

# FRYSTEKNIK.

## Utveckling av förundersökningsmetoder i samband med tunnelbyggande i dåligt berg

Verifiering av metoder och teorier i Möllebackzonen,  
Hallandsåprojektet  
SBUF 11766  
En Förstudie

SKANSKA SVERIGE AB

SLUTRAPPORT, Rev 2

Januari 2010

**SKANSKA**

## SAMMANFATTNING

---

Utvecklingsprojektet är en förstudie av frysning av jord på mycket stort djup.

Frysning av jord och berg är en vanligen säker metod att stabilisera och/eller tätta ”byggnadsmaterialet” i samband med exempelvis tunnelbyggnad. Emellertid är kunskapen om det frysta jord- och bergmaterialets korttidshållfasthet, krypegenskaper och sättningsskarakteristik på stora jord- och bergdjup ej fullständig. Det finns idag oklarheter för hur olika dimensioneringsparametrar behandlas i olika dimensioneringsmetoder för temporärt frysta konstruktioner. Det finns även oklarheter i hur störda prover i förundersökningsmaterial skall behandlas för att tolkas på rätt sätt i respektive dimensioneringsmetod.

Projektets övergripande syfte är att öka förståelsen för hur jord- och bergmaterialet uppträder under frysnings- och tingsprocessen då detta sker på stora djup. Detta utvecklingsprojekt har genomförts som en förstudie.

Utvecklingsprojektet har genomförts i nära samarbete mellan Skanska, Skanska Teknik AB, KTH och LTU. LTU är ledande inom området cykliskt fryst jord och permafrost.

Projektets målsättning var att ge värdefull information om hur förundersökningar skall utföras och värderas i samband med byggande av anläggningar på stora djup.

Projektet har bedrivits parallellt med forskning som redan utförts/utförs inom det frysta området, Möllebackzonen på Hallandsåsen.

På grund av praktiska svårigheter att åstadkomma beständiga och relevanta prover som kan analyseras i laboratorium (LTU) har det övergripande syftet med projektet inte kunnat uppnås. Projektet har dock gett värdefulla erfarenheter om möjligheter till att ta in situ prover i fryst jord/berg material. Dessa erfarenheter kommer till nytta i framtida frysprojekt i allmänhet och för fortsatt frysning i Hallandsåsprojektet i synnerhet.

Projektet är ett exempel på hur det praktiska utförandet får ett avgörande inflytande på slutresultatet i forskningsuppdraget. I detta fall har en hög målsättning inte kunnat uppnås på grund av de speciella förutsättningar och den miljö man mött i verkligheten på arbetsplatsen, samt av de mycket komplexa och speciella geologiska förutsättningar som råder i Möllebackszonen i Hallandsåsprojektet.

Projektet demonstrerar snarare svårigheter med provtagning för dimensionering samt uppföljning av frysprojekt. På grund av att all provtagning endast utgör en ett begränsat urval ur den geologiska formationen, måste design och utförande innehålla marginaler för de verkliga förhållanden och variationer som kan uppträda vid ett verkligt utförande.

## BAKGRUND

---

Frysning av jord och berg ökar stadigt i omfattning i Sverige och utomlands. Metoden används i huvudsak för att stabilisera och hydrauliskt täta jord och berg men även andra tillämpningar förekommer.

Kunskapen kring frysning av jord och berg, speciellt avseende korttidshållfastheten, krypning och sättningar under frys- och tiningsprocessen på stora djup är emellertid begränsad.

I designarbetet för frysning och TBM- drift genom Möllebacks zonen har en omfattande teoretisk och praktisk erfarenhet erhållits. Möjligheten till att säkert kunna följa upp arbetet med förbättrad analys av det frysta materialets verkliga egenskaper är därför av stort värde. Förutsättningen är dock att provtagningen är praktiskt genomförbar och inte orsakar utökade risker i projektet.

Genom medverkan av bl a professor Sven Knutsson har värdefull kunskap från tjälforskningen vid Luleå Tekniska Universitet att tillförts projektet.

Ett flertal jord- och bergfrysningprojekt är nyligen genomförda i Sverige och utomlands och ett antal planeras. Exempel på nyligen genomförda projekt i Sverige är:

- Botniabanan entreprenad 5415 (Lemminkäinen)
- SL01 Södra Länken i Stockholm (Geofrost Engineering/NCC)
- SL04 Södra Länken i Stockholm (Skanska Teknik)
- Älvsjö dagvattentunnel (Geofrost Engineering/Skanska Teknik)

Exempel på stora jord- och bergfrysningprojekt genomförda i vår geografiska närhet är:

- Köpenhamns tunnelbana, Nørreport Station 2001 (NCC)
- Oslofjordstunneln 1999 (Geofrost Engineering)
- Storabälttunneln 1994
- Helsingfors tunnelbana, Kluuvi cleft 1980 (Lemminkäinen)
- Frysning för avloppsledning Oslo 2008 (Skanska Teknik)

Nya krav från EU som gäller exempelvis arbetarskydd och miljöförhållanden har inneburit att frysmetoden fått en ökad aktualitet vid byggande i jord och berg. EU:s nya ramdirektiv för vattenskydd, ”*Water policy KOM (97)614 slutlig*”, lades fram av EU:s kommission och antogs av EU:s råd våren 1997. I detta ramdirektiv förstärks miljöskyddet för mark och användandet av kemiska produkter i samband med byggandet försvåras.

De nya kraven från EU enligt ovan som även omfattar exempelvis arbetarskydd och miljöförhållanden har inneburit att frysmetoden fått en ökad aktualitet vid byggande i jord och berg.

## SYFTE

---

Det övergripande syftet med projektet är att:

- Genom en förstudie utföra en försöksplanering för kommande laborieförsök på in situ fruset material. Jämförelse av det in situ frusta materialets egenskaper i fruset och tinat tillstånd med material som tagits fram i samband med förundersökningen.
- Skapa en plattform för vidare utveckling och uppbyggnad av kunskap och erfarenhet inom frysteknik i jord och berg.

Målsättningen har varit att ge tillförlitlig information i förundersökningsmaterialet, klarlägga de styrande parametrarna och ge ett effektivare konstruktionsverktyg som tillåter ansvarig konstruktör och beställare att fatta beslut på säkrare underlag. Tillämpning av frysning är en teknik som utnyttjas när andra förstärknings- och tätningsmetoder inte visar sig möjliga. De kostnadsmissiga aspekterna måste därför innefatta en marginal som säkerställer att metoden får avsedd effekt. Ett misslyckande kan innebära att alla åtgärder som vidtagits blir förgäves, samt att sekundära skador och kostnader uppstår.

Utvecklingsprojektet har avgränsats till att sammanställa praktiska erfarenheter för möjlig provtagning av in situ fruset material.

## GENOMFÖRANDE

---

### Utvecklingsprojektet

Utvecklingsprojektet har utförts av Skanska Teknik i nära samarbete med Skanska Vinci HB och varit kopplat till arbetena vid Hallandsåsprojektet.

Projektet har utförts genom;

- Genomgång av hur aktuella dimensioneringsmetoder för frusta tunnlar på stora djup är kopplade till laborieförsök.
- Provtagning på det in situ frusna materialet i den frusta delen av Möllebackzonen på Hallandsåstunneln.
- Försök till laborieförundersökning av prover vid LTU.

De erfarenheter som uppnåtts vid detta projekt är en viktig grund för vidare arbeten i MBZ och i andra liknande projekt.

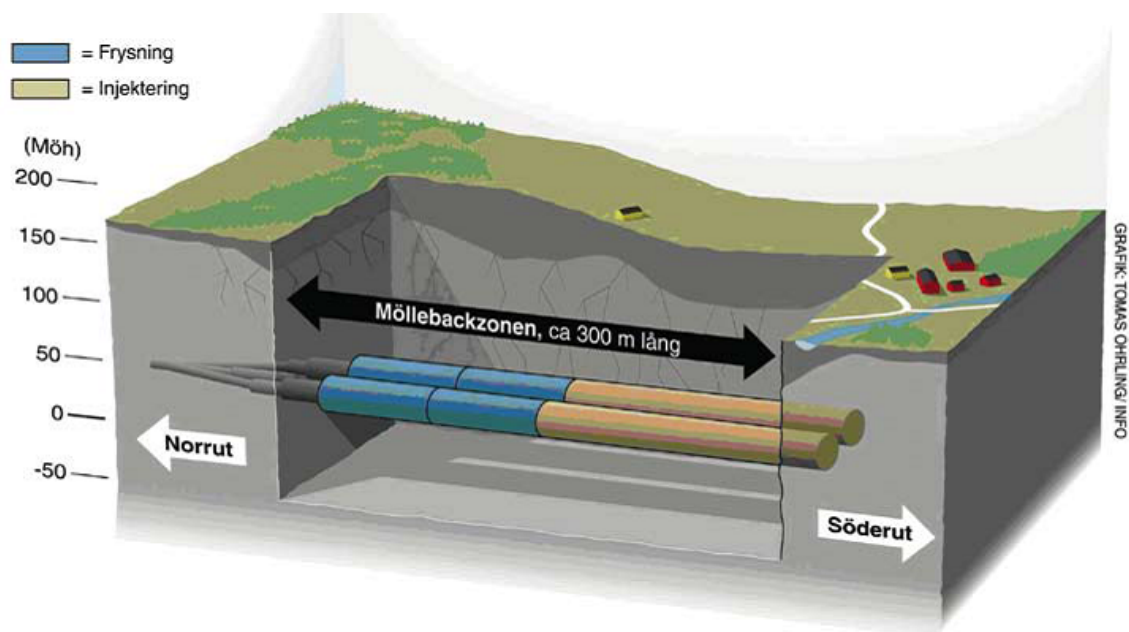
### Projekt Hallandsås – Möllebackzonen

Möllebackzonen (MBZ) är en 300 m lång, komplext uppbyggd och mycket heterogen svaghetszon med bitvis exceptionellt dåligt berg. Till skillnad från de två randzonerna med vittrat berg längs Hallandsås sidor förväntas också höga vattentryck (12-14 bar) och hög vattengenomsläpplighet. Zonen kan principiellt indelas i två delar, en nordlig del (ca 125

m) som domineras av kraftigt vittrat berg med zoner av uppsprucket berg med mycket hög vattengenomsläpplighet, samt en sydlig del (ca 175 m) med krossat och uppsprucket berg med mycket hög vattengenomsläpplighet. Bergförhållandena i MBZ har undersökts med geofysik och med ett flertal kärnborrhål, borrade både från ytan och från tunnelnivån.

Skanska-Vinci förordade ett alternativ med frysning och injektering för att underlätta tunneldrivningen. Den södra delen av MBZ förväntades kunna injekteras för att reducera vattenflödet tillräckligt och därmed minska sannolikheten för problem under tunnelborrningen. Den norra delen bedömdes innehålla för stor andel finmaterial för att framgångsrikt kunna injekteras, varför frysning presenterades. De huvudsakliga stegen för att åstadkomma förbehandlingen av MBZ har varit (se också Figur nedan):

- Drivning av en 600 m lång accesstunnel från existerande tunnelfronter på norra sidan fram till MBZ.
- Uttag av borrhållare för frysborrning.
- Borrning och installation av 16 st horisontella fryshål och 4 observationshål i en ring med 8 m diameter parallellt med huvudtunneln. Hålen är ungefär 100 m långa.
- Frysning under 6-12 månader med kontinuerlig kontroll av fryszonens utveckling.
- Drivning av en 88 m lång pilotunnel med en diameter på 5 m inuti den frysta cylindern för att nå den södra delen av MBZ.
- Förlängning av den frysta cylindern, etapp 2, genom borrning av ytterligare fryshål och observationshål från pilotunnelns ände.
- Injektering av den södra delen av MBZ från pilotunnelns ände.



**Principiell layout på förbehandlingen av Möllebackzonen.  
Dimensionering av frysning i MBZ**

Design av ett frysprojekt måste baseras på och är helt beroende av rådande geologiska och geotekniska förhållanden. Det avser både tiden att frysa materialet och de egenskaper den frysta jorden/berget har. För Möllebackzonen har dimensioneringen gjorts utifrån det sämsta materialets egenskaper. Detta material är en helt genomvittrad och leromvandlad gnejs med mycket låg ”ofrusen” hållfasthet. Zoner av detta vittrade berg finns också nära zoner med hög hydraulisk konduktivitet och höga vattentryck vilket innebär att flytjordsförhållanden (flowing ground) kan uppstå.

En av de parametrar som diskuterades under dimensioneringsfasen var hur mycket E-modul och hållfasthet skulle öka till följd av frysningen, framförallt för det sämsta materialet. Andra viktiga parametrar som studerats är exempelvis permeabilitet, packningsgrad och expansions-egenskaper. För att klarlägga materialets egenskaper gjordes en omfattande laboratorieundersökning av prover från kärnboring innan frysningen startade. I tillägg till detta etablerades också ett omfattande fullskaligt provprogram att genomföra i samband med drivning av pilotunneln genom den frysta zonen. Detta provprogram omfattade temperaturmätningar, deformationsmätningar, mätningar av last på förstärkning (sprutbetonglining) samt dilatometermätningar (HPD). I tillägg fanns en ambition att också utföra kompletterande laboratorieundersökningar på in situ fryst material. Således lades stor energi på att försöka ta prover från det frysta materialet i de mest vittrade partierna av pilotunneln.

För att erhålla en robusthet i dimensioneringen och verifieringen av densamma, gjordes många olika mätningar för att säkerställa att projektet inte skulle bli beroende av en metod som inte visade sig ge tillförlitliga data. Detta är en viktig lärdom att ta till sig då man tillämpar aktiv design eller observationsmetoden.

### **Provning av material som fryst på laboratorium**

Tidigt i dimensioneringsprocessen genomfördes kärnboringar i MBZ. Ett stort antal borrkärnor har erhållits och provkroppar har tagits ut och sänts till laboratorium. Redan i detta skede var det, trots sofistikerade borrhings och provtagningsmetoder med trippel tub och försiktig borrhning, mycket svårt att få sammanhängande provkroppar från det sämsta materialet. På grund av dessa svårigheter har huvuddelen av de prover som testats i laboratorium varit re-kompakterade provkroppar som frysts på laboratoriet. Proverna har mixats enligt kunskap om det vittrade materialets karaktär och packas i laboratoriemiljö. Efter preparering har utförts försök på såväl ofruset som fruset material vid olika temperaturer.

Några prover har hållit ihop och varit möjliga att testa direkt efter frysning på laboratoriet.

### **Provtagning på det in situ frusna materialet**

Frysningen av Möllebackzonen i Hallandsåsprojektet medger en unik möjlighet att genom borrkärnor från det in situ frysta materialet jämföra deformations-, kryp-, och hållfasthetsegenskaper med de prover som tagits upp i förundersökningen som packats, frusits och därefter provats. Provernas resultat skulle härigenom indirekt verifiera dimensioneringsmetoder och labförsök på förundersökningsmaterial. I denna förstudie har ett flertal praktiska provtagningsförsök utförts.

Försök har utförts att borra ut prover i tunneln, genom sprutbetongen, med en kärnborrare typ Hilti. Detta har visat sig mycket svårt. Materialet är så vittrat att det inte håller ihop. Det är hållfasthetsmässigt tillfredsställande när det är fryst men den påverkan kärnboringen har, gör att proverna smälter och faller samman. Detta orsakas framförallt av att spolvatten, som måste användas, eroderar materialet. Även den begränsade storleken på kärnprovtagaren gör att proverna blir känsliga för mekanisk åverkan.



*Provboring i den frysta pilotunneln mars 2007*

Vid försök att borra utan spolvätska faller proverna sönder på grund av friktionen mellan borrar-cylinder och borkärna.



***Bild på sönderfallen utborrad provkropp och kall spolärvätska (etylalkohol) på tunnelgolvet.***

Det har också gjorts försök att borra med kall spolärvätska (etylalkohol), men den metoden fungerar inte heller. Det utborrade provet löses upp (se bild ovan). Som jämförelse kan konstateras att utmärkta prover har tagits med Hiltikärnborren från betong och bättre berg, vilket visar att provtagningsapparaten fungerar så länge materialet är lämpligt.

Det har också gjorts försökt att skicka frysta ”skut” från tunneluttaget till labbet för att där borra ur prover under mer kontrollerade former. Detta har inte heller fungerat. Problemet är detsamma som i tunneln, d.v.s. att proverna är så sköra att de går sönder. De skut som fanns tillgängliga hade begränsad storlek på grund av sprängningsmetod och skörheten i det frysta materialet.

Det har funnits teorier om att kunna såga ut större stycken direkt ur berget . På grund av de kritiska förhållandena i den aktuella delen av berget med ”flowing ground”, samt risk för reducerad bärighet och skador på de inborrade frysörerna, har denna metod av säkerhetsskäl inte kunnat utföras.

Det har också funnits förslag till att utföra provborring med spolning med flytande kväve vid  $-192\text{ °C}$  (Anne-Lise Berggren Geofrost). Denna metod har framgångsrikt tillämpats på andra platser. Det är dock osäkert huruvida metoden skulle fungera i det mycket inhomogena materialet som finns i Möllebackszonen. Förutom att metoden är kostsam är hantering med flytande kväve mycket komplicerad från arbetsmiljö och säkerhetssynpunkt, med tanke på de aktuella förhållandena i den frysta tunneln.





*Bild från pilottunneln 2009 genom den mest kritiska delen av Möllebackszonen där försök till provtagning utfördes direkt efter utsprängning 2007. Tunneln omges av "frysör" strax utanför den utsprängda tunnelsektionen.*

## **Resultat**

Som framgår av beskrivning av provtagningsförsök enligt ovan har tillfredsställande prover inte kunnat tas ut från pilottunneln. Eftersom de uttagna proverna inte har varit stabila har det inte varit möjligt att utföra några laboratorieanalyser vid LTU förutom de som gjordes i det inledande skedet.

Det är viktigt att poängtera att i det aktuella projektet har design och funktion kunnat verifieras på annat sätt än med in situ provtagning, bland annat genom fullskaliga deformationsmätningar under lång tid samt mätning av laster på förstärkning och en rad andra mätningar.

## **KONKLUSION**

---

Detta forskningsprojekt har delmoment som förutsätter framgång för att nästföljande moment i projektet skall kunna utföras. Problem med att praktiskt kunna ta ut prover ur det komplext vittrade materialet i Hallandsås, Möllebackszonen har visat sig svårare än förväntat. Resultatet är i sig dock av intresse för frystekniken i allmänhet och Hallandsåsprojektet i synnerhet. Det visar på svårigheten att kunna förutse aktuella förhållanden i mycket komplexa jord- och bergmaterial. Utförandemetoder måste därför beakta detta faktum och bygga på att

det finns tillräckliga marginaler i design och utförande. Verifiering av dimensionering och utförande måste säkerställas med kompletterande metoder.

## ORGANISATION

---

Organisationen för utredningsprojektet har bestått av en *utredningsgrupp* och en *referensgrupp*.

### **Utredningsgrupp:**

Tekn. Dr Teddy Johansson, Skanska Teknik  
Civ ing Björn Stille, Skanska Teknik  
Tekn Dr Robert Sturk, Skanska/Vinci  
Prof Sven Knutsson, Luleå Tekniska Universitet  
Civ ing Hans Pilebro, Skanska Teknik

Utredningsprojektet stöds av en referensgrupp som följt projektet under design och utförande.

### **Referensgrupp:**

Prof Håkan Stille, KTH  
Tekn Dr Anders Fredriksson, Golder Associates