



CHALMERS

Långtidsuppföljning av KC- förstärkning under E45 med InSAR

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Samhällsbyggnadsteknik

Ebba Muren
Alva Sellgren

INSTITUTIONEN FÖR GEOLOGI OCH GEOTEKNIK

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2024
www.chalmers.se

Långtidsuppföljning av KC-förstärkning under E45 med InSAR

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

EBBA MUREN

ALVA SELLGREN

©EBBA MUREN & ALVA SELLGREN, 2024

Examensarbete ACEX20

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Chalmers tekniska högskola 2024

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för geologi och geoteknik

Chalmers tekniska högskola

412 96 Göteborg

Telefon: 031-772 10 00

Chalmers/Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Göteborg 2024

Långtidsuppföljning av KC-förstärkning under E45 med InSAR

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet

Samhällsbyggnadsteknik

EBBA MUREN

ALVA SELLGREN

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för geologi och geoteknik

Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

E45:an är en fyrfilig väg som sträcker sig mellan Alta i Norge och Gela på Sicilien. Sträckan Göteborg – Trollhättan, som i nuvarande form stod färdig 2012, är belägen i ett lerigt område. Därmed ökar risken för sättningar och instabilitet här.

Markrörelser längst sträckan har observerats med hjälp av InSAR, en relativt ny teknik. Det är en satellitbaserad metod som man kan mäta markrörelser med millimeterprecision med. Tekniken kan användas till att hitta markrörelser i ett tidigt skede och därmed påbörja åtgärdsarbetet tidigare vilket är en ekonomisk och hållbar vinning.

Kalkcementpelare är en förstärkningsmetod som användes under byggnationen av vägen. En kalkcementblandning blandas in i den naturliga jorden och bindningsmedlet binder sig därefter med jordens vätska. Efter att cement-jordblandningen har fått brinna så bildas pelare i marken som avlastar jorden och sprider ut lasten. Kvaliteten på kalkcementpelare kan variera beroende på olika faktorer.

Syftet med examensarbetet är att göra en långtidsuppföljning av en KC-förstärkt väg. Delsträckor som analyseras är Alafors – Tollered, Grönån och Alvhem. Det diskuteras om det var rätt förstärkningsåtgärd, med tanke på den geologin som råder över den aktuella sträckan. En jämförelse görs mellan de beräknade sättningarna i områdena och de faktiska sättningarna, uppmätta med hjälp av InSAR.

Områdena som studerats har satt sig mer långs E45:an än entreprenörerna räknat med. Differenserna mot de beräknade värdena uppgår till ungefär 80 millimeter. Slutsatsen som drogs var att det beror på kvaliteten på kalkcementpelarna och den bristfälliga uppföljningen. Vid installationen av kalkcementpelare måste flera parametrar stämma, såsom disponeringen av material och inblandning av en tillräckligt fuktig jord. Brist på vertikalspänning i det övre skiktet i marken är även en påverkande faktor. En till orsak till de stora differenserna är att vissa beräkningar gjorda i en sektion ska representera en längre sträcka där jordprofil och vattenkvot kan variera.

Nyckelord: E45:an, kalkcementpelare, markrörelser, InSAR, sättningar.

Long-term Monitoring of Lime-Cement Columns under E45 with InSAR

*Degree Project in the Engineering Programme
Civil and Environmental Engineering*

EBBA MUREN

ALVA SELLGREN

Department of Architecture and Civil Engineering
Department of geology and geotechnics
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

The E45 is a four-lane road that stretches from Alta in Norway to Gela in Sicily. The section between Gothenburg and Trollhättan, completed in its current form in 2012, is situated in a clay-rich area, which increases the risk of settlements and instability.

Ground movements along this stretch have been monitored using InSAR, a relatively new technique. This satellite-based method can measure ground movements with millimeter precision. By detecting ground movements at an early stage, InSAR allows for earlier remedial action, providing economic and sustainable benefits.

Lime-cement columns were used as a reinforcement method during the road's construction. This process involves mixing a lime-cement blend into the natural soil, allowing the materials to bind with the moisture present. Once the cement-soil mixture has cured, columns are formed in the ground that help relieve the soil and distribute the load. The quality of lime-cement columns can vary based on several factors.

The purpose of this thesis is to conduct a long-term follow-up on a lime-cement reinforced road. The sections analyzed are Alafors – Tollered, Grönån, and Alvhem. The study evaluates whether this was the appropriate reinforcement measure, considering the geological conditions of the area. The study compares the settlements between the predicted and the actual settlements measured using InSAR.

The areas studied had greater settlements along the E45 than the contractor had anticipated. The differences compared to the calculated values amount to approximately 80 millimeters. The conclusion drawn was that this great settlement was due to the quality of the lime-cement columns and inadequate follow-up. During the installation of lime-cement columns, several parameters must align, such as the distribution of material and mixing with sufficiently moist soil. A lack of vertical stress in the upper layer of the ground was also a contributing factor. Another reason for the significant difference between the calculated and actual settlement was that the calculations were made for strictly one section and would then have to represent a longer portion of the road where soil profile and water content can vary.

Key words: E45, lime-cement columns, ground movements, InSAR, settlements.

Innehåll

SAMMANFATTNING	I
ABSTRACT	II
INNEHÅLL	III
FÖRORD	V
ORDLISTA	VI
1 INLEDNING	1
1.1 Syfte	1
1.2 Metod	1
1.3 Avgränsningar	2
2 BAKGRUND	3
2.1 Götaälvdalens geologiska historia	3
2.2 Vägteknik	4
2.3 Sättningar	4
2.3.1 Dränerad skjuvhållfasthet	7
2.3.2 Odränerad skjuvhållfasthet	8
2.4 Kalkcementpelare	8
2.4.1 Konstruktion	9
2.4.2 Miljö	9
2.4.3 Provbankar	10
2.4.4 Mätsektioner	11
2.5 InSAR	13
2.5.1 Teknik	13
2.5.2 Utmaningar	15
2.6 Delsträckor	15
2.6.1 Alafors – Tollered	15
2.6.2 Grönån	18
2.6.3 Alvhem	20
3 ANALYS	25
3.1 Alafors – Tollered	25
3.2 Grönån	26
3.3 Alvhem	27
4 DISKUSSION	29
SLUTSATS	32

REFERENSER	34
5 BILAGOR	38
5.1 Planritningar	38
5.1.1 Alafors - Tollerred	38
5.1.2 Grönån	39
5.1.3 Alvhem	40
5.2 Längdsektionritningar	42
5.2.1 Alafors – Tollerred	42
5.2.2 Grönån	43
5.2.3 Alvhem	43
5.3 Tvärsektionsritningar	44
5.3.1 Alafors – Tollerred	44
5.3.2 Grönån	45
5.3.3 Alvhem	47

Förord

Efterföljande examensarbete undersöker sättningar efter byggnation av E45:an. Detta görs med mätverktyget InSAR. Arbetet har gjorts på uppdrag av Norconsult. Därmed vill vi tacka Norconsult Geotekniska avdelning för den stöttning vi har fått under våren. Tack till de drivna medarbetarna som har hjälpt oss analysera beräknings-PM samt haft diskussioner om sättningar och kalkcementpelare med oss.

Ett extra stort tack till Martin Persson, hydrogeolog och geofysiker på Norconsult, som har handlett oss genom arbetet. Han har svarat på frågor och drivit intressanta diskussioner för att lyfta examensarbetet.

Även ett stort tack till vår examinator och handledare Mats Karlsson för lärorika samtal och spännande inspel.

Vi vill även tacka Jenny Arvidsson på Trafikverket som har bistått med geotekniskt underlag samt beräknings-PM.

Göteborg juni 2024

Alva Sellgren

Ebba Muren

Ordlista

Azimutvinkeln – anger riktningen på satelliten i förhållande till väderstreck.

Artesiskt tryck – när grundvattennivån är högre än markytan, ett tryck skapas.

Darcys lag - flödet mellan två punkter i marken är direkt proportionell mot den sammanlagda potentialskillnaden mellan punkterna.

c/c-avstånd – avståndet mellan två pelares centrum.

Förkonsolideringstryck – den effektiva vertikalspänning som, om den överskrids, ger upphov till plastiska deformationer. Är den maximala vertikalspänning jorden konsoliderat för. Kan bero på direkt last, fluktuationer i grundvattennivå, uttorkning, kemiska processer, etc.

Hydraulisk gradient - skillnaden i grundvattennivån vid två punkter dividerat med avståndet mellan punkterna. Detta kan vara användbart för att förutse till exempel vattenflödet.

Isälvsdeltan - Isälvarna drog med sig sten, grus och sand, vilka avsattes och bildade deltan vid mynningen av vattendragen. Ett delta är ett flackt landområde.

Kapillaritet – en vätskas förmåga att stiga eller hållas kvar i ett poröst material, exempelvis jord, till följd av ytspänning.

Kompressibilitet – volymändring i jord under en extern pålagd last eller under förändrade grundvattenförhållanden.

Krypning – plastisk deformation på grund av långvarig belastning

Permeabilitet – ett mått på hur mycket vatten ett material släpper igenom.

Porositet – kvoten mellan porvolym, V_p , och provets totala volym, V . Skrivs vanligen som $n = V_p/V$ och uttrycks i procent.

Portal – anger förhållandet mellan porvolymen, V_p och fasens fasta volym, V_k . Uttrycks som e och beräknas: $e = V_p/V_k$. Sambandet mellan porositeten och portalet kan uttryckas som: $e = n/(1-n)$

Skjuvhållfasthet – ett mått på jordpartiklarnas motstånd att röra sig i förhållande till varandra.

Transgression - en höjning av havsnivån.

Valvverkan - när det bildas som ett valv. Där lasten tas upp i pelarna via tryck.

Glaciomarin varvig glacial lera - när lera avsätts vid olika tidpunkter så bildas det olika skikt. Detta blir visuellt randigt.

Vattenmättnadsgrad – anger hur stor del av porvolymen V_p som är fylld med vatten. Skrivs vanligen som $S_r = V_w/V_p$ och uttrycks i procent. För helt torrt material är $S_r = 0$ och för vattenmättat är $S_r = 10$

1 Inledning

Väg 45 sträcker sig mellan Alta i Norge och Gela på Sicilien, den svenska delen går mellan Göteborg i Västra Götaland och Karesuando i Lappland. Delen mellan Trollhättan och Göteborg byggdes om till en fyrfilig väg som invigdes år 2012 (Skanska, u.å). E45:an har, längs delar av sträckan, en förhöjd risk för sättningar och stabilitetsproblem på grund av den ställvis mäktiga leran. Grundläggningsmetoden för den aktuella sträckan Trollhättan – Göteborg inkluderade kalkcementpelare, vilket kan vara en kostnadseffektiv och bra metod för att undvika sättningar (Skanska, u.å). Vägen har idag, trots förstärkning, satt sig mer än beräknat i projekteringsskedet.

InSAR är en förhållandevis ny satellitbaserad fjärranalysmetod som noggrant kan mäta markytans läge (Pap & Lier, 2019). Metoden har på senare år används i bland annat byggplatsuppföljning med avseende på grundvattensänkning och därmed relaterade sättningar (Lier, 2022). I nuläget görs det normalt inga långtidsuppföljningar på infrastrukturprojekt men med hjälp av InSAR underlättar man arbetet. Därmed kan markrörelser upptäckas i ett tidigt skede.

Analysen i rapporten är unik då den är fördjupad inom just KC-förstärkt jord. Arbetet kan bidra till en optimering av projektering, utförande och uppföljning av förstärkningsåtgärder.

1.1 Syfte

Examensarbetets syfte är att göra en långtidsuppföljning av sättningarna som har skett längs E45 mellan Göteborg och Trollhättan för att se om kalkcementpelare var en tillräckligt bra förstärkningsåtgärd. Examensarbetet utförs på uppdrag av Norconsult.

- Varför varierar sättningarna längs E45an?
- Var grundläggningsmetoden kalkcementpelare en bra metod längs vägen med tanke på den geologin som vägen sträcker över?
- Hur och varför avviker beräknade sättningsförlopp mot de verkliga, med InSAR uppmätta?

1.2 Metod

För att sammanställa fakta, data och teorier relevanta för examensarbetet utfördes en litteratur- och arkivstudie. Den litteratur som har sammanställts är främst från vetenskapliga rapporter, som Statens Geotekniska Institut (SGI) har publicerat. Beräknings-PM för delsträckorna används som underlag.

Som en del i arbetet kommer även bland annat Götaälvdalens geologi, fenomenet sättningar, InSAR och kalkcementpelares funktion beskrivas för att ge en gedigen bakgrund. En analys med InSAR utfördes för att ta reda på var det har skett mest sättningar längst sträckan. Därefter genomfördes en litteraturstudie om delsträckorna som var relevanta. Litteraturstudien är baserad på dokument från Trafikverket, framför allt beräknings-PM för delsträckorna. Ett beräknings-PM inkluderar geotekniska undersökningar och uträkningar. En jämförande studie mellan de beräknade sättningarna samt de faktiska enligt InSAR har genomförts.

1.3 Avgränsningar

Parallellt med motorvägen går en järnväg som byggdes under samma tidsperiod. Även järnvägen har uppvisat sättningsproblem, men i rapporten analyseras enbart motorvägen för att avgränsa arbetet. Under arbetet kommer inte, annat än översiktligt, sättningar undersökas beroende av tillförda laster eller ändrad grundvattensituation.

2 Bakgrund

I kommande kapitel beskrivs den geologiska historien i götaälvdalen, vägteknik, sättningar, kalkcementpelare samt InSAR.

2.1 Götaälvdalens geologiska historia

Sedan inlandsisens reträtt har det sedimenterade materialet i Sverige avlagrats av isens smältvatten (Andréasson, 2015a). Avlagringarna lade sig direkt på berggrunden, och de bestod av sand, grus, leror och moräner. Vid intensiva ismältningsperioder avlagrades mycket morän som hamnade i smältvattnet (Andréasson, 2015b). Smältvattenströmmarna bidrog till att det lösa moränmaterialet sorterades. De minsta kornpartiklarna, som lera och silt, suspenderades i lugnare sedimentationsmiljöer. Leran, som är den jordart som sedimenterar långsammast, avsattes längst bort från ismynningen (Andréasson, 2015c). Så kallade varviga glaciala leror bildades vid isälvarnas deltan (Larsson, Sällfors, 1995) och skapade ett mönster av återkommande ler- respektive siltlager (Andréasson, 2015c). Dessa uppstod till följd av att sedimenttillförseln är större under smältsäsonger.

I topografiskt lågt belägna områden som till exempel Göteborg, kom sedimenten att överlagras av postglaciala leror (Larsson, Sällfors, 1995). Dessa leror fanns tidigare på grundare bottnar, men har sedan eroderat och transporterats till djupare vatten där de avsatts som postglaciala leror (SGU, 2020). För 14000 – 10000 år sedan passerade inlandsisens tillbakaryckning Västsverige och därefter har de postglaciala sedimenten avlagrats i bland annat Götaälvdalen (Larsson, Sällfors, 1995). Lerlagren har ofta en tjocklek mellan 10 och 20 meter, men det är inte ovanligt att mäktigheter på 100 meter förekommer. På många ställen består den glaciala leran, samt underdelen av den överliggande postglaciala, av sand- och siltlager med lägre plasticitet än leran ovanpå. I den vanligast förekommande jordlagerföljden ökar graden av finkornighet successivt närmare markytan, och även mängden organiskt material, vilket bidrar till högre plasticitet. Vissa områden består, på grund av den höga organiska halten, av lerig gyttja eller gyttja i det översta jordlagret. Dessa organiska sediment är avlagrades som regel senare än för 14000 – 10000 år sedan.

Variationer i jordlagerföljden förekommer på sina ställen. Exempelvis vid mäktigare jordlager där den glaciala leran övergår i varvig postglacial lera närmare ytan (Larsson, Sällfors, 1995). Vanligtvis blir dessa varviga leror dock åter finkornigare, med mer organiskt innehåll vid markytan.

Ett par geologiskt avgörande händelser har spelat stor roll för Götaälvdalens avsättningshistoria (Larsson, Sällfors, 1995). Den ena är avtappningen av Baltiska issjön för cirka 13000 respektive cirka 11600 år sedan (NE, u.å). Vid den andra tappningen sjönk issjöns nivå med 25 meter på 1–2 år, och hamnade i höjd med havsytan. Detta ledde till stor avlagring av varviga leror, och även en del grövre material (Johnson et al., 2010). Den andra händelsen var transgressionen av havsnivån för ca 9000–7000 år sedan, varvid sedimentationen förändrades och siltinnehållet ökade tillfälligt (Larsson, Sällfors, 1995). De två omständigheter ledde till vissa avvikelser i jordlagerföljden, men i huvudsak gäller den generella bilden.

Sedan inlandsisens tillbakaryckning har landhöjningen pågått, vilket inneburit att sedimentationen upphört då markytan nått havsvattnets nivå (Larsson, Sällfors, 1995).

Somliga extremt lågt belägna kustpartier har kommit att hamna över havsytan först de senaste 1000 åren eller ännu senare. Landhöjningen har lett till att grundvattennivån sänkts, vilket i sin tur medfört mindre effektivspänningsökningar utöver de ökningarna som skett under hela sedimentationsprocessen. De lösa lerorna i Sverige kan betraktas som normalkonsoliderade, om man antar att ingen erosion eller betydande mänsklig påverkan har stört dem. Normalkonsoliderad innebär i det här fallet att lerorna nu upplever sin högsta effektiva vertikalspänning. Undersökningar har dock visat att många västsvenska leror uppvisar ett svagt överkonsoliderat beteende, då deformationen vittnar om att de tidigare varit utsatta för högre belastningar och sedan avlastats till de nuvarande spänningarna. I Göteborgstrakten ligger överkonsolideringsgraden på cirka 0,9 – 1,3.

2.2 Vägteknik

Vid planering, projektering och byggnation av en ny väg behöver undersökningar göras, till exempel geotekniska (Trafikverket, 2017). Det behöver även fastslås exakt hur vägen ska ligga i höjd och lateralt, samt tas hänsyn till en rad olika aspekter. Exempelvis intressenternas åsikter, ekosystemen och olika möjliga lösningar på utförandet behöver tas i beaktande. När allt det administrativa är klart kan man påbörja byggnationen.

En väg består i huvudsak av två delar. En överbyggnad och en underbyggnad. Underbyggnaden är marken under en väggropp (Styffe, m.fl, 2021). Där ingår även förstärkningsåtgärder, fyllnadsmaterial samt diken och trummor vars uppgift är att leda bort vatten.

Överbyggnaden läggs sedan ovanpå en terrassering (Styffe, m.fl, 2021). Terrassering innebär att man schaktar bort material och sedan fyller igen, för att bilda en så jämn vägbana som möjligt. Överbyggnaden består sedan av ett förstärkningslager, bärlager samt en beläggning. Materialvalet är viktigt då överbyggnaden är en avgörande faktor i vägens bärighet. En bra överbyggnad innehåller alla olika kornstorlekar, så det inte bildas några hålrum. Däremot kan materialen i under- och överbyggnaden vara så finkorniga att de kan blanda sig med varandra. Då sker en formändring vilket kan leda till att bärighetssättningar kan uppstå. Detta åtgärdar man med hjälp av materialskiljare i form av geotextil eller fiberduk (Granhage, 2009). Överbyggnaden innehåller flera olika lager vars uppgift är att fördela lasterna neråt i väggkonstruktionen (Styffe, m.fl, 2021). En vattenansamling i väggkonstruktionen skulle bidra till en nedsatt bärighet, därav är vattengenomsläppligheten viktig nedåt i väggkonstruktionen. Om undergrundens bärighet är instabil så behövs kraftigare förstärkningar, till exempel kalkcementpelare eller pålning.

2.3 Sättningar

Sättningar uppstår när jorden komprimeras. Detta kan ske när man bygger på dåligt packad sand, lera eller finkornig jord. Anledningen är att dessa lager dräneras på vatten då jorden trycks ihop av tyngden, och därmed förändras volymen på materialet som packas annorlunda. Sättningar är störst i början av pålastningen, men kan pågå i upp till 50-100 år (SGI, 2023a).

Att det uppstår sättningar beror på jordens tekniska egenskaper. Avgörande för en jords geotekniska egenskaper är dess kornstorleksfördelning och form (Larsson, 2007). Även kapillariteten och permeabiliteten, som beror av porvolym och porstorlek, spelar in. Jordens skjuvhållfasthet och kompressibilitet har med dess kornfördelning och relativa lagringstäthet att göra. För lerjordar gäller dock lite annorlunda förutsättningar; deras egenskaper är mer beroende av struktur och tidigare inverkan av spänningar än kornstorleksfördelning. Leror definieras, enligt europeisk standard, av kornstorlekar som är mindre än 0,002 millimeter i diameter och kan inte urskiljas med blotta ögat (Andréasson, 2015a).

När det kommer till leror, bestäms deras mekaniska egenskaper i hög grad av förkonsolideringsgraden (Larsson, 2007). Om förkonsolideringstrycket är detsamma som det vertikala effektivtrycket ($\sigma'_c = \sigma'_0$) på ett visst ställe i jorden, sägs jordlagret vara normalkonsoliderat. Då förkonsolideringsspanningen är större än det vertikala effektivtrycket ($\sigma'_c > \sigma'_0$) är jorden däremot överkonsoliderad. Överkonsolideringsgraden, så kallad OCR (Over Consolidation Ratio), beräknas enligt ekvation (1):

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} \quad (1)$$

Att en jord är överkonsoliderad innebär att den tidigare varit utsatt för en större belastning än den nu rådande. Detta har lett till att mestadels mindre elastiska deformationer har uppstått då den utsätts för laster av liknande storlek som den tidigare maximala (Larsson, 2007). Då jorden upplever sin högsta belastning under rådande omständigheter, betraktas den som normalkonsoliderad (Larsson, Sällfors, 1995).

Deformationer kan förekomma som antingen momentana eller tidsbundna. De momentana sättningarna uppkommer i form av formändring i vattenmättade och odränerade jordar (Larsson, 2007). Odränerat tillstånd innebär i detta fall att porvattentrycket inte hunnit utjämnas i samma takt som belastningsökningen (SGI, 2023b). Detta tillstånd är ofta styrande i början av en tilläggslasts pålastning i kohesionsjordar. Allteftersom tiden går blir leran mer dränerad, vilket betyder att porvattentrycket jämnas ut och belastningen tas upp av kornskelettet.

Tidsbundna sättningar förekommer som konsolidering och krypning. Man skiljer på primär och sekundär konsolidering (Larsson, 2007). Med primär konsolidering menas att volymminskningen sker i takt med hydrodynamisk fördröjning. När detta sker i en vattenmättad jord, ökar porvattentrycket. I normalkonsoliderade jordar blir storleken på portrycksökningen lika stor som vertikaltrycksökningen. Man antar här endimensionell dränering. Det innebär att vattenströmningen sker uppåt mot markytan, och eventuellt nedåt om det finns underliggande permeabla lager. Jordvolymen minskar i takt med att porvattnet pressas ut. Detta förlopp leder till att kornskelettet kommer ta upp allt större del av lasten, som inte längre bärs upp av poröverttrycket. Effektivspänningar i leran uppstår till följd av detta. Dräneringstiden beräknas ofta med hjälp av konsolideringskoefficienten, c_v , som kan tas fram med ekvation (2):

$$c_v = \frac{k \cdot M}{\gamma_w} \quad (2)$$

där

k = permeabilitetsfaktor

M = kompressionsmodul

γ_w = tungheten för vatten

För att beräkna tiden för en viss konsolideringsgrad att inträffa används ofta ekvation (3):

$$t = T_v \cdot \frac{h^2}{c_v} \quad (3)$$

där

T_v = tidsfaktor

h = jordlagrets tjocklek (h/2 i fallet dubbelsidig dränering)

Konsolideringsgraden betecknas U och anger hur stor del av porövertrycket som utjämnats. Den avläses som funktion av tidsfaktorn ur diagram.

Viktigt att notera att vid beräkning av U görs ett antal förenklade antaganden om jorden, så som:

- Darcys lag gäller
- Jorden är vattenmättad och homogen
- Vattenflödet och sättningar sker endast i vertikal riktning
- k och M är konstanter
- Sambandet mellan portal och effektivspänning är oberoende av tiden

För korta tidsintervall är dessa förenklingar acceptabla, då deformationerna inte är så stora. Ska sättningar för längre tidsintervall i kompressibel jord studeras, bör man använda mer förfinade metoder.

Sekundär konsolidering avser volymminskningen som uppstår till följd av konstant spänning utan att någon hydraulisk gradient uppstår. Den sekundära konsolideringen är en form av krypsättning som egentligen förekommer samtidigt som den primära. Man studerar vanligen denna krypdeformation med hjälp av en tid-sättningskurva efter en ökning av pålaggslast.

För de flesta jordar beror sekundärfasens inverkan på pålaggslastens storlek, spänningsnivån, dräneringsgrad och vilket tidsspann man beaktar. I grovkorniga jordar, med hög permeabilitet, är dess tidsmässiga inverkan särskilt betydande jämfört med primärkonsolideringsfasen, eftersom portrycksutjämningen uppnås relativt

snabbt. Den största delen av totalsättningen för dessa jordar, uppstår dock vid belastningstillfället. Sekundärsättningarna är ofta omfattande i finkorniga lösa jordar med mycket organiskt material.

Parallellt med de tidsberoende volymdeformationerna, förekommer också krypning till följd av skjuvspänningar (Larsson, 2007).

2.3.1 Dränerad skjuvhållfasthet

En viktig parameter när det kommer till jords geotekniska egenskaper är dess skjuvhållfasthet. Denna är ett mått på jordpartiklarnas motstånd att röra sig i förhållande till varandra, och delas in i odränerat eller dränerat fall för olika jordar, beskrivet ovan (SGI, 2023b). Huruvida det är den odränerade eller dränerade skjuvhållfastheten som styr, bestäms av belastningsfall och konsolideringsförhållanden (Larsson, 2007). I grovkorniga jordar är i huvudsak det dränerade tillståndet av intresse, medan den odränerade skjuvhållfastheten är dimensionerande i kohesionsjordar direkt efter en belastningsändring (och därmed en ändring av effektivspänningen). Som tidigare nämnt kommer portrycket utjämnas så småningom och den dränerade skjuvhållfastheten blir styrande.

Om provets volym vid skjuvning kan anses konstant, sägs provet vara i kritisk lagring. Då kan den dränerade hållfastheten skrivas enligt (4):

$$\tau_f = \sigma' \cdot \tan\varphi'_{cv} \quad (4)$$

där

τ_f = skjuvhållfastheten

σ' = effektivtryck vinkelrätt mot brottplanet

φ'_{cv} = friktionsvinkel (cirka 30° - 37° beroende på material och kornform)

I normalkonsoliderad löst lagrade jordar minskar däremot volymen vid skjuvning, och den dränerade hållfastheten får då i stället skrivas enligt (5):

$$\tau_f = c' + \sigma' \cdot \tan\varphi'_{cv} \quad (5)$$

där c' , effektivtrycket, (normalt 0,03 för svenska normalkonsoliderade jordar) och φ'_{cv} gäller för ett begränsat effektivspänningsintervall.

På grund av kapillärsugning i jord ovanför grundvattenytan, fås ett negativt portryck i detta lager (Larsson, 2007). I denna kapillärt vattenmättade zon blir den dränerade skjuvhållfastheten (6):

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_w) \cdot \tan\varphi' \quad (6)$$

där effektivspänningen ($\sigma' = \sigma - u_w$) blir större än totaltrycket σ på grund av det negativa portrycket. u_w är porvattentrycket. Ovanför det vattenmättade jordlagret sjunker vattenmättnadsgraden och portrycket, och då fås den dränerade skjuvhållfastheten (7):

$$\tau_f = c' + (\sigma - S_r u_w) \cdot \tan \varphi' \quad (7)$$

där S_r är vattenmättnadsgraden.

2.3.2 Odränerad skjuvhållfasthet

I fall där en vattenmättad jord belastas utan att konsolidering hinner uppstå, kommer effektivspänningarna påverkas till följd av portrycksändringar. Dessa effektivspänningar är, i odränerade finkorniga jordar, vid brottillståndet ungefär desamma oberoende av vilka spänningar som rådde i marken innan den aktuella belastningen.

Den odränerade skjuvhållfastheten för vattenmättade jordar kan uttryckas enligt ekvation (8):

$$\tau_{fu} = c_u \quad (8)$$

där τ_{fu} är hållfastheten och c_u skjuvhållfastheten, båda för odränerade förhållanden. För överkonsoliderade jordar är skjuvhållfastheten mycket tidsberoende, då dräneringen leder till ökning av effektivspänningarna.

När det kommer till jordar som inte är helt vattenmättade, blir portrycksförändringarna inte lika stora vid lastökning som i vattenmättade fall (Larsson, 2007). Under icke vattenmättade förhållanden blir den odränerade skjuvhållfastheten ett mellanting mellan fullt dränerad och odränerad hållfasthet i vattenmättade jordar.

I detta fall kan den odränerade skjuvhållfastheten skrivas (9):

$$c_u = b_0 + \sigma'_{ct} \cdot \tan \beta_0 \quad (9)$$

där

σ'_{ct} = effektivtrycket före spänningsändringen

b_0 och β_0 är variabler som ändras med effektivspännings- och portrycksnivån innan skjuvningen.

2.4 Kalkcementpelare

Kalkpelarmetoden kom till Sverige på 1970-talet och har främst utvecklats i Japan och Sverige (Larsson, 2006). Kalkcementpelare används i huvudsak vid djupstabilisering av väg- och järnvägsbankar för att reducera sättningar och öka stabiliteten, då styvheten är högre i pelarna jämfört med i lera (Edstam, 1997). Med hjälp av olika installationsmönster, pelardjup, avstånd mellan pelare och diametern på pelarna kan man anpassa konstruktionen efter den aktuella utmaningen (Larsson, 2006). Styvheten

på pelarna varierar beroende på lera. Till exempel har en kalkcementpelare i lera med organiskt material en lägre hållfasthet än i en lera med lägre andel organiskt innehåll (Alén et al., 2006).

2.4.1 Konstruktion

En kalkcementpelare appliceras genom att man först borrar ett djupt hål i marken samtidigt som borren dras upp disponerar ut bindningsmedlet och blandas in under omrörning av jordmassan. Det är viktigt att blandningen sprids ut jämnt, vilket kan vara svårt då installationen sker direkt i jorden. Därefter bildas en kemisk reaktion mellan bindemedlet och vattnet i jordmassan (Larsson, 2002). Den vanligast förekommande blandningsproportionen av kalkcementpelare består av 50% kalk och 50% cement.

Det finns främst två installationsmetoder för den här typen av pelare; en torr och en våt metod. Däremot har man i Sverige enbart använt den torra metoden (Larsson, 2006). Denna metod lämpas bäst i lös jord med högt vatteninnehåll, och går ut på att man blåser in bindemedlet med hjälp av tryckluft, som i sin tur reagerar med vattnet i jorden. Den våta metoden går i stället ut på att man blandar bindemedlet med vatten och pumpar sedan ner det i jorden under blandning. Därav är den våta metoden mer lämpad för en jord med lägre vatteninnehåll.

Kalkcementpelare kan installeras i olika mönster för olika typer av åtgärder. Vid ändamålet att reducera sättningar och minska konsolideringstiden så installeras pelarna oftast i ett rut- eller triangelmönster (Larsson, 2006). Om det krävs mer stabilisering kan man använda till exempel geotextil vilket efterliknar en dragarmering mellan pelarna och banken. Ifall förstärkningen fortfarande inte är bra kan man installera pelarna som skivor, alltså att de överlappar varandra och därmed tar upp en större last. Vid stabilisering av en slänt, ett schakt eller skärningar använder man vanligtvis installationsmönster i form av skivor och gitter. Gittermönster innebär att pelarnas placering efterliknar ett nät om man ser pelarna ovanifrån.

Pelarens diameter kan variera mellan 500–800 millimeter men den vanligast förekommande är 600 millimeter (Edstam, 1997). Pelarna har oftast en maximal längd på ungefär 25 meter (Larsson, 1999). Det dominerande installationsmönstret är ett kvadratisk rutnät där avståndet mellan pelarna varierar beroende på diametern på pelarna och kan vara allt mellan 0,8 – 2 meter långt, men oftast mellan 1,3–1,6 meter (Edstam, 1997). En större diameter på pelaren bidrar till en större last tas upp och därmed kan avståndet mellan pelarna öka.

2.4.2 Miljö

Vid installationer av bindemedelstabiliserande pelare förs nya kemiska komponenter ner i jorden (Larsson, 2006). Detta kan påverka närliggande vattendrag och även grundvattnet. Enligt EU:s grundvattendirektiv bör både bindemedel och reaktionsprodukter i huvudsak ses som potentiella källor till föroreningar och deras möjliga urlakningspotential bör konstateras. Undantag görs för grundläggningmaterial då sannolikheten att urlakning sker är låg. Kalkcementpelare installeras som regel i lös finkornig jord med en väldigt låg permeabilitet, därav är ingen stor vattenomsättning eller urlakning förväntad och undantag kan göras. Ämnen från pelarna kan släppas ut i jorden då permeabiliteten är högre i pelarna än i jorden

med hjälp av vertikal vattenströmning och konsolidering. Detta är en viktig parameter att ha under kontroll främst då tillsättningar av restprodukter sker som kan bidra till ett miljöproblem.

Cement består främst av kalciumoxid vilket är bränd kalk (Naturskyddsföreningen, 2022). Bränd kalk framställs genom att man värmer upp kalksten till 1450 grader och då frigörs koldioxid som har varit bundet i kalkstenen. Vid framställning av 1 ton cement sker ett utsläpp på 700–800 kilo koldioxid. Koldioxid är en växthusgas som bidrar till en ökad växthuseffekt och därmed fås ett varmare klimat. Kalkstenen bryts i Sverige och är en ändlig resurs (Riksdagen, 2013). När kalkstenen tar slut vid en täkt måste man hitta ett nytt ställe att bryta på. Då försvinner ett stort antal arbetsplatser och även naturresurserna är borta.

2.4.3 Provbankar

Längs väg E45 byggdes tre provbanker för mätning av deformation och portryck. Dessa anlades i Surte, Nödinge och Stora Viken Norra, men togs sedan bort vid utbyggnad av järnvägen (Edstam, 2017). En karta över provbankarnas placering redovisas i figur 1. Projektet drevs av Statens Geotekniska Institut och GEO-avdelningen på Chalmers för att studera hållfastheten på kalkcementpelare (Edstam, 1997). Man utförde pålastning i två steg, först en last som inte skulle överskrida pelarens kryplast och sedan en andra last som skulle överskrida den (Alén et al., 2006). Kalkcementpelare kan räknas som ett två - till trefasmaterial vilket indikerar att porövertrycket i pelaren succesivt avtar med tiden. Detta bidrar i sin tur till att permeabiliteten är den materialegenskap som beskriver sättningarnas tidsutveckling. Vid en permeabilitetsmätning i en av provbankerna mättes permeabiliteten till 5–50 gånger större än i naturlig lera.



Figur 1. Provbankar placering

Lermäktigheterna vid provbankarna varierade mellan ungefär 15–40 meter och pelarlängden mellan 12–20 meter (Alén et al, 2006). I Surte och Nödinge var pelarna svävande, medan de i Stora Viken Norra fördes ned till fast botten. C/c-avstånd är 1,5 meter och diametern 0,6 meter. Installationsmönstret var kvadratisk. I Stora Viken Norra var den karakteristiska skjuvhållfastheten 80 kPa, och 120–160 kPa i Surte och Nödinge. I Stora Viken var också överkonsolideringsgraden något högre, med OCR på 1,6–1,7, medan den var cirka 1,3 i de andra två områdena.

I provbankarna uppmättes sättningarna i övergångszonen till en tredjedel av den totala sättningen, och brukar till stor del uppträda i början av en pålastning (Alén et al. 2006). Övergångszonen är området mellan fyllningslutet och stället där kalkcementpelarna får en högre kvalitet. Övergångszonen varierar beroende på lastspridningen från banken till blocket, tryckhållfastheten i de övre delarna på pelarna samt den varierande kvaliteten på pelaren (Larsson, 2006). Om de övre delarna av pelarna har en lägre standard så ökar tjockleken på zonen. Den lastspridning som uppstår styrs av utformningen på banken och påverkar lastöverföringen till pelarna. Banklasten sprids genom valvverkan och begränsas av pelarnas tryckhållfasthet. Den kvarvarande lasten fördelas genom skjuvspänning längs pelarna. När kalkcementpelarna tar slut så bredds lasten ut likt en kon.

2.4.4 Mätsektioner

Utöver provbankar placerades fem mätsektioner ut för att kunna göra uppföljningsmätningar. Mätsektionerna är belägna i Stora viken, Nödinge, Trollevik, Nol och Lödöse (Edstam, 2017).

2.4.4.1 Stora viken

Provbanken Stora viken är belägen i järnvägsbanken där jordlagerföljden är två meter järnvägsbank, ett tunt lager torrskorpelera och sedan 28 m djup lera.

Kalkcementpelarna är 5–23 m långa och svävande vilket menas att det inte når ner till berggrunden. De är placerade i installationsmönstret gitter vilket är gallerformat.

Sättningshastigheten 6 år efter byggnationen av järnvägen uppmättes till 10 mm/år i de övre jordlagren, medan de uppmättes till 4 mm/år längre ner i marken.

2.4.4.2 Nödinge

Mätsektionerna är placerade vid tillfartsfilen. Jordlagerföljden är först ett tunt lager med torrskorpelera och därefter cirka 13–15 meter lera. Varannan kalkcementpelare är 10 meter lång och de andra går hela vägen ner till berg. De är installerade i ett kvadriskt mönster. Den största sättningen av de olika provbankerna skedde i Nödinge. Ett år efter belastningen så hade marken redan satt sig 25–30 centimeter. Efter 6 år var sättningshastigheten närmare 10 millimeter/år. Det kan synas på hur sättningarna har varierat med djupet att pelarnas kvalitet har varit sämre i övre delen. Varför detta har skett finns det däremot inget svar på.

2.4.4.3 Trollevik

I Trolleviken finns det två mätsektioner, de är belägna vid järnvägen. Jordlagerföljden består återigen av ett tunt lager torrskorpelera och därefter 29 meter lera.

Kalkcementpelarna är 6–23 meter långa och därmed svävar alla pelare. Även här är installationsmönstret format som gitter. 6 år efter byggnationen hade man en sättningshastighet på 12–18 millimeter/år i den övre delen. I de nedre delarna var sättningshastigheten närmare 6–8 millimeter/år.

2.4.4.4 Nol

Mätsektionen är belägen vid påfarten till E45:an. Jordlagerföljden består av ett tunt lager torrskorpelera och därefter 35–39 meter lös lera. Kalkcementpelarna har en längd på 22 meter vilket betyder att de svävar. De är placerade i ett kvadriskt mönster. 1 år efter byggnationen hade man en sättning på 10–12 centimeter. 6 år senare hade man en sättningshastighet på 10 millimeter/år i de övre delarna och 4 millimeter/år i de nedre delarna. Pelarnas kvalitet i de övre delarna är bättre än de i Nödinge, detta ser man då man jämför dess sättningsvariation.

2.4.4.5 Lödöse

De två mätpunkterna är belägna vid en påfart till E45:an. Jordlagerföljden består av ett tunt lager torrskorpa och därefter 18–23 meter lera. Kalkcementpelarna är 10–17 meter långa och svävar därmed. De är placerade i ett skivmönster vilket betyder att de är placerade på en rad och överlappar varandra (Larsson, 2006). 1 år efter byggnationen hade en sättning på 5–6 centimeter uppmätts (Edstam, 2017). 3 år efter byggnationen uppmättes en sättningshastighet på 25–30 millimeter/år. Med hjälp av sättningsvariationen med djupet kan det konstateras att pelarnas kvalitet i de övre delarna är bättre vid Lödöse jämfört med Nödinge och Nol.

2.5 InSAR

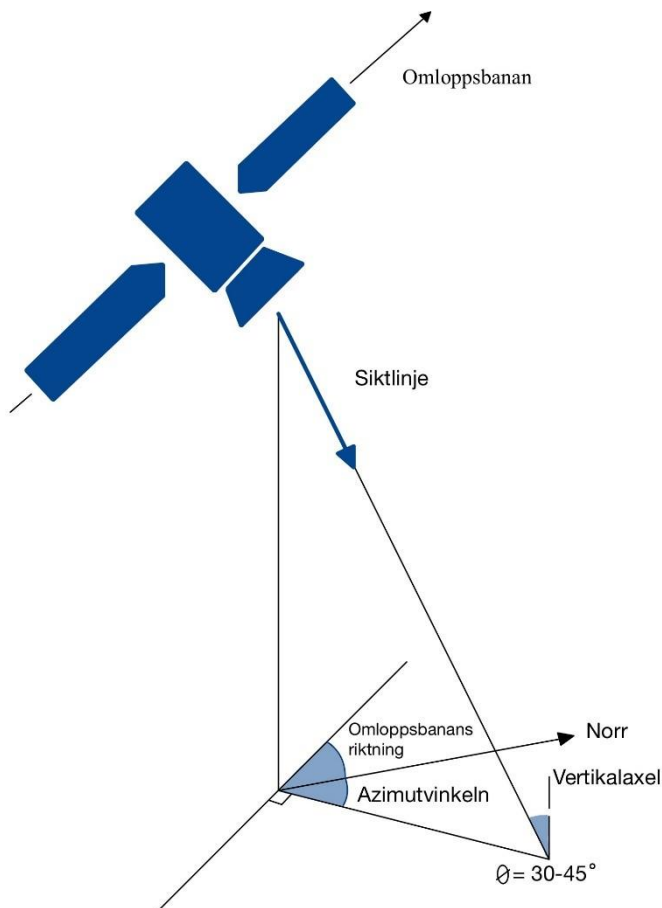
Interferometrisk syntetisk aparturraranalys (InSAR) är en relativt ny teknik som mäter markrörelser med millimeterprecision, både under byggprocesser och i befintlig infrastruktur (Rymdstyrelsen, 2021). Dataregistreringen började år 2014 och drivs av det europeiska rymdorganet (ESA). Tekniken kan användas för att förbättra arbetsprocesser, reducera kostnader samt bidra till klimatanpassningar. InSAR möjliggör att hitta markrörelser i ett tidigt skede och därmed kan man sätta i gång med åtgärdsarbetet tidigare.

Med hjälp av den stora datainsamlingen som InSAR erbjuder kan man använda det till flera olika saker, till exempel bevaka aktiviteten hos vulkaner (USGS, u.å.). I nuläget har många vulkaner brist på bevakning. Med hjälp av satelliterna som rör sig över svåråtkomliga och farliga områden kan man i ett tidigt skede se markförändringar. En förvarning om att det är något som sker, till exempel att magma rör sig i marken (Rymdstyrelsen, 2018).

2.5.1 Teknik

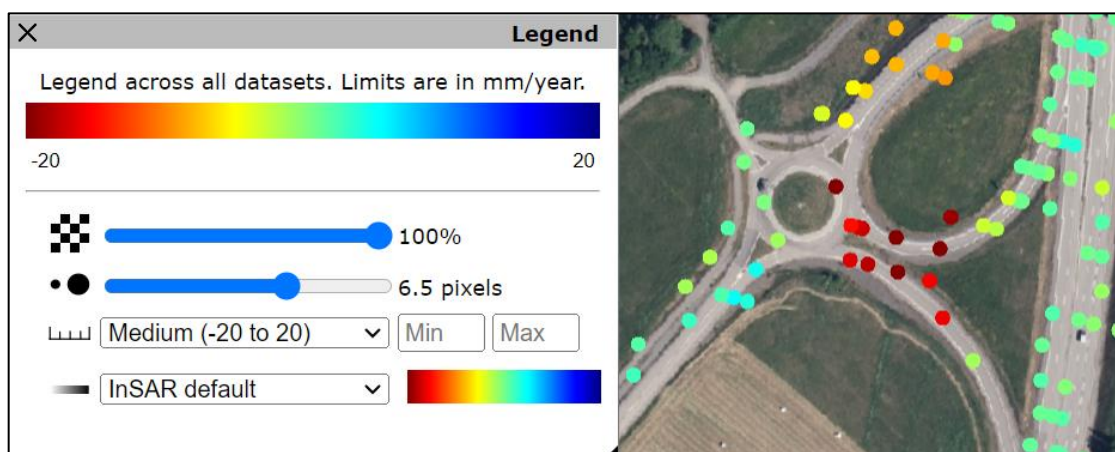
Satelliterna cirkulerar i polära omloppsbanor runt jorden, där datan delas in i ascending (stigande) och decending (fallande) vilket beror på om satelliten rör sig norr eller söderut när den passerar ett område på jorden (Rymdstyrelsen, 2021). Indelningen av datan görs för att kunna tolka rörelsedatan. De polära omloppsbanorna blir tätare närmare polerna, vilket bidrar till en stor överlappning av datainsamling. Det genereras två datainsamlingar i Norge och Sverige. Med hjälp av den dubbla datainsamlingen kan kvaliteten på signalerna bedömas. Om en viss markrörelse visas i en punkt så kan man se om båda satelliterna fångar samma data för att se om den är verklig rörelse eller enbart en störning.

Satelliterna skickar ut en radiosignal där man samlar in returvägens fas så man kan se förskjutningsvinkeln (Bygg & Teknik 2019). Detta upprepas sex dagar senare för att man sedan ska kunna jämföra datan (NGU, u.å.). Satelliterna skickar ut radar riktat åt höger i färdriktningen (Rymdstyrelsen, 2021). Därav blir azimutvinkeln annorlunda för ascending- och decendingradarn. Radarn samlar in information över en 250 kilometer lång sträcka. Vinkeln mellan siktlinjen och vertikalaxeln varierar mellan 30-45° vilket modellen i figur 2 symboliserar. Ascending- och decendingdatan över samma område ger markrörelser i en horisontell riktning, positivt respektive negativt värde beroende på vilken data som analyseras. Detta sker då radarn mäter markrörelser i färdriktningen. Om det däremot sker en markrörelse i vertikalt led så blir markrörelsen negativ för både ascending och decending.



Figur 2 InSAR- satellit modell. Modifierad från (NGU, u.å)

Markrörelser kan avläsas på InSAR i form av prickar. Färgen på pricken symboliserar olika mycket markrörelser där man själv kan välja vilken gradering man vill ha. Standarden är -20 till 20 mm/år. I figur 3 kan man avläsa att röd är markeringen för större sättning, grön är oförändrad och blå är för hävning.



Figur 3 Satellitbild med InSAR

2.5.2 Utmaningar

InSAR är fortfarande en ny metod som är under utveckling. Detta är något man ska ta hänsyn till vid analysering av InSAR-data. Det kan till exempel ske störningar där vissa punkter har ett missvisande värde (Rymdstyrelsen, 2021). Därav bör man titta på en punkt med försiktighet. I stället för att titta på enstaka värden så får man zooma ut och titta på trender eller fler punkter. En störning som kan ske är förändring i vegetation, markfuktighet eller ytvatten då det kan bidra till att radarsignaler kan reflekteras annorlunda (NGU, u.å).

Vid den rikstäckande datainsamlingen har sammanställning gjorts av ett antal mindre områden, som alla behandlas individuellt (Rymdstyrelsen, 2021). Om datainsamlingen som sker vid olika tidpunkter används för att bearbeta intilliggande områden, så kan detta bidra till en förskjutning av värdena. Det bildas som ett jack i en rak sträcka. Ett sådant jack kan dämpas vid datainsamlingen och även vid bearbetningen av datan. Satelliterna cirkulerar i omloppsbanan året om, och vid snö kan missvisande data påträffas. Därav begränsar man datainsamlingen till juni-oktober. Däremot kan snö påträffas även då i vissa områden. Detta är en felkälla som är under utveckling.

2.6 Delsträckor

Ett urval på tre delsträckor mellan Göteborg och Trollhättan med kalkcementpelare förstärkning beskrivs i efterföljande kapitel.

2.6.1 Alafors – Tollered

2.6.1.1 Området och topografin

Den aktuella sträckan ligger mitt emellan Alafors och Tollered. Området som studeras redovisas i Figur 4. Väster om den studerade sträckan utgörs terrängen initialt av skogsbevuxen fast mark som övergår till öppet jämnt åkerlandskap på en nivå av 16 meter över havet (Kullander & Markusson, 2008). Öster om vägen återfinns öppen åkermark, med vissa skogspartier i lutning upp mot öst. Närmast vägen varierar marknivån mellan 16,5 och 17,5 meter över havet. En lokalväg som löper längs med E45an ”buktar ut” på denna sträcka, och en gång-cykelbana korsar E45an genom en GC-port. Den nya vägen går på bank, liksom den förra, och breddas i huvudsak åt öster. Även ett dike har anlagts väster om sträckan. Se Bilaga 5 för planritning och tvär- och längdsektionsritningar.



Figur 4 InSAR-karta över Alafors-Tollered

2.6.1.2 Geotekniska förhållanden

Området utgörs i huvudsak av fyllning och torrkorpa. Under delar av sträckan består jordlagerföljden av 0,3–0,7 meter mulljord över siltig lera följt av friktionsjord ner till berg. När det gäller leran, ökar den i mäktighet från väster till öster med en variation mellan cirka 1–4 meter. I den sydligare delen av sträckan är lerlagret ungefär 0–1 meter i västra väggkanten och mellan 3–7 meter i den östra. Norrut ökar lerdjupen mellan 6–15 meter på västra sidan, och på den östra mellan 12–16 meter. Generellt över sträckan ligger en utbildad torrskorpa med en tjocklek på 1–1,5 meter.

Berggrunden har genom mätningar visats ligga på ett upp till 25 meters djup. Det innebär att friktionsjorden under leran har ett djup på upp till 10 meter.

Den odränerade skjuvhållfastheten uppvisar stor spridning över sträckan. I genomsnitt är den korrigerade hållfastheten, med avseende på konflytgräns, cirka 10 kPa, med en viss variation på nivåerna +3 till +12 meter på $10 + 1,25 \text{ Pa/m}$. Genomsnittliga konflytgränser för olika nivåer varierar mellan 35 %, 45 % och 65 %.

Densiteten är cirka $1,6 \text{ ton/m}^3$ på nivån +14 meter, med en spridning på uppemot $0,1 \text{ ton/m}^3$. Under denna nivå ökar den ner mot djupet med ungefär $0,02 \text{ ton/m}^3$ per meter.

När det gäller vattenkvot är den som högst, 65–85 %, cirka 2–3 meter under marknivån. Därunder avtar den mot djupet. På nivån +4 till +6 meter har den sjunkit till 45 %. Leran är sensitiv och klassas som kvick från 3 meters djup. Den är överkonsoliderad med 5–20 kPa. Överkonsolideringen minskar till 0–10 kPa om hänsyn tas till krypeffekter som ger en reduktion på 80 % av förkonsolideringstrycket. Kompressionsmodulerna är relativt låga och varierar beroende på borrhål. M_L uppmäts till mellan 300–800 MPa.

Grundvattenförhållandena har mätts i fyra punkter. Osäkerheter på grund av årstidsvariationer kan förekomma då alla mätningar inte utförts under samma period. Porvattentrycket från de högsta uppmätta värdena ökar från 0 kPa i underkanten av torrskorpan till 50 kPa nere vid 5 meters djup, dvs en ökning med 12,5 kPa per meter. På djup under 5 meter ökar portrycket istället med 11,5 kPa per meter. Detta motsvarar på 15 meters djup ett artesiskt tryck på 1,5 meter över markytan i friktionsjordens undre akvifer. När det kommer till de lägsta uppmätta värdena uppvisar dessa ett porvattentryck på 48 kPa 5 meter under marknivå. Därefter ökar porvattentrycket med 10,7 kPa per meter, och det artesiska trycket ligger då på ca 0,5 meter i den undre akviferen.

2.6.1.3 Sättningar

Sättningarna är baserade på provtagning samt konsolidering och har beräknats både för pelarförstärkt och oförstärkt lera (Kullander & Markusson, 2008). Lasten har förts ned till 2/3 av KC-pelarna och därefter har 2:1-metoden använts för att beskriva lastspridningen. Under KC-pelarna antas leran vara enkeldrainerad. Krypning har beaktats genom att reducera förkonsolideringstrycket till 80 %, dock inte lägre än rådande effektivtryck med hänsyn till förmodade portryck. För torrskorpan har kompressionsmodulen antagits till 1000 kPa och överkonsolideringen till 30 kPa.

Hänsyn till krypning har tagits genom att förkonsolideringstrycket reduceras till 80 %, dock inte lägre än rådande effektivtryck.

Differenssättningarna har studerats i tvärled och i längsled. I de sydligare delarna beräknas kraven på max tillåtna differenssättningarna (1 %) teoretiskt uppfyllas i tvärled eftersom lerdjupen är små (Kullander & Markusson, 2008). Dock föreslås förstärkning av leran på högra vägshalvan för att sättningarna inte ska upplevas som störande. I de nordligare delarna ökar lerdjupen och kraven på differenssättningarna uppfylls ej.

Sättningsberäkningarna har bland annat utförts i anslutning till gång-cykelvägen där markhöjningen är 1,6 meter, och en grundvattensänkning på 2 meter har antagits. Lerdjupet är cirka 14 meter. På KC-pelarna beräknades en totalsättning på cirka 11 centimeter fås, varav 10 av de centimetrarna förväntades utvecklas det första året. Denna beräkning gäller för en sträcka av 35 meter vid bron. Även en bit söder om gång-cykelvägen, i km 18/280, har sättningsberäkningar för KC-pelare gjorts. Här bedöms lerdjupet vara 12 meter, markhöjningen 1,8 meter och grundvattensänkningen 0 meter. Totalsättningen efter 20 år för detta område beräknas till 95 millimeter, varav 90 millimeter utvecklas under första året. Enligt beräknings-PM är dessa sättningsberäkningar giltiga för hela sträckan 18/200 till 18/400, förutom vid gång-cykelporten, där KC-installationen ser annorlunda ut. Störst totalsättning fås i den oförstärkta leran på höger sida av vägen, söder om gång-cykelbanan, och den sätts till 36 centimeter. Härifrån och söderut bedöms förstärkning vara nödvändig för att undvika för höga sättningsdifferenser i tvärled och längsled.

2.6.1.4 Förstärkningsåtgärder

Mellan km 18/100 till 18/410 förstärks E45:an med KC-pelare, men endast på höger vägshalva mellan 18/100 och 18/210.

Centrumavståndet är 1,5 meter. Varannan pelare har förts ned till ett djup av 7 meter, och varannan till fast botten. En högsta bankhöjd på 2,1 meter har tillåtits, samt en släntlutning på 1:3.

Mellan km 18/315 till 18/340, i anslutning till gång-cykelporten, anläggs varannan KC-pelare i skivor (cc-avstånd 1,5 meter) under huvudvägen, för att stabilisera marken ytterligare. Vid gång-cykelportens brovingar kompletteras installationsmönstret under huvudvägen av KC-pelare i 45 graders lutning mot denna (samma centrumavstånd). Dessa skivor installeras ned till +8 meter (7 meters djup).

2.6.2 Grönån

Beräknings-PM innefattar delsträckan Älvängen – Ramstorp. Den delen som beskrivs nedan innefattar området strax söder om Grönån vilket kan avläsas i Figur 5 nedan.

2.6.2.1 Området och topografi

Området är beläget 2 km norr om Älvängen. En bit ifrån vägen går Grönån. Området är nästintill hel platt men i slutet av sträckan påbörjas en stigning med en lutning på 2–5 % (Vägverket, 2010a). Se Bilaga 5 för planritning och tvär- och längdsektionsritningar.



Figur 5 InSAR-karta över Grönån

2.6.2.2 Geotekniska förhållanden

Jordlagerföljden börjar med 0–1 meter torrskorpelera och därefter kommer ett lager med lera som är normal- svagt överkonsoliderad. Ner till ett djup av 5 meter är leran väldigt lös men blir fastare med djupet. Lerdjupet är över 50 meter. När stigningen börjar så övergår leran till att bli kvick. Vid en sondering mättes djupet till berggrunden på 77 meter strax söder om bron över Grönån. Vid sonderingen kunde man även avläsa att det är ett 5 meter djupt lager med skiktad friktionsjord/lera.

På delsträckan är det dimensionerade portrycket hydrostatiskt, vilket motsvarar en grundvattenyta på 0,5 – 10 meter ner i marken. Grundvattentytan ligger 1 meter ner under markytan. I närheten av Grönån visar mätningar att portrycket är lite högre och porövertryck råder på större djup.

2.6.2.3 Sättningar

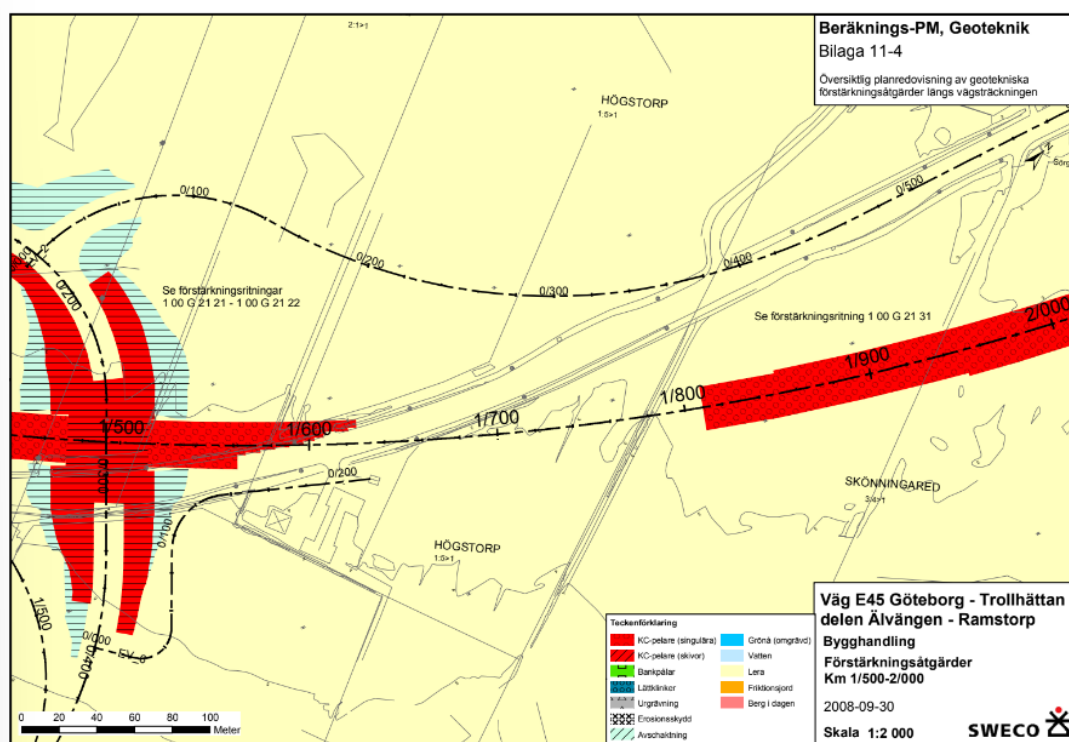
Sättningsberäkningar har gjorts vid delsträckan med metoderna 2:1 – och Boussinesqs metod. Den totala sättningen efter den dimensionerade livslängden på 40 år utan

förstärkning så landar sättningarna på 460 – 690 millimeter. Och med förstärkning så är den beräknade sättningen 30–250 millimeter på 40 år.

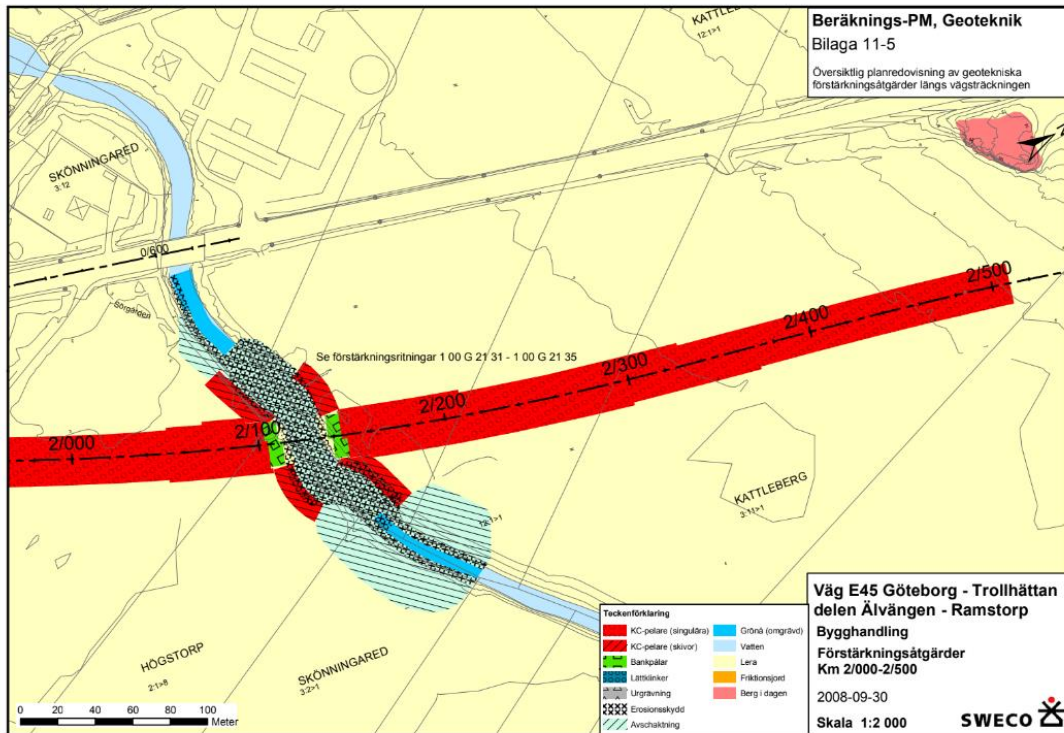
2.6.2.4 Förstärkningsåtgärder

SWECO som ansvarade för projekteringen av delsträckan vägde för- och nackdelar med olika förstärkningsåtgärder. De jämför till exempel bankpållning, cellplast, lättklinkers och KC-pelare. Slutsatsen som drogs var att kalkcementpelare är den bästa metoden för de geologiska förutsättningarna som råder i delsträckan. Lättklinkers är även ett bra alternativ men dyrare än kalkcementpelare.

Kalkcementpelarna är monterade i ett kvadratisk mönster. Pelarna har en längd på 7 meter på den första delen av sträckan 1/831 - 1/900 och 2/330,5 - 2/489,5. De har ett c/c-avstånd på 1,5 meter mellan varje pelare. På sträckan 1/901,5 - 1/949,5 och 2/300,5 - 2/329 har varannan pelare en längd på 10 meter och varannan 5 meter. C/c-avstånd 1,5 meter. Planredovisningen över förstärkningsåtgärderna längst den aktuella sträckan ses i figur 6 och 7 nedan.



Figur 6 Förstärkningsåtgärder Grönån markerat i rött

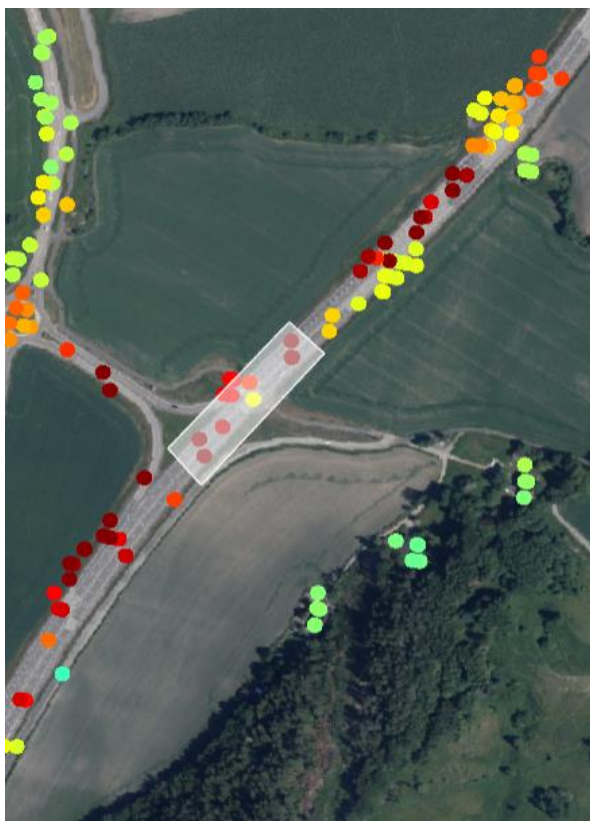


Figur 7 Förstärkningsåtgärder Grönån markerat i rött

2.6.3 Alvhem

2.6.3.1 Området och topografin

Området som analyseras ligger strax söder om Alvhem och visas i Figur 8. Den nya sträckan vid Alvhem utgörs av en 18,5 meter bred fyrfilig väg med mitträcke (Vägverket, 2010b). Den utfördes med flacka slänter (1:4), alternativt 1:2 vid hög bank (>2 meter). Vägen går vid denna del på låg bank, och där E45:an viker av österut är banken cirka 1 meter. Två höjdparter passeras längs sträckan på östra sidan. Vägen går mestadels genom odlingsmark. Se Bilaga 5 för planritning och tvär- och längdsektionsritningar.



Figur 8 InSAR-karta över GC-porten i Alvhem

2.6.3.2 Geotekniska förhållanden

Södra halvan (km 1/020 - 1/400)

Den södra delen av området Alvhem utgörs jordlagerföljden av cirka 20–36 meter tjock lera överlagrad av 1 meter torrskorpelera (Vägverket, 2010b). Egenskaperna varierar längs med hela sträckan och är i flera delar kvick eller väldigt lös. Mellan 1/020 och 1/150, återfinns ett friktionsskikt med lerig silt från ca 4–5 meters djup. Norrut ligger detta friktionslager på cirka 7–8 meters djup, och med en mäktighet mellan 0,5–3 meter. Kvickleran återfinns på ett maxdjup av 7–11 meter.

Grundvattenytan förväntas ligga på ett djup av 0,5 meter och portrycket antas öka hydrostatiskt.

Överkonsolideringsgraden från torrskorpan och ner till 6 meter varierar mellan 1,4–2,0, och på större djup är leran överkonsoliderad med 10–40 %, dvs ett OCR på 1,1–1,4.

Tungheten för leran varierar mellan 16–17 kN/m³, permeabiliteten mellan $7,0 \cdot 10^{-10}$ – $2,0 \cdot 10^{-9}$ m/s och den odränerade skjuvhållfastheten går från 11 kPa i de övre skikten till $11 + 1,3 \cdot z$ kPa från 7 meters djup (där z är djupet). Sättningsmodulen M_L ökar också med djupet från cirka 450–1100 kPa. Förkonsolideringstrycket kan beskrivas med $40 + 7 \cdot z$ kPa från 4 meters djup. För friktionsjorden gäller en tunghet på 21 kN/m³ och en friktionsvinkel på 38 grader.

Norra halvan (km 1/400 - 2/150)

Även på den norra delen utgörs det översta skiktet av 1 meter torrskorpelera som överlagrar en lös lera, som successivt blir alltmer fast på lägre djup än 8 meter. Mäktigheten på leran går från inledningsvis 36 meter, för att sedan öka till 55 meter i 1/600, och därefter återgå till cirka 32 meter. Mellan cirka 1/800 till 1/900, finns ett siltlager på 6–8 meters djup. Under leran finns antingen berg eller ett 0–2 meter mäktigt friktionsjordlager. Den här delen av sträckan innehåller ingen kvicklera.

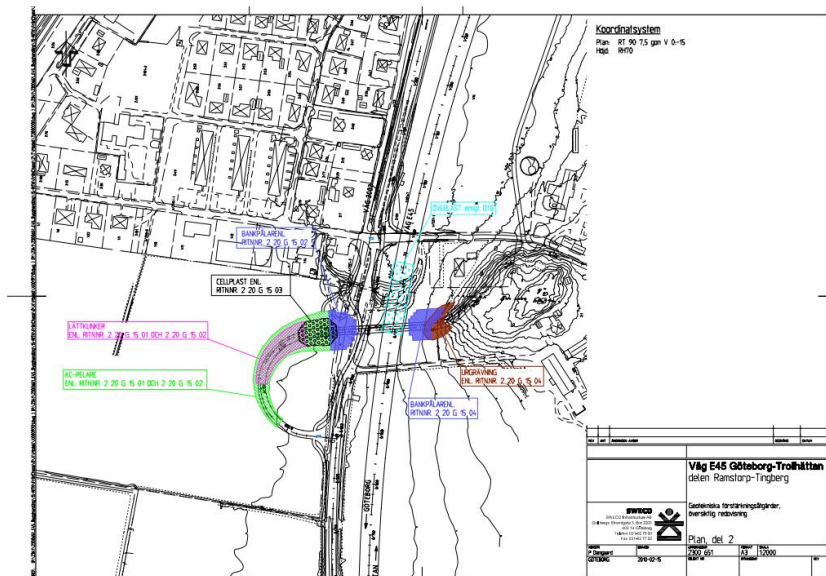
Grundvattenytan förväntas ligga på ett djup av 0,5 meter och portrycket antas öka hydrostatiskt.

Överkonsolideringsgraden ner till 6 meters djup ligger på 1,5–2,0, och därunder är leran normal- svagt överkonsoliderad med OCR på 1,0–1,3.

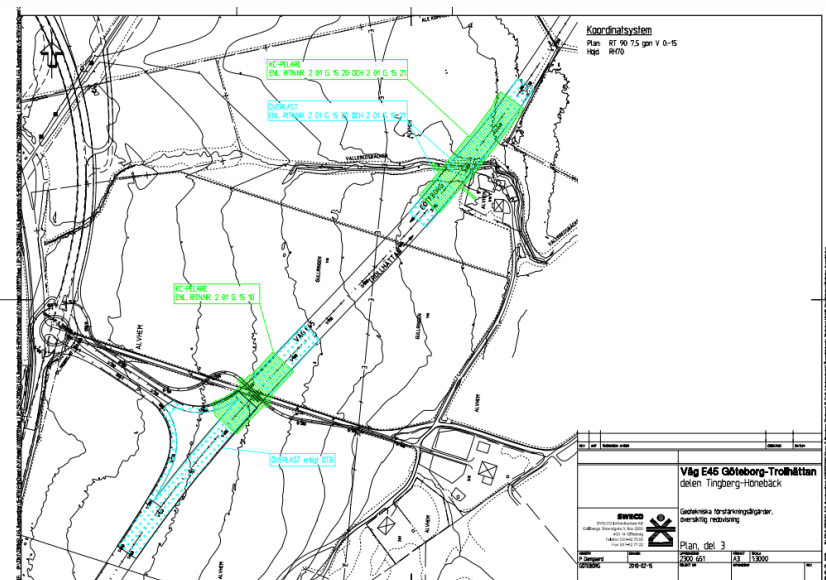
Materialparametrarna är i stort sett desamma som för den södra delen av sträckan, med undantag för den odränerade skjuvhållfastheten som varierar med djupet z enligt $13+1,5*z$ kPa, efter 8 meters djup.

2.6.3.3 Sättningar

Beräkning av sättningar har gjorts med hjälp av 2:1-metoden samt Bousinesqs metod (Vägverket, 2010b). Där KC-pelare använts har man i stället använt Mathcad. Krypsättningar antas utbildas i de fall där den rådande spänningen överskrider 80 % av förkonsolideringstrycket. Över större delen av sträckan Alvhem har man räknat med mycket små eller inga sättningar. Dock har man bitvis ändå använt överlast för att få en nedpressning. Vid gång-cykelporten i den norra delen av Alvhem har man förstärkt E45:an med KC-pelare samt överlast, se Figur 9 och 10. Här har man beräknat totalsättningar efter 40 år upp till 20 centimeter utan åtgärd, och 7 centimeter med förstärkning, och hänsyn tagen till krypning. Man har även gjort sättningsberäkningar för en oförstärkt sektion mellan km 0/540 och 1/130, och dessa beräknades uppgå till 9 centimeter som mest. Det ska tilläggas att det längs en stor del av det studerade området saknas redovisade sättningsresultat.



Figur 9 Förstärkningsåtgärder över Alvhem 0/800-1/200



Figur 10 Förstärkningsåtgärder över Alvhem 1/600-2/150

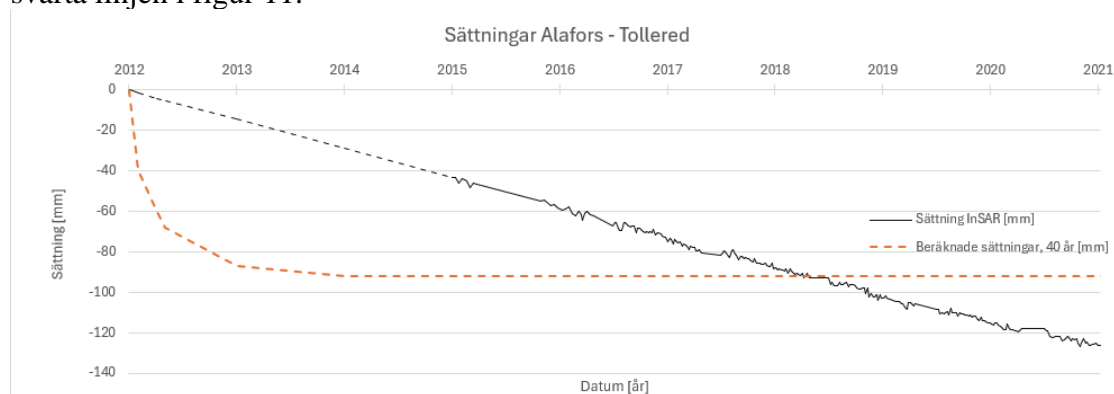
2.6.3.4 Förstärkningsåtgärder

I projektet vid området Alvhem eftersträvade man att utforma väglösningar på ett sätt att man med små eller inga förstärkningsåtgärder alls ändå kunde uppnå de geotekniska sättningskraven. På vissa delsträckor ansågs ändå förstärkning vara nödvändig. I anslutningar från lokalvägar har man bland annat valt bankpålning som förstärkningsmetod, främst för att förhållandena varit ogynnsamma för KC-pelare. Se figurerna ovan. Även cellplast och lättklinker har använts för att avlasta höga bankar som sedan förstärkts med KC-pelare. Dessa pelare har man installerat där jordegenskaperna varit gynnsamma och inte innehållit spår av friktionsmaterial. Gång-cykelporten har dock grundlagts med KC-pelare enligt Figur 10. Längderna på pelarna varierar mellan 4–14 meter. Längs själva E45:an är det dock, vilket framgår i bilagorna, bara denna korta sektion som förstärkts med just KC-pelare.

3 Analys

3.1 Alafors – Tollered

InSAR:s data för sättningar är registrerade från år 2015, därav antogs att sättningshastigheten var konstant fram till 2015. Detta redovisas med den streckade svarta linjen i figur 11.



Figur 11 Beräknade och InSAR data sättningar Alafors - Tollered

I sättningsberäkningarna, som har hämtats från beräknings-PM Väg 45 – Norge/Vänernbanan (Delen Nol-Älvängen), har man räknat med ett lerdjup på cirka 12–13 meter i längdsektionen 18/340 och 18/380. Ungefär samma djup gäller för 18/240 efter CPT-sondering. Dessa mätningar ska vara representativa för vår studerade sträcka som börjar i ca 18/380 och slutar i ca 18/470, där InSAR-mätningarna är som rödast. Enligt WSP, som är entreprenören bakom beräknings-PM, är det totala jorddjupet 15–30 meter, baserat på tvär- och längdsektionsritningar. Detta stämmer väl överens med SGU:s jorddjupskarta över området. Dock visar kartan upp få borrhovor precis *över* E45:an, utan de flesta ligger precis i anslutning till denna.

En observation gällande området är att det till stor del verkar bestå av postglacial lera med siltinslag de översta metrarna, enligt SGU:s jordartskarta. Som beskrivet i avsnittet om Götaälvdalens geologiska historia, förekommer ofta organiskt material i dessa jordar. Dessa inslag har en tendens att bidra till minskad hållfasthet (SGI, 2023c).

Vad som är extra markant med just området Alafors-Tollered, är att sättningarna verkar vara avgränsade till en väldigt kort sträcka av bara cirka 100 meter. Dessutom är de mycket stora. Skillnaden mellan WSP:s beräknade sättningar mellan åren 2012 till 2021, och InSAR:s uppmätta dito, framgår i diagrammet. Här uppvisas en felräkning på 30 millimeter vid år 2021.

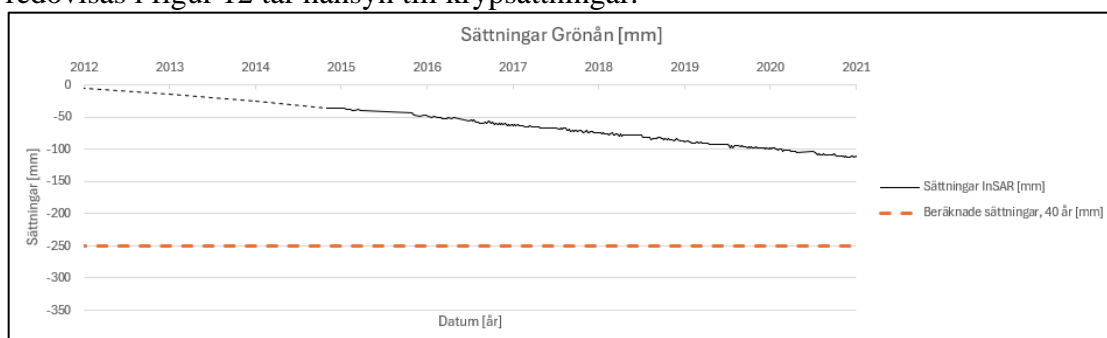
Orsaken till denna differens är inte helt lätt att fastslå. Ritningar visar marken grundlagts med KC-pelare från 18/100 till 18/410. Dock visar satellitbilderna på kritiska sättningshastigheter redan i cirka 18/380. Vad som händer mellan 18/410 och 18/500, där vi också ser omfattande sättningar, vet vi inte. På grund av bristfälligt beräknings-PM för sträckan 18/150 till 18/500, får vi väldigt lite information om vad som beaktats när det gäller den resterande sträckan 18/410 till 18/470. Av PM:et att döma, verkar denna sträcka inte ha åtgärdats med någon förstärkning. Det framgår här att totalsättningar har beräknats till 20 millimeter i 18/440 i oförstärkt lera.

Om KC-grundläggningen upphör i sektion 18/410, kan det vara en av anledningarna till att InSAR uppvisar störst sättningshastigheter just här. Vidare har varannan pelare först ned till ett djup av 7 meter, och penetrerar därmed inte hela lerlagret.

En annan tänkbar orsak kan vara att WSP räknat med att sättningsberäkningarna i 18/280 ska gälla för en sträcka av ungefär 150 meter. Detta kan innebära vissa osäkerheter, i och med varierande lerdjup. Det framgår inte heller hur djupt ner den postglaciala leran sträcker sig, varken i beräkning-PM eller i SGU:s jordartskarta. Viss hänsyn har tagits till det organiska materialet i och med mulljordslagret, men utöver det beskrivs inga postglaciala inslag. Missbedömningar när det kommer till lerans egenskaper kan ha gett upphov till att man antagit fel värden på de geotekniska parametrarna, och därmed fått till följd att sättningsberäkningarna blir felaktiga.

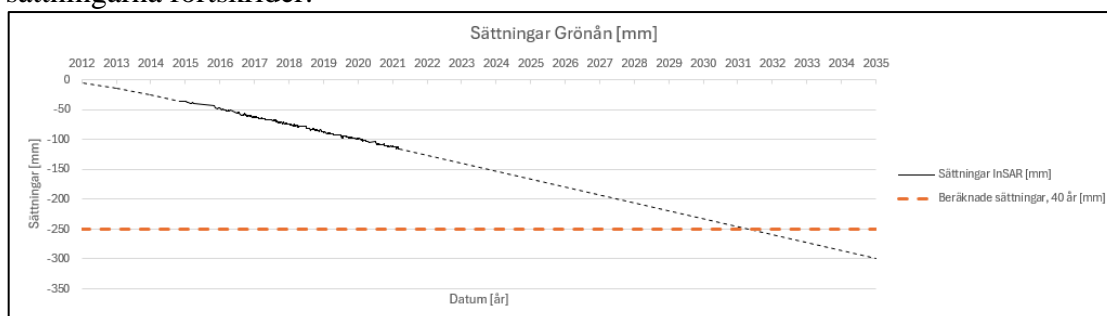
3.2 Grönån

Sättningsberäkningar på KC-förstärkt jord har gjorts längst sträckan. Uträkningen är baserad på den dimensionerade livslängden vilket ligger på 40 år. I beräknings-PM är enbart beräkningen för livslängden redovisad vilket bidrar till den raka linjen. I Figur 12 visar InSAR datan som finns över sträckan vilket är från år 2015 till 2021. Eftersom det inte finns några manuella mätningar eller beräknade under tidsspannet 2012 och 2015 så antag att sättningen har haft en linjär sättning vilket är vanligt förekommande vid användning av kalkcementpelare. De beräknade sättningarna som redovisas i figur 12 tar hänsyn till krypsättningar.



Figur 12 Sättningar Grönån

I figur 13 nedan redovisas en uppskattning av när den faktiska sättningen överskrider den beräknade. Detta sker i mitten på 2031. Detta är enbart ett antagande att sättningarna fortskrider.



Figur 13 Approximerade sättningar i framtiden.

Sättningsberäkningarna är hämtade från beräknings-PM Väg E45 Göteborg-Trollhättan delen Älvängen – Ramstorp. Beräkningarna har gjorts med ett jorddjup på över 50 meter, vilket stämmer överens med SGU:s jorddjupskarta. Borrproverna som har gjorts i området ligger däremot en bit från den aktuella sträckan. De närmsta borrproverna är placerade cirka 100 meter från den aktuella platsen och har ett

jorddjup på 55,8 meter och 52,4 meter. Kalkcementpelarna på den första delen av sträckan 1/831 - 1/900 och 2/330,5 - 2/489,5 har en längd på 7 meter och ett c/c avstånd på 1,5 meter. Vid 1/901,5 - 1/949,5 och 2/300,5 - 2/329 går det över till att varannan pelare är 10 meter och varannan är 5 meter.

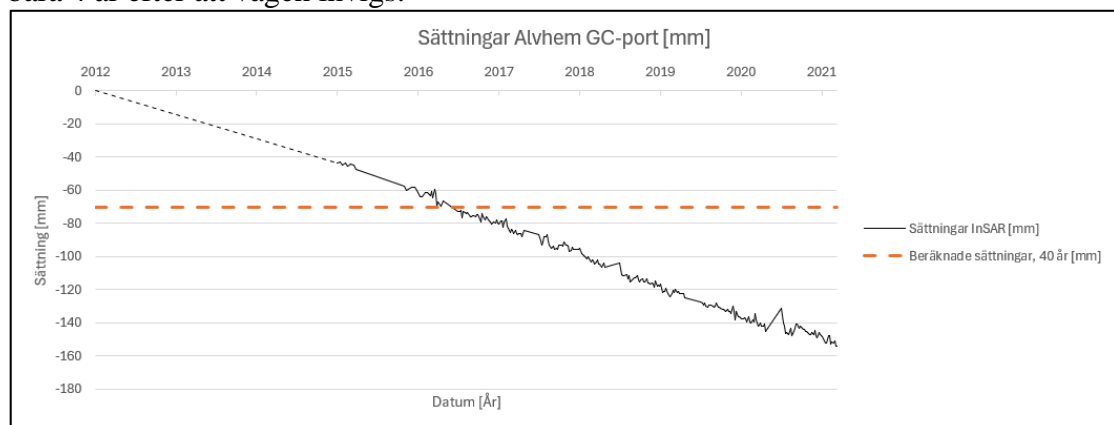
Enligt SGU:s kartvisare har sträckan ett lager av postglacial lera de översta metrarna. I beräknings-PM kan man avläsa att ”Det finns även visst inslag av skalrester” vilket kan vara ett tecken på postglacial lera. Däremot framgår det inte hur djupt den postglaciala leran sträcker sig.

Sättningarna enligt InSAR är jämna mellan överfarten och Grönån. Vid dessa har fler åtgärder gjorts för att förhindra sättningar. Detta avspeglas i sättningarna man kan se på InSAR där de områdena inte har några markanta markrörelser.

Vid beräkningen av sättningen, inkluderades byggandet av kalkcementpelare och grundarbeten. Man förväntade sig en sättning på 1 decimeter under byggnationen på 1 år. För att återställa marknivå till dess ursprungliga höjd fyller man på med vägmateriäl. Sättningarna under den dimensionerade livslängden beräknas därmed utan sättningarna som bildas under byggnationen. Den förväntade sättningen efter 40 år är beräknad till 250 millimeter totalt under hela livslängden.

3.3 Alvhem

Sättningsberäkningar på KC-förstärkt mark har utförts på den aktuella sträckan vid Alvhem. Beräkningarna finns redovisade i beräknings-PM Väg E45 Göteborg - Trollhättan (Delen Ramstorp – Tingberg). De är baserade på den dimensionerade livslängden av 40 år. I Figur 10 redovisas InSAR-data mellan åren då det finns registrerad data, alltså mellan 2015 – 2021. Innan 2015 så har antagandet om att sättningshastigheten är konstant gjorts. Den dimensionerade sättningen efter 40 år är beräknad till 70 millimeter, utan hänsyn tagen till krypsättningar. Detta passeras efter bara 4 år efter att vägen invigs.



Figur 14 Sättningar Alvhem GC-port

Vid beräkningarna av sättningen tog entreprenören hänsyn till en sättning under byggnationen på 1 år till 4 millimeter. Den sättningen som beräknades fyllde man sedan upp med material. Därefter gjordes en ny beräkning hur mycket vägen skulle sätta sig efter den dimensionerade livslängden på 40 år.

Vad som är extra anmärkningsvärt med sträckan Alvhem, är att det är en oerhört lång sträcka där InSAR-mätningarna uppvisar omfattande sättningar. Vi har valt att studera

området vid gång-cykelporten lite extra (km 1/800 - 1/900), eftersom det endast är här man förstärkt med KC-pelare. Här skiljer sig de beräknade totalsättningarna vid år 2021 och InSAR-sättningarna med 80 millimeter, se Figur 14 ovan.

Genomgående över hela området Alvhem är de stora lermäktigheter som uppgår till 20 – 55 meter. Återigen består det översta jordlagret av postglacial lera, vilket framgår av SGU:s jordartskarta. Dessutom innehåller, som tidigare nämnt, den sydligare halvan av sträckan kvicklera. Dock har man ändå ansett att sträckan inte behöver förstärkas i någon omfattande utsträckning. I fallet med GC-porten där man valt att ändå åtgärda med KC-pelare, har man tagit till en pelarlängd på maximalt 14 meter, trots att man uppskattat lerdjupet till så mycket som 50 meter. Detta påminner om fallet med Grönån.

Det går inte att urskilja från InSAR:s karta att man grundlagt GC-porten med KC-pelare, så frågan är om dessa varit helt verkningslösa. Sättningsberäkningar saknas för km 1/130 - 1/810, vilket är en sträcka på 680 meter.

4 Diskussion

Som framgår i analysen, har alla tre områden vi studerat satt sig mer längs E45:an än entreprenören räknat med. Differenserna mot de beräknade värdena uppgår till ungefär 30-80 millimeter. Om man jämför med Trafikverkets senaste krav för geokonstruktioner från 2022, ser man att alla delsträckor klarar kraven i nuläget. Däremot om sättningshastigheten fortsätter konstant så kommer det överskridas inom den dimensionerade livslängden. Högsta tillåtna totalsättning för vägar med hastighetsbegränsning mellan 100–120 km/timmen är 300 millimeter, att jämföra med uppmätta 100-125 millimeter (Trafikverket, 2022). Nedan diskuteras tänkbara orsaker till dessa skillnader, med fokus på KC-pelarna.

Till exempel har vi Grönån och Alvhem, där kalkcementpelarna är väldigt korta i förhållande till lerdjupet i området. Det innebär att det är cirka 35–45 meter oförstärkt lera där sättningar kan uppstå. Detta kan vara en betydande faktor för de omfattande sättningarna.

En annan aspekt är att kvalitén på kalkcementpelarna kan variera. Dannewitz och Rydell (2003) sammanfattar i en rapport från en workshop som ägde rum 2003 om kvalitetskontroller för KC-pelare. Till exempel påverkar väderförhållanden resultatet - är det en väldigt torr period kan bindemedlet ha svårt att binda sig. Brist på vertikalspänning i det övre skiktet är också en bidragande faktor till att kalkcementblandningen har svårt att binda sig. Detta leder till att förstärkningen blir som svagast i det övre skiktet, cirka 0,5 meter ner i jorden. Man konstaterade detta för mätsektionerna och provbankarna som gjordes längs E45:an. Man drog slutsatsen att de största sättningarna skedde i detta skikt.

Mätningarna i mätsektionerna understryker skillnaden i kvaliteten hos pelarna och att sättningarna är som störst i de övre delarna. En slutsats av mätningarna som har gjorts är att sättningarna i underkant av pelarna är 4–8 millimeter när pelarna svävar. Dock uppgår sättningarna till 25–30 millimeter när pelarna går hela vägen ner till berg. Däremot kan detta vara missvisande eftersom mätningar vid mätpunkten gjordes senast 3 år efter byggnationen. Detta är relevant då sättningar är som störst i början av pålastning.

För att kalkcementpelare ska uppnå den önskade bärigheten som önskas behöver allt mellan projektering och utförande hanteras korrekt. En entreprenadform som lyftes under workshopen var funktionsentreprenad (Dannewitz & Rydell, 2003). Detta betyder att entreprenören är med från projektering, konstruktion, byggande till underhållet. Detta bidrar till att samma entreprenör tar hand om hela processen och därmed blir kvalitén densamma på hela sträckan. Vid byggnationen av E45 så användes utförandeentreprenad. Ett problem med utförandeentreprenad är samordningen. Var går till exempel gränsen mellan de olika entreprenörerna? Gränserna mellan olika entreprenörer blir svaga områden där det kan uppstå sättningar. I Sverige är nästan alla projekt utförandeentreprenörer. Man går därmed in i en anbudstävling där det gäller att vara så effektiv och billig som möjligt. Om ett företag försöker effektivisera arbetet och dra ner på utgifterna så mycket som möjligt så finns en risk för att genvägar kommer tas vilket kan påverka slutresultatet. Detta kan leda till att kvalitén på arbetet försämras.

Vidare är det viktigt med kvalitetskontroller av pelarna. Kvalitetskontroller är ett sätt att få en större vetskap om hur bra installationen gick. Man kan exempelvis studera om omblandningen var tillräcklig. Om det utförda arbetet inte stämmer överens med det planerade kan det bidra till för låg bärighet och slöseri med material. Problematiken är att det landar på beställarens byggläsa att ta tag i och genomföra kontroller. För att göra kontroller behövs lämpliga verktyg vilket är en bristvara.

År 2003 medverkade Leif Säfström som då arbetade på Vägverket, på workshopen som hölls om kalkcementpelare. Leif berättade att det oftast utfördes kontroller på 0,5 % av alla pelare i ett projekt. Om resultaten var spridda så utökades det till 1 % av alla pelare. Alltså bör det ha gjorts kontrollmätningar på kalkcementpelarna under E45:an.

Inblandningsförhållandena i KC-pelarna är också av stor betydelse. Enligt Larsson (2006) baseras mängden inblandningsmedel- och typ på lokala erfarenheter och jämförelser med liknande jordartförhållanden. Han menar dock att trots likheter, kan utfallet bli märkbart annorlunda ute i fält jämfört med vad som uppmäts i laboratoriet. Inspektion och kontroller är också begränsade till relativt grova stickprovtagningmetoder. Larsson betonar vikten av rätt inblandningsmängd genom att likna en ofullständigt blandad pelare med staplar av tunna skivor med mellanliggande mjukt material och liten kontakt mellan dem. Sådana pelare kan ta upp vertikala laster på ett bra sätt, förutsatt att de är centrerade till mitten och att kompression tillåts. Däremot är de känsliga när det kommer till böj- och skjuvspänningar, och även dragpåkänningar. Dessutom är draghållfastheten låg. Svaghetskikt kan uppträda även om inblandningen är god, på grund av variationer i jorden. Med andra ord är KC-pelare sköra installationer, varför de ofta placeras i skivor eller block med överlappning sinsemellan. Dessa överlappningszoner kan dock också utgöra svaga punkter.

Om man jämför våra områden med provbankarna, kan vi se skillnader i sättningförloppen (Alén et al. 2006). Provbänkarna ligger som tidigare nämnt i Surte, Nödinge och Stora Viken Norra. Här har man valt att bortse från sättningar de översta två metrarna i överföringszonen, eftersom kvaliteten ofta är låg där. Sättningsberäkningarna i både Nödinge och Stora Viken visade sig överensstämma bra med hur sättningförloppet såg ut de första 1000 dagarna i KC-blocket. Skillnaderna uppgick endast till ungefär 5 mm. I Surte, däremot, har man överdimensionerat och räknat med större sättningar än vad som faktiskt uppstått. Cirka 20–30 millimeter skillnad ser man här. Detta skulle kunna påvisa att man varit noggrannare i utförandet av KC-förstärkningen när det gäller provbankarna. Dock framhäver Alén et al. att svårigheter fortfarande finns med att tillverka KC-pelare av god kvalitet de översta metrarna där det ofta är torrskorpa. De betonar att det är nödvändigt med utvecklingsarbete av produktionsmetoder på grund av detta. Det ska även tilläggas att eftersom provbanksmätningarna bara sträckte sig till cirka 2,7 år efter pålastningen, vet man inte hur mycket de hade satt sig totalt över en dimensionerande livslängd.

Ytterligare en aspekt som är värd att ta i beaktande är vilka geotekniska parametrar man antagit. Larsson (2006) understryker att det är av yttersta vikt att hållfasthetsegenskaperna fastslås för hela den aktuella jordprofilen. Detta gäller även för grundvatten- och portrycksförhållanden. Dessutom kan kemiska egenskaper i leran

vara betydande. Organisk halt, pH och humussyror kan nämligen spela in valet av stabiliseringsmedel. Dessa parametrar är inget som tas upp i något beräknings-PM vi läst. Därtill har por- och grundvattentryck mätts i endast fyra punkter längs sträckan Alafors – Tollered. Det är svårt att säga hur pass omfattande felen på grund av ingångsdata skulle kunna vara. Man får utgå från att de geotekniska egenskaperna stämmer för de punkter där man gjort mätningar, men däremellan skulle de kunna variera.

Ur en miljöaspekt kan man också diskutera huruvida det är försvarbart med så bristfälliga pelare med tanke på den omasfaltering av vägen som kan komma att krävas. Därtill inräknat den klimatpåverkan från cementtillverkningen som gett upphov till verkningslösa pelare.

Slutsats

Efter att ha granskat KC-förstärkning under de tre delsträckorna av E45:an kan vi dra vissa slutsatser baserat på frågeställningarna.

En av frågorna var varför sättningarna varierar så mycket längs sträckan. Här drog vi slutsatsen att omständigheterna i jorden är av mycket stor betydelse för pelarnas bärighet. I diskussionen framförs hur känsliga KC-pelarna är för bland annat inblandningsvariationer, väderförhållanden, brist på vertikalspänningar i de övre skikten, dragpåkänningar och geotekniska parameteregenskaper. Till detta kommer problemen med olika entreprenörer som bidrar med varierande kvalitet. Baserat på resultaten från provbankarna, verkar det inte ha haft någon avgörande betydelse om pelarna förts ned till fast botten, eller om de varit svävande. Detta får oss att luta oss mot slutsatsen att kvalitets- och installationsproblemen med pelarna överskuggar variationer i geologin och lermäktigheter.

En annan fråga var om KC-förstärkning var en bra metod med tanke på geologin som råder längs sträckan. Svaret på denna fråga handlar snarare om utförandet än själva metoden. Med tanke på hur utförandet gick till finns det tydliga brister på detta område. Däremot, tycker vi inte att det är något fel på själva metoden. Som nämnts i diskussionen är kvalitetskontroller avgörande för bestämning av hur bärigheten hos pelarna väl blev ute i fält. Det går inte att simulera exakta verkliga förhållanden i laboratoriet. Hade uppföljning gjorts i tillräcklig utsträckning och utförande med samma noggrannhet som för provbankspelarna, hade vi dragit slutsatsen att metoden var lämplig.

I vår analys har vi också konstaterat att sättningarna oftast inte är påtagliga vid gångcykelportar och liknande. Detta kan bero på att man här har förstärkt extra mycket och i ett annat mönster än det vanliga kvadratiska. Dock är det svårt för oss att säga vilken metod som hade varit bättre. Kanske att man skulle provat med lättklinkerfyllning på vissa ställen i vägbanken. Just det översta lagret med torrskorpelera som återkommer på många ställen, verkar ställa till det. Denna problematik är svår att komma runt. Här undrar vi om det är praktiskt genomförbart att blanda den våta och torra metoden i övergången mellan leran och torrskorpan, för att uppnå en bättre hållfasthet.

Den sista frågan handlade om hur och varför de beräknade sättningsförloppen avviker från InSAR-mätningarna. På frågan hur framgår svaret i analysen av delsträckorna, där avvikelserna för varje delsträcka visas i diagram. På frågan varför, kom vi fram till att det till stor del kan handla om att sättningsberäkningar gjorda i en sektion har fått representera en lång sträcka. Alafors – Tollered är ett exempel på det. Att samma beräkningar gäller för en sträcka av 150 meter är inte självklart. Tittar man på sträckan Alvhem, konstaterade vi att sättningsberäkningar också saknades för en sträcka av 680 meter. Detta betyder inte att det inte finns beräkningar för denna del, men inga vi kunde ta del av i alla fall. Återigen beror även avvikelserna mycket troligt på kvalitetsbrister i pelarna, som man inte räknat med.

Det ska tilläggas att vi i rapporten valt att lita på att InSAR-datan stämmer. Trots vissa brister med InSAR. För att minimera felmarginalen så har vi tittat på trender över ett område och inkluderat flera mätpunkter för att få en generell bild över sättningen i området. Att titta på en punkt och dra en slutsats från det ansågs missvisande.

I vidare studier hade det varit intressant att ta del av kvalitetskontroller av KC-pelarna, om det gjorts sådana. Även uppföljningsmätningar av vissa områden hade varit av intresse. Vi hade också kunnat göra egna sättningsberäkningar och analyserat om ändringar i parameterdatan kunnat ge ett mer korrekt sättningsförlopp.

Referenser

- Alén, C., Sällfors, G., Bengtsson, P. & Baker, S. (2006). *Provbankar Riksväg 45/Nordlänken. Bankar på kalksementpelarförstärkt jord - beräkningsmodell för sättningar*. [Vetenskaplig rapport, SGI] <https://swedgeo.se/globalassets/publikationer/svensk-djupstabilisering/sd-r15.pdf>
- Andréasson, P. (2015a). *Geobiosfären, s.242–243* (2 uppl.). Studentlitteratur.
- Andréasson, P. (2015b). *Geobiosfären, s.378* (2 uppl.). Studentlitteratur.
- Andréasson, P. (2015c). *Geobiosfären, s.381* (2 uppl.). Studentlitteratur.
- Bygg & Teknik (2019) *InSAR mätning för mark rörelser och sättningar*. Tommy Pap, Øyvind Lier Norconsult AB. <https://byggteknikforlaget.se/insar-matning-for-mark-rorelser-och-sattningar/>
- Dannewitz, N & Rydell, B. (2003) *Kalkcementpelare som jordförstärkning – hur kan vi åstadkomma rätt funktion?* [Arbetsrapport, SGI] <https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/svensk-djupstabilisering/sd-ar32.pdf>
- Edstam, T (1997) *Erfarenhetsbank för kalk-cementpelare*. [Vetenskaplig rapport, SGI] <https://swedgeo.se/globalassets/publikationer/svensk-djupstabilisering/sd-r1.pdf>
- Edstam, T (2017). *Tillförlitligare sättningsprognoser vid grundläggning med kalkcementpelare*. [Vetenskaplig rapport] <https://vpp.sbuf.se/Public/Documents/ProjectDocuments/9606face-5bbc-41b1-98bb-165c8880584c/FinalReport/SBUF%2012527%20Slutrapport%20-%20S%C3%A4ttningsprognoser%20vid%20grundl%C3%A4ggning%20med%20kalkcementpelare.pdf>
- Granhage, L. (2009) *Kompendium i vägbyggnad*. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1452855/FULLTEXT02.pdf>
- Johnson, M.D., Larsson O., Seger, S., Ståhl, Y. (2010). *New exposures of Baltic Ice Lake drainage sediments, Götene, Sweden*. GFF (Volume 132, s. 1 – 12). <https://www.tandfonline.com/doi/epdf/10.1080/11035891003597067?needAccess=true>
- Kullander, K., Markusson, M. (2008). *Beräknings-PM, Väg 45 – Norge/Vänernbanan, Delen Nol - Älvängen, VÄG Sträcka 18/150 - 18/500, Inkl GC-port Heljered*. (10070613). WSP. <file:///C:/Users/46760/Documents/Geomtrl%20Alafors%20-%20Tolered/1GBR0001/18100-18500%20BerPM.pdf>
- Larsson, R., Sällfors, G. (1995). *Sättningsegenskaper i lös lera på grund av geologisk avsättning och ”åldring”*. SGI. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1300344/FULLTEXT01.pdf>

- Larsson, R. (2003) *Mixing Processes for Ground Improvement by Deep Mixing*. [Doktorsavhandling, SGI] <https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/svensk-djupstabilisering/sd-r6e.pdf>
- Larsson, R. (2006). *Djupstabilisering med bindemedelsstabiliserade pelare och masstabilisering – En vägledning*. [vetenskaplig rapport, SGI] <https://swedgeo.se/globalassets/publikationer/svensk-djupstabilisering/sd-r17.pdf>
- Larsson, R. (2007). *Jords egenskaper*. (Information 1). SGI. <https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/info/pdf/sgi-i1.pdf>
- Lier, Ø. (2022) *Utvärdering av rikstäckande InSAR*. Trafikverket. https://fudinfo.trafikverket.se/fudinfoexternwebb/Publikationer/Publikationer_006201_006300/Publikation_006245/01_Rapport_InSAR_TRV_00_Main_v1.pdf
- Nationalencyklopedin (u.å). *Baltiska issjön*. <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/baltiska-issj%C3%B6n> (hämtad 2024-01-30).
- Naturskyddsföreningen, (2022). *Cement, klimat och miljö*. <https://www.naturskyddsforeningen.se/faktablad/cement-klimat-och-miljo/>
- Norges Geologiske Undersøkelse (NGU) (u.å) *What is InSAR?* <https://www.ngu.no/en/geologisk-kartlegging/what-insar>
- Pap, T. & Lier, Ø. (2019) *InSAR mätning för markrörelser och sättningar*. Bygg och Teknik. <https://byggteknikforlaget.se/insar-matning-for-mark-rorelser-och-sattningar/>
- Riksdagen (2013) *Fond för ersättning och näringslivsutveckling vid uttag av naturresurser*. https://www.riksdagen.se/sv/dokument-och-lagar/dokument/motion/fond-for-ersattning-och-naringslivsutveckling-vid_h102n343/
- Rymdstyrelsen (2018) *Vulkaner övervakas från rymden*. <https://www.rymdstyrelsen.se/upptack-rymden/bloggen/2014/09/vulkaner-overvakas-fran-rymden/>
- Rymdstyrelsen (2021) *Information om tjänsten*. <https://www.rymdstyrelsen.se/rymddata/datakallor/insar/information-om-tjansten/>
- Skanska (u.å) *E45 Bohus – Nödinge, entreprenad E33*. <https://www.skanska.se/vart-erbjudande/vara-projekt/57322/E45-BohusNodinge%2C-entreprenad-E33> (Hämtad 2024-01-25)
- Styffe, S, Karlsson, R, Hansson, K, Hawzheen, K & Asp, A. (2021). *Forskning- och innovationsinriktning för vägkropp/vägkonstruktion*. Trafikverket. <https://trafikverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1545347/FULLTEXT02.pdf>

Sveriges Geologiska Undersökning (2020). *Postglaciala finkorniga sediment*.
<https://www.sgu.se/om-geologi/jord/fran-istid-till-nutid/landhojning-fran-havsbotten-till-lerslatt/postglaciala-finkorniga-sediment/>

Sveriges Geotekniska Institut (2023a). *Sättningar i småhus*.
<https://www.sgi.se/sv/Forskning--larande/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/sattningar-i-smahus/>

Sveriges Geotekniska Institut (2023b). *Jords tekniska egenskaper*.
<https://www.sgi.se/sv/Forskning--larande/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/jordmateriallara/jords-tekniska-egenskaper/>

Sveriges Geotekniska Institut (2023c). *Jordmateriallära*.
<https://www.sgi.se/sv/Forskning--larande/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/jordmateriallara/>

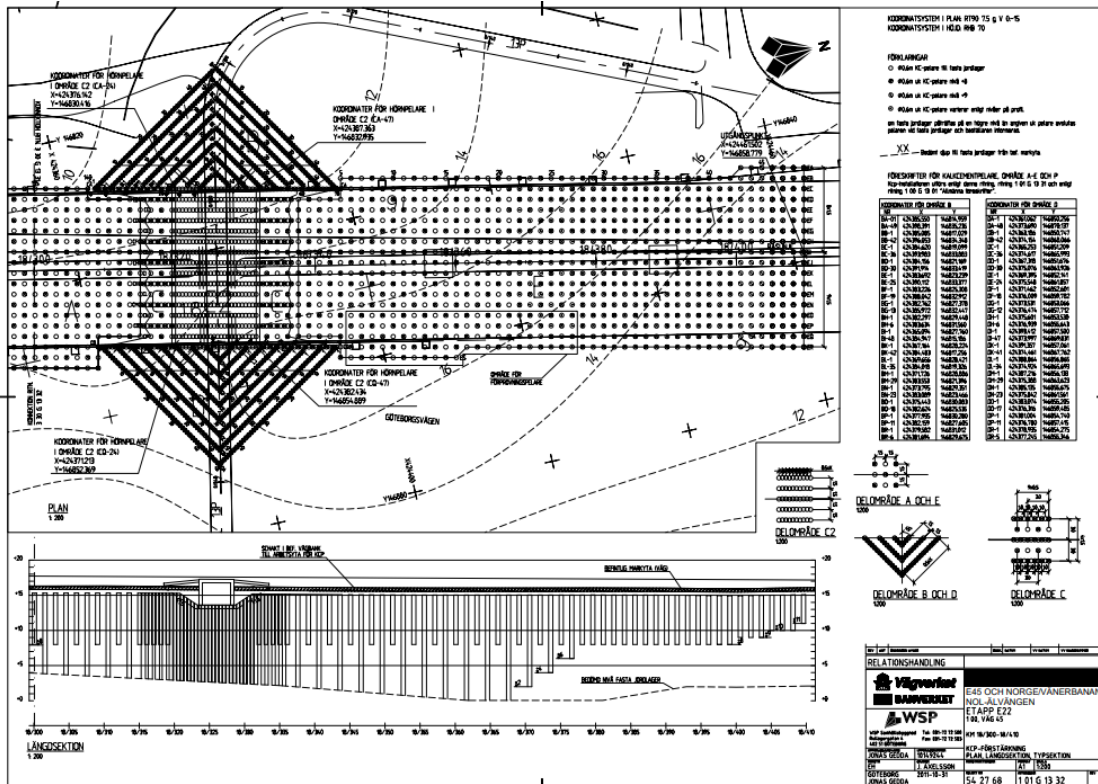
Trafikverket (2017) *Från planering till byggande*.
https://bransch.trafikverket.se/om-oss/var-verksamhet/sa-har-jobbar-vi-med/Fran-planering-till-byggande/?utm_source=youtube&utm_medium=social&utm_term=&utm_content=fran-planering-till-byggande&utm_campaign=generell

Trafikverket (2022). *Geokonstruktion, dimensionering och utformning*. Trafikverkets infrastrukturregelverk. file:///C:/Users/46760/Downloads/Krav%20TRVINFRA-00230%20Geokonstruktion,%20Dim%20v1_0.pdf

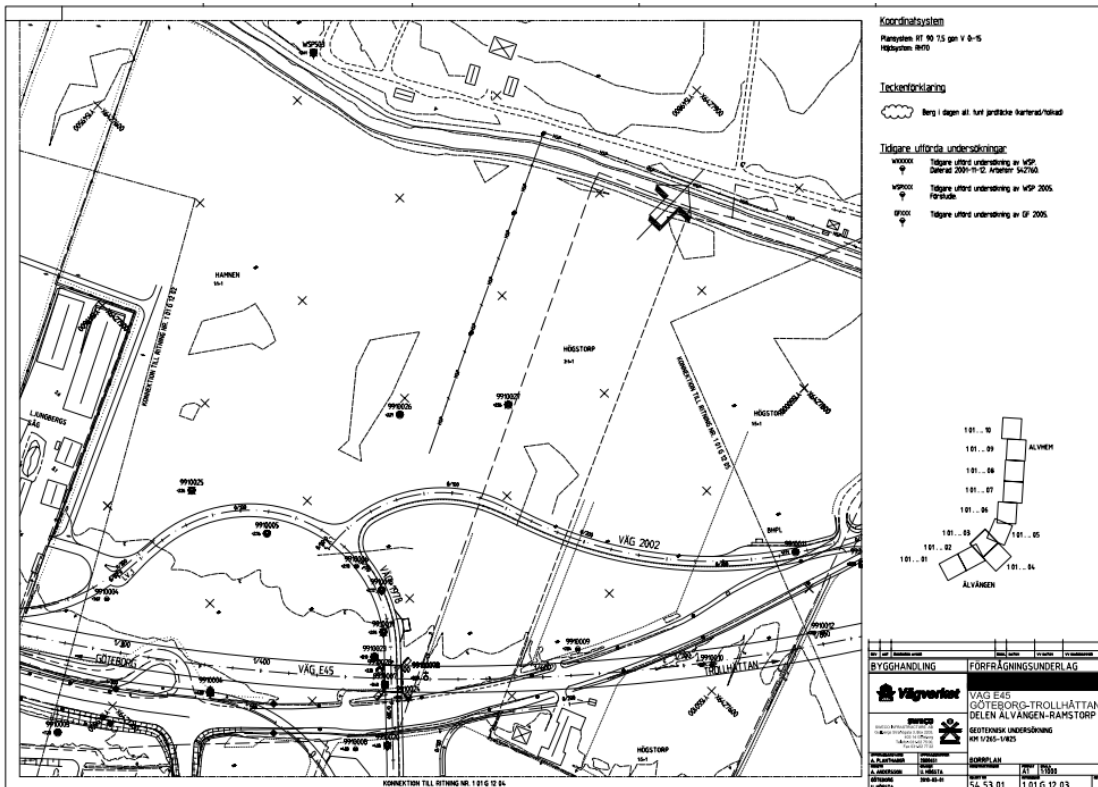
Vägavdelningen (2001). *Provningsmetoder för alternativa material till vägunderbyggnad - Undersökning av rosteldad kolbottenaska, slaggrus och krossad betong*. Vägverket. <https://trafikverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1364283/FULLTEXT01.pdf>

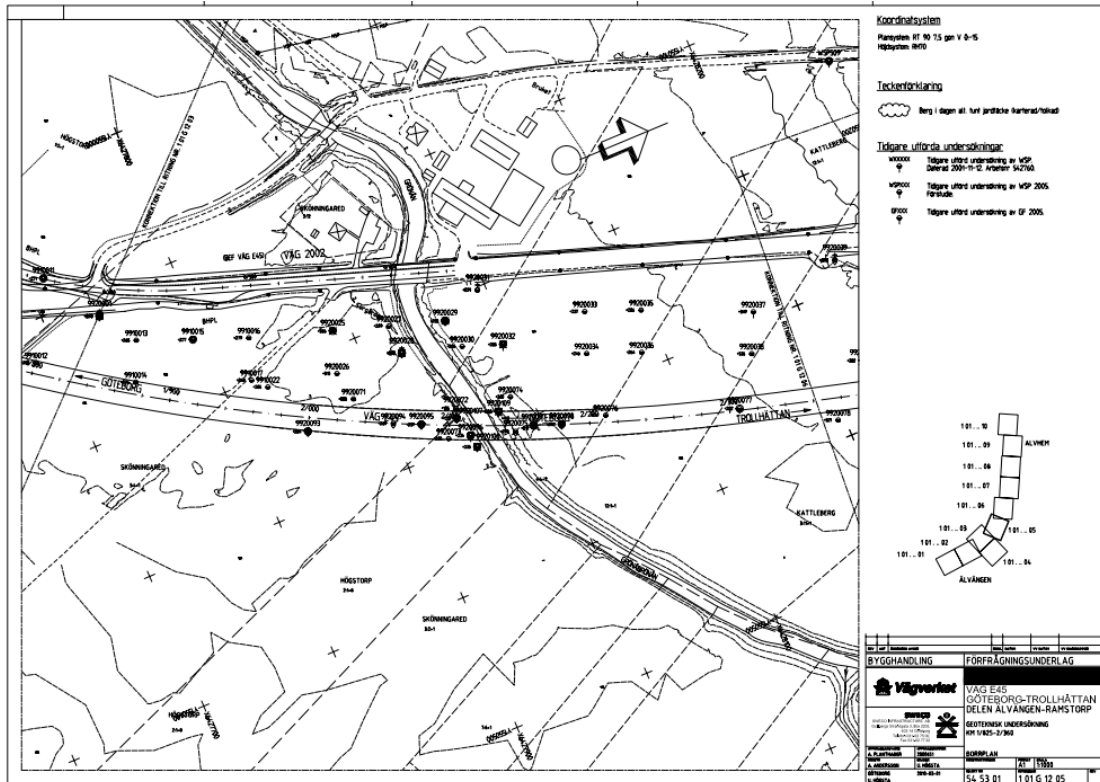
Vägverket (2010a). *Beräknings-PM Geoteknik, Väg E45 Göteborg - Trollhättan, Delen Älvängen - Ramstorp Västra Götalands län*. (Objektnr 545301). BanaVäg i Väst. <https://drive.google.com/file/d/1AxSumzeNjMT8XH9vZ-vtIKW2ILSTfNlg/view>

Vägverket (2010b). *Beräknings-PM Geoteknik, Väg E45 Göteborg - Trollhättan, Delen Ramstorp – Tingberg Västra Götalands län*. (Objektnr 545302). BanaVäg i Väst. <file:///C:/Users/46760/Documents/Geomtrl%20Ramstorp%20-%20Tingberg/000G1106.PDF>

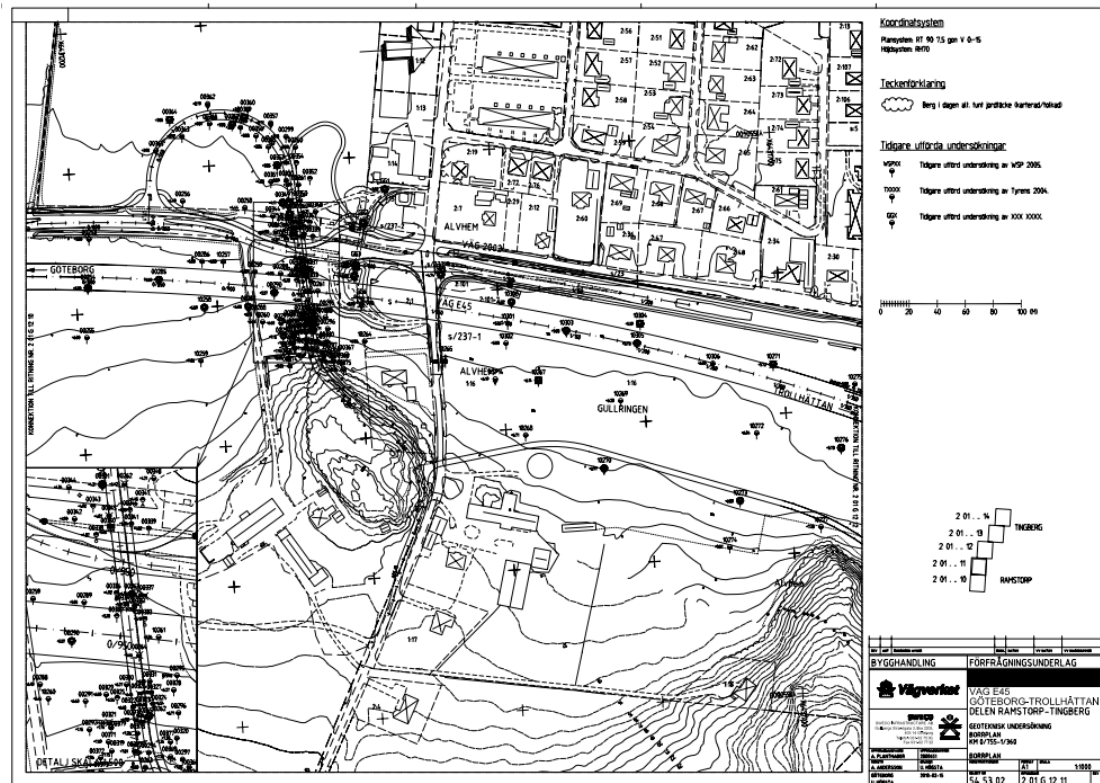


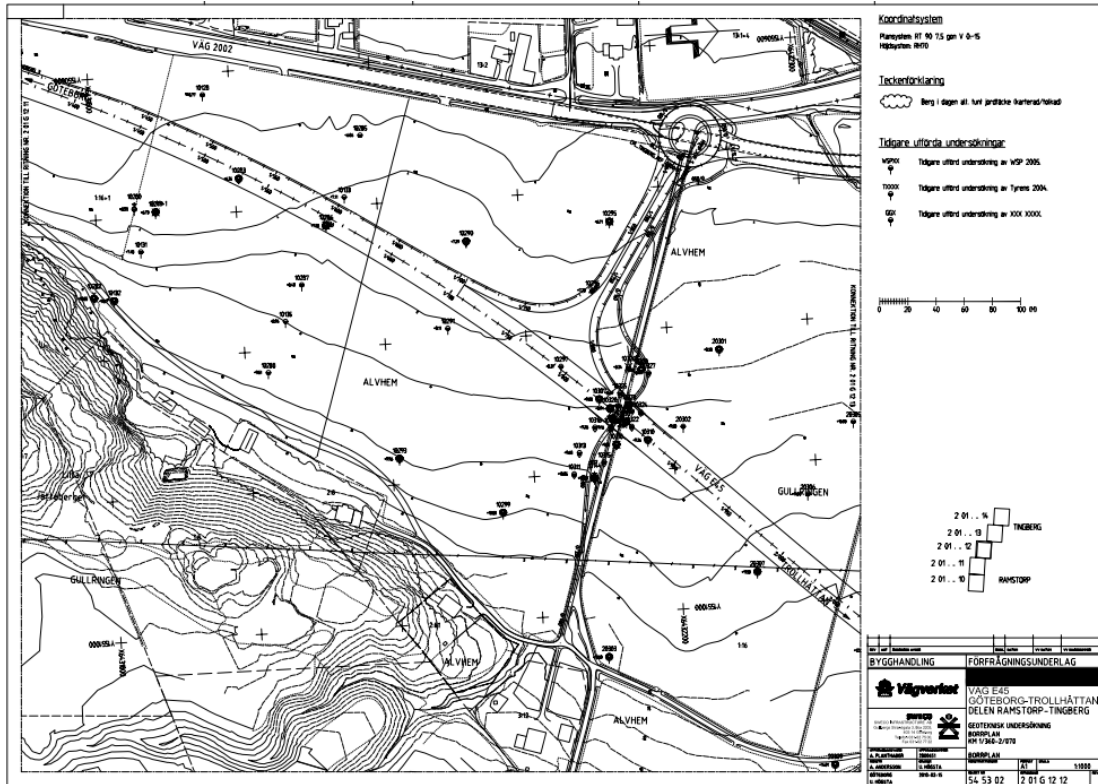
5.1.2 Grönån





5.1.3 Alvhem

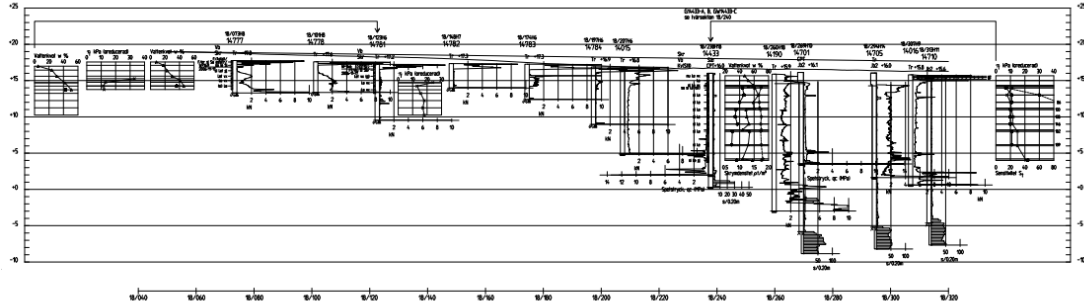




5.2 Längdsektionritningar

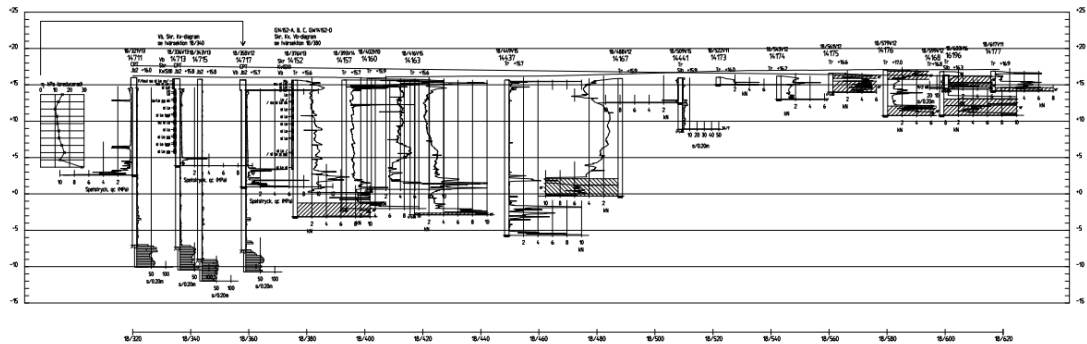
5.2.1 Alafors – Tollered

KOORDINATSYSTEM I PLAN R190 75 g V 60-1
KOORDINATSYSTEM I HÖJD R190 70
BETONGBETONNINGAR
BETONNINGAR ENLGT SIF/BSG BETONNINGSSYSTEM
ANMÄRKNING
REDUCISAD BLIVANDE MARKRYTA KAN AVVIKA FRÅN SLUTLIG
PROJEKTERING



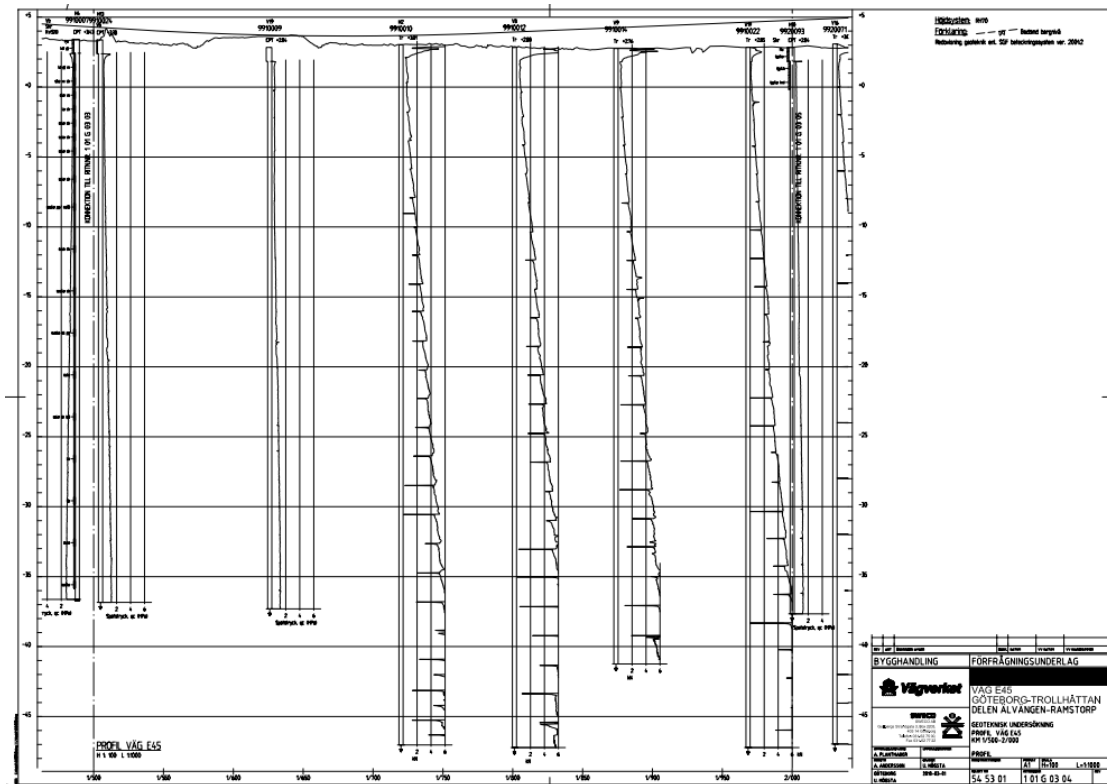
LÄNGDSEKTION 18/050 - 18/320
1:1 200 1:1 500

KOORDINATSYSTEM I PLAN R190 75 g V 60-1
KOORDINATSYSTEM I HÖJD R190 70
BETONGBETONNINGAR
BETONNINGAR ENLGT SIF/BSG BETONNINGSSYSTEM
ANMÄRKNING
REDUCISAD BLIVANDE MARKRYTA KAN AVVIKA FRÅN SLUTLIG
PROJEKTERING

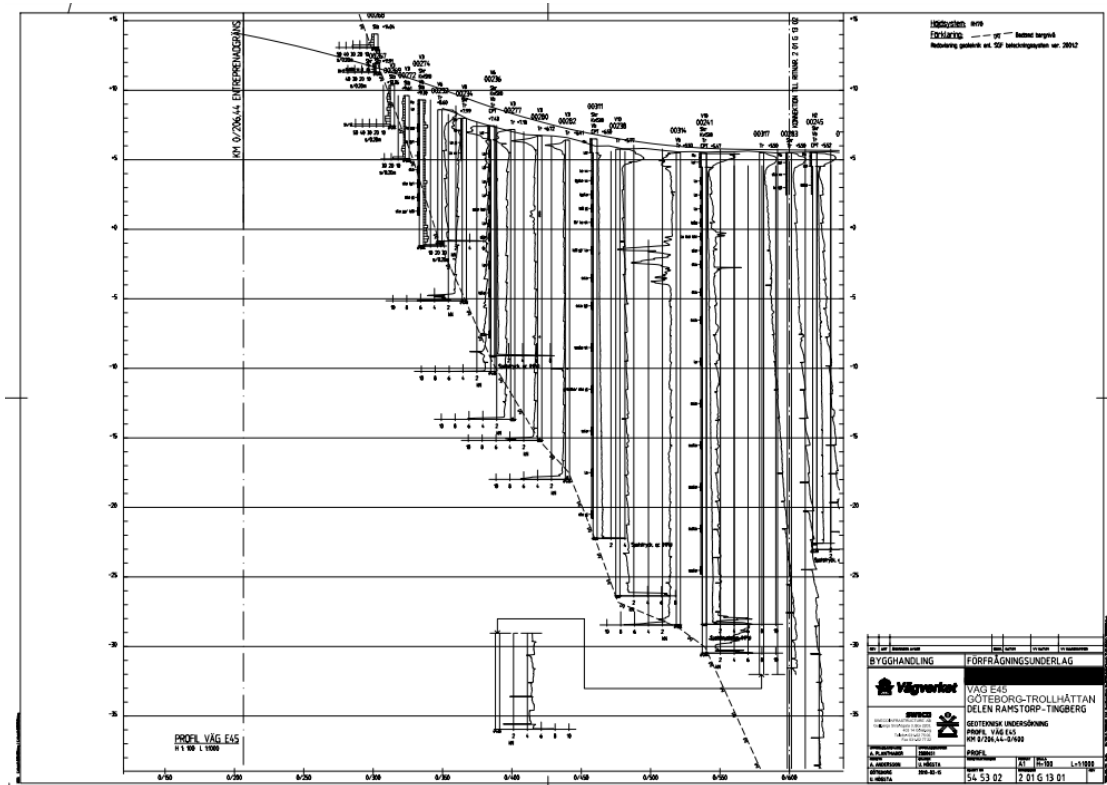


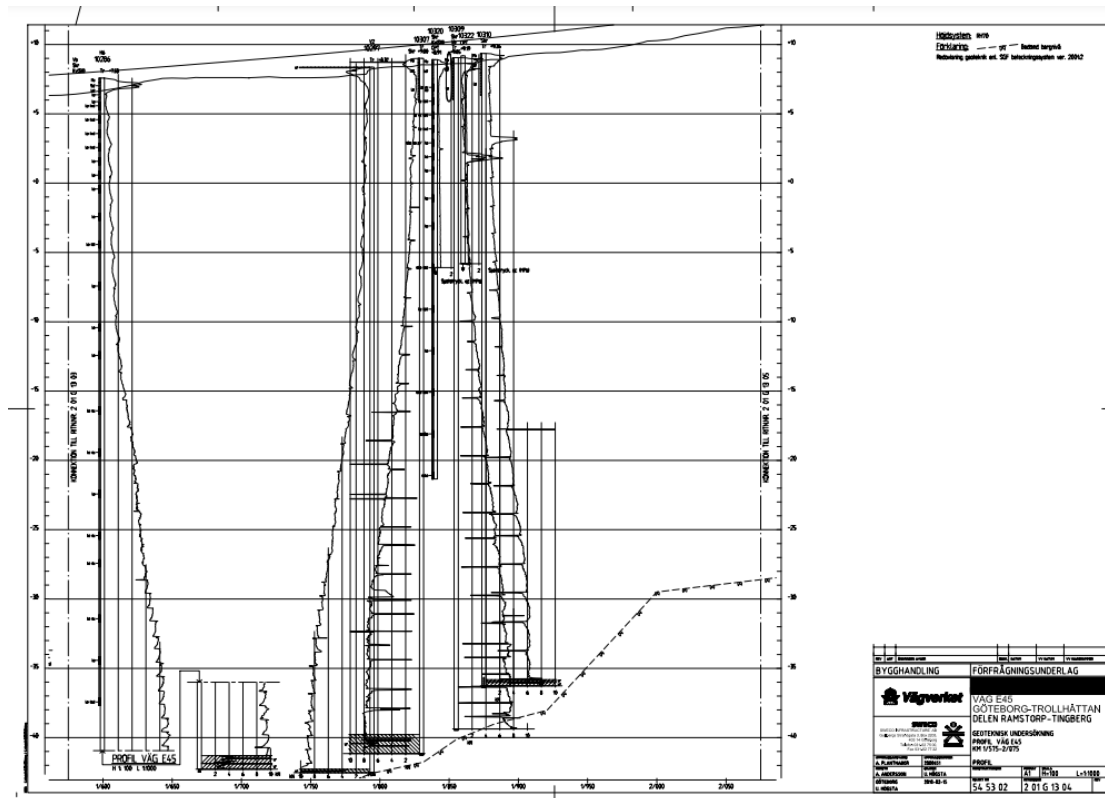
LÄNGDSEKTION 18/320 - 18/620
1:1 200 1:1 500

5.2.2 Grönån



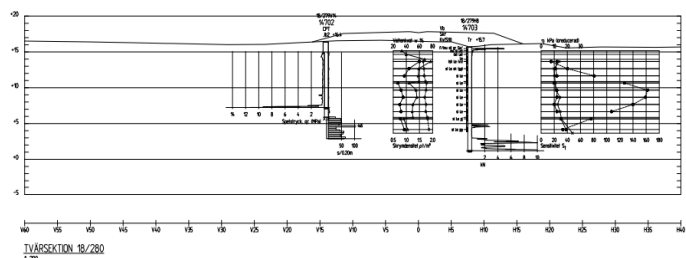
5.2.3 Alvhem





5.3 Tvärsektionsritningar

5.3.1 Alafors – Tollered

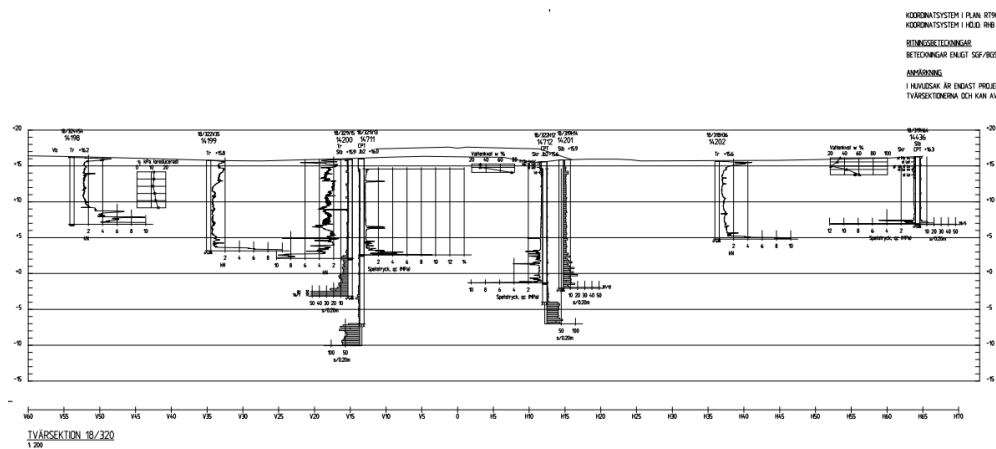


KOORDINATSYSTEM I PLAN RT90 75 g V 60-1
 KOORDINATSYSTEM I HÖJD RNB 70

BYGGNADSBETECKNINGAR
 BETECKNINGAR ENLIGT SEP/ISSS BETECKNINGSSYSTEM

ANMÄRKNING
 I HANDESKAR ÄR ENKAST PROJEKTBERÄDNING (E45) REDIGERAD PÅ
 TVÄRSEKTIONERNA OCH KAN AVVIKA FRÅN SUTLIGT PROJEKTERING.

TVÄRSEKTION 18/280
 1:200



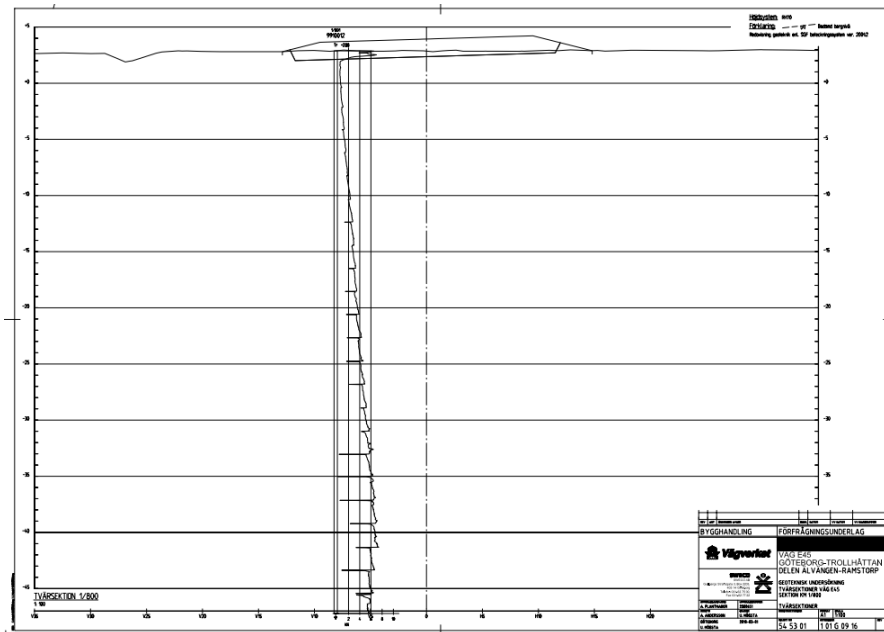
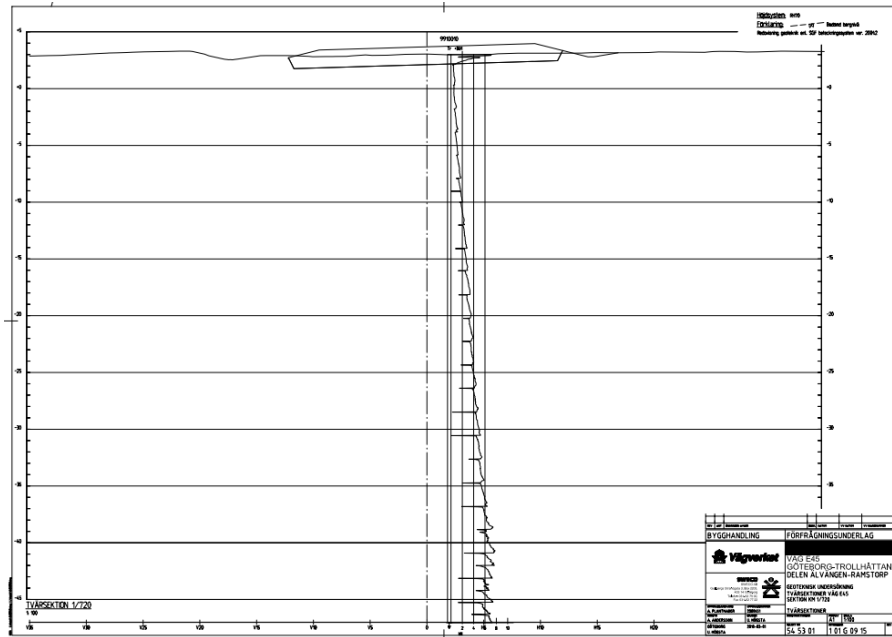
KOORDINATSYSTEM I PLAN RT90 75 g V 60-1
 KOORDINATSYSTEM I HÖJD RNB 70

BYGGNADSBETECKNINGAR
 BETECKNINGAR ENLIGT SEP/ISSS BETECKNINGSSYSTEM

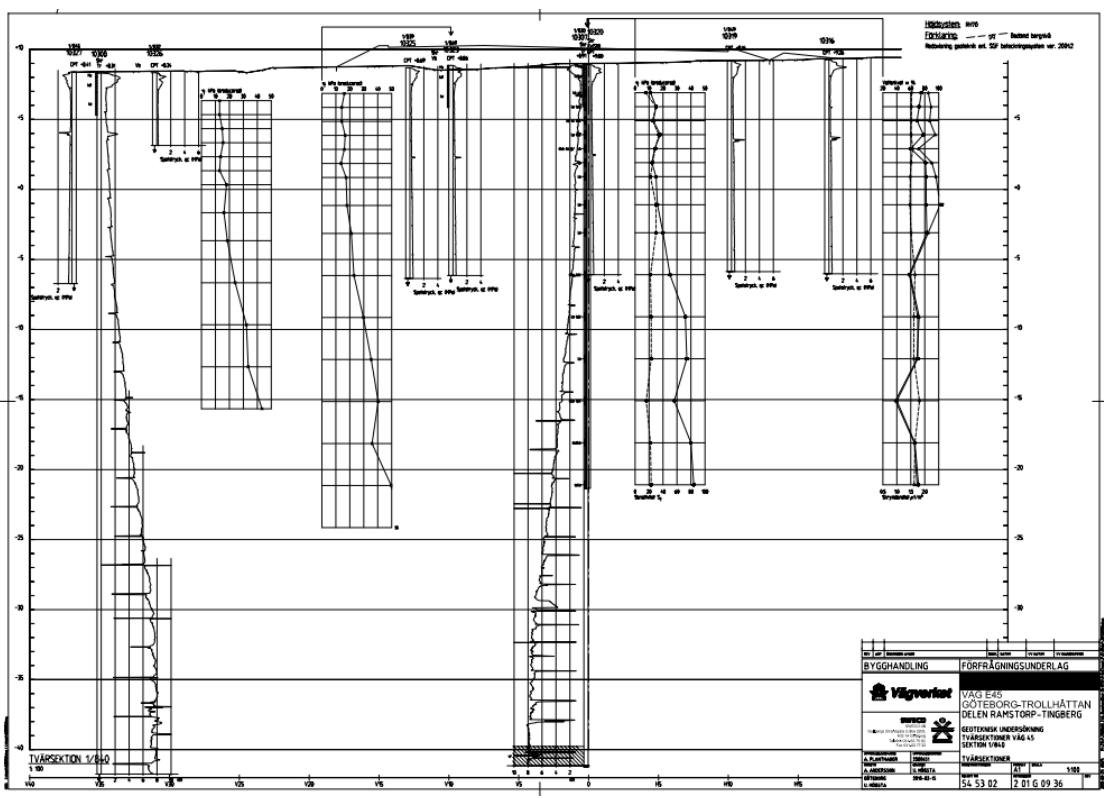
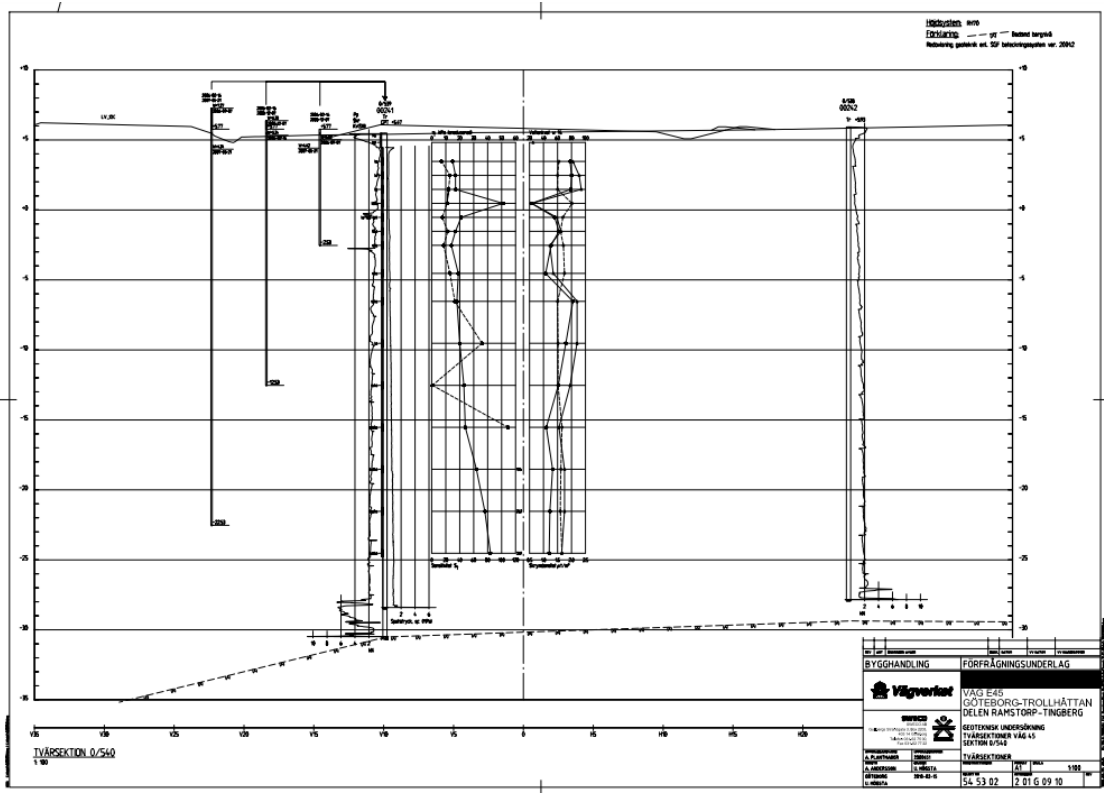
ANMÄRKNING
 I HANDESKAR ÄR ENKAST PROJEKTBERÄDNING (E45) REDIGERAD PÅ
 TVÄRSEKTIONERNA OCH KAN AVVIKA FRÅN SUTLIGT PROJEKTERING.

TVÄRSEKTION 18/320
 1:200

5.3.2 Grönån



5.3.3 Alvhem





CHALMERS