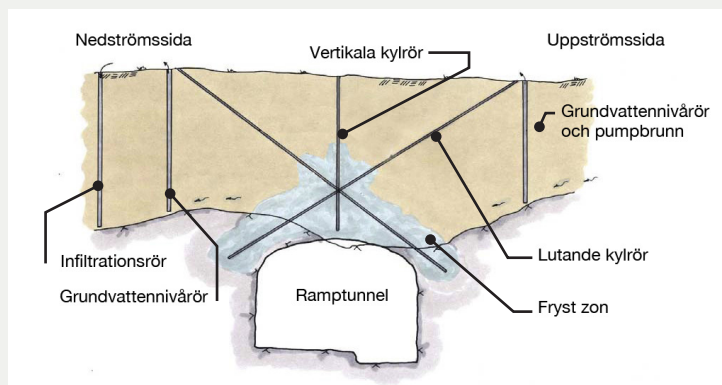


System för stabilisering av jord genom frysning

Detta projekt behandlar framför allt den tningsrelaterade sättningen i finkornig jord och beskriver den artificiella frys- och tningsprocessen med en identifiering av skillnader och likheter med naturlig frysning. Dessutom skildras hur olika jordparametrar påverkar deformationer och spänningar vid nedfrysning och upptining i artificiellt frysta konstruktioner.



Bakgrund

Projektet Artificial Ground Freezing in Clayey Soils är en fortsättning på SBUF-projekt 11071. I detta projekt genomfördes en omfattande litteraturgenomgång. Denna kunskap har använts som forskningsplattform för det fortsatta arbetet. 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 tätta tunnlar under tunneldrift – Artificiell jord och bergfrysning (AGF). Tidigare har AGF tillämpats i Sverige bland annat i samband med tunnelprojekt, exempelvis då Lindmark byggde tunneln genom Brunkebergsåsen i Stockholm 1884 och vid utbyggnaden av Stockholms tunnelbana vid Tegelbacken 1952. Metoden är vanlig i bland annat Tyskland, Storbritannien, USA och Frankrike. De flesta av nära 400 dokumenterade frysprojekt har utförts efter 1940-talet.

På Södra Länkenprojekten stabiliserade och hydrauliskt tätade man temporärt två skilda tunnelavsnitt med dålig bergtäckning genom AGF, båda med lyckat resultat. Under tningsförloppet uppstod däremot oväntat stora markdeformationer som relaterades till tnings sättning av lera. Till följd av det intressanta resultat som uppnåddes i det tidigare utvecklingsprojektet, SBUF 11071, har området studerats djupare vetenskapligt för att få en ännu bättre mekanismförståelse av de olika fysikaliska förloppen och möjligheter att kvantifiera energiflödena.

Syfte

Denna doktorsavhandling behandlar framför allt den tningsrelaterade sättningen i finkornig jord och beskriver den artificiella frys- och tningsprocessen med en identifiering av skillnader och likheter med naturlig frysning. Dessutom skildras hur olika jordparametrar påverkar deformationer och spänningar vid nedfrysning och upp-

ting i artificiellt frysta konstruktioner. Avhandlingen har i huvudsak begränsats till temporär stabilisering och hydraulisk tätning av finkornig jord med artificiell brinefrysning i samband med tunnelbyggnad.

Genomförande

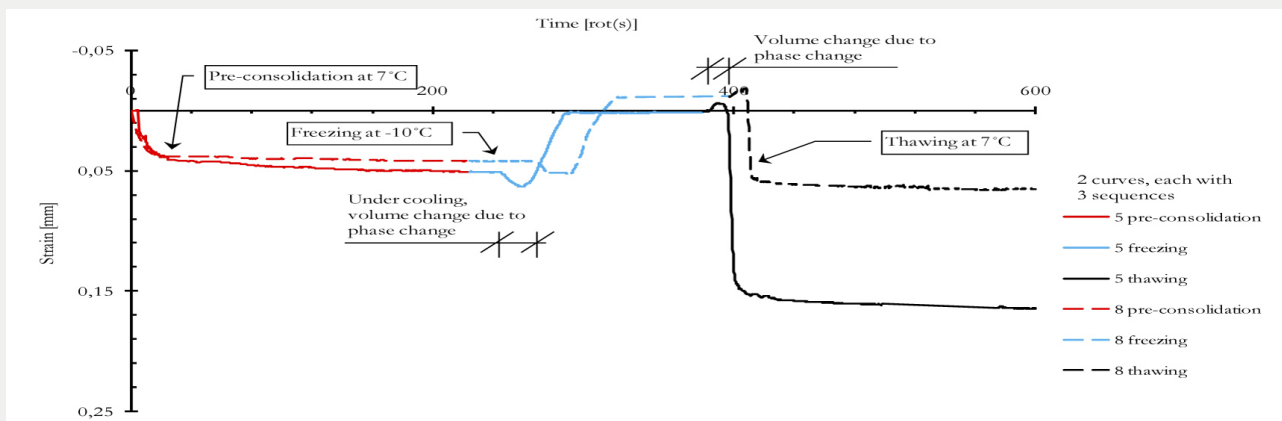
Med stöd från framför allt SBUF, KTH, Skanska, Forskningskonsortiet Väg, Bro och Tunnel (VBT) och Botniabanan har arbetet omfattat bland annat

- en litteraturstudie inom forskningsområdet
- tre fallstudier
- ett fältförsök på Botniabanan under cirka fem år
- mer än 500 laboratorieförsök.

På en av Botniabanans entreprenader har man i ett avsnitt på cirka 90 m stabiliserat och tätat jorden temporärt genom artificiell frysning. På det frysta området bedrivs fältförsök som ansluter till forskningsområdet och beskrivs i avhandlingen. Fältförsöken inleddes i samband med att kylmaskinen stängdes av hösten 2003. Jordprover har tagits upp ur marken intill den frysta konstruktionen och betraktas som ostörda av frysprocessen. Provernas egenskaper har analyserats i KTH:s laboratorium dels som ostörda och dels som tinade.



Figur 1. Artificiell frysning av jord på ett avsnitt av Botniabanan, cirka 1 mil nordost om Örnsköldsvik. På vänster sida, brinesystemet för de installerade frysrörerna i marken. På höger sida, kylmaskinerna, i bildens fond Stranneberget.



Figur 2. Illustration av en typisk deformationsutveckling i ett frys- och tiningningsförsök i ödometer. Pilotförsöket är genomfört med dubbelsidig dränering av ett sulfidhaltigt lerprov från Botniabanan. Försöket är genomfört med en halvdags förkonsolidering vid in-situtemperaturen +7°C, ett dygns frysning vid -10°C, samt tining vid in-situtemperaturen +7°C under ett dygn. Resultatet visas av deformationen (abskissan) för ett prov från 5 m djup och ett prov från 8 m djup med de tre sekvenserna förkonsolidering, frysning och tining. Proverna är belastade med respektive in situ effektivspänning.

Resultat

En sammanfattande slutsats av studien är att artificiell frysning i urban miljö i lerhaltig jord kan förorsaka problem med tining-relaterad deformation. Detta bekräftas av tidigare genomförda projekt såväl i nutid (SL01 och SL04) som i dåtid (Tegelbacken, Stockholms tunnelbana). Totalt 14 publicerade analytiska metoder för att prognostisera tiningssättning har analyserats. Analyserna har framför allt baserats på Botniajordens egenskaper. Prognoserna för den tiningssättningen har även studerats i samband med fältstudien och laborieförsöken. De 14 analytiska metoderna för att prognostisera tiningssättningen har jämförts med resultaten från laborieförsöken (se pilotförsök av frys- och tiningningsförsök i Figur 2). Emellertid är spridningen på resulterande slutsättning mycket stor. Resultaten från de teoretiskt baserade metoderna visar att tiningssättningen blir cirka 1.08 m, medan resultaten från de empiriskt baserade metoderna ger tiningssättning varierande mellan 1.93 m och 3.85 m. En anledning till den stora spridningen är att de empiriskt baserade prognoserna för tiningssättningarna är relaterade till framför allt permafrost och specifika jordar eller områden. Laboriestudien visar dock att det finns en korrelation mellan tiningssättningens numerär (ϵ) och kvoten mellan vattenkvoten (w) och plasticitetstalet (w_p). Den resulterande totala prognostiserade tiningssättningen, det vill säga sättningsen inklusive tjälhävningen blev $\epsilon = \Delta H/H = 7.0 \ln(w/w_p) + 7.8$, och på samma sätt blev den prognostiserade tiningssättningen för ostörd jord aktuell för artificiell frysning $\epsilon = \Delta H/H = 2.7 w/w_p + 3.8$.

Avhandlingens laborieförsök och fältförsök baseras på Botniabananens temporära stabilisering och hydrauliska tätning genom frysning år 2002 till år 2003. Under mätningarna har man bland annat konstaterat att det sker en oväntad lastuppbyggnad på tunneltaket, samtidigt som markytan oväntat hävt sig cirka 1 dm. Denna utveckling är viktig att följa upp, analysera och beskriva i fortsatta studier. Dessutom bör en undersökning av temperaturns inverkan på det nedfrysade jordmaterialets tiningrelaterade deformation ingå i fortsatta studier. Analysen bör utgå från ursprunglig vattenkvot och plasticitetsgräns parade med vattenkvot och plasticitetsgräns, efter en frys- och tiningningscykel.

Följande generella slutsatser kan dras (alla försök baseras på en frys- och tiningningscykel under in-situlast för den frysta Botnia-konstruktionen)

- vattenkvoten i Botniajorden sjönk i genomsnitt med cirka 14 % efter en frys- och tiningningscykel, vilket ungefär motsvarar; $w_{in} = 0.8w - 1.5$
- vattenkvotsminskningen har ingen korrelation till djupet under markytan men det finns en stark korrelation mellan den ostörda jordens vattenkvot och minskningens storlek.
- jorden får högre densitet efter tining under in-situlasten samtidigt som den blir mer permeabel
- flytgränsen blir lägre efter en frys- och tiningningscykel samtidigt som den relativa andelen ler- och finsiltpartiklar minskar medan andelen grövre partiklar ökar
- den grövre och kompaktare jorden som bildats efter tiningen får högre förkonsolideringstryck och ökad skjuvhållfasthet
- registrerade temperaturer i den frysta Botnia-konstruktionen påverkas starkt av foderrörens värmeledning av atmosfärstemperatur och solstrålning då temperaturen nått vattnets fasomvandlingstillstånd från is till vatten
- tiningen av den frysta Botnia-konstruktionen har startat kring foderrörens för temperaturgivare och frysrör. De tinade "fönstren" bildar dräneringsvägar för det migrerande vattnet.

Ytterligare information

Kontaktpersoner:

Teddy Johansson, Bjerking, tel 018-65 11 00,

e-post: teddy.johansson@bjerking.se.

Staffan Hintze, KTH, tel 08-790 60 15,

e-post: staffan.hintze@byv.kth.se.

Litteratur:

- Doktorsavhandlingen "Artificial Ground Freezing in Clayey Soils; Laboratory and Field Studies of Deformations During Thawing at the Bothnia Line". Johansson Teddy.
- Licentiatavhandlingen "Frysning av Jord och Berg vid Tunnelbyggande; Studier av Deformationer och Spänningar". Johansson Teddy.
- Utveckling av frysteknik för att temporärt stabilisera och täta jord och berg. Samhällsbyggaren, nr 4-2010, av Hintze S & Johansson T, 6 sidor.

Internet:

www.cryocell.com, www.geofrost.no