© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

# BETONGINKLÄDNAD AV TUNNEL VID HALLANDÅSPROJEKTET

Åke Hansson och Kenneth Rosell, Banverket

## Inledning

Banverket Södra banregionen bygger tunnlar genom Hallandsås som en del av utbyggnaden av Västkustbanan. Den planerade omfattning av projektet består av två enkelspårstunnlar med vardera längd på 8600 m.

År 1989 startade ett antal geologiska förundersökningar för att fastställa bergets kvalitet. Undersökningarna omfattade berggrundsgeologiska, geofysiska, hydrogeologiska och bergmekaniska undersökningar. Arbetet omfattade även hammar- och kärnborrningar. Undersökningarna sammanställdes och presenterades 1992 i ett förfrågningsunderlag som primärdata, d v s undersökningsresultatet presenterades utan någon geologisk-bergmekanisk prognos. Undersökningarna indikerade ett berg med varierande kvalitet, bl a med vittrade zoner, berg med hög sprickfrekvens och hög vattenföring. Två stycken enkelspårstunnlar planerades genom Hallandsås, från Båstad i norr till Förslöv i söder.

Svenska Vattendomstolen medgav att inträngande grundvatten fick avledas med maximalt 33 liter/sekund från båda tunnlarna. Fördelat utmed tunnelsträckan blev det 3,5 liter/sekund och 1000 meter dubbeltunnel.

Totalentreprenaden med Svenska Kraftbyggarna AB startade hösten 1992 med förberedelser för tunnelpåslagen. Kraftbyggarna valde att använda en TBM (open gripper hard rock TBM) för tunneldrivningen. Projektet var planerat att slutföras under 1996. Efter ca 2 månader och 13 m borrning, i den norra randzonen, togs beslutet att backa ut maskinen och bygga om den. Planerna var då att driva konventionellt genom norra randzonen och sedan fortsätta borrningen med TBM när man kommit in i bättre berg. Beslutet att helt övergå till konventionell tunneldrivning togs dock i januari 1995. Under 1995 valde Kraftbyggarna Entreprenad AB att bryta kontraktet med Banverket. 18 % av totala tunnelsträckan var då driven.

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

# Geologi

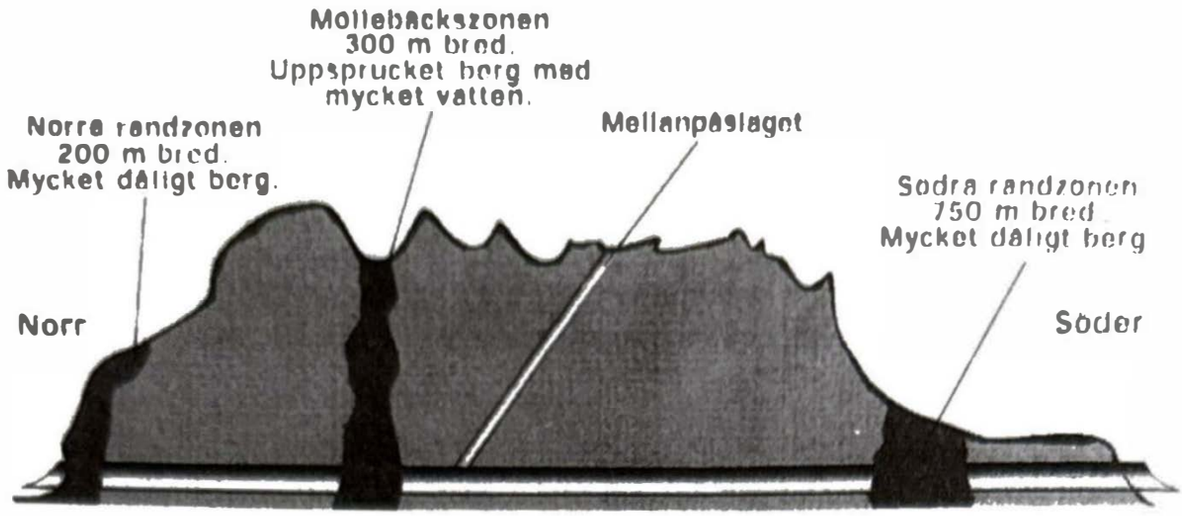



*Fig 1 – Hallandsås svaghetszoner.*

I samband med upphandling av ny entreprenör, 1995 – 1996, kompletterades undersökningarna med kärnborrhål och geoelektriska mätningar. Samtliga geologiska undersökningar redovisades i en översiktlig bergprognos. I början av 1996 påbörjade Skanska arbetena i en generalentreprenad. Denna gång planerades tunneldrivningen att utföras med konventionell nordisk teknik genom borrning och sprängning. Projektet planerades då att slutföras under 2000. Projektet stoppades i oktober 1997 efter en giftutsläppsolycka men även för att givna vattendomar inte kunde innehållas. Då hade totalt en tredjedel av totala tunnelsträckan drivits.

Generellt karaktäriseras de båda entreprenaderna av komplicerad tunneldrivning genom norra och södra randzonerna samt extrema svårigheter att uppnå erforderlig täthet mot inträngande grundvatten genom enbart cementinjektering vid tunneldrivning från norra påslaget. Båda entreprenaderna har därför också präglats av utveckling av injekteringsmetoder och injekteringsmedel.

För att klara vattendomens krav på täthet i de redan utsprängda tunneldelarna, beslöt Banverket att utföra efterinjektering från södra påslaget. För att täta de mest läckande tunneldelarna från norra påslaget beslöts att det skulle utföras en betonginklädnad. Detta arbete avslutades under januari år 2001.

## Konstruktionslösning

Under 1997 gjordes bedömningen att det inte var möjligt att erhålla erforderlig täthet med enbart cementinjektering för de mest läckande tunneldelarna vid norra påslaget. Därför beslöt Banverket att utföra någon typ av betonginklädnad för de aktuella tunnelsträckorna. Metodvalet för betonginklädnaden utfördes genom att olika alternativ utvärderades. Följande metoder diskuterades i detta sammanhang:

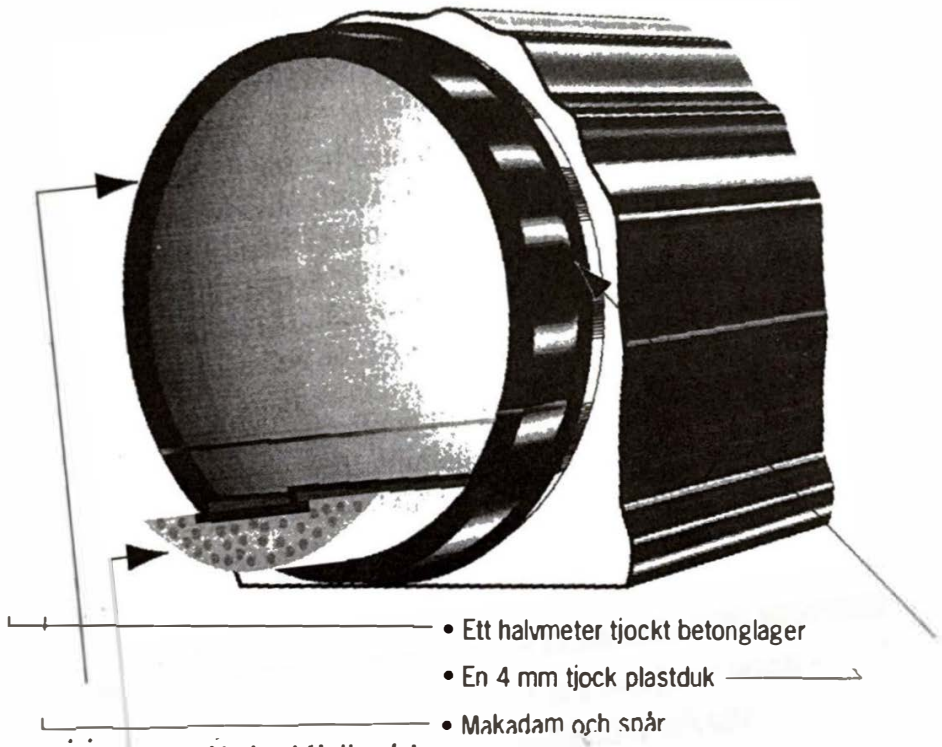
© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

- Inklädnad med platsgjuten betong och plastmembran.
- Inklädnad med platsgjuten betong och plåtmembran.
- Inklädnad med platsgjuten armerad betong.
- Inklädnad med platsgjuten armerad betong och plastmembran.
- Montering av prefabricerade armerade betongelement.

Den teknik som kunde ge de bästa referenserna gällande utförande och täthet var inklädnad med platsgjuten betong och plastmembran. Trots de stora erfarenheterna med denna metod, speciellt från kontinenten, fanns det dock inga erfarenheter av det stora dimensionerande vattentrycket ( 150 m v p) som inklädnaden vid Hallandsås skulle utsättas för. 75 m v p var det högsta dimensionerande vattentryck för internationella referensobjekt som Banverket kunde hitta. Detta innebar att särskild omsorg fick läggas vid projekteringen av inklädnadens tätningssystem.

Under projekteringen diskuterades både cirkulärt och elliptiskt tvärsnitt. Fördelen med att använda det elliptiska tvärsnittet var att strossningsarbetet kunde minimeras. De maximala böjmoment som kunde förekomma beräknades för båda alternativen. Beräkningarna visade att den cirkulära sektionen fick avsevärt mindre böjmoment vinkelrätt mot tunnelns längdaxel än den elliptiska sektionen under de lastförhållande som kunde förekomma. Det innebar bl a att omfattningen av armering kunde minimeras vid cirkulärt tvärsnitt.

En oarmerad cirkulär betongkonstruktion med ett yttre och inre betongskal med mellanliggande plastmembran valdes (Fig 2).




*Figur 2 – Betonginklädnad Hallandsås*

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

För denna konstruktion beräknades alla berglaster tas upp av en traditionell nordisk bergförstärkning. Det yttre betongskalets funktion är primärt att utgöra ett jämt underlag för membranmontaget. Den minsta betongkvaliteten som ställdes på detta yttre skal var motsvarande K30.

Tätmembranets funktion är att täta mot grundvattenläckaget. Ett 4 mm tjockt geomembran av polyetylenplast valdes för ändamålet.

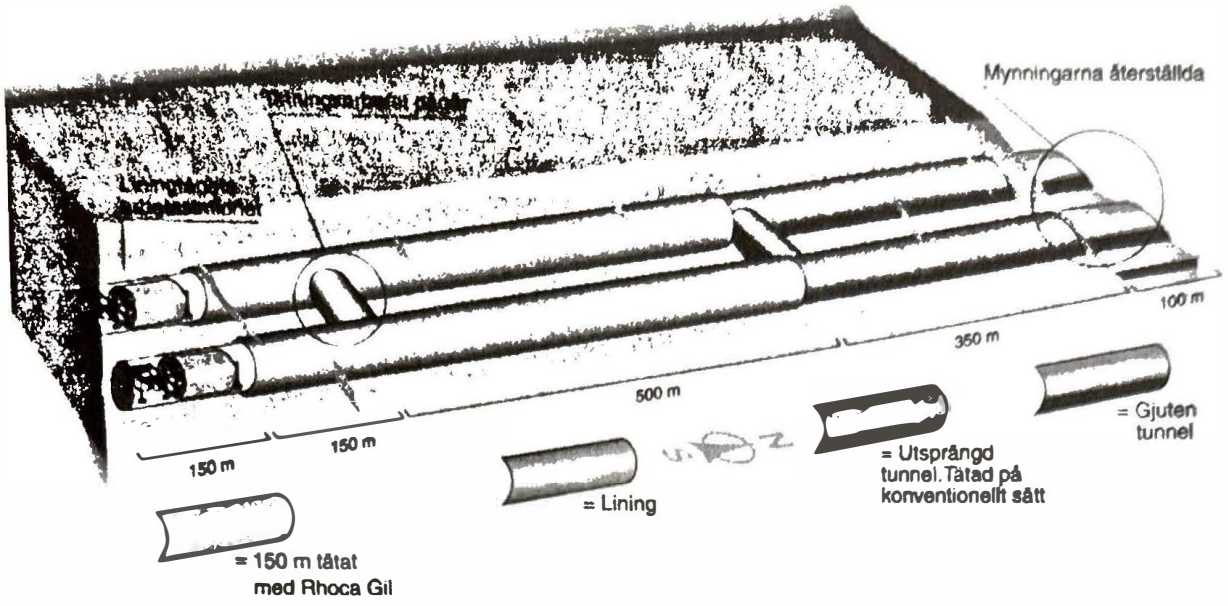
Det inre betongskalets funktion var stå emot en vattenlast i form av grundvattentrycket. Vid dimensioneringen antogs att vattentrycket mot tunnelinklädnaden styrdes av en grundvattenyta belägen ca 5-10 m under markytan. Detta resulterade i ett största vattentryck av 150 m över tunnelns centrumlinje. Följaktligen blev trycket mot tunnelinklädnadens botten ca 5 m högre och motsvarande 5 m lägre mot tunnelinklädnadens tak. Övriga laster som inre betongskalet dimensionerades för var:

| | |
|---|---|
| Permanenta laster | Egentyngd hos konstruktionen. |
| | Last från tunnelinredningen. |
| | Krympningen. |
| Variabla laster | Tåglaster. |
| | Temperaturlaster. |
| Olyckslaster | Urspårning. |
| | Laster från urfallande bergblock. |

Det inre betongskalet skulle utföras i minsta betongkvalitet motsvarande K45. För att konstruktionen skulle kunna klara tåglasterna fick betongskalet nedre del utformas med dubbla lager nätarmering.

Frågan var vilka tunnelsträckor på norr som skulle kläs in med betong ? Första sträckan från tunnelmynningen till första tvärtunneln utgörs av bitvis kraftig lervittrad gnejs och bitvis starkt uppsprucken gnejs. Det bedömdes som att strossning i dessa sträckor skulle medföra mycket stora svårigheter. När grundvatteninläckaget för denna sträcka är relativt låg, ca 5 l/s vid fullt grundvattentryck, togs beslutet att starta inklädnaden efter tvärtunnel 1. Tunnelsträckorna närmast stuffarna, ca 120 meter, utfördes injektering med det giftiga injekteringsmedlet Rhoca Gil. I detta område fanns, trots saneringsåtgärder, en viss mängd giftiga monomerer kvar i berget som var lösta i vatten. Det bedömdes då i samråd med myndigheter att det var olämpligt att täta dessa båda tunnelsträckor med betonginklädnad, vilket dessutom sannolikt skulle fördröja saneringen. Beslut togs då att inte utföra en betonginklädnad för detta saneringsområde. Beslut togs också att utföra en betonginklädnad i tvärtunnel 2. Totalt beslutades att 2 x 640 meter av huvudtunnlarna samt 22 meter tvärtunnel skulle kläs in med betong (Fig.3).

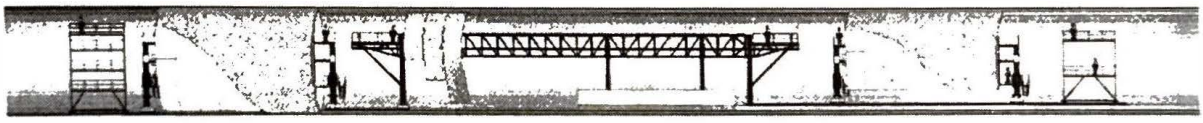
© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare




*Figur 3 – De betonginklädda delarna Hallandsås.*

## Formutrustning

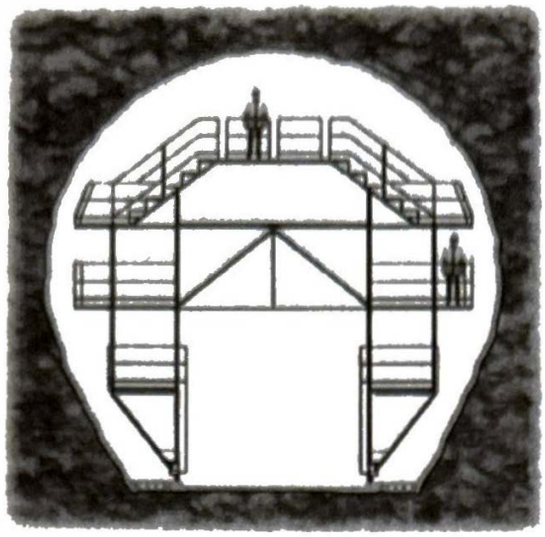
Formutrustningen utfördes som högmekaniserade hopfällbara konstruktioner bestående av 5 st mobila enheter (Fig 4).



*Figur 4 - Formtåget*

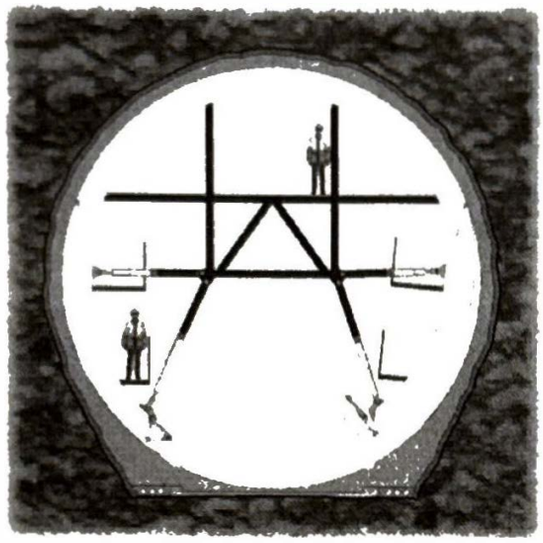
Vid första enheten utfördes kontroll av att tunnelsektionen samt montering av dränagesystem för att avleda punktläckage (Fig 5).

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare



*Figur 5 – Ställning för förberedande arbeten*

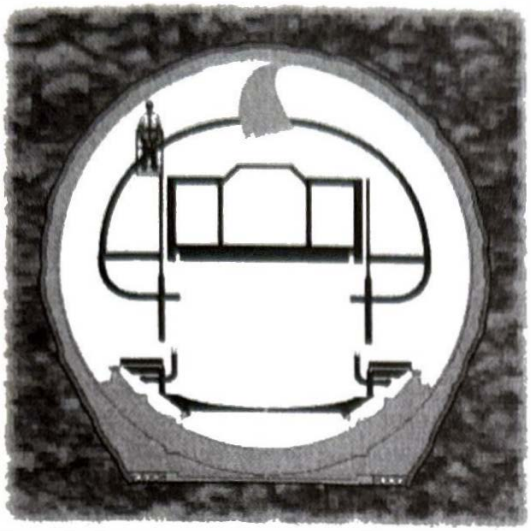
Vid andra enheten göts den yttre betonginklädnaden (Fig 6).



*Figur 6 – Formutrustning yttre betonginklädnaden*

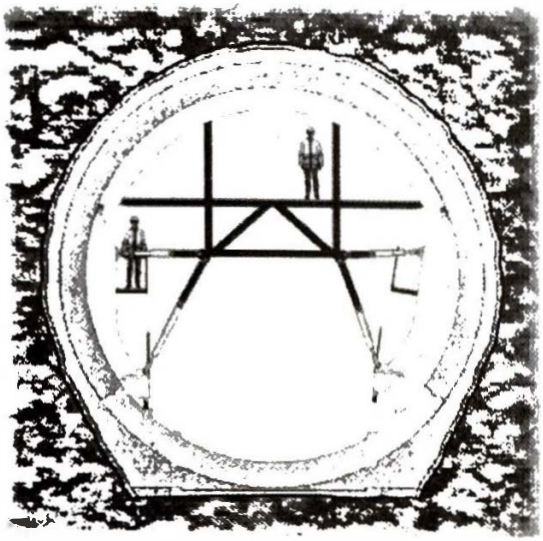
Tredje enheten var sammansatt för att klara både montering av membran, bottenarmering och gjutning av bottendelen för den inre betonginklädnaden (Fig 7). Huvudanledningen för denna utformning var att försöka minska den tid då membranet i botten stod oingjuten och exponerad för eventuella skador.

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare



*Figur 7. Formutrustning för membranmontage och gjutning av bottendel.*

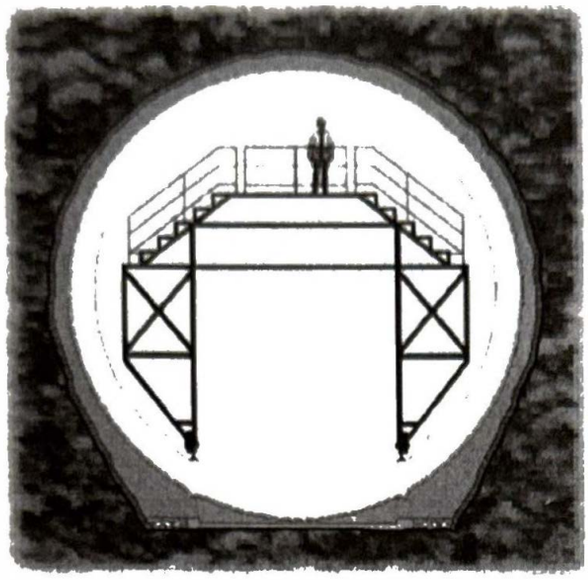
Gjutning av valvet för den inre betonginklädnaden utfördes vid fjärde enheten (Fig 8).



*Figur 8. Formutrustning för gjutning av valv*

Vid femte enheten utfördes slutligen uppsågning för brottanvisningar av inre betonginklädnaden och rensning av ytor osv (Fig 9).

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare



*Figur 9. Ställning för sågning och efterarbeten*

Längden för formtåget var under gjutning minst 190 m. I parkerat tillstånd kunde längden minskas till ca 100 m. Enheterna utformas så att transporter av personal, material, media och maskiner kunde förekomma igenom formutrustningarna när de stod parkerade. Detta innebar att gjutningsarbetet endast kunde utföras i en av dubbeltunnlarna i taget, då alla transporter måste gå igenom en av tunnlarna. En förutsättning för gjutningsarbetena var också att betongtransporter kunde ske till båda ändarna av formtåget.

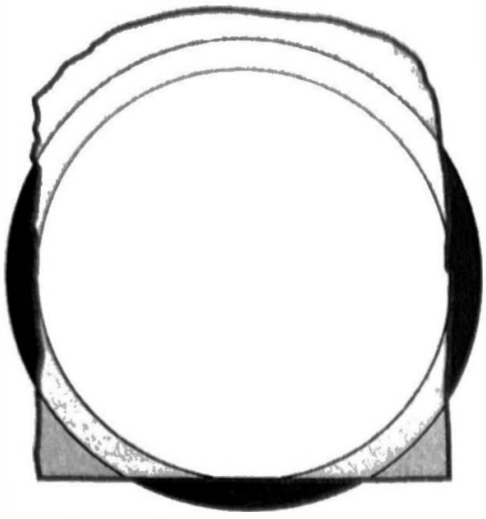
## Utförande

Byggandet av inklädnaden utfördes i en stegvis process omfattande nedanstående aktiviteter.

1. Strossningsarbeten.

Eftersom den aktuella tunnelsträckan var driven med en sektion som inte var anpassad för inklädnad var det tvunget att vidga dessa till ett cirkulärt tvärsnitt (Fig 10).

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare



*Figur 10 - Utvidgning av tunnelsektionen.*

I detta arbete ingick också injekteringsarbete, utförande av driftsförstärkning och permanentförstärkning.

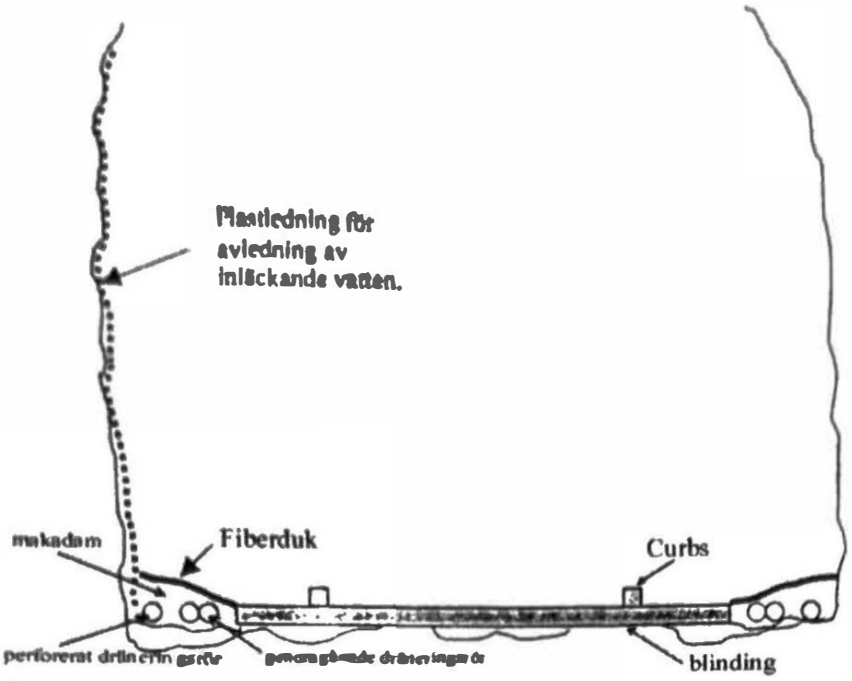
Detta arbete påbörjades i juni 1998 och avslutades under oktober 1999. Då hade tvärsnittet, på en sträcka av 1550 meter, utvidgats till cirkulärt tvärsnitt.

2. Gjutning av betongplatta (blindning)

För att erhålla ett gott underlag för betonginklädnaden göts en betongplatta på botten av tunneln. Denna gjutning föregicks av att syltan rensades tills att 50 % av berget i botten blev blottlagd. Betongplattan göts längs hela tunnelbotten förutom en meter bred remsa på båda sidor av tunneln där dräneringsledningar placerades.

På plattan göts sedan balkar för montage av räls, s k Curbs (Fig.11).

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare




*Figur 11 – Bottenplattan med dräneringsrör*

## 3. Barriärer

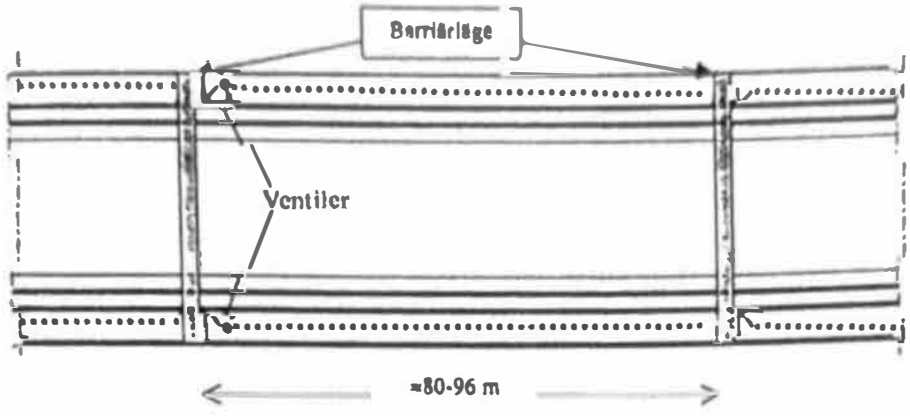
För att förhindra vattenflöde längs med tunnlarna i gränssnittet berg - inklädnad byggdes det barriärer av betong var 80:e - 96:e m längs tunneln. Gjutningarna av barriärerna föregicks av att syltan rensades tills att 100 % av berget i botten blev blottlagd. Tätningen mot barriärkonstruktionen utfördes med bentonitband.

Vid ändarna av själva inklädnaden kompletterades dessa barriärer med ridå- och kontaktinjekteringar.

## 4. Montage av dränledningar

Ett tillfälligt dräneringssystem installerades för att klara det inläckande grundvattnet under byggtiden. Varje ledningsbädd innehöll minst tre ledningar. Ett perforerat rör placerades mellan två barriärer med uppgiften att dränera sträckan mellan barriärerna och två huvuddräneringsrör som svarade för dräneringen för hela den betonginklädda sträckan och för dränering innanför den aktuella betonginklädnaden. Det perforerade dränageröret anslöts till huvuddräneringsrör vid barriärerna och när inklädnaden var klar mellan två barriär stängdes det perforerade dräneringsröret med en ventil (Figur 12).

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare




*Figur 12 – Det tillfälliga dräneringssystemet*

5. Vägg- och takdränage.

För att kunna klara gjutningarna på ett kvalitetsmässigt acceptabelt sätt var det tvunget att leda bort det vatten som läckte utmed tunnelväggarna via vattenavledande dräner ner till dräneringsbädden. Eftersom det fanns stora restriktioner från konstruktören på hur stor del av ytan som fick täckas av dränagemattor utfördes denna avledning med hjälp av plastkoppar och plastledningar.

6. Gjutning av den yttre inklädnaden.

Varje gjutetapp omfattade en längd på 16 m och innehöll över 300 $m^3$ betong. Gjutningen startade vid föregående gjutetapp och fylldes ut mot avstängaren. Detta arbete påbörjades under januari 1999 och avslutades januari 2000.

7. Fyllning av kaviteter i taket bakom den yttre inklädnaden.

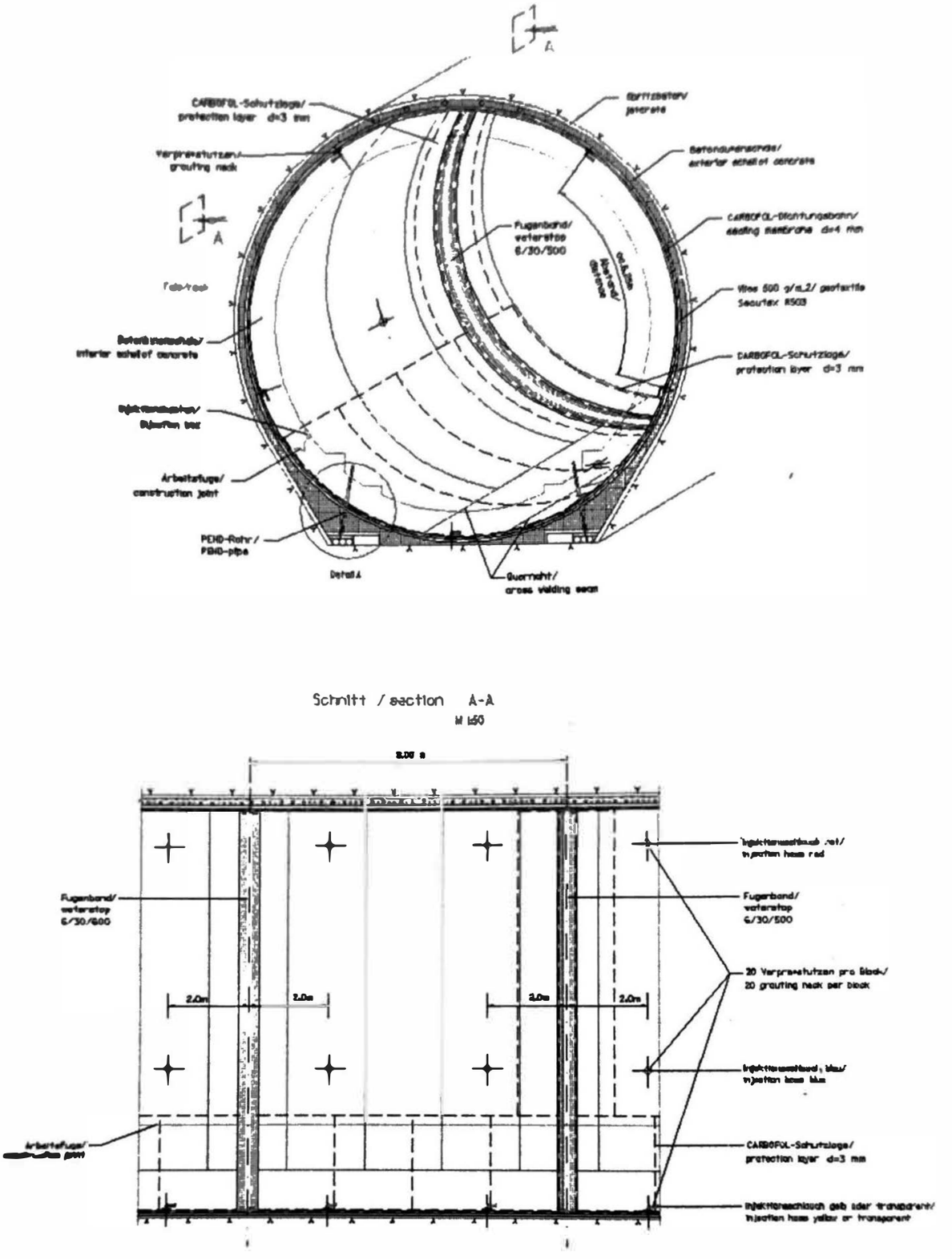
För att fylla ut eventuella kaviteter mellan sprutbetong och det yttre inklädnaden monterades injekterings- och avluftningsslangar i tunnelhjässan. Dessa slangar injekterades före formflytten.

8. Montage av plastmembran samt tätningssystem.

För att kunna spåra eventuella läckage sektionerades inklädnaden radiellt med fogband var 8:e m på den torra sidan av membranet. För att förhindra vattentransporter mellan membranet och den yttre inklädnaden, längs med tunnlarna, monterades fogband även på den våta sidan av membranet. Dessa placerades radiellt i vartannat block vid gjutningen av den yttre betonginklädnaden. Fogbanden svetsades ihop med plastmembranet. Som underlag mot den yttre betonginklädnaden placerades först ett

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

lager med geotextil alternativt ett lager med dränerande plastmatta (Grid). I bottendelen monterades ytterligare ett lager plastmembran som skydd (Fig.13).




*Figur 13 – Montering av plastmembran.*

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

För att kunna utföra kompletterande tätning vid läckage genom membranet försågs plastmembranet med genomföringar som möjliggör injektering på både den våta och torra sidan av inklädnaden.

Membranet monterades mot den yttre betonginklädnaden med hjälp av speciella fästanordningar "rondeller" som spikades fast i underlaget. Membranet värmesvetsades sedan mot dessa "rondeller". Membranvåderna svetsades med dubbla sömmar. Dessa sömmar kontrollerades sedan kontinuerligt genom täthetsprovning med tryckluft. Lagningar och genomföringar testades med vakuumprovning.

I samband med membranmontaget monterades även slangar för fyllning av eventuella kaviteter efter gjutningen av takdelen.

9. Gjutning av botten på den inre inklädnaden (Invert).

Även här omfattade varje gjutetapp en längd på 16 m. Före gjutningen monterades, med hjälp av en travers, armeringskorg i bottendelen. Ca 65 $m^3$ betong behövdes för denna gjutetapp.

10. Gjutning av väggar och tak (Arch).

Med hjälp av sista formen göts den sista gjutetappen. Denna gjutning följde i princip metoderna vid gjutning av den yttre betonginklädnaden. Ca 230 $m^3$ betong behövdes för denna gjutetapp. Detta arbete påbörjades under maj 1999 och avslutades under mars 2000.

11. Injektering av kaviteter

Formutfyllnaden i hjässan säkerställdes före formflytt genom injektering av slangar.

12. Sågning av sprickanvisning

För att reducera uppkomsten av krympsprickor sågades sprickanvisningar, 0,25 m djupa spår, mitt på varje gjutetapp.

13. Efterbehandling

De nygjutna betongytorna besprutades med membranhärdare omedelbart efter formrivningen.

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

## 14. Trycksättning

När arbetena planerades var tanken att trycksätta betonginklädnaden etappvis mellan barriärerna när erforderlig betonghållfasthet hade erhållits. Eftersom det fanns osäkerheter om dräneringsrörens hållfasthet beslutades att trycksättningen skulle ske för längre etapper, nämligen:

I. Hela sträckan mellan tvärtunnlarna.

II. Sträckan mellan tvärtunnel 2 och sista blocket.

III. Tvärtunnel 2.

Trycksättningen utfördes genom att tätinjektera dräneringsledningarna med expanderande cementpasta. Detta arbete påbörjades under maj 2000 och avslutades i december 2000.

### Kostnader

Kostnaderna enbart för betonginklädnaden uppgår till ca 125 000 kr / tunnelmeter. I denna kostnad finns varken arbetsplatsomkostnader eller kostnader för formar medräknade.

### Kapaciteter

Efter en lång inkörningsperiod uppnåddes en takkapacitet på 37 meter/vecka, vilket innebar en cykel på tre dygn för varje gjutetapp.

### Produktionserfarenheter

Följande erfarenheter kan noteras (januari 2001):

- Med vald konstruktion går det att uppnå en tät tunnel där läckaget understiger 1 l/min och 100 meter tunnel.
- Hittills verkar utförandet av plastmembranet fungera mycket bra. Endast ett fåtal punkteringar har noterats då det inbyggda tätningssystemet behövt användas.
- Under produktionen har det några gånger varit problem med att kaviteter har uppstått i den gjutna inre betonginklädnaden. Trots injekteringar efter gjutningarna har dessa kaviteter funnits kvar i tunnelhjässan. En av dessa oupptäckta kaviteter orsakade en punktering på membranet efter trycksättningen (december 2001).
- Ledningarna för det tillfälliga dränagesystemet måste utformas i stål för att trycksättning ska kunna göras etappvis mellan barriärerna.

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

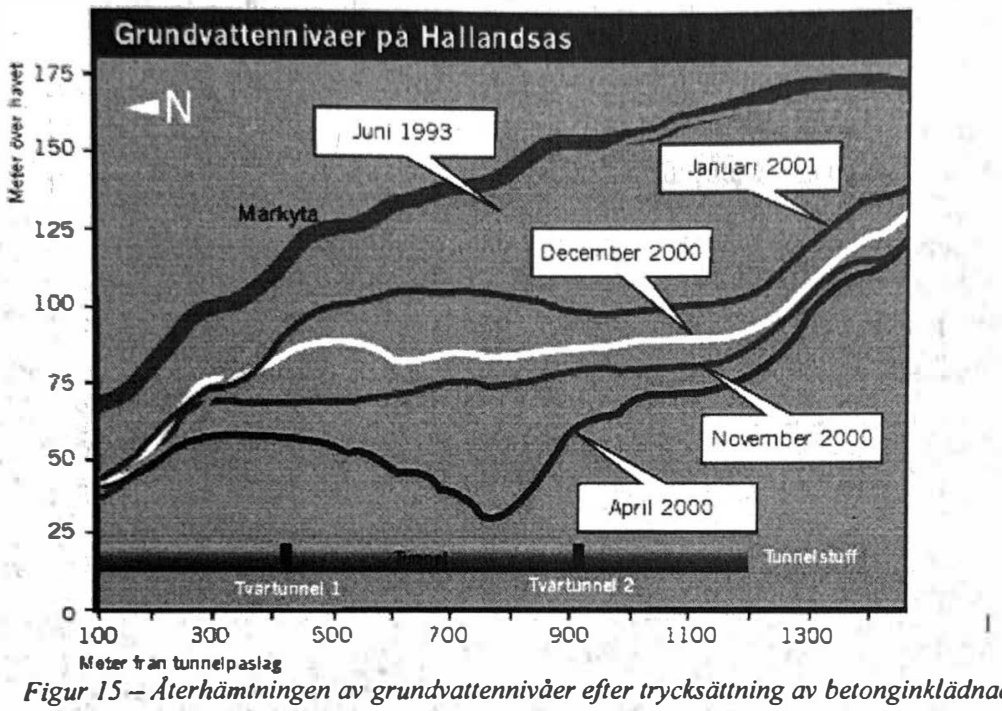
- Tidsåtgången för strossningsarbetet undervärderades vid planeringen. Dessutom undervärderades logistikproblemen mellan bergarbetena och arbetena med inklädnaden, vilket bl a orsakade förseningar av projektet.

- Utformningen av inklädnaden av tvärtunnel 2 var komplicerad vilket medförde stora kostnader och stor tidsåtgång. Även tidsåtgången av detta arbete undervärderades vid planeringen.

- Generellt är den valda konstruktionen en mycket dyr tätningsmetod.

## Erfarenheter från trycksättning

Återhämtningen av grundvattennivåerna har gått mycket fort vilket illustreras nedan (Fig.15).




*Figur 15 – Återhämtningen av grundvattennivåer efter trycksättning av betonginklädnad.*

Under vintern har grundvattentrycket ökat snabbt och uppgår nu (januari 2001) över 8 bar.

## Fortsatt tunneldrift

Under 1999 fick Banverket av regeringen i uppdrag att utreda om det är möjligt att genomföra tunnelprojektet på ett miljömässigt acceptabelt sätt. Utredningen överlämnades den 14 november 2000 och visar vilka tekniker som kan användas för genomförandet samt vilka konsekvenser teknikvalet får på miljön, både i bygg- och i driftsskedet.

© 2001 Svenska Bergteknikföreningen och författare

Två metoder utvärderades:

- Borra och spränga (B&S) med betonginklädnad, utförd med plastmembran.
- Tunnelborrningsmaskin (TBM) med inklädnad av prefabricerade betongelement.

Banverket bedömer båda metoderna som tekniskt möjliga och metoderna kan även kombineras. Båda metoderna har sina för- och nackdelar. En av nackdelar för B&S är att den öppna sträckan mellan front och tät inklädnad blir ganska stor, ca 500 meter, vilket innebär att grundvatteninläckaget blir ganska stor under byggtiden.

## Diskussion och slutsatser

Projekt Hallandsås är ett av de första undermarks projekten i Sverige där höga täthetskrav har kombinerats med svåra geologiska- och hydrogeologiska förhållanden, i synnerhet då höga grundvattentryck (> 100 m v p). Det har här visat sig, att den i norden framgångsrika tätningsmetoden med cementinjektering, ej fungerat i erforderlig omfattning.

Fortsätter trenden från myndigheter att ställa allt högre täthetskrav på undermarksbyggande innebär det sannolikt att tidigare använda tätningsmetoder med cementinjektering måste kompletteras med inklädnader. Konsekvensen blir att kostnaderna för undermarksbyggande ökas så kraftigt att andra alternativ måste övervägas. Det är därför viktigt att myndigheterna beaktar de generella miljövinsterna med undermarksbyggande mot eventuella miljöbelastningar som en grundvattensänkning kan medföra.