



GEOTEKNISKA UNDERHÅLLSARBETEN

Hur ingenjörer kan använda sig av
injekteringsteknologi med geopolymer

Upprättad för Geobear av Liam Bromley, projektingenjör och
Daniel Hadfield, teknisk chef

Sammandrag

Injektering med geopolymer är ett störningsfritt och effektivt alternativ till traditionella metoder och pålning. Geobear har forskat, utvecklat, testat och gjort installationer med teknologin i över 30 år. Tillämpningen av Geobears injekteringsmetoder med geopolymer kan kategoriseras som proaktivt (markförstärkning för att tillåta större belastning eller motverka sättning som uppstår med tiden) eller reaktiv (behandla en befintlig sättning).

Introduktion

Tillämpningen av injektering med geopolymer kan kategoriseras i två faser:

1. Ytstabilisering
2. Djupstabilisering

Vid ytstabilisering injekteras geopolymer i det grunda området under en grund med avsikt att helt återupprätta kontakten mellan grundens undersida och den underliggande marken genom att fylla håligheter i den behandlade marken.

Djupstabilisering innebär att marken behandlas till ett större djup och avser därmed krafterna som uppstår till följd av belastning. Målsättningen med en djupstabilisering är att öka densiteten i marken genom att:

- Avlägsna håligheter genom fyllning och kompaktering/stabilisering
- Driva ut luft och vatten
- Agglomerera marken (i granulära fall)

Efter injektering kommer geopolymeren att utvidgas både horisontalt och vertikalt i ett område där materialet väljer den väg som ger minsta motstånd och som har det största behovet av förstärkning. När detta har skett kommer geopolymeren att utvidgas vertikalt och pressas mot grundens undersida och övergår slutligen från vätskefasen till fast form.

Varje injekteringspunkt kommer att bilda en påverkningszon med en cirka 1 meters radie (beroende på den använda polymerens egenskaper), vilket resulterar i en förstärkning av marken i den zonen. Injekteringspunkterna placeras normalt med 1,0 – 1,5 meters avstånd från varandra för att säkerställa att hela området som kräver behandling påverkas av injekteringarna. Avståndet kan ändras beroende på faktorer såsom marktypen, markens bärighet och belastningen.

Geobear har i samarbete med världsledande materialtillverkare utvecklat en portfölj med fler än 30 material, för användningsområden beroende av projektets omfattning och markens egenskaper. Varje geopolymermaterial har olika egenskaper vilket ger dem fördelar vid olika scenarier. Dessa egenskaper inkluderar:

Stelningstid – Den tid det tar för den injekterade geopolymeren att börja övergå från vätska till fast form.

Gelningstid – Den tid det tar för geopolymeren att fästa på en yta vilket är början på utvidgningsfasen.

Klibbfri tid – Den tid det tar för geopolymeren att sluta fästa på en yta vilket är slutet på utvidgningsfasen.

Fri expanderingsdensitet – Geopolymerens densitet vid injektering utan inneslutning (inneslutningens omfattning kommer att direkt påverka geopolymerens densitet och därmed är den fria expanderingsdensiteten den lägsta möjliga densiteten.)

I enlighet med Geobears "störningsfria" filosofi utförs markförbättrande injektering från oberoende mobila verkstäder där all utrustning som behövs för standardprojekt alltid ingår. Beroende på ett antal faktorer kommer Geobears tekniker att använda antingen extraktionsmetoden eller flerrörsmetoden vid injektering.

Extraktionsmetod

1. Hål med en diameter på 16–50 mm borrar till det djup som krävs för behandlingen
2. Ett enda injekteringsrör av den längd som krävs förs ner i hålet
3. Geopolymer injekteras genom röret, samtidigt mäts flödet samt även den hastighet med vilken röret dras ut.

Flerrörsmetod

1. Hål med en diameter på 16–50 mm borrar till det djup som krävs för behandlingen
2. Flera injekteringsrör av olika längder kommer därefter att föras ända ner i hålet
3. En specificerad mängd geopolymer injekteras i varje rör.

Material

Geobears geopolymerer består av flera komponenter. När dessa komponenter blandas under installationsprocessen påbörjas polymeriseringen. Detta är den process som gör att materialet byter aggregationstillstånd från vätska till fast form (och expanderar när detta sker).

Geopolymerernas mekaniska styrka har utvärderats av Geobears materialtillverkare genom att utföra tryckbelastningsprov enligt EN 826 (enligt denna standard mäts tryckbelastningen vid 10% deformation av materialet).

Efter installationen kommer geopolymeren normalt aldrig att helt avsluta utvidgningscykeln och uppnå sin specificerade fria expansionsdensitet, eftersom varje injekterat lager kommer att utöva ett mottryck på geopolymeren. Detta kommer att begränsa den horisontala deformationen. För att efterlikna detta utförs tryckbelastningsprov på Geobears geopolymerer med hjälp av en form för att undvika horisontal deformation.

En geopolymers tryckhållfasthet är beroende av den anbringade densiteten. Tryckhållfastheten för varje material har därför uppmätts vid olika anbringade densiteter, för att erhålla resultat som vid behov kan användas för interpolering.

Resultaten från tryckbelastningsprov på två av Geobears geopolymere visas nedan:

	Fri lateral utvidgning			Innesluten mätning		
	Densitet	10% kompression	E-modulus	Densitet	10% kompression	E-modulus
	kg/m ³	MPa	N/mm ²	kg/m ³	MPa	N/mm ³
Geobear A	163	2,544	66	164	3,050	66
	229	4,311	97	230	5,004	102
Geobear B	324	4,383	120	325	5,232	123
	402	8,536	219	402	10,926	217

"Environmental impact of the Geobear Resins on soil and groundwater" är ett dokument som skrivits av Geobears materialtillverkare. Det beskriver geopolymereffekten efter injektering tillsammans med tester som utförts av materialtillverkaren i detta avseende. I dokumentets sammanfattning konstaterar man att:

"Geobears materialkomponenter injekteras i mark och kan därför tänkas påverka miljön och marken såväl som omgivande grundvattens ekologiska villkor. Flera studier gjorda på miljöpåverkan av Geobears geopolymere på marken och grundvatten visar ingen eller ringa påverkan."

Hydrauliska konduktivitetstester har genomförts på både rena Geobear geopolymere och på provtagningar i injekterad mark med användning av in situ geopolymere med en densitet på cirka 37 kg/m³. Denna densitet anses vara låg för en in situ geopolymere (eftersom in situ densitet påverkas av flerfaldiga faktorer inklusive mottryck vid geopolymereffekten). Därför är detta i huvudsak ett i värsta fall scenario.

Testresultaten visade att hydrauliska konduktivitetvärden för ren geopolymere är mellan 1,10⁻⁹ och 1,10⁻⁸ m/s vilket tyder på närvaron av reducerad sammanhängande porositet. Den hydrauliska konduktiviteten i det injekterade markprovet var cirka 10⁻¹⁰ m/s.

Baserat på dessa resultat drogs slutsatsen att geopolymereffekten består nästan uteslutande av slutna porer som inte är vattenledande. Den mycket låga hydrauliska konduktiviteten i de injekterade markproven berodde på slumpvisa mikrodefekter. Sammanställningen av testerna avslutades med detta utlåtande:

"Dessa hartser kan därför anses vara praktiskt taget ogenomträngliga och opåverkade av vattenuppsugning."

I samarbete med materialtillverkaren har det inom Geobears nätverk beställts flera laboratorietester för att fastställa geopolymereffekters fysiska och mekaniska egenskaper.

Ett sådant test genomfördes för att utvärdera sambandet mellan expansionskraft och densitet. Detta test genomfördes med användning av en speciellt konstruerad anordning som möjliggjorde att geopolymeren kunde injekteras i en styv metallcylinder försedd med en kolv.

Omedelbart efter injekteringen började geopolymeren expandera vertikalt (på grund av behållarens styvhet utgjorde detta vägen med minsta motstånd).

Under expansionen pressade geopolymeren kolven uppåt några få centimeter där vägen blockerades av ett tvärställt hinder försett med en manometer. Expansionskraften bestämdes därefter genom att mäta det tryck som det tvärställda hindret utgjorde för att hindra kolven från att förflyttas uppåt.

Resultatet från experimentet har givit följande samband:

$$P = \exp(0.23(Y_{rf} - 0.36)) - 1$$

där:

P = utvidgningskraft (uttryckt i MPa);

Y_{rf} = vikten av den expanderade geopolymerens volymenhet (uttryckt i kN/m³).

Expansionsförhållandet för den i marken, i vätskeform (V_{ri}), injekterade geopolymerens expansionsvolym (Y_{rf}) kan också beräknas. Geopolymerens massa förblir i stort sett oförändrad under övergången från den ursprungliga vätskeformen till den slutliga expanderade fasta formen, och därför kan volymerna V_{ri} och Y_{rf} jämföras med den specifika vikten för de expanderade och vätskeformiga polymererna. Expansionsförhållandet kan därmed erhållas ur följande ekvation:

$$10,5/0,36 + (1/0,23) \ln(1+P)$$

där 10,5 avser en specifik vikt av 10,5 kN/m³ för geopolymer i vätskeform.

Verifiering

Vare sig injektering av geopolymer används för att förhindra framtida sättning eller för att öka markens bärighet utför Geobears tekniker en standardkontroll på platsen; strukturell rörelse. Under hela injekteringsprocessen med geopolymerer övervakas relevanta delar i den överliggande strukturen med användning av roterande lasermätare och infästa sensorer med sensorer placerade i närheten av den aktiva injekteringspunkten. Varje injektering kommer att pågå tills en reaktion registreras (< 0,5 mm). Detta indikerar när en viss kompaktering/stabilisering har uppnåtts. Det visar också att den behandlade marken förstärkts tillräckligt för att uppbära strukturens belastning eftersom en uppåtriktad kraft kommer att agera på den ovanliggande grundens undersida och förorsaka den uppåtriktade rörelsen.

För att kvantifiera ökningen i markstyrka som uppnås genom geopolymer injekteringar, används oftast dynamisk konpenetrometertest (DCP). Detta test ger en insikt i de behandlade markförhållandena och klargör även den testade markens bärighet med 100 mm mellanrum. Genom att jämföra resultaten från tidigare utförda mätningar med resultaten från DCP-testen efter behandlingen kan förbättringen i markens bärighet bevisas.

DCP-testerna före och efter arbeten sker med samma utrustning: Pagani DPM 30 – 20 penetrometrar med 30 kg:s fallvikter. Genom att jämföra hur många "slag" som krävs för att driva en stav 100 mm ner i marken som ska testas före och efter behandlingen kan man se hur mycket bärigheten har förbättrats.

Vid omvandling av DCP-testdata använder Geobear en realistisk omvandling av $N(300) = N(100) \times 1,25$.

Detta gör det möjligt för Geobear att relatera före- och eftertesterna gjorda med dynamisk konpenetrometer (DCP) till värdena från det omgivande Standard Penetration Test (SPT) och möjliggör omvandling av dessa resultat med hjälp av vanliga geotekniska formler och parametrar. När ett motsvarande SPT-värde på testdjupet har erhållits, används denna information till att beräkna en skjuvhållfasthet med användning av ett "i värsta fall-scenariot" (marken är helt kohesiv och är föremål för skjuvningsbristningar). Detta uppnås genom att återanvända den bekanta metoden från Stroud för sambandet SPT – skjuvhållfasthet. Igen används "i värsta fall-scenariot" där marken är helt kohesiv, där den ger en funktion som relaterar dessa två parametrar med varierande plasticitetsindex. Därmed kan följande samband förväntas:

Skjuvhållfasthet: $C_u = 5,0 \times N(300)$.

I slutskedet av omvandlingsberäkningarna måste Geobear härleda en bärighetskapacitet – genom att använda en traditionell teori för bärighetskapacitet motsvarar detta $6 \cdot C_u$.

Geobear kommer därefter att införa en säkerhetsfaktor som beror på syftet med arbetena. I fall där injektering med geopolymer används för att underlätta en nybyggnation, används säkerhetsfaktor 3. I fall där injektering med geopolymer används för att underlätta en renovering används säkerhetsfaktor 2.

Injekteringsarbeten med geopolymer har även verifierats med ett antal olika testmetoder inklusive plattbelastning, CBR-test och GPR-undersökning (beroende på kundens behov).

Slutsats

Geobear strävar ständigt efter utveckling av både geopolymerer (vidareutveckling av befintliga material och skapande av nya geopolymerer) och av bästa praxis för installation/verifiering. Geobear kan därför anpassa sig till kraven från både våra klienter och till de platser vi arbetar på. Detta säkerställer att Geobears störningsfria filosofi upprätthålls såväl som tillåter Geobear att fortsätta att visa de viktigaste fördelarna med injektering med geopolymerer.

Dessa är:

- Snabbhet
- Störningsfri
- Effektivitet
- Minimala arbetsredskap
- Minimal miljöpåverkan
- Inget schaktningsbehov.

För en byggnadsingenjör är den viktigaste fördelen vid användning av injektering med geopolymerer i stället för traditionella metoder systemets effektivitet. De totala ekonomiska effekterna med invasiva metoder som drabbas av störningar och långa tidsramar blir alltmer påtagliga. Genom att ha alternativet att grundförstärka marken och öka bärigheten på några få dagar med användning av geopolymerinjektering, kan intressenterna fokusera på projektets långtidsmål.

Med flerfaldiga forskningsresultat och över 200 000 utförda projekt under de senaste 30 åren är användning av geopolymerer nu ett naturligt val för konsultingenjörer över hela världen.

Fallstudie – Nationalgalleriet, Irland

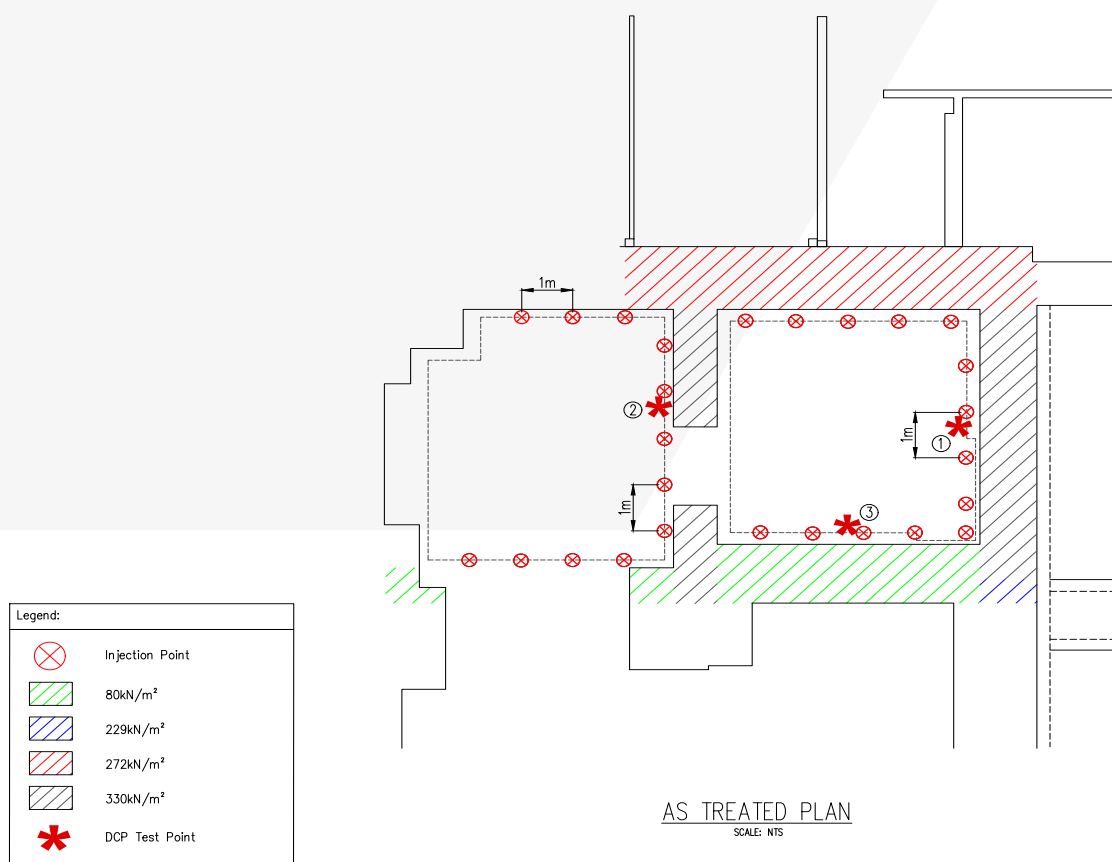
Det föreslogs att Irlands nationalgalleri skulle renoveras som en del av planen om att ändra layouten för flyglarna Dargan och Milltown vid Merrion Square i Dublin. Som en del av renoveringsarbetet fastställdes att marken under 28 löpmeter vägg (se ritning) inte hade den bärighet som krävdes för att på ett säkert sätt överföra de föreslagna belastningarna på 80kN/m^2 , 229kN/m^2 , 272kN/m^2 och 330kN/m^2 .

John Paul Construction kontaktade därför Geobear för att grundförstärka marken i relevanta områden för att underlätta den föreslagna renoveringen.

Efter att ha granskat den av klienten tillhandahållna platsrapporten och med hänsyn till den maximala belastningen på 330 kN/m^2 (tillsammans med grundens relevanta dimensioner) specificerade Geobear att injektering med geopolymer borde utföras till ett maximalt djup av 2,5 meter under markytans nivå vid de väggar som skulle behandlas. Relevanta marktest som gjorts visade att marken skulle bli stabil och säkert kunna överföra den relevanta belastningen.

Efter avslutade arbeten genomförde Geobear Dynamisk probtest för att tillhandahålla verifiering av arbetena (se nedan).

Ritning över platsen:



Testresultat från platsen

Platsens adress: Irlands nationalgalleri, Irland

Djup under marknivå	Antal slag före	Bärighetskapacitet kN/m ²	Antal slag efter	Bärighetskapacitet kN/m ²
0,1m				
0,2m				
0,3m				
0,4m				
0,5m				
0,6m				
0,7m				
0,8m				
0,9m	11	206,25	19	356,25
1,0m	9	168,75	19	356,25
1,1m	9	168,75	22	412,50
1,2m	7	131,25	23	431,25
1,3m	8	150	31	581,25
1,4m	11	206,25	33	618,75
1,5m	10	187,50	36	675,00
1,6m	10	187,50	40	750,00

