



UMEÅ UNIVERSITY

Karaktärisering av morän i Aitikgruvan för användning vid efterbehandling av gråberg

Anna Larsson

Student

Examensarbete i geovetenskap 15 hp

Avseende kandidatexamen

Rapporten godkänd: 2018-11-27

Handledare Umu: Rolf Zale

Stockpiled Till Characterization at the Aitik Mine and its suitability for use into waste cover system

Anna Larsson

Abstract

The Aitik Mine is the largest copper mine in Europe and every year, 15 – 20 Mt waste rock is deposited in dumps located close to the mine. This waste rock can contain sulfides, which if exposed to oxygen can cause leeching and formation of acid rock drainage. To prevent this from happening, Boliden has designed a dry cover system to prevent leaching from occurring. The purpose of this study was to characterize existing stockpiles of till at Boliden's Aitik Mine site in the context of requirements for the closure cover system. The till was evaluated primarily of its suitability for use in a highly compacted layer (HCL), since Boliden has a cover system design that has to provide the necessary control on oxygen diffusion rates to underlying waste rock material over the long term. The sampling took place on three of the stockpiles and a total of 31 test pits were excavated. A total of 27 samples of soil were collected and analyzed for particle size distribution (PSD) testing. Following review of PSD results, select samples were tested for hydraulic conductivity and compaction testing. The PSD results showed that all materials were fine-grained sand with some gravel, cobbles and silt. Results also show the amount of clay particles (0,004 mm) were relatively low across the three stockpiles. The result for the hydraulic conductivity were higher than Boliden's prescriptive criteria. The results indicate that the sampled till would require addition of sodium bentonite to be able to construct a HCL with a hydraulic conductivity not exceeding Boliden's criteria.

Keywords: Aitik Mine, Characterization, Till, Waste rock, Hydraulic conductivity

Förord

Jag vill börja med att tacka min handledare Rolf Zale från Umeå universitet som hjälpt mig med skrivandet av denna rapport. Jag vill även tacka Erika Fagerlönn och Anton Sandgren på Boliden Mineral AB, som gjort detta projekt möjligt och som hjälpt mig under vistelsen vid Aitikgruvan. Stort tack till Matt McKeown och Larissa Doucette på O'Kane Consultants för all hjälp under provtagningen.

Anna Larsson

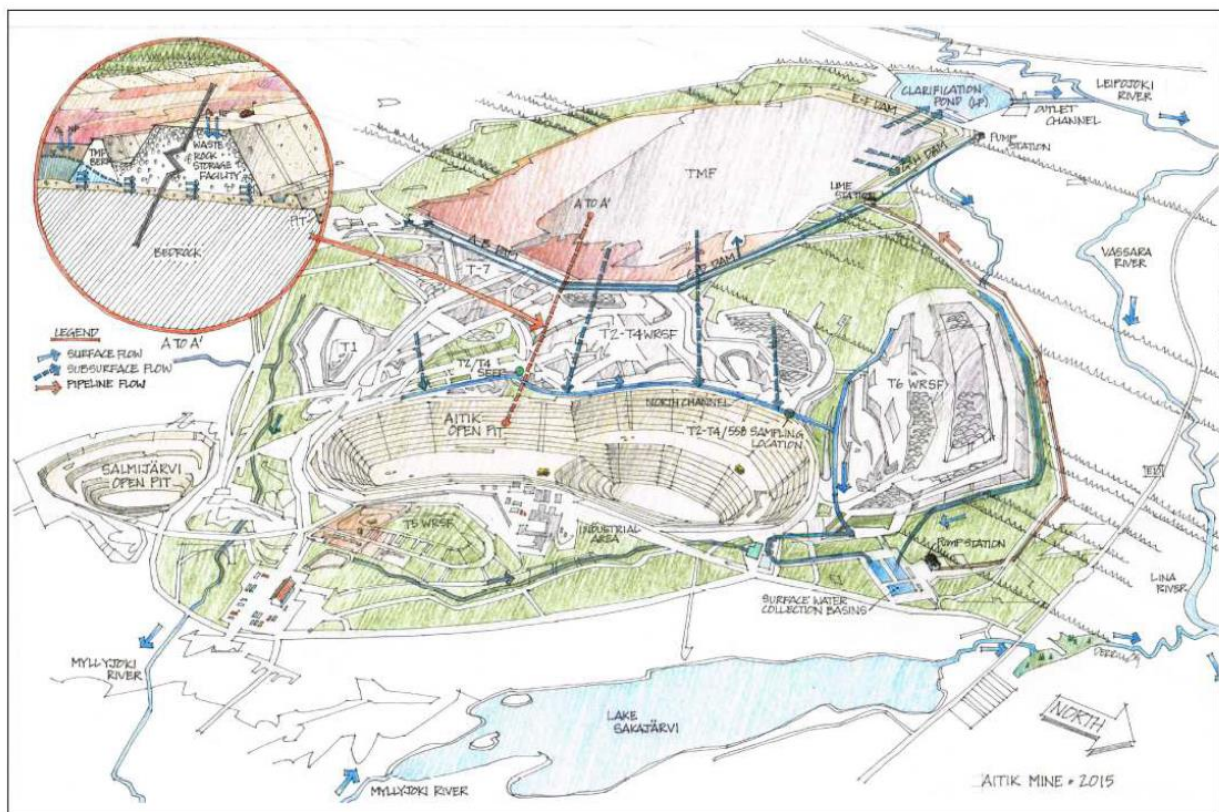
Innehållsförteckning

1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	3
2 Undersökta parametera för att utröna moränens geotekniska egenskaper	4
2.1 Kornstorleksfördelning	4
2.2 Hydraulisk konduktivitet.....	4
2.3 Optimal vattenkvot och maximal torrdensitet för packning.....	5
3 Material och metod	6
3.1 Egen undersökning	6
3.1.1 Salmijärvi.....	7
3.1.2 Moräntipp D	7
3.1.3 Moräntipp F.....	8
4 Resultat	9
4.1 En sammanställning av resultaten från kornstorleksfördelningen ..	9
4.1.1 Salmijärvi.....	9
4.1.2 Moräntipp D	9
4.1.3 Moräntipp F.....	10
4.1.4 Sammanställning från alla tre moräntippar	11
4.1.5 Sammanställning av kornstorleksfördelningen från egen undersökning och tidigare karaktärisering	11
4.2 Hydraulisk konduktivitet.....	12
4.3 Optimal vattenkvot och maximal torrdensitet	12
5 Diskussion	13
4.1 Kornstorleksfördelning	13
4.1 Hydrauliska konduktivitet	14
4.1 Optimal vattenkvot och maximal torrdensitet	14
4.1 Slutsats.....	15
6 Referenser.....	16

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Aitikgruvan ligger 1,5 mil söder om Gällivare och är en av Europas största koppargruvor. Aitik bryter malmen kopparkis (CuFeS_2) för att utvinna koppar, guld och silver, och under 2016 anrikades cirka 36 051 miljoner ton malm (New Boliden 2016). Vid brytningen av malmen produceras det stora mängder gruvavfall, främst anrikningssand och gråberg. Sedan gruvan öppnades 1968 har mer än 500 miljoner ton gråberg deponerats och varje år bryts runt 15 - 20 miljoner ton gråberg ytterligare för att komma åt malmen (Lindvall 2005, Sjöblom et al 2012). Anrikningssanden deponeras i ett sandmagasin och gråberget deponeras i stora tippor inne på gruvområdet (figur 1) (Lindvall 2005).



Figur 1. Aitik's hela gruvområde där sandmagasinet (TMF) och de olika gråbergstipporna (T1-T7) syns (Lindvall 2005).

Gruvavfallet kan skapa stora miljöproblem om inga åtgärder tas, då avfallet innehåller sulfider (Lindvall 2005). Om dessa sulfider kommer i kontakt med syre sker en oxidation, vilket gör att det frigörs metaller, sulfat och syrabildande vätejoner till närliggande mark och vatten. Vittringen av sulfiderna leder till att så kallat surt lakvatten uppstår, Acid Mine Drainage (AMD) (Naturvårdsverket 2002). Detta lakvattnet kan bidra till en försurning i närliggande miljö (Naturvårdsverket 2002, SGU 2017).

För att förhindra att gråberget vittrar och leder till miljöfarligt lakvatten, genomförs efterbehandlingsåtgärder. Dessa åtgärder ska sänka vittringshastigheten och utlakningen av tungmetaller från avfallet. Förutsättningen för att vittringsbenägna mineral ska vittra är tillgången till syre, vittringsbenägna mineraler och vatten. Främst är det tillgången till syre som är den begränsande faktorn och därför är det viktigt att efterbehandlingen förhindrar kontakten mellan syre och avfallet. Genom att syre transporteras och kommer i kontakt med avfallet i första hand genom diffusion, så avser efterbehandlingen till att minska denna

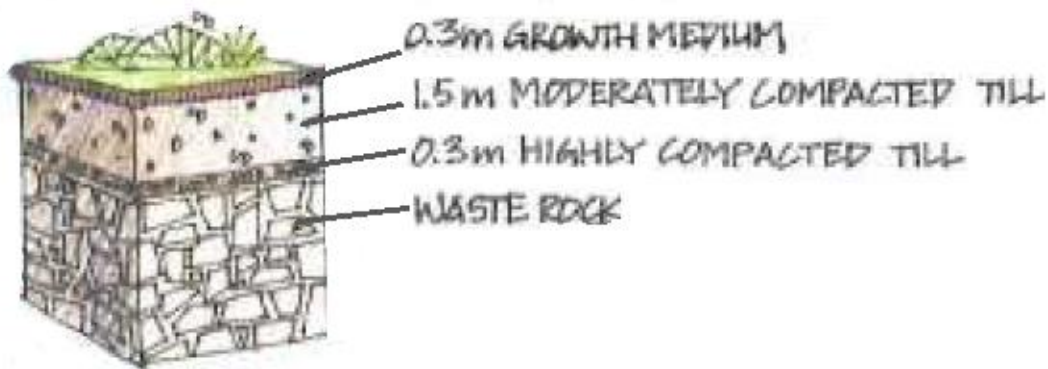
kontakt genom att skapa ett diffusionsmotstånd (Naturvårdsverket 2002). Syftet med efterbehandling är också att åtgärderna ska hålla under en mycket lång tid, helst till nästa istid. De vanligaste metoderna för att efterbehandla avfall är att använda olika täckningsmetoder, antingen jordtäckning eller vattentäckning (Lövgren et al 2004, SGU 2017).

I Sverige, och även vid Aitikgruvan, används både jordtäckning och vattentäckning. Vattentäckning används för att efterbehandla anrikningssanden och för gråberget används jordtäckning. Detta eftersom de är mest långsiktiga och kräver mindre övervakning samt är mindre kostsamma (Lindvall 2005, Naturvårdsverket 2002). Att gråberget efterbehandlas med en kvalificerad jordtäckningen innebär att avfallet täcks med en moränjord. Tekniken bygger på att en vattenmättad spärr mot syre uppstår, vilket uppnås när porerna i materialet vattenfylls (SGU 2017).

Moränen som används vid täckningen kommer från ett flertal moräntippar som finns inom gruvområdet. Detta eftersom det blir både kostnads- och tidseffektivt att använda material som finns i närheten av verksamheten, då långa transporter undviks. Moräntipparna har uppbyggts i och med avtäckningen från nya omtag i gruvan (Lindvall 2005).

Den kvalificerade jordtäckning som används i Aitikgruvan består av tre olika lager. Ett lager tätskikt och två lager skyddsskikt (figur 2). Denna täckning används för all gråberg som ligger över en svavelhalt på 0,1 % och kopparhalt på 0,03 % (New Boliden 2015). Första lagret är det så kallade HCL (highly compacted layer) och består av 0,3 m väl kompakterad morän som ligger närmast avfallet. HCL eller tätskiktet som det också kallas är det viktigaste lagret i täcksystemet, då den har som uppgift att reglera både syretransporten och infiltrationen av vatten ner till gråberget. Infiltrationen av vatten ner till avfallet reduceras starkt om skiktet har en låg hydraulisk konduktivitet och diffusionen av syre reduceras starkt om transporten sker genom en barriär som är helt eller nästan vattenmättad. Detta eftersom syrediffusionen sker i porutrymmet mellan jordpartiklarna och om utrymme är vattenfyllt sker denna process mycket långsammare jämför med om den sker i luft. Tätskiktet ska därför ha en hög kapillärhållande förmåga, vilket gör att jorden hålls tillräckligt vattenmättad (Lövgren et al 2004, McKeown et al 2015).

Det andra lagret består av 1,5 m morän som kompakteras (Lindvall 2005, McKeown et al 2015). Sista lagret är 0,3 m organiskt material som kallas rötslam, vilket läggs ovanpå moränen. Rötslammet kommer bland annat från reningsverk i Stockholm, Luleå och Skellefteå. Båda lagren har som uppgift att skydda tätskikten mot erosion och se till att tätskiktens egenskaper förblir oförändrade med tiden. Rötslammet binder även fukt och metaller, konsumerar syre samt underlättar etableringen och ger näring till växter (New Boliden 2017). Vattenmättnaden i skyddsskikten är låg jämfört med tätskiktet där vattenmättnaden är och ska förbli hög (Lövgren et al 2004).



Figur 2. Genomsnitt av en kvalificerad jordtäckning som används i Aitikgruvan. Gråberget (waste rock) täcks av först ett lager tätskikt (HCL) och därefter ett lager skyddsskikt. Sist placeras ett lager rötslam, som också fungerar som skyddsskikt (New Boliden 2015).

Allt gråberg som överstiger gränsvärdena för svavel- och kopparhalten måste efterbehandlas med en kvalificerad jordtäckning. I Aitikgruvan har runt 35 % av allt gråberg som deponeras förmåga att producera Acid Mine Drainage (AMD) och kräver då en kvalificerad jordtäckning (Lindvall 2005, New Boliden 2015). Allt gråberg som ligger under denna halt kallas mljögråberg och kräver inte en kvalificerad jordtäckning. För detta avfall räcker det med ett lager av 0,3 m ospecificerad morän för att växter ska kunna etablera sig (Lindvall 2005).

För att jordtäckningen ska kunna förhindra syre- och vatteninträngen till avfallet krävs det att jorden som används har rätt egenskaper som kan skapa ett diffusionsmotstånd (Naturvårdsverket 2002). Om moränen har rätt egenskaper för att användas tas reda på genom en karaktärisering av moränen. Exempel på material som används i Sverige vid jordtäckning är fina jordar såsom lera, silt eller lerig morän (Lövgren et al 2004, Naturvårdsverket 2002). För att en morän ska klassas som lerig ska den innehålla 5–15 % ler (Eriksson et al 2011).

Boliden har sedan 2016 påbörjat en karaktäriseringenstudie av Aitik moräntippar varav 7 tippar ska undersökas för att utröna om moränen går att använda för efterbehandling av gråberg. Swecon påbörjade karaktärisering av moräntippar i Aitik under 2016 (Swecon 2016) Denna undersökning gjordes på moräntipparna A, B och C inom gruvområdet (figur 3) och insamling av jordprover togs med hjälp av blåsprov. Proverna skickades till MRM (Mark Radon Miljö) i Luleå, där bestämning av kornfördelning, permeabilitetsbedömning och proctorinstampning (packbarhet) testades.



Figur 3. Moräntipparna A, B, C, D, E och F. Salmijärvitippen syns ej i denna figur (Swecon 2016).

1.2 Syfte

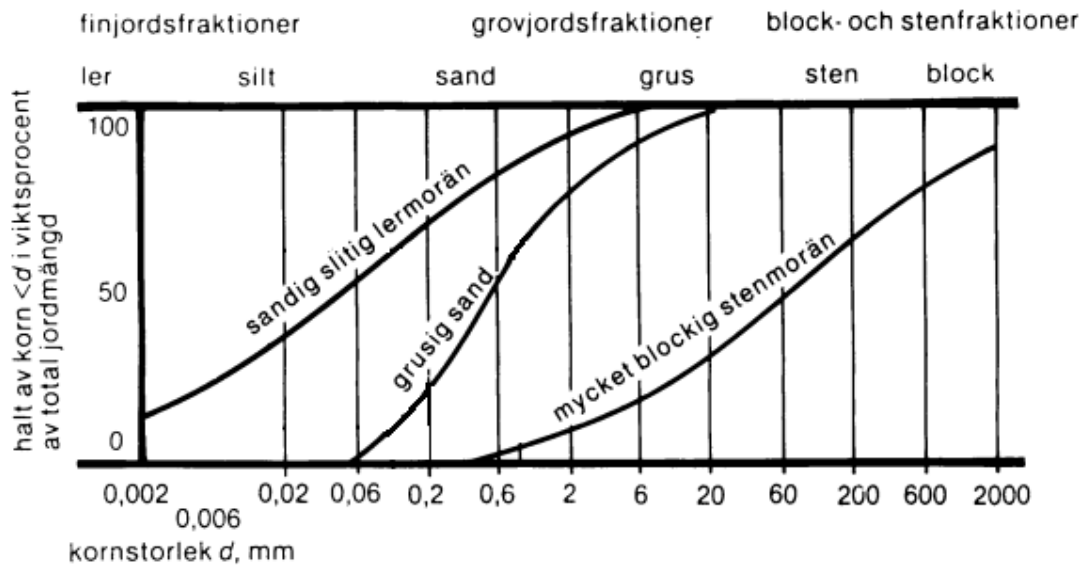
Detta examensarbete syftar till att karakterisera morän inom gruvområdet och avgöra om moränen lämpar sig att använda för jordtäckning vid efterbehandling av gråberg. Det främsta syftet är att ta reda på om moränen går att använda som tätskikt (HCL), då detta jordlager är det viktigaste i hela täcksystemet.

2 Undersökta parametera för att utröna moränens geotekniska egenskaper

Vid karaktäriseringen av en jordart görs en bedömning genom att undersöka ett flertal olika parametrar. För att ta reda på om moränen som provtagits är lämpligt att använda vid efterbehandling av gråberg undersöks jordens kornstorleksfördelning, hydraulisk konduktivitet, optimal vattenhalt och maximal torrdensitet. Alla dessa olika parametrar är viktiga för att avgöra om materialet uppfyller kraven för genomsläpplighet av syre.

2.1 Kornstorleksfördelning

Kornstorleksfördelningen eller förkortat kornfördelning, är en mycket viktig klassificering för ett jordmaterial. Detta eftersom formen och storleken på de enskilda partiklarna har stor påverkan på jordens geotekniska egenskaper och ger därför indirekt information om flera andra egenskaper för jorden (Larsson 2008, SGI 2017). Jordens permeabilitet, kapillaritet, och hur ett jordmaterial packas beror alla på kornstorleksfördelningen (SGI 2017). Kornstorleksfördelningen redovisas i en kornfördelningskurva (figur 4) och bestäms genom siktning- och sedimentationsanalys (Larsson 2008).



Figur 4. Ett exempel på hur flera kornfördelningskurvor kan se ut. Kornstorleken är mellan 0,002 mm och 2 m (Larsson 2008).

Eftersom en kvalificerad jordtäckning innebär att en vattenmättad spärr mot syre uppstår, måste därför jorden som används innehålla finare jordpartiklar som till exempel silt och ler (Lindvall 2005). Detta på grund av att finare partiklar har en bättre förmåga av att både hålla kvar och suga upp vatten, vilket gör att jorden lättare hålls vattenmättad och därmed skapar en barriär som reducerar syre- och vattentillförseln ner till gråberget (Lövgren et al 2004, McKeown et al 2015). Kornstorleksfördelningen är därför en mycket viktig första del av undersökningen av moränen, då en bedömning kan göras tidigt om moränen är lämplig att använda eller ej och vilka andra undersökningar av jorden som måste göras (SGI 2017).

2.2 Hydraulisk konduktivitet

Markens hydrauliska konduktivitet eller permeabilitet anger jordens genomsläpplighet av syre och vatten och beror främst på kornstorleken, kornform, hur jorden är packad och vattenhalten i jorden (Grip & Rodhe 1994). Den hydrauliska konduktiviteten varierar mycket mellan de olika jordarterna. Jordarter med stora porer och mycket porutrymme kommer ha en god förmåga att släppa igenom syre och vatten, medan en jordart som har små porer och är tätt packad kommer ha en sämre förmåga. Generellt räknas lera och silt som jordarter med en mycket låg hydraulisk konduktivitet (Grip & Rodhe 1994, Lövgren et al 2004).

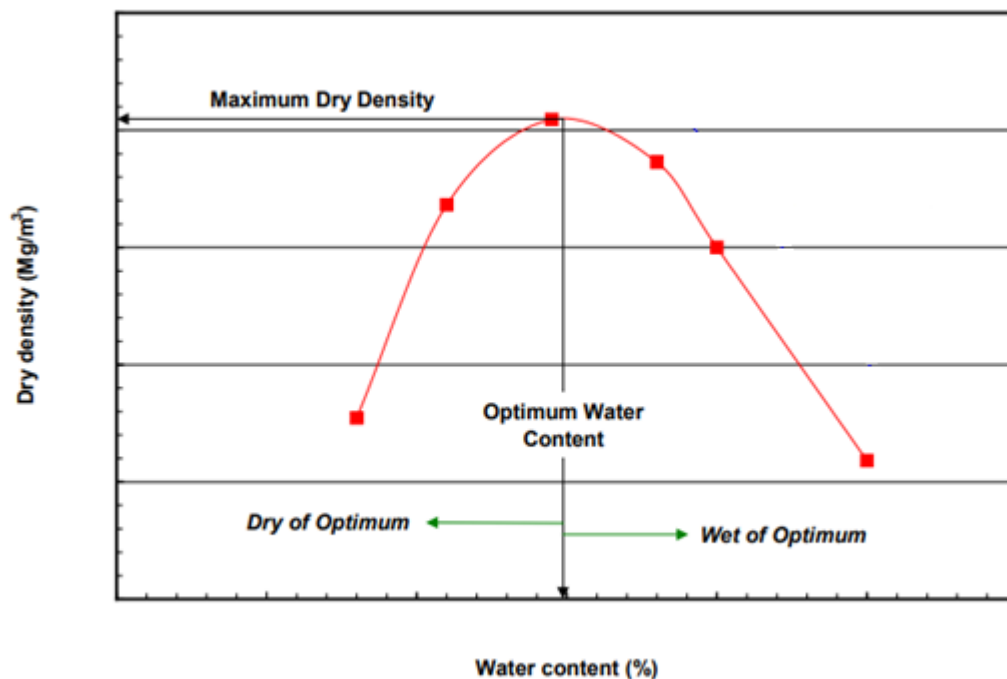
Den hydrauliska konduktiviteten beräknas oftast genom Darcys lag och är kvoten mellan transporthastigheten och den hydrauliska gradienten (Larsson 2008). Om ett material har en permeabilitet som är större än 0,1 mm per sekund klassas det som självdränerande medan material som har ett värde mindre än 0,001 mikrometer per sekund klassas det som tät (tabell 1) (Larsson 2008, SGI 2017). Boliden har som krav att den hydrauliska konduktiviteten i deras täcksystem i tätskiktet ska vara under 1×10^{-8} m/s (New Boliden 2015) och enligt Larsson (2008) uppnås det i siltiga och leriga moränjordar som har ett tätvärde på 7–10 (figur 5).

Tabell 1. Medelvärden av permeabiliteten för olika moränjordar (Larsson 2008).

Jordart	Permeabilitet m/s	Tätvärde
Moräner (månggraderad jord)		
Grusig morän	$10^{-5} - 10^{-7}$	5 - 7
Sandig morän	$10^{-6} - 10^{-8}$	6 - 8
Siltig morän	$10^{-7} - 10^{-9}$	7 - 9
Lerig morän	$10^{-8} - 10^{-10}$	8 - 10
Moränlera	$10^{-9} - 10^{-11}$	9 - 11

2.3 Optimal vattenkvot och maximal torrdensitet

En jords optimala vattenkvot är den vattenhalt vid vilken bäst packningen av jorden kan ske. Vid bestämning av optimal vattenkvot används en teknik som kallas proctorpackning och då bestäms också en jords maximala torrdensitet. Resultatet plottas i en packningskurva (figur 6) som visar hur torrdensiteten stiger med ökad vattenkvot tills kurvan når en topp. I toppen av kurvan är både torrdensiteten och vattenkvoten maximal därefter avtar torrdensiteten med ökad vattenhalt (New Boliden 2012).



Figur 5. En typisk packningskurva för en jord som visar hur torrdensiteten stiger med ökad vattenkvot för att nå en topp var både torrdensiteten och vattenkvoten är optimal (New Boliden 2012).

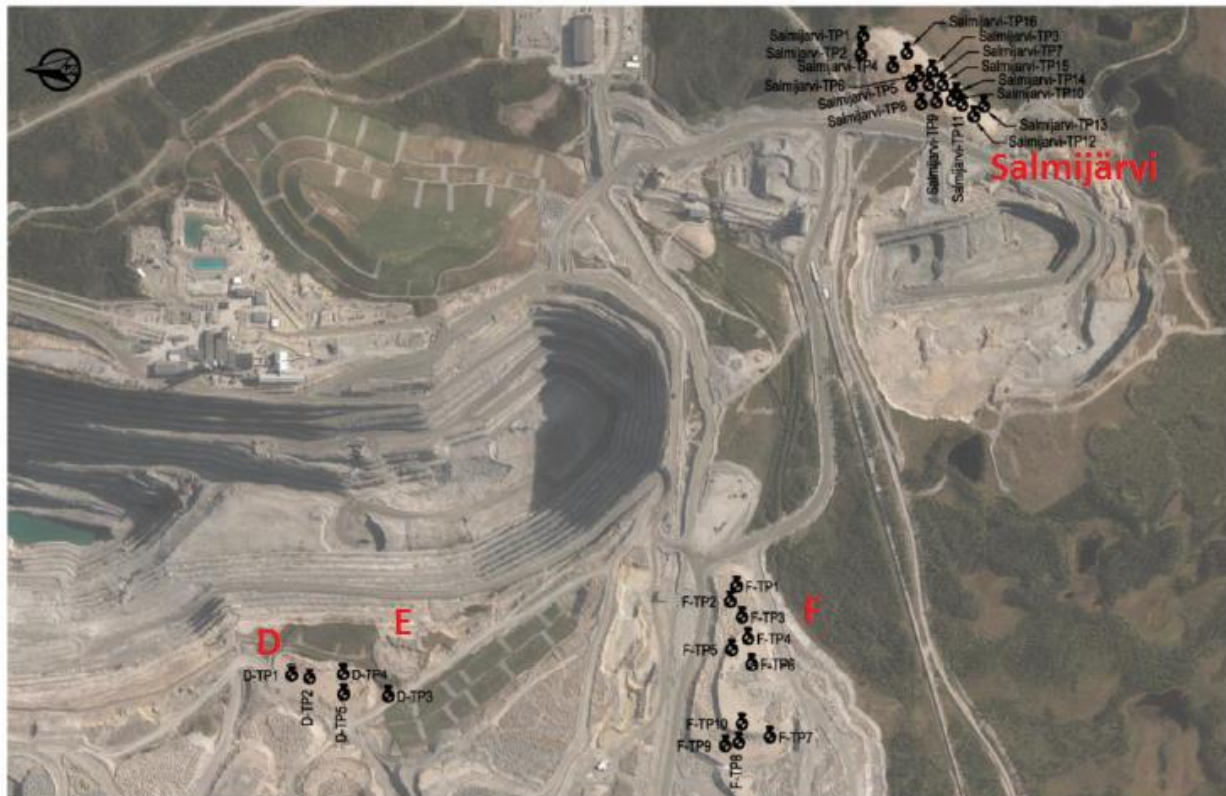
Generellt ger en högre packningsgrad minskad hydrauliska konduktivitet samt att jordmaterialet blir mer mekaniskt stabilt. Om jorden packas över den optimala vattenkvoten luckras jorden upp, då vattnet pressar isär jordpartiklarna och därmed blir den hydrauliska konduktiviteten högre. Jorden blir även mindre stabil, vilket är negativt då jordtäckningen måste tåla körning av tunga maskiner. Den bästa packningen fås när packningen att jorden sker vid den optimala vattenkvoten och då blir även den hydrauliska konduktiviteten som lägst (New Boliden 2012)

3 Material och metod

Detta arbete har baserats på data från en egen fältstudie som gjordes tillsammans med två representanter från den kanadensiska konsultfirman O’Kane Consultants, som är experter på efterbehandling av gruvavfall.

3.1 Egen undersökning

Arbetet i fält skedde mellan 21 - 24 juni 2017. Provtagningen av moränen skedde på tipparna D, E, F och Salmijärvi (figur 6). På plats vid tipp E, visade det sig att den redan var tömd, därmed gjordes bedömningen att provtagning ej var nödvändig.



Figur 6. Karta över de återstående moräntipparna D, E, F och Salmijärvi i gruvområdet med alla provhål (Google maps 2018).

Provtagningen på alla tre moräntippar utfördes med personal från O’Kane som översåg grävningen och var lika för alla tippar. En grävmaskin grävde ett hål på cirka 2 meters djup där jorden placerades på höger sida om gropen. Ett måttband användes för att bestämma djupet. Efter 2 meter fortsatte grävandet till ett djup på 4-6 meter och detta material placerades på vänster sida av gropen. Själva insamlingen av jordprover skedde både från 0-2 meters djup och på 2-6 meters djup i 20 liters hinkar. Dock tog hinkarna slut och resterande jordprover salmadades in i 6 liters plastpåsar. Både hinkar och plastpåsar markerades med datum, vilken tipp, provhål och företag. För vissa gropar skedde det dock ingen provtagning alls utan O’Kane gjorde en okulär bedömning att det inte var nödvändigt, eftersom materialet var så pass likt den tidigare insamlade jorden. Koordinater för varje provhål togs med GPS. Efter avslutad provtagning fylldes provgroparna igen.

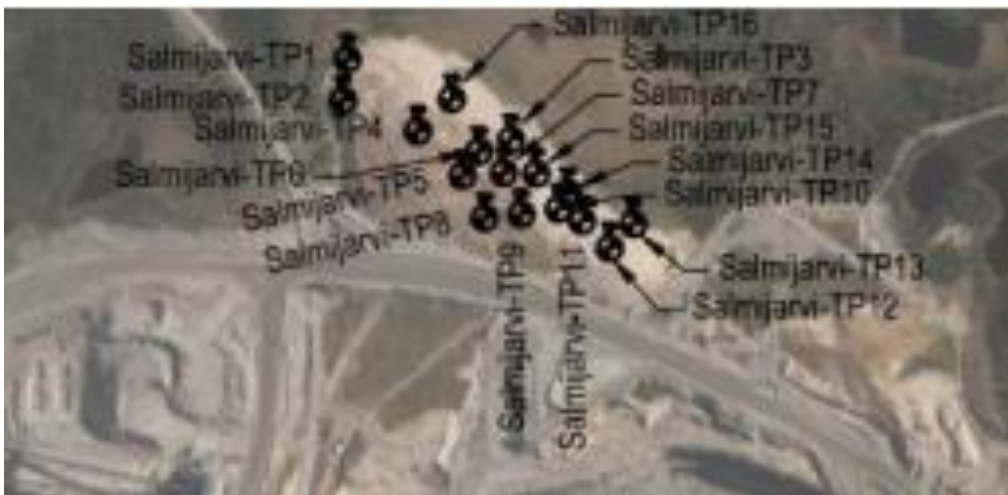
Totalt samlades 397,2 kg jord in som skulle skickas för geoteknisk analys. Jordproverna märktes upp med datum, företag, vilken moräntipp proverna var tagna från, provnummer samt vilken nivå jorden var tagen ifrån.

27 olika jordprover skickades till MRM (Mark Radon Miljö) i Luleå för att ta reda på kornstorleksfördelningen genom skiktanalys och sedimenteringsanalys enligt SS-EN 933-1:2012. Det ska noteras att MRM sorterat bort allt material som är större än 100 mm i kronfraktion och bara skiktat material upp till 31,5 mm, vilket gjort att kornfördelningskurvorna ej visar hela jordprovet. Där gjordes även en providentifiering och klassifiering av jord enligt SS-EN/ISO-14688-2:2004 för bestämning av jordart.

Utöver testerna utförda på MRM i Luleå skickades även jordprover till Golder Associates i Saskatoon, Kanada för mer detaljerad undersökning. Där proctorpackning (ASTM D698) gjordes för optimal vattenkvot och maximal torr densitet samt nippelpermeameter för bestämning av hydraulisk konduktivitet.

3.1.1 Provtagning Salmijärvitippen

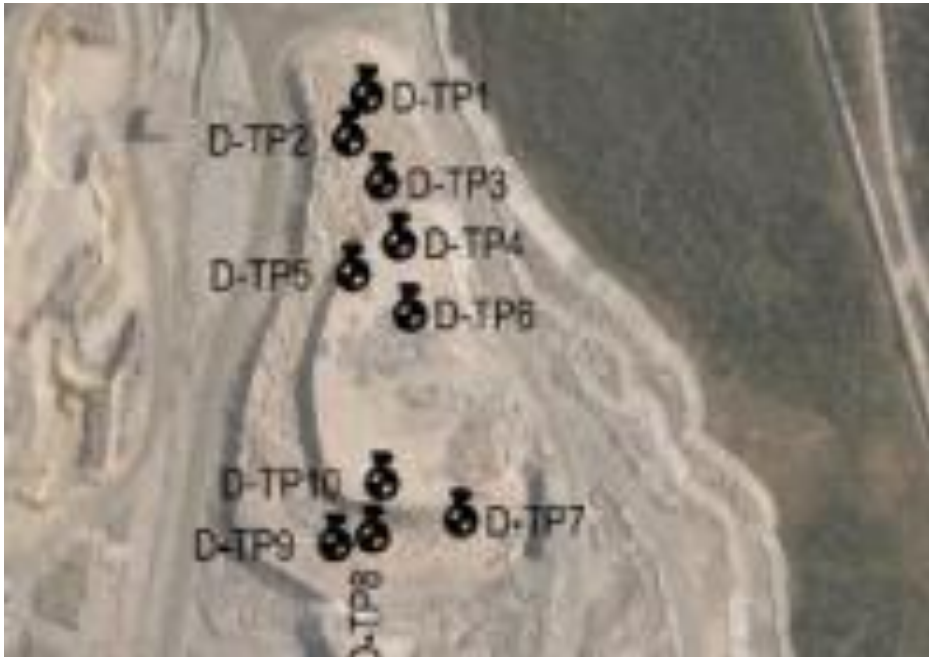
Provtagningen på Salmijärvi skedde 21–22 juni. Totalt 16 provhål (figur 7) grävdes var totalt 268,3 kg jord samlades in. Från provhål 13, 14 och 15 togs inga jordprover, utan en okulär bedömning av materialet gjordes istället.



Figur 7. Alla provhål (TP) på moräntipp Salmijärvi.

3.1.2 Provtagning moräntipp D

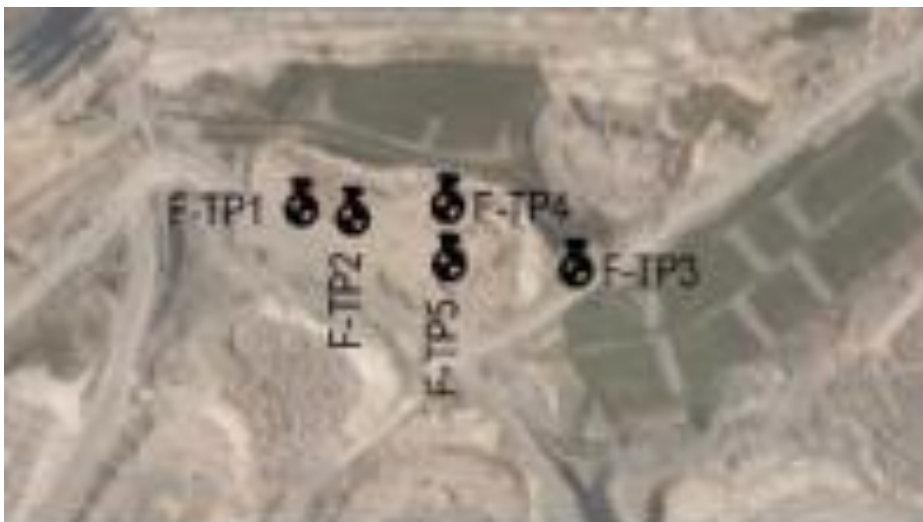
Provtagningen på moräntipp D skedde mellan 23–24 juni. Totalt 10 provhål (figur 8) grävdes och totalt 106,8 kg jord samlades in för provtagning.



Figur 8. Alla provhål (TP) på moräntipp D.

3.1.3 Provtagning moräntipp F

På moräntipp F skedde provtagningen den 24 juni. Eftersom denna tipp var mycket mindre än tipparna D och Salmijärvi grävdes bara 5 provhål (figur 9) var totalt 22,1 kg jord samlades in. Från provhål 2 togs dock inga prover, då det fanns gråberg uppe på ytan, vilket gjorde att det inte gick att ta prover.



Figur 9. Alla provhål (TP) på moräntipp F.

4 Resultat

4.1 En sammanställning av resultaten från kornstorleksfördelningen

I kornstorleksfördelningen är lerhalten i tabellerna 2 – 5 relaterad till 100 mm kornfraktionen.

4.1.1 Salmijärvi

Från Salmijärvitippen, som var störst av de tre provtagna moräntipparna togs totalt 13 jordprover (tabell 2) från varierande djup på 0 - 5,0 m. Analysen visade att moräntippen innehåll främst en grusig, sandig, siltig, morän (SS-EN/ISO-14688-2:2004) men det fanns även en del sandig grusig siltig morän. Även siltig sandig morän hittades i provhål 9 och 10. Halten ler (0,004 mm) var relativt låg för alla provhål med ett värde mellan 1,0 % - 4,7 %. De högsta värdena hittades i provhål 5, 1 och 11 på 4,7 %, 4,2 % och 4,0 %. Inget prov togs från provhål 13 - 15, då personal från O'Kane gjordes en okulär bedömning att materialet var så pass likt den övrigt provtagna jorden.

Tabell 2. Sammanställning av resultaten av kornstorleksfördelningen på Salmijärvi.

Prov	Djup (m)	Jordart	Halt korn 0,004 mm i %
1	0,0 - 2,0	Grusig sandig siltig morän	4,2
2	0,0 - 2,0	Grusig siltig sandig morän	1,4
3	0,0 - 2,0	Sandig grusig siltig morän	2,6
4	0,0 - 2,0	Grusig sandig siltig morän	2,2
5	0,0 - 2,0	Grusig sandig siltig morän	4,7
6	2,5 - 5,0	Sandig grusig siltig morän	1,8
7	2,5 - 5,0	Sandig grusig siltig morän	1,6
8	2,0 - 4,5	Grusig sandig siltig morän	1,0
9	2,0 - 4,5	Siltig sandig morän	2,4
10	2,0 - 5,0	Siltig sandig morän	2,0
11	2,0 - 5,0	Sandig grusig siltig morän	4,0
12	2,0 - 4,5	Grusig sandig siltig morän	2,3
13		Inget prov togs	
14		Inget prov togs	
15		Inget prov togs	
16	2,0 - 4,0	Grusig sandig siltig morän	2,1

4.1.2 Moräntipp D

Från moräntipp D, togs totalt 10 jordprover (tabell 3) från ett varierande djup på 0 - 5,0 m. Resultaten visade att tippen innehåll främst en grusig, siltig, sandig, morän (SS-EN/ISO-14688-2:2004) men innehåll även sandig, grusig, siltig morän och sandig, siltig morän. I denna tipp fanns det även grusig, sandig morän och grusig morän. Mängden ler (0,004 mm) hade ett värde mellan 0,8 % - 5,0 %. Det högsta värdet av ler uppmättes i provhål 4, vilket var en sandig, siltig morän. Även provhål 6 hade högre andel ler jämfört med de resterande provhålen på 4,3 %.

Tabell 3. Sammanställning av resultaten av kornstorleksfördelningen på moräntipp D

Prov	Djup (m)	Jordart	Halt korn 0,004 mm i %
1	2,0 - 4,0	Sandig grusig siltig morän	0,8
2	0,0 - 2,0	Sandig grusig siltig morän	2,4
3	2,0 - 4,5	Grusig sandig siltig morän	2,2
4	2,0 - 5,0	Sandig siltig morän	5,0
5	0,0 - 2,0	Sandig siltig grusig morän	1,3
6	0,0 - 2,0	Grusig sandig siltig morän	4,3
7	2,0 - 4,5	Grusig sandig morän	1,3
8	0,0 - 2,0	Grusig sandig siltig morän	2,2
9	2,0 - 4,5	Grusig sandig siltig morän	3,0
10	2,0 - 5,0	Grusig morän	1,1

4.1.3 Moräntipp F

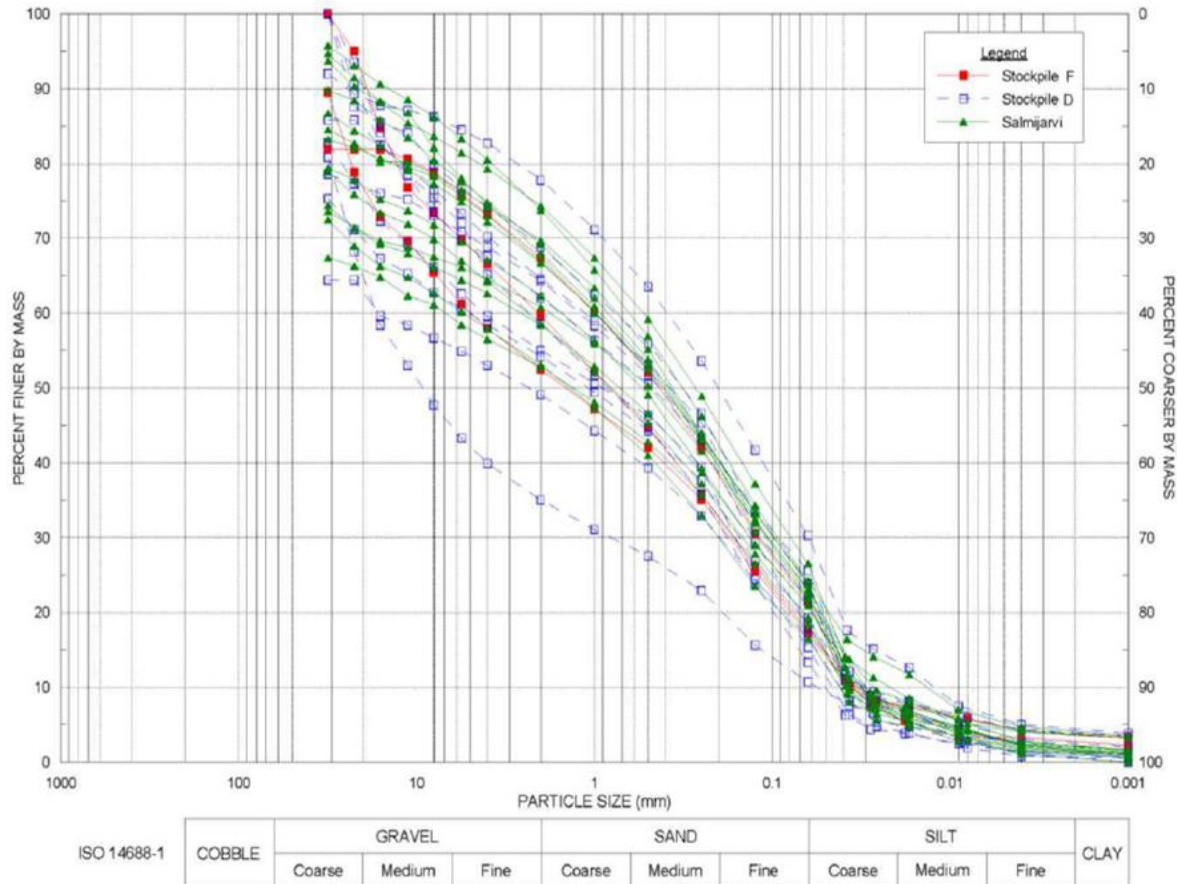
Från Moräntipp F togs totalt 4 jordprover (tabell 4) från ett varierande djup på 0 - 5,5 meter. Analysen visade att hälften av jordproverna var en grusig sandig siltig morän och resterande två provhål var sandig grusig siltig morän samt siltig sandig morän (SS-EN/ISO-14688-2:2004). Mängden ler (0,004 mm) varierade mellan 2,2 % - 4,2 %. Det högsta värdet av ler hittades i provhål 1 med 4,2 %. Inget prov togs från provhål 2, då det förekom gråberg vid ytan.

Tabell 4. Sammanställning av resultaten av kornstorleksfördelningen på moräntipp F.

Prov	Djup (m)	Jordart	Halt korn 0,004 mm i %
1	2,0 - 4,0	Sandig grusig siltig morän	4,2
2		Inget prov togs	
3	2,0 - 5,5	Grusig sandig siltig morän	3,3
4	2,0 - 4,5	Grusig sandig siltig morän	2,2
5	0,0 - 2,0	Siltig sandig morän	2,7

4.1.4 Sammanställning från kornstorleksfördelningen för alla 27 jordprover

I figur 10 visas kornfördelningskurvor av den provtagna moränen från den egna undersökningen. Notera att kurvorna bara går upp till det grövsta skiktet på 31,5 mm, resterande grövre kornfraktioner syns inte i denna figur, vilket gör att kurvorna ej går upp till 100 procent. Figuren visar att det finns en viss skillnad mellan tipparna, främst när det kommer till mängden sand och grus. I silt och ler fraktionen är skillnaden inte lika stor.



Figur 10. Kornfördelningskurvor med alla jordprover från Salmijärvi, tipp D och tipp F.

4.1.5 Sammanställning av kornstorleksfördelningen från egen undersökning och tidigare karaktärisering

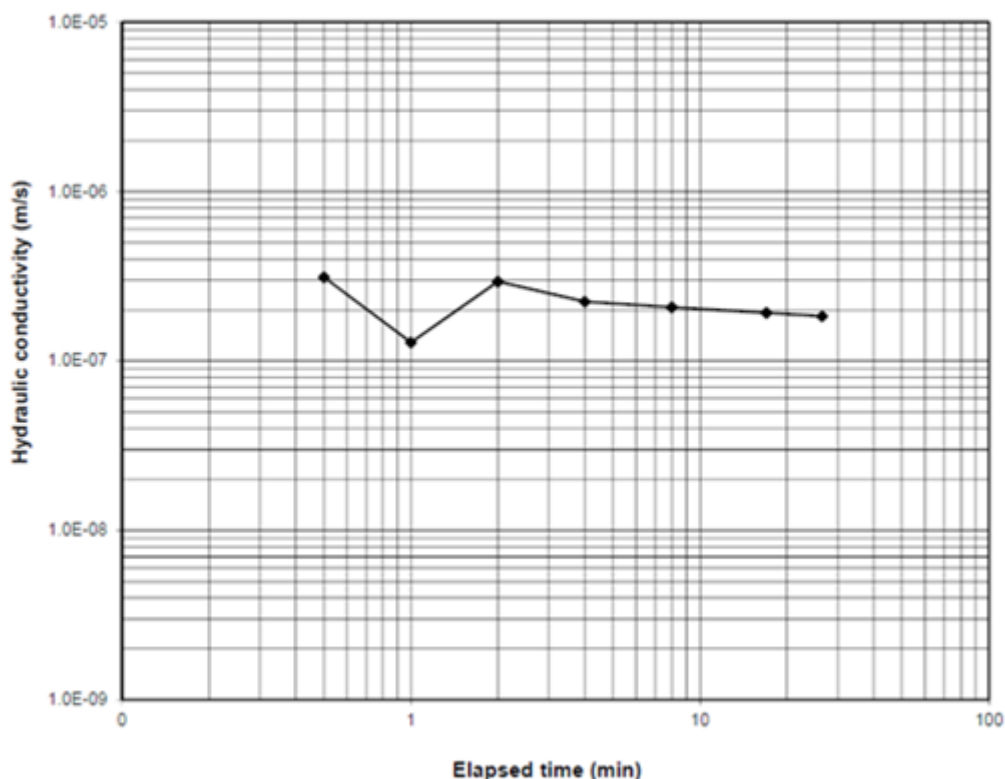
I tabell 5 redovisas en sammanställning av kornstorleksfördelningen från den egna undersökningen samt den tidigare karaktäriseringen gjord av Swecon (2016). Tabellen visar genomsnittet av de olika fraktionerna i procent från alla provtagna moräntippar. Mängden ler är uttagen ur siltfraktionen. Resultaten visade en ganska stor likhet mellan de två provtagningsgrupperna var den dominerande fraktionen från båda provtagningsgrupperna var sand med 42 % jämför med 47 %. För grusfraktionen hade tipparna Salmijärvi, D och F 37 % och tipparna A, B och C 30 %. I siltfraktionen hade moräntipparna A, B och C ett högre värde på 23 % medan moräntipparna Salmijärvi, D och F hade ett högre värde i mängden ler med 2,7 %.

Tabell 5. Genomsnitt av de olika kornstorleksfraktionerna från alla provtagna moräntippar i procent.

	Grus (60-2 mm)	Sand (0,063–2 mm)	Silt (<0,063 mm)	Ler (0,004 mm)
2017 Provtagning (Salmijärvi, D, F)	37 %	42 %	21 %	2,7 %
2016 Provtagning (A, B, C)	30 %	47 %	23 %	1,9 %

4.2 Hydraulisk konduktivitet

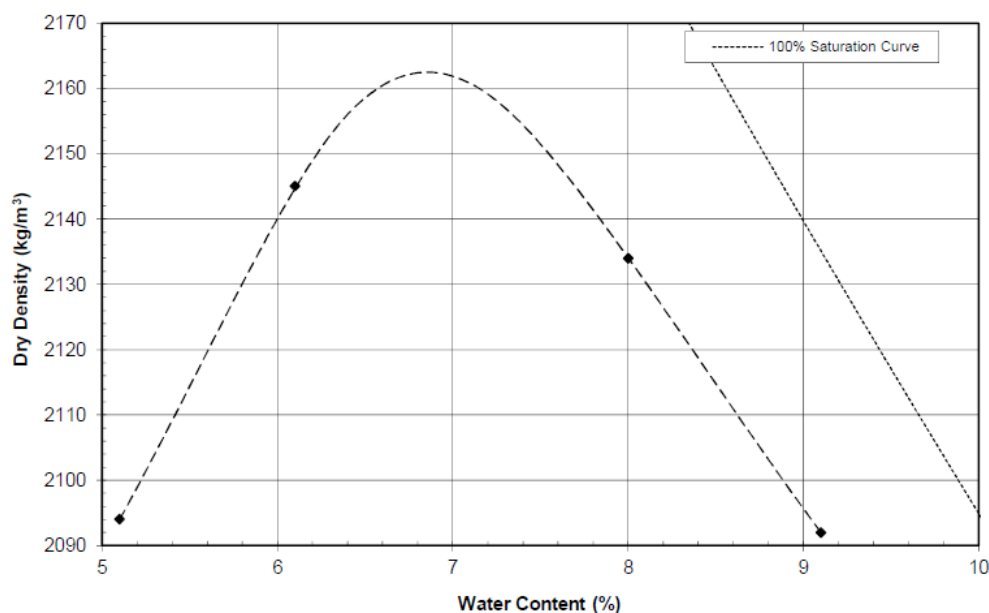
Den hydrauliska konduktiviteten analyserades på jordprover från Salmijärvitippen. Resultatet av analysen kommer från en blandning av provhål 1, 5 och 8 som alla var en grusig, sandig, siltig morän. Resultatet visas i figur 11 var den hydrauliska konduktiviteten uppmättes till 2×10^{-7} m/s.



Figur 11. Den hydrauliska konduktiviteten över tid för jordprover från Salmijärvi.

4.3 Optimal vattenkvot och maximal torrdensitet

Den optimala vattenkvoten och maximala torrdensiteten analyserades på en blandning av provhål 1, 5 och 8 som alla var en grusig, sandig, siltig morän från Salmijärvitippen. Resultatet visas i figur 12, var den optimala vattenkvoten blev 6,9 % och maximala torrdensiteten 2162 kg/m³.



Figur 12. Packningskurva som visar maximal torrdensitet och vattenkvot för jordprover från Salmijärvi.

5 Diskussion

5.1 Kornstorleksfördelning

Analysen av alla moräntippar visade att jordproverna främst bestod av en grusig, sandig, siltig morän (tabell 2, 3, 4), vilket var väntat då det observerats under insamlingen av alla jordprover och moräner benämns efter dominerande kornfraktioner (Eriksson et al 2011). Det finns även en viss skillnad mellan moräner i de olika tipparna (figur 10), vissa var sandigare och vissa grusigare. Genomsnittet i kornstorleksfördelningen (tabell 5) visar att moräner domineras av främst sand (42 %) och därefter grus (37 %) och därefter silt (21 %). Under insamlingen iaktogs även moränens bristande inslag av mängden ler och personal från O’Kane misstänkte att detta skulle få betydelse på hur moräner senare ska användas i täcksystemet. McKewon¹ från O’Kane Consultants gjorde en okulär bedömning under provtagningen i fält eftersom han misstänkte att den provtagna moräner inte skulle innehålla tillräckligt med ler för att kunna konstruera en kvalificerad jordtäckning. Resultaten från analysen bekräftade även detta, då genomsnittet i mängden ler bara var 2,7 % i den provtagna moräner (tabell 5) och enligt McKewon eftersträvas en högre lerhalt. Dock är det viktigt att komma ihåg att mängden ler är relaterad till kornfraktionen 100 mm, vilket gör att mängden ler är högre än om skikt- och sedimentanalys hade gjorts på grövre fraktioner.

Resultatet från kornstorleksfördelningen indikerar att moräner inte skulle vara lämplig att använda som just tätskikt (HCL) i täcksystemet då mängden ler har stor betydelse för hur moränens geotekniska egenskaper blir. En för liten mängd ler innebär att moränens förmåga att bli och förbli vattenmättad minskar och risken att syre och vatten kommer ner till avfallet ökar (Lövgren et al 2004, McKeown et al 2015). Dock skriver Lövgren et al (2004) att ett visst lerinnehåll är nödvändigt, men att den inte måste vara mycket hög för att uppnå en låg porositet och låg hydrauliska konduktivitet. De menar på grund av att moränjordar är välgraderad och har olika kornstorlekar kan de mindre partiklarna pressas in i utrymmet mellan de större partiklarna, vilket resulterar att jordens genomsläpplighet blir avsevärt mycket mindre (Lövgren et al 2004).

¹ McKeown Matt: Geoteknisk ingenjör, O’Kane Consultants. 2017. Intervju, 22 juni.

Den provtagna moränen kan dock användas som skyddsskikt i täcksystemet, eftersom skiktet inte har lika höga krav på moränens egenskaper. Skyddsskiktet i täcksystemet är också det lager som kräver mest mängd morän, vilket är bra då Boliden åtminstone har morän som fungerar till en del av täcksystemet.

Moränen i den egna undersökningen var även mycket lik moränen som Swecon (2016) undersökte (tabell 5). För tipparna A, B och C var sand även där den dominerande fraktionen på 47 % och därefter grus med 30 %. Dock hade moräntipparna A, B och C en genomsnittligt lägre lerhalt (1,9 %), vilket indikerar att moränen från Salmijärvi, D och F har bättre egenskaper när det kommer till porositet och hydraulisk konduktivitet.

5.2 Hydraulisk konduktivitet

Den hydrauliska konduktiviteten (figur 11) analyserades bara på jordprover från Salmijärvitippen, då det togs mest mängd jord från den tippen då den var störst av alla tippar. I Kanada testades sedan en blandning av provhål 1, 5 och 8, eftersom alla var en grusig, sandig, siltig morän. Resultatet från kornstorleksfördelningen indikerade att den hydrauliska konduktiviteten inte skulle komma att falla under det värde som Boliden har som riktvärde (1×10^{-8} m/s), på grund av moränens låga innehåll av ler (New Boliden 2015), vilket visade sig att vara rätt. Den hydrauliska konduktiviteten som uppnåddes i labb blev 2×10^{-7} m/s, vilket är högre än Bolidens riktvärde. Därmed indikerar även detta resultat att moränen inte är lämplig att använda som tätskikt (HCL), då genomsläppligheten blir för hög.

Dock skriver både Lövgren et al (2004) och McKeown et al (2015) att den hydrauliska konduktiviteten kan bli mindre när jorden packas ute i fält jämför med när den packas i ett laboratorium, då det inte är möjligt att replikera komprimering av tung utrustning i ett laboratorium. Studier har gjorts där en jord först testats i laboratorium och fått ett högre värde för hydraulisk konduktivitet jämfört med tester utförda på plats i fält. Båda fann att den hydrauliska konduktiviteten var mindre ute i fält, då porutrymmet minskat ytligare och gjort att det fanns färre vägar för gas och vatten att färdas med (Lövgren et al 2004, McKeown et al 2015). Därmed förutspår O’Kane att den hydrauliska konduktiviteten troligtvis kommer att hamna under 2×10^{-7} m/s när den packas ute i fält. O’Kane har upplyst Boliden att packningen av moränen måste ske på bästa sätt för att kunna sänka den hydrauliska konduktiviteten, men att även baserat på dessa resultat ovan så måste Boliden blanda in bentonitlera för öka mängden lerpartiklar i jorden. De menar att om lerinnehållet ökar med några procent så kan den provtagna moränen med hjälp av hög packningsgrad uppnå de krav som Boliden ställer för just tätskiktet i sitt täcksystem för efterbehandling av gråberget. Detta skulle självklart innebära en ökad kostnad för Boliden, men det är troligtvis fortfarande inte lika dyrt som det hade blivit för Boliden att köpa in allt material från utomstående källor.

5.3 Optimal vattenkvot och maximala torrdensitet

Analysen för vattenkvoten och torrdensiteten testades bara på jordprover från Salmijärvi och var en grusig, sandig, siltig morän. Resultatet för den optimala vattenkvoten blev 6,9 % och 2162 kg/m^3 för maximala torrdensiteten (figur 12), vilket betyder att jorden ska packas med detta vatteninnehåll, för att uppnå den lägsta hydrauliska konduktiviteten och bli så stabilt som möjligt.

5.4 Slutsats

Resultaten från den undersökning som genomförts visar att den provtagna moränen hade bristande innehåll av ler (0,004 mm), vilket har stor betydelse huruvida moränen kan fungera som tätskikt (HCL) eller ej. En morän med högre lerinnehåll hade fungerat bättre då jorden fått lägre porositet samt hydrauliska konduktivitet, vilket skulle ha resulterat till att en vattenmättad spärr uppstått som reducerar syre -och vattentillförseln ner till gråberget.

Fortsatta tester på hur mycket bentonitlera som behövs blandas in måste göras, så Boliden vet hur mycket som ska tilläggas i deras morän så moränen kan användas till tätskiktet. Moränen går att använda som den är nu till lagret som skyddsskikt med förutsättningen att moränen kompakteras. Om Boliden väljer att följa O'Kanes rekommendationer återstår att se, då kostnaderna för jordtäckningen för gråberget kommer att stiga.

6 Referenser

- Eriksson, J., Dahlin, S., Nilsson, I., & Simonsson, M. 2011. *Marklära*. Lund: Studentlitteratur AB.
- Google maps. 2018.
- Grip, H & Rodhe, A. 1994. *Vattnets väg: från regn till bäck*. 3. uppl. Uppsala: Hallgren & Fallgren.
- Larsson, R. 2008. *Jords egenskaper*. Statens geotekniska institut. Linköping.
- Lindvall, M. 2005. *Strategies for remediation of very large deposits of mine waste; the Aitik mine, Northern Sweden*. Luleå tekniska universitet. Doktorsavhandling Department of Chemical Engineering and Geosciences.
- Lövgren, L., Öhlander, B., Neretnieks, I., Moreno, L., Malmström, M., Elander, P., Lindvall, M., & Lindström, B. 2004. *MiMi (Mitigation of the Environmental Impact from Mining Waste) - Performance Assessment Main Report*. MiMi 2003:3.
- McKeown, M., Christensen, D., Taylor, T., & Mueller, S. 2015. *Evaluation of Cover System Field Trials with Compacted Till Layers for Waste Rock Dumps at the Boliden Aitik Copper Mine, Northern Sweden*. 10th International Conference on Acid Rock Drainage & IMWA Annual Conference.
- Naturvårdsverket. 2002. *Uppföljning av efterbehandlingsprojekt inom gruvsektorn. Åtgärder, kostnader och resultat*. Stockholm: Naturvårdsverket.
- New Boliden. 2012. *Boliden Aitik Mine Waste Rock Dump Cover System Design Program 2012 Compaction Field Report*. New Boliden.
- New Boliden. 2015. *Aitik Mine Closure Plan Base Case Description*. New Boliden.
- New Boliden. 2016. *Metaller & innovation för framtiden. Årsredovisning 2016*. New Boliden.
- New Boliden. 2017. *Rötslam används vid återställning av gruvområden*. <http://www.boliden.com/sv/hallbarhet/vart-ansvarstagande/i-fokus/rotslam-anvands-vid-aterstallning-av-gruvomraden/> [hämtad 2018-08-30]
- SGI. 2017. Statens Geotekniska Institution. *Jords tekniska egenskaper*. <http://www.swedgeo.se/sv/kunskapscentrum/om-geoteknik-och-miljogeoteknik/geoteknik-och-markmiljo/jordmateriallara/jords-tekniska-egenskaper/> [hämtad 2018-07-20]
- SGU. 2017. *Gruvor och miljöpåverkan*. <https://www.sgu.se/mineralnaring/gruvor-och-miljopaverkan/> [hämtad 2018-06-13]
- Sjöblom, A., Christensen, D., Mueller, S., & Taylor, T. 2012. *Evaluation of the Function of the Dry Cover System at WRD5 at the Boliden Aitik Copper Mine, Northern Sweden*. Proceedings of the 9th International Conference on Acid Rock Drainage (ICARD), Ottawa, Ontario, Canada.
- Swecon. 2016. *Moränprovtagning Aitik*. Rapport Geoteknik. Swecon Civil AB.