute T, skabe opmærksomhed og beredskab for overvågningen. Trafikken til og fra Kalundborg vil forløbe langs med den østlige del af KKØ-2.1, KKØ-3-1 og KKØ-4.3, og et skib, der kunne forårsage en KAT IV kollision mod den østlige del af broen, vil dermed kunne overses som en del af denne sædvanlige trafik.

Endelig vil trafikken til og fra vestlige destinationer (Fredericia, Lillebælt, Vejle) passere langs med den vestlige del af KKØ-3.1 og delvis langs med KKØ-4.3, og denne trafik vil tilsvarende kunne sløre identifikation af et KAT IV scenarie. Samlet vurderes KKØ-1.1 at have de bedste betingelser for varsling imod KAT IV kandidater, dernæst kommer KKØ-2.1 med ikke-optimale betingelser på den østlige del og sidst kommer KKØ-3.1 og til dels også KKØ-4.3 med udfordringer på både den østlige og vestlige del.

5.7 Sammenfatning af kollisionsrisiko

De analyserede løsninger er i første beregning, hvor effekten af eksterne beskyttelsesrev ikke er medtaget, estimeret at have en risiko for afbrydelser, der er en størrelsesorden over de værdier, der sædvanligvis betragtes som acceptable for tilsvarende bygværker. De endelige resultater, hvor effekten af foreslåede beskyttelsesværker er medtaget, er nærmere et sædvanligt accepteret niveau.

Men forudsætningen om at etablere de usædvanligt store beskyttelsesværker på dybt vand giver i sig selv anledning til at tildele løsningerne en forhøjet projektrisiko. Der er ikke tidligere er gjort erfaringer med beskyttelse af denne form og i dette omfang, så der udestår en del arbejde med at påvise beskyttelsens effektivitet, tilstrækkelighed og pålidelighed førend løsningerne med de nødvendige beskyttelsesværker kan konkluderes realisable. Endelig vil disse store eksterne rev være årsag til grundstødninger, der ellers ikke ville være forekommet. De mulige følger heraf – forsinkelser for skibstrafikken, skader på skibene og spild af last eller brændstof til havmiljøet – skal medtages i den samlede vurdering af den valgte korridor og løsning.

Den beregnede afbrydelsesfrekvens for en ren broløsning i KKØ-3.1 forudsætter at anker- og overgangspillerne på den dobbelte skråstagsbro kan udformes eller gives ydre beskyttelse, så de har samme modstandsevne overfor kollisioner, som skråstagsbroens pyloner. Forudsætningen vurderes dermed at indebære en projektrisiko, hvis det ikke viser sig muligt at eftervise en tilstrækkelig og tilstrækkelig pålidelig modstandsevne for disse piller. Det vil imidlertid være muligt at erstatte skråstagsbroen med en hængebro, som forudsat ved broløsningerne i KKØ-1.1 og KKØ-2.1, for derved at opnå en mere robust hovedbro. KKØ-3.1 er derfor ikke tilskrevet yderligere projektusikkerhed pga. de gjorte forudsætninger om anker- og overgangspillernes kollisionskapacitet.

Muligheden for at varsle trafikken på broen før en kollision indtræffer er diskuteret i afsnit 5.6 og den resulterende kvalitative evaluering er medtaget i den samlede evaluering af de estimerede kollisionsfrekvensers betydning for projektrisikoen.

Tabel 5-5 sammenfatter de beregnede og vurderede afbrydelsesfrekvenser, som følge af skibskollisioner, for de betragtede korridorer og deres broløsninger. Ved sammenligning af frekvenserne med det i afsnit 5.3 motiverede fravalgskriterie på 9×10^{-4} per år, med tillæg grundet nødvendigheden af omfattende ekstern beskyttelse og eventuelle udfordringer for varsling før kollision, er løsningernes samlede evaluering omsat til en projektrisiko.

Tabel 5-5 Kollisionsrisiko for KKØ-korridorer med løsninger helt eller delvist baseret på brokonstruktioner og afledt projektrisiko.

Korridor og løsning	Beregnet eller vurderet risiko for skibsstød samt vurdering af betingelserne for varsling	Evaluering
KKØ-1.1 Bro	Beregnet afbrydelsesfrekvens: 8×10^{-4} per år Varsling KAT II: stærkt udfordret KAT IV: bedst mulig	Forhøjet til uacceptabel projektrisiko
KKØ-2.1 Bro KKØ-2.2 Bro KKØ-2.3 Bro KKØ-2.4 Bro	Beregnet afbrydelsesfrekvens: 6×10^{-4} per år Vurderet afbrydelsesfrekvens: $\sim6\times10^{-4}$ per år Vurderet afbrydelsesfrekvens: $\sim6\times10^{-4}$ per år Vurderet afbrydelsesfrekvens: $\sim6\times10^{-4}$ per år Varsling KAT II: god KAT IV: let udfordret	Forhøjet projektrisiko
KKØ-3.1 Bro	Beregnet afbrydelsesfrekvens: 9×10^{-4} per år Varsling KAT II: god KAT IV: udfordret	Forhøjet til uacceptabel projektrisiko
KKØ-4.3 Bro	Vurderet afbrydelsesfrekvens: $\sim7\times10^{-4}$ per år Varsling KAT II: god KAT IV: udfordret	Forhøjet projektrisiko
KKØ-3.1 Bro+ST KKØ-3.2 Bro+BT KKØ-3.3 Bro+ST KKØ-3.4 Bro+BT	Estimeret afbrydelsesfrekvens: $>9\times10^{-4}$ per år Estimeret afbrydelsesfrekvens: $>9\times10^{-4}$ per år Estimeret afbrydelsesfrekvens: $>9\times10^{-4}$ per år Estimeret afbrydelsesfrekvens: $>9\times10^{-4}$ per år	Forhøjet til uacceptabel projektrisiko
KKØ-2.5 Bro+BT KKØ-4.1 Bro+BT KKØ-4.2 Bro+BT KKØ-4.3 Bro+ST	Estimeret afbrydelsesfrekvens: $>9\times10^{-4}$ per år Estimeret afbrydelsesfrekvens: $>9\times10^{-4}$ per år Estimeret afbrydelsesfrekvens: $>9\times10^{-4}$ per år Estimeret afbrydelsesfrekvens: $>9\times10^{-4}$ per år	Forhøjet til uacceptabel projektrisiko

"Bro": ren broløsning, "Bro+ST": bro og sænketunnel, "Bro+BT": bro og boret tunnel

6 Sammenfatning

Tabel 6-1 giver en sammenfattet evaluering af sejladsforholdenes og kollisionsrisikoens betydning for projektrisikoen. Siden løsningsrummet for udfordringer i sejladsforholdene vurderes at blive begrænset ved samtidige udfordringer med kollisionsrisikoen – og omvendt – er sammenfatningen af de to vurderede forhold gjort additiv. Så den samlede evaluering for projektet vil være værre end eller lig med evalueringen for hvert forhold.

Tabel 6-1 Samlet projektrisiko baseret på navigationsforhold og kollisionsrisiko for KKØ-korridorer med løsninger helt eller delvist baseret på brokonstruktioner.

Korridor og løsning	Projektrisiko baseret på Sejladsforhold	Projektrisiko baseret på Kollisionsrisiko	Samlet projektrisiko
KKØ-1.1 Bro	Forhøjet til uacceptabel	Forhøjet til uacceptabel	Uacceptabel
KKØ-2.1 Bro KKØ-2.2 Bro KKØ-2.3 Bro KKØ-2.4 Bro	Acceptabel	Forhøjet	Forhøjet
KKØ-3.1 Bro	Forhøjet til uacceptabel	Forhøjet til uacceptabel	Uacceptabel
KKØ-4.3 Bro	Acceptabel	Forhøjet	Forhøjet
KKØ-3.1 Bro+ST KKØ-3.2 Bro+BT KKØ-3.3 Bro+ST KKØ-3.4 Bro+BT	Acceptabel	Forhøjet til uacceptabel	Forhøjet til uacceptabel
KKØ-2.5 Bro+BT KKØ-4.1 Bro+BT KKØ-4.2 Bro+BT KKØ-4.3 Bro+ST	Acceptabel	Forhøjet til uacceptabel	Forhøjet til uacceptabel

"Bro": ren broløsning, "Bro+ST": bro og sænketunnel, "Bro+BT": bro og boret tunnel

7 Referencer

[1] "Indledende Linjeføringsovervejelser for en Kattegatforbindelse, Delrapport", COWI for Vejdirektoratet, Sund & Bælt, Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, marts 2020.

[2] "Indledende Linjeføringsovervejelser for en Kattegatforbindelse", "Skibskollision – Supplerende overvejelser", Fagnotat, ", COWI for Vejdirektoratet, Sund & Bælt, Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, marts 2020.

[3] "Skibskollisioner, Grundlag og Beregninger", A/S Storebælt, COWI rapport, Dok. Nr. A054212-007, 2016-05-27

[4] "Opdatering af model for Skibe der glemmer at dreje", A/S Storebælt, COWI notat, Dok. Nr. A054212-067, 2019-07-30

[5] "Skibskollisionsundersøgelser. Vurdering af indtrufne hændelser", A/S Storebælt, COWI rapport, Dok. Nr. A054212-030, 2016-05-27

[6] "Foretrukken teknisk løsning til VVM-processen – Femern A/S' anbefaling" 25. November 2010 (4 sider)

[7] Bilag 3 – Sejladssikkerhed, Trafikudvalget 2010-11, TRU alm. del Bilag 87 (Offentligt), 25. November 2010. (9 sider)

[8] Femern Bælt A/S, *Fehmarnbelt Fixed Link – Bridge Design, Ship Collision Risk – Risk Assessment*, January 2010, COWI Report, Doc No. A4429-C-P-REP-20-055, Rev 0.1, 29 Jan 2010.

[9] Femern Bælt A/S, *Fehmarnbelt Fixed Link – Bridge Design, Ship Collision Risk – Arrangements*, January 2010, COWI Report, Doc No. A4429-C-P-REP-20-052, Rev 0.1, 27 Jan 2010.