



Minna Leppänen

13.1.2016

22.01.2016

ÖLJYALAN PALVELUKESKUS

HDPE-KALVON PITKÄAIKAISKESTÄVYYS

Kirjallisuusselvitykseen perustuva lausunto

Jakeluasemarakentaminen on uudistunut. Uudistuneen jakeluasemastandardin (SFS 3352, 2014) mukaan kaikilla alueilla käytetään ensisijaisia suojausrakenteita, joilla estetään haitallisten aineiden pääsy ympäristöön. Herkillä alueilla kuten pohjavesialueilla on käytössä myös toissijainen suojausrakenne. Suojausrakenteet ovat ns. varorakenteita vaurion, vuodon, onnettomuuden tai muun poikkeuksellisen tilanteen varalta.

Tässä selvityksessä on kirjallisuuden perusteella tarkasteltu suojausrakenteissa käytettyjen HDPE-tiivistyskalvojen pitkäaikaiskestävyyttä.

1. Geosynteetit

Geosynteetti (GSY) on yleinen termi kuvaamaan tuotetta, jossa on vähintään yksi levymäinen, kaistalemainen tai kolmiulotteisen rakenteen muodostava, synteettisestä tai luonnonpolymeeristä tehty komponentti ja jota käytetään maan ja/tai muun materiaalin kanssa kontaktissa geoteknisissä ja rakennusteknisissä sovelluksissa (EN ISO 10318). Standardin EN ISO 10318 määritelmän mukaan **georiste** on alhaisen läpäisevyyden omaava geosynteettinen materiaali, jota käytetään geoteknisissä ja rakennusteknisissä sovelluksissa vähentämään tai estämään nesteen virtausta rakenteen läpi. **Geomembraani** on polymeeristä valmistettu, ohut veden ja kaasujen kulkeutumisen estämiseen tarkoitettu tiivistyskalvo eli synteettinen muovigeoriste (GBR-P). Polymeerisessä georisteessä (GBR-P) eristevaikutuksen aikaansaavat polymeerit.

Pitkäaikaiskestävyydellä tarkoitetaan materiaaliominaisuuksien pitkäaikaista säilymistä käsittäen erityisesti kemialliset ja fysikaaliset muutokset. Muutokset voivat olla materiaalille ominaisia, mutta niitä voivat edistää myös erilaiset ulkoiset kuormitukset.

Geosynteettisen tuotteen kestävyys riippuu:

- polymeerityypistä,
- geosynteettisen tuotteen makrorakenteesta, esim. geomembraanin paksuus tai kuitujen paksuus,
- raaka-aineiden puhtaudesta ja epäpuhtauksien määrästä,
- polymerisointiprosessista ja käytetyistä katalyytistä,
- kopolymeroinnista, joka yleensä heikentää kestävyyttä, ja
- valmistusprosesseista.



Minna Leppänen

13.1.2016

Tuotteisiin lisätään muoviraaka-aineen lisäksi erilaisia lisäaineita parantamaan valmistuksen aikaisia tai käyttötilan ominaisuuksia. Jos koostumus muuttuu, etenkin jos lisäaineet muuttuvat, myös oletettu käyttöikä muuttuu. (Koerner et al 2011)

Esimerkiksi geomembraani eli tiivistyskalvo koostuu

- 1) muoviraaka-aineesta (*resin*),
- 2) hiilimustasta (*carbon black*), jota lisätään UV-kestävyyden parantamiseksi, tai väriaineista,
- 3) lyhytvaikutteisista käsittelystabilisaattoreista ja
- 4) pitkävaikutteisista antioksidanteista eli hapettumisen estoaineista.

HDPE-kalvo koostuu tavallisesti 96 – 97,5 %:sta polyeteeniraaka-ainetta, 2 – 3% hiilimustaa ja 0,5 – 1,0% muita lisäaineita kuten antioksidanteja ja stabilisaattoreita.

2. Geosynteettien vaurioitumismekanismit

Geosynteettisten tuotteiden kuten tiivistyskalvojen vaurioitumismekanismeja ja tekijöitä voidaan luokitella seuraavasti (Koerner et al 2011):

- **ultraviolettisäteily**; kohdistuu vain peittämättömiin rakenteisiin,
- **hapettuminen**; tapahtuu kaikissa polymeerissä, polyolefiinien eli polyetyleenin ja polypropyleenin päävaurioitumismekanismi kaikissa olosuhteissa,
- **otsoni**, tapahtuu kaikissa polymeerissä,
- **hydrolyysi**; päävaurioitumismekanismi polyestereillä ja polyamideilla,
- **kemiallinen vaurioituminen**; tapahtuu kaikissa polymeerissä ja vaihtelee veden vaikutuksesta (vähiten aggressiivinen) orgaanisiin liuottimiin (aggressiivisin),
- **radioaktiivisuus**; mahdollinen, jos kalvo altistuu korkea-aktiivisille materiaaleille,
- **biologinen vaurioituminen**; mahdollinen, mikäli on käytetty biologisesti herkkiä lisäaineita,
- **jännitystila**; tapauskohtainen kuormitus,
- **lämpötila**; mitä korkeampi lämpötila, sitä nopeammin hajoaminen tapahtuu mekanismeista riippumatta.

Geosynteettisiin tuotteisiin voi rakenteessa kohdistua käyttöiän aikana samanaikaisesti usean tyyppisiä vaurioitumismekanismeja. Mekanismien yhteisvaikutus voi olla vaurioitumista kiihdyttävä. (Rowe et al 2002)

Jakeluasemien suojausrakenteissa oleellisia kuormitustekijöitä ovat edellä mainituista **hapettuminen**, **kemiallinen kuormitus** ja **jännitystila**. Hapettuminen on maakerroksilla peitetystä rakenteesta erittäin hidasta verrattuna paljaana oleviin rakenteisiin. Tiivistyskalvojen läpiviennit ja asennus suunnitellaan ja toteutetaan siten, ettei kalvoon kohdistu jännityksiä. Kemiallista kuormitusta voivat aiheuttaa maahan vaurioiden, onnettomuustilanteiden ja virheellisen toiminnan takia joutuvat



Minna Leppänen

13.1.2016

polttoaineperäiset hiilivedyt. Todennäköisin päästötilanne on vuodot tankkauksen yhteydessä.

Geosynteettiset tuotteet voivat vaurioitua jo ennen käyttövaihetta. Merkittävin osuus vaurioista aiheutuu asennustyön aikaisista virheistä ja riittämättömästä suojauksesta. Mahdollisia vaurioita aiheuttavia vaihteita ovat (Scheirs 2009):

- valmistusvirheet,
- vaurioituminen kuljetuksen aikana tehtaalla, varastossa, työmaalla ja niiden välissä,
- mekaaninen vaurio kuormauksen, kuorman purun ja varastoinnin tai levittämisen aikana,
- varastointi suojaamattomana,
- sääaltistus sallittua pidempään,
- asennusvirheet, esim. hitsausvirheet, rakenteeseen jäävät veikit ja taitokset,
- tuulenpuuskien aiheuttamat taitokset,
- liikennöinti tuotteen päällä ilman riittävää suojakerrosta ja yläpuolisten kerrosten rakentaminen.

Geosynteettiset tuotteet ovat teollisia tuotteita, joiden valmistuksen aikainen kattava laadunvalvonta varmistaa, että tuote vastaa sille asetettuja vaatimuksia. Eurooppalaisissa harmonisoiduissa tuotestandardeissa on määrätty käyttökohteittain, mitkä tiedot tuotteista on ilmoitettava CE-merkinnässä ja millä menetelmillä ne on testattava. Jakeluaseman pohjavedensuojauksia koskee standardi *SFS-EN 13492 Georisteet. Jäte-altaiden, vastaanottoasemien ja vuotoa keräävien järjestelmien rakentamisessa käytettäviltä georisteiltä vaadittavat ominaisuudet (2013)*. Rakennushankekohtaisissa asiakirjoissa voidaan asettaa käyttökohdekohtaisia lisävaatimuksia. Valmistuksen aikainen laadunvalvonta ja tuotteen vastaavuuden tarkistus työmaalla karsivat raaka-aineista ja valmistuksesta johtuvat poikkeamat, joten pitkäaikaiskestävyyden kannalta merkittävimpiä tekijöitä ovat **asennuksen ja käyttöään aikaiset kuormitukset**.

Rakentamisen aikainen laadunvalvonta ja -varmistus ovat tärkeitä etenkin geomembraanien vaurioiden minimoimisessa. HDPE-kalvojen suurin riskitekijä on työnaikaiset virheet tai virheelliset materiaalit, saumaaminen, karkean kiviaineksen tai työkalujen aiheuttama pistekuormitus, työmaaliikenteen tai liitoskohtien aiheuttamat venymät.

Geomembraanin laadunvalvonta ja -varmistus jakaantuvat periaatteessa seuraavasti (Peggs 2004):

- 1) raaka-aineen valmistaja tekee laadunvalvontatestaukset valmistamalleen raaka-aineelle
- 2) geomembraanin valmistaja tekee laadunvarmistustestaukset käytettäville raaka-aineille
- 3) geomembraanin valmistaja tekee laadunvalvontatestaukset valmistamalleen tuotteelle



Minna Leppänen

13.1.2016

- 4) tiivistyskalvon asentaja tekee laadunvalvontamittaukset asennuksen aikana
- 5) riippumaton laadunvalvoja tai muu riippumaton osapuoli valvoo rakentamista, tarkastaa urakoitsijan laadunvalvontatoimenpiteet ja tekee valmiin rakenteen laadunvarmistustestauksen.

3. Raaka-aineiden vaikutus

Tiivistyskalvoja valmistetaan useista eri raaka-aineista. Laajimmin tunnettu ja yleisimmin käytetty on korkeatiheyksinen polyeteeni HDPE (*high density polyethylene*). Muita mahdollisia erilaisiin käyttökohteisiin soveltuvia raaka-aineita ovat polyvinyylidikloridi (PVC *polyvinyl chloride*), kloorattu polyeteeni (CPE *chlorinated polyethylene*), klorosulfanoitu polyeteeni (CSPE *chlorosulphonated polyethylene*), etyleeni-propyleenikumi (EPDM *ethylene propylene rubber*), polypropyleeni (PP *polypropylene*), lineaarinen matalatiheyksinen polyeteeni (LLDPE *linear low density polyethylene*), keskitiheyksinen polyeteeni (MDPE *medium-density polyethylene*) sekä bitumiset geomembraanit (BGM *bituminous geomembrane*). Raaka-aineiden hyviä ja huonoja puolia on esitetty taulukossa 1. Tässä tarkastelussa keskitytään polyeteenistä valmistettuihin HDPE-kalvoihin, joiden kemiallinen kestävyys on merkittävästi muita parempi ja kattavampi ja joita käytetään yleisesti pohjavedensuojusrakenteissa ja kaatopaikkarakentamisessa. Muita Suomessa käytettyjä kalvomateriaaleja ovat LLDPE ja EPDM.

USA:ssa on vahva PVC-teollisuus, joten siellä PVC-tuotteiden käyttö on huomattavasti yleisempää kuin Euroopassa, jossa niihin suhtaudutaan varauksella pehennysaineiden lyhyen iän takia. PVC-kalvojen pitkäaikaiskestävyyttä on parannettu käyttämällä erilaisia lisäaineita. Markkinoilla on esimerkiksi fluorinoitua PVDF-kalvoja, jotka valmistajan mukaan kestävät korkeita lämpötiloja ja hiilivetyjä.



Minna Leppänen

13.1.2016

Taulukko 1. Yleisesti käytettyjen geomembraanien etuja ja haittoja (Scheirs 2009)

Geomembraani	Etuja	Rajoituksia
HDPE	Ylivoimainen ja laaja-alainen kemiallinen kestävyys Hyvä hitsaussauman kestävyys Hyvät ominaisuudet matalissa lämpötiloissa Suhteellisen halpa	Altis jännityssäröilylle Lämpölaajeneminen suurta Huono puhkaisukestävyys Huonot moniakksiaaliset muodonmuutosominaisuudet Jäykkä, vaikea asentaa
LLDPE	Parempi joustavuus kuin HDPE:llä Helpompi levittää kuin HDPE Hyvä rasituksen kestävyys ja moniakksiaaliset muodonmuutosominaisuudet	Keskinkertainen UV-kestävyys verrattuna HDPE:en Keskinkertainen kemiallinen kestävyys verrattuna HDPE:en
fPP	Voidaan taitella jo tehtaalla, jolloin vähemmän työmaalla tehtäviä saumoja Erinomaiset moniakksiaaliset venymäominaisuudet Hyvä joustavuus Laaja sauma-alue	Rajoitettu kestävyys hiilivedyille ja kloorivedelle
PVC	Hyvä työstettävyys ja asennusominaisuudet Helppo saumata Voidaan taitella/laskostaa, joten vähemmän työmaalla tehtäviä saumoja	Huono kestävyys UV:lle ja otsonille, ellei erityisesti valmistettu Huono säärasituksen kestävyys Huono suorituskyky korkeissa ja matalissa lämpötiloissa
CSPE	Erinomainen UV- ja otsonin kestävyys Hyvä suorituskyky matalissa lämpötiloissa Hyvä kestävyys kemikaaleille, hapoille ja öljyille	Ei voi lämpöhitsata kovenemisen jälkeen
EPDM	Hyvä UV- ja otsonin kestävyys Korkeat lujuusominaisuudet Toimii hyvin matalissa lämpötiloissa Helppo levittää	Alhainen kestävyys öljyille, hiilivedyille ja liuottimille Huono sauman laatu
Butyylilikumi	Hyvä UV-, otsonin ja säärasituksen kestävyys	Suhteellisen alhaiset mekaaniset ominaisuudet Alhainen repimislujuus Alhainen kestävyys hiilivedyille Vaikea saumata
Nitriilikumi	Hyvä öljyn ja polttoaineen kestävyys (ei biodieselin)	Huono otsonin kestävyys Huono repimislujuus



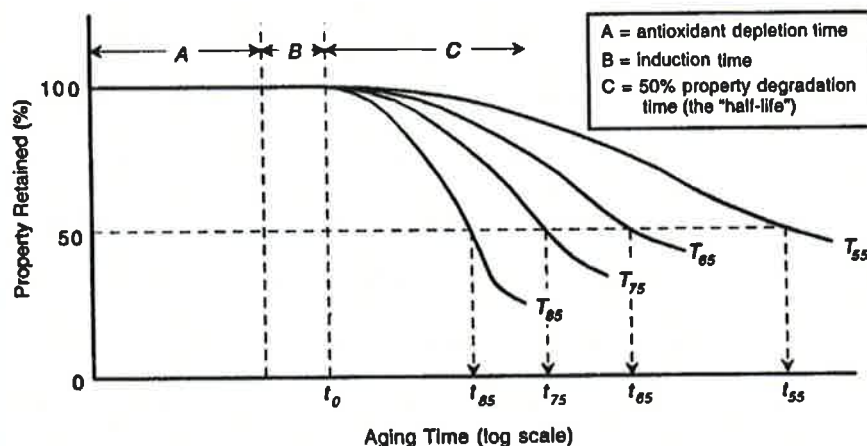
Minna Leppänen

13.1.2016

4. HDPE-geomembraanin hapettuminen

Hapettuminen on polyolefiinien eli polyetyleenin ja polypropyleenin päävaurioitumismekanismi kaikissa olosuhteissa. Hapettumisenkestävyys testataan CE-merkintää varten standardin EN ISO 13438 menetelmän C1 mukaisesti. Testissä mitataan näytteen vetolujuuden muutos, kun sitä on säilytetty 14 päivää hapellisessa liuoksessa 5 000 Pa paineessa ja 80° C:ssa. Vaihtoehtoinen menetelmä on EN 14575, jolloin lämpötila on 85° C:ssa ja säilytys kestää 90 päivää. Testeissä materiaalin ikääntymistä nopeutetaan korkealla lämpötilalla.

Hapettuminen alkaa käytännössä heti valmistuksen jälkeen. Antioksidanteilla eli hapettumisenestoaineilla voidaan pidentää polyeteenien käyttöikää merkittävästi. Kun antioksidantit on kulutettu loppuun, hapettuminen alkaa kiihtyä (kuva 1). (Koerner et al 2011)



Kuva 1. Geomembraanien ominaisuuksien säilyminen ajan funktiona. Kuvaajassa on esitetty kolme hapettumisvaihetta: Vaihe A: antioksidanttien käyttöaika, Vaihe B: induktioaika ja Vaihe C: ominaisuuksien puoliintumisaika. (Koerner et al 2011)

Antioksidanttien kestoaika riippuu käytettyjen antioksidanttien tyypistä ja määrästä eli on seoskohtainen. Antioksidantteja kuluttavat kemialliset reaktiot kalvoon diffundoituvan hapen kanssa sekä antioksidanttien fysikaalinen katoaminen, mihin vaikuttavat niiden jakautuminen tuotteessa sekä käyttökohteen olosuhteet ja lämpötila. (Koerner et al 2011)

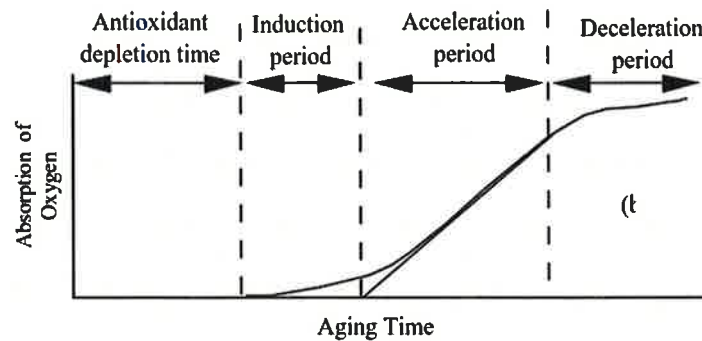
Antioksidanttien määrää mitataan usein määrittämällä hapettumisaika (*oxidative induction time* OIT). Käytössä on kaksi testiä, ns. standardi-OIT-koe (ASTM D3895) ja korkeapaine-OIT-koe (ASTM D5885).

Hapettuminen tapahtuu aluksi hitaasti. Reaktio kiihtyy ja lopulta taas hidastuu noudattaen S-muotoista käyrää (kuva 2). (Koerner et al 2011)



Minna Leppänen

13.1.2016



Kuva 2. Geomembraanien hapettumisen eteneminen ajan funktiona. (Koerner et al 2011)

Synteettisten materiaalin rajakäyttötilana käytetään yleisesti tietyn mitoitusominaisuuden puoliintumista, esimerkiksi vetolujuuden puoliintuminen. On kuitenkin huomattava, että puoliintumisajan kuluttuakin tuote edelleen on olemassa ja voi toimia, vaikkakin heikentyneet ominaisuudet takaavat alemman varmuustason kuin suunnitteluarvot.

Peitetyissä rakenteissa hapettuminen on hidasta, koska hapen saanti on rajoitettua ja maakerrokset suojaavat kalvoa UV-säteilyltä ja korkeilta lämpötiloilta, mutta paljaana olevissa kalvorakenteissa on todettu antioksidanttien määrän ja OIT-arvon laskevan hitaasti ajan funktiona. GSE:n tekemien kohdetutkimusten mukaan kalvojen mekaaniset ominaisuudet eivät ole antioksidanttien kulumisesta huolimatta juurikaan heikentyneet 30 käyttöiän aikana, mikä johtunee käytetyn kalvon paksuudesta, sillä antioksidanttimäärä on merkittävästi vähentynyt vain 2,0...2,5 mm paksuisten kalvojen pintaosasta. Diffuusio kontrolloi hapen kulkeutumista kalvon läpi, joten kalvon suurempi paksuus varmistaa pidemmän käyttöiän. (Tarnowski & Baldauf 2006)

Käyttölämpötila vaikuttaa merkittävästi käyttöikään; mitä korkeampi lämpötila sitä lyhyempi käyttöikä. Taulukossa 2 on esitetty amerikkalaisen *Geosynthetic Research Institutin* (GRI) tekemien ja koostamien laajojen ja pitkäaikaisten tutkimusten perusteella ennustettu käyttöikä puoliintumisaikana kuvattuna eri lämpötiloissa. Tulosten perusteella HDPE-tiivistyskalvon ominaisuuksien puoliintumisaika on peitettynä keskimäärin 446 vuotta 20 °C:ssa ja 40 °C:ssa se pienenee 69 vuoteen.

Taulukko 2. Peitetyn HDPE-tiivistyskalvon käyttöikäennuste erilaisissa kenttälämpötiloissa (Koerner et al 2011)

Käyttö- lämpötila (°C)	Vaihe "A" (vuosia)			Vaihe "B" (vuosia)	Vaihe "C" (vuosia)	Kokonais- ennuste* (vuosia)
	Standard OIT	Korkeapaine- OIT	Keski- määräinen OIT			
20	200	215	208	30	208	446
25	135	144	140	25	100	265
30	95	98	97	20	49	166
35	65	67	66	15	25	106
40	45	47	46	10	13	69

*Kokonaisennuste = Vaihe A (keskimääräinen) + Vaihe B + Vaihe C



Minna Leppänen

13.1.2016

5. HDPE-kalvon kemikaalienkestävyys

HDPE on kemialliselta kestävyydeltään laaja-alainen ja ylivoimainen muihin kalvomateriaaleihin nähden, kuten taulukosta 1 ilmenee. HDPE:n hyvät ominaisuudet kuten korkea lujuus ja jäykkyys, pieni läpäisevyys ja hyvä kemiallinen kestävyys johtuvat sen korkeasta tiheydestä ja kristallirakenteesta, joka toisaalta myös aiheuttaa sen haurauden ja alttiuden jännityssäröilylle. (Scheirs 2009)

Kemialliset kuormitukset riippuvat käyttökohteesta ja varastoitavista aineista. Osa kemikaaleista voi vaikuttaa HDPE-kalvoon esimerkiksi aiheuttaen vähäistä paisumista, kuten hiilivedyt, tai kiihdyttäen hapettumista.

6. Rakentamisen ja käytön aikaiset kuormitukset

Pohjavedensuojusrakenteeseen kohdistuu useita erilaisia kuormituksia riippuen käyttökohteesta. Kuormitukset voidaan luokitella

- **mekaanisiin**, esim. liikennekuormat, pintakuormat, yläpuolisten rakenteiden kuormitus, painuma, eroosio
- **ilmastollisiin**, esim. kuivuminen, jäätyminen, UV-säteily,
- **kemiallisiin**, esim. kaasut, kemikaalit ja muut haitalliset aineet vesiliuoksessa tai omana faasinaan, ja
- **biologisiin**, esim. mikro-organismit, nisäkkäät ja juuret.

Rakentamis- ja käyttövaiheessa yleisimpiä HDPE-geomembraanin vaurioiden syitä ovat olleet (Scheirs 2009):

- mekaaninen vaurio rakentamisen aikana, esim. kiven tai puskutraktorin tekemä reikä,
- huono saumaus,
- altistuminen rakentamisen aikaisille jännityksille,
- käyttötilajännitykset, jotka aiheuttavat hitsaussauman vaurion (esim. epätasainen painuminen),
- jännityssäröily jännityksen huippupisteissä.

Asentamisen ja käytön aikaiset kuormitukset voidaan välttää käyttämällä asennuksessa ammattitaitoisia työntekijöitä sekä tunnistamalla ja karsimalla suunnitteluvaiheessa kalvoon muodonmuutoksia mahdollisesti aiheuttavat tekijät, kuten kokoonpuristuva alusta tai luiskan riittämätön stabiliteetti. Saumauksen ja asennuksen laatuun vaikuttavat merkittävästi tekijöiden ammattitaidon lisäksi vallitsevat sääolosuhteet, kalvoon esim. lämpölaajenemisen takia muodostuvat rypyt ja viereisten rakennekerrosten rakentaminen. Työnaikaiseen laadunvalvontaan kuuluu asennuksen dokumentointi ja saumojen tiiviyyden testaus standardoiduilla menetelmillä.

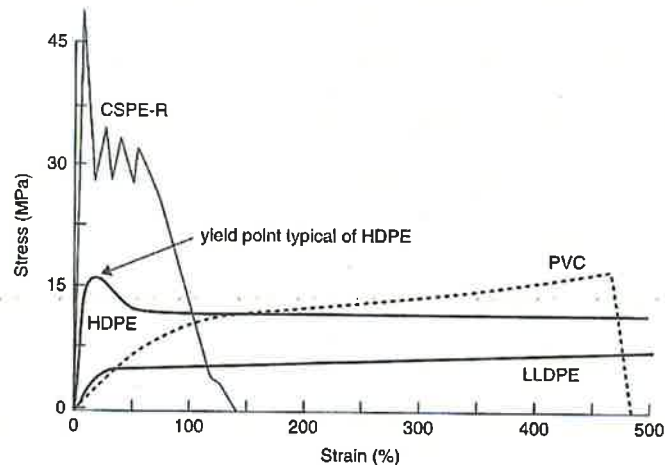
Käyttötilan mekaaniset kuormitukset voivat vaikuttaa pitkäaikaiskestävyyteen, jos ne käynnistävät jännityssäröilyn tai aiheuttavat murtuman. HDPE-kalvo käyttäytyy yksiaksiaalisessa vedossa hauraasti (kuva 3) eli sillä on selvä myötöpiste noin 12 % muodonmuutostasolla (eli venymällä), jonka jälkeen se ohenee vaikei jännitys kasva. Vastaavasti LLDPE-kalvon myötökohta noin 40 % muodonmuutostasolla ei ole ollenkaan yhtä selväpiirteinen. Suunnittelussa asetetaan yleensä lähtökohdaksi, että



Minna Leppänen

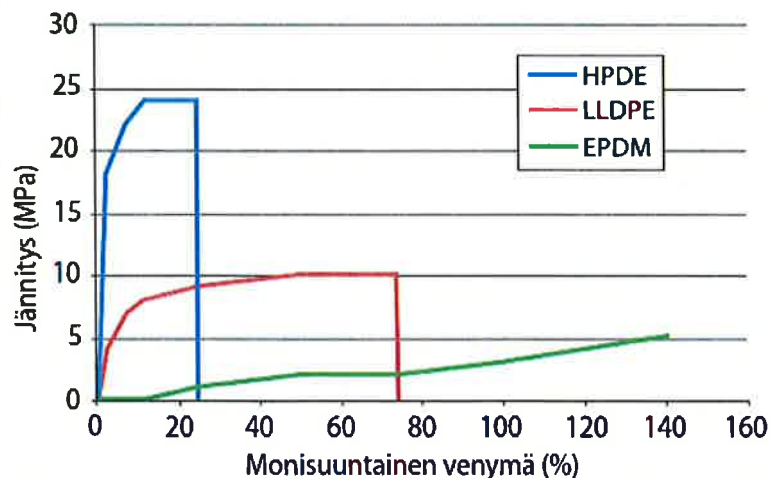
13.1.2016

HDPE-kalvon käyttötilassa venymä ei saa jännityssäröilyriskin takia olla suurempi kuin 3...6 %. Tämä taso voi helposti ylittyä lämpötilan, pohjamaan painuman tai ylä- tai alapuolisten kerrosten materiaalien tunkeutumisen aiheuttamien jännitysten takia, jollei riskiä tunnisteta ja hallita. (Scheirs 2009)



Kuva 3. Geomembraanien vetolujuuskuvaajia (Koerner 2005)

Todellisessa rakenteessa muodonmuutokset ja jännitykset ovat usein moniaksisiaalisia. Hauras käyttäytyminen on HDPE-kalvolle tyypillinen myös moniaksisiaalisessa venymässä (kuva 4). Venymä on selvästi pienempi kuin yksiaksisiaalisessa kokeessa, noin 20..30 %.



Kuva 4. Geomembraanien monisuuntainen venymä (Infra 15-710106)

Pääsääntönä on, että pohjavedensuojusrakenteissa käytettävät geosynteettiset tuotteet suojataan mekaanisilta kuormilta eikä niiden suunnitella ottavan vastaan muodonmuutoksia aiheuttavia jännityksiä. Rakentamisen aikaisista liikennekuormista voi aiheutua geomembraanille rasituksia, jotka ylittävät sallitut venymäarvot, jollei kalvoa suojata riittävästi. Kalvorakenteiden päällä ei saa liikennöidä ilman riittävä (tuotteesta ja kuormituksesta riippuen > 0,5...1,0 m) suojakerrosta ja silloinkin vain varovaisuutta käyttäen. Käyttötilan mekaanisista rasituksista tärkein on epätasaiset



Minna Leppänen

13.1.2016

painumat. Painumaerot aiheutuvat ensisijaisesti pohjamaan tai alapuolisten rakennekerrosten epähomogeenisuudesta.

Luiskissa rakenteeseen kohdistuu yläpuolisten rakennekerrosten painon aiheuttama luiskan suuntainen jännitys. Jos rakennekerrosten välinen kitka tai rakenteen sisäinen kitka ei ole riittävä, aiheutuu riittämättömän stabiliteetin takia muodonmuutoksia, jotka voivat muodostaa halkeamia tai venymiä rakenteeseen, tai jopa luiskan liukusortuma. Pohjavedensuojusrakenteissa rakennusaikainen tilanne ennen täyttöjä on luiskastabiliteetin kannalta usein vaarallisin. Jakeluasemarakenteissa ei tyypillisesti ole pitkiä jyrkkiä luiskia.

HDPE-kalvojen käyttöikää rajoittavin tekijä on sen **alttius jännityssäröilylle** (*stress cracking SCR*), joka heikentää sen pitkäaikaista mekaanista kestävyyttä. Erityisesti asennuksen ja saumauksen aikana tapahtuu jännityssäröilyn käynnistävää kuormitusta, mutta myös käyttötilanteessa kalvoon kohdistuva pistekuorma tai jännitys voi johtaa jännityssäröilyyn. Jännityssäröilynkestävyys on tutkittava CE-merkintää varten standardin EN 14576 mukaisesti.

Käytännössä HDPE-kalvon valmistamiseen käytetään jännityssäröilyriskin pienentämiseksi MDPE-raaka-ainetta ja kalvon korkea tiheys (0,941-0,950 g/cm³) saavutetaan hiilimustan lisäyksellä (Scheirs 2009). Suomessa yleisesti käytettävä kalanteroitu kalvo on puhallettua kalvoa (yleinen Amerikassa) tasalaatuisempi eikä siinä ole taitoksista johtuva venymiä, joista jännityssäröily voi helposti käynnistyä.

Polyeteenin tiheydellä on merkittävä vaikutus tuotteen ominaisuuksiin. Mitä korkeampi on polyeteenin tiheys, sitä suurempi kiteisyys, murtovetolujuus, jäykkyys ja parempi kemiallinen kestävyys ja kulutuskestävyys ja toisaalta sitä heikompi iskulujuus, jännityssäröilynkestävyys ja käsiteltävyys sekä pienempi läpäisevyys. LLDPE-kalvolla onkin siten HDPE-kalvoa parempi muodonmuutoskestävyys sekä isku- ja puhkaisulujuus, mutta toisaalta kemiallinen kestävyys on hieman heikompi. (Scheirs 2009)

Tutkimusten mukaan kalvon pitkäaikaiskestävyys kasvaa ja vaurioitumisherkkyys pienenee, kun paksuus kasvaa (Rowe et al 2010).

Käyttöikää voi lyhentää myös ilmastolliset tekijät kuten alhaiset lämpötilat ja UV-säteily. Niiden vaikutukset ovat peitetyissä rakenteissa tavallisesti merkittäviä vain rakentamisen aikana. UV-säteilyn ikäännyttävää vaikutusta voidaan vähentää peittämällä geosynteettiset tuotteet heti asennuksen jälkeen ja varastoimalla tuotteet työmaalla asianmukaisesti suojattuna. Tiivistysrakenteen jäätyminen tulee estää riittävällä suojamaakerroksella ja rakentamisajankohdan valinnalla. Tarvittaessa käytetään lämmöneristeitä, jos peittokerros jää liian ohueksi.

7. Ehjyyden varmistaminen

Pohjavedensuojusrakenteet ovat vaativia rakenteita, joiden laatu varmistetaan useammassa eri vaiheessa. Parhaatkaan laadunvarmistusmenettelyt ja kolmannen osapuolen tarkastuksetkaan eivät pysty täysin eliminoimaan inhimillisen virheen mahdollisuutta. Virheet johtavat tiivistysrakenteen vaurioon ja vuotoon. Käyttöiän ja rakenteen tehokkuuden kannalta on oleellista tietää vuodon laajuus. Rakenteen



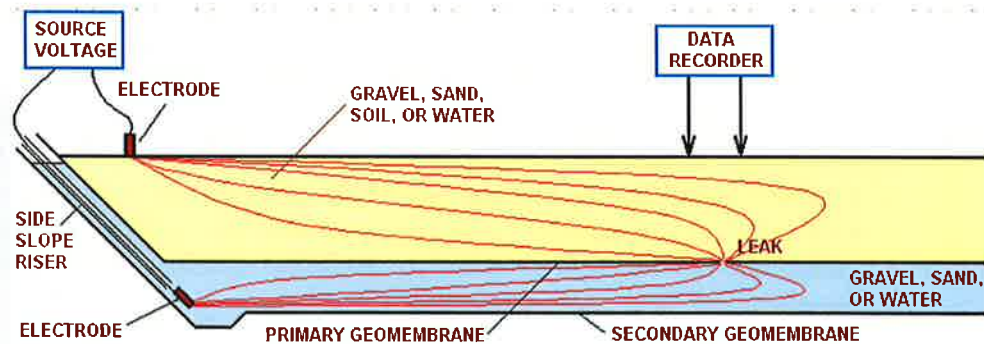
Minna Leppänen

13.1.2016

ehjyyden osoittaminen ja vuotojen seuraaminen sähköisillä vuodontarkkailujärjestelmillä voivat antaa luotettavamman kuvan rakenteen tehokkuudesta.

Kalvon ehjyys voidaan todeta sähköisillä menetelmillä asennuksen jälkeen. Reikien havaitseminen perustuu siihen, että tiivistyskalvo on eriste eli ei johda sähköä. Mikäli kalvon läpi havaitaan virtaavan sähköä, se tapahtuu vauriokohdan tai reiän kautta (kuva 5).

Ehjiysmittaukset voidaan tehdä suoraan kalvon päältä tai maakerroksella peitetyn kalvon päältä. Reikä voidaan paikantaa ja korjata. Reiän havaitsemista voi edistää käyttämällä valkoista kalvoa tai kalvoa, jonka alapintaan on laminoitu sähköjohtava folio (esim. GSE Leak Location Liners). Markkinoilla on olemassa myös järjestelmiä kalvon pitkäaikaisen ehjyyden tarkkailuun.



Kuva 5. Sähköisen vuodon havaitsemisen periaate (Leak location services)

8. Yhteenveto

Tiivistyskalvon pitkäaikaiskestävyys muodostuu

- raaka-aineiden vaikutuksesta
- valmistuksesta
- käsittelystä ja varastoinnista ennen käyttöä
- asennuksesta
- käytönaikaisista kuormituksista.

Polyeteenikalvon merkittävin vanhenemisprosessi on hapettuminen, jota hidastetaan käyttämällä muoviseoksessa lisäaineita. Maaperässä oleva, peitetty rakenne vanhenee hitaasti, koska happea ei ole saatavilla, UV-säteily ei heikennä kalvoa ja olosuhteet ovat tasaiset. Laajan tutkimusaineistojen perusteella tehtyjen tarkastelujen perusteella peitetty HDPE-tiivistyskalvo kestää hapettumatta lähes 500 vuotta (Koerner et al 2011).

HDPE-tiivistyskalvo kestää kemiallisia kuormituksia selvästi muita raaka-aineita paremmin ja laaja-alaisemmin. HDPE-kalvon materiaalin kestävyys on jakeluaseman pohjavedensuojusrakenteilta vaaditun käyttöiän kannalta selvästi riittävä eikä käyttökohteelle tavanomainen kemiallinen kuormitus heikennä kalvon kestävyyttä. Valmistuksen aikaisella systemaattisella laadunvalvonnalla karsitaan raaka-aineen ja valmistuksen laatueroja.



Minna Leppänen

13.1.2016

Kalvon toimintaa ja pitkäaikaiskestävyyttä heikentävät mahdolliset työnaikaiset virheet, kuten huono saumaustyö tai alustan huono tiivistys, tai käytön aikana kalvoon kohdistuvat mekaaniset kuormitukset, kuten karkean kiviaineksen suojaamattomaan kalvoon aiheuttamat pistemäiset kuormat tai liitoksissa kalvoon kohdistuvat jännitykset. Asiantuntevalla suunnittelulla varmistetaan, että käytettävät materiaalit, detaljit ja rakenneratkaisut ovat asianmukaisia eivätkä aiheuta kalvoon jännityksiä tai venymiä.

Asennusvirheet minimoidaan ammattitaitoisella henkilöstöllä ja työaikaisella laadunvalvonnalla. Tärkeintä on välttää jännityssäröilyä käynnistäviä tekijöitä, kuten pistemäisiä kuormia, taitoksia tai paikallisia venymiä. Kalvon ehjyys voidaan varmistaa sähköisillä mittauksilla asennuksen jälkeen.

Tiivistyskalvon tehokkuutta voidaan lisätä käyttämällä yhdistelmä-rakennetta, jolloin kalvon yksittäisen vauriokohdan vaikutus suojauksen tehokkuuteen ei ole yhtä merkittävä. Yhdistelmä-rakenteessa kalvon alle rakennetaan mineraalinen tiivistyskerros, jolloin erityyppiset tiivistysrakennekerrokset täydentävät ja suojaavat toisiaan. Tutkimusten mukaan yhdistelmä-rakenne on tuhansia kertoja tehokkaampi kuin kalvo yksinään. Jakeluasemastandardin (SFS 3352, 2014) mukaan yhdistelmä-rakennetta käytetäänkin herkille alueille rakennettavissa toissijaisissa suojausrakenteissa.

Minna Leppänen
Tampereen teknillinen yliopisto
Maa- ja pohjarakenteet

Lähteet

- ASTM D3895-14 Standard Test Method for Oxidative-Induction Time of Polyolefins by Differential Scanning Calorimetry
- ASTM D5885/D5885M-15 Standard Test Method for Oxidative Induction Time of Polyolefin Geosynthetics by High-Pressure Differential Scanning Calorimetry
- EN ISO 10318 Geosynthetics - Terms and definitions
- EN ISO 13438 Geotextiles and geotextile-related products — Screening test method for determining the resistance to oxidation
- EN 14575 Geosynthetics. Test method for determining the resistance of polymeric geosynthetic barriers to environmental stress cracking



Minna Leppänen

13.1.2016

- Greenwood J.H., Schroeder H.F. and Voskamp W. (2013). CUR 243 – Durability of Geosynthetics. CUR Report 243. CUR Bouw & Infra. Saatavissa http://www.geosynthetica.net/wp-content/uploads/Publication243_Durability_C187.pdf
- Infra 15-710106 (2013) Kaatopaikkarakenteet. Rakennustieto Oy, Rakennustietosäätiö RTS
- Koerner Robert M. (2005) Designing with Geosynthetics. Fifth edition.
- Koerner Robert M., Hsuan Y. Grace and Koerner George R. (2011) Geomembrane Lifetime Prediction: Unexposed and Exposed Conditions. GRI White Paper #6. Geosynthetic Institute. Original: June 7, 2005. Updated: February 8, 2011. Saatavissa: <http://www.geosynthetic-institute.org/papers/paper6.pdf>
- Leak location services, verkkosivu <http://www.llsi.com/>
- Müller, Werner W. (2007) HDPE Geomembranes in Geotechnics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Peggs I.D. (2004) Assuring the Quality of HDPE Geomembrane Liners: An International Perspective. Saatavissa: <http://www.geosynthetica.net/resources/assuring-the-quality-of-hdpe-geomembrane-liners-an-international-perspective-1/>
- Rowe, R. K., Islam M. Z. & Hsuan Y. G. (2010) Effects of Thickness on the Aging of HDPE Geomembranes, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Feb 2010. Saatavissa [http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000207](http://ascelibrary.org/doi/pdf/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000207)
- Rowe R. Kerry, Sangam Henri P. (2002) Review Article - Durability of HDPE geomembranes. Geotextiles and Geomembranes 20 (2002) 77–95. Saatavissa http://www3.epa.gov/region05/waste/clintonlandfill/PDFClintonLFChemicalWaste_USEPAApplication/cl_132.pdf
- Scheirs John 2009. A guide to polymeric Geomembranes. John Wiley & Sons.
- SFS 3352 Palaviene nesteiden jakeluasema SFS 3352, 2014.
- SFS-EN 12226 Geosynthetics. General tests for evaluation following durability testing
- SFS-EN 13492 Georisteet. Jäte-altaiden, vastaanottoasemien ja vuotoa keräävien järjestelmien rakentamisessa käytettäviltä georisteiltä vaadittavat ominaisuudet (2013).
- Tarnowski, C., & Baldauf, S. (2006). Ageing resistance of HDPE-geomembranes - Evaluation of long-term behavior under consideration of project experiences. In Geosynthetics. Edited by J. Kuwano and J. Kosaki. Millpress, Rotterdam, N.L.D., pp. 359–362.

