

Ville Kinnunen

**GEOMEMBRAANIEN VUOTOJEN SÄHKÖISET PAIKANNUSME-  
NETELMÄT**

# **GEOMEMBRAANIEN VUOTOJEN SÄHKÖISET PAIKANNUSMETE- NELMÄT**

Ville Kinnunen  
Opinnäytetyö  
Kevät 2020  
Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma, Sähkötekniikka

---

Tekijä: Ville Kinnunen

Opinnäytetyön nimi: Geomembraanien vuotojen sähköiset paikannusmenetelmät

Työn ohjaaja: Esa Silomaa

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2020

Sivumäärä: 65

---

Opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä Geosynt Oy:lle selvitys geomembraanien eheyden tarkistamiseen käytettävistä sähköisistä menetelmistä, niiden toimivuuden reunaehdoista sekä teoriasta menetelmien taustalla. Lisäksi opinnäytetyössä tarkasteltiin Geosynt Oy:n vuosien 2016 – 2018 aikana tekemien ekstruusiohitsauksien syitä. Kokonaisuuden tarkoituksena oli kerätä tietoa yrityksen liiketoiminnan laajentamista varten sekä kartoittaa yrityksen sisäisen laadunvalvonnan kehityskohteita ekstruusiohitsauksien osalta.

Työssä etsittiin tietoa sähköisistä vuodonpaikannusmenetelmistä. Tietoa saatiin käymällä keskusteluita geomembraanivalmistajan edustajan sekä alan ammattilaisten kanssa, hankkimalla esitteitä sähköisiä vuodonpaikannusmittauksia tekeville yrityksiltä sekä lukemalla alaa koskevia standardeja ja tutkimuksia. Kerätyistä tiedoista koostettiin tietopaketti Geosynt Oy:n käyttöön sekä markkinoinnissa käytettävä PowerPoint -esitys.

Ekstruusiohitsauksien syyt luokiteltiin niiden syntymekanismien mukaan eri luokkiin. Luokiksi valikoitui syyt, joihin voidaan vaikuttaa ja syyt, joihin ei voida vaikuttaa omalla toiminnalla. Aineiston koostamiseen ja käsittelyyn käytettiin Excel -ohjelmaa.

Opinnäytetyö on luonteeltaan kirjallisuuskatsaus. Opinnäytetyöhön käytetty tieto sekä aineisto perustuvat kansainvälisiin ASTM-standardeihin, riippumattoman tutkimuslaitoksen sekä tutkijoiden tekemiin tutkimuksiin, yritysten omiin materiaaleihin, oppikirjoihin sekä keskusteluihin geosynteettialan ammattilaisten kanssa. Opinnäytetyön toisessa luvussa käsitellään geomembraanirakenteiden vuotoja sekä niiden syntymekanismeja. Kolmannessa luvussa käsitellään sähköisiä vuodonpaikannusmenetelmiä. Opinnäytetyön ulkopuolelle on jätetty talonrakentamisessa käytettyjen geomembraanien sekä muoviseoksista valmistettujen putkilinjojen sähköiset vuodonpaikannusmenetelmät.

---

Asiasanat: geomembraani, vaurio, vuoto, vuodonpaikannus

## ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences  
Degree Programme in Electrical and Automation Engineering, Electrical Engineering

---

Author: Ville Kinnunen

Title of thesis: Electrical Leak Location Methods for Geomembranes

Supervisors: Esa Silomaa (OAMK), Perttu Juntunen (Geosynt Oy)

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2020

Number of pages: 65

---

The objective of this thesis was to make a research for the Geosynt Oy on electrical leak location methods (ELL) used to inspect geomembranes. Research also included boundary conditions and theory behind these methods. The thesis includes inspection of the reasons of extrusion welds made by Geosynt Oy between 2016 - 2018. The meaning of this entirety is to gather information to expand Geosynt Oy's business model and to see if there is a need to enhance internal quality assurance program of extrusion welds.

At first information of electrical leak location methods was searched. The most of gathered information came from conversations with geomembrane manufacturers and professionals, brochures of leak location services and products and also by reading standards, white papers and scientific releases considering ELL. After this all available information was compiled into a compact information package and PowerPoint presentation to be used as a marketing tool.

Extrusion welds were categorized by the reason of why the weld was made. The chosen categories are: the reasons which could be prevented by installer and the reasons which could not be prevented by installer. Microsoft Excel was used to compose and analyze data of the extrusion welds.

The nature of this thesis is research and literature review. The literature material used for this thesis is based on international ASTM standards, studies made by independent researchers, materials provided by companies, textbooks and conversations with professionals in the geosynthetic field. The first theoretical part (second chapter) of the thesis includes reasons and birth mechanisms behind leaks on geomembrane liners. The second theoretical part of the thesis deals with electrical leak location (ELL) methods. Leak location measurements for all but geomembranes used in civil engineering applications are excluded from the thesis.

---

Keywords: geomembrane, leak, damage, hole, electrical leak location

## **ALKULAUSE**

Haluan kiittää Geosynt Oy:tä mahdollisuudesta tutustua geomembraaneihin ja sähköisiin vuodonpaikannusmenetelmiin opinnäytetyöni muodossa. Kiitos Esa Silomaalle ja Perttu Juntuselle pitkäjänteisestä opinnäytetyön ohjaamisesta. Kiitos myös kaikille muille Geosynt Oy:n työntekijöille, jotka autoitte minua opinnäytetyössäni.

Lopuksi haluan kiittää perhettäni ja ystäviäni saamastani tuesta, kannustuksesta ja ymmärryksestä opintojeni aikana.

Oulussa 25.3.2020

Ville Kinnunen

# SISÄLLYS

1 JOHDANTO	8
2 GEOMEMBRAANIRAKENTEIDEN TIIVEYS JA VUODOT	10
2.1 Geomembraanirakenteiden tiiveyden valvonta	10
2.2 Geomembraanirakenteiden vuodot ja niiden arvioiminen	12
2.3 Geomembraanirakenteiden vauriot	17
2.3.1 Vuotojen sijainnit	17
2.3.2 Vuotojen koko	20
2.3.3 Vuotojen aiheuttajat	21
2.4 Geomembraanin asentamisen aikainen ja jälkeinen laadunvalvonta	23
2.4.1 Geomembraanin asentamisen aikainen laadunvalvonta	24
2.4.2 Geomembraanin asentamisen jälkeinen laadunvalvonta	25
3 SÄHKÖISET VUODONTARKKAILUMENETELMÄT	27
3.1 Yleisiä asioita sähköisestä vuodontarkkailusta	27
3.2 Toimivuuden reunaehdot	28
3.3 Vuodontarkkailumenetelmät peittämättömälle geomembraanille	30
3.3.1 Vesilammikkomenetelmä (Water Puddle Methode)	31
3.3.2 Vesisauvamenetelmät (Water Lance Methode)	33
3.3.3 Kipinätestausmenetelmä (Spark Testing Method)	35
3.3.4 Valokaarimenetelmä (Arc Testing Method)	41
3.4 Dipolimenetelmä peitetyle geomembraanirakenteelle	43
3.5 Kiinteät vuodonpaikannusjärjestelmät	48
4 AINEISTOSELVITYS JA EKSTRUUSIOAINEISTON KARTOITTAMINEN	53
4.1 Aineistonselvityksen sisältö	53
4.1.1 Aineistonselvityksen rakenne	54
4.1.2 Aineistonselvityksen tekeminen	54
4.2 Ekstruusioaineiston analyysi	55
4.2.1 Ekstruusioaineiston läpikäyminen ja jaottelu	55
4.2.2 Aineiston koostaminen ja analysointi	57
5 YHTEENVETO	58
LÄHTEET	60

## SANASTO

Ekstruusio	Muovien muokkaamiseen käytettävä menetelmä, missä sula muovimassa puristetaan haluttuun muotoon suulakkeen läpi
Ekstruusiohitsaus	Muovien liittäminen toisiinsa käyttämällä sulaa muovimassaa sekä tapauskohtaista suulaketta
Geosynteetti	Teollisesti valmistettu tuote, jonka avulla pyritään parantamaan tai korvaamaan maaineksia sekä niiden ominaisuuksia maarakentamisessa
Geomembraani	Rakenteiden tiivistämiseen käytettävä taipuissa, yleensä alle 3 mm paksu tiivistyskalvo, joka on valmistettu muovista tai bitumista
Geomembraanivuota	Pienin yksittäinen tiivistyskalvon kappale, jota käytetään tiivistämään rakennetta
HDPE	High-density polyethylene, korkeatiheyksisestä polyeteenistä valmistettu muovityyppi
kV	1000 V, tuhat volttia, jännitteen yksikkö
LLDPE	Linear low-density polyethylene, lineaarisesta matalatiheyksisestä polyeteenistä valmistettu muovityyppi

# 1 JOHDANTO

Geosynt Oy on geosynteettisten, eli teollisesti valmistettujen, maanrakennustuotteiden jälleenmyyntiä sekä asennustoimintaa harjoittava yritys. Geosynteeteillä tarkoitetaan tuotteita, joiden avulla voidaan parantaa tai korvata maa-aineksia maarakentamisessa.

Geosynt Oy syntyi, kun kaksi geosynteettialan kokeneimmista sekä arvostetuimmista yrityksistä, Kaitos Oy ja Taretek Oy, fuusioituivat tammikuussa 2019. Yritykset olivat toimineet tiiviissä yhteistyössä samoissa projekteissa jo jonkin aikaa, joten fuusio oli järkevä ratkaisu. Fuusion myötä Geosynt Oy:stä tuli Suomen johtava geosynteettialan palvelukokonaisuuksien tarjoaja. Geosynt Oy:n tuotteita sekä palveluita käytetään paljon muun muassa kaivosteollisuudessa, infrarakentamisessa sekä talon- ja ympäristönrakentamisessa. Geosynt Oy on toimittanut ja ollut asentamassa ympäristöä suojaavia geosynteettejä lukuisiin eri kohteisiin, kuten huoltoasemille, kaatopaikoille ja pohjavesialueille. (1.)

Geosynt Oy jälleenmyy ja asentaa yleisimpiä sekä uusimpia geosynteetteihin liittyviä tuotteita. Tällaisia tuotteita ovat muun muassa HDPE- ja LLDPE-muovista valmistetut tiivistyskalvot, eli geomembraanit, bentoniittisavesta tehdyt bentoniittimatot sekä erilaisista muoviseoksista valmistetut, maa-aineksien lujittamiseen tarkoitetut lujiteverkot sekä -kankaat. Geosynt Oy toimii myös asiakkaille sekä ympäristöviranomaisille asiantuntijana ja avustavana tahona geosynteetteihin liittyvissä hankkeissa. Geosynt Oy pyrkii tarjoamaan asiantuntevaa sekä vastuullista ympäristön rakentamista, tarkoituksenaan edistää ympäristön säilymistä tuleville sukupolville. (1.)

Opinnäytetyön tavoitteena oli etsiä ja tuottaa markkinointimateriaalia Geosynt Oy:lle sähköisistä vuodonilmaisumenetelmistä. Opinnäytetyön tuotoksena syntyvää materiaalia käytetään Geosynt Oy:n markkinoinnissa sekä uusien liiketoimintojen kehittämisessä.

Geosynt Oy:n vuosien 2016 - 2018 aikana tekemien ekstruusiohitsausten laatu-aineistoja vuotojen syntymekanismeista kartoitettiin osana opinnäytetyötä. Aineiston analysoimisella pyrittiin kartoittamaan vaurioiden syntymekanismeja Geosynt Oy:n asennuskohteissa yrityksen laatu järjestelmän kehittämistä varten. Vauriot luokiteltiin yrityksen kannalta merkityksellisesti vaurioihin, joihin voidaan vaikuttaa ja vaurioihin, joihin ei voida vaikuttaa. Ekstruusioaineiston luokittelua tarkastellaan luvussa 4.2. Analysoitua aineistoa käsitellään luvussa ainoastaan havainnollistavasti, koska aineisto on tarkoitettu ainoastaan Geosynt Oy:n sisäiseen käyttöön ja sitä ei voida julkaista yleisesti saataville.

Opinnäytetyön teoriaosuudessa käsitellään yleisesti geomembraanin vaurioitumiseen johtavia tekijöitä. Tarkoituksena on taustoittaa lukijalle, miksi vuodontarkkailua tarvitaan. Vaurioiden syntymekanismien jälkeen käsitellään erilaisia sähköisiä vuodontarkkailumenetelmiä ja niiden toimintaedellytyksiä. Lopuksi esitän Geosynt Oy:n vuosien 2016 - 2018 aikana tekemien ekstruusio korjausten aineistoanalyysin luokittelun taustoja.

Opinnäytetyössä keskitytään ainoastaan ympäristö- ja infrarakentamisessa sekä teollisuudessa käytettävien geomembraanien, eli muovikalvojen, sähköiseen vuodontarkkailuun. Opinnäytetyön ulkopuolelle on jätetty talonrakentamisessa käytettyjen geomembraanien, kuten kattojen ja uima-altaiden tiivisrakenteiden sähköinen vuodontarkkailu sekä muoviseoksista valmistettujen putkilinjojen vuodontarkkailu.

## 2 GEOMEMBRAANIRAKENTEIDEN TIIVEYS JA VUODOT

Geomembraaneja käytetään estämään haitallisten aineiden päätymistä ympäristöön kaatopaikkojen, teollisuusalueiden tai muiden vastaavien kohteiden tiivistysrakenteista. Tiivistysrakenteissa olevien vuotojen määrä on minimoitava, jotta ympäristöön ei päädy haitallisia aineita, kuten esimerkiksi kemikaaleja, sulfideja tai kaivosjätteitä. Vuotojen jatkuessa pitkään on vaarana, että geomembraanin alapuoliset rakenteet syöpyvät pois aiheuttaen entistä suuremman vaaran ympäristölle rakenteiden pettäessä. (2, s. 2; 3; 4; 5; 6.) Jatkuvat ja suuret tiivistysrakenteiden vuodot saattavat aiheuttaa myös tuotantotappioita teollisuuslaitoksille.

Ensimmäiset suuren mittakaavan geomembraanirakenteet tulivat kaivosteollisuuden käyttöön 1970-luvun alkupuolella Yhdysvalloissa (7, s. 1). Pian tämän jälkeen Euroopan kaivosteollisuudessa otettiin käyttöön ensimmäiset geomembraanirakenteet. Suomessa geomembraanirakenteet ovat yleistyneet vasta 1990-luvulla. (3; 4; 5; 6.)

Suomessa on saatu useita positiivisia käyttökokemuksia geomembraanien käytämisestä maanrakentamisessa, mikä puolestaan on vauhdittanut geomembraanien yleistymistä rakennusmateriaalina. Rikkinäiset geomembraanit eivät täytä niille asetettua tehtävää toimia tiivisrakenteina, joten geomembraanien eheydestä huolehtiminen on tärkeää. Rikkinäisten geomembraanien aiheuttamiin ongelmiin havahduttiin Yhdysvalloissa sekä Euroopassa jo 1980-luvulla. Tällöin ryhdyttiin tutkimaan geomembraanien tiiveyttä ja käyttäytymistä eri olosuhteissa. (3; 4; 5; 6.)

### 2.1 Geomembraanirakenteiden tiiveyden valvonta

Mikään olemassa olevista laatujärjestelmistä ei voi täysin taata geomembraanirakenteen 100%:sta eheyttä asentamisen jälkeen. Nykyisillä asennusmenetelmillä ei voida täysin ennalta ehkäistä geomembraanin vaurioitumista. Giroud ja

Bonaparte (1988) esittivät toteavan kysymyksen: ”*All liners leak, including geomembranes, but how much?*”. Siitä lähtien tutkijat ovat pyrkineet vastaamaan tähän kysymykseen. (8, s. 1; 9, s. 3.)

Aiheesta on tehty lukuisia tutkimuksia, mutta ensimmäisenä erittäin kattavana tutkimuksena voidaan pitää Giroud'n sekä Bonaparten (1988) tekemää tutkimusta. Tutkimuksessaan he pyrkivät selvittämään, kuinka paljon geomembraanirakenteet todellisuudessa vuotavat. (8.)

Giroud ja Bonaparte (1988) toteavat tutkimuksessaan, ettei kalvorakenteen tiiveyden kannalta ole olennaista se, onko kalvorakenteessa reikiä tai vaurioita, sillä niitä on aina. Merkitystä on ainoastaan sillä, missä nämä vuotokohdat sijaitsevat ja kuinka suuria vuodot ovat. Giroud ja Bonaparte (1988) kehittivät tutkimuksensa pohjalta matemaattisen laskentatavan, jonka avulla voidaan laskea geomembraanirakenteiden läpi tapahtuvan vuodon määrä ympäristövaikutusten arvioimiseksi. (8.)

Ympäristönsuojelulaissa on säädetty ympäristön pilaantumisen ehkäisemisestä sekä ympäristön tahallisesta tai tahattomasta kuormittamisesta. Ympäristönsuojelulain yleisten periaatteiden mukaan ympäristön pilaantumisen ehkäisemistä on tehtävä tarkoituksenmukaisia sekä kustannustehokkaita toimia yhdistämällä. Toimien tarkoituksena on ennaltaehkäistä ympäristölle aiheutuvien vaarojen syntymistä. (10.)

Ympäristönsuojelulain asettamien velvoitteiden valvonnasta vastaavat valvontaviranomaiset. Valvontaviranomaiset määrittelevät ympäristön suojelemiseksi tehtävien toimenpiteiden riittävyyden. Valvontaviranomaiset määrittävät myös rajat arvot ympäristöön vaikuttavien hankkeiden ympäristöön päästämille haitta-ainemäärille. Ympäristöviranomaisen tehtävänä on myös arvioida, mikä on sallittu enimmäismäärä geomembraanirakenteiden läpi tapahtuvalle vuodolle. (10.)

Koska geomembraanirakenteet eivät ole täysin tiiviitä, niiden läpi vuotavan aineksen määrää pyritään rajaamaan muutoin. Tyypillisimmät sekä yleisesti hyväksytyt

menetelmät tiiveyden parantamiseen ovat kaksoiskerrosrakenteen sekä savikerroksen käyttäminen tiivisrakenteena. Paksu ja kallis savikerros voidaan myös korvata bentoniittimatolla, joka on ominaisuuksiltaan vastaavanlainen kuin savi-kerros. (3; 4; 5; 6.)

## 2.2 Geomembraanirakenteiden vuodot ja niiden arvioiminen

Geomembraanirakenne voi vuotaa eri tavoilla. Vuotoa voi tapahtua geomembraanin kyllästymisen, geomembraanin lävitse tapahtuvan johtumisen kautta tai pistosten sekä selkeiden reikien kautta. Kyllästymisellä viitataan nestemäisten aineiden geomembraanin läpäisemiseen ja johtumisella puolestaan kaasumais-ten aineiden geomembraanin läpäisemiseen. Geomembraanin lävitse tapahtu- van johtumisen ja geomembraanin kyllästymisen kautta tapahtuva geomembraa- nirakenteen vuotaminen edellyttää kuitenkin, Giroud'n ja Bonaparten tutkimuksen (1988) mukaan, 50 - 100 kPa:n painetta. Tämä paine vastaa noin 5 - 10 metrin korkeuseroa veden alla. (8, s. 15 - 17.)

Kyllästymisen kautta tapahtuvan nestemäisen aineksen vuodon määrä voidaan laskea kaavalla 1 tai kaavalla 2, jotka pohjautuvat Darcyn yhtälöön. Molemmat kaavat ovat laajalti käytössä, eivätkä ne sulje toisiaan pois. Usein kuitenkin suositaan kaavaa 2 käytännön syiden takia. (8, s. 15 - 17.)

$$q_g = \frac{Q_g}{A} = k_g * i = \frac{k_g * \Delta h}{T_g} \quad \text{KAAVA 1}$$

missä

$q_g$  = kyllästymisestä johtuva vuoto yhtä pinta-alayksikköä kohden

$Q_g$  = kyllästymisestä johtuva vuoto

$A$  = pinta-ala

$k_g$  = geomembraanin hydraulinen johtavuus

$i$  = hydraulinen gradientti, eli vesivietto

$\Delta h$  = hydraulinen korkeus

$T_g$  = geomembraanin paksuus

$$q_g = \frac{Q_g}{A} = \frac{m_g}{T_g} \quad \text{KAAVA 2}$$

missä

$q_g$  = geomembraanin lävitse tapahtuva vuoto, yhtä pinta-alayksikköä kohden

$Q_g$  = geomembraanin lävitse tapahtuva vuoto

$A$  = pinta-ala

$m_g$  = geomembraanin johtumiskerroin, läpäisykerroin

$T_g$  = geomembraanin paksuus

Kaasumaisessa olomuodossa olevien aineiden johtumista geomembraanin lävitse voidaan arvioida Fickin yhtälön avulla. Fickin yhtälö on esitetty kaavassa 3. Yhdistämällä Fickin yhtälöön kaasun paineen ja suhteellisen ilmankosteuden yhtälö, kaava 4, saadaan Fickin yhtälöstä johdettua kaava 5. Kaava 5 huomio geomembraanin eri puolilla vallitsevan kosteuden geomembraanin lävitse virtaavan kaasun määrän arvioinnissa. Vaikka Fickin yhtälön yhteydessä puhutaan vesihöyryistä, samaa kaavaa voidaan käyttää myös muille kaasumaisille aineille. (8, s. 20 - 21.)

$$WVT = \frac{M}{A*t} = \frac{D_g*\Delta p}{T_g} \quad \text{KAAVA 3}$$

missä

$WVT$  = Water Vapor Transmission rate, Vesihöyryn virtauksen määrä geomembraanin lävitse

$M$  = geomembraanin lävitse virtaavan kaasun massa

$A$  = pinta-ala

$t$  = aika

$D_g$  = geomembraanin vesihöyrydiffuusiokerroin

$\Delta p$  = geomembraanin ylä- ja alapuolen paine-ero

$T_g$  = geomembraanin paksuus

$$p = p_s * H$$

KAAVA 4

missä

$p$  = kaasun paine

$P_s$  = kaasun paine saturaatiopisteessään

$H$  = suhteellinen kosteus

$$WVT = \frac{M}{A*t} = \frac{D_g * P_s * \Delta H}{T_g}$$

KAAVA 5

missä

$WVT$  = Water Vapor Transmission rate, geomembraanin lävitse virtaavan kaasun määrä

$M$  = geomembraanin lävitse virtaavan kaasun massa

$A$  = pinta-ala

$t$  = aika

$D_g$  = geomembraanin höyrydiffuusiokerroin

$P_s$  = kaasun paine saturaatiopisteessään

$\Delta H$  = geomembraanin ylä- ja alapuolen suhteellisen kosteuden ero

$T_g$  = geomembraanin paksuus

Geomembraanin lävitse tapahtuvan kyllästymisen ja johtumisen aiheuttamaan vuodon määrään vaikuttaa merkittävästi geomembraania ympäröivä aines. Giroud ja Bonaparte (1988) viittaavatkin useisiin muihin tutkimuksiin (August –

Tatzky 1984; Haxo et al. 1984; Haxo & Waller 1987), joissa on käsitelty eri kemiallisten aineiden ja geomembraanien välistä kyllästymistä ja johtumista. Heidän mukaansa tutkimukset osoittavat jopa orgaanisten kemikaalien johtuvan ja kylästyvän geomembraanin lävitse huomattavasti nopeammin ja suuremmissa määrissä kuin esimerkiksi veden. Geomembraanin lävitse kyllästymällä tai johtumalla vuotavat ainekset eivät ole ympäristöriski, sillä näin tapahtuvan vuodon määrä on verrattain pieni. (8, s. 29.)

Pistosten kautta geomembraanin läpi tapahtuvan vuodon suuruus saadaan Giroud'n mukaan arvioitua Poiseuillen yhtälön, kaava 6, avulla. Reikien kautta tapahtuvan vuodon suuruutta voidaan arvioida Bernoullin yhtälön, kaava 7, avulla. Poiseuillen ja Bernoullin yhtälöt lähtevät siitä oletuksesta, että virtaus pääsee tapahtumaan esteettä geomembraanin lävitse ja geomembraanin ylä- ja alapuolella oleva materiaali on läpäisevyydeltään ääretön, eikä aiheuta estettä nesteen virtaukselle. (8, s. 30 - 33.)

Täytyy kuitenkin muistaa, että ympäristörakenteessa on harvoin tilannetta, jossa geomembraanin ylä- ja tai alapuolella ei olisi nesteen virtausta hidastavaa ainesta. Geomembraanin alapuolelle asennetaan 1-kerrosrakenteissa bentoniittimatto tai ominaisuuksiltaan vastaava savikerros. Nesteitä sisältävät allasrakenteet toteutetaan yleensä 2-kerrosrakenteena, jolloin alimmaisen geomembraanin alapuolella on bentoniittimatto ja yläpuolella salaoja- tai suojakerros. Suojakerroksen päälle tulee toinen geomembraani, jolloin rakenteessa on bentoniittimatto ja kaksi erillistä geomembraania. (10.)

$$Q = \frac{\pi * \rho * g * h_w d^4}{128 n * T_g}$$

KAAVA 6

missä

Q = pistoksen läpi tapahtuvan vuodon määrä

$\rho$  = nesteen tiheys

g = painovoiman aiheuttama kiihtyvyys

$h_w$  = geomembraanin päällä olevan nestekerroksen paksuus

$d$  = vuotokohdan halkaisija

$\eta$  = nesteen viskositeetti

$T_g$  = geomembraanin paksuus

$$Q = C_B * a \sqrt{2 * g * h_w} \quad \text{KAAVA 7}$$

missä

$Q$  = geomembraanin läpi tapahtuvan vuodon määrä

$C_b$  = reiän muodon mukaan määräytyvä kerroin

$a$  = vuotokohdan pinta-ala

$g$  = painovoiman aiheuttama kiihtyvyys

$h_w$  = geomembraanin päällä olevan nestekerroksen paksuus

Taulukkoon 1 on laskettu pistosten, halkaisijaltaan 0,1 ja 0,3 mm, sekä reikien, halkaisijaltaan 2 mm ja 11,3 mm, kautta vuotavan nesteen määrä. Laskennassa on käytetty kaavoja 6 ja 7. Laskennassa on oletettu geomembraanin paksuuden olevan 2,0 mm, nesteen (veden) viskositeetiksi 1,002 kg/ms, nesteen (veden) tiheydeksi 997 kg/m<sup>3</sup> ja reiän vuotokertoimeksi 0,6.

TAULUKKO 1. Geomembraanin vaurion lävitse virtaavan nesteen määrä.

Geomembraanin päällä olevan nestekerroksen paksuus [m] = $h_w$					
Vuodon halkaisija [mm]	0,003	0,03	0,3	3	30
* 0,1	0,003	0,031	0,310	3,105	31,049
* 0,3	0,251	2,515	25,149	251,493	2514,933
** 2	39,51	124,95	395,12	1249,47	3951,16
** 11,3	1261,31	3988,61	12613,10	39886,13	126131,01

Tulokset ovat yksikössä litraa per vuorokausi [L/day]

\* Pistoksen lävitse vuotavan nesteen määrän laskentakaava

\*\* Reiän lävitse vuotavan nesteen määrän laskentakaava

## 2.3 Geomembraanirakenteiden vauriot

Geomembraanien vaurioituminen niiden elinkaaren aikana on tiedostettu ongelma. Viime vuosina kyseistä aihetta ei ole kuitenkaan tutkittu paljoa. Syynä tähän lienee se, ettei geomembraanien asennustekniikoissa tai peittorakenteiden rakennustekniikoissa ole tapahtunut merkittävää kehitystä, mikä edesauttaisi geomembraanirakenteen ehjänä säilymistä.

2000-luvun alkupuolella tehtiin useita toisistaan riippumattomia tutkimuksia. Tutkimuksilla oli kuitenkin erilaiset intressit, joten niiden vertaileminen keskenään on vaikeaa. Osa tutkimuksista pyrki tuottamaan tietoa geomembraanirakenteiden vuotojen määrästä, kun taas osa tutkimuksista pyrki todistamaan vuodontarkkailun ja työnaikaisen laadunvalvonnan tärkeyttä. (11; 12.)

Vladimir Nosko ja hänen kollegansa Nathalie Touze-Foltz (2000) toteuttivat suuren tutkimuksen geomembraanirakenteiden eheydestä. Tutkimuksessaan he tutkivat yli kolmensadan eri kohteen sähköisten vuodontarkkailumittausten tuloksia. Osa mittauksista oli toteutettu peitetyille geomembraanirakenteille ja osa peittämättömille rakenteille. Kohteet, joille sähköistä vuodontarkkailua tehtiin, sijaitsivat eri puolilla maailmaa, 16 eri maassa. Kohteiden yhteenlaskettu pinta-ala oli yli 3 250 000 m<sup>2</sup>. Tutkimuksessaan Nosko ja Touze-Foltz jaottelivat havaintonsa kolmen pääkriteerin mukaan:

1. Vaurion sijainti
2. Vaurion koko
3. Vaurion aiheuttaja. (11, s. 2.)

### 2.3.1 Vuotojen sijainnit

Käsiteltäessä geomembraanirakenteen yleisimpiä vuotokohtia, geomembraanirakenne voidaan jaotella neljään eri osa-alueeseen. Osa-alueisiin jaottelussa hyödynnetään geomembraanirakenteiden ominaisuuksia sekä erityispiirteitä. Tärkeimmät jaottelussa huomioitavat ominaisuudet ovat geomembraanin alapuolisen pohjarakenteen kaltevuus, vuotokohdan sijainti geomembraanin reunasta

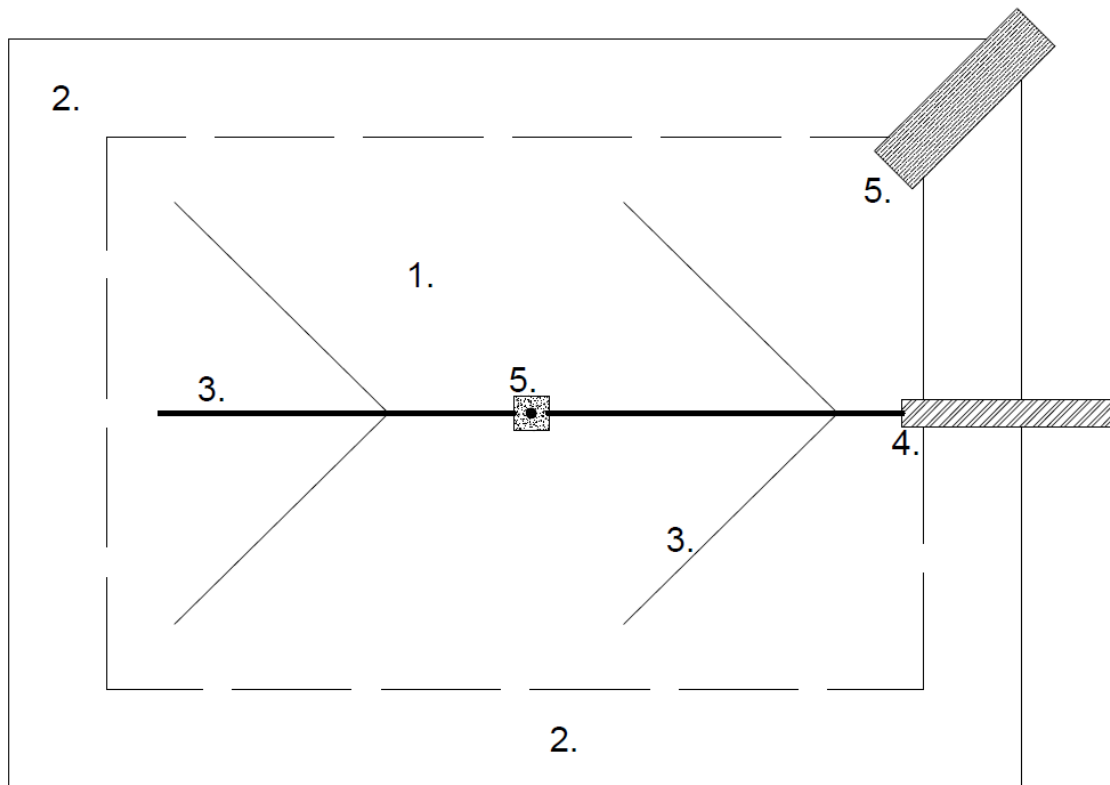
sekä etäisyys mahdolliseen erikoisrakenteeseen, kuten geomembraanin läpivientiin. (3; 4; 5; 6.)

Tasaiseksi luokiteltava alue on pinta-alallisesti suhteutettuna suurin yksittäinen luokka. Tasaiseksi luokiteltavalla alueella geomembraanivuodat, eli -kaistat tai -paneelit, ovat tyypillisesti tukeutuneet tasaisesti pohjarakennetta vasten, eikä pohjarakenteessa ole merkittäviä tai äkillisiä taitteita. Tasaiseksi luokiteltava alue on merkitty kuvaan 1 numerolla 1. (11.)

Taite- ja reuna-alueet ovat pinta-alojen mukaan suhteutettuna toiseksi suurin luokka. Taite- ja reuna-alueilla on tyypillistä, että geomembraanin pohjarakenteen kaltevuus muuttuu äkillisesti. Näillä alueilla joudutaan usein muotoilemaan geomembraania, jotta se tukeutuu tiiviisti pohjarakennetta vasten. Kuvassa 1 taite- ja reuna-alueet on merkitty numerolla 2. (11.)

Erikoiskohteiden alueet ovat kolmanneksi merkittävin luokka, pinta-alojen mukaan suhteutettuna. Erikoiskohteet pitävät sisällään erilaiset läpiviennit, geomembraanien liittämiset valulevyihin tai muut vastaavat tilanteet sekä erilaisten imu- ja syöttöputkien alapuolella olevat alueet. Kuvassa 1 erikoiskohteita on merkitty numeroilla 3, 4 ja 5. (11.)

Nosko ja Touze-Foltz (2000) ovat tutkimuksessaan halunneet jaotella erikoiskohteiden alueet tarkemmin. Heidän käyttämänsä jaottelu korostaa läpivientien (kuva 1. nro 4) sekä erilaisten putkien alapuolisten rakenteiden (kuva 1. nro 3) vaurioiden osuutta sekä vaurioitumismekanismien erilaisuutta. He ovat huomioineet myös muut erikoiskohteet, kuten tiet ja betonivalut tutkimuksessaan erillisinä alueina (kuva 1 nro 5). (11.)



*KUVA 1. Geomembraanirakenteen eri alueet (muokattu 11, s. 2).*

Noskon ja Touze-Foltzin (2000) mukaan lähes 78% tutkimuksen aikana havaituista vuodoista sijaitsi geomembraanirakenteen tasaisella alueella (11, s. 3). Vuotojen suuri lukumäärä selittyy tasaisen alueen suurena osuutena verrattuna kokonaispinta-alaan. Yleensä noin 95 % geomembraanirakenteen kokonaispinta-alasta voidaan katsoa olevan tasaiseksi luokiteltavaa aluetta.

Tutkimuksen lähes 4200 vuotokohdasta noin 10 % sijaitsi geomembraanirakenteiden taite- ja reuna-alueilla. Putkien alapuolella sijaitsi n. 4 % ja läpivientien kohdalla 2 %. Muissa geomembraanirakenteen kohdissa, kuten työmaateiden, betonirakenteiden sekä varastoalueiden kohdalla, vuotojen osuus oli n. 7 %. (8, s. 3.)

### 2.3.2 Vuotojen koko

Taulukossa 2 on esitetty geomembraanirakenteiden vuotojen aiheuttajia ja niiden jaottelua suhteessa vuotokohdan kokoon. Taulukossa esitettyjen vuotojen aiheuttajia käsitellään luvussa ”2.2.3 Vuotojen aiheuttajat”.

Taulukosta 2 voidaan nähdä, että suurin osa havaituista vuodoista on kooltaan 0,5 – 2,0 cm<sup>2</sup> ja vaurion aiheuttajana on kivi. Tämä johtuu geomembraanirakenteen tyypillisestä toteutustavasta, jossa geomembraanin päälle rakennetaan suojaerros kiviaineksesta, jonka raekoko vaihtelee 0 – 4 ja 0 – 16 mm:n välillä. Pienten kivien aiheuttamia pistemäisiä kuormituksia pyritään vähentämään asentamalla geomembraanin päälle suojaava suojageotekstiili.

*TAULUKKO 2. Vuotojen aiheuttajat suhteessa vuodon kokoon (muokattu 11, s. 3).*

Vuodon koko [cm <sup>2</sup> ]	Kivi [kpl]	%	Raskas-kalusto [kpl]	%	Saumot [kpl]	%	Viillot [kpl]	%	Asentajat [kpl]	%	Yhteensä
< 0,5	332	11,1	-	-	115	43,4	5	8,5	-	-	452
0,5 - 2,0	1720	57,6	41	6,3	105	39,6	36	61,0	195	84,4	2097
2,0 - 10	843	28,2	117	17,9	30	11,3	18	30,5	36	15,6	1044
> 10	90	3,0	496	75,8	15	5,7	-	-	-	-	601
Määrä	2985		654		265		59		231		4194
Yhteensä	71,17 %		15,59 %		6,32 %		1,41 %		5,51 %		100 %

Suuremmissa, yli 10 cm<sup>2</sup>:n kokoisissa vuodoissa, suurin syyllinen geomembraanien vaurioitumiseen on raskas kalusto. Raskaalla kalustolla tarkoitetaan maanrakennustöissä käytettäviä työkoneita kuten kaivinkoneita, dumppereita, pusku-traktoreita sekä kiviautoja. Kaikista yli 10 cm<sup>2</sup>:n kokoisissa vuodoista raskaan kaluston osuus on 83 %. Vuodot syntyvät usein suuren maansiirtokoneen osuessa geomembraaniin. Raskaan kaluston käyttäminen on kuitenkin välttämätöntä maanrakennustöissä. Harmittavan usein raskaan kaluston aiheuttamat vauriot jäävät piiloon geomembraanin peiterakenteen alle.

Taulukon 2 perusteella toisena merkittävänä tekijänä yli 10 cm<sup>2</sup>:n kokoisissa vuodoissa ovat kivet. Noskon ja Touze-Foltzin (2000) tutkimuksessa ei eritelty tar-

kemmin vuodon aiheuttaneen kiven kokoa tai kuinka kivi on päätynyt geomembraanin pinnalle (11, s. 3). Voidaan kuitenkin olettaa, että yli 10 cm<sup>2</sup>:n kokoisen vuodon aiheuttanut kivi voi olla ns. ”ampukivi” (kuva 2) (3; 4; 5; 6). Ampukivellä tarkoitetaan kallion louhimisen yhteydessä räjähdysten voimasta ilmaan sinkoutunutta kiveä, joka on pudonnut räjäytysalueen ulkopuolelle.

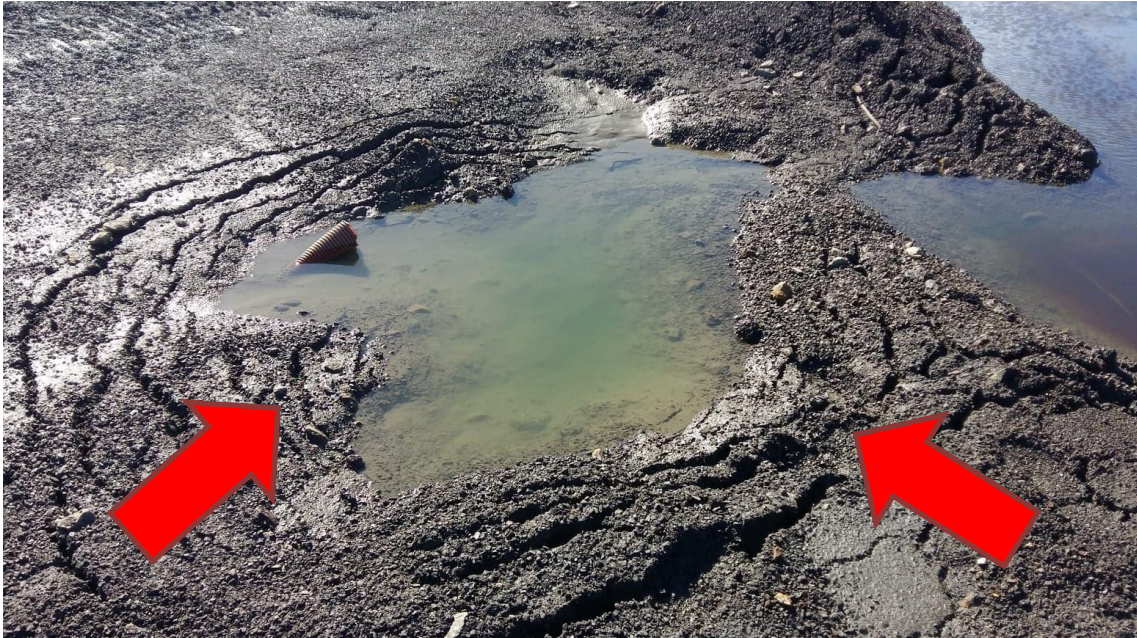


*KUVA 2. ”Ampukivi,” joka on lävistänyt suojaamattoman geomembraanin.*

### **2.3.3 Vuotojen aiheuttajat**

Suurin osa geomembraanin vaurioitumisista tapahtuu geomembraania suojaavan peiterakenteen rakentamisen yhteydessä (13, s. 5). Peiterakenne on hienojakoisesta, raekooltaan n. 0 – 16 mm:n maa-aineksesta tehtävä 300 - 500 mm:n paksu suojakerros, jonka tarkoituksena on suojata tiivistyskalvoa raskaan maansiirtokaluston sekä käytönaikaisen kuormituksen aiheuttamilta vaurioilta. Suurimpana syynä peiterakenteen rakentamisen aikana syntyviin vaurioihin ovat suoraan tiivistyskalvon päälle joutuneet kivet, joita ei ole havaittu peiterakennetta tehtäessä. Kivien aiheuttamien vuotojen osuus kaikista havaituista vuodoista on n. 71 % (11, s. 3). Peiterakenteiden painaumat eivät kuitenkaan aina johdu geomembraanirakenteen vuotamisesta, vaan ne saattavat johtua myöskin esimerkiksi

maa-aineksen tiivistymisestä, kuten kuvan 3 tapauksessa. Maa-aineksen tiivistyminen voi johtua jäisen maa-aineksen sulamisesta tai maa-aineksen kosteuden muuttumisesta.



*KUVA 3. Maa-aineksen tiivistymisestä johtunut painauma geomembraanin peiterakenteessa, jota epäiltiin vuotokohdaksi. Painauma on merkitty punaisilla nuolilla.*

Toiseksi suurimpana syynä geomembraanien vaurioitumiseen ovat asennustyössä käytettävien työkonoiden aiheuttamat vauriot n. 16 %:n osuudella. Asentajista sekä hitsauskoneista johtuvien geomembraanivaurioiden syiksi luetaan esimerkiksi asentajien huolimattomuus, erilaiset hiontavauriot sekä hitsauskoneiden odottamattomat rikkoutumiset. Näiden syiden osuus on n. 13 % geomembraanien vaurioista. (11, s. 3.)

Erikoiskohteiden (kuva 1, merkinnät 3, 4 ja 5) yhteydessä geomembraaniasentajien ammattitaito sekä huolellisuus korostuvat. Noskon ja Touze-Foltzin (2000) mukaan erikoiskohteissa havaittujen vuotojen suurin yksittäinen syy on hitsausauman pettäminen (11, s. 3). Tämä pitää hyvinkin paikkansa, sillä geomembraanirakenteet ja erityisesti läpiviennit joutuvat kovan rasituksen kohteeksi. Syynä

tähän on usein nesteen liike tai maapohjan elämisen seurauksena syntyneet epätoivotut liikkeet geomembraanissa. Epätoivottujen liikkeiden seurauksena geomembraanin ekstruusioliitos saattaa pettää, kuten kuvassa 4 on käynyt.

Ekstruusio- eli pursotehitsauksessa geomembraanit liitetään toisiinsa esilämmitämällä liitoskohtaa kuumailmapuhaltimella, jonka jälkeen liitoskohtaan pursoteetaan sulaa muovimassaa ekstruuderilaitteella. Ekstruuderilaitte sulattaa halkaisijaltaan 2 - 5 mm olevan muovilangan muovimassaksi, joka puristuu ekstruuderin kärjessä olevan suukappaleen läpi geomembraanien liitoskohtaan muodostaen pitävän sauman. (14, s. 37.)



*KUVA 4. Geomembraanin hitsausseama on pettänyt mekaanisen rasituksen takia.*

#### **2.4 Geomembraanin asentamisen aikainen ja jälkeinen laadunvalvonta**

Kuten aiemmin on todettu, yksikään geomembraanirakenne ei ole täysin tiivis eikä yksikään laatu järjestelmä voi täysin estää geomembraanien vaurioitumista. Tästä huolimatta nykyiset laadunvalvontamenetelmät keskittyvät enimmäkseen

geomembraanivuotien liitossaumojen testaamiseen menetelmillä, joista osa vaurioittaa saumaa. Saumaa vaurioittavista testauksista geomembraaniteollisuus on oppinut kahdessa vuosikymmenessä sen, että saumat ovat yleensä luotettavia, eivätkä ne lähes koskaan altistu merkittävälle kuormitukselle. Käytännössä saumat eivät koskaan ratkea elinkaarensa aikana ilman ulkopuolisia tekijöitä. (15, s. 1 - 3.) Ulkopuolisia tekijöitä ja niiden osuuksia geomembraanien vaurioitumiseen on esitetty taulukossa 2 sivulla 20.

#### **2.4.1 Geomembraanin asentamisen aikainen laadunvalvonta**

Asentamisen aikainen laadunvalvonta on osa geomembraanien asennustoimintaa. Laadunvalvonta on lähes aina pakollista ja tarkoin säädeltyä. Kaikilta geomembraanirakenteilta ei kuitenkaan edellytetä tiiveyttä, joten geomembraanirakenteen asentamisen aikaisissa laadunvalvontakäytännöissä on eroja. Asentamisen aikaisista laadunvalvontaa toteutetaan ennalta määrätyn laadunvalvontasuunnitelman pohjalta. Geomembraanien asennuksien laadunvalvontasuunnitelmat pohjautuvat ASTM-standardeihin, GRI:n julkaisemiin ohjeistuksiin sekä IAGI:n suosituksiin. (3; 4; 5; 6.)

Geomembraanirakenteen täydellistä tiiveyttä ei edellytetä kohteissa, joissa geomembraanirakenne on ainoastaan väliaikainen, tiivistysrakenne on toteutettu toisin tai geomembraani toimii ainoastaan eroosiosuojana. Puhtaan sadeveden viemäriverkostoon ohjaamiseen tai viivyttämiseen käytettyjen geomembraanirakenteiden, esimerkiksi hulevesialtaiden, täydellinen tiiveys ei myöskään ole välttämätöntä. Tiiveysvaatimuksen määrittää yleensä työtilaaja tai rakenteen suunnittelija yhdessä ympäristöviranomaisen kanssa. (3; 4; 5; 6.)

Vaikka laadunvarmistus on pakollista, sen toteutustavat, testimetodit sekä testaustiheys vaihtelevat. Vaihtelut johtuvat kohdemaan käytännöistä, ympäristöviranomaisten määräyksistä, asiakkaan toiveista sekä asennuksen toteuttavan yrityksen käytännöistä. Tilaajilla on usein liialliset odotukset geomembraanituotteiden toimintaa kohtaan. Liialliset odotukset voivat kohdistua tuotteiden kestävyyteen, hintaan sekä toimivuuteen erityisolosuhteissa. Liiallisten odotuksien takia

vaarana on, että asentamisen aikaisessa laadunvarmistuksessa tapahtuu laiminlyöntejä. Tilaaja voi esimerkiksi painostaa geomembraaniasentajia kiirehtimään asennuksen laadunvalvonnan kanssa aikataulullisten syiden takia. (3; 4; 5; 6; 12, s. 4.)

Suomessa geomembraanirakenteiden asentamisen aikainen laadunvalvonta keskittyy geomembraanien saumojen testaamiseen paine-, veto- sekä kuorintakokeilla. Geomembraanivuodille ei tehdä laajamittaisia tarkastuksia vaan ne tarkastetaan silmämääräisesti geomembraanin levittämisen sekä hitsaamisen yhteydessä. Valmis geomembraanirakenne tarkistetaan yhdessä rakennustyönvalvojan kanssa. (16, s. 5 - 7)

Forget, Rollin ja Jacquelin (2005) analysoivat tutkimuksessaan työnaikaisen laadunvalvonnan merkitystä geomembraanirakenteiden eheydelle. He havaitsivat työnaikaisen laadunvalvonnan pienentävän geomembraanirakenteen vaurioitumisen riskiä lähes 80 %:lla verrattuna kohteisiin, joissa ei tehty työnaikaista laadunvalvontaa. Työnaikainen laadunvalvonta yhdistettynä sähköiseen vuodon tarkkailuun pienensi geomembraanirakenteeseen jäävien vaurioiden riskin 6 %:iin verrattuna kohteisiin, joissa ei tehty minkäänlaista laadunvalvontaa. (12, s. 5.)

#### **2.4.2 Geomembraanin asentamisen jälkeinen laadunvalvonta**

Geomembraanirakenteiden eheydenvalvontaa voidaan tehdä peittämättömille tai peitetyille geomembraanirakenteille. Paljaalle geomembraanirakenteelle on huomattavasti helpompi tehdä eheydentarkastusmittauksia kuin peitetyille geomembraanirakenteille. Peitettyjen geomembraanirakenteiden eheydenvalvonta on kuitenkin huomattavasti tärkeämpää. Perkins kertoo Noskon vuonna 1999 tekemästä tutkimuksesta, jossa todettiin, että 73 % geomembraanirakenteen vaurioitumisista tapahtuu peite- tai kuivatuskerroksen rakentamisen aikana (17). Nämä vauriot jäävät lähes aina peiterakenteen alle piiloon, ellei geomembraanirakenteen eheyttä testata. Kuvassa 5 on esimerkki 300 mm:n paksuisen peiterakenteen alta löytyneestä vaurioituneesta geomembraanista.



*KUVA 5. Vaurioitunut geomembraani, joka on löytynyt sakasta ja kivituhkasta muodostuneen 300 mm:n paksun peiterakenteen alta.*

Geomembraanirakenteen valmistumisen jälkeiseen eheydenvalvontaan käytettävä menetelmä riippuu olosuhteista, geomembraanin tyypistä, onko geomembraani paljas vai peitetty sekä siitä, onko mittaus tarkoitus suorittaa kertaluontoisesti vai jatkuvana mittauksena. Jos geomembraanin eheyttä on tarkoitus tarkkailla jatkuvasti, tulee tämä ottaa huomioon rakenteen suunnitteluvaiheessa kustannustehokkuuden maksimoimiseksi. (2.)

Luvussa neljä esittelen erilaisia sähköisiä vuodontarkkailumenetelmiä, joita voidaan hyödyntää peitetyn tai paljaan geomembraanirakenteen eheyden testaamiseen. Paljaalle geomembraanirakenteelle tarkoitetut vuodontarkkailumenetelmät soveltuvat myös työnaikaiseen laadunvalvontaan. Peitetyille geomembraanirakenteille kehitettyjä menetelmiä voidaan soveltaa nesteen peitossa tai maa-aineksen alla oleviin geomembraanirakenteisiin. Esiteltävät menetelmät koostuvat kertaluontoisesti tehtävistä tarkastuksista sekä kiinteistä vuodonpaikannusjärjestelmistä.

### **3 SÄHKÖISET VUODONTARKKAILUMENETELMÄT**

Geomembraanirakenteiden työmaalla tapahtuvaa laadunvalvontaa ei voida täysin korvata sähköisellä vuodontarkkailulla. Sähköinen vuodontarkkailujärjestelmä ainoastaan täydentää hyvää laadunvalvontajärjestelmää, ei korvaa sitä. Hyvä laadunvalvontajärjestelmä ennakoii ja poistaa geomembraanirakenteelle mahdollisesti aiheutuvia riskejä jo ennen niiden syntymistä. Sähköisellä vuodontarkkailujärjestelmällä voidaan varmistua erityisesti asennustyön lopputuloksesta, geomembraanirakenteen tiiveydestä sekä toimivuudesta sen koko elinkaaren ajan. (18.)

Geomembraanien valmistajat ovat käyttäneet sähköisiä vuodontarkkailumenetelmiä testatakseen tuotteidensa eheyttä tuotantoprosessin aikana 1980-luvulta lähtien. Seuraava askel olikin sähköisten vuodontarkkailumenetelmien siirtäminen tuotantolaitoksista rakennustyömaille, joilla geomembraanien asentaminen tapahtuu. Sähköisten vuodontarkkailumenetelmien tuominen rakennustyömaille alkoi kaupallisesti USA:ssa vuonna 1985. Euroopan ensimmäiset käyttökokeet sähköisistä vuodontarkkailumittauksista saatiin vasta vuonna 1991, jonka jälkeen menetelmien käyttö yleistyi ympäri maailmaa aina 2000-luvulle asti. 2000-luvun alussa ASTM julkaisi ensimmäisen virallisen sähköistä vuodontarkkailua koskevan standardin. (2, s. 2; 9; 18, s. 2; 19.)

#### **3.1 Yleisiä asioita sähköisestä vuodontarkkailusta**

Sähköinen vuodontarkkailu voi kuulua osaksi nykyaikaista geomembraanirakenteiden laadunvalvontajärjestelmää. Sähköistä vuodontarkkailua hyödyntämällä on mahdollista saavuttaa suurin todennäköisyys geomembraanirakenteen eheydelle (9). Sähköistä vuodontarkkailua voidaan tehdä rakentamisen aikana, sen loppuvaiheessa sekä rakenteen ollessa jo käytössä. Vuodontarkkailuun käytettävän mittausmetodin valintaan vaikuttavat oleellisesti mitattavan kohteen

- mittausolosuhteet, kuten sää
- sähköiset ominaisuudet

- geomembraanin tyyppi
- maastonmuodot
- valmiusaste
- peiterakenteen paksuus sekä peiterakenteen materiaali (2.)

Sähköiset vuodon tarkkailumenetelmät on jaoteltu usealla eri tavalla, lähteestä riippuen. Menetelmät voidaan ryhmitellä liikuteltavuuden, testattavan rakenteen tai peittotavan mukaan eri ryhmiin. Eniten käytetty jaottelu on peittotapaan perustuva ryhmittely, jossa mittausmenetelmät jaotellaan sen mukaan, tehdäänkö mitaus paljaalle vai peitetulle geomembraanirakenteelle. Tämän jaottelun lisäksi mittausmenetelmät voidaan jaotella myös

- liikuteltaviin tai kiinteisiin mittausmenetelmiin
- nesteen alapuolella olevien geomembraanirakenteiden mittausmenetelmiin
- kiinteään maa-aineksen alapuolella olevien geomembraanirakenteiden mittausmenetelmiin (2, s. 3; 20, s. 2.)

### **3.2 Toimivuuden reunaehdot**

Jotta sähköinen vuodontarkkailu voidaan toteuttaa luotettavasti, tulee mittauksen kannalta kriittiset perusedellytykset täyttyä. Perusedellytyksiä ovat seuraavat asiat.

1. Geomembraanin rakenteen päällä ja alla tulee olla sähköä johtava kerros. Tietyissä tapauksissa sähköä johtava kerros voi olla myös geomembraanissa itsessään.
2. Geomembraanin yläpuolella mahdollisesti oleva peiterakenne ei saa olla suorassa kontaktissa geomembraanin alapuoliseen rakenteeseen.
3. Sähkövarauksen on päästävä kulkeutumaan geomembraanin läpi vauriokohdassa hyvin.
4. Sähkövarauksen ainoa yhteys mittauselektrodien välillä saa olla geomembraanin vauriokohdissa. (2, s. 2; 21, s. 1.)

Sähköisen vuodontarkkailun luotettavuuden kannalta on tärkeää, että sähköä johtava kerros sijaitsee geomembraanin ylä- tai alapuolella ja että se tukeutuu riittävän hyvin geomembraanin alapuolisiin rakenteisiin. Sähköä johtava kerros voi sijaita myös geomembraanissa itsessään erikoispinnoitteena, jolloin se korvaa toisen sähköä johtavista kerroksista. Sähköä johtava pinnoite vähentää riskiä vuodontarkkailumittauksen epäonnistumisille ruttujen, taitteiden, paltteiden tai muiden huonosti sähköä johtavien kohtien kohdalla. (21, s. 1; 22, s. 10.) Tällä hetkellä ainoastaan kaksi eurooppalaista geomembraanivalmistajaa tuottaa geomembraaneja, joissa on sähköä johtava pinnoite.

Geomembraanirakenne, jolle ollaan tekemässä sähköistä vuodontarkkailumittauksia, tulee erottaa ympäröivästä maastosta. Yleensä tämä tehdään käyttämällä kaivantoa, joka kiertää mitattavaa aluetta. (22, s. 3.) Jos geomembraanin yläpuolinen peiterakenne on yhteydessä alapuoliseen peiterakenteeseen, vaarana on vuodontarkkailumittauksen epäonnistuminen mittausjännitteen ”karkaamisen” vuoksi. (3; 4; 5; 6.)

Karkaamisella tarkoitetaan tilannetta, jossa geomembraanin yläpuolisen ja alapuolisen peiterakenteen välille syntyy oikosulku muussa kohdassa kuin geomembraanin vaurion kohdalla. Mittausjännitteen karkaaminen tapahtuu usein sähköä johtavien kappaleiden, esineiden tai rakenteiden kautta. Tällaisia kappaleita ja rakenteita ovat esimerkiksi kulkutiet ja rampit, syöttö- ja purkuputket, pelastusköydet tai geomembraanin pintaan jäänyt likakerros.

Polyeteenistä, PVC:stä tai bitumista valmistetut geomembraanit toimivat sähköä eristävänä kerroksena korkean resistiivisyytensä ansiosta. Korkean resistiivisyyden omaavassa ja ympäröivästä maastosta erotetussa geomembraanirakenteessa, mittausjännitteen ainoa maadoittumisreitti on geomembraanirakenteen vaurio. Vauriokohdassa geomembraanin yläpuolelle syötetty mittausjännite pääsee kosketuksiin geomembraanin alapuolisen rakenteen kanssa, jolloin se maadoittuu. (2, s. 2; 21, s. 1.) Jotta sähköisellä vuodontarkkailulla pystyttäisiin havaitsemaan geomembraanissa olevat vauriot, tulee vaurioituneessa kohdassa olla

hyvä sähköinen jatkuvuus geomembraanin ylä- ja alapuolen välillä. Tällöin virta pääsee kulkemaan ongelmitta geomembraanin vauriokohdan läpi elektrodeihin aiheuttaen potentiaalimuutoksen sähkökentässä, joka voidaan havaita mittalaitteilla. Sähköisen johtavuuden saavuttaminen vuotokohdassa ei ole yleensä ongelma, sillä geomembraanin alapuolelle tiivistyvä kondenssivesi kerääntyy vauriokohtiin mahdollistaen hyvän sähköisen jatkuvuuden (3; 4; 5; 6; 12, s. 3; 15, s. 4.)

### **3.3 Vuodontarkkailumenetelmät peittämättömälle geomembraanille**

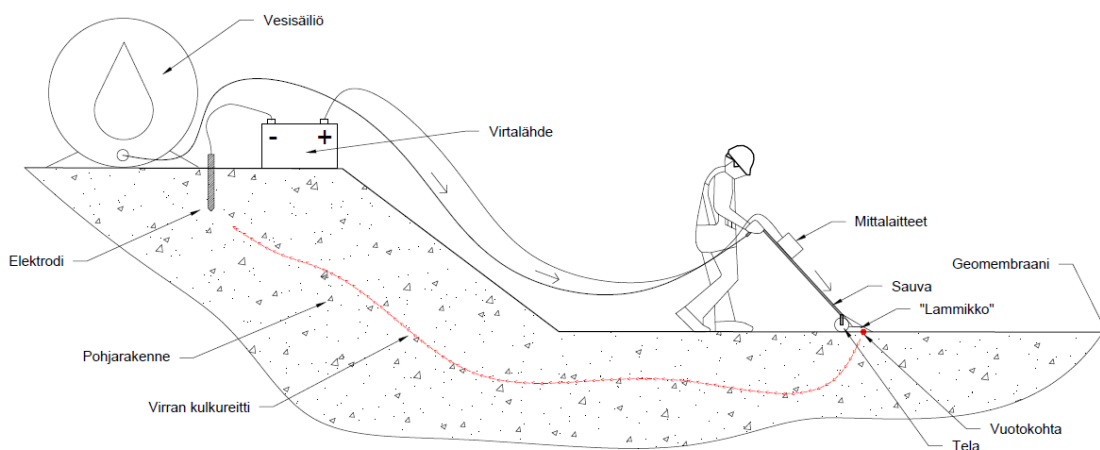
Peittämättömän geomembraanin eheyden tarkastamiseen voidaan käyttää useita eri vuodontarkkailumenetelmiä. Kullakin eri menetelmällä on omat etunsa sekä menetelmäkohtaiset vaatimukset toiminnalleen. Menetelmäkohtaiset vaatimukset liittyvät usein geomembraanin tyyppiin, mitattavan kohteen maastonmuotoihin, tarvittavaan mittaustalustukseen, rakenteen sähköjohtavuuteen tai tarvittavan veden määrään. (2, s. 3 - 4; 22, s. 1 - 2.)

Peittämättömälle geomembraanirakenteelle tehtäville vuodontarkkailumittauksille on yhteistä niiden nopea käyttöönottoaika, yksinkertaisuus sekä ennen kaikkea mittaustarkkuus. Kaikilla käytetyimmillä mittaustavoilla voidaan havaita suotuisissa olosuhteissa jopa yhden (1) millimetrin halkaisijaltaan olevia vuotokohtia. (2, s. 4.)

Ilmoitettu mittaustarkkuus on usein kuitenkin teoreettinen, sillä mittaustuloksen tarkkuuteen vaikuttaa oleellisesti geomembraanin alapuolella olevan materiaalin sähköjohtavuus. Geomembraanin alapuolisen rakenteen sähköjohtavuus vaihtelee kohteen mukaan. Usein sähköjohtavuutta heikentävät myös geomembraanin suojaamiseen käytetyt materiaalit, kuten suojageotekstiilit sekä bentoniitimatot (15, s. 5 - 7).

### 3.3.1 Vesilammikkomenetelmä (Water Puddle Methode)

Vesilammikkomenetelmä (*Water Puddle Methode*) on suosituin sähköinen vuodontarkkailumenetelmä paljaille, tasaisille, sähköä johtamattomille geomembraanirakenteille. Vesilammikkomenetelmällä voidaan testata geomembraanin eheys jo asennuksen aikana, mutta suositeltavampaa on testata vasta täysin valmis geomembraanirakenne. Täysin valmiin geomembraanirakenteen testaamisen aikana mittauksessa käytettävä vesi ei pääse valumaan pois mittausalueelta yhtä helposti kuin keskeneräistä geomembraanirakennetta mitatessa. Vesilammikkomenetelmällä kyetään mittaamaan n. 1000 m<sup>2</sup>/h/mittaja ja sillä voidaan havaita teoriassa yhden (1) millimetrin suuruisia vaurioita. Kokeneelta mittajalta vesilammikkomenetelmän käyttöönottamiseen kuluu yhdestä kolmeen tuntia. (2, s. 3 - 4; 12, s. 2.) Esimerkki vesilammikkomenetelmän mittausjärjestelystä on esitetty kuvassa 6.



KUVA 6. Vesilammikkomenetelmän mittausjärjestelyt (muokattu 2, s. 5).

Vesilammikkomenetelmä ei sovellu käytettäväksi luiskissa, jotka ovat jyrkempiä kuin 2:1, sillä mittaustarkkuus heikkenee luiskien jyrkentyessä, ja veden virratessa pois mitattavasta kohdasta. Jyrkissä luiskissa suositellaankin käytettäväksi valokaari- tai vesisauvamenetelmää. Vesilammikkomenetelmän mittaustarkkuus heikkenee, jos geomembraanissa esiintyy paljon lämpölaajenemisen aiheuttamia rypyjä. Rypyjien kohdalle muodostuu usein ilmarako geomembraanin ja geo-

membraanin alapuolella olevan johtavan kerroksen välille. Tällöin geomembraanin päälle ruiskutettava vesi ei pääse muodostamaan sähköä johtavaa siltaa vauriokohdan läpi. Ryppyjen aiheuttaman ongelman välttämiseksi, mittaukset kannattaa suorittaa yöllä tai varhain aamulla, jolloin geomembraaniin ei ole vielä ehtinyt muodostua lämpölaajenemisesta aiheutuneita rypyjä. (2, s. 4; 12, s. 2; 15, s. 9; 22, s. 1.)

Ennen mittausta on varmistettava, ettei geomembraanin alapuolella oleva maaines ole yhteydessä geomembraanin yläpuolella olevaan aineeseen. Helpoiten tämä onnistuu nostamalla geomembraanin reunat ylös. Reunojen ylös nostaminen myös edesauttaa veden pysymistä mittausalueella. Mittauksen esivalmisteluita tehtäessä, geomembraanin alapuolella olevaan pohjarakenteeseen asennetaan maadoituselektrodi mittausta varten. Maadoituselektrodi liitetään virtalähteen miinusnapaan maadoituspisteen luomiseksi. Mittausvälineistön toiminta testataan etsimällä mitattavalta alueelta sinne tarkoituksella tehty vaurio. (2, s. 3; 21, s. 3; 22, s. 1.)

Varsinaisessa mittauksessa geomembraanin pintaan johdetaan pienjännite, joka on suuruudeltaan 12 – 36 V. Jännitteen johtamiseen käytetään kuvassa 7 esitetyn kaltaista vesitelaa, joka suihkuttaa ulkoisesta vedenlähteestä vettä eteensä muodostaen telan ja geomembraanin väliin pienen vesilammikon. Vesitela on liitetty virtalähteen plusnapaan, joten vettä suihkuttaessaan se toimii johtimena. Mahdollisen vuotokohdan löytyessä veden kautta kulkeva virta pääsee kulkeutumaan geomembraanin läpi maahan sulkien virtapiirin. Mittalaite havaitsee virtapiirin sulkeutumisen ja antaa visuaalisen sekä auditiivisen indikaation vaurion löytymisestä. (2, s. 3 - 4; 12, s. 2.)



*KUVA 7. Vesilammikkomenetelmässä käytettävä noin metrin levyinen vesitela (23).*

### **3.3.2 Vesisauvamenetelmät (Water Lance Methode)**

Vesisauvamenetelmä (*Water Lance Methode*) on toinen paljaalle geomembraanirakenteelle tehtävistä vuodontarkkailumittauksista, jossa käytetään vettä vuodon paikallistamiseen. Vesisauvamenetelmä noudattaa samanlaista toimintaperiaatetta ja indikointia vuodon löytymisestä kuin vesilammikkomenetelmäkin. Vesisauvamenetelmässä vesi kuitenkin johdetaan geomembraanin pintaan käyttämällä paineistettua vettä suihkuttavaa vesisauvaa vesitelan sijaan. (2, s. 4 - 5; 9.)

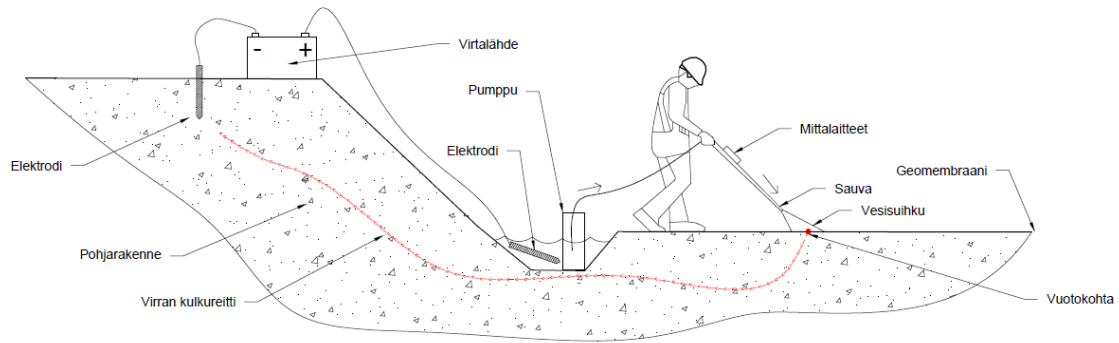
Vesisauvan antaman vesisuihkun kapeuden takia mittausnopeus on alhaisempi kuin vesilammikkomenetelmässä. Mittausnopeus on kuitenkin kokeneella mittajalla n. 900 m<sup>2</sup>/h/mittaja. Toisin kuin vesilammikkomenetelmää, vesisauvamenetelmää voidaan käyttää myös luiskissa, jotka ovat jyrkempiä kuin 2:1. Vesisauva- ja vesilammikkomenetelmiä käytetäänkin usein yhdessä tämän takia.

Jyrkkiä luiskia mitattaessa on kuitenkin syytä aloittaa mittaaminen alhaalta ja edetä ylöspäin, ettei luiskaa alaspäin valuva vesi sotke mittausta. (2, s. 4 - 5; 9; 22, s. 1 - 2.) Kuvassa 8 on vesisauva.



*KUVA 8. Vesisauvamenetelmässä käytettävä vesisauva (24).*

Vesisauvamenetelmän käyttäminen vaatii huomattavan määrän vettä toimiakseen verrattuna vesilammikkomenetelmään. Ongelman ratkaisemiseksi mittamiseen käytettyä vettä kerätään keruuojiin ja pumpataan edelleen uudelleen käytettäväksi mittauksessa. Vesikierto mahdollistaa virtalähteen plusnavasta lähtevän elektrodin asettamisen suoraan vesilähteeseen, kuten alueelta pois virtaavan veden keräämiseen käytettyyn keruuojaan. (2, s. 4 - 5; 22, s. 1 - 2.) Havainnollistava kuva vesisauvamittauksen mittausjärjestelyissä on esitetty kuvassa 9.



KUVA 9. Vesilammikkomenetelmän mittausjärjestelyt (muokattu 2, s. 5).

### 3.3.3 Kipinätestausmenetelmä (Spark Testing Method)

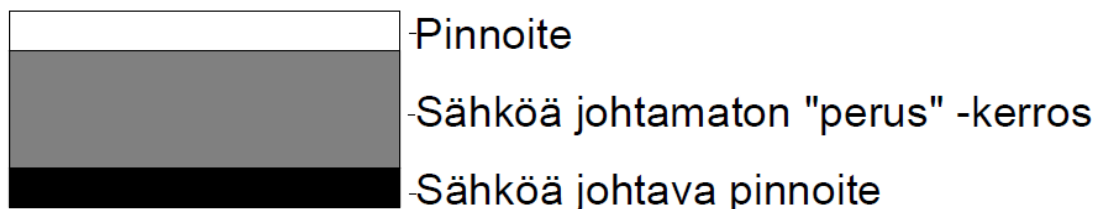
Kipinätestaus eli kipinäkoe (*Spark Testing Method*) on peittämättömälle, sähköä johtavasta erikoisgeomembraanista valmistetulle geomembraanirakenteelle suoritettava sähköinen vuodonpaikannusmittaus. Kipinätestauksen toiminta poikkeaa aiemmin esitellyistä sähköisistä vuodonpaikannusmittauksista huomattavasti, sillä se ei vaadi toimiakseen vettä, kiinteää maadoituspistettä tai geomembraanirakenteen alapuolella olevaa sähköä johtavaa kerrosta kuten muut sähköiset vuodonpaikannusmenetelmät. Kipinätestauksen toiminta perustuu sähköä johtavan kalvon ja mittalaitteiston välillä tapahtuvaan sähköstaattiseen induktioon eli influenssiin. (2, s. 6; 22, s. 2; 25, s. 1 - 3.) Esittelen näitä ominaisuuksia tässä luvussa myöhemmin.

Kipinätestausmenetelmä kehitettiin alun perin pinnoitettujen teräsputkien pinnoitteen eheyden tarkastamiseen. Menetelmässä negatiivisen varauksen omaava johdin eli maadoituselektrodi kiinnitetään teräsputken runkoon, jonka jälkeen positiivisen varauksen omaavaa koettinta kuljetetaan teräsputken pinnoitetta pitkin. Jos pinnoitteessa on vaurioita, koettimen kärjen ja teräsputken välille syntyy oikosulun seurauksena kipinä, joka pystytään havaitsemaan mittalaitteilla. Geomembraanien valmistajat havaitsivat menetelmän soveltuvan myös polyeteenistä valmistettujen geomembraanien eheyden valvontaan tuotantoprosessien aikana. (19, s. 2; 26; 27, s. 1.)

Sähköisten vuodontarkkailumenetelmien yleistyessä maailmalla, geomembraanien valmistajat ryhtyivät kehittämään kipinätestaukseen perustuvaa järjestelmää myös geomembraanien asentamisaikaiseen sekä -jälkeiseen laadunvalvontaan työmaaolosuhteissa. Ongelmana oli geomembraanin alapuolisen rakenteen sähkönjohtavuuden varmistaminen kaikissa työmaaolosuhteissa. Työmaiden ja geomembraanien alapuolisten rakenteiden välillä oli eroja, eikä kipinätestaus ollut mahdollinen kaikissa työmaakohteissa. Tämä johtui ja johtuu edelleen geomembraanien alapuolisten rakenteiden sähkönjohtavuuden vaihtelusta. (17, s. 2; 18; 26.)

Ongelman ratkaisemiseksi geomembraanien valmistaja GSE kehitti erikoisvalmisteisen geomembraanin, jossa itsessään on sähköä johtava kerros. Sähköä johtava kerros sijaitsee geomembraanin alapuolella, kiinni geomembraanissa. Kerros muodostuu erikoisvalmisteisesta muoviseoksesta, joka lisätään geomembraanin valmistusprosessin aikana suoraan valmistettavan geomembraanin pintaan koekstruusion avulla. (26; 27, s. 1; 28, s. 2.)

Koekstruusiosta geomembraanien valmistamiseen käytettävät erilaiset muovimassat pursotetaan suulakkeiden läpi toistensa päälle ennen geomembraanin jäähdyttämistä. Geomembraanin peruskerroksen pintaan voidaan koekstruusion avulla liittää erilaisia pinnoitteita, kuten sähköä johtava kerros, kitakerrointa parantava pinnoite tai geomembraanin maisemointia helpottava väriyty. Kuvassa 10 on esitetty havainnollistava kuva sähköä johtavan geomembraanin poikkileikkauksesta. (26; 27, s. 1; 28, s. 2.)



*KUVA 10. Koekstruudatun sähköä johtavan geomembraanin poikkileikkaus (muokattu 19, s. 2).*

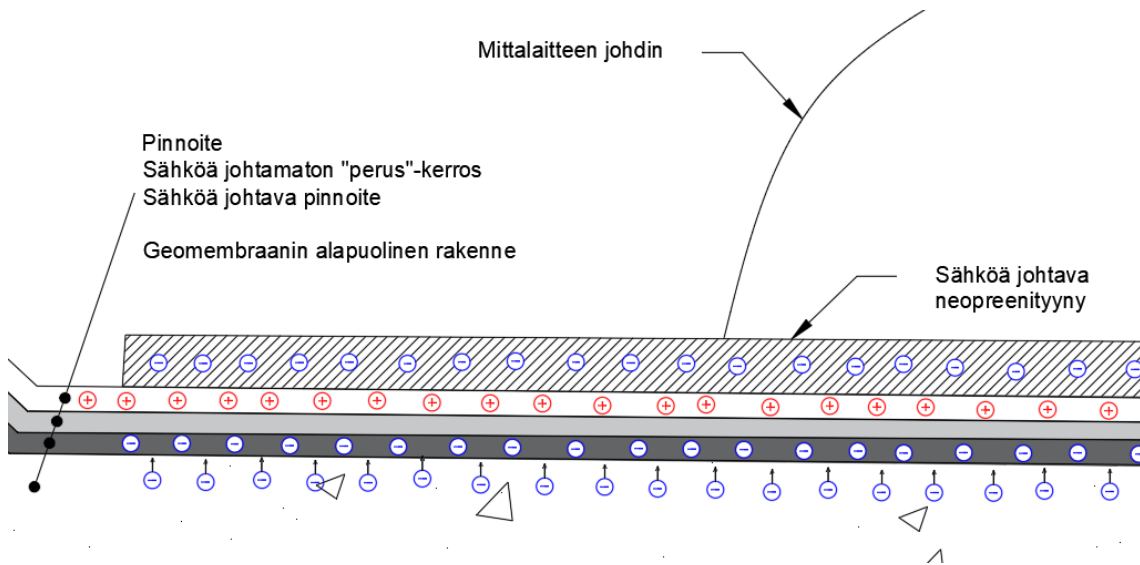
Toinen oleellinen osa kipinätestausmenetelmää on mittausvälineistö. Mittausvälineistö koostuu sähköä johtavasta neopreenityynystä, virtalähteestä, mittalaitteistosta sekä yleensä messinkiharjaisesta metalliharjasta. Mittausvälineistön toiminta perustuu sähköstaattiseen induktioon eli influenssiin. Ilmiönä sähköstaattisessa induktiossa eli influenssissa on kyse sähköä johtavan tai eristävän kappaleen sähköisten varausten uudelleen järjestymisestä. (25, s. 1 - 2; 29, s. 11 - 12; 30, s. 34 - 35)

Kaikki kappaleet koostuvat erilaisista aineista ja aineet puolestaan atomeista. Atomien ytimessä on positiivisesti varautuneita hiukkasia eli protoneja sekä sähköisesti neutraaleja neutroneja. Atomin ytimen protoneja sekä neutroneja kiertävät, atomin ulkokuorella, negatiivisesti varautuneet elektronit. (25, s. 14.)

Kappaleen sähköiset ominaisuudet määräytyvät aineen atomin ulkokuorella olevien elektronien määrän mukaan. Jos atomin ulkokuorilla on yhtä paljon elektroneja kuin atomin ytimessä protoneja, aine on ympäristöönsä nähden sähkötön. Jos aine on ympäristöönsä nähden sähkötön, ovat positiivisesti varautuneiden protoneiden sähkövaraukset kumonneet negatiivisesti varautuneiden elektronien sähkövaraukset, ja kokonaissähkövaraus on nolla. Jos aineessa on enemmän protoneja kuin elektroneja, aine on positiivisesti varautunut. Jos aineessa on puolestaan enemmän elektroneja kuin protoneja, on aine negatiivisesti varautunut. Kappaleessa olevien elektronien määrään voidaan vaikuttaa hankaamalla kappaletta, jolloin kappaleen pinnan elektronimäärä muuttuu positiivisesti tai negatiivisesti varautuneeksi riippuen siitä, luovuttaako vai vastaanottaako kappale ylimääräisiä elektroneja. (31, s. 14 - 15; 32, s. 78 - 79.)

Kappaleen pintaan voidaan luoda positiivinen tai negatiivinen varaus käyttämällä influenssia. Influenssissa kappaleen ympärille luodaan sähkökenttä, jonka vaikutuksesta kappaleessa olevat positiiviset ja negatiiviset sähkövaraukset jakautuvat kappaleen sisällä eri pinnoille. Varausten jakautuminen pintojen välillä riippuu sähkökentän suunnasta, sillä negatiivisesti varautuneet elektronit hakeutuvat sähkökenttää vastaan olevalle pinnalle ja positiivisesti varautuneet protonit sähkökentän myötäiselle pinnalle. (29, s. 35; 30, s. 34 - 35; 32, s. 78 - 79.)

Kipinätestausmenetelmässä sähköä johtava, negatiivisesti varautunut, neopreenityyny luo geomembraanin lähelle sähkökentän, jonka vuoksi geomembraanissa olevat sähköiset varaukset järjestyvät uudelleen. Positiivisesti varautuneet protonit hakeutuvat geomembraanin sähköä johtamattoman pinnan läheisyyteen ja negatiivisesti varautuneet elektronit siirtyvät geomembraanin sähköä johtavan pinnan läheisyyteen. Sähköä johtava pinta varautuu negatiivisesti. Kuvassa 11 on neopreenityynyn luoma, sähkökentän aiheuttama varausten uudelleen järjestyminen. (2, s. 6; 25, s. 3; 29, s. 35; 30, s. 34 - 35.)

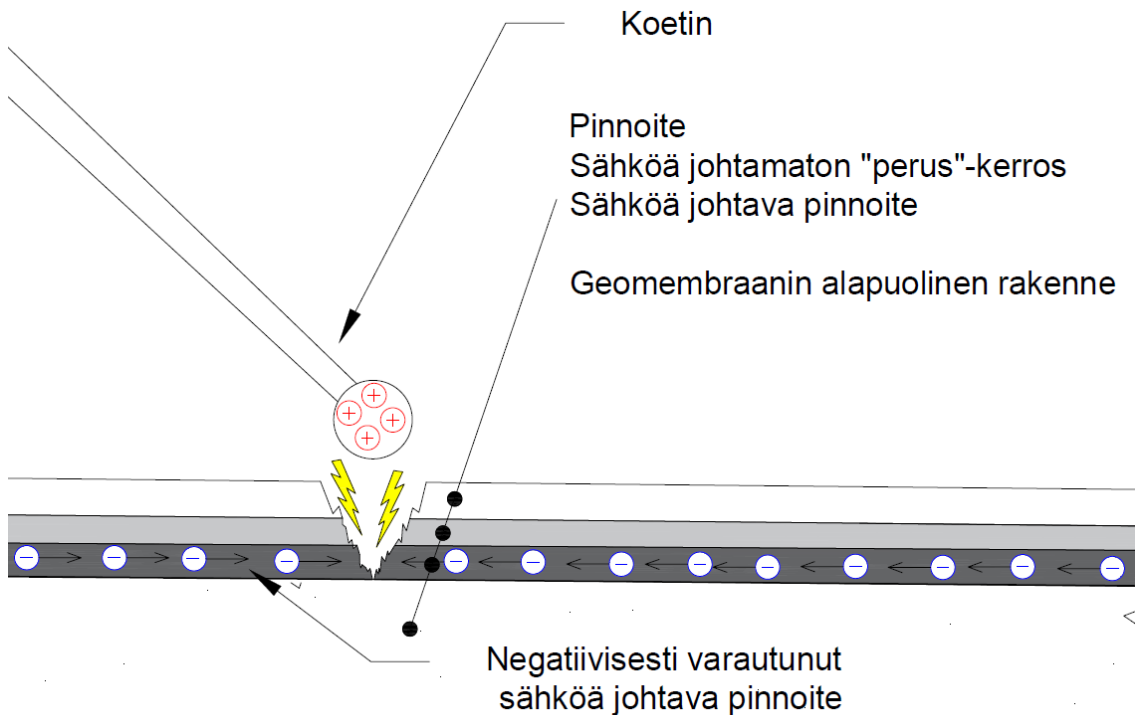


*KUVA 11. Influenssi neopreenityynyn läheisyydessä kipinäkoemenetelmässä.*

Negatiivisesti varautuneet elektronit pääsevät liikkumaan sähköä johtavassa kerroksessa laajalle alueelle. Elektronit hakeutuvat sähköä johtavassa kerroksessa kohtiin, joissa pinnan kaarevuussäde on pieni. Geomembraanin kohdalla, pienin pinnan kaarevuussäde löytyy vauriokohdasta. (29, s. 35.)

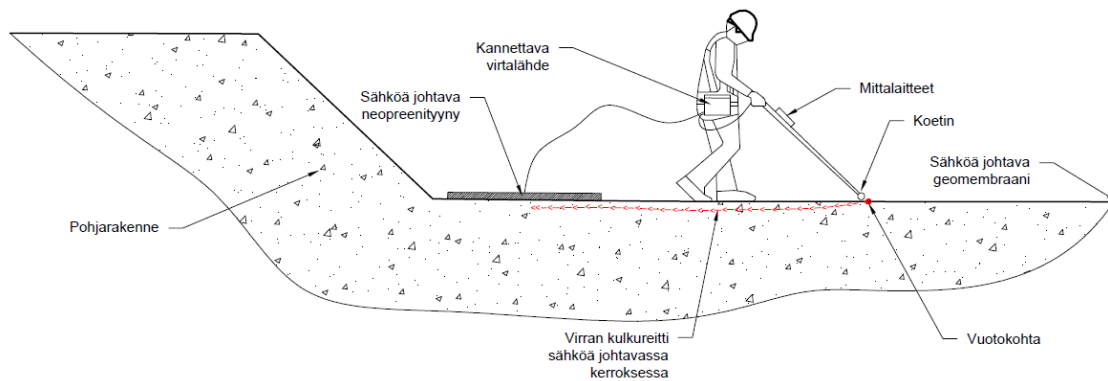
Kipinäkoemenetelmässä käytettävä koetin eli metalliharja on positiivisesti varautunut. Kun positiivisesti varautunut koetin viedään geomembraanin vauriokohdan päälle, syntyy negatiivisesti varautuneen sähköä johtavan kerroksen ja koettimen kärjen tai harjasten välille oikosulku. Tällöin sähkövaraukset pääsevät purkautumaan aiheuttaen kipinän, jonka mittalaite havaitsee. Mittalaite ilmoittaa vaurion

löytymisestä auditiivisesti sekä visuaalisesti. Kuvassa 12 näkyy vauriokohdassa tapahtuva oikosulku. (2, s. 6 - 7; 26, s. 3.)



*KUVA 12. Geomembraanin vauriokohdassa syntyvä oikosulku.*

Kipinätestausmenetelmässä mittaja levittää sähköä johtavan neopreenityynyn erikoisvalmisteisen geomembraanin päälle. Neopreenityyny luo geomembraanin sähköä johtavaan kerrokseen negatiivisen varauksen influenssin avulla. Mittaja liikkuu mittausalueella positiivisesti varautuneen koettimen tai metalliharjan kanssa, joka on kytketty mittalaitteeseen. Geomembraanin vaurion kohdalla koettimen ja sähköä johtavan kerroksen välille syntyy oikosulku, jonka mittalaite havaitsee. Mittalaitteen ilmoituksen jälkeen, mittaja merkitsee vuotokohdan korjaustoimenpiteitä varten. Korjaustoimenpiteiden jälkeen, geomembraani tarkistetaan uudelleen vuotokohtien kohdalta. Kipinätestausmenetelmän mittausjärjestelyt on esitetty kuvassa 13. (2, s. 7; 3; 4; 5; 6; 25, s. 3.)

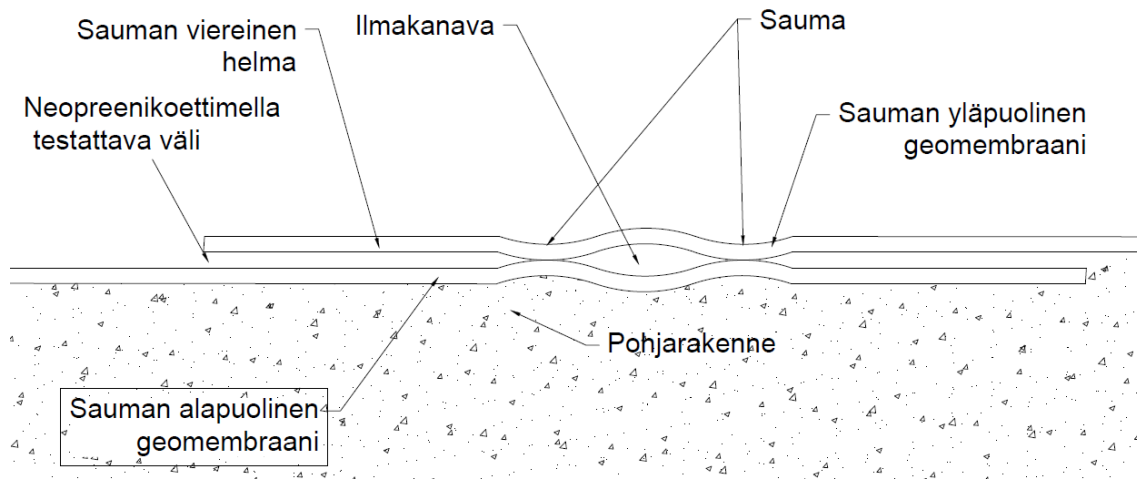


KUVA 13. Kipinätestausmenetelmän mittausjärjestelyt (muokattu 2, s. 7).

Kipinätestausmenetelmässä käytettävä mittausjännite säädetään työmaakohtaisesti 6 - 35 kV:iin. Mittausjännitteen säätäminen tapahtuu mittauksen esivalmisteluiden yhteydessä säätämällä mittalaitteen jännitteensyöttöä. Sopiva jännite haetaan etsimällä mittauslaitteen säätämistä varten tehty testireikä geomembraanista. Oikean mittausjännitteen löydyttyä voidaan aloittaa varsinainen mitaaminen. Kipinätestausmenetelmää käyttäen mittaja voi mitata 500 - 1500 m<sup>2</sup> tunnissa. (2, s. 4; 2, s. 6; 25, s. 2 - 3.)

Jotta kipinätestausmenetelmällä voidaan testata myös geomembraanivuotien saumat, tulee saumojen olla hitsattu sähköä johtavaa geomembraania varten suunnitellulla hitsauskalustolla, joka yhdistää geomembraanin alapuolella olevat sähköä johtavat kerrokset. Ellei saumoja ole hitsattu oikeanlaisella kalustolla, kipinätestausmenetelmä saattaa antaa väärän tuloksen saumojen testaamisen yhteydessä. (2, s. 6 - 7; 9, s. 17; 25, s. 2 - 3.)

Jotta geomembraanivuotien saumojen lähellä olevien kohtien tiiveys saadaan mitattua luotettavasti kipinätestausmenetelmällä, tulee ne mitata ensin sauman yläpuolelta käyttämällä metalliharjaista koetinta. Tämän jälkeen saumojen kohdat tulee testata käyttämällä neopreenistä valmistettua koetinta, joka laitetaan geomembraanivuodissa olevien saumakohtien limityksen väliin. Tällä varmistetaan, ettei sauman viereisen geomembraanihelman reunan alle (kuva 14) ole jäänyt vuotokohtia. (2, s. 6 - 7; 19, s. 2 - 3; 25, s. 3.)



KUVA 14. Geomembraanin sauman poikkileikkaus.

### 3.3.4 Valokaarimenetelmä (Arc Testing Method)

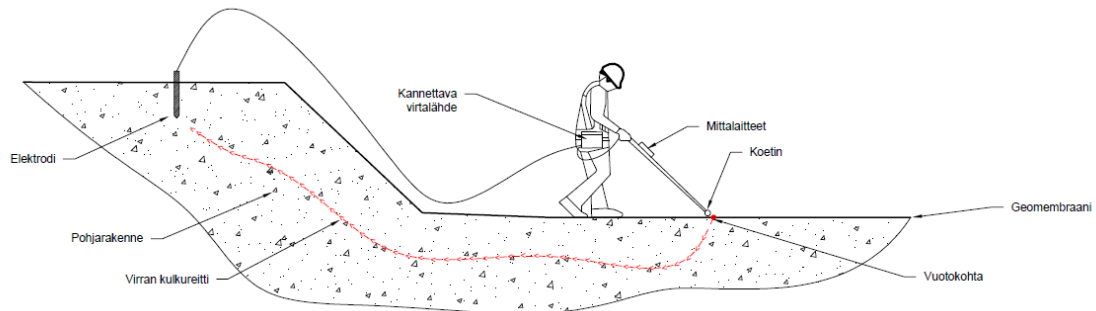
Valokaarimenetelmä (*Arc Testing Method*) on paljaalle geomembraanirakenteelle tehtävä sähköinen vuodonpaikannusmenetelmä, jonka toiminta perustuu oikosulun aiheuttamaan valokaareen ja sen havainnointiin. Menetelmässä mitattavalle alueelle johdetaan 6 - 50 kV:n mittausjännite, käyttämällä erikoisvalmisteisiä koettimia, jotka on liitetty mittalaitteeseen. Mittalaitteet havaitsevat geomembraanin vauriokohdassa koettimen ja geomembraanin alapuolisen rakenteen välille syntyvän oikosulun ja sen aiheuttaman valokaaren. Mittalaite ilmoittaa valokaaren syntymisestä auditiivisesti sekä visuaalisesti, jotta mittaja voi merkitä vaurioituneen kohdan. (2, s. 6.)

Valokaarimenetelmässä käytettävien erikoisvalmisteisten koettimien koot vaihtelevat pienistä, n. 2 cm levyisistä koettimista aina 1,5 m levyisiin suuriin koettimiin. Pienillä koettimilla pystytään testaamaan ahtaita ja hankalasti luokse päästäviä kohteita, kuten erilaisia geomembraanin läpi vietyjen kappaleiden liitoksia. Suuremmilla ja leveämmillä koettimilla (kuva 15) voidaan testata laajoja alueita. Kokenut mittaja pystyy valokaarimenetelmää ja leveää koetinta hyödyntäen tarkastamaan tunnissa n. 900 m<sup>2</sup> laajuisen alueen, riippuen löydettyjen vaurioiden määrästä. Menetelmällä kyetään havaitsemaan erittäin pieniä, kooltaan alle yh-

den millimetrin suuruisia vaurioita. Mittalaitteen ja valokaarikoettimen käyttöönottoon sekä mittauksien esivalmisteluihin kuluu aikaa n. 30 minuuttia. Mittausjärjestelyitä havainnollistetaan kuvassa 16. (2, s. 4; 33, s. 3 - 4.)



*KUVA 15. Senson Groupin valmistama valokaarikoetin (34).*



*KUVA 16. Valokaarimenetelmän mittausjärjestelyt (muokattu 2, s. 6).*

Vuodonpaikannusmittauksissa, joissa käytetään vuodonpaikantamiseen vettä, geomembraanirakenteen eheys voidaan testata jo asentamisen aikana valokaarimenetelmällä. Toisin kuin vettä hyödyntävissä menetelmissä, valokaarimene-

telmässä ei ole tarvetta kastella mitattavaa aluetta mittauksen aikana. Koska valokaarimenetelmässä ei käytetä vettä, testausmenetelmän toimivuuden kannalta on tärkeää, että testattava pinta on mahdollisimman puhdas ja kuiva. Mittausalueella oleva kosteus ja lika saattavat aiheuttaa virheellisiä mittaustuloksia. (2, s. 6.)

Valokaarimenetelmä soveltuu käytettäväksi myös jyrkissä luiskissa, sillä menetelmässä ei käytetä vettä, joka voisi virrata pois mittausalueelta. Menetelmä ei sovellu kohteisiin, joissa geomembraaneissa esiintyy paljon lämpölaajenemisen aiheuttamia ryppyjä. Ryppejen kohdalle muodostuu usein ilmarako geomembraanin ja geomembraanin alapuolisen rakenteen välille. Geomembraanin vaurion ollessa samassa kohdassa kuin ilmarako, valokaarimenetelmän mittausjännite ei pääse muodostamaan oikosulkua koettimen ja geomembraanin alapuolisen rakenteen välille. Ryppejen aiheuttaman ongelman välttämiseksi mittaukset kannattaa suorittaa yöllä tai varhain aamulla, jolloin geomembraaniin ei ole vielä ehtinyt muodostua lämpölaajenemisesta aiheutuneita ryppyjä. (2, s. 6.)

### **3.4 Dipolimenetelmä peitetyle geomembraanirakenteelle**

Dipolimenetelmä on ainoa liikuteltava vuodontarkkailumenetelmä, jonka avulla voidaan mitata peitetyn geomembraanirakenteen eheys. Mittaus voidaan suorittaa geomembraanirakenteille, vaikka ne olisi peitetty maa-aineksella tai ne olisivat veden pinnan alapuolella. Menetelmä ei kuitenkaan enää ole luotettava, yli 500 mm paksuisten, kiinteästä materiaalista toteutettujen, peiterakenteiden alapuolisten geomembraanirakenteiden vaurioiden paikallistamiseen. (2, s. 7; 22, s. 2 - 3.)

Dipolimenetelmät jaotellaan geomembraania peittävän aineksen mukaisesti veden peittämien kohteiden mittaukseen sekä maa-aineksella peitettyjen kohteiden mittaukseen. Molemmat mittaukset noudattavat samaa pääperiaatetta, mutta niiden toteutustavassa on hienoisia eroja. Dipolimenetelmät perustuvat geomem-

braanin pinnassa kulkevan jännitteen potentiaalissa tapahtuvien, yllättävien muutoksien havainnointiin. Muutokset johtuvat virran kulkeutumisesta geomembraanin vuotokohdan läpi. (2, s. 7; 22, 2 - 3; 35, s. 2.)

Molemmissa mittaustavoissa virtalähteeseen kytketyt elektrodit syöttävät geomembraanin ylä- ja alapuolella olevaan peiterakenteeseen tasajännitettä. Syötetty tasajännite vaihtelee peiterakenteen mukaan. Veden peittämissä kohteissa käytettävä tasajännite on 36 - 75 V ja maa-aineksella peitetyissä kohteissa 50 - 1000 V. Syötetty tasajännite luo geomembraanin yläpuolelle positiivisen ja alapuolelle negatiivisen sähkökentän. (2, s. 8; 35, s. 2, 36, s. 2 - 3.)

Geomembraanin vaurioituneessa kohdassa, mittaukseen käytettävä jännite pääsee kosketuksiin geomembraanin alapuolella olevan maa-aineksen kanssa. Tällöin mittausvirtapiiri sulkeutuu, mahdollistaen virran kulkeutumisen toiseen elektrodista. Virran kulkeutuminen geomembraanin yläpuolelta alapuolelle aiheuttaa potentiaalimuutoksen geomembraanin pinnassa olevassa jännitteessä. Tämä muutos pyritään havaitsemaan dipolimittauksessa käytettävillä mittalaitteilla. (22, s. 2 - 3; 35, s. 2; 36, s. 2 - 3.)

Potentiaalieron havaittavuuteen vaikuttavat mittalaitteen mitta-anturin etäisyys vuotokohdasta sekä potentiaalieron suuruus, joka on riippuvainen vuotokohdan läpi kulkevan virran määrästä. Vuotokohdassa syntyvä teoreettinen potentiaaliero voidaan laskea kaavalla 8. (36, s. 2 - 3)

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi r(r+\Delta r)}$$

KAAVA 8

missä

$\Delta V$  = potentiaaliero vuotokohdassa

$I$  = vuotokohdan läpi kulkeva virta

$\rho$  = Geomembraania peittävän aineksen resistiivisyys

$r$  = Etäisyys jännitelähteestä

$\Delta r$  = Mittauselektrodien etäisyys toisistaan

Vauriokohdassa syntyvän potentiaalieron havaittavuutta voidaan parantaa parhaiten nostamalla vuotokohdan läpi kulkevan virran määrää tai tihentämällä mitaustaajuutta. Vuotokohdan läpi kulkevan virran määrän korottaminen onnistuu suurentamalla mittausjännitettä, sillä geomembraanin ylä- ja alapuolisen rakenteen resistiivisyyteen ei voida yleensä vaikuttaa. (36, s. 2 - 3.)

Ohmin lain mukaan vuotokohdan läpi kulkeva virta on suoraan verrannollinen vuotokohdassa vaikuttavaan jännitteeseen ja kääntäen verrannollinen vuotokohdan resistanssiin. Vuotokohdan resistanssi pystytään arvioimaan hyvin käyttämällä kaavoja 9 ja 10. Kaavalla 9 saadaan arvioitua vuotokohdan ylä- tai alapuolisen rakenteen resistanssi ja kaavalla 10 voidaan puolestaan arvioida geomembraanivaurion sisällä olevan aineksen aiheuttama resistanssi. Vaurion sisällä olevan aineksen resistanssi on suoraan verrannollinen geomembraanin vaurion syvyyteen eli ”johtimen” pituuteen. Yhdistämällä kaavat 9 ja 10 saadaan kaava 11, jonka avulla voidaan arvioida vaurioituneen kohdan resistanssi kokonaisuutena. (31, s. 40; 31, s. 48; 36, s. 2 - 3.)

$$R = \frac{\rho}{4 \cdot a}$$

KAAVA 9

missä

$R$  = aineksen resistanssi

$a$  = vuotokohdan säde

$\rho$  = geomembraanin ylä- tai alapuolisen aineksen resistiivisyys

$$R = \frac{\rho \cdot t}{\pi a^2}$$

KAAVA 10

missä

$R$  = aineksen resistanssi

$a$  = vuotokohdan säde

$\rho$  = vauriokohdan sisällä olevan aineksen resistiivisyys

$t$  = geomembraanin paksuus

$$R = \rho \left( \frac{1}{2a} + \frac{t}{\pi a^2} \right)$$

KAAVA 11

missä

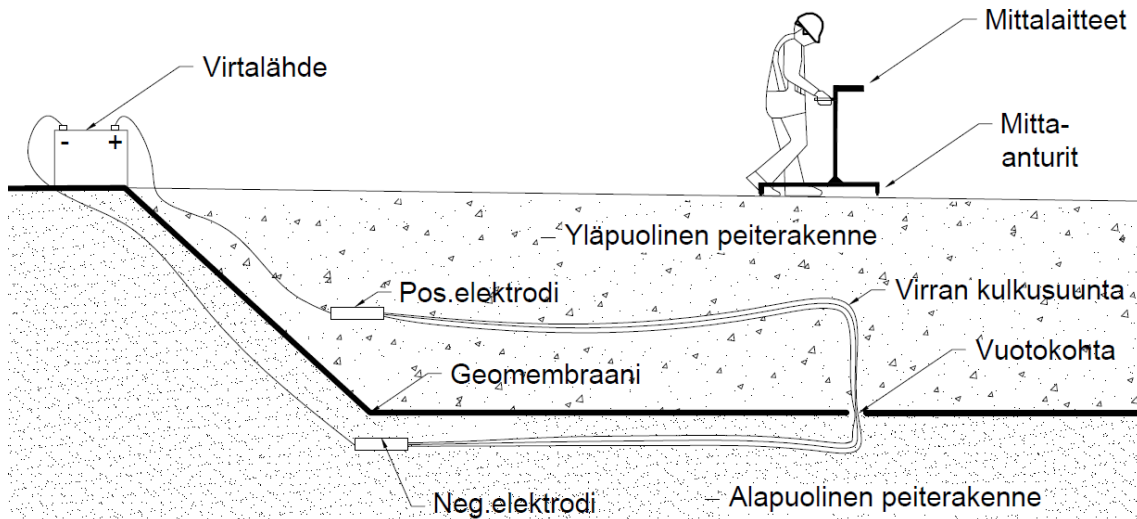
$R$  = aineksen resistanssi

$a$  = vuotokohdan säde

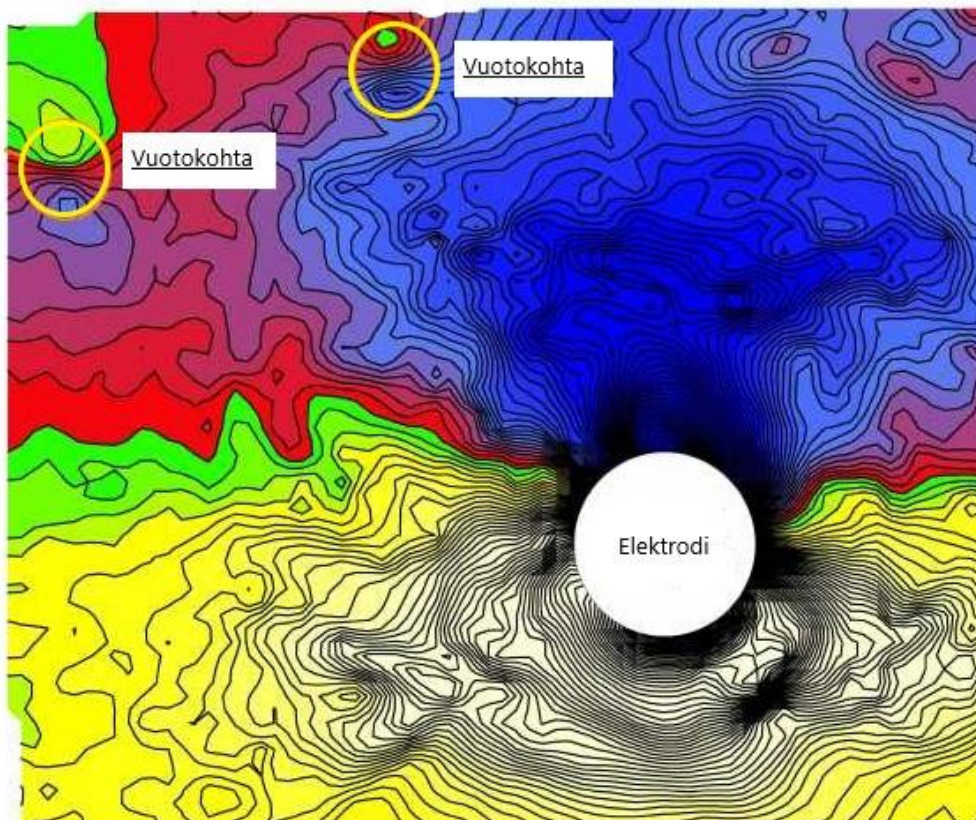
$\rho$  = vauriokohdan sisällä, ylä- ja alapuolella olevan aineksen resistiivisyys

$t$  = geomembraanin paksuus

Maa-aineksella peitetyille geomembraanirakenteille tehtävässä dipolimittauksessa (kuva 17) mitattava alue jaetaan ennen mittaamista mittausalueisiin eli mittausruudukkoon. Mittausruudukon jokaisessa ruudussa käydään mittaamassa ruudukossa vallitsevan jännitteen potentiaali dipolimittauksella. Mittausvälineistön mitta-antureiden väli vaihtelee 0,2 ja 3 metrin välillä, riippuen laitevalmistajasta. Mittausdata siirretään mittauslaitteesta tietokoneelle, jossa datan perusteella laaditaan potentiaalikartta mittausalueesta. Mittausalueesta tehdystä potentiaalikartasta voidaan nähdä geomembraanin vauriokohdissa tapahtuvat äkilliset potentiaalimuutokset. Kuvassa 18 esitetyssä potentiaalikartassa on merkitty kaksi vuotokohtaa. (12, s. 3; 22, s. 2 – 4; 36, s. 3.)

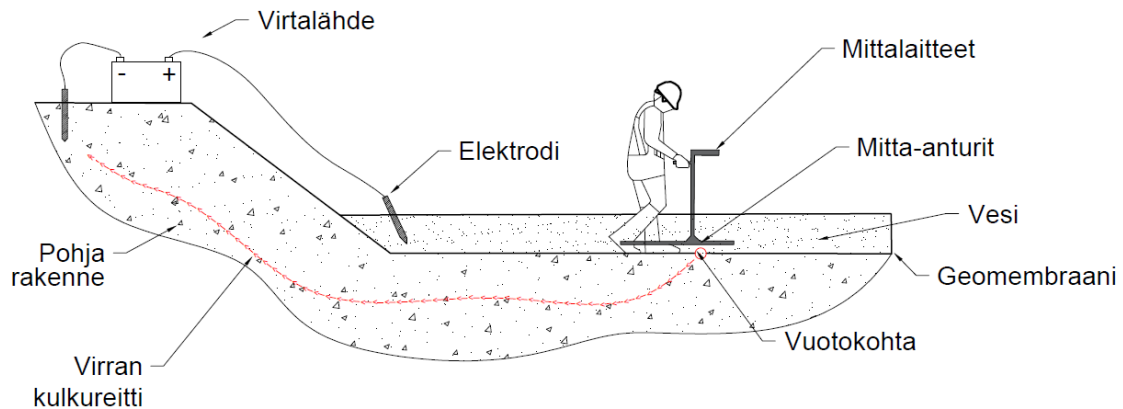


KUVA 17. Dipolimittaus maa-aineksen peitossa olevalle geomembraanille (muokattu ja yhdistetty 2, s. 7; 36, s. 2).



KUVA 18. Esimerkki dipolimittauksen avulla kerätyn datan käsittelyn jälkeen saadusta potentiaalikartasta (muokattu 35, s. 13).

Veden alla oleville geomembraanirakenteille tehtävässä dipolimittauksessa (kuva 19) mitattava alue jaetaan myös mittausalueisiin mittaamisen helpottamiseksi. Mittaus voidaan suorittaa käyttämällä samanlaista mittauskalustoa kuin maa-aineksella peitetyle geomembraanille tehtävässä dipolimittauksessa tai kannettavat mitta-anturit voidaan korvata vedettävillä mitta-antureilla. Vedettävät mitta-anturit soveltuvat erityisesti syvällä veden alla olevien geomembraanirakenteiden vuotojen paikallistamiseen. Toisin kuin maa-aineksella peitettyjen rakenteiden dipolimittauksessa, veden alapuolella olevien geomembraanirakenteiden mittaus voidaan suorittaa käyttämällä mittalaitetta, joka indikoi vuodon löytymisestä auditiivisella merkillä. Näin vedenalaisten dipolimittausten aineistoa ei tarvitse käsitellä erikseen tietokoneella. (2, s. 7 - 8; 22, s. 6.)

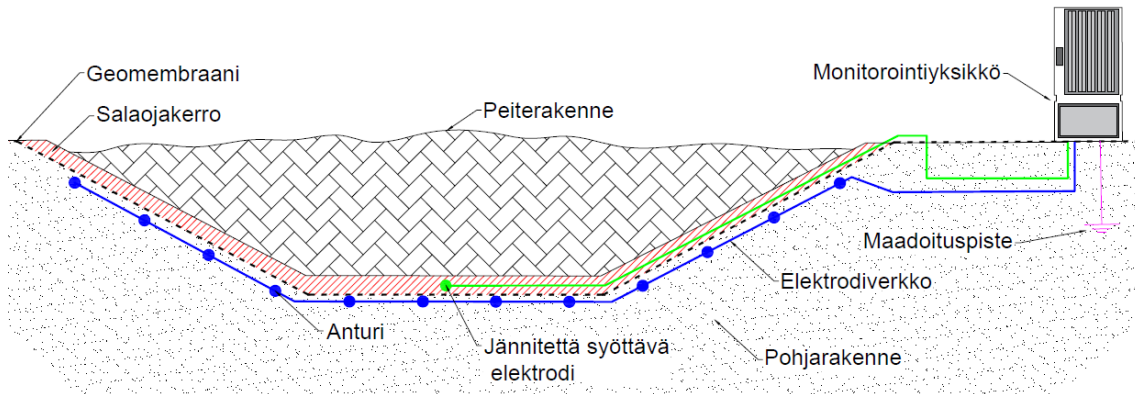


KUVA 19. Veden alla olevan geomembraanin dipolimittaus (muokattu 18, s. 8).

### 3.5 Kiinteät vuodonpaikannusjärjestelmät

Kiinteät vuodonpaikannusjärjestelmät on kehitetty geomembraanirakenteen koko elinkaaren mittaiseen eheyden valvontaan. Niillä pystytään kartoittamaan geomembraanin eheyttä geomembraanin asennuksen aikana ja välittömästi sen jälkeen. Mittauksia voidaan suorittaa myös peiterakenteen asentamisen aikana tai geomembraanirakenteen ollessa jo käytössä, kymmenien metrien paksuisten maamassojen alla. Mittausjärjestelmä koostuu geomembraanin ylä- ja alapuoli-

sista elektrodiverkoista, elektrodien kaapeloinneista sekä geomembraanirakenteen ulkopuolella olevasta monitorointiyksiköstä. Kuvassa 20 on esitetty kiinteän vuodontarkkailujärjestelmän rakenne. (2, s. 9 - 10; 37; 38.)



*KUVA 20. Kiinteän vuodontarkkailujärjestelmän periaatteellinen rakenne (muokattu 39, s. 3).*

Kiinteän vuodonpaikannusjärjestelmän toiminta perustuu geomembraanin ala- ja yläpuolella olevan, kiinteän elektrodiverkon tekemiin potentiaalimittauksiin. Menetelmän periaate on hyvin samanlainen kuin aiemmin esitellyn dipolimenetelmän toimintaperiaate, jossa geomembraanin yläpuolella oleva elektrodi syöttää geomembraanin pintaan jännitteen, joka luo geomembraanin pintaa sähköisen potentiaalin. Sähköinen potentiaali jakautuu tasaisesti mitta-alueelle, ellei se pääse karkaamaan mitta-alueelta. Jännitteen karkaamista käsiteltiin kappaleessa 3.2 Toimivuuden reunaehdot. Geomembraanissa olevan vaurion kohdalla jännitteen potentiaalissa tapahtuu muutos, joka pyritään havaitsemaan geomembraanin alapuolella sijaitsevan elektrodiverkon mitta-antureiden avulla. (2, s. 9 - 10; 35, s. 2; 36, s. 2 - 3.)

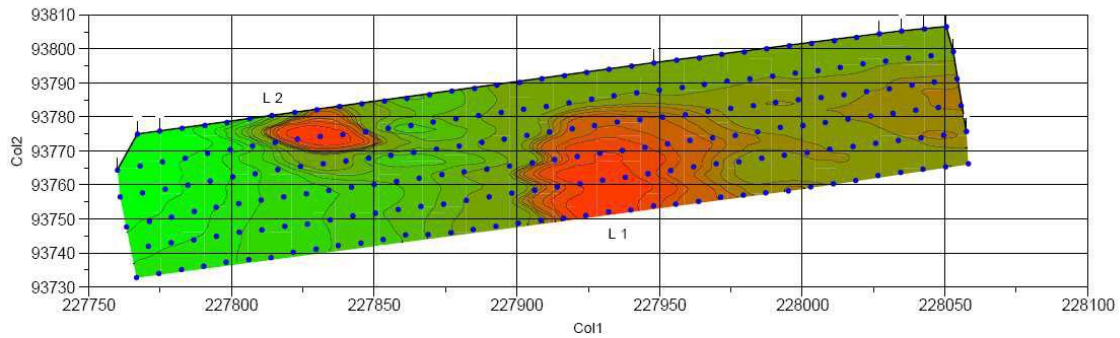
Geomembraanin alapuolelle tuleva elektrodiverkko asennetaan geomembraanin alapuoliseen rakenteeseen ennen geomembraanin asentamista. Koska elektrodiverkko on geomembraanin alapuolella, tulee kiinteän vuodonpaikannusjärjestelmän käyttöönottamista ryhtyä suunnittelemaan hyvissä ajoin. Tällöin saavutetaan kustannustehokkain ratkaisukokonaisuus, sillä elektrodeja ei tarvitse ryhtyä

asentamaan jälkiasennuksena. On olemassa myös mittausjärjestelmä, jonka käyttämä elektrodiverkko voidaan asentaa myös jälkiasennuksena geomembraanin päälle. (2, s. 9 - 10; 37; 38; 39; 40.)

Geomembraanin pintaan asennettavassa, jälkiasenteisessa järjestelmässä hyödynnetään erikoisvalmisteisia anturimoduuleita. Erikoisvalmisteiset anturimoduulit toimivat samanaikaisesti jännitettä syöttävänä elektrodina sekä potentiaalinmuutoksia havaitsevana mitta-anturina. Erikoisvalmisteisten moduulien hinnat ovat korkeampia kuin maahan asennettavien elektrodiverkkojen, minkä takia kustannustehokkuus kärsii. (37, s. 3 - 4)

Mitta-antureiden mittausalueen sähköpotentiaaleista keräämä data kerätään mittausalueen reunalla olevaan monitorointiyksikköön. Mittausalueen koosta riippuen, monitorointiyksiköitä voi olla yksi tai useampi erillinen yksikkö. Usean monitorointiyksikön tapauksessa yksi monitorointiyksiköistä toimii pääyksikkönä ja muut erillisinä alayksiköinä mittausdatan keräämisen helpottamiseksi. Alayksiköt voivat siirtää keräämänsä mittausdatan suoraan pääyksikköön luettavaksi, jolloin mittausdataa haettaessa, tasapotentiaalikäyrästä varten, mittaajan ei tarvitse käydä lukemassa kaikkia yksiköitä erikseen. (37; 38; 39; 40.)

Päämonitorointiyksiköstä saadun mittausdatan pohjalta laaditaan tasapotentiaalikäyrästä, josta voidaan paikantaa geomembraanirakenteen vaurioista aiheutuvat potentiaalin muutokset. Vaurioiden aiheuttamat muutokset näkyvät tasapotentiaalikäyrästä kohonneina jännitearvoina. Käytettävästä käyrästyypistä riippuen, kohonneet potentiaaliarvot voidaan esittää eri tavoilla, kuten värein. Kuvassa 21 on esitetty potentiaalierot eri väreillä, jossa punainen kuvastaa korkeaa potentiaalia ja vihreä alhaista potentiaalia. (2, s. 9 - 10; 37; 38.)



*KUVA 21. Esimerkki tasapotentialikäyrästä (39, s. 2).*

Kiinteän vuodonpaikannusjärjestelmän keräämä mittausdata voidaan noutaa käsiteltäväksi monitorointiyksiköistä kahdella eri tavalla. Mittausdata voidaan noutaa monitorointiyksiköstä ennalta määritellyin määräväleihin tai se voidaan lähettää suoraan mittausdataa tarvitsevalle taholle. Puhutaankin Offline- ja Online-mittauksista. Mittausdatan noutamistavan valintaan vaikuttaa valvottavan kohteen kriittisyys. (39, s. 8 - 11.)

Offline-mittauksessa mittausdataa tarvitseva taho noutaa mittausdatan suoraan monitorointiyksiköstä menemällä paikan päälle. Mittausdatan noutoväli on ennalta määritetty mittausjärjestelmän huolto-ohjelmassa. Mittausdatan noutoväli vaihtelee kuukaudesta yhteen vuoteen. Noutovälin pituuteen vaikuttaa tarkkailtavan kohteen kriittisyys. (39, s. 8 - 11; 41.) Esimerkiksi tavallisen kaatopaikan peittämiseen käytettävän geomembraanirakenteen eheys ei välttämättä ole yhtä kriittinen kuin pohjavesialueella sijaitsevan, teollisuuden jätevesiä sisältävän altaan geomembraanirakenteen eheysvaatimukset.

Online-mittauksessa monitorointiyksikkö lähettää mittausdatan suoraan mittausdataa tarvitseville tahoille, kuten esimerkiksi teollisuusalueen valvomoon tai ympäristöviranomaisille. Mittausdatan lähettäminen edellyttää verkkoyhteyttä monitorointiyksikön ja mittausdataa tarvitsevan tahon välillä. Monitorointiyksikkö voi myös ilmoittaa vaurion syntymisestä ja sen havaitsemista teksti- tai sähköpostiviestillä. Online-mittausta käytetään kohteissa, joissa geomembraanirakenteen tiiveydelle on erittäin korkeat vaatimukset. (39, s. 8 - 11; 42) Tällaisia kohteita

ovat esimerkiksi pohjavesialueilla sijaitsevat, teollisuuden jätevesiä sisältävät altaat.

## **4 AINEISTOSELVITYS JA EKSTRUUSIOAINEISTON KARTOITAMINEN**

Toimeksiantaja tilasi aineistonselvityksen sähköisistä vuodonilmaisumenetelmistä sekä analyysin Kaitos Oy:n ja Taretek Oy:n, nykyinen Geosynt Oy, vuosien 2016 - 2018 aikana tekemien ekstruusiohitsausten syistä. Ekstruusiohitsauksien syiden selvittämisellä, toimeksiantaja toivoi saavansa käsityksen mahdollisista ongelmista työmenetelmissään, puutteista työvälaineissa ja kalustossa sekä tietoa henkilöstön laatukselutuksen tarpeesta. Sähköisistä vuodonilmaisumenetelmistä tehty aineistonselvitys toimii osana toimeksiantajan markkinointimateriaalia ja tukena uusien palvelukokonaisuuksien selvittämisessä.

### **4.1 Aineistonselvityksen sisältö**

Toimeksiantaja tarjoaa kokonaisvaltaisia palveluratkaisuja geosynteetteihin liittyen, asiakkaan tarpeiden mukaisesti. Tällä hetkellä toimeksiantaja on vakiinnuttanut toimintansa sekä asiakaskuntansa nykyisten palvelukonseptiensä avulla. Toimeksiantaja pyrkiiin laajentamaan palvelutarjontaansa uusilla, geosynteetteihin liittyvillä tuotteilla sekä palveluilla. Toimeksiantaja on ollut pitkään tietoinen sähköisistä vuodonpaikannusmenetelmistä, mutta vähäisen kysynnän takia niihin ei ollut paneuduttu riittävästi palvelukonseptin muodostamista varten. Nykyisten, alati tiukentuvien ympäristösäädösten vuoksi sähköisten vuodontarkkailumenetelmien kysynnän uskotaan kasvavan tulevaisuudessa.

Toimeksiantajan kanssa käytiin useita keskusteluita aineistonselvityksen sisällöstä ja sen rajaamisesta. Keskusteluiden pohjalta päädyttiin rajaamaan selvitetävät sähköiset vuodontarkkailumenetelmät kattamaan ainoastaan maanrakennuskäytössä oleville geomembraaneille tehtävät vuodontarkkailumittaukset sekä -järjestelmät. Aineistonselvityksen ulkopuolelle jätettiin putkistoille sekä talonrakentamisessa käytettävät vuodontarkkailumenetelmät, sillä ne eivät suoranaisesti kuulu toimeksiantajan ydinpalveluihin.

#### **4.1.1 Aineistonselvityksen rakenne**

Aineistonselvityksestä tehtiin tietopaketti toimeksiantajan käyttöön. Tietopaketissa on esitetty erilaisten sähköisten vuodonpaikannusmenetelmien ominaisuuksia sekä niiden etuja toisiin vuodonpaikannusmenetelmiin nähden. Toimeksiantajan pyynnöstä, aineistonselvityksen sisällöstä koottiin myös PowerPoint -esitys toimeksiantajan markkinointitiimille. Tietopaketin rakenteen osalta toimeksiantajalla ei ollut muita vaateita kuin asioiden esittäminen loogisessa järjestyksessä helposti ymmärrettävällä tavalla. PowerPoint -esityksen ulkoasun täytyi kuitenkin noudattaa toimeksiantajan graafisia ohjeita.

#### **4.1.2 Aineistonselvityksen tekeminen**

Aineistonselvityksen ensimmäisenä työvaiheena kartoitettiin olemassa olevan aineiston määrä, laatu ja sisältö. Olemassa olevasta aineistosta poimittiin aineiston tekemiseen käytettyjä lähteitä ja niiden luotettavuus sekä ajantasaisuus tarkistettiin. Olemassa olevan aineiston kartoittamisen jälkeen ryhdyttiin etsimään uutta tietoa sähköisistä vuodontarkkailumenetelmistä.

Tiedon etsinnässä hyödynnettiin kansainvälisiä tietopankkeja, joihin on kerätty useita sähköisiä vuodontarkkailumenetelmiä käsitteleviä tutkimuksia. Sähköisiä vuodontarkkailumenetelmiä käsittelevää aineistoa saatiin myös geomembraanivalmistajilta ja heidän yhteistyökumppaneiltaan. Sähköisiä vuodontarkkailumenetelmiä koskevat standardit hankittiin puolestaan kansainvälisen standardisointiliiton kautta.

Lähtöaineiston keräämisen jälkeen, siitä ryhdyttiin muotoilemaan toimeksiantajan toiveiden mukaista kokonaisuutta Microsoft Word -ohjelmaa käyttäen. Aineiston pohjalta koostettu kokonaisuus noudattaa järjestystä, jossa ensin esitellään geomembraanirakenteen vuotoja ja niiden vaikutuksia teoreettiselta kannalta. Seuraavassa osassa esitellään kansainvälisiä tutkimuksia geomembraanien vaurioista, niiden syntymekanismeista sekä yleisimmistä esiintymispaikoista. Teoreettisen taustoituksen jälkeen perehdytään sähköisiin vuodonilmaisumenetelmiin. Vuodonilmaisumenetelmät jaoteltiin peittämättömälle geomembraanirakenteelle

tarkoitettuihin vuodonilmaisumenetelmiin, peitetyle geomembraanirakenteelle tarkoitettuihin vuodonilmaisumenetelmiin sekä kiinteästi asennettuihin vuodonilmaisumenetelmiin. Teoreettista aineistoa havainnollistavia kuvia piirrettiin uudestaan käyttämällä AutoCAD -ohjelmistoa.

Varsinaisen tietopaketin valmistumisen jälkeen, sen pohjalta tehtiin toimeksiantajan graafista ohjeistusta noudattava PowerPoint -esitys. Esitykseen koottiin markkinointitiimin kannalta tietopaketissa olevat tärkeimmät tiedot, helposti esitettävässä muodossa.

## **4.2 Ekstruusioaineiston analyysi**

Osana kokonaisvaltaista laatuajrjestelmänsä päivittämistä, toimeksiantaja halusi selvittää asennuskohteissaan vuosina 2016 - 2018 syntyneiden geomembraanirakenteen paikkauksien, vahvistuksien sekä ekstruusiosauhojen syntymiseen johtaneita tekijöitä. Saatujen tuloksien pohjalta pyrittiin selvittämään toimeksiantajan kannalta tarpeellisia kehityskohteita. Tarkasteltavia kehityskohteita olivat muun muassa työvälineiden rikkoutumisesta aiheutuvat vauriot, ulkopuolisista syistä johtuvat vauriot sekä henkilöstön huolimattomuudesta tai kokemattomuudesta aiheutuvat vauriot.

### **4.2.1 Ekstruusioaineiston läpikäyminen ja jaotteleminen**

Ekstruusioaineiston läpikäyminen aloitettiin etsimällä kaikki vuosien 2016 – 2018 aikana tehtyjen asennuskohteiden laatuaineistot. Laatuaineistosta poimittiin ekstruusioopöytäkirjat erilleen ja niistä kerättiin ekstruusiohitsaukseen johtaneet syyt Excel -taulukoon kohteittain. Ekstruusiohitsauksen syyt jaoteltiin kahteen pääryhmään: "Vahvistuksiin" ja "Paikkauksiin." Pääryhmien sisällä ekstruusiohitsauksien syyt jaoteltiin "Omiin vikoihin" sekä "Pakollisiin ekstruusioihin". Näiden alaryhmien sisällä, ekstruusioiden syyt jaoteltiin vielä niiden syntymekanismien mukaisesti.

Ensimmäiseksi pääryhmäksi valikoitui ”Vahvistukset,” koska se on toinen toimeksiantajan henkilöstön käyttämistä ekstruusiohitsauksen tyypeistä. Ekstruusiovahvistuksessa geomembraanin vaurio voi olla naarmu, painauma tai muu vaurio, joka ei kuitenkaan ole täysin rikkonut geomembraanin pintaa. Ekstruusiovahvistuksiksi luokitellaan myös alle 1 cm kokoiset, geomembraanin läpi menevät reiät ja hitsatuissa saumoissa olevat vuotokohdat.

Toisena pääryhmänä ekstruusioaineiston luokittelussa käytettiin ”Paikkauksia”. Paikkauksiksi luokiteltavissa kohdissa geomembraanirakenne on vaurioitunut laajemmalta alueelta kuin 1 cm x 1 cm, jolloin vaurioituneen alueen päälle on jouduttu hitsaamaan geomembraanista tehty paikkalappu. Tyypillisimpiä syitä paikkauksien tekemiselle ovat hitsauskoneen rikkoutumiseen liittyvät tekijät, geomembraanin ylä- tai alapuolelle jääneet kivet, jotka ovat painuneet geomembraanin läpi sekä hitsaussauman laadunvarmistusta varten otettujen näytteenottokohtien paikkaaminen.

Alaryhmään ”Omat viat” koottiin ekstruusiohitsauksen syyt, joihin toimeksiantajan henkilöstö olisi pystynyt vaikuttamaan omalla toiminnallaan. Tällaisia syitä olivat muun muassa liitettävien geomembraanikaistojen limityksen karkaaminen, jota asentaja ei ollut havainnut ajoissa, geomembraanin alapuolelle jääneen kiven havaitsemattomuus työnaikaista laadunvalvontaa tehtäessä, erilaiset kuljetusvauriot sekä hitsaamiseen käytettävän kaluston jumiutuminen tai rikkoutuminen hitsaamisen aikana.

Toiseen alaryhmään, ”Pakolliset ekstruusiot,” koottiin kaikki ne ekstruusiohitsauksen syyt, jotka eivät johtuneet toimeksiantajan henkilöstöstä tai kalustosta. Lisäksi tähän alaryhmään liitettiin ne ekstruusiohitsauksen syyt, jotka olivat välttämättömiä geomembraanirakenteen tiivistämisen kannalta. Tällaisia syitä olivat esimerkiksi hitsaussauman aloitus- ja lopetuskohdat, saumasta otettavien, laadunvarmistamiseen käytettävien näytepalojen ottokohtien paikkaamiset, geomembraanin asettelua varten tehtyjen leikkauksien tiivistäminen sekä geomembraanirakenteen lävitse tulevien läpivientien liittäminen.

#### 4.2.2 Aineiston koostaminen ja analysointi

Ekstruusiohitsauksia käsittelevän aineiston läpikäymisen sekä jaottelamisen jälkeen, valmistuneesta aineistosta koottiin yhteenveto ekstruusiohitsauksien syistä Excel -tauluktoon. Excel -tauluktoon kerättyjä syitä vertailtiin asennuskohteittain keskenään toimeksiantajan kanssa. Pääryhmien sisällä verrattiin ”Omien vikojen” ja ”Pakollisten ekstruusioiden” määriä suhteessa asennuskohteiden pinta-aloihin.

Vertailun pohjalta laskettiin ekstruusioiden määrä suhteessa asennettuun geomembraanimäärään eli ekstruusioita per hehtaari. Laskennan tuloksena saatua suhdelukua käytettiin tasoittamaan asennuskohdekohtaisia eroja vertailun helpottamiseksi sekä yhtenä indikaattorina laatujärjestelmän kehityskohteista. Tuloksia analysoidessa tuli kuitenkin huomioida, etteivät kaikki kohteet ole keskenään vertailukelpoisia suhdeluvusta huolimatta, sillä asennuskohteen koko, ikä ja tyyppi vaihtelivat huomattavasti.

Tuloksia tarkastelemalla havaittiin tiettyjen ekstruusiohitsauksien syiden toistuvan useassa kohteessa. Samojen syiden toistuessa, toimeksiantaja tuli tietoiseksi asennustoiminnassaan olevista ongelmakohtista ja kykeni puuttumaan ongelmien syntymekanismeihin. Puuttuminen ongelmakohtiin mahdollisti toimeksiantajan toiminnan kehittymisen.

## 5 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli tehdä Geosynt Oy:lle selvitys geomembraanien eheyden tarkistamiseen käytettävistä sähköisistä menetelmistä, niiden toimivuuden reunaehdoista sekä teoriasta menetelmien taustalla. Lisäksi opinnäytetyössä tarkasteltiin Geosynt Oy:n vuosien 2016 – 2018 aikana tekemien ekstruusiohitsauksien syitä. Tarkoituksena oli kerätä tietoa yrityksen liiketoiminnan laajentamista varten sekä kartoittaa yrityksen sisäisen laadunvalvonnan kehityskohteita ekstruusiohitsauksien osalta.

Työn lopputuloksena saatiin kerättyä paljon tietoa erilaisista sähköisistä vuodonpaikannusmenetelmistä, teoriasta menetelmien taustalla sekä niiden käytön mahdollisuuksista geomembraanirakenteiden eheyden valvonnassa. Kerätystä tiedosta koostettu selvitys toimii yrityksen sisäisenä tietopankkina, josta tietoa voidaan jakaa helposti asiakkaille, viranomaisille sekä muille yhteistyötahoille. Selvitys sisältää oleellisimman teorian geomembraanirakenteiden vuotojen syntymekanismeista ja vuotojen paikallistamiseen käytettävistä menetelmistä. Vuodonpaikannusmenetelmien toiminnan taustalla olevaan teoriaan pyrittiin paneutumaan selvityksessä tarkemmin, jotta menetelmien toimintaperiaate avautuisi lukijalle selkeästi ja ymmärrettävästi.

Sähköisissä vuodonpaikannusmenetelmissä on paljon potentiaalia, jota voidaan tulevaisuudessa hyödyntää. Hyödyntäminen vaatii kuitenkin tietouden lisäämistä ja ympäristönormien uudelleen tarkastelemista, jotta potentiaali saadaan hyödynnettyä kunnolla. Väärin toteutettua geomembraanirakennetta ei voida mitata sähköisesti, minkä takia sähköisten vuodonpaikannusmenetelmien käyttäminen tulisi huomioida jo rakenteiden suunnittelun yhteydessä.

Geosynt Oy:n ekstruusioaineiston läpikäyminen vuosilta 2016 – 2018 tuotti tietoa, jota pystytään hyödyntämään yrityksen sisäisessä laadunkehittämisessä. Aineiston läpikäymisen yhteydessä esille ei noussut hälyttäviä asioita, joihin olisi täytyntä puuttua välittömästi. Joitain asioita tullaan nostamaan esille Geosynt Oy:n tulevaisissa koulutuksissa työn laadun parantamiseksi.

Sähköiset vuodontarkkailumenetelmät olivat opinnäytetyön aiheena erittäin mielenkiintoinen ja opettavainen. Aihe mahdollisti hyvän yhtymäkohdan työelämän ja opintojen loppuunsaattamisen välille, sillä aihe sisältää sähkötekniikkaa ja maarakennustekniikkaa koskevia asioita. Olin jollain tavoin tietoinen sähköisistä vuodonpaikannusmenetelmistä ja geomembraanirakenteiden vaurioiden syntymekanismeista jo ennen opinnäytetyön tekemistä. Osa vuodonpaikannusmenetelmistä ja geomembraanivaurioiden syntymekanismeista oli tullut minulle tutuiksi jo aiemmin työskennellessäni Geosynt Oy:ssä. Asiaan perehtyminen opinnäytetyön muodossa kuitenkin mahdollisti paremman tutustumisen sähköisten vuodonpaikannusmittausten toimintaperiaatteisiin.

Opinnäytetyön päätavoite oli tuottaa Geosynt Oy:lle informatiivinen esityspaketti sähköä johtavista kalvoista ja erilaisista sähköisistä vuodonpaikannusmenetelmistä. Alkuperäisen suunnitelman mukaan osana opinnäytetyötä olisi tehty myös sähköinen vuodonpaikannusmittaus todelliseen kohteeseen. Tämä kuitenkin jouduttiin poistamaan opinnäytetyöstä ja korvaamaan se ekstruusioaineiston läpikäymisellä mittauskohteen toteutussuunnitelmien muututtua. Vaikka suunnitelma muuttuikin opinnäytetyön edetessä, opinnäytetyön sisällölliset tavoitteet toteutuivat hyvin.

## LÄHTEET

1. Geosynt. Saatavissa: <https://www.geosynt.fi/yritys/> Hakupäivä: 9.8.2019
2. ASTM D6747. 2015. Standard Guide for Selection of Techniques for Electrical Leak Location of Leaks in Geomembranes. ASTM International. West Conshohocken. PA. USA
3. Juntunen, Perttu. Geosynt Oy. Keskustelut toukokuun 2016 - marraskuun 2019 aikana.
4. Heikkinen, Markku. Geosynt Oy. Keskustelut toukokuun 2016 - marraskuun 2019 aikana.
5. Heikkinen, Tero. Geosynt Oy. Keskustelut toukokuun 2016 - marraskuun 2019 aikana.
6. Raumonen, Harri. Geosynt Oy. Keskustelut toukokuun 2016 - marraskuun 2019 aikana.
7. Breitenbach, Allan 2005. Heap leach pad design and construction practices in the 21<sup>st</sup> century.
8. Giroud, J.P. – Bonaparte, R. 1988. Leakage through Liners Constructed with Geomembranes – Part I. Geomembrane Liners. Boynton Beach, Florida: GeoServices Inc.
9. Sähköinen vuodontarkkailu. 2016. PowerPoint-diasarja. Perttu Juntunen, Kaitos Oy.
10. Ympäristönsuojelulaki 27.6.2014/527.
11. Nosko, V. – Touze-Foltz, N. 2000. Geomembrane liner failure: modelling of its influence on contaminant transfer

12. Forget, B. – Rollin, A.L. – Jacquelin, T. 2005. Impacts and limitations of Quality Assurance on geomembrane integrity. Quebec, Kanada: Solmers Inc.
13. Ramsey, Boyd 2014. Advances in Geomembranes: Leak Location Liner: Geomembrane Barrier Systems with increased integrity. Houston, Texas, USA: GSE Environmental LLC.
14. Geomembraaniasentajan käsikirja – Hitsausmenetelmät. 2019. Geosynt Oy.
15. Smith, Bradford – Darilek, Glenn – Laine, Daren 2007. Enhanced Geomembrane CQA Through Proper Application of Geomembrane Leak Location Surveys.
16. Laatusuunnitelma – Tiivistysrakenteen laadunvarmistus työmaalla. 2019. Geosynt Oy.
17. Liner Integrity Survey – Electrical Leak Location. 2015. PowerPoint-diasarja. Tammy Perkins, Weaver Consultants Group.
18. Sähköiset vuodonpaikantamisjärjestelmät. 2011. PowerPoint-diasarja. Veli-Pekka Perttinä, Sito-Rakennuttajat Oy
19. Youngblood, J. – Ward, B. 2007. The Technical Background and Successful Field Experience of Spark Testing a Conductive Liner.
20. ASTM D7007. 2016. Standard Practices for Electrical Methods for Locating Leaks in Geomembranes Covered with Water or Earthen Materials. ASTM International. West Conshohocken. PA. USA
21. Designing for Electrical Leak Location General Guide. 2014. Yleisohje. TRI Liner Integrity Services. Saatavissa: <http://www.linersurvey.net/wp-content/uploads/2013/01/LINER-INTEGRITY-SURVEY-GUIDE.pdf> . Hakupäivä: 10.8.2019

22. Electrical Leak Location Survey General Guide. 2014. Yleisohje. TRI Liner Integrity Services. Saatavissa: <http://www.linersurvey.net/wp-content/uploads/2013/01/LINER-INTEGRITY-SURVEY-GUIDE.pdf> . Hakupäivä: 10.8.2019
23. Bare Liner Leak Location – Water Puddle. 2019. hydroGEOPHYSICS inc. Saatavissa: [https://hgileakdetection.com/technology/bare-liner-integrity-surveys/attachment/bare-liner\\_water-puddle/](https://hgileakdetection.com/technology/bare-liner-integrity-surveys/attachment/bare-liner_water-puddle/) . Hakupäivä: 16.6.2019
24. Bare Liner Leak Location – Water Lance. 2019. hydroGEOPHYSICS inc. Saatavissa: <https://hgileakdetection.com/applications/bare-liner-leak-location/bare-liner-leak-location-water-lance/>. Hakupäivä: 15.7.2019
25. ASTM D7240. 2011. Standard Practices for Leak Location using Geomembranes with an Insulating Layer in Intimate Contact with a Conductive Layer via Electrical Capacitance Technique (Conductive Geomembrane Spark Test). ASTM International. West Conshohocken. PA. USA
26. Hamdi, Donia 2019. Technical Manager, GSE/Solmax. Keskustelut 14.5.-20.5.2019
27. LEAK LOCATION LINER. 2019. Application sheet. GSE Environmental / Solmax
28. GSE Leak Location Geomembranes. 2019. Tuote-esite. GSE Environmental / Solmax.
29. Inkkinen, Pentti – Manninen, Reijo – Tuohi, Jukka 2002. Momentti 2. Insinöörifysiikka. 1. painos. Keuruu: Otavan Kirjapaino Oy
30. Lahti, Leena 1977. Sähköoppi. Helsinki: Oy Gaudeamus Ab.
31. Ahoranta, Jukka 2014. Sähkötekniikka. Helsinki: Sanoma Pro Oy.
32. Lehto, Heikki – Havukainen, Raimo – Leskinen, Janna – Luoma, Tapani 2006. Fysiikka 6. Helsinki: Kustannusosakeyhtiö Tammi.

33. Sensor DDS MIT. 2019. Tuote-esite. Sensor Group.
34. Sensor DDS MIT – Arc Tester ASTM Aproved. 2019. Sensor Group. Saatavissa: [https://www.sensorgroup.com/wp-content/uploads/ArcTester\\_1.jpg](https://www.sensorgroup.com/wp-content/uploads/ArcTester_1.jpg).  
Hakupäivä 24.10.2019
35. ASTM D7007. 2016. Standard Practices for Electrical Methods for Locating Leaks in Geomembranes Covered with Water or Earthen Materials. ASTM International. West Conshohocken. PA. USA
36. Darilek, G.T. – Laine, D.L. 1999. Performance-Based Specification on Electrical Leak Location Surveys for Geomembrane Liners. Boston, USA
37. MSS Permanent Monitoring Systems for Geomembrane Sealing. 2018. Tuote-esite. Texplor Group. Saatavissa: [https://www.texplor.eu/files/Downloads/Broschuren\\_englisch/MSS\\_permanent\\_2018\\_Rev01\\_E\\_web.pdf](https://www.texplor.eu/files/Downloads/Broschuren_englisch/MSS_permanent_2018_Rev01_E_web.pdf) Hakupäivä: 2.11.2019
38. Leak-detection systems for the long-term monitoring of geomembran sealing systems. 2008. Tuotekansio. Progeo Monitoring GmbH & Co.
39. geologger – Leak detection system. 2011. System description – Version E. Progeo Monitoring GmbH & Co.
40. geologger – integrity monitoring solutions for geotechnics and environmental protection. 2017. Tuote-esite. Progeo Monitoring GmbH & Co. Saatavissa: [https://progeo.com/wp-content/uploads/2017/10/geologger\\_en\\_web.pdf](https://progeo.com/wp-content/uploads/2017/10/geologger_en_web.pdf) Hakupäivä: 2.11.2019
41. PERMANENT OFFLINE MONITORING. Sensor Group. Saatavissa: <https://www.sensorgroup.com/permanent-offline-monitoring> Hakupäivä: 2.11.2019

42.24/7 ONLINE MONITORING SOLUTIONS. Sensor Group. Saatavissa:  
<https://www.sensorgroup.com/24-7-geomembrane-leak-detection> Haku-  
päivä: 2.11.2019