

Nanna Torenö

TÄRINÄNHALLINNAN KEHITTÄMINEN SAIRAALAKOHTTEEN LOUHINTATÖISSÄ

Case: Kymsote kiinteistöt Fb-osa

Opinnäytetyö

Insinööri AMK

Rakennustekniikka

2021



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tekijä/Tekijät	Tutkintonimike	Aika
Nanna Torenö	Insinööri (AMK)	joulukuu 2021
Opinnäytetyön nimi		85 sivua
Tärinänhallinnan kehittäminen sairaalakohteen louhintatöissä Case: Kymsote kiinteistöt Fb-osa		69 liitesivua
Toimeksiantaja		
YIT Suomi Oy		
Ohjaaja		
Juha Karvonen Valtteri Perälähti		
Tiivistelmä		
<p>Tämä opinnäytetyö käsittelee tärinänhallinnan kehittämistä sairaalakohteen louhintatöissä. Tutkimuksen kohteena olivat toimeksiantaja YIT Suomi Oy:n rakennustyömaan louhintatyöt Kymsote-Kiinteistöjen Kymenlaakson keskussairaalan laajennusprojektissa.</p> <p>Lähtökohtana tutkimukselle oli toimeksiantajan tarve tärinämittaustulosten tarkastelulle ja tärinänhallinnan kehittämiseksi louhintatöissä. Sairaalakohteessa asetetaan erityisen alhaiset raja-arvot tärinälle, sillä sairaalalaitteet ja -toiminnot ovat herkkiä häiriintymään tärinästä.</p> <p>Opinnäytetyö toteutettiin tutustumalla aiheeseen haastattelujen ja teoreettisen tiedonhaun avulla, sekä tarkastelemalla kohdeyrityksen louhintatöiden suunnittelua ja analysoimalla louhintatöistä kerättyä aineistoa, muun muassa panostussuunnitelmia, tärinäraportteja ja poikkeamaraportteja. Louhinta- ja panostussuunnitelmia oli dokumentoitu louhintaurakoitsijan omiin arkistoihin, ja louhinnan aiheuttamista tärinäistä oli kertynyt mittaustietoa tärinämittausjärjestelmään. Tutkimuksen tarkoituksena oli analysoida ja koota tärinälylyksiin johtaneita syitä ja kehittää toimenpiteitä tärinöiden hallitsemiseksi.</p> <p>Tutkimuksen edetessä selvisi, että panostussuunnitelmien dokumentoinnissa oli sisällöllistä vaihtelua, ja lisäksi ne jäivät erilleen tärinä- ja poikkeamaraporttien tiedoista. Yhdeksi työn tavoitteeksi asetettiin irrallaan olevan tiedon yhteen kokoaminen. Tuloksena syntyi kooste panostus-, räjäytys- ja tärinätiedoista sekä tärinäpoikkeamista syineen ja toimenpiteineen. Tietojen pohjalta analysoitiin tärinöihin vaikuttavia tekijöitä ja etsittiin tärinänhallinnan kehityskohtia.</p> <p>Opinnäytetyön tärkeimmät tulokset ovat tutkimuksen aikana esiin nousseet havainnot ja kehityskohtat tulevia louhintakohteita ajatellen. Merkittävimpiä esiin nousseita kehitystarpeita tärinänhallinnan kannalta olivat suunnittelun ja tärinäasiantuntijan yhteistoiminnan edistäminen sekä panostussuunnitelmien dokumentoinnin selkeyttäminen ja yhtenäistäminen.</p>		
Asiasanat		
louhinta, tärinämittaus, tärinänhallinta		

Author (authors)	Degree	Time
Nanna Toreno	Bachelor of Engineering	December 2021
Thesis title Development of vibration control in blasting work at a hospital site Case: Kymsote-Kiinteistöt Part Fb		85 pages 69 pages of appendices
Commissioned by YIT Suomi Oy		
Supervisor Juha Karvonen Valtteri Perälähti		
Abstract <p>This thesis deals with developing vibration management in blasting work at a hospital construction site. The commissioner for this thesis was the construction company YIT Suomi Oy, and the research was implemented at their Kymsote-Kiinteistö's Kymenlaakso Central Hospital site.</p> <p>The starting point for the study was the commissioner's need to review the vibration measurement results and to develop vibration management during blasting work. Particularly low limits for vibration are set at hospital sites, as hospital equipment and functions are sensitive to vibration.</p> <p>The research method of the thesis is qualitative, and it was carried out by getting acquainted with the topic through interviews and theoretical information retrieval. Data collection was also performed by reading plans and analyzing documents of blasting work, including investment plans, vibration reports and deviation reports.</p> <p>At the start of the study, blasting work at the site was nearly completed. The blasting and loading plans had been documented, and measurement data on the vibrations caused by the blasting work had been collected in the vibration measurement system. The purpose of the study was to analyze the causes of vibration exceedances and to develop actions to control vibrations.</p> <p>As the study progressed, it became apparent that there was variation in the documentation of the investment plans. In addition to that, they remained separate from the data in the vibration and deviation reports. One of the aims of the work was to bring together the information that was loose. The result was to combine the loading, blasting and vibration data, as well as vibration deviations with their causes and measures into one document.</p> <p>The main results of the thesis are the findings and development points that emerged during the research. The most significant development needs found from the vibration management point of view were the promotion of co-operation between design and vibration experts, and the clarification and harmonization of the documentation of loading plans.</p>		
Keywords blasting, vibration measurement, vibration control		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	TUTKIMUKSEN TAUSTAT.....	7
2.1	Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimusmenetelmät.....	8
2.2	Lähde- ja tutkimusaineisto.....	9
2.3	Työn rajaus.....	9
3	LOUHINTA.....	10
3.1	Perinteinen louhinta.....	10
3.2	Tarkkuuslouhinta.....	22
3.3	Louhinnan vaikutukset ja niiden hallinta lähialueella.....	23
3.4	Laadunvarmistus.....	25
3.5	Louhintaan liittyvät luvat, ilmoitukset ja katselmukset.....	26
4	TÄRINÄ.....	28
4.1	Aaltoliike.....	28
4.2	Tärinästä aiheutuva haitta.....	31
4.3	Tärinämittaus.....	31
4.4	Täriinhallinta.....	38
5	CASE KYMSOTE-KIINTEISTÖT FB-OSA.....	41
5.1	Louhinta sairaalaympäristössä.....	43
5.2	Tärinä sairaalaympäristössä.....	47
5.3	Täriinhallinnan keinoja.....	54
5.4	Tärinäraportit.....	61
6	TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	74
6.1	Havainnot.....	74
6.2	Kehityskohteet ja toimenpide-ehdotukset.....	77
6.3	Jatkotutkimus.....	79
6.4	Yhteenveto.....	80

LIITTEET

Liite 1. Panostus-, tärinä- ja poikkeamatietojen koonti

Liite 2. Työ- ja laadunvarmistussuunnitelma

Liite 3. Työvaiheen toteutussuunnitelma

Liite 4. Aikataulut

Liite 5. Työmaapäiväkirja

Liite 6. Kenttäkortit

Liite 7. Poikkeamaraportti

Liite 8. Panostussuunnitelmat ja kenttäkortit

Liite 9. Geosuunnitelma

1 JOHDANTO

Rakentamisen työmaa-aikaiset vaikutukset ympäristöönsä koetaan harvoin positiivisina. Etenkin rakennuspohjien louhintatyöt aiheuttavat lähiympäristöön tärinöitä, jotka voivat häiritä ihmisiä sekä aiheuttaa vaurioita rakenteille ja herkimmille laitteille.

Louhintatöissä on otettava huomioon toimintaympäristö, jossa toimintaa harjoitetaan. Etenkin räjäytystöissä on huomioitava paitsi lähialueella oleskelevien henkilöturvallisuus ja viihtyvyys, myös pyrittävä minimoimaan häiriöt ja ai-neelliset vahingot. Huomioon otettavia asioita on lukuisia, kun toimintaympäristönä on toiminnassa olevan sairaalan alue.

Tämä opinnäytetyö käsittelee rakennustyömaan tärinänhallintaa louhintavaiheessa, ja sen toimeksiantajana toimi YIT Suomi Oy. Tutkimuksen kohteena oli Kymsote-Kiinteistöjen Kymenlaakson keskussairaalan rakennustyömaa Kotkassa. Lähtökohtana opinnäytetyölle oli toimeksiantajan tarve tärinämit-taustulosten analysoimiselle ja sitä kautta tärinänhallinnan kehittämiseksi louhintatöissä.

Sairaalassa on monia tärinälle herkkiä laitteita ja toimintoja, minkä vuoksi sairaalatyömaan tärinöille asetetaan selvästi tiukemmat ohjearvot kuin tavanomaisessa louhintakohteessa. Laittevalmistajien antamat tärinän ohjearvot ovat yleensä todella alhaisia, ja niiden rajoissa on haastavaa pysyä, kun louhitaan käyttämällä räjähteitä. Sairaalatyömaan louhinnassa joudutaan käyttämään tavanomaisesta poikkeavia ratkaisuja tärinäarvojen alhaisena pitämiseksi.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia louhintaa, tärinämittauksia ja tärinäraja-arvojen ylityksiä sairaalakohteessa. Louhintaurakoitsija tuottaa jokaisesta tärinäpoikkeamasta raportin, jossa pohditaan tärinäylitysten syitä ja korjaavia toimenpiteitä. Tässä opinnäytetyössä tarkasteltiin poikkeamaraportteja ja koottiin syitä tärinäraja-arvojen ylityksille sekä arvioitiin tehtyjä korjaavia toimenpiteitä ja pyrittiin edelleen kehittämään niitä. Syitä tärinälle haluttiin pohtia

mahdollisimman syvällisesti, tavoitteena tuottaa tarkempaa tietoa louhinnan tärinäarvoihin vaikuttavista tekijöistä, ja esittää toimenpiteitä tärinän hallitsemiseksi.

2 TUTKIMUKSEN TAUSTAT

Tämä tutkimus lähti liikkeelle vuonna 2021 YIT Suomi Oy:n rakennustyömaalla Kotkassa, jossa rakennettiin hankkeen tilaajana olevalle Kymsote-Kiinteistöt Oy:lle Kymenlaakson keskussairaalan laajennuksen Fb-osaa. Kymenlaakson keskussairaalan laajennus- ja peruskorjausprojektissa oli jo aiemmin valmistunut G-talo sekä sädehoitoyksikön laajennus ja peruskorjaus. Fb-osan rakennushanke toteutettiin projektinjohtourakkana, joka mahdollistaa joustavan toteutuksen ja tilaajan toteutuksenaikaisen vaikuttamisen suunnitteluratkaisuihin ja kustannuksiin. Maanrakennus- ja louhintatöitä suoritettiin kohteessa kevään ja kesän 2021 aikana, ja lähimmillään töitä tehtiin toiminnassa olevan sairaalarakennuksen kyljessä kiinni. (Kymen sairaalat 2021; Kiiras 2001, 765.)

Maanrakennustyöt ja räjäytystyöt aiheuttavat tyypillisesti lähialueen asukkaille ja toimijoille häiriöitä, joita ovat esimerkiksi melu, pöly, tärinä ja liikennejärjestelyjen muutokset. Erityisesti sairaalaympäristössä louhinnasta aiheutuvat tärinät vaikuttavat sairaalan herkkiin laitteisiin ja toimenpiteisiin. Siksi räjäytystyöt sairaalan läheisyydessä vaativat ennakointia ja toimenpiteitä.

Tärinäarvoja seurattiin louhintatyön aikana sairaalalaitteiden viereen asennettujen tärinämittarien avulla, ja jokaisesta ohjearvon ylittävästä tärinästä urakoitsija teki poikkeamaraportin, jossa oli selvitys ylitykseen johtaneista syistä ja korjaavista toimenpiteistä. Louhintätärinään vaikuttaa moni tekijä, ja sairaalakohteessa asetetut ohjearvot ovat tavanomaisen louhinnan ohjearvoihin nähden hyvin matalia. Louhintaurakoitsija on erisuuntaisten vaatimusten välissä, kun samaan aikaan louhintatyön tulisi edistyä ja edetä vielä kustannustehokkaasti, mutta toisaalta tärinää ei saisi syntyä. Poikkeamaraportissa arvioidaan tärinäylitysten syitä tapauskohtaisesti olosuhteet huomioon ottaen,

mutta tärinäaallon voimakkuuteen vaikuttaa niin moni tekijä, että usein todellisten syiden juurille pääseminen on ammattilaisellekin haastavaa. Tämä vaikeuttaa oikeanlaisten korjaavien toimenpiteiden suunnittelua ja toteuttamista.

2.1 Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimusmenetelmät

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia louhintaa sairaalakohteessa. Tarkastelun kohteeksi nostettiin erityisesti louhinnan aiheuttamat tärinät. Opinnäytetyön tavoitteena oli arvioida tilaajayrityksen prosesseja tärinänhallintaan liittyen louhintatöissä ja edelleen kehittää niitä.

Tarkemmin tutkittiin mitattuja tärinäarvoja ja ohjearvojen ylityksiä sekä poikkeamaraportteja, joiden pohjalta koostettiin raja-arvojen ylitysten syitä. Lisäksi tutustuttiin louhintaurokoitsijan keinoihin vaikuttaa tärinäarvoihin ja pyrittiin kehittämään tärinänhallintaa. Alun perin oli tarkoitus tutkia tarkemmin tärinöiden vaikutuksia sairaalan näkökulmasta sekä louhintaan liittyvän viestinnän kehitystarpeita, mutta nämä osa-alueet rajattiin lopulta tutkimuksen ulkopuolelle.

Opinnäytetyön tutkimusmenetelmänä on laadullinen eli kvalitatiivinen tutkimus, ja se toteutettiin tutustumalla aiheeseen haastattelujen ja teoreettisen tiedonhaun avulla sekä tutustumalla kohdeyrityksen louhintatöiden suunnitteluun ja analysoimalla louhintatöistä kerättyä aineistoa, muun muassa tärinäraporttien ja poikkeamaraporttien muodossa.

Kehitystyön konkreettisen tuotoksen osalta tavoitteena oli dokumentoida kohdeyrityksen louhintatyöt tärinän osalta. Alun perin oli tarkoitus myös kehittää tärinänhallintaan toimintasuunnitelma tai jonkinlainen tarkistuslista tulevia kohteita varten. Tutkimuksen edetessä kävi kuitenkin ilmi, että louhintatyön toteutuksen yhteydessä kirjattujen räjäytys- ja louhintasuunnitelmien dokumentoinnissa oli paikoitellen erilaisia käytäntöjä ja lisäksi ne jäivät panostustietoineen erilleen tärinä- ja poikkeamaraporttien tiedoista. Jotta muun muassa räjähdetyypin ja momentaanisen räjähdysainemäärän vaikutuksia tärinöihin voitiin tutkia tarkemmin, oli tarve saada kerättyä irrallaan oleva tieto yhteen. Tuloksena syntyi kooste panostus-, räjäytys- ja tärinätiedoista sekä tärinäpoikkeamista si-

sältäen ylityksiin johtaneet todennäköiset syyt ja korjaavat toimenpiteet. Tärinänhallintaan liittyviä käytännön toimia tutkittiin ja arvioitiin niiden toimivuutta ja kehitystarpeita. Myös tärinänhallinnan prosesseihin liittyviä kehityskohtia todettiin tutkimuksen aikana, ja ne on esitetty työssä toimenpide-ehdotuksina.

2.2 Lähde- ja tutkimusaineisto

Tämän opinnäytetyön teoriaosan lähdeaineistona on käytetty louhinta- ja räjäytysalan kirjallisuutta ja verkkomateriaalia, ammattilehtien ajankohtaisia artikkeleita, sekä tärinään ja meluun liittyviä lakeja ja asetuksia.

Tutkimusosan aineistona on käytetty YIT:n ja sen sidosryhmien asiakirjoja, suunnitelmia ja muuta aineistoa, esimerkiksi tärinämittausraportteja, poikkeamaraportteja ja räjäytystyön turvallisuussuunnitelmaa. Tilannetta on lisäksi kartoitettu vastaavan louhintatyönjohtajan, rakennusvalvojan, geosuunnittelijan, louhintatyöntekijöiden ja muiden louhintaan osallistuvien sidosryhmien haastatteluilla.

2.3 Työn rajaus

Räjäytyksistä aiheutuvan tärinän tiedetään jo lähtökohtaisesti vaikuttavan merkittävästi sairaalan päivittäiseen toimintaan, joten tärinä on nostettu tässä opinnäytetyössä erityiseksi tutkimuksen kohteeksi. Työssä pureuduttiin tärinäraja-arvojen asettamiseen, tärinöiden jatkuvaan mittaamiseen ja mittaustulosten seurantaan ja analysointiin sekä tärinäylityksiin reagoimiseen. Muita louhintatyön vaikutuksia sairaalalle sivutaan, mutta kehitystyön rajaamisen vuoksi niitä käsitellään pintapuolisemmin jättäen tilaa syventyä tärinämittaus-tuloksien analysointiin ja tärinänhallinnan kehittämiseen.

Louhinta-urakoitsijan ja sairaalan välinen viestintä on tärkeää molempien osapuolten toiminnan sujuvuuden takaamiseksi. Sairaalahenkilökunta voi omalla toiminnallaan ehkäistä tärinästä aiheutuvia toiminnallisia haittoja, ja myös louhijat voivat toiminnallaan vaikuttaa tärinöiden ajoitukseen ja voimakkuuteen. Sairaalahenkilökunnalta vaaditaan joustavuutta, mutta työmaa ei saa estää akuutteja sairaalatoimintoja, vaan potilasturvallisuus menee työmaatoimintojen edelle. Näissä tilanteissa osapuolten välisen viestinnän on oltava nopeaa

ja saumatonta. Osapuolten välinen viestintä ja sen sujuvuus on mielenkiintoinen aihe, jota sivutaan tässä opinnäytetyössä, mutta sen syvempi tutkiminen haastattelujen avulla rajattiin lopulta tämän tutkimuksen ulkopuolelle. Pääsyy rajaukselle oli työn laajuus. Osasyynä oli halu keskittyä tarkemmin tärinämittaus-tuloksiin, jotka eivät suoraan liity sairaalassa tehtäviin tärinäherkkiin tutkimuksiin ja toimenpiteisiin. Tämä johtuu siitä, että sairaalatutkimukset keskeytettiin ja laitteet sammutettiin räjäytystöiden ajaksi. Näin ollen tutkimuksen kohteena olevan louhintatyömaan tärinäylytysten mahdolliset vaikutukset ulottuivat vain laitteiden tärinäherkkiin tietokoneyksikköihin, eivät sairaalan tutkimus- ja hoitotoimintoihin.

3 LOUHINTA

Louhintatyö tarkoittaa kallion tai mineraalien irrotusta ja niihin liittyviä töitä. Tyypillisesti louhinnasta puhuttaessa tarkoitetaan avolouhintaa. Louhintatyössä käytetään räjähteitä, jotka voidaan jakaa räjähdysaineisiin ja sytytysvälineisiin. (Työturvallisuuskeskus 2016, 4–5; Jääskeläinen 2010, 199.)

Räjähdykset voidaan jakaa mekaanisiin, kemiallisiin ja ydinräjähdyksiin. Räjähdysaineiden räjähdykset ovat kemiallinen reaktio, jossa räjähdysaineen kemiallinen potentiaalienergia muuttuu kineettiseksi energiaksi kohdistuen painealtona ympäristöön purkautuvien kaasujen muodossa. Räjähdyksestä aiheutuu nopeasti valtava kuumuus ja tuloksena kaasuja, jotka ovat pääasiassa hiilidioksidia, typpeä ja vesihöyryä. Kemialliset räjähteet voidaan jakaa karkeasti sotilasräjähdeksiin ja louhintaräjähdeksiin. (Vuolio & Halonen 2012, 57; Jääskeläinen 2010, 192; Työturvallisuuskeskus 2016, 5.)

3.1 Perinteinen louhintaa

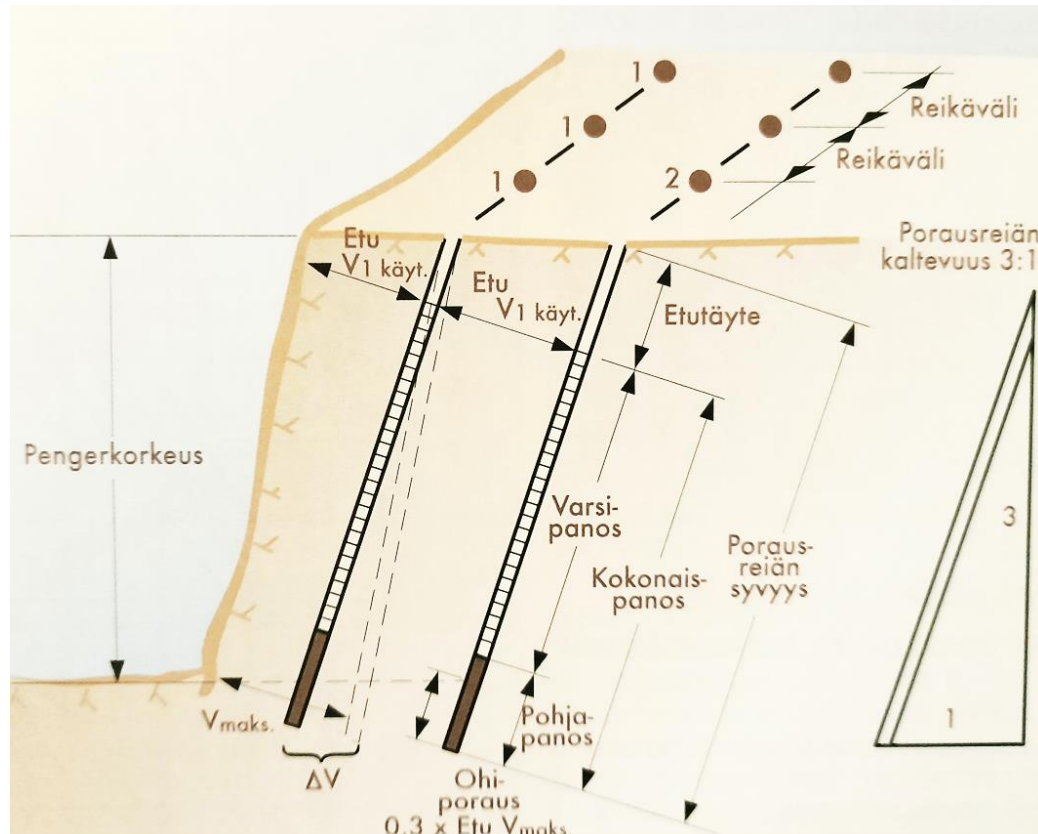
Yleisin avolouhinnan räjäytystyötapana on pengerlouhintaa, jota lähes kaikki louhintaa on. Perinteisessä louhinnassa louhintaräjähdeaine panostetaan porareikään. Räjähdysaineen tarkoituksena on paitsi rikkoa kallio tai kivi, myös siirtää lohkat paikkaan, josta ne ovat kätevästi kuljetettavissa eteenpäin. Ka-

naalilouhinta eroaa pengerlouhinnasta siten, että siinä tarvitaan suurempi ominaisporaus ja -panostus purkautumisreitien ahtaudesta johtuen. (Vuolio & Halonen 2012, 125; Hakapää & Lappalainen 2011, 165.)

3.1.1. Räjätystapahtuma

Räjätukset tulee suunnitella hyvin, sillä niitä on jälkikäteen mahdotonta perua. Räjätöksessä kallion irtoamisessa on kolme vaihetta. Ensimmäiseksi kallion lävitse kulkee iskuaalto, jonka nopeus on 3000–6000 m/s. Nopeus riippuu eniten kallion geologisista ominaisuuksista. Iskuaalto aiheuttaa painetta, joka edelleen aiheuttaa porausreiän reunoille tangentialisen jännitystilän. Kallioon murskautuu mikroskooppisia halkeamia 1–5 kertaa porausreiän säteen suuruiselle alueelle. Seuraavassa vaiheessa iskuaalto heijastuu vapaasta kalliopinnasta tai raoista muuttuen puristusjännitystilän vetojännitykseksi, aiheuttaen reiän keskeltä lähteviä säteittäisiä rakoja. Aalto on heijastumisen jälkeen nopeudeltaan 500–2000 m/s. Räjätyskaasut tunkeutuvat rakoihin laajentaen niitä, ja samalla kallio antaa myöten. Irtoava kallio liikkuu noin 10–30 m/s eli tämä on iskuaaltoon verraten selvästi hitaampi vaihe. Kaiken kaikkiaan räjätuksen tapahduttua porausreikä laajenee 5 millisekunnissa kymmenkertaiseksi. (Vuolio & Halonen 2012, 101.)

Seuraavassa kuvassa 1 nähdään tärkeimpiä käsitteitä louhinnassa.



Kuva 1. Pengerlouhinnan käsitteet (Vuolio & Halonen 2012, 103).

Panos jakautuu porareissä pohjapanokseen, varsipanokseen ja etutäytteen kuvan 1 mukaisesti. Rakennustyömaiden louhinnoissa porausreikien kaltevuus on yleensä 3:1. Sopivaksi räjähdysainemääräksi 1–15 metrin pengerkorkeuksilla on pääasiassa käytännön räjäytystöihin perustuen todettu noin 0,4 kg/m³. Ahtaat tilat ja rikkonainen kallio vaativat suuremman ominaispanostuksen. Myös lohkokokoa saadaan taloudellisesti pienemmäksi käyttämällä korkeampaa ominaispanostusta. Ominaispanostus liikkuu Suomessa tyypillisesti välillä 0,4–1,2 kg/m³ reikäläpimittojen ollessa välillä 30–203 mm. Kuvan mittakaavasta poiketen varsipanoksen on hyvä olla noin 0,4 x pohjapanoksen suuruinen. (Vuolio & Halonen 2012, 103–104; Jääskeläinen 2010, 200.)

Peruskaava panoslaskennassa on yhtälössä 1 esitetty Langeforsin kaava:

$$V = \frac{d_b}{33} * \sqrt{\frac{P*s}{c*f*\left(\frac{E}{V}\right)}} \quad (1)$$

jossa	V	= maksimietu [m]
	d_b	= porausreiän pohjan läpimitta
	P	= räjähdysaineen panostustiheys [kg/dm ³]
	s	= räjähdysaineen voima / painoyksikkö
	c	= kalliovakio 0,4 (0,3–0,5) = $c + 0,005$, kun $V_{\text{maks.}}$ = 1,4–15 m
	f	= pohjajännitys, joka riippuu reiän kallistuksesta esimerkiksi pystyreikä / kallistus 3:1 = 1,0 / 0,95

(Vuolio & Halonen 2012, 108.)

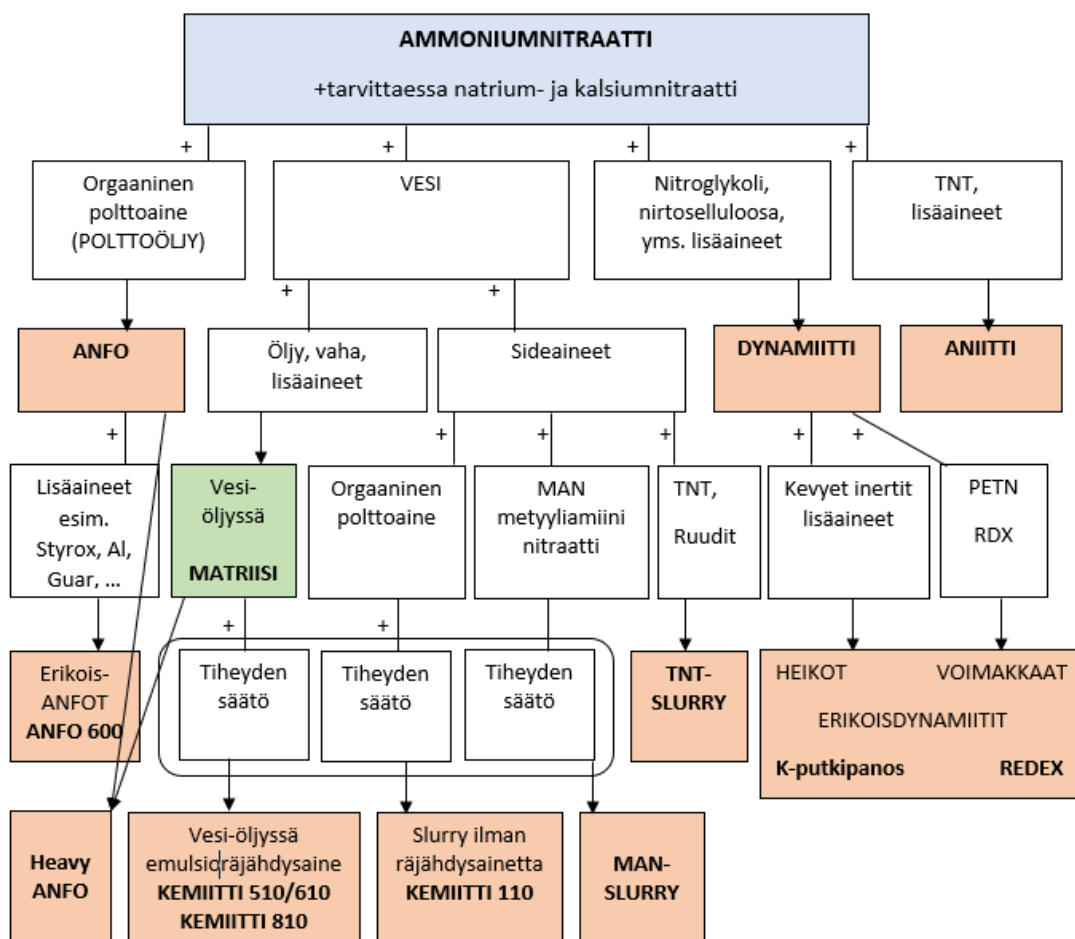
3.1.2 Räjähdyksaineet

Ensimmäinen varsinainen räjähdysaine, mustaruuti, oli käytössä ilotulituksissa todennäköisesti jo ennen vuotta 800. Se kuuluu niin sanottuihin deflagroiviin eli humahtaviin räjähteisiin, eli sen räjähdysnopeus on alle 1500 m/s. Kuitenkin suljetussa tilassa sekin voi detonoida. Varsinaisiin räjähtäviin eli detonoiviin räjähteisiin kuuluvat mm. dynamiitti, TNT, ANFO, aniitti, kemiitti, nitroglyseroli, lyijyatsidi ja heksogeeni. Näiden räjähdysnopeus eli iskuaallon etenemisnopeus on 1500–8500 m/s. (Vuolio & Halonen 2012, 19; 58.)

Louhintaräjähdyksaineet jaetaan kaikissa maissa nitroglyseroli- ja nitroglykoliräjähdyksaineisiin, sekä ANO-, Anfo-, vesigeeli- ja emulsioräjähdyksaineisiin. Ensin mainittu ryhmä on lähinnä dynamiittia, ja sitä kutsutaan myös lyhenteellä NG-räjähdyksaineet. Räjähdyksaineiden olomuoto on kiinteä tai rakeinen aine, tai jäykkä neste. (Jääskeläinen 2010, 192.)

Useimmat louhintaräjähdyksaineet koostuvat kahdesta tai useammasta komponentista, sisältäen minimissään palavan aineen ja happea antavan komponentin. Seos voi lisäksi sisältää räjähdysainekomponentin, ja mahdollisesti myös alumiinia, joka lisää räjähdyskaasujen ja -lämmön määrää. (Hakapää & Lappalainen 2011, 165.)

Ammoniumnitraatti on yleisin louhintaräjähteiden raaka-aine. Se voi esiintyä kide-, jauhe-, tai liuosmuotoisena (Hakapää & Lappalainen 2011, 165). Kuvassa 2 on esitelty suomalaisten räjähdysaineiden yksinkertaistetut valmistuskaaviot.



Kuva 2. Suomalaisien räjähdysaineiden valmistuskaaviot (Vuolio & Halonen 2012, 58).

Kuvassa 2 nähdään yksinkertaistettuna, miten ammoniumnitraatista valmistetaan erilaisia räjähdysaineita, kuten dynamiittia. Dynamiittia käytetympiä louhintaräjähdysaineita ovat ns. bulkkituotteet, kuten ammoniumnitraatin ja polttoöljyn seoksesta tehty Anfo ja pumpattavat emulsioräjähdysaineet kuten Kemiitti. Näitä käytetään suurissa louhintakohteissa, Anfoa pääasiassa varsipanoksina suurreikärajäytyksissä ja tunnelitöissä, ja Kemiittiä suurissa avolouhoskohteissa. (Työturvallisuuskeskus 2016, 5; Jääskeläinen 2010, 196.)

Fordyn-dynamiitti, Kemix A ja Aniitti ovat esimerkkejä suomalaisista patruonoiduista räjähdysaineista, joilla päästään kohtuullisiin lohkokokoihin 0,4 kg/m³ ominaispanostusta käyttäen reikäkoon ollessa alle 40 mm ja porauksen tiheää. Näitä kaikkia käytetään niin pohja- kuin varsipanoksinakin. (Vuolio & Halonen 2012, 109; Jääskeläinen 2010, 193–197.)

3.1.3 Räjähdysaineiden tärkeimmät ominaisuudet

Räjähdysaineelta vaaditaan muun muassa tehokkuutta, varmuutta, tasalaatuisuutta, turvallisuutta ja kilpailukykyistä hintaa. Kun räjähdysaineita vertaillaan toisiinsa, käytetään vertailuperusteena yleensä aineiden räjähdysteknillisiä ominaisuuksia. Tehdasvalmisteisilla tuotteilla vertailtavia ominaisuuksia ovat esimerkiksi *räjähdysnopeus*, *räjähdysvälitys*, *panostusaste*, *kaasutilavuus*, *räjähdyslämpö*, *sekä voima/painoyksikkö ja voima/tilavuusyksikkö*. (Vuolio & Halonen 2012, 64.)

Räjähdysnopeus tarkoittaa nopeutta, jolla reaktiorintama etenee aineen läpi. Yleensä suuri räjähdysnopeus on eduksi louhintatöissä, etenkin pohjapanoksissa. Reikäpanoksissa alkumurtumia porausreiän seinämissä aiheuttaa edellä menevä räjähdysten etenemisestä aiheutuva iskuaalto, ja sen perässä seuraa kaasunpaineaalto tehden varsinaisen irrotuksen. Dynamiitin räjähdysnopeus vaihtelee välillä 2500–6000 m/s riippuen sytytystavasta, lämpötilasta, panostustiheydestä, patruunan läpimitasta ja vastaavista tekijöistä. Suuri räjähdysnopeus särkee paremmin kiveä. (Vuolio & Halonen 2012, 64; Jääskeläinen 2010, 198.)

Räjähdyvälitys eli välitysetäisyys tarkoittaa suurinta etäisyyttä, jolla räjähdys etenee kappaleesta toiseen, eli rakoa, jonka yli räjähdys hyppää räjähtävästä kappaleesta toiseen. Tällä välitysetäisyydellä on käytännössä paljon merkitystä. Räjähdyvälitys suurenee patruunan läpimitan kasvaessa, ja pienenee alhaisessa lämpötilassa plastisilla räjähdysaineilla. (Vuolio & Halonen 2012, 64. Jääskeläinen 2010, 198.)

Panostusaste kuvaa ainemäärää porausreikämetriä kohden (kg/m). Suuria panostusasteita käytetään pohjalouhinnassa ja vedenalaisessa louhinnassa, ja pieniä panostusasteita tarkkuuslouhinnassa. (Vuolio & Halonen 2012, 64.)

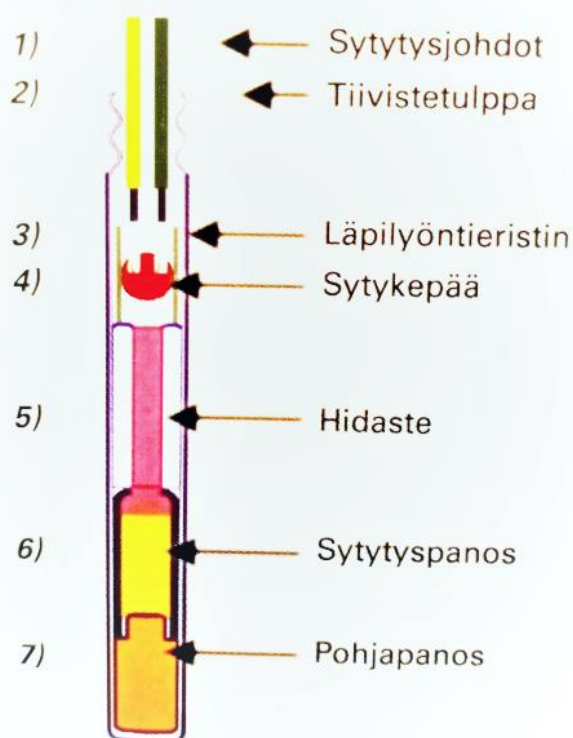
Irrotuslouhinnassa tarvitaan voimakasta ja reaktionopeudeltaan nopeaa dynamiittia, kuten Fordyn-dynamiittia. Se puristetaan porareikässä tiukasti kallion pintaa vasten, jolloin kallioon kohdistuu räjähdystapahtumassa suora voimakas isku, joka aiheuttaa kallion rikkoutumisen. Myös paine, joka seuraa välittömästi on suuri. Irrotusdynamiittia käytetään yli 40 mm:n rei'issä pohjapanoksena, mutta pienemmissä myös varsipanoksena. Tarkkuuslouhinnassa taas halutaan jäljestä sileää ja ehjää, jolloin dynamiitin on oltava hitaampaa ja heikompa. Tarkkuuslouhinnassa käytetään ohuisiin putkiin pakattua dynamiittia, esimerkiksi F-putkipanoksia. Putkipanokset asetetaan ohjurin avulla suurempaan porareikään niin, että putki jää irti kallion seinästä. Tällöin räjähdys ei iske lujaa kallion pintaan, vaan vierii viereen poratuissa rei'issä syntyy samanaikaisesti painetta ja jännitystä, jolloin kallio repeää irti suoraviivaisesti reikien välistä. (Jääskeläinen 2010, 193.)

Nykyiset räjähteet ovat oikein käsiteltyinä hyvin turvallisia, mutta huolimattomissa käsissä ne voivat aiheuttaa vakavia onnettomuuksia. Iskut, hankaus ja lämpö ovat olosuhteita, joita vastaan räjähdysaineiden kestävyyttä tarkkailaan. Vaikka useimmat räjähteet vaativat 200 °C lämpötilan tai enemmänkin syttyäkseen, räjähteitä ei silti saa sijoittaa paikkaan, jonka lämpötila ylittää 50 °C. (Vuolio & Halonen 2012, 67.)

3.1.4. Sytytysvälineet

Yleisin räjähdysaineiden sytytysväline on sähköräjäytysnalli. Perinteistä aika-tulilankaa käytetään nykyään harvoin, ja räjähtävää tulilankaa erikoistapauksissa. Kasvava ryhmä ovat impulssiletkuräjäytysnallit, ja elektronisten räjäytysnallien käyttö tulee kasvamaan tulevaisuudessa. (Hakapää & Lappalainen 2011, 166.)

Elektroninen nalli muistuttaa ulkoisesti sähkönallia, mutta sen sytytystapa on tarkemmin säädettävä. Elektronisella nallilla päästään nykyiseen verrattuna pienempiin tärinäihin, parempaan louhintajälkeen, suurempiin louhintakenttiin, tarkemmin haluttuun lohkokokoon ja heittoon, parempaan käyttöturvallisuuteen, sekä matalampiin kokonaiskustannuksiin. Myös kaukolaukaisujärjestelmä on mahdollistunut. (Hakapää & Lappalainen 2011, 169–170.)

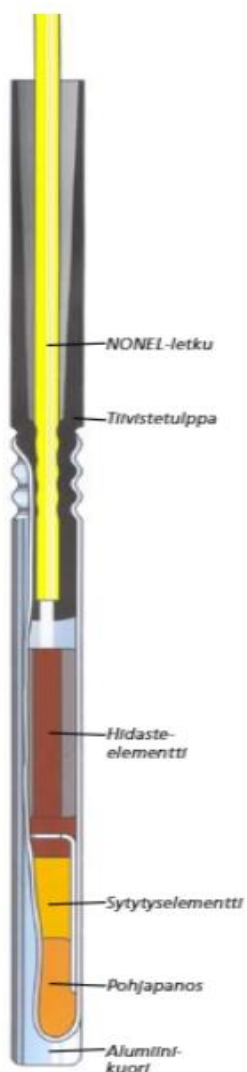


Kuva 3. Hidastesähkönallin halkileikkaus (Vuolio & Halonen 2012, 81).

Kuvan 3 halkileikkauksessa on merkitty numeroin sähkönallin osat:

1. Nallijohtimilla johdetaan sähkövirta sytykepäähän. Niiden materiaali on tavallisesti muovitettua kuparijohdinta tai tinattua rautaa. Nallin kuorossa ja jatkoholkissa on numerolapussa nallin numero, joka ilmoittaa syttymisjärjestyksen.
2. Muovitulppa estää veden pääsyn sisälle nalliin, ja kaasujen pääsyn ulos.
3. Alumiininen nallikuori.
4. Sytykepää, jossa kahden metallilamellin välissä vastuslanka. Sen ympärillä tulitikun raapaisumassan kaltaisesta materiaalista oleva herkästi syttyvä helmi.
5. Hidaste-elementillä kasvatetaan räjähdystehoa porrastamalla samaan aikaan sytytettyjen nallien räjäytysajankohdat. Samalla tärinä vaimenee.
6. Yhdessä sähkönallissa on räjähdysainetta noin 1 gramma. (Vuolio & Halonen 2012, 81–82.)

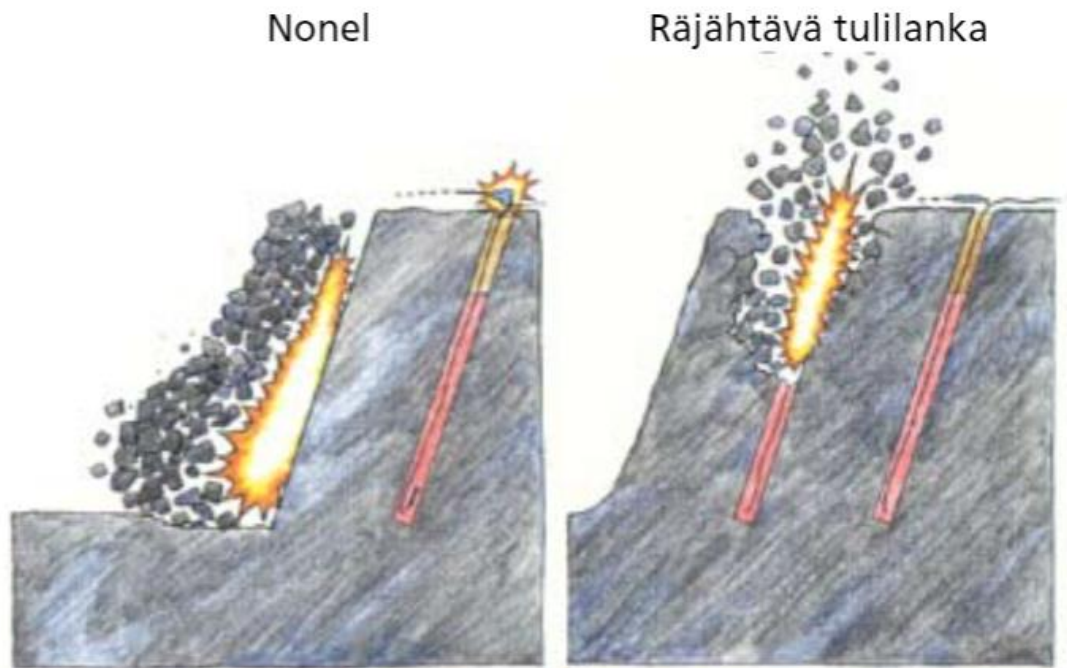
Impulssiletkunalleja kutsutaan yleisesti NONEL-nalleiksi, vaikka kyseinen nimi onkin vain yhden valmistajan patentoitu kauppanimi. Vastaava toimintaperiaate on esimerkiksi Austin-nalleilla. NONEL-sytytyksellä päästään maltillisempiin tärinöihin kuin sähkösytytyksellä, ja myös kiven heitto on säädeltävissä paremmin. Muita etuja ovat sähköturvallisuus, pakkasenkestävyys, sekä rajattomat kenttäkoot. NONEL-nallin sytytyssysteemi rakentuu ulkohalkaisijaltaan 3 mm paksusta muoviletkusta, jonka sisäpinnalla oleva hieno räjähdysaine sytytetään pohja- tai räjäytysnallilla tai räjähtävällä tulilangalla. 2100 m/s etenevä shokkiaalto saa aikaan pistoliekin, joka sytyttää päässä olevan nallin, ja räjähdys alkaa reiän pohjalta. (Vastaava louhintatyönjohtaja 2021; Oy Forcit Ab, 5; Vuolio & Halonen 2012, 85–86.)



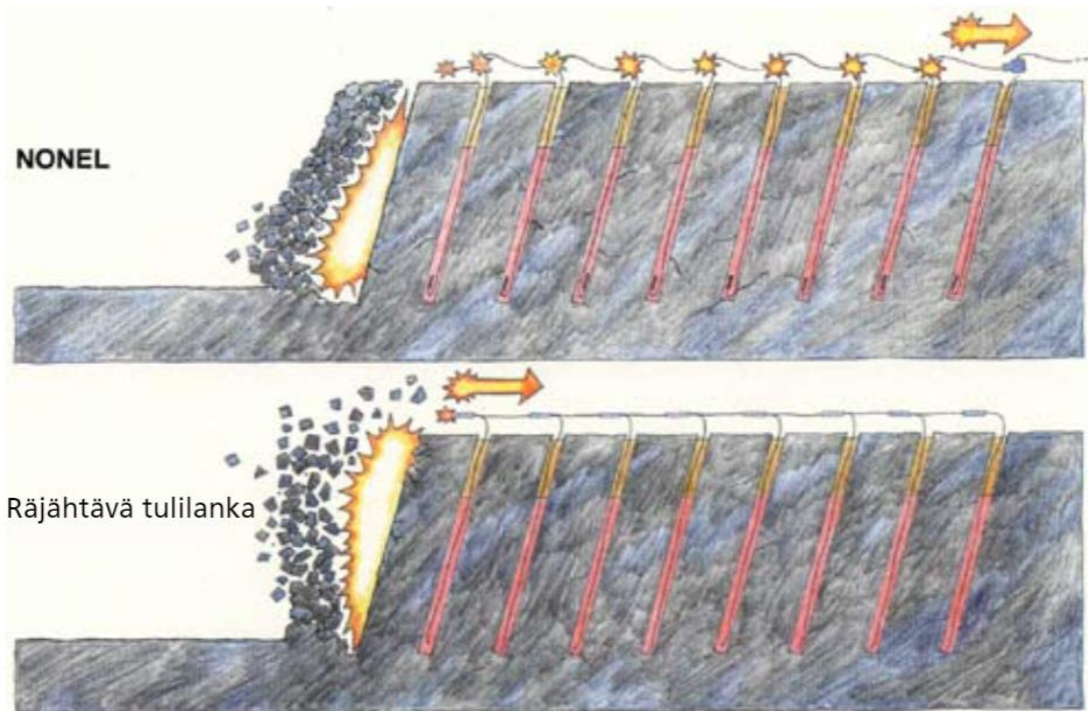
Kuva 4. Impulssiletkunallinen rakenne (Oy Forcit Ab, 8).

Kuvassa 4 on esitelty impulssiletkunallinen rakenne, joihin NONEL- ja Austinallit kuuluvat. Niiden sytytys tapahtuu impulssilaukaisimella. Siinä pienellä sähkövirralla saadaan aikaiseksi kipinä, joka sytyttää sytytysjohtimen pentriitin. Pentriitti johtaa impulssin n. 7000 m/s nopeudella johdinta pitkin kenttään, sen eri hidasteisiin ja nalleihin. Alumiininen nallikuori sisältää sytytys-elementin sekä heksogeenisen pohjapanoksen, joka sytyttää räjähdysaineen. Nalli sisältää yhteensä noin 1 g räjähdysainetta. NONEL-nallin hidasteaika koostuu hidaste-elementistä, sytytys-elementistä ja letkussa olevasta viiveestä. Letkun viive on 0,5 ms/m. (Vastaava louhintatyönjohtaja 2021; Oy Forcit Ab, 8.)

Seuraavissa kuvissa 5 ja 6 havainnollistetaan Nonel-sytytyksen eroa verrattuna räjähtävään tulilankaan. Nonel-letkussa paineaalto pysyy letkun sisällä, kun taas räjähtävä tulilanka räjähtää heti. (Oy Forcit Ab, 5.)



Kuva 5. Nonel-sytytyksen ja räjähtävän tulilangan käytön erot kiven sinkoailussa (Oy Forcit Ab, 6).



Kuva 6. Sytytyksen eteneminen Nonel-sytytyksessä verrattuna räjähtävään tulilankaan (Oy Forcit Ab, 6).

Kuvista 5 ja 6 nähdään, että räjähtävää tulilankaa käytettäessä syntyy kiven sinkoailua, sillä etutäyte voi tuhoutua, kun sytytys kulkee sen läpi. Nonelilla räjähdysaine syttyy tehokkaasti pohjasta päin, kun taas räjähtävällä tulilangalla

räjähdyks alkua reiän yläosasta, ja voi tuhota räjähdyspanosta tai heikentää sen tehoa matkalla alaspäin. Nonelia käytettäessä kytkinkappaleiden pintasytytys voidaan myös saada etenemään koko kentän läpi ennen kuin yhtään räjähdysainetta on syttynyt ja kiveä liikkunut, toisin kuin räjähtävän tulilangan kohdalla. (Oy Forcit Ab, 6.)

3.1.5 Panostaminen

Varsinaiset räjähdysaineet eivät lähtökohtaisesti syty nallilla, vaan nalli sijoitetaan aloitepanokseen eli boosteriin. Tällaisia nallipaloja sijoitetaan yleensä 2 kappaletta reikää kohden, toinen pohjalle, ja toinen pintaan niin, että se räjähtää myöhemmin kuin pohjanalli. (Hakapää & Lappalainen 2011, 171.)

Sähkönalleja, kuten Firex-nalleja valmistetaan 25 ms aikaerolla ja ne on numeroitu arvoin 1–20. Hieman suuremmalla aikaerolla varustetut VA-nallit taas jatkavat sarjaa numeroilla 21-30. Firex-nalleilla eri aikaan räjähtäviksi reiiksi voidaan näin ollen kytkeä maksimissaan 30 reikää. Järjestelmää voidaan käyttää myös reikien jakamiseen, jolloin nallit kytketään eri palotiloihin ja räjäytetään vain 15 reikää kerrallaan. Jos Firex-kentässä palotilojen määrä on 2, tarkoittaa se sitä, että käytetään välitakkäystä, jolloin molemmat räjähdyspanokset räjähtävät erikseen. Momentaaninen maksimipanos, joka tarkoittaa suurinta yhtäaikaista räjähtävää räjähdysainemäärää, on tällöin reiässä ja kentässä oleva massaltaan suurin erikseen räjähtävä panos. (Vastaava louhintatyönjohtaja 2021.)

Impulssinallien paloaika on 450 ms tai 500 ms, jolla varmistetaan, että impulssi on useimmiten edennyt kentässä kaikkiin nalleihin. Tällöin kallion lustaisuudesta eli luonnonrakoilusta johtuvaa lohcareiden siirtymistä ei ole vielä voinut tapahtua eikä räjähdys näin ollen katkea siitä syystä. Paloajaltaan 450 ms nallit ovat aina johtimeltaan yli 9 m pitkiä ja 500 ms nallit ovat pääasiassa 4–10 m pitkiä. Jos samaan pitkään reikään laitetaan kaksi eri nallia niin pohjalle tulee tällöin 450 ms nalli ja pintaan 500 ms nalli. Toisin sanoen pohja lähtee ensin ja pinta vasta sitten. Austin-nallien paloaika on aina samansuuruinen, joten jos ne halutaan saada räjähtämään eri aikaan, täytyy käyttää hidasteita. Hidasteita on eri suuruisia: 17 ms, 25 ms, 42 ms 67 ms ja 109 ms ja 167 ms.

Hidasteet kytketään aina pintaan huolellisesti kiinni nallin ja toisten hidasteiden johtimiin. Hidasteilla on periaatteessa mahdollisuus saada aikaan räjähdys, jossa kaikki nallit räjähtävät eri aikaan ja näin momentaaninen räjähdysainemäärä saadaan yhdellä nallilla syttyvän räjähdysainemäärän suuruiseksi. Nallit voidaan kytkeä joko samaan palotilaan, tai eri palotilaan. Samaa palotilaan nallit kytketään silloin, kun halutaan eliminoida kallion rikkonaisuudesta johtuvien lohcareiden siirtymisestä aiheutuva räjähdysten katkeaminen reiän sisällä. Pinnassa oleva nalli varmistaa sen, että pinnassa oleva räjähdysainemäärä palaa varmasti. Pohjanalli taas polttaa pohjaräjähteen. Näin ollen, mikäli lohkat siirtyvät katkaisten reiän, tällöin räjähtävät kaikki räjähteet, jotka on laitettu reikään. Eri palotilaan kytkettynä saadaan pienennettyä momentaanisesti räjähtävän räjähdysainemäärän massaa reiässä, kunhan välitila muistetaan täyttää huolellisesti räjähdystä välittämättömällä aineella, kuten hiekalla siten, ettei räjähdys voi välittyä panostilasta toiseen. (Räjähdystyönjohtaja 2021.)

Mikäli impulssinallikentässä käytetään kahta saman numeroista nallia, joiden palo-aika on sama, niin käytännössä kaikki reikään laitettut räjähteet palavat saman aikaisesti. Tällöinkin voidaan joskus käyttää välitakkäystä erottamaan nallit, mutta sen tarkoitus on vain keventää reikäpanosta. Tällöin reikäpanos on kokonaisuudessaan välitakkäyksen pituuden verran pienempi kuin se olisi ollut, jos se olisi räjäytetty yhdellä nallilla, tai kahdella nallilla ilman välitakkäystä. Tällaisessa tapauksessa momentaaninen panos on suurin koko reiän yhteenlaskettu panos, joka panoskentästä löytyy, eikä yksittäisen palotilan panos. (Vastaava louhintatyönjohtaja 2021.)

3.2 Tarkkuuslouhinta

Tarkkuuslouhinta tulee kyseeseen louhittaessa tarkkojen toleranssien mukaan ja pyrittäessä sileisiin pintoihin. Tarkkuuslouhinnassa reunimmaisten reikien poraus tulee tehdä tavallista tiheämmin ja panostus kevyemmin. Reunareikien osalta tavoitteena on suhteellisen pieni panostustiheys, ja paras sytytysmenetelmä saa reunareikien räjähdysainemäärän räjähtämään reikien välillä korkeintaan 1–2 millisekunnin viiveellä, kun taas tavallisessa louhinnassa pyritään nallien eriaikaiseen räjähdykseen. Tarkkuus louhinta voi epäonnistua, jos reikäväli ja

räjähdysainemäärä porametriä kohden eli panostusaste on liian suuri tai porausreikä tai sen täyttö on tehty huolimattomasti. (Hakapää & Lappalainen 2011, 177–178.)

3.3 Louhinnan vaikutukset ja niiden hallinta lähialueella

Louhinnasta aiheutuu ympäristölle yleensä hieman häiriöksi koettuja vaikutuksia, kuten melua, pölyä ja tärinää. Lisäksi lähialueella liikkuvien turvallisuuteen on kiinnitettävä huomiota louhintatyömailla.

3.3.1 Melu, pöly, tärinä

Louhinnasta aiheutuu ympäristölle väistämättä jonkinlaista häiriötä, kuten melua, pölyä ja tärinää. Räjähdyksien ja porausten lisäksi myös lohkkareiden rikotus ja louheen murskaus aiheuttavat meluhaittaa.

Valtioneuvosto on meluntorjuntalain nojalla meluhaittoja ehkäistäkseen ja ympäristön viihtyisyyden turvatakseen päättänyt melutasolle yleiset ohjeavot. Hoitolaitosta palvelevilla ulkoalueilla sallitun melun A-painotetun ekvivalenttitason (L_{Aeq}) raja päiväsaikaan on 55 dB ja yöllä 50 dB, joiden ylitystä ei sallita. Sisätiloissa, kuten potilashuoneissa vastaavat melurajat ovat päivällä 35 dB ja yöllä alle 30 dB. (Rakentaminen ja maankäyttö 2021, 617.)

Räjähdyksessä muodostuu pilvi, joka sisältää räjähdyskaasuja, mutta myös louhittavasta materiaalista lähtöisin olevaa pölyä. Huolellisella panostuksella ja räjähdysaineiden valinnalla voidaan vaikuttaa räjäytystyön ympäristövaikutuksiin. (Rakentaminen ja maankäyttö 2021, 618.) Louhinnassa käytetyt täkkäysmatot estävät osaltaan pölyn leviämistä, ja lisäksi pölyä sidotaan kastelulla. Porausvaunut on varustettu pölynerotuslaitteistolla.

3.3.2 Turvallisuus

Ennen räjäytys- ja louhintatöiden aloittamista tulee laatia kirjallinen turvallisuussuunnitelma, joka ottaa huomioon työn ja työympäristön vaarat. Laatija

voi olla louhintaurakoitsija tai työmaan päätoteuttaja. Turvallisuussuunnitelmasta tulee selvittää seuraavat asiat:

- 1) työkohte ja sen geotekniset ominaisuudet
- 2) työpaikan ja työvaiheen sähköistys, valaistus, yhteydenpito, louhintamenetelmä ja tila- ja muut tekniset ratkaisut
- 3) kulkuväylät, poistumisreitit ja suojapaikat
- 4) työvälineet ja niiden valintaperusteet, käyttö ja kunnossapito
- 5) turvalliset työskentelytavat
- 6) työssä käytettävät räjähteet ja terveydelle vaaralliset aineet sekä selvitys niiden säilytyksestä
- 7) pelastautuminen hätätilanteissa, pelastautumislaitteen tarve
- 8) muut terveyteen ja turvallisuuteen vaikuttavat tekijät räjäytys- ja louhintatyössä. (Työturvallisuuskeskus 2016, 11–12.)

Varsinaisen räjäytyksen aikana alue tyhjennetään ihmisistä, ja tämä varmistetaan varmistusmiesten ja varoitusäänen avulla.

Kiven lentäminen räjäytystyön yhteydessä on todellinen riski, jota pyritään minimoimaan täkkäämällä, eli suojaamalla räjäytyskohta kumimatoilla.



Kuva 7. Kumimattojen pinoamista tutkimuksen kohteena olevalla työmaalla.

Ilman täkkäystä kiviä sinkoilisi jopa satojen metrien päähän räjäytystyön yhteydessä. Kuvassa 7 nähdään suojakumimattojen siirtelyä täkkäyspuomin

avulla. Tavallisesti koneeseen on kiinnitetty iskuvasara, eli kansankielisesti rammeri, jota käytetään louhinnassa irronneiden ylisuurten kivien rikotukseen. Kivien sinkoaminen on todellinen riski myös iskuvasaraa käytettäessä. Hydraulivasaran ympärille onkin olemassa suojalaitteita, jotka estävät kivien lentämistä ja meluhaittoja.

3.4 Laadunvarmistus

Ennen louhintatöiden aloitusta on tyypillisesti huolehdittava kalliopinnan vaaituksen suorittamisesta tulevaa massalaskentaa varten. Tarvittavat rai-vaus-, purku-, tukemis-, lujitus- ja kaivutyöt tulee olla suoritettuna ennen louhintatöiden aloittamista. Ympäristökatselmukset, rakenteiden suojaukset ja tärinäsuojaukset tulee olla tehtynä ennen kuin louhintatyöt voivat alkaa, ja myös louhintatyön yleissuunnitelma on hyväksyttävä tilaajalla. Suunnitelmassa esitetään louhintatyön eteneminen, louhintajärjestys ajankohtineen, työmaaliikenteen suunnitelma, lujitustöiden vaiheistus, suojaus- ja varotoimenpiteet, sekä perusteet tärinärajojen ja muiden vaatimusten täyttymisestä. Louhintatyöt on suunniteltava ja suoritettava valtioneuvoston asetuksen 644/2011 ja 484/2016 mukaan. Urakoitsijan laatimat räjäytyssuunnitelmat hyväksytetään tilaajalla ennen porauksen aloittamista. (Geosuunnittelu 2021.)

Ennen louhintatöiden aloitusta laaditaan työ- ja laadunvarmistussuunnitelma (liite 2). Siinä määritellään louhinnan laatutekijät, toleranssit, laatutekijöiden mittausmenetelmät, mittauksiin, mittauksen suorittaja sekä dokumentointi. (YIT 2020.) Työvaiheen toteutussuunnitelmassa (liite 3) pyritään kuvaamaan koko louhintatyömenetelmä sisältäen kaluston, materiaalit, työryhmän, työhön valmistautumisen, työn suorituksen kuvauksen, työjärjestyksen turvallisuus- ja ympäristöriskeineen (YIT 2021).

Louhinnalle määritellään toleranssit, jotka on esitetty kunkin kohteen pohjarakennustyön työselostuksessa. Porauksen tulee pysyä toleranssien sisällä, ja kenttäreikien panostusaste tulee olla sellainen, ettei kallio rikkoudu syvemälle kuin reikien aiheuttaman rikkonaisuusvyöhykkeen alueelle. Epätarkka

porausta ja ylisuuri panostus vaikeuttavat värinänhallintaa, ja voivat myös aiheuttaa ylilouhintaa, josta aiheutuvat toimenpiteet urakoitsijan on korvattava. (Geosuunnittelu 2021.)

Taulukko 1. Toleranssit ja sallittu rikkoutumisvyöhyke kallioavoleikkauksen seinissä ja pohjissa (Geosuunnittelu 2021).

Laatuluokka	Seinäpinnan tarkkuusvaatimus, mm	Pohjapinnan tarkkuusvaatimus, mm
0	0...100	-
1	0...200	0...400
2	0...400	0...600
3	0...600	luokittelematon
4	luokittelematon	-

Taulukon 1 mukaisista laatuluokista on rakennuspohjan louhintatöissä pääsääntöisesti käytössä laatuluokka 1, ja seinäpinnoissa laatuluokka 0. Piha-alueen kanaalilouhinnoissa ja piharakennekerrosten alle jäävissä louhinnoissa, jotka jäävät kauas anturoista ja ehjänä säilytettävistä kallioalueista, käytetään laatuluokkaa 1. (Geosuunnittelu 2021.)

3.5 Louhintaan liittyvät luvat, ilmoitukset ja katselmukset

Työsuojeluviranomaiset valvovat työturvallisuuslain ja siihen liittyvien säädösten noudattamista. Säädöksiä ovat muun muassa valtioneuvoston asetukset rakennustyön sekä louhinta- ja räjäytystyön turvallisuudesta. TUKES valvoo lisäksi vaarallisten kemikaalien ja räjähteiden käsittelyn turvallisuudesta annetun lain noudattamista. Räjähteiden yleiseen turvallisuuteen liittyvien asioiden noudattamista valvoo poliisi, jolle tehdään myös räjähdystyön aloittamisilmoitus. (Työturvallisuuskeskus 2016, 6.)

Räjäytystöiden tekeminen edellyttää asianmukaista voimassa olevaa pätevyyskirjaa, joka on panostajan pätevyyskirjojen rekisterissä (Rakentaminen ja

maankäyttö 2021, 674). Lisäksi panostaja laatii jokaisesta räjäytyksestä kirjallisen räjäytyssuunnitelman, joka toimii dokumenttina siitä, miten räjäytys on toteutettu. Mikäli suunnitelma ja toteutus eroavat merkittävästi toisistaan tulee poikkeamat kirjata arkistoitavaan suunnitelmaan. Räjäytyssuunnitelma sisältää tiedot pengerkorkeudesta, kentän sijainnista ja koosta, porausreiän koon ja ominaispanostuksen, suurin momentaanisen räjähdysainemäärän, käytettävät sytytysvälineet ja räjähdysaineet, reikäpanoksen, räjäytysnallien kytkennän, vaarallisen alueen ja varmistustoimenpiteet, tiedot peittämisestä, tärinämittausten tulokset, räjäytysajankohdan sekä suunnitelman laatijan ja hyväksyjän eli vastaavan louhintatyönjohtajan tiedot. (Työturvallisuuskeskus 2016, 12.)

Räjähteiden varastointi vaatii Turvallisuus- ja kemikaaliviraston luvan, jota haussa tulee esittää selvitys suunnitellusta toiminnasta ja sen turvallisuusjärjestelyistä. Lupaa tilapäiseen varastointiin on haettava vähintään 2 viikkoa ennen toiminnan aloittamista, ja myönteisen päätöksen jälkeen viranomaisen tarkastaa tilapäisvaraston ennen sen käyttöönottoa. (Rakentaminen ja maankäyttö 2021, 642, 656.)

Lain mukaan räjäytystyöstä on tehtävä sitä koskeva kemikaaliturvallisuuslain 79. §:n mukainen ilmoitus poliisille viimeistään 7 vuorokautta ennen töiden aloittamista. Mikäli räjähteitä käytetään yksittäisinä panoksina maksimissaan 1 kg panostilassa ja enintään 25 kg vuorokaudessa, riittää ilmoitusajaksi 1 vuorokausi. (Rakentaminen ja maankäyttö 2021, 659.)

Ilmoituksesta tulee käydä ilmi seuraavat asiat:

1. Räjäytystyömaan sijainti
2. Arvio työmaan kestoajasta, ja räjäytyspäivistä/-viikoista
3. Räjäytystyönjohtaja yhteystietoineen
4. Räjähteiden varasto- ja säilytyspaikat työmaalla
5. Mahdolliset räjähteiden valmistukseen siirrettävällä laitteistolla ja siihen liittyvien vaarallisten kemikaalien varastointiin liittyvät selvitykset.

(Rakentaminen ja maankäyttö 2021, 659.)

Kaivos- ja louhintatyöhön tarvitaan myös kaivannon tekemistä varten maankäyttöön liittyviä lupia, jotka liittyvät hankkeen suunnitteluun. Näihin voi sisältyä esimerkiksi kaivoslupa ja maa-aineksen ottamislupa. Joissain tapauksissa tarvitaan myös ympäristölupa ja meluilmoitus 1 kuukausi ennen töiden aloitusta tilapäisestä erittäin häiritsevästä melusta. (Työturvallisuuskeskus 2016, 7.)

Ennen räjäytystöiden alkua suoritetaan läheisissä rakennuksissa alkukatselmukset, joissa todetaan ja dokumentoidaan rakennusten kunto juuri ennen louhinnan aloitusta. Heti räjäytysten päätyttyä suoritetaan loppukatselmukset, joissa voidaan todeta mahdolliset aiheutuneet vauriot. Näihin katselmuksiin osallistuu ainakin värinäasiantuntija, ja myös kiinteistön edustajalla ja louhinta-työn suorittajalla tulee olla mahdollisuus osallistua. Katselmusten tarkoitus on varmistaa osapuolten oikeudet niissä tapauksissa, jos epäillään kiinteistöihin syntyneen vaurioita louhintatyömaan aikana. (Vuolio & Halonen 2012, 298; Forcit Consulting 2021a.)

4 TÄRINÄ

Louhintatöistä aiheutuu yleensä värinää lähiympäristöön. Suurimmat värinähaitat tuntuvat tyypillisesti räjäytysalueen välittömässä läheisyydessä, mutta värinä etenee maaperässä aaltomaisesti, joten vaikutukset saattavat tuntua jopa satojen metrien päässä. (Kotkan kaupunki 2021.)

4.1 Aaltoliike

Räjähdyspanos saa kalliolla aikaan jännitysaallon. Kallio vastustaa paineaaltoa, jonka seurauksena aine tiivistyy ja usein myös murskautuu pieneltä alueelta. Loppuosa paineaallosta etenee aineessa shokkiaaltona tiivistäen ja rikkoen kalliota. Shokkiaalto on räjähdysten aaltoliikkeistä nopein, ja se vaikuttaa vain noin 1 cm paksuisella vyöhykkeellä ja 0,2 mikrosekunnin ajan. Tämän jälkeen se hidastuu ja muuttuu plastiseksi aalloksi, vaimentuen edelleen niin, ettei väliaineessa synny enää pysyviä muutoksia, muuttuen lopulta kimmoaallosi. (Hakapää & Lappalainen 2011, 179; Vuolio & Halonen 2012, 299.)

Tärinä on yksinkertaisimmillaan heilahdusliikettä, joka muodostuu sinimuotoisesta aaltoliikkeestä. Heilahdus on luonnossa harvoin sinimuotoista, mutta käytännössä tämä on riittävä tarkkuus arvioitaessa räjäytyksiä. Siirtymän heilahdusnopeusamplitudi kuvaa heilahdusliikkeen suuruutta. Alla esitetystä kaavasta 2 saadaan derivoimalla kaavan 3 heilahdusnopeus, josta saadaan derivoimalla kiihtyvyys kaavan 4 mukaisesti. (Vuolio & Halonen 2012, 298.)

$$u = A \sin \omega T \quad (2)$$

$$v = 2 \pi f A \quad (3)$$

$$a = 4 \pi^2 f^2 A \quad (4)$$

jossa: u = poikkeama hetkellä ωT

A = siirtymän heilahdusamplitudi [mm]

ω = kulmataajuus

T = jakson aika

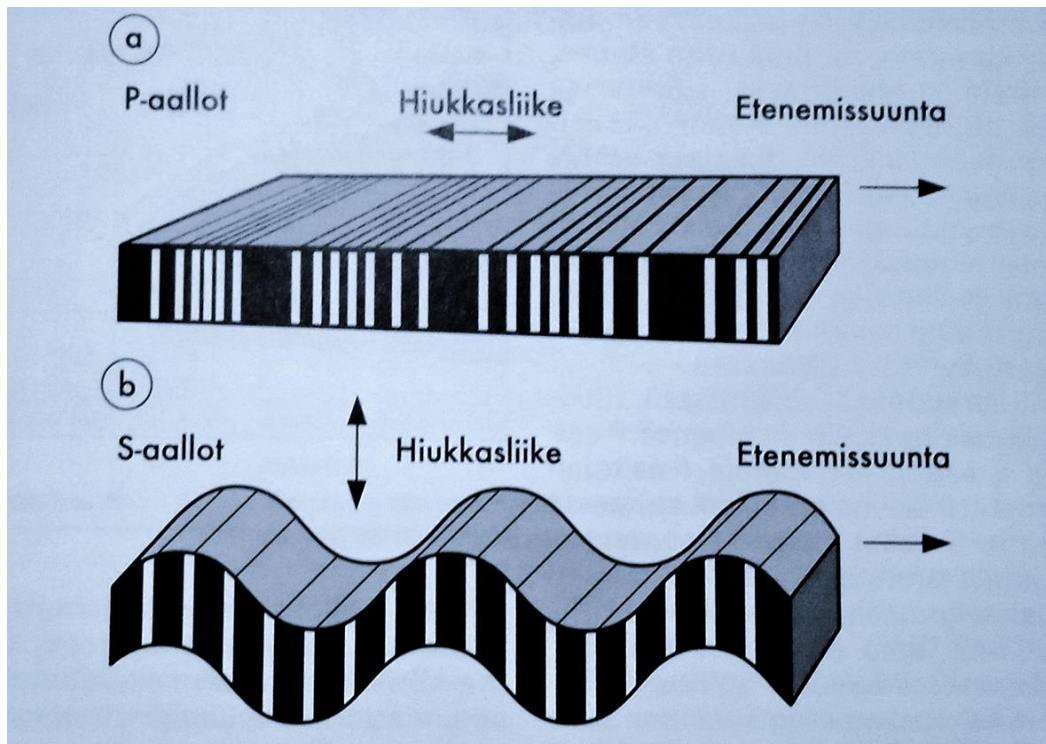
v = heilahdusnopeus [mm/s]

π = siniheilaidus, n. 3,14

a = kiihtyvyys (m/s^2). (Vuolio & Halonen 2012, 298.)

4.1.1 Aaltoliiketyypit

Kimmoaallot voidaan jakaa runko- ja pinta-aaltoihin. Runkoaallot voidaan jakaa edelleen P- ja S-aaltoihin. Primaari- eli P-aaltojen eteneminen tapahtuu pitkittäissuunnassa etenemissuuntaisesti, ja seismisissä eli S-aalloissa poikittaisesti etenemissuuntaan nähden. Kuvassa 8 on visualisoitu molempien runkoaaltotyyppien liikkeit. (Niemi 2018; Vuolio & Halonen 2012, 299.)



Kuva 8. P- ja S-aallot elastisena aaltoliikkeenä (Vuolio & Halonen 2012, 299).

Teoriassa pistemäisen panoksen räjähtäminen aiheuttaisi vain kuvassa 8 näkyviä vaakasuuntaisia P-aaltoja. Käytännössä räjähdyspanokset ovat sylinterimäisiä, ja aiheuttavat sekä P- että S-aaltoja. Näiden lisäksi tarkkaillaan käytännössä vielä R-aaltoa, joka on pinta-aalloista tunnetuin. (Vuolio & Halonen 2012, 300.)

4.1.2 Aaltoliikkeiden etenemisnopeudet

P-aallot ovat aalloista nopeimpia. S-aallon nopeus on kalliolla hieman yli puolet ja soralla hieman alle puolet P-aallon nopeudesta. R-aallon nopeus on enintään 90 % S-aallon nopeudesta. Kaikki aaltotyypit voivat edetä joko suoraviivaisesti, heijastuen tai taittuen. Etenemistavasta riippumatta aalloista saapuvat perille yleensä ensin P-aallot, sitten S-aallot, ja lopuksi R-aallot. (Vuolio & Halonen 2012, 300.)

Kallion geologiset ominaisuudet vaikuttavat värinäaaltoliikkeen etenemisnopeuteen. Kovassa graniitissa aaltoliike etenee nopeasti, 5000–6000 m/s, jolloin rikkoutuminen onnistuu parhaiten dynamiiteilla ja emulsioilla, jotka ovat nopeita räjähdysaineita. Liian pieni ominaispanostus graniitissa voi aiheuttaa

reiän suulta sinkoutuvia kappaleita sekä sen, että lohkat ei irtoa kunnolla ja pohjalle jää kynsiä, jotka ylittävät halutun leikkaustason. (Vuolio & Halonen 2012,110)

4.2 Tärinästä aiheutuva haitta

Rakenteiden kunto ja kuormitushistoria vaikuttavat merkittävästi siihen, kuinka hyvin ne sietävät tärinää ja värähtelyä. Huonokuntoiset rakenteet rapistuvat muutenkin hyväkuntoisia nopeammin, ja tärinä voi nopeuttaa tätä prosessia entisestään ja vaurioittaa huonokuntoisia rakenteita. Tärinä voi osaltaan aiheuttaa halkeamia rakenteissa, mutta niitä tulee vanhempiin rakenteisiin joka tapauksessa muun muassa lämpötila- ja kosteuserojen ja perustusten painumien vuoksi. (RIL ry 2010, 20–21.)

Tärinä voi aiheuttaa löyhissä hiekkamaissa maakerrosten tiivistymistä. Tiivistymistä tapahtuu yleensä pohjaveden pinnan alapuolella, yleisimmin lyöntipaalutuksissa ja pontituksissa. (RIL ry 2010, 95–96.)

Mikäli työmaan välittömässä läheisyydessä on tärinälle herkkiä laitteita, voivat ne rajoittaa louhintatöitä merkittävästi. Tärinä voi vaurioittaa tärinälle herkkiä laitteita ja häiritä tärinäherkkiä toimintoja, jolloin louhinnan työtapoihin ja voimakkuuteen tulee kiinnittää huomiota. Monissa tapauksissa tärinäherkät laitteet voidaan eristää tärinävaimentimilla. (Forcit Consulting 2021b.)

4.3 Tärinämittaus

Heilahdusnopeuden suurimman komponentin maksimiarvo (v_{max}) on yleisin tärinäkriteeri perustuksissa. Tärinän suuruutta mitataan kolmessa suunnassa, joista yksi on aina pystysuuntaan. Mittausanturit tulee sijoittaa vaakasuunnassa mittauskohteen ja tärinälähteen yhdistävän suoran suuntaisesti, sekä tätä vastaan kohtisuoraan. (RIL ry 2010, 21–22.)

Louhintatärinää tulee Vuolion & Halosen (2012, 319) mukaan seurata mittamalla tehollisarvojen sijaan huippuarvoja, sillä louhintatärinälle on luonteenomaista epäsäännöllisyys. Mitattavia tärinäsuureita ovat:

v = heilahdusnopeus (mm/s)

f = taajuus (Hz tai 1/s)

A = siirtymän heilahdusamplitudi (mm)

a = kiihtyvyys (m/s^2 tai $g = 9,8 \text{ m/s}^2$) (mt. 320).

4.3.1 Tärinän laskukaavoja

Ril ry:n (2010, 81) ohjeella tärinän heilahdusnopeus v voidaan laskea kaavalla 5:

$$v = k * \frac{Q^m}{R^n} \quad (5)$$

jossa Q on räjähdysainemäärä

R on etäisyys

k , m ja n ovat räjäytystavasta ja olosuhteista riippuvia kertoimia.

Räjäytystärinän mallinnuksessa tärinä oletetaan yleensä skaalatun etäisyyden potenssifunktioksi. Tavallisesti etäisyys skaalataan jakamalla se momentaanisen räjähdysainemäärän neliöjuurella. Skaalatun etäisyyden funktiona yhtälön 6 mukaisesti heilahdusnopeus on suora. (RIL ry 2010, 81–82.)

$$v = k * \left(\frac{R}{\sqrt{Q_e}} \right)^m \quad (6)$$

jossa R on räjäytys- ja kohdepisteen välinen etäisyys [m]

Q_e on momentaaninen räjäytysainemäärä [kg]

k ja m ovat kertoimia (RIL ry 2010, 81–82).

Kun arvioidaan louhintatärinän voimakkuutta, käytetään momentaanista räjähdysainemäärää. Se tarkoittaa räjähdysainemäärää, joka räjähtää räjäytyksessä niin samanaikaisesti, että siitä aiheutuu kaikista räjäytyskentän panosten aiheuttamista tärinähuipuista kaikkein suurin tärinäarvo. Käytännössä momentaanista räjähdysainemäärää ei edes tiedetä, kun kentässä on ajoitukseltaan toisiaan lähellä olevia panoksia ja reikien sijainnit kohteeseen nähden synnyttävät aikaeroja. Tärinän kannalta samanaikaisena räjähdyskentän pidetään aikaerollisesti enintään 8 ms:n päässä toisistaan eri panostiloissa räjähtäviä panoksia alle 100 metrin päässä kohteesta. (RIL ry 2010, 82.)

4.3.2 Mittarit ja mittauspisteet

Tärinää mitataan yleensä analyysimittauslaitteella, joka koostuu tärinämittarista ja tärinäanturista. Anturi kiinnitetään rakennusten tärinöitä mitattaessa kantavaan rakenteeseen lähelle perustuksia, ja herkkien laitteiden tärinämittauksessa laitteen perustaan tai suoraan itse laitteeseen. Rakennusten tärinöitä tarkasteltaessa anturit on syytä sijoittaa mahdollisimman lähelle louhintakohdetta, jolloin voidaan välttää rakenteiden aiheuttamaa mittaustulosten monimutkaistumista. Mittauslaitteilla voidaan tulostaa heilahdusnopeuskäyrät, joista seurataan ohjeellisten heilahdusnopeuden maksimiarvojen mahdollisia ylityksiä. Herkkien laitteiden osalta seurataan yleensä laitevalmistajien antamia ohjearvoja, jotka on annettu usein suurimpana sallittuna kiihtyvyyden arvona. (Vuolio & Halonen 2012, 320–321.)

Tärinän mittaamiselle ei ole annettu kovin tarkkoja ohjeita, vaan ne ovat tärinäasiantuntijan vastuulla. Tärinää on mitattava riittävästi ja mittaustavan on oltava tarkoituksenmukainen. Mittausten taajuusalueen tulee olla 5–300 Hz, ja saatujen arvojen tulee olla vertailukelpoisia kohteelle määritettyihin tärinän ohjearvoihin. Mittauksissa tehdään kolmikomponenttimittauksia, ellei ole toisin päätetty. (RIL ry 2010, 38.)

4.3.3 Tärinän voimakkuuteen vaikuttavat tekijät

Kallion ominaisuuksilla on suurempi merkitys tärinänhallinnassa kuin käytettävällä räjähdysaineella. Räjähdyksiä suunniteltaessa on tärkeää tietää kalliokohdainen rikkomiseen tarvittava ominaispanostus eli räjähdysainemäärä kiloina kuutiometriä kohden. Lisäksi tulee tuntea räjäytysgeometria ja ymmärtää syttymisjärjestyksen ja syttymisaikavälin merkitys. Tärinäjohtavuuskerrointa pyritään arvioimaan suunnitteluvaiheessa, mutta sen suuruus tulisi tarkistaa koe-rajähdyksillä ja tärinämittauksilla. Väliaineen vaihtuminen esimerkiksi kalliosta soraan tai saveen vaimentaa yleensä tärinöitä. Väliaineen ominaisuuksilla on tärinäjohtavuuden ohella vaikutusta myös tärinäaallon etenemisnopeuteen ja taajuuteen. (Vuolio & Halonen 2012, 101, 325.)

Rakenteeseen tai laitteeseen kohdistuvan räjäytystärinän suuruuteen vaikuttavat seuraavat tekijät:

- Kallioperän kivilajit ja rakenne
- Mittauskohteen etäisyys räjäytyskohteesta
- Porausreiässä samanaikaisesti syttyvän panoksen suuruus
- Usean reikäpanoksen tärinäyhteisvaikutus samalla räjäytyskerralla
- Pinnanvaihtelut mittauspisteen ja räjäytyspisteen välisessä kalliossa
- Panosten asento suhteessa kohteeseen (pistemäinen / sauvamainen) (Vuolio & Halonen 2012, 325–326.)

Tärinä siirtyy perustuksilta ylempiin rakenteisiin, joissa värähtely voi olla selvästi suurempaa ja kehittyä resonanssiksi tai ominaisvärähtelyksi. Ylärakenteisiin voidaan yleensä soveltaa perustusten tärinän ohjearvoja. (RIL ry 2010, 19.)

Tärinän taajuussisältö vaikuttaa tärinän vaikutuksiin. Rakenteiden tärinävauriot johtuvat usein rakenteiden siirtymäeroista, ja joskus kiihtyvyyden aiheuttamista rasituksista. Helpomman mitattavuuden vuoksi kuitenkin heilahdusnopeutta käytetään paljon kuvaamaan tärinän aiheuttamia vaurioriskejä. Se voi kuitenkin vääristää tärinätilannetta, sillä matalataajuisella tärinällä aiheutuu suurempia siirtymiä kuin korkeataajuisella, vaikka heilahdusnopeus olisi sama. (RIL ry 2010, 21.)

Louhintatärinän ohjearvoissa käytetään heilahdusnopeutta huomioiden samalla tärinän taajuus etäisyyden välityksellä. Korkeataajuinen tärinä vaimenee maassa matalataajuisista nopeammin, mutta etäisyyksien kasvaessa tärinä muuttuu taajuussisällöltään matalammaksi. Tätä kuvataan taulukossa 2. (RIL ry 2010, 21;25.)

Taulukko 2. Louhintatärinän heilahdusnopeuden perusarvo v_1 (mm/s) suhteessa etäisyyteen eri pohjille perustetuissa rakennuksissa (RIL ry 2010, 25).

1	2	3	4	5
Etäisyys (m)	Pehmeä savi, leikkauslujuus < 25 kN/m ²	Sitkeä savi, siltti, löyhä hiekka	Tiivis hiekka, sora, moreeni, rikkonainen tai löyhä kallio	Kiinteä kallio
1	9	18	35	140
5	9	18	35	85
10	9	18	35	70
20	8	15	28	55
30	7	14	25	45
50	6	12	21	38
100	5	10	17	28
200	4	9	14	22
500	3	7	11	15
1000	3	6	9	12
2000	3	5	7	9

Taulukosta 2 nähdään, että kiinteä kallio perustusten alapinnassa aiheuttaa nelinkertaisen heilahdusnopeuden perusarvon verrattuna löyhään kallioon 1 metrin päässä tärinälähteestä, mutta 10 metrin päässä enää kaksinkertaisen. Etäisyyksien kasvaessa tärinän heilahdusnopeuksien arvojen erot erilaisilla maa- ja kallioperillä tasoittuvat. (RIL ry 2010, 21;25.)

Heilahdusnopeuden matemaattiset mallit pohjautuvat riippuvuuteen kaavan 7 mukaisesti.

$$v = k \frac{Q^m}{R^n} \quad (7)$$

jossa v = heilahdusnopeus [mm/s]

k = väliaineen (kallion) tärinäjohtavuus

Q = yhdessä panostilassa räjähtävä räjähdysainemäärä [kg]

R = etäisyys räjähdyskohteesta [m]

$$\left. \begin{array}{l} m = \frac{1}{2} \\ n = \frac{3}{4} \end{array} \right\} \text{ kun räjäytetään useampi reikäpanos kerralla.}$$

(Vuolio & Halonen 2012, 326.)

4.3.4 Ohjearvot

Erilaisten rakenteiden kohdalla voidaan käyttää rakennustapakertoimia, joiden avulla määritellään perustuksille erilaiset tärinän ohjearvot. Taulukossa 3 on esitetty rakennustapakertoimia eri rakenneluokilla. (RIL ry 2010, 22.)

Taulukko 3. Perustusten tärinän ohjearvojen määrittelyyn käytetyt rakennustapakertoimet (RIL ry 2010, 24).

Rakenneluokka (hyväkuntoinen rakenne)	Rakennustapakerroin F_k (kelpoisuus a-luokka)	Rakennustapakerroin F_k (kelpoisuus aa-luokka)
1. Raskaat teräsbetoni- ja teräsrakenteet, kuten sillat ja laiturit	1,75	2,00
2. Teräsbetoniset, teräksiset ja puurakenteiset teollisuus- ja varastorakennukset, ruiskubetonoidut kalliotilat, yleensä staattisesti määrätyt rakenteet, joissa ei asuta tai työskennellä	1,25	1,50
3. Pilariperustuksille rakennetut elementtirakenteiset teräsbetonirakenteet, teräs- ja puurakenteiset toimisto- ja asuinrakennukset, muut puu- ja teräsrakennukset, johdot ja maakaapelit	1,00	1,20
4. Massiiviseinäiset tiili-, kevytsoraharkko- ja teräsbetonirunkoiset teollisuus-, toimisto- ja asuinrakennukset, lasiseinäiset teräsrunkoiset sekä tiiliverhotut puurunkoiset rakennukset, ruiskubetonoinnattomat kalliotilat	0,85	1,00
5. Rakennukset, joissa on kevytbetoni- tai kalkki-hiekkatiilirakenteita, tai muuta vaurioherkkää materiaalia, tärinä- ja värähtelyherkät vanhat rakennukset, kuten kirkot tai korkeita holveja käsittävät rakenteet	0,55	0,65

Taulukossa 3 esitetty rakennustapakerroin F_k kerrotaan taulukon 2 louhintätärinän heilahdusnopeuden ohjearvon perusarvolla, jolloin saadaan tärinän heilahdusnopeuden suurin ohjearvo yhtälöllä 8 (RIL ry 2010, 24).

$$v = F_k \times v_1 \quad (8)$$

Vaativuusluokassa 3 tärinän heilahdusnopeuden perusarvo voidaan taulukon 2 arvojen sijaan määrittää toisella kaavalla niin, että taajuus tulee huomioitua. Tällöin tärinän ohjearvo lasketaan kaavalla 9. (RIL ry 2010, 24–25.)

$$v = F_k \times V_A \quad (9)$$

jossa V_A [mm/s] = $2 \pi \times f \times 0,2$ mm
 f = taajuus [Hz, 1/s].

Hankkeelle määritelty tärinäasiantuntija asettaa kohdekohtaisesti sekä louhintätärinöille että muille maanrakennus- ja pohjatöille ohjearvot. Nämä edustavat hyvää rakennustapaa ja niiden tarkoituksena on helpottaa rakennusten tärinäkestävyyden arviointia. Yleisin tärinäkriteeri perustuksille on heilahdusnopeuden suurimman komponentin maksimiarvo (v_{max}). (RIL ry 2010, 19.)

Värähtely voi häiritä monien laitteiden käyttöä. Etenkin sairaalateknologian laitteet ja laboratorioiden havainto- ja mittausvälineet, kuten röntgenlaitteet, elektronimikroskoopit ja laserit ovat tärinälle herkkiä, mutta tutkimustuloksia laitteiden tärinäkestävyyksistä on niukasti. Tällaisille laitteille on yleensä asetettu laitevalmistajien toimesta niin alhaiset tärinätasovaatimukset, että niiden toteutuminen normaalikäytössäkin on lähes mahdotonta. Tällöin pelkkä laitteiden vieressä kävely voi aiheuttaa valmistajan antamien tärinän ohjearvojen ylityksen. (RIL ry 2010, 111.)

Värähtelykriteerin perusta voi kestävyyden ohella olla esimerkiksi laitteella tehtävän mittauksen sallittu virhe. Tällöin laite ei varsinaisesti vaurioidu tärinästä, mutta sen tulisi olla pois käytöstä värähtelyn aikana. Useiden laitetointimittajien ohjearvot perustuvat VC-käyriin (vibration criteria), jotka on laadittu jatkuvalla tärinällä. Ajoittaisen tärinän kohdalla käytetään "slow"-aikapainotusta. (RIL ry 2010, 111–112.)

4.3.5 Mittaustulosten luotettavuus

Kirjallisuudesta löytyy raportoituna tärinämittaustuloksia eri räjähdemäärillä, etäisyyksillä ja olosuhteissa. Samalla louhintapaikalla voidaan saada vaihtelevia mittaustuloksia, sillä olosuhteet ja panosten yhteisvaikutus räjäytystilässä synnyttävät hajontaa. Etäisyyden ja räjähdysainemäärän riippuvuudesta tärinöiden maksimiarvoihin voidaan kuitenkin laskea tilastollisia todennäköi-

syyksiä kerätyn aineiston pohjalta. Mittaus- ja kirjaustapojen ollessa vertailukelpoisia ja tarpeeksi tarkkoja saadaan samalla louhintapaikalla tehtyjen mittaustulosten hajonta melko kohtuulliseksi. (RIL ry 2010, 81.)

Mittaustulosten luotettavuuteen vaikuttaa oleellisesti mittauksen ja mittariasennuksen ohjeenmukainen suorittaminen. Väärin käytettynä tärinämittari voi äärimmillään antaa tulokseksi vääriä arvoja, joita ei voi verrata ohjearvoon. Tällöin tärinämittaustulos voi johtaa virheellisiin johtopäätöksiin.

4.4 Tärinänhallinta

Rakentamisen ja louhinnan tärinöitä voidaan vähentää ottamalla ne huomioon työn suunnittelussa ja toteutuksessa. Tärinöiden minimoimisella voidaan myös tehostaa työtä ja säästää ympäristöä, sillä tärinät ovat lähes aina hukkaenergiaa. (RIL ry 2010, 3.)

4.4.1 Tärinänhallinnan vaativuusluokat

Tärinän hallinta voidaan jakaa kolmeen vaativuusluokkaan niin suunnittelun kuin toteutuksenkin osalta. Vaativuusluokitus määrittää paitsi tarvittavat toimenpiteet, myös tärinäasiantuntijan kelpoisuusvaatimukset. Vaativuusluokat ovat 1 (helppo), 2 (vaativa) ja 3 (erittäin vaativa). (RIL ry 2010, 15.)

Vaativuusluokat määritellään tilannekohtaisesti olosuhteiden mukaan, ja niihin voidaan joissain tapauksessa jopa vaikuttaa suunnitteluratkaisuilla (RIL ry 2010, 15). Taulukossa 4 on esitetty vaativuusluokkien määrittely yleispiirtein.

Taulukko 4. Tärinään liittyvien tehtävien vaativuusluokittelu (RIL ry 2010, 15).

	A Lyhytaikainen tärinävaikutuksen kesto, pienet suoritemäärät	B Tavanomainen tärinävaikutuksen kesto, keskimääräiset suoritemäärät	C Pitkä tärinävaikutuksen kesto, suuret suoritemäärät
Vaikutusalueella ei tärinästä häiriintyviä erityisiä luonnonarvoja tai ihmisiä tai vaurioituvia rakenteita tai rakennuksia	1	1	2
Kohde asutulla alueella, tavanomaisia rakennuksia tai rakenteita	2	2	3
Lähellä on tärinäherkkiä rakenteita ja erityistä varovaisuutta edellyttäviä kohteita	3	3	3

Taulukon 4 kohdassa A tarkoitetaan kohteita, joissa tärinän kokonaiskesto on alle 2 viikkoa, ja tärinä tapahtumia enintään kahdesti vuorokaudessa. Myös, mikäli tärinä tapahtumia on kuukauden aikana alle 10 kpl, kohteen vaativuusluokittelu katsotaan A-sarakkeelta. Kun tärinän kesto on 1–6 kuukautta, ja tärinä tapahtumia on yhteensä 10–50 kertaa, tai enintään kahdesti päivässä, käytetään B-saraketta. Näiden ylittävien osalta käytetään C-kohtaa. Vaativuusluokaksi määritellään luokka 3 yleensä muutaman tai joskus jopa yhden tärinäherkän laitteen tai rakenteen vuoksi. (RIL ry 2010, 16.)

4.4.2 Tärinäasiantuntija

Rakennushankkeessa tulee käyttää tärinäasiantuntijaa, joka täyttää hankkeen vaativuusluokkaa vastaavat kelpoisuusvaatimukset. Vaativuusluokan 3 kohteissa tärinäasiantuntijan tulisi olla mukana jo aivan hankkeen alkuvaiheesta lähtien, ja tehdä yhteistyötä rakenne- ja geosuunnittelun kanssa. Kohde luokitellaan luokkaan 3 mikäli lähellä on tärinäherkkiä rakenteita ja erityistä varovaisuutta edellyttäviä kohteita. Suunnitteluvaiheessa tärinäasiantuntija arvioi tärinöiden vaikutusta ja ehkäisymahdollisuuksia, sekä tekee tärinän tarkkailun ohjelman. Toteutusvaiheessa hän huolehtii tärinää aiheuttavien töiden valvonnasta, tärinävaimennuksesta, -mittauksesta ja -katselmuksista. (RIL ry 2010, 15–17.)

4.4.3 Tärinäeristys

Tärinäeristimet asennetaan laitteiden alle, ja ne toimivat paremmin korkeataajuisien, kuten louhinnasta aiheutuvien tärinöiden eristämiseen. Louhintatärinä on taajuudeltaan korkeaa, usein yli 30 Hz, kun taas monet pohjarakennustyöt aiheuttavat taajuudeltaan alhaisempaa, noin 5–20 Hz tärinää, jota on huomattavasti vaikeampi eristää. (RIL ry 2010, 112.)

4.4.4 Louhijan toimintaan liittyvät tärinänhallintakeinot

Louhijan on otettava toiminnassaan huomioon kallion laatu, ympäristön tärinävaatimukset, rakennushankkeen aikataulu, sekä taloudelliset seikat. Kova kalio vaatii irrotukseen nopeita räjähdysaineita, jotka aiheuttavat tärinää. Tärinäaallot myös kulkeutuvat kalliossa paremmin kuin pehmeämmissä materiaaleissa. (Vastaava louhintatyönjohtaja 2021.)

Hyvin toteutetulla rakolinjalla voidaan ehkäistä tärinöiden kulkeutumista jossain määrin. Rakolinjassa reikiä porataan tietyin välein ja rako räjäytetään auki. Tiheämmällä railon porauksella saadaan rakolinjaa siistimpi jälki, ja irti-poraus onkin yksi parhaista keinoista, joilla louhija voi vaikuttaa tärinöihin. (Vastaava louhintatyönjohtaja 2021.)

Kalliolaadun vaikutus voidaan määrittää vain kokeilemalla erilaisia panostusyhdistelmiä, reikien syvyyksiä, etua ja reikävälejä. Porauksen ja panostuksen ohessa räjähdysaineilla ja muun muassa niiden palamisnopeuksilla on mahdollisuus vaikuttaa tärinöihin. (Vastaava louhintatyönjohtaja 2021.)

Momentaanisen räjähdysaineen määrää säätelemällä voidaan vaikuttaa tärinöihin. Momentaanisen räjähdysainemäärän pienentämiskeinoja ovat muun muassa penkereen räjäyttäminen kahdessa osassa, reikäpanoksen jakaminen sepeli- tai hiekkavälitäytteellä eri aikaan räjähtäviin osiin, tai porauksen tihentäminen, joka mahdollistaa pienemmän panostusasteen ja reikäpanoksen. Panostilojen huolellinen jakaminen onkin tärkeä keino hallita tärinöitä. Myös nallitus on hyvinkin tärkeä osa tärinöiden torjuntaa, vaikka nallien omat räjähdeai-

nemäärät ovat mitättömiä. Eri numeroisia nalleja käyttämällä saadaan pienennettyä momentaanista räjähdysainemäärää, ja näin ollen myös tärinää. (Vuolio & Halonen 2012, 329; Vastaava louhintatyönjohtaja 2021.)

Reikien, räjähdysaineiden ja panostuksen yhdistelmä tulisi saada sellaiseksi, että olisi mahdollista räjäyttää maksimaalisen suuria kenttiä ilman, että räjäytyksestä aiheutuisi vaurioita aiheuttavia vahinkoja. Samalla myös urakan aikataulu ja työn kustannukset pysyvät kohdallaan. (Vastaava louhintatyönjohtaja 2021.)

5 CASE KYMSOTE-KIINTEISTÖT FB-OSA

Kymenlaakson keskussairaalassa on meneillään laajennus- ja peruskorjausprojekti, joka on osa Kymsote-Kiinteistöjen mittavaa sairaalauudistushanketta. Kotkassa sijaitsevan Kymenlaakson keskussairaalan rinnalla Kymsote-Kiinteistöt on samaan aikaan rakentanut Kouvolaan Ratamokeskusta, joka tulee täydentämään keskussairaalan toimintoja pohjoisessa Kymenlaaksossa.

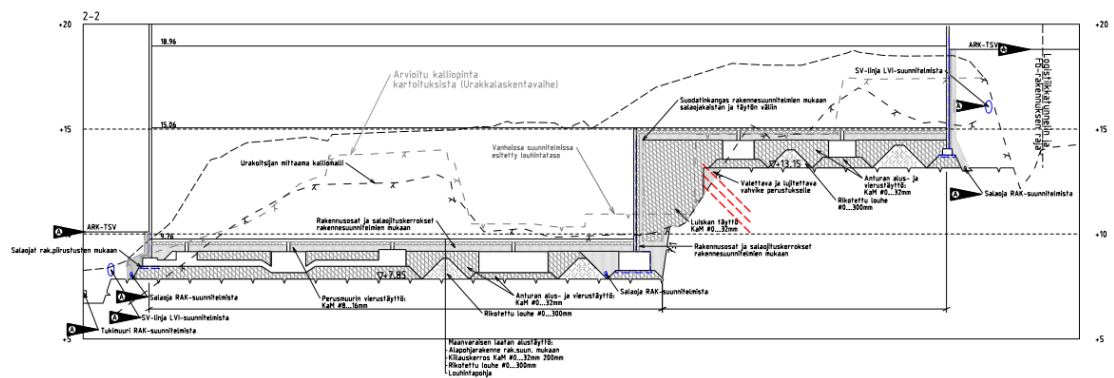
Kotkassa vuonna 2017 alkaneiden rakennustöiden tuloksena on jo käyttöön otettu uusi akuuteimmat sairaalatoiminnot sisältävä G-osa sekä sädehoitoyksikkö. Tällä hetkellä rakennustyön alla olevan Fb-osan on määrä valmistua vuonna 2023, ja sinne sijoittuvat aikanaan alempiin kerroksiin laboratorio- ja lääkevalmistustilat, logistiikka sekä ylempiin kerroksiin vuodeosastoja.

Tämän opinnäytetyön tutkimuksen kohteena olivat louhintatyöt Kymsote-Kiinteistöt Oy:n Kymenlaakson keskussairaalan laajennuksen Fb-osassa. Tilajalle oli kertynyt jo kokemusta sairaalan louhintatöistä Kymenlaakson keskussairaallalla aiemmin valmistuneiden osien osalta. Fb-osa rakentuu kalliorinteeseen, ja alimmat TT- ja T-kerrokset sijoittuvat osittain louhitun kallion sisälle (kuva 9).



Kuva 9. Fb-osan leikkauspiirustus.

Kuvassa 9 näkyy, miltä uudisosa Fb:n leikkaus näyttää, ja miten rakennus sijoittuu rinteeseen ja osittain kallion sisään. Seuraavassa kuvassa 10 on esitetty louhintasuunnitelman leikkauskuva samasta kohtaa, mutta vastakkaisesta suunnasta.



Kuva 10. Leikkaus louhintasuunnitelmasta.

Kuvassa 10 voidaan nähdä uuden rakennuksen perustuksien sijoittuminen alkuperäiseen kalliopintaan nähden. Kuvassa näkyvään anturapintaan asti pääseminen edellytti massiivisia louhintatöitä. Muita louhintasuunnitelmapiirustuksia on esitelty liitteessä 9.

Louhinnat suoritettiin pengerialouhintana, jonka työvaiheita olivat irrotus poraamalla ja räjäyttämällä, rikotus ja louheen lastaus ja kuljetus. Tässä kohteessa louhe myös murskattiin paikan päällä ja käytettiin suurelta osin hyödyksi kohteen maanrakennustöissä. Louhintoja suoritettiin piha-alueen sekä rakennuspohjan osalta (kuva 11).



Kuva 11. Louhintasuunnitelma RP81 Kymenlaakson keskussairaalalla (YIT Suomi Oy 2021).

Kuvassa 11 näkyy räjäytyspiste RP81 rakennuspohjalla, sekä räjäytyksen vapaa suunta nuolella kuvattuna. Tärinät suuntautuvat vapaasta suunnasta vastakkaiseen suuntaan päin.

5.1 Louhinta sairaalaympäristössä

Työmaan aikataulujen ja sairaalan vaatimusten yhteensovittaminen mahdollistuu osapuolten välisen kommunikaation ansiosta. Kun louhintaa harjoitetaan aivan toiminnassa olevan sairaalan vieressä, joudutaan tavanomaisten seikkojen lisäksi ottamaan huomioon potilaiden viihtyvyys ja turvallisuus, sekä tärinästä ja melusta häiriintyvät sairaalatoiminnot ja laitteet. Suunnitteluvaiheessa nämä tekijät otettiin huomioon. Myös louhintatöiden aikana varauduttiin siihen, että akuutti sydänoperaatio menee tärkeysjärjestyksessä edelle ja keskeyttää työmaan räjäytystyöt.

5.1.1 Lähtökohdat ja louhintatyön suunnittelu

Kymsote-Kiinteistöt Fb-osa sijoittuu pääsairaalarakennuksen ja sen G-laajennusosan länsi- ja lounaispuolelle kiinni Fa-osaan. Fb-osa sijoittuu osittain purettavan, vanhan rakennuksen tilalle. Kallio suunniteltiin irrotettavaksi parhaiten soveltuvin menetelmin, ensisijaisesti räjäyttämällä, ja varautuen paikoin mekaanisiin menetelmiin. Työn suorittaja oli vastuussa tärinäarvojen pysymisestä kohteelle sallituissa rajoissa.

Kymsote-Kiinteistöjen Af- ja G-osilla aiemmin suoritettujen louhintatöiden myötä oli kertynyt jo kokemusta, jonka pohjalta Fb-osan louhintoja voitiin kehittää. Af-, G- ja Fb-osien louhintatöiden suunnittelusta vastasi sama henkilö, mikä edisti tiedon siirtymistä ja tärinänhallinnan kehittämistä merkittävästi.

Kalliotutkimuksia ei tehty ennen Fb-osan louhintoja. Tähän syinä olivat geosuunnittelijan kokemuspohja edellisistä osista, ja osaltaan myös se, että Fb-osa rakennettiin pääosin vanhan rakennuksen tilalle, jolloin täysin kattava koe-porausten suorittaminen ei olisi ollut mahdollista ennen vanhan rakennuksen purkua. Kalliotutkimusten uupuessa tiedot kallion ominaisuuksiin pohjautuivat kokemuksiin aiemmilta osilta. Kallion kivilajien tiedettiin olevan pääosin graniittia ja sen muunnosta rapakivigraniittia. Kokemusten pohjalta oli tiedossa, että kalliossa on maatäytteisiä ruhjealueita sekä vaakarakoja, joista osa on täysin kiinni olevia. Louhintaurakoitsijat olivat varautuneet näihin poikkeamiin kalliossa, mutta niiden tarkat sijainnit selvisivät vasta louhintatöiden aikana. Pohjarakennustyön työselostuksessa määrätään, että louhittaessa ilmenevistä heikkousvyöhykkeiden ja rikkonaisten kallio-osuuksien esiintymisestä tulee tiedottaa valvojalle jo porausvaiheessa louhintatöiden toteutus suunnittelun tarkentamiseksi riittävän ajoissa.

Tärinöiden hallinta geosuunnittelun osalta perustui irtiporauksiin. Af- ja G-osan kokemuksiin pohjautuen irtiporauslinja otettiin käyttöön myös Fb-osalla kiinnittäen erityisesti huomiota railon syvyyteen ja puhtaanapitoon. Pöly ja vesi heikentävät irtiporausrailon tärinänkatkaisuo ominaisuuksia merkittävästi, ja syvyyden tulee olla selkeästi lopullisen louhintatason alapuolella, jotta tärinöiden vä-

littyminen jää mahdollisimman pieneksi. Kalliota pitkin tapahtuu joka tapauksessa jonkin verran tärinöiden välittymistä irtiporauslinjan alta. Tärinöiden välittymistä voidaan tiettyyn tasoon asti pienentää railon syvyyttä kasvattamalla, mutta samalla kasvavat myös kustannukset.

G-osalla anturat perustettiin portaittain eri korkoihin, mikä vaikeutti suunnittelua ja louhintatöitä. Fb-osalla oli käytössä kaksi yleislouhintatasoa, mikä helpotti suunnittelua huomattavasti. Myös louhinnassa oli helpompi laskea panostuksia ja arvioida niiden vaikutuksia muun muassa tärinöihin, kun louhinta-alue oli esitetty selkeämmin.

Ennen irtiporausta määrättiin suoritettavaksi vesimenekikokeet ja niiden perusteella mahdollisesti suoritettavat injektoinnit ja kalliopulttaukset. Edellisten perusteena on ”InfraRYL Maa-, pohja- ja kalliorakenteet 2018” ja ”By 53 Kalliotilojen injektointi 2006” -dokumenttien vaatimukset ja ohjeet. Vesimenekikokeissa porataan 2 metriä lopullisen louhintatason alapuolelle ulottuvia reikiä, joihin pumpataan vettä koepaineella ja mitataan menekkiarvot. Reikien läpimitta valitaan siten, että niihin voidaan tarvittaessa tehdä kallion tiivistysinjektioinnit. Tiivistysinjektioinnit suoritetaan, mikäli tiiveysvaatimuksena oleva vesimenekkiarvo ylittyy.

Aiemmin valmistuneen Af-osan louhintatöiden aikana viereinen sädehoitoyksikkö oli käytössä, mikä teki louhinnasta haasteellista. Hoidot venyivät ja kiireellisiä hoitoja tuli muiden lisäksi. Tästä syystä luvattuja aikaikkunoita ei voitu hyödyntää ja räjäytyksiä jouduttiin suorittamaan tämän vuoksi myös normaalin työajan ulkopuolella.

Sopivia mahdollisuuksia räjäyttämiseksi jäi käyttämättä osittain tiedonkulusta johtuen, mutta myös hoitojen mennessä prioriteettina louhinnan edelle, mikä aiheutti viiveitä, haasteita ja ylimääräisiä kustannuksia. Louhintatöiden hidastuminen on merkittävä kustannuskysymys, kun normaalisti noin kuukauden kestävä työ venyy yli puolen vuoden mittaiseksi. Tästä syystä vaihtoehtoisten ratkaisujen hakeminen, esimerkiksi hoito-osaston siirtäminen louhintatöiden ajaksi voi olla joissain tapauksissa kannattavaa.

Saatujen kokemusten pohjalta huomattiin, että louhintatöiden tehostamiseksi sairaalan ja louhijan väliseen viestintään ja aikaikkunoiden täsmällisyyteen ja niiden noudattamiseen tulee kiinnittää erityistä huomiota. Aikaikkunat pyrittiin saamaan sairaalan kannalta sopiviksi, ja myös hoitotöiden suunnittelua kehitettiin mukautumaan louhinnan aikatauluihin. Fb-osan louhintatöiden kohdalla näiden asioiden yhteen sulauttaminen sekä niistä viestiminen onnistui paremmin. Af-osalla työskennelleen työnjohtajan mukaan myös tärinöiden seuranta huippuarvomittarein ja poikkeamaraporttikäytäntö olivat käytössä Af-osalla, mistä kertyneen kokemuksen pohjalta niitä kehitettiin edelleen Fb-osan louhintatöihin.

Normaaliin kaupunkilouhintaan nähden Kymsote-Kiinteistöt Fb-osan louhintatöiden oli oletuksena kestää noin 30 % kauemmin. Louhintatyöt viivästyivät jonkin verran suunnitellusta (liite 4) johtuen sairaalan toiminnasta johtuvista räjäytystöiden viivästyksistä sekä muun rakennustyömaan etenemiseen liittyvistä syistä. Etenkin pihan louhinnan osalta maanrakennustöiden sekä tukimuurien ja perustusten rakennustöiden vuoksi louhintaa jouduttiin suorittamaan jaksottaisesti alkuperäisistä suunnitelmista poiketen.

5.1.2 Viestintä ja räjäytysten aikaikkuna

Räjäytyksille oli sovittu päivittäin kaksi ajanjaksoa, niin sanottua aikaikkunaa, joiden ulkopuolella ei tehty räjäytyksiä. Aikaikkunat olivat arkisin klo 12.00–12.30 ja klo 17.00–17.30. Mikäli räjäytystä ei jostain syystä voitu tehdä aiotun aikaikkunan puitteissa, siirtyi räjäytys seuraavaan aikaikkunaan. Pienet viivästykset räjäytystyössä saattoivat johtaa muiden räjäytystyöstä riippuvaisten töiden viivästymiseen, ja aikaikkunoista johtuen viivästymisissä puhuttiin tuntien sijaan vuorokausista. Lisäksi ajoittain päädyttiin jakamaan toista aikaikkunaa niin, että loppupuolisko annettiin läheisen tietyömaan käyttöön.

Sairaalahenkilökunta ja vastaava louhintatyönjohtaja toimivat tiiviissä yhteistyössä viestien molempiin suuntiin. Pääsääntöisesti jokainen aikaikkuna pyrittiin käyttämään, mutta mikäli sairaalassa oli käynnissä akuutti toimenpide, joka esti räjäyttämisen, siitä soitettiin vastaavalle louhintatyönjohtajalle, joka

perui räjäytyksen ja siirsi sen seuraavan aikaikkunaan. Vastaavasti, jos louhijat pitivät vapaapäivän, sairaalalle tiedotettiin, että räjähdyksiin liittyvät toimenpiteet sairaalalla voi sinä päivänä jättää suorittamatta.

5.1.3 Louhinnasta aiheutuvat haitat

Louhinnasta aiheutuu tyypillisesti tärinää, melua ja pölyä. Lisäksi räjäytykset aiheuttavat sen, että alueella ei voi liikkua niiden aikana. Liikkumiskiellon osalta kyse on vain lyhyistä hetkistä, mutta näistä on viestittävä selkeästi tiedotteiden, varmistusmiesten ja varoitusaänen avulla.

Sairaalaympäristössä pölyn suhteen ollaan erityisen tarkkoja, ja louhintojen alkuvaiheessa Kymenlaakson keskussairaalassakin huomattiin louhintatöissä aiheutunut pöly. Kun asiaan kiinnitettiin paremmin huomiota, pöly onnistuttiin hyvin sitomaan kastelun avulla.

Kohteen pohjarakennustöiden työselostuksessa mainitaan, että sairaalarakennuksen ilmanvaihtojärjestelmät on suojattava vaurioitumiselta ja pölyn pääsy järjestelmiin on estettävä. Myös sairaalarakennuksen suojausta tarvittavilta osin louhintatöiden ajaksi esitetään työselostuksessa.

5.2 Tärinä sairaalaympäristössä

Sairaalassa on monia tärinästä häiriintyviä toimintoja ja laitteita. Viestintä ja yhteistyö sairaalan ja louhijoiden välillä on oltava saumatonta, jotta päivittäiset toiminnot ja potilasturvallisuus eivät vaarannu. Toimintamallit tutkimusten toteuttamiseen ja koneiden alasajoon liittyen räjäytystöiden aikana tulee suunnitella ja ohjeistaa tarkasti.

5.2.1 Tärinäherkät sairaalalaitteet ja -toiminnot

Sairaalateknologian laitteet ja laboratorioden havainto- ja mittausvälineet, kuten röntgenlaitteet, laserit ja elektronimikroskoopit voivat häiriintyä pienestäkin tärinästä. Esimerkiksi sydämeen kohdistuvat tutkimukset ovat häiriölle herkkiä. Useimmiten tutkimukset pystyttiin ajoittamaan räjäytysaikojen ulkopuolelle,

mutta akuutin sydänoperaation sattuessa sairaalalta oltiin yhteydessä louhintatyön johtajaan, ja tarvittaessa valmisteltu räjäytys jouduttiin siirtämään myöhemmäksi. Myös sädehoito aiheutti viivästyksiä aikaikkunoihin.

Vaurioitumisalttiimpia laitteita sairaalassa ovat tietokoneet ja niiden levymuistiyksiköt. Kuvassa 12 näkyy Kymenlaakson keskussairaalan tietokoneyksiköitä, joiden viereinen lattiapinta oli tarkkailun kohteena tärinäarvojen osalta.



Kuva 12. Tärinäherkät keskusyksiköt Kymenlaakson keskussairaalassa.

Herkimmät laitteet sairaalaympäristössä eivät ole välttämättä aina varsinaiset tutkimuslaitteet, vaan niiden takana tietoja käsittelevät keskusyksiköt, kuten kuvassa 12 näkyvät tietokoneet. Nämä tietokoneet ajettiin alas varmuuden vuoksi päivittäin räjäytystöiden ajaksi, jotta ne eivät vaurioituisi mahdollisten tärinälylytysten sattuessa. Samalla myös tutkimuslaitteet olivat poissa käytöstä. Kuvissa 13 ja 14 nähdään esimerkkejä sairaalan tutkimuslaitteista, jotka jouduttiin päivittäin sulkemaan räjäytystöiden ajaksi.



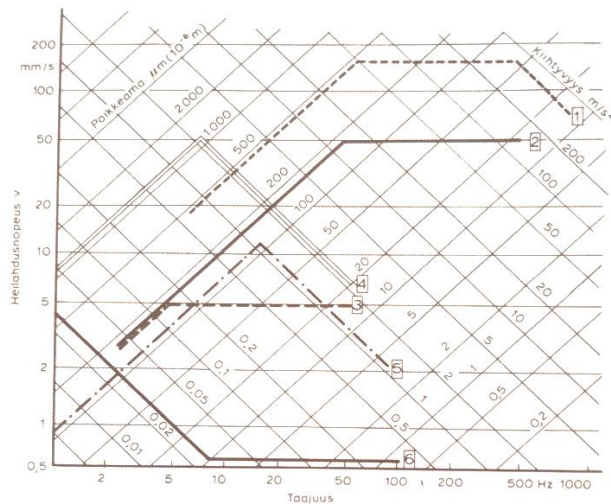
Kuvat 13 ja 14. Viipalekuvauslaite ja gammakamera.

Esimerkiksi gammakamera ja viipalekuvauslaite ajettiin alas päivittäin louhintatöiden ajaksi. Alasajoneen ja uudelleenkäynnistyksineen laitteet olivat kerrollaan 1–2 tunnin ajan poissa käytöstä.

5.2.2 Tärinöiden raja-arvot

Rakennusten tärinälle vaurioitumisalttiutta tarkastellessa käytetään yleensä kriteerinä heilahdusnopeutta, sillä sen mittaaminen on kiihtyvyyden tai siirtymien mittaamista helpompaa. Tärinälle herkkien laitteiden osalta on kuitenkin käytettävä tärinämittauksen kriteerinä kiihtyvyyssarvoja.

Tilastollisia tutkimuksia herkkien laitteiden tärinänkestävyydestä ei löydy samalla tavalla kuin rakennuksista löytyy. Rikkoutumisriskin minimoimiseksi laitevalmistajien asettamat tärinän ohjearvot pohjautuvat teollisuudessa käytettävien tietokoneiden raja-arvoihin, ollen n. 5–10 % niistä tärinäarvoista mitä rakennuksille sallitaan. IBM:n sallitut tärinäarvot käynnissä oleville tietokoneille suhteessa taajuuteen näkyvät kuvassa 15 jatkuvan tärinän osalta käyrällä 5 ja hetkellisen tärinän osalta käyrällä 4.



- 1) Räjäytysten aiheuttamat suoranaiset vahingot.
 - 2) Suositeltu ylin raja räjäytyksissä.
 - 3) Suositeltu ylin raja paalutuksessa, ponttauksessa, täyrräjäytyksessä, dynaamisessa syvätiivistyksessä ja liikenteessä.
 - 4) Ylin raja-arvo IBM:n tietokoneille tärinänkestoajan ollessa < 5 sekuntia.
 - 5) Ylin raja-arvo IBM:n tietokoneille tärinänkestoajan ollessa > 5 sekuntia.
 - 6) Tärinät jotka vaikuttavat häiritsevästi ihmisiin.
- HUOM. Käyrät 1—3 ovat talojen perustuksista saatujen mittaustulosten mukaisia. Ohjearvot 2—3 koskevat tavonomaaisia rakennuksia. Tarkemmassa raja-arvomäärityksessä on aina huomioitava rakennuksen kunto ja perustamistapa.

Kuva 15. Ruotsalaisen tärinänormiehdon vahinkoarviot ja suositukset (Vuolio & Halonen 2012, 313).

Käytännössä kuvan 15 tietokoneita koskevat käyrät 4 ja 5 kertovat, että IBM:n asettama asutuskeskuslouhintojen taajuuksilla käynnissä olevaan tietokoneeseen kohdistuva tärinän maksimi kiihtyvyyssarvo on noin 0,25 g, jossa g on puotomiskiihtyvyys ($\approx 10 \text{ m/s}^2$), jolloin saadaan suurimmaksi sallituksi kiihtyvyyssarvoksi noin 2,5 m/s^2 . Nämä raja-arvot ovat yleisessä käytössä louhinnassa, vaikkakin käytännössä ja tutkimuksissa on todettu tietokoneiden kestävän selvästi suurempiakin tärinöitä.

Osa sairaalalaitteiden valmistajista antaa tärinälle laitekohtaisia ohjearvoja, mutta joidenkin laitteiden osalta suositeltujen tärinäohjearvojen selvittäminen osoittautui Kymenlaakson keskussairaalan lääkintälaitetekniikasta vastaavan huoltopäällikön mukaan haastavaksi. Osalle sairaalalaitteista oli asetettu tärinän maksimiarvoksi 0,1 g eli kiihtyvyyssarvo 1,0 m/s^2 . Forcit Consulting Oy:n tärinäasiantuntijan avustuksella tutkimuskohteen sairaalalaitteille asetettiin muutamien koeräjäytysten perusteella siedetyn tärinän maksimiarvoksi kuitenkin 0,2 g eli 2,0 m/s^2 kiihtyvyyssarvo standby-tilassa. Vaikka laitteille sallittu tärinän kiihtyvyyssarvo kaksinkertaistettiin, sen rajoissa pysyminen oli silti haastavaa. Laitevalmistajien asettamat laitteille sallitut raja-arvot on miltei mahdo-

tonta saavuttaa jo normaaleissa käyttöolosuhteissa, ja arvo koskee alas ajettua laitetta. Käytössä olevan sädehoitolaitteen tärinän raja-arvoksi on laitevalmistajan puolesta ilmoitettu 0 m/s^2 , eli yhtään värähtelyä ei sallita käytön aikana.

Laitteille asetetut tärinävaatimukset on usein suunniteltu koskemaan jatkuvaa tärinää. Lyhytaikaiset, alle 0,5 sekuntia kestävät tärinät, ja yksittäiset iskut, joihin räjäytystärinä voidaan tässä yhteydessä luokitella, eivät Vuolion (2010) mukaan saa resonansseja heräämään. Iskumuotoinen alle 30 g kiihtyvyyttä aiheuttaa harvoin vaurioita elektroniikkalaitteisiin, ja tavanomaiset laitteet kestävät tunteja jatkuvaa 2 g :n sinimuotoista tärinää eikä niiden toiminta häiriinny vielä $0,5 \text{ g}$:n kiihtyvyydellä. (Vuolio 2010, 312–313.) Eräiden laitevalmistajien mukaan laitteiden häiriintyminen tärinästä ei välttämättä näy heti, vaan tärinästä aiheutuvia vaurioita voi usein ilmetä vuosien päästä altistumisesta. Tutkimustiedon uupuessa onkin haastava osoittaa jälkikäteen mistä tietokoneyksiköiden mahdolliset myöhemmin ilmenevät viat tai käyttöiän väheneminen ovat alun perin lähtöisin.

Kun tarkastellaan herkkiin laitteisiin kohdistuvaa tärinää, on tärkeää selvittää kiihtyvyyden lisäksi myös siirtymän heilahdusamplitudi (μm), tärinän taajuussäältä (Hz tai $1/\text{s}$) ja kestoai-ka. Louhintatärinän taajuus lähialueella on yleensä yli 100 Hz , jolloin tärinäaallon amplitudi pienenee niin paljon, ettei herkkien laitteidenkaan tärinätarkkailuun ole syytä. (Vuolio & Paavola 2008, 10; Vuolio & Halonen 2012, 312.)

5.2.3 Tärinämittaukset ja -mittarit

Tärinämittauksesta Kymenlaakson keskussairaalan Fb-osan louhintojen aikana vastasi Forcit Consulting Oy. Samasta yrityksestä oli nimitetty kohteelle tärinäasiantuntija. Forcit Consulting Oy asensi analyysimittauslaitteet mittauspisteisiin, ja ylläpiti sähköistä järjestelmää, johon mittausturrit lähettivät tietoa louhinnassa aiheutuneista tärinäistä. Käytetty tärinämittauslaitteisto oli 3-akselinen aaltomuoto-, taajuus- ja huippuarvomittauslaitteisto. Tärinätapahtumat

tallentuivat pitkittäis-, poikittais- ja pystysuuntaisine huippuarvoineen kaukovalvontajärjestelmään, josta niitä pääsi reaaliaikaisesti tarkastelemaan internet-pohjaisessa VipNordic-ohjelmassa.



Kuva 16. Kymenlaakson keskussairaalan värinämittauspisteet ja Fb-osan louhintapisteet kartalla.

Kymenlaakson keskussairaalaan ja sen läheisyyteen sijoitettiin kaikkiaan 16 värinämittaria, jotka näkyvät numeroituina ja nimettyinä kuvassa 16. Samassa kuvassa oranssina näkyvät pommisymbolit kuvaavat räjähdyspisteitä. Mittarit mittasivat värinää jatkuvana mittauksena, ja niiden värinälukemia tarkkailtiin koko louhintojen ajan. Raja-arvojen ylitykset muodostivat automaattisesti ra-

portin mittausohjelmaan, jota käyttäjätunnukset omaavat pääsivät seuraamaan verkkopohjaisen ohjelman kautta. Tärinämittauslaitteisto mittasi ja tallensi taajuutta, kiihtyvyyden huippuarvoja sekä heilahdusnopeutta kolmessa suunnassa: pystysuuntaista (V), radan suuntaista (L) sekä rataa vastaan kohtisuoraa (T).

Kolme tärinämittaria, mittauspisteet MP13-15 sijoitettiin omakotitaloalueelle rakennustyömaan länsi- ja pohjoispuolelle. Nämä mittarit eivät tallentaneet muiden mittareiden tavoin kiihtyvyyssarvoja, vaan heilahdusnopeudelle ei ollut säädetty vaadittua raja-arvoa, eivätkä työmaan räjäytystärinät missään vaiheessa nousseet sellaiselle tasolle, että ne voisivat vaurioittaa rakennuksia. Omakotialueen mittauspisteiden mittaustulokset jätettiin kokoa-matta koosteeseen, sillä niissä oli mitattu tärinää eri yksiköissä kuin muissa mittareissa, ja lukemat olivat verrattain alhaisia.

Kuvissa 17 ja 18 näkyy tärinäanturi, joka on liimattu lattiaan heikosti tärinää kestävässä sairaalan tietokoneyksikön viereen mittaamaan louhinnoissa aiheutuvia tärinäarvoja.



Kuvat 17 ja 18. Tärinämittari ja tietokoneyksikkö sairaalan sisätiloissa.

Kuvissa 17 ja 18 näkyy tärinämittauspiste 5. Tärinämittarit oli kalibroitu juuri ennen asennusta, ja kalibrointi tehdään muutaman vuoden välein, joten asennuksen jälkeen kalibroinnille ei ole tarvetta, ellei herää epäilystä mittausten luotettavuudesta.

5.3 Tärinänhallinnan keinoja

Kohteen louhijoille oli jo alusta asti selvää, että kohteelle asetetut tärinäraja-arvot ovat erittäin alhaiset, ja vaikeat toteuttaa räjähdysaineilla louhittaessa. Tärinöiden hallitsemiseksi oli monia keinoja käytössä alusta asti. Louhintatöistä pidettiin työmaapäiväkirjaa (liite 5), johon merkittiin kunkin päivän tapahtumat ja tärinöihin liittyvät havainnot ja toimenpiteet. Lisäksi raja-arvojen ylittyessä analysoitiin ylitykseen johtaneita syitä ja korjaavia toimenpiteitä, sekä dokumentoitiin tiedot poikkeamaraportteihin.

5.3.1 Irtiporaus ja sahaus

Hyvä keino hallita herkille laitteille aiheutuvaa tärinää on eristää tärinän aiheuttaja eli louhinta ympäristöstään. Tämä tapahtuu poraamalla kallioon rako louhinta-alueen ja herkkiä laitteita sisältävän rakennuksen väliin. Tällainen rako tehdään poraamalla samansuuntaisia reikiä vierä vierä, mikä vaimentaa tärinöitä suhteellisen hyvin, etenkin kun se on täysin auki ja ulottuu louhintasyvyyden alapuolelle.

Kymenlaakson keskussairaalan louhintatöissäkin käytettiin irtiporausta, osaltaan estämään tärinöiden siirtymistä ja toisaalta myös louhintalinjan rajaamiseksi ja lohkaroitumisen estämiseksi. Kuvassa 19 näkyy miltä irtiporauslinja näyttää louhinnan jälkeen.



Kuva 19. Irtiporauslinja louhintatyömaan ja sairaalan vanhan osan välissä.

Kymenlaakson keskussairaalan vanha, vuonna 1968 valmistunut osa on perustettu suoraan kalliolle, ja joutui tästä syystä kovalle koetukselle louhintatärinöiden kanssa. Irtiporaus suoritettiin tästä syystä juuri työmaan ja sairaalan vanhan osan välille, sillä vanhan osan CT-simulaattorin mittauspisteessä 16 mitattiin suhteellisen paljon tärinäraja-arvojen ylityksiä. Sen sijaan sen läheisyydessä sijaitsevassa 1,5 vuotta sitten murskepatjan päälle valmistuneessa sädehoidon yksikössä sijaitseva mittauspiste 3 säilyi lähes värähtelyltä vapaana, johtuen oletettavasti perustamistavasta.

Seinäpintoja toteutettiin irtiporaamalla suunnitelmissa määritetyillä kohdilla ja suunnitelmissa esitetyille tasoille. Irtiporausraot oli määritelty puhdistettavaksi huolellisesti irtomateriaalista ja vedestä, sekä niiden yläosat tukittavaksi niin, että railot pysyvät puhtaana koko työn ajan.

Geosuunnittelijan mukaan irtiporausraojen puhtauteen kiinnitettiin Fb-osalla huomiota aiemmilta osilta saadun kokemuksen pohjalta. Projektijohtajan mukaan irtiporauslinjan puhtaanapitoon olisi tullut kiinnittää vielä nykyistä enemmän huomiota, ja lisäksi porauslinja olisi tullut toteuttaa heti alussa koko matkalta riittävän syväksi.

Pohjarakennuksen työselostuksessa oli myös määrätty kallion seinäpintojen osalta varautumaan paikoitellen vaijerisahauksiin ja timanttipyörösauihin. Kohteessa päädyttiinkin käyttämään vaijerisahausta, kun paljastui, että irtiporattun seinän porauslinjan taso ei ollut riittävä, ottaen huomioon alueelle tehtävien uusien rakenteiden tilantarpeen. Kuvissa 20 ja 21 nähdään käynnissä olevat kiviseinämän vaijerisahaustyöt, sekä sahauksen jälkeen aikaan saatu sileä seinäpinta ja kaadettu seinä.



Kuva 20. Kiviseinämän vaijerisahaustyöt.



Kuva 21. Kaadettu kiviseinä vajerisahausten jälkeen.

Kuvassa 20 nähdään vajerisahausta, jossa kiviseinämän alaosaan porattiin pitkittäin reikä, josta vajeri pujotettiin. Vajeri kiersi ja pyöri koko kiviseinämän ympäri, ja sahaus tapahtui koneen voimin muutamissa tunneissa. Samalla pölyä hallittiin huolehtimalla kastelusta. Kun pystysahaus oli valmis, sahattiin vielä vaakasuunnassa alhaalta, mutta ei ihan päähän asti, jotta vajeri ei jäänyt jumiin kiven tipahtaessa sen päälle. Lopuksi kivihiylly kaadettiin kaivinkoneen avulla, kuten kuvassa 21 on tapahtunut. Pois viemisen helpottamiseksi kivihiylly pilkottiin vielä iskuvasaralla eli Rammerilla pienemmäksi.

5.3.2 Poraus, panostus ja räjähteen valinta

Kohdetyömaalla panostusreikien poraaminen tapahtui pääasiassa Ranger DX-sarjan pintavasaraporakoneella, jollainen näkyy kuvassa 22.



Kuva 22. Sandvikin Ranger DX -sarjan päältä iskevä porauslaite (Sandvik 2021).

Kuvassa 22 näkyy porauslaite, jollainen oli käytössä myös Kymenlaakson keskussairaalan Fb-osan louhintatöissä. Siinä on pyörivä ylärakenne, porauksen ohjausjärjestelmä, sekä vakauttava vastapainoratkaisu. Laadukkaat laitteet edesauttavat laadukasta porausjälkeä, joka osaltaan edistää tärinänhallintaa. Laite soveltuu parhaiten 51–127 mm reikien poraamiseen, ja kohdetyömaalla yleisin porareian koko oli 51 mm.

Tutkimuskohteen louhintatöissä käytettiin räjäytysaineina patruunoitua Fordyn-dynamiittia sekä Kemix A -emulsioräjähdy patruunoita (Kuva 23). Fordyn on gelatiiniräjähdde, joka sopii tarkkoihin räjäytystöihin, joissa räjähdysainemäärät ovat pieniä. Se on tarkasti annosteltavissa niin, että esimerkiksi yhdestä 130 gramman patruunasta voidaan leikata veitsellä paloja 5–10 gramman tarkkuudella. Kemix A -patruunat sisältävät räjähdysenergiaa lisäävää alumiinijauhetta, ja sopivat kaikenlaisiin louhintakohteisiin. (Forcit Group 2021; Vuolio & Halonen 2012, 60.)



Kuva 23. Fordyn-dynamiitti ja Kemix A-patruunat.

Dynamiitin räjähdysvälitys on 40 cm luokkaa, kun Kemix A:lla se on alle 30 cm. Näin ollen Kemix A:ta käytettäessä momentaaninen panos saadaan pysymään pienempänä, kun räjäytysten välitystä panokselta toiselle ei tapahdu. Edellisten lisäksi Kymenlaakson keskussairaalan louhinnassa käytettiin tarkkuuslouhinta-aineina 17–22 mm F-putkipanoksia ja Kemix A -putkipanoksia, ja niiden kanssa räjähdysväliä varmistamiseksi räjähtävää tulilankaa.

Tavallisesti louhintakohteissa sallitaan tärinälle suurempia arvoja, jolloin räjähdettä voidaan käyttää 1–5 kg annoksia kerrallaan. Kymenlaakson keskussairaalan louhintatöissä sallitun kiihtyvyyden raja-arvon ollessa $2,0 \text{ m/s}^2$ räjähteitä käytettiin yli 10 metrin päässä 1–2 kg, ja lähempänä sairaalaa enintään 0,5 kg.

Louhintatärinäen pyrittiin vaikuttamaan tutkimuskohteena olevalla sairaalatyömaalla jakamalla panoksia useisiin kerroksiin, ja suuntaamalla räjäytys niin, että tärinät suuntautuvat pois päin laitteista. Tämä tarkoittaa vapaan suunnan suuntaamista laitteisiin päin, jolloin tärinä suuntautuu vastakkaiseen suuntaan. Panosten jakamista toteutettiin täkkäämällä panostetun pohjan ja pinnan väli hiekalla niin, että räjähdys ei välittynyt panostilojen välillä. Näin saatiin momentaanista räjähdysaineen määrää pienennettyä. Reikäpanokselle tehtiin myös toisinaan pienempi kevennys välitakkäyksellä niin, että kaksi samannumeroista impulssinallia räjähti yhtä aikaa reiässä.

Jo toisen räjäytyksen kohdalla maaliskuussa 2021 todettiin, että mittauspis-
teellä MP08 tapahtui ylitys, ja työmaapäiväkirjaan kirjattiin toimenpiteeksi kent-
täkoon pienentäminen sekä siirtyminen reiän jakamiseen kahteen nallinume-
eroon, toisin sanoen eri aikaan räjähtäviin nalleihin.

5.3.3 Eristäminen

Suomalainen tutkimus vuodelta 2001 osoittaa, että paras ja edullisin tapa suo-
jella laitteita tärinältä on eristää ne perustastaan kumieristimin. Niiden käy-
tössä on kuitenkin tunnettava alin esiintyvä normiylityksiä aiheuttava tärinätaa-
juus (f), jolla on vaikutusta vaimennusmateriaalin jousto-ominaisuuteen perus-
tuvaan tärinäeristykseen. Vaimentimella ja laitteen siihen kohdistamalla painu-
malla saavutetaan systeemin ominaistajuus (f_0), joka pienenee painuman
kasvaessa. Taajuussuhde ($n=f/f_0$) tulisi pyrkiä pitämään mahdollisimman suu-
rena, eli vaimentimille käytetään suurinta sallittua kuormitusta ja painumaa. Li-
säksi on huomioitava, ettei tärinälähde aiheuta värähtelytaajuuksia, jotka ovat
järjestelmän resonanssitaajuuksialueella. (Vuolio 2010, 315.) Kymenlaakson
keskussairaalallekin toimitettiin laitteiden alle asennettavia kuvassa 24 esitet-
tyjä tärinäeristimiä.



Kuva 24. Tärinäeristimet laitteiden alle asennettavaksi.

Tärinäeristimet oli määrä asettaa sairaalan tietokoneyksöiden alle vaimentamaan louhintatärinöitä. Osa eristimistä otettiin käyttöön, mutta nopeasti huomattiin, että laitteiden oli parempi olla kovalla alustalla. Onkin todettu, että paikallinen tärinävaimennus voi aiheuttaa enemmän haittaa kuin hyötyä, mikäli eristettävän laitteen massa ei ole tarpeeksi suuri, ja laite sisältää liikkuvia osia (Vuolio 2010, 315). Eristimet toimivat kyllä laitteiden ollessa sammutettuina, mutta käynnissä ollessaan sairaalalaitteista itsestään aiheutui tärinää, joka voimistui niiden ollessa eristimien varassa. Tästä syystä tärinäeristimet jätettiin pääosin käyttämättä, ja laitteet sijoitettiin kovalle alustalle eli lattialle. Mikäli laitteita saataisiin sijoitettua ryhminä samoille tärinävaimentimille, voisi passiivinen massa nousta riittävän suureksi.

5.3.4 Viestintä

Viestimällä louhintaan liittyvistä asioista voidaan pyrkiä hallitsemaan tärinän vaikutuksia esimerkiksi ihmisille ja laitteille. Sairaalalaitteiden alasajo räjäytysten ajaksi saattaa laitteet tilaan, jossa ne kestävät paremmin tärinää. Tämä edellyttää viestintää räjäytysten tarkoista ajankohdista, sillä toimivan sairaalan tutkimuslaitteet voivat olla vain lyhyitä ajanjaksoja suljettuna toiminnan sujuvuuden ja potilasturvallisuuden takaamiseksi. Myös esimerkiksi tärinäeristämiseen liittyvää tietoa jakamalla voidaan minimoida laitteiden altistuminen tärinälle.

Viestintä on sairaalakohteessa tärkeää myös toiseen suuntaan, eli sairaalalta louhijoille päin. Sairaalassa voi olla juuri räjäytyksen aikaikkunan kohdalla käynnissä akuutti toimenpide, jolla voidaan pelastaa ihmishenki. Tällöin sairaalalta on viestittävä louhijoille päin räjäytyksen perumiseksi, jolloin ehkäistään tärinöiden aiheuttama herkän laitteen tai potilasturvallisuuden vaarantaminen.

5.4 Tärinäraportit

Forcit Consulting Oy:n tärinämittausjärjestelmään kertyi paljon dataa tutkimusjakson ajalta. Mittarit mittauspisteillä reagoivat kaikenlaiseen tärinään, ja räjäytysten ajankohtien sekä räjäytyspistetietojen perusteella voitiin haarukoida,

mitkä mittarien reagoinnit liittyivät tutkimuksen kohteena olevan louhintatyömaan toimintaan. Vieressä samaan aikaan toimiva tietyömaa omine louhintoi-
neen aiheutti myös mittaustuloksia mittaustuloksistaan, mutta kohdetyömaan
räjähtyskentät oli numeroitu ja sijoitettu kartalle, jolloin järjestelmään saatiin tä-
rinätulokset kunkin räjähtyksen osalta. Haastetta aiheuttivat pienet poikkeamat
tä-
rinämittaustuloksissa. Joidenkin räjähtysten kohdalla ei ollut kirjautunut tu-
loksia ollenkaan, ja joidenkin kohdalla räjähtyspiste oli jäänyt kirjaamatta jär-
jestelmään, joten tä-
rinään reagoimisen kohdentaminen tiettyyn räjähtykseen
kuukausia jälkikäteen tapahtumahetkestä sisälsi epävarmuustekijöitä. Pää-
sääntöisesti tä-
rinämittarien reaktiot olivat kuitenkin aukottomasti kohdennetta-
vissa aina tiettyyn räjähtyskenttänumeron.

5.4.1 Mittaustulokset ja raja-arvojen ylitykset

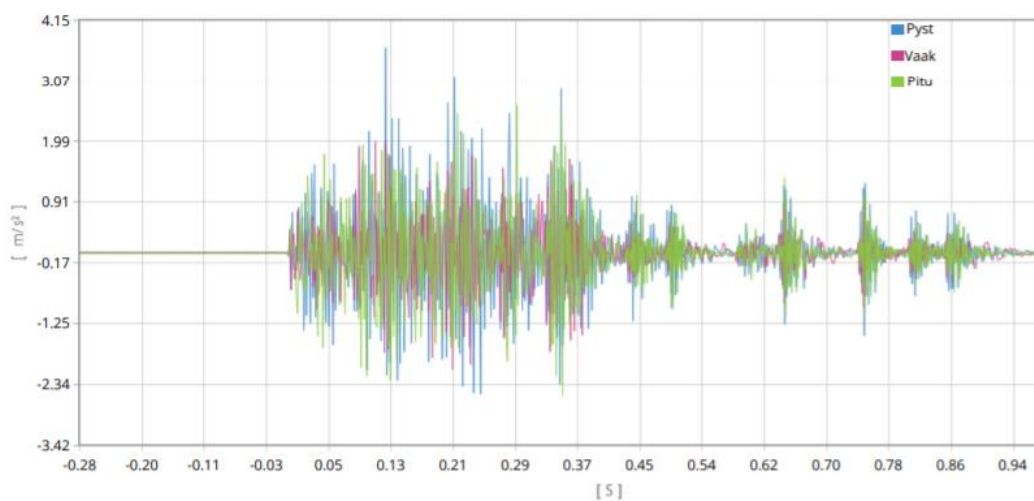
Tä-
rinöiden seurantaan järjestelmään tallentui tiedot jokaisesta tä-
rähtyksestä. Mittaustuloksista ilmeni mittaustuloksista, räjähtysnumero, aika, kiihtyvyyssarvo ja
sen ohjearvo (m/s^2), siirtymä (μm), taajuus (Hz), heilahdusnopeus (mm/s),
sekä kiihtyvyyssarvon prosentuaalinen ylitys ohjearvoon nähden. Räjähtys ai-
heuttaa tä-
rinämittauksiin vaihtelevia arvoja, ja tallennetuissa tuloksissa esite-
tään huippuarvot. Seuraavassa kuvassa 25 nähdään mittaustulosten MP08
mittaustulosten huippuarvot kolmeen suuntaan räjähtysnumeron RP079 koh-
dalla.

Aika		Loggeri							
2021-04-23 17:08:58		3533 - 14140							
Projekti		Standardi							
MP8genex		ISO8569 Acceleration							
Mittaustulokset									
Pyst (V12V)									
NIMI	OSOITE	KIIHTYVYYS	HASTINGS.	HZ	SIIRTYMÄ	OHJEARVO	ETÄISYYS	OSA (%)	RÄJ.NRO
MP08V	Genexpert vetokaappi P372	3.7 m/s^2	3.0 mm/s	241.0 Hz	7.1 μm	2,0 m/s^2		187	RP079
MP08L	Genexpert vetokaappi P372	2.1 m/s^2	3.0 mm/s	316.0 Hz	12.9 μm	2,0 m/s^2		106	RP079
MP08T	Genexpert vetokaappi P372	2.6 m/s^2	3.1 mm/s	278.0 Hz	9.7 μm	2,0 m/s^2		135	RP079

Kuva 25. Mittaustulokset MP08 tä-
rinämittaustulokset räjähtykseen nro RP079
(Forcit Consulting 2021c).

Kuvassa 25 näkyviin tietoihin yhdistettiin tämän opinnäytetyön tuotoksena (liite 1) vastaavien räjäytysten panostussuunnitelmista ja kenttäkorteista panostamiseen liittyviä tietoja. Lopputuloksena samaan taulukkoon saatiin edellä mainittujen tietojen lisäksi mittaustuloskohtaisesti kyseisen räjäytyksen: ominaispanostus (kg/m^3), momentaaninen räjähdysainemäärä (kg), reiän halkaisija (mm), reikien keskisyvyys (m), reikien lukumäärä, panostilojen määrä/reikä, etu (m), sekä käytetty räjähdysaine jaoteltuna pohjapanos, varsipanos 1, varsipanos 2. Kenttäkorttien 395–441 tavoittaminen ei onnistunut, joten niiden osalta panostustiedot jäivät kirjaamatta. Panostustietojen lisäksi räjäytyspisteiden karttaan merkityistä sijainneista mitattiin etäisyydet lähimpiin sairaalan seiiniin, ja merkittiin ne taulukkoon. Lisäksi poikkeamaraporttinumerot ja -tiedot kirjattiin samaan taulukkoon niin, että ylityskohtaisesti on nopeasti luettavissa ylitykseen johtaneet syyt ja vaaditut toimenpiteet.

Mittaustuloksista tallentui myös kaaviot, joista voi nähdä räjähdysten etenemisen kokonaisuudessaan graafisesti. Seuraavassa kuvassa 26 on esitetty edellisessä kuvassa taulukkotuloksina esitetyn räjähdysten RP079 eteneminen kaaviona.



Kuva 26. Räjäytyksen nro RP079 värinäaaltojen eteneminen kaaviona (Forcic Consulting 2021c).

Aiheeseen perehtynyt voi tehdä kuvan 26 graafisesta esityksestä johtopäätöksiä. Eri räjäytysten kaavioissa esiintyy säännönmukaisuuksia ja poikkeamia joiden perusteella voi päätellä muun muassa värinäylysten syitä.

Mittaustuloksista katsottiin ensisijaisesti kiihtyvyyssarvoa, sillä sairaalalaitteissa on asetettu ohjearvot sen suhteen. Kiihtyvyyssarvot vaihtelivat välillä 0–6,8 m/s² (liite 1), kun ohjearvo kiihtyvyydelle oli 2,0 m/s². Piha-alueella, kauimpana sairaalasta suoritetuista räjäytyksistä kaikki eivät aiheuttaneet mitään reaktiota laitteissa. Mittarit reagoivat kuitenkin valtaosaan räjäytyksistä, mitaten niiden kiihtyvyyssarvoja ja muuta dataa, ja suurin osa räjäytyksistä saatiin pysymään alhaiseksi säädetyn raja-arvon rajoissa.

Kiihtyvyyden ohjearvon ylittävien räjäytysten määrä suhteessa kaikkiin räjäytyksiin on esitetty kuvassa 27.

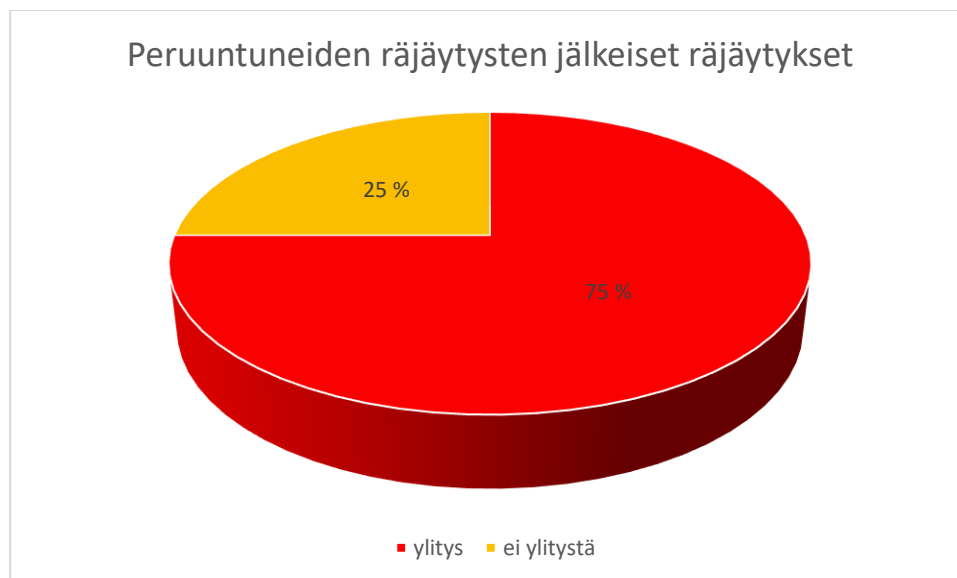


Kuva 27. Tärinäylitysten osuus kaikista räjäytyksistä.

Kuten kuvasta 27 nähdään, noin kolmasosa räjäytyksistä aiheutti jonkinasteisen kiihtyvyyssarja-arvon ylityksen jollakin mittauspisteellä. Tähän tilastoon on laskettu kaikki pienimmätkin ylitykset. Räjäytyksiä oli tutkitulla aikavälillä 441 kpl, ja niistä 142 kpl aiheutti ylityksen.

Räjäytyksiä jouduttiin perumaan jonkin verran sairaalatoimenpiteisiin liittyvistä syistä. Peruutukset ovat aina työmaan kannalta epätoivottuja, sillä ne aiheuttavat töiden viivästymistä ja sitä kautta tarvetta kiritä aikatauluja kiinni. Edellä mainittujen syiden pohjalta heräsi kiinnostus tutkia peruutusten jälkeisiä räjäy-

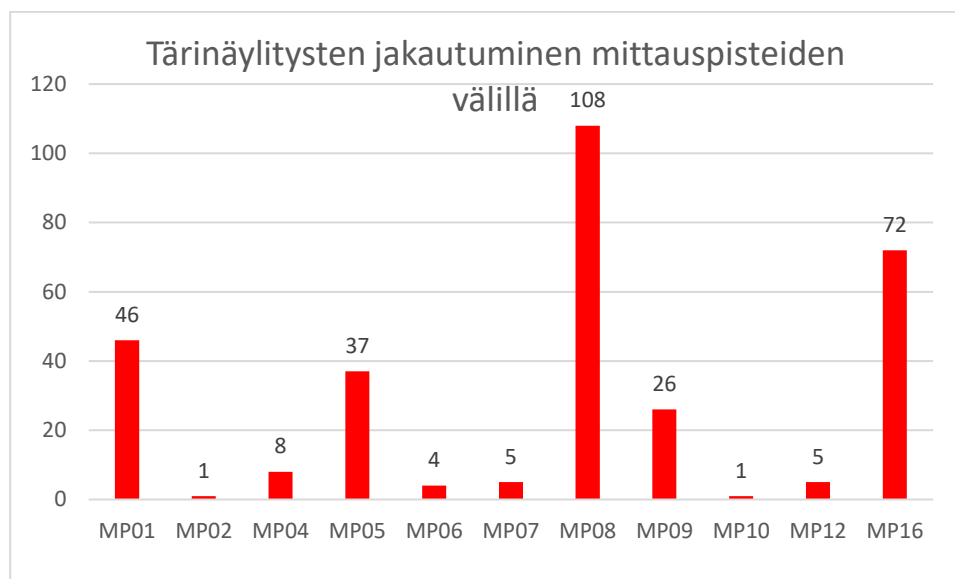
tyksiä. Työmaapäiväkirjaan merkittyjen peruutusten perusteella pystyttiin havainnoimaan peruutusta seuraavia räjäytyksiä, ja tärinäylitysten suhdetta raja-arvossa pysyneisiin räjäytyksiin on niiden osalta esitetty kuvassa 28.



Kuva 28. Seuraavat räjäytykset peruuntuneiden jälkeen.

Kuvasta nähdään, että tärinäylitysten osuus seuraavassa räjäytyksessä peruuntuneen räjäytyksen jälkeen oli 75 % räjäytyksistä, kun kaikkien räjäytysten kohdalla se oli 32 %. Peruuntuneita räjäytyksiä oli kirjattu tutkimusjakson aikana työmaapäiväkirjaan 12 kappaletta, joiden perusteella aihetta tutkittiin. Todellinen peruuntumisten määrä oli tutkimusjakson aikana suurempi. Tämän otannan perusteella näyttäisi siltä, että räjäytyksen peruuntuminen lisäsi tärinäylityksen todennäköisyyttä seuraavassa räjäytyksessä. Tämän kaltaista tulosta ei voida selittää kallion ominaisuuksiin tai suunnitteluun liittyvillä syillä. Peruuntuneen räjäytyksen aiheuttama aikataulupaine voi mahdollisesti vaikuttaa seuraavaan panostukseen joko tiedostetusti tai tiedostamatta. Oli myös havaittavissa, että tärinäylityksiä tuli ilta-aikaan hieman enemmän kuin päiväsaikaan. On ymmärrettävää, että louhinnassa saatetaan toimia varovaisemmin silloin, kun työmaalla ja sairaalalla on enemmän henkilökuntaa paikalla. Räjäytystapahtuman lopputulokseen vaikuttavat hyvin pienetkin nyanssit, ja panostuksen suorittaa aina ihminen. Leikkimielisesti kentällä on kuultu sanottavan, että tärinäissä näkyy millainen päivä panostajalla on ollut. Vaikka mukana on huumoria, voidaan tuloksista kuitenkin päätellä, että myös inhimillisillä tekijöillä ja aikataululla on vaikutusta tärinöiden suuruuteen.

Mittaustuloksissa oli jonkin verran eroja mittarikohtaisesti. Seuraavassa kuvassa 29 nähdään, miten värinäilytykset jakautuivat eri mittauspisteiden välillä.

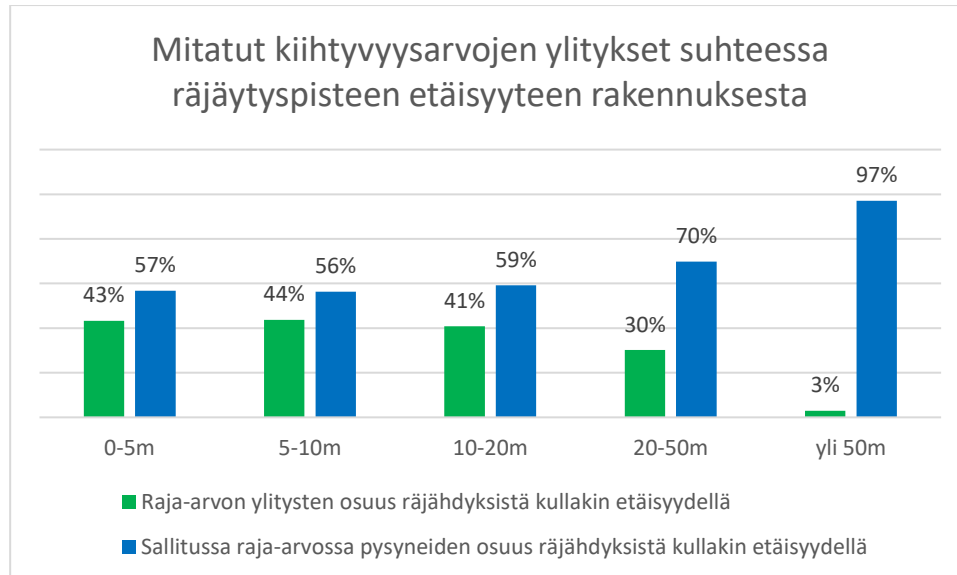


Kuva 29. Värinäilytysmäärät mittauspisteittäin.

Kuvasta 29 nähdään, että mittauspiste MP08 reagoi louhintatyön aikana eniten, ja yhteensä 108 räjäytystä eli noin 76 % ylityksistä ja 24 % kaikista räjäytyksistä aiheutti sallitun kiihtyvyyden raja-arvon $2,0 \text{ m/s}^2$ ylityksen mittauspisteellä MP08. Mittauspiste MP08 on sijoitettu Genexpert-nimisen kemian analysointilaitteen yhteyteen, jolla analysoidaan muun muassa covid 19 -näytteet. Laite sijaitsee vetokaapissa sairaalan vanhassa osassa pohjakerroksessa, ulkoseinän lähellä Fb-rakennuksen työmaan puolella. Sairaalan vanha osa on rakennettu suoraan saman kallion päälle, jossa louhintaa suoritetaan, ja mittari sijaitsee hyvin lähellä louhittua rakennuspohjaa ja sen räjäytyspisteitä, joten se reagoi etenkin aivan seinän vieressä tehtyihin rakennuspohjan räjäytyksiin. Uudempia sairaalan osia vaimentaa perustusten alle rakennusvaiheessa lisätty murskepatja. Seuraavaksi eniten reagoivat mittauspisteet MP16 ja MP01, jotka sijaitsevat myös sairaalan vanhassa osassa hieman kauempana työmaasta kuin MP08, lähellä toisiaan.

Räjäytyspisteen etäisyydellä rakennuksesta on suuri merkitys värinän suuruuteen, sillä kuten taulukossa 2 on jo aiemmin esitetty, värinä vaimenee huomattavasti etäisyyden kasvaessa etenkin kiinteässä kallioperässä. Seuraavassa

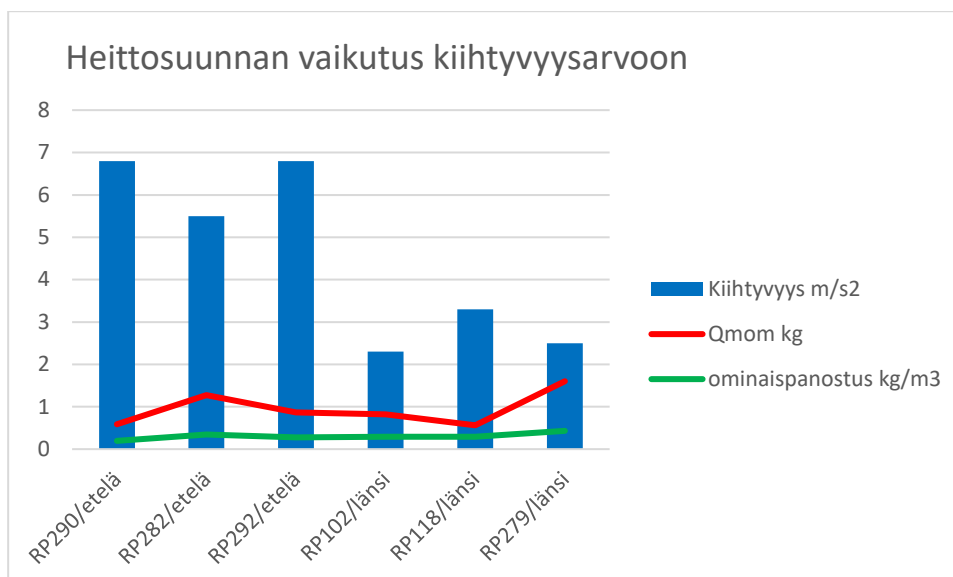
kuvassa 30 on esitetty raja-arvojen ylityksen ja alitusten suhde tutkimuskoh-
teen tärinämittaustuloksissa suhteessa räjäytyspisteen etäisyyteen rakennuk-
sen seinästä.



Kuva 30. Tärinän pysyminen raja-arvoissa suhteessa etäisyyteen.

Kuten kuvasta 30 voidaan nähdä, kiihtyvyyssarvot ylittävät sallitun raja-arvon herkemmin, kun räjäytys tapahtuu 20 metrin sisällä rakennuksesta. Kun mennään yli 50 metrin päähän, tärinät vaimenevat huomattavasti. Kuvassa näkyisi oletettavasti vielä selkeämmät erot etäisyyden vaikutuksesta tärinään, mikäli kaikki räjäytykset olisi tehty samalla tavalla ja samalla räjähdysainemäärällä. Nyt panostukset on jo valmiiksi suhteutettu etäisyyteen rakennuksesta, eli kaukana rakennuksesta on voitu käyttää isompia räjähdysainemääriä, ja lähellä rakennusta on panostettu varovaisemmin.

Seinän viereisiä räjäytyspisteitä ja poikkeamaraportteja tarkasteltaessa voidaan todeta, että räjäytyksen suunta vaikuttaa sairaalan tärinämittarien havaitsemiin kiihtyvyyssarvoihin. Alla olevassa kuvassa 31 on havainnollistettu muutamien aivan lähellä sairaalan vanhan osan seinää olevan räjäytyspisteen aiheuttamia kiihtyvyyssarvoja mittauspisteellä MP08.

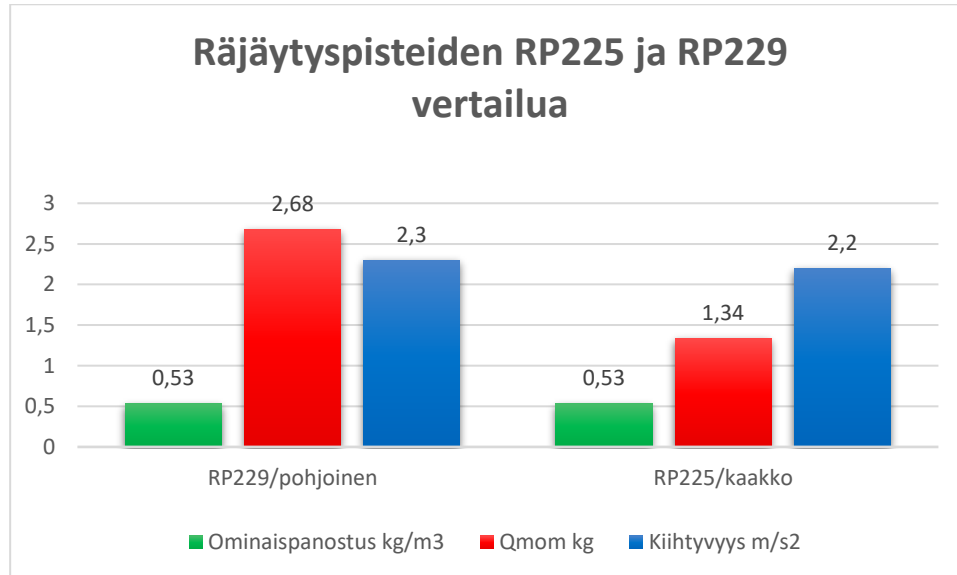


Kuva 31. Mitattuja kiihtyvyyssarvoja seinän vieruslouhinnasta suhteessa räjäytyksen vapaaseen suuntaan.

Kuvasta 31 nähdään, miten kyseisten räjäytysten kohdalla räjäytyksen vapaa suunta vaikuttaa mitattuihin kiihtyvyyssarvoihin. Tämän pienen otannan perusteella näyttää siltä, että vapaa suunta eli kentän heittosuunta vaikuttaa tässä kohtaa tärinöihin siten, että heiton suuntaisesti välittyä enemmän tärinöitä kuin sivuttaissuuntaisesti. Kohteen poikkeamaraporttien korjaavissa toimenpiteissä sekä alan kirjallisuudessa tuli usein esiin tärinöiden suuntautuminen vapaaseen suuntaan nähden vastakkaisuuntaisesti, minkä vuoksi tärinöitä pyrittiin kohdetyömaallakin hallitsemaan suuntaamalla heittoa kohti sairaalaa. Kuvan mukaan heittoa kannattaisi suunnata eniten sivusuuntaan siitä osasta, jolle halutaan vähiten tärinöitä. Toisin sanoen vapaan suunnan tulisi olla itään, kohti sairaalan uutta osaa, jolloin suurimmat tärinät suuntautuisivat merelle päin länteen, ja vähiten tärinää suuntautuisi tällöin sivulle, eli eteläpuolella olevaan sairaalan vanhaan osaan. Tulokset johtuvat todennäköisesti kallion lustaisuudesta, jonka vuoksi tärinät eivät välttämättä liiku normaalisti, vaan voivat välittyä lustien eli vaakarakojen suuntaisesti.

Momentaanisen eli yhtäaikaa räjähtävän räjäytysainemäärän vaikutuksia tärinöihin tutkittaessa nousi esiin tilanteita, joissa reikäpanosta oli jaettu kahteen panostilaan momentaanisen räjäytysainemäärän puolittamiseksi. Seuraavassa kuvassa 32 on esitetty kaksi räjäytyskenttää, jotka ovat teoriassa identtisiä räjähdysaineiden, ominaispanostuksen ja reikien määrän ja mittojen

osalta, mutta RP225:ssä on kaksi eri aikaisesti räjähtävää panostilaa, kun taas RP229:ssä panostilat räjähtävät samanaikaisesti (Kenttäkortit liite 6). Tärinämittausohjelman kartan mukaan pisteet ovat myös hyvin lähellä toisiaan ja molemmat alle 20 metrin päässä sairaalan seinästä.



Kuva 32. RP225 ja RP229 kiihtyvyyssarvot suhteessa vapaaseen suuntaan ja momentaaniseen räjähdysainemäärään.

Kuvassa 32 näkyvien räjäytyspisteiden erot ovat momentaaninen räjähdysainemäärä ja vapaa suunta. Molemmat reiät on jaettu kahteen panostilaan, mutta RP229:ssä reiän molemmissa panoksissa on sama nallinumero, jolloin panokset räjähtävät yhtäaikaisesti. Nalli vain pienentää koko reiän panosta välitytteen verran. RP225:ssä reiän momentaanista räjähdysainemäärää on kevennetty jakamalla reikä kahteen panostilaan, jotka räjähtävät eri numeroisilla nalleilla eri aikaan. Tällä toimenpiteellä ei ole jostain syystä ollut vaikutusta kiihtyvyyssarvoon, sillä molemmissa tapauksissa kiihtyvyyden raja-arvo on ylittynyt hieman. On todennäköistä, että panostilojen välinen täkkäys eli välitäyte ei ole pitänyt, vaan räjähdys on välittynyt panostilasta toiseen. Vaihtoehtoisesti räjäytyksen vapaa suunta vaikuttaa lopputulokseen. Puolet pienemmän momentaanisen räjähdysainemäärän sisältänyt räjäytys oli suunnattu suoraan kohti kaakkoa, eli sairaalan vanhaa osaa, kun suuremman momentaanisen räjähdysainemäärän omaava räjäytys oli suunnattu pohjoiseen. Teoriassa pohjoiseen suuntautuvasta räjäytyksestä pitäisi välittyä eniten tärinöitä etelän

suuntaan, ja samalla suunnalla olevaan kaakkoon. Näin ei kuitenkaan ole tapahtunut. Vaikka räjäytyksistä lähtee yleensä taakse päin suurimmat tärinät, niin ne eivät ilmeisesti tässä kohtaa ole siirtyneet sivuttaissuuntaisesti niin, että välittyisivät 45° kulmassa takana sijaitseviin kohteisiin yhtä tehokkaasti kuin heittosuunnan suuntaiset tärinäaallot. Pääsääntöisesti heittosuuntana pyrittiin käyttämään kaakkoa, eli sairaalan vanhaa osaa, jotta siihen kohdistuisi mahdollisimman vähän tärinöitä.

Louhinta toiminnassa olevan sairaalan vieressä asettaa haasteita louhinnan ja etenkin sen porauksen ja panostuksen tarkkuudelle. Kun halutaan saada aikaan tarkkaa louhintajälkeä rikkomatta jäljelle jäävää seinää, tulee reunareivät räjäyttää mahdollisimman samanaikaisesti. Yhtaikaiset räjähdykset tarkoittavat suurempaa momentaanista räjähdysainemäärää, mikä voi aiheuttaa suuremman tärinän. Toisaalta tärinää voi aiheutua myös liian pienestä momentaanisesta räjähdysainemäärästä johtuen, jolloin kiven irtoaminen ei tapahdu riittävä hallitusti. Tässä tutkimuksessa oli pyrkimys tutkia momentaanisen räjähdysainemäärän vaikutusta tärinöihin keskittyen nimenomaan liian pieniin ja liian suuriin momentaanisiin räjähdysainemääriin tärinöiden aiheuttajana. Tehävä osoittautui valitettavasti haastavaksi, eikä johdonmukaisuutta tutkimusaineiston perusteella löytynyt.

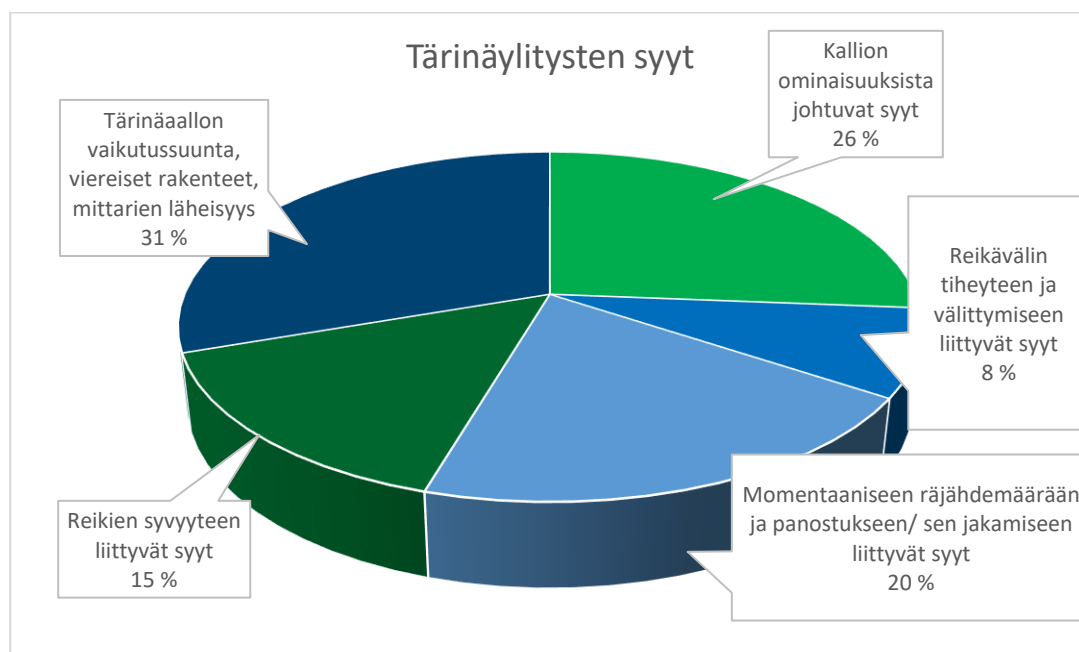
5.4.2 Poikkeamaraportit: syyt ja toimenpiteet

Tärinäarvojen ylittäessä ohjearvon, laaditaan tapahtumasta poikkeamaraportti (liite 7). Poikkeamaraporttiin on dokumentoitu ohjearvon ylityksen ajankohta, räjäytyksen numero, ylitysarvot mittarikohtaisesti, poikkeaman kuvaus, käytetty momentaaninen räjähdysainemäärä, sekä virheen juurisyyt ja toimenpiteet sekä vastuuhenkilö. Poikkeamaraporttiin on liitetty tärinämittaushjelmasta mittaustulokset taulukkomuodossa sekä kaaviona.

Kiihtyvyyden ohjearvon ylitys tapahtui tutkitulla aikavälillä 142 räjäytyksen kohdalla, mutta tärinään liittyviä poikkeamaraportteja laadittiin kuitenkin tutkimusjaksolla 99 kpl. Ero määrässä johtuu siitä, että osaan poikkeamaraporteista oli yhdistelty tiedot useamman räjäytyskentän ylityksistä samalla kertaa, ja lisäksi kaikkein minimaalisimmista ylityksistä ei laadittu ollenkaan raporttia.

Poikkeamaraporteilla käsitellään tärinäohjearvon ylitykseen johtaneita mahdollisia syitä, sekä toimenpiteitä toiminnan korjaamiseksi. Pääsääntöisesti tärinäylitykseen oli useita syitä, tai syytä ei pystytty määrittämään. Suuntaa antavan tiedon esittämiseksi tärinäylitysten syyt on kerätty ja syykoodattu opinnäytetyön tuotokseen liitteeseen 1, ja tästä eteenpäin yhdistelty ja luokiteltu karkealla tasolla aihepiireihin.

Seuraavassa kuvassa 33 nähdään poikkeamaraporteille kirjattujen tärinäylitysten syiden jakautuminen aihepiireittäin.

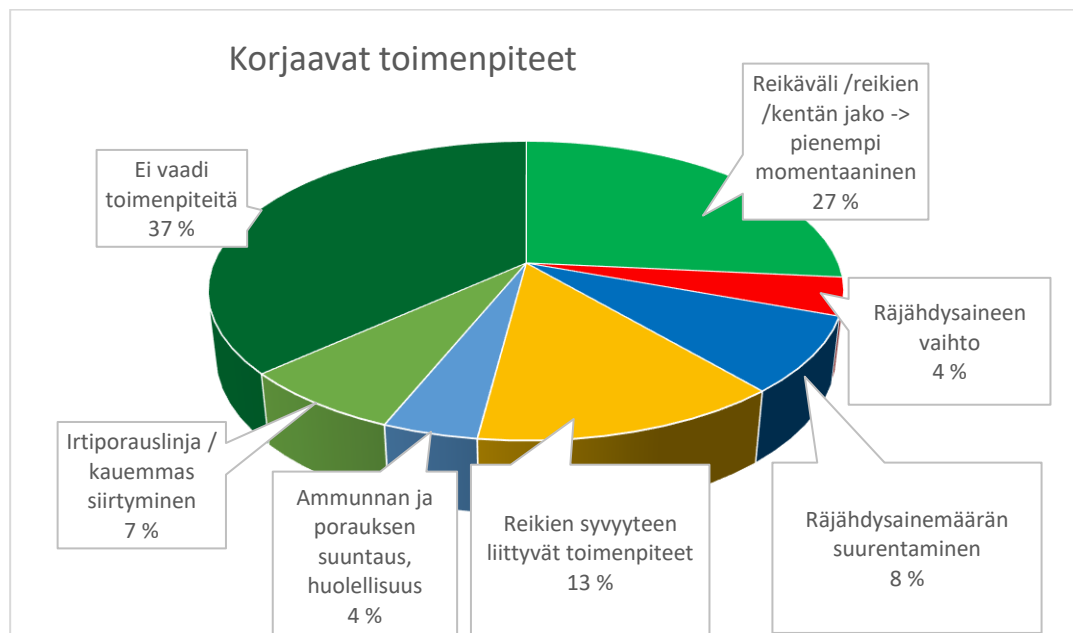


Kuva 33. Tärinäylitysten syiden jakautuminen aihepiireittäin.

Kuvan 33 mukaan suurin syy tärinäylityksille oli räjäytysten suorittaminen hyvin lähellä rakennuksen seinää ja tärinämittareita. Ohjearvo on niin alhainen, että lähellä olemassa olevia rakenteita ja laitteita räjäytystä on lähestulkoon mahdotonta suorittaa niin, että kivi irtoaisi kunnolla, mutta ohjearvo ei ylittyisi. Seuraavaksi suurimpana nousivat kallion ominaisuuksiin liittyvät syyt, joka sisältää myös tuntemattomat syyt. Kuvassa näkyviä syitä ja niiden jakautumista on yksinkertaistettu, sillä käytännössä syitä oli samaa räjäytystä kohden useita. Kuviosta puuttuu myös kallion lustaisuus eli vaakasuuntainen rakoilu tärinöiden syynä. Miltei jokaisessa poikkeamaraportissa oli mainittu ensimmäi-

senä syynä kallion lustaisuus, jonka vuoksi värinäaaltojen välittyminen on hankalaa ennakoita. Värinähallinnallisen näkökulman mukaisesti tähän kuvioon pyrittiin kuitenkin tuomaan ensisijaisesti sellaisia syitä, joihin voidaan vaikuttaa louhinnan suunnittelun ja toteutuksen yhteydessä. Syiden jakautuminen tarkemmalla tasolla on sisällytetty taulukkoon, joka on osa tämän opinnäytetyön tilaajalle luovutettavia tuloksia (liite 1).

Seuraavassa kuvassa 34 on esitetty karkealla tasolla kootusti poikkeamaraaportteihin kirjatut korjaavat toimenpiteet, joilla värinäylityksiin pyritään reagoimaan.



Kuva 34. Korjaavat toimenpiteet värinäylitysten johdosta.

Kuvasta 34 nähdään, että 37 % tapauksista ei louhijoiden mielestä aiheuttanut toimenpiteitä. Voidaan tulkita, että tällöin värinäylitysten syyt eivät olleet louhijoiden toiminnasta riippuvaisia. Seuraavaksi yleisin (27 %) korjaava toimenpide liittyi kentän jakamiseen, jolla saadaan pienennettyä momentaanista räjähdyssainemäärää. Noin 13 % korjaavista toimenpiteistä liittyi reikien poraus- syvyyteen, tarkemmin sanottuna reikien syvyyden optimointiin irtiporauslinjan värinäkatkona toimimisen tehostamiseksi, tai yksinkertaisesti siihen, että todettiin reiän olevan liian syvä tai liian matala. Toimenpiteiden jakautuminen tarkemmalla tasolla on sisällytetty taulukkoon, joka on esitetty tämän opinnäytetyön liitteenä 1.

5.4.3 Tärinä- ja poikkeamaraporttien analysointi

Sairaalalaitteiden tärinäohjearvo $2,0 \text{ m/s}^2$ on erittäin alhainen kiihtyvyyssarvo räjähdysaineilla tapahtuvalle louhintatyölle. Siihen nähden tärinäylytyksiä oli louhintatöiden aikana suhteellisen vähän.

Syitä tärinäylytyksille voidaan tutkia ja analysoida, mutta lopulta tullaan usein lähtökohtaan, että louhinta tapahtuu niin lähellä rakennusta, niin kovassa kalliossa, että vaikutusmahdollisuudet jäävät lopulta vähäisiksi. Tutkimista ja johdonmukaisuuksien löytämistä vaikeuttavat tärinöitä kuljettavat kalliolustat sekä panostukseen liittyvien muuttuvien tekijöiden suuri määrä.

Poikkeamaraporteista kuvastuu se, että korjaavia toimenpiteitä on suoritettu kokeellisesti edestakaisin molempiin suuntiin. Välillä momentaaninen räjähdysainemäärä on ollut liian suuri ja aiheuttanut tärinää, ja välillä taas liian pieni määrä on tehnyt saman. Liian pieni räjähdysainemäärä ei irrota kalliota, jolloin sen koko energia muodostaa tärinää. Tärinään vaikuttaa moni seikka, ja tarkoituksena on hakea kompromissia eri tekijöiden suhteen. Vaikka räjähdysainemäärän saisikin matemaattisella kaavalla optimoitua, niin jokin ominaisuus kalliossa, esimerkiksi ennalta huomaamaton lusta, eli rako kalliossa, muuttaa herkästi lopputulosta. Louhinta perustuu viimekädessä kokeellisiin menetelmiin.

Tämä tutkimus alkoi siinä vaiheessa, kun kohteen louhinnat olivat jo loppusuoralla. Louhintaan ja tärinöihin liittyvää aineistoa oli kertynyt, mutta toimintatapoihin tai aineiston keruumenetelmiin ei pystytty vaikuttamaan. Tästä syystä on vaikea arvioida dokumentoidun aineiston tarkkuutta ja luotettavuutta. Jälkikäteen on myös haastavaa selvittää puutteellisista merkinnöistä johtuvia aukkoja tiedoissa.

6 TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyössä dokumentoitiin Kymenlaakson keskussairaalan laajennuksen Fb-osan louhintatyöt. Tutkimuksen perusteella esitetään ohessa tärkeimpiä havaintoja ja kehityskohteita tulevien vastaavien kohteiden louhintatöiden tä-
rinänhallintaan. Samoin ohessa on tehty toimenpide-ehdotuksia, joilla voidaan parantaa louhintakohteiden tärinänhallintaa tulevaisuudessa.

6.1 Havainnot

Tutkimustuloksissa havaittiin, että sairaalan vanhoissa osissa sijaitsevat tä-
rinämittarit reagoivat herkemmin räjäytystärinöihin, kuin uusissa osissa sijait-
sevat. Syyksi voidaan arvioida rakennusten erilaiset perustustavat, sillä vanha
osa on rakennettu suoraan kallion päälle, kun taas uusi rakennus on perus-
tettu murskepohjalle.

Sairaalan seinän vieressä tehdyt räjäytystyöt aiheuttivat enemmän raja-arvo-
jen ylityksiä kuin kauempana pihalla tehdyt räjäytystyöt. Tarkempia tutkimuk-
sia etäisyyden suhteen ei tämän aineiston perusteella ole syytä tehdä, sillä rä-
jäytyspisteiden tarkkoja koordinaatteja ei ole merkitty järjestelmään, joten rä-
jäytyspisteiden etäisyydet sairaalan seinästä on laskettu karkealla tasolla kart-
taan merkityistä pisteistä katsottuna. Etäisyys on kuitenkin erittäin oleellinen
tärinän vaikuttava tekijä, sillä sama räjäytysainemäärä vaikuttaa eri tavalla ei
etäisyyksien päästä tärinöiden vaimentuessa matkalla.

Rakolinjojen toteutus tärinöiden hallitsemiseksi onnistui vaihtelevasti. Lähellä
G-osan nurkkaa, sekä louhintatasojen välisellä FG-linjalla onnistuneesti toteu-
tetut irtiporausrailot auttoivat estämään tärinöiden siirtymistä sairaalalle päin.
Fa-osan seinän vieressä työskentely sen sijaan oli ahdasta, minkä vuoksi po-
ravaunu ei mahtunut tekemään suorita porauksia. Etenkin vanhan osan pilari-
manttelointien kiertäminen aivan seinän vieressä aiheutti sen, että tilanahtau-
desta johtuen hieman vinoon poraten toteutettu rakolinja ei auennut kunnolla.
Tämän seurauksena tärinät välittyivät rakennukseen. Tärinöiden pienentä-
miseksi jouduttiin pienentämään kenttäkokoja, ja tämä hidasti työn etene-
mistä. Louhijoiden haastatteluissa tulikin esille, että jo suunnitteluvaiheessa
olisi syytä miettiä työtekniisiä puolia, jotta uutta rakennusta ei sijoitettaisi täysin

kiinni vanhaan. Tämä mahdollistaisi kunnan työskentelyvarat. Geosuunnittelijan mukaan rakennuksen sijoittelun suunnitteluun on yritetty vaikuttaa Fb-osan ja jo G-osankin osalta louhinnan näkökulmasta, mutta irti vanhasta rakennuksesta rakentamisessa syntyville hukkaneliöille on vaikea saada hyväksyntää arkkitehdiltä, sillä arkkitehdin tilaohjelmassa kiinnitetään ensisijaisesti huomiota rakennuksessa suunnitellun toiminnan tavoitteisiin, työtekniesten seikkojen tullessa vasta niiden jälkeen.

Tutkimuksessa nousi esille se, että vaikka projekti voidaan RIL 253-2010 -määritelmien mukaan värinäherkkien laitteiden läheisyyden perusteella luokitella vaativuusluokan 3 kohteeksi värinöiden osalta, nimitettiin värinäasiantuntija kohteelle vasta toteutusvaiheessa, eikä hän ollut projektin aikana yhteydessä geosuunnittelijan kanssa. Värinäasiantuntijan mukaan on hyvin tyypillistä, että värinäasiantuntija ja geosuunnittelija toimivat erillään toisistaan, ja värinäasiantuntijan tehtävät liittyvät enemmän katselmuksiin ja mittauksiin kuin suunnitteluun. Värinäasiantuntijan keskeisiin tehtäviin kuuluvat määritelmän mukaan kuitenkin värinävaikutusten arviointi ja hallinta, ja näiden huomioimisen todetaan olevan tarkoituksenmukaista tehdä samanaikaisesti yhdessä muun suunnittelun kanssa. Värinähallinnan kokonaisuudessa olisikin esiin nousseiden tietojen nojalla mahdollisuuksia kehittää prosessia sellaiseksi, että suunnittelijat ja värinäasiantuntijat toimisivat yhteistyössä.

Tutkimustuloksista voidaan nähdä, että louhintaurakoitsijalla on monia keinoja vaikuttaa värinäarvoihin, mutta lähtökohdat työlle määrittyvät jo ennen louhintatyötä. Kallion laadulla ja suunnittelulla on merkittävät osansa lopputuloksen kannalta. Louhijan mahdollisuudet kulminoituvat räjäytettävien kenttien koon ja reikien jakamiseen, sekä räjähdysainemääriin, mutta kenttien loputon pienentäminen ei ole mahdollista aikataulu- ja kustannussyistä. Kyse onkin tasapainosta eri vaatimusten välillä.

Tutkimuksessa tuli esille panostukseen liittyvän dokumentoidun tiedon sisällön vaihtelevuus, ja sen vaikutukset mahdollisuuksiin tutkia louhintakohteen värinöitä matemaattisesti. Panostussuunnitelmat ja kenttäkortit (liite 8) vaihtelevat toteuttajansa mukaan, ja niihin dokumentoitu tieto ei ole kaikilta osin yhtenäistä. Laki vaatii panostajaa tekemään panostussuunnitelman, ja määrittää

myös sen minimivaatimukset. Käytännössä louhintatyön vastuhenkilö saattaa puhtaaksikirjoittaa panostajan tekemiä suunnitelmia, mikäli panostaja ei hallitse ohjelman käyttöä riittävän hyvin. Käsien ja eri ohjelmilla tehdyt panostussuunnitelmat eroavat toisistaan.

Reiän jakaminen täkkäyksellä eri aikaan räjähtäviin osiin oli paljon käytetty tapa pienentämään momentaanista eli yhtäaikaan räjähtävän räjähdysaineen määrää. Kenttäkortit olivat kuitenkin paikoitellen vaikeatulkintaisia panostustilojen ja täkkäyksen suhteen. Osasta löytyi tietoa selkeästi ja osasta ei. Sama asia oli saatu esitettyä monella eri tavalla riippuen kenttäkorttipohjasta ja sen täyttäjistä. Osa kenttäkorteista oli myös mahdollisesti täytetty kiireessä etu- tai jälkikäteen, jolloin osa kohdista oli jäänyt kokonaan täyttämättä.

Inhimillisten tekijöiden, kuten urakan aikataulupaineiden vaikutusta tärinäarvoihin ei ole syytä aliarvioida. Tutkimuksissa havaittiin viitteitä siitä, että peruuntuneen räjäytyksen jälkeen seuraavaksi tehdyssä räjäytyksessä oli yli kaksi kertaa todennäköisemmin tärinäylitys kuin räjäytyksissä keskimäärin. Tämä havainto tukee esiin tullutta tarvetta panostussuunnitelmien kehittämiseen toteutettavaksi selkeämmän ja ohjaavamman laskentapohjaisen ohjelman avulla. Kokeilevan panostamisen rinnalle tulisikin tämän tutkimuksen perusteella nostaa nykyistä enemmän teoreettisiin laskelmiin pohjautuvaa panostamista, vaikkakin myös aikataulut ja tarpeet niissä pysymiseen ohjaavat panostamista.

Tavoitteena on räjäyttää mahdollisimman suuria kenttiä niin, ettei samalla aiheudu vaurioita. Tällöin pysytään sekä aikataulussa että budjetissa. Tämän asian osalta Kymsote-Kiinteistöt Fb-osan louhintatöissä onnistuttiin hyvin. Vaurioilta vältyttiin, ja louhintatyön kustannukset ja aikataulu pysyivät aisoissa. Kiihtyvyyden raja-arvon ylityksiä kirjautui mittareihin jonkin verran, mutta pysyttiin verrattain matalissa lukemissa eikä sairaalalaitteille aiheutunut vaurioita louhintatöiden yhteydessä.

Suuri osa tärinäylyksistä voitiin todeta aiheutuneen louhintaurakoitsijasta riippumattomista tekijöistä. Tästä huolimatta louhijat pyrkivät jatkuvasti kokeellisesti löytämään erilaisia korjaavia toimenpiteitä tärinöiden hallitsemiseksi. Oman toiminnan tarkastelu onkin tärkeä lähtökohta toiminnan kehittämiseksi.

6.2 Kehityskohteet ja toimenpide-ehdotukset

Louhintätärinään vaikuttaa niin moni tekijä, että tärinänhallinnan kehittäminen ei ole aivan yksinkertaista. Pelkästään asian tutkiminen aiheuttaa kuitenkin josen, että totuttuja toimintatapoja aletaan tarkastelemaan, ja prosesseihin ja dokumentointiin aletaan kiinnittämään enemmän huomiota. Dokumentoinnissa helposti rutinoidutaan, eikä täsmällisen ja yhtenäisen tiedon keruuta pidetä välttämättä tärkeänä, mikäli kerätyn aineiston tarpeellisuutta ei ole tarpeeksi korostettu. Oman toiminnan vaikutusten kriittinen tarkasteleminen on aika ajoin tarpeellista. Kun vanhat toimintatavat joutuvat tarkastelun alle, jo kehitystyön aloittaminen voi itsessään edistää kehittymistä.

Tämän tutkimuksen perusteella ilmeni, että panostuksen suunnittelussa olisi hyvä olla käytössä yhtenäinen, selkeämpi lomake tai järjestelmä, jotta kaikki vertailtavat tiedot saadaan dokumentoitua, ja tärinänhallintaa panostustietojen pohjalta kehitettyä. Selkeäksi kehityskohteeksi nouseekin panostussuunnitelman ja kenttäkortin yhtenäistäminen ja selkeyttäminen. Panostuksen kehitystyö on tähän mennessä tapahtunut kokemukseen perustuen yrityksen ja erehdyksen kautta, mutta jäänyt dokumentoimatta tarkalla tasolla. Panostusaineiston puutoksista johtuen myös tämän kehitystyön tuotoksessa panostilojen jakamisen merkitseminen jäi osin vajaaksi.

Tutkimuskohteessa toiminut vastaava louhintatyönjohtaja tiedostaa puutokset dokumentoinnissa, ja kehittää parhaillaan panostuksen suunnitteluun työkalua, joka ohjaa paremmin tietojen täyttämässä ja on selkeämmin ymmärrettävissä. Sähköinen lomake laskisi annettujen tietojen perusteella muut tiedot suoraan sisään rakennetuilla kaavoilla, pienentäen inhimillisten virheiden mahdollisuutta. Yksityiskohtaisemman ja tasalaatuisen dokumentaation kautta voidaan saada jatkossa tarkempaa tietoa siitä, mitkä seikat vaikuttavat eniten räjäytysten kiihtyvyyssarvoihin. Panostussuunnitelmien laatimiseen käytettävän

ohjelman tulisi olla mahdollisimman yksinkertainen käyttää, ja tuottaa dokumentti, jota myös maallikko pystyy tulkitsemaan. Parhaaseen lopputulokseen päästään oletettavasti kehittämällä lomake lopulliseen muotoonsa yhteistyössä sitä käyttävien panostajien kanssa.

Louhinnan suunnitteluun on kehitetty valmiita ohjelmia, joissa pureudutaan pitkälle porakoneiden ja panostajan väliseen yhteistyöhön. Fb-osan louhinnoisakin käytössä olleessa DX800 poravaunussa on mahdollisuus GPS-paikannusta hyödyntämällä kerätä tietoa porareikien sijainnista, syvyyksistä ja kaltevuustiedoista suoraan panostusohjelmaan. Tarjolla olevat lisenssipohjaiset ohjelmat koetaan kuitenkin käytännön tasolla jäykiksi pienten panostuskenttien osalta, ja osin tarpeettoman teoreettisiksi. Selkeälle ja käyttäjäystävälliselle ohjelmalle olisi tilausta.

Suunnitteluvaiheeseen panostaminen voidaan myös nostaa toimenpide-ehtotukseksi jatkossa. Suunnitteluvaiheessa tehdään monet tärinäihin vaikuttavat päätökset. Siksi tärinänhallinta tulisi ottaa paremmin huomioon jo rakennusta suunniteltaessa. Tämä merkitsee tiivistä yhteistyötä tilaajan, suunnittelun ja urakoitsijan välillä. Käytännössä suunnitelmat tehdään aikataulullisesti ensin, joten urakoitsijan ei ole mahdollista olla alusta asti mukana suunnittelussa.

Suunnitelmaratkaisut, kuten viereisten rakennusten läheisyys ja etenemissuunnat vaikuttavat merkittävästi lopputulokseen. Geosuunnittelija pyrkii ohjaamaan suunnitteluratkaisuja niin, että työtekniset seikat olisi mahdollisimman hyvin huomioitu. Aina tämä ei kuitenkaan ole mahdollista. Suunnitelmien yhteen sovittaminen vaatisi saumatonta yhteistyötä mahdollisimman varhaisesta vaiheesta lähtien. Suunnittelua ohjaavat päälimmäisenä muut tekijät kuin tärinävaikutukset, ja vastuu tärinäistä onkin dokumenttien mukaan urakoitsijan harteilla.

Tämän mittaluokan projekteissa nimitetään yleensä tärinäasiantuntija huolehtimaan, että tärinöitä hallitaan, mitataan ja huomioidaan riittävällä tasolla läpi projektin. Tutkimuksessa nousi esille, että tärinäasiantuntijan nimittämisen li-

säksi tärinänhallintaprosessia tulisi kehittää sellaiseksi, että se toisi tärinäasiantuntijan ja geosuunnittelijan saman pöydän ääreen projektin alkumetreiltä lähtien.

Tutkimuksessa selvisi, että tärinäasiantuntijan ja suunnittelun yhteistyö jää usein kokonaan puuttumaan, mikä muuttaa tärinäasiantuntijan koko toimenkuvan suppeammaksi kuin mitä sille on asetettu tavoitteiksi. Tärinäasiantuntijan ja suunnittelijoiden toimiminen toisistaan erillään ei rakenna projektille yhteistä tärinänhallintalinjaa, vaan tekee tärinänhallintaprosessista vaikeasti hallittavan ja toimenpiteistä pirstaloituneita. Tärinänhallintaprosessissa olisi tämän osalta kehittämisen varaa. Tärinäasiantuntijan nimittäminen jo varhain suunnitteluvaiheessa on oleellista suunnittelun ja tärinäasiantuntijan yhteistyön kannalta.

Räjäytystöissä aiheutuvat tärinät ovat riippuvaisia lukemattomista tekijöistä, ja syvällinen perehtyminen aiheeseen vaatii paneutumista. Kehitystyön tuloksena syntyi dokumentti, johon on koottu yhteen irrallaan ollutta numeroaineistoa kohdetyömaan räjäytyksistä. Dokumentti jää aineistoksi louhintatyön asiantuntijoille, ja sen pohjalta voidaan tehdä jatkotutkimuksia ja tarkastelua. Tutkimuskohteen osalta louhintatyöt olivat jo niin pitkällä tutkimuksen alkaessa, että niihin ei ehditty juurikaan vaikuttaa. Tämän kehitystyön osalta tulokset näkyvätkin tulevissa louhintakohteissa ja niiden suunnittelussa.

6.3 Jatkotutkimus

Tutkimuksen kohdetyömaan louhintatöistä ja niiden tärinäarvoista jää tutkimuskelpoista dataa mahdollisille jatkotutkimuksille. Tärinämittarit tallensivat esimerkiksi eri suuntaisia kiihtyvyyssarvoja (V, T, L), joita ei tässä tutkimuksessa erikseen analysoitu.

Räjäytyksen suunta vaikuttaa räjäytyksestä lähteviin tärinöihin. Tämä tieto ohjaa panostajien päivittäistä työskentelyä, mutta tilastollisen tutkimuksen kannalta olisi tärkeää dokumentoida räjäytysten suunnat. Tässä tutkimuksessa tutkittiin suunnan vaikutusta tärinöihin muutaman yksittäisen räjäytyspisteen

osalta katsoen kenttäkortin karttaan merkityistä nuolista suuntaa antavasti räjäytyksen ilmansuunta. Ilmansuunnan voisi kuitenkin merkitä myös sanallisesti panostussuunnitelmiin/-pöytäkirjoihin, jotta tietojen vertaileminen onnistuisi helpommin. Räjähdyssuunnat olisi ollut mielenkiintoista koota myös opinnäytetyön tuotoksena syntyneeseen dokumenttiin. Valitettavasti osassa kenttäkor-teista ei ollut suuntatietoja, ja kartan sisältävien kenttäkorttien osalta jäi tiedonkeruuvaiheessa epäselväksi, kuinka eksaktisti nuolet on karttaan merkitty, ja näin ollen karttakuvaa käsiteltiin lähinnä suuntaa antavana tietona.

Kiinnostava tutkimuskohde olisi ollut momentaanisen räjähdysaineen määrän vaikutus tärinäihin siitä näkökulmasta, voiko yhtä lailla liian pieni räjähdysainemäärä aiheuttaa tärinää lohkareen irrotessa huonosti, kuin liian suuri räjähdysainemäärä. Tärinän optimoiminen laskukaavalla niin, että irtoaminen tapahtuu, mutta kiihtyvyys jää mahdollisimman pieneksi, jäi tässä tutkimuksessa kokeilematta. Oletettavasti kyseiseen laskelmaan tulisi saada mukaan myös etäisyyden ja suunnan vaikutukset. Monimutkaisessa laskelmassa on kuitenkin vaarana oleellisesti lopputulokseen vaikuttavien seikkojen epätarkkuus tai liiallinen yksinkertaistaminen. Ylianalysoimisen välttämiseksi räjähdemäärälaskelmien tarkastelu rajattiin tämän tutkimuksen ulkopuolelle.

Tutkimuskohteessa käytettiin useampaa räjähdelainetyyppiä, ja niiden erilaisia vaikutuksia tärinäihin oli alun perin tarkoitus tutkia. Se jää kuitenkin mahdollisen jatkotutkimuksen aiheeksi.

Tutkimuksessa esille nousutta tärinäasiantuntijan käytännön roolia olisi syytä pohtia tarkemmin ja laajemmin, sekä mahdollisesti kehittää yhteistyötä geosuunnittelun kanssa. Tärinäasiantuntijan rooli nimenomaan tärinänhallinnan etukäteissuunnittelussa on kiinnostava tutkimus- ja kehityskohde.

6.4 Yhteenveto

Louhinnasta aiheutuviin tärinäihin vaikuttavat moninaiset tekijät. Tämän tutkimuksen perusteella tärinöitä voidaan ehkäistä erilaisin toimenpitein louhintatyön eri vaiheissa. Louhintatyöhön sisältyy kuitenkin aina myös tekijöitä, joita

ei voida tarkasti etukäteen laskea. Kallion laadun, etäisyyden ja louhintasuunnan vaikutukset tärinäihin ovat esimerkkejä tekijöistä, joiden tarkkaa tärinävaikutusta on vaikea määrittää etukäteen.

Suunnitteluvaiheessa tehdyt ratkaisut ovat tärkeitä tärinöiden kannalta, ja suunnittelussa tulisi kiinnittää enemmän huomiota työtekniisiin seikkoihin. Lisäksi suunnitteluun tulisi saada mukaan louhintakohteelle nimitetty tärinäasiantuntija. Tutkimuksen perusteella tärinäasiantuntijan rooli liittyy käytännössä enemmän mittauksiin ja katselmuksiin kuin tärinänhallinnan etukäteissuunnitteluun. Tärinäasiantuntijan yhteyttä geosuunnitteluun tulisi kehittää jatkossa, jotta tärinäasiantuntija voisi kiinnittää huomioita myös tärinän vähentämismahdollisuuksiin, kuten hänen tehtävänsä teoriassa kuuluu.

Geosuunnittelu määrittää linjaukset, joiden puitteissa louhijat toimivat. Tärinänhallinnan suunnitelmallisista keinoista oleellisimman, eli irtiporauslinjan laajuus ja sijainti määritellään geosuunnitelmissa ja niiden työselostuksessa. Panostajan ratkaisuilla on myös suuri vaikutus louhintatärinäihin. Louhintaa suoritetaan perustellusta syystä kokeellisesti, sillä tarkka laskelmointi on käytännössä mahdotonta. Myös aikataulussa pysyminen voi mennä laskelmien edelle. Tutkimuksen perusteella tuntumapohjaisiakin toimia on syytä dokumentoida nykyistä tarkemmin. Lopputuloksena voidaan saada paremmin tietoa erilaisten panostusratkaisujen vaikutuksista ja kehittää tärinänhallintaa tulevia louhintakohteita ajatellen. Tätä varten esitettiin panostussuunnitteluohjelman kehittämistä selkeämmin ymmärrettävään ja täyttäjää ohjaavampaan suuntaan yhtenäisen dokumentoinnin varmistamiseksi.

Tärinäylitysten syyt jakautuivat monelle osa-alueelle. Tärkein syy oli kallion lustaisuus eli vaakaraot, jotka vaikuttavat tärinöiden etenemiseen ennalta arvaamattomasti. Eniten käytetty korjaava toimenpide oli momentaanisen räjähdysainemäärän pienentäminen jakamalla reikiä eri aikaan räjähtäviin osiin. Mittarien välisiin mittaustuloksiin vaikutti eniten mittarin etäisyys räjäytyspisteestä sekä mittarin sijoituspaikkana toimivan rakennuksen perustamistapa.

Opinnäytetyön tärkeimmät tulokset ovat panostus-, tärinämittaus- ja poikkeamaraporttitietojen yhteen kokoaminen, sekä tutkimuksen aikana esiin

nousseiden havaintojen ja kehityskohtien esiin tuominen tulevien louhintakoh-
teiden tärinänhallinnan kehittämiseksi. Esiin nousi runsas määrä tekijöitä ja
kehityskohteita, joista merkittävimpiä tärinänhallinnan kannalta olivat suunnit-
telun ja tärinäasiantuntijan yhteistoiminnan edistäminen sekä panostussuunni-
telmien dokumentoinnin selkeyttäminen ja yhtenäistäminen. Osa tärinään vai-
kuttavista tekijöistä on vaikeasti hallittavia, mutta valtaosaan esiin tulleista ke-
hityskohdista on aito mahdollisuus vaikuttaa tiedostamalla niiden olemassa-
olo.

LÄHTEET

Forcit Consulting. 2021a. Kiinteistökatselemus. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://forcitconsulting.fi/kiinteistokatselemus/> [viitattu 15.11.2021].

Forcit Consulting. 2021b. Tärinäherkkien laitteiden vaimennus. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://forcitconsulting.fi/tarinaherkkien-laitteiden-vaimennus/> [viitattu 15.11.2021].

Forcit Consulting. 2021c. Vipnordic - Tärinämittaustulokset. Saatavissa (käyttäjille): <https://vipnordic.forcitconsulting.fi/> [viitattu 23.10.2021].

Forcit Group. 2021. Tuotteet – Tuotetieto Fordyn / Kemix A. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://forcitexplosives.fi/tuotteet/> [viitattu 19.9.2021].

Geosuunnittelija. 2021. Af-, G ja Fb-osien geosuunnittelu. Puhelinhaastattelu 20.11.2021.

Geosuunnittelu. 2021. Pohjarakennustyön työselostus, Fb-osa. Rev. a. 16.3.2021. PDF-dokumentti.

Hakapää, A. & Lappalainen, P. 2011. Kaivos- ja louhintatekniikka. Oppikirja. Vammala: Opetushallitus.

Huoltopäällikkö. 2021. Lääkintäteknikka. Kymsote-Kiinteistöt Oy. Haastattelu 14.9.2021. Kotka.

Jääskeläinen, R. 2010. Maanrakennuksen ja louhinnan perusteet. Porvoo: Tammertekniikka / Amk-kustannus Oy.

Kiiras, J. 2001. Toteutusmuodon valinta - Tehtävätarjotin ja toteutusmuotokortit. Rakentajain kalenteri 2001. Rakennustieto Oy.

Kotkan kaupunki. 2021. Hyväntuulentien louhintatyöt etenevät Paimenportin risteyksen eteläpuolelle. WWW-dokumentti. Saatavissa:

<https://www.kotka.fi/2021/08/hyvantuulentien-louhintatyot-etenevat-paimen-portin-risteyksen-etelapuolelle/> [viitattu 3.11.2021].

Kymen sairaalat. 2021. Tietoa Kymenlaakson sairaaloiden rakentamisesta. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.kymsairaalat.fi/tietoa-rakentamisesta/> [viitattu 28.9.2021].

Niemi, V. 2018. Tuhoisien maanjäristysten analysointi helpottuu – Tekoäly jätti jo taakseen perinteiset algoritmit. Tekniikan maailma. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://tekniikanmaailma.fi/tuhoisien-maanjaristysten-analysointi-helpottuu-tekoaly-jatti-jo-taakseen-perinteiset-algoritmit/> [viitattu 2.11.2021].

Oy Forcit Ab. Nonel – Käyttäjän opas. WWW-dokumentti. <https://docplayer.fi/19477939-Nonel-sytytys-2-100-m-sec-6-500-m-sec-paineaalto-pysyy-nonel-letkun-sisalla-kun-taas-rajahtava-tulilanka-rajahtaa.html> [viitattu 8.11.2021].

Rakennustöiden valvoja. 2021. Kymsote-Kiinteistöt Oy. Haastattelu 12.11.2021. Kotka.

Projektijohtaja. 2021. Kymsote-Kiinteistöt Oy. Haastattelu 21.10.2021. Kotka.

Rakentaminen ja maankäyttö. 2021. Lakikokoelmat. Keuruu: Edita Publishing Oy.

RIL ry. 2010. RIL 253-2010. Rakentamisen aiheuttamat tärinät. Saarijärvi: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry.

Sandvik. 2021. Ranger DX800 päältäiskevä porauslaite. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.rocktechnology.sandvik.fi/laitteet/maanpäälliset-porauslaitteet/maanpäälliset-päältäiskevät-porauslaitteet/ranger-dx800-maanpäällinen-päältäiskevä-porauslaite/> [viitattu 16.11.2021].

Työnjohtaja A. 2021. Af-osan pääurakoitsija. Puhelinhaastattelu 18.11.2021.

Työnjohtaja B. 2021. YIT Suomi Oy. Haastattelu 11.11.2021. Kotka.

Työturvallisuuskeskus TTK. 2016. Räjähdy- ja louhintatyön turvallisuusohje. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://ttk.fi/files/6418/Rajaytys_ja_louhintatyon_turvallisuusohje_23123.pdf [viitattu 20.9.2021].

Tärinäasiantuntija. 2021. Forcit Oy. Puhelinhaastattelu 24.11.2021.

Vastaava louhintatyönjohtaja. 2021. YIT Suomi Oy. Haastattelut 20.9.-29.11.2021. Kotka.

Vuolio, R. & Paavola, P. 2008. Rakentamisen aiheuttamista tärinäistä ja niiden huomioonottamisesta. Workshop 2.6.2008. TKK, materiaalitekniikan laitos. Espoo.

Vuolio, R. & Halonen, T. 2012. Räjätystyöt. Suomen Rakennusmedia Oy. Tampere: Tammerprint Oy.

YIT Suomi Oy. 2021. Avolouhinnan räjäytysuunnitelma. PDF-dokumentti.

YIT. 2021. Työvaiheen toteutussuunnitelma. Avolouhinta. PDF-dokumentti.

YIT. 2020. Työ- ja laadunvarmistussuunnitelma. Syvennyslouhinta. Kotka Carrea Fb-osa. PDF-dokumentti 31.5.2020.