

KATTEGATFORBINDELSE - KYST-KYST ANLÆGSTEKNISKE FORUNDERSØGELSER

BYGGEMETODER OG ARBEJDSKANALER FOR LAVBROER PÅ LAVT VAND

FAGNOTAT

INDHOLD

1	Indledning	1
2	Referenceprojekter	2
2.1	Sheikh Jaber Al-Ahmad Al-Sabah causeway	2
2.2	Temburongbroen	7
2.3	Mumbai Trans Harbour Link (MTHL)	10
3	Kattegat lavbro med 60 m fag	10
4	Konklusion	13
5	Referencer	13

1 Indledning

Korridorerne KKV-3.1, -3.2 og -3.4 forløber på meget lavt vand over en stor del af kyst-kyst strækningerne. Her er lavbroer med 60 m spændvidde og mono-piles underbygning valgt. Det er antaget at mono-piles bygges fra arbejdspramme mens overbygningen bygges oppefra. Det har været forudsat, at en arbejdskanal som er 50 m bred i bunden med anlæg 1:2 og 6 m dybde er tilstrækkelig til at sikre adgang for arbejdsfartøjer. En sådan arbejdskanal vil for KKV-3.1 være nødvendig langs ca. 6,2 km af linjeføringen og indbefatte afgravning af ca. 1 mio. m³ havbundsmateriale. Der henvises til Baggrundsrapport [1] for beskrivelse af korridorer og broløsninger. Afgravningsmængder kan findes i fagnotat [2].

Ovenstående antagelse om byggemetode medfører et uddybningsomfang for nogle korridorer, som har vist sig at kunne medføre sedimentspredning i et

PROJEKTNR.

A134385

DOKUMENTNR.

A134385-B-NOT-003

VERSION

1.0

UDGIVELSESDATO

15. marts 2021

BESKRIVELSE

UDARBEJDET

TSH

KONTROLLERET

PTR

GODKENDT

PTR

omfang som vil kunne påføre havmiljøet alvorlig skade. Formålet med nærværende fagnotat er at undersøge muligheder for at reducere omfanget af midlertidige arbejdskanaler. Da behovet for arbejdskanaler i høj grad er bestemt af byggemetode undersøges også alternative byggemetoder. Undersøgelserne er udført som et "desktop study" der i høj grad er baseret på information fra andre sammenlignelige referenceprojekter indhentet fra internettet.

I næste afsnit beskrives tre megaprojekter som er sammenlignelige med foreslåede løsninger for Kattegat lavbroer med 60 m fag. Disse tre projekter er meget nye og anses at repræsentere foretrukne byggemetoder i dag.

2 Referenceprojekter

2.1 Sheikh Jaber Al-Ahmad Al-Sabah causeway

Sheikh Jaber Al-Ahmad Al-Sabah Causeway er en meget lang vejbro over Sulaiyikhat bugten i Kuwait. Den blev indviet i 2019. Projektet indeholder:

- > Main Link: 36 km broer, heraf 27 km marine broer;
- > Doha Link: 12 km broer, heraf 7,7 km marine broer.

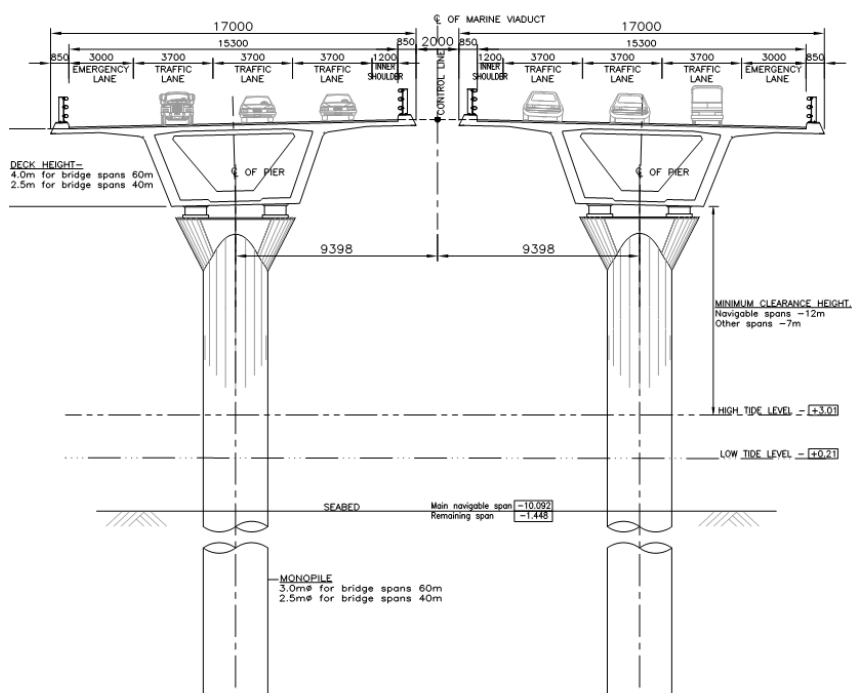
Broerne har følgende karakteristika:

- > Meget lavt vand over 1/3 af strækningen med marine broer;
- > Betydeligt tidevand -0,70 m til +3,01 m (middelvandstand 1,66 m);
- > Stor fokus på miljø da broen passerer naturhabitater og områder med de berømte grønne tigerrejer;
- > To parallelle betonkassedragere med typisk 60 m fag (1800 tons/dragere) for Main Link og 40 m fag (950 tons/dragere) for Doha Link;
- > Mono-piles underbygning med diameter 2,5 og 3,0 m for 40 m hhv. 60 m fag;
- > Pælelængde 30 til 84 m.

Informationer og billeder er fra artikel i Dar Magazine [3] (Link: <https://dar.com/content/publications/i14/document.pdf>).

Informationer og billeder specifikt om borede pæle er fra teknisk referenceblad fra Trevi Foundations [4] som udførte 760 af de 1200 borede pæle med udstyr fra Soilmec [5].

Typisk tværsnit for 60 m fag er vist i Figur 2-1.



Figur 2-1 Tværsnit af brodragere og mono-piles for 60 m fag (Doha Link, illustration: [3])

Pæle på lavt vand blev udført fra en midlertidig arbejdsbro parallelt med linjeføringen for den permanente bro. Arbejdsbroen havde fingre vinkelret herpå ved bropillelinjer ved arbejdsfront som vist i Figur 2-2. På fingeren i front af billedet er færdigbundet armering ved at blive installeret mens der ved den næste finger bores ud til pæle. Fingrene flyttes med frem i takt med udførelse af mono-piles.



Figur 2-2 Midlertidig arbejdsbro til udførelse af mono-piles (foto: [4])

Pæle på dybere vand blev boret fra pramme som vist i Figur 2-3. Hovedprammen var ca. 74 m lang og 20 m bred. Dybgangen er ikke oplyst men samlet højde af pram var 5 m og antages minimum 1,5 m fribord svarer det til maksimal 3,5 m dybgang. Prammen blev placeret ved hjælp af slæbebåde, forankret til havbunden og understøttet på 4 jack-up ben. Hovedprammen husede selve boremaskinen, en almindelig kran til placering af armering og blandedeanlæg og tanke til bentonit (til midlertidig stabilisering af borehul). Derudover var der mindre pramme til armeringsnet og bortskaffelse af udboret materiale.



Figur 2-3 Udførelse af mono-piles fra pram (foto: [5])

Udstøbning af beton skal foregå i en kontinuert proces og med meget store betonmængder op til 594 m³ per pæl anvendtes 2 pramme med hver deres betonblandeanlæg og pumpearme, se Figur 2-4.



Figur 2-4 Betonblandeanlæg til udførelse af mono-piles fra pram (foto: [4])

Del af monopiles over vand (pilleskaft) blev enten udført fra arbejdsbro som vist i Figur 2-5 eller fra pramme.



Figur 2-5 Midlertidig arbejdsbro til udførelse af del af mono-piles over vand (Doha Link, foto: [3])

For Main Link blev der i en tidevandszone syd for den sydlige kunstige ø anvendt en 4 km lang midlertidig arbejdsbro til at udføre mono-piles, dvs. over 15% af kyst-kyst strækningen. Kote havbund er her typisk -0,5 m hvilket svarer til at vanddybden er ca. 2,2 m ved normalvande.

For hovedstrækningen af Main Link mellem de to kunstige øer er havbundskoten ca. -10 m ved gennemsejlingsåbning og tilnærmelsesvis lineært stigende til 0 ved de to øer.

Vanddybde hvor der blev lavet marine operationer (uden arbejdsbro) var minimum 4-6 m. Der er en del tidevand i Kuwait så højvande blev udnyttet til tunge operationer.

For Doha Link blev der udelukkende anvendt midlertidig arbejdsbro til at udføre marine pæle da den største del af den marine bro er i tidevandszonen. Længden af den midlertidige bro var ca. 7,7 km.

Overbygningen er i lavvandede områder nær land udelukkende bygget oppefra uden operationer på vand. Overbygningen er udført som fulde fag støbt i land der blev kørt ud af allerede bygget bro på "multihjul" specialkøretøj hvorefter en portalkran løftede fag til endelig position på brolejer på pillerne. Portalkran er vist i Figur 2-6.



Figur 2-6 Portalkran til montering af hele fag (Main Link, foto: [3])

Typiske 60 m brofag til Main Link vejer 1800 tons og blev sejlet ud på pram og monteret med flydekran, se Figur 2-7.



Figur 2-7 Flydekran til montering af hele fag (Main Link, foto: [3])

Byggeperioden var ca. 5 år for 48 km broer, 2 kunstige øer og landanlæg.

Kontraktsum for Doha Link var ca. 550 mio. USD. Heraf udgjorde de marine broer ca. 441 mio USD inkl. forholdsmæssig fordeling af generelle udgifter. Det svarer til 2,60 mia. DKK for 7,7 km bro. Udgiften til den midlertidige bro var ca. 10% heraf eller 260 mio. kr. Alle priser er 2014K4 baseret på Sydkoreansk entreprenør og udførelse i et land med billig arbejdskraft.

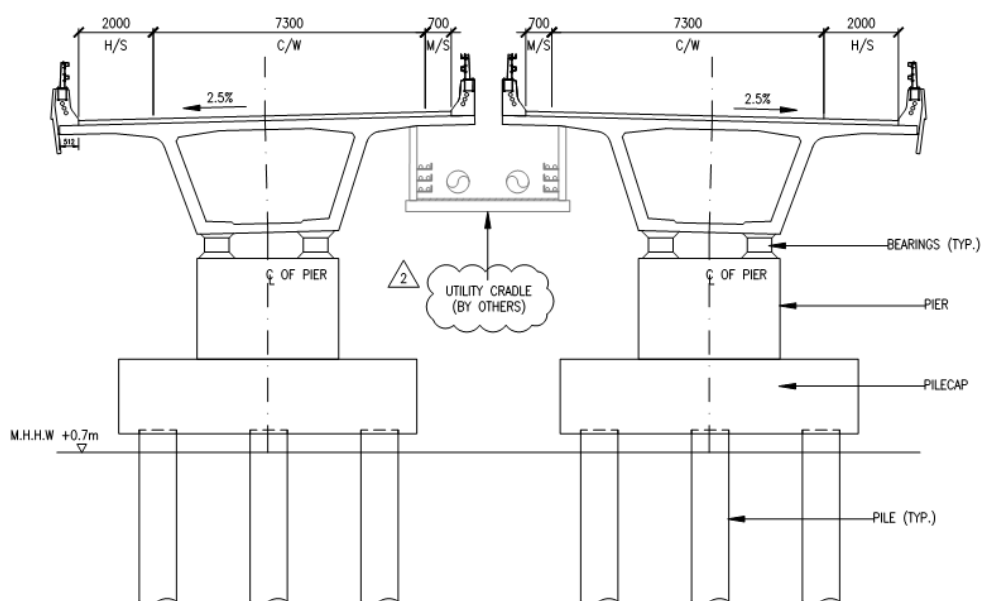
2.2 Temburongbroen

Temburongbroen er officielt navngivet Sultan Haji Omar Ali Saifuddien Bridge. Broen er en lang vejbro i Brunei indviet i 2020.

Projektet indeholder mange komponenter og den interessante del mht. byggetekniker for lavbroer på lavt vand er Marine Viaduct CC2 som er en 13,4 km lang bro bygget af Daelim og Swee med følgende karakteristika:

- > Lavt vand over hele strækningen;
- > Moderat tidevand -0,6 m til +0,7 m (middelvandstand 0,1 m);
- > Stor fokus på miljø da broen passerer naturhabitater;
- > To parallelle betonkassedragere med 50 m fag (870 tons/drager);
- > Traditionel pælefundering dog med "spun piles" (rammede forspændte hule betonpæle), pile cap og pilleskæft.

Broen indgår i beregning af enhedspriser, se fagnotat [6] for yderligere beskrivelser. Typisk tværsnit for 50 m fag er vist i Figur 2-8.



Figur 2-8 Tværsnit af brodrager og bropille for 50 m fag (illustration: [7])

Projektering af broerne er bl.a. beskrevet i 2 artikler [7] og [8] udgivet før byggeriet startede. Undersøgelser i forbindelse med projekteringen konkluderede at pramme egnet til ramning af de meget lange pæle har en dybgang på 3-4 m. Eksempel på pram er vist i Figur 2-9.



Figur 2-9 Forslag til pram til ramning af pæle (foto: [8])

Det blev ligeledes konkluderet at det ville være nødvendigt at afgrave i alt ca. 6 mio. m³ til arbejdskanaler.

Sedimentberegninger blev udført af HR Wallingford [9] som konkluderede, at det formentlig ville være nødvendigt at udgrave en 120 m bred arbejdskanal 3 m dyb.

Til udarbejdelse af nærværende notat har det ikke været muligt at finde informationer om faktiske forhold ved byggeriet af bropillerne. Dybden af arbejdskanal på 3 m er derfor behæftet med en vis usikkerhed.

Dog er der anvendt mindre udstyr til ramning af pæle end først antaget og omfang af afgravning blev derfor betydeligt reduceret. Anvendt pram er vist i Figur 2-10.



Figur 2-10 Anvendt pram til ramning af pæle (foto: Arup Hongkong)

Overbygningen blev udført som hele fag sejlet ud på pramme og løftet op i par vha. en nyskabende portalkran fra Dorman Long Technology (DLT) [10] gengivet i Figur 2-11. Løftekapaciteten er 2 x 870 tons.



Figur 2-11 Montering af hele fag Temburong (foto: [10])

Denne metode kræver kun moderat vanddybde svarende til pram og nyttelast. Dybgang af tom pram er omkring 2 m. Antages pram at være 20 x 60 m vil vægten af et fag på 870 tons betyde 0.7 m forøgelse af dybgangen fra nyttelast. Samlet dybgang er derefter ca. 2,7 m hvilket er sammenligneligt med dybgangen af en mindre slæbebåd.

2.3 Mumbai Trans Harbour Link (MTHL)

Broen er en lang vejbro i Indien som er ved at blive bygget. COWI er designer for pakke 1.

Projektet indeholder mange komponenter og den interessante del mht. byggete metoder for lavbroer på lavt vand er Marine Viaducts som for pakke 1 er 7,5 km betonbro med følgende karakteristika:

- > Lavt vand over det meste af strækningen;
- > Betydeligt tidevand +0,76 m til +5,8 m (middelvandstand 2,51 m);
- > Stor fokus på miljø da broen passerer naturhabitater med bl.a. lyserøde flamingoer;
- > To parallelle betonkassedragere med typisk 60 m fag;
- > Traditionel pælefundering med borede pæle med diameter 2,2 m, pile cap og pilleskraft.

Broen indgår i beregning af enhedspriser, se fagnotat [6] for yderligere beskrivelser.

Der bygges bropiller med marine operationer ved vanddybder ned til 4-5 m ved lavvande. Ved lavere vanddybde anvendes midlertidig arbejdsbro. Undervejs i byggeriet har entreprenøren valgt at forlænge arbejdsbroen, da de ser fordele med mere effektiv byggeproces. Pris på arbejdsbro er ikke tilgængelig men det er den samme arbejdsbro som blev anvendt til Doha Link i Kuwait, der bliver genbrugt.

Overbygningen bliver i modsætning til forrige to referenceprojekter udført som precast segmental med korte 3,6 m segmenter monteret oppefra.

3 Kattegat lavbro med 60 m fag

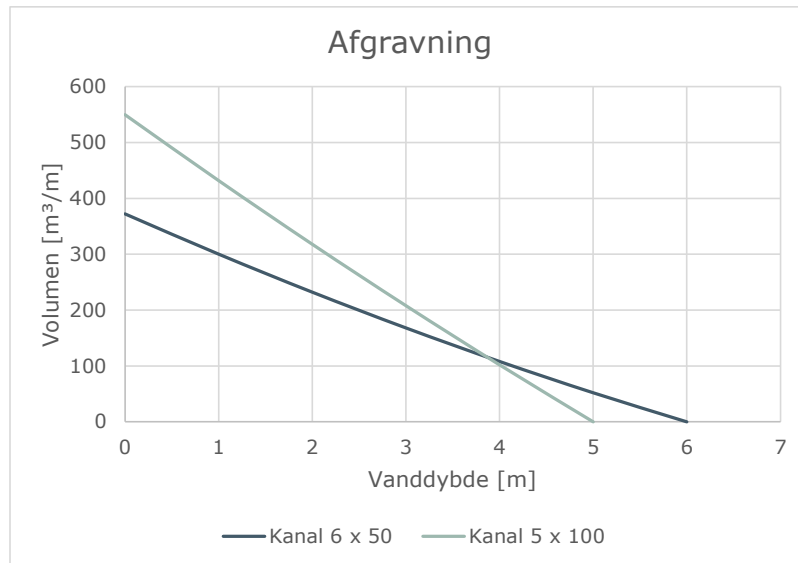
Baseret på de 3 undersøgte referenceprojekter vurderes det at:

- > Marine operationer kræver 3-6 m vanddybde afhængig af udstyr;
- > Midlertidige arbejdsbroer kan med fordel benyttes op til 4-5 m vanddybde;
- > Udgiften per løbende meter til arbejdsbro er ca. 10% af prisen på permanent bro, men der spares så udgifter til marint udstyr og afgravning.

Det astronomiske tidevand er meget begrænset i de indre danske farvande. De største variationer i vandstanden skyldes vejret, herunder vinden og det barometriske tryk. Der tages ikke højde for tillæg herfor.

For Kattegat lavbroer med 60 m fag vurderes det på dette stadie rimeligt at antage, at der skal udføres midlertidige arbejdskanaler langs linjeføringerne for at

sikre 5 m vanddybde over en bredde på 100 m til marine operationer. Dette øger afgravningsmængder sammenlignet med hidtidige antagelser. Forskellen per løbende meter som funktion af vanddybden er illustreret i Figur 3-1.



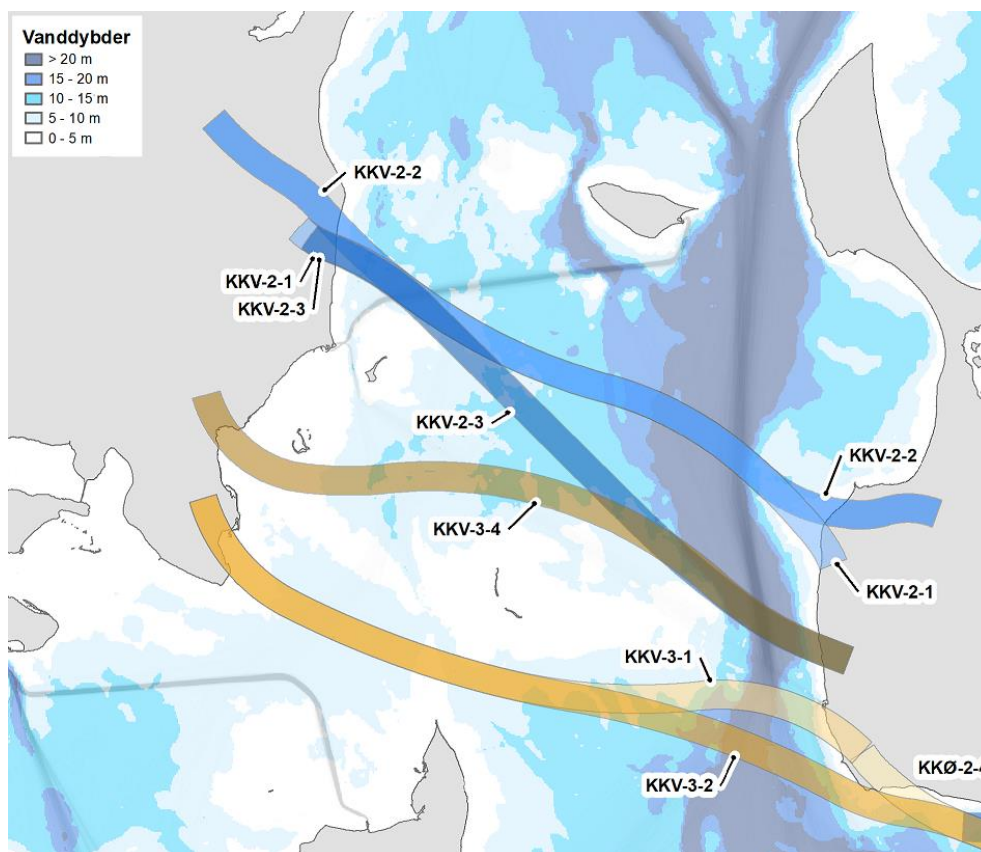
Figur 3-1 Afgravningsvolumen per løbende meter som funktion af vanddybden

Afgravningsmængder baseret på hidtidige antagelser er anført i Tabel 3-1.

Tabel 3-1 Mængder arbejdskanaler iht. [2] (bundbredde: 50 m, dybde: 6 m), som anvendt i miljøanalyserne

Korridor	Afgravningsmængde [m³]	Længde af arbejdskanaler [m]
KKV-3.1	997.000	6.240
KKV-3.2	1.025.000	7.500
KKV-3.4	875.000	4.800

Med dybgang reduceret til 5 m er der behov for arbejdskanaler, hvor korridorer passerer hvide områder i Figur 3-2.



Figur 3-2 Batymetri og KKV korridorer med rene broløsninger

Afgravningsmængder baseret på reduceret dybgang og øget bundbredde er anført i Tabel 3-2.

Tabel 3-2 Mængder arbejdskanaler (bundbredde: 100 m, dybde: 5 m)

Korridor	Afgravningsmængde [m ³]	Længde af arbejdskanaler [m]
KKV-3.1	1.244.000	4.440
KKV-3.2	1.202.000	5.340
KKV-3.4	1.118.000	4.500

Hvis der antages midlertidige arbejdsbroer ved Jyllandssiden for vanddybder 0-3 m reduceres afgravningsmængderne betydeligt som anført i Tabel 3-3.

Tabel 3-3 Mængder kombineret arbejdsbroer og arbejdskanaler

Korridor	Afgravningsmængde [m ³]	Længde af arbejdskanaler [m]	Længde af arbejdsbroer [m]
KKV-3.1	411.000	2.400	2.040
KKV-3.2	363.000	3.300	2.040
KKV-3.4	533.000	3.180	1.320

KKV-3.1 og -3.2 passerer Overgrund nord for Endelave. Afgravningsmængden er her alene ca. 208.000 m³ over en strækning på 900 m. Her kunne evt. også anvendes midlertidig arbejdsbro idet vanddybden er under 3 m over 600 m. Dog er arbejdsbroer til havs mindre oplagte da fordelene med direkte adgang fra land ikke er til stede. Afgravningsmængderne for KKV-3.1 og KKV-3.4 vil kunne reduceres med yderligere ca. 100.000 m³ ved også at anvende arbejdsbroer ved Samsøs kyst.

Midlertidige arbejdsbroer er stålbroer understøttet på et stort antal rammede stålpræle. Der vil derfor være støj i forbindelse med opførelse af arbejdsbroer.

4 Konklusion

Det har været forudsat, at en arbejdskanal som er 50 m bred i bunden med anlæg 1:2 og 6 m dybde er tilstrækkelig til at sikre adgang for arbejdsfartøjer.

Muligheder for at reducere omfanget af midlertidige arbejdskanaler er undersøgt. Da behovet for arbejdskanaler i høj grad er bestemt af byggemetode er alternative byggemetoder også undersøgt. Tre store nye sammenlignelige projekter er anvendt som grundlag.

Konklusionen af nærværende undersøgelser er, at dybden af arbejdskanaler kan reduceres til 5 m, men bredden i bunden bør øges til 100 m for at sikre tilstrækkelig plads til arbejdsfartøjer. Dette øger samlet set afgravningsmængderne.

Den mest effektive måde at reducere omfang af arbejdskanaler er i stedet at anvende midlertidige arbejdsbroer nær land, ved vanddybder under 3 m. Dette medfører visse restriktioner for overbygningen med hensyn til vægt af elementer, idet de vil skulle transporteres ud ad allerede bygget permanent bro.

En løsning med anvendelse af arbejdsbroer nær Jyllands kyst vil betragteligt reducere udgravningsvolumenet, og vurderes kun i ringe grad at påvirke anlægsoverslaget. Den samlede pris skønnes øget med i størrelsesordenen 1%.

5 Referencer

- [1] COWI, »Kattegatforbindelse - Kyst-Kyst - Anlægstekniske Forundersøgelser, Baggrundsrapport,« Februar 2021.
- [2] COWI, »Kattegatforbindelse - Kyst-Kyst - Anlægstekniske Forundersøgelser, Interfaceinformation til miljøundersøgelser,« Oktober 2020.
- [3] Dar, »Special Feature: Sheikh Jaber Al-Ahmad Al-Sabah Causeway,« *DarMagazine i14*, pp. 54-91, January 2018.
- [4] Trevi Foundations Kuwait CO.WLL, »Technical reference: Sheikh Jaber Al-Ahmad Al-Sabah causeway - Bored piles,« [Online]. Available: https://www.trevispa.com/downloads/4151/1643/Ref_CAUSEWAY_Kuwait.pdf.

- [5] Soilmec, »Home / News & Events / News / Notable projects: Soilmec equipment at work for Sheikh Jaber Al-Ahmad Al-Sabah Causeway Project,« [Online]. Available: https://www.soilmec.com/en/news/notable_projects_soilmec_equipment_at_work_for_sheikh_jaber_alahmad_alsabah_causeway_project.
- [6] COWI, »Kattegatforbindelse - Kyst-Kyst - Anlægstekniske Forundersøgelser, Enhedspriser til anlægsoverslag, Fagnotat,« Januar 2021.
- [7] T. Murphy, Y.-h. Chong, A. Luk, J. Yiu, S. Sangakkara og L. Wojnarski, »Temburong Bridge, Brunei - CC2 Marine Viaducts in Brunei Bay,« *IABSE Conference 2015: Providing Solutions to Global Challenges, Geneva*, pp. 2038-2045, 2015.
- [8] N. Hussain, S. Kite, F. Chiu, K. K. Chin, G. Anderson og H. M. B. H. A. Salim, »Temburong Bridge, Brunei - Environmental Impact Study and Mitigation Measures,« *IABSE Conference 2015: Providing Solutions to Global Challenges, Geneva*, pp. 2030-2037, 2015.
- [9] HR Wallingford, »Home / Projects / Brunei Temburong Bridge,« [Online]. Available: <https://www.hrwallingford.com/projects/brunei-temburong-bridge>.
- [10] DLT Engineering, »Reference project: Temburong Bridge Project, Brunei,« [Online]. Available: <https://www.dlteng.com/en/projects/TemburongCC2.htm>.