© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

MASKIN BORRAD TUNNEL - ETT ALTERNATIV TILL FÖRBINDELSE UNDER STORA BÄLT

Gunnar Nord, Civilingenjör, Skanska AB, Danderyd

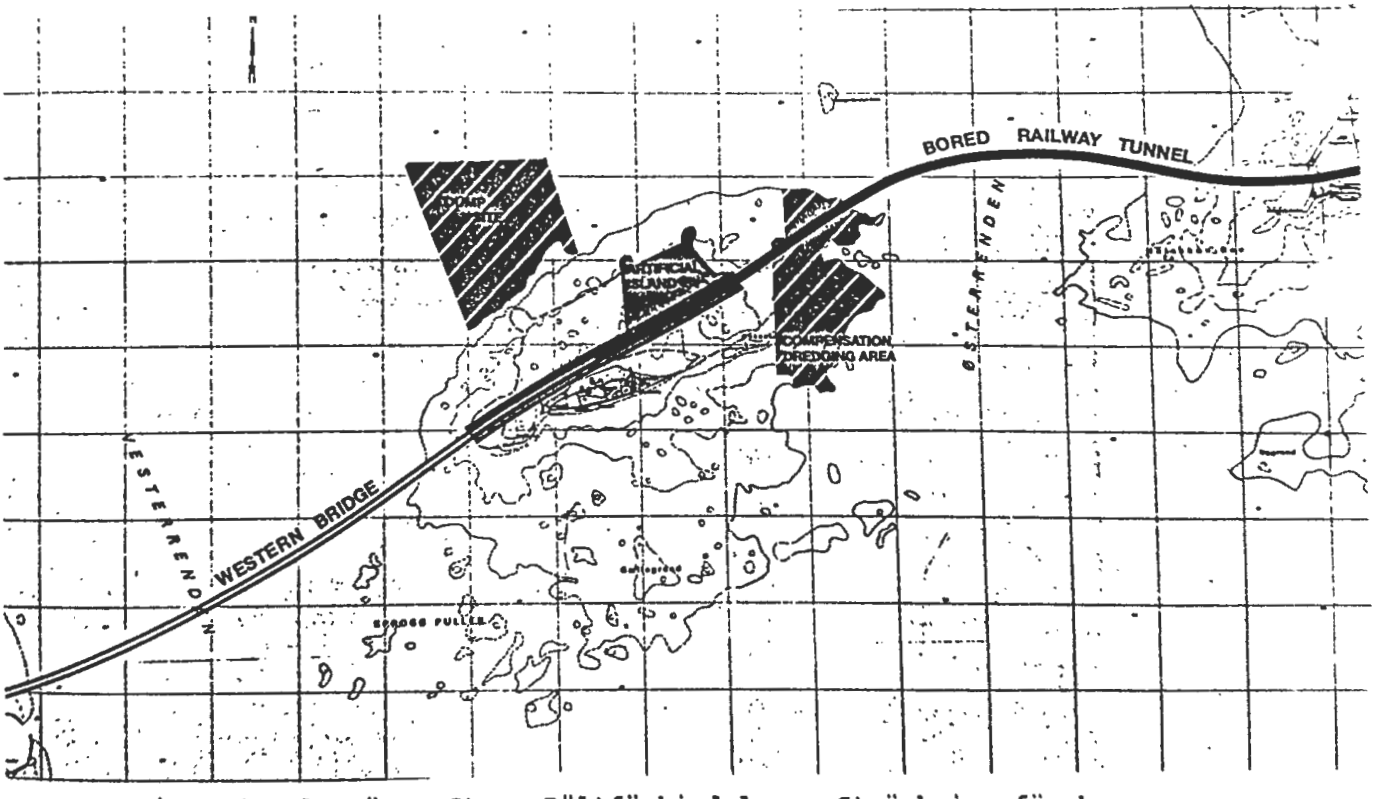
En fast förbindelse över/under Stora Bält i Danmark skall byggas och den skall i sin helhet vara klar för trafik 1996.

Förbindelsen över Stora Bält är ur byggarens synvinkel en flerstegsraket den innehåller följande steg:

1 Tunnelförbindelse för järnväg mellan Själland och Sprogö.

2-3 Broförbindelse mellan Sprogö och Fyn för både järnväg och landsväg.

4 Tunnelförbindelse för biltrafik mellan Själland och Sprogö.



Figur 1. Plan över Stora Bältförbindelsen. Sträckning för borrad tunnel under Österrännan.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

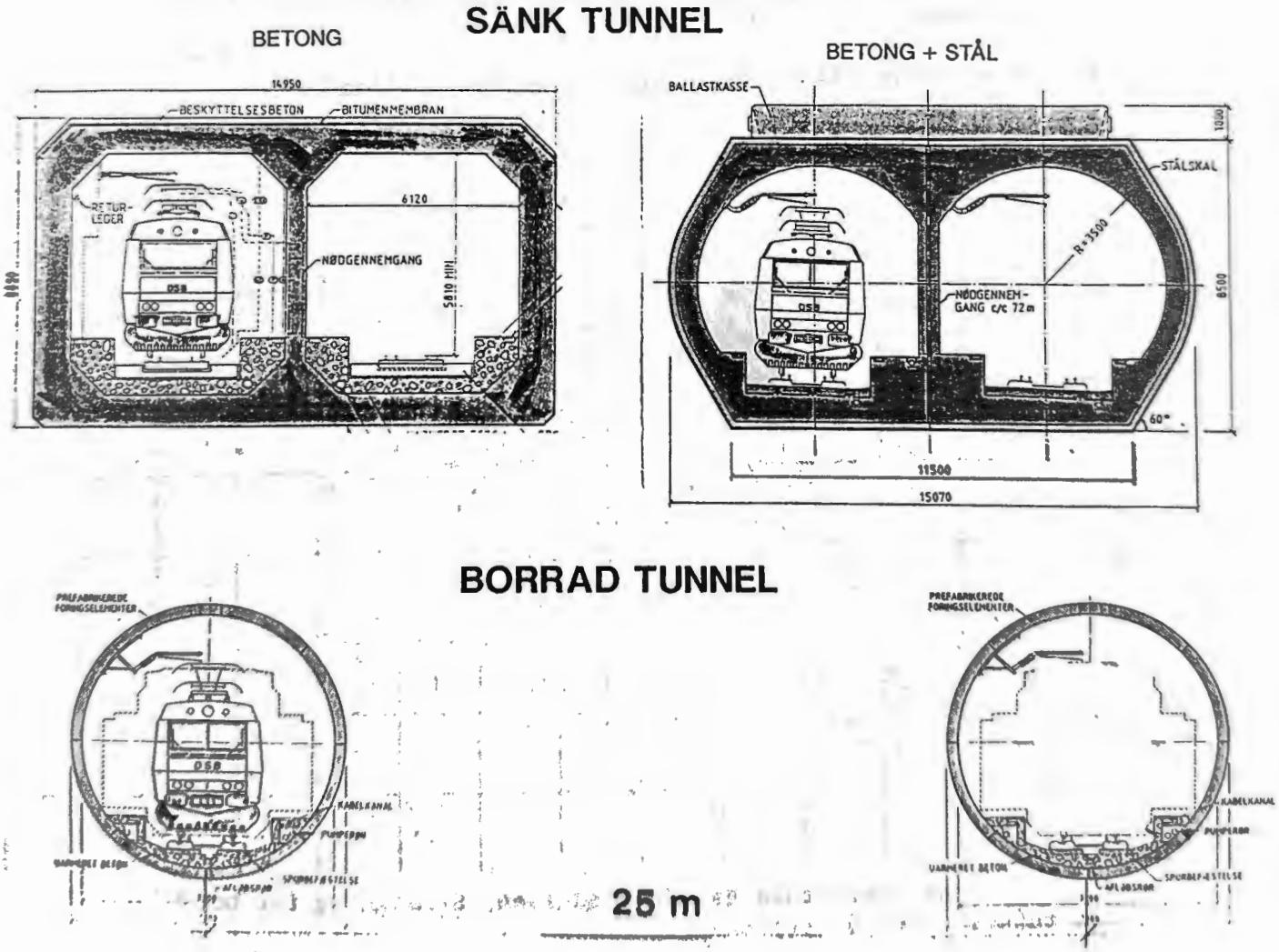
Finansiering av hela projektet är i enkla drag tänkt så att det "Stora Bält-bolag" som har bildats med eget aktiekapital och med upplånade pengar skall täcka kostnaderna för byggnationen. Intäkterna kommer sedan när förbindelsen är färdig och tullavgifter kan tagas ut av de som trafikerar den.

De steg som ligger först i tiden och som skall presenteras här är tunnelförbindelsen mellan Själland och Sprogö. Det bör sägas att vi är mitt inne i anbudsräkningen. Handlingarna kom för cirka två veckor sedan och anbudet skall vara inne i mitten av juni.

Enligt tidningarna i Danmark har fyra konsortier blivit godkända att deltaga i anbudsgivningen på järnvägstunneln under Österrännan.

De tre tunnelalternativen.

Tunneln under Osterrännan kan antingen utföras som en sänktunnel (typ Tingstadstunneln i Göteborg) eller som en borrad tunnel. Vad gäller sänktunneln finns två möjligheter antingen en sådan helt i betong eller en i stål och betong som är ett vanligt byggsätt i USA.



Figur 2. De tre tunnelalternativen Sänktunnel i betong, sänktunnel i stål och betong samt borrad tunnel.

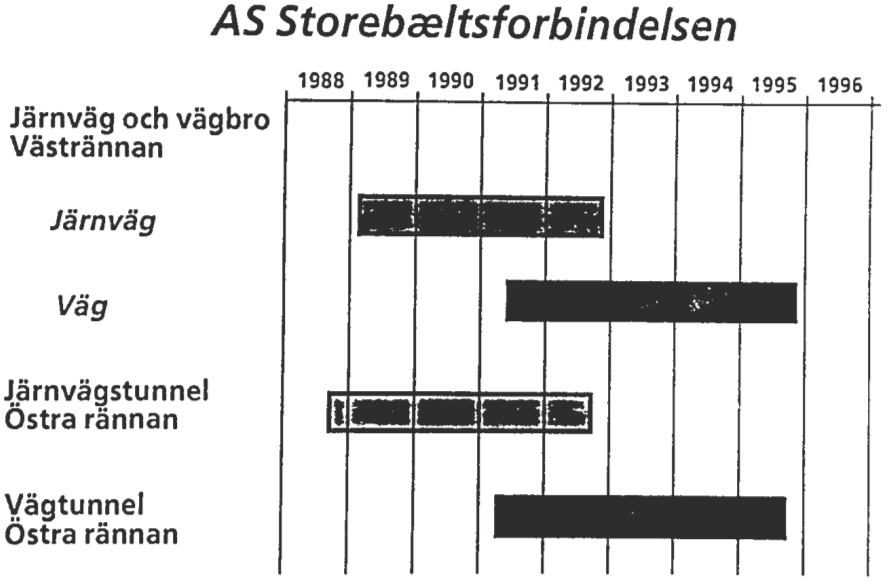
© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Det kan vara intressant att konstatera att det sker en kontinuerlig utveckling inom undermarkbyggandet. Hade detta projekt varit aktuellt att bygga för 15 år sedan är det knappast sannolikt att någon skulle ha trott på ett borrat tunnelalternativ. Det är väl dessutom mer sannolikt att broalternativet hade kommit till utförande då miljöaspekterna inte vägde lika tungt som idag.

Det skall understrykas att den borrade tunneln blir längre så att meterpriset för den borrade måste vara lägre än det för sänktunneln om det skall kunna konkurrera.

Sänktunneln kan av naturliga skäl placeras högre på och blir följdaktligen kortare.

Tidplanen för byggnationen av hela projektet sträcker sig från senare delen av 1988 till slutet av 1995, eller drygt 7 år.



Figur 3. Tidplan för byggnadsarbetena.

Tidplaner för de tre delarna är som framgår av figuren. Järnvägs tunneln under Österrännan som etapp 1 officiellt heter, skall påbörjas under hösten 1989 och vara färdigställd under hösten 1992. Bron över västerrännan skall påbörjas under våren 1988 och vara klarhösten 1992. Slutligen skall tunnelförbindelsen för landsvägstrafik under Österrännan påbörjas våren 1991 för att stå färdig hösten 1995. Det är alltså så som tidsschemat ser ut idag.

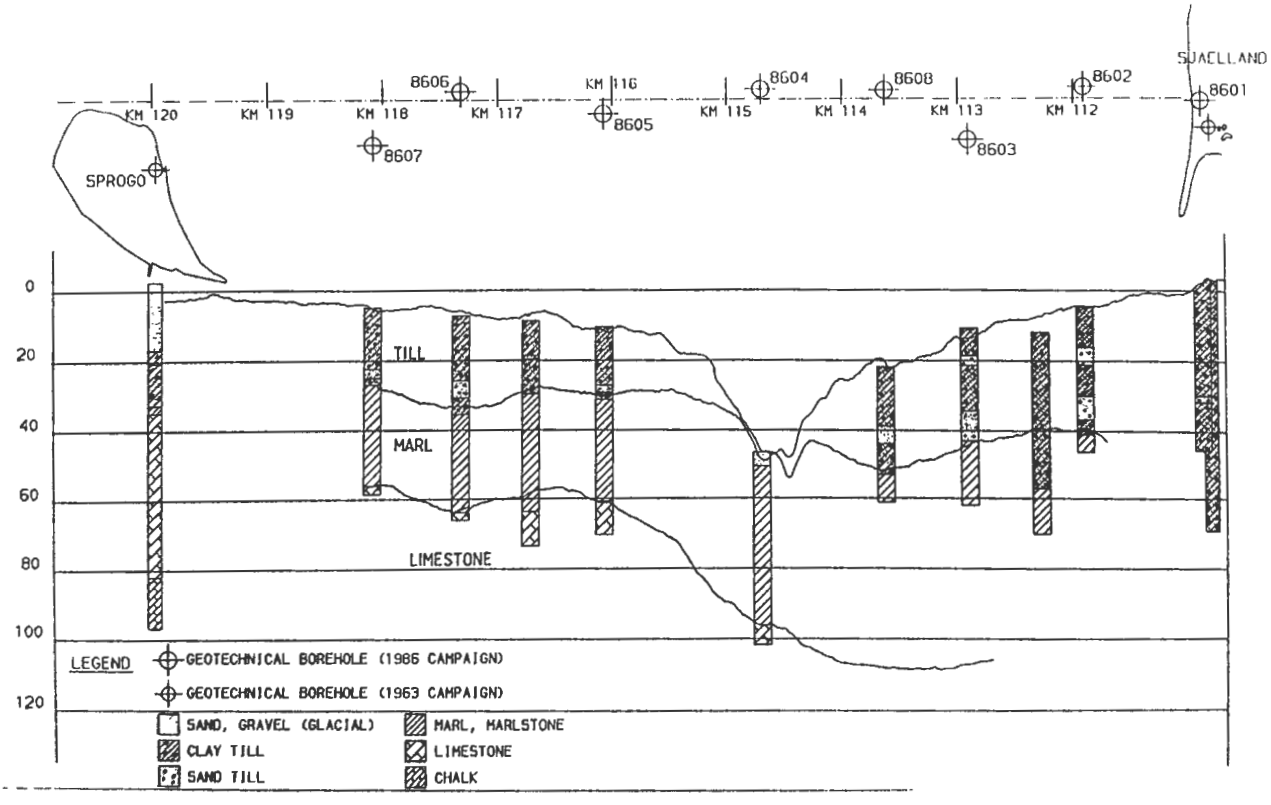
© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Byggnationen av järnvägsförbindelsen skall dock vara avslutat före 1993. Det innebär att tunnlarna under Österrännan måste byggas på fyra år. Tunnellängden är 7,5 km för den borrade och sänktunneln 5,6 km.

Borrad tunnel
(från och med nu behandlas endast den borrade tunneln).

De geologiska förhållandena längs den borrade tunneln framgår av figur nedan. Börjar man uppifrån så finns först ett lager av postglaciala sediment som inte påverkar tunneln annat än vid förskärningarna. Under detta tunna sedimentslager kommer glaciala avlagringar, morän som varierar i tjocklek från några få meter upp till 70 meter. Den mäktigheten finns dock inte längs tunnelsträckningen. Den äldsta och djupast liggande moränen är mer än 100 000 år gammal och har legat under några inlandsisar men även de högre liggande lagren har legat under inlandsisen.

Geologisk längdsektion



Figur 4. Resultat av geotekniska borrundersökningar.

Det innebär alltid att moränen är väl konsoliderad. Den kan betecknas som en moränlera där lerinnehållet utgör cirka 17% och calciumkarbonat innehållet är av samma storleksordning. Volymvikten är cirka 2,3 ton/m^3.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Moränen är inte homogen och man har identifierat fyra lager med något skilda egenskaper. Vattengenomsläppligheten varierar och det finns mätningar som visar att den kan vara lika tät som sprickfattiga partier av vår berggrund men det finns också partier som är mycket genomsläppliga. I moränen finns två problem nämligen block och smältvattenfickor men dessa skall beröras sedan tunneldesign och tunnelborrmaskinen har beskrivits.

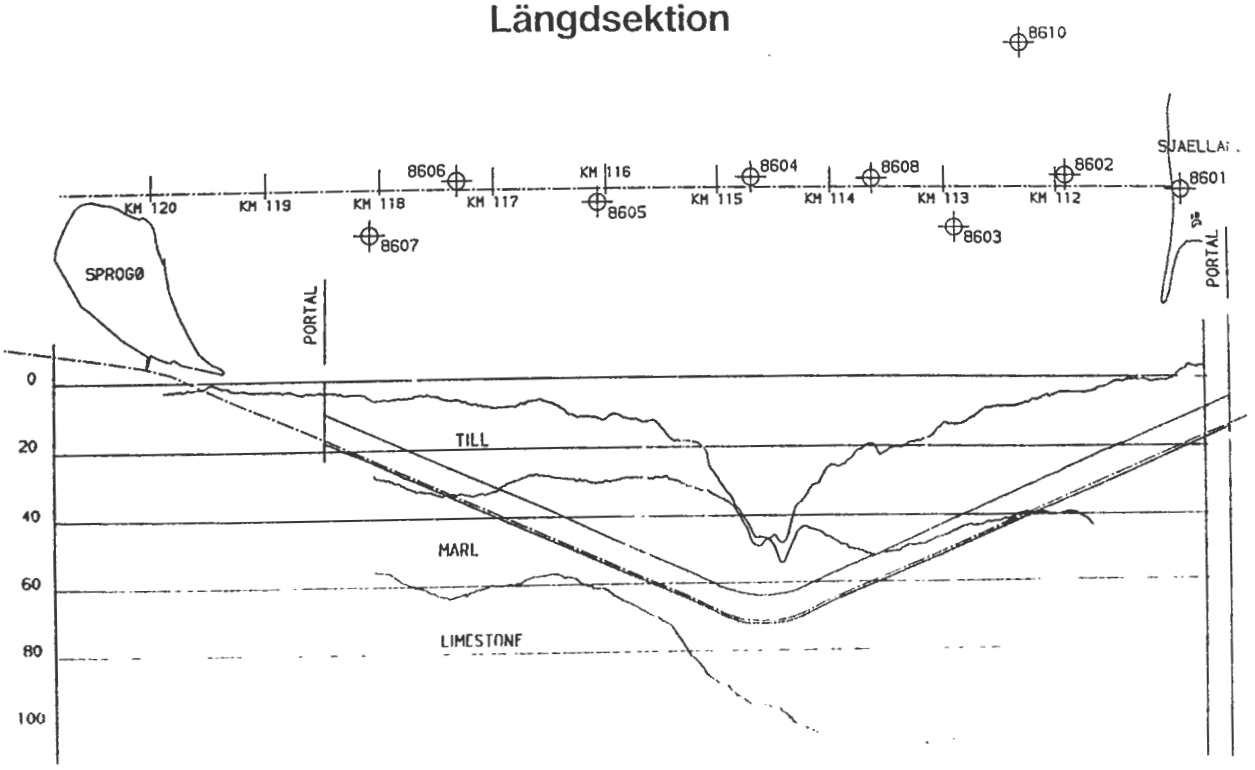
Under moränen ligger tertiär lagerföljd som utgörs av märgel. Märgel är enkelt uttryckt ett sedimentärt berg som har bildats av ler och kalk. I detta fall är proportionerna i genomsnitt 41% ler och 56% kalk och har en volymvikt som understiger 2,0.

Märgel är inte heller homogen ju längre ner man kommer desto större blir kalkinnehållet. Den blir följdaktligen också styvare längre ner och i de djupare delarna kan någon flinta uppträda.

Generellt är märgeln småsprickig och ganska vattengenomsläpplig. Beräkningar i förstudier har indikerat vatteninläckning vid tunnelfront skulle kunna vara av storleksordningen 7000 minutliter vid 70 meters vattentryck i de lägre liggande lagren. Denna siffra skall bara tagas som en storleksordning.

Märgeln underlagras av de s k Danien kalksten som är åtminstone 50 miljoner år gammal. Eftersom tunneln inte förväntas passera genom detta lager skall inte mera ordas om detta lager.

Tunneln kommer att löpa i morän 30% märgel 55% och blandat 15%.

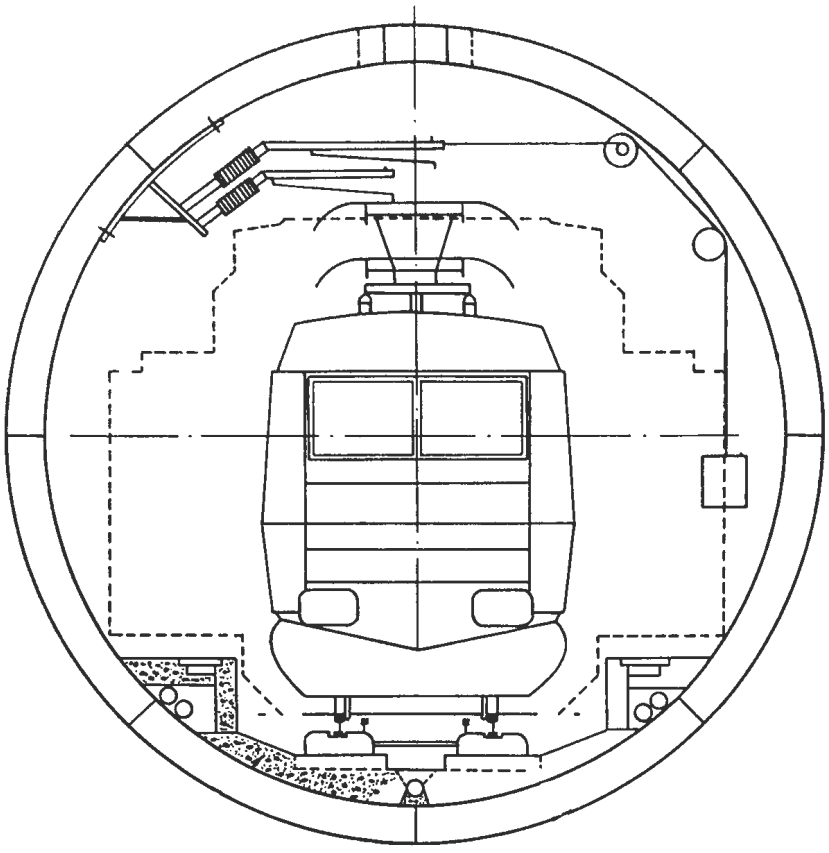


Figur 5. Längdsektion av borrad tunnel observera att tunneln är idag lagd cirka 8 meter djupare i dess djupaste del.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Tunnelinklädnad

Tunneln skall inklädas med betong i ett enkelt lager. I design förslaget från beställaren skall den utföras av prefabelement som bultas samman och förses med tätningar.



Figur 6. Programförslag på indelning av betongelement.

Tunnelomkretsen fullbordas med 8 segment plus ett s k nyckelblock placerat i toppen. Ytterdiametern på tunneln är 8,5 m och tjockleken på segmenten är 0,4 m. vilket ger en inre fri diameter på 7,7 m. Längden av segmenten i tunnelriktningen har satts till 1,5 m. I mitten på varje element finns ett hål för injektering av utrymmet mellan betongelementen och den omkringliggande jorden. I fogarna mellan elementen sätts tätningar som måste klara åtminstone ett vattentryck på 7 bar.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Moränen är inte homogen och man har identifierat fyra lager med något skilda egenskaper. Vattengenomsläppligheten varierar och det finns mätningar som visar att den kan vara lika tät som sprickfattiga partier av vår berggrund men det finns också partier som är mycket genomsläppliga. I moränen finns två problem nämligen block och smältvattenfickor men dessa skall beröras sedan tunneldesign och tunnelborrmaskinen har beskrivits.

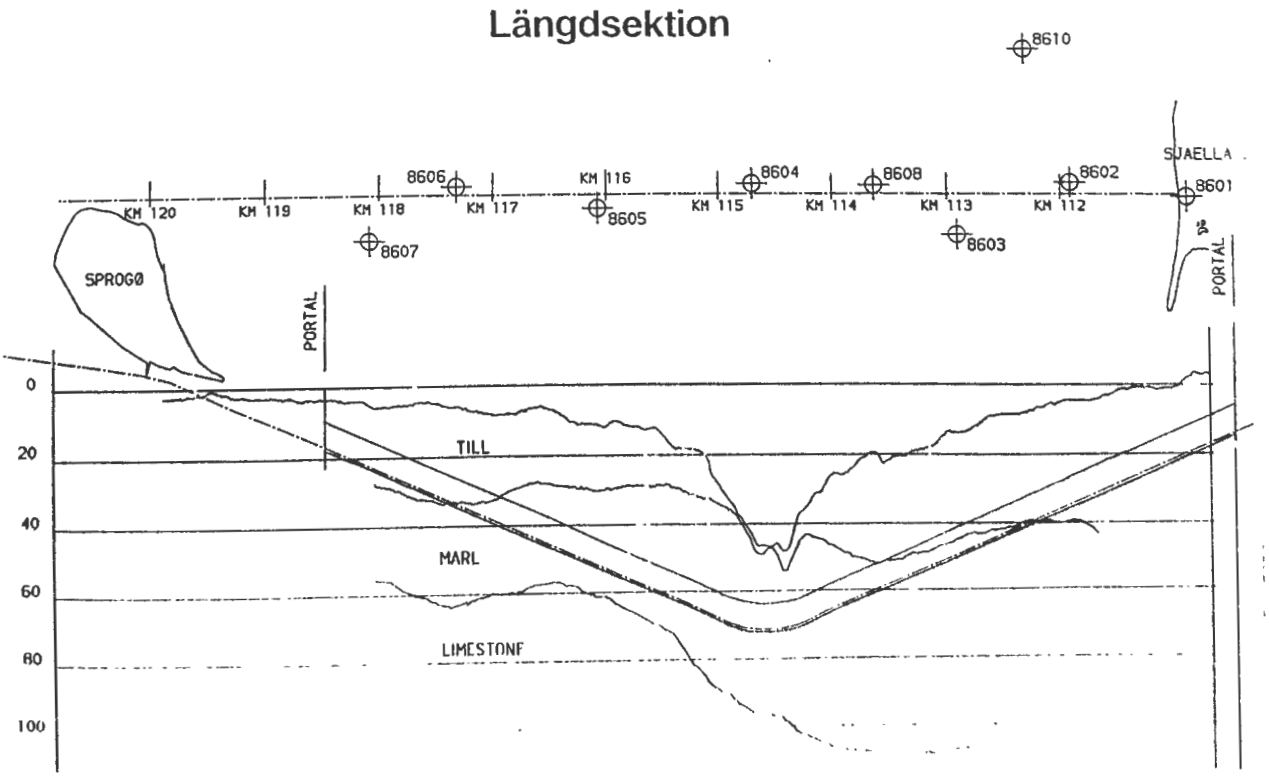
Under moränen ligger tertiär lagerföljd som utgörs av märgel. Märgel är enkelt uttryckt ett sedimentärt berg som har bildats av ler och kalk. I detta fall är proportionerna i genomsnitt 41% ler och 56% kalk och har en volymvikt som understiger 2,0.

Märgel är inte heller homogen ju längre ner man kommer desto större blir kalkinnehållet. Den blir följdaktligen också styvare längre ner och i de djupare delarna kan någon flinta uppträda.

Generellt är märgeln småsprickig och ganska vattengenomsläpplig. Beräkningar i förstudier har indikerat vatteninläckning vid tunnelfront skulle kunna vara av storleksordningen 7000 minutliter vid 70 meters vattentryck i de lägre liggande lagren. Denna siffra skall bara tagas som en storleksordning.

Märgeln underlagras av de s k Danien kalksten som är åtminstone 50 miljoner år gammal. Eftersom tunneln inte förväntas passera genom detta lager skall inte mera ordas om detta lager.

Tunneln kommer att löpa i morän 30% märgel 55% och blandat 15%.

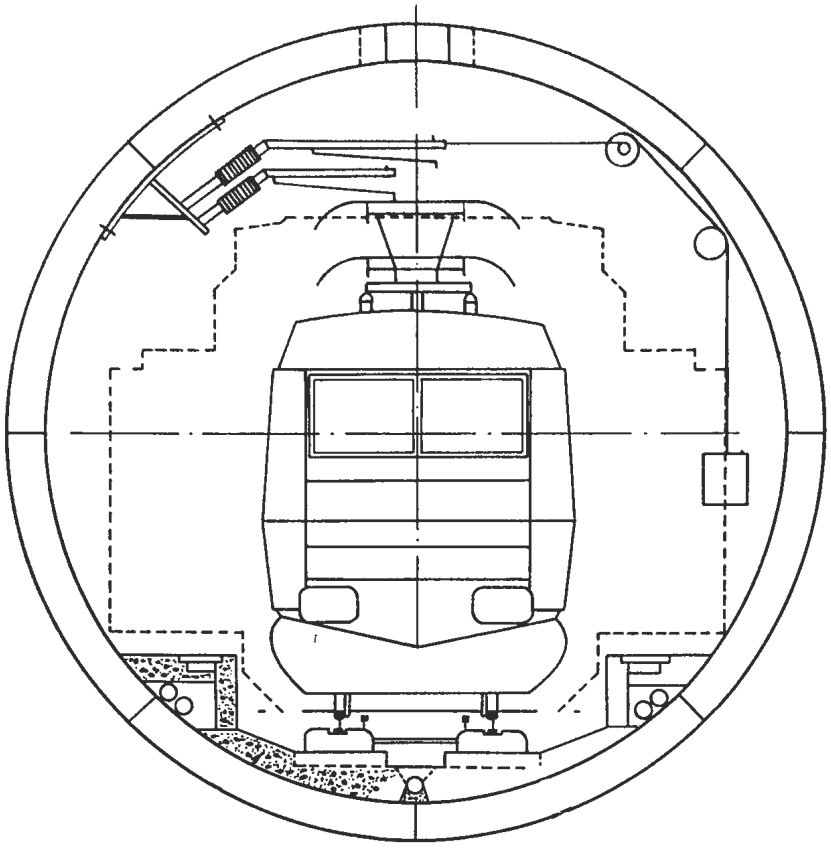


Figur 5. Längdsektion av borrad tunnel observera att tunneln är idag lagd cirka 8 meter djupare i dess djupaste del.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Tunnelinklädnad

Tunneln skall inklädas med betong i ett enkelt lager. I design förslaget från beställaren skall den utföras av prefabelement som bultas samman och förses med tätningar.



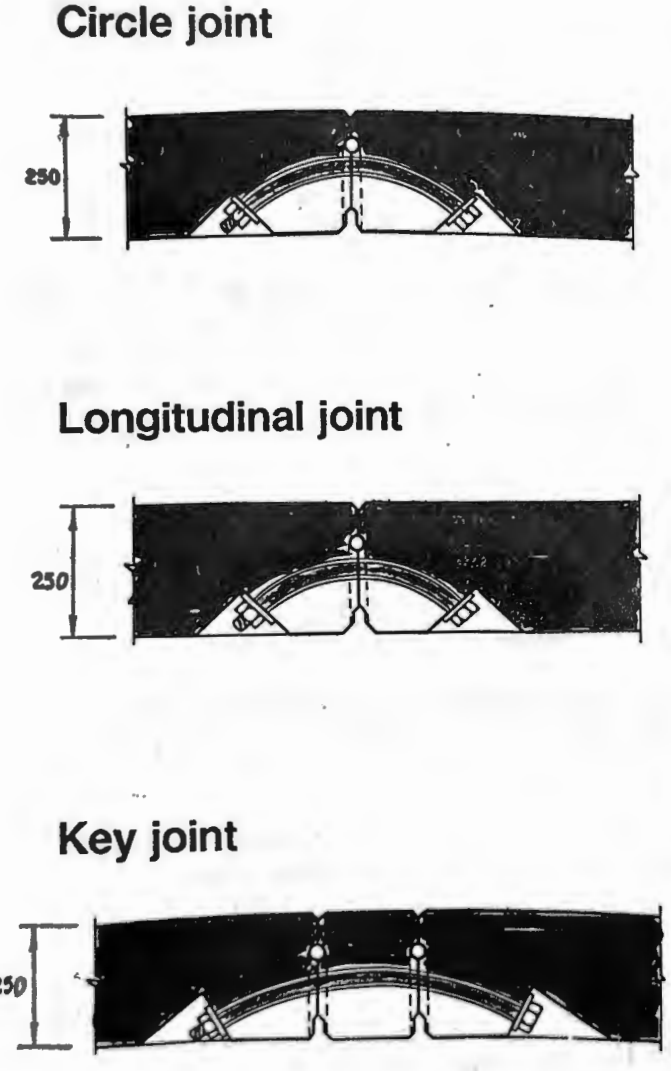
Figur 6. Programförslag på indelning av betongelement.

Tunnelomkretsen fullbordas med 8 segment plus ett s k nyckelblock placerat i toppen. Ytterdiametern på tunneln är 8,5 m och tjockleken på segmenten är 0,4 m. vilket ger en inre fri diameter på 7,7 m. Längden av segmenten i tunnelriktningen har satts till 1,5 m. I mitten på varje element finns ett hål för injektering av utrymmet mellan betongelementen och den omkringliggande jorden. I fogarna mellan elementen sätts tätningar som måste klara åtminstone ett vattentryck på 7 bar.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

De två tunnlarna skall löpa parallellt med 25 meters centrumavstånd. På var 250:e meter skall en tvärförbindelse byggas. Eftersom tvärförbindelserna utförs ett satt stycke bakom TBM måste elementen vid tvärförbindelsepunkterna utformas så att de kan monteras bort. Beställaren har här tänkt sig ett de skall vara utförda i gjutjärn.

Toleranskraven är mycket hårda. Tunnlarna får inte i färdigt skick avvika mer än ± 100 mm från den teoretiska tunnellinjen.



Figur 7. Detaljer av fogar mellan betongelementen.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Tunnelborrmaskinen

Beställaren har i sina handlingar ställt bestämda krav på hur tunnelborrutrustningen skall se ut.

Det skall vara en sköldmaskin bakom vilket betongelement skall resas som tunnelinklädnad. Det tryck som maskinen måste generera på tunnelfronten skall tagas upp av betongelementen. Skärhuvudet längst fram skall förses med verktyg som är kapabelt att bryta ned det material som kan förväntas längs tunnelsträckningen. Man talar om både tänder och diskar och dessa skall kunna bytas ut på ett smidigt sätt. Borrhuvudet skall kunna rotera i båda riktningarna och skall kunna dras tillbaka från tunnelfronten oberoende av själva maskinen.

Krav ställs vidare på att maskinen skall helt igenom byggas så att den har förmågan att prestera 6 cm/minut vilket vilket fritt översatt skulle innebära att man förväntas sig en framdrift på 15-20 meter per dygn.

Det ställs vidare krav på robust konstruktion som gott och väl skall klara den aktuella tunnellängden. Inspektion av lager och tätning skall vara möjlig och likaså utbyte av dessa. Den bakre tätningen, den mellan sköld och linning måste kunna motstå ett tryck på 12 bar vilket överstiger det maximala vattentrycket som är 8 bar.

Skölden skall förses med mellanvägg så att man kan skapa så stort tryck vid fronten som krävs för att hålla den stabil. Men samtidigt talar man om att maskinen även skall kunna arbeta i "open mode" vilket innebär att mellanväggen öppnas och atmosfärstryck kommer att råda vid tunnelfronten.

De lossbrutna massorna måste över en del av tunnelsträckan slussas ut på ett eller annat sätt från utrymmet framme vid tunnelfronten, då detta är trycksatt.

Det måste också vara möjligt för personalen att arbeta framme i det trycksatta utrymmet, och därför måste maskinen förses med en sluss genom vilken den kan ta sig till tunnelfronten.

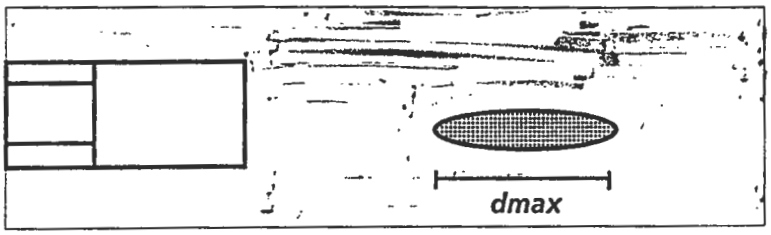
Maskinen måste vara utrustad på sådant sätt att man kan utföra undersökningsborrning framför borrhuvudet för att informera sig om grundförhållandena. Syftet är här att man i god tid skall kunna för bereda drivning för nya förhållanden.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Speciella problem att lösa

I moränen finns block av sådan storlek att de inte utan nedbrytning kan transporteras genom tunnelborrmaskinen. Beställaren har gjort en uppskattning av frekvens och storlek på de block som kan som kan förväntas dyka upp längs tunnelsträckningen. Det är en inte oväsentlig mängd block. Även om TBM är utrustad med diskskär så är det rimligt att antaga att bergsblocken inte helt kan brytas ned till storlekar som är anpassade till transportsystemet. Följdaktligen måste man taga hand om dessa block eller blockrester på något annat sätt och det är alltså upp till entreprenören att finna ut någon lämplig lösning.

Block i morän

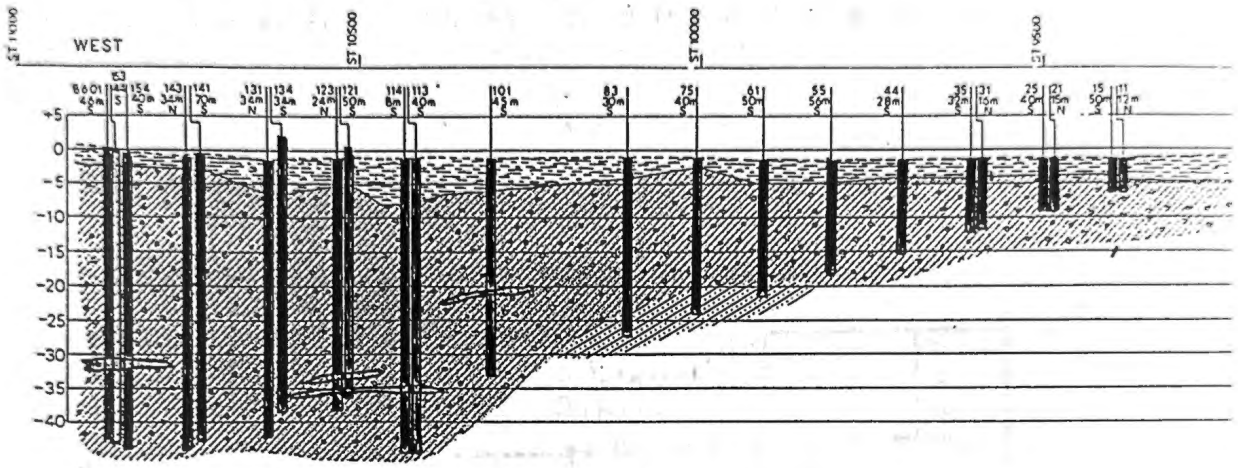


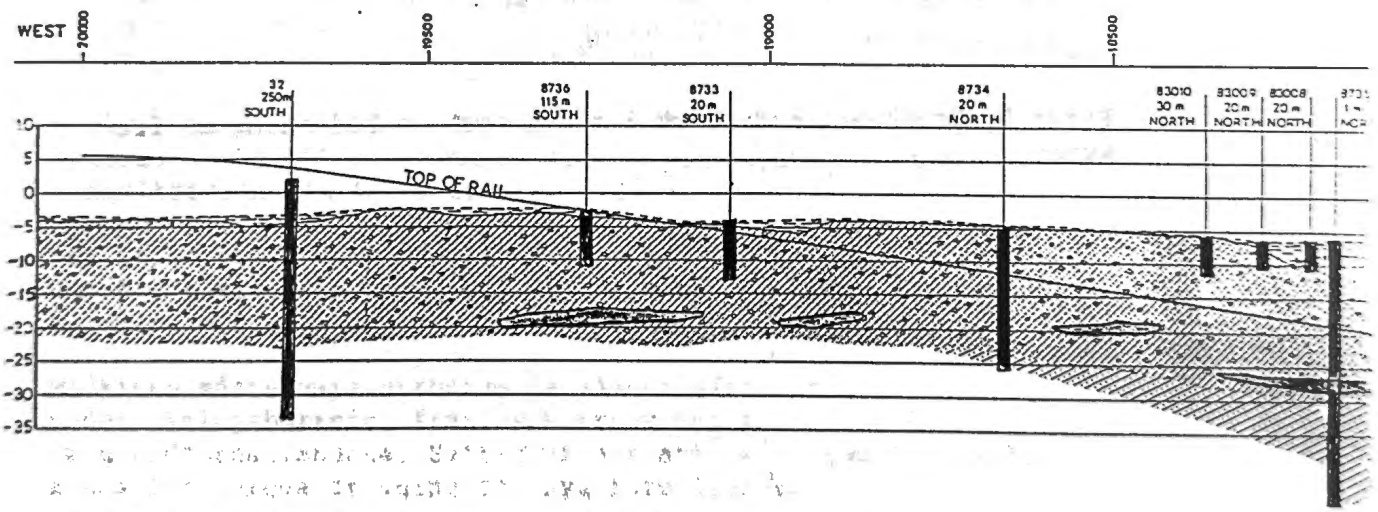
dmax	antal block / km tunnel
1,1 - 1,5 m	50 st
1,5 - 2,0 m	5 st
2,0 - 2,5 m	0,5 st

Figur 8. Problemet med block i morän samt en bedömning av frekvens.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Ett annat problem som också har utpekats i anbudshandlingarna är smältvattenfickor. I moränlagret finns linser av sandig karaktär som sannolikt har uppstått i samband med isavsmältning. De är mycket mer vattengenomsläppliga än den omgivande moränen. När man stöter på en sådan ficka kan man förvänta vattengenombrott som kan ge materialtransport och instabil front om fronten inte är trycksatt. Är fronten trycksatt så är detta inte något problem.





Figur 9. Smältvattenfickor (sandfyllda) i morän.

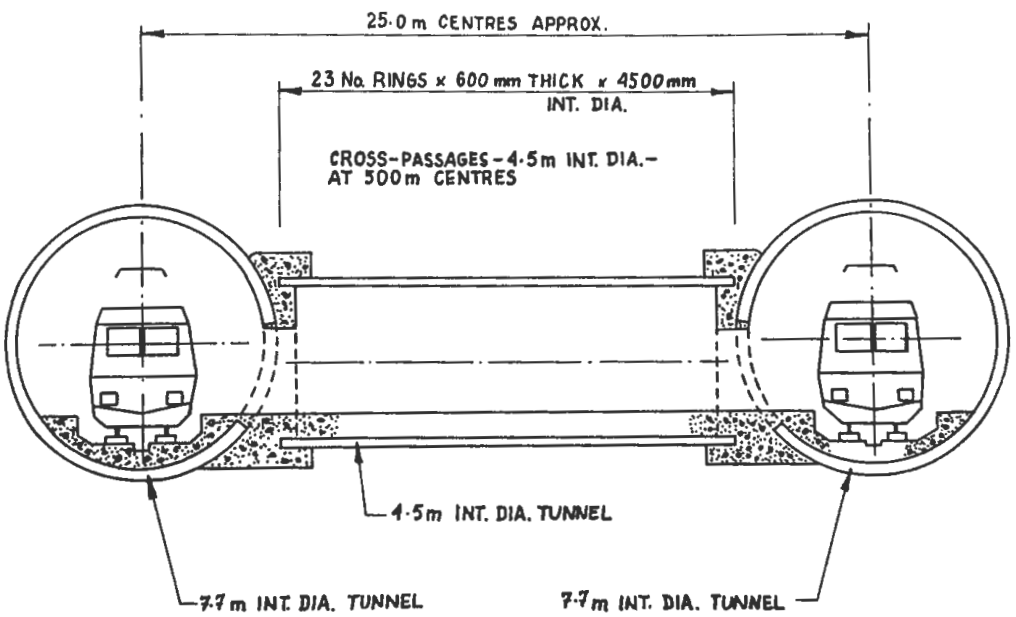
© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Smältvattenfickorna kan även enligt handlingarna vara lerfyllda. Är leran väl konsoliderad bör dessa inte vara alltför problematiska. Skulla leran å andra sidan vara löst lagrad så blir naturligtvis fronten instabil om den inte är trycksatt.

Tvärförbindelser

De två tunneltuberna skall förses med tvärförbindelser på var 250:e meter. Det är sannolikt av säkerhetsskäl som man vill ha dessa förbindelser.

Som tidigare nämnts förses de sektioner där förbindelserna skall göras med speciella element som är designade för demontering. Vid utförande av dessa tvärförbindelser har man tänkt sig använda sig av injektering för att begränsa eventuella vattenläckage. Elementen i huvudtunneln skall därför förses med speciella genomförningar för att underlätta borrningen för förinjekteringshålen. Enligt handlingarna kan man tänka sig att utföra den temporära förstärkningen i tvärtunnlarna med sprutbetong som är armerad. En sekundär inklädning med gjutbetong följer därpå.



Figur 10. Utförande av tvärtunnlar var 250:e meter.

Tvärtunnlarna i sig är ett stort arbete, och utförandet kommer säkert att inverka störande på drivningen av huvudtunnlarna.

© 1988 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Borrad tunnel eller sänktunnel?

Kommer det att bli en borrad tunnel eller en sänktunnel? Vore den den frågan enkelt besvarad skulle inte beställaren inbjuda entre prenörsgrupperna att ge tre stycken helt separata enbud för de skil da tunnellösningarna. Vid kanaltunnel är det uppenbart så att en sänktunnel inte kunde tävla med en borrad. Vad är det då som skiljer Stora Bält-tunneln från kanaltunneln. Som jag ser det är det ett antal faktorer som gynnar det borrade alternativet.

- Tunnel har en längd av närmare 50 km, stora längder gynnar borrning.

- Merparten av de geologiska förhållandena längs tunneln är relativt gynnsamma för borrning. Man kommer inte att arbeta med vattentryck på sig från den engelska sidan. Skulle man stöta på vatten så injek terar man tätt.

Väderlekan i den engelska kanalen är betydligt hårdare än i Stora Bält vilket försvårar sänkoperationer av tunnelelement.

Det är alltså klara skillnader mellan kanaltunneln och Stora Bält förbindelsen. Men då jag själv är involverad i anbudsgivningen av den borrade tunneln så tror jag på det alternativet.