



RAKENNUSTIETO >

Rakennusalan täyden palvelun tietotalo

Rakennustieto Oy edistää hyvää rakennustapaa ja tuottaa rakentamisesta luotettavaa tietoa. Puolueettoman ja asiakaslähtöisen Rakennustieto Oy:n tuotteet kattavat rakentamisen koko elinkaaren suunnittelusta ylläpitoon. Yhtiön omistaa Rakennustietosäätiö RTS.

Tutustu palveluihimme

> rakennustieto.fi/rk/palvelut

Rakentajain kalenterin artikkelit

Tämä artikkeli on julkaistu alun perin Rakentajain kalenterissa, jota ovat julkaisseet Rakennustietosäätiö RTS sr ja Rakennusmestarit ja -insinöörit AMK RKL ry.

Julkaisu oli rakennusalan ammattilaisten ja opiskelijoiden käsikirja, joka yhdisteli teoriaa ja käytäntöä sekä kannusti hyvään rakentamiseen. Artikkelin vasemmassa reunassa olevasta vesileimasta näkee ko. Rakentajain kalenterin vuosikerran.

> [Artikkeliarkisto, kokoelma vuosien 1997–2018 Rakentajain kalenterissa julkaistuista artikkeleista](#)

Nykyaikainen kalliomekaaninen suunnittelu kalliorakennushankkeen riskienhallinnassa

Jannis Mikkola, diplomi-insinööri
Toimialapäällikkö, Kalliosuunnittelu Oy Rockplan Ltd
jannis.mikkola@rockplan.fi

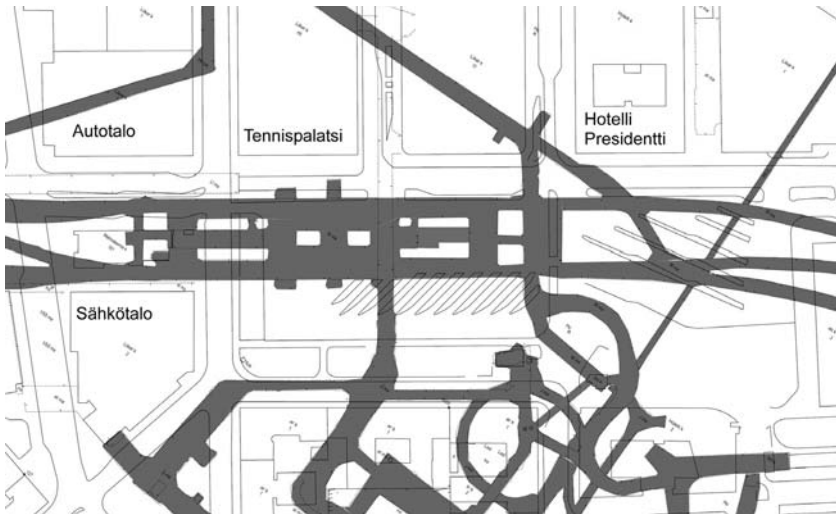
2

Johdanto

Kalliorakentaminen alkoi lisääntyä Suomessa vuonna 1958 annetun väestönsuojelulain jälkeen. Aikaisemmat kalliorakennuskohteet olivat pääasiallisesti kaivoksia. 1980-luvulle asti kalliorakennushankkeet olivat lähinnä väestönsuojia, joille kehitettiin rauhanajan käyttö. 1980-luvulla rauhanajan käyttöä ja väestönsuojaominaisuuksia suunniteltiin rinnakkain. Nykyään monissa kalliorakennuksissa ei ole lainkaan väestönsuojia, joten ne suunnitellaan ainoastaan normaaliajan käytön ehdoilla. Kalliorakentamisesta onkin tullut tiiviin keskustarakentamisen normaali rakennusmahdollisuus. Louhintakaluston ja -menetelmien kehittyminen on laskenut kalliorakennusten rakennuskustannuksia niin, että varsinkin tiheästi rakennetuilla alueilla kalliorakennukset ovat hinnaltaan kilpailukykyisiä perinteisiin rakennuksiin verrattuna.

Toinen merkittävä muutos on ollut tilojen jännevälien kasvu. Perinteisesti tilat olivat jänneväleiltään alle 20 m, jolloin ne toimivat hyvin esimerkiksi pysäköintilaitoksina. Myöhemmin suurimmat jännevälit olivat jopa 30 m, esimerkiksi jääkiekkohalleissa. Tällä hetkellä Suomen leveimmät kalliotilat ovat Leppävirran talviurheilukeskus (40 m) ja Helsingin Salmisaaren hiilisiilot (42 m).

Kolmantena kehityssuuntana on ollut ympäristöolosuhteiden vaikeutuminen. Varsinkin Helsingin keskusta-alueella, jossa kalliorakennuksia on runsaasti, parhaimmat rakennuspaikat on käytetty ja on jouduttu siirtymään heikompiatuisen kallion alueille. Suurimmassa osassa uusia hankkeita kohteen käyttötarkoitus määrää kalliorakennuksen sijainnin tarkasti, joten paikalla vallitsevat kallio-olosuhteet täytyy hallita. Haasteita on lisännyt uusien kalliorakennuksien rakentaminen vanhojen kalliotilojen läheisyyteen.



Kuva 1. Kalliotilat Kampin alueella.

Kaikki edellämainitut seikat ovat lisänneet kallioperän käyttäytymisen tuntemisen merkitystä kalliorakennuskohteen rakentamisprosessissa.

Nykyaikainen kalliomekaaninen suunnittelu

Kalliomekaaninen suunnittelu on kehittynyt ratkaisevasti viime vuosikymmeninä. Merkittäviä kehityskaskelia ovat olleet kallionparametrien luokitusmenetelmien kehittyminen ja niihin liittyvät empiiriset lujitussuosituksot. Tietokoneiden laskentatehon huima kasvu on mahdollistanut kalliomassan käyttäytymisen numeerisen mallintamisen. Kehittyneiden suunnittelumenetelmien ansiosta laajojenkin tilojen toteuttaminen haastavassa ympäristössä on mahdollista hallitulla riskitasolla.

Suunnittelun lähtötietoina tarvitaan tarkka kuva kallioperän olosuhteista. Tämän vuoksi korkealaatuiset kallioperätutkimukset ovat avainasemassa onnistuneen suunnittelun lähtökohtina. Niinpä myös kallioperän tutkimusmenetelmissä on tapahtunut tuntuvaa kehitystä.

Kalliorakennushankkeen toteuttaminen ideasta valmiiksi tilaksi voidaan jakaa kallioteknisen suunnittelun osalta taulukon 1 mukaisesti.

Nykyaikainen kalliorakenteen mitoitus sisältää yleensä seuraavat viisi vaihetta:

1. Tutkimukset
2. Mitoitusarvojen (kallioparametrien) määrittäminen
3. Mitoituslaskenta
4. Seuranta
5. Jälkilaskenta

Mitoitukseen käytettävät resurssit määrää kohteen käyttötarkoitus ja vaatimustaso, koko, kalliolaatu, sijainti (alueellinen ja syvyys) ja suunnitteluvaihe. Alustavissa suunnitteluvaiheissa tehdään vain vaiheet 1–3. Vaihe 4 tehdään rakennusvaiheessa kuten myös vaihe 5, mutta vain jos kalliolaatu ei vastaa oletettua ja sen käyttäytyminen on ennusteista poikkeavaa.

Tutkimukset

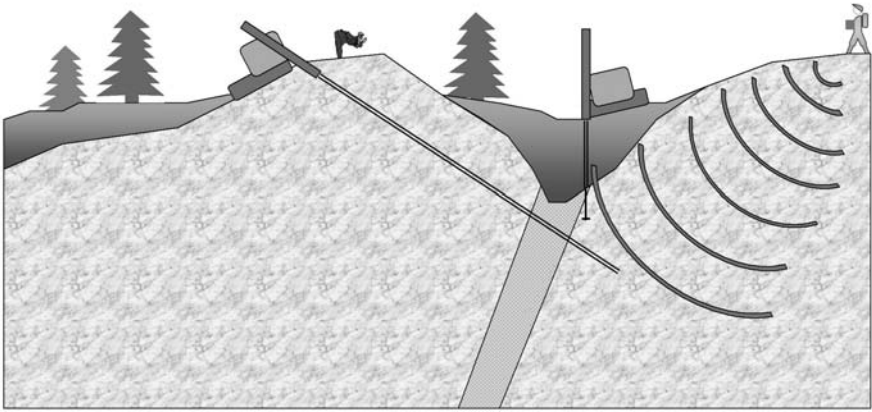
Tutkimusten tarkoitus eri suunnitteluvaiheissa

Hanke- ja esisuunnitteluvaiheissa kalliorakennuskohteen tutkimuksilla haetaan tietoa maakerrosten paksuuksista, kallioperän sijainnista, geologiasta, kalliolaadusta, pohjavesiolosuhteista ja rakennetusta ympäristöstä. Tulosten perusteella arvioidaan rakennettavuus ja jatkokäytökustannukset.

Luonnon- ja toteutussuunnitteluvaiheissa täydennetään hanke- ja esisuunnitteluvaiheen tietoja mitoituslaskelmien vaatimusten mukaisesti. Tarkennettavia tekijöitä ovat alueen heikkousvyöhykkeet, rakosuunnat ja niiden mekaaniset ominaisuudet, ehjän kiven mekaaniset ominaisuudet, jännitystilä, vedenjohtavuus sekä ympäristön rakenteet ja laitteet. Tuloksia käytetään kalliolaadun, tilakoon ja -muodon, lujitusarpeen ja tiivistysarpeen määrittämiseen.

Taulukko 1. Suunnitteluvaiheet.

Suunnitteluvaihe ja sitä vastaava tutkimusvaihe	Kallioteknisen suunnittelun tavoite	Kalliotutkimusten vaihe
Hankesuunnittelu Hanketutkimus	<ul style="list-style-type: none"> • alueen hankintasuositus • vaihtoehtoiset sijoitusratkaisut • kalliorakennusvaihtoehdot 	Vaihtoehtoisten rakennusalueiden pääpiirteinen maa- ja kallioperän selvitys alueiden keskinäistä vertailua varten <ul style="list-style-type: none"> • maastokartat • maastokäynti
Esisuunnittelu Yleispiirteinen tutkimus	<ul style="list-style-type: none"> • toteuttamiskelpoisimman kalliorakennusvaihtoehdon valinta • rakennuskohteen lopullinen sijoitus 	Rakennuspaikan kallioperän rakennettavuuden selvitys <ul style="list-style-type: none"> • vanhat pohjatutkimustiedot • alueen geologinen kartoitus • geofysikaaliset tutkimukset
Rakennussuunnittelu Yksityiskohtainen tutkimus	<ul style="list-style-type: none"> • kalliorakenteiden mitoituslaskelmat • rakenne- ja luhintapiirustukset • työselitykset 	Alueen kallioperästä muodostetaan 3-ulotteinen kuvaus, jota käytetään tilojen lopullisen muodon ja lujituksen suunnitteluun <ul style="list-style-type: none"> • raskaat maastotutkimukset (kallionäyttekairaukset, jännitysilamittaukset ym.)
Rakennusaikainen suunnittelu Tarkkailututkimukset	<ul style="list-style-type: none"> • tarkkailumittaussuunnitelma • lujitussuunnitelmien tarkistus 	Varmistetaan ennustettu kallionlaatu ja seurataan kallion liikkeitä



Kuva 2. Kallioperätutkimukset.

Tutkimusmenetelmät mitoitusarvojen määrittämiseksi

Tärkeimmät tutkimusmenetelmät suoritusjärjestyksessä ovat:

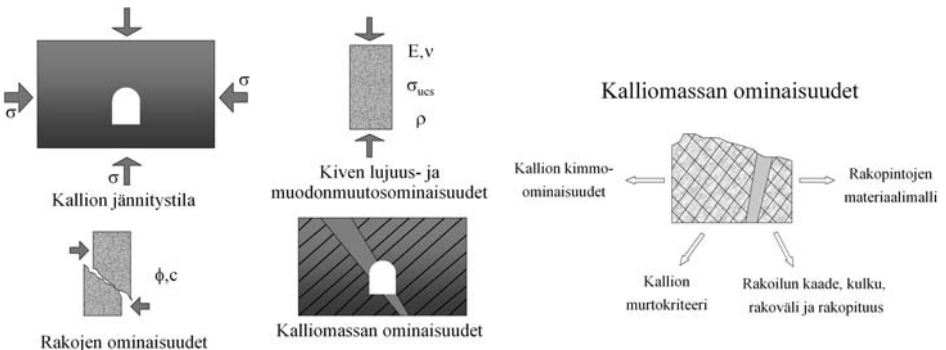
1. Lähtötietojen hankinta
2. Geologinen kartoitus
3. Maatukamittaus, seisminen refraktioluotaus
4. Porakonekairaus
5. Kallionäyttekairaus
6. Jännitystilamittaus

Tutkimusten tavoitteena on antaa suunnittelijalle ja rakennuttajalle tarpeelliset tiedot rakennuskohteen mitoitusta varten.

Kallioparametriarvojen määrittäminen

Kallion rakenne, jännitystila ja kalliotilan koko vaikuttavat laskentamenetelmän valintaan ja siten parametriarvojen valintaan. Kallion raken-

teesta ja jännitystilasta riippuen sitä kuvataan laskennassa joko jatkuvana tai epäjatkuvana, rakoilun tai heikkousvyöhykkeiden pilkkomana materiaana. Yleistään voidaan käyttää seuraavaa jakoa, joka pätee normaalille kalliorakoilulle eikä jatkuville heikkousvyöhykkeille: kalliotilaa nähden erittäin tiheään tai erittäin harvaan rakoillut kallio käyttäytyy jatkuvan materiaan tavoin kaikissa jännitystiloina. Keskitiheästi rakoillut kallio sen sijaan käyttäytyy matalissa jännitystiloina epäjatkuvasti, mutta korkeissa jännitystiloina sen voidaan olettaa toimivan jatkuvasti puristavan voiman vaikutuksesta. Jatkuvan ja epäjatkuvan kalliomassan parametriarvojen valinta perustuu kallioluokitukseen, ehjän kiven ominaisuuksiin ja jännitystilaan. Epäjatkuvan kallion rakojen parametriarvoja voidaan määrittää myös rakojen leikkaus- ja normaalikokeilla.



Kuva 3. Lähtötietoina tarvittavat kallioparametrit.

Kallion parametrien määrittämiseen ei ole vielä olemassa yleisesti hyväksyttyä ohjetta, joka on puute. Yleisesti on noudatettu varovaisen keskiarvon periaatetta, mutta selvästi perustellumpi vaihtoehto on selvittää parametrien hajonta riittävien tutkimuksien ja valita todennäköisyystaso tutkimusmäärästä riippuen (75 % – 95 %). Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää keskiarvon ja keskihajonnan erotusta. Alimman mittausarvon valinta johtaa pääsääntöisesti erittäin konservatiiviseen mitoittamiseen. Määritetyille parametreille ja kuormille käytetään mitoitusohjeiden mukaisia osavarmuuskertoimia.

Tutkimuksien avulla selvitetään yleensä seuraavat parametrit: rakojen tiheys, rakoilun suunta, rakopintojen ominaisuudet, heikkousvyöhykkeiden sijainti, rakojen vedenjohtavuus, ehjän kiven lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet ja kallion jännitystilä. Ainoastaan mitattu jännitystilä antaa suoraan mitoituksessa tarvittavan arvon. Muista arvoista on erilaisten luokitusmenetelmien ja tilastollisen käsittelyn avulla tuotettava luotettavat lähtöparametrit. Näitä tarvittavia lähtöparametreja ovat: kallioperän kimmo- ja lujuusominaisuudet (kallion murtokriteeri), rakopintojen materiaalimalli sekä rakoilun kaade, kulku, rakoväli ja rakopituus.

Mitoituslaskenta

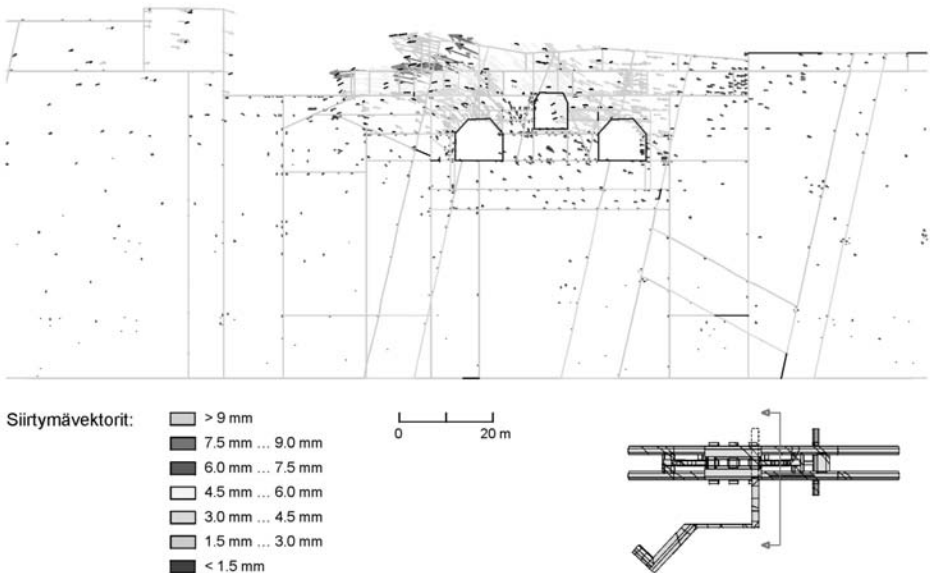
Mitoituslaskentamenetelmät voidaan karkeasti jakaa empiirisiin kallioluokitukseen perustuviin menetelmiin, yksinkertaisiin analyttisiin tarkasteluihin ja numeerisiin kalliomekaanisiin mallinnuksiin. Soveltuva laskentamenetelmä valitaan suunnitteluvaiheen, tilan koon ja laatuvaatimusten, sijainnin, kalliolaadun ja jännitystilän perusteella.

Empiirinen mitoitus

Yleisimmin käytetyt empiiriset mitoitusmenetelmät perustuvat toteutuneista kalliorakennuskohteista saatuun kalliolaatu-, lujitus- ja stabiliteettitietoihin. Nämä ns. taulukkomitoitusmenetelmät soveltuvat hanke- ja esisuunnitteluvaiheeseen, mutta ne ohjaavat vahvasti lujitussuunnittelua myös luonnos- ja toteutusvaiheissa. Yleisimmin käytetty taulukkomitoitus on Q-luokituksen lujitussuosituksat

Analyttiset menetelmät

Analyttiset menetelmät ovat nopeita ja yksinkertaistettuja, tiettyyn erikoistapaukseen rajautuvia laskentamenetelmiä (pääosin tietokoneohjelmia tai laskentakaavoja). Tunnelitilan ja rakojen rajaaman lohkon stabiliteetti (keyblock) on yksi yleisimmistä sovelluksista. Sillä voi-



Kuva 4. Kampin keskuksen siirtymiä itäisen liukuporraskuilun kohdalla.

daan selvittää kalliotilan holviin ja seinille muodostuvan lohkon maksimikoko ja määrittää lohkolle riittävä lujitus.

Numeeriset kalliomekaaniset mallinnukset

Numeeristen menetelmien perusidea on pilkkoa käsiteltävä laskentatapa geometrisesti yksinkertaisiin alkioihin, joiden mekaaninen käyttäytyminen pystytään numeerisesti laskemaan. Laskentaohjelmat luokitellaan laskenta-alkioiden matemaattisen ratkaisun ja alkion vuorovaiikutusten laskentaperusteen mukaan. Yleisimpiä ovat finiittielementtimenetelmä (FEM), finiittidifferenssimenetelmä (FDM) ja reunaelementtimenetelmä (BEM). Karkeasti jaettuna FEM- ja FDM-menetelmät soveltuvat parhaiten epäjatkuvan kimmoplastisen kalliomassan kuvaukseen, kun taas BEM-menetelmä sopii parhaiten homogeenisen jatkuvan materiaalin kimmoisiin tarkasteluihin. Kustakin menetelmätyypistä on olemassa erityisesti kallion mekaanisen käyttäytymisen laskentaan tarkoitettuja 2- ja 3-dimensionaalisia ohjelmia.

Seuranta

Kalliolaadun seuranta ja kalliotilan liikkeiden valvontamittaukset ovat erittäin tärkeä osa kalliomekaanista suunnittelua. Louhinnan aikana seurataan vastaako kalliolaatu oletettua ja käyttäytykö kallio ennustetusti. Seurantatulosten ja ennalta asetettujen hälytysrajojen perusteella päätetään louhinta- ja lujitussuunnitelmiin mah-

dollisesti tehtävistä muutoksista. Kallion liikkeiden seuranta aloitetaan ennen louhintaa ja vaativissa kohteissa sitä jatketaan useita vuosia louhinnan päättymisen jälkeen.

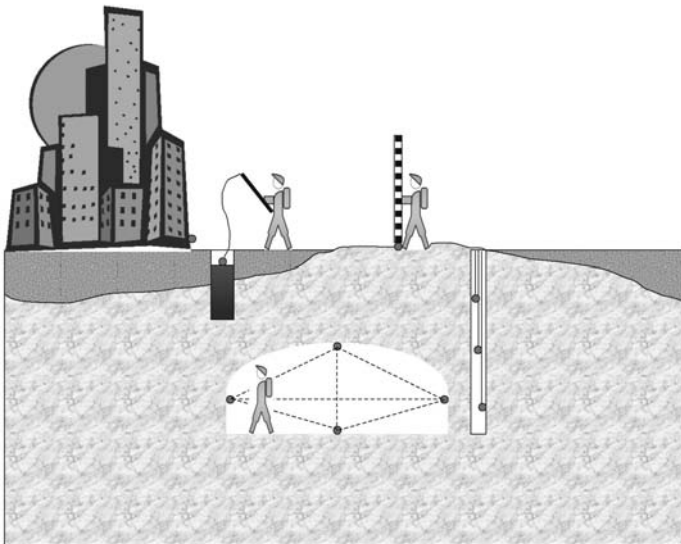
Yleisimmin käytetyt seurantamittaukset ovat siirtymä-, kuormitus-, lämpötila- ja jännitystilamuutosmittaus sekä pohjaveden korkeuden seuranta.

Siirtymän mittaamiseen käytetään mm. seuraavia menetelmiä: tarkkavaaitus, geodeettinen mittausta (x,y,z), konvergenssimittaus ja ekstenometrimittaus, joista viimeksimainittu on yleisimmin käytössä.

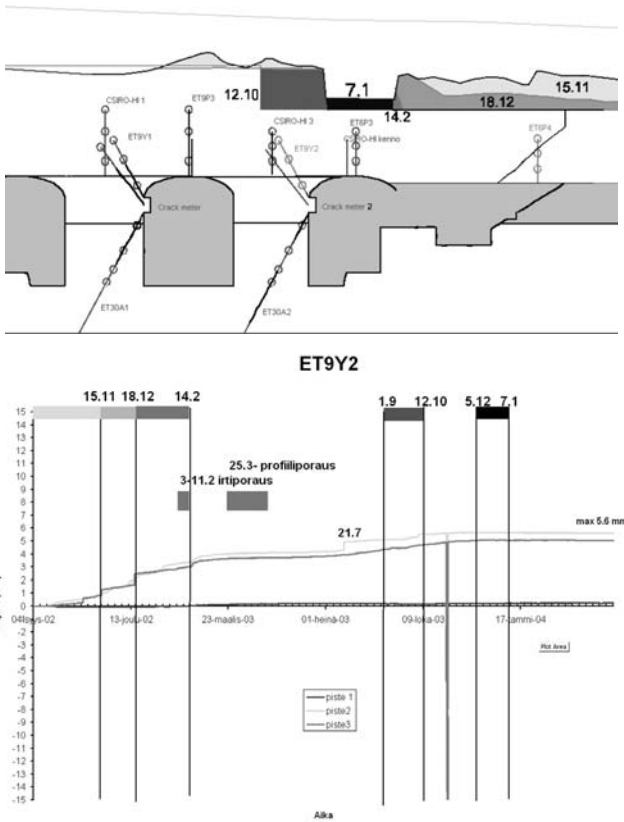
Kuormitusmittauksia tehdään yleensä kalliopulteissa, mutta myös ruiskubetonissa tai massiivisissa betonirakenteissa.

Jännitystilan muutoksen seurantaan käytetään samoja kenoja kuin irtikairaukseen perustuvissa jännitystilamittauksissa. Kennot asennetaan lähelle louhittavaa tilaa kohtiin, joissa jännitystilan muutokset ovat suuria. Jännitystilan seuranta on aloitettava huomattavasti aiottua louhintaa aikaisemmin. Lämpötilan mittausta tehdään muiden mittausten yhteydessä, jotta voidaan varmistua, ettei lämpötilalla ole oleellista vaikutusta seurantamittaustuloksiin.

Pohjaveden korkeutta seurataan mittaamalla pohjaveden pinnankorkeus havaintoputkissa. Pohjaveden korkeudella on erityistä merkitystä alueilla, joissa on puupaaluille perustettuja rakennuksia, paksuja savikerroksia tai maan kosteuspiitoisuudelle herkkää kasvillisuutta.



Kuva 5. Kallioerän seurantamittaukset.



Kuva 6. Seurantatuloksia Kampin keskuksen metroasemalta.

Jälkilaskenta

Jälkilaskennalla varmistetaan suunnitelmien toteutettavuus ja tilojen käyttöajan turvallisuus sekä selvitetään odottamattomat kallion liikkeet. Jälkilaskenta suoritetaan, jos louhinnan aikaisessa seurannassa kalliolaatu osoittautuu selvästi ennakoitua heikommaksi tai seurantamittauksien tulokset osoittavat huomattavasti ennakoitua suurempia siirtymiä tai kuormia. Jälkilaskennan lähtöarvot perustuvat suunnitteluvaiheen tutkimuksiin, louhinnanaikaiseen kalliolaadun seurantaan ja todettuihin kallion liikkeisiin.

Yhteenveto

Nykyaikaisella kalliomekaanisella suunnittelulla on merkittävä tehtävä kalliorakennushankkeen riskienhallinnassa. Perinteisesti kalliorakentamista on pidetty ns. mutu-rakentamisena,

joka on riskialtista. Suurta yleisöä on huolestuttanut eniten louhinnan aiheuttama tärinä, mutta myös kallion sortumisesta on oltu huolestuneita.

Nykyisellä järjestelmällisesti etenevällä suunnittelulla pystytään kalliorakentamisen aiheuttamat riskit ympäristölle ennustamaan hyvin tarkasti. Suunnittelussa on päästy sellaiselle tasolle, että äärimmäisen harvoinkin luonto pääsee yllättämään täysin ”puun takaa”. Kun kyseessä on erityyppinen epähomogeeninen luonnonmateriaali, jota ei voi verrata betoni- ja teräsrakenteisiin, on kuitenkin luonnollista, että työn aikana kallioperän kuva aina tarkentuu. Tarkoilla etukäteistutkimuksilla, huolellisella suunnittelulla ja riittävällä työnaikaisella seurannalla voidaan nykyistä kalliorakennustoimintaa pitää hallittuna ja systemaattisena rakennusprosessina, jonka riskitaso on oleellisesti laskenut viime vuosikymmeninä. Se lisää käyttötarkoituksen mukaisen suunnittelun vapausasteita ja antaa mahdollisuuden toimia yhä vaikeammassa ympäristöissä.