

Potentiella spridningsvägar för vatten och föroreningar i berg - Hydrogeologisk fallstudie av Åseberget, Kungälv

Hannes Welander

**Degree of Bachelor of Science
with a major in Earth Sciences
15 hec**

**Department of Earth Sciences
University of Gothenburg
2022 B-1174**

Faculty of Science



UNIVERSITY OF GOTHENBURG

Potentiella spridningsvägar för vatten och föroreningar i berg - Hydrogeologisk fallstudie av Åseberget, Kungälv

Hannes Welander

ISSN 1400-3821

B1174
Bachelor of Science thesis
Göteborg 2022

Mailing address
Geovetarcentrum
S 405 30 Göteborg

Address
Geovetarcentrum
Guldhedsgatan 5A

Telephone
031-786 19 56

Geovetarcentrum
Göteborg University
S-405 30 Göteborg
SWEDEN

Abstract

Groundwater plays an important role regarding the spreading of contaminations. By achieving knowledge of the groundwater flow direction, it contributes to greater understanding of the extent of the contamination and therefore the extent of the problem. The transport possibility of groundwater is dependent of the hydraulic conductivity of the ground layer. The structure of a rock and its mineral content are factors that can affect both the groundwater flow and the groundwater chemistry. This report is focusing on the area Åseberget in Kungälv, containing a closed landfill. The goal is to, by mapping of the fracture directions in the rock, get knowledge of the groundwater movement in the rock and through that localize a spreading direction of potential contaminants. The report also has as a goal to examine if the amount of sulfide in the rock can contribute to increased contamination. Electrical resistivity tomography and resistivity measurements on single soil samples, are being used as aiding tools.

By the mapping of fractures on Åseberget, a group with a dipping direction towards west-northwest are distinguished, which is characterized as the dominating fracture direction. The analysis of the sulfide content in the rock, shows rates of sulfur under the limit for further examination and is assessed not to be a problem of acid rock drainage. Examinations of contamination in the area shows exceeded limits of several contaminants, where PFAS is expected to be the one with largest potential of spreading by groundwater. Three profiles on the landfill in the area were obtained by the electrical resistivity tomography. The interpretation of these profiles gives indication on irregular soil layers in the landfill. Where areas with higher resistivity are interpreted as soil with a lesser amount of clay and therefore more prone to infiltrate precipitation. The groundwater is estimated to be able to flow from the landfill and further down into the rock. Based on the dominating fracture direction, mostly in the direction west-northwest.

Sammanfattning

Grundvattnet spelar en stor roll när det handlar om spridning av föroreningar. Genom att få kunskap över grundvattnets flödesriktning, bidrar det till större förståelse för en förorenings utbredning, och på så sätt även problemets omfattning. Grundvattnets möjlighet till transport är beroende av marklagrens hydrauliska konduktivitet. Ett bergs struktur och dess mineralinnehåll är faktorer som kan påverka både grundvattnets flöde, samt grundvattnets kemi. Denna studie fokuserar på området Åseberget i Kungälv, vilket innefattar en nedlagd deponi. Målet är att, genom en kartering av bergets sprickriktningar, få kunskap om grundvattnets rörelse i berget och genom det lokalisera en spridningsväg för potentiella föroreningar. Studien har även som mål att undersöka om bergets sulfidhalt kan bidra till ökad förorening. Elektrisk resistivitetstomografi, samt resistivitetmätningar på enskilda jordprov, används som hjälpmedel.

Genom kartering av Åsebergets sprickor, utmärker sig en grupp med västlig-nordvästlig stupningsriktning. Vilket ses som den dominerande sprickriktningen. Analysen av bergets sulfidhalt visar svavelnivåer under gränsen för vidare undersökningar, och bedöms inte vara ett problem för försurning av lakvatten. Undersökningar av föroreningar utförda på området visar på höjda nivåer av ett antal föroreningar, där PFAS kan antas vara den med störst spridningspotential i grundvatten. Av elektriska resistivitetstomografien framkom tre profiler över områdets deponi. Tolkningen av dessa profiler visar på oregelbundna jordlager i deponin där områden med högre resistivitet tolkas som jord med mindre lerinnehåll och därmed mer benägna för infiltration av nederbörd. Grundvattnet bedöms ha möjlighet att flöda från deponin och vidare ned i berget. Baserat på den dominerande sprickriktning, mestadels i västlig-nordvästlig riktning.

Innehållsförteckning

1. Inledning.....	1
2. Bakgrund	1
2.1 Områdesbeskrivning.....	1
2.2 Hydrogeologi och föroreningar	3
2.3 Sulfid i berg.....	6
2.4 Resistivitet	7
3. Metod.....	10
3.1 Sprickkartering	10
3.2 Provtagning av sulfider i berg.....	11
3.3 Resistivitetsmätning kolvprov	11
3.4 Elektrisk resistivitetstomografi.....	13
4. Resultat.....	14
4.1 Strukturmätningar	14
4.2 Svavelhalt i berget	17
4.3 Resistivitet från TRC:n	18
4.4 Elektrisk resistivitetstomografi.....	19
5. Diskussion.....	21
5.1 Sprickriktning.....	21
5.2 Potentiella föroreningar i grundvattnet.....	22
5.3 Resistivitet	22
5.4 Spridningsväg för grundvatten	23
6. Slutsats	24
7. Tackord	25
8. Referenslista.....	26

1. Inledning

En utmaning samhället har är att hantera behovet av nybyggnationer utan att skador på miljö och människor uppstår. Detta är ett problem som har fått ökad uppmärksamhet de senaste åren, då miljöproblem belysts mer påtagligt. Denna utmaning benämns av FN som *Hållbara städer och samhällen* (Regeringskansliet, 2022). Vid byggnation av och i samhällen finns det olika typer av miljöproblem. Dessa kan innefatta befintliga föroreningar, eller föroreningar orsakade av ny byggnation. För att begränsa skadan föroreningar kan ha, på både omgivande natur och människor boende i området, är det viktigt att få kunskap om eventuella föroreningskällor och möjliga transportvägar. Vid spridning av föroreningar spelar grundvattnet en avgörande roll. Att ha kännedom om grundvattnets rörelse ger därför en kunskap om förorenings-spridning.

I Kungälv kommun finns planer på att uppföra en ny stadsdel med cirka 1500-2000 nya bostäder på och omkring Åseberget (figur 1) (Kungälv kommun, 2021). I förstudierna för projektet utreds potentiella föroreningar på området rutinmässigt. Att ett område på toppen av Åseberget har använts som deponi tidigare kan medföra en ökad sannolikhet för oönskade halter av föroreningar.

Arbetets syfte kretsar kring grundvattnet vid Åseberget och dess potential som transportväg för föroreningar. Detta sker genom en studie av bergets strukturgeologi gällande sprickor och spricksystem. Som del i arbetet undersöks även sulfidhalten i berget för att utröna lämpligheten till att lokalt bergmaterial används som fyllnadsmaterial i området. Som komplement till detta har punktvisa resistivitetsmätningar genomförts på jordprov i anslutning till berget, samt på deponin. Mer yttäckande resistivitetsmätningar har även genomförts på deponin. I nu presenterat arbete har följande frågeställningar använts:

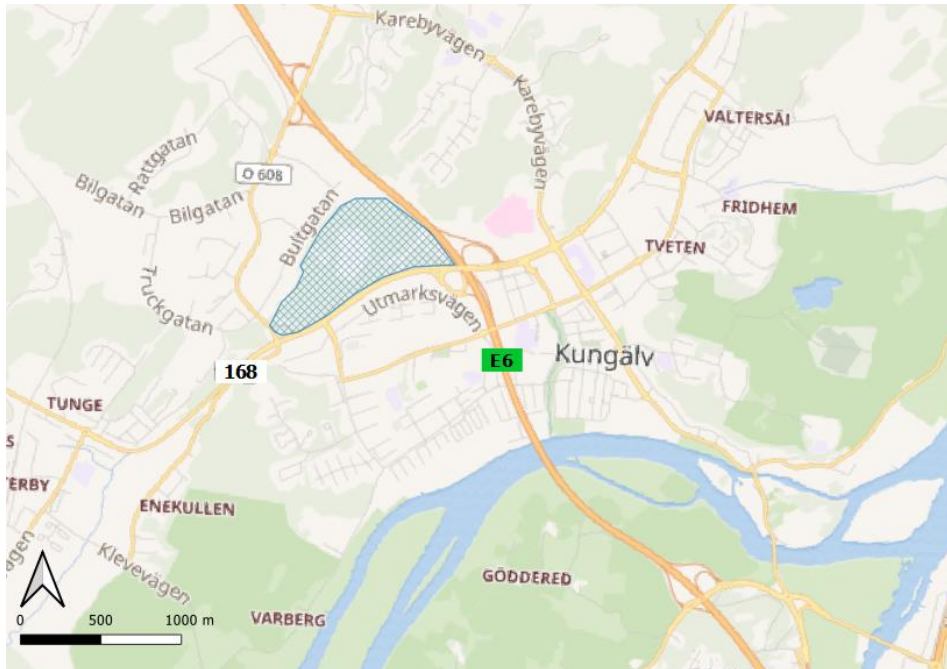
- Kan en dominerande sprickriktning identifieras på Åseberget?
- Vilka potentiella föroreningar finns i grundvattnet?
- Kan resistivitetsmätning på enskilda jordprov eller elektrisk resistivitetstomografi bidra till information om grundvattnet eller föroreningskällor?
- Hur ser spridningsvägarna för grundvatten ut i området?

2. Bakgrund

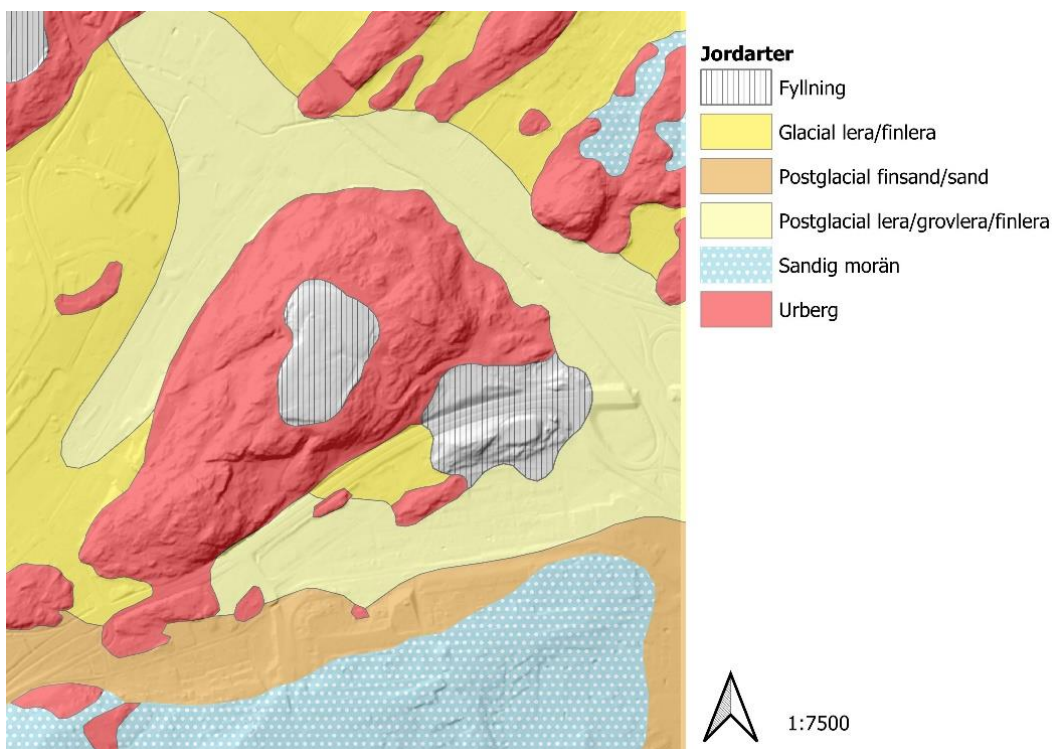
2.1 Områdesbeskrivning

Platsen där studien har utförts ligger i Kungälv, i nordvästlig riktning från dess centrum (figur 1). Det aktuella området består av Åseberget och dess närmaste omgivning, och har en gemensam area på cirka 44 hektar. Åseberget har en högsta höjd på omkring 66 meter över havsytan och består främst av kristallint berg, med ytor av fyllnadsmaterial på toppen samt på den sydöstra kanten av berget. Inom områdets östra del förekommer även ytor bestående av lera (figur 2) (SGU, 2018a). Berggrunden i områden är en del av Idefjordenterrängen, med en ålder på 1,52-1,59 miljarder år. Den har senare omvandlats vid

den svekonorvegiska orogenesisen (SGU, 2018b). Den dominerande bergarten runt Åseberget är en granodiorit-tonalitik gnejs och är en del av ett stråk som går i nordöstlig-sydvästlig riktning. Stråket gränsar på den sydöstra sidan till RA-granit och på den nordvästra sidan till Stora Le – Marsstrand formationen (Göransson & Persson, 2018).



Figur 1: Det blåmarkerade området är det för studien aktuella områdets placering i Kungälv.



Figur 2: Förekommande jordarter i området (SGU, 2018a).

På toppen av Åseberget ligger ett område på runt 4 ha med fyllnadsmaterial som avsatts då området användes som deponi (figur 3). Där bland annat överskottsmassor från utbyggnationen av väg E6 och Marstrandsvägen deponerats. Fyllnadsmaterialet har som

djupast uppmätts till 24 m, men då borren inte nådde berg vid den borrningen, så är det största djupet okänt (Kungälv kommun, 2021). Öster om berget har borrningar visat grundare jorddjup på 0 – 15 meter, bestående främst av leriga-gyttjiga material med en del skal i.



Figur 3: Ortofotograf av Åseberget, med deponin markerad.

2.2 Hydrogeologi och föroreningar

2.2.1 Hydraulisk konduktivitet

Flödet av grundvatten i marken varierar av flera olika anledningar. Hur grundvattnet rör sig och i vilken mängd, har inverkan på förekomsten och spridningen av föroreningar. Vattenflödet påverkas av topografien, mängden vatten och materialets genomsläpplighet (Naturvårdsverket, 2009). Topografins betydelse finns i att vatten rör sig från högre till lägre nivåer, samt att höjdskillnader påverkar ytvattnets rörelse. Mängden vatten beror på nederbördsvolym och tillflödande vatten. Ett materials genomsläpplighet kallas benämns som dess hydrauliska konduktivitet, och bestäms genom Darcys lag (Fetter, 2014). Ekvation 1 visar Darcys lag, där flödet (Q) är ett resultat av hydraulisk konduktivitet (K), tvärsnittsarean (A), höjdskillnad (dh) och avstånd (dl). Enheten för hydraulisk konduktivitet är m/s.

$$Q = -KA\left(\frac{dh}{dl}\right) \quad (\text{Ekvation 1})$$

Den hydrauliska konduktiviteten skiljer sig mellan olika typer av medium i marken. Jordarter har oftast en högre genomsläpplighet än bergarter, med vissa undantag (figur 4). Bland

jordarterna har de med stor andel grus stor hydraulisk konduktivitet, till exempel isälvsmaterial. Ju större fraktion mindre kornstorlekar, desto lägre hydraulisk konduktivitet. Lera har i allmänhet en hydraulisk konduktivitet på under 10^{-9} m/s, vilket är lägre än vissa bergarter. Genomsläppligheten kan i praktiken vara lägre i lera på grund av sprickor eller linser med högre hydraulisk konduktivitet (Bovin m.fl., 2015).

Jord- eller bergartstyp	Porositet		Hydraulisk konduktivitet						Vattenmängd		
	Primär (genom porer) %	Sekundär (genom sprickor o d sällan > 10 %)	Omfång (m/s)						Uttagbar i brunnar		
			10^0	10^{-2}	10^{-4}	10^{-6}	10^{-8}	10^{-10}	Hög	Måttlig	Låg
Jordarter											
Grus	30–40		■						■		
Grovsand	30–40		■					■			
Mellansand-grovmo	30–35			■				■			
Finmo-mjåla	40–50	Tillfälligt			■					■	
Lera, morän	40–55	Ställvis (sprickor, skikt)				■				■	
Sedimentära bergarter											
Kalksten, dolomit	1–50	Karstsprickor skiktfogar	■						■		
Grov-medelkornig sandsten	< 20	Sprickor	■					■			
Finkornig sandsten	< 10	Sprickor		■						■	
Lerskiffer, mosten	–	Sprickor			■					■	
Vulkaniska bergarter											
Basalt	–	Sprickor	■						■		
Porfyr o d	–	Sprickor		■						■	
Kristallina bergarter											
Granit, gnejs m fl	–	Sprickor och vittring (avtagande med tilltagande djup)		■						■	

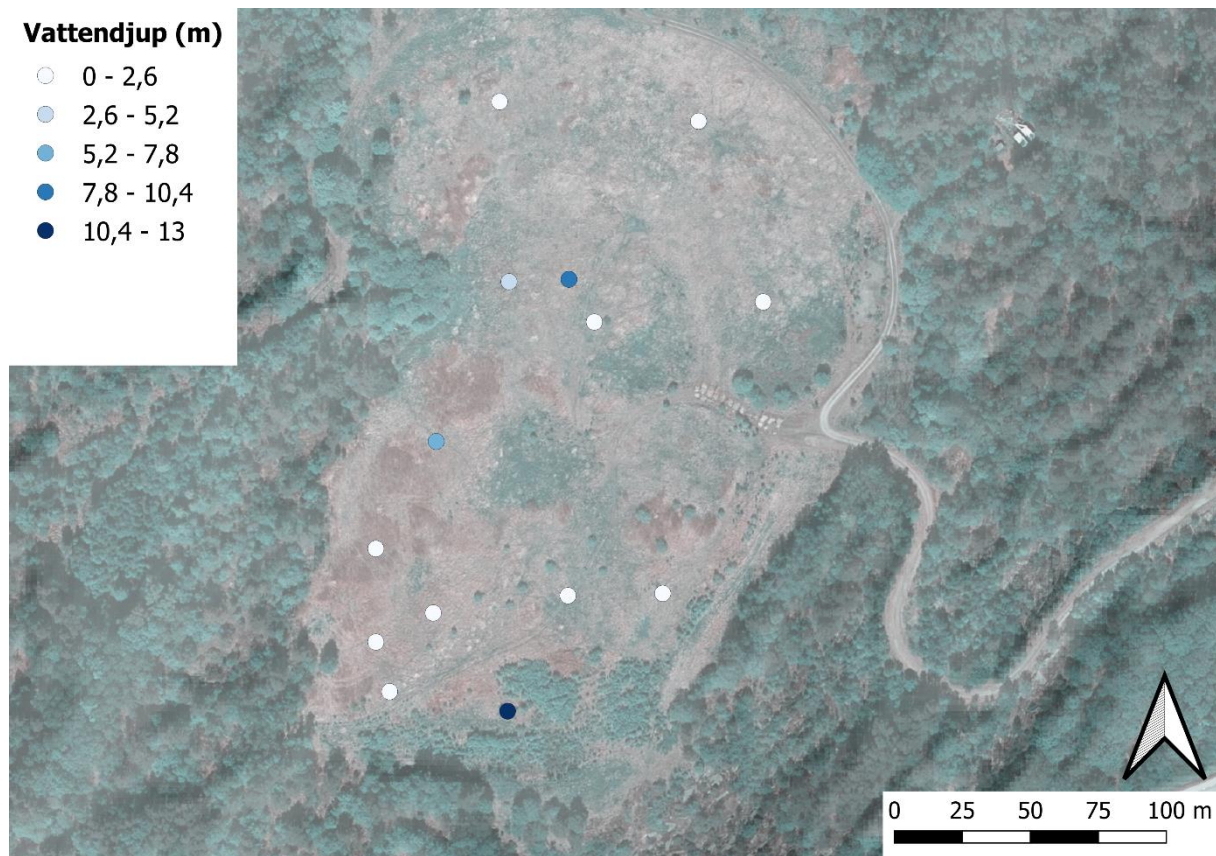
Figur 4: Variationen i hydraulisk konduktivitet i olika medium (Knutsson m.fl., 1995. Hämtad från Svedberg m.fl., 2003).

Hydraulisk konduktivitet i berg skiljer sig åt beroende på bergart och struktur. Vattnet flödar genom berg i sprickor eller porer. Sedimentära bergarter, som sand- och kalksten, kan vara porösa och därmed ha en genomsläpplighet av grundvatten genom sammanlänkade porer. Kristallint berg är oftast mindre porösa och där är sprickor den dominerande vattenvägen (Naturvårdsverket, 2009). Sedimentära bergarter kan även de ha sprickbildningar som primärt vattenflöde, där en kombination mellan poröst och uppsprucket berg kan ge ännu högre hydraulisk konduktivitet. Sprickornas kontaktgrad spelar också en stor roll. Ju fler sprickor som är sammanhängande, desto större är förmågan för vattnet att flöda. Fyllnadsgraden av sprickorna är även det en faktor som påverkar den hydrauliska konduktiviteten (Wahlgren m.fl., 2015). För att grundvattnet ska tränga in i sprickorna krävs att vattentrycket överstiger trycket från berget (Naturvårdsverket, 2009).

Ytterligare faktorer som påverkar den hydrauliska konduktiviteten i berg är omvandlingsgraden och bergspänningen. Massformiga bergarter som till exempel granit har högre förekomst av större spricksystem än bergarter med större metamorfgrad, till exempel gnejs. Därmed har massformiga bergarter generellt en högre hydraulisk konduktivitet än

mer omvandlade. Riktningen på bergspänningen påverkar sprickors öppningsgrad. Där sprickriktningar vinkelräta mot den största bergsspänningen tenderar att vara mer stängda, och de som är parallella mer öppna (Wahlgren m.fl., 2015).

Undersökningar gjorda av WSP våren 2022 visar på en skiftande grundvattennivå på Åseberget (figur 5). I södra delen av deponin är djupet till grundvattnet i ett rör uppmätt till 13m. Det är den lägsta uppmätta grundvattennivån. Majoriteten av mätningarna visar på en grundvattennivå mellan 0-2,6 m under marknivå (WSP, 2022).



Figur 5: Uppmätt grundvattendjup på Åseberget, gjorda våren 2022 av WSP. Skala 1:1500. SWEREF 99.

2.2.2 Föroreningar i grundvatten

Olika typer av föroreningar har olika egenskaper och samspelar därför på olika sätt i kontakten med vatten. Det som benämns *Light Non Aqueous Phase Liquid* (LNAPL) är ämnen som inte löser sig i vatten, och även har en lägre densitet än vatten. De ämnena kommer därför vid markinfiltration att lägga sig upp på vattenpelaren och därför inte transporteras bort, löst i grundvattnet. Många petroleumprodukter är exempel på LNAPL. Även flyktiga organiska ämnen ingår i denna kategori (Nilsson m.fl., 2005). Föroreningar i kategorin *Dense Non Aqueous Phase Liquid* (DNAPL) kan liksom LNAPL inte lösas i vatten, men har till skillnad en högre densitet än vatten. Det får konsekvensen att DNAPL ämnen i större utsträckning sjunker ned i marken. Markens struktur, sammansättning och jordlager har stor inverkan på DNAPL ämnens spridning. Exempel inom denna kategori föroreningar är klorerade kolväten och polycykliska aromatiska kolväten (PAH) (Nilsson m.fl., 2005). Tungmetaller har även de högre densitet än vatten och tenderar att följa markens struktur. Tungmetaller kan spridas i grundvatten genom att de adsorberar till partiklar. Mängden som adsorberar påverkas av

pH värdet i vattnet, där katjoner har större benägenhet att adsorbera vid högt pH och anjoner vid lågt pH. Över lag tilltar adsorptionen vid lägre pH. Andra exempel på adsorberande föroreningar är PCB och dioxiner. De föroreningar som i största grad sprids med grundvattnet är de vattenlösliga. Exempel på sådana ämnen är salter, PFAS och ammonium (Naturvårdsverket, 2009).

2.2.3 Föroreningar vid Åseberget

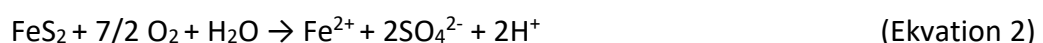
Undersökningar av föroreningar i mark och grundvatten vid Åseberget gjordes 2016 (Kungälv kommun, 2021). Det område som undersöktes då var deponin på bergets topp. De föroreningar vars halter överskred värdena för känslig markanvändning var PCB och PAH-H. PAH-H är en grupp av polycykliska aromatiska kolväten med en hög molekylvikt (Förorenade områden, 2019a). De bedömdes däremot förekomma i sådan låg nivå att de inte ansågs vara ett problem. I ett grundvattenrör påträffades höga halter klorid. Det bedömdes inte innebära en risk på grund av begränsat flöde av vatten i området. Över lag ansågs grundvattnet inte vara skadligt för hälsa eller miljö. En förorening som undersökning ansåg vara problematisk, var halten av metangas som påträffades i deponin.

Ytterligare undersökningar har genomförts av WSP våren 2022. Vid dessa tillfällen undersöktes både deponin, samt punkter nedanför Åseberget. Provtagningspunkterna som inte befinner sig på deponin är belägna sydväst och väst om berget. Även i de undersökningarna påträffades höga halter av metangas på deponin. Skillnader från undersökningen 2016 är att det 2022 uppmättes halter av kobolt överstigande naturvårdsverkets nivå för känslig markanvändning. I några av grundvattenrören påträffades PFAS med nivåer bedömda över gränsen för dricksvatten. Mindre mängder klorerande lösningsmedel återfanns i två av de djupaste grundvattenrören (WSP, 2022).

2.3 Sulfid i berg

2.3.1 Vittring av sulfidmineral

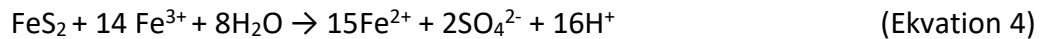
Sulfider förekommer i form av flera olika mineral, där det vanligaste är pyrit (FeS_2). Bergarter kan i sin tur innehålla olika mängd sulfidmineral (Dold, 2017). Mängden sulfidbärande berg varierar över Sverige. Sulfidmineral bildas i reducerande miljöer och bibehåller sin stabilitet så länge miljön hålls reducerande. Om sulfidmineralet kommer i kontakt med syre i en oxiderande miljö, påbörjas en vittring av mineralet (SGU, 2020). Vittringsprocessen kan ske i olika steg. Oxideringen av pyrit påbörjas då mineralet kommer i kontakt med atmosfäriskt syre och vatten, vilket leder till en reaktion där svavelsyra och järn(II)oxid bildas (ekvation 2) (Dold, 2010).



I nästa steg i vittringsprocessen oxideras järn(II)oxid till järn(III)oxid (ekvation 3).

Järn(III)oxiden kan sedan reagera med pyrit och bidra till en ökad oxidation (ekvation 4) (Dold, 2010). Den senare reaktionen blir mer dominerande för vittringen av pyrit vid lägre pH (<4,5). Som en katalysator i dessa reaktioner kan acidithiobacillus bakterier spela en stor roll

för ökad oxidation (INAP, 2014). Dessa reaktioner bidrar till en ökad mängd fria vätejoner och som leder till en surare miljö. Processen går under namnet *acid rock drainage* (Dold, 2017).



Förekomsten av kalciumrika karbonater och silikater i bergarten bidrar som en motvikt till försurningen från sulfider (INAP, 2014).

2.3.2 Sulfidbärande berg som ballast

Vid stora byggnadsprojekt behövs en omfattande mängd ballast. Användningen av ballast har ökat i Sverige de senaste åren och 2019 låg produktionen på 100 000 000 ton. I de siffrorna räknas inte entreprenadballast in, vilket innebär ballast av överblivet material från exempelvis byggnadsprojekt (SGU, 2021). Vid användning av berg som entreprenadballast finns det behov av att analysera sulfidhalten i berget. Då berget krossas för att användas som ballast ökar exponering av syre för sulfidmineralen, vilket bidrar till en ökad försurning (Trafikverket, 2015). Riktlinjer från EU säger att en svavelhalt kan klassas som inert då:

Avfallet har en maximihalt på 0,1 % sulfid-svavel, eller en maximihalt på 1 % sulfid-svavel och en neutraliseringspotentialskvot, definierad som kvoten mellan neutraliseringspotentialen och syrapotentialen och fastställd genom den statistiska provningen prEN 15875, som är större än 3 (Europeiska unionens officiella tidning, 2009).

En svavelhalt under 0,1% kan alltså ses som oproblematiskt. Region Stockholm har i sina riktlinjer för svavelbärande berg angivit att en svavelhalt på 0,5% är godkänt utan att behöva göra några åtgärder (Region Stockholm, 2022).

2.3.3 Risker med surt lakvatten

Användning av sulfidrikt berg som ballast kan leda till försurat lakvatten, vilket på engelska benämns *acid rock drainage*. Områden som blir drabbade i högre utsträckning är de som ligger nedströms i yt- och grundvattnets avrinningsväg. Om vattnet försuras innebär det negativa konsekvenser för organismer levande i de miljöerna och kan leda till fiskdöd i drabbade vattendrag (SGU, 2019). Ett lägre pH kan även ha en negativ påverkan på järn- och betongkonstruktioner (Trafikverket, 2015). När pH sänks innebär det en ökad urlakning av vissa metalljoner, till exempel Co, Cu, Ni, Zn, Pb, Cd och Mn (INAP, 2014).

2.4 Resistivitet

2.4.1 Resistivitet inom geologin

Resistivetsmätningar är en geofysisk metod som kan användas för att undersöka flera geologiska parametrar, bland annat lakvatten, föroreningar, jordlagerföljd och sprickzoner (SGF, 2008). För att räkna ut resistivitet behövs materialets resistans, vilket i sig utgår ifrån

Ohms lag (ekvation 5). Resistansen är kvoten av spänning och ström, och har enheten Ohm (Ω) (Khan & Musset, 2000).

$$R = \frac{V}{I} \quad (\text{Ekvation 5})$$

För att räkna ut resistiviteten behövs, förutom materialets resistans, även längden och arean på tvärsnittet. Vid en homogen materialkropp kan ekvationen nedan användas (ekvation 6) (Khan & Musset, 2000). Resistivitet har enheten Ohmmeter (Ωm).

$$\text{Resistivitet} = \text{Resistans} \times \frac{\text{Area}}{\text{Längd}} \quad (\text{Ekvation 6})$$

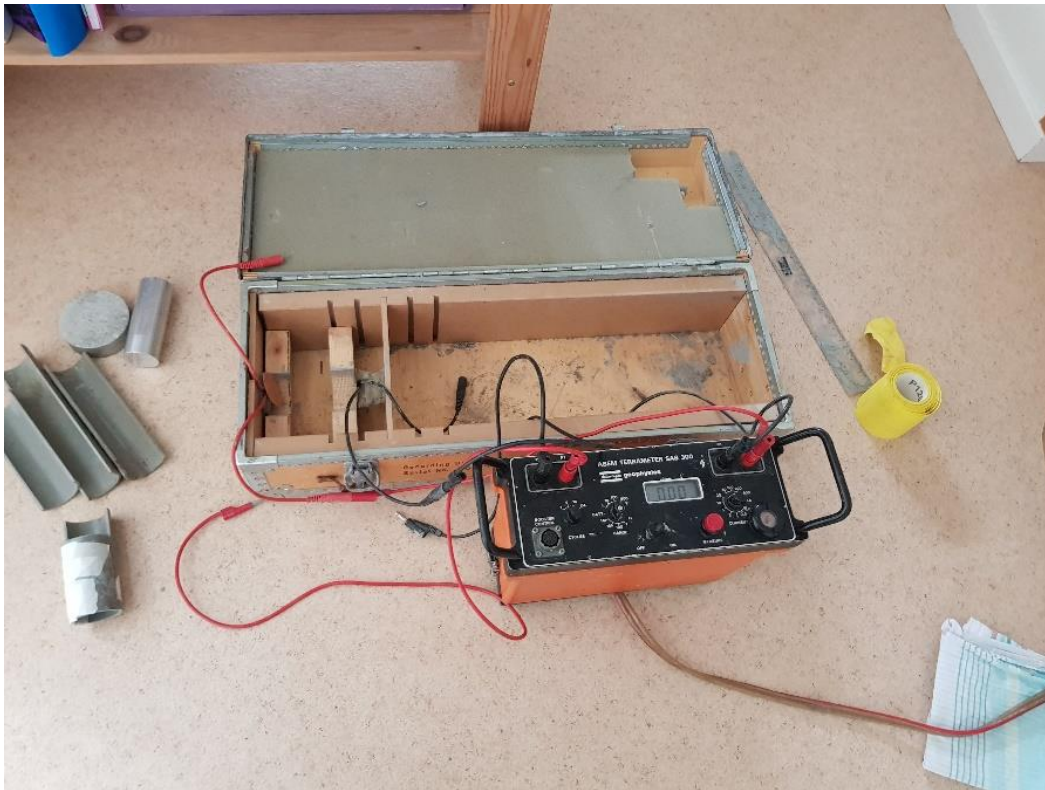
Resistivitet skiljer sig mellan olika medium och kan även variera inom jord- och bergarter (tabell 1). Lera är den jordart som har lägst resistivitet. Resistiviteten i morän kan variera mellan 200-3000 Ωm , och kommer få en lägre resistivitet vid högre grad lerinnehåll (Matsson, 2013). Saltvatten visar en lägre resistivitet än grundvatten på grund av förekomsten av Na^+ och Cl^- joner. Kvikklara, som är dränerad på saltjoner, har därför inte de lägsta resistivitetsvärdena som lera kan ha. Tidigare studier har visat att kvikklara inte har resistivitet lägre än 5 Ωm i Västsverige, men kvikklara med resistivitet på 4 Ωm har påträffats (SGI, 2018). Föroreningar i marken kan också bidra med en ökad mängd lösta joner. Lakvatten från deponier kan därför inneha en låg resistivitet (SGF, 2008).

Tabell 1: Skillnaderna i resistivitet mellan olika markmaterial (Khan & Musset, 2000).

Material	Resistivitet (Ωm)
Lera	1-100
Sand	500-5000
Grus	100-5000
Naturligt vatten	1-1000
Havsvatten	0,2

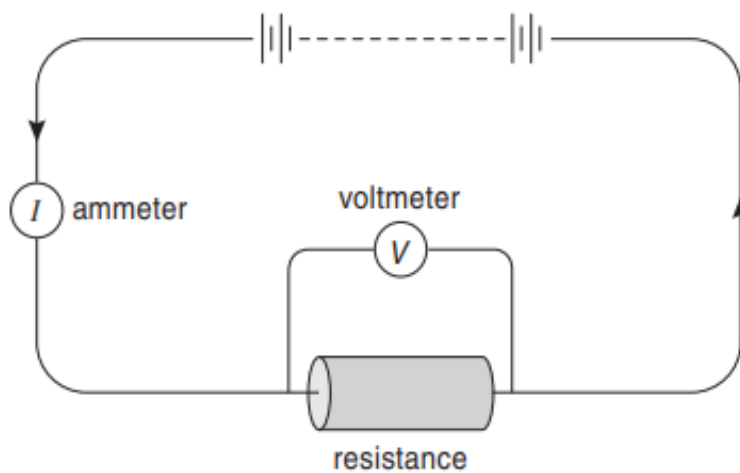
2.4.2 The Resistance Cell

The Resistance Cell (TRC) är ett instrument för att mäta resistivitet på enskilda jordprov. Det är framtaget för att användas i fält och därmed möjliggöra mätning av resistivitet på mindre påverkade prov (Tenny, 2018). Jordproverna ska inneha kolvform för att enklast mätas med instrumentet. TRC:n består av en låda med två kopparelektroder som kan justeras efter önskad längd på kolven (figur 6).



Figur 6: The Resistance Cell.

Elektrodena kopplas sedan till en resistivitetsmätare som drivs av ett bilbatteri. Två tillhörande elektroder används för att placera i provet och på visa mäta potentialen. En modell av instrumentets teori visas nedan (figur 7).



Figur 7: Schema över hur resistans mäts (Khan & Musset, 2000).

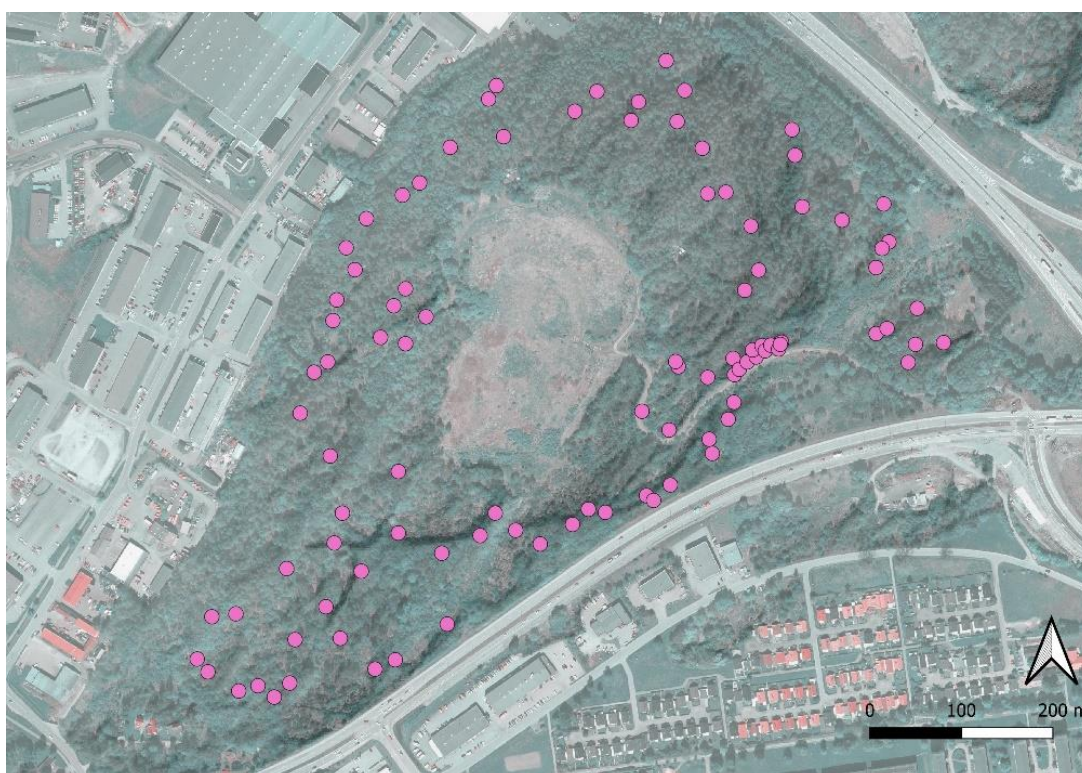
2.4.3 Elektrisk resistivitetstomografi

Elektrisk resistivitetstomografi (ERT) är en metod för att mäta jord- och berglagars resistivitet längs med profiler. Metoden följer samma principer beskrivna i ovanstående stycke. Skillnaden är att istället för att resistiviteten mäts på enskilt prov så mäts ERT via elektroder placerade längs med en linje på markytan. Resultaten blir en profil över resistiviteten i marken under den utplacerade linjen elektroder (Hasan m.fl., 2021).

3. Metod

3.1 Sprickkartering

Karteringen av bergets sprickor och planstrukturer genomfördes på 99 platser över områdetets ytor som består av berg (figur 8). Valet av provpunkter utgick från målet att vara jämnt fördelade över området. En viss ojämnh fördelning förekom på grund av förekomsten eller avsaknaden av berg i dagen. Flest punkter är tagna på den sydvästra sidan av Åsberget, där en vägskäring i berget förenklade provtagningen. Mätningarna genomfördes med en Clar kompass, som presenterar stupning och stupningsvinkel. Mätningarna utfördes på bergets planstruktur och på sprickbildningar i berget, där varje provtagningspunkts placering loggades av en GPS på mobiltelefon. På de punkter där flera sprickriktningar förekom valdes den som bedömdes vara den mest dominerade.



Figur 8: Provpunkter för strukturmätningar. Skala 1:4000.

Analysen av strukturmätningarna genomfördes i programmet Dips, skapad av Rocscience. Där undersöktes övergripande sprickriktningar. Programmet användes även som ett verktyg för att presentera resultatet. Strukturmätningarna delades in i grupper för att utröna möjligheten av dominerande riktningar. Detta skedde genom *Cluster analysis*, som är ett verktyg i Dips för att identifiera sprickgrupper utifrån de inmatade mätningarna. Grupperna innehöll mätningar med stupningsvinkel samt stupningsriktning inom 30° radie från den valda mittpunkten. Verktöget presenterar ett medelvärde på stupningsvinkel och stupningsvinkel utifrån mätningarna fallande innanför de valda parametrarna (Rocscience, u.å).

3.2 Provtagning av sulfider i berg

Inhämtningen av bergprover för analys av sulfider bestod av tre samlingsprov, vars provtagningsområden var belägna på Åsebergets södra och sydvästra sida (figur 9). Samlingsproverna är benämnda HBP 1-3 och består vardera av 15-20 delprov. Vikten per samlingsprov var 5 kg. Bergproverna inhämtades med hjälp av slägga och behållare med lock. Platserna för inhämtning valdes från förslag på nya vägar upp till toppen av Åseberget (Kungälv kommun, 2021).

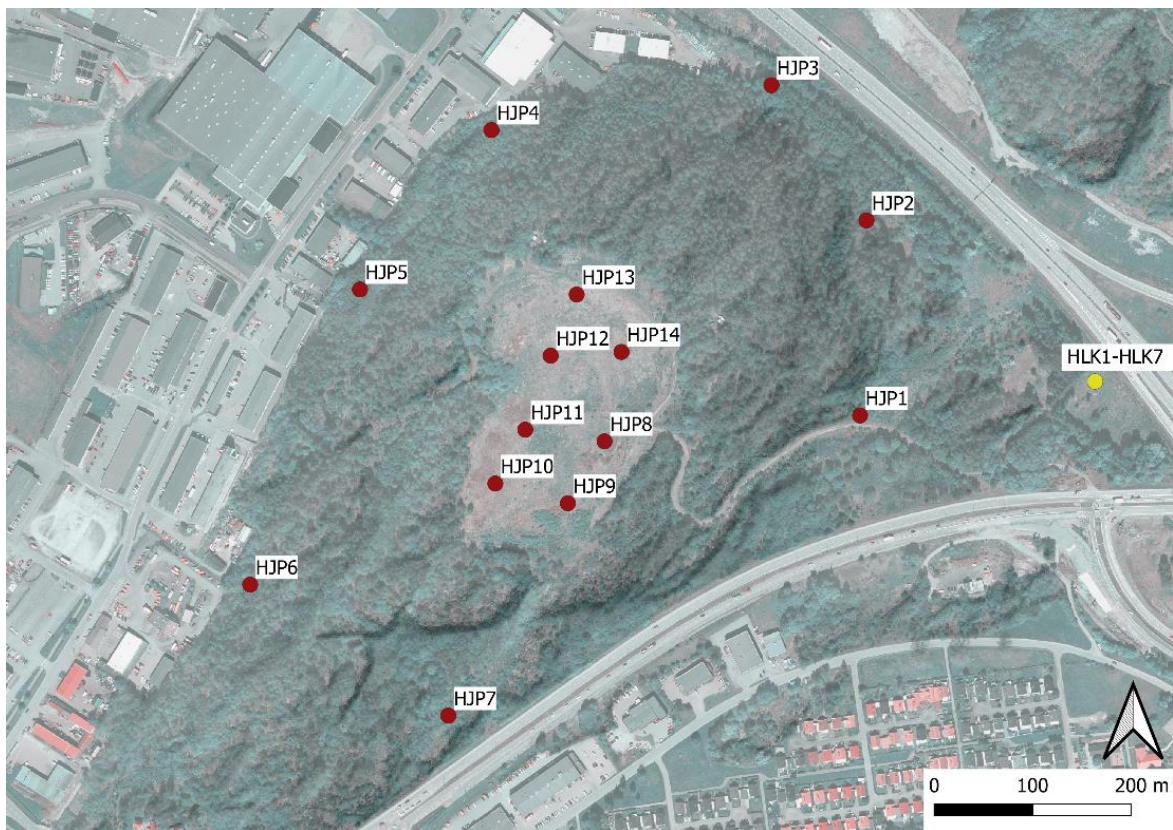
Bergproverna skickades till ALS Globals laboratorium i Luleå, där det krossades och maldes. Av de malda bergproverna användes 50g från respektive prov för analys. Proverna analyserades med ICP-MS, i syfte att ta reda på pH värde, samt halt av S, Ca, As och Fe i proven (ALS, 2022).



Figur 9: Provtagningsområden för samlingsprov av berg. Skala 1:5000.

3.3 Resistivitetmätning kolvprov

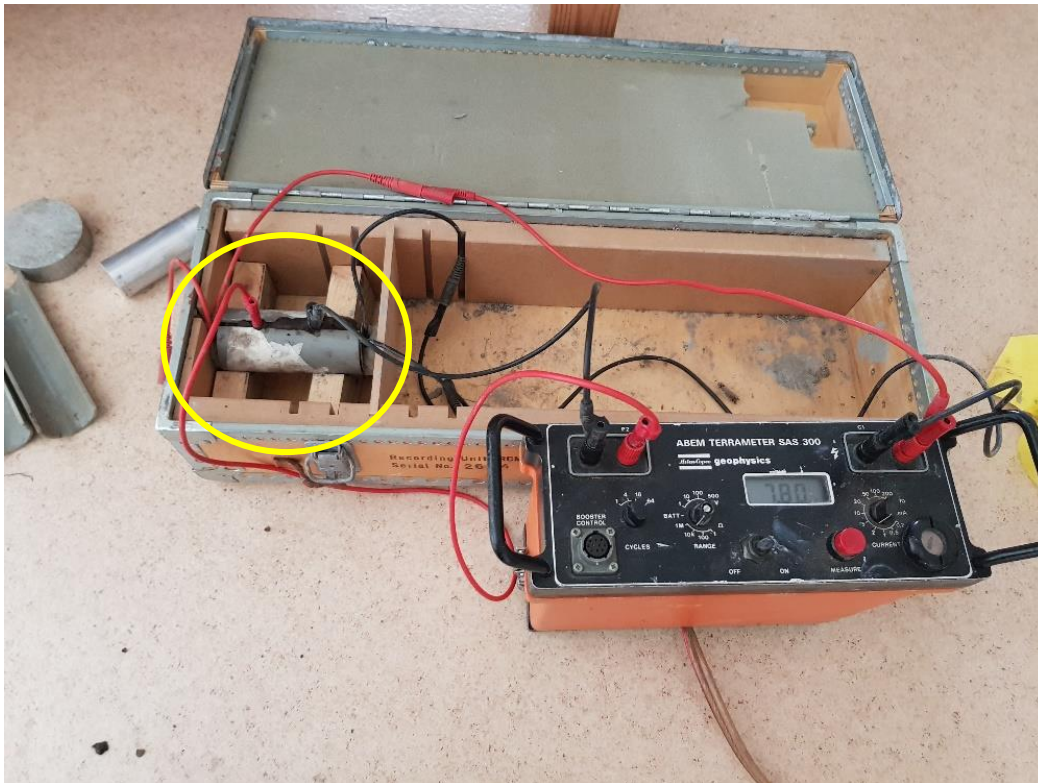
Resistivitetmätningen utfördes på kolvprov i TRC:n. Proverna bestod dels av sju lerprover inhämtade av en borrhandsvagn av typ Geotech, där samtliga inhämtades på olika djup i samma håll. Lerproverna inhämtades på djup mellan 2-13,5 m och benämndes HLK1-HLK7. Lerproven från borrhigen bestod av kolvar med en diameter på 5cm och med skiftande längder, mellan 6,9-9 cm. Den andra kategorien av prov bestod av jordprov inhämtade på sju punkter på nedsidan av Åseberget, samt sju punkter på deponin (figur 10). De sju punkterna på nedsidan valdes med tanken att vara jämnt utspridda runt berget. De sju punkterna på deponin valdes med tanken att ge en jämn utspridning över deponin. Jordproverna inhämtades med hjälp av en spadborrh och togs på cirka 0,5 m djup. De benämns HJP1-HJP14.



Figur 10: Provpunkter för resistivetsmätningar. HJP1-HJP14 avser jordprov från 0,5 m djup och HLK1-HLK7 avser prov inhämtade från borrhigg. Skala 1:4000. SWEREF 99.

Ler- och jordprovens resistans mättes i TRC:n genom Wenner metoden. Vilket innebär att de fyra elektroderna placeras med lika stort mellanrum (Khan & Musset, 2000).

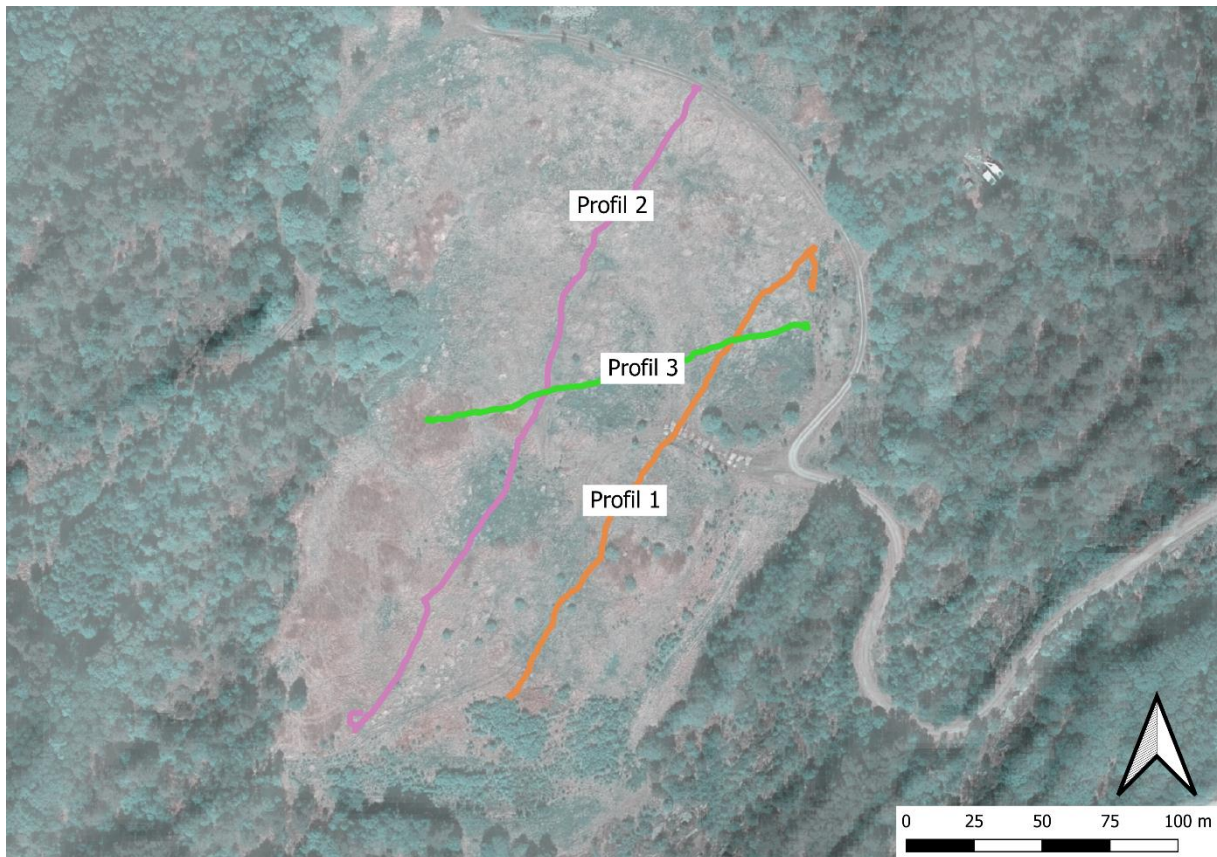
Resistivetsinstrumentet kopplat till TRC:n var en ABEM SAS 300. Provens tvärsnittsarea och längd mättes inför provtagning. För jordprover med lägre lerinnehåll, där kolvformen inte höll ihop naturligt, tillverkades ett plaströr som gav proverna en kolvform. Vilken hade en diameter på 4,5 cm och en längd på 11,5 cm (figur 11). Innan mätningen av ler- och jordprover så mättes resistiviteten på en aluminiumkolv för kalibrering. Varje provs resistans mättes tre gånger och ett medeltal användes sedan tillsammans med tvärsnittets area och kolvens längd för att få fram resistiviteten. Lerproven HLK1-HLK7s surhetsgrad analyserades även.



Figur 11: TRC:n under mätning av jordprov. Jordprovet har placerats i ett plaströr för att uppnå cylindrisk form. Jordprovet i plaströr är markerat med gul cirkel.

3.4 Elektrisk resistivitetstomografi

På deponin uppmättes tre resistivetsprofiler av Geofysik 3-kursen vid Göteborgs universitet (figur 12). Dessa mätningar genomfördes i maj 2022. Instrumentet som användes för mätningarna var en ABEM Terrameter LS. Mätmetoden som användes var *gradient*, vilket innebär att de strömförande elektroderna är fixerade och att de två elektroderna som används för att mäta potentialen flyttas i linje mellan de strömförande elektroderna. Potentialelektroderna har ett mindre avstånd mellan sig (Khan & Musset, 2000). Det minsta elektrodavståndet sattes till två meter. Längden är 235m på profil 1, 304m på profil 2 och 166m på profil 3. Profil 1 och 2 går i riktning nordnordost till sydsydväst. Profil 3 korsar de två andra profilerna och har en riktning från nordost till sydväst.

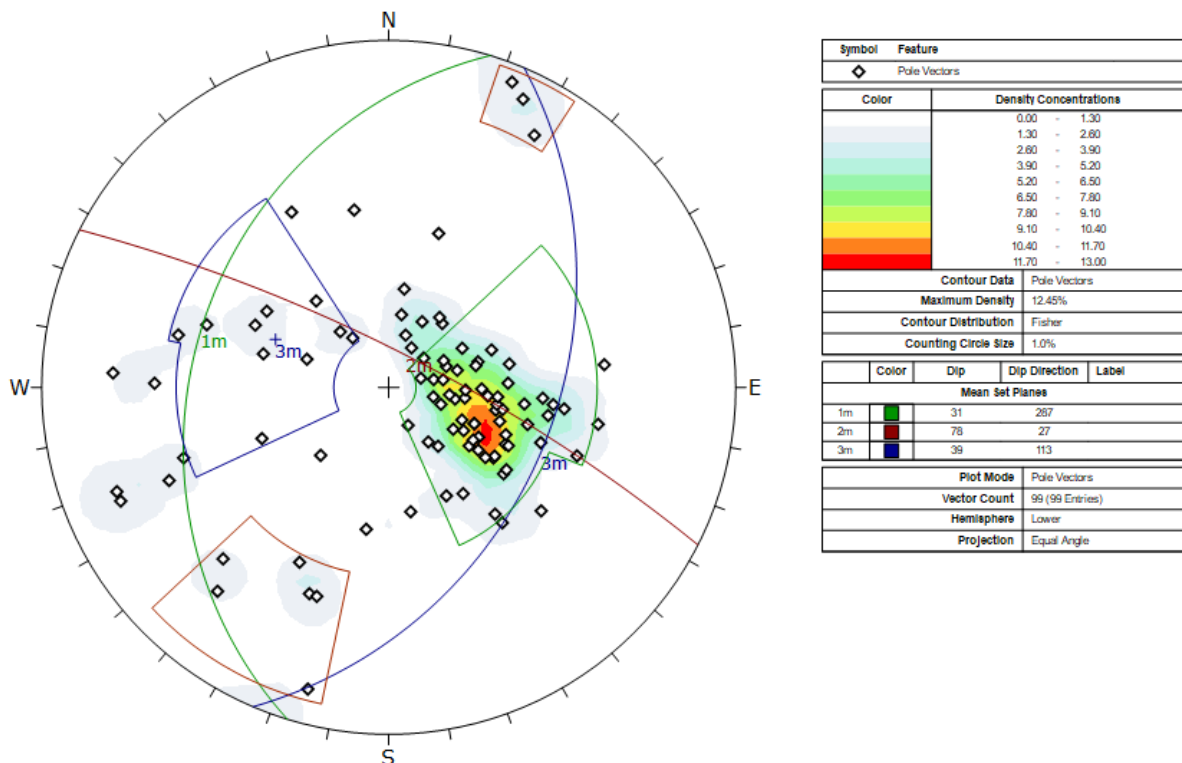


Figur 12: De tre sträckorna på deponin där elektrisk resistivitetstomografi utfördes. Skala 1:1500. SWEREF 99.

4. Resultat

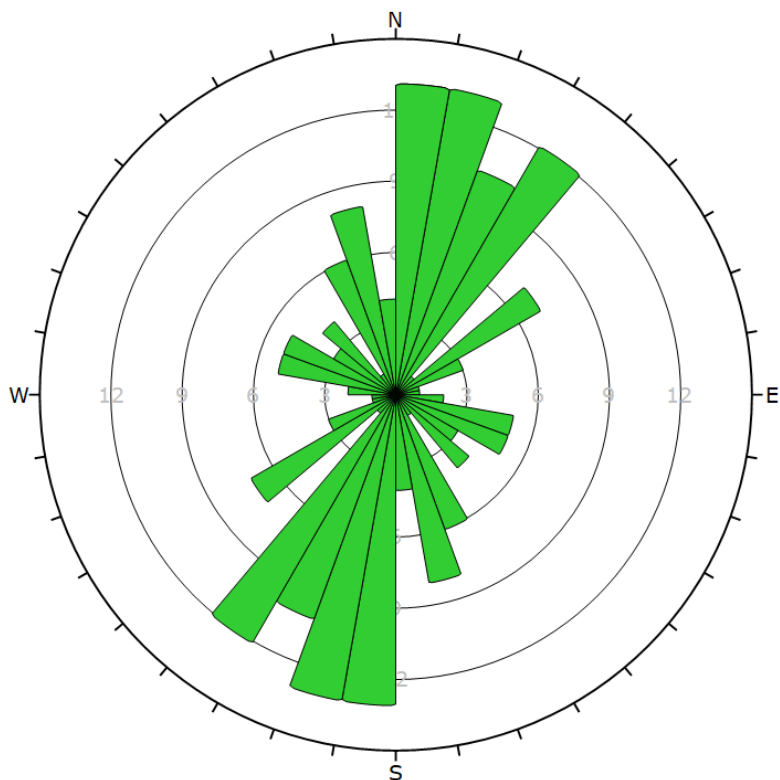
4.1 Strukturmätningar

Resultaten från sprickkarteringen visar en koncentration av strukturer med stupningsvinkel mellan i riktningen ost till nordost. Genom verktyget *Cluster analysis* framtoogs 3 grupper, med namnen 1m, 2m och 3m. Grupperingen visar att grupp 1m innehåller 57 mätningar, och bildar därmed den överlägset största sprickgruppen (figur 13). Medelstupningsriktningen på grupp 1m är 287° och medelstupningsvinkel på 31°. Grupp 2m innehåller 9 punkter och har medelstupningsriktningen 27° och medelstupningsvinkeln 78°. Övriga 23 mätpunkter faller utanför de 3 valda grupperna och har stupningsvinklar och stupningsriktningar med spridda värden.



Figur 13: Stereoplot över de 3 mest dominerade sprickgrupperna. Av de grupperna innehåller 1m (grön) flest mätning punkter med 57, medan 2m (röd) har 9 och 3m (blå) har 10. Stereoploten visar mätningarnas poler som en normal till planet.

Struktur mätningarna presenterade i ett rosdiagram visar på en majoritet av sprickor med en strykning i nordnordvästlig - sydsydvästlig utsträckning (figur 14). Rosdiagrammet grupperar in strykningar i 10° intervall. De två vanligaste strykningarna på sprickor är 0°-10° och 10°-20°, med 13 mätningar i vardera grupp. Intervallet 20°-30° innehåller 10 mätningar och intervallet 30°-40° innehåller 12 mätningar. Vilket innebär att 48 av mätningarna hamnar innanför intervaller 0°-40°. Av de återstående 51 mätningarna återfinns ingen lika tydlig riktning. Några intervaller som sticker ut en aning från mängden är 50°-60° med 7 mätningar, 100°-120° med sammanlagt 10 mätningar och 150°-170° med sammanlagt 14 mätningar.



Plot Mode	Rosette
Plot Data	Apparent Strike
Face Normal Trend	0.0
Face Normal Plunge	90.0
Bin Size	10°
Outer Circle	15 planes per arc
Planes Plotted	99
Minimum Angle To Plot	0.0°
Maximum Angle To Plot	90.0°

Figur 14: Rosdiagram som visar strykningen på de insamlade strukturmätningarna. Cirka hälften av sprickorna visar har en strykning på 0°-40°.

Till vilken grad berget var uppsprucket varierade mellan olika platser på berget. På vissa mätpunkter runt om Åseberget uppvisades en större grad av sprickbildning, till exempel vägsärning vid bergets sydöstra del. En del av berget var även mossbeklädd, vilket försvårade möjligheten att upptäcka sprickorna. Bredden på sprickorna varierar på olika mätpunkter och en del av sprickorna var även vattenförande. Ett exempel på en mer uppsprucken del av berget med olika sprickriktningar, och som även är vattenförande, ses nedan (figur 15).



Figur 15: En uppsprucken sektion av Åseberget. Sprickorna är vattenförande.

4.2 Svavelhalt i berget

Resultatet från analysen av bergproverna visar på svavelhalter mellan 180–680 mg/kg, vilket motsvarar 0,068–0,018 % (tabell 2). Mängden kalcium ligger högre med halter mellan 12 700–19 900 mg/kg, medan halten järn är högst av de provtagna ämnena på nivåer mellan 32 200–44 600 mg/kg. Mängden arsenik ligger på alla prov under lägsta detektionsgränsen på 3 mg/kg. HBP1 visar det högsta pH-värdet på pH 10, medan HBP2 och HBP3 ligger lite lägre på pH 9,1 vardera.

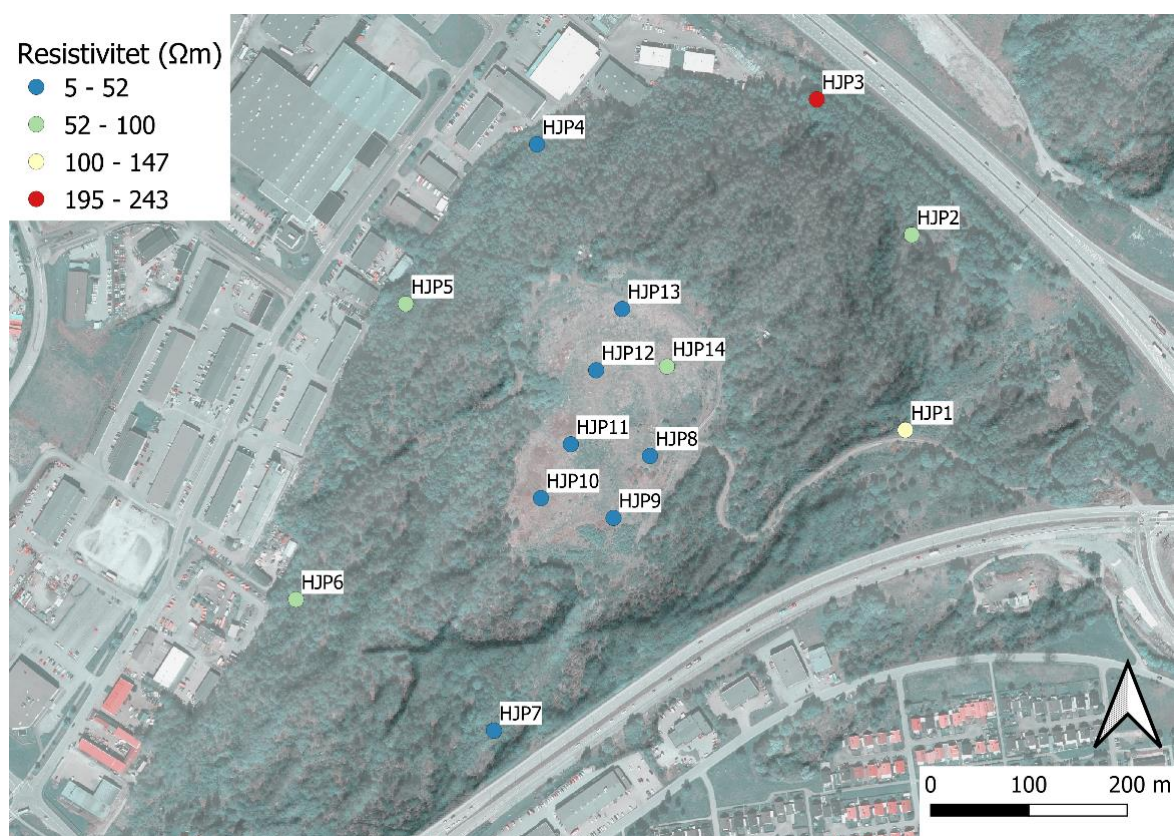
Tabell 2: Resultat från provtagning av berg.

Provpunkt	pH	S (mg/kg)	Ca (mg/kg)	Fe (mg/kg)	As (mg/kg)
HBP1	10	680	18 400	34 800	<3
HBP2	9,1	348	19 900	44 600	<3
HBP3	9,1	180	12 700	32 200	<3

4.3 Resistivitet från TRC:n

Resistivitetmätningarnas resultat innefattade värden mellan 1,5-242,6 Ωm (figur 16). Bland jordproverna HJP1-HJP7, tagna på nedsidan av Åsebergets branter, uppmättes största skillnader mellan punkterna. Där HJP3, inhämtat på den norra sidan av berget, hade högst resistivitet på 242,6 Ωm . Lägst resistivitet bland jordproverna tagna på nedsidan hade HJP4, med 18,8 Ωm . HJP1-HJP7 bestod av jordarter med olika sammansättning. De bestod till stor del av lera, med viss variation i mängd sand och grus.

Resistiviteten för de prov inhämtade uppe på deponin hade en mindre spridning, där endast HJP14 sticker ut med en resistivitet på 88,1 Ωm . De andra proven, HJP8-HJP13, hade resistivitet mellan 4,8-9,6 Ωm . HJP8-HJP13 bestod av lera, medan HJP14 hade en grusig/sandig sammansättning.



Figur 16: Resultat från resistivitetmätningar med TRC:n, tagna på jordprov inhämtade på 0,5m djup. Skala 1:4000. SWEREF 99.

Lerkolvarna, HLK1-HLK7, inhämtades i samma borrhål på djup från 2-13,5 m (tabell 3). De proven var de som visade lägst resistivitet på 1,5-2,4 Ωm . Skillnaden mellan olika djup var som störst 0,9 Ωm , och kan ses som en gradvis stigning från HLK2 ned till HLK7. Surheten skiftar mellan 6,6 pH på 2m till 8,3 pH på 13,5 m, vilket är en stigning på 1,7 pH. pH värde för HLK6 saknas.

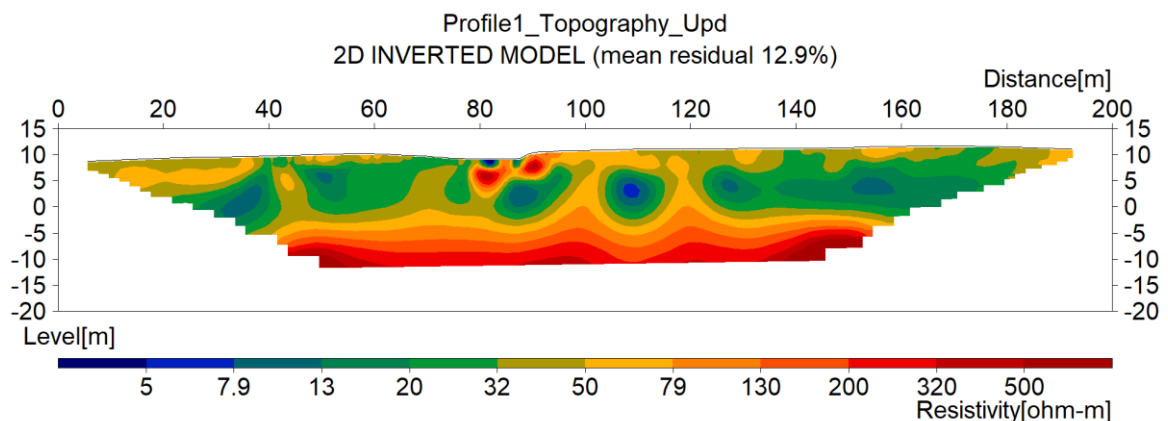
Tabell 3: Resistivitet och pH på lerproven inhämtade av borrhög.

Provpunkt	Resistivitet (Ωm)	pH	Djup
HLK1	1,9	6,6	2
HLK2	1,5	7,3	4
HLK3	1,5	7,6	6
HLK4	1,8	7,5	8
HLK5	1,9	7,7	10
HLK6	1,9	-	12
HLK7	2,4	8,3	13,5

4.4 Elektrisk resistivitetstomografi

Resultaten från resistivitetstomografin presenteras i tre profiler. Profil 1 visar ett övre lager på några meters djup med en resistivitet mellan 32-79 Ωm (figur 17). Det är inte homogent och är lägre på vissa ställen. Omkring 80m in på profilen finns ett område med högre resistivitet, med värden över 500 Ωm . Från cirka 5m till 15m djup är resistiviteten generellt lägre, med värden från 32 Ωm till under 5 Ωm . Under den nivån ökar resistiviteten.

ERIGRAPH - ABEM Instrument AB

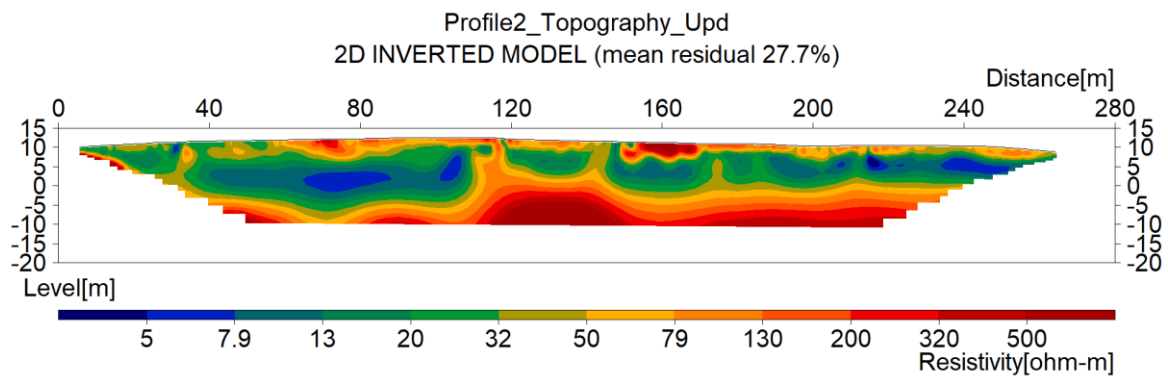


Data file: Profile1_Topography_Upd Model file: Profile1_Topography_Upd.RHO (mean residual = 12.9%)

Figur 17: Profil 1 från resistivitetstomografi genomförd på Åsebergets deponi.

I profil 2 har de översta 2-4 m en hög resistivitet på 79 Ωm till över 500 Ωm (figur 18). En skillnad är de första 50m med en lägre resistivitet än resterande topplager. Under det kommer ett lager mellan 5-15 m med lägre resistivitet. Där de lägsta nivåerna ligger på under 5 Ωm . På längre djup ökar resistiviteten och har som högst värden på över 500 Ωm . Det nedersta lagret med högre resistivitet återfinns i mitten av profilen på ett lägre djup än på sidorna.

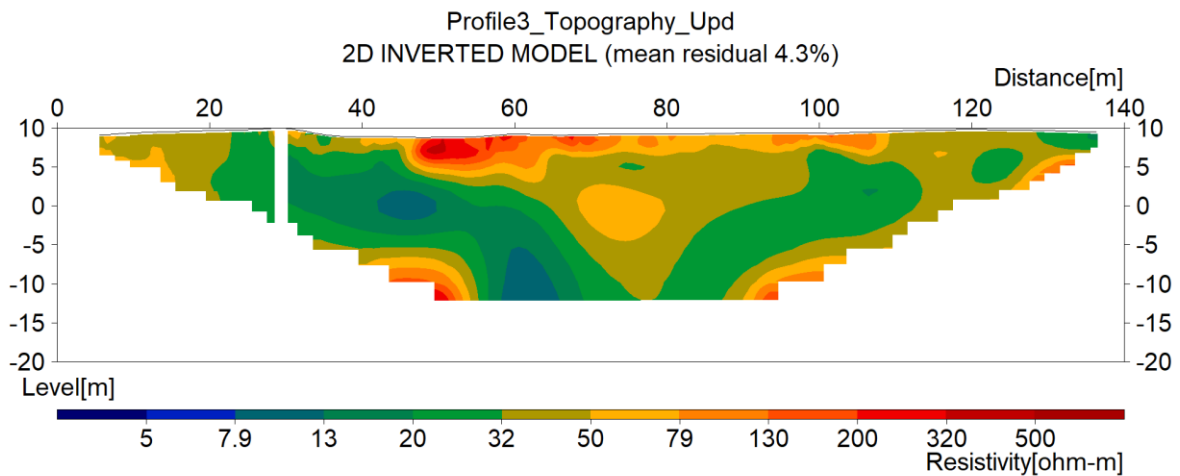
ERIGRAPH - ABEM Instrument AB



Data file: Profile2_Topography_Upd Model file: Profile2_Topography_Upd.RHO (mean residual = 27.7%)

Figur 18: Profil 2 från resistivitetstomografi genomförd på Åsebergets deponi.

Profil 3 har likt de andra två profilerna ett översta lager med högre resistivitet (figur 19). Under det är resistiviteten lägre, mellan 7,9 Ωm till 79 Ωm . I denna profil framträder inget tydligt undre lager med högre resistivitet. Högre nivåer kan ses vid profilens kanter på ungefär 20m djup. I mitten av profilen är resistiviteten i samma nivå som lagret under topplagret.



Data file: Profile3_Topography_Upd Model file: Profile3_Topography_Upd.RHO (mean residual = 4.3%)

Figur 19: Profil 3 från resistivitetstomografi genomförd på Åsebergets deponi.

5. Diskussion

5.1 Sprickriktning

Resultaten från sprickkarteringen visar en koncentration av sprickor med stupningsriktning i västlig – nordvästligriktning. Vilket synliggörs i stereoploten, där den största grupperingens medelstupningsriktning är 287° (figur 13). 57 mätningar innefattas av den grupperingen, benämnd 1m, vilket är en klar majoritet av mätningarna. Stupningsvinkeln skiljer sig en del mellan punkterna i gruppen, men medelstupningsvinkeln beräknas till 31° . De andra grupperna, benämnda 2m och 3m, är inte lika dominerande med endast 9 och 10 mätningar. Rosdiagrammet visar på liknande resultat som stereoploten, även om inte stupningsvinkeln inte presenteras i det diagrammet (figur 14). Strykningen i rosdiagrammet visar att de fyra 10° intervallen med flest mätningar är de med en strykning mellan 0° - 40° . 48 av de 99 mätningarna är nära hälften av alla mätningar och den tydligaste trenden. Rosdiagrammet innehåller förvisso endast strykning och visar inte vilken riktning det stupar åt. Med en jämförelse mot stereoploten går det dock att se att den största strykningsriktningen i rosdiagrammet sammanfaller med den största koncentrationen av normalpolar.

Det som presenteras i stereoploten och rosdiagrammet pekar på att det finns en dominerande sprickorientering, vilket är i västlig – nordvästlig riktning. Av de resterande mätningar finns det vissa som har liknande stupningsriktningar och ses som mindre sprickgrupper. Rosdiagrammet visar en grupp med 10 mätningar med strykning 100° - 120° , vilket sammanfaller med grupp 2m i stereoploten. Denna grupp innehåller stupningsriktningar som går i motsatt riktning till varandra, men som har en så pass brant

stupningsvinkel att de grupperas tillsammans. De bildar en gruppering av nära vertikala stupningsvinklar. Denna sprickgrupp är inte alls lika dominerande som den västnordvästliga.

5.2 Potentiella föroreningar i grundvattnet

Utifrån tidigare undersökningar av föroreningar i studieområdet, samt detta arbetes analys av svavelhalt i berg, kan man göra vissa antagningar om potentiella föroreningar i grundvattnet. Resultaten från bergprovs analysen visar halter av svavel lägre än 0,1% av berget. Vilket innebär en så pass låg sulfidhalt i berget att försurning genom urlakning av berget inte bedöms som ett problem. Berget kan ur försurningssynpunkt därför användas som ballast. Bergproven påvisade höga pH-värden, från 9,1 upp till 10. Detta pekar även det på en låg försurningspotential från berget. Att mängden kalcium var stor i förhållande till svavel kan tyda på att karbonater förekommer i berget.

Undersökningarna av föroreningar från 2016 och 2022 visar på vissa förhöjda nivåer av PCB, PAH-H, klorider, kobolt, PFAS och i mindre mängd klorerande lösningsmedel. Det som beskrivs som den största föroreningsproblemet är metangas. Metangas är flyktigt och kommer därför inte spridas med grundvattnet. PAH och klorerande lösningsmedel klassas som en DNAPL och har en högre densitet än vatten. Dess spridningsväg kommer därför följa jordlagrens täthet och topografin. Det finns därför en möjlighet för PAH-H att spridas genom sprickor i berget. PCB och kobolt tillhör gruppen av adsorberande föroreningar. De löses inte enkelt i vatten men kan däremot förekomma adsorberade till lerpartiklar och organiska partiklar (Förorenade områden, 2019b). Beroende tillgängligheten av partiklar att adsorbera till så kan PCB spridas med grundvattnet. Klorid och PFAS är vattenlösligt och sprids därför i grundvattnet. Sammanfattningsvis kan PAH-H, PCB, PFAS, kobolt, klorerande lösningsmedel och klorid vara potentiella föroreningar som sprids av grundvattnet.

5.3 Resistivitet

Mätningarna med TRC:n gav ett skiftande resultat mellan de olika platserna. Proverna HLK1-HLK7, som togs i på olika djup i samma hål, visar på liknande resistivitet på alla djup (tabell 3). De har alla en låg resistivitet, med högsta värde på 2,4 Ωm . Baserat på resistiviteten kan antagande göras att leran troligen inte är en kvicklera, då den är lägre än 5 Ωm (SGI, 2018). Kvicklera med lägre resistivitet än 5 Ωm har påträffats kan det inte klarläggas endast av resistiviteten. Att det pekar på att det inte är en kvicklera kan ses som ett tecken på liten vattengenomsämsel inom det området. Lera har i sig låg hydraulisk konduktivitet vilket gör området för denna provtagning ett område med låg vattengenomsämsel.

Proverna HJP1-HJP, tagna på nedsidan av Åseberget, visar på skiftande resistivitet. HJP4 och HJP7 visar den lägsta resistiviteten på mellan 5-52 Ωm (figur 16). De låga värdena tyder på ett högt lerinnehåll, vilket innebär att marken vid dessa punkter har en låg hydraulisk konduktivitet. Prov HJP1 och HJP3 har både resistivitet över 100 Ωm . Det tyder på en lägre grad lerinnehåll. Vilket i sin tur är tecken för en högre hydraulisk konduktivitet i marken runt de provpunkterna, jämfört med de andra. Av TRC mätningarna gjorda på prov tagna uppe på deponin, var det endast HJP14 som hade en aning högre resistivitet på 88,1 Ωm . HJP8-HJP13 låg alla på en låg resistivitet som tyder på en högre grad lerinnehåll. De jordprov som använts till mätning i TRC:n är alla tagna på cirka 0,5m djup. Resistiviteten från de

mätningarna gäller därför endast för det övre marklagret. De är även tagna på enskilda punkter, vilket betyder att skiftningar kan ske i omkringliggande område.

Profilerna från den elektriska resistivitetstomografin ger en mer översiktlig bild över resistiviteten på deponin. De tre profilerna visade alla ett övre lager på några meter, där resistiviteten generellt var högre än underliggande lager. Även om det förefaller finnas skillnader på olika platser längs med profilerna. Områdena med högre resistivitet kan tolkas som jordarter med lägre lerinnehåll, vilket gör det mer genomsläppligt. Det översta marklagret ligger i många fall över grundvattennivån på deponin. Den högre resistiviteten kan vara ett tecken på icke saturerade jordlager.

Under det översta lagret märks i alla tre profiler en sänkning av resistiviteten. Det kan tolkas på olika sätt. Ett sätt att tolka det är att det innebär att lerinnehållet på de djupa har en högre lerinnehåll. Resistiviteten kan även ha sänkts på grund av högre vattenkvot. Om marken innehåller föroreningar kan även det ge en lägre resistivitet. Det som syns, främst i profil 1 och profil 2, är områden med högre resistivitet i det mellersta lagret. Det kan tolkas som områden med lägre lerinnehåll och istället en större andel sand/grus. Vilket gör att de områdena har en högre hydraulisk konduktivitet. De områdena kan utgöra transportvägar för infiltrerad nederbörd. Längst ned i profilerna ses lager med högre resistivitet, vilket som denna studie tolkar som bergets början. I profil 3 är resistiviteten lägre i mitten av profilen, jämfört med de två andra profilerna. Mätningarna har inte på den sträckan nått ned till berget. Högre resistivitet kan ses på de nedre sidorna av profilen, vilket tyder på ett större djup till berg i mitten av profil 3.

5.4 Spridningsväg för grundvatten

Deponin är belägen högst upp på Åseberget, vilket gör att grundvattnets tillförsel där endast kommer från nederbörd. Det övre marklagrets sammansättning påverkar hur stor del av nederbörden som infiltreras kontra det som blir ytavrinning. Undersökningar av grundvattennivå på deponin visar på höga nivåer på de flesta mätpunkterna, vilket tyder på att infiltration förekommer. Den elektriska resistivitetstomografin visar områden med kontinuerlig högre resistivitet från ytan ned till berggrunden, lokaliserade i mittpartierna av profil 1 och 2. Högre resistivitet tolkas som områden med lägre grad lera och kan därav ha en högre hydraulisk konduktivitet. Den centrala delen av deponin kan därför vara ett område där infiltration från ytan ned till berget är möjlig.

Mätningar av surhetsgrad på lerproven HLK1-HLK7 visar på en ökning av pH-värde från markytan till största djupet. Från 6,6 pH på 2m, till 8,3 pH på 13,5m. Nederbörd i Sverige har en surhetsgrad på 5,5-6 pH (Nationalencyklopedin, 2022). Att lera är surare närmare marken kan vara en effekt av nederbörden. Då pH-värdet ökar vid större djup kan det ses som ett tecken på låg infiltrationsgrad av nederbörd. Lera närmast berggrunden har det högsta pH-värdet. Det kan vara en orsak av infiltration av mer basiskt grundvatten från berggrunden, vilket påverkat lera i nära anslutning till berget.

Utifrån sprickkarteringens resultat kan en dominerande sprickriktning i västlig-nordvästlig riktning utrönas. Då de flesta sprickor går i den riktningen är det ett tecken på att den riktningen är där stora delar av grundvattnet flödar. Under karteringen påträffades

vattenförande sprickor med andra sprickriktningar, vilket tyder på att grundvattenflöde i andra riktningar förekommer. Längden på sprickor och sammankopplingen mellan sprickor, påverkar den hydrauliska konduktiviteten, vilket är en faktor som inte undersöks i denna studie.

6. Slutsats

Kartering visar att en dominerande sprickriktning åt väst till nordväst kan urskiljas på Åseberget. En klassificering av sprickmätningarna i en stereoplot, där mätningar inom en radie på 30° grupperades, visar en grupp innehållande 57 mätpunkter. Denna grupp har en medelstupningsriktning på 287° och en medelstupningsvinkel på 31°. Av de totala 99 mätpunkterna utgör de 57 mätningarna i denna grupp mer än hälften. Det gör att sprickriktning utmärker sig som den klart tydligaste inom det studerade området.

Undersökningar av föroreningar i området har genomförts 2016 och 2022. Resultaten från de undersökningarna visar på förhöjda halter av PAH-H, PCB, PFAS, kobolt, klorerande lösningsmedel, metangas och klorid. Med undantag för metangas är alla de föroreningar vilka kan spridas med grundvattnet. PFAS och klorid är av de nämnda föroreningarna de som lättast löser sig i vatten och därför de som lättast sprids med grundvattnet. Då kloriden inte ansågs utgöra en risk kan därför PFAS anses vara den förorening det förekommer störst spridningspotential för. Undersökning av bergets sulfidhalt, gjord på tre provområden, visade låga halter av svavel. De låg under ansedda nivåer för vidare undersökningar. Risken för försurat lakvatten från berget anses därför vara låg.

Resistivitet användes i denna studie för att bedöma jordlagars sammansättning.

Resistivetsmätningar utgjorda på enskilda jordprov, med hjälp av instrumentet TRC, visar punktvisa resistivets värden. På prov tagna med hjälp av borrhandsvagn kunde resistiviteten uppmätas på olika djup i samma borrhål. Vilket ger en tydlig bild av markens resistivitet på den platsen. På prov tagna med hjälp av spadborr kan endast resistivitet på det översta marklagret undersökas. Elektrisk resistivitetstomografi användes för att skapa tre profiler över deponin. Genom det kunde resistiviteten analyseras på större djup än de på de enskilda jordproverna. Från profilernas resistivitet kunde antaganden om jordlager med högre hydraulisk konduktivitet göras, vilket bidrar till information om infiltration av nederbörd och flöde av grundvatten.

Den ovan nämnda resistivetsmätningen, tillsammans med uppmätta grundvattennivåer, talar för att nederbörd infiltreras i deponin. Hur stor andel av nederbörden som blir ytavrinning jämfört med andelen som infiltreras framgår inte av denna studie. Den dominerande sprickriktningen i berget pekar mot en dominerande grundvattenrörelse i västlig-nordvästlig riktning. För att se hur stor andel av grundvattnet som rör sig i den riktningen krävs vidare undersökningar.

7. Tackord

Tack till min handledare Martin Persson för bra stöttning under arbetet och för alla intressanta idéer. Tack till min examinator och kursansvarig, Mark Johnson. Jag vill även tacka Vera Bouvier för att jag fick följa med henne och hennes kollegor på Åseberget och för hennes hjälpsamhet i mitt arbete. Tack till Ylva Bellander för hjälp angående frågor om sulfidförande berg. Till sist vill jag tacka min opponent Carl Malmborg och resterande klasskamrater som varit till stor hjälp.

8. Referenslista

- ALS. (2022). *Analys av sulfidhaltigt bergmaterial*. Hämtad 2022-04-14 från: <https://www.alsglobal.se/sok-analys?selected-matrix=0&selected-sub-matrix=&selected-area=0&selected-sub-area=&q=sulfidhaltigt>
- Bovin, K. Vikberg, E. Morén, I. (2015). *Tätande jordlager – en kunskapsammanställning*. SGU-rapport: 2015:32.
- Dold, B. (2010). Basic Concepts in Environmental Geochemistry of Sulfidic Mine-Waste Management. I E. S. Kumar (Red.), *Waste Management* (s.173-198). InTech.
- Dold, B. (2017). *Acid rock drainage prediction: A critical review*. Journal of Geochemical Exploration 172: 120-132 doi: 10.1016/j.gexplo.2016.09.014
- Europeiska unionens officiella tidning. (2009). *KOMMISSIONENS BESLUT av den 30 april 2009 om komplettering av definitionen av inert avfall för genomförandet av artikel 22.1 f i Europaparlamentets och rådets direktiv 2006/21/EG om hantering av avfall från utvinningsindustrin*. 2009/359/EG. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/SV/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009D0359&from=EN>
- Fetter, C. W. Jr. (2014). *Applied Hydrogeology*. Pearson.
- Förorenade områden. (2019a). *PAH*. Hämtad 2022-05-16 från: <https://www.forenadeomraden.se/index.php/aemnen/pah>
- Förorenade områden. (2019b). *PCB*. Hämtad 2022-05-16 från: <https://www.forenadeomraden.se/index.php/aemnen/pcb>
- Göransson, M. Persson, L. (2018) *Beskrivning till bergkvalitetskartan Kungälv*. Sveriges geologiska undersökning (SGU). <http://resource.sgu.se/produkter/k/k610-beskrivning.pdf>
- Hasan, M., Shang, Y., Meng, H., Peng, S., Xuetao, Y. (2021). *Application of electrical resistivity tomography (ERT) for rock mass quality evaluation*. *Sci Rep* 11, 23683. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-03217-8>
- The Internation Network for Acid Prevention (INAP). (2014). *Global Acid Rock Drainage Guide*. <http://www.gardguide.com/images/5/5f/TheGlobalAcidRockDrainageGuide.pdf>
- Kungälvs kommun. (2021). *Förstudie – Åseberget*. https://www.kungalv.se/siteassets/dokument/bygga-och-bo/dokument/planer-och-byggprojekt/aseberget-forstudie/forstudie-aseberget-ks2021_0772-2.pdf
- Khan, M. A., Musset, A. E. (2000). *Looking into the Earth – An introduction to geological geophysics*. Cambridge University Press. New York.
- Mattson, H. (2013). *Projekt kärnbränsleförvaret – Resistivitetmätning vid våtmark 16 i Forsmark*. Geovista AB.
- Nationalencyklopedin. (2022). *Sur nederbörd*. Hämtad 2022-05-27 från: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/sur-nederb%C3%B6rd>

- Naturvårdsverket. (2009). *Undersökningar av föroreningar i berggrund*. Rapport 5930. <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1618517/FULLTEXT01.pdf>
- Nilsson, G. Rosqvist, H. Andersson-Sköld, Y. Starzec, P. Norrman, J. (2005). *Föroreningsspridning – Underlag för handlingsplan för att förutse och förebygga naturolyckor i Sverige vid förändrat klimat*. SGI-rapport. (Varia, 560:3). <https://www.sgi.se/globalassets/publikationer/varia/pdf/sgi-v560-3.pdf>
- Regeringskansliet. (2022). *Agenda 2030 | Mål 11 | Hållbara städer och samhällen*. Hämtad 2022-04-18 från: <https://www.regeringen.se/regeringens-politik/globala-malen-och-agenda-2030/agenda-2030-mal-11-hallbara-stader-och-samhallen/>
- Region Stockholm. (2022). *Underlag till bedömningsgrunder för berg innehållande sulfider*. FUT 2022-0040. <https://nyatunnelbanan.se/wp-content/uploads/2022/02/Bedomningsrunder-sulfidforande-berg.pdf>
- Rocscience. (u.å). *Sets from Cluster Analysis*. Hämtad 2022-05-11 från: <https://www.rocscience.com/help/dips/documentation/sets/sets-from-cluster-analysis>
- Statens Geotekniska Institut (SGI). (2018). *Metodik för kartläggning av kvicklera - Vägledning*. SGI publikation 46.
- Svedberg, B. Mácsik, J. Knutsson, S. (2003) *Modell för miljögeoteknisk bedömning av väg- och järnvägsbyggnadsmaterial*. Luleå tekniska universitet.
- Sveriges geologiska undersökning (SGU). (2018a). *Produkt: Jordarter 1:25 000-1:100 000*. <https://resource.sgu.se/dokument/produkter/jordarter-25-100000-beskrivning.pdf>
- Sveriges geologiska undersökning (SGU). (2018b). *Produkt: Berggrund 1:50 000 - 1:250 000*. <https://resource.sgu.se/dokument/produkter/berggrund-50-250000-wms-beskrivning.pdf>
- Sveriges geologiska undersökning (SGU). (2019). *Miljöproblem kopplade till sur sulfatjord*. Hämtad 2022-04-14 från: <https://www.sgu.se/anvandarstod-for-geologiska-fragor/hur-man-kanner-igen-och-undersoker-sur-sulfatjord/miljoproblem-kopplade-till-sur-sulfatjord/>
- Sveriges geologiska undersökning (SGU). (2020). *Sulfidmineral i gruvavfall*. Hämtad 2022-04-13 från: <https://www.sgu.se/mineralnaring/gruvor-och-miljopaverkan/sulfidmineral/>
- Sveriges geologiska undersökning (SGU). (2021). *Behovet av ballast – Prognos till 2040*. Hämtad 2022-04-13 från: <https://www.sgu.se/samhallsplanering/bergmaterial-for-byggande/svensk-ballastproduktion/ballastanvandning---prognos-till-2040/>
- Sveriges geotekniska förening (SGF). (2008). *Automatiserad Resistivitetmätning – Metodblad*. <http://www.sgf.net/web/page.aspx?refid=3363>
- Tennby, G. (2018) *Electrical resistivity – A new and improved model strategy*. [Masteruppsats, Göteborgs universitet]. ISSN 1400-3821.
- Trafikverket. (2015). *Trafikverkets handbok för hantering av sulfidförande bergarter*. https://trafikverket.ineko.se/Files/SV-SE/11741/RelatedFiles/2015_057_Trafikverkets_handbok_for_sulfidforande_bergarter.pdf

Wahlgren, C-H. Mellkvist, C. Bovin, K. Jelinek, C. Persson, L. Thunholm, B. Wåhlén, H. (2015). *Grundvatten i kristallin berggrund, en pilotstudie baserad på SGUs data*. SGU-rapport 2015:21.

WSP. (2022). *Kompleterade miljöteknisk undersökning, Åseberget*. Del av Rollsbo 1:32.