Teddy Johansson
Inst för Byggvetenskap
Avd för Jord- och bergmekanik

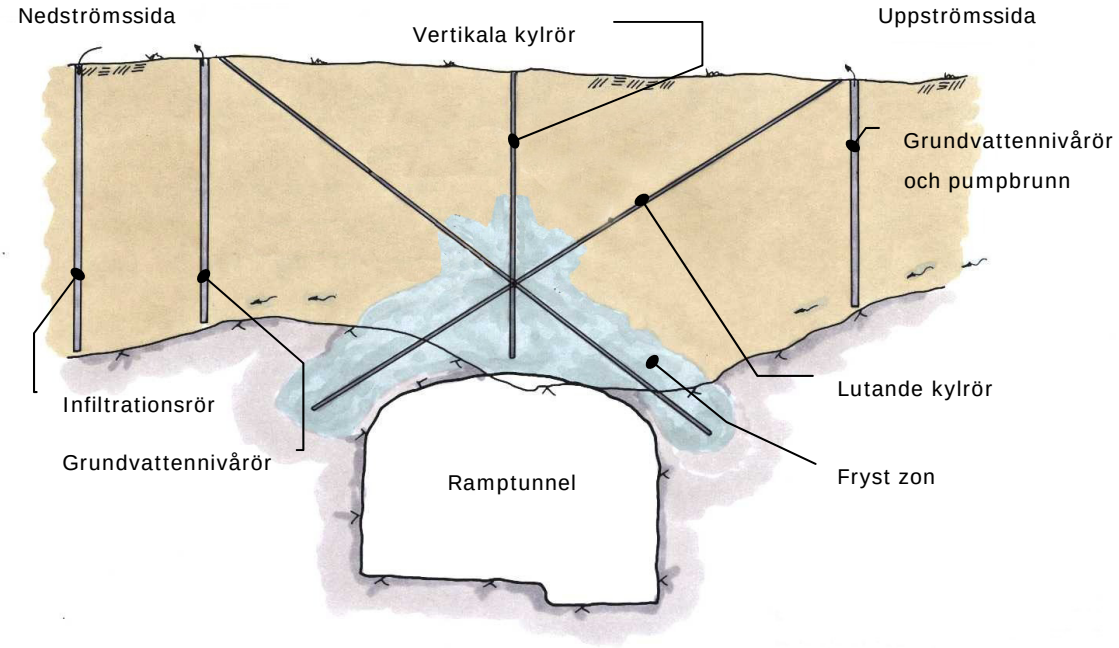
2005-06-29

FRYSNING AV JORD OCH BERG VID TUNNELBYGGANDE

STUDIER AV DEFORMATIONER OCH SPÄNNINGAR, ETAPP 1

LICENTIATAVHANDLING

SAMMANFATTNING



Address
KTH
Avd Jord- och Bergmekanik
Brinellvägen 34
SE-100 44 STOCKHOLM

Phone
+468 790 80 48

Fax
+468 790 79 28

e-mail
teddy.johansson@byv.kth.se

www.byv.kth.se/avd/job

BAKGRUND

Projektet är en fortsättning på SBUF-projekt 1071. I detta projekt genomfördes en omfattande litteraturgenomgång. Denna kunskap har använts som forskningsplattform för det fortsatta arbetet. Projektledare för detta projekt, liksom projekt 1071 har varit Prof Staffan Hintze vid KTH/Carl Bro (tidigare KTH/Skanska Teknik AB). Prof Håkan Stille har varit vetenskapligt stöd och rådgivare i projektet.

Till följd av det intressanta resultat som uppnåddes i det tidigare SBUF-stödda utvecklingsprojektet har området studerats djupare vetenskapligt för att få en ännu bättre mekanismförståelse av de olika fysikaliska förloppen och möjligheter att kvantifiera energiflödena.

Professor Sven Knutsson har medverkat i referensgruppen och tillfört värdefull kunskap från tjälforskningen vid Luleå Tekniska Universitet.

Utvecklingsområde

Frysning av jord och berg ökar i omfattning. Metoden används internationellt i huvudsak för att stabilisera och täta jord och berg. Ett flertal projekt är nyligen genomförda i Sverige och internationellt, och ett flertal planeras. Exempel på nyligen genomförda projekt i Sverige är; SL01 och SL04 (Södra länken i Stockholm), samt Älvsjötunneln. I Boston, Massaschusetts har man under 2000-2001 frusit ett stationsområde för att kunna bygga tre tunnlar under spårområdet, under pågående spårtrafik. Nyligen har Lemminkäinen startat nedfrysningen av en etapp på Botniabanan, *Stranneberget*. Hallandsås, Citybanan och förbifart Stockholm är ytterligare projekt där man anser att frysteknik kan vara rätt metod för att stabilisera och täta jord och berg.

I samband med byggandet av Södra Länkenprojekten i Stockholm i början av 2000-talet, tillämpades för svenska förhållanden en relativt oprövad lösning för att temporärt stabilisera och täta tunnlar under tunneldrift, artificiell jord och bergfrysning. Metoden är mycket vanlig i bland annat USA, Storbritannien och Frankrike, men har tidigare tillämpats i Sverige i samband med tunnelprojekt, framför allt Lindmarks tunnel genom Brunkebergsåsen i Stockholm 1884 och vid utbyggnaden av Stockholms tunnelbana 1952, vid Tegelbacken.

På Södra Länkenprojekten i början av 2000-talet stabiliserade och hydrauliskt tätade man temporärt två skilda avsnitt med dålig bergtäckning genom frysning, båda projekten med mycket bra resultat i samband med tunneldrivningen. Under tiningsförloppet uppstod däremot oväntat stora deformationer som relaterades till tiningskonsolidering av lera.

Metoden betraktas som säker och fungerar i alla jordar och berg med en vattenhalt som överstiger 10 %. Beroende på ingående vattenhalt skapas både en stabilitet och en hydraulisk täthet hos den frysta jorden eller berget. Jord- och bergfrysning har dock även nackdelar, bland annat betraktas metoden som dyr, och i vissa finkorniga jordar uppstår expansion under frysprocessen samt tiningsrelaterad konsolidering.

När detta arbete skrivs våren 2005 har det frysta området för fältförsök vid Botniabanan ännu ej tinat. Avhandlingens laboratorie- och fältförsök baseras på Botniabanans temporära stabilisering och hydrauliska tätning genom frysning år 2002 till år 2003. Under mätningarna har man bl a konstaterat att det sker en oväntad lastuppbyggnad på tunneltaket, samtidigt som markytan oväntat hävt sig c:a 5 cm. Denna utveckling är viktig att följa upp, analysera och beskriva i de fortsatta studierna. Dessutom bör en undersökning av temperaturens inverkan på det nedfrysta jordmaterialets tiningsrelaterade deformation ingå i fortsatta studier. Analysen bör utgå från ursprunglig vattenkvot och flytgräns parade med vattenkvot och flytgräns, efter en frys- och tiningscykel.

SYFTE OCH AVGRÄNSNINGAR

Huvudsyftet med projektet ”Frysning av jord och berg vid tunnelbyggande…” har varit att stärka kompetensen inom SBUF:s medlemskrets för byggande i fr a urban miljö, speciellt m h t kommande stora infrastrukturprojekt.

Syftet med etapp 1, SBUF-projekt 1071 avrapporterad september 2002 var att genomföra en omfattande litteraturgenomgång. Denna kunskap har använts som forskningsplattform för det fortsatta arbetet.

Projektet syftar till att studera deformationer och spänningar under frysnings- och tiningsprocessen. Med denna kunskap kan påverkan på mark och konstbyggnader vid artificiell jord- och bergfrysning och stora oväntade kostnader relaterade till markdeformationer bättre förutses.

Syftet med forskningsstudien kan delas upp i tre delar:

- Med en litteraturstudie inom området beskriva den artificiella frys- och tiningsprocessen samt identifiera skillnader och likheter med frysprocessen i naturlig tjälprocess
- Med en litteraturstudie, fältförsök och laboratorieförsök beskriva hur olika jord- och bergparametrar påverkar deformationer och spänningar vid nedfrysning och upptining, i samband med artificiell jord- och bergfrysning
- Skapa en plattform för fortsatta studier inom området

Avhandlingen har i huvudsak begränsats till stabilisering och hydraulisk tätning av finkornig jord med artificiell brinefrysning i samband med tunnelbyggnad.

GENOMFÖRANDE

Genomförandet av denna forskningsstudie har omfattat:

- En litteraturstudie inom forskningsområdet
- Beskrivning av tre fallstudier
- Beskrivning av ett fältförsök
- Sammanfattande slutsatser
- Rekommendationer till fortsatta studier inom området

Litteraturstudien i kapitel 2 omfattar en översiktlig beskrivning av skillnader och likheter mellan naturlig tjälprocess och artificiell frysning, samt förutsättningarna för energitransporter i jord och berg. Kapitlet omsluter även frysprocessen för vatten, hävningsmekanismer för frysning av jord, samt konsolideringsprocessen med dess styrande parametrar. Faktainsamlandet har skett genom sökning i framför allt utländska och svenska litteraturdatabaser, via artiklar från konferenser och facktidskrifter samt via fristående fackhandböcker.

Fallstudierna i kapitel 3 innehåller tre färdigställda frysprojekt som tagits i bruk under 1990-talet och i början av 2000-talet. Projekten har valts med hänsyn till frysmetod, jordförhållanden, geografisk belägenhet, att projekt ej är äldre än 10 år och hänförs till tunnelbyggande, samt att det finns tillgång till vederhäftig information via litteratur. Projekten i fallstudierna som behandlas i detta arbete är:

- Storebælt eastern railway tunnel, Danmark 1994
- Oslofjordstunneln, Hurum weakness zone, Norge 1999
- Kobe, Frysning kring befintlig tunnel, Japan 1996

Fältstudien i kapitel 4 har utförts på en delsträcka av Botniabanans entreprenad 5415. Bygget av delsträckan påbörjades i oktober 2001 och färdigställdes i mars 2004. Den temporära stabiliseringen och den hydrauliska tätningen genom frysning som detta arbete har studerat, påbörjades i februari 2002 och avslutades i september 2003.

I kapitel 5 diskuteras och analyseras forskningsresultaten och en jämförelse mellan litteraturstudie, fältförsök och laboratorieförsök utförs. Denna jämförelse kopplas i vissa avseenden till fallstudien i kapitel 3.

I kapitel 6 redovisas förslag till fortsatt forskning och utveckling av studien i kommande etapp.

Forskningsarbetet har följts av en referensgrupp med en sammansättning av personer med olika erfarenheter av jord- och bergstabilisering samt frysning. Gruppen har fungerat som diskussionspartners och dess arbete har framförallt bestått av sakkunnig granskning av framställda utredningsförslag.

Referensgruppen har bestått av:
Civilingenjör Lars Bjerin, Vägverket, Region Stockholm
Professor Lars-Olof Dahlström, NCC/Luleå Tekniska Universitet, sedan hösten 2004 Banverket/LTU
Teknologie doktor Anders Fredriksson, Golder Associates AB
Teknologie doktor Matti Kivelö, Kivelö Geoteknik AB
Professor Sven Knutsson, Luleå Tekniska Universitet
Civilingenjör Gunnar Lejon, Botniabanan AB/Banverket

Figur 1 *Södra länken (SL04); stabilisering och hydrauliskt tätning genom Jord- och bergfrysning i samband med tunnelbyggnad. Foto; Skanska*

RESULTAT

En sammanfattande slutsats av studien är att artificiell frysning i urban miljö i lerhaltig jord, kan förorsaka problem med tiningsrelaterad deformation. Detta bekräftas av tidigare genomförda projekt såväl i nutid (SL01 och SL04) som i dåtid (Tegelbacken, Stockholms tunnelbana).

Litteraturstudien visar att:
Skillnaderna mellan den naturligt frysta jorden (tjäle) och den artificiellt frysta jorden består fr a av:

- Vid naturlig frysning exempelvis ständig tjäle ("permafrost"), har tjälen bildats under en insvängningsfas, d v s jorden har frusit och tinat under många cykler innan den under lång tid blir frusen till en relativt måttlig temperatur, i allmänhet över -15°C. Vid artificiellt frusen jord, fryses jorden jungfruligt och det är i allmänhet önskvärt med lägre temperaturer, ned till -25 till -30°C, eftersom hållfastheten ökar med sjunkande temperatur
- Artificiell frysning tillämpas i allmänhet på djupare liggande jord, d v s jord som befinner sig under andra spänningsförhållanden än den ytligare belägna jorden som ej varit fryst på lång geologisk tid. Vid den naturliga frysningen utbreder sig frysfronten i allmänhet parallellt markytan. Den tvådimensionella frysfronten vid artificiell frysning rör sig oftast i en annan huvudriktning än naturlig frysning (endimensionell), detta gäller även under tiningsfasen då tiningen sker i andra huvudriktningar än den naturligt frysta jorden
- När den djupare liggande jorden fryser, sker detta under förhållanden helt olikt naturlig frysning. Frysningen sker med stor temperaturgradient, ibland upp till nära 50°C, mellan ursprunglig ostörd jord och jorden intill kylelementet
- Frysningen av den djupare liggande jorden sker under andra spänningsförhållanden. In situ spänningens påverkan på islinsbildningen, d v s den vattenanrikning som ges av den hydrauliska potentialen i den frysta randzonen avtar med djupet. Detta visas av fr a Segregation Potentialmodellen
- I den naturligt frysta jorden har man vanligen horisontella islinser, vars frekvens och tjocklek avtar med djupet. Vid artificiellt frusen jord bildas islinserna parallellt frysfronten, d v s vid lodräta kylelement kommer islinserna att vara vertikala o s v

Likheterna mellan den naturligt frysta jorden och den artificiellt frysta jorden är bl a att;

- Det existerar ofruset vatten och islinser
- Tiningskonsolidering uppstår när finkornig jord tinar
- Islinser bildas i samma riktning som vid artificiellt fryst jord, d v s parallellt frysfronten
- Islinsernas frekvens tillsammans med tjockleken avtar med djupet

Analytiska lösningar för deformationer vid tiningen av dels jord belägen i ständig tjäle och dels artificiellt frusen jord som tinar är svårligen jämförbara, eftersom det är så stora skillnader mellan den naturligt frysta jorden och den artificiellt frysta jorden. Detta bekräftas av de analytiska lösningar som prognostiserat den tiningsrelaterade deformationen på Botniabanan. Skillnaderna består fr a av:

- Hur frysningen bildats, temperaturgradient, insvängningsfas, eg frys- och tiningscykel
- Tiden/hastigheten för frysningen
- Frysfrontens riktning
- Tiningsfrontens riktning
- Tiden/hastigheten för tiningen

Artificiell frysning kan principiellt utföras genom *direkt frysning* eller *indirekt frysning*. Till indirekt frysning räknas vanligen luftkylning eller kompressorkylning av brine som i sin tur cirkuleras i kylrör installerade i marken.

Den vanligaste direkta frysmetoden är frysning med flytande kväve. När man fryser en jordmassa med exempelvis flytande kväve sker nedfrysningen relativt snabbt, jämfört med kompressorkylning och cirkulerande brine. Fryshastigheten inverkar på den frysta jordens hållfasthet, i synnerhet i kohesionsjordar, eftersom långsam infrysning ger större bildning av islinser.

Fallstudien visar att:

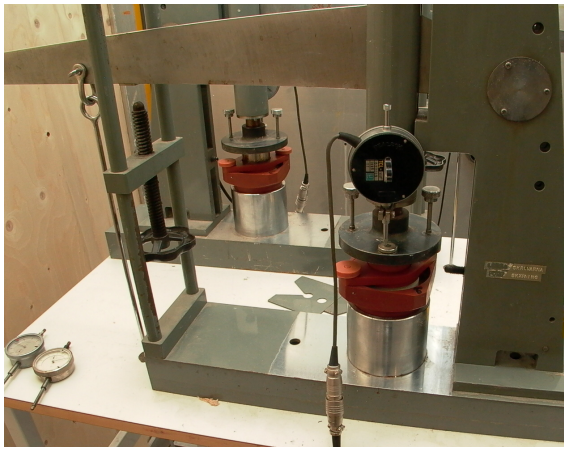
- Stabilisering och hydraulisk tätning av jord och berg genom frysning är en säker metod med många komparativa fördelar mot andra metoder, bl a att konstruktioners hållfasthetsegenskaper i allmänhet är lätta att verifiera
- Metoden även har nackdelar, bl a att fryst och tinad finkornig jord får stora tiningskonsolideringssättningar och att metoden har en relativt hög etableringskostnad

Fältförsöken visar att:

- Temperaturutvecklingen i den frysta zonen har i princip följt prognos i numerisk analys
- Lastuppbyggnaden på tunneltaket förefaller utvecklas i takt med den tinade jordens avancemang och i takt med att förbindelse med porvattensystemet utanför den frysta zonen etableras
- Jordens deformation började registreras då medeltemperaturen i jorden var c:a -10˚C. Under den period som mätningarna pågått har den frysta massan tinat från c:a -10˚C till c:a -1˚C och överraskande expanderat

Laboratorieförsöken visar att:

- Det finns en relation mellan deformationen efter tiningsprocessen och ursprunglig vattenkvot i respektive prov. Ju högre ursprunglig vattenkvot ett prov har, desto större deformation bildas
- Vattenkvoten sjunker efter en frys- och tiningscykel med mellan 6 och 17 procentenheter



Figur 2 *Ödometerförsök; bilden t v standardödometrar med jordprov under belastning i klimatkammare. Bilden t h fruset lerprov i ödometerring, där det översta lagret spolats bort (provet har ej belastats), provet kommer från Södra länken 01 i Stockholm*

RESULTATREDOVISNING

Projektet har resulterat i en licentiatavhandling ”Frysning av jord och berg vid tunnelbyggande. Studier av deformationer och spänningar, etapp 1”. Avhandlingen presenteras av licentianden vid ett licentiatseminarium på KTH (sal V3, Teknikringen 76) den 30 september, kl 13 med tekn dr Peter Viklander, Vattenfall som opponent/granskare.

SBUF:s ekonomiska anslag för projektet har tillsammans med finansiering från Skanska/Skanska Teknik, Forskningskonsortiet Väg, Bro och Tunnel (VBT) samt KTH, avd Jord- och Bergmekanik resulterat i följande:

- En licentiatavhandling; ”Frysning av jord och berg vid tunnelbyggande. Studier av deformationer och spänningar, etapp 1”. Två ex bifogas
- Kunskapsuppbyggande inom ämnesområdet vid KTH/Jord- o Bergmekanik
- Handledning av examensarbete vid KTH, avd jord- och bergmekanik; ”Jordförstärkningsteknik vid tunneldrivning. En jämförelse mellan Jord- och Bergfrysning och Jetinjektering” av teknologerna Seval Mert och Catarina Pettersson. Två ex bifogas
- Artikel i Bygg & Teknik 1/2003 ”Frysteknik – för att stabilisera och täta jord och berg”, Johansson T & Hintze S. Två ex bifogas
- Artikel i Bygg & Teknik 1/2005 ”Konsekvenser av frysning och tining på finkornig jords egenskaper”, Knutsson S & Johansson T. Två ex bifogas
- Presentation vid seminarium 2003-05-15 i forskningskonsortiet Väg, Bro och Tunnel
- Presentation vid seminarium 2004-11-22 i forskningskonsortiet Väg, Bro och Tunnel (Utvärdering av forskningsprojekten inom forskningsprogrammen)
- Presentation vid seminarium för Svenska Geotekniska Föreningen (SGF) (Gm prof Staffan Hintze)
- Presentation vid SBUF:s Anläggningsdag i Arlanda i februari 2005 (Gm prof Staffan Hintze)

RESULTATENS PRAKTISKA FÖLJDER OCH FORTSATTA STUDIER

Med utgångspunkt från litteraturstudien, fallstudien, och de resultat som erhållits från fältförsöken och laboratorieförsöken, framkommer att det finns en brist i kunskap om deformationer och spänningar i samband med artificiell frysning vid tunnelbyggande gällande:

- Expansionen av en fryst jord, i samband med temperaturhöjning i den frysta zonen
- Prognos av tiningsrelaterade deformationer
- Fryshastighetens inverkan på tiningssättningen
- Frystemperaturens inverkan på tiningssättningen
- Lastuppbyggnad på ett tunneltak i samband med tiningen

Kunskapen är synnerligen viktig inför de kommande stora infrastrukturprojekten, t ex Citybanan, Norra Länkenprojekten och förbifart Stockholm.

Med den nya kunskapen kommer man bättre att kunna prognostisera ev tiningsrelaterade deformationer och spänningsutveckling i samband med frysning av jord- och berg, för att åstadkomma en stabilitets- och hydraulisk täthet. En bättre styrning av frysningen i samband med stabilisering och hydrauliska tätningen, medför en högre säkerhet

Avhandlingens laboratorie- och fältförsök baseras på Botniabanans temporära stabilisering och hydrauliska tätning genom frysning år 2002 till år 2003. Under mätningarna har man bl a konstaterat att det sker en oväntad lastuppbyggnad på tunneltaket, samtidigt som markytan oförmodat hävt sig c:a 5 cm. Fenomenet har skett under förhållanden där markens temperatur stigit från c:a -10˚C till c:a -1˚C. Denna utveckling är viktig att följa upp, analysera och beskriva i de fortsatta studierna.

Fältförsöken på Botniabanan är centrala, och kan tillsammans med laboratorieförsök ligga till grund för en analytisk beskrivning av konsolideringsförloppet och lastuppbyggnaden på tunneltaket. Det är därför viktigt att fortsätta med mätningar av temperaturutvecklingen, grundvattenförändringen, lastuppbyggnad på tunneltaket, samt jordens deformationsutveckling på Botniabanan.

En mer detaljerad fältundersökning och laboratorieundersökning kopplat till den utförda litteraturstudien bör utföras i den fortsatta studien. Ytterligare jordprover, representativa för det frysta området bör analyseras i frysödometer och jämföras med resultaten från fältmätningarna på Botniabanan. Laboratorieförsöken med frysödometer bör utföras genom att ostörda jordprover från Botniabanan under lasten av respektive effektivspänning fryses in under ett längre tidsförlopp (jämfört med denna undersökning) med stegvis lägre temperatur, så att jordprovet har möjlighet att bygga upp islinser representativt för jorden i fält under samma omständigheter. Med laboratorieförsöken och fältmätningarna från Botniabanan kan en teoretisk analys skapa en bild av utvecklingen av deformationen i fryst och sedan tinad jord. Detta är viktigt för att kunna bedöma deformationsutvecklingen i framtida frysta konstruktioner.

Undersökning av temperaturens inverkan på det nedfrysta jordmaterialets tiningsrelaterade deformation bör ingå i fortsatta studier. För Botniabanans frysta struktur var ett designkriterium att konstruktionen skulle bestå av ett tre meter tjockt valv med en medeltemperatur på -15°C. Konstruktionen skulle hypotetiskt i stället kunnat bestå av ett ”tjockare” valv med en högre medeltemperatur, exempelvis -10°C som var ett designkriterium för tunneltryckningen på Boston South Station. Temperaturens inverkan på tiningssättningen undersöks för att analysera om det finns ett samband mellan nedfrysningstemperaturen och total tiningssättning. Analysen bör utgå från ursprunglig vattenkvot och flytgräns parade med vattenkvot och flytgräns, efter en frys- och tiningscykel.

I samband med byggandet av två huvudtunnlar och en ramptunnel genom tunneltryckning under Boston South Station år 2000, frös man bl a ”Boston blue clay”, för att stabilisera marken under banområdet. Tiningskonsolideringsförloppet har nogsamt följts av lokala myndigheter (Johansson & Hintze, 2002). Vid byggandet av Södra Länkenprojekten SL01 och SL04 i Stockholm uppstod deformationer som kan relateras till tiningsprocessen. Resultaten från fältförsöken på Botniabanan, laboratorieförsöken, samt sättningsutvecklingen på Boston South Station, SL01 och SL04 utgör en plattform för den fortsatta studien.

Figur 3 *Södra Länken 04 (SL04); efterarbeten, omläggning av spillvattenledning (Ø1,2 m) och uppstöttning av grunden till bef verkstad, p g a att den lerhaltiga jorden tiningskonsoliderat, efter jord och bergstabilisering genom frysning, i samband med tunnelbyggnad*