

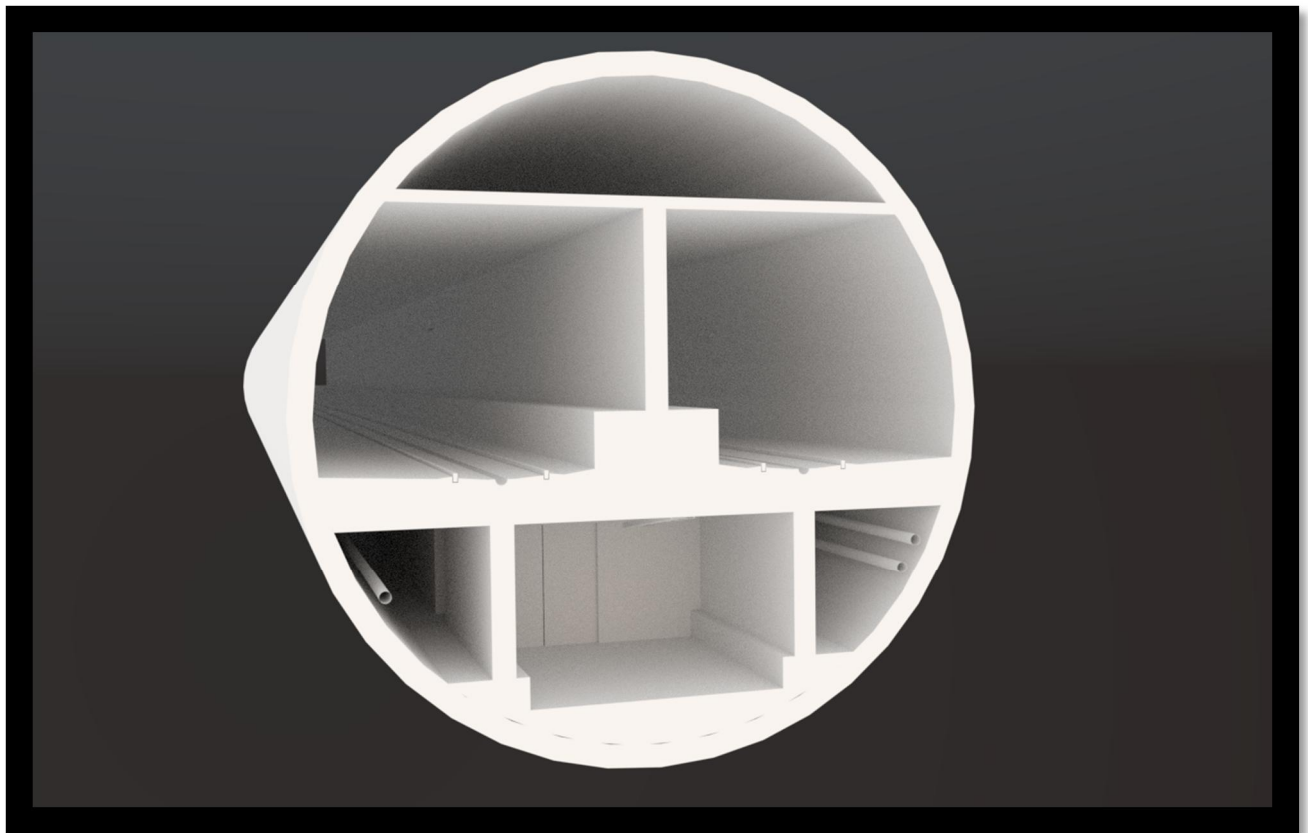
Til  
Malmø Stad

Dokumenttype  
Rapport

Dato  
1. December 2016

# ØRESUNDSMETRO FASE 3

## UDDYBENDE STUDIE AF EN BORET TUNNELLØSNING



Revision F

Dato 01/12/16

Udarbejdet af SKRI /LVE/SWG

Kontrolleret af SWG, JTR

Godkendt af SWG

Ref 1100023192-ØM3-Uddybende studie af en boret tunnel

## Indhold

<b>1.</b>	<b>INDLEDNING</b>	<b>5</b>
1.1	Baggrund for rapporten	5
1.2	Formål med opgaven	5
1.3	Baggrundsdokumenter	5
1.4	Anlægsløsning og trafikkoncept	6
1.5	Tunnelkonceptet	6
<b>2.</b>	<b>FORUDSÆTNINGER</b>	<b>7</b>
2.1	Generelt	7
2.2	Normer og regelværk	7
2.3	Geologiske forhold	7
2.4	Tog og trafikale forudsætninger	7
2.5	Miljømæssige forudsætninger	8
2.6	Plangeometri og længdeprofiler for tunnellinjeføringen.	8
2.7	Tunneltværsnit	9
	2.7.1 Sikkerhedskrav	9
	2.7.2 Trykforhold	9
	2.7.3 Fritrumsprofil	9
	2.7.4 Indvendige konstruktioner	10
	2.7.5 M&E pladskrav	11
2.8	Afvanding	11
2.9	Behov for kunstig ø	11
2.10	Deponering af udborede jordmængder	12
2.11	Udarbejdelse af anlægsoverslag	12
<b>3.</b>	<b>LINJEFØRING</b>	<b>13</b>
<b>4.</b>	<b>SIKKERHEDSKONCEPT</b>	<b>15</b>
4.1	Regelværk og standarder	15
	4.1.1 Generelt	15
	4.1.2 Rummet under sporene	16
4.2	Valg af kravspecifikationer for Øresundsmetro	16
	4.2.1 Nødfortove	17
	4.2.2 Nøddøre	17
	4.2.3 Redningsstationer/Brandbekæmpelsessteder i tunnelen	17
	4.2.4 Sikkert område	18
4.3	Ventilation	18
	4.3.1 Normal drift	18
	4.3.2 Nødsituationer	19
	4.3.3 Ventilation og nødsituationer ved transversal i tunnelen	21
4.4	Skakte/nødstationer ved kysten	22
4.5	Redningstog	24
4.6	Redningsvej	24
4.7	Rummet under sporene	24
<b>5.</b>	<b>LØSNINGSFORSLAGET</b>	<b>25</b>
5.1	Indretning af tunneltværsnit	25
	5.1.1 Fritrumsprofil	26
	5.1.2 Indvendige konstruktioner	26
	5.1.3 Sporunderbygning	26
	5.1.4 Afvanding	27
	5.1.5 M&E installationer samt service og vedligehold	28

	5.1.6	<i>Tolerancer</i>	28
5.2		Udførelse af tunnelen	28
	5.2.1	<i>Geologi</i>	29
	5.2.2	<i>TBM typer og deres kendetegn</i>	29
	5.2.3	<i>Valg af TBM til en Øresundsmetrotunnel</i>	34
	5.2.4	<i>Tykkelse på tunnelling</i>	34
	5.2.5	<i>Vandtryk</i>	35
	5.2.6	<i>Skakte</i>	35
	5.2.7	<i>Mødepunkt for de udførende TBM maskiner</i>	36
	5.2.8	<i>Risiko</i>	36
<u>6.</u>		<u>ANLÆGSOVERSLAG</u>	<u>38</u>
6.1		Generelt	38
6.2		Post 1. Tunnelboremaskiner	38
6.3		Post 2. Produktion af beton	39
6.4		Post 3. Skakte ved kysten	39
6.5		Post 4. Mekaniske og elektriske installationer	39
6.6		Post 5. Geoteknik og miljø	39
6.7		Post 6. Jernbane	39
6.8		Udeladelser	39
6.9		Anlægstid	41

## 1. INDLEDNING

Nærværende rapport beskriver resultatet af det uddybende studie af en boret tunnelforbindelse til metro, mellem København og Malmø som er udført i perioden Juni - December 2016.

### 1.1 Baggrund for rapporten

Frem mod 2029 forventes det at Øresundsregionen vokser fra ca. 3,7 indbyggere til 4,1 millioner indbyggere. I tillæg forventer Trafikstyrelsen (blandt andet på grund af Femern-forbindelsen) et øget antal af godstog i løbet af perioden 2012-2027. På baggrund af dette, er iværksat undersøgelser af en ny en forbindelse til persontrafik mellem København og Malmø, til aflastning af trafikken over den eksisterende Øresundsforbindelse.

Undersøgelserne er inde i en 3. fase af forstudier, hvor der bla. er fokus på mere detaljerede studier af de forskellige, overordnede anlægstekniske løsninger for forbindelsen der blev undersøgt i de tidligere faser. Specifikt for dette studie, gælder den løsning hvor forbindelsen anlægges som en boret tunnel, med ét stort tværsnit der rummer to metrospor i samme plan. De to tidligere faser havde følgende formål:

Fase 1. Udarbejdelse af anlægsoverslag for en tunnelloøsning, herunder overordnet vurdering af relevante metoder (sænketunnel, boret tunnel) anvendt på et trafikkoncept der omfattede både en metroløsning og en løsning med regionaltoget

Fase 2. Udarbejdelse af anlægsoverslag, herunder løsningskoncept, for en kombineret sænketunnel/lavbro anvendt på trafikkoncept bestående af en metroløsning

### 1.2 Formål med opgaven

Formålet med rapporten er følgende:

- At estimere dimensioner for tunneltværsnittet med basis i et givet metro- og trafikkoncept og et funktions- og sikkerhedskoncept der er udviklet med henblik på give et tilfredsstillende sikkerhedsniveau for så lang en tunnel. Dette inkluderer en vurdering af relevant regelværk og standarder
- At vurdere og beskrive anlægsgennemførelsen, og etableringen af den borede tunnel, herunder miljømæssige konsekvenser på et overordnet niveau.
- At udarbejde et anlægsoverslag for tunnelforbindelsen.

I denne forbindelse er udarbejdet et løsningsforslag, som beskrives og gennemgås i nærværende rapport og bilag.

### 1.3 Baggrundsdokumenter

Til rapporten er udarbejdet et antal baggrundsnotater og tegningsskitser der er vedlagt som bilag. Den geotekniske rapport er udarbejdet i projektets fase 1, men er medtaget da den fortsat er gyldig og relevant for fase 3 og nærværende rapport.

Bilagsnr.	Type	Beskrivelse	Fase
1	Rapport	Geologisk og geoteknisk rapport	1
2	Notat	Nødvendigt ventilationstværsnit	3
3	Memo	Metro toghøjde og fritrumsprofil	3
4	Memo	Metro transversal i tunnel	3
5	Tegningsskitse	Metro fritrumsprofil	3
6	Tegningsskitse	Tunnel tværsnit, hovedtunnel	3
7	Tegningsskitse	Tunnel tværsnit, enkeltsporstunnel	3

8	Tegningsskitse	Tunneltværsnit, afvandingsprincip	3
9	Tegningsskitse	Horisontal og vertikal linjeføring	3

Tabel 1. Bilagsliste.

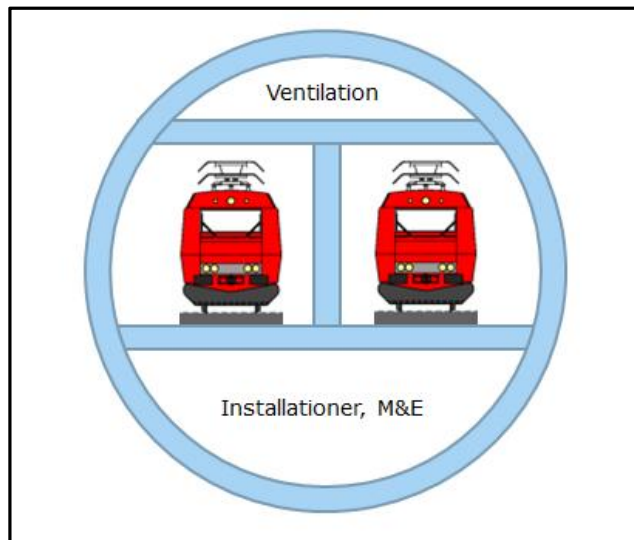
1.4 Anlægsløsning og trafikkoncept

Den borede tunnel udføres med tunnelboremaskiner (TBM) mellem skakte placeret ved Prøvestenen ud for Amager på den københavnske side, og ved Scaniaparken i Malmø. Linjeføringen vil være en ret linje mellem disse skakte, krydsende under Saltholm. Længden vil være ca. 22,2 km fra skakt til skakt.

Metroforbindelsen vurderes ud fra et koncept med en maksimal hastighed på 120km/t, og op til 36 afgangene i timen i hver retning.

1.5 Tunnelkonceptet

Konceptet for den borede tunnel, er et enkelt rør med stor diameter, hvor de to metro spor er placeret ved siden af hinanden, adskilt af en skillevæg. Centralt for sikkerhedskonceptet i dette tværsnit, er at det modsatte trafikrum udgør "sikkert" område i en ulykkesituation.



Figur 1. Tunnelkoncept, princip tværsnit

## 2. FORUDSÆTNINGER

### 2.1 Generelt

I dette afsnit gennemgås de forhold og forudsætninger der danner grundlag for dette uddybende studie af en boret tunnel.

### 2.2 Normer og regelværk

Internationalt set bygges metroer efter lokale/nationale bestemmelser som f.eks. BOStrab-komplekset i Tyskland, og regelgrundlaget for Københavns metro er netop BOStrab-komplekset. Ydermere har krav fra standarderne NFPA130 og AUGT(IEC 62267) indgået som en del af grundlaget for Metro Cityringen i København, da der ikke findes danske standarder på området. De nævnte standarder og deres anvendelse er beskrevet nedenfor.

- BoStrab-komplekset er tyske nationale regulativer om opførelse og drift af letbaner. Regulativet dækker også undergrundsjernbaner, herunder metro, hvor der er anført særlige hensyn hertil. Disse hensyn er specielt henvendt til f.eks. evakuerings faciliteter, sikkert område og sikre zoner.
- NFPA130 er en amerikansk standard for brand og brandbeskyttelse af transportsystemer, som bruges af passagerer. Standarden er gældende for undergrundsbaner, overflade- og højbaner, samt ydermere for stationer, togveje, brandventilationsanlæg, køretøjer, kommunikation, styresystemer og opbevaringsareal for togvogne.
- AUGT (IEC 62267) er en international standard, der er udgivet af International Electrotechnical Commission (IEC). Standarden stiller sikkerhedskrav til transportsystemer i byområder, med førerløst eller uovervåget selvkørende tog kørende på uafhængige strækninger.
- TSI-SRT bestemmelserne, som angiver krav til sikkerhed i jernbanetunneller, gælder for det Europæiske jernbane netværk med undtagelse af metroer, bybaner, S-baner og lignende. De gælder således ikke nødvendigvis for en ny Øresundsforbindelse, men TSI-SRT vil være et godt startsted til at definere krav, og det vurderes at samme sikkerhedsniveau som i TSI-SRT bør efterstræbes tilstræbes.

I forhold til drift/service i tunnelen, er de fleste servicekrævende installationer lagt i den nederste del af tunnelen, under sporene. Kravene til tunnelens udformning i denne del af tværsnittet, herunder dimensioner af ingeniørgange, afstand mellem opgange og disses frie tværsnit, er baseret på arbejdstilsynets "Forskrifter for indretning af og arbejde i brønde og tunneller til fjernvarmeanlæg o.l." – afsnit 1.2. "Nye tunneler".

### 2.3 Geologiske forhold

De geotekniske forudsætninger er givet i Bilag 1; "Berggrundens oppbyggnad och egenskaper, slutrapport".

### 2.4 Tog og trafikale forudsætninger

Der er tidligere udarbejdet en kapacitetsanalyse, som sammen projektforudsætningerne (se bilag 4) danner grundlag for trafik- og metrokoncepterne. Disse baserer sig på en togtype med en størrelse og kapacitet som de Københavnske metrotog, men med maks. tilladt hastighed på 120km/t. Togene forudsættes at have dimensioner, der er sammenlignelige med den københavnske metro, men særligt pga. den højere hastighed, vil togene have en lidt øget højde. Med 36 afgang i timen, vil togene sendes afsted for hver 100 sekunder, hvilket svarer til at der vil være 3,3km mellem tog i tunnelen. I praksis vil der ved forstyrrelser i driften, skulle sendes

tog afsted med kortere intervaller, og der er i forhold til sikkerhedskonceptet antaget at mindsteafstanden mellem tog i tunnelen, vil være 2km. Dette har betydning for hvor langt der maksimalt må være mellem brandbekæmpelsessteder i tunnelen – se afsnit 4.

Togtype	Metro
Hastighed	120 km/t
Højde af tog	3,6m (øget fra 3,4m)
Gulvhøjde	1,0 m over S.O.
Bredde af tog	2.65 m
Strømforsyning	Via Pantograf
Højde kørestrømsanlæg, inkl pantograf	0,75m
4 vogns metrotog, længde	50m – (120 siddepladser)
Transversaler, antal	3 ialt (1 i tunnelen samt 1 i hver skakt/nødstation ved kysten)
Transversal i tunnel, krav	Diamantkrydsning, 30km/t
Transversaler, længde	50m
Max frekvens/antal tog	36 tog/time
Total længde af forbindelse, kyst-kyst	22 km
Maks antal toge i tunnel samtidigt (i hvert trafik rør)	7
Afstand ml toge i tunnel	2 km

Tabel 2: Øresundsmetroens kapacitets- og dimensionsmæssige grundlag

## 2.5 Miljømæssige forudsætninger

Det miljømæssige grundlag for denne rapport, er alene baseret på eksisterende kendskab til Øresundsregionen, da der ikke foreligger specifikke rapporter om hverken forureninger eller miljømæssige restriktioner.

De forventede miljøkrav er tidligere diskuteret med referencegruppen for "Øresundsmetroprojektets arbejdsgruppe om anlægsteknik og anlægsoverslag", og der er aftalt: En 0-løsning for gennemstrømning, dvs. hvis der fyldes op i Øresund (fx en ø), skal gennemstrømningen sikres ved uddybning i andre områder. 1 km respektafstand til Saltholm skal overholdes (lig krav for den eksisterende Øresundsforbindelse).

De nøjere miljømæssige påvirkninger betragtes ikke.

## 2.6 Plangeometri og længdeprofiler for tunnellinjeføringen.

Den maksimale tilladelige stigning på sporene forudsat som 60‰, som det er tilfældet for den Københavnske metro. Den største gradient for linjeføringen i løsningsforslaget er mindre end 60‰, og gradienter større end 3‰ er kun udnyttet ved start og slut af forbindelsen, for at komme hurtigst muligt at komme ned i en dybde hvor der er min. 1,5 x tunneldiameteren kalkdække. Basis for topografi, bathymetri og geologi, er samme som for fase 1.

Minimum hældning i længderetning er forudsat som 3‰ for at sikre afvandingen i tunnelen (brandvand, vaskevand, spildvand mv.)



## 2.7 Tunneltvaersnit

De elementer der har størst indflydelse på tunneltvaersnittet, er trafik- og sikkerhedsrelaterede krav, herunder krav til ventilationskapacitet, togets størrelse og fritrumsprofil, trykforhold omkring toget ved hastighedsgrænsen og størrelse af teknisk udstyr og installationer.

### 2.7.1 Sikkerhedskrav

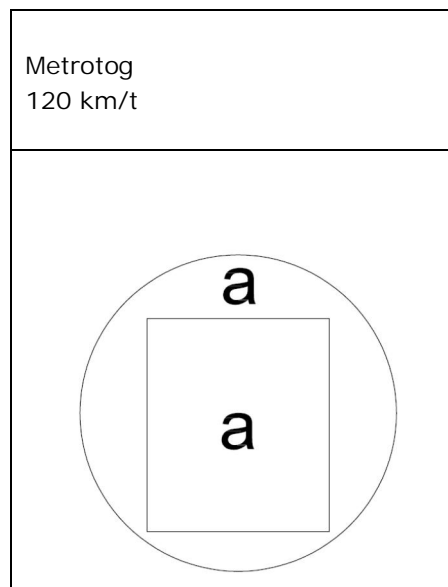
De sikkerhedskrav der er relevante for en Øresundsmetro, og de krav som løsningsforslaget baseres på, gennemgås i afsnit 4.

### 2.7.2 Trykforhold

Når tog kører 120 km/h skal der tages hensyn til trykforholdene omkring toget. Disse trykforhold har af tunnelens tværsnit. De væsentligste parametre ifm. tryk er følgende:

- Togets hastighed
- Blokeringsstallet (forholdet imellem effektivt tunnelareal og togets areal)
- Tunnellængden
- Togets længde
- Tunnellens stigningsgradient

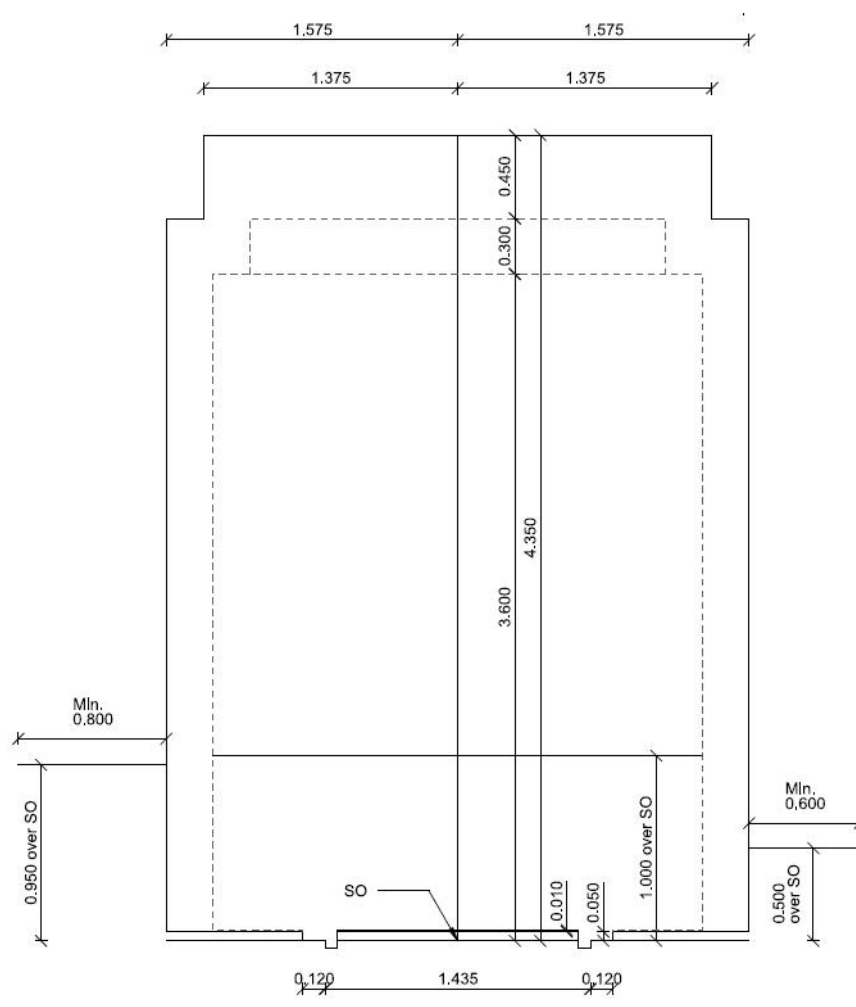
Der er gjort en overordnet vurdering af trykforholdene som er vist på tabellen under, og som er overholdt i løsningsforslaget.



Tabel 2. Vurdering af krav til forhold mellem areal af tog og areal af det frie rum omkring toget.

### 2.7.3 Fritrumsprofil

I bilag 5 er gjort en vurdering af det krævede fritrumsprofil, baseret på BOStrab/VDV151 krav. Fritrumsprofilet er tegnet op i bilag 7, og gengivet herunder:



Figur 2. Metro fritrumsprofil.

Profilen er baseret på følgende betydende parametre:

- Toghøjde (uden pantograf) på 3600 mm, sammensat af
  - Fri højde for passagerer
  - Gulvhøjde/indtrædningshøjde 1000 mm
  - Tagets konstruktionshøjde
  - Indlæg af paneler mv
- Pantograf højde på 300 mm
- Højde af strømskinne på 450mm, sammensat af strømskinne 300mm og pantograf bevægelsesfrihed på 150mm.

#### 2.7.4 Indvendige konstruktioner

Tværsnittets indvendige konstruktioner i løsningsforslaget, er indikative, og dimensioneret efter erfaringsmæssige vurderinger. De indvendige konstruktioner i rummet under sporene kan udformes og arrangeres på antal måder, og i en senere fase r må det afklares hvilken løsning der er mest optimal i forhold til økonomi og funktionalitet..

I forhold til anlægsoverslaget, er alle de indvendige konstruktioner antaget udført i armeret konstruktionsbeton.

### 2.7.5 M&E pladskrav

Der er i nærværende notat ikke gjort detaljerede overvejelser omkring indretning og udrustning af tunnelen, men der er gjort en overordnet vurdering af hvilke M&E elementer der er styrende for størrelsen af tværsnittet. Udgangspunktet kørestrømsforsyning er et anlæg med 2000 kVA effekt, svarende til Københavns metro. Der vil kræves mere effekt til en Øresundsmetro, men dette kan efterkommes ved at have forsyninger med kortere intervaller. Det vurderes at den største teknik "blok" (svarende til en transformer) vil måle 2,5 m i højden, og 1,5 m i både bredde og dybde. Hertil kommer 0,6 m frigang under blokken, til bøjning af indgående kabler. For at sikre fuld redundans mellem forsyningsstationerne ved 750VDC, estimeres der en afstand på 2,5 km mellem forsyningsstationer.

### 2.8 Afvanding

Vurdering af afvandingsprincip og størrelse af pumpe-sumpe er gjort på et overordnet niveau. Der er især kigget på løsninger fra Øresundstunnelen, Storebæltstunnelen og VVM undersøgelsen af en boret tunnel under Vejle Fjord.

### 2.9 Behov for kunstig ø

Overvejelser omkring muligheden for anlæggelse af en kunstig ca. midtvejs på den borede strækning mellem København og Malmø, herunder fordele og ulemper og udarbejdelse af muligt koncept, er tidligere undersøgt i fase 2. Introduktionen af den kunstige ø angik dog kun en løsning til regionaltoget, med to tunnelrør og tværtunneler. I dette koncept var øen relevant pga følgende forhold:

- Ventilation. Idet trafik-konceptet med regionaltogsløsningen betød at der ville være maksimalt 2 tog i hvert rør ad gangen, kunne den langsgående røgudsugningskanal i tunnelen erstattes med røgudsugning via den kunstige ø. Dvs at hvis et tog bryder i brand på strækningen mellem København og den kunstige ø, vil længdeventilation bære røgen i retning mod øen, hvor den vil suget ud. Idet det nærmeste forankørende tog vil befinde sig på strækningen imellem den kunstige ø og Malmø, vil det være en sikkerhedsmæssigt acceptabel løsning. Fraværet af den langsgående røgudsugningskanal i tunnelen, ville betyde at tunnel tværsnittet og dermed omkostninger til boring af denne, kunne reduceres.
- Redning/evakuering. Den kunstige ø ville kunne fungere som "redningsstation", og således reducere den afstand, og dermed den tid, passagerer skulle rejse for evakuere til det fri.

Det blev dog konkluderet, at prisen for anlægge en sådan ventilationsø vil være så høj, at det vil være billigere at anlægge tunnelen med et større tværsnit, med plads den langsgående røgudsugningskanal. I tillæg vil der være en mængde omfattende miljømæssige konsekvenser ved konstruktion af øen, både i anlægsfasen og i den permanente fase.

I forhold til nærværende fase 3 tunnelkoncept, vurderes det ikke at være relevant med en kunstig ø. Dels vil der skulle anlægges flere af dem, idet der er krav om at eventuel brandrøg ikke må kunne nå hen til foran-holdende tog (3,3km – jf tabel 1), dels vil de miljømæssige konsekvenser være meget omfattende, og endeligt vil det fordyre projektet betydeligt. Fordelen ved én eller flere øer, vil være at evakuering til det fri ville foregå hurtigere end i situationen uden en ø, tunneltværsnittet vil kunne reduceres da røgudsugningskanalen vil kunne reduceres og der vil være mulighed for at udnytte ø-anlægget til at modtage tunnelboremaskinerne. Dog ville disse fordele i opvejes af behov for marint beredskab til evakuering, og marin demobilisering af tunnel-operationen i tilfældet med modtagelse af TBM.

Der er således ikke indarbejdet én eller flere kunstige øer i løsningsforslaget

#### 2.10 Deponering af udborede jordmængder

Der er ikke taget stilling til muligheder, problematikker, egnede formål mv i forhold til behandling, transport og deponering af de jordmængder der vil blive produceret i forbindelse med anlæggelse af tunnelen.

#### 2.11 Udarbejdelse af anlægsoverslag

Der er udarbejdet anlægsoverslag for den borede tunnel.

Overslaget er søgt tilnærmet den forventelige endelige anlægspris, men har ikke en præcision der medfører, at det kan forventes at de vil holde indtil der er udarbejdet endeligt anlægsoverslag på eksempelvis VVM niveau.

### 3. LINJEFØRING

Ved planlægningen af den borede tunnels linjeføring, er følgende forhold styrende:

Komponent	Krav	Konsekvens for koncept
Natura 2000 område/ Saltholm	Ingen gravning eller permanente konstruktioner nærmere end 1 km fra Saltholm.	Ingen – den borede tunnel medfører ingen indgreb i Natura 2000 området, eller i havbunden i øvrigt.
Længdeprofil, geometriske krav	Maksimum sporgradient er 60‰, svarende til krav for Københavns metro	Den største gradient på 48‰ findes ved på tunnelstrækningen op mod skaten på Malmø siden, se længere nede på siden for nærmere forklaring.
Længdeprofil, afvandingskrav	Minimum hældning i længderetning skal være 3‰ for at sikre afvanding til en pumpesump (vaskevand, spildvand osv.)	For at undgå at tunnelen placeres dybere end ca. 60 m, medfører det 2 dybdepunkter, og dermed 2 pumpesumpe. Konsekvens ved at have ét dybdepunkt vil være at tunnelen bliver mere end 75 m dyb.
Længdeprofil, krav til jorddække over tunnelen	Oversiden af den borede tunnel er placeret minimum 1 x tunneldiameteren under terræn/havbund, og generelt minimum 1,5 x tunneldiameteren. Dette krav er af hensyn til tunnelens stabilitet under fremdriften, herunder både boretryksstabilitet og opdriftsstabilitet.	Dybden af skaktene ved hver kyst afgøres af tunneldiameteren, jo større boremaskine, des dybere (og dyrere) bliver skakten.

Tabel 3: Styrende parametre for tunnelens linjeføring.

Med udgangspunkt i ovenstående punkter er der udarbejdet en linjeføring, som er vedlagt som bilag 9.

Den borede tunnel starter ved stationering ca. 0+270, ved Prøvestenen ud for Amager på den Københavnske side og slutter i stationering ca. 22+450 ved Scaniaparken i Malmø. Den horisontale linjeføring er uden kurver, og den totale borelængde er således ca. 22,2 km .

Linjeføringens hældning er kraftigst inde ved land. Dette skyldes at de største vanddybder (13 - 14m) i Øresund findes relativt tæt på land, samt at det er ønskværdigt at skaktene på land bliver anlagt i mindst mulig dybde. De kritiske punkter for linjeføringen er ved overgangen fra hav til kyst, ved stationering ca. 0+450 på Københavnsiden og ved ca. 22+100 på Malmøside. Her er tunnelen lagt således at der er 1 x tunneldiameterens jorddække, og fra disse punkter videre til sammenkoblingen med skaktene, skal den vertikale afbøjningsradius afsluttes så det passer med at hældningen på skaktenes bundplader er 3‰. Dette svarer til de eksisterende underjordiske skakte/stationer på Københavns metro, og sikrer at der hældning nok til at sikre afvandingen.

Væk fra skaktene, er linjeføringen lagt således at tunnelen så hurtigt som muligt når ned i kalkbjergarterne, i en dybde der svarer til 1,5 x tunneldiameters kalkdække.

Antagelsen om at der skal være minimum 1x tunneldiameter jorddække er en generel "tommelfingerregel" der skal sikre stabiliteten af tunnelen. Placeringen af hoveddelen af tunnelen i en dybde på 1,5 x tunneldiameteren i kalk, er valgt ud fra et sikkerhedsmæssigt synspunkt, da jordbundsforholdene er relativt ukendte langs store dele af tunnelstrækningen.

Denne linjeføring medfører at løsningsforslagets maksimale stigningsgradient på Københavnssiden er 32‰ og 48‰ på Malmø siden. De minimale afbøjningsradier der er anvendt, er  $R=10.000$ , hvilket er en værdi der vurderes gennemførlig på dette stadie. Større stigningsgradienter er således ikke relevante med de anvendte "rammer" for linjeføringen .

Af den foreslåede linjeføring fremgår det at der etableres 2 dybdepunkter, og at tunnelens dybeste punkt vil ligge ca. 55m under havoverfladen.

Det vurderes at der i en senere fase vil være mulighed for en optimering af skaktplacering, skaktdybde og tunnelgradient, ud fra et mere omfattende kendskab til projektområdets geologi og projektets rammer.

## 4. SIKKERHEDSKONCEPT

### 4.1 Regelværk og standarder

#### 4.1.1 Generelt

Vurdering og indarbejdelse af et sikkerhedskoncept for en Øresundsmetro har vigtig betydning for størrelse og indretning af tunneltværsnittet samt anlægsomkostningerne. I vurderingen indgår særligt overvejelser omkring hvilket regelværk og standarder sikkerhedskonceptet skal baseres på, samt hvordan tunnelen indrettes og udrustes til at håndtere evakuering og redning i en ulykkessituation. Herunder nævnes nogle af de sikkerhedsrelaterede krav der har betydning for størrelsen af en tunnels tværsnit, indretning og installationer;

- Krav til etablering af "sikkert område" i tunnelen
- Krav til maksimal afstand til "sikkert område"
- Krav til brandslukning og brandbekæmpelsessteder i tunnelen
- Krav til bredde af nødfortove
- Krav til nødbelysning, flugtvejs skiltning, brandhydranter, ventilation og andet sikkerhedsudstyr

Den eksisterende metro i København er baseret på BOStrab komplekset, som er tyske, nationale regulativer om opførelse og drift af letbaner, det Amerikanske NFPA130 som er en standard for brand og brandbeskyttelse af transportsystemer, og det internationale AUGT(IEC 62267) der en standard der stiller sikkerhedskrav til transportsystemer i byområder, med førerløst eller uovervåget selvkørende tog, kørende på uafhængige strækninger.

Hovedtrækkene for Københavns metro konceptet, i forhold til de mest betydende krav nævnt herover, er:

- "Sikkert område". Københavns metro er udført som to separate tunnelrør, med ét spor i hvert rør og det sikre område udgøres af metrostationerne. I en ulykkessituation, skal automatik sørge for at det berørte metrotog fortsætter frem til næste station (eller i enkelte tilfælde redningsstationer), hvor de evakuerende passagerer har mulighed for komme i sikkerhed på gadeniveau via trapper. I det tilfælde at et uheldsramt metrotog ikke når frem til stationen, må de evakuerende passagerer gå langs tunnelens nødfortov hen til stationen. Nødfortovet er 0,7m bredt.
- Maks. 600m til nærmeste sikre område. Dog er der undtagelsesvist opnået dispensation for at der kan være 1200m hen til nærmeste sikre område/station.
- I det tilfælde der opstår en brand, skal følgende foranstaltninger sikre overlevelse af passagerer:
  - Metrogenes sprinklersystem
  - Tunnelventilationen, som udgøres af de kørende toges stempeleffekt og af mekanisk længdeventilation. Brandrøgen drives i køreretningen, mens de evakuerende passagerer ledes mod den nærmeste station i modsatte retning.

De fleste store/lange tunnelanlæg til jernbane i Danmark er bygget og udformet sikkerhedsmæssigt efter krav fra TSI som er de gældende europæiske regler for alle jernbaner i EU, herunder blandt andet Storebæltstunnelen, Øresundstunnelen, Sydhavnsgadetunnelen, København-Ringsted Tunnelanlæg og Femern tunnelen.

For de sikkerhedsmæssigt betydende krav nævnt ovenfor, foreskriver TSI'en følgende:

1. Der skal etableres 'sikkert område' i tunnelen, som kan udgøres af det modsatte eller "ikke-berørte" tunnelrør i forbindelse en dobbelttunnel, eller en tunnel hvor de to metrospor er adskilt af en skillevæg. Adgang til det sikre område sker igennem tværpasager eller nøddøre, som forbinder de to sporum.

2. Der må maksimalt være 250 meter til såkaldt "sikkert område" i tunneler som er længere end 1000m, hvilket medfører en maksimal afstand mellem nøddøre på 500 m.
3. For "kategori A" tog, svarende til metrotog, er der krav om brandbekæmpelsessteder i tunneler som er længere end 5km, og afstanden mellem brandbekæmpelsessteder må maksimalt være 5km.
4. Nødfortove skal have en bredde på minimum 0,8m

Tunneler til vej og bane i Sverige baseres generelt på Trafikverkets tekniske krav for tunneler; "TRVK tunnel 11". Men denne har ikke status som myndighedskrav, og for jernbanetunneler med relevansområde omfattet af TSI, er TSI gældende.

Hovedtrækkene i TRVK tunnel 11, i forhold til de mest betydende krav nævnt herover, er:

- "Sikkert område". Der må maksimalt være 500m mellem sikre områder. Sikre områder kan være stationer eller det ikke-berørte tunnelrør i tilfældet med dobbelt-tunneler. Hvis det sikre område er det ikke-berørte tunnelrør, skal der anlægges tværtunneler for hver 500m som har en dimension på min. 2,25m i højden og 1,5m i bredden. Der stilles ikke krav til maksimal afstand mellem redningsstationer/brandbekæmpelsessteder, men det forudsættes at hvis det modsatte tunnelrør udgør sikkert område, skal trafikken i dette rør kunne stoppes, kontrolleres eller advares.
- Nødfortovet skal minimum være 1,2m bredt.
- Hvis det ikke-berørte tunnelrør udgør sikkert område, skal brandrøg fra det uheldsramte tunnelrør hindres i at trænge ind i det ikke-berørte.

#### 4.1.2 Rummet under sporene

Rummet under sporene er tilegnet service af de installationer mv der er placeret her.

Sikkerhedskrav, og koncept for redning mv. i rummet under sporene, er ikke uden videre omfattet af de standarder og kravspecifikationer der er omtalt i afsnit 4.1.1. Arbejdstilsynets "Forskrifter for indretning af og arbejde i brønde og tunneller til fjernvarmeanlæg o.l." – afsnit 1.2. "Nye tunneler" er et godt udgangspunkt, selvom det er stilet imod servicearbejde mv i mindre forsyningstunneler. Hovedtrækkene i forskriftens krav til dimensioner og plads er:

- I tunneler, hvortil der ønskes adgang, når ledningerne er i drift (ingeniørgange), skal inspektionsgangen have en fri bredde på mindst 0,6 m og en fri højde på mindst 1,9 m, således at den efter montering af ledninger og øvrige installationer kan passeres i løb mellem 2 opgange.
- Opgangene skal være anbragt med højst 50 m afstand i selve tunnelen og på sådanne steder, at der ikke opstår blinde ender.
- Alle opgange skal som mindste krav have fastmonterede, eller fastholdte lejdere. Indstøbte stige trin må ikke anvendes. Lejdere skal føre fra tunnelens gulv til terræn og være skrånede, hvor pladsforholdene tillader det
- Opgangenes og dækselkarmenes frie tværsnit skal mindst være 0,6 x 0,8 m, og der skal, når dækslet er fjernet, være anbragt et scepter eller håndtag over terrænet, der kan tjene som støtte ved op- og nedstigning.
- Tunneler skal have fast installeret almenbelysning af passende styrke, dog mindst 50 lux
- Tunneler skal i forbindelse med eftersyn ventileres ved mekanisk indblæsning af friskluft

#### 4.2 Valg af kravspecifikationer for Øresundsmetro

Som nævnt er den eksisterende metro i København baseret på BOStrab krav, og særligt kravene om en bredde af nødfortovet på 0,7m og strømforsyning via "3 skinne" i bunden af tunnelprofilen har gjort det muligt at udforme et størrelses- og pladseffektivt tunneltværsnit. Sammen med det forhold at metrostationerne ligger med en afstand der medfører at tværtunneler til evakuering mellem de to tunnelrør ikke er nødvendige for at overholde BOStrab kravene, er dette grundlaget for en økonomisk og effektiv løsning.



Størrelsen af tunneltværsnittet er en af de væsentligste økonomiske "drivere" i tunnelprojekter, idet det bla. har indflydelse på størrelsen af tunnelboremaskinen, de jordmængder der skal udbores og deponeres og den mængde beton der er nødvendig til foring og indretning. I forhold en Øresundsmetrotunnel og løsningsforslaget, er tværsnittets størrelse bestemt af en række andre forhold end dem der har muliggjort en meget pladseffektiv løsning på den eksisterende metro i København, særligt:

- Metrotogets fritrumsprofil
- Krav til størrelse af ventilationstværsnittet
- Krav til højde af forsyningsstationer.

Dvs at der opnås ingen større økonomisk fordel ved at reducere bredden af nødfortovet til BOStrab krav (0,7m), da dette ikke vil medføre en reduktion af tunnelens tværsnit. Der er med andre ord "pladsoverskud" i sporrummene. Og da etableringen af tværpasager/nøddøre foretages i en skillevæg og ikke kræver udførelse af en tværtunnel for at forbinde separate tunnelrør, er dette kun forbundet med relativt lave omkostninger. Anvendelse af BOSstrab krav, og dermed konceptet fra Københavns metro, vil også betyde at der skal etableres redningsstationer/brandbekæmpelsessteder for hver 600m, hvilket forekommer unødvendigt tæt, og dermed uøkonomisk. Følges TSI, vil afstanden mellem brandbekæmpelsessteder være 2 km, idet der her blot stilles krav om at der ikke må være to tog imellem to tilstødende brandbekæmpelsessteder af hensyn til røgventilationen. Sikkerhedsmæssigt vil der dog være en fordel ved BOSstrab's krav, pga den kortere afstand mellem brandbekæmpelsessteder, og den kortere tid det vil tage et uheldsramt tog at nå frem.

I det følgende gennemgås de sikkerhedsrelaterede forhold der har betydning for størrelsen af tunneltværsnittets indretning og installationer, og de krav og standarder det er valgt at basere løsningsforslaget der beskrives i afsnit 5, på.

#### 4.2.1 Nødfortove

Til benyttelse for passagererne i tunnelen under en evakuering, etableres der et nødfortov på indersiden af sporene i hvert af trafikrørene. Bredden af nødfortovet baseres på arbejdstilsynets krav om at opgange og dækselkarmes frie tværsnit skal mindst være 0,6 x 0,8 m. For at få plads til dette frie tværsnit i nødfortovet, bliver bredden totalt 0,9m.

#### 4.2.2 Nøddøre

Med nøddøre skal i denne forbindelse forstås forbindelser fra det ene trafikrør til det andet. Krav til den maksimale afstand mellem nøddøre i skillevæggen mellem de to trafikrum, baseres på TSI-SRT krav og er dermed 500m. Afstanden mellem nøddørene vil være væsentligt kortere i forbindelse med brandbekæmpelsesstederne, da der skal være kapacitet til at et fuldt tog, svarende til "crush load", skal rømmes. Nøddørenes højde er 2m og bredden er 1,4m

#### 4.2.3 Redningsstationer/Brandbekæmpelsessteder i tunnelen

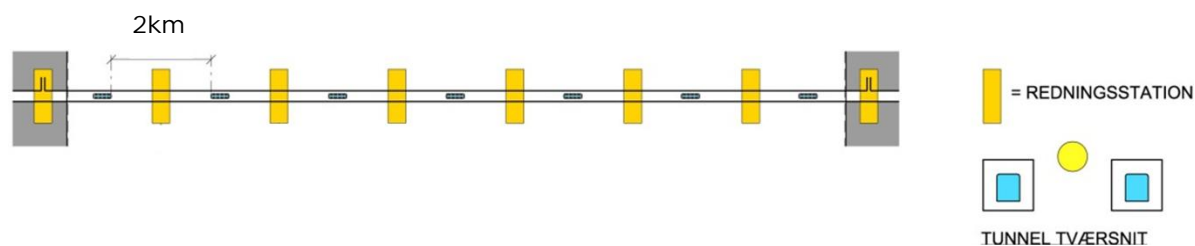
Overordnet er redningsstationernes/brandbekæmpelsesstedernes formål at sikre en effektiv evakuering og effektiv håndtering af brand. TSI-SRT definerer begrebet "brandbekæmpelsessted" som et sted, et tog vil køre frem til i en brandsituation, hvor der vil findes faciliteter til at håndtere et brændende tog, og evakuere passagerer.

Faciliteter og krav i forbindelse med brandbekæmpelsesstederne baseres på TSI-SRT, og er som følger:

- Afstand mellem brandbekæmpelsessteder på maks. 5km (metrotoget)
- Adgang til sikkert område via egen eller andres hjælp
- Vand til brandslukning (minimum 800 l/min i 2 timer)
- Mulighed for afbrydelse af kørestrømmen
- Adgang for beredskabet via redningsvej
- Mulighed for at tilgå det berørte tog uden gennemgang af sikkert område

- Håndtering og kontrol af brandrøg

Afstanden mellem brandbekæmpelsesstederne svarer til den mindste afstand mellem de kørende tog i tunnelen. Denne afstand er kortere end den normsatte (5km), for at sikre at togene ikke blokerer adgangen til brandbekæmpelsesstederne for hinanden. De planlagte togafstande er 2 km, og denne afstand er således også gældende som maksimal afstand mellem brandbekæmpelsesstederne.



Figur 3: Illustration af brandbekæmpelsessteder (gul firkant) i tunnelen, og togene i mellem med en indbyrdes afstand på 3,3 km. Skaktene/Nødstationerne på land er markeret med en grå firkant bagved den gule.

TSI stiller også krav til togenes evne til at fortsætte til et sikkert område efter en brand er opstået. Kategori A tog skal kunne fortsætte i minimum 4 minutter ved 80 km/t efter at en brand er opstået.

#### 4.2.4 Sikkert område

Sikkert område har til formål at sikre passagererne mod påvirkninger fra en ulykke, som fx af røg.

Faciliteter og krav i forbindelse med sikkert område er følgende:

- Passagererne skal kunne nå frem til området med eller uden hjælp
- Passagererne skal kunne redde sig selv, om muligt, eller vente på at blive reddet af redningstjenesterne
- Mulighed for kommunikation via mobiltelefon og / eller fastnettelefon

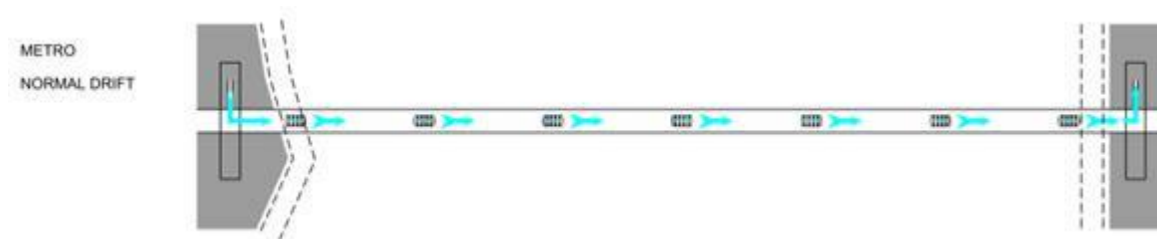
I løsningsforslaget udgør det ikke-berørte trafikrør sikkert område, både i brandbekæmpelsesstederne og i strækningerne mellem dem.

Hvis et tog ikke når frem til nærmeste brandbekæmpelsessted, og der skal evakueres via nøddøre imellem brandbekæmpelsesstederne, er det vigtigt at tog i det ikke-berørte rør bremses ned og ikke kolliderer med de evakuerende passagerer i høj fart.

### 4.3 Ventilation

#### 4.3.1 Normal drift

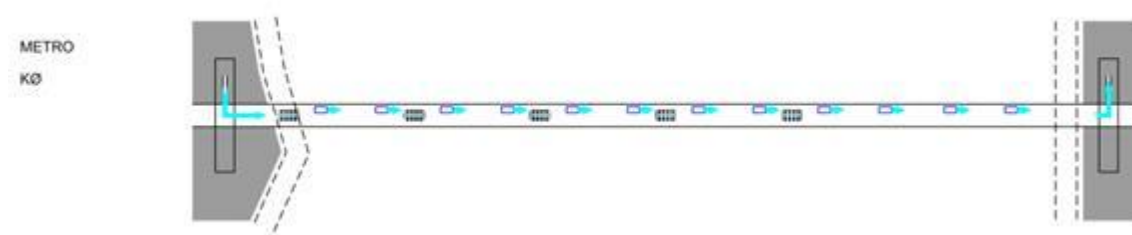
For løsningsforslaget gælder, at trafikrørene i normal situationen ventileres ved hjælp af stempeleffekten fra togene (se figur 4). Da gradienterne på sporene er overvejende små, og da togene normalt ikke har stop undervejs, vil varmeudviklingen fra togene være relativt lille. Det vurderes derfor, at den langsgående ventilation fra stempeleffekten vil kunne holde lufttemperaturen på et tilstrækkeligt lavt niveau.



Figur 4: Ventilation, normal drift

Af hensyn til passagerernes komfort må togdriften organiseres således, at længerevarende stop af tog i tunnelen undgås. Således bør det så vidt muligt sikres, at tog, der allerede befinder sig i tunnelen, når der indtræffer mindre driftsproblemer, kan fortsætte ud af tunnelen og eventuelt først stoppe uden for denne.

I situationer, hvor dette ikke lykkes, må der iværksættes mekanisk længdeventilation for at sikre en tilstrækkelig tilførsel af udeluft til passagererne i de strandede tog. Denne ventilation etableres ved hjælp af impulsventilatorer, der installeres med jævne mellemrum i hvert trafikrør (se Figur 5).



Figur 5: Ventilation, driftsforstyrrelse

Som vist på figurerne tænkes et trafikrør at udgøre ét ventilationsafsnit, med indtag på skakten på den ene side og afkast på den anden side af Øresund. Indtag og afkast foregår gennem trykaflastningsskakte til det fri. Ved passende placering og dimensionering af skaktene skal det tilstræbes, at ventilationsafsnittet i tunnelen gøres uafhængigt af de tilstødende ventilationsafsnit på hver side.

#### 4.3.2 Nødsituationer

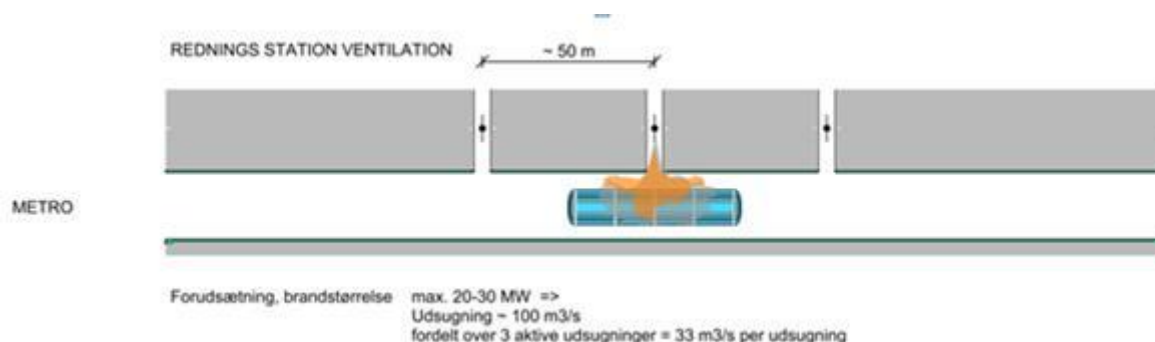
Med hensyn til nødsituationer skelnes mellem "kolde" hændelser (kollision, afsporing) og "varme" hændelser (brand). De grundlæggende forskelle mellem de to typer hændelser er, at kolde hændelser ikke indebærer et særligt tidsmæssigt problem med hensyn til at redde passagererne ud pga. mulige forbrændinger og/eller røgforgiftning, da kolde hændelser ikke medfører produktion af varme og potentielt giftige gasser.

For begge typer hændelser gælder, at ikke-berørte tog forudsættes at forlade tunnelen inden for rimeligt kort tid. For tog, der måtte være fanget bag det uheldsramte tog, må der opstilles effektive procedurer for at få toget ud af tunnelen. Under kolde hændelser vil længdeventilation med impulsventilatorer således kunne give en tilstrækkelig lufttilførsel.

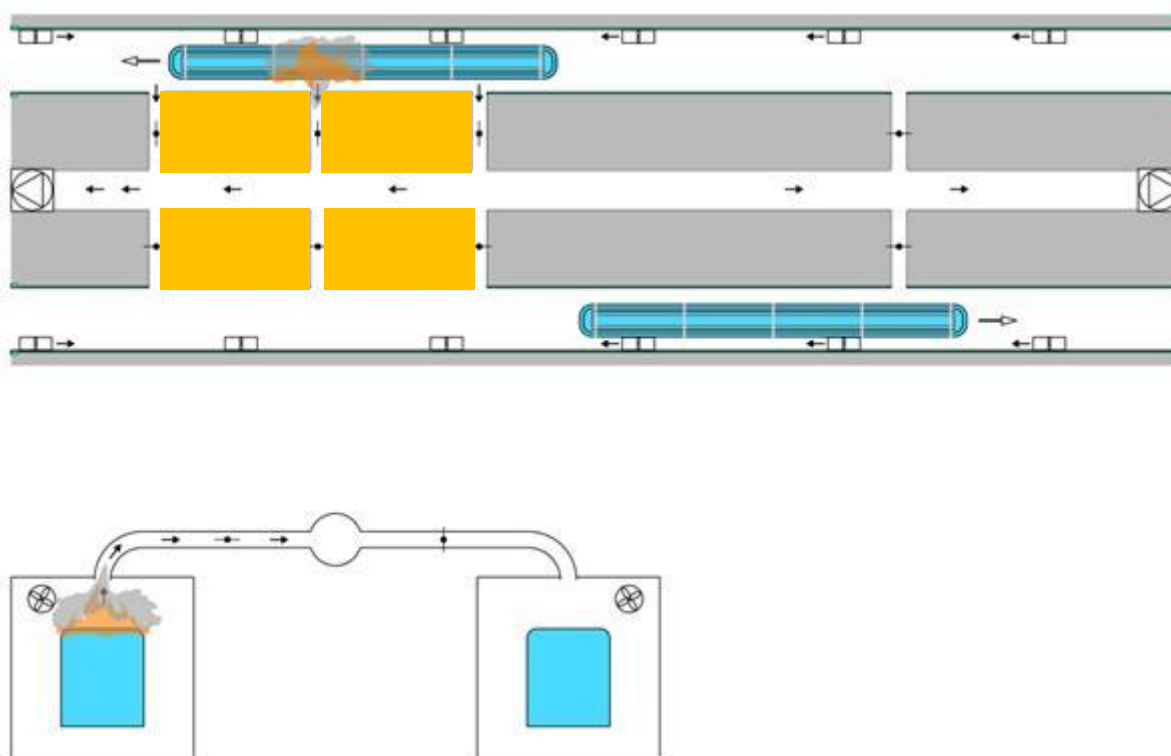
For brandscenarier forudsættes, at de anvendte tog opfylder kravene til enten Kategori A (for metro tog) jf. TSI SRT, således at de normalt er i stand til at tilbagelægge en vis strækning, selv om de er brudt i brand. Brandbekæmpelsesstederne placeres som tidligere nævnt i tunnelen for hver 2 km, så et tog ikke blokerer et brandbekæmpelsessted for et ulykkesramt tog.

Det skal bemærkes, at såfremt det, på trods af forudsætningerne beskrevet ovenfor, ikke lykkes for et brændende tog at nå frem til et brandbekæmpelsessted, vil passagererne skulle evakueres direkte til det ikke-berørte rør gennem nøddøre. Den mekaniske længdeventilation skal i denne specielle situation være i stand til at kontrollere røgudbredelsen.

Et brandbekæmpelsessted er ventilationsmæssigt karakteriseret ved, at der er installeret et antal udsugningsåbninger over toget (se Figur 6 og Figur 7). Den samlede kapacitet af udsugningen (skønnet til ca. 100 m<sup>3</sup>/s) svarer til røgudviklingen fra den forventede maksimale brandstørrelse i et passagertog (20-30 MW).



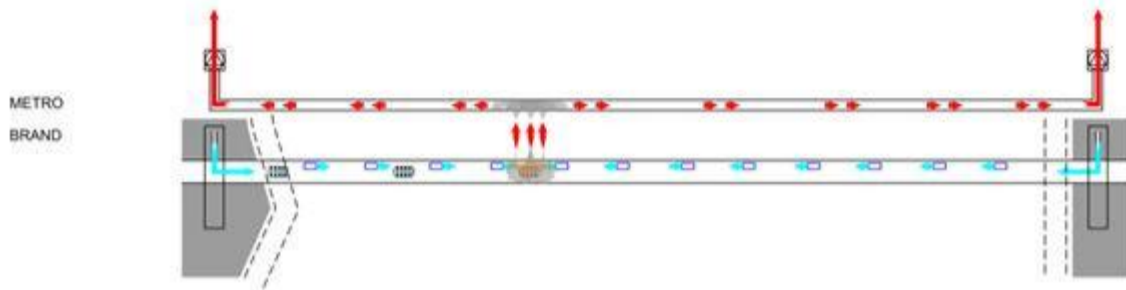
Figur 6: Ventilation i brandbekæmpelsessted



Figur 7: Princip for ventilation i brandscenarie

Når toget når frem til brandbekæmpelsesstedet, startes udsugningen op samtidigt med aktivering af impulsventilatorerne i det uheldsramte tunnelrør, således at der tilføres erstatningsluft fra hver side (se Figur 8). Endvidere aktiveres impulsventilatorerne i det ikke-berørte rør og sender luft mod ulykkesstedet, således at der opbygges et overtryk i forhold til de uheldsramte rør. Når passagererne flygter til sikkert område, vil de således bevæge sig mod luftretningen, og det sikres, at det sikre område holdes røgfrit.

Røgdugsugning vil foregå i en langsgående udsugningskanal over trafikrørene. I skaktene ved kysten vil blive placeret ventilationsrum og –anlæg til fælles transport af røgen ud til det fri i begge skakte..



Figur 8: Røgdugsugning i langsgående kanal

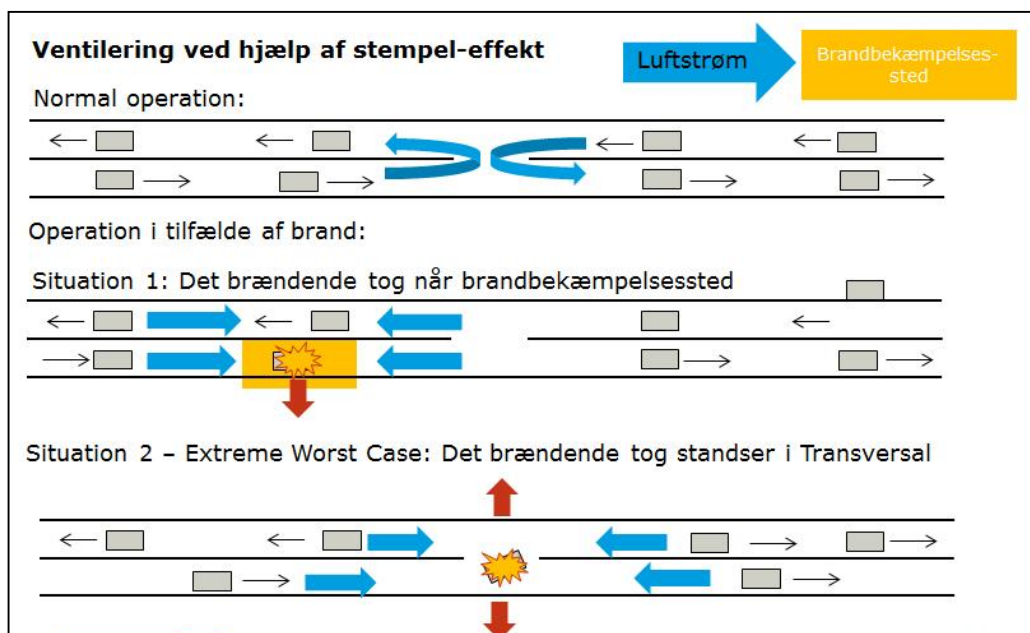
En langsgående kanal vil skulle have et indre tværsnit på ca. 11m<sup>2</sup>, jf. også bilag 2.

#### 4.3.3 Ventilation og nødsituationer ved transversal i tunnelen

I løsningsforslaget er der placeret en transversal ca. midt på tunnelstrækningen – se bilag 4 - der tænkt som en løsning der permanent er åben. Den nedenstående figur illustrerer hvorledes dette område ventileres i normalsituationen og i en nødsituation hvor et brændende tog er i nærheden af (på vej mod, eller på vej væk) af transversal åbningen.

Togenes stempeleffekt sikrer ventilationen i normal drift, og når togene er stoppet, anvendes impulsventilation. I den normale situation, vil luften vende rundt og blive trykket ud pga. åbningen i transversal området. Det vurderes at være tilstrækkeligt til det nødvendige luftskifte.

I en brandsituation anvendes impulsventilatorer til at levere luft, der bliver trukket ud. Impulsventilatorer både i ikke-berørte rør og i berørte rør, vil vende luftretningen fra de tog der er på vej ud (illustreret i "situation 1" på figuren under).



Figur 9: Ventilation i normal- og nødsituation ved transversalåbningen.

I det højst usandsynlige tilfælde hvor det brændende tog holder i transversal åbningen, vil impuls ventilation og spjæld op til røgdugsugningskanalen sørge for udsugning.

#### 4.4 Skakte/nødstationer ved kysten

TSI (og det Svenske Trafikverket) stiller krav om at der skal etableres redningsstationer/brandbekæmpelsessteder udenfor lange tunnelers portalområder, svarende til de skakte der udgør startkamre for Øresundsmetrotunnelen. Med udgangspunkt i dette formål sættes krav med hensyn til ventilation, trykaflastning, evakuering og redningsveje. Både den nye Cityring metro og den eksisterende københavnske metro anvendes som referencer. Bl.a. tages inspiration fra skakterne på Enghave Plads og Havnegade. Desuden anvendes nogle grove estimater for ventilationskonceptet i designet af skakterne. Således vurderes nedenstående krav at være relevante ved udformningen af skakten:

##### *Ventilation (min. 33m<sup>2</sup>)*

Heraf 11m<sup>2</sup> som minimumsareal for at sikre tilstrækkelig ventilation. Fordi der vil være røgudsugning i skakter i begge kyster.

50% redundans i ventilatorer, dvs. 50% ekstra plads nødvendigt, 11m<sup>2</sup>

Herudover kræves plads til skakt for serviceadgang, installationskanaler mv. til ventilatorerne.

##### *Trykaflastning (min. 67m<sup>2</sup>)*

Der, anvendes som minimum trykaflastningsareal der svarer til areal i Enghave Plads skakten på den kommende metro cityring.

##### *Evakuering (~25m<sup>2</sup>)*

Ifølge København Metro, Havnegade skakten, anvendes en trappeskakt på ca. 25 m<sup>2</sup>.

##### *Adgangsvej for redningspersonel (~7m<sup>2</sup>)*

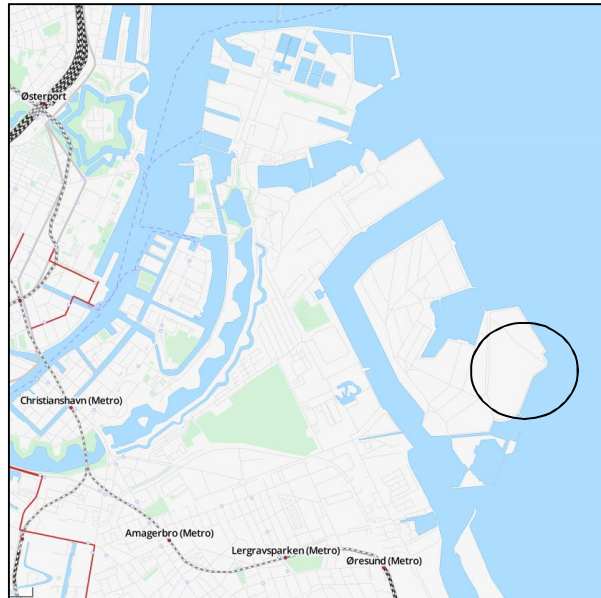
Ifølge København Metro, Havnegade skakten, anvendes en elevator på ca. 7 m<sup>2</sup>.

##### *"Safe area" ~315 m<sup>2</sup>)*

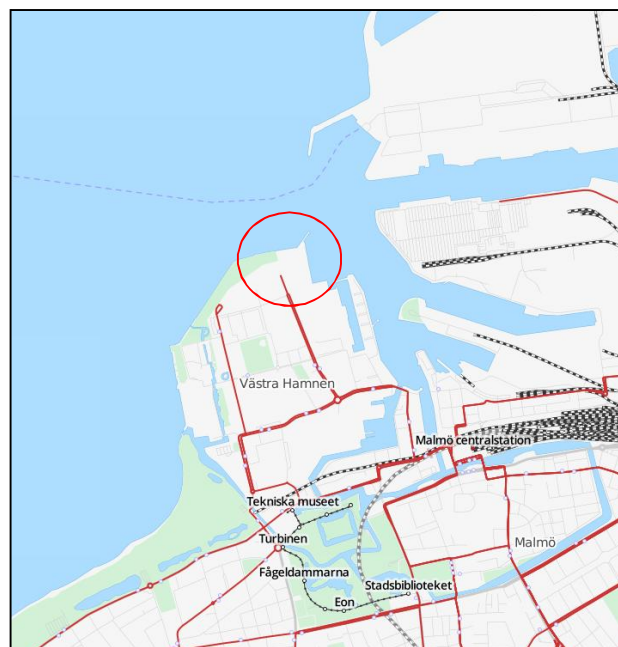
Der dimensioneres for "crush load", hvor nødvendigt areal antages at være 0.5 m<sup>2</sup>/person.

Disse krav og dimensioner antages for skaktene i løsningsforslaget, og anlægsoverslaget.

Skaktene er placeret ved Prøvestenen ud for Amager på den københavnske side og ved Scaniaparken i Malmø, se nedenstående figurer.



Figur 11. Skakt ved Prøvestenen, København.



Figur 12. Skakt ved Scaniaparken, Malmø.

#### 4.5 Redningstog

Redningstog skal sikre en hurtig og effektiv redning i tunnelen.

På grund af længden af tunnelen vil hastigheden på redningstoget have stor indflydelse på indsatstiden.

I henhold til beredskabsloven skal kommunerne opdele kommunen i "tæt bebyggelse", "spredt bebyggelse" eller "åbent land". Der er til disse tre kategorier knyttet responstider for beredskabet, med den mindste responstid knyttet til kategorien "tæt bebyggelse". Det må forventes at tunnelen og skaktene vil blive placeret i den skrappeste kategori ("tæt bebyggelse"). Dette vil medføre, at beredskabet vil skulle være ved skakten på mindre end 10 minutter. Herfra vil redningsmandskabet så vha. redningstoget skulle rykke frem til uheldsstedet. Der vil således også blive stillet krav til redningstogets udformning og konstruktion, da øget mængde udstyr også kan være aktuelt.

I en redningssituation vil et redningstog til indsat brandbekæmpelse være det første tog på stedet, så beredskabet kan komme i gang med deres indsats. Efterfølgende vil togene til evakuering blive indsat, så passagererne kan blive bragt i sikkerhed. Proceduren er kendt fra Storebælt tunnelen.

#### 4.6 Redningsvej

En redningsvej for tunnelen skal sikre beredskabets vej til det forulykkede område.

I en redningssituation hvor det tilstødende trafikrør benyttes til redning, vil redningsvejen kort efter alarmering tilgås af redningstog fra enten København eller Malmø, afhængig af kørselsretningen i det trafikrør som er redningsvej. Når alle tog er ude af tunnelen, kan redningstog rykke ud fra den modsatte portal. Løsningen er igen kendt fra Storebælt tunnelen.

#### 4.7 Rummet under sporene

Under sporene vil der findes opgange til nødfortovet i trafikrummet, for hver 50m, som det er beskrevet i afsnit 4.1.2, og i tillæg er rummet brandsektioneret med 500m intervaller. Ved en brand vil beredskabet kunne tilgå området enten fra trafikrummet via op/nedgangene, eller nærmere via adgangsvejen for service køretøjet. I normalsituationen, antages det at udluftning sikres ved indblæsning af frisk luft fra skaktene/nødstationerne ved kysten, og til fælde af brand, vil det være nødvendigt at bringe bærbart udstyr til indblæsning af frisk luft gennem den nærmeste opgang i den ene retning, og suge røg ud gennem den nærmeste opgang i den anden retning.

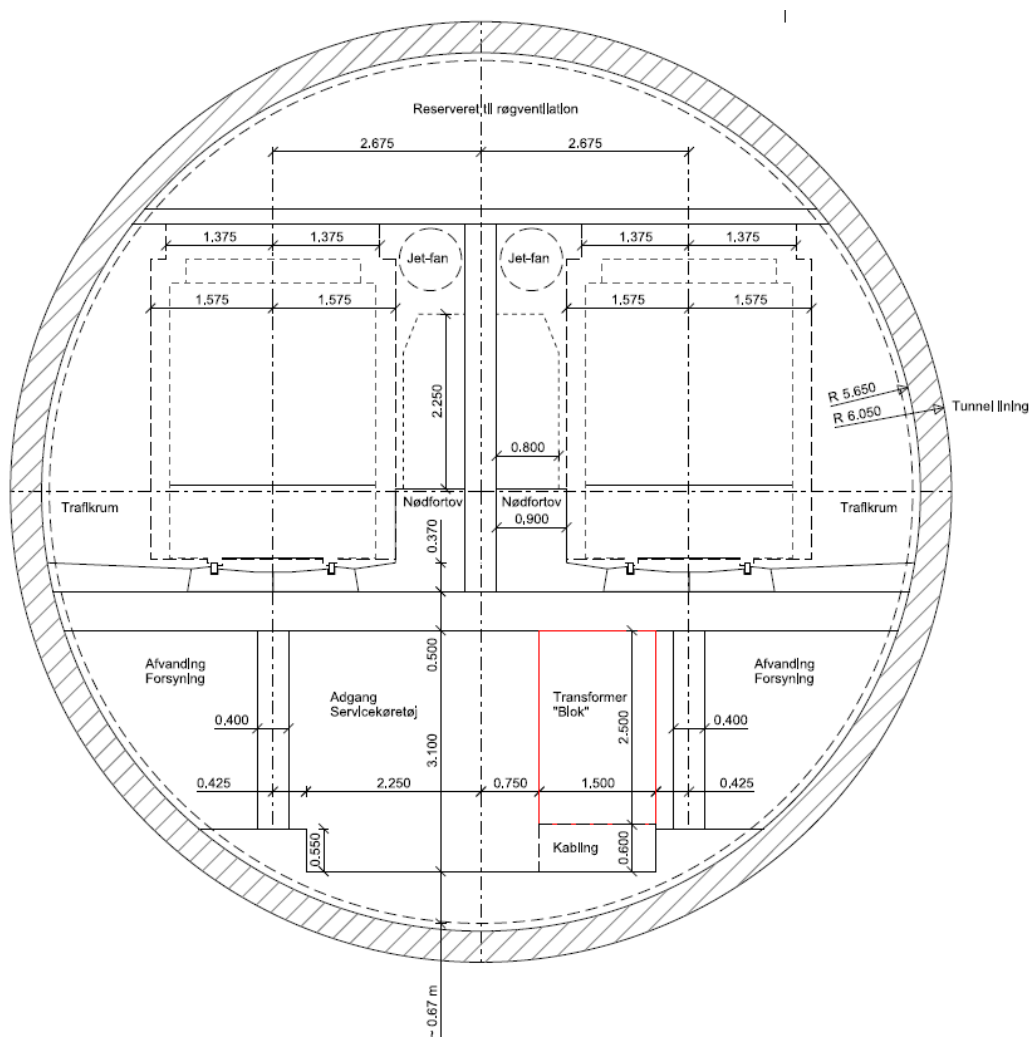


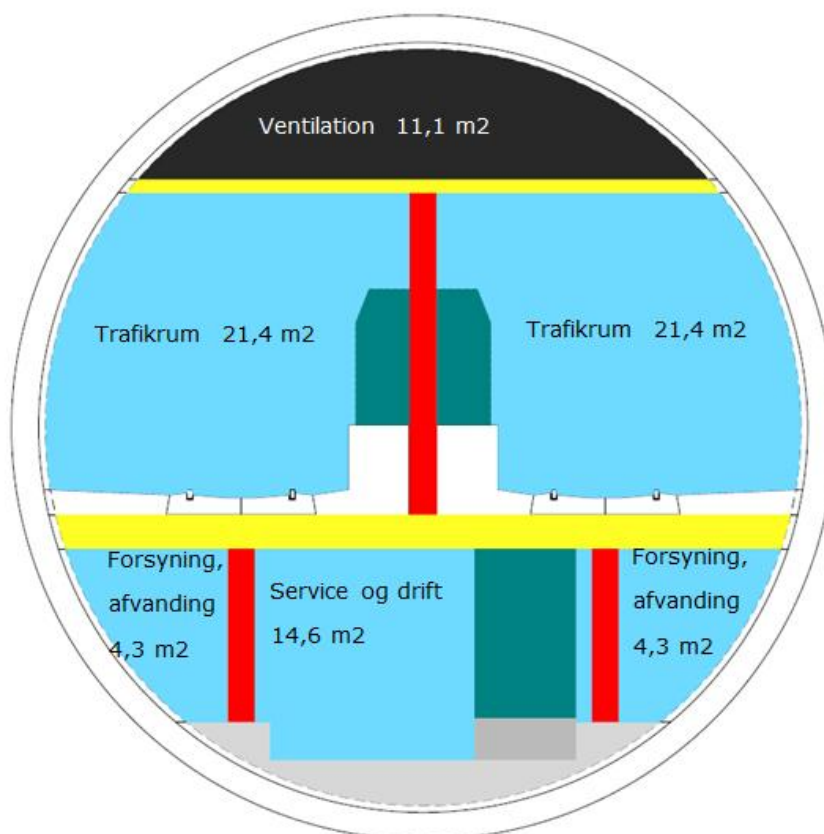
## 5. LØSNIINGSFORSLAGET

### 5.1 Indretning af tunneltværsnit

Som tidligere beskrevet er tværsnittet baseret på et enkelt stort tunnelrør, forbundet af tværforbindinger. Dette afsnit beskriver, hvorledes tværsnittet med en ydre diameter på 12,1 m er fastlagt.

Tunneltværsnit er vist i i bilag 6 og på figurene herunder.





Figur 13. Tunneltværsnittet – dimensioner og arealer.

#### 5.1.1 Fritrumsprofil

Der henvises til bilag 3 samt forudsætningsafsnittet vedrørende fritrumsprofilen der er lagt til grund for tunneltværsnittets trafikrum.

#### 5.1.2 Indvendige konstruktioner

Tværsnittets indvendige konstruktioner omfatter:

- Central skillevæg, der adskiller de to trafikrum. Skillevæggen er 0,4m bred. Nøddøre der skal skabe adgang igennem skillevæggen, antages udført som skydedøre der åbner ind i skillevæggen
- Tværgående betondæk til spor. Denne har en tykkelse på 0,5m, og udføres i armeret beton
- Skillevægge i rummet under sporene. Disse har en tykkelse på 0,4m. I løsningsforslaget er antaget at disse udformes med åbninger hver 20m, for at skabe nem adgang til rummene med installationer (rum "forsyning og afvanding" på figur 13).

#### 5.1.3 Sporunderbygning

Det er valgt at basere konceptet på en slab track løsning. Der er ikke taget stilling til hvilken af de mange systemer der findes, kunne være det rette for Øresundsmetroen, og en løsning med ballasteret spor må også vurderes på et senere tidspunkt.

Fordelen ved slab track løsningen, er bla.:

- Lang levetid
- Mindre vedligehold, særligt vigtigt ved højfrekvent afgangsmønster
- Høj sporstabilitet og kørekømfart

Ulemper er bla.:

- Dyr løsnig
- Sandsynligvis mere støjende end ballasteret løsnig

#### 5.1.4 Afvanding

Vand i tunnelen skal ledes til dybdepumpestationerne. Der er ikke taget stilling til en specifik løsnig, men i f.eks. Øresundstunnelen, er Sonnevilles systemet benyttet med fald i betonpladen mod en central åben afløbsrende midt mellem de to skinner. Det er en billig og enkel udformning, hvor den løbende renholdelse af afløbssystemet er uden problemer (se figur 14).

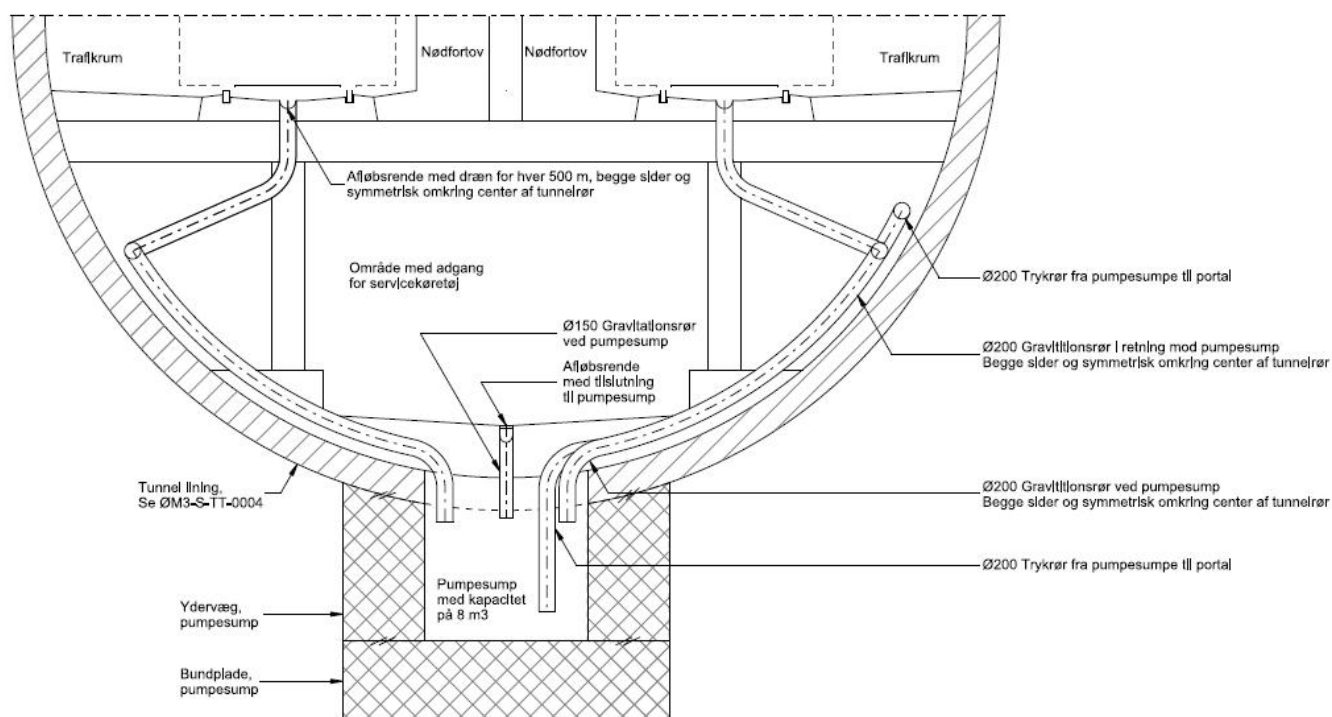


Figur 14. Snit i Sonnevilles LVT systemet hvor afløbsrenden er vist i midten. © Sonnevilles AG.

Princippet med den åbne afløbsrende er antaget i tunneltværsnittet, både for afvanding af sporene, og for afvanding af service rummet under sporene.

I løsningsforslaget er der to pumpeumpe med et volumen på ca. 8m<sup>3</sup> hver, som er placeret i lavpunkterne i station ca. 3+500 og ca. 18+000. Det vurderes at pumpeumpe skal ligge under tunnelrøret som vist på figuren herunder, for at få tilstrækkeligt tilløbstryk.

I afvandingsprincippet, er antaget dræn fra afvandingsrenderne for hver 500m, der fører ned til gravitationsrør der løber i siden af tunnelen og fører vandet til pumpeumpe. Parallelt med gravitationsrøret, løber trykrør der fører vandet i pumpeumpe ud af tunnelen.



Figur 15. Afvandingsprincip for løsningsforslaget. Se også bilag 8.

Rummet under sporene afvandes via tværfald til en afløbsrende i midten, som afvander til pumpesumpene via gravitationsrør.

#### 5.1.5 M&E installationer samt service og vedligehold

Da alle nødvendige Mekaniske og Elektriske (M&E) installationer skal kunne være indeholdt i det tunneltværsnittet er der foretaget en overordnet vurdering af disse M&E installationer og deres pladsbehov.

For optimal udnyttelse af tværsnittet, er det tænkt at rummet under sporene i videst mulige omfang, skal udnyttes til tekniske installationer, så som kabler, ledninger, transformere, pumpesumpe og sikkerhedsudstyr, samt bruges som adgangsvej for service mandskab. Service og vedligeholdelsesarbejderne forudsættes udført med et specialkøretøj.

Det mest pladskrævende tekniske udstyr og installationer vurderes at være udstyret til kørestrømsforsyningen – se afsnit 2.7.4.

Transversaler er placeret midt i tunnelen, samt ved skakt/nødstation ved kysten.

Transversalen i tunnelen er tegnet op efter en afstand fra spormidte til spormidte som siden er ændret fra de 6,1m i bilaget, til 5,35m i det endelige løsningsforslag. For situationen med 6,1m, vil transversalen blive ca. 50m lang, under antagelse af følgende parametre:

Togstørrelse	Svarende til Kbh metro
Toglængde	37m
Deflection+tillæg for kinematisk profil	8-15cm + 25cm
Radius	R=100
Maks. Hastighed i transversal	30km/t
Længde transversal	50m

I forhold til løsningsforslaget,

Der henvises i øvrigt til bilag 4 for forudsætninger og projektering af tunneltransversalen.

#### 5.1.6 Tolerancer

Udover de geometriske krav beskrevet ovenfor, er der ved fastlæggelsen af den indre diameter tillagt en tolerance på 100 mm som vurderes tilstrækkeligt til at kunne optage dels udførelsestolerancer, dels den 'ovalisering' der – over tid - vil opstå i tunnelen.

#### 5.2 Udførelse af tunnelen

I dette afsnit beskrives tunnelkonstruktionerne løsningsforslaget, der omfatter

- Boret tunnel
- Skakte/nødstationer ved kysten

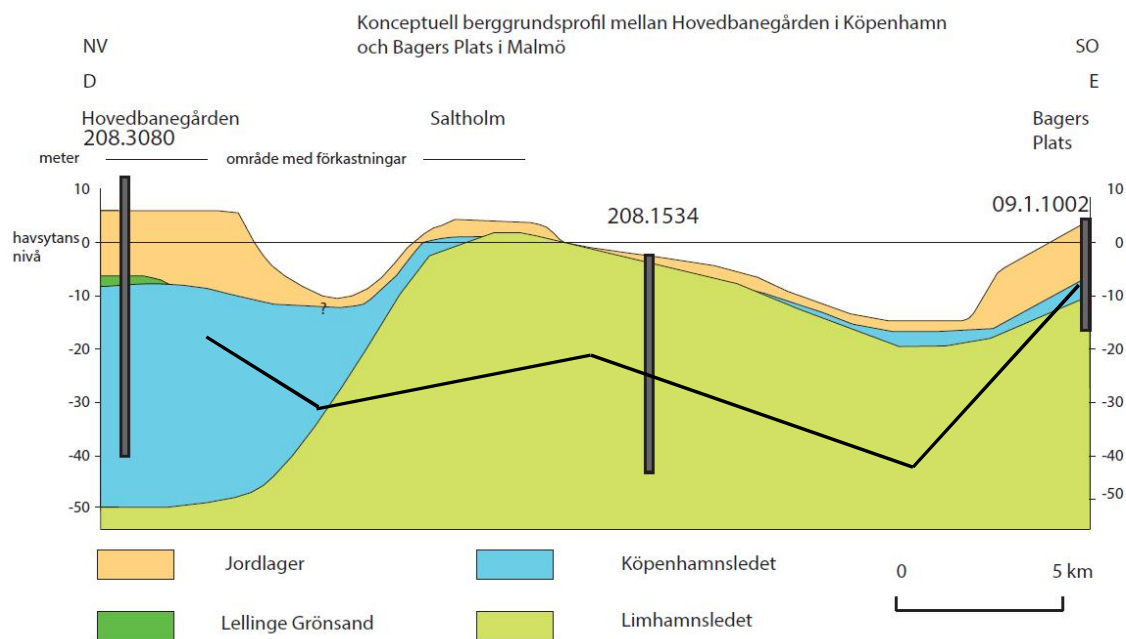
Den overordnede udførelsessekvens der ligger til grund for løsningsforslaget og anlægsoverslaget, er som følger:

- Anlæggelse af skakte ved kysterne i hhv København og Malmø, der begge har funktion af startkamre og arbejdsplads for TBM boringen
- Den borede strækning udføres med to TBM'er der startes og drives fra hver skakt
- De to TBM maskiner mødes i Øresund ca. midt mellem de to skakte
- Der etableres en udvidelse af tunnelen ved mødepunktet
- TBM'erne skæres op, skilles ad og transporteres tilbage igennem tunnelen som led i demobiliseringen

### 5.2.1 Geologi

De geologiske forudsætninger er givet i bilag 1 "Berggrundens oppbyggnad och egenskaper".

I figuren nedenfor er angivet et groft geologisk længdeprofil langs en linje mellem Københavns hovedbanegård, og Bagers Plats i Malmø. Denne linje ligger tæt på løsningsforslagets linjeføring og vurderes at give et rimeligt retvisende billede af den overordnede geologi der skal bore igennem. Dette geologiske længdesnit er således brugt som grundlag for den geologiske information der er lagt ind på løsningsforslagets linjeføring – se bilag 9.



Figur 16: Geologisk længdeprofil mellem København H og Malmø.

På figuren er det blå og grønne område henholdsvis Københavnerkalk og Bryozokalksten (på figuren ovenfor kaldet Limhamnsledet), dvs. kalkrige og hårde aflejringer, inklusiv flintbænke i Københavnerkalken og visse flint forekomster i bryozokalken. De orange lag på figuren, repræsenterer de kvartære aflejringer, og den sorte linje en tilnærmet linje for overside af tunnelen. Tunnelen ligger således overalt i kalk, bortset fra det område på Malmø siden hvor tunnelen har sit startpunkt. Her vil den første korte strækning af tunnelen muligvis skulle bores i i et jordprofil der har kvartært materiale i den øverste del af tunnelen. Der er tilstræbt en udførelsesmæssigt konservativ linjeføring, hvor tunnelen for den langt største del ligger min. 1,5 x tunneldiameteren under havoverfladen.

Erfaringer fra boring med Tunnelboremaskiner i kalk, både i København, Malmø og internationalt er overvejende gode i forhold til bla. opnået fremdrift, og fravær af længerevarende standsninger pga geologisk uforudsete forhold og/eller funktionssvigt relateret til tunnelboremaskinerne. Den største risiko relateret til geologiske/geohydrologiske forhold, vurderes at vil udgøres af sprækker og/eller diskontinuiteter i kalken der kan være vandførende. I tillæg kan omfattende forekomst af flint og/eller såkaldte "hard grounds" i kalken medføre stor slidtage på TBM'ens skæreværktøj, og dermed sænke fremdriften pga hyppigt vedligehold.

### 5.2.2 TBM typer og deres kendetegn

Der findes forskellige typer af TBM maskiner som er specielt udviklet til boring i forskellige geologiske aflejringstyper.

De primære forskelle mellem TBM typerne er skæreværktøjer, skærehoved, og princippet for transport af udgravet materiale samt hvorvidt der bores med eller uden tryk i forkammeret til at modvirke trykket fra den omgivende jord.

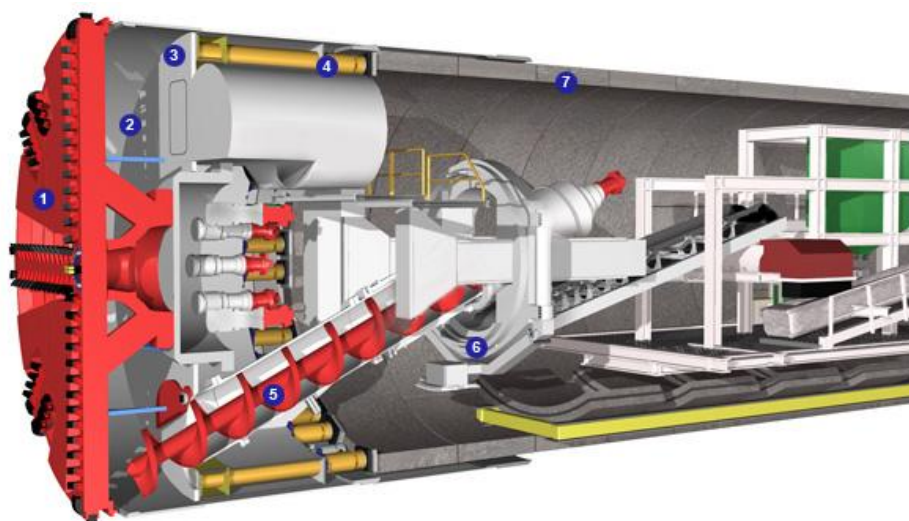
Valget af TBM er en central del af etableringen af en boret tunnel og baseres i meget høj grad på projektets geologi. Der er overordnet set 2 hoved TBM-typer til boring i sedimentære jord- og kalkaflejringer:

- 1) Earth Pressure Balance-TBM (EPB)
- 2) Slurry TBM

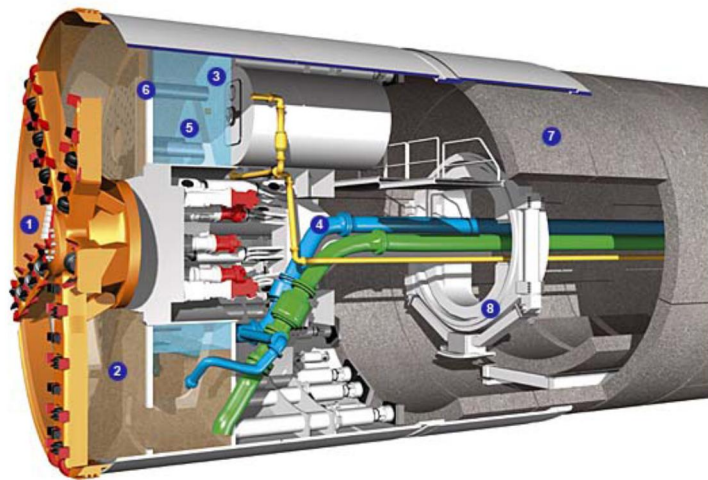
I tillæg findes der såkaldte "multimode" eller "variable mode" TBM, der er kan skifte imellem EPB og slurry mode så driftsform løbende kan tilpasses.

Principsnit af TBM-typerne, earth pressure balance og slurry machine, er vist i henholdsvis Figur 17 og Figur 18. Nye fremskridt i TBM-teknologien og undersøgelser af jordbundsforhold har medført et større overlap mellem de jordbundsforhold, der traditionelt set har været forbundet med brugen af EPB-TBM'er og slurry-TBM'er.

Bag selve borehovedet og skjoldet følger et en række store vogne – den såkaldte "back-up enhed", der dels sørger for at bringe tunnelsegmenter fra specialtoget frem til skjoldet hvor de monteres og dels transportere tunnel-muck'en (den udborede jord) væk fra skjoldet, herudover indeholder back-up'en kontrolcenter, strømforsyning, ventilation, forsyning af hjælpestoffer (skum, polymerer og andet), fedt til vandtætning, magasin for forsyningskabler og -rør, reservedele, værksteder osv. Back-up enheden kan være op til hundrede meter lang, og skal tænkes ind ved planlægningen af bl.a. startkammer.



Figur 17: Principsnit i en Herrenknecht EPB-tunnelboremaskine. 1: Borehoved, 2: borekammer, 3: Skot, 4: Hydrauliske donkrafte, 5: transportsnegl, 6: Udstyr til montage af betonsegmenter, 7: Betonsegmenter. Kilde: Herrenknecht



Figur 18. Principsnit i Herrenknecht Shield Slurry-tunnelboremaskine. () 1: Borehoved, 2: Borekammer, 3: Skot, 4: Tilførsel slurry (blå) og udløbsrør til slurry og muck, 5: Luftvolumenen til trykstyring, 6: Skillevæg, 7: Betonsegmenter, 8: Udstyr til montage af betonsegmenter. Kilde: Herrenknecht

Typiske kendetegn for EPB TBM og slurry TBM er som følger:

Aspekter	EPB-TBM	Slurry Shield-TBM
Sammenfatning	<p>TBM'er af EPB-typen bedst egnede til boring af tunneler i bløde klippearter og kohæsiv og sandet jord, og har følgende primære fordele:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Samlet set er der en mindre investering, da det ikke er behov for et separationsanlæg</li> <li>• Pladskravene på overfladen er mindre, grundet mindre behov for afdræning og separation.</li> </ul>	<p>Generelt er slurry shield-typen bedre til at klare boringer gennem glaciale aflejringer og blandede jordbundsforhold, herunder:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kan operere med større tryk end EPB-maskiner</li> <li>• Minimering af risici for ukontrollabel vandindstrømning i arbejdskammeret</li> <li>• Slitage på skæreværktøjerne og borehovedet er mindre</li> <li>• Store sten og blokke håndteres nemmere</li> </ul>

Aspekter	EPB-TBM	Slurry Shield-TBM
<p>Styring af tryk foran borehovedet</p>	<p>Trykket i borekammeret styres ved en afbalancering af hvor meget maskinen presses fremad og hvor meget jord der tages ud af borekammeret med sneglen.</p> <p>EBP maskiner kan køres i en række forskellige modes afhængig af hvilken jord der bores i, og grundvandsforholdene.</p> <p>Ved ustabile jordarter fyldes borehovedet helt med jord og der opnås herved en afbalancering af jorden foran og omkring borehovedet.</p> <p>EPB maskiner kan operere med grundvandstryk op til ca. 7 bar, trykket i borekammeret udlignes i sneglen ved at opbygge en jordprop i sneglen, ved høje vandtryk er der risiko for at denne prop kan skylles ud af sneglen.</p>	<p>Ved ustabile jordarter afbalanceres jorden foran og omkring borehovedet ved aktiv styring af trykket i borekammeret.</p> <p>Trykket i borekammeret styres aktivt ved at tryksætte borevæsken, dette kan enten gøres ved at styre ind og ud flow i borekammeret, samt fremdrift af TBM'en eller ved hjælp af trykluft.</p> <p>Slurry-TBM'er kan klare større vandtryk end EPB-TBM'er grundet det lukkede slurry-kredsløb.</p>
<p>Effekt</p>	<p>Strømforbruget for en EPB TBM går primært til fremskubning af maskinen og Rotation af borehovedet.</p>	<p>Slurry TBM'er bruger mindre strøm til fremskubning og rotation af borehovedet, men har til gengæld et strømforbrug til drift af slurry-pumperne. Samlet er effektbehovet omtrent det samme for EPB og slurry maskiner.</p>
<p>Geologi</p>	<p>EPB TBM'er anvendes traditionelt i bløde klippearter samt kohæsiv og sandet jord.</p> <p>Hvor der ikke er vand til stede i form af grundvand, bør det tilsættes for at frembringe den nødvendige konsistens af den udgravede jord.</p> <p>Med undersøgelser af jordbundsforholdene kan EPB-teknologi anvendes ved mindre kohæsiv jord og ved blandede jordbundsforhold.</p>	<p>Slurry TBM'er bruges primært i ikke-kohæsive jordbundsforhold – friktions jord og heterogen blød jord.</p> <p>Stenknusere i bunden af borekammeret anvendes til at knuse sten på op til ca. 1,0-1,5 m i størrelsen. Større sten vil blive boret i stykker før de kan komme ind gennem åbningerne i borehovedet. Forekomsten af sten og blokke er på nuværende tidspunkt ikke vurderet.</p> <p>For at undgå problemer under separation af slurrien, må andelen ultrafine partikler på &lt; 0,02mm ikke være for stor.</p>



Aspekter	EPB-TBM	Slurry Shield-TBM
Additiver	<p>Brug af additiver f.eks. filler, skum, polymerer og slurry kan øge anvendelsesområdet for EPB-TBM'en (se 'Geologi' ovenfor). Additiver kan også anvendes til at reducere friktion, og dermed slitage på skæreredskaberne, og medføre formindsket trykkraft.</p> <p>Forskellige typer skum anvendes til smøring og justering af tryk i borehovedet.</p> <p>Effekten af additiver afhænger både af produktvalg og entreprenørens ekspertise og erfaring.</p>	<p>Slurryen kan i permeabel jord danne en membran (mud cake) ved borefronten der reducerer mængden af slurry der tabes ud i den omgivende jord.</p> <p>Polymerer eller særlige fyldstoffer kan tilsættes slurryen hvis den omgivende jord er for permeabel, f.eks. <math>&gt; 10^{-3}</math> m/s.</p> <p>Brugen af additiverne er stærkt afhængig af entreprenørens ekspertise indenfor og erfaring med anvendelsen af ny bentonit-teknologi. Teknologien skal tilpasses de aktuelle jordbunds- og grundvandsforhold.</p>
Jord-transport	<p>Jorden tages ud af borekammeret ved hjælp af en transportsnegl.</p> <p>Så snart jorden forlader transportsneglen kan den transporteres til overfladen ved hjælp af transportbånd eller specialtog eller specialvogne og derefter til deponeringsområdet ved hjælp af transportbånd eller lastbiler.</p>	<p>Jorden opslemmes i borekammeret i slurryen, herfra pumpes slurryen ud af tunnelen til et separationsanlæg. I separationsanlægget separeres fra slurryen ved sold, centrifuger og evt. filterpresser eller cykloner. Den rensede slurry pumpes herefter tilbage til TBM'en. Processen forgår løbende.</p>
Bortskaffelse af jord	<p>Generelt kan bortskaffelse af jorden finde sted uden yderligere behandling, dvs. uden et separationsanlæg. Men det kan blive nødvendigt med områder, hvor jorden kan sætte sig før den transporteres væk.</p>	<p>Større områder til afdræning er en stor fordel og desuden kræves et separationsanlæg.</p> <p>Separationsanlægget er en af de vigtigste komponenter i slurry shield-TBM'en og leveres ofte i modulær form. Endvidere kan filterpresser eller cykloner være nødvendige for at fjerne vand fra jorden.</p> <p>Samlet kræves der et betydeligt større arbejdsområde på overfladen sammenlignet med EPB-TBM'en.</p>

Tabel 4. Typiske kendetegn for TBM'er af EPB- og slurry- typen

Indkøbspris og drift af TBM'er er i samme størrelsesorden for EPB og slurry maskiner, men udgiften til separationsanlæg og separation af jord fra boremudderet udgør en større omkostning ved slurry boring.

### 5.2.3 Valg af TBM til en Øresundsmetrotunnel

Ved valget er den vigtigste information om tunnelen:

- Den samlede borelængde er ca. 22,2 km.
- Tunnelen skal bores langt overvejende i kalk
- Det hydrostatiske vandtryk under fjorden er ca. 6 bar, og TBM'erne skal som minimum kunne modstå et vandtryk som er lidt højere end det.

Ud fra den nuværende viden om den forventligt ensartede geologi der udgøres af kalk langs linjeføringen samt erfaringerne med TBM'er med stor diameter, vurderes det at en EPB type TBM vil være mest relevant til etablering af en tunnelen. En EPB er således antaget i løsningsforslaget. Det tryk der skal bores under, betyder dog at en Slurry TBM ikke kan udelukkes.

Medmindre der i forbindelse med større kendskab til geologien kommer entydige tegn på at der skal vælges en bestemt maskine, eller at linjeføringen kan optimeres så de maksimale hydrostatiske tryk kan reduceres, bør valget af TBM overlades til entreprenøren og frihedsgraden i forbindelse med arealreservation og anvendelse af jorden opretholdes.

### 5.2.4 Tykkelse på tunnelling

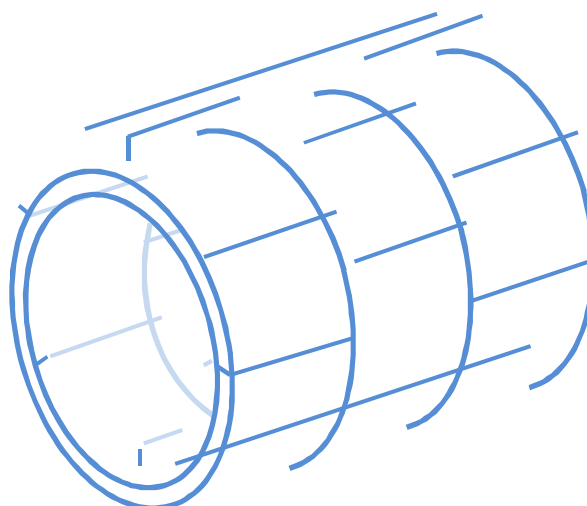
Tykkelsen på tunnelling (betonpladerne der udgør selve tunnelen) er vurderet til 0,40 meter. Dette er baseret på en erfaringsmæssig vurdering ud fra udførelse af tilsvarende tunnelprojekter i tilsvarende dybder, i tilsvarende geologiske forhold

Tunnelboremaskinen der borer tunnelrørene, monterer samtidigt de betonsegmenter, der kommer til at udgøre den permanente konstruktion i den borede tunnel.

Betonsegmenterne danner en foring af tunnelen der er opbygget af ringe, der hver især består af et antal segmenter. Dette afsnit beskriver centrale dele af hvorledes disse segmenter er opbygget og hvad der er forudsat i forbindelse med nærværende skitseprojekt. På figur 19 kan det ses hvorledes en boret tunnel er samlet af et stort antal tunnelsegmenter.

Udformningen af segmenterne skal sikre:

- Vandtæthed
- Dimensioneringen af en foring, der modstår såvel kort- som langsigtede lastforhold.
- Langsgående kontinuitet af tunnelens linjeføring
- Holdbarhed i tunnelens levetid
- Hurtig og sikker montage i TBM'en



Figur 19. Den bærende betonkonstruktion i en boret tunnel er et puslespil af tunnelsegmenter som tunnelboremaskinen samler til ringe. Efterhånden som TBM'en arbejder sig gennem jorden samles ringene til et rør.

Bestemmelse af dimensioner, betonstyrke armering mv. er en kompliceret sammenhæng mellem linjeføring, TBM-design, geologi og entreprenørens erfaringer, der nedenfor kun beskrives overordnet.

I denne fase er layout og geometri for tunnelens foringssegmenter således kun vejledende og etableret som grundlag for anlægsoverslag. De nødvendige valg, vurderinger og beregninger skal overlades til den endelige designer af tunnelen uden at være styret af de forudsætninger der er gjort i dette afsnit.

Tunnelsegmenterne, designes med åbninger/huller der muliggør sekundær støbning gennem segmenterne. Den sekundære støbning sker ved at en cementmørtel (grout) under højt tryk pumpes gennem åbningerne og ud i jorden omkring tunnelen, hvorved det hulrum TBM'ens skjold efterlader udfyldes og der skabes en ensartet sammenhæng til den omgivende jord.

Åbningerne forsynes med envejsventiler. Envejsventilerne er nødvendige for at undgå indstrømning af vand og jord under bagstøbningsprocessen.

#### 5.2.5 Vandtryk

Vandtrykket omkring tunnelen vil variere mellem lidt over 1 og næsten 6 bar henover linjeføringen. Betonen og samlingerne skal designes således at dette vandtryk kan modstås. Vandtæthed af betonsegmenternes samlinger opnås bl.a. ved at anvende tætningsringe af et blødt plastmateriale langs randene på hvert segment (gaskets). Tætningerne skal udføres og testes for et maksimalt vandtryk på mindst en bar over end det maksimale hydrostatiske tryk, som tunnelen udsættes for i den permanente fase – dvs. ca. 7 bar. Den umiddelbare grænse for eksisterende løsninger ligger omkring 15-16 bar.

#### 5.2.6 Skakte

Ved hver kyst etableres skakte, der i anlægsfasen skal fungere som startkamre. Dimensionerne af skaktene vil være styret af deres anvendelse som nødstationer i driftsfasen i højere grad end hvad der kræves i anlægsfasen til udførelse af den borede tunnel.

Skaktene skal anlægges i relativt stor dybde – ca. 35m på Københavnsiden (jv. Bilag 9) og ca. 26m på Malmøsidens. Skaktene antages anlagt som støttede udgravninger, der udgraves under grundvandssænkning og anlægges som vandtætte konstruktioner.

Skakten på den københavnske side er placeret indenfor "Prøvestensdepotet", som er et lukket depot for lettere forurenede jord dvs. klasse 2 og 3 jord i henhold til Københavns Kommunes tidligere regulativ. I den nederste del af fylden må der dog forventes opblanding med kraftigere forurenede havbundssediment (olieforurenede), som kan medføre at jorden skal til rensning.

Skakten nær kysten i Malmø placeres på et område, som blev opfyldt med rent sand i 1987. Derfor forudsættes også i overslaget ca. 1 m forurenede jord, der stammes fra den oprindelige havbund.

Under boringen af tunnelerne transporteres alt materiale fra og til tunnelen gennem startområdet, og i tilfældet med en EPB maskine kommer jorden ud fra tunnelerne ud via transportbånd, evt. via specialtog eller specialkøretøjer.

I forhold til inddragelse af arealer til skakte og tilhørende arbejdsplads- og opbevaringsområder, kan der som udgangspunkt påregnes følgende behov, der anses for at være "typiske" i forbindelse med et stort tunnelprojekt:

- Blandeanlæg til cementmørtel
- Betonblandeanlæg
- Betonsegmentfabrik
- Lagerplads til segmenterne
- Midlertidigt jordoplæg ved startkammer
- Mandskabsfaciliteter

Arbejdspladsområdet for den igangværende udførelse af Follobanetunnelen i Oslo området i Norge (22km lang dobbelt tunnel,  $\varnothing 9,5\text{m}$ ) er ca. 200.000m<sup>2</sup>, og indeholder alle de ovennævnte faciliteter. Follobanetunnelens arbejdsplads er placeret i et område hvor der generelt ikke er samme pladsbegrænsninger og beboerhensyn at tage som der forventes at vil være ved skaktene i hhv København og Malmø, og det vurderes således at dette areal kan reduceres til 80-120.000m<sup>2</sup>, muligvis mindre. Særligt lagerplads til segmenter vil være et område hvor der kan "justeres" afhængig af den plads der er til rådighed.

#### 5.2.7 Mødepunkt for de udførende TBM maskiner

Der er ikke gjort detaljerede overvejelser omkring udformning, koncept og udførelse af dette kammer, men kun overordnede overvejelser omkring mulige udførelsesmetoder. Placeringen af møde/modtagepunktet vil ligge ca. midt tunnelstrækningen, hvor bunden af tunnelen ligger i kote ca. -35m for løsningsforslagets linjeføring. Udvidelse af tunnelen omkring TBM borehovederne er nødvendig for at skabe plads til at udføre adskillelsen, og kan eksempelvis udføres ved NATM metoden som kendetegnes ved at der udgraves i korte sekvenser, og sikres med sprøjtebeton ofte i kombination med ét eller flere sikringselementer såsom armeringsnet, stålbuer og ankerbolte. Metoden kendes bla. fra Københavns metro, hvor enkelte kortere tunnelstrækninger er udført på denne måde i kalken. Samme metode brugtes også til udførelse af modtagekammer og tværtunnelerne på Storebæltstunnelen, dog i kombination med frysning af den omgivende jord i forbindelse med modtagekammeret og enkelte af tværtunnelerne. I stedet for frysning, vil grundvandssænkning omkring modtagekammeret fra overfladen også være en mulighed, og endeligt kan modtagekammeret etableres som en skakt fra overfladen. I dette sidste tilfælde vil der skulle udføres en kofferdam for at kunne foretage udgravningen ned til mødepunktet og den efterfølgende demobilisering og bort-transport af tunnelboremaskinerne.

#### 5.2.8 Risiko

En egentlig risikoanalyse er ikke udført, men herunder er gengivet nogle af de risici og farer der er rapporteret fra projekter udført med TBM:

- Svigt i TMB'ens hovedleje. Kræver normalt adgang fra overfladen for bjærgning, hvilket ikke er muligt under fjorden. Her må i stedet udgraves og sikres omkring borehovedet, evt. stabiliseres ved frysning hvis svigtet sker et tilstrækkeligt uheldigt sted, for at skabe plads at udføre arbejderne på.
- Uforudset vandindtrængning gennem TBM fronten
- Brand opstået på TBM'en
- Farer i forbindelse med arbejder i trykkammeret, ved vedligeholdelsesarbejder.
- Store sten og blokke i jorden i de kvartære lag, hvilket indtil videre ikke er relevant i de tunneldybder løsningsforslagets vertikale linieføring placeres i – her skal udelukkende tunneleres i kalk
- Farer i forbindelse med udførelse af tværtunneler, herunder brydning af tunnelføringen og udgravning mellem rør (kun aktuel for en tvillingerørsløsning)

En udførlig risikoanalyse som fastslår hvilke afbødende foranstaltninger der skal implementeres i projektet for at imødekomme risici, vil være en meget vigtig del af eventuel fremtidig planlægningsprocess.

## 6. ANLÆGSOVERSLAG

### 6.1 Generelt

Boret tunnel: 22.2 km

Det er antaget at hele den borede strækning gennemføres med to styk tunnelboremaskiner (TBM). Der er antaget en "Earth Pressure Balance" (EPB) type TBM.

Tværsnit er antaget med indre diameter (ID) på 11,3 m og en tykkelse af foringsringene på 0,4 m, hvilket giver en ydre diameter (YD) på 12,1m. Foringsringene er antaget 1,5m brede. Der er inkluderet betonvolumen til indvendige konstruktioner, som eksempelvis betondækket midt i tværsnittet som sporene anlægges på.

Prisposterne er udarbejdet ved, at der er enten udregnet eller skønnet mængder for de overordnede anlægselementer. Disse er sammenholdt med erfaringsmæssige enhedspriser og Rambølls generelle reference-priser og der er specifikt taget udgangspunkt i nogle af de seneste projekter, hvor Rambøll har lavet lignende overslag. Priser på opbygning og drift af TBM, slidtage med videre er i stort omfang baseret på et prisoverslag for en ny Vejle fjord forbindelse, som Rambøll har udarbejdet i 2016. Indkøb af TBM, driftspersonale og strømforbrug samt omkostninger til trykkammer og sammenkobling af TBM'er er baseret på anlægsoverslag for en boret tunnel løsning for Femernforbindelsen, der oprindeligt er udarbejdet i 2012, men senest er opdateret i 2016. Priser på beton-støbning til både segmenter og mere konventionel beton i tunnelens tværsnit er baseret på de generelle priser fra en række projekter, men i særdeleshed benchmark'et i forhold til (indeksregulerede) overslag på en Østlig Ringvej om København fra 2012, anlægsoverslag på Nordhavnstunnelen fra 2010 samt de to ovenstående.

Et skønsmæssigt tillæg for omkostninger til arbejdsplads på 8 % og tillæg til projektering på 15% er inkluderet, og endeligt er tillagt et generelt korrektionstillæg på 50 % der tager højde for projektets tidlige stade. Dette svarer til metoden fra fase 1, og anlægsoverslagene er dermed sammenlignelige.

Med i overslaget tages eventuelle tillægskonstruktioner, der er nødvendige af hensyn til de valgte sikkerheds- og ventilationskoncepter, herunder også pladsbehov for installationer i tunnelen.

Da det ikke er fastlagt om tunnelforbindelsen skal have forbindelse til et eksisterende toget, eller om det skal være et lukket system, vil konstruktioner forbundet med depot og værkstedareal ikke være inkluderet. Evt. stationsbygninger og stationsfaciliteter heller ikke er inkluderet.

Alle priser er i DKK, baseret på 2016 prisniveau.

### 6.2 Post 1. Tunnelboremaskiner

Hovedposten "Tunnelboremaskiner" dækker over omkostningerne forbundet med indkøb, opbygning og drift af tunnelboremaskiner. Underposterne udspecificerer omkostningerne fordelt på etableringsomkostninger for maskinerne (indkøb, transport til byggeplads, opbygning), omkostninger forbundet med at demobilisere maskinen samt driftsomkostninger til personale og slidtage fra selve tunnel-driften (1.1-1.5). Derudover er der indeholdt omkostninger til at opløde jorden foran borehovedet så det udgravede materiale bliver en ensartet masse (1.6), omkostninger til sammenkobling af tunnelen på det sted, hvor de to TBM'er mødes (1.8) og omkostninger til etablering og bemanning af trykkamre, som nødforanstaltning hvis der er ulykker som følge af arbejde under tryk (1.9).

Underposten "Håndtering af jord" (1.7) dækker omkostningerne til transporten af boremudder fra fronten af borehovedet til deponeringssted. Der er ikke indeholdt deponeringsafgifter til bortskaffelse af jorden.

Posten "Strømforbrug" (1.10) dækker over omkostningerne til strømforbruget til at drive tunnelboremaskinerne frem. Der er i denne post også inkluderet det øvrige strømforbrug på byggepladsen og ved produktion af segmenter.

### 6.3 Post 2. Produktion af beton

Hovedposten "Produktion af beton" dækker over alle betonarbejder i tunneler – både til foringsringe langs den ydre omkreds (segmenterne) og til etablering af dæk og vægge i tunnelens tværsnit. Posten "Indvendig beton i tunnelrør" (2.1) dækker alle omkostningerne til armering, beton, forme og udstøbning af beton (vægge og dæk) i tunneltværsnittet. Underposten "Segmenter (foringsringe) inkl. montering mv." (2.2) angiver den samlede pris for etablering af et produktionsanlæg for udstøbning af segmenter, det aktuelle forbrug af beton og armering til segmenterne, tætningsringen langs segmenternes omkreds samt yderligere omkostninger til montering og sammenkobling af segmenter, ekstra vandtætning og nødvendige reparationer efter montering.

Underposterne "Etablering af injiceringsværk" og "Forbrug af injiceringsmateriale (til overcut)" (2.3 og 2.4) dækker over omkostningerne til etablering af siloer og blandeværk til injiceringsmaterialer (cement, bentonit, microsilica mv.) samt forbrug af injiceringsmateriale omkring tunnelens foringsringe.

### 6.4 Post 3. Skakte ved kysten

Posten indeholder alle udgifter til etablering af skakte på begge sider af Øresund samt indretning af disse med alle installationer og funktioner.

### 6.5 Post 4. Mekaniske og elektriske installationer

Posten indeholder alle udgifter til mekaniske, elektriske og øvrige systemer, herunder strøm, ventilation, belysning, drænering samt sikkerheds- og overvågningssystemer.

### 6.6 Post 5. Geoteknik og miljø

Denne post indeholder udgifter til forundersøgelser, miljø overvågning, landskabsarbejder mv.

### 6.7 Post 6. Jernbane

Denne post indeholder alle udgifter til anlæggelse af metroporene langs forbindelsen.

### 6.8 Udeladelser

Følgende elementer er ikke omfattet af anlægsoverslaget:

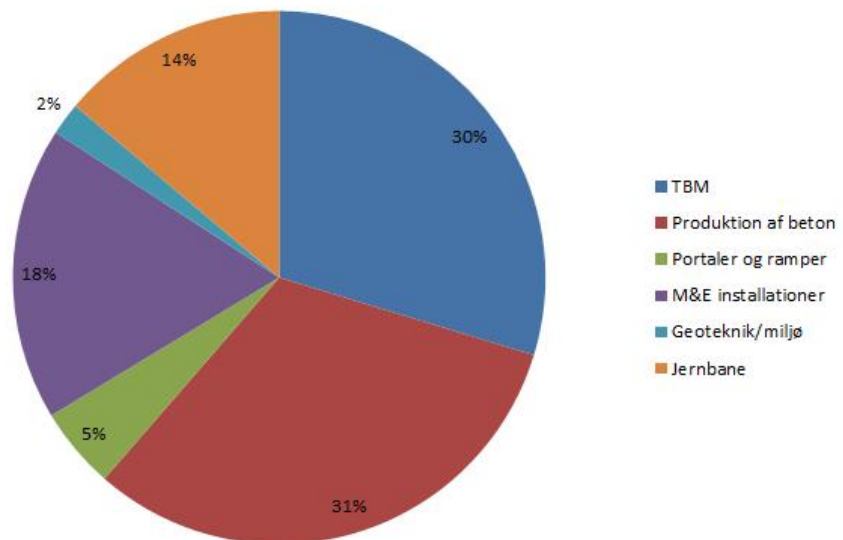
- Bygherrens organisation
- Tilladelser
- Eksproprieringsomkostninger
- Entreprenørens forsikringer

Metro løsning med 1-rør, 11,3 m indvendig diameter					
Post	Tekst	Antal	Enhed	Pris pr. enhed	Total Pris
1	Tunnelboremaskiner				
1.1	Indkøb af TBM inkl. transport	2	stk	kr. 292.758.355	kr. 585.516.711
1.2	Opbygning af TBM	2	stk	kr. 15.000.000	kr. 30.000.000
1.3	Demobilisering	2	stk	kr. 10.000.000	kr. 20.000.000
1.4	Slidtage på TBM - udskiftning af komponenter mv.	1	sum	kr. 210.000.000	kr. 210.000.000
1.5	Personale TBM - 24 timers drift	1.071.640	timer	kr. 800	kr. 857.312.000
1.6	Tilsætningsmaterialer til ensartning af boremudder	1	sum	kr. 60.000.000	kr. 60.000.000
1.7	Håndtering af jord	3.722.876	m3	kr. 150	kr. 558.431.440
1.8	Sammenkobling af tunneller	1	stk	kr. 50.000.000	kr. 50.000.000
1.9	Trykkamre inkl. personale	2	stk	kr. 7.500.000	kr. 15.000.000
1.10	Strømforsbrug - estimeret 100.000 MWh/TBM	400.000.000	kwh	kr. 2	kr. 600.000.000
2	Produktion af beton				
2.1	Indvendig beton i tunnelrør	14,2	m3/m	kr. 4.500	kr. 1.407.078.000
2.2	Segmenter (foringsringe) inkl. montering mv.	320.985	m3	kr. 5.000	kr. 1.604.926.589
2.3	Etablering af injiceringsværk	2	stk	kr. 2.500.000	kr. 5.000.000
2.4	Forbrug af injiceringsmateriale (til overcut)	202.553	m3	kr. 1.000	kr. 202.552.804
3	Skakte ved kysten				
3.1	Skakt, København	1	stk	kr. 260.000.000	kr. 260.000.000
3.2	Skakt, Malmø	1	stk	kr. 235.000.000	kr. 235.000.000
4	Mekaniske og elektriske installationer				
4.1	Installationer				
4.1.1	Strømsystem	1	stk	kr. 512.700.000	kr. 512.700.000
4.1.2	Lys gallerier	1	stk	kr. 39.600.000	kr. 39.600.000
4.1.3	Lys jernbane	1	stk	kr. 28.000.000	kr. 28.000.000
4.1.4	Dræn jernbane	1	stk	kr. 111.900.000	kr. 111.900.000
4.1.5	Ventilation jernbane	1	stk	kr. 167.800.000	kr. 167.800.000
4.1.6	Midlertidige installationer	1	stk	kr. 139.800.000	kr. 139.800.000
4.2	Brand og sikkerhed				
4.2.1	Brandsikring	1	stk	kr. 233.100.000	kr. 233.100.000
4.2.2	Varsling og overvågning	1	stk	kr. 130.500.000	kr. 130.500.000
4.2.3	SCADA Overvågning	1	stk	kr. 111.900.000	kr. 111.900.000
4.2.4	Sikkerhed og nødprocedurer	1	stk	kr. 186.500.000	kr. 186.500.000
4.2.5	Test og kontrol	1	stk	kr. 93.200.000	kr. 93.200.000
5	Geoteknik og miljø				
5.1	Geotekniske forberedelser	1	sum	kr. 180.000.000	kr. 180.000.000
5.2	Miljø overvågning	1	sum	kr. 20.000.000	kr. 20.000.000
6	Jernbane				
6.1.1	Jernbanearbejder	22.020	m	kr. 65.000	kr. 1.431.300.000
	<b>Total overslag</b>				<b>kr. 10.087.100.000</b>

TBM	3.000.000.000
Produktion af beton	3.200.000.000
Portaler og ramper	500.000.000
M&E installationer	1.800.000.000
Geoteknik/miljø	200.000.000
Jernbane	1.400.000.000
sum	10.100.000.000

Arbejdsplads	800.000.000
Projektering	1.500.000.000
Byggeledelse	800.000.000
Total	13.200.000.000
Korrektionstillæg	6.600.000.000
Anlægsoverslag	19.800.000.000

Boret tunnel, I.D. 11,3 m.



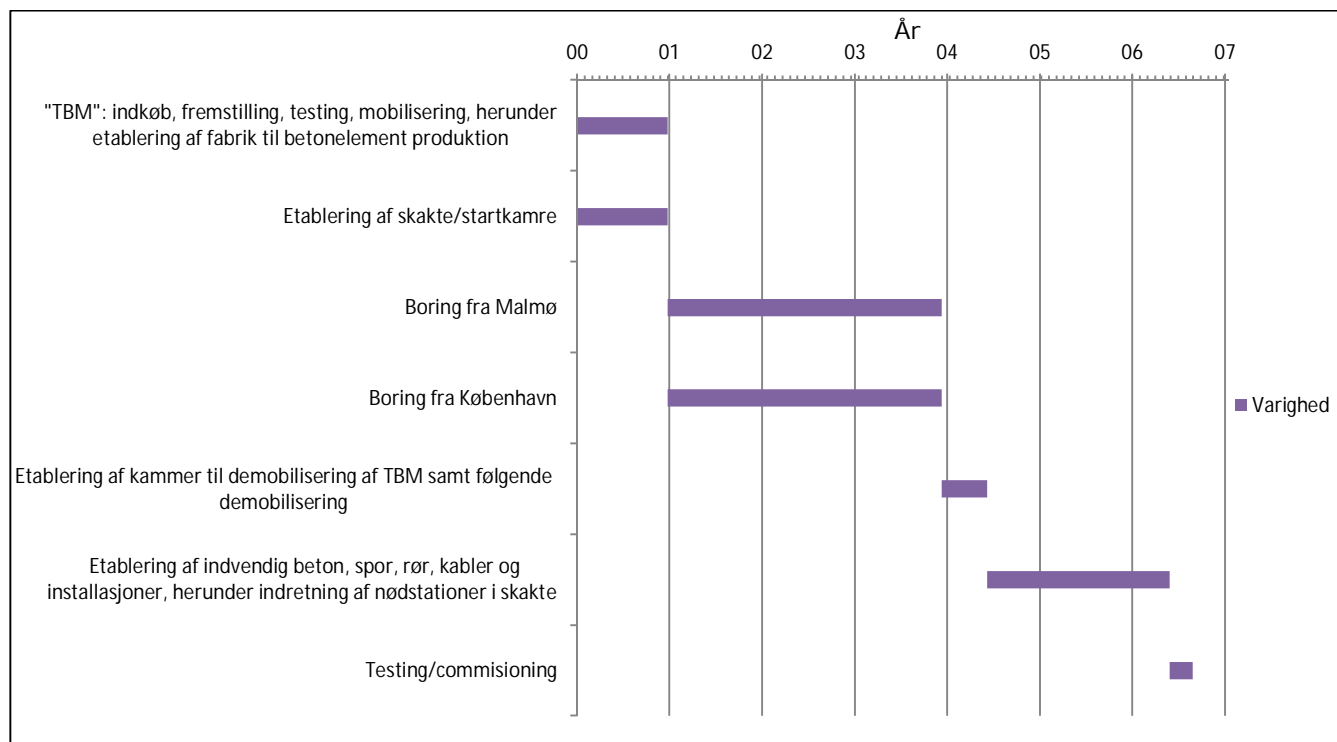
Figur 20. Oversigt over anlægsoverslaget



### 6.9 Anlægstid

Det vurderes at der på baggrund af det foreslåede tværsnit og valg af boremetode kan opnås en produktionsrate på 12 m tunnel per dag, per TBM, hvilket giver en total boretid i omegnen af 3 år. Hertil kommer tid til indkøb, bygning og klargøring af tunnelboremaskinerne (typisk ca. 1 år), mobilisering, demobilisering og indretning af tunnelen med indvendige betonkonstruktioner, anlæggelse af spor og installationer mv. Total anslås anlægstiden at være ca. 6,5 år. Figuren under er vist en grov, overordnet tidsplan for tunnelanlægget, baseret på tidsplaner for tilsvarende TBM projekter, herunder Storebæltstunnelen, Femern tunnelen (boret alternativ) og Vejle Fjord tunnelen (VVM niveau). Tidsplanen er udarbejdet under følgende forudsætninger:

- 1) Der bores med 2 TBM'er, der forudsættes at arbejde 24/7/365 inkl. vedligehold.
- 2) TBM-fremdriften på 12 meter pr. døgn, pr. TBM.
- 3) Startkamre i hhv Malmø og København etableres samtidigt, og det er antaget dette arbejde ikke ligger på kritisk vej. Således vil opstart og udførelse af dette arbejde ligge indenfor tidsrammen af "TBM" for hvilken den kritiske vej er indkøb, fremstilling, testning og mobilisering af TBM.



Figur 21. Grov vurdering af tidsplan for løsningsforslaget.