

SUND & BÆLT HOLDING A/S

ADRESSE COWI A/S
Parallelvej 2
2800 Kongens LyngbyKATTEGATFORBINDELSE - KYST-KYST
ANLÆGSTEKNISKE FORUNDERSØGELSER

TLF +45 56 40 00 00

FAX +45 56 40 99 99

WWW cowi.dk

SUPPLERENDE UNDERSØGELSER AF LØSNINGER MED KUN ÉT JERNBANESPOR

FAGNOTAT

INDHOLD

1	Indledning	2
2	Broer	2
2.1	Brodrager med trafik i to niveauer	2
2.2	Brodrager med trafik i ét niveau	6
2.3	Brolejer	8
2.4	Bropiller	13
3	Tunneler	14
3.1	Tunnellers drifts- og sikkerhedsforhold	14
3.2	Tunnellers tværsnit	18
3.3	Sænkettunneller anlægsteknik	19
3.4	Borede tunneller anlægsteknik	21
4	Drift og Vedligehold	21
5	Sammenfatning	22
6	Referencer	22

BILAG

Bilag A Brolejer

PROJEKTNR.

A134385

DOKUMENTNR.

A134385-A-NOT-009

VERSION

1.0

UDGIVELSES DATO

20. december 2021

BESKRIVELSE

UDARBEJDET

TSH, TOOL, SSO

KONTROLLERET

PTR

GODKENDT

PTR

1 Indledning

Jernbaneforbindelse over Kattegat kan anlægges med 1 eller 2 jernbanespor, eller en kombination med f.eks. ét spor øst for Samsø og to spor vest for Samsø. I Baggrundsrapporten [1] er brotværnsnit vist for løsninger med 1 og 2 spor. Løsninger med 2 spor er taget fra referenceprojekter. For løsninger med 1 spor findes der meget få referenceprojekter og udformninger er derfor skitseret op i forundersøgelserne for en Kattegatforbindelse baseret på referenceprojekter. For Boret tunnellsøsningerne er kun jernbaneløsninger med 2 spor beskrevet i Baggrundsrapporten [1].

Nærværende notat har til formål at supplere beskrivelsen i baggrundsrapporten omkring mulige udformninger af bro- og tunnellsøsninger med 1 spor samt baggrunden for broløsningerne.

Anlægsoverslagene i [1] er udarbejdet for både 1 og 2 spor.

- > For broløsninger baseret på enhedspriser gange areal af vej og bane.
- > For tunnellsøsningerne er anlægsoverslag baseret på tværsnitstyper, mængder og længder.

For yderligere beskrivelse af bro- og tunnellsøsninger, samt anlægsoverslag, se Baggrundsrapporten [1] og fagnotat *Enhedspriser for broer baseret på mængder* [2] .

2 Broer

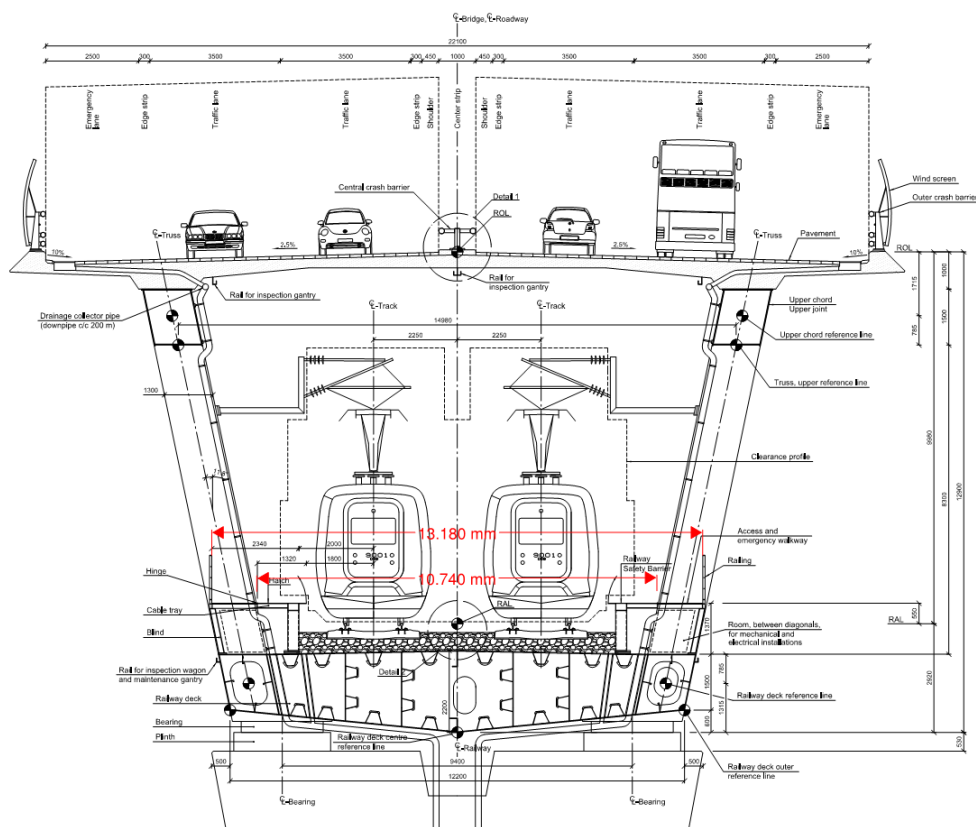
I det følgende er foretaget en optegning af brotværnsnit og evaluering af banebredde anvendt i anlægsoverslag i [1]. For bjælkebroer er der foretaget en indledende meget grov dimensionering af overbygningen, se fagnotat *Enhedspriser for broer baseret på mængder* [2]. Derudover er der kun foretaget strukturelle beregninger for nuværende mht. brolejer.

2.1 Brodrager med trafik i to niveauer

Broløsninger mellem Sjælland og Samsø inkluderer hængebro eller skråstagsbro over T ruten, af hensyn til skibstrafikken, samt tilslutningsbroer med 200m faglængde. Når der skal jernbane over sådanne broer opnås den økonomisk mest gunstig anlægspris ved at udforme overbygningen som en gitterdrager med vejtrafik øverst og tog nederst.

2.1.1 To spor

Eksempel på brotværnsnit for tilslutningsbroer med 2 spor er vist i Figur 2-1. Samme principielle udformning af tværsnit anvendes for hovedfagene (hængebro eller skråstagsbro), men her udformes øverste dæk til vej i stål i stedet for beton for at spare vægt.



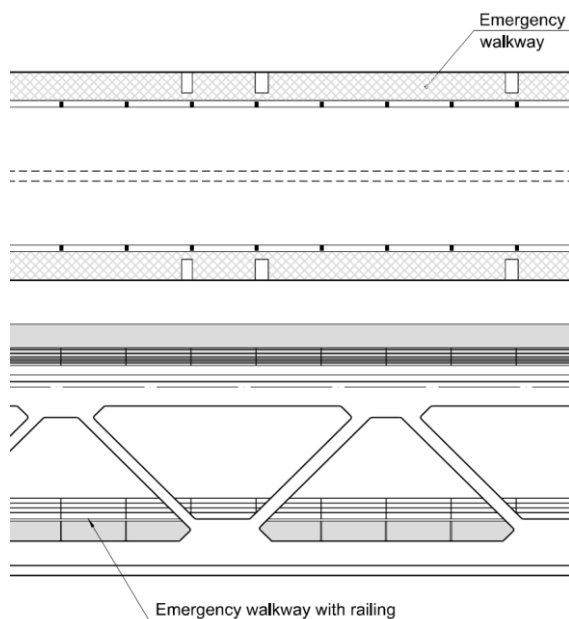
Figur 2-1 Højbro med trafik i to niveauer, 2 spor (eksempel fra Femernbælt koncept-design)

Baggrunden for denne udformning er:

- Dragerhøjde bestemt af spændvidden på 200 m ($d/L = 12,9/200 = 1/15,5$);
- Vejdæk udformet i beton da hovedparten af topflangen er i tryk for globale langsgående momenter (fag monteres simpelt understøttet og størstedelen af egenvægten giver derfor kun positive momenter);
- Jernbanedæk udformet i stål da hovedparten af bundflangen er i træk for globale langsgående momenter og det lokale langsgående spænd mellem gitterknudepunkter er i overkanten til en løsning med tværbjælker og betontrug som på Øresundsbroen;
- Betondæk optimeret med areal bestemt af behov for langsgående bæreevne og anvendelse af forspænding i tværretningen til at sikre tværgående bæreevne;
- Ståldæk optimeret med minimumsbredde for at reducere tværgående effekter og størrelse af bropille. Dette betyder at platforme til evakuering forløber delvis mellem gitterdiagonaler;
- Skrå gitterplaner hældende ca. 12 grader fra lodret for at reducere bredde af ståldæk og samtidigt optimere understøtningspunkter af betondæk.

I anlægsoverslagene i Baggrundsrapporten [1] anvendes en konstant bredde af bane på 12,3 m for 2 spor for alle broløsninger. De 12,3 m svarer til Storebælt Vestbro (mellem rækværker) eller Øresund (indre mål mellem gitterplaner).

Tilsvarende bredde for Femernbælt konceptdesign med 2 spor er 10,74 m indre mål mellem gitterplaner i niveau med platform og 13,18 m mellem rækværker for platform, se Figur 2-1. Her kan diskuteres hvor stor en del af platformarealet der skal regnes med i banearealet, da dele af platforme beliggende imellem gitterdiagonalerne er afbrudt ved hver nedre gitterknode, se Figur 2-2, og desuden kun er belastet med en lille last fra fodgængere. Derfor er også anvendt bredde af bane på 12,3 m for dette tværsnit svarende til lidt over gennemsnittet af to mål mellem gitterplaner og rækværker, som er $(10,74+13,18)/2=12,0$ m.

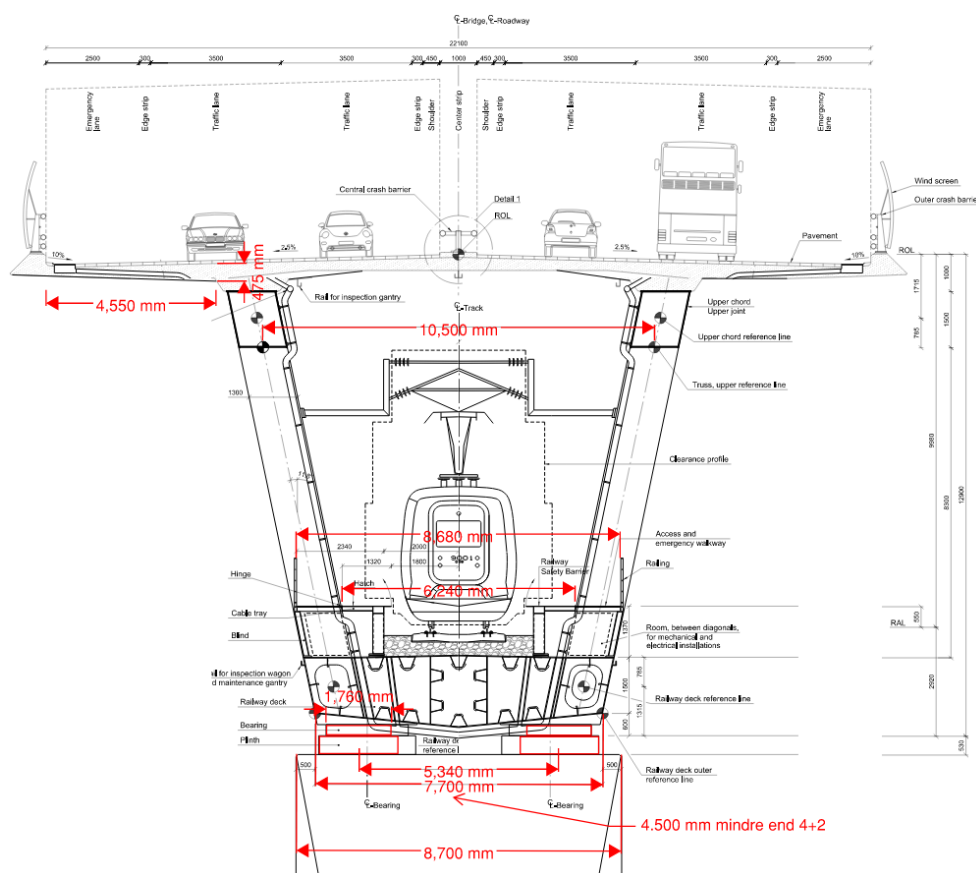


Figur 2-2 Platform til evakuering, plan (øverst) og opstalt (nederst), 2 spor (eksempel fra Femernbælt konceptdesign)

Det bemærkes, at kun den del af platformareal vist i Figur 2-2 hvor frihøjden under diagonalerne er større end 2 m kan anvendes til nødfortov.

2.1.2 Ét spor

Anlægsoverslaget i Baggrundsrapporten for en 1-sporet løsning er baseret på et tilsvarende 2-etagers brotværsnit som skitseret i Figur 2-3.



Figur 2-3 Højbro med trafik i to niveauer, ét spor og minimumsbredde nedre dæk

Afstanden fra centerlinje spor til gitterplan og bredden af nødplatforme er uændret i forhold til løsning med 2 spor, og dermed opfylder dette tværsnit samme funktionskrav som løsningen med 2 spor.

Bredden af nedre dæk og bropille er reduceret med 4,5 m i forhold til løsning med 2 spor. Afstanden mellem lejer er tilsvarende reduceret og med kun ca. 5,3 m mellem lejer kan opløft blive problematisk. Størrelsen af lejerne er reduceret svarende til lavere lejereaktioner sammenlignet med Femern konceptdesign. Lejereaktioner er vurderet i afsnit 2.3.

Udkragningen af betondæk med vejtrafiklast er 4,55 m, hvilket er i overkanten for et optimeret tværdesign. Til sammenligning er udkragningen på Øresundsbroen ca. 3,8 m. Derfor er det nødvendigt at øge afstanden mellem gitterplaner ved toppen med $4,55 - 3,8 = 0,75$ m i hver side, dvs. fra 10,5 m til 12,0 m. Dette gøres ved at rotere gitterplanerne yderligere ca. 5 grader om nedre knudepunkter (ikke vist). Denne rotation giver 0,3 m ekstra afstand mellem gitterplaner i niveau med platforme, idet bundbredden ikke ønskes reduceret.

En Femernbælt løsning med 1 spor som skitseret i Figur 2-3 er $4,5 - 0,3 = 4,2$ m smallere i niveau med platformene end en løsning med 2 spor, dvs. banebredden bliver $12,3 - 4,2 = 8,1$ m. Grundet usikkerheden forbundet med definition af baneareal for gitterdrager med skrå gitterplaner er i stedet anvendt den mere

veldefinerede bredde for lavbro på 8,0 m, se afsnit 2.2.2, også i anlægsoverslag for højbro.

2.2 Brodrager med trafik i ét niveau

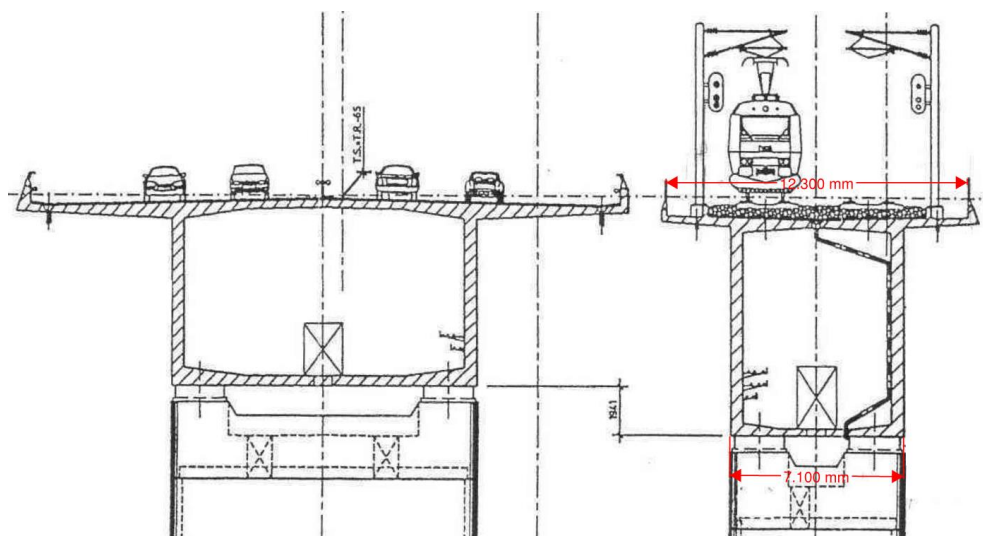
Broløsninger mellem Samsø og Jylland inkluderer højbro med 200 m faglængde over sejlruten nær Samsø samt lavbroer med typisk 100 m faglængde. Da lavbroer udgør størstedelen, er kun disse undersøgt i det følgende.

Følgende bredder af bane er anvendt for alle broløsninger:

- > 2 spor: 12,3 m (svarende til Storebælt Vestbro og Øresundsbroen)
- > 1 spor: 8,0 m (teoretisk mindre areal baseret på Storebælt Vestbro beregnet som to gange afstanden fra center af ene spor til nærmeste rækværk)

2.2.1 To spor

Når der skal jernbane over lavbroer opnås den økonomisk mest gunstige anlægspris ved at udforme overbygningen som bjælkebro med to parallelle lukkede kassedragere i beton pga. moderat spændvidde. Dette sikrer en billigere overbygning, præfabrikation på land og minimal vedligeholdelse. Den ene drager er til vej og den anden drager er til jernbane. Eksempel på brotværsnit for lavbro med 2 spor er vist i Figur 2-4.

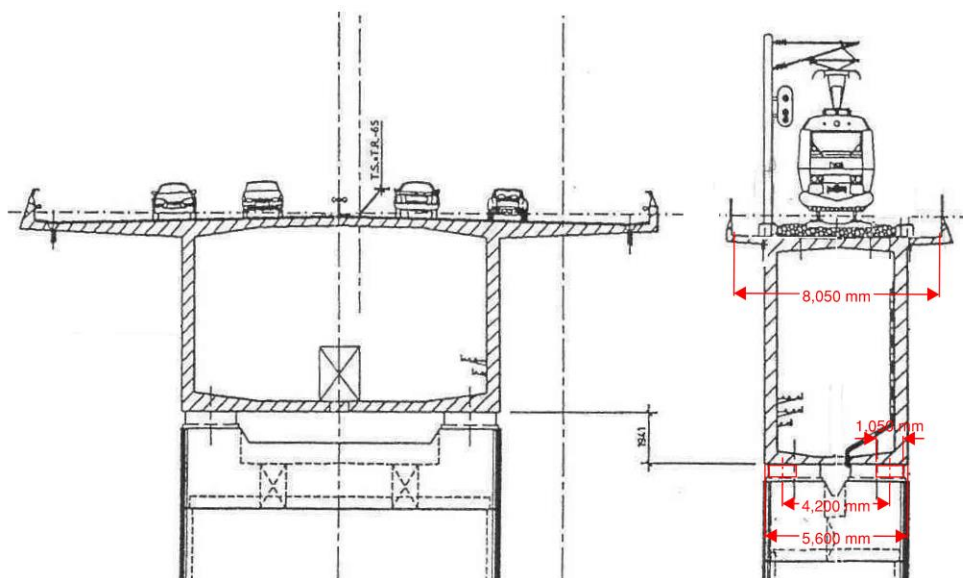


Figur 2-4 Lavbro med trafik i ét niveau, 2 spor (eksempel fra Storebælt Vestbro)

2.2.2 Ét spor

En tilsvarende løsning med 1 spor og samme placering af kroppe i forhold til centerlinje spor og samme udkrægning af topflange vil resultere i en meget smal jernbanedrager med kun ca. 3 m bred bundflange. Denne løsning er teknisk ikke mulig, da der er for kort afstand mellem kroppe (vanskeligt at optage torsion fra vindlast og skibsstød), for kort afstand mellem lejer (stor opløft) og for smal bropille (lav modstand mod tværkræfter som f.eks. skibsstød). Disse problemer kan afhjælpes ved at flytte kroppene længere fra hinanden, men det er på

bekostning af topflangen, som derved får større spændvidde i tværretningen. En sådan løsning er skitseret og vist i Figur 2-5.



Figur 2-5 Lavbro med trafik i ét niveau, ét spor og minimumsbredde

Denne løsning er vurderet teknisk mulig omend der er tale om en forholdsvis smal kassedrager. Bredden af bundflange og pilleskaft er reduceret med 1,5 m i forhold til løsning med 2 spor. Størrelsen af lejerne er reduceret svarende til lavere lejereaktioner sammenlignet med Vestbroen. Afstanden mellem lejer er kun ca. 4,2 m hvorved opløft kan blive problematisk. Lejereaktioner er vurderet i afsnit 2.3.

Bredden af jernbaneareal mellem inderside af rækværker/kantbjælker er beregnet baseret på Vestbroens dimensioner som følger:

2 spor: Afstand centerlinje bro til centerlinje spor: 2125 mm
 Afstand centerlinje bro til inderside rækværk: 6150 mm
 Afstand centerlinje spor til inderside rækværk: $6150 - 2125 = 4025$ mm

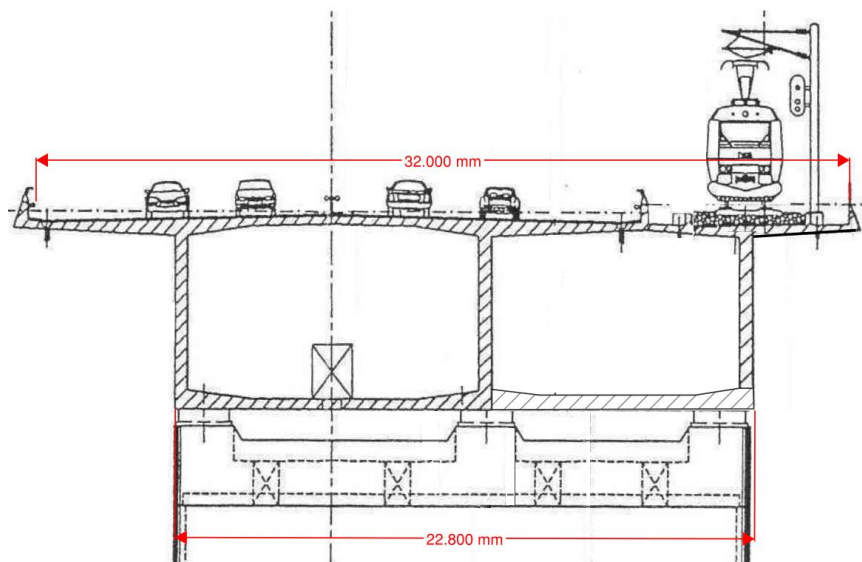
1 spor: Afstand mellem inderside rækværker: $2 \cdot 4025 = 8050$ mm

Der anvendes tilnærmet 8,0 m som bredde af baneareal.

Da Baggrundsrapportens anlægsoverslag for 1-sporsløsninger er baseret på en tilsvarende geometri, vurderes disse anlægsoverslag at være realistiske.

Alternativ løsning med en fælles kassedrager er skitseret og vist i Figur 2-6. Sporet er placeret således at der er plads til samme platform op mod vej som i yderside. Afstanden fra fritrumsprofil af tog til inderside af vejautoværn er her ved ca. 1,8 m, hvilket er sammenligneligt med den nye Storstrømsbro, hvor vej og bane også er i (omtrent) samme niveau på fælles kassedrager. Vejdelen af kassedrageren er vist identisk til Vestbroens vejdrager, men idet topflangen op mod jernbanedrageren nu ikke er udkraget, vil tykkelsen af flangen skulle

modificeres til at have kortere voute og større del med konstant tykkelse. Ligeledes bør det i en senere fase undersøges om den midterste krop med fordel kan placeres centralt mellem yderkroppene idet vejlast og jernbanelast er omtrent ens.



Figur 2-6 Lavbro med trafik i ét niveau, ét spor og fælles kassedrager

Fordelene ved denne løsning er at undgå den forholdsvis smalle jernbanedrager, opnå et mere effektivt tværsnit og give mulighed for kun et pilleskæft og dermed eventuelt mindre fundament. Desuden spares en krop, men på bekostning af bredere samlet bundflange.

Ulempen ved denne løsning er en tung drager som vil kræve flydekran med stor løftekapacitet ved montering af fulde fag som på Storebælt Vestbro. Flydekranen Svanen anvendt på Storebælt havde dengang en løftekapacitet på 6.400 tons. Svanen blev efterfølgende ombygget til brug ved byggeriet af Confederation Bridge i Canada, hvorved løftekapaciteten blev øget til 8.700 tons. Vægten af Storebælt Vestbro vejdrager er ca. 5500 tons. Vægten af den brede fælles kassedrager med 1 spor skitseret ovenfor er ca. 50% tungere end Vestbro vejdrager. Kassedrageren vejer dermed ca. 8.300 tons, og bør derfor kunne løftes med kendt udstyr.

Løsningen har samme belastede areal og dermed samme pris, baseret på anvendt metode med enhedspriser, som løsningen med 2 separate dragere.

2.3 Brolejer

Brodragere med kun et jernbanespor er smallere end brodragere anvendt fra referenceprojekterne. Konsekvensen af en smal brodrager er bl.a. kort tværafstand mellem brolejer og dermed større risiko for opløft i lejer fra væltende moment (torsion af brodrager) fra tværlaster. Opløft i lejer bør undgås da det komplicerer lejeudformning og vanskeliggør vedligehold og udskiftning. Lejereaktioner beregnes for lastopstillinger som giver minimum lejereaktion for at sikre at der ikke er opløft.

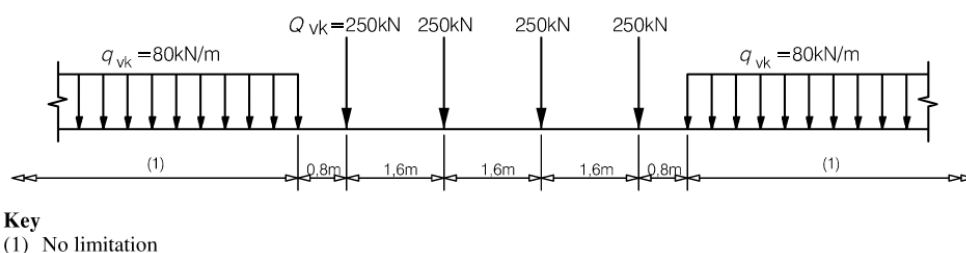
Tværlaster af betydning er centrifugallaster fra trafik samt vindlast på brodrager og trafik. De to laster beskrives i følgende afsnit. Øvrige laster og lastkombinationer er beskrevet i Design basis [3].

2.3.1 Centrifugallast

Centrifugallast er en tværlast fra trafiklast som optræder hvor linjeføringen har horisontal krumning. Horisontal radius varierer for de forskellige korridorer. Konservativt er anvendt minimumsradius på 1888 m svarende til toghastighed 200 km/t. Centrifugallasten er bestemt jf. Eurocode 1 del 2 Trafiklast på broer [4] samt nationalt anneks [5].

Der er ingen centrifugallast fra vejtrafik idet radius er større end 1500 m.

Jernbanelasten for passagertog er lastmodel HSLM. Centrifugallasten fra HSLM skal beregnes baseret på vertikal last fra lastmodel LM71, se Figur 2-7. Det er meget konservativt.



Figur 2-7 Jernbanelast LM71

Der er anvendt faktor $\alpha=1,33$ på vertikal LM71 last jf. nationalt anneks. Influenslængde for maksimal tværreaktion på bropille er 2 gange faglængden. Lasten angriber 1,8 m over top af skinner. De fire punktlaster er simplificeret til jævnt fordelt last og centrifugallasten herfra er ca. 20 kN/m. Den typiske centrifugallast udenfor punktlasterne er ca. 10 kN/m. Opadrettede lejereaktioner fra centrifugallasten alene er -1,86 MN for højbro og -2,86 MN for lavbro 100 m fag. Disse skal overlejres med reaktioner fra øvrige laster, se afsnit 2.3.4. Beregninger er vedlagt i Bilag A.

2.3.2 Vindlast

Vindlasten er bestemt jf. Eurocode 1 del 1-4 Vindlast [6] samt nationalt anneks [7]. Basisvindhastigheden er 24 m/s for området hvor en Kattegatforbindelse vil være beliggende. Dette er den karakteristiske 10-minutters middelvindhastighed uanset vindretning og årstid, i 10 m højde over åbent terræn. Der er konservativt anvendt faktorer 1,0 for vindretning og årstid. Terrænkategori er 0 svarende til hav eller kystområde eksponeret til åbent hav. Der er ikke anvendt tillæg til basisvindhastigheden pga. klimaændringer idet der i dag ikke er dokumentation herfor.

Vindhastigheder i niveau med brodrager er beregnet baseret på højde over vandoverflade på 75 m for højbro og 30 m for lavbro. Beregninger er vedlagt i Bilag A og sammenfattet herunder.

Tabel 2-1 Vindhastigheder og vindtryk i niveau med brodrager

Vind	Højbro	Lavbro 100 m fag
Middelvindhastighed v_m [m/s]	37,9	34,5
Peakvindhastighed v_p [m/s]	51,0	47,6
Peakhastighedstryk q_p [kN/m ²]	1,52	1,31

Der er både undersøgt situation med trafik og uden trafik. Højden af trafik er 3 m for vej og 4 m for jernbane. Formfaktorer er taget fra referenceprojekter hvor de blev beregnet baseret på computer simuleringer.

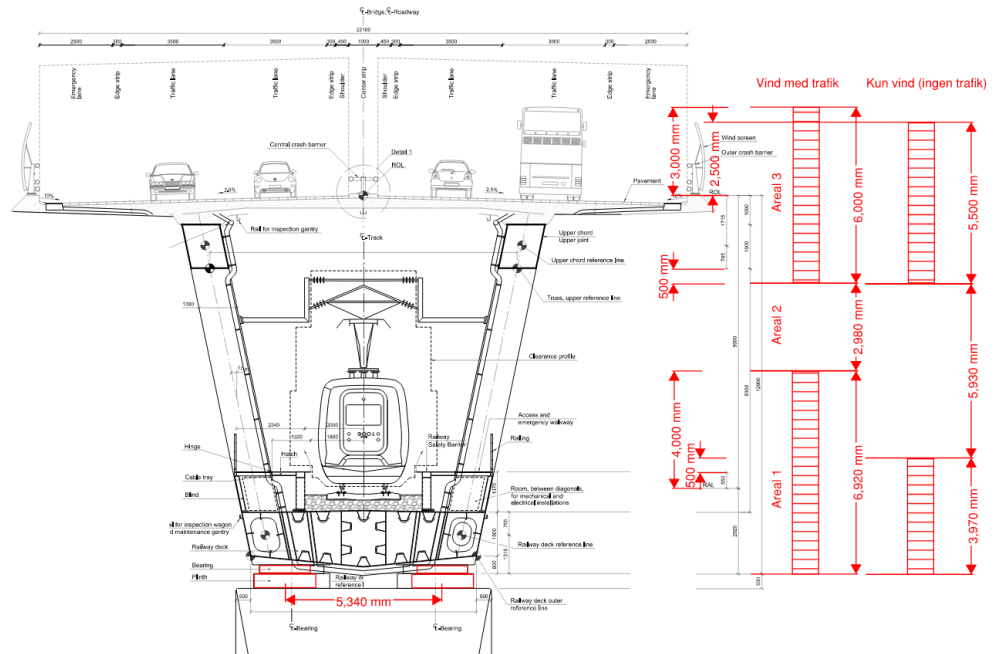
Højbro

For højbro er anvendt beregninger fra Femern konceptdesign hvor formfaktor C_D var 0,40 uden trafik og 0,48 med trafik (lastbiler og tog). Disse tal er normeret mht. bredden $B=30$ m og begge baseret på vindskærme på vejdek. Hvis der normeres mht. højden fås 0,93 uden trafik og 1,12 med trafik. Disse forholdsvist lave værdier skyldes at der er tale om en åben gitterdrager. Linjelasten er beregnet som $f_w = q_p \cdot C_D \cdot B$ og er sammenfattet i Tabel 2-2.

Tabel 2-2 Vindlaster højbro

Last	Højbro med trafik	Højbro uden trafik
Linjelast f_w [kN/m]	21,89	18,24

Formfaktorer for moment er ikke anvendt, i stedet er vindlast opdelt og påført som vist i Figur 2-8. Vind på diagonaler er medtaget som 0,5 m ekstra højde på stålfanger i både bund og top. Der er anvendt ækvivalent vindtryk inkl. formfaktorer således at den samlede linjelast er den samme som fra simuleringer på de samlede tværsnit anført i Tabel 2-2. Det væltende moment og tilsvarende træk/tryk kræfter i lejer er beregnet.



Figur 2-8 Vindlast på højbro

Lavbro

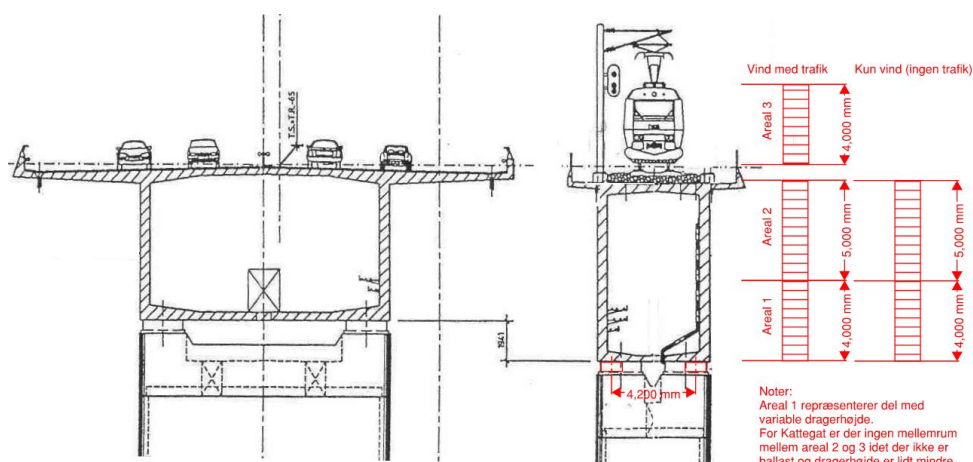
Lavbro 100 m fag har varierende dragerhøjde med 8 m over pille og 4 m i midten af et fag. Dertil lægges 1 m for kantbjælke. Gennemsnitshøjden eksponeret for vindlast er derfor $(9+5)/2 = 7$ m. Der er anvendt formfaktorberegninger fra Mumbai Trans Harbour Link stålbroer. Disse er kassedragere med bredde 14,8 m og højde 7 m og dermed sammenlignelige, om end bredere. Formfaktor uden trafik var ca. 1,0 normeret mht. bredden. Normeres med gennemsnitshøjden 7 m fås formfaktor 2,1. For situation med trafik anvendes samme formfaktor også for trafikareal.

Linjelasten er beregnet som $f_w = q_p \cdot C_D \cdot B$ og er sammenfattet i Tabel 2-3.

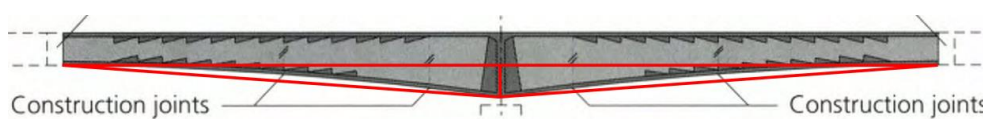
Tabel 2-3 Vindlaster lavbro

Last	Lavbro med trafik	Lavbro uden trafik
Linjelast f_w [kN/m]	30,41	19,37

Formfaktorer for moment er ikke anvendt, i stedet er vindlast opdelt og påført som vist i Figur 2-9. Areal 1 er den varierende del af dragerhøjden som konservativt er antaget at variere linært mellem pille og midten af fag og dermed har form som en trekant, se Figur 2-10. Der er anvendt ækvivalent vindtryk inkl. formfaktorer således at den samlede linjelast er den samme som fra simuleringer på de samlede tværsnit anført i Tabel 2-3. Det væltende moment og tilsvarende træk/tryk kræfter i lejer er beregnet.



Figur 2-9 Vindlast på lavbro



Figur 2-10 Vindlast på lavbro, Areal 1

2.3.3 Øvrige laster

Reaktioner på top af bropiller er beregnet i fagnotat Enhedspriser for broer baseret på mængder [2] for egenvægt DL og SDL, trafiklast vej og trafiklast jernbane. Her er trafiklasten opstillet til at give maksimalt tryk og er derfor påført et fag til hver side for pille. Denne lastopstilling er afgørende for maksimalt væltende moment fra tværlaster idet centrifugal-og vindlast på trafik kun kan optræde hvis der er trafik i samme område. Egenlaster og jernbanelast bidrager ikke til de væltende momenter. Vejlast kan opstilles usymmetrisk ved kun at have last i nogle baner og derved give væltende moment, dette er der dog set bort fra idet det kun berører højbro, hvor opløft ikke er i nærheden af at være kritisk. Lejereaktioner fra øvrige laster er beregnet som halvdelen af reaktioner på pilletop svarende til ligelig fordeling på de to lejer.

2.3.4 Sammenfatning

Minimale lejereaktioner er sammenfattet i Tabel 2-4. Lastkombinationer er for vind som dominerende variabel last. Positive værdier er tryk og negative værdier er opløft.

Tabel 2-4 Minimale lejereaktioner [MN]

Last	Højbro med trafik	Højbro uden trafik	Lavbro med trafik	Lavbro uden trafik
Egenvægt konstruktioner	33,75	33,75	10,34	10,34
Egenvægt overlejet	8,65	8,65	1,78	1,78

Trafiklast vej	8,02	0,00	0,00	0,00
Trafiklast bane, lodret	2,83	0,00	1,53	0,00
Trafiklast bane, centrifugal	-1,86	0,00	-2,86	0,00
Trafiklast bane, i alt	0,98	0,00	-1,33	0,00
Vind	-6,45	-5,60	-5,40	-2,50
SLS	39,93	36,80	5,66	9,62
ULS	34,06	29,76	1,33	7,17

Det ses at for højbro er der altid stort tryk i lejer. For lavbro jernbanedragere er lejer også altid i tryk om end marginalt for situation med trafik. Det konkluderes at der ikke forekommer opløft i lejer.

2.4 Bropiller

Konsekvenserne af 1 spor i stedet for 2 spor er en lettere overbygning og dermed:

- > Behov for mindre areal af fundamentet for at overføre lasten til jorden (billigere);
- > Behov for mindre betontværsnit af piller (billigere);
- > Lavere tryknormalkraft i pillerne og dermed mindre reduktion af de ugunstige effekter fra bøjning, både med hensyn til revnevidder og bæreevne, noget der evt. kan resultere i større armeringsmængder i piller (potentielt dyrere);
- > Mindre modstand mod skibsstød. Udover bøjningskapaciteten er en stor masse af bropiller gunstig til at reducere påvirkninger fra skibsstød. En eventuel besparelse fra første 2 punkter kan derfor være tvivlsom de steder hvor skibsstød er dimensionsgivende.

Det er derfor svært at vurdere den samlede effekt af ét spor frem for to spor med hensyn til bropillerne, især i områder med store skibsstøds-laster.

3 Tunneler

3.1 Tunnellers drifts- og sikkerhedsforhold

Ved planlægning af lange jernbanetunneler for eksempel a) under eksisterende bymæssige bebyggelser, b) i kuperet terræn, c) gennem og under bjerge og d) som i tilfældet med Kattegatforbindelsen undersøiske, vælges det nu til dags at planlægge forbindelser med trafikken adskilt i to separate tunnelrør, det vil sige med et tunnelrør for trafik i hver sin retning.

Oftest planlægning store jernbanetunneller til persontog med to tunnelrør (et i hver retning), enten a) fordi der er et tilsvarende kapacitetsbehov (med to tunnelrør) der skal dækkes umiddelbart efter forbindelsens åbning eller b) man forventer en trafikstigning på forbindelsen (svarende til to tunnelrør) indenfor en overskuelig fremtid, derved er jernbanetunnelen fremtidssikret med to rør, selv om behovet ved åbning kun kræver et rør.

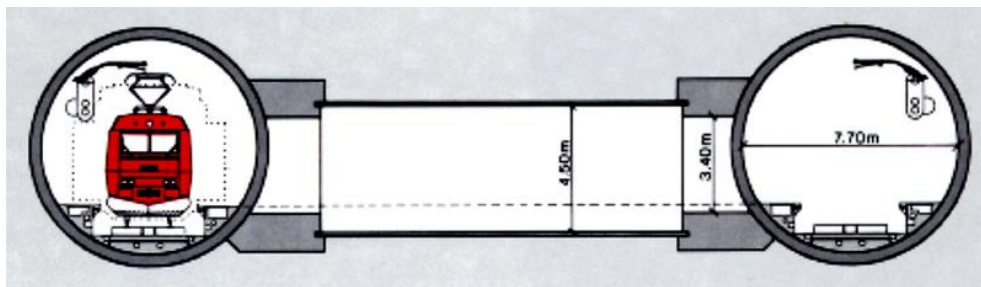
Jernbanetunneller som er ældre end 75 år har man set udført med kun ét tunnelrør i kuperet eller bjergrigt terræn, hvor jernbanetrafikken har kunnet skifte fra den ene retning til den anden alt efter behov.

Ved en udarbejdelse og gennemgang af tunnel referenceprojekter til Baggrundsrapporten [1] anlagt indenfor de seneste 30-40 år er der ikke identificeret jernbanetunneller til persontog, hvor der kun er udført jernbane med ét spor. Eksempel fra England er vist Figur 3-1.



Figur 3-1 Enkelt sporet jernbanetunnel (Chipping Campden tunnel, England)

Undersøiske faste forbindelser som Kanaltunnelen (UK/FR), Seikantunnel (JP) og Storebæltstunnelen (DK) vist på Figur 3-2, som er de mest kendte referencer, har alle to rør, et rør til hver retning af jernbanen.

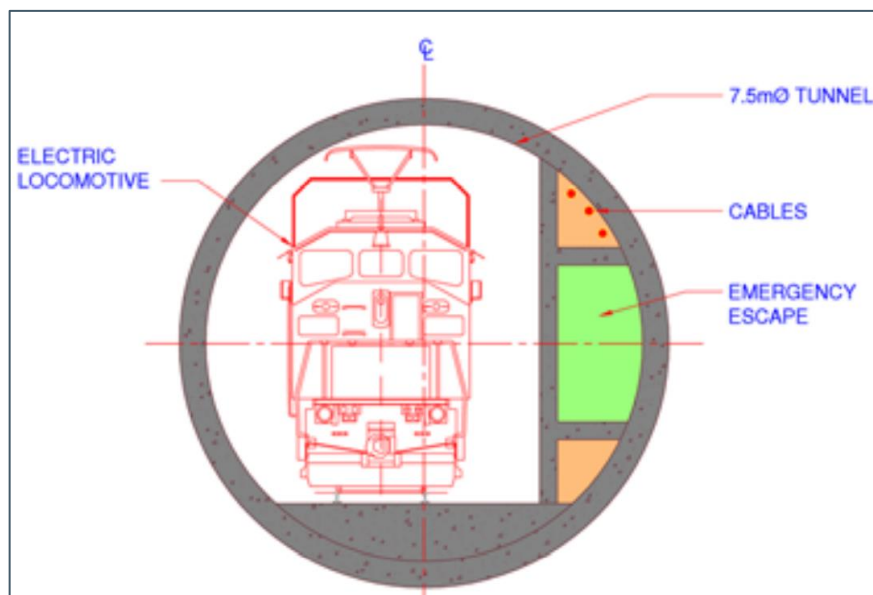


Figur 3-2 Storebælt – Boret tunnel tværsnit TBM

Der blev i 2014 og 2018 udarbejdet et mulighedsstudie for en ny 30 km lang tunnelkrydsning kun med jernbane mellem Labrador og øen Newfoundland i det nordøstlige Canada (ved Strait of Belle Isle), hvor et vist alternativ til en fast forbindelse er med ét tunnelrør, se tværsnit i Figur 3-3. Da dette alternativ kun har ét tunnelrør, skal evakueringen ske til et adskilt rum i tunnelrøret. Dette er nok det mest detaljerede studie af en ét-rørs løsning på verdensplan p.t. Et link til rapporten er indsat her:

["An update on the 2004 pre-feasibility study for a fixed link between Labrador and the island of Newfoundland" \(gov.nl.ca\)](https://www.gov.nl.ca/infrastructure/transportation/strait-of-belle-isle-tunnel/)

Ét-rørsløsningen for tunnelen er vist nedenfor:

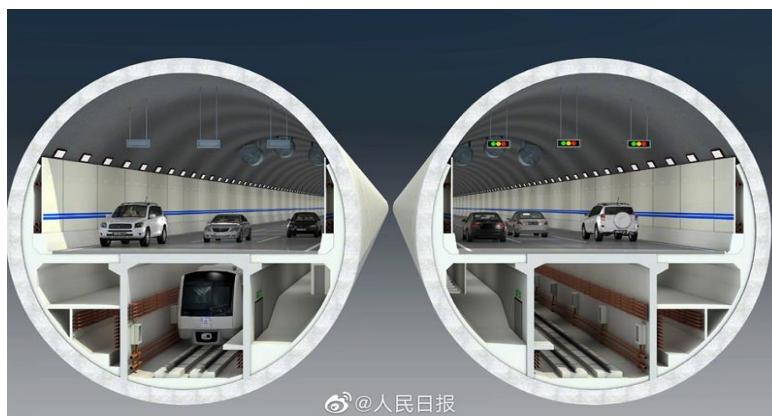


Figur 3-3 Strait of Bell Isle, Canada – Mulighedsstudie enkeltrør TBM

Et alternativ som ikke er diskuteret i Baggrundsrapporten er en 2-etagers boret tunnelloøsning med vej øverst og jernbane under. En sådan løsning vil kræve en større diameter end forudsat i mulighedsstudiet til Femern tunnel. En sådan løsning er dog ikke studeret, da den ikke blev fundet relevant på Femern projektet. Løsningen kunne som i de tidlige feasibility studier for Femern kombineres med tværtunneler til et sideløbende vejør.

Jinan Yellow river tunnel er et eksempel under udførelse vist på Figur 3-4, åbning forventes i slutningen af 2021. Denne løsning er dog baseret på strømføring

via 3. skinne og kræver derfor begrænset plads over togprofilet – svarende til Københavns metro. For Kattegat tunnelen er 3. skinne ikke en mulighed pga. den eksisterende elektrificering i Danmark samt at 3. skinne ikke fungerer ved høj hastighedselektrificering. Fritrumsprofilet til toget vil derfor skulle være væsentligt højere end på Jinan Yellow river.



Figur 3-4 Jinan Yellow river tunnel, China – 2-etagers vej- og jernbanetunnel

På baggrund af fritrumsprofilet vil det derfor næppe være gennemførbart i en Kattegat kontekst med højhastighedsbane under vejprofilet. Diamenteren på tunnelen vil simpelthen blive langt over de nuværende rekorddiametre.

3.1.1 Sænketunnel med ét spor

De drifts- og sikkerhedsmæssige forhold omkring et sænketunneltværsnit på Kattegatforbindelsen med 2 vejbanerør, 1 service galleri og 1 tunnelrør til jernbane vil skulle baseres på muligheden for at benytte det nærmeste vejbanetunnelrør som flugtvej og til adgang for vedligehold.

Ventilationskonceptet i løsningen med 1 jernbanerør er med langsgående ventilation, vil være det samme som for en løsning med 2 jernbanerør, men flugtvejen fra jernbanerøret vil ikke være til det andet jernbanerør, men derimod til det nærmeste vejbanerør.

Flugtscenarier for en konfiguration med flugt fra jernbanerøret til nærmeste vejbanerør er ikke uden udfordringer og umiddelbart findes der ikke andre tunnel-eksempler der kan refereres til. Afstanden imellem nøddøre kan være den samme som for en 2-rørsløsning, dvs. placeret ca. for hver 100 m.

For sikkert at kunne evakuere fra jernbanerøret til vej-tunnelrøret, skal man sikre, at der ikke er køretøjer i vej-tunnelrøret kørende med høj hastighed, som vil kunne påkøre de evakuerende fra jernbanerøret. Det vil formodentligt kunne sikres ved effektiv trafikstyring (med skilte til banekontrol), men det udgør bestemt en risiko ved at dette koncept - så vidt vides - ikke er afprøvet i praksis.

Inspektion, reparation og anden vedligehold af tunnelrøret vil kræve at tunnelrøret lukkes indtil sagen er udbedret og der vil for en enkeltrørsløsning ikke være mulighed for jernbanetransport så længe jernbanetunnelrøret er lukket.

Tværsnit for sænketunnel med 2 vejbaner og 1 jernbanespor er vist i oversigten over tværsnit afsnit Tunnellers tværsnit 3.2.

Det forventes, at drift og sikkerheden for et sænketunneltværsnit med to rør til vej, et service galleri og ét jernbanespor vil kunne opnå godkendelse fra drifts- og sikkerhedsorganisation på projektet; men det er behæftet med usikkerhed, da der ikke er erfaring hermed.

For anlægsoverslaget for sænketunnel løsningerne har Sund & Bælt estimeret prisen baseret på deres viden om Femern projektet.

3.1.2 Boret tunnel med ét spor

For en løsning med 2 vejbanerør og 1 tunnelrør med 1 spor tage der udgangspunkt i løsningen for boret tunnel fra mulighedsstudiet af Femern forbindelsen, hvor anlægget består af tre store separate tunnelrør: to rør hver med to vejspor og et nødspor, og et tunnelrør med plads til begge jernbanespor.

Det er i Femern mulighedsstudiet for boret tunnel 4+2 forudsat at tunnelrøret med to jernbanespor er uden forbindelse til vejbanerør. Drift- og sikkerhed for henholdsvis vej og jernbane kan derfor helt adskilles. Der er visse fordele, men også visse ulemper ved anlæg af separate rør, som ikke er behandlet i dette forstudie.

Femern mulighedsstudiet for boret tunnel løsning antager at jernbane udføres med et separat rør til jernbane med to spor. Det antages for en 1-sporet jernbane at være den bedste løsning ud fra et driftsmæssigt synspunkt, at jernbanerøret forbindes til det nærmeste vej-tunnelrør med tværforbindelser, i stil med dem fra Storebæltsforbindelsen og med samme afstand. Hermed forventes det at man vil kunne opnå tilstrækkelig brugersikkerhed.

Et alternativ for en 1-sporet jernbane i et separat jernbanerør er at forsyne jernbanerøret med et kombineret flugt-, redning- og servicegalleri til udrykningskøretøjer i samme rør som jernbanesporet. Løsningen formodes at være dyrere end alternativet med tværtunneller og er i øvrigt sammenlignelig med 4+2.

Tværsnit for boret tunnel med 2 vejbaner og 2 jernbanespor er vist i oversigten over tværsnit afsnit 3.2. Boret tunnel med 1 jernbanespor er ikke vist.

Det forventes at drift og sikkerheden for et boret tunneltværsnit med ét jernbanespor vil kunne opnå godkendelse fra drifts- og sikkerhedsorganisation på projektet; men det er behæftet med usikkerhed, da der ikke er erfaring hermed.

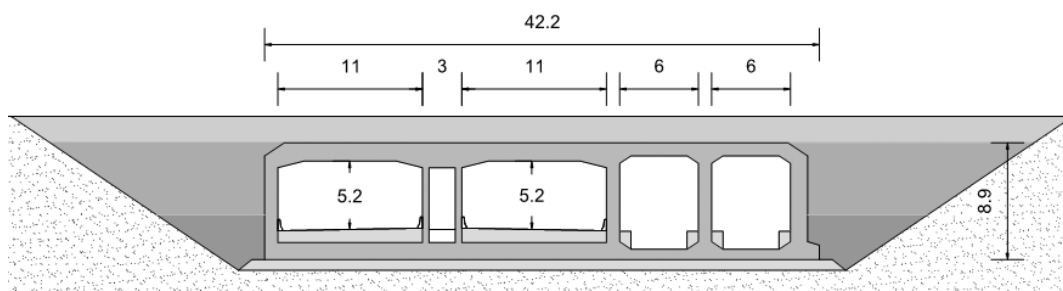
Der er ikke på nuværende stadie lavet en anlægsoekonomisk vurdering af en boret tunnelloøsning med jernbane i ét spor, idet denne vurderes at indeholde betydelige sikkerhedsmæssige og driftsmæssige komplikationer.

3.2 Tunnellers tværsnit

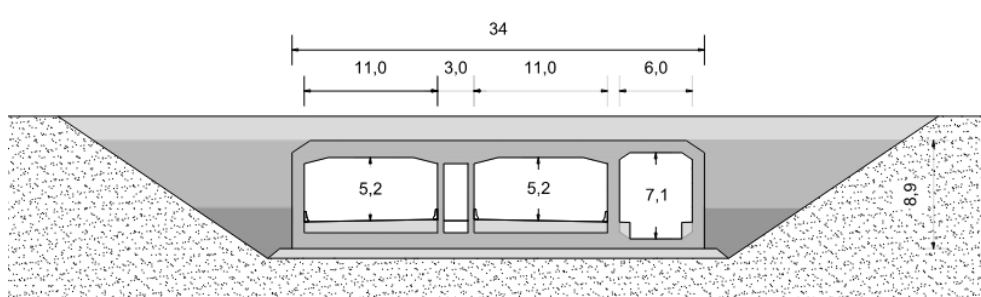
På baggrund af drift- og sikkerhedsforhold beskrevet Baggrundsrapporten [1] er det for denne forundersøgelse af en Kattegatforbindelse valgt at basere undersøgelserne på de tværsnit, som blev udarbejdet under forundersøgelserne for Femernforbindelsen.

Følgende bredde af tunnelrør til jernbaner er anvendt for sænketunnelløsning:

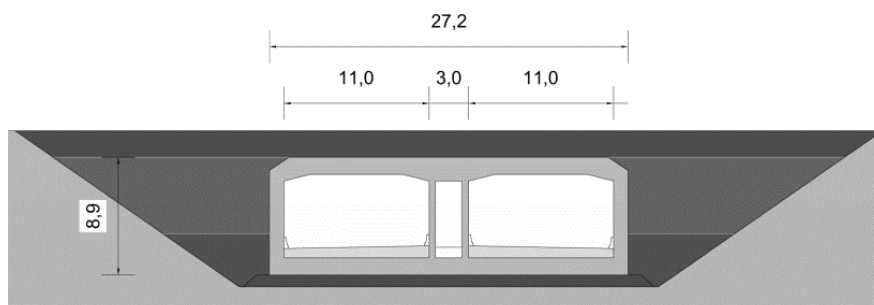
- > 2 spor: 6,0 m i hver af to separate tunnelrør (som Femern sænketunnel)
- > 1 spor: 6,0 m (identisk med det ene rør i 2-sporsløsningen)



Figur 3-5 Sænketunnel tværsnit 4+2



Figur 3-6 Sænketunnel tværsnit 4+1



Figur 3-7 Sænketunnel tværsnit 4+0

Følgende ydre diameter af tunnelrør til jernbaner er anvendt for boret tunnel:

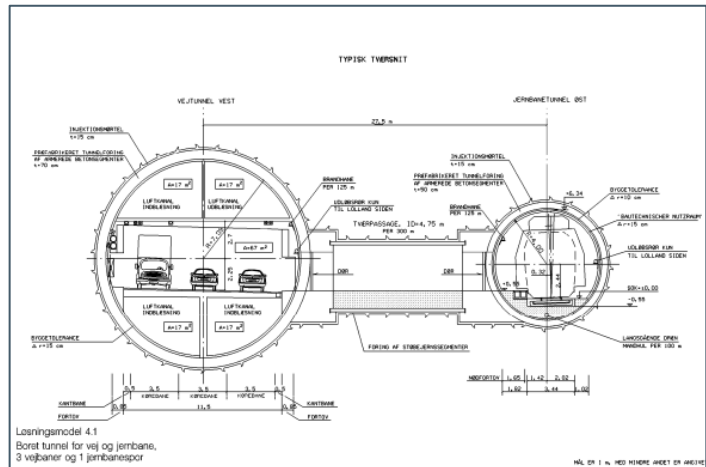
- > 2 spor: 16,94 m i ét tunnelrør (svarende til Femern boret tunnel studie)
- > 1 spor: 8.5 m (svarende til Storebælt boret tunnel)



Figur 3-8 Boret tunnel tværsnit 4+2



Figur 3-9 Boret tunnel tværsnit 4+0



Figur 3-10 Femern Feasibility studie 1999 - løsning med ét jernbanespor

3.3 Sænketunneller anlægsteknik

Der er som nævnt ikke identificeret et udført (eller for sags skyld planlagt) sænketunnelreferenceprojekt med ét jernbanespor. Hvor drift og sikkerhedsforhold kan være specielle at få til at virke hensigtsmæssigt for sænketunnel med ét jernbanespor, er der ikke noget usædvanligt ved anlæg af sænketunnel med ét jernbanespor.

Der er ingen væsentlige forskelle imellem anlæg af en sænketunnel med en jernbaneløsning med to spor og en jernbaneløsning med ét spor. For en

sænkettunnelløsning er det en relativ lille ekstra belastning at lave et ekstra rør i tunnelelementet da etablering af støbefaciliteten, transport og sænkning af tunnel elementer, er stort set sammenlignelige. De store komponenter som indgår i anlægsomkostningen, vil være nogenlunde proportional med bredden af sænkettunnelen.

Der er intet specielt ekstra at forholde sig til ved cut & cover tunnel på begge sider eller på de kunstige øer, ved overgang til lavbro.

3.4 Borede tunneller anlægsteknik

Der er som nævnt ikke identificeret et udført boret tunnel referenceprojekt med ét jernbanespor. Der er dog ikke noget usædvanligt ved selve udførelsen af boret tunnel med ét jernbanespor, som forbindes med tværtunneller til vejttunnel.

Der er ingen væsentlige forskelle imellem anlæg af en boret tunnel med en jernbaneløsning med to spor og en jernbaneløsning med ét spor. Det skal dog siges at kompleksiteten går op med diameteren størrelse og anlæg af tværtunnel er en separat risiko, men ikke noget som gør at løsningen ikke vil, være mulig at udføre.

De store komponenter som indgår i anlægssomkostningen for en boret tunnel, vil være direkte afhængig af diameteren på den specifikke del. Vejttunnel vil bestå af to tunnelrør med stor diameter (ca. 15-16m), hvor jernbane vil have en væsentlig mindre diameter (ca. 8-9m).

Der er intet specielt ekstra at forholde sig til ved cut & cover tunnel på begge sider eller på de kunstige øer, ved overgang til lavbro.

4 Drift og Vedligehold

Helt overordnet må nævnes at lange forbindelser med kun ét spor er behæftet med en stor usikkerhed i forhold til driftssituationen. Vedligehold omkring et spor (bro eller tunnel) vil betyde en total afbrydelse af trafikken modsat situationen med to spor hvor trafikken kan fortsætte med trafik i begge retninger. Erfaringer fra både Storebæltsforbindelsen og Øresundsforbindelsen viser at der kan blive behov for vedligeholdelsesarbejder af længere varighed med f.eks. løbende natlige afbrydelser af trafikken i det ene spor af gangen.

Konsekvenserne ved 1 spor frem for 2 spor er store ud fra drift og vedligehold synspunkter. Ét spor vil bl.a. betyde:

- > Nedsat kapacitet;
- > Mere sårbar overfor nedbrud og tekniske problemer med tog;
- > Lukketid i forbindelse med uheld og vedligehold.

5 Sammenfatning

Helt overordnet må nævnes at lange forbindelser med kun ét spor er behæftet med en stor usikkerhed i forhold til driftssituationen. Erfaringer fra både Storebæltsforbindelsen og Øresundsforbindelsen viser at der kan blive behov for vedligeholdelsesarbejder af længere varighed med f.eks. løbende natlige afbrydelser af trafikken i det ene spor af gangen.

Analysen af brotværnsnit har bekræftet banearealerne anvendt i anlægsoverslagene i Baggrundsrapporten [1]. Det er desuden konkluderet at de mindre brodragere ikke giver anledning til opløft i brolejer.

Analysen af henholdsvis sænketunnel og boret tunnel har primært fundet udfordringer relateret til de drifts- og sikkerhedsmæssige forhold, mens der ikke anlægsteknisk er nogle væsentlige komplikationer i relation til en tunnel med kun ét jernbanespor. Det bør dog fremhæves, at det er meget usædvanligt, selv på verdensplan, at vælge alternativer med kun ét spor på store anlægsprojekter som Kattegatforbindelsen.

Løsningen med kun ét jernbanespor i boret tunnel vurderes som kompleks ud fra et drifts- og sikkerheds- og dermed også anlægøkonomisk perspektiv, og der har ikke inden for rammerne af forprojektet været mulighed for at analysere denne i detaljer.

6 Referencer

- [1] COWI, »Kattegatforbindelse - Kyst-Kyst - Anlægstekniske Forundersøgelser, Baggrundsrapport,« August 2021.
- [2] COWI, »Kattegatforbindelse - Kyst-Kyst - Anlægstekniske Forundersøgelser, Enhedspriser for broer baseret på mængder, Fagnotat,« Januar 2021.
- [3] COWI, »Kattegatforbindelse - Kyst-Kyst - Anlægstekniske Forundersøgelser, Design basis, Fagnotat,« April 2021.
- [4] Dansk standard, »DS/EN 1991-2 Eurocode 1: Last på bygværker - Del 2: Trafiklast på broer,« 2003.
- [5] Dansk standard, »DS/EN 1991-2 DK NA Nationalt Anneks til Eurocode 1: Last på bygværker - Del 2: Trafiklast på broer,« 2017.
- [6] Dansk standard, »DS/EN 1991-1-4 Eurocode 1: Last på bygværker - Del 1-4: Generelle laster - vindlast,« 2007.
- [7] Energistyrelsen, »DS/EN 1991-1-4 DK NA Nationalt anneks til Eurocode 1: Last på bygværker - Del 1-4: Generelle laster - vindlast,« 2015.

Bilag A Brolejer

Beregninger:

				Højbro		Lavbro					
Project				Kattegat		Kattegat					
Solution				4+1		4+1					
Girder				2 level truss		Rail girder					
Variable loads				Traffic+wind	Wind only	Traffic+wind	Wind only				
Span length				[m]	200	200	100	100			
Bearing spacing				[m]	5.34	5.34	4.2	4.2			
Girder depth				[m]	12.9	12.9	7	7	Lavbro: average		
Rail centrifugal load	Input	Factor on load	α	[-]	1.33		1.33		DK NA		
		Train speed	V	[km/t]	200		200				
		Horizontal radius	r	[m]	1888		1888		Min r used		
		Loaded length	L _f	[m]	400		200				
	Height z	Code reduction factor	f	[-]	0.574		0.590				
		Load above rail		[m]	1.8		1.8		Above Top Of Rail (TOR)		
		Bearing to rail		[m]	2.92		9		Bearing to TOR		
		Load above bearing		[m]	4.72		10.8				
	Point load	Vertical load	Q _{vk}	[kN]	250		250		Excl alfa		
		Transverse load	Q _{tk}	[kN]	31.83		32.74		Incl alfa		
		No. of point loads	No.	[-]	4		4				
		Length point loads area	L	[m]	6.4		6.4				
	UDL	Equivalent UDL		[kN/m]	19.90		20.46				
		Vertical load	q _{vk}	[kN/m]	80		80		Excl alfa		
		Transverse load	q _{tk}	[kN/m]	10.19		10.48		Incl alfa		
Wind load	10 meter	Basis ref. wind speed	v _{b,0}	[m/s]	24	24	24	24	DK NA		
		Directional factor	c _{dir}	[-]	1	1	1	1			
		Seasonal factor	c _{season}	[-]	1	1	1	1			
		Air density	ρ	[kg/m³]	1.25	1.25	1.25	1.25			
		Terrain factor	z ₀	[m]	0.003	0.003	0.003	0.003			
		Terrain factor	z _{m in}	[m]	1	1	1	1			
		Basis wind speed	v _b	[m/s]	24	24	24	24			
		Code factor	k _r	[-]	0.16	0.16	0.16	0.16			
		Deck level	Height above sea level	z	[m]	75	75	30	30		
			Code factor	k _i	[-]	1	1	1	1		
			Code factor	c ₀ (z)	[-]	1	1	1	1		
			Code factor	c _r (z)	[-]	1.58	1.58	1.44	1.44		
	Mean wind speed		v _m (z)	[m/s]	37.92	37.92	34.49	34.49			
	Code factor		I _v (z)	[-]	0.10	0.10	0.11	0.11			
	Peak wind speed		v _p (z)	[m/s]	51.03	51.03	47.60	47.60			
	Peak wind pressure		q _p (z)	[kN/m²]	1.52	1.52	1.31	1.31			
	Force coeff. and forces	Drag coefficient, breadth	C _D	[-]	0.48	0.40	-	1.00	Drag with regards to breadth		
		Girder breadth	B	[m]	30.00	30.00	-	14.80	Breadth		
		Eff. wind area per length	A _{ref}	[m]	14.40	12.00	23.24	14.80			
		Drag coefficient, height	C _D , height	[-]	1.12	0.93	3.32	2.11	For comparison only		
		Line load	f _w	[kN/m]	21.89	18.24	30.41	19.37			
		Reaction on pier	F _w	[MN]	4.38	3.65	3.04	1.94	F _w : Horizontal reaction on pier		
		Wind load simplified	Pressure	Effective incl gust/drag	q _{eff}	[kN/m²]	1.7	1.93	2.77	2.77	Iteration for F _w to match row 84
				Area 1	Pressure	q _{eff1}	[kN/m²]	1.7	1.93	2.77	2.77
			Height	h ₁	[m]	6.92	3.97	4	4		
			Red. factor		[-]	1	1	0.5	0.5		
	Area 2		Pressure	q _{eff2}	[kN/m²]	0	0	2.8	2.8	Højbro: Gap (open truss)	
			Height	h ₂	[m]	2.98	5.93	5	5		
Area 3	Pressure		q _{eff}	[kN/m²]	1.7	1.93	2.77	2.77			
	Height		h ₃	[m]	6	5.5	4	0			
Centroid z from bearings	Area 1		z ₁	[m]	3.46	1.985	2.667	2.667			
	Area 2		z ₂	[m]	8.41	6.935	6.5	6.5			
	Area 3		z ₃	[m]	12.9	12.65	11	9			
Load comb wind load	SLS-C characteristic		Dead load	DL	[-]	1	1	1	1	From Design basis	
			Superimposed dead load	SDL	[-]	1	1	1	1		
			Live load road	LL road	[-]	0.4	0.4	0.4	0.4		
			Live load railway	LL rail	[-]	0.8	0.8	0.8	0.8		
			Wind load	Wind	[-]	1	1	1	1		
	ULS	Dead load	DL	[-]	0.9	0.9	0.9	0.9			
		Superimposed dead load	SDL	[-]	0.9	0.9	0.9	0.9			
		Live load road	LL road	[-]	0.56	0.56	0.56	0.56			
		Live load railway	LL rail	[-]	1.12	1.12	1.12	1.12			
		Wind load	Wind	[-]	1.5	1.5	1.5	1.5			
Analyses											
Centrifugal	Top of pier	Horizontal reaction	F	[MN]	2.10		1.11		F and M can have sign ±		
		Overturning moment	M	[MNm]	9.91		12.01				
Wind	Top of pier	Horizontal reaction area 1	F _{w1}	[MN]	2.35	1.53	0.55	0.55	F _{wi} : Horizontal reaction on pier		
		Overturning moment area 1	M ₁	[MNm]	8.14	3.04	1.48	1.48	M _i : Overturning moment on pier		
		Horizontal reaction area 2	F _{w2}	[MN]	0.00	0.00	1.39	1.39	Area 1, 2 or 3		
		Overturning moment area 2	M ₂	[MNm]	0.00	0.00	9.00	9.00	F _w =F _{w1} +F _{w2} +F _{w3}		
		Horizontal reaction area 3	F _{w3}	[MN]	2.04	2.12	1.11	0.00	M=M ₁ +M ₂ +M ₃		
		Overturning moment area 3	M ₃	[MNm]	26.32	26.86	12.19	0.00	F and M can have sign ±		
		Horizontal reaction total	F _w	[MN]	4.39	3.66	3.05	1.94	Row 84		
		Overturning moment total	M	[MNm]	34.46	29.90	22.67	10.48			
		Vertical reactions other loads	Top of pier	Dead load	DL	[MN]	67.50	67.50	20.69	20.69	From Fagnotat Enhedspriser...
				Superimposed dead load	SDL	[MN]	17.29	17.29	3.55	3.55	
Live load road	LL road			[MN]	16.05	0.00	0.00	0.00			
Live load railway	LL rail			[MN]	5.66	0.00	3.07	0.00			
Serviceability limit state	SLS-C			[MN]	95.74	84.79	26.69	24.24			
Ultimate limit state	ULS			[MN]	91.64	76.31	25.25	21.82			
Vertical reactions	Bearings			Dead load	DL	[MN]	33.75	33.75	10.34	10.34	
				Superimposed dead load	SDL	[MN]	8.65	8.65	1.78	1.78	
				Live load road	LL road	[MN]	8.02	0.00	0.00	0.00	
				Live load railway vertical	LL rail ver	[MN]	2.83	0.00	1.53	0.00	
		Live load railway horizontal	LL rail hor	[MN]	-1.86	0.00	-2.86	0.00	Reactions can have sign ±		
		Live load railway total	LL rail	[MN]	0.98	0.00	-1.33	0.00			
		Wind load	Wind	[MN]	-6.45	-5.60	-5.40	-2.50	Reactions can have sign ±		
		Serviceability limit state	SLS-C	[MN]	39.93	36.80	5.66	9.62			
		Ultimate limit state	ULS	[MN]	34.06	29.76	1.33	7.17			