

Synteettiset materiaalit kaivosten allasrakenteiden tiivisrakenteena

Anne Tuomela
Vesi- ja ympäristötekniikan tutkimusryhmä
Oulun yliopisto

TIIVISTELMÄ

Kaivosteollisuus käyttää geosynteettisiä materiaaleja useissa sovelluksissa ja viimeisten vuosikymmenien aikana niiden käyttö erilaisten altain pohjarakenteissa on lisääntynyt. Geomembraanirakenteita käytetään tekemään pohjarakenteista mahdollisimman heikosti läpäiseviä. Käytettäviä pohjarakenteita on erilaisia riippuen monesta asiasta, mutta lähtökohta suunnittelussa ovat rakenteen päälle tuleva materiaali ja hydraulinen paine sekä paikalliset olosuhteet. Tieteellisesti kaivosten käyttämistä pohjarakenteista on julkaistu kohtuullisen vähän tietoa ja käyttökokemuksia. Mitään yhtenäistä rakenteiden suunnitteluopasta tai lainsäädännön ohjausta rakenteiden tekemiseen ei ole. Monet käytetyt suunnitteluratkaisut pohjautuvat pohjaveden suojeluun ja kaatopaikkarakenteisiin, vaikka kaivosten allasrakenteet saattavat poiketa niistä huomattavasti. Suomessa uusien rikastushiekka-altain pohjarakenteita on suunniteltu ja rakennettu geomembraaneilla tiivistäen 2000-luvun jälkeen. Osassa geomembraanirakenteisissa rikastushiekka-altaissa on havaittu vuotoja ympäristöön ja geomembraanien on todettu vaurioituneen. Nopeasti aloitetut korjaus- ja valvontatoimenpiteet ovat edesauttaneet tilanteista selviämisessä. Tässä selvitystyössä on käyty läpi kaivosten pohjarakenteista löytyviä tieteellisiä julkaisuja ja konferenssiesityksiä. Työssä esitetään niiden perusteella pohjarakenteiden suunnittelun tärkeimmät huomioitavat asiat sekä pohditaan pohjarakenteisiin liittyviä ongelmia.

ALKUSANAT

Tämä selvitystyö on tehty Kainuun elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskuksen (ELY-keskus) toimeksiannosta joulukuun 2015 ja tammikuun 2016 välisenä aikana. Työn taustalla ovat olleet Suomen kaivoksilla tapahtuneet pohjarakenteiden geomembraanien vuototapaukset. Selvitystyön johtoryhmässä ovat olleet mukana Kainuun ELY-keskuksen edustajien lisäksi asiantuntijoita Suomen ympäristöministeriöstä, Kaivosteollisuus ry:stä, Maa- ja metsätalousministeriöstä, Lapin ELY-keskuksesta ja Fortumista.

Työ on tehty Oulun yliopiston Teknillisessä Tiedekunnassa Vesi- ja ympäristötekniikan tutkimusryhmässä ja työhön on osallistunut seuraava työryhmä: vastuullinen tekijä DI Anne Tuomela sekä asiantuntijat maa- ja pohjarakentamisen professori Kauko Kujala, hydrologian asiantuntija yliopistonlehtori TkT Anna-Kaisa Ronkanen sekä pohjavesien tutkijatohtori Pekka M. Rossi.

Tammikuun 29. 2016

Anne Tuomela

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ALKUSANAT	3
SISÄLLYSLUETTELO	4
1 JOHDANTO	5
2 GEOSYNTTEETTIEN KÄYTTÖ KAIVOSTEOLLISUUDESSA	8
2.1 Geosynteettiset tuotteet	8
2.2 Geomembraanien käyttö pohjarakenteissa.....	8
2.3 Geomembraanien käytön laajuus kasaliuotuksessa ja rikastushiekka-altaissa	15
3 ALLASRAKENTEIDEN SUUNNITTELU	17
3.1 Kasaliuotus	17
3.1.1 Suunnittelun lähtökohdat.....	19
3.1.2 Stabiiliteetin huomioiminen	21
3.2 Rikastushiekka-altaat	21
3.2.1 Suunnittelun lähtökohdat.....	23
3.3 Muut allasrakenteet.....	27
3.4 Läjityksen häiriintymisherkkyys	27
3.5 Geomembraanin valinta ja vaurioitumisherkkyys	28
3.5.1 Geomembraanin alapuolinen materiaali.....	30
3.5.2 Geomembraanien yläpuolinen kerros.....	33
3.6 Nesteen keräysputkistot	36
3.7 Laadunvarmistus	36
3.8 Vaurioiden vaikutukset suotovesiin	38
3.9 Pohjarakenteen vaikutus sulkemiskäytöihin.....	42
4 JOHTOPÄÄTÖKSET.....	44
LÄHDELUETTELO	

1 JOHDANTO

Geosynteettisten materiaalien käyttö on yleistynyt viimeisien vuosikymmenien aikana teollisuudessa. Niiden käyttö on yleistä kaatopaikkarakenteissa, joissa niiden on todettu toimivan hyvin ja käytöstä on Euroopassa paljon kokemusta. Kaatopaikkarakenteiden suunnitteluun on saatavana niin kansallisia kuin kansainvälisiäkin oppaita ja rakenteiden toimivuutta on tarkasteltu useassa tutkimuksessa (Daniel 1993, Darilek & Laine 2001, Bouazza et al. 2002, Lupo & Morrison 2004, Peggs et al. 2005, Podgorney & Bennett 2006, Stępniewski et al. 2011, Jingjing 2013). Kaatopaikkojen rakenteista on Suomessa säädetty lainsäädännöllä ja Valtioneuvoston asetus (331/2013) ohjaa kaatopaikkojen rakentamista, jonka taustalla on neuvoston direktiivi (1999/31/EY). Kaivosteollisuudessa pohjarakentamisen osalta lainsäädäntö on sen sijaan vaihtelevampaa ja riippuu suuresti kunkin maan omista vaatimuksista ja lainsäädännöstä. Mutta koska Suomessa, kuten muualla Euroopassakin, on hyviä kokemuksia vettä heikosti läpäisevistä kaatopaikkarakenteista, ovat ne vaikuttaneet vaatimuksiin kaivosalueilla tehtävistä pohjarakenteista.

Kaivosteollisuus käyttää geosynteettisiä materiaaleja erilaisissa rakenteissa kuten allasrakenteissa, mutta koska kaivosteollisuus käsitteenä on laaja, mahtuu koko teollisuuden alalle runsaasti erilaisia sovelluskohteita. Myös kaivostoiminnassa esiintyvät ongelmat ja vaikutukset ympäristöön ovat hyvin erityyppisiä riippuen kaivoksesta. Vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi alueen ja louhittavan malmin mineralogia ja talteen haluttava mineraali, käytettävä prosessi, alueen topografia, ilmasto ja toiminnan eri vaiheet. Ihmisten tietoisuus ympäristövaikutuksista on kasvanut ja ympäristöä halutaan suojella haittavaikutuksilta mahdollisimman hyvin. Metallimalmikaivosten suurimpana ympäristöongelmana pidetään suotovesien mukana aiheutuvia haittavaikutuksia ympäröivään luontoon, pohja- ja pintavesiin ja sen vuoksi niiden pääsyä halutaan estää esimerkiksi tiiviillä pohjarakenteilla.

Aikaisemmin Suomessa rikastushiekka-altaat on rakennettu kaivosalueilla suoalueille, laaksoihin maanpinnan muotoja hyödyntäen tai rinteiden reunoihin. Näin paikan valinnassa on hyödynnetty luontaisia heikosti vettä läpäiseviä kerroksia tai

maamuodostumia, joilla on pyritty estämään mm. suotovesien haittavaikutuksia ympäristöön. Altaiden toiminta on perustunut siihen, että altaista suotautuvat vedet on kerätty ympärillä oleviin ojiin tai muihin kuivattaviin rakenteisiin. Lainsäädännön tiukentuminen on kuitenkin tietyissä tilanteissa pakottanut suunnittelemaan pohjarakenteen sellaiseksi, että niissä käytetään yhtenä elementtinä keinotekoista eristettä, jonka tehtävä on katkaista veden kulku alapuolisiin maakerroksiin ja pohjaveteen. Taustalla on ollut mm. huoli pohjaveden ja läheisten vesistöjen veden laadun heikkenemisestä. Viime vuosina Suomen uusilla kaivoksilla (Talvivaara 2012–2013, Kittilä 2015) on kuitenkin tapahtunut vuotoja ympäristöön näiden uusien vaatimusten mukaisten pohjarakenteiden kautta sisältäen geosynteettisen kalvon (geomembraanin) yhtenä osana rakennetta. Nopeasti aloitetut korjaus- ja valvontatoimenpiteet ovat edesauttaneet haittavaikutusten rajaamisessa ja tilanteista selviämässä.

Huolimatta siitä, että geomembraaneja käytetään kaivosteollisuuden pohjarakenteissa, niiden toimivuudesta ei ole tarpeeksi tietoa saatavilla ja tutkimuksia arktisissa olosuhteissa vielä heikommin. Sattuneiden onnettomuuksien vuoksi kalvorakenteiden käyttö erityisesti rikastushiekka-altaissa on herättänyt paljon kysymyksiä ja tämän selvitystyön tarkoitus on tieteellisten julkaisujen ja olemassa olevien selvitysten avulla kartoittaa seuraavia asioita:

- Selvittää kuinka laajalti synteettisiä tiivisrakenteita käytetään ja mikä on peruste niiden valinnalle? Löytyykö vastaavia rakenteita alueilta, joissa sääolosuhteet ovat lähellä Suomen olosuhteita (esim. Ruotsi ja Kanada).
- Koota kokemuksia kalvorakenteiden toimivuudesta allasrakenteiden pohjarakenteista
- Onko muualla maailmalla esiintynyt ongelmia ja mikäli on, miten ne on ratkaistu?
- Millaisia muita rakenteita käytetään tilanteissa, joissa edellytetään ”täydellistä” eli erittäin pientä vedenpitävyyttä (esim. turve tms.)?
- Millaisia rakennevaatimuksia kalvolle ja kalvorakenteiden ylä- ja alapuolisille rakenteille asetetaan?

- Liittyykö kalvorakenteisia käyttöön reunaehtoja (esim. veden varastointi, läjitystekniikka, läjitettävä materiaali)?

2 GEOSYNTTEETTIIEN KÄYTTÖ KAIVOSTEOLLISUUDESSA

2.1 Geosynteettiset tuotteet

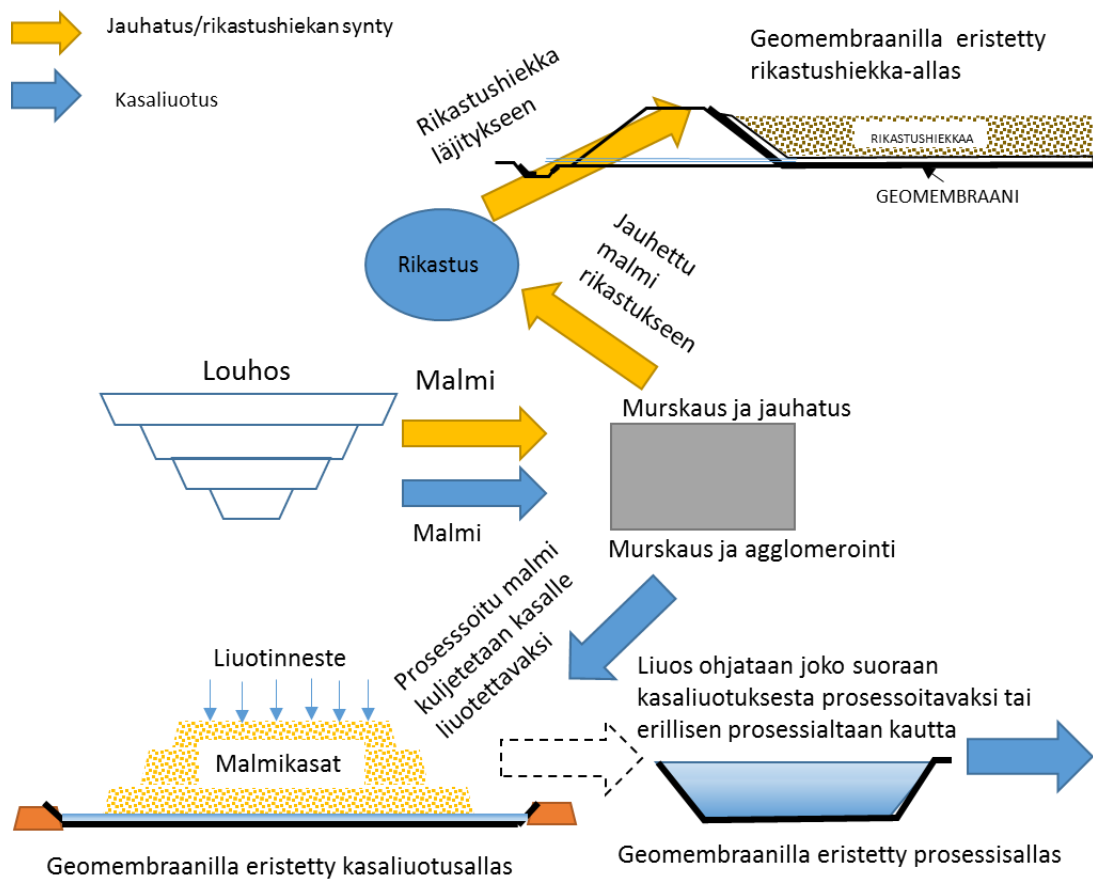
Geosynteettiset tuotteet ovat laaja joukko erilaisia materiaaleja, joiden ominaisuudet riippuvat sekä valittavasta materiaalista mutta myös käyttökohteesta. Tuotteita on nykyisin runsaasti markkinoilla ja uusia kehitetään. Kaivosteollisuudessa käytetään useita geosynteettisiä tuotteita kuten geomembraaneja, muoviputkia, geotekstiilejä, geosynteettistä savieristeitä (bentoniittimatot) ja vahvisteita. Geomembraanien käyttö kohdistuu erilaisiin prosessialtaiden, kasaliuotusaltaiden ja rikastushiekka-altaiden kalvorakenteisiin sekä sivukivien kapselointiin, jolla pyritään estämään happamien kuivatusvesien synty. Muoviputkia puolestaan käytetään keräämään prosessiliuokset ja kuljettamaan niitä. Muoviputkia käytetään myös liuosten ja vesien palauttamiseen prosessikierrossa sekä vuotojen havaitsemiseen ja seuraamiseen. Geotekstiilejä käytetään pitämään rakennekerrokset sekoittumattomina ja varmistamaan kuivatuskerroksen ja keräysputkien toiminta, suojamaan geomembraania, maan stabilointiin ja eroosion kontrollointiin. Geosynteettistä savikerrosta kuten bentoniittimattoa käytetään geomembraanien alapuolelle heikosti vettä johtavina kerroksina ja myös estämään sivukivien happamien suotovesien muodostumista. Geovahvisteita käytetään nimensä mukaisesti parantamaan maaperän vakavuutta erilaisissa kohteissa kaivosalueilla. (Lupo & Morrison 2005) (Hornsay et al. 2010)

2.2 Geomembraanien käyttö pohjarakenteissa

Kaivosteollisuudessa geomembraanien käyttö on aloitettu 1970-luvulla käyttämällä geomembraaneja prosessialtaiden tiivistyksessä sekä haihdutusaltaiden tiiviiden pohjarakenteiden tekemiseen. Ensimmäiset täyden mittakaavan rakenteet on tehty 1970-luvun alussa Tenneco Mineralsille Utahiin USA:an ja Sociedadada Quimica y Mineran kaivokselle Pohjois-Chileen haihdutusaltaiksi (eng. solar ponds). Geomembraanien käyttö alkoi yleistyä 1970-luvun lopulla kasaliuotusaltaiden pohjissa ja vasta viimeisen

kahden vuosikymmenen aikana on yleistynyt niiden käyttö rikastushiekka-altaiden pohjarakenteissa. Tätä ennen rikastushiekka-altaat olivat maalla tiivistettyjä. (EPA 1994) (Breitenbach 2005) (Breitenbach & Smith 2006)

Eniten geomembraaneja käytetään kolmentyyppisten altaiden pohjarakenteissa 1. haihdutusaltaat, 2. kasaliotus ja 3. rikastushiekka-altaat, mutta niitä voidaan käyttää myös erilaisissa prosessialtaissa, sivukivikasoissa ja vesivarastoaltauissa (Addis 2011, Breitenbach & Smith 2006). Tarkoitus on joko kerätä nestettä tai estää sen kulkeutuminen pohja- ja pintavesiin tai haihduttaa sitä. Allastettava materiaali vaihtelee vedestä kiviainesmateriaaleihin. Näiden lisäksi kaivosteollisuus käyttää geomembraaneja myös suojaamaan rakenteita tai kasoja, erityisesti kasaliuotusaltaita ja sivukivikasoja, runsailta vesisateilta ja tällöin puhutaan nk. sadetakeista (Breitenbach & Smith 2007). Kuvassa 1 on esitetty prosessikaavion omaisesti kasaliuotuksen ja rikastushiekan läjittämisessä käytettävät tyypilliset kohteet geomembraaneille pohjarakenteissa.



Kuva 1. Geomembraanien käyttö kasaliuotuksessa ja rikastushiekkan läjityksessä.

Pohjarakenteissa käytetään geomembraaneissa tyypillisesti seuraavia materiaaleja: LLDPE eli matalatiheksinen polyeteeni, HDPE eli korkea tiheksinen polyeteeni, PVC eli polyvinyylikloridi, PP eli polypropeeni, EPDM eli synteettinen vulkanoitu kumimateriaali (elastomeeri) ja EIA eteenista valmistettu polymeeriseos (eng. Ethylene interpolymmer Alloy). Tärkeitä ominaisuuksia kalvotyyppiä valittaessa ovat kemikaalikestävyyys, kalvon kestävyys vetoa ja jännityksiä vastaan, lämpötilakestävyyys, asennettavuus, hinta ja käyttökokemukset. Tyypillisesti käytettävien kalvomateriaalien edut ja heikkoudet Scheirsin (2009) mukaan täydennettynä bitumigeomembraanien osalta (Breulin et al 2006, Cunning et al. 2008) ovat taulukossa 1. Suomessa on käytetty rikastushiekka-aitaiden pohjarakenteissa bitumigeomembraania (lyh. BGM), mutta sen käyttökokemuksista rikastushiekka-aitaissa ei ole raportoitu tieteellisesti (Fourie et al. 2010). Käyttökokemuksia löytyy muista kohteista kuten padoista ja kanaaleista (Bannour 2013). Cunning et al. (2008) on raportoinut patorakenteissa

bitumigeomembraanin käytöstä ja heidän mukaansa BGM tuo mukanaan hyvinä puolina sen, että alapuolella olevan materiaalin valinta ei ole niin kriittistä, materiaali kestää kylmyyttä paremmin kuin HDPE ja sen asentaminen on ollut helpompaa kun sen voi tehdä myös talviaikana. Breul et al. (2006) mukaan bitumigeomembraanin kestää paremmin yläpuolelta kohdistuvaa rasitusta eikä ole yhtä vaurioitumisherkkää kuin HDPE-kalvot.

Taulukko 1. Tyypillisesti käytettävien geomembraanien edut ja heikkoudet Scheirsin (2009) mukaan täydennettynä bitumigeomembraanin ominaisuuksilla (Breul et al. 2006, Cunning & Reinson 2008).

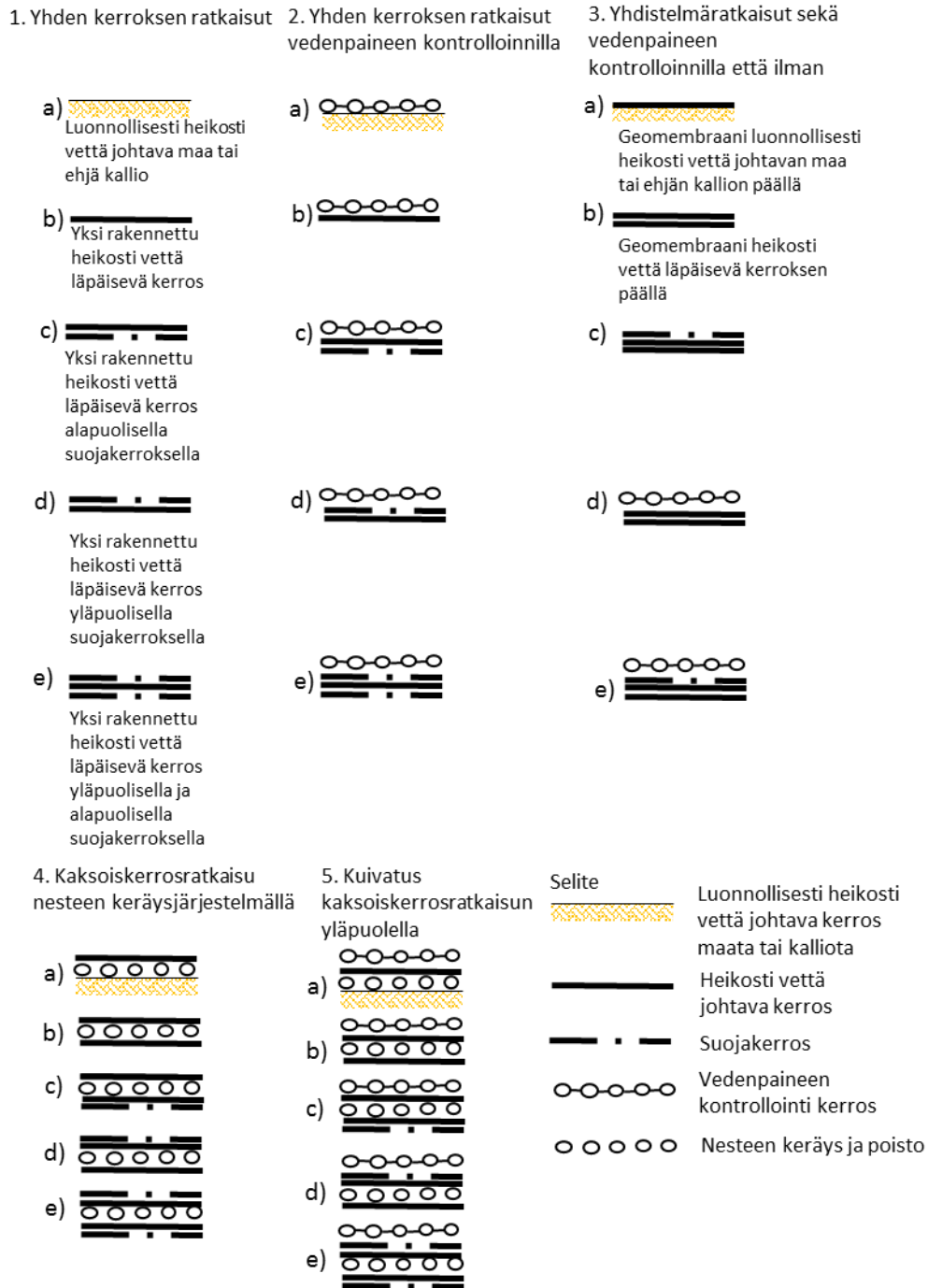
Geomembraani	Hyvät puolet	Rajoitukset
HDPE	Laaja kemikaalikestävyys Hyvä hitsausseamojen kestävyys Kestää matalia lämpötiloja	Jännityshalkeamat mahdollisia lämpölaajenee Reikiintyy herkästi huonosti kestää usean suuntaisia jännityksiä
LLDPE	Joustavampi kuin HDPE Parempi levitettävyyys kuin HDPE Hyvä kestävyys usean suuntaisille jännitykselle	Huonompi UV-kestävyys kuin HDPE:lla Huonompi kemikaalikestävyys kuin HDPE:llä
fPP	Voidaan valmistaa ja taitella tehtaalla, joten vähemmän kentällä tehtyjä saumoja Kiitettävät moniakksiaaliset venymäominaisuudet laaja lämpötilaikkuna saumojen tekemiselle	Rajoitettu kestävyys hiilivedyille ja klooratulle vedelle
PVC	Hyvä työstettävyys ja levitettävyyys helppo saumata voidaan taittaa, joten vähemmän saumoja kentällä	Huono UV- ja otsonikestävyys Ikkäänny helposti toiminta heikompaa korkeissa ja matalissa lämpötiloissa
BGM	Voidaan käyttää vaikeissa ilmasto- olosuhteissa peittomateriaalin laatu ei ole yhtä kriittinen kuin LLDPE ja HDPE:lla painavana voidaan asentaa tuulisella ilmalla asentamiseen tarvitaan vain hitsauspoltin ja tela	Painavampi ja paksumpi (voi olla myös hyvä) Bitumin kemikaalikestävyys
EPDM	Hyvä UV- ja otsonikestävyys Kestävää ja venyvää Levitettävyyys voidaan käyttää kylmissä olosuhteissa	kestävyys hiilivedyille ja liuottimille Sauman laatu

Geomembraanit ja pohjarakenteissa käytettävät muut geosynteettiset tuotteet kuten putket joutuvat kaivosteollisuudessa koviin olosuhteisiin, jotka ovat poikkeukselliset muuhun teollisuuteen tai vaikkapa kaatopaikkarakentamiseen verrattuna. Tällaisia olosuhteita ovat poikkeukselliset prosessiolosuhteet kuten suuret geomembraaneihin kohdistuvat rasitukset (jopa yli 3 MPa), lämpötila, ilmastus ja käytettävät kemikaalit. Lisäksi kaivosten sijainti maantieteellisesti ja ilmastollisesti haastavilla alueilla kuten kylmissä, kuivissa, aurinkoisissa, sateisissa tai ylängöillä aiheuttavat haasteita käytettäville materiaaleille ja asennustekniikoille. Kaivosten toimintaolosuhteet voivat aiheuttaa materiaaleille ylimääräistä rasitusta ja saattavat johtaa materiaalien nopeampaa kulumiseen tai ominaisuuksien heikkenemiseen. (Lupo & Morrison 2007, Fourie et al. 2010) Tämän vuoksi kaivosten läjitysalueet poikkeavat yhdyskuntajätteen läjittämisestä ja Garrick et al. (2014) on listannut tärkeimmät eroavaisuudet verrattuna rikastushiekan läjittämiseen:

- Rikastushiekan vedenjohtavuus voi vaihdella 10^{-6} m/s... 10^{-10} m/s, mutta on tyypillisesti konsolidoitumisesta johtuen alhainen $k < 5 \cdot 10^{-8}$ m/s, joten konsolidoitunut rikastushiekka voi jo kontrolloida suotautumisastetta
- Kun laaja rikastushiekka-allas sijoitetaan laaksotyyppisesti, tulee tilanteita joissa pohjavedenpinta geomembraanin alapuolella vaihtelee paikallisesti. Kun siihen yhdistetään geomembraanin yläpuolinen tilanne, jossa neste yrittää kulkeutua geomembraanin alapuolelle heikosti vettä johtavan rikastushiekan läpi, on altaan suotovirtausongelmien ratkominen sekä analyyttisesti että mallintamalla haastavaa
- Jos kalvon yläpuolella ei ole peruskuivatusysteemiä kuten yhdyskuntajätteen kaatopaikoilla on, altaaseen varastoitu neste saattaa aiheuttaa suuren painekorkeuden geomembraanin yläpuolelle
- Rikastushiekanesteen kemia saattaa vaikuttaa käytettävien geosynteettisten savimateriaalien (eng. GCL=Geosynthetic clay liner) vedenjohtavuutta kasvattavasti. Homrsay et al. (2010) ovat kiinnittäneet huomiota myös siihen, että muutkin rasitukset voivat vaikuttaa GCL:n toimintaan.
- Lämpötilat ovat tyypillisesti alemmat rikastushiekka-altaissa kuin yhdyskuntajätteen läjitysalueilla, koska yhdyskuntajäte on biologisesti

aktiivista ja se nostaa lämpötilaa kasalla. Tämä voi edesauttaa geomembraanin kestävyyttä, mutta aikaa myöten hajoamista tapahtuu kuitenkin. Tästä on vielä vähän tietoa saatavilla, koska epäillään että korkea sulfaattipitoisuus ja erittäin korkeat suolapitoisuudet heikentävät geomembraanien kestävyyttä.

Pohjarakenneratkaisut voivat olla hyvin erilaisia ja ne ovat hyvin kohderiippuvaisia. Pohjaveden suojelun kannalta rakenneratkaisut on jaettu viiteen kategoriaan sen mukaan käytetäänkö suojauksessa yhtä heikosti johtavaa kerrosta vai useamman kerroksen toimintaan perustuvia yhdistelmäratkaisuja, ja näitä on käytetty lähtökohtana myös kaivosalueiden allasrakenteissa (kuva 2) (EPA 1995, EC 2009). Keveimmässä vaihtoehdossa rakenneratkaisuna toimii luonnollisesti heikosti vettä johtava maakerros tai ehjä kallio eikä niissä ole keinotekoista eristettä eli geomembraania. Vaativimmat rakenteet ovat yhdistelmävaihtoehtoja, joissa on käytetty kahta keinotekoista eristettä yhdessä vuodonilmaisukerroksen ja kuivatuskerroksen kanssa. Kaikkien ratkaisujen tarkoitus on kuitenkin sama, estää suotovesien pääsy ympäristöön.



Kuva 2. Periaatteelliset vaihtoehdot pohjarakennusratkaisuksi pohjaveden suojaamiseksi (muokattu EPA 1995, EC 2009).

2.3 Geomembraanien käytön laajuus kasaliuotuksessa ja rikastushiekka-altaissa

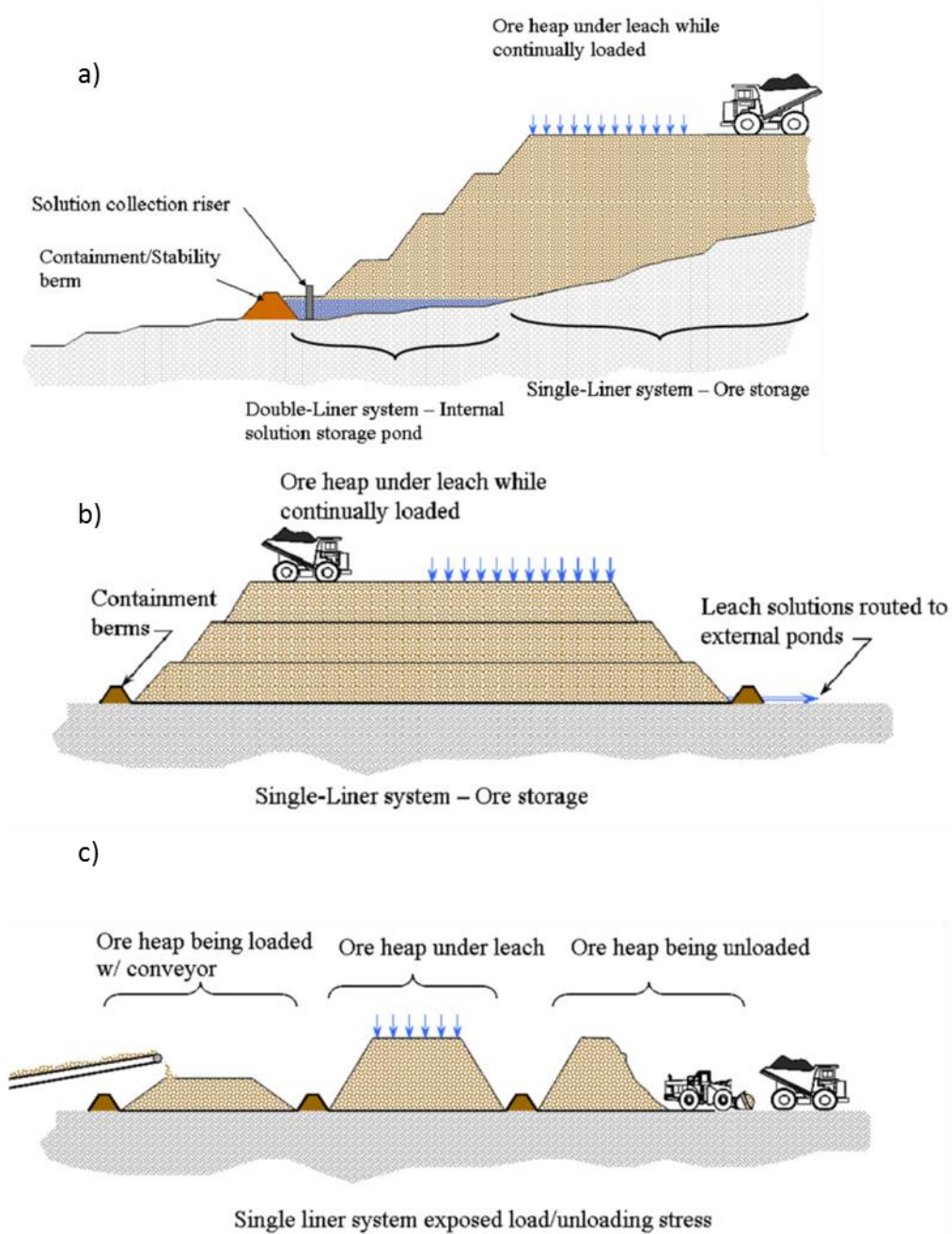
Maailmanlaajuisesti geomembraanien käytössä on eroja. Todennäköisesti eniten geomembraanipohjarakenteita on kasaliuotuksessa, ainakin USA:ssa ja Etelä-Amerikassa (Fourie et al. 2010). Rowen et al. (2013) tutkimuksen lähtötietoina on 92 eri kasaliuotusprojektia 15 maasta (Argentiina, Brasilia, Chile, Columbia, Ghana, Indonesia, Meksiko, Namibia, Nigeria, Peru, Philippiinit, Puola, Turkki, USA ja Uzbekistan). Rikastushiekka-altaissa tiedetään kalvoja käytettävän, mutta niiden käytöstä ei ole julkaistu yhtä laajasti kuin kasaliuotuksesta. Suurimpana yksittäisenä käyttökohteena Euroopassa on pidetty Irlannin Lisheeniin rakennettua rikastushiekka-allasta (Dillon et al. 2004). Namibiassa Swakop Uranium's Husabin kaivoksen rikastushiekka-altaassa on suunnitelmien mukaan käytetty geomembraania (Cole et al. 2014), Alcoa World Aluminan ja BHP-Billitonin tiedetään käyttävän geomembraaniratkaisuja kaivoksillaan, ja Alcoa on julkaissut ohjeen (2009) alumiiniteollisuudessa syntyvän bauksiittijäännöksen loppusijoittamista varten rakennettaville läjitysalueille ja siinä ohjataan geomembraanien käyttöön. Newmontin operoimalla kaivokselle Ghanaan on suunniteltu geomembraanieristeinen rikastushiekka-allas, mutta geomembraania ei ole asennettu (Fourie et al. 2010). Cetcon (2012) mukaan Goldstriken kaivoksella Nevadassa on käytetty HDPE-kalvoa yhdessä bentoniittimaton kanssa (Bentomat DN GCL). Turkissa Ovacikin kultakaivoksella on rikastushiekka-altaan pohjarakenteessa keinotekoinen eriste (Akcil 2002). Granadan alueelle Espanjassa on rakennettu vanhalle strontiumkaivokselle rikastushiekka-allas (2002), jonka pohjarakenteeseen on suunnitelmien mukaan asennettu PVC-geomembraani ja sen alapuolelle suojaetekstiili suojaamaan geomembraania reikiintymiseltä (EC 2009). Vastaavanlainen rakenne on Rio Narcean Espanjan kaivoksella.

Euroopan komission (2009) mukaan Euroopan alueella on lisäksi geomembraaneilla eristettyjä pohjarakenteita Suomessa, Saksassa ja Unkarissa. Suomessa geomembraanipohjarakenteita on Boliden Luikonlahden kaivoksella Kaavissa, Agnico Eagle Finland Oy:n Kittilän kaivoksella, Nordic Mines Oy:n Laivakankaan kaivoksella Raahessa, First Quantum Minerals Ltd:n Kevitsan kaivoksella Sodankylässä ja Terrafame

3 ALLASRAKENTEIDEN SUUNNITTELU

3.1 Kasaliuotus

Kasaliuotuksen arvellaan olevan yksittäisistä kaivosrakenteista suosituin, mihin kalvorakenteita on käytetty ainakin Etelä-Amerikan ja USA:n alueella. Kasaliuotus on prosessi, jossa suuria kasoja murskattua tai jauhettua malmia liuotetaan erilaisilla kemikaaleilla ja liuokseen liukenevat arvokkaat mineraalit otetaan liuoksesta talteen (Thiel & Smith 2004). Näissä altaissa käytetään tyypillisimmin HDPE-, LLDPE-, PVC- ja PP-geomembraaneja. Kasaliuotusalueita on erityyppisiä (kuva 4) laaksoon sijoitettavia, tasaiselle maalle tehtäviä kasoja joita korotetaan, sekä kasoja jotka liuotuksen jälkeen puretaan ja kasataan uudelleen. Kasaliuotusalueet koostuvat geomembraanirakenteista, jonka päällä on kuivatuskerros. Tyypillisesti kuivatus on järjestetty siten, että 10-15 senttimetrin halkaisijaltaan olevat putket on asennettu 2 metrin välein. Sen jälkeen kasatun malmin (yleensä agglomeroitu) päälle johdetaan rikkihappopohjainen liuotin ja läpisuotautuvaa nestettä kierrätetään kasoissa ja se kerätään sitten talteen ja johdetaan metallien talteenottoon (Fourie et al 2010). Suomessa tällaisia vastaavia rakenteita on Terrafame Oy:n Talvivaaran kaivosalueella Sotkamossa (ELY 2015), jossa käytetään lähinnä kuvan 4 vaihtoehtoa c.



Kuva 4. Kasaliuotuksen kolme perustyyppiä: a) laaksoon sijoitettu b) tasaiselle maalle sijoitettu, jossa kasaa korotetaan c) tasaisella olevat kasat, jotka liuotuksen loputtua puretaan ja kasataan tilalle uusi reaktiivinen malmi. (Lupo 2010)

3.1.1 Suunnittelun lähtökohdat

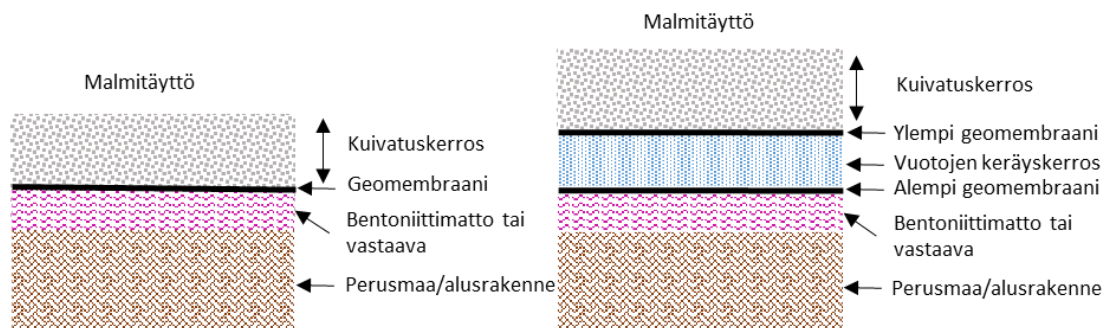
Kasaliuotusalueen suunnittelu sisältää eri komponenttien välisen yhteistoiminnan suunnittelun, perusmaan, geomembraanin alapuolisen kerroksen, geomembraania suojaavan kerroksen ja kuivatuksen suunnittelun (Lupo 2005). Toisinaan edellisten lisäksi myös ilmaston suunnittelun. Aikaisemmin kuivatuksen ja ilmaston suunnittelu oli erillään geomembraanirakenteen suunnittelusta. Geomembraanilla on erityisen tärkeä merkitys myös taloudellisesti, koska kasaliuotuksen tärkein periaate on saada mahdollisimman tehokkaasti malmista suotautuva neste, jossa haluttu materiaali on, talteen. Muita tärkeitä tarkasteltavia asioita ovat kasojen häiriintymisherkkyys- ja stabiliteettitarkastelut. (Thiel & Smith 2004, Lupo et al. 2007)

Kasaliuotuksen suunnittelu vaihtelee suuresti riippuen siitä minkälaiseen alueeseen tai tapaan päädytään, mitkä ovat alueen ominaisuudet kuten ilmasto, pinnanmuodot, saatavilla olevat rakennusmateriaalit ja malmityyppi (Lupo 2010). Kasaliuotusalueiden suunnittelun kriittiset kohdat ovat seuraavat ja ne tulee huomioida jokaisessa tapauksessa (Thiel & Smithin 2004):

- 1) malmikasan korkeus
- 2) veden / nesteen määrä ja laatu
- 3) paikalliset olosuhteet

Kasaliuotuskasojen korkeudet ovat kasvaneet vuosikymmenien kuluessa. Aluksi kasat on suunniteltu noin 15 metrin läjityskorkeudelle kun ne nykyään ovat vähintään 50 metriä, tyypillisesti 100 m. Syy kasvaneisiin kasakorkeuksiin ei ole pelkästään taloudellisuus vaan osittain myös tilanpuute. Kasvavien kasakorkeuksien vuoksi suunnittelua on tehtävä entistä huolellisemmin. Kasaliuotuksessa tärkein asia on kiertävä neste ja sen talteenotto, jollaista ei muissa altaissa esiinny. Paikalliset olosuhteet on huomioitava, koska ne vaikuttavat koko altaan toimintoihin rakentamisesta, valittavasta allastyypistä aina käytön aikaisiin ratkaisuihin. Esimerkiksi sateisilla alueilla voi tulla ylimääräistä vettä 6000 mm vuodessa ja sen määrä on huomioitava.

Tyypilliset käytetyt pohjarakenteet on Lupo et al. (2007) mukaan yksinkertainen yhdistelmä rakenne tai kaksinkertainen yhdistelmä ratkaisu (kuva 5). Jos käytetään yksinkertaista geomembraanirakennetta, koostuu se kuivatuskerroksesta jonka tehtävä on myös suojata geomembraania, kuivatuskerroksen alle valitusta geomembraanista ja sen alla olevasta aluskerroksesta. Aluskerros voi olla savesta tehtyä tai vastaavasta heikosti vettä johtavasta materiaalista (kuvassa 5 vasemmalla). Yksinkertaista yhdistelmä ratkaisua käytetään yleensä, jos suotautuvan nesteen hydraulinen korkeus kalvon päällä on matala eli < 5 metriä.



Kuva 5. Tyypilliset kasaliuotuksessa käytetyt pohjarakenteet, vasemmalla yksinkertainen geomembraanirakenne ja oikealla kaksinkertainen yhdistelmä ratkaisu (Lupo et al. 2007).

Kaksoisyhdistelmä rakennetta (kuvassa 5 oikealla) on yleensä käytetty alueilla, joilla geomembraaniin kohdistuu korkea hydraulinen paine nesteestä. Tällaisia alueita ovat esimerkiksi laaksoihin suunnitellut altaat. Tällöin rakenteen tarkoitus on vähentää hydraulinen paine alemmalta geomembraanilta ja estää vuodot altaalta. Rakenne sisältää perustuksen, alusrakenteen, alemman geomembraanin, vuodon havaitsemis- ja keräyskerroksen, ylemmän geomembraanin ja kuivatuskerroksen ylimpänä. Jos kyseessä on rinteessä oleva kasaliuotusallas, voidaan pohjarakennerratkaisuksi ottaa molempien yhdistelmä. Alueella, jossa pohjarakenteeseen kohdistuu pienempi vedenpaine, voidaan käyttää yksinkertaista rakennetta ja vastaavasti vedenpaineen kasvaessa tehdä pohjarakenne vaativammaksi kaksinkertaiseksi yhdistelmä rakenteeksi. (Lupo et al. 2007)

3.1.2 Stabiiliteetin huomioiminen

Stabiiliteettitarkastelut on tehtävä huolellisesti. Kuitenkaan varmuuskertoimille ei ole olemassa kaikkiin tilanteisiin valmiita raja- tai ohjearvoja siitä, kuinka laskenta tulisi tehdä ja minkälaiselle varmuudelle. Alle on kerätty tilanteet, jotka yleensä tulevat tarkasteltavaksi tai ne olisi huomioitava: (Thiel & Smith 2004, Lupo 2007)

- Huomiota on kiinnitettävä leikkauslujuuden muutoksiin. Korkeissa kasoissa on huomioitava, että ei voida käyttää vain yhtä vakioarvoa vaan leikkauslujuuden testausaluetta on laajennettava ja huomioitava, että koheesio ja leikkauskestävyyskulma voivat vaihdella luiskissa kuormituksen muuttuessa nolasta maksimiarvoonsa.
- Kasa-alueen laajuuden ja syvyyden kasvaessa myös lajittumisesta tulee suurempi kysymys. On huomioitava, että läjityksen aikana tulee tapahtumaan helpommin lajittumista siten, että reunoille ja kerroksen pohjalle kerrostuvat usein karkein materiaali, mikä voi aiheuttaa kanavoitumista kasoihin.
- Kasalla tapahtuu biologisia ja kemiallisia reaktioita, jotka voivat vaikuttaa malmin hajoamiseen ja sitä kautta hienoaineksen määrän lisääntymiseen, kyllästymisasteen kasvuun ja mm. suodattimien tukkeutumiseen.
- Uutena asiana ovat tulleet kasojen sisäiset geomembraanit, jotka ovat ohuempia, 0,5 mm paksuja, kuin pohjarakenteissa yleensä ja niillä pyritään estämään sulfidisten happamien suotovesien syntyä sekä varmistamaan että saadaan mahdollisimman tehokkaasti talteen reaktiivisessa vaiheessa olevan malmin arvometallit. Kalvoja voidaan asentaa 2 metrin korkeusvälein, mutta tyypillisesti etäisyys on 4-8 m. Nämä välikerrokset aiheuttavat kalvojen myötä uuden heikkousvyöhykkeen läjitykseen.

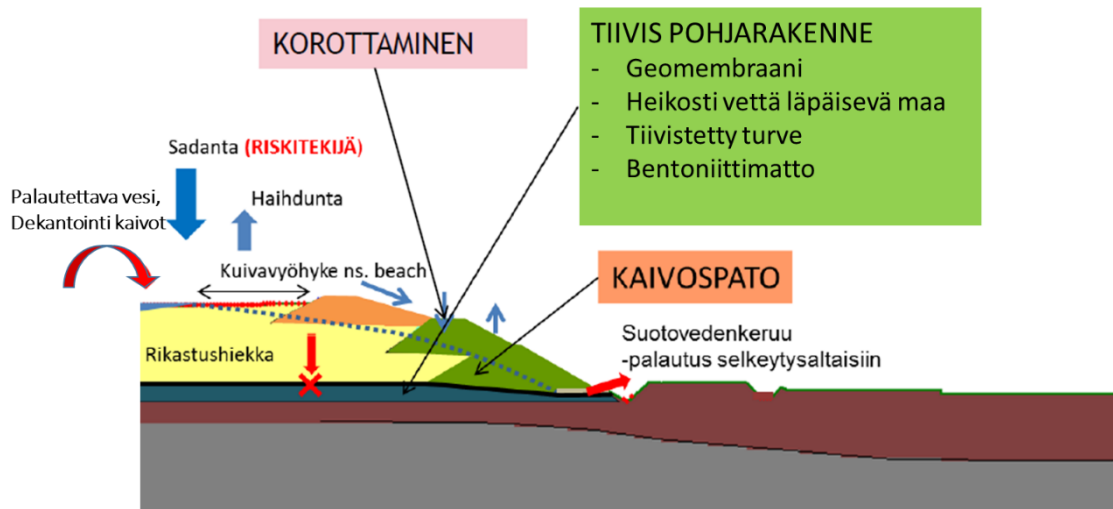
3.2 Rikastushiekka-altaat

Rikastushiekka-altaisiin läjitettävien rikastushiekkojen laatu vaihtelee sekä fysikaalisesti että kemiallisesti. Raekokojakaumaltaan rikastushiekat ovat tyypillisesti

luonnonmateriaaleista vastaavia kuin hieno hiekka, silttinen hiekka tai hiekkainen siltti ja ne voivat sisältää kemikaalijäämiä mineraalien erotuksesta tai vedenerotuksessa käytettävistä koagulantteista ja flokkulantteista. Rikastushiekan ominaisuudet poikkeavat luonnon maamateriaalista myös siten, että sen raemuoto on särmiäs esimerkiksi luonnon siltin ollessa pyöristynyttä. (Jewell & Fourie 2015)

Merkittävimmän haasteen ympäristön kannalta aiheuttavat happoa muodostavat rikastushiekat, joita myös Suomessa esiintyy useilla kaivoksilla. Happoa muodostuu, kun luonnollisesti sulfiitteja sisältävät mineraalit hapettuvat. Happojen muodostumisella voi olla merkittäviä vaikutuksia alueen pinta- ja pohjavesiin ja sitä kautta maankäyttöön. Mikäli kaivoksella syntyy happamia suotovesiä voi niiden kontrollointi, käsittely ja kerääminen olla kallista ja vaikeaa. Suotovesien tarkkailua tehdään aina kaivoksen alkuvaiheesta pitkälle kaivoksen sulkemisen jälkeen. Happamien suotovesien syntyä pyritään estämään, mutta kustannustehokasta menetelmää ei ole vielä olemassa. Tyypillisesti pyritään välttämään ilman ja veden pääsyä hiekkaan, joko niin että rikastushiekka pidetään jatkuvasti veden alla tai suojataan se kuivalla maakerroksella, mutta näiden ei ole todettu kokonaan estävän reaktion tapahtumista. Koska happamia suotovesiä ei ympäristöön haluta laskea, on niiden varastoinnilla suuri merkitys ja rakenneratkaisuissa pyritään vettä läpäisemättömiin lopputuloksiin. (Kuyucak 2012)

Perinteisesti rikastushiekka läjitetään lietteenä 20–40 % kiintoainespitoisuudessa altaisiin (EC 2009) (kuva 6). Allasläjitetyksessä tyypillistä on useassa vaiheessa korotettavat kaivospadot. Altaaseen puretaan rikastushiekka yleensä purkuputkilla ja purkutavasta johtuen rikastushiekka lajittuu altaaseen. Yleensä karkein osa rikastushiekasta jää lähelle purkuputkea hienoimman osan liikkuessa veden mukana ja läjittyessä liikkeen pysähtyttyä. Altaasta pyritään keräämään vedet hallitusti joko takaisin prosessiin tai selkeytysaltaiden kautta pois johdettaviksi. Altaan pinnan kautta vettä pumpataan dekantointikaivoilla. Mikäli patorakenne on suotaava, kerätään padon ulkopuolelle tulevat kuivatusvedet ojiin. Tiiviillä pohjarakenteilla puolestaan halutaan välttää pohjan kautta tapahtuvaa suotautumista. (Jewell and Fourie 2015)



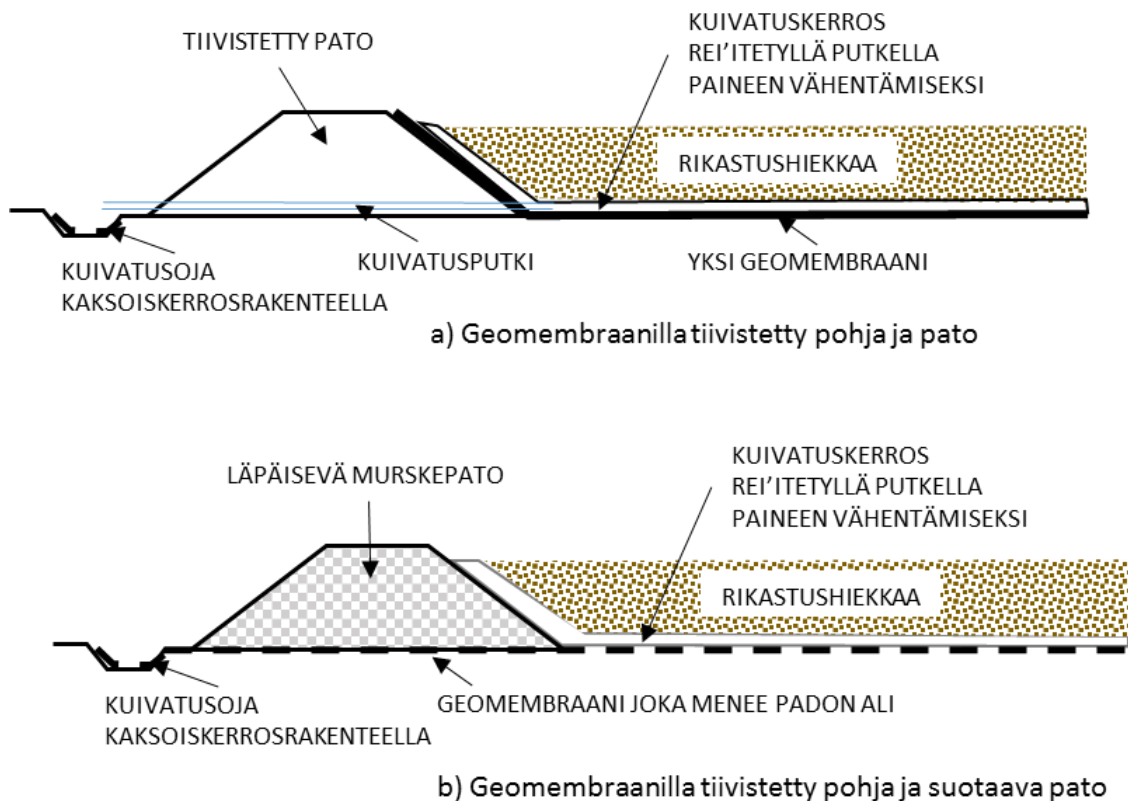
Kuva 6. Rikastushiekan läjittäminen perinteisesti lietteenä rikastushiekka-altaaseen, josta mm. geomembraanien avulla pyritään estämään suotovesien kulku pohjarakenteen kautta ympäristöön.

3.2.1 Suunnittelun lähtökohdat

Rikastushiekka-altaan ja kasaliuotuksen suunnittelussa on useita yhteisiä suunnitteluperiaatteita, mutta ne myös eroavat huomattavasti toisistaan esimerkiksi läjitettävän materiaalin osalta. Rikastushiekka-altaan suunnittelutyön alkuvaiheessa tulisi arvioida, ennustaa ja mallintaa rikastushiekka-altaan suotovesien kulkeutumisreitit sekä altaan käytön aikana mutta myös sen sulkemisen jälkeen. Altaan käyttöä ja sulkemisen jälkeisiä vaikutuksia ei pitäisi erottaa toisistaan, koska nimenomaan käyttöä varten tehdyt suunnitteluratkaisut tulevat vaikuttamaan myös altaan sulkemisen jälkeiseen tilanteeseen. Tärkeimmät huomioitavat asiat ovat patojen stabiilitarkastelut ja pohjarakenteiden sekä kuivatuksen suunnittelu. Suunnittelu jakautuu alkuvaiheen suunnitelmiin, joissa laskentaa tehdään parametreilla, joissa on paljon vielä epävarmuutta, mutta laskelmat pitäisi päivittää sitä mukaan kuin luotettavampaa tietoa on saatavilla. (EPA 1994, Davies et al. 2002, Garrick et al 2014)

Davies et al. (2002) on esittänyt kaksi perusratkaisua padotuille geomembraaneilla tiivistetyille rikastushiekka-altaille (kuva 7). A-kohdassa geomembraani on nostettu padon harjalle ja B-kohdassa se on viety patorakenteen ali suotovesien keräysojaan asti.

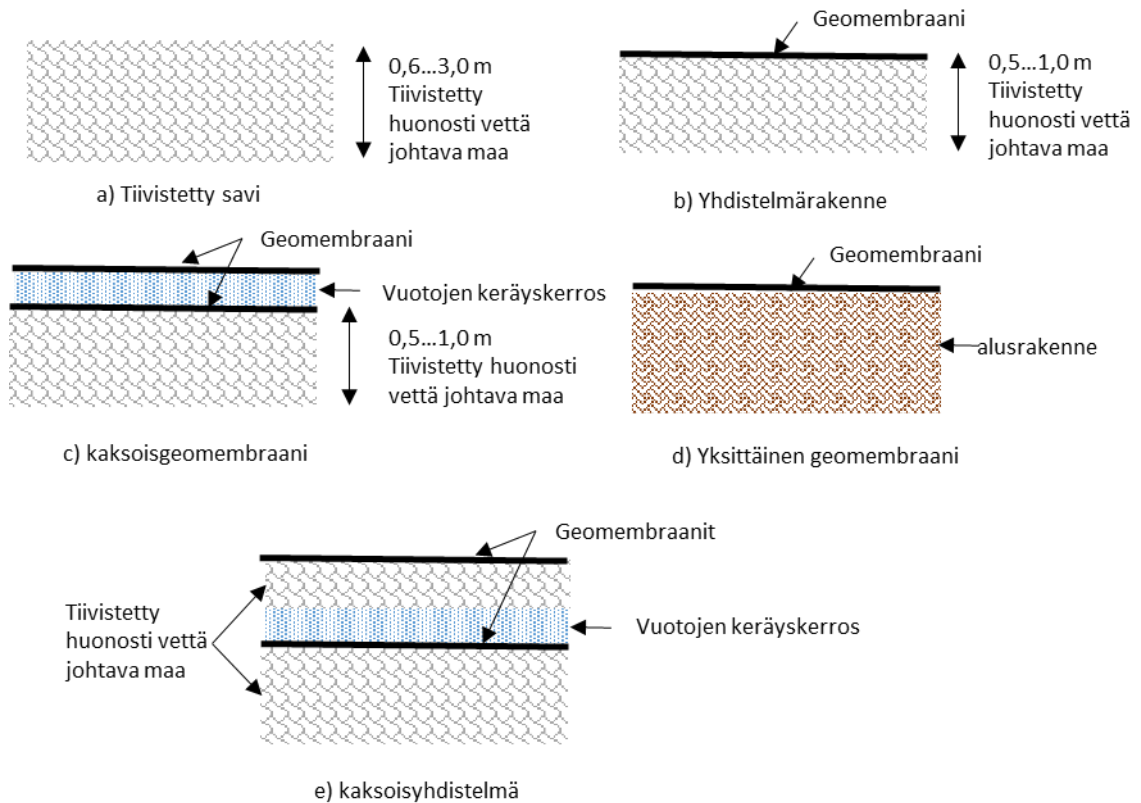
Kuivatuskerros on rakennettu geomembraanin päälle ja sen tarkoitus on alentaa huokosveden paine geomembraanien yläpuolelta ja minimoida vuodot sen läpi. Koska kuivatusratkaisun avulla rikastushiekkaläjityksen vedenpaine saadaan laskettua, myös rikastushiekan lujuus kasvaa ja stabiliteetti paranee.



Kuva 7. Perusratkaisu rikastushiekka-altaan geomembraaniratkaisusta Davies et al. (2002) mukaan.

Edellä esitetyissä ratkaisuissa ei ole huomioitua geomembraanin alla olevia kerroksia. USA:n ympäristöministeriö EPA (eng. Environmental Protection Agency) on vuonna 2001 esittänyt USA:ssa käytettävät ratkaisut pohjarakenteissa, joissa vaaditaan pientä vedenläpäisevyyttä (Kuva 8). Heillä on viiden tyyppisiä rakenteita käytössä: a) tiivistetty savi, joka ei sisällä geomembraania, b) yhdistelmäratkaisu, jossa on geomembraani yhdessä tiivistetyn heikosti vettä johtavan maakerroksen kanssa, c) kaksinkertainen geomembraani vuotojen havaitsemiskerroksen kanssa, d) yksittäinen geomembraani

alusrakenteen kanssa ja e) kaksoisyhdistelmä rakenne, jossa on kaksi geomembraania ja niiden välissä hyvin vettä johtava kerros mahdollisten vuotovesien havainnointiin sekä tiivistetyt heikosti vettä läpäisevät kerrokset.



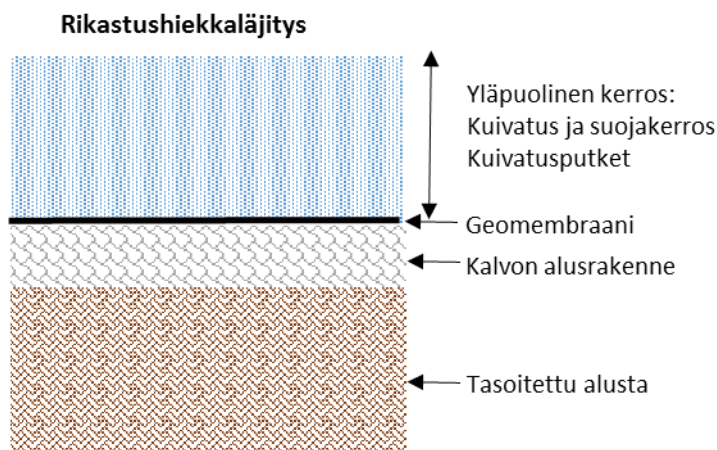
Kuva 8. USA:ssa käytettävät pohjarakenneratkaisut kun vaaditaan pientä vedenläpäisevyyttä (EPA 2001, Workman & Keeble 1989).

Kuvan 8 ratkaisuissa taas ei ole huomioitu millään tavalla geomembraanin yläpuolelle tulevaa materiaalia. Lupon (2010) mukaan geomembraanirakenteiden suunnittelussa tulisikin ottaa kaikki seuraavat asiat pohjarakenteen osalta huomioon yhdessä:

- Perustus
- Kalvon alapuolinen alusrakenne, materiaali
- Geomembraani
 - HDPE, LLDPE, PVC tai vastaava

- Kalvon yläpuolinen kerros
 - Suojakerros
 - Kuivatuskerros
 - Kuivatusputket

Näiden lisäksi suunnittelussa on huomioitava geomembraaniin kohdistuvat jännitykset ja venymät johtuen kuormituksesta ja perustuksen painumista sekä suotovesien kemian aiheuttamat rasitukset. Maksimi hydraulinen korkeus kalvon päällä, vuotojen havainnointi ja keräys sekä rikastushiekan kuljettaminen ja purkaminen kalvon päälle voi aiheuttaa vaurioita kalvoon. Lupo (2008) on esittänyt perusratkaisun rikastushiekaltaan pohjaratkaisuksi käyttäen yhdistelmärakennetta, jossa huomioidaan geomembraanin ylä- ja alapuolinen rakenne (kuva 9).



Kuva 9. Rikastushiekka-altaan tyypillinen yhdistelmärakennerratkaisu Lupon (2008) mukaan.

Lupon (2010) ja Davies et al. (2002) suunnitteluratkaisujen mukaisesti on muistettava, että lietteenä läjitettävän rikastushiekka-altaan suunnittelussa on muistettava kokonaisuus. Miten pohjaratkaisu altaan alla liittyy ympäröiviin patorakenteisiin, jotta voidaan välttyä siltä että ratkaisut eivät toimi kokonaisuutena (pato+pohja). Lisäksi tulee huomioida käytön aikaiset toimenpiteet kuten korottamiset sekä altaan sulkeminen ja jälkiseuranta. Suunnitteluprosessissa on huomioitava kohteen lainsäädännölliset seikat,

mitkä ovat vuosien aikana tiukentuneet huomattavasti lähes kaikkialla maailmassa, mutta samalla on muistettava kustannukset, etteivät ne nousisi liian korkeiksi. Suunnittelussa tulisi miettiä myös muita vaihtoehtoja kuin perinteisiä allasratkaisuja kuten sakeuttaminen ja pasta. Hyvä suunnittelu sisältää erilaisten vaihtoehtojen huomioimisen ja vertailun koko kaivoksen elinkaaren ajalta. (Fourie et al. 2010) (Adiansyah et al. 2015)

3.3 Muut allasrakenteet

Muiden allasrakenteiden pohjarakenteissa kuten sivukivikasoissa ja vesivarastoaltaissa käytetään suunnittelun lähtökohtana kasaliuotusaltaiden ja rikastushiekka-altaiden pohjarakennesuunnittelun periaatteita. Yleisin käytetty ratkaisu on yksinkertainen yhdistelmäratkaisu, joka sisältää geomembraanin ja tiivistetyn heikosti vettä läpäisevän pohjamaan. Suunnittelua sovelletaan kohdekohtaisesti huomioiden suunniteltavan kohteen eroavaisuudet ja esimerkiksi sivukivialueen tärkein asia on huomioida liikenneivät raskaat kulkuneuvot, jotka aiheuttavat rasituksen geomembraanille. (Touze-Foltz et al. 2013)

3.4 Läjityksen häiriintymisherkyys

Materiaali, joka on löyhästi sitoutunutta ja rakeista, voi helposti häiriintyä ja menettää kantavuutensa ns. juoksettua tilanteessa, jossa jokin tapahtuma sysää materiaalin liikkeeseen. Tyypillinen tapahtuma voi olla seismisesti herkillä alueilla tapahtuva maanjäristys. Kasaliuotuksessa on havaittu, että herkimpiä ovat alle 20 metrin syvyiset kasat, tai kasat joissa käytetään lisäksi kasan sisäisiä synteettisiä kalvoja. (Thiel & Smith 2004) Juoksettuminen on ilmiönä tunnettu, mutta hienorakeisen materiaalin patoamisessa sen riskin arvioiminen on koettu hankalaksi (Davies et al. 2002 b).

3.5 Geomembraanin valinta ja vaurioitumisherkyys

Geomembraanin valinta pohjarakenteisiin ei ole helppoa, koska jokainen suunniteltava kohde on ainutlaatuinen eivätkä suunnitelmat ole kopioitavissa kohteista toisiin sellaisinaan. Geomembraanin valinta onkin tehtävä huolellisesti ja se vaatii ymmärrystä geomembraanin ja sen ylä- ja alapuolisen rakenteen yhteistoiminnasta sekä siihen kohdistuvista leikkaus- ja normaalijännityksistä (Touce-Foltz et al. 2008). Lupo & Morrison (2007) on kokemuksiin perustuen kehittänyt valintakaavion, jota voidaan käyttää helpottamaan sopivan geomembraanimateriaalin ja sen vahvuuden valitsemisessa (taulukko 2). Valinnassa huomioidaan perustusolosuhteet eli pohjamaan kantavuus, geomembraanin alapuolinen ja yläpuolinen materiaali sekä geomembraanille kohdistuvan kuormituksen määrä, mutta valittavina materiaaleina ovat vain HDPE ja LLDPE.

Taulukko 2. Geomembraanin valintakaavio (Lupo & Morrison 2007)

Perustusolosuhteet ¹	Kalvon alapuolinen maa ²	kalvon yläpuolinen materiaali ³	Tehokas normaalijännitys (MPa)*		
			<0,5	0,5 < <1,2	>1,2
Kantava ja korkea lujuus	karkea-rakeinen	karkearakeinen	2 mm LLDPE tai HDPE	2 mm LLDPE tai HDPE	2,5 mm LLDPE tai HDPE
		hienorakeinen	1,5 mm LLDPE tai HDPE	2 mm LLDPE tai HDPE	2,5 mm LLDPE tai HDPE
	hieno-rakeinen	karkearakeinen	1,5 mm LLDPE tai HDPE	1,5 mm LLDPE tai HDPE	2 mm LLDPE tai HDPE
		hienorakeinen	1 mm LLDPE tai HDPE	1,5 mm LLDPE tai HDPE	2 mm LLDPE tai HDPE
Pehmeä tai matala lujuus	karkea-rakeinen	karkearakeinen	2 mm LLDPE	2 mm LLDPE	2,5 mm LLDPE
		hienorakeinen	1,5 mm LLDPE	2 mm LLDPE	2,5 mm LLDPE
	hieno-rakeinen	karkearakeinen	2 mm LLDPE	2 mm LLDPE	2,5 mm LLDPE
		hienorakeinen	1,5 mm LLDPE	2 mm LLDPE	2,5 mm LLDPE

¹ Perustusolosuhteiden tila on suhteellinen lujuuden mitta. Perustusolosuhteet on tutkittava ja testattava, jotta voidaan valita yhteensopiva geomembraani

² Alapuolisella maalla tarkoitetaan suorassa kontaktissa olevaa geomembraanin alla olevaa maata. Testausta ja suunnittelulaskelmat tarvitaan päättämään yhteensopivuus geomembraanin kanssa

³ Yläpuolisella maalla tarkoitetaan suoraan geomembraanin päälle tulevaa materiaalia. Testausta ja suunnittelulaskelmat tarvitaan päättämään yhteensopivuus geomembraanin kanssa

*Tehokas normaalijännitys on maksimi jännitys joka kohdistuu geomembraanin malmin ja muun ulkopuolisen kuorman vuoksi

Kasaliuotuksessa geomebraanin päällä oleva materiaali on tyypillisesti kuivatuskerroksen materiaalia hyvin lajittunutta ja rakeista, jonka vedenjohtavuus on vähintään 1×10^{-4} m/s. Päällä oleva malmi voi aiheuttaa jopa 2000 kPa kuorman (100 m ja tilavuuspaino 20 kN/m^3). Yhdyskuntajätteen kaatopaikoilla käytetään suojaavaa verhousta, mutta kasaliuotuksessa suojaavia kankaita ei ole käytetty syistä, että se aiheuttaa ylimääräisen heikkousvyöhykkeen läjityksen alle ja toisaalta aiheuttaa merkittävän kustannuksen, minkä vuoksi niitä ei ole suunniteltu rakenteisiin. Mikäli niitä halutaan käyttää, tulisi osoittaa, että niiden käytöstä on hyötyä. (Thiel & Smith 2004)

Kalvojen reikiintymisherkkyttä voidaan testata laboratorio-olosuhteissa ja yleisesti se tehdään staattisella korkeapaineisella reikiintymistestillä, jossa käytetään oikeaa geomembraanin ala- ja yläpuolelle suunniteltuja materiaaleja nk. kerrosvoileipä-rakennetta. Paine nostetaan testissä jopa 2000 kPa ja tulokset eli vauriot geomembraanissa testin jälkeen luokitellaan ”vähäisiin”, ”keskitasoon” ja ”vaikeisiin” riippuen siitä, mitä geomembraanille on testissä tapahtunut. Arviointi tehdään silmämääräisesti. (Thiel & Smith 2004) (Rowe et al. 2013)

Lisäksi geomembraanien kestävyttä voidaan testata 120 päivää kestäväällä laboratoriotestillä, jolla simuloidaan kohteen ominaisuuksia. Thiel & Smith (2004) ovat testanneet HDPE-, LLDPE- ja PVC-geomembraanien sopivuutta kasaliuotukseen. Lopputuloksena havaittiin että molemmat polyetyleenigeomembraanit kestivät testissä hyvin, mutta PVC kärsi huomattavasti tullen testissä hauraammaksi, joten PVC-geomembraanin ei havaittu olevan kestävä olosuhteissa, joissa on vahvoja happoja käytössä. Muutoksia havaittiin kyllä HDPE- ja LLDPE-geomembraaneissakin ja sen vuoksi vaativissa kohteissa täytyy miettiä tarkasti kalvojen elinikää. Kokeen perusteella suositellaan käytettäväksi aina HDPE- tai LLDPE-geomembraania, jonka minimipaksuus on 1,5 mm. Dynaamisille kasoille suositellaan käytettäväksi vähintään 2,0 mm paksuista kalvoa. Tutkimuksissa ei ole käyty läpi muita kalvomateriaalivaihtoehtoja, joten ne voivat testauksen perusteella sopia yhtä hyvin tai paremmin käytettäväksi. Geomembraania voidaan osittain suojella haittavaikutuksilta kun altaan käyttöön otossa minimoidaan aika, jolla malmia parannetaan kasaliuotuksessa ennen normaalin liuottamisen alkua, tällä voidaan välttää aggressiivinen happovaikutus geomembraanin

pintaan. Lisäksi geomembraanin kuntoa tulee tarkkailla säännöllisesti ikääntymisen, pehmenemisen tai muiden näkyvien ongelmien havaitsemiseksi mikäli se on mahdollista. (Lupo 2010)

3.5.1 Geomembraanin alapuolinen materiaali

Pohjarakenteen toiminta sekä rikastushiekka-altaissa että kasaliuotuksessa kuten myös muissa altaissa on niiden kaikkien rakennekerrosten summa. Tämä tarkoittaa, että mikäli joku kerros ei toimi koko rakenteen toiminta saattaa heiketä. Geomembraanien on todettu vaurioituvan rakennusvaiheessa ja käytön aikana. Sen vuoksi geomembraanin alapuolisella kerroksella on iso rooli. Alapuolisen maan on oltava vakaa ja hyvin valmisteltu pohjamaa tai rakennettu kerros. Vakaa perustus on hyvä, koska silloin alapuolinen perusmaa ei aiheuta geomembraaneihin painumisista johtuvia jännityksiä tai venymiä, jotka voivat olla rakenteen toiminnan kannalta kriittisiä. (Lupo & Morrison 2007)

Suunnittelua varten on ensisijaisen tärkeää tehdä hyvät pohjatutkimukset, jotka antavat riittävän tiedon maaperän kantavuudesta. Mikäli pohjamaa ei ole riittävän kantavaa, täytyy se ottaa suunnittelussa huomioon ja esimerkiksi sallia pienemmät kuormat, jotta vältytään ongelmilta. Tutkimuksia on tehtävä kairauksilla ja lisäksi voidaan hyödyntää geofysikaalisia mittausmenetelmiä. Maastotutkimuksia on täydennettävä laboratoriotestein ottamalla myös häiriintymättömiä näytteitä, joista määritetään vedenläpäisevyyksiä ja mekaanisia ominaisuuksia, ja joista suositellaan tehtäväksi kolmiaksaalikokeita eri olosuhteissa (avointa ja suljettua koetta sekä konsolidoituna että ilman), suorita leikkauskokeita, puristuslujuuksia ja painumakokeita. (Lupo & Morrison 2007)

Painumista aiheuttavat mahdolliset venymät geomembraaneille tulee arvioida. Laskenta normaalisti suoritetaan niin, että ensin lasketaan altaasta aiheutuvat painumat perustukselle eli geomembraanin alapuoliselle rakenteelle ja niiden avulla arvioidaan geomembraanin käyttäytymistä. HDPE:lle voidaan sallia 4-8 % venymiä ja LLDPE:lle vähän enemmän 8-12 %, sallitut venymät on aina tarkistettava materiaalitöimittajalta.

Huomioitavaa em. painumien arvioinnissa on, että ne ovat suuren mittakaavan painumia eivätkä siten huomio paikallisia tilanteita esim. pistekuormista aiheutuvia jännityksiä. (Peggs et al. 2005)

Lupo & Morrison (2007) ovat esittäneet kalvon alapuoliselle materiaalille vaatimukset. Materiaalina tulisi käyttää hienoainesta sisältävää maata. Maksimipartikkelikoko saa olla 38 mm, partikkelikokojakauma tulisi olla tasaisesti jakautunut, korkea hienoainespitoisuus, plastisuus yli 15 ja kyllästyneen tilan vedenjohtavuus $1 \cdot 10^{-8}$ m/s tai vähemmän. Useassa julkaisussa on esitetty hyvät puolet sille, että geomembraani on suoraan kontaktissa alapuolella huonosti vettä johtavan maakerroksen kanssa (Weber & Zornberg 2008, Bannour et al. 2013) Kohteen olosuhteet on huomioitava, jotta rakennuskustannukset pysyvät kohtuullisina, joten mikäli vedenjohtavuus on kohteessa luonnollisesti liian suuri, voidaan käyttää bentoniittia vähentämään suotovesien määrää (Shackelford et al. 2009). Maanparannuksessa käytettävän bentoniitin määrä on tyyppillisesti vaihdellut 3-8 % kuivapainosta, mutta se on testattava tapauskohtaisesti. Bentoniittimattoja voidaan käyttää myös, mutta stabiliteettia on muistettava tarkastaa korkeiden kuormien vuoksi sekä bentoniittimaton virumisen ja kokoonpuristuvuuden sekä sisäisten leikkauslujuuksien vuoksi.

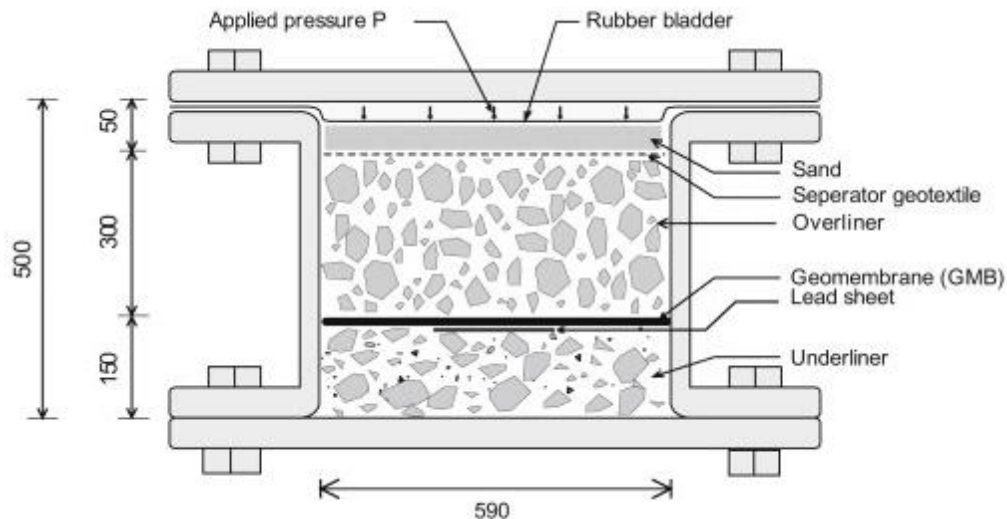
Rowe et al. (2013) on testannut alapuolisen kerrosateriaalien toimivuutta yhdessä geomembraanin kanssa. Alapuolisen materiaalin vaikutuksia kalvon reikiintymiseen ja venymiseen testattiin koejärjestelyllä, jossa kalvon yläpuolinen materiaali pidettiin koko ajan muuttumattomana (kuva 10). Yläpuolinen materiaali oli kuivatuskerrokseen sopiva karkearakeinen materiaali (Lupo 2007), materiaalin vedenläpäisevyyden ollessa luokkaa $6 \cdot 10^{-2}$ m/s. Alapuoliset materiaalit olivat:

1. soraa, jossa oli hiekkaa
2. hiekkaa ja soraa
3. hiekkaa ja soraa sekä vähän silttiä
4. soraista hiekkaa ja silttiä

5. siltistä hiekka

6. siltistä hiekkaa geosynteettisen savikerroksen kanssa

7. tiivistettyä savea.



Kuva 10. Kalvon alapuolisen materiaalin testauksessa on käytetty laitteisto (Rowe et al. 2013)

Kokeiden perusteella alapuolisen materiaalin rakeisuuskäyrän muodolla on suuri merkitys geomembraanin reikiintymisherkyyteen ja venymiin. Mikäli alapuolinen materiaali on rakeista kuten soraa tai hiekkaa geomembraani reikiintyi merkittävästi. Mutta kun alapuolinen materiaali oli hyvin lajittunutta hiekkaa tai soraa jossa oli mukana hienoainesta, ei reikiä havaittu ja venymät olivat pienemmät. Kokeen perusteella myös saven ja bentoniittimaton tapauksessa venymät lähtivät kasvuun. Johtopäätöksenä oli, että yläpuolisen ja alapuolisen materiaalin yhteensopivuus geomembraanin kanssa vaatisi lisätutkimuksia, koska jokainen testi ylitti (6 %) venymän, joka yleensä geomembraanille (HDPE) voidaan hyväksyä. Mikäli alapuolinen maa sisältää hajoavaa materiaalia venymät kasvavat entisestään. Vastaavanlaista testausta on Brachman (2011) et al. tehnyt HDPE-geomembraanille ja tulokseksi saanut, että mikäli

geomembraania ei suojata suojatekstiilillä ja silttisellä hiekkakerroksella on reikiintymisen riski merkittävää. Rowen et al. (2013) tutkimuksessa olleiden kasaliuotusalojen pohjarakenteissa geomembraanin alapuolella oli 48 % tapauksissa hienoainesta sisältävää maata (todennäköisesti savea), luonnontilainen maa 9 %, bentoniittimatto 5 %, rikastushiekkaa 4 % ja siltti/hiekka 3 %. Lopuista 30 % ei ollut tietoa annettu.

Yllä on esitetty materiaalin valintaan liittyviä seikkoja pohjamaan / alapuolisen materiaalin ollessa kitkamaalajeja, mutta useasti rikastushiekka-altaan paikaksi valitaan tarkoituksella alue, jossa on luontaisesti jo heikosti vettäläpäisevä maaperä kuten suoalueet. Silloin altaan pohjalle jätetään tarkoituksella turvetta, joka on kokoonpuristuvaa ja pitkällä ajanjaksolla virumisesta ja luonnollisesta hajoamisesta johtuen painuvaa ja tiivistyvää. Lupo & Morrisonin (2007) mukaan on tärkeää että kenttä- ja laboratoriokokeet tehdään vastaavasti kuin hyvin kantavalle pohjalle. Toisinaan voidaan käyttää lujiteverkkoja, maan alapuoliseen täyttöön käytettäviä materiaaleja ja betonisia rakenteita vähentämään venymiä geomembraaneissa. Suunnittelussa on huomioitava laskennallisesti mahdolliset perustuksesta aiheutuvat painumat, jotta voidaan arvioida geomembraaneihin kohdistuvat venymät.

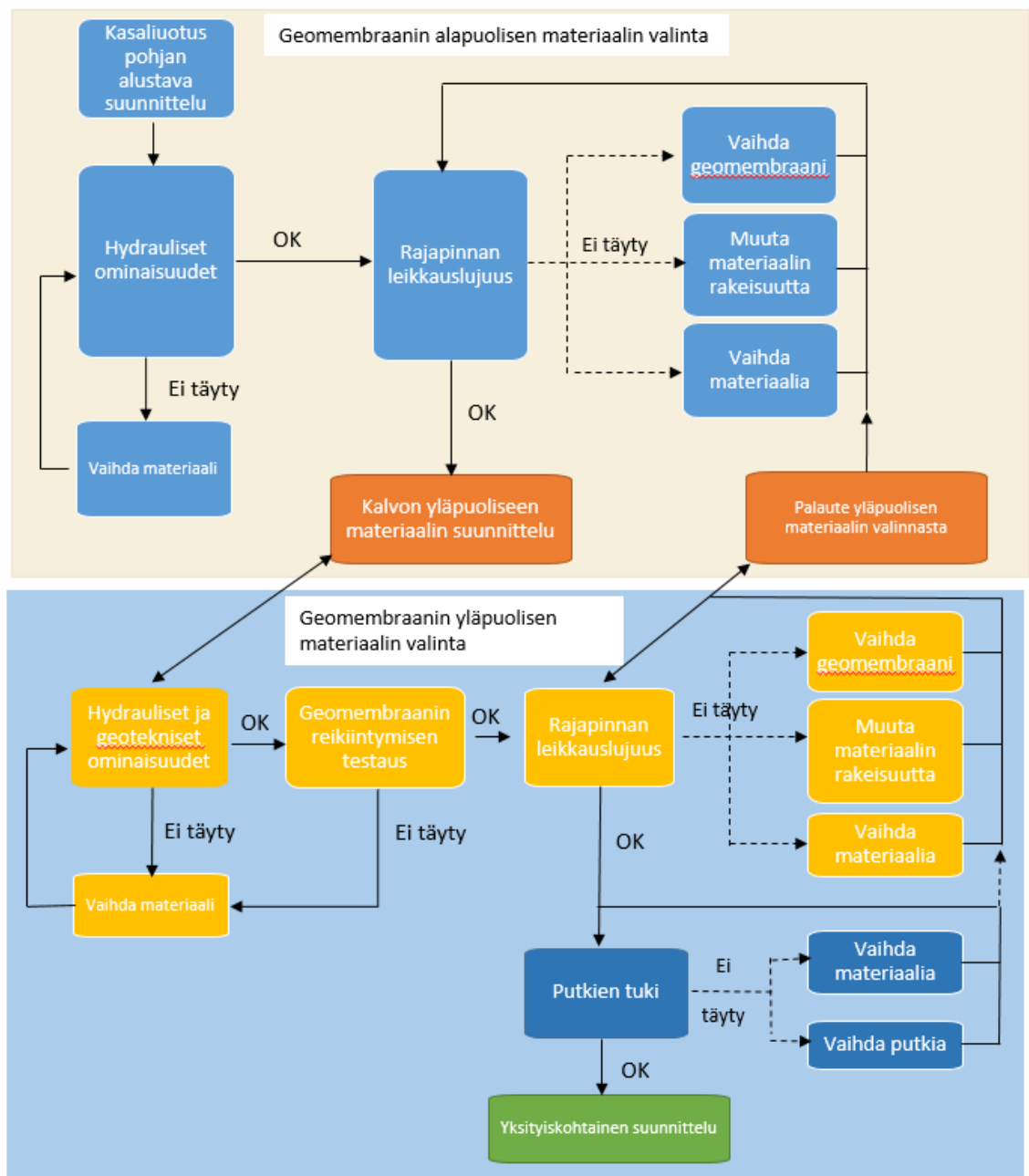
3.5.2 Geomembraanien yläpuolinen kerros

Kalvon yläpuolisella kerroksella on merkittävä rooli geomembraanin ja pohjarakenteen toiminnan kannalta ja ainakin toisinaan keskusteluissa unohdetaan tämän merkitys ja mietitään vain geomembraanimateriaalia ja sen alapuolisen kerroksen vedenjohtavuutta. Esimerkiksi Rowen et al. (2013) testatessa alapuolisen materiaalin vaikutusta kalvon reikiintymiseen, kiinnitettiin huomiota siihen, että kun päästiin 13-14 % venymiin geomembraaneissa ei alapuolisella materiaalille enää ollut merkitystä ja epäiltiin että yläpuolinen materiaali vaikutti enemmän.

Geomembraania suojaava kerros voi koostua yhdestä tai useammasta erillisestä kerroksesta, koska yläpuolisella kerroksella voi olla useita tehtäviä. Esimerkiksi

kaksoisyhdistelmä rakenteissa yläpuolinen kerros toimii suojauksen lisäksi vuotojen ilmaisukerroksena. Yläpuolisen materiaalin tärkein tehtävä on kuitenkin aina suojata geomembraania yläpuoliselta kuormitukselta ja altaan toiminnoilta esim. läjitettävän materiaalin ominaisuuksilta ja sen purkamisen aiheuttamilta rasituksilta, tyypillisen kaivosaltaan useilta rakennusvaiheiden aiheuttamilta kuormilta sekä mahdollisilta ajoneuvoista tulevilta kuormituksilta. Suojamateriaalina voidaan käyttää hiekkaa, soraa ja silttiä ja joskus jopa savista maata. Suojakerros voi sisältää geotekstiilejä, mikäli stabiliteettia ei vaaranneta. Kerroksen paksuus voi vaihdella, ja se riippuu yleensä geomembraanin päälle tulevasta kuormituksesta paksuuden vaihdelleessa alle 1 metristä jopa 5 metriin, mikäli päällä ajetaan todella raskailla ajoneuvoilla. (Fourie et al. 2010).

Kuivatuskerros on yleensä osa tätä suojakerrosta ja sen tehtävä on koota suotautuva vesi ja laskea geomembraaniin kohdistuvaa vedenpainetta. Yleensä kuivatuskerros on luonnonmateriaalia hiekkaa tai soraa ja materiaalin on oltava hyvin vettä johtavaa ja lujuus riittävä eli kestää päälle tulevaa kuormitusta ilman hajoamista, jolloin varmistetaan vedenjohtavuuden pysyvyys. Lisäksi kuivatuskerros voi sisältää putkia ja kuivatusputkien on kestettävä altaassa vallitsevat olosuhteet. Ongelmia on esiintynyt putkien painuessa kasaan ja rikkoutuessa tai tukkeutuessa. Lupo (2010) on esittänyt geomembraanin alapuolisen ja yläpuolisen materiaalin valintaan vaikuttavat tekijät, jotka nyt on yhdistetty yhdeksi kaavioksi (kuva 11). Pohjarakenteen suunnittelussa on siis muistettava tehdä materiaalivalinnat kokonaisuuksina ja muuttaa valintoja, mikäli näyttää että rakenne ei toimi muuten yhtenäisenä kokonaisuutena. (Lupo & Morrison 2007, Fourie et al. 2010)



Kuva 11. Geomembraanirakenteen suunnittelussa on huomioitava rakenne kokonaisuutena sekä sen yläpuolisen että alapuolisen materiaalien valinnan kanssa (muokattu Lupo 2010).

3.6 Nesteen keräysputkistot

Nesteen keräysputkisto joutuu kovan rasituksen alle johtuen päälle kasattavan malmin tai rikastushiekan painosta. Putkiston säilyvyys riippuu ensisijaisesti ympäröivästä materiaalista. Jos ympäröivä maa on kokoonpuristumatonta, eivät rasitukset jakaannu putkistoon. Joten mitä paremmin tiivistetty maa, sitä vähemmän deformaatiota ja rasituksia kohdistuu putkiin. Yleisin käytetty täyttömateriaali on rakeista ja materiaalin leikkauslujuus on yli 35°. Silti putket voivat vaurioitua isoista rasituksista ja sen vuoksi ympäröivän materiaalin huokoisuuden olisi hyvä olla alle 40 %. Putkien kestävyyttä testataan laboratorio-olosuhteissa. Siinä laatikko, joka on kooltaan 750 mm x 600 mm x 500 mm (leveys, syvyys, korkeus), paineistetaan 2000 kPa ja seurataan mitä erikokoisille putkille tapahtuu. Ympäröivä materiaali on vastaavaa kun kohteessa on suunniteltu käytettäväksi ja tiivistäminen tehdään proctor-kokeen mukaisesti 78 % ja 88 % tiiveyteen. Putkien on havaittu testissä painuvan ja 2000 kPa (2000 kPa kuorma vastaa 100 metrin korkuista kasaa materiaalilla jonka tilavuuspaino on 20 kN/m³) kuormaa pidetään jo erittäin haasteellisena putkien toiminnan kannalta. (Thiel & Smith 2004, Fourie et al. 2010)

3.7 Laadunvarmistus

Laadunvarmistus on yksi tärkein osa-alue onnistuneessa geomembraanilla eristetyssä allasrakenteessa. Rakentamisen aikainen laadunvarmistus eli CQA (eng. construction quality assurance) on kallista, joten korkean kustannuksen vuoksi laadunvalvonnassa on havaittu useita tasoja, jotka jaetaan yleensä kolmeen luokkaan ”heikko”, ”hyvä”, ja ”erinomainen”. Mikäli noudatetaan ohjeistettua CQA-protokollaa se sisältää materiaalitestausta, geomembraanin asentamisen kontrollointia ja geomembraanin saumojen testausta sekä mahdollisten vuotopaikkojen havaitsemista tai löytämistä käyttäen apuna mm. elektronisia menetelmiä. (EPA 2001, Darilek & Laine 2001)

Iso osa laadunvarmistuksesta keskittyy usein testaamaan kalvojen saumojen tiiviyttä, vaikka niiden on todettu harvoin epäonnistuvan. Suurimman riskin on havaittu aiheutuvan suojakerroksen asentamisesta geomembraanin päälle ja sen vuoksi laadunvalvonnassa kannattaisi keskittyä enemmän havaitsemaan mahdollisia vuotopaikkoja, joilla voidaan välttää rakentamisesta aiheutuvia vahinkoja siinä vaiheessa kun allas on käytössä. Beck et al. (2009) on arvioinut laaduntarkkailun kolmen laatutason vaikutuksia suotautuviin vesimääriin. Suotovesimääriä on verrattu 1 metrin paksuiseen tiivistettyyn savikerrokseen, jonka $k = 1 \cdot 10^{-9}$ m/s (taulukko 3). Tuloksista voidaan havaita, että geomembraani toimii suotovesiä vähentävästi laatutason vaihteluista huolimatta.

Taulukko 3. Suotautuvat vesimäärät pohjarakenteen läpi kun on huomioitu vedenpaineen muutokset eritasoisesti rakennettujen kalvojen kautta verrattuna tiivistettyyn 1 metrin paksuiseen savikerrokseen. (Beck et al. 2009)

Vedenpaine (m)	Vuotomäärät (l/ha/päivä)			
	korkeatasoinen laadunvalvonta: geomembraani	keskitasoinen laadunvalvonta: geomembraani	matalatasoinen laadunvalvonta: geomembraani	tiivistetty savi, 1 m paksuinen $k = 1 \cdot 10^{-9}$ m/s
1	6	37	79	864
5	35	208	446	4320
10	86	503	1077	8640
20	230	1350	2894	17280

Lupo & Morrison (2007) on listannut tärkeimmät laadunvalvonnassa kiinnitettävät kohdat seuraavasti:

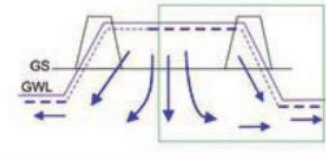
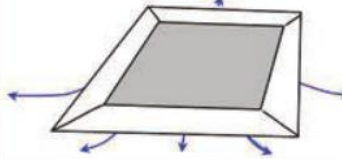
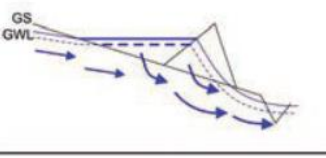
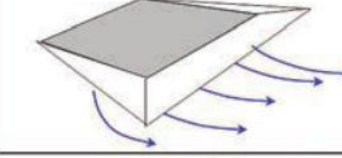
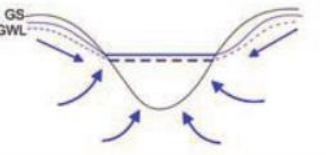
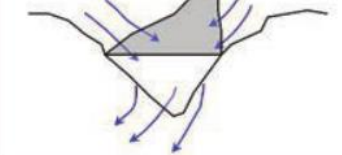
- Dokumentointi: on kiinnitettävä huomio geomembraanin alapuolisen maan tutkimusten kohdentamiseen, tutkimusten laatuun, tiivistämistöihin ja alapuolisen materiaalin vedenjohtavuuksiin
- Geomembraanin asentamisen seuraaminen: huomioiminen ettei asennuksessa synny vaurioita, geomembraanin laadun testaus, asennustöiden onnistumisen valvonta

kerroksen läpi (m^3/s), A on pinta-ala alueelle, jota tutkitaan, k_L on huonosti vettä johtavan kerroksen hydraulinen johtavuus (m/s) ja i on hydraulinen gradientti.

$$Q = Ak_L i \quad (2)$$

Kun käytössä on yhdistelmä rakenne ovat tutkijat (Giroud 1997, Giroud et al. 1997, Rowe & Booker 1998, Touze-Foltz & Giroud 2003, Touze-Foltz & Barroso 2006, Rowe 2012) kehittäneet empiirisiä laskentakaavoja vuotojen laskemista varten erilaisissa tapauksissa.

Analyttisen laskennan rinnalla on yleensä tehtävä mallintamista ohjelmistojen avulla. Usein riittävä laskentatarkkuus voidaan saavuttaa 2D-tarkastelussa, mutta toisinaan olisi hyvä mallintaa tilanne 3D:nä. Kuvassa 12 on esitetty tyypillisiä padotettuja allasratkaisuja ja esimerkiksi voi huomata, kuinka 2D-mallinnuksella ei voida huomioida veden virtausta patojen nurkissa tai laaksomaisissa rakenteissa. (Garrick et al. 2014)

2-D Representation (After EC, 2009)	3-D Representation	Applicability
		Ring dyke: radial flow geometry, flow system well represented by 2-D section from centre to perimeter
		Hill slope: Gravity flow to point is discharge at base of slope, 2-D geometry is representative of key elements of flow.
		Valley fill: Discharge to valley centre (into tailings) and downslope parallel to natural valley. 3-D flow system, flow to downstream receptors not represented in 2-D.

Kuva 12. Suotovesien virtausta on kuvattu sinisin nuolin sekä 2D- että 3D-tilanteessa. Laskentaa tehtäessä on päätettävä onko 2D-tarkastelu riittävä vai tarvitaanko 3D-tarkastelua. (Garrick et al. 2014)

Garrick et al. (2014) ja La Touche & Garrick (2012) ovat laskeneet rikastushiekka-altaista suotautuvien vesien määrää ja verranneet erilaisia skenaarioita toisiinsa. Laskennallisesti on voitu osoittaa, että suotovesien pääsyä ympäristöön voidaan rajoittaa tehokkaasti yhdistelmä-rakenteella (geomembraani ja bentoniittimatto) kun laadunvalvonta on tehty erinomaista tasoa vastaavasti (taulukko 4). Taulukossa 4 on esitetty laskentatuloksia MODFLOW-SURFACT:illa mallinnettuna tilanteessa, johon alueelle rakennetaan uusi rikastushiekka-allas. Mallinnuksessa on verrattu rakennettavan altaan (pohjarakenne muuttuu) vaikutuksia ajan suhteen muuttumattomassa tilanteessa ja suotovesimääriä on verrattu tilanteeseen, jossa allasta ei ole rakennettu. Tuloksissa on havaittu altaan rakentamisen vaikuttavan kontrollipaikan suotovesimääriin 2...691 % riippuen käytettävästä pohjarakenneratkaisusta.

Taulukko 4. Suotovesimäärien suhteellista vertailua erilaisten rikastushiekka-altaan pohjaratkaisujen kautta (Garrick et al. 2014).

Skenaario	Vähemmän ajan suhteen muuttumattomassa tilanteessa verrattuna altaaseen, jossa ei ole keinotekoisista eristettä [%]	Lisäys ajan suhteen muuttumattomassa tilanteessa pintavaluntaan altaan ulkopuolelle verrattuna perustilanteeseen (ei allasta) [%]
ei geomembraania, allas rakennettu	-	691
yksinkertainen HDPE-geomembraani	77,1	210
yhdistelmä-rakenne	98,2	2
ei kalvotettu, katkaisuseinä	-0,2	693

Tutkimuksen mukaan laskenta on erittäin herkkä HDPE-geomembraanin vaurioille ja siten niiden valmistuksen ja rakentamisen laadulle. Laskelma osoittaa, että yksittäinen rakenne HDPE-geomembraania käyttäen on tehtävä erittäin hyvällä CQA-laadulla, mikäli halutaan saavuttaa merkittäviä etuja suotovesimääriin rikastushiekka-altaalla. Jo ”hyvä” CQA-laatu lisää suotautumista niin, että geomembraanin on arvioitu olevan johtavampi kuin yläpuolella sijainnut rikastushiekka ($k=1 \times 10^{-8}$ m/s), joten vuodot tällaisessa tilanteessa kontrolloituu rikastushiekan johtavuudesta eikä alapuolisen kerroksen

mukaan (taulukko 5). Kuitenkin laskennassa on pystytty osoittamaan, että hyvä laatutaso yhdistelmärakenteessa riittää vielä pitämään suotovirtauksen pienempänä kuin ilman geomembraanirakennetta. (Garrick et al. 2014)

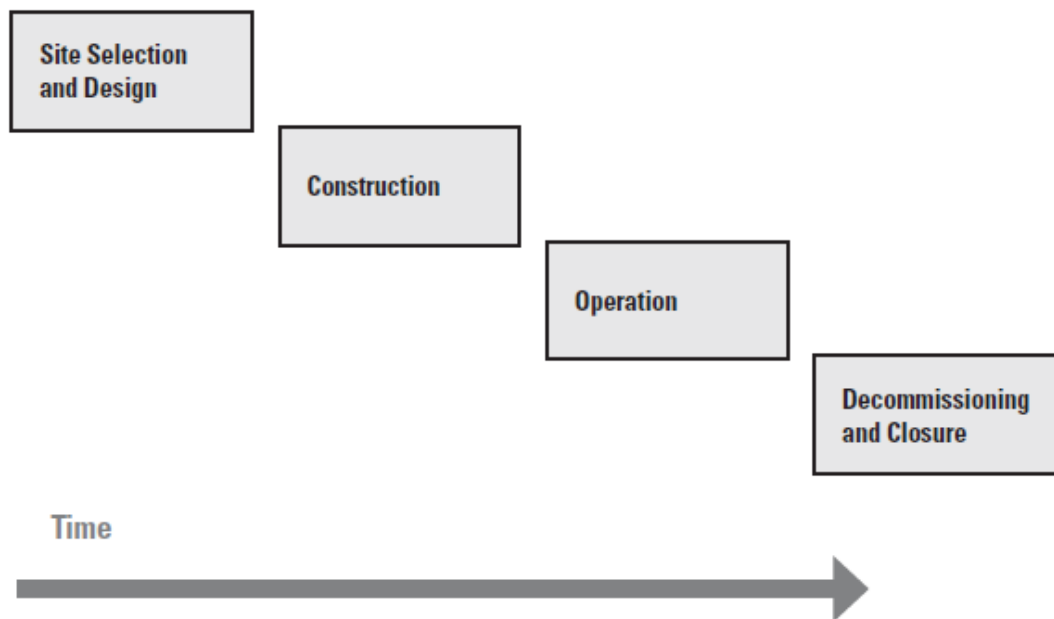
Taulukko 5. Laskennalliset johtavuudet 1 metriä paksulle geomembraanirakenteille sekä yksittäisen geomembraanin tilanteessa ja yhdistelmärakenteelle kun rakentamisen laatu on otettu huomioon sekä vaihtelevat painekorkeudet altaassa (Garrick et al. 2014).

Painekorkeus (m)	Yksittäisen geomembraanirakenteen 1 m vastaava vedenjohtavuus mallissa (m/s)	Yhdistelmärakenteen 1 m vastavan rakenteen vedenjohtavuus mallissa (m/s)
"Erinomainen" CQA-laatuso		
65	$8,40 \times 10^{-11}$	$2,40 \times 10^{-11}$
50	$9,60 \times 10^{-11}$	$1,91 \times 10^{-11}$
35	$1,15 \times 10^{-10}$	$1,40 \times 10^{-11}$
20	$2,80 \times 10^{-10}$	$8,50 \times 10^{-12}$
5	$4,32 \times 10^{-10}$	$2,32 \times 10^{-12}$
"Hyvä" CQA laatuso		
65	$5,00 \times 10^{-7}$	$6,40 \times 10^{-10}$
50	$5,70 \times 10^{-7}$	$5,10 \times 10^{-10}$
35	$6,72 \times 10^{-7}$	$3,80 \times 10^{-10}$
20	$8,70 \times 10^{-7}$	$2,30 \times 10^{-10}$
5	$1,52 \times 10^{-6}$	$6,50 \times 10^{-11}$

On kuitenkin muistettava, että malleilla laskettaessa simuloidaan yksinkertaistettuja tilanteita. Laskentaohjelmilla ei voida huomioida rikastushiekan konsolidoitumista tai ominaisuuksien muuttumista ajan kuluessa sekä esimerkiksi edellä tehdyissä laskuissa käytettyä steady-state-oletusta ei saavuteta allasrakenteissa, joihin koko ajan puretaan uutta materiaali (Garrick et al. 2014). EPA:n (1994) mukaan geomembraanin suunnittelussa on huomioitava, että ne vuotavat aina. Vuotojen määrä on kuitenkin riippuvainen geomembraanin yläpuolisen nestepatsaan korkeudesta, geomembraanimateriaalin paksuudesta ja tehokkuudesta sekä ajasta jolla geomembraaniin kohdistuu hydraulinen paine.

3.9 Pohjarakenteen vaikutus sulkemiskäytäntöihin

Osa kaivosten allasrakenteista ei tarvitse erillisiä sulkemiskäytäntöjä kaivoksen toiminnan päättyessä, mutta esimerkiksi yleensä rikastushiekka-altaat, kasaliuotus ja sivukivialueet vaativat. Kuvassa 13 on esitetty rikastushiekka-altaan tyyppinen elinkaari, joka päättyy altaan sulkemiseen. Sulkemiskustannukset voivat olla suuret ja niihin on varauduttava. (The Mining Association of Canada 2011, Fourie et al. 2010)



Kuva 13. Tyyppinen rikastushiekka-altaan elinkaari, joka päättyy altaan sulkemiseen (The Mining Association of Canada 2011).

Sulkemisen päätarkoitus on minimoida altaalta suotautuva vesi ja toisaalta estää eroosiota ja pölyämistä sekä palauttaa allas maankäytöllisesti sopivaan tilaan. Sulkemiskäytäntöjä jaetaan kuiva- ja vesipeittoihin sekä niiden yhdistelmiin. Kuivapeittoratkaisuissa voidaan yksinkertaisimmillaan käyttää yhtä maamateriaalia tai vaativimmissa ratkaisuissa voidaan hyödyntää myös geosynteettisiä tuotteita. Vesipeitossa allas peitetään tarpeeksi paksulla kerroksella vettä, jolla pyritään estämään sulfidipitoisten rikastushiekkojen hapettumista ja haitta-aineiden liukenemistä. Altaan

pohjarakenneratkaisulla voi olla merkitystä altaan sulkemisen suunnitteluun, kustannuksiin ja käytettäviin vaihtoehtoihin. Mikäli halutaan rakentaa altaan päälle tiivis pintarakenne, tulee altaan vedenpaine pystyä laskemaan ja vapaa vesi poistaa. Tämä voi olla haastavaa, jos kuivatusratkaisuja ei ole otettu altaan suunnittelussa huomioon. Tiiviillä pintarakenteilla pyritään ennen kaikkea estämään pitkäaikaisesti vaikutuksia ympäristöön ja vaikuttamaan happamien suotovesien syntyyn. Sulkemiskäytäntöihin on löydettävissä paljon tietoa ja esimerkiksi Kanadassa (2011) on julkaistu ohje ” A Guide to the Management of Tailings Facilities”, jossa on mm. yksityiskohtainen muistilista rikastushiekka-altaan sulkemissuunnittelua varten. Bjelkevik (2005) on julkaissut vesipeiton suunnitteluun liittyvän oppaan. Suomessa on ollut käynnissä CLOSEDURE-projekti, jonka päätarkoitus on ollut kerätä tietopankki, josta voi löytää tietoa sulkemisesta ja sen jälkeisestä monitoroinnista (GTK 2016). (Fourie et al. 2010, Kauppila et al. 2011)

4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Viimeisen kahden vuosikymmenen aikana geomembraanien käyttö kaivosteollisuuden allasrakenteiden pohjarakenteissa on lisääntynyt, mutta silti niiden käytöstä ja vaikutuksista ympäristöturvallisuuteen ollaan erimielisiä. Toisaalta hyvät kokemukset kaatopaikkarakentamisessa ovat vauhdittaneet niiden käyttöä myös kaivosten pohjarakenteissa, toisaalta taas ongelmiakin on esiintynyt. Geomembraanien asentaminen on ollut haasteellista ja laadunvalvonta usein puutteellista tai siihen ei ole tarpeeksi kiinnitetty huomiota, olosuhteet ovat yksilölliset ja usein haasteelliset ja pohjarakenteet vaurioituvat rakentamisen aikana kohtuullisen herkästi. Toiset toimijat ovat sitä mieltä, että tällaisia altaita ei tulisi sijoittaa alueille, joissa suotovesistä voi aiheutua haittaa pohjavedelle ja altaat olisi suunniteltava ilman keinotekoisia eristeitä. Toiset tutkimukset kuitenkin osoittavat, että geomembraanirakenteilla voidaan vähentää pohjarakenteiden läpi suotautuvaa vesimäärää huomattavasti verrattuna rakenteeseen, joka olisi tehty luonnonmateriaaleilla vähän vettä läpäiseväksi.

Kaivosten pohjarakenteiden päälle voidaan läjittää erilaisia materiaaleja ja nesteitä ja se on suunnittelun lähtökohtana. Verrattaessa kasaliuotusta rikastushiekka-altaiden pohjarakenteiden tekemiseen on siinä muutamia suuria eroja. Kasaliuotuksessa geomembraanien käyttö on perusteltua ja välttämätöntäkin, jotta metallien talteenotto on mahdollisimman tehokasta eli geomembraanien käytöllä saavutetaan taloudellisesti paras tilanne ja samalla voidaan estää metallisen liuoksen vuodot ympäristöön. Taas rikastushiekka-altaalta vesien kerääminen ei välttämättä tehosta prosessia tai tuotantoa, joten pohjarakenteiden tekeminen ja vaativampiin rakenteisiin siirtyminen ovat merkittävä kustannuslisä toiminnalle. Lisäksi perinteiset rikastushiekka-altaat vaativat patorakenteet ja kaivoksen toiminnan loputtua rikastushiekka jää usein altaisiin. Suomessa tapahtuneet vuodot viittaavat siihen, että rakenteiden suunnittelussa on käytettävä harkintaa ja otettava huomioon se, että geomembraanilla eristetyt pohjarakenteet tulevat vuotamaan jossakin elinkaarensa vaiheessa. Aitaiden pohjarakenteisiin vaikuttaa suuresti sen suunniteltu käyttötarkoitus. Tämän vuoksi aitaiden käyttötarkoituksen muuttaminen rakentamisen jälkeen voi olla ongelmallista,

mikäli sitä ei ole suunnittelussa huomioitu ja altaan pohjarakennetta tarkasteltu vaihtoehtoiselle käyttötarkoitukselle.

Pohjarakenteen valinnalla voi olla vaikutuksia altaan käytön päättymisen jälkeen, mikäli sulkemistoratkaisuja tarvitaan. Sen vuoksi olisi oleellista, että jo altaiden suunnitteluvaiheessa suunniteltaisiin todelliset vaihtoehdot altaiden koko elinkaaren ajalle, käytönaikaisille tilanteille, sulkemiselle ja jatkotarkkailulle sekä laskettaisiin näille kustannukset. Liian usein mietitään pelkästään ensimmäisen vaiheen rakentamisen kustannuksia tai lähimmän 5 vuoden aikana tulevia kustannuksia. Esimerkiksi kunnollisten kuivatusratkaisujen rakentamisella voidaan vaikuttaa altaan sulkemiseen, mutta myös käytön aikaiseen turvallisuuteen. Vedenpaineen laskeminen altaassa vähentää vuotoriskiä, mutta myös edesauttaa rikastushiekan konsolidoitumista. Sillä voidaan saavuttaa useita etuja: patoturvallisuus kasvaa, vuotoriski vähenee, rakentaminen ja toimiminen altaalla helpottuvat, sulkeminen helpottuu ja kaivoksen sulkemisen jälkeisen riskit ympäristöön vähenevät. Rikastushiekka-altaiden kohdalla olisi mietittävä myös muita vaihtoehtoja kuin perinteisesti lietteenä läjitettävä rikastushiekka. Sakeutettu rikastushiekka, pasta ja kuivaläjitys tarjoavat uudempia vaihtoehtoja, joilla voidaan vähentää suotovesien määrää, mutta ne usein jätetään huomioimatta suurempien alkukustannusten sekä vähäisen kokemuksen perusteella.

Mikäli lainsäädännöllä tai muilla vaatimuksilla pyritään geomembraanirakenteita lisäämään kaivosten pohjarakenteissa, olisi yhtenäisemmät ohjeistukset niiden rakentamisesta oltava. Euroopassa ja Suomessa on lainsäädännöllä varmistettu kaatopaikkarakenteiden rakentaminen ja vaadittavat rakenteet on esitetty yksityiskohtaisesti esimerkiksi kerrospaksuuksien ja vedenjohtavuuksien osalta. Mikäli kaatopaikkojen rakenteissa halutaan ohjeellisesta rakenteesta poiketa, tulee esitettävällä uudella rakenteella saavuttaa vastaava suojaustaso ja osoittaa se. Kaivosten pohjarakenteille vastaavia ei ole esitetty. Suurin osa löytyvistä suojausratkaisuesimerkeistä ovat kvalitatiivisia eli laadullisia eikä niissä esitetä kerrospaksuusvaatimuksia tai edes materiaalivaatimuksia tarkasti. Vaadittava suojaustaso jää siis epäselväksi.

Kaivosten pohjarakenteista on kohtuullisen vähän julkaistua tietoa. Enemmän tutkimusta kaivattaisiin geomembraanin ja sen alapuolisen ja yläpuolisen maan toimintaan ja ratkaisuihin, miten luonnonmaa ja keinotekoinen eriste saadaan korkean kuormituksen alla toimimaan yhdessä mahdollisimman hyvin, joko käyttämällä rakennettua luonnonmaakerrosta tai esim. bentoniittimattoja. Savikerrosten pitkäaikaiskäyttäytyminen huolestuttaa tutkijoita eikä niiden uskota yhdistelmä rakenteissa olevan niin luotettavia kuin laskelmissa osoitetaan. Laskelmissa ei pystytä huomioimaan saven pitkäaikaiskäyttäytymistä, tuleeko siihen kanavia, halkeamia tms. vyöhykkeitä, joissa vuotoja pääsee ajan kuluessa syntymään. Jotta uudet tekniikat yleistyisivät, tulisi niiden toimivuudesta saada myös tieteellisiä tuloksia ja osoituksia käyttökelpoisuudesta. Kaivosteollisuus on laajaa ja monenlaisia rakenteita on olemassa ja rakennettu. Ne on joko hyväksi tai huonoksi koettu, mutta vähän löytyy tietoa onnistuneista tai epäonnistuneista rakenteista. Sen vuoksi olisi oleellisen tärkeää saada asianmukaista tietoa sekä hyvistä ratkaisuista että oppia virheistä, jotta rakenteet voisivat tulevaisuudessa olla entistä turvallisempia ja parempia.

LÄHDELUETTELO:

- Addis, P. (2011). Lining of the Return Water Dam at the Onverwacht Tailings Storage Facility. In *Proceedings Tailings and Mine Waste*.
- Adiansyah, J. S., Rosano, M., Vink, S., & Keir, G. (2015). A framework for a sustainable approach to mine tailings management: disposal strategies. *Journal of Cleaner Production*, 108, 1050–1062. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615010707>
- Akcil, A. (2002). Cyanide control in tailings pond : Ovacik gold mine.
- Alcoa. (2009). *Application Guide - Geosynthetic Clay liners (GCLs) for Residue Disposal Areas (AWA)*.
- Bannour, H., Barral, C., & Touze-Foltz, N. (2013). Flow rate in composite liners including GCLs and a bituminous geomembrane Nathalie Touze-Foltz. Flow rate in composite liners including GCLs and a bituminous geomembrane. In *The 3rd International Conference on Geotechnical Engineering*. Retrieved from <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00813189>
- Beck, P.E, Smith, M, Sample, K. (2009). Design considerations for the use of geomembranes for phosphate tailing impoundments. In *Presented at the 3rd International Conference on the Valorization of Phosphates and Phosphorus Compounds*. Retrieved from http://www.ausenco.com/uploads/pages/1443768133-Design_Considerations_for_the_Use_of_Geomembranes_for_Phosphate_Tailing_Impoundments.pdf
- Bjelkevik, A. (2005). *Water cover closure design for tailings dams. Report*.
- Bouazza, a., Zornberg, J. G., & Adam, D. (2002). Geosynthetics in waste containment facilities: recent advances. In *International Conference on Geosynthetics* (pp. 445–507). Retrieved from http://www.ce.utexas.edu/prof/zornberg/pdfs/CP/Bouazza_Zornberg_Adam_2002.pdf
- Brachman, R. W. I., Rowe, R. K., Irfan, H., & Gudina, S. (2011). High-Pressure Puncture Testing of HDPE Geomembranes. In *2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference* (p. 7).
- Breitenbach, A. J. (2005). Heap leach pad design and construction practices in the 21.
- Breitenbach, A. J., & Smith, M. E. (2006). Overview of geomembrane history in the mining industry. In *Proceedings of the 8th bi-annual meeting of the International Geosynthetics Society, Japan*.
- Breitenbach, A. J., & Smith, M. E. (2007). Geomembrane Raincoat Liners in the Mining Heap Leach Industry. *Geosynthetics* 25.
- Breul, B., Reinson, J., Eldreidge, T., Stenson, G., & Harman, A. (2006). Bituminous geomembrane in extremely cold conditions. In *8th International Conference on*

Geosynthetics, Yokohama Japan

- Cetco. Mine tailings storage facility bottom liner system (2012).
- Cole, J., Walls, J., & Collins, R. (2014). Husab Tailings Storage Facility Containment Design. In *Proceedings of Geosynthetics Mining Solutions*. Retrieved from http://www.gseworld.com/content/documents/Other/Husab_Tailings_Storage_Facility_Containment_Design_3.pdf
- Cunning, J., Isidoro, A., Eldridge, T., & Reinson, J. (2008). Dam Construction at Diavik using Bituminous Geomembrane Liners. In *Proceedings of the 61st Canadian Geotechnical Conference, GeoEdmonton'08, Edmonton, Alberta. September 21-24, 2008*. (pp. 933–939).
- Daniel, D. E. (1993). Case histories compacted clay liners and covers for waste disposal facilities. In *Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*.
- Darilek, G. T., & Laine, D. L. (2001). Costs and Benefits of Geomembrane Liner Installation CQA G.T. Darilek Leak Location Services, Inc.,. In *Geosynthetics Conference* (pp. 65–75).
- Davies, M., Lighthall, P., Rice, S., & Martin, T. (2002). a. Design of Tailings Dams and Impoundments. In *Keynote Address Tailings and Mine Waste Practices SME*. Retrieved from <http://www.infomine.com/library/publications/docs/Davies2002b.pdf>
- Davies, M., McRoberts, E., & Martin, T. E. (2002). b. Static liquefaction of tailings: fundamentals and case histories. *Tailing Dams 2002: Association of State Dam Safety Officials, U.S. Society on Dams*.
- Dillon, M., White, R., & Power, D. (2004). Tailings storage at Lisheen Mine, Ireland. *Minerals Engineering*, 17(2), 123–130. <http://doi.org/10.1016/j.mineng.2003.10.021>
- ELY. 2015. Sähköposti. Tiedonanto Suomen kaivosten pohjarakenteissa käytetyistä geomembraaneista vuoteen 2015 . Kainuun elinkeino-, liikenne ja ympäristökeskus
- EPA, U.S. Environmental Protection Agency. (1994). Technical Report, Design and Evaluation of Tailings Dams. Report.
- EPA. (2001). *Part IV Protecting Ground Water Chapter 7: Section B Designing and Installing Liners Technical Considerations for New Surface Impoundments, Landfills, and Waste Piles Contents*. US Environment Protection Agency publication SW-846. Retrieved from <http://www.epa.gov/osw/nonhaz/industrial/guide/pdf/chap7b.pdf>
- European Commission (EC). (2009). *Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities. Reference Documents on Best Available Techniques*. Retrieved from http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/mmr_adopted_0109.pdf
- Fourie, A. B., Bouazza, A., & Lupo, J. (2010). Improving the performance of mining infrastructure through the judicious use of geosynthetics. In *9th International*

Conference on Geosynthetics, Brazil.

- Garrick, H., Digges La Touche, G., Plimmer, B., & Hybert, D. (2014). Assessing the hydraulic performance of tailings management facilities. In *Proceedings of the 17th Extractive Industry Geology Conference*. Retrieved from <http://static1.squarespace.com/static/54199a46e4b05afa19b4e68c/t/545770b9e4b05903c3d20109/1415016633320/16+Garrick.pdf>
- Giroud, J. P. (1997). Equations for calculating the rate of liquid migration through composite liners due to geomembrane defects. *Geosynthetics International*, 4, 3–4.
- Giroud, J. P., King, T. D., Sanglerat, T. R., Hadj-Hamou, T., & Khire, M. V. (1997). Rate of Liquid Migration Through Defects in a Geomembrane Placed on a Semi-Permeable Medium. *Geosynthetics International*, 4(3-4), 349–372. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Rate+of+liquid+migration+through+defects+in+a+geomembrane+placed+on+a+semi-permeable+medium#0>
- GTK. 2016. CLOSEDURE - Mine Closure Technologies Resource <http://en.gtk.fi/research/program/greenmining/closedure.html>
- Hornsey, W. P., Scheirs, J., Gates, W. P., & Bouazza, A. (2010). The impact of mining solutions/liquors on geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(2), 191–198. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266114409001095>
- ICOLD. (2010). *Geomembrane sealing systems for dams, Design principles and review of experience. Bulletin 135.*
- Jewell R.J, Fourie A.B. toim. 2015. Paste and Thickened Tailings – A Guide. Third Edition.
- Jingjing, F. (2014). Leakage Performance of the GM + CCL Liner System for the MSW Landfill. *The Scientific World Journal*.
- Kauppila, P., Räisänen, M., & Myllyoja, S. (2011). Metallimalmikaivostoiminnan parhaat ympäristökäytännöt.
- Kuyucak, N. (1999). Acid mine drainage prevention and control options. In *Mine, Water & Environment*.
- La Touche, G. D., & Garrick, H. (2012). Hydraulic performance of liners in tailings management and heap leach facilities. In *International Mine Water Association*.
- Lupo, J. F. (2005). Heap leach facility liner design. In *Proceedings of the North American Geosynthetics Society (NAGS)/GRI19 Conference, Las Vegas, Nev., 14–16 December 2005*.
- Lupo, J. F. Liner system design for tailings impoundments and heap leach pads (2008).
- Lupo, J. F. (2010). Liner system design for heap leach pads. *Geotextiles and Geomembranes*, 28(2), 163–173. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0266114409001071>

- Lupo, J. F., & Morrison, K. F. (2004). *The likely medium to long-term generation of defects in geomembrane liners.*
- Lupo, J. F., & Morrison, K. F. (2005). Geosynthetic design and construction approaches in the mining industry. In *2005 GeoFrontiers Conference. Austin* (Vol. 25, pp. 96–108). <http://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.07.003>
- Lupo, J. F., & Morrison, K. F. (2007). Geosynthetic design and construction approaches in the mining industry. *Geotextiles and Geomembranes* 25, 96–108. <http://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2006.07.003>
- Peggs, I. D., Schmucker, B., & Carey, P. (2005). Assessment of Maximum Allowable Strains In Polyethylene and Polypropylene Geomembranes. In *Proceedings of the Geo-Frontiers 2005 Congress.*
- Podgorney, R. K., & Bennett, J. E. (2006). Evaluating the Long-Term Performance of Geosynthetic Clay Liners Exposed to Freeze-Thaw. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. <http://doi.org/10.1061/ASCE1090-02412006132:2265>
- Rowe, R. K. (2012). Short- and long-term leakage through composite liners. The 7th Arthur Casagrande Lecture 1 1 This lecture was presented at the 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Toronto, Ont., October 2011, and a pre-print appear. *NRC Research Press*. <http://doi.org/10.1139/t11-092>
- Rowe, R. K., & Booker, J. (1998). *Theoretical Solutions for Calculating Leakage Through Composite liner Systems.*
- Rowe, R. K., Brachman, R. W. I., Irfan, H., Smith, M. E., & Thiel, R. (2013). Effect of underliner on geomembrane strains in heap leach applications. *Geotextiles and Geomembranes*, 40, 37–47. <http://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2013.07.009>
- Shackelford, C. D., Sevick, G. W., & Eykholt, G. R. (2009). Hydraulic conductivity of geosynthetic clay liners to tailings impoundment solutions. *Geotextiles and Geomembranes*, 28, 149–162. <http://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.10.005>
- Stepniewski, W., Widomski, M. K., & Horn, R. (2011). *Hydraulic Conductivity and Landfill Construction.*
- The Mining Association of Canada. (2011). *A Guide to the Management of Tailings Facilities.*
- Thiel, R., & Smith, M. E. (2004). State Of The Practice Review Of Heap Leach Pad Design Issues. *Geotextiles and Geomembranes*, 22(6), 555–568.
- Touze-Foltz, N. & Giroud, J.P. 2003. Empirical Equations for Calculating the Rate of Liquid Flow through Composite Liners Due to Geomembrane Defects. *Geosynthetics International*, 10(6), 215-233.
- Touze-Foltz, Nathalie, Lupo, J., & Barroso, M. (2008). Geoenvironmental Applications of Geosynthetics. *EuroGeo4*, 1–98.

Weber, C. T., & Zornberg, G. J. (2008). Use of GCLS to Control Leakage through Geomembrane defects under High hydraulic loads.

Workman, J. P., & Keeble, R. L. (1989). *Design and Construction of Liner Systems*.