

Oskari Jantunen

Lähtevyyden parantaminen tunnelilouhinnassa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

2.4.2016

Tekijä Otsikko	Oskari Jantunen Lähtevyyden parantaminen tunnelilouhinnassa
Sivumäärä Aika	41 sivua 2.4.2016
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Infrarakentaminen
Ohjaajat	Lehtori, Mika Räsänen, Metropolia Ammattikorkeakoulu Työmaapäällikkö, Esa Juhantila, Destia Oy
<p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli perehtyä tunnelilouhinnassa katkon lähtevyyden parantamiseen ja tähän vaikuttaviin tekijöihin, kun työtä tehdään poraus- ja panostusmenetelmällä. Lähtevyydellä tarkoitetaan prosenttilukua siitä, kuinka paljon tunnelikatkoa on todellisuudessa räjäytyksessä irronnut verrattuna suunniteltuun tunnelikatkon pituuteen. Työ toteutettiin syksyn 2015 ja kevään 2016 aikana yhdessä Destia Oy:n kanssa.</p> <p>Työn aikana tehtiin Destia Oy:n urakoimalta Länsimetron jatkeen ajotunnelityömaalta katkoseurantaa, jossa laskettiin lähtevyysprosentit ja tulokset eriteltiin porauskaavioiden mukaan. Työn aikana tehtiin lisäksi laskentamalli optimaaliselle katkon pituudelle, kun muuttujana toimivat tunnelikatkon lähtevyys, suurreiän poraus sekä aikatauluvaikutus. Lisäksi tarkasteltiin kallioteknisten ominaisuuksien vaikutusta katkon lähtevyyteen ja tämän vaikutusta koko louhintaprosessiin.</p> <p>Opinnäytetyön aineisto koottiin alan kirjallisuudesta, louhintatyötä suorittavien haastatteluista sekä räjähdeainevalmistajan haastattelusta. Koska lähtemättömälle tunnelikatkon pituudelle sama työ tehdään louhintatyössä kahteen kertaan, on hyvä lähtevyys erinomainen kilpailuetu.</p>	
Avainsanat	Lähtevyys, suurreikä, yhdensuuntaisavaus

Author Title	Oskari Jantunen Improving the pull in tunnel excavation
Number of Pages Date	41 pages 2 April 2016
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Infrastructural Engineering
Instructors	Lecturer, Mika Räsänen, Metropolia University of Applied Sciences Site Manager, Esa Juhantila, Destia Ltd
<p>The aim of this thesis was to examine the pull in a tunnel excavation and the factors influencing the pull when the work is done using a drill and blast method. The parameter used to describe the advance of the excavation work in tunneling is called the pull or the advance per round or the yield per round. The work was carried out during the autumn of 2015 and spring of 2016 along with Destia Ltd.</p> <p>For this thesis the pull was calculated for each different drilling graph. The data about each round in work tunnels was provided by Destia Ltd. A calculation model was created to find out the best round length in a tunnel. The parameters used in this model are the pull, the cut hole drilling and the cost impact for schedule. The effect of rock conditions for a pull of tunnel round and the whole excavation process were also taken into consideration.</p> <p>The data was collected by interviewing tunnel excavation experts and an explosive material manufacturer and by using different literary sources. A good pull for a tunnel round is a key competitive factor against other contractors because it decreases the number of extra rounds.</p>	
Keywords	Pull, cut hole, parallel cut

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Maanalainen rakentaminen	1
1.2	Työn taustat	2
1.3	Tilaaajayrityksen maanalainen rakentaminen	2
1.4	Työn tavoite ja tutkimusmenetelmät	3
2	Tunnelirakentamisen teoria	4
2.1	Kallio-olosuhteet	4
2.1.1	Kallioperän tutkimukset	5
2.1.2	Kallioperän rakenne	5
2.1.3	Kallion laatuluokitus	7
2.1.3.1	Q-luku	8
2.1.3.2	RG-luokitus	9
2.2	Porauskaavio	10
2.2.1	Aukaisureiät	11
2.2.1.1	Yhdensuuntaisaukaisu	11
2.2.1.2	Kiila-avaus	14
2.3	Poraustyö ja kalusto	16
2.3.1	Porausreiän koko	16
2.3.2	Lusta-automaatiikka	17
2.3.3	Katkon poraus	18
2.4	Panostustyö	20
2.4.1	Nallitus	20
2.4.2	Räjähdeaineet	21
3	Katkojen lähtevyys Case-tapauksissa	23
3.1	Katkoseuranta	23
3.1.1	Lähtevyysprosentin laskeminen	24
3.1.2	Tunnelin avaus suurreikämenetelmällä	24
3.2	Kallio-olosuhteiden vaikutus	26
3.2.1	Lisäkustannusten jakautuminen RG-luokituksen mukaan	27

3.3	Vaikuttavan suurriän läpimitan vaikutus katkon lähtevyyteen	29
3.3.1	Suurriän lisäys avaukseen	30
3.4	Vaikuttavan suurriän ja kallio-olosuhteiden yhteys	31
3.5	Optimi katkon pituus	32
4	Tulokset ja vertailu	33
4.1	Katkoseuranta Kaitaalta ja Finnoosta	33
4.2	Optimaalisen katkon pituuden laskeminen käytännössä	35
5	Yhteenveto	39
6	Johtopäätökset	41
	Lähteet	42

1 Johdanto

1.1 Maanalainen rakentaminen

Helsingistä on tulossa maanalaisen rakennusosaamisen esimerkkikaupunki, josta on käyty ottamassa oppia jopa Singaporesta asti. Helsingin kaupungin maanalainen yleiskaava on tiettävästi maailmassa ainoa laatuaan ja rakennuttajat ovat halukkaita viemään maanalaista osaamista maailmalle nykyistä tehokkaammin. Helsingissä maan alta löytyy ostoskäytäviä, tietokonehalleja, liikuntapaikkoja (Kuva 1), kaukolämpöputkia, metro- ja huoltotunneleita sekä parkkihalleja parhaimmillaan viidessä kerroksessa. [1.]



Kuva 1 Helsingissä Itäkeskuksen uimahalli on rakennettu maan alle [2, s.8].

Helsinkiä voidaan hyvin pitää esimerkkikaupunkina maanalaisessa rakentamisessa, sillä siellä on osattu hyödyntää maanalaisen rakentamisen luomia mahdollisuuksia jo 1960-luvulta alkaen. Vuoteen 2009 mennessä maanalaisia tiloja oli rakennettu lähes 400 kpl ja teknisen huollon tunneleita oli yhteensä noin 200 kilometriä. Kun kaupunkirakenne kasvaa koko ajan ja siitä halutaan entistä tiiviimpi, on maanalainen rakentaminen ratkaisu tähän. Yhdessä maanalaisen rakentamisen ansiosta eri käyttötarkoituksiin soveltuvia toimintoja on mahdollista kytkeä yh-

teen saaden yhtenäisiä toimivia kokonaisuuksia. Tulevaisuutta ajatellen maanalaisten rakentamisen tulevaisuus näyttää erinomaiselta, sillä pelkästään Helsingissä on maanalaisten toimintojen hankerekisterissä yli 200 uutta varausta. [2 s. 6–7.]

Suomessa on tehty viimeisen kymmenen vuoden aikana paljon suuria maanalaisia hankkeita, joista suurimpina yksittäisinä Kehärata ja Länsimetron. Kehäradan kustannusarvio on 773,8 miljoonaa euroa ja Länsimetron arvio on lähemmäs miljardi euroa [3 ja 4]. Tällä hetkellä rakenteilla olevia suuria maanalaisia rakennusprojekteja ovat mm. Länsimetron jatke sekä Blomminmäen jätevedenpuhdistamo ja tulevaisuus tulee näyttämään, miten Pisara-rata hankkeen käy.

1.2 Työn taustat

Destia Oy on urakoinut Länsimetron jatkeen ajotunneleita Finnoossa, Soukassa, Sammalvuoressa sekä Kaitaalla. Työ on pääosin pitänyt sisällään louhinta- ja luji-tustöitä tunneleissa, ja yhteensä tunneleissa olleita räjäytyksiä on tehty satoja. Tunnelikatkolle, eli kerralla räjäytettävä osuus tunnelissa, tehdään suunnitelma räjäytyksestä ja räjäytyksen jälkeen tarkastetaan toteuma jota verrataan suunniteltuun. Tunneleiden louhinnassa normaali katkon pituus vaihtelee 4,0 ja 6,0 metrin välillä. Toteutunut pituus on käytännössä aina alle suunnitellun tunnelikatkon pituuden. Lukua, joka saadaan jakamalla toteutunut katkon pituus, suunnitellulla katkon pituudella kutsutaan lähtevyydeksi ja kerrottuna 100:lla saadaan lähtevyyssprosentti. Suunniteltu katkon pituus on se pituus, joka tunneliin porataan ja panostetaan, eli tunneliin irtoamatta jääneelle kohdalle louhintatyö tehdään kahteen kertaan.

1.3 Tilaajayrityksen maanalainen rakentaminen

Tämän insinööriyön tilaajana toimiva Destia Oy on suomalainen infra- ja rakennusalan palveluyhtiö. Destia Oy rakentaa, ylläpitää ja suunnittelee liikenneväyliä ja ratoja sekä liikenne- ja teollisuusympäristöjen lisäksi kokonaisia elinympäristöjä. Destia Oy:n palvelut ulottuvat kattavasti maanalaisesta rakentamisesta maanpäälliseen sekä energia- ja insinöörirakentamiseen. [5.] Destia Oy:n vuotuinen lii-

kevaihto oli 462,8 miljoona euroa vuonna 2015 ja henkilöstöä oli keskimäärin 1505 [6].

Maanalaisen rakentamisen jatkuvasti lisääntyessä on Destialla oma yksikkönsä, joka on erikoistunut kalliorakentamiseen. Yhteistyökumppaniverkostonsa ansiosta Destia kykenee suunnittelemaan ja rakentamaan tunneleita ja maanalaisia tiloja, joita ovat mm. pysäköintitilat, liikenneasemat sekä väestösuojat. [7.]

1.4 Työn tavoite ja tutkimusmenetelmät

Opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää tunnelilouhintaprosessissa eri työvaiheiden, työtapojen ja kallio-olosuhteiden vaikutusta katkon lähtevyyteen. Jo ennen opinnäytetyön aloittamista on tehty katkoseurantaa, jota jatketaan työn aikana ja tämän avulla voidaan katkon lähtevyys laskea keskiarvona halutulle tunneliosuudelle. Tutkimustulokset perustuvat todellisiin mittaustuloksiin ja näiden paikkaansa pitävyyttä verrataan teoriaan.

Tavoitteena on antaa toimintatavat parempaan lähtevyyteen tunnelilouhinnassa, jolloin koko tunnelityö on mahdollista suorittaa nopeammin ja se mahdollistaa säästöjä työkustannuksissa, materiaaleissa sekä aikasidonnaisissa kustannuksissa. Tutkimuksen kohteena ovat kallion laatu, panostamisen ja erityisen huomion kohteena poraustyö.

2 Tunnelirakentamisen teoria

Tunnelia tehtäessä poraus ja panostus menetelmällä samat työvaiheet toistuvat jokaisessa katkossa. Poraustyö suoritetaan maanalaisella porauslaitteella, jota kutsutaan jumboksi (Kuva 2). Jumbo koostuu yleensä kahdesta tai kolmesta porauspuomista sekä yhdestä nostokoripuomista. Poraustyössä voimanlähteenä käytetään sähköä ja porausreikien puhdistamiseen käytetään vesihuuhtelua. Poraustyö on erityistä tarkkuutta vaativaa työtä ja se suoritetaan ennalta määrätyn porauskaavion mukaisesti.



Kuva 2 [8]. Tämä jumbo koostuu kahdesta porauspuomista sekä yhdestä nostokorista.

Poraustyön jälkeen tunnelin porausreiät panostetaan suureikiä lukuun ottamatta panostuskaavion mukaisesti. Panostuskaavion pohjana toimii porauskaavio, jossa jokaisen reiän kohdalla näkyy, miten reikä panostetaan. Jokaisen reiän kohdalla on merkintä siellä käytettävästä nallista, joita kuvataan hidasteajan mukaan, sekä käytettävästä räjähdaineesta.

2.1 Kallio-olosuhteet

Kallioperän olosuhteet voidaan selvittää käyttämällä erilaisia tutkimuksia ja näiden perusteella on mahdollista rakennuskohteen paikkaa muuttaa sinne, jossa kallio-

olosuhteet ovat paremmat. Kohteen siirto parempiin kallio-olosuhteisiin voi tulla kysymykseen, kun rakennetaan laite- tai väestösuoja. Kun rakennetaan tietunneleita ja rautatietunneleita, ei kohdetta voida siirtää paljoa sen mukaan, missä on parempi kallio. [9, s. 51.]

Metrolinja määräytyy sen mukaan, että se hyödyttää mahdollisimman montaa ihmistä. Tällöin sen on kuljettava suurien asutuskeskusten läpi ja mahdollisimman suoraan, jotta matkustusaika pysyy kohtuullisena. Kun tunnelinlinja tehdään hyvin pitkälti alueen kartan mukaan, ei usein voida välttyä huonolta kalliolaadulta.

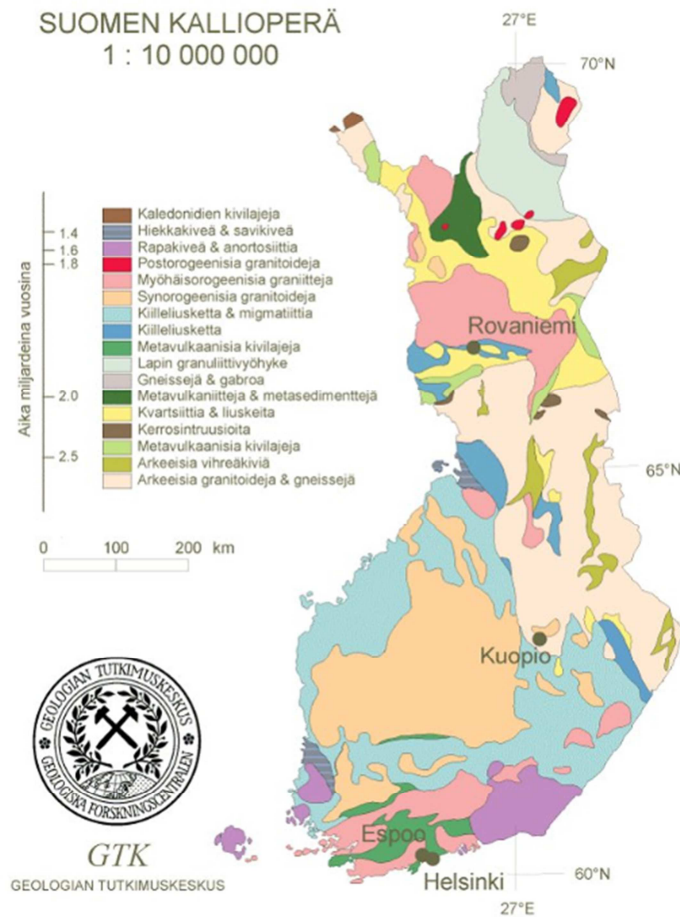
2.1.1 Kallioperän tutkimukset

Kallioperän lujitustarve riippuu tilan käyttötarkoituksesta sekä kalliolaadusta. Kalliomekaaninen suunnittelu on se ala, joka määrittelee lujitustarpeen [10, s. 55]. Kalliota voidaan lujittaa kalliopulseilla, joita on mahdollista pinnoittaa kestävästi erilaisia kemiallisia rasiituksia rakennuskohteen mukaan. Toinen lujittamisen muoto on ruiskubetonointi, jotka voidaan erotella kuidulliseen ja kuiduttomaan ruiskubetoniin. Kuidulliseen ruiskubetoniin lisätään joko teräskuituja tai muovikuituja ja niiden määrä mitataan betonissa kg/m³. Lujitustarpeen lisääntyessä on mahdollista lisätä kalliopulsettien määrää ja ruiskubetonikerroksen paksuutta.

Kalliorakennuskohteissa on syytä selvittää ennakkotutkimuksilla edullisin paikka rakennuskohteelle, mikäli paikkaa on mahdollista muuttaa. Tutkimuksia suoritetaan useassa eri vaiheessa ja alustavat tutkimukset voidaan aloittaa ilmakuva- ja karttakuvatulkinnalla ja myöhemmin jatkaa käymällä maastossa. Yksityiskohtainen tutkimus kohdistetaan lopulliseen rakennuskohteeseen. [9, s. 51 ja 53.]

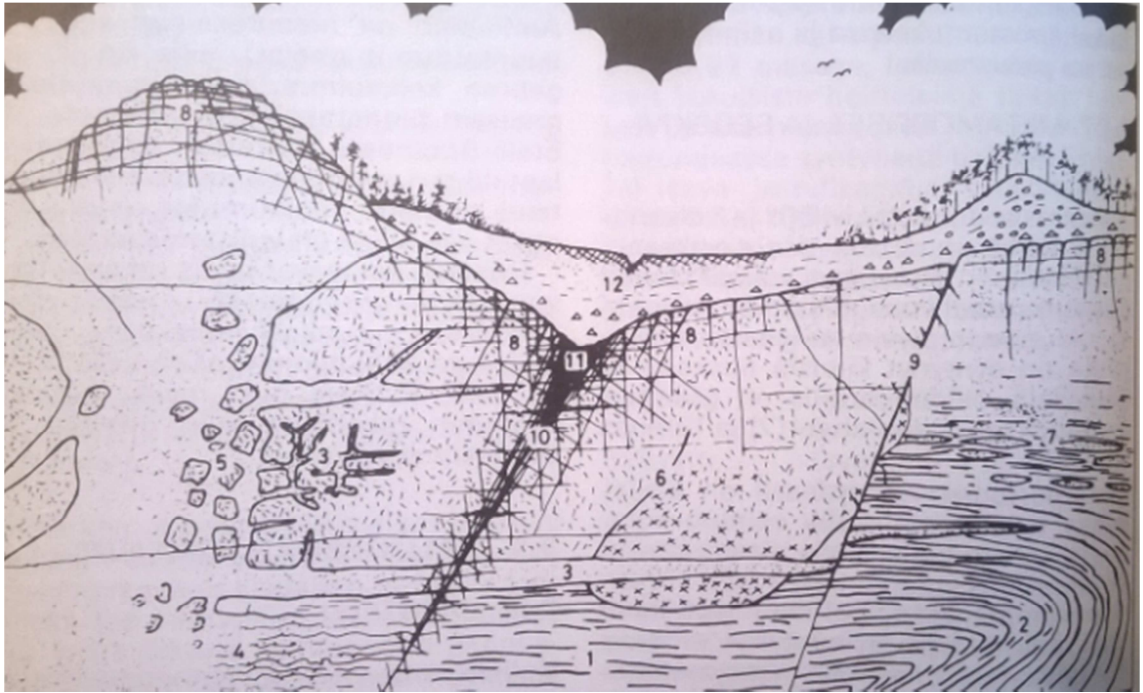
2.1.2 Kallioperän rakenne

Suomen kallioperä on hyvin vanhaa ja se on muodostunut nykyiseen tilaan jo noin 1 400 – 3 000 miljoonaa vuotta sitten. Suomen kallioperä on sekä vanhin että vakain kallioperä koko Euroopassa. Suomen kallioperästä noin 52,5 % on erilaisia graniittisia kivilajeja. Erilaisia seoskiviä, joita kutsutaan migmatiiteiksi, kattavat Suomen kallioperästä noin 22 % osuuden. [11.] Geologian tutkimuslaitos on kartoittanut Suomen kallioperän (Kuva 3).



Kuva 3 [12] Geologian tutkimuskeskuksen määrittelemä kartta Suomen kallioperästä.

Kallion rakennus- ja louhintateknisiin ominaisuuksiin vaikuttavat erityisesti kivilajien keskinäinen yhteenliittyminen ja suuntaus, joita kuvataan poimuttumisella ja liuskeisuudella. Liuskeisuuden suunta ilmoitetaan liuskeisuustason ja vaakatason leikkaussuoran poikkeamana pohjoissuunnasta (kulku) ja sitä vastaan kohtisuoran kaltevuuden poikkeamana (kaade). Poimuttuminen tarkoittaa alkuperäiseen kallioon muodostuneet liuskeisuuden vääntymistä poimuille. Koko kalliomassan rikkonaisuutta tai heikkousvyöhykkeitä kuvataan rakoilulla, siirroksilla tai ruhjeilla (Kuva 4). Kallioperän pinnanmuodot ja korkeussuhteet kertovat kallioperän topografian ja vielä lisätään kemiallinen rapautuneisuus, niin nämä yhdessä muodostavat kallioperän geologisen rakenteen. [9, s. 59–60.]



Kuva 4 Kaavamainen esitys kallioperän rakenteista. Nro 1. kuvaa liuskeisuutta, 2. poimuja, 3. juonia, 4. suonia, 5. sivukivisulkeumia, 6. terävää kontaktia, 7. kontaktivyöhykettä, 8. rakoilua, 9. siirrosta, 10 ruhjevyöhykettä, 11. savivyöhykettä ja 12. maalajeja. [9, s. 60.]

2.1.3 Kallion laatuluokitus

Kallion laadun mittaukseen on kehitetty erilaisia mittaustapoja, jolla voidaan asettaa erilaiset kalliotyypit järjestykseen rakennettavuuden kannalta. Yleisin nykyisin käytetty menetelmä on Q-luokitus [10, s. 51]. Kallio on varsin epähomogeeninen rakennusmateriaalina ja useat eri ominaisuudet vaikuttavat lujitus- ja tiivistystöiden laatuun. Kallion luokittelun tavoitteena on jakaa kalliomassa riittävän yhtenäisiin osiin, jolloin voidaan työsuorituksia ja yksikköhintoja määrittellä urakka-asiakirjoissa kallioluokkien mukaan. [9, s. 77.]

Kalliotilojen lujusrakenteen on suunniteltava kalliomekaanisin perustein, ja mitoitus on mahdollista tehdä joko laskennallisesti tai taulukkomitoituksena. Kalliomekaaniset laskelmat tulee tehdä, mikäli kalliotilan jännevälit ovat suuria tai kallio-olosuhteet ovat vaativia. Taulukkomitoituksessa noudatetaan kansainvälisesti hyväksyttyä Q-luokitusta kallioluokista. [13, 8 §.]

2.1.3.1 Q-luku

Q-luokitus on NGI:ssä (Norwegian Geotechnical Institute) vuosina 1971 - 1974 kehitetty menetelmä, jolla kalliomassa voidaan luokitella. Q-luku luokittelee maanalaisen tilan kalliomassan laadun kuuden parametrin avulla. [14.]

Q-luku on logaritminen suure ja se määritetään seuraavasti:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

jossa:

RQD = rakoilun tiheyttä kuvaava luku (10 - 100 %)

J_n = rakosuuntien lukumäärätekijä (20 - 0,5)

J_r = rakopintojen karheusluku (1 - 4)

J_a = rakojen vedenläpäisevyysluku (0,05 – 1)

SRF= jännitystilaluku (400 – 0,5).

[10, s. 56.]

Kalliotilojen lujitustarve on mahdollista määrittellä suoraan taulukkotapauksena, kun määritellään kalliotilan käyttötarve ja lasketaan kalliotilalle Q-luokka (Kuva 5) [10, s. 62].

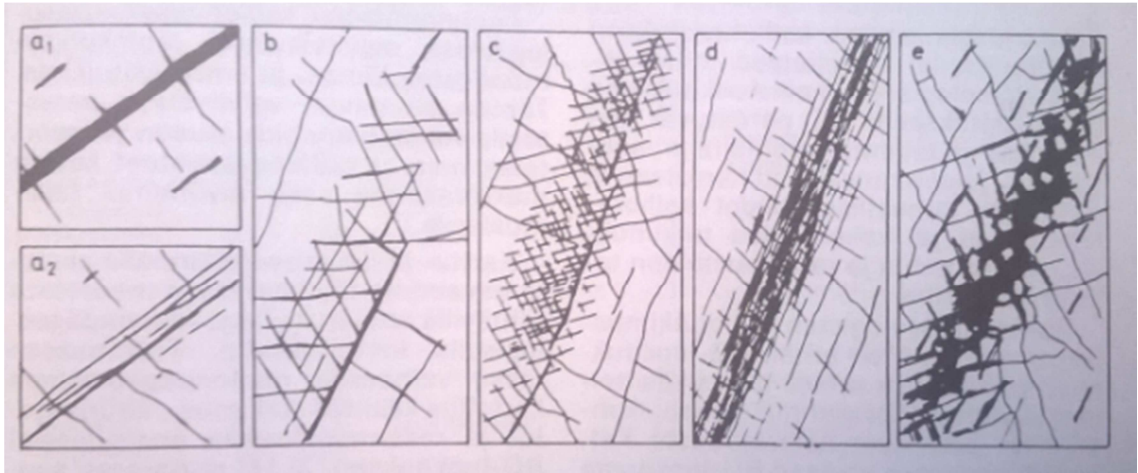
<i>Kallion laatuluokka</i>	<i>Q-luku</i>
<i>Poikkeuksellisen heikko (exceptionally poor)</i>	<i>0,001–0,01</i>
<i>Erittäin heikko (extremely poor)</i>	<i>0,01–0,1</i>
<i>Varsin heikko (very poor)</i>	<i>0,1–1</i>
<i>Heikko (poor)</i>	<i>1–4</i>
<i>Kohtalainen (fair)</i>	<i>4–10</i>
<i>Hyvä (good)</i>	<i>10–40</i>
<i>Varsin hyvä (very good)</i>	<i>40–100</i>
<i>Erittäin hyvä (extremely good)</i>	<i>100–400</i>
<i>Poikkeuksellisen hyvä (exceptionally good)</i>	<i>400–1000</i>

Kuva 5 Kallion laatuluokat määritellään Q-luokituksessa oheisen kaavion mukaan [10, s. 56].

2.1.3.2 RG-luokitus

Rakennusgeologinen luokitus (RG-luokitus) perustuu tutkijan visuaalisiin havaintoihin kiviaineksesta ja kalliosta. Havaintoja on mahdollista tehdä kalliopaljastumista, näyte-kappaleista tai kairausnäytteistä. Luokituksen tarkkuutta on mahdollista täsmentää laboratorio tutkimuksin. Luokitus tehdään kivilaadun ja rakoilun perusteella, jossa kivi-näytteestä määritellään rapautuneisuus, osasten järjestäytyneisyys, mineraalien raeko-ko sekä päämineraalit. Kallion raot ja murtumat muodostavat yhdessä kallion rakoilun, jossa rakoilutyyppi, rakotiheys ja rakojen laatu määrittelevät kalliolaadun. [9, s. 78 ja 142.]

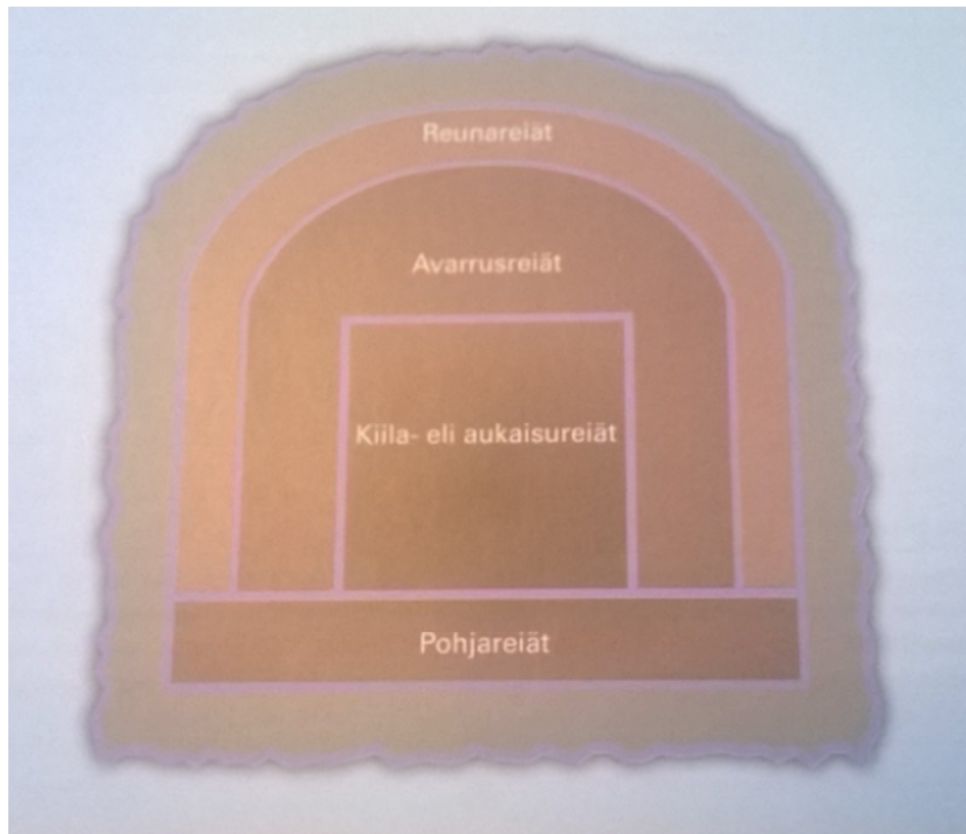
Rakennusgeologisessa luokituksessa kallion rakenteellinen kiinteys jaetaan kolmeen osaan, jotka ovat kiinteä kallio, löyhä kallio ja rikkonainen kallio. Kiinteä kallio on mahd-ollista jakaa vielä massarakenteiseen, liuskerakenteiseen ja seosrakenteiseen raken-nytyppiin. Löyhä kallio jaotellaan löyhärakenteiseen ja raparakenteisiin. Kallion rikkou-tuneisuus jaotellaan halkeamien mukaan viiteen eri luokkaan (Kuva 6), jossa annetaan numerot yhdestä viiteen ja numeron eteen kirjaimet ”Ri”.



Kuva 6 a1) ja b1) ovat halkeamarakenteista kalliota (Ri I), b) rakorakenteinen kallio (Ri II), c) murrosrakenteinen kallio (Ri III), d) ruhjerakenteinen kallio (Ri IV) ja e) savirakenteinen kallio (Ri V). [9 s. 85.]

2.2 Porauskaavio

Tunnelilouhinnassa porareiät jaetaan eri luokkiin sen mukaan, missä ne sijaitsevat tunnelin poikkileikkauksessa (Kuva 7). Kiilareiät, joita kutsutaan myös aukaisurei'iksi sijaitsevat yleensä profiilin keskellä ja tämä on se kohta, josta räjähdys lähtee liikkeelle. Tämän alueen kiertäviä reikiä pohjaa lukuun ottamatta kutsutaan avarrusrei'iksi, joiden tarkoituksena on laajentaa syntynyttä reikää. Avarrusreikien ympärillä sijaitsevat reunareiät, jotka saavat tunneliprofiilin lopulliseen muotoonsa yhdessä profiilin pohjalla sijaitsevien pohjareikien kanssa. Pohjareiät ja reunareiät räjähtävät viimeisenä.



Kuva 7 Reikätyypit [15, s. 229].

2.2.1 Aukaisureiät

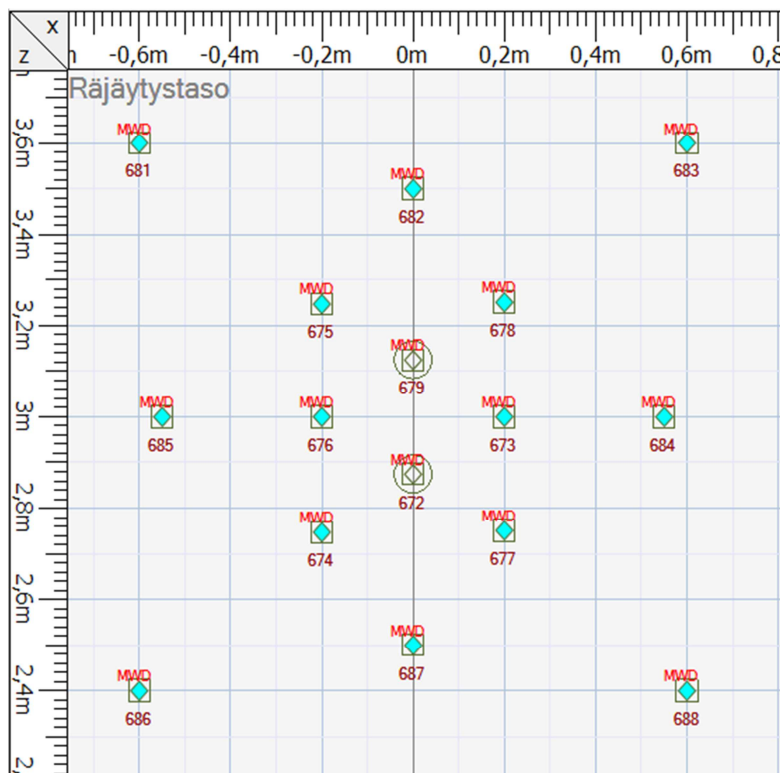
Tunnelin räjäytys lähtee liikkeelle tunnelin aukaisulla, joita ovat yhdensuuntaisaukaisu ja kiila-aukaisu. Aukaisun pinta-ala on yleensä vain noin 2 m^2 ja sen ominaispanostus vaihtelee välillä $7,0$ ja $13,0 \text{ kg/m}^3$. Ominaispanostus tarkoittaa sitä räjähdeainemäärää kilogrammoina, joka panostetaan yhtä irrotettavaa kalliokuutiometriä kohden. Ominaisporaus vastaavasti tarkoittaa sitä määrää porattua reikää (m), joka tehdään yhtä irrotettavaa kalliokuutiometriä kohden. Ominaispanostusta suurentavana tekijänä pidetään kallion laatuja vaikutusta sekä reikien suuntausvirheitä, jotka vaikuttavat tunnelilouhinnassa huomattavasti enemmän kuin avolouhinnassa. Aukaisun suuri ominaispanostus johtuu siitä, että sillä on vain yksi purkamissuunta, eikä maanalaisessa louhinnassa ole niin suurta varaa heittokivistä, kuin avolouhinnassa. [15, s. 225–226.]

2.2.1.1 Yhdensuuntaisaukaisu

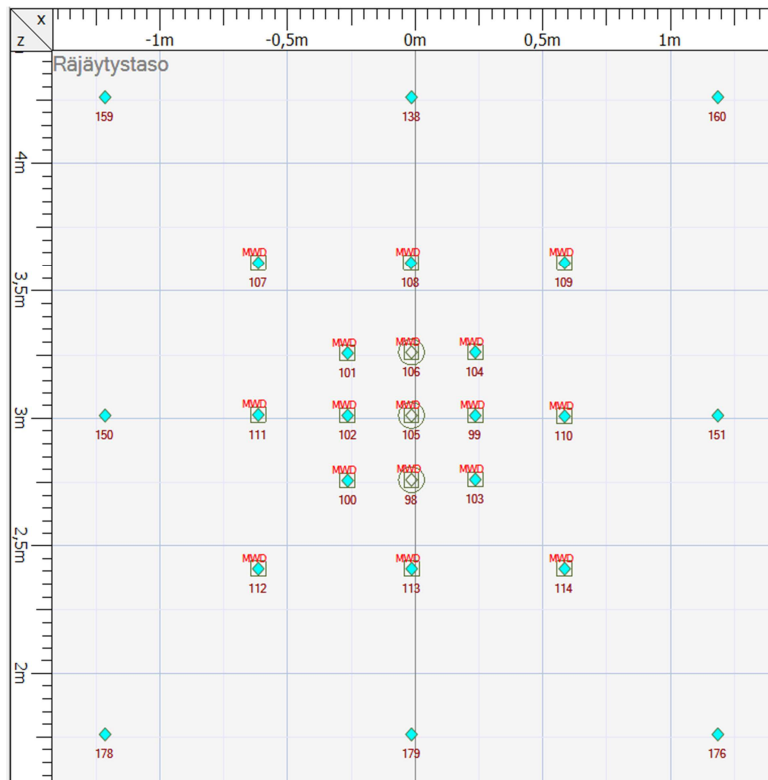
Yhdensuuntaisaukaisusta tarkoittaa, että avaukseen porataan suureikiä, jotka jätetään panostamatta. Suureiän tarkoitus on ainoastaan helpottaa kallion purkautumista räjähdyksessä. Kun panostetut reiät ovat tyypillisesti tunnelilouhinnassa $45 - 54 \text{ mm}$

halkaisijaltaan, ovat panostamattomat suureiät 76 – 127 mm halkaisijaltaan. Yhdensuuntaisaukaisu on yleistynyt samalla, kun jumboporaus on kehittynyt. [15, s. 227.]

Pienissä ja kapeissa tunneleissa yhdensuuntaisaukaisu onärkevin tapa porata aukaisu, sillä tilanpuutteen vuoksi jumboporausella kiila-aukaisulla ei ole mahdollista saada riittävän pitkää katkoa. Nykyaikaisissa yhdensuuntaisaukaisuissa on mahdollista käyttää erilaisia porauskaavioita. [15, s. 229.] Yhdensuuntaisavauksessa suureikien lukumäärä voi vaihdella ja suureikien sijoittelu voidaan toteuttaa eri tavoin. Kahdella (Kuva 8) ja kolmella suureiällä (Kuva 9) voidaan sijoittaa päällekkäin ja niiden ympärille sijoittamaan panostettavia reikiä. Neljän suureiän vaihtoehto antaa ensimmäiselle räjäytykselle enemmän tilaa irrota kuin edelliset vaihtoehdot ja nämä voidaan sijoittaa päällekkäin (Kuva 10) edellisen tapaan tai niin sanottuun apilaan (Kuva 11).



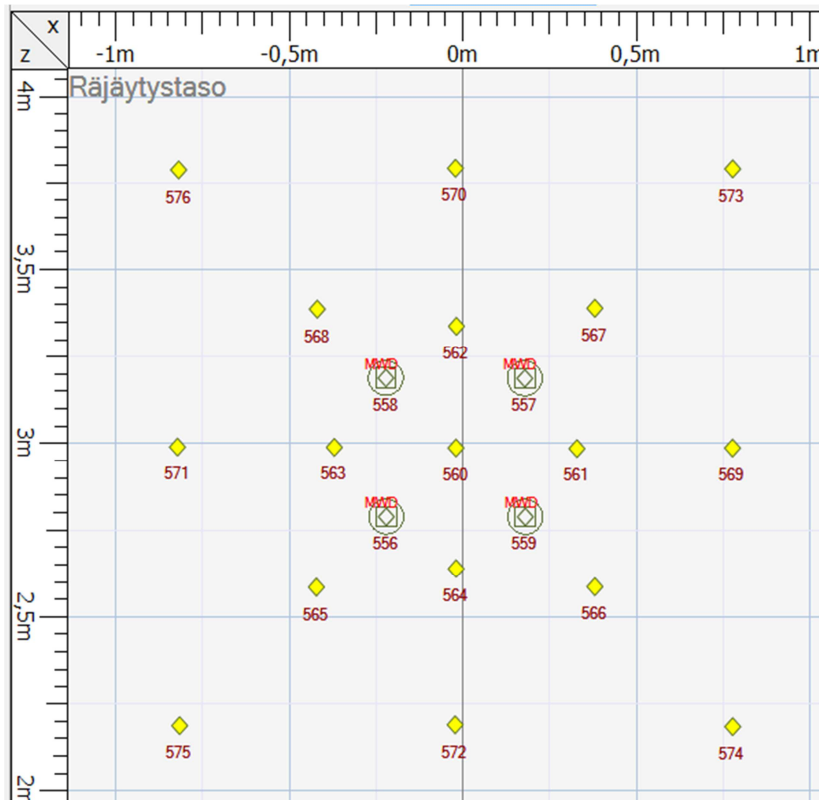
Kuva 8 [16] Ympyröidyt pisteet 679 ja 672 ovat 102 mm suureikiä ja muut pisteet ovat panostettavia 48 mm reikiä. Suunnitelma on tehty iSure-ohjelmalla.



Kuva 9 [16] Yhdensuuntaisuus kolmella päällekkäisellä suureiällä.



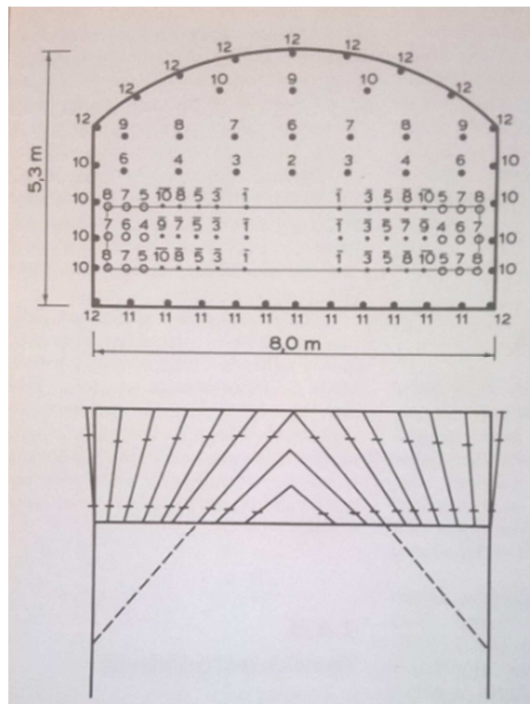
Kuva 10 [16] Yhdensuuntaisuus neljällä suureiällä, jotka sijaitsevat päällekkäin.



Kuva 11 [16] Yhdensuuntaisavaus neljällä suurellä, jotka edellisistä poiketen ovat sijoitettu neliöksi, niin sanottu apila-avaus.

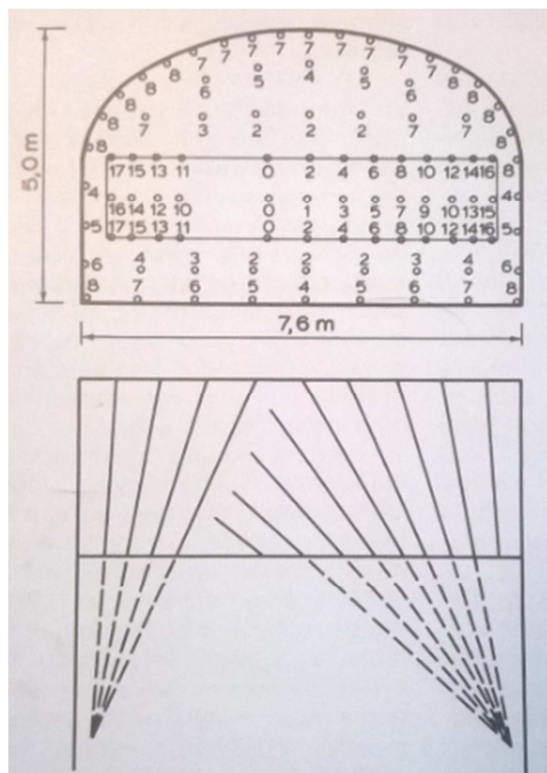
2.2.1.2 Kiila-avaus

Kiila-avauksista on erilaisia variaatioita, joista yleisimmin käytetyt ovat aurakiila, viuhkakiila sekä momentaaniset kiilat. Näistä kolmesta vaihtoehdosta aurakiila on eniten käytetty avaus. Aurakiilassa avaus porataan auramaiseksi (Kuva 12). Tässä menetelmässä terävimmän auran kulma ei saa olla pienempi kuin 60° . Mikäli kulma on pienempi, ei kallio irtoa räjäytyksessä, vaan kiilautuu kiinni. Aurakiilan käyttö vaatii leveää tunneliprofiilia, sillä sen etenemä on ainoastaan noin 50 % tunnelin leveydestä. [15, s. 233.]



Kuva 12 Aurakiila-aukaisun nallituskaavio näkyy yllä ja porausreiät alla [15, s. 34].

Toiseksi yleisin kiila-avaus on viuhkakiila, jossa avaus porataan viuhkamaiseksi (Kuva 13). Tämän kiilan hyviä puolia ovat pienen vastajännityksen vuoksi suhteellisen pienet tärinät. Tämäkin menetelmä vaatii tunneliprofiililta suuren leveyden, jotta päästään riittävän pitkään katkoon. [15, s. 234.]



Kuva 13 Viuhkakiila-aukaisun nallituskaavio näkyy yllä ja porausreiät alla [15, s. 34].

Aurakiilojen käyttö vaatii vähemmän kalliita porametrejä kuin yhdensuuntaisaukaisu, joten niiden käyttöä suuriprofiilisissa tunneleissa on syytä harkita [15, s. 226].

2.3 Poraustyö ja kalusto

Tunneliporauksessa käytetyt jumbot ovat kehittyneet hyvin paljon viime vuosikymmeninä ja erilaisia apuvälineitä on tullut sekä työn suunnitteluun ja työn toteutukseen. Porauksessa on tärkeää, että toteutuneet reiät ovat mahdollisimman lähellä suunniteltuja reikiä. Porauksen reikien oikea sijoittuminen voidaan tarkastaa jumbon antamasta porausdatasta, jossa toteutunut porareikä tunnistetaan porauspuomin asennosta, kun reikää on lähdetty poraamaan ja pituus siitä miten paljon porauskankea on syötetty reikään. Reiän kiertämistä ei vielä ole mahdollista tunnistaa jumbon antaman datan avulla, mutta reiän suoruuden mittaukseen olemassa erilaisia laitteita. Reiän suoruuden mittaamista tehdään ainoastaan satunnaisista rei'istä.

2.3.1 Porausreiän koko

Porausreiän koko määräytyy porauskruunun (Kuva 14) halkaisijan perusteella, joka kiinnitetään porauskankeen kierteillä kiinni. Porareian vesihuuhtelua varten on porauskruunun sivulla reikä. Porasoija kulkeutuu ulos reiästä porauskangen ulkopuolella, jonka takia kruunun halkaisijan on oltava kangen halkaisijaa suurempi. Kruunun halkaisijan valintaan vaikuttavat eniten panostustyö sujuminen ja kaluston kestävyys. Mitä lähempänä reiän koko on panostettavan räjähteen halkaisijaa, sitä enemmän syntyy ongelmia panostustyössä. Vaikka käytettäisiin pienempiä räjähdeaineita, joita käytetään muun muassa kaarirei'issä, muodostuu ongelmaksi kaluston kestävyys. Mitä suurempaa kruunua käytetään, sitä suurempaa kankea on mahdollista käyttää ja suurempi kanki on huomattavasti lujempi. Ohuemmillä porakangilla on suurempi mahdollisuus, että porauksen aikana reikä alkaa kiertää tai että kanki katkeaa. Suuremman reikäkoon poraus on hitaampaa ja kalliimpaa, ja optimaalinen reikäkoko valitaan sen mukaan, että panostustyö onnistuu ja suuremmilta kalustorikoilta vältytään. Peränajossa käytössä on yleisesti 48 mm halkaisijaltaan olevat porauskruunut. [17.]



Kuva 14 [18]. Porauskuunu kiinnitetään kierteillä porakankeen ja kruunun reunalla on reiät, vesi-huuhtelua varten.

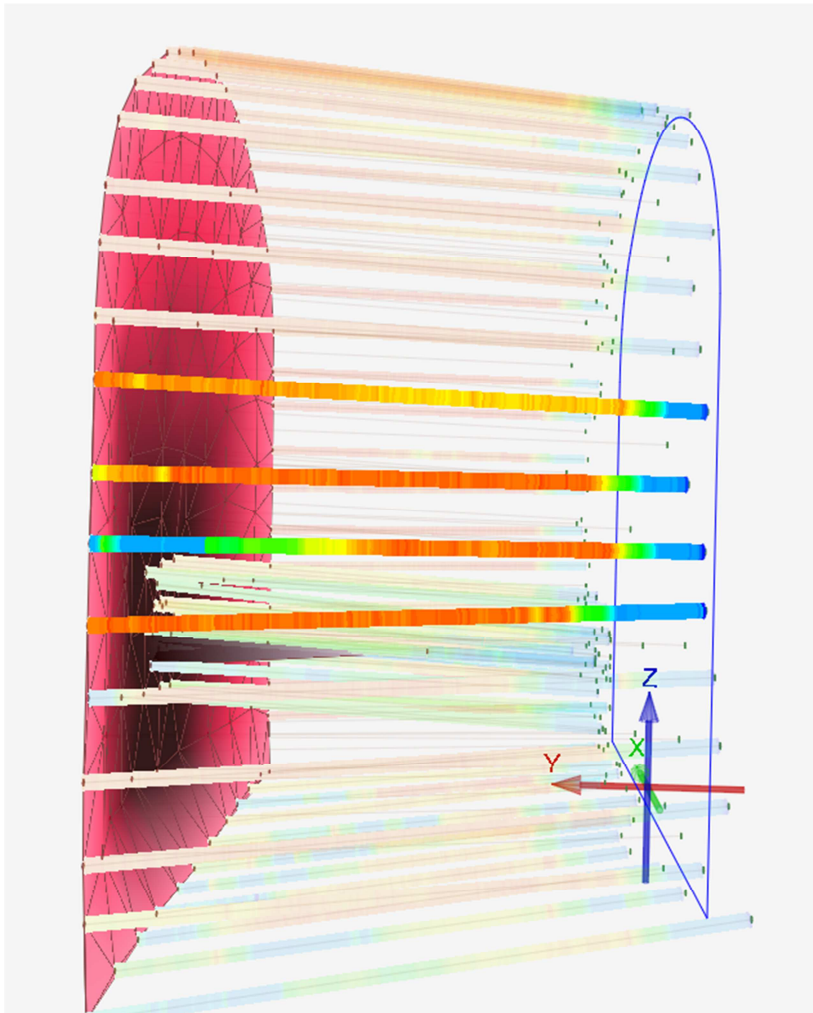
2.3.2 Lusta-automatiikka

Lustaan eli halkeamaan osuessaan poranterä alkaa helposti kiertää halkeaman suuntaisesti, jolloin katkon poraus ei ole enää suunnitelmien mukainen ja syntyy ongelmia panostuksessa ja katkon lähtevyydessä. Toinen mahdollisuus lustan kohdassa on kiinniporautuminen. Porakangen kiertäminen on todennäköisempää, jos porakanki osuu hiukan vinosti lustaan kuin, että se osuisi kohtisuoraan [16.]

Lusta-automatiikka on järjestelmä, joka pystyy tunnistamaan milloin pora osuu lustaan ja tehdä sen mukaan automaattisesti tarvittavat toimenpiteet ja ehkäisee näin kiinniporautumisen ja vähentää mahdollisuutta, että porakanki lähtee kiertämään. Automatiikka optimoi porauksen aikana syöttövoiman, pyöritysvoiman, pyörityspaineen sekä muut parametrit. [19, s. 25.] Porarin on laitettava lustan kohta merkille ja ilmoitettava siitä panostajalle, joka voi näiden reikien panostuksessa varautua tuplanallilla. Tuplanalli tarkoittaa, että ensimmäinen nalli sijoitetaan normaalisti reiän pohjalle ja seuraava nalli, joka on hidasteajaltaan pidempi, sijoitetaan reikään halkeaman jälkeen. Näin varmistetaan, että räjähdys ei katkea lustan kohdalta.

Jumbo tekee porauksesta koko ajan MWD-dataa, jonka saa jumbosta siirrettyä tietokoneelle. MWD tulee sanoista measurement-while-drilling ja se arvioi reiän pituuden, todellisen pohjan kohdan sekä reiän suuntauksen [20]. MWD-dataa tutkimalla saa tärke-

ää tietoa porauksen onnistumisesta. MWD-dataan siirtyä edellä mainittujen lisäksi tietoa porausparametreista ja mm. lullan voi tunnistaa tästä datasta. Lullan kohdassa jumbo osaa alentaa poraustehoa, jotta se pääsee tästä kohdasta ohi ja MWD-dataan se merkitsee poraustehot värikoodein (Kuva 15).

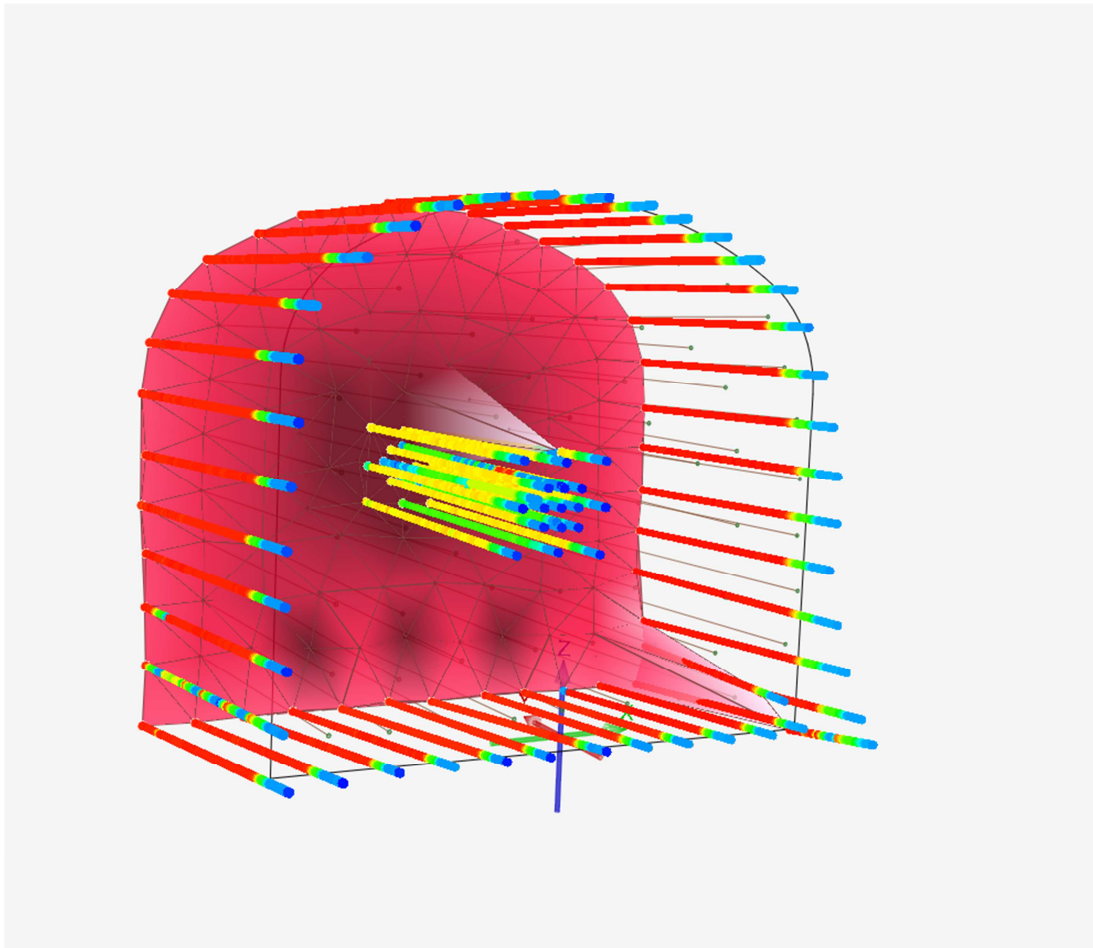


Kuva 15 Jumbo on tunnistanut lullan yhden reiän loppupuolella ja osannut alentaa tehoa sen kohdalla. Sininen väri kertoo alemmasta poraustehosta, vihreä on hiukan tehokkaampi ja punainen on näistä tehokkain poraus. [16.]

2.3.3 Katkon poraus

Katkon porauksessa on erityisen tärkeää, että porattavat reiät ovat mahdollisimman suorat, sillä porausreiän kiertymistä ei MWD-datan avulla ole mahdollista vielä nykyisin tunnistaa. Porausreikä menee suurempaan, kun poraustehoa pidetään pienempänä. Suurin todennäköisyys, että reikä alkaa kiertämään tapahtuu aivan porausreiän alkuvaiheessa. Tästä syystä jumbo poraa reiän alun pienemmällä teholla, jolloin tarkkuus parantuu ja tietyn etäisyyden jälkeen jumbo kasvattaa poraustehon ylöspäin. [16.]

Tunneliperän avauksen porauksen onnistuminen on avainasemassa koko katkon onnistumisen kannalta. Tunnelin avauksessa on paljon reikiä pienellä alueella ja näiden keskinäiset välit ovat pieniä, niin pienelläkin virheporauksella tai reiän kierrolla reiät porautuvat yhteen. Avauksessa käytetään pienempää poraustehoa, jolloin reikien tarkkuus paranee. MWD-data kertoo eri värein tehon, jota reiän poraukseen on käytetty (Kuva 16). [16.]



Kuva 16 Tunneliprofiilin avaukseen on käytetty pienempää tehoa kuin reunareikien poraukseen. Kenttäreiät on jätetty pois kuvasta havainnoinnin helpottamiseksi.

Reunareivät on mahdollista porata suuremmalla teholla kuin avauksen, mutta kuitenkin pienemmällä teholla kuin kenttäreiät. Tunnelin profiili jäljittelee hyvin pitkälle reunareikiä, joten niiltä vaaditaan tarkkuutta. Kallion ulkonemat eivät saa missään tilanteessa ulottua teoreettisen profiilin sisäpuolelle ja poikkeamat profiilin ulkopuolelle riippuvat laatuluokasta (Kuva 17) [21]. Muut reiät, jotka tässä tapauksessa ovat kenttäreikiä, voidaan porata entistä suuremmalla teholla, sillä näiden toleranssit ovat suuremmat. [16.]

Laatuluokka	Tarkkuusvaatimus, mm
Luokka 1	0...200
Luokka 2	0...400
Luokka 3	0...600
Luokka 4	luokittelematon

Kuva 17 Kalliotilojen seinä-, katto- ja pohjapinnat louhitaan suunnitelma-asiakirjojen mukaan seuraaviin laatuluokkiin [21]. Tarkkuusvaatimus (mm) tarkoittaa, että louhinta ei saa jättää yhtään kovia, mutta saa ulottua profiiliin yli tarkkuusvaatimuksen mukaan.

2.4 Panostustyö

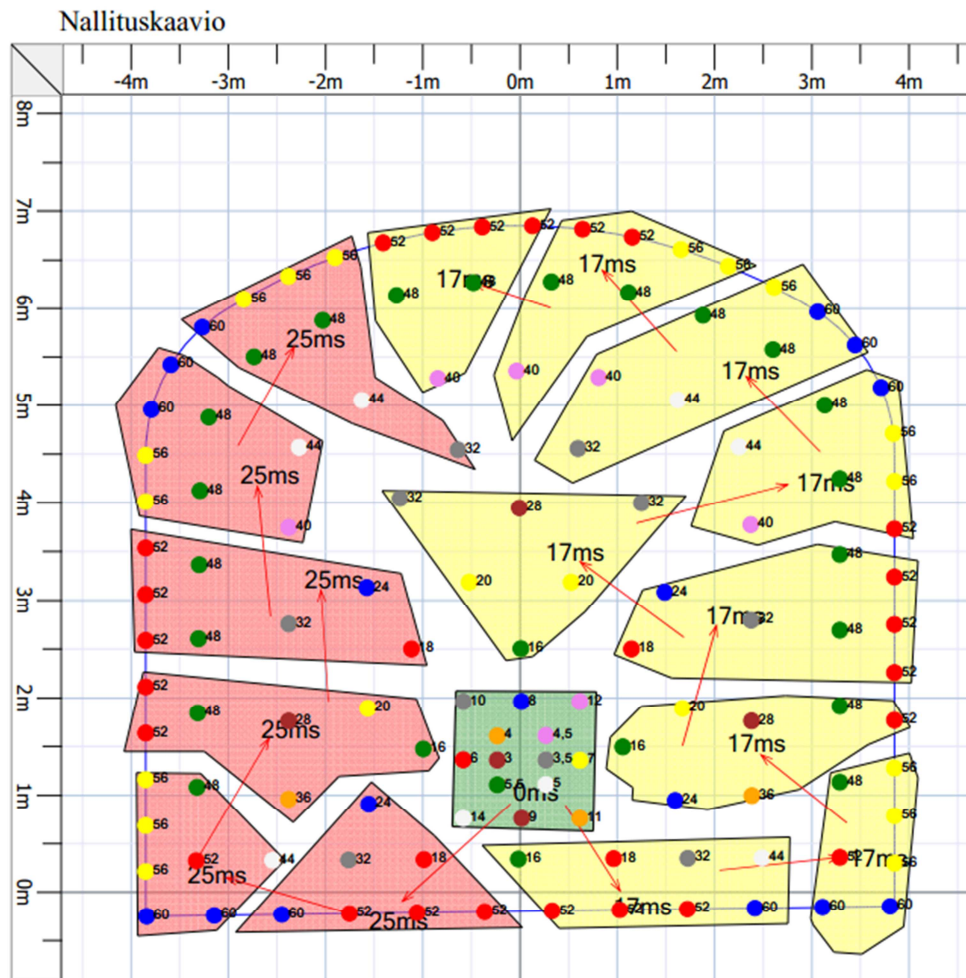
Panostustyössä poratut reiät täytetään suunnitellun panostuskaavion mukaisesti. Reiän pohjalle tulee nalli sekä mahdollisesti aloitepanos. Itse reikä täytetään räjähdeaineelle, niin että räjähdeaine on reiässä yhtenäinen. Nallin sisältämä pieni räjähdeainemäärä aiheuttaa räjähdeaineen räjähdyksen.

2.4.1 Nallitus

Nallin hidasteaika kertoo sen, miten kauan kestää ennen kuin nalli räjähtää, jolloin samalla räjähdeaine räjähtää. Nallien hidasteaikaa kuvataan millisekunneissa ja tavallisessa tunnelilouhinnassa on käytössä nalleja joista lyhimmän hidasteaika on ainoastaan 25 ms ja pisimmän 6000 ms [22]. Nalleja tältä väliltä löytyy 75 – 500 ms välein [22]. Yhdensuuntaisavauksessa, joka on yleisin menetelmä, alkaa tunnelikatkon räjähdys suurteikien vierestä (sijaitsee yleensä profiiliin poikkileikkauksen keskellä) ja etenee ulkoreunoille päin.

Yhden tunnelikatkon räjäytys koostuu useammasta pienemmästä räjäytyksestä, koska kallio turpoaa räjäytyksessä, tarvitaan tyhjää tilaa johon kiinteä kallio voi purkautua. Ensimmäisen reiän räjäytyksen kallio voi laajeta tyhjiin suurteikiin, sen jälkeen louhe lentää ulos katkosta ja antaa tyhjää tilaa seuraaville räjäytyksille. Nallien hidasteaikojen on oltava riittävän pitkät, jotta kiviaines ehtii riittävästi purkautumaan pois ennen seuraavaa räjäytystä. Mikäli kiviaines ei ehdi siirtyä riittävästi pois ennen seuraavaa ei seuraavilla räjäytyksillä yksinkertaisesti ole riittävästi tilaa purkautua ja tällöin on suuri riski, että katko jää lyhyemmäksi.

Ennen nalleja on mahdollista käyttää lisäksi pintahidasteita, joiden avulla saadaan pintahidasteen hidasteajan verran lisää aikaa räjäytykseen. Tällöin kaikki saman hidasteajan nallit eivät räjähdä tunnelikatossa samaan aikaan ja voidaan räjäyttää useita samanlaisia räjäytyksiä hiukan eri aikaan. Nallituskaaviossa nallien hidasteaika ilmoitetaan luvulla, joka kerrotaan 100 millisekunnilla, niin saadaan sen hidasteaika ja hidasteet merkitään suoraan millisekunteina (Kuva 18).



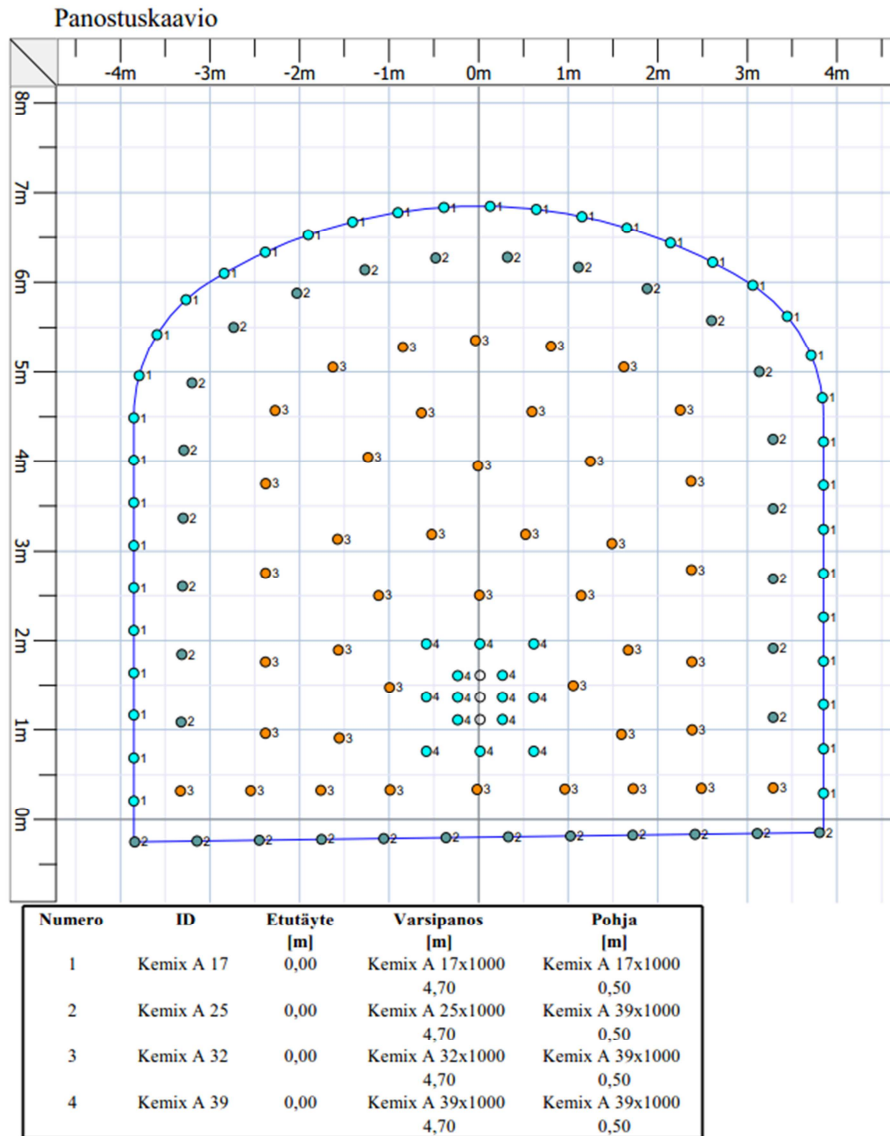
Kuva 18 [16] ISure-ohjelmalla tehty esimerkki nallituskaaviosta, josta löytyy jokaisen reiän nallit ja näiden hidasteet. Hidasteet on merkitty kuvaan, niin että vihreällä alueella on 0 ms hidasteen nallit, keltaisella alueella on käytössä 17 ms hidasteet ja punaisella on 25 ms hidasteet.

2.4.2 Räjähdeaineet

Tunnelikatkon panostuksessa on mahdollista käyttää joko emulsiota tai putkipanoksia (Kuva 19). Maanalaiseen soveltuva emulsioräjähdeaine Kemiitti 810 pumpataan porareikiin erikoisvalmisteisella panostuslaitteella. Putkiräjähteet ovat tunnelilouhinnassa 1000 mm pituisiin muovisiin putkiin pakattua räjähdeainetta. Molemmilla tavoilla panos-

tettaessa panostaminen koostuu pohjapanoksesta, varsipanoksesta ja etutäytteestä. Emulsio vaatii nallin lisäksi aloitepanoksen, esimerkiksi 25 g räjähdettä sisältävän Forp-
rimen. Pohjapanoksena käytetään suurempaa räjähdeainemäärää kg/m ja nimensä mukaisesti sijoitetaan reiän pohjalle. Suurempaa räjähdeainemäärää käytetään, jotta katkon leikkautuu mahdollisimman hyvin pohjasta irti. [23, 24, 25.]

Putkiräjähteissä pohjapanos tehdään niin, että halkaistaan putken muovikuori ja painetaan puukepillä pohjalle ja tarkoituksenaan täyttää koko reikä. Emulsiolla voidaan räjähdeainetta säätää pohjapanoksen osalta niin, että panostuslaite laittaa enemmän räjähdeainetta pohjalle. Pohjapanoksen on oltava tiukasti pohjalla ja täytettävä koko reikä, muuten on vaara että se pääsee räjähde liikahtamaan eteenpäin ja katko jää lyhyemmäksi kuin muuten olisi mahdollista saavuttaa. Varsipanoksena käytetään hiukan pienempää kg/m räjähdeainemäärää reiässä ja etutäytteellä tarkoitetaan reiän suuaukolla tyhjää pituutta. Reikää ei tarvitse panostaa aivan piri pintaan asti sillä varsipanoksen on huolehtinut siitä, että kallio on rikkoutunut etutäyteen kohdalta jo. [25.] Emulsio alkaa kaasuuntua ja turpoamaan heti panostustyön jälkeen, jolloin se täyttää panostettavan reiän [16].



Kuva 19 [16] Esimerkkitapauksen panostaminen putkipanoksilla. Panostuskaaviossa numero kertoo miten reikä tulee panostaa ja alla on vielä selitys jokaisen numeron varsipanoksesta, pohjapanoksesta sekä etutäytteestä.

3 Katkojen lähtevyys Case-tapauksissa

3.1 Katkoseuranta

Toteutuneen katkon pituus eroaa usein suunnitellusta ja siksi on tärkeää seurata, mikä verran suunniteltu katkon pituus ja toteutunut katkon pituus eroavat toisistaan. Seuranta voi yksinkertaisimmillaan olla yksi A4-kokoinen paperi, johon on kirjattu sarakkeisiin katkoa koskevat tiedot (Kuva 20). Urakoitsijalle maksetaan usein tehtyjen tunneli-

metrien mukaan, joten on suositeltavaa, että räjäytettävä katko irtoaa vähintään yhtä hyvin kuin on suunniteltu.

Työmaa	Räjäytys nro	PL alku	PL loppu	Katkon pituus (m)	Porauskaavio	Panostus-kaavio	Pvm	Kello	Huomioita
Työmaa 1	1	-	4,80	4,80	Kaavio 2 (5,0 m)	Kaavio 1	4.1.2016		
Työmaa 1	2	4,80	9,50	4,70	Kaavio 2 (5,0 m)	Kaavio 1	5.1.2016		
Työmaa 1	3	9,50	14,40	4,90	Kaavio 2 (5,0 m)	Kaavio 1	7.1.2016		
Työmaa 1	4	14,40	19,10	4,70	Kaavio 3 (5,0 m)	Kaavio 2	7.1.2016		
Työmaa 1	5	19,10	23,50	4,40	Kaavio 3 (5,0 m)	Kaavio 2	7.1.2016		
Työmaa 1	6	23,50	23,50	-	Korjaus		7.1.2016		Korjausampu
Työmaa 1	7	23,50	28,00	4,50	Kaavio 3 (5,0 m)	Kaavio 2	9.1.2016		
Työmaa 1	8	28,00	32,80	4,80	Kaavio 3 (5,0 m)	Kaavio 3	9.1.2016		
Työmaa 1	9	32,80	36,80	4,00	Kaavio 4 (4,5 m)	Kaavio 3	10.1.2016		
Työmaa 1	10	36,80	41,00	4,20	Kaavio 4 (4,5 m)	Kaavio 3	10.1.2016		
Työmaa 1	11	41,00	45,10	4,10	Kaavio 4 (4,5 m)	Kaavio 3	12.1.2016		

Kuva 20 Esimerkki yksinkertaisesta pöytäkirjapohjasta, jolla voidaan tehdä katkoseurantaa.

3.1.1 Lähtevyysprosentin laskeminen

Lähtevyys lasketaan yhden katkon kohdalla toteutunut pituus jaettu suunnitellulla pituudella. Jumbo navigoi itselleen niin sanotun nollakohdan, josta katkon poraus alkaa ja porareilla on eri kohtia tunneliperässä johon he navigoivat nollakohdan. Katkokaavioon merkitään alkupaaluksi navigointi piste ja loppupaaluksi seuraavan katkoporauksen navigointipiste. Tunnelin perä on aina jonkin verran muhkurainen ja osa navigoi jumbon tunneliperän syvimpään kohtaan ja osa navigoi jumbon uloimpaan pattiin. Tästä johtuen yksittäisten katkojen lähtevydet saattavat poiketa toisistaan merkittävästi vaikka niissä ei olisikaan eroa.

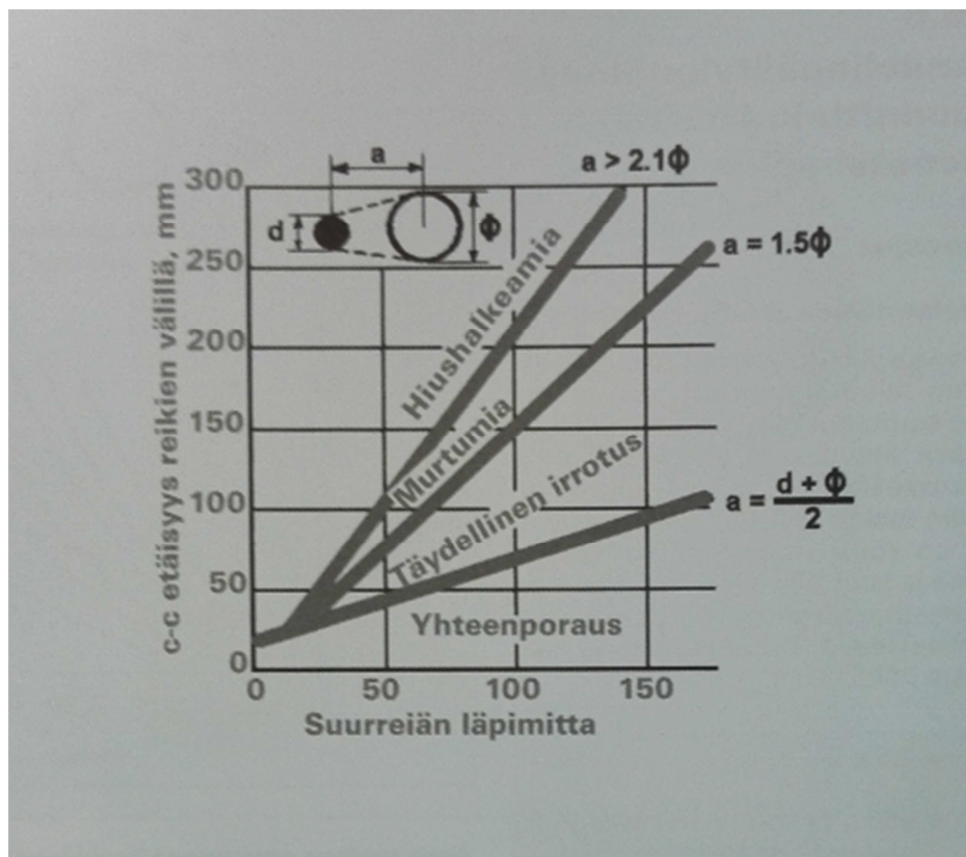
Lähtevyysprosentin laskeminen voidaan suorittaa esimerkiksi laskemalla toteutunut tunnelimetrimäärä siihen käytettyjen suunniteltujen katkojen yhteispituudella. Tästä muodostuu sekä suunnitellulle että toteutuneelle katkolle aritmeettinen keskiarvo, josta yleisesti puhutaan pelkkänä keskiarvona. Aritmeettisen keskiarvon käyttäminen tulevan ennustamisesta on usein paras ennustus [26].

3.1.2 Tunnelin avaus suureikämenetelmällä

Nykyisin hyvin usein käytetty tunnelin avaus on yhdensuuntaisavaus, joka on yleistynyt poraustehon ja poraustarkkuuden kehityksen ansiosta. Lisäksi yhdensuuntaisavauksissa on mahdollista päästä pienimmissä tunneleissa suurempiin katkopituuksiin. Tunne-

liavauksen suunnittelu onnistuu teoriapohjalta, jossa lähtötietoina riittää suureiän läpimitta (mm) ja porausreiän läpimitta (mm). [15, s.227.]

Suureiän keskipisteen etäisyys panostetun reiän keskipisteestä kertoo, minkä verran kalliota irtoaa yhden reiän räjäytyksessä. Täydellinen irrotus tapahtuu, kun suureiän keskipisteen etäisyys panostetun reiän keskipisteestä on puolitoista kertaa suureiän halkaisija (Kuva 21). Kuvasta nähdään myös, että suurempi etäisyys reikien välillä, ei irrota enää kalliota, vaan aiheuttaa ainoastaan rakoilua. [15, s. 227.]



Kuva 21 Räjätystulos suureikäräjäytyksissä eri suureikäpimitoilla ja suureikien sekä panostettujen reikien läpimitoilla. ϕ :llä tarkoitetaan suureiän halkaisijaa ja d :llä vastaavasti panostettavan reiän halkaisijaa. [15, s. 227.]

Etäisyyden a ollessa $(d+\phi)/2$ porautuvat reiät yhteen. Porattaessa avasta ovat reikien välit melko pieniä, niin on todella tärkeää, että poraustyö on tarkkaa. Pienellä suureiän läpimitalla yhdistyvät suureikä ja panostettava reikä jo pienelläkin virheporauksella ja mikäli reikien etäisyys kasvaa, ei räjähdä jaksa irrottaa kalliota. [15, s. 227.] Mikäli ensimmäisen räjähtävän reiän keskipisteen etäisyys suureiän keskipisteestä on pienempi kuin 1,5 kertaa suureiän halkaisija muodostuu suurempi riski, reikien yhteenporaukselle, mutta aiheuttaa se myös ylimääräisiä kuluja. Tällaisella varmuuskertoimella saa-

daan pienempi määrä louhetta irrotettua kuin mihin teoreettisesti olisi mahdollista. Ylimääräisten kulut aiheutuvat siitä, että reikiä joudutaan poraamaan yhteen katkoon enemmän, jos varmuutta käytetään paljon ja reiät panostetaan samalla räjähdaineella vaikka ne olisivat lähempänä kuin teoreettinen etäisyys antaisi luvan.

Suurreikien lähellä panostus on tehtävä tarkasti, sillä suurella panostusasteella (kg/m) on mahdollista, että panostettava reikä purkaa vastakkaiselle puolelle suuremman yli ja painaa vastakkaisen panostetun reiän niin sanotusti kuolleeksi ja se jää räjähtämättä [25].

3.2 Kallio-olosuhteiden vaikutus

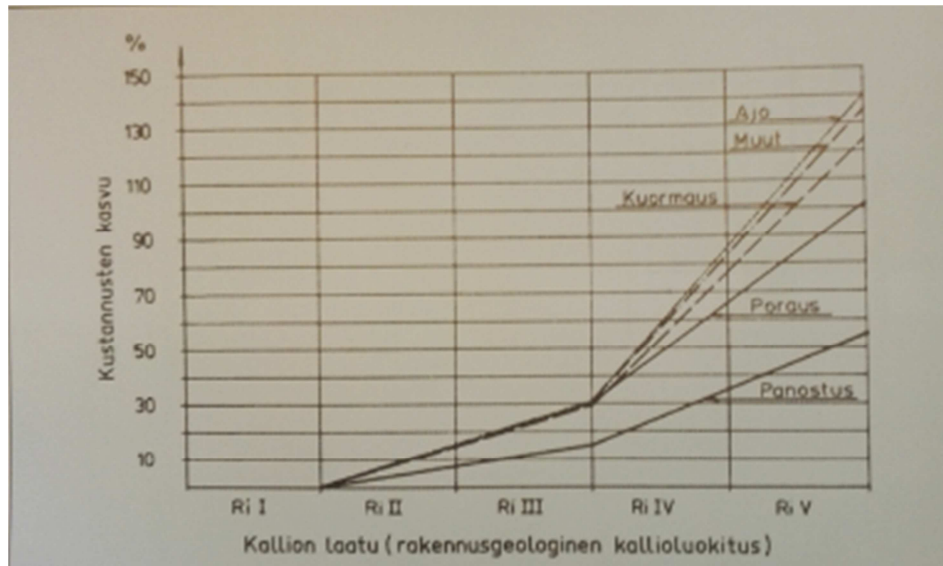
Kallion laatua kuvataan kallion rikkonaisuuden mukaan. Huonoin luokka on silloin, kun kallio on erityisen rikkonaista ja halkeamat ovat täyttyneet kalliosavella. Rikkonaista kalliota kuvataan Ri tunnuksella ja numeroin 1 – 5, josta 5 on hankalin. Luokissa Ri I ja Ri II louhintaan ei muodostu haittaa eikä sen suuremmin lujitus- ja tiivistystöihin, mutta louhintajälki voi paikoin olla heikkoa. Luokan Ri III kalliossa on louhinnassa jo paikoin työn hidastumista ja runsaita vesivuotoja ilmenee, joka johtaa injektointityön kasvamiin. Ri III eli murrosrakenteisessa luokassa on kallion lujitustarve jo keskimääräistä suurempi ja louhintajälki on yleensä heikkoa. [9, s. 79–80.]

Luokassa Ri IV eli ruhjerakenteisessa kalliossa, joka on runsas- tai tiheärakoista kalliota ja se sisältää jo huomattavia vaikeuksia louhintatyössä. Alueella on runsaasti injektointia vaativia vesivuotoja ja satunnaisesti louhintatyönäikaisia lujitustöitä. [9, s. 80.] Louhintatyön aikaiset lujitustyöt pitävät sisällään turvapulttauksen sekä turvaruiskubetonoinnin, jotka keskeyttävät louhintatyön. Tavallisesti pulttusta ja ruiskubetonointia tehdään louhintatyön jälkeen, mutta turvallisuussyistä sitä joudutaan tekemään paikoin jokaisen katkon jälkeen.

Savirakenteinen Ri V luokka eroaa luokasta Ri IV vain niin, että kallion raoissa on runsaasti savea sekä lujitustarve on vielä suurempi. Luokassa Ri V on vielä lisäksi vaaraa sortumalle sekä ryöstöille, josta aiheutuu työkatoja. [9, s. 79–80.]

3.2.1 Lisäkustannusten jakautuminen RG-luokituksen mukaan

Kustannusten kasvu tapahtuu niin, että mitä rikkonaisempaa kallio on sitä suuremmaksi kustannukset muodostuvat. Kustannusten kasvu on mahdollista jakaa panostukseen, poraukseen, kuormaukseen, ajoon ja muihin (Kuva 22). Poraus ja panostus ovat työvaiheet, jotka muodostavat merkittävimmän osuuden kustannusten kasvusta.



Kuva 22 Arvio kustannusten kasvuprosentista rakennusgeologisen kallioluokituksen mukaan [15, s. 250].

Poraustyötä rikkonaisessa kivessä hidastavat halkeamat, jotka nykyaikaiset jumbot osaavat tunnistaa ja alentavat poraustehoa näissä, jotta porauskanget eivät lähde kiertämään halkeaman mukana. Tunneliporauksessa ohjataan porausreiästä kivipöly vesihuuhtelun avulla pois ja huuhtelupaine irrottaa luokissa Ri IV sekä Ri V savea halkeamista, jotka voivat pahimmassa tapauksessa aiheuttaa porakanget kiinnijäämisen. Hankalassa savilustassa voi joutua välillä huuhtelemaan edestakaisin reikää, jotta irtoaines tulee ulos. Huuhtelun kova paine saattaa irrottaa savilustasta savea pitkältikin matkalta. [16.]

Panostuksessa lisäkustannukset muodostuvat pääosin siitä, että tukkeutuneita reikiä joudutaan avaamaan. Pohjareiät suojataan tyypillisesti heti alussa porausreikään juuri ja juuri sopivilla letkuilla joiden päät nostetaan ylös, jotta poraussoija ei pääse valumaan porauksen aikana pohjareiäkiin ja näin tukkien ne. Tukkoreiät avataan niin, että käytetään jumbon porauskankea porausreiässä pelkällä vesihuuhtelulla. Mikäli reiässä on kivi jumissa, voidaan se rikkoa iskettämällä kiveä ja huuhtelemalla irtoaines ulos reiästä.

Tukkoreiät on avattava ennen kuin tehdään panostustyötä sillä on mahdollista, että panostettavassa reiässä oleva räjähdaine räjähtää, jos siihen porataan. Tukkoreikien avaukseen sovelletaan Valtioneuvoston päästöstä räjäytys- ja louhintatyön järjestysohjeista kohdassa § 28:

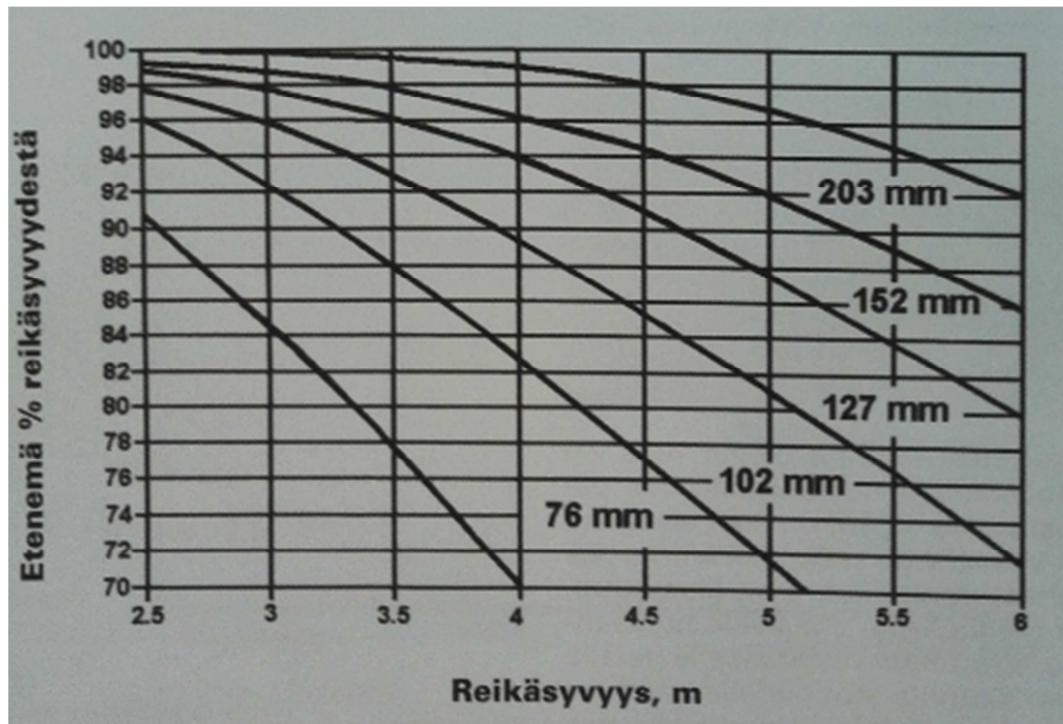
Poraamista ja panostamista saa samanaikaisesti suorittaa vain silloin, kun porattavien ja panostettavien reikien keskinäinen etäisyys on riittävä ja vähintään viisi metriä. Poraamista ei saa suorittaa kahta metriä lähempänä panostettua reikää eikä suoraan panostettavan reiän yläpuolella. (22.2.1996/121)

Veden alla tai porausreiän tukkeutumisvaaran muuten niin edellyttäessä voidaan poiketa siitä, mitä 3 momentissa on määrätty. Poraamista ei kuitenkaan saa suorittaa 0,8 metriä lähempänä panostettua reikää. [27, 28 §.]

Kuormauksen sekä ajon pientä kustannusten kasvua voidaan selittää sillä, että kiven laadulla ei ole vaikutusta kuormaukseen tai kuljetukseen. Kustannusten kasvu näiden osalta selittyy sillä, että heikossa kalliossa ryöstöt kasvavat, koska kallio on rikkonaisempaa. Kustannusten kasvu kuormauksen ja ajon osalta selittyy siis louheen määrän kasvulla.

3.3 Vaikuttavan suurreiän läpimitan vaikutus katkon lähtevyyteen

Katkon lähtevyys lasketaan todellinen irronnut katkon pituus jaettuna suunnitellulla pituudella, josta saadaan prosenttiluku. Tämä prosenttiluku kertoo katkon lähtevyyden. Mitä lähemmäksi 100 prosenttia luku saadaan, sitä parempi se on. Katkon lähtevyyteen on olemassa suuntaa antavia lukuja (Kuva 23).



Kuva 23 Lähtevyyden riippuvuus katkon pituudesta sekä vaikuttavan suurreiän halkaisijasta [15, s. 227].

Jumboilla poratessa suurreiän halkaisijana tyypillisesti käytetään 102 mm halkaisijaltaan olevaa porauskruunua. Suurreikä porataan niin, että ensi porataan suurreiän keskikohtaan tavallisella porauskruunulla reiät, jonka jälkeen nämä reiät avarretaan suuremmalla porauskruunulla. [17.] Mikäli käytetään enempää kuin yhtä suurreikää voidaan vaikuttavan suurreiän halkaisija laskea seuraavalla tavalla:

$$D = \emptyset\sqrt{n}$$

D = vaikuttava suurreikä (mm)

\emptyset = suurreiän läpimitta (mm)

n = suurreikien lukumäärä [15, s.227].

Kuten aiemmasta kuvaajasta huomataan, on vaikuttavalla suurreiän läpimitalla todella suuri merkitys katkon lähtevyyteen. Suuremmalla vaikuttavan suurreiän D koolla ja

lyhyemmällä katkolla saadaan lähtevyyttä parannettua. Koska suurreikien lukumäärä on neliöjuuressa edellisessä kaavassa, ei niiden määrää ole mielekästä lisätä tarpeetoman paljoa, koska suurreikien poraus on aikaa vievää ja suhteellisen kallista tavallisen porausreiän poraukseen nähden. Jo neljällä suurreiällä päästään 102 mm reikäkoolla korkeimmalle käyrälle ($204 = 102\sqrt{4}$).

3.3.1 Suurreiän lisäys avaukseen

Yhden suurreiän poraukseen 5,0 metrin mittaisessa katkossa kuluu aikaa yhdeltä puomilta noin 15 min [17]. Poraustyötä on katkossa tietty määrä ja optimi tilanteessa porausmäärä jakautuu jokaiselle jumbon puomille tasaisesti. Jumbojen puomien lukumäärä vaihtelee tyypin mukaan, mutta yleisesti käytössä on 2- tai 3-puomisia jumboja. 15 minuutin lisäys poraukseen 3-puomisella, kun poraus jakautuu tasaisesti kaikille puomeille tuo poraukseen lisäaikaa vain 5 minuutin verran. Asiaa ei voi ajatella kuitenkaan niin mustavalkoisesti, että yhden suurreiän lisäys tarkoittaisi porausajan lisäystä 5 minuutilla.

Ajatellaan, että porataan 130 kpl panostettavia reikiä ja yhdellä suurreiän lisäyksellä kolmesta neljään saadaan 5,0 metrin katkoa irrotettua 9 cm enemmän (Kuva 24). Tällöin seuraavan katkon säästö porauksen osalta on $0,09 \text{ m} \times 130 = 11,7$ metriä panostettavissa reissä ja suurrei'issä $0,09 \times 3 = 0,27$ metriä. Eli yhden 5,0 metrin suurreiän lisäyksellä saatiin seuraavasta katkosta säästettyä 11,7 metriä panostettavia reikiä sekä suurreikiä 0,27 metriä. Yhteys suurreiän ja panostettavan reiän välille voidaan yksinkertaisesti ajatella olevan niin, että suurreikä on neljä kertaa kalliimpi ja hitaampi [17]. Nyt saadaan yhteys ja voidaan laskea kuinka paljon todellisuudessa yhden suurreiän lisäys tuo porausta lisää.

$$5,0 - 0,27 - \frac{11,7}{4} = 1,805 \text{ m}$$

Eli todellisuudessa yhden 5,0 metrin suurreiän lisääminen tässä esimerkkitapauksessa toikin vain 1,81 metriä lisää suurreikäporausta, mutta katkoa saatiin irrotettua 9 cm enemmän. Porausajan lisäys oli yhdessä katkossa aiemmin mainittu noin 5 minuuttia, mutta koko työmaanajalle porausta ei tullut läheskään niin paljoa, koska tunnelia saatiin enemmän louhittua.

Hukkaa (m)	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	
102	0,05	0,12	0,25	0,42	0,65	0,95	1,29	1,68	1 kpl 102
127	0,04	0,06	0,14	0,24	0,41	0,63	0,88	1,20	
144	0,03	0,05	0,10	0,18	0,30	0,47	0,69	0,95	2 kpl 102
152	0,03	0,05	0,08	0,16	0,25	0,40	0,61	0,84	
177	0,01	0,03	0,05	0,10	0,17	0,29	0,46	0,67	3 kpl 102
203	-	0,02	0,02	0,04	0,09	0,18	0,30	0,48	4 kpl 102

Kuva 24 Ylärivillä on katkon pituus ja ensimmäisessä vaakarivillä on vaikuttavan suurriän halkaisija. Arvot ruudukossa kertovat paljonko katkoa jää irtoamatta. Arvot on laskettu pohjautuen Raimo Vuolion ja Tommi Halosen kirjaan Räjätystyöt s.227 [15]. Arvot 144 ja 177 on arvioitu lineaarisesti tunnetun ylemmän ja alemman arvon perusteella.

Arvot taulukossa ovat teoreettisia ja yhden suurriän lisäys porauskaavioon ei automaattisesti tarkoita, että lähtevyys paranee, mikäli porauskaaviossa avaus ei ole toimiva. Kun muutoksia on tehty, on hyvä seurata katkoraporteista jonkin aikaa onko suurriän lisäyksellä tai vähennyksellä ollut vaikutusta katkon lähtevyyteen. Ylimääräisiä reikiä ei tietenkään kannata porata, jos vähemmällä reikämäärällä onnistutaan samantyyppiseen lähtevyyteen.

Taulukkoa tarkkailemalla huomataan, että katkoa lyhentämällä saadaan lähtevyyttä huomattavasti parannettua. Tärinäherkissä kohteissa tärinää vähennetään lyhentämällä katkon pituutta ja esimerkiksi 3,0 metrin katkon hukka kahdella 102 mm suurriällä on 5 cm ja neljällä suurriällä 2 cm, eli lyhennetyillä katkoilla päästään korkeaan lähtevyyteen myös pienemmällä suurriällä, jolloin niitä on mahdollista vähentää katkon lähtevyyden sen suuremmin kärsimättä.

3.4 Vaikuttavan suurriän ja kallio-olosuhteiden yhteys

Poratulla tunnelikatkon pituudella sekä laskemalla vaikuttavan suurriän halkaisija voidaan arvioida tunnelikatkon lähtevyyttä edellä mainitun taulukon mukaisesti. Hyvästä kivistä puhuttaessa tarkoitetaan kovaa ja ehjää kiveä, jonka porausaika voi olla jopa pidempi kuin normaalisti ja kivi kuluttaa porakruunuja enemmän kuin rikkonainen kivi. Ehjässä ja kovassa kivessä katkon lähtevyys on varmempaa ja tunnelin pinta on siilempi. [28.]

Räjähteen räjähtäessä reiässä aiheuttaa se kovan paineen joka rikkoo kalliota. Ehjässä kalliossa paine pysyy hyvin reiässä ja koko räjähteen energia menee kallion rikkomiseen. Rikkonaisessa kalliossa syntyvä paine pääsee osittain purkautumaan kallion rakoja pitkin ja näin se menettää tehoaan. Tämä osittain sen, että rikkonaisessa kivessä joudutaan suorittamaan korjausampuja. Rikkonaisessa kivessä riski, että katko jää

merkittävän lyhyeksi, on myös suuri ja ennustettavuus räjäytyksissä on huonompaa. [28.]

Ehjässä ja kovassa kalliossa on mahdollista, että katkon lähtevyys onnistutaan saamaan kolmella suurella lähestulkoon samaan kuin neljällä suurella tosin sanoen $177 \text{ mm} (= 102\sqrt{3})$ on hyvin lähellä $204 \text{ mm} (= 102\sqrt{4})$ käyrää, jolloin tietenkin valitaan suureikien lukumääräksi pienempi. Rikkonaisessa kivessä eri vaikuttavien suureikien käyrien väliset erot kasvavat ja tällöin pystytään helpommin perustelevaan enempien suureikien käyttöä. [28.]

3.5 Optimi katkon pituus

Louhintatyöt ovat räjäytysten osalta pääkaupunkiseudulla hyvin rajoitettuja eli on tiettyjä aikoja jolloin voi räjäyttää vaikka muita töitä voisi tehdä ympäri vuorokauden, joka usein johtaa siihen, että yhdestä tunneliperästä ei saada enempää tai vähempää katkoa vuorokaudessa vaikka katkon pituutta muutettaisiin suuntaan tai toiseen.

Kuten aiemmin huomattiin, saadaan lähtevyyttä parannettua lyhentämällä katkoa tai poraamalla lisää suureikiä. Hukkametreille voidaan laskea jonkinlainen euromääräinen summa sekä suureiän poraukselle, jotka ovat yritykselle molemmat menoeriä. Mikäli ainoastaan nämä asiat vaikuttaisivat, olisi taloudellisesti järkevintä louhia mahdollisimman lyhyitä katkoja. Koska työmaalla on aikasidonnaisia kustannuksia aiheuttaa tämä sen, että jokaisesta säästetystä työpäivästä saadaan nämä aikasidonnaiset kustannukset säästettyä yritykselle ja optimaalinen katkon pituus saadaan, kun annetaan hinta säästetylle työpäivälle, hukkametreille ja suureiän poraukselle. Optimi katkon pituus tulee muuttumaan sen mukaan kuinka tärkeänä näitä edellä mainittuja pidetään.

Mikäli tunneliperiä on työmaalla käynnissä useampi samanaikaisesti, on mahdollista saada synergiaetua siitä, että resursseja pystytään jakamaan tarpeen mukaan eri kohteisiin ja tällöin aikasidonnaiset kustannukset jakautuvat yhden tunneliperän sijaan useammalle.

Jumbolla on tietty reikäpituus, jonka se voi porata yhdellä porauskangella (Kuva 25). Injektoinnissa porataan pidempiä reikiä, jolloin porauskankia voidaan lisätä ja näin porata pidempiä reikiä, mutta tämä hidasta jonka takia katkon porauksessa ei näin mene-

tellä. Näin ollen porauslaite voi muodostua rajoittavaksi tekijäksi katkon pituudessa vaikka taloudellisesti olisi järkevämpää pyrkiä pidempään katkoon.

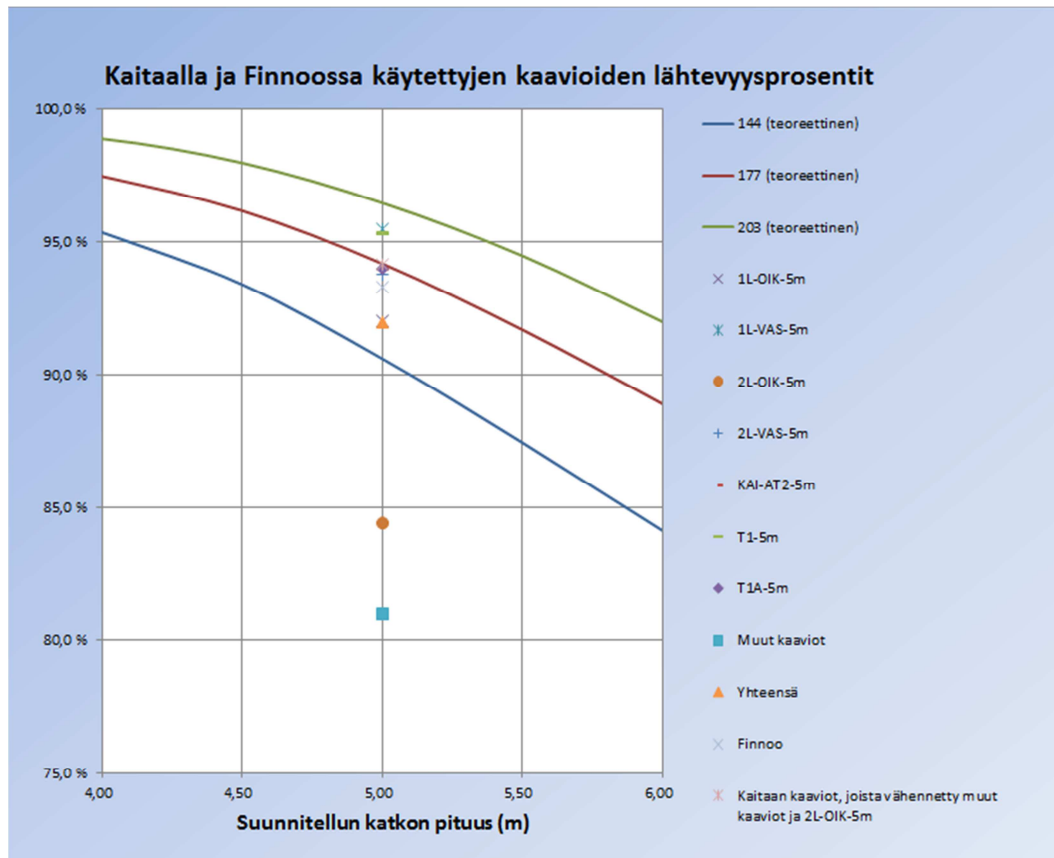


Kuva 25 [29.] Jumbon porauskangen pituus valitaan porauspuomin mukaan.

4 Tulokset ja vertailu

4.1 Katkoseuranta Kaitaalta ja Finnoosta

Katkon lähtevyysprosentin laskemiseen on tehty katkoseurantaa Kaitaalla ja Finnoossa, johon on merkitty vähintään katkon numero, alkupaalu, loppupaalu sekä käytetty kaavio. Näiden perusteella on pystytty tekemään yhteenveto, jossa eri kaavioiden toimivuutta on mahdollista vertailla (Kuva 26). Jokaisen kaavion avauksessa on ollut käytössä 3 suureikää, joiden läpimitta on 102 mm, näin ollen vaikuttavan suureiän halkaisijaksi muodostuu 177 mm ($177 = 102\sqrt{3}$). Kaiken kaikkiaan vertailu käsittää 46 katkoa Kaitaan louhinnasta sekä 25 katkoa Finnoon louhinnasta. Tästä katkoseurannasta on jätetty erikoistapaukset pois, kuten tunnelin levitykset, yhdystunnelin tekeminen ja korjausräjäytykset.



Kuva 27 Ohjearvot lähtevyyksille on piirretty käyrillä, jossa 144 on kahdella suurreiällä, 177 kolmella ja 203 on neljällä suurreiällä. Eri kaavioiden tulokset on merkitty kuvaajaan pisteillä.

Kuvaajasta (Kuva 27) havaitaan, että kolmella suurreiällä eri kaavioiden lähtevyysprosentit ovat sijoittuneet hyvin lähelle teoreettista lähtevyyden käyrää. Muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta kaaviot ovat toimineet hyvin. Kolmella suurreiällä on onnistuttu saamaan parempi lähtevyys kuin olisi mahdollista kahdella suurreiällä, mutta kuitenkin huomattavasti mihin neljän suurreiän käyttö antaisi mahdollisuuden.

4.2 Optimaalisen katkon pituuden laskeminen käytännössä

Yksinkertaisia tapoja parantaa lähtevyyttä on vähentää suunniteltua katkon pituutta mahdollisimman lyhyeksi ja lisätä suurreikien määrää, mutta taloudellisesti se ei ole paras ratkaisu, jonka tulemme huomaamaan. Optimaalisessa katkon pituuden arvioinnissa on otettava huomioon louhintatyöhön liittyvät aikasidonnaiset kustannukset sekä työkustannukset. Seuraavassa optimoinnissa on otettu tarkasteluun säästetty työvuoro, hukkametri ja suurreiän kustannus. Hukkametrimillä tarkoitetaan sitä kustannusta joka muodostuu siihen katkon osaan joka jää räjäytyksessä lähtemättä. Hukkametrimin kustannukset muodostuvat pääosin reikien porauksesta, räjähdettäineistä ja panostustyös-

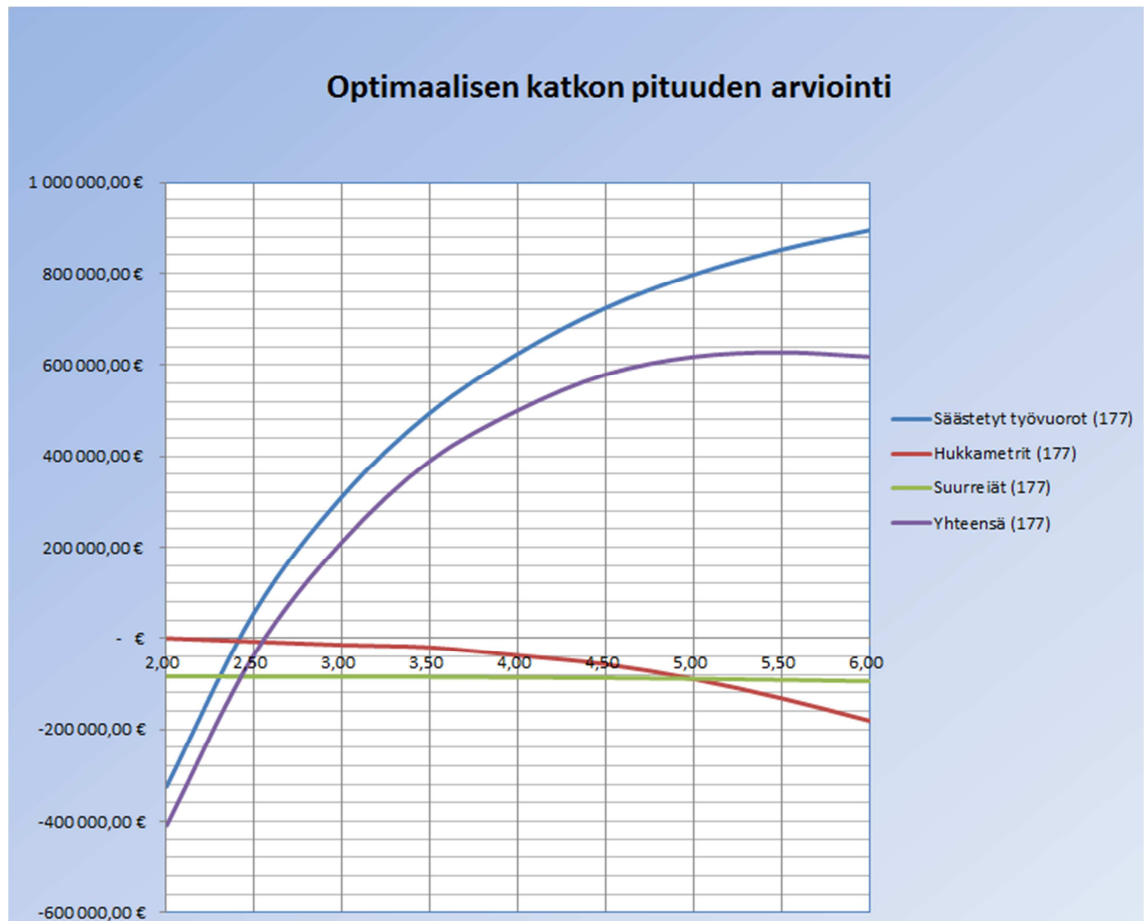
tä. Hukkametrin hinnaksi on arvioitu 1450 €, kun otetaan huomioon poraustyö, räjähdäinekkustannukset sekä ylimääräinen panostustyö [30]. Suurreiän porauksen on oletettu olevan noin 28 €/m yhtä suureikää kohden, eli neljällä suureiällä muodostuu hinnaksi 112 €/m suureiille.

Säästetyssä työvuorossa on arvioitu saavutettua kustannussäästöä työvuoroa kohden, kun työmaa saadaan aikaisemmin päätökseen. Monet kustannukset ovat aikaan sidottuja ja ne joudutaan maksamaan vaikka työ ei etenisikään. Materiaalikustannuksia ei kuitenkaan työvuorossa synny mikäli työtä ei tehdä. Yhden työvuoron kustannuksia on arvioitu alla [30].

- Pyöräkuormaaja	800 €
- 3 Kuorma-autoa	1950 €
- Jumbo	3800 €
- 2 Työnjohtajaa	1000 €
- Työmaatukikohta	100 €
- Työmaa-autot	150 €
- <u>Yhteensä</u>	7800 €

Edellä mainituilla resursseilla pystytään louhimaan kahta tunneliperää, jonka jälkeen vaaditaan jo toinen jumbo ja muitakin resursseja [30]. Seuraavissa esimerkeissä on oletettu, että näillä resursseilla tehdään kahta tunneliperää eli yhdelle tunneliperälle muodostuu työvuorosta kustannuksia 3900 €.

Edellä mainittujen lähtötietojen avulla on mahdollista arvioida yhden tunneliperän kohdalla kustannuksien muodostumista eri katkon pituuksilla. Oletuksena on ollut, että tunnelikatkoja tehdään yksi työvuoroa kohden ja lähtevyytenä on käytetty ohjearvoja (Kuva 23). Esimerkissä on tehty yhtä tunneliperää 1000 metriä ja ”todellinen” tehty tunnelimetrimäärä on voitu arvioida lähtevyyden mukaan. Lähtevyydestaulukon avulla voidaan arvioida kuinka monta työvuoroa menee tietyllä katkon pituudella koko tunnelin tekeminen. Esimerkissä on piirretty kuvaajaan (Kuva 28) hukkametrin, suureiät ja säästetyt työvuorot, kun olisi tehty kolmella suureiällä.

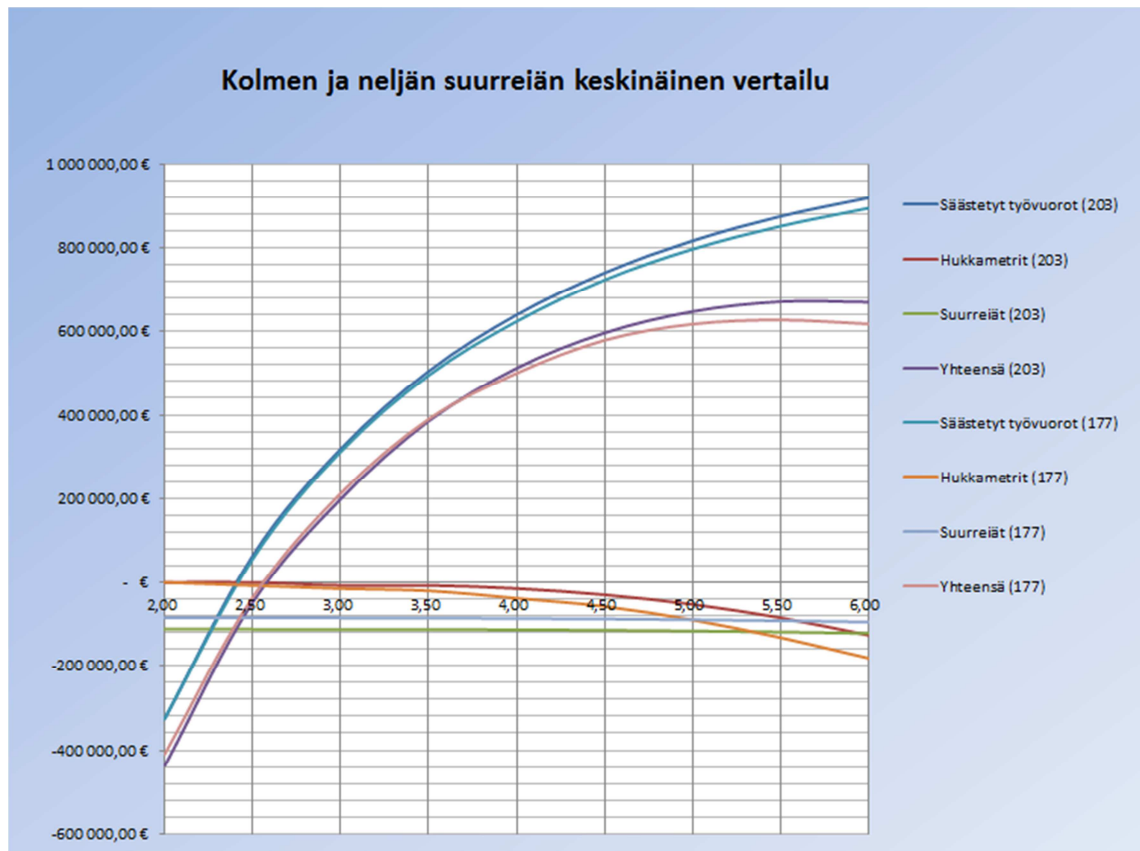


Kuva 28 Optimaalinen katkon pituus luetaan "yhteensä"-käyrältä niin, että tarkastetaan tämän suurin arvo pystyakselilta ja tarkastetaan vaak akselilta käytetty katkon pituus. Tässä esimerkissä optimaalinen katkon pituus on noin 5,50 metriä.

Mitä suuremman arvon käyrä antaa, sitä suurempi on kustannussäästö yritykselle. Säästö työvuoroissa kasvaa koko ajan katkon pituuden kasvaessa ja sen arvot ovat merkittävästi riippuvaisia käytetystä katkon pituudesta. Hukkametrien hinta on myös merkittävästi riippuvainen käytetystä katkon pituudesta, mutta siitä suurempi katkon pituus aiheuttaa enemmän kustannuksia. Suurreiän kustannusvaikutus pysyy melko vakiona eri katkon pituuksien mukaan, koska tässä esimerkissä lähtevyys on myös 6,0 metrin katkossa melko hyvä.

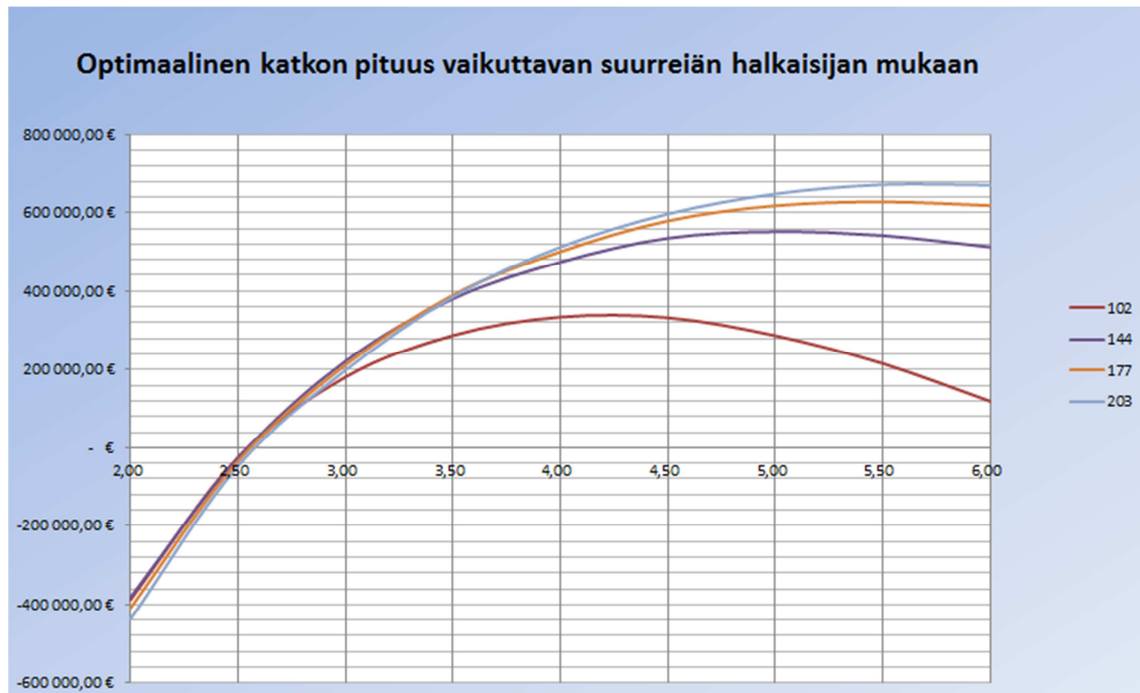
Seuraavassa esimerkissä on tarkasteltu samassa kuvaajassa (Kuva 29) optimaalisen katkon pituutta, kun tunnelia tehdään kolmella tai neljällä suurreiällä. Neljän suurreiän käyttämisestä kuvaaja näyttää hyvin samanlaiselta verrattuna kolmen suurreiän käyttämiseen. Merkittävimpana erona, on että suurreikien poraus tulee kalliimmaksi ja katkon lähtevyyden parantuessa hukkametrit vähenevät. Paremman lähtevyytensä ansiosta olisi neljän suurreiän käyttäminen kokonaistaloudellisesti parempi vaihtoehto. Tutkimuksen mukaan neljän suurreiän (203) käyttö olisi parempi kaikissa katkon pituuksis-

sa yli 3,50 metriä. Neljän suurreiän käytöllä optimaalinen katkon pituus asettuu 5,70 metrin kohdalle ja kolmea suurreikää käytettäessä noin 5,50 metrin kohdalle.



Kuva 29 Vertailussa kolmen (177) ja neljän (203) suurreiän käyttö.

Lopuksi on tarkasteltu pelkästään ”yhteensä”-käyrää ilman erillistä jaottelua yhdellä, kahdella, kolmella ja neljällä suurreiällä (Kuva 30). Mitä vähemmän suurreikiä käytetään sitä suuremmaksi hukkametrit kasvavat, jonka takia lyhyemmän katkon käyttäminen on näissä tapauksissa parempi vaihtoehto.



Kuva 30 kuvaajassa on laskettu 1 (102), 2 (144), 3 (177) ja 4 (203) suureiälle optimaalinen katkon pituus.

Kuvaajissa pystyakselin kustannukset kertovat ainoastaan eri tapauksien keskinäiset erot. Optimaalinen katkon pituus riippuu hyvin paljon siitä, minkälaiset ovat työmaan aikasidonnaiset kustannukset ja hukkametrin kustannus. Optimaalinen katkon pituus kasvaa, mikäli työvuorosäästöä on esimerkiksi suurempi ja vastaavasti pienenee, mikäli säästö on pienempi. Hukkametrin kustannuksen kasvaessa optimaalinen katkon pituus pienenee ja vastaavasti pienentyessä katkon pituutta olisi kasvatettava. On mahdollista, että jumbon kyky porata katkon pituus muodostuu rajoittavaksi tekijäksi. Suurreikien kohdalla kustannukset ovat hyvin vähän riippuvaisia käytetystä katkon pituudesta, mikäli lähtevyys pysyy hyvänä.

5 Yhteenveto

Insinööriyön tarkoituksena oli selvittää katkon lähtevyteen vaikuttavia tekijöitä ja samalla parantaa katkon lähtevyttä. Työn teoriaosuus koottiin alan kirjallisuudesta sekä asiantuntijalausuntojen pohjalta. Lähtevyysprosentteja laskettiin Kaitaan ja Finnoon tunneleiden louhinnassa katkoraporttien pohjalta ja pystyttiin, jopa vertailemaan erilaisien kaavioiden toimivuutta. Eri kaavioiden lähtevydet listattiin taulukkoon, josta näkyvät ohjearvot ja vertailussa havaittiin lähtevyksien noudattavan todella hyvin teoreettisia arvoja.

Työn aikana pohdittiin työvaiheista poraustyön ja panostustyön vaikutusta katkon lähtevyyteen. Poraustyötä pidetään tärkeimpänä työvaiheena ja sen onnistuminen mahdollisimman tarkasti suunnitelmien mukaan on elintärkeää. Poraustyö suunnitellaan iSure-ohjelmalla, jonka mukaan jumbo suorittaa porauksen ja poraustyön onnistuminen on mahdollista tarkastaa MWD-datan avulla. Poraustyössä pohdittiin lisäksi panostettavien reikien kokoa ja panostamattomien suurreikien porausta.

Kallio-olosuhteita on mahdollista arvioida esimerkiksi RG-luokituksen tai Q-luokituksen avulla ja lisäksi merkittävät halkeamat kalliossa voidaan tunnistaa jumbolla porauksen aikana. Kallion laatua pidetään huonona silloin, kun se on rikkonaista, koska silloin räjähdaine ei välttämättä toimi normaalisti. Räjähdaineen räjähdyksessä aiheutu- neesta paineesta osa pääsee purkautumaan rakoja pitkin. Porauksen aikana rikkonai- nen kallio altistaa porareian kiertämiselle mistä johtuen katkon räjäytys voi epäonnis- tua, kun reiän pohja sijaitsee väärässä kohdassa.

Erilaisista avausmenetelmistä ajotunneleissa on yleisesti käytössä ainoastaan yhden- suuntausavaus, sillä kiila- ja viuhka-avauksilla ei pystytä saavuttamaan riittävän pitkiä katkoja kapeissa tunneleissa. Yhdensuuntaisavauksessa on useampi erilainen tapa suorittaa avauksen poraus, jossa suurreikiä voi olla yhdestä neljään ja erilaisessa muodossa. Työn aikana tarkasteltiin vaikuttavan suurreian halkaisijaa katkon lähtevyy- teen erilaisilla katkopituuksilla.

Työn tuloksena saatiin kuvaaja, joista voidaan arvioida miten erilaiset käytetyt katkon pituudet ja käytettyjen suurreikien määrä vaikuttaa kustannuksiin. Taloudellisesti paras ratkaisu syntyy, kun käytetään neljää suurreikää ja käytetty katkon pituus on reilussa 5 metrissä. Optimikohta vaihtelee sen mukaan minkä hintaisia hukkametreit ovat, säästet- ty työvuoro ja suurreian poraus on, joista säästetyllä työvuorolla on suurin painoarvo. Hyvässä kalliolaadussa lähtevyys voidaan saada kolmella suurreillä lähes samaan kuin neljällä, mutta huonossa kivilaadussa erot voivat olla merkittävästi teoriaa suu- remmat. Tämän insinööriyön tulosten pohjalta suosituksena on neljän suurreian käyt- täminen avauksessa, sillä sen antama hyöty on paljon suurempi kuin siitä aiheutunut kustannus. On kuitenkin erityisen tärkeää louhintatyön aikana tehdä kunnollinen katko- seuranta, josta löytyy käytetty poraus- ja panostuskaavio, jotta erilaisia vaihtoehtoja voidaan verrata toisiinsa ja teoriaan.

6 Johtopäätökset

Tärkeimpänä onnistumisena tässä insinööriyössä voidaan pitää tilaajayritykselle tehtyä laskentatyökalua optimaalisen katkon pituuden arviointiin. Jatkossa työkalua tullaan kehittämään niin, että siinä osataan ottaa huomioon korjausräjätysten vaikutus.

Jatkossa kiinnostavaksi kehityskohteeksi jää avauksessa sijaitsevien panostettavien reikien sijoittelu suurreikiin nähden ja erilaisten kuvioiden kokeilu suurreikäsisijoittelussa. Jatkoa ajatellen voidaan tutkia, onko mahdollista tehdä erilaisia panostuskaavioita ehjälle ja rikkonaiselle kalliolle sekä minkälainen yhteys ominaispanostuksella ja ominaisporauksella saadaan lähtevyyteen.

Suurreikien porauksen kustannukset olivat melko pieniä suhteessa hukkametreihin ja säästettyyn työvuoroon. Teoreettisten lähtevyyksien ylimmälle käyrälle onnistutaan pääsemään neljällä 102 mm suurreillä, mutta kokeilun vuoksi voidaan tulevaisuudessa kokeilla miten lähtevyys käyttäytyy, jos vaikuttavan suurreian koko saadaan tästäkin suuremmaksi. Tällaisella kokeilulla voidaan saavuttaa suuri säästö varsinkin yli viiden metrin katkoissa, jonka jälkeen lähtevyys alkaa merkittävästi heikentyä.

Lähteet

- 1 Maanalainen Helsinki kiinnostaa maailmalla. 29.3.2012. Verkkodokumentti. Yle Uutiset.
<http://yle.fi/uutiset/maanalainen_helsinki_kiinnostaa_maailmalla/5100490>.
Päivitetty 5.4.2012. Luettu 8.3.2016.
- 2 Helsingin maanalainen yleiskaava. 17.12.2009. Verkkodokumentti. Kaupunkisuunnitteluvirasto, Helsingin kaupunki.
<http://www.hel.fi/hel2/ksv/Aineistot/maanalainen/Maanalaisen_yleiskaavan_selostus.pdf>. Luettu 8.3.2016.
- 3 Kehärata. Verkkodokumentti. Liikennevirasto.
<<http://www.liikennevirasto.fi/keharata#.VtltZ8vVyM8>>. Luettu 9.2.2016.
- 4 Länsimetron hinta kipuaa yli miljardin. 17.1.2014. Verkkodokumentti. Länsiväylä. <<http://www.lansivayla.fi/artikkeli/275165-lansimetron-hinta-kipuaa-yli-miljardin>>. Päivitetty 18.1.2014. Luettu 9.2.2016.
- 5 Yritysesittely. 2016. Verkkodokumentti. Destia Oy.
<<http://www.destia.fi/yritys.html>>. Luettu 10.3.2016.
- 6 Vuosikertomus. 2015. Verkkodokumentti. Destia Oy.
<<http://www.destia.fi/media/vuosikertomus-2015/destia-vuosikertomus-2015-yhdistetty.pdf>>. Luettu 10.2.2016.
- 7 Yritysesittely. Verkkodokumentti. Destia Oy.
<<http://www.destia.fi/palvelut/kalliorakentaminen.html>>. Luettu 10.3.2016.
- 8 Kuva jumbosta. 26.4.2012. Verkkokuva. Länsimetro Oy.
<<https://www.flickr.com/photos/lansimetro/6989143978/in/album-72157665101958082/>>. Katsottu 11.3.2016.
- 9 Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL. 1987. RIL154-1 Tunneli- ja kalliorakennus I. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y.
- 10 Kaivannaisteollisuus ry. 2011. Kaivos- ja louhintatekniikka. Helsinki: Opetushallitus.
- 11 Suomen kallioperä. Verkkodokumentti. Suomen kansallinen geologian komitea (SKGK). <<http://www.geologia.fi/index.php/2011-12-21-12-30-30/2011-12-21-12-39-11/2011-12-21-12-39-38/suomen-kallioperae>>. Luettu 23.2.2016.
- 12 Suomen kallioperä. Verkkokuva. Geologian tutkimuskeskus, GTK.
<http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kiviteknologia/e2_kiviteknologia_kirjasaria_kt1.htm>. Katsottu 25.2.2016.

- 13 Sisäasianministeriö. <<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2001/20011075>>. Luettu 20.2.2016.
- 14 Q-system. Verkkodokumentti. Norwegian Geotechnical Institute, NGI. <<http://www.ngi.no/en/Contentboxes-and-structures/Reference-Projects/Reference-projects/Q-system/>>. Luettu 29.1.2016.
- 15 Halonen, Tommi & Vuolio, Raimo. 2010. Räjätystyöt. Helsinki: Suomen rakennusmedia Oy.
- 16 Hämäläinen, Juho. 2016. Työmaainsinööri ja iSure-ohjelman käyttäjä, Destia Oy, Espoo. Haastattelu 11.2.2016.
- 17 Jokitalo, Henri. 2016. Toimitusjohtaja, Pohjolan Kalliotyö Oy. Haastattelu 18.2.2016.
- 18 Kuva jumbon terästä. 26.4.2015. Verkkokuva. Länsimetro Oy. <<https://www.flickr.com/photos/lansimetro/17333084490/in/album-72157649767652659>>. Katsottu 11.3.2016
- 19 2013. Mäkipörhölä, Janne. Automaattoratkaisut kaivosteollisuudessa. Insinööri-työ. Kemi-Tornion Ammattikorkeakoulu. <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/60042/Makiporhola_Janne.pdf?sequence=1>. Luettu 2.2.2016.
- 20 Measurement-While-Drilling (MWD). Verkkodokumentti. Halliburton. <<http://www.halliburton.com/en-US/ps/sperry/drilling/measurement-while-drilling-mwd.page?node-id=hfyrqum>>. Luettu 1.2.2016.
- 21 Kalliotunnelit 17610. 25.11.2015. Verkkodokumentti. Rakennustieto, InfraRYL 2015/1. <<https://www-rakennustieto-fi.ezproxy.metropolia.fi/infraryl/extra/teknisetvaatimukset.html.stx?URL=c3Vic2Vzc2lvdj0xJm5hdml1cmk9aHR0cCUzQSUyRiUyRmxvY2FsaG9zdCUzQTgwODAIMkZpbmRveCUyRm-luZG94c2VydmlldCUzRnhtbCUzREluZnJhUllMjTJGMjAxNV8xJTJGdGwIMkZ0eW9sYWppdC54bWwIMjZkb2N1bWVudHJvbGUIM0RpbmZyYXJ5bC10b2MlMjZ0OV9wYXJhbSUzRHN0cmlyUzQXBvaXN0ZXR0YXZhdF9rYXl0dG9rb2h0ZVVV0JTNBbm9uZSZvcGVubm9kZT0wOjE6MzoxMjg5OjE0MTE6MTQxMzo=>>>. Luettu 7.3.2016.
- 22 Exel LP-nalli. Verkkodokumentti. Oy Forcit Ab. <<http://www.forcit.fi/archives/tuote/nonel-lp-nalli>>. Luettu 25.2.2016.
- 23 Kemiitti 810 emulsioräjähdäaine, tuotetieto. Verkkodokumentti. Oy Forcit Ab. <<http://www.forcit.fi/archives/tuote/kemiitti-810>>. Luettu 20.3.2016.

- 24 Forprime, tuotetieto. Verkkodokumentti. Oy Forcit Ab.
<<http://www.forcit.fi/archives/tuote/forprime>>. Luettu 20.3.2016.
- 25 Tuovinen, Rami. 2016. Työnjohtaja, Destia Oy, Espoo. Haastattelu 21.1.2016.
- 26 Kröger, Pekka. 2016. Matematiikan lehtori, Metropolia Ammattikorkeakoulu.
Haastattelu 14.3.2016.
- 27 Valtioneuvoston päätös räjäytys- ja louhintatyön järjestysohjeista. 29.5.1986.
Verkkodokumentti. Valtioneuvosto.
<<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/kumotut/1986/19860410#L6P28>>. Luettu
19.1.2016.
- 28 Järvinen, Janne. 2016. Myynti- ja palvelujohtaja, Oy Forcit Ab. Haastattelu
4.3.2016.
- 29 Porausanki. 19.2.2015. Verkkokuva. Länsimetro Oy.
<<https://www.flickr.com/photos/lansimetro/16616912916/in/album-72157623417700420/>>. Katsottu 9.3.2016.
- 30 Juhantila, Esa. 2016. Työmaapäällikkö, Destia Oy, Helsinki. Haastattelu
8.3.2016.