

**KAIVOKSEN SÄHKÖVERKON SELEKTIIVISYYDEN
TARKASTELU**

Tolonen Joni

Opinnäytetyö
Sähkötekniikka
Kaivosalan muuntokoulutus
Insinööri (AMK)

2016

Tekniikka ja liikenne
Sähkötekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Joni Tolonen	Vuosi	2016
Ohjaaja	DI Jaakko Etto		
Toimeksiantaja	Dragon Mining Oy		
Työn nimi	Kaivoksen sähköverkon selektiivisyyden tarkastelu		
Sivu- ja liitemäärä	40 + 4		

Opinnäytetyö tehtiin Dragon Mining Oy:n Oriveden Kutemassa sijaitsevalle kulta-kaivokselle. Tavoitteena oli tarkastella kaivosalueen sähköverkon selektiivisyyttä sekä päivittää kaivoksen sähkökaaviot ajan tasalle ja sähköisiksi. Tarkastelukohteina olivat ensisijaisesti oikosulkuvirrat, jännitteenalenemat ja jakokeskuslähtöjen sulakekoot.

Työssä keskityttiin pääasiassa pienjännitepuolen selektiivisyyden tarkasteluun, joten keskijännitepuoli rajattiin pois. Myös pienjännitepuolelta rajattiin pois Sarvisuon muuntopiiri, sillä se tullaan lähitulevaisuudessa purkamaan. Sähköverkon pienjännitepuolelta tarkasteltiin ensisijaisesti kaivoksen ilmoittamia osaluaita.

Selektiivisyyttä tarkasteltaessa käytettiin laskelmissa apuna Trimble NIS -verkkotietojärjestelmää ja sähkökaavioiden päivittämiseen sähköiseksi AutoCad -ohjelmistoa. Kaivosalueen sähköverkon tarvittavista tiedoista saatiin osaa suoraan kaivoksen sähköosaston työntekijöiltä ja osa heidän opastuksellaan sähköverkkoa tutkimalla.

Opinnäytetyön alussa esitellään lyhyesti Oriveden kaivosta ja Vammalassa toimivaa rikastamoaa. Tämän jälkeen käsitellään kaivoksen sähköistykseen liittyviä suosituksia ja määräyksiä, sähköverkon selektiivisyyteen liittyvää teoriaa sekä lopuksi Oriveden kaivoksen sähköverkkoa - sen rakennetta ja selektiivisyyttä.

Selektiivisyyden tarkastelun jälkeen voi todeta, että kaivoksen sähköverkon tilanne näyttää hyvältä. Rakentamisvaiheessa on huomioitu tarpeeksi suuret muuntajakoot ja kaapeleiden poikkipinnat. Näiden osalta kaivoksen nykyisessä verkossa ei ole, eikä tule olemaan ongelmia. Myöskään johtopituudet eivät ole erityisen pitkiä, jotka aiheuttaisivat verkossa huomattavaa jännitteenalenemaa.

Industry and Natural Resources
Bachelor of Engineering

Author	Joni Tolonen	Year	2016
Supervisor	Jaakko Etto, M.Sc (Tech.)		
Commissioned by	Dragon Mining Oy		
Subject of thesis	Review of the Selectivity in the Mine Electricity Grid		
Number of pages	40 + 4		

This thesis was made for a gold mine of Dragon Mining Ltd in Kutema in Orivesi. The aim was to review the selectivity of the electricity grid in the mining area and to upgrade electric diagrams and updated electronic. Subjects of the review were primarily short-circuit currents, voltage drops and fuses of distribution cabinets.

The work mainly focused on the low-voltage side of the selectivity, so the medium-voltage side was excluded. In addition, the low-voltage side in Sarvisuo was the transformation circuit excluded, as it will be demolished in the near future. As to the low-voltage side of the power grid, the areas reported by the mine were primarily reviewed.

Trimble NIS program was used in the calculations to review selectivity and to update the electric diagrams electrical AutoCad software was used. The information on the electricity grid in the mining area was directly from the mine's electrical department employees and the power grid was studied with their guidance.

At the beginning of the thesis the Orivesi Mine and Concentration Plant operating in Vammala are briefly introduced. After that the review deals with the recommendations and regulations related to the mine electrification and the theory of the selectivity of the electrical grid. The end of the work deals with the electricity grid in mine area - its structure and selectivity.

After reviewing the selectivity it can be stated that the situation in the mine electricity grid looks good. Sufficiently large transformers and cable cross sections are taken into account during the construction phase. For these there are no, nor will be problems in the current grid. The line lengths are not particularly long, which would result in a significant voltage drop.

Key words

mining, electricity grids, electrical safety

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	DRAGON MINING OY	8
2.1	Oriveden kultakaivos.....	8
2.1.1	Historia	9
2.1.2	Tuotanto	10
2.1.3	Ympäristö	11
2.2	Vammalan rikastamo	12
3	KAIVOKSEN SÄHKÖISTYS	13
3.1	Sähköverkko	13
3.2	Sähkölaitteet	14
3.3	Johdot ja kaapelit	14
3.4	Johtojen ja kaapeleiden mitoitus	15
3.5	Sähköverkon suojaus.....	16
3.5.1	Keskijänniteverkon suojaus	17
3.5.2	Pienjänniteverkon suojaus	18
3.6	Maadoitus	18
3.7	Piirustukset	20
4	SÄHKÖVERKKO ORIVEDEN KAIVOKSESSA	21
4.1	Sähkönjakelun toteutus.....	21
4.2	Kaivoksen sähkökaaviot	24
5	TUOTANTOPROSESSIEN SÄHKÖTEKNINEN LASKENTA	25
5.1	Oikosulkuvirtojen laskenta	25
5.1.1	Kolmivaiheinen oikosulkuvirta	26
5.1.2	Kaksivaiheinen oikosulkuvirta	26
5.1.3	Yksivaiheinen oikosulkuvirta	27
5.1.4	Alkuoikosulkuvirta.....	28
5.1.5	Terminen oikosulkuvirta	29
5.1.6	Jatkuvan tilan oikosulkuvirta.....	31
5.2	Jännitteenalenema	31
5.3	Johdon oikosulkusuojaus.....	31
5.4	Johdon ylikuormitussuojaus.....	32
5.5	Yhdistetty oikosulku- ja ylikuormitussuojaus	33

6 SÄHKÖVERKON SUOJAUKSEN TARKASTELU JA JATKOTOIMENPITEET	
35	
6.1 Oikosulkuvirtalaskelmat	35
6.2 Jännitteenalenemalaskelmat	36
6.3 Suojalaitteiden tarkastelut.....	37
7 POHDINTA.....	38
LÄHTEET	39
LIITTEET	40

ALKUSANAT

Haluan kiittää opinnäytetyön aiheesta toimeksiantajaa Dragon Mining Oy:ta ja työnohjauksesta Lapin ammattikorkeakoulun lehtori DI Jaakko Ettoa. Erityiskiitos kaivoksen sähköosaston työntekijöille, sillä heidän tietonsa ja taitonsa ovat olleet korvaamattomia työn valmistumisen kannalta. Lisäksi haluan kiittää kaikkia muita työn valmistumiseen vaikuttaneita henkilöitä.

Tampereella 24.8.2016

Joni Tolonen

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön toimeksiantaja on kaivosyhtiö Dragon Mining Oy, australialainen kaivosyhtiö, jolla on toimintaa Suomessa ja Ruotsissa. Opinnäytetyö on tehty Oriveden kaupungissa sijaitsevalle maanalaiselle kultakaivokselle. Työn perustana on kaivoksen tarve sähköverkon selektiivisyyden tarkastelulle sekä sähkökaavioiden päivittämiselle. Aihe oli myös henkilökohtaisesti kiinnostava oppimisprosessi, sillä kyseisessä aihepiirissä on sekä vanhan muistelua että uuden oppimista. Lisäksi pääsin tutustumaan ensimmäistä kertaa kaivoksen sähköverkkoon ja sen komponentteihin todella ammattitaitoisessa opastuksessa.

Teollisuuslaitoksen sähköverkon tilan tunteminen on tärkeää sekä tuotannon käyttövarmuuden että henkilö- ja laiteturvallisuudenkin kannalta. Epäselektiivisessä sähköverkossa esiintyy usein esimerkiksi sähköisku- ja tulipalovaara. Selektiivisyydellä pyritään rajaamaan sähköverkon vikatilanteessa vikaantunut osa mahdollisimman pienelle alueelle ja irrottamaan vain vikaantunut osa verkosta pois, jolloin muut verkon osat voivat toimia normaalisti koko ajan.

Sähköverkosta ei ole tarkoitus käsitellä koko pienjänniteverkkoa, vaan tarkastellaan kaivoksen ilmoittamat osa-alueet. Tarkastelukohteina ovat ensisijaisesti oikosulkuvirrat, jännitteenalenemat sekä jakokeskuslähtöjen sulakekokoja. Työstä rajattiin keskijänniteverkon ja muuntajien tarkastelu pois sekä pienjännitepuolelta muuntopiiri 6, koska se tullaan purkamaan.

Työn alussa esitellään lyhyesti kaivosta ja Vammalassa toimivaa rikastamoaa. Tämän jälkeen käsitellään kaivoksen sähköistykseen liittyviä suosituksia ja määräyksiä, sähköverkon selektiivisyyteen liittyvää teoriaa sekä lopuksi Oriveden kaivoksen sähköverkkoa - sen rakennetta ja selektiivisyyttä.

2 DRAGON MINING OY

Dragon Mining Oy on pörssiyhtiö, joka on perustettu kullan tuottajaksi ja on keskittänyt toimintaansa ensisijaisesti Ruotsiin ja Suomeen. Kaivostoimintaa yhtiö harjoittaa Oriveden lisäksi Huittisten Jokisivussa sekä Ruotsin Svartli-denissä. Rikastamoita yhtiöllä on Suomessa Vammalassa ja Ruotsissa Svartli-denissä. Yhtiöllä on myös eri puolilla Pohjois-Suomea useita projekteja, joissa pyritään löytämään uusia malmiesiintymiä. (Dragon Mining 2016.)

2.1 Oriveden kultakaivos

Kultakaivos sijaitsee 180 kilometriä Helsingistä pohjoiseen Oriveden kaupun-gissa Pirkanmaalla. Kaivostoiminta oli aluksi käynnissä vuosina 1994 – 2003, jonka jälkeen kaivos suljettiin ja tuotantoa jatkettiin taas vuonna 2007. Tänä ai-kana Oriveden kultakaivos on tuottanut yli 500 000 unssia kultarikastetta. Malmi rikastetaan Vammalan rikastamolla, joka sijaitsee noin 80 kilometriä Orivedestä lounaaseen. (Dragon Mining 2016.)

Orivesi kuuluu Tampereen proterotsooniseen liuskejaksoon. Kultalöydös on lieriömäisissä malmiesiintymissä, jotka sijaitsevat yli 50 hehtaarin kokoisella laajalla alueella ja malmiesiintymät vaihtelevat syvyydeltään kymmenistä satoi-hin metreihin. (Dragon Mining 2016.)

Kuvassa 1 on esitetty Oriveden maanalaisen kultakaivoksen sisäänkäynti, josta myös malmin kuljettaminen maan pinnalle ja kohti Vammalan rikastamoita tapah-tuu.



Kuva 1. Oriveden kultakaivoksen sisäänkäynti.

2.1.1 Historia

Jo vuonna 1940 kaivostoimintaa harjoitettiin nykyisellä kaivosalueella. Siihen aikaan louhittiin serisiittiä käytettäväksi keraamisissa eristeissä ja muissa kohteissa. Oriveden kultaesiintymä löydettiin vuonna 1982 Lohja Oy:n ja Helsingin yliopiston geologian laitoksen tutkimushankkeen seurauksena. (Dragon Mining 2016.)

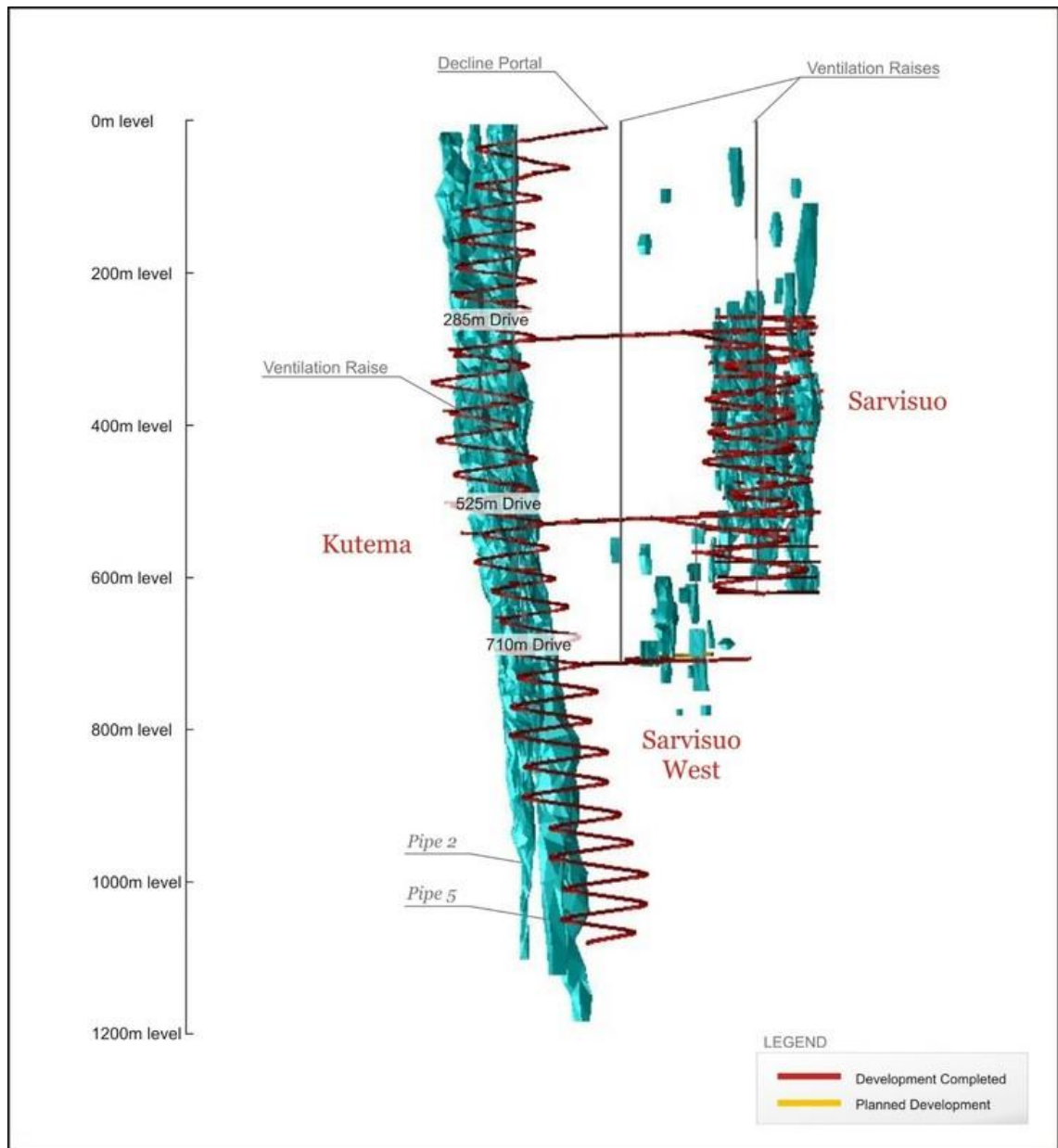
Outokumpu Oy osti oikeudet kultaesiintymään vuonna 1990 ja suoritti toteutettavuustutkimuksia seuraavan neljän vuoden ajan aikavälillä 1990–1993. Oriveden kultakaivos avattiin virallisesti vuonna 1994 ja Outokumpu jatkoi toimintaansa, kunnes myi kaivoksen Dragon Miningille vuonna 2003. (Dragon Mining 2016.)

2.1.2 Tuotanto

Vuosien 1994-2003 aikana Oriveden kultakaivos toimi Outokumpu Mining Oy:na, jonka aikana kaivos louhi Kuteman malmiesiintymästä 422 000 unssia kultaa. Kultapitoisuus oli 9.4 g/t ja kullan louhinta ylettyi 720 metrin syvyyteen. (Dragon Mining 2016.)

Kaivostoiminta jatkui vuonna 2007, jolloin Dragon Mining keskittyi vuonna 2002 löydetyin Sarvisuon malmiesiintymän louhimiseen. Sarvisuo sijaitsee 300 metrin päässä Kuteman malmiesiintymästä. (Dragon Mining 2016.)

Kuteman ja Sarvisuon malmiesiintymät ovat kapeita ja lieriömäisiä esiintymiä, joiden syvyys vaihtelee kymmenistä metreistä satoihin metreihin. Kaivoksen syvin osa on tällä hetkellä 1090 metrin syvyydessä Kuteman esiintymässä, mutta kultaesiintymän tiedetään jatkuvan ainakin 1175 metrin syvyyteen. Kuviossa 1 on esitetty Kuteman ja Sarvisuon malmiesiintymät. (Dragon Mining 2016.)



Kuvio 1. Kuteman ja Sarvisuon malmiesiintymät. (Dragon Mining 2016.)

2.1.3 Ympäristö

Oriveden kultakaivos toimi vuonna 2006 myönnetyllä ympäristöluvalla. Kaivos haki Länsi- ja Sisä-Suomen aluehallintovirastolta ympäristöluvalla jatkoa vuonna 2010, mutta tämä hakemus kuitenkin hylättiin joulukuussa 2015. (Dragon Mining 2016.)

Kaivos toteutti laajat tutkimukset läheisten järvien ja purojen kunnosta vuosina 2012-2013. Uusi vedenlaadun valvontajärjestelmä on asennettu pahimpien päästölähteiden yhteyteen. Nykyiseen valvontajärjestelmään kuuluu kuukausittainen näytteidenotto ja niiden analysointi kaivosalueella sekä sen ympäristössä. Vuoden 2014 aikana tehtiin myös laaja tutkimus lähialueiden vesistöjen maa-ainesten uraanipitoisuuksista. Tutkimuksessa todettiin, että tällä hetkellä uraanipitoisuuksista ei ole ympäristöllistä tai terveydellistä haittaa. (Dragon Mining 2016.)

2.2 Vammalan rikastamo

Orivedeltä louhittu malmi rikastetaan Vammalan rikastamossa, joka sijaitsee Sastamalassa noin 160 km Helsingistä luoteeseen. Rikastamo avattiin uudelleen vuonna 2007 palvelemaan alueen kaivosteollisuutta. Rikastamolla murskataan, jauhetaan ja vaahdotetaan vuosittain 300 000 tonnia malmia. Ympäristölupa myönnettiin rikastamolle kesäkuussa 2014. Taulukossa 1 on esitetty avainlukuja Vammalan rikastamolta vuosilta 2007–2015. (Dragon Mining 2016.)

Taulukko 1. Vammalan rikastamon avainlukuja. (Dragon Mining 2016.)

		2007*-2010	2011	2012	2013	2014	2015**	Yhteensä
Käsitelty malmi	Tonnia	677,296	222,373	290,675	305,967	302,169	213,41	2,011,890
Malmin laadun keskiarvo	g/t	5,56	3,86	3,1	3,74	4,64	4,74	4,514
Arvoaineen talteen jääminen rikastuksen jälkeen	%	84,79	83,6	76,8	78	81,66	85,94	82,12
Rikastamon kunnan tuotanto	Unssia	102,323	23,043	21,991	28,732	27,224	28,688	243,023

*6 kuukauden tuotanto vuodelta 2007

**Syyskuun loppuun 2015

3 KAIVOKSEN SÄHKÖISTYS

Sähkö on kaivoksen eniten käytetty energiamuoto. Kaivoksen sähkönkulutus vaihtelee 12-25 kWh/malmitonni, rikastamo kuluttaa 30-50 kWh/malmitonni ja muu kuulutus on noin 2-4 kWh/malmitonni. Kaivosten yleinen sähkönkulutusjakauma on rikastamo 74,4 %, kaivos 22,4 % ja muu (kunnossapito, häviöt, muut ja laboratorio) 3,2 %. (Paalumäki, Lappalainen & Hakanpää 2015, 279.)

3.1 Sähköverkko

Suurin sallittu jakelujännite kaivoksessa on yleensä 20 kV, ja muut käytössä olevat jännitteet ovat 6 kV ja 10 kV. Maanalaisessa kaivoksessa suurin sallittu käyttöjännite on 1000 V ja avolouhoksessa 3000 V. Kiinteiden laitteiden (esimerkiksi pumppaamot, murskaamot) käyttöjännitteenä sallitaan kuitenkin 6000 V. (ST 51.78, 2004, 1.; Hakanpää & Lappalainen 2011, 253.)

Maanalaisen kaivoksen jakeluverkko on pyrittävä rakentamaan siten, että henkilöturvallisuudelle tärkeiden laitteiden (kuten tuulettimien, pumppujen jne.) sähkönsyöttö tapahtuu kahta eri reittiä. Jakeluverkko tulee myös jakaa sopiviin osiin, jotka tarvittaessa voidaan tehdä jännitteettömiksi. Jakelumuuntaja on saatava jännitteettömäksi kyseisellä muuntamalla tai sen läheisyydestä samalta tasolta. (ST 51.78, 2004, 1-2.)

Muuntamot on sijoitettava maanalaisessa kaivoksessa vähintään 25 metrin etäisyydelle mm. kuiluista, ruokapaikoista, korjaamoista. Räjähdystarvikevarastoihin ja palavan aineen varastoihin on etäisyyden oltava vähintään 50 metriä. Muuntamot ja jakokeskukset on sijoitettava kallioon louhittuun syvennykseen tai muuhun suojaiseen paikkaan niin, että esim. liikenteen aiheuttama vahingoittumisen vaara on mahdollisimman vähäinen ja että huolto- ja käyttötoimenpiteet voidaan suorittaa turvallisesti. Sähkötilat on lisäksi varustettava kiinteällä valaistuksella. (ST 51.78, 2004, 2.)

3.2 Sähkölaitteet

Kaivoksissa käytettäviä sähkölaitteita ovat sähkön siirtoon ja jakeluun liittyvät laitteet (esimerkiksi voimajohdot, muuntajat ja kaapelit), sähköenergialla toimivat laitteet (esimerkiksi sähkömoottorit, valaisimet ja käsityökalut) sekä ohjaus-, valvonta-, viestintä- ja automaatiolaitteet. Kaivoksen olosuhteet ovat teollisuusympäristöistä kaikista raskaimpia, missä sähkölaitteita käytetään. (Hakanpää & Lappalainen 2011, 251.)

Kaivos (mukaan lukien rikastamo, korjaamot ja toimistorakennukset) muodostaa erillisen sähkölaitoksen tai sähkölaitteiston ja sillä tulee olla määrätyn pätevyyden omaava hoitaja. Sähkönkulutuspisteet voidaan jakaa kiinteisiin (pääpumput, kiinteä valaistus, kompressorit ja osa puhaltimista), harvoin siirrettäviin (paikallispuhaltimet, nousuporauslaitteet ja kairauskoneet) ja jatkuvasti siirrettäviin laitteisiin (uppopumput, työmaakeskukset ja työpaikkavalaistus). (Hakanpää & Lappalainen 2011, 251.)

Kaivokseen asennettavan sähkölaitteen on oltava rakenteeltaan mekaanisesti lujia ja korroosionkestävä kaivosolosuhteiden vuoksi. Sähkölaitteen automaattinen käynnistyminen sähkökatkoksen jälkeen on estettävä, jos siitä voi aiheutua vaaraa. Maanalaiseen kaivokseen asennettujen valaisimien on oltava myös mekaanisesti lujia ja ne on sijoitettava kolhuilta suojattuun paikkaan. (ST 51.78, 2004, 2.)

3.3 Johdot ja kaapelit

Maanalaiseen tunneliin tai kaivokseen saa asentaa yleensä vain märkään tilaan sallittuja johtolajeja (SFS 6000-5-52). Poikkeuksen voi tehdä, jos ei ole jännitteisten osien tahattoman koskemisen vaaraa standardien SFS 6000-41 ja SFS 6000-8-810 mukaisesti. Paloturvallisuuden kannalta on suositeltavaa käyttää HF-kaapeleita. Riippukierrejohtoja (esim. AMKA) ei saa kaivoksissa käyttää. (ST 51.78, 2004, 2; Paalumäki, Lappalainen & Hakanpää 2015, 283.)

Eristepäälysteisen johtimen saa asentaa sähkötilaan pinta-asennuksena asennusputkessa suojattuna. Valvomoissa ja muissa paikoissa, missä mekaanisen vaurioitumisen vaara on vähäinen, suositellaan käytettäväksi vähintään keskilujaa asennusputkea. (ST 51.78, 2004, 2.)

Avolouhoksissa on käytettävä lujalla mekaanisella tai sähkömekaanisella suojauksella varustettua kaapelia kuten esimerkiksi MCMK-, AMCMK- tai AXCMK-kaapelia. Johtojen ja kaapelien rakenteen ja sijainnin on oltava sellainen, että johto tai kaapeli kestää käyttöolosuhteissa kaiken siihen kohdistuvan ympäristöstä aiheutuvan rasituksen kuten kosteuden, korroosion, työkoneiden aiheuttamat kolhaisut, räjäytyksistä aiheutuvat paineaallot ja lentävät kivet. (ST 51.78, 2004, 2.)

3.4 Johtojen ja kaapeleiden mitoitus

Sähköjohtoja ja -kaapeleita laskemalla pyritään määrittämään johtimien poikkipinta, materiaali ja rakenne. Tavoitteena on sähköverkon mitoittaminen siten, että asetetut jännite yms. vaatimukset saavutetaan mahdollisimman taloudellisesti. Verkon rakenteiden oikeilla valinnoilla voidaan myös vaikuttaa sähkönsiirron luotettavuuteen. (Aura, L & Tonteri, A. 1993, 81.)

Johdon mitoituksessa noudatetaan standardia SFS 6000-52. Mitoituksessa on huomioitava kuormitusvirrat, johtopituudet, sallittu jännitteen alenema, ympäristön lämpötila ja muut olosuhteet sekä oikosulkukestoisuus. Sijoittaminen maanalaiseen kaivokseen ei tee kaapelista palonkestävää, vaan se on varustettava lisäksi ylikuormitus- ja oikosulkusuojilla (SFS 6000-4-43). Kupari- ja alumiinijohtimen pienimmän sallitun poikkipinnan on vähintään oltava standardin SFS 6000-5-52 taulukon 52-5 mukainen. Jos kaapeli sijoitetaan porausreikään, niin mitoituksessa ja sijoittelussa on noudatettava standardin SFS 6000-5-52 ohjeita. (ST 51.78, 2004, 2-3; Paalumäki, Lappalainen & Hakanpää 2015, 283.)

Olosuhteiden lämpötila tulee huomioida johtojen ja kaapeleiden mitoittamisessa. Ilman lämpötila maanalaisen kaivoksen lämmittämättömissä osissa on ta-

sainen, noin +7 °C 400 metrin syvyyteen asti. Syvemmälle mentäessä ilma lämpenee noin 1 °C:lla 100 metriä kohden. (ST 51.78, 2004, 3.)

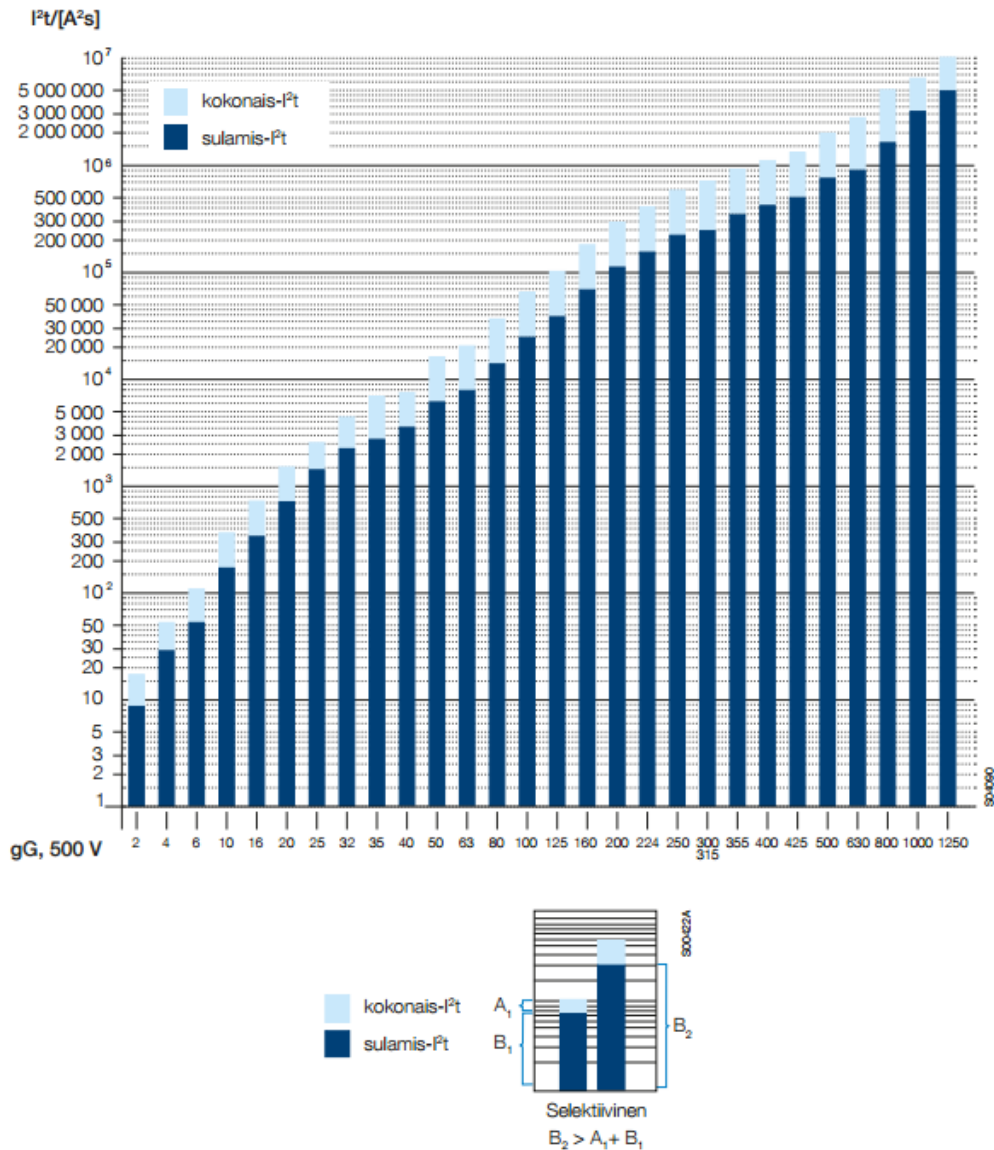
3.5 Sähköverkon suojaus

Sähköjakeluverkon yleisimmät vikatapaukset ovat oikosulku, maasulku, ylikuormitus, ylijännite, alijännite ja johtokatkos. Vika voi myös olla edellisten yhdistelmä. Vika voi pahimmillaan aiheuttaa vakavia tapaturmia, laitevaurioita tai tuotannon keskeytymisen. Tämän vuoksi jakeluverkkoon on asennettava suojarkeitä ja muita suojalaitteita, jotka havaitsevat syntyneen vian. (Hakanpää & Lappalainen 2011, 258.)

Suojalaitteiden ensisijaisena tehtävänä on torjua häiriöiden haittavaikutuksia. Vikatilanteissa ilmaantuvat ilmiöt tapahtuvat niin nopeasti, että suojalaitteiden on toimittava ja tehtävä tarvittavat säätö- ja ohjaustoiminnot ilman käyttöhenkilökunnan apua ja valvontaa. Mikäli häiriö on vähäinen eikä siitä synny välitöntä vaaraa tai turvallisuusriskiä, on mahdollista käyttää myös hälyttävää suojaustapaa. (Aura, L & Tonteri, A. 1993, 167.)

Suojauksen on toimittava selektiivisesti eli siten, että mahdollisimman pieni osa verkosta joutuu häiriötilanteessa pois käytöstä. Sen on toimittava myös niin nopeasti, että häiriön aiheuttamat vahingot jäävät mahdollisimman pieniksi. Lisäksi suojausten on suojattava koko järjestelmää aukottomasti, oltava yksinkertainen ja käyttövarma sekä se on voitava koestaa käytön aikana. (Aura, L & Tonteri, A. 1993, 167.)

ABB:n kahvasulakkeille on olemassa myös omat selektiivisyystaulukot. Taulukot löytyvät muun muassa ABB:n Internet-sivustolta. Kuten kuvion 2 pienempi taulukko osoittaa, niin selektiivisyys toimii kun seuraavan palkin tummansininen osa B_2 on isompi kuin edellisen palkin tummansininen ja vaaleansininen (A_1+B_1) -palkki yhteensä.



Kuvio 2. Kahvasulakkeiden selektiivisyys. (ABB 2016, 39.)

3.5.1 Keskijänniteverkon suojaus

Käytetty suojarеле on yhdistetty ylivirta- ja maasulkurele, joka suojaa oikosulussa ja kaapeleiden ylikuormituksessa. Rele voidaan asettaa antamaan laukaisuimpulssi sopivan ajan kuluttua (0,3 - 0,2 s) siitä, kun virran arvo ylittää ennakoon viritetyn arvon. Tämän lisäksi välitön laukaisu tapahtuu oikosulkuvirran suurilla arvoilla (noin 4-12 kertaa nimellisarvo). Maasulkuvalvonnassa releeseen liittyy erillinen kaapelivirtamuuntaja, jonka tehtävä on mitata vaihevirtojen summaa ja tehdä asetellun virtaepäsymmetrian tapahtuessa laukaisu. Johtoverkon peräkkäisten ylivirtareleiden aika-asettelut tehdään selektiivisiksi (kauempana

verkon syöttöpisteestä oleva katkaisija laukeaa ensin). Yksittäisen jakelumuntajan suojauksena käytetään varokkeita tai katkaisijaa, joiden täytyy toimia ylivirta- ja oikosulku tapauksissa. Muuntajan ylikuormituksessa (lämpeneminen) katkaisijan saa avautumaan lämpöanturin ja magneettisen laukaisulaitteen avulla. (Hakanpää & Lappalainen 2011, 259.)

3.5.2 Pienjänniteverkon suojaus

Pienjänniteverkon tärkein suojalaite on varoke. Pienille virroille ($\leq 63A$) valmistetaan pyöreitä tulppavarokkeita ja isommille virroille (630 A:iin asti) kahvavarokkeita. Varoke sijoitetaan pohja-alustaansa. Yleensä käytetään kytkinvarokkeita, joissa voi suorittaa varokkeen vaihdon turvallisesti jännitteettömänä. Varokkeiden tilalla voidaan käyttää myös johdonsuojakatkaisijoita tai suuremmilla kuormilla katkaisijoita ja suojareleitä, joilla kuitenkin on samanlainen katkaisufunktio kuin varokkeilla. Varoke toimii, kun johdossa sattuu oikosulku tai ylikuormitus ja toiminta-aika on kääntäen verrannollinen ylivirran suuruuteen (esitetään sulakkeen sulamiskäyränä). Pienjännitejakeluverkkoa, jossa käytetään yhteistä suoja- ja nollajohtoa, voidaan käyttää vain syötettäessä sähköä moottorikuormia syöttävään verkkoon. Jakeluverkossa, jossa on yksivaiheisia kuormia, valaistusta, pistorasioita jne., on verkko rakennettava viisijohdinjärjestelmällä, jossa suoja- ja nollajohtimet ovat syöttöpisteestä asti erillisiä. Kaapeleiden ylivirta- ja oikosulkusuojaus on tehtävä standardin SFS 6000-4-43 mukaisesti. (Paalumäki, Lappalainen & Hakanpää 2015, 287.)

3.6 Maadoitus

Maadoitus on välttämätön osa sähköasennuksia. Sähköverkon suojatoimenpiteet perustuvat luotettavaan ja kunnossa olevaan maadoitukseen. Maadoittamisella tarkoitetaan virtapiireihin kuulumattoman ja tavallisesti jännitteelle alttiin osan maadoittamista. Maadoituksella pyritään estämään vaarallisen kosketusjännitteen syntymistä kosketeltavaan kappaleeseen esimerkiksi eristysvian vuoksi. (Paalumäki, Lappalainen & Hakanpää 2015, 285.)

Kaivoksen sähkölaitteiden maadoitusten suorittamisessa on noudatettava soveltuvien osien standardin SFS 6001-9 ja SFS 6000-5-54 ohjeita. Kaivoksen maadoituselektrodit on asennettava sopivaan paikkaan maan pintakerrokseen. Kaivokseen on tehtävä tarvittaessa lisäelektrodeja, mikäli kallioperän johtavuus antaa siihen mahdollisuuden. Maadoituselektrodit täytyy sijoittaa yli 100 metrin päähän räjähdysvaarallisesta tilasta sekä sähkönalleilla panostettavasta räjäytyskentästä. Sähköverkon maadoitusjärjestelmää ei saa panostuslaitteilla maadoittaa. (ST 51.78, 2004, 4.)

Standardien SFS 6001-9, SFS 6000-5-54 ja SFS 6001-4-442 mukaan yhteistä maadoituselektrodia käytettäessä on eri järjestelmien maadoitettavat osat yhdistettävä elektrodiin siten, että maanpäälliseltä maadoituselektrodilta asennetaan vähintään kaksi runkomaadoitusjohtinta kaivoksen muuntoasemien läheisyyteen mieluummin rengasmaisesti. Johtimien katkeamisvaaran vuoksi ne on asennettava vähintään kahta eri reittiä kaivokseen. Runkomaadoitusjohtimet on asennettava niin, että niiden vahingoittumisvaara on vähäinen. Niitä ei saa sijoittaa samaan kaapelikanavaan yli 1000 voltin järjestelmän johtojen kanssa. (ST 51.78, 2004, 5.)

Muuntoasemalla on oltava oma maadoituskisko, johon yhdistetään suurjännitejärjestelmän suojamaadoitettavat osat, muuntajan PE-napa ja pääkeskuksen PEN-kisko, runkomaadoitusjohtin vähintään kahdella johtimella, mahdolliset lisämaadoituselektrodit, metalliputkistot, arinat yms. laajat metallirakenteet. Runkomaadoitusjohtimen poikkipinta on vähintään 50 mm² Cu. Alumiinijohtinta ei saa käyttää maadoitusjohtimena tai erillisenä suojajohtimena. Eristepäällysteisen suojajohtimen väri on kelta-vihreä, eikä sitä saa käyttää muihin tarkoituksiin. (ST 51.78, 2004, 5.; Hakanpää & Lappalainen 2011, 257.)

Maadoitusjohtimen sekä erillisen suojajohtimen mitoitus tehdään pienjänniteasennuksissa standardin SFS 6000-5-54 ja suurjänniteasennuksissa standardin SFS 6001-9 mukaisesti. Maadoitus- ja suojajohtin mitoitetaan laskemalla tai käyttämällä eri tapauksissa standardien valmiiksi antamia vähimmäispoikkipintoja. Kaapeleiden kanssa samalla hyllyllä tai samassa kaapelikanavassa oleva

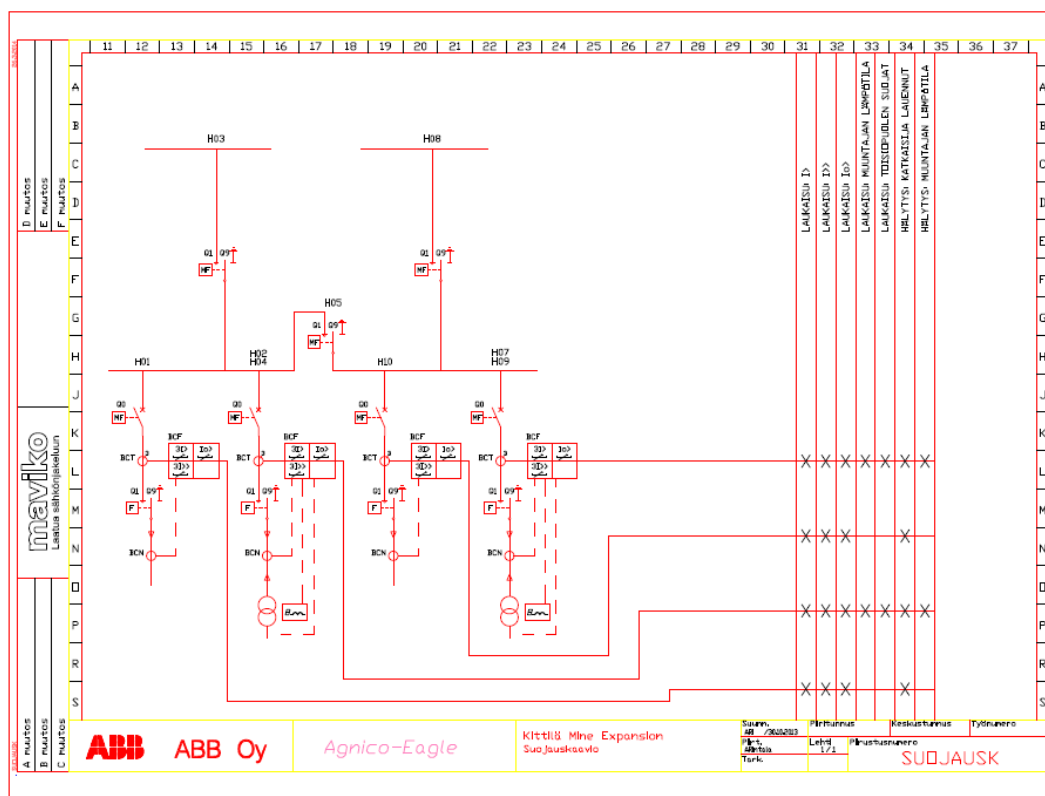
maadoitusjohdin ei ole palonkestävästi asennettu. (Hakanpää & Lappalainen 2011, 254-255.)

3.7 Piirustukset

Kaivoksen sähköverkoista on oltava ajan tasainen sähköjakeluverkon pääkaavio sekä puhelin- ja maadoitusverkon yleiskaaviot. Lisäksi on oltava karttapiirustukset, keskuksiin liittyvien laitteiden piirikaaviot sekä tarpeelliset piirikaaviot ja asennusohjeet kaivoksen kojeista ja laitteista. (ST 51.78, 2004, 5.)

Pienjänniteverkostokaaviosta on selvittävä nollausehtojen valvomisessa tarvittavat tiedot SFS 6000-514. (ST 51.78, 2004, 5.)

Kuviossa 3 on esitetty esimerkki Kittilän kultakaivoksen suojauskaaviosta.



Kuvio 3. Kittilän kultakaivoksen suojauskaavio. (Juotasniemi 2015, 60.)

4 SÄHKÖVERKKO ORIVEDEN KAIVOKSESSA

Oriveden kaivoksen sähköverkko on liitetty Elenia Oy:n 20 kV:n jakeluverkkoon. Elenia Oy on toteuttanut sähkön syötön kaivokselle RV63 –tyypin keskijänniteilmalinjalla.

4.1 Sähkönjakelun toteutus

Kaivoksella on oma 20 kV:n energian mittauksella varustettu asiakasmuuntamo, josta lähtö tehtaan omille muuntamoille on toteutettu. Energian mittauksella varustettu asiakasmuuntamo on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Kaivoksen 20 kV:n energian mittauksella varustettu asiakasmuuntamo.

Maan päällisiä muuntamoita syötetään PAS70- ja SP40 –tyyppien keskijännitteimalinjoilla. Maan pinnalla on kaksi pylväsmuuntamorakennetta, jotka syöttävät muun muassa kaivoksen hallintorakennuksia. Lisäksi maanpäällisessä sähköverkossa on kolme manuaalista kuormaerotinta, joilla saadaan erotettua tarvittaessa jokin osa sähköverkosta pois käytöstä.

Maanalainen keskijänniteverkko on toteutettu AHXAMK-W 3x70+35 –maakaapelilla. Maan alla on tällä hetkellä kahdeksan muuntamoita, jotka syöttävät kaivoksen eri tasoilla olevia jakokaappeja ja muita sähköverkon pj-osia. Muuntamot on rakennettu erillisissä syvennyksissä oleviin kontteihin. Muuntamokontit on varustettu ilmanvaihtokanavilla tai ilmalämpöpumpuilla, joiden avulla laitteistojen lämpenemistä saadaan hallittua. Kuvassa 3 on esitetty kulkukäytävän puolelta uusin muuntamo ja kuvassa 4 muuntamokontti syvennyksen sisällä. Kyseinen muuntamo on 1095 metrin syvyydessä maan alla.



Kuva 3. Kaivoksen muuntamo.



Kuva 4. Muuntamokontti syvennyksessä.

Jakokaapit syöttävät kaivoksen eri tasoilla sijaitsevia komponentteja kuten esimerkiksi tuulettimia, porapistorasioita ja pumppaamoita.

Jakokaapit ovat jakautuneet seuraavasti kaivoksessa:

Maanpäällisten muuntamoiden jakokaapit:

- M1: 4 kpl (näistä 1kpl maanalainen)
- M21: 1 kpl.

Maanalaisten muuntamoiden jakokaapit:

- M2: 4 kpl
- M3: 4 kpl
- M4: 7 kpl
- M5: 9 kpl
- M7: 4 kpl
- M8: 9 kpl
- M9: 1 kpl.

4.2 Kaivoksen sähkökaaviot

Opinnäytetyön yksi keskeisin vaihe oli kaivoksen sähkökaavioiden päivittäminen ja dokumentointi sähköiseen muotoon. Maadoitusverkon ja muuntopiirin 9 kaaviot laadittiin uusina dokumentteina ja loput päivitettiin olemassa olevista kuvista sähköisiksi.

Keskijännitekaavioon päivitettiin muun muassa keskijännitekaapeleiden poikkipintoja ja pituuksia, keskijännitesulakkeita, rele- ja muuntajatietoja. Muuntopiiri-kaavioihin päivitettiin varokepohjia, varokkeita, pienjännitekaapeleiden poikkipintoja ja pituuksia sekä syötettäviä sähkölaitteita syvyystasoiineen. Lisäksi kaavioihin päivitettiin pää- ja jakokeskuksien sähkötekniisiä tietoja niiltä osin, kuin ne olivat saatavilla. Sähkökaaviot on esitetty liitteessä 4.

Luettelo päivitetystä sähkökaavioista:

- Keskijänniteverkko
- Maadoitusverkko
- Muuntopiiri 1
- Muuntopiiri 2
- Muuntopiiri 3
- Muuntopiiri 4
- Muuntopiiri 5
- Muuntopiiri 7
- Muuntopiiri 8
- Muuntopiiri 9
- Muuntopiiri 21.

5 TUOTANTOPROSESSIEN SÄHKÖTEKNINEN LASKENTA

Yleensä sähköverkosta halutaan tietää oikosulkuvirtojen suuruudet eri osissa verkkoa, mutta tämän lisäksi verkon toiminnan ja sähköturvallisuuden kannalta verkon johtojen ja kaapeleiden jännitteenalenemien ja kuormitettavuuksien tunteminen on tärkeässä asemassa. Seuraavaksi esitellään eri laskentatapoja ja -kaavoja kyseisten suureiden laskemiseksi.

5.1 Oikosulkuvirtojen laskenta

Oikosulkuvirtalaskenta suoritetaan symmetristen komponenttien menetelmällä. Vikapaikkaan sijoitetaan ekvivalenttinen jännitelähde E_{ekv} , joka korvaa jokaisen vikapaikkaan vikavirtaa syöttävän lähteen. Verkon komponentit kuvataan niille määritetyillä myötä-, vasta- ja nollaimpedansseilla. (Welling 2010, 19.)

Oikosulkuvirtalaskennassa selvitetään normaalisti virtojen suuruus kolmi-, kaksi- ja yksivaiheisissa oikosuluissa. Taulukossa 1 on esitetty jännitekertoimen c -arvoja, joita käytetään oikosulkuvirtojen laskentayhtälöissä. (Welling 2010, 19.)

Taulukko 1. Standardin IEC 60909 mukainen jännitekerroin c . (ABB Oy 2000-7, 2.)

Nimellisjännite U_n	Suurinta oikosulkuvirtaa laskettaessa c_{max}	Pienintä oikosulkuvirtaa laskettaessa c_{min}
Pienjännite		
100 V – 1000 V	1,05	0,95
Keskijännite		
1 kV – 35 kV	1,10	1,00
Suurjännite		
> 35 kV	1,10	1,00

5.1.1 Kolmivaiheinen oikosulkuvirta

Kolmivaiheinen symmetrinen oikosulkuvirta I_{k3v} on oikosulkulaskennan perustapaus ja virraltaan normaalisti suurin vikavirta. Siinä esiintyy vain myötäimpedansseja eli kolmivaiheverkon komponenttien tavallisia oikosulkuimpedansseja. (Huotari & Partanen 1998, 20.)

$$I_{k3v} = \frac{E_{ekv}}{\sqrt{R_1^2 + X_1^2}} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_1} \quad (1)$$

missä

E_{ekv}	on	vikapaikkaan sijoitettava ekvivalenttinen jännitelähde
R_1	on	oikosulkupiirin myötäresistanssi
X_1	on	oikosulkupiirin myötäreaktanssi
c	on	jännitekerroin, jolla huomioidaan sähkömotoristen voimien ja verkon nimellisjännitteen ero
U_n	on	vikapaikan nimellisjännite
Z_1	on	oikosulkupiirin myötäimpedanssi.

Kolmivaiheinen oikosulkuvirta yleensä on verkon suurin oikosulkuvirta, mutta esimerkiksi pienjännitteisissä teollisuusverkoissa yksivaiheiset oikosulkuvirrat voivat olla jopa hieman kolmivaiheisia suurempia. (Welling 2010, 20.)

5.1.2 Kaksivaiheinen oikosulkuvirta

Esitetään kaksivaiheinen oikosulkuvirta kolmivaiheisen oikosulkuvirran I_{k3v} avulla. (Welling 2010, 20.)

$$I_{k2v} = \frac{\sqrt{3}}{1 + Z_2/Z_1} \times I_{k3v} \quad (2)$$

missä

Z_2	on	oikosulkupiirin vastaimpedanssi
Z_1	on	oikosulkupiirin myötäimpedanssi.

Ei-pyörivillä koneilla, kuten johdoilla, muuntajilla sekä epätahtimoottoreilla myötä- ja vastaimpedanssit ovat samansuuruiset ja yleensä pienjänniteverkkojen oikosulut tapahtuvatkin kaukana generaattorista, jolloin edellä mainitut impedanssit ovat yhtä suuret. Tämä vaatii kuitenkin seuraavan ehdon toteutumista. (Huotari & Partanen 1998, 11; Welling 2010, 21.)

$$X_k \geq 2X_{sv} \quad (3)$$

missä

X_k	on	muuntajan oikosulkureaktanssi
X_{sv}	on	syöttävän verkon reaktanssi.

Edellä mainituissa tapauksissa kaava (2) voidaan sieventää muotoon:

$$I_{k2v} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_{k3v} \quad (4)$$

Myötä- ja vastaimpedanssin ollessa erisuuria saadaan kaksivaiheinen oikosulkuvirta I_{k2v} laskettua:

$$I_{k2v} = \frac{cU_n}{|Z_1+Z_2|} \quad (5)$$

Usein etenkin lyhyillä ja vahvoilla kaapeliyhteyksillä kaksivaiheiset oikosulkuvirrat ovat pienjänniteteollisuusverkossa pienimpiä oikosulkuvirtoja. (Welling 2010, 21.)

5.1.3 Yksivaiheinen oikosulkuvirta

Maadoitetussa teollisuusverkossa yksivaiheinen oikosulku on joko vaihejohtimen yhteys nollajohtimeen tai maahan ja se voidaan laskea myötä- ja vastaimpedanssien ollessa yhtä suuria seuraavasti.

$$I_{k1v} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|Z_1+Z_2+Z_0|} = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|2Z_1+Z_0|} \quad (6)$$

Yksivaiheinen oikosulkuvirta voidaan esittää myös kolmivaiheisena oikosulkuvirran avulla.

$$I_{k1v} = \frac{3}{1+Z_2/Z_1+Z_0/Z_1} \times I_{k3v} \quad (7)$$

Vasta- ja myötäimpedanssien ollessa yhtä suuria sievenee kaava (7) muotoon:

$$I_{k1v} = \frac{3}{2+Z_0/Z_1} \times I_{k3v} \quad (8)$$

Edellä esitettyjä yksivaiheisen oikosulkuvirran kaavoja voidaan käyttää, kun ratkaistaan verkon alkuoikosulkuvirtoja käyttämällä piirin komponenttien alkuimpedanssiarvoja. Impedanssien laskemiseksi muun muassa sähköverkostosuositukseen SA 2:08 on taulukoitu jakelumuuntajien, johtojen sekä kaapeleiden resistansseja ja reaktansseja. Jakelumuuntajien resistanssit ja reaktanssit on esitetty liitteessä 1 sekä johtojen liitteessä 2. Arvot voidaan saada myös muuntaja- ja kaapelivalmistajilta sekä syöttävän verkon osalta verkonhaltijalta.

Kun lasketaan pienjännitekeskuksen oikosulkuvirtaa, niin muuntajan oikosulkuimpedanssi muodostaa selvästi suurimman osan koko piirin impedanssista. Dyn-kytkentäisillä muuntajilla nollaimpedanssi on suunnilleen myötäimpedanssin suuruinen ja tällöin yksivaiheiset oikosulkuvirrat muodostuvat yhtä suuriksi kuin kolmivaiheisetkin. (Huotari & Partanen 1998, 12.)

5.1.4 Alkuoikosulkuvirta

Alkuoikosulkuvirta on oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentin tehollisarvo oikosulun syntyhetkellä. Sen arvoa tarvitaan määrittäessä muita oikosulkusuureita, eikä sitä sellaisenaan käytetä suojauksen tai mitoituksen perusteena. Oikosulkupiirin alkuoikosulkuvirta saadaan laskettua aiemmin esiteltyjen oikosul-

kuvirtakaavojen sekä verkon komponenttien impedanssien avulla. (Huotari & Partanen 1998, 23.)

Taustaverkoille ilmoitetaan normaalisti joko jatkuvan tilan oikosulkuvirta I_{k3v} tai alkuoikosulkuvirta I_k'' , jotka oletetaan samansuuruisiksi mikäli tuotantolaitoksella tai sen läheisyydessä ei ole generaattoria. (Welling 2010, 23.)

5.1.5 Terminen oikosulkuvirta

Komponenttien terminen oikosulkukestoisuus mitoitetaan oikosulkuvirran aiheuttaman lämpenemän perusteella. Oikosulkuvirta ei ole vakio, joten sen vuoksi lasketaan oikosulkuvirran alkuarvon tehollisarvosta I_k'' yhden sekunnin pituista oikosulkua vastaava keskimääräinen tehollinen oikosulkuvirta I_{th} tai I_{1s} , joka aiheuttaa komponentissa saman lämpömäärän kuin todellinen oikosulkuvirta. (Huotari & Partanen 1998, 29.)

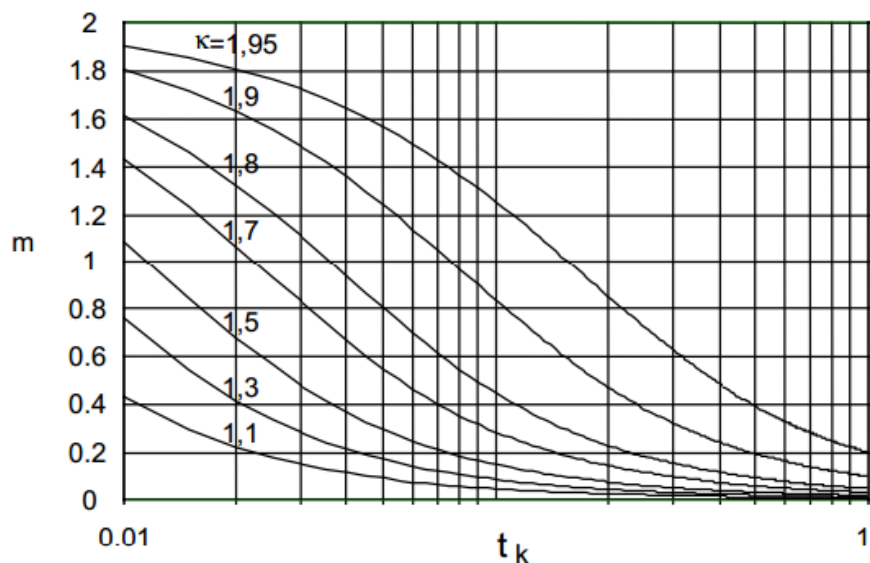
Terminen oikosulkuvirta voidaan laskea kaavalla:

$$I_{th} = I_k'' \times \sqrt{(m + n)t_k} \quad (9)$$

missä

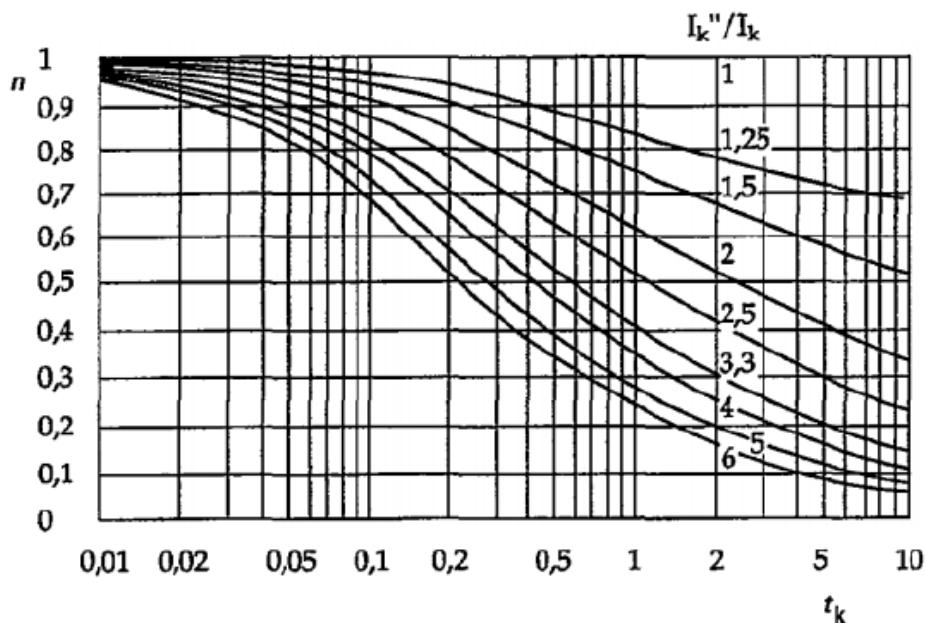
I_k''	on	kolmivaiheinen oikosulkuvirta
m	on	tasavirtatekijä
n	on	vaihtovirtatekijä
t_k	on	vian kesto aika.

Tasavirtakomponentin vaimeneminen on huomioitu tasavirtatekijällä m , jonka arvo on riippuvainen sysäyskertoimesta k ja oikosulun kestoajasta t_k . Tämä riippuvuus on esitetty kuviossa 3.



Kuvio 3. Tasavirtatekijän m riippuvuus oikosulkuvirran sysäyskertoimesta k ja oikosulun kestoajasta t_k (ABB Oy 2000-7, 8; VDE 0102.)

Vaihtovirtakomponentin vaimeneminen on huomioitu vaihtovirtatekijällä n . Se on riippuvainen oikosulkuvirran alkuarvon ja pysyvän tilan virta-arvon suhteesta I_k''/I_k sekä oikosulun kestoajasta t_k kuvion 4 mukaisesti.



Kuvio 4. Vaihtovirtatekijän n riippuvuus oikosulkuvirran alkuarvon ja pysyvän tilan suhteesta ja oikosulun kestoajasta. (Huotari & Partanen 1998, 30; VDE 0102.)

5.1.6 Jatkuvan tilan oikosulkuvirta

Jatkuvan tilan oikosulkuvirralla I_k tarkoitetaan oikosulkuvirtaa, jossa kaikki muutoksiin ovat vaimentuneet. Jatkuvan tilan oikosulkuvirralla ei voida kuitenkaan laskea tarkkaa arvoa alkuoikosulkuvirran tapaan, sillä se riippuu muun muassa verkon kytkentätilanteiden muutoksista oikosulun aikana, generaattorien ja muuntajien automaattisista jännitteensäädöistä sekä tahtikoneiden magnetointitavoista ja –säädöistä. Normaalisti jatkuvan tilan oikosulkuvirtaa ei ehditä saavuttaa, sillä verkon suojalaitteet ehtivät toimia ennen sitä. (Huotari & Partanen 1998, 25.)

5.2 Jännitteenalenema

Standardi SFS 6000 suosittelee suurimmaksi jännitteenalenemaksi 3 % valaistuskormalle ja muulle kuormalle 5 % liittymispisteestä sähkönkulutuslaitteelle. Taulukko suositelluista maksimijännitteenalenemista on esitetty liitteessä 3. Hetkellisesti suurempi jännitteenalenema sallitaan kuitenkin moottorin käynnistyessä ja niissä laitteissa, joiden kytkentävirta on kohtalaisen suuri. Kaapelin jännitteenalenema voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$U_h = \sqrt{3} \times I(R\cos\varphi + X\sin\varphi) \quad (10)$$

missä

U_h	on	jännitteenalenema
I	on	johtimen virta
R	on	johtimen vaihtovirtaresistanssi
X	on	johtimen vaihtovirtareaktanssi
φ	on	jännitteen ja virran välinen vaihesiirtokulma.

5.3 Johdon oikosulkusuojaus

Johtimen oikosulkusuojaja on sijoitettava yleensä kohtaan, jossa johtimen poikkipinta-ala pienenee tai ominaisuudet muuten muuttuvat. Suojan tulee pystyä katkaisemaan jännitesyöttö asennuspaikalla esiintyvään prospektiiviseen oi-

kosulkuvirtaan asti ja suojalaitteen mitoitusvirtakyky ei saa joitakin poikkeuksia lukuun ottamatta olla pienempi kuin suojalaitteen asennuspaikalla esiintyvä prospektiivinen oikosulkuvirta. Standardissa SFS 6000 on esitetty kaikki poikkeustapaukset. Oikosulkusuojan tulee toimia ennen kuin suojattavan johtimen lämpötila saavuttaa sille suurimman sallitun lämpötilan. (SFS 6000-4-43.)

5.4 Johdon ylikuormitussuojaus

Ylikuormitussuojat ovat suojalaitteita, joiden toiminta-aika on käänteisesti verrannollinen virtaan ja niiden katkaisukyky voi olla pienempi kuin verkon prospektiivinen oikosulkuvirta suojalaitteen asennuskohdassa. Kaapelin kuormitettavuutta laskettaessa on määritettävä maksimikuormitusvirta, jolla kaapelia voidaan kuormittaa ilman liian suurta lämpötilan nousua, josta voisi aiheutua vaurioita kaapelin eristykselle, jatkoille, liitoksille tai ympäristölle. PVC-eristeisillä kaapeleilla rajalämpötila on 70 °C ja PEX-eristeisillä 90 °C. Määritellyn kuormitettavuuden perusteella kaapelille valitaan ylikuormitussuoja, kuten gG-tyypin sulake, ylikuormituslaukaisulla varustettu katkaisija tai releohjattu suojalaite. (SFS 6000-4-43; Welling 2010, 35.)

Kuormitettavuuden määrittämisessä on huomioitava kaapelin lämpenemiseen ja asennusympäristöön liittyvät vaikutukset. Tällaisia ovat muun muassa kaapelin asennustapa, muiden kaapeleiden läheisyys ja asennuksen ympäristöolosuhteet, jotka huomioidaan erilaisilla korjauskertoimilla (tunnus C_i). Korjauskertoimet löytyvät taulukoituna esimerkiksi standardista SFS 6000. Jos asennusolosuhteet muuttuvat kaapelireitillä, tulee kuormitettavuus määrittää epäedullisemmän asennusolosuhteen mukaan. Kaapelin kuormitettavuus lasketaan seuraavalla kaavalla (SFS 6000-5-52.):

$$I_z = I_t \times C_i \times C_{i+1} \times C_{i+2} \dots \quad (11)$$

missä

I_z on johtimen todellinen kuormitettavuus

I_t	on	taulukoitu yhden virtapiirin kuormitettavuus standardinmukaisissa asennusolosuhteissa
C_i	on	asennusolosuhteet huomioiva korjauskerroin.

Ylikuormitukselta suojaavalle suojalaitteelle on seuraavat ehdot määritelty. (SFS 6000, 2012.)

$$I_B \leq I_n \leq I_Z \quad (12)$$

ja

$$I_2 \leq 1,45 \times I_Z \quad (13)$$

joissa

I_B	on	virtapiirin suunniteltu virta
I_n	on	suojalaitteen mitoitusvirta
I_Z	on	johtimen jatkuva kuormitettavuus
I_2	on	virta, jolla suojalaite toimii tehokkaasti.

Johdon tai kaapelin kaikki äärijohtimet on varustettava ylivirtasuojalla poikkeuksena standardissa SFS 6000 mainitut erikoistapaukset, kuten esimerkiksi kolmivaihemoottorin tapaus, jossa yksittäisen vaiheen poiskytketyminen voi aiheuttaa vaaraa. Tällöin on ryhdyttävä toisiin varotoimenpiteisiin ylikuormitussuojauksen järjestämiseksi. Muutoin ylivirtasuojan tulee katkaista virta siitä vaiheesta, missä ylivirtaa esiintyy. (SFS 6000, 2012.)

Ylikuormitussuoja on asennettava sellaiseen paikkaan, jossa johtimen kuormitettavuus muuttuu. Tällaisia paikkoja ovat esimerkiksi muutokset johtimen poikkipinnassa, johdinlajissa, asennustavassa tai muussa rakenteessa. Teollisuudessa ylikuormitussuojat on sijoitettu yleensä keskitetysti sähkökeskuksiin. (SFS 6000, 2012.)

5.5 Yhdistetty oikosulku- ja ylikuormitussuojaus

Samana suojalaitteen toteuttaessa suojauksen sekä ylikuormitukselta että oikosululta tulee sen täyttää molempien tapauksen erikseen standardin SFS 6000

lukujen 433 ja 434 mukaiset vaatimukset. Suojalaitteen katkaisukyvyyn on oltava vähintään yhtä suuri kuin sen asennuskohdassa esiintyvä prospektiivinen oikosulkuvirta, jolloin suojalaitteen katsotaan suojaavan kuormituspuolen johtimet myös oikosulkuvirralla. Yhdistetty suojaus voidaan toteuttaa ylikuormituslaukaisulla varustetulla katkaisijalla tai gG-typin sulakkeilla. Moottorilähdöissä suojaus on yleensä toteutettu aM-typin sulakkeilla. (SFS 6000, 2012.)

6 SÄHKÖVERKON SUOJAUKSEN TARKASTELU JA JATKOTOIMENPITEET

Kaivoksen sähköverkon tilanne näytti ensisilmäyksellä erittäin hyvältä. Rakentamisvaiheessa on huomioitu tarpeeksi suuret muuntajakoot ja johtojen poikkipinnat. Näiden suhteen kaivoksessa ei ole, eikä tule olemaan ongelmia. Myöskään johtopituudet eivät ole erityisen pitkiä, jotta ne aiheuttaisivat verkossa huomattavaa jännitteenalenemaa.

6.1 Oikosulkuvirtalaskelmat

Trimble NIS -verkkotietojärjestelmää apuna käyttäen laskettiin oikosulkuvirrat I_{k1} ja I_{k3} olemassa olevien tietojen puitteissa jokaisen muuntopiirin pj-keskukselta/pj-navoilta aina mahdollisimman kauimpaan sähkönkulutuspisteeseen asti. Tulokset on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Oikosulkuvirrat muuntopiirin kauimmaiselle kulutuspisteelle.

Muuntopiiri	Verkon oikosulkuvirran laskentaväli	Kaapeleiden yhteispituus	Oikosulkuvirta I_{k1}	Oikosulkuvirta I_{k3}
M1	Muuntajan PJ-navat - JK 3.2 lähtö 8	358 m	1426 A	6198 A
M2	Muuntamon PJ-keskus - JK 1.3 lähtö 4	280 m	2079 A	6195 A
M3	Muuntamon PJ-keskus - JK 1.4 lähtö 2	274 m	2519 A	7344 A
M4	Muuntamon PJ-keskus - JK 3.1 lähtö 3	270 m	2729 A	10 083 A
M5	Muuntamon PJ-keskus - JK 5.2 lähtö 3	686 m	1311 A	3938 A
M5	Muuntamon PJ-keskus - JK 2.2 lähtö 3	340 m	1962 A	6861 A
M7	Muuntamon PJ-keskus - JK 2.1 kisko	250 m	3733 A	24 989 A
M8	Muuntamon PJ-keskus - JK 6.1 lähtö 3	510 m	1561 A	6514 A
M9	Muuntamon PJ-keskus - JK 1.1 lähtö 3	175 m	3429 A	16 785 A
M21	Muuntajan PJ-navat - JK 1 lähtö 1	88 m	4438 A	11 686 A

*huom. laskettu I_k JK 2.2 lähdön 3 päähän (JK 2.1 - JK 2.2 välin toinen syöttökaapeli AMCMK 3x240+72 rikki).

Oikosulkuvirrat ovat kaivoksessa hyvät juuri suurten kaapeleiden poikkipintojen ansiosta, joten suojalaitteiden oikosulkusuojaus toimii hyvin eri puolella kaivosta.

6.2 Jännitteenalenemalaskelmat

Seuraavaksi laskettiin kaivoksen jännitteenalenemia olemassa olevien tietojen puitteissa jokaisen muuntopiirin pj-keskukselta/pj-navoilta aina mahdollisimman kauimpaan sähkönkulutuspiisteeseen asti. Kaikki tulokset on laskettu muuntajien nimelliskuormilla, joten tulee huomioida, että todelliset kokonaiskuormat ovat yleensä kuitenkin selvästi pienempiä. Tulokset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Jännitteenalenemat muuntopiirin kauimmaiselle kulutuspiisteelle.

Muuntopiiri	Verkon oikosulkuvirran laskentaväli	Kaapeleiden yhteispituus	Jännitteenalenema $U_h\%$
M1	Muuntajan PJ-navat - JK 3.2 lähtö 8	358 m	6,7 %
M2	Muuntamon PJ-keskus - JK 1.3 lähtö 4	280 m	2,3 %
M3	Muuntamon PJ-keskus - JK 1.4 lähtö 2	274 m	4,3 %
M4	Muuntamon PJ-keskus - JK 3.1 lähtö 3	270 m	2,9 %
M5	Muuntamon PJ-keskus - JK 5.2 lähtö 3	686 m	2,9 %
M7	Muuntamon PJ-keskus - JK 2.1 lähtö 4	350 m	5,3 %
M8	Muuntamon PJ-keskus - JK 6.1 lähtö 3	510 m	5,7 %
M9	Muuntamon PJ-keskus - JK 1.1 lähtö 3	175 m	4,1 %
M21	Muuntajan PJ-navat - JK 1 lähtö 1	88 m	2,9 %

Muuntopiirissä 1 jännitteenalenema muuntajan nimelliskuormalla (1000 kW) on JK 3.2 lähdön 8 päässä 6,7 %. Kuormitusta muuntajalla saisi olla noin 350 kW, jotta jännitteenalenema olisi 4,9 % (< 5 %).

Muuntopiirissä 7 jännitteenalenema muuntajan nimelliskuormalla (1000 kW) on JK 2.1 lähdön 4 päässä 5,9 %, kuormitusta muuntajalla saisi olla noin 850 kW, jotta jännitteenalenema olisi 4,9 % (< 5 %).

Muuntopiirissä 8 jännitteenalenema muuntajan nimelliskuormalla (1000 kW) on JK 6.1 lähdön 3 päässä 5,7 %, kuormitusta muuntajalla saisi olla noin 550 kW, jotta jännitteenalenema olisi 4,9 % (< 5 %).

Mikäli muuntajia pidetään korkeissa kuormissa ja jännitteenalenemat kasvavat, niin saadaan jännitetasoa nostettua muun muassa loistehon kompensoinnilla. Kompensointivaihtoehtoja pienjännitteellä on laitekohtainen kompensointi (esimerkiksi moottorit ja valaisimet) tai keskitetty kompensointi joko ryhmä- tai pää-

keskustasolla. Myös jännitteenkorottimen avulla voidaan nostaa jännitetasoa verkon heikoimmissa osissa.

6.3 Suojalaitteiden tarkastelut

Suojalaitteiden ylikuormitussuojatarkastelussa huomattiin joissakin kohdissa sähköverkkoa liian suuria sulakekokoja suhteessa aiemmin verkossa oleviin sulakkeisiin. Esimerkiksi monille alakeskuksien porapistorasioille oli asennettu 3x 400A sulakkeita pääkeskuslähdön sulakkeiden ollessa 3x 315A. Tällöin oikosulku porapistorasian kaapelissa saattaisi aiheuttaa pääkeskuslähdön sulakkeiden palamisen ja siten kaikki alakeskukset lähtöineen jäisivät ilman sähköä.

Taulukkoon 4 on kerätty kartoituksessa löydettyjä väärän kokoisia suojalaitteita. Taulukkoon on eritelty niiden sijainnit muuntopiireittäin ja jakokeskuslähdeittäin, nykyinen suojalaite, syyt miksi ne on suositeltava vaihdettavaksi sekä niihin asennettavaksi suositellut uudet suojalaitteet.

Taulukko 4. Vaihdettavaksi suositeltavat suojalaitteet.

Muuntopiiri	Keskus	Lähtö	Nykyisen suojalaitteen tyyppi	Syy	Suosittelun uuden suojalaitteen tyyppi
M1	JK 1	4 ja 6	gG 400A	Selektiivisyys	gG 315A
M1	JK 2	2	gG 400A	Selektiivisyys	gG 315A
M2	JK 1.2 (+235)	1 ja 2	gG 400A	Selektiivisyys	gG 315A
M3	JK 1.1 (+303)	1, 2, 4 ja 5	gG 250A	Selektiivisyys	gG 315A
M3	JK 1.4 (+354)	2	gG 400A	Selektiivisyys	gG 250A
M4	PJ-keskus (+380)	1,4 ja 11	gG 400A	Selektiivisyys	gG 315A
M4	JK 1.1 (+380)	2 ja 5	gG 400A	Selektiivisyys	gG 315A
M4	JK 1.2 (+510)	3	gG 400A	Selektiivisyys	gG 315A
M4	JK 1.3 (+540)	4	gG 400A	Selektiivisyys	gG 315A
M4	JK 2 (+436)	2	gG 400A	Selektiivisyys	gG 315A
M4	JK 2 (+436)	5	gG 400A	Selektiivisyys	gG 125A
M5	JK 3.1 (+645)	5 ja 6	gG 400A	Selektiivisyys	gG 315A
M8	JK 4.1 (+1020)	1 ja 8	gG 400A	Selektiivisyys	gG 315A
M8	JK 2.1 (+890)	3, 4, 5 ja 6	gG 400A	Selektiivisyys	gG 315A
M8	JK 5.1 (+1060)	1 ja 2	gG 400A	Selektiivisyys	gG 315A
M21	JK 1	3	gG 50A	Selektiivisyys	gG 35A

7 POHDINTA

Opinnäytetyössä tarkasteltiin Oriveden kultakaivoksen pienjännitepuolen sähköverkon selektiivisyyttä oikosulkuvirtojen, jännitteenalenumien ja suojalaitteiden osalta sekä päivitettiin kaivoksen sähkökaaviot. Sähkökaaviot ovat olleet kaivoksella suurimmalta osin kuulakärkikynäversioita, joten sähköiseksi päivittäminen oli varmasti tarpeen. Nyt kaivoksella on helppo tulevaisuudessa tehdä kaavioihin muutoksia CAD-ohjelman avulla.

Alun perin oli tarkoitus, että keskijännitepuoli otettaisiin mukaan tarkasteluun. Tulimme kuitenkin kaivoksen sähköosaston työntekijöiden kanssa siihen lopputulokseen, että pienjännitepuolen tarkastelu riittää. Mielestäni työmäärään nähden tämä toteutettu kokonaisuus oli sopiva. Keskijännitepuolen sähkökaavio päivitettiin kuitenkin ajan tasalle ja sähköiseksi.

Työtä tehdessä, tällä hetkellä noin neljä vuotta sähköverkkoalalla olleena, oppi paljon kaivoksen sähköverkkoihin liittyvistä asioista ja sai uusia ammatillisia näkökulmia. Olin aikaisemmin vierailut muutaman kerran kaivoksessa, mutta näin tiiviisti en ole aikaisemmin päässyt maanalaiseen sähköverkkoon tutustumaan. Lisäksi opin käyttämään paremmin Trimble NIS -verkkotietojärjestelmää.

Opinnäytetyö oli todella pitkä, mielenkiintoinen ja antoisa prosessi kaikkine haasteineen, mutta lopputulokseen olen erittäin tyytyväinen.

LÄHTEET

ABB Oy 2000. ABB TTT-Käsikirja 2000-7.

ABB Oy 2016. Pienjännitekojeet, esite OF1FI 11-09, Viitattu 22.8.2016.
<https://library.e.abb.com/public/6bac18b236fde340c1257927002efd8c/1SCC317002C1801.pdf>

Aura, L. & Tonteri, A.J. 1993. Sähkölaitostekniikka. Porvoo: WSOY.

Dragon Mining Oy 2016. Viitattu 14.5.2016. <http://www.dragonmining.com/>

Etto, J. 1998. Prosessisähköistyksen kunnossapito, osa 2. Kunnossapitokoulu, Kunnossapito –lehden erikoisliite N:o 48.

Hakanpää, A. & Lappalainen, P. 2011. Kaivos- ja louhintatekniikka. 2. tarkistettu painos. Helsinki: Opetushallitus

Huotari K. & Partanen J. 1998. Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.

Juotasniemi, J. 2015. Kaivoksen keskijänniteverkon relesuojausten selektiivisyyden tarkastelu ja kehitysesitykset. Lapin ammattikorkeakoulu. Sähkötekniikka. Opinnäytetyö.

Paalumäki T., Lappalainen P. & Hakanpää A. 2015. Kaivos- ja louhintatekniikka. 3. uudistettu painos. Helsinki: Opetushallitus

Roivainen, H. 2014. Teollisuuslaitoksen sähköverkon oikosulkulaskelmat. Lapin ammattikorkeakoulu. Sähkövoimatekniikka. Opinnäytetyö.

SFS 6000 2012: Pienjännitesähköasennukset. Helsinki: SFS. Hakupäivä 15.7.2016.

ST 51.78. 2004. Sähkölaitteet ja -asennukset kaivoksissa sekä huolto- ja työtunneleissa. Kustannuspaikka: Sähkötieto ry

VDE 0102/11.75. Leitsätze für die Berechnung der Kurzschlußströme: Teil 2. Drehstromanlagen mit Nennspannungen bis 1000 V.

Welling, J. 2010. Elintarviketehtaan sähköverkon selvitys ja kehittämissuunnitelma. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Diplomityö.

LIITTEET

- Liite 1. Muuntajien resistanssi- ja reaktanssiarvot
- Liite 2. Johtojen resistanssit ja reaktanssit
- Liite 3. Suositellut jännitteenalenemat
- Liite 4. Kaivoksen sähköjakelun kaaviot (luottamuksellinen)

Muuntajien resistanssi- ja reaktanssiarvot (Verkostusuositus SA2:08)

IEHO	R_m		X_m		R_{m0}	X_{m0}
	kVA	%	Ω	%	Ω	Ω
30	3,0	0,160	2,6	0,14	0,070	0,0093
50	2,6	0,083	3,0	0,097	0,087	0,0980
100	2,0	0,031	3,5	0,056	0,033	0,0570
200	1,4	0,011	3,7	0,030	0,012	0,0310
315	1,3	0,0065	4,2	0,021	0,007	0,0220
500	1,1	0,0037	4,4	0,014	0,0041	0,0140
800	0,89	0,0018	4,6	0,0092	0,0021	0,0096
1000	0,92	0,0015	4,9	0,0079	0,0018	0,0083
1250	0,84	0,0011	5,9	0,0076	0,0014	0,0081
1600	0,79	0,0008	5,9	0,0060	0,0011	0,0064
2000	0,73	0,0006	6,0	0,0048	0,0008	0,0052

Johtojen resistanssit ja reaktanssit (Verkostosuositus SA2:08)

JOHTO	R_r (+40 °C) Ω/km	R_o (+ 40 °C) Ω/km	X_r Ω/km	X_{r0} Ω/km	X_o Ω/km	PITUUSKERROIN		
						Perusjohto AMKA 3x35+50	Perusjohto AMKA 3x70+95	Perusjohto AXMK 4x185 S
Avojohto								
2x21/4 Al/Fe	1,470	1,470	0,400	0,000	0,400	1,782	3,411	7,551
4x21/4 Al/Fe	1,470	1,470	0,378	0,567	0,396	1,808	3,460	7,657
4x34/6 Al/Fe	0,917	0,917	0,359	0,551	0,377	1,183	2,264	5,012
4x54/9 Al/Fe	0,580	0,580	0,340	0,525	0,358	0,820	1,569	3,473
4x85/14 Al/Fe	0,365	0,365	0,321	0,503	0,337	0,606	1,160	2,566
AMKA								
1x16+25	2,064	1,491	0,090	0,000	0,074	2,101	4,025	8,898
1x25+35	1,297	1,065	0,090	0,000	0,074	1,399	2,677	5,946
3x16+25	2,064	1,491	0,108	0,055	0,074	2,101	4,021	8,902
3x25+35	1,297	1,065	0,106	0,045	0,073	1,404	2,679	5,950
3x35+50	0,938	0,778	0,104	0,045	0,073	1,000	1,914	4,237
3x35+70	0,938	0,533	0,103	0,045	0,072	0,875	1,674	3,706
3x50+70	0,693	0,533	0,101	0,045	0,071	0,730	1,397	3,095
3x70+95	0,479	0,392	0,097	0,045	0,070	0,523	1,000	2,214
3x120+95	0,273	0,392	0,092	0,030	0,078	0,404	0,772	1,707
AMCMK								
3x16+10 Cu	2,064	2,060	0,082	0,082	-	2,436	4,663	10,32
3x25+10 Cu	1,298	2,060	0,082	0,082	-	1,999	3,803	8,419
3x25+16 Cu	1,298	1,240	0,082	0,082	-	1,503	2,875	6,365
3x35+10 Cu	0,939	2,060	0,082	0,082	-	1,774	3,395	7,514
3x35+16 Cu	0,939	1,240	0,082	0,082	-	1,459	2,455	5,400
3x50+16 Cu	0,694	1,240	0,078	0,078	-	1,144	2,189	4,846
3x70+21 Cu	0,480	0,936	0,075	0,075	-	0,839	1,605	3,551
3x95+29 Cu	0,348	0,691	0,075	0,075	-	0,616	1,179	2,605
3x120+41 Cu	0,276	0,478	0,072	0,072	-	0,449	0,859	1,897
3x150+41 Cu	0,226	0,478	0,072	0,072	-	0,418	0,801	1,767
3x185+57 Cu	0,181	0,345	0,072	0,072	-	0,315	0,603	1,330
3x240+72 Cu	0,140	0,275	0,072	0,072	-	0,248	0,474	1,050
3x300+88 Cu	0,114	0,225	0,069	0,069	-	0,204	0,390	0,864
AURA								
3x50+29 Cu	0,694	0,691	0,078	0,078	-	0,820	1,568	3,472
3x95+57 Cu	0,348	0,345	0,075	0,075	-	0,414	0,795	1,750
3x150+88 Cu	0,226	0,225	0,072	0,072	-	0,268	0,513	1,137
APAKM								
3x35+35	0,941	0,941	0,072	0,072	-	1,114	2,131	4,717
3x70+70	0,479	0,479	0,066	0,066	-	0,568	1,086	2,405
3x120+120	0,278	0,278	0,062	0,062	-	0,331	0,633	1,401
3x185+185	0,183	0,183	0,060	0,060	-	0,214	0,420	0,929
AXCMK								
3x16+10	2,064	2,060	0,078	0,078	-	2,436	4,663	10,32
3x25+10	1,298	2,060	0,076	0,076	-	1,999	3,803	8,419
3x35+10	0,939	2,060	0,075	0,075	-	1,774	3,394	7,514
3x70+21	0,480	0,936	0,072	0,072	-	0,838	1,694	3,551

Johtojen resistanssit ja reaktanssit (Verkostosuositus SA2:08)

JOHTO	R _v (+40 °C) Ω/km	R ₀ (+ 40 °C) Ω/km	X _v Ω/km	X _{v0} Ω/km	X ₀ Ω/km	PITUUSKERROIN		
						Perusjohto AMKA 3x35+50	Perusjohto AMKA 3x70+95	Perusjohto AXMK 4x185 S
3x120+41	0,276	0,478	0,069	0,069	0,001	0,448	0,858	1,899
3x185+57	0,181	0,345	0,069	0,069	0,001	0,314	0,602	1,332
3x300+88	0,114	0,225	0,069	0,069	0,001	0,204	0,390	0,864
AXMK								
4x16 S	2,064	2,064	0,091	0,091	0,091	2,970	4,675	10,35
4x25 S	1,298	1,298	0,088	0,088	0,088	1,537	2,942	6,514
4x35 S	0,939	0,939	0,088	0,088	0,088	1,115	2,134	4,725
4x50 S	0,694	0,694	0,087	0,087	0,087	0,826	1,581	3,499
4x70 S	0,480	0,480	0,085	0,085	0,085	0,576	1,103	2,442
4x95 S	0,348	0,348	0,084	0,084	0,084	0,428	0,819	1,813
4x120 S	0,276	0,276	0,082	0,082	0,082	0,342	0,654	1,447
4x150 S	0,226	0,226	0,082	0,082	0,082	0,278	0,533	1,181
4x185 S	0,181	0,181	0,082	0,082	0,082	0,236	0,452	1,000
4x240 S	0,140	0,140	0,079	0,079	0,079	0,191	0,366	0,810
4x300 S	0,114	0,114	0,079	0,079	0,079	0,166	0,318	0,703
MCMK								
3x2,5+2,5	7,992	7,992	0,115	0,115	-	8,999	17,221	-
3x6+6	3,322	3,322	0,115	0,115	-	3,867	7,401	16,381
3x10+10	1,974	1,974	0,110	0,110	-	2,307	4,415	9,774
3x16+16	1,240	1,240	0,088	0,088	-	1,467	2,808	6,216
3x25+16	0,786	1,240	0,082	0,082	-	1,198	2,293	5,077
3x35+16	0,566	1,240	0,077	0,077	-	1,069	2,046	4,531
3x50+25	0,419	0,786	0,076	0,076	-	0,719	1,375	3,045
3x70+35	0,291	0,566	0,075	0,075	-	0,509	0,975	2,158
3x95+50	0,211	0,419	0,074	0,074	-	0,397	0,759	1,681
3x120+70	0,168	0,291	0,074	0,074	-	0,275	0,527	1,167
3x150+70	0,138	0,291	0,073	0,073	-	0,255	0,488	1,080
3x185+95	0,112	0,211	0,072	0,072	-	0,195	0,373	0,827
3x240+120	0,087	0,168	0,072	0,072	-	0,157	0,301	0,666
MMJ								
2x6	3,322	3,322	-	-	-	3,867	7,415	16,381
2x10	1,974	1,974	-	-	-	2,307	4,415	9,774
4x6	3,322	3,322	0,115	0,115	0,115	3,867	7,401	16,381
4x10	1,974	1,974	0,110	0,110	0,110	2,307	4,415	9,774
4x16	1,240	1,240	0,088	0,088	0,088	1,467	2,808	6,216
PLKVJ								
3x10+10	1,950	1,950	0,110	0,110	0,110	2,213	4,424	9,784
3x16+16	1,230	1,230	0,105	0,105	0,105	1,464	2,803	6,184
3x25+16	0,787	1,230	0,094	0,094	0,094	1,200	2,297	5,074
3x35+16	0,568	1,230	0,094	0,094	0,094	1,071	2,050	4,528
3x50+25	0,420	0,787	0,088	0,088	0,088	0,721	1,380	3,055
3x70+35	0,292	0,568	0,088	0,088	0,088	0,519	0,993	2,199
3x95+50	0,212	0,420	0,085	0,085	0,085	0,387	0,741	1,639
3x120+70	0,169	0,292	0,085	0,085	0,085	0,291	0,556	1,231

Suositellut jännitteenalennemat (SFS 6000, 2012)

Asennuksen tyyppi	Valaistus %	Muu käyttö %
A – Pienjänniteasennus, joka on syötetty suoraan yleisestä jakeluverkosta	3	5
B – Pienjänniteasennus, joka on syötetty yksityisestä teholahteesta*	6	8
<p>* Suositellaan, että niin pitkälle kuin mahdollista ryhmäjohtojen jännitteenalennema ei ylitä asennustyyppille A annettuja arvoja.</p> <p>Kun asennuksen pääjohdot ovat pitempiä kuin 100 m, näitä jännitteenalennemia voidaan kasvattaa 0,005 % johdon 100 m ylittävän pituuden metriä kohti. Ilman tätä lisäystä se ei saa olla suurempi kuin 0,5 %.</p> <p>Jännitteenalennema määritellään sähkölaitteen tehontarpeen mukaan käyttäen soveltuvin osin tasoituskertoimia, tai käyttäen piirien suunniteltuja virtoja.</p>		