

SUND OG BÆLT HOLDING A/S

KATTEGATFORBINDELSE - KYST-KYST ANLÆGSTEKNISKE FORUNDERSØGELSER

MAKSIMAL ANLÆGSTEKNISK LÆNGDE FOR BORET TUNNEL

FAGNOTAT

ADRESSE COWI A/S
Parallelvej 2
2800 Kongens Lyngby

TLF +45 56 40 00 00

FAX +45 56 40 99 99

WWW cowi.dk

INDHOLD

1	Indledning	1
2	Begrænsende faktorer for længden af borede tunneller	3
2.1	Levetid på hovedleje	3
2.2	Forsyningslinjerne bliver for lange	4
2.3	Indvendige betonkonstruktioner	4
2.4	Andre begrænsninger	6
2.5	Erfaring fra borede tunnel til vej/jernbane	6
2.6	Samlet evaluering, anbefaling og risikovurdering	9
3	Konsekvens af svigt af hovedleje og andre dele	10
4	Konklusion	11

1 Indledning

Dette notat har til formål at fastlægge den øvre grænse for, hvor lang en strækning man anlægsteknisk med rimelighed kan planlægge at kunne anlægge en borede tunnel med diameter på ca. 15 m uden adgang fra overfladen. Med rimelighed forstås, at den kan anlægges indenfor planlagt tid, pris og med acceptabel risiko. Det er som udgangspunkt forudsat, at der anvendes velafprøvet teknologi, med andre ord "uden at bryde grænser".

Det skal dertil siges, at tunneler på verdensplan er meget efterspurgt, og at TBM teknologien er i fortsat udvikling med store projekter i Nordamerika, Europa og Asien. Grænserne for, hvad teknologien kan præstere rykkes løbende.

PROJEKTNR.

A134385

DOKUMENTNR.

A134385-C-NOT-001

VERSION

3.0

UDGIVELSESDATO

9. august 2021

BESKRIVELSE

UDARBEJDET

TOOL

KONTROLLERET

SDE

GODKENDT

PTR/SSO

Hvad der i 2021 betragtes som innovativt vil på mange parametre i 2030 betragtes som velafprøvet.

For at belyse TBM teknologiens begrænsninger i 2021 vil følgende spørgsmål blive adresseret:

- > Hvor lang en strækning mellem to punkter lokaliseret på land eller på en kunstig ø vil man kunne anlægge en boret tunnel med TBM startende fra et startkammer på hver side?
- > Hvilke praktiske erfaringer på verdensplan har man med anlæg af lange og større tunneller udført med TBM?
- > Hvilke faktorer er afgørende for begrænsning af den maksimale strækning af boret tunnel imellem to punkter, dvs. rækkevidden af en TBM?
- > Hvilke risici i forhold til bygbarhed, pris og tidsplan er gældende og hvilke risikoreducerende tiltag kan iværksættes?
- > Hvilke lange tunneller er planlagt på verdensplan og hvor lange strækninger imellem to punkter opererer disse planlagte tunnel med?

Forhold omkring drift af tunnel, ventilation, sikkerhed og brugeroplevelse er ikke vurderet i dette notat og behandles separat.

De begrænsninger der har med udførelsen at gøre, er vurderet at omfatte:

- > levetid for hovedlejet, som tilpasses tunnelens diameter
- > logistik og forsyningsveje til TBM
- > erfaring fra lange tunneller til vej og jernbanetunneller

Vurderingen tager udgangspunkt i, at tværsnittet for vej og jernbanetunnel forudsætter for a) vej alene: to individuelle rør for b) vej og bane: tre individuelle rør. Ingen af løsningerne opererer med separat pilot tunnel.

Evaluerings af anlægsteknisk projektrisiko for udførelsen af lange borede tunneller er ligeledes beskrevet i dette fagnotat.

2 Begrænsende faktorer for længden af borede tunneller

2.1 Levetid på hovedleje

Hovedlejernes udformning i en TBM har afgørende betydning for hovedlejerne levetid, og dermed hvor langt en TBM forventes at kunne bore, uden at bryde sammen. Hovedlejerne leveres til TBM leverandøren af en underleverandør, der er højt specialiseret i at fremstille netop den slags lejer. Hovedlejerne bygges op efter projektspecifik specifikation omkring krav, levetid og belastning.

Der er i industrien en accepteret garantilevetid på hovedlejer på 20.000 arbejdstimer. Denne garanti er et gængs stillet krav i tunnelindustrien som leverandørerne imødekommer.

Det forudsættes, som et centralestimat, at der i gennemsnit arbejdes 6 dage om ugen, og at der produceres 250 m tunnel i gennemsnit på en arbejdsmåned. Afhængig af geologi vil fremdriften per måned være større eller mindre. Ca. 1/3 af tiden er reel boretid, hvor hovedlejet arbejder. Det antages, at boretiden i forhold til den totale arbejdstid altid er den samme (dvs. forholdet mellem boretiden og arbejdstiden altid er 1/3) uafhængig af fremdriftsrate.

250 m fremdrift er baseret på TBM erfaring fra sammenlignelige forhold og tunnel diameter (bl.a. M30 tunnel i Madrid og Sparvo tunnelen i Italien, hvor gennemsnitsfremdriften i begge tilfælde var højere end 250 m per måned). Fremdriften er et central estimatet, hverken optimistisk eller konservativt.

$4,3 \text{ uge/måned} * 6 \text{ arbejdsdage} = 25,8 \text{ arbejdsdage/måned}$ a $24 \text{ timer/arbejdsdag} = 619 \text{ arbejdstime/måned}$ heraf $1/3 \text{ boretid} = 206 \text{ boretimer/måned}$

$20.000 \text{ arbejdstimer} / 206 \text{ boretimer/måned} = 97 \text{ "bore" måneder}$

$97 \text{ "bore" måneder} * 250\text{m} \approx 24 \text{ km}$

Med 20% sikkerhedsmargin vil den maksimale borelængde blive 19 km.

Ved behov for borede tunneller længere end 2 x 24 km vil TBM skulle projekteres således at hovedlejet kan skiftes. Dette er kendt teknologi, og ønsket om at kunne skifte hovedlejet har været indarbejdet på flere projekter, som et risikoreducerende tiltag, hvis der skulle opstå problemer med hovedlejet. En sådan løsning forventes at have indflydelse på byggetid og anlægspris, men er ikke nødvendigvis begrænsende.

2.2 Forsyningslinjerne bliver for lange

For at boremaskinen kan opretholde en acceptabel fremdriftsrate skal forsyningslinjerne kunne bortskaffe den bortgravede jord og forsyne boremaskinen med tunnelsegmenter til at fore tunnelen samt andet forbrugsmaterialer, der holder maskinen kørende:

- > Mørtel til bagstøbning
- > Kølevand til køling af hydraulisk udstyr
- > Brugsvand
- > Proces-vand både ind og ud
- > Fedt
- > Olie
- > Reserve og sliddele
- > Elforsyning
- > Ventilation

Af ovenstående vil tunnelsegmenter, mørtel, fedt, olie, reserve og sliddele skulle transporteres ind i tunnel med tog eller køretøj.

For lange tunneller med stor diameter (> 10 m) vurderes det hensigtsmæssigt at materialer transporteres ind i tunnelen med special køretøjer frem for tog, da køretøjer giver større fleksibilitet end tog.

Tunnel muck kan for EPB TBMer føres ud af tunnelen med transportbånd i stedet for køretøjer. For slurry-TBMer vil der anvendes rørføring.

Til vand, el, ventilation skal der føres rør, ledninger og kanaler frem til TBM.

Det kræver tiltagende investeringer i udstyr for at opretholde produktionen på et acceptabelt niveau jo længere tunnelen bliver.

For store tunneller (diameter større end ca. 10 m), hvor der kan anvendes specialkøretøjer med dobbeltrettet kørsel, vurderes effektreduktion i fremdrift og tillæg i anlægspris for lange tunneller dog at være beskednen.

2.3 Indvendige betonkonstruktioner

Ved fremdrift af TBM efter montage af ydre tunnelsegmenter, skal indvendige konstruktioner bygges. Udformning af de indvendige betonkonstruktioner vil afhænge af drift & vedligeholdsmæssige forhold, herunder redning og brandbekæmpelse, i samspil med anlægsomkostninger, driftsomkostninger og byggetidsplan.

Det er normal praksis på store borede tunneller at tænke disse forhold ind i projekteringen for at opnå optimale produktionsprocesser. Oftest udføres så meget

som muligt af de indvendige konstruktioner med præfabrikerede elementer, dette afhænger blandt andet af tradition/erfaring og arbejdsløn.

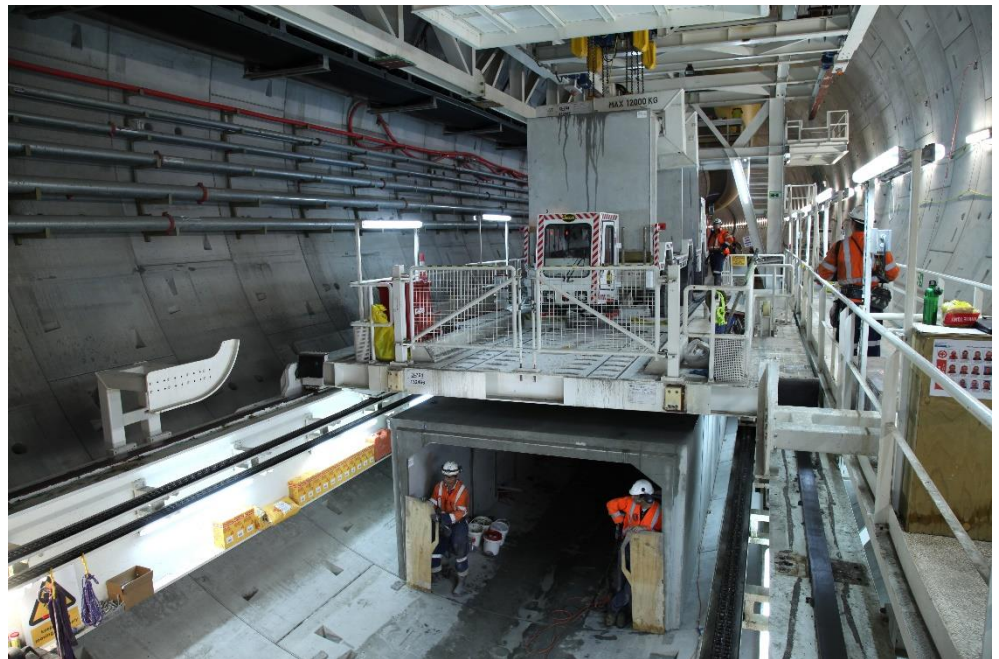
I Kina på store TBM'er til vej-tunneller ses det ofte, at løftearrangement til placering af de præfabrikerede dele af indvendige konstruktioner, at denne er bygget sammen med den bageste del af TBM. Hermed knyttes fremdriften af de indvendige konstruktioner til fremdriften af TBM.

Hvis den ene aktivitet udføres langsommere end anden vil den samlede fremdrift være som langsomme del. I hvilket omfang det vil påvirke den samlede fremdrift kan der ikke siges noget konsekvent, det afhænger af specifikke forhold.

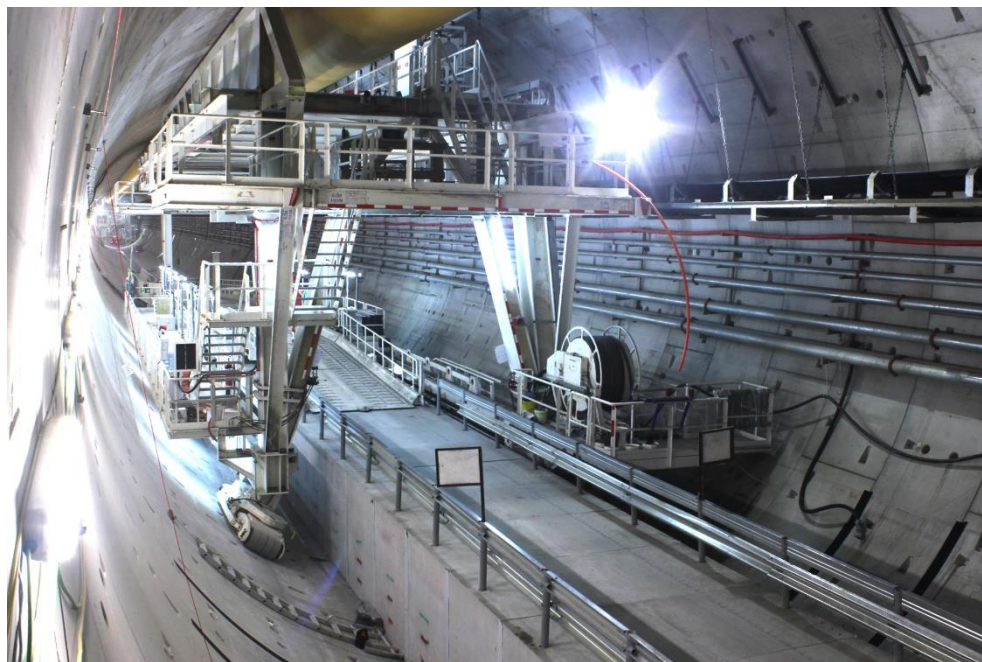
Det vil i tunneller med diameter over ca. 12 m være muligt at arbejde med installation af indvendige konstruktioner bag tunnelboremaskinen, såfremt det gøres muligt at få tunnelsegmenter og andet materiale transporteret forbi, hvorved fremdriften af TBM er afkoblet fra fremdriften af de indvendige konstruktioner.

På Figur 1 og Figur 2 er vist et eksempel med system til installation af præfabrikeret elementer til indvendig konstruktion fra TBM-leverandør Herrenknecht, hvorpå køretøjer til forsyning af ringsegmenter til TBM'en vil kunne køre op over den monterede indvendige konstruktion.

Herved gøres montage af indvendige konstruktioner uafhængig af fremdrift, som kunne optimere processen og dermed for eksempel reducere omkostningerne og eller risikoen. Systemet her er kaldet "Secondary Tunnel installation system". Billeder er fra Waterview tunnel projektet i New Zealand, som åbnede i 2017.



Figur 1 – Indvendig konstruktion (set imod TBM) - copyright Well-Connected Alliance



Figur 2 - Indvendig konstruktion (set væk fra TBM) - copyright Well-Connected Alliance

2.4 Andre begrænsninger

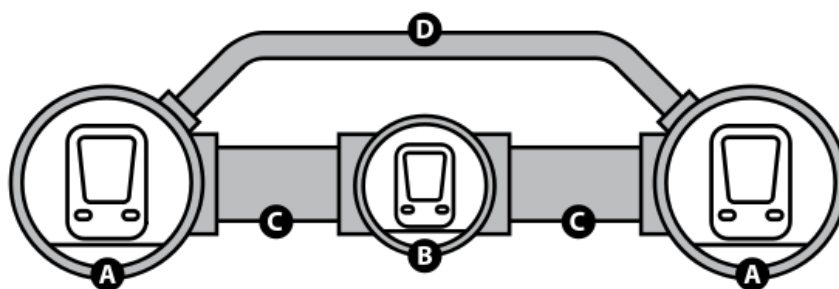
Det er muligt, at der for overholdelse af arbejdsmiljøkrav bliver stillet krav om brug af batteridrevne tog/køretøjer til forsyning/bortkørsel.

Dette er en ny og forholdsvis uprøvet teknologi som muligvis kan bidrage til en begrænsning af den længde, det er muligt at udføre borede tunneler i. Det vurderes dog, at hvis der indføres eldrevne køretøjer vil det være muligt at disse kan tilbagelægge 50 km eller mere på en opladning. Disse forhold vurderes ikke at bliver afgørende for begrænsning på længden, men kunne påvirke anlægspris af tunnel per km.

2.5 Erfaring fra borede tunnel til vej/jernbane

2.5.1 Kanaltunnelen (UK/FR)

Den eneste reference på lange tunneller som er gennemført, hvor der ikke har været adgang til TBMer over længere stræk via arbejdsskakte, stationer eller andet, er Kanaltunnelen mellem UK og Frankrig. Tunnelen består af 1 servicerør med $D_i = 4.8$ m og to Banerør med $D_i = 7.6$ m.



Figur 3 Skematisk repræsentation af Kanaltunnelen

Kanaltunnelen er totalt 50 km lang med arbejdsskakte nær kysten på den engelske side. Strækningen mellem adgangsskaktene på ca. 37 km under vand som er boret med 3x2 maskiner (3 fra hver ende). Der er to kaverner ca. i 3.-dels punkterne med sporkryds. Disse blev udgravet fra servicetunnelen (som ikke er planlagt på Kattegat boret tunnel løsninger) før hovedmaskinerne ankom. I kavernen på den engelske side var planlagt et større vedligehold af de 2 TBM, som skulle bore væsentligt mere end halvdelen af de 37 km.

På Kanaltunnelen blev der indenfor hovedlejets levetid på 20.000 timer boret følgende:

- > fra Frankrig 15,8 km
- > fra England 22,0 km

Dette inkluderer jævnlig inspektion og vedligehold under kortere stop, samt indlagt mulighed for at benytte af safe haven for hver 10-12 km har TBM, hvor TBM passerer igennem kavernerne til sporkryds.

Bemærk at TBMerne fra England har boret længere end den beregnede afstand inklusive sikkermargin i ovenstående afsnit baseret på fremdrifts antagelser og garanti på hovedleje.

For TBM Ø9 m har det vist sig muligt, somat bore mere end 15 km og må betragtes som den længste strækning en TBM af større diameter har boret.

Det skal bemærkes, at det tryk som maskinen skal arbejde under, vil have indflydelse på det slid maskinen udsættes for, jo højere boretryk, jo højere slid. Det vil være muligt at reducere slitagen, ved at tage det i betragtning under projektering og udførelse af TBM.

2.5.2 Erfaring med Mega-TBM

Over de seneste 10-15 år har man på verdensplan opnået stor erfaring med store TBM'er, med de største op til Ø16 m - Ø17 m i diameter og planlagte op til 19 m.

Ligeledes har TBM-fabrikanter opnået erfaring med effektoptimering af hovedlejer også for store TBM. Hermed øges pålideligheden og mindskes risikoen for nedbrud før levetiden af hovedlejet er opbrugt.

Flere TBM-fabrikanter (bl.a. Herrenknecht og Robbins) oplyser, at de forventer, at TBM'er i den nærmeste fremtid under en forudsætning af godt og løbende vedligehold, vil kunne opnå TBM borelængder på over 15 km.

- > Der arbejdes i øjeblikket i planlægningsfasen på Yantai-Dalian undersea tunnel i Kina, hvor det planlægges, at der på flere strækninger skal bores op til 20 km pr. TBM med diameter 10 m.
- > Ligeledes planlægges der en 120 km lang jernbanetunnel fra Talin til Helsinki, hvor der vil anvendes TBMer med diameter 17 m og borelængder omkring 20 km med afstand omkring 40 km imellem hver TBM-skakt.
- > For Brenner Base tunnellen (i Alperne) er der en tunnel boring under udførelse med diameter 10.7 m double shield TBM på en længe af 17,5 km i blød til mellemhård klippe.

COWIs analyse til Kattegatforbindelsen bekræftes således af andre sammenlignelige projekter med TBM-strækninger ligeledes på planlægningsstadiet

COWI har ikke kendskab til, at der er udført tunneller med TBM på Ø14 m - Ø16 m, hvor disse udover en stor TBM-diameter også har boret langt (>10 km). Appendix A indeholder liste af tunnel projekter, som er udført med TBM med en diameter >14,0 m.

Fra Kanaltunnellen for TBM Ø9m har det vist sig muligt at bore som minimum op til 15 km. Siden Kanaltunnellen blev bygget først i 1990erne er teknologien indenfor store TBM udviklet, så TBMer Ø14-16 m i 2020 er blevet den ny "standard" for borede vej- og jernbanetunneller. Der opnås i øjeblikket stor erfaring med TBM'er på Ø15-Ø16 m fra adskillige tunneler under større floder i Kina, disse tunneller har typisk en længde på 4-7 km, På baggrund af analyser understøttet af praktiske eksempler vil det være muligt at eftervise at hovedlejers pålidelighed ikke ændres væsentligt fra en TBM Ø9 m til en TBM Ø16 m.

På et videomøde afholdt den 25. november 2020, med den tyske maskinfabrikant Herrenknecht, leverandør af nogle af verdens største tunnelboremaskiner, blev grundlaget og resultaterne af forundersøgelsen drøftet.

På mødet blev levetiden på 20.000 arbejdstimer for hovedlejet i TBM for det konkrete projekt bekræftet. Baseret på et begrænset kendskab til de aktuelle forhold herunder geologien, borelængder, vandtryk og tunnel diameter, blev en lang boret tunnellsning på Kattegatforbindelsen bekræftet af Herrenknecht som værende mulig.

Ligeledes anså Herrenknecht, at projektet kan gennemføres med kendt, allerede udviklet og anvendt TBM teknologi, med de forbundne kendte risici som et stort tunnelprojekt indeholder. En væsentlig fordel for tunnelprojektet er information og erfaring indsamlet fra udførelsen af Storebæltstunnellen.

2.6 Samlet evaluering, anbefaling og risikovurdering

2.6.1 Evaluering

Den samlede erfaring fra udførte og planlagte tunneller opsummeres som følger:

- 1 For denne indledende fase vurderes det, at hovedlejerne for en TBM Ø16 m vil være lige så pålidelige som på en TBM Ø9 m.
- 2 Boret tunnel længde svarende til hovedlejets levetid er ca. 19 km inkl. 20% sikkerhed på fremdriften som funktion af boretid.
- 3 For meget lange strækninger - f.eks. for Kanaltunnel – har det med særlige foranstaltninger og vedligeholdelses stop i en kaverne vist sig muligt allerede i 1990'erne at bore henholdsvis 15 km og 22 km. Teknologien er udviklet væsentligt siden.
- 4 Der er identificeret 3 planlagte borede tunneller med længder i størrelsesordenen 15-20 km per TBM. Disse planlagte tunneller spænder fra "meget tidligt planlægning" til "under udførelse".
- 5 En eventuel Kattegat forbindelse med boret tunnel skal tidligst bygges i 2028, hvor TBM-teknologien forventes at være yderligere udviklet, og mere erfaring er opnået og blevet delt på verdensplan.

2.6.2 Anbefaling

Baseret på den samlede indsamling af data, analyser, evalueringer og antagelser 1-5 anbefales det i Kattegat projektet at arbejde med en maksimal borelængde på $2 \times 19 \text{ km} = 38 \text{ km}$ - med indlagte planlagte vedligehold.

2.6.3 Projektrisikokategorisering

Løsninger med lange borede tunneller er kategoriseret i henhold til beskrivelsen af projektrisikoniveauer som defineret i Kattegat Baggrundsrapport A134385-A-REP-007. Projektrisikobidraget fra udførelsen er her defineret som følger:

Projektrisikobidraget hidrørende fra udførelsen vurderes som **Forventeligt**, når der er tale om en konstruktion, som med hensyn til type og størrelse ikke er usædvanlig, og hvormed der er erfaring fra lignende internationale projekter. Der vurderes således at være lav risiko for, at udførelsen vil kræve anvendelse af højt specialiserede anlægstekniske udførelsesmetoder, som kun sjældent er set før.

Projektrisikobidraget hidrørende fra udførelsen vurderes som **Forhøjet**, når der er tale om en konstruktion, som med hensyn til type og størrelse er sjælden, og hvormed der er meget begrænset erfaring fra lignende internationale projekter. Der vurderes således at være betydelig risiko for, at udførelsen vil kræve anvendelse af højt specialiserede anlægstekniske udførelsesmetoder, som kun sjældent er set før.

Borede tunneler med en samlet borelængde på over 19 km (TBM fra begge sider er nødvendig) er derfor kategoriseret til at indebære et **Forhøjet** projektrisikobidrag; medens det for kortere tunneler kategoriseres i den lave ende af **Forhøjet**.

3 Konsekvens af svigt af hovedleje og andre dele

Skulle et hovedleje eller andre vitale dele på TBM på trods af garanti ikke opnå den garanterede levetid betyder dette nødvendigvis ikke at tunnelarbejdet ikke kan gennemføres.

Skift af hovedleje, sliddele og andre vitale dele er en risikofaktor, der vil have betragtelig indflydelse på tidsplan og ekstraomkostninger.

Det er afgørende, at man allerede i planlægningsfasen ser på de risici, der er forbundet med svigt af hovedlejet og slid af andre dele og identificere alle de tiltag man kan gøre for at minimere denne risiko.

Dette kan bl.a. være:

- > Forbedret design af forseglingslæber på hovedlejet
- > Frekvensen hvor der kontrolleres for urenheder i olien i hovedlejet
- > Design af hovedleje der kan skiftes indenfor maskinens skjold
- > Forstærkning af bærearmer i borehovedet så slitage minimeres
- > Øget fokus på slitage af boreværktøjer for at minimere antallet af rotationer krævet for fremdrift

> Øget frekvens for vedligehold og inspektion

Der kan med planlagte foranstaltninger foretages en udskiftning af hovedleje, også under vand. I nogle TBM'er kan hovedlejet skiftes inde fra, hvis det er planlagt på forhånd - i andre projekter har det været nødvendigt at lave en skakt eller kaverne foran boremaskinen, hvorfra hovedlejet er skiftet, f.eks. på TBM Store Bertha i Seattle (17 m dia).

Med et set-up, hvor der bores fra begge sider, ligger der en sikkerhed i, at maskinen fra den modsatte side kan bore længere og således overtage tunnelstrækning fra en maskine med et eventuelt nedbrud. Denne planlægning blev f.eks. benyttet på Storebælt og Kanaltunnellen mellem UK og Frankrig

Fastlæggelse af afstanden imellem to skakte (til eventuelt vedligehold), skal som i Kanaltunnel basere sig på en risikovurdering af geologi, fremdrift, boretid og levetidsgaranti for hovedlejet på en TBM, som kunne sætte ud og TBM fra den anden side dermed skulle bore længere for at dække strækningen.

Der bør i en kommende projektfase identificeres områder langs linjeføringen, hvor der er de bedste geologiske forhold, som kan planlægges til såkaldte safe haven, hvor der evt. kan udføres inspektion og vedligehold af bore hoved, hovedleje og sliddele

4 Konklusion

Ud fra allerede opnåede borede tunnelstrækninger (Kanal Tunnel med 15 km og 22 km borer) og levetidsbetragtninger på hovedlejet, samt kendskab til fremtidige planlagte projekter, anbefales det, at der i denne planlægningsfase ud fra et anlægsteknisk synspunkt arbejdes med en begrænsning på længder for borede tunneler på $2 \times 19 \text{ km} = 38 \text{ km}$.

Hvis borelængden planlægges længere end $2 \times 15 \text{ km} = 30 \text{ km}$, anbefales det at der indhentes yderligere detaljeret information med erfaring fra lange borestræk med store TBM'er fra projekter (bl.a. i Kina) og fra erfaringer fra TBM-leverandører.

Bilag A Borede tunneler med stor diameter

Startår	Land	Projekt	Status	Diame-ter [m]	Total længde [km]	Læng- ste stræk [km]
1988	England/ Frankrig	Channel tunnel	i drift	7.6	50	22
-	Kina	Yantai-Dalian (Bohai strait) undersea tunnel	planlagt	10	123	20
-	Finland/ Estland	Helsinki to Tallinn tunnel	planlagt	17	120	20
2000	Schweiz/ Italien	Lötschberg base tunnel	i drift	9.4	34.6	18.8
2014	Østrig/ Italien	Brenner/Brennero base tunnel	under udførelse	10.7	55	17.5
2002	Spanien	Guadarrama tunnel	i drift	9.5	28.2	15.8
2006	Schweiz	Gotthard/Gottardo base tunnel	i drift	9.6	57	14
2006	Canada	Niagara Water Diversion Tunnel	i drift	14.4		10
2017	Japan	Tokyo Outer Ring Road Kanetsu to Tomei	under udførelse	16.1		9
2016	Italien	Santa Lucia Highway Tunnel, A1 nær Firenze	under udførelse	15.87		7.6
2011	Kina	Shanghai West Changjiang Yangtze River Road Tunnel	i drift	15.43	8.9	7.5
2008	Kina	Nanjing Yangtze River Tunnel	i drift	14.93		7.5
2000	Holland	Groene Hart double-track rail tunnel	i drift	14.87		7.2
2017	New Zealand	Waterview	i drift	14,4m	2.4	2.4