

Anne Hyvärinen

KLORIDI KEMIN KAIVOSALUEEN VESISSÄ

Opinnäytetyö

Insinööri (YAMK)

Ympäristötekniikan koulutusohjelma (YAMK)

2021



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (YAMK)
Tekijä	Anne Hyvärinen
Työn nimi	Kloridi Kemin kaivosalueen vesissä
Toimeksiantaja	Outokumpu Chrome Oy, Kemin Kaivos
Vuosi	2021
Sivut	52 sivua, liitteitä 12 sivua
Työn ohjaaja(t)	Arto Sormunen ja Samuli Nikula

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön tutkimuksen perusteena oli Kemin Kaivoksen alueen vesissä esiintyvien kloridipitoisuuksien ja kloridien lähteen tunnistaminen, koska kloridin tiedetään aiheuttavan kohonneena pitoisuuksina ympäristössä haittavaikutuksia. Kemin Kaivoksen kloridilähteen oletettiin sijaitsevan maanalaisen kaivoksen kallioperässä, mutta lähteen vahvistamiseksi tarvittiin tutkimustuloksia. Tutkimuksen tavoitteena oli kartoittaa Kemin kaivoksen alueella liikkuvien vesien kloridipitoisuuksia ja selvittää mahdollisuus käyttää YSI Pro DSS -kenttämittaria vesien kloridipitoisuuksien tunnistamisessa. Eri kohteista analysoitujen vesien kloridipitoisuuksien perusteella oli mahdollista määrittää lähde Kemin Kaivoksella vesissä esiintyvälle kloridille.

Tutkimuksessa menetelmänä käytettiin sähkönjohtavuuden mittausta. Vesien johtokykyarvoja mitattiin YSI Pro DSS -kenttämittarilla kaikissa tutkimuksessa tarkastelluissa kohteissa. Tarkasteltavista kohteista otettiin kenttämittausten yhteydessä vesinäytteitä, joista laboratorioissa analysoitiin kloridipitoisuus sekä muita suolapitoisuuksia. Tutkimuksessa tarkasteltujen vesien kohteina olivat Kemin Kaivoksen maanalaisen kaivoksen kairareikiä, maanalaisen kaivoksen pääpumppaamot sekä maanpäällisen alueen vesien kierron tärkeimpiä tarkkailupisteistä.

Opinnäytetyön tutkimuksen tuloksena YSI Pro DSS – kenttämittarilla toteutetun johtokykymittauksen todettiin soveltuvan kloridipitoisten vesien ilmentämiseen ja kloridipitoisuustason määrittämiseen Kemin Kaivoksella ($\rho=0,998$, $r^2=0,996$). Kloridipitoisten vesien kartoituksen tuloksena voitiin määrittää kloridipitoisten vesien lähteen olevan maanalaisen kaivoksen kallioperä ja kallioperän vesitaskut. Vesitaskuista purkautuvat vedet olivat pitoisuuksiltaan runsaasti kloridia sisältäviä ns. Brine-vesiä. Kallioperästä kloridipitoiset vedet purkautuvat mm. kairareikien kautta maanalaisen kaivoksen tuotantotasolle, joista ne pumpataan tuotantotasojen pumppaamojen kautta taso kerrallaan kohti maanpäällistä rikastushiekka- sekä vesienselkeytysaltaita päätyen sisäisenä kiertona takaisin prosessivedeksi tai kaivosalueelta purettavana vetenä läheiseen Iso-Ruonaojaan ja edelleen kohti Perämerta. Kloridilähteen ja kloridipitoisuuksien tutkimuksella tuotettiin pohjatietoja ympäristön haittavaikutusten arvioinnille sekä prosessien materiaalivalinnoille, huomioiden kloridien korroosiovaikutukset.

Asiasanat: johtokyky, kloridi, vesi

Degree	Master of Engineering
Author	Anne Hyvärinen
Thesis title	Chloride in the waters of the Kemi mining area
Commissioned by	Outokumpu Chrome Oy, Kemi Mine
Time	2021
Pages	52 pages, 12 pages of appendices
Supervisor	Arto Sormunen ja Samuli Nikula

ABSTRACT

The starting point of the study was the identification of the chloride source in the Kemi Mine and the chloride concentrations in the waters. That was important because chloride is known to cause adverse effects in the environment in elevated concentrations. The chloride source was assumed to be located in the bedrock of the underground mine, but research results were needed to confirm the source. The aim of this study was to find out the chloride concentrations of water moving in the area of the Kemi Mine and to find out the possibility of using the YSI Pro DSS field meter to identify the chloride concentrations in the waters. Based on the chloride concentrations which were analysed from different observation points, the source of chloride could be determined.

The method used in the empirical part of the study was the measurement of conductivity. Water conductivity values were measured with a YSI Pro DSS field meter at all observation points. Samples were taken from waters in the observation points at the same time when conductivity was measured. Chloride concentration and other salt concentrations of samples were analysed in the laboratory. The waters examined in the study were from the boreholes of the Kemi Mine's underground mine, and the above ground's most important observation points in the water cycle.

As a result of the study, the conductivity measurement with a YSI Pro DSS field meter was found to be suitable for the expression of chloride containing waters and the determination of the chloride concentration level at the Kemi Mine ($\rho = 0.998$, $r^2 = 0.996$). Also the source of chloride was determined. The source was located in the bedrock of the underground mine and the water pockets of the bedrock. The waters that discharged from the water pockets through drilling holes were so called chloride rich Brine waters. Chloride rich waters erupt from the bedrock for example through boreholes to the production levels of the underground mine where waters are pumped through the production level's pumping stations towards the above ground tailings and water clarification basins. These waters are pumped again to the concentration process or discharged outside Kemi Mine to Iso-Ruonaoja and again to bay of Bothnia. This study provided some basic information for the assessment of adverse effects on the environment and for the choice of materials for the processes, taking into account the corrosion effects of chlorides.

Keywords: chloride, conductivity, water

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	KLORIDI	8
2.1	Veden kloridipitoisuuksien vertailu ja raja-arvoja	8
2.2	Kloridin kuormitustekijät ja haittavaikutukset	9
2.2.1	Lyhyt ja pitkäaikaiset vaikutukset.....	10
2.2.2	Korroosiovaikutukset.....	12
2.3	Suolaiset pohjavedet suomessa	13
2.4	Vesien kloridipitoisuudet Kemin Kaivoksella	14
3	KEMIN KAIVOS	16
3.1	Vesien kulku ja hallinta maanalaisessa kaivoksessa	17
3.1.1	Vesien kulku ja hallinta maanpäällisellä kaivosalueella	18
3.1.2	Ympäristölupa ja velvoitetarkkailu.....	20
4	AINEISTO JA MENETELMÄT	22
4.1	Tutkimuksen suunnitelma ja näytepaikat	22
4.1.1	Kenttämittari YSI Pro DSS	22
4.1.2	Laboratorioanalyysit.....	23
4.1.3	Kairareiät	24
4.1.4	Maanalaisen kaivoksen pumppaamot.....	26
4.1.5	Maanpäällinen alue.....	27
4.2	Johtokykyarvon ja kloridipitoisuuden korrelaatio.....	28
5	TULOKSET.....	30
5.1	Tutkimuksen esiselvitykset	30
5.2	Johtokykyarvojen ja kloridipitoisuuksien korrelaatiot.....	32
5.3	Johtokykymittausten tulokset YSI Pro DSS -kenttämittarilla	34
5.4	Kairareikien vesien mittaus- ja analyysitulokset.....	36
5.5	Maanalaisen kaivoksen pumppaamojen vesien mittaus- ja analyysitulokset.....	38
5.6	Maanpäällisen alueen vesien mittaus- ja analyysitulokset.....	40

6	TULOCSIEN TARKASTELU	42
6.1	Kloridipitoisuus ja johtokyky	42
6.2	Maanalaisen kaivoksen kairareiät sekä pumppaamot	42
6.3	Maanpäällinen alue.....	43
6.4	Korroosiovaikutukset	46
7	YHTEENVETO JA KEHITYSKOhteITA	47
	LÄHTEET	49
	KUVALUETTELO	51

LIITTEET

Liite 1. YSI Pro DSS – kenttämittausten johtokykytulokset

Liite 2. Kairareikien profiilit

Liite 3. Maanalaisen kaivoksen pumppaamoja

Liite 4. Maanpäällisen alueen tarkkailupisteet

Liite 5. Kloridiliuosten korroosiovaikutuksia teräksessä

Liite 6. YSI Pro DSS johtokykyymittausten keskiarvot ja laboratorioanalyysien tulokset tarkastelukohteittain

Liite 7. Velvoitetarkkailun pisteet

Liite 8. Litorinameren rantaviivan Suomessa ja Ruotsissa karttakuvassa

1 JOHDANTO

Kemin kerrosintruusion alueella sijaitsevan Kemin Kaivoksen kallioperän vesissä esiintyy kloridia. Kallioperässä esiintyvät vedet ovat oletettavasti suolaisia pohjavesiä, joiden esiintymiä on ollut tiedossa Fennoskandian alueella, muinaisen Litorinanmeren rantaviivan läheisyydessä, vuosisadan vaihteesta alkaen. (Nurmi 1987; Alapieti 2005.) Kemin Kaivoksen vesien kloridipitoisuuden voidaan olettaa lisääntyvän edettäessä syvemmälle Kemin Kaivoksen maanalaisessa kaivoksessa. Tätä oletusta vahvistaa kaivosalueen vesien velvoitetarkkailun yhteydessä havaittu vesien kloridipitoisuuden kaksinkertaistuminen Kemin Kaivoksen alapuolisessa vesistöissä vuodesta 2015. Kaivosalueen vesien kloridipitoisuuksissa esiintyy huomattavia eroja, mutta maanalaisen kaivoksen syvenemisen myötä kaikissa tarkkailupisteissä vesien kloridipitoisuudet ovat alkaneet kohota. (Kettunen 2020.)

Kaivostoiminnan alueelta purettaville vesille ei ole viranomaisen määrittelmää veden kloridipitoisuuden lupa- tai suositusrajaa Kemin Kaivoksen voimassa olevassa ympäristöluvassa. Kaivostoiminnassa tulee kuitenkin huomioida ympäristönsuojelulain (527/2014) 7. §:n mukaisesti toiminnanharjoittajan velvollisuus järjestää toimintansa niin, että ympäristön pilaantuminen voidaan ehkäistä ennakolta. Kesällä 2020 Kemin Kaivoksella on käynnistetty YVA -hanke, jossa huomioidaan kloridin ympäristövaikutukset. Kloridin myrkyllisyyttä vesistöissä on tutkittu. Kanadassa tehdyn tutkimuksen tulosten perusteella makean veden kloridipitoisuuden ohjearvoiksi määriteltiin pitemmän ajan altistuksessa 120mg/l ja lyhyen ajan altistuksessa 640 mg/l. Meriveden osalta suositeltavia ohjearvoja ei ole määritetty. Suomessa veden kloridipitoisuuksille ei ole asetettu yleisiä raja-arvoja. Talousveden laatusuositus Suomessa on sosiaali- ja terveysministeriön asetuksen 17.11.2015/1352 mukaisesti 250 mg/l. (Chloride 2011; Valvira 2020, liite 1.)

Opinnäytetyössä kartoitetaan missä kloridipitoisia vesiä esiintyy Kemin Kaivoksen alueella ja mikä on vesien johtokykyarvo sekä kloridipitoisuus tutkimuskohteissa. Työssä tarkastellaan kloridipitoisuuden ja johtokykyarvon lisäksi vesien natrium, magnesium, kalsium, sulfaatti ja kiintoainepitoisuuksia. Kartoitustutkimuksen lisäksi opinnäytetyössä selvitetään, onko YSI Pro DSS -

kenttämittaria mahdollista käyttää kaivosalueen vesien kloridipitoisuuden suurusluokan määrittelyyn ja kloridipitoisten vesien esiintymisen todentamiseen.

Opinnäytetyössä toteutettavan tutkimuksen myötä on mahdollista arvioida miten Kemin Kaivosalueella esiintyvien vesien kloridipitoisuudet vaikuttavat ympäröivään vesistöön, sekä millaisia korroosivaikutuksia ne aiheuttavat esiintymiskohteissa. Mikäli selvityksessä osoittautuu mahdolliseksi määrittää vesien kloridipitoisuuden suurusluokka kenttämittarilla, voidaan jatkossa kenttämittauksien tuloksia käyttää myös kloridipitoisuuksien vaikutuksia arvioitaessa.

2 KLORIDI

Kloridi-ioneja esiintyy luonnossa, joten lisääntyneen kloridin pitoisuus vesissä ei välttämättä ole ihmisen toiminnasta aiheutuvaa. Luonnon kloridilähteitä ovat suolaliuokset sekä suolaisten pohjavesien purkautumiset. Muita luonnon lähteitä voivat olla esimerkiksi tulivuorenpurkaukset tai meriveden tunkeutuminen rannikkoalueelle. Meriveden suolapitoisuudet ovat noin 35 000 mg/l ja suolasta noin 55 % on kloridia eli kloridi-ioneja merivesi sisältää noin 19 250 mg/l. (Chloride 2011.)

Kloridi esiintyy luonnossa aina yhdisteenä ja yleisimmin suolana. Yleisimpiä suoloja ovat KCl, NaCl, MgCl₂, CaCl₂ sekä AlCl₃ ja FeCl₃. Kloridisuolat ovat helposti veteen liukenevia ja liunneena suolat hajoavat ioneiksi esim. Na⁺ ja Cl⁻. NaCl:n liukenevuus on 35,7 g NaCl/100 g vettä. (Chloride 2011.)

Viimevuosina ilmastonmuutos on nostanut haitallisten suolapäästöjen pitoisuutta mm. maaperässä, mikä on haitallista ihmiselle ja luonnolle. Haitallisimpia suolapäästöjä ovat natrium, kloridi, nitraatti, sulfaatti, kalsium, kalium sekä magnesium. Korkea pitoisuus vaikuttaa mm. ekosysteemin biologiseen monimuotoisuuteen, maanviljelyn satoon ja kansanterveyteen. Maaperän suolaantumisen vaikuttaa sen fysikaalis-kemiallisiin ominaisuuksiin, mikä aiheuttaa mm. maaperän eroosiota, maaperän kyllästymistä vedellä, maaperän kantavuuden heikentymistä sekä alenevaa leikkauslujuutta. (Bessaim ym. 2020.)

2.1 Veden kloridipitoisuuksien vertailu ja raja-arvoja

Suomessa veden laadulle on asetettu laatutavoitteita sosiaali- ja terveysministeriön asetuksessa 17.11.2015/1352, talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista. Talousvedelle on laatutavoitteena asetettu alle 250 mg/l:n kloridipitoisuuden pitoisuus, veden syövyttävyyteen vaikuttavana tekijänä. Sähkönjohtavuuden tavoitearvo talousvedelle on alle 2500 µS/cm. Asetuksen huomautusten mukaisesti talousveden sähkönjohtavuuden tulisi kuitenkin olla alle 250 µS/cm ja kloridipitoisuuden alle 25 mg/l ja, jotta voidaan ehkäistä vesijohtomateriaalin mahdollinen syöpyminen. (Valvira 2020, liite 1.)

Kanadassa kloridipitoisuuksille on määritetty makean veden laadun ohje-arvoja. Ohje-arvot perustuvat tutkimuksiin kloridin myrkyllisyydestä vesistöissä eri

eliöille. Tutkimuksessa makean veden kloridipitoisuuden ohjearvoiksi määritettiin pitkän ajan altistuksessa 120 mg/l ja lyhyen ajan altistuksessa 640 mg/l. Meriveden osalta suositeltavia ohjearvoja kloridipitoisuudelle ei ole määritelty. (Chloride 2011.)

Rhode Islandilla taas Ympäristöhallinnan laitos (DEM) on asettanut kloridin-pitoisuusrajoiksi makeassa vedessä 230 mg/l pitempiaikaisen altistumisen kroonisten haittavaikutusten estämiseksi ja 860 mg/l lyhyen altistumisajan välittömien haittavaikutusten estämiseksi. Juomavedelle asetettu kloridipitoisuuden enimmäismäärän DEM:n asettamana on 250 mg/l. (Hunt ym. 2012.)

2.2 Kloridin kuormitustekijät ja haittavaikutukset

Ominaisuuksiltaan kloridi on helposti saostuva ja biokertyvä, mutta ei biologisesti hajoava. Kloridi-ioni ei adsorboidu helposti mineraalipinnoille ja siksi pitoisuudet pysyvät korkeina pintavedessä sekä sedimenttien huokosvesissä ja jossain määrin myös sedimenteissä. (Chloride 2011.)

Epäorgaanisessa muodossa olevaa kloridia pidetään yleensä hydrologisesti ja kemiallisesti inerttinä. Tutkimuksissa on kuitenkin paljastanut, että suuri osa maaperään varastoituneesta epäorgaanisesta kloridista muuttuu orgaaniseksi kloridiksi maaperässä tai kasvillisuudessa. Muuttumista tapahtuu myös käänteisesti, jolloin orgaaninen kloridi muuttuu epäorgaaniseksi kloridiksi. Tämän taustalla olevaa mekanismia ei vielä tunneta. (Chloride 2011.)

Suuret kloridipitoisuudet makeassa vedessä vahingoittavat vesieliöitä häiritsemällä biologista osmoregulaatioprosessia, jolla eliöt ylläpitävät sopivaa suolapitoisuutta ja muiden liuenneiden aineiden pitoisuutta kehon nesteissään. Osmoregulaation häiriintyminen voi estää elion elävänä selviytymisen, kasvun ja lisääntymisen. Tutkimuksissa on esiintynyt viittauksia, että kalat olisivat vähemmän herkkiä kloridin haittavaikutuksille kuin pienet plankton äyriäiset. Planktonit ovat ravinnonlähde kaloille sekä sammakkoeläimille. Ne auttavat myöskin torjumaan levien rehevöitymistä ja ravinteiden kertymistä, mikä aiheuttaa järvien happikatoa. Jotkut kalalajit voivat olla kuitenkin todella herkkiäkin kloridin haittavaikutuksille. Purotaimenille on havaittu toleranssipitoisuudeksi jopa 3,1 mg/l kloridia. Kohonneen kloridipitoisuuden on tutkimuksissa

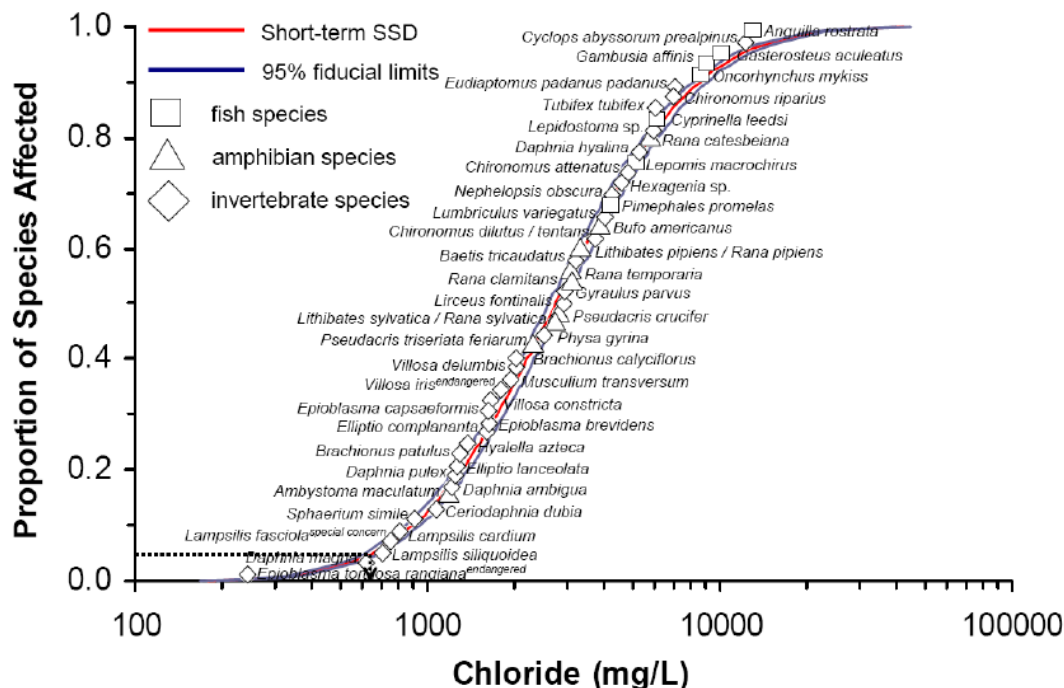
havaittu häiritsevän myöskin bakteerien tyyppiä hajottavia prosesseja. (Hunt ym. 2012.)

Kloridi-ioni on tärkeä viljelykasvien ravintoaine maaperässä, mutta liian korkeana pitoisuutena se voi heikentää maaperän hedelmällisyyttä ja aiheuttaa mm. satotoksisuutta. Kloridin liikkuvuus maaperässä on korkea. Yksi syy siihen on sen osallistuminen harvoin hapetus- ja pelkistysreaktioihin. Toinen tekijä on kloridi-ionien adsorboituminen vain heikosti positiivisesti varautuneisiin maapartikkeleihin sähköstaattisten voimien kautta. Kun maaperässä kloridi-ionien saostuminen ylittää haihtumisen, liukenee se helposti veteen ja etenee maaperässä liuenneena. (Geilfus 2018.)

2.2.1 Lyhyt ja pitkäaikaiset vaikutukset

Kloridin toksisuutta on tutkittu Kanadassa siedättämättömille organismeille SSD-menetelmällä (lajien välinen herkkyysjakauma) lisäämällä natrium- ja kalsium-kloridisuoloja veteen. Kalsiumkloridin ja natriumkloridin toksiset vaikutukset johtuvat todennäköisesti kloridianionista. Kalium- ja magnesiumkloridin toksisten vaikutusten on havaittu johtuvan toisin, eli kalium- ja magnesiumkationista, ei kloridianionista. Määriteltäessä suolojen toksisuuden konsentraatio-rajaa kloridianionien perusteella on makeassa vedessä toksisuusjärjestys seuraava: kaliumkloridi, magnesiumkloridi, kalsiumkloridi ja natriumkloridi. (Chloride 2011.)

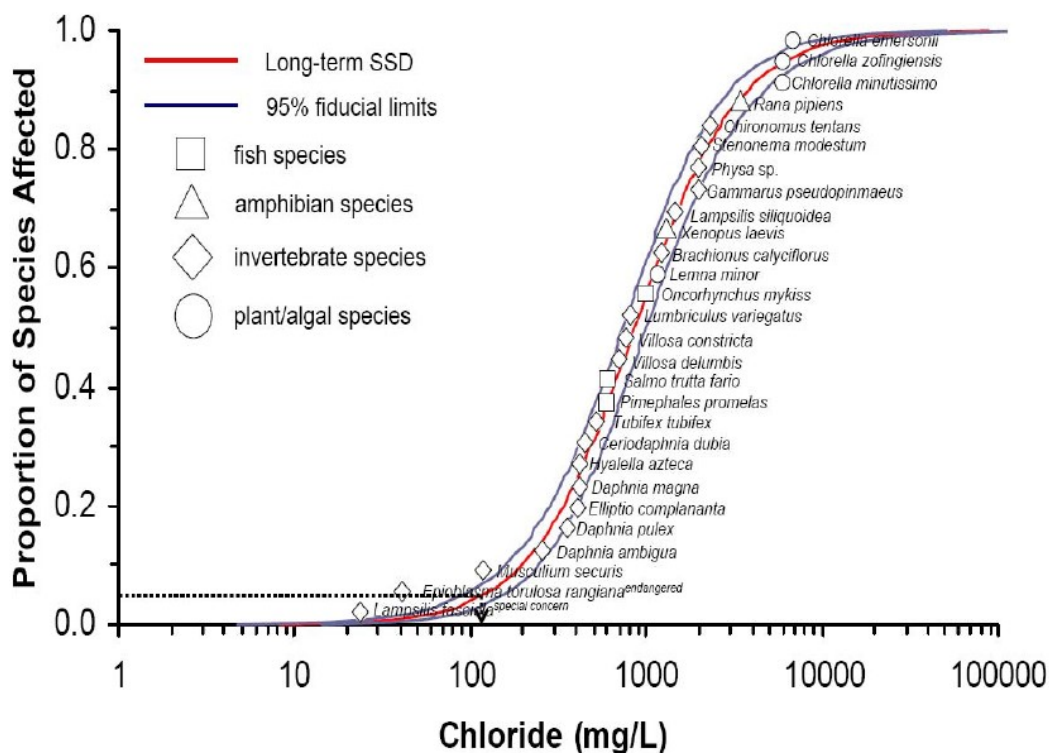
Kanadassa toteutetuissa tutkimuksissa määritettiin kalsium- ja natriumkloridilla lyhyen ajan altistumista sekä pitemmän ajan altistumista makeassa vedessä. Lyhyen ajan altistumisen vakavien vaikutusten altistumista määritettiin 24 - 96 tunnin jaksoissa osoittamaan hetkellisten ja vakavien altistumisien vaikutuksia vesistöihin. Tutkimuksen tuloksena lyhytaikaisen altistumisen ohjearvoksi määritettiin 640 mg/l kloridi-ioni pitoisuus. Makeassa vedessä, kloridi-ioni pitoisuudessa 640 mg/l ja sitä suuremmissa pitoisuuksissa, eliöissä voi ilmetä vakavia vaikutuksia ja kuolemia. Lyhyen ajan altistumisen tutkimuksen tuloksia on esitetty kuvassa 1. Tutkimuksessa tarkasteltavina altistuksen kohteina käytettiin kaloja, sammakkoeläimiä sekä selkärangattomia. (Chloride 2011.)



Kuva 1. Kanadassa tehdyn tutkimuksen tuloksia kloridi-ionin lyhytaikaisesta altistumisesta vesistössä. Tuloksena tutkimuksessa määritettiin ohjearvoksi 640 mg/l kloridi-ioneja. (Chloride 2011.)

Kanadassa toteutetussa pitkän ajan altistumisen tutkimuksessa käytetyt altistumisjaksot ovat olleet kaloille sekä selkärangattomille 7 päivää ja noin 24 tuntia vesikasveille sekä leville. Tutkimuksen tuloksena makean veden kloridi-ionien pitoisuuden ohjearvoksi määriteltiin 120 mg/l pitoisuus, jolla suojataan kaikki vesistön eliöt määrittelemättömällä altistusjakson pituudella. Kloridi-ionien pitoisuuden ollessa alle 120 mg/l, ei pitoisuudesta ole haitallisia vaikutuksia tutkimuksessa tarkastelluille eliöille. Tutkimuksen tulokset on esitetty kuvassa 2. (Chloride 2011.)

Edellä esitetyissä, Kanadassa toteutetuissa, tutkimuksissa ei ole huomioitu esimerkiksi veden kovuuden tai muiden tekijöiden vaikutuksia toksisuuteen. Myöskään mahdollisia luonnossa esiintyviä, jo jonkin asteisia, kloridi-ioneille tapahtuneita luonnollisia siedätyksiä ei ole huomioitu. Tutkimuksen tuloksena määritellyt ohjearvot on tarkoitettu vain suojaamaan kloridin välittömiltä myrkyllisiltä vaikutuksilta. (Chloride 2011.)



Kuva 2. Kanadassa tehdyn tutkimuksen tuloksia kloridi-ionin pitkäaikaisesta altistumisesta vesistössä. Tuloksena tutkimuksessa määritettiin pitkän altistusajan ohjeavoksi 120 mg/l kloridi-ioneja. (Chloride 2011.)

2.2.2 Korroosivaikutukset

Kloridilla on korroosivaikutuksia rakennetussa ympäristössä mm. ajoneuvojen materiaaleihin, yleisesti teräsiin, teräsrakenteisiin sekä betoniin. Rakennettuun ympäristöönkin vaikuttavassa korroosiomuodossa, ilmastokorroosiossa, kloridit toimivat vaikuttavana tekijä. (Vestola ym. 2006, 28–37.)

Eri kemikaalit reagoivat eri tavoin kosteuteen. Natriumkloridi esiintyy kuivana suolana aina 76% ilmankosteuteen, jolloin suola ei myöskään aiheuta korroosivaikutuksia. Korroosivaikutus alkaa, kun ilmankosteus nousee yli 76 % ja kuiva suola kostuu ja muodostaa syövyttävän liuoksen. Korroosivaikutus päättyy, kun ilmankosteus laskee alle 76 %. Natriumkloridinliuosten pitoisuuden sekä lämpötilaolosuhteiden vaikutuksia on esitetty liitteessä 5. (Vestola ym. 2006, 28–37.)

Hygrooskooppiset suolat kuten kalsium- ja magnesiumkloridi sekä merivedestä syntyneet suolakerrostumat kuivuvat erittäin huonosti ja pysyvät kosteina hyvinkin alhaisiin ilmankosteuspitoisuuksiin asti. Kosteina ja syövyttävänä nämä

suolat aiheuttavat korroosiovaikutuksia alhaisienkin ilmankosteuksien olosuhteissa. Liitteessä 5 on esitetty eri suolapitoisuuksilla ja eri kloridisuolan liuoksilla tehtyjen suolasumukokeiden vaikutuksia korroosionopeuteen teräksissä. (Vestola ym. 2006, 28–37.)

Kloridien korroosiovaikutuksista talousveden laatumääritteenä on Sosiaali- ja terveysalan lupa- ja valvontavirasto Valvira julkaissut WHO:n enimmäissuosituspitoisuuksiin perustuen Talousvesiasetuksen soveltamisohjeen 16/2018. Ohjeessa määritellään mm. kemiallisien muuttujien laatuvaatimuksia. Kloridin osalta soveltamisohjeessa on korroosio-ongelmien välttämiseksi määritetty veden kloridipitoisuuden arvoksi alle 25 mg/l, mikäli ei vedessä ole jotain muita ominaisuuksia, jotka vähentävät kloridin korroosiovaikutusta. (Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksen 17.11.2015/1352 liite 1.)

2.3 Suolaiset pohjavedet Suomessa

Suolaisen pohjaveden esiintymät Fennoskandian alueella ovat olleet tiedossa vuosisadan vaihteesta alkaen. Pohjavesiä, joiden suolapitoisuus on 10 g/l, on havaittu kallioperään poratuissa noin 200 m syvissä kaivoissa Itämeren rannikkoalueilla Suomessa sekä Ruotsissa. Kaivoista havaitut vedet ovat Na-Ca-Cl -vesiä, jotka esiintyvät muinaisen Litorinameren rantaviivan läheisyydessä. Vedet ovat jääneet loukkuun kallioon ja vesi - kallio vuorovaikutukset ovat ajan kuluessa muokanneet vettä. Suomessa suolaisten, syvien pohjavesien kemiallinen koostumus on tyypillisesti Mg-Ca-Na-SO₄-Cl, ja kaikkein suolaisimpien koostumus Ca-Na-Cl. Maan pinnalla ja 300 – 600 m syvyydessä vesien suolapitoisuuksissa on eroja. Litorinanmeren rantaviivat on esitetty katkoviivalla liitteessä 8. (Blomqvist 1999; Nurmi 1987.)

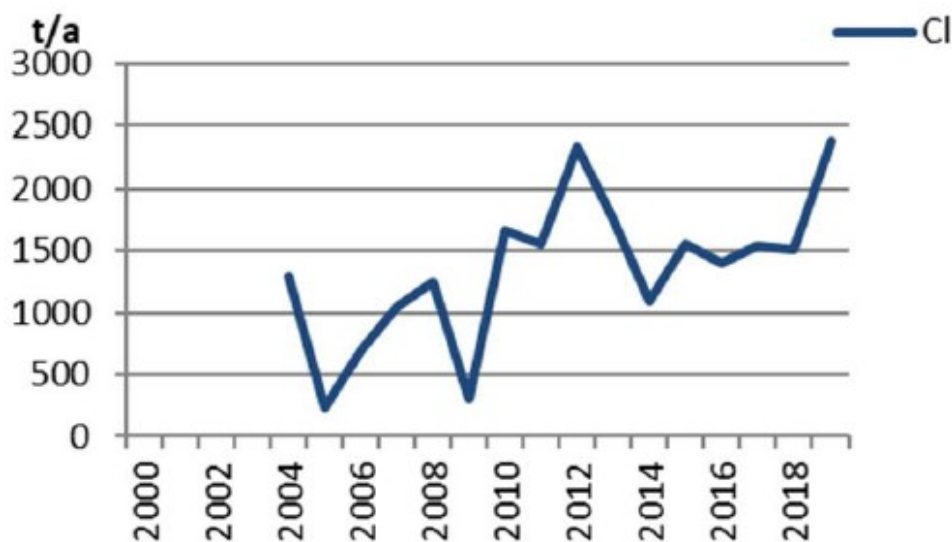
Syvemmillä kallioperässä olevia vesien osalta tiedetään graniitissa esiintyvien Na-Ca-Cl vesien olevan meteorista alkuperää. Vedet esiintyvät kallioperään sulkeutuneina nesteinä, ja niiden lisääntynyt suolapitoisuus on peräisin vesi - kivi vuorovaikutuksista. Syvemmillä kallioperässä esiintyy Brine-vesiä, joiden suolapitoisuus on yli 100 g/l. Näiden vesien on tulkittu oleva metamorfisesti muodostuneita vesiä ja niitä esiintyy yleensä alle 650 m:n syvyydessä. Runsaasti suolaa sisältävien Brine -vesien alkuperä ei ole edelleenkään selkeää,

mutta niiden kehitys liittyy voimakkaasti veden reaktioihin toissijaisten mineraalien kanssa kallioperässä suljetussa tilassa. (Nurmi 1987.)

Kemin kerrosintruusio kuuluu varhaisproterotsooisten magmaattisten intruusioiden ketjuun. Ikää intruusiolla on noin 2,4 miljardia vuotta. Kaivoksessa esiintyvien vesien suolaisuuden alkuperään vaikuttavat maaperän minerologia, litologia ja historia. Syvemmällä maaperässä sijaitsevilla vesillä on maaperästä liennut aineksia veteen ja näin on muodostunut suolainen vesi. Suolaisuus on mahdollisesti peräisin jopa mm. litorina ajalta (Litorinan meri) 7500–4500 BP (before present). (Alapieti 2005; Blomqvist 1999.)

2.4 Vesien kloridipitoisuudet Kemin Kaivoksella

Kemin Kaivoksen kokonaiskloridikuormitusta on määritetty Pöyryn toimesta vuodesta 2000 alkaen. Kloridin kokonaiskuormitus on kohonnut seurantajakson aikana. Vuosien 2004 – 2009 kuormitustaso on välillä 250–1300 t/a ja vuosien 2010–2019 välillä 1100–2400 t/a (kuva 3).

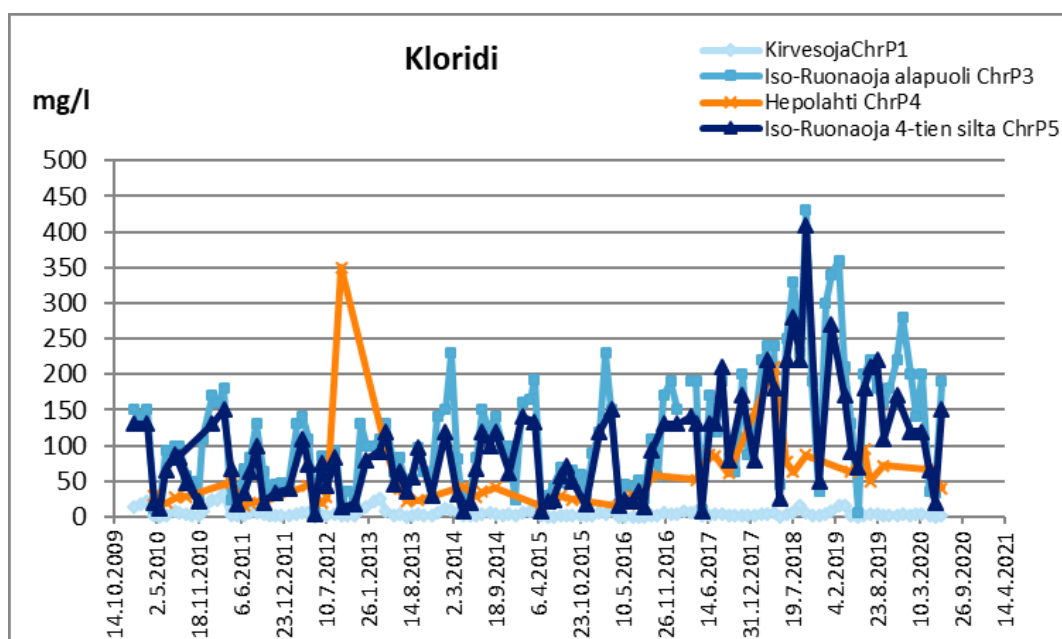


Kuva 3. Kemin kaivoksen purkuvesien kloridin kokonaiskuormitus vuosille 2004-2019 (Kettunen 2020).

Vuodesta 2010 alkaen Kemin Kaivoksen velvoitetarkkailun yhteydessä on seurattu vesien kloridipitoisuutta Kirvesojassa (ChrP1) ja Iso-Ruonaojassa (ChrP3). Kirvesoja on luonnonoja, joka laskee kaivosalueen reunalla Iso-Ruonaojaan. Kirvesojassa virtaavan veden kloridipitoisuus on ollut vähäinen velvoitetarkkailun alkuvuodesta 2010 alkaen. Iso-Ruonaojan vedessä, kaivoksen

vesien purkupisteen alapuolella (ChrP3), veden kloridipitoisuus on vuonna 2010 ollut keskimäärin 110 mg/l. Kauempana kaivoksen purkupisteestä, Iso-Ruonaojan alaosassa (ChrP5), veden kloridipitoisuus on ollut keskimäärin 80 mg/l (kuva 4). (Kettunen 2020.)

Vuodesta 2015 alkaen vesien kloridipitoisuudet ovat alkaneen kohota Iso-Ruonaojassa, kaivoksen purkupisteen alapuolella (ChrP3) sekä alempana Iso-Ruonaojassa sijaitsevassa tarkkailupisteessä (ChrP5). Hepolahden tarkkailupisteessä, joka on purkuvesistön kauimmainen tarkkailupiste ennen perä-merta, kloridipitoisuus on keskimääräisesti kohonnut vähemmän kuin Iso-Ruonaojassa. Kloridipitoisuuden kohoamista on tapahtunut aina vuoteen 2019 asti verrattaessa vuoden 2010–2015 tasoon. Alkuvuoden 2020 aikana otettujen vesinäytteiden analyysitulokset ovat kuitenkin osoittaneet matalampia kloridipitoisuuksia kuin vuoden 2019 aikana analysoiduissa näytteissä (kuva 4).

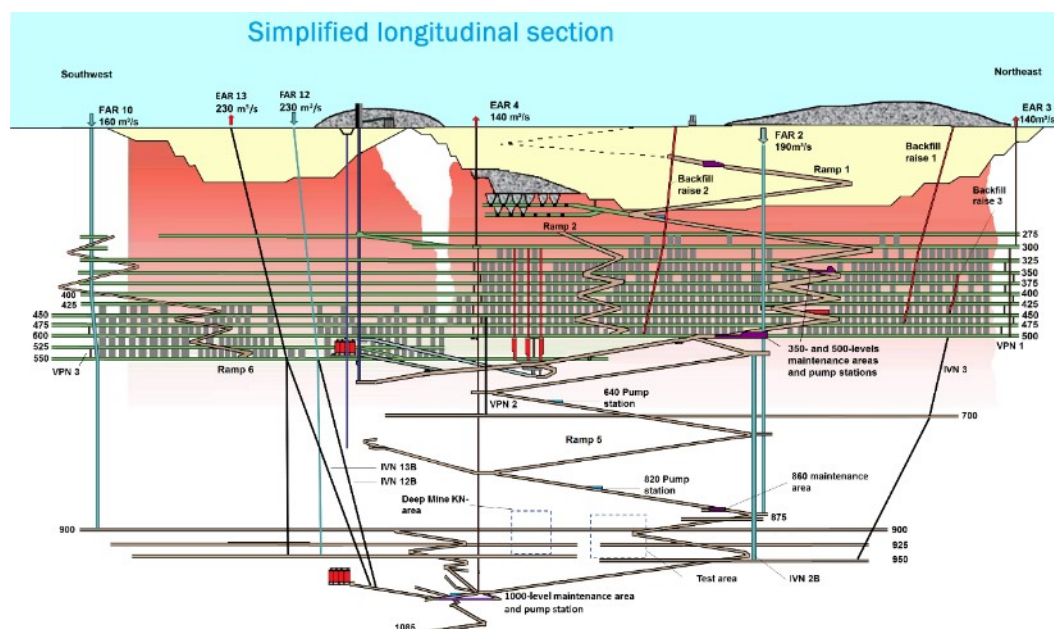


Kuva 4. Veden kloridipitoisuuksien kehittyminen vuosina 2010–2020. Kuvaajina kloridipitoisuudet kaivoksen tarkkailupisteissä: yläpuolinen tarkkailupiste Kirvesoja (ChrP1), kaivoksen alapuolinen tarkkailupiste Iso-Ruonaoja alapuolinen (ChrP3), Hepolahti (ChrP4) sekä alaosassa Iso-Ruonaojaa sijaitseva tarkkailupiste (ChrP5) (Juutinen 2020).

3 KEMIN KAIVOS

Outokumpu Chrome Oy:n Kemin Kaivos on ainoa toiminnassa oleva kromikaivos Euroopan Unionin alueella. Kaivos toimii osana integroitua tuotantokokonaisuutta Torniossa sijaitsevan Outokumpu Tornio Works:n kanssa. Kemin Kaivoksen raportoituja malmivaroja on 35,2 miljoonaa tonnia ja raportoituja mineraalivarantoja 122,3 miljoonaa tonnia. Kaivoksesta louhitaan kromiittimalmia, joka rikastetaan maan päällä sijaitsevalla rikastamolla palarikasteeksi sekä hienorikasteeksi. Rikastamon prosessi perustuu painovoimaan eli kemi-kaaleja ei rikastusprosessissa käytetä. Valmiit rikasteet toimitetaan Tornioon ferrokromitehtaalle, ferrokromin raaka-aineeksi. (Kaivosvastuu 2020.)

Kaivostoiminta Kemin Kaivoksella aloitettiin avolouhoksena vuonna 1965. Vuonna 1999 aloitettiin maanalaisen kaivoksen valmistelevat työt ja vuonna 2003 kaivostoiminta maanalaisessa kaivoksessa alkoi. Avolouhoksen louhinta päättyi vuonna 2006, kun louhinta siirtyi kokonaisuudessaan maanalaiseen kaivokseen. jonka pituusleikkaus on esitetty kuvassa 5. (Alapieti 2005.)



Kuva 5. Kemin Kaivoksen pituusleikkaus (YVA-ohjelma 2020, 18)

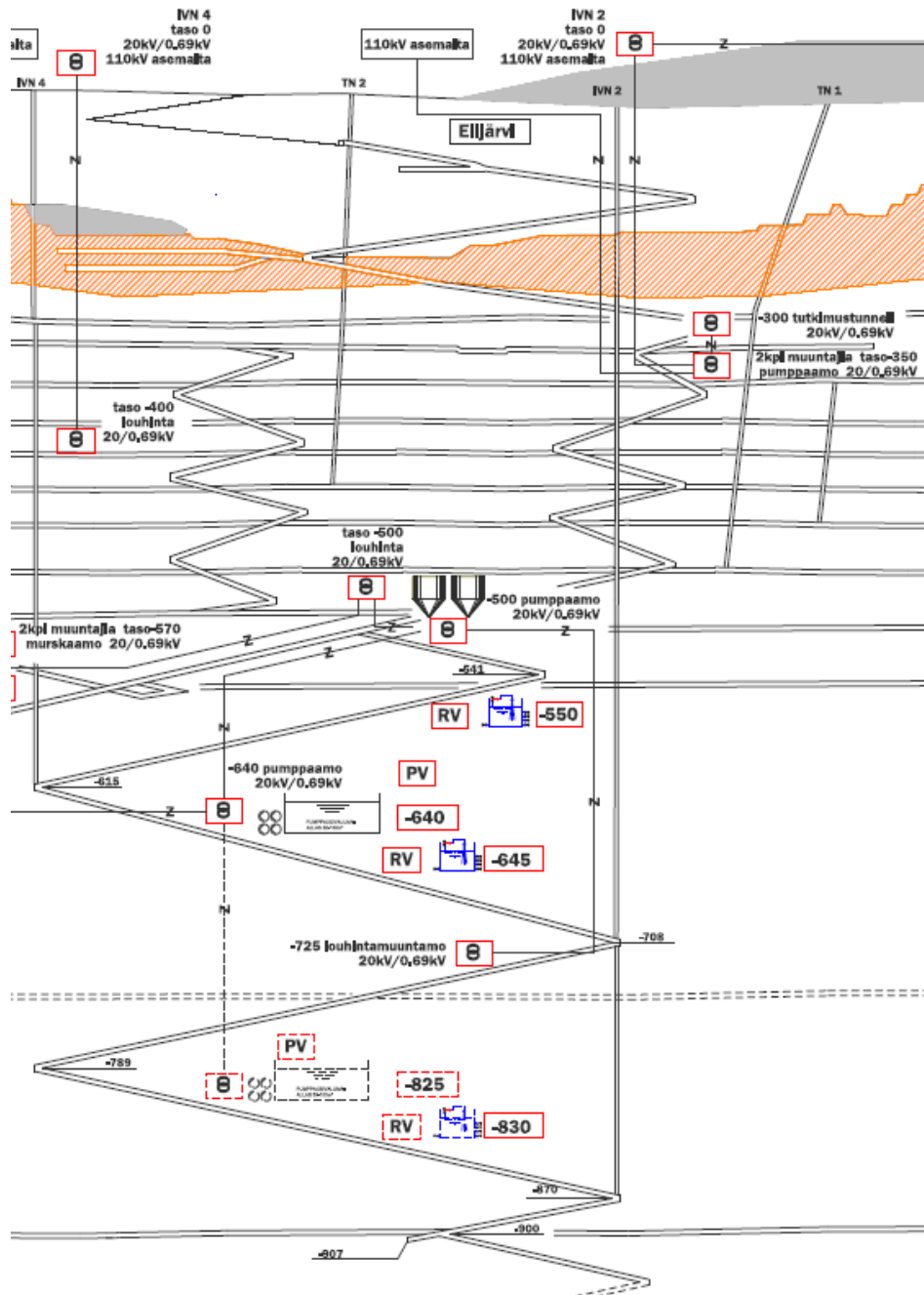
Kromimalmin louhinta suoritetaan nykyisin maanalaisessa kaivoksessa lähellä avolouhoksen pohjaa. Jotta kromimalmin saatavuus voidaan varmistaa tulevina vuosikymmeninä, on Kemin kaivoksella vuosina 2017–2020 investoitu

maalaisen kaivoksen laajentamisprojektiin (ns. DeepMine). DeepMine-projektin myötä maanalaiseen kaivokseen on rakennettu uusi päätaso -1000m tasolle. Koelouhintaa projektin alueella suoritetaan vuosien 2019–2021 aikana. (YVA-ohjelma 2020, 17–18.)

3.1 Vesien kulku ja hallinta maanalaisessa kaivoksessa

Kemin Kaivoksen maanalaiseen kaivokseen tarvitaan vettä 0,2 Mm³/a porauksien ja kairauksien toteuttamiseksi sekä pumpuille ja työskentelytilojen kasteluun sekä puhdistukseen. Vesi johdetaan maanalaiseen kaivokseen Viian avolouhoksesta sekä 222 m tasolta kaivokseen suotautuvista vesistä. Viian avolouhokseen vedet kertyvät sadannasta sekä valumavesistä. Kuivanapitovesiä maanalaisesta kaivoksesta pumpataan pois maan päälle kerääjäkaivon (P1 oja A) kautta rikastushiekka-altaalle 7. (YVA-ohjelma 2020, 29.)

Pääasiallisia pumppaamoja maanalaisessa kaivoksessa sijaitsee tasoilla 350 m, 500 m, 640 m, 825 m (kuva 6) sekä viimeisimpänä syvennysprojektissa valmistunut pumppaamo 1015 m tasolla. Maanalaisessa kaivoksessa vedet pumpataan syvemmillä pumppaamotasolta seuraavalle ylemmällä tasolla sijaitsevalle pumppaamolle kohti maan pintaa. Pumppaamojen lisäksi pumppaamojen välisillä tasoilla on mm. raakavesialtaita (RV) ja pienempiä vesikupikoita, joista vedet pumpataan pumppaamoille, tasoilta ylöspäin ja edelleen kerääjäkaivon (P1 oja A) kautta, mittauskaivon ja virtaamamittauksen jälkeen rikastushiekka-altaalle 7. Vesien pääasiallinen liike maanalaisessa kaivoksessa on aina vertikaalinen, syvemmillä tasoilta ylöspäin, kohti maan pintaa. Pumppaamojen välisillä tasoilla vesiä johdetaan ja pumpataan kohti lähinnä sijaitsevaa pumppaamoja, jolloin vesiä liikkuu myös osittain horisontaaliseen suuntaan. Maanalaisen kaivoksen pumppaamoista 500 m tason pumppaamo on tällä hetkellä ns. pääpumppaamo, jonka kautta liikkuu suurin määrä vesiä kohti maan pintaa. (Kemin Kaivos 2016.)



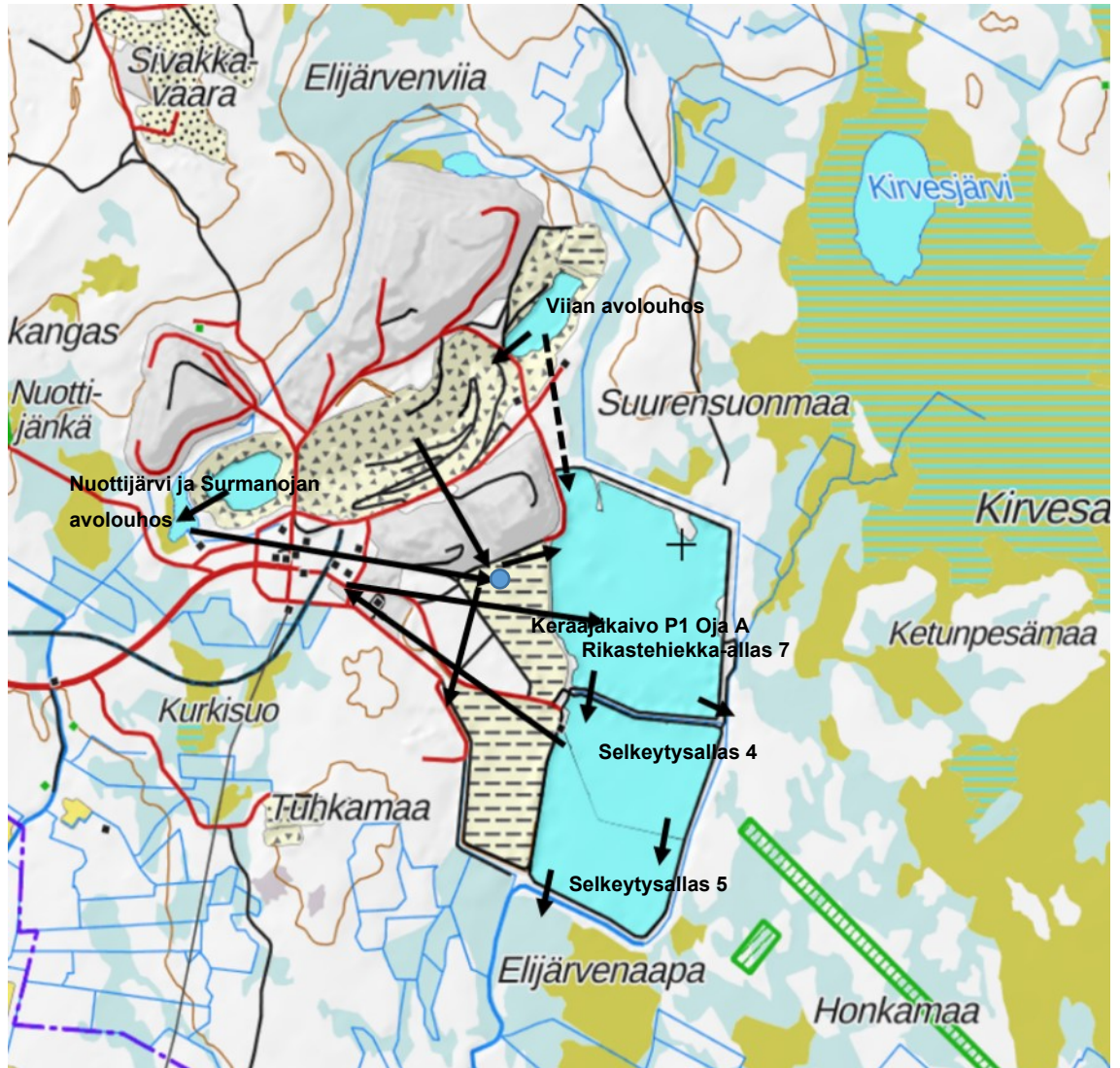
Kuva 6. Kaavio maanalaisen kaivoksen vesien kulkuun pumppuasemista ja altaista (Kemin kaivos 2016).

3.1.1 Vesien kulku ja hallinta maanpäällisellä kaivosalueella

Kemin Kaivoksella suuri osa vesistä käytetään rikastamon prosessivedeksi. Käyttömäärä on noin 300 m³/h eli vuositasolla 2,5 Mm³ vettä. Vedestä 96 % on sisäisen kierron vesiä ja loppu osuus ostetaan Stora Enso Oyj:n Veitsiluodon tehtaiden makeavesikanavasta. Kuvassa 7 on esitettyä mustilla nuolilla vesien kulku ja kulkusuunnat Kemin Kaivoksen maanpäällisellä alueella. (YVA-ohjelma 2020, 28.)

Kemin Kaivoksella vedet kierrätetään maanpäällisellä alueella sijaitsevien rikastushiekka-altaiden sekä vesien selkeytysaltaiden kautta edelleen rikastamon prosessivedeksi. Rikastushiekka-altaan sekä vesien selkeytysaltaiden läpi kiertää vettä noin 5 Mm³/a, josta noin 2,5 M³/a pumpataan takaisin rikastamolle prosessivedeksi. (YVA-ohjelma 2020, 28–29.)

Rikastamon rikastusprosessissa muodostuu rikastushiekkalietettä, joka johdetaan rikastushiekka-altaalle. Rikastushiekka-altaalle johdetaan myös muita kaivosalueen valumavesiä sekä maanalaisesta kaivoksesta pumpattavat vedet kerääjäkaivon P1 Oja kautta. Saman kerääjäkaivon P1 Oja A kautta johdetaan myös kaivosalueen hulevesiä rikastushiekka-altaalle. Rikastushiekka-altaalla raskain rikastushiekka sekä muu painava aines laskeutuu pohjaan ja vedet johdetaan ylivuotona vesien selkeytysaltaille. Vesi tuodaan selkeytysaltaaseen 4, josta välipadon kautta vesi kulkee edelleen selkeytysaltaaseen 5. Altaasta 5 vedet pumpataan prosessivedeksi rikastamolle tai ilmastusportaan läpi purkuvetenä Iso-Ruonaojaan, jonne johdetaan muutkin altailta suotautuvat vedet. Purkuveden määrä Iso-Ruonaojaan on tavoitteena pitää mahdollisimman vähäisenä ja käyttää altailla kierrätettävät vedet rikastamon prosessivesinä. Purkuvesiä johdetaan Iso-Ruonaojaan noin 1–2 Mm³/a. (YVA-ohjelma 2020, 29.)



Kuva 7. Kemin Kaivoksen maanpäällisen alueen vesien kulkupaikkoja ja kulkusuuntia mustilla nuolilla esitettyä (Maanmittauslaitos 2020).

3.1.2 Ympäristölupa ja velvoitetarkkailu

Kemin kaivokselle aluehallintoviranomainen on myöntänyt voimassa olevan ympäristöluvan 27.12.2010. Ympäristöluvassa on määritelty pintavesien pilaantumisen estämiseksi luparaja 10 mg/l kiintoainetta Iso-Ruonaojaan johdettaville vesille. Kuormittavista aineista, typen osuudesta, viranomaisen on ympäristöluvassa määritellyt Kemin Kaivoksella käytettäväksi louhinnassa niukkaliukoista typpeä sisältävää räjähdysainetta. Kloridien osalta voimassa oleva ympäristölupa ei ota kantaa. (Aluehallintovirasto 2010.)

Kesällä 2020 Kemin Kaivos käynnisti YVA-hankkeen. YVA-ohjelmassa kohdassa 3.5 on ympäristövaikutusten osalta tunnistettu Kemin Kaivoksen yhdeksi merkittäväksi riskiksi kaivoksen alapuolisten vesistöjen kloridi- sekä typikuormitus. Pääasiallinen kuormittuva vesistö on Iso-Ruonaoja, joka lopulta laskee Perämereen. (YVA-ohjelma 2020, 48.)

Kemin kaivoksella toteutetaan voimassa olevan ympäristöluvan mukaista, Lapin ympäristökeskuksen hyväksymää, vesien laadun sekä vesistövaikutusten tarkkailua. Tarkkailu kaivosalueen vesistä, alueelta purettavista vesistä sekä kaivosalueen ulkopuolisesta purkuvesistöistä. Vesistö tarkkailun pisteet on esitetty liitteessä 7. (Kettunen 2020; Aluehallintovirasto 2010.)

Kemin Kaivoksen ympäristöluvassa on määritelty vesinäytteet otettavan kuukausittain tarkkailupisteistä Kirvesoja (ChrP1), Selkeytysallas (ChrP2) sekä Iso-Ruonaojasta kaivoksen alapuolelta (ChrP3). Iso-Ruonaojan alaosalta (ChrP5) vesinäyte otetaan yhdeksän kertaa vuodessa (ei helmikuussa, lokakuussa eikä joulukuussa) ja Hepolahden tarkkailupisteestä (ChrP4) vesinäyte otetaan neljä kertaa vuodessa. Kaivoksen aiheuttama kuormitus määritetään kaivoksen ylä- ja alapuolelta mitattujen virtaamien avulla ja laskemalla pitoisuusmuutoksien sekä virtaamatietojen avulla kaivoksen toiminnan aiheuttama laadun muutos vesissä. (Aluehallintovirasto 2010.)

4 AINEISTO JA MENETELMÄT

4.1 Tutkimuksen suunnitelma ja näytepaikat

Toteutettavaan tutkimukseen määritellyt vesinäytteiden mittaus ja näytteenotopaikat sijaitsivat alueellisesti tarkasteltaessa kattavasti maanalaisen kaivoksen tuotantotasoilla sekä kaivosalueen pumppaus- ja purkukohteissa. Maanpäällisen alueen kohteet on esitetty kuvassa 11. Näytteenotopaikkojen valinnassa perusteena oli mahdollisuus arvioida ja mallintaa tulosten perusteella vesien kloridipitoisuuksien eroa kaivosalueen sisällä. Johtokyky mittaukset Ysi Pro DSS -kenttämittarilla suoritettiin kaikissa pisteissä kaksi (2) kertaa kuukaudessa kolmena (n=3) rinnakkaismittauksena, joista toinen sijoittui velvoitetarkkailun näytteenoton yhteyteen. Tämä toteutui ensimmäistä mittauskierrosta lukuun ottamatta.

Velvoitetarkkailun yhteydessä otetut vesinäytteet analysoitiin ulkopuolisessa Eurofins:n laboratoriossa. Analysoitavia komponentteja olivat Natrium (Na), Kalsium (Ca), magnesium (Mg), Kloridi (Cl), johtokyky ja sulfaatti (SO₄). Rinnakkaisnäytteitä ei analysointiin kerätty. Näytteet toimitettiin saman vuorokauden (24h) aikana laboratorioon kylmälaukuissa (tavoitelämpötila +4 C°).

Tutkimukseen valituissa näytteenotto ja kenttämittauspisteissä suoritettiin yhtäaikaaisesti johtokykyarvon kenttämittaus sekä otettiin laboratorioon analysoitavaksi menevä vesinäyte, kolmen peräkkäisen Kemin Kaivoksen velvoitetarkkailun näytteenoton yhteydessä, kevättalvella 2020. Näin mahdollistettiin johtokyky kenttämittausten ja laboratoriossa analysoitujen näytteiden analyysitulosten rinnakkainen vertailu mm. johtokykyarvon ja kloridipitoisuuden välillä.

4.1.1 Kenttämittari YSI Pro DSS

Tutkimusmenetelmänä kenttämittauksissa käytettiin johtokykyyn perustuvaa mittaustekniikkaa. Mittalaite oli Xylem laitevalmistajan vedenlaadun kenttämittari YSI Pro DSS (kuva 8).

YSI Pro DSS -vedenlaatumittarilla on mahdollista mitata kenttäolosuhteissa, yhdellä mittauksella useita parametrejä mitattavasta kohteesta. Elektrodivaihtoehtoja on useita ja paikalleen sijoitettuna on mahdollista olla yhtäaikaisesti

neljä eri elektrodiä. Tarkasteltava parametri tässä tutkimuksessa oli ominaisjohtokyky, jolloin suoritettussa mittauksessa lämpötilan vaikutus on kompensoitu. (Xylem brand 2018.)



Kuva 8. YSI Pro DSS -kenttämittari

YSI Pro DSS -mittarin johtokykyelektrodin ominaisjohtokyvyn mittausalueeksi on laitteen esitteessä määritetty 0–200m S/cm ja resoluutioksi 0.001, 0.01, 0.1 mS/cm. Kemin Kaivokselle mittari hankittiin tammikuussa 2020 laitetoimittajan kalibroimana. (Xylem. s.a.)

4.1.2 Laboratorioanalyysit

Taulukossa 1 on esitettyä analysoitujen parametrien ja alkuaineiden SFS-EN -standardimenetelmät sekä menetelmien mittausepävarmuudet sekä määrittämissrajat. Kloridin analysoinnissa käytettävän menetelmän SFS-EN ISO 10304-1:2009 määrittämissraja on 0,1 ja mittausepävarmuus $<2:\pm 0.2$ mg/l, $>2:\pm 10$ %. Tutkimuksen tuloksissa tarkastellaan sähkönjohtavuuden, kloridin, kalsiumin, magnesiumin sekä natriumin analyysituloksia. (Eurofins 2020.)

Vesinäytteistä määritettiin laboratoriossa myöskin johtokykyarvo, mutta tutkimuksessa sekä tuloksien tarkastelussa käytetään YSI Pro DSS -kenttämitta-

rilla paikan päällä mitattua johtokykyarvoa. Laboratoriossa mitattu arvo on mitattu seisonesta sekä pullossa vähintään vuorokauden säilytetystä vedestä. Tämä voi mahdollisesti vaikuttaa johtokykymittaukseen ja mittauksen tulokseen.

Taulukko 1. Laboratorioanalyysissä käytetyt SFS-EN menetelmät, määrittärajat sekä mitausepävarmuudet (Eurofins 2020)

Menetelmätiedot

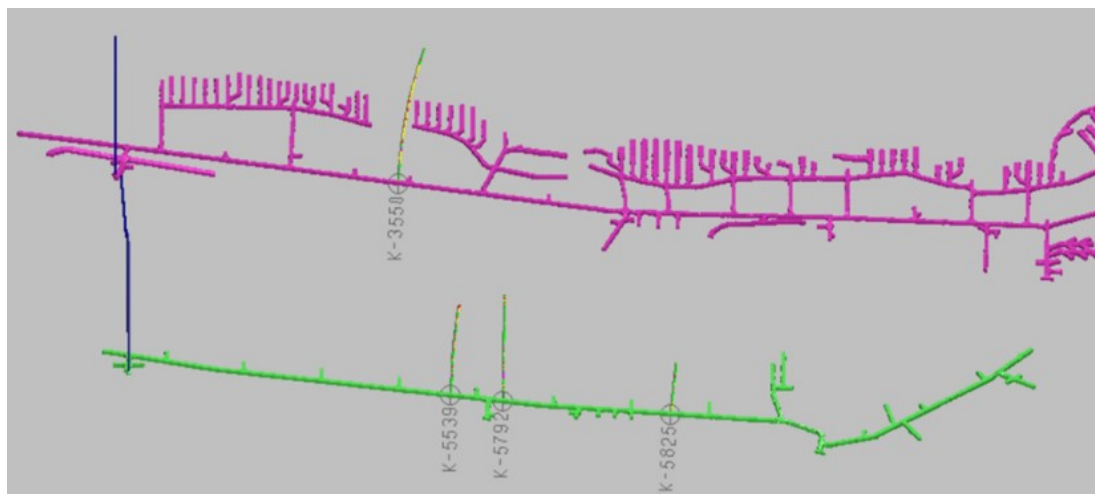
Testikoodi	Parametrin nimi	Menetelmän mitausepävarmuus	Menetelmän määrittärajat	Akkreditoitu	Menetelmä	Laboratorio
Fysikaalis-kemialliset tutkimukset						
YSB53	Sähkönjohtavuus 25°C	<4:±0.2mS/m >4:±5%	1	Ei	SFS-EN 27888:1994	YS
YSD10	Kloridi (Cl ⁻)	<2:±0.2mg/l >2:±10%	0,1	Ei	SFS-EN ISO 10304-1:2009	YS
YSD12	Sulfaatti (SO ₄)	<2:±0.2mg/l >2:±10%	0,2	Ei	SFS-EN ISO 10304-1:2009	YS
YSC16	Kiintoaine GF/C	<3:±0.5mg/l >3:±20%	1	Ei	SFS-EN 872:2005	YS
YSD24	Typpi (N)	<0.07:±0.01µg/l >0.07:±15%	0,05	Ei	SFS-EN ISO 11905-1:1998	YS
YSD28	Nitraattityppi (NO ₃ -N)	<0,013:±0,002mg/l >0,013:±15%	0,005	Ei	SFS-EN ISO 13395:1997	YS
YSD02	Ammoniumtyppi (NH ₄ -N)		0,005	Ei	SFS-EN ISO 11732:2005	YS
YSD06	Ammoniumtyppi (NH ₄ -N)	<0,050:±0,01mg/l >0,050:±20%	0,01	Ei	ISO 15923-1:2013	YS
Alkuaineet						
YB06W	Kalsium (Ca)	<0.5:±0.04mg/l >0.5:±8%	0,05	Ei	SFS-EN ISO 11885:2009	YB
YB06Z	Magnesium (Mg)	<0.25:±0.025mg/l >0.25:±10%	0,025	Ei	SFS-EN ISO 11885:2009	YB
YB071	Natrium (Na)	<0.5:±0.05mg/l >0.5:±10%	0,25	Ei	SFS-EN ISO 11885:2009	YB

Kaivoksen maanpäälliseltä alueelta laboratorioanalyysiin menevien vesinäytteiden otosta vastasi Eurofins:n sertifioitu näytteenottaja. Näin toimittiin siitä syystä, että näytteet olivat myöskin kaivoksen velvoitetarkkailuun sisältyviä näytteitä. Näytteistä analysoitavia komponentteja lisättiin velvoitetarkkailuun analyysilistan lisäksi täyttämään opinnäytetyön tutkimuksen tarkastelun tavoitteet. Maanalaisen kaivoksen vesinäytteet pumppuasemilta sekä kairareijistä kerättiin geologien kanssa Eurofins:n toimittamiin näytepulloihin ja toimitettiin Eurofins:n näytteenottajan mukana laboratorioon analysoitavaksi.

4.1.3 Kairareijät

Maanalaisesta kaivoksesta kairareikien vesien tutkimukseen valittiin neljä yläkätistä kairareikää, joista on purkautunut vettä kairauksen aikana ja veden purkautuminen on jatkunut suoritetun kairauksen jälkeen. Valittujen kairareikien sijainnit maanalaisessa kaivoksessa on esitetty kuvassa 9 ja kairareikien profiilit sekä tarkemmat tiedot on esitetty liitteessä 2. Tutkimuksessa

tarkastelluista kairareikiä yksi sijaitsi tuotantotasolla 400 m, profiilin 6560 kairareikä K-3550. Kairareikä valutti vettä tasaisena valumana ojaan kairareikään asetettua sinettiä ja kaivostunnelin katon kautta ohjattua letkua pitkin (kuva 9). Muut kolme kairareikää sijaitsivat tasolla 900 m. Profiilissa 6640 kairareikä K-5539, profiilissa 6720 kairareikä K-5792 sekä profiilissa 6980 kairareikä K-5825. Kairareikiissä K-5792 sekä K-5539 oli asennettu hana estämään veden valuminen kaivostunneliin. Hanaa aukaistaessa kairareikästä purkautui vettä pienellä paineella. Kairareikien K-5792 sekä K-5539 osalta oli mahdollisesti vettä ja kiintoainetta laskeutunut kairareikään asennettua hanaa vasten, hanaan tulpatessa veden vapaan virtauksen kairareikästä. Vesiä oli mahdollista valuttaa vain vähäisiä määriä pois kairareikästä ennen näytteenottoa, koska veden purku tapahtui suoraan kaivostunnelin tielle.



Kuva 9. Tutkimuksessa tarkasteltujen kairareikien sijainti maanalaisessa kaivoksessa. Violetilla värillä on esitetty taso 400 m ja vihreällä taso 900 m.

Kairareikässä K-5825, 900 m tasolla, valuva vesi oli ohjattu sinetillä ja letkulla kaivostunnelin katon kautta ojaan (kuva 10). Letkusta tulevan veden määrä oli vähäistä, joten näytteenotossa letku irrotettiin sinetistä. Letkun irrottaminen mahdollisti nopeamman vesinäytteen keruun litran näytepulloon, koska vettä vapautui kairareikästä runsaampana valumana. Kairareikä K-5825 osalta on myös mahdollista, että vettä ja kiintoainetta oli pieniä määriä laskeutunut kairareikään sinetin ja letkun tulpatessa veden vapaata virtausta. Kairareikien veden valumaa ja virtausta ei tutkimuksessa tarkemmin määritetty.

Tutkimuksessa tarkasteltujen kairareikien K-5539 ja K-5792 osalta YSI Pro DSS -mittarin johtokykymittauksen mittausalue ei riittänyt vesinäytteiden arvojen mittaukseen. Johtokykymittausten mahdollistamiseksi vesinäyte laimennettiin 1:1 ionivaihdetulla vedellä. Kairareikien vesinäytteet kenttämittauksiin kerättiin litran muovipulloihin, joista johtokyky oli mahdollista mitata suoraan.



Kuva 10. Vasemmalla sinetöity kairareikä K-3550 maanalaisen kaivoksen tasolla 400 m ja oikealla kairareikä K-5825 maanalaisen kaivoksen tasolla 900 m

Tutkimuksessa tarkasteltujen kairareikien K-5539 ja K-5792 osalta YSI Pro DSS -mittarin johtokykymittauksen mittausalue ei riittänyt vesinäytteiden arvojen mittaukseen. Johtokykymittausten mahdollistamiseksi vesinäyte laimennettiin 1:1 ionivaihdetulla vedellä. Kairareikien vesinäytteet kenttämittauksiin kerättiin litran muovipulloihin, joista johtokyky oli mahdollista mitata suoraan.

4.1.4 Maanalaisen kaivoksen pumppaamot

Kairareikien lisäksi tutkimuksessa tarkasteltiin maanalaisen kaivoksen pumppaamoilla kiertäviä vesiä. Vesinäytteiden otto ja johtokyky kenttämittaukset YSI Pro DSS -mittarilla suoritettiin pääpumppaamoilla, jotka sijaitsevat tuotantotasolla 350 m, 500 m, 640 m ja 825 m. Kuvia pumppaamoista on liitteessä 3. Näiden lisäksi tarkasteltiin kertänäytteenä tason 1015 m, DeepMine-projektissa rakennetulta, pumppaamolta otettu vesinäyte.

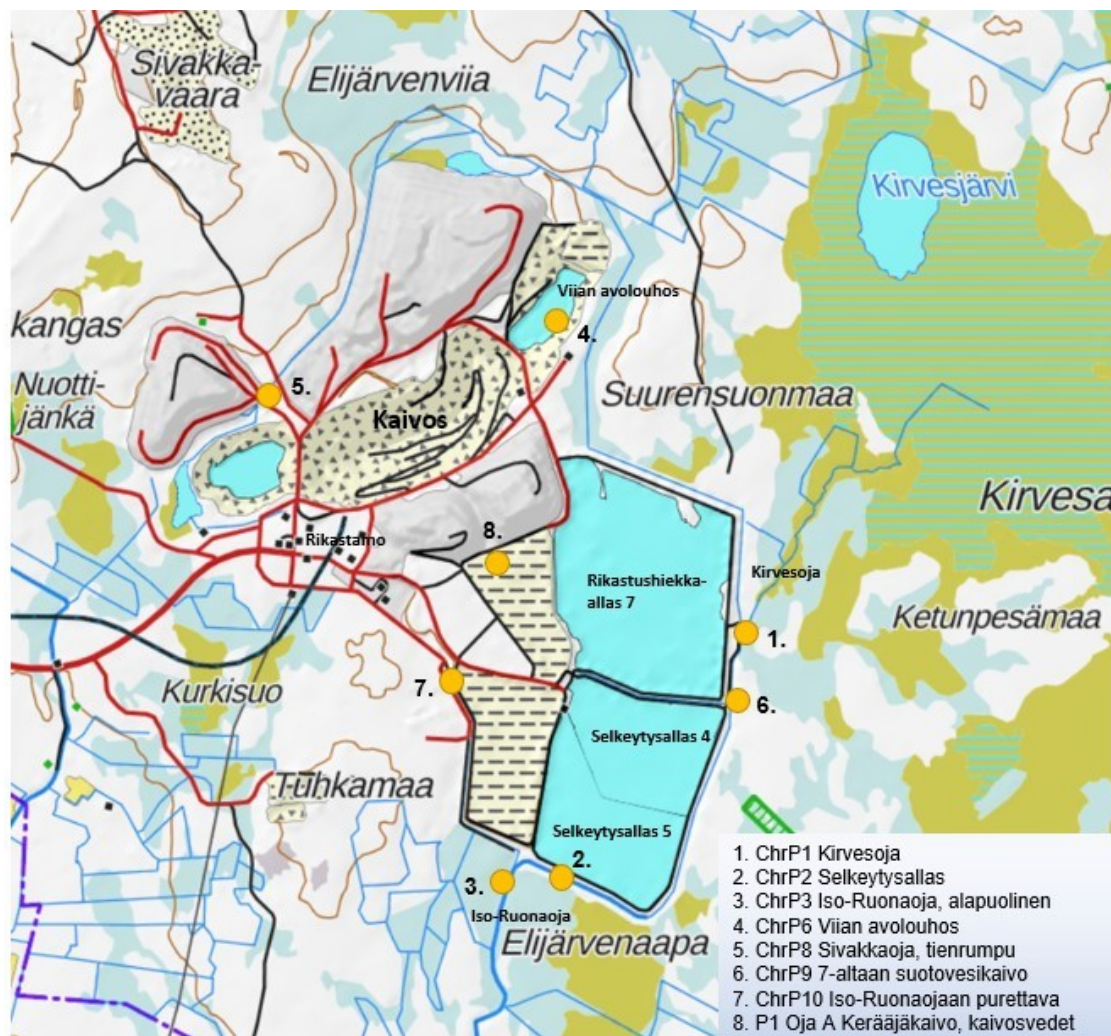
Maanalaisen kaivoksen neljän pääpumppaamon vesinäytteet kenttämittauksiin otettiin ämpärillä pumppaamojen vesisäiliöistä. Näytteiden johtokykyarvot mitattiin ämpäristä YSI Pro DSS -kenttämittarilla. Pumppaamoilta otettujen vesinäytteiden kiintoainepitoisuuksissa esiintyi vaihtelua johtuen pumppaamolle pumpattavien vesien kiintoainepitoisuudesta. Näytteenotto pyrittiin toteuttamaan ajankohtana, jolloin pumppaamolle vettä pumppaava pumppu käy. Tällöin kiintoaine ei ole saapuvan veden osalta ehtinyt laskeutua altaan pohjalle. Syvemmällä sijaitsevien pumppaamojen osalta näytteenotto toteutui pumppujen käydessä, mutta 500 m ja 350 m tason pumppaamoilla viimeisien näytteiden osalta näin ei toteutunut.

Viimeisimmän kenttämittaus ja näytteenottokerran aikana pumppuasemien lisäksi oli otettu käyttöön maanalaisen kaivoksen tehostettu tulvapumppaus. Tulvapumppauksessa kaivoksen vesiä siirtyi myös toista reittiä, eri tasojen kautta maan päällä sijaitsevalle kerääjäkaivolle P1 oja A, josta vesinäyte otettiin ja suoritettiin kenttämittaus. Tulva-ajan pumppauksen vaikutus näkyi näytteenottohetkellä 500 m tason pumppaamolla vesisäiliön vedenpinnan ollessa huomattavasti matalammalla. Veden laatuun ja näytteiden johtokykymittaukseen sekä analyysituloksiin tulvapumppauksen käynnistämällä ei ollut merkittävää vaikutusta.

4.1.5 Maanpäällinen alue

Kemin kaivoksen maanpäälliseltä alueelta tutkimuksessa tarkasteltaviksi näytteenotto sekä YSI Pro DSS -kenttämittarilla suoritettavien johtokykymittausten kohteiksi valittiin velvoitetarkkailun näytteenottopisteet ChrP 1, 2, 3, 6, 8, 9, 10 ja sisäisen tarkkailun näytteenottopiste, kerääjäkaivo, P1 Oja A. Pisteet sijoituvat kaivosalueen vesien purkupisteisiin sekä muihin kloridipitoisuuksien osalta merkittäviin tarkkailupisteisiin. Kerääjäkaivo P1 Oja A on kaivo, jonka kautta maanalaisesta kaivoksesta pumpattavat kuivanapitovedet kulkevat rikastushiekka-altaan ja selkeytysaltaiden vesikiertoon. Maanmittauslaitoksen karttapohjalle merkityt tarkkailupisteet, ja niiden sijainnit on esitetty kuvassa 11. Kuvia tarkkailupisteistä on liitteessä 4.

Velvoitetarkkailun, kuukausittaisten vesinäytteen ottojen, yhteydessä mitattiin tarkkailupisteen veden johtokyky kenttämittarilla. Laboratorioanalyysien tuloksia ei ole tarkkailupisteille ChrP8 ja ChrP9 jokaiselle näytteenotokerralle, koska näiden tarkkailupisteiden näytteenotto ei ole kuulunut velvoitetarkkailun ohjelmaan suoritettuna näytteenoton ajankohtina. Viikolla 12 ei tarkkailupisteessä ChrP10 suoritettu johtokykymittausta, koska pisteelle ei tuolloin johdettu vesiä.



Kuva 11. Tutkimuksessa tarkasteltujen maanpäällisen alueen näytteenotto ja mittauspisteet kartalle sijoitettuna (Maanmittauslaitos 2020)

4.2 Johtokykyarvon ja kloridipitoisuuden korrelaatio

Korroosiotarkastelussa käytettiin velvoitetarkkailussa otetuista vesinäytteistä analysoituja kloridipitoisuuksia sekä näytteenoton yhteydessä YSI Pro DSS -kenttämittarilla mitattuja johtokykyarvoja. Vertailtavia tuloksia oli 45 kpl.

Kloridipitoisuuksien ja johtokykyarvojen tarkastelussa käytettiin Minitab-ohjelmaa. Komponenttien tuloksille määritettiin lineaarista riippuvuutta määrittävä Pearsonin korrelaatio (ρ). Johtokykyarvon ja kloridipitoisuuden korrelaation lisäksi määritettiin Pearsonin korrelaatiot johtokykyarvon sekä natrium, kalsium ja magnesium suolaionien pitoisuuksien välille.

Pearsonin korrelaatiota esitetään kahdella kirjainlyhenteellä. Kirjain rho (ρ) populaatiolle ja kirjain r näytteelle. Pearsonin lineaarinen korrelaatiokerroin on arvo välillä -1 ja +1. Arvo -1 tarkoittaa vahvaa negatiivista korrelaatiota ja +1 vahvaa positiivista korrelaatiota. Arvo 0 tarkoittaa, että korrelaatiota ei ole. Nollahypoteesin hylkäämiseksi tai vahvistamiseksi käytetään hypoteesitestauksia, jonka todisteena toimii P-arvo. Mitä pienempi P-arvo on, sitä vahvempi todiste se on hylkäämään nollahypoteesi ja osoittaa tulosten olevan merkittäviä. (Statistic how to 2021.)

Selityskertoimen (r^2) hyödyllisyys on sen kyky osoittaa todennäköisyys tulevista tapahtumista ennustettuihin tuloksiin. Näytteitä lisättäessä kerroin osoittaa todennäköisyyden, että uusi piste on lineaarinen muuhun joukkoon nähden. Vaikka kahden muuttujan välillä olisi vahva yhteys, määrittäminen ei osoita syy-yhteyttä.

5 TULOKSET

Opinnäytetyön tutkimuksen tuloksena todettiin YSI Pso DSS -kenttämittarilla mitattujen johtokykyarvojen sekä analysoitujen kloridipitoisuuksien välille vahva riippuvuus. Pearsonin korrelaatiokerroin muuttujien välillä oli $\rho = 0,998$.

Kemin Kaivoksen kloridipitoisten vesien lähteen todettiin sijaitsevan maanalaisen kaivoksen kallioperässä. Kloridit liikkuvat vesissä maanalaisesta kaivoksesta aina kaivosalueelta purettaviin vesiin asti.

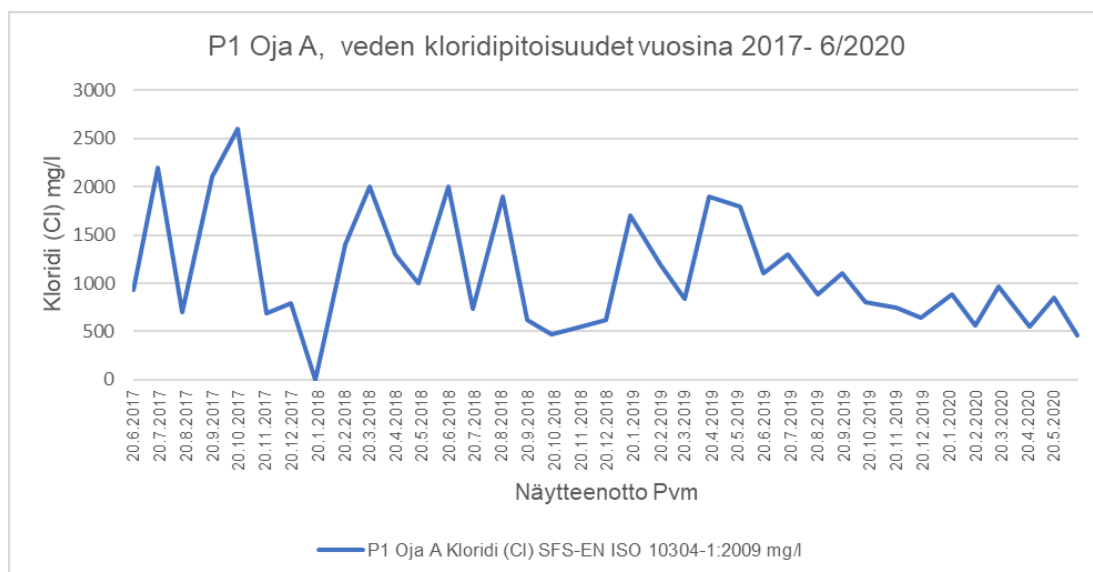
Sähkönjohtavuuden ja moniparametrimittarin käytön soveltuvuuden ja tulosten luotettavuuden todentamisessa käytettiin analyysi- ja mittaustulosten korrelaatiotarkastelua sekä mittaustulosten keskihajontalukuja. Kenttämittausten mittaustulokset ovat kokonaisuudessaan taulukossa liitteessä 1.

5.1 Tutkimuksen esiselvitykset

Kemin Kaivoksen alueen vesien kloridipitoisuuksia on tarkkailtu velvoitetarkkailun näytteenottopisteissä sekä sisäisen valvonnan näytteissä vuosilta 2004-2017 alkaen. Tarkkailun aloituksen ajankohta on vaihdellen tarkkailupisteittäin. Kemin Kaivoksen velvoitetarkkailun vesinäytteiden keruu sekä analysointi toteutetaan ulkopuolisen toimijan, Eurofins:n toimesta. Afry konsulttina tarkkaillee velvoitetarkkailun eri komponenttien arvojen muutoksia ja kuormituksia vuoden ja vuosien tasolla. Velvoitetarkkailun ja sisäisentarkkailun analyysitulokset hallinnoidaan Afry:n Puro-ympäristötiedon hallintajärjestelmässä.

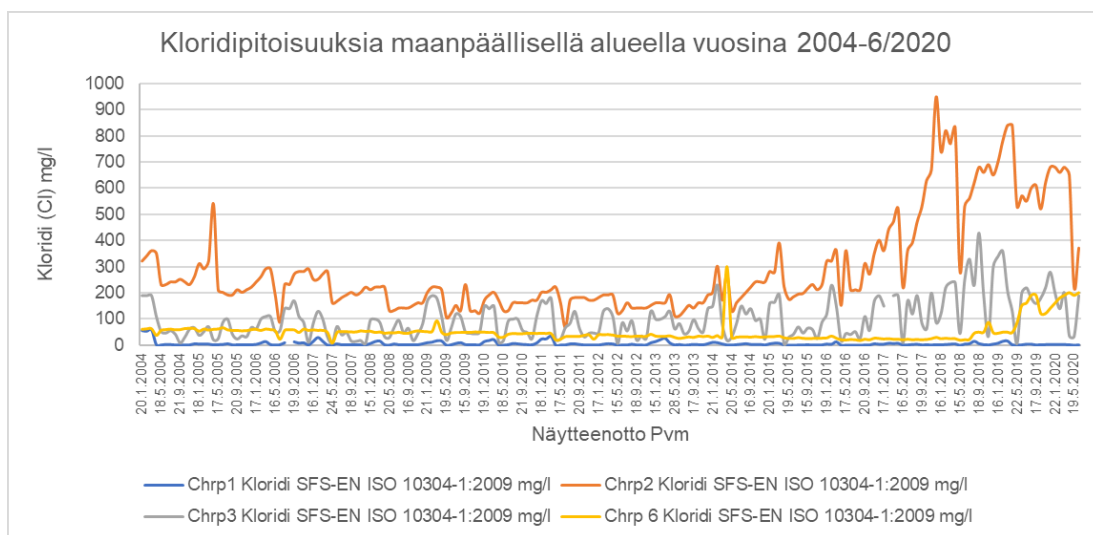
Tutkimuksen mittaus ja näytteenottoaikoja valittaessa huomioitiin velvoitetarkkailun näytteenottoaikat ja tarkasteltiin näytteenottoaikojen analyysituloksia Puro-järjestelmästä vuosilta 2004 alkaen. Vuosien ajalta kerätyn kloridianalyysitulosten pitoisuustasossa esiintyy selkeä ero kaivoksesta pumpattavien kuivanapitovesien pitoisuuksissa verrattaessa maanpäällisen alueen vesien pitoisuuksiin. Kuvassa 12 on esitetty kuvaajalla maanalaisesta kaivoksesta kerääjäkaivon P1 Oja A kautta rikastushiekka-altaan ja selkeytysaltaiden vesikiertoon pumpattavien kuivanapitovesien kloridipitoisuuksia vuosilta 2017-6/2020. Kuvaajassa esitetyn kerääjäkaivon P1 Oja A kautta kulkevien vesien kloridipitoisuus on 2017-2019 ajanjaksolla ollut keskimäärin 1 000 mg/l

tasolla ja vuoden 2020 aikana keskimäärin 750 mg/l. (Puro - ympäristötiedon hallintajärjestelmä 2020.)



Kuva 12. P1 Oja A, kerääjäkaivon kloridipitoisuudet sisäisen tarkkailun näytteissä vuosina 2017-6/2020 (Puro-ympäristötiedon hallintajärjestelmä 2020)

Maanpäällisen alueen kloridipitoisuuksia on vuodesta 2004 alkaen Kirvesojasta, Iso-Ruonaojan purkupisteeltä, Iso-Ruonaojan alemmalta tarkkailupisteeltä sekä Viian avolouhoksen tarkkailupisteeltä. Kloridipitoisuudet tarkkailupisteissä on esitetty kuvassa 13. Kuvajasssa esitetyissä pisteessä ChrP1 (Kirvesoja) kloridipitoisuus on koko aikajanan ollut hyvin matalalla, luonnon veden, pitoisuustasolla. Pisteissä ChrP 2 (Iso-Ruonaojan purkupiste) sekä ChrP3 (Iso-Ruonaojan alempi tarkkailupiste) kloridipitoisuus on läpi ajanjakson ollut luonnonveden pitoisuutta suurempi ja pitoisuustaso on kohonnut vuodesta 2015. Purkuvesipisteessä ChrP2 veden kloridipitoisuuden taso on ollut vuosien 2007–2015 aikana keskimäärin 100–200 mg/l ja vuodesta 2015 alkaen kohoamisen jälkeen keskimäärin tasolla 600 mg/l. Iso-Ruonaojan alemmalla tarkkailupisteellä ChrP3 kloridipitoisuuden taso on matalampi kuin purkupisteellä ChrP2. Keskimääräinen pitoisuus on ollut 59–100 mg/l vuoteen 2015 asti ja vuodesta 2015 alkaen kohoamisen jälkeen keskimäärin tasolla 100–200 mg/l. Tarkkailupisteessä ChrP6 Viian avolouhoksessa kloridipitoisuus on kohonnut kloridipitoisuustasosta 50 mg/l tasoon n. 100–200 mg/l loppuvuodesta 2018 alkaen. (Puro-ympäristötiedon hallintajärjestelmä 2020.)



Kuva 13. Maanpäällisen alueen kloridipitoisuuksia Kirvesojan, Iso-Ruonaojan purkupisteen, Iso-Ruonaojan alemman tarkkailupisteen sekä Viian avolouhoksen tarkkailupisteissä vuosilta 2004–6/2020 (Puro-ympäristötiedon hallintajärjestelmä 2020)-.

Kemin Kaivoksella on oletettu kloridipitoisten vesien olevan peräisin maanalaisesta kaivoksesta, mutta tarkempi kartoitus osoittautui tarpeelliseksi kloridin kuormituksen lisääntyttyä. Esiselvityksenä kaivoksen geologit paikallistivat yläkätisiä kairareikiä, joista purkautuu kairauksen päätyttyä edelleen vettä, ja vesinäytteen kerääminen kairareiästä on mahdollista. Tutkimukseen soveltuvia kairareikiä paikallistettiin neljä kappaletta.

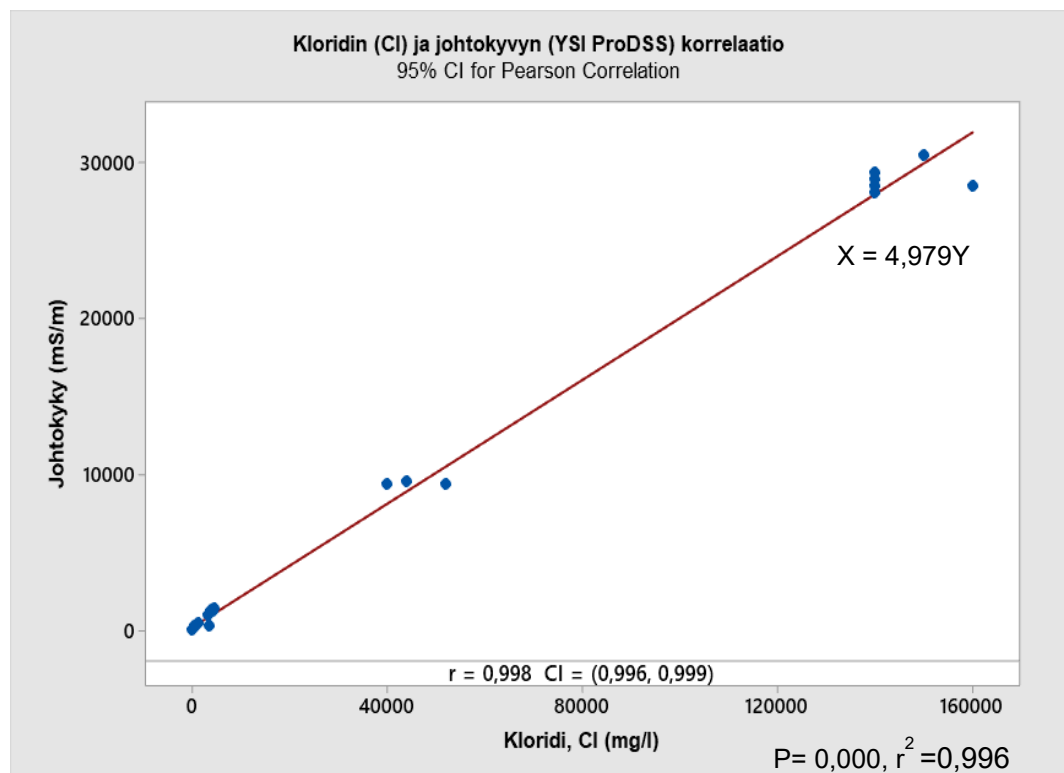
Maanalaisessa kaivoksessa vedet liikkuvat eri tasoilla pumppaamojen kautta pääasiallisesti aina ylemmällä tasolla olevalle pumppaamolle, kohti maan pintaa ja rikastushiekka-allasta. Tutkimuksessa oli oleellista tarkastella maanalaisen kaivoksen toiminnassa olevien pääpumppaamojen vesiä.

5.2 Johtokykyarvojen ja kloridipitoisuuksien korrelaatiot

YSI Pro DSS -kenttämittarilla mitattujen johtokykyarvojen sekä analysoitujen kloridipitoisuuksien välinen riippuvuus on vahva ($\rho = 0,998$). Selityskerroin ($r^2 = 0,996$) kertoo tulevien mittausten olevan lineaarinen olemassa olevaan joukkoon nähden.

Korrelaatiotarkastelun perusteella voitiin todeta kloridipitoisuuden ja johtokyvyn korreloivan hyvin ja näin ollen johtokykymittauksen tulosta voidaan käyttää kloridipitoisuuden suuruusluokan määrittämiseksi Kemin kaivoksen vesien tarkastelussa (kuva 14).

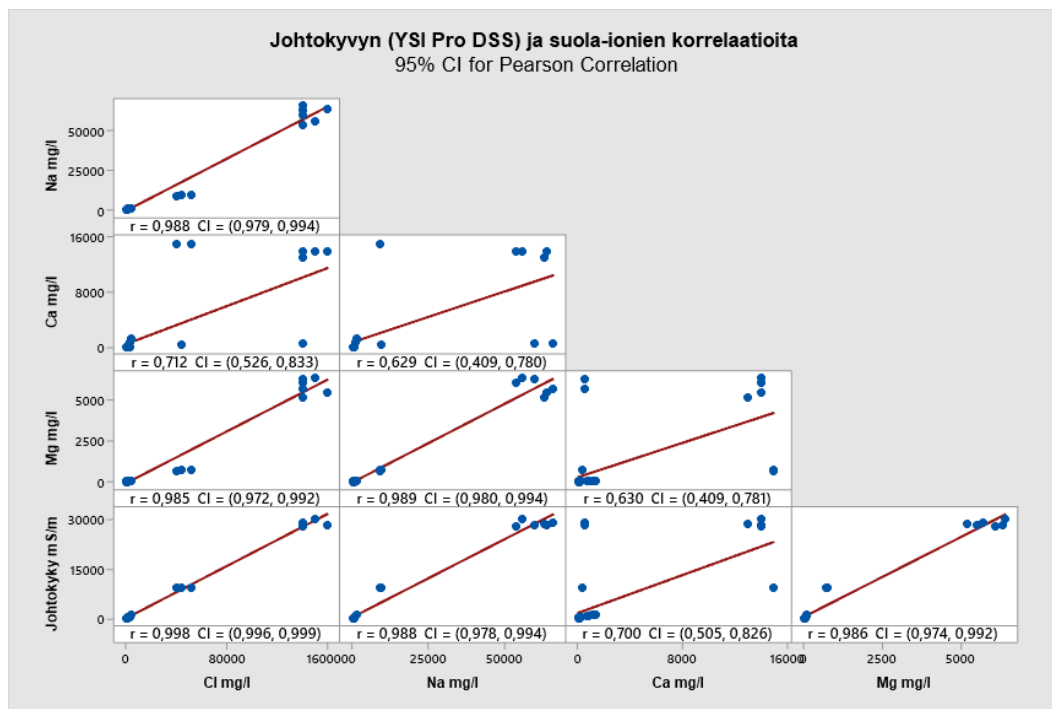
Tutkimuksessa tarkasteltujen pisteiden YSI Pro DSS -mittarilla mitattujen johtokykymittausten mittauskertakohtaisesti määritetty keskihajonta on 70 %:ssa mittauskerroista alle yhden. Keskihajonnasta voidaan todeta mitausten olevan luotettavalla tasolla. Korkeissa johtokykyarvoissa, jotka ovat mittarin mitausalueen ylärajalla, esiintyy huomattavasti suurempaa hajontaa rinnakkaismittausten välillä. Korrelaatiotarkastelussa käytetyt mittauskertakohtaiset keskiarvot mitaustuloksista sekä mitausten keskihajonnat ovat esitettyinä sivun 36 taulukossa 3.



Kuva 14. Kloridipitoisuuden ja YSI Pro DSS -kenttämittarilla mitatun johtokykyarvon korrelaatio (korrelaatiokerroin $\rho = 0,998$, selityskertoimen $r^2 = 0,996$, P-arvo $P = 0,000$)

Suolaionien natrium, kalsium ja magnesium osalta korrelaatiot ovat positiivisesti vahvoja verrattaessa johtokykyarvoon. Määritetyt Pearsonin korrelaatiokertoimet olivat kaikkien muiden vertailtavien komponenttien osalta suurempia kuin 0,9, mutta kalsiumin korrelaatio oli kaikkien komponenttien osalta 0,629–0,712. Korrelaation määrittämisessä lineaariselta linjalta eniten poikkeamia esiintyy kalsiumin osalta ($r^2 = 0,396$ – $0,507$). Suolaionien ja johtokykyarvojen korrelaatiot on esitetty kuvassa 15. Suola-ionien tarkempi tarkastelu ja ns. sitoutuminen toisiinsa, esimerkiksi kolmiodiagrammin avulla, olisi mahdollista, mikäli näytteistä olisi määritetty myös CHO_3 tai alkaliniteetti.

Tarkasteltaessa suola-ionien natrium ($\rho = 0,988$), kalsium ($\rho = 0,700$) ja magnesium ($\rho = 0,986$) vahvaa korrelaatiota mitattuihin johtokykyarvoihin, vahvistaa se edelleen mahdollisuutta määrittää vesinäytteen kloridipitoisuuden suuruusluokka YSI Pro DSS -kenttämittarilla mitatun johtokykyarvon perusteella.



Kuva 15. Suola-ionien ja johtokykyarvojen korrelaatioita.

Kemin Kaivoksen vesien kloridipitoisuuden seuranta voidaan toteuttaa opinäytetyön tutkimuksessa luodun yhtälön avulla, joka on kloridipitoisuuksien ja johtokykyarvojen lineaarisen regression yhtälö ($X = 4,979 \cdot Y$) (kuva 14). Lineaarisen regression yhtälön kaavalla lasketun kloridipitoisuuden tarkkuus on Kemin Kaivoksen käyttötarkoitukseen riittävällä tasolla.

5.3 Johtokymittausten tulokset YSI Pro DSS -kenttämittarilla

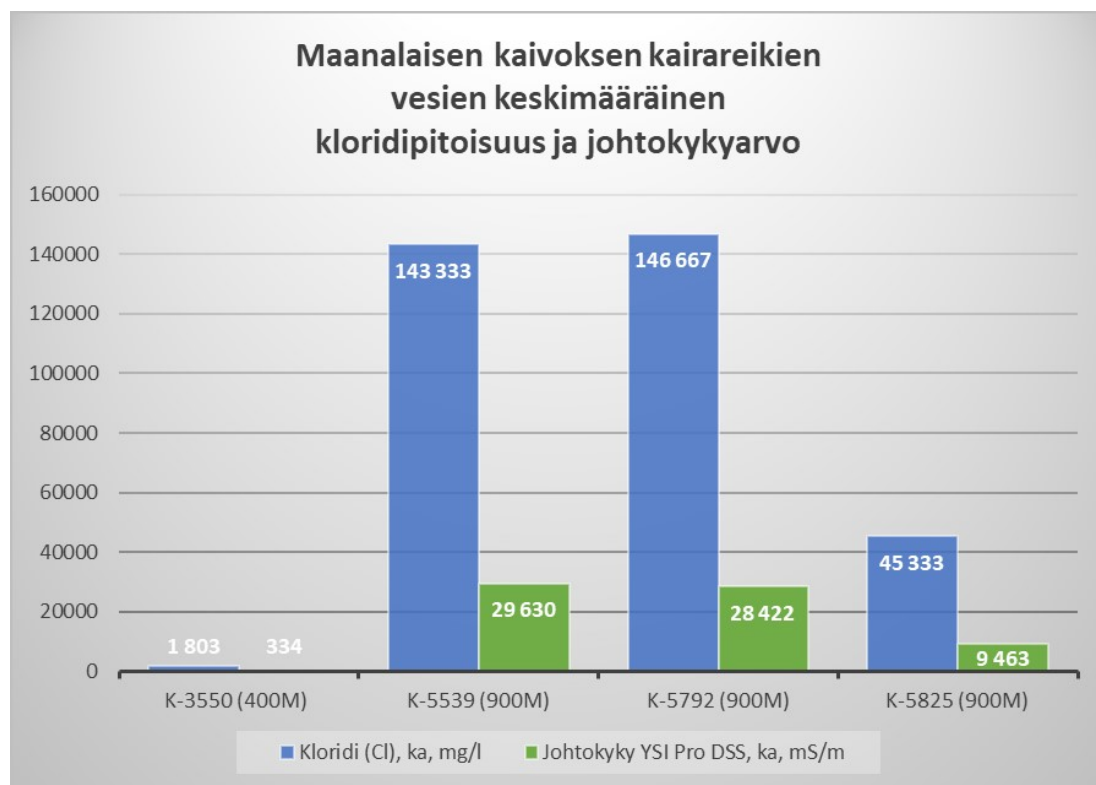
Johtokymittausten tuloksista nähdään tarkkailupisteiden viikoittaisten tulosten olevan samalla tasollaan koko tutkimuksen ajan maanpäällisen alueen tarkkailupisteissä sekä kairareikien vesissä (taulukko 2). YSI Pro DSS -kenttämittari toimi kentällä kaikissa erilaisissa mittausolosuhteissa moitteettomasti. Lämpötilalla, ilmankosteudella tai ilmanpaineella ei havaittu vaikutuksia mittauksiin.

Maanpäällisen alueen tarkkailupisteessä Chrp3, viikon 17 mittaus poikkeaa selkeästi muiden viikkojen mitatuista johtokykyarvoista kevättulvan saavuttua. Eroavaisuuksia johtokykyarvojen mittauksissa esiintyi viikkojen välillä maanalaisen kaivoksen pumppaamoilla. 350 m tason pumppaamon viikon 8 johtokykyarvo (452 mS/m) oli noin 400 mS/m suurempi verrattuna muiden tutkimusviikkojen mittaustuloksiin (noin 130 mS/m). Pumppaamojen 640 m ja 825 m, viikkojen 8 ja 17, johtokykyarvot olivat myös noin 400 mS/m korkeampia kuin viikoilla 11, 12 ja 14 mitatut. Pumppaamojen mittaustuloksissa näkyy selkeästi eniten poikkeamaa viikkojen välillä, ja todennäköisin syy tähän on pumppaamon kautta kulkevien vesien vaihtelu, riippuen pumpattavan veden lähteestä (valumavesiä, tuotannon poravesiä yms.) ja määrästä.

Tarkkailupisteiden mitattujen johtokykyarvojen taso kairanäytteiden vesissä oli erityisen korkea tasoluokkaa 10 000–30 000 mS/m. Maanalaisen kaivoksen ylempien tasojen pumppaamojen (350 m ja 500 m) vesien johtokykyarvot olivat tasoluokkaa 100–400 mS/m ja alempien tasojen (640 m ja 825 m) vesien johtokyky tasoluokkaa 700–1400 mS/m. Maanpäällisen alueen luonnonvesiä edustavissa tarkkailupisteissä (ChrP1 ja Chrp8) mitatut johtokykyarvot olivat luokkaa 4–11 mS/m. Muiden maanpäällisen alueen prosessivesien tarkkailupisteiden, joissa liikkuu prosessivesiä, mitatut johtokykyarvot olivat tasoluokkaa 70–300 mS/m.

Johtokykymittaustulosten lisäksi taulukossa 2 on esitetty eri värisävyillä johtokykyarvoa vastaavan analysoidun kloridipitoisuuden taso. Tasojen määrittäminen on käytetty Kanadassa toteutetussa tutkimuksessa määritettyjä kloridipitoisuuden ohjearvoja. Taulukon tuloksista näkee johtokykyarvojen kohoamisen ja kloridipitoisuuden lisääntymisen yhteneväisyyden sekä Kemin Kaivoksen alueella kohteet, joissa vesien kloridipitoisuuden tasot ovat korkeammat. Toki kloridipitoisuustasoja yli 1 g/l ja yli 100 g/l ei taulukossa ole tuotu värein esille. Tällaisia ovat useimmat maanalaisen kaivoksen kohteet.

Eri kairareikien vesien kenttämittausten johtokykyarvojen sekä analysoitujen kloridipitoisuuksien keskiarvojen selkeät erot on esitetty kuvassa 16. Korrelaatiotarkastelussa kairareikien korkean kloridipitoisuuden sisältävien vesien johtokykytulosten hajonta ja poikkeama lineaarisen regression kuvaajasta oli suurempaa kuin matalien kloridipitoisuuden sisältävien vesien mittaustuloksien osalta.



Kuva 16. Tutkimuksessa tarkasteltujen maanalaisen kaivoksen kairareikien keskimääräiset kloridipitoisuudet sekä johtokykyarvot (YSI Pro DSS)

Kaikkien kairareikien vesien kloridi, magnesium ja natrium -pitoisuudet olivat hyvinkin samalla tasolla jokaisella näytteenotokerralla. Kairareikien K-5539 ja K-5792 vesien kalsiumpitoisuudet poikkesivat selkeästi viimeisellä näytteenotokerralla aikaisempien viikkojen analysoiduista pitoisuuksista. Syytä tähän ei tunnistettu. 400 m tasolla sijaitsevan kairareian K-3550 vesissä natrium-, magnesium- sekä kalsiumpitoisuus olivat selkeästi matalampia verrattaessa muiden tarkasteltujen kairareikien vesiin. Kiintoainepitoisuuksissa esiintyi huomattavia eroavaisuuksia kairareikien ja näytteenotokertojen välillä vaihdellen <math><1-650\text{ mg/l}</math>.

Vain kairareian K-3550 vesistä oli myös sulfaattipitoisuudet ollut mahdollista analysoida (63–66 mg/l). Sulfaattipitoisuuksia ei laboratorion saatu runsaasti

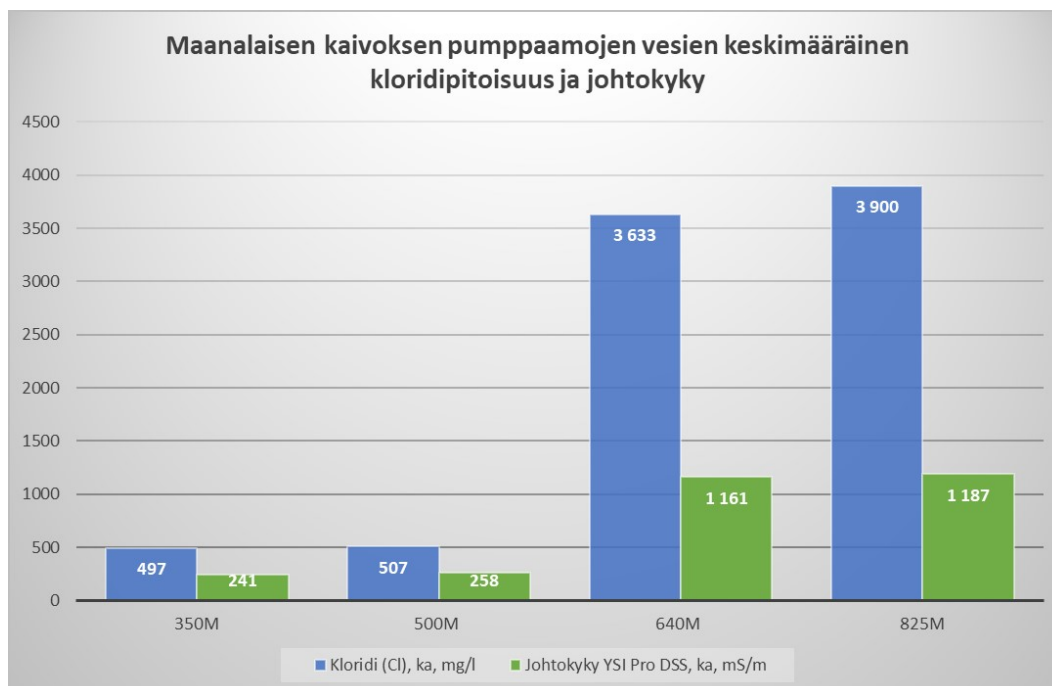
kloridia sisältävistä vesinäytteistä, koska korkea kloridipitoisuus häiritsi matriisivaikutuksena sulfaattianalyysiä.

5.5 Maanalaisen kaivoksen pumppaamojen vesien mittaus- ja analyysitulokset

Maanalaisen kaivoksen eri tasojen pumppaamojen tulokset olivat kaikilla näytteenottokerroilla pääasiallisesti samalla tasolla eri analysoitavien komponenttien osalta (liite 6). Poikkeamana tuloksissa oli 350 m tason pumppaamon ensimmäisen näytteenottokerran pitoisuudet. Ne olivat huomattavasti korkeampia kuin kahdella jälkimmäisellä näytteenottokerralla. Selkeää syytä tähän ei tunnistettu, mutta oletettava syy on pumppaamolle näytteenottohetkellä pumppattu runsaasti kloridia sisältävä vesi maanalaisen kaivoksen alempien tasojen pumppaamojen kautta, esimerkiksi kairaus ja tuotantokohteista. Kiintoainepitoisuuksissa taas esiintyi huomattavia poikkeamia tarkastelupisteiden ja näytteenottokertojen välillä. Pumppuasemien pumppausykyllä ja kiintoaineen laskeutuvuudella on oleellisesti merkitystä näytteen kiintoainepitoisuuden, sekä säiliöön pumpattavan kuivanapitoveden kiintoainepitoisuudella eri ajankohtina. Pumppaamojen analyysitulokset ovat kokonaisuutenaan esitetty liitteessä 6.

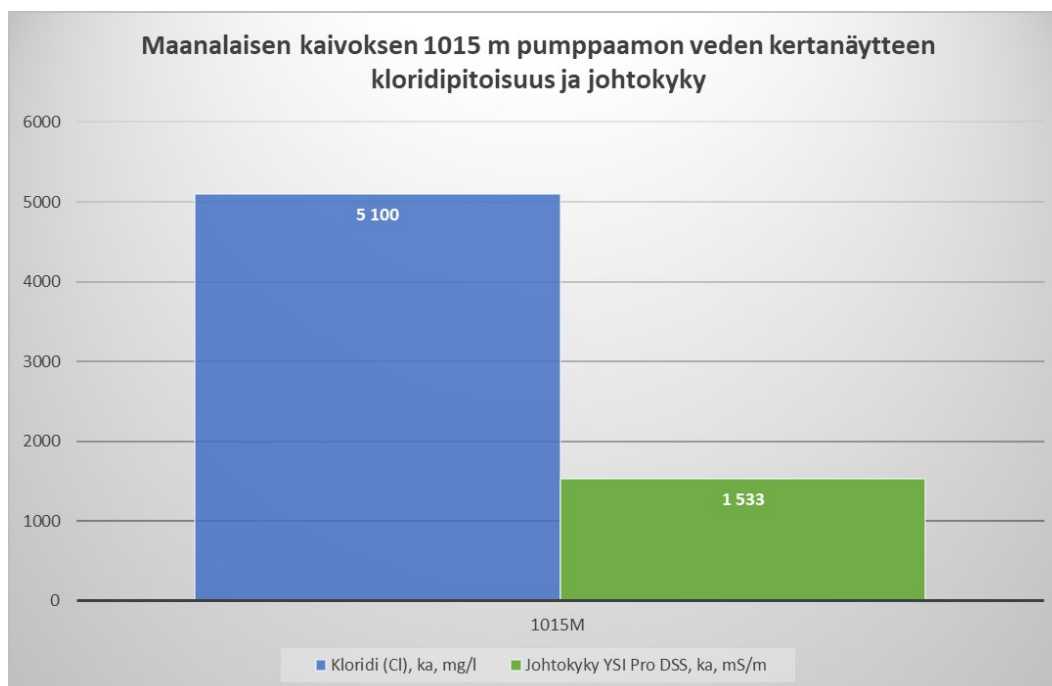
Analysoitujen vesinäytteiden kloridipitoisuus 3 100–4 500 mg/l sekä kenttämittauksen johtokykyarvo 942–1 388 mS/m olivat korkeampia syvempien tasojen (640 m sekä 835 m) pumppaamoilla. Ylempien tasojen (350 m ja 500 m) pumppaamoilla kloridipitoisuudet olivat tasoluokkaa 190–1 100 mg/l ja johtokykyarvo esiintyi välillä 135–452 mS/m. Sulfaattien pitoisuudet eivät noudattaneet samaa linjaa, vaan olivat samalla tasolla samalla tasolla kaikkien pumppaamojen vesissä.

Keskiarvopitoisuudet pumppuasemien vesien analysoiduista kloridipitoisuuksista sekä kenttämittauksen johtokykyarvoista on esitetty kuvassa 17. Kaaviossa tulee esille syvemmän tason (640 m ja 825 m) pumppaamojen pitoisuustason eron verrattaessa ylemmän tason pumppaamojen (350 m ja 500 m) vesiin. Korrelaatiotarkastelussa johtokykymittausten tulosten hajonta oli pääasiassa alle 1 mS/m. Lineaarisen regression osalta poikkeamaa esiintyi vähäisesti 640 m ja 825 m pumppaamojen osalta.



Kuva 17. Tutkimuksessa tarkasteltujen pääpumppaamoiden keskimääräiset kloridipitoisuudet sekä johtokykyarvot (YSI Pro DSS).

Yksittäisen, 1015 m tason pumppuasemalta otetun, vesinäytteen johtokykyarvo sekä kloridipitoisuus olivat korkeampia kuin kaikkien tutkimuksessa tarkasteltujen ylemmän tason pumppaamojen vesistä oli analysoitu (kuva 18). Sulfaattipitoisuus oli samaa tasoa kuin muillakin pumppuasemilla.



Kuva 18. Maanalaisen kaivoksen 1015 m pumppaamon veden kertonäytteen kloridipitoisuus ja johtokykyarvo (YSI Pro DSS).

5.6 Maanpäällisen alueen vesien mittaus- ja analyysitulokset

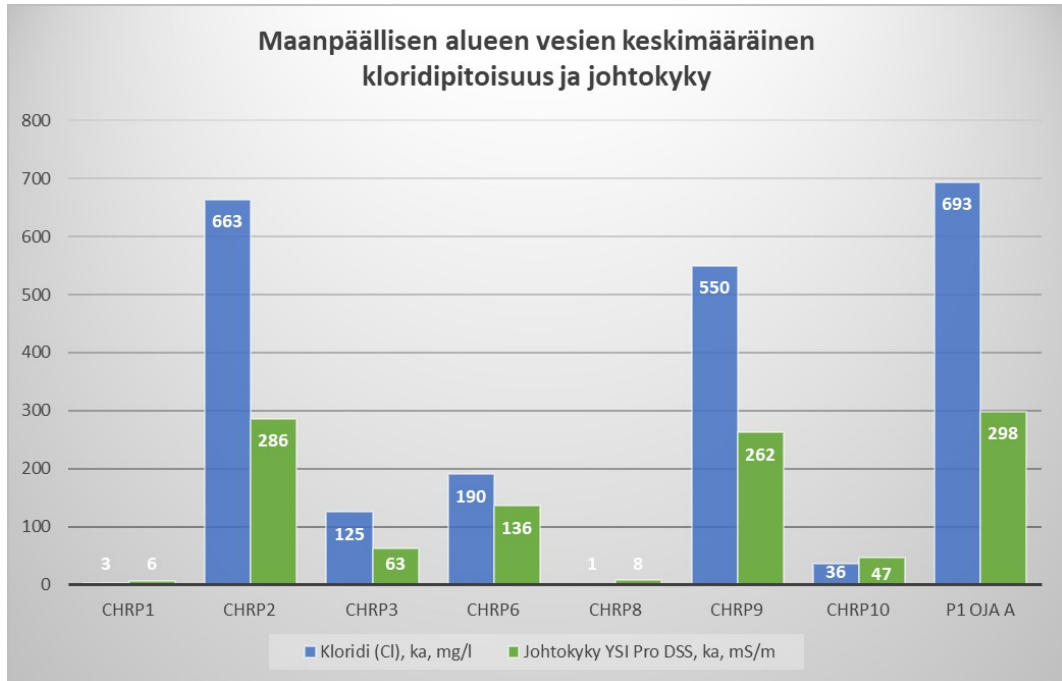
Maanpäällisen alueen tarkastelupisteiden mittaus- ja analyysitulosten tasot olivat läpi tarkastelujakson lähes samalla tasolla kaikilla määritettävillä komponenteilla (liite 6). Eniten poikkeamaa tuloksissa näytteenotokertojen välillä esiintyi maanalaisesta kaivoksesta pumpattavien vesien tarkkailupisteessä keääjäkaivo P1 Oja A. Kuvassa 19 on esitetty eri maanpäällisen alueen tarkkailupisteiden analysoitujen kloridipitoisuuksien sekä kenttämittausten johtokykyarvojen keskiarvot havainnollistamaan pitoisuuseroja. Maanpäällisen alueen vesien analyysitulokset ovat kokonaisuutenaan esitetty liitteessä 6.

Todella matalia kloridipitoisuuksia sekä muidenkin analysoitujen komponenttien pitoisuuksia esiintyi luonnonvesien tarkastelupisteissä ChrP1 Kirvesoja sekä ChrP8 tien rumpu. Analysoitu kloridipitoisuus luonnonveden tarkkailupisteissä oli tasolla 1–3 mg/l. Kenttämittarilla mitattujen johtokykyarvojen taso oli myös todella matala 5–9 mS/m.

Prosessivesien osalta esiintyivät korkeimmat analysoitujen komponenttien pitoisuudet sekä mitatut johtokykyarvot maan päällisen alueen tarkkailupisteissä P1 OJA A (maanalaisen kaivoksen kuivanapitovesien maanpäällinen pumpauspiste), ChrP9 (rikastushiekka-altaan suotovesien tarkkailupiste) sekä ChrP2 (selkeytysaltaiden vesien purkupiste). Kenttämittarilla mitatut johtokykyarvot olivat tasolla 242–388 mS/m ja analysoidut kloridipitoisuudet tasolla 550–970 mg/l.

Hiukan alempana purkuvesistöä tarkkailupisteessä ChrP3 (Isoruonaoja alapuolinen), kaikkien analysoitavien komponenttien pitoisuudet olivat matalampia kuin kaivoksen allasalueen kierrossa olevissa vesissä. Kloridipitoisuuden taso oli kahdella ensimmäisellä näytteenotokerralla 140–200 mg/l ja johtokykyarvo 70–97 mS/m. Viimeisellä, tulva aikaan sijoittuvalla näytteenotokerralla, alapuolisen tarkkailupisteen (ChrP3) analyysitulokset olivat selkeästi matalammalla tasolla. Taso oli noin neljännes aikaisemmista näytteenotokertojen analysoiduista pitoisuuksista. Kloridin osalta pitoisuus oli 36 mg/l ja johtokykyarvo oli 21 mS/m.

Kiintoainepitoisuudet olivat kaikissa maanpäällisissä tarkkailupisteissä vähäisempi kuin maanalaisen kaivoksen pumppaamojen vesien kiintoainepitoisuudet. Maanpäällisen alueen vesien kiintoainepitoisuus oli <math><1-11\text{ mg/l}</math> ja maanalaisen kaivoksen pumppaamojen 2–2 400 mg/l.



Kuva 19. Tutkimuksessa tarkasteltujen kaivoksen maanpäällisen alueen pisteiden kloridipitoisuuksia sekä johtokykyarvoja (YSI Pro DSS).

6 TULOKSIEN TARKASTELU

6.1 Kloridipitoisuus ja johtokyky

Kloridi-ionien pitoisuuden arviointi veden sähkönjohtavuuden funktiona osoitautui opinnäytetyön tutkimuksessa mahdolliseksi. Samanlaiseen tulokseen on tultu Meksikossa vuonna 2011 tehdyssä tutkimuksessa, jossa tarkasteltiin mm. kloridipitoisuuden ja pohjaveden sähkönjohtavuuden suhdetta. Tarkastelussa oli käytetty vuosien 1980–2008 aikana pohjavesistä kerättyjä 1358 näytettä sekä vuonna 2008 kerättyä 66 näytettä. Kerätyille näytteille tutkimuksessa määriteltiin lineaarinen regressiomalli veden sähkönjohtokyvyn ja kloridipitoisuuden välille. Tutkimuksessa todettiin eri tutkimusten perusteella, että veden sähkönjohtavuudet ja kloridipitoisuudet voidaan sovittaa hyvin lineaariselle, polynomi- ja potentiaalimalleille. Vuosien 1980–2008 aikana kerättyjen näytteiden lineaarisen mallin korrelaatiokertoimeksi tutkimuksessa määritettiin $\rho = 0,965$ ja selityskertoimeksi $r^2 = 0,932$ ja vuonna 2008 kerättyjen näytteiden korrelaatiokertoimeksi tutkimuksessa määritettiin $\rho = 0,946$ ja selityskertoimeksi $r^2 = 0,896$. (Peinado-Guevara ym. 2011.)

Meksikossa tehdyssä tutkimuksessa todettiin myöskin kulmakertoimen kasvavan kloridipitoisuuden kohoamisen funktiona. Tutkimuksen havainnot ja tulokset tukevat opinnäytetyön tutkimuksen tulosta, Kemin Kaivoksen vesistä analysoitujen kloridipitoisuuksien sekä kenttämittauksilla mitattujen johtokykyarvojen hyvästä korrelaatiosta. (Peinado-Guevara ym. 2011.)

6.2 Maanalaisen kaivoksen kairareivät sekä pumppaamot

Kemin Kaivoksen maanalaisen kaivoksen alueen vesivirtojen tarkastelu, sisältäen kairareikien sisältämiä vesiä sekä maanalaisilla pumppaamoilla liikkuvia vesiä, osoittaa suurimpien kloridipitoisuuksien esiintymisen kallioperän syvemmillä tasoilla, mm. 900 m tasolla sijaitsevien kairareikien vesissä. Kairareikien vesien analysoidut kloridipitoisuudet 900 m tasolla sijaitsevien kairareikien osalta olivat pienimpänäkin pitoisuutena yhdessä kairareissä 40 g/l ja kahdessa kairareissä 140 g/l. Korkean kloridipitoisuuden sisältäviä vesiä voi esiintyä myös ylemmillä maanalaisen kaivoksen tasoilla esimerkiksi kairareistä purkautuvissa vesissä, vaikkakin tässä tutkimuksessa sellaisia ei ollut tarkasteltavana. Näiden yli 100 g/l kloridia sisältävien vesien alkuperä voi

mahdollisesti olla kallioperän Brine-vesiä. Vedet voivat olla alkuperältään metamorfisia vesiä ja peräisin jopa muinaisen Litorinanmeren aikakaudelta 7 500-4 500 BP (before present). (Blomqvist 1999; Nurmi 1987.)

Kairareikien vesien koostumusta eri suolaionien yhdisteinä ja millaisia yhdisteiden koostumuseroja eri kairareikien vesissä esiintyy, ei ollut toteutettavissa tutkimuksessa toteutettujen analyysien perusteella. Kolmiodiagrammien avulla tarkastelu olisi ollut mahdollista, mikäli vesistä olisi analysoitu CHO_3 -pitoisuus tai alkaliniteetti. Nyt vertailua on toteutettu vain kunkin suolaionin ja johtokykyarvon korrelaation tarkastelulla. Näissä tarkasteluissa selkeästi kalsiumionien korrelaatio on heikoin.

Kallioperässä esiintyvät kloridipitoiset vedet purkautuvat maanalaisen kaivoksen tuotantotiloihin. Nykyhetkellä suurimmissa pitoisuuksissa 900 m tasolla kairareikien vesissä yli 140 g/l kloridia sisältävät vedet purkautuvat tuotantotiloihin ja johtautuvat 825 m (3,9 g/l kloridia) syvyydessä sijaitsevan pumppaamon sekä 1015 m (5,1 g/l kloridia) syvyydessä sijaitsevan pumppaamalla liikkuviin vesiin. Maanalaisen kaivoksen vesikierron syvemmilta tasoilta kohti maan pintaa, eri tasojen pumppaamojen kautta taso kerrallaan, johdettavat kuivanapitovedet tuovat syvältä maanalaisesta kaivoksesta, 1015 m tasolta alkaen, kloridipitoiset vedet maan pinnan vesistöön. Ylemmillä pumppaamotasoilla vedet sekoittuvat aina vähäkloridipitoisempiin raaka-, suoto- ja valumavesiin. Tämä on selkeästi havaittavissa vesistä analysoiduista kloridipitoisuuksista. Lähellä maan pintaa sijaitsevan 350 m tason pumppaamon vesialtaasta analysoitujen vesinäytteiden kloridipitoisuus oli alimmillaan 190 mg/l.

6.3 Maanpäällinen alue

Kemin Kaivoksen maanpäällisen alueen osalta tutkimuksen tuloksista nähdään luonnonvesien vähäinen kloridipitoisuus. Luonnonvesiä alueella virtaa Kirvesojassa (tarkkailupiste ChrP1) sekä Sivakkoajan oja rummussa (tarkkailupiste Chrp8). Luonnonvesien kloridipitoisuus on samalla tasolla opinnäytetyön tutkimuksen analyysituloksissa kuin se on ollut veloitettarkkailun alkuvuodesta 2010 asti. Maanpäällisen alueen keskimääräiset kloridipitoisuudet sekä johtokykyarvot ovat esitettynä kuvassa 19, sivulla 41.

Maanalaisesta kaivoksesta pumpattavien kuivanapitovesien tarkastelupisteen kerääjäkaivo P1 Oja A:n vesien keskimääräinen kloridipitoisuus on lähes 700 mg/l. Vuoden 2020 alkukuukausien kloridipitoisuuden taso sisäisen tarkkailun näytteissä on ollut samalla tasolla kuin on opinnäytetyön tutkimuksessa analysoitujen vesinäytteiden pitoisuuksien taso. Opinnäytetyön tutkimuksen esiselvityksien mukaisesti vuosien 2017–2019 kloridipitoisuuden taso on kerääjäkaivon vesinäytteissä ollut kloridipitoisuuden osalta korkeampi kuin opinnäytetyön tutkimuksessa analysoiduissa vesinäytteissä (kuva 12).

Kerääjäkaivon vesien kloridipitoisuus on matalampi kuin maanalaisen kaivoksen kairareikien vesien ja syvempien tasojen pumppaamoilla liikkuvien vesien kloridipitoisuus. Kerääjäkaivolta kaivoksesta pumpatut vedet johdetaan rikastushiekka-altaalle 7, jonka suotovedessä (tarkastelupisteessä Chrp9), keskimääräinen kloridipitoisuus on matalampi kuin maanalaisesta kaivoksesta kerääjäkaivolle pumpattavassa vedessä, mutta korkeampi kuin purkuvesistössä, alapuolisessa tarkkailupisteessä ChrP3.

Rikastushiekka-altaalle vesiä pumpataan eri kohteista, mm. rikastamon prosessivedet sekä kaivosalueen hulevesiä. Rikastushiekka-altaalta kloridipitoiset vedet kulkeutuvat selkeytysaltaiden kautta. Selkeytysaltaiden kautta kulkiessa vesien kloridipitoisuus edelleen laskee. Allasalueiden vesikiertoon pumpattavat hulevedet laimentavat vesien kloridipitoisuuksia vesikierrrossa. Laimentunut, mutta silti selkeästi luonnonvesiä ja talousvesiä suuremman kloridipitoisuuden sisältävät vedet purkautuvat kaivoksen purkuvesistöön Iso-Ruonaojaan. Kaivosalueelta purettavan vesimassan keskimääräinen kloridipitoisuus, vesien liikkua selkeytysaltaiden 4 ja 5 läpi, on Iso-Ruonaojan tarkkailupisteessä Chrp2 korkeampi kuin korkeampi kuin purkuvesistössä, Iso-Ruonaojan alapuolisessa tarkkailupisteessä ChrP3. Pitoisuustaso on samaa luokkaa kuin tutkimuksen esiselvityksissä vuodesta 2015 alkaen esiintynyt keskimääräinen taso 600 mg/l (kuva 13). Vesiä pumpataan myöskin selkeytysaltaalta 5 rikastamolle prosessivedeksi ja vedet palaavat rikastamon prosessista uudelleen rikastushiekka-altaalle sisäiseen kiertoon.

Purkuvesistön, Iso-Ruonaojan, alemmassa tarkkailupisteessä Chrp3 keskimääräinen kloridipitoisuus on korkeampi kuin Iso-Ruonaojaan myöskin laske-

van Kirvesojan (luonnonveden) kloridipitoisuus. Maanpäällisellä alueella vesien kloridipitoisuudet pienenevät suhteellisen lineaarisesti edettäessä rikastushiekka-altaalta vesien selkeytysaltaiden kiertoon ja edelleen selkeytysaltailta purettaviin vesiin ja purkuvesistöön. Opinnäytetyön tutkimuksen tuloksissa Iso-Ruonaojan alapuolisen tarkastelupisteen kloridipitoisuudet esiintyivät samalla tasolla (n. 200 mg/l) kuin ne veloitetarkkailun tuloksissa vuonna 2019 keskimääräisesti esiintyivät. (Kettunen 2020; Juutinen 2020.)

Verrattaessa Kemin kaivoksen maanalaisesta kaivoksesta pumpattavia kuivanapitovesiä, rikastushiekka-altaalle pumpattavien prosessivesien sekä kaivosalueelta purettavan veden kloridipitoisuuksia Kanadassa sekä Rhode Islandissa määriteltyihin ohjearvoihin, ovat vesien kloridipitoisuudet korkealla tasolla. Lyhyen altistumisajan akuuttien vaikutusten maksimiarvot 640 mg/l (Kanada) ylittyy ja 860 mg/l (Rhode Island) arvon alapuolelle jäädään kaikissa tarkastelupisteissä. Korkein Kemin kaivoksen maanpäällisen alueen vesien analysoitu kloridipitoisuus 700 mg/l, jää 160 mg/l alle Rhode Islandin maksimiarvosta (860 mg/l). Pitemmän altistumisen raja-arvoja tarkasteltaessa kaivoksen kuivanapitovedet sekä rikastamon prosessivedet ovat kloridipitoisuuksiltaan selkeästi yli enimmäisarvojen 120 mg/l (Kanada) ja 230 mg/l (Rhode Island). Iso-Ruonaojassa, alapuolisessa purkuvesistön tarkkailupisteessä (Chrp3) analysoidut kloridipitoisuudet ovat Kanadassa määritellyn pitemmän altistumisen, kroonisten haittavaikutusten enimmäispitoisuuden ohjearvon tasolla, mutta selkeästi alle Rhode Islandilla asetetun enimmäisarvon. (Chloride 2011; Hunt 2012.)

Nuottijärven pumppaamolta pumpattavien ja ojien kautta tarkkailupisteelle Chrp10 johdettavien vesien keskimääräinen kloridipitoisuus on jonkin verran koreampi kuin luonnonveden kloridipitoisuus, mutta huomattavasti matalampi kuin kaivoksen prosesseissa liikkuvissa vesissä esiintyvä kloridipitoisuus.

Viian avolouhoksessa, josta pumpataan maanalaiseen kaivoksen poravesi, keskimääräinen analysoidun kloridipitoisuuden taso (tarkkailupisteessä Chrp6) on samalla tasolla kuin opinnäytetyön tutkimuksen esiselvityksien tarkastelussa sen on todettu olleen vuodesta 2018 alkaen (kuva 13). Maanalaisesta kaivoksesta pumpattuja kuivanapitovesiä on osittain ohjattu kulkemaan myös takaisin Viian avolouhokseen, poravesivarastoon. Viian avolouhoksen veden

analysoidun kloridipitoisuuden ollessa 200 mg/l, on maanalaisessa kaivoksessa käytettävässä poravedessä jo lähtötilanteessa kloridipitoisuus kohonnut verrattaessa luonnonveden kloridipitoisuuteen. Viian avolouhoksen porave- tenä käytettävän veden analysoitu kloridipitoisuus ylittää Kanadassa määritel- lyn pitemmän altistumisen, kroonisten haittavaikutusten enimmäispitoisuuden ohjearvon 120 mg/l, mutta on 30 mg/l alle Rhode Islandilla asetetun enim- mäisarvon 230 mg/l. (Chloride 2011; Hunt 2012.)

On mahdollista, että kaivosalueen maanpäällisessä vesienkierrossa ja puret- tavassa vedessä kloridipitoisuudet ovat jatkossa pienempinä pitoisuuksina. Toisaalta on myös mahdollista, että tuotannon käynnistyminen kaivoksen sy- vemmillä tuotantotasoilla ns. DeepMine -alueella, joissa runsaammin kloridia sisältäviä vesiä esiintyy, nostaa jälleen vesien kloridipitoisuuksia. Kaivoksen purkuvesistön mahdollinen lisääntyvä kloridikuormittuminen voisi tulevaisuu- dessa aiheuttaa purkuvesistön eliöstölle haittavaikutuksia. Vaikutusten aste- seen vaikuttaisi oleellisesti kuormituksen kokonaismäärä lyhyillä ja pitemmillä ajanjaksoilla.

6.4 Korroosiovaikutukset

Korroosiovaikutuksia vesien kohonneilla kloridipitoisuuksilla on mm teräksiin, joita käytetään koneiden ja erilaisten rakenteiden materiaalina. Kloridipitoisuu- den lisäksi korroosiovaikutukseen vaikuttaa olosuhteet mm. ilmankosteus sekä lämpötila (liite 5). Kemin kaivoksen alueella korroosiovaikutuksia lisääviä kohonneita ilmankosteuden olosuhteita esiintyy maanalaisessa kaivoksessa sekä rikastamon prosessissa. (Vestola ym. 2006, 28–37.)

Maanalaisessa kaivoksessa korroosiovaikutuksia lisääviä kloridipitoisuuksia esiintyy syvemmillä tuotantotasoilla kairareikien vesisisissä. Myöskin pumppu- asemilla liikkuvien vesien kloridipitoisuudet lisäävät korroosiovaikutuksia. Eri- tyisesti syvempien tasojen pumppaamoilla (kuva 16). Maanpäällisellä alueella korroosiovaikutukset kohdistuvat rikastamon prosessin rakennemateriaaleihin sekä prosessin laitteiden materiaaleihin. Rikastamon prosessissa käytettävä vesi pumpataan vesien selkeytysaltaalta, jossa opinnäytetyön tutkimuksen tu- loksena esiintyy myöskin kloridipitoisia vesiä tarkkailupisteessä ChrP2 (kuva 19).

7 YHTEENVETO JA KEHITYSKOhteITA

Kemin kaivoksen vesissä esiintyvän kloridipitoisuuden lähteeksi opinnäytetyön tutkimuksen tuloksena on vahvistettu maanalaisen kaivoksen kallioperä ja kallioperässä sijaitsevat vesitaskut. Tämä mahdollistaa jatkoselvitysten kohdentamista oikeille osa-alueille.

Tutkimuksen tuloksena määritellyn lineaarisen regression kaavan avulla Kemin Kaivoksen vesien kloridipitoisuuksien tasoluokka voidaan määrittää kenttämittarilla mitatuista johtokykyarvoista. Kemin Kaivoksella mm. DeepMine alueelta rakennustyömailla esiintyvien vesien ja kairareikien kairauksessa purkautuvien vesien osalta menetelmä on ollut jo käytössä ja toimenpideratkaisuja voidaan ohjata saatujen tulosten perusteella.

Jokaisessa tutkimuksen kohteessa kaikkien kolmen analyysin osalta analyysitulokset olivat hyvin samansuuntaisia. Kloridipitoisuuksissa sekä kloridipitoisten vesien liikkumisessa on mahdollista esiintyä vaihtelua ja muutoksia. Esimerkiksi ohjailtaessa vesiä liikkumaan eri reiteillä tai muiden muutostöiden vaikutusten myötä, erityisesti maanalaisessa kaivoksessa esimerkiksi tulvapumppausten aikana. Maanpäällisellä alueella on myös mahdollista esimerkiksi vuodenajan mukaisten vaihteluiden (tulva-aika).

Kemin Kaivoksella olisi tarpeellista jatkossa toteuttaa vesien kloridipitoisuuksien seuranta kenttämittauksilla, jotta kloridipitoisten vesien esiintymiskohteiden ja vesien sisältämien kloridipitoisuuksien vaikutusten määrittelyyn mm. ympäristön, tuotannon ja turvallisuuden näkökulmista saadaan lisää tarkentavaa tietoa. Tärkeä tarkastelunäkökulma on kloridipitoisten vesien lähde ja kloridien aiheuttamien rakenneympäristön ja laitteistojen korroosiovaikutusten mahdollisuus. Vaikuttavatko vesien korkeammat kloridipitoisuudet epäorgaanisten alkuaineiden, metallien, liukenemiseen kallioperästä, vai tapahtuuko liukeneminen vain korroosiovaikutusten tuotteena. Kirjallisuuden korroosiotietojen perusteella selkeitä korroosioriskejä on todennäköisimmin olemassa erityisesti maanalaisen kaivoksen olosuhteissa.

Opinnäytetyössä toteutetun kloridipitoisten vesien kartoituksen jälkeen tulisi ympäristövaikutusten osalta kartoittaa vesien sisältämän kloridin aiheuttamaa kuormitusta kaivosalueella sekä purkuvesistössä. Kuormituksen kartoittamiseksi on oleellista tunnistaa ja hallita virtaavia vesimääriä, jotka maanpäällisellä alueella hallitaan vuosittaisen vesitaseen sekä alueelle sijoitettujen mittakaivojen (V-pato) ja virtaamamittarien avulla. Maanalaisen kaivoksen osalta virtaamia ja vesien hallintaa tulisi kehittää esimerkiksi asentamalla virtausmittareita tunnistamaan eri kohteissa liikkuvia vesimääriä.

Kloridipitoisten vesien esiintymisien ennustettavuutta voisi kehittää kaivoksen tuotannossa jo kairareikien kairausten yhteydessä. Luodaan toiminta- ja analyysiohjelma, kun kairareikiä kairatessa esiintyy purkautuvia vesiä. Pumppaamojen yhteydessä on jo nykyisellään johtokykymittauksia, mutta mittauksien toiminta, toiminnan varmuus sekä laatu tulisi selvittää. Tulevaisuudessa voisi rakentaa mahdollisen automatisoidun johtokykymittauksen eri vesikohteisiin koko kaivosalueella.

Vesien sisäisien kierrätysten osalta tulisi tarkastella sisäisien kiertojen vaikutusta kiertävän veden kloridipitoisuuteen. Veden kloridipitoisuus todennäköisesti alkaa kohota veden sisäisessä kierrossa, mutta voidaanko sisäisen kierroksen veden kloridipitoisuutta laskea ottamalla kiertoon mukaan säännöllisesti matalakloridipitoista vettä. Erityisesti tutkimuksessa havaittujen suurempien kloridipitoisuuksien vesien sisäisen kierrätyksen osalta tulee kloridipitoisuuden ”rikastuminen” estää korroosivaikutusten vuoksi.

Tulevaisuuden kannalta tulisi kartoittaa opinnäytetyön tutkimuksessa selvitettylle vesien pitoisuustasolle soveltuvia teknisiä ratkaisuvaihtoehtoja, joilla vesien kloridipitoisuuden vähentäminen tai poistaminen olisi mahdollista Kemin Kaivoksen alueella liikkuvista vesistä. Huomioitavia asioita ovat kloridipitoisuus ja toiminta olosuhteet ja miten veden kiintoainepitoisuus vaikuttaa tekniikan toimintaan.

LÄHTEET

Alapieti, T. & Huhtelin, T. 2005. The Kemi Intrusion and associated chromite deposit. Opas 51a. Chapter 2. Geologian tutkimuskeskus. Espoo.

Aluehallintovirasto. 2010. LUPAPÄÄTÖS Nro 125/10/1. Dnro PSAVI/121/04.08/2010. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://docplayer.fi/7712645-Asia-luvan-hakija-lupapaatos-nro-125-10-1-dnro-psavi-121-04-08-2010-annettu-julkipanon-jalkeen-27-12-2010.html> [viitattu 1.12.2020]

Bessaim, M., Missoum, M., Bendani, K., Laredj, N. & Bekkouche, M. 2020. Effect of processing time on removal of harmful emerging salt pollutants from saline-sodic soil during electrochemical remediation. *Chemosphere* 253 (2020) 126688. Abdelhamid Ibn Badis University of Mostaganem. Algeria.

Blomqvist, R. 1999. Hydrogeochemistry of deep groundwaters in the central part of the Fennoscandian Shield. Tiedonanto YST-101. Geologian tutkimuskeskus. Espoo.

Chloride. 2011. Canadian Council of Ministers of the Environment. Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life.

Geilfus, C. 2018. Chloride in soil: From nutrient to soil pollutant. *Environmental and Experimental Botany* 157 (2019) 299–309. Humboldt-University of Berlin. Germany.

Eurofins. 2020. Tutkimustodistus AR-20-YS-003543-01.

Hunt, M., Herron, E. & Green, L. 2012. Chlorides in Fresh Water. URI watershed watch. College of the Environment and Life Sciences (CELS). Department of Natural Resources Science (NRS). Rhode Island.

Juutinen, A. 2020. Konsultti. Sähköpostiviesti. Kemin kaivoksen kesäkuun vesistötarkkailun tuloksia. Afry.

Kaivosvastuu. 2019. Yrityskortti. Outokumpu Chrome Oy. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.kaivosvastuu.fi/yrityskortti/outokumpu-chrome-oy-2-2-2/> [viitattu 8.12.2020]

Kemin Kaivos. 2016. Tulo- ja poistovesialtaat ja muuntamot. Kaivosleikkaus. MAKKA Kaavio 480812-1.

Kettunen, K. 2020. Kemin kaivoksen velvoitetarkkailun vuosiyhteenveto 2019. Afry. Oulu.

Maanmittauslaitos. 2020. Karttapohja.

Nurmi, P., Kukkonen, I. & Lahermo, P. 1987. Geochemistry and origin of saline groundwaters in the Fennoscandian Shield. Geological Survey of Finland. SF-02150 Espoo. Finland

Peinado-Guevara, H., Green-Ruíz, C., Herrera-Barrientos, J., Escolero-Fuentes, O., Delgado-Rodríguez, O., Belmonte-Jiménez, S. & Ladrón de Guevara, M. 2011. Relationship between chloride concentration and electrical conductivity in groundwater and its estimation from vertical electrical soundings (VESs) in Guasave, Sinaloa, Mexico. Environmental and ecology research note. Santiago. Chile.

Puro - ympäristötiedon hallintajärjestelmä. 2020. Kemin Kaivoksen vesistö-tarkkailu.

Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksen 17.11.2015/1352. Liite 1.

Statistic how to. 2021. Correlation coefficient formula. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.statisticshowto.com> [viitattu 16.12.2020]

Vanhat kartat. 2020. Maanmittauslaitos. WWW-dokumentti. Saatavilla: <https://vanhatkartat.fi/#11.05/65.7686/24.7084> [viitattu 18.12.2020]

Valvira. 2020. Ohje 5/2020. Dnro V/33102/2020. Talousvesiasetuksen soveltamisohje. Osa III. Enimmäisarvojen perusteet.

Vestola, E., Pohjanne, P., Carpén, L., Kaunisto, T. & Ahlroos, T. 2006. Kalsiumkloridin sivuvaikutukset. Tiehallinto. Helsinki. s.28-37

YVA-ohjelma. 2020. Outokumpu Chrome Oy, Kemin kaivoksen laajentaminen, Envineer

Xylem brand. 2018. Prodigital User Manual. Item# 626973-01REF. Revision F

Xylem. s.a. ProDSS multiparameter waer quality field instrument. Catalog W86-02. Rev B. s.

KUVALUETTELO

Kuva 1. Kanadassa tehdyn tutkimuksen tuloksia kloridi-ionin lyhytaikaisesta altistumisesta vesistössä. Tuloksena tutkimuksessa määritettiin ohjearvoksi 640 mg/l kloridi-ioneja. (Chloride 2011.)

Kuva 2. Kanadassa tehdyn tutkimuksen tuloksia kloridi-ionin pitkäaikaisesta altistumisesta vesistössä. Tuloksena tutkimuksessa määritettiin pitkän altistusajan ohjearvoksi 120 mg/l kloridi-ioneja. (Chloride 2011.)

Kuva 3. Kemin kaivoksen purkuvesien kloridin kokonaiskuormitus vuosille 2004-2019 (Kettunen 2020).

Kuva 4. Veden kloridipitoisuuksien kehittyminen vuosina 2010-2020. Kuvaajina kloridipitoisuudet kaivoksen tarkkailupisteissä: yläpuolinen tarkkailupiste Kirvesoja (ChrP1), kaivoksen alapuolinen tarkkailupiste Iso-Ruonaoja alapuolinen (ChrP3), Hepolahti (Chrp4) sekä alaosassa Iso-Ruonaojaa sijaitseva tarkkailupiste (ChrP5) (Juutinen 2020).

Kuva 5. Kemin Kaivoksen pituusleikkaus. (YVA-ohjelma 2020, 18.)

Kuva 6. Kaavio maanalaisen kaivoksen vesien kulkuun pumppuasemista ja altaista (Kemin kaivos 2016).

Kuva 7. Kemin Kaivoksen maanpäällisen alueen vesien kulkupaikkoja ja kulkusuuntia mustilla nuolilla esitettyä (Maanmittauslaitos 2020).

Kuva 8. YSI Pro DSS -kenttämittari

Kuva 9. Tutkimuksessa tarkasteltujen kairareikien sijainti maanalaisessa kaivoksessa. Violetilla värillä on esitetty taso 400 m ja vihreällä taso 900 m.

Kuva 10. Vasemmalla sinetöity kairareikä K-3550 maanalaisen kaivoksen tasolla 400 m ja oikealla kairareikä K-5825 maanalaisen kaivoksen tasolla 900 m.

Kuva 11. Tutkimuksessa tarkasteltujen maanpäällisen alueen näytteenotto ja mittauspisteet kartalle sijoitettuna (Maanmittauslaitos 2020).

Kuva 12. P1 oja A, kerääjäkaivon kloridipitoisuudet sisäisen tarkkailun näytteissä vuosina 2017-6/2020 (Puro-ympäristötiedon hallintajärjestelmä 2020).

Kuva 13. Maanpäällisen alueen kloridipitoisuuksia Kirvesojan, Iso-Ruonaojan purkupisteen, Iso-Ruonaojan alemman tarkkailupisteen sekä Viian avolouhoksen tarkkailupisteissä vuosilta 2004-6/2020 (Puro-ympäristötiedon hallintajärjestelmä 2020).

Kuva 14. Kloridipitoisuuden ja YSI Pro DSS -kenttämittarilla mitatun johtokykyarvon korrelaatio (korrelaatiokerroin $\rho = 0,998$, selityskerroin $r^2 = 0,996$, P-arvo $P = 0.000$).

Kuva 15. Suola-ionien ja johtokykyarvojen korrelaatioita.

Kuva 16. Tutkimuksessa tarkasteltujen maanalaisen kaivoksen kairareikien keskimääräiset kloridipitoisuudet sekä johtokykyarvot (YSI Pro DSS).

Kuva 17. Tutkimuksessa tarkasteltujen pääpumppaamoiden keskimääräiset kloridipitoisuudet sekä johtokykyarvot (YSI Pro DSS).

Kuva 18. Maanalaisen kaivoksen 1015 m pumppaamon veden kertaanäytteen kloridipitoisuus ja johtokykyarvo (YSI Pro DSS).

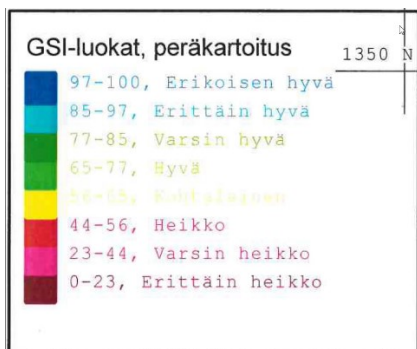
Kuva 19. Tutkimuksessa tarkasteltujen kaivoksen maanpäällisen alueen pisteiden kloridipitoisuuksia sekä johtokykyarvoja (YSI Pro DSS).

YSI Pro DSS – KENTTÄMITTAUSTEN JOHTOKYKYTULOKSET

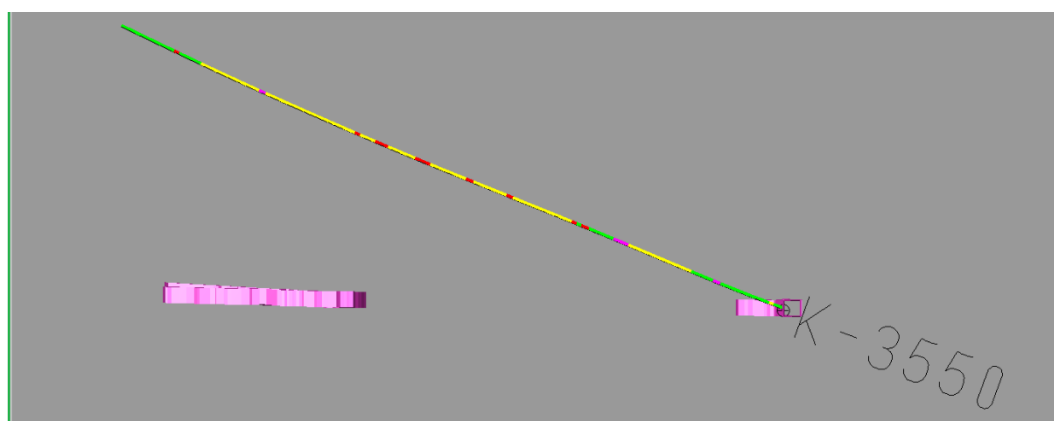
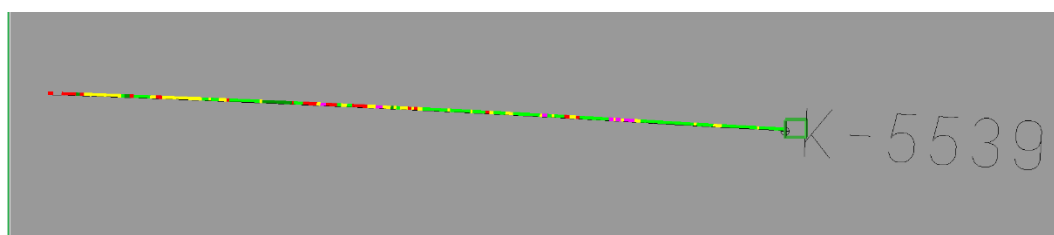
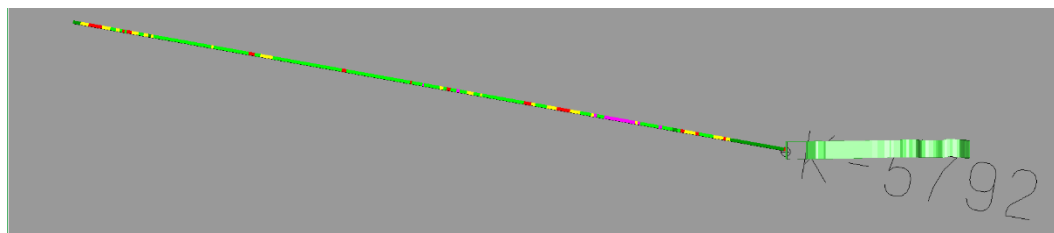
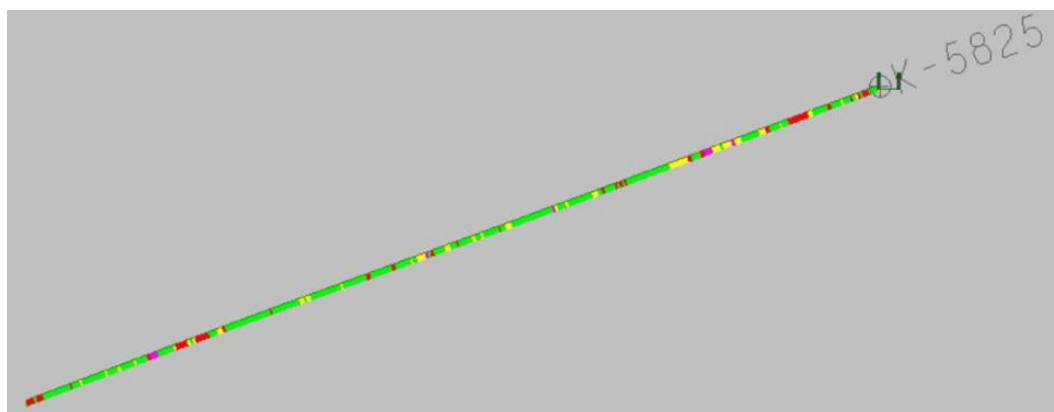
MITTAUSPISTEET	YSI PRO DSS MITTARILLA MITATTUJEN KENTTÄMITTAUSTEN JOHTOKYKYTULOKSET (m/s/m)														
	VK8/2020			VK11/2020			VK12/2020			VK14/2020			VK17/2020		
	Mittaus 1	Mittaus 2	Mittaus 3	Mittaus 1	Mittaus 2	Mittaus 3	Mittaus 1	Mittaus 2	Mittaus 3	Mittaus 1	Mittaus 2	Mittaus 3	Mittaus 1	Mittaus 2	Mittaus 3
Maan päällinen alue:															
ChrP 1 Kirvesoja	6	6		4	4	4	7	7	7	8	8	8	5	5	5
ChrP 2 Selkeytyksallas	288	287		285	285	285	283	286	286	290	291	292	286	286	286
ChrP 3 Isoruonaja alapuolinen	70	71		78	78	79	98	97	97	95	95	95	21	21	21
ChrP 6 Vian avolouhos	138	137		89	89	89	137	137	136	154	154	155	133	133	133
ChrP 8 Tierrumpu	7	7		8	8	8	9	9	9	11	11	11	7	7	7
ChrP 9 7-altaan suotovesikaivo	267	267		268	268	268	279	278	277	275	275	275	243	242	242
ChrP 10 Isoruonajaan purettava	50	50		47	47	47				30	30	30	44	44	44
P1 oja A kaivo	248	247		304	299	297	388	388	388	259	258	257	259	259	259
Maanalainen kaivos:															
350m pumppaamo	450	454		132	132	132	135	135	135	137	137	137	137	137	136
500m pumppaamo	275	273		301	301	301	267	267	266	310	311	310	235	234	235
640m pumppaamo	1213	1222		760	761	760	979	979	979	804	804	804	1286	1286	1286
825m pumppaamo	1386	1389		737	738	738	943	942	941	848	848	847	1234	1233	1232
K-3560 (400m)	326	327	328	351	351	350	339	339	339	328	328	328	336	337	335
K-5539 (900m) *	15302	15215		14675	14676	14664	14434	14504	14482	15151	15153	15162	14714	14712	14715
K-5792 (900m) *	14290	14291	14301	13990	13994	13989	14081	14078	14085	14245	14245	14244	14260	14251	14260
K-5825 (900m)	9391	9391	9397	9416	9419	9418	9432	9429	9428	9530	9521	9525	9568	9568	9565

* mitaus suoritettu 1:1 laimennetusta näytteestä

KAIRAREIKIEN PROFIILIT



Kairareikä	Sijainti	X	Y	Z	Pituus	Profiili
K-3550	400 m	1273,7	6560,0	-387,2	248,9 m	6560
K-5539	900 m	1473,9	6639,9	-896,1	230 m	6640
K-5792	900 m	1424	6720	-896	230,4 m	6720
K-5825	900 m	1392,2	6980,4	-898,4	326,8 m	6980



MAANALAISEN KAIVOKSEN PUMPPAAMOJA



Maanalaisen kaivoksen 500m tason pumppaamo



Maanalaisen kaivoksen 640m tason pumppaamo



Maanalaisen kaivoksen 8250m tason pumppaamo

MAANPÄÄLLISEN ALUEEN TARKKAILUPISTEET



Maanpäällisen alueen, Kirvesojan luonnon ojan, tarkkailupiste ChrP1.



Maanpäällisen alueen, vesienselkeytysaltaiden vesien purkupisteen, tarkkailupiste ChrP2.



Maanpäällisen alueen, Iso-Ruonaojan alapuolinen, tarkkailupiste ChrP3.



Maanpäällisen alueen, Viian avolouhoksen, tarkkailupiste ChrP6.



Maanpäällisen alueen, Sivakkaojan luonnon oja, tarkkailupiste ChrP8.



Maanpäällisen alueen tarkkailupiste ChrP10



Maanpäällisen alueen, kerääjäkaivon, tarkkailupiste P1 Oja A.

KLORIDILIUOSTEN KORROOSIOVAIKUTUKSIA TERÄKSESSÄ

Suolaliuosten aiheuttamia korroosionopeuksia teräksessä suolasumukokeessa (Vestola ym. 2006, 28–37).

Ilmastollisen korroosion kestävyys Suomessa	Korroosionopeus $\mu\text{m/a}$
Maaseutuilmasto	5 – 10
Meri- ja kaupunki-ilmasto	20-35
Suolasumukoe 0,3 % NaCl	175
Suolasumukoe 0,6 % NaCl	269
Suolasumukoe 1,20 % NaCl	643
Suolasumukoe 0,29 % CaCl ₂	168
Suolasumukoe 0,57 % CaCl ₂	211
Suolasumukoe 1,14 % CaCl ₂	272

Natriumkloridiliuosten aiheuttamia korroosionopeuksia teräksessä liuotuskokeessa (Vestola ym. 2006, 28–37).

Korroosionkestävyys natriumkloridiliuoksissa		
Korroosionopeus ($\mu\text{m/a}$)	Lämpötila (°C)	Liuos (%)
257	--	0,3
259	--	0,6
193	--	1,2
582	--	15
61	huoneenlämpötila	3
39	huoneenlämpötila	10
12	huoneenlämpötila	23
>1270	10	10
508	10	20
<508	10	30

YSI PRO DSS JOHTOKYKYMITTAUSTEN KESKIARVOT JA LABORATORIOANALYYSIEN TULOKSET TARKASTELUKOHITEITTAIN

KAIRAREIKIEN YSI PRO DSS JOHTOKYKYMITTAUSTEN JA LABORATORIOANALYYSIEN TULOKSET						
		K-3550 (400m)	K-5539 (900m)	K-5792 (900m)	K-5825 (900m)	
vk 8/2020	Cl	mg/l	3500	150000	160000	52000
	Na	mg/l	480	56000	64000	9000
	Ca	mg/l	89	14000	14000	15000
	Mg	mg/l	45	6400	5500	750
	Johtokyky	mS/m	330	20000	21000	8900
	Kiintoaine	mg/l	1	16	260	650
	SO ₄	mg/l	64			
	YSI Pro DSS	mS/m	327	30517	28588	9393
vk 12/2020	Cl	mg/l	920	140000	140000	40000
	Na	mg/l	470	63000	54000	8800
	Ca	mg/l	87	13000	14000	15000
	Mg	mg/l	43	5200	6100	690
	Johtokyky	mS/m	330	21000	23000	9100
	Kiintoaine	mg/l	<1	150	140	40
	SO ₄	mg/l	63	41	210	16
	YSI Pro DSS	mS/m	339	28946	28162	9430
vk 17/2020	Cl	mg/l	990	140000	140000	44000
	Na	mg/l	490	66000	60000	9400
	Ca	mg/l	100	550	510	370
	Mg	mg/l	47	5700	6300	720
	Johtokyky	mS/m	340	22000	21000	9500
	Kiintoaine	mg/l	<1	120	230	24
	SO ₄	mg/l	66			310
	YSI Pro DSS	mS/m	336	29427	28514	9567

Maanalaisen kaivoksen kairareikien johtokykymittausten ja laboratorioanalyyseiden tulokset

1015m PUMPPAAMON YSI PRO DSS JOHTOKYKYMITTAUKSEN JA LABORATORIOANALYYSIEN TULOKSET		
		1015m
Cl	mg/l	5100
Na	mg/l	1600
Ca	mg/l	1500
Mg	mg/l	51
Johtokyky	mS/m	1500
Kiintoaine	mg/l	420
SO ₄	mg/l	160
YSI Pro DSS	mS/m	1533

Maanalaisen kaivoksen 1015m pumppaamon johtokykymittausten ja laboratorioanalyyseiden tulokset

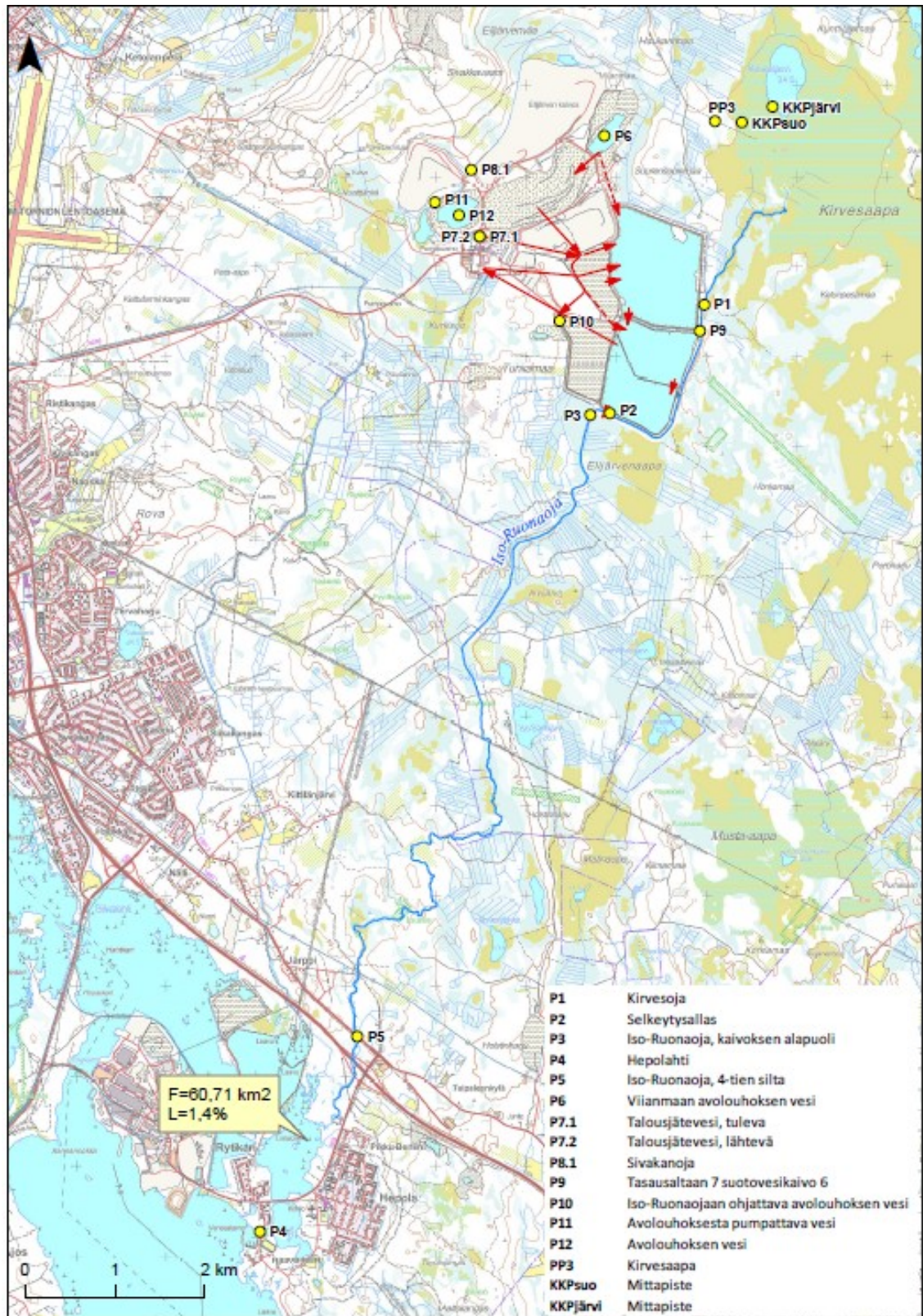
MAANALAISEN KAIVOKSEN PUMPPAAMOJEN YSI PRO DSS JOHTOKYKYMITTAUSTEN JA LABORATORIOANALYYSIEN TULOKSET						
			350m	500m	640m	825m
vk 8/2020	Cl	mg/l	1100	550	3700	4500
	Na	mg/l	480	350	1100	1200
	Ca	mg/l	270	76	1100	1300
	Mg	mg/l	44	38	77	96
	Johtokyky	mS/m	450	270	1200	1400
	Kiintoaine	mg/l	340	330	140	1000
	SO ₄	mg/l	170	170	150	150
	YSI Pro DSS	mS/m	452	274	1217	1388
	vk 12/2020	Cl	mg/l	190	560	3200
Na		mg/l	140	360	970	980
Ca		mg/l	59	73	800	720
Mg		mg/l	36	38	79	76
Johtokyky		mS/m	140	270	970	930
Kiintoaine		mg/l	25	23	540	270
SO ₄		mg/l	140	180	160	140
YSI Pro DSS		mS/m	135	267	979	942
vk 17/2020		Cl	mg/l	200	410	4000
	Na	mg/l	140	340	1200	1100
	Ca	mg/l	60	49	1400	1200
	Mg	mg/l	39	32	89	96
	Johtokyky	mS/m	140	230	1300	1200
	Kiintoaine	mg/l	2	170	2400	250
	SO ₄	mg/l	160	210	150	130
	YSI Pro DSS	mS/m	137	235	1286	1233

Maanalaisen kaivoksen pumppaamojen johtokykymittausten ja laboratorioanalyysien tulokset

MAANPÄÄLLISEN ALUEEN YSI PRO DSS JOHTOKYKYMITTAUSTEN JA LABORATORIOANALYYSIEN TULOKSET									
		ChrP1 Kirvesoja	ChrP2 Selkeytys- allas	ChrP3 Isoruonoaja alapuolinen	ChrP6 Viian avolouhos	ChrP8 Tien rumpu	ChrP9 7- altaan suotovesikaivo	ChrP10 Isoruonoajan purettava	P1 oja A kerääjäkaivo
vk 8/2020	Cl	mg/l	3	660	140	180		36	560
	Na	mg/l	4	350	76	130		43	298
	Ca	mg/l	4	98	28	53		22	100
	Mg	mg/l	2	33	13	37		25	36
	Johtokyky	mS/m	6	280	70	130		50	250
	Kiintoaine	mg/l	2	<1	2	<1		8	
	SO ₄	mg/l	1	160	38	150		66	180
	YSI Pro DSS	mS/m	6	287	70	138	7	267	247
	vk 12/2020	Cl	mg/l	3	680	200	190	1	37
Na		mg/l	5	370	110	140	2	42	460
Ca		mg/l	5	100	39	57	10	23	220
Mg		mg/l	2	34	15	39	5	24	45
Johtokyky		mS/m	6	280	99	130	10	55	390
Kiintoaine		mg/l	2	<1	2	<1	<1	1	
SO ₄		mg/l	< 0,5	150	46	150	5	64	180
YSI Pro DSS		mS/m	7	285	97	136	9	278	388
vk 17/2020		Cl	mg/l	2	650	36	200		550
	Na	mg/l	3	350	23	140		310	17
	Ca	mg/l	4	94	10	56		92	19
	Mg	mg/l	2	32	4	38		33	20
	Johtokyky	mS/m	4	280	21	130		240	44
	Kiintoaine	mg/l	2	1	10	1		2	11
	SO ₄	mg/l	<0,2	140	9	150		110	55
	YSI Pro DSS	mS/m	5	286	21	133	7	242	44

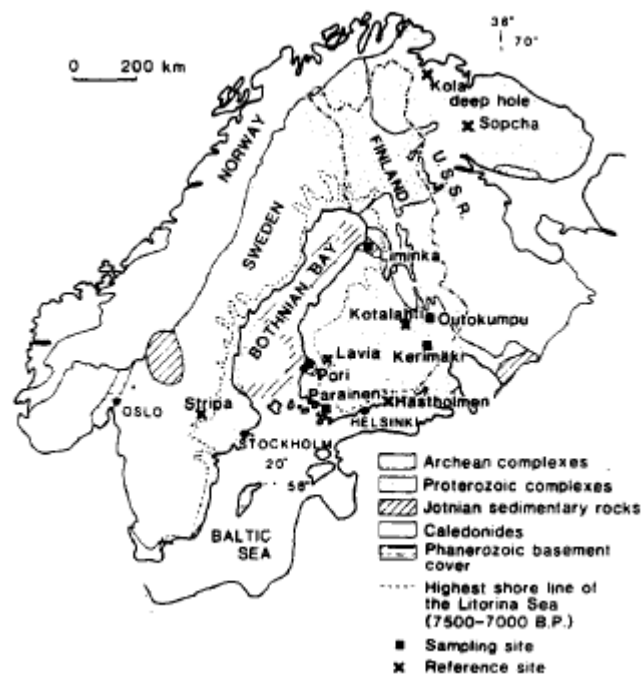
Maanpäällisen alueen johtokykymittausten ja laboratorioanalyysien tulokset

VELVOITETARKKAILUN PISTEET



Kemin Kaivoksen vesistötarkkailun pisteet kaivosalueella sekä purkuvesistössä (Kettunen 2020).

LITORINAN MEREN RANTAVIIVA SUOMESSA JA RUOTSISSA KARTTA-KUVASSA



Karttakuva, jossa on katkoviivalla esitettyä muinaisen Litorinameren rantaviiva Suomessa ja Ruotsissa (Nurmi 1987).