



MAANALAISET SKANNAUKSET OSANA KORJAUSRAKENTAMISEN INVENTOINTIA

Abstrakti

Raportissa tarkastellaan rakennuskannan ikääntymisestä, korjausvelasta ja ilmastonmuutoksen kosteusvaikutuksista aiheutuvia haasteita. Hankkeessa on testattu sähköiseen tomografiaan perustuvaa maanalaisten rakenteiden ja maaperän kuvantamisteknologiaa, joka mahdollistaa rakennusten ja niiden perustusten kunnon kartoittamisen ilman rakenteiden rikkomista. Teknologian avulla voidaan parantaa korjausten suunnittelun lähtötietojen laatua sekä vähentää yllätyksiä ja kustannuksia. Menetelmä soveltuu erilaisiin rakennuskohteisiin ja tarjoaa vaihtoehdon perinteisille kuntotutkimusmenetelmille.

Deep Scan Tech Oy, 3.6.2025

DEEP SCAN TECH

Non-invasive 3D scanning for securing
clean and resilient environment

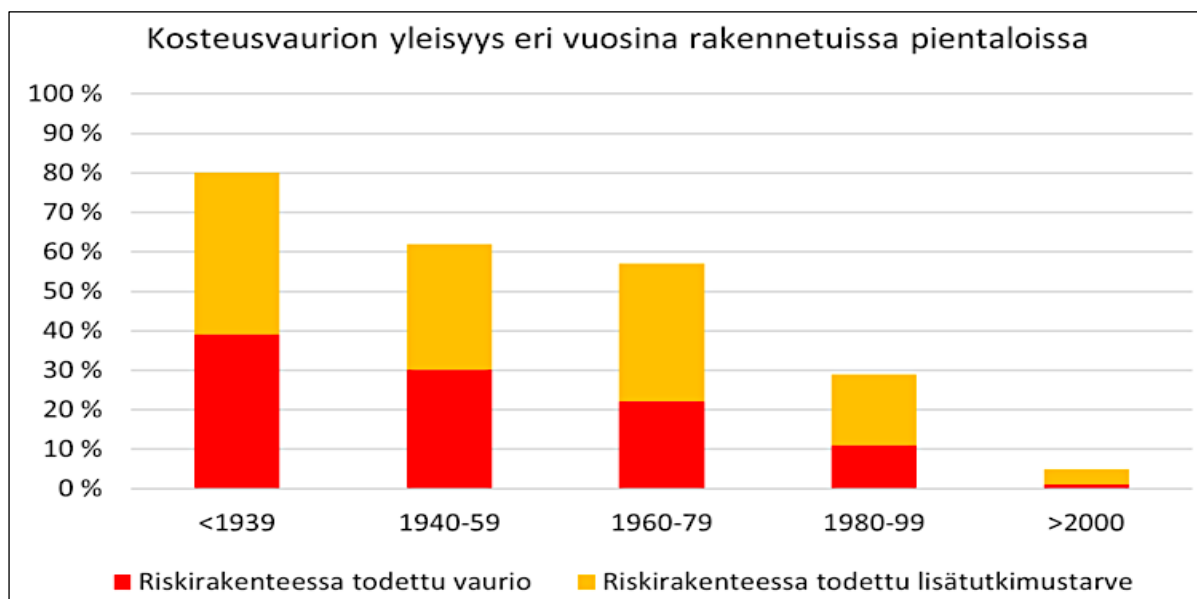
Sisällysluettelo

1	<i>Tausta</i>	2
1.1	Rakennuskannan kunto.....	2
1.2	Tavoitteena kestävämpi rakennuskanta	3
1.3	Vastaaminen kasvavaan tiedontarpeeseen	5
1.4	Hankkeen toteuttajat.....	6
2	<i>Hankkeen tavoite</i>	7
3	<i>Menetelmäkuvaus</i>	8
4	<i>Projektin työvaiheet ja toteutus</i>	11
5	<i>Case-kohteet ja tulokset</i>	12
5.1	Urheilukentän maaperäolosuhteiden selvittäminen.....	12
5.2	Viemäriputken paikantaminen	13
5.3	Rakennuksen alaisen vuotoreitin todentaminen	14
5.4	Nupulakivipihan täyttömaakerroksen paksuuden selvittäminen	15
5.5	Kalliokanaalin mittasuhteiden määrittäminen	16
5.6	Kalliopinnan määrittäminen	17
6	<i>Johtopäätökset</i>	18
7	<i>Suosituks</i>	19
8	<i>Lähteet</i>	20

1 Tausta

1.1 Rakennuskannan kunto

Suomen rakennuskantaa koskevat merkittävät haasteet, joita aiheuttavat rakennusten ikääntyminen, kasvava korjausvelka sekä ilmastonmuutoksen myötä muuttuvat olosuhteet, erityisesti kosteusrasituksen lisääntyminen. Kuva 1 havainnollistaa, kuinka kosteusvaurioiden esiintyvyys kasvaa rakennusten vanhetessa. ROTI-raportin (Rakennetun omaisuuden tila -paneeli 2023) mukaan korjaamatta jätettyjen rakennusten yhteisarvoinen korjaustarve on jo yli 70 miljardia euroa.



Kuva 1. Kosteusvauriot ovat sitä yleisempiä mitä vanhempaa rakennuskantaa tarkastellaan (Salmela 2022).

Korjaustarpeiden kartoittamista ja toimenpiteiden suunnittelua vaikeuttaa se, että monet kriittiset ongelmat – kuten kosteusvauriot, riskirakenteet ja maaperän liikkeet – sijaitsevat usein rakennusten maanalaisissa ja siten huonosti havaittavissa osissa. Eduskunnan tarkastusvaliokunta (2012) on arvioinut, että näiden riskien vaikutuspiirissä elää, työskentelee ja opiskelee satojatuhansia suomalaisia.

Maanalaisten rakenteiden ongelmat ovat erityisen haasteellisia, sillä niiden havaitseminen ja tutkiminen on monesti vaikeaa. Se edellyttää usein rakenteiden avaamista tai kaivuutöitä, mikä tekee tutkimisesta kallista ja hidasta – erityisesti silloin, kun kyseessä on suojeltu rakennus, jonka muutostöihin kohdistuu rajoituksia.

Voidaan sanoa, että Suomessa painiskellaan mittavan rakennusten kosteus- ja homeongelman kanssa. Eduskunnan tarkastusvaliokunta (2012) on koostamalla alan tutkimuksia arvioinut, että merkittäviä homeongelmia on asuinrakennuksista 7–10 %:ssa, kouluista ja päiväkodeista 12–18 %:ssa ja hoitolaitoksissa 20–26 %:ssa. Näissä rakennuksissa asuu 324 000–597 000 ihmistä, opiskelee tai on päivähoidossa 172 000–259 000 lasta ja on hoidossa 36 000–46 800 potilasta. Voidaan siis puhua laajalle levinneestä ongelmasta, joka rahassa mitattuna kohdistuu 13–28 miljardin euron arvosta rakennuskantaan, puhumattakaan ongelman laajoista inhimillisistä vaikutuksista. Esimerkiksi lasten riski sairastua astmaan kasvaa 2,8–4-kertaiseksi kosteusvaurioisessa talossa. Samantapaiset ongelmat ovat yleisiä maailmalla; tarve puuttua ongelman juurisyihin on erittäin merkittävä ja maailmanlaajuinen.

Suomessa käytetään vuosittain arviolta 400 miljoonaa euroa asuinrakennusten kosteusvaurioiden korjaamiseen. Pientaloissa korjausrakentamisen painopiste on siirtymässä 1980-luvulla rakennettuihin kohteisiin, kun taas asuinkerrostaloissa suurin korjaustarve kohdistuu edelleen 1970-luvun rakennuskantaan. Tilastokeskuksen tilastojen ja Rakennusteollisuus RT:n arvioiden mukaan toteutunut korjausrakentaminen kattaa vain noin 80 % todellisesta tarpeesta. (Nippala & Vainio 2016)

Rakennusten kosteus- ja homeongelmat johtuvat monista eri tekijöistä. Kaikki kosteusvauriot eivät ole seurausta suunnittelu- tai rakentamisvirheistä, eivätkä ne rajoitu vain tiettyihin riskirakenteisiin tai -rakennuksiin. Kiinteistöt kuluvat ajan myötä, ja niiden toimivuus edellyttää jatkuvaa hoitoa ja kunnossapitoa. Valtaosa kosteusvaurioista johtuu tekijöistä, jotka voivat kohdata minkä tahansa rakennuksen. Mikäli yksittäisten rakenneosien tai koko rakenteen kunnossapito laiminlyödään, vaurioriski kasvaa merkittävästi. Hyvä kunnossapito ja rakennuksen tarkoituksenmukainen käyttö voivat ehkäistä suuren osan kosteusvaurioista tai ainakin lieventää niiden seurauksia. Rakenteita on tarkkailtava säännöllisesti, huollettava suunnitelmallisesti ja uusittava tarpeen mukaan, jotta niiden kosteustekninen toimivuus säilyy pitkällä aikavälillä.

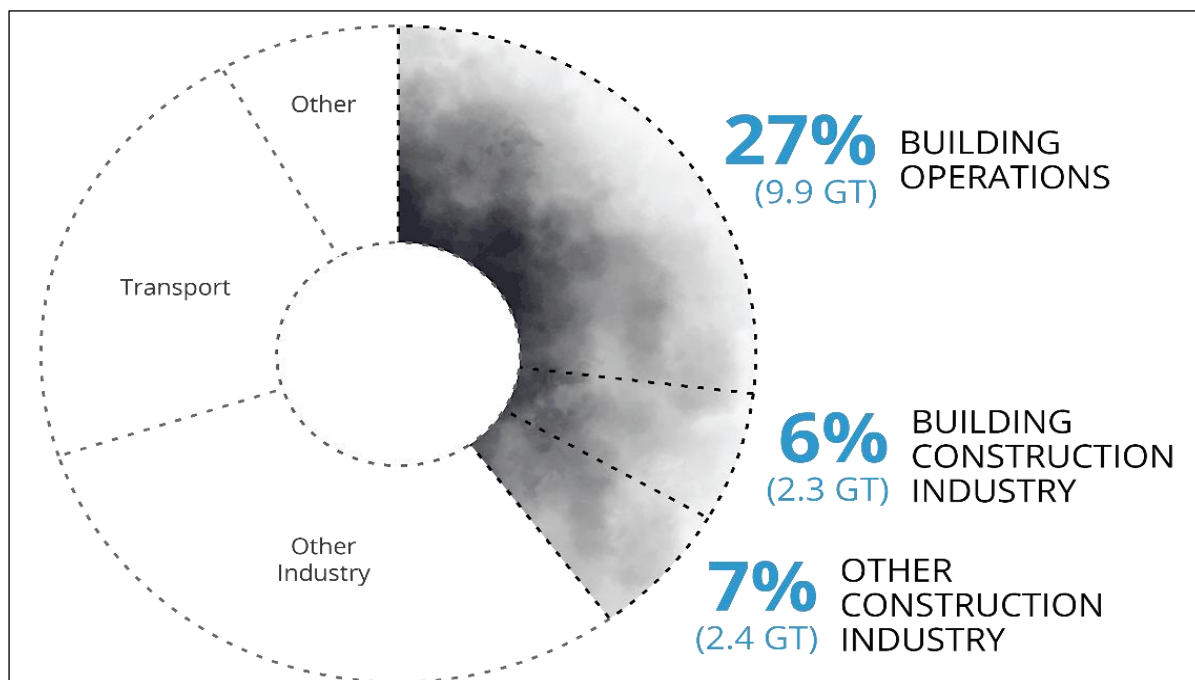
Rakenteiden rakennusfysikaalinen toimivuus ja säilyvyys riippuvat kiinteistön ja sillä sijaitsevien rakenteiden kosteudenhallinnasta. Kiinteistöt rakennuksineen joutuvat tulevaisuudessa toimimaan entistä haastavammassa olosuhteissa, kun ilmastonmuutos vaikuttaa niin maaperän kosteustasapainoon kuin rakenteisiin kohdistuviin kosteuskuormiin ja näiden kuivumiskykyyn.

Energiatehokkuuden rinnalla on entistä tärkeämpää huomioida myös kosteusturvallinen rakentaminen. Sekä EU:n selvitykset että Suomen ilmastopaneelin raportti (Gregow ym. 2021) osoittavat, että ilmastonmuutos etenee vääjäämättä lähivuosikymmeninä: lämpötilat nousevat, talvikausien sademäärät kasvavat ja auringonpaistetta esiintyy yhä harvemmin. Samaan aikaan sään ääri-ilmiöt yleistyvät, ja rankkasateiden myötä myös tulvariskit lisääntyvät. Nämä muutokset kuormittavat rakennuksia ja niiden rakenteita yhä enemmän. Pitkäkestoiset sateet ja tulvat heikentävät maarakenteita ja lisäävät painetta perustuksille. Lisäksi jäätymis- ja sulamisjaksot muuttuvat entistä arvaamattommiksi, mikä kasvattaa vaurioriskejä kaikilla rakentamisen osa-alueilla.

1.2 Tavoitteena kestävämpi rakennuskanta

Suomen tavoitteena on saavuttaa hiilineutraalius vuoteen 2035 mennessä ja siirtyä nopeasti sen jälkeen hiilinegatiivisuuteen. Lisäksi pyritään pysäyttämään luonnon monimuotoisuuden heikkeneminen vuoteen 2030 mennessä. Lisäksi Suomi pyrkii maailman ensimmäisenä fossiilivapaaksi hyvinvointiyhteiskunnaksi. Korjausrakentamisen strategiassa keskeisenä tavoitteena on parantaa rakennuskannan energiatehokkuutta vuoteen 2030 mennessä. Tavoitteena on, että rakennusten hiilidioksidipäästöt vähenevät vuoden 2020 tasosta 90 prosenttia vuoteen 2050 mennessä.

Nämä kunnianhimoiset tavoitteet ovat saavutettavissa muuttamalla rakennus- ja kiinteistöalan toimintatapoja sekä lisäämällä tuottavuutta ottamalla laajemmin käyttöön ilmastonmuutosta hillitseviä ja vähähiilisyttä edistäviä teknologioita ja toimintamalleja. Rakentaminen aiheuttaa maailmanlaajuisesti noin 13 prosenttia kaikista kasvihuonekaasupäästöistä ja on ilmastovaikutuksiltaan teollisuudenaloista saastuttavin (Kuva 2). Tämä luo merkittävän mahdollisuuden parantaa alan kestävyttä optimoimalla rakentamista ja korjausrakentamista sekä pidentämällä rakennusten elinkaarta.



Kuva 2. Rakentamisen päästöt kattavat 13 % maailman kasvihuonekaasupäästöistä IEA:n (2022) tietojen mukaan. Kuva: Architecture 2030 (2025).

Rakennuskannan perusparantaminen on yksi keskeisistä tekijöistä yhteiskunnan vihreässä siirtymässä kohti hiiletöntä ja puhtaan energian järjestelmää. Sen rinnalla kestävä kasvun avainalueita ovat energia- ja materiaalitehokkuus, hiilineutraalius, kiertotalous ja resurssien niukkuuden hallinta. Rakennusten elinkaaren pidentäminen on lähes poikkeuksetta ilmastoteko. Nämä tekijät yhdessä luovat runsaasti mahdollisuuksia uusille teollisuuden kasvutarinoille ja vientituotteiden kehittämiselle.

Rakennukset, rakennustuotteet ja rakentaminen muodostavat keskeisen sektorin ilmastonmuutoksen torjunnassa, vähähiilisyiden edistämässä ja kiertotalouden toteuttamisessa. Vaikka tämän tutkimusprojektin painopiste on rakennusprojektin tasolla, sen voidaan katsoa tukevan laajemmin koko rakennusalan siirtymää kohti vähähiilisyyttä sekä ilmastonmuutoksen hillintää ja siihen sopeutumista. Tämä korostuu erityisesti suunnitteluvaiheessa, jossa tehdään jopa 90 prosenttia päätöksistä, jotka vaikuttavat rakennuksen ympäristövaikutuksiin.

Hankkeessa hyödynnetty teknologinen ratkaisu edistää päästötavoitteiden saavuttamista mahdollistamalla olemassa olevien rakenteiden olemassaolon ja kunnon luotettavan todentamisen sekä uudisrakentamisen optimaalisen suunnittelun. Ratkaisu mahdollistaa myös maaperän kosteuden havaitsemisen, mikä auttaa paikantamaan ihmisiin ja ympäristöön kohdistuvia riskejä, kuten vuotoja ja kosteusongelmia, sekä tuottamaan tarvittavaa tietoa korjaavien toimenpiteiden suunnitteluun. Tällä on erityistä merkitystä ilmastonmuutokseen sopeutumisen kannalta.

Hankkeessa keskityttiin erityisesti rakennusten perustusten sekä niiden alla ja ympärillä olevan maaperän skannaamiseen. Kehitetty teknologia ja siihen liittyvä palvelukonsepti ovat helposti skaalattavissa ja monistettavissa laajamittaiseen käyttöön. Hankkeen ensisijaisena tavoitteena oli edistää hyväkuntoisen, terveellisen ja kestävä rakennetun ympäristön kehittämistä Suomessa. Kehitetyn teknologian soveltamisella on kuitenkin huomattava kansainvälinen potentiaali, sillä vastaava kokonaisratkaisu ei ole tällä hetkellä tarjolla muilta toimijoilta.

1.3 Vastaaminen kasvavaan tiedontarpeeseen

Korjausrakentamisen prosessin tärkein vaihe on kiinteistöä koskevien lähtötietojen huolellinen selvittäminen. Näiden tietojen sekä kiinteistön omistajan tavoitteiden pohjalta voidaan laatia tarkoituksenmukaiset korjaussuunnitelmat ja käynnistää korjaustyöt niiden mukaisesti. Esimerkiksi, jos alkuperäisessä rakenteessa havaitaan kosteusvaurioita, on vaurion syy ensin selvitettävä, jotta korjaustoimenpiteet voidaan mitoittaa oikein. Suunnitteluvaiheessa tulee lisäksi varmistaa, että uusi rakenneratkaisu toimii luotettavasti eikä altistu vastaavanlaiselle vauriolle uudelleen. On tärkeää muistaa, että vaurion aiheuttaja ei aina sijaitse siinä kohdassa, missä vaurio näkyy – siksi perusteellinen selvitys on välttämätön. Tämä edellyttää usein kuntotutkimuksen teettämistä, jonka tulosten ja suositusten perusteella suunnittelija määrittelee korjauksen laajuuden. Olennaista on, että korjataan vain ne rakenteet, jotka ovat vaurioituneita tai toimimattomia. Turhaa purkamista tulee välttää, mikä vähentää sekä kustannuksia että rakennus- ja purkujätteen määrää.

Myös rakenneratkaisuilla on erilainen herkkyys esimerkiksi alkukosteustasojen osalta. Vanhan rakenteen korkea alkukosteus tai rakentamisen aikana kastuneet uudet materiaalikerrokset voivat muodostaa merkittäviä riskitekijöitä. Liiallinen alkukosteus on syytä poistaa kuivaamalla ennen korjaustöiden aloittamista. Lisäksi on tärkeää selvittää kostumisen syy ja poistaa sen aiheuttaja, jotta ongelmat eivät pääse toistumaan.

Nykyisin valtaosa rakenneteknisistä selvityksistä perustuu asiantuntija-arvioihin ja silmäämääriin havaintoihin. Kosteusmittauksissa käytetään yleisimmin pintakosteusmittareita, koska menetelmä on nopea ja edullinen – mutta samalla myös epäluotettava. Esimerkiksi rapatuista julkisivuista voidaan arvioida kosteuseroja noin 50 mm syvyyteen asti, kun taas betonisandwich-rakenteissa mittaus paljastaa ainoastaan elementin ulkokuoren kosteuden vaihtelut. Rakenteen todellinen kosteus voidaan tällä hetkellä selvittää vain materiaalinäytteiden avulla.

Mittauksia voidaan täydentää porareikämittauksilla, mutta nekin eivät ole ihanteellinen ratkaisu, sillä poraaminen vaurioittaa rakenteita. Lisäksi menetelmän luotettavuus riippuu käytetyn mittarin laadusta sekä mittajan asiantuntemuksesta – erityisesti siitä, kuinka tarkasti mittauspiste osataan määrittää niin, että tuloksista voidaan tehdä oikeita johtopäätöksiä. Porareikämittaus on myös hidas menetelmä, siihen liittyy runsaasti epävarmuustekijöitä, ja se tarjoaa tietoa vain mittaushetken kosteustasosta tietyllä syvyydellä. Lisäksi menetelmä kuluttaa paljon aikaa ja resursseja. Kaikkia edellä mainittuja mittausmenetelmiä yhdistää keskeinen haaste: kosteuskartoitukset on usein vaikea kohdistaa tarkasti oikeille alueille, mikä heikentää piilevien ongelmien tunnistamista ennen varsinaisen korjaustyön aloittamista. Erityisen ongelmallisia ovat maanalaiset tai muulla tavoin piilossa olevat rakenteet, joita ei voida tutkia ilman rakenteiden rikkomista.

Rakennusten kuntotutkimuksista saadun kokemuksen mukaan piilevät vauriot esiintyvät usein kosteudelle alttiissa riskirakenteissa. Tällä hetkellä ainoa luotettava tapa määrittää vaurion laatu ja laajuus on tehdä rakenneavauksia. Kerroksellisissa rakenteissa kosteusvauriot voivat kehittyä huomaamatta piilovaurioina, ja erityisesti kiviaineisissa rakennusvaipoissa piilovaurioiden paikantaminen ja korjaaminen on haastavaa. Rakenneavaukset ovatkin pääasiallinen keino selvittää kerroksellisten rakenteiden kunto.

Asiantuntija-arvion ohella ainoa rakenteita rikkomaton mittausmenetelmä rakennekosteuden arvioimiseen on pintakosteusmittari, jonka tulokset ovat kuitenkin vain suuntaa antavia – eri laitteiden välillä voi olla huomattaviakin eroja. Lisäksi mittauksien tulokset

vaikuttavat merkittävästi rakennusmateriaalin laatu ja ominaisuudet. Pintakosteusmittarin epäluotettavuuden vuoksi rakenteen kosteuden tarkka määrittäminen edellyttää muita kosteusmittausmenetelmiä, kuten näytepaloihin, porareille ja viilloille tehtäviä mittauksia tai materiaalin kosteuspitoisuuden määrittystä kuivatus-punnitus-menetelmällä. Kaikki nämä menetelmät rikkovat rakennetta, ovat työläitä ja aikaa vieviä, ja niiden tulokset kuvaavat vain mittauspisteen tai näytteenottopaikan hetkellistä kosteustilannetta.

Tässä hankkeessa tarkasteltiin mahdollisuuksia tarjota entistä kattavampaa tietoa kosteuden lähteistä ja yleisesti rakennusten maanalaisesta kunnosta korjausrakentamisen suunnittelun tueksi. Uudenlainen sähköisen tomografian sovellus rakennetun ympäristön kohteisiin mahdollistaa 2D- ja 3D-näkymien muodostamisen maanpinnan alapuolisista rakenteista ilman rakenteiden rikkomista. Skannausten avulla voidaan havaita maanalaiset olosuhteet sekä tutkia jopa rakennusten ja infrastruktuurin alle ulottuvia alueita. Näkyviin saadaan muun muassa kosteus, vuotovedet, maalajikerrostumat, peruskallion ja kantavien kerrosten syvyydet, pohjaveden taso sekä perustusten osat, putket, tunnelit ja kaapelit. Mittaukset tehdään pääasiassa maanpinnan tasolta, jolloin kaivamista, poraamista, kairaamista tai rakenteiden avaamista ei tarvita. Mittauslaitteisto on kevyt ja helppokäyttöinen, mikä mahdollistaa suurtenkin alueiden nopean ja tehokkaan tutkimisen. Hankkeen keskeisenä tavoitteena on arvioida tätä skannausteknologiaa rakenteita rikkomattoman diagnosoinnin välineenä ja edistää siten korjaushankkeiden suunnittelun tehokkuutta.

1.4 Hankkeen toteuttajat

Hankkeen on toteuttanut Deep Scan Tech Oy, ja sen rahoittajina toimivat Ympäristöministeriön Terveet tilat 2028 -ohjelma, Rakennustuotteiden Laatu Säätiö sekä Suomenlinnan hoitokunta.

Deep Scan Tech on suomalainen cleantech-yritys, joka toimii kansainvälisesti ja hyödyntää ainutlaatuista teknologiaa maanalaisten rakenteiden ja maaperän kuvantamisessa. Yrityksen uudenlainen maanalainen skannausratkaisu tuottaa kriittistä tietoa, kuten maakerrosten koostumuksen, kosteuspitoisuuden, pohjaveden tason, kalliopinnan muodot sekä maanalaisen infrastruktuurin. Tätä tietoa hyödynnetään ylläpidossa, suunnittelussa, projektinhallinnassa ja kestävämmän rakennuskannan edistämisessä.

2 Hankkeen tavoite

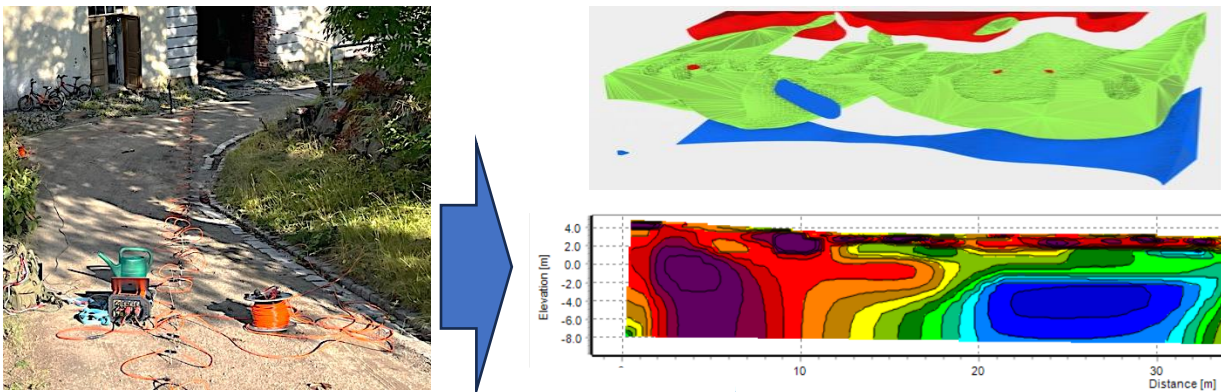
Tässä hankkeessa selvitettiin erilaisten case-kohteiden avulla uudenlaisen maanalaisen skannausratkaisun soveltuvuutta käytännön kohteissa sekä arvioitiin sen tuottamien tulosten vaikutuksia rakennusprojektin onnistumiseen. Skannausten tavoitteena on tarjota korjaushankkeille tarkat maanalaiset poikkileikkauskuvat, joiden pohjalta voidaan kohdistaa korjaustoimenpiteet suoraan ongelmakohtiin ja niiden juurisyihin. Tämä vähentää korjausrakentamisen aikaisia yllätyksiä, auttaa pysymään paremmin aikataulussa ja alentaa kustannuksia. Lisäksi menetelmä estää huomaamatta jääneiden ongelmien ohittamisen, mikä vähentää vaurioiden uusiutumista sekä niistä mahdollisesti aiheutuvia kiistoja ja jälkiselvittelyitä.

Hankkeeseen on valittu useita korjausrakennuskohteita Suomenlinnasta, joissa korjaushankkeiden suunnittelu on alkamassa. Ennen töiden käynnistymistä tehdyillä skannauksilla pyritään konkreettisesti osoittamaan, mitä tietoja suunnitelmista puuttuu puutteellisten lähtötietojen vuoksi – sekä millaisia haittoja nämä puutteet voisivat aiheuttaa rakennustöiden aikana. Valituissa kohteissa pyritään edellä mainittujen tavoitteiden lisäksi tunnistamaan mahdollisia piileviä ongelmia, joita nykyisillä teknologioilla ei voida havaita – ja jotka muuten paljastuisivat vasta korjaustöiden aikana. Suomenlinnan merellinen ympäristö ja ajoittain äärimmäiset sääolosuhteet muodostavat vaativan tutkimusympäristön, jossa rakenteiden kosteusolosuhteet ovat usein poikkeuksellisen haastavat. Ympäristönä se tarjoaa eräänlaisen käytännön laboratorion, jossa ilmastonmuutoksen mukanaan tuomat vaikeat sääolosuhteet toteutuvat jo nyt.

3 Menetelmäkuvaus

Tutkimuksessa hyödynnettiin sähköisen tomografian menetelmiä, joita on jo pitkään sovellettu lääketieteeseen ja maaperätieteiden aloilla. Näitä menetelmiä käytettiin tässä hankkeessa erityisesti rakennetun ympäristön tarpeisiin kehitetyssä kuvantamisratkaisussa – rakenteita rikkomatta. Tuloksena saatiin kohteista läpivalaisukuvia muistuttavia poikkileikkauskuvia, jotka paljastavat rakenteiden ja maaperän sisäisiä ominaisuuksia. Sähköinen tomografia (Electrical Tomography, ET) perustuu tutkittavan materiaalin sähköisen ominaisvastuksen, kompleksisen ominaisvastuksen ja impedanssin mittaamiseen. Mittausten avulla voidaan muodostaa kuva tutkittavasta kohteesta fysikaalisten vuorovaikutusten avulla mittaamalla kohdemateriaalin vastetta.

Geotieteissä sähköresistiivinen tomografia (ERT) on yleinen tekniikka, jossa käytetään maaperän pinnalla tehtyjä sähköresistiivisyyssmittauksia esimerkiksi malmin etsintään. Tässä kokeellisessa tutkimuksessa sovelletaan sähköiselle tomografialle perustuvaa tekniikkaa rakennetun ympäristön kohteissa ja selvitetään sen käytettävyyttä rakennusten ja rakennuskohteiden piilevien ongelmien ja vaurioiden selvittämiseen, joita on joko mahdotonta tai hyvin vaikeaa havaita luotettavasti ja kustannustehokkaasti nykyisillä menetelmillä rikkomatta rakenteita tai kaivamatta maaperää. Kuva 3 näyttää kaksi esimerkkiä menetelmällä saatavista tomografiakuvista.



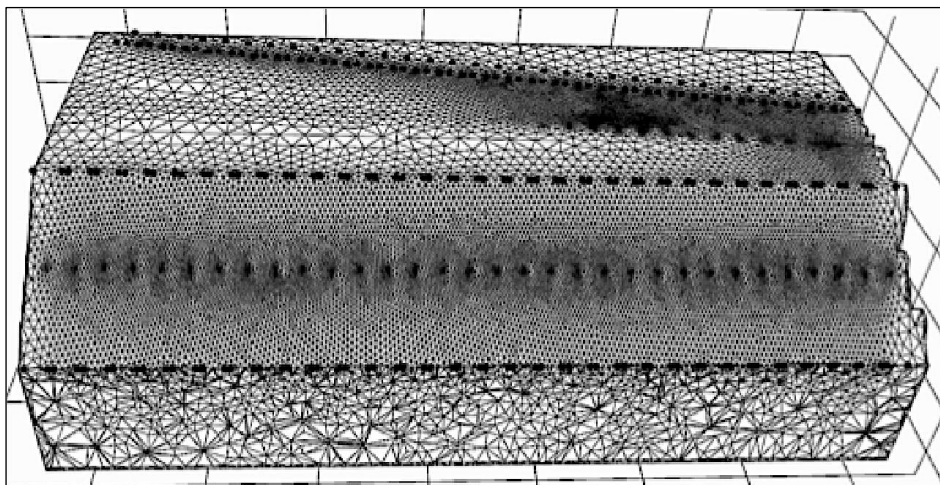
Kuva 3 Sähkötomografiamenetelmällä saadaan kaksi- ja kolmiulotteisia kuvia maanalaisista tilavuuksista. Vasemmalla on kuva kenttämittauksista ja oikealla kaksi esimerkkikuvaa skannaustuloksista: ylempänä kolmiulotteinen näkymä ja alempana kaksiulotteinen poikkileikkaus.

Rakennetun ympäristön kohteissa Deep Scan Tech hyödyntää yhdistelmää, jossa perinteisiä mittaustekniikoita täydennetään aika-alueen indusoidun polarisaation (DCIP) menetelmällä. Tässä lähestymistavassa mitataan tomografisesti maaperän resistanssivaihtelua eri taajuuksilla, ja mittaustulosten perusteella lasketaan inversiolaskennalla keskeiset sähköiset maaperäparametrit, kuten reaalin ja imaginaarinen sähkönjohtavuus, normalisoitu varautuvuus ja vaihe-ero, kolmiulotteisina jakaumina (Loke ym. 2013). Kahden tai useamman sähköisen parametrin samanaikainen käyttö vähentää tulkinvaraisuutta erityisesti monimutkaisissa kohteissa, kuten rakennettuun ympäristöön liittyvissä rakenteissa tai geologisesti vaihtelevissa muodostelmissa. Tämä lähestymistapa on osoittautunut toimivaksi useissa sovelluksissa, kuten infrastruktuurin ja litologian kartoituksessa (Slater & Lemes 2002).

Lisätarkkuutta saavutetaan huolellisella kenttätöyllä, esimerkiksi varmistamalla mittauselektrodien hyvä kontakti maaperään, suunnittelemalla mittausgeometria tarkasti kohteen mukaan ja tekemällä täydentäviä mittauksia. Tällöin mahdolliset yksittäiset mittausvirheet voidaan havaita ja rajata pois tilastollisen analyysin avulla (Flores ym. 2012).

Käytännössä kenttämittaukset tässä hankkeessa toteutettiin painamalla maahan elektrodeja, joiden muodostamassa mittauskentässä tietokoneohjatusti käydään läpi elektrodien väliset sähköiset yhteydet tomografiakuvan muodostamiseen tarvittavan datan keräämiseksi. Tyypillisesti mittaukset tehdään joko suorana linjamittauksena, jossa kaikki elektrodit asetetaan yhdelle linjalle, tai kahden rinnakkaisen linjan välisenä mittauksena. Elektrodien ei tarvitse kuitenkaan olla suorissa linjoissa – niiden sijoittelussa voidaan hyödyntää joustavuutta ja asetella ne mittauskohteen ympärille siten, että saadaan mahdollisimman laadukas ja kattava kuva kohteesta. Elektrodien maahankosketusta voidaan tarvittaessa parantaa esimerkiksi: i) kastelemalla elektrodien kohdat, ii) käyttämällä sähköä johtavaa geeliä tai kostutettua bentoniittia elektrodien alla, tai iii) yhdistämällä kaksi tai useampia elektrodeja samaan mittauspisteeseen kontaktiresistanssin pienentämiseksi.

Yksinkertaistetusti neljän elektrodin väliltä mitattuja vastuksia voidaan pitää kaikkien potentiaalelektrodien välisten virran kulkureittien vastusten ja varautuvuuden painotettuna keskiarvona. Tällainen mittaus antaa arvion mitatun tilavuuden keskimääräisestä sähkönjohtavuudesta. On kuitenkin tärkeää ymmärtää, että maanalaisen tilavuuden todellista resistanssijakaumaa ei voida suoraan päätellä yksittäisestä mittauksesta. Virta esimerkiksi helpoiten kanavoituu alueille, joilla on alhaisempi vastus ja vastaavasti ohjautuu pois alueilta, joilla on korkeampi vastus. Näin ollen ilman täydentävää tietoa maaperän rakenteesta ei voida yksiselitteisesti määrittää todellisia paikallisia vastusarvoja. Tämän vuoksi käytetään inversiomenetelmää (käänteismallinnusta), jossa pyritään löytämään sellainen kolmiulotteinen malli maaperän sähköisistä ominaisuuksista, jonka perusteella lasketut potentiaali-jakaumat vastaavat mahdollisimman hyvin mitattuja arvoja (Korkealaakso & Saksa 1986; Korkealaakso & Paananen 2021). Deep Scan Techin inversiomenetelmässä mitatut vastukset on invertoitu käyttämällä tavanomaista Gauss-Newton-menettelyä, jossa optimointi on toteutettu matemaattisilla regularisointirajoitteilla ja ilman geologisia tietoja. Sovelletussa inversiomenetelmässä regularisoinnilla haetaan mallia, joka on kompakti, eli sisältää mahdollisimman vähän poikkeamia vertailumalliin nähden, sekä tasainen, eli mahdolliset poikkeamat jakautuvat useisiin soluihin eivätkä keskity yksittäisiin mallin soluihin. Inversiomenetelmää varten mallin äärellisten elementtien verkko mukautetaan maan pinnalla ja alla oleviin elektrodirakenteisiin. Laskennallista inversiota varten verkko määritellään elementtisarjana, jossa jokaisessa on neljä solmua (muodostaen tetraedreja, Kuva 4). Elektrodit voivat sijaita missä tahansa verkon sisällä, kunhan ne osuvat solmupisteisiin. Elektrodin ympärillä olevien elementtien keskikoko on puolet elektrodien vähimmäisetäisyydestä.



Kuva 4. Esimerkki mallinnuksessa käytetystä tetraedriverkosta. (Kuva: Deep Scan Tech Oy.)

Tulokset – eli käänteisen vastuksen ja indusoidun polarisaation parametrien jakaumat – esitetään analyysien ja tulkintojen yhteydessä kaksiulotteisina pystysuorina poikkileikkauksina valittujen mittauslinjojen kohdalta sekä vaakasuuntaisina syvyysleikkauksina, jotka kattavat koko mitatun alueen. Esitystapa on visuaalinen, ja tulokset esitetään valmiiksi tulkittuina muodossa, joka on helposti siirrettävissä loppukäyttäjän omaan CAD- tai BIM-prosessiin. Tässä lopullisessa muodossa 2D- tai 3D-kuvat kuvaavat sähköisten suureiden sijaan suoraan tulkittuja rakenteita, materiaaleja, maalajien kerroksia, kosteuspitoisuuksia tai muita rakennuskohteen kannalta oleellisia ominaisuuksia.

4 Projektin työvaiheet ja toteutus

Projektin työvaiheet:

1. Työvaihe: Projektin yksityiskohtainen läpikäynti (sisältäen muun muassa tavoitteet, lähtötiedot, koordinaatisto, toteutus, aikataulut, käytännön asiat) yhdessä mukana olevien sidosryhmien kanssa.
2. Työvaihe: Vaiheen 1 pohjalta Deep Scan Tech suunnitteli ja toteutti tarvittavat kenttämittaukset tavoitteiden mukaisten tulosten saamiseksi.
3. Työvaihe: Deep Scan Tech analysoi datat, teki tarvittavat tulkinnat omissa ohjelmissaan ja laati työstä raportin sekä esitteli tulokset johtopäätöksineen mukana oleville sidosryhmille.

Kenttämittaukset toteutettiin rakentamalla maan päälle kohdealueella elektrodikenttä, jossa elektrodien väleille johdettiin sähköä (12 V, 50–150 W) ja fysikaalisen vuorovaikutuksen kautta mitattiin kohdeaineesta saatu vaste. Vastesignaaleista voitiin matemaattisten mallien avulla päätellä eri aineiden jakautuminen kohteen sisällä perustuen näiden sähköisille ominaisuuksille. Mitattavia sähköisiä suureita olivat muun muassa resistiivisyys, impedanssi, permittiivisyys ja indusoitu polarisaatio.

Kenttämittausten jälkeen mittausdata vietiin Deep Scan Techin mallinnus- ja laskentaympäristöön, jossa maaperää mallintavassa laskentaverkossa toteutettiin matemaattinen inversio- eli käänteismallinnus. Sovelletussa inversiomenetelmässä regularisoinnilla haettiin mallia, joka oli kompakti (eli sisälsi mahdollisimman vähän poikkeamia vertailumalliin nähden) ja tasainen (eli mahdolliset poikkeamat jakautuivat useisiin soluihin eivätkä keskittyneet yksittäisiin mallin soluihin). Inversiomenetelmää varten mallin äärellisten elementtien verkko mukautettiin maan pinnalla ja alla oleviin elektrodirakenteisiin. Tämän jälkeen sähköisten parametrien jakaumat mittauskohteessa oli mahdollista visualisoida kuvina.

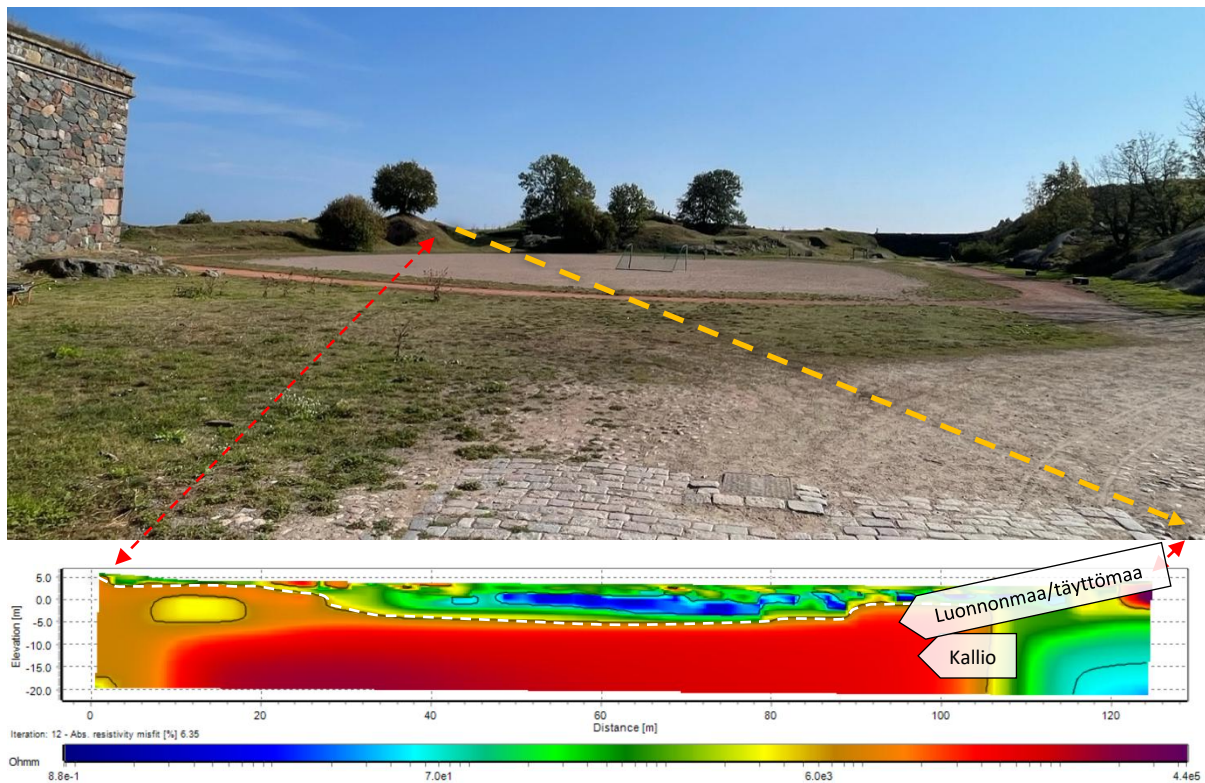
5 Case-kohteet ja tulokset

Työssä keskityttiin erityisesti maaperäolosuhteiden ja maanalaisen rakenteen kartoittamiseen useissa erilaisissa käyttötapauksissa. Tähän raporttiin on valittu toisistaan poikkeavia kohteita ja käyttökkenaarioita, jotka havainnollistavat sähköiseen tomografiaan perustuvan maanalaisen kuvantamisteknologian monipuolisia sovellusmahdollisuuksia. Erityistä huomiota kiinnitettiin maaperäominaisuuksien tarkkaan analysointiin vaihtelevissa olosuhteissa ja eri käyttötarpeissa.

Seuraavassa esitetään tiivis yhteenveto mittauksen toteutuksesta ja keskeisimmistä tuloksista.

5.1 Urheilukentän maaperäolosuhteiden selvittäminen

Tavoitteena oli selvittää maaperäolosuhteet Suomenlinnan jalkapallokentän alueella, joka sijaitsee B28-rakennuksen lounaispuolella. Alueen maaperän rakenteeseen, koostumukseen ja kantavuuteen vaikuttaa se, että paikalla on historiallisesti sijainnut merenlahti. Kuva 5 esittää skannauksen päätulokset valitulta alueelta kentällä.

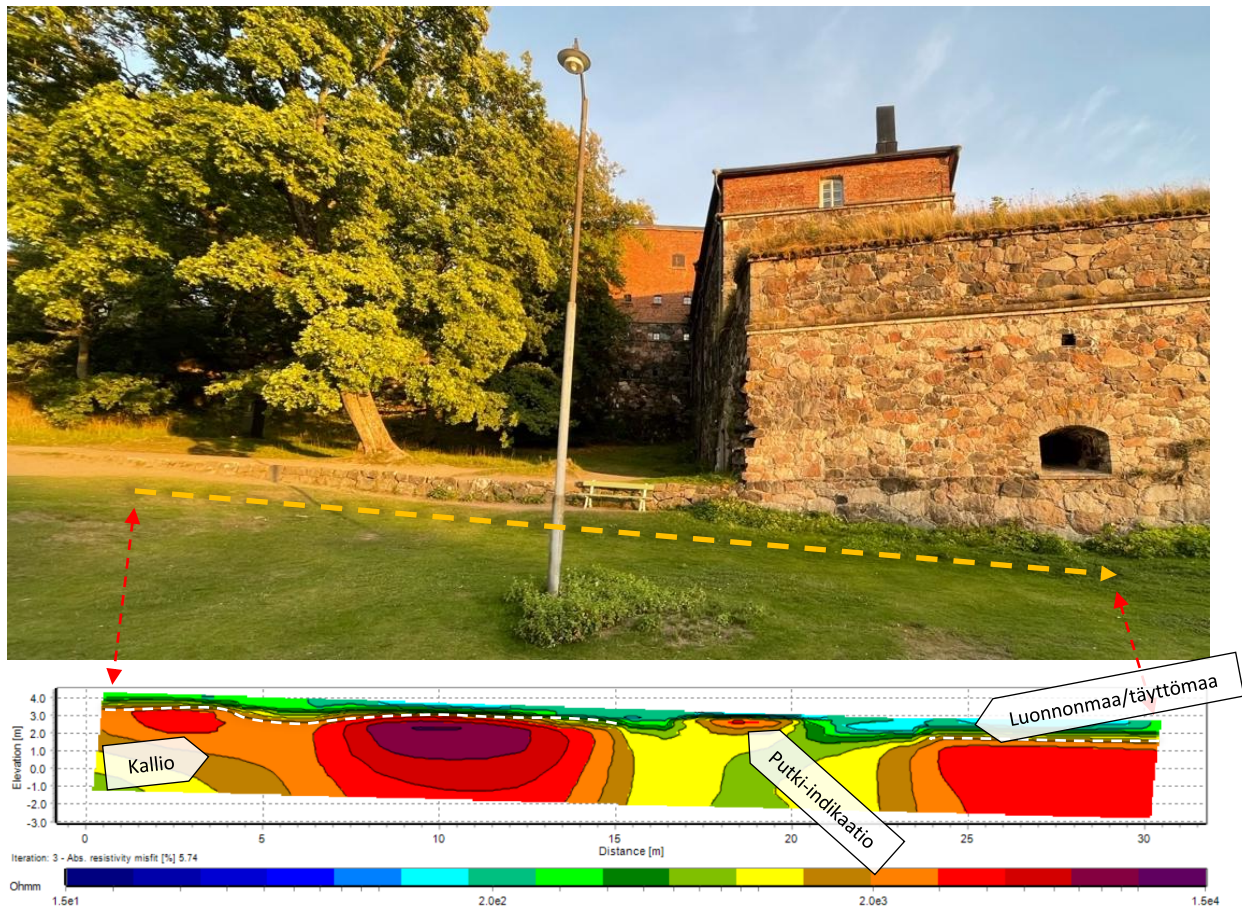


Kuva 5 Kohdealueella suoritettujen skannausten sijainti maastossa on kuvattu valokuvassa suuntaa antavasti oranssilla katkoviivanuolella. (Valokuva on esitetty peilikuvana, jotta sen tulkinta yhdessä tulokuvan kanssa olisi helpompaa. Peilauksella on varmistettu, että molemmat kuvat ovat samoin päin, mikä helpottaa yksityiskohtien vertailua ja kohteiden paikantamista.) Valokuvan alla olevan tulospystyleikkauksen X-akseli kuvaa maan pinnalla (valokuvassa oranssi katkoviiva) kulkevaa mittauslinjaa metreinä (matkapisteet 0–126 m), ja Y-akseli esittää mittauksen syvyyttä metreinä suhteessa merenpinnan tasoon. Arvioitu kalliopinnan ja luonnonmaan/täyttömaan rajapinta on visualisoitu tulokuvassa suuntaa antavasti valkoisella katkoviivalla.

Skannauksen tuloksena saatiin tarkka kuva maanpinnan ja kalliopinnan rajapinnasta sekä maaperän kerrostuneisuudesta. Kalliopinta havaittiin kentän keskiosassa noin 10 metrin syvyydessä. Tulosten perusteella voidaan arvioida kentän kantavuutta sekä tunnistaa mahdolliset pehmeät maakerrokset, joilla voi olla vaikutusta kentän pitkäaikaiseen käyttöön ja kunnossapitoon.

5.2 Viemäriputken paikantaminen

Tavoitteena oli paikantaa Suomenlinnan B49-rakennuksesta muurin alitse kulkeva maanalainen viemäri linja, jonka tarkka sijainti oli tiedossa vain epätarkasti (Kuva 6). Koska kaikki Suomenlinnan rakennukset ja kulttuuriympäristö on suojeltu ja viemäri linja kulkee lähellä historiallisia rakenteita, kaivavat tutkimukset olisivat olleet paitsi teknisesti haastavia myös riskialttiita rakenteiden vaurioitumisen kannalta. Suojelustatuksen vuoksi kaivutoimenpiteet edellyttävät erityisiä lupia ja varovaisuutta, mikä korostaa ei-invasiivisten tutkimusmenetelmien merkitystä.

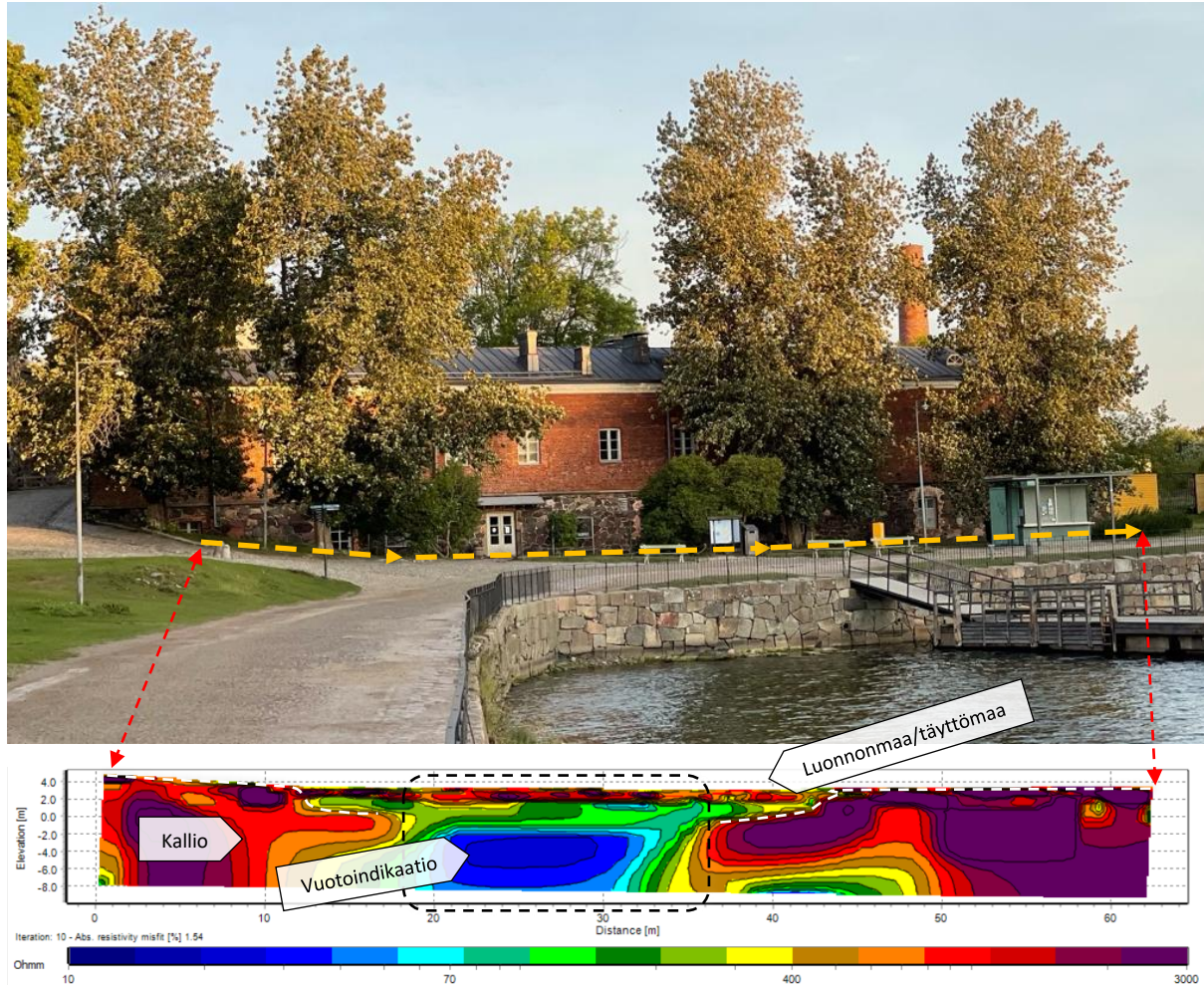


Kuva 6 Kohdealueella suoritetun skannauksen sijainti maastossa on kuvattu valokuvassa suuntaa antavasti oranssilla katkoviivanuolella. (Valokuva on esitetty peilikuvana, jotta sen tulkinta yhdessä tulostuvan kanssa olisi helpompaa. Peilauksella on varmistettu, että molemmat kuvat ovat samoin päin, mikä helpottaa yksityiskohtien vertailua ja kohteiden paikantamista.) Valokuvan alla olevan tulospystyleikkauksen X-akseli kuvaa maan pinnalla (valokuvassa oranssi katkoviiva) kulkevaa mittauslinjaa metreinä (matkapisteet 0–31 m), ja Y-akseli esittää mittauksen syvyyttä metreinä suhteessa merenpinnan tasoon. Arvioitu kalliopinnan ja luonnonmaan/täyttömaan rajapinta on visualisoitu tulostuvassa suuntaa antavasti valkoisella katkoviivalla.

Tässä kohteessa sähköiseen tomografiaan perustuva skannaus mahdollisti viemärilinjain paikantamisen maan alta ilman kaivuutöitä. Tulokuvassa on havaittavissa muun muassa maanalaisen kalliopinnan sijainti sekä viemärilinjaa osoittava putki-indikaatio skannatun alueen keskivaiheilla. Hankittu tieto tukee tulevia kunnossapito- ja korjaustoimenpiteitä sekä vähentää riskiä vahingoittaa muita rakenteita alueella.

5.3 Rakennuksen alaisen vuotoreitin todentaminen

Suomenlinnan B1-rakennuksen alapuolella epäiltiin sijaitsevan merestä kuivatelakkaan kulkeva vuotoreitti (Kuva 7). Skannauksen avulla tämä vuotoreitti voitiin todentaa ja paikantaa tarkasti, mikä mahdollistaa kohdennetut jatkotoimenpiteet vuodon hallitsemiseksi.



Kuva 7 Kohdealueella suoritetun skannauksen sijainti maastossa on kuvattu valokuvassa suuntaa antavasti oranssilla katkoviivanuolella. Valokuvan alla olevan tulospystyleikkauksen X-akseli kuvaa maan pinnalla (valokuvassa oranssi katkoviiva) kulkevaa mittauslinjaa metreinä (matkapisteet 0–63 m), ja Y-akseli esittää mittauksen syvyyttä metreinä suhteessa merenpinnan tasoon. Arvioitu kalliopinnan ja luonnonmaan/täyttömaan rajapinta on visualisoitu tulokuvassa suuntaa antavasti valkoisella katkoviivalla. Vuotoindikaatio ympyröity kuvassa mustalla katkoviivalla.

Tuloksissa havaittiin vuotoindikaatio alueella, jossa kahden kallioalueen väli on täyttynyt maa-aineksella. On mahdollista, että rakennuksen perustana oleva maa-aines on alun perin tuotu täytteeksi kahden kallioiden saaren tai luodon välille. Vuotoindikaation tarkka paikantaminen mahdollisti korjaustoimenpiteiden suunnittelun siten, että kosteusvaurioiden laajeneminen voidaan tehokkaasti ehkäistä.

5.4 Nupulakivipihan täyttömaakerroksen paksuuden selvittäminen

Suomenlinnan B20-rakennuksen edustan nupukivipihan pohjaolosuhteiden kartoittaminen oli tärkeää sade- ja hulevesien virtausten ymmärtämiseksi (Kuva 8). Rakennuksen pohjaolosuhteiden tarkkailu viittasi siihen, että kosteutta pääsi rakenteisiin maanalaisia reittejä pitkin, mikä lisäsi tarvetta selvittää sade- ja hulevesien kulkureitit tarkemmin.

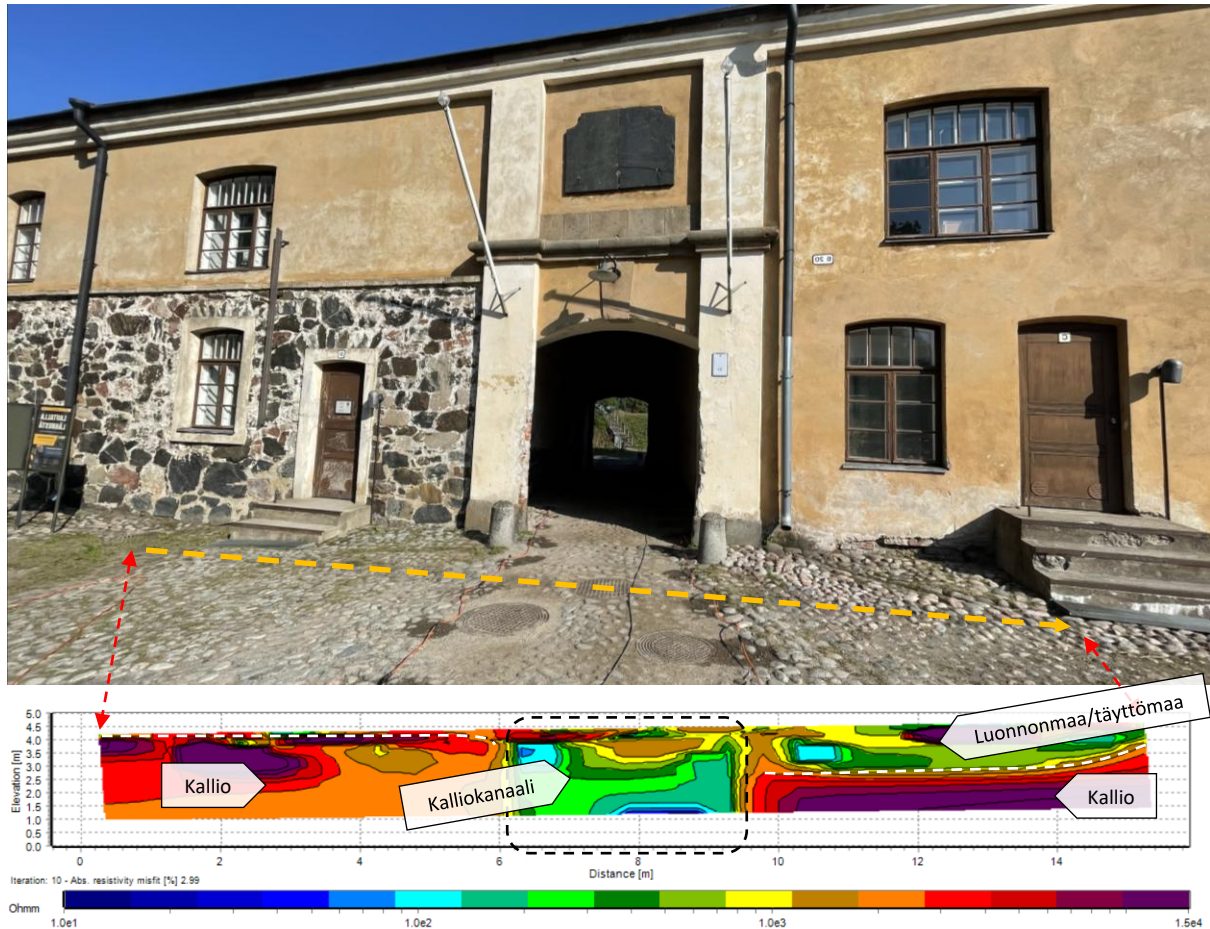


Kuva 8 Kohdealueella suoritetun skannauksen sijainti maastossa on kuvattu valokuvassa suuntaa antavasti oranssilla katkoviivanuolella. (Valokuva on esitetty peilikuvana, jotta sen tulkinta yhdessä tulokuvan kanssa olisi helpompaa. Peilauksella on varmistettu, että molemmat kuvat ovat samoin päin, mikä helpottaa yksityiskohtien vertailua ja kohteiden paikantamista.) Valokuvan alla olevan tulospystyleikkauksen X-akseli kuvaa maan pinnalla (valokuvassa oranssi katkoviiva) kulkevaa mittauslinjaa metreinä (matkapisteet 0–63 m), ja Y-akseli esittää mittauksen syvyyttä metreinä suhteessa merenpinnan tasoon. Arvioitu kalliopinnan ja luonnonmaan/täyttömaan rajapinta on visualisoitu tulokuvassa suuntaa antavasti valkoisella katkoviivalla.

Skannauksen perusteella havaittiin, että vettä valuu kivityksen alla sijaitsevaa kallion pintaa pitkin kohti rakennuksen alapohjaa. Samassa yhteydessä määritettiin täyttömaan kerrospaksuudet ja arvioitiin pohjamaan kantavuus. Nämä tiedot ovat keskeisiä pihan vedenhallinnan suunnittelussa sekä alapohjan kosteusvaurioiden ehkäisyssä, mikä puolestaan tukee rakennuksen pitkäaikaista turvallisuutta ja rakenteellista kestävyyttä.

5.5 Kalliokanaalin mittasuhteiden määrittäminen

Suomenlinnan B20-rakennuksen alikulkutunnelin edustan maaperä- ja pohjaolosuhteet kartoitettiin erityisesti kalliokanaalin koon ja laajuuden määrittämiseksi (Kuva 9).



Kuva 9 Kohdealueella suoritettujen skannausten sijainti maastossa on kuvattu valokuvassa suuntaa antavasti oranssilla katkoviivanuolella. (Valokuva on esitetty peilikuvana, jotta sen tulkinta yhdessä tuloskuvan kanssa olisi helpompaa. Peilauksella on varmistettu, että molemmat kuvat ovat samoin päin, mikä helpottaa yksityiskohtien vertailua ja kohteiden paikantamista.) Valokuvan alla olevan tulospystyleikkauksen X-akseli kuvaa maan pinnalla (valokuvassa oranssi katkoviiva) kulkevaa mittauslinjaa metreinä (matkapisteet 0–15,5 m), ja Y-akseli esittää mittauksen syvyyttä metreinä suhteessa merenpinnan tasoon. Arvioitu kalliopinnan ja luonnonmaan/täyttömaan rajapinta on visualisoitu tuloskuvassa suuntaa antavasti valkoisella katkoviivalla. Kalliokanaali ympyröity kuvassa mustalla katkoviivalla.

Kuten tuloskuvasta käy ilmi, skannatun alueen keskivaiheilta löytyi maa-aineksella täytetty kalliokanaali. Lisäksi havaittiin, että kalliokanaalin toisella puolella kallio on lähes maanpinnassa, kun taas toisella puolella kallio sijaitsee noin 1,5 metrin syvyydessä. Tämä ero voi vaikuttaa rakennuksen perustusten kestävyys- ja kosteudenhallintaan, ja tieto on arvokas tulevaa kunnossapitoa varten.

5.6 Kalliopinnan määrittäminen

Tavoitteena oli kartoittaa Suomenlinnan C84-rakennuksen päädyn pohjaolosuhteet, keskittyen erityisesti kalliopinnan sijaintiin ja muotoon (Kuva 10).



Kuva 10 Kohdealueella suoritettujen skannauksien sijainti maastossa on kuvattu valokuvassa suuntaa antavasti oranssilla katkoviivanuolella. Valokuvan alla olevan tulospystyleikkauksen X-akseli kuvaa maan pinnalla (valokuvassa oranssi katkoviiva) kulkevaa mittauslinjaa metreinä (matkapisteet 0–21 m), ja Y-akseli esittää mittauksen syvyyttä metreinä suhteessa merenpinnan tasoon. Arvioitu kalliopinnan ja luonnonmaan/täyttömaan rajapinta on visualisoitu tulokuvassa suuntaa antavasti valkoisella katkoviivalla. Rakennuksen pääty merkitty tulokuvassa mustalla katkoviivalla.

Tutkimuksissa havaittiin, että skannatun alueen toisella puolella kallio sijaitsee lähellä pintaa, noin metrin syvyydessä, ja sen pinta on epätasainen. Toisella puolella kallio on merkittävästi syvemmällä. Näillä havainnoilla on tärkeä merkitys rakennuksen perustusten kestävyys- ja kosteudenhallinnan kannalta, ja tieto tukee tulevaa kunnossapitoa.

6 Johtopäätökset

Tässä raportissa käsitellään rakennuskannan merkittäviä haasteita, joita aiheuttavat ikääntyminen, korjausvelka sekä ilmastonmuutoksen vaikutukset erityisesti kosteusongelmien muodossa. Perinteisillä menetelmillä piilevät, maanalaiset vauriot ovat usein vaikeasti havaittavissa ja korjattavissa, mikä lisää korjausrakentamisen riskejä, kustannuksia ja terveysongelmia.

Hankkeessa on tutkittu uudenlaista sähköiseen tomografiaan perustuvaa maanalaisten rakenteiden ja maaperän kuvantamisteknologiaa. Tämä menetelmä mahdollistaa rakennusten ja niiden perustusten kunnan tarkan kartoittamisen ilman rakenteiden rikkomista. Case-kohteiden tulokset osoittavat, että teknologian avulla voidaan parantaa korjausrakentamisen lähtötietojen laatua, kohdistaa toimenpiteet täsmällisesti sekä vähentää yllätyksiä, aikatauluviiveitä ja kustannuksia. Lisäksi teknologia tukee rakennusten kestävyyttä ja terveellisyttä, mikä on keskeistä Suomen hiilineutraaliustavoitteiden ja ilmastonmuutokseen sopeutumisen kannalta.

Teknologia soveltuu laajasti erilaisiin rakennuskohteisiin, ja sen potentiaali ulottuu Suomen rajojen ulkopuolelle, sillä vastaavaa kokonaisratkaisua ei ole tällä hetkellä tarjolla muilta toimijoilta. Hankkeen tulokset korostavat uudenlaisen maanalaisskannauksen merkitystä rakennusten kuntotutkimuksessa ja korjausrakentamisen suunnittelussa, tarjoten kustannustehokkaan ja ympäristöystävällisen vaihtoehdon perinteisille menetelmille.

Kaiken kaikkiaan hanke edistää rakennusten pitkäikäisyyttä, energiatehokkuutta ja kosteusturvallisuutta, tukien kestävästä rakentamisesta ja hyvinvointia suomalaisessa yhteiskunnassa sekä avaten uusia mahdollisuuksia cleantech-alan kasvulle ja vientituotteiden kehitykselle.

7 Suositukset

Hankkeen tulokset osoittavat, että uusi sähköiseen tomografiaan perustuva maanalaisten rakenteiden ja maaperän kuvantamisteknologia tarjoaa merkittäviä mahdollisuuksia Suomen rakennuskannan kestävyys-, terveellisyys- ja elinkaaren hallinnan tehostamiseen. Teknologia vastaa tehokkaasti rakennusten ikääntymisestä, kosteusongelmista ja korjausvelasta johtuviin haasteisiin.

Perinteiset kuntotutkimusmenetelmät ovat usein kalliita, työläitä ja rakenteisiin tai niiden ympäristöön kajoavia, erityisesti maanpinnan alapuolisten osien osalta. Tämä aiheuttaa epävarmuutta kunnossapidossa, lisää kustannuksia, viivästyttää aikatauluja ja saattaa johtaa virheellisiin korjauspäätöksiin. Sähköinen tomografia mahdollistaa rakenteiden kunnan ja niihin vaikuttavien tekijöiden tarkan arvioinnin ilman rakenteiden rikkomista. Tämä parantaa merkittävästi korjausrakentamisen lähtötietojen laatua ja mahdollistaa toimenpiteiden kohdentamisen juuri sinne, missä tarve on suurin.

Teknologian soveltuvuus erilaisiin rakennuskohteisiin tekee siitä arvokkaan työkalun sekä yksittäisten rakennusten että koko rakennuskannan hallintaan. Sen avulla voidaan vähentää korjausrakentamisen riskejä ja kustannuksia sekä edistää rakennusten kosteusturvallisuutta — kaikki nämä tekijät ovat keskeisiä kansanterveyden ja ilmastotavoitteiden kannalta.

Sähköisen tomografian käyttöä voisi harkita osana kansallisia kuntotutkimus- ja korjaussuosituksia sekä rakennusten huolto- ja ylläpitosuunnitelmia. Teknologian käyttöönottoa voidaan edistää esimerkiksi koulutuksen, ohjeistusten ja tarvittaessa kannustimien avulla, jotta sen hyödyt saadaan mahdollisimman laajasti käyttöön. Tällöin voidaan tukea rakennusten pitkäikäisyyttä ja energiatehokkuutta sekä cleantech-alan kehittymistä ja vientimahdollisuuksia.

8 Lähteet

Architecture 2030 (2025): Why the built environment? Saatavissa: <https://www.architecture2030.org/old-why-the-built-environment/>

Eduskunnan tarkastusvaliokunta (2012): Rakennusten kosteus- ja homeongelmat. Saatavissa: https://www.eduskunta.fi/FI/tietoaeduskunnasta/julkaisut/Documents/trvj_1+2012.pdf

Flores Orozco, A., Kemna, A. ja Zimmermann, E. (2012): Data error quantification in spectral induced polarization imaging. *Geophysics* 77 (3), E227–E237.

Gregow, H. ym. (2021): Ilmastomuutokseen sopeutumisen ohjauskeinot, kustannukset ja alueelliset ulottuvuudet. Suomen ilmastopaneelin raportti 2/2021. Suomen ilmastopaneeli. Saatavissa: https://www.ilmastopaneeli.fi/wp-content/uploads/2021/09/SUOMI-raportti_final.pdf

IEA (2023): CO2 Emissions in 2022. Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>

Korkealaakso, J., & Paananen, M. (2021): Sähköiset 3D-resistiivisyystomografiat täyden mittakaavan järjestelmäkokeessa. Sovelletun geofysiikan XXIII neuvottelupäivät, 23.–24.11.2021; Esityskokoelma (toimittanut Hanna Leväniemi), Vuorimiesyhdistys, Espoo.

Korkealaakso, J., & Saksa, P. (1986): Calculation of electromagnetic field components in frequency and time domain using dipole source excitation and layered earth model: documentation of software development. VTT Research Notes 597.

Loke, M.H., Chambers, J.E., Rucker, D.F., Kuras, O. ja Wilkinson, P.B. (2013): Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of Applied Geophysics* 95, 135–156.

Nippala, E. & Vainio, T. (2016): Asuinrakennusten korjaustarve 2006–2035. VTT. Saatavissa: <https://publications.vtt.fi/pdf/technology/2016/T274.pdf>

Rakennetun omaisuuden tila -paneeli (2023): ROTI 2023 – Rakennetun omaisuuden tila. RIL.

Salmela, A. (2022): Kosteusvaurioiden yleisyys pientalojen riskirakenteissa. *Ympäristö ja Terveys -lehti* 5/2022.

Slater L. ja Lesmes D. (2002): IP interpretation in environmental investigations, *Geophysics*, 67, 77–88.

t
deep
scan
h