



**TURUN
YLIOPISTO**

Matemaattis-luonnontieteellinen
tiedekunta

Hydraulisen painekorkeusdatan analysointityökalun kehitys Posiva Oy:n tarpeisiin

Juho Vuorio

Maaperägeologia
Pro gradu -tutkielma
Laajuus: 30 op

19.3.2026

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu

Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Pro gradu -tutkielma

Pääaine: Maaperägeologia

Tekijä: Juho Vuorio

Otsikko: Hydraulisen painekorkeusdatan analysointityökalun kehitys Posiva Oy:n tarpeisiin

Ohjaajat: Eila Hietaharju, Samuel Bronstein ja Ville-Pekka Paalumäki

Sivumäärä: 57 sivua + liitteet 3 sivua

Päivämäärä: 19.3.2026

Posiva Oy valmistelee käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitusta Olkiluodon kallioperään, mikä edellyttää tarkkaa ja jatkuvaa pohjaveden hydraulisen painekorkeuden seuranta. Monitorointidataa on kerätty 1990-luvun alusta lähtien, ja sitä hyödynnetään muun muassa numeeristen virtausmallien kalibroinnissa ja rakentamisen aikaisten vaikutusten arvioinnissa. Haasteena on ollut raakadatassa esiintyvien virhepiikkien ja muiden poikkeamien siivoaminen, joka on tähän asti tehty pitkälti manuaalisesti. Työssä lähestytään ongelmaa hyödyntämällä modernia koneoppimista ja ohjelmistokehitystä datan laadunvarmistusprosessin parantamiseksi.

Työn tavoitteena oli kehittää käyttäjäystävällinen, Python-pohjainen analysointityökalu (SIHTI), joka kykenee erottamaan virheellisen mittausdatan luonnollisista pohjaveden paineilmiöistä. Tarkoituksena oli vähentää manuaaliseen tarkastustyöhön kuluva aikaa ja parantaa Posivan tutkimustietokantaan vietävän prosessoidun datan luotettavuutta.

Aineistona käytettiin pohjaveden automaattisen painekorkeusseurannan tuottamaa aikasarjadataa maanpäällisiltä syväkairareitiltä ja maanalaisilta tutkimusreitiltä. Kehitetty SIHTI-ohjelma hyödyntää ohjaamatonta koneoppimista, Isolation Forest -algoritmia, poikkeamien tunnistamiseen. Ohjelmisto sisältää sääntöpohjaista jälkisuodatusta ja graafisen käyttöliittymän, joka mahdollistaa asiantuntijan tekemän validoinnin ennen datan lopullista hyväksymistä.

Kehitetty työkalu osoittautui teknisesti suorituskykyiseksi ja tarkaksi. Se tunnisti luotettavasti paitsi suuret virhepiikit, myös vaikeammin havaittavat ilmiöt, kuten vikaantuneiden antureiden aiheuttamat tasomaiset virhepiikit. Ohjelmalla pystyttiin myös tunnistamaan todellisia hydrogeologisia vasteita, kuten ONK-DTPH6-kairausten aiheuttamia paineenalennuksia, ja erottamaan ne teknisistä häiriöistä. Testauksessa havaittiin, että optimaalinen tulos vaatii tasapainoilua tunnistusherkkyyden ja spesifisyyden välillä, minkä vuoksi ohjelmaan toteutettiin säädettävät parametrit eri käyttötarkoituksia varten.

Työn tuloksena syntynyt SIHTI-ohjelma tehostaa merkittävästi Posivan painekorkeusdatan laadunvarmistusprosessia vähentämällä manuaalisia työvaiheita. Modernien Python-kirjastojen ja koneoppimisen hyödyntäminen mahdollistaa tarkemman anomaliatunnistuksen kuin perinteiset menetelmät. Työ osoittaa, että automaattinen tunnistus yhdistettynä asiantuntijan visuaaliseen varmistukseen on tehokas tapa hallita suuria hydrogeologisia aikasarja-aineistoja loppusijoitushankkeen kaltaisessa ympäristössä.

Avainsanat: Hydraulinen painekorkeus, Poikkeamien tunnistus, Isolation Forest, Pohjaveden monitorointi, Ydinjäte, Loppusijoitus, Hydrogeologia

Sisällys

1. Johdanto.....	5
2. Hydraulisen painekorkeuden monitorointi Posivalla.....	7
2.1. Mihin painekorkeusdataa käytetään Posivalla	9
2.2. Mikä vaikuttaa painekorkeuksiin Olkiluodossa.....	11
2.2.1. Olkiluodon hydrogeologiset vyöhykkeet	15
2.3. Kairareiät ja monitorointilaitteisto	17
2.3.1. Syvät kairareiät.....	17
2.3.2. ONKALO-tutkimusreiät	19
2.3.3. Monitorointilaitteisto	20
2.4. Ongelman esittely sekä tavoitteet.....	24
3. Aineisto ja menetelmät	26
3.1. Painekorkeusdata ja tutkimusaineisto	26
3.2. Tietokanta ja visualisointityökalu	27
3.3. Ohjelmistot ja kirjastot.....	28
4. Tulokset ja tulosten tulkinta.....	30
4.1. Ohjelmiston toteutus ja työnkulku	30
4.1.1. Poikkeamien tunnistusmenetelmän valinta	32
4.2. Ohjelman toiminta.....	33
4.2.1. Koneoppimismenetelmän toiminta	36
4.3. Mitä ilmiöitä ohjelmalla tunnistettiin.....	38
4.3.1. Vertailu processed-dataan	42
5. ONK-DTPH6 kairausten vaikutukset ja analysointi SIHTI-ohjelmalla	45
5.1. ONK-DTPH6 painevasteiden tunnistus SIHTI-ohjelman avulla.....	49
6. Johtopäätökset.....	53
7. Kiitokset.....	55
8. Kirjallisuus.....	56

Liite 1

Lyhenne	Selitys
BFZ-vyöhyke	Hauras rikkonaisuusvyöhyke
GWMS	Ground water monitoring system - pohjaveden automaattiseen monitorointiin kehitetty laitteisto
HZL-vyöhyke	Paikallinen hydrogeologinen vyöhyke
HZ-vyöhyke	Alueellinen hydrogeologinen vyöhyke
m.a.s.l	Meters above sea level – metriä merenpinnan yläpuolella
OL-KR	Maan pinnalta porattu syväkairareikä. OL = Olkiluodon saari
OMO	Olkiluoto monitoring program – Olkiluodon monitorointiohjelma
ONKALO, ONK-	Posivan loppusijoituslaitos
ONK-CTPH	ONKALO:sta porattu keskustunnelin pilottireikä
ONK-DTPH	Loppusijoitustunnelin pilottireikä
ONK-KR	ONKALO:sta porattu kairareikä
ONK-PH	ONKALO:sta porattu pilottireikä
ONK-PVA	ONKALO:sta porattu pohjavesiasema
PFL	Posiva flow log - transmissiviteettimittaus
POTTI	Posivan tutkimustietokanta

1. Johdanto

Posiva Oy valmistelee käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoitusta syvälle (400–450 m syvyyteen) Olkiluodon saaren kiteiseen peruskallioon. Olkiluodon ydinvoimalaitos, jonka kolme toiminnassa olevaa reaktoria, matala- ja keskiaktiivisen jätteen loppusijoituslaitos (VLJ-luola) ja käytetyn polttoaineen välivarasto sijaitsevat saaren länsiosassa. Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituslaitos sekä kapselointilaitos sijaitsevat saaren keskiosassa (Aalto et al. 2021).

Pohjaveden hydraulista painekorkeutta on monitoroitu Olkiluodon saaren kairareilissa 1990-luvun alkuvaiheesta lähtien. Hydraulisen painekorkeuden monitoroinnilla on mahdollista seurata erityisesti syvän pohjaveden paineolosuhteiden tilaa ja kehitystä. Paineolosuhteiden seuranta perustuu maanpinnalta kairattuihin havaintoreikiin asennettavien monitulppalaitteistojen havaintoväleissä tehtäviin hydraulisen painekorkeuden mittauksiin. Lisäksi maanalaisista tiloista kairatuista havaintorei'istä monitoroidaan vastaavalla menetelmällä painekorkeuden sijaan havaintovälien painetta. Hydraulisen painekorkeuden ja painetason monitorointi syvän kallioperän kairareikien monitulppalaitteistojen tulppaväleissä tuottaa jatkuvaluonteisesti tietoa pohjaveden paineolosuhteista, niiden lyhyt- ja pitkäaikaisista muutoksista sekä pitkän aikavälin kehityksestä. Vuoden 2025 loppupuolella monitoroitavia tutkimusreikiä (maanpinnalta poratut OL-KR ja maanalaiset ONK-KR/PVA/PH/CTPH) on yhteensä 57 kappaletta ja yhdessä kairareissä on 1–10 tulppaväliä, joista data tallennetaan kairareiän laitteiston mukaan 15 min tai 1 h välein.

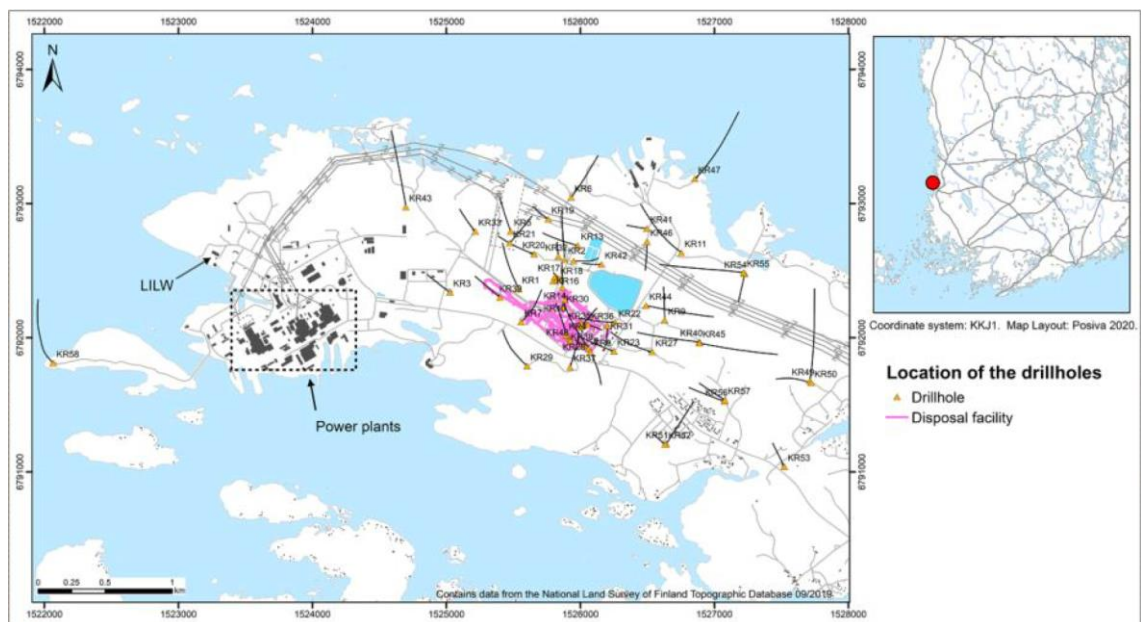
Pohjaveden hydraulisen painekorkeuden osalta monitoroitavista kairareikien tulppaväleistä tuotetaan raakadatasta (engl. measurement data, lyh. meas-data) virhetuloksista siivottu ja m.a.s.l-yksikköön muunnettu versio (engl. processed data, lyh. proc-data) Posivan tutkimustietokantaan POTTI:in, josta dataa jatko käytetään esimerkiksi vuosiraportointiin ja muuhun tulkintaan. Raakadata mahdollisesti sisältää virhepiikkejä tai muita anomaalisia tuloksia, jotka voivat johtua esimerkiksi näytteenotoista tai laiterikoista. Tämä siivous tehdään nykyään vanhan Microsoft Excel-makron ja manuaalisen tarkastustyön keinoin ja siihen kuuluu merkittävä määrä työtunteja.

Tämän työn tavoitteena on kehittää käyttäjäystävällinen työkalu, joka erottaa virheellisen datan pohjaveden painekorkeuden ilmiöistä. Työkalun tarkoituksena on vähentää erillisiä työvaiheita ennen varsinaista analyysiprosessia.

Painekorkeusdatan siivoustyökalun tulisi tunnistaa anomaaliset tulokset luonnollisesta vaihtelusta, jonka vuoksi työkalussa aiotaan hyödyntää koneoppimisalgoritmia. Työkalun tulisi olla helppokäyttöinen; käyttäjä lataa monitorointitulokset ohjelmaan, ohjelma visualisoi sekä merkitsee löytämänsä anomaaliset tulokset, jonka jälkeen käyttäjä voi tarkastaa nämä ja valita käytetäänkö kyseistä dataa siivotussa versiossa. Käytännössä ohjelma aiotaan toteuttaa Python-koodikielellä ja hyödyntäen ainakin seuraavia kirjastoja: pandas (datan käsittely), scikit-learn (koneoppimismalli Isolation Forest), matplotlib (datan visualisointi).

2. Hydraulisen painekorkeuden monitorointi Posivalla

Käytetyn ydinpolttoaineen loppusijoituksen pitkäaikaisturvallisuuden arviointi Olkiluodon kallioperässä perustuu yli 30 vuotta jatkuneeseen kattavaan tutkimusohjelmaan. Hydrogeologian ymmärtäminen on keskeistä, koska todennäköisin radionuklidien vapautumismekanismi loppusijoitustilasta on niiden liukeneminen pohjaveteen ja sitä seuraava kulkeutuminen hitaiden pohjavesivirtausten mukana biosfääriin (Aalto et al. 2021). Siksi kallioperän hydraulisten ominaisuuksien ja pohjaveden paineolosuhteiden tarkka tunteminen on tärkeää loppusijoituksen turvallisuuden kannalta. Tutkimusta on vuodesta 2004 lähtien tehty myös maanalaisessa ONKALO-tutkimustilassa, joka on mahdollistanut kallioperän ominaisuuksien tutkimisen suoraan tulevassa loppusijoitusympäristössä (Aalto et al. 2021) (Kuva 1).



Kuva 1. Karttakuva Olkiluodon saaresta ja ydinlaitosten sijainnista (Aalto et al. 2021).

Olkiluodon hydrogeologisessa monitoroinnissa seurataan, ja tässä työssä mainittaessa painekorkeus tarkoitetaan nimenomaan makean veden painekorkeutta (engl. freshwater head), jotta eri syvyyksiltä ja eri puolilta aluetta kerätty painedata saadaan keskenään vertailukelpoiseksi ja riippumattomaksi kallioperän suolaisuus- ja tiheysvaihteluista

(Aalto et al. 2021). Hydraulinen painekorkeus h määritellään summana korkeustasosta z ja painekomponentista h_p kaavalla:

$$h = z + h_p$$

Painekomponentti h_p lasketaan mitatun paineen p , veden tiheyden ρ ja putoamiskiihtyvyyden g avulla kaavalla:

$$h_p = \frac{p}{\rho g}$$

Kiteisessä kallioperässä pohjaveden virtaus tapahtuu kiviaineksen raoissa ja murtumavyöhykkeissä, jotka muodostavat hydraulisia yhteyksiä eri painetasoilla olevien alueiden välille. Virtauksen ajavina voimina toimivat paitsi painekentän erot eli gradientit, myös nesteen noste- eli tiheysero vaikutukset (Aalto et al. 2021). Olkiluodon erityispiirteenä on pohjaveden suolaisuuden ja siten myös tiheyden lähes eksponentiaalinen kasvu syvyyden funktiona, mikä aiheuttaa laskennallisen makean veden painekorkeuden nousun syvemmälle mentäessä ilman varsinaista ylöspäin suuntautuvaa virtausta. Olkiluodon alueella suolaisuutta mitataan yleisimmin TDS-arvon avulla (engl. total dissolved solids). Tämä suolaisuusvaikutus on huomioitava monitorointidatan tulkinnassa ja numeeristen virtausmallien kalibroinnissa, jotta todelliset virtausta ohjaavat gradientit voidaan erottaa tiheysvaihteluiden aiheuttamasta painelisästä (Aalto et al. 2021).

Systemaattinen pohjaveden hydraulisen painekorkeuden seuranta Olkiluodossa käynnistyi 1980-luvun lopulla osana paikanvalintatutkimuksia. Vuonna 1989 perustettiin seurantaverkosto hydraulisten painekorkeuksien mittaamiseksi syvältä kallioperästä, ja vuodesta 1991 lähtien syvissä kairanrei'issä on hyödynnetty monitulppalaitteistoja paineolosuhteiden vyöhykekohtaiseen seurantaan. ONKALO:n rakentamisen aloitus vuonna 2004 oli merkittävä käännekohta, sillä maanalaisen tilan louhinta muutti kallioperän luontaisia paineolosuhteita laaja-alaisesti. Koska avoimet tunnelit ovat ilmakehän paineessa, ne toimivat hydraulisina nieluina, jotka alentavat pohjaveden painetta ympäröivässä kalliomassassa ja saavat aikaan voimakkaita hydraulisia gradientteja kohti tunneleita (Aalto et al. 2021). Tämä häiriö ilmenee painekorkeuden alenemana erityisesti vettä johtavissa hydrogeologisissa vyöhykkeissä, ja se voi muuttaa

pohjaveden virtaussuuntia sekä aiheuttaa hydrogeokemiallista epätasapainoa eri vesityyppien sekoittumisen seurauksena (Aalto et al. 2021).

Rakentamisen aikaisten vaikutusten systemaattiseksi mittaamiseksi ja ymmärtämiseksi perustettiin Olkiluodon monitorointiohjelma (lyh. OMO) vuonna 2004. Ohjelman tavoitteena on tuottaa tietoa pitkäaikaisturvallisuuden arviointiin ja hydrogeologisten mallien validointiin sekä tarjota ajantasaista palautetta loppusijoitustilan suunnittelulle ja rakentamiselle (Aalto et al. 2021). Rakentamisen alkuvaiheessa tiheä kairausohjelma johti haasteisiin, kun useat avoimiksi jätetyt kairanreiät aiheuttivat hydraulisten häiriöiden leviämistä ja erilaisten pohjavesien sekoittumista, mikä heikensi painekorkeusmittausten luotettavuutta. Tämän ongelman korjaamiseksi vuodesta 2008 alkaen valtaosaan kairanrei'istä on asennettu monitulppalaitteisto, joka eristää reiän hydraulisesti eri osiin ja mahdollistaa tarkkojen, vyöhykekohtaisten hydraulisten painekorkeusmittausten tekemisen estäen samalla pystysuuntaisen virtauksen kairareian sisällä (Aalto et al. 2021). Jatkuvalla painekorkeusseurannalla kerätty data on ensiarvoisen tärkeää, sillä sitä tarvitaan muun muassa numeeristen virtausmallien kalibrointiin ja varmentamiseen. Nämä mallit kuvaavat pohjaveden käyttäytymistä ja ennustavat järjestelmän pitkän aikavälin kehitystä loppusijoituksen jälkeen. Lisäksi seurantatietoja hyödynnetään suoraan rakennusteknisissä ratkaisuissa, kuten tunneleiden tiivistysinjektointien tehokkuuden arvioinnissa seuraamalla painealeneman kehitystä kallioperässä (Aalto et al. 2021).

2.1. Mihin painekorkeusdataa käytetään Posivalla

Seurantaohjelman keräämällä painekorkeusdatalla on useita käyttökohteita loppusijoitusjärjestelmän eri vaiheissa. Pohjaveden hydraulisen painekorkeuden seuranta on keskeinen osa Olkiluodon monitorointiohjelmaa, ja kerättyä dataa hyödynnetään sekä rakentamisen aikaisessa toiminnan ohjauksessa että pitkäaikaisturvallisuuden arvioinnissa (Aalto et al. 2021). Aineisto on välttämätöntä loppusijoituspaikan hydrogeologisten olosuhteiden ymmärtämiseksi, mallinnukselle ja turvallisuusperustelujen laatimiseksi (Pere et al. 2021).

Maanalaisten tilojen rakentaminen häiritsee väistämättä kallioperän luonnollista pohjavesijärjestelmää, mikä ilmenee hydraulisen painekorkeuden alenemana (engl. drawdown) erityisesti kallioperän paremmin vettä johtavissa hydrogeologisissa vyöhykkeissä (Vaittinen et al. 2020). Jotta tämän häiriön laajuutta ja ajallista kehitystä voidaan arvioida luotettavasti, seurannan keskeisenä vertailukohtana hyödynnetään kallioperän luonnontilaa kuvaavia perustila-arvoja (engl. baseline) (Pentti 2020). Nämä arvot edustavat hydrogeologista tilaa ennen loppusijoituslaitoksen ja ONKALO:n rakentamisen aiheuttamaa hydraulista vaikutusta (Ahokas et al. 2008).

Vertaamalla nykyisiä mittaustuloksia määritettyihin perustila-arvoihin voidaan laskea rakentamisen aiheuttama tarkka painealenema ja erottaa se kallioperän luonnollisesta taustavaihtelusta (Pentti 2020). Tätä seurantatietoa hyödynnetään suoraan rakennusteknisissä ratkaisuissa, kuten tunneleiden tiivistysinjektointien tehokkuuden arvioinnissa (Aalto et al. 2021; Laakso et al. 2023). Tiivistämisellä pyritään rajoittamaan painealeneman syntymistä sekä vuotoja avoimiin tunneleihin, ja jatkuva painekorkeusdata mahdollistaa näiden toimenpiteiden onnistumisen seurannan lähes reaaliaikaisesti. Lisäksi perustilaan peilattujen painevasteiden analysoinnin kautta voidaan tunnistaa ja tulkita hydraulisia yhteyksiä kallioperän eri rakenteiden, kairareikien ja maanalaisten tilojen välillä (Vaittinen et al. 2020). Perustila-arvojen säännöllinen päivittäminen ja tarkentaminen varmistaa, että monitorointi pysyy luotettavana loppusijoitushankkeen edetessä (Pentti 2020).

Jatkuvalla seurannalla kerätty data on ensiarvoisen tärkeää myös numeeristen virtausmallien kalibroinnille ja varmentamiselle (Aalto et al. 2021). Nämä mallit kuvaavat pohjaveden käyttäytymistä ja ennustavat järjestelmän pitkän aikavälin kehitystä loppusijoituksen jälkeen. Monitorointihavainnot ovat siten olennainen osa hydrogeologisen rakennemallin ylläpitoa ja päivittämistä, joka puolestaan on keskeinen työkalu radionuklidien kulkeutumisen mallinnuksessa (Vaittinen et al. 2020). Koska painekorkeusdata reagoi muutoksiin pohjavesijärjestelmässä suhteellisen nopeasti, jo käyttövaiheen aikana kerättävä data pohjavesijärjestelmän häiriön mahdollisesta palautumisesta on arvokasta pitkän aikavälin palautumisen mallintamisessa. Tätä

mallinnusta tarvitaan laitoksen lopullisen sulkemisen yhteydessä tehtävässä turvallisuusperustelussa (Pere et al. 2021). Painekorkeusdata toimii myös lähtötietona hydrogeokemiallisen häiriön mallintamiselle, sillä pohjaveden virtauksissa tapahtuvat muutokset aiheuttavat eri vesimassojen sekoittumista ja sitä kautta kemiallisia muutoksia kallioperän pohjavedessä (Pere et al. 2021).

Pitkäaikaisturvallisuuden näkökulmasta hydraulisen painekorkeuden seurannalla varmistetaan, että kallioperän olosuhteet säilyvät teknisten vapautumisesteiden toiminnalle suotuisina (Aalto et al. 2021). Monitorointiohjelmassa on määritelty numeerinen toimenpideraja pitkäaikaiselle painekorkeuden alenemalle (Pere et al. 2021). Rajan ylittyminen käynnistää Posivan johtamisjärjestelmän mukaisen arviointiprosessin, jossa selvitetään havainnon merkitys käyttö- ja pitkäaikaisturvallisuudelle. Tällä menettelyllä varmistetaan, että mahdollisiin epäsuotuisiin kehityskulkuihin voidaan reagoida hallitusti ja oikea-aikaisesti (Pere et al. 2021).

2.2. Mikä vaikuttaa painekorkeuksiin Olkiluodossa

Jotta hydraulista painekorkeusdataa voidaan tulkita oikein, on ymmärrettävä mitkä tekijät siihen vaikuttavat. Olkiluodon kallioperän pohjaveden hydrauliseen painekorkeuteen vaikuttavat luonnolliset ja ihmistoiminnasta lähtöisin olevat tekijät, joiden yhteisvaikutus määrittää pohjavesijärjestelmän tilan. Nämä tekijät on tunnistettava, jotta rakentamisen aiheuttama häiriö voidaan luotettavasti erottaa luonnollisesta taustavaihtelusta (Pere et al. 2021).

Olkiluodon kallioperä on osa muinaista Svekofennistä vuorijonoa. Se koostuu pääasiassa migmatiittisista kiillegneisseistä, jotka esiintyvät rakenteeltaan suonigneisseinä ja diateksiittisina gneisseinä, sekä magmaattisista tonaliitti-granodioriitti-graniitti (TGG) -sarjan kivilajeista ja graniittisista pegmatoideista. Kallioperän kehityshistoriaan kuuluu useita muodonmuutosvaiheita; plastinen deformaatio on muovannut kiven rakenteen ja sen suuntariippuvan anisotrooppisuuden, kun taas myöhemmät hauraat murtumisvaiheet ovat synnyttäneet kallioperää leikkaavia rikkonaisuusvyöhykkeitä. Nämä geologiset

yksiköt ja niiden rakenteelliset ominaisuudet muodostavat perustan alueen hydrogeologiselle toiminnalle ja painekorkeuksien vaihtelulle (Aaltonen et al. 2016).

Luonnolliset prosessit aiheuttavat jatkuvaa, pääosin syklistä vaihtelua pohjaveden painekorkeuteen. Olkiluodon hydrogeologiseen järjestelmään vaikuttavat merkittävimmin pohjaveden muodostumisen vuodenaikaisvaihtelu, merenpinnan korkeuden muutokset, ilmanpaineen muutokset ja maan vuorovesi-ilmiö (engl. earth tide) (Aalto et al. 2021).

Pohjaveden muodostumisen eli nettomuodostuman vuodenaikaisvaihtelu on keskeisin luonnollinen painekorkeutta säätelevä tekijä. Fetterin (2001) mukaan pohjaveden pinnankorkeus heijastaa jatkuvaa dynaamista tasapainotilaa akviferiin suotautuvan veden ja sieltä tapahtuvan purkautumisen välillä. Vaihtelu on suora seuraus sadannan, haihdunnan ja lumen sulamisen välisestä tasapainosta (Voipio et al. 2004). Tämä luonnollinen vaihtelu pohjaveden pinnankorkeudessa voi olla paikallisista olosuhteista riippuen jopa useita metrejä (Aalto et al. 2021).

Olkiluodon saarisijainnin vuoksi merenpinnan korkeuden muutoksilla on suora vaikutus kallioperän paineolosuhteisiin (Voipio et al. 2004). Itämeren pinnankorkeus vaihtelee enimmäkseen tuulen sekä ilmanpaineen vaihtelun seurauksena. Nämä muutokset heijastuvat viiveellä ja vaimennettuna pohjavesisysteemiin (Pere et al. 2021). Ilmiö on rannikkoakvifereille tyypillinen vaste, jossa merenpinnan tason vaihtelu aiheuttaa painemuutoksia kallioperässä joko suoran hydraulisen yhteyden tai mekaanisen kuormitusvaikutuksen kautta (Freeze & Cherry 1979).

Vähäisempiä, mutta mittauksissa havaittavia painekorkeuden vaihteluita aiheuttavat ilmanpaineen muutokset sekä maan vuorovesi-ilmiö (Aalto et al. 2021). Nämä vaikutukset korostuvat erityisesti syvällä sijaitsevilla suljetuilla tai puolisoljetuilla akvifereissa, joissa kallioperän elastiset ominaisuudet vaikuttavat painevasteeseen (Freeze & Cherry 1979).

Ilmanpaineen vaikutus perustuu kallioperän ja siinä olevan veden väliseen kuormituksen jakautumiseen. Kun ilmanpaine nousee, se kohdistaa lisäpaineen suoraan avoimen kairareiän vesipatsaaseen, mutta vain osittain kallioperän raoissa olevaan veteen, koska osa kuormasta jää kiviaineksen kannateltavaksi. Tämän seurauksena ilmanpaineen nousu painaa kairareiän vedenpintaa alas suhteessa ympäröivään kallioon, ja painekorkeus laskee. Ilmiön voimakkuus riippuu akviferin niin kutsutusta barometrisestä tehokkuudesta (engl. barometric efficiency), joka heijastaa kallioperän jäykkyyttä (Freeze & Cherry 1979).

Myös maan vuorovesi-ilmiö aiheuttaa pieniä, säännöllisiä painefluktuaatioita (Pere et al. 2021). Se on seurausta kuun ja auringon gravitaatiovoimien aiheuttamasta maankuoren elastisesta muodonmuutoksesta. Tämä jännitystilän muutos supistaa ja laajentaa kallioperän rakoja hyvin vähän, mikä nostaa tai laskee rakojen veden painetta syklisesti. Vaikka maan vuorovesi-ilmiön aiheuttama muutos on tyypillisesti vain muutamia senttimetrejä, sen havaitseminen on merkki siitä, että mittauspiste on hydraulisesti tiivis ja hyvin eristetty ilmakehän suorilta vaikutuksilta (Freeze & Cherry 1979).

Ihmistoiminnasta peräisin olevista tekijöistä maanalainen rakentaminen on merkittävin yksittäinen pohjaveden painekorkeuteen vaikuttava tekijä. ONKALO:n ja siihen liittyvien tilojen rakentaminen on aiheuttanut laaja-alaisen painekorkeuden alenemavyöhykkeen (Vaittinen et al. 2020). Alenema on voimakkain vettä hyvin johtavissa, maanalaisiin tiloihin yhteydessä olevissa hydrogeologisissa vyöhykkeissä, joissa se voi olla ONKALO:n läheisyydessä jopa kymmeniä metrejä verrattuna luonnontilaan (Laakso et al. 2023).

Muita ihmistoiminnasta peräisin olevia, painekorkeuksiin vaikuttavia tekijöitä ovat kairaukset, hydrauliset testit ja erilaiset näytteenotot. Avoimet tutkimuskairareivät tai tulppavälit voivat aiheuttaa paikallisia painekorkeuden häiriöitä, mikäli ne yhdistävät hydraulisesti eripaineisia kallioperän vyöhykkeitä. Erilaiset hydrauliset testit, kuten näytteenottopumppaukset ja PFL-mittaukset (Posiva Flow Log), aiheuttavat väliaikaisia

ja paikallisia muutoksia paineolosuhteisiin (Pere et al. 2021). Lisäksi maanpinnalle rakennettu Korvensuon tekoallas, jonka vettä käytetään Olkiluodossa prosessi- ja käyttövetenä, aiheuttaa paikallista painekorkeuden nousua altaan lähiympäristössä, kun vettä suotautuu pohjavesisysteemiin (Aalto et al. 2021).

Monitoroinnissa erotetaan eri tekijöiden vaikutukset toisistaan. Soveltamalla mittausdataan laskennallisia korjauksia sitä analysoitaessa voidaan luonnollisten tekijöiden aiheuttama vaihtelu poistaa. Tämä mahdollistaa esimerkiksi rakentamistoiminnasta aiheutuvan painealeneman tarkan seurannan ja arvioinnin (Pere et al. 2021). Aleneman laskentaa varten vuonna 2025 käytettyjen luonnontilan korjauskertoimien suuruusluokkaa on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Luonnollisen pohjaveden vaihtelun, merenpinnan tason vaihtelun, maan vuorovesi-ilmiön ja ilmanpaineen vaikutuksen laskennassa vuonna 2025 Posivalla käytettyjen korjauskertoimien minimi-, maksimi- ja keskiarvot (Mukaiilu Laakso et al. 2025).

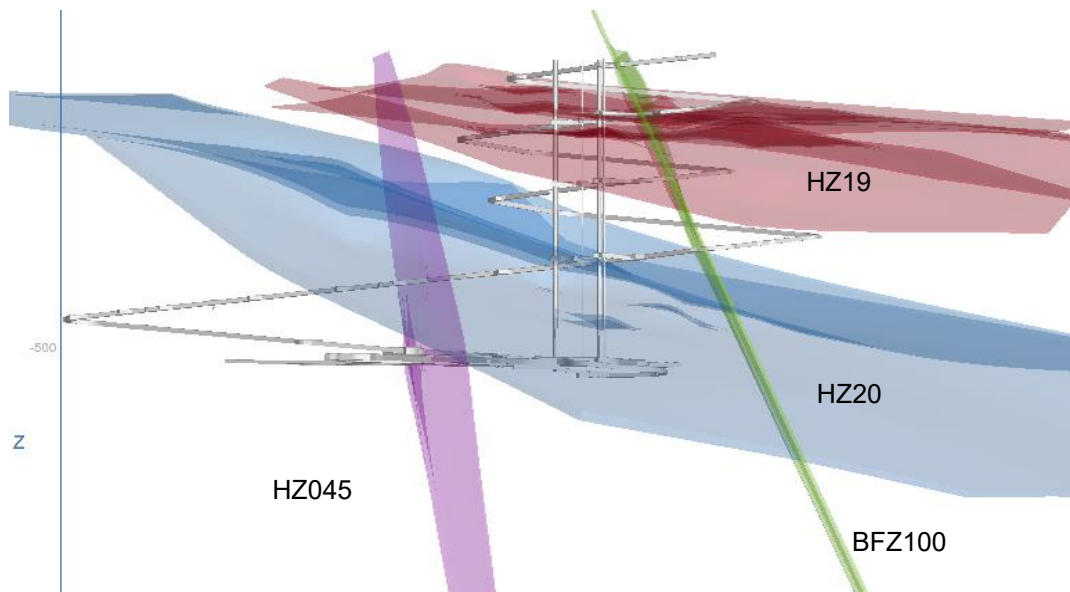
Redusointitermi		Syväkairareikien korjauskertoimet
Pohjaveden vaihtelu (kerroin)	Keskiarvo	0.5034
	Minimi	0
	Maksimi	1.5365
Merenpinnan tason vaikutus (nollasta poikkeavat arvot) (kerroin)	Keskiarvo	0.3418
	Minimi	0.0985
	Maksimi	0.8586
Maan vuorovesi-ilmiön vaikutus (10^3s^2)	Keskiarvo	25.909
	Minimi	0
	Maksimi	75.302
Ilmanpaineen vaikutus (mm/kPa)	Keskiarvo	24.828
	Minimi	-67.7725
	Maksimi	94.600

2.2.1. Olkiluodon hydrogeologiset vyöhykkeet

Olkiluodon kallioperän hydrogeologinen kuvaus perustuu deterministiseen rakennemalliin, jonka keskeisenä lähtötietona hyödynnetään painekorkeusdataa. Mallin ytimen muodostavat hydrogeologiset vyöhykkeet (HZ), jotka määritellään kallioperän deterministisesti tunnistetuiksi, pohjaveden virtausta hallitseviksi osiksi. Nämä vyöhykkeet vastaavat yleensä geologisia rikkonaisuusvyöhykkeitä, ja niiden hydraulinen johtavuus on merkittävästi ympäröivää kalliota suurempi transmissiviteetin ollessa tyypillisesti välillä 10^{-5} – 10^{-6} m²/s (Vaittinen et al. 2020).

Rakennemallissa vyöhykkeet jaotellaan mittakaavan ja jatkuvuuden mukaan alueellisiin (HZ) ja paikallisiin (HZL) hydrogeologisiin vyöhykkeisiin. Lisäksi mallinnuksessa huomioidaan hydrogeologisesti merkittävät hauraat rikkonaisuusvyöhykkeet (BFZ). Käytännössä usein HZ-vyöhykkeiden taustalla on geologinen rakenne eli BFZ-vastine. Rakenne nimetään hydrogeologisessa mallinnuksessa BFZ-vyöhykkeeksi, mikäli vyöhyke on geometrialtaan mallinnettu täysin geologisen mallin BFZ-vyöhykkeen mukaiseksi, ja toisaalta HZ-vyöhykkeeksi, mikäli mallinnettu vaikutusalue ei geometrialtaan täysin vastaa geologista vastinetta. Malleja ja vyöhykkeiden nimiä päivitetään jatkuvasti uusimman tiedon mukaiseksi, ja tässä työssä on käytetty kirjoittamishetkellä uusinta 19.8.2025 päivitettyä rakennemallia (Laakso 2025).

Alueen hydraulisen tasapainon ja ONKALO-loppusijoitustilan vedenkertymisen kannalta keskeisimpiä rakenteita ovat vyöhykkeet OL-HZ19 ja OL-HZ20 (Vaittinen et al. 2020). OL-HZ19-vyöhykejärjestelmä (osat A, B ja C) on tunnistettu yhdeksi Olkiluodon merkittävimmistä hydraulisista rakenteista. Sille on ominaista paikoin erittäin korkea transmissiviteetti, mikä tekee siitä kriittisen pohjaveden virtausreitit (Vaittinen et al. 2020). OL-HZ19-vyöhykkeellä on huomattava vaikutus ONKALO:n vesitaseeseen ja sen aiheuttama paineenalenuma on havaittavissa laajalla alueella (Laakso et al. 2025). Vastaavasti OL-HZ20-vyöhyke (osat A ja B) on mallinnettu rakenteena, joka sijoittuu lähelle loppusijoitustiloja. Vyöhyke aiheuttaa jatkuvaa vedentuloa ONKALO:n tiloihin, ja sen hydraulinen kytkettyvyys on todettu vahvaksi kairareikämittauksissa (Aalto et al. 2021) (Kuva 2.).



Kuva 2. Hydrogeologisesti merkittävien rakenteiden OL-HZ19, OL-HZ20, OL-HZ045 ja OL-BFZ100 mallinnettu sijainti suhteessa ONKALO:on.

Suurten vyöhykkeiden lisäksi Olkiluodon mallia tarkentavat paikalliset hydrogeologiset vyöhykkeet, joilla selitetään kallioperän heterogeenisuutta ja kairareikien välisiä painevasteita. HZL-vyöhykkeet, kuten esimerkiksi OL-HZL4 ja OL-HZL10, ovat mittakaavaltaan pienempiä rakenteita, joita hyödynnetään erityisesti numeeristen virtausmallien tarkkuuden parantamiseen. HZL-vyöhykkeillä voi myös olla merkitystä suolaisen pohjaveden liikkumisen ja sekoittumisen ymmärtämisessä paikallisessa mittakaavassa (Aalto et al. 2021).

Olkiluodon hydrogeologian ja erityisesti loppusijoitustunneleiden käytettävyyden kannalta tärkeitä ovat myös tietyt pystysuuntaiset rakenteet, kuten esimerkiksi OL-HZ045 ja OL-BFZ100. Pystysuuntaiset, vettä johtavat rakenteet toimivat usein ensisijaisena reittinä pohjaveden virtaukselle syvemmissä kallioperän osissa ja niillä on myös suuri merkitys erityyppisten pohjavesien sekoittumisen mahdollistavina reitteinä (Vaitinen et al. 2020). OL-HZ045 ja OL-BFZ100 ovat hydrogeologisesti aktiivisia vyöhykkeitä, jotka ovat merkittäviä niiden leikatessa useita jo louhittuja tai suunnitteilla olevia loppusijoitustunneleita. Nämä pystysuuntaiset rakenteet kytkeytyvät HZ-verkostoon

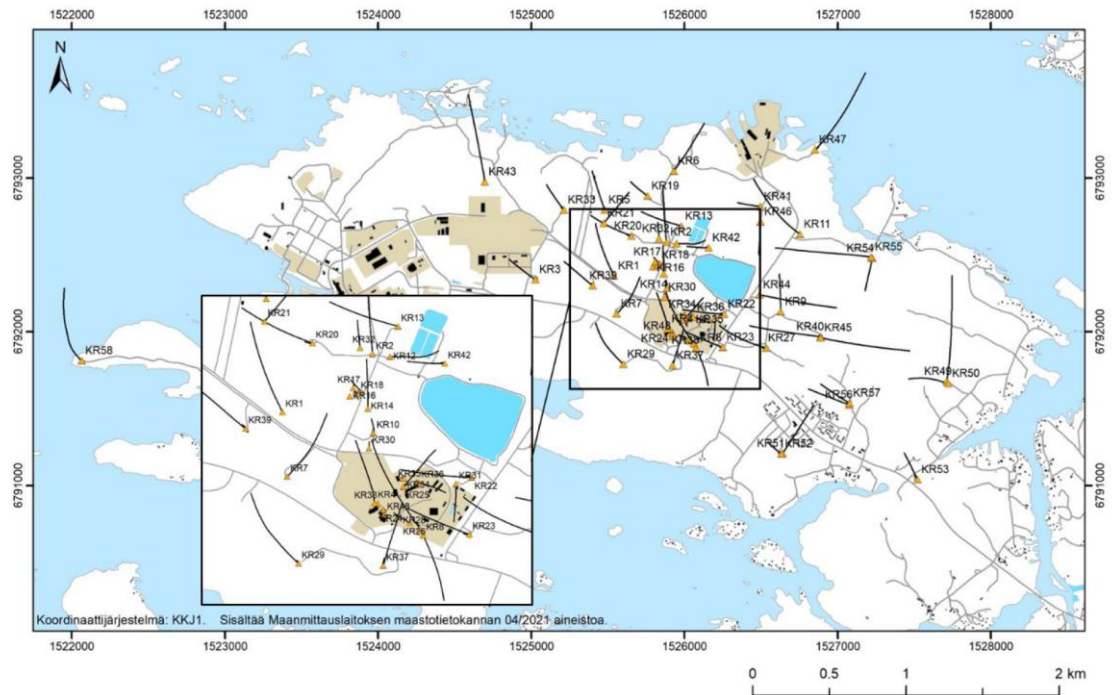
muodostaen monimutkaisen hydraulisen järjestelmän, joka määrittää pohjaveden virtaussuunnat ja mahdolliset kulkeutumisreitit (Aalto et al. 2021; Laakso et al. 2024).

2.3. Kairareivät ja monitorointilaitteisto

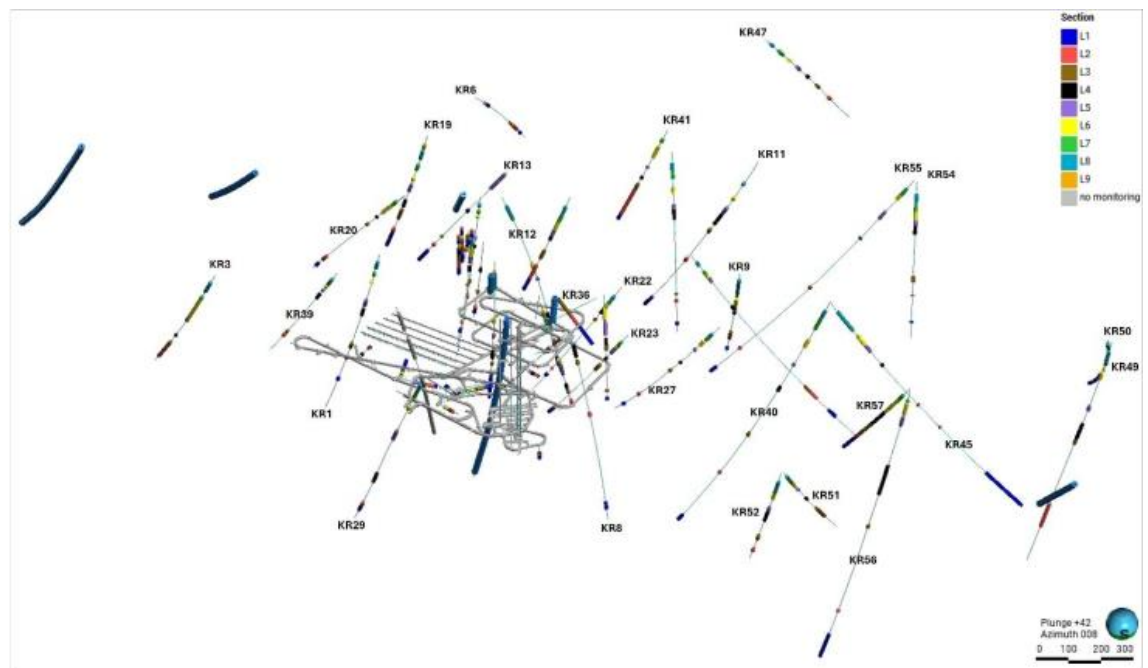
Olkiluodon kallio- ja maaperän pohjaveden painekorkeutta seurataan kattavalla havaintopisteiden verkostolla. Verkosto koostuu kahdesta päätyypistä: maanpinnalta poratuista syvistä kairanrei'istä (etuliite OL-KR) sekä maanalaisista ONKALO-tutkimuslaitoksesta poratuista tutkimusrei'istä (ONK-KR), pilottirei'istä (ONK-CTPH, -DTPH, -PH) ja pohjavesiasemista (ONK-PVA). Paine korkeuden syvyyskohtaisen vaihtelun mittaamiseksi suurin osa rei'istä on eristetty eri syvyyksillä tulppaväleihin monitulppalaitteistoilla (Laakso et al. 2025).

2.3.1. Syvät kairareivät

Suurin osa automaattiseurannassa olevista kairare'i'istä on maanpinnalta porattuja syväkairareikiä. Nämä reiät ulottuvat tyypillisesti useita satoja metrejä syvälle kallioperään, ja ne on sijoitettu kattamaan loppusijoitusalueen hydrogeologiset olosuhteet (Pere et al. 2021). Syväkairareikien avulla voidaan seurata pohjaveden painekorkeusolosuhteita kallioperässä eri syvyyksillä ja eri puolilla Olkiluodon saarta, mikä on välttämätöntä alueen hydrogeologisen kokonaiskuvan muodostamiseksi (Pere et al. 2021). Tämän työn tekohetkellä seurannassa on 45 monitulppalaitteistolla varustettua syväkairareikää (Liite 1, Taulukko 2) (Kuvat 3 ja 4).



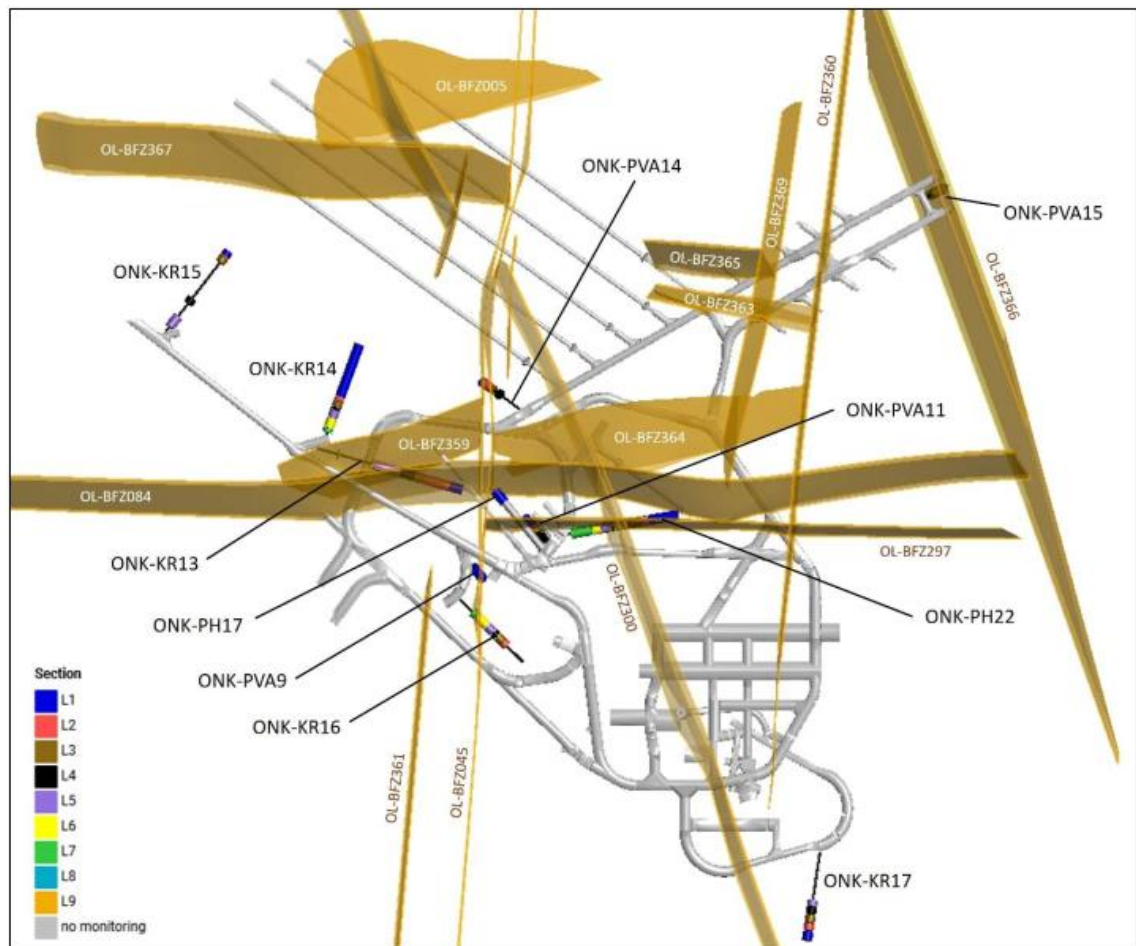
Kuva 3. Syväkairareikien sijainti Olkiluodon saarella (Pere et al. 2021).



Kuva 4. Syvien kairareikien mallinnettu sijainti ja ulottuvuus suhteessa ONKALO:on (Laakso et al. 2025).

2.3.2. ONKALO-tutkimusreiät

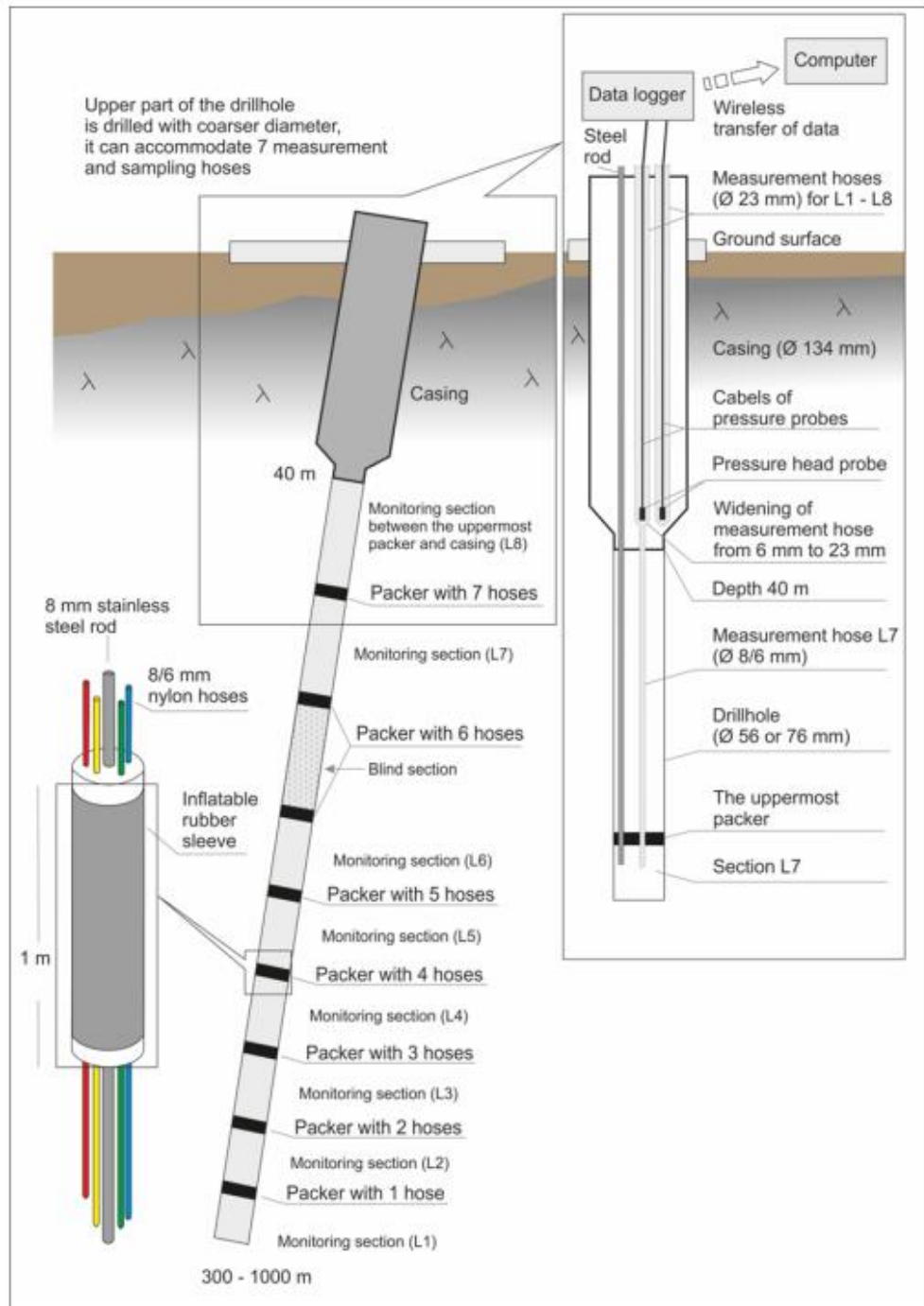
Automaattiseurannassa on myös ONKALO:sta käsin porattuja, horisontaalisia tutkimusreikiä. Näitä tutkimusreikiä on tämän työn tekohetkellä seurannassa 12 kappaletta (Liite 1, Taulukko 3) (Kuva 5), ja niiden määrä vaihtelee ONKALO:n rakentamisen edetessä. Kaikista loppusijoitustunneleista ja keskustunneleista porataan ensin pilottireiät, jotka usein varustetaan monitulppalaitteistolla ja liitetään seurantaverkkoon, kunnes varsinainen louhinta aloitetaan. Tämä mahdollistaa paineolosuhteiden monitoroinnin ennen tunnelin louhintaa, mikä osaltaan tarkentaa hydrogeologisia malleja ja auttaa tunnelin rakentamisen suunnittelussa.



Kuva 5. ONKALO-kairanreikien sijainti suhteessa ONKALO:on ja hydrogeologisesti merkittäviin hauraisiin rikkonaisuusvyöhykkeisiin (Laakso et al. 2025).

2.3.3. Monitorointilaitteisto

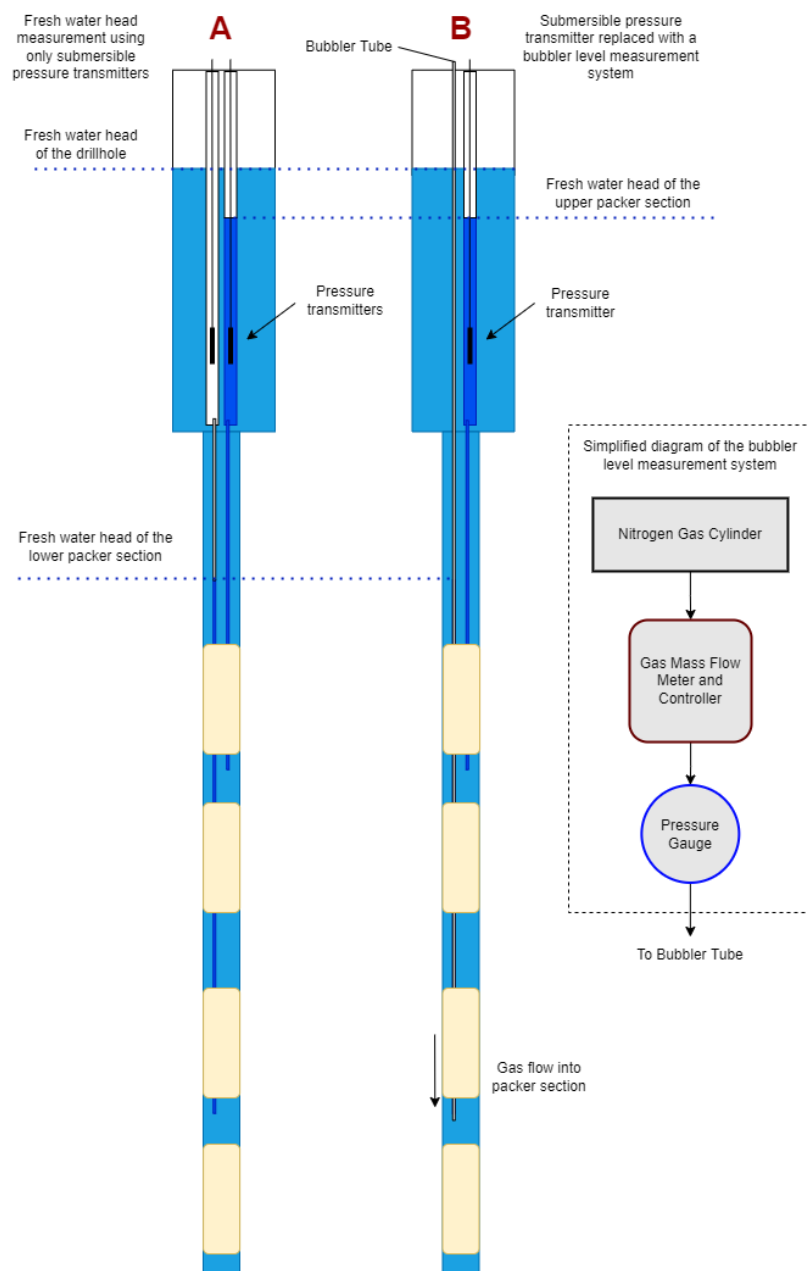
Kallioperän hydraulisen korkeuden tarkkailuun Olkiluodossa hyödynnetään Posivan ja Lapela Oy:n yhteistyössä kehittämää monitulppalaitteistoa (engl. Groundwater Monitoring System, lyh. GWMS) (Klockars & Ahokas 2007) (Kuva 6). Järjestelmän avulla kairanreikä voidaan jakaa useisiin, hydraulisesti toisistaan eristettyihin mittausosioihin, eli tulppaväleihin. Tämä eristäminen toteutetaan kumipäällysteisillä tulpilla, jotka laajenevat ja tiivistyvät kairanreikää vasten, kun ne täytetään vedellä yhteisen paineletkun kautta. Tämä estää veden pystysuuntaisen virtauksen kairanreikää pitkin eri paineisten kallioperän vyöhykkeiden välillä (Laakso et al. 2023). Jokaisesta eristetystä osiosta johtaa oma mittausletku maanpinnalle, mikä mahdollistaa paineen ja sitä kautta hydraulisen painekorkeuden mittaamisen jopa yhdeksästä eri syvyydestä samanaikaisesti (Klockars & Ahokas 2007). Syvissä kairanrei'issä on vuodesta 2000 lähtien käytetty automaattista järjestelmää, jossa mittausletkuihin asennetut paineanturit on yhdistetty internet-yhteydellä varustettuun tiedonkeruuyksikköön (engl. logger), josta painekorkeusdata siirtyy Posivan tutkimustietokanta POTTI:in kerran päivässä (Klockars & Ahokas 2007).



Kuva 6. Monitulppalaitteiston kuvaus (Klockars & Ahokas 2007).

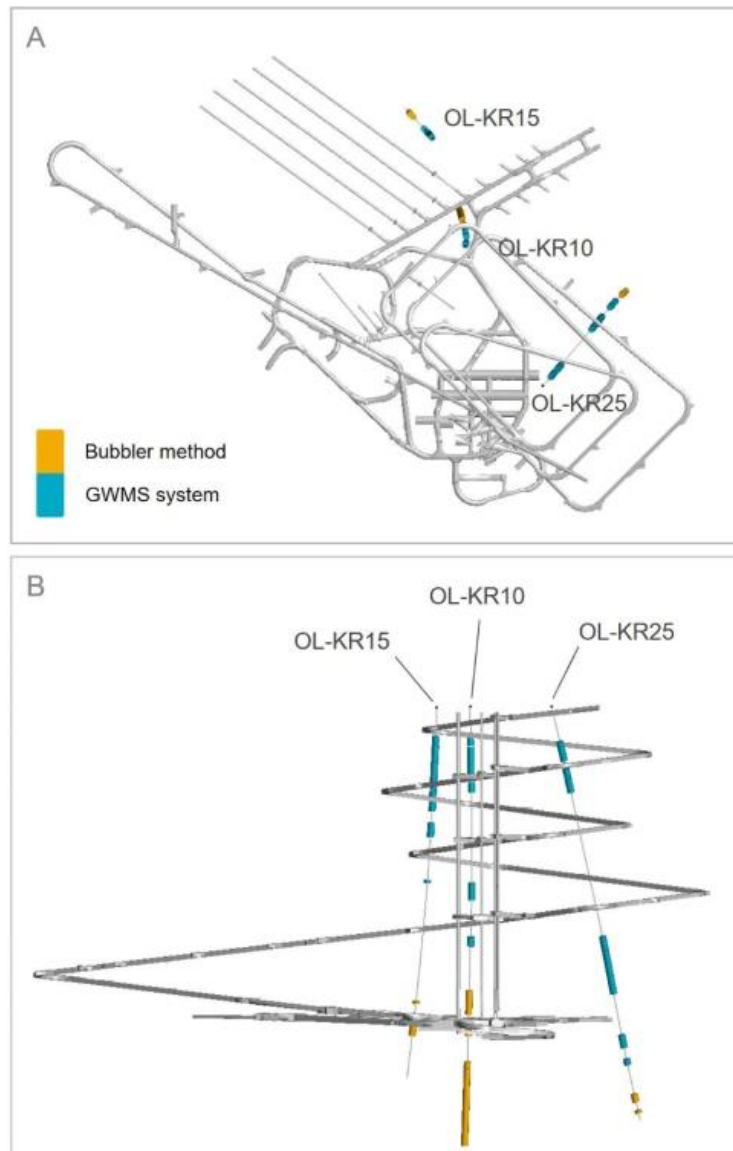
Kuplutinmenetelmää (engl. Bubbler-method) (Kuva 7) on käytetty hydraulisen painekorkeuden mittaamiseen vuodesta 2021 alkaen tilanteissa, joissa monitulppalaitteistolla eristetyn tulppavälin painekorkeus on niin matala, että vesipatsas mittauspätkässä laskee kairareiän, tyypillisesti noin 40 m pitkän, avarretun alkuosan alapuolelle, jossa paineanturit sijaitsevat (Laakso et al. 2025). Menetelmän periaatteena

on syöttää mittausputkeen hitaasti ja tasaisesti typpikaasua. Tämä hidas kaasuvirtaus varmistaa, että mittausputki täyttyy kaasulla aiheuttamatta merkittävää paineen nousua tulppavälissä (Jänkäväära 2024). Kun mittausputki on täynnä kaasua, mittausosion absoluuttinen paine voidaan laskea tarkasti maanpinnalla mitatun kaasunpaineen ja mittausputken pään syvyyden perusteella (Jänkäväära 2024). Tämä menetelmä mahdollistaa luotettavan paineseurannan myös erittäin alhaisissa painekorkeusolosuhteissa, joita voi esiintyä esimerkiksi ONKALO:n rakentamisen lähialueelle aiheuttaman hydraulisen painegradientin laskun seurauksena (Laakso et al. 2025).



Kuva 7. Kuplulinlaitteiston kuvaus (Jänkäväära 2024).

Kuplutiinmittaukset suoritetaan kampanjaluontoisesti tarpeen mukaan, eikä menetelmä ole osa jatkuvaa, automaattista seuranta. Menetelmän avulla varmistetaan, että seurantatietoa saadaan kerättyä luotettavasti myös haastavissa olosuhteissa, joissa primäärinen mittausjärjestelmä ei toimi (Laakso et al. 2023). Vuoden 2025 lopussa kuplutiinmittauslaitteisto on asennettuna kairareikiin OL-KR10 (tulppavälit L1-L4), OL-KR15 (tulppavälit L1, L2) ja OL-KR25 (tulppavälit L1, L2) (Laakso et al. 2025) (Kuva 8).



Kuva 8. Kuplutiinmittausvälien sijainti suhteessa ONKALO:on. Kuplutiinmenetelmällä mitattavat tulppavälit kuvassa värjättyinä keltaiseksi (Laakso et al. 2025).

2.4. Ongelman esittely sekä tavoitteet

Painekorkeuden raakadata kaikilta seurattavilta havaintopisteiltä, eli measurement-data, muunnetaan prosessoiduksi dataksi (processed data) kerran vuodessa. Tässä prosessissa Microsoft Excel-makron avulla poistetaan datasta suurimmat virhepiikit automaattisesti ja muunnetaan painekorkeusdatan yksikkö meters above sealevel (m.a.s.l) -muotoon. Automaattisen käsittelyn lisäksi data visualisoidaan ja tarkastetaan manuaalisesti, virhepiikkien varalta ennen sen hyväksymistä ja siirtoa Posivan tutkimustietokanta POTTI:in.

Hydraulisen painekorkeus-raakadatan, eli measurement-datan (z- korkeus) muunto m.a.s.l-muotoiseksi processed-dataksi tehdään seuraavalla kaavalla:

$$\text{Painekorkeus PROC} = (z - (L \times \sin(\beta))) + \text{Painekorkeus MEAS}$$

Jossa z on reiän z -koordinaatti, L on paineanturin upotussyvyys ja β on reiän kaltevuuskulma.

Nykyisin käytössä olevan raakadatan muuntoprosessin ongelmakohdiksi on tunnistettu vanhan Excel-makron rajoitteet virhepiikkien poiston osalta; se tunnistaa luotettavasti vain todella suuresti normaalista tasosta poikkeavat tulokset ja esimerkiksi tasomaiset virhetulokset jäävät tunnistamatta. Datan manuaalinen tarkastus makron ajamisen jälkeen on paljon aikaa vievää, sillä dataan jää aina paljon virheellisiä tuloksia manuaalisesti siivottavaksi. Datan suuren määrän (yli 300 tulppaväliä eli erillistä aikasarjaa) vuoksi tämä manuaalinen siivous on erityisen aikaa vievää. Lisäksi manuaaliseen tarkastukseen eli datan visualisointiin ja virheellisten tulosten merkintään pois käytöstä (tilatiedoksi in use = 0) ei ole yhtä työkalua, vaan data on visualisoitu Power Bi-raportin avulla selaimessa ja samanaikaisesti on etsitty POTTI:n käyttöliittymästä havaittua virhepiikkiä vastaava rivi ja merkattu se pois käytöstä.

Tämän työn osana tuotettavan ohjelman tarkoituksena on ensinnäkin virtaviivaistaa ja tehostaa aiemmin kuvailtua raakadatan siivousprosessia virhepiikeistä. Lisäksi

tavoitteena on jatkossa korvata vanhan Excel-makron käyttö tämän ohjelman avulla eli datan siivouksen lisäksi tehdä aineistolle muunto prosessoiduksi dataksi. Tämä on tarkoitus toteuttaa yhdistämällä kaikki tarvittavat asiat yhteen ohjelmaan, eli datan visualisointi, automaattinen virhepiikkien tunnistus, muunto m.a.s.l -muotoon ja käyttäjäystävällinen merkintä käytöstä poistettavaksi tai käyttöön. On myös tarkoitus tutkia ohjelman kykyä tunnistaa erilaisia ihmistoiminnasta tai luonnollisista ilmiöistä aiheutuvia painekorkeuden muutoksia eli painevasteita ja toimia asiantuntijan apuna näiden tunnistamisessa.

3. Aineisto ja menetelmät

Tässä luvussa esitellään tutkimuksessa käytetty aineisto sekä tekniset menetelmät ja työkalut, joiden pohjalta painekorkeusdatan siivoustyökalu SIHTI (akronyymi sanoista systemaattinen in-situ häiriöiden tunnistusinstrumentti) on kehitetty. Aluksi tarkastellaan Olkiluodon monitorointiverkoston painekorkeusdataa ja sen ominaisuuksia tutkimusaineistona. Tämän jälkeen kuvataan datan hallintaan käytetty tietokantaympäristö sekä ohjelmistokehityksessä hyödynnetty ohjelmointikieli ja käytetyt kirjastot, jotka mahdollistavat poikkeamien tunnistamisen ja visualisoinnin.

3.1. Painekorkeusdata ja tutkimusaineisto

Olkiluodon hydraulinen painekorkeusdata kerätään maanpinnalta kairatuista syvistä kairarei'istä (lyh. OL-KR) sekä maanalaisista ONKALO-tutkimustilan havaintorei'istä (lyh. ONK-KR, -PVA, -PH, -CTPH). Havaintoverkosto koostuu 45 monitulppalaitteistolla varustetusta OL-KR-reiästä ja 12 ONK-reiästä. Kairareiät on jaettu monitulppalaitteistoilla 1–10 eristettyyn tulppaväliin (Laakso et al. 2025).

Painekorkeuden automaattinen monitorointi (lyh. GWMS) tuottaa havaintoja tunnin välein syväkairarei'istä ja 15 minuutin välein ONK-rei'istä. Tässä tutkimuksessa käytetty keskeinen muuttuja on hydraulinen painekorkeus (Aalto et al. 2021). Automaattisesti kerätty data siirtyy mittausloggereilta mittauspalvelimelle, josta se tallennetaan Posivan tutkimustietokantaan (Aalto et al. 2021; Laakso et al. 2023). Hydraulisen painekorkeuden monitorointi tulpatuista rei'istä alkoi vuonna 1991, ja automaattisen monitoroinnin tuottamaa dataa on vanhimmista syväkairarei'istä saatavilla 2000-luvun alkupuolelta alkaen (Laakso et al. 2025).

Tässä tutkimuksessa käytettiin POTTI-tietokannasta ladattuja CSV-tiedostoja, jotka sisältävät kullekin tulppavälille uniikin aktiviteettinumeron, aikaleiman, kairareiän tunnuksen, tulppavälin tunnuksen, painekorkeustiedon ja käyttötilatiedon.

Käyttötilatiedon arvo kertoo, onko kyseinen mittaushavainto hyväksytty käyttöön (arvo 1) vai merkitty poikkeamaksi (arvo 0). Kehitetty ohjelma tunnistaa kairareiän ja tulppavälin tunnisteiden perusteella käsiteltävät datarivit visualisointia varten. Kun käyttäjä merkitsee datapisteitä poikkeamiksi, ohjelma muokkaa niiden käyttötilatiedon arvoksi 0 ja tallentaa muokatun datan uuteen CSV-tiedostoon. SIHTI-ohjelman kehityksessä testi- tai opetusdatana käytettiin pääasiassa 2020-luvun aineistoa, kairareiän mukaan useimmiten noin 2–4 vuoden aikasarjaa, sillä tulppakalustojen tai reiän yleisen painekorkeustason muutokset vaikuttavat eri aikakausien data-aineistojen vertailtavuuteen.

3.2. Tietokanta ja visualisointityökalu

Posivalla tutkimusaineistot tallennetaan Posivan tutkimustietokantaan. Sinne tallennetaan esimerkiksi GWMS-anturidata, eli hydraulinen painekorkeusdata, kolmessa eri muodossa. Ensimmäisenä on raakadata, jonka loggeri lähettää ja tallentaa automaattisesti POTTI:in measurement-datana.

Seuraavassa vaiheessa measurement-data muunnetaan processed-dataksi siivoamalla siitä mahdolliset virhetulokset pois (tila in use = 0) ja tekemällä muunto m.a.s.l-muotoon. Tämä data tallennetaan uutena tietueena eli aktiviteettina POTTI:in joten saman datan raakaversio jää edelleen ennalleen.

Kolmantena vaiheena on processed-datan muunto interpreted-dataksi. Tässä vaiheessa siihen tehdään erinäisiä luonnontilakorjauksia, jotta erilaiset ilmiöt tai ihmistoiminnan vaikutukset painekorkeusdataan saadaan näkyviin parhaalla mahdollisella tavalla. Tämäkin data tallennetaan erillisenä aktiviteettinaan POTTI:in.

POTTI:n lisäksi painekorkeusdatan käyttäjäystävällisempään tarkasteluun ja visualisointiin on kehitetty Microsoft Power Bi-raportti, jonka avulla saadaan huomattavasti helpommin visualisoitua esimerkiksi eri kairareikien dataa, ja sen avulla

tehdäänkin datalle viikoittaiset tarkistukset anturivikojen tai muiden vastaavien häiriöiden havaitsemiseksi. Tämän työkalun avulla myös datan virhepiikkejä on aiemmin paikallistettu ja manuaalisesti POTTI:n kautta merkitty vastaavat rivit tilaan `in use = 0`.

3.3. Ohjelmistot ja kirjastot

Painekorkeusdatan siivoustyökalu SIHTI on toteutettu Python-ohjelmointikielellä (versio 3.12). Kehitysympäristönä on käytetty Visual Studio Codea ja kirjastojen hallinnassa Anaconda-jakelua. Ohjelma on rakennettu yhden pääluokan ympärille, mikä mahdollistaa sovelluksen tilan, datankäsittelyprosessien ja käyttöliittymän keskitetyn hallinnan.

Datan käsittely ja muokkaus perustuvat pandas-kirjastoon, jota käytetään CSV-tiedostojen lataamiseen, aikaleimojen jäsentämiseen sekä datan tehokkaaseen suodattamiseen DataFrame-tietorakenteissa. Numeerisiin operaatioihin, kuten liukuvien mediaanien ja poikkeamien kynnysarvojen laskentaan, käytetään numpy-kirjastoa.

Koneoppimismenetelmän toteutus perustuu scikit-learn-kirjastoon. Ohjelma hyödyntää Isolation Forest -algoritmia poikkeavien havaintojen tunnistamiseen. Ohjelmassa käytetty RobustScaler-luokka normalisoi datan käyttämällä mediaania ja kvartiilivälejä, mikä todettiin välttämättömäksi tutkimusaineistolle, joka sisältää huomattavia virhepiikkejä ja muita poikkeamia.

Käyttöliittymä on toteutettu Pythonin sisäänrakennetulla tkinter-kirjastolla, joka tarjoaa interaktiiviset komponentit, kuten painikkeet, pudotusvalikot (ttk) ja lokitulosteet (scrolledtext). Datan visualisoinnissa hyödynnetään matplotlib-kirjastoa, joka on integroitu suoraan tkinter-ikkunaan FigureCanvasTkAgg-rajapinnan kautta. Tämä mahdollistaa kuvaajien dynaamisen päivittämisen sekä työkalut, kuten RectangleSelector, jolla käyttäjä voi manuaalisesti valita ja merkitä data-alueita. Ohjelman suorituskyvyn varmistamiseksi analyysiprosessit on erotettu käyttöliittymästä

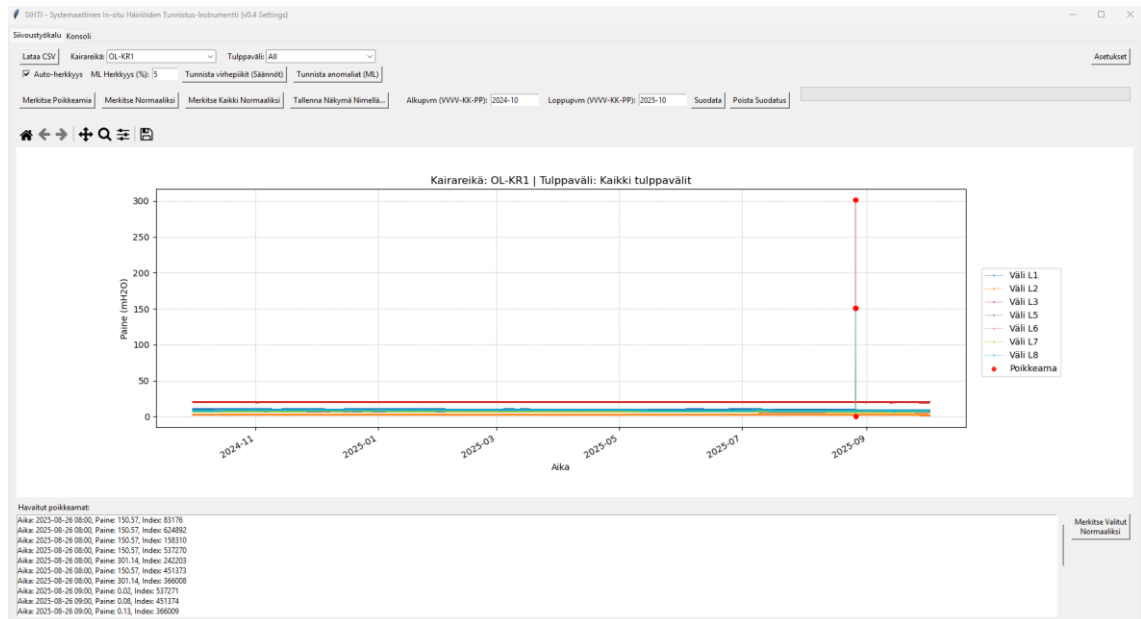
omiksi säikeikseen (threading), ja viestintä niiden välillä hoidetaan jonorakenteiden (queue) avulla.

4. Tulokset ja tulosten tulkinta

Tässä luvussa esitellään työn keskeiset tulokset, jotka painottuvat kehitetyn SIHTI-siivoustyökalun tekniseen toteutukseen ja sen suoriutumiseen poikkeamien tunnistuksessa. Luvun alussa kuvataan ohjelmiston rakenteelliset ratkaisut sekä käyttöliittymän toiminnallisuudet, jotka on suunniteltu tukemaan asiantuntijan tekemää laadunvarmistusta. Tämän jälkeen tarkastellaan työkalun kykyä havaita erilaisia painekorkeusdatassa esiintyviä häiriötyyppejä ja arvioidaan anomaliatunnistusmenetelmien tarkkuutta. Lopuksi tuloksia tulkitaan suhteessa työlle asetettuihin tavoitteisiin ja pohditaan kehitetyn menetelmän tarjoamia hyötyjä monitorointiprosessin tehostamisessa.

4.1. Ohjelmiston toteutus ja työnkulku

Tämän työn tuloksena kehitetty SIHTI-siivoustyökalu toteutettiin modulaarisena Python-sovelluksena. Ohjelmiston ensisijaisena tavoitteena oli luoda puoliautomaattinen työvaihe, joka tehostaa asiantuntijan tekemää laadunvarmistusta poistamatta kuitenkaan ihmisen tekemää lopullista päätöksentekoa. Toteutuksessa hyödynnettiin luvussa 3.3 esiteltyjä kirjastoja tavalla, joka mahdollistaa datan käsittelyn ja visuaalisen analyysin samassa käyttöliittymässä (Kuva 9).



Kuva 9. SIHTI-ohjelman käyttöliittymä.

Ohjelman tärkeimpänä ominaisuutena on kaksi erillistä automaattista analyysimenetelmää, jotka on suunniteltu käsittelemään jokaista kairareian tulppaväliä omana itsenäisenä aikasarjanaan. Tämä on tärkeää, sillä hydrauliset olosuhteet ja antureiden ominaiskäyttäytyminen vaihtelevat merkittävästi eri osioiden välillä. Analyysilogiikka noudattaa hybridimallia, jossa on sekä karkea, sääntöperustainen massiivisten virhepiikkien poisto, joka minimoi virheelliset positiiviset tulokset ja tarkempi, koneoppimiseen perustuva Isolation Forest -algoritmipohjainen analyysimenetelmä.

Analyysiprosessi voidaan jakaa kolmeen päävaiheeseen: 1. Datan esikäsittely ja adaptiivinen parametrisointi, 2. Hybriditunnistus ja 3. Interaktiivinen validointi. Vaiheessa 1 ladatusta aineistosta muodostetaan piirrekirjasto, joka sisältää muun muassa painekorkeuden paikalliset piikit, poikkeamat 30 vuorokauden liukuvasta trendistä sekä paikallisen kohinatason. Ennen varsinaista analyysia ohjelma arvioi kunkin tulppavälin kohinaprofiilin perusteella optimaalisen herkkyytason anomaliatunnistukselle. Tämä minimoi väärin positiivisten havaintojen määrän stabiilissa datassa säilyttäen samalla herkkyyden sotkuisemmissa, eli enemmän mittalaitteistosta johtuvia tai ihmisen aiheuttamia häiriöitä sisältävissä aikasarjoissa.

Vaiheessa 2 ohjelma suorittaa anomaliatunnistuksen yhdistämällä tilastollisia raja-arvoja ja koneoppimista. Logiikka on rakennettu tunnistamaan tyypillisiä häiriötyyppejä, kuten äkillisiä tasohyppyjä, anturin kuivumista tai epänormaalia kohinan kasvua. Käyttämällä RobustScaler-skaalausta ohjelma kykenee säilyttämään analyysikyvyn myös silloin, kun aineisto sisältää huomattavia virhepiikkejä, jotka muuten vääristäisivät tilastollisia tunnuslukuja.

Vaiheessa 3 automaattisen analyysin tulokset visualisoidaan käyttäjälle interaktiivisena kuvaajana, jossa havaitut poikkeamat on korostettu. Käyttöliittymä on suunniteltu niin, että asiantuntija voi tarkastella ehdotettuja virhepisteitä, hyödyntää visuaalisia työkaluja (kuten zoomausta ja aluevalintoja) ja tehdä lopulliset korjaukset manuaalisesti.

Lopullisena tuloksena ohjelma tuottaa siivotun aineiston, jossa poikkeamiksi vahvistettujen rivien tila on muutettu muotoon $in\ use = 0$. Ohjelma säilyttää alkuperäisen datan rakenteen ja sarakkeet, mikä varmistaa sen, että prosessoitu tiedosto on suoraan yhteensopiva Posivan tutkimustietokannan kanssa.

4.1.1. Poikkeamien tunnistusmenetelmän valinta

Työkalun kehityksessä arvioitiin useita aikasarjapoikkeamien tunnistusmenetelmiä. Yksi harkituista malleista oli LSTM (Long Short-Term Memory) Autoencoder. Sen vahvuutena on korkea tunnistustarkkuus, kun malli koulutetaan riittävällä ja hyvälaatuisella opetusdatalla. Menetelmän heikkouksiksi havaittiin kuitenkin sen hitaus sekä koulutus- että analysointiprosessissa. Lisäksi menetelmä on riippuvainen pitkistä, yhtenäisistä aikasarjoista, joissa ei tapahdu merkittäviä tasonmuutoksia. Käytännössä tämä tarkoittaa, ettei kairareiän vallitsevia olosuhteita vastaavaa opetusdataa ole enää saatavilla, mikäli tulppauskonfiguraatiota muutetaan tai reiän painekorkeustaso muuttuu merkittävästi muista syistä.

Toisena vaihtoehtona arvioitiin sääntöpohjaista tunnistusta, joka perustuu yksinkertaisiin kynnyksarvoihin ja datan gradientin eli muutosnopeuden tarkasteluun. Menetelmä on nopea ja läpinäkyvä, mutta sen tarkkuus on rajallinen monimutkaisempien poikkeamien tunnistamisessa.

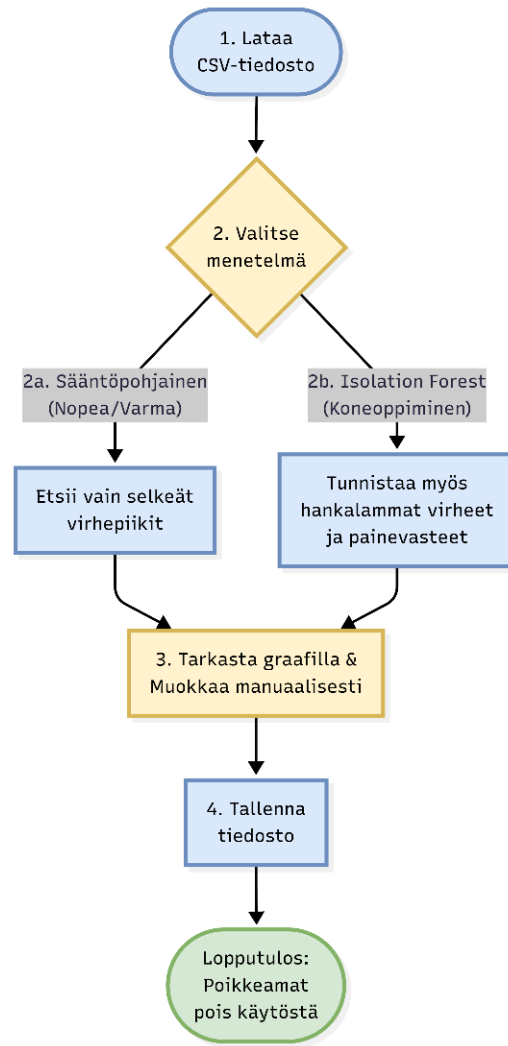
Kolmantena vaihtoehtona tarkasteltiin Isolation Forest -mallia, joka on koneoppimiseen perustuva poikkeamien tunnistusmenetelmä. Malli osoittautui nopeaksi ja käyttäjäystävälliseksi, ja sen tarkkuus on hyvä erityisesti yhdistettynä sääntöpohjaiseen suodatukseen.

Lopulliseksi ratkaisuksi valittiin kaksivaiheinen hybridimalli, joka yhdistää sääntöpohjaisen logiikan ja Isolation Forest -mallin. Ensimmäinen vaihe on konservatiivinen ja tunnistaa vain suuret, selvät virhepiikit käyttäen tiukkoja kynnyksarvoja. Tämä vaihe minimoi värien positiivisten määrän, mikä mahdollistaa automaattisen datan esikäsittelyn ilman jatkuvaa manuaalista tarkistusta.

Toinen vaihe on herkempi ja yhdistää sääntöpohjaisen suodatuksen ja Isolation Forest -mallin. Tämä vaihe tunnistaa sekä suuria mittausvirheitä että pienempiä poikkeamia, mutta saattaa herkkyyasetuksista riippuen tuottaa myös jonkin verran vääriä positiivisia tuloksia. Lisäksi menetelmä voi merkitä todellisia pohjaveden paineen muutoksia poikkeamiksi, mikäli ne eroavat merkittävästi aikaisemmasta trendistä. Tämän vuoksi tunnistusmenetelmän tuottamat poikkeamahavainnot vaativat aina käyttäjän validoinnin ennen niiden hyväksymistä tai hylkäämistä.

4.2. Ohjelman toiminta

Kehitetty ohjelma on graafisella käyttöliittymällä varustettu laadunvarmistustyökalu, joka on suunniteltu pohjaveden paineaineistojen systemaattiseen tarkasteluun. Ohjelmisto mahdollistaa suurten aikasarja-aineistojen tehokkaan visualisoinnin, automaattisen virheentunnistuksen sekä asiantuntijan validoinnin (Kuva 10).



Kuva 10. Hydrogeologisen aikasarjadatan siivouksen prosessikaavio SIHTI-ohjelmalla.

Analyysi alkaa CSV-muotoisen raakadatan lukemisella (Kuva 10 vaihe 1). Ohjelmisto tunnistaa automaattisesti aineiston metatiedot, kuten kairareian tunnisteiden (HOLE_ID) ja tulppavälit (Test Section). Aikasarjat piirretään interaktiiviselle graafille, joka mahdollistaa datan tarkastelun eri mittakaavoissa (zoomaus ja panorointi). Tämä visualisointivaihe on tärkeä, jotta käyttäjä voi hahmottaa datan yleisen laadun ja mahdolliset katkokset ennen varsinaista virheentunnistusta. Ohjelma lataa automaattisesti kairareian tunnisteiden perusteella (ONK- vs. OL-alkuiset tunnisteet) kohdekohtaisen asetusprofiilin, joka määrittää analyysissä käytettävät herkkyysparametrit.

Seuraavassa vaiheessa (2.) käyttäjällä on mahdollisuus suorittaa aineistolle joko karkea, sääntöpohjainen virheentunnistus (2a), tai Isolation forest- koneoppimismenetelmään

perustuva herkempi poikkeamantunnistus (2b), jonka tekninen toteutus esitellään tarkemmin kappaleessa 4.2.1.

Vaiheen 2a sääntöpohjainen virheentunnistusmenetelmä on suunniteltu havaitsemaan yksittäiset, suuret virhepiikit ja fyysikaalisesti mahdottomat arvot ilman raskasta laskentaa. Sääntöpohjainen algoritmi perustuu tilastolliseen suodatukseen. Menetelmä laskee ensin aikasarjan trendin käyttämällä havaintojen liukuvaa mediaania. Tämän jälkeen lasketaan jäännösvirheen (havainto - trendi) mediaanin itseisarvon poikkeama (lyh. MAD, engl. Median Absolute Deviation), joka kuvaa sarjan normaalia kohinatasoa. Poikkeamakynnys T määritellään dynaamisesti kaavalla:

$$T = \max(5,0, 15 \times \text{MAD})$$

Tämä tarkoittaa, että poikkeaman on oltava joko vähintään 5,0 mittayksikköä (mH₂O) tai 15 kertaa normaalia kohinaa suurempi tullakseen merkityksi poikkeavaksi. Lisäksi algoritmi liputtaa automaattisesti kaikki nolla- tai negatiiviset painearvot ($P \leq 0$) sekä globaalit poikkeamat, jotka eroavat yli 50 yksikköä mediaanitasosta. Menetelmä on tehokas suurten yksittäisten virheiden poistoon, mutta se ei kykene tunnistamaan hienovaraisia, trendin mukana liikkuvia virheitä samalla tarkkuudella kuin koneoppimista hyödyntävä tunnistusmenetelmä. Lisäksi tämä sääntöpohjainen menetelmä on suunniteltu käytettäväksi vain OL-KR -datan kanssa.

Vaiheessa 3, riippumatta valitusta menetelmästä (sääntöpohjainen tai koneoppiminen), havaitut poikkeamat visualisoidaan aikasarjagraafille punaisina pisteinä. Käyttäjiliittymä noudattaa *Human-in-the-loop*-periaatetta: asiantuntija voi tarkistaa algoritmin ehdotukset ja tarvittaessa muokata tuloksia manuaalisesti. Käyttäjä voi graafisilla valintatyökaluilla hyväksyä ehdotetut poikkeamat, poistaa virheellisiä merkintöjä tai lisätä uusia poikkeamia, jotka algoritmi on saattanut ohittaa.

Lopuksi vaiheessa 4, hyväksytyt lopputulos tallennetaan uuteen CSV-tiedostoon. Ohjelmisto ei tuhoa alkuperäistä dataa poistamalla rivejä, vaan muuttaa poikkeavaksi todettujen havaintojen tilatiedon. Tiedostossa oleva IN_USE-sarake saa arvon 0

merkityissä kohdissa, jolloin tieto säilyy jäljitettävänä, mutta se voidaan helposti suodattaa pois esimerkiksi visualisoinneissa.

4.2.1. Koneoppimismenetelmän toiminta

Herkempi menetelmä häiriöiden tunnistamiseksi pohjaveden paineaineistosta perustuu ohjaamattomaan koneoppimiseen (engl. Unsupervised Machine Learning), jossa yhdistetään Isolation Forest -algoritmi ja sääntöpohjainen jälkikäsitteily. Tunnistusprosessin kriittisin vaihe on piirteiden irrotus (engl. Feature Engineering), sillä absoluuttisella painearvolla ei ole merkitystä ilman ajallista kontekstia, johtuen pohjaveden painekorkeuden luontaisesta hydrologisesta vaihtelusta.

Jokaiselle analysoitavalle tulppavälille lasketaan joukko tilastollisia tunnuslukuja, jotka kuvaavat sen poikkeavuutta eri aikaväleillä. Näitä vertailuarvoja ovat 4 tunnin liukuva mediaani ja keskihajonta, jotka kuvaavat hetkellistä paikallista vaihtelua ja kohinaa, sekä 30 vuorokauden liukuva mediaani, joka mallintaa pitkän aikavälin kausivaihtelua. Lisäksi lasketaan koko mittaushistorian mediaani globaalin perustason määrittämiseksi.

Varsinaiselle Isolation Forest -mallille syötetään neljän johdetun piirteen matriisi. Ensimmäinen ja usein painavin piirre on dynaaminen Z-score, joka mittaa datapisteen poikkeamaa suhteessa sen paikalliseen volatilitettiin:

$$Z = \frac{P_t - \text{Mediaani}_{4h}}{\text{Keskihajonta}_{4h}}$$

Kaavoissa P_t kuvaa paineen (ONKALO-reiät, yksikkö kPa) tai painekorkeuden (OL-KR, yksikkö mH₂O) raakamittausarvoa tarkasteltavana olevalla ajanhetkellä t , ja vastaavasti P_{t-1} kuvaa edellistä mittausarvoa. Tämä suhteellinen mittari tekee algoritmista dynaamisen, mahdollistaen korkeamman herkkyuden stabiilissa datassa ja sallivuuden kohinaisessa datassa. Toinen piirre on Delta, eli muutosnopeus, joka lasketaan seuraavasti:

$$\Delta P = P_t - P_{t-1}$$

Delta ilmaisee paineen muutoksen edelliseen havaintoon verrattuna. Suuret Delta-arvot viittaavat fyysiikan vastaisiin ilmiöihin, kuten äkillisiin sähköpiikkeihin tai anturin irtoamisiin. Kolmas muuttuja on Trendipoikkeama:

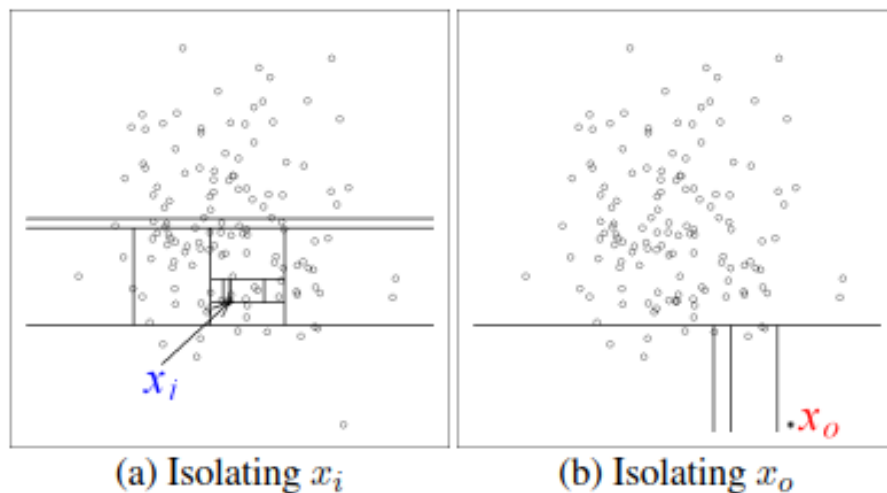
$$\Delta_{trendi} = P_t - \text{Mediaani}_{30d}$$

Tämä kuvaa erotusta 30 vuorokauden mediaaniin, joka mahdollistaa sellaisten tasomuutosten tunnistamisen, jotka eivät välttämättä näy suurena Deltana, mutta jotka eroavat selvästi alueen kausivaihtelusta. Neljäs piirre on Globaali poikkeama:

$$\Delta_{globaali} = P_t - \text{Mediaani}_{historia}$$

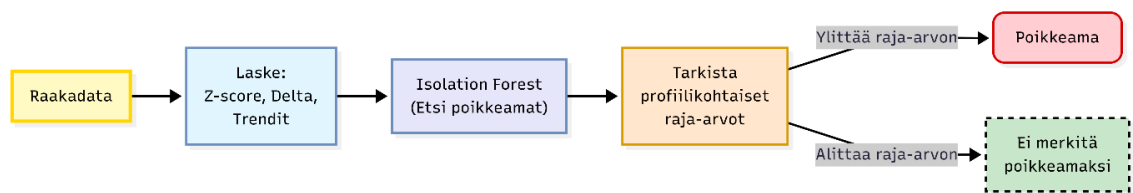
Globaali poikkeama vertaa pistettä koko historian mediaaniin ja auttaa erottamaan suuret poikkeamat, kuten laitevirheistä johtuvat virhetulokset.

Isolation Forest -malli käsittelee nämä neljä piirrettä ja pyrkii eristämään tilastollisesti poikkeavat datapisteet rakentamalla satunnaisia päätöspuita. Algoritmin poikkeamatunnistuksen ydinajatus on, että anomaliat ovat herkempiä eristämiseksi kuin normaalit havainnot, mikä visualisoidaan kuvassa 11 (Liu et al. 2008). Pisteet, jotka voidaan eristää lyhyellä polulla puun juuresta lehteen (eli jotka eivät jaa piirteitä muiden pisteiden kanssa), luokitellaan poikkeaviksi.



Kuva 11. Isolation forest- algoritmin toimintaperiaate (mukaillen Liu et al. 2008). (a) normaalin havainnon x_i eristäminen vaatii useita satunnaisia jakoja, kun taas (b) poikkeava havainto x_o eristyy huomattavasti nopeammin.

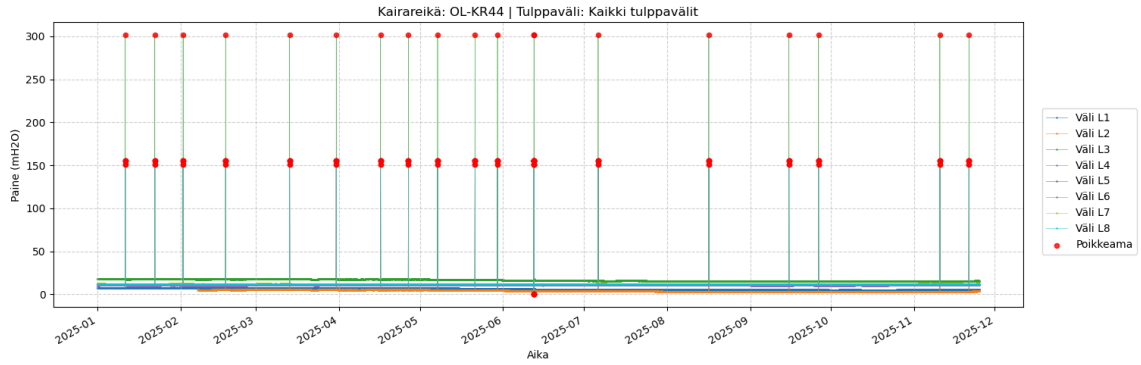
Lopullinen häiriön hyväksyminen perustuu hybridisuodatukseen. Vaikka koneoppimismalli tunnistaisi pisteen tilastollisesti poikkeavaksi (esim. korkean Z-scoren vuoksi), se hylätään, jos poikkeaman absoluuttinen suuruus on alle asetetun fyysikaalisen kynnyksarvon. Tämä sääntöpohjainen jälkikäsitteily eliminoi hydrogeologisesti merkityksettömän kohinan. Ohjelma käyttää tähän tarkoitukseen esiladattuja asetusprofiileja (esim. OL-KR tai ONK), jolloin raja-arvot mukautetaan automaattisesti tarkasteltavaan tutkimusreikään sopiviksi (Kuva 12).



Kuva 12. Isolation forest- pohjaisen tunnistusmenetelmän prosessikaavio.

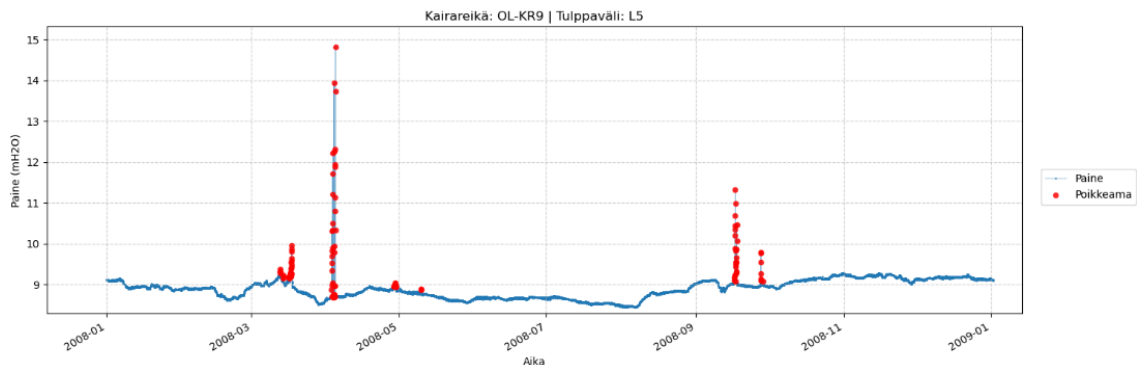
4.3. Mitä ilmiöitä ohjelmalla tunnistettiin

Posivan hydraulisessa painekorkeusdatassa esiintyvät yleisimmät virhetyypit ovat suuria virhepiikkejä, jotka johtuvat usein anturin nostamisesta kalibrointia tai näytteenottoa varten. Nämä virhetulokset esiintyvät yleensä hyvin lyhytkestoisina, vain muutaman mittauspisteen jaksoina. Ne poikkeavat merkittävästi luonnollisesta vaihtelusta ja ovat suuruusluokaltaan joko 150–300 mH₂O tai vaihtoehtoisesti arvoltaan negatiivisia (Kuva 13). Nämä virheet on helppo tunnistaa myös karkealla, sääntöpohjaisella tunnistusmenetelmällä SIHTI:n avulla.



Kuva 13. Yleisin virhetyyppi, todella suuret tai negatiiviset, nopeasti palautuvat virhepiikit. SIHTI:n tunnistamat poikkeamat kuvassa punaisella.

Toinen melko yleinen virhetyyppi on anturin vikaantumisesta johtuva mittaustulosten anomaalinen vaeltaminen, jota seuraa usein palautuminen normaalille tasolle, jonka jälkeen seuraa jälleen uusia epätarkkoja jaksoja datassa. Tästä virhetyypistä on esimerkki kuvassa 14.



Kuva 14. Esimerkki anturin vikaantumisesta johtuvasta hetkellisestä virhetuloksesta, jota seuraa palautuminen sekä uusia virhejaksoja. OL-KR9 tulppaväli 5 vuosina 2008–2009, SIHTI:n tunnistamat poikkeamat kuvassa punaisella.

Kolmas yleinen virhetyyppi on tasomaiset virheet, näitä voi olla esimerkiksi anturin tippuminen mittausalueelta (jolloin lukema pysyy lähellä 0-tasoa minimaalisella vaihtelulla) tai tason äkilliset muutokset, jota seuraa palautuminen tai pudotus nollatason lähelle. Tämän kaltainen tasonmuutos useimmiten indikoi anturin vikaantumista. Kuvassa 15 on esimerkki molemmista edellä kuvatuista virheistä.

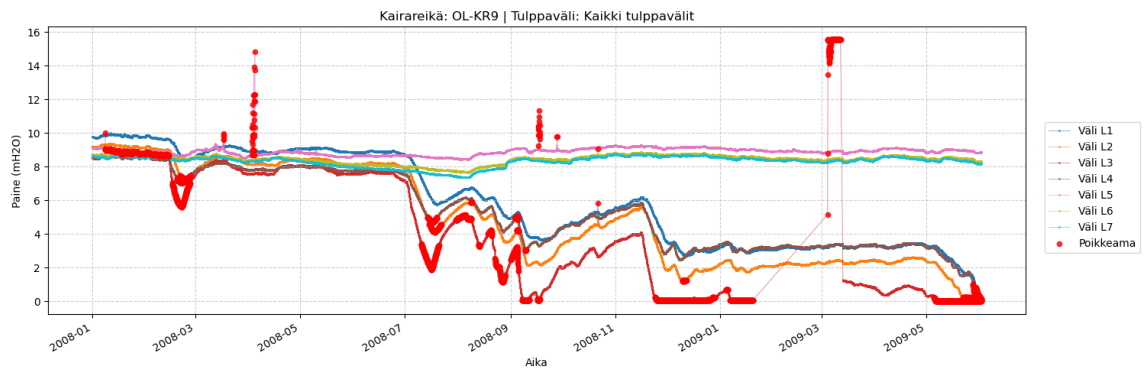


Kuva 15. Esimerkit tasomaisista virheistä. Yllä anturin tippuminen mittausalueelta ja alempana anturin vikaantumisesta johtuva tasonmuutos. SIHTI:n tunnistamat poikkeavat pisteet punaisella.

Tasomaisten virheiden tunnistus osoittautui ohjelmalle hankalimmaksi virhetyypiksi, sillä joskus tasonmuutos on niin pieni, että tilastolliset tunnusluvut tai raja-arvot eivät sitä tunnista, vaikka ihmissilmällä muutos on helposti tunnistettavissa. Myös ”kuolleen” anturin eli mittausalueelta tippuneen anturin lähettämä data usein oli suurempi kuin 0, ja sisälsi pientä vaihtelua, jota oli ensin vaikeaa havaita, mutta tätä varten lisättiin raja-arvoparametrit epänormaalin pienelle ja lähellä nollassa tapahtuvalle vaihtelulle, jonka myötä nämä virheet saatiin entistä paremmin kiinni.

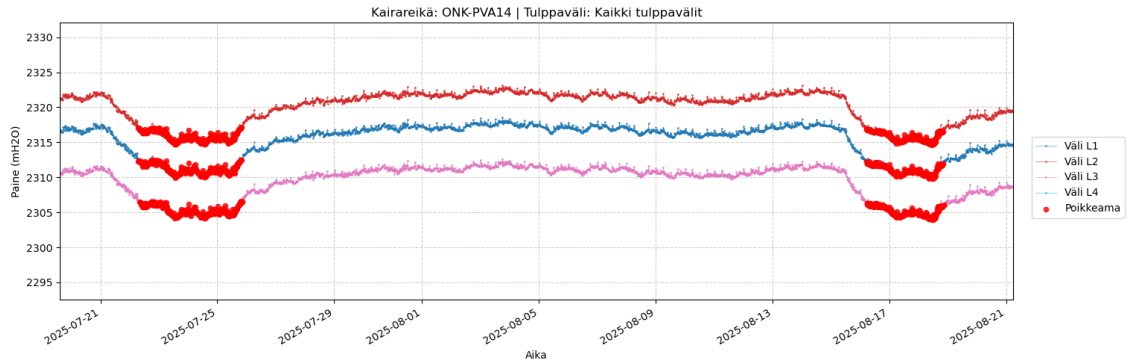
Virheiden lisäksi SIHTI:n avulla on mahdollista tunnistaa erilaisia todellisia ilmiöitä. Kaikki havaitut ilmiöt tulkittiin ihmistoiminnan aiheuttamiksi häiriöiksi, yleisimmin ne johtuivat näytteenottopumppauksista, ONKALO:n rakentamisesta, kairauksista, Posiva flow log-mittauksista (lyh. PFL), monitulppalaitteistojen asennuksesta tai poistosta. Esimerkki ONKALO:n louhinnasta vuosilta 2008–2009 kuvassa 16. SIHTI tunnistaa

tämän kaltaisissa ”sotkuisissa” dataseiteissä vain suurimmat muutokset, tässä esimerkissä suurimmat nousu- ja laskukohtat sekä erilaiset anturivirheet.



Kuva 16. OL-KR9 hydraulinen painekorkeusdata kaikista tulppaväleistä vuosina 2008–2009, jossa näkyy suuret, ONKALO:n louhinnasta johtuvat, painevasteet. SIHTI:n tunnistamat poikkeamat kuvassa punaisella.

Kuvassa 17 on esimerkki kahdesta erillisestä painevasteesta ONK-PVA14 tulppaväleissä L1-L3 heinä-elokuun 2025 aikana suoritettuun pienen mittakaavan vuorovaikutuskokeeseen liittyen (Paalumäki et al. 2025). Vuorovaikutuskokeessa avattiin valikoiduista, loppusijoitustunnelissa 5-1 sijaitsevista, loppusijoitusreikien pilottirei’istä (ONK-DHPH5-1-X) näytelinja yksi reikä kerrallaan ja seurattiin mahdollisia painevasteita läheisessä ONK-PVA14 -pohjavesiasemassa, jotta saataisiin tarkempaa tietoa alueelle mallinnetun OL-BFZ045-rakenteen vaikutusalueesta. Havaitut painevasteet liittyivät ONK-DHPH5-1-4 ja ONK-DHPH5-1-5 näytelinjojen avauksiin. SIHTI-ohjelman tunnistusmenetelmällä onnistuttiin tunnistamaan nämä painevasteet.

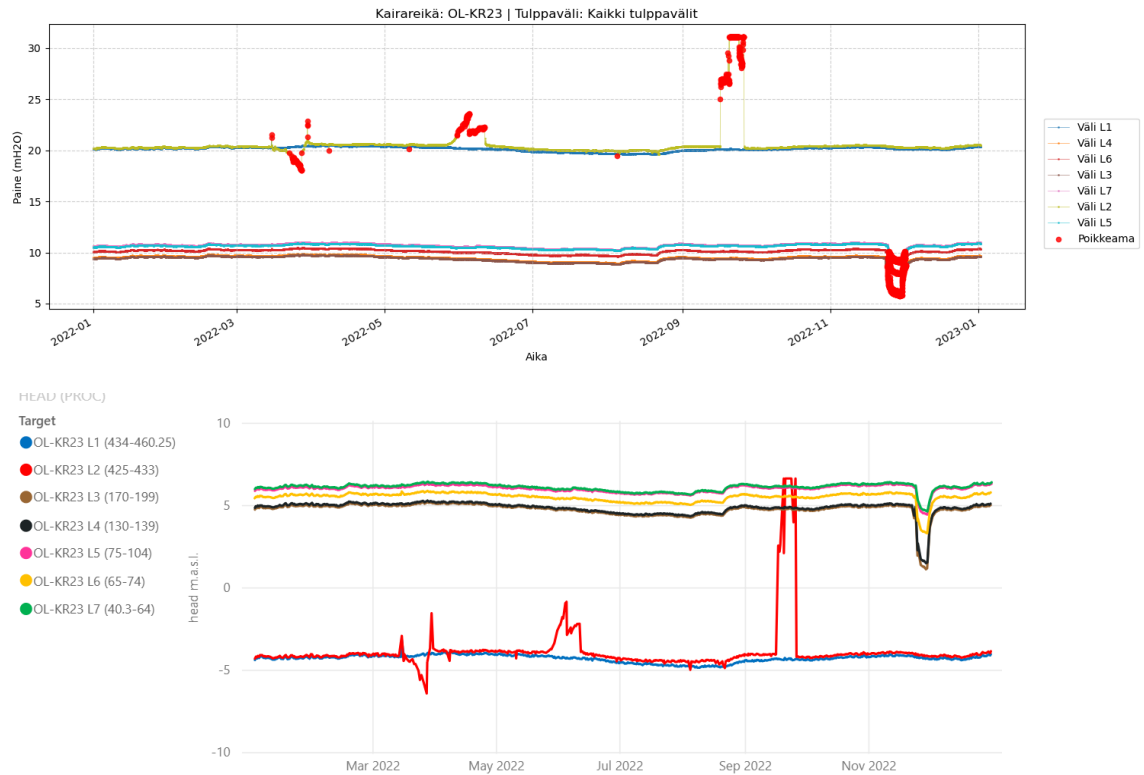


Kuva 17. ONK-PVA14 tulppaväleissä L1-L3 havaitut painevasteet vuonna 2025 toteutetun pienen mittakaavan vuorovaikutuskokeen aikana. SIHTI:n tunnistamat poikkeamat kuvassa punaisella.

4.3.1. Vertailu processed-dataan

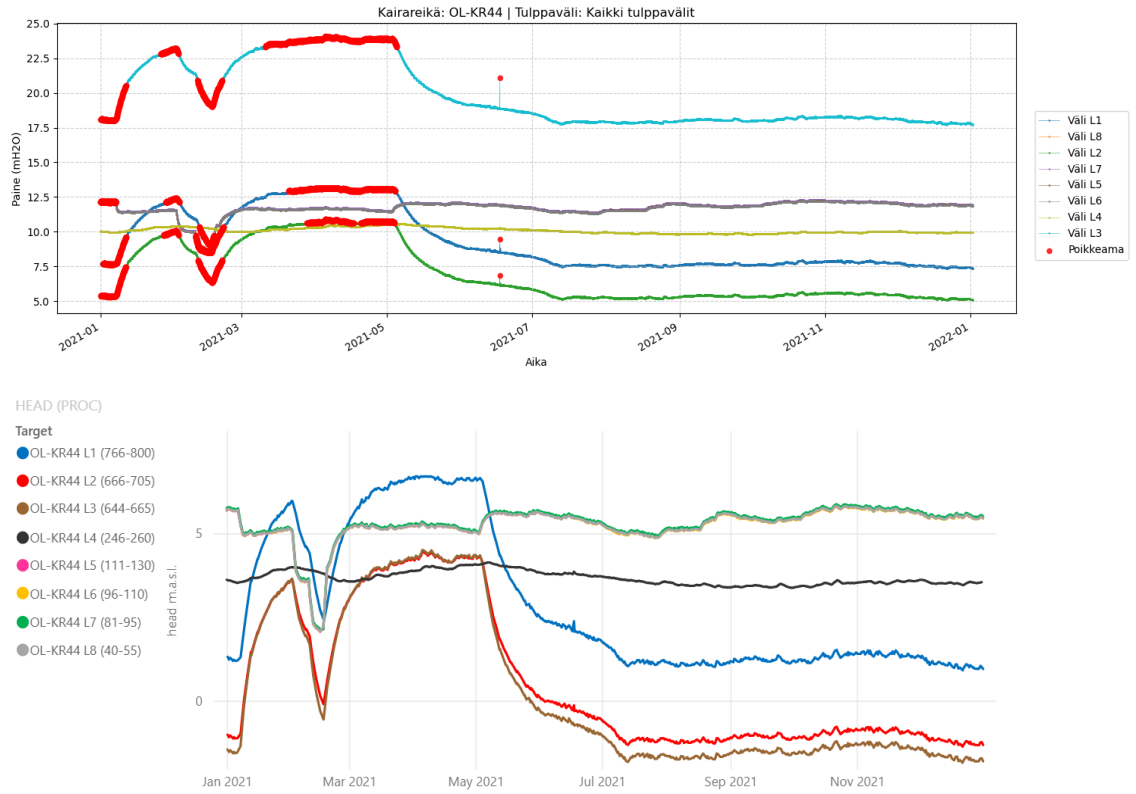
SIHTI-ohjelmaa kehitettäessä vertailtiin dataa myös siivottuihin historiallisiin datoihin, joista on myös tulkittu tunnetut painevasteet eri ilmiöihin, kuten rakentamisen vaikutuksiin tai PFL-mittauksiin. Näiden esimerkkikuvien graafeista on kuvien selkeyden vuoksi ensin siivottu SIHTI-ohjelmaa käyttäen suurimmat, yleiset anturin nostosta tai vastaavasta häiriöstä johtuvat hetkelliset virhepiikit.

Kuvassa 18 esitetään vuoden 2022 ajalta OL-KR23 kaikkien tulppavälien hydraulinen painekorkeus kahdella graafilla. Ylemmässä on SIHTI-ohjelman tuottama graafi, jossa punaisella värillä merkityt kohdat ovat isolation forest-tunnistuksen poikkemaksi merkitsemiä datapisteitä. Alemmassa graafissa on vastaavan ajankohdan processed-data, joka on muunnettu m.a.s.l-muotoon ja useimmat virhepiikit ovat siivottu pois. SIHTI:n tunnistamat poikkeamat tulppavälissä L2 (vaaleanvihreä käyrä ylemmässä graafissa ja punainen alemmassa) ovat viallisen anturin aiheuttamia (Laakso et al. 2023), vaikka ne ovatkin poikkeuksellisesti päätetty jättää processed-datan visualisointiin. Tämä on myös hyvä esimerkki aiemmassa kappaleessa mainitusta ”vaeltavasta” anturivirheestä Joulukuun alussa tulppaväleissä L3-L7 havaittava alenema on taas tulkittu olevan painevaste OL-KR35 PFL-mittaukselle (Laakso et al. 2023).



Kuva 18. KR23 vuonna 2022. Yllä measurement-data, jossa punaisella merkitty SIHTI-ohjelman tunnistamat poikkeamat, alla processed-data samalta ajanjaksolta.

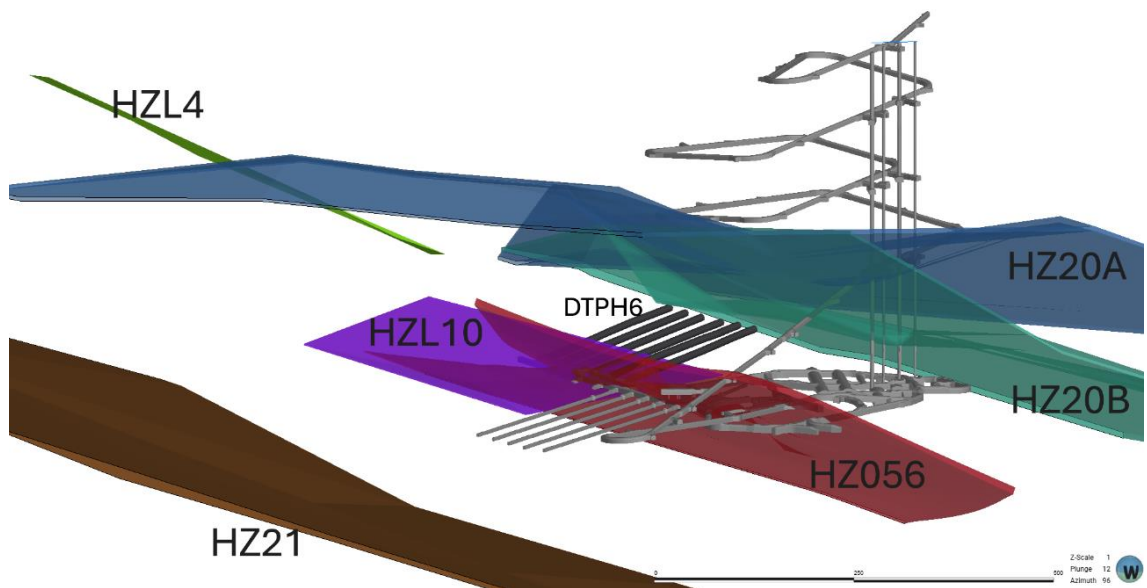
Vastaavasti kuvassa 19 esitetään vuoden 2021 ajalta OL-KR44 kaikkien tulppavälien hydraulinen painekorkeus kahdella graafilla. Tässä tapauksessa alkuvuoden suuret painekorkeusvaihtelut ovat tulkittu OL-KR25 PFL-mittauksen aiheuttamaksi häiriöksi (Laakso et al. 2022). Graafista nähdään, että SIHTI tunnistaa osittain tämän todellisen häiriötilanteen ja lisäksi pienet virhepiikit kesäkuussa tulppaväleissä L1, L2 ja L3.



Kuva 19. OL-KR44 painekorkeusgraafit vuodelta 2021. Yllä measurement-data, jossa punaisella merkitty SIHTI-ohjelman tunnistamat poikkeamat, alla processed-data samalta ajanjaksolta.

5. ONK-DTPH6 kairausten vaikutukset ja analysointi SIHTI-ohjelmalla

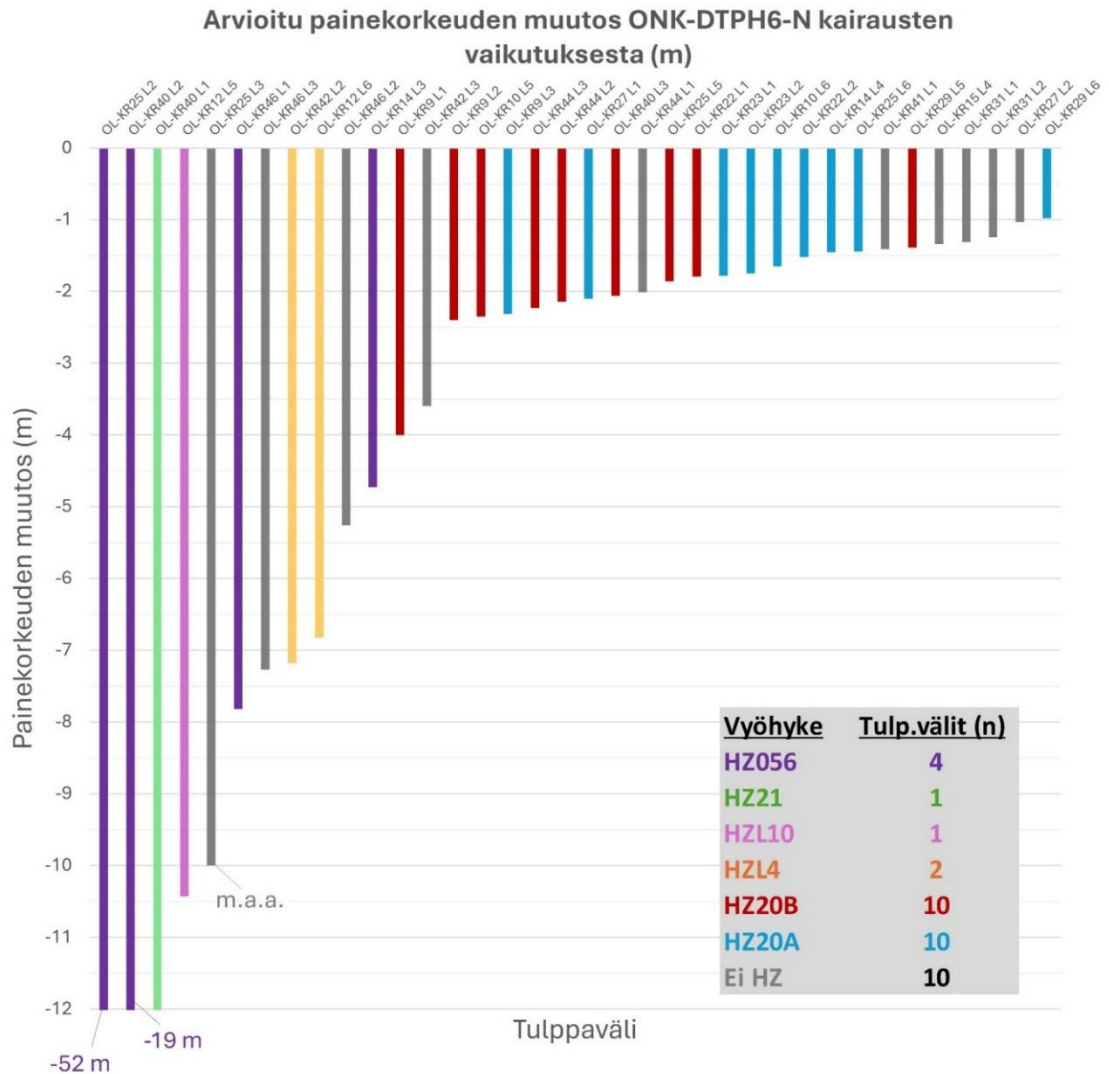
Loppusijoituslaitoksen paneelin 6 loppusijoitustunnelien pilottireikien (ONK-DTPH6-1...6-6) kairaustyöt toteutettiin 11.4.–14.7.2025 välisenä aikana. Kairaukset aiheuttivat laaja-alaisia painevasteita kallioperän hydrogeologisissa vyöhykkeissä. Ensimmäiset vasteet havaittiin heti kairausten alkuvaiheessa 12.4.2025, ja pääosa vasteista alkoivat huhti-toukokuun vaihteessa (29.4.–6.5.2025). Vaikutukset kohdistuivat vyöhykkeisiin HZ20A, HZ20B, HZ056, HZL4, HZ21 ja HZL10 sekä useisiin mallintamattomiin havaintoväleihin (Paalumäki et al. 2025) (Kuva 20). Liitteen 1 taulukossa 4 on esitetty kaikki paneelin 6 loppusijoitustunnelien pilottireikien kairaustyöstä aiheutuneet havaitut painevasteet tulppaväleittäin ja niihin liittyvät hydrogeologiset vyöhykkeet.



Kuva 20. Mallinnetut hydrogeologiset vyöhykkeet, joissa havaittiin painevasteita DTPH6 kairauksille sekä DTPH6-1...6-6 kairareikien sijainti mallinnettuna suhteessa ONKALO:on.

Loppusijoitustunnelien pilottireiät tulpattiin kairausten ja sen jälkeisten tutkimusten valmistuttua monitulppalaitteistoilla syksyn 2025 aikana ja niihin asennettiin myös GWMS-automaattiseuranta. Kuvassa 21 esitetään arvioitu painekorkeuden muutos paneelin 6 loppusijoitustunnelien pilottireikien kairauksien vaikutuksesta

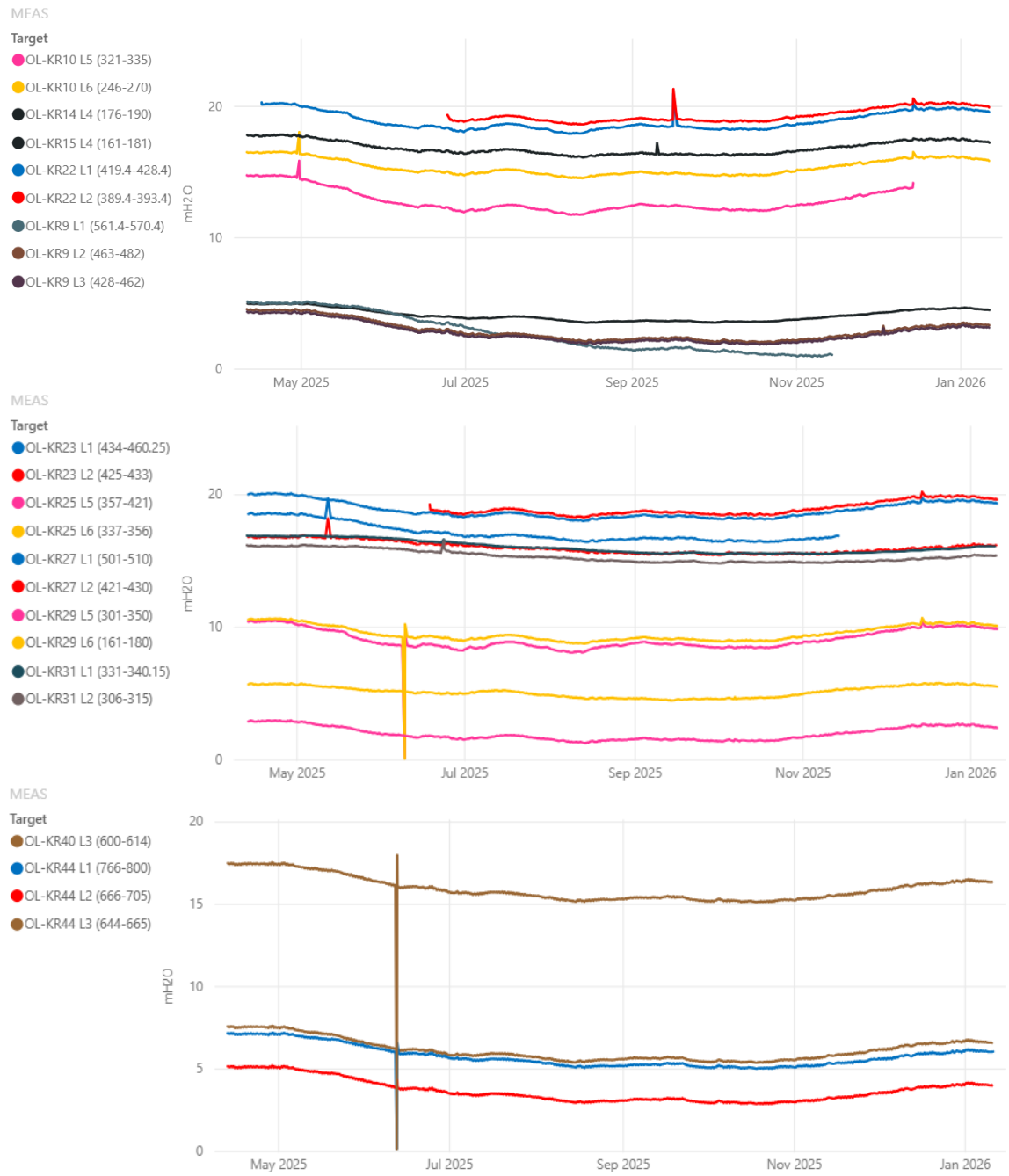
tulppaväleittäin. Kuvasta havaitaan, kuinka muissa kuin HZ20-vyöhykkeiden tulppaväleissä havaittiin huomattavasti suuremmat alenemat. (Paalumäki et al. 2025).



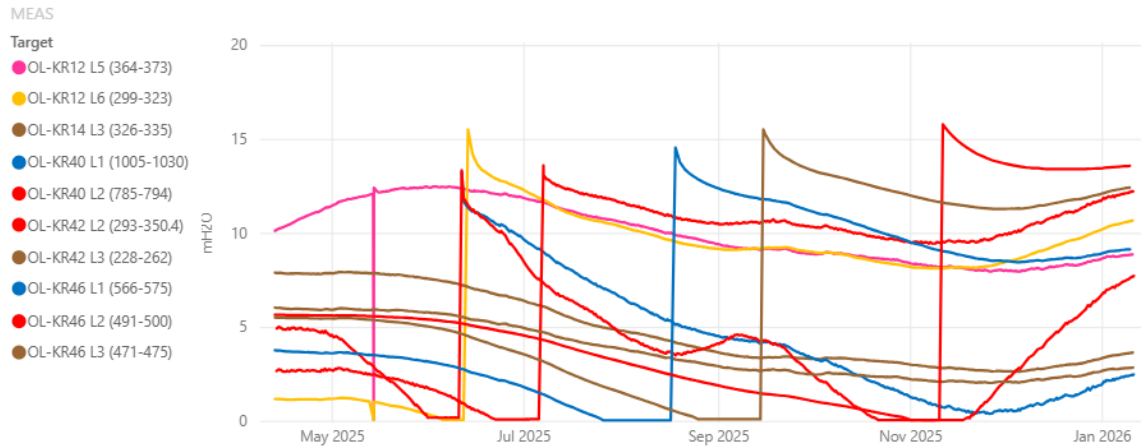
Kuva 21. Arvioitu painekorkeuden muutos ONK-DTPH6-N kairausten vaikutuksesta (m). Paineekorkeuden muutos on laskettu suhteessa valittuun referenssisitasoon 29.4.2025 muttamien poikkeuksin (esim. datakatkojen vuoksi). Pylvään väri viittaa mallinnettuun vyöhykelävistykseen. Suurimman aleneman pylväät rajautuvat osittain ulos kuvaajasta pysty akselin skaalauksen vuoksi. Mittausalueen alapuolella (m.a.a.) oleville painekorkeuksille ei voida laskea alenemaa, mutta se on suurempi kuin koosteessa käytetty arvo (Paalumäki et al. 2025).

Tulppavälit, joissa havaittiin painevasteita, mutta joissa ei ollut mallinnettua vyöhykelävistystä, pystyttiin luokittelemaan painevasteen suurusluokan, käyrän muodon ja palautumisen ajankohdan mukaan kahteen pääryhmään: HZ20-vyöhykkeen

vaikutusalueella oleviin tulppaväleihin (Kuva 22) ja HZ056, HZ21, HZL4 tai HZL10-vyöhykkeiden vaikutusalueella oleviin tulppaväleihin (Kuva 23). Merkittävimpinä eroina ryhmien välillä on HZ20-vyöhykkeen suuruusluokaltaan selkeästi pienemmät painealenemat ja selkeä tasaantuminen uudelle tasolle 2025 joulukuun lopun aikana. HZ056, HZ21, HZL4 tai HZL10-tyypin tulppaväleissä tasaantumista uudelle tasolle ei vielä tammikuun 2026 loppuun mennessä havaittu. Lisäksi havaittiin, että aiemmin DTPH6 kairauksiin yhdistetty paineen lasku tulppavälissä OL-KR41 L1 ei todennäköisesti liity tähän tapahtumaan, vaan edustaa jotain muuta ilmiötä, sillä sen trendi on ollut tasaisesti laskusuuntainen.



Kuva 22. Käyrän muodon ja käyttäytymisen perusteella HZ20-vaikutusalueella olevien tulppavälien mittaustulokset DTPH6 kairausten alusta vuoden 2026 alkuun.

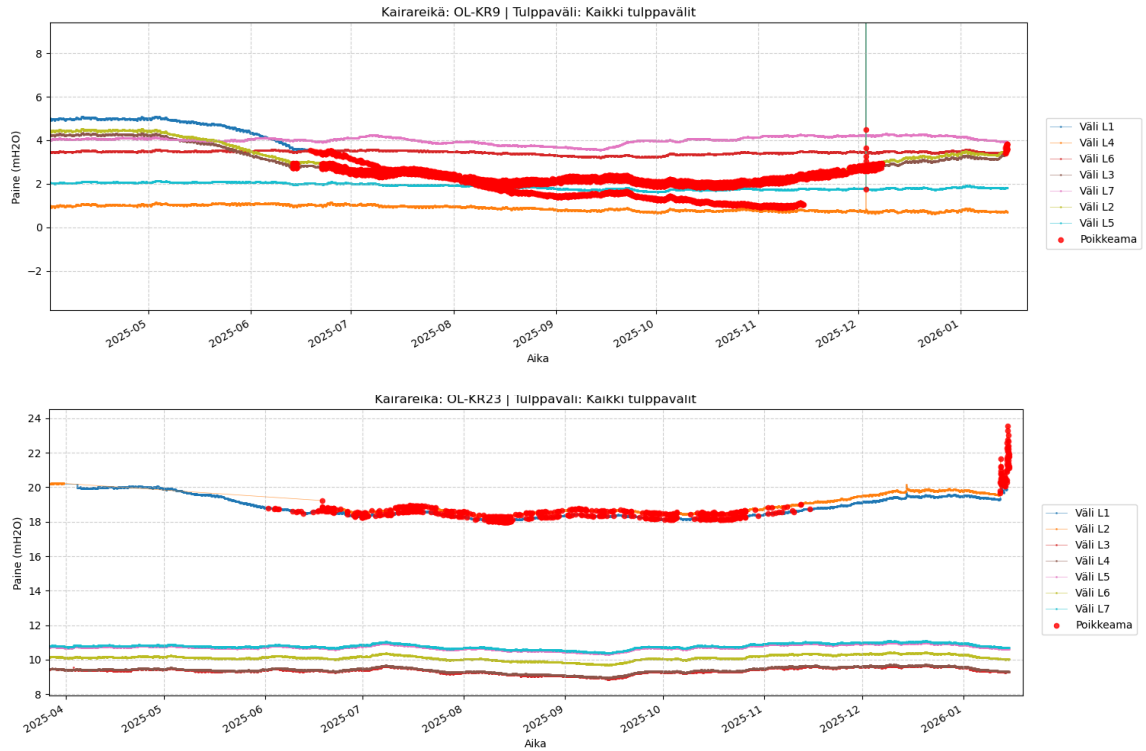


Kuva 23. Käyrän muodon ja käyttäytymisen perusteella HZ056, HZ21, HZL10 tai HZL4 vaikutusalueella olevien tulppavälien mittaustulokset DTPH6 kairausten alusta vuoden 2026 alkuun.

Syväkairareikien lisäksi neljässä ONKALO-reiässä, ONK-KR15, ONK-PVA11, ONK-PVA15 ja ONK-CTPH5.2, havaittiin painevasteet DTPH6 kairauksille. Nämä tulkitaan liittyvän hauraiden rikkonaisuusvyöhykkeiden kautta kulkeviin hydraulisiin yhteyksiin reikien välillä. ONK-KR15 tulppaväliin L4, jossa havaittiin epävarma, mahdollinen painevaste paneelin 6 kairauksille, ei ole mallinnettu vyöhykelävistyksiä.

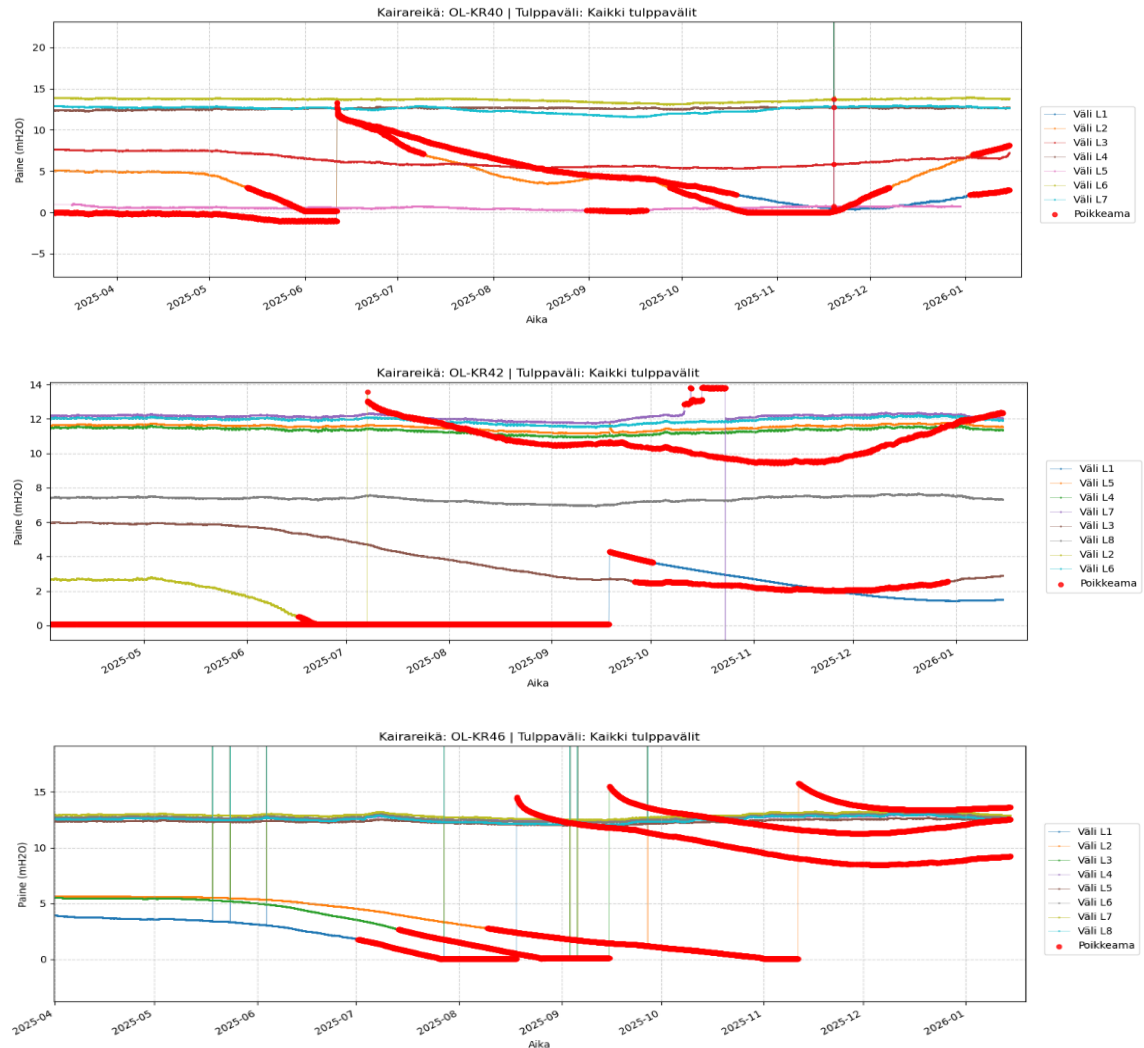
5.1. ONK-DTPH6 painevasteiden tunnistus SIHTI-ohjelman avulla

Reikiä, joissa oli havaittu paneelin 6 loppusijoitustunnelien pilottireikien kairauksiin liittyviä painevasteita, analysoitiin SIHTI-ohjelman Isolation forest -pohjaisella poikkeaman tunnistusmenetelmällä. Testiin valittiin reiät OL-KR9 (maksimissaan noin -4 m muutos painekorkeudessa) ja OL-KR23 (maksimissaan noin -1,5 m muutos painekorkeudessa), jotka edustavat tyypillistä HZ20-vyöhykkeen vaikutusalueen painevastetta (Kuva 24). SIHTI-ohjelman poikkeamatunnistusmenetelmällä saatiin tunnistettua paineenalenumakohdat kohtalaisen hyvin, kunhan ohjelman sisäiset raja-arvo asetukset olivat riittävän herkäksi säädetyt.



Kuva 24. HZ20-vyöhykkeen vaikutusaluea edustavat kairareiät OL-KR9 ja OL-KR23 SIHTI-ohjelmalla analysoituna. Poikkeamatunnistuksen merkitsemät pisteet punaisella.

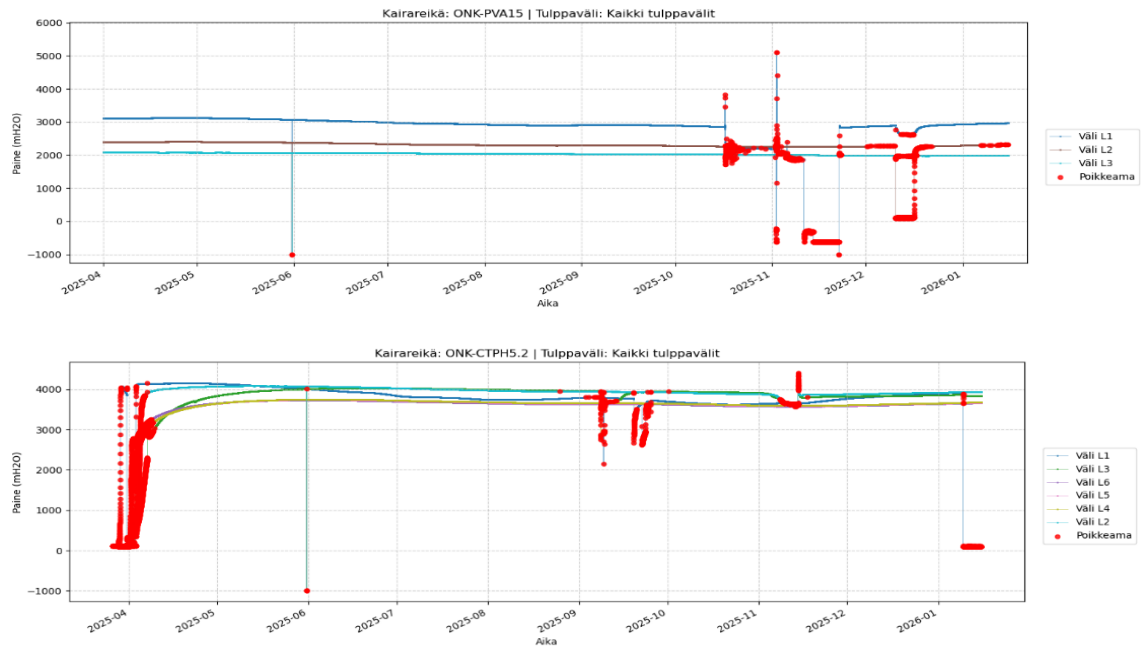
HZ056, HZ21, HZL10 tai HZL4-vyöhykkeille tyypillisiä, suuruusluokaltaan HZ20-vyöhykkeen painevasteita merkittävästi suurempia, painevasteita edustamaan testiin kairareiät OL-KR40 (maksimissaan noin -19 m muutos painekorkeudessa), OL-KR42 (maksimissaan noin -7,5 m muutos painekorkeudessa) ja OL-KR46 (maksimissaan noin -8 m muutos painekorkeudessa). Nämä suuret paineenalenemat ja myös osin paineen nousukohtat saatiin SIHTI-ohjelman poikkeamatunnistuksella merkittyä lähes kokonaisuudessaan (Kuva 25).



Kuva 25. HZ056, HZ21, HZL4 tai HZL10 -tyypin painevastetta edustavat kairareivät OL-KR40, OL-KR42 ja OL-KR46 SIHTI-ohjelmalla analysoituina. Poikkeamatunnistuksen merkitsemät pisteet punaisella.

Testiin valittiin myös ONKALO-reiät ONK-PVA15 ja ONK-CTPH5.2. ONK-PVA15 välissä L1 oli havaittu melko heikko, maksimissaan noin 260 kPa paineenalenema. ONK-CTPH5.2 välissä L1 paineenalenema oli maksimissaan noin 500 kPa. Näissä rei'issä tunnistusmenetelmän osalta haasteeksi osoittautui datan sotkuisuus; molemmat rei'istä olivat olleet paineseurannassa vasta melko lyhyen aikaa DTPH6 kairausten aikaan (ONK-CTPH5.2 paineseuranta aloitettu huhtikuussa 2025 ja ONK-PVA15 paineseuranta aloitettu joulukuussa 2024). Osin tämän ja myös paineanturien vikaantumisten sekä erilaisten näytteenottojen aiheuttamien häiriöiden takia SIHTI:n tunnistusmenetelmällä

oli vaikeuksia tunnistaa näitä painevasteita muiden, suuruusluokaltaan merkittävästi suurempien häiriöiden joukosta (Kuva 26).



Kuva 26. ONKALO-reiät ONK-PVA15 ja ONK-CTPH5.2 SIHTI-ohjelmalla analysoituna. Poikkeamatunnistuksen merkitsemät pisteet punaisella.

SIHTI-ohjelman tunnistusmenetelmällä saatiin tunnistettua melko hyvin DTPH6 kairauksiin liittyviä painevasteita. SIHTI-ohjelman raja-arvoja LIMIT_LOCAL_SPIKE, LIMIT_LOCAL_SHIFT ja LIMIT_GLOBAL_SHIFT säätämällä saadaan heikotkin painevasteet näkyviin, mutta samalla väärin positiivisten tulosten määrä kasvaa. Tämän takia onkin suositeltavaa käyttää herkempiä asetuksia etsittäessä painevasteita, kun taas käytön painottuessa datan siivoamiseen virhepiikeistä on suositeltavaa käyttää hieman konservatiivisempia raja-arvoja. Painekorkeusdatan riittävä ajallinen pituus ja suhteellinen virheettömyys auttaa merkittävästi tulppavälikohtaisen luotettavan normaalin painekorkeustason löytämistä ja sitä kautta tunnistuksen tarkkuuden parantumista.

6. Johtopäätökset

Tässä työssä kehitettiin SIHTI-ohjelmistotyökalu Olkiluodon tutkimusreikien hydraulisen painekorkeus- ja painedatan käsittelyä, visualisointia ja laadunvarmistusta varten. Työn ensisijaisena tavoitteena oli korvata vanhentunut Excel-makropohjainen järjestelmä modernilla Python-alustalla, joka kykenee hallitsemaan suuria datamääriä tehokkaasti ja tunnistamaan mittausvirheet aiempaa luotettavammin.

Asetetut tavoitteet saavutettiin pääosin onnistuneesti. Kehitetty työkalu integroi aiemmin erilliset työvaiheet – virheiden tunnistuksen, datan visualisoinnin ja asiantuntijatarkastuksen – yhdeksi kokonaisuudeksi. Koekäytön perusteella ohjelmalla on potentiaalia nopeuttaa datan siivousprosessia merkittävästi verrattuna aiempaan työvaiheeseen, jossa dataa visualisoitiin erillisellä raportointityökalulla ja virheelliset rivit poistettiin manuaalisesti tietokannan käyttöliittymästä.

Teknisesti ohjelman suorituskyky osoittautui tarkaksi. Käytetty Isolation Forest -tunnistusmenetelmä tunnisti luotettavasti paitsi suuret ja ilmeiset virhepiikit, myös vaikeammin havaittavat poikkeamat, joita ei ennen tunnistettu automaattisesti ollenkaan. Kehitystyön aikana selveni, että modernit Python-kirjastot tarjoavat joustavan ja suorituskykyisen alustan vaatimaan aikasarja-analyysiin.

Testausvaiheen aikana havaittiin, että automaattinen laadunvarmistus vaatii tasapainoilua tunnistuksen herkkyyden ja spesifisyyden välillä. Liian herkkä suodatus tuottaa vääriä positiivisia tuloksia, joissa todellinen hydrogeologinen informaatio tulkitaan virheeksi. Toisaalta liian salliva asetus jättää teknisiä virheitä lopulliseen aineistoon. Tästä syystä samoja herkkyydsasetuksia ei voida suoraan käyttää sekä virheiden siivoukseen että hienovaraisten painevasteiden tunnistamiseen. Tämän haasteen ratkaisemiseksi ohjelmaan toteutettiin säädettävät parametrit, joiden avulla tunnistusherkkyyys voidaan optimoida joko karkeaan virhesiivoukseen tai hienovaraisempaan vasteanalyysiin kulloisenkin tavoitteen mukaisesti.

Vaikka automaattinen virheidentunnistus hoitaa valtaosan siivoustyöstä, asiantuntijan tekemä visuaalinen varmistus on edelleen välttämätön. Puoliautomaattinen lähestymistapa todettiin käytännössä toimivaksi; se vähentää inhimillisen virheen mahdollisuutta rutiinitarkastuksesta, mutta säilyttää asiantuntijan kontrollin tilanteissa, joissa luonnollinen vaste (kuten kairauksesta johtuva painevaste) muistuttaa teknistä häiriötä.

Ohjelma todettiin toimivaksi koekäytön aikana kaikilla automaattiseen seurantaan kuuluvilla tutkimusreikädatoilla, mutta vanhan Excel-makropohjaisen menetelmän täysimääräinen korvaaminen on vielä tämän työn kirjoittamisen aikaan kesken. Organisaation sisäisistä rajoituksista ja hyväksyntäprosesseista johtuen testikäytön aikana vuoden 2025 raakadatojen lopullinen muunto m.a.s.l. -muotoiseksi processed-dataksi ja tallennus tietokantaan tehtiin vielä osittain vanhaa menetelmää hyödyntäen. SIHTI-ohjelmaa käytettiin kuitenkin jo menestyksekkäästi käytöstä poistettavien rivien listaukseen.

Jatkossa tavoitteena on integroida SIHTI-siivous osaksi säännöllistä, esimerkiksi neljännesvuosittain tapahtuvaa prosessia, jotta myös raakadata pysyy mahdollisimman virheettömänä läpi vuoden. Ohjelmassa on tunnistettu myös potentiaalia laajentua muidenkin anturityyppien aikasarjadatan analysointiin. Tämänhetkinen Isolation forest -pohjainen tunnistusmenetelmä sekä kehitetyt visualisointi- ja tarkastustyökalut tarjoavat jo nyt merkittävästi entistä menetelmää virtaviivaisemman ja helpommin tulkittavan ratkaisun Posivan nykyisiin monitorointitarpeisiin.

7. Kiitokset

Ensisijaisesti kiitokset ohjaajille Eila Hietaharju, Samuel Bronstein ja Ville-Pekka Paalumäki ohjauksesta, tuesta ja tarkastuksesta. Erityiskiitokset Jere Lahdenperälle opinnäytetyön teon mahdollistamisesta, luottamuksesta sekä osaltaan myös ideoinnista ja ohjauksesta. Kiitos Jyri Laaksolle opinnäytetyön aiheen ideoinnista sekä tarkastuksesta. Juho Kuusistolle kiitokset SIHTI-ohjelman tekniseen kehitykseen ja Posivan järjestelmiin integroimiseen liittyvästä avusta. Lopuksi kiitos koko Posiva Oy:lle ja sen väelle opinnäytetyön teon mahdollistamisesta, tutkimusaineistosta ja mukavista lounas- ja kahvihetkistä.

8. Kirjallisuus

- Aalto, P., Aro, P., Komulainen, J., Koskinen, L., Poteri, A., Vanhanarkaus, O., Hurmerinta, E., Pentti, E., Tammisto, E., Vaittinen, T., Joyce, S., Mosley, K., Williams, T., Karvonen, T., Hartley, L. & Selroos, J-O. P. 2021. Hydrogeology of Olkiluoto. Eurajoki. Finland. Posiva Oy. Posiva Report 2021-15. 534 s.
- Aaltonen, I., Kosunen, P., Mattila, J., Engström, J., Paananen, M., Paulamäki, S., Front, K., Gehör, S. & Kärki, A. P. 2016. Geology of Olkiluoto. Eurajoki, Finland, Posiva Oy. Posiva report 2016-16. 398 s.
- Ahokas, H., Tammisto, E. & Lehtimäki, T. 2008. Baseline Head at Olkiluoto. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. Working Report 2008-69. 191 s.
- Fetter, C.W. 2001. Applied Hydrogeology. 4th ed. Upper Saddle River (N.J.): Prentice Hall. 598 s.
- Freeze, R.A. and Cherry, J.A. 1979. Groundwater. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, Vol. 7632, 604 s.
- Jänkävaara, H. 2025. Kuplutiinmittauksen työohje. Posivan sisäinen muistio POS-033121, Posiva Oy. 17 s.
- Klockars, J. & Ahokas, H. 2007. Installation of Multi-Packer Equipment into Drillholes at Olkiluoto Since 1999. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. Working Report 2007- 59. 55 s.
- Laakso, J. 2025. Hydrogeologinen rakennemalli 19.8.2025. Posivan sisäinen muistio LP-00130275. Posiva Oy. 10 s.
- Laakso, J., Iisalmi, V., Junnila, J., Jänkävaara, H., Vanhanarkaus, O., Nummela, J., Pentti, E., Ripatti, K. & Tammisto E. 2022. Results of Monitoring at Olkiluoto in 2021, Hydrology and Hydrogeology. Eurajoki. Finland. Posiva Oy. Working Report 2022-43. 524 s.
- Laakso, J., Iisalmi, V., Jänkävaara, H., Mustonen, A., Paalumäki, V., Vanhanarkaus, O., Pentti, E., Ripatti, K., Tammisto, E. 2024. Results of Monitoring at Olkiluoto in 2023, Hydrology and Hydrogeology. Eurajoki, Finland, Posiva Oy. Working Report 2024-01. 441 s.

- Laakso, J., Iisalmi, V., Jänkävaara, H., Mustonen, A., Paalumäki, V., Vanhanarkaus, O., Pentti, E., Ripatti, K., Tammisto, E. P. 2025. Results of Monitoring at Olkiluoto in 2024, Hydrology and Hydrogeology. Eurajoki. Finland. Posiva Oy. Working Report 2025-01. 457 s.
- Laakso, J., Iisalmi, V., Jänkävaara, H., Pere, T., Nummela, J., Pentti, E., Ripatti, K., Tammisto, E. 2023. Results of Monitoring at Olkiluoto in 2022, Hydrology and Hydrogeology. Eurajoki. Finland. Posiva Oy. Working Report 2023-01. 125 s.
- Liu, F. T., Ting, K. M., & Zhou, Z. H. 2008. Isolation Forest. 2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining (ICDM), s. 413–422.
- Paalumäki, V., Laakso, J. & Vanhanarkaus O. 2025. Hydrologian ja hydrogeologian monitoroinnin neljännesvuosimuistio 3/2025. Posivan sisäinen muistio POS-039364, Posiva Oy. 14 s.
- Pentti, E. 2020. Update of Baseline Head in OL-KR Drillholes in Olkiluoto. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. Working Report 2020-17. 428 s.
- Pere, T., Alho, P., Haapalehto, S., Hansen, J., Laakso, J., Sojakka, T., Yli-Kaila, M. & Ylöstalo, R. 2021. Olkiluodon monitorointiohjelma - 2022. Eurajoki. Finland. Posiva Oy. Working Report 2020-02. 156 s.
- Vaittinen, T., Ahokas, H., Nummela, J., Pentti, E. & Paalamäki, S. P. 2020. Hydrogeological Structure Model of the Olkiluoto Site in 2015. Eurajoki, Finland, Posiva Oy. Working report 2019-06. 443 s.
- Voipio, S., Tammisto, E., Lehtimäki, T., & Ahokas, H. 2004. Summary of Long-Term Hydrological Monitoring at the Olkiluoto Site. Eurajoki, Finland: Posiva Oy. Working Report 2003-42. 188 s.

Liite 1

Taulukko 2. 2025 paineseurannassa olevat syväkairareivät, niiden syvyys, tulppavälien lukumäärä ja ensimmäisen tulppauksen päivämäärä.

Reikä	Syvyys	Tulppavälien lukumäärä	Tulppauksen päivämäärä
OL-KR1	775	8	29.10.2015
OL-KR2	1052	8	30.11.2007
OL-KR3	473.2	8	28.1.2002
OL-KR6	530	5	15.5.2020
OL-KR8	564.54	4	1.11.2007
OL-KR9	570.4	8	21.11.2023
OL-KR10	614.4	9	8.4.2021
OL-KR11	1002	8	17.1.2013
OL-KR12	763	8	11.12.2024
OL-KR13	500	4	6.11.2019
OL-KR14	480	4	10.9.2018
OL-KR15	460	8	17.12.2020
OL-KR16	170.2	6	2.9.2004
OL-KR16B	35	2	26.6.2008
OL-KR17	157.13	6	23.8.2004
OL-KR17B	30	2	30.6.2008
OL-KR18	125.49	5	18.8.2004
OL-KR18B	45.5	3	7.4.2008
OL-KR19	544.34	9	10.3.2022
OL-KR20	474	7	17.5.2004
OL-KR22	428.4	8	4.6.2007
OL-KR23	460.25	7	22.4.2020
OL-KR25	594	10	3.5.2021
OL-KR27	510	8	25.4.2008
OL-KR29	800	8	3.11.2016
OL-KR31	340.15	6	27.6.2022

OL-KR36	205.174	3	15.6.2023
OL-KR37	274.59	5	7.9.2007
OL-KR39	503	8	6.10.2011
OL-KR40	1030	8	18.11.2021
OL-KR41	401.42	7	24.11.2022
OL-KR42	400.85	7	8.9.2021
OL-KR44	800	8	29.4.2011
OL-KR45	1023.3	8	12.8.2022
OL-KR46	575	8	8.1.2019
OL-KR47	1008.76	8	1.9.2015
OL-KR49	1050	8	23.4.2013
OL-KR50	940	8	5.6.2013
OL-KR51	650.55	8	8.8.2012
OL-KR52	427.35	8	13.5.2013
OL-KR54	454	8	16.10.2013
OL-KR55	998.4	8	5.8.2015
OL-KR56	1201.65	7	16.9.2022
OL-KR57	401.71	7	14.9.2023
OL-KR58	1082	10	15.1.2019

Taulukko 3. 2025 paineseurannassa olevat ONK-tutkimusreiät, niiden syvyys, tulppavälien lukumäärä ja ensimmäisen tulppauksen ajankohta.

Reikä	Syvyys	Tulppavälien lukumäärä	Tulppauksen päivämäärä
ONK-CTPH 5.2.	181	6	26.3.2025
ONK-KR13	120.45	7	12.2.2013
ONK-KR14	75	7	7.9.2011
ONK-KR15	79.96	5	3.5.2021
ONK-KR16	70	7	26.3.2014
ONK-KR17	63	5	16.12.2019
ONK-PH17	38	1	26.2.2024
ONK-PH22	88	7	15.2.2013

ONK-PVA09	15.95	1	3.9.2024
ONK-PVA11	30.5	4	5.2.2015
ONK-PVA14	44.3	4	11.8.2022
ONK-PVA15	24	3	7.11.2024

Taulukko 4. Tutkimusreiät, joissa havaittiin painevaste ONK-DTPH6 kairauksille.

*: Epävarma tulos, **: Kupluttinmittausväli, ***: Ei mallinnettua vyöhykelävistystä, luokiteltu käyrän muodon perusteella.

Reikä	Tulppavälit	Vyöhyke
OL-KR9	L1, L2, L3	HZ20
OL-KR10	L5, L6	HZ20
OL-KR12	L5, L6	HZL10, HZL4
OL-KR14	L3, L4	HZ056 (L3), HZ20
OL-KR15	L4	HZ20***
OL-KR22	L1, L2	HZ20
OL-KR23	L1, L2	HZ20
OL-KR25	L2**, L3, L5, L6	HZ056 (L2), (L3***), HZ20
OL-KR27	L1, L2	HZ20 (L2***)
OL-KR29	L5, L6	HZ20
OL-KR31	L1, L2	HZ20***
OL-KR40	L1, L2, L3	HZ21 (L1), HZ056 (L2), HZ20
OL-KR42	L2, L3	HZL4 (L3***)
OL-KR44	L1, L2, L3	HZ20 (L1***)
OL-KR46	L1, L2, L3	HZ056 (L2***, L3***)
ONK-KR15	L4*	Ei mallinnettua vyöhykelävistystä
ONK-PVA11	L4*	BFZ297*
ONK-PVA15	L1	BFZ366
ONK-CTPH5.2	L1	BFZ100