

MARTS 2020
VEJDIREKTORATET, SUND & BÆLT, TRAFIK-, BYGGE- OG BOLIGSTYRELSEN

INDLEDENDE LINJEFØRINGSOVERVEJELSER FOR EN KATTEGATFORBINDELSE

KYST TIL KYSTANLÆG – ENHEDSPRISER TIL ANLÆGSOVERSLAG

FAGNOTAT



INDHOLD

1	Indledning	5
2	Generelt	7
2.1	Terminologi	7
2.2	Indeks	7
3	Enhedspriser broer	9
3.1	Principper for beregning af enhedspriser	9
3.2	Danske broer	14
3.3	Udenlandske broer	23
3.4	Øvrige broer	36
3.5	Udfletningsanlæg	37
3.6	Sammenfatning referenceprojekter for broer	38
3.7	Udvalgte referenceprojekter for broer	39
3.8	Anlægsoverslag for broløsningerne	41
4	Enhedspriser tunneler	49
4.1	Borede tunneler	49
5	Referencer	59

BILAG

Bilag A	Enhedspriser broer
---------	--------------------

1 Indledning

Anlægsoverslag for Kattegatforbindelsen baseres i nuværende fase på erfaringspriser for sammenlignelige projekter.

Erfaringspriser for broer omregnes til pris per kørebaneareal, inkl. baneareal ved broer med jernbane. Dette resulterer i enhedspriser i kr. per m².

Erfaringspriser for tunneler omregnes typisk til enhedspris per meter.

Formålet med dette fagnotat er at dokumentere indsamlede referenceprojekter og beregning af enhedspriser for broer og borede tunneler. Enhedspriser for sænketunneler er baseret på et datagrundlag udarbejdet af Sund & Bælt.

2 Generelt

2.1 Terminologi

Ved beskrivelse af broer og tunneler er anvendt forkortelsen X+Y hvor X angiver antal vognbaner og Y angiver antal jernbanespor. For eksempel refererer 4+2 til en løsning med 4 vognbaner og 2 jernbanespor. 4+0 refererer til en løsning med 4 vognbaner uden jernbane.

2.2 Indeks

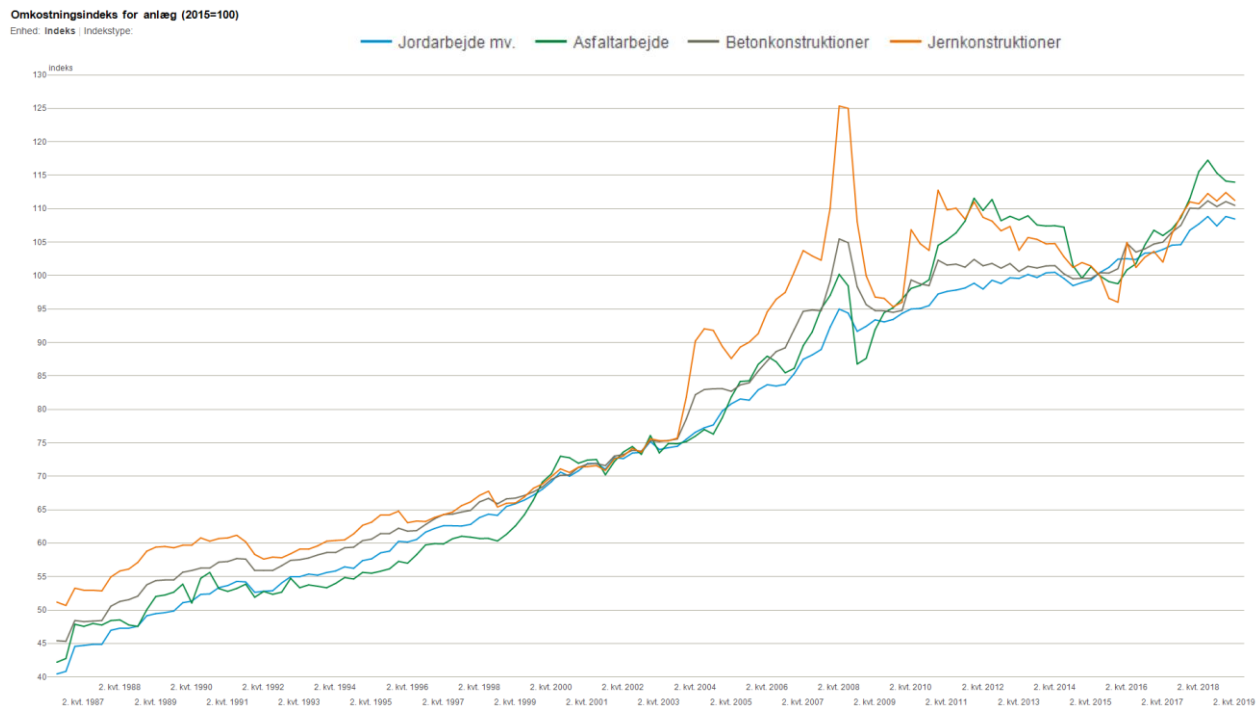
Der anvendes prisindeks fra Danmarks statistik. Omkostningsindeks BYG61 for anlæg (2015=100) efter indekstype og enhed (1986K3-2019K2) anvendes:

<https://www.statistikbanken.dk/statbank5a/default.asp?w=1920>

Dette indeks indeholder følgende indekstyper:

- > Anlæg af veje
- > Jordarbejde mv.
- > Asfaltarbejde
- > Betonkonstruktioner
- > Jernkonstruktioner (efterfølgende benævnt stålkonstruktioner)

Indekstype "anlæg af veje" er et vægtet gennemsnit af de øvrige undtagen jernkonstruktioner. Dette er ikke relevant for bro- og tunnelloøsninger. De øvrige er grafisk fremstillet i Figur 2-1.



Figur 2-1 BYG61 indeks (fra Danmarks Statistik)

Seneste indeks er 2019K2 (15-06-2019). Enhedspriser for referenceprojekter omregnes derfor til 2019K2 ved formlen:

$$\text{Pris}_{2019K2} = \text{Pris}_i \times \text{Indeks}_{2019K2} / \text{Indeks}_i$$

hvor i refererer til kvartal for, hvor prisen er oplyst. Dette vil typisk være ved indgåelse af kontrakt eller ved åbning af bro eller tunnel.

Der ses store udsving i 2008, især for stålkonstruktioner. Da kun et af referen-
 ceprojektpriserne er fra 2008 har dette ingen betydning for enhedspriser.

De forskellige indekser følges ad. Hovedparten af prisen på broreferenceprojek-
 terne er beton- og stålkonstruktioner. Derfor ses der bort fra indeks for jordar-
 bejde og asfaltarbejde.

Priser for de forskellige broprojekter er totalpriser. Indledende er andel af beton-
 og stålkonstruktioner estimeret og et vægtet beton- og stålindex beregnet for
 alle referenceprojekterne. Denne vægtning resulterede i at enhedspriser 2019K2
 afviger med op til +1.8% eller -3.3% sammenlignet med enhedspriser baseret
 udelukkende på betonindeks. Denne effekt er forsvindende og derfor er udeluk-
 kende anvendt betonindeks. For 2019K2 er betonindekset 110,5.

Prisen på tunneler er primært bestemt af omfang af betonkonstruktioner samt
 afgravninger. Der findes ikke indeks for afgravning under vand. Derfor anvendes
 udelukkende betonindeks for tunneler.

3 Enhedspriser broer

3.1 Principper for beregning af enhedspriser

Enhedspriser udregnes ud fra pris og broareal.

Som udgangspunkt sammenfattes og beskrives alle sammenlignelige referenceprojekter. Efterfølgende udvælges relevante referenceprojekter til brug for Kattegat anlægsoverslag.

3.1.1 Priser på broer

Priser på broer kan være følgende:

- > Fysikestimat ved ikke byggede broer eller broer under opførelse
- > Kontraktsum
- > Endelig pris ved afsluttet byggeri

De store broprojekter indsamlet som referenceprojekter er typisk totalentrepriser, hvor pris inkluderer detailprojektering men ikke bygherreorganisation og tilsyn.

Et fysikestimat er en detaljeret beregning baseret på mængdelister. Dette refereres også til som "bottom up" da man bryder projektet op i mange dele og anvender erfaringspriser for forskellige materialer og komponenter. Hertil lægges en %-sats for detailprojektering. Det er normalt rådgiver som udarbejder fysikestimatet.

Kontraktsum er entreprenørens bud på pris og svarer til et fysikestimat med et detaljeret estimat af omkostninger baseret på den valgte byggemetode evt. med tillæg for risiko eller fradrag hvis projektet vurderes strategisk vigtigt for den bydende.

Endelig pris ved afsluttet byggeri indeholder udover kontraktsum også tillægsarbejder og accepterede ekstrakrav.

For at have sammenlignelige referencer anvendes som udgangspunkt kun fysik-estimer og kontraktsummer. Evt. tillæg håndteres efterfølgende ved korrektionsfaktor.

Hvis vi kun kender den endelige pris på ibrugtagningstidspunktet, fratrækkes så vidt muligt ekstrabetalinger under udførelsen, så det er den oprindelige kontraktpris der lægges til grund for enhedspriserne.

For udenlandske referenceprojekter omregnes oplyst pris til danske kroner vha. valutakursen gældende på tidspunktet for prisen. Derefter fremskrives til 2019K2 vha. dansk indeks.

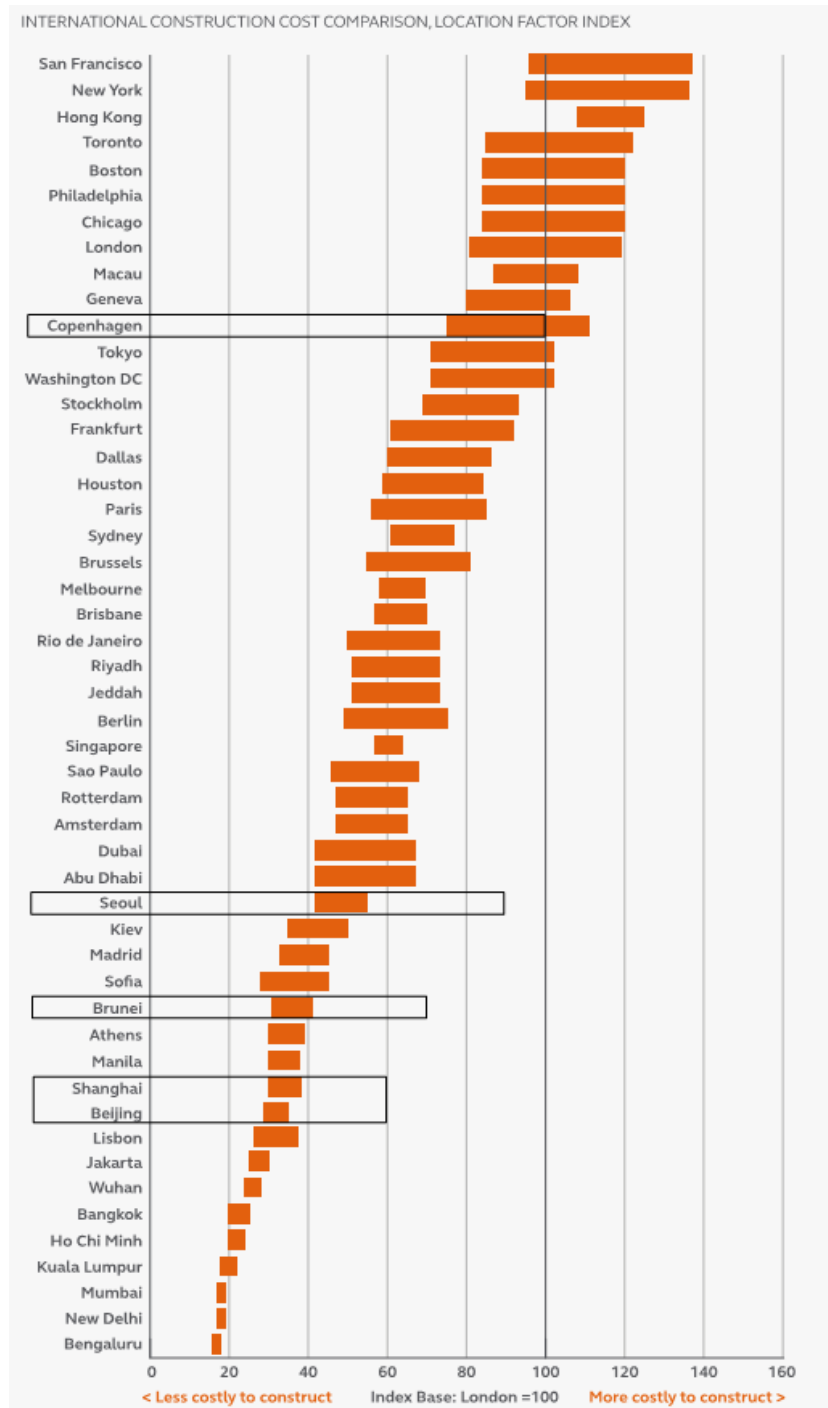
Der korrigeres som udgangspunkt ikke for landeindeks, da de meget store broprojekter i høj grad er drevet af internationale priser. For broer i lande hvor meget billige enhedspriser observeres er dog anvendt landeindeks som følger:

- > Sydkorea: 90
- > Brunei: 70
- > Kina (eksklusive Hong Kong): 60

Reference landeindeks er her 100. Disse 3 landeindeks er bestemt baseret på opgørelser af internationale priser på byggeri /4/ som indeholder alle former for konstruktioner, både husbygning og anlæg. Dertil er estimeret tillæg for at broer er meget specialiserede konstruktioner, hvor internationale priser gælder for visse elementer. Basis landeindeks samt valgt indeks for 3 lande er vist i Figur 3-1. For Kina er anvendt de tre store kystnære byer Beijing, Shanghai og Shenzhen. De øvrige to kinesiske byer i indekset /4/, Macau og Wuhan, er ikke taget i betragtning. Macau er, ligesom Hongkong, kendetegnet ved at være en tidligere koloni, geografisk meget lille, og derfor med meget høje grundpriser. Wuhan er geografisk beliggende langt fra det kinesiske referenceprojekt og derfor ikke relevant.

Følgende usikkerheder knytter sig til anvendelse af landeindeks:

- > Indeks for år 2018-2019 er anvendt selvom nogle af broerne er bygget en del år tidligere.
- > Indeks er i høj grad afhængig af valutakurser.
- > Broelementer er ofte bygget i flere lande og derefter sejlet til brosted, hvorfor et vægtet indeks burde anvendes.
- > Indeks omfatter hovedsageligt storbyer hvor grundpriser er dyrere og det generelt er dyrere at bygge end f.eks. på åbent land/vand hvor broer ofte ligger.
- > Indeks er kun tilgængelig for udvalgte byer og lande.



Figur 3-1 Sammenligning af prisen på byggeri fra /4/

Til sammenligning er også anvendt indeks fra Faithful+Gould:

<https://www.fgould.com/uk-europe/articles/2019-global-location-indices/>

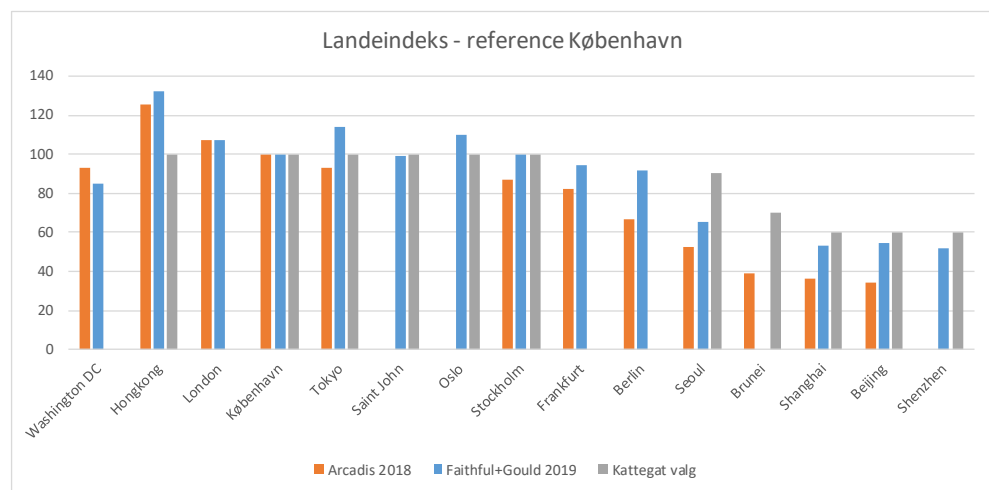
Dette indeks har Washington D.C. som reference. Indeks er regnet om til London for at være sammenlignelig med Arcadis.

Begge indeks er omregnet til at have København som reference. Faithful+Gould inkluderer ikke København, derfor er forholdet mellem København og London

taget fra Arcadis og anvendt ved Faithful+Gould for København som reference. De forskellige indekser er sammenfattet i Tabel 3-1 og Figur 3-2.

Tabel 3-1 Sammenligning af landeindeks (gul markerer referenceby)

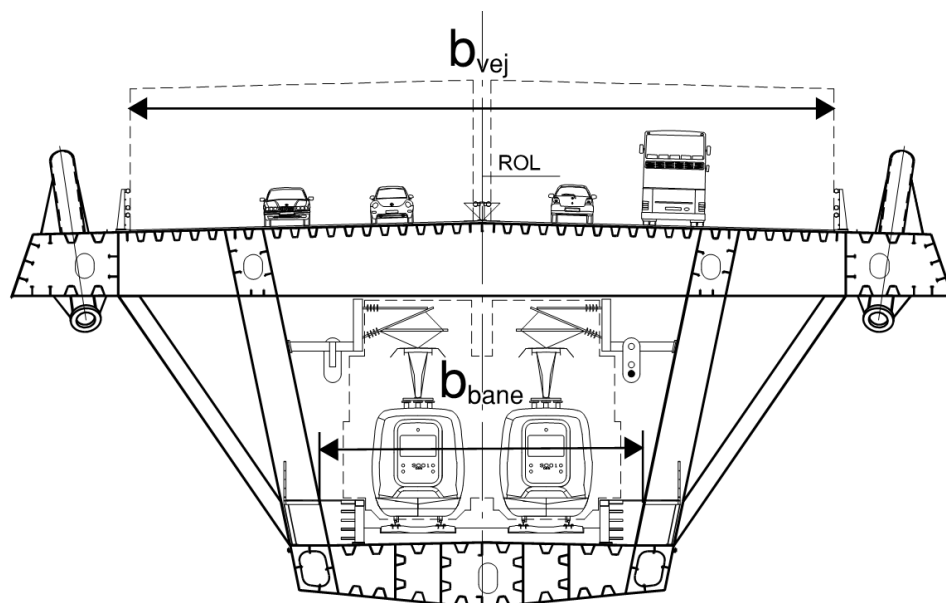
By	Land	Arcadis 2018				Faithful+Gould 2019			
		Nedre	Øvre	Gennemsnit	Kbh ref	USA ref	London ref	Kbh ref	
Washington DC	USA	71	102	86.5	93	100	79	85	
Hongkong	Kina	108	125	116.5	125	155.78	123	132	
London	England	81	119	100	108	126.51	100	108	
København	Danmark	75	111	93	100			100	
Tokyo	Japan	71	102	86.5	93	134.34	106	114	
Saint John	Canada					116.55	92	99	
Oslo	Norge					129.68	103	110	
Stockholm	Sverige	69	93	81	87	117.14	93	100	
Frankfurt	Tyskland	61	92	76.5	82	110.73	88	94	
Berlin	Tyskland	49	75	62	67	108.14	85	92	
Seoul	Sydkorea	42	55	48.5	52	76.76	61	65	
Brunei	Brunei	31	41	36	39				
Shanghai	Kina	30	38	34	37	62.47	49	53	
Beijing	Kina	29	35	32	34	64.28	51	55	
Shenzhen	Kina					60.7	48	52	



Figur 3-2 Sammenligning af landeindekser samt valg for referenceprojekter anvendt for Kattegat

3.1.2 Broareal

Prisen på en bro afhænger i høj grad af hvilken trafik og intensiteten af trafik som skal føres over. Dette afspejles i bredde af kørebaneareal samt antal jernbanespor. Da dette varierer meget for referenceprojekterne, omregnes priser derfor til pris per broareal. Brobredde anvendt til beregning af broareal defineres som vist i Figur 3-3.



Figur 3-3 Definition af bredde af vej og bane

For vej anvendes afstand mellem inderside af ydre autoværn. Bredden af evt. midterautoværn fratrækkes ikke da dette normalt er lille og ofte inddrages i lastbaner. Ved broer med adskilte kørebener, f.eks. pga. central pylon, fratrækkes dette betydelige areal som ikke er belastet med vejtrafik.

For jernbane tages bredde svarende til brodæk nødvendig for sportrace inkl. frit-rumsprofil, kantbjælker og evt. gangareal til evakuering. Dette vil for dragerbroer være indre afstand mellem rækværker mens det for gitterbroer med bane på nedre dæk vil være indre afstand mellem gitterplaner.

Broareal beregnes af formlen:

$$A = (b_{vej} + b_{bane}) \times L$$

hvor L er længden af broen (målt imellem dilatationsfugerne i enderne).

3.1.3 Udvalgelse af referenceprojekter

Kriterier og prioritering for udvælgelse af referenceprojekter er:

- > Sammenlignelig med forventede broløsninger på Kattegat
- > Af "nyere" dato (Storebælt med åbning i 1998 er et af de ældste projekter medtaget)
- > Kabelbårne broer med ét stort eller to mindre gennemsejlingsfag (sidstnævnte for separeret skibstrafik)
- > Bjælkebro med mange moderate fag (lange krydsninger med stor gentagelse)
- > Geografisk nærhed
- > COWI kendskab gennem design eller uafhængig kontrollant-opgave
- > Oplysninger til offentlig rådighed

Referenceprojekter beskrives i følgende 3 afsnit, delt op i:

- > Danske projekter, inkl. Øresundsbroen og Femernbælt brokonceptdesign
- > Udenlandske projekter
- > Øvrige projekter med reference til tidligere udregnede enhedspriser

Hvis ikke andet er beskrevet er underbygningen inkl. piller og pyloner betonkonstruktioner.

Detaljeret geometri, priser, indeks samt beregnede enhedspriser er sammenfattet i tabel vedlagt i Bilag A.

3.2 Danske broer

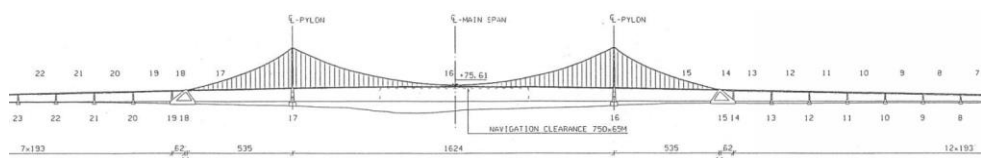
Danske broer er her også krydsninger til Sverige og Tyskland. Alle større danske broer er taget i betragtning på nær Farøbroerne som ikke vurderes relevante pga. spændvidde, manglende opdeling af pris i skråstagsbro og tilslutningsbroer samt bro af ældre dato. Vejlefyordbroen er inkluderet i afsnit 3.4.

3.2.1 Storebæltsbroen

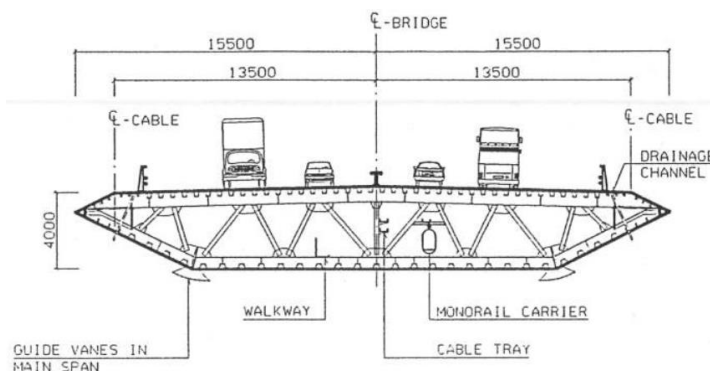
3.2.1.1 Østbro

- Beskrivelse:** Hængebro og tilslutningsbroer motorvej 4+0. Direkte funderet på moræneler i moderat vanddybde. Gennemsejlingshøjde 65m. Overbygning er stålkassedrager. Åbnet 1998.
- Prisantagelse:** Kontraktsum inkl. detailprojektering. Tillæg på tilkøb ikke inkluderet (ca. 7%). Pris fordelt med 60% for hængebro og 40% for tilslutningsbroer.
- Broareal:** 2 vognbaner + nødspor i begge retninger.
- Særlige forhold:** Pris for stålarbejder (Italiensk entreprenør) under markedspris (600 mio. kr. under næstlavest bydende gruppe), derfor krav on statsstøttegaranti.
- Referencer:** Kontraktsum jf. /6/. Fordeling hængebro og tilslutningsbroer jf. Sund & Bælt via Vejdirektoratet/Niras rapport /1/.

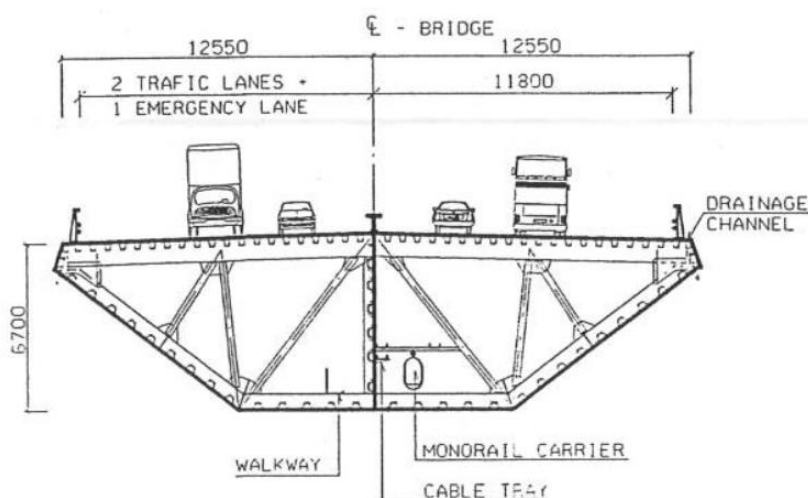
Opstalt (uddrag):



Brotværsnit (hængebro):



Brotværsnit (tilslutningsbro):



3.2.1.2 Vestbro

Beskrivelse:

Lavbro motorvej samt jernbane 4+2. Direkte funderet på moræneler i moderat vanddybde. Dårlige funderingsforhold nær Sprogø medførte afgravninger og dybere fundamenter. Gennemsejlingshøjde 18m. Overbygning er to separate betonkassedragere. Åbnet 1998.

Prisantagelse:

Kontraktsum inkl. detailprojektering beregnet som:

Endelig pris vej 3,093 mia. kr. (1998K2) + bane 3,399 mia. kr. (1997K2) = 11,008 mia. kr. (2019K2) oplyst af S&B i e-mail 06-11-2019

Fratrukket ekstraarbejder taget som forskel mellem endelig pris og kontraktpris for betonentreprisen (ESG) jf. /7/:

Endelig pris 4,486 mia. kr. (1994K1 antaget svarende til overlevering) – kontraktpris 3,153 mia. kr. (1989K2) = 2,056 mia. kr. (2019K2)

Dvs. der er antaget ikke at være ekstraarbejder på dele ikke en del af betonentreprisen (belægning, baneteknik etc.).

Herved fås justeret kontraktpris 8,952 mia. kr. (2019K2).

Tilsvarende for vejbro alene (4+0):

Endelig pris vej 3,093 mia. kr. (1998K2) = 5,165 mia. kr. (2019K2) oplyst af S&B i e-mail 06-11-2019

Fratrukket ekstraarbejder taget som halvdelen af forskel mellem endelig pris og kontraktpris for betonentreprisen (ESG) jf. ovenstående beregning for 4+2:

$$2,056 \text{ mia. kr.} / 2 = 1,028 \text{ mia. kr. (2019K2)}$$

Dvs. det er antaget at halvdelen af ekstraarbejder er for vejbroen og at der ikke var ekstraarbejder på dele ikke en del af betonentreprisen (belægning, banelogik etc.).

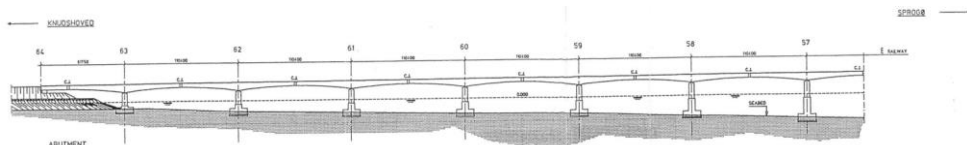
Herved fås justeret kontraktpris 4,137 mia. kr. (2019K2).

Broareal: 2 vognbaner + nødspor i begge retninger. 2 jernbanespor.

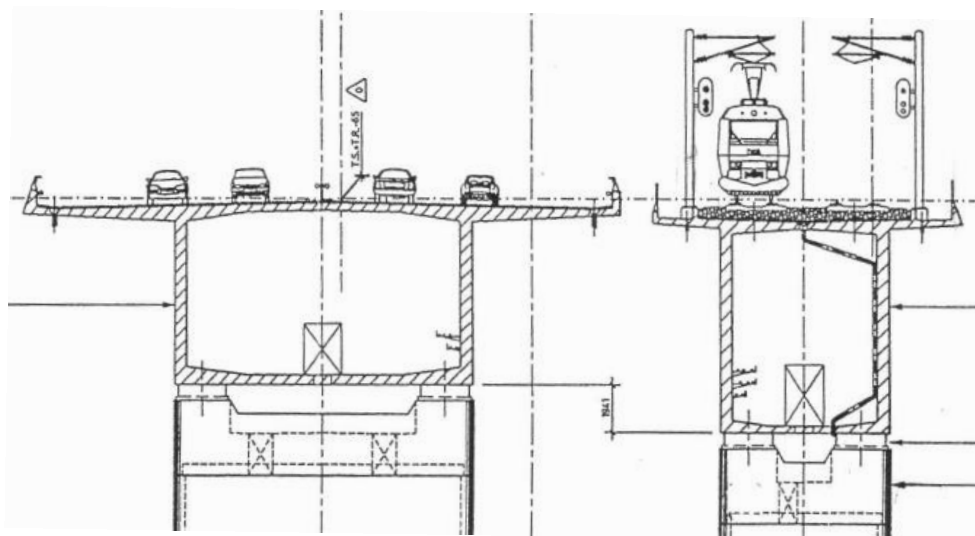
Særlige forhold: Økonomisk optimeret design for valgt byggemetode med præfabrikerede fag. Som konsekvens er ekspansionsfuger beliggende midt i fag og derfor nødvendigt med ekstra bropille hver ca. 1km som æstetisk ikke er nogen god løsning.

Referencer: Kontraktsum jf. /7/ og e-mails fra S&B.

Opstalt (uddrag):



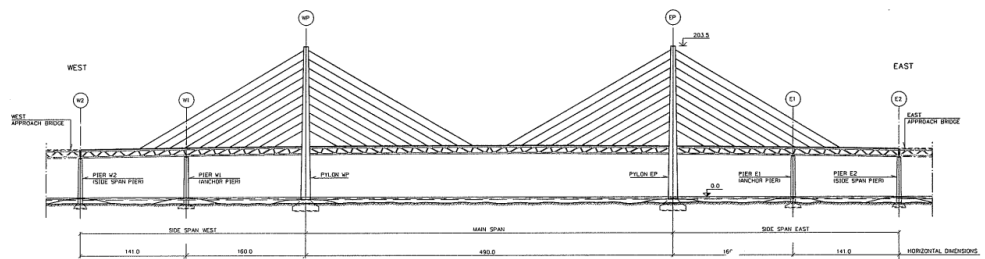
Brotværsnit (over pille):



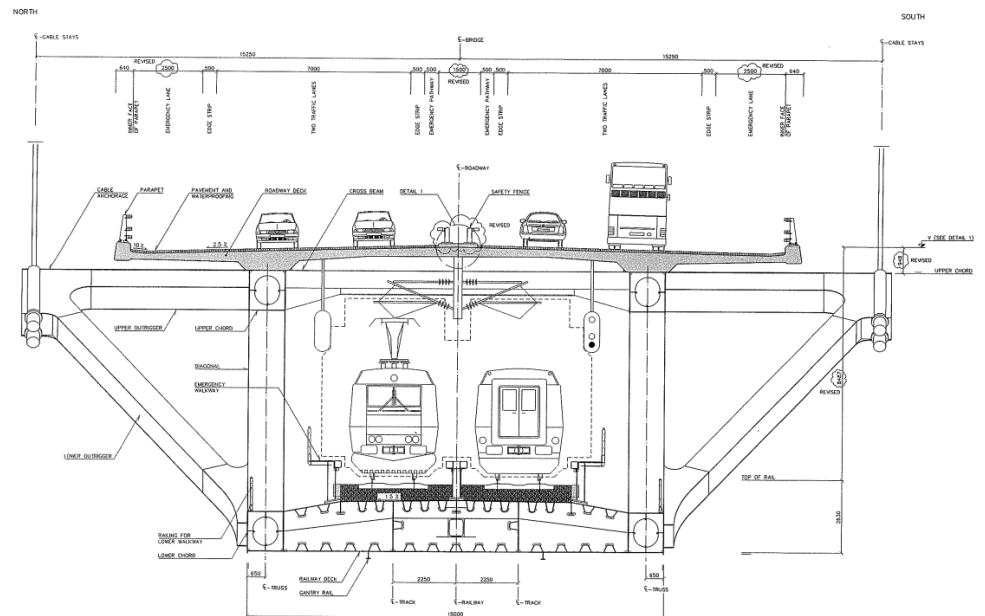
3.2.2 Øresundsbroen

- Beskrivelse:** Skråstagsbro og tilslutningsbroer motorvej samt jernbane 4+2 i 2 niveauer. Direkte funderet på kalk i moderat vanddybde. Gennemsejlingshøjde ca. 55m. Overbygning er kompositgitterdrager. Åbnet 2000.
- Prisantagelse:** Kontraktsum inkl. detailprojektering. Pris oplyst både for skråstagsbro og tilslutningsbroer med beregnet fordeling 29% hhv. 71%.
- Broareal:** 2 vognbaner + nødspor i begge retninger. 2 jernbanespor.
- Særlige forhold:** Usikkerhed om indhold af priser, både mht. baneinstallationer og udfletningsanlæg på Peberholm og Lernacken. Der er usikkerhed om S&B's tal, da pris er betydeligt højere end endelig byggepris på 6,8 mia. kr. jf. /8/ og der angives 1990K2 priskvartal, som er før projektet blev påbegyndt.
- Referencer:** COWI tegninger.
Pris jf. Sund & Bælt e-mail 2019-11-06.

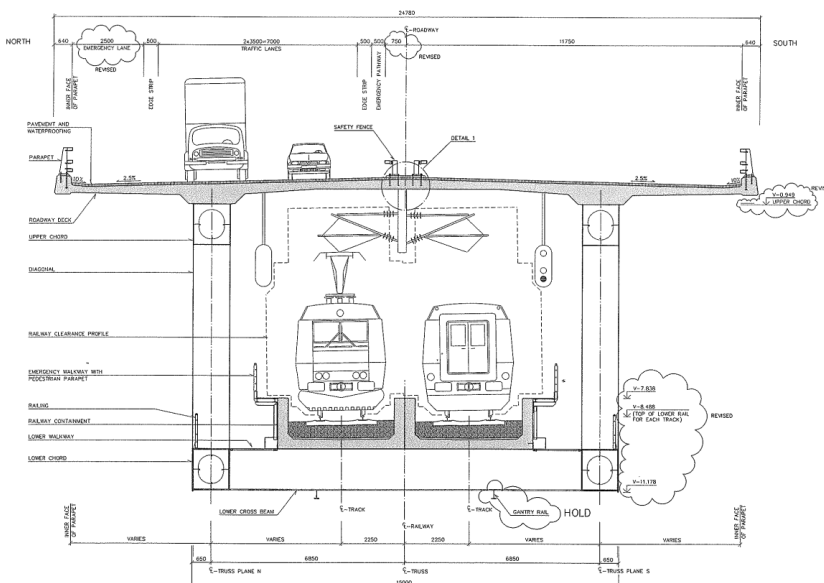
Opstalt (uddrag):



Brotværsnit (skråstagsbro):



Brotværsnit (tilslutningsbro):



3.2.3 Femernbælt brokonceptdesign – Variant 1

Beskrivelse: Konceptdesign for 3 pylons skrånstagsbro og tilslutningsbroer motorvej samt jernbane 4+2 i 2 niveauer refereret til som Variant 1. Direkte funderet på overvejende moræneler i betydelig vanddybde. Gennemsejlingshøjde 66,2m. Overbygning er stål-gitterdrager for skrånstagsbro og kompositgitterdrager for tilslutningsbroer. Bro-løsningen blev fravalgt til fordel for tunnel.

Prisantagelse: Meget detaljeret fysikestimat delt op i skrånstagsbro, tilslutningsbroer underbygning og tilslutningsbroer overbygning. Detailprojektering inkluderet. "Construction risk and opportunities" ekskluderet (fastsat til ca. 10% i fysikestimat).

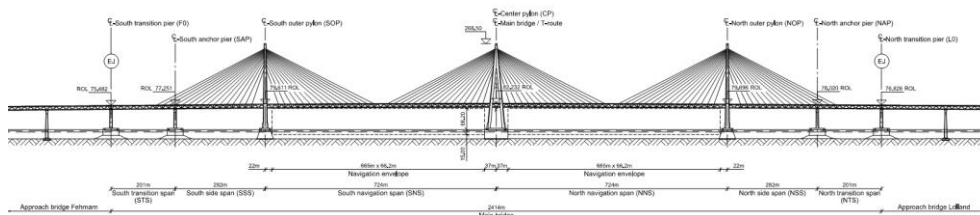
Priser baseret på at stålkomponenter til brodragere blev fremstillet i Kina og samlet i Polen, hvor også betondæk skulle støbes. Derfor lav pris.

Broareal: 2 vognbaner + nødspor i begge retninger. 2 jernbanespor.

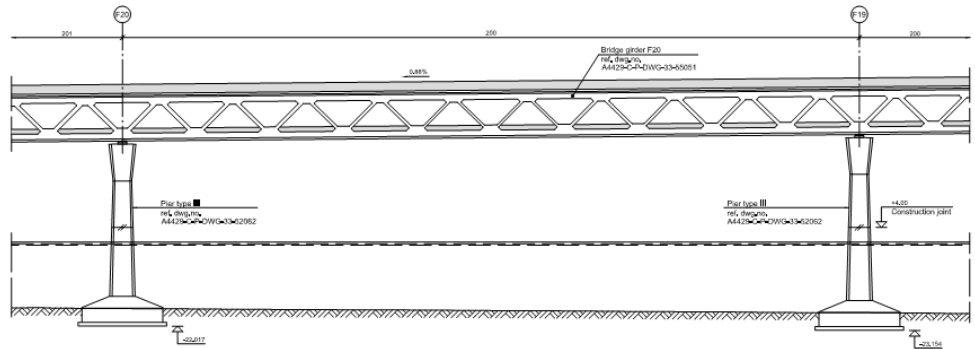
Særlige forhold: Bro ikke realiseret.

Referencer: COWI/Obermeyer joint-venture tegninger.
COWI/Obermeyer joint-venture rapport /2/

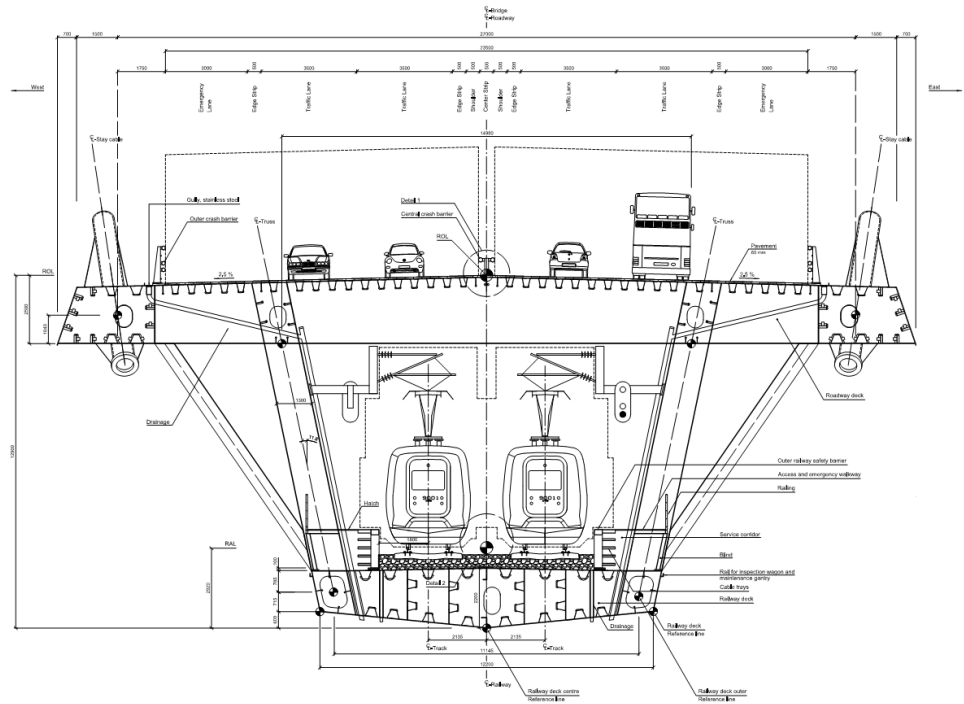
Opstalt (skrånstagsbro):



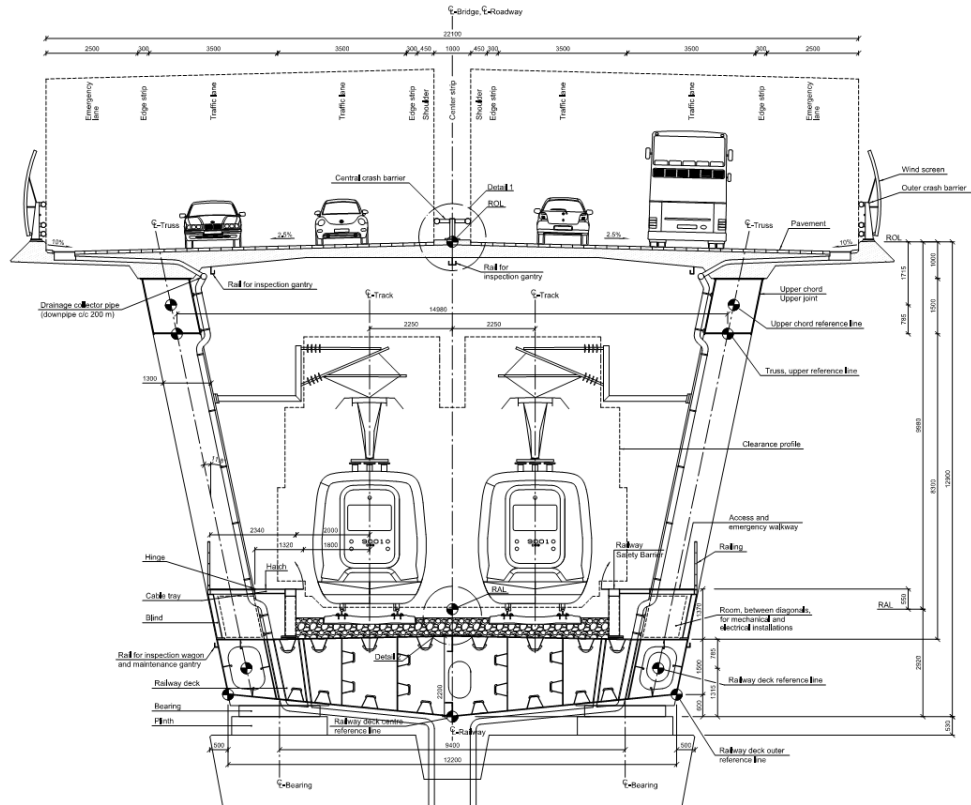
Opstalt (typisk fag til slutningsbro, variant 2):



Brotværsnit (skråstagsbro):



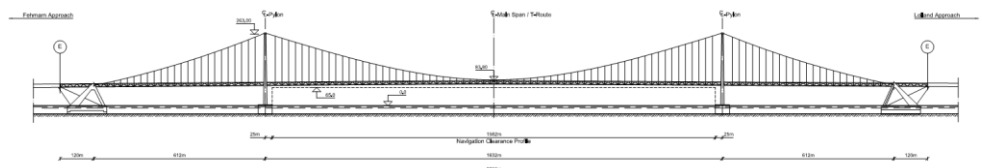
Brotværsnit (tilslutningsbro, variant 2):



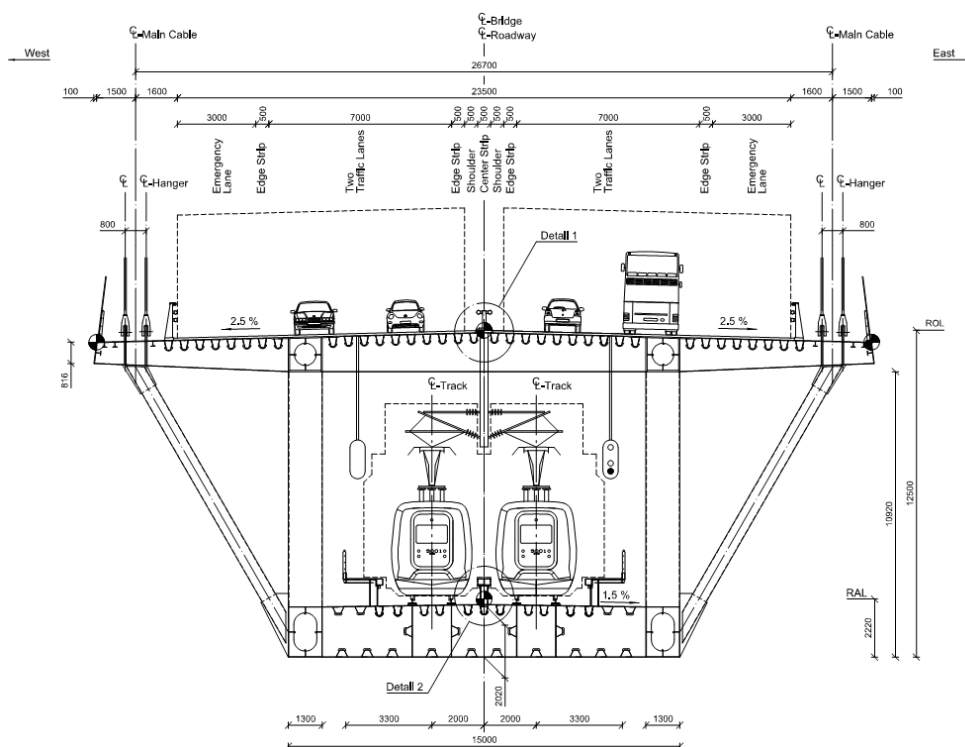
3.2.4 Femernbælt brokonceptdesign – Hængebro A2-2

- Beskrivelse:** Konceptdesign for hængebro og tilslutningsbroer motorvej samt jernbane 4+2 i 2 niveauer refereret til som koncept A2-2. Direkte funderet på overvejende moræneler i betydelig vanddybde. Gennemsejlingshøjde 65m. Overbygning er stål-gitterdrager for hængebro og kompositgitterdrager for tilslutningsbroer. Bro ikke realiseret.
- Prisantagelse:** Groft fysikestimat for hængebro alene.
- Broareal:** 2 vognbaner + nødspor i begge retninger. 2 jernbanespor.
- Særlige forhold:** Fysikestimatet blev udarbejdet for at kunne sammenligne forskellige hængebroer og er som sådan ikke noget præcist fysikestimat for vist hængebrosløsning. Hængebrosløsningen blev fravalgt tidligt i konceptdesign primært pga. lang byggetid.
- Referencer:** COWI/Obermeyer joint-venture tegninger.
COWI/Obermeyer joint-venture rapport /3/ inkl. baggrundsregneark.

Opstalt:



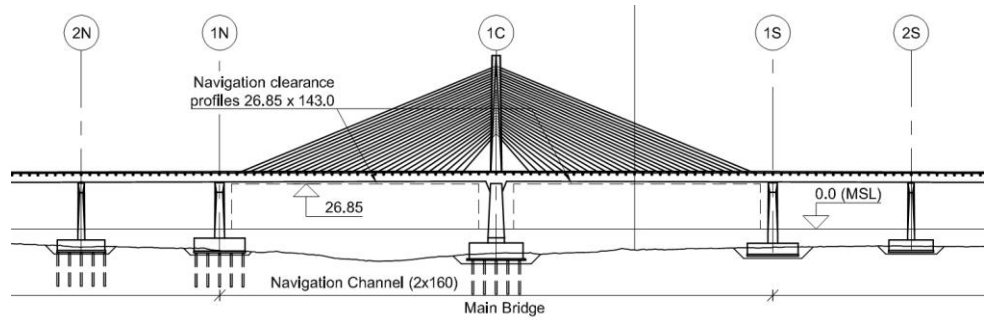
Brotværsnit:



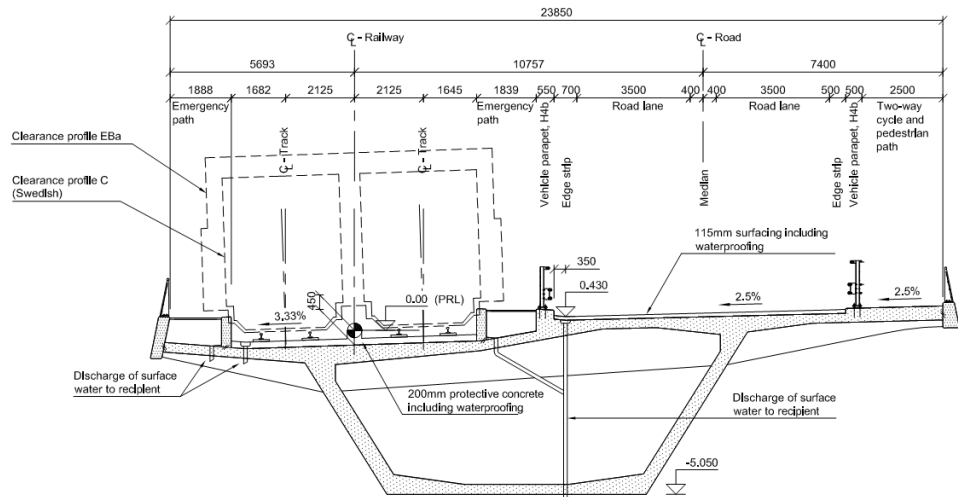
3.2.5 Ny Storstrømsbro

- Beskrivelse:** Udbudsdesign for 1 pylons skrånstagsbro og tilslutningsbroer vej samt jernbane 2+2 i et niveau. Direkte funderet på overvejende moræneler i moderat vanddybde. Gennemsejlingshøjde 26,85m. Overbygning er betonkassedrager. Byggeriet pågår.
- Prisantagelse:** Kontraktsum inkl. detailprojektering fratrukket 140 mio. kr. for landanlæg (estimeret). Pris fordelt med 15% for skrånstagsbro og 85% for viaduktbroer. Denne fordeling er beregnet ud fra et detaljeret fysikestimat, med opdeling af poster i hovedbro hhv. viaduktfag. Resterende poster, som er fælles for hele broen, er fordelt i forhold til bro længder.
- Broareal:** 1 vognbane i begge retninger samt cykel/gangsti. 2 jernbanespor.
- Særlige forhold:** Fase 3 design (Preliminary design).
- Referencer:** COWI tegninger og fysikestimat for ny bro løsning E-COS 6.2.

Opstalt (uddrag):



Brotværsnit:



3.2.6 Kronprinsesse Marys bro (Fjordforbindelsen Frederikssund)

Beskrivelse: Højbro vej 4+0. Funderet på pæle i varierende vanddybde. Gennemsejlingshøjde 22m. Overbygning er en betonkassedrager. Åbnet 2019.

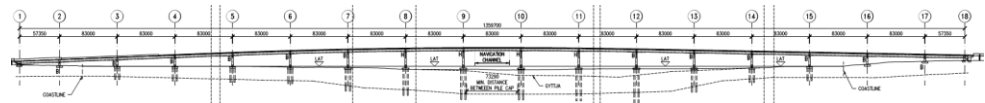
Prisantagelse: Kontraktsum inkl. detailprojektering.

Broareal: 2 vognbaner i begge retninger.

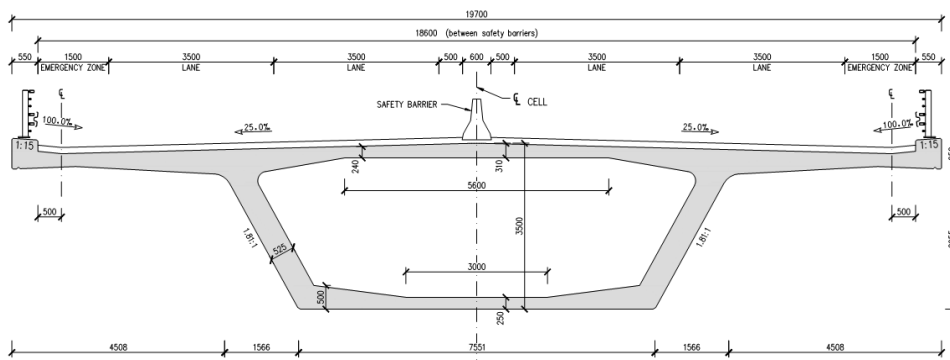
Særlige forhold: Forholdsvis kort bro sammenlignet med Kattegatforbindelsen. Funderet i dårlig jord.

Referencer: Basic Design tegninger fra Sund & Bælt. Pris jf. Sund & Bælt e-mail 2019-11-11.

Opstalt:



Brotværsnit:



3.3 Udenlandske broer

For de udenlandske broer beskrives først forbindelser med skråningsbroer og derefter forbindelser med hængebroer, i rækkefølge efter stigende spændvidde af hovedfag.

3.3.1 Temburong – Brunei

Beskrivelse:

To mindre skråningsbroer og 13km viaduktbroer motorvej 4+0. Funderet på pæle i lav vanddybde. Gennemsejlingshøjde 32,6m. Overbygning er betonkassedrager. Byggeri pågår.

Prisantagelse:

Estimeret anlægsoverslag fra bygherren oplyst til COWI 08-08-2015. Fordeling mellem 3 brodele estimeret af COWI således at skråningsbroer bliver ca. dobbelt så dyre som viadukt fag.

Broareal:

2 vognbaner og nødspor i begge retninger.

Særlige forhold:

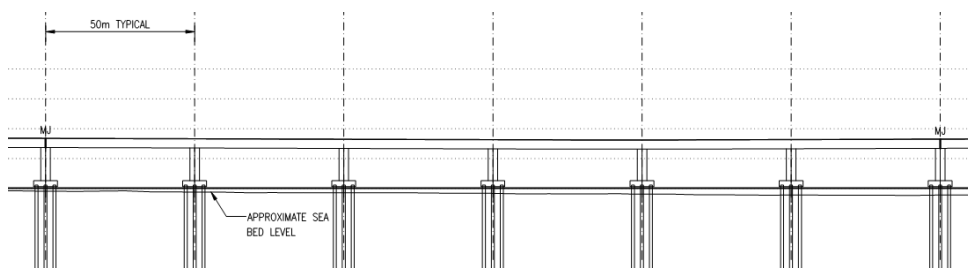
Kinesisk entreprenør og land med lave byggeomkostninger. Meget lav vanddybde. Derfor billig m² pris.

Kun viaduktbroerne er relevante i Kattegatsammenhæng og derfor er opstalt og tværsnit kun vist for disse.

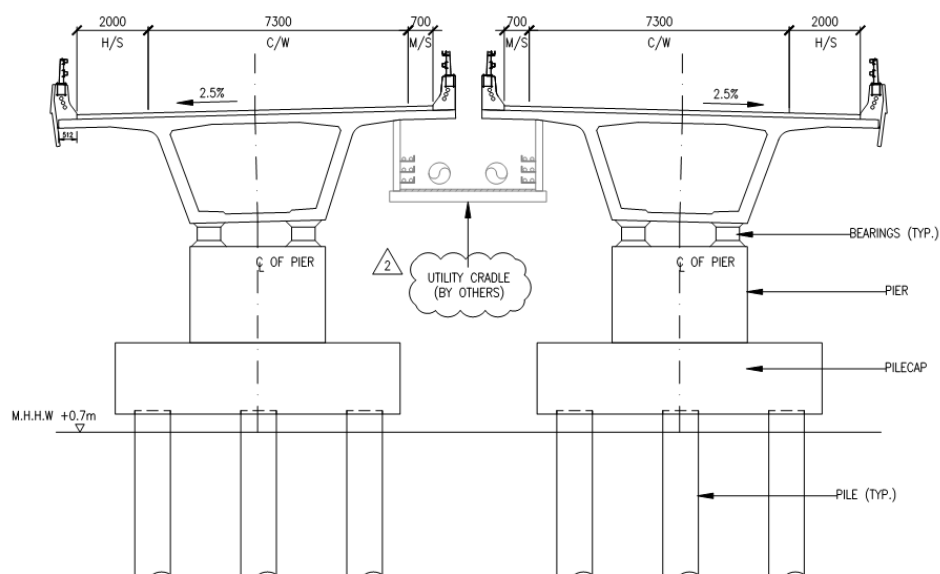
Referencer:

Udbudstegninger fra Ove Arup & Partners.
Projektreferencebrev fra bygherren.

Opstalt (typisk ekspansionssektion):



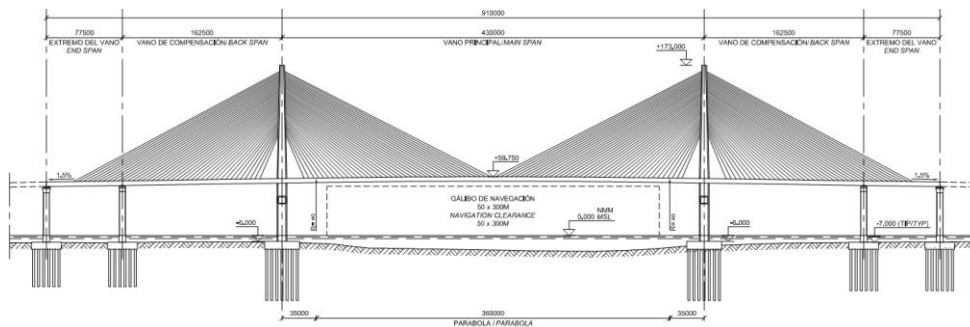
Brotværsnit:



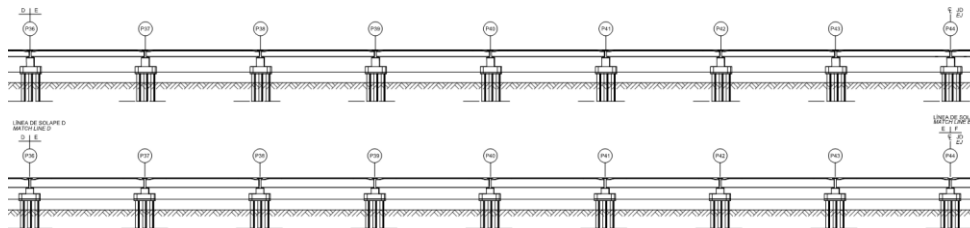
3.3.2 Puente Nigale (Maracaibo) – Venezuela

- Beskrivelse:** Skråstagsbro og tilslutningsbroer motorvej samt jernbane 4+2 på 2 separate dragere. Funderet på pæle i moderat vanddybde. Gennemsejlingshøjde 50m. Overbygning er betonkassedragere. Byggeri påbegyndt 2012 men stoppet pga. ustabilitet i Venezuela.
- Prisantagelse:** Kontraktsum inkl. detailprojektering (uformel information til COWI med vis usikkerhed). Fordeling mellem brodele estimeret af COWI således at skråstagsbro er antaget at have ca. dobbelt så høj enhedspris som tilslutningsbroer.
- Broareal:** 2 vognbaner + nødspor i begge retninger. 2 jernbanespor.
- Særlige forhold:** Hvis broen var blevet bygget, ville den have været verdens længste skråstagsbro med jernbane på betondrager bygget som præfabrikeret segmentbro.
- Mht. faglængder er primært tilslutningsbroerne relevante i Kattegatsammenhæng.
- Stor usikkerhed både på totalpris og fordeling imellem skråstagsbro og tilslutningsbroer.
- Referencer:** COWI tegninger.

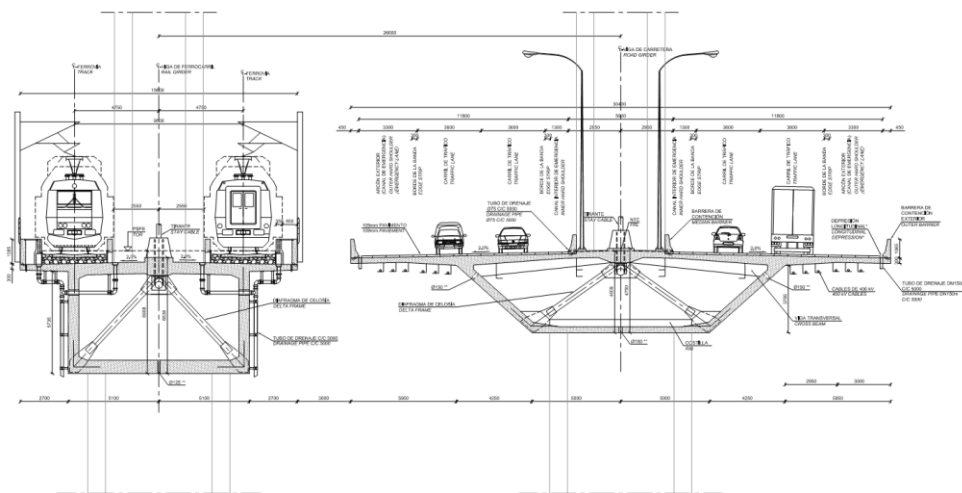
Opstalt (skråstagsbro, vejdrager vist):



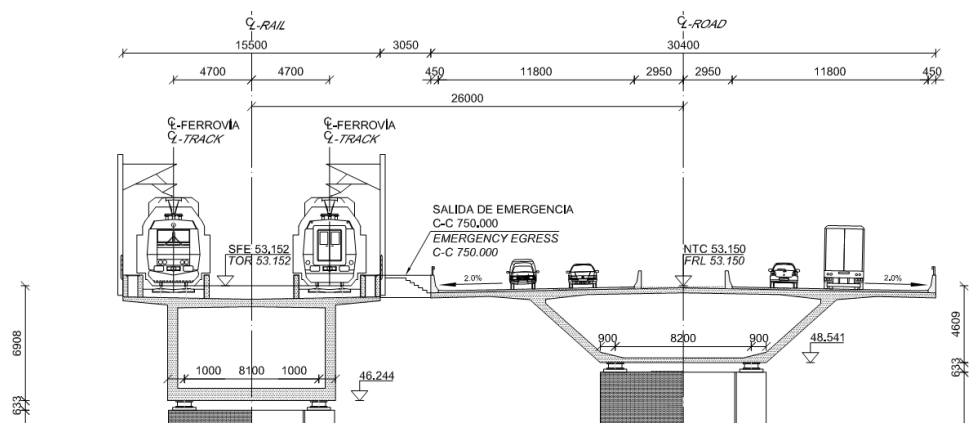
Opstalt (tilslutningsbroer uddrag, vejdrager øverst):



Brotværsnit (skråstagsbro):



Brotværsnit (tilslutningsbroer):



3.3.3 Busan-Geoje fixed link – Sydkorea

Beskrivelse: Fast forbindelse bestående af 2 skråstagsbroer, tilslutningsbroer samt sænketunnel (ikke del af enhedsprisberegning) motorvej 4+0. Direkte funderet (typisk) i betydelig vanddybde. Gennemsejlingshøjde 52m. Overbygning er komposit pladedrager. Åbnet 2010.

Prisantagelse: Byggepris (construction value) fra entreprenøren oplyst til COWI 04-04-2016. Fordeling mellem 3 brodele estimeret af COWI således at skråstagsbroer er antaget ca. 2,5 gange dyrere pr. m² end tilslutningsbroerne.

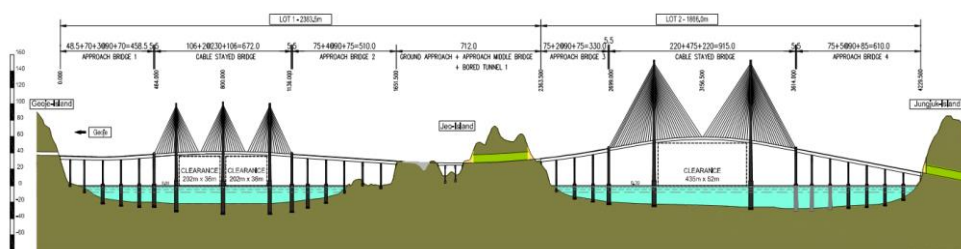
Broareal: 2 vognbaner i begge retninger. Skråstagsbro med størst spændvidde har desuden slæbespor i en retning.

Særlige forhold: Ekstreme vind og bølgelaster.

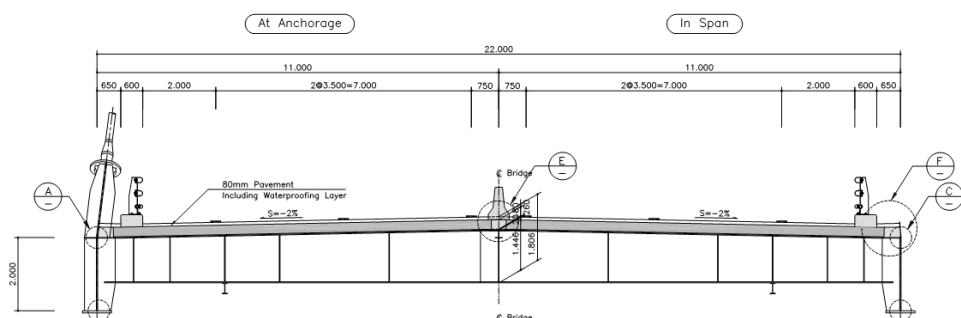
Mht. faglængder er primært tilslutningsbroerne relevante i Kattegatsammenhæng.

Referencer: COWI tegninger og projektreferancebrev fra entreprenøren.

Opstalt:



Brotværsnit (skråstagsbro, tilslutningsbroer tilsvarende bredde men flere højere I-drage):



3.3.4 Quensferry Crossing – Skotland

Beskrivelse: Skråstagsbro og tilslutningsbro motorvej 4+0. Funderet på pæle i varierende vanddybde. Gennemsejlingshøjde 47,85m. Overbygning er kompositkassedragger. Åbnet 2017.

Prisantagelse: Kontraktpris taget fra internettet. Pris inkluderer 4km vej som dog udgør en forsvindende del af prisen. Fordeling mellem 2 brodele og vej estimeret af COWI således at tilslutningsbroer får typisk enhedspris og hoveddelen (90%) er for skråstagsbroen.

Til sammenligning er endelig pris på internettet oplyst til GBP 1,35 mia. eller 70% over kontrakt. Dette skyldtes bl.a. store forsinkelser. For sammenligning med andre projekter er derfor anvendt kontraktsum.

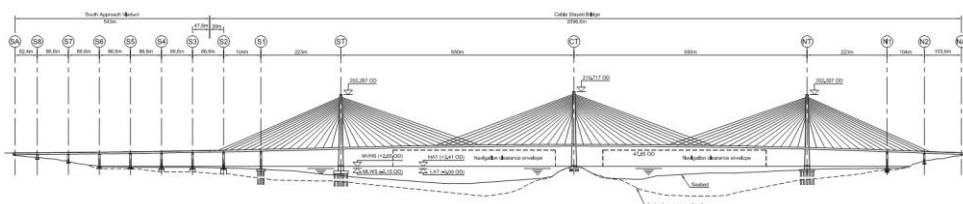
Broareal: 2 vognbaner + nødspor i begge retninger.

Særlige forhold: Verdens længste skråstagsbro med kompositdrager.

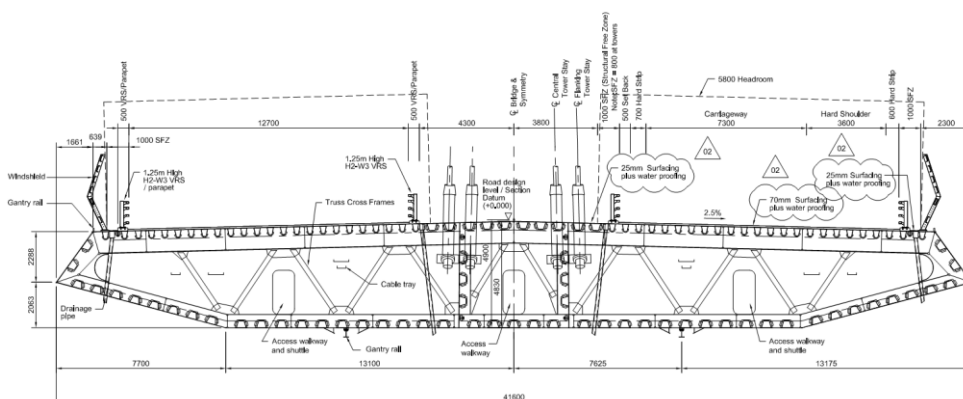
COWI's kendskab til broen er primært gennem tilbudsdesign for en entreprenørgruppe som ikke vandt opgaven. Tværsnit vist nedenfor er derfor ikke repræsentative for den byggede bro.

Referencer: Pris: https://en.wikipedia.org/wiki/Queensferry_Crossing
COWI tegninger for tilbudsdesign.

Opstalt:



Brotværsnit:



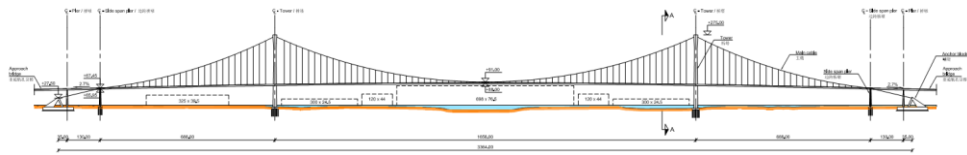
3.3.5 Shenzhong fixed link – Kina

- Beskrivelse:** Fast forbindelse bestående af en stor hængebro, en skrånstagsbro, tilslutningsbroer samt sænketunnel (ikke del af enhedsprisberegning) motorvej 8+0. Pælefunderet (typisk) i moderat vanddybde. Gennemsejlingshøjde 76,5m. Overbygning varierer. Byggeri påbegyndt 2017.
- Prisantagelse:** Priser fra billigst bydende entreprenør oplyst til COWI af bygherre. Pris opdelt i forskellige brodele. Kvartal for pris er ikke oplyst, derfor er pris antaget at svare til tidspunkt for evaluering af tilbud estimeret til 2017K2.
- Broareal:** 4 vognbaner + nødspor i begge retninger.
- Særlige forhold:** COWI's kendskab til broen er gennem vindende konceptdesign til international design konkurrence. Efterfølgende har COWI rådgivet bygherre samt kinesiske designere. Tegninger nedenfor er fra designkonkurrence og repræsenterer ikke endeligt design.
- Kinesisk entreprenør og land med lave byggeomkostninger. Lav vanddybde. Derfor billig m² pris.

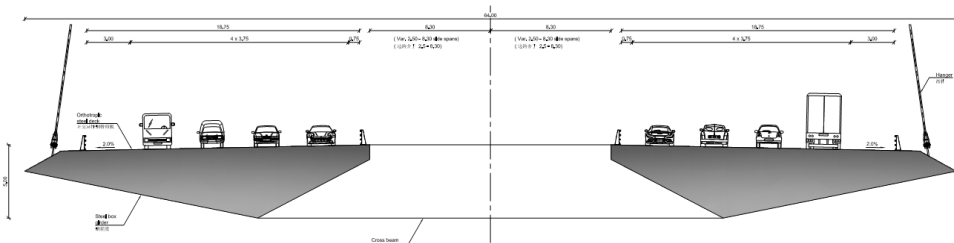
Referencer: COWI tegninger samt prisinformation fra bygherre.

https://en.wikipedia.org/wiki/Shenzhen%E2%80%93Zhongshan_Bridge

Opstalt (hængebro):



Brotværsnit (hængebro):



3.3.6 Hålogaland – Norge

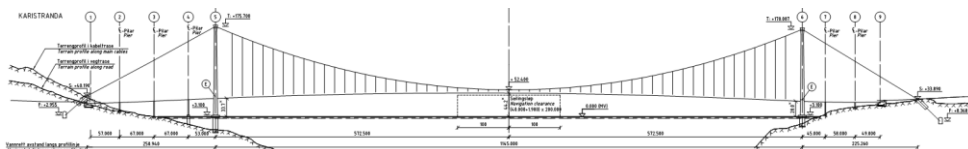
- Beskrivelse:** Hængebro vej 2+0. Direkte funderet på klippe, delvis på land. Gennemsejlingshøjde 40 m. Overbygning er stål-kassetrager i hovedfag og betonkassetrager i sidefag som er understøttet på piller i stedet for ophængt. Åbnet 2018.
- Prisantagelse:** Kontraktsum inkl. detailprojektering oplyst af bygherre. Fordeling mellem 2 brodele estimeret af COWI således at viadukt fag med gennemsnitlig faglængde på 60m får typisk enhedspris for den slags broer og resterende er for hængebro delen. Herved udgør hængebroen 82% af prisen.

Broareal: 1 vognbane i begge retninger samt gang/cykelsti.

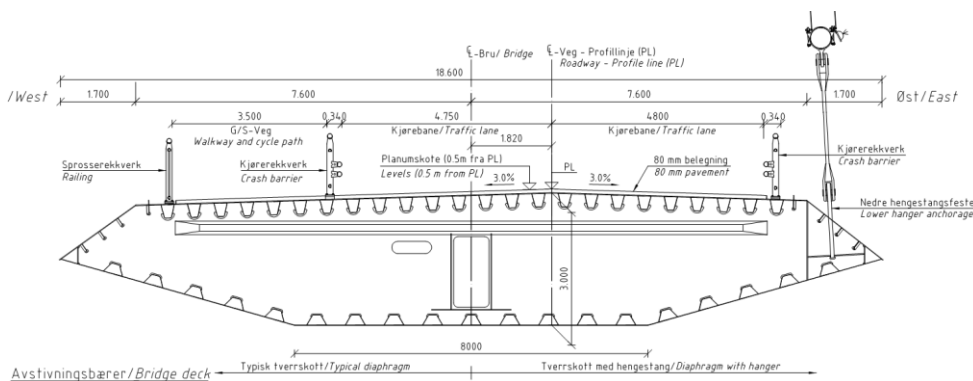
Særlige forhold: Sidefag er betonstrager understøttet på piller og hovedkabler er forankret direkte i klippe og dermed ikke behov for store ankerblokke. Dette bidrager til total pris lavere end for typiske hængebroer. Brodrager meget smal hvormed vindlast bliver afgørende, dette bidrager til højere pris end for typiske hængebroer.

Referencer: COWI tegninger samt pris informeret af bygherre.

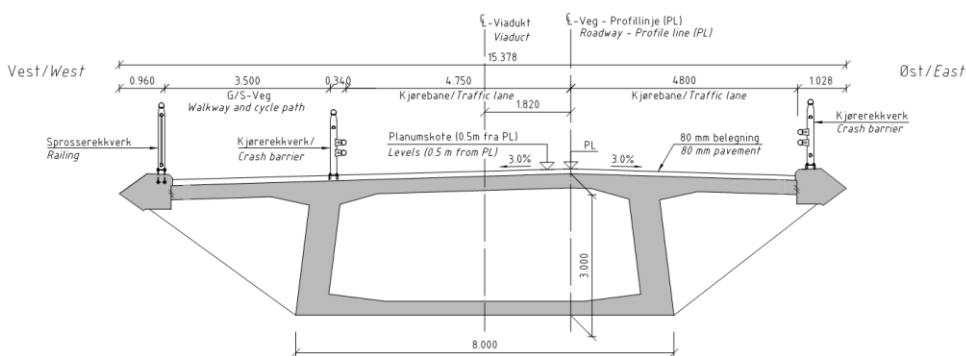
Opstalt:



Brotværsnit (hovedfag):



Brotværsnit (sidefag):



3.3.7 Hardanger – Norge

Beskrivelse: Hængebro vej 2+0. Direkte funderet på klippe på land. Gennemsejlingshøjde 55m. Overbygning er stålkassedrager. Åbnet 2013.

Prisantagelse: Pris for brodel jf. Niras rapport /1/

Broareal: 1 vognbane i begge retninger samt gang/cykelsti.

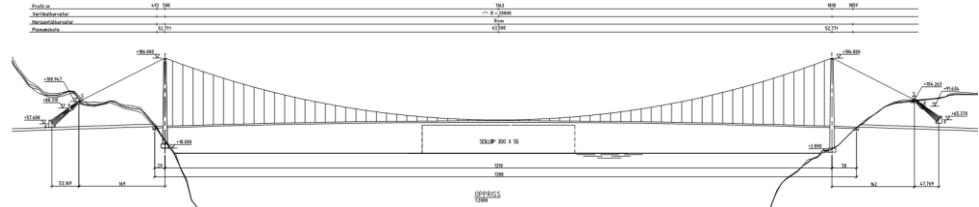
Særlige forhold: Forholdsvis billig hængebro da ingen sidefag og hovedkabler er forankret direkte i klippe og dermed ikke behov for store ankerblokke. Bro længde er

afstand mellem endevederlag svarende til hovedfag samt to korte sidefag på 20 m hhv. 50 m.

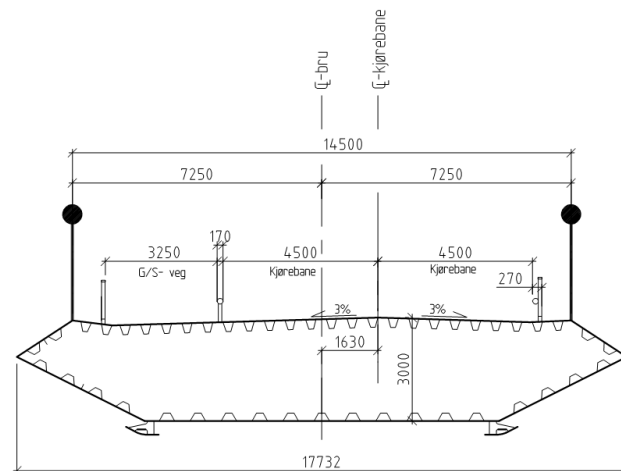
Referencer:

<https://www.vegvesen.no/Vegprosjekter/Hardangerbrua/InEnglish>

Opstalt:



Brotværsnit:



3.3.8 Tsing Ma – Hong Kong

Beskrivelse:

Hængebro motorvej samt jernbane 6+2 i 2 niveauer. Direkte funderet på land (delvist opfyldt). Gennemsejlingshøjde 53m. Overbygning er delvis åben stål-kassedrager med jernbane inde i kassen.

Prisantagelse:

Pris taget fra internettet. Valutakurs for Hong Kong dollars 1997 estimeret til 0,75.

Broareal:

3 vognbaner i begge retninger. 2 jernbanespor samt 2 reservevognbaner (bruges ved tyfon) inde i kassen.

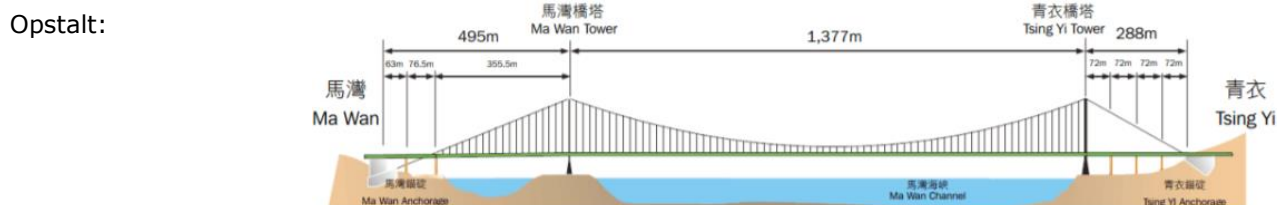
Bredde af vej på øvre dæk estimeret til 39m (brodæk er 41m bredt). For bredde af bane er anvendt 12,4m svarende til Øresund. Den ekstra bredde fra reservevognbaner er ikke medtaget da de bruges ved høje vindhastigheder, hvor øvre dæk er lukke for trafik.

Særlige forhold:

Hængebro med længste spændvidde med jernbane fra åbning 1997 og frem til 2016.

Tegningsmateriale ikke til rådighed.

Referencer: Internettet:
https://en.wikipedia.org/wiki/Tsing_Ma_Bridge
<https://industrialhistoryhk.org/the-construction-of-the-tsing-ma-bridge/>



Brotværsnit: Ikke til rådighed.

3.3.9 Yavuz Sultan Selim (3rd Bosphorus) – Tyrkiet

Beskrivelse: Hybridbro (kombineret hænge- og skråstagsbro) motorvej og jernbane 8+2. Funderet på land. Gennemsejlingshøjde 64m. Overbygning er stål-kassetrager i hovedfag og betonkassetrager i sidefag. Nogle af skråstagnene er forankret i land. Åbnet 2016.

Prisantagelse: Budgetteret pris jf. internettet. Projektet inkluderer også 115km vej på land. COWI har estimeret vejdel til at udgøre 25%.

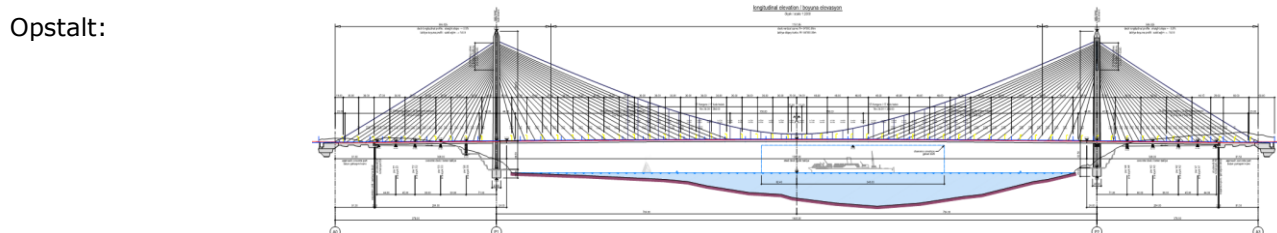
Broareal: 4 vognbaner i begge retninger. 2 jernbanespor.

Særlige forhold: Kabelbåret bro med verdens længste spændvidde for jernbane.

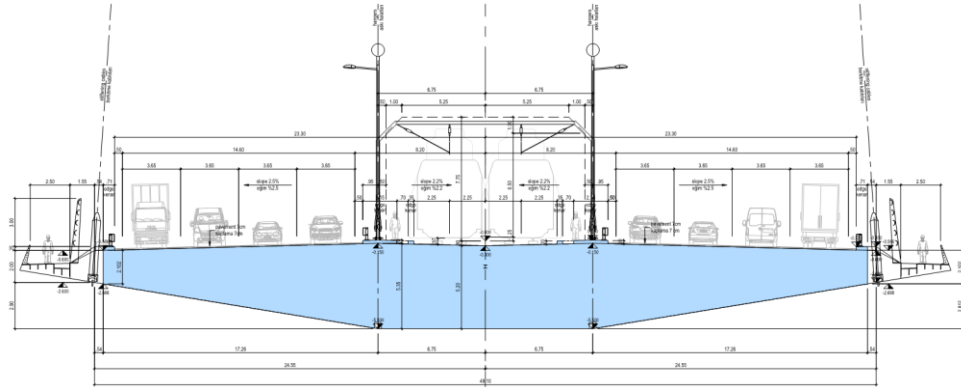
Pyloner og ankerblokke på land. Ankerblokke mindre end for hængebro. Kabelsystem stivere end for hængebro, fordel mht. deformationer og rotationer af brodrager.

Usikkerhed på prisfordeling bro/vej.

Referencer: Tegninger fra designer (T engineering, Michel Virlogeux, Greisch)
 Pris: https://en.wikipedia.org/wiki/Yavuz_Sultan_Selim_Bridge



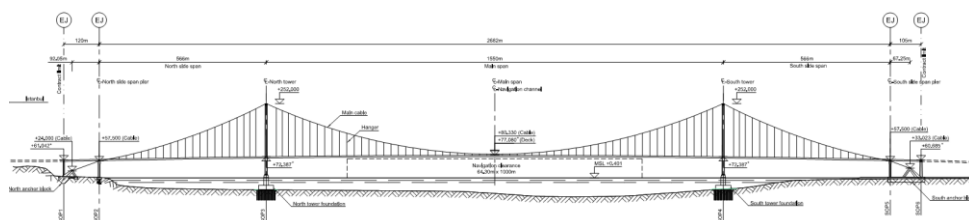
Brotværsnit (hoved-
fag):



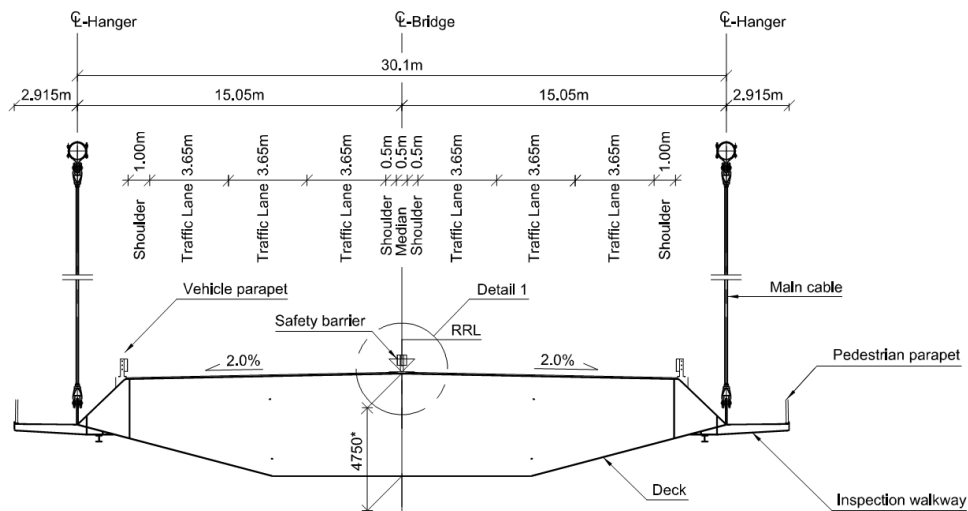
3.3.10 Osman Gazi (Izmit) – Tyrkiet

- Beskrivelse: Hængebro motorvej 6+0. Direkte funderet på dybt vand (pyloner) samt på land. Gennemsejlingshøjde 64,3m. Overbygning er stål-kassedrager. Åbnet 2016.
- Prisantagelse: Pris taget fra internettet.
- Broareal: 3 vognbaner i begge retninger.
- Særlige forhold: Designet for store jordskælv og derfor stålpyloner.
- Nyeste hængebro med vej der er sammenlignelig med spændvidde på Kattegat forbindelse.
- Referencer: COWI tegninger.
Pris: https://en.wikipedia.org/wiki/Osman_Gazi_Bridge

Opstalt:



Brotværsnit:



3.3.11 Akashi Kaikyō – Japan

Beskrivelse: Hængebro vej 6+0. Direkte funderet i varierende vanddybde. Gennemsejlingshøjde 65,75m. Overbygning er stål gitterdrager. Åbnet 1998.

Prisantagelse: Pris taget fra internettet.

Broareal: 3 vognbaner i begge retninger.

Særlige forhold: Verdens længste hængebro. Ekstreme vind og jordskælvslaster. Japan var ved byggeriet et lukket marked uden international konkurrence.

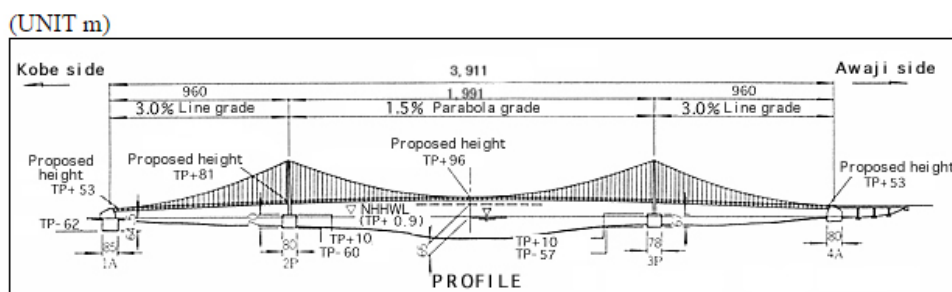
Af disse grunde er enhedsprisen betydeligt højere end normalt og dermed ikke anvendelig for Kattegatforbindelsen.

Referencer: Internettet:

Tegning: <https://en.wikiarquitectura.com/building/akashi-kaikyo-bridge/>

Pris: https://en.wikipedia.org/wiki/Akashi_Kaikyo%C5%8D_Bridge

Opstalt:

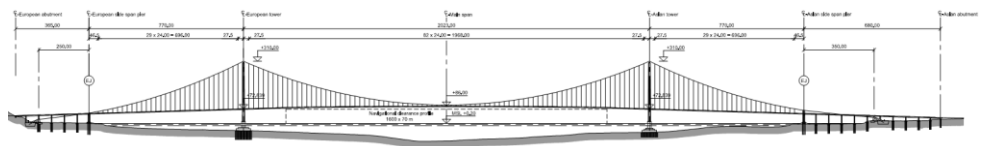


Brotværsnit (tegning ikke til rådighed):

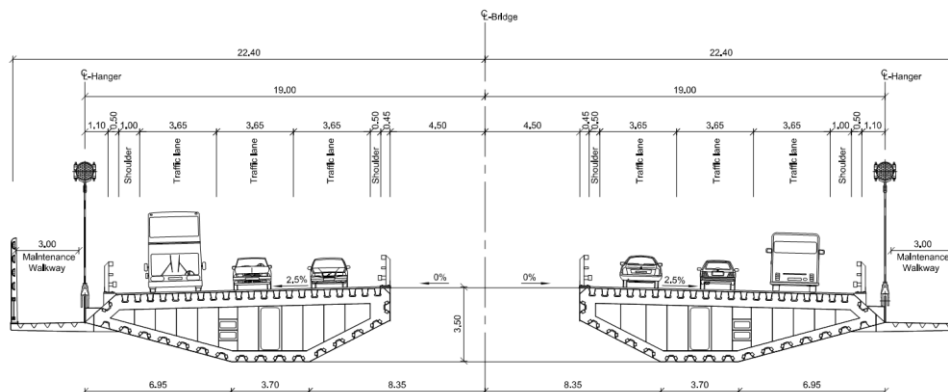


3.3.12 Çanakkale 1915 – Tyrkiet

- Beskrivelse:** Hængebro og tilslutningsbroer motorvej 6+0. Direkte funderet i varierende vanddybde og delvis på land. Gennemsejlingshøjde 70m. Overbygning er dobbelt stål-kassedrager med tværbjælker for hængebro og 2 parallelle betonkassedrager for tilslutningsbroer. Under opførelse.
- Prisantagelse:** Pris taget fra internettet. Projektet inkluderer også 316km vej på land. COWI har estimeret vejdel til at udgøre 36%, tilslutningsbroer til 4% og hængebro til 60%. Kvartal for pris er ikke oplyst, derfor er pris antaget at svare til start af byggeri 2017K1.
- Broareal:** 3 vognbaner i begge retninger.
- Særlige forhold:** Designet for store jordskælv og derfor stålpyloner.
Broen bliver verdens længste hængebro når den indvies.
Usikkerhed på prisfordeling bro/vej samt indeks.
- Referencer:** COWI tegninger (initial design vist nedenfor).
Pris: https://en.wikipedia.org/wiki/%C3%87anakkale_1915_Bridge
- Opstalt:**



Brotværsnit (hængebro):



3.3.13 Messina Strait – Italien

Beskrivelse: Hængebro motorvej og jernbane 6+2. Direkte funderet på land. Gennemsejlingshøjde 65m. Overbygning er 3 parallelle stålkassedragere med tværbjælker. Projekt aflyst under detailprojektering i 2013 grundet den generelle dårlige økonomiske situation i Italien, usikkerheder mht. jordskælv og at broen ikke ville blive rentabel.

Prisantagelse: Seneste budget fra internettet. Budgettet er i projektperioden steget betydeligt.

Broareal: 3 vognbaner i begge retninger. 2 jernbanespor.

Særlige forhold: Ekstrem spændvidde og jordskælvslast gør at broen ikke er sammenlignelig med en Kattegatforbindelse.

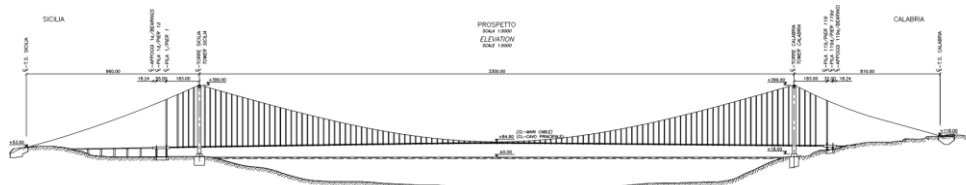
Brolængde er taget som ophængt del inkl. 2 korte overgangsfag (pille 1d til 119d).

Stor usikkerhed på pris.

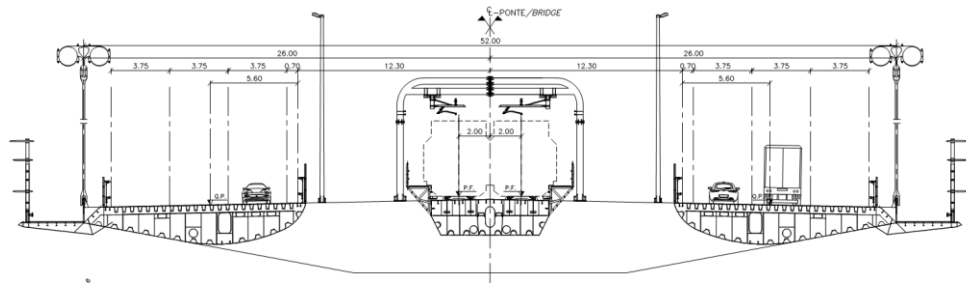
Referencer: COWI tegninger.

Pris: https://en.wikipedia.org/wiki/Strait_of_Messina_Bridge

Opstalt:



Brotværsnit:



3.4 Øvrige broer

For den ny Storstrømsbro blev der udarbejdet enhedspriser for en række referenceprojekter, se /5/. Disse medtages her uden detaljerede beskrivelser.

Broerne er:

- > Funder Ådal, Danmarks længste bro på land for motorvej åbnet i 2012.
- > Årstabron i Sverige, jernbanebro med 2 spor åbnet i 2005.
- > Vejlefjordbroen, viaduktbro for motorvej åbnet i 1980.
- > Qatar Bahrain Causeway (QBC), 40km fast forbindelse primært bestående af lavbro. Projektet stoppede under detailprojektering.
- > Tresfjordbrua i Norge, vej- og gangbro åbnet i 2015. Typisk faglængde 60m, hovedfag 160m. Gennemsnit 66m faglængde er anvendt ved optegning.
- > E4 Sundsvallsfjärden i Sverige, bro for motorvej åbnet i 2014. 11 fag med varierende spændvidde fra 88m til 170m. Gennemsnit 130m faglængde er anvendt ved optegning.
- > Confederation Bridge i Canada, 12,9km vejbro åbnet i 1997. 65 brofag med varierende spændvidde op til 250m. Gennemsnit 200m faglængde er anvendt ved optegning.
- > Vasco da Gama broen i Portugal, 10,2km viaduktbroer, 826m lang skråstagsbro og tilkørselsbroer åbnet i 1998. Skråstagsbro udgør kun lille del af projektet og er derfor ikke anvendt. Faglængde 2 viaduktbroer 78m hhv. 45m. Gennemsnit $(80 \times 78m + 84 \times 45m) / (80+84) = 61m$ faglængde er anvendt ved optegning.

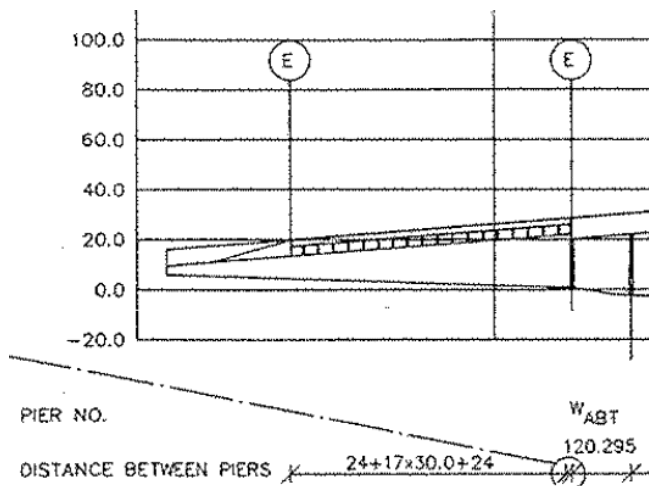
Enhedspriser svarende til 2011K3 er anvendt direkte og omregnet til 2019K2. Disse projekter og enhedspriser er også anvendt i /1/.

3.5 Udfletningsanlæg

For broløsninger med trafik i to etager skal der laves udfletningsanlæg for at separere vej og jernbane fra fælles niveau i land til to niveauer på bro. Dette antaget gjort med en betonbro løsning som på Peberholm, se Figur 3-4 og Figur 3-5.



Figur 3-4 Udfletningsanlæg Peberholm luftfoto

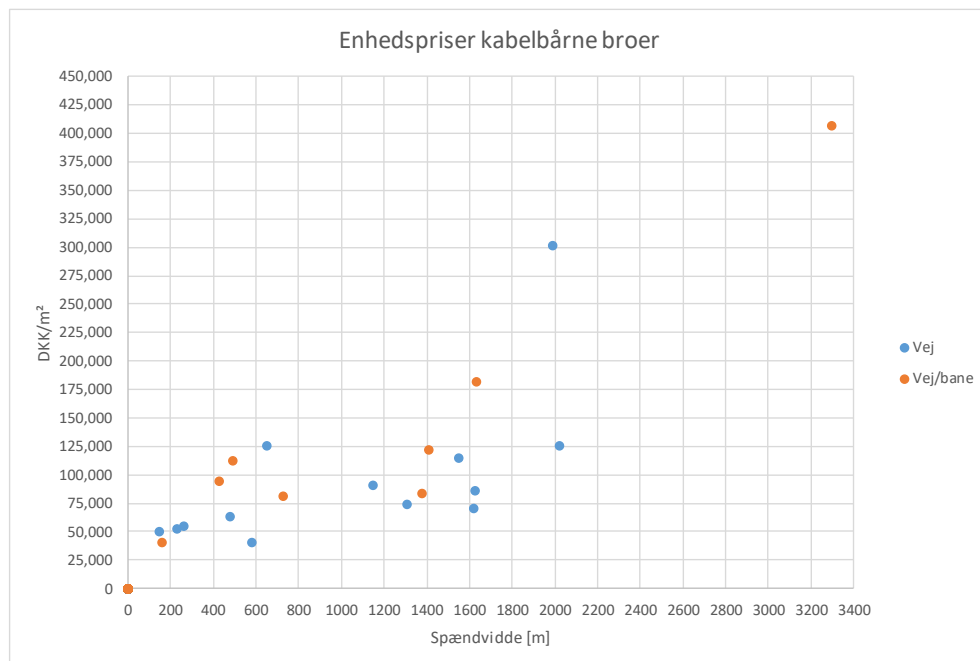


Figur 3-5 Udfletningsanlæg Peberholm opstalt

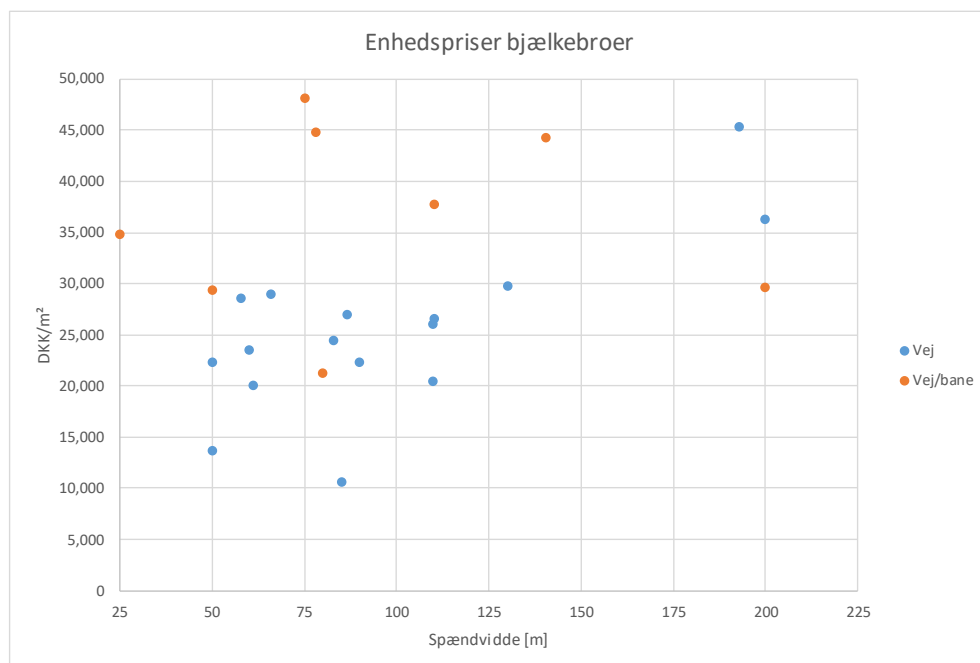
Som enhedspris anvendes samme pris som for lavbro med 60m spændvidde. Udfletningsanlæg er på land og derfor billigere underbygning, men til gengæld er der behov for portalrammer som antages at opveje dette.

3.6 Sammenfatning referenceprojekter for broer

Sammenfatning af geometri, priser, indeks samt enhedspriser er vedlagt i Bilag A. Enhedspriser som funktion af spændvidde er illustreret i følgende to figurer.



Figur 3-6 Enhedspriser kabelbårne broer



Figur 3-7 Enhedspriser bjælkebroer

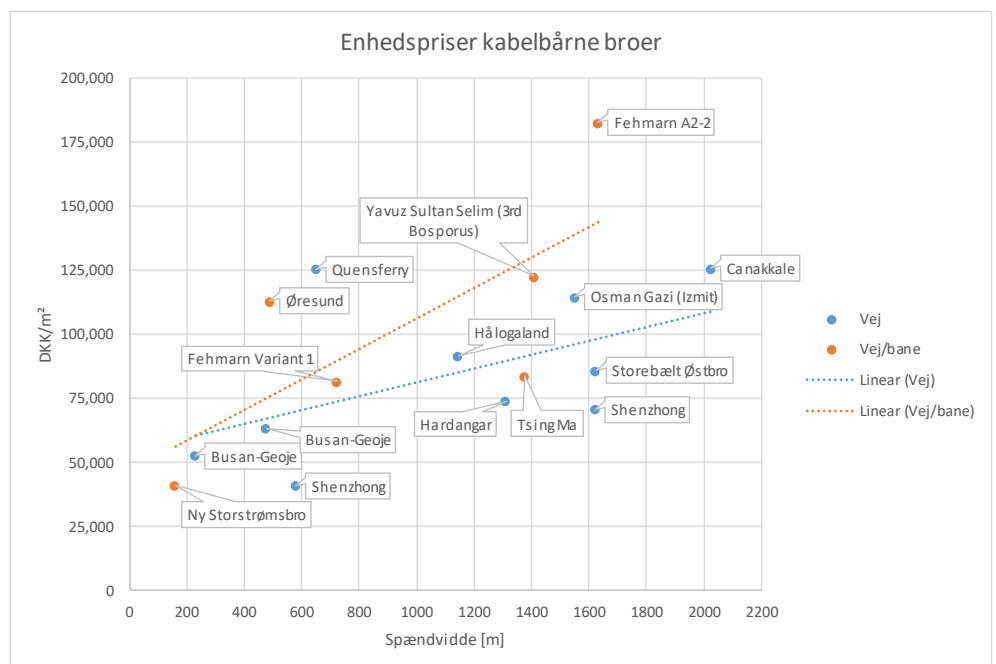
Der observeres stor spredning på enhedspriser. Spredningen kan skyldes forskelle i broforhold som funderingsdybde og materiale, vanddybde, gennemsejlingshøjde, naturlaster (jordskælv etc.) og lokale regulativer og normer. Desuden bidrager usikkerhed på priser og hvad de indeholder også til spredningen.

3.7 Udvalgte referenceprojekter for broer

For valg af referenceprojekter relevante for beregning af enhedspriser for Kattegatforbindelsen er følgende referenceprojekter fravalgt:

- > Puente Nigale broen i Venezuela pga. usikkerhed på pris, prisfordeling og landeindeks.
- > Akashi Kaikyō broen i Japan hvor er lukket marked resulterede i en meget høj pris.
- > Messinabroen i Italien pga. ekstremt stor spændvidde ikke relevant for Kattegatforbindelse.
- > Kabelbårne broer som udgør lille del af stort projekt, hvor kun samlet pris haves (usikkerhed ved prisfordeling dermed for stor). Broer: Temburong.
- > Bjælkebroer som udgør lille del af stort projekt, hvor kun samlet pris haves (usikkerhed ved prisfordeling dermed for stor). Broer: Quensferry, Hålogaland og Canakkale.
- > Funder Ådal der er meget billig bro på land og derfor ikke sammenlignelig med Kattegat.
- > Årstabroen i Sverige som er ren jernbanebro med dyr arkitektonisk tværsnitsudformning.
- > Tresfjordsbrua i Norge pga. irregulære faglængder og derfor ikke anvendelig ved optegning af trendline.

Trendlines er optegnet for resterende sammenlignelige referenceprojekter i Figur 3-8 og Figur 3-9. Da spredningen på enhedspriser er stor, skal trendlines bruges med et vist forbehold.

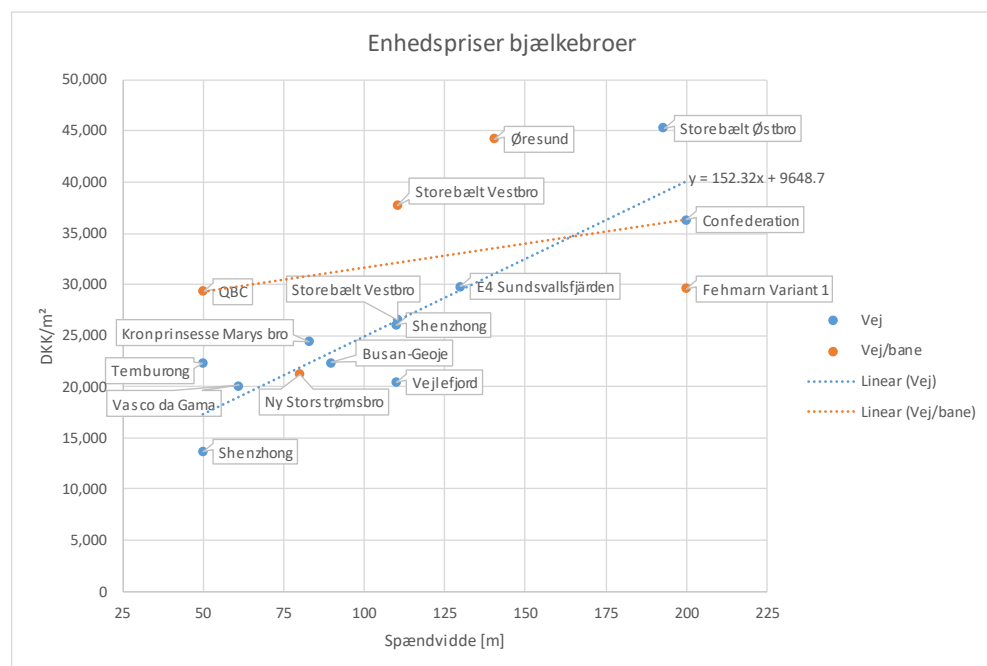


Figur 3-8 Enhedspriser udvalgte kabelbårne broer

Følgende kabelbårne broer udskiller sig markant:

- > Quensferry vejbro er meget dyr, selv med oprindelig kontraktpris anvendt.
- > Tsing Ma vej/bane bro er forholdsvis billig, hvilket kan skyldes mulig forankring af hovedkabler i klippe og dermed lille udgift til ankerblokke.
- > Femern A2-2 vej/bane hængebro er forholdsvis dyr, men her er usikkerheden stor da fysikestimat er fra tidlig fase af konceptdesign.

Trendline for vej/bane bør ikke anvendes pga. for få punkter og meget stor spredning.



Figur 3-9 Enhedspriser udvalgte bjælkebroer

Følgende bjælkebroer udskiller sig markant:

- > Storebælt Østbro vej tilslutningsbroer virker umiddelbart meget dyre.
- > Femern Variant 1 vej/bane tilslutningsbroer synes meget billige.

Forskellen mellem Storebælt Østbro og Femern kan skyldes at en stålbjælkebro med kassedrager med konstant dragerhøjde er en meget kostbar løsning for denne faglængde mens en gitterdrager med betondæk for vejdel er en økonomisk gunstig løsning for faglængde omkring de 200m.

Trendline for vej er i høj grad bestemt af Storebælt Østbro og skal derfor bruges med forbehold, f.eks. ved at udelade denne bro.

Trendline for vej/bane er ikke anvendt ved fastlæggelse af enhedspris for Kattegatforbindelsen pga. for få punkter og meget stor spredning.

3.8 Anlægsoverslag for broløsningerne

3.8.1 Enhedspriser

Enhedspriser for referenceprojekterne er vist i Bilag A. For broerne på en ny Kattegatforbindelse lægges enhedspriser i Tabel 3-2 til grund for anlægsoverslagene.

Tabel 3-2 Enhedspriser anvendt til anlægsoverslag

Bro	Spændvidde [m]	Enhedspris 4+0 [kr./m ²]	Enhedspris 4+2 [kr./m ²]
Skråstagsbro	2 × 750	75.000	82.500
Hængebro	1630	100.000	110.000
Hængebro	1900	110.000	121.000
Bjælkebro, højbro	200	38.000	41.800
Bjælkebro, lavbro	100	26.000	28.600
Bjælkebro, lavbro	60	21.000	23.100
Udfletningsanlæg	60	21.000	23.100

Enhedspriser for kombineret vej/bane (4+2) er taget som enhedspris for ren vejbro (4+0) med 10% tillæg for jernbane med passagertog. Dette moderate tillæg dækker over skærpede stivhedskrav ved jernbane. Der er ikke regnet med tillæg pga. tungere trafiklast da undersøgelse har vist, at toglast for kun passagertog er sammenlignelig med last fra vejtrafik.

Baggrunden for valgte priser for vejbro (4+0) er:

- > Skråstagsbro: Femern fysikestimat anvendt, reduceret jf. ovenstående således at 4+2 fastholdes som i fysikestimat.
- > Hængebro 1630m spændvidde: Gennemsnit af Storebælt Østbro og Osman Gazi anvendt. Storebælt vurderes for billig, se 3.2.1, mens Osman Gazi er dyrere pga. jordskælvlast i Tyrkiet. Herved opnås sammenfald med trendline.
- > Hængebro 1900m spændvidde: Trendline.
- > Bjælkebro, højbro: Trendline 1 anvendt. Dette giver for sammenligning en enhedspris svarende til gennemsnit af tilslutningsbroerne for Storebælt Østbro (4+0) og Femern (4+2).
- > Bjælkebro, lavbro: Trendline 1 anvendt.
- > Udfletningsanlæg: Trendline 1 anvendt.

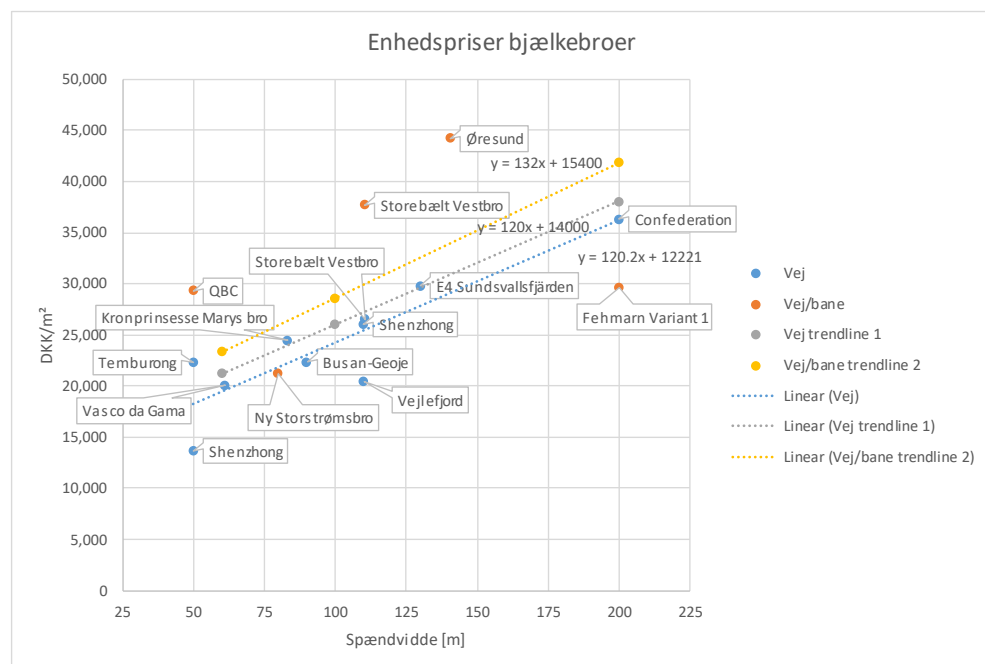
Trendline 1 er vist i Figur 3-10.

Trendline 1 er defineret som trendline for enhedspriser for bjælkebroer vej eks. Storebælt Østbro (blå linje baseret på 10 vejreferenceprojekter vist i Figur

3-10), kalibreret til at give ca. 24.000 kr./m² for 80m spændvidde (grå linje vist i Figur 3-10), svarende til seneste større danske bro Kronprinsesse Marys bro. Enhedspris bliver derved $y = 120x + 14000$ hvor x er spændvidden. Trendline 1 giver herved god overensstemmelse med de andre lange broforbindelser som Storebælt vestbro (vej alene), Vasco da Gama, Temburong og Confederation. Ny Storstrømsbro indgår ikke, da det er en kombineret vej- og jernbanebro. Desuden er den meget billige enhedspris ikke fundet repræsentativ af følgende grunde:

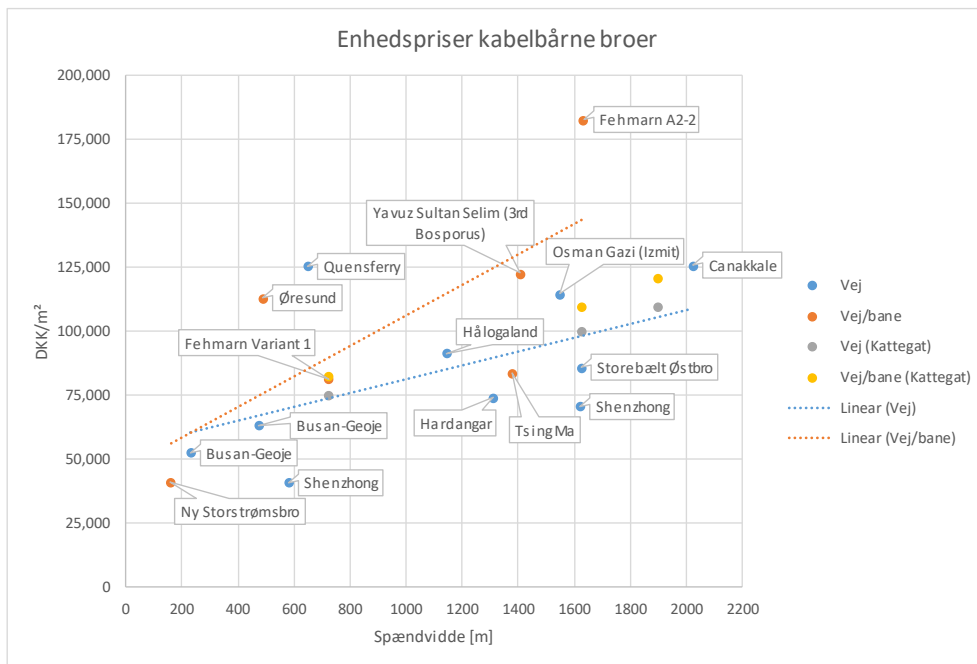
- > Lav vanddybde, i gennemsnit 6,1 m for viaduktfrag;
- > Små laster fra skibsstød på viaduktfrag og piller pga. den lave vanddybde;
- > Gode funderingsforhold med direkte fundering;
- > Stor forskel på licitationspriser fra 4 bydende grupper, billigste gruppe var med 2057 mio. kr. 11% under gennemsnittet af de fire licitationspriser, og 439 mio. kr. billigere end den dyreste af de 4 bydende.

Trendline 2 er 1,1 gange trendline 1 (10% tillæg), dvs. $y = 132x + 15400$.

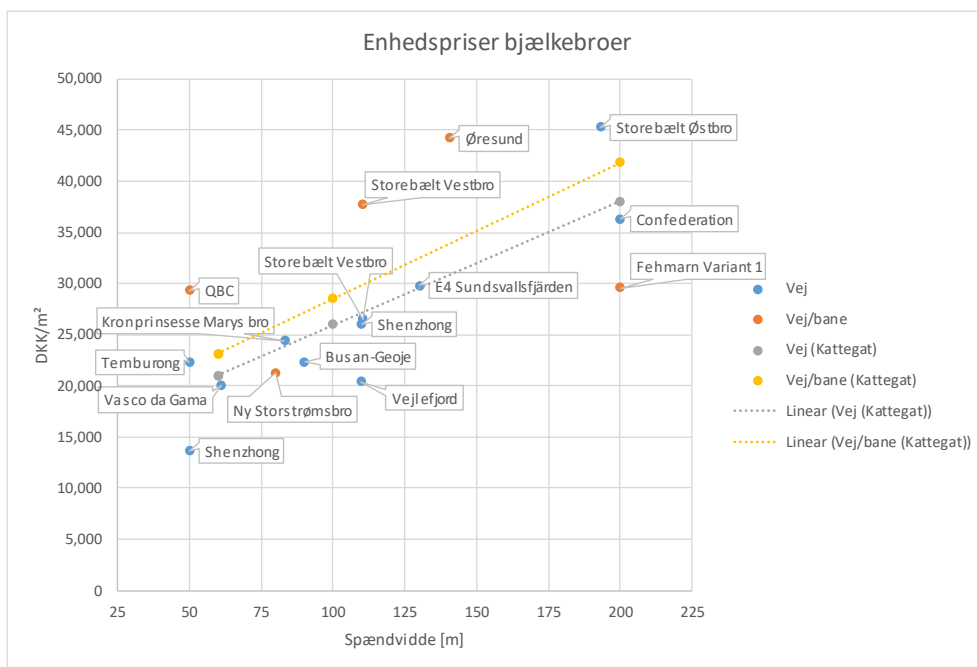


Figur 3-10 Trendlines 1 og 2

De valgte enhedspriser for Kattegat er vist i følgende to figurer sammen med enhedspriser for udvalgte referencebroer.



Figur 3-11 Enhedspriser udvalgte kabelbårne broer og Kattegat valg

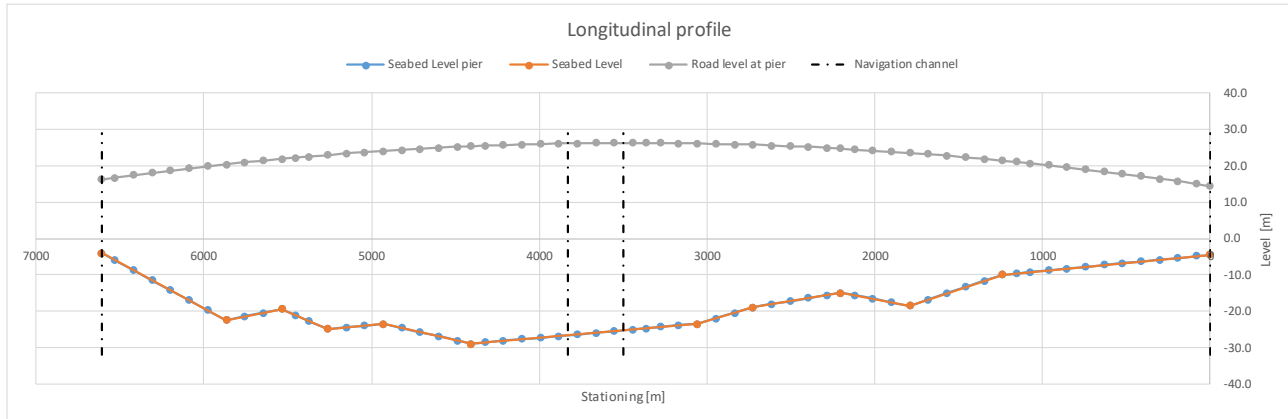


Figur 3-12 Enhedspriser udvalgte bjælkebroer og Kattegat valg

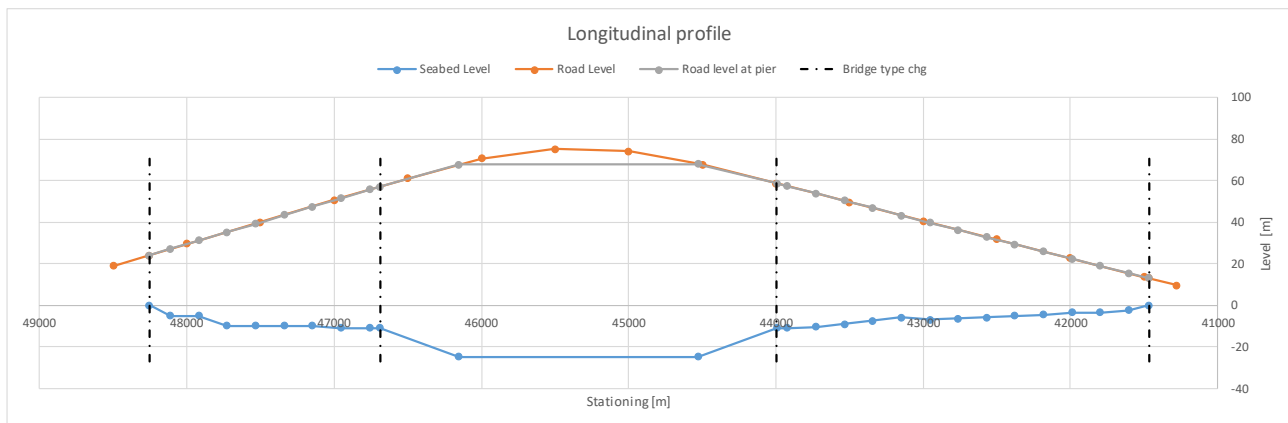
3.8.2 Evaluering af indflydelse fra vanddybde og konstruktionshøjde

Vanddybde og konstruktionshøjde varierer meget i de udvalgte referenceprojekter. Disse to parametre har indflydelse på pris af underbygningen. Derfor er effekten evalueret for udvalgte danske broer, brugt som referenceprojekter, ved at beregne gennemsnitshøjder til brug for sammenligning med brøløsninger for Kattegatforbindelsen.

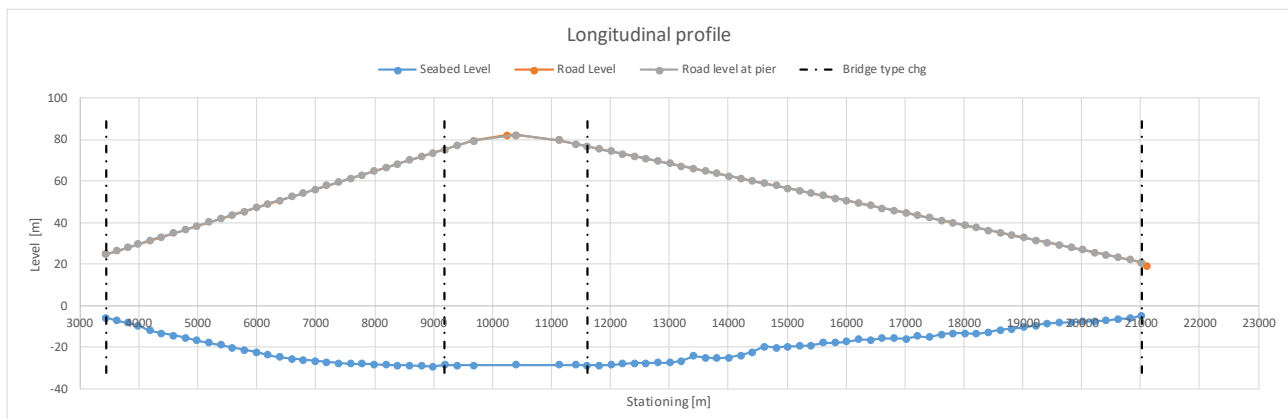
Længdeprofil af brooverbygning (kote top af vej) samt havbund er optegnet i følgende figurer. For Storebælt Østbro er dyb sejlrunde i midten af hovedfag samt overhøjde af hovedfag ikke medtaget da disse ekstrabidrag til gennemsnitshøjden ikke medfører øget omkostning af underbygningen.



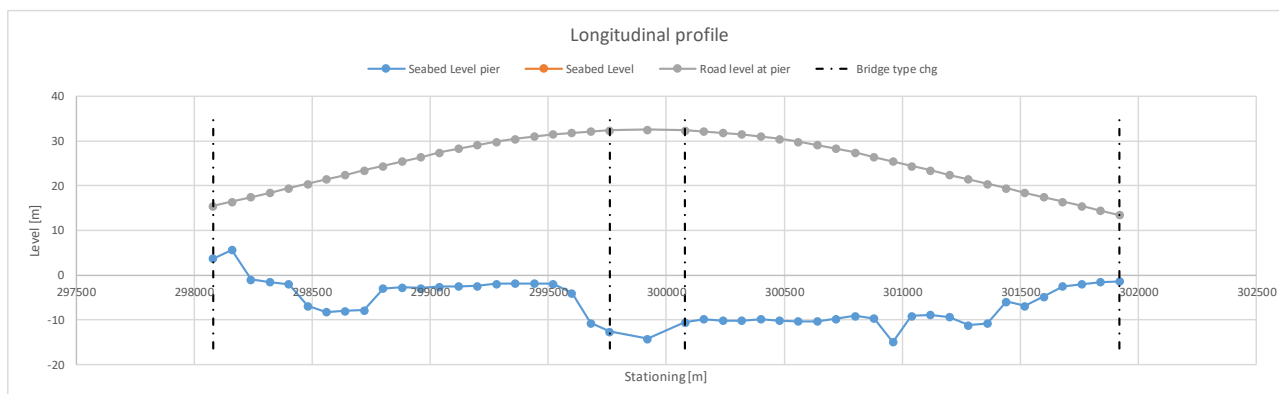
Figur 3-13 Længdeprofil for Storebælt Vestbro (vejdrager)



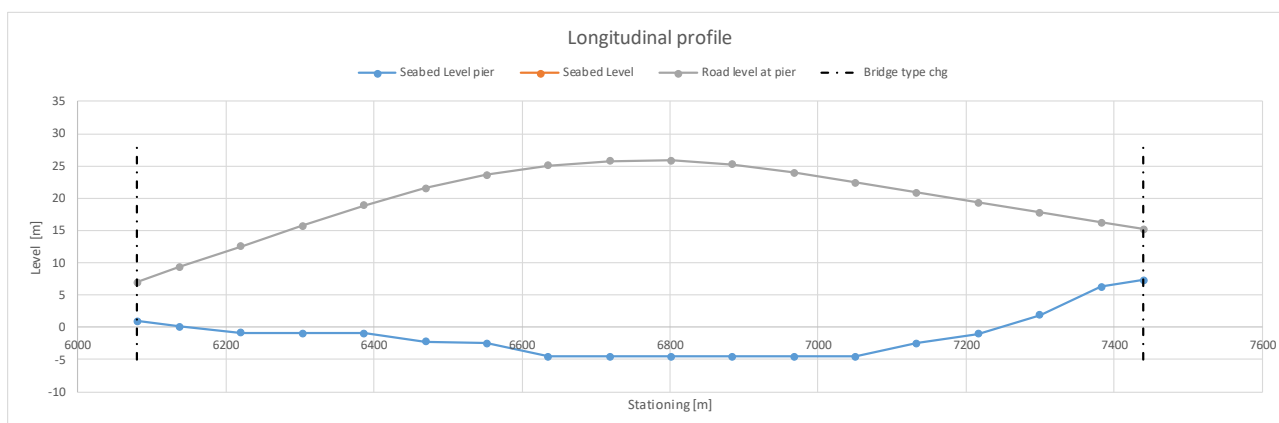
Figur 3-14 Længdeprofil for Storebælt Østbro (dyb sejlrunde ikke medtaget)



Figur 3-15 Længdeprofil for Femern Variant 1



Figur 3-16 Længdeprofil for Storstrømsbroen



Figur 3-17 Længdeprofil for Kronprinsesse Marys bro

Gennemsnitshøjde H fra havbund til overside brodrager er beregnet og vist i Tabel 3-3 sammen med drager højde D ved pille og gennemsnitshøjde af underbygning h.

Tabel 3-3 Gennemsnitshøjde for udvalgte referencebroer

Bro	Delbro	H [m]	D [m]	h = H-D [m]
Storebælt Vestbro	Lavbro 4+0	40,8	7,3	33,5
	Lavbro 4+2	40,8	8,0	32,8
Storebælt Østbro	Tilslutningsbro	44,8	6,7	38,1
	Hængebro	88,1	4,0	84,1
Femern Variant 1	Tilslutningsbro	68,4	12,9	55,5
	Skråstagsbro	108	12,9	95,1
Storstrømsbroen	Tilslutningsbro	30,9	5,0	25,9
	Skråstagsbro	45,4	5,0	40,4
Kronprinsesse Marys bro 4+0	Højbro	21,7	4,0	17,7

Dragerhøjde for Storebælt Vestbro 4+2 er gennemsnit af to brodragere. Der er ikke taget hensyn til eventuelle lokale afgravninger.

Prisen på underbygning, defineret som pille skaft og fundament, udgør typisk 35-40% af prisen på en bro. Her anvendes 35% svarende til detaljeret fysikestimater for Femern Variant 1 tilslutningsbroer.

Prisen antages at variere lineært med gennemsnitshøjden h. Baggrunden herfor er at dimensgivende laster på en pille typisk er enkeltkræfter angribende ved pille top, enten på tværs af broen fra vind eller på langs fra lejefriktion, temperatur eller bremselast. En dobbelt så høj pille vil derfor dimensioneres for dobbelt så stort bøjningsmoment ved kritisk snit i bund. Det samme gælder for fundament.

Højdekorrektionsfaktor på samlet pris beregnes af formlen:

$$f_h = (h_{\text{Kattegat}} / h_{\text{Ref}}) \times 0.35 + (1 - 0.35)$$

For Kattegatforbindelse er gennemsnitshøjder beregnet som vist i Tabel 3-4. For beskrivelse af de forskellige korridorer og broløsninger, se Delrapport /9/.

Tabel 3-4 Gennemsnitshøjde for Kattegatforbindelse 4+2

Korridor	Delbro	H [m]	D [m]	$h_{\text{Kattegat}} = H - D$ [m]
KKV-1	Lavbro	32,1	8,0	24,1
KKV-2	Lavbro	30,1	8,0	22,1
	Højbro	55,4	8,0	47,4
KKV-3	Lavbro	27,1	4,5	22,6
	Højbro	56,4	8,0	48,4
KKØ-1	Tilslutningsbro	71,7	12,9	58,8
	Hængebro	112,6	12,9	99,7
KKØ-2	Tilslutningsbro	66,0	12,9	53,1
	Hængebro	104,6	12,9	91,7
KKØ-3	Tilslutningsbro	64,0	12,9	51,1
	Skråstagsbro	109,7	12,9	96,8
KKØ-3	Lavbro	37,1	8,0	29,1

Gennemsnitshøjde af Kattegat lavbroer med 60 m og 100 m faglængder varierer mellem 22,1 m og 29,1 m. Til sammenligning er gennemsnitshøjden for de 3 danske referenceprojekter Storebælt vestbro, Storstrømsbroen og Kronprinsesse Marys bro, som bl.a. indgår i beregning af enhedspris for lavbro, henholdsvis 32,8 m, 25,9 m og 17,7 m. Disse 3 vigtige referenceprojekter er derfor sammenlignelige med hensyn til vanddybde og brohøjde.

Gennemsnitshøjde af Kattegat højbroer/tilslutningsbroer med 200 m faglængde varierer mellem 47,4 m og 58,8 m. Enhedspris er her udelukkende baseret på trendline og derfor er sammenligning med specifikke projekter ikke relevant. Dog bemærkes det at konceptdesign for Femern tilslutningsbro har 55,5 m gennemsnitshøjde.

Gennemsnitshøjde af Kattegat hængebroer og skråstagsbro er sammenlignelig med Storebælt Østbro og konceptdesign for Femern grundet samme spændvidder og sammenlignelige vanddybder.

4 Enhedspriser tunneler

Tunneler omfatter sænketunnel, boret tunnel, cut & cover tunnel, trug og evt. kunstig ø hvis tunnel kombineres med bro.

4.1 Borede tunneler

4.1.1 Omregning fra HS2 (UK-2011) til Kattegat (2019K2)

For beregning af prisen på den borede tunnel er der taget udgangspunkt i HS2 referencen som beskrevet i det følgende. HS2 beregningen er baseret på to rør boret med hver en TBM. Da alle Kattegat boret tunnel løsninger er særdeles lange er det forventet at der skal bores fra begge sider mod midten, som man gjorde ved Storebæltstunnelen. I omregningen af priser fra HS2 er der derfor regnet med den halve afstand og derefter til sidst ganget med 2, i og med der er behov for permanente installationer på 2 tunnelarbejdspladser, og tilsvarende en løbende drift begge steder.

For at forenkle forståelsen af omregningen fra HS2 til Kattegat er der i det følgende kun regnet på halve tunneler. Efterfølgende korrigeres der for at omkostningen skal fordobles.

4.1.1.1 Enhedspriser

Enhedspriser er baseret på High Speed 2 (HS2) projektet fra England.

For at overføre priserne til Danske enhedspriser i 2019K2 er følgende justeringer foretaget:

Tabel 4-1 Faktor påført enhedspriser i HS2 Guiden for at konvertere til DK priser 2019K2

Justering	Antagelse	Faktor
Inflation 2011 -> 2019K2.	Udregnet til 13% (1,7% PA i gennemsnit)	1,13

Forskel i markedspriser UK-DK	Antaget at Danske anlægspriser generelt er 10% højere end de engelske	1,1
Vekselkurs Britisk pund til Danske kroner	Antaget 1 GBP = 8,5 DKK	8,5
Overslag regnes i mio.DKK frem for DKK		1/1000000
Samlet faktor		0.000010565500

Ud over skaleringen af enhedspriser skal der også justeres for at de borede tunneler under Kattegat er en anden type tunnel end i High Speed 2.

Forskellene er opsamlet i følgende skema, Tabel 4-2.

Tabel 4-2 Forskel imellem boret tunneller angivet i HS2 og Kattegat Vej/Bane

Forskelle	HS2	Kattegat Vej	Kattegat jernbane
Funktion	Jernbane – et spor pr. rør	Vej – 2 spor pr. rør	Jernbane – to spor pr rør
Dimensioner	Passer til fritrumsprofil for Jernbane	Passer til fritrumsprofil til vej samt plads til føringsveje	Passer til fritrumsprofil for jernbane inkl. servicegalleri under banen
Indre opbygning	Ingen væsentlig	Har underliggende intern bærende konstruktion	Har underliggende intern bærende konstruktion
Genanvendelse af TBM	Ikke genanvendt	Ikke genanvendt	Ikke genanvendt
Deponering af jord	Engelske forhold	Delvist kendte danske forhold	Delvist kendte danske forhold

En sammenligning af geometrien for HS2 og Kattegat er givet i Tabel 4-3, hvor man kan se at Kattegatforbindelsen er væsentligt større målt på den ydre diameter af TBM. Dette er vurderet indenfor en rimelig margen til at kunne anvende guiden for HS2.

Tabel 4-3 Sammenligning af HS2 og Kattegat Vej/Bane

	HS2	Kattegat	
		Vej	Bane
Indre Diameter [m]	8,80	14,2	15,2
Segment tykkelse [m]	0,60	0,70	0,70
Over ekskavering på grund af TBM skjold [m]	0,17	0,17	0,17
TBM ydre diameter [m]	10,34	15,94	16,94
	100%	154%	164%

HS2 opdeler anlægsoverlaget i nedenstående delposter. Der henvises til HS2 guiden for information om det præcise indhold af hver af posterne.

- > Køb af tunnelboremaskine(r)
- > Støttefunktioner under anlægsperioden
 - > Faste omkostninger som etablering af arbejdsplads (uafhængigt af længden) *For overskuelighedens skyld udtages de faste omkostninger til etablering af arbejdsplads og tillægges efter fysikoverslaget på linje med de andre konstruktionstyper.*
 - > Tidsrelaterede omkostninger (afhængig af fremdrift)
- > Anlægsaktiviteter (konstruktioner herunder tværtunneler mm)
- > Bortskaffelse af jord (kalibreret til Danske priser)
- > Tunnelskakte (vurderet separat som Cut & Cover strækninger)
- > Mekaniske og EL installationer (vurderet separat)

I anlægsoverslaget er ovenstående priselementer skaleret med en faktor f_i , som tager højde for en ændret diameter. Størrelsen på faktoren er vurderet for hvert enkelt priselement, idet prisen vurderes at være proportional med enten:

- > Diameter/omkreds
- > Frontarealet
- > Et sted midt imellem

Skalering sker således efter formlen:

$$f_i = \left(\frac{d_y}{d_y^{HS2}} \right)^{e_i}$$

hvor f.eks.

$e_i = 1,0$: Proportionalt med diameter eller omkredsen

$e_i = 2,0$: Proportionalt med frontarealet

I Tabel 4-4 er sammenfattet de vurderede faktorer for de enkelte bidrag.

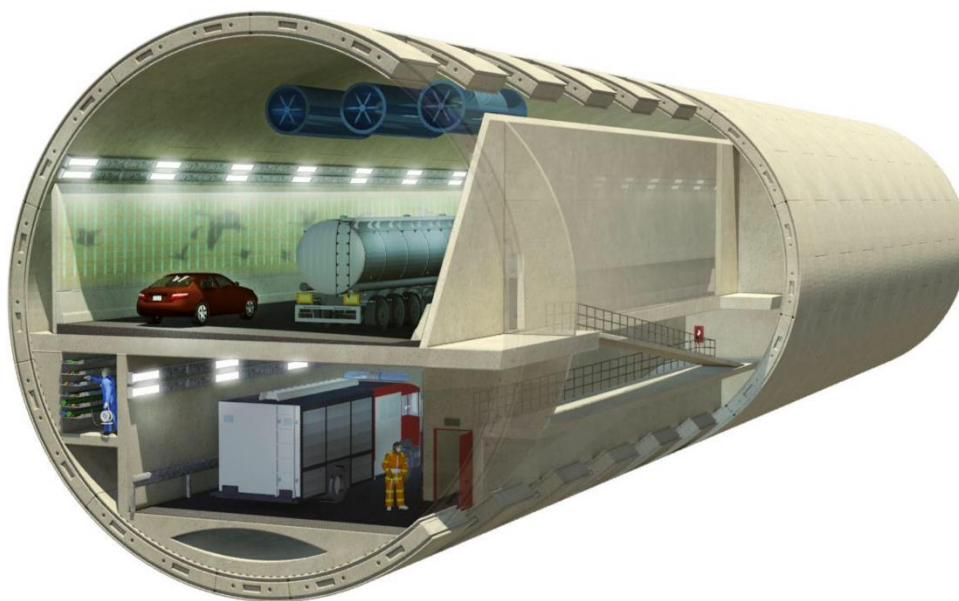
Tabel 4-4 Boret tunnel skalering af HS2 priser

Reference	Enhed	e_i
Fremdrift TBM	[m/uge]	-1,50
Fremdrift Internt færdiggørelse	[m/uge]	-1,20
Pris TBM	[DKK]	1,50
Støttefunktion faste omkostninger	[DKK]	1,00
Støttefunktion tidsafhængig TBM-drift	[DKK/uge]	1,00
Støttefunktion tidsafhængig færdiggørelse	[DKK/uge]	1,00
Anlæg af tværtunneler	[DKK/m]	1,50
Færdiggørelse	[DKK/m]	1,50
Deponering af udgravet materiale	[DKK/m]	2,00

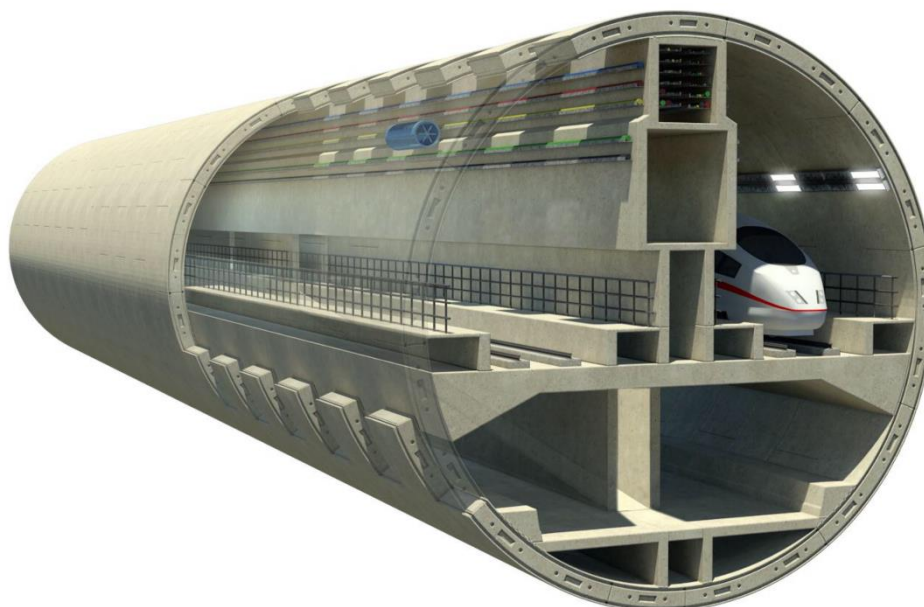
4.1.1.2 Konstruktioner

Der er i denne fase ikke udviklet et nyt tværsnit. I stedet refereres til de tværsnit der blev udviklet som en del af Femern konceptfasen. Årsagen til at de er fundet relevante for Kattegat er at der her er udviklet sikkerhedskoncepter svarende til den cirka 18 km lange krydsning.

Tværsnit for vej henholdsvis jernbane er vist på Figur 4-1. og Figur 4-2.



Figur 4-1 Boret tunnel tværsnitsprofil for vej tunnel (eksempel fra Femern)



Figur 4-2 Boret tunnel tværsnits for jernbanetunnel (eksempel fra Femern)

4.1.1.3 Køb af tunnelboremaskine

Omkostning til køb af tunnelboremaskiner er estimeret i det følgende er estimeret i det følgende.

Det antages – som på Storebælt øst tunnelen at hvert rør bores af en maskine fra hver ende. Hver maskine skal således bore en halv længde.

Der forventes her anvendt en Mixed shield Slurry TBM som kan håndtere varierende jordbundsforhold. HS2 guiden arbejder ikke med estimat af en Mixed shield men enten med en Slurry eller en EPB-maskine. Vi har her valgt at baserer os på Slurry maskinen, men uden yderligere tillæg for en mixed shield maskine da disse bliver mere og mere standard.

Tabel 4-5 Køb af TBM for vej henholdsvis bane

	Enhed	Beregning af enhedspris for 1 stk. Mixed shield TBM-maskine	
		Vej	Bane
Basispris [2011 GBP], HS2 guiden	GBP	16 000 000	
Faktor påført enhedspriser i HS2 Guiden for at konvertere til DK priser 2019K2 (se Tabel 4-1)	-	0,0000105655	
Boret tunnel skalering af HS2 priser, faktor (se Tabel 4-4) $\left(\frac{Dy, KAT}{Dy, HS2}\right)^{1.5}$	-	$\left(\frac{15,94}{10,34}\right)^{1.5} = 1,914$	$\left(\frac{16,94}{10,34}\right)^{1.5} = 2,10$
Pris for TBM (Kattegat) (2019 mio. DKK)	[Mio. DKK/stk.]	324	354

For 4+0 løsningen anslås indkøb af 2 stk. Mixed shield TBM til 648 mio. kr, mens for 4+2 løsningen skal der indkøbes maskiner for 648+354 = 1 000 mio. kr.

Ovennævnte er som nævnt i afsnit 4.1.1.1 for den halve tunnel. Beløbet for den hele tunnel vil være dobbelt så stort.

4.1.1.4 Støttefunktioner under anlæg

Støttefunktioner under anlæg er opdelt i følgende to poster:

- > Faste omkostninger (uafhængigt af længden)
- > Tidsrelaterede omkostninger (afhængig af fremdrift)

4.1.1.5 Faste omkostninger (arbejdsplads)

Beregning af de faste omkostninger til støtte af slurry TBM er vist i Tabel 4-6.

Tabel 4-6 Faste omkostninger til støtte af Slurry TBM

	Enhed	Faste omkostninger ved etablering af en tunnel arbejdsplads for en slurry TBM	
		Vej	Bane
Basispris [2011 GBP], HS2 guiden	GBP	45 000 000	
Faktor påført enhedspriser i HS2 Guiden for at konvertere til DK priser 2019K2 (se Tabel 4-1)	-	0,0000105655	

Boret tunnel skalering af HS2 priser, faktor (se Tabel 4-4) $\left(\frac{Dy, KAT}{Dy, HS2}\right)^{1.0}$	-	$\left(\frac{15,94}{10,34}\right)^{1.0} = 1,54$	$\left(\frac{16,94}{10,34}\right)^{1.0} = 1,64$
Pris for TBM (Kattegat) (2019 mio. DKK)	[Mio. DKK/TBM]	732	779

For arbejdspladsen for 4+0 vil der således være faste omkostninger på 1.464 mio. kr., mens der for 4+2 vil være faste omkostninger på 2.244 mio. kr.

Ovennævnte er som nævnt i afsnit 4.1.1.1 for den halve tunnel. Beløbet for den hele tunnel vil være dobbelt så stort.

4.1.1.5.1 Tidsrelaterede omkostninger

De tidsrelaterede omkostninger er angivet i Tabel 4-7.

Tabel 4-7 Tidsrelaterede omkostninger til støtte af TBM omregnet til m Boret tunnel

	Enhed	Tidsrelaterede omkostninger for boring med TBM	
		Vej 2 TBM	Bane 1 TBM i tillæg til vej
Basispris [2011 GBP], HS2 guiden	GBP/wk	1 100 000	550 000
Faktor påført enhedspriser i HS2 Guiden for at konvertere til DK priser 2019K2 (se Tabel 4-1)	-	0,0000105655	
Boret tunnel skalering af HS2 priser, faktor (se Tabel 4-4) $\left(\frac{Dy, KAT}{Dy, HS2}\right)^{1.0}$	-	$\left(\frac{15,94}{10,34}\right)^{1.0} = 1,54$	$\left(\frac{16,94}{10,34}\right)^{1.0} = 1,64$
Pris for TBM (Kattegat) (2019 mio. DKK)	[Mio. DKK/uge]	17,9	9.5
Basis fremdrift fra HS2	[m/uge]	58	
Boret tunnel skalering af HS2 priser, faktor (se Tabel 4-4) $\left(\frac{Dy, KAT}{Dy, HS2}\right)^{-1.5}$	-	$\left(\frac{15,94}{10,34}\right)^{-1.5} = 0.52$	$\left(\frac{16,94}{10,34}\right)^{-1.5} = 0.48$
Fremdrift for Kattegat	[m/uge]	30	28
Pris for TBM (Kattegat) (2019 mio. DKK)	[Mio. DKK/km rute]	592	344

Prisen for drift af 2 TBM til boring af vej tunnel 4+0 er således anslået til 592 mio. DKK/km. Skulle der i tillæg også bores et rør for bane vil prisen være 592+344 = 935 mio. DKK/km.

Tabel 4-8 Færdiggørelse af indre at boret tunnel fordelt på m Boret tunnel

	Enhed	Tidsrelaterede omkostninger for færdiggørelse af tunnel	
		Vej 2 TBM	Bane 1 TBM i tillæg til vej
Basispris [2011 GBP], HS2 guiden	GBP/wk	1 100 000	550 000
Faktor påført enhedspriser i HS2 Guiden for at konvertere til DK priser 2019K2 (se Tabel 4-1)	-	0,0000105655	
Boret tunnel skalering af HS2 priser, faktor (se Tabel 4-4) $\left(\frac{Dy, KAT}{Dy, HS2}\right)^{1,0}$	-	$\left(\frac{15,94}{10,34}\right)^{1,0} = 1,54$	$\left(\frac{16,94}{10,34}\right)^{1,0} = 1,64$
Pris for TBM (Kattegat) (2019 mio. DKK)	[Mio. DKK/uge]	17,9	9,5
Basis fremdrift fra HS2	[m/uge]	400	
Boret tunnel skalering af HS2 priser, faktor (se Tabel 4-4) $\left(\frac{Dy, KAT}{Dy, HS2}\right)^{-1,2}$	-	$\left(\frac{15,94}{10,34}\right)^{-1,2} = 0,60$	$\left(\frac{16,94}{10,34}\right)^{-1,2} = 0,55$
Fremdrift for Kattegat	[m/uge]	237	221
Pris for TBM (Kattegat) (2019 mio. DKK)	[Mio. DKK/km rute]	75	43

Mellemregning som viser hvordan fremdrift på 237 hhv 221 m/uge er udregnet

Prisen for færdiggørelse af 2 TBM til boring af vej-tunnel 4+0 er således anslået til 75 mio. DKK/km. Skulle der i tillæg også bores et rør for bane vil prisen være 75+43 = 118 mio. DKK/km.

4.1.1.6 Anlægsaktiviteter

Omkostning til anlæg af Slurry TBM-tunnel er angivet i Tabel 4-9. Anlæg indeholder fabrikation af tunnel segmenter m.m.

Et tillæg for indre konstruktioner i vej-tunneler er vurderet som ca. 35% af selve tunnelen i og med at disse må betragtes som ret komplekse at etablere.

Prisen fra HS2 guiden er reduceret med 20% da der ikke her skal etableres komplekse tværtunneler pr. 380 m i og med redning og installationer er etableret under vej og bane niveau.

Tabel 4-9 Omkostning til anlæg af Slurry tunnel

	Enhed	Anlægsaktiviteter ved anvendelse af slurry TBM	
		Vej 2 rør	Bane 1 rør
Basispris [2011 GBP], HS2 guiden	GBP/m	25 000 * 0.8	12 500 * 0.8
Faktor påført enhedspriser i HS2 Guiden for at konvertere til DK priser 2019K2 (se Tabel 4-1)	-	0,0000105655	
Boret tunnel skalering af HS2 priser, faktor (se Tabel 4-4) $\left(\frac{Dy, KAT}{Dy, HS2}\right)^{1.5}$	-	$\left(\frac{15,94}{10,34}\right)^{1.5} = 1,91$	$\left(\frac{16,94}{10,34}\right)^{1.5} = 2,10$
Pris (Kattegat) (2019 mio. DKK)	[Mio. DKK/km rute]	404	221

For anlæg af 4+0 anslås omkostningen således til 404 mio. kr./km. For 4+2 vil omkostningen være 404+221 = 626 mio. kr./km

Tabel 4-10 Omkostning til anlæg af Slurry TBM-tunnel, tillæg for indre konstruktioner

	Enhed	Anlægsaktiviteter for indre konstruktioner ved anvendelse af slurry TBM	
		Vej 2 rør	Bane 1 rør
Basispris [2011 GBP], HS2 guiden	GBP/m tunnelrør	4400	4400
Faktor påført enhedspriser i HS2 Guiden for at konvertere til DK priser 2019K2 (se Tabel 4-1)	-	0,0000105655	
Boret tunnel skalering af HS2 priser, faktor (se Tabel 4-4) $\left(\frac{Dy, KAT}{Dy, HS2}\right)^{1.5}$	-	$\left(\frac{15,94}{10,34}\right)^{1.5} = 1,91$	$\left(\frac{16,94}{10,34}\right)^{1.5} = 2,10$
Antal tunnelrør		2	1
Pris (Kattegat) (2019 mio. DKK)	[Mio. DKK/km rute]	178	98

For anlæg af 4+0 anslås omkostningen således til 178 mio. kr./km. For 4+2 vil omkostningen være 178+98 = 276 mio. kr./km

4.1.1.7 Bortskaffelse af jord

Omkostning til bortskaffelse af jord er angivet i Tabel 4-11.

Baseret på kendte erfaringspriser der for bortskaffelse indført en erfaringsfaktor på bortskaffelsen på 0.82.

Tabel 4-11 Omkostning til bortskaffelse af jord

	Enhed	Omkostning til bortskaffelse af jord	
		Vej 2 rør	Bane 1 rør
Basispris [2011 GBP], HS2 guiden	GBP/m tunnel	4500	2250
Faktor påført enhedspriser i HS2 Guiden for at konvertere til DK priser 2019K2 (se Tabel 4-1)	-	0,0000105655	
Boret tunnel skalering af HS2 priser, faktor (se Tabel 4-4) $\left(\frac{Dy, KAT}{Dy, HS2}\right)^{2,0}$	-	$\left(\frac{15,94}{10,34}\right)^{2,0} = 2,38$	$\left(\frac{16,94}{10,34}\right)^{2,0} = 2,68$
Erfaringsfaktor UK->DK		0.82	
Pris (Kattegat) (2019 mio. DKK)	[Mio. DKK/km tunnel]	113	64

For anlæg af 4+0 anslås omkostningen således til 113 mio. kr./km. For 4+2 vil omkostningen være 113+64 = 177 mio. kr./km

4.1.1.8 Tunnelskakte

Tunnelskakte er medtaget i HS2 projektet, men ikke her i Kattegat projektet. De håndteres og er estimerede som dybe brede Cut & Cover tunnel strækninger, som anvendes til start/slut kammer og lukkes efterfølgende.

4.1.1.9 Forklassificering

Der regnes ikke med forklassificering for boret tunnel. Der vil være krav om dokumentation af forureningsgraden for muck, når der bores på/under kortlagte grunde og formentlig også hvor grundvandet er forurenat. Der er medregnet en pris på 30 kr./t for begge situationer. Prisen vil dække håndtering af mucken over jorden, ventetid, analyser og noget rådgivning

4.1.1.10 M&E installationer og vej-/baneopbygning

M&E installationer er ikke medtaget baseret på HS2 beregningen. Priserne er estimeret baseret på erfaring fra tilsvarende projekter.

Der er generelt medtaget følgende tillæg:

Tabel 4-12 Tillæg for M&E installationer samt vej-/baneopbygning

	Vej 2 rør	Bane 1 rør
Mekaniske og elektriske installationer	50 mio. kr./km	30 mio. kr./km
Vej-/bane opbygning	5 mio. kr./km	20 mio. kr./km
Vandtågeanlæg	15 mio. kr./km	15 mio. kr./km
I alt	70 mio. kr./km	65 mio. kr./km

5 Referencer

/1/ Fast forbindelse over Kattegat, Kyst-kyst forbindelse, Teknisk forudsætninger og anlægsudgifter, Niras for Vejdirektoratet, 01-12-2018

/2/ Fehmarnbelt Fixed Link – Bridge Design, Conceptual Design, Cost Estimate Levels 0-4, COWI/Obermeyer for Femern Belt A/S, 06-08-2010 (WORK IN PROGRESS)

/3/ Fehmarnbelt Fixed Link – Bridge Design, Intermediate Conceptual Design Report, COWI/Obermeyer for Femern Belt A/S, 30-10-2009 (DRAFT)

/4/ Tackling costs in the digital age, International construction costs 2018, Arcadis, 2018

/5/ Storstrømsbroen, Metode og valg af referenceprojekt for udarbejdelse af fysikestimat for ny Storstrømsbro, COWI for Vejdirektoratet, 27-06-2014

/6/ The Storebælt Publications, East Bridge by A/S Storebæltsforbindelsen, 1998

/7/ The Storebælt Publications, West Bridge by A/S Storebæltsforbindelsen, 1997

/8/ The Øresund Technical Publications, The Bridge by Øresundsbro Konsortiet, 2000

/9/ Indledende linjeføringsovervejelser for en Kattegatforbindelse – Delrapport, COWI for Vejdirektoratet, Sund & Bælt, Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, marts 2020.

Bilag A Enhedspriser broer