

**LOUHOSSEINÄMIEN STABILITEETTIEN VALVONTAME-  
NETELMÄN LUONTI KEVITSAN KAIVOKSELLE**

Jaakko Julkunen  
Henri Rantajärvi

Opinnäytetyö  
Maanmittaustekniikka  
Insinööri (AMK)

2015

Tekniikka ja liikenne  
Maanmittaustekniikan koulutusohjelma

---

<b>Tekijä</b>	Jaakko Julkunen Henri Rantajärvi	<b>Vuosi</b>	2015
<b>Ohjaaja</b>	Timo Karppinen		
<b>Toimeksiantaja</b>	FQM Kevitsa Mining OY		
<b>Työn nimi</b>	Louhosseinämien stabiliteettien valvontamenetelmän luonti Kevitsan kaivokselle		
<b>Sivu- ja liitemäärä</b>	54+1		

---

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin laserkeilausmenetelmän soveltuvuutta avolouhosseinämien stabiliteettien valvontaan Kevitsan kaivoksella. Työssä käsitellään ja vertaillaan myös muita stabiliteettien valvontamenetelmiä. Työn tarkoituksena oli luoda mittausmenetelmä ja -käytäntö, jolla valvontaa aletaan toteuttaa.

Opinnäytetyö on kaksijakoinen. Alkuosassa käydään läpi yleisiä asioita Kevitsan kaivoksesta, teoreettista taustaa avolouhoksen suunnittelusta ja sortumatyypeistä sekä vertaillaan eri valvontamenetelmiä. Tarkoituksena oli antaa hyvät perustiedot Kevitsan avolouhoksesta ja mahdollisuuksista seurannan toteuttamiseen.

Toisessa osassa tarkastellaan tarkemmin laserkeilaimen soveltuvuutta monitorointijärjestelmäksi Kevitsan kaivoksen olosuhteissa. Osiossa selostetaan käytetty mittauskalusto, mittausmenetelmä sekä aineistojen ja tulosten käsittely. Aihetta on havainnollistettu asiaan liittyviin kuvin. Teksti etenee järjestyksessä keilauspaikkojen valinnasta aina lopputuloksiin asti.

Laserkeilausmenetelmä soveltuu tässä vaiheessa seinämien seurantajärjestelmäksi Kevitsan kaivoksella, mutta se vaatii tuekseen muitakin menetelmiä. Menetelmällä voidaan seurata koko louhosta, mutta vertailua kannattaa kuitenkin tehdä vain kriittisistä seinämistä aineistojen koon vuoksi.

**Avainsanat** avolouhos, laserkeilaus, monitorointi, stabiliteetti, valvontamenetelmä

Technology, Communication and  
Transport  
Degree Programme of Land Surveying

---

<b>Author</b>	Jaakko Julkunen Henri Rantajärvi	Year	2015
<b>Supervisor(s)</b>	Timo Karppinen		
<b>Commissioned by</b>	FQM Kevitsa Mining OY		
<b>Subject of thesis</b>	Creating Open Pit Wall Stability Monitoring Methods for the Kevitsa Mine		
<b>Number of pages</b>	54+1		

---

The purpose of this Bachelor's thesis was to research the suitability of a laser scanning method on stability monitoring in the Kevitsa mine. The other stability monitoring methods were also compared in this thesis. The goal of this thesis was to create a functional survey system for the open pit wall stability monitoring.

The theory part of this thesis covers facts of Kevitsa Mining Oy, open pit planning, open pit landslides and a comparison of the stability monitoring methods. The purpose of this part was to give the basic information about open pit mining and monitoring methods.

The practical part of this thesis includes testing the laser scanning method in the Kevitsa mine wall monitoring. The measuring equipment, the survey methods and data processing were explained in this part. Finally, it was considered how stability monitoring should be carried out in the future.

Key words

laser scanning, method, monitoring, open pit, stability

## SISÄLLYS

KUVIOLUETTELO .....	6
ALKUSANAT.....	8
1 JOHDANTO .....	9
2 KEVITSAN KAIVOS.....	10
2.1 First Quantum Minerals Ltd.....	10
2.2 FQM Kevitsa Mining Oy .....	11
3 AVOLOUHINTA.....	13
3.1 Avolouhoksen suunnittelu .....	13
3.2 Stabiliateetti ja monitorointi .....	15
3.3 Kalliomekaniikka .....	16
4 STABILITEETTIEN VALVONTAMENETELMIÄ.....	20
4.1 Satelliittimittaus.....	20
4.1.1 Yleiskuvaus .....	20
4.1.2 Menetelmän soveltuvuus.....	21
4.2 Takymetri .....	22
4.2.1 Yleiskuvaus .....	22
4.2.2 Menetelmän soveltuvuus.....	23
4.3 Laserkeilain.....	25
4.3.1 Yleiskuvaus .....	25
4.3.2 Menetelmän soveltuvuus.....	27
4.4 UAS-järjestelmä .....	28
4.4.1 Yleiskuvaus .....	28
4.4.2 Menetelmän soveltuvuus.....	29
4.5 Tutka.....	30
4.5.1 Yleiskuvaus .....	30
4.5.2 Menetelmän soveltuvuus.....	31
4.5.3 IDS IBIS-Tutka .....	33
4.6 Kallioon asennettavat kiinteät mittalaitteet .....	36
4.6.1 Yleiskuvaus .....	36
4.6.2 Menetelmän soveltuvuus.....	37
5 STABILITEETTIEN VALVONTA KEVITSAN AVOLOUHOKSELLA.....	39
5.1 Mittauslaitteisto .....	39

5.2	Laserkeilaus.....	40
5.3	Aineistojen käsittely .....	41
5.4	Tulosten käsittely .....	45
6	POHDINTA.....	47
6.1	Työn tulokset .....	47
6.2	Työn tarkkuus ja laatutavoitteet .....	47
6.3	Keilausmenetelmän käyttö jatkossa.....	48
6.4	Muita valvonta menetelmiä .....	51
	LÄHTEET.....	52
	LIITE .....	55

## KUVIOLUETTELO

Kuvio 1. First Quantum Minerals Ltd kaivokset kartalla (Kevitsa Mining Oy 2013, 2).....	10
Kuvio 2. Ilmakuva Kevitsan kaivosalueesta (Kevitsa Mining Oy 2014a, 8) .....	11
Kuvio 3. Vasemmalla avolouhoksen suunniteltu koko ja oikealla malmiesiintymän malli (Kevitsa Mining Oy 2014a, 52) .....	13
Kuvio 4. Poikkileikkaus louhoksen seinämsuunnitelmasta (Kevitsa Mining Oy 2014a, 55).....	14
Kuvio 5. Louhoksen neljä eri vaihetta (Kevitsa Mining Oy 2014a, 51) .....	15
Kuvio 6. Avolouhoksen tyypilliset sortumatyytit (Antikainen ym. 2011, 61) .....	18
Kuvio 7. Tutkalla havaittu liikemäärä esimerkki sortumasta Pohjois-Amerikassa (Antolini, ym. 2012, 16) .....	19
Kuvio 8. Havainnekuva RTK-mittauksen toiminnasta (Leica SmartNet Europe 2015).....	21
Kuvio 9. Havainnekuva automaattisesta robottitakymetri seurantajärjestelmästä (Luomala 2010, 12).....	23
Kuvio 10. Pulssilaserin toimintaperiaate (Kukko 2005, 7) .....	26
Kuvio 11. Vaihe-erolaserin toimintaperiaate (Kukko 2005, 7) .....	26
Kuvio 12. Leica Aibotix UAV -lennokki (Leica Geosystems 2013) .....	29
Kuvio 13. Havainnekuva lautastutkan ja suuren laskennallisen läpimitan tutkan toiminnasta (IDS IBIS 2013) .....	31
Kuvio 14. IBIS-FM -tutkan vertausnäkyvä Siilinjärven kaivoksen länsiseinämästä (Suikkanen 2015).....	34
Kuvio 15. Yläpuolella Siilinjärven mobiilitutkalla havaittu sortuma, alapuolella ennen ja jälkeen kuvat samasta sortumasta (Suikkanen 2015) .....	35
Kuvio 16. Liikekäyrä Siilinjärven louhoksen seinämän sortumasta ajalta 20.11.2014–27.11. 2014 (Suikkanen 2015) .....	36
Kuvio 17. Riegl VZ-2000 -laserkeilain ja Leican Viva GS 15 -vastaanotin asennettuna kolmijalalle.....	39
Kuvio 18. Kuvassa pistepilvet ennen editointia .....	42
Kuvio 19. Pistepilvienyhdistys-työkalun näkyvä yhdistyksen loppuvaiheessa .	43
Kuvio 20. Kuvassa pistepilvet yhdistyksen jälkeen .....	43

Kuvio 21. Kuvassa jäädä aiheutuvia pulssien kimmokevirheitä seinämän takana .....	44
Kuvio 22. Kuva valmiista seinämäpinnasta .....	45
Kuvio 23. Kuva kahden pinnan liikkeiden vertailusta 17.2.2015–18.2.2015.....	46
Kuvio 24. Kuva kahden pinnan liikkeiden vertailusta 18.2.2015–10.3.2015.....	46

## ALKUSANAT

Työn teki mahdolliseksi Kevitsa Mining Oy. Suuret kiitokset tästä ennen kaikkea Kevitsa Mining Oy:n suunnitteluosaston Jukka Brusilalle, Jani Luusualle ja Tony Vaaralalle työn ohjauksesta kaivoksen puolelta. Kiitoksia myös Yara Oy:n Siilinjärven kaivoksen Mikko Suikkaselle siitä, että otit meidät sinne vierailulle ja annoit meille paljon hyödyllistä tietoa opinnäytetyötä varten. Koulun puolelta halusimme kiittää ohjaavaa opettajaamme Timo Karppista.



## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön taustalla olivat puutteelliset seinämien seuranta menetelmät Kevitsan avolouhoksella. Louhosseinämien stabiliteettien valvontamenetelmän kehittäminen on ajankohtainen aihe Kevitsan kaivoksella, koska louhos syvenee ja seinämien sortumisvaara kasvaa. Aiheen valitsimme, koska se kuulosti mielenkiintoiselta ja haastavalta. Työn lopputuloksena on tarkoitus luoda järjestelmä louhosseinämien stabiliteettien seurantaan ja tutkia sen soveltuvuutta Kevitsan kaivokselle.

Työssä tutkittiin jo olemassa olevia menetelmiä louhosseinämien liikkeiden seurantaan ja kehitettiin Kevitsan kaivokselle oma menetelmä laserkeilausta hyväksi käyttäen. Työn teoriaosuus sisältää jo olemassa olevien seurantamenetelmien tutkimista ja vertailua. Teoriaosuudessa käsitellään myös yleisesti avolouhosuunnittelua ja sortumatyyppejä. Työn käytännönsuuteen kuului mittausmenetelmien luominen, testaaminen ja aineistojen editointi.

Stabiliteettien seuranta avolouhoksilla toteutetaan ainakin satelliitti-, takymetri- ja laserkeilanmittauksilla sekä UAS-lennokki- ja tutkajärjestelmillä. Kallioon kiinteästi asennettavilla mittalaitteilla voidaan valvoa paikallisesti kalliossa tapahtuvia liikkeitä. Työssä vertailtiin näiden menetelmien tarkkuutta, kustannuksia ja soveltuvuutta stabiliteettien valvontaan. Soveltuvuutta pohditaan Kevitsan kaivoksen kannalta.

Tässä työssä käytimme Kevitsa Mining Oy:n omaa mittauskalustoa. Keilauksen suoritettiin Riegl VZ-2000 -laserkeilaimella ja keilaimen sijainnin määrittämisessä käytössä oli Leica Viva GS-15 GNSS -satelliittipaikannin. Aineistojen käsittelyn ja tulosten vertailun suoritimme RiSCAN PRO -ohjelmistolla.

Mittaustyöt tehtiin talvella ja se aiheutti omat ongelmansa menetelmää testattaessa ja seurantarajoja määriteltäessä. Seinämille kertyvä lumi ja jää aiheuttivat hankaluuksia määritettäessä, kuinka suuria liikkeitä menetelmällä voidaan alkaa seuraamaan. Sääolosuhteet aiheuttivat myös lisätyötä aineistojen editointiin.

## 2 KEVITSAN KAIVOS

### 2.1 First Quantum Minerals Ltd

First Quantum Minerals Ltd on suuri ja nopeasti kasvava Kanadalainen kaivosyhtiö, joka on päätoimisesti keskittynyt malmien etsintään, kaivoshankkeiden kehittämiseen ja kaivostoimintaan. Yhtiöllä on toiminnassa yhteensä seitsemän kaivosta Afrikassa, Australiassa ja Euroopassa, sekä kaivoshankkeita Afrikassa, Etelä- ja Väli-Amerikassa (Kuvio 1). (Kevitsa Mining Oy 2014a, 3.)

Yhtiön tavoitteena on olla vuoteen 2018 mennessä yksi viidestä maailman suurimmasta kuparintuottajasta. FQML:n liikevaihto vuonna 2013 oli 3 550 000 000 dollaria ja sen osakkeet on listattu Lontoon ja Toronton pörssiin. (Kevitsa Mining Oy 2014a, 3.)

### FQML TOIMIVAT KAIVOKSET

#### 1. Kansanshi: Zambia

30 Mt, Cu 260 kt, Au 136 koz  
Toiminta-aika: 17 v  
Työntekijöitä: 1700

#### 6. Las Cruces: Espanja

1.1 Mt, Cu 67 kt  
Toiminta-aika: 9 v  
Työntekijöitä: 246 + 867

#### 7. Pyhäsalmi: Suomi

1.4 Mt, Cu 13 kt, Zn 26 kt  
Toiminta-aika: 6 v  
Työntekijöitä: 233 + 65

#### 2. Guelb Moghrein : Mauritania

3.6 Mt, Cu 38 kt, Au 60 koz  
Toiminta-aika: 9 v  
Työntekijöitä: 1500

#### 3. Ravenstorp : Australia

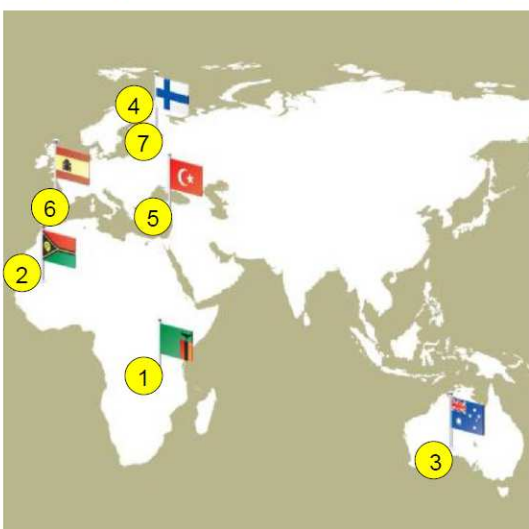
2.8 Mt, Ni 30 kt  
Toiminta-aika: 30+ v  
Työntekijöitä: 445

#### 4. Kevitsa: Suomi

3.1 Mt, Ni 4 kt, Cu 8 kt  
Toiminta-aika: 29 v  
Työntekijöitä: 330

#### 5. Cayeli: Turkki

1.2 Mt, Cu 31 kt, Zn 41 kt  
Toiminta-aika: 6 v  
Työntekijöitä: 506 + 188



**FQM Kevitsa Mining**

Kuvio 1. First Quantum Minerals Ltd kaivokset kartalla (Kevitsa Mining Oy 2013, 2)

## 2.2 FQM Kevitsa Mining Oy

FQM Kevitsa Mining Oy on kanadalaisen First Quantum Minerals Ltd:n (FQML) tytäryhtiö. FQM Kevitsa Mining Oy on Sodankylässä sijaitseva monimetallikaivos, joka toimii avolouhoksena (Kuvio 2). Kaivoksen päätuotteita ovat kupari ja nikkeli. FQM Kevitsa Mining Oy:n liikevaihto vuonna 2013 oli 130 648 000 euroa. (Suomen Asiakastieto Oy 2013, 1) Rikastetuotteina kaivos tuottaa nikkeli-platinaryhmän rikastetta sekä kupari-kultarikastetta. Kaivoksen tuotantomäärä on nikkeli-rikastetta noin 85 000 tonnia vuodessa ja kupari-rikastetta noin 70 000 tonnia vuodessa kun vuosituotanto on viisi miljoonaa malmitonnia. Vuosittain rikasteet sisältävät noin 10 000 tonnia nikkeliä ja 20 000 tonnia kuparia. (Kevitsa Mining Oy 2013, 6.)



Kuvio 2. Ilmakuva Kevitsan kaivosalueesta (Kevitsa Mining Oy 2014a, 8)

Geologinen tutkimuskeskus (GTK) löysi Kevitsan monimetalliesiintymän vuonna 1987. Outokumpu Mining Oy omisti oikeudet esiintymään vuosina 1995–1998. Scandinavian Gold Prospecting AB (myöhemmin Scandinavian Minerals Ltd) val-

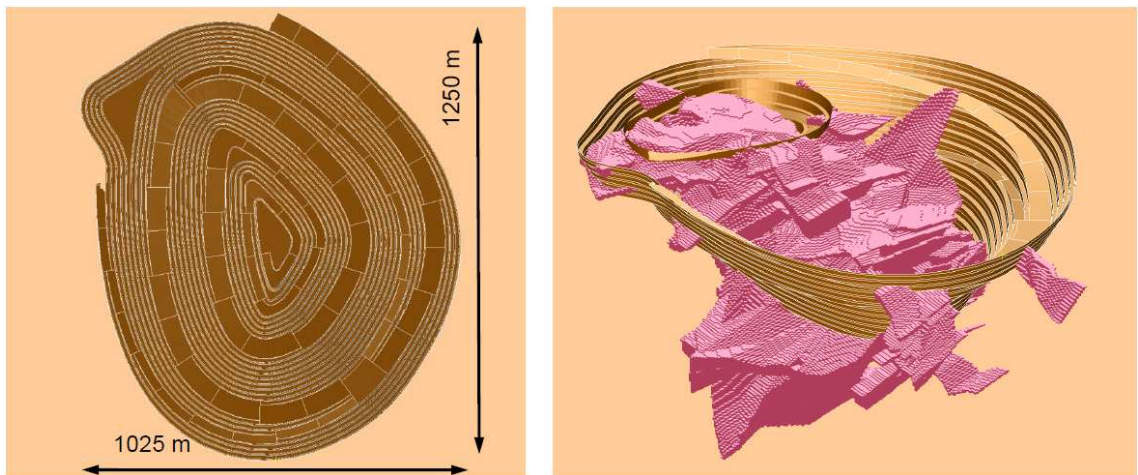
tasi alueen oikeudet vuonna 2000. Vuonna 2006 Scandinavian Minerals Ltd perusti tytäryhtiön Kevitsa Mining Oy:n, minkä jälkeen aloitti lupien haun ja alustavat työt kaivostoiminnan käynnistämiseksi. First Quantum Minerals Ltd osti Scandinavian Minerals Ltd:n vuonna 2008 ja päätti kaivoksen rakentamisesta marraskuussa 2009. Tuotanto alkoi toukokuussa 2012 ja kaupallinen tuotanto alkoi elokuussa 2012. (Kevitsa Mining Oy 2014a, 7.)

Pohjois-Suomen aluehallintovirasto on myöntänyt Kevitsan kaivokselle ympäristöluvan laajennuksen kesällä 2014. Kaivos alkaa louhia vuodessa 10 miljoonaa tonnia malmia ja 63 miljoonaa tonnia sivukiveä. Louhintamäärät tekevät kaivoksesta Suomen suurimman. (Ojanen 2014.)

### 3 AVOLOUHINTA

#### 3.1 Avolouhoksen suunnittelu

Tärkein kaivossuunnittelun lähtötieto on malmiesiintymän geologinen malli (Kuvio 3). Siinä kuvataan esiintymän geometriset jatkuvuudet, arvoainepitoisuudet sekä kivilajityypit. Geologinen malli koostuu kaksiulotteisista pysty- ja vaakaleikkauksista, näistä tehdyistä kappalemalleista ja lohkomalleista, joita käytetään esimerkiksi avolouhosoptimoinnissa. Malmiesiintymän tutkimisen alkuvaiheessa ovat maanpinnalta kairatut näytteet yleensä ainoa tieto esiintymästä. (Brusila & Lovén 2011, 69.)

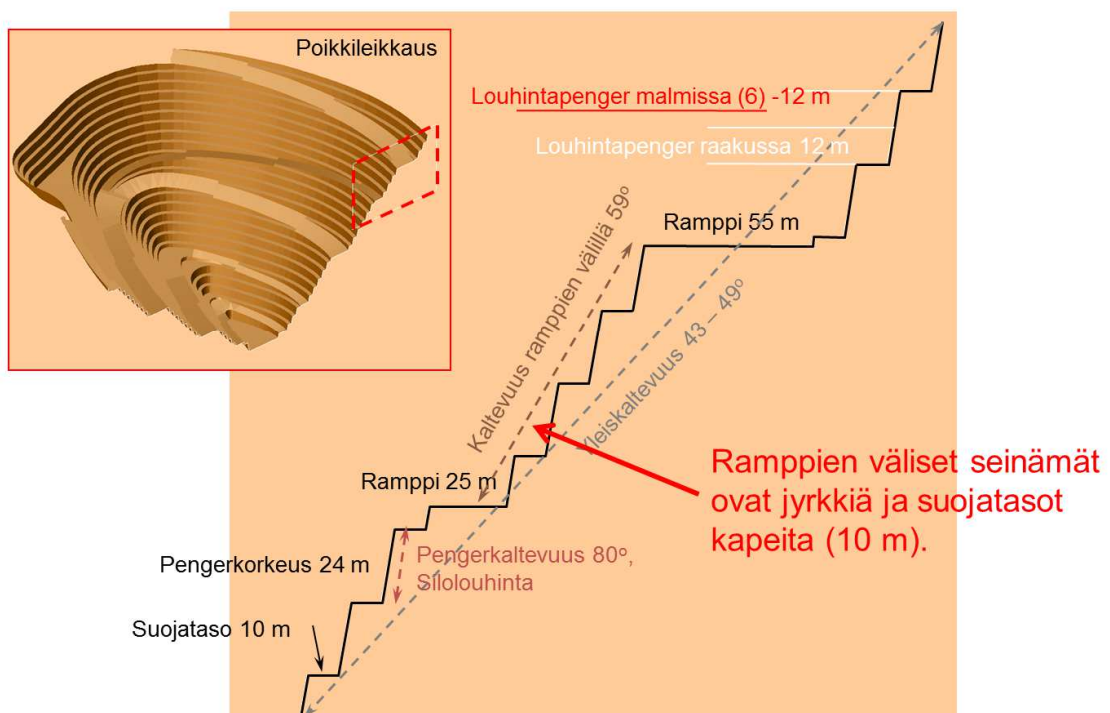


Kuvio 3. Vasemmalla avolouhoksen suunniteltu koko ja oikealla malmiesiintymän malli (Kevitsa Mining Oy 2014a, 52)

Avolouhinnan suunnittelussa tarpeellisia perustietoja ovat maanpintatiedot, louhosseinämien yleiskaltevuudet, pengerkorkeudet ja -leveydet, avolouhosteiden leveydet ja kaltevuudet sekä louhoksen pohjatasen minimileveys. Avolouhinnan suunnittelu on teknisiin tietoihin, mutta myös kustannustietoihin perustuvaa taloudellisten louhintarajojen määrittelyä, avolouhosoptimointia. Avolouhosoptimoinnilla tarkoitetaan työvaihetta, jossa avolouhoksen lopullinen paikka ja muoto määrätään tulojen ja kustannusten tasapainon perusteella. Avolouhosoptimointi tehdään nykyään tietokoneohjelmilla. (Brusila & Lovén 2011, 72.)

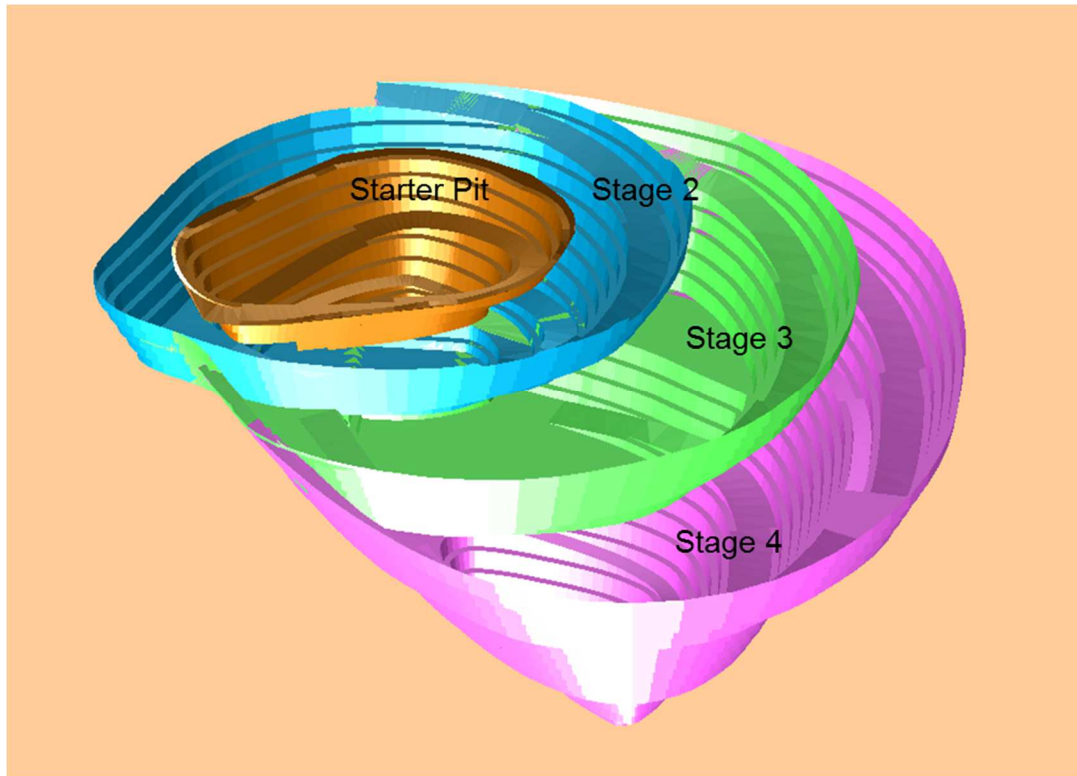
Louhoksen seinämien yleiskaltevuudet määräytyvät seinämästabiilitutkimusten perusteella. Jos tällaista ei ole käytettävissä, lähtökohtana suomalaisessa avokalliossa voi käyttää 45:tä astetta (Kuvio 4). Penger muodostuu pengerkulmasta, pengerkorkeudesta ja pengertason leveydestä. Pengertason tarkoituksena on pysäyttää paikallisesti sortuvia lohkareita. Pengerkorkeus määräytyy malmion geometrian, tuotantotason ja vaadittavan louhinnan selektiivisyyden perusteella. Maksimi pengerkorkeus on Suomessa yleensä noin 30 metriä. Turvatasanteen leveydellä on mahdollista säädellä seinämän yleiskaltevuutta. Ajotien leveys määräytyy käytettävän ajoneuvokaluston perusteella. Ajopinnan lisäksi tulee jättää tilaa seinämän puoleiselle ojalle ja louhoksen puoleiselle turvapenkalle. Ajotien kaltevuus on yleensä yhden suhde kymmeneen. (Antikainen, Hakala & Syrjänen 2011, 59, 61; Brusila & Lovén 2011, 72–73.)

#### AVOLOUHOKSEN SUUNNITTELUPARAMETRIT



Kuvio 4. Poikkileikkaus louhoksen seinämsuunnitelmasta (Kevitsa Mining Oy 2014a, 55)

Malmien louhinnat suoritetaan Kevitsassa neljässä vaiheessa (Kuvio 5). Kaivoksella on alkamassa stage 2 -vaihe. Louhoksen lopullinen syvyys on 510 metriä. Avolouhoksen koko ja syvyys ovat suurimpia Suomessa kun louhinta on suoritettu. (Kevitsa Mining Oy 2014a, 51.)



Kuvio 5. Louhoksen neljä eri vaihetta (Kevitsa Mining Oy 2014a, 51)

### 3.2 Stabiilitteetti ja monitorointi

Stabiilitteetti tarkoittaa tasapainoa tai liikkumattomuutta (Suomisanakirja 2015b). Louhosseinämien stabiilitteettien valvonnalla tarkoitetaan louhoksen seinämissä tapahtuvien liikkeiden seuraamista eli monitorointia (Suomisanakirja 2015a). Monitoroinnilla tarkoitetaan uudelleen mitattujen seinämien tai pisteiden vertaamista jo aiemmin mitattuihin seinämiin tai pisteisiin. Mittauksia vertailemalla saadaan tietoa seinämien tai pisteiden liikkeistä. Isot sortumat voivat aiheuttaa henkilö-, kalustovahinkoja tai tuotantokatkoksia. Pienemmät sortumat aiheuttavat lähinnä lisätyötä, mutta niistäkin voi syntyä vaaratilanteita. Sortumiin pystyttäisiin seurannan avulla varautumaan. (Brusila 2015.)

Avolouhoksen suunnittelun lähtökohtana on seinämäkaltevuuden optimointi siten, että sivukiven louhintamäärä on mahdollisimman pieni, mutta samalla seinämät ovat pysyviä, sortumavaaraa ei ole ja turvallinen tuotanto voidaan taata. Louhoksen syventyessä ja laajentuessa louhosseinien stabiilitteettia valvotaan tilanteeseen sopivilla menetelmillä. (Kevitsa Mining Oy 2014b, 4.)

Aluksi Kevitsan avolouhoksella seinämiä valvotaan säännöllisesti toistetuilla laserkeilauksilla. Jos tällöin havaitaan jossain louhoksen osassa liikettä, joka voi mahdollisesti myöhemmin johtaa seinämän sortumiseen, aloitetaan siellä tarkempi seuranta. Tällöin laserkeilauksia voidaan tehdä lyhyemmin aikaväleihin, tai asentaa kriittisille alueille kiinteitä, jatkuvatoimisia mittalaitteita. (Kevitsa Mining Oy 2014b, 4–5.)

Monitorointia voidaan toteuttaa monilla eri menetelmillä ja tarkkuuksilla (Liite 1). Kaupallisia sovelluksia ja laitteita on saatavilla takymetrimittaukselle, satelliittimittaukselle, laserkeilaukselle, uav-lennokille sekä tutkamittaukselle. Niihin perehdytään seuraavassa osiossa tarkemmin. Kallioon voidaan asentaa myös kiinteitä mittalaitteita, kuten ekstensometrejä, joilla voidaan seurata pieniäkin liikkeitä epävakaisissa lohkoissa reaaliajassa. Menetelmien tukena käytetään perinteistä visuaalista seurantaa sekä valokuvia.

### 3.3 Kalliomekaniikka

Avolouhoksilla voi tapahtua paikallisia, yksittäisten pengerten sortumia, tai isoja useampia pengertasoja käsittäviä sortumia. Isoja sortumia aiheuttaa kalliolaatuun nähden liian suuren kokonaiskaltevuuden tai louhosteiden välisen kaltevuuden käyttäminen. Brusilan mukaan laajemmat sortumat liittyvät lähes poikkeuksetta kallioperän heikkousvyöhykkeisiin. Sortuma tapahtuu, kun kallion jännitystila ylittää kiven kestävyuden. Jännitystila taas aiheutuu ennen kaikkea painovoimasta, mutta kalliossa on myös laaja-alaisia vaakasuoria jännityskenttiä, joiden on ajateltu johtuvan mannerten liikkeistä (Brusila 2015). Tyypillisiä avolouhossortumia ovat pyörähdysortuma, tasosortuma, kiilasortuma ja kaatumasortuma. (Antikainen, ym. 2011, 61.)

Pyörähdysortumia (circular failure, rotational shear) esiintyy, kun kallio tai maalaji on heikko. Sortuma voi tapahtua ympyrän kaarta muistuttavaa leikkauspintaa pitkin. Sortumaan vaikuttaa pyörähdystason kitkakulma ja koheesio. Tasosortumia (plane failure) saattaa esiintyä silloin, kun rakopinta on suunnilleen yhden-suuntainen rakolinjan kanssa ja lohkon pituus on niin suuri, että lohkon sivujen

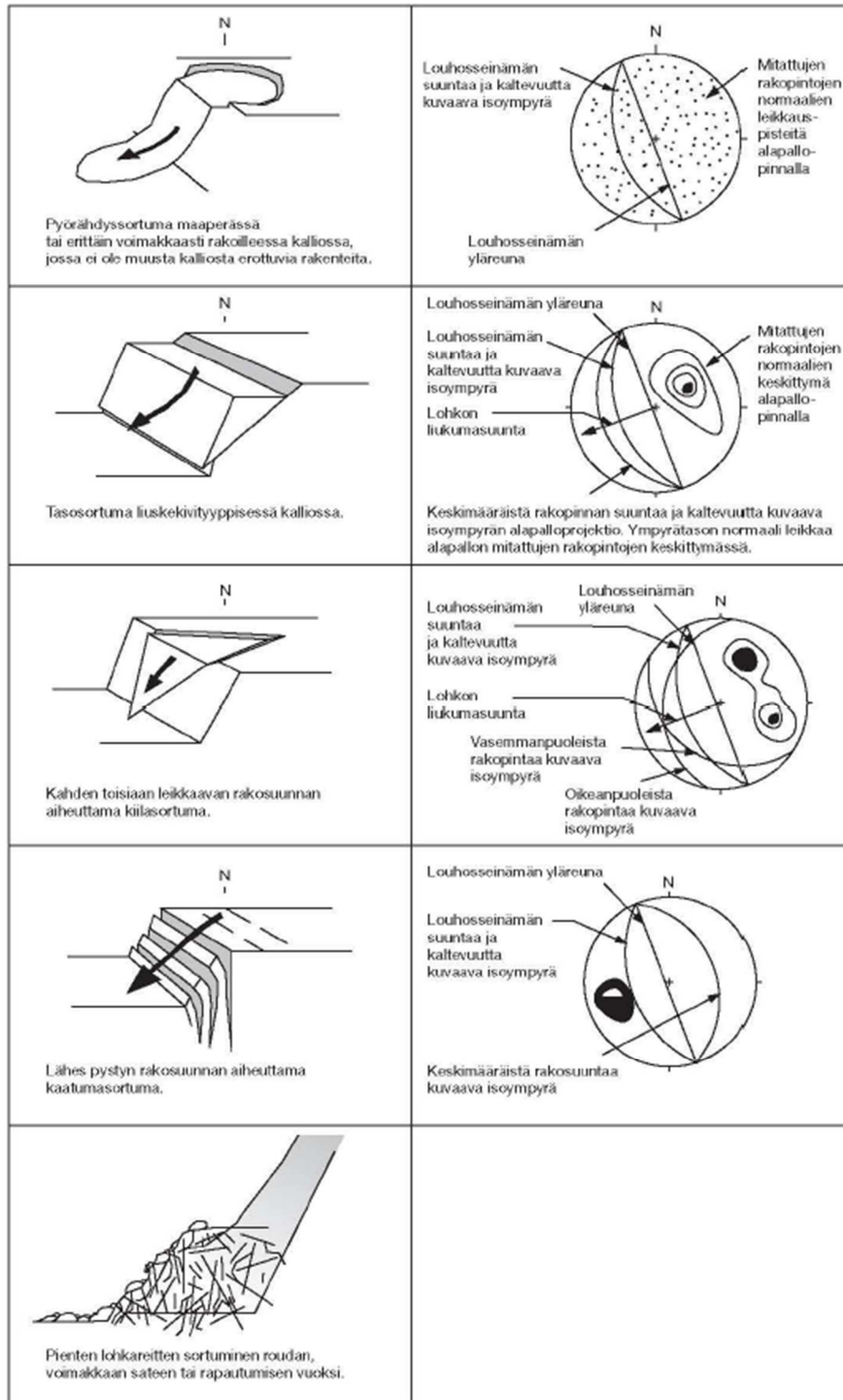


vaikutus on vaikutukseton. Kiilasortumassa (wedge failure) kaksi rakopintaa leikkaa toisensa. Kaatumasortumia (toppling failure) esiintyy tapauksissa, joissa rakoilu on lähes pystysuoraa. Kaatumasortumassa kallio voi liikkua tai sortua, joten varmuuskertoimen määrittäminen on vaikeaa. (Kuvio 6) (Antikainen ym. 2011, 61.)

Yleensä avolouhoksissa tapahtuvat pienemmät paikalliset sortumat ovat seurausta pitkäaikaisista liikkeistä seinämissä. Yleensä ne johtuvat sääolosuhteista, roudan sulamisesta, kovista vesisateista tai rapautumisesta kalliossa. Sortumia voi myös tapahtua nopeasti ja yllättäen esimerkiksi räjäytyksien yhteydessä. (Antikainen ym. 2011, 61.)

Avolouhosten sortuma-analyseissä on huomioitava pohjaveden vaikutus. Pohjaveden paine alentaa rakolinjojen normaalijännitystä, jolloin niiden leikkauslujuus pienenee. Veden vaikutusta vähennetään kuivattamalla louhosta esimerkiksi porareillä, tai suurissa avolouhoksissa jopa kuivatustunneleilla. (Antikainen ym. 2011, 61.)

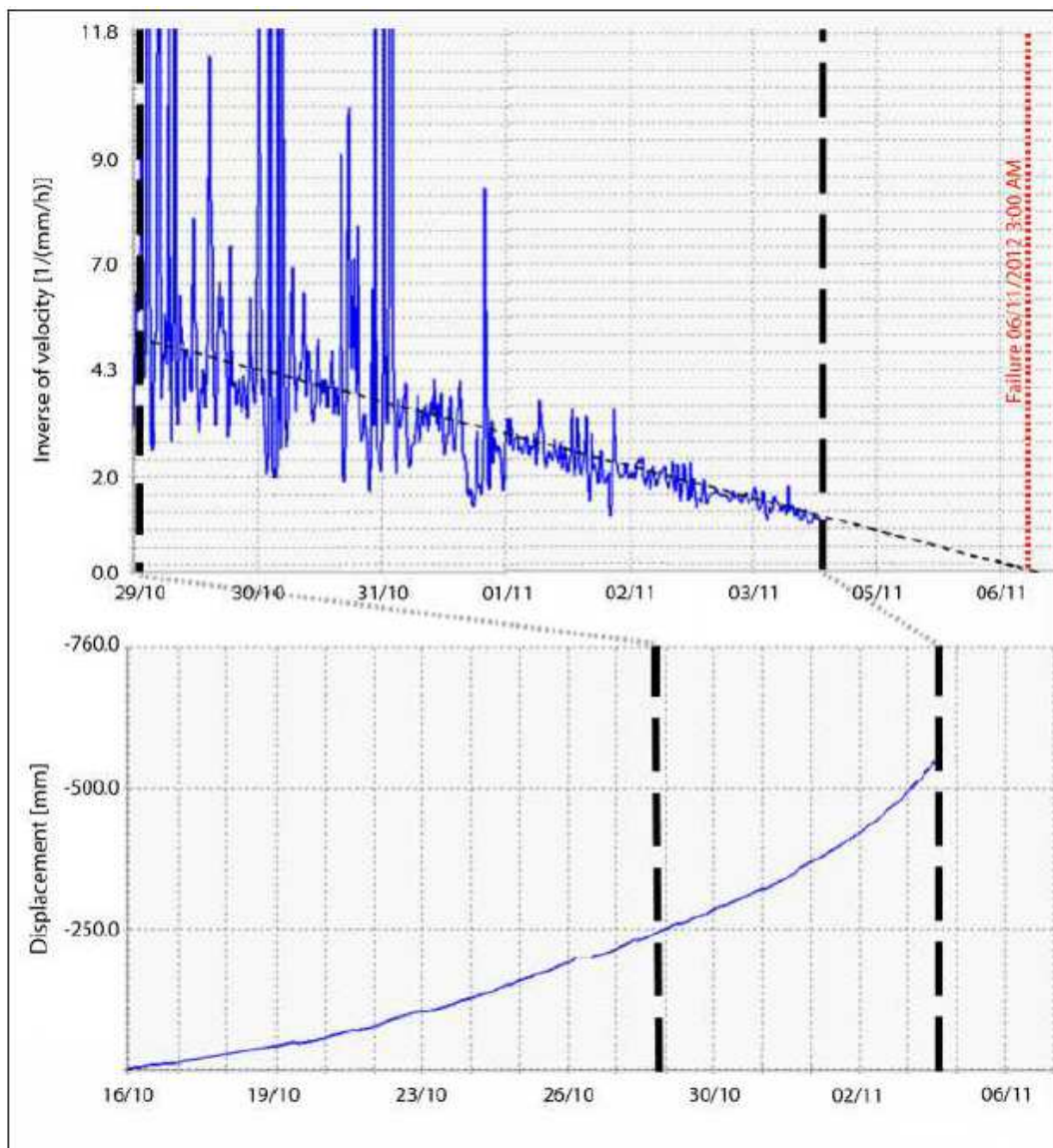
Toistaiseksi ei ole keksitty teoriaa, joka täysin selittäisi aineen murtumisen. Tästä syystä joudutaan käyttämään erilaisia myötökriteerejä. Nämä kriteerit ovat kuitenkin vain suuntaa antavia, eikä niiden avulla pystytä tarkalleen määrittämään tulevan sortuman ajankohtaa. Tästä syystä seinämää täytyy tarkkailla säännöllisesti. Sortumaan vaikuttavia tekijöitä ovat suurin ja pienin pääjännitys kalliomasan antaessa periksi, kivilajin yksiaksaalinen puristusmurtolujuus, kivilajien ominaisuudet sekä louhinnan ja jännitysten aiheuttamaa kallion häiriintymiset. (Antikainen, ym. 2008, 39.)



Kuvio 6. Avolouhoksen tyypilliset sortumatyytit (Antikainen ym. 2011, 61)

Yleensä ennen isoa sortumaa liikettä tapahtuu seinämissä jo viikkoja ennen varsinaista sortumaa ja liikkeen suuruus vaihtelee kymmenestä senttimetrinä yli puoleen metriin. Alussa liike on hitaampaa ja sortuman lähestyessä se kiihtyy

(Kuvio 7). Seurannan tarkoituksena on havaita liike hyvissä ajoin ennen sortumaa. Mittalaitteen tarkkuus ja mittaustiheys määrittyvät seinämässä tapahtuvien liikkeiden nopeuden ja suuruuden perusteella. Reaaliaikainen seuranta on paras menetelmä seinämien seurannassa, koska silloin alun hidas liike havaitaan parhaiten. Pienemmät sortumat voivat tapahtua nopeasti, jopa tunneissa tai päivissä, ja näihin pystytään varautumaan vain reaaliaikaisella seurannalla. Jos seuranta ei voida toteuttaa reaaliajassa, mittaus tiheyden tulee olla vähintään kaksi kertaa viikossa. (Antolini, Atzeni, Barla, Pieraccini 2012, 15-16.)



Kuvio 7. Tutkalla havaittu liikemäärä esimerkki sortumasta Pohjois-Amerikassa (Antolini, ym. 2012, 16)

## 4 STABILITEETTIEN VALVONTAMENETELMIÄ

### 4.1 Satelliittimittaus

#### 4.1.1 Yleiskuvaus

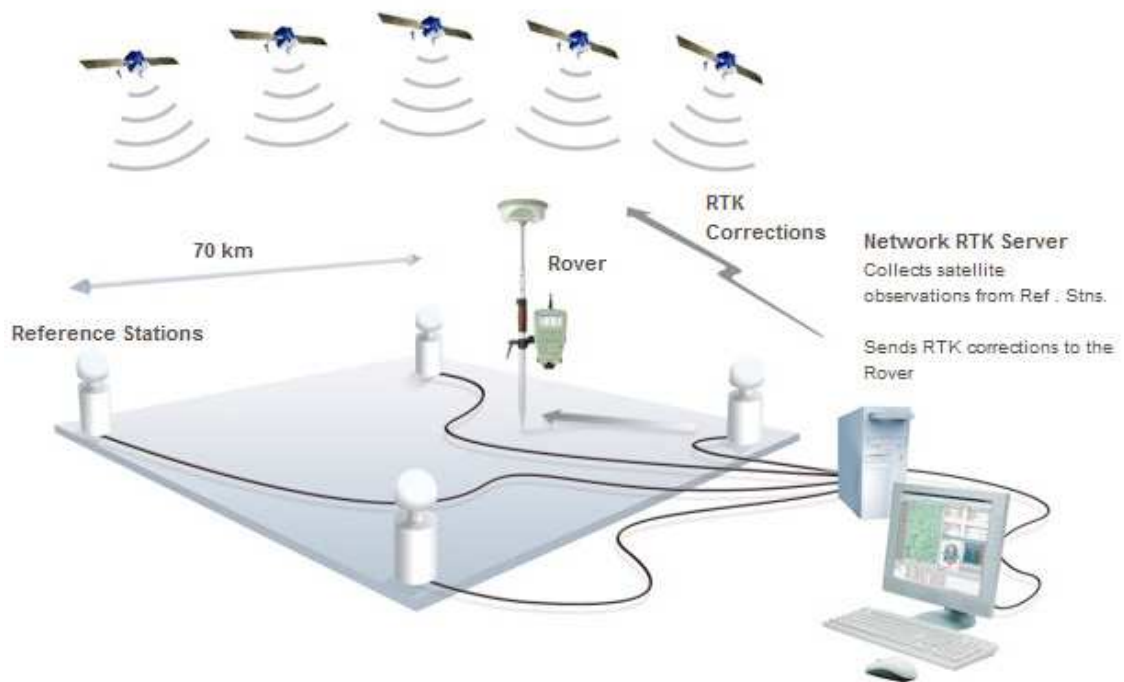
Satelliittimittaus on satelliittipaikannusjärjestelmien avulla tehtävää sijainnin määrittämistä. Satelliittimittauksesta käytetään perinteisesti termiä GPS-mittaus (Global Positioning System), mutta sen sijaan nykyään voidaan puhua myös maailmanlaajuisesta GNSS-mittauksesta (Global Navigation Satellite System). Tällöin sijainnin määrittämiseen käytetään GPS-järjestelmän lisäksi muitakin satelliittipaikannusjärjestelmiä. Satelliitit lähettävät radiosignaaleja eri taajuuksilla. Signaalien kantoaaltoihin on lisätty binäärikoodeja, joiden avulla paikanmääritys voidaan tehdä. Satelliittipaikanmääritys jaetaan absoluuttiseen, differentiaaliseen ja suhteelliseen paikanmääritykseen. (Laurila 2012, 289; Maanmittauslaitos 2014.)

Absoluuttinen paikanmääritys tehdään yksittäisellä vastaanottimella, esimerkiksi käsinavigaattorilla, joka vastaanottaa satelliitin lähettämän signaalin. Absoluuttisella paikanmäärityksellä päästään alle 10 metrin tarkkuuksiin. Differentiaalinen paikanmääritys eli DGPS pienentää paikanmäärityksen virheitä differentiaalikorjauksen avulla. Differentiaalista paikanmääritystä käyttämällä päästään 0,5–5 metrin tarkkuuksiin. Korjaukset välitetään vastaanottimelle radio- tai matkapuhelin verkkojen välityksellä. Suhteellinen paikanmääritys perustuu satelliittien signaalien kantoaallon hyväksikäyttöön. Paikanmääritykseen tarvitaan vähintään kaksi vastaanotinta, joista toinen on koordinaateiltaan tunnetulla pisteellä. Mittauksessa määritetään koordinaattieroja vastaanottimien välillä. Tällä menetelmällä päästään alle viiden senttimetrin tarkkuuksiin. (Laurila 2012, 289; Maanmittauslaitos 2014.)

Suhteellisen paikanmäärityksen tärkeimmät sovellukset ovat staattinen GPS -mittaus ja RTK-mittaus. Staattinen GPS -mittaus tapahtuu jälkilaskentana ja soveltuu esimerkiksi tarkkojen kiintopisteverkkojen mittaamiseen ja erilaisiin deformaatiomittauksiin. RTK-mittauksessa, eli reaaliaikaisessa kinemaattisessa (Real

Time Kinematic) mittauksessa laskennat voidaan suorittaa reaaliajassa (Kuvio 8). (Laurila 2012, 289; Maanmittauslaitos 2014.)

Satelliittimittausjärjestelmään kuuluvat taivaalla olevat satelliitit, kiinteä tai siirrettävä vastaanotin, tallennin ja kartoitussauva. Lisäksi tarvitaan toimiva mobiilidataverkko, sekä tarvittavat tukiasematiedot. (Maanmittauslaitos 2014.)



Kuvio 8. Havainnekuva RTK-mittauksen toiminnasta (Leica SmartNet Europe 2015)

#### 4.1.2 Menetelmän soveltuvuus

Osiassa pohditaan satelliittimittauksen soveltuvuutta Kevitsan kaivosolosuhteisiin. Satelliittimittaus sopii kaivosseinämien valvonnassa tukimittausten tekemiseen, sillä voidaan esimerkiksi luoda kiintopisteitä ja valvoa yksittäisiä kohteita, sekä rampeja ja huoltoteitä. Kaivokseen voidaan myös asentaa kiinteitä antenneja, jotka seuraavat reaaliaikaisesti yksittäisen kohteen liikettä. Kaivoksen reunamille voidaan asentaa tukipisteverkko, jolla valvotaan louhoksen yläreunaa. Satelliittimittauksella ei voida valvoa koko seinämää kerralla.

Satelliittimittauksen hyviä puolia ovat sen edullisuus ja helppo saatavuus, sekä laitteelle, että tuelle. Menetelmä on kohtuullisen varmatoiminen ja sään vaikutus mittauksiin on vähäinen. Mittausten suorittaminen tosin on hidasta. Staattisella mittauksella yhteen mittaukseen voi kulua jopa puolituntia, koska tarkan mittaus-tuloksen saamiseksi tarvitaan useita havaintoja samalta pisteeltä. Myös mittaus-ten suorittaminen turvallisesti louhoksen seinämällä on hankalaa tai lähes mah-dotonta.

Satelliittimittauksen tarkkuus suhteellisella paikannusmenetelmällä on parhaim-millaan tasotarkkuudella yksi senttimetri ja korkeustarkkuudella 1,5 senttimetriä. Tarkkuudeltaan menetelmä soveltuu lähinnä tukimittausten tekemiseen. Satelliit-timittausta käytettäessä pisteiden ja aineistojen käsittely on helppoa ja nopeaa, koska siinä verrataan vain yksittäisiä pisteitä tai viivamaista tietoa. Saatuja mit-taustuloksia voidaan käsitellä ja verrata yksinkertaisillakin ohjelmilla.

## 4.2 Takymetri

### 4.2.1 Yleiskuvaus

Takymetri on kulman- ja etäisyydenmittauskoje, jolla mitataan pysty- ja vaakakul-mia sekä etäisyyksiä. Näistä havainnoista voidaan laskea koordinaatteja, kor-keuksia ja muita suureita. Mittaustulokset tallennetaan sähköisenä. Takymetri-mittauksissa tarvitaan takymetrin lisäksi muun muassa kolmijalkoja kojeiden ja tähysten jalustoiksi, prismoja ja tähyksiä etäisyyksien ja kulmien mittaukseen ja kartoitussauvoja. Nykyään kojeet ovat pitkälle kehittyneitä automatisoituneita mit-tausrobotteja. Kehittyneimmillä takymetreillä voidaan mitata kulmia ja etäisyyksiä sekä keilata ja valokuvata mittauskohteita. Takymetrimittauksella voidaan päästä tarkkuudessa jopa millimetritasolle riippuen laitteesta, sen ominaisuuksista ja sen käyttäjän ammattitaidosta. (Laurila 2012, 237–238.)

Takymetrin käyttö edellyttää tarkkaa koordinaateiltaan tunnettua tukipisteverk-koa, jotta se voidaan orientoida koordinaatistoon tarkasti. Takymetri voidaan orientoida koordinaatistoon tunnetulle asemapisteele tai vapaalle asemapis-teelle. Koordinaateiltaan tunnettua asemapistettä käytettäessä tarvitaan myös

tunnettu liitospiste liitossuuntaa määritettäessä. Vapaalle asemapisteele orientoitessa tarvitaan kaksi koordinaateiltaan tunnettua apupistettä. Tukipisteitä voidaan myös rakentaa väliaikaisesti satelliittipaikantimen avulla, mutta silloin tarkkuus kärsii. (Laurila 2012, 257, 260.)

#### 4.2.2 Menetelmän soveltuvuus

Markkinoilla on olemassa robottitakymetreja, joilla mittaus voidaan tehdä automaattisesti ja reaaliaikaisesti. Muun muassa Leica ja Geotrim markkinoivat tällaisia tuotteita ja mittausjärjestelmään tarvittavia ohjelmistoja. Mittauksissa robottitakymetri asennetaan kiinteästi liikkumattomaan paikkaan, josta on esteetön näkyvyys mittauspisteisiin (Kuvio 9). Mittauspisteisiin asennetaan prismat, joiden sijainnin mittalaite mittaa halutuin väliajoin. Mittausohjelmisto osaa antaa hälytyksen, jos jokin mittauspisteistä liikkuu. (Luomala 2010, 11.)



Kuvio 9. Havainnekuva automaattisesta robottitakymetri seurantajärjestelmästä (Luomala 2010, 12)

Mittausjärjestely on varsin kallis ominaisuuksiinsa nähden ja lähinnä tästä syystä se ei ole yleistynyt kovin laajasti. Suomessa ei ole tietävästi tehty tämän tyyppisiä mittauksia, mutta ulkomailla joitakin seurantakohteita on olemassa. Menetelmällä voidaan mitata jopa alle yhden millimetrin liikkeitä. Vaikka mittausmenetelmä antaa tarkimman mahdollisen mittaustuloksen hyvissä oloissa, on mittaustavalla omat puutteensa. Esimerkiksi lumi ja jää hankaloittavat prismojen näkyvyyttä ja prismat saattavat huurtua, jäätyä tai jäädä piiloon lumen alle. Myös räjäytys- ja

maansiirtotöistä johtuvat liikkeet tai roiskeet saattavat vaurioittaa maan pinnalla olevia havaintopisteitä. Robottitakymetri vaatii säännöllistä huoltoa, joten mittalaitteita pitäisi olla käytössä kaksi. Toinen laite olisi koko ajan mittaamassa, kun toista laitetta huolletaan. (Luomala 2010, 11–12.)

Seuraavassa osiossa pohditaan takymetrimittauksen soveltuvuutta Kevitsan kaivosolosuhteisiin. Takymetrimittausta käytettäessä menetelmän vahvuuksia ovat tarkkuus yksittäisten kohteiden seurannassa, sekä mahdollisuus liikkeiden reaaliaikaiseen seurantaan. Nykyaikaisilla takymetreillä voidaan myös keilata seinämää, jolloin prismoja ei tarvita ja samalla saadaan katettua suurempi kokonaisuus seinämästä.

Menetelmän heikkouksia kaivosolosuhteissa ovat prismojen sijoitus- ja asennusvaikeudet. Nämä ongelmat syntyvät siitä, että prismojen asentaminen seinämille ja lohkareille turvallisesti on haastavaa ja työlästä. Ilman keilausominaisuuden käyttöä koko seinämän seuranta ei onnistu, eikä keilausta voida suorittaa kovin kaukaa, koska keilausominaisuudet eivät ole niin kehittyneitä kuin laserskanneissa. Sääolosuhteiden vaikutus mittauksiin on myös suuri. Esimerkiksi lumi- ja vesisade, sekä kylmät ja kuumat lämpötilat vaikuttavat mittausten onnistumiseen ja tarkkuuteen. Myös lumi ja jää saattavat talvisin kertyä prismoihin ja estävät mittauksen suorittamisen ja niiden puhdistaminen on työlästä.

Menetelmä sopii hyvin tukimuotona muille järjestelmille ja yksittäisten pisteiden vertaaminen on tarkkaa ja helppoa, mutta keilausominaisuutta käytettäessä jälkikäsitteily on joskus työlästä olosuhteista riippuen. Helpon siirrettävyytensä vuoksi takymetri voidaan myös kohdentaa paikkoihin, joita ei esimerkiksi tutkalla voida seurata. Perinteinen takymetrimittaus ei ole kovin kallista, mutta skannausominaisuus tai reaaliaikainen tarkkailujärjestelmä nostaa hintaa jo reilusti.



### 4.3 Laserkeilain

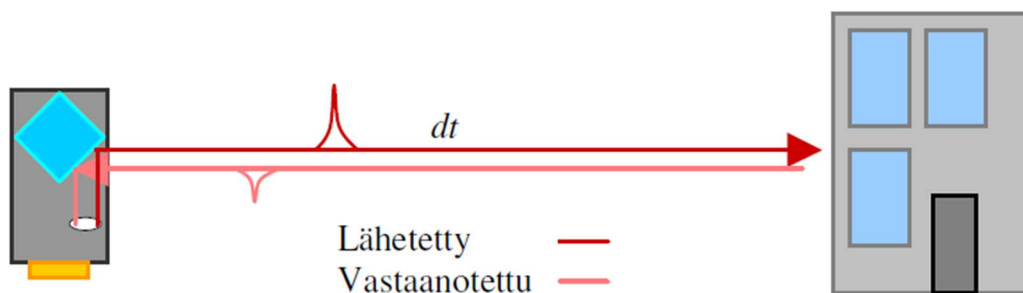
#### 4.3.1 Yleiskuvaus

Laserkeilaus perustuu etäisyyden mittaukseen ja mittaussuuntien tarkkaan orientointiin. Mittauslaite on näin ollen tavallaan automaattisesti toimiva takymetri. Maassa laserkeilainta käytetään kolmijalalle asennettuna kuten takymetria. Keilaus sopii erityisen hyvin erilaisten rakenteiden mittaamiseen ja mallintamiseen, mutta sitä voidaan käyttää myös maaston kohteiden mittaamiseen. Laserkeilain koostuu lasertykistä, joka tuottaa lasersäteen, keilainosasta, joka poikkeuttaa lasersädettä ja ilmaisinosasta, joka tulkitsee vastaanotetun signaalin ja määrittää sen perusteella etäisyyden kohteeseen. (Cronvall, Kråknäs & Turkka 2012, 10; Laurila 2012, 269, 271.)

Mittausten perusteella saadaan mittauspisteiden koordinaatit ja kolmiulotteinen pistepilvi, jonka avulla mittauskohteita voidaan tutkia ja mallintaa. Maalaserkeilauksessa pistepilvi orientoidaan jälkikäteen liitospisteiden tai asemapisteen ja yhteisten pintojen avulla. Laserkeilaimet mittaavat etäisyyden joko valon kulkuajan perusteella tai vaihe-eromittauksella. Keilaimet mittaavat kohdetta nopeasti tehden jopa useita satojatuhansia mittauksia sekunnissa. (Laurila 2012, 272.)

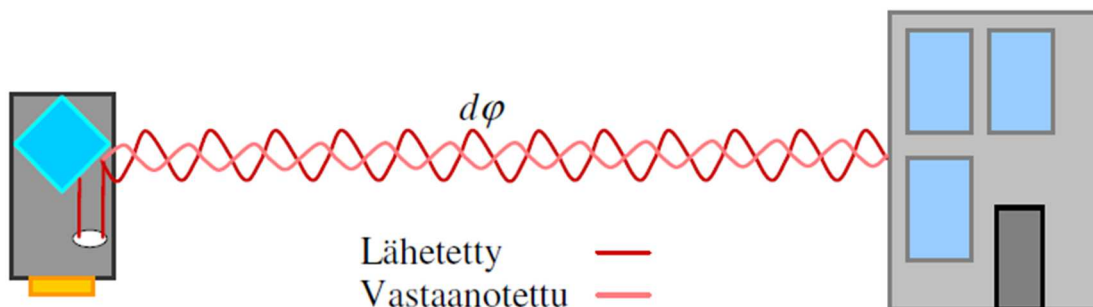
Laserkeilaimet jaetaan toimintatapansa mukaan kolmeen eri luokkaan, pulssilaseriin, vaihe-erolaseriin ja optiseen kolmiomittaukseen perustuvaan lasermittaukseen. Käyttötapansa mukaan keilaimet voidaan luokitella neljään eri pääluokkaan. Näitä ovat kaukokartoitus-laserkeilaimet, mobiililaserkeilaimet, maalaserkeilaimet ja teollisuuslaserkeilaimet. (Cronvall ym. 2012, 12.)

Pulssilaser lähettää katkonaista lasersädettä, jonka edestakainen kulku-aika mitataan laitteen ja kohteen välillä. Tämän jälkeen kohteen etäisyys voidaan määrittää pulssin kulkuajan ja valonnopeuden avulla (Kuvio 10). Pulssilasereilla voidaan mitata etäisyyksiä suurella vaihteluvälillä, etäisyys kohteesta voi olla muutamasta metristä yli kilometriin. Mittausetäisyyteen vaikuttavat lähetetyn pulssin teho ja toistotaajuuden määräämä enimmäiskulku-aika. (Cronvall ym. 2012, 12.)



Kuvio 10. Pulssilaserin toimintaperiaate (Kukko 2005, 7)

Vaihe-erolaser lähettää jatkuvaa signaalia, jonka intensiteettiä moduloidaan sini-aalloilla tai useampia eri kanta-aallonpituuksia sisältävällä signaalilla. Laserkeilain määrittää lähetetyn ja kohteesta heijastuneen ja vastaanotetun signaalin välisen vaihe-eron. Kantaaalto voidaan ratkaista useamman aallonpituuden moduloinnilla. Etäisyshavainto saadaan ratkaistua vaihe-eron ja kokonaislukutuntemattoman avulla (Kuvio 11). Mittausetäisyys on rajoittunut alle 100 metriin. (Cronvall ym. 2012, 12.)



Kuvio 11. Vaihe-erolaserin toimintaperiaate (Kukko 2005, 7)

Optiseen kolmiomittaukseen perustuvat laserkeilaimet tuottavat valopisteen, joka suunnataan mitattavan kohteen pintaan. Kohteesta takaisin heijastuva valopiste kulkee linssin lävitse sensorin pinnalle, jossa sen sijainti rekisteröidään. Kohteen etäisyys lasketaan valonlähteen ja sensorin välisen etäisyyden ja havaittavan valon saapumiskulman perusteella. Tätä menetelmää käyttäviä laserkeilaimia hyödynnetään erityisesti vaativissa teollisuusmittauksissa, joissa mittaustarkkuuden on oltava hyvä. Laitteen käyttöä rajoittavat lyhyet mittausetäisyydet ja suuret katvealueet. (Cronvall ym. 2012, 12.)

#### 4.3.2 Menetelmän soveltuvuus

Osiossa pohditaan laserekeilauksen soveltuvuutta Kevitsan kaivosolosuhteisiin. Laserkeilain soveltuu stabiliteettien seurantaan paremmin kuin satelliitti- tai takymetrimittaus, koska sillä voidaan seurata kaikkia seinämiä kerralla tai kohdentaa se tarkasteltavaan seinämään. Takymetreillä voidaan myös keilata, mutta mittausetäisyys on lyhempi ja tarkkuus huonompi kuin laserkeilaimissa. Mittaus on helppoa ja nopeaa kun otetaan huomioon saatavan datan määrä. Mittausnopeus riippuu halutun pistepilven tarkkuudesta ja mitattavan kohteen koosta. Laserkeilaimella voidaan myös toteuttaa seurantaa reaaliajassa. Käytettäessä tarkinta mittaustapaa seinämiä voidaan mallintaa tarkasti ja yksityiskohtaisesti, koska keilaimen helpon siirrettävyyden ansiosta seinämiä voidaan skannata eri suunnista.

Laserkeilainta käytettäessä menetelmän heikkouksia ovat sään suuri vaikutus mittaukseen. Ääriämpötilat haittaavat tai voivat jopa estää keilausten suorittamisen. Pöly, lumi- tai vesisade haittaavat mittauksen suorittamista ja tuovat lisätyötä aineistoa editoitaessa, koska ne aiheuttavat mittausaineistoon hajapisteitä. Myös seinämille kertyvä lumi, jää ja vesi aiheuttavat mittauksiin tulkinta hankaluuksia tai jopa virheitä, koska lasersäde saattaa heijastua näistä eritavoin kuin kiinteästä kalliuseinästä. Tulosten tulkintavaikeuksia syntyessä voidaan käydä paikalla katsomassa, sekä ottamassa valokuvia kyseisestä paikasta ja niiden perusteella tulkita mistä erot mittauksissa aiheutuvat.

Laserkeilaimella päästään hyvissä olosuhteissa alle senttimetri luokan tarkkuuksiin. Valmistajat lupaavat laitteilleen mittausetäisyydestä ja olosuhteista riippuen jopa muutamien millimetrien tarkkuutta. Nämä tarkkuudet riittävät liikkeiden seurantaan seinämillä. Laserkeilaimella saatavan aineiston käsittely on kuitenkin työlästä ja vaatii tekijältään ammattitaitoa. Lisäksi mittauksista kertyvien datojen määrät ovat suuria ja se luo haasteita tiedostojen tallennukseen. Myös tiedostojen pyörittäminen ohjelmilla vaatii tietokoneelta suorituskykyä. Laserkeilainten hinnat riippuvat merkistä ja laitteen ominaisuuksista, mutta ne ovat kuitenkin kalliimpia kuin takymetrit ja vaativat myös hyvät ohjelmistot aineiston käsittelyyn. Monet laitevalmistajat tekevät myös ohjelmistoja keilausaineistojen käsittelyyn.

## 4.4 UAS-järjestelmä

### 4.4.1 Yleiskuvaus

UAV-lennokilla (Unmanned Aerial Vehicle) tarkoitetaan miehittämätöntä ilmaluista. UAV on ilmassa liikkuva laite, joka osaa autopilotin avulla lentää ennakolta määrätyn reitin GPS-koordinaattien avulla. Laitteessa on myös tavanomainen radio-ohjaus, jotta vika- tai vaaratilanteessa sitä voi ohjata myös käsin. Joskus käytetään UAS-nimitystä (Unmanned Aerial System) ja silloin tarkoitetaan koko järjestelmää maa-asemineen ja sensoreineen. Sensorina UAV-laitteessa voi olla still- tai videokamera, infrapuna- tai väärävärrikamera, hyperspektrikamera, SAR-tutka, magnetometri ja nykyisin myös laserkeilaimia on käytössä niiden entistä pienemmän kokonsa vuoksi. Lennokki termillä voidaan tarkoittaa sekä lennokkeja että helikoptereita, eli kiinteä- ja pyöriväsiipisiä (Kuvio 12). Nykyisten määreysten mukaan maksimilentokorkeus on 150m ja lennokin pitää olla koko ajan näkyvissä. (Hassinen 2013, 3–4.)

Lentokoneen ja sensorin lisäksi miehittämättömän lentokoneen käyttö edellyttää ohjelmointia, laadunvarmistusta ja kerätyn aineiston prosessointia. Prosessoinnin lopputulos on ortokuvamosaiikki, kolmiulotteinen pintamalli tai pistepilvi sekä näiden yhdistelmät. Aineiston koordinaatistoon saamiseksi vaaditaan signaloidut tukipisteet. Aineiston tarkkuus riippuu käytetystä sensorista, tukipisteiden määrästä ja tarkkuudesta. Esimerkiksi kameralla 150 metrin korkeudesta kerätyn aineiston pikselikoko on viisi senttimetriä kanttiinsa ja GPS-tukipisteitä käyttämällä tasotarkkuus on noin 2,5 senttimetriä eli puoli pikseliä ja korkeustarkkuus noin viisi senttimetriä. Tarkkuudeltaan lennokin ottama aineisto vastaa siis perinteistä fotogrammetriaa. Nykyisin menetelmä on kehittyneempi ja aineiston tarkkuus vastaa lähes satelliittimittausta jos tukipisteet ovat hyvät. (Isotalo 2011, 17–18.)



Kuvio 12. Leica Aibotix UAV -lennokki (Leica Geosystems 2013)

#### 4.4.2 Menetelmän soveltuvuus

Osiossa pohditaan UAV-lennokin soveltuvuutta Kevitsan kaivosolosuhteissa. Stabiiliteettien valvontaa UAV-lennokeilla voidaan tehdä käyttämällä sensorina joko kameraa tai laserkeilainta. UAS-lennokkijärjestelmällä saatu aineisto kattaa koko louhoksen, mutta kameran avulla saatu pistepilvi on harvempi kuin laserkeilaimella mitattu pistepilvi. Pistepilven tiheys riippuu käytetystä kamerasta sekä lentokorkeudesta. Seinämävertailussa pistepilven tulisi olla tarkka, jotta pistepilvestä muodostettu malli vastaisi seinämän todellisia muotoja. Lennokin ja kameran avulla saadusta pistepilvestä voidaan lähinnä seurata louhoksen ja pengerten reunamien sekä hyllyjen liikkeitä, koska pistepilven tiheys ei riitä seinämä seurantaan. Ilmalaserkeilauksen avulla saadun pistepilven tarkkuus riittää isompien liikkeiden seurantaan seinämällä.

Menetelmän hyviä puolia ovat mittausten nopea ja helppo suoritettavuus. Perus UAS-lennokkijärjestelmä on kohtuullisen halpa, mutta paremmat laitteet maksavat jo reilusti enemmän. Laserkeilain on myös mittalaitteena kalliimpi kuin kamera. Lennokilla ei pystytä lentämään kovalla tuulella sen keveyden takia tai pakasella niiden ominaisuuksien takia. Lumi- ja vesisade haittaavat mittauksia ja vaikeuttavat aineiston käsittelyä. Yleensä lennokokuvauksia ja -mittauksia tehdään vain sulanmaan aikana, koska lumi ja jää vääristävät tuloksia. Lentoaika on varsin lyhyt mittausten suorittamisen kannalta, mutta automatisoidun järjestel-

män ansiosta akun vaihtaminen sujuu helposti. Pysyvien tukipisteiden ja signaalien rakentaminen louhosalueelle on tässä vaiheessa hankalaa, koska louhos muuttuu. Tilapäinen tukipisteverkkokin toimii, mutta tarkkuus kärsii.

## 4.5 Tutka

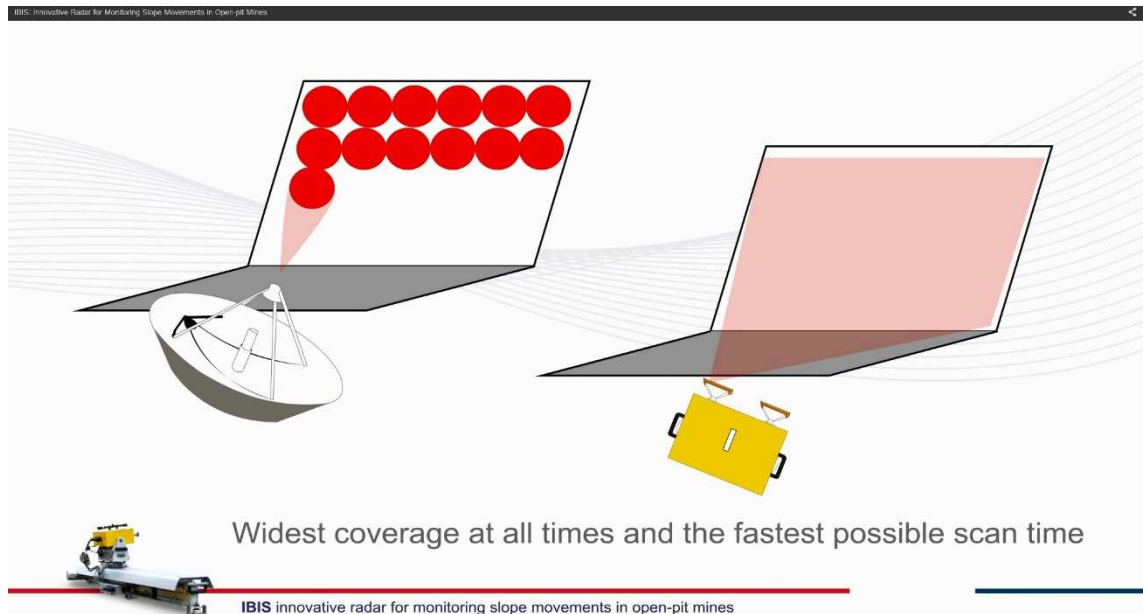
### 4.5.1 Yleiskuvaus

Tutkajärjestelmät yleistyvät kovaa vauhtia suurilla ja moderneilla avolouhoksilla ympäri maailmaa. Avolouhoksilla käytettävien tutkalaitteiden tekniikat voidaan jakaa kahteen luokkaan, todellisen apertuurin tekniikkaan (real aperture radar, RAR) ja synteettisen apertuurin tekniikkaan (synthetic aperture radar, SAR). Näitä tekniikoita käyttäviä tutkajärjestelmiä on kehitetty avolouhosseinämien seurantaan. (Suikkanen 2015.)

Suuren laskennallisen läpimitan tutkassa (synthetic aperture radar, SAR) on liikkuvat antennit. Toinen antenni lähettää elektromagneettisia pulsseja ja toinen antenni ottaa vastaan pulssien sirontaa eli kimmokkeita. SAR tutkat mittaavat takaisin siroavan säteilyn amplitudia ja vaihetta joiden avulla pystyvät peräkkäisiä tutkauksia vertaamalla tunnistamaan jopa 0,1 millimetrin muutoksia seinämän ja tutkalaitteen etäisyydessä. IDS:n IBIS-tutkissa antennit liikkuvat kiskolla sivuttain ja tällä liikkeellä pienet antennit saadaan vastaamaan isoa synteettistä antennia. Liikkeen avulla tutka saadaan kattamaan paljon laajempi alue seinämästä (Kuvio 13). IDS:n IBIS-tutkia on saatavilla niin kiinteästi asennettavina kuin trailerin päälle rakennettuina mobiiliversioina. (Pieraccini 2013, 1–2; IDS-IBIS 2014; Suikkanen 2015.)

Lautastutkassa (real aperture radar, RAR) on lähetinantenni ja vastaanotinlautanen. Lautastutkassa lähetinantenni lähettää elektromagneettisia pulsseja ja vastaanotinlautanen vastaanottaa pulssien sirontaa. Lautastutkalla ei voida tutkata koko seinämää kerrallaan, vaan se suoritetaan usealla peräkkäisellä tutkauksella. Järjestelmä lähettää pulsseja kohdennetulle alueelle, kun pulssit on saatu takaisin, kääntyy lautanen uuteen asentoon ja suorittaa toiminnot uudelleen (Kuvio 13). Koko seinämän tutkaaminen kestää kauemmin kuin SAR- tutkalla, mutta

tutkalaitteet ovat kevyempiä kuin SAR-tutkat. Tuotteita on markkinoilla siirrettävänä mobiiliversioina. Tähän menetelmään perustuvia tutkia valmistavat GroundProbe ja Reutech. (Pieraccini 2013, 1–2; GroundProbe 2015; Reutech 2015; Suikkanen 2015.)



Kuvio 13. Havainnekuva lautastutkan ja suuren laskennallisen läpimitan tutkan toiminnasta (IDS IBIS 2013)

#### 4.5.2 Menetelmän soveltuvuus

Osiassa pohditaan tutkajärjestelmän soveltuvuutta Kevitsan kaivosolosuhteisiin. Tutkalla suoritettava stabiliteettien valvonta on tarkinta ja nopeinta reaaliaikaisessa mittauksessa. Tutka seurannalla voidaan tarkkailla laajoja alueita louhosseinämistä tai kohdentaa se kriittisille alueille siirrettävillä tutkilla. Tuloksista saatavan datan määrästä ja tarkkuudesta huolimatta se vie vain vähän tilaa verrattuna laserkeilain aineistoihin ja datan siirtäminen onnistuu helposti wlan- tai mobiiliverkossa langattomasti. Sääolosuhteetkaan kuten pöly, sumu, lumi- tai vesisade eivät vaikuta mittausten suorittamiseen, eivätkä tuo datan käsittelyyn lisätyötä. Koko louhoksen valvonta onnistuu kerralla, koska useiden tutkien havainnot voidaan yhdistää järjestelmässä yhdeksi kokonaisuudeksi. Laitteet ovat myös pitkäikäisiä, kunhan niitä huolletaan säännöllisesti. Etenkin lautastutkia pitää huoltaa usein koska lautasen liikemekanismi vaatii paljon huoltoa, myös gene-

raattorit vaativat säännöllistä huoltoa. Vaikka laitteilla ei ole maahantuoja Suomessa, silti kaikki valmistajat tarjoavat eritasoisia vuosittaisia teknisiä tukipaketteja.

Siirrettävän mobiilitutkan käyttö on mahdollista, mutta sen siirtäminen on työlästä, koska laite on todella iso ja painava ja tarvitsee järkkymättömän ja tasaisen alustan. Laitteiston siirtoon tarvitaan maasturi tai muu iso auto. Tutkan siirron jälkeen mittausprojekti joudutaan aloittamaan uudelleen, ellei voida varmistaa että tutka saadaan tarkalleen samalle paikalle siirron jälkeen.

Lumi- ja vesisade eivät itsessään haittaa mittauksen suorittamista, kuitenkin seinämille kertyvät lumi ja jää saattavat aiheuttaa virheellisen hälytyksen, koska järjestelmä tulkitsee lumen kinostumisen tai jääputouksen kasvun liikkeenä seinämässä. Sateiden aikana myös datan tulkinta vaikeutuu koska virheellistä liikettä esiintyy ympäri louhosta. Kaikissa tutkalaitteissa tutkadataan voi aiheutua häiriöitä kun paikallinen ilmasto muuttuu nopeasti. Ilmanpaineen, lämpötilan ja kosteuden nopeasti tapahtuvat muutokset voivat aiheuttaa häiriöitä dataan.

Ainakin IDS on kehittänyt algoritmin korjaamaan säiden vaihtelusta aiheutuvia häiriöitä. Algoritmi ei kuitenkaan aina pysy mukana, jos muutokset ovat nopeita. Nämä säätilan vaihteluista, sekä lumen ja jään kertymisestä aiheutuvat häiriöt oppii kuitenkin tunnistamaan datasta helposti niiden laajuuden ja tavallisesti niissä esiintyvien vyöhykkeisten sateenkaarivärien takia. Ne vaikeuttavat kuitenkin suuresti tulkintaa, koska laajat sääliikkeet voivat peittää alleen todellisia liikkeitä. Tulosten tulkintavaikeuksia syntyessä voidaan käydä paikanpäällä katso-massa, sekä ottamassa valokuvia kyseisestä paikasta ja niiden perusteella tulkita onko hälytys aiheellinen.

Tutkajärjestelmä on seurantalaitteena kaikkein paras, mutta se on myös huomattavasti kalliimpi kuin muut järjestelmät. Alussa laitteiston säätäminen ja oikeiden hälytysrajojen etsiminen vievät aikaa. Ohjelmiston säätämisen jälkeen kaikki toimii kohtuullisen hyvin. Ohjelmistot on suunniteltu täysin automaattiseksi seurantajärjestelmäksi ja ne ovat muokattavissa käyttötarkoitusta vastaavaksi.



#### 4.5.3 IDS IBIS-Tutka

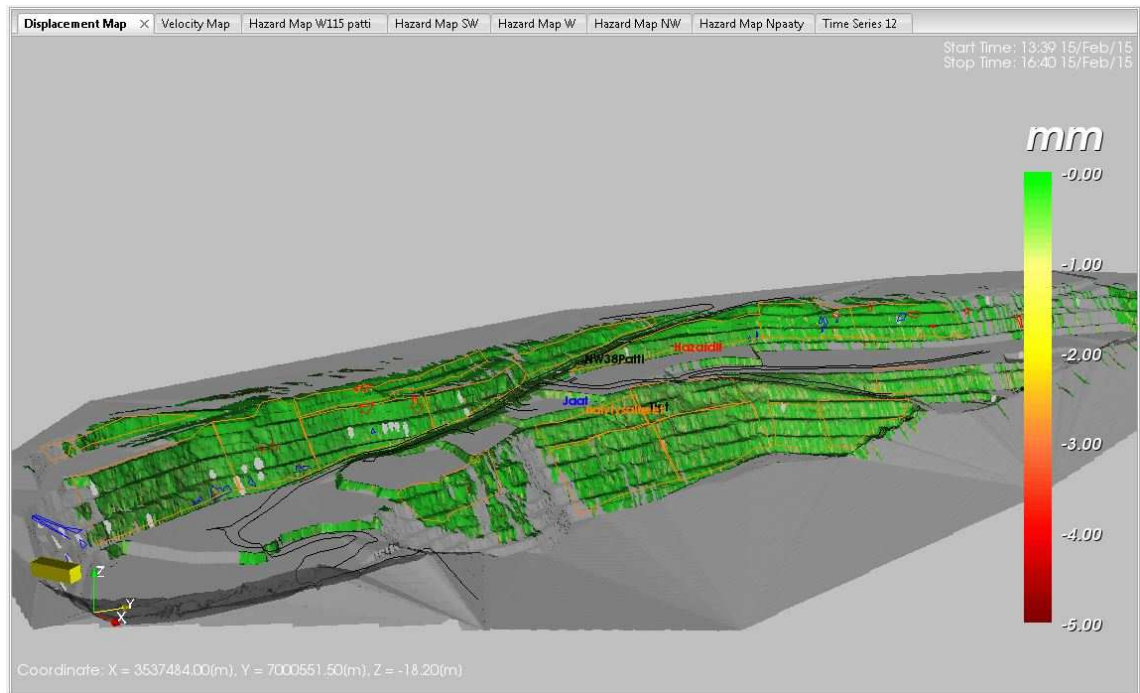
Siilinjärven Yara Oy:n kaivoksella on käytössä kaksi IDS:n valmistamaa IBIS-tutkaa. Järjestelmään kuuluu kiinteästi louhoksen kaakkoiskulmaan asennettu IBIS-FM -tutka, joka valvoo louhoksen länsiseinämää ja siirrettävä IBIS-FMT -tutka. Molemmat tutkalaitteet lähettävät dataa sisäisen 3G verkon kautta kaivoskonttorilla sijaitseviin tietokoneisiin, jotka suorittavat valvontaa. IBIS-FMT -mobiilitutkaa käytetään valvomaan kriittisiä työskentelyalueita esim. rakoporausta, panostusta ja rusnausta. (Törmänen 2014, 17–18; Suikkanen 2015.)

IBIS-FM -tutka on asennettu kiinteästi lämmitettyyn konttiin, joka sijaitsee louhoksen yläreunalla. Tutkan sensorit toimivat vielä -20 asteen lämpötilassa, mutta kontin lämmityksellä varmistetaan, ettei lämpötila pääse laskemaan sen alapuolelle. Kesäisin laitteen tarvitsema virta saadaan kontin katolle sijoitetusta aurinkopaneelistä ja talvisin verkkovirrasta. Tutka on sijoitettu konttiin niin, että se pääsee liikkumaan kahden senttimetrin etäisyydellä Gore-Tex -kalvosta, joka erottaa tutkan ja ulkoilman. Gore-Tex -kalvo toimii tavallaan ikkunana. Lumi ja jää eivät tartu yleensä kalvon pintaan, koska se on liukas, jos kalvon pintaan kuitenkin kertyy lunta tai jäätä ne aiheuttavat mittaushäiriöitä ja kalvo täytyy puhdistaa. Kesäisin kalvot suojaavat tutkalaitteita sateelta ja pölyltä. Sulaan aikaan kalvolla helmeilevät vesipisarot ovat suurempi haitta kuin lumi ja jää, koska ne aiheuttavat dataan vääristymää. Kontissa on tietokone, joka ohjaa tutkaa, valvoo sen toimintaa ja lähettää kahden minuutin välein tehtyjen tutkauksien datan langattoman verkon kautta kaivoskonttorilla sijaitsevalle tietokoneelle. (Suikkanen 2015.)

Louhoksen seinämäpinnat on rajattu valvontaohjelmassa erillisiin lohkoihin. Seinämän ollessa liikkumaton se näkyy kuvassa vihreänä. Kun liikettä havaitaan järjestelmään säädettyjen rajojen ylittävän määrän ohjelmisto hälyttää ja näyttää liikkuvan alueen eri värillä. Lohkojako on tehty liikkeen paikantamisen helpottamiseksi. Järjestelmällä voidaan verrata uutta tutkausta, jopa useita kuukausia vanhoihin datoihin ja näin voidaan seurata seinämien liikkeitä pitkällä aikavälillä. Vertailunäkymässä on näkyvillä muunneltavissa oleva väripalkki, joka kuvaa seinämässä tapahtuvien liikkeiden suuntaa ja suuruutta (Kuvio 14). Yleensä vihreällä

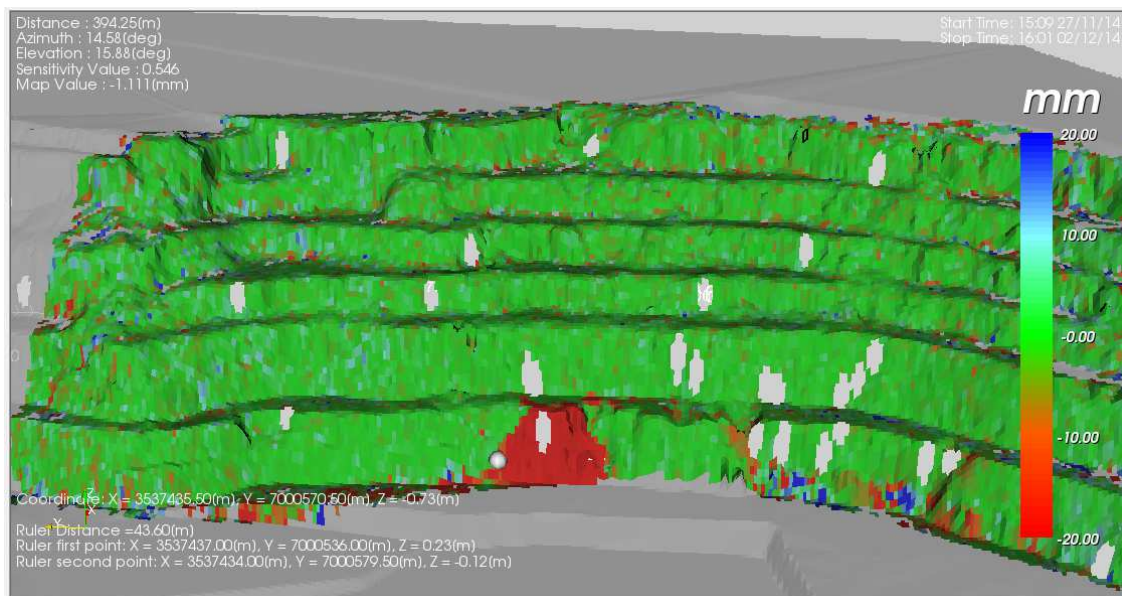
värillä kuvataan seinämän liikkumattomuutta ja siitä eteenpäin liukuvärjäys kertoo seinämien liikkeet tutkaa kohti tai pois päin. (Suikkanen 2015.)

IBIS-FMT -siirrettävä mobiilitutka toimii samalla periaatteella kuin IBIS-FM -tutka, mutta se on asennettu liikutettavalle alustalle, joka on katettu. Mobiilitutkan lämmitys on toteutettu webastolla. IBIS-FMT -tutkasta löytyvät samat osat ja ominaisuudet kuin IBIS-FM -tutkasta. (Suikkanen 2015.)



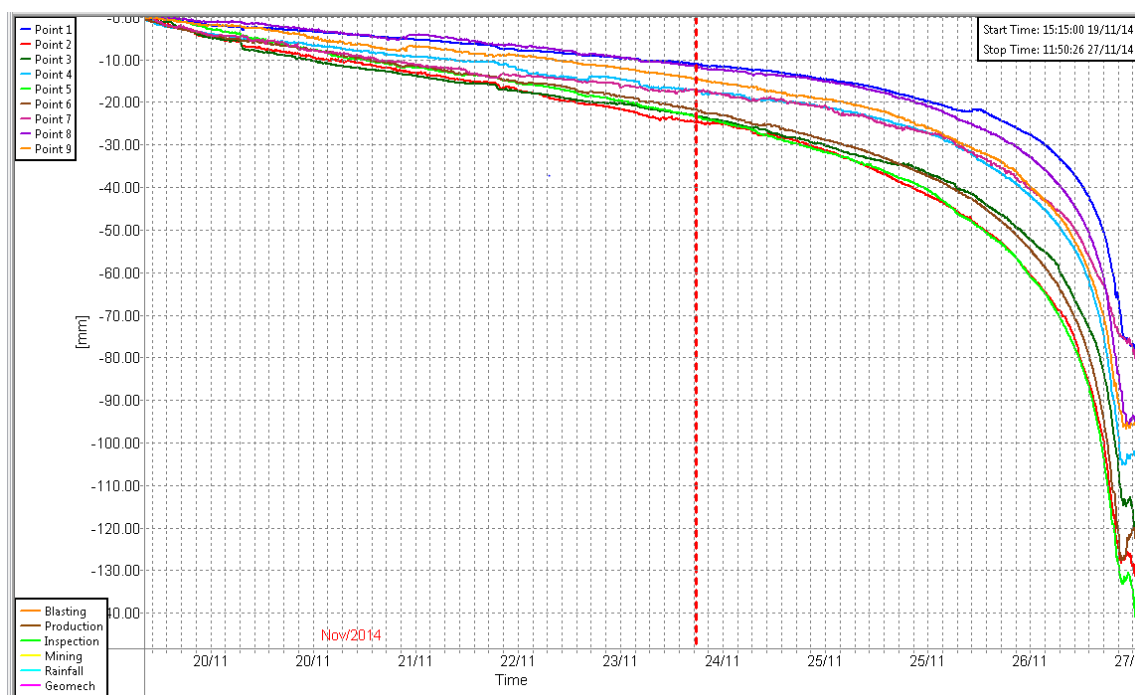
Kuvio 14. IBIS-FM -tutkan vertausnäkö Siilinjärven kaivoksen länsiseinämästä (Suikkanen 2015)

Yleensä IBIS-FMT -tutka on kohdistettu tutkaamaan eri seinämää kuin kiinteä tutka, jotta mahdollisimman suuri osa louhoksesta saadaan katettua. Kun kiinteällä IBIS-FM -tutkalla tai jollain muulla menetelmällä havaitaan liikettä, voidaan siirrettävä IBIS-FMT -tutka tarvittaessa kohdistaa seuraamaan kyseistä seinämää paremmalla mittauskulmalla. Paras tulos saadaan kun tutka mittaa seinämää kohtisuoraan ja yläviistoon (Kuvio 15). (Suikkanen 2015.)



Kuvio 15. Yläpuolella Siilinjärven mobiilitutkalla havaittu sortuma, alapuolella ennen ja jälkeen kuvat samasta sortumasta (Suikkanen 2015)

Yleensä seinämän alkaessa antamaan periksi, eli sortuman lähestyessä seinämässä havaitaan ensin pientä ja hidasta liikettä. Tämän voivat aloittaa esimerkiksi kovat vesisateet tai louhinnan aiheuttamat värinät kallioperässä. Sateiden loputtua ja seinämän kuivuttua, liike voi hidastua, tai jopa loppua kokonaan. Seinämää voidaan myös yrittää kuivattaa poraamalla sinne kuivatusreikiä. Kuivatusreikienkin porauksen jälkeen liike voi kiihtyä tai käynnistyä uudelleen esimerkiksi uusien sateiden tai räjäytysten seurauksena. Näin tapahtui esimerkiksi Siilinjärven kaivoksella. Räjäytyksen jälkeen epästabiili lohko alkoi tasaisesti pullistua. Liike alkoi kiihtymään ja sortuma tapahtui. Tutka hälytti sortumasta 17 tuntia ennen kuin se tapahtui ja siihen ehdittiin varautua. Jo muutamaa päivää aiemmin oli selvää että sortuma tulee tapahtumaan. Kokonaisliike sortuneessa lohkoissa oli kolmen viikon aikana 13 – 41 cm (Kuvio 16). (Suikkanen 2015.)



Kuvio 16. Liikekäyrä Siilinjärven louhoksen seinämän sortumasta ajalta 20.11.2014–27.11. 2014 (Suikkanen 2015)

## 4.6 Kallioon asennettavat kiinteät mittalaitteet

### 4.6.1 Yleiskuvaus

Kallioon asennettavilla kiinteillä mittalaitteilla valvotaan kallion yksittäisin lohka-reen, lohkon tai raon liikkeitä. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi ekstensometri ja inklinometri. Laitteet asennetaan kiinteästi mittauspaikkaan ja tieto liikkeestä saadaan tarkasti ja nopeasti. (Brusila 2015)

Inklinometri on maaperän liikkeiden valvontaan yleisesti käytetty mittauslaite. Inklinometri on tarkka kulma-anturi, joka kertoo mittalaitteen asennon suhteessa maan vetovoimaan. Mittaukset tehdään maahan asennetusta inklinometripuksesta. Putki voidaan painaa maahan tai asentaa tarkoitusta varten tehtyyn porareikään. Putki asennetaan kovaan pohjaan saakka. Tämä on välttämätöntä, sillä mittaukset tehdään nimenomaan putken alaosan suhteen. Mittauksessa inklinometri lasketaan putken ja mittauksulokset luetaan tietyiltä syvyyksiltä. Mit-

tauksia toistamalla saadaan tietoa putken ja siten maaperän liikkeistä eri syvyyksillä. Käsin tehtävät mittaukset ovat varsin luotettavia, mutta työläitä. (Luomala 2010, 12.)

Merkittävä kehitysaskel inklinometrihistoriassa on ollut inklinometriä automatisointi. On olemassa sovelluksia, joissa perinteinen inklinometri on automatisoitu rakentamalla mekaniikka mittalaitteen liikuttamiseksi putkessa. Nykyaikaisissa inklinometreissa käytetään useita antureita samanaikaisesti. Inklinometriä käytetään tyypillisesti sortuman liukuvyöhykkeen määrittäminen. (Luomala 2010, 12.)

Ekstensometrillä mitataan kahden pisteen välistä etäisyyden muutosta. Ekstensometrit asennetaan kallioreikään ja niiden ankkurit liikkuvat referenssipäähän nähden kallion liikkeiden mukana. Nykyään tämä liike mitataan automaattisesti. Tieto liikkeistä kalliossa saadaan nopeasti ja täsmällisesti. Tämä voidaan myös ohjelmoida antamaan hälytys välittömästi, mikäli mitatut liikkeet ylittävät sille asetetut rajat. Tietoja voidaan tarkastella graafisesti halutulla tavalla. Mittausjärjestelmän huoltotarve on erittäin vähäinen, eikä kaapeleita tarvita, koska laite toimii akulla ja tiedonsiirtoon käytetään GSM-verkkoa ja tarvittaessa myös kalliotiloihin sijoitettavia radiolinkkejä. Näin ennakoiviin toimenpiteisiin voidaan ryhtyä nopeasti ennen kuin ongelmat kehittyvät vakaviksi. (FinMeas, 2014.)

#### 4.6.2 Menetelmän soveltuvuus

Kiinteiden mittalaitteiden soveltuvuutta pohditaan osiossa Kevitsan kaivosolosuhteisiin. Menetelmä on kokonaisuudessaan kohtalaisen halpa. Laitteet toimivat ääriolosuhteissakin, eivätkä lumi ja jää haittaa mittausta. Laitteisto on myös helpohuoltainen. Menetelmällä ei pystytä valvomaan laajoja alueita seinämällä vaan se on paikallisten liikkeiden mittaukseen.

Kallion liikkeiden automaattinen valvonta ekstensometreillä on perinteisiä valvontamenetelmiä taloudellisempi ja varmempi. Kun laite on asennettu mittauspisteeseen, käyttökustannukset ovat alhaiset. Paikalla ei tarvitse käydä, vaan tiedot

näkyvät Internet-palvelussa ja hälytykset toimivat määritellyllä tavalla. Esimerkiksi suomalainen FinMeas Oy tarjoaa tällaisia mittauspalveluja laitteineen ja tukineen.

## 5 STABILITEETTIEN VALVONTA KEVITSAN AVOLOUHOKSELLA

### 5.1 Mittauslaitteisto

Mittaukset toteutettiin Kevitsan omilla laitteilla. Kevitsassa on käytössä Leican GNSS -satelliittipaikannusjärjestelmä ja Rieglin laserskeilain (Kuvio 17). Leica Viva GS 15 GNSS -järjestelmää käytettiin laserkeilaimen paikanmäärittämisessä ja keilaukset suoritettiin Rieglin VZ-2000-laserkeilaimella. Lisäksi kaivoksella on käytössä Leican robottitakymetri, mutta sitä emme tarvinneet työn suorittamiseen.



Kuvio 17. Riegl VZ-2000 -laserkeilain ja Leica Viva GS 15 -vastaanotin asennettuna kolmijalalle

Tässä työssä käytetty Leica Viva GS 15 GNSS -satelliittipaikannusjärjestelmä on tarkkuudeltaan mittausvaatimukset täyttävä. Laittevalmistajan lupaamat tarkkuudet RTK-mittaukselle ovat sijaintiedolle kahdeksan millimetriä ja korkeustiedolle 15 millimetriä, mutta nämä tarkkuudet vaativat hyvät yhteydet ja paljon havaintoja yhdeltä pisteeltä. Kevitsassa on Leican tukiasema ja yhteydet toimivat ainakin vielä hyvin, mutta louhoksen syventyessä voi tulla häiriöitä yhteyksissä. (Leica Geosystems Oy 2012, 2.)

Riegl VZ-2000 -laserkeilain on nopeimpia ja tekniikaltaan kehittyneimpiä pulssi-maalaserkeilaimia. Mittausetäisyys voi olla muutamista metreistä jopa kahteen kilometriin. Mittausnopeuksia on useita ja niiden avulla voidaan säätää mahdollisimman tarkka mittaustulos etäisyydestä riippuen. Laitteen mittausnopeus on parhaimmillaan 400 000 lähtevää pulssia sekunnissa tai 240 linjaa sekunnissa. Laserin pulssintoistotaajuus on melkein megahertsi eli 950 kilohertsiä. Pitemmillä etäisyyksillä joudutaan kuitenkin mittausnopeutta laskemaan tarkemman tuloksen saamiseksi. Keilain voidaan myös kohdistaa skannaamaan vain haluttu alue. Pistepilven tiheys ja tarkkuus riippuu siis käytetystä nopeudesta ja mittausetäisyydestä. Laittevalmistajan lupaama tarkkuus pisteen sijainnille on kahdeksan millimetriä. Pistepilvessä olevien pisteiden väli voi olla jopa kaksi millimetriä, mutta se vaatii useamman keilauksen. (Nordic Geocenter 2014; Riegl 2014, 6.)

## 5.2 Laserkeilaus

Kevitsan avolouhoksella seinämien stabiliteettien valvontamenetelmää kehitettäessä valittiin testikohteeksi seinämä, joka tämän hetkisten suunnitelmien perusteella pysyy samanlaisena mahdollisimman pitkään. Aluksi laserkeilaimelle valittiin kolme eri asemapaikkaa, joista olisi mahdollisimman hyvä ja esteetön näkyvyys tutkittavalle seinämälle. Asemapaikat sijaitsivat niin, että niiltä saataisiin tutkittava seinämä keilattua mahdollisimman eri kulmista. Keilauspaikkojen valinnan jälkeen lähdettiin suorittamaan mittaukset. Keilain pystytettiin tukevasti asennettun ja karkeasti tasatun kolmijalan päälle. Kun keilain käynnistettiin, se tasasi itsensä automaattisesti, jonka jälkeen sen sijainti mitattiin Leican Viva GS 15



GNSS -paikantimella, louhokselle asennettua omaa tukiasemaa hyväksi käyttäen. Havaintoja otettiin samalta asemalta useita kymmeniä, joista laite laski havaintojen keskiarvon perusteella sijaintinsa.

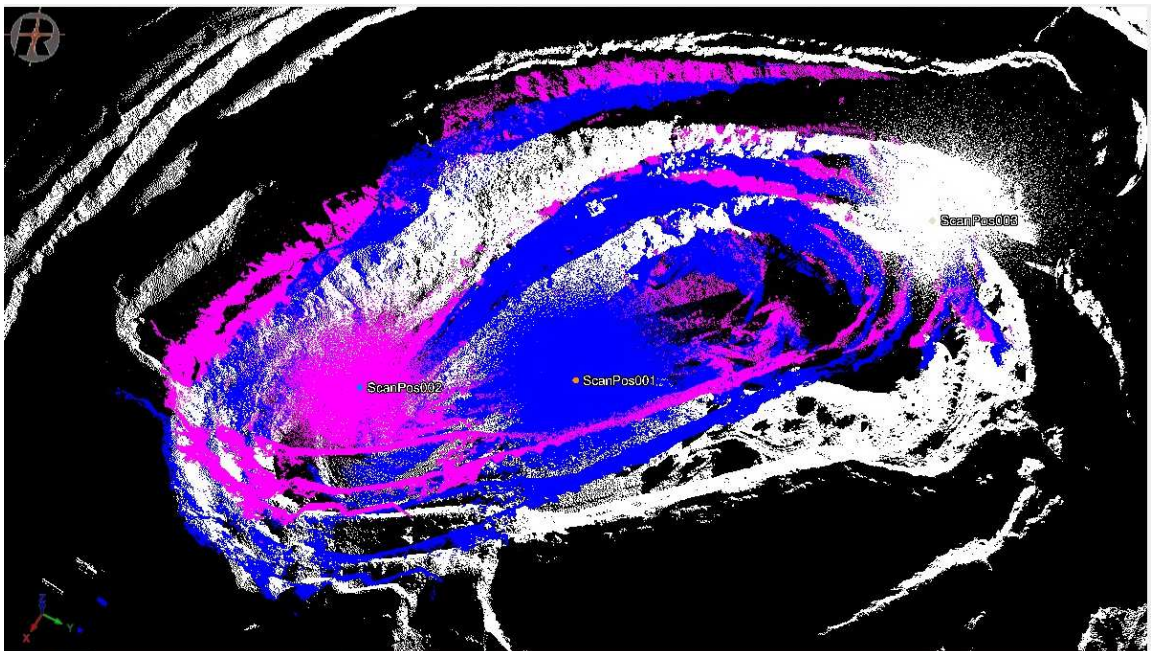
Keilaimen sijaintitiedon ollessa tallessa, voitiin aloittaa louhoksen yleisskannaus. Keilainta käytimme älypuhelimella etänä keilaimen muodostaman WiFi-yhteyden ja puhelimen internet-selaimen kautta. Puhelimen selaimella päästiin helposti keilaimen asetuksiin, joista valittiin mm. mittaustarkkuus, -nopeus ja aluerajaus hienoskannausta varten. Louhos skannataan ensin panorama 60 -toimintoa käyttäen 100 kilohertsin tai 300 kilohertsin nopeudella. Tämän jälkeen saadusta yleisskannauksesta rajattiin haluttu seinämä ja suoritettiin siitä hienoskannaus. Tämä toteutettiin muuttamalla mittaustarkkuutta paremmaksi, jolloin mittausaika piteni ja seinämästä saatiin tarkempaa pistepilveä. Seinämästä saadun pistepilven on oltava mahdollisimman tarkka, jotta seinämästä saadaan muodostettua tarkka malli. Laserskannerin yhteyteen voidaan myös liittää kamera, joka ottaa kuvat tutkittavasta seinämästä. Tämän ansiosta, seinämien vertausvaiheessa tulokintavaikeuksia syntyessä, ei tarvitse enää lähteä louhokseen tutkimaan epäselvyyksiä vaan ne voidaan katsoa kuvilta.

Ensimmäisen skannausaseman valmistuttua keilain siirrettiin uuteen paikkaan ja suoritettiin sama toiminto uudelleen. Tämä toistettiin yhteensä kolme kertaa, jo aikaisemmin määritellyiltä paikoilta. Näin ollen tutkittavasta seinämästä saatiin tarkkaa pistepilveä monesta eri suunnasta. Skannauspaikat merkattiin louhokseen paaluilla, jotta keilaukset voidaan seuraavilla kerroilla tehdä mahdollisimman tarkasti samoilta paikoilta. Tämä on kuitenkin alkuvaiheessa ongelmallista, koska louhos muuttuu jatkuvasti ja paikat, joissa keilainta on ennen käytetty, kaatoavat.

### 5.3 Aineistojen käsittely

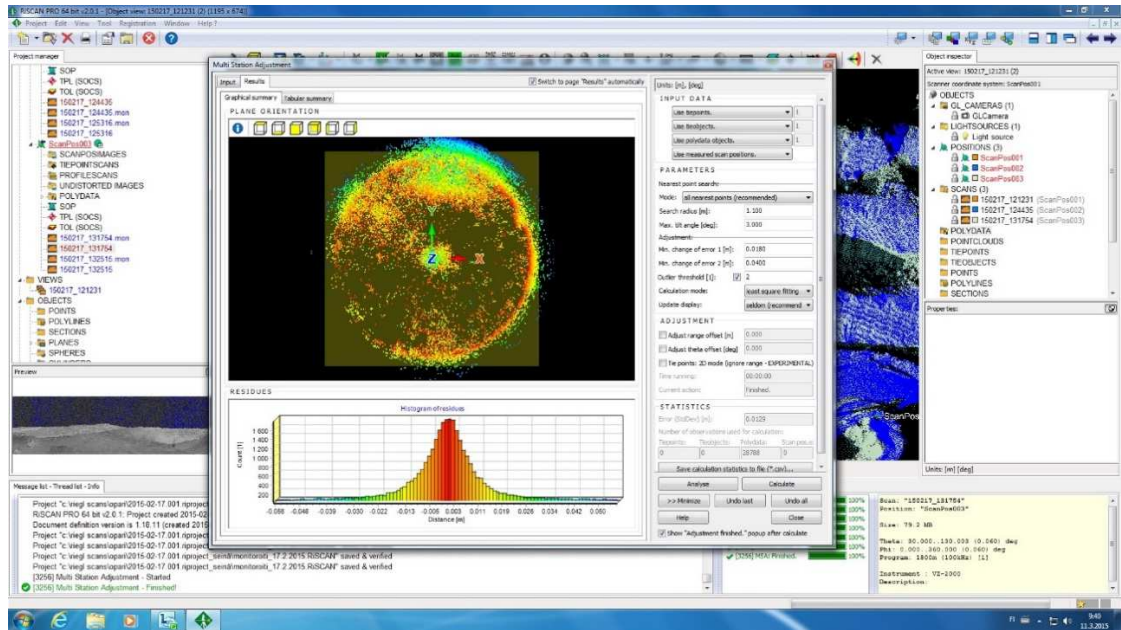
Keilausten valmistuttua aineistot siirrettiin tietokoneelle. Tiedostoista täytyi editoida ylimääräiset pisteet pois sekä saada aineistot koordinaatistoon. Editoinnissa käytettiin Rieglin valmistamaa RiSCAN PRO -ohjelmistoa. Aluksi pistepilvet

avattiin yksi kerrallaan, jotta tiedostojen editointi helpottuisi. Tiedostoja editoitaessa aineistosta poistettiin ylimääräiset pisteet. Ylimääräiset pisteet voivat aiheutua esimerkiksi lumi-, vesisateesta tai pölystä. Hajapisteitä poistettiin työkalulla, jolla pystyttiin poimimaan pisteitä amplitudin, heijastus- sekä hajonta-arvojen avulla. Kaikkia hajapisteitä ei kuitenkaan saatu näillä toiminnoilla poistettua, joten ne täytyi poistaa valintatyökalua ja piilotusfilttereitä hyväksi käyttäen manuaalisesti. Tämä on toisinaan paljon aikaa vievää, koska lumisade tuottaa aineistoon paljon ylimääräisiä pisteitä (Kuvio 18).



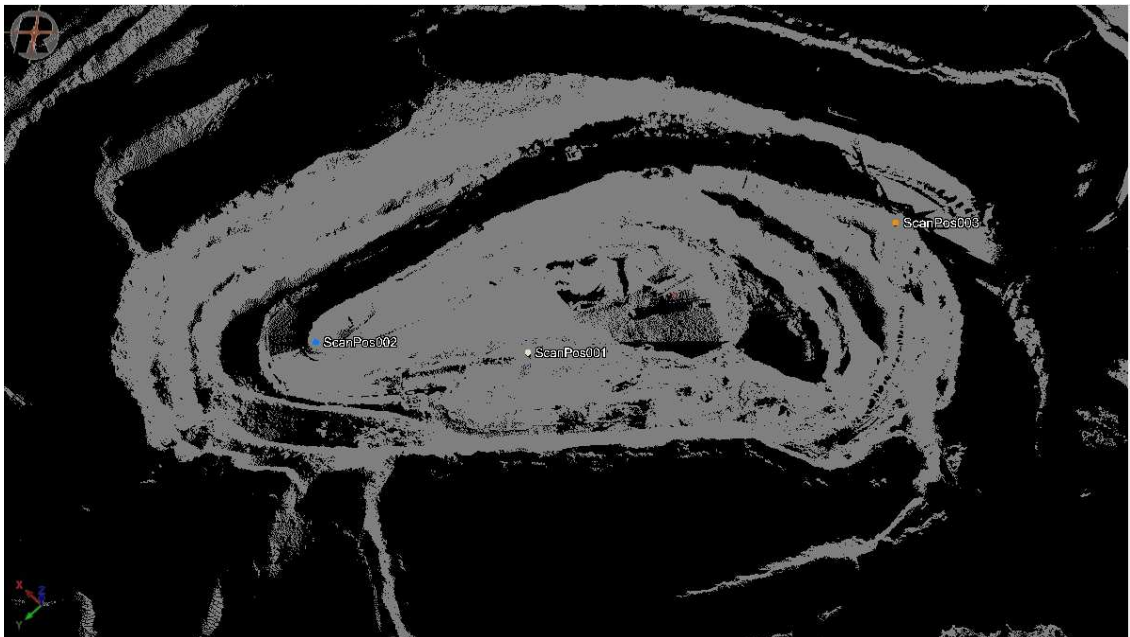
Kuvio 18. Kuvassa pistepilvet ennen editointia

Aineistojen hajapisteiden poiston jälkeen, keilaimen sijaintitiedot tuodaan txt. tiedostoina ohjelmistoon. Tässä vaiheessa pistepilvet eivät ole vielä oikeissa asennoissa, mutta ne saadaan kuitenkin samalle näkymälle. Seuraavaksi jokaisesta pistepilvestä muodostetaan polydata ohjelman työkalulla. Työkalulla asetetaan kuutiolle raja-arvot ja minimi pistemäärä, joka kuution sisällä täytyy olla. Ohjelma laskee polydatan määrän pistepilvistä ja näiden tietojen avulla pistepilvet yhdistetään yhdeksi kokonaisuudeksi. Polydata sisältää tiedot pinnoista. (Kuvio 19).



Kuvio 19. Pistepilvienyhdistys-työkalun näkymä yhdistyksen loppuvaiheessa

Aluksi kaikkien keilausasemien sijaintitiedot lukittiin ja polydatan määrää sekä jäännösvirhettä seuraamalla alettiin säätämään pintoja kohdilleen. Myöhemmin voitiin vapauttaa keilausasemien sijaintitiedot yhtä lukuun ottamatta. Lukittuna pidettiin sen keilausaseman sijainti, joka on ylimpänä, koska siitä on olemassa tarkin sijaintitieto. Vapautuksen jälkeen saatiin yhdistettyä pistepilvet mahdollisimman tarkasti (Kuvio 20).



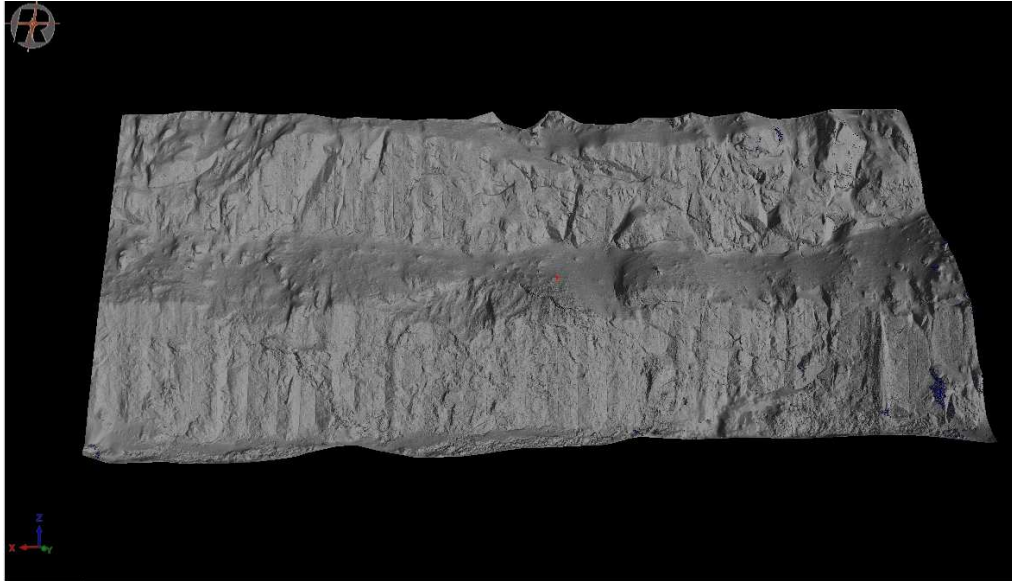
Kuvio 20. Kuvassa pistepilvet yhdistyksen jälkeen

Editoinnin ja yhdistyksen jälkeen rajattiin pistepilvestä seinämä, jonka liikkeitä haluttiin tarkastella. Tämä tehtiin valintatyökalun avulla. Rajatusta pistepilvestä poistettiin seuraavaksi kaikki ylimääräiset hajapisteet, jotka voivat aiheuttaa virheitä pintaa muodostettaessa. Hajapisteet, joita ei editointivaiheessa huomata, sijaitsevat yleensä lähellä seinää. Seinämän etu- ja takapuolelle hajapisteitä voivat aiheuttaa pöly, lumi, jää ja vesi. Esimerkiksi jää voi aiheuttaa virheellisiä tuloksia, koska pulssit heijastuvat eritavalla jääpinnasta kuin kiviseinämästä (Kuvio 21).



Kuvio 21. Kuvassa jäädä aiheutuvia pulssien kimmokevirheitä seinämän takana

Hajapisteiden poiston jälkeen rajattu pistepilvi muodostettiin pinnaksi kolmiointityökalua ja seinämän taakse sijoitettua vertailupintaa hyväksi käyttäen. Lopputuloksena saatiin muodostettua tarkka 3D-malli tutkittavasta seinämästä (Kuvio 22). Eri päivinä suoritetuille keilauksille tehdään samat toimenpiteet kuten edellä kuvatussa.



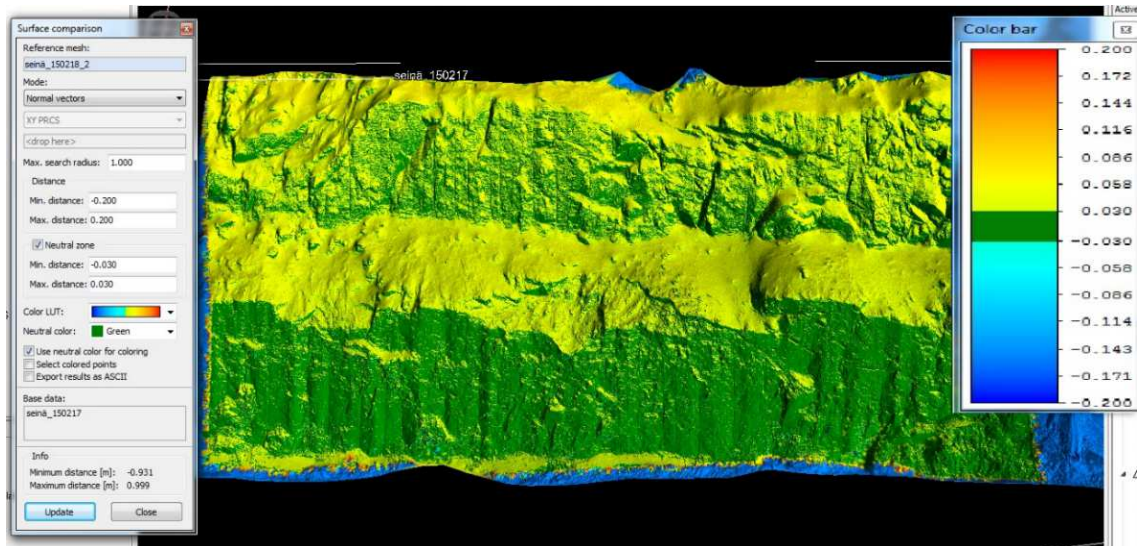
Kuvio 22. Kuva valmiista seinämäpinnasta

#### 5.4 Tulosten käsittely

Eri päivinä suoritettujen keilausten aineistoista muodostettuja pintoja vertailemalla saatiin tietoa seinämien mahdollisista liikkeistä. RiSCAN PRO -ohjelmassa on vertailutyökalu, jolla pystyttiin vertaamaan pintoja toisiinsa. Vertailun lopputuloksena saatiin värjätty kuva, jossa värit kertovat mahdollisten liikkeiden suuruudesta.

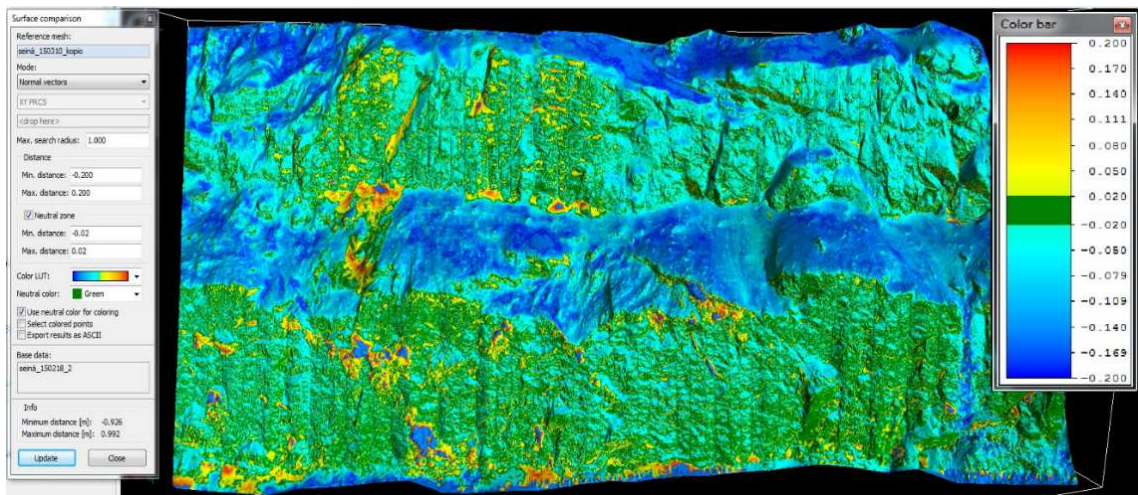
Kuvassa oleva vihreä tarkoittaa sitä, että seinämä on pysynyt paikallaan. Väripalkissa oleva liukuväritys kelta-puna alueella kuvaa liikettä skanneria kohti. Sininen liukuvärjäys taas kuvaa liikettä skannerista poispäin. Kuvassa näkyvä keltainen väri johtuu siitä, että keilausten välissä on seinämille kertynyt lunta. (Kuvio 23)

Talvisin lumen ja jään kertyminen ja sulaminen seinämällä aiheuttavat mittaustuloksissa muutoksia molempiin suuntiin, koska pulssit eivät läpäise näitä esteitä. Talvisin keilausten yhteydessä kannattaa ottaa seinämästä kuvia, niin tulosten tulkintavaiheessa vaikeuksien syntyessä voidaan kuvasta katsoa seinämän lumi ja jää tilanteen muutoksia. Tästä voidaan päätellä onko liike tapahtunut kalliossa vai sen pinnalla olevassa lumessa.



Kuvio 23. Kuva kahden pinnan liikkeiden vertailusta 17.2.2015–18.2.2015

Seinämille voi räjäytysten yhteydessä jäädä irtosoraa ja kiviä, jotka saattavat jään sulaessa rapista seinämiltä pois ja näkyvät vertailuvaiheessa liikkeenä, myös tässä tilanteessa valokuvista on apua. Alla olevassa kuvassa vihreä väri kertoo kallioseinämän paikallaan pysymistä ja sininen väri kuvaa lumen ja jään sulamista. Keltainen ja punainen väri kuvaavat irtosoran ja -jään liikettä. Selitykset näille liikkeille saatiin vertailemalla keilauspäivinä otettuja kuvia toisiinsa. (Kuvio 24)



Kuvio 24. Kuva kahden pinnan liikkeiden vertailusta 18.2.2015–10.3.2015

## 6 POHDINTA

### 6.1 Työn tulokset

Käytännön työt ja mittaukset onnistuivat hyvin, vaikka kumpikaan ei ollut ennen käyttämäämme laitteeseen tutustunut. Pienen perehdytyksen ja parin käyttökeran jälkeen laitteen käyttö alkoi onnistua jo hyvin. Suunnitellusta aikataulusta myöhästyimme jonkin verran, koska mittaus- ja tulostenkäsittelypäiviä kaivoksella kertyi enemmän, mitä olimme suunnitelleet. Käytännön työn tuloksena saimme varmistuksen siitä että laserkeilausmenetelmä soveltuu ainakin tässä vaiheessa hyvin louhoksen seinämien stabiliteettien valvontaan Kevitsassa.

Työn teoriaosuuskin sujui hyvin, vaikka se veikin kohtalaisen paljon aikaa, koska tiedon löytäminen oli haastavaa. Kattavien kirjallisten-, digitaalisten- ja haastattelulähteiden ansiosta saimme teoriaosuudesta laajan ja luotettavan. Teoriaosuudessa on tietoa Kevitsan kaivoksesta, avolouhoksen suunnittelusta, avolouhos sortumista ja stabiliteettien valvontamenetelmistä.

Oman oppimisen kannalta työ oli hyvä ja tarpeeksi haastava. Siinä opittiin paljon uutta laserkeilaimen käytöstä ja aineistojen käsittelystä. Opimme myös yleisesti avolouhinnasta ja kalliomekaniikasta, koska kumpikaan meistä ei ollut aikaisemmin tutustunut aiheeseen tarkemmin. Työn teoriaosaa kirjoitettaessa opimme, että eri mittausmenetelmiä voidaan soveltaa monipuolisesti stabiliteettien valvontaan.

### 6.2 Työn tarkkuus ja laatutavoitteet

Maanmittausalalla ja kaivosolosuhteissa virheiden arviointi ja hallinta ovat välttämättömiä mittaustavan valinnan, mittauksen tarkoituksenmukaisen suorittamisen ja laadunvalvonnan kannalta. Mittaustapahtumassa syntyneet virheet voidaan jaotella kolmeen eri luokkaan, systemaattiseen-, karkeaan- ja satunnaiseen virheeseen. Systemaattinen virhe on aina yhteydessä mittaushavaintoon tai tiettyyn osaan mittausta ja se esiintyy aina samansuuruisena. Karkeat virheet johtuvat käyttäjän erehdyksistä, viallisista kojeista tai poikkeavista mittaolosuhteista.

Satunnaisille virheille ei ole erityistä syytä, esimerkiksi mittaustulokset voivat vaihdella vaikka olosuhteet eivät muuttuisikaan. (Laurila 2012, 35.)

Tässä työssä virheet voivat aiheutua sääolosuhteista, mittalaitteiden tarkkuudesta, käyttäjän virheestä tai pistepilvien yhdistämisestä ja editoinnista. Avolouhoksen sääolosuhteet ovat ankarat ja vaihtelevat. Sääolosuhteet voivat aiheuttaa virheitä mittaukseen, vaikeuttaa tai jopa estää sen kokonaan sekä tuovat lisätyötä aineiston editointiin. Mittalaitteiden tarkkuudesta johtuvaan virheeseen ei voida vaikuttaa. Käyttäjän inhimillinen virhe voi aiheuttaa karkeita virheitä tuloksiin. Mittauksia suoritettaessa ja aineistoa editoitaessa on oltava tarkkana, jotta karkeilta virheiltä vältyttäisiin.

Tässä työssä käytetyllä Leican Viva GS15 -satelliittipaikantimella päästään tasotarkkuudessa parhaimmillaan kahdeksaan millimetriin ja korkeustarkkuudessa 15 millimetriin, mutta käytännössä tarkkuus on hieman heikompi. Riegl VZ-2000 -laserkeilaimelle luvattu pisteiden tarkkuus on kahdeksan millimetriä. Näin ollen laiteyhdistelmän tarkkuus niiden ominaisuuksien puolesta on suurimmillaan  $\pm$  kaksi senttimetriä. Näillä tarkkuuksilla eri päivinä samoilta paikoilta suoritettut mitaukset voivat poiketa toisistaan jopa neljä senttimetriä. Tämän takia tällä menetelmällä voidaan alkaa louhoksen seinämistä seuraamaan vain senttimetritason liikkeitä. Louhinnan tässä vaiheessa se riittää seinämien valvontaan.

Laserkeilaimella stabiliteettien valvontaa suoritettaessa tutkittavasta seinämätä saadun pistepilven tulisi olla mahdollisimman tarkka, jotta pienimmätkin seinämän muodot saadaan mukaan seurantaan. Pistepilven ollessa liian harva seinämästä tehty malli muodostuu väärin ja vertailu vaiheessa se voi näkyä virheellisesti pieninä liikkeinä seinämällä.

### 6.3 Keilausmenetelmän käyttö jatkossa

Kaivoksen syventyessä mittausten tarpeellisuus kasvaa, koska riskit sortumiin kasvavat. Yleensä seinämissä havaitaan liikettä jo viikkoja ennen kuin ne lopullisesti sortuvat, joten alussa riittää, kun keilauksia toistetaan säännöllisesti esimer-



kiksi kaksi kertaa viikossa. Usein seinämissä tapahtuva liike on useita, jopa kymmeniä, senttimetrejä ennen kuin isompi sortuma tapahtuu ja nämä liikkeet havaitaan helposti keilainaineistosta. Liikettä havaittaessa keilauksia tulee suorittaa tiheämmällä aikavälillä, kuten kerran päivässä jotta mahdollisiin sortumiin ehditään varautua ajoissa. Seinämistä ei kannata alkaa seurata pieniä yksittäisiä liikkeitä, koska ne voivat johtua esimerkiksi pikkukivien tai irtosoran varisemisesta pois seinämältä. Liikkeisiin kannattaa kiinnittää huomiota vasta kun liikkeet tapahtuvat laajemmilla alueilla.

Uutta keilausta ei kannata vertailla ainoastaan edelliseen keilaukseen, koska siinä välissä seinämä ei välttämättä ole liikkunut kuin muutaman millimetrin ja näin pieniä liikkeitä ei keilainmenetelmällä havaita. Keilainmenetelmällä voidaan pienimmillään seurata yli senttimetrin liikkeitä. Keilauksia kannattaa siis vertailla myös vanhempaan aineistoon, jotta havaitaan kuinka paljon seinämä on liikkunut pitkällä aikavälillä. Menetelmällä voidaan seurata koko louhosta, mutta vertailua kannattaa kuitenkin tehdä vain kriittisistä seinämistä tai rajatusta alueesta louhoksesta, koska aineistot ovat niin isokokoisia.

Kesäisin laserkeilausmenetelmä on varmasti toimiva, koska seinämät ovat puhkaita. Talvisin seinämiin kertyvä lumi ja jää estävät osittain itse seinämien seurannan. Talvisin pienempiä sortumia ei kuitenkaan juuri tapahdu, koska seinämät ovat lujasti jäässä. Paikalliset pienemmät sortumariskit esiintyvät keväisin roudan ja jään sulaessa, kesäisin nopeiden lämpötilojen muutoksien yhteydessä sekä syksyisin kovien sateiden yhteydessä. Räjähdyksien yhteydessä voi kuitenkin aina tapahtua odottamattomia liikkeitä tai sortumia.

Tulevaisuudessa laserkeilaus mittausten luotettavuutta voidaan parantaa asentamalla pysyville seinämille kiinteitä koordinaateiltaan tunnettuja tähyksiä, sekä rakentaa kiinteitä koordinaateiltaan tunnettuja asemapisteitä laserkeilaimelle. Tämän ansiosta pistepilvien orientointi saadaan aina yhtä tarkaksi ja satelliittipainin voidaan irrottaa muihin tehtäviin. Kun kiinteät asemapisteen on rakennettu kunnolla, voidaan laserkeilainta käyttää aina samasta paikasta ja näin ollen mitaustarkkuuskin paranee kahdeksaan millimetriin, koska keilaimen sijainnissa ei

silloin synny virheitä. Tämä kuitenkin edellyttää, että asemapisteeet pysyvät aina paikoillaan ja niitä valvotaan säännöllisesti.

Kiinteät tunnetut asemapisteeet kannattaa tulevaisuudessa esimerkiksi rakentaa valamalla kallion päälle betonilaattoja, joihin keilain saadaan kiinnitettyä. Näin olen keilain saadaan aina asennettua samaan paikkaan. Tunnettu sijainti keilaimelle voidaan määrittää esimerkiksi staattista satelliittimittausta ja jälkilaskentaa käyttäen, tai takymetrillä jonomittausta käyttäen. Näillä menetelmillä tarkkuus on jo niin hyvä, että sijainti saadaan määritettyä tarkasti ja keilaukset saadaan toistettua mahdollisimman tarkasti samoilta pisteiltä.

Asemapisteeiden keskinäistä sijaintia tulee myös seurata tasaisin väliajoin esimerkiksi staattisella satelliittimittauksella, että voidaan luottaa sijainnin pysymiseen. Tähykset kannattaa sijoittaa niin, että niihin on esteetön näkyvyys mahdollisimman monesta paikasta ja niiden koordinaatit voidaan määrittää takymetrimittauksella. Tähysten täytyy kuitenkin olla oikean tyyppisiä, kuten prismatarroja. Lasi-prismat saattavat vahingoittaa keilainta, koska lasiprismasta heijastuva laserpulssi saattaa polttaa keilaimen vastaanottimen.

Tässä vaiheessa kiinteiden pisteiden rakentaminen kaivoksella on vaikeaa koska louhos muuttuu koko ajan. Kiinteät pisteet kannattaisi rakentaa paikkoihin, jotka tulevat pysymään mahdollisimman pitkään muuttumattomina ja niiltä olisi myös esteetön näkyvyys seinämille. Kiinteät pisteet kannattaa sijoittaa niin, että seinämät saadaan mitattua monesta eri suunnasta.

Kevitsassa ongelmia voi aiheuttaa mittauskaluston vähäisyys, koska käytössä on vain yksi keilain ja yksi satelliittipaikannin. Satelliittipaikantimen hajotessa tai ollessa käytössä skannaus voidaan suorittaa kiinteältä asemapisteeeltä tai seinämille asennettuja kiinteitä tähyksiä hyväksikäyttäen.

#### 6.4 Muita valvonta menetelmiä

Kevitsassa kannattaa laserkeilauksien yhteydessä seurata seinämää myös silmä määräisesti sekä kuvilta. Laserkeilaimella liikettä havaittaessa tietyssä lohossa tai lohokareissa voidaan näitä alkaa seuraamaan tarkemmilla menetelmillä. Isoille epävakaille lohokareille voidaan asentaa kiinteitä tähyksiä, jotta pienetkin liikkeet huomattaisiin takymetriseurannalla. Isot lohokareet saattavat sortuessaan aiheuttaa myös vahinkoja. Epävakaita lohkoja voidaan seurata myös kiinteästi kallioon asennettavilla mittalaitteilla kuten ekstensometreillä. Ekstensometri mittaa kalliossa tapahtuvaa liikettä antureiden avulla ja siinä on mahdollisuus reaaliaikaiseen seurantaan.

Pienetkin sortumat tai vyöryt kannattaa merkitä karttaan päivämäärineen, jotta nähdään milloin ja missä niitä tapahtuu ja riskialueita voidaan määrittää. Keilausaineistosta tehdyistä 3D-malleista saadaan geologien tarvitsemia tietoja ja voidaan esimerkiksi seurata rakoiluja seinämällä.

Louhoksen syventyessä kannattaa myös harkita tarkempaa reaaliaikaista seurantaan kuten tutkajärjestelmää. Tutkajärjestelmä on stabiliteettien seurannassa paras mahdollinen tapa.

## LÄHTEET

- Antikainen, J., Hakala, M., Mikkola, J., Mononen, S., Sahalahti, K & Syrjänen, P. 2008. Kalliomekaaninen suunnittelu. Kaivos- ja louhintatekniikan käsikirjan liite D luku 4. Teoksessa A. Hakanpää & P. Lappalainen (toim.) Kaivos- ja louhintatekniikka. Kaivannaisteollisuus ry ja Opetushallitus. Vammalan kirjapaino Oy, 39-43.
- Antikainen, J., Hakala, M. & Syrjänen, P. 2011. Kalliomekaaninen suunnittelu. Teoksessa A. Hakanpää & P. Lappalainen (toim.) Kaivos- ja louhintatekniikka. Kaivannaisteollisuus ry ja Opetushallitus. Vammalan kirjapaino Oy, 55-67.
- Antolini, F., Atzeni, C., Barla, M., Pieraccini, M. 2012. Early Warning Monitoring of Natural and Engineered Slopes with Ground Based Synthetic Aperture Radar. Viitattu 23.4.2015 <http://www.rockmech.polito.it/download>.
- Brusila, J. & Lovén, P. 2011. Kaivossuunnittelu. Teoksessa A. Hakanpää & P. Lappalainen (toim.) Kaivos- ja louhintatekniikka. Kaivannaisteollisuus ry ja Opetushallitus. Vammalan kirjapaino Oy, 69-90.
- Brusila, J. 2015. Opinnäytetyön kommentointi. Email jaakko.julku-nen@edu.lapinamk.fi 13.4.2015. Tulostettu 13.4.2015.
- Cronvall, T., Kråknäs, P. & Turkka, T. 2012. Laserkeilauksen käyttö liikennetunneleiden kunnossapidon hallinnassa. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 2012:41. Viitattu 9.12.2014 [http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts\\_2012-41\\_laserkeilauksen\\_kaytto\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts_2012-41_laserkeilauksen_kaytto_web.pdf).
- FinMeas Oy 2014. Kallion liikkeiden mittaus. Viitattu 24.4.2015 <http://www.finmeas.com/tuotteet-palvelut/kallion-liikkeiden-mittaus/>.
- GroundProbe 2015. GroudProbe. Slope Stability Radar (SSR). Viitattu 20.3.2015 <http://www.groundprobe.com/products-and-services/slope-stability-radar-ssr>.
- Hassinen, A. 2013. UAV-lennokit - Kokemuksia UAV-laitteista. Viitattu 15.4.2015 <http://mekri.uef.fi/uav/UAV-lennokit.pdf>.
- IDS IBIS 2013. IBIS: Innovative Radar for Monitoring Slope Movements in Open-pit Mines. Viitattu 24.3.2015 <https://www.youtube.com/watch?v=HrbSoLL98v0>.
- IDS IBIS 2014. GeoRadar. Viitattu 24.3.2015 <https://www.idscorporation.com/georadar>.
- Isotalo, K. 2011. Uusia asiakkaita ilmakuvaukselle. Positio. Viitattu 15.4.2015 [http://www.paikkatietoikkuna.fi/c/document\\_library/get\\_file?uuid=d2b18403-d980-45b7-bcc3-d05e37eace54&groupId=108478](http://www.paikkatietoikkuna.fi/c/document_library/get_file?uuid=d2b18403-d980-45b7-bcc3-d05e37eace54&groupId=108478).

- Kevitsa Mining Oy 2013. Kevitsan kaivoksen esittelymateriaali.
- Kevitsa Mining Oy 2014a. Kevitsan kaivoksen esittelymateriaali.
- Kevitsa Mining Oy 2014b. Selvitys yleisten ja yksityisten etujen turvaamisesta. Viitattu 8.12.2014  
[http://www.tukes.fi/Tiedostot/Kuulutukset\\_yleiset\\_ja\\_yksityiset\\_edut/Kevitsa.pdf](http://www.tukes.fi/Tiedostot/Kuulutukset_yleiset_ja_yksityiset_edut/Kevitsa.pdf).
- Kukko, A. 2005. Laserkeilaimen valinta lähifotogrammetriin mittaustehtäviin. Fotogrammetrian erikoistyö. Viitattu 11.3.2015  
[http://foto.hut.fi/opetus/290/julkaisut/Antero\\_Kukko/Laserkeilaimen\\_valinta\\_lahifotogrammetriin\\_mittauksiin.pdf](http://foto.hut.fi/opetus/290/julkaisut/Antero_Kukko/Laserkeilaimen_valinta_lahifotogrammetriin_mittauksiin.pdf).
- Laurila, P. 2012. Mittaus- ja kartoitustekniikka. 4. uudistettu painos. Rovaniemen ammattikorkeakoulun julkaisusarja D nro 3.
- Leica Geosystems Oy 2012. Leica Viva GNSS GS15 Receiver Datasheet. Viitattu 23.3.2015  
[http://www.leica-geosystems.com/downloads/123/zz/gpsgis/Viva%20GS15/brochures-datasheet/Leica\\_Viva\\_GS15\\_DS\\_en.pdf](http://www.leica-geosystems.com/downloads/123/zz/gpsgis/Viva%20GS15/brochures-datasheet/Leica_Viva_GS15_DS_en.pdf).
- Leica Geosystems Oy 2013. Leica Geosystems and Aibotix Sign Cooperation Agreement. Viitattu 15.4.2015  
[http://www.leica-geosystems.com/en/About-us-News\\_360.htm?id=4556](http://www.leica-geosystems.com/en/About-us-News_360.htm?id=4556).
- Leica SmartNet Europe 2015. Network RTK. Viitattu 24.3.2015  
[http://www.smartnet-eu.com/network-rtk\\_221.htm](http://www.smartnet-eu.com/network-rtk_221.htm).
- Luomala, H. 2010. Ratapenkereiden monitorointi. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 2010/22. Viitattu 11.12.2014  
[http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts\\_2010-22\\_ratapenkereiden\\_monitorointi\\_web.pdf](http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lts_2010-22_ratapenkereiden_monitorointi_web.pdf).
- Maanmittauslaitos 2014. Satelliittimittaus eli GPS-mittaus. Viitattu 11.12.2014  
<http://www.maanmittauslaitos.fi/kartat/kartoitus/gps-mittaus>.
- Nordic Geocenter. 2014. RIEGL VZ-2000. Viitattu 25.3.2015  
<http://www.geocenter.fi/riegl-vz-2000/>.
- Ojanen, L. 2014. Kevitsan kaivos laajenee Suomen suurimmaksi. Kauppalehti 11.7.2014. Viitattu 3.12.2014  
<http://www.kauppalehti.fi/uutiset/kevitsan-kaivos-laajenee-suomen-suurimmaksi/KdJDST7z>.
- Pieraccini, M. 2013. Real Beam vs. Synthetic Aperture Radar for Slope Monitoring. Viitattu 19.3.2015  
[https://www.idscorporation.com/images/Downloads/GeoRadar/IBIS\\_White\\_Papers/2013%20Real%20Beam%20vs.%20Synthetic%20Aperture%20Radar%20for%20Slope%20Monitoring.pdf](https://www.idscorporation.com/images/Downloads/GeoRadar/IBIS_White_Papers/2013%20Real%20Beam%20vs.%20Synthetic%20Aperture%20Radar%20for%20Slope%20Monitoring.pdf).

- Reutech 2015. Advanced Geo-Technical Monitoring and Surveying Systems. Viitattu 20.3.2015  
<http://www.reutechmining.com/en/>.
- Riegl 2014. RIEGL VZ-2000. Viitattu 25.3.2015  
[http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxpriegldownloads/Datasheet\\_VZ-2000\\_2014-11-27\\_PRELIMINARY.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/Datasheet_VZ-2000_2014-11-27_PRELIMINARY.pdf).
- Suikkanen, M. 2015. Yara Suomi Oy, Siilinjärven kaivos. Geologin haastattelu 20.1.2015
- Suomen Asiakastieto Oy. 2013. FQM Kevitsa Mining Oy. Viitattu 3.12.2014  
<https://www.asiakastieto.fi/yritykset/fqm-kevitsa-mining-oy/23457038/taloustiedot>.
- Suomisanakirja. 2015a. monitorointi. Viitattu 10.12.2014  
<http://www.suomisanakirja.fi/monitorointi>.
- Suomisanakirja. 2015b. stabiili. Viitattu 10.12.2014  
<http://www.suomisanakirja.fi/stabiili>.
- Törmänen, E. 2014. Lannoitteen lähteellä. Tekniikka & Talous 14.11.2014, 16-18.

## LIITE

Liite 1. Vertailu eri menetelmillä saaduista aineistoista ja tarkkuuksista (Antolini, ym. 2012, 17)

Table 1. Main characteristics of the monitoring techniques discussed.

	Accuracy	Temporal resolution	Spatial resolution	Range	Density of information
<b>GBInSAR</b>	≤ mm	< 3 min regardless of coverage	Continuous map, tens of thousands of pixels	≤ 4 km	High
<b>RAR</b>	≤ mm	From 5 to 30 min depending on coverage	Continuous map, thousands of pixels	≤ 2.5 km	High to medium
<b>Laser Scanner</b>	≤ cm	Minutes to hours depending on coverage	Continuous map, millions of points	≤ 3 km	Very high
<b>Robotized Total Station</b>	mm	Tens of minutes	Pointwise	≤ 1 km	Pointwise
<b>D-GNSS</b>	≤ cm	Minutes	Pointwise	Tens of km	Pointwise