

Miia Martin

LOVIISAN LOPPUSIJOITUSLAITOKSEN RUISKUBETONIN IKÄÄNTYMISEN TUTKIMINEN JA TUTKIMUSOHJELMAN LUOMINEN

Opinnäytetyö

Rakennustekniikan koulutusohjelma

Insinööri (AMK)

2024



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä/Tekijät	Miia Martin
Työn nimi	Loviisan loppusijoituslaitoksen ruiskubetonin ikääntymisen tutkiminen ja tutkimusohjelman luominen
Toimeksiantaja	Fortum Power and Heat
Vuosi	2024
Sivut	48 sivua
Työn ohjaaja(t)	Sirpa Laakso ja Valtteri Perälähti (XAMK) Kaisa Mäkinen (Fortum)

TIIVISTELMÄ

Tämä opinnäytetyö tehtiin Loviisan ydinvoimalaitokselle. Sen tavoitteena oli suorittaa loppuun aikaisemmin aloitettu loppusijoituslaitoksen ruiskubetonin kuntotutkimus ja analysoida käytettyjen tutkimusmenetelmien hyödyllisyyttä, koska toimeksiantajaa kiinnosti tutkimusmenetelmien määrän mahdollinen vähentäminen jatkossa. Tavoitteena oli myös laatia ruiskubetonin kunnan seuranta varten tutkimusohjelma, jonka mukaan ruiskubetonin kuntoa seurataan tulevaisuudessa. Lisäksi opinnäytetyöllä haluttiin täsmentää käsitteiden sulfaatti ja sulfiitti käyttämistä, koska aikaisemmissa raporteissa niitä oli käytetty päällekkäin.

Betonin kunnan selvittämiseksi suoritettiin kuntotutkimus, jonka näytteet tutkittiin laboratoriossa. Tämän jälkeen pohdittiin käytettyjen tutkimusmenetelmien tarpeellisuutta sekä määriteltiin ruiskubetonin kunnan seuraamiselle menetelmien käyttämisen malli. Tähän päädyttiin lukemalla alan kirjallisuutta ja haastatteleamalla betoniasiantuntijoita.

Opinnäytetyön päätuloksena olivat tutkimusohjelman luominen ja sen pohjaksi määritelty tutkimusmenetelmien käyttämisen malli. Nämä perustuivat hyvin pitkälle kuntotutkimuksista saatuihin tuloksiin, joiden mukaan ruiskubetoni oli sekä aikaisempien että tässä tutkimuksessa saatujen tulosten perusteella ikäisekseen hyväkuntoista eikä ulkoisten rasitusten lisääntymisestä ollut merkejä.

Johtopäätöksenä oli, että kuntotutkimuksessa käytettävien menetelmien määrää ei voitu juurikaan vähentää, mutta betonin hyvän kunnan takia tutkimuksia voidaan jatkossa harventaa, mikäli merkittäviä muutoksia ei tapahdu kemiallisessa rasituksessa eikä olosuhteissa. Laadittu tutkimusohje tullaan jatkossa liittämään loppusijoituslaitoksen jo olemassa olevaan rakenteiden ikääntymisen seurantaohjelmaan.

Asiasanat: ruiskubetoni, kuntotutkimusmenetelmä, loppusijoituslaitos, rasitustekijä

Degree title	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Miia Martin
Thesis title	Observing the aging of spray concrete at the Loviisa nuclear power plant final repository and the research program
Commissioned by	Fortum Power and Heat
Time	2024
Pages	48 pages
Supervisor	Sirpa Laakso and Valtteri Perälähti (XAMK) Kaisa Mäkinen (Fortum Power and Heat)

ABSTRACT

The objective of this thesis was to examine the condition of the spray concrete at the Loviisa nuclear power plant's final repository. The aim was to decide on the use of spray concrete condition assessment methods. Another aim was to create a research program according to which the condition of spray concrete will be observed in the future.

The thesis began with a condition assessment of spray concrete which was a continuation of a previously initiated condition assessment. Based on the results, a decision was made of their use and schedule in the future. Following that, a desired research program for the spray concrete was created.

According to the results, the concrete was in good condition. In some places weakened tensile strength and elevated chloride levels were found, but the positive results included moderate sulfate levels. As a conclusion, it was found that the research methods could not be significantly reduced, but the studies could be conducted less often if there are no significant changes in chemical stresses or conditions. Also, a decision was made to use the sulfate concept instead of sulfite in the context of chemical exposure in the future. In addition, a spray concrete research program was prepared for the commissioner to review the condition of spray concrete in the future.

Keywords: spray concrete, condition assessment method, final repository, chemical stress

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	RUISKUBETONOINTI	8
2.1	Kuivaseosmenetelmä	9
2.2	Märkäseosmenetelmä	9
2.3	Laadunvarmistus työn aikana	9
2.4	Ruiskubetonin kuntotutkimusmenetelmät	10
2.5	Kuntotutkimusmenetelmien käyttökelpoisuus	12
3	RUISKUBETONIN IKÄÄNTYMISEEN VAIKUTTAVAT RASITUSTEKIJÄT	13
3.1	Kosteus.....	15
3.2	Betonin karbonatisoituminen	16
3.3	Kloridikorroosio	16
3.4	Sulfaattirasitus	17
4	TUTKIMUSKOHDDE.....	18
4.1	Tässä työssä tutkittavien tilojen ruiskubetonoinnit	19
4.2	Loppusijoituslaitoksen olosuhteet	20
4.3	Aikaisemmat tutkimukset	21
5	TUTKIMUSTYÖ.....	22
5.1	Näytteenottosuunnitelma	23
5.2	Näytteiden ottaminen.....	24
5.3	Näytekappaleiden visuaalinen tarkastelu.....	26
5.4	Laboratoriotutkimukset	27
6	TULOKSET.....	28
6.1	Huoltojätetilan 3 tulokset.....	29
6.2	Kiinteytettyjen jätteiden tilan tulokset.....	31
6.3	Porraskuilun tulokset	33
7	TULOSTEN TARKASTELU	35

7.1	Ruiskubetonin kunto	35
7.2	Käytettyjen tutkimusmenetelmien tarpeellisuus	37
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	38
8.1	Tutkimusmenetelmien käyttäminen jatkossa	38
8.2	Tutkimusohjelma.....	41
8.3	Muita johtopäätöksiä.....	43
8.4	Suosittelut jatkotoimenpiteet	44
	LÄHTEET.....	46

SANASTOA

Silmämääräinen tarkastelu

Aistinvaraisesti tehtävä ruiskubetonipintojen katselmointi kunnan arvioimiseksi ja näytteenottoaikaan valitsemiseksi

Visuaalinen tarkastelu

Timanttiporaamalla irrotetun koekappaleen tarkastelu

HJT3

Huoltojätetila

KJT

Kiinteytettyjen jätteiden tila

POK

Porraskuilu

XRF

Alkuainetutkimus

TGA

Massan muutoksen mittaus suhteessa lämpötilaan

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena oli Loviisan ydinvoimalaitoksen loppusijoituslaitoksen ruiskubetonin kunnan kartoittaminen sekä jatkossa käytettävien tutkimussisällön ja -ajankohtien määrittäminen. Opinnäytetyö oli jatkoa loppusijoituslaitoksella aikaisemmin aloitetuille ruiskubetonin kuntotutkimuksille. Opinnäytetyö oli ajankohtainen siitäkin syystä, että sen toimeksiantaja, Fortum Power and Heat, oli saanut Valtioneuvoston päätöksellä (VN/7906/2022) luvan jatkaa Loviisan voimalaitosyksiköiden käyttöä vuoden 2050 loppuun saakka. Tämän lisäksi valtioneuvosto myönsi luvan käyttää ydinjätehuollon kannalta tarpeellisia rakennuksia sekä varastoja mahdollisine laajennuksineen vuoden 2090 loppuun asti. Opinnäytetyössä tutkittava loppusijoituslaitos kuuluu kokonaisuudessaan luvassa mainittuihin rakennuksiin ja varastoihin.

Työn tutkimusongelma oli loppusijoituslaitoksen ruiskubetonin kunnan kartoittamiseen laaditun tutkimusohjelman puuttuminen. Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli luoda kyseinen ohjelma. Tähän liittyi läheisesti toimeksiantajan kiinnostus, voiko ruiskubetonin kunnan saada luotettavasti selville vähemmällä tutkimusmenetelmillä kuin aikaisemmin on tehty.

Tutkimusongelmiin haettiin ratkaisuja tutkimuskysymyksillä, joita olivat: mikä on ruiskubetonin kunto niissä loppusijoituslaitoksen tiloissa, joissa sitä ei ollut vielä tutkittu? Olivatko kaikki tutkimuksessa käytetyt tutkimusmenetelmät hyödyllisiä? Miten määritellään kuntotutkimusten ajankohdat ja tutkimussisällöt jatkossa?

Opinnäytetyön tavoitteena oli myös saada lisäselvitystä aikaisempiin tutkimuksiin liittyen ruiskubetonin kunnosta tasolla -90...-100 m eli kohdassa, jossa porraskuilu leikkaa yhden kallion ruhjevöhykkeistä. Tämän lisäksi haluttiin saada täsmennystä aikaisemmassa raportissa päällekkäin käytettyihin käsitteisiin sulfaatti- ja sulfiittipitoisuudet sekä perusteltu päätös, kumpaa jatkossa käytetään.

Loppusijoituslaitoksen luolaa oli rakennettu 1990-luvulta alkaen, joten sen käyttöikä kasvaa mahdollisesti lopulta 100-vuotiaaksi. Loppusijoituslaitoksen

olosuhteet ovat ruiskubetonille haastavat. Kallioon louhittu loppusijoituslaitos sijaitsee yli 110 m merenpinnan alapuolella, joten ruiskubetoniin kohdistuu ra-situksia sekä kallion suunnalta että tunnelin puolelta. Loppusijoituslaitoksen pohjavesikemian seurannasta käy ilmi, että kallion halkeamissa liikkuva vesi on hyvin suolapitoista, mikä luo omat haasteensa ruiskubetonin säilymiselle (Penttinen ym. 2022, 232). Ikääntyvän ruiskubetonin kuntoa on vaikea arvi-oida pelkästään aistinvaraisesti tunnelin puolelta, joten sen kunnan määrittä-miseen tarvitaan myös rakenteita rikkovia menetelmiä (Virtanen 2023, 4–5).

2 RUISKUBETONOINTI

Ruiskubetonointi on vanha betonointimenetelmä, joka kehitettiin yli sata vuotta sitten Yhdysvalloissa (Petrow 2015, 8). Ruiskubetonia käytetään laajalti tunne-lien ja kaivosten lujittamiseen, ja se on osoittautunut soveltuvaksi menetel-mäksi varmistaa kalliotilan pysyvyys. Käyttökelpoisuus perustuu ruiskubetonin ja kallion yhdessä muodostamaan liittorakenteeseen sekä ruiskubetonointime-netelmän toteuttamismahdollisuuksiin epätasaiselle kalliopinnalle. (Pöllä 1988, 121.) Ruiskubetoni lujittaa kalliota ruiskubetonirakenteen lisäksi tunkeutumalla halkeamiin ja koloihin sekä tasoittamalla epätasaisuuksia. Tällä tavalla kallion omaan holvaamiseen perustuva kantokyky paranee. (Väylävirasto 2019, 58.) Ruiskubetonointi poikkeaa menetelmänä merkittävästi muista betoninvalume-netelmistä, koska betoni ruiskutetaan paineilman avulla ruiskutussuuttimen kautta betonoitavalle pinnalle. Menetelmän poikkeavuuden takia myös sen koostumus on erilainen tavanomaisiin betoneihin verrattuna. Maksimiraekoko on yleensä verrattain pieni eli 8 mm, mikä tarkoittaa suurta sementtimäärää ja lukuisten lisäaineiden yhtäaikaista käyttöä. (Haara ym. 2018, 352.) Ruisku-betonin laatuun vaikuttavat merkittävästi ruiskuttajan työtekniikka sekä ruisku-betoninkerrosten riittävä paksuus (SILKO 2009, 5).

Ruiskubetonointia suoritetaan kahdella eri menetelmällä, jotka ovat kuiva- ja märkäseosmenetelmä (Petrow 2015, 9). Molemmissa menetelmissä teräs- tai polymeerikuitujen käyttö on yleistä, koska kuitujen lisäämisellä parannetaan betonin sitkeysominaisuuksia ja vetolujuutta. Kuiduilla saadaan korvattua osit-tain tai jopa kokonaan perinteinen tanko -ja verkkoraudoitus. (Haara ym. 2018, 66–67.)

2.1 Kuivaseosmenetelmä

Kuivaseosmenetelmä on ruiskubetonimenetelmistä vanhempi. Kuivaseosmenetelmässä perusseos on maakosteaa betonimassaa, joka koostuu sementistä ja luonnonkosteasta kiviaineksesta. Perusseos voi pitää sisällään myös muita seosaineita, kuten esimerkiksi silikaa, masuunikuonaa ja teräs- tai polymeerikuituja. Tarvittava vesi lisätään ruiskutuskaluston suuttimessa, johon kiinteä perusseos on ohjattu paineilmalla. (Ruiskubetonointi s.a.)

Kuivaseosmenetelmän etuna voidaan pitää sen käyttökelpoisuutta ahtaissakin tiloissa. Sillä saavutetaan ohuemmillä kerroksilla vesitiiviys ja tavoiteltu lujuus. Tämän lisäksi betonoinnin yhteydessä kaikki sementti ei reagoi veden kanssa, vaan reagoimista jatkuu betonoinnin jälkeenkin. Tällöin kuivaseos pystyy paikkaamaan mahdolliset alkuvaiheen halkeamat eli se toimii itseään korjaavasti. (Jokela 2023.)

2.2 Märkäseosmenetelmä

Märkäseosmenetelmän käyttö kalliorakentamisessa yleistyi Suomessa 1990-luvulla. Menetelmässä betonimassan perusseos ja vesi sekoitetaan valmiiksi, minkä jälkeen valmis massa ruiskutetaan paineilman avulla suuttimesta betonitavalle pinnalle. Massaan lisätään ruiskutuksen yhteydessä suuttimessa nestemäinen kiihdytin, jolla varmistetaan nopea sitoutuminen sekä alkulujuuden kehittyminen. Märkäseosmenetelmän suurimpina etuina voidaan pitää sen ruiskutustehokkuutta ja hukkaroiskeiden syntymisen vähäistä määrää. Märkäseosmenetelmässä on mahdollista käyttää ruiskutusrobotteja, minkä ansiosta myös työturvallisuutta saadaan parannettua merkittävästi. Tätä menetelmää käytetään yleisesti suurien ruiskutuspintojen betonoinnissa. (Petrow 2015, 8–10.)

2.3 Laadunvarmistus työn aikana

Ruiskubetonoinnissa toteutetaan standardeja SFS-EN 14487-1 ja SFS-EN 14487-2, jotka molemmat on vahvistettu vuonna 2006 kansalliseksi suoma-

laiseksi standardiksi. Näistä ensin mainittu (Ruiskubetonointi. Osa 1: Määritelmät, vaatimukset ja vaatimuksenmukaisuus) korvaa vuoden 2006 painoksen 1 (SFS-EN 14487-1: 2022, 1; SFS-EN 14487-2: 2006, 1.)

Petrowin (2015, 48–51) mukaan ruiskutuksen toteuttamiseen on laadittu yleissääntöjä laadukkaan lopputuloksen saavuttamiseksi. Tavoitteena on ruiskubetonin tartunnan takaaminen, ruiskubetonin eheys kerroksista huolimatta sekä mahdollisen hukkaroiskeen minimoiminen. Ruiskuttajan ammattitaito ja kokemus vaikuttavat työn laatuun. Ruiskutustyön käsialaan vaikuttavat ruiskutuksen suunta, etäisyys ja etenemisnopeus. Huomioitava on myös kerroksellisuuden toteuttaminen, jotta myös kerrosrajassa betonin lujuus vastaisi tavoiteltua. Riittävällä kerroksen paksuudella saavutetaan vaadittu raudoituksen suojaetäisyys. Ennen betonointia tehtävässä laadunvarmistussuunnitelmassa käydään läpi käytettävän menetelmän ja työkohteen erityispiirteet, toteutettavat laadunvarmistuskokeet ja työvaiheet. Kaikki ruiskubetonointiin liittyvä tieto dokumentoidaan.

2.4 Ruiskubetonin kuntotutkimusmenetelmät

Ruiskubetonin kuntotutkimukseen voidaan käyttää samoja menetelmiä kuin yleensäkin betonirakenteiden kuntotutkimuksissa. Kuntotutkimuksen sisältö tulee suunnitella yksilöllisesti jokaiselle kohteelle. Sisältö tulee määritellä kunkin kohteen ongelmakohdista lähtien eli ensin tulee tunnistaa kohteen rakenne ja sen rasitusolosuhteet. Näiden tietojen perusteella voidaan päättää tutkimuksessa käytettävät tutkimusmenetelmät sekä otosten laajuus. Haasteena kuntotutkimuksissa ovat vanhan rakenteen ominaisuuksien ja kunnan vaihtelu eri kohdissa. Näiden epävarmuuksien takia tulee kerätä rinnakkaisia tietoja erilaisilla menetelmillä, jotta tulosten arviointi ja niistä tehtävät johtopäätökset olisivat mahdollisimman luotettavia. (Lahdensivu ym. 2019, 57–58.)

Kuntotutkimusten tulisi edetä systemaattisesti alkaen yksinkertaisista ja halvoista menetelmistä ja tarkentua kohti kalliimpia erikoismenetelmiä. Tällä tavalla siirtymällä helposti toteutettavasta tutkimusten tasosta vaativampaan tulosten tarkkuus ja edustavuus kasvaa. (Lahdensivu ym. 2019, 59.)

Betonin kuntotutkimuksen yksinkertaisesti toteutettavat tutkimusmenetelmät ovat silmämääräinen havaitseminen ja vasarointi (ns. kopotutkimus). Silmämääräisillä tarkastuksilla voidaan todeta betonin pinnan poikkeamat eli halkeilut, terästen näkyminen, härmevalumat ja pullistumat. Usein ruiskubetonirakennetta havainnoidessa tehdään samalla pinnan koputtelua isolla vasaralla tai rusnauskangella, jolloin voidaan kuulla koputusäänen laatu. Matala kumea ääni kertoo mahdollisesti huonosta tartunnasta kalliopintaan. (Lahdensivu ym. 2019, 89). Kopoääni voi kertoa myös ruiskubetonissa olevasta salaojasta, jolloin betonin tartunta kalliopintaan jää puuttumaan (Ritola ym. 2002, 18). On muistettava, että ruiskubetonin vaurio on usein ehtinyt edetä jo varsin pitkälle, ennenkö se on silmämääräisesti havaittavissa (Lahdensivu ym. 2019, 7).

Betonin kuntotutkimuksen vaativampia ja rakenteita rikkovia menetelmiä ovat porajauhetutkimukset ja lieriönäytteet, joiden tuloksia tarkastellaan laboratoriossa. Porajauhenäytteillä tutkitaan näytteenottokohdan sulfaatti- ja kloridipitoisuudet. Nämä otetaan useammalta eri syvyydeltä, jotta saadaan selville kyseisten rasitusten mahdollinen eteneminen. (Lahdensivu ym. 2019, 87.)

Näytelieriöistä on mahdollista tutkia heti näytteenoton jälkeen visuaalisella tarkastelulla betonipeitepaksuus ja karbonatisoitumissyvyys. Betonipeitteen mittaamisella saadaan selville teräksiä suojaavan betonipeitteen paksuus sekä raudoitusten sijainti. Näin pystytään määrittämään terästen altistuminen kloridien aiheuttamalle korroosiolle. (Lahdensivu 2019, 85.)

Karbonatisoitumissyvyyden mittaamisella pyritään määrittelemään betonin pH:n muutoksen etenemissyvyys ja sen myötä raudoitusten altistuminen mahdolliselle korroosiolle. Siinä koekappale käsitellään pH-indikaattorilla eli fenoliftaleiiniliuoksella. Liuos muuttaa karbonatisoitumattoman betonin punaiseksi. Tuloksella voidaan nähdä karbonatisoitumisen etenemisen profiili betonissa. (Lahdensivu 2019, 83–84.)

Laboratoriotutkimuksissa näytelieriöstä voidaan tutkia betonin vetolujuus, josta saadaan selville rapautumistilanteen aste ja laajuus. Sitä heikentävät erilaiset

mikrohalkeamat, joiden rapauttava vaikutus tulee esille vetokokeessa. Vetolujuuden ja betonin rapautumistilanteen välistä yhteyttä voidaan määritellä esimerkiksi taulukon 1 mukaisesti. (Lahdensivu 2019, 92–93.)

Taulukko 1. Vetolujuuksien tulkintatapa rapautumistilanteeseen nähden (Lahdensivu 2019, 93)

Vetolujuus	Todennäköinen rapautumistilanne
luokkaa 0 MPa	näytteessä on pitkälle edennyttä rapautumaa
luokkaa 0,5...1,0 MPa	näytteessä on jonkinasteista rapautumaa
luokkaa 1,5 MPa tai yli	näytteessä ei todennäköisesti ole merkittävää rapautumaa

Taulukossa 1 on käsitelty vetolujuuden heikkouden yhteyttä nimenomaan betonin rapautumaan. Koska betonin vetolujuus saattaa heikentyä muistakin syistä, on tuloksen syyt aiheellista varmentaa esimerkiksi ohutvietutkimuksien avulla (Lahdensivu 2019, 93).

Betonin puristuslujuutta käytetään hyvin yleisesti betonin laatua määriteltäessä. Kuntotutkimuksissa sen antamat tulokset eivät kuitenkaan kerro betonin rapautumisesta eikä minkään vaurion etenemisestä rakenteessa. Tämän takia tutkimuksen teettäminen on turhaa. (Lahdensivu ym. 2019, 103.)

Betonin rapautumistilanteen tarkin ja luotettavin tutkimusmenetelmä on ohutvietutkimus. Mikroskooppitarkastelussa saadaan selville tarkkaa ja luotettavaa tietoa betonin kunnosta ja laadusta, halkeama- ja säröilytyypeistä sekä niiden suuntautuneisuudesta. Tutkimus tehdään näytelieriön pitkittäissuunnassa, joten siinä on mahdollista havaita betonissa esiintyvien tutkittavien asioiden koko profiili. (Lahdensivu 2019, 90–91.)

2.5 Kuntotutkimusmenetelmien käyttökelpoisuus

Aikaisemmin mainittuja kuntotutkimusmenetelmiä on arvioitu taulukossa 2 niiden käyttökelpoisuuden näkökulmasta. Arviointikriteereinä ovat olleet käytännölliset seikat, kuten työmäärän tarve tutkimuksen tekemisessä sekä kustannukset. Toisaalta on arvioitu myös menetelmän tuomaa tiedon luotettavuutta. (Lahdensivu ym. 2019, 68.)

Taulukko 2. Eri tutkimusmenetelmien käyttökelpoisuus betonin rapautumistilanteen arvioimisessa (Lahdensivu ym. 2019, 68)

TUTKIMUS-MENETELMÄ	<i>Silmäm. tarkastelu kohteella</i>	<i>Vasarointi</i>	<i>Poralieriöiden silmäm. tarkastelu</i>	<i>Vetokoe</i>	<i>Mikrorakennetutkimus</i>
<i>Todettavissa oleva rapautumisaste</i>	hyvin pitkälle edennyt rapautuminen	pitkälle edennyt rapautuminen	pitkälle edennyt rapautuminen	alkuvaiheessa oleva rapautuminen	hyvin alkuvaiheessa oleva rapautuminen
<i>Edustavuus</i>	laaja	melko laaja	pistemäinen	pistemäinen	pistemäinen
<i>Luotettavuus</i>	huono	kohtalainen	kohtalainen	hyvä	erittäin hyvä
<i>Tarvittava työmäärä</i>	vähäinen	kohtalainen	suuri	suuri	erittäin suuri
<i>Kustannus</i>	erittäin halpa	halpa	halpa (näytteet muita tutkimuksia varten)	kohtalainen	kallis

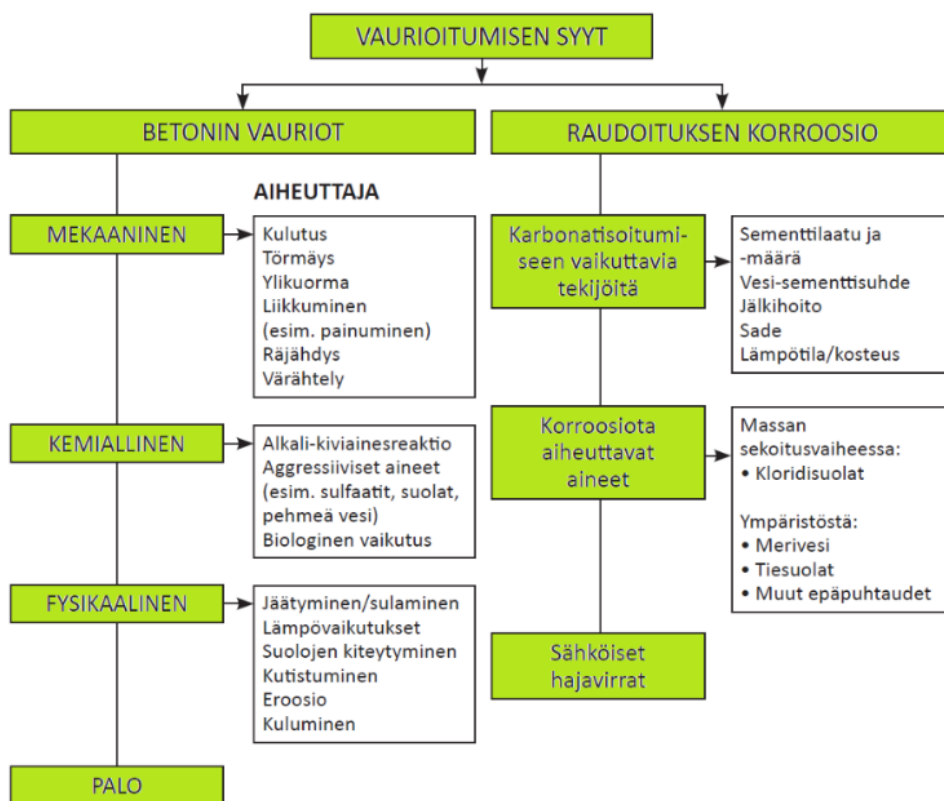
Taulukossa 2 esitettyjen tutkimusmenetelmien tarpeellisuus on hyvä tiedostaa ennen kuntotutkimukseen ryhtymistä, koska se on yleensä varsin kallista. Menetelmät ovat usein rinnakkaisia, ja niiden tulokset täydentävät tietoa ja ymmärrystä rapautumisen astetta kartoitettaessa. Esimerkiksi poralieriöiden silmämääräisen tarkastelun perusteella saadaan todennäköisesti lähetettyä laboratoriotutkimuksiin betonin rapautumista parhaiten edustavat näytteet. (Lahdensivu ym. 2019, 59.)

3 RUIKUBETONIN IKÄÄNTYMISEEN VAIKUTTAVAT RASITUSTEKIJÄT

Betonirakenteen ikääntymiseen vaikuttavat sekä ympäristön että betonirakenteen ominaisuudet. Rakenteen ominaisuuksien perusteella määräytyy betonin kyky vastustaa ikääntymisen ilmiötä eli toisin sanoen kyse on betonin säilyvyydestä. Näitä asioita mitoittavat mm. betonin koostumus, lujuus ja eheys. Ulkopuolelta tulevien rasitusten voimakkuus määrittelee sen sijaan ikääntymisen nopeuden. (Mehta & Monteiro 2006, 123.)

Standardin SFS EN 1504-9 (2009, 8) mukaan betonin vaurioitumisen tavallisia syitä ovat mekaaniset, kemialliset, fysikaaliset tekijät sekä palotilanne. Tässä

opinnäytetyössä näistä tekijöistä käsitellään vain yleisimmät loppusijoituslaitoksella todetut rasiustekijät, joista kerrotaan tarkemmin seuraavissa alaluvuissa (Paukku 2023, 2–5). Alapuolella näkyvässä kuvassa 1 on esitetty havainnollistaen vaurioitumisen syyt ja aiheuttajat kaaviona (Betonirakenteen säilyvyys s.a.)



Kuva 1. Kaaviokuva betonin vaurioitumisen syistä (Betonirakenteiden säilyvyys s.a.)

Kuvassa 1 esitetyistä vaurioitumisen mahdollisista syistä tämän työn ulkopuolelle jätetään palotilanne, pakkasrasitus, mekaaniset törmäykset ja meriveden välitön kosketus. Niiden esiintyminen nyt tutkittavissa tiloissa on harvinaista. Vaikka niistä joku toteutuisikin, tulisi turvallisuustilanne arvioida joka tapauksessa uudelleen huolellisesti.

Kemiallisen rasiusluokan XA2 ja XA3 sementeissä on standardin SFS-EN 197-1 vaatimuksen mukaisesti sulfaattipitoisuus (= sementtikemiassa rikki- trioksidipitoisuus SO_3) $\leq 3,0$ % ja kloridipitoisuus $\leq 0,10$ % sementin painosta. Tämä tarkoittaa, ettei kaikki tutkimustuloksissa esiintyvät sulfaatti- ja kloridipitoisuudet ole ulkoisen rasiuksen aiheuttamia, vaan niitä on ollut betonissa lähtökohtaisesti standardin sallimissa puitteissa. (Finnsementti s.a.) Loviisan

loppusijoituslaitoksen betonit edustavat kyseisiä rasitusluokkia (Kelokaski 2020a, 24).

3.1 Kosteus

Betonin ikääntymisen ja vaurioitumisen mekanismit tarvitsevat toteutuakseen kosteutta. Kosteus ei lähtökohtaisesti itsessään vaurioita betonia, vaan betonin heikentymiseen vaikuttavat pikemminkin kosteuden ja kuivumisen vaihtelu sekä veden mukana kulkeutuvat aineet. Myös hapen olemassaolo vaikuttaa turmeltumisen alkamiseen ja sen etenemiseen. (Mannonen 2024.) Tämä tarkoittaa, että betonin säilyvyys on riippuvainen veden olemassaolosta, betonin läpäisevyydestä ja veden sisältämistä aineista. Rakenteiden pahimpana rasiustekijänä pidetään nimenomaan kosteutta, koska se on lähes aina läsnä merkittävässä rakenteiden turmeltumisilmiöissä. (Mehta & Monteiro 2006, 123.) Kallioon louhittujen tunneleiden kosteuslähteinä ovat useimmiten maaperän kosteus ja pohjaveden sekä meriveden aiheuttamat erilaiset vuotovedet kallion epäjatkuvuuskohdissa eli halkeamissa, ruhjevyöhykkeillä ja säröilyissä (Väylävirasto 2019, 63). Ruhjevyöhykkeen kohdalla kallion tiivyyttä heikentävät halkeamat, joissa pohjavesi pääsee liikkumaan helpommin kuin muualla kallioperässä (Geosto 2023).

Mehta & Monteiro (2006, 135) mukaan kallioperästä peräisin oleva läpivirtaava vesi kuljettaa mukanaan mm. suoloja, jotka pyrkivät kiteytymään ruiskubetonin sisäpinnan taakse. Tämä tapahtuu ainoastaan silloin, kun suolapitoisen veden siirtymisnopeus huokosten välillä on hitaampi kuin sisäpinnasta tapahtuva haihtumisnopeus pois betonista. Kiteytyvien huokosten tilavuus suurenee aiheuttaen laajenemista.

Kallioperän kosteusrasitusta pyritään yleisesti hallitsemaan osana ruiskubetonointia mm. ohjaamalla vuotovesiä salaojaputkia pitkin viemäriverkoston. Näin ennen ruiskubetonointia tehtävä salaojitus estää kalliopinnan pistevuotojen haittavaikutukset vastavalmistuneessa betonoinnissa ja samalla se toimii jatkossa hyvänä vuotovesien ohjausmenetelmänä. (Ritola ym. 2002, 17–18.)

3.2 Betonin karbonatisoituminen

Betonin karbonatisoituminen on ilmiö, joka on seurausta ilman sisältämän hiili-dioksidin CO₂ pääsystä betoniin. Karbonatisoituminen on betonissa tapahtuva neutraloitumisreaktio, joka etenee betonin pinnasta syvemmälle betoniin las- kien betonin normaalin pH:n 12–13:sta likimain arvoon 8,5. Karbonatisoitumi- sen etenemisnopeuteen vaikuttavat betonin tiiveys ja kosteustila (Haara ym. 2018, 111–112.) Vaikka karbonatisoituminen ei itsessään vahingoita betonia, se luo mahdollisuuden terästen korroosiolle. Betonirakenteessa tämä tarkoit- taa sitä, että terästen pinnalle korkeassa pH:ssa syntynyt korroosiolta suo- jaava oksidikerros katoaa. Karbonatisoituneessa betonissa terästen korroosio käynnistyy, mikäli läsnä on vettä ja happea. (Lahdensivu ym. 2019, 17–19.)

Karbonatisoitumisen etenemisen nopeutta betonissa voidaan määritellä kar- bonatisoitumiskertoimen avulla. Kerroin lasketaan alapuolella olevan lasken- tayhtälön mukaisesti (yhtälö 1).

$$k = \frac{d}{\sqrt{t}} \quad (1)$$

jossa	k	karbonatisoitumiskerroin	
	d	karbonatisoitumissyvyys	[mm]
	t	aika	[v]

Laskentakaavalla saatu kerroin on sitä suurempi mitä nopeammin karbonati- soituminen on betonissa edennyt. Tyypillisesti karbonatisoitumiskertoimet liik- kuvat välillä $k = 1,5 \dots 3,5$. Tämä tarkoittaa, että kertoimen ollessa esimerkiksi 3, betonin karbonatisoitumisnopeus pinnasta alkaen on sadassa vuodessa 30 mm (Betonin karbonatisoituminen s.a.)

3.3 Kloridikorroosio

Kloridit pääsevät tunkeutumaan betonirakenteen pinnalle kosteuden mukana, mutta syvemmälle betonin kapillaarihuokosiin ne siirtyvät diffuusion vaikutuk- sesta. Edettyään teräksiin asti ne pääsevät rikkomaan teräksiä suojaavan ok- sidikalvon ja aiheuttamaan näin ollen terästen korroosion. Korroosion edelly- tyksenä kosteuden lisäksi on hapen olemassaolo. Esimerkiksi vedenalaisissa

rakenteissa, joissa kosteus on jatkuvasti läsnä, hapen puutteen takia korrosio on hitaampaa kuin rakenteissa, jotka altistuvat vuorotellen kosteudelle ja kuivuudelle (Mannonen 2024.) Terästen korrosio voi tapahtua ilman, että sitä pystyy havaitsemaan ulkoapäin aistinvaraisesti. Betonin tiiveydellä ja alhaisella vesi-sideainesuhteella voidaan hidastaa kloridien pääsyä betoniin. Kloridipitoisuuden kriittisenä pidetty raja-arvo vaihtelee kirjallisuudessa, mutta yleisesti rajana voidaan pitää noin 0,03...0,07 painoprosenttia, kun määrittäminen on tehty happoliukoisena betonin painosta. Kloridikorrosiolle on tyypillistä, että se ilmenee betonissa pistemäisesti, varsinkin, jos kloridit ovat päässeet tunkeutumaan jo kovettuneeseen betoniin. (Haara ym. 2018, 114–115.)

3.4 Sulfaattirasitus

Suomen rannikkoseudun pohjavesissä on luontaisesti sulfaatteja (SO_4^{2-}), mikä on haaste betonin kestävyydelle (Betonin kemialliset korroosiot s.a.). Sulfaatit reagoivat sementissä olevan trikalsiumalumiinin (C_3A) ja sen hydratatut tuotteiden kanssa, minkä seurauksena syntyy betonia paisuttavaa ettringiittiä ja kipsiä. Tämä puolestaan johtaa betonirakenteen halkeiluun ja rapautumiseen. Sulfaattirasitusta voidaan ehkäistä käyttämällä sulfaatinkestävää sementtiä, jonka trikalsiumalumiinipitoisuus (C_3A) on alle 3 %. Suomessa vaatimukset täyttävä sementtilaatu on CEM I 42,5 N SR 3. (Eurofins 2023.)

Betonin sulfaattipitoisuuden riskitasolle ei ole tarkkaa raja-arvoa, koska sulfaattirasitus on riippuvainen monista betonin koostumus- ja tiiveysominaisuuksista sekä sulfaattirasituksen muodoista. Raja-arvosta ei ole kirjoitettu alan teoriakirjallisuudessa, mutta alalla arvioidaan yleisesti, että rapautumisriski kasvaa, kun sulfaattipitoisuus lähestyy 5 painoprosenttia sementin painosta. Tämä raja-arvo perustuu kokemukseräiseen tietoon alan tutkimustuloksista. Kohonnut sulfaattipitoisuus ei vielä sinällään tarkoita sulfaattivaurioitumista, mutta se antaa viitteitä sulfaattirasituksesta ja siten jatkotutkimuksien tarpeellisuudesta. Kokonaisvarmuus asiasta saadaan vasta vahvemmillä tutkimuksilla, mitä ovat esimerkiksi ohuthietutkimukset. (Mannonen 2024; Paukku 2023; Pyy 2023, 30.)

Sulfaatti- ja sulfiittipitoisuudet

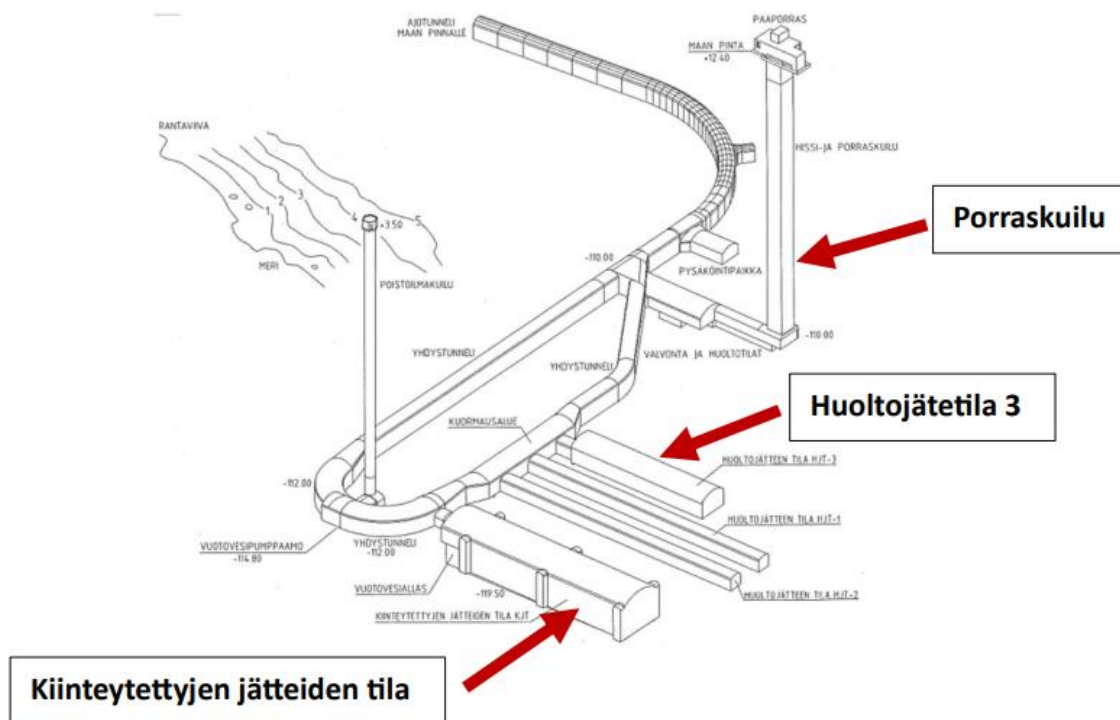
Aikaisemmissa tutkimuslausunnoissa ja -raporteissa oli käytetty rasitustekijänä sekä sulfaatti- että sulfiittipitoisuuden määritelmiä. Tämä oli herättänyt keskustelua Loviisan laitoksen vuosittaisissa käytön tarkastusohjelman tarkastuksissa termien sekoittumisen mahdollisuudesta sekä niiden käyttämisestä jatkossa.

Teoriakirjallisuudesta ei löydy juurikaan tietoa sulfiittipitoisuuden käyttämiselle, mutta sulfaattipitoisuutta on käsitelty paljon sementtikemiassa. Esimerkiksi kirjassaan *Cement chemistry* Taylor (1997) käsittelee pelkästään nimenomaan sulfaattia eikä mainitse kertaakaan sulfiittia. Samoin *Betoniyhdistys* käyttää sementtikemian rikkiatrioksidin lyhenteestä SO_3 termiä sulfaatti (Sementtikemian lyhenteet s.a).

Mannosen (2024) mukaan sementtikemian termien, sulfaattipitoisuus (SO_4^{2-}) tai rikkiatrioksidipitoisuus (SO_3), käyttäminen on perusteltua rasitustyyppistä puhuttaessa. Betonilaboratorion lausunnossa (Larjamo ym. 2024, 3) suositellaan rasitustyyppin nimen kanssa yhtenevää sulfaattipitoisuuden määrittystä. Tämä helpottaa tutkimustulosten tarkastelun sekä ymmärtämistä että läpikäymistä. Samalla vähenee mahdollisten väärinymmärrysten riski. Näistä syistä Loviisan voimalaitoksella päädyttiin jatkossa käyttämään kokonaisrikkipitoisuudesta laskennallisesti saatavaa sulfaattipitoisuutta.

4 TUTKIMUSKOHDE

Tämän opinnäytetyön tutkimuskohteena oli loppusijoituslaitoksen ruiskubetonin kunto niissä tiloissa, joissa sitä ei vielä ollut tutkittu. Tilat olivat huoltojätetila 3 ja kiinteytettyjen jätteiden tila. Tutkittavista tiloista käytetään jatkossa niiden lyhenteitä eli huoltojätetila 3 = HJT3 ja kiinteytettyjen jätteiden tila = KJT. Lisätutkimusten kohteena olleen porraskuilun lyhenne on POK. Alapuolella olevassa kuvassa 2 näkyy tilojen sijainti.



Kuva 2. Laitoksen loppusijoitustilat ja näytteenottoapaikat nuolella merkittynä (Virtanen 2022, 4)

Kuten kuvasta 2 on nähtävissä, loppusijoituslaitos sijaitsee peruskalliossa yli sadan metrin syvyydessä. HJT3:n toteutuksen vaiheet on tehty vuosina 2010–2012, ja se on otettu käyttöön vuonna 2016. KJT:n louhinta valmistui 1997, vuonna 2005 tehtiin pieniä ruiskubetonin kunnostustöitä, suurempi kallioseinien kunnostaminen 2016 ja käyttöönotto tapahtui 2019. Porraskuilu on rakennettu ja viimeistely vuosien 1994–1996 aikana. (Kelokaski 2020b, 4.)

4.1 Tässä työssä tutkittavien tilojen ruiskubetonoinnit

Koska tutkittavat tilat on toteutettu vuosien 1994–2019 välisenä aikana, varsinkaan vanhimmista työsuorituksista ei ole löydettävissä tarkempia työsuunnitelmia tai dokumentteja laitoksen arkistossa. Dokumentoitua tietoa ruiskubetonin sementtimäärästä ja vesisementtisuhteesta ei ollut saatavissa myöskään betonitehtailta heidän järjestelmämuutostensa takia. Vaakatunneleiden ruiskubetonin reseptistä oli mahdollista saada tarvittavaa tietoa työhön osallistuneiden työnjohtajien haastatteluilla.

Ruiskubetonin koostumus eli resepti on liikesalaisuuden mukaisesti salainen, joten perusseoksen ja lisäaineiden täsmälliset pitoisuudet eivät ole käytettävissä. Tässä opinnäytetyössä on sovittu vaakatulosten betonitoimittajien kanssa käytettäväksi luotettava arvio esimerkiksi betonin tiheydestä [kg/m^3], sementin määrästä [kg/m^3] ja vesi-sementtisuhteesta.

HJT3:n ruiskubetonointi suoritettiin vuonna 2015. Se tehtiin märkäseosmenetelmällä ja teräskuituja käytettiin alimmissa ruiskubetonikerroksissa. Päällimmäinen 30 mm:n pintakerros toteutettiin kuiduttomalla betonimassalla. Pintakerroksessa käytettiin vesitiiviyyden parantamiseksi Penetron Admix -lisäainetta. Ruiskubetonin suunniteltu käyttöikä oli 100 vuotta ja rasitusluokaksi määriteltiin XS2. (Silventoinen 2011, 5.) Sementtilaatuna käytettiin sulfaatinkestävää SR-sementtiä. Sementin arvioitu määrä oli 400–450 kg/m^3 ja vesi-sementtisuhte oli noin 0,45. Ruiskubetonointi tehtiin kahdella ruiskutuskerroksella. (Toivonen 2023.)

KJT:n seinäpinnat ruiskubetonointiin loppuun vuonna 2016. Betoniseoksen sementtilaatuna oli Weber RB 40/8 ja sementin arvioitu määrä oli vähintään 450 kg/m^3 . Betonissa käytettiin polymeerikuituja vahvistukseksi ja betonointi tehtiin kahdella kerroksella. Vesi-sementtisuhte oli 0,40. Ruiskubetonin käyttöikäksi määriteltiin 100 vuotta. Ruiskubetonointi tehtiin kahdella ruiskutuskerroksella. Tämän opinnäytetyön näytteenottokohdasta numero kolme jouduttiin lisälouhimaan kalliota myöhemmin, ja tämän korjaukseen käytettävässä ruiskubetonimassassa käytettiin teräskuituja. (Jokela 2023.)

POK:n seinäpinnat tehtiin työteknisistä syistä kuivaseosmenetelmää käyttäen. Ruiskubetonin lujuusluokaksi määriteltiin vähintään K35-2. Työ luokiteltiin laatuokkaan II, ja betonin vahvistuksena käytettiin \varnothing 4 mm:n raudoiteverkkoa. Ruiskubetonointi tehtiin kahdella ruiskutuskerroksella. (Lampén 2020.) Tämän tilan ruiskubetonin reseptistä ei ollut saatavilla tarkempaa tietoa.

4.2 Loppusijoituslaitoksen olosuhteet

Loppusijoituslaitos on louhittu peruskallioon, jossa on halkeamien ja säröilyjen lisäksi suurempia läpivirtauksia mahdollistavia ruhjevyöhykkeitä. Ruiskubetoni on betonoitu pääsääntöisesti kiinni kallioon. Ainoastaan salaojitusten kohdalla

tartunta kallioon ei ole mahdollinen. Kaikki ruiskubetonirakenteissa havaittavat muutokset liittyvät kosteuteen sekä kallioperässä kulkeutuvien pohjavesien sisältämiin kemiallisiin ominaisuuksiin. Kosteuden hallitsemiseksi ruiskubetonoi-tuihin kalliopintoihin on asennettu salaojaputkia 3–4 m:n välein. (Virtanen 2023, 4–5.)

Loppusijoituslaitoksella ruiskubetonia rasittaa sisäpinnan eli tunnelin puolella huoneilman hiilidioksidi ja poistoilmajärjestelmän aiheuttama ilmavirta. Huo-neilman lämpötila on noin +10 °C, mikä on suurin piirtein vastaava kallion läm-pötilan kanssa.

Loppusijoituslaitoksen alueella on tehty kallio- ja pohjavesiolosuhteiden tutki-muksia vuodesta 1979 lähtien. Tulosten mukaan vuoden 2022 sulfaattipitoi-suudet ovat paikoitellen koholla (Penttinen ym. 2022, 29). Myös kloridipitoi-suudet vaihtelevat sallituista arvoista raja-arvot ylittäviin pitoisuuksiin. Ne ovat monin paikoin koholla niin paljon, että kloridikorrosio on todennäköistä ja jopa varmaa. (Paukku 2023, 26.)

4.3 Aikaisemmat tutkimukset

Loppusijoituslaitoksen ruiskubetonin kuntoa on tutkittu kolmeen eri otteeseen vuosien 2021, 2022 ja 2023 aikana (Virtanen 2023). Aikaisempien tutkimustu-losten perusteella ruiskubetonirakenteen ikääntyessä tapahtuu vaurioitumista. Vaurioiden juurisytyt ovat betonin koostumuksessa ja rakenteellisissa ominai-suuksissa, mitkä ovat seurausta esimerkiksi heikosta työnsuorituksesta tai huonosti toimivasta rakenneratkaisusta, sekä rasitusolosuhteissa. (Paukku 2023, 2.)

Tutkimuksien perusteella rasitusolosuhteista suurimpana mitoittavana tekijänä ruiskubetonin ikääntymisen ja pitkäaikaiskestävyyden kannalta voidaan pitää kallion halkeamien läpi kulkeutuvia vesivuotoja. Vesivuodot aiheuttavat beto-nin sideaineiden liukenemista ja kohonneita kloridi- ja sulfaattipitoisuuksia. Tämä näkyy kalkkihärmän vuotamisella ruiskubetonin pintaan sekä ruisku-betonin pullistumisena ja rikkoutumisena tunnelin puolelle. Turmeltuminen on yleensä mahdollista havaita vasta sitten, kun vaurio on edennyt ruiskubetonin läpi sen pintaan. (Virtanen 2023, 32.)

Aikaisemmissa loppusijoituslaitoksella tehdyissä tutkimuksissa ruiskubetonin koekappaleista tutkittiin laboratorioissa vetokoe, puristuskoee, mikrorakenne- eli ohuthietutkimus, stereomikroskooppinen murtopintatarkastelu, alkuaineita mittaava tutkimus XRF, massan muutoksen mittaus suhteessa lämpötilaan tai aikaan eli TGA, kloridipitoisuus sekä sulfaattipitoisuus. Koska kyseessä oli useita ja työläitä laborioriotutkimuksia, ne oli teetetty monessa eri laboratoriossa. (Virtanen 2023, 4.)

Aikaisemmissa tutkimuksissa kloridipitoisuudet olivat suurelta osin korrosioriskin kannalta merkityksettömiä ja vain muutamissa näytteenottoaikoissa yli kriittisenä pidetyn rajan (Paukku 2023, 12). Sulfaattipitoisuudet puolestaan olivat useammin lähellä kriittisenä pidettyä rajaa tai jopa reilusti sen yli. Ne eivät kuitenkaan näkyneet täysin varmasti tarkimpina ja vaativimpina pidetyissä stereomikroskooppisissa ohuthietarkasteluissa, mutta niiden aiheuttamaa tilavuudenmuutosta tai sulfaattihyökkäystä ei voitu myöskään kokonaan sulkea pois. (Vatanen 2022, 20.)

5 TUTKIMUSTYÖ

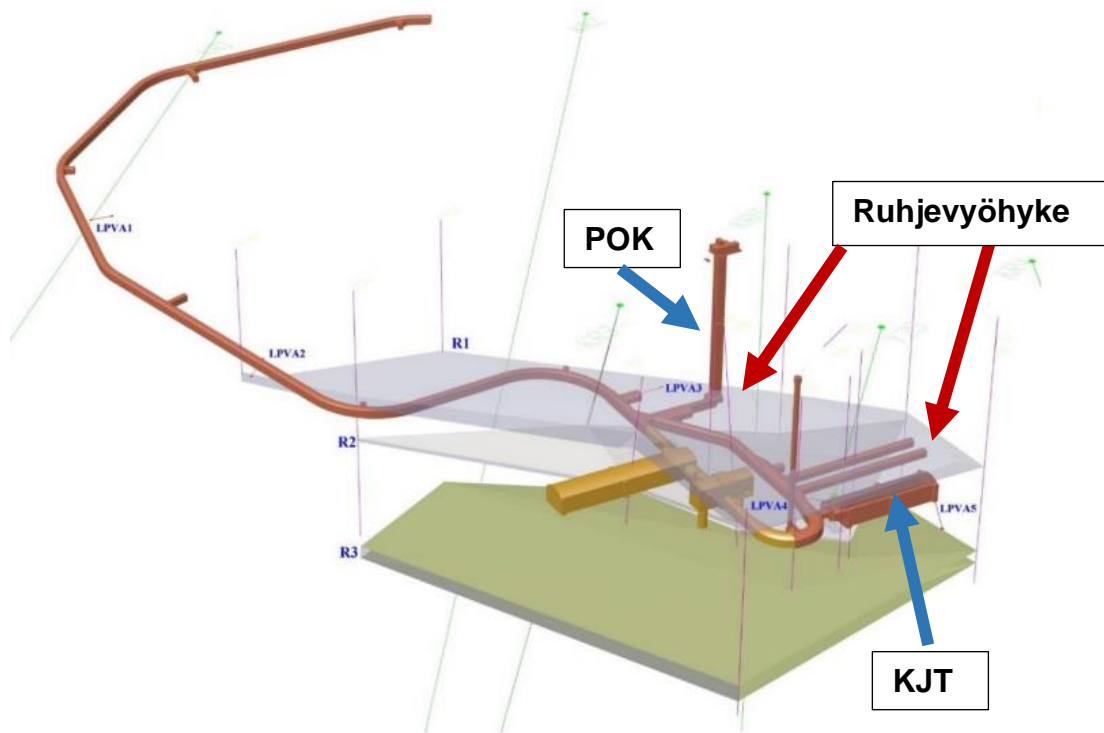
Koska tämä opinnäytetyö oli jatkoa jo aloitetulle loppusijoituslaitoksen ruiskubetonin kuntotutkimusselvitykselle, tilaajalla oli selkeät tavoitteet tutkimukselle. Työhön oli ohjattu resursseja huomattavan paljon, mikä edesauttoi työn tekemistä. Tutkimustyöhön oli varattu useampi työntekijä ja laborioriotutkimuksia oli tarkoitus tehdä paljon, mitkä kummatkin olivat iso kustannus. Haasteena puolestaan oli tiedon hankinnan vaikeus eli vanhoja loppusijoituslaitoksen louhimiseen ja ruiskubetonointiin liittyviä dokumentteja tai raportteja oli heikosti saatavilla. Tämän takia tietoa täytyi etsiä haastatellen urakoihin liittyneitä henkilöitä. Haastattelujen avulla selvisi ruiskubetonin toimittajilta betonin koostuksesta tietoja molempiin vaakatusseleihin, mutta pystykuilun osalta tietoa ei löytynyt. Pohjatietona käytettävissä olivat vanhojen tutkimusten raportit ja laboratorioanalyysit. Niiden perusteella oli ennakoitavissa, että tutkittavissa ti-loissa ruiskubetoni olisi ainakin osittain vaurioitunutta, vaikkakaan ei aivan heikkolaatuista.

5.1 Näytteenottosuunnitelma

Tässä opinnäytetyössä käytössä oli sama tutkimussuunnitelman runko kuin aikaisemmissa tutkimuksissa (Virtanen 2022), mistä poiketen tällä kertaa tutkitavat tilat olivat HJT3 ja KJT. Lisäksi haluttiin tehdä lisätutkimuksia jo aikaisemmin tutkitussa porraskuilussa, jotta saataisiin varmistus ruiskubetonin kunnosta nimenomaan ruhjevyöhykkeen kohdalta sen kosteuden läpäisevyyden takia. Toinen aikaisemmasta tutkimussuunnitelmasta poikkeava kohta oli, ettei tällä kertaa tehty XRF- eikä TGA-tutkimuksia. Tämä päätös oli tehty ennen opinnäytetyötä, ja se perustui siihen, että alkuperäisiä koekappaleita ei ollut säästetty referenssinäytteinä. Näin ollen ei ollut enää mahdollista verrata esimerkiksi, mitkä alkuaineet ovat päätyneet ruiskubetoniin luolan olosuhteiden vaikutuksesta ja mitkä ovat olleet betonissa alun perin, esimerkiksi sulfaattipitoisuus. Murtopintatarkastelu jäi pois tämänkertaisesta tutkimusohjelmasta.

Näytteenottopaikat oli valittu ennen opinnäytetyön aloittamista yksinkertaisia tutkimusmenetelmiä käyttäen eli silmämääräisesti tarkastellen sekä vasaromalla betonipintoja. Tämän lisäksi hyödynnettiin tietoa ruhjevyöhykkeen sijainnista. Näytteet haluttiin ottaa paikkojen erityispiirteiden perusteella, jotta tutkimukseen saataisiin mahdollisimman kattavasti koko ruiskubetonin tilaa edustavat näytteet. Porraskuilun tilanne kiinnosti aikaisemmin saatujen tulosten varmistamiseksi. Näytteenottoa oli HJT3:sa kaksi, joissa olosuhteet olivat silmämääräisesti arvioituna samanlaiset. Molemmissa paikoissa näkyi kalkkihärmää merkinä halkeamakohtasta.

KJT:n yläpuolella, noin -93...-96 metriä merenpinnan tason alapuolella, tiedettiin olevan yksi kallion ruhjevyöhykkeistä, mikä oli määritelty rakennusgeologisissa kallioluokituksissa murrosrakenteiseksi/tiheärakoiseksi eli rakojen täyteisyyden oli todettu olevan vähäistä. Sama ruhjevyöhyke jatkuu porras- ja hissikuilun kohdalla -92...-99 metriä merenpinnasta. Tuolla kohdalla se on määritelty murrosrakenteiseksi/tiheärakoiseksi että ruhjerakenteiseksi. Ruhjerakenteisella kallioluokituksella tarkoitetaan runsas- tai tiheärakoista kalliota, jonka raoissa esiintyy savitäytettä. (Rihu ym. 2024, 6.) Kuvassa 3 näkyy ruhjevyöhyke sekä sen määrittelemiseksi poratut pystysuuntaiset ja viivamaiset porakairareivät.



Kuva 3. Ruhjevyöhykkeen sijainti porraskuiluun ja kiinteytettyjen jätteiden tilaan nähden (mukaillen Rihu ym. 2024, 6)

Kuvassa 3 oleva ruhjevyöhyke näkyy harmaana laattamaisena alueena. Sen sijainti on merkitty punaisilla nuolilla. KJT ja POK:n näytteenotto kohta jäävät ruhjevyöhykkeen alapuolelle. Tilat on merkitty kuvaan sinisillä nuolilla. Ruhjevyöhykkeen oletettiin aiheuttavan vesivuotoja alapuolella oleville louhituille kallioseinämille. Tämän takia KJT:ssa näytteenotto kohtia valittiin viisi, jotka olivat toisistaan poikkeavia olosuhteiden, kalliopohjan sekä silmämääräisten tarkastustulosten suhteen. Kohdat olivat märkä kohta, lisälouhittu kohta, kopo-kohta sekä ns. itkevä kohta, jossa koputustarkastuksessa kimeä koputusääni antoi olettaa muista kohdista poikkeavan tuloksen. Lisäksi näytteet otettiin referenssikohteesta, jossa oletettavasti olivat parhaimmat olosuhteet ruiskubetonille. KJT:n aulatilasta otettiin pelkästään kloridi- ja sulfaattinäytteet. Porraskuilusta otettiin 8 lieriönäytettä sekä 6 porajauhenäytettä.

5.2 Näytteiden ottaminen

Vaativampia tutkimusmenetelmiä haluttiin käyttää, jotta saataisiin selville tarkemmat tutkimustulokset ruiskubetonin kunnosta. Näytteenotokohdista otettiin suunnitelman mukaisesti jokaisesta kohteesta 6–8 lieriönäytettä eli koe-

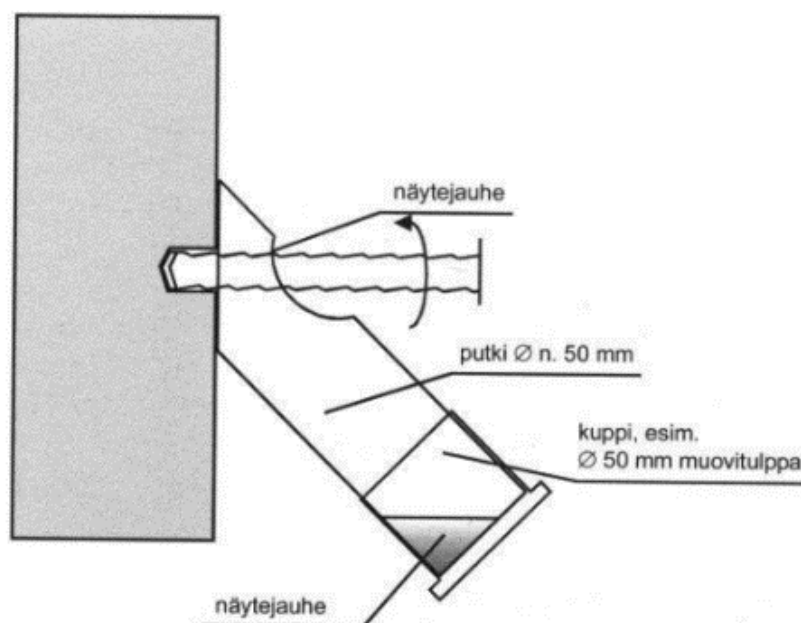
kappaleita sekä 6 porajauhenäytettä. Lieriönäytteiden poraus ulotettiin kalliopintaan asti ja jopa muutaman millimetrin kallion sisään, jotta voitaisiin todentaa ruiskubetonin ja kallion välinen tartunta. Koekappaleita otettiin varmuuden vuoksi ylimääräisiksi varakappaleiksi, jotta laboratoriotutkimuksista saataisiin riittävän kattavat tulokset. Alapuolella olevassa kuvassa 4 näkyy timanttiporalla tapahtuva lieriönäytteiden ottaminen.



Kuva 4. Lieriönäytteen ottaminen timanttiporaamalla

Kuvassa 4 näkyy yksi koekappaleen kohta tummana. Siinä näyte on jäänyt ns. putkeen eli se on irronnut betonista porauksen aikana. Kuvan muut näyte-lieriöt ovat vielä irrottamatta betonipinnasta.

Kuvassa 5 on periaatekuva porajauhenäytteen ottamisesta. Näytejauhe voidaan ottaa kuvan mukaisesti näyteputken päässä olevaan kuppiin tai suoraan näytepussiin.



Kuva 5. Periaatekuva porajauhenäytteen ottamisesta (Lahdensivu ym. 2019, 88)

Kuvassa 5 näkyy porajauhenäytteen ottamisen periaate. Se otetaan huoneen puolelta yleensä eri syvyyksiltä (0–20, 20–40, 40–60 mm), jotta saadaan tarkennettua mahdollinen kloridien ja sulfaattipitoisuuksien tunkeumasyvyyys. Jokainen näytesyvyydestä saatu jauheannos pakataan tiiviisti suljettuun muovipussiin. (Lahdensivu 2019, 88).

5.3 Näytekappaleiden visuaalinen tarkastelu

Koekappaleille tehtiin visuaalinen tarkastelu, missä jokainen koekappale tarkasteltiin yksilöllisesti. Tulokset dokumentoitiin taulukkomuotoon (Martin 2023). Tarkastelun tavoitteena oli tehdä yleiskatselmus koekappaleesta, teräksiä suojaavan betonipeitteen paksuudesta, terästen kunnosta ja niiden sijainneista, mahdollisista halkeamista tai työsaumoista ja niiden sijainneista, huokosten määrästä ja suuruusluokasta sekä ylipäänsä betonin eheydestä silmämääräisesti katsottuna. Tarkastuksen yhteydessä koekappaleet käsiteltiin fenoliftaleiiniliuoksella karbonatisoitumisen selvittämiseksi. Visuaalisessa tarkastelussa valittiin laboratoriotutkimuksiin lähetettävät koekappaleet niiden ulkoisten ominaisuuksien perusteella. Vetokokeisiin ja ohuthietutkimuksiin valikoituivat koekappaleet, joissa esiintyi mahdollisesti kerrosrajoja, halkeamia tai runsashuokoisuutta. Esimerkkinä visuaalisista tarkasteluista on kuvassa 6 olevat koekappaleet HJT3:sta.



Kuva 6. Huoltojätetila 3:n poralierionäytteitä

Kuvassa 6 oleva koekappale on käsitelty sisäpinnastaan fenoliftaleiiniliuoksella karbonatisoitumisen selvittämiseksi. Näytteestä on visuaalisesti havaittavissa, että koekappale ei ole karbonatisoitunut sisäpinnasta, koska fenoliftaleiini näkyy selvästi sivellyssä kohdassa.

5.4 Laborioriotutkimukset

Tutkittavat näytteet analysoitiin Sweco Finland Oy Tutkimukset ja laadunvarmistus testauslaboratoriossa Vantaalla. Laborioriotutkimuksista oli tehty etukäteen sopimus, jonka mukaan liikesalaisuuden takia laboratorioanalyysit eivät ole julkisia. Tästä syystä julkisesta opinnäytetyöstä tutkimustulosliitteet salataan. Tähän työhön on kuitenkin luvallista nostaa esille tarvittavat tulokset. Tutkittavia näytteitä oli yhteensä 76, joista lieriönäytteitä oli 29. Lopuista näytteistä oli tilattu mitattavaksi kloridi- ja sulfaattipitoisuudet kolmelta eri syvyydeltä porattuna (0–20, 20–40 ja 40–60 mm). Lieriönäytteille oli tilattu tehtäväksi vetokoe, puristuskoe sekä ohuthietutkimukset.

Osa KJT:sta otetuista koekappaleista olivat liian lyhyitä puristuslujuuden mittaamiseen, joten kyseisistä näytteistä haluttiin teettää lisätutkimuksina tiheyden mittaaminen. Tämän lisäksi KJT:sta ja POK:sta oli molemmista saatu sellaiset koekappaleet, jotka kiinnostivat lisävetokokeen kannalta, koska lieriön ulkopinnassa oli mukana iso osa kalliota. Tällä tutkimuksella haluttiin saada selville, onko murtumakohta betonin kohdalla, kallion kohdalla vai niiden liitoskohdassa.

Laboratorion ruiskubetonianalyysin raportissa on lueteltu standardit, joiden mukaan tutkimusmenetelmät on suoritettu. Standardit ja tuloksia täydentävät tiedot on koottu taulukkoon 3. (Vatanen 2024, 4–5.)

Taulukko 3. Tutkimusmenetelmien standardit (mukaillen Vatanen 2024, 4–5, 24)

Tutkimus	Standardi	Täydentävä tieto
Kloridipitoisuudet	SFS-EN 14629:2007	Määrittäminen happoliukoisina betonin painosta joko porajauhenäytteestä tai näytekappaleesta
Sulfaattipitoisuudet		HJT3 ja KJT: Betonin tiheys 2240 kg/m ³ Sementin määrä 450 kg/m ³ POK: Betonin tiheys 2310 kg/m ³ Sementin määrä 300 kg/m ³
Vetolujuus	SFS 5445:2988	Ennen koetta näyteliერიön päät tasattu. Murtosyvyyden ilmoitettu näyteliერიön alkuperäisestä rasisuspinnasta mitattuna.
Puristuslujuus	SFS-EN 1250-1:2019	Tulokset ilmoitettu muuntumattomana lieriölujuutena. Testauksessa käytetty lisäniveltä.
Ohuthietutkimus	ASTM C856/C856M-20	Tutkimus suoritettu standardin mukaisesti soveltuvin osin.

Taulukossa 2 ei ole standardia sulfaattipitoisuuden määrittämiseen, koska sellaista ei ole. Betonin sulfaattipitoisuuden laskemisessa käytetään kokonaisriikkiä, joka on laskettu painoprosenttina sementin määrästä, ja betonin tiheyttä.

6 TULOKSET

Tutkimustulosten esittelyssä käytetään jo aikaisemmin tässä työssä esille nostettuja kriittisenä pidettyjä raja-arvoja. Ne on koottu alapuolella olevaan taulukkoon 4 tulosten lukemisen helpottamiseksi.

Taulukko 4. Betonitutkimuksessa käytettyjen tulosten raja-arvoja (mukaillen Betonin karbonatisoituminen s.a.; Lahdensivu 2019, 93; Mannonen 2023; Vatanen 2024, 4)

Karbonatisoitumiskerroin	Huomioitava
Tyypillisesti $k = 1,5...3,5$	Mitä suurempi k , sitä karbonisoituneempaa betonia
Kloridipitoisuuden kriittinen alue	Huomioitava
0,03...0,07 paino-%	määritys happoliukoisena betonin painosta
Sulfaattipitoisuuden riskiraja	Huomioitava
kun arvo lähestyy 5 paino-%:a tai nousee sen yli	määritys paino-%:a sementin painosta
Vetolujuus	Todennäköinen rapautumatilanne
luokkaa 0 MN/m^2	näytteessä pitkälle edennyttä rapautumaa
luokkaa $0,5...1,0 \text{ MN/m}^2$	näytteessä jonkinasteista rapautumaa
luokkaa $1,5 \text{ MN/m}^2$ tai yli	näytteessä ei todennäköisesti merkittävää rapautumaa

Taulukon 4 määrittelemät raja-arvot ovat tarkkuudeltaan suuntaa antavia ja aina yhteydessä betonin koostumukseen ja sen rasitusolosuhteisiin. Alalla niitä on pidetty yleisesti tunnustettuina ja luotettavina.

6.1 Huoltojätetilan 3 tulokset

Huoltojätetila 3:n visuaalisten tarkastelujen ja laboratoriotutkimusten tulokset on koottu alapuolella olevaan taulukkoon 5. Visuaalisista tarkasteluista taulukossa näkyvät betonipeitteen minimi- ja keskimääräinen paksuus, karbonatisoitumisen tilanne sekä betonissa käytetty vahvike. Laboratoriotutkimuksista taulukossa näkyvät kloridi- ja sulfaattipitoisuudet, veto- ja puristuslujuudet sekä niistä tehdyt mahdolliset uusintakokeiden tulokset. Lisäksi taulukkoon on kirjattu mahdollinen koekappaleessa havaittu betonointien kerrosraja.

Paikassa 1 näytteitä otettiin 8 kappaletta, joista kaksi irtosi porauksen yhteydessä kalliosta ja lieriö jäi ns. putkeen. Muut 6 kappaletta olivat kiinni kalliosta. Paikassa 2 näytteitä otettiin kuusi, joista puolet olivat kiinni kalliosta ja puolet katkesivat näytteenoton yhteydessä näytteenottoputkeen.

Taulukko 5. Huoltojätetila 3:n tulokset (mukaillen Vatanen 2024, 8–11)

Näytteenotto-paikka	Visuaalinen tarkastelu			Kloridipitoisuus p-% betoni Sulfaattipitoisuus p-% sementti			Lujuus	Lujuus, uusinta	Puristus-lujuus	Kerros-raja
	Betonipeite minimi (keskimääräinen) [mm]	Karbonatisoituminen min/max (keskimääräinen) Karb.kerroin $k = d/Vt$	Vahvike	0 -20 mm	20-40 mm	40-60 mm				
HJT3 v. 2012							Vetolujuus [N/mm ²], murtosyvyyys [mm]	Vetolujuus [N/mm ²], murtosyvyyys [mm]	Lieriö [Mpa]	Vetokoekpl kerrosraja sp min/max [mm]
Paikka 1, 8 koekappaletta	> 25 (30)	0-2/ 2-10 (2) $k = 0,58$	Teräs-kuituja	0,01 3,7	< 0,01 3,8	< 0,01 3,8	1,1 sp 16-28	3,4 sp 61-68	84,6	14-45
Paikka 2, 6 koekappaletta	> 68 (82)	Ei karbonatisoitumista	Teräs-kuituja	0,04 3,8	0,02 3,4	<0,01 3,8	2,6 sp 139-145	Ei tehty	78,2	Mahdollisesti 2 kerrosrajaa

Taulukossa 5 ei ole koottu ohuthietutkimustuloksia. Ne on avattu sanallisesti tässä kappaleessa myöhemmin.

Silmämääräisessä tarkastelussa molemmissa näytteenottoaikkojen ruiskubetonissa oli havaittavissa kalkkihärmeen valumista halkeaman kohdalla. Muuten molempien aikkojen ruiskubetonipinnat vaikuttivat ehjiltä ja siisteiltä.

Visuaalisessa tarkastelussa betonipeitteiden paksuus oli pienimmillään 68 mm. Kummankaan aikkan teräksissä ei havaittu merkkejä korroosiosta. Näytteenottoaikkan 1 karbonatisoituminen oli edennyt sisäpinnasta katsottuna keskimäärin 2 mm. Tässä kohdassa karbonatisoitumiskerroin oli $k = 0,58$. Betonipeitteen paksuus oli pienimmillään 25 mm ja keskimäärin se oli 30 mm. Aikkan 2 koekappaleet eivät olleet karbonatisoituneet.

Kloridipitoisuus näytteenottokohdassa 1 oli 0,01 tai sen alle. Aikkan 2 kloridipitoisuus oli 0,01 % ja 0,02 %, paitsi syvyydeltä 0–20 mm mitattu pitoisuus oli 0,04 %.

Sulfaattipitoisuus oli kaikilta syvyyksiltä mitattuna molemmissa näytteenottoaikossa tasaista. Arvot vaihtelivat välillä 3,4...3,8 painoprosenttia sementin painosta.

Vetolujuus paikassa 1 oli 1,1 N/mm² ruiskubetonin sisäpinnasta mitattuna. Murtosyvyys oli 16–28 mm. Uusintavetokoe antoi tulokseksi 3,4 N/mm² ja murtosyvyys oli tuolloin 61–68 mm. Paikassa 2 vetolujuus oli 2,6 N/mm² ja murtosyvyys oli 139–145 mm sisäpinnasta mitattuna. Molempien aikkojen koekappale oli murtunut pääosin runkoainesta myötäillen.

Puristuslujuus paikassa 1 oli 84,6 MPa, ja murtovoima oli 201 kN. Aikkan 2 puristuslujuus oli 78,2 MPa ja murtovoima oli testissä 186 kN.

Ohuthietutkimus osoitti koekappaleen HJT3P1/2 ohuthieestä näkyvän työsaumainen kerrosraja 30–38 mm:n syvyydellä sisäpinnasta mitattuna. Koekappaleessa oli havaittavissa kosteusrasitusta ja huokosten reunoilla monin

paikoin ettringiittiä. Lisäksi huokosissa oli saumarajan kohdalla tunnistamaton mineraalia, minkä osalta sekundääristä sulfaattirasitusta ei voida sulkea pois. Varmoja merkkejä sulfaattirasituksesta ei ollut havaittavissa. (Vatanen 2024, 11.)

Koekappale HJT3P2/6 vaikutti tutkimusten perusteella edustavan homogeenistä betonia. Sideaineen hydrataatio vaikutti olevan epätasaista ja vaihtelevaa. Tutkitussa näytteessä esiintyi läpi koko näytesyvyyden mittainen halkeama, jonka sisäpinnalla havaittiin karbonaattia vain vähän. (Vatanen 2024, 11.)

6.2 Kiinteytettyjen jätteiden tilan tulokset

Kiinteytettyjen jätteiden tilan tulokset visuaalisten tarkastelujen ja laboratoriotutkimusten tulokset on koottu alapuolella olevaan taulukkoon 6. Visuaalisista tarkasteluista taulukossa näkyvät betonipeitteen minimi- ja keskimääräinen paksuus, karbonatisoitumisen tilanne sekä betonissa käytetty vahvike. Laboratoriotutkimuksista taulukossa näkyvät kloridi- ja sulfaattipitoisuudet, veto- ja puristuslujuudet sekä niistä tehdyt mahdolliset uusintakokeiden tulokset. Lisäksi taulukkoon on kirjattu mahdollinen koekappaleessa havaittu betonointien kerrosraja.

Taulukko 6. Kiinteytettyjen jätteiden tilan tulokset taulukkomuodossa (mukaillen Vatanen 2024, 12, 19)

Näytteenotto- paikka	Visuaalinen tarkastelu			Kloridipitoisuus p-% betoni Sulfaattipitoisuus p-% sementti			Lujuus	Lujuus, uusinta	Puristus- lujuus/ tiheys	Kerros- raja
	Betonipeite minimi (keskimääräinen) [mm]	Karbonatisoituminen min - max (keskimääräinen) Karb. kerroin $k = d/vt$	Vahvike	0-20 mm	20-40 mm	40-60 mm				
KJT v. 2019							Vetolujuus [N/mm ²], (murtosyvyy- s) [mm]	Vetolujuus [N/mm ²], murtosyvyy- s [mm]	Lieriö [Mpa]	Vetokoepl kerrosraja sp min/max [mm]
Paikka 1, 7 koekappaletta	Betonipeite läpi koko kappaleen	0-8/3-17 (5) $k = 2,5$	Polymeeri- kuitu	0,36 2,9	0,04 0,2	0,02 0,2	2: 0,7 (sp 17-26) 4: 0,5 (sp 24-38)	Ei tehty	Tiheys 2260 kg/m ³	
Paikka 2, 6 koekappaletta	> 25 (30)	Koko näytteen matkalta	Teräskset Ø4 mm Polymeeri- kuitu	0,10 2,5	0,26 2,2	0,27 3,1	0,9 (sp 12-38)	2,0 sp 59-64	46,5	25-33
Paikka 3, 5 koekappaletta	> 12 (64)	Koko näytteen matkalta	Teräskset Ø4 mm Teräskuitu	0,65 3,8	0,14 0,2	0,04 0,1	1,0 (sp 32-38)	2,7 sp56-60	54,2	
Paikka 4, 8 koekappaletta	> 4 (27)	0/4-9 (3) $k = 1,5$	Teräskset Ø4 mm Polymeerikuitu	0,14 3,2	0,10 2,7	0,22 4,3	2: 0,6 (sp 28-38) 7: 1,3 (sp 58-65)	2: 1,6 sp 48-53 7: 2,1 sp 83-93	57,7	2: 30-43
Paikka 5, 8 koekappaletta	Betonipeite läpi koko kappaleen	0/2-15 (3) $k = 1,5$	Polymeeri- kuitu	0-30 mm 0,53 0-40 mm 3,2			2,3 (sp 8-20)	Ei tehty	Tiheys 2200 kg/m ³	

Taulukossa 6 ei ole koottu ohutietutkimustuloksia. Ne on avattu sanallisesti tässä kappaleessa myöhemmin.

Silmämääräisessä tarkasteluissa KJT:ssa havaittiin betonipeitteen olevan hyvinkin vaihtelevan näköistä värin, kosteuden ja kopotarkastusäänten perusteella. Paikka 1 valittiin ns. referenssikohdaksi, koska se vaikutti etukäteen betonipinnaltaan siistiltä ja kuivalta. Paikasta otettiin seitsemän koekappaletta, joista kuusi oli kiinni kalliolla ja yksi katkesi porauksen yhteydessä ja jäi näytteenottoputkeen. Neljässä näytteessä oli mukana pieni pala kalliota mukana.

Paikka 2 vaikutti silmämääräisessä tarkastelussa vaurioituneimmalta KJT:n paikoista, koska se oli hyvin märkä ja maahan oli sillä kohtaa valunut rusehtavaa liejua. Paikasta otettiin kuusi koekappaletta, joista yksi jäi kiinni putkeen. Viidessä näytteessä oli pala kalliota mukana.

Paikassa 3 oli tehty aikaisemmin lisälouhintaa, jonka yhteydessä ruiskubetonia oli poistettu. Tilalle asennetussa ruiskubetonissa oli käytetty vahvikkeena teräskuituja. Näytteenoton aikana havaittiin ruiskubetonin sisällä olevan salaoja. Paikasta otettiin 5 näytettä, joista yksi oli kiinni kalliolla. Muut jäivät kiinni putkeen.

Paikka 4 valittiin näytteenottokohdaksi matalan kopoäänien perusteella. Kuusi näytettä kahdeksasta oli kiinni kalliolla. Kaksi näytteistä katkesi kahteen osaan, jotka jäivät kiinni putkeen ja niiden mukana tuli pala solumuovia.

Paikan 5 kohdalta kopoääni oli kimeä. Sen kohdalta otetuista kahdeksasta näytteestä seitsemän näytettä olivat kiinni kalliolla. Yksi näytteistä jäi kiinni putkeen, ja sillä kohdalla näytteenottoreikään jäi rapautunutta kalliota.

Visuaalisessa tarkastelussa paikan 1 karbonatisoituminen oli edennyt keskimäärin 5 mm sisäpinnasta mitattuna. Karbonatisoitumiskerroin oli $k = 2,5$. Näytteen ruiskubetonissa oli käytetty vahvikkeena polymeerikuituja. Paikoissa 2 ja 3 näytekappaleet olivat karbonatisoituneet koko matkalta, mistä kertoi fenoliftaleiinin erittäin heikko näkyminen sivellyssä pinnassa. Molemmissa pai-

koissa oli teräsvahvike (\varnothing 4 mm), joissa havaittavissa korroosiota. Betonipeitteet olivat pienimmillään 12...25 mm. Paikoissa 4 ja 5 oli polymeerikuituvahviketta. Molempien paikkojen näytekappaleiden karbonatisoitumissyvyys oli keskimäärin 3 mm, ja karbonatisoitumiskerroin oli $k = 1,5$. Paikassa 4 oli lisäksi teräsverkkoa (\varnothing 4 mm), jossa vaikutti olevan korroosiota.

Kloridipitoisuus vaihteli välillä 0,02...0,65 paino-% betonin painosta. Kriittisenä pidettyä raja-arvojen alapuolelle jäi yksi näyte 13:sta.

Sulfaattipitoisuus oli 0,2...4,3 paino-% sementin painosta. Vain yksi mittaus-tulos 13:sta antoi sulfaattipitoisuuden arvoksi yli 4 paino-%.

Vetolujuus jäi paikassa 1 kaikki alle 1 MN/m^2 . Paikan 4 toinen vetolujuustulos antoi tulokseksi $0,6 \text{ MN/m}^2$. Muiden paikkojen vetokoe antoi tulokseksi 1 MN/m^2 tai enemmän. Kaikissa uusintavetokokeissa tuli $1,6 \text{ MN/m}^2$ tai sitä suurempia vetolujuusarvoja.

Puristuslujuudet vaihtelivat KJT:ssa välillä 46,5...57,7 MPa. Koska kaikista näytteistä ei ollut mahdollista lyhyen mittansa vuoksi suorittaa puristuslujuuskoetta, suoritettiin kahdesta näytteestä **tiheyden** mittaus. Näistä tulokseksi tuli paikasta 1 2269 kg/m^3 ja paikasta 5 2200 kg/m^3 .

Ohuthietutkimuksen perusteella tutkittujen näytteiden betonikerrokset olivat kohtalaisen homogeenisiä, ja niissä oli havaittavissa viitteitä kosteusrasituksesta. Yleisesti näytteissä esiintyi saumarajoja, joiden katsottiin muodostaneen paikallisia heikkousvyöhykkeitä. Näytteissä esiintyi säröilyjä ja mikrohalkeamia, jotka voivat mahdollisesti olla seurausta heikkousvyöhykkeistä. Paikan 2 näytteessä näkyi sekundääristä karbonaattia, joka oli heikentänyt kerrosrajoja merkittävästi. (Vatanen 2024, 19–20.)

6.3 Porraskuilun tulokset

Porraskuilun visuaalisten tarkastelujen ja laboratoriotutkimusten tulokset on koottu alapuolella olevaan taulukkoon 7. Visuaalisista tarkasteluista taulu-

kossa näkyvät betonipeitteen minimi- ja keskimääräinen paksuus, karbonatisoitumisen tilanne sekä betonissa käytetty vahvike. Laboratoriotutkimuksista taulukossa näkyvät kloridi- ja sulfaattipitoisuudet, veto- ja puristuslujuudet sekä niistä tehdyt mahdolliset uusintakokeiden tulokset. Lisäksi taulukkoon on kirjattu mahdollinen koekappaleessa havaittu betonointien kerrosraja.

Taulukko 7. Porraskuilun tulokset taulukkumuodossa (mukailien Vatanen 2024, 21–23)

Näytteenotto- paikka	Visuaalinen tarkastelu			Kloridipitoisuus p-% betoni Sulfaattipitoisuus p-% sementti			Lujuus	Lujuus, uusinta	Puristus- lujuus	Kerros- raja
	Betonipeite minimi (keskimääräinen) [mm]	Karbonatisoituminen min - max (keskimääräinen) Karb.kerroin $k=d/\sqrt{t}$	Vahvike	0 -20 mm	20-40 mm	40-60 mm	Vetolujuus [N/mm ²], murtosyvyyys [mm]	Vetolujuus [N/mm ²], murtosyvyyys [mm]	Lieriö [Mpa]	Vetokoekpl kerrosraja sp min/max [mm]
Paikka 1, 8 koekappaletta	> 6 (24)	Koko näytteen matkalta	Teräskset Ø4 mm Polymeeri- kuitu	0,20 3,4	0,16 3,6	0,02 1,0	4: 0,3 (sp 32-55) 5: 0,3 (sp 48-60)	4: 0,5 sp 56-70 5: 0,5 sp 62-75	45,2	4: 45-70 5: 43-65

Taulukossa 7 ei ole koottu ohuthietutkimustuloksia. Ne on avattu sanallisesti tässä kappaleessa myöhemmin.

Silmämääräisen tarkastelun perusteella porraskuilun näytteenottokohdassa ruiskubetoni oli ehjää ja siistiä. Koekappaleita otettiin kahdeksan, jotka kaikki olivat kiinni kalliossa. Jokaisessa näytteessä oli mukana kalliota.

Visuaalisessa tarkasteluissa teräksiä suojaava betonipeite oli pienimmillään 6 mm ja keskimäärin 24 mm. Näytteet olivat karbonatisoituneet koko matkalta. Näytteissä esiintyi teräksiä sekä verkkoraudoitteena että teräskuituina. Niissä kaikissa oli havaittavissa korroosiota. Jokaisessa näytteessä oli mukana kalliota.

Kloridipitoisuus oli lähimpänä kalliota mitatussa kohdassa 0,02 paino-% betonin painosta. Kahdelta muulta näytteenottosyvyydeltä mitattuna pitoisuus vaihteli välillä 0,02...0,20 paino-% betonin painosta.

Sulfaattipitoisuus oli lähimpänä kalliota mitatussa kohdassa 1,0 paino-% sementin painosta. Kahdelta muulta näytteenottosyvyydeltä mitattuna pitoisuus vaihteli välillä 1,0...3,6 paino-% sementin painosta.

Vetolujuuksia mitattiin kahdesta eri kohdasta. Tulokset olivat molemmissa näytteissä $0,3 \text{ MN/m}^2$ ja suoritetuissa uusintakokeissa molempien kohtien tulokset olivat $0,5 \text{ MN/m}^2$.

Puristuslujuuden tulos oli $45,2 \text{ MPa}$. Murtovoima testissä oli $45,2 \text{ kN}$.

Ohuthietutkimus osoitti näytekappaleen sisältävän halkeillutta rapakivigraniittia eli kalliota. Betonin ja kallion välinen tartuntapinta oli enimmäkseen avoin ja siinä esiintyi säröilyä. Tartuntapinnassa oli havaittavissa laastimaista tartunta-ainetta, minkä sideaine oli korvautunut sekundäärisellä karbonaatilla. Näyte-kappaleessa ei ollut selkeitä viitteitä kosteusrasituksesta. Läpi koko näytteen esiintyi säröilyä, joka runsastui kalliopinnan läheisyydessä. (Vatanen 2024, 23.)

7 TULOSTEN TARKASTELU

7.1 Ruiskubetonin kunto

Aikaisempiin tutkimuksiin verrattuna tällä kertaa tutkittu ruiskubetoni oli yleisesti ottaen paremmassa kunnossa, mikä saattaa johtua ruiskubetonin nuoremasta iästä. Tällä kertaa silmämääräisissä tarkasteluissa ei havaittu betonissa irtoilevia osia.

Karbonatisoituminen oli yleisesti ottaen vähäistä eli k-kerroin oli keskimäärin $0,58\text{--}2,5$, mikä vastaa tyyppillisiä arvoja (kaava 1). Tämä tarkoitti, että tämänhetkisen karbonatisoitumistilanteen mukaan, mikäli olosuhteet jatkuisivat muuttumattomina, betoni karbonatisoituisi seuraavassa sadassa vuodessa keskimäärin $5,8\text{--}25 \text{ mm}$.

Kemiallisen rasituksen olemassaolosta ja sen etenemisestä näkyi viitteitä molemmissa tutkimuksissa. Mitään selitystä ei löytynyt tulosten vaihtelevuudelle.

Aikaisemmissa tutkimuksissa tulokset viittasivat paikoitellen sulfaattirasitukseen, mutta siihen ei kuitenkaan löytynyt tukea murtopintatarkasteluilla eikä ohuthietutkimuksilla. Sulfaattipitoisuuden yleisesti pidetyn riskirajan ylittämisen

ja sen aiheuttaman todellisen vaurion yhteyttä ei siis voitu todentaa. Tässä tutkimuksessa sulfaattipitoisuudet eivät lähestyneet yleisesti kriittisenä pidettyä raja-arvoa. Laboratoriotutkimuksissakaan sulfaattirasitusta ei havaittu suoraanaisesti, mutta sen mahdollisuutta tulevaisuudessa ei voitu myöskään sulkea pois, koska kerrosrajat vaikuttavat mahdollisesti betonin läpäisevyyteen ja sitä kautta kosteuden liikkumiseen. Tämä altistaa betonia mahdolliselle sulfaattirasitukselle.

Kloridipitoisuudet olivat puolestaan tässä tutkimuksessa yleisesti ottaen korkeammat kuin aikaisemmassa tutkimuksessa. Kloridipitoisuudet olivat HJT3:ssa merkityksettömiä, mutta KJT:ssa ja osittain POK:ssa ne nousivat kriittisenä pidetylle tasolle ja olivat siten merkityksellisiä betoniterästen mahdolliselle korroosiolle. Teräksissä oli havaittavissa vähäisessä määrin korroosiota, mikä näkyi sekä visuaalisissa tarkasteluissa että ohuthietutkimuksessa.

Pääsääntöisesti vetolujuuden arvot olivat tutkimusten mukaan hyviä eikä merkkejä todennäköisestä rapautumasta ollut. Tulokset olivat aiempiin verrattuna vähän paremmat, mikä voi selittyä betonin iällä. Tässä tutkimuksessa ensimmäisissä vetokokeissa murtumakohta oli useimmiten betonin kerrosrajan kohdalla, mikä kertoi kerrosten välisen tartunnan heikkoudesta. Tämä näkemys varmistui uusintakokeissa. Ne tehtiin kerrosrajattomalle koekappaleelle, ja tulokset olivat joka kerta hyviä eli betonissa ei ollut todennäköisesti huomattavaa rapautumaa. Ainoastaan POK:n koekappaleiden vetokokeiden tulokset olivat heikkoja, eikä uusintakokeilla saavutettu juurikaan parempia tuloksia. Betonin katsottiin olevan näytteenotto paikassa erittäin rapautunutta.

Koska vetokokeen murtumakohdat olivat pääsääntöisesti kerrosrajalla, voitiin sanoa betonin heikoimman kohdan olevan nimenomaan niissä kohdissa. Syynä tälle voitiin pitää betonointivaiheen laadunvalvonnan puutteita, koska työsuoritus oli jäänyt toivottua heikommalle tasolle. Työsuorituksella eri betonointimenetelmien välillä ei näkynyt eroja, eli sekä märkä- että kuivaseosmenetelmässä näkyi yhtä lailla huonoa työn laatua.

Ohuthietutkimukset vahvistivat, että näissä kohdissa, missä työsuoritus ei täyttänyt laadukkaan työn vaatimuksia, kerrosrajojen kohdalle muodostui halkeamia ja säröilyjä. Nämä olivat aiheuttaneet tai luoneet mahdollisuuden heikkousvyöhykkeille, jotka altistavat betonin erilaisille ulkopuolisille rasituksille.

Puristuslujuuden arvot olivat kaikki tavanomaisia betonille. Ruiskubetonin kuntoa tutkittaessa puristuslujuuden määrittäminen ei ole merkittävää.

Verrattuna silmämääräisiin tarkasteluihin valittujen näytteenottokohtien laboratoriotulokset korreloivat yleisesti ennalta oletettuja arvoja. Poikkeuksena oli kuitenkin yllättävästi esimerkiksi KJT:n referenssikohtana pidetty ns. todennäköisesti paremmassa kunnossa oleva ruiskubetoni. Siltä kohdalta saatiin heikommat vetolujuustulokset kuin viereisissä paikoissa 2 ja 3, joissa oletettiin etukäteen olevan rapautuneempaa betonia. Toisaalta taas HJT3:ssa silmämääräisissä tarkasteluissa havaitut halkeamat näkyivät myös ohuthietuloksissa.

7.2 Käytettyjen tutkimusmenetelmien tarpeellisuus

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tarkastella käytettyjen tutkimusmenetelmistä saatuja hyötyjä, koska toimeksiantaja halusi kartoittaa jatkossa käytettävien menetelmien tarpeellisuutta. Johtopäätöksenä voitiin sanoa, että käytetyt tutkimusmenetelmät olivat lähes kaikki tarpeellisia. Ainoastaan puristuslujuuden mittaamisesta saatua tietoa ei pidetty merkityksellisenä.

Tutkimusmenetelmien käyttökelpoisuuden huomattiin noudattavan taulukossa 2 mainittuja määräyksiä. Tehtyjen tutkimusten perusteella oli havaittavissa, että silmämääräiset tarkastelut olivat helposti ja edullisesti toteutettavissa, mutta niissä tehdyt havainnot osoittautuivat vain osittain paikkansa pitäviksi.

Koska silmämääräisillä tarkasteluilla ei pystytä saamaan varmuutta betonin todellisesta kunnosta, vahvistui käsitys rakenteita rikkovien menetelmien tarpeellisuudesta. Kuten edellä tuli esille, laboratoriotutkimuksien merkitys betonin kunnan tarkassa selvittämisessä on korvaamaton. Porajauhenäytteiden ot-

taminen oli nopeaa ja helposti toteutettavissa. Näistä näytteistä haettiin merkkejä kemiallisille rasiuksille altistumisesta, koska niiden merkitys tunnistettiin yhdeksi merkittävimmistä betonin vaurioitumisen syistä. Poraliერიönäytteiden ottaminen oli suuritöistä ja hintavaa, mutta siitä tehtyjen vetokokeiden ja ohutkokeiden ansiosta pystyttiin selvittämään betonin heikoimmat kohdat, rasiusten laajuutta ja betonin mikrorakennetta.

Tässä opinnäytetyössä ei teetetty murtopintatarkasteluja, kuten se tehtiin aikaisemmissa tutkimuksissa. Murtopintatarkasteluissa tutkitaan stereomikroskoopilla ultraviolettivalon avulla vetokokekappaleiden murtopintoja. Niistä on mahdollista havaita runkoaineen laatuun ja koostumukseen liittyviä asioita. Lisäksi voidaan tutkia huokoisuuden määrää yleisellä tasolla, selkeitä huokostäytteitä sekä halkeiluja. (Virtanen 2023.) Vaikka tästä tutkimusmenetelmästä ei ole kirjoitettua tutkimustietoa alan kirjallisuudessa, tutkimuspalveluja tarjoava laboratorio myy kyseistä tutkimusmenetelmää osana betonitutkimuksia. Murtopintatarkasteluja on mahdollista suorittaa jatkossa joko tilaamalla tutkimuslaboratoriosta tai tutkimalla asiaa luvanhaltijan omasta toimesta, mikäli siihen on ammatillista asiantuntemusta ja välineitä.

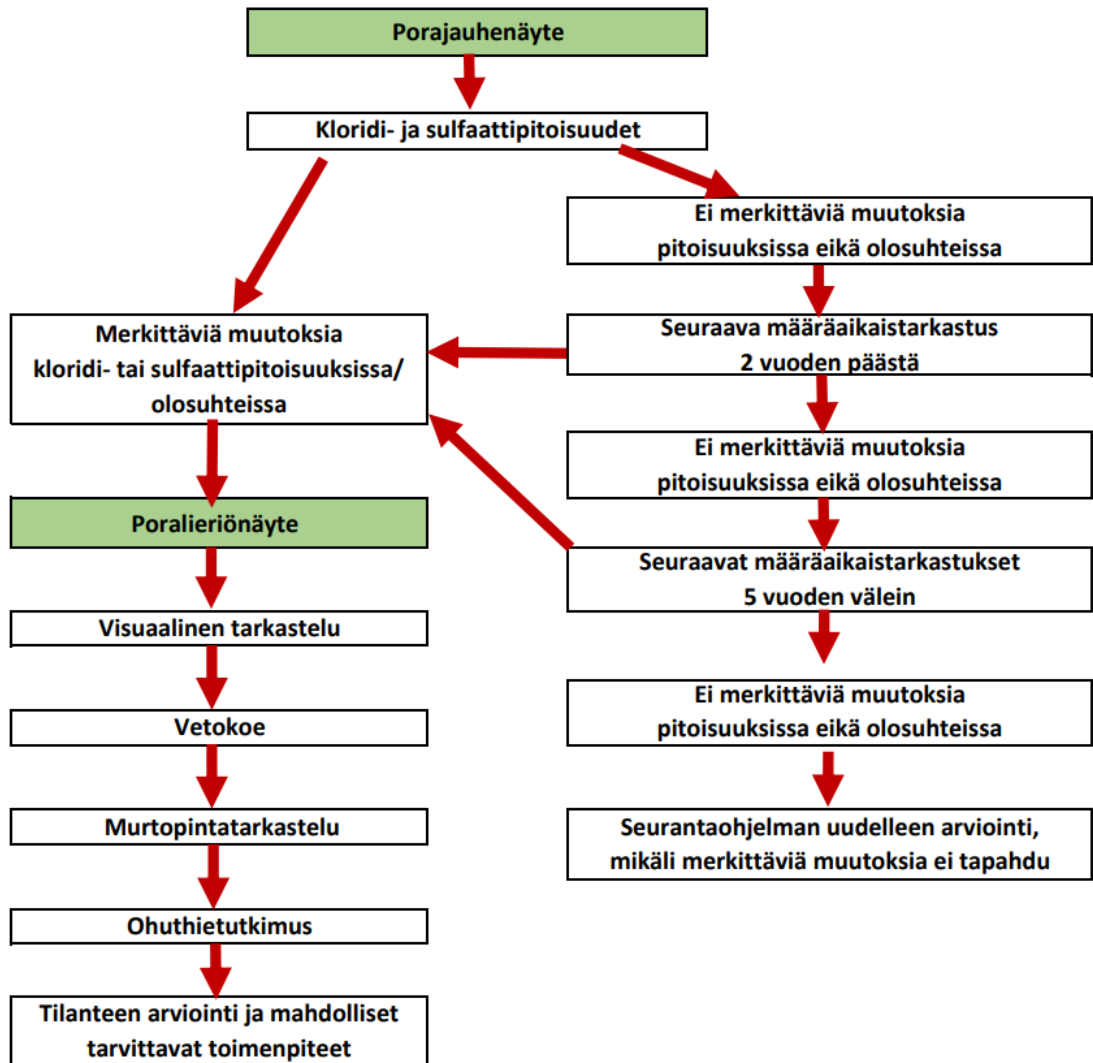
8 JOHTOPÄÄTÖKSET

8.1 Tutkimusmenetelmien käyttäminen jatkossa

Koska loppusijoituslaitoksen ruiskubetonissa ei havaittu rasiolosuhteet huomioiden normaalista ikääntymisestä poikkeavia arvoja, oli aiheellista esittää kysymys: tarvitaanko edelleen aikaisemmin käytettyä tutkimusmenetelmien kokonaispakettia suorittaa yhdellä kertaa vai onko mahdollista tehdä kuntotutkimukset vaiheittain? Vaiheittainen tekeminen antaisi mahdollisuuden tehdä kuntotutkimuksia harvemmin, mutta pysyä silti betonin kunnon suhteen ajan tasalla. Asiaa pohdittiin keskusteluissa toimeksiantajan ja betoniasiantuntijoiden kanssa, minkä jälkeen syntyi päätös käytettävien tutkimusmenetelmien käyttämisestä. Tämän pohjalta luotiin tutkimusmenetelmien kaavio, jota käytettiin myöhemmin tutkimusohjelman perustana.

Kuten edellä esitettiin, ruiskubetonin kunnan selvittämisessä useat käytetyistä menetelmistä puoltavat paikkaansa. Koska loppusijoituslaitoksen ruiskubetonin katsottiin olevan ikäänsä nähden hyväkuntoista ja täyttävän sille asetetut vaatimukset käyttöiän suhteen, päätettiin edetä jatkossa tehtävissä kuntotutkimuksissa vaiheittain eikä teettäen kaikkia laboratoriotutkimuksia yhdellä kertaa. Tämä ei lähtökohtaisesti sulje pois mitään yksittäistä tutkimusmenetelmää.

Koska porajauhenäytteistä saaduilla tuloksilla betonin kunto vaikutti olevan vaurioituneempaa kuin se tarkimpina pidetyissä ohuthietutkimusten mukaan lopulta oli, voidaan luottaa porajauhenäytteistä saatavan ennakoivaa tietoa kemiallisesta rasituksesta ja siten betonin kunnosta. Tästä syystä katsotaan jatkossa kemiallisen rasituksen tuloksen mukaan, onko tarpeen edetä tutkimusmenetelmien ketjussa aina loppuun saakka heti vai voidaanko edetä määräaikaistarkastuksilla niiden väliä jopa pidentäen. Betonirakenteiden kuntotutkimusten hyvänä tarkastusvälinä on alalla yleisesti pidetty viittä vuotta, mutta koska loppusijoituslaitoksella halutaan edetä riittävän varovasti, valittiin ensimmäiseksi määräaikaistarkastuksen väliksi kaksi vuotta. Määräaikaistarkastusten aikavälin pidentämisen ehtona on, ettei tuloksissa eikä olosuhteissa tapahdu merkittäviä muutoksia. Jatkossa loppusijoituslaitoksen ruiskubetonin kuntoa seurataan kohdekohtaisesti vaiheittain kuvassa 7 esitetyn tutkimusmenetelmäkaavion mukaisesti.



Kuva 7. Kaaviokuva kuntotutkimusmenetelmien käyttämisen etenemisestä

Suunnitelman mukaisesti ruiskubetonin kunnon seuraaminen alkaa porajauheen ottamisella. Näytteet otetaan silmämääräisten tarkastelujen perusteella ja ruhevyöhykkeiden vaikutusalueet huomioiden. Näistä näytteistä saadaan selville betonin kemiallisen rasituksen tilanne eli kloridi- ja sulfaattipitoisuuksien olemassaolo ja niiden mahdollinen eteneminen betonissa. Mikäli näissä pitoisuuksissa eikä olosuhteissa tapahdu merkittäviä muutoksia aikaisempiin tuloksiin verrattuna, siirretään seuraava määräaikaistarkastus kahden vuoden päähän. Mikäli siinäkin porajauhetutkimuksessa tilanne on edelleen ennallaan, siirretään seuraava määräaikaistarkastus viiden vuoden päähän. Mutta, jos tutkimuksissa havaitaan merkittäviä muutoksia kloridi- ja sulfaattipitoisuuksissa tai olosuhteissa huonompaan suuntaan, otetaan kyseisiltä paikoilta poralieriönäytteet laboratoriotutkimuksia varten. Poralieriöistä teetetään laborato-

riossa vähintään vetolujuus- ja ohuthietutkimukset. Lopuksi tulosten analysoinnin jälkeen tehdään huolellinen tilanteen arviointi ja suunnitelma tarvittavista toimenpiteistä.

8.2 Tutkimusohjelma

Loppusijoituslaitoksen lakisääteinen määräaikainen turvallisuusarvio (MTA) suoritetaan viidentoista vuoden välein (Eurajoki 2020, 4). Loppusijoituslaitoksen rakenteiden kuntoa valvotaan ennakkohuolloilla sekä seurantaohjelmien avulla. Yksi seurantaohjelmista on ikääntymisen hallinnan seurantaohjelma, jonka tarkoituksena on havaita ajoissa ruiskubetonin osalta betonirakenteissa tapahtuvat muutokset (Lampén 2020a, 8). Opinnäytetyön tavoitteena oli laatia toimeksiantajalle edellä mainittuun seurantaohjelmaan ruiskubetonin kunnan kartoittamiseen systemaattinen tutkimusohjelma, jonka mukaan ruiskubetonin kuntoa seurataan tulevaisuudessa.

Silmämääräisiä tarkastuksia tehdään vuosittain. Ruiskubetonirakenteiden kuntoa seurattaessa erityisen tarkastelun alla ovat havaittujen ja ennalta tiedettyjen vesivuotojen ympäristöt, koska kosteus ja ruiskubetonin vaurioitumisen tiedetään liittyvän toisiinsa. Tehdyt havainnot dokumentoidaan ja kaikki huomiotavat kohdat valokuvataan ohjeen liitteeseen. Dokumentoinnissa käytetään laitokselle vakiintunutta käytäntöä, jolla havainnot sidotaan tunnelien ja kuilujen seiniin merkittyihin paalu-/tasomerkintöihin. Paalumerkinnät alkavat loppusijoituslaitoksen ajoluiskan suuaukon ovesta alaspäin juoksevana numerointina. Kartoitushavainnot tehdään lohkoittain, joihin loppusijoituslaitos on jaettu. Nämä ovat suuaukko, ajotunneli, vastaanottohalli, hissi/porraskuilu, yhdystunneli ja kuormausalue, KJT-tila, poistoilmakuilu, HJT1, HJT2, HJT3 ja uusi yhdystunneli. (Lampén 2020b, 3.)

Taulukkoon 8 on koottu eri tilojen seuranta-ajankohdat. Kaaviokuvan mukaista tutkimusmenetelmien käyttämistä aletaan noudattaa suunnitellusta vuodesta lähtien. Kuntotutkimuksella tarkoitetaan edellisessä kappaleessa esiteltyä rakenteita rikkovaa kuntotutkimusmenetelmien käyttösuunnitelmaa (kuva 7). Taulukossa 8 kuntotutkimuksesta käytetään lyhennettä KT.

Taulukko 8. Taulukossa on loppusijoituslaitoksen ruiskubetonin tutkimusohjelma, jota aletaan noudattaa suunnitellusta vuodesta lähtien edellä esitellyn tutkimusmenetelmäkaavion mukaisesti.

Tila	Tehty vuosi	Arkistonumero	Suunniteltu vuosi	Tutkimusmenetelmä
Vastaanottohalli	2021	LO1-K4910-00046	2026	KT
Yhdystunneli ja kuormausalue, P230	2022–2023	LO1-K4910-00054	2026	KT
Ajotunneli	2022–2023	LO1-K4910-00054	2027	KT
Hissi/POK	2022–2023 2023–2024	LO1-K4910-00054 LO1-K4910-00058	2027	KT KT
HJT1 ja 2	2022–2023	LO1-K4910-00054	2024 2029	KT KT
HJT3	2023–2024	LO1-K4910-00058	2029	KT
KJT	2023–2024	LO1-K4910-00058	2029	KT
Uusi yhdystunneli	2026		2026	KT

Taulukon 8 mukaisesti tilojen HJT1:n ja HJT2:n kuntotutkimukset tehdään jo vuonna 2024, koska ne halutaan tehdä ennen niissä alkavaa isoa rakennusprojektia. Tämä suunnitelma on toistaiseksi voimassa oleva, mistä voidaan poiketa joko aikaistaen tai harventaen kuntotutkimuksien väliä. Mikäli vuosittaisissa silmämääräisissä tarkasteluissa havaitaan muutoksia, kuntotutkimuksia aikaistetaan. Toisaalta, mikäli kemiallisessa rasituksessa tai olosuhteissa ei tapahdu merkittäviä muutoksia, pidennetään kuntotutkimusten aikaväliä ensin kahteen vuoteen ja siitä edelleen viiteen vuoteen, jos samat ehdot täyttyvät. Viisi vuotta on yleisesti luotettavana pidetty tarkastusten väli betonirakenteiden kuntoa määritettäessä. Jos merkittäviä muutoksia ei havaita edelleenkään kahden viisivuotistarkastuksen jälkeen, tehdään seurantaohjelman uudelleen arviointi.

Määräaikaistarkastuksissa ruiskubetonista otetaan porajauhenäytteet kolmelta eri syvyydeltä (0–20, 20–40, 40–60 mm sisäpinnasta alkaen). Jos lieriönäytteiden ottamiselle on tarvetta, niitä otetaan näytteenotto paikalta 6–8 kappaletta. Ne otetaan timanttiporalla, jonka halkaisija on 50–70 mm. Poraaminen ulottuu

muutaman millimetrin verran kallion sisälle, jotta saadaan selville ruiskubetonin ja kallion välisen tartunnan laatu. Jokaisesta tutkittavasta tilasta näytteenotokohdiksi valitaan mahdollisimman laajasti ruiskubetonin kuntoa edustavat paikat. Paikkojen valinnassa tulee huomioida riittävä määrä kosteita alueita, jotta pystytään seuraamaan esimerkiksi vettä johtavien ruhjevyöhykkeiden aiheuttamien vesivirtojen vaikutusta betonin kuntoon. Näiden lisäksi koekappaleita otetaan myös silmämääräisesti kuivemmista ja ehjemmistä ruiskubetonipinnoista.

8.3 Muita johtopäätöksiä

Kloridi- ja sulfaattirasitus näytti olevan voimakkaampaa porajauhenäytteistä kuin ohuthietutkimuksista saatujen tulosten perusteella. Koska ohuthietutkimusta pidetään tutkimusmenetelmistä tarkimpana, on syytä pitää siitä saatuja tuloksia luotettavina. Toisin sanoen, vaikka porajauhenäytteiden tulokset kertoivat kemiallisten rasitusten olevan paikoitellen riskitasolla, betoni ei vaikuttanut olevan vaurioitunutta. On vielä hyvä muistaa, että käytetty betoni sisältää alun alkaen sekä kloridi- että sulfaattipitoisuuksia, joten kaikki pitoisuudet eivät ole kokonaisuudessaan aiheutuneet ulkoisesta rasituksesta. Voidaan esittää kysymys, onko loppusijoituslaitoksen kemiallisen rasituksen riskitasot korkeammalla kuin yleisesti alalla on pidetty?

Työssä oli tehtävänä selkeyttää päällekkäistä sulfaatti- ja sulfiittikäsitteiden käyttämistä, mikä oli aiheuttanut hämmennystä edellisissä raporteissa. Asiaan haettiin vastausta alan kirjallisuudesta ja haastatteleamalla betoniasiantuntijoita. Näiden perusteella tehtiin päätös käyttää jatkossa termiä sulfaattirasitus (ks. 3.4).

Tässä opinnäytetyössä tutkittavien paikkojen ja näytekappaleiden otanta oli ruiskubetonin kunnan tutkimiselle niin laaja, että näytemäärää voitiin pitää luotettavana. Toisaalta näytteet olivat kohdekohtaisia, joten yksittäisten tulosten yleistäminen tai korostaminen ei ollut aiheellista.

Haasteena oli ruiskubetonireseptien tiedon luotettavuus, koska sen enempää ruiskubetonin toimittaneilla yrityksillä kuin Loviisan voimalaitoksellakaan ei ollut enää dokumentteja ruiskubetonin reseptistä eikä työn suunnitelmista tai toteuttamisesta. Tieto oli osittain ihmisten muistin varassa, mikä saattaa aiheuttaa vääristymistä tuloksiin. Toisaalta kirjoittamattomat alalla yleisesti käytetyt raja-arvot riskitasojen määrittämisessä ja lähdekriittisyys ohjasi etsimään selitystä ja hakemaan tietoa betonitutkimusta tekeviltä ammattilaisilta.

Ruiskubetonin kuntoa tutkittaessa on olennaisen tärkeää, että luvanhaltijalla on oman henkilökuntansa puolesta ammattitaitoa tehdä luotettavasti silmämääräisiä tarkastuksia sekä ymmärtää konsulteilla teetettyjä kuntotutkimuksia ja niiden perusteella saatuja lausuntoja. Näin luvanhaltijan puolella ruiskubetonin kunnon seuraaminen ja päätöksen tekeminen tulevien määräaikaistarkastusten suhteen on luotettavaa.

8.4 Suositellut jatkotoimenpiteet

Jatkoseurannan helpottamiseksi olisi aiheellista laatia seurantataulukko, jonne koottaisiin edellä mainittujen määräaikaistarkastusten eri menetelmillä saavutetut tulokset sekä tiedot eri betonien koostumuksesta. Tämä helpottaisi jatkossa tilanteen seuraamista niin lyhyellä kuin pitkälläkin aikavälillä. Se liittyisi läheisesti tutkimusohjelmaan ja siinä esitettyjen määräaikaistarkastusten väleihin.

Tutkimusmenetelmistä ruiskubetonin puristuslujuuden mittaaminen jätetään pois. Perusteluna tälle on se, että saavutettu tulos ei kerro mahdollisen vaurion esiintymisestä eikä sen etenemisestä tutkittavassa betonissa.

Koska murtopintatarkastelut antavat lisätietoa betonista, tässä kohtaa voisi nostaa esille ajatuksen toiminnan kehittämisestä Loviisan voimalaitoksella. Olisiko mahdollista kouluttaa voimalaitoksen omaa väkeä suorittamaan murtopintatarkasteluja? Tämäkin lisäisi edellä mainittua luvanhaltijan omaa potentiaalia ymmärtää ruiskubetonirakenteita ja siinä tapahtuvia mahdollisia muutoksia.

Jotta jatkossa voidaan paremmin todentaa ruiskubetonin alkuperäisen koostumuksen ja siihen vaikuttaneiden ulkopuolisten rasiustekijöiden välinen ero, on tulevaisuudessa tehtävistä betonivaluista valettava referenssinäytteet ns. betonipankkia varten. Niistä on mahdollista teettää myöhemmin tästä tutkimuksesta pois jätetyt XRF- ja TGA-tutkimukset, joiden avulla voidaan verrata referenssibetonia rasiitettuun betoniin.

Kiinnostavaa olisi myös jatkaa tutkimusta ruiskubetonin kemiallisten rasiustekijöiden (kloridi- ja sulfaattipitoisuudet) riskirajojen määrittämisestä loppusijoituslaitoksen rasiusolosuhteissa. Tutkimuksissa on alalla yleisesti hyväksytyistä rajoista huolimatta tässäkin tutkimuksessa havaittu, etteivät rajojen ylittämisestä oletettavasti seuraavat vaurioitumiset ole kuitenkaan vahvistuneet ohuthietutkimuksissa. KJT:ssa on tutkittu kloridien tunkeutumista tilan sisällä olevaan betonikaukalo. Myös näiden tutkimusten valossa on noussut esiin kloridipitoisuuksien riskitason raja-arvojen häilyvyys teräsbetonirakenteiden kohdalla (Mannonen ym. 2016, 1–4.) Voidaan perustellusti esittää kysymys: mitkä ovat loppusijoituslaitoksen riskirajat kemiallisessa rasiuksessa? Tämän opinnäytetyön puitteissa asian tutkimiseen ei ollut resursseja, mutta jatkoa ajatellen se antaisi varmuutta kuntotutkimustulosten analysointiin.

LÄHTEET

Betonin karbonatisoituminen. s.a. Betonitieto. Suomen Betoniyhdistys ry (BY). WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sa-nasto/betonisanasto/karbonisoituminen.html> [viitattu 10.12.2023].

Betonin kemialliset korroosiot. s.a. Betonitieto. Suomen Betoniyhdistys ry (BY). WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sa-nasto/betonisanasto/kemiallinen-korroosio.html> [viitattu 10.12.2023].

Betonirakenteiden säilyvyys. s.a. Betonitieto. Suomen Betoniyhdistys ry (BY). WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.betonitieto.fi/suunnittelijat/betonirakenteiden-suunnittelu-talonrakentaminen/betonirakenteiden-suunnittelupe-rusteet/betonirakenteiden-sailyvyys.html> [viitattu 12.1.2024].

Eurajoki, T. 2020. Loviisan matala- ja keskiaktiivisen jätteen loppusijoituslaitoksen määräaikainen turvallisuusarvio 2020. Raportti. Fortum Power and Heat. PDF-dokumentti. Päivitetty 16.9.2020. Intranet.

Eurofins. Sulfaattikorroosio. WWW-dokumentti. Päivitetty: 12.9.2023. Saatavissa: <https://www.eurofins.fi/expertservices/palvelut/testaus-ja-tarkastus/ra-kennusmateriaalien-testaus/betoni/sulfaattikorroosio/> [viitattu 17.12.2023].

Finnsementti. s.a. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://finnsementti.fi/> [viitattu 22.2.2024].

Geosto Oy. 2016. Geolämpövoimalan erikoissivusto. WWW-dokumentti. Päivitetty 15.12.2023. Saatavissa: [Geosto | geoterminen voimala | kalliooperä | geologiset ominaisuudet | kalliorakoilu | vedenjohtavuus](#) viitattu [11.1.2024].

Haara, T., Heikkilä, E., Johansson, K., Järvinen, M., Kaskiaro, T., Koivisto, M., Kunnassaari, E., Kuula, P., Lumme, P., Mannonen, R., Mantila, A., Matsinen, M., Mattila, J., Meriläinen, J., Merikallio, T., Niemi, S., Paukku, E., Petrow, S., Punkki, J., Tallbacka, T., Tepponen, P., Tikkanen, J., Toivonen, M., Valjus, J., Vasama, M., Virtanen, J., Ålander, C. 2018. BY201 Betonitekniikan oppikirja 2018. 8. painos. Helsinki: By-koulutus Oy.

Jokela, J. 2023. Toimitusjohtaja. Haastattelu 15.12.2023. Lujitustekniikka Oy.

Kelokaski, P. 2020a. Loviisan loppusijoituslaitoksen määräaikainen turvallisuusarvio 2020 - seurantaohjelmien tulokset. Raportti. Fortum Power and Heat. PDF-dokumentti. Päivitetty 1.7.2020. Intranet.

Kelokaski, P. 2020b. Loppusijoituksen vaiheistus, aikataulut ja tilojen yleiskäyttö. Raportti. Fortum Power and Heat. PDF-dokumentti. Päivitetty 16.12.2020. Intranet.

Lahdensivu, J., Weijo, I., Ruuska-Jauhijärvi, K., Pyy, H. 2019. BY42 Betonijulkisivun kuntotutkimus 2019. 4. painos. Helsinki: BY-koulutus Oy.

Leppänen, E. 2022. VLJ-luolan ikääntymisen hallinnan seurantaraportti. Fortum Power and Heat. PDF-dokumentti. Päivitetty: 16.5.2023. Intranet.

Lampén, H. 2020a. Loviisan loppusijoituslaitoksen määräaikainen turvallisuusarvio 2020 - käyttökokemukset, ikääntymisen hallinta ja laitosparannukset. Fortum Power and Heat. PDF-dokumentti. Päivitetty 14.8.2020. Intranet.

Lampén, H. 2020b. VLJ-luolan rakenteiden ja jätepakkausten ikääntymisen seuranta. Ohje. Fortum Power and Heat. PDF-dokumentti. Päivitetty 9.6.2020. Intranet.

Larjamo, K. & Vatanen, J. 2024. Selvitys sulfaatti- ja sulfiittitermien käytöstä sulfaattihyökkäyksen yhteydessä. Lausunto. Fortum Power and Heat. PDF-dokumentti. Päivitetty: 1.2.2024. Intranet.

Mannonen, R. 2024. Tekniikan tohtori. Haastattelu 8.1.2024.

Mannonen, R. & Punkki, J. 2016. KJT-kaukalon korjaustoimenpiteiden arviointi. Raportti. Fortum Power and Heat. PDF-dokumentti. Päivitetty 21.6.2016. Intranet.

Martin, M. 2023. Loppusijoituslaitoksen ruiskubetonin visuaaliset tarkastelut 2023. Tutkimusselostus. Fortum Power and Heat. Päivitetty 23.11.2023. Intranet.

Mehta, P., & Monteiro, P. 2006. Concrete. Microstructure, Properties, and Materials. McGraw-Hill. PDF-dokumentti. Saatavissa: [Concrete-Microstructure-Properties-and-Materials.pdf \(worksaccounts.com\)](#) [viitattu 10.12.2023].

Paukku, E., 2023. VLJ-luolan ruiskubetoni. Tutkimusselostus. PDF-dokumentti. Fortum Power and Heat. Päivitetty: 23.3.2023. Intranet.

Penttinen, T., Tammisto, E., Wichmann, A. & Nummela, J. 2023. Loviisan voimalaitoksen VLJ-luolan hydrologiset seurantamittaukset vuonna 2022. Raportti. PDF-dokumentti. Fortum Power and Heat. Päivitetty: 12.5.2023. Intranet.

Petrow, S. 2017. BY63 Ruiskubetoniohjeet 2015. 2. painos. Helsinki: BY-koulutus Oy.

Pyy, H. 2023. Betonirakenteiden kemialliset vauriot. Betoniyhdistys. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssit> [viitattu: 14.12.2023].

Pöllä, J. 1988. Ruiskubetoni ja sen käyttö kallionlujittamisessa. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus.

Rihu, E & Forsberg, R. 2024. VLJ-luolan ikääntymisen hallinnan seurantaraportti 2022. Raportti. Fortum Power and Heat. PDF-dokumentti. Päivitetty 21.2.2024. Intranet.

Ritola, J. & Vuopio, J. 2002. Kalliovesitiiviyyden hallinta. VTT-tiedotteita 2147. PDF-dokumentti. Saatavilla: [T2147.pdf \(vttresearch.com\)](#) [viitattu 15.1.2024].

Ruiskubetonointi s.a. Betonitieto. Suomen Betoniyhdistys ry (BY). WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto/ruiskubetonointi.html> [viitattu 10.12.2023].

Sementtikemian lyhenteet s.a. Betonitieto. Suomen Betoniyhdistys (BY). WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.betonitieto.fi/kirjasto-ja-sanasto/betonisanasto/sementtikemian-lyhenteet.html> [viitattu 3.1.2024].

SFS-EN 197-1:en. 2012. Sementti. Osa 1: Tavallisten sementtien koostumus, laatuvaatimukset ja vaatimuksenmukaisuus.

SFS-EN 14487-1:en. 2022. Ruiskubetoni. Osa 1: Määritelmät, vaatimukset ja vaatimuksenmukaisuus.

SFS-EN 14487-2:en. 2006. Ruiskubetoni. Osa 2: Toteuttaminen.

SFS-EN 1504-9. 2009. Betonirakenteiden suojaus- ja korjausmenetelmät.

SILKO 1.232. 2009. Betonirakenteet, betonointi ruiskuttamalla. PDF-dokumentti. Saatavilla: s1232_10.pdf (vaylapilvi.fi) [viitattu 19.12.2023].

Taylor, H.F.W. 1997. Cement chemistry. Lontoo: Academic Press. PDF-dokumentti. Saatavissa: Cement-Chemistry-2nd-Edition_1539670060.pdf (fazaia.edu.pk) [viitattu 8.1.2024].

Toivonen, J. 2023. Laatu päällikkö. Haastattelu 10.12.2023. Rudus Oy.

Valtioneuvoston päätös Fortum Power and Heat Oy:n hakemukseen saada ydinenergialain 20 §:ssä tarkoitettu lupa käyttää ydinvoimalaitosyksiköitä Loviisa 1 ja Loviisa 2 ja niihin kuuluvia ydinpolttoaine- ja ydinjätehuollon kannalta tarpeellisia rakennuksia ja varastoja VN/7906/2022.

Vatanen, J. 2022. Loviisan ruiskubetonit, laboratorioanalyysit. Raportti. PDF-dokumentti. Fortum Power and Heat. Päivitetty 9.12.2022. Intranet.

Vatanen, J. 2024. Laboratorioanalyysit. Raportti. PDF-dokumentti. Fortum Power and Heat. Päivitetty: 2.2.2024. Intranet.

Virtanen, J. 2022. Ruiskubetonin tutkimussuunnitelma. Fortum Power and Heat. PDF-dokumentti. Päivitetty 30.8.2022. Intranet.

Virtanen, J. 2023. VLJ-luolan ruiskubetonitutkimus. Fortum Power and Heat. PDF-dokumentti. Päivitetty: 9.5.2023. Intranet.

Virtanen, J. 2024. Betonin erityisasiantuntija. Haastattelu 12.2.2024. Fortum Power and Heat.

Väyläviraston ohjeita 28/2019. Kalliotunnelin kalliotekninen suunnitteluohje. PDF-dokumentti. Saatavissa: Microsoft Word - VO 28-2019 Kalliotunneliohje_24.10.2019 (vaylapilvi.fi) [viitattu 19.12.2023].

