



Pohjavedensuojaurakenteiden käyttöikämitoitus ja tuotehyväksyntä

Markku Tammirinne, Markku Juvankoski, Rainer Laaksonen,
Hans Rathmayer

Pohjavedensuojaurakenteiden käyttöikämitoitus ja tuotehyväksyntä

Markku Tammirinne
Markku Juvankoski
Rainer Laaksonen
Hans Rathmayer

Tekijä VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka
Paikka Espoo, kesäkuu 2004

ISBN 952-5004-50-3

Tiivistelmä

Julkaisu on Tekesin INFRA-tutkimusohjelman "Infrarakenteiden käyttöikämitoitus" osaprojektin "Pohjavedensuojaurakenteet" loppuraportti. Projektin tavoitteena on ollut esittää kaatopaikan tiivistysrakenteissa käytettäville materiaaleille ja rakenteille tuotehyväksyntämenettely ja käyttöikämitoituksen perusteet, jotka perustuvat suojausrakenteille asetettaviin toimivuustavoitteisiin ja -vaatimukseen. Raportissa on esitetty kaatopaikan tiivistysrakenteiden tuotehyväksyntämenettelyn kuvaus. Raportista löytyy opastusta eristysrakenteiden suunnittelusta ja käyttöiän tarkastelumahdollisuuksista. Verrattain laajasti on käsitelty eristysrakenteiden suunnitteluun ja mitoitukseen liittyviä asioita. Raportissa on esitetty esimerkin omaisesti kahden mitoituksen ja kaatopaikan mallintamiseen käyttökelpoisen tietokoneohjelman (HELP, LandSim) käyttömahdollisuuksia ja niiden tulostusta. Raporttia ei ole tarkoitettu kaatopaikan eristysrakenteiden suunnitteluohjeeksi.

Tässä projektissa ei ole tutkittu materiaaleja eikä niiden ominaisuuksia eikä projektin tuloksena esitetä yksittäisten materiaalien käyttökelpoisuutta tai eri materiaaleista tehtyjen rakenteiden vastaavuutta. Mutta tiivistystarkoituksessa käytettävien materiaalien ominaisuuksille ja mitoitusparametreille esitetään tutkimus- ja testausmenetelmät laboratoriossa. Myös rakenteiden toimivuuden mittaamiselle (seurantamittauksille) esitetään periaatteellisia menettelytapoja.

Abstract

The life time design and product acceptance of ground water protection structures for landfills.

Abstract

This publication is the final report of the "Ground water protection structures" –project, a sub-project to the TEKES INFRA- project "Life time design of infra structures". The aim of the project has been to present general rules for how the product acceptance and life time design of ground water protection structures of landfills should be carried out. In landfill lining system acceptance and design the function and the requirements of each individual element has to be taken into account.

The report describes in details the voluntary product acceptance procedure for base sealing and capping system and their materials. The acceptance certification has to be given by the expert group and based on the comprehensive test results of the materials and structures presented to the expert group by the applicant. Some general guidelines for life time design of the lining systems protection structures has been given. The long term behaviour and stability of materials and structures has to be also taken into account in the product acceptance.

As for an example two data programs (HELP and LandSim) has been described in general level. Those two programs has been used to give an idea how the life time design can be done and how the results can be presented when using the results in selection of structures. However, this final report has not ment to be used as an official design guideline or manual for landfill lining structures.

In the project no test has been made to find out design parameters for different materials. Project has neither given any conclusions for the usability of different materials or structures compared with an other structures. However, the general guidelines how to make the comparisons have presented. The list of the laboratory testing methods for different materials (natural geological materials, sand bentonite, by-products, geosynthetics) has presented. Usability criteria for different materials as linings has also been given, partly for test use in the described acceptance procedure.

Alkusanat

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikassa käynnistettiin vuonna 2003 Tekesin INFRA-teknologiaohjelmaan sisältyvä projektikokonaisuus "Infrarakenteiden käyttöikäsuunnittelu". Projektin muodostuu neljästä osa-alueesta:

- Yleinen osa: Infrarakenteiden käyttöikämitoitus
- Sovellusesimerkki 1: Tierakenteet - tietuotteet-kokonaisuus
- Sovellusesimerkki 2: Pohjavedensuojusrakenteet
- Sovellusesimerkki 3: Stabiloitu rakennekerros tie- ja katurakenteissa

Tämä raportti on sovellusesimerkin 2: Pohjavedensuojusrakenteet, loppuraportti. Pohjavedensuojusrakenteet-osaprojektin tavoitteena on esittää kaatopaikan eristysrakenteissa käytettäville materiaaleille ja rakenteille tuotehyväksyntämenettely ja käyttöikämitoitus, jotka perustuvat suojausrakenteille asetettaviin toimivuustavoitteisiin ja -vaatimukseen. Toimivuusvaatimuksia ja tuotehyväksyntämenettelyä määriteltäessä otetaan mahdollisuuksien mukaan huomioon suojausrakenteilta vaadittu käyttöikä (pitkäaikaistoimivuus).

Projektin valvontaryhmän kokoonpano on ollut: Markku Kukkamäki, SYKE (puheenjohtaja), Esa Kleemola, Kaakkois-Suomen ympäristökeskus, Esa Nummela (Markku Salo), Jätelaitosyhdistys, Ari-Pekka Heikkilä, Finncao Oy, Martti Keppo, Lohja Rudus Ympäristöteknologia Oy Ab, Peter Brandt, ViaPipe Oy, Mikko Laitinen, Jätekuukko Oy, Kari Kuusipuro, Nordkalk Oyj Abp, Jukka Saarenpää, Tieliikelaitos, Antti Kaartokallio (Jan Österbacka), Ekokem-Palvelu Oy, Ilkka Ilmavirta, VAPO Oy ja Mauri Uusihakala, YTV Jätehuoltolaitos.

Pohjavedensuojusrakenteet -projektin ovat rahoittaneet Tekes (INFRA-teknologiaohjelma) ja valvontaryhmässä edustettuna olleet yritykset sekä VTT.

Tutkimuksen toteutukseen ovat osallistuneet tutkimusprofessori Markku Tammirinne (projektipäällikkö), tukijat Markku Juvankoski ja Rainer Laaksonen sekä erikoistutkija Hans Rathmayer VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikasta.

Espoo, huhtikuussa 2004

Markku Tammirinne

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	3
Abstract	4
Alkusanat	5
1. Johdanto	9
2. Kaatopaikan tiivistysrakenteiden ja materiaalien tuotehyväksyntä	13
2.1 Tuotehyväksynnän osapuolet	15
2.2 Tuotehyväksyntähakemus	16
2.3 Tuotehyväksynnän arviointiperusteet	17
2.4 Tuotehyväksyntäpäätöksen sisältö	21
2.5 Tuotehyväksynnän voimassaolo	21
2.6 Kustannukset ja rahoitus	22
2.7 Materiaalista tuotehyväksyntäpäätökseen	22
3. Pohjaveden suojausrakenteiden suunnittelun lähtökohtia	26
3.1 Pohjavedensuojausrakenteiden vaatimuksia määräyksissä ja ohjeissa	26
3.1.1 Suomi	26
3.1.2 Saksa	29
3.1.3 Hollanti	35
3.1.4 Iso Britannia	39
3.1.5 Ruotsi	44
3.2 Geosynteettisiä materiaaleja koskeva EU- /CEN-tasolla meneillään oleva kehitystyö	46
3.2.1 Geosynteettisten tuotteiden CE-merkintä	46
3.2.2 Geotekstiilien harmonisoidut sovellusstandardit	47
3.3 Kaatopaikan suojausrakenteiden suunnittelu	52
4. Toimivuusvaatimukset suojausrakenteiden pohjana	55
4.1 Rakenne- ja rakenneosakohtaiset vaatimukset	55
4.1.1 Tiivisterakenteisiin kohdistuvat rasitukset	55
4.1.2 Kaatopaikan pintaeristys	62
4.1.3 Kaatopaikan pohjaeristys	72
4.2 Eristerakenteiden materiaalien ympäristökelpoisuus	78
4.3 Geosynteettisten tuotteiden hyväksymiskriteerit	80
4.4 Tiivistysmateriaalien testausmenetelmät	87

5.	Toimivuusvaatimukseen perustuva suojausrakenteiden suunnittelu.....	98
5.1	Suojausrakenteiden suunnittelun lähtökohdat ja toimivuusajattelu suojausrakenteiden mitoituksessa.....	98
5.2	Suojausrakenteiden läpäisevyys.....	100
5.2.1	Läpäisevyysmitoitus	100
5.2.1.1	Mineraaliaineksisen tiivisteiden läpäisevä vesimäärä	100
5.2.1.2	Geomembraanin ja yhdistelmärakenteen läpäisevä vesimäärä.....	101
5.2.1.3	Diffuusio.....	104
5.2.2	Pohjavesisuojausten mitoitushjelmat	115
5.2.2.1	HELP	118
5.2.2.2	LANDSIM.....	130
5.2.2.3	Riskinarviointi @RISK-ohjelmalla.....	133
5.2.3	Suojausrakenteiden vastaavuus	136
5.2.4	Käyttöikämitoitus	154
5.3	Materiaalien turmeltuminen.....	167
5.4	LandSim -ohjelman esimerkkilaskennat.....	186
6.	Toteutuneen rakenteen käyttöiän mittaaminen.....	212
6.1	Suojausrakenteiden toimivuuden mittaaminen.....	212
6.1.1	Lähtökohdat.....	212
6.1.2	Ympäristönsuojelujärjestelmien toimivuuden mittaamiselle asetetut tavoitteet	214
6.1.3	Kaatopaikkojen ympäristönsuojelujärjestelmien toimivuuden toteaminen	215
6.2	Eristysrakenteiden laadunvalvonta ja -varmistus.....	219
7.	Näkökohtia kaatopaikan suojausrakenteiden suunnittelusta ja mitoituksesta.....	224
7.1	Kaatopaikalle sijoitettavan jätteen laadun muuttuminen tulevaisuudessa	224
7.2	Pohjavedensuojausrakenteiden toimivuusvaatimusten ja mitoituskriteerien asettaminen	231
7.3	Tiivistysrakenteiden turmeltuminen ja taloudellisuus -BLACE.....	238
	Lähdeluettelo.....	245

1. Johdanto

Kaatopaikkojen pohjavesisuojausten määrä on ollut vakaassa kasvussa ja uusia suuria kaatopaikkoja tullaan varmasti vielä perustamaan ja jo aloitettuja laajentamaan lähivuosinakin. Jätehuollon tavoitteet lähivuosille merkitsevät lukuisten kaatopaikkojen lopettamista ja peittämistä asianmukaisesti. Rakenteissa käytettyjen tiivistysmateriaalien valikoima on viimeisen vuosikymmenen aikana lisääntynyt. Perinteisesti sellaisenaan käytettävien maamateriaalien ohella varsinkin pohjaeristysrakenteissa ovat vallitsevana bentoniittia sisältävät maaseokset. Näissä seoksissa runkoaineena voidaan käyttää paikankäältä saatavia, mutta yleisesti muualta kuljetettavia materiaaleja ja haluttu vedenläpäisevyys saadaan aikaan bentoniitin määrää säätämällä.

Mm. valtioneuvoston kaatopaikkoja koskevan päätöksen mukaan kaatopaikkojen pohjalla käytetään mineraalista tiivistyskerrosta, jos maaperän tiiviys (geologinen este) ei luonnostaan vastaa tiettyjä vaatimuksia, ja tavanomaisen jätteen ja ongelmajätteen kaatopaikalla tiivistyskerroksen päällä lisäksi keinotekoista eristettä. Tällä yhdistelmä-rakenteella saavutetaan nykytietämyksen mukaan suurempi varmuus ja parempi suoja liika-aineiden ympäristöön kulkeutumista vastaan, kuin periaatteessa vedenvirtauksen suhteen vastaavalla "yksikerroksisella" eristyskerroksella.

Pintaeristysrakenteissa käytettävien materiaalien kirjo on suurempi ja käyttöön on hyväksytty teollisuuden sivutuotteista tehtyjä tiivistysrakenteita ja myös erikoisturpeen käyttö on joissain tapauksissa hyväksytty. Myös pohjaveden suojaukseen tarkoitettuja geosynteettejä on tullut enemmän markkinoille. Sivutuotteiden käyttökelpoisuutta, samoin kuin sellaisenaan vedenläpäisevyydeltään heikkolaatuisten materiaalien käyttömahdollisuuksia parantaa sekoituksessa tarvittavien ja käytettävien laitteiden kehittyminen.

Eri puolilla Suomea kaatopaikoille hyväksytyt pintaeristysrakenteet poikkeavat toisistaan suuresti. Yleisesti käytetään mineraalitiivistystä tai sitä korvaavaa muusta mineraalista tehtyä tiivistystä ilman geosynteettistä kalvoa. Kohteen asettaman vaatimustason ollessa korkea tulee yleensä käyttää geosynteetin ja mineraalisen tiivistekerroksen sisältävää yhdistelmä-rakennetta.

Kaikkien eristysrakenteiden tulee täyttää tietyt vaatimukset. Eristysrakenteita tulee niiden toiminnan kannalta tarkastella kokonaisuutena ja ottaen huomioon koko tiivistysrakenteen toimintaikä. Kaikki kerrokset yhdessä ja kunnolla toteutettuna varmistavat, että eristysrakenteen toimii asianmukaisesti ja kaatopaikan alle ei pääse haitallisissa määrin ympäristölle haitallisia aineita. Päällimmäisenä tiivistysrakenteiden vaatimuksista on totuttu pitämään pientä vedenläpäisevyyttä. Tiivistävät rakenneosat joutuvat jo rakennusaikana tai viimeistään rakenteessa ollessaan alttiiksi monille rasituksille, jotka saattavat suurentaa tiivisteen vedenläpäisevyyttä. Riski geosynteettien läpäisevyyden kas-

vuun on yleensä suurimmillaan jo rakennusaikana (vaurioituminen). Mineraalisten tiivisteiden toiminnan puutteet puolestaan tulevat esille vasta yleensä rakennusajan jälkeen käyttöaikana. Tiivistyskerroksen hyvin pienen läpäisevyyden takia yhä korostetummin on tullut esille myös haitta-aineiden siirtyminen eristekerrosten läpi diffuusiolla. Myös eristyskerroksen haitta-aineita pidättävästä ominaisuudesta (adsorptio) puhutaan yhä enemmän.

Mineraaliainestiivisteiden pitkäaikaiskäyttäytymiseen merkittävästi vaikuttavia tekijöitä ovat mm. routimisesta (toistuvasta jäätymisestä ja sulamisesta) aiheutuva vedenläpäisevyyden kasvu, vesipitoisuuden muuttumisesta (kuivumisesta) aiheutuva halkeilu, tiivisteiden muodonmuutoksista aiheutuva halkeilu painuvissa kohteissa ja kemiallisten sekä myös biologisten rasitusten vaikutus läpäisevyyteen. Kemiallisia rasituksia tiivisterakenteille aiheutuu kaatopaikkojen suotovesistä. Sivutuotteilla läpäisevyyden kasvua saattaa aiheutua näiden ohella myös tiivistemateriaalien ainesosien liukenemisestä.

Vuonna 2003 käynnistettiin VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikassa Tekesin INFRA-tekniologiaohjelmaan sisältynyt projekti "Infrarakenteiden käyttöikäsuunnittelu" ja projektin yksi sovellusesimerkki oli "Pohjavedensuojusrakenteet". Pohjavedensuojusrakenteet-osaprojektin tavoitteena on ollut esittää kaatopaikan eristysrakenteissa käytettäville materiaaleille ja rakenteille tuotehyväksyntämenettely ja käyttöikämitoitus, jotka perustuvat suojausrakenteille asetettaviin toimivuustavoitteisiin ja -vaatimuksiin.

Yhtenäiset ja käyttökelpoisiksi todetut menettelytavat suojausrakenteissa käytettävien materiaalien tutkimisessa ja kelpoisuuden toteamisessa sekä rakenteiden käyttöiän huomioinnossa suunnittelussa, mitoittamisessa ja niiden toimivuuden seurannassa mm.

- helpottavat suojausrakenteiden toteutukseen liittyvien lupaprosessien käsittelyä suojarakenteiden hyväksyttävyyden osalta (tuloksista hyötyä rakennuttajille ja lupaviranomaisille),
- auttavat materiaalityöntekijöitä omien materiaaliensa tuotteistamisessa ja omassa liiketoiminnassaan (tuloksista hyötyä rakenteiden tekijöille ja materiaalityöntekijöille) ja
- parantavat suojausrakenteiden toimintavarmuutta (tuloksista hyötyä suojausrakenteiden "omistajille")

Tässä projektissa ei ole tutkittu materiaaleja eikä niiden ominaisuuksia eikä projektin tuloksena esitetä yksittäisten materiaalien käyttökelpoisuutta tai eri materiaaleista tehtyjen rakenteiden vastaavuutta. Sensijaan materiaalien ominaisuuksille ja mitoitusparametreille esitetään tutkimus- ja testausmenetelmät laboratoriossa. Myös rakenteiden toimivuuden mittaamiselle (seurantamittauksille) esitetään periaatteellisia menettelytapoja.

Projektin tuloksena pohjavedensuojusrakenteissa käytettävät materiaalit on mahdollista tutkia ja rakenteiden kelpoisuus todeta yhtenäisten hyväksymismenettelyiden mukaan. Materiaalit rakenteisiin valitaan käyttötarkoituksen ja toiminnallisten tavoitteiden mukaisesti. Menettelytavat on esitetty tässä raportissa. Verrattain laajasti on käsitelty eristysrakenteiden suunnitteluun ja mitoitukseen liittyviä asioita. Raportissa on esitetty esimerkin omaisesti kahden mitoituksen ja kaatopaikan mallintamiseen käyttökelpoisen tietokoneohjelman (HELP, LandSim) käyttömahdollisuuksia ja niiden tulostusta.

Suojusrakenteissa käytettävien teollisuuden sivutuotteiden ympäristökelpoisuuden arvioinnista ja tutkimisesta on tehty VTT Prosessit-yksikössä erillinen projekti (PIPO), jonka tuloksena on ohjeet ja menettelytavat sivutuotteiden hyväksymisestä eristysrakenteisiin ympäristölle haitattomuuden näkökulmasta /100/. Tässä raportissa on tarvittavissa kohdissa viitattu PIPO- projektin raporttiin.

Suojusrakenteiden toteuttamisen laatu ratkaisee pitkälti suojausrakenteiden todellisen tehokkuuden ja pitkäaikaistoimivuuden. Raportissa on suppeasti käsitelty myös laadunvarmistusta. Käsitelyn pohjana on käynnissä oleva kaatopaikkojen suojausrakenteiden laadunvalvonnan ohjeistamista käsittelevän projektin raporttiluonnos /47/.

Tämän projektin suojausrakenteita koskevien tutkimusten ja töiden lähtökohtana on kaatopaikkadirektiivi sekä Suomen ympäristökeskuksen julkaisemat Ympäristöoppaat Nro 36 ”Kaatopaikan tiivistysrakenteet” ja Nro 89 ”Kaatopaikkojen lopettamisopas”. Työssä on käytetty hyväksi ympäristögeotekniikka-ohjelmassa (1994-99) suoritettujen tähän aiheeseen liittyvien ja käytettävissä olleiden myöhemminkin tehtyjen tutkimusten tulokset.

Työssä on otettu huomioon myös eurooppalaisella tasolla meneillään oleva erityisesti geosyntetisten tuotteiden määräyksiä (mm. CE-merkinnät) koskeva muutos- ja kehitystyö.

Kaatopaikkojen suojausrakenteita, niiden materiaaleja ja toimintaa käsitteleviä kirjoituksia (lehtiartikkelit, konferenssikirjoitukset, tutkimusraportit) on maailmalta saatavissa hyvin runsaasti esim. internetistä. Tämän tutkimuksen yhteydessä ei ole ollut mahdollista eikä ole ollut tarkoituksenakaan tehdä kattavaa kirjallisuustutkimusta aiheesta. Tämän raportin laadinnassa on käytetty hyväksi valikoiden tuota runsasta kirjallista materiaalia.

Tämä julkaisu on tutkimusprojektin loppuraportti. Raportissa on esitetty kaatopaikan tiivistysrakenteiden tuotehyväksyntämenettelyn kuvaus. Raportista löytyy opastusta eristysrakenteiden suunnittelusta ja käyttöään tarkastelumahdollisuuksista. Esitetyt asiat ovat myös eri asteista taustatietoa rakenteiden ja materiaalien tuotehyväksynnälle ja

tuotehyväksynnässä sekä tuotekehittelyssä oleellisiksi arvioituille asioille. Raporttia ei ole tarkoitettu kaatopaikan eristysrakenteiden suunnitteluohjeeksi.

Raportissa esimerkkeinä esitetyt erilaisia materiaaleja ja rakenteita koskevat tulokset ja johtopäätökset eivät ole millään tavalla puolesta tai vastaan kannanottoja ko. materiaalien tai rakenteiden käyttökelpoisuudesta Suomessa tai keskinäisestä paremmuudesta.

Raportti on kirjoitettu siitä lähtökohdasta, että sen lukija omaa perustiedot ainakin maamekaniikasta ja yleensä maarakenteiden käyttäytymisestä ja kaatopaikan suojausrakenteiden toimivuudesta.

Eristysrakenteiden tuotehyväksyntämenettelyä on kuvattu tämän raportin lisäksi erillisessä raportissa "Kaatopaikan tiivistysrakenteiden - ja materiaalien tuotehyväksyntä. Menettelytapaopas vapaaehtoiselle tuotehyväksynnälle" /39/, joka sisältää vain menettelytavan kuvauksen.

2. Kaatopaikan tiivistysrakenteiden ja materiaalien tuotehyväksyntä

Materiaalien tai eristysrakenneteknisien ratkaisujen hyväksyminen kaatopaikan eristyskäyttöön edellyttää materiaalien teknisten ominaisuuksien ja rakenteiden teknisen toimivuuden arvioinnin lisäksi myös niiden toimivuuden arviointia ympäristön, työntekijöiden turvallisuuden ja terveyden, kaatopaikan uudelleen käytettävyyden, toteutettavuuden ja taloudellisuuden näkökulmasta. Kaikki nämä asiat tulee osoittaa, ennen kuin rakenne voidaan hyväksyä käyttöön.

Tuotehyväksyntämenettelyssä esitetään

- suositeltava menettelytapa, jota noudattaen voidaan päätellä, soveltuuko jokin materiaali tai rakenne kaatopaikan tiivistysrakenteen käyttöön (pohjarakenteessa, pintarakenteessa) itsenäisenä kerroksena tai yhdistelmärakenteen osana, niin että se täyttää pohjavedensuojausrakenteille asetetut määräykset (EY ja kansalliset) ja käyttötarkoituksenmukaiset toimivuusvaatimukset ja
- miten tiivistyskerroksessa käytettävän materiaalin tai rakenteen tuotehyväksyntä tapahtuu.

Tuotehyväksyntämenettelyssä käsitellään ensisijaisesti materiaalien ja rakenteiden teknistä hyväksyttävyyttä. Hyväksyntään kuuluu kuitenkin myös ympäristökelpoisuuden osoittaminen aina silloin, kun se on tarpeellista. Vaikkakaan toimivuuden arviointia työntekijöiden turvallisuuden ja terveyden tahi kaatopaikan uudelleen käytettävyyden näkökulmasta ei käsitellä, asiat on oltava hallinnassa jokaisessa yksittäisessä kaatopaikkahankkeessa. Myöskään rakenteiden taloudellisuutta ei käsitellä, vaikkakin se on tärkeä tekijä kaatopaikan suojausrakenteita valittaessa.

Tuotehyväksyntämenettely on tarkoitettu

- materiaalien tuottajille heidän kehittäessään uusia käyttötarkoituksia omille materiaaleilleen ensisijaisesti kaatopaikoilla käytettäväksi,
- jätealan yrityksille heidän arvioidessaan konsulttien / urakoitsijoiden esittämien uusien materiaalien ja rakenteiden luotettavuutta ja käyttökelpoisuutta,
- urakoitsijoille esim. KVR-urakoinnissa heidän hakiessa ympäristölupaa esittämälleen kaatopaikkarakenteelle,
- ympäristölupaviranomaisille heidän arvioidessaan ympäristölupahakemuksessa (kaatopaikkalupahakemuksessa) esitettyjen suojausrakenneteknisien ratkaisujen toimivuutta ja hyväksyttävyyttä ja
- tutkimus- ja testauslaitoksille niiden osallistuessa uusien materiaalien ja rakenteiden tuotekehitykseen.

Tässä yhteydessä esitetyt menettelytavat on laadittu vain kaatopaikan suojausrakenteiden näkökulmasta. Ne eivät välttämättä noudata yksityiskohdiltaan rakennuslalla (esim. talonrakennuksessa) käytössä olevia kansallisia tai eurooppalaisia tuotehyväksyntämenettelyitä /59/. Pyrkimyksenä on ollut, että tässä esitetyt menettelytavat eivät ole kuitenkaan ristiriitaisia olemassa olevien "lähialojen" menettelytapojen kanssa. Tuotehyväksyntämenettelyä laadittaessa on käytetty hyväksi mm. seuraavia lähteitä /13, 20, 91/.

Tuotteella tarkoitetaan tässä yhteydessä pohjavedeneristysrakenteen (pohjarakenne, pintarakenne) tiivistysosana käytettävää materiaalia tai rakennetta. Tuotehyväksyntä ei puutu muiden kerrosten materiaaleihin tai erillisiin rakennekerroksiin. Muut rakennekerroksen ovat kuitenkin mukana tarkasteltaessa koko suojausrakenteen toiminnallista hyväksyntää

Tässä esitetty kaatopaikkarakentamisen tiivisterakenteiden materiaalien tuotehyväksyntämenettely on laadittu mineraalimateriaalien käytön näkökulmasta. Luonnonmateriaalien (savi, siltti, moreeni) tutkimusmenettelyt on kuvattu Ympäristöoppaassa 36 "Kaatopaikan tiivistysrakenteet". Mineraalimateriaaleista poikkeavien materiaalien osalta menettelytapaoppaassa esitetyt menettelytavat ovat yksityiskohdissaan puutteellisia.

Geosynteettisiä tehdastuotteita (geomembraanit, bentoniittimatot, geotekstiilit) käsitellään suojausrakenteen / yhdistelmärakenteen "valmisosana" ja arvioitaessa yhdistelmärakenteiden toimivuutta. Geosynteettisille tuotteille on olemassa tai valmisteilla omat viralliset tai yleisesti käytössä olevat yleensä kansainvälisesti hyväksytyt tuotestandardit (CE-merkintä). Näissä tuotestandardeissa ei kuitenkaan esitetä raja-arvoja kaikkien ominaisuuksien osalta, kun materiaaleja käytetään tiivisterakenteena joko yksistään tai yhdistelmärakenteissa. Standardit eivät myöskään huomioi niitä kuormitusolosuhteita, joihin materiaalit saattavat altistua erilaisissa rakennekerroksissa ja erilaisissa kaatopaikoissa. Bentoniittimatton korvatussa tai täydentäessä tavallisesti mineraalitiivistettä, on tuotehyväksyntä kytkettävä suunniteltuun rakennekokonaisuuteen ja rasitusolosuhteisiin. Tässä yhteydessä on esitetty ja laadittu osin koekäyttöön hyväksymiskriteereitä ja raja-arvoja myös geosynteettisille tuotteille.

Tuotehyväksyntä voidaan myöntää vain sellaisille tuotteille, jotka täyttävät viranomaisvaatimukset myöskin suunnitelman mukaisissa rasitusolosuhteissa koko suunnitellun käyttöjakson ajan. Tiedot tai arviot vaurioitumismekanismeista ja mittaukset ominaisuuksien säilymisestä muodostavat perustan tuotehyväksynnälle.

Ympäristölainsäädännön mukaan pohjavedeneristysrakenteiden hyväksyntä on viimekädessä kaatopaikkaluvan myöntäjän asia. Vaikka materiaalille tai rakenteelle on myönnetty tässä esitetyn menettelyn mukainen tuotehyväksyntä, niin se ei kaikissa yksittäistä-

pauksissa takaa ratkaisujen käyttömahdollisuutta edes tuotehyväksynnän osoittamassa laajuudessa.

2.1 Tuotehyväksynnän osapuolet

Pohjavedensuojusrakenteiden ja materiaalien tuotehyväksyntämenettelyn osapuolet ovat

- tuotehyväksynnän hakija,
- puolueeton asiantuntijaryhmä (tuotehyväksyntäryhmä) ja
- asiantuntijalaitos.

Tuotehyväksynnän hakijana voi olla kuka tahansa alan toimijoista (materiaalivalmistaja /-tuottaja/-myyjä, urakoitsija, jätehuoltolaitos, jne.).

Puolueeton asiantuntijaryhmä

Puolueeton asiantuntijaryhmä (puh.joht. + 4-5 jäsentä) koostuu pohjavedensuojusrakenteista monipuolisesti hyvin perillä olevista henkilöistä, jotka eivät välittömästi edusta mitään tuotehyväksyntää hakevaa toimijaa tai sen intressiä. Tärkeää on, että henkilöt ovat puolueettomasti toimivia asiantuntijoita omalla kaatopaikkojen rakentamiseen ja / tai suojaukseen liittyvällä alallaan ja nauttivat eri tahojen luottamusta.

Ryhmän puheenjohtajan nimeää SYKE ja sen muut jäsenet ovat kutsuttuja riippumattomia kaatopaikka-/ materiaaliasiantuntijoita. Asiantuntijaryhmä voi käyttää apunaan asian käsittelyssä myös ryhmän ulkopuolisia asiantuntijoita, mutta nämä eivät osallistu asiantuntijaryhmän päätöksentekoon. Asiantuntijaryhmä voi kuulla asian käsittelyssä kutsuttuna myös tuotehyväksynnän hakijaa tai hänen nimeämänsä edustajaa.

Asiantuntijaryhmän asettaa ja sen jäsenet nimittää SYKE ja ryhmä toimii SYKE:n alaisuudessa. Ehdotuksen asiantuntijaryhmän jäsenistä tekee toiminnan käynnistyessä "Pohjavedensuojusrakenteiden käyttöikämitoitus ja tuotehyväksyntä" -projektin valvontaryhmä. Myöhemmin ryhmän jäsenet nimeää SYKE. Jäsenyys kestää 3 vuotta ja se voidaan tarvittaessa uudistaa.

Asiantuntijaryhmän jäsenten työstä aiheutuvat matkakustannukset ja muut välittömät kulut korvataan.

Asiantuntijaryhmällä tulee olla tekninen sihteeri (kaatopaikkarakenteisiin perehtynyt henkilö). Tekninen sihteeri toimii asiantuntijaryhmän kokouksissa "esittelijänä".

Asiantuntijaryhmä (ja tekninen sihteeri mukana) laatii itselleen "työjärjestyksen" / työskentelytavan kuvauksen, jonka ryhmän nimeäjä hyväksyy ennen kuin ryhmä aloittaa varsinaisen tuotehyväksyntätönsä.

Asiantuntijaryhmän työskentely perustuu siihen, että tuotehyväksyntäkäsittelyn päätökset ovat yksimielisiä.

Asiantuntijalaitos tekee sellaiset tuotehyväksyntään kuuluvat tehtävät, jotka sille tuotehyväksyntämenettelyssä on osoitettu tai asiantuntijaryhmä osoittaa. Tällaisia tehtäviä voisivat olla esim. rakenteen läpäisevyysominaisuuksien tarkastelu ja pitkäaikaistoimivuuden arviointi. Tällaisen asiantuntijalaitoksen on oltava puolueeton. Asiantuntijalaitokseksi ehdotetaan sellaista asiantuntijaorganisaatiota, jolla on "yleisesti tunnustettu pätevyys". Jäteasetuksen mukaan jätealan asiantuntijalaitoksina toimivat SYKE ja VTT.

2.2 Tuotehyväksyntähakemus

Hakija toimittaa tuotehyväksyntähakemuksen SYKE:lle ja 6 kappaleena asiantuntijaryhmälle (sen sihteerille) Hakemuksessa on oltava seuraavat tuotetta koskevat tiedot yhteenvedonomaaisesti.

1. Tuotteen nimi (tuotemerkki)
2. Tuotehyväksynnän hakija ja yhteystiedot
3. Tuotekuvaus
4. Tuotteen käyttötarkoitus (johon hyväksyntää haetaan)
5. Tuotekohtaiset laatuvaatimukset (vähimmäis-/enimmäisarvot, vaihtelurajat)
6. Tuotetiedot / tuotteen koostumus (esitettävä tunnettaviksi vaaditut ominaisuudet)
7. Tuotteen suunnittelutiedot
 - Mitoitusparametrit (käyttötarkoituksen mukaan)
 - Pitkäaikaikäkäyttäytyminen
 - Ympäristökelpoisuus
 - Referenssi kohteet ja käyttökokemukset (jos olemassa)
8. Yleinen työselitys

Hakemuksen liitteenä on oltava (kahtena kappaleena) kaikki materiaalitutkimusten tulokset, parametrit (mitattujen lisäksi myös arvioidut, jolloin myös arviointiperusteet esitettävä), laskentojen tulokset ja käyttötarkoitusta kuvaavat rakennekuvat, työselitys ym. anomuksen liitteeksi vaaditut tai sitä täydentävät asiakirjat. Liitteet ja asiakirjat on luetteloitava luvussa "Tuotehyväksynnän arviointiperusteet. Tiivistämateriaaleista tuotehyväksynnässä esitettävät ominaisuudet (taulukot)" esitetyllä tavalla.

Asiantuntijaryhmä laatii tarkemmat ohjeet tuotehyväksyntähakemuksen sisällöstä ja muodoista.

Kun tuotehyväksyntähakemus tulee SYKE:lle, se diarioidaan ja tieto anomuksen sisäänotosta julkaistaan SYKE:n internet sivuilla.

Tuotehyväksyntäpäätös pyritään antamaan kuukauden kuluessa siitä, kun tuotehyväksyntäasiakirjat on toimitettu hyväksyttävällä tavalla asiantuntijaryhmälle. Toiminnan aloitusvaiheessa aika saattaa olla huomattavasti pidempi toiminnan käynnistämiseen liittyvien seikkojen johdosta. Tarvittaessa hakijalle annetaan välipäätös, jossa esim. määritellään ne lisätutkimukset, jotka tarvitaan lopullisen päätöksen (tuotehyväksyntäasiakirjan) tekemiseksi.

Hyväksytystä tuotteesta laadittava hyväksyntäasiakirja (hyväksyntätodistus) on julkinen. Tuotehyväksyntäpäätöksistä pidetään luettelo SYKE:n internet sivuilla.

2.3 Tuotehyväksynnän arviointiperusteet

Tuotteiden yleiset vaatimukset eristysrakenteissa

Tuotteiden on oltava sopivia eristysrakenteeseen, joka kokonaisuutena ja erillisiltä osiltaan sopii tarkoitukseensa (yhteensopivuus muiden rakenneosien / materiaalien kanssa). Tuotteelle asetettavat vaatimukset riippuvat tuotteen käyttötarkoituksesta ja käyttökohteesta (pohjarakenne, pintarakenne). Asetettujen vaatimusten on täytyttävä tuotteen koko käyttöajan ajan. Jos rakenteiden käyttöikä ei ole yleisesti määritelty, se tulisi määritellä kaatopaikan ympäristöluvassa.

Kaatopaikan eristysrakenteet on suunniteltava siten, että ne täyttävät asetetut vaatimukset pintaveden, pohjaveden, maaperän ja ilman saastumisen sekä kaikkien niistä johtuvien ihmisten terveydelle ja luonnolle aiheutuvien vaarojen ehkäisemiseksi tai vähentämiseksi niin pitkälle kuin mahdollista. Kaatopaikan eristysrakenteet on myös rakennettava siten, että kaatopaikasta ei aiheudu pitkänkään ajan kuluessa vakavaa vaaraa ympäristölle eikä haittaa ihmisten terveydelle.

Tiivistyskerrosten rakenteiden / materiaalien arviointiperusta

Tiivistekerroksessa käytettävien materiaalien ominaisuusarvoja ja rakenteiden toimivuutta arvioidaan suhteessa Suomessa voimassa oleviin viranomaismääräyksissä esitettyihin tai viranomaisten muuten joko yleisesti tai kaatopaikkakohtaisesti asettamiin arvoihin ja toimivuusvaatimuksiin.

Niiltä osin, kun virallisia arvoja ei ole esitetty, arvioinnissa käytetään ulkomailla käytössä olevia Suomen olosuhteisiin "hyväksi havaittuja" kriteereitä (esim. asiantuntijaryhmän käyttökelpoisiksi arvioimia tai toteamia).

Jos ulkomaisiakaan Suomeen soveltuvia kriteereitä ei ole käytettävissä, asiantuntijaryhmä tekee arvioinnin omaan asiantuntemukseensa pohjautuen (paras mahdollinen käytettävissä oleva tekniikka/tieto).

Olellaiset tiivistyskerroksen toimivuusvaatimukset:

- tiiviys (konvektio, diffuusio, rakennekohtainen)
- kestävyys työnaikaisia tai kaatopaikan käytön aikaisia mekaanisia rasituksia vastaan
- pitkäaikainen kestävyys fysikaalisia, kemiallisia ja biologisia rasituksia vastaan
- kerroksen pitkäaikainen toimivuus, ominaisuuksien pysyvyys
- rakenteellinen varmuus
- yhteensopivuus ja toimivuus muiden rakenneosien kanssa
- rakennettavuus / valmistettavuus
- laadunvalvontatoimenpiteiden toteutettavuus ja luotettavuus.

Tiivistysrakenteen rakenneyksityiskohdat (läpiviennit, liitynnät, saumat yms.) näyttelevät ratkaisevaa osaa tiivistyskerroksen toimivuudessa ja vedenläpäisevyydessä. Näiden yksityiskohtien ratkaisutavat esitetään työselityksessä.

Tiivistemateriaaleista tuotehyväksynnässä esitettävät ominaisuudet ja tiedot

Tuotteesta on annettava tuotehyväksyntäanomuksessa seuraavat tiedot (käsitellään ja annetaan materiaaliakohtaisesti tarvittavilta osin, luku 4.4).

Geosynteettisille tuotteille (geomembraanit, bentoniittimatot, geotekstiilit) olemassa olevia ja osin tässä projektissa laadittuja epävirallisia ja koekäyttöön tarkoitettuja hyväksymiskriteereitä ja arviointiperusteita on käsitelty luvussa 4.3.

Ympäristökelpoisuuden arviointiperusteet ja hyväksymiskriteereitä on esitetty suppeasti luvussa 4.2 ja laajemmin raportissa /100/.

Liiteasiakirjojen numerointi	Ominaisuus, josta on esitettävä – tutkimustulos (raportti / dokumentti) tai – ominaisuus (x) on arvioitava (perusteet esitettävä)	Dokumentti, jossa omi- naisuus tai asia on käsi- teltty (tarkka viittaus tuo- tehyväksyntäänomuksen liitteeseen)	Asiantuntijaryhmän arvio ja kommentteja
1	Rakeisuus (saviprosentti)		
2	Tiivistyvyys		
3	Konsistenssirajat (plastisuus)		
4	Vesipitoisuus (vaikutus tiiviyteen)		
5	Orgaanisen aineksen määrä (runkoaineesta)		
6	Kiintotiheys		
7	Huokoisuus / huokoskokojakautuma / tyhjätila		
8	Ominaispinta-ala		
9	Paisumiskyky (paisumisindeksi)		
10	Erilaisten savimineraalien määrä		
11	Liukeneva suolamäärä		
12	pH		
13	Karbonaattipitoisuus		
14	Ioninvaihtokapasiteetti / adsorptiokyky		
15	Orgaanisen hiilen määrä		
16	Kemiallinen kestävyys (suotovedet)		
17	Biohajoavuus (aerobinen ja anaerobinen)		
18	Vedenpidätyskyky		
19	Tilavuuskutistuma (halkeiluriskit)		
20	Routivuus		
21	Terminen rasiskestävyys		
22	Lämpöliikkeet ja niiden kestävyys		
23	Muodonmuutoskyvyn varmistaminen		
24	Kokoonpuristuvuus / ödometrikoe		
25	Lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet		
26	Vedenläpäisevyys.		
27	x) Itsekorjautuvuus - kuivumisesta		
28	x) Lujittuminen / haurastuminen		
29	Ympäristökelpoisuus		

Tiivistyskerroksesta tutkittavat tai arvioitavat ominaisuudet / seikat

	Pohjarakenteen tiivistyskerros / yhdistelmä rakenne Tutkittu / arvioitava seikka	tehty / dokumentti	asiantuntijaryhmän arviointi/kommenteja
B1	tiiviyys (vedenläpäisevyys) (annettava rakennepaksaus)		
B2	haitta-aineiden diffuusio/adsorptio tiivistysrakenteessa		
B3	kestävyys fysikaalisia / termisiä rasituksia vastaan		
B4	kestävyys kemiallisia rasituksia vastaan		
B5	kestävyys biologisia rasituksia vastaan		
B6	pitkäaikainen pysyvyys tärkeiden ominaisuuksien muuttumatta haitallisesti		
B7	yhteensopivuus muiden rakenneosien kanssa		
B8	yhteensopivuus saastuttavien kemikaalien suhteen		
B9	rakennettavuus / valmistettavuus (työselitys)		

	Pintarakenteen tiivistyskerros / yhdistelmä rakenne Tutkittu / arvioitava seikka	tehty / dokumentti	asiantuntijaryhmän arviointi/kommenteja
S1	tiiviyys (vedenläpäisevyys) (annettava rakennepaksaus)		
S2	tiiviyys (kaasunläpäisevyys) (annettava rakennepaksaus)		
S3	kestävyys fysikaalisia / termisiä rasituksia vastaan		
S4	kestävyys kemiallisia rasituksia vastaan		
S5	kestävyys biologisia rasituksia vastaan		
S6	pitkäaikainen pysyvyys tärkeiden ominaisuuksien muuttumatta haitallisesti		
S7	rakenteellinen varmuus (stabiliteetti luiskissa)		
S8	yhteensopivuus muiden rakenneosien kanssa		
S9	rakennettavuus / valmistettavuus (työselitys)		
S10	korjattavuus		

Eristysrakenteiden hyväksyttävyyttä arvioidaan myös seuraavien eristysrakenteen yleisten toimivuusominaisuuksien perusteella kaatopaikan koko toiminnan (aktiivivaihe ja passiivivaihe) aikana (kestoikä tarkastelu /-mitoitus koko kaatopaikka huomioonottaen)

	Tiivistyskerros / yhdistelmä rakenne kaatopaikassa Tutkittu / arvioitava seikka	tehty / do- kumentti	asiantuntijaryhmän arviointi/kommenteja
B/S1	rakenteiden hydraulinen toimivuus (esim. HELP-ohjelmalla tarkasteltuna)		
B/S2	kaatopaikan alla ja ympäristössä ilmenevät / esiintyvät haitta-ainepitoisuuksien muutokset (esim. LandSim -ohjelmalla tarkasteltuna)		

2.4 Tuotehyväksyntäpäätöksen sisältö

Tuotehyväksyntäpäätös sisältää seuraavat tiedot:

1. Tuotteen nimi (tuotemerkki)
2. Tuotehyväksynnän hakija ja yhteystiedot
3. Tuotekuvaus (ei "reseptitietoja")
4. Tuotteen käyttötarkoitus (johon hyväksyntää haetaan)
5. Viittaukset tuotetta koskeviin viranomais määräyksiin, standardeihin ja ohjeisiin
6. Tuotekohtaiset laatuvaatimukset (vähimmäis-/enimmäisarvot, vaihtelurajat)
7. Tuotetiedot / tuotteen koostumus (esitettävä tunnettaviksi vaaditut ominaisuudet)
8. Tuotteen suunnittelutiedot
 - Mitoitusparametrit (käyttötarkoituksen mukaan)
 - Pitkäaikaiskäyttäytyminen
 - Ympäristökelpoisuus
 - Referenssikohteet ja käyttökokemukset (hakija esittää, jos olemassa)
9. Käyttökokemusten ja palautteen raportointi rakennettavista kohteista
10. Hyväksynnän laajuus / rajoitukset
11. Hyväksynnän voimassaolo (voimassaoloaika, voimassaoloehdot).

Kohtien 3, 4, 6, 7, ja 8 tiedot on ilmentävä tai on oltava asiantuntijaryhmän pääteltävissä anomuksen liitteenä olevista asiakirjoista.

Hyväksyntähakemukseen tulee liittää materiaalin / rakenteen (yhdistelmä rakenteessa kaikkien rakenneosien) käyttöä ja rakentamista koskeva yleinen työselitys, jonka tulee sisältää myös tuotteen laadunvalvonta (hankekohtaiset ennakkotestit ja työnaikainen laadunvalvonta).

Hyväksyntäpäätökseen liitetään ohjeet / menettelytapa (kohta 9), jota noudatetaan hyväksytyin materiaalin tai rakenteen seurantatiedon ja käyttökokemusten kokoamiseksi ja toimittamiseksi asiantuntijaryhmälle. Seurantatieto rakennuskohteista kootaan kohteissa tehtävän riippumattoman laadunvalvonnan yhteydessä.

Tuotehyväksyntäpäätös /-asiakirja on julkinen. Tuotehyväksyntäpäätöksistä pidetään luetteloja ja ne julkaistaan sähköisessä muodossa (pdf) SYKE:n internet-sivuilla.

2.5 Tuotehyväksynnän voimassaolo

Tuotehyväksyntäpäätös on voimassa 5 vuotta tai tästä poikkeava voimassaoloaika määritellään päätöksessä. Tuotehyväksynnän haltijalta edellytetään, että hän toimittaa asiantuntijaryhmän pyynnöstä raportin tuotteen käytöstä kaatopaikkarakenteissa (raportointiaika mainitaan päätöksessä ja päätöksessä mainitaan myös raportoitavat asiat). Mi-

käli päätöksen kohteena olevaa materiaalia tai rakennetta on käytetty voimassaoloaikana eikä materiaalista tai rakenteesta ole tullut esille mitään sen käyttöä rajoittavia tekijöitä, voidaan päätös uusina edelleen 5 -vuotisjaksoissa. Tuotehyväksyntä edellyttää laadunvalvontaa, jolla osoitetaan tuotekoostumuksen säilyneen koko toimintajakson ajan hyväksyntäpäätöstä vastaavana.

Asiantuntijaryhmä voi peruuttaa tuotteen hyväksynnän, jos tuotteen kestävyys myöhemmin toteutuskohteista saatavan palautetiedon perusteella tai muuten todetaan tuotehyväksynnän yhteydessä arvioitua heikommaksi tai jos peruuttamiseen havaitaan olevan aiheutta tuotteen valmistuksen tai laadunvalvonnan epäkohtien johdosta.

2.6 Kustannukset ja rahoitus

Tuotehyväksynnän hakija vastaa tuotehyväksyntäpäätöksen käsittelystä ja antamiseen liittyvistä toimenpiteistä aiheutuvista kustannuksista.

Asiantuntijaryhmän tekniselle sihteerille hakemuksen käsittelystä aiheutuvista töistä annetaan hakijalle kustannusarvio ennen työhön ryhtymistä.

Tuotehyväksyntäpäätöksestä, joka sisältää asiantuntijaryhmän käsittelyn ja päätöksen, SYKE perii hyväksymismaksun (hinnat määritellään toiminnan käynnistyessä)

Tuotehyväksyntäasiakirjojen käsittely asiantuntijaryhmässä ja <u>tuotehyväksyntäpäätös</u>		xxxx €
Uusintakäsittely asiantuntijaryhmässä esim. täydentävien kokeiden jälkeen (<u>täydennys tuotehyväksyntäpäätökseen</u>)		xxx €

Hakija vastaa kaikkien tuotehyväksyntäpäätöksessä mahdollisesti esitettävien kokeiden ja testausten kustannuksista ja toimii kokeiden tilaajana toteutusorganisaatiolta.

2.7 Materiaalista tuotehyväksyntäpäätökseen

Kun materiaalista kehitetään tuotetta tai rakennetta, niin käytännössä kehitystyö on iteratiivinen prosessi. Myös hyväksymisprosessi saattaa käytännössä olla iteratiivinen. Alla on esitetty vain menettelyn periaatteet ja pääkohdat. Käytännössä järjestyskin saattaa käytännössä olla esitetystä poikkeava.

1. Hakija valitsee rakenteen, jossa on ajateltu käyttää ko. materiaalia (pohjaeristys / pintaeristys). Yleiset periaatekuvat VNp861/97:n mukaisista suojausrakenteista eri kerroksineen ja toimivuusvaatimuksia rakennekerroksille ja rakenteisiin kohdistuvia rasiuksia on esitetty tämän raportin luvussa 2.1. Materiaalien perusominaisuuksia, jotka yleensä pitää tutkia ensiksi on esitetty luvussa 3.4. Tarvittaessa tarkennetaan materiaalin käyttötarkoitusta: mitä erityisiä etuja materiaalin käytöstä luullaan / toivotaan olevan valitussa rakenteessa / rakennekerroksessa. Materiaalille asetettavia vaatimuksia / suosituksia on esitetty luvussa 3.1.

Jotta tutkimus- ja testaustulokset voidaan arvioida ja hyväksyä tuotehyväksyntäkäsittelyä silmälläpitäen riittävän luotettaviksi, on testit oltava tehty yleisesti nimenomaan ko. tarkoitukseen hyväksytyillä menetelmillä ja luotettavaksi osoittautuneen tai osoitetun testauslaitoksen /-laboratorion toimesta. Tavoitteena on, että "luotettaviksi osoittautuneista testauspaikoista" pidetään julkista luetteloa (esim. asiantuntijaryhmän arvioimana).

Hakijan on suositeltavaa olla yhteydessä asiantuntijaryhmän sihteeriin mahdollisimman aikaisessa vaiheessa ja pyytää arviota tutkimusten riittävydestä tuotehyväksyntäkäsittelyä silmälläpitäen. Tällä tavalla hakija voi kohdistaa ominaisuuksien mahdollista täydennystestausta tuotehyväksyntämenettelyn kannalta tarpeellisiin testeihin ennen tuotehyväksyntämenettelyn "virallista" aloittamista ja asiantuntijaryhmän käsittelyä.

2. Tutkitaan (hakijan toimesta) materiaalin erityisominaisuudet (aiempia tutkimuksia täydennetään tarvittaessa), jotka materiaalista pitää olla tiedossa ko. rakennekerrokseen ja ko. erityistarkoitukseen käytettäessä. Määritetään ja joidenkin ominaisuuksien osalta arvioidaan (perustelut esitettävä) hakijan toimesta materiaalin ominaisuuksien pitkäaikaiskäyttäytyminen ja turmeltumisominaisuudet sekä kriittiset ominaisuudet kestoikämitoitusta / -tarkastelua /-arviointia varten, mm. parametrien muuttuminen ajan mukana, vauriomallit. Luettelo ominaisuuksista ja testausmenetelmistä / tutkimustavoista on luvussa 4.3 (geosyntetit) ja luvussa 4.4.

Erityisominaisuudet pitää tutkia hyväksytyjä testausmenetelmiä käyttäen ja luotettavaksi osoittautuneessa tai osoitetussa testauslaitoksessa /-laboratoriossa.

Pitkäaikaiskäyttäytymistä koskevat tarkastelut on suositeltavaa teettää asiantuntijalaitoksessa, jotta tulosten luotettavuus olisi hyvä ja kehittyisi alalle yhtenäiset menettelyt.

3. Hakijan toimesta selvitetään / määritetään sellaiset rakenteen tekemiseen liittyvät tai materiaalin käyttöön muulla tavalla vaikuttavat tekijät, jotka voivat osoittautua käytön rajoitteeksi tai esteeksi. Laaditaan materiaalin käytön yleinen työselitys (Työselitystä täydennetään aina toteutettavan kohteen suunnittelun yhteydessä).

Yleisenkin työselityksen laatiminen edellyttää yleensä jonkin laajuista koerakentamista / rakennekokeita, ts. myös käytännön kokemusta materiaalin käytöstä ja käyttäytymisestä rakennettaessa.

4. Lasketaan tiivistekerroksen läpäisevyysominaisuudet (suotovesivirtaus sekä pohjettä pintaeristeessä tarvittaessa yhdistelmä rakenteena, pohjaeristeessä lisäksi haitta-aineiden vapautuminen suotovedestä, luku 5.2.1) "standarditapauksessa" (= vakiovedenpaine, vakio suotoveden kloridipitoisuus + muut hakijan ja tarkastuslaitoksen yhdessä päättämät / valikoimat "haitta-aineet").

Tämä osa on suositeltavaa teettää asiantuntijalaitoksessa, jotta tulosten luotettavuus olisi hyvä ja kehittyisi yhtenäiset menettelyt.

<u>Vaihe 1</u>	<u>Vaihe 2</u>
<p>Tuotekehitysprosessi voidaan "keskeyttää" tähän vaiheeseen ja hakea tuotehyväksyntää kohtien 1-4 tulosten perusteella materiaalille (osana yhdistelmä rakennetta) tiivistyskerroksessa käytettäväksi > siirtyminen kohtaan 7.</p> <p>Materiaalin käyttö todellisessa rakenteessa vaatii aina käyttökohdekohtaisen eristerakenteen suunnittelun / mitoituksen todellisilla rasituksilla.</p>	<p>Mikäli halutaan tuotehyväksyntää rakenteelle tai varmistua rakenteen toimivuudesta kaatopaikassa, niin jatketaan eteenpäin kohdat 5-6. Tarkastelu voidaan tehdä "mallikaatopaikallekin", jos sellainen on määritettävissä.</p>
<p>Tulosten perusteella asiantuntijaryhmä arvioi tarkasteltavan tiivistekerroksen toimivuutta suhteessa muihin materiaaleihin, jos niistäkin vastaavat laskelmat on tehty (luku 5.2.3)</p>	<p>Tarkastelut kuuluvat olennaisesti tuotehyväksyntään, vaikka ne olisikin sittemmin tehtävä aina jokaisessa hankkeessa suunniteltavan kaatopaikan parametreilla ja olosuhteilla.</p>

5. Tutkitaan ja / tai lasketaan rakenteen hydraulinen toimivuus kaatopaikassa (vesitase-malli, esim. HELP, luku 5.2.2.1) ja arvioidaan, täyttääkö se toimivuusvaatimukset, myös pitkäaikainen toimivuus huomioidaan (käyttöikämitoitus, luku 5.2.4). Vertailu suoritetaan "normitettuihin" arvoihin / vaatimuksiin tai viranomaisen tapauskohtaisesti asettamiin vaatimuksiin.

Tämä osa suositellaan tehtäväksi asiantuntijalaitoksessa hakijan toimeksiannosta, jotta taattaisiin eri materiaalien / tuotteiden tasapuolinen ja puolueeton käsittely ja jotta kehittyisi yhtenäiset menettelyt.

6. Tutkitaan / lasketaan haitta-ainepitoisuudet kaatopaikan alla ja ympäristössä (esim. LandSim, luvut 5.2.2.2 ja 5.4) ja arvioidaan, miten rakenne toimii kaatopaikassa, myös pitkäaikainen toimivuus huomioidaan (käyttöikämitoitus). Vertailu suoritetaan "normitettuihin" arvoihin / vaatimuksiin tai viranomaisen tapauskohtaisesti asettamiin vaatimuksiin.

Tämä osa suositellaan tehtäväksi asiantuntijalaitoksessa hakijan toimeksiannosta, jotta taattaisiin eri materiaalien / tuotteiden tasapuolinen ja puolueeton käsittely ja jotta kehittyisi yhtenäiset menettelyt.

7. Hakija toimittaa **tuotehyväksyntähakemuksen** asiantuntijaryhmälle (sen sihteerille). Hakemuksen liitteenä on oltava kaikki materiaalitutkimusten tulokset, parametrit (mitattujen lisäksi myös arvioitua, arviointiperusteet esitettävä), laskentojen tulokset ja käyttötarkoitusta kuvaavat rakennekuvat, työselitys ym. anomuksen liitteeksi vaaditut asiakirjat

Asiantuntijaryhmä antaa joko lopullisen tuotehyväksyntäasiakirjan (tahi hylkäämispäätöksen) tai esittää täydentäviä kokeita ja / tai kohdassa 8 mainittujen rakennekokeiden / koerakentamisen toteuttamista (ehdollinen hyväksyminen koekäyttöön).

8. Jos materiaali tai rakenne ei täytä sille asettuja vaatimuksia (asiantuntijaryhmä on todennut ja yksilöinyt puutteet tuotehyväksyntäkäsittelyn lausunnossaan tai välipäätöksessään), hakija selvittää materiaalin jalostamisen tai rakenteen muuttamisen niin, että materiaali tai rakenne täyttää suunnitellulle eristysrakenteelle asetet vaatimukset. Jos materiaalin tai rakenteen käyttöön hyväksyminen edellyttää kentällä suoritettavaa koerakentamista tai laboratorio-olosuhteissa suoritettavia rakennekokeita, toteuttaa hakija tarvittavat kokeet.

Tuotehyväksynnän hakija laatii koerakentamis- tai rakennekoeohjelman. Täydentävät tulokset toimitetaan asiantuntijaryhmälle

Kaatopaikkahanke:

Tuotehyväksynnän hakija toimittaa tuotehyväksyntäasiakirjan mukaisen palautetiedon rakenteista ja niiden toimivuudesta asiantuntijaryhmälle.

- Palautetieto rakennusaikana kootaan rakentamisen laadunvalvonnan yhteydessä (luku 6.2).
- Palautetieto rakenteiden toimivuudesta kaatopaikan aktiivivaiheen (ja passiivivaiheen) aikana kootaan kaatopaikan haltijan toimesta (tai sen kokoamisesta sovitaan hankekohtaisesti)

3. Pohjaveden suojausrakenteiden suunnittelun lähtökohtia

3.1 Pohjavedensuojausrakenteiden vaatimuksia määräyksissä ja ohjeissa

Tässä luvussa on aluksi kuvattu suppeasti kaatopaikkojen suojausrakenteiden toteutusta ohjaavia määräyksiä Suomessa. Luvussa on käsitelty määräyksiä, ohjeita ja käytäntöä myös eräissä muissa maissa. Esitys ei pyri olemaan tyhjentävä esitys edes ko. maiden käytännöstä, vaan vain esimerkkejä siitä, miten EY:n kaatopaikkadirektiiviä sovelletaan muutamissa Euroopan maissa.

3.1.1 Suomi

EY-direktiivissä (asiakirjavihko N:o 97/0085(SYN), 7028/99, 1.4.1999) todetaan:

- Maaperän, pohjaveden ja pintaveden suojelemiseksi on käytettävä geologisen esteen ja pohjavuorauksen yhdistelmää toiminnallisen / aktiivin vaiheen aikana ja geologisen esteen ja eristevuorauksen yhdistelmää passiivisen vaiheen aikana / käytöstä poistamisen jälkeen.

Kaatopaikan pohjaeristyksestä EY-direktiivissä todetaan (*kursivoidut tekstit direktiivin englanninkielisestä versiosta*):

- Kaatopaikan perustuksen ja sivujen tulee koostua mineraalikerroksesta (*mineral layer*), joka täyttää läpäisevyys- ja paksuusvaatimukset siten, että se vastaa maaperän, pohjaveden ja pintaveden suojelun kannalta (*sufficient attenuation capacity to prevent the potential risk*) yhteisvaikutuksiltaan vähintään seuraavia vaatimuksia (*equivalent to the one resulting*):
 - vaarallisen jätteen kaatopaikka: $k \leq 1.0 \times 10^{-9}$ m/s; paksuus ≥ 5 m
 - tavanomaisen jätteen kaatopaikka: $k \leq 1.0 \times 10^{-9}$ m/s; paksuus ≥ 1 m
 - pysyvän jätteen kaatopaikka: $k \leq 1.0 \times 10^{-7}$ m/s; paksuus ≥ 1 m
- Jos geologinen este (*geological barrier*) ei luonnostaan vastaa edellä mainittuja vaatimuksia, sitä voidaan täydentää rakentamalla ja vahvistaa (*artificially and reinforced*) muilla vastaavan suojan antavilla keinoilla. Rakennetun geologisen esteen (*an artificially established geological barrier / geological barrier established by artificial means*) on oltava vähintään 0,5 m paksu.

Asiakirjan VNp 861/97, muutos VNp 1049/99 18.11.1999 liitteessä 1, todetaan:

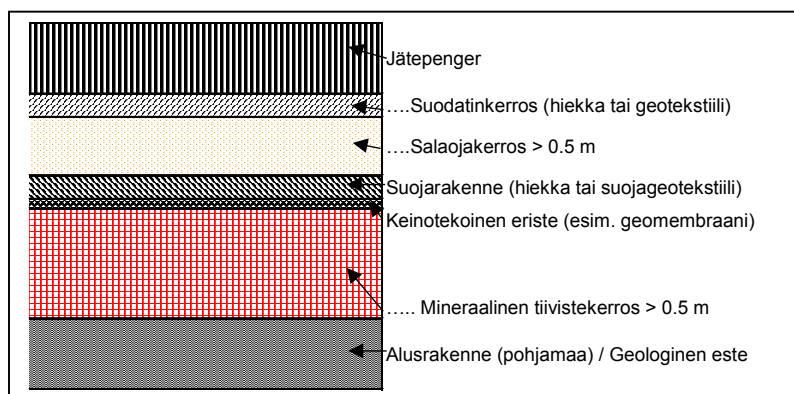
Kaatopaikan maaperälle (kivennäismaa tai kallio) asetetaan seuraavat vaatimukset

- kaatopaikan maaperän on oltava kantava ja kaatopaikan maaperän on täytettävä sellaiset veden kyllästämän maan vedenläpäisevyys- (K) ja paksuusvaatimukset, että niiden yhdistetty vaikutus vastaa seuraavilla kaatopaikoilla vähintään seuraavia vaatimuksia:
 - ongelmajätteen kaatopaikka: $K \leq 1.0 \times 10^{-9}$ m/s; paksuus ≥ 5 m
 - tavanomaisen jätteen kaatopaikka: $K \leq 1.0 \times 10^{-9}$ m/s; paksuus ≥ 1 m
 - pysyvän jätteen kaatopaikka: $K \leq 1.0 \times 10^{-7}$ m/s; paksuus ≥ 1 m

Jos kaatopaikan maaperän tiiveys ei luonnostaan vastaa edellä tarkoitettuja vaatimuksia, on sitä parannettava rakennetulla tiivistyskerroksella vastaavan suojatason saavuttamiseksi. Rakennetun tiivistyskerroksen paksuuden on oltava tavanomaisen jätteen ja pysyvän jätteen kaatopaikoilla vähintään 0.5 m ja ongelmajätteen kaatopaikalla vähintään 1.0 m.

Jos käytetään keinotekoisia estettä, on varmistettava, että sen alla oleva geologinen kerros on kaatopaikan muodon huomioonottaen riittävän vakaa ehkäisemään pohjan painumisen, joka voi vahingoittaa estettä.

Kuvassa 3.1 on Ympäristöoppaan 36 mukainen esimerkki kaatopaikan pohjan rakennekerroksista.



Kuva 3.1. Kaatopaikan pohjan rakennekerrokset (paksuudet ei mittakaavassa) /40/. Mineraalinen tiivistekerros rakennetaan, jos geologinen este ei ole riittävä estämään ympäristön pilaantumista.

Kaatopaikan pintaeristyksestä kaatopaikkadirektiivin 1999/31 (EY, 26.4.1999) liitteessä 1 todetaan:

- Geologisen esteen lisäksi on lisättävä suotoveden keruu- ja tiivistysjärjestelmä seuraavien periaatteiden mukaisesti, jotta varmistetaan, että suotoveden kerääntyminen kaatopaikan pohjalle on mahdollisimman vähäistä.

Pintavuorausta (pintaeristystä) koskevat seuraavat suositukset (VNp 861):

	KAATOPAIKKALUOKKA	
	TAVANOMAINEN JÄTE	ONGELMAJÄTE
Kaasunkeräyskerros	vaaditaan	tarpeen mukaan
Keinotekoinen tiivistysvuoraus	ei vaadita	vaaditaan
Läpäisemätön mineraalikerros	vaaditaan	vaaditaan
Kuivatuskerros ≥ 0.5 m	vaaditaan	vaaditaan
Pintamaakerros ≥ 0.1 m	vaaditaan	vaaditaan

On toteutettava kaatopaikan ominaisuuksiin ja sääolosuhteisiin liittyvät tarvittavat toimenpiteet (mm.)

- jätemassaan imeytyvän sadannan hallitsemiseksi
- pintaveden ja / tai pohjaveden virtauksen ehkäisemiseksi kaatopaikalle sijoitettuun jätteeseen.

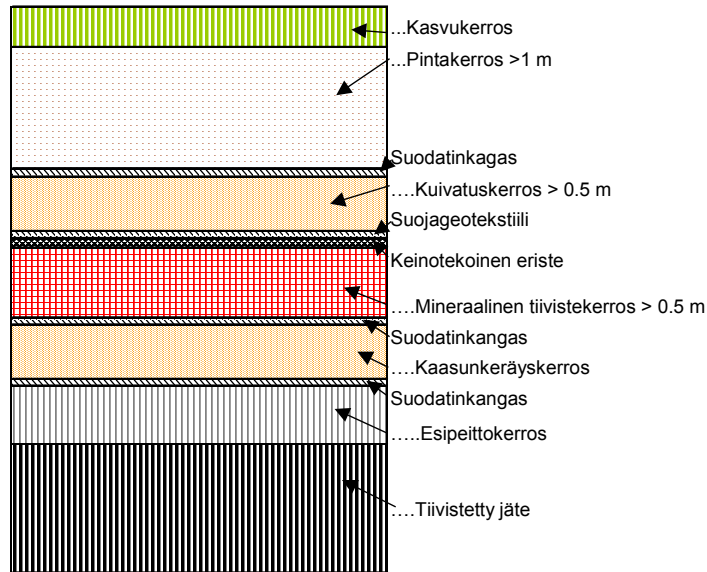
On toteutettava tarvittavat toimenpiteet kaatopaikka-kaasujen kertymisen ja purkautumisen valvomiseksi.

Ympäristöoppaan 89 /41/ mukaan tiivistekerroksen vedenläpäisevyysvaatimus määräytyy rakenteen tehokkuuden mukaisesti. Mikäli veden kerääntyminen kaatopaikkaan halutaan estää eikä pohjassa ole toimivaa kuivatuskerrosta, on pintarakenteen vedenläpäisevyyden oltava pienempi tai enintään yhtä suuri kuin pohjarakenteen vedenläpäisevyys.

Toinen tapa määrittää pintarakenteen vedenläpäisevyysvaatimus on määrittää kaatopaikkapenkereeseen päästettävän veden määrä ja mitoittaa rakenne ko. vaatimusta vastaavaksi, esim.

- jos suotautuvan veden määräksi annetaan (sallitaan) 5 % sadannasta, niin $k < 1 \times 10^{-9}$ m/s tai
- jos suotautuvan veden määräksi sallitaan 20-25 % sadannasta, niin $k < 1 \times 10^{-8}$ m/s on riittävä.

Kuvassa 3.2 on Ympäristöoppaan 89 mukainen esimerkki kaatopaikan pintaeristykseen rakennekerroksista.



Kuva 3.2. Esimerkki kaatopaikan pintaeristyksen rakennekerroksista (paksuudet ei mit-takaavassa) /41/.

3.1.2 Saksa

Vaikuttaa siltä, että kaatopaikan suojausrakenteita koskevat Saksan määräykset 1990-luvun alkupuolelta (TA Abfall 1991/2/ ja TA Siedlungsabfall 1993/80/) ovat olleet merkittävästi vaikuttamassa nykyisten EY:n kaatopaikkadirektiivien sisältöön. Joiltain osin Saksassa voimassa olevat vaatimukset näyttävät olevan tiukempiakin kuin tämänhetkiset EU:n määräykset. Saksassa toimii "LAGA-Arbeitsgruppe" (Ländesarbeitsgemeinschaft Abfall), joka antaa hakemuksesta puolueettoman asiantuntijalausunnan materiaalien soveltuvuudesta kaatopaikkaeristykseen. Lausunnon pohjana on työryhmälle toimitettu tutkimusmateriaali, mukaan lukien käyttökokemukset ja referenssirakenteet. Elin voi myös pyytää ennen lausunnon antamista lisäselvityksiä. Myös BAM (Bundesanstalt für materialforschung und prüfung) antaa materiaaleista ja rakenteista puolueettomia virallisia lausuntoja ("BAM Gutachten"). Lähtökohtana ovat kansalliset määräykset: TA Siedlungsabfall ja TA Abfall.

Pintaeristysten arviointi tapahtuu ensisijaisesti seuraavien (materiaali)ominaisuuksien perusteella:

- tiiviys
- mekaaninen kestävyys
- kestävyys fysikaalisia, kemiallisia ja biologisia rasituksia vastaan
- pitkäaikainen toimivuus
- sijaintipaikkakohtaisten virheiden vaikutukset
- materiaalivaihtelun ja rakentamisen poikkeamien (rakennusvirheiden) vaikutukset
- rakennettavuus / valmistettavuus
- laadunvalvontatoimenpiteet.

Asiantuntijapiireissä käydään parhaillaan keskustelua erityisesti pintaeristysten vaihtoehtoisista ekologisesti käyttökelpoisista ja taloudellisesti edullisista rakenneratkaisuista ja niiden hyväksymiskriteereistä, esim. /69/ ja /42/. Kaatopaikoilla, joille on sijoitettu erityyppisiä jätteitä (yhdyskuntajäte, vaarallinen jäte), fysikaaliset, kemialliset ja mikrobiologiset prosessit ovat enemmän tai vähemmän kontrolloimattomia. Suotovedet ja kaatopaikkakaasut (ja niiden haittavaikutukset) pitää minimoida käyttämällä tarkoituksenmukaisia teknologisia keinoja. Perustana jokaisen maapäällisen kaatopaikan suunnittelulle, rakentamiselle ja kaatopaikan operoinnille on yhdistelmäsuojaus-konsepti (multibarrier concept), mikä tarjoaa joukon varmuusnäkökohtia. Kaatopaikan suunnittelun yleisiä lähtökohtia ovat:

- Kaatopaikan pitää sijaita hydrologisesti ja geologisesti sopivalla paikalla (suuri absorptiokapasiteetti, pieni vedenläpäisevyyskerroin, turvallisen suuri etäisyys akviferista).
- Kaatopaikan pohjaeristykseen pitää ehkäistä suotovirtaus huomattavan pitkäksi aikaa. Eristykseen tehokkuus pitää olla taattu erityisesti muutamien ensimmäisten vuosikymmenien ajan rakentamisesta, koska tänä aikana ennalta arvaamattomia ja usein suuria saastekertymiä voidaan odottaa suotovedessä.
- Jätteen tulee pysyä enemmän tai vähemmän pysyvässä (immobile) tilassa kaatopaikkapenkereessä. Aineosat, jotka reagoidessaan toistensa kanssa muodostavat uhkan ympäristölle, pitää poistaa jätteen lajittelulla. Kaatopaikan / kaatopaikkapenkereen pitää olla itsessään sekä myös ympäristön suhteen mekaanisesti stabiili, ts. jäte tulee mm. tiivistää.
- Sadeveden tai muista lähteistä peräisin olevan veden imeytyminen kaatopaikkapenkereeseen pitää minimoida pintaeristyksellä.
- Suljettua kaatopaikkaa pitää monitoroida myöhemmän käytön yhteydessä, jotta voidaan havaita pintaeristykseen mahdollinen rikkoutuminen.
- Kaatopaikan pitkäaikaista käyttäytymistä pitää seurata (monitoroida) ja tulokset sekä käyttäytyminen pitää dokumentoida.

Yleisiä vaatimuksia

- Tiivistysrakenteisiin kohdistuvien kuormitusten aiheuttamat kerrosten muodonmuutokset ja painumat eivät saa vaikuttaa haitallisesti eristysrakenteiden toimivuuteen. Muodonmuutokset on laskettava tai arvioitava.
- Läpiviennit pitää tehdä siten, että niitä voidaan tarkkailla ja tarvittaessa korjata.
- Keinotekoisien eristykseen soveltuvuus eristysrakenteeseen tulee todeta hyväksyty toimijan / asiantuntijatahon toimesta (esim. BAM, Instituts für Bautechnik).

- Esitetyistä kaatopaikkaeristyksen vaatimuksista ("normirakenteesta") voidaan poiketa, kun voidaan esittää, että vaihtoehtoinen ratkaisu on vaatimuksia vastaava. Vastaavuuden toteamiseksi on tutkittava "määräyksissä TA Siedlungsabfall esitetyt ominaisuudet".

Pohjaeristys /TA Siedlungsabfall//80/, Kaatopaikkaluokka II

Pohjaeristyksen tulee sisältää seuraavat, välittömästi toistensa päälle tulevat rakennekerrokset (kaatopaikkaluokka II vastaa tavanomaisen jätteen kaatopaikkaa, luokka I on pylvään jätteen kaatopaikka):

- Tiivistyskerros pitää tehdä yhdistelmärakenteena mineraalisesta kerroksesta, jonka päälle tehdään keinotekoinen tiivistyskerros (kaatopaikkaluokassa I ei tarvita). Mineraalisen kerroksen paksuuden pitää olla vähintään 0,75 m (0,5 m Kaatopaikkaluokka I). Vedenläpäisevyyskerroksen pitää olla enintään 5×10^{-10} m/s ($i=30$, rakennetusta kerroksesta otetusta häiriintymättömästä näytteestä määritetty arvo). Keinotekoisien eristeiden paksuuden pitää olla vähintään 2,5 mm. Keinotekoinen eriste pitää suojata tarkoituksenmukaisesti kuormitusten aiheuttamia vaurioita vastaan.
 - Tiivistekerroksen yläpinta pitää muotoilla "katon muotoiseksi". Tiivistyskerroksen kokoonpuristumisenkin jälkeen kerroksen yläpinnan kaltevuuden pitää olla poikkisuunnassa vähintään 3 % ja pituussuunnassa vähintään 1 %.
- Tiivistysrakenne voidaan toteuttaa myös muunlaisella vastaavalla rakenteella (kun se on todettu vastaavaksi).
- Kuivatuskerroksen paksuuden pitää olla vähintään 0,3 m ja sen vedenläpäisevyyden pitää olla vähintään 1×10^{-3} m/s (pitää säilyttää tämä arvo myös pitkäaikaisesti).
 - Kuivatuskerros pitää varustaa huuhdeltavilla ja tarkkailun mahdollistavilla salaojaputkistoilla ja tarkastuskaivoilla.

Pintaeristys /TA Siedlungsabfall/ /80/, Kaatopaikkaluokka II

Pintaeristyksen eri rakenneosia koskevat seuraavat vaatimukset:

- Tiivistekerroksen pohjaksi kaatopaikkapenkereen pinnalle pitää tehdä rakeisesta materiaalista (nicht bindigem Material) homogeeninen vähintään 0,5 m paksu tiivistetty kerros. Jos kaatopaikkakaasut otetaan talteen, eikä tämä voi tapahtua em. kerroksesta, pitää tämän kerroksen päälle tehdä vähintään 0,3 m paksu kaasunkeräyskerros. Kalsiumkarbonaattipitoisuus (CaCO_3) kaasunkeräyskerroksen materiaalissa ei saa ylittää 10 paino-%.
- Tiivistysrakenne pitää tehdä yhdistelmätiivisteenä. Mineraalisen tiivisteen paksuuden pitää olla vähintään 0,5 m ja sen vedenläpäisevyyskerroin saa olla enintään

5×10^{-9} m/s ($i=30$). Keinotekoisien eristeiden (ei tarvita kaatopaikkaluokassa I) paksuuden pitää olla vähintään 2,5 mm. Tiivistysrakenteissa suositellaan käytettäväksi uusiomateriaaleja (Recyclaten), joiden soveltuvuus pitää olla selvitetty.

- Kaatopaikkapenkereen kokoonpuristumisenkin jälkeen tiivistyskerroksen yläpinnan kaltevuuden pitää olla vähintään 5 %.
- Tiivistysrakenteita voidaan toteuttaa myös muunlaisella vastaavalla rakenteella (kun se on todettu vastaavaksi).
- Kuivatuskerroksen paksuuden pitää olla vähintään 0,3 m ja sen vedenläpäisevyyden pitää olla vähintään 1×10^{-3} m/s (pitää säilyttää tämä arvo myös pitkäaikaisesti).
- Kasvukerroksen paksuuden tulee olla vähintään 1 m ja sen pitää olla kasvien kasvu- alustaksi sopiva. Kerros pitää rakentaa siten, että se suojaa tiivistyskerrosta juuriston tunkeutumiselta ja roudan vaikutuksilta.

Eristyskerrosten materiaalien hankinnassa ja rakentamisessa tulee ottaa huomioon seuraavat seikat /80/:

Mineraalimateriaalit (mm.):

- Mineraalimateriaalin rakeisuus on valittava siten, että hienoaineksen poistuminen materiaalista ei ole mahdollista (suffoosiokestävyys) ja halkeamakerkyys on mahdollisimman pieni. Hienon aineksen ($<0,002$ mm) määrän tulee olla vähintään 20 paino-%.
- Savimineraalien määrän ja laadun tulee olla kussakin yksittäistapauksessa tarpeellisen adsorptiokyvyn mukainen (vähintään 10 paino-%)
- Soraa ja kiviä, puuta, juuria tai muita epäpuhtauksia sisältäviä materiaaleja ei saa käyttää. Orgaanisen aineksen määrä ei saa ylittää 5 paino-%. Karbonaattipitoisuus ei saa ylittää 15 tilavuus-%.
- Mineraalimateriaalin tulee rakennetussa tilassa "seurata plastisesti" laskettuja muodonmuutoksia.
- Mineraalimateriaalin tulee rakennetussa tilassa olla homogeenista ja tiivistämisvesipitoisuuden pitää olla sama / tasainen.

Kuivatusrakenteen materiaalit (mm.):

- Kuivatuskerroksen ja suotovesiputkistojen pysyvyyteen (käyttöikänsä) vaikuttavat kemiallis-fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet on valittava siten, että suotoveden kemiallis-fysikaaliset ominaisuudet ja kaatopaikkapenkereen mekaaninen kuormitus eivät vaikuta haitallisesti rakenteen kuivatustehon säilyvyyteen. Kuivatuskerroksen materiaalin kalsiumkarbonaattipitoisuus ei saa olla suurempi kuin 20 paino-%.

- Kuivatuskerroksessa tulee käyttää pestyä materiaalia. Luonnonmateriaali (pyöreäreakeinen) on suositeltavaa.
- Kuivatuskerroksen materiaalin rakeisuuden on oltava rajoissa 16/32 mm. Tästä poikkeavan materiaalin rakeisuuden pitää taata 16/32 mm vastaava huokostila. Tämä toteutuu esim. 8/16 mm rakeisuudella.
- Suodatinputkistojen muodonmuutoskestävyys pitää osoittaa.

Viitteen /54/ mukaan pintaeristyksen yhdistelmäsuojauksen eri rakenneosien pitää säilyttää toimivuutensa vähintään useita vuosikymmeniä. Vuosikymmenien, jopa vuosisatojen kuluessa tapahtuvat vaikutukset, kuten kuivuminen, kastuminen, routa, painumat ja juuristotunkeumat pitää ottaa huomioon.

Vaihtoehtoisia eristysratkaisuja pitää voida vertailla keskenään, ts. vastaavuus on pysyttävä arvioimaan ja määrittämään. Raportissa /54/ vertaillaan "TA Siedlungsabfall - säännösten mukaisia pintaeristeen tiivisteratkaisuja" (= yhdistelmätiiviste: mineraalitiiviste + geomembraani HDPE / kaatopaikkaluokka II ja mineraalitiiviste / kaatopaikkaluokka I) vaihtoehtoisiiin ratkaisuihin seuraavien kriteerien pohjalta

- tiiveys (Dichtigkeit)
- paikkakohtaiset vaatimukset (Standortanforderungen)
- pysyvyys (Beständigkeit, über 100 Jahren)
- rakenteellinen varmuus (Systemsicherheit)
- rakennettavuus (Herstellbarkeit)
- kustannukset (Kosten).

Tarkastellut pintaeristyksen vaihtoehtoiset ratkaisut ovat (näistä on viitteessä /54/ esitetty vertailutaulukot):

- (pelkkä) keinotekoinen eriste
- "Kontrollierbare Oberflächenabdichtungen" / perustuu keinotekoisien eristeen käyttöön
- kapillaarisulku
- bentoniittimatto
- asfalttibetonitiiviste

Eri rakenteita on tarkasteltu sekä HELP- että BOWAHALD-simulointiohjelmilla /12/. Seuraavassa on esimerkkinä kaatopaikkaluokan II yhdistelmätiivisteen ("standardiratkaisu / perusratkaisu") arviointitaulukko, taulukko 3.1.

Taulukko 3.1. Kaatopaikkaluokan II yhdistelmätiivisteiden ("standardiratkaisu / perusratkaisu") arviointitaulukko /12/

Tiiveys (Dichtigkeit)	
Kaasutiiveys	– tiivis – tiivistävä elementti keinotekoinen eriste (2,5 mm HPDE)
Vesitiiveys	– tiivis – tiivistävä elementti keinotekoinen eriste (2,5 mm HPDE)
Sijaintipaikkakohtaiset vaatimukset (Standortanforderungen)	
Vakavuus	– rajoitettu keinotekoisien eristeen kontaktipinnan leikkauslujuuden takia – mineraalitiiviste vs. keinotekoinen eriste - suojakerros – kaltevuudella $\geq 1:4$ on noudatettava vakavuudenmäärittämisohjeita – kaltevuudella $\leq 1:3$ ovat vakavuuden parantamistoimenpiteet tarpeellisia
Painumansieto	– pieni mineraalitiivisteiden muodonmuutoskestävyyden takia – erityisen herkkä "teräville" painumaeroille – "kuopat" syvyys / halkaisija $> 1:7$ asettavat "kuormitusrajan" – (kaarevuussäde < 200 m, www.uvm.baden-wuerttemberg.de/alfaweb)
Tilantarve	– suuri etenkin kaatopaikan reunoilla
Jälkikäyttö	– rajoitettua – mahdollista vain pienillä pintakuormilla ja kuormituseroilla, rakentamiskäytössä tiivistyskerrosten puhkaisemisen ehkäiseminen tulee taata
Pysyvyys (Beständigkeit)	
Kuivuminen	– ei kuivumista (niin kauan kuin keinotekoinen eriste ehjä)
Juuristotunkeumat	– ei juuristotunkeumia (niin kauan kuin keinotekoinen eriste ehjä)
Mekaaniset vaikutukset	– vähäinen vaurioitumisherkkyys teräväsärmäisille rakeille, suositellaan suojageotekstiilin käyttöä
Vanheneminen	– keinotekoisien eristeen käyttöikä noin 100 v (BAM) – mineraalitiivisteiden käyttöikä riippuu vesipitoisuudesta, halkeamien muodostuminen mahdollista
Rapautuminen	– melko rapautumiskestävä päälle tulevien kerrosten rakentamisen jälkeen ja keinotekoisien eristeen konvektiovaikutuksen johdosta – keinotekoinen eriste UV-stabiili nokipigmentoinnin johdosta – mineraalitiivisteissä voi esiintyä lämpötilajohdannaista veden kulkeutumista
Rakenteellinen varmuus (Systemsicherheit)	
Korvautuvuus ? (Redundanz)	– kahden tiivistysrakenteen yhdistelmä varmistaa korvautuvuuden (kun mineraalieristeen kuivumisvaara on eliminoitu)
Seurattavuus	– vain rakennetun seurantajärjestelmän avulla
Korjattavuus	– vain rakenteiden esille kaivamisella
Heikkouskohdat	– keinotekoinen eriste: hitsausseamat, puhkeamat / läpäisyt – mineraalitiiviste: kuivumisriski (pienennettävissä materiaalivalinnalla tai muilla tiivistysselementeillä)
Rakennettavuus (Herstellbarkeit)	
Rakentamistekniikka	– keinotekoinen eriste: asennus BAM-ohjeiden mukaan (henkilöstö: hitsauskoulutus DVS-ohjeen 2213 mukaan) – mineraalitiiviste: rakentaminen kahtena kerroksena (2x 25 cm) – suojakerrosten käyttö BAM:n mukaan
Materiaalivaatimukset	– keinotekoinen eriste: BAM-ohjeet – mineraalitiiviste: materiaalin tulee olla hyvin tiivistettävää vaaditun k-arvon saavuttamiseksi
Säärapautumisalttius	– vahvasti ilmastovaikutuksille altis – keinotekoinen eriste: rakentaminen ei mahdollista $< 5^{\circ}\text{C}$:ssa, sateella, auringonpaisteessa, lätkäköityneelle pohjalle – mineraalitiiviste: rakentaminen ei mahdollista $< -2^{\circ}\text{C}$:ssa ja rankalla sateella, auringonpahteen ja kastumisen haitat voidaan ehkäistä peittämisellä,
Laadunvarmistus	– oma- ja riippumaton laadunvalvontasuunnitelma: TASi 10.4.1.2 mukaan, laaduntoteaminen /kokeet: TA Abfall liite E, keinotekoisien eristeen omavalvonta: DVS ohje 2225
Materiaalin saanti / hankinta	– keinotekoinen eriste: useita tarjoajia – mineraalitiiviste: suuret hankintakustannukset, jos ei ole saatavissa läheltä
Vastaavuus (Gleichwertigkeit)	– standardiratkaisu / perusratkaisu, vastaavuutta ei tarvitse osoittaa
Kustannukset (Kosten)	– kokonaiskustannukset (rakentaminen mukana) 130-150 DM/m ² (1968) – kustannuserittely liitteessä (ei esitetä tässä yhteydessä)
Referenssit (Referenzprojekte)	– (projektiluetteloa ei esitetä tässä yhteydessä)

Saksassa kaatopaikka peitetään usein ensin "väliaikaisella" pintarakenteella. Lopullinen pintarakenne rakennetaan noin 5-7 vuoden kuluttua kaatopaikan toiminnan lopettamisesta (sulkemisesta). Tällöin on pääosa painumista tapahtunut. Yleensä myös kaatopaikan suotovesien määrää ja laatua (sekä toimintaa yleensäkin) seurataan ja tulokset vaikuttavat lopullisen eristeen rakentamisajankohtaan. Pintaeristyksen tulee vastata rakentamisen ajankohdan teknistä tasoa ja vaihtoehtoiset ratkaisut ovat luovallisia. (Välikäisenkin pintaeristyksen tekemisessä tulee ottaa huomioon kaatopaikkakaasujen hallinta.)

Kaatopaikan suojausrakenteen toimivuuden määräävät tekijät on esitetty taulukossa 3.2 /42/.

Taulukko 3.2. Kaatopaikan suojausrakenteen toimivuuteen vaikuttavat tekijät /42/.

Leistungen	Eigenschaften	Einwirkungen
Dichtigkeit	Konvektionsverhalten <ul style="list-style-type: none"> Durchtrittszeit Durchflussrate Diffusionsverhalten <ul style="list-style-type: none"> Induktionszeit Permeationsrate Sorptionsverhalten <ul style="list-style-type: none"> Adsorption 	<ul style="list-style-type: none"> Hydraulischer Gradient Schadstoff Temperatur Schadstoff Konzentrationsgradient Temperatur Schadstoff Konzentration der Lösung
Mechanische Widerstandsfähigkeit	Verhalten bei mechanischer Belastung <ul style="list-style-type: none"> Standsicherheit Verformungssicherheit Hydraulische Widerstandsfähigkeit 	<u>Mechanische Einwirkungen</u> <ul style="list-style-type: none"> Verformungen aus Setzungen Kräfte aus Verformungen Kräfte aus Neigung und Auflast Verkehrslasten Wasserspannungen Sonderlasten <u>Hydraulische Einwirkungen</u> <ul style="list-style-type: none"> Stromungskräfte
Beständigkeit	Beständigkeit gegenüber chemischen Einwirkungen Beständigkeit gegenüber physikalischen Einwirkungen Beständigkeit gegenüber biologischen Einwirkungen	<u>Chemische Einwirkungen</u> <ul style="list-style-type: none"> Sickerwasser Aggressive flüssige Medien Gase <u>Physikalische Einwirkungen</u> <ul style="list-style-type: none"> Temperaturen Feuchtigkeit UV-Strahlung <u>Biologische Einwirkungen</u> <ul style="list-style-type: none"> Mikroorganismen, Pilze Pflanzen Tiere
Herstellbarkeit	<ul style="list-style-type: none"> Einbaubarkeit Mechanische Empfindlichkeit Witterungsempfindlichkeit Eigenschaften der Materialien im eingebauten Zustand Anschlüsse und Durchdringungen Prüfbarkeit Reparierbarkeit 	<ul style="list-style-type: none"> Einbaubeanspruchungen Witterung

3.1.3 Hollanti

(Hollantilaista käytäntöä ei ole tässä yhteydessä yksityiskohdissaan selvitetty, koska oleellinen ja yksityiskohtainen aineisto on vain hollanninkielistä, eikä sitä ole tämän työn yhteydessä ryhdytty kääntämään.)

Hollannin kaatopaikkamääräykset vastaavat kokonaisuutena periaatteessa EU:n kaatopaikkadirektiivin vaatimuksia.

"Concerning the interpretation and implementation of the EC Council Directive of Landfilling, we consider, in the Dutch Directive of landfilling specified, a groundwater-capillary-barrier of a layer of coarse sand (minimal thickness of 0,3 meter) as an essential part of the geological barrier.

Our geological barrier consist of combination lining of a mineral layer and a polyethylene liner in close contact with each other (German art), supported by a groundwater-capillary-barrier. Please bear in mind that in the major part of Holland the average high groundwater level is near the landfillbottom and for that reason a distance of at least 0,5 meter between average high groundwater level and bottom of waste is prescribed. Larger distances would be better but where to get the soil from, not to mention the costs. With common sand-bentonite, thickness at least 0,5 meter (considering the k-values) as prescribed in our existing landfilling Degree and Guidelines (1993), our geological barrier has a minimal thickness of 0,8 meter." /Fax Risto Kuusiniemelle, SYKE, 15.1.1999, lähettäjä Pieter Ruardi, Netherlands/. Hollannissa on käytössä puolueeton tiivistysmateriaalien testaus- ja hyväksymismenettely, joka on suunniteltu heidän kansallisia tarpeitaan vastaavaksi.

Jätteen on sijaettava vähintään 0,7 m:n päässä pohjavedestä. Geologisista olosuhteista johtuen geologinen este korvataan pohjaeristeellä. Membraanin ja mineraalisen eristeen toimintaikänä (vaatimuksena) pidetään 100 vuotta. Rakenteita tulee seurata ja tarvittaessa kunnostaa (pintarakenteita) ja pohjaveden laatua on seurattava koko ajan. Jälkitarkkailua on jatkettava periaatteessa ikuisesti /63/, /64/, /80 /.

Kaatopaikkamääräystä alempitaisoisissa ohjeissa tarkastellaan mineraalisten eristeiden pitkäaikaiskestävyyttä. Vaihtoehtoisia suojausmateriaaleja ovat hiekkabentoniitti, bentoniittimatto sekä Trisoplast™. Rakenteiden tulisi kestää epätasaista painumaa, kuivumista sekä kationinvaihtoa. Kationinvaihdon oletetaan aiheutuvan perustuskerroksesta diffuusiolla kulkeutuvista kationeista. Mikäli perustuskerroksen SAR -arvo (= Sodium Activity Ratio) on riittävän suuri, ei kationinvaihtoa tapahdu /22/. Suojusrakenteen tulisi sietää vähintään 5 %:n venymää ilman, että se vaikuttaa vedenläpäisevyyteen, mutta testaus kuitenkin suoritetaan 10 %:n venymällä. Kuivumisen vaikutusta arvioidaan materiaalien vedenpidätyskyvyn avulla.

Pohjaeristyksen referenssirakenne (ylhäältä alaspäin):

- jätepengeri
- kuivatuskerros (hiekkaa / soraa), jossa suotoveden keräysputkisto; kerroksen yläpinnan tulee olla vähintään 0,7 m ylimmän pohjavedenpinnan (koko kaatopaikan käyttöikä) yläpuolella
- geomembraani, HDPE, paksuus 2 mm
- hiekkabentoniittikerros (tai savi), paksuus 0,5 m ja $k < 2 \times 10^{-10}$ m/s; laskennallinen läpäisevä vesimäärä saa olla 20 mm/v
- kuivatuskerros, jossa tarkistusputkisto alimman pohjavedenpinnan (kaatopaikan käyttöikä) alapuolella.

Pinnassa käytetään myös yhdistelmärakennetta. Hiekkabentoniittirakenteen vertailupaksuus on 0,25 m. Laskennallisen vastaavuuden vertailuarvot ovat 0,5 m:n vesipaine ja 0,5 m:n imupaine. Sallittu läpäisevä laskennallinen vesimäärä 20 mm/200 d. Lopullista pintarakennetta ei saa rakentaa, ennen kuin kaatopaikan painumat ovat pääosin tapahtuneet. Pintarakenteen toimintaiästä ja sille asetettavasta toimintaikävaatimuksesta käydään parhaillaan keskustelua.

Mineraalisen pohjaeristeen laskennallinen mitoitus tehdään siten, että päällä oletetaan olevan 0,5 m:n vesipaine ja alla 0,3 m:n imupaine. Membraanin ja mineraalisen eristeen toimintaikä pidetään 100 vuotta,

Tämä rakenne perustuu ympäristölle aiheutuvalla minimikuormitukselle, joka aiheutuu suotovesien virtauksesta (advektio, konvektio) tai molekyylien siirtymisestä (diffuusio) rakenteen läpi, kun kaatopaikka on sijoitettu hydrogeologisesti soveltuvaan paikkaan hollantilaisissa olosuhteissa (referenssipaiikka). Referenssipaiikalle on ominaista:

- pohjan painuminen on enintään 0,25 m
- pohjaveden virtausnopeus pysty- ja vaakasuuntaan on pieni (low well situation)
- tarkistusputkien käyttö pohjaveden mahdollisen saastumisen tarkkailemiseksi pitää olla mahdollista
- ensimmäinen (ylin) läpäisevä kerros (aquifer) on ohuempi kuin 10 m.

Yleisesti kaatopaikkojen tiivisterakenteiden mitoituksesta ja materiaalien vaatimuksista voidaan todeta /81/:

- Ennen vuotta 1993 pintaeristyksenä oli käytössä 25 cm mineraalitiiviste (hiekkabentoniitti). Vuoden 1993 jälkeen on hyväksytty vain yhdistelmä rakenne (mineraalitiiviste + HDPE-kalvo).

- Hollannissa käytetään tällä hetkellä pintaeristysrakenteissa mineraalieristeenä savea, hiekkabentoniittia, bentoniittimattoja, hydrostab'ia (vesilasipohjainen tuote) ja Tri-soplast'ia.
- Hiekkabentoniitista tehdyn suojausrakenteen käyttöiäksi arvioidaan (materiaalin pysyvyys) 25 - 50 vuotta.
- Pelkkä k-arvo (vedenläpäisevyys) ei ole enää riittävä materiaalin ominaisuus arvioitaessa sen käyttökelpoisuutta mineraalieristeenä. Materiaalin on oltava mm. kemiallisesti pysyvää ja lämpötilastabiilia, mekaanisesti ja biologisesti kestävää ja lisäksi materiaalin / rakenteen kationinvaihto-ominaisuudet pitää olla hallinnassa ottaen huomioon eristeen alla oleva materiaali + reaktiot (lisäksi hallittava työstettävyyys, varmistettava myrkyttömyys, jne.)
- Eristysrakenteiden materiaaleille ja toiminnalle asettaa nykyisin lisävaatimuksia mm. se, että pintaeristyksessä mineraalitiivistekerroksen alla tasauskerroksena / alustana on alettu käyttää puhtaan hiekan sijasta erilaisia teollisuuden sivutuotteita (mm. lentotuhkaa), jolloin tapahtuu reaktioita suojamateriaalin ja sivutuotteen kesken.
- Näistä syistä johtuen mm. bentoniitin / hiekkabentoniitin kestoikä voi olla vähemmän kuin 50 v; vedenläpäisevyyden suurenemista arvosta 10^{-11} m/s arvoon $10^{-6} \dots 10^{-7}$ m/s on havaittu.
- Suotovesiä tulee myös jätepenkereen luiskista ja tämä on otettava huomioon pintaeristysrakenteissa.
- Pintaeristeen toimintaa voi vaarantaa mm. kasviston juurien tunkeutuminen (puut ovat kiellettyjä kaatopaikalla), eri materiaalit käyttäytyvät eri tavalla (hiekkabentoniitissa 0,8 m juuritunkeumia kuudessa vuodessa on havaittu).

Tavoitteena on eristää kaatopaikka synteettisen ja mineraalisen tiivisteiden yhdistelmällä ja tarkkailla pohjaveden laatua tiivisteiden alle asennetun tarkkailujärjestelmän avulla. Jos kaatopaikalta puuttuu pohjaeristys, on toteutettava sitä korvaavat toimenpiteet niin, että saavutetaan pohjaeristeellä saavutettavaa vastaava pohjamaan suojaustaso. Pitkän ajan kuluessa myös pohjaeristeellä varustetuilla kaatopaikoilla on rakenteiden pettäminen mahdollista ja pohjaveden saastumisriski olemassa. Eristys on saavutettavissa "hydrogeologisella eristämällä" (hydrogeological isolation). Jokainen kaatopaikka on yksittäistapaus ja sellaisena se on käsiteltävä myös eristysrakenteiden suunnittelussa.

Kaatopaikan eristämisen tavoitteena on pohjaveden virtausten hallinta ja kontrollointi niin, että maapohjan / maaperän saastuminen rajoitetaan rajatulle alueelle. Tavoitteena on haitta-aineiden "0-emissio" tältä rajatulta alueelta ympäristöön, tai 100 %:n suojaustehokkuus. Kuitenkin pohjamaan paikallisten epähomogeenisuuksien ja ensisijaisten virtaussuuntien (preferential flow-paths) takia ei ole koskaan mahdollista taata 100 %:n tehokkuutta. Suojauksen kustannus nousee hyvin jyrkästi, kun halutaan saavuttaa korkea suojaustaso.

3.1.4 Iso Britannia

Viitteen /48/ mukaan

- (Sub-paragraph 4) The landfill base and sides shall consist of a mineral layer which provides protection of soil, groundwater and surface water at least equivalent to that resulting from the following permeability and thickness requirements (kuten EY-direktiivissä 1999/31/EC of 26 April 1999).
- Where the geological barrier does not meet the requirements of sub-paragraph (4) naturally, it may be completed artificially and reinforced by other means providing equivalent protection; but in any such case a geological barrier established by artificial means must be at least 0.5 meter thick.

Lähteessä Landfill Directive (LFD) /49/ todetaan mm:

Suojausrakenteiden (pohjaveden pilaantumisen estämisen) suunnittelun toiminnalliset vaatimukset on esitetty viitteessä Groundwater Directive (GWD) /82/. Sen mukaan kaatopaikasta ei saa päästä pohjaveteen ollenkaan listan I aineita (taulukko 3.3) ja Listan II aineet (taulukko 3.4) eivät saa aiheuttaa pohjaveden likaantumista. Landfill Directiven:n /49/ ohella on noudatettava myös "Groundwater Directive"a /GWD/. Sovellettavia raja-arvoja on esitetty ohjeessa /34/.

Taulukko 3.3. Lista I: Aineet, joita ei saa päästä ollenkaan pohjaveteen

List I of families and groups of substances
List I contains certain individual substances which belong to the following families and groups of substances, selected mainly on the basis of their toxicity, persistence and bioaccumulation, with the exception of those which are biologically harmless or which are rapidly converted into substances which are biologically harmless:
1. organohalogen compounds and substances which may form such compounds in the aquatic environment,
2. organophosphorus compounds,
3. organotin compounds,
4. substances in respect of which it has been proved that they possess carcinogenic properties in or via the aquatic environment ¹
5. mercury and its compounds,
6. cadmium and its compounds,
7. persistent mineral oils and hydrocarbons of petroleum origin,
and for the purposes of implementing Articles 2, 8, 9 and 14 of this Directive:
8. persistent synthetic substances which may float, remain in suspension or sink and which may interfere with any use of the waters.

Taulukko 3.4. Lista II: Aineet, jotka eivät saa aiheuttaa haitallista pohjaveden saastumista.

List II of families and groups of substances	
List II contains:	
<ul style="list-style-type: none"> - substances belonging to the families and groups of substances in List I for which the limit values referred to in Article 6 of the Directive have not been determined, - certain individual substances and categories of substances belonging to the families and groups of substances listed below, 	
<p>and which have a deleterious effect on the aquatic environment, which can, however, be confined to a given area and which depend on the characteristics and location of the water into which they are discharged.</p>	

Lista II: (jatkoa) Aineet, jotka eivät saa aiheuttaa haitallista pohjaveden saastumista.

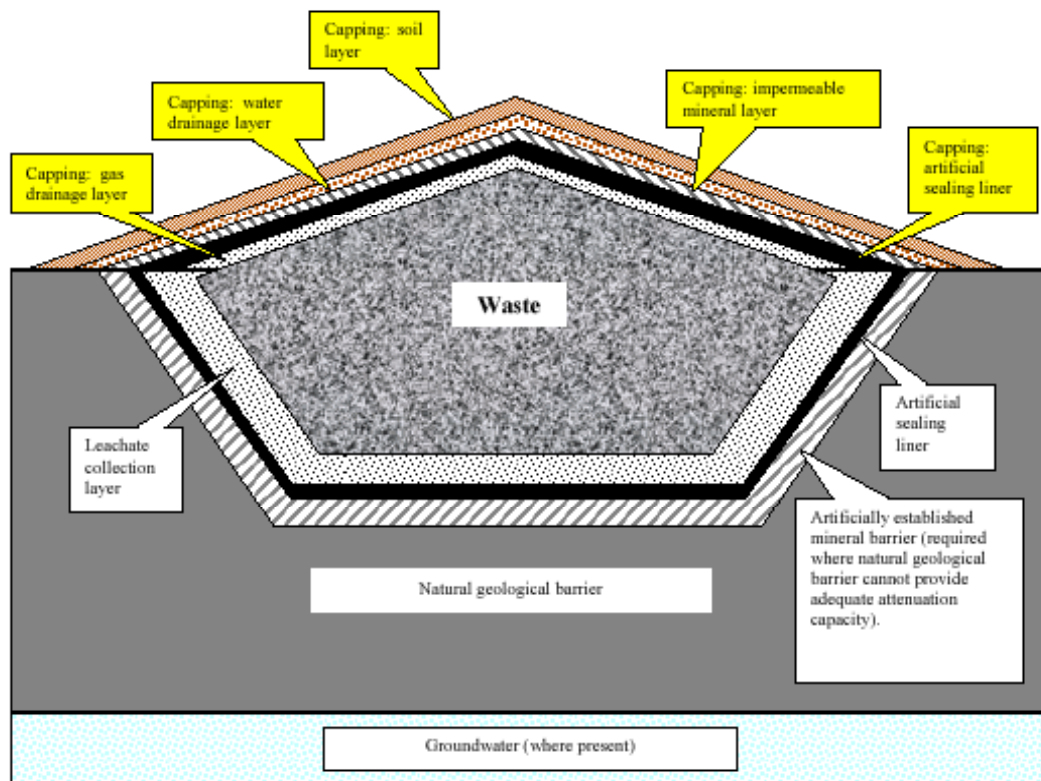
Families and groups of substances referred to in the second indent			
1. The following metalloids and metals and their compounds:			
1. zinc	6. selenium	11. tin	16. vanadium
2. copper	7. arsenic	12. barium	17. cobalt
3. nickel	8. antimony	13. beryllium	18. thalium
4. chromium	9. molybdenum	14. boron	19. tellurium
5. lead	10. titanium	15. uranium	20. silver
2. Biocides and their derivatives not appearing in List I.			
3. Substances which have a deleterious effect on the taste and/or smell of the products for human consumption derived from the aquatic environment, and compounds liable to give rise to such substances in water.			
4. Toxic or persistent organic compounds of silicon, and substances which may give rise to such compounds in water, excluding those which are biologically harmless or are rapidly converted in water into harmless substances.			
5. Inorganic compounds of phosphorus and elemental phosphorus.			
6. Non persistent mineral oils and hydrocarbons of petroleum origin.			
7. Cyanides, fluorides.			
8. Substances which have an adverse effect on the oxygen balance, particularly : ammonia, nitrites.			

Kaatopaikan suunnittelussa on pidettävä aina mielessä se, että pohjavesisuojausta ei saa erottaa kaatopaikkakaasujen hallinnasta. Pohjavesisuojaus ja suotovesien hallinta voivat suoraan vaikuttaa kaasujen hallintaan. Pohjavesisuojauksen kannalta toimiva rakenne ei välttämättä ole hyväksyttävä kaatopaikkakaasujen hallinnan kannalta.

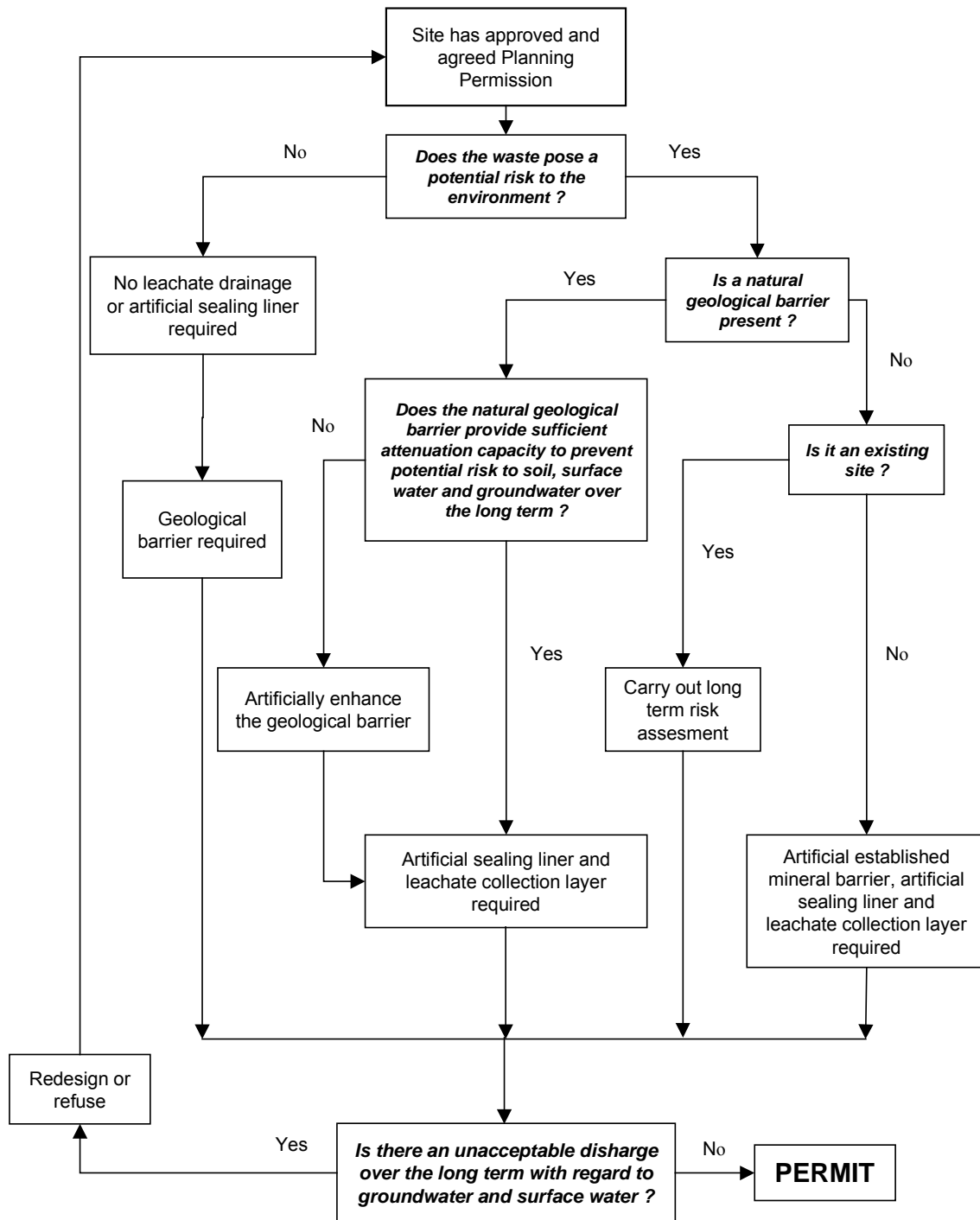
Eristysrakenteiden ja muiden suojaustoimenpiteiden suunnittelussa etusijalla on riskin arviointiin perustuva menettelytapa. Suojausrakenteiden toimivuuden arvioinnissa pitää kaikissa tapauksissa soveltaa kahta peruslähtökohtaa:

- minkäänlaista riskiä sille, että kaatopaikasta aiheutuisi hyväksymättömiä päästöjä, ei saa esiintyä lyhyellä, keskipitkällä tai pitkällä ajanjaksolla,
- ratkaisulla pitää olla rakenteellinen ja fysikaalinen stabiliteetti lyhyellä, keskipitkällä tai pitkällä ajanjaksolla.

Figure 1 Clarification of the Terms to be Used for the Various Elements of the Landfill Engineering for a Site.



Kuva 3.3. Kaatopaikan periaatekuva ja käsitteitä /49/



Kuva 3.4. Päätösprosessikaavio kaatopaikan rakenteiden hyväksymiselle /49/

Geologinen este

Geologinen este on geologinen muodostuma / kerrostuma keinotekoisien tiivisteen alapinnan ja tarkastelupisteen (compliance point), jossa GWD:n /82/ määräykset tulee toteutua, välissä. Tarkastelupiste Lista II:n haitta-aineille voi olla pohjavedenhavaintoputki hydraulisen gradientin suunnassa tai jokin muu riittävän herkkä "vastaanotin". Paikka

määräytyy kaatopaikan geologisen / hydrogeologisen rakenteen (olosuhteiden) perusteella. Lista I:n haitta-aineille tarkastelupiste on kaatopaikan alla olevan vedellä kyllästyneen kerroksen yläpinta (esim. pohjavedenpinta).

Geologisen esteen tulee antaa riittävä "attenuaatio" estämään pohjaveden ja maapohjan pilaantumisriski. Ehdotetun geologisen esteen toimivuuden arvioimiseksi / toteamiseksi GWD:n ja LFD:n mukaisesti tulee suorittaa riskitarkastelu ottaen huomioon Lista I:n ja Lista II:n tapaukset. Tarkastelun tulee sisältää myös pysyvyystarkastelut ja kaatopaikka-kaasujen hallinta /34/.

Geologisen esteen toimivuuden tarkastelun tulee pitää sisällään kaatopaikan käyttöaika (aktiivivaihe) ja sulkemisen jälkeinen aika (passiivivaihe). Tarkastelussa tulee ottaa huomioon tulevaisuudessa mahdollisesti tapahtuvat aktiivisten suojaus- ja valvontatoimenpiteiden (keinotekoinen tiiviste ja salaojitusjärjestelmä, käyttö- ja hallintatoimenpiteet) pettäminen tai vaurioituminen sekä pettämisen tai vaurioitumisen aiheuttamat haitta-aineiden pitoisuudet kaatopaikalla.

Jos geologinen este sellaisenaan ei tarjoa riittävää suojaa, sitä voidaan täydentää keinotekoisesti. Keinotekoisesta geologisen esteen (kuvassa 3.3 "artificially established mineral barrier") tulee olla vähintään 0,5 m paksu (reasonable minimum). Paksuus määräytyy rakentamisen hyvän lopputuloksen varmistamisesta ja geologista eristettä täydentävän geosynteettisen tiivisterakenteen hyvän alustan varmistamisesta. "Puhtaan" geologisen esteen tulee olla luonnontilainen ja luonnostaan huonosti vettä läpäisevää eikä sitä kerrosta saa keinotekoisesti parantaa.

Keinotekoinen tiiviste (Artificial Sealing Liner)

LFD:ssä käytetään termejä pohjaeriste (bottom liner) ja keinotekoinen tiiviste (artificial sealing layer), jotka pitänee tulkita samaa tarkoittavaksi. LFD:n mukainen "kokonaisvaltainen" ympäristönsuojaus saadaan aikaan keinotekoisesta tiivisteestä ja sen alla olevan geologisen esteen yhdistelmällä.

Keinotekoisesta tiivisteestä (rakenteesta) valinta tehdään riskitarkastelun perusteella, jolloin myös geologinen este on oltava tarkastelussa mukana. Hyväksymättömiä päästöjä ei saa tapahtua kaatopaikan koko elinkaaren aikana.

Suotovesien hallinta (Leachate Management)

Suotovesipaineen minimoimiseksi ja suotovesien poistamiseksi vaaditaan vähintään 0,5 m paksuinen salaojituskerros. Riskitarkastelun tulosten perusteella voidaan poiketa em. paksuusvaatimuksesta ja toteuttaa kuivattaminen myös muilla keinoin. Ehdotetun ratkaisun pitää täyttää sille asetetut vaatimukset koko kaatopaikan käyttöä. Pohjaveden

pilaantumisriskien hallinnan kannalta tehokas suotovesien keräys on vähintään yhtä tärkeää kuin tiivistysrakenteet. Vaikka GWD:ssä/LFD:ssä ei mainitakaan erikseen salaojitusputkistoja, ei se tarkoita sitä, että sellaista ei tarvittaisi. Suotoveden poiston salaojituskerroksesta tulee toimia lyhyellä, keskipitkällä ja pitkällä aikavälillä /25/.

Kaatopaikan peittäminen (Capping)

Peittorakenne vaaditaan, mikäli suotovesien syntymisen (sadeveden imeytymisen) estäminen on tarpeen. Yleensä vaarallisen ja tavanomaisen jätteen kaatopaikalle pitää tehdä aina peittorakenne. Riskitarkastelun perusteella voidaan poiketa direktiivien suosituksista (joko vaativampaan tai lievempään suuntaan). Peittorakenteen tarpeeseen ja toimivuusvaatimukseen vaikuttaa myös kaatopaikkakaasujen hallintamenettely sekä tarve eristää jäte ympäristöstä fysikaalisesti, vaikka ei olisikaan olemassa ympäristön pilaantumisriskiä suotovesien kautta (esim. asbesti). Vähimmillään peittorakenteen pitää sisältää tiivistyskerros, pintavesien salaojitus- / keräyskerros ja peittomaa.

3.1.5 Ruotsi

Ruotsalaisten sovellutus EY-direktiivistä on seuraava (otteita) /21/:

19 § En deponi skall vara lokaliserad så att allt lakvatten efter driftfasen och ej uppsamlat lakvatten under driftfasen passerar genom en geologisk barriär som uppfyller följande krav. Transporttiden för lakvattnet genom barriären får inte vara kortare än 200 år för deponier för farligt avfall, 50 år för deponier för icke-farligt avfall och 1 år för deponier för inert avfall.

Om de naturliga förhållandena på platsen inte innebär att kraven i första stycket uppfylls i fråga om en viss del av lakvattnet, får kompletteringar ske så att mark och vatten skyddas genom en geologisk barriär som uppfyller kraven i 20 § andra stycket.

20 § Om en deponi inte lokaliserar så att kraven i 19 § uppfylls, skall deponin anläggas på eller förses med en geologisk barriär som uppfyller kraven i denna paragraf.

Under deponin och på de sidor om deponin där lakvatten kan förorena mark eller vatten skall barriären vara minst 0,5 meter tjock samt i fråga om genomtränglighet (permeabilitet) och tjocklek (mäktighet) ge ett skydd som är minst likvärdigt med effekten av följande krav:

Deponi för	Permeabilitet	Måktighet
– farligt avfall	$< 1,0 \times 10^{-9}$ meter per sekund	> 5 meter
– icke-farligt avfall	$< 1,0 \times 10^{-9}$ meter per sekund	> 1 meter
– inert avfall	$< 1,0 \times 10^{-7}$ meter per sekund	> 1 meter

22 § Deponier för farligt avfall och deponier för icke-farligt avfall skall under driftfasen vara försedda med en botten tätning, ett dränerande materialskikt som är minst 0,5 meter tjockt och ett uppsamlingsystem för lakvatten.

Tätningen, materialskiktet och uppsamlingsystemet skall konstrueras så att lakvatten inte läcker med mer än 5 liter per kvadratmeter och år från en deponi för farligt avfall och 50 liter per kvadratmeter och år från en deponi för icke-farligt avfall.

Insamlat lakvatten skall behandlas så att det kan släppas ut utan att utsläppet strider mot gällande bestämmelser om skydd för människors hälsa och miljön eller mot villkor som gäller för verksamheten.

Sluttäckning

31 § Verksamhetsutövaren skall se till att en deponi som avslutas förses med sluttäckning. Sluttäckningen skall vara så konstruerad att mängden lakvatten som passerar genom täckningen inte överskrider eller kan antas komma att överskrida 5 liter per kvadratmeter och år för deponier för farligt avfall och 50 liter per kvadratmeter och år för deponier för icke-farligt avfall.

En tillståndsmyndighet får i det enskilda fallet medge avsteg eller undantag från kraven på genomsläpplighet i första stycket, om det kan ske utan risk för skada eller olägenhet för människors hälsa eller miljön.

32 § En deponi, eller en del av den, anses avslutad först när sluttäckningen har inspekterats genom tillsynsmyndighetens försorg och tillsynsmyndigheten har godkänt den.

Efterbehandling

33 § Under deponins efterbehandlingsfas skall verksamhetsutövaren se till att det i minst 30 år eller den längre tid som tillsynsmyndigheten bestämmer vidtas de åtgärder för underhåll, övervakning och kontroll som behövs med hänsyn till skyddet för människors hälsa och miljön.

3.2 Geosynteettisiä materiaaleja koskeva EU- /CEN-tasolla meneillään oleva kehitystyö

Tässä kappaleessa on käsitelty geosynteettisiin tuotteisiin liittyvää kehitys- ja standardointityötä. Etenkin kaatopaikkarakenteissa käytettävien tärkeiden geosynteettisten eristemateriaalien sovellusstandardit ovat tällä hetkellä (kevät 2004) viimeistelyvaiheessa.

Vaikka geosynteettisille tuotteille on olemassa tai valmisteilla omat viralliset tai yleisesti käytössä olevat, yleensä kansainvälisesti hyväksytyt tuotestandardit (CE-merkintä), niin näissä tuotestandardeissa ei kuitenkaan esitetä raja-arvoja kaikkien ominaisuuksien osalta, kun materiaaleja käytetään tiivisterakenteena joko yksistään tai yhdistelmä-rakenteissa. Raja-arvot on määriteltävä yleisesti tai ne on "lyötävä lukkoon" viimeistään kaatopaikan suunnittelussa.

Luvussa 3.3 on esitetty tässä projektissa laaditut hyväksymiskriteerit, joita sovelletaan tiivisterakenteiden tuotehyväksynnässä materiaalien ja rakenteiden hyväksyttävyyttä arvioitaessa toistaiseksi koekäyttöluonteisesti. Nämä kriteerit eivät ole virallisesti hyväksytyjä. Esitetyissä kriteereissä on kuitenkin sellaisia osioita, jotka ovat tavalla tai toisella ainakin puolivirallisia tai hyväksi käytännöksi muodostuneita.

3.2.1 Geosynteettisten tuotteiden CE-merkintä

CEN tekninen komitea TC 189 valmistelee harmonisoituja tuotestandardeja sekä niihin liittyviä testausmenetelmästandardeja eri rakentamisen sovellusalueilla käytettäville geosynteettisille tuotteille. Ympäristörakentamisessa hyödynnetään geosynteettisiä tiivistemateriaaleja, suojausgeotekstiilejä, lujitteita sekä salaojitustuotteita.

Geotekstiilien sekä niihin rinnastettavien tuotteiden osalta toimitaan jo voimassa olevien harmonisoitujen tuotestandardien mukaisesti. Geosynteettiset tuotteet on näin ollen varustettava CE-merkinnällä tavaran vapaan liikkumisen varmistamiseksi Euroopan Unionin alueella. Näille tuotteille vaaditaan AC luokkaa 2+ (= attestation of conformity, = yhteneväisyyden osoittamisluokka), joka tarkoittaa, että "ilmoitettu laitos" (Notified Body) kontrolloi valmistajan laatujärjestelmän, mutta valmistaja vastaa tuotteiden laadusta ja dokumenttien oikeellisuudesta.

Vaikka EU-virkamiestasolla vallitsee käsitys CE-merkin pakollisuudesta koko EC:n alueella, ollaan Suomessa tällä hetkellä (v. 2004) vielä eriävällä kannalla pakollisuudesta muiden kuin talonrakennustuotteiden suhteen.

Ympäristörakentamisessa käytettäville geosynteettisille tiivistemateriaaleille valmistettiin CEN TC 189 työryhmässä vastaavia harmonisoituja tuotestandardeja ensiksi viidelle sovellusalueelle. Kaksi niistä tuli hyväksytyksi, kolme hylätyksi pitkäaikaiskestävyyden osoittamismenettelyn takia, vaikka eri standardien tekstit eivät poikkea siinä suhteessa toisistaan. Ongelman ratkaiseminen voi siirtyä vuoden 2004 loppupuolelle, mitä tarkoittaa, että tiivistemateriaalien CE-merkintä astuisi voimaan todennäköisemmin vasta vuonna 2006.

3.2.2 Geotekstiilien harmonisoidut sovellusstandardit

Geotekstiileille ja niiltä vaadittaville ominaisuuksille on olemassa seuraavat standardit:

EN 13249: the construction of roads and other trafficked areas (excluding railways and asphalt inclusion)

EN 13250: the construction of railways

EN 13251: earthworks, foundations and retaining structures

EN 13252: drainage systems

EN 13253: erosion control works (coastal protection, bank revetments)

EN 13254: the construction of reservoirs and dams

EN 13255: the construction of canals

EN 13256: the construction of tunnels and underground structures

EN 13257: solid waste disposals

EN 13265: liquid waste containment projects

Geotekstiilien osalta harmonisoinnin edellyttämät ominaisuudet eri toimintafunktioissa on esitetty taulukossa 3.5.

Taulukko 3.5. Geotekstiilien harmonisoinnin edellyttämät ominaisuudet eri toimintafunktioissa.

Characteristic	Test method	Function				
		Filtration	Separation	Reinforcement	Protection	Drainage
Tensile strength	EN ISO10319	H	H	H	H	H
Elongation at maximum load	EN ISO 10319			H	H	
Static puncture resistance CBR test (*)	EN ISO 12236		H	H		
Dynamic perforation resistance (cone drop test) 1)	EN 918	H		H	H	
Protection efficiency of a geosynthetic in preventing geomembrane perforation	prEN 13719				H	
Characteristic opening size	EN ISO 12956	H				
Permeability normal to the plane without load	EN ISO 11058	H				
Water flow capacity in the plane	EN ISO 12958					H
Declaration on durability	According to Annex B	H	H	H	H	H

(*) It should be considered that this test may not be applicable for some types of products, e. g. geogrids.

Suodatinkankaat

NordGeoSpec /58/

Tavanomaisten suodatin- ja erottamistarkoituksissa käytettyjen suodatinkankaiden (geotekstiilien) uudistettu käyttöluokitus on ollut voimassa vuoden 2003 alusta. Suodatinkankaan käyttöluokan valinta ja suodatinkankaan ominaisuuksien vaaditut arvot käyttöluokittain on esitetty julkaisussa: Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset: Penger- ja kerrosrakenteet, kohta 4450 Suodatinkankaat (TIEH 2200017-v-03) /83/.

Uudet laatuvaatimukset pohjautuvat tuotteiden materiaalivaatimusten osalta eurooppalaiseen tuotestandardiin: SFS-EN 13249 Geotextiles and geotextile-related products. Characteristics required for use in the construction of roads and other trafficked areas (excluding railways and asphalt inclusion) /70/. Suomenkielisen käännöksen otsikko on "SFS-EN 13249 Geotekstiilit ja vastaavat tuotteet. Toiminnalliset vaatimukset teiden ja muiden liikennöityjen alueiden rakentamisessa/ (lukuun ottamatta rautateitä ja asfaltilla sidottuja kerroksia" /71/. Laatuvaatimukseen sisältyvä suodatinkankaiden käyttöluokitus on uuden pohjoismaisen suodatinkangasluokituksen NorGeoSpec /58/ (tekijät SINTEF ja VTT) mukainen.

Käyttökohteeseen soveltuvan suodatinkankaan käyttöluokka määritetään taulukon 3.6 avulla.

Taulukko 3.6. Suodatinkankaan valinta käyttöolosuhteiden perusteella NordGeoSpec:n mukaisesti /83/.

Pohjamaa	Rakentamisolosuhteet ¹⁾	Täyttömateriaalin maksimiraekoko (d_{max}) [mm]			
		$d_{max} < 60$	$60 < d_{max} < 200$	$200 < d_{max} < 500$	$d_{max} > 500$
Pehmeä Tv, Sa ($s_u \leq 25$ kPa)	Normaalit	N3	N4	N5	N5
	Suotuisat	N3	N3	-	-
Kiinteä Sa ($s_u > 25$ kPa) Si, Hk, Sr	Normaalit	N3	N3	N3	N4
	Suotuisat	N2	N2	-	-

¹⁾ Rakentamisolosuhteet:

Normaalit: vähintään kaksi seuraavista olosuhteista toteutuu

- a) raskas rakentamisen aikainen liikenne,
- b) murskattu ja teräväsärmäinen täyttömateriaali tai
- c) tiivistys raskaalla tärykalustolla

Suotuisat: Jos vain yksi edellä mainituista olosuhteista toteutuu ja lisäksi täyttömateriaalin maksimiraekoko on < 200 mm.

Suodatinkankaan tulee täyttää suunnitelmassa määritetyn käyttöluokan mukaiset, taulukossa 3.7 esitetyille ominaisuuksille asetetut vaatimukset. Suodatinkankaan pitkäaikaiskestävyyden on aina täytettävä vähintään standardin SFS-EN 13249 liitteen B kohdan B.2 mukaiset 25 vuoden käyttöajalle asetetut vaatimukset. Kaatopaikoissa erottamistarcoituksessa suositellaan käytettäväksi vähintään käyttöluokan N3 suodatinkangasta.

Taulukko 3.7. Suodatinkankaan ominaisuuksien vaaditut arvot käyttöluokittain NordGeoSpec:n mukaisesti /83/.

Ominaisuus	Testi-menetelmä	Maksimihajonta ¹⁾	95% luottamusrajaa vastaavat vaaditut arvot ²⁾				
			Käyttöluokka NordGeoSpec				
			N1	N2	N3	N4	N5
Vetolujuus, minimiarvo (kN/m), $F_{a,95}$	EN ISO 10319	-10%	6	10	15	20	26
Murtovenymä, minimiarvo maksimikuormalla (%), $\epsilon_{a,95}$	EN ISO 10319	-20%	15	20	25	30	35
Reikäkoko kartiopudotuskokeessa, maksimiarvo (mm)	EN 918	+20%	42	36	27	21	12
Energiaindeksi, minimiarvo (kN/m), $R_{a,95}$	EN ISO 10319		1.2	2.1	3.2	4.5	6.5
Nopeusindeksi ³⁾ , minimiarvo (10^{-3} m/s)	EN ISO 11058	-30%	3	3	3	3	3
Merkitsevä aukkokoko, maksimiarvo O_{90} (mm)	EN ISO 12956	$\mp 30\%$	0.2	0.2	0.2	0.15	0.15
Massan maksimihajonta yksikköä kohti ⁴⁾	EN 965		$\mp 12\%$	$\mp 12\%$	$\mp 10\%$	$\mp 10\%$	$\mp 10\%$
Staattinen puhkaisulujuuden maksimihajonta ⁴⁾	EN ISO 12236		-10%				

¹⁾ Valmistajan on määritettävä hajonta, tässä taulukossa annetaan maksimihajonta CE –merkin liitteessä ilmoitetulle hajonnalle.

²⁾ Hajontaa ei saa lisätä vaadittuihin arvoihin. Tuotteen 95% luottamusrajaa vastaava arvo (= nimellisarvo + / - hajonta) lasketaan ja verrataan vaadittuun arvoon

³⁾ Jos CE –merkissä on ilmoitettu vedenläpäisevyyden arvo, lasketaan nopeusindeksi (VIH50) kaavalla: $VIH50 = K * 50/t$, jossa K on vedenläpäisevyys ja t on geotekstiilin paksuus [mm]. Tämä riippuvuus on voimassa vain vedenläpäisevyyksikokeessa, jossa veden virtaus on laminaarista.

⁴⁾ Ominaisuuksien arvoille ei aseteta vaatimusta. Hajonnan osalta katso huomautus ¹⁾.

Geomembraanien harmonisoidut sovellusstandardit

Geosynteettisten eristemateriaalien laatuvaatimuksia on valmisteltu CEN TC 189 työryhmässä WG 6. Ns. harmonisoituja sovellusstandardeja on valmisteltu viidelle sovellutusalueelle (suluissa tilanne):

prEN 13361:2002 Geosynthetic Barriers - Characteristics required for use in the construction of reservoirs and dams (Final Draft - July 2002).

prEN 13362:2002 Geosynthetic Barriers - Characteristics required for use in the construction of canals (Final Draft - July 2002).

prEN 13491:2002 Geosynthetic Barriers - Characteristics required for use as a fluid barrier in the construction of tunnels and underground structures (Final Draft - August 2002).

prEN 13492:2002 Geosynthetic Barriers - Characteristics required for use in the construction of liquid waste disposal sites, transfer stations or secondary containment (Final Draft - August 2002).

prEN 13493:2002 Geosynthetic Barriers - Characteristics required for use in the construction of solid waste storage and disposal sites, and storages for hazardous solid materials (Final Draft - August 2002).

Em. standardeissa esitetään kolmelle materiaaliryhmälle sovellettavat testausmenetelmät ja -standardit. Materiaaliryhmät ovat seuraavat:

GBR-P	geosynthetic barrier – polymeric (= polymeeriset geomembraanit)
GBR-B	geosynthetic barrier – bituminous (= bitumikermit)
GBR-C	geosynthetic barrier – clay (= bentoniittimatot, tunnetaan vanhalla nimellä GCL eli ”geosynthetic clay liner”)

Pohjaveden suojausrakenteille (sovellutusalue lähinnä tierakentamisessa ja muussa liikenneväylärakentamisessa / INFRA-rakentaminen) tullaan laatimaan erillinen standardi “General and specific requirements for geosynthetic barriers used in the construction of transportation infrastructure” (=WI 00189094) ja myös sen valmistelu on annettu CEN TC 189 WG 6 työryhmälle. Standardi tulee rakenteeltaan vastaamaan edellä mainittuja harmonisoituja sovellusstandardeja. "INFRA" -standardin arvioitu valmistumisaika on joulukuussa 2004.

Esimerkkinä sovellusstandardien esittämistä oleellisista ominaisuuksista ja testausmenetelmistä on esitetty standardin /prEN 13493:2002 Geosynthetic Barriers - Characteristics required for use in the construction of solid waste storage and disposal sites, and storages for hazardous solid materials/ /15/ vaatimustaulukko taulukossa 3.8 Taulukossa käytetyt merkinnät H, A tai S ovat:

H = harmonisoidun sovellusstandardin vaatima testaus

A = kaikissa sovelluksissa vaadittu testaus (valmistajan ilmoittama tulos) ja

S = tietyissä käyttötapauksissa vaadittu testaus (valmistajan ilmoittama tulos).

Vaatimuksilla pyritään parhaimmillaan varmistamaan geomembraanin kestävyys 25 vuoden ajan (weathering, oxidation vaatimus: > 75 % vetolujuuden säilyvyys). Oksidaatiokoe on luonteeltaan seulontatyyppinen eikä sellaisenaan tarkoitettu käyttöiän määrittämiseen.

Työmaalla tapahtuvasta geosyntetisten tuotteiden näytteenotosta ja laaduntarkkailusta on lisäksi CEN TC 189 WG1 työryhmässä valmisteltu CEN- tekninen raportti /Wi 00189070, "Geotextiles and geotextile related products - On site quality control/ /102/. Suunnittelijan on mahdollista käyttää CEN - teknistä raporttia apuvälineenä työmaalla tapahtuvan laadunvalvonnan järjestämisessä.

Taulukko 3.8. prEN 13493:2002. Geosynthetic barriers used in the construction of solid waste storage and disposal sites, for hazardous solid materials - Functions, function related characteristics and test methods to be used.

Nr	Property to be tested	Geosynthetic barrier			Test methods			
		GBR-P	GPR-B	GBR-C	GBR-P	GPR-B	GBR-C	
Physical properties								
1	Thickness	A	A	A	EN 1849-2	EN 1849-1	EN 964-1	
2	Mass per unit area	A	A	A	EN 1849-2	EN 1849-1	prEN 14196	
Hydraulic properties								
3	Water permeability (liquid tightness)	H	H	H	prEN 14150	prEN 14150	ASTM D 5887-95	
4	Gas permeability	H	H	S	ASTM 1434-82	ASTM 1434-82	see remarks in 4.3.1	
5	Swell index	-	-	A	-	-	ASTM D 5890-95	
Mechanical properties								
6	Tensile strength	H	H	H	ISO 527	EN 12311-1	EN ISO 10319	1)
7	Elongation	A	A	A	ISO 527	EN 12311-1	EN ISO 10319	1)
8	Static puncture	H	H	H	EN ISO 12236	EN ISO 12236	EN ISO 12236	
9	Burst strength	S	S	S	prEN 14151	prEN 14151	prEN 14151	
10	Tear strength	S	S	-	ISO 34	EN 12310-1	-	2)
11	Friction shear strength	S	S	S	prEN ISO 12957-1	prEN ISO 12957-1	prEN ISO 12957-1	3)
12	Friction inclined plane	S	S	S	prEN ISO 12957-2	prEN ISO 12957-2	prEN ISO 12957-2	
Thermal properties								
13	Low temperature behaviour (flexure)	S	S	-	EN 495-5	EN 1109	-	
14	Thermal expansion	A	A	-	ASTM D 696-91	-	-	

Nr	Property to be tested	Geosynthetic barrier			Test methods			
		GBR-P	GPR-B	GBR-C	GBR-P	GPR-B	GBR-C	
Durability and chemical resistance								
15	Weathering	H	H	-	EN 12224	EN 12224	EN 12224	4)
16	Micro organisms	A	A	A	EN 12225	EN 12225	EN 12225	
17	Oxidation	H	H	H	ENV ISO 13438 or annex C to this standard	ENV ISO 13438 or annex C to this standard	ENV ISO 13438 or annex C to this standard	5)
18	Environmental stress cracking	H	-	S	ASTM D 5397-95	-	ASTM D 5397-95	6)
19	Leaching (water soluble)	A	A	A	prEN 14415	prEN 14415	prEN 14415	7)
20	Chemical resistance	A	A	A	prEN 14414	prEN 14414	prEN 14414	
21	Wetting/drying	-	-	S	-	-	prEN 14417	
22	Freezing/thawing	-	-	S	-	-	prEN 14418	
23	Root penetration	S	S	S	prEN 14416	prEN 14416	prEN 14416	
Relevancy: H required for harmonisation; A relevant to all conditions of use; S relevant to specific conditions of use; - not relevant								

- 1) For GBR-P use ISO 527 part 1 and 3, test specimen type 5 at a speed of 100 mm/min
- 2) For GPR-P use Method B, angle Specimen (Figure 2) without nick at a speed of 50 mm/min
- 3) For determining the bonding strength of GBRs an internal shear or peel bond may be applicable.
- 4) GBR-C: see 4.3.5
- 5) for the geotextile elements and reinforcement yarns of GBR-C barriers ENV ISO 13438 is applicable
- 6) GBR-C: Only applicable to polymeric membrane element of the GBR-C
- 7) Durability aspects for products in contact with potable water; see annex B (normative) for produce to be used.

NOTE Particular application cases can contain requirements about additional properties and - preferably standardised - test methods, if they are technically relevant and not conflicting with European Standards. The design life of the product should be determined, since its function may be temporary, as a construction expediency, or permanent, for the lifetime of the structure.

3.3 Kaatopaikan suojausrakenteiden suunnittelu

Ympäristöoppaan 36 (Kaatopaikan tiivistysrakenteet) mukaisesti kaatopaikan rakennetyypin valintaan ja rakenteeseen kohdistuvien kuormitusten määrittelyyn tarvittavat paikkakohtaiset tutkimus- ja suunnittelutiedot ovat

- kaatopaikka-alueen pohjasuhteet ja topografia
- jätteen ja siitä muodostuvan suotoveden laatu *)
- jätetäytön lopullinen korkeus*), täytön vaiheistus ja alueen käyttö kaatopaikan käytöstä poistamisen jälkeen
- rakenteen käyttöikä
- rakenteen toteutusaikataulu.

*) vanhan kaatopaikan osalta mittauksin, uuden kaatopaikan osalta pääosin arvionvaraisia

Kaatopaikan yleissuunnittelu tehdään ympäristölupahakemusta varten /40/

- rakennuttajan / käyttäjän ja viranomaisten käyttöön
- kaatopaikan koko elinkaaren ajaksi - käsitellään myös pintaeristys ainakin periaatteellisella tasolla
- valitaan rakennetyyppi / rakennetyypit
- tehdään "räätälöidyn rakenteen" päämitoitus (lähtötiedot ja mitoituslaskelmat)
- määritellään käytettävät materiaalit päälaatuvaatimuksineen (rakeisuus/ mineraalinen, vedenläpäisevyys / mineraalinen, kerrospaksuus /mineraalinen, materiaalit/geosynteetti, paksuus / painoluokka / geosynteetti) ja niiden toiminnallinen tehtävä rakenteessa
- suunnitelmien perusteella on voitava osoittaa rakenteiden toimivuus ja laatia kustannusarvio
- suunnitelmien perusteella on voitava käsitellä ympäristölupa.

Tuotehyväksyntämenettelyn käyttöönoton jälkeen yleissuunnittelussa valittaisiin käytettäväksi joko nimetty tuotehyväksytty rakenne tai sitä vastaava. Suositeltavinta olisi määritellä tässä vaiheessa vain eristysrakenteiden toiminnalliset vaatimukset (mahollisuuksien mukaan numeroarvoina) ja käyttöikä, joiden perusteella eristysrakenteet mitoitetaan.

Kaatopaikkaa koskevassa lupahakemuksessa on lisäksi esitettävä seuraavat tiedot (YSA 12 §:n 2 momentti):

- kaatopaikan rakentamisesta ja rakenteesta,
- kaatopaikan käytöstä ja hoidosta,
- kaatopaikan valvonnasta ja tarkkailusta,
- kaatopaikan käytöstä poistamisesta ja jälkihoidosta,
- vahinkotilanteisiin varautumisesta ja niiden hoidosta.

Tuotehyväksyntämenettelyn käyttöönoton jälkeen ympäristölupahakemuksessa esitettäisiin käytettäväksi joko nimetty tuotehyväksytty rakenne tai sitä vastaava. Suositeltavinta olisi määritellä vain eristysrakenteiden toiminnalliset vaatimukset (numeroarvoina) ja käyttöikä, joiden perusteella eristysrakenteet mitoitetaan

Kaatopaikan rakennussuunnittelu ajoitetaan siten, että lopullisessa suunnitelmassa voidaan ottaa huomioon asetetut lupaehdot ja että yksityiskohtainen suunnitelma on käytettävissä rakennustyöhön ryhdyttäessä /40/:

- tehdään rakennuttajan ja urakoitsijan käyttöön
- suunnittelussa täydennetään ja täsmennetään yleissuunnitelman ratkaisuja huomioiden ympäristölupapäätöksen ehdot
- vaiheittain rakentaminen
- rakennustyön toteutus ja rajoitukset

- laadunvalvontasuunnitelma ja poikkeamien käsittely
- täytön suunnittelu
- täyttöjärjestys.
- täytön tiivistys
- rakennekerrokseen asennettavat muut rakenneosat.

Tuotehyväksyntämenettelyn käyttöönoton jälkeen rakennussuunnittelussa tarkennettaisiin (sovitettaisiin yksityiskohdissaan ko. kaatopaikan olosuhteisiin) yleissuunnittelussa nimetty ja lupahakemuksessa esitetty tuotehyväksyty tai sitä vastaava rakenne. Jos kaatopaikkaluvassa olisi määritelty vain toimivuusvaatimukset, joihin mitoituksen tulee perustua, mitoitetaan rakenteet näitä vaatimuksia vastaaviksi.

4. Toimivuusvaatimukset suojausrakenteiden pohjana

4.1 Rakenne- ja rakenneosakohtaiset vaatimukset

4.1.1 Tiivisterakenteisiin kohdistuvat rasitukset

Yleistä

Pohjavedensuojauksessa käytävien tiivistemateriaalien tärkein ominaisuus on yleensä niiden pieni vedenläpäisevyys. Mitä pienempi vedenläpäisevyys on, sitä vähemmän vettä suotautuu tiivistekerroksen läpi ja sitä vähemmän myöskin haitta-aineita kulkeutuu suotoveden mukana kaatopaikan alle. Tiivistemateriaalien ja rakenteiden on kestettävä niihin kohdistuvat kaikki rasitukset siten, ettei tiivisterakenteen läpäisevyydessä tapahdu haitallisia muutoksia rakenteen suunniteltuna käyttöaikana.

Tiivisterakenteisiin kohdistuvat rasitukset voidaan jakaa

- mekaanisiin,
- ilmastollisiin,
- kemiallisiin ja
- biologisiin rasituksiin.

Kaikki nämä rasituslajit kohdistuvat kaikkien tiivisterakenteisiin ja niiden rakenneosiin ainakin jossain tiivisterakenteen elinkaaren vaiheessa. Tiivisterakenteen tyyppistä ja käyttökohteesta riippuen rasitukset saattavat olla lyhytaikaisia, ehkä vain rakennusaikaisia, tai hyvinkin pitkäaikaisia, jopa käyttökohteen aktiivisen käyttöajan jälkeenkin jatkuvia, kuten kaatopaikkatiivisteisiin kohdistuvat rasitukset. Erityyppisten rasitusten suuruus vaihtelee voimakkaasti käyttökohteista riippuen. Lähes kaikki rasitusmuodot vaikuttavat mineraaliainestiivisteeseen sen vedenläpäisevyyttä kasvattaen.

Taulukossa 4.1 on esitetty tyypillisimpiä tiivisterakenteisiin kohdistuvia rasituksia, niiden ajoittumista sekä rasitusten suhteellinen merkittävyys /90/. Rakennetyypit on taulukossa jaettu pintarakenteisiin ja pohjarakenteisiin.

Taulukossa tiivisterakenteen kohdistuvat rasitustyyppit on esitetty vain yleisellä tasolla. Tiivisterakenteeseen kohdistuvia rasituksia laajemmin (painuma, stabiliteetti jne.), suunnittelun periaatteita ja materiaalille, mukaan lukien sekä geosynteettiset tuotteet että mineraaliainestiivisteet, asetettavia vaatimuksia on kaatopaikkojen osalta käsitelty, mm. Kaatopaikan tiivistysrakenteet -julkaisussa /40/.

Taulukko 4.1. Tiivisterakenteisiin kohdistuvat rasitukset ja niiden ajoittuminen. Rasitusten merkittävyys kasvaa *x* merkkien lukumäärän myötä.

Rakenne	Rasitus	Työnai- kainen	Käytönai- kainen	Käyttökohdekohtainen kohdistuvuus
Pintarakenne	Mekaaninen			
	liikennekuormat	xxx	x	kaikki pintarakenteet
	pintakuormat		x	kaikki pintarakenteet
	painuma	xx	xxx	lähinnä kaatopaikan pintarakenteet
	erosio	xxx	x	kaikki pintarakenteet
	Ilmastollinen			
	kuivuminen	xxx	xxx	kaikki pintarakenteet
	jäätyminen	xxx	xxx	kaikki pintarakenteet
	UV-säteily	xx		
	Kemiallinen			
	kemikaalit		xxx	tiealueen pohjavesisuojaukset, varmistusrakenteet
	suola		xxx	tiealueen pohjavesisuojaus
	kaasut		xx	kaatopaikan pintarakenteet
	Biologinen			
	mikro-organismit		x	kaikki pintarakenteet
	juuret		x	kaikki pintarakenteet
	nisäkkäät		x	kaikki pintarakenteet
Pohjarakenne	Mekaaninen			
	liikennekuormat	xxx	x	
	pintakuormat		xxx	
	painuma		xxx	
	erosio	xxx	x	
	Ilmastollinen			
	kuivuminen	xxx	xxx	
	jäätyminen	xxx	x	
	UV-säteily	xx		
	Kemiallinen			
	suotovesi		xxx	
	kemikaalit		xxx	
	suola		xx	
	kaasut		x	
	Biologinen			
	mikro-organismit		xxx	
	juuret		x	
	nisäkkäät		x	

Ilmastolliset rasitukset

Kaatopaikan suojausrakenteissa mineraaliainestiiivisteiden merkittävimmät rasitukset aiheutuvat ilmastollisista rasituksista, eli kuivumisesta ja jäätymisestä. Mineraaliainestiiivisteiden varsinaista kuivumista saattaa esiintyä jo työn aikana, ellei työjärjestyksen suunnittelulla ole varmistettu tiivistekerroksen riittävän nopeaa peittämistä. Tiivisteiden nopeallakaan peittämisellä ei kuitenkaan välttämättä pystytä estämään pitkällä aikavälillä materiaalissa tapahtuvaa kuivumista, koska ylöspäin tapahtuvan haihtumisen ohella kosteus saattaa, käytetystä materiaalista, pohjasuhteista ja vallitsevista lämpöolosuhteista johtuen siirtyä vesihöyryinä myös alaspäin.

Jäätymisestä aiheutuvien haitallisten vaikutusten estämisessä ei materiaalivalinnalla ole yhtä suurta merkitystä kuin kuivumisriskissä, koska kaikissa hienorakeisissa (maa)materiaaleissa tapahtuu jäätyminen ja sulamisen yhteydessä vedenläpäisevyyden kasvua. Jäätyminen haitalliset vaikutukset voidaan poistaa kokonaan ainoastaan estämällä tiivistemateriaalin jäätyminen. Mineraaliainestiiivisterakenteissa myös jäätyminen on yleensä tiivisteiden toimintaa pitkäaikaisesti vaarantava rasitus. Kaatopaikkojen pohjaeristeiden ja luiskien jäätymisriski voidaan välttää routimisen estävällä täytöllä ennen ensimmäistä talvikautta ja siihen saakka, kunnes kaatopaikkapenger muodostaa riittävän routasuojauksen. Jätetäytöstä vapautuvan lämmön johdosta myös valmiissa kaatopaikan pintarakenteissa jäätymisriski on helposti vältettävissä.

Ilmastolliseksi rasitukseksi voidaan laskea myös auringon UV-säteily. Sen haitallinen vaikutus kohdistuu ennen kaikkea suojausrakenteissa käytettäviin geosynteettisiin tuotteisiin (geomembraanit, bentoniittimattojen geotekstiilit). Rasitusvaikutus ajoittuu lähinnä vain rakenteiden rakennusaikaan ja UV-säteilyn haittavaikutusta voidaan pienentää säteilylle alttiiden rakenneosien mahdollisimman nopealla peittämisellä ja asianmukaisella varastoinnilla työmaalla.

Mekaaniset rasitukset

Taulukossa 4.1 esitetyistä mekaanisista rasituksista epätasaisia painumia ja painumieroja voitaneen pitää vaarallisimpana sekä pinta- että pohjarakenteita uhkaavana rasituksena. Kaatopaikkojen tiivistemateriaalien vaatimuksiin sisältyykin tästä johtuen mineraaliainestiiivisteiden muodonmuutoskyvyn tarkistamisvaatimus. Painumaerosta aiheutuvat rasitukset vaikuttavat yhdistelmä rakenteissa molempiin tiivistäviin komponentteihin, sekä geomembraaniin että mineraaliainestiiivisteeseen. Vaikka geomembraanien muodonmuutoskyky on yleensä melko hyvä, on geomembraanille pitkäaikaisesti sallitun kokonaisvenymän suuruudeksi esitetty ainoastaan 3 %. Kaatopaikoissa tästä venymästä on otaksuttu maapohjan painumisesta syntyväksi enintään 2.75 % ja asennuksesta ja kuivatuskerroksen epätasaisuuksista aiheutuvaksi venymäksi enintään 0.25 % /93/. Mineraaliainestiiivisteiden rajavenymät vetokokeessa ja taivutusrasituksessa ovat samaa suu-

ruusluokkaa, 0.1...4.0 % /50/. Bentoniittimattojen kestävät rajavenymät ovat suuruusluokkaa 1...10 % /50/. Haitallisen venymän suuruus riippuu kuitenkin voimakkaasti bentoniittimaton rakenteesta. Painumaeron ohella myös rakentamisen aikaisista liikennekuormista voi aiheutua sekä geomembraanille että mineraaliainesteivisteellä sallitut venymät ylittyviä rasituksia.

Pohjatiivisteissä painumaerot aiheutuvat primäärisesti maapohjan epähomogeenisuudesta ja kaatopaikan pintatiivisteissä jätetäytön epähomogeenisuudesta. Osa painumeroista aiheutuu pintakuormien epätasaisesta jakautumisesta, mutta kuormituksen ja kaantumiseen voidaan vaikuttaa ja tätä kautta estää painumaerojen muodostumista. Kuormitus sinällään ei kuitenkaan ole kaikissa tapauksissa tiivisterakenteen toimintaa vaarantava tekijä. Pintakuorma ja tiivisterakenteelle aiheutuva kuormitus voivat muodostaa myös tiivisterakenteen toimivuutta parantavan tekijän. Mineraaliseen tiivisteeseen eri syistä syntyvien halkeaminen vaikutus pienenee niiden umpeutuessa tiivisteeseen kohdistuvaa jännitystä lisättäessä. Pintaeristysrakenteissa kuormitus on kuitenkin suhteellisen pieni tiivistysvaikutuksen aikaansaamiseen

Kemialliset rasitukset

Tiivistemateriaaleihin kohdistuvat kemialliset rasitukset riippuvat tiivisteiden käyttökohdeesta ja rasitukset ovat yleensä vaikeasti ennustettavissa. Kaatopaikkojen pohjaosissa suotoveden koostumus vaihtelee kaatopaikoittain mm. jätesisällön ja kaatopaikan fyysikaalisten, kemiallisten ja biologisten hajoamisprosessien seurauksena. Suotoveden pitoisuudet vaihtelevat myös ajallisesti samankin kaatopaikan eri osissa. Suotovesien koostumusta on esitetty taulukoissa 4.2 - 4.4.

Taulukko 4.2. Kaatopaikkojen suotovesien pitoisuustietoja Suomesta /55/.

Parametri	Yks.	Kirjallisuustietoja suomalaisista tutkimuksista			
		Pienin	Keskiarvo	Mediaani	Suurin
Sähkönjohtavuus	mS/m	5,0	160	150	820
Kloridi	mg/l	4,8	220	130	1 800
pH	-	2,8	-	7,0	8,6
Alkaliteetti	mmol/l	1,0	15	-	36
COD _{Mn}	mg/l	7,0	230	-	1 200
COD _{Cr}	mg/l	40	390	200	2 200
TOC	mg/l	0,04	180	-	590
BOD ₇	mg/l	< 1	270	-	3 900
P-kok	µg/l	< 16	513	-	3 900
N-kok	mg/l	5,0	74	-	370
NH ₄ -N	mg/l	-	33	6,4	340
F	mg/l	< 0,1	3,30	-	44
SO ₄	mg/l	< 1	110	-	1 000
Al	µg/l	600	4 600	-	12 700
As	µg/l	-	9,50	< 6	760
B	µg/l	-	500	250	2 900
Hg	µg/l	< 0,01	-	-	-
Cd	µg/l	< 0,01	0,80	< 6	70
K	mg/l	-	66	43	650
Ca	mg/l	-	67	-	-
Co	µg/l	-	35	30	260
Cr	µg/l	-	71	15	7 000
Cu	µg/l	-	22	20	190
Pb	µg/l	-	0,70	3,0	63
Mg	mg/l	24	42	-	60
Mn	µg/l	80	1 600	1 400	81 000
Na	mg/l	-	120	73	750
Ni	µg/l	-	260	12	3 200
Fe	mg/l	< 0,1	23	6,1	150
Zn	µg/l	-	1 200	90	110 000
AOCL	µg/l	-	160	37	3 200
AOX	µg/l	-	510	-	-
2,4,6-TCP	µg/l	-	0,82	0,09	6,00
2,3,4,6-TeCP	µg/l	-	0,74	0,10	5,60
PCP	µg/l	-	0,15	0,08	3,00
kresolit	µg/l	-	78,00	4,20	870
syanidi	µg/l	-	< 5	62	650
PCB	µg/l	-	0,49	< 0,05	3,80

Taulukko 4.3. Yhteenveto Tarastenjärven kaatopaikan viemäriin johdettavien, Ämmäsuo-
suon kaatopaikan viemäriin pumpattavien ja Topinojan kaatopaikan suotovesien seu-
rannasta /96,97,98,94,95/

Parametri	Yksikkö	Viemäri-vesien tarkkailu v. 1996-2000 Tarastenjärvi		Viemäri-vesien tarkkailu v. 1999-2001 Ämmässuo		Suotovedet Topinojan kaatopaikka v. 2000-2001	
		Keski-arvo	Vaihtelu	Keski-arvo	Vaihteluväli	Keski-arvo	Vaihteluväli
Q	l/s	3,9	1,4 - 7,0				
pH	-	7,5	7,2 - 8,1	7,6	7,3 - 7,9	7,7	7,4-8,0
S-johtavuus	MS/m	432	272 - 870	696	440 - 926	690	330-870
Sameus	FTU	225	23 - 485	96	49 - 190		
Kiintoaine	Mg/l	116	41 - 220			91,7	7-370
BOD ₇	Mg/l	114	23 - 160	308	24 - 800	41,0	3,5-67,0
COD _{Mn}	Mg/l	149	64 - 500				
COD _{Cr}	Mg/l	635	380 - 1100	1344	610 - 2400	541	230-690
kok-N	Mg/l	224	120 - 580	408	240 - 750	326,2	71-450
NH ₄ -N	Mg/l	213	74 - 530	380	220 - 720	293	15-430
NO ₃ -N	Mg/l	-	-	0,74	< 0,1 - 2,1		
kok-P	Mg/l	1,3	0,6 - 2,3	4,4	1,2 - 12	6,9	0,210-50
Cl	Mg/l	349	240 - 630	608	360 - 880	701	280-910
Fe	Mg/l	-	-	16	11 - 25	14,2	0,9-67
Mn	Mg/l	-	-	0,89	0,68 - 1,3		
SO ₄	Mg/l	58,3	< 4,0 - 94	142	33 - 520	1,0	1-66
TOC	Mg/l	210*	180 - 240*	531	210 - 1500	174,9	68-290
Cu	Mg/l	0,017*	-	0,039	0,006 - 0,084		
Ni	Mg/l	0,052	0,036 - 0,1	0,060	0,025 - 0,14	0,043	0,006-0,110
Pb	Mg/l	0,003	< 0,001 - 0,009	0,012	0,007 - 0,019	0,004	0,001-0,011
Cr	Mg/l	0,061	0,036 - 0,1	0,063	0,021 - 0,11	0,035	0,003-0,080
Cd	Mg/l	0,0001	< 0,0001 - 0,0002	0,001		0,0002	0,0001-0,0012
Zn	Mg/l	0,051	< 0,020 - 0,1	0,28	0,14 - 0,52	0,136	0,009-0,430
Co				0,011	0,005 - 0,020		
As				0,012	< 0,001 - 0,036	0,010	0,002-0,020
CN				0,010			
AOX				0,599	0,33 - 1,2	0,304	0,150-0,410
Öljy						0,1	0,1-0,1

Taulukko 4.4. Kaatopaikoilta suoraan vesistöön johdettavien suotovesien käsittelyvaatimukseen liittyvät raja-arvot eräissä Euroopan maissa /61/.

Aine	Vesistöön johdettavien kaatopaikkavesien käsittelyvaatimukset, mg/l			
	Saksa	Sveitsi	Hollanti	Itävalta
COD	200	-	-	75
BOD	20	20	7 - 20	20
SO ₄	-	300	500	-
TKN	70	-	8 - 15	-
NH ₄ -N	50	-	4 - 8	-
NO ₂ -N	2	0,3	1 - 4	1,5
Pb	0,5	0,5	0,05	1
Cd	0,1	0,1	0,003	0,1
Cr(IV)	0,1	0,1	0,075	0,1
Cr, tot	0,5	2,1	-	2,1
Cu	0,5	0,5	0,05	1
Ni	0,5	2	0,1	2
Hg	0,05	0,01	0,0005	0,01
Zn	2	2	0,2	3
Sn	-	2	-	2
Fe	-	2	-	2
AOX	0,5	-	-	-
fenoli	-	0,05	-	0,1
kok.hiilivedyt	10	10	-	-
CN	0,2	-	-	-
S	1	-	-	-
P, tot	3	-	-	-

Taulukko 4.5. Skenaariotarkastelussa käytettävien suotoveden sisältämien aineiden laskea- arvojen lähtökohdat /100/.

	SO ₄ , mg/l	Cl, mg/l	Ba, mg/l	Cu, mg/l	Mo, mg/l	TOC, mg/l
LÄHTEET						
Suunnittelukeskus 2000	110	220	Tulokset 16 ulkom. kaato- paikalta	0.022	Tulokset 2 ulkom. kaato- paikalta.	180
Tarastenjärvi, Pirkanmaan JH Oy	58	349		0.017		210
Ämmässuo, YTV	142	608		0.039		531
Topinoja, Turku	34	701		-		175
75. PROSENTTIPISTE	118	631	1.11	0.03	0.10	290
Skenaariotarkastelun lähtöarvo	120	630	1.10	0.03	0.10	290

Teollisuusjätteiden kaatopaikoilla yksittäisten aineiden pitoisuudet ovat yleensä suurempia kuin yhdyskuntajätteen kaatopaikoilla. Kaatopaikkavesien liuotinpitoisuudet ovat olleet alhaisia luonnon saville ja geomembraaneille haitallisiin pitoisuuksiin verrattuna. Suotovesien pH on ollut keskimäärin 7 (neutraali). Suomalaisia kaatopaikkavesiä vastaavilla kaatopaikkavesillä hiekkabentoniittiseoksen vedenläpäisevyys on ollut kolminkertainen puhtaalla vedellä määritettyyn läpäisyyn nähden /17/. Suoto- ja jätevesillä suoritetuissa pidempiaikaisissa läpäisevyysmäärittelyissä mineraaliainestivistemateriaalien (maabentoniitit ja luonnonmateriaalit) läpäisevyyden on kuitenkin havaittu myös pienentyvän puhtaalla vedellä suoritettuihin läpäisevyysmäärittelyihin nähden /26/.

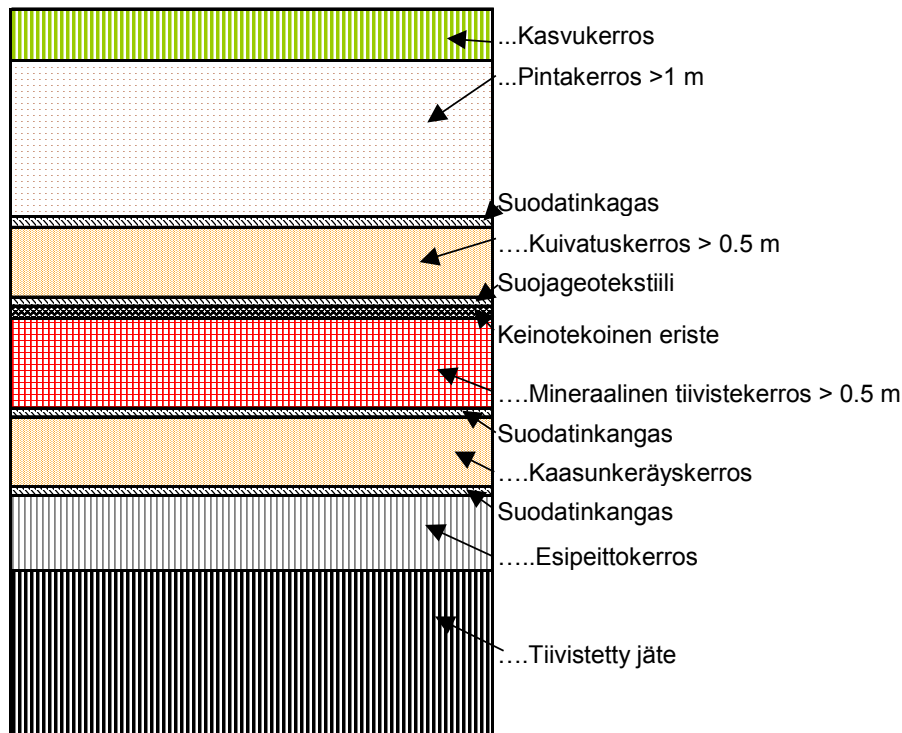
Vaarallisten aineiden varastoalueilla ja nykyisissä kaatopaikan pohjarakenteissa geomembraania käytetään yleensä vastaamaan tiivisterakenteen kemiallisesta tiiviydestä. Yhtenä perusteena yhdistelmärakenteen käytölle on juuri se, että geomembraani pidättää tiettyjä orgaanisia yhdisteitä, joita mineraaliainestiiivisteellä ei voida pidättää. Mineraaliainestiiiviste puolestaan toimii mm. raskasmetalleja pidättävänä komponenttina. Kaatopaikoissa käytettävien geomembraanien kestävyys tutkitaan yleensä käyttäen puhtaita, joko laimentamattomia tai laimennettuja, kemikaaleja tai kemikaalien seoksia sekä suotovesiä simuloivia nesteitä. Tarvittaessa suotoveden koostumus ja geomembraanin tai maamateriaalin vastustuskyky todellista koostumusta vastaan on selvitettävä erikseen.

Biologiset rasitukset

Biologisilla rasituksilla on yleensä vähäinen vaikutus tiivisterakenteessa käytettävään mineraaliainekseen. Kaatopaikan pohjalla vallitsevat anaerobiset olosuhteet ja mikrobiologinen toiminta sekä orgaanisten yhdisteiden hajoaminen on näissä olosuhteissa yleensä hitaampaa kuin hapellisissa olosuhteissa. Toisaalta kaatopaikan pohjalla ja yläosassa eliöiden kasvuolosuhteet saattavat olla merkittävästi edullisemmat mm. lisääntyneestä ravinnon saannista ja korkeammasta lämpötilasta johtuen. Tämä saattaa aiheuttaa maamateriaalissa tai etenkin muussa vastaavassa tiivistemateriaalissa (esim. uusiomateriaalit) olevan orgaanisen aineksen normaalia nopeampaa hajoamista. Nykyisin käytävissä rakenneratkaisuissa biologinen kuormitus kohdistuu lähinnä pohjaeristyksen geomembraaniin ja esim. pintaeristyksessä mahdollisesti käytettävään bentoniittimattoon. Muiden biologisten rasitusten vaikutukset (kasvien juuret, eläimet) pintaeristeisiin on pyrittävä estämään rakenteellisilla toimenpiteillä. Kaatopaikkakäyttöön tarkoitettujen geomembraanien soveltuvuus testataan mikrobeja, juurien tunkeutumista ja eläimiä vastaan standardoiduin testein.

4.1.2 Kaatopaikan pintaeristys

Ympäristöoppaan 89 /41/ mukainen esimerkki kaatopaikan pintaeristyksestä eri kerroksineen on esitetty alla olevassa kuvassa 4.1 (kerrospaksuudet eivät ole mittakaavassa).



Kuva 4.1. Esimerkki kaatopaikan pintaeristyksestä eri kerroksineen

Pintaeristykseen yleiset, eri kerroksille yhteiset toimivuusvaatimukset

- Pintaeristykseen tehtävänä on estää tai rajoittaa kaatopaikan passiivisen vaiheen aikana / käytöstä poistamisen jälkeen sade- ja pintavaluntavesien imeytyminen jätteenkereeseen ja siitä seuraava likaantuneen suotoveden muodostuminen ja haitta-aineiden kulkeutuminen ympäristöön (pitää puhtaat vedet ja likaiset suotovedet erillään).
- Tiiviin pintaeristykseen avulla tehostetaan kaasun talteenottoa ja vähennetään kaatopaikkojen ympäristöhaittoja.
- Kestävyys fyysisiä kuormituksia vastaan
- Kestävyys kemiallisia rasituksia vastaan
- Ominaisuuksien pysyvyys

Mahdollisessa vaiheittaisessa kaatopaikan suojausrakentamisessa kaatopaikan lopettamisen jälkeen ensimmäisessä vaiheessa rakennetaan jätteiden päälle väliaikainen pinta-rakenne. Samalla kerätään suotovedet talteen (puhdistukseen) ja annetaan kaatopaikan toimia aktiivisena bioreaktorina. Kun huomattavaa pintaeristysten toimivuutta vaarantavaa jätteiden hajoamista ja painumista ei enää tapahdu, rakennetaan lopullinen pintarakenne.

Pintaeristykseen kerroskohtaiset toimivuusvaatimukset, rasitukset sekä materiaali- tai rakennevaatimuksia ja -suosituksia

Kasvukerros

Kasvukerroksen tehtävänä on

- toimia kasvien kasvualustana
- edistää pintavaluntaa
- kaatopaikka-alueen maisemointi (jälkikäytöstä riippuen)
- metaanin ja hajukaasujen biologinen hapettaminen (yhdessä pintakerroksen kanssa, jos kaatopaikalla ei ole kaasunkeräysjärjestelmää)
- toimia kuormitusta kantavana kerroksena (hoito- yms. jälkikäytön toimenpiteiden aiheuttamat kuormat)

Kasvukerrokseen kohdistuvat rasitukset

- ilmasto
- lämpötila (kuivuminen, jäätyminen)
- sade (pintavalunta, eroosio, liettyminen)
- tuulet (pölyäminen, tuulieroosio)
- mekaaninen kulutus ja kuormitus (riippuu kaatopaikka-alueen jälkikäytöstä)
- kasvillisuus (juuristo, kasvien tarvitsema kosteus)

Materiaalilta edellytettävä ominaisuus / rakennesuositus

- humusmaata tai muuta sopivaa kasvualustaa (jälkikäytöstä riippuen)
- eroosiokestävyys (arvioidaan rakeisuuden perusteella)
- kerroksen paksuuden on oltava riittävä istutettavan kasvillisuuden juuriston syvyys huomioon ottaen (syväjuuristen kasvien käyttöä vältettävä)
- riittävä kantavuus pinnalla esiintyvien kuormien suhteen

Pintakerros

Pintakerroksen tehtävänä on (yhdessä kasvukerroksen kanssa)

- toimia mineraalisen tiivistyskerroksen routasuojojauksena
- estää mineraalisen tiivistyskerroksen kuivumista
- edistää pintavaluntaa (pintakerroksen läpi tulevan veden ohjautuminen pois alemmista kerroksista)
- suojata alempia kerroksia kasvien juurilta
- edistää kaatopaikka-alueen maisemointia ja jälkikäyttöä
- tulipalojen estäminen (kaatopaikkapalot)
- metaanin ja hajukaasujen biologinen hapettaminen (jos kaatopaikalla ei ole kaasunkeräysjärjestelmää)

Pintakerrokseen kohdistuvat rasitukset

- ilmasto
 - lämpötila (kuivuminen, jäätyminen)
- sade (pintavalunta, eroosio)

- suotautuminen (veden virtaus)
- bioturbaatio (kasvit, eläimet)
- kaatopaikkakaasut (kaasujen koostumuksesta aiheutuvat rasitukset)
- kaatopaikkapenkereen muodonmuutokset (painuminen, siirtymät luiskissa)
- kasvukerroksen pinnalla esiintyvät kuormitukset

Materiaalilta edellytettävä ominaisuus / rakennesuositus

- vettä pidättävää luonnonmaa-ainesta (soveltuvuus arvioidaan usein rakeisuuden ja materiaalikoostumuksen perusteella)
- teollisuuden sivutuotteilla lisäksi kaatopaikkakelpoisuus
- eroosion kestävä (arvioidaan yleensä rakeisuuden perusteella)
- "juuristo- / kasvuystävällistä"
- leikkauslujuus riittävä (luiskien riittävää stabiliteettia varten)
- kantavuus riittävä pinnalla esiintyvien kuormien suhteen
- kerroksen vähimmäispaksuus 1,0 m /41/ (routasuojausvaatimus paikallisesti)
- tiiviys (juuriston haitallisen tunkeutumisen ehkäiseminen)

Suodatinkerros

Suodatinkerroksen tehtävänä on

- salaojakerroksen ja pintakerroksen toistaan erottaminen
- estää pintakerroksesta irtoavan (suotoveden mukana kulkeutuvan) kiintoaineksen kulkeutuminen salaojakerrokseen
- estää salaojakerroksen vedenjohtavuuden pienentyminen ja kerroksen tukkeutuminen

Suodatinkerrokseen kohdistuvat rasitukset

- pintakerroksesta irtoava hienoaines (saattaa tukkia suodatinkerroksen)
- pintakerroksen läpi suotautuva vesi ja sen virtaus (eroosio, suffoosio)
- suotoveden kemiallinen koostumus (kerroksen rakeisuuden / huokoisuuden muuttumisriski)
- suotoveden biologinen koostumus (kerroksen läpäisevyyden haitallinen kasvu)
- bioturbaatio (kasvit, eläimet)

Materiaalilta edellytettävä ominaisuus / rakennesuositus

- suodatinkriteerit (kuivatuskerrosta vastaan) täyttävä mineraalimaa (arvioidaan rakeisuuden perusteella)
- suodatinkangas (luokka \geq III / NordGeoSpec N3, paino ≥ 200 g/m²)
- teollisuuden sivutuotteilla lisäksi ympäristökelpoisuus (PIPO-ohjearvot /100/)

Kuivatuskerros

Kuivatuskerroksen (salaojituskerroksen) tehtävänä on

- alentaa tiivistyskerrokseen kohdistuvaa vesipainetta
- johtaa yläpuolisten kerrosten läpi suotautuva vesi pois rakennekerroksesta

Kuivatuskerrokseen kohdistuvat rasitukset

- suotoveden (ylempien kerrosten läpi tulleen sadeveden) määrä (virtaus)
- suotoveden kemiallinen koostumus (kerroksen rakeisuuden / vedenjohtavuuden muuttumisriski)
- suotoveden biologinen koostumus (kerroksen läpäisevyyden haitallinen pieneneminen)
- suotoveden mukana kulkeutuva hienoaines (tukkii kerroksen, jos suodatinkerros ei toimi)
- bioturbaatio (kasvit, eläimet)

Materiaalilta edellytettävä ominaisuus / rakennesuositus

- pitkäaikainen kemiallinen kestävyys (mineraalimaan CaCO₂-pitoisuus < 20 p-%) /41/
- pitkäaikainen mekaaninen kuormituskestävyys (kokoonpuristuvuus)
- hydraulisten ominaisuuksien (vedenläpäisevyys, vedenjohtavuus) pysyvyys
- rakeisuus (# 16-32 mm), raemuoto (pyöreärakeista) /41/
- riittävä huokostila (vedenläpäisevyys $k > 10^{-3}$ m/s) /41/
- teollisuuden sivutuotteilla lisäksi ympäristökelpoisuus (PIPO-ohjeavot /100/)
- geomatto (geosynteettinen matto, soveltuvuus on aina osoitettava tapauskohtaisesti)
- kerroksella on oltava riittävä eroosiokestävyys (arvioidaan rakeisuuden perusteella)
- kerroksella on oltava riittävä stabiliteetti luiskissa (leikkauslujuus)
- mineraalimaakerroksen vähimmäispaksuus 0,5 m /41/
- pinnan vähimmäiskaltevuus 5 % /41/

Suojakerros

Jos keinotekoista eristettä ei asenneta, niin suojakerroksen korvaa suodatinkerros, jonka tehtävänä on erottaa salaojakerros ja tiivistyskerros toistaan, jolloin siihen kohdistuvat suodatinkerrokseen yleensä kohdistuvat rasitukset ja yleensä suodatinkerrosta koskevat vaatimukset.

Keinotekoisien eristeen yläpuolisen suojakerroksen tehtävänä on

- suojata keinotekoista eristettä vaurioitumista vastaan

Suojakerrokseen kohdistuvat rasitukset

- suotoveden määrä ja koostumus (kemiallinen, biologinen)
- bioturbaatio (syväjuurisot kasvit, eläimistö)
- yläpuolisten kerrosten asennustyö, mekaaniset rasitukset
- jätepenkereen muodonmuutokset (painuminen, sivusiirtymät)

Materiaalilta edellytettävä ominaisuus / rakennesuositus

- yhteensopivuus (kemiallinen, mekaaninen) keinotekoisien eristeiden kanssa
- riittävä kitka keinotekoisien eristeiden rajapinnassa
- sopiva rakeisuus (kivennäismaa # 0...2 mm) /40/
- mineraalimaakerroksen paksuus vähintään 0,1 m /41/
- geotekstiili / kuitukangas, paino vähintään 1200 g/m² /40/
- teollisuuden sivutuotteilla lisäksi kaatopaikkakelpoisuus (PIPO-ohjeavot /100/)

Keinotekoinen eriste

Keinotekoinen eriste joko toimii itsenäisenä / ainoana tiivistyskerroksena tai se täydentää tarvittaessa tiivistyskerrosta ja sen tehtävänä on

- estää sadevesien (ylempänä olevien kerrosten läpi suotautuvan veden) imeytyminen ensin tiivistyskerrokseen ja sen läpi jätepenkereeseen
- tehostaa kaatopaikkakaasujen keräilyä (kaasujen nouseminen ylöspäin estyy)
- estää kasviston juurien tunkeutuminen tiivistyskerrokseen

Keinotekoiseen eristykseen kohdistuvat rasitukset

- suotoveden määrä (sen mukana olevien membraanille haitallisten aineiden määrä)
- suotoveden kemiallinen koostumus ylhäältäpäin
- suotoveden biologinen koostumus
- kaatopaikkakaasun koostumus (alhaaltapäin)
- lämpötila (jätepenkereen lämpötila, yläpuolinen lämpötila)
- jätepenkereen kaasunmuodostus (mahdollinen kaasunpaine alta päin)
- yläpuolelta tulevat mekaaniset rasitukset työaikana (esim. työkoneet)
- alla olevan pohjan muodonmuutokset (painuminen, epätasaiset painumat)
- jätepenkereen siirtymät (luiskissa)
- UV-rasitus (työaikana, työmaalla varastoituna)
- lämpötila rakennusaikana ennen peittämistä (kalvon lämpölaajeneminen, venyminen / kutistuminen)

Materiaalilta edellytettävä ominaisuus / rakennesuositus

- pitkäaikainen muodonmuutoksen kestävyys (painumansietokyky/muodonmuutoskestävyys)
- pitkäaikainen kemiallinen kestävyys
- pitkäaikainen biologinen kestävyys
- kestävyys UV-säteilyä vastaan (rakennusvaiheessa)
- roudankestävyys, pakkasen kestävyys /YO 89/
- yhteensopivuus mineraalisen tiivistyskerroksen kanssa (mm. kemiallinen yhteensopivuus, rajapinnan kitka > stabiliteetti, tiivis kontakti)
- yleensä käytetään geomembraania (HDPE), paksuus ≥ 2 mm /YO 36/

- riittävä keinotekoisien eristeen ja yläpuolella olevan suojakerroksen välinen kitka (liukumisen, luiskien stabiliteetti)
- saumojen tiiviys, tiiviiden läpimenojen toteutusmahdollisuus

Tiivistyskerros

Tiivistyskerroksen tehtävänä on

- vähentää sadevesien imeytymistä jätepenkereeseen
- ohjata kaasun purkautumista kaasunkeräyskerrokseen
- toimia (mahdollisen) keinotekoisien eristeen tukikerroksena ja suojakerroksena (alaspäin)

Tiivistyskerrokseen kohdistuvat rasitukset

- suotoveden määrä
- suotoveden kemiallinen koostumus (kerroksen rakeisuuden /vedenjohtavuuden muuttumisriski)
- suotoveden biologinen koostumus (kerroksen läpäisevyyden haitallinen suureneminen)
- hydraulinen gradientti (vesipaine)
- lämpötila jätepenkereen pinnalla
- bioturbaatio (kasvit, eläimet), jos ei ole keinotekoisia eristettä
- alla olevan jätepenkereen muodonmuutokset (painumat, epätasaiset painumat)
- jätepenkereen siirtymät (luiskien stabiliteetti)

Materiaalilta edellytettävä ominaisuus / rakennesuositus

- perusratkaisussa mineraalimateriaalin $k < 1 \times 10^{-9}$ m/s /41/
- (mineraalimateriaalin) leikkauslujuus vähintään 50 kN/m² /41/
- muodonmuutoskestävyys (vedenläpäisevyyden pysyvyys muodonmuutostilanteessa)
- itsekorjautuvuus (arvioidaan esim. materiaalikoostumuksen, vedenpidättymisen ja plastisuuden perusteella)
- savipitoisuus (<0.002 mm) vähintään 14 %, >10 % savimineraaleja /40/
- plastisuusindeksi (savi) > 10 %, juoksuraja < 90 % /40/
- kuivumisen sieto halkeilematta (vedenpidätyskyky), tilavuuskuivumiskutistuma < 5% /40/
- pitkäaikainen kemiallinen kestävyys (vedenläpäisevyyden suurenematta) (karbonaattimineraalien määrä enintään 15 p-%) /41/
- pitkäaikainen biologinen kestävyys (vedenläpäisevyyden suurenematta) (orgaanisen aineksen määrä enintään 2 p-%) /41/
- jäätyminen sieto /routimattomuus (vedenläpäisevyyden suurenematta)
- yhteensopivuus keinotekoisien eristeen kanssa (tiivis kontaktipinta, kemiallinen yhteensopivuus)
- teollisuuden sivutuotteilla lisäksi ympäristökelpoisuus (PIPO-ohjeavot /100/)

- materiaalin rakennettavuus (etenkin tiivistettävyyys)
- mineraalisen tiivistyskerroksen (savi, siltti, silttimoreeni, maabentoniitti, mineraalinen teollisuuden sivutuote) minimipaksuus 0,5 m /41/
- materiaalin homogeenisuus (myös tiivistyksen jälkeen)
- säänkestävyys (lämpötila, sade) (arvioidaan yleensä materiaalikoostumuksen ja rakeisuuden perusteella)
- eroosionkestävyys (myös materiaalin sisäinen eroosio)
- mineraalisen tiivistyskerroksen vaihtoehtomateriaalien vastaavuus osoitettava (ohennettu mineraalieriste, bentoniittimatto, muut korvaavat materiaalit)

Suodatinkerros

Suodatinkerroksen tehtävänä on

- erottaa tiivistyskerros ja kaasunkeräyskerros toisistaan

Suodatinkerrokseen kohdistuvat rasitukset

- tiivistyskerroksen läpi suotautuva vesi ja sen virtaus
- kaasunkeräyskerroksen läpi kaatopaikasta tulevat kaasut

Materiaalilta edellytettävä ominaisuus / rakennesuositus

- suodatinkriteerit täyttävä mineraalimaa (arvioidaan yleensä rakeisuuden perusteella)
- teollisuuden sivutuotteella lisäksi ympäristökelpoisuus (PIPO-ohjeartot)
- suodatinkangas (luokka \geq III / NordGeoSpec N3, paino \geq 200 g/m²)
- suodatinkriteerin tulee täytyä kaasunkeräyskerrosta vastaan
- kestävyys aggressiivisia kaasukomponentteja vastaan (arvioidaan usein mineraalikoostumuksen perusteella)
- mineraalikerroksen paksuus vähintään 0,1 m /41/

Kaasunkeräyskerros

Kaasunkeräyskerroksen (ja kaasunkeräysputkiston) tehtävänä on

- kerätä ja johtaa jätepenkereestä syntyvä kaasu edelleen käsiteltäväksi
- Kaasunkeräyskerrokseen tai sen alapuolelle voidaan tehdä kosteuden jakokerros kasteluputkistoineen, jos jätepengertä kastellaan kaasunmuodostuksen (biologisen hajoamisen) tehostamiseksi.

Kaasunkeräyskerrokseen kohdistuvat rasitukset

- jätepenkereestä syntyvät kaatopaikkakaasut (agressiivisuus kaasunkeräyskerroksen materiaalin suhteen)
- ylhäältäpäin suotautuva sadevesi
- jätepenkereen painuminen

Materiaalilta edellytettävä ominaisuus / rakennesuositus

- hyvin kaasua johtavaa materiaalia (kaasunkeräyskyky / kaasunläpäisevyys), (arvioidaan yleensä rakeisuuden perusteella)
- kestävyys aggressiivisia kaasukomponentteja vastaan (arvioidaan usein materiaali - / mineraalikoostumuksen perusteella)
- kestävyys (mahdollisia) suotovirtauksia vastaan (arvioidaan yleensä rakeisuuden perusteella)
- kestävyys kaasusta peräisin olevien ainesosien aiheuttamaa tukkeutumista vastaan (arvioidaan yleensä materiaalikoostumuksen perusteella)
- yleensä käytetään karkeaa lajittunutta maa-ainesta
- teollisuuden sivutuotteilla lisäksi ympäristökelpoisuus (PIPO-ohjeartikkelit)
- geomatto (geosynteettinen matto, soveltuvuus osoitettava aina tapauskohtaisesti)
- mineraalisen kerroksen paksuus vähintään 0,3 m /41/
- kaasunkeräysputket HDPE (PEH PN 10, reikien määrä ≥ 5 % putkipinta-alasta)

Kasteluputkisto

Kasteluputkiston tehtävänä on

- johtaa vettä kostutuskerroksen kautta jätepenkereeseen

Kasteluputkisto rakennetaan, jos pintaeristyksen tiivistyskerros on vettäläpäisemätön ja kaatopaikkaprosessien hallittu ylläpito hoidetaan jätepenkereen keinotekoisella kastelulla.

Kasteluputkistoon kohdistuvat rasitukset

- kasteluvesi: määrä ja koostumus
- asennustyö (ympäröivä materiaali ja sen tiiveys, tiivistystyö)
- yläpuolisten kerrosten mekaaninen rasitus
- alustan (jätepenkereen) painuminen
- kaatopaikkapenkereen lämpötila

Materiaalilta edellytettävä ominaisuus / rakennesuositus

- pitkäaikainen kemiallinen kestävyys (materiaali yleensä HDPE)
- pitkäaikainen mekaaninen kuormituskestävyys (tarvittava rengasjäykkyys määritettävä)
- haluttu kastelun edellyttämä putkiston rei'itys mitoitettava

Suodatinkerros

Suodatinkerroksen tehtävänä on

- erottaa esipeittokerros ja kaasunkeräyskerros toisistaan

Suodatinkerrokseen kohdistuvat rasitukset

- tiivistyskerroksen (ja kaasunkeräyskerroksen) läpi suotautuva vesi ja sen virtaus
- kaasunkeräyskerroksen läpi kaatopaikasta tulevat kaasut

Materiaalilta edellytettävä ominaisuus / rakennesuositus

- suodatinkriteerit täyttävä mineraalimaa (arvioidaan rakeisuuden perusteella)
- suodatinkriteerin tulee täytyä kaasunkeräyskerrosta vastaan
- suodatinkangas (luokka \geq III / NordGeoSpec N3, paino $\geq 200 \text{ g/m}^2$)
- kestävyys aggressiivisia kaasukomponentteja vastaan (arvioidaan yleensä mineraalikoostumuksen perusteella)
- teollisuuden sivutuotteella lisäksi ympäristökelpoisuus (PIPO-ohjeavot)
- mineraalikerroksen paksuus vähintään 0,1 m /41/

Esipeittokerros

Esipeittokerroksen tehtävänä on

- muodostaa riittävän tasainen pinta ja kantava alusta ylemmille kerroksille
- estää alla olevan jätteen ja yläpuolella olevan suodatinkerroksen materiaalin sekoittuminen toisiinsa

Esipeittokerrokseen kohdistuvat rasitukset

- tiivistyskerroksen läpi suotautuva ja / tai kasteluputkistosta tuleva vesi ja sen virtaus
- jätepenkereestä tulevat kaasut

Materiaalilta edellytettävä ominaisuus / rakennesuositus

- yleensä käytetään ylijäämämaata tai muuta luonnonmaa-ainesta
- teollisuuden sivutuotteella lisäksi ympäristökelpoisuus (PIPO-ohjeavot)
- vähimmäispaksuus 0,3 m (mineraalimaakerros) /41/
- riittävästi kaasua läpäisevä (arvioidaan yleensä rakeisuuden perusteella)

Jätetäyttö

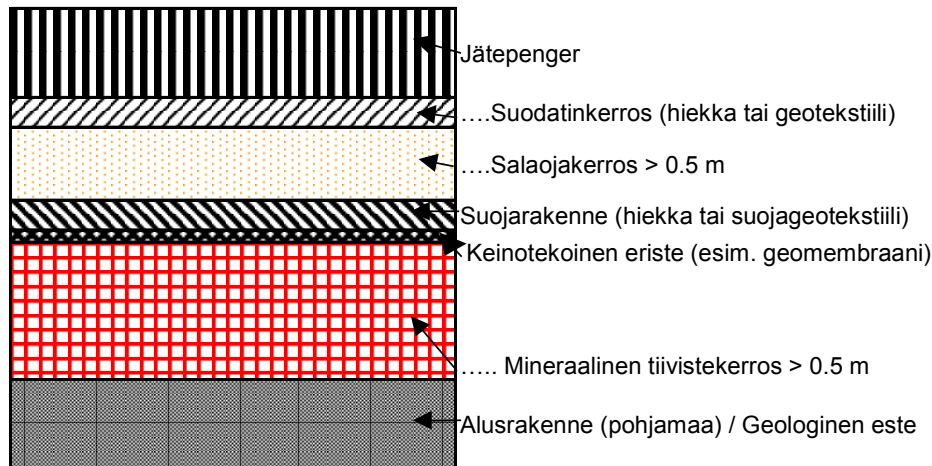
Jätetäytön (yläpinnan) on muodostettava riittävän tukeva ja stabiili alusta pintaeristysrakenteille sekä rakenteiden rakentamisen aikana että pitkäaikaisesti

Jätetäytön pinnalta edellytettävä ominaisuus

- jätepenkereen pinta on muotoiltava siten, että sen kaltevuudet ovat tehokkaan pinta-kuivatuksen ja kuivatuskerroksen toiminnan kannalta riittävät jätepenkereen painumisenkin jälkeen
- kaltevuudet muotoiltava toisaalta siten, että ne ovat riittävän loivat pintaeristykseen luiskattujen osien stabiliteettia (liukumisen estymistä) silmälläpitäen

4.1.3 Kaatopaikan pohjaeristys

Ympäristöoppaan 36 /40/ mukainen kaatopaikan pohjaeristuksen (yhdistelmä rakenne) periaatekuva eri kerroksineen on esitetty alla olevassa kuvassa 4.2 (kerrosten paksuudet eivät ole mittakaavassa).



Kuva 4.2. Kaatopaikan pohjaeristuksen (yhdistelmä rakenne) periaatekuva /40/. Tiivistyskerrokset rakennetaan, jos geologinen este ei ole riittävä haitta-aineiden kulkeutumisen estämiseksi

Pohjaeristuksen yleiset, eri kerroksille yhteiset toimivuusvaatimukset

- Pohjaeristuksen tehtävänä on tehostaa kaatopaikan suotovesien keräilyä ja vähentää haitta-aineiden kulkeutumista kaatopaikan ympäristöön kaatopaikan aktiivivaiheessa ja jälkihoitovaiheessa (pitkäaikaisesti). Pohjaeristys tehdään, jos geologinen este ei ole riittävä haitta-aineiden kulkeutumisen estämiseksi.
- Kestävyys fysikaalisia kuormituksia vastaan
- Kestävyys kemiallisia rasituksia vastaan
- Ominaisuuksien pysyvyys

Pohjaeristuksen kerroskohtaiset toimivuusvaatimukset, rasitukset sekä materiaali- tai rakennevaatimuksia ja -suosituksia

Suodatinkerros

Suodatinkerroksen tehtävänä on

- estää jätetäytöstä irtoavan (suotoveden mukana kulkeutuvan) kiintoaineksen kulkeutuminen salaojakerrokseen
- estää salaojakerroksen tukkeutuminen
- salaojakerroksen ja jätetäytön toistaan erottaminen

Suodatinkerrokseen kohdistuvat rasitukset

- jätetäytöstä irtoava hienoaines
- jätepenkereestä suotautuva vesi ja sen virtaus (erosio, suffoosio)
- suotoveden kemiallinen koostumus (kerroksen rakeisuuden / huokoisuuden muuttumisriski)
- suotoveden biologinen koostumus (kerroksen läpäisevyyden haitallinen muuttuminen)

Materiaalilta edellytettävä ominaisuus / rakennesuositus

- suodatinkriteerit täyttävä mineraalimaa
- suodatinkriteerin tulee täytyä salaojakerrosta vastaan
- suodatinkangas (luokka \geq III / NordGeoSpec N3, paino ≥ 200 g/m²)
- mineraalimaakerroksen paksuus vähintään 0,1 m /40/

Salaojakerros

Salaojakerroksen (kuivatuskerroksen) tehtävänä on

- kerätä ja poistaa (putkiston kautta) jätetäytöstä kertyvät suotovedet
- vähentää (poistaa) tiivistysrakenteen päälle muodostuvaa vesipainetta
- mahdollistaa kerrokseen sijoitettavan suotovesien keräilyputkiston rakentaminen

Rakennekerrokseen kohdistuvat rasitukset

- suotoveden määrä
- suotoveden kemiallinen koostumus (kerroksen rakeisuuden / vedenjohtavuuden muuttumisriski)
- suotoveden biologinen koostumus (kerroksen läpäisevyyden haitallinen pieneneminen)
- suotoveden mukana kulkeutuva hienoaines (tukkii kerroksen, jos suodatinkerros ei toimi)
- asennustyö (yläpuolisten kerrosten rakentaminen)
- jätepenkereen rakentaminen
- jätepenkereen paino
- suotoveden / jätepenkereen lämpötila

Materiaalilta edellytettävä ominaisuus / rakennesuositus

- pitkäaikainen kemiallinen kestävyys (mineraalimaan kokonais-CaCO₃-pitoisuus < 20 p-%) /40/
- pitkäaikainen mekaaninen kuormituskestävyys (kokoonpuristuvuus)
- hydraulisten ominaisuuksien (vedenläpäisevyys, vedenjohtavuus) pysyvyys
- rakeisuus (16- 32 mm), huokostila (vedenläpäisevyys $k > 10^{-3}$ m/s), raemuoto (pyöreärakeista) /40/
- teollisuuden sivutuotteilla lisäksi ympäristökelpoisuus (PIPO-ohjearvot /100/)

- geomatto (geosynteettinen matto, soveltuvuus on aina osoitettava tapauskohtaisesti)
- mineraalimaakerroksen paksuus vähintään 0,5 m /40/

Salaojitusputkisto

Salaojakerroksen putkiston tehtävänä on

- kerätä ja poistaa jätetäytöstä kertyvät suotovedet käsiteltäväksi

Salaojitusputkistoon kohdistuvat rasitukset

- suotoveden määrä (putkisto mitoitettava)
- suotoveden kemiallinen koostumus
- suotoveden biologinen koostumus
- suotoveden mukana kulkeutuva hienoaines
- suotoveden / jätepenkereen lämpötila
- asennustyö (ympäröivä materiaali ja sen tiiveys)
- jätepenkereen mekaaninen rasitus (staattinen kuormitus)
- alustan painuminen

Materiaalilta edellytettävä ominaisuus / rakennesuositus

- pitkäaikainen kemiallinen kestävyys (materiaali yleensä HDPE)
- pitkäaikainen mekaaninen kuormituskestävyys (rengasjäykkyys)

Suojakerros

Keinotekoisien eristeen yläpuolisen suojakerroksen / -rakenteen tehtävänä on

- suojata keinotekoista eristettä vaurioitumisesta vastaan sekä rakennusvaiheena että sen jälkeenkin

Suojakerrokseen kohdistuvat rasitukset

- suotoveden määrä ja koostumus (kemiallinen, biologinen)
- yläpuolisten kerrosten asennustyö, mekaaniset rasitukset
- jätepenkereen staattinen kuormitus
- suotoveden / jätepenkereen lämpötila

Materiaalilta edellytettävä ominaisuus / rakennesuositus

- yhteensopivuus (kemiallinen, mekaaninen) keinotekoisien eristeen kanssa
- riittävä kitka keinotekoisien eristeen rajapinnassa
- sopiva rakeisuus (kivennäismaa # 0...2 mm) /40/
- suojageotekstiili / kuitukangas, paino vähintään 1200 g/m² /40/
- teollisuuden sivutuotteilla lisäksi kaatopaikkakelpoisuus (PIPO-ohjeavot /100/)
- mineraalimaakerroksen paksuus vähintään 0,1 m; geomembraanin päällä olevan suojakerroksen paksuuden on oltava vähintään 30 cm, ennenkuin membraanin päällä saa liikkua (työkoneilla) /40/

Keinotekoinen eriste

Keinotekoinen eriste täydentää mineraalista tiivistyskerrosta ja sen tehtävänä on

- estää kaatopaikkapenkereestä suotautuvan veden pääsy tiivistyskerrokseen ja sen läpi pohjamaahan
- tehostaa suotovesien keräilyä

Keinotekoiseen eristykseen kohdistuvat rasitukset

- suotoveden määrä (sen sisältämien kalvolle haitallisten aineiden määrä)
- suotoveden / jätepenkereen lämpötila
- suotoveden kemiallinen koostumus
- suotoveden biologinen koostumus
- vesipaine (hydraulinen gradientti)
- kaasunpaine alta (jos suotovesi reagoi mineraalitiivisteeseen kanssa kaasua synnyttävästi)
- jännitykset (asennuksen aikana syntyneet, myöhemmin syntyvät)
- yläpuolelta tulevat mekaaniset rasitukset työnaikana
- jätepenkereen staattinen kuormitus
- alla olevan pohjan muodonmuutokset (painuminen, epätasaiset painumat)
- jätepenkereen siirtymät (luiskissa)
- UV-rasitus (työnaikana, suojaamattomana, työmaalla varastoituna)
- lämpötila rakennusaikana ennen peittämistä (kalvon lämpölaajeneminen, venyminen / kutistuminen)

Materiaalilta edellytettävä ominaisuus / rakennesuositus

- pitkäaikainen muodonmuutoskestävyys (painumansieto)
- pitkäaikainen kemiallinen kestävyys
- pitkäaikainen biologinen kestävyys
- kestävyys UV-säteilyä vastaan (rakennusvaiheessa)
- roudankestävyys, pakkasen kestävyys (työaikana, ennen riittävän suojauksen rakentamista)
- yhteensopivuus mineraalisen tiivistyskerroksen kanssa (mm. kemiallinen yhteensopivuus, rajapinnan kitka > stabiliteetti, tiivis kontakti)
- yleensä käytetään geomembraania (HDPE), paksuus ≥ 2 mm /40/
- saumojen tiiviys, tiiviiden läpimenojen toteutusmahdollisuus

Tiivistyskerros

Tiivistyskerroksen tehtävänä on

- kaatopaikasta irtoavien haitta-aineiden suotautumisen minimointi / rajoittaminen sallittuun arvoon
- kaatopaikasta irtoavien haitta-aineiden diffuusion minimointi / rajoittaminen sallittuun arvoon
- kaatopaikasta irtoavien haitta-aineiden, esim. raskasmetallien sitominen (adsorptio)
- toimia keinotekoisien eristeen tukikerroksena ja suojakerroksena (alaspäin)

Tiivistyskerrokseen kohdistuvat rasitukset

- suotoveden määrä
- suotoveden kemiallinen koostumus (kerroksen rakeisuuden /vedenjohtavuuden muuttumisriski)
- suotoveden biologinen koostumus (kerroksen läpäisevyyden haitallinen suureneminen)
- hydraulinen gradientti (vesipaine)
- lämpötila jätepenkereen alapinnassa
- jätepenkereen staattinen kuormitus
- alla olevan pohjan muodonmuutokset (painumat, epätasaiset painumat)
- jätepenkereen siirtymät (luiskien stabiliteetti)

Materiaalilta edellytettävä ominaisuus / rakennesuositus

- vedenläpäisevyys /92/
 - vaarallisen jätteen kaatopaikka: $k \leq 1.0 \times 10^{-9}$ m/s (paksuus ≥ 5 m)
 - tavanomaisen jätteen kaatopaikka: $k \leq 1.0 \times 10^{-9}$ m/s (paksuus ≥ 1 m)
 - pysyvän jätteen kaatopaikka: $k \leq 1.0 \times 10^{-7}$ m/s (paksuus ≥ 1 m)
- mineraalimateriaalin leikkauslujuus vähintään 50 kN/m² /40/
- muodonmuutoskestävyys (vedenläpäisevyyden pysyvyys muodonmuutostilanteessa)
- itsekorjautuvuus (arvioidaan esim. materiaalikoostumuksen, vedenpidättymisen ja plastisuuden perusteella)
- savipitoisuus (<0.002 mm) vähintään 14 %, >10 % savimineraaleja /40/
- plastisuusindeksi (savi) > 10 %, juoksuraja < 90 % /40/
- kuivumisen sieto halkeilematta (vedenpidätyskyky), tilavuuskuivumiskutistuma < 5% /40/
- pitkäaikainen kemiallinen kestävyys (vedenläpäisevyyden suurenematta) (karbonaattimineraalien määrä enintään 15 p-%) /40/
- pitkäaikainen biologinen kestävyys (vedenläpäisevyyden suurenematta) (orgaanisen aineksen määrä enintään 2 p-%) /40/
- jäätyminen sieto /routimattomuus (vedenläpäisevyyden suurenematta)
- yhteensopivuus keinotekoisien eristeen kanssa (tiivis kontaktipinta, kemiallinen yhteensopivuus)

- teollisuuden sivutuotteilla lisäksi ympäristökelpoisuus (PIPO-ohjeavot /100/)
- materiaalin rakennettavuus (etenkin tiivistettävyys)
- mineraalimaasta rakennetun tiivistyskerroksen paksuuden on oltava tavanomaisen jätteen ja pysyvän jätteen kaatopaikoilla vähintään 0.5 m ja ongelmajätteen kaatopaikalla vähintään 1.0 m /92/
- tiivistetyn rakenteen homogeenisuus ja materiaalin tasalaatuisuus
- säänkestävyys (lämpötila, sade), (arvioidaan yleensä materiaalikoostumuksen ja rakenteen perusteella)

Tiivistemateriaalin/-kerroksen "diffuusio / adsorptio-ominaisuudet" sekä haitta-aineiden diffuusio tiivistekerroksen läpi ja niiden pidättäytyminen tiivistekerrokseen on osoitettava laskelmin. Laskelmien tiivistemateriaalia koskevat lähtötiedot on tutkittava tai ne on muulla tavalla osoitettava tapauskohtaisesti luotettaviksi.

Alusrakenne

Kaatopaikan alusrakenteen tehtävänä on

- muodostaa riittävän tukeva ja stabiili alusta pohjaeristysrakenteille sekä rakenteiden rakentamisen aikana että pitkäaikaisesti päälle tulevan kaatopaikkapenkereen rasitukset huomioonottaen

Alusrakenteeseen kohdistuvat rasitukset

- kaatopaikan suotovedet
- kaatopaikkapenkereen staattinen kuormitus

Materiaalilta edellytettävä ominaisuus / rakennesuositus

- riittävä kantavuus /40/
 - kantavuusvaatimus karkearakeiselle pohjalle $E_2 \geq 45 \text{ MN/m}^2$
 - kantavuusvaatimus hieno- ja sekarakeiselle pohjalle $E_2 \geq 20 \text{ MN/m}^2$
 - kantavuussuhde $E_2/E_1 \leq 2,2$
- riittävä painumattomuus
- tiivistysrakenteen materiaalin kulkeutumisen estäminen alaspäin (suodatinkriteeri)

Geologinen este (perusmaa)

Geologisella esteellä (perusmaalla) tulee olla riittävä suojavaikutus estämään pohjaveden ja maapohjan haitallinen pilaantumisriski. Mikäli geologinen este ei täytä vaatimuksia, tehdään rakennetut tiivistyskerrokset perusmaan / alusrakenteen päälle.

Geologiselta esteeltä edellytettävä ominaisuus / rakennesuositus

Kaatopaikan maaperälle (kivennäismaa tai kallio) silloin, kun se voidaan käsittää geologiseksi esteeksi, asetetaan seuraavat vaatimukset (jolloin ei tarvita keinotekoisia tiivistyskerrosta):

- kaatopaikan maaperän on oltava kantava (kts. alusrakenne)
- kaatopaikan maaperän (geologisena esteenä) on täytettävä sellaiset veden kyllästämän maan vedenläpäisevyys- (k) ja paksuusvaatimukset, että niiden yhdistetty vaikutus vastaa seuraavilla kaatopaikoilla vähintään seuraavia vaatimuksia
 - vaarallisen jätteen kaatopaikka: $k \leq 1.0 \times 10^{-9}$ m/s; paksuus ≥ 5 m
 - tavanomaisen jätteen kaatopaikka: $k \leq 1.0 \times 10^{-9}$ m/s; paksuus ≥ 1 m
 - pysyvän jätteen kaatopaikka: $k \leq 1.0 \times 10^{-7}$ m/s; paksuus ≥ 1 m

4.2 Eristerakenteiden materiaalien ympäristökelpoisuus

Raportissa /100/ on esitetty ehdotus eristemateriaalien ympäristökelpoisuuden arviointiperiaatteista. Kaatopaikkaeristemateriaalien ympäristökelpoisuus-kriteerien määrittely perustuu kahteen pääperiaatteeseen. Ensimmäiseksi kaikkien eristerakenteissa käytettävien materiaalikerrosten on oltava kelpoisia vähintään tavanomaisen jätteen kaatopaikalle. Toiseksi sovellettavien kriteerien tulee olla sopuosinnissa olemassa olevien kriteerien (esim. uusiomateriaalien maarakentamiskäytön ympäristökelpoisuus-kriteerit) kanssa. Esitetyt rajat asettuvat pysyvän ja tavanomaisen jätteen ominaisuuksille annettujen EU-kriteerien välille. Lisäksi haitta-aineiden kokonaispitoisuudet (esim. metallipitoisuudet) eivät saa ylittää ongelmajäteluokituksen raja-arvoja. Lupaviranomainen päättää ko. tapaukseen soveltuvasta lähestymistavasta.

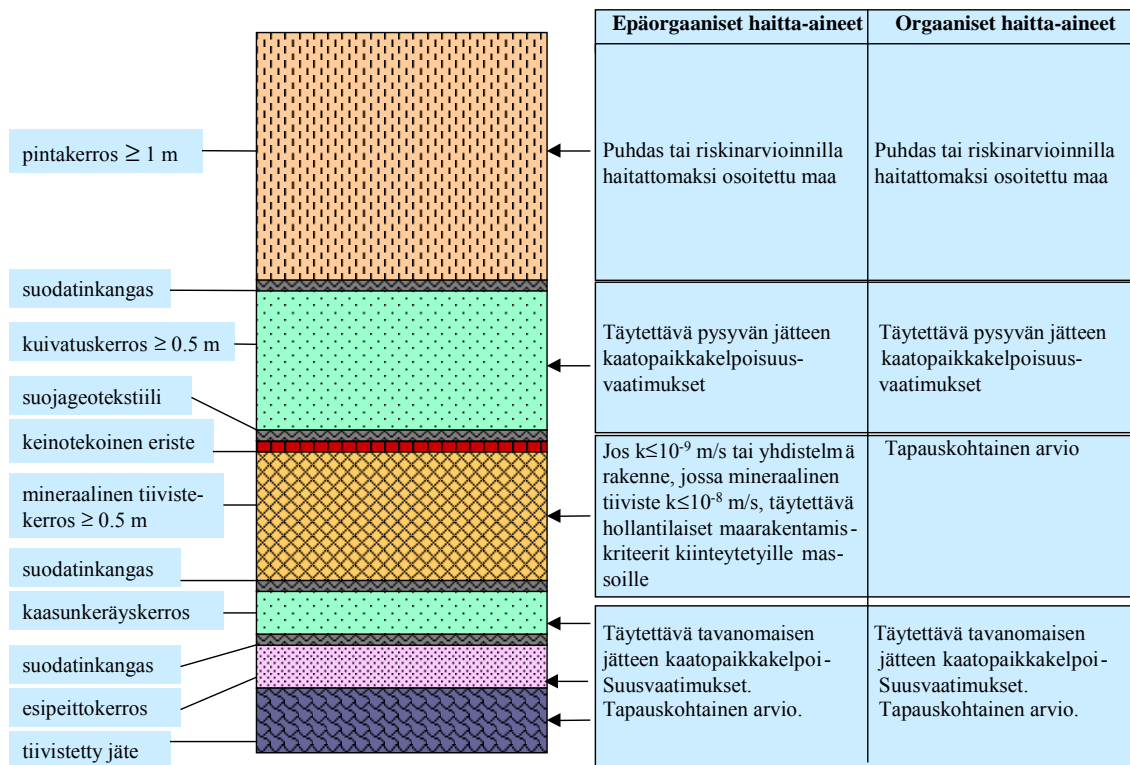
PIPO-projektin ehdotus eristerakenteissa käytettävien materiaalien ympäristökelpoisuuden arviointiperiaatteista on esitetty taulukossa 4.6 ja kuvissa 4.3 ja 4.4. Ehdotettujen kelpoisuus-kriteerien lähtökohtana on käytetty EU:n kaatopaikkakelpoisuus-kriteerejä. Lähestymistapana voidaan soveltaa myös tapauskohtaista riskiarviointia, jossa arvioidaan skenaariotarkastelulla kaatopaikkarakenteesta tulevia päästöjä eri ajanjaksoilla ja myös päästöjen merkitystä eri tilanteissa.

Skenaariotarkastelulla voidaan arvioida tunnistettujen hättatekijöiden suuruutta (esim. haitta-aineen pitoisuutta kaatopaikan pinta- tai pohjavesissä tai liukenevia aineita sijoituspaikan pinta-alaa kohden) eri aikaväleillä. Tästä voidaan arvioida hetkelliset päästöt tai ns. keskimääräiset päästöt koko tarkasteluajana. Näitä arvioita voidaan verrata vertailuarvoihin, joita pidetään sijoituspaikalla hyväksyttävänä. Vertailuarvoina voidaan käyttää Suomen kaatopaikkavesistä kerättyjä tietoja kaatopaikalta maastoon johdettavan veden pitoisuustasoista (esim. luku 4.1.1) ja toisaalta myös jätevesien viemärikelpoisuusvaatimuksia.

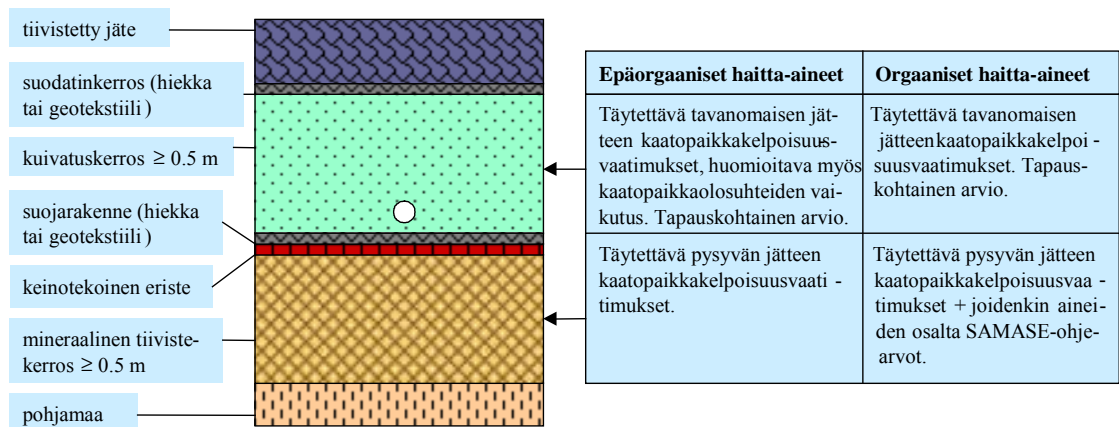
Taulukko 4.6. Pinta- ja pohjarakenteiden eristekerrosten ympäristökelpoisuuskriteerit /100/.

Eristekerros	Kriteeri (kohta- ja taulukko- viittaukset alkuperäisraporttiin /100/)	Peruste
Pintarakennekerros	Ympäristökelpoisuuskriteerin lähtökohtana tulee käyttää puhtaan maan kelpoisuusvaatimukset. Riskinarvioinnin perusteella voidaan näistä poiketa.	Arvioitava tapauskohtaisesti huomioimalla haitta-aineen ominaisuudet, sijoituspaikan olosuhteet ja alueen käyttö
Pintarakenteen kuivatuskerros	Pysyvän jätteen kelpoisuusvaatimukset (kohta 4.3.2, taulukko 10)	Sijoitusympäristö vastaa pysyvän jätteen kaatopaikkaolosuhteita
Pintarakenteen mineraalien tiivistyskerros ilman keinotekoisista eristekerrosta (muovi) *)	<ul style="list-style-type: none"> - Mikäli tiivistyskerroksen vedenläpäisevyys alle 10^{-9} m/s, sovelletaan hollantilaisia kiinteytettyjen seosten maarakentamiskäytölle (sijoitusluokan 1B mukaan) annettuja kriteerejä (kohta 4.3.4.3, taulukko 13) - Mikäli tiivistyskerroksen vedenläpäisevyys 10^{-9} m/s < $k < 10^{-8}$ m/s, sovelletaan EU:n pysyvälle jätteelle ehdotetut väljennetyt liukoisuuskriteerit (kohta 4.3.4.3, taulukko 13) - PH-olosuhteiden vaikutusta arvioitava, kun metallipitoisuus merkittävä - Orgaanisten haitta-aineiden kokonaispitoisuuksille raportissa on esitetty eri lähteistä tausta-arvoja, joita voidaan käyttää vertailuarvoina enimmäispitoisuuksien arvioimiseksi (kohta 4.3.4.3, taulukko 12) 	
Pintarakenteen mineraalien tiivistyskerros, jossa keinotekoinen eristekerros (muovi) *)	<ul style="list-style-type: none"> - Mikäli muovikalvon alapuolinen eristemateriaalin vedenläpäisevyys alle 10^{-8} m/s, sovelletaan hollantilaisia kiinteytettyjen seosten maarakentamiskäytölle (sijoitusluokan 1B mukaan) annettuja kriteerejä (kohta 4.3.4.3, taulukko 13) - PH-olosuhteiden vaikutusta arvioitava, kun metallipitoisuus merkittävä - Orgaanisten haitta-aineiden kokonaispitoisuuksille raportissa esitetty eri lähteistä tausta-arvoja, joita voidaan käyttää vertailuarvoina enimmäispitoisuuksien arvioimiseksi (kohta 4.3.4.3, taulukko 12) 	
Pintarakenteen kaasuunkeräyskerros ja esipeittokerros	Käytettävien materiaalien tulisi olla kaatopaikkakelpoisia tavanomaisen jätteen kaatopaikalle. (kohta 4.3.2, taulukko 10)	Sijoitusympäristö vastaa kaatopaikkaolosuhteita
Pohjarakenteen mineraalinen tiivistyskerros	Pohjaeristeiden ympäristökelpoisuuskriteereiksi ehdotetaan käytettäväksi EU:n antama pysyvän jätteen kelpoisuusvaatimukset. Joillekin orgaanisille haitta-aineille (PCB, PAH, mineraaliöljyt) käytetään rajana saastuneen maan tavoitearvoja (kohta 4.3.5.1, taulukot 10 ja 15)	Pohjaeristeille asetettavat ympäristökriteerit ovat tiukat, koska pohjaeristettä ei voida myöhemmin poistaa. Tutkimuksissa huomioitava kaatopaikkaolosuhteet (pH, suotoveden laatu).
Pohjarakenteen muut kerrokset (esim. salaojakerros)	Käytettävien materiaalien tulisi olla kaatopaikkakelpoisia tavanomaisen jätteen kaatopaikalle. Kaatopaikkaveden vaikutusta myös arvioitava, mikäli tarkasteltavana on sellaisen epäorgaanisen ja orgaanien jätteen kaatopaikka (kohta 4.3.5.2)	Edellyttää usein tapauskohtaista arviointia kaatopaikkaolosuhteiden huomioon ottamista.

*) Mineraalisen tiivistyskerroksen vaadittava vedenläpäisevyysarvo riippuu kaatopaikkatäyttöön imeytyvän suotoveden sallitusta määrästä. Suositus vedenläpäisevyysarvoksi on 10^{-9} m/s. Poikkeaminen suosituksesta edellyttää tapauskohtaista arviota /41/.



Kuva 4.3. Pintarakennekerrosten ympäristökelpoisuusvaatimukset /100/



Kuva 4.4. Pohjarakenteen ympäristökelpoisuusvaatimukset /100/.

4.3 Geosynteettisten tuotteiden hyväksymiskriteerit

Ympäristöoppaassa 36 "Kaatopaikan tiivistysrakenteet" on esitetty laajasti geosynteettisten tuotteiden käyttöön ja rakenteiden suunnitteluun liittyviä asioita ja mm. materiaallivaatimuksia sekä asentamista ja laadunvalvontaa työmaalla. Kuitenkaan tuotteiden ja materiaalien laatuvaatimuksia eikä hyväksymiskriteereitä ole juurikaan esitetty.

Geosynteettisille tuotteille on olemassa tai parhaillaan (kevät 2004) valmisteilla omat viralliset tai yleisesti käytössä olevat yleensä kansainvälisesti hyväksytyt tuotestandardit (luku 3.2), mutta nämäkään eivät sisällä eivätkä tule sisältämään hyväksymiskriteereitä erilaisissa käyttötarkoituksissa.

Tässä luvussa esitetyt geosynteettisten tuotteiden (bentoniittimatot, geotekstiilit, geomembraanit) kaatopaikkakäyttöä koskevat hyväksymiskriteerit ovat tarkoitettut kaatopaikan ensisijaisesti tiivistysrakenteita koskevassa tuotehyväksynnässä joko sellaisenaan tai yhdistelmärakenteen osana sovellettavaksi ja koekäyttöön. Geotekstiileille esitetyt kriteerit ovat sovellettavissa erottamis- ja suojaamistarkoituksessa käytettäville geotekstiileille. Tässä luvussa on esitetty myös tutkimus- ja testausmenetelmät, joiden tuloksiin esitetyt kriteerit perustuvat (vaikka tiivistysmateriaalien testausmenetelmiä on muuten käsitelty luvussa 4.4)

Hyväksymiskriteereillä tarkoitetaan sellaisia ominaisuusarvoja, jotka tuotteen tulee täyttää, kun testit tehdään annetuilla testimenetelmillä. Tuotehyväksyntään tähtävissä tutkimuksissa tuotetta ei voida kuitenkaan testata kaikissa käytännön rasitusolosuhteissa. Tuotetta mahdollisesti vaurioittavat rasitustekijät on poistettava tai minimoitava mahdollisimman pieniksi rakenteellisilla ratkaisuilla tai rakennusaikaisin toimenpitein. Esim. erilaisten kuormitusten, ennen kaikkea pistemäisten kuormitusten haitallinen vaikutus tuotteen vedenläpäisevyyteen on poistettava tuotteen päälle tulevien rakennekerrosten avulla. Myös on estettävä se, että bentoniittimatto kastuu työn aikana, koska kastumisesta (vedellä kyllästymisestä) seuraa vaurioitumisriski vähästenkin pistemäisten kuormitusten suhteen.

Tässä luvussa esitetyt kriteerit on laadittu useiden alan asiantuntijoiden ja joidenkin teollisuuden edustajien kanssa käytyjen keskustelujen ja käytävissä olleiden julkaisujen kriteerejä koskevien kirjoitusten, standardien tai standardiehdotusten pohjalta /33/, /1/, /24/, /107/, /15/, /11/, /47/. Kriteerit, joita käytetään arvioitaessa tuotteiden käyttökelpoisuutta kaatopaikkaeristeissä on esitetty

- bentoniittimatoille taulukossa 4.7 (osin viralliset)
- geomembraaneille taulukossa 4.8 (koekäyttöön)
- suojageotekstiileille taulukossa 4.9 (koekäyttöön)
- suodatingeotekstiileille taulukossa 4.10 (viralliset)

Lähtökohtana on ollut se, että kaatopaikan eristysrakenteilta vaaditaan suurta varmuutta ympäristövahinkojen estämiseksi ja että varsinkin pohjaeristykset ovat pysyviä rakenteita (hyvin pitkäikäiseksi tarkoitettuja) ja niiden korjaaminen samaan tapaan kuin esim. tien luiskasuojauksen korjaaminen ei ole käytännössä mahdollista. Tuotteen laadusta tinkiminen saattaa johtaa eristysrakenteiden kokonaistoiminnan pettämiseen ja hyvin vakaviin ja yleensä vaikeasti havaittaviin ympäristövaurioihin.

Kun näitä tuotteita käytetään kaatopaikkarakentamisessa, lähtökohtana vaatimuksille ja hyväksymiskriteereille on pidetty erityisesti sitä, että tuotteiden pitää toimia asetetussa toimintatarkoituksessa hyvin pitkä aika. Tiivistämis- ja suojaustarkoituksessa käytettävien tuotteiden saumaus on oleellinen osa tuotteen toimivuutta ja myös se on tehtävä huolellisesti. Saumausmenetelmä ja työn laadunvalvonta sekä saumalta vaadittavat ominaisuudet (hyväksymiskriteerit) on esitettävä työselityksessä.

Kuitenkaan hyväksymiseksi tehtävät testit eivät suoraan anna yksikäsitteisiä materiaalien ja tuotteiden tahi rakenteiden käyttöikämitoituksessa tarvittavia parametrejä. Testien tuloksista pitäisi kuitenkin pystyä arvioimaan tuotteiden turmeltumista ajan mukana (luku 5.3). Mitä parempi tuote olennaisilta turmeltumiseen vaikuttavilta testituloksiltaan rakenteeseen valitaan, sitä todennäköisempää on, että tuotteella ja koko rakenteella on myös pitkä kestoikä.

Esitetyt kriteerit on katsottu tarkoituksenmukaiseksi laatia ja julkaista tässä yhteydessä osin epävirallisina ja koekäyttöluonteisina, koska esim. tiivistykseen käytettävän yhdistelmärakenteen käsittely ilman geomembraania ei ole mahdollista ja jotta rakenne olisi luotettavasti toimiva ja erilaisten rakenteiden vertailtavuus olisi mahdollista, on kaikille rakenneosille (myös suoja- ja suodatingeotekstiileille) oltava tietyt mieluiten yleiset ja yhtenäiset vaatimukset. Tässä yhteydessä esitetyt kriteereitä voidaan perustellusti muuttaa ja tarkentaa. Myös meneillään oleva CE-merkintöihin liittyvä kehitystyö saattaa aiheuttaa muutostarpeita tässä esitettyihin kriteereihin.

Standardin prEN 13493:2002 "Annex B (normative) Durability of geosynthetic barriers" (versio January 2004) mukaan geosyntetisten tuotteiden kestävyys suojauskäytössä riippuu niiden kyvystä vastustaa erilaisia rasituksia, jotka aiheuttavat tuotteen turmeltumista. Tällaisia turmeltumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat:

- kohonneiden lämpötilojen aiheuttama oksidaatio, UV-säteily tai toistuvat mekaaniset rasitukset
- solvaatio eli nestemäisten kemikaalien adsorption aiheuttamat materiaalin muutokset
- ympäristötekijöiden aiheuttama jännitys-säröily eli tuotteen mekaaninen murtuminen kemiallisten rasitustekijöiden vaikutuksesta
- mikrobiologisten rasitusten aiheuttama tuotteen heikkeneminen
- tuotteen liukenevien ainesosien liukeneminen
- ioninvaihto ja materiaalin sisältämien lisäaineiden turmeltuminen.

Testausmenetelmiä on käytettävissä seuraavien turmelevien rasitusten vaikutuksen selvittämiseksi /15/

- ilmatorasitukset (Resistance to weathering) EN 12224
- mikrobiologiset rasitukset (Microbiological resistance) EN 12225
- juuritunkeumat (Resistance to root penetration) prEN 14416

- jännitys-säröily (Resistance to environmental stress cracking) ASTM D 5397-99 (Appendix)
- liukeneminen (Resistance to leaching) prEN 14415
- oksidaatio (Resistance to oxidation) prEN 14575
- suotovedet (Resistance to landfill leachates) prEN 14414
- kuivuminen / kastuminen (Resistance to wetting / drying cycles) prEN 14417
- jäätyminen / sulaminen (Resistance to freeze / thaw cycles) prEN 17718

Bentoniittimatto

Taulukko 4.7. Ehdotus bentoniittimaton tuotehyväksyntävaatimuksiksi (koekäyttöön). Vaatimukset on tarkoitettu ensisijaisesti kaatopaikan pintaeristeessä käytettävälle tuotteelle.

Ominaisuus	Testausmenetelmä	Vaatimus
kankaiden laatu		ylempi neulasidottu alempi neulasidottu ¹⁾ , suositellaan komposiittia
kankaiden materiaali		PP, PE, PET
kankaiden neliöpaino	EN 965	ylempi $\geq 200 \text{ g/m}^2$ alempi neulasidottu: $\geq 200 \text{ g/m}^2$ alempi kudottu: $\geq 150 \text{ g/m}^2$
valmistustapa		läpeneulattu
vetolujuus	EN ISO 10319	$\geq 15 \text{ kN/m}^1$
murtovenymä	EN ISO 10319	25...50 % ¹⁾
repimislujuus	EN ISO 10319	$\geq 60 \text{ N/10 cm}$
puhkaisulujuus	EN ISO 12236	$\geq 2,5 \text{ kN}$
bentoniittityyppi	jauhe	natriumbentoniittia, ei sallita Na-aktivoitua bentoniittia
bentoniitin määrä	ASTM D5993-96	$\geq 4,0 \text{ kg/m}^2$, w = 0 %, minimimäärä
bentoniitti- (montmorillonitti) pitoisuus	XRD	$\geq 85 \%$
	metyleenisinikoe VDG P 69	$\geq 300 \text{ mg/g}$
toimitusvesipitoisuus	uunikuivaus	$\leq 12 \%$
orgaanisen aineksen määrä	termoanalyysi	ei sallita bentoniitissa
bentoniitin paisumisindeksi	ASTM D 5890	$\geq 25 \text{ mg/2 g}$, homogeeninen sakka, väri tasainen koko korkeudella
bentoniitin veden adsorptio	DIN 18132 (24 h)	$\geq 600 \%$
"fluid loss"	ASTM D 5891	$\leq 18 \text{ ml}$
läpäisevä vesimäärä	ASTM D 5887-95	$\leq 5 \times 10^{-9} \text{ (m}^3/\text{m}^2)/\text{s}$
rullan leveys, pituus		ilmoitettava
paksuus	EN 964-1	ilmoitettava
bentoniittimaton ja geomembraanin kontakti	ASTM D5321-02 (soveltaen)	osoitettava (rasialeikkauskoe tai Tilt –table)
saumaus	saumausmenetelmä ja saumauksen laadunvalvontamenetelmä sekä hyväksymiskriteerit on esitettävä	

¹⁾ Jos bentoniittimaton alusta on hyvin kantavaa ja vähän kokoonpuristuvaa, voidaan käyttää jäykempäänkin tuotetta ja maton alapinnassa voidaan käyttää myös kudottua kangasta.

Geomembraani

Taulukko 4.8. Ehdotus geomembraanin tuotehyväksyntävaatimuksiksi (koekäyttöön)
(Taulukon arvojen taustalla ovat mm. BAM-kriteerit)

Ominaisuus	Testimenetelmä	Vaatus
kalvomateriaali		HDPE (pohjaeriste)
mikro-organismit	EN ISO 846	Ei huomattavaa muutosta keskiarvoissa dw < 5 %, d(venymä) ja d(lujuus) < 10 %
juuret	prEN 14416	Ei läpitukenkautumista
vetomyötölujuus	EN ISO 527-3	≥ 15 N/mm ²
myötövenymä	EN ISO 527-3	≥ 10 %
murtolujuus	EN ISO 527-3	≥ 25 N/mm ²
murtovenymä	EN ISO 527-3	≥ 400 %
repimislujuus	DIN 53515	≥ 250 N
puhkaisulujuus (Static puncture test)	EN ISO 12236	≥ 6000 N
käyttäytyminen kaksiaksiaalisessa vetokokeessa	DIN 53861-1	≥ 15 %
jännityshalkeilunvastus (Stress Crack Resistance)	ASTM D 5397	≥ 200 h
hiilimustan määrä ¹⁾	EN ISO 11358	1.8...2.6 %
hiilimustan dispersio ¹⁾	ASTM D 5596-94	1.2
sulamisindeksi ¹⁾	DIN ISO 1133	muutos raaka-aineen ja tuotteen sulamisindeksissä ≤ 15 %
Oxidative Induction Time ¹⁾	EN 728	210 °C > 20 min
UV-kestävyys	EN 12224	tulokset raportoitava
rullan leveys		ilmoitettava
rullan pituus		ilmoitettava
paksuus	DIN 16726, DIN 53370	Ympäristöoppaan 36 mukaan "vähintään 2.0 mm" ²⁾
saumaus	saumausmenetelmä ja saumauksen laadunvalvontamenetelmä sekä hyväksymiskriteerit on esitettävä	

¹⁾ Membraanin lisäainekoostumus on ratkaiseva tuotteen pitkäikäisyyden ja ominaisuuksien pysyvyyden kannalta.

²⁾ Paksuusvaatimus-arvo tulisi määritellä tarkemmin (keskiarvo ja sallittu hajonta, luottamusväli tms.). Tehtaan tuotannon ja työmaan laadunvalvonnan vaatimukset tuotteelle tulisi yhtenäistää (saattaa yhteismitalliseksi).

BAM määrittelee Saksassa vaaditun 2.5 mm paksuuden seuraavasti: Arvo on nimellisarvo ja kaikkien yksittäisarvojen on oltava ≥ 2.5 mm; yksittäisarvo = keskiarvo ± 0.15 mm. Muille kuin 2.5 mm nimellispaksuuksille yksittäisarvo = keskiarvo ± 0.20 mm.

Pintaeristyksessä saattaa olla tarkoituksenmukaista käyttää pehmeämpää geomembraania, jolloin eräät ominaisuudet (esim. myötövenymä) poikkeavat yllä olevan taulukon arvoista. Taulukon arvot eivät ole välttämättä soveltuvia muille kuin muovista tehdyille membraaneille.

Suojageotekstiili

Taulukko 4.9. Ehdotus geomembraanin suojageotekstiilin tuotehyväksyntävaatimuksiksi (koekäyttöön)

Ominaisuus	Testimenetelmä	Vaatus
Neliöpaino	EN 965	Ympäristöopas 36 suosittelnee neliöpainoksi vähintään 1200 g/m ² , neulasidottu tuote
Rullan koko		leveys ja pituus ilmoitettava
Materiaali /tuote	Materiaali ei saa reagoida haitallisesti kalvomateriaalin kanssa (yhteensopivuus varmistettava / esitettävä) Neulasidottu, suojaustarkoituksiin valmistettu Neulavapaa	
Saumaus	Saumausmenetelmä ja saumauksen laadunvalvontamenetelmä sekä hyväksymiskriteerit on esitettävä.	
Huomautus: Jotta geomembraanin vaurioitumisriski työn aikana ja senkin jälkeen olisi mahdollisimman pieni ja tiivisterakenteen toimintakyky säilyisi mahdollisimman pitkään, suojageotekstiilille tulisi asettaa Ympäristöopas 36:ssa esitetyjä yksityiskohtaisemmat hyväksymisvaatimukset. Alla on <u>esimerkkinä itävaltalaiset vaatimukset (ÖNORM S 2076-2) /107/</u>		
Neliöpaino	EN 965	≥ 1200 g/m ² Minimiarvo (\bar{x} -s)
Paksuus (2 kPa kuormalla)	EN 964	≥ 6mm
Puhkaisulujuus (CBR puncture resistance)	EN ISO 12236	≥ 8 kN (\bar{x} -s)
Pyramidikoe (Pyramid puncture test)	(kuvattu normissa)	≥ 1000 N Minimiarvo (\bar{x} -s)
Vetolujuus (molemmat suunnat) Venymä (molemmat suunnat)	EN ISO 10319 EN ISO 10319	≥ 40 kN/m ≥ 30 %
Kemiallinen kestävyys	EN ISO 10319	muutos vetolujuudessa ja venymässä ≤ 30 %
Turmeltuminen	EN ISO 10319	muutos vetolujuudessa ja venymässä ≤ 20 %
Biologinen kestävyys	EN ISO 10319	muutos vetolujuudessa ja venymässä ≤ 10 %

Suodatinkangas

Kaatopaikkarakentamisessa noudatetaan tienrakennuskäyttöön tarkoitettuja vaatimuksia /TYLT4450/ (luku 3.2). Eristysrakenteissa suodatin/-erottamistarkoituksissa käytettäviltä geotekstiileiltä vaaditaan vähintään luokan N3 (NordGeoSpec) ominaisuuksia.

Taulukko 4.10. Suodatinkankaan ominaisuuksien vaaditut arvot käyttöluokittain Nord-GeoSpec:n mukaisesti /58/. Eristerakenteissa vaaditaan käyttöluokan N3 tuotetta.

Ominaisuus	Testimenetelmä	Maksimihajonta ¹	95% luottamusrajaa vastaavat vaaditut arvot ²				
			Käyttöluokka				
			N1	N2	N3	N4	N5
Vetolujuus, minimiarvo (kN/m), $F_{a,95}$	EN ISO 10319	-10%	6	10	15	20	26
Murtovenymä, minimiarvo maksimikuormalla (%), $\epsilon_{a,95}$	EN ISO 10319	-20%	15	20	25	30	35
Reikäkoko kartiopudotuskokeessa, maksimiarvo (mm)	EN 918	+20%	42	36	27	21	12
Energiaindeksi, minimiarvo (kN/m), $R_{a,95}$	EN ISO 10319		1.2	2.1	3.2	4.5	6.5
Nopeusindeksi ³ , minimiarvo (10^{-3} m/s)	EN ISO 11058	-30%	3	3	3	3	3
Merkitsevä aukkokoko, maksimiarvo O_{90} (mm)	EN ISO 12956	$\pm 30\%$	0.2	0.2	0.2	0.15	0.15
Massan maksimihajonta yksikköä kohti ⁴	EN 965		$\mp 12\%$	$\mp 12\%$	$\mp 10\%$	$\mp 10\%$	$\mp 10\%$
Staattinen puhkaisulujuuden maksimihajonta ⁴	EN ISO 12236		-10%				

¹Valmistajan on määritettävä hajonta, tässä taulukossa annetaan maksimihajonta CE –merkin liitteessä ilmoitetulle hajonnalle.

²Hajontaa ei saa lisätä vaadittuihin arvoihin. Tuotteen 95% luottamusrajaa vastaava arvo (= nimellisarvo \pm hajonta) lasketaan ja verrataan vaadittuun arvoon

³Jos CE –merkissä on ilmoitettu vedenläpäisevyyden arvo, lasketaan nopeusindeksi (VIH50) kaavalla: $VIH50 = K * 50/t$, jossa K on vedenläpäisevyys ja t on geotekstiilin paksuus (mm). Tämä riippuvuus on voimassa vain vedenläpäisevyyskokeessa, jossa veden virtaus on laminaarista.

⁴Ominaisuuksien arvoille ei aseteta vaatimusta. Hajonnan osalta katso huomautus ¹.

Kuivatusgeokomposiitti (geomatto)

Kuivatusgeokomposiiteille (käyttö pintaeristysrakenteissa) ei ole toistaiseksi olemassa yleisiä hyväksymiskriteereitä. Tuote koostuu vettäjohtavasta muovisesta "monofiilista" (drainage net), joka on tehtaalla kiinnitetty geotekstiilien väliin. Tuote on hyväksyttävä käyttöön tapauskohtaisesti. Tuotteen toimivuuden kannalta tärkeitä ominaisuuksia ovat mm.

- paksuus
- kokoonpuristumattomuus
- vaakasuora vedenjohtavuus
- pitkäaikainen toimivuus (kestoikä)

Tuotteelle ollaan valmistelemassa CEN-tuotestandardia.

4.4 Tiivistysmateriaalien testausmenetelmät

Ympäristöoppaassa 36 "Kaatopaikan tiivistysrakenteet" on esitetty suositukset mineraalisten tiivistysrakenteiden soveltuvuustestauksille. Selvitettävät ominaisuudet on ryhmitelty seuraavasti

- perusominaisuudet
- saviaineksen mineraloginen karakterisointi
- sullontaominaisuudet
- muodonmuutosominaisuudet
- vedenläpäisevyys
- suotoveden kemiallinen vaikutus tiivistysmateriaaliin
- tiivistysmateriaalin eroosiokestävyys.

Suositukset on laadittu ensisijaisesti luonnonmateriaalien (savi, bentoniittisavi) näkökulmasta, mutta niitä voidaan soveltaa yleensä kaikkiin mineraalisiin tiivistämateriaaleihin. Ympäristöoppaassa /40/ on esitetty myös materiaalivaatimuksia, joita on tässä raportissa esitetty luvussa 4.1

Tässä raportissa esitetty kaatopaikkarakentamisen tiivisterakenteiden materiaalien tuotehyväksyntämenettely on laadittu mineraalimateriaalien hyväksynnän näkökulmasta. Mineraalimateriaaleista poikkeavien materiaalien osalta menettelytavat, etenkin tutkittavat ominaisuudet ja niiden testausmenetelmät ovat yksityiskohdissaan vielä puutteellisia. Poikkeavan materiaalin testausmenetelmien ja tuotehyväksyntämenettelyiden kehittämistä vastuu (mineraalisille materiaaleille laadittujen menettelyiden soveltaminen) on materiaalin tuottajalla / tuotehyväksynnän hakijalla.

Taulukossa 4.11 on esitetty tuotehyväksyntämenettelyyn sisällytetyt materiaaleista tutkittavat ominaisuudet. Määrittäminen on kuvattu suppeasti taulukon jälkeen. Ominaisuuksia määritetään seuraavista lähtökohdista:

- ominaisuutta / parametriä tarvitaan rakenteen mitoituksessa / toimivuuden mallintamisessa (tarvitaan tuotehyväksynnässä)
- ominaisuutta / parametriä voidaan käyttää materiaalien keskinäisessä vertailussa (ei suoranaista käyttöä varsinaisessa mitoituksessa, täydentää tuotehyväksyntää)
- ominaisuuden / parametrin perusteella voidaan luonnehtia materiaalia /arvioida materiaalin käyttäytymistä kvalitatiivisesti (täydentää tuotehyväksyntää).

Geosynteettisten tuotteiden testausmenetelmiä on esitetty tämän raportin luvussa 3.2

Taulukko 4.11. Tiivistyskerroksen materiaalista tutkittavat ominaisuudet.

Merkinnät: X aina, o tarvittaessa, ? tarve/keinot auki										
Tässä listassa luetellut kokeet ovat osin pakollisia, osin informatiivisia ja osin pitkäaikaiskestävyyttä indikoivia. Tehtävät kokeet vaihtelevat materiaaleittain ja käyttökohteittain sekä jossain määrin myös siitä, käytetäänkö materiaalia pohja- vai pintaeristeessä	savi, silti, moreeni	maabentonitiitti	tiivis asfaltti (ABT) ¹⁾	turve	kuitusavi	PIMA-stabiilaattit	Viranomaisvaatimus/-suositus	Menetelmät	Ohjelmat / LandSim & Help	
Rakeisuus (saviprosentti)	X	X		?	?	X	•	SFS-EN 993-1/-2 ²⁾		
Tiivistävyys / proctor-koe	X	X		X	X	X	•	prEN 13286-2		
Tiivistävyys / ICT	o	o	X	o	o	o		menettely avoin		
Konsistenssirajat (plastisuus)	X	X			X	X	•	GLO-85 ³⁾ ASTM D4318		
Vesipitoisuus (vaikutus tiiveyteen)	X	X		X	X	X		GLO-85	(*)	
Orgaanisen aineksen määrä (runkoaineesta)	X	X		?	X	X	•	GLO-85, ASTM D2974		
Kiintotiheys	X	X	o		X	X		SFS-EN 1097-7	(*)	
Huokoisuus / huokoskokojakautuma / tyhjättila	X	X	X	X	X	X		ABT: PANK 4110	*	
Ominaispinta-ala (typpiadsorptio)	X	X			?	X		PANK 2401		
Paisumiskyky (paisumisindeksi)		X				o		ASTM D4829, ASTM D5890		
Erialaisten savimineraalien määrä	X	X			?		•	ASTM C837, VTT/GTK-men. ⁴⁾		
Liukeneva suolamäärä	X	X		X	X	X	•	ASTM D4542-95		
pH	X	X		X	X	X		ISO 10390, ASTM D4972		
Karbonaattipitoisuus	o	o			X	X	•	DIN 18129, ASTM D4373		
Ioninvaihtokapasiteetti / adsorptiokyky	X	X		X	X			GTK -menetelmä, ⁴⁾	(*)	
Orgaanisen hiilen määrä	X	X		X	X			GTK -menetelmä	(*)	
Biohajoavuus (aerobinen ja anaerobinen)				X	X	o	o	OECD 301F, ASTM D5210, ISO/DIS		
Vedenpidätyskyky	X	X		X	X	X		DIN 18132, ASTM D3152, ASTM D2325	(*)	
Tilavuuskutistuma - kuivumisesta	X	X		?	X	X	•	ASTM D427, ASTM D4943		
Routivuus	X	X		?	X	X	o	VTT -menetelmä, ⁴⁾		
Terminen rasituskestävyys	o	o	X	o	o	X		ABT: PANK 4302		
Lämpöliikkeet ja niiden kestävyys			X			X		ABT: PANK 4302		
Muodonmuutoskyvyn varmistaminen	o	o	o	X	X	X	o	Viite /1/ ja /2/		
Kokoonpuristuvuus / ödometrikoe	X	?		X	X	o	o	prCEN ISO/TS 17892-5, ASTM D2435		
Lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet (kolmiakksiaaliko, rasialeikkauskoe, HVL-koe)	X	X	X	X	X	X	o	prCEN ISO/TS 17892-9 / 17892-10, PANK 3202		
Vedenläpäisevyys ⁵⁾ . Toteutus: 2 - 3 tiiveyttä ja vesi + 1 tiiveys ja suotovesi / tarvittaessa myös jäädytys-sulatus -syklit.	X	X	X	X	X	X	•	ASTM D5084, ASTM D4511, ASTM D6035, prCEN ISO/TS 17892-11	*	
Ympäristökelpoisuus	Teollisuuden sivutuotteet ja lisäaineet								PIPO -projektissa määritellyt menetelmät /100/	

Taulukon selityksiä:

¹⁾ Raaka-aineiden ja massan vaatimukset Asfalttinormit 2000 ja sen lisälehden 2003 mukaan.

²⁾ pesuseulonta + areometri / sedigrifi / laseranalysaattori: PANK-2101 tai PANK-2102 tai GLO-85

³⁾ CEN valmistelee ohjetta prCEN ISO/TS 17892-12:2003

⁴⁾ Tutkimuslaitos- / maakohtaisia menetelmiä

⁵⁾ joustavaseinäinen vedenläpäisevyyskoe tai vastaava

Viranomais • vaatimus o suositus

Ohjelmat: * pametria käytetään sellaisenaan ohjelmassa (*) parametria käytetään "välillisesti" ohjelma-

massa

Viitteet:

/1/ Geotechnics of Landfill. Design and Remedial Works, Technical Recommendations 1993, s.42 Assessment of Mineral Sealing Layer Deformation tai

/2/ Ir. Jack Wammes. TRISOPLAST The new standard for soil protection

Taulukon 4.11 soveltaminen

Eristysrakenteissa käytettäviä erilaisia materiaaleja ei ole järkevää tutkia aina "saman kaavan" mukaisesti eikä kaikki tutkimus- /testausmenetelmät sovellukaan kaikille materiaaleille. Myöskään kaikille materiaaleille yhteisiä materiaalien tuotehyväksyntävaatimuksia ei voida eikä ole järkevääkään asettaa, koska materiaalit saattavat poiketa toisistaan runsaasti. Erilaisilla materiaaleilla saattaa olla toisistaan poikkeavia sellaisia toiminnallisia erikoisominaisuuksia, jotka varmistavat eristerakenteen toimintaa ja vaikuttavat positiivisesti sen kestoikään. Eräät "olennaiset" vaatimukset ovat kuitenkin samoja kaikille materiaaleille.

Taulukossa 4.11 mainituista ominaisuuksista on aina tutkittava ne ominaisuudet, joille on esitetty viranomaisvaatimukset tai -testaussuositukset. Osa testeistä ei koske kaikkia materiaaleja / rakenteita ja osa ominaisuuksista on tarpeen materiaalin pitkäaikaiskäytettyymisen arvioimiseksi. Jos jotakin ominaisuutta ei jostain syystä määritetä, on syy siihen mainittava.

Tässä esitetyt selvitykset ja määritykset eivät missään muodossa osoita materiaalin pitkäaikaiskestävyyttä erilaisissa rakenteissa tai vaihtelevissa olosuhteissa.

Taulukon 4.11 materiaaliryhmät kattavat nykyisin markkinoitavat tai käytössä olevat materiaalit tämän hetkisen yleisessä käytössä olevan julkisesti saatavilla olevan tietämyksen pohjalta. Uudet materiaalit ja rakenneratkaisut tutkitaan soveltaen nykyisten materiaalien testausmenetelmiä ja tarpeen vaatiessa kehittäen uusia menetelmiä. Uusien materiaalien tutkimusmenettelyistä saa lisätietoa esim. tuotehyväksynnän asiantuntijaryhmältä.

Geosynteettisten tuotteiden (sekä tiivistys- että suojaustarkoituksessa) testausmenetelmät on esitetty luvussa 4.3.

Materiaaliryhmät

Savi, siltti, moreeni

Nämä ovat kotimaisia luonnon mineraalimateriaaleja. Moreeni voi olla myös käsiteltyä siten, että siitä on poistettu käytön kannalta liian karkea aines. Luonnonmateriaaliin ei ole lisätty mitään sen ominaisuuksia muuttavaa lisäainetta.

Jos luonnonmateriaaliin on kuitenkin lisätty esim. sementtiä (mineraalinen, pysyvä ainesosa), jolla ei muuteta alkuperäisen materiaalin lujuutta tai siitä tehdyn kerroksen tiiveyttä, vaan sementti on vain tarkoitettu savimassan kosteuden alentamiseen (käsittelyn ja tiivistyvyyden parantamiseen), voidaan tällainen materiaali tutkia luonnonmateriaa-

lien tapaan. Tällöin on kuitenkin sementin määrän käyttö oltava hallittua ja kokein on varmistettava myös se, että sementti ei aiheuta materiaalin sellaista lujittumista tai muuta muutosta, joka olisi haitallinen materiaalin läpäisevyysominaisuuksille pitkälläkään aikavälillä.

Maabentoniitti

Mineraaliseen runkoaineeseen on lisätty bentoniittia lopputuotteen vesitiiviyyden parantamiseksi. Runkoaine voi olla hiekkaa, moreenia, murskettä tai muuta rakeista materiaalia. Bentoniittiin voi olla lisätty lopputuotteen ominaisuuksia parantavia lisäaineita.

Tiivis asfaltti (ABT)

Asfaltti, joka on tehty nimenomaan vesitiiviyyttä edellyttävissä eristysrakenteissa käytettäväksi. Tällä hetkellä on käytössä tuotenimikkeillä "Lemdense" ja "Lemproof" markkinoitavat tiiviit asfaltit (Lemminkäinen Oy).

Turve

Eristysrakenteisiin käytettäväksi kehitetty erikoisturve. Tällä hetkellä markkinoilla on vain "Tiivisturve"-nimikkeellä kaatopaikkakäyttöön markkinoitava turve (Vapo Oy).

Kuitusavi

Puunjalostusteollisuuden sivutuotteista eristysrakenteissa käytettäväksi kehitetty materiaali. Kuitusavi sisältää paperitehtaiden kuitulietettä ja yleensä myös energiatuotannon tuhkaa. Seoksessa voi olla myös seosaineita, jotka parantavat materiaalin ominaisuuksia eristysrakennekäytössä. Tällä hetkellä markkinoilla on kaatopaikkakäyttöön tarkoitettu "FINNCAO L8"-tuotenimellä markkinoitava kuitusavituote (Finncao Oy).

PIMA-stabilaatit

Pilaantuneista maista käsittelemällä (prosessoimalla) tehtyjä pintaeristysrakennekäyttöön tarkoitettuja materiaaleja. Pilaantunut maa on yleensä runkoainetta ja tiiviys saadaan aikaan esim. bentoniitilla. Tällä hetkellä (kevät 2004) tämän ryhmän materiaaleja ei ole juurikaan käytetty tiivistysrakenteissa.

Luokitusominaisuudet

Rakeisuus

Rakeisuus määritetään kuiva- tai pesuseulonnalla standardin SFS-EN 993-1/-2 mukaan. Saviprocentin määrittäminen tehdään areometrillä, sedigrafilla tai laser –partikkelianalysointilaitteilla menetelmäkohtaisten ohjeiden mukaan. On muistettava, että eri menetelmät antavat aina erilaiset tulokset. Tarvittaessa on tehtävä vertailumittauksia. Rakeisuutta ei voida määrittää luotettavasti materiaaleista, joissa on mukana kuituja. Rakeisuudelle on annettu Ympäristöoppaassa 36 /40/ suositusrajat hienoainemäärän osalta.

Tiivistyvyys

Tiivisterakenteet tiivistetään useimmiten tunnettuun maksimitiiveyteen suhteutettuun tiiveyteen. Materiaalin maksimikuivairtoiheys ja sitä vastaava vesipitoisuus määritetään Proctor -kokeella tulevan SFS -standardin mukaan. Ennen sen valmistumista käytetään ohjetta GLO-85 /23/. Menetelmä, maksimirakeisuus ja muottikoko on aina esitettävä tulosten yhteydessä. Ympäristöoppaassa 36 suositellaan standardi Proctor –menetelmän käyttöä.

Materiaalin maksimikuivairtoihetyttä voidaan etsiä myös kiertotiivistimellä (esim. ICT - laite). Menetelmä ei kuitenkaan tuota vertailukelpoisia tuloksia Proctor-kokeen kanssa, koska kokeen menettelytapaa ei ole standardisoitu. Menettely soveltuu kuitenkin hyvin materiaalien tiivistyvyyden vertailuun ennakkokokeissa ja laadunvarmistuskokeissa.

Konsistenssirajat

Konsistenssirajoilla (juoksu- ja kieritysraja sekä kutistumisraja) kuvataan materiaalin työstettävyyden ylä- ja alarajavesipitoisuuksia. Liiallinen vesi tekee massasta "juoksevaa" eli vaikeasti työstettävää ja tiivistettävää. Vastaavasti liian alhainen vesipitoisuus vaikeuttaa työstöä ja tiivistämistä. Plastisuusindeksille on annettu suositusrajat Ympäristöoppaassa 36.

Vesipitoisuus

Useimpien materiaalien työstäminen - levitys ja tiivistäminen - voidaan toteuttaa vain kapealla vesipitoisuusalueella. Liian märkä tai liian kuiva massa johtaa heikentyneeseen tiivistystulokseen ja suurempaan vedenläpäisevyyteen. Tämän johdosta vesipitoisuutta on seurattava ennakkokokeissa ja rakennusaikaisissa laadunvarmistuskokeissa. Vesipitoisuus määritetään GLO-85 /23/ tai vastaavan menettelyn mukaan.

Orgaanisen aineksen määrä

Orgaanisen aineksen määrä tarkoittaa tässä yhteydessä mineraalisen tiivistemateriaalin (ei kuitenkaan turpeen / kuitusaven) palavan aineksen määrää, esim. humusta. Määrittäminen tehdään polttamalla orgaaninen aine pois massasta + 600 - 800 °C lämpötilassa. Paljon hienoainesta tai savea sisältävillä massoilla voi olla tarvetta määrittää myös kidevesikorjaus. Turpeilla määrittäminen tuottaa myös palamattoman aineksen määrän. Orgaaninen aine voi lahota tai mädätä rakenteessa ja siten osittain hävitä rakenteesta. Aineen häviäminen kasvattaa huokostilaa ja lisää vedenläpäisevyyttä. Orgaanisen aineksen määrälle on annettu suositusraajat Ympäristöoppaassa 36.

Kiintotiheys

Kiintotiheyttä tarvitaan materiaalin huokoisuuden määrän laskennassa (esim. vesitaseohjelmia varten). Kiintotiheys tarkoittaa mineraalirakeen tai massan kiintoaineksen tiheyttä. Mineraalisilla materiaaleilla määrittäminen on helppoa ja tulos tarkka, mutta massoilla, joissa on sekaisin mineraalista ainesta ja muuta ainesta esim. puukuituja, kiintotiheys edustaa massaa kokonaisuutena. Tiiviin asfaltin suhteutusvaiheessa määritetään yleensä myös kiviaineksen kiintotiheys.

Huokoisuus ja tyhjätila

Mineraalimateriaalin huokoisuus on laskettavissa kuivairtitiheyden ja kiintotiheyden avulla. Huokoskokajakautuma on määritettävä erikseen esim. elohopeaporosi- tai typpiadsorptiometrillä. Huokoisuus kertoo vedenläpäisevyydestä ja huokoskokajakautuma massan pakkasenkestävyydestä. Huokoskokajakautuman määrittäminen hienorakeisista (täysin tai osittain kyllästyneistä) materiaaleista on hankalaa ja kallista tai jopa mahdotonta. Tiiviin asfaltin tyhjätilan määrän määrittämiseen on useita eri menetelmiä.

Ominaispinta-ala

Ominaispinta-alaa käytetään materiaalin hienoaineksen mineralogiseen karakterisointiin. Ominaispinta-alalla on yhteys materiaalin pidätyskykyyn ja ioninvaihtokapasiteettiin. Tarkemmin asiaa on käsitelty Ympäristöoppaassa 36. Materiaalin ominaispinta-ala (vaihtelee rakeisuuden eri fraktioissa) voidaan määrittää esim. typpiadsorptiomäärityksellä.

Paisumiskyky

Hienorakeiset materiaalit - erityisesti paisuvahilaisia mineraaleja sisältävät materiaalit - paisuvat vettä imiessään. Tiivistemateriaaleilla paisumiskykyä edellytetään ja sitä mitataan, erityisesti massoissa käytetyistä bentoniiteista (ASTM D5890-02). Paisumisindeksi

mittaa suoraan kuivan mineraalin tilavuuden kasvua vesiupotuksessa. ASTM D4829-03 on käyttökelpoinen massan (esim. runkoaines + bentoniitti) paisumisindeksin määrittämisessä.

Erilaisten savimineraalien määrä-, röntgendiffraktio- ja termooanalyysimenetelmillä. Metyleenisini-menetelmä ei sovellu erityisen hyvin montmorillonitiin tunnistamiseen laadullisesti tai määrällisesti. Röntgendiffraktiomenetelmä ei sovellu hyvin montmorillonitiin tunnistamiseen määrällisesti ja on lisäksi suhteellisen kallis ja hidas menetelmä. Materiaalin hienoaineksen sisältämille savimineraalimäärälle on Ympäristöoppaassa 36 asetettu vähimmäismäärä (savipitoisuus <0.002 mm vähintään 14 %, >10 % savimineraaleja).

Kemialliset ominaisuudet

Liukeneva suolamäärä

Liukeneva suola aiheuttaa huokosmäärän kasvua tiivistemateriaalissa ja lisää siten materiaalin vedenläpäisevyyttä. ASTM D 4542-95 soveltuu käytettäväksi hienorakeisien ja vettä pidättävien materiaalien testaukseen – se ei sovellu karkearakeisille materiaaleille, esim. hiekalle, soralle tai murskeelle. Liukeneville suoloille ja muille liukeneville aineille yhteensä on Ympäristöoppaassa 36 annettu yläraja (<5%).

pH

pH –määrittystä käytetään arvioitaessa suotoveden vaikutusta tiivistemateriaalin toimivuuteen. pH vaikuttaa orgaanisten ja epäorgaanisten aineiden saostumiseen materiaalis- sa. Vastaavasti tarkasteltaessa yhdistelmä-rakenteen toimivuutta on tarpeen varmistaa, että eri rakenneosat eivät vahingoita toisiaan. Määrittäminen voidaan tehdä materiaalin huokosvedestä tai materiaali-vesi -lietteestä.

Karbonaattipitoisuus

Karbonaattipitoisuus määritetään, koska karbonaatti saattaa liueta pois rakenteesta joutuessaan kosketuksiin happojen (happamien suotovesien) kanssa. Karbonaatin liukene- minen kasvattaa huokostilaa ja lisää vedenläpäisevyyttä. Karbonaattipitoisuudelle on Ympäristöoppaassa 36 annettu yläraja (<15%).

Ioninvaihtokapasiteetti / Adsorptio

Ioninvaihto voi aiheuttaa vedenläpäisevyyden muuttumisen tiivistysmateriaalissa. Omi- naisuutta ei sellaisenaan käytetä tarkasteluissa. Ioninvaihtokapasiteetin määrittämiseen ei ole olemassa yhtä nimettävää menetelmää. Eri tutkimusorganisaatioilta löytyy omia

”In-House” –menetelmiään. Ioninvaihtokapasiteettia on tarkemmin käsitelty Ympäristöoppaassa 36.

Orgaanisen hiilen määrä

Orgaanisen hiilen määrä kertoo eri aineiden pidättymisestä tiivistemateriaaliin. Arvoa ei suoraan käytetä mitoituksessa, mutta sen pohjalta arvioidaan materiaalin käyttäytymistä. Orgaanisen hiilen määrittämiseen ei ole olemassa yhtä nimettävää menetelmää. Eri tutkimusorganisaatioilta löytyy omia ”In-House” –menetelmiään. Useimmiten määritetään kokonaishiili TC – esimerkiksi poistamalla karbonaattinen hiili ensi hapolla ja sitten määrittämällä kokonaishiilen määrä. Kansanterveyslaitos pystyy tekemään TOC = kokonais-orgaaninen-hiili – määrityksiä.

Biohajoavuus

Orgaanisia aineksia sisältävien materiaalien pitkäaikaiskestävyyden varmistamiseksi on määritettävä materiaalien biohajoavuus. Massassa hajoava materiaali vaikuttaa massan pitkäaikaisiin tiiviysominaisuuksiin. Tiivistysmateriaaleille soveltuvat biohajoavuustestit on esitetty PIPO –projektin raportissa /100/.

Tekniset ominaisuudet

Vedenpidätyskyky

Vedenpidätyskyky –tietoja tarvitaan vesitaselaskelmissa. Vedenpidätyskäyrästä voidaan arvioida laskelmissa tarvittavat lakastumispiste ja kenttäkapasiteetti. Vedenpidätyskyky voidaan määrittää painelevykokeella mm. ASTM D2325-68 tai ASTM D3152-72 -standardien mukaan. Menetelmävalinta on tehtävä materiaalin rakeisuuden mukaan.

Tilavuuskutistuma

Hienorakeinen, runsaasti vettä sisältävä materiaali (kokonaan tai osana karkeampaa rae-runkoa) kutistuu kuivuessaan. Kokeen avulla selvitetään materiaalin kutistumisen määrä kutistumisrajan ja kutistumissuhteen avulla. Menetelmässä ASTM 427-93 käytetään elohopeaa ja sen tilalla tulisi käyttää korvaavaa menetelmää ASTM D4943-95. Tilavuuskutistumalle on Ympäristöoppaassa 36 annettu yläraja (< 5%).

Routivuus

Hienoainesta sisältävät materiaalit, jotka sisältävät vettä tai voivat saada vettä jäätyessään, routaantuvat jäätyessään. Käytettävissä olevan veden määrästä ja jäätyemisprosessin kestosta riippuen materiaalin voi myös muodostua routalinssejä. Tiivisterakenteen

routaantuminen itsessäänkin laajentaa raerunkoa ja lisää siten sulaneen materiaalin vedenläpäisevyyttä huomattavasti. Materiaalin routivuusominaisuudet voidaan määrittää routanousukokeilla ja routaantumisen vaikutus vedenläpäisevyyteen vedenläpäisevyysskokeilla ennen ja jälkeen jäädytys-sulatus syklien. Menettelylle ei ole olemassa valmista standardia – ainoastaan tutkimuslaitoskohtaisia menetelmiä.

Terminen rasituskestävyys

Termisillä rasituksilla tarkoitetaan tässä tiivisterakenteeseen kohdistuvia ulkoisia tai sisäisiä lämpötila (lämpötilaero) -rasituksia. Terminen rasitus - vaikka ei sellaisenaan vahingoita materiaalia - voi aiheuttaa materiaalin kostumista tai kuivumista lämpötilan tai lämpötilagradientin suunnan mukaan. Termiselle rasituskestävyydelle ei ole olemassa koemenettelyä eikä yksiselitteisiä tarvekuvauksia.

Lämpöliikkeet ja niiden kestävyys (Lämpöliikkeiden sietokyky)

Tiivistemateriaali voi joutua alttiiksi lämpöliikkeen aiheuttamalle rasitukselle - suoralle auringonvalolle kesällä tai jäätymiselle talvella. Materiaalin tai sen alustan lämpöliike (kutistuminen / laajeneminen) voi aiheuttaa materiaaliin jännityksiä, jotka rikkovat materiaalin. Materiaaliin syntyy vettä johtavia rakoja. Asfaltin pakkasenkestävyyttä voidaan arvioida PANK -menetelmän mukaan. Muiden materiaalien lämpöliikkeiden kestävyvylle ei ole olemassa menetelmiä.

Muodonmuutoskyvyn varmistaminen

Tiivisterakenteella – erityisesti pintarakenteessa - on oltava muodonmuutoskykyä. Rakenteen on mukauduttava alustan epätasaisiin painumiin eristyskykyään menettämättä. Materiaalin vetomuodonmuutoskykyä voidaan arvioida vetokokeella (halkaisuvetokokeilla), mutta yksiaksiaalinen koe ei välttämättä anna täsmällistä kuvaa materiaalin kaksikulotteisesta muodonmuutoskyvystä. Muodonmuutoskyvyn varmistus voidaan tehdä laboratorio- tai kenttäkokeella, jossa tiivistekerroksen alapuolisen kerroksen annetaan painua, jolloin tiivistekerros painuu ja samalla venyy kaksikulotteisesti. Tiivisteiden toimintaa seurataan joko läpäisevää vesimäärää mittaamalla tai alla olevan kerroksen kosteusmuutosta mittaamalla. Yleisohjeita on annettu Ympäristöoppaassa 36. Yksiaksiaalisen puristuskokeen tulosten perusteella ei tiivistyskerroksen pitkäaikaista muodonmuutoskykyä voida arvioida.

Kokoonpuristuvuus

Tiivisterakenteelta edellytetään tiettyä paksuutta rakennusvaiheessa ja koko rakenteen toiminnan ajan. Jos materiaali on kokoonpuristuvaa - kuten turve, kuitusavi ja savi - niin sen kokoonpuristuminen kuorman vaikutuksesta ajan kanssa on selvitettävä. Labo-

ratoriomittakaavassa kokoonpuristuminen tutkitaan ödometrikokeella. Ödometrikoe voidaan tehdä ASTM D2435-96 -standardin tai tulevan CEN -standardin mukaan. Materiaalin tiivistyminen kokoonpuristumisen johdosta muuttaa materiaalia, tekee esim. savesta vähemmän plastista ja parantaa tiiveysominaisuuksia - pienentää vedenläpäisevyyttä.

Lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet

Tiivisterakenteen odotetaan kestävän siihen tulevat kuormat ilman rakenteen vaurioitumisvaaraa. Kuormitus voi olla päältäpäin tuleva kuormitus - rakennustyön aikainen tai käyttötilan aikainen kuorma. Kuormitus voi myös johtua painovoiman vaikutuksesta luiskatuissa tiivisterakenteissa, jolloin luiskarakenne voi liukua heikkoa kerrosta tai muovikalvon pintaa pitkin alas rinnettä. Tavanomaisin rakenteellisessa suunnittelussa käytetty parametri on kitkakulma ja koheesio, jotka tiivistemateriaaleille (yleensä poislukien asfaltti) voidaan määrittää kolmiakselikokeella. Kitkakerroin mineraalimaakerroksen tai geotekstiilin ja membraanin välillä voidaan määrittää isolla rasialeikkauksella esim. ASTM D5321-02 -standardin mukaan. Eri materiaalit saattavat edellyttää tiettyjä koko-, jännitystila-, nopeus- ja muodonmuutosehtoja.

Vedenläpäisevyys

Tiivisterakenteelta edellytetään tiiveyttä, eli pientä veden- tai suotovedenläpäisevyyttä. Tälle materiaaliominaisuudelle on annettu testaus- ja viranomaisvaatimukset. Tiivistemateriaalien vedenläpäisevyyttä tutkitaan vedenläpäisevyyskokeella, tyypillisesti Suomessa ASTM D 5084 -standardia mukaillen. Tulossa on myös CEN -standardi ja kehitteillä on myös alan suomalainen menettelytapaohje. Vedenläpäisevyys on määritettävä materiaalin tilaolosuhteissa, jotka vastaavat rakentamista ja rakenteen käyttötilaa. Tärkein tilasuure on materiaalin tiiveys. Tarvittaessa, jos tiivisteeseen läpi virtaa tavanomaisesta vedestä koostumukseltaan poikkeavaa suotovettä, on koe varmistettava myös suotovettä käyttäen.

Vedenläpäisevyys testataan aina kyllästetyllä näytteellä. Osittain kyllästyneen materiaalin vedenläpäisevyyden määrittäminen on mahdollista erikoistekniikoilla /36/.

Ympäristökelpoisuus

Raportissa /100/ on esitetty ehdotus eristemateriaalien ympäristökelpoisuuden testausmenetelmistä. Taulukossa 4.12 on yhteenveto eristysrakenteiden ympäristökelpoisuuden arvioimiseksi soveltuvista tutkimusmenetelmistä.

Taulukko 4.12. Eristemateriaalien kelpoisuuden arviointiin soveltuvat tutkimusmenetelmät /100/

Eristekerros	Ominaisuus	Soveltuvat menetelmät	Saatu tieto	HUOM!
Kaikki kerros-tyypit	Kokonaispitoisuusmääritys	Mikroaaltouunihajoitus (prEn 13656) Kuningasvesiuute (prEN 13657) Röntgen Sulate	Haitallisten aineiden tunnistus	Varmistettava menetelmän (mm. uuttoliuksen ja esikäsiteltävän) soveltuvuus ko. testimateriaalille
Kaikki	Orgaaniset haitta-aineet	Maaperä, lietestandardoinnissa kehitetyt menetelmät	Haitallisten aineiden tunnistus	Standardointi alkanut
Kaikki	Kuiva-ainepitoisuus	Kuiva-ainepitoisuus 105 °C.	Materiaalin karakterisointi. Perusparametri päästöjen laskennassa.	Standardimenetelmät valmistumassa
Kaikki	Orgaanisen aineen osuus	TOC-määritys (EN13137) Hekkutushäviö	Materiaalin karakterisointi (erityisesti biohajoavuustutkimuksia varten)	Standardimenetelmä valmistumassa
Pohjarakenteen tiivistyskerros	Liukoisuusominaisuus	Sellitesti tai NEN7343 (NT ENVIR 002)	Simuloi aineiden liukenemistä tiiviin sivutuotekerroksen läpi. Tuloksia voidaan käyttää kelpoisuusarvioinnissa.	
Pintakerros, kuivatuskerros	Liukoisuusominaisuus	TS14405, NEN7343 ja Nordtest NT ENVIR 002	Simuloi aineiden liukenemistä sivutuotteesta, jonka materiaalikerroksen läpi suotautuu vettä. Tuloksia voidaan käyttää kelpoisuusarvioinnissa.	Uusi CEN-menetelmä valmistumassa (testiolo-suhteet tarkemmin kuvattuna)
Pintarakenteen tiivistyskerros	Liukoisuus-Ominaisuus	NVN 7347, NEN 7343 (NT ENVIR 002) tai sellitesti	Simuloi pintaliukenemistä diffuusion tai pintahuuhoutumisen perusteella (rakenne pysyvä ja vedenläpäisevyys alle 10 ⁻⁹ m/s) tai kolonnitesti/sellitesti (rakenteeseen tulee murtumia tai vedenläpäisevyys yli 10 ⁻⁹ m/s) Tuloksia voidaan käyttää kelpoisuusarvioinnissa.	
Kaikki	Liukoisuus-Ominaisuus	ANC-menetelmä prEN14429 pH-staattinen testi	Simuloi pH-muutosten vaikutusta aineen liukoisuuteen.	Standardimenetelmäluonnokset valmistumassa
Pinta- ja pohjarakenteen tiivistyskerros	Biohajoavuus	OECD-menetelmä ISO/ASTM-menetelmä	Materiaalin orgaanisen osan biologinen hajoaminen hapellisessa tai hapettomassa liuosympäristössä	Menetelmät kehitetty kemikaalien ja polymeerien biohajoavuuden toteamiseen

5. Toimivuusvaatimukseen perustuva suojausrakenteiden suunnittelu

5.1 Suojausrakenteiden suunnittelun lähtökohdat ja toimivuuksajattelu suojausrakenteiden mitoituksessa

Toimivuuksajattelu ja käyttöikämitoitukset ovat tulossa yhä laajemmin käyttöön myös infrarakentamisessa. Toimivuudella tarkoitetaan rakenteen tai sen osan suoriutumista sille asetetussa tehtävässä. Toimivuusvaatimukset esitetään rakennetta määrittelemättä (kts. luku 4.1). Suunnittelun lopputuloksena esitetään sellainen tekninen ratkaisu, joka täyttää asetetut vaatimukset. Kun rakenne lakkaa täyttämästä sille asetetut toimintavaatimukset, on rakenteen käyttöikä saavutettu.

Toimivuusvaatimusten määrittäminen pakottaa tilaajan tai käyttäjän esittämään todelliset tarpeensa rakenteiden suunnittelun pohjaksi. Toimivuusvaatimukseen vaikuttavat osaltaan myös käyttöolosuhteet. Menettelytapa antaa edellytykset hyödyntää laajalaisesti suunnittelijoiden ja urakoitsijoiden osaamista.

Hyvältä toimivuusvaatimukselta voidaan edellyttää, että se on /43/

- kattava
- ristiriidaton
- johdonmukainen
- toteuttamiskelpoinen
- neutraali teknisen ratkaisun suhteen
- jäljitettävä
- tarpeellinen
- tiiviisti kuvattu
- oikea ja
- todennettavissa oleva.

Jos hyvää toimivuusvaatimusta ei pystytä esittämään, vaatimuksena on tällöin tekninen ratkaisu /43/.

Todentaminen on oleellinen osa toimivuusmenettelyä. Yleisellä tasolla todentaminen tehdään yleensä mittaamalla (esim. luku 6.1), mutta todentamismenettely voi olla myös laskennallinen, mikä vastaa rakenteen mitoittamista.

Toimivuuksajattelun käyttöönotto ei välttämättä muuta esim. nykyisillä kaatopaikoilla käytössä olevia ja käytettäviä rakenteita. Nykyiset rakenteetkin perustuvat tiettyyn, vaikka ehkä osin kirjaamattomaan toimivuuksajatteluun. Toimivuusvaatimusten asettamisen pohjana voidaan myös käyttää nykyisin käytettäviä, hyviksi havaittuja rakenteita.

Toimivuuksajattelun käyttöönotto antaa kuitenkin suuremman vapauden rakenteiden suunnitteluun, mitoitukseen, toteutukseen ja uusien innovatiivisten rakenteiden ja materiaalien käyttöön, kun rakenneratkaisua ei yksityiskohdissaan enää etukäteen määritellä. Periaatteessa taulukoiduista rakenneratkaisuista määritettyine paksuuksineen ja materiaalivaatimuksineen voidaan monissa tapauksissa ajanmyötä luopua ja toteuttaa rakente vapaasti, kunhan sille on asetettu järkevät toimivuuksvaatimukset ja asetut toimintavaatimukset täyttyvät.

Pohjavesisuojausrakenteiden toimintavaatimuksia voivat olla mm. /44/

- suojausrakenteen läpäisevälle vesimäärälle (Q) asetettu arvo
- tietyn haitta-aineen vuolle (J) suojausrakenteen läpi asetettu maksimiarvo
- tietyn haitta-aineen pitoisuudelle (C) asetettu maksimiarvo
- läpäisevän vesimäärän saavuttamiselle asetettu aika
- haitta-aineen vuon saavuttamiselle asetettu aika ja
- haitta-aineen pitoisuuden saavuttamiselle asetettu aika.

Valitusta kriteeristä riippumatta toimintavaatimuksen taustalla on säilyttää pohjaveden laatu (ympäristön pilaantumisen estäminen) /44/.

Läpäisevään vesimäärään perustuvalla toimivuuksvaatimuksella tähdätään primäärisesti suotoveden mukana kulkeutuvien haitta-aineiden päästön pitämiseen kohtuullisella (haitattomalla) tasolla. Tällaisia toimivuuksvaatimuksia on käytössä mm. Hollannissa (läpäisevä vesimäärä), Ruotsissa (läpäisevä vesimäärä) ja Englannissa (haitta-aineiden pitoisuudet) (esim. luku 3.1). Läpäisevä vesimäärä on tärkeä, koska yhdistelmärakenteissakin geomembraanin otaksuttujen vaurioiden läpi tapahtuva epäorgaanisten kemikaalien kulkeutuminen on pääasiallinen kulkeutumismuoto. Haitta-aineiden pitoisuuksien ja vuon vaikutus korostuu yhdistelmärakenteissa, koska orgaaniset kemikaalit kulkeutuvat myös geomembraanien läpi /44/.

Edellä esitettyssä toimivuuksvaatimusten luettelossa on toimivuuksvaatimukseen sisällytetty myös aikaan liittyviä vaatimuksia. Tietyissä tapauksissa nämä saattavat olla tarpeen ja myös käyttökelpoisia rakenteiden toimintaa tarkasteltaessa. Tällaisten toimintavaatimusten asettaminen edellyttää myös tarkastelupaikan (-pisteen) asettamista. Tarkastelupaikka voi olla tiivisterakenteen alareuna tai yleisemmin tiivisterakenteen alapuolella olevan osittain kyllästyneen maakerroksen alapinta (pohjavesiesiintymän yläpinta) tai myös esim. tietyllä etäisyydellä kaatopaikasta oleva kaivo.

5.2 Suojausrakenteiden läpäisevyys

5.2.1 Läpäisevyysmitoitus

5.2.1.1 Mineraaliaineksisen tiivisteiden läpäisevä vesimäärä

Suojaustarkoituksissa käytettävän mineraaliaineksien soveltuvuutta tiivistystarkoitukseen kuvataan yleisimmin materiaalin vedenläpäisevyydellä. Mineraaliaineksien vedenläpäisevyys riippuu materiaalin huokosten määrästä, niiden koosta ja huokostilojen jatkuvuudesta. Materiaalin tiivistämisellä vaikutetaan näihin ominaisuuksiin. Laboratoriossa vedenläpäisevyys määritetään tietyssä tilavuuspainossa, joka vastaa tiettyä tiiviysastetta (testattavan materiaalin kuivapainon suhde maksimikuivatilavuuspainoon prosentteissa ilmaistuna). Rakentamisen yhteydessä on varmistettava siitä, että vähintään vastaava tiiviysaste saavutetaan myös rakenteessa.

Veden virtausnopeus maassa voidaan ilmaista Darcyn lain mukaan

$$v = Q/A = -k (dh/dx) = k * i$$

missä

- v on veden virtausnopeus, m/s
- Q virtaavan veden määrä, m³/s
- A virtauksen poikkileikkauspinta-ala, m²
- k vedenläpäisykerroin, m/s
- h veden painekorkeus, m
- x etäisyyskoordinaatti virtauksen suunnassa, m
- i hydraulinen gradientti, -

Jos vedenpaine korkeus maakerroksen päällä on h [m] ja maakerroksen paksuus D [m] on hydraulinen gradientti

$$i = (h+D)/D$$

Edellä esitetyllä kaavalla voidaan laskea mineraaliaineksien tiivisteiden läpäisevä vesimäärä Q.

Kemiallisiin ja biologisiin reaktioihin osallistumattomat liuenneet aineet liikkuvat veden keskimääräisellä suotautumisenopeudella. Virtaus etenee huokosten kautta nopeammin kuin koko poikkileikkauspinta-alaa kohden tarkasteltuna:

$$v_s = v/n$$

missä

v_s on nesteen todellinen virtausnopeus huokosissa, m/s

n kokonaishuokoisuus, -

v keskimääräinen virtausnopeus poikkileikkausta kohti, m/s

Virtausnopeus v_s osoittaa sen, että neste voi todellisuudessa virrata vain huokoisen aineen läpi, kun taas virtausnopeus v edustaa virtausta materiaalin koko poikkileikkaukseen nähden /40/.

5.2.1.2 Geomembraanin ja yhdistelmä rakenteen läpäisevä vesimäärä

Geomembraanit ovat ehjinä käytännöllisesti katsoen vettä läpäisemättömiä, vaikka vesi kulkee diffuusiolla myös geomembraanin läpi. Merkittävämpi määrä vettä kulkeutuu geomembraanin läpi yleensä asennuksen, levityksen ja saumauksen yhteydessä syntyvien reikien läpi.

Kun geomembraani ei ole maakerroksessa tai siihen yhteydessä olevan maamateriaalin vedenläpäisevyys on suuri ($10^{-1} \dots 10^{-2}$ m/s /87/), voidaan siinä olevan reiän läpi kulkeutuva vesimäärä laskea Bernoullin virtausotaksumien perusteella

$$Q = 0.6 \cdot a \cdot (2 \cdot g \cdot h)^{0.5}$$

missä

Q on virtaus aukon kautta, m^3/s

a aukon pinta-ala, m^2

g maan vetovoiman kiihtyvyys, m^2/s

h veden painekorkeus aukon päällä, m

Edellistä tiiviimpään (vedenläpäisevyys pienempi) maakerrokseen kontaktissa olevan geomembraanin reiän läpi kulkeutuvaa vesimäärää rajoittaa maakerroksen vedenläpäisevyys.

Yhdistelmä rakenteille on johdettu kokemukseräisiä läpäisevyyden arviointimenettelyjä /27/. Yhdistelmä rakenteen läpäisevyys riippuu geomembraanissa olevan viian tai reiän koosta ja muodosta, geomembraanin yhteydessä olevan maakerroksen läpäisevyydestä ja joissain määrin tämän kerroksen paksuudesta, geomembraanin päällä olevan nesteen painekorkeudesta sekä geomembraanin ja maakerroksen kontaktista. Viitteessä /87/ on esitetty Giroudin tutkimuksiin pohjautuvat menetelmät yhdistelmä rakenteen läpäisevän

vesimäärän määrittämiseksi geomembraanin ja tiivistekerroksen vajavaisen ja hyvän kontaktin tapauksessa.

Kontaktin ollessa vajavainen läpäisevä vesimäärä on

$$Q = 1.15 * i_{avg} * a^{0.1} * h^{0.9} * k^{0.74}$$

missä

Q on reiän läpäisevä vesimäärä, m³/s

a reiän pinta-ala, m

k geomembraanin alapuolisen maakerroksen vedenläpäisevyys, m/s

h veden painekorkeus reiän päällä, m

i_{avg} dimensioton vakio, -

Kontaktin ollessa hyvä läpäisevä vesimäärä on

$$Q = 1.15 * i_{avg} * a^{0.1} * h^{0.9} * k^{0.74}$$

Jos vedenpainekorkeus h on pienempi tai yhtä suuri kuin alla olevan tiivistekerroksen paksuus D, kuten useimmissa mineraalimateriaaleista rakennetuissa tiivisterakenteiden tapauksissa on, i_{avg} = 1. Muissa tapauksissa, esim. geomembraanin rajoittuessa bentoniittimattoon, painekorkeus voi olla huomattavastikin bentoniittimaton paksuutta suurempi, jolloin dimensioton vakio saadaan esimerkiksi viitteessä /87/ esitetystä nomogrammista. Yhdistelmä rakenteiden läpäisevien vesimäärien laskentaan eri tilanteissa on esitetty kaavat ja myös interaktiivisesti toimivat laskimet web-osoitteessa http://landfilldesign.com/cgi-bin/composite_leakage.pl /51/. Kaavoja on esitetty myös viitteessä /44/ ja myöhemmin käsiteltävän HELP-vesitaseohjelman manuaalissa.

Tutkimuksissa, joiden tuloksiin edellä mainitut kaavat pohjautuvat, on todettu, että erityäin huolellisestikin tehdyissä ja asianmukaisesti valvotuissa geomembraanirakenteissa on aina reikiä ja heikkouskohtia. Viat voivat olla geomembraanien valmistusvirheitä ("pikkureikiä", läpimitta pienempi kuin geomembraanin paksuus) tai asennusvirheitä. Huolellisuudella, hyvällä työn laadulla sekä valvonnalla vikojen esiintymistä voidaan kuitenkin vähentää ja reikiä pienentää. Vikojen esiintymistiheys riippuu asennuksen laadusta, testauksesta, materiaaleista, pinnan valmistelusta, varusteista ja laadunvalvonnasta. Vikojen tiheyttä voidaan arvioida taulukon 5.1 pohjalta.

Taulukko 5.1. Geomembraanin asennuksen laadun vaikutus reikien esiintymistiheyteen. /51./. Vikojen lukumäärässä (vikoja/ha) desimaaliluvut johtuvat muunnoksesta eekkeristä (4000 m²) hehtaariksi.

Asennuksen laatu	Vikoja / eekkeri	Vikoja / ha	Frekvenssi, %
Erinomainen	...1	...2.5	10
Hyvä	1...4	2.5...10	40
Kohtuullinen	4...10	10...25	40
Heikko	10...20	25...50	10

Tiukan laadunvalvonnan alaisena geomembraanissa voi olla halkaisijaltaan 2 mm reikiä 2.5...5 kappaletta hehtaarilla. Tyypillistä rakennetta tarkasteltaessa halkaisijaltaan 3.5 mm:n (pinta-ala 0.1 cm²) reikiä voi olla 2.5 kappaletta hehtaarilla. Konservatiiviseen (varman päälle tapahtuvaan) suunnitteluun on esitetty käytettäväksi 2.5 kappaletta halkaisijaltaan 11 mm:n (pinta-ala 1 cm²) reikää hehtaarilla /5/, kun laadunvalvonta on hyvä.

Toisaalta LandSimin manuaalissa /19/ on esitetty, että salaojituskerroksen asennuksen jälkeenkin suoritettujen vuotokohtien paikannuksen ja korjauksen jälkeen vikojen määrä voi olla vielä 13 kpl pienempää ja 3 kpl suurempaa reikää ja 1 kpl repeämä. Pienet reiät läpäisevät suhteessa enemmän vettä kuin suuret. Esimerkiksi jäljempänä olevassa taulukossa 5.2 savitiivisteiden tapauksessa 10 kappaletta halkaisijaltaan 2 mm reikää vuotavat lähes kolminkertaisen vesimäärän suurempiin reikiin nähden.

Yhdistelmärakenteen läpäisevää vesimäärää laskettaessa on siis arvioitava geomembraanissa olevien reikien määrä, mahdollisesti reiän muoto ja pinta-ala sekä otettava kantaa asennustyön laatuun. Käytännössä on tunnettava myös geomembraanin päällä vaikuttava painekorkeus, ellei käytetä maksimioletuksia (esim. kaatopaikassa oletusta 1.0 m vesipaineesta geomembraanin päällä). Käytännössä pitkäaikaisesti geomembraanin päällä vaikuttava vedenpaine voi olla huomattavan pieni (ja myös huomattavan suuri, ellei kuivatusjärjestelmä toimi). Vedenpaineen suuruuden arviointia varten rakenteille on suoritettava vesitaselaskelmat. Jäljempänä käsitellään kaatopaikan vesitaseen laskentaohjelmaa (HELP), jolla mm. painekorkeudet eristekerrosten pinnoilla voidaan määrittää. HELP-ohjelmaan, samoin kuin myös jäljempänä käsiteltävään LandSim -ohjelmaan, on sisällytetty geomembraanin sisältävän yhdistelmärakenteen vedenläpäisevyyden laskenta edellä esitetyn reikien lukumäärän ja asentamisen laadun funktiona. Yhdistelmärakenteen läpäiseviä vesimääriä on esitetty taulukossa 5.2.

Taulukko 5.2 Yhdistelmärakenteen läpäiseviä vesimääriä kahdella eri veden korkeudella (h_w), kun geomembraanissa on 2,5 kpl ympyränmuotoista reikää hehtaarilla ja yhden reiän halkaisija on $D = 11 \text{ mm}$ ($A = 1 \text{ cm}^2$) ja maamateriaalin ja kalvon kontakti on hyvä, laskettuna viitteessä /51/ esitetyllä laskimella.

Materiaali	k, m/s	Läpäisevä vesimäärä litraa / ha / vrk	
		$h_w = 0.3 \text{ m}$	$h_w = 1.0 \text{ m}$
Savi ($D=1.0 \text{ m}$)	$1 \cdot 10^{-9}$	1.37	4.32
Hiekkabentoniitti ($D=0.5 \text{ m}$)	$6.7 \cdot 10^{-10}$	1.05	3.49
Trisoplast ($D=0.09 \text{ m}$)	$1 \cdot 10^{-11}$	0.058	0.258

5.2.1.3 Diffuusio

Lika-aineiden kulkeutumista mallinnetaan yleensä lika-aineen kulkeutumisesta maanpinnanalaiselle ympäristölle aiheutuvien vaikutusten arvioimiseksi. Helposti sekoittuvien lika-aineiden kulkeutumista huokoisessa maamateriaalissa säätelevät monenlaiset fysikaaliset, kemialliset ja biologiset prosessit. Ensisijaiset fysikaaliset prosessit ovat kulkeutuminen, diffuusio ja dispersio. Advektio kuljettaa massaa veden mukana ja se on merkittävää suurilla virtausnopeuksilla. Diffuusiosta massan leviäminen tapahtuu konsentraatiogradientin johdosta ja sen merkitys taas on suurin alhaisilla virtausnopeuksilla. Dispersion vaikutuksesta massa leviää virtauskentässä olevien heterogeisyyksien johdosta /76/.

Kemiallisia ja biologisia prosesseja ovat

- sorptio,
- radioaktiivinen hajoaminen,
- liukeneminen/saostuminen,
- happo/emäs -reaktiot,
- kompleksoituminen,
- hydrolyysi/substituutio,
- hapettuminen/pelkistyminen ja
- biohajoaminen.

Sellaiset prosessit kuin

- adsorptio,
- radioaktiivinen hajoaminen,
- liukeneminen,
- hydrolyysi ja
- biohajoaminen

ovat vaimenevia prosesseja, koska lika-ainetta poistuu vedestä. Joissakin tapauksissa heikentymisprosessit eivät välttämättä ole tehokkaita vähentämään lika-aineiden vaikutusta. Esimerkiksi alkuperäisen radioaktiivisen aineen hajotessa syntyy sivutuotteita, joilla saattaa olla edelleen haitallinen vaikutus ympäristöön. Myös aikaisemmin adsorboituneiden aineiden desorbtiio tai aikaisemmin saostuneiden aineiden liukeneminen voi aiheuttaa haitallisia vaikutuksia /76/.

Vaikka edellä esitetyt prosessit ovat hyvin tunnettuja, vain advektio, diffuusio ja dispersio sekä kemiallisesta prosesseista sorptio ja radioaktiivinen hajoaminen on tyypillisesti sisällytetty käytännön mallinnussovelluksiin. Vaikka muidenkin prosessien malleja on olemassa, näitä ei vielä ole pidetty "valmiina" rutiinikäyttöön. Lika-aineen kulkeutumisen mallinnus sisältää tämän johdosta ainoastaan advektion, dispersion ja diffuusion sorbtion ja radioaktiivisen hajoamisen kanssa. Tässä yhteydessä on esitetty ainoastaan malli yksidimensioisessa tapauksessa /76/.

Advektio - diffuusio - dispersio -vuo

Lika-aineen advektio-diffuusio-dispersio -massavuo maamateriaalin vesifaasin läpi voidaan esittää yhtälöllä

$$J_{ad} = q c - \theta D \partial c / \partial x$$

missä

J_{ad} on advektio-diffuusio-dispersio -massavuo, $[ML^{-2}T^{-1}]$; M=massa, L=pituus, T=aika]

q nestevuo $[LT^{-1}]$

c lika-aineen konsentraatio $[ML^{-3}]$

θ tilavuusvesipitoisuus $[L^3L^{-3}]$

D dispersio-diffuusio vakio $[L^2T^{-1}]$

x kulkeutumissuunta [L]

Nestevuo on

$$q = k i = -k \partial h / \partial x = \theta v$$

missä

k on hydraulinen läpäisevyys $[LT^{-1}]$

i hydraulinen gradientti

Nestevuo q edustaa veden tilavuusvirtaa koko kiintoaineksen ja nesteen täyttämän poikkipinnan läpi kohtisuorassa virtausuuntaa vastaan. Koska virtaus ei tapahdu kiinteän aineksen läpi, q ei edusta todellista virtausnopeutta.

Dispersio-diffuusio -kerroin esitetään tyypillisesti kaavalla

$$D = \alpha_L v + D^*$$

missä

α_L on maan pituussuuntainen dispersiivisyys [L], peukalosääntönä $\alpha_L = 0.1 L$,

L on kulkeutumismatka eli eristeen paksuus

D^* tehokas diffuusiokerroin maassa [L^2T^{-1}]

Dispersiivisyyden ja virtausnopeuden tulo ilmaisee mekaanisen dispersion vaikutuksen ja tehokas diffuusiokerroin ilmaisee nesteen leviämisen diffuusion vaikutuksesta. Pienillä virtausnopeuden arvoilla nopeuden lähestyessä nolaa nesteen diffuusiosta tulee hallitseva ja suurilla nopeuksilla diffuusio on mitätön.

Advektio-dispersio -yhtälö perustuu yleisempään massan säilymisen jatkuvuusyhtälöön

$$\partial m / \partial t = -\nabla J_{ad} + S$$

missä

m on lika-aineen adsorboituneen ja nestefaasin sisältämä kokonaismassa tilavuusyksikössä

t aika

S yleinen lisäys tai poisto

Lika-aineen kokonaismäärä kokonaistilavuudessa on

$$m = \theta c + \rho_d c_s = \theta R_d c$$

missä

ρ_d on maan kuivatilavuuspaino [ML^{-3}]

c_s lika-aineen absorboitunut konsentraatio [MM^{-1}]

R_d pidättymiskerroin nopealle, lineaariselle ja palautuvalle sorbtioille

Pidättymiskerroin on

$$R_d = 1 + (\rho_d / \theta) K_d$$

missä

K_d on jakaantumiskerroin

Jakaantumiskerroin ilmaisee pidättyneen konsentraation ja huokosveden konsentraation suhteen.

$$K_d = c_s / c$$

Neutraaleilla orgaanisilla yhdisteillä K_d korreloi usein orgaanisen hiilivakion K_{oc} kanssa

$$K_d = f_{oc} K_{oc}$$

missä

f_{oc} on orgaanisen aineksen pitoisuus (massa oc / kiinteän aineen massa).

Radioaktiivisten aineiden hajontaa edustaa termi

$$S = -\lambda_w \theta c - \lambda_s \rho_d c_s = -\theta \Lambda c$$

missä

λ_w on lika-aineen ensimmäisen asteen hajoamisen hajoamisvakio vesiliuoksessa [T^{-1}]

λ_s lika-aineen ensimmäisen asteen hajoamisen hajoamisvakio kiinteässä aineksessa [T^{-1}]

Λ yhdistetty hajoamisvakio

Yhdistetty hajoamisvakio on

$$\Lambda = \lambda_w + \lambda_s (R_d - 1)$$

Radioaktiivisen hajoamisen lisäksi ensimmäisen asteen hajoamista on käytetty mm. eräiden orgaanisten aineiden hydrolyysireaktioiden ja biohajoamisreaktioiden mallintamiseen.

Edellä esitetyn perusteella tiivistekerroksen läpi tapahtuvalle kulkeutumiselle saadaan yhtälö

$$\frac{\partial(\theta R_d c)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(q c - \theta D \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \theta \Lambda c$$

Em. yhtälö voidaan vakiotilanteessa (tilavuusvesipitoisuus ja tilavuusvirta vakioita) esittää yleisemmässä muodossa (advection-dispersion -reaktion equation - ADRE).

$$R_d \frac{\partial c}{\partial t} = \left(D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} \right) - \Lambda c.$$

Advektio-dispersio -reaktioyhtälö voidaan periaatteessa ratkaista analyyttisillä yhtälöillä, puolianalyttisillä malleilla tai numeerisilla malleilla. Analyttiset mallit edustavat yhtälön suljetun tilan ratkaisua tietyillä alku- ja reunaehdoilla. Numeeriset mallit perustuvat etupäässä differenssimenetelmiin tai elementtimenetelmiin.

Edellä esitetyn yhtälön (ADRE) analyyttinen ratkaisu tapauksessa, jossa $\lambda_w = \lambda_s = \lambda = 0$ ja jonka alku- ja reunaehdot ovat (konsentraatio maassa alussa 0, maahan suotautuvan nesteen konsentraatio säilyy vakiona c_0 , maakerroksen paksuus ääretön ja pitoisuus siellä 0):

$$\left. \begin{aligned} c(x,0) &= 0 \\ c(0,t) &= c_0 \\ c(\infty,t) &= 0 \end{aligned} \right\}$$

ja jossa tarkastelu suoritetaan pisteessä $x = L$, missä L on tiivistekerroksen paksuus, on

$$c(L,t) / c_0 = 0.5 [\operatorname{erfc}(\xi_1) + \exp(\xi_2) \operatorname{erfc}(\xi_3)]$$

missä

c_0 on lika-aineen konsentraatio sisään suotautuvassa vedessä

ξ_1, ξ_2, ξ_3 dimensiottomia parametreja

$$\xi_1 = (R_d L - v t) / (2 \sqrt{R_d D t}) = (1 - T_r) / (2 \sqrt{\xi_4})$$

$$\xi_2 = v L / D = P_L$$

P_L on Pecletin luku

$$\xi_3 = (R_d L + v t) / (2 \sqrt{R_d D t}) = (1 + T_r) / (2 \sqrt{\xi_4})$$

missä

$$\xi_4 = D t / (R_d L^2)$$

$$T_r = T / R_d = v t / (R_d L)$$

missä

T_r on reagoiva virtauksen huokostilavuus

T todellinen virtauksen huokostilavuus

Virhefunktion *erf* ja sen komplementaarifunktion *erfc* arvo voidaan määrittää taulukkoarvoista tai sarjakehitelmistä ja määrittäminen sisältyy myös uusimpiin Excel-taulukkolaskentaohjelman funktioihin.

Pecletin luku ilmaisee advektio- ja dispersiokulkeutumisen suhteen. Mitä pienemmäksi luku tulee, sitä suurempi on dispersion merkitys.

Ajasta riippuvaa virtausmäärää voidaan myös käyttää arvioitaessa lika-aineen kulkeutumista tiivistekerroksen läpi.

Lika-aineen advektio-diffuusio-dispersio -massavuolle maamateriaalin vesifaasissa saadaan, kun $x = L$

$$J_{ad} = 0.5 * q c_0 [\operatorname{erfc}(\xi_1) + (2 / (\sqrt{\pi\xi_5})) \exp[-(\xi_1)^2]]$$

$$\xi_5 = v^2 t / (R_d D)$$

Esittämisessä käytetään usein suhteellista liukoisen massavuon arvoa, jossa advektio-dispersio massavuo normalisoidaan advektiivisella massavuolla

$$RF = J_{ad}(L,t) / (q c_0) = J_{ad} / J_a$$

Kun diffuusio on hallitseva, veden nopeus lähestyy nollaa, ja diffuusiovuolle saadaan yhtälö

$$J_d = -\theta D^* \partial c / \partial x$$

ja advektio-dispersio -reaktioyhtälö muuttuu muotoon

$$R_d \frac{\partial c}{\partial t} = D^* \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - \Lambda c$$

Tämän yhtälön analyyttiset ratkaisut saadaan asettamalla $v=0$ advektio-dispersio -reaktioyhtälön analyyttisistä ratkaisuista.

Efektiivinen diffuusiokerroin maamateriaalissa on

$$D^* = D_0 \tau_a$$

missä

D_0 on aineen diffuusiokerroin vedessä (taulukoituja arvoja useille aineille ja yhdisteille mm. viitteessä /Shackelford/)

τ_a näennäinen tortuositeetti (useimmille hienorakeisille materiaaleille
 $0.1 \dots 0.4$; $\tau_a = \theta^{10/3} / \phi^2$; jossa θ kosteus ja ϕ huokoisuus)

Osittain kyllästyneille maamateriaaleille diffuusiokerrointa voidaan arvioida kaavalla

$$D_{\theta}^* = ((\theta - \theta_{\min}) / (n - \theta_{\min})) D^*$$

missä

θ_{\min} on minimi tilavuusvesipitoisuus, jossa vesi ei enää muodosta yhteyksiä, jonka kautta diffuusio voi kulkea.

Tässä yhteydessä on käsitelty kulkeutumista ainoastaan yksidimensioisessa tapauksessa edellä esitetyillä reunaehdoilla. Kulkeutumismallin muita reunaehtoja sisältäviä analyttisiä ratkaisuja ja ratkaisuja myös kolmiulotteisessa kulkeutumisessa on esitetty mm. internetissä viitteissä /84/ ja /16/.

Analyttisten ratkaisujen käytöllä on etuna etenkin käytön yksinkertaisuus, mutta puutteena on ratkaisujen soveltumattomuus monimutkaisempien, todellisten rakenteiden ja reunaehtojen kuvaukseen. Todellisten rakenteiden mallintamisessa käytetään useimmiten numeerisia menetelmiä. Numeerisia menetelmiä ei tässä yhteydessä käsitellä. Eri menetelmiin perustuvia ohjelmia on runsaasti saatavina sekä kaupallisesti että myös vapaasti ladattavissa internetistä. Alla on mainittu muutamia www-sivustoja, joilla näitä ohjelmia on käsitelty. Tässä raportissa myöhemmin käsiteltävissä esimerkkitapauksissa on käytetty internetistä saatavissa olevaa Mouser-ohjelmaa.

Ympäristogeotekniikkaan, kaatopaikkoihin, veden ja lika-aineen kulkeutumiseen liittyviä web-sivuja ja niillä esitetyjä ohjelma-alueita ja ohjelmia. Sivusto sisältää useimmiten kuvaukset ohjelmista. Osa ohjelmista on ladattavissa suoraan sivustoilta, osa ohjelmista on vain ostettavissa.

<http://www.ggsd.com/>

Geoenvironmental program index and directory by category (ohjelma alueet - kussakin useita ohjelmia)

Aquifer test analysis

Contaminant modelling

Contaminant transport (1D)

Contaminant transport (2D FD)

Contaminant transport (2D FEM)

Contaminant transport (2D analytical)

Contaminant transport (3D)

Geochemistry

Geoenvironmental database systems

Geoenvironmental software suites

Groundwater flow (1D)

Groundwater flow (2D)

Groundwater flow (3D)

Groundwater flow (MODFLOW)

Groundwater modelling

Hydraulic properties

Impact assessment

Remediation

<http://www.epa.gov/ahaazvuc/csmos/modeldescr.html>

2DFATMIC	CHEMFLO	MT3D	UTCHEM
3DFATMIC	GEOEAS	NAPL Simulator	VLEACH
BIOCHLOR	GEOPACK	PESTAN	WhAEM
BIOPLUME II	HSSM	RETC	WhAEM 2000
BIOPLUME III	MODFLOW	RITZ	WHPA
BIOSCREEN	MOFAT	STF	

<http://water.usgs.gov/pubs/twri/twri3-b7/html/pdf.html>

Wexler, E.J. Analytical Solutions for one-, two-, and three-dimensional Solute Transport In Ground-Water Systems With Uniform Flow, US Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations, Book 3, Chapter B7.

<http://www.landsim.com/> /<http://www.landsim.com>

Landsim. An interactive program developed by Golder Associates on behalf of the Department of the Environment/National Rivers Authority (now the Environment Agency), LandSim uses Monte Carlo probabilistic performance assessment models constructed for new and existing landfill sites. The model essentially tracks leachate production, chemistry, migration and leakage through engineered and non-engineered structures, followed by leachate migration through the unsaturated zone to assess the ultimate impact on the aquifer.

<http://www.wes.army.mil/el/elmodels/>

useita ympäristötekniikkaan liittyviä ohjelmia, mm. HELP versio 3.07 ladattavissa

<http://www.water.hut.fi/~tkarvone>

Prof. Tuomo Karvosen kotisivut Teknillinen korkeakoulu, Vesitekniikka esitelmiä, opetusmateriaalia, demoja

http://www.tu-harburg.de/wwv/skripte/Groundwater_engineering/

Prof. Dr.-Ing. W. Schneiderin esitelmiä veden ja haitta-aineiden kulkeutumisesta, kap-pale 4 sisältää mm. kulkeutumisyhtälön analyttisiä ratkaisuja ja esimerkkejä - myös 3-dimensionaalisia ratkaisuja

<http://www.lmnoeng.com/Groundwater/transportStep.htm>

rekisteröitymisen ja maksullisen aikalisenssin hankkimista vaativia online-ohjelmia, mm. haitta-aineiden kulkeutuminen

<http://www.groundwater.buffalo.edu/software/software.html>

sivuilta on ladattavissa muutamia ohjelmia, mm. haitta-aineiden kulkeutumisen mallintamiseen Mouser, 1-D Reactive Transport Model.

<http://www.geo-slope.com/>

Geo-Slope -ohjelmistopaketti (SLOPE/W, SEEP/W, SIGMA/W, TEMP/W, CTRAN/W) ja uusimpana WADOSE/W

http://www.scisoftware.com/products/sesoil_overview/sesoil_overview.html

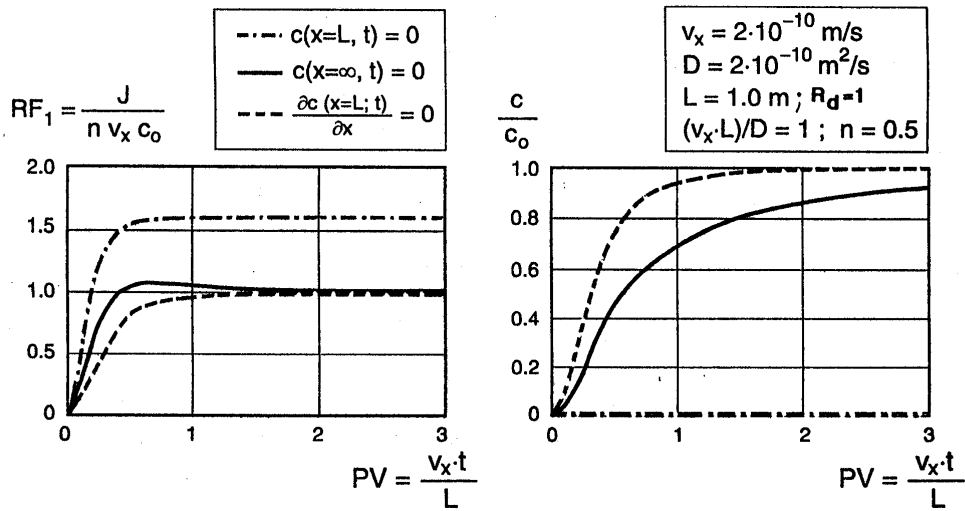
SESOIL HELP-ohjelman tapainen lika-aineiden kulkeutumistakin mallintava ohjelma

Reunaehtojen merkitys

Suurin epävarmuus kulkeutumisen mallintamisessa voi käytännön tapauksissa aiheutua reunaehtojen valinnasta. Sellaisissa tapauksissa, joissa reunaehdot ovat epävarmat tai niitä ei tunneta, on suositeltavaa käyttää konservatiivisia reunaehtoja. Viitteessä /76/ esitettyssä eri reunaehtojen vertailussa sekä advektion että diffuusion hallitsemassa kulkeutumisessa suurin suhteellinen massavuo RF saavutetaan käyttämällä tiivistekerroksen (paksuus 1 m) ylempänä (suotoveden) reunaehtona $c(0,t)=c_0$ ja alempana ulostuloreunan (suotoveden poistuminen) reunaehtona nollapitoisuutta $c(L,t)=0$ eli "huuhtelua".

Edellä esitetty analyyttinen ratkaisu ei ole siten reunaehdoiltaan konservatiivinen kulkeutumisen suhteen. Sen sijaan pitoisuuksien suhteen sitä voidaan pitää käytännössä konservatiivisena. Massavuon maksimoivalla reunaehdolla (täydellisellä huuhtelulla) konsentraatio ulostulevalla pinnalla on nolla.

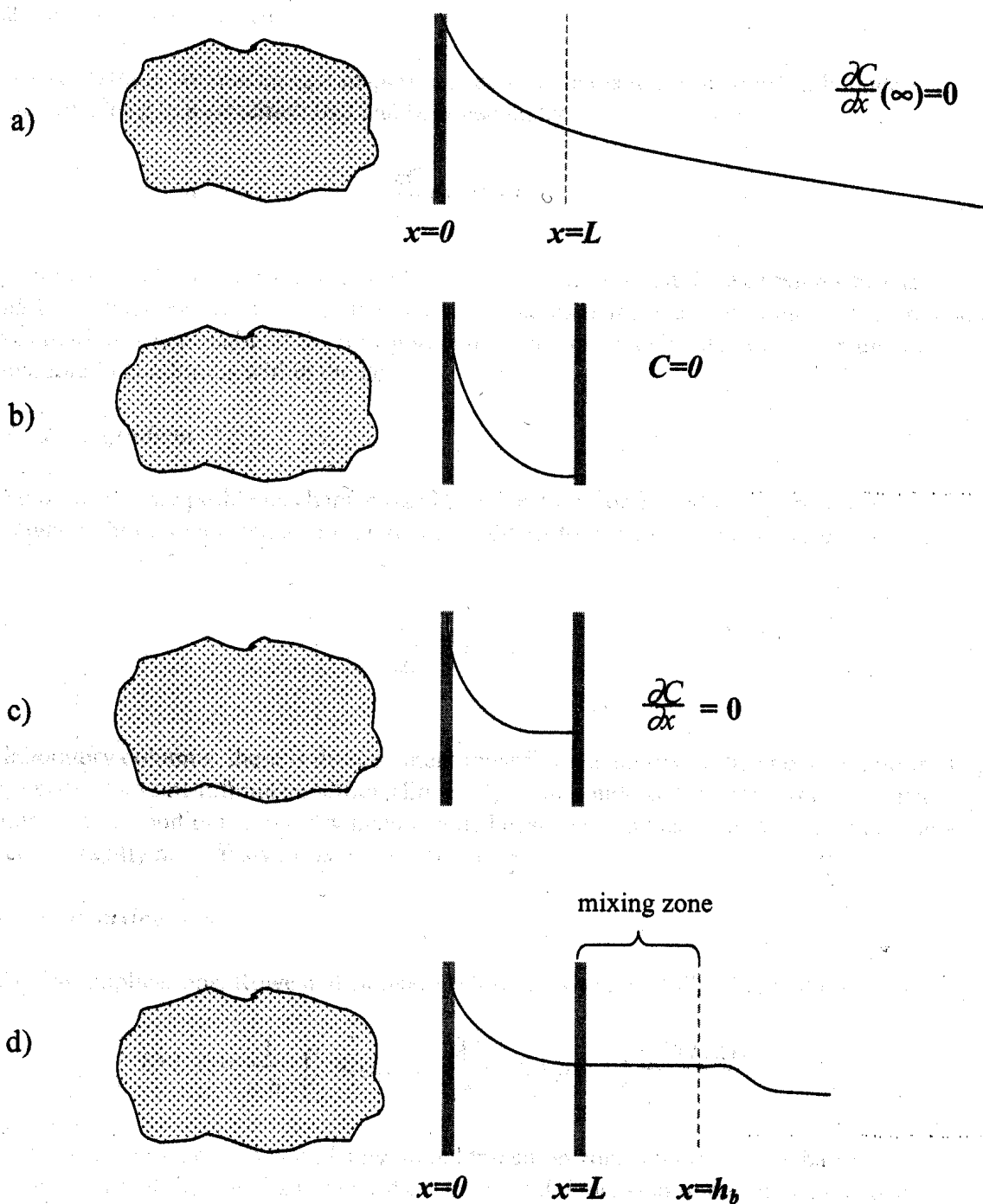
Kuvassa 5.1 on havainnollistettu tiivistekerroksen ulostuloreunan eri reunaehtojen vaikutusta lika-aineen virtaukseen ja ulostuloreunan konsentraatioon. Vasemmanpuoleisessa kuvassa on yhtenäisellä viivalla esitetty edellä käsitellyillä äärettömän maakerroksen reunaehdoilla analyyttisellä ratkaisulla saatu normalisoitu massavirta. Tätä vastaava normalisoitu pitoisuus eristekerroksen alareunassa on esitetty oikeanpuoleisessa kuvassa myös yhtenäisellä viivalla. Pistekatkoviivalla on esitetty vastaavissa kuvissa alapinnan "huuhtelureunaehdolla" saadut suhteelliset massavuot ja pitoisuudet. "Huuhtelureunaehto" käyttäen massaa siis siirtyy vakioilanteessa (joka huuhtelureunaehdolla saavutetaan ajan / virranneen huokostilavuuden suhteen nopeammin kuin äärettömän maakerroksen tapauksessa) tässä tapauksessa n. 1.6 -kertainen määrä äärettömän maakerroksen reunaehtoon verrattuna. Eristekerroksen alapinnan huuhtelun (haitta-aineen poiskuljetuksen johdosta) pitoisuus alapinnassa on 0. Kuvassa on lisäksi esitetty kolmantena reunaehtona tapaus, jossa diffuusiokulkeutuminen on ulostuloreunassa nolla ($\partial c(L,t)/\partial x = 0$). Tällä reunaehdolla saavutetaan suurin pitoisuus ulostuloreunalla. Vakioilanteessa massavirta on kuitenkin saman suuruinen kuin äärettömän maakerroksen tapauksessa.



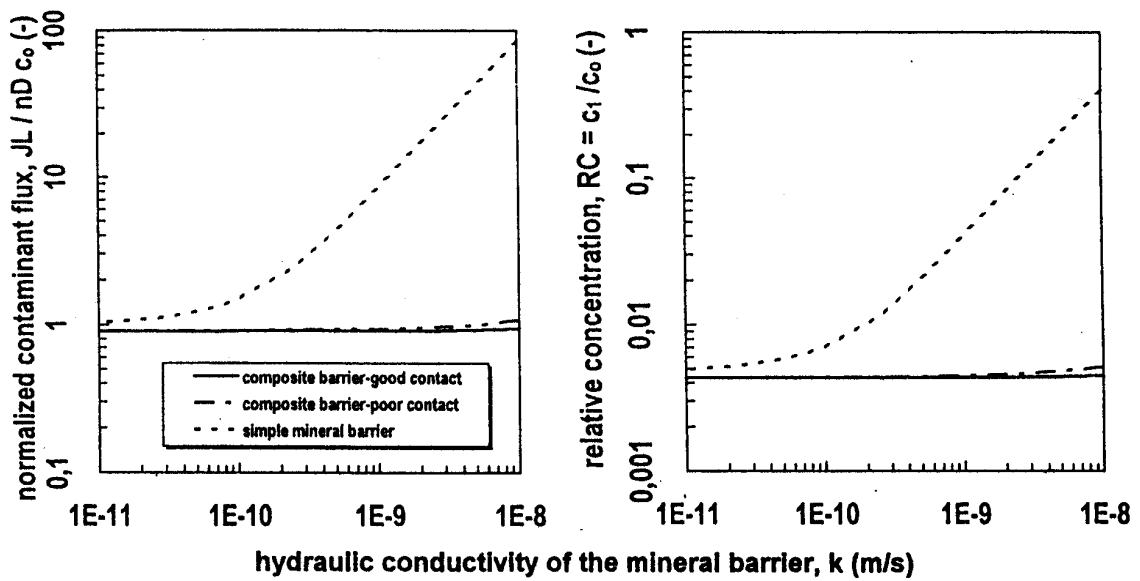
Kuva 5.1. Reunaehto-*jen vaikutus lika-aineen virtaukseen ja ulostuloreunan konsentraatioon* /57/. $PV = \text{pore volume, huokostilavuus}$.

Ulostuloreunan reunaehtoja on havainnollistettu kuvassa 5.2. Sekoittumisvyöhyke (kuva d) mahdollistaa esim. tiivisteen alapuolella olevan akviferin ulostulevaa lika-ainetta kuljettavan reunaehdon määrityksen (ulostuloreunan pitoisuus riippuu akviferin mitoista ja siinä olevan veden virtausnopeudesta).

Edellä on käsitelty diffuusion vaikutusta ainoastaan mineraaliaineksen läpäisyn osalta. Analyttisillä laskentamenetelmillä, kuten myöskään kaikilla diffuusiotarkasteluihin tarkoitetuilla ohjelmilla, ei voida ratkaista geomembraania sisältävien rakenteiden pitoisuuksia tai massavirtoja. Pelkkään mineraaliainestivisteseen verrattuna yhdistelmä-rakenteen läpäisy on pieni. Viitteessä /57/ on vertailtu Suomessakin periaatteessa tyypillisen yhdistelmä-rakenteen lika-aineen vuota ja pitoisuuksia tapauksessa, jossa tiivistekerros ja sen päällä oleva geomembraani ovat akviferin päällä. Akviferin paksuus on 3 m ja veden virtausnopeus siinä 2 m vuodessa. Vertailun tulokset on esitetty kuvassa 5.3. Vedenläpäisevyyden arvolla $k=1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$, mineraaliaineksen läpäisy on noin kymmenkertainen tietyn määrän geomembraanin reikiä sisältävään yhdistelmä-rakenteeseen nähden. Yhdistelmä-rakenteiden läpäisy ei näytä suuresti riippuvan mineraaliaineksen ja geomembraanin kontaktin laadusta. Tässä yhteydessä geomembraanien huomioimista lika-aineiden kulkeutumistarkasteluissa on käsitelty lähemmin luvussa 5.2.3 (Suojausrakenteiden vastaavuuden osoittaminen).



Kuva 5.2. Kaaviokuva reunaehdoista a. puoliääretön, b. nollakonsentraatio, c. nolla-gradientti ja d. sekoittumisvyöhyke (lähteen konsentraatio on vakio ja P_L kohtuullinen) /56/.



$D = 3 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$: hydrodynamic dispersivity of the mineral barrier
 $n = 0.5$: porosity of the mineral barrier
 $D_m = 3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$: pure diffusion coefficient of the geomembrane
 $a = 250 \text{ mm}^2/\text{ha}$: total area of the geomembrane holes per hectare
 $c_0 = 100 \text{ mg/l}$: inflow concentration

$R_d = 1 (-)$: retardation factor
 $L = 1 \text{ m}$: thickness of the mineral barrier
 $s = 2 \text{ mm}$: thickness of the geomembrane
 $H_l = 0.3 \text{ m}$: hydraulic head of the leachate
 c_1 : outflow concentration (mg/l)

Kuva 5.3. Yhdistelmätiivisteiden ja yksinkertaisen mineraaliainestiivisteen vuon ja pitoisuuksien vertailu /57/.

5.2.2 Pohjavesisuojausten mitoitusohjelmat

Pohjavesisuojausten mitoitusmenettelyinä ja myös eräänlaisina riskinarviointimenettelyinä voidaan käyttää perinteisiä vesitasemalleja ja / tai stokastisia simulointimalleja. Analyttisillä vesitasemalleilla pyritään arvioimaan rakenteesta, esim. kaatopaikasta, ympäristöön suotovesien mukana kulkeutuvan lika-aineen määrää (itse asiassa ohjelma laskee vain veden kulkeutumisen määrää). Simulointimalleilla voidaan laskea mahdollisesti myös vesitasetta, mutta ensisijaisesti niillä tarkastellaan lika-aineen kulkeutumista ja sen pitoisuuksia ennalta määritetyissä pisteissä.

Vesitasemalleissa oletetaan yleensä, että sadanta joko valuu kaatopaikan pinnalta, imeytyy pintakerrokseen tai varastoituu jonkin aikaa lumena. Osa imeytyneestä vedestä haihtuu pinnalta joko suoraan tai kasvillisuuden välityksellä. Osa satavasta vedestä voi varastoitua maakerrokseen (ja myös vapautua) niiden kosteuspitoisuudesta riippuen. Mikäli pintarakenteessa on kuivatuskerros, poistuu osa sadannasta tulevasta vedestä kuivatusjärjestelmän kautta. Loppu vesi muodostaa suotovettä, josta osa voi varastoitua jätetäyttöön tai kulkeutua pois pohjaeristeen päällä olevassa kuivatuskerroksessa ja osa kulkeutuu pohjaeristeen mahdollisesti eri komponenttien läpi ympäristöön. Mitoitusohjelmista saatavia tuloksia voidaan hyödyntää mm. myös kaatopaikan salaojitusta suun-

niteltaessa. Oleellisin piirre vesitaseohjelmissä on rakenteeseen suotautuvan veden määrän arviointi. Kaavamuodossa esitettyä rakenteeseen suotautuvan veden määrää on

$$I = P - R - S - Et$$

missä

I on rakenteeseen sisään suotautuvan veden määrä

P sadanta (paikkakuntariippuva)

R pintavalunta (mm. kaltevuus-, materiaali- ja sadantariippuva)

S varastoituminen (mm. materiaali-, lämpötilariippuva)

Et haihdunta (mm. sadanta-, lämpötila-, materiaali, tuuli-, säteilyriippuva).

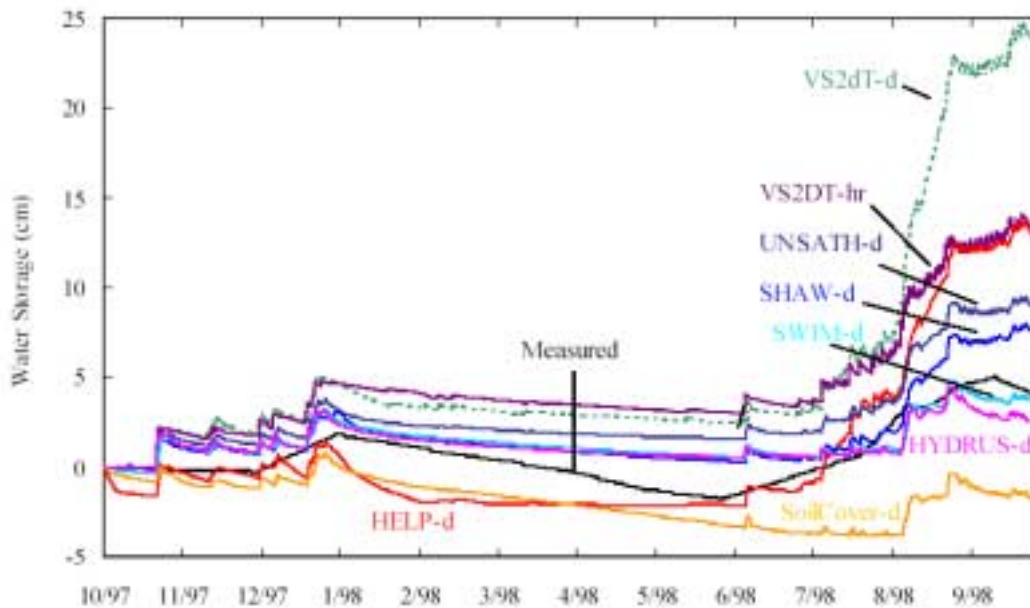
Suotovesimäärän arvioimiseksi on laadittu monia tietokoneohjelmia. Tällaisia ovat mm.

- HELP, <http://www.wes.army.mil/el/elmodels>,
- HYDRUS-1D, <http://www.ussl.ars.usda.gov/MODELS/HYDR1D1.HTM>,
- SHAW, SOILCOVER, SWIM, <http://www.clw.csiro.au/products/swim>,
- UNSATH, <http://hydrology.pnl.gov/resources.asp>,
- VS2DT, <http://water.usgs.gov/software/vs2di.html>,
- CREAMS, http://lupo.wiz.uni-kassel.de/model_db/mdb/creams.html,
- SESOIL, http://www.scisoftware.com/products/sesoil_overview/sesoil_overview.html
- BOWAHALD, <http://www.umwelt.sachsen.de/lfug/Dasima/form2.asp?index=381>.

Ohjelmat poikkeavat toisistaan mm. tarvittavien lähtötietojen ja myös niillä saatavien tulosten suhteen. Kattavia vertailuja eri ohjelmista on niukasti. Erojen havainnollistamiseksi viitteessä /35/ on esitetty kapillaarieristyskerroksen eri ohjelmilla suoritettujen vesitaselaskelmien vertailuja (USA, Texas). Kaikkien ohjelmien tulokset kuvasivat kohtuullisen hyvin kenttämittauksilla havaittua vesitasetta. Suurimmat erot muodostuivat sadannan jakautumisessa haihduntaan ja veden varastointiin (taulukko 5.3 ja kuva 5.4). HELP-ohjelma aliarvioi tässä vertailussa haihduntaa. Toisessa suppeammassa vertailussa Saksan olosuhteissa HELP -ohjelma on antanut suurempia vuotovesimääriä kuin BOWAHALD -ohjelma, johtuen lähinnä tiivistekerroksen päällä vaikuttavasta suuremmasta painekorkeudesta /105/, eron korostuessa etenkin kuivissa olosuhteissa /106/.

Taulukko 5.3. Mitattu ja simuloitu vesitase kuusikerroksisessa kapillaarieristeessä loka-kuusta 1997 syyskuuhun 1998 (d päivittäinen, hr tunneittainen tai 15 min sadanta)/35/.

	Precipitation			Storage	
	Irrigation (cm)	Runoff (cm)	Evaporation (cm)	change (cm)	Drainage (cm)
Measured	42.7	6.0	32.6	4.1	0.0
HELP	42.7 (d)	1.5	27.3	13.0	0.9
HYDRUS 1D	42.7 (d)	0.0	39.8	2.5	0.4
	42.7 (hr)	0.0	38.5	3.8	0.4
	42.7 (15 min)	0.8	37.7	3.8	0.4
SHAW	42.7 (d)	0.0	34.8	7.6	0.3
	42.7 (hr)	0.1	35.4	7.1	0.3
SoilCover	42.7 (d)	1.5	43.0	-1.8	0.0
SWIM	42.7 (d)	0.0	39.1	3.6	0.0
	42.7 (hr)	0.0	38.5	4.2	0.0
UNSATH	42.7 (d)	0.0	33.5	8.9	0.3
	42.7 (hr)	0.1	33.5	8.8	0.3
VS2DT	42.7 (d)	0.0	19.1	23.6	0.0
	42.7 (hr)	0.1	29.2	13.4	0.0
	42.7 (15 min)	0.9	29.3	12.5	0.0



Kuva 5.4. Mitattu ja simuloitu veden varastoituminen kuusikerroksisessa kapillaarieristeessä eri ohjelmilla laskettuna /35/.

Tämän projektin yhteydessä ei ole vertailtu eri ohjelmia. Jäljempänä on tarkasteltu lähemmin ainoastaan HELP -ohjelmaa, mikä ei kuitenkaan ole kannanotto HELP -ohjelman paremmuudesta muihin ohjelmiin verrattuna. Ohjelma lienee kuitenkin tunnetuimpia yleisessä käytössä olevia vesitaseohjelmia. HELP-ohjelmassa käytetään useita yleisesti hyväksytyjä analyttisiä yhtälöitä sekä tiettyjä oletuksia ennustamaan kaato- paikan peittorakenteen, jätteen ja pohjarakenteen läpi suotautuvaa vesimäärää.

Äskettäin myös GEO-SLOPE on tuonut jo melko yleisessä käytössä olevien saman valmistajan geoteknisten laskentaohjelmien (SLOPE/W, SEEP/W, CTRAN/W, TEMP/W, QUAKE/W) tapaan toimivan yksi- tai useampikerroksisten mineraaliaineseristysten analysointiin perustuvan elementtiohjelman (VADOSE/W). Ohjelmalla voidaan analysoida 2-dimensioisessa tapauksessa osittain kyllästyneiden peittorakenteiden käyttäytymistä todelliseen ilmastolliseen lähtöaineistoon pohjautuen. Monista muista vastaavan tyyppisistä ohjelmista poiketen ohjelmalla voidaan tarkastella nestevirtauksen ohella myös tiettyjä kaasun- ja lämpövirtoja. Ilmastotietojen pohjalta laskettua huokospainejakautumaa voidaan tarvittaessa käyttää peiterakenteiden stabiliteettianalyseissa.

Lähtötietoina WADOSE/W -ohjelma ottaa huomioon sadannan, haihdunnan, lumen kerääntymisen ja sulamisen, pohjaveden suotautumisen, maan jääntymisen ja sulamisen, kaasun virtauksen maassa ja kasvien aiheuttaman haihdunnan. Vuosittaiset ilmastotiedot voidaan valita 40 paikkakunnan tietokannasta, tai käyttäjä voi määrittellä tiedot itse. Käyttöympäristönsä puolesta (toimii vastaavaan tapaan kuin muut GEO-SLOPE:n ohjelmat) ohjelma saattaisi olla kaatopaikkasuunnittelussa helposti käyttöönotettavissa.

Lika-aineiden kulkeutumista mallintavista ohjelmista LandSim –ohjelma on tarkoitettu työvälineeksi kaatopaikkojen riskinarviointiin. LandSim –ohjelman on valmistanut Englannin ympäristöministeriölle (British Environment Agency) Golder Associates /19, <http://www.golder.com/>. Ohjelma perustuu virtauksen ja lika-aineen kulkeutumisen analyttisiin ratkaisuihin suhteellisen yksinkertaistetuilla oletuksilla. Ohjelmalla lasketaan lika-aineen kulkeutuminen ja sen pitoisuus tietyssä ennalta määritetyssä pisteessä soveltaen laskemiin Monte Carlo analyysiä. Tulokset saadaan todennäköisyysjakautumina. Myöskään LandSim:n esimerkin omainen käyttö tässä projektissa ei ole kannanotto sen paremmuudesta muihin vastaaviin ohjelmiin verrattuna.

5.2.2.1 HELP

HELP -ohjelma (Hydrologic Evaluation of Landfill Performance) on kvasi-kaksidimensioinen hydrologinen malli kaatopaikkojen, peittorakenteiden, ja muiden kiinteän jätteen säilytyspaikkojen vesitaselaskelmien suorittamiseen. Malli käyttää lähtötietoina ilmasto-, materiaali- ja suunnittelutietoja ja huomioi

- veden varastoitumisen,
- lumen sulamisen,
- valunnan, suotautumisen,
- haihdunnan,
- kasvillisuuden,
- veden pidättymisen,
- vaakasuuntaisen kuivatuksen,
- suotovedenkierron,

- veden pystysuoran liikkeen osittain kyllästyneessä kerroksessa sekä
- veden suotautumisen tiivistekerrosten läpi (maamateriaali, geosynteettinen kalvo tai komposiittirakenne).

Ohjelma on tarkoitettu ensisijaisesti vaihtoehtoisten rakenteiden vertailussa käytettäväksi työkaluksi. Ohjelman päätuloksina saadaan /77/ sadannan jakautuminen

- valuntaan,
- haihduntaan,
- kuivatukseen,
- jätevesien keräykseen ja
- tiivisterakenteen läpi kulkeutuvaan vesimäärään.

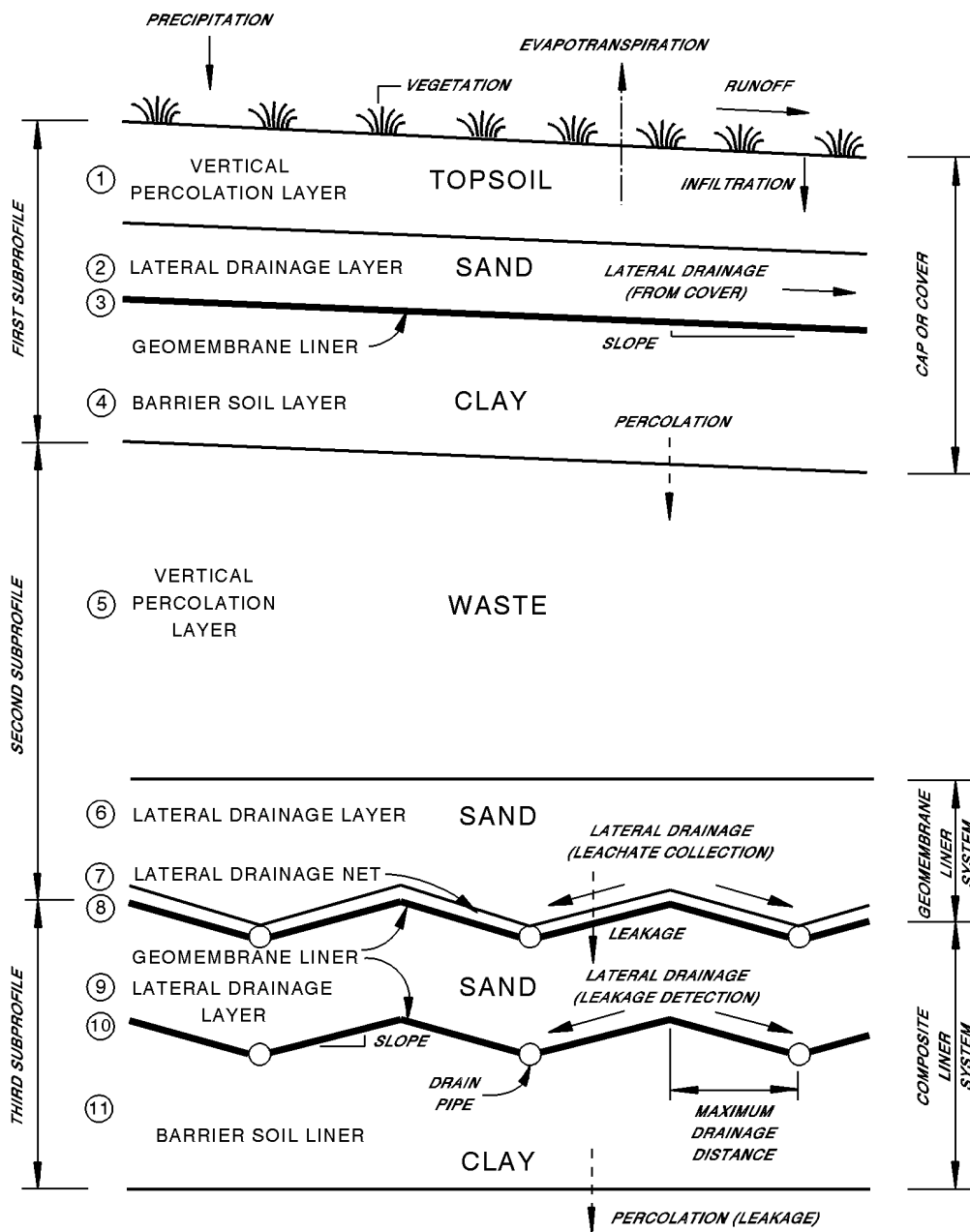
Tyypillisen ohjelmalla ratkaistavan rakenteen pääpiirteitä on esitetty kuvassa 5.5.

Ohjelman laskentamenetelmiä ja niiden taustalla olevia teorioita tai ohjelman rajoituksia ei tässä yhteydessä käsitellä. Ohjelman manuaali, jossa nämä on esitetty, samoin kuin ohjelmakin, on saatavilla internetissä osoitteessa: <http://www.wes.army.mil/el/elmodels>. Ohjelman tarvitsemat lähtötiedot sen sijaan käsitellään tässä yhteydessä päätasolla - esim. ilmastolähtötietojen antamisessa on monia optioita, jotka ovat hyödynnettävissä ainoastaan Yhdysvalloissa, kuten esim. pitkänajan sadantatiedot. Ohjelmassa on mahdollista käyttää SI -järjestelmän yksiköitä.

Ohjelma tarvitsee kolmenlaisia lähtötietoja:

- ilmastotiedot,
- maamateriaaleihin liittyvät tiedot ja
- suunnittelutiedot.

Käyttäjä voi käyttää monissa osissa lähtötietoina ohjelmaan sisään rakennettuja datapankkeja tai antaa kullekin suurelle omat arvonsa. Datapankeissa olevat ilmastolliset lähtötiedot pohjautuvat kuitenkin Pohjois-Amerikan ilmastotietoihin, minkä johdosta ne eivät ole sellaisenaan suoraan käytettävissä.



Kuva 5.5. Periaatekuva kaatopaikkarakenteiden tyypillisistä piirteistä /77/.

Ilmastotiedot

Tarvittavat ilmastotiedot jakaantuvat neljään ryhmään:

- haihdunta,
- sadanta,
- lämpötila ja
- säteily

Haihduntatiedot:

- paikkakunta - location, maksimisyvyys, josta haihdunta on mahdollista - evaporative zone depth
- maksimi haihduttavan lehtialueen suhde kasvillisuuden peittämään alaan - maximum leaf area index (LAI). Parametrien arvojen valintaa tukemaan manuaalisissa (tiedot ovat tarjolla myös itse ohjelman apuvalikoissa) on annettu viitteitä eri tapauksista ja parametrien herkkyyksistä. Esimerkiksi hyväkuntoiselle ruohopeitteelle LAI-parametrin arvo on 3.5.
- kasvukauden alkamis- ja päättymisajankohta
- vuoden keskimääräinen tuulen nopeus
- keskimääräinen suhteellinen kosteus vuosineljänneksittäin.

Sadantatiedot:

Sadantageneraattorilla on mahdollista generoida tietylle paikkakunnalle (139 kaupunkia Yhdysvalloissa) päivittäinen sadanta enintään 100 vuoden jaksolle. Sadannalla on tällöin suurin piirtein sama tilastollinen jakautuma kuin datapankin sisältämällä historiallisen aineiston jakautumalla (historiatiedostojen ajallinen pituus ei ole kuitenkaan kovin pitkä). Käyttäjä voi antaa omat keskimääräiset kuukausisadannan arvot parantamaan laskennan tarkkuutta.

Lämpötilatiedot:

Päivittäiset lämpötilatiedot voidaan generoida kuten sadantatiedotkin. Sadanta on määritettävä ennen lämpötilajakautumaa, koska päivittäiset lämpötilat ovat sadannan heikko funktio.

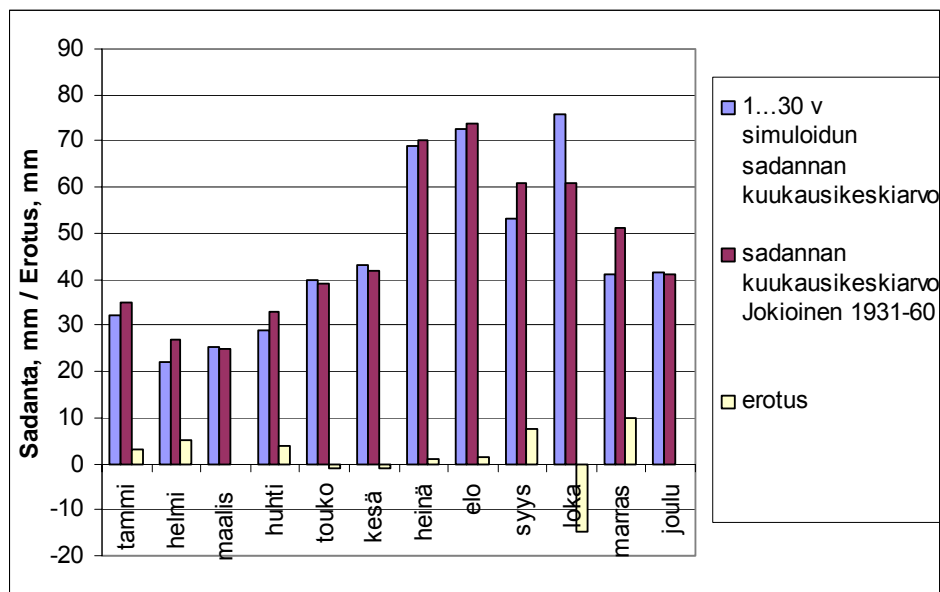
Säteilytiedot:

Myös säteilylähtötiedot voidaan generoida sadannan ja lämpötilan tapaan ja tuloksen tarkkuutta voidaan parantaa antamalla kohteen sijainti (leveysaste). Säteily on vahvasti sadannasta riippuvainen, joten sadanta on tässäkin tapauksessa määritettävä ensin.

Jäljempänä on esitetty HELP-ohjelmalla saatujen laskentojen tuloksia. Esimerkissä käytetyn rakenteen sijaintipaikkakunnaksi on valittu Jokioinen. Esimerkkitarkastelussa tarvittavat ilmastotiedot on pääosin esitetty viitteen /78/ taulukossa 11 "Keskimääräinen ilmasto Jokioisissa". Ilman lämpötilat ja keskimääräinen sademäärä ovat vuosilta 1931...1960, säteilytiedot vuosilta 1963...1972 ja suhteellinen kosteus vuosilta 1951...60. Esimerkkitarkastelussa käytetyt ilmastotiedot on generoitu vuosille 1...100 edellä mainituilla tavoilla. Generoinnissa on käytetty (tarkastelua helpottamaan ja pitkän tarkasteluajanjakson saamiseksi mukaan tarkasteluun) Minnesotan Minneapolisian sadanta- ja lämpötilatietojen generoinnissa sekä Alaskan Fairbanksin säteilytietojen generoinnissa. Ko. paikkakuntien kuukausittaiset arvot on korvattu Jokioisten kuukausittai-

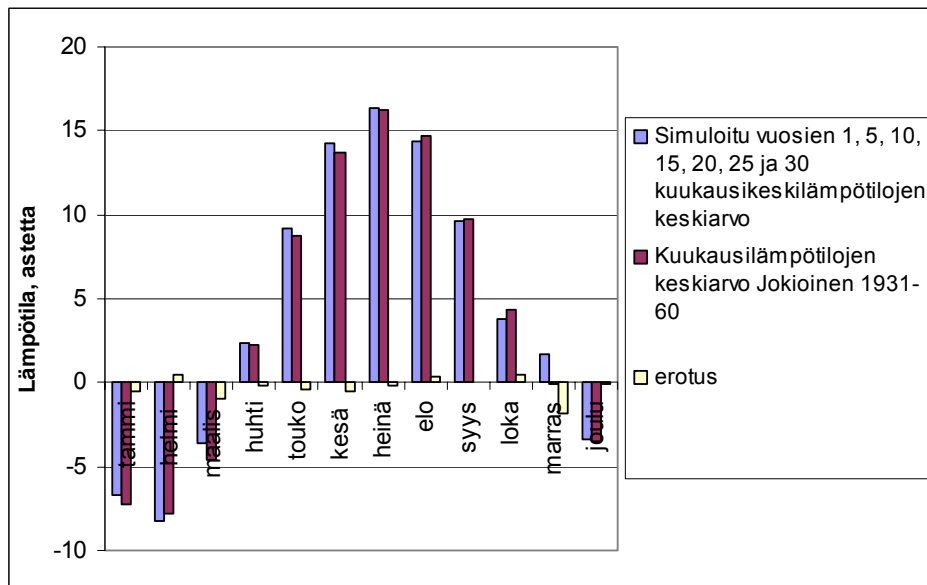
silla sadanta-, lämpötila- ja säteilytiedoilla, mutta riippuvuussuhteet ovat siis em. paikkakuntien riippuvuussuhteita.

Vuosisadannan keskiarvo Jokioisissa 1931-1960 on ollut 559 mm. Generoinnin tuloksena saadussa simulointiaineistossa keskimääräinen vuosisadanta 30 ensimmäisen vuoden aikana on 14 mm pienempi. Kuukausittaiset kohteen todelliset ja simuloitut sademäärät on esitetty kuvassa 5.6. Esimerkkilaskennassa käytetyssä 100 vuoden jaksossa keskimääräinen vuosisadanta oli enää 3 mm todellista keskimääräistä vuosisadantaa pienempi.



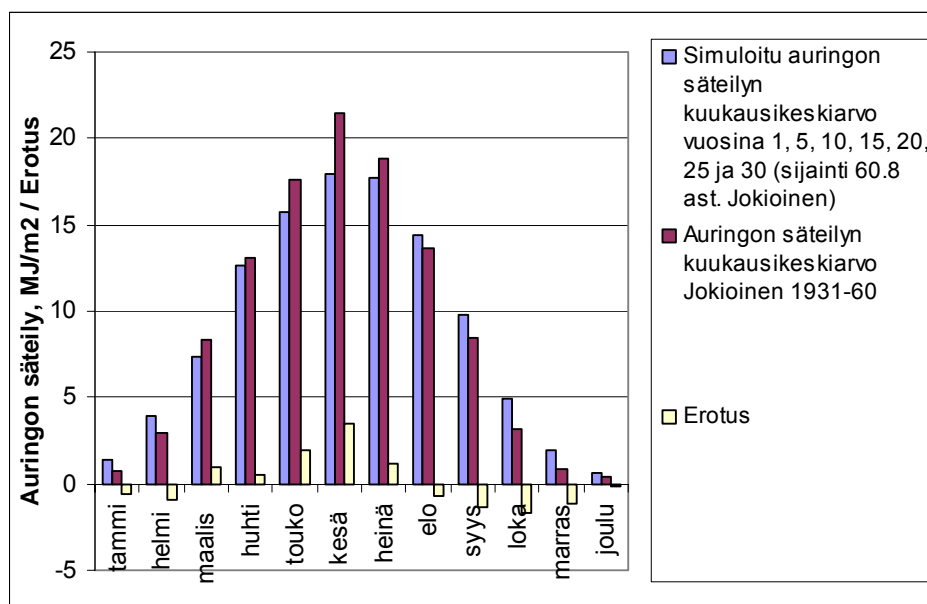
Kuva 5.6. Mitattu ja simuloitu kuukausisademäärä.

Todelliset kohteen keskimääräiset kuukausilämpötilat ja generoidut keskimääräiset kuukausilämpötilat eräiden vuosien osalta on esitetty kuvassa 5.7. Vastaavasti kuvassa 5.8 on esitetty mitatut kuukausittaiset säteilyarvot ja generoidut säteilyarvot eräiden vuosien osalta. Simuloitujen lämpötilojen mukaan laskettu vuosittainen keskilämpötila on ollut tarkasteltujen vuosien osalta 4.1°C, kun todellinen keskilämpö on ollut 3.9°C. Säteilyn osalta poikkeamat näyttävät suurilta, mutta kokonaissäteilyn määrät tarkasteltujen vuosien osalta poikkeavat toisistaan vain hieman yli 1 %.



Kuva 5.7. Mitattu ja simuloitu kuukausilämpötila.

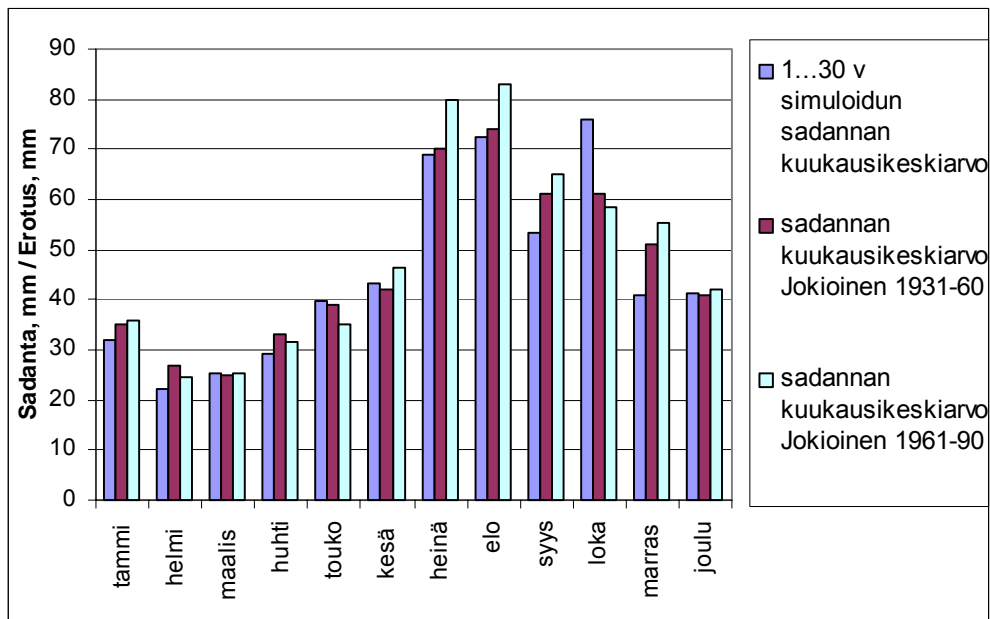
Mikäli ohjelman käyttöönotto Suomessa nähdään tarkoituksenmukaiseksi, tulisi ohjelmasta luoda tietokantoinen maakohtainen versio, kuten Saksassakin on tehty. Saksalaisessa ohjelmaversiossa on ilmoitettu korjatun joitakin alkuperäisen HELP-ohjelman virheitä. Ilmastotietokannat eivät saksalaisessa versiossa liene Saksankaan osalta täydelliset, koska niitä on esitetty sovellettavaksi vain opetus- ja testaustarkoituksiin /28/.



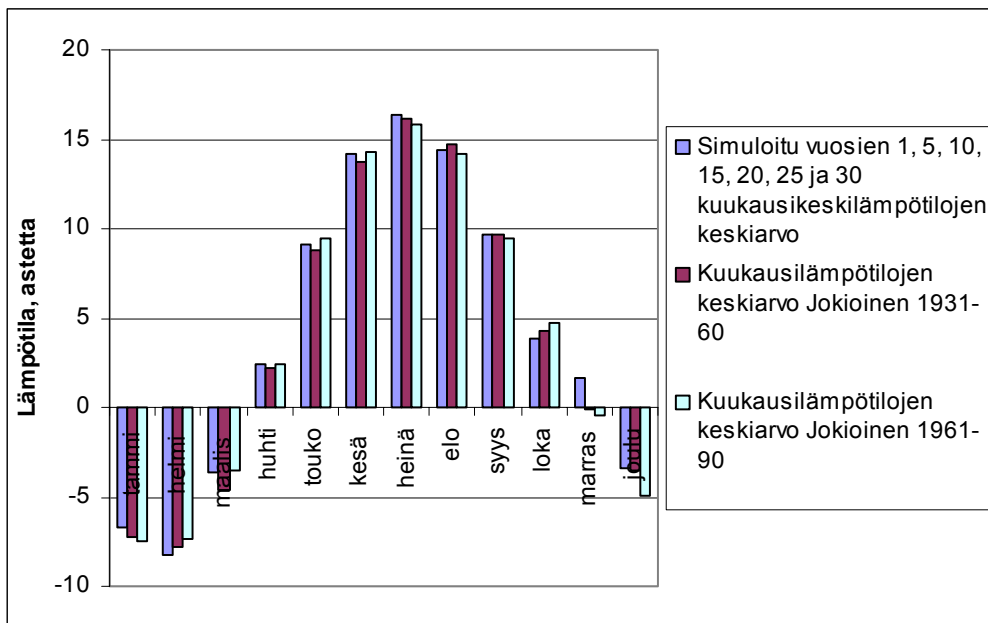
Kuva 5.8. Mitattu ja simuloitu kuukausittainen auringon säteily.

Tarkempaa HELP-ohjelmalla suoritettavaa tarkastelua varten sääasemakohtaiset päivittäiset sademäärät ja lämpötilat vuosina 1961-90 on saatavissa viitteestä /88/. Julkaisusta löytyvät myös kuukausittaiset keskimääräiset sademäärät, lämpötilat, tuulen nopeudet

sekä ilman suhteelliset kosteudet, mutta ei säteilytietoja. Paitsi paikkakunnittain, käytettävät ilmastoarvot vaihtelevat myös käytettyjen vertailujaksojen puitteissa. Kuvissa 5.9 ja 5.10 on esitetty edelleen Jokioisiin edellä mainittua generointimenettelyä käyttäen saadut päivittäisistä arvoista lasketut sademäärän ja lämpötilan kuukausittaiset keskiarvot, generoinnin pohjalla käytettyjen kuukausittaisten sademäärien ja lämpötilojen keskiarvot vuosilta 1931-60, sekä viitteen /88/ mukaiset kuukausittaisten sademäärien ja lämpötilojen keskiarvot vuosilta 1961-1990.



Kuva 5.9. Vuosien 1931-60 keskimääräisten kuukausittaisten sademäärien perusteella generoidut keskimääräiset kuukausittaiset sademäärät ja keskimääräiset kuukausittaiset sademäärät vertailujaksoilla 1931-60 ja 1961-90 Jokioisissa.



Kuva 5.10. Vuosien 1931-60 keskimääräisten kuukausittaisten lämpötilojen perusteella generoidut eräiden vuosien keskimääräiset kuukausittaiset lämpötilat ja keskimääräiset kuukausittaiset lämpötilat vertailujaksolla 1931-60 ja 1961-90 Jokioisissa.

Maamateriaali- ja suunnittelutiedot

Yleistietona kaatopaikasta tarvitaan:

- (projektin nimi)
- kaatopaikan pinta-ala
- prosentuaalinen osuus kaatopaikan pinta-alasta, jolta valunta on mahdollinen
- alkuperäisen kosteusvaraston määrittämistapa (käyttäjän vai laskennallinen)
- lumena varastoitunut vesimäärä, jos käyttäjä määrittää kosteusvaraston

Kerrostietoina annetaan:

- kerrostyyppi (pystysuora läpäisykerros, vaakasuora kuivatuskerros, tiivistekerros tai geomembraani)
- kerrospaksuus
- maan rakenne (huokoisuus, kenttäkapasiteetti ja lakastumispiste yksikköinä tilavuus / tilavuus sekä kyllästyneen tilan vedenläpäisevyys, yksikkö cm/s)
- alkuperäinen maamateriaalin tilavuusvesipitoisuus (haluttaessa)
- maanalainen virtaus kerrokseen

Kuivatuskerroksista annetaan:

- maksimi kuivatuspituus
- salaojan kaltevuus %:ssa
- kuivatuskerroksesta kerättävän ja kierrätettävän suotoveden prosenttiosuus
- kerros, johon kierrätettävä vesi johdetaan

Geomembraaneista annetaan:

- pienten reikien tiheys
- geomembraanin asennusvirheet
- geomembraanin asennuksen laatu (valittavissa kuudesta luokasta)
- geomembraanin kyllästynyt vedenjohtavuus (vesihöyryn diffuusio), cm/s
- geotekstiilin kuljetuskyky, cm²/s (jos se on asennettu geomembraanin kanssa)

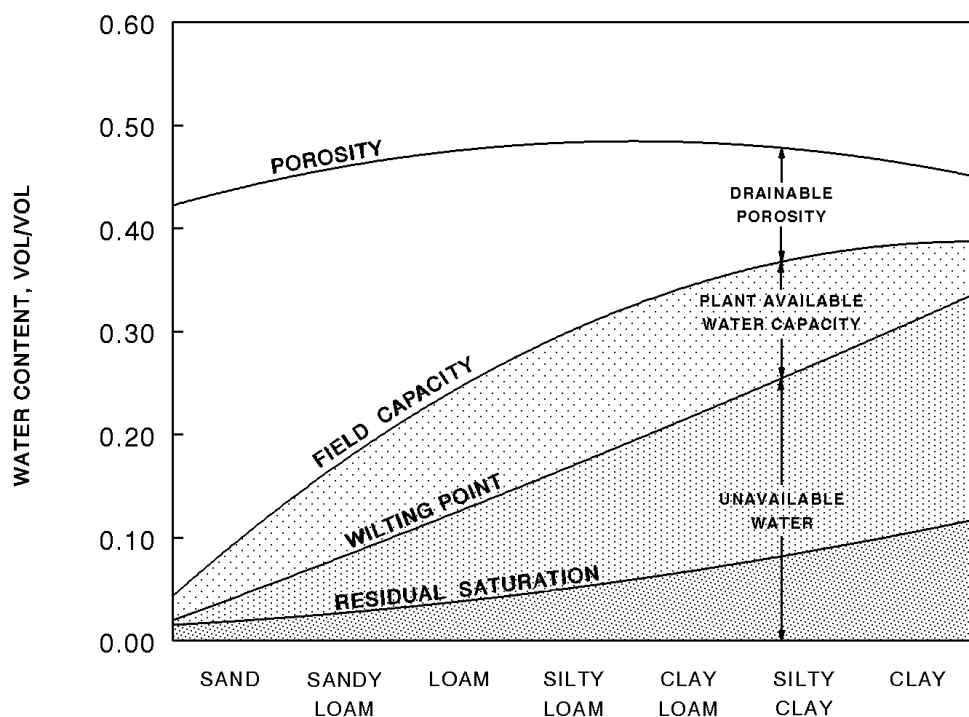
Valunnan huomioimisen vaihtoehdot:

- ohjelma laskee haluttaessa käytettävän valuntakäyräluvun pinnan kaltevuuteen, luiskan pituuteen, luiskan materiaaliin ja kasvillisuuden määrän perustuvana.

Ohjelman tietopankeissa on käytettävissä useita valmiita parametriluetteloita maakerroksille (USDA / USCS -luokitus), tiivistemateriaaleille (ml. bentoniittimatto) ja muutamille uusiomateriaaleillekin (esim. lentotuhka) sekä jätteille. Käyttäjä voi helposti määrittää omat materiaalinsa. Ohjelmassa tarvittavista parametreista ainoastaan kenttäkapasiteetti ja lakastumispisteen arvot eivät ehkä kuulu normaalisti maamateriaaleista määritettäviin ominaisuuksiin. Ne voidaan kuitenkin arvioida maamateriaalin vedenpidätyskäyrään perustuen. Kenttäkapasiteetti vastaa tilavuusvesipitoisuutta 33 kPa imupaineella ja lakastumisraja kuvaa sitä imupainetta (1500 kPa), jonka jälkeen kasvit eivät voi enää hyödyntää maassa olevaa kosteutta. Eri maamateriaalien kosteusparametrien suuruusluokka on esitetty kuvassa 5.11. Ohjelman manuaalissa on esitetty myös menetelmät, joilla käyttäjä voi laskea maamateriaaleille tarvittavat tiedot maamateriaalin huokoisuuteen, hiekka-, siltti- ja savipitoisuuteen sekä raekokoon perustuen.

Geomembraanien osalta tarvittavat läpäisevyydet on esitetty kahdeksalle materiaalille.

Taulukossa 5.4 on esitetty tavanomaisen jätteen kaatopaikan vesitaseanalyysissä tarvittavat lähtötiedot, joita on käytetty esimerkkitarkastelussa.



Kuva 5.11. Eri maamateriaalien kosteusparametrien suuruusluokkia /77/.

Taulukko 5.4. Vesitasetarkastelun lähtötiedot. Tavanomaisen jätteen kaatopaikka. Kerrokset ja niiden ominaisuudet.

Kerros	Paksuus	Yksikkö	Vedenläpäisevyys	Yksikkö	Kerrosnumero
Pintarakenne					
Kasvukerros					ei mukana
Pintakerros	1.0	m			1
Kuivatuskerros	0.5	m	1.00E-03	m/s	2
Keinotekoinen eriste	2	mm			3
Tiivistekerros	0.5	m	1.00E-09	m/s	4
Suodatinkangas tarvittaessa					ei mukana
Kaasunkeräyskerros	0.3	m			5
Suodatinkangas tarvittaessa					ei mukana
Esipeittokerros	0.3	m			6
JÄTE	15	m			7
Pohjarakenne					
Kuivatuskerros	0.5	m	1.00E-03	m/s	8
Suojauskerros					ei mukana
Keinotekoinen eriste	2	mm			9
Tiivistekerros	1.0	m	1.00E-09	m/s	10

Kerroskohtaiset arvot (kerrosnumero viittaa edellä olevaan kerrosten numerointiin) (Huom. taulukossa k [cm/s]).

Kerrosnumero	Kerrostyyppi	Paksuus, cm	Materiaalinumero	Huokoisuus	Kenttäkapasiteetti	Lakastuspiste	k sat, cm/s	Kuivatuspituus. m	Kaltevuus, %	Geomembraanin asennusvirheet / ha	Geomembraanin asennuksen laatu	Materiaalin kuvaus
1	1	100	7	0.473	0.222	0.104	5.2E-04					siHk
2	2	50	21	0.397	0.032	0.013	3.0E-01	100	5			Sr
3	4	0.2	35				2.0E-13			3	3	GMB
4	3	50	16	0.427	0.418	0.367	1.0E-07					savi- tiiviste
5	1	30	21	0.397	0.032	0.013	3.0E-01					Sr
6	1	30	1	0.417	0.045	0.018	1.0E-02					Hk
7	1	1500	18	0.671	0.292	0.077	1.0E-03					Jäte
8	2	50	21	0.397	0.032	0.013	3.0E-01	25	3			Sr
9	4	0.2	35				2.0E-13			3	3	GMB
10	3	100	16	0.427	0.418	0.367	1.0E-07					savi- tiiviste

Yleiset lähtötiedot

Leveysaste	60.8
Kasvukauden alkamispäivä 28.4.	118
Kasvukauden päättymispäivä 12.10.	285
LAI	2
Haihtumissyvyys, cm	50
Keskimääräinen tuulen nopeus, km/h	14
Keskimääräinen 1. vuosineljänneksen suhteellinen kosteus	85
Keskimääräinen 2. vuosineljänneksen suhteellinen kosteus	69.3
Keskimääräinen 3. vuosineljänneksen suhteellinen kosteus	78.7
Keskimääräinen 4. vuosineljänneksen suhteellinen kosteus	91
Käytetään SI-järjestelmän yksiköjä	2
Käyttäjällä ei määritä alkutilan kosteusjakautumaa	0
Kaatopaikan pinta-ala, ha	1
Valunta-alue, % kaatopaikan pinta-alasta	100
Help Model Computed Curve Number	3
Luiskan kaltevuus, %	5
Luiskan pituus, m	100
Luiskan pintamateriaali (maamateriaalin numero)	7
Kasvillisuus	3
Runoff curve number	75

Taulukossa 5.5 on havainnollistettu eri rakennetekijöiden vaikutusta kaatopaikan vesitaseeseen. Materiaalit ja kerrospaksuudet on pidetty vakioina, mutta mm. geomembraanit on saatettu poistaa rakenteesta sekä lopulta myös pintakerros on poistettu. Tarkasteltavat tapaukset ovat seuraavat:

1. Rakenne - kaikki pinta- ja pohjarakenteen osat, myös pintarakenteen geomembraani mukana
2. Rakenne - kaikki pinta- ja pohjarakenteet osat, ei kuitenkaan geomembraania pintarakenteessa
3. Rakenne - kaikki pinta- ja pohjarakenteet osat, ei kuitenkaan geomembraania pinta- eikä pohjarakenteessa
4. Rakenne - ei pintarakennetta, mutta pohjarakenne geomembraaneineen kokonaisuudessaan
5. Rakenne - ohennettu jätetäyttö, pohjarakenteessa ei geomembraania

Tuloksista voidaan havaita, että rakenteella 1 pohjatiivisteiden läpäisevä vesimäärä on pienin ja pintatiivisteiden kuivatuskerrosvalunta on suurin, koska jo pintarakenteen geomembraani ja mineraaliainestiiviste estävät veden valumista alaspäin tehokkaasti. Pintarakenteen kalvon puuttuessa vettä suotautuu runsaasti pintarakenteesta jätetäytön läpi, mutta se kerätään tehokkaasti pohjatiivisterakenteen kuivatuskerroksessa. Pohjaeristeen läpäisevä vesimäärä ei ole juurikaan suurempi kuin rakenteella 1. Mikäli kalvoa ei ole pinta- eikä pohjarakenteessa, kuten rakenteessa 3, vain pieni osa pintarakenteen läpi suotautuvasta vedestä ohjautuu kuivatusjärjestelmään ja suurin osa suotautuu myös pohjaeristeen läpi. Ilman pintarakennetta olevissa rakenteissa pohjarakenteen kuivatuskerroksen toimivuudella on suuri merkitys (rakenteet 4 ja 5). Näiden toimiessa hyvin pohjarakenteen läpäisevät vesimäärät ovat ainakin näillä olettamuksilla samaa suuruusluokkaa kuin pintarakenteet sisältävillä vastaavilla rakenteilla.

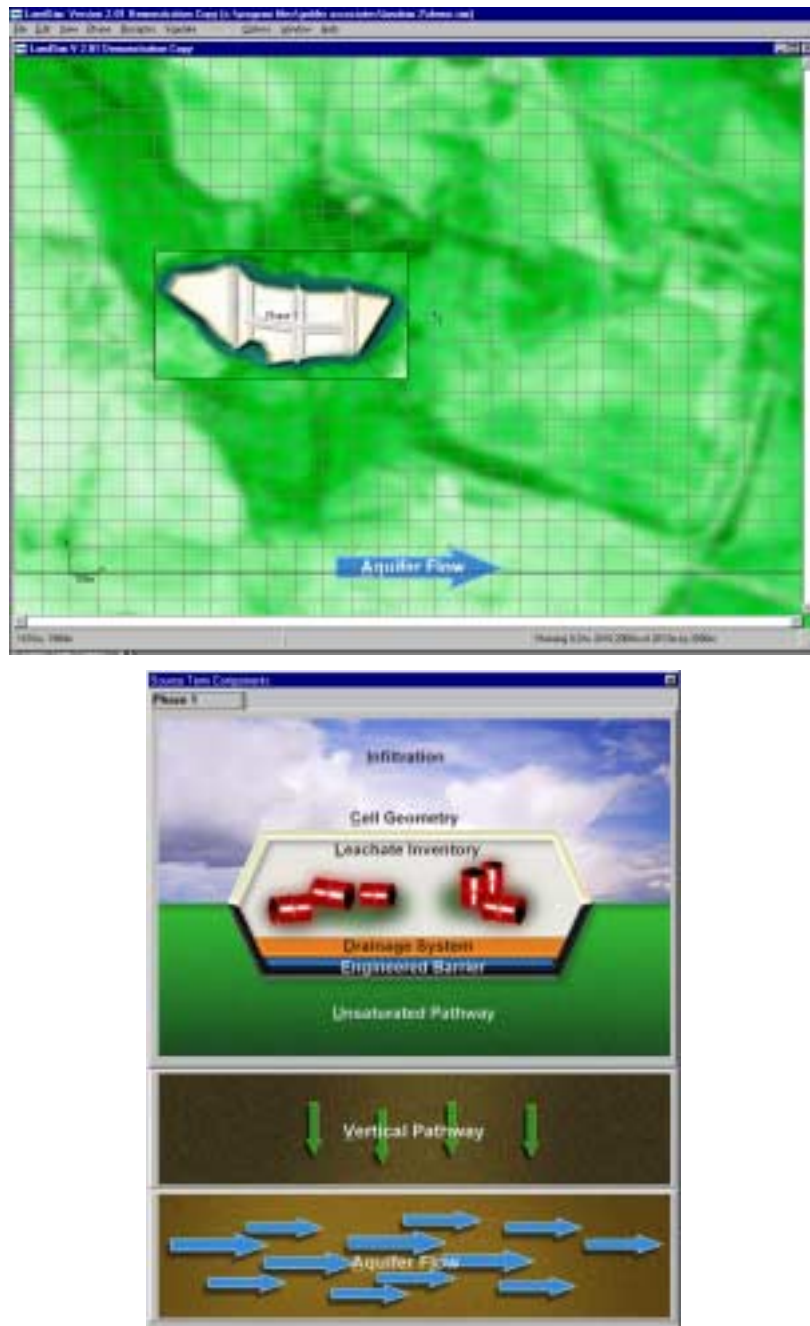
Taulukko 5.5. Eri rakennetekijöiden vaikutus kaatopaikan vesitaseeseen.

Rakenne	1. Rakenne - kaikki rakenteiden osat mukana paksuus m / mm (kalvo)		2. Rakenne - pintarakenteessa ei ole kalvoa paksuus m / mm (kalvo)		3. Rakenne - pinta- ja pohjarakenteessa ei kalvoa paksuus m / mm (kalvo)		4. Rakenne - ei pintarakennetta mukana paksuus m / mm (kalvo)		5. Rakenne - ei pintarakennetta, ohut jätetäyttö, pohjarakenteessa ei kalvoa paksuus m / mm (kalvo)	
Pintakerros	1.0		1.0		1.0		ei ole		ei ole	
Kuivatuskerros	0.5		0.5		0.5		ei ole		ei ole	
Keinotekoinen eriste	2		ei ole		ei ole		ei ole		ei ole	
Tiivistekerros	0.5		0.5		0.5		ei ole		ei ole	
Kaasunkeräyskerros	0.3		0.3		0.3		ei ole		ei ole	
Esipeittokerros	0.3		0.3		0.3		ei ole		ei ole	
Jätetäyttö	15		15		15		15		1	
Kuivatuskerros	0.5		0.5		0.5		0.5		0.5	
Keinotekoinen eriste	2		2		ei ole		2		ei ole	
Tiivistekerros	1.0		1.0		1.0		1.0		1.0	
Vesimäärät	Q, m3/ha/y	%	Q, m3/ha/y	%	Q, m3/ha/y	%	Q, m3/ha/y	%	Q, m3/ha/y	%
Sadanta 100 v keskiarvo / ha	5556	100	5556	100	5556	100	5556	100	5556	100
Pintavalunta	995	17.9	995	17.9	995	17.9	1037	18.7	1037	18.7
Haihdunta	2990	53.8	2990	53.8	2990	53.8	2914	52.5	2914	52.5
Kuivatuskerrosvalunta	1572	28.3	1359	24.5	1359	24.5				
Vedenpaine korkeus pintatiivistekerroksen pinnalla, mm	1.66		1.44		1.44					
Pintarakenteen tiivistyskerrosten läpäisy	0.006	0.00011	213.3	3.84	213.3	3.84				
Pohjarakenteen kuivatuskerrosvalunta	0.005	0.00009	212.1	3.82	27.3	0.49	1605	28.9	1431	25.8
Vedenpaine korkeus pohjatiivistekerroksen pinnalla, mm	0		0.093		0.013		0.706		0.631	
Pohjarakenteen tiivistyskerrosten läpäisy	0.001	0.00001	0.001	0.00002	184.8	3.33	0.003	0.0005	173.07	3.12

5.2.2.2 LANDSIM

LandSim -ohjelmalla voidaan määrittää lika-aineen kulkeutumisen ja pitoisuuden todennäköisyysjakautuma tietyssä ennalta valitussa kaatopaikan ympäristön pisteessä ajan funktiona. Periaatteessa kaatopaikka ja ennalta valittu tarkastelupiste mallinnetaan tassa ja poikkileikkauksena kuvan 5.12 tapaan. Poikkileikkaukseen kuuluvat kaatopaikkarakenteiden ohella maapohjaa kuvaavat osat.

Koska ohjelmalla lasketaan joko kulkeutumisaajan tai pitoisuuksien todennäköisyysjakautumia, on myös oleelliset lähtötiedot annettava jakautumina.



Kuva 5.12. Kaatopaikan sijoittumisen, tarkastelupisteen ja poikkileikkauksen havainnollistaminen LandSim -ohjelmassa. /LandSim V2.01 Demonstration Copy, internetissä <http://www.lansim.co.uk/>, Golder Associates/.

Tämä onkin yksi suurimmista todennäköisyystarkasteluun pohjautuvan tarkastelumene-
telmän eduista. Kaatopaikan suotoveden sisältäminen aineiden pitoisuuksia ei useinkaan
voida tarkasti ennalta määrittää ja sama koskee myös monia muita lika-aineen kulkeu-

tumiseen vaikuttavia tekijöitä. Käytettävästä jakautumasta riippuen ylä- ja alarajat voidaan usein kuitenkin antaa esim. valvottuna rakennetun tiivistekerroksen paksuudelle.

LandSim -ohjelmassa on mahdollista antaa lähtötietoina useampia, eri vaiheessa olevia kaatopaikan osia. Eri osat voivat poiketa toisistaan sisään suotautuvilta vesimääriltään, tiivisterakenteiltaan ja myös suotoveden laatu voi olla erilainen. Ominaisuudet voivat vaihdella myös eri vaiheiden aikana. Tiivisterakenteiden alla olevan osittain kyllästyneen vyöhykkeen ominaisuudet voivat myös poiketa toisistaan, mutta vettäjohtava kerros eri alueiden alla on yhteinen. Useampia osioita ja vaiheita sisältävässä tarkastelussa saadaan määritettyä niiden yhteisvaikutus tarkasteltavaan pisteeseen. Kulloinkin käytettävä tarkastelu voidaan valita optioilla, esim. huomioidaanko lika-aineiden heikentyminen ajanmyötä, pidättyminen ja biohajoaminen vai huomioidaanko esimerkiksi vain hydrauliset tekijät. Tuloksina saadaan valinnasta riippuen

- tiivisteiden läpäisevät nestemäärät ja niiden laimentuminen akviferissä,
- kulkuajat, joko pidättyminen huomioituna tai ilman pidättymistä osittain kyllästyneen kerroksen läpi ja tarkastelupisteeseen,
- lika-aineen pitoisuudet osittain kyllästyneen kerroksen pohjalla, kunkin vaiheen (automaattisesti 5 m päähän veden virtaussuuntaan asetettavassa) tarkastelupisteessä ja luvannukaisessa (viranomaisen määrittämässä) tarkastelupisteessä.

Tarkasteluissa on mahdollista huomioida myös akviferissä vaikuttavat alkupitoisuudet (taustapitoisuudet), jotka voivat vaikuttaa sallittavien päästöjen suuruuteen /19/.

Riskitarkastelussa LandSim -ohjelma vaatii tyypillisesti lähtötietoina edellä esitettyjen geometriatietojen ohella /37/, /29/

- kaatopaikkaan suotautuvan veden (ei siis sateen) määrän vuosittaisen, keskiarvon ja keskihajonnan,
- lika-ainetyypit ja niiden konsentraatiot hajontoihin,
- kuivatusjärjestelmän kuvauksen (esim. maamateriaalit, kaltevuudet, putkivälit),
- tiivisterakroksen kuvauksen (materiaalit, vedenjohtavuuden jakautumiseen),
- eristerakenteiden alapuolisen kerroksen kuvauksen (kosteuspitoisuus, hydrauliset ja dispersio sekä pidättymisominaisuudet) ja
- akviferin ominaisuudet (geometriset ja hydrauliset ominaisuudet sekä dispersio-ominaisuudet).

LandSim -ohjelmalla suoritettujen laskentojen tuloksia on esitetty luvussa 5.4 "LandSim -ohjelman esimerkkilaskelmat".

Myös HELP-ohjelmassa suoritetaan lähtöarvojen variointia (simulointia), koska päivittäiset ilmastolliset lähtöarvot ja sen mukana rakenteen materiaalien vesipitoisuudet, vedenläpäisevyydet jne. vaihtelevat. Laskennassa saadaan yhteenvedona käytetystä lasken-

tajakson pituudesta riippuen esim. 30, 50 tai 100 vuoden aikana (yleensä tuloksena hahuttuna aikana) keskimääräinen vuosittainen pohjaeristeen läpäisevä vesimäärä. Vuosittaiset vaihtelut voivat kuitenkin olla suuria. Vuosittaisia läpäisymääriä yksittäin käsitellessä on näistä arvoista saatavissa läpäisevän vesimäärän jakautuma, jos läpäisy halutaan ilmoittaa suhteessa todennäköisyyteen. HELP-ohjelmassa ei kuitenkaan ole mahdollisista suoraan huomioida materiaalien muiden perusominaisuuksien muuttumista tai vaihtelua (esim. ajassa).

5.2.2.3 Riskinarviointi @RISK-ohjelmalla

Riskinarviointi on tarvittaessa melko helposti kytkettävissä mukaan perinteisiinkin mitoitus- ja laskentatarkasteluihin, esimerkiksi @RISK -ohjelmalla. Riskitarkasteluita on käsitelty mm. lähteissä /63/ ja /64/.

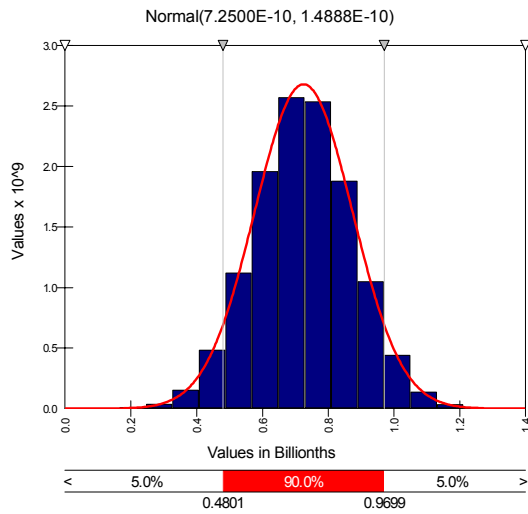
@RISK on Microsoft Excel® tai Lotus® 1-2-3 taulukkolaskentaohjelmiin liitettävä riskianalyysi- ja simulointiohjelma /65/. Ohjelma liittyy taulukkolaskentaohjelmaan samanlaisina työkaluina ja funktioina kuin taulukkolaskentaohjelmissa jo olevat työkalut ja funktiot.

Taulukkolaskentaohjelmaa käytetään riskitarkasteluohjelman käyttöönoton jälkeen tavalliseen tapaan. Jos halutaan esimerkiksi arvioida lähtöarvojen vaihtelun vaikutusta kahden muuttujan funktiossa, kummankin muuttujan lähtöarvo annetaan tavalliseen tapaan omissa soluissaan ja kolmanteen soluun kirjoitetaan haluttu funktio. Epävarmuutta sisältäviin lähtöarvoihin määritetään tämän jälkeen @RISK -ohjelman mukaiset funktiot, jotka kuvaavat arvojen vaihtelualueita ja alkuperäisen tuloksen sisältävään soluun funktio, joka määrittää sen halutuksi tulosjakautumaksi. Lähtöarvo- ja tulossoluissa näkyvät ulospäin edelleen alkuperäiset lähtöarvot ja tulos. Solun editointitilassa näkyvät käytetyt @Risk-ohjelman ja taulukkolaskentaohjelman funktiot. Lähtötietojen jakautumaa on mahdollista kuvata 37:lla eri todennäköisyysjakautumalla. Lähtötietojen jakautumien tunteminen on siis välttämätöntä, mutta ohjelmalla voidaan suorittaa myös jakautuman sovittaminen havaintoaineistoon (esimerkiksi tiivisterakenteen vedenläpäisevyysmääritys-havaintoihin). Kolmiomallisen jakautuman käyttö mahdollistaa kuitenkin myös sellaisten lähtöarvojen käsittelyn, joiden jakautumaa ei tarkalleen tunneta, mutta jonka todennäköisin arvo sekä minimi- ja maksimi-arvot voidaan otaksua.

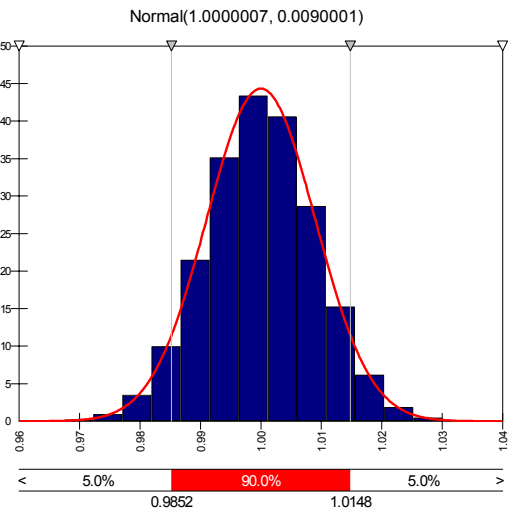
Ongelman määrittelyn jälkeen käynnistetään simulointi. @RISK-ohjelma laskee taulukkosivun aina uudelleen niin monta kertaa, kuin simulointikierrösmääräksi on asetettu. Kullakin simulointikierröksellä lähtöarvot valitaan satunnaisesti lähtösoluissa määrättyjen funktioiden mukaisesti. @RISK -ohjelmassa voidaan käyttää edellä mainittua Monte Carlo -menetelmää parametrien arvojen näytteenottoon tai Monte Carlo -menetelmän tyyppistä näytteenottomenetelmää (Latin Hypercube Sampling). Monte

Carlo -menetelmällä otetut näytteet voivat pienillä näytemäärillä keskittyä jakautuman keskelle. Jälkimmäisessä menetelmässä suureen todennäköisyysjakautuma jaetaan väleihin, joista näytteenotto suoritetaan ilman takaisinpanoa laskentaparametrien valinnassa. Menetelmällä on esitetty saatavan tietyissä suhteissa aineistoa paremmin kuvaavia lähtöarvoja. Osittamalla kumulatiivinen todennäköisyysjakautuma ja pakottamalla näytteenotto eri alueille varmistetaan paremmin parametrien satunnaisuus ja ei-toivotut korrelaatiot sekä niiden riippumattomuus. Toisistaan selvästi riippuville muuttujille on mahdollista määrittää korrelaatiotaulukot.

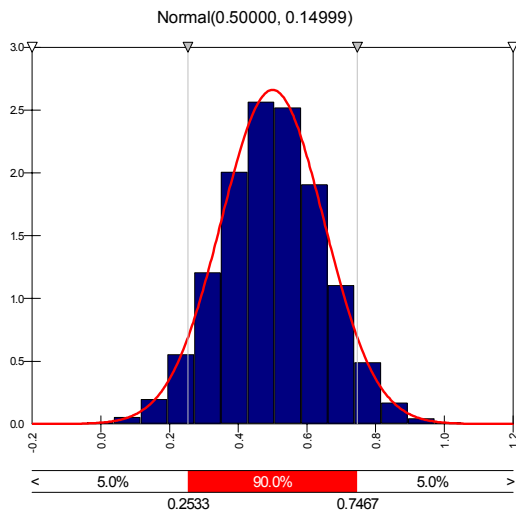
Se kuinka kauan laskentaa jatketaan (simulointikierrosten määrä), riippuu tarkasteltavasta tapauksesta ja muuttujien lukumäärästä. Laskentaa tulee kuitenkin jatkaa niin kauan, että poikkeamat eri simulointikierrosmäärien välillä eivät enää aiheuta merkittäviä muutoksia tuloksissa. Simuloinnin jälkeen tuloksina voidaan tarkastella sekä lähtötietojen että tulosten jakautumia ja todennäköisyyksiä numeromuodossa tai graafisina kuvaajina. Ohjelmalla voidaan suorittaa myös herkkyysanalyyskejä tuloksiin eniten vaikuttavien tekijöiden määrittämiseksi. Esimerkkinä ohjelman käytöstä on esitetty järempänä eristerakenteen läpäisevä vesimäärä, kun vedenläpäisevyydelle, painekorkeudelle ja tiivisteiden paksuudelle on esitetty normaalijakautuman mukaiset jakautumat. Vedenläpäisevyyden keskiarvon ollessa $7.25 \cdot 10^{-10}$ m/s ja keskihajonnan $1.49 \cdot 10^{-10}$ m/s, vedenpainekorkeuden keskiarvon 0.500 m ja keskihajonnan 0.149 m ja tiivisteiden paksuuden keskiarvon 1.000 m ja keskihajonnan 0.009 m, eristeiden keskimääräinen läpäisevyys on 34.3 mm/v ja keskihajonta 7.84 mm/v. Viiden prosentin todennäköisyydellä läpäisevyys voi olla alle 21.4 mm/v tai yli 47.2 mm/v (kuvat 5.13...5.16).



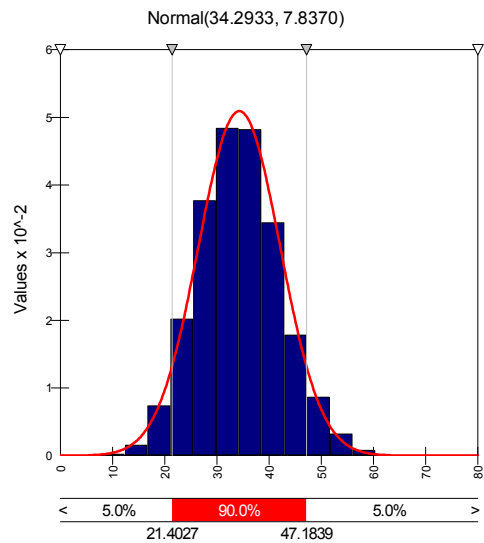
Kuva 5.13. Esimerkkitarkastelussa käytetty vedenläpäisevyyden hajonta.



Kuva 5.14. Esimerkkitarkastelussa käytetty mineraalitiivistyskerroksen paksuuden hajonta.



Kuva 5.15. Esimerkkitarkastelussa käytetty tiivistekerroksen pinnalla vaikuttavan vednpainekorkeuden hajonta.



Kuva 5.16. Esimerkkitarkastelussa tuloksena saatu tiivistekerroksen läpäisevän vuosittaisen vesimäärän (mm/vuodessa) hajonta.

5.2.3 Suojusrakenteiden vastaavuus

Tiivisterakenteiden keskinäisessä vertailussa on yleensä kiinnitetty huomiota ainoastaan tiivistemateriaalien hydrauliseen vastaavuuteen. Kuten edellä on käynyt ilmi, myös muut suojausrakenteen osat vaikuttavat rakenteiden toimivuuteen ja rakenteiden vastaavuutta analysoitaessa on siten mallinnettava tarkasteltavat rakenteet (mieluiten koko kaatopaikkapenger eristerakenteineen) kokonaan.

Tässä kappaleessa tarkastellaan kuitenkin ähinnä tiivistekerroksen vastaavuutta esimerkiksi avulla. Koska vedenläpäisevyydeltään alhaisissa ($k < 10^{-9}$ m/s) tiivistemateriaaleissa diffuusio on haitta-aineiden tärkein kulkeutumismuoto, tulee vastaavuustarkasteluun sisällyttää myös diffuusion vaikutuksesta tiivisterakenteen läpäisevät haitta-ainemäärät. Yleisesti ottaen vastaavuustarkastelut ovat hyvin monimutkaisia, eikä kaiken kattavaa vastaavuustarkastelua liene järkevää edes tavoitella. Toimivuusvaatimukset antavat kuitenkin mahdollisuuden tarkastella rakenteita eri näkökulmista. Seuraavassa vastaavuustarkastelua on lähestytty kirjallisuudessa esitettyjen vastaavuustarkasteluiden (esimerkkien) pohjalta. Johtopäätökset ja kannanotot eivät ole millään lailla kannanottoja rakenteen kelpoisuuden puolesta tai sitä vastaan.

Viitteessä /99/ on esitetty bentoniittimaton ja mineraaliaineksisen tiivisteiden vastaavuuk-sien vertailuun käytetty menettely. Tässä menettelyssä on tarkasteltu veden ja veteen liuenneiden aineiden läpäisyä vakiotilanteessa, diffuusiota vakiotilanteessa ja mekaanista dispersiota. Vakiotilanteessa bentoniittimatto (GCL) ja mineraaliainestiiviste (CCL) ovat hydraulisesti vastaavia kun $v_{GCL} = v_{CCL}$.

Bentoniittimatolta vaadittava vedenläpäisevyys on tällöin

$$k_{GCL} = k_{CCL} * (T_{GCL} / T_{CCL}) * ((H + T_{CCL}) / (H + T_{GCL}))$$

missä

k on materiaalin vedenläpäisevyys, m/s

T materiaalin paksuus, m

H veden painekorkeus eristeen päällä, m

Tämä vastaa Kaatopaikan tiivistysrakenteet -julkaisussa /40/ esitettyä paksuudeltaan ja vedenläpäisevyydeltään erilaisten rakenteiden vertailumenettelyä.

Yksidimensioisessa tarkastelussa vakiotilanteessa bentoniittimaton läpi kulkeutuva liuenneiden aineiden tilavuus on

$$V_{m,A} = C_{leachte} * k * (H+T) / T = C_{leachte} * v$$

$V_{m,A}$ on advektiolla kulkeutuva massavirta, m^3/s

$C_{leachte}$ liuenneen aineen konsentraatio suotovedessä, mg/l

Advektiolla tapahtuvan kulkeutumisen suhde eri tiivisteiden välillä on

$$F_{m,d} = V_{m,d}(GCL) / V_{m,d}(CCL)$$

Advektiolla kulkeva massavirta on siis identtinen läpäisevien vesimäärien suhteen kanssa. Tämän johdosta, jos materiaalien vastaavuus on osoitettu vakiotilanteessa hydraulisesti, vastaavuus on osoitettu myös vakiotilanteessa liuenneiden aineiden massavirran suhteen /99/.

Vakiotilanteessa bentoniittimaton läpi diffuusiolla kulkeutuva massavirta on

$$J_D = D^* \eta \Delta C / L$$

missä

D^* on tehokas diffuusiokerroin, m^2/s

η huokoisuus

ΔC konsentraatioero bentoniittimaton ylä- ja alapuolen välillä

L paksuus, m

Vakiotilanteessa diffuusiovirtojen suhde on

$$F_D = J_D(CCL) / J_D(GCL)$$

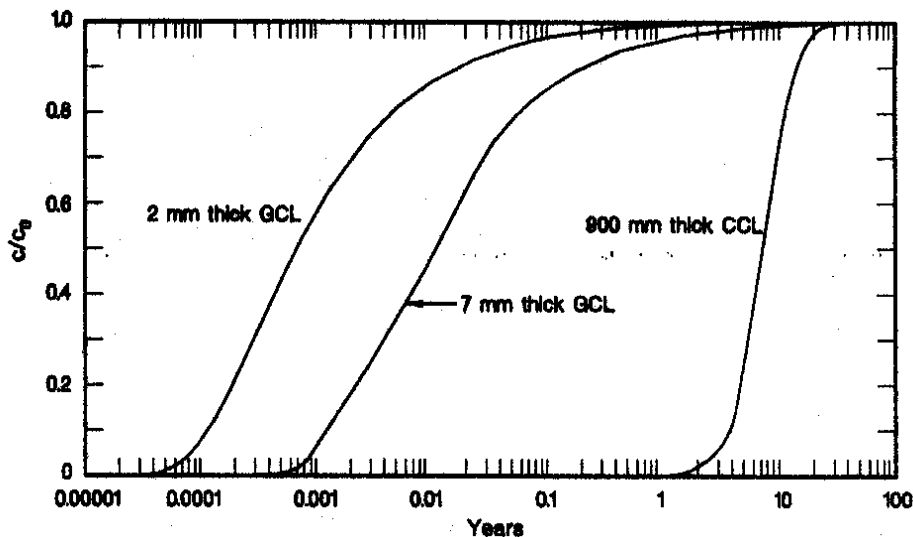
Suhteen ollessa 1 vakiotilanteen diffuusiovirrat ovat yhtä suuret. Jos kerroin on alle 1, kulkeutuminen bentoniittimaton läpi on suurempaa kuin mineraaliaineksen läpi.

Eristemateriaalien vertailu mekaanisen dispersion suhteen on suoritettu olettamalla, että maakerros on kyllästynyt ja homogeeninen puoliavaruus ja että nesteen Darcyn lain mukainen vakiovirtaus on vallitsevana ja että liennut aine kulkeutuu vain pystysuunnassa. Reunaehtoina on käytetty maakerroksen alkukonsentraatiota nolla, $C(x \geq 0, t=0)=0$, suotoveden vakiona pysyvää alkukonsentraatiota C_0 , $C(x \leq 0; t=0) = C_0$ ja oletusta, että konsentraatio äärettömän kaukana maakerroksessa on alkuaikojen jälkeen nolla; $C(x=\infty; t>0)$. Tämän ratkaisu on esitetty edellä diffuusiota tarkastellessa (kohta 5.2.1.3 virhefunktion *erf* sisältävät pitoisuuden ja vuon kaavat). Dispersion suhteen vertailuparametrina on käytetty konsentraatiosuhteen arvoa $C/C_0 = 0.5$ eristekerroksen alapinnassa.

Viitteessä /99/ on vertailtu "normaalipaksuista" (7 mm) ja ohentunutta (2 mm) bentoniittimattoa savitiivisteeseen (paksuus 30...90 cm, vedenläpäisevyys $1 \cdot 10^{-9}$ m/s, veden painekorkeus 30 cm). Bentoniittimatto vastaa hydraulisilta ominaisuuksiltaan paksuudeltaan 90 cm olevaa savitiivistettä, kun paksunnan bentoniittimaton vedenläpäisevyys on $\sim 3 \cdot 10^{-11}$ m/s ja ohuemman $\sim 9 \cdot 10^{-12}$ m/s, mitkä arvot saatetaan saavuttaa nykyisillä bentoniittimatoilla.

Vakiotilanteessa vaikuttavan diffuusiovuon tarkastelussa on käytetty kemiallisena aineena kloridia sen suuresta diffuusiokertoimesta ($4.7 \cdot 10^{-10}$ m²/s) ja sen pidättymisominaisuuksista johtuen ($R_d=1$). Kloridi ei pidäty maakerroksiin niiden läpi kulkeutuessaan. Bentoniittimaton huokoisuutena on käytetty arvoa 0.60 ja savitiivisteeseen huokoisuuden arvona 0.37. Kertoimelle F_D (vakiotilanteen diffuusiovuosuuhde) on saatu arvot $5.6 \cdot 10^{-3}$ ja $3.4 \cdot 10^{-3}$ savitiivisteeseen paksuuksilla 60 cm ja 90 cm, kun bentoniittimaton paksuus tarkastelussa on ollut 7 mm, eli bentoniittimatto ei vastaa vakiotilanteen diffuusiovuon suhteen savikerrosta.

Mekaanisen dispersiotarkastelun tulokset on esitetty kuvassa 5.17. Kuvasta voidaan havaita, että konsentraatiosuhteen 0.5 saavuttaminen 90 cm savitiivisteellä kestää n. 7 vuotta, paksummalla bentoniittimatoilla n. 0.009 vuotta (noin 3 vrk) ja ohuemmalla bentoniittimatoilla n. 0.0006 (noin 5,5 tuntia) vuotta, joten bentoniittimatto ei ole tähän savitiivisteeseen verrattuna vastaava myöskään mekaanisen dispersion näkökulmasta.



Kuva 5.17. Bentoniittimaton ohentumisen vaikutus konsentraatiosuhteeseen ajan funktiona /99/.

Viitteessä /101/ vastaavuutta on lähestytty samalta pohjalta kuin edellä, tosin hieman eri tavalla muotoiltuna.

Advektiovirtauksen osalta eristeet ovat vastaavia, jos konsentraatiot eristeiden suojattavalla puolella yhtäsuuren hydraulisen ja konsentraatiogradientin johdosta ovat yhtäsuuret, kun huomioidaan ainoastaan advektiokulkeutuminen. Vastaavuus advektiokulkeutumisen suhteen tarkoittaa vastaavuutta hydraulisen kulkeutumisen kanssa, joka määritetään kaavasta

$$\sum_{i=1}^n M_i / \sum_{i=1}^n \frac{M_i}{k_i} = \sum_{j=1}^m M_j / \sum_{j=1}^m \frac{M_j}{k_j}$$

missä

n ja m ovat kerrosten lukumäärä

M_i ja M_j kerrosten paksuudet

k_i ja k_j kerrosten vedenläpäisevyydet.

Diffuusion suhteen eristeet ovat vastaavia, jos konsentraatio diffuusiolla tapahtuvan kulkeutumisen johdosta ovat saman suuruiset eristeiden suojattavalla puolella. Konsentraatioiden tulee olla etäisyydellä x ja ajassa t olla vastaavuuden täyttymiseksi

$$\frac{x_A}{\sqrt{D_A}} = \frac{x_B}{\sqrt{D_B}}$$

missä

D on tehokas diffuusiokerroin materiaalissa.

Viitteessä /101/ esitetty advektio-dispersiotarkastelu ei poikkea aiemmin esitetystä bentoniittimatolla esitetystä menettelystä.

Viitteessä /101/ on esitetty myös "esimerkinomaisia" vastaavuustarkasteluita edellä olevien kulkeutumismuotojen osalta sekä annettu ohjeita tarkemmissa numeerisissa tarkasteluissa käytettävien parametrien valinnasta.

Taulukoissa 5.6 ja 5.7 on esitetty tiivistysrakenteissa käytettävien eri materiaalien vastaavuuksia kerrospaksuuksina ja verrattu geomembraanin ja savitiivisteiden vastaavuuksia diffuusion suhteen.

Taulukko 5.6. Eräiden eristemateriaalien hydraulinen vastaavuus /101/.

Eristemateriaali	Keskimääräinen vedenläpäisevyys, m/s	Tiivistyskerroksen paksuus, cm	Ekvivalenttipaksuus, Tapaus A, m	Ekvivalenttipaksuus, Tapaus B, m	Ekvivalenttipaksuus, Tapaus C, m
Tiivistetty savi	1.0^{-9}	60	0.6	3.1	93
Hiekkabentoniitti, 3 % bentoniittia #	$5.0 \cdot 10^{-7}$	(60)	300	1550	46500
Hiekkabentoniitti, 5 % bentoniittia #	$1.0 \cdot 10^{-7}$	(60)	60	310	9300
Hiekkabentoniitti, 10 % bentoniittia #	$1.0 \cdot 10^{-9}$	(60)	0.6	3.1	93
Hiekkabentoniitti, 15 % bentoniittia #	$8.0 \cdot 10^{-11}$	(60)	0.048	0.248	7.44
Geomembraani	$8.0 \cdot 10^{-13}$	0.2	0.00048	0.00248	0.0744
Geomembraani, reikä d=5 mm ##	$4.7 \cdot 10^{-12}$	0.2	0.00282	0.01457	0.4371
Geomembraani, reikä d=1 cm ##	$9.5 \cdot 10^{-12}$	0.2	0.0057	0.02945	0.8835
Geomembraani, reikä d=2 cm ##	$1.9 \cdot 10^{-11}$	0.2	0.0114	0.0589	1.767
Bentoniittimatto	$2.5 \cdot 10^{-11}$	1	0.015	0.0775	2.325
Tiivisteasfaltti	$3.0 \cdot 10^{-11}$	5	0.018	0.093	2.79

Tapaus A: ekvivalentti paksuus 60 cm paksuiseen, $k=1 \cdot 10^{-9}$ m/s tiivistetyn savikerroksen kanssa
 Tapaus B: ekvivalentti paksuus 60 cm paksuiseen, $k=10 \cdot 10^{-9}$ m/s tiivistetyn savikerroksen kanssa, kun sen päällä on geomembraani (HDPE, d=2 mm)

Tapaus C: ekvivalentti paksuus 60 cm paksuiseen, $k=10 \cdot 10^{-9}$ m/s tiivistetyn savikerroksen kanssa, kun sen päällä on kaksi geomembraania, joiden välissä on kuivatuskerros (2 x HDPE, d=2 mm)

tiettyihin kokeisiin perustuvat keskimääräiset vedenläpäisevyydet

pallomaiseen virtauskenttään perustuvat keskimääräiset vedenläpäisevyydet

Taulukko 5.7. Geomembraanin ja tiivistetyn savikerroksen diffuusiiovastaavuudet /101/.

Haitta-aine	Tehokas diffuusiokerroin, $\times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$	Tehokas diffuusiokerroin, $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	Ekvivalentti savikerroksen paksuus 2 mm:n paksuiseen HDPE -kalvoon nähden, cm	Ekvivalentti HDPE -kalvon paksuus 60 cm tiivistettyyn savikerrokseen nähden, cm *
	Tiivistetty savikerros	Geomembraani		
Metanoli	4.8	0.80	4.9	2.4
Asetoni	3.4	0.60	4.8	2.5
Etyylimetyyliketoni	3.0	0.55	4.7	2.6
Etikkahapon etyyliesteri	2.8	0.80	8.6	3.2
Formaldehydiliuos	5.9	0.25	5.4	1.2
Kloroformi	3.1	0.25	7.0	1.7
Hiilitetrakloridi	2.9	0.25	6.8	1.8
Trikloorietyleeni	2.9	0.25	6.8	1.8
1,2-dikloorietaani	3.0	0.25	6.9	1.7
Tetrakloorietyleeni	2.5	0.25	6.3	1.9
Klorobentseeni	2.7	0.25	6.6	1.8
Bentseeni	3.0	0.20	6.6	1.5
Etylibentseeni	2.3	0.20	7.7	1.8
Ksyleeni	2.4	0.20	6.8	1.7
Tolueeni	2.7	0.20	7.3	1.6
Pentaani	2.7	0.20	7.3	1.6
Heksaani	2.4	0.20	6.9	1.7
Heptaani	2.2	0.20	6.6	1.8

*sarakkeen arvot laskettu uudestaan viitteen /101/ kaavoilla

Tarkempia, mahdollisesti koko tiivistetyn kerroksen sisältäviä numeerisia tarkasteluita varten on annettu yleiset ohjeelliset arvot erityyppisten haitta-aineiden huomioimiseksi (taulukko 5.8) /101/. Näissä ohjeissa haitta-aineet on jaettu kuuteen ryhmään, joilla on erilainen vaikutus tiivistetyn kerroksen eri osiin. Nämä ryhmät ovat

- alkalimetallien kationit ja maa-alkalimetallit (Na, K, Mg, Ca)
- halogenidien anionit (Cl, Br, I)
- myrkkymetallit ja raskasmetallit (Sr, Cd, Cu, Ni, Zn, Pb, Fe)
- klorinoidut hiilivedyt (mm. mono- ja diklooribenseeni, hiilitetrakloridi)
- alkoholit ja niiden johdannaiset (mm. alkoholit, aldehydit, ketonit)
- aromaattiset orgaaniset yhdisteet (mm. benseeni, ksyleeni, tolueeni).

Taulukko 5.8. Edustavat hydrauliset ja kulkeutumispparametrit numeerisiin vastaavuus-tarkasteluihin /101/.

Ominaisuus	HDPE-geomembraani	Tiivistetty savi-kerros	Maapohja 1)	Kuivatuskerros 2)
Vedenläpäisevyys, m/s	$1 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-4}$
Tehokas diffuusiokerroin, m²/s				Kyllästyneessä tilassa
1. Ryhmä	$2 \cdot 10^{-16}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-9}$
2. Ryhmä	$3 \cdot 10^{-16}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$7 \cdot 10^{-9}$
3. Ryhmä	$1 \cdot 10^{-16}$	$3 \cdot 10^{-11}$	$3 \cdot 10^{-11}$	$5 \cdot 10^{-10}$
4. Ryhmä	$2 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-11}$	$6 \cdot 10^{-10}$
5. Ryhmä	$6 \cdot 10^{-13}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$2 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-9}$
6. Ryhmä	$2 \cdot 10^{-13}$	$3 \cdot 10^{-10}$	$3 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{-10}$
Dispersiivisyys, m	0.0001	0.01 (0.2)	0.08 (3)	riippuu paksuudesta 3)
Kerros-paksuus, m	0.0002	0.025 (0.6)	0.08 (3)	riippuu paksuudesta 3)
Langmuirin isotermin "A"-parametri, mg/kg	T=0.001 meq/100g 4)	T=10 meq/100g 4)	T=5 meq/100g 4)	T=2 meq/100g 4)
Langmuirin isotermin "K"-parametri, m ³ /g	0.1	0.03	0.1	0.01
Hajoamiskerroin λ, 1/s	0	0	0	0
Huokoisuus n, -	0.000001	0.5	0.45	0.33
Tehokas huokoisuus, -	0.000001	0.02	0.004	0.33

1) vain vaarallisten aineiden kaatopaikoilla

2) vain eristekerroksen välisessä kuivatuskerroksessa

3) dispersiivisyys voidaan määrittää kerros-paksuudesta riippuen kirjallisuudesta

4) haitta-aineryhmille 1., 2., ja 3. parametri voidaan laskea $A \text{ (mg/kg)} = M \cdot 10 \cdot T \text{ (meq/100g)}$, missä A on Langmuirin isotermin parametri ja M suhteellinen atomipaino. Ryhmille 4., 5. ja 6. arvot määritetään laboratoriotesteillä.

Yksinkertaistettu mitoitusmenettely yhdistelmärakenteen vastaavuuksien ja läpäisevien haitta-aineiden määrittämiseksi

Edellä vastaavuuden osoittamismenettelyitä on tarkasteltu vain mineraalisen tiivistekerroksen osalta ja geomembraaneille esitetyt maakerrosvastaavuudet ovat koskeneet ehjiä geomembraaneja. Edellä esitetyillä menettelyillä ei voida tarkastella rakenteita, joissa geomembraani on mukana. Nykyisin kaatopaikan pohjarakenteeseen kuuluu kuitenkin oleellisena osana myös geomembraani. Viitteessä /44/ on esitetty yksinkertaistettu menettely myös geomembraanin sisältävän rakenteen tarkasteluun. Kirjallisuuden pohjalta on tunnettua (on hyväksytty), että myös asianmukaisesti valvottuna ja hyvin asennettunakin geomembraanissa on aina reikiä.

Epäorgaanisten aineiden kulkeutumisessa geomembraanin reikien kautta tapahtuva vuotaminen on pääkulkeutumismekanismi. Reikien kautta kulkevan vesimäärän määrittämistä on tarkasteltu aikaisemmin. Aikaisemmin esitettyä yksidimensionaalista kulkeutumisyhtälöä voidaan käyttää myös geomembraanin sisältävässä rakenteessa, oletta- malla kulkeutumispinta-alaksi ekvivalentti pinta-ala A_e , joka saadaan kaavasta

$$A_e = Q_e / (k \cdot i)$$

missä

i on tavanomainen hydraulinen gradientti ($i = 1 + h_w/L$)

Q_e reiän läpi kulkeutuva vesimäärä, joka riippuu geomembraanin ja maan kontaktin hyvydestä, reiän (tai muun vian) laadusta sekä maamateriaalin vedenläpäisevyydestä ja vedenpaine korkeudesta

Konsentraatio ja massavuo voidaan nyt laskea edellä esitetyllä tavalla, esim. äärettömän maakerroksen reunaehtoja käyttäen. Massavuossa on kuitenkin huomioitava, ettei se enää koske koko pinta-alaa, vaan reiälle ainoastaan määritettyä ekvivalenttia pinta-alaa A_e . Kokonaisvuo on tällöin

$$J_{\text{kok}} = J_e \cdot N \cdot A_e$$

missä

J_e on massavuo rakenteen läpi

N reikien tai vikojen lukumäärä.

Orgaaniset aineet kulkeutuvat molekyyli- tai ionitasolla geomembraanin läpi. Geomembraanin suuremman lika-aineen omaavan konsentraation puolella orgaaninen aine ensin hajoaa geomembraaniin ja sen jälkeen kulkee diffuusiolla geomembraanin alapintaan ja ja- kaantuu siitä uudestaan geomembraanin alapuolella olevaan huokosveteen. Koska geo-

membraanit ovat ohuita, vakio-olosuhteet saavutetaan nopeasti ja geomembraanin läpi kulkeva massavuo on

$$J_d = D_g * K_g * (c_0 - c_e) / t_g$$

missä

D_g on nesteen diffuusiokerroin geomembraanille

K_g nesteen ja geomembraanin välinen jakautumisvakio

c_0, c_e pitoisuudet geomembraanin ylä- ja alapuolella

t_g geomembraanin paksuus.

Orgaanisten kemikaalien konsentraatiota ja vuota laskettaessa tehdään seuraavat oletukset:

- molekulaarinen diffuusio geomembraanin läpi on paljon suurempi kuin reikien kautta tapahtuva suotautuminen
- diffuusiota geomembraanin läpi ei huomioida, koska geomembraani on paljon savi-kerrosta ohuempi
- kulkeutuminen geomembraanin läpi on nolla, koska geomembraanin vuotomäärät ovat vähäiset.

Oletusten johdosta tarkastellaan siis ainoastaan savikerroksen läpi tapahtuvaa diffuusiota, jolloin veden virtausnopeus savikerroksessa on nolla ja edellä esitetyt kaavat yksinkertaistuvat. Laskentamenetelmällä on saatu tuloksia, jotka vastaavat erittäin hyvin tarkempien kolmiulotteiseen differenssimenetelmään perustuvien tarkasteluiden tuloksia /44/.

Taulukossa 5.9 on esitetty edellä esitetyllä yksinkertaisella tavalla lasketut yhdistelmä-rakenteen läpäisevät epäorgaanisten ja orgaanisten aineiden konsentraatiosuhteita $c/c_0=0.1$ ja $c/c_0=0.9$ vastaavat ajankohdat sekä maksimivuot. Laskennassa oletuksina on käytetty $c_0=1$ mg/l, $h_w=30$ cm, geomembraanissa on halkaisijaltaan 2 mm:n reikiä 10 kpl/ha, geomembraanin $D_g = 2 \cdot 10^{-8}$ m²/s, $K_g=130$, $t_g=0.1$ cm ja diffuusiokerroin on $2 \cdot 10^{-6}$ cm²/s, pidättymiskerroin $R=2$ epäorgaanisille aineille ja $R=1$ orgaanisille aineille, saven $n=0.4$.

Taulukko 5.9. Eristerakenteiden vuotovesien ja kemikaalien vapautuminen /44/. Tauluk-
koon on lisätty paksuudeltaan 1.0 m yhdistelmä-rakenteen vastaavat arvot, jotka on las-
kettu edellä kuvatulla, samalla menettelyllä kuin taulukon muut arvot sekä yhdistelmä-
rakenne, jossa epäorgaanisella ja orgaanisella aineella on toisistaan poikkeavat di-
fuusiokertoimen arvot ja $R=1$ sekä epäorgaanisilla että orgaanisilla aineilla. Geomem-
braanin ominaisuudet eivät vaikuta tuloksiin. Geomembraanin oletetaan säilyvän ehjä-
nä "äärettömän" kauan.

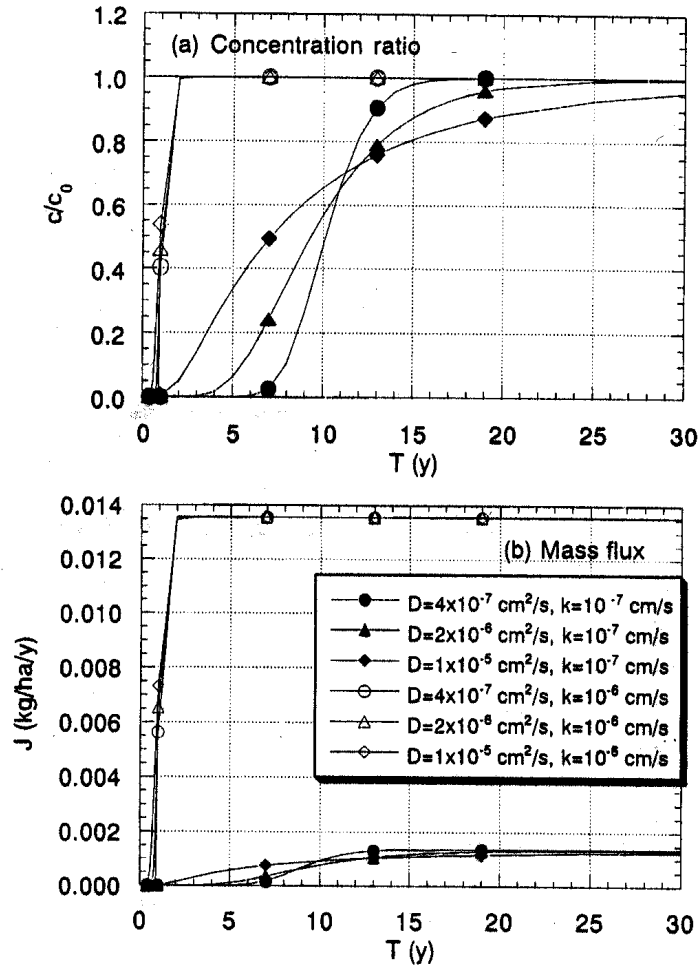
Eristetyyppi	h_w , m	Geo- memb- raani	Savikerros		Vuoto- vesi- määrä l/ha/a	Epäorgaanisten aineiden vapautuminen			Orgaanisten aineiden vapautuminen		
			Veden- läpäise- vyys, k, m/s	Paksuus, cm		$T_{0.1}$ (a)	$T_{0.9}$ (a)	J_{max} (kg/ha/a)	$T_{0.1}$ (a)	$T_{0.9}$ (a)	J_{max} (kg/ha/a)
Geomembraani	0.3	0.1	-	-	$1.44 \cdot 10^6$	-	-	$1.44 \cdot 10^0$	-	-	$8.34 \cdot 10^1$
Savikerros	0.3	-	$1 \cdot 10^{-9}$	60	$4.73 \cdot 10^5$	5.6	16	$4.73 \cdot 10^{-1}$	2.8	7.9	$4.73 \cdot 10^{-1}$
Savikerros	0.3	-	$1 \cdot 10^{-9}$	120	$3.94 \cdot 10^5$	16	35	$3.94 \cdot 10^{-1}$	7.7	18	$3.94 \cdot 10^{-1}$
Yhdistelmä- rakenne	0.3	0.1	$1 \cdot 10^{-9}$	60	$1.36 \cdot 10^3$	5.6	16	$1.36 \cdot 10^{-3}$	11	1808	$2.03 \cdot 10^{-2}$
Yhdistelmä- rakenne	0.3	0.1	$1 \cdot 10^{-8}$	60	$1.36 \cdot 10^4$	0.85	1.2	$1.36 \cdot 10^{-2}$	11	1808	$2.03 \cdot 10^{-2}$
Yhdistelmä- rakenne	0.3	0.2	$1 \cdot 10^{-9}$	100	$1.30 \cdot 10^3$	12	29	$1.30 \cdot 10^{-3}$	30	5000	$1.22 \cdot 10^{-2}$
Yhdistelmä- rakenne	1.0	0.2	$1 \cdot 10^{-9}$	100	$4.08 \cdot 10^3$	8.5	17	$4.08 \cdot 10^{-3}$	30	5000	$1.22 \cdot 10^{-2}$
Yhdistelmä- rakenne*	1.0	0.2	$1 \cdot 10^{-9}$	100	$4.08 \cdot 10^3$	2.4	11.7	$4.08 \cdot 10^{-3}$	7	1200	$5.21 \cdot 10^{-2}$

*epäorgaanisten aineiden vapautumisessa haitta-aineena kloridi $D_0=20.3 \cdot 10^{-10}$ m²/s ->
 $D=1.1 \cdot 10^{-9}$ m²/s, orgaanisilla aineilla $D_0=1.2 \cdot 10^{-9}$ m²/s -> $D=8.54 \cdot 10^{-10}$ m²/s

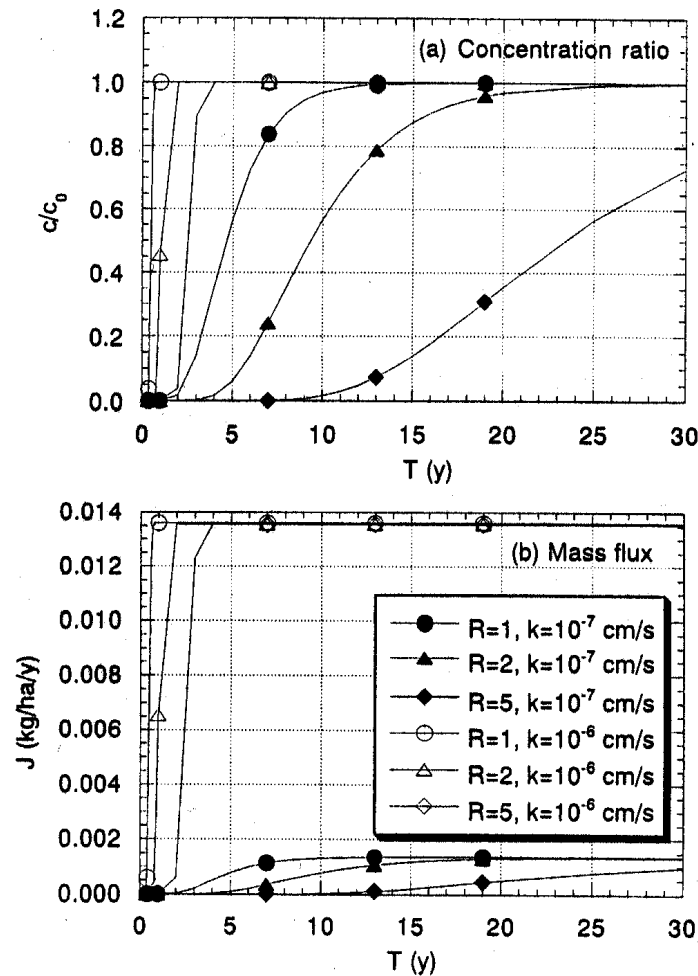
Edellä vastaavuutta tarkasteltaessa ei juurikaan ole otettu huomioon eri haitta-aineiden diffuusionopeuksia tai eristemateriaalien kykyä pidättää joitain haitta-aineita. Diffuusionopeus ja haitta-aineiden pidätyminen vaikuttavat etenkin tietyn pitoisuuden saavuttamiseen eristerakenteen alareunassa kuluvaan aikaan, vuon suuruuteen sekä kumulatiiviseen massamäärään. Pitkän ajan kuluessa vuon määrä kuitenkin saavuttaa saman vakiotason kuin mitä ilman pidättymistäkin. Kuvissa 5.18 - 5.19 on havainnollistettu sekä diffuusionopeuden että pidätyksen vaikutusta sekä pitoisuuksiin että muihin tekijöihin.

Etenkin lyhyemmällä ajanjaksoilla pidätyksellä saattaa siis olla ratkaiseva merkitys rakenteen käyttäytymiseen tiettyjen, maamateriaaleihin pidätyvien haitta-aineiden suhteen. Kuvassa 5.18 on esitetty pitoisuudet ja vuo epäorgaanisille aineille 60 cm paksun yhdistelmä-rakenteen tapauksessa (muut arvot kuten edellä olevassa taulukossa 5.9). Suurimmalla diffuusiokertoimella läpäisy alkaa parissa vuodessa, pienimmällä vasta noin seitsemässä vuodessa. Yhdistelmä-rakenteen mineraaliosan suurempi vedenläpäisevyys johtaa nopeasti suurempiin pitoisuuksiin ja massamääriin. Kuvassa 5.19 pidätyksiskertoimen $R=1$ omaava haitta-aine alkaa näkyä alapinnassa jo parin vuoden kuluttua ja läpäisee eristeen n. 12 vuodessa. Pidätyksiskertoimen ollessa $R=5$ aine alkaa näkyä

vasta 7...10 vuoden kuluttua. Vuo saavuttaa arvon 2/3 pidättymättömän haitta-aineen vuosta noin 30 vuodessa.



Kuva 5.18. Haitta-aineiden vapautuminen 60 cm paksun yhdistelmä rakenteen alapinnasta eri diffuusiokertoimien ja mineraaliaineksen vedenläpäisevyyden arvoilla /44/.



Kuva 5.19. Haitta-aineiden vapautuminen 60 cm paksun yhdistelmärakenteen alapinnasta eri pidättymiskertoimien ja mineraaliaineksen vedenläpäisevyyden arvoilla /44/.

Edellä ei myöskään vastaavuustarkasteluissa ole huomioitu muita materiaalien käyttäytymiseen vaikuttavia tekijöitä, esimerkiksi savitiivisteiden kuivumisriskiä, mikä saattaa vaikuttaa huomattavasti savitiivisteiden käyttäytymiseen, jos saven vesipitoisuus on suuri. Tämä ja muut vastaavanlaatuiset mahdolliset tekijät on huomioitava koko tiivisterakenteen käyttäytymistä tarkasteltaessa.

Vastaavuuden arviointi

Edellä on käsitelty materiaalien vastaavuustarkasteluihin liittyviä tekijöitä. Näiden perusteella on arvioitava, ettei yksikäsitteistä materiaalien (tai rakenteiden) vastaavuutta ole helposti ja aivan yksikäsitteisesti määritettävissä. Periaatteessa vaihtoehtoiselta materiaalilta (tai rakenteelta) tulee edellyttää vähintään yhtähyvää toimintaa kaikissa suhteissa kuin ns. vertailumateriaalilta. Vertailumateriaalin tai -rakenteen (referenssinmateriaali, -rakente) määrittäminen puolestaan on hankala tehtävä, koska joku toinen materiaali saattaa tietyssä suhteessa olla parempi kuin toinen. Sen sijaan toimintavaatimusten

suhteen materiaalien ja rakenteiden vertailu on mahdollista. Joissain sovellusratkaisuissa läpäisevä vesimäärä, joissain olosuhteissa puolestaan läpäisevät haitta-ainemäärät tai niiden pitoisuudet, tai näiden saavuttamiseen kuluva aika saattavat olla määrääviä. Tilaajan tai viranomaisen tehtävänä olisi määrittää kulloisenkin kaatopaikkakohteen ensisijainen toimintavaatimus ja sen jälkeen vastaavuus osoitetaan tämä vaatimuksen suhteen, mikäli se on tarpeen.

Edellä esitettyjä menettelyitä voidaan soveltaa yleisellä tasolla vaihtoehtoisten mineraaliaineskerrosten tai yhdistelmärakenteiden käyttäytymisen vertailuun. Yleisellä tasolla tarkoitetaan tässä käytettyjä reunaehtoja, joiden mukaiset oletukset toteutuvat käytännössä vain erikoistapauksissa.

"Ääretöntä" reunaehtoa käytetään tarkasteluissa, joka on diffuusion osalta esitettyjen reunaehtojen mukainen tai reunaehtoja ei vielä tarkemmin tunneta. Kuten aikaisemmin on esitetty, kulkeutumistarkasteluissa käytettävillä reunaehdoilla on ratkaiseva merkitys. Mikäli materiaali on rakenteessa todella olosuhteissa, joissa haitta-aine kulkeutuu eristeen alapinnalta pois (virtaus mahdollista), on tarkasteluissa käytettävä vastaavaa "huuhtelureunaehtoa", jota käyttäen voidaan arvioida haitta-aineiden kulkeutumisen maksimiarvoja. Eräiden kaatopaikan pohjatiivisteessä käytettävien tiivistemateriaalien käyttäytymistä kloridin ($D_0 = 20.3 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$) suhteen on havainnollistettu kuvissa 4.20...4.24 molempia reunaehtoja käyttäen. Laskelmat on suoritettu Mouser-ohjelmalla /56/.

Kuvissa 4.25...4.29 on havainnollistettu eräiden kaatopaikan pohjarakenteissa käytettävien materiaalien käyttäytymistä suureholla orgaanisen aineksen diffuusiovakion arvolla ($D_0=1.2e^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$) ja tapauksessa, jossa geomembraania on käytetty mineraaliainestievästeen päällä (laskettu edellä käsitellyllä menetelmällä, jossa geomembraanin vaikutusta ei ole huomioitu ja mineraaliaineksen $v=0$; toteutettu Mouser-ohjelmassa asettamalla gradientti = 0).

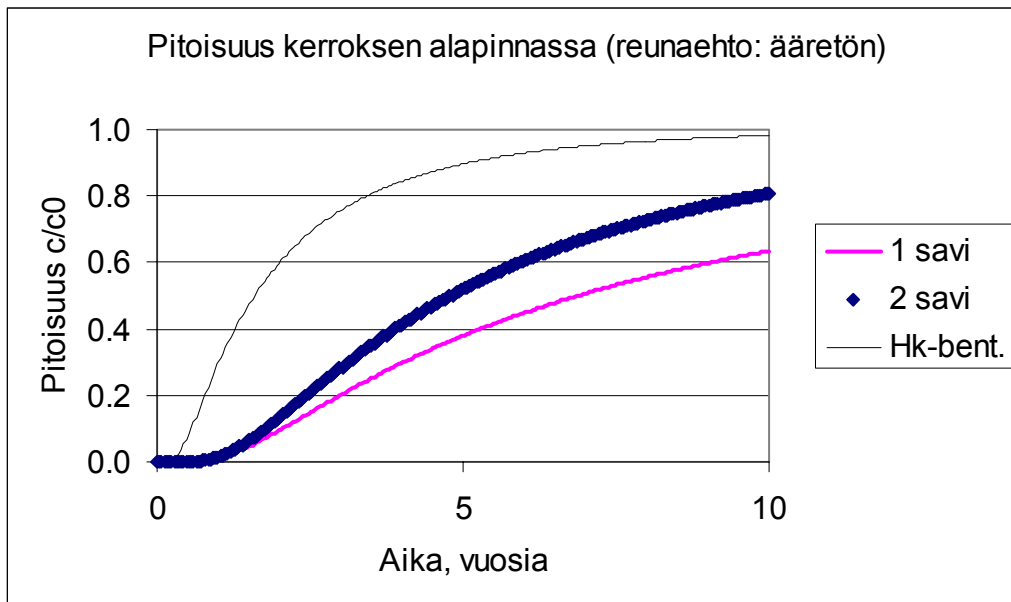
Laskennassa materiaaleilla käytetyt lähtöarvot on esitetty taulukossa 5.10.

Kuvissa 5.20...5.29 esitetyt pitoisuudet ja massamäärät on laskettu suotoveden lähtöpitoisuudella 1 mg/l, joten pitoisuudet on kerrottava suotoveden todellisella pitoisuudella. Mahdollista pidättymistä ei ole huomioitu minkään materiaalin tai aineen osalta.

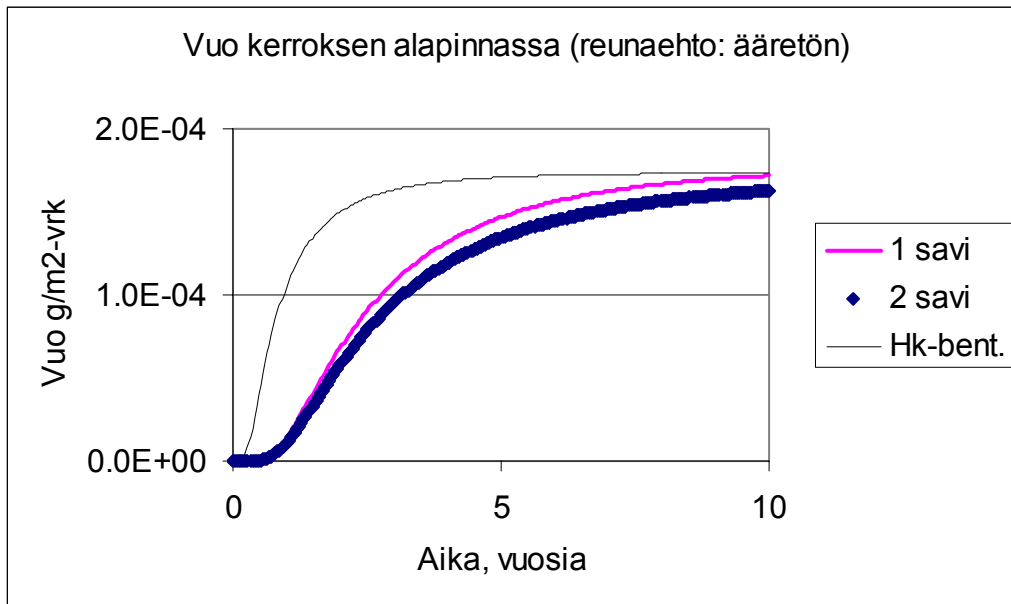
Taulukko 5.10. Materiaaleille käytetyt lähtöarvot.

Materiaali	Kuivatilavuuspaino, ρ_d , kg/m ³	Huokoisuus, n	Tilavuus-vesipitoisuus, θ	Kyllästys-aste, Sr, %	Vedenläpäisevyys, k, m/s
Savi 1	1.1	0.770	0.770	100	1*10 ⁻⁹
Savi 2	1.2	0.427	0.427	100	1*10 ⁻⁹
Hiekkabentoniitti	1.9	0.300	0.300	100	6.7*10 ⁻¹⁰

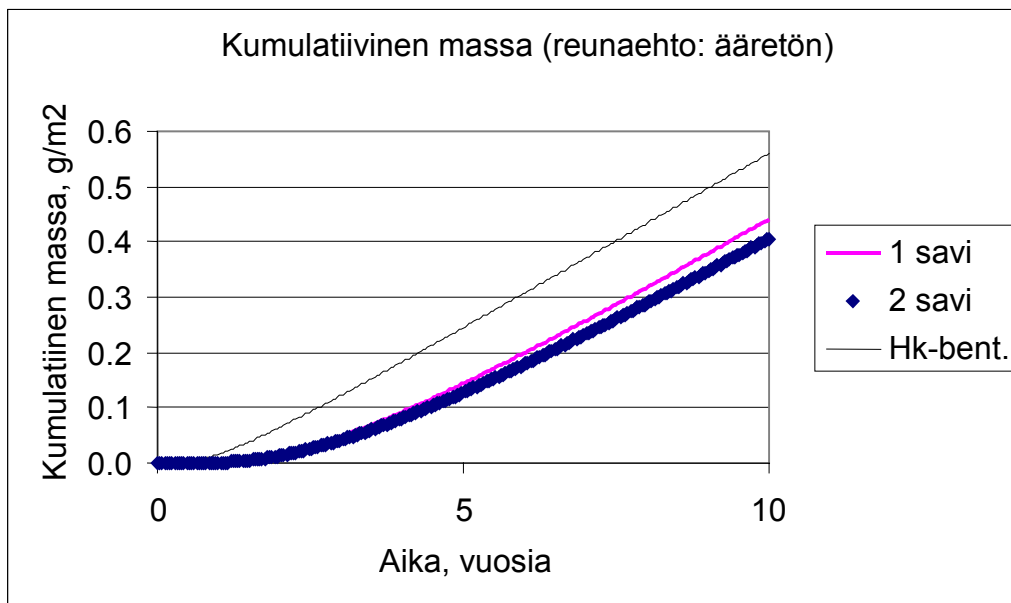
Materiaali	Paksuus, h, m	gradientti, i, hw=1.0 m	α (0.1*h)	Tortuositeetti	
				τ_a	Mouser ohjelman Hp
Savi 1	1.0	2	0.1	0.839	1.09
Savi 2	1.0	2	0.1	0.322	1.32
Hiekkabentoniitti	0.5	3	0.05	0.202	1.49



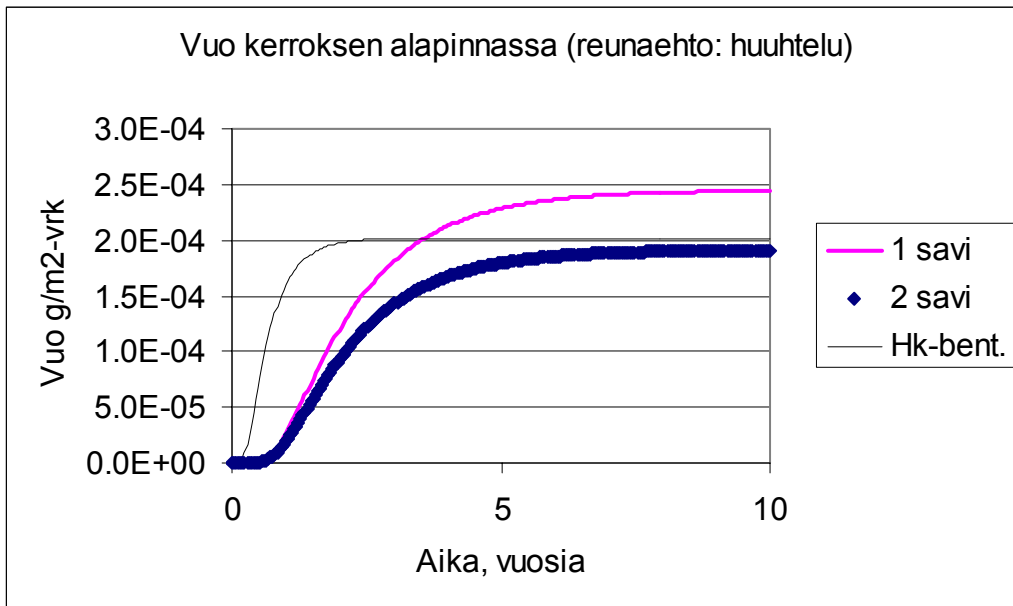
Kuva 5.20. Kloridin pitoisuus eri eristemateriaalikerrosten alareunassa. Savikerrosten paksuus 1.0 m ja hiekkabentoniitin paksuus 0.5 m.



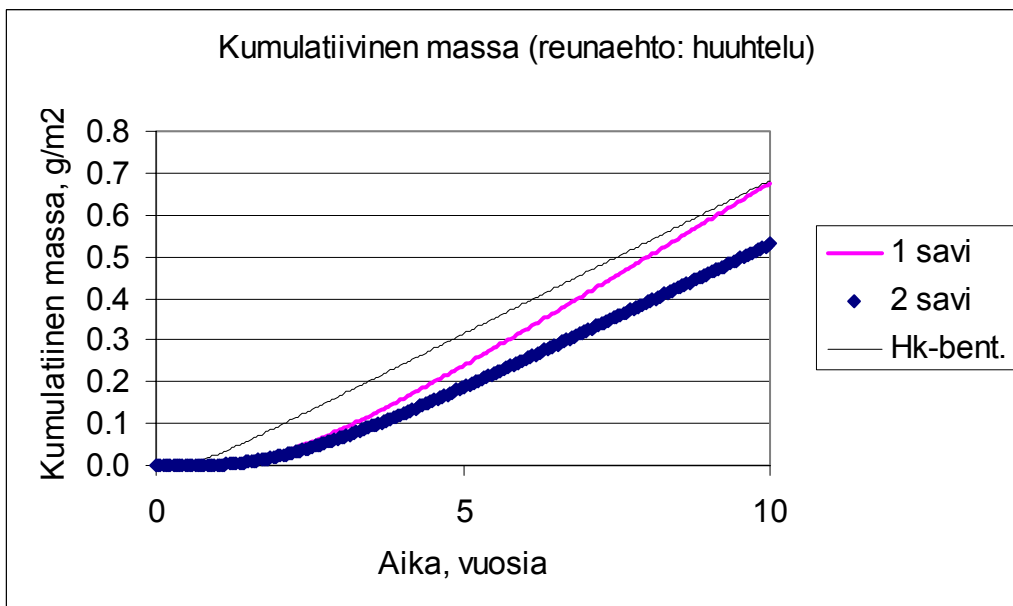
Kuva 5.21. Kloridin vuo eri eristemateriaalikerrosten alareunassa. Savikerrosten paksuus 1.0 m ja hiekkabentoniitin paksuus 0.5 m.



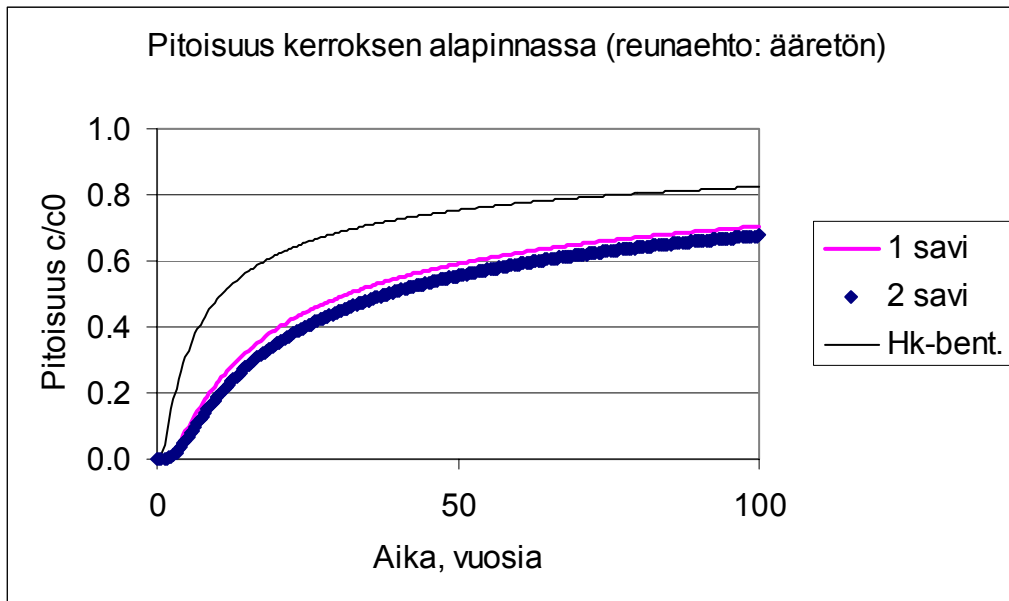
Kuva 5.22. Kloridin kumulatiivinen massa eri eristemateriaalikerrosten alareunassa. Savikerrosten paksuus 1.0 m ja hiekkabentoniitin paksuus 0.5 m.



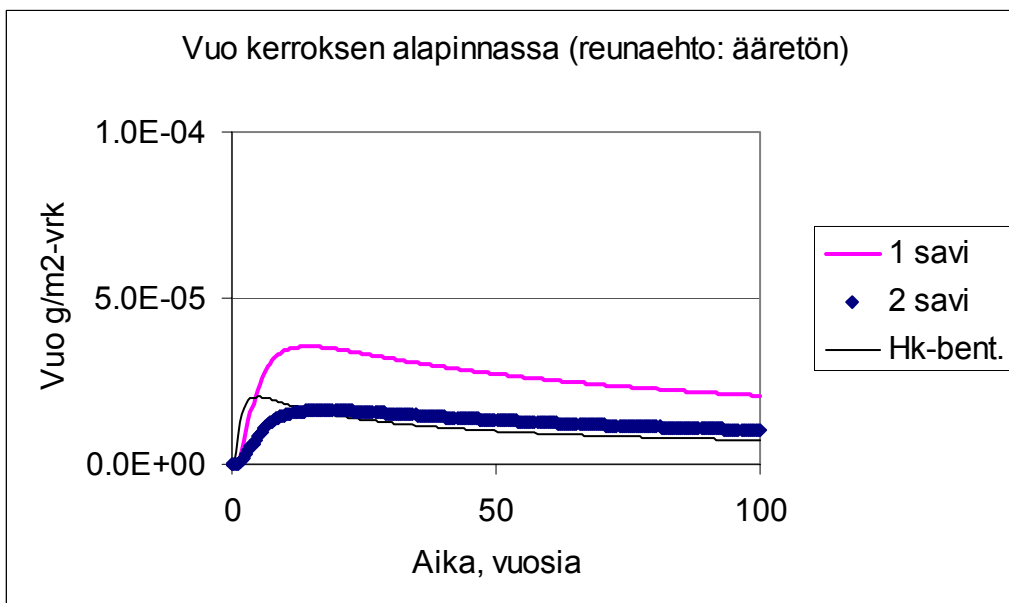
Kuva 5.23. Kloridin vuo eri eristemateriaalikerrosten alareunassa. Savikerrosten paksuus 1.0 m ja hiekkabentoniitin paksuus 0.5 m.



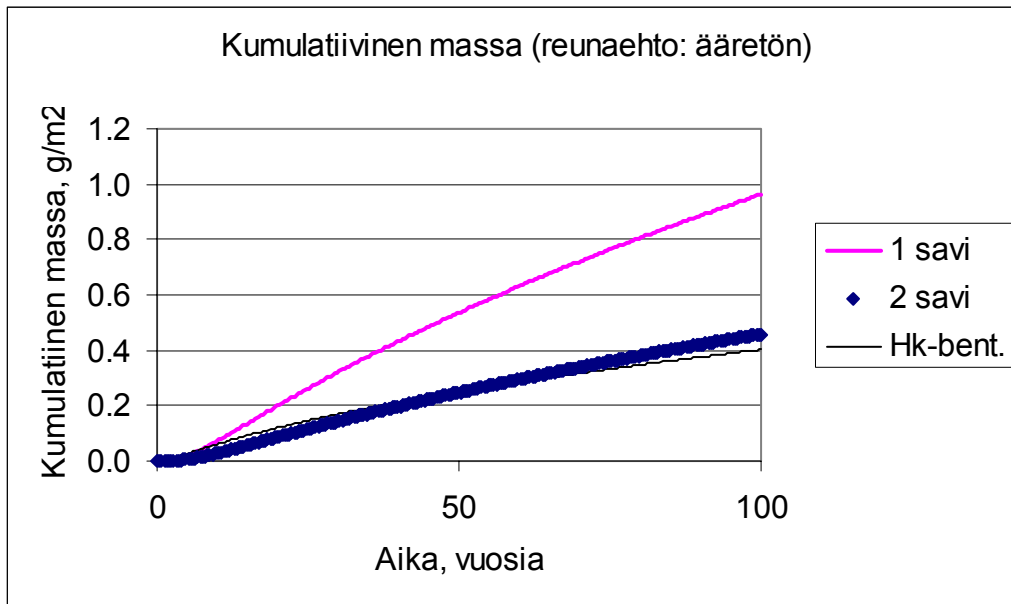
Kuva 5.24. Kloridin kumulatiivinen massa eri eristemateriaalikerrosten alareunassa. Savikerrosten paksuus 1.0 m ja hiekkabentoniitin paksuus 0.5 m.



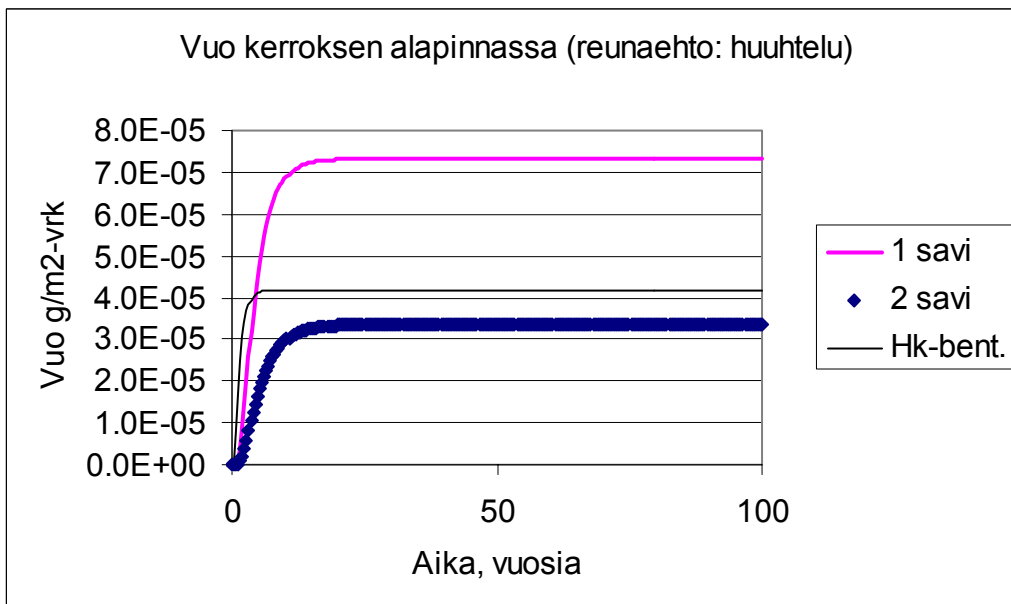
Kuva 5.25. Orgaanisen haitta-aineen pitoisuus eri eristemateriaalikerrosten alareunassa tapauksessa, jossa geomembraani estää veden liikkumisen mineraalisessa tiivistemateriaalissa ($v=0$). Savikerrosten paksuus 1.0 m ja hiekkabentoniitin paksuus 0.5 m.



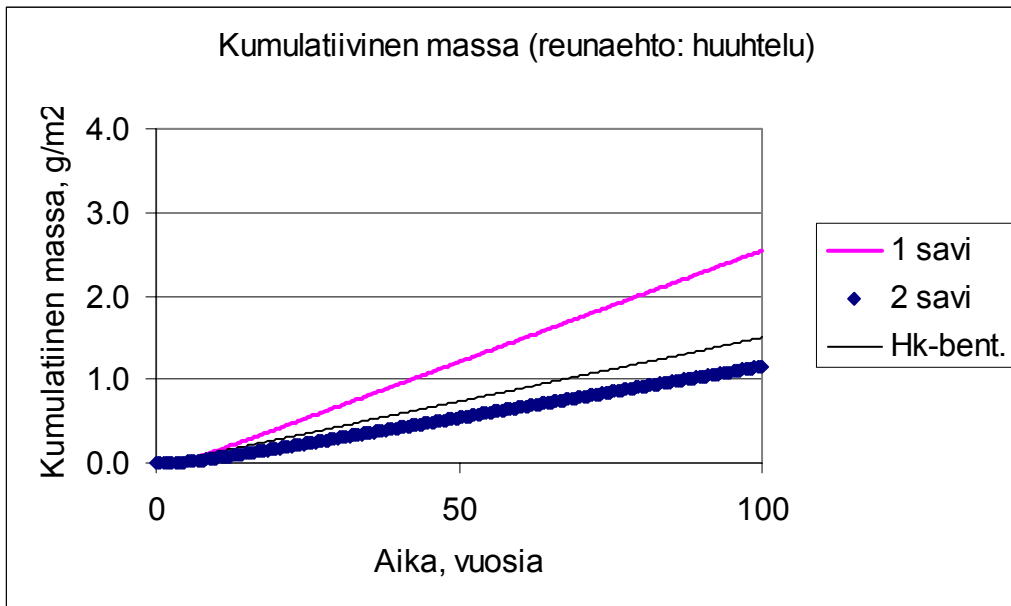
Kuva 5.26. Orgaanisen haitta-aineen vuo eri eristemateriaalikerrosten alareunassa tapauksessa, jossa geomembraani estää veden liikkumisen mineraalisessa tiivistemateriaalissa ($v=0$). Savikerrosten paksuus 1.0 m ja hiekkabentoniitin paksuus 0.5 m.



Kuva 5.27. Orgaanisen haitta-aineen kumulatiivinen massa eristemateriaalikerrosten alareunassa tapauksessa, jossa geomembraani estää veden liikkumisen mineraalisessa tiivistemateriaalissa ($v=0$). Savikerrosten paksuus 1.0 m ja hiekkabentoniitin paksuus 0.5 m.



Kuva 5.28. Orgaanisen haitta-aineen vuo eri eristemateriaalikerrosten alareunassa tapauksessa, jossa geomembraani estää veden liikkumisen mineraalisessa tiivistemateriaalissa ($v=0$). Savikerrosten paksuus 1.0 m ja hiekkabentoniitin paksuus 0.5 m.



Kuva 5.29. Orgaanisen haitta-aineen kumulatiivinen massa eri eristemateriaalikerrosten alareunassa tapauksessa, jossa geomembraani estää veden liikkumisen mineraalissa tiivistemateriaalissa ($v=0$). Savikerrosten paksuus 1.0 m ja hiekkabentoniitin paksuus 0.5 m.

Tuotehyväksynnässä käytettävä menettely

Tuotehyväksyntään ehdotettu menettelytapa on se, että määritellylle eristysratkaisulle esitetään vuotovesimäärä ja epäorgaanisten ja orgaanisten aineiden vapautuminen taulukon 5.9 tapaan, käyttäen haitta-aineiden kulkeutumistarkasteluissa äärettömän maakerroksen reunaehto. Tarkastelut suoritetaan ainakin jäljempänä esitetyillä haitta-aineilla ja muilla oletusparametrien arvoilla. Lisäksi on suositeltavaa suorittaa tarkastelu niillä tyypillisillä haitta-aineilla tai edellä esitetyillä haitta-aineryhmillä, joita tuotehyväksyntää koskevassa ratkaisussa erityisesti esiintyy. Oletusparametrit poikkeavat vähäisessä määrin taulukon 5.9 laskennassa käytetyistä arvoista - haitta-aineiden pidättymistä ei esimerkiksi huomioida lainkaan (taulukossa 5.9 viimeisen rivin yhdistelmä rakenteen arvot on laskettu jäljempänä esitetyillä oletusparametreilla). Oletusparametreilla suoritettua laskennan ohella tuotehyväksynnässä voidaan esittää esimerkiksi sovellutusratkaisulle tyypillisillä haitta-aineilla vapautumisessa myös sellaiset arvot, joissa tietyn haitta-aineen pidättyminen on perustellusti huomioitu.

Kumulatiivisen massamäärän esittäminen saattaa joissain tarkastelutapauksissa olla myös suositeltavaa, samoin kuin kulkeutumisen maksimoivan reunaehdon käyttö aineiden vapautumismääriä laskettaessa. Kaatopaikkakohteen suunnittelija ja lopulta tilaaja voi tämän jälkeen valita tyyppihyväksytyistä materiaaleista tai rakenteista sen, joka parhaiten vastaa toimivuusominaisuuksiltaan tilaajan tarpeita.

On muistettava, että tässä esitetyllä menettelytavalla saadaan "laskennallinen käsitys" eristerakenteen toiminnasta, joka saattaa poiketa todellisesta tilanteesta niin tarkastelussa käytettyjen reunaehtojen (esim. ääretön maakerros) kuin oletustensakin (mm. vedenpaine korkeus, geomembraanin reikien määrä) suhteen. Kulkeutumisaikojen osalta on huomattava, että esimerkiksi orgaanisilla aineilla suurien konsentraatiosuhteiden saavuttamiseen tarvittavat laskennalliset ajat voivat olla useita tuhansia vuosia ja geomembraanien käyttöikä lasketaan pikemminkin sadoissa vuosissa (geomembraanien käyttöikä on tarkasteltu kohdassa 5.3).

Laskennassa tehdään seuraavat oletukset:

- haitta aineen pitoisuus $c_0=1$ mg/l (todelliset haitta-ainemäärät saadaan kertomalla todellisella haitta-ainepitoisuudella)
- veden painekorkeus $h_w=1.0$ m
- geomembraanissa (kun se on mukana rakenteessa) on halkaisijaltaan 2 mm:n reikiä 10 kpl/ha
- peruslaskennassa pidättymiskerroin $R=1$ sekä epäorgaanisille aineille että orgaanisille aineille
- kloridin diffuusiokerroin on $D_0 = 20.3 \cdot 10^{-10}$ m²/s (tehokas diffuusiokerroin lasketaan tästä materiaali- ja rakennekohtaisesti)
- orgaanisen aineen diffuusiokerroin $D_0 = 1.2 \cdot 10^{-9}$ m²/s (tehokas diffuusiokerroin lasketaan tästä materiaali- ja rakennekohtaisesti).

Lopullista kohteen toimivuusvaatimukseen pohjautuvaa suunnittelua varten tyyppihyväksyntäasiakirjoissa esitetään materiaalikohtaiset, materiaalille määritetyt suunnitteluparametrit, joita käyttäen koko suojausrakenteen toimivuus osoitetaan. Esim. kaatopaikoissa pohjatiivisteen läpi lopulta kulkeutuva vesimäärä ja veden mukana kulkeutuvat haitta-ainemäärät voivat olla huomattavasti pienemmät, kuin pelkän pohjarakenteen läpi laskennallisesti kulkeutuvat hydraulisesta gradientista riippuen. Lopullinen toimivuus osoitetaan luonnollisesti kohteen pohjasuhteisiin sijoitettuna, jolloin myös sijoituspaikan ominaisuudet tulevat otetuiksi huomioon. Todellisia mitoituksen lähtökohtia ovat mm. todelliset haitta-ainepitoisuudet ja niiden mahdollinen pienentyminen jätetäytössä ajanmyötä, mahdollinen osittain kyllästynyt kerros rakenteen alla; pohjaveden virtausnopeus rakenteen alla; mahdolliset haitta-aineiden alkupitoisuudet pohjavedessä jne.

5.2.4 Käyttöikämitoitus

Infrarakentamisessa toimivuusvaatimusten ja käyttöikämitoituksen käytännön soveltamisessa ollaan vielä aivan alussa. Sensijaan talonrakennuspuolella toimivuusvaatimuksia ja käyttöikämitoitusta on jo sovellettu jonkin aikaa. Voidaan kuitenkin todeta, että mm. tienrakenteiden nykyiset tekniset vaatimukset ovat peräisin tien toimivuuden läh-

tökohtista. Syy-vaatimus -vuorosuhteet ovat tosin aikojen kuluessa jääneet kirjaamatta ja myös osittain unohtuneet.

Etenkin kantavien rakenteiden käyttöikämitoitukselle on jo olemassa menetelmiä. Näitä on käsitelty mm. julkaisussa /66/. Käyttöikämitoituksen menetelmiä ovat mm. muunto-kerroinmenettely, tilastollinen mitoitus ja rajatilamenetelmä.

Tiivisterakenteiden käyttöiän määrittämiseen voidaan periaatteessa käyttää kaikkia em. menetelmiä. Muuntokerroinmenettely saattaisi sopia parhaiten pitkälle tuotteistetuille materiaaleille tai rakenneosille, joille valmistaja tai materiaalitoimittaja pystyy esittämään vertailukäyttöiän. Tilastollinen mitoitusmenettely on puolestaan periaatteiltaan jo rakenteellisesta mitoituksesta tutuksi tullut menetelmä, koska mitoitusyhtälöt esitetään rasitusparametrin ja vasteparametrin avulla, mutta siten, että parametrit ovat ajasta riippuvia.

Rajatilamenetelmässä kantavien rakenteiden osalta riski on jaettu rasituksen ja vasteen suhteen erikseen annettuihin osavarmuustekijöihin. Siten osavarmuuskertoimeen voidaan ajatella sisältyvän myös ajasta riippuvaa tekijöiden epävarmuutta ja riskiä. Rajatilamenetelmää käsitellään tässä yhteydessä esimerkin valossa, koska se vaikuttaa tässä vaiheessa yksinkertaisimmalta lähestymistavalta (useimmiten paikalliset materiaalit, joiden käyttäytymistä ei kaikissa olosuhteissa kovin tarkasti tunneta) sekä rakenneosien (tiivistyskerros) että koko kaatopaikan tarkasteluun.

Kaikkien em. menettelyjen oleellisena vaikeutena on niiden soveltamisessa tarvittavien parametrien tai turmeltumismallien puuttuminen ja myös niiden määrittäminen.

Käyttöikämitoituksen menettelykäytännöt on pisimmälle vietyjä kantavien rakenteiden osalta, minkä takia jatkossa tekstissä myös puhutaan usein kantavuudesta ja kuormituksesta. Jatkossa kantavuus voidaan kuitenkin ymmärtää laajemminkin toimivuutena yleensä.

Rajatilamenetelmä

Rajatilamitoituksessa rakenne mitoitetaan käyttämällä suunnitteluiän vaadittua arvoa, joka on sama kuin rakennuttajan tai omistajan (ympäristörakenteiden osalta usein lait ja asetukset) määrittelemä tavoiteikä (t_g, g = target). Käyttöikämitoitus perustuu kunkin materiaalin omiin määrääviin tekijöihin, minkä johdosta eri materiaaleista valmistettujen rakenteiden käyttöikämitoitus on laskukaavoiltaan erilainen /66/.

Rakenteen käyttörajatilat koskevat rakenteen käyttötoimivuutta, ihmisten turvallisuutta tai viihtyisyyttä ja rakenteiden ulkonäköä. Ne luokitellaan mekaanisen rakennesuunnit-

telun rajatiloja vastaavasti soveltaen standardin ENV 1991-1 mukaista luokittelua seuraavasti:

1. Käyttörajatilat

- muodonmuutokset ja siirtymät
- värähtelyt
- ulkonäköön tai säilyvyyteen vaikuttava pintavaurio tai halkeilu

2. Äärirajatila

- rakenteen sortuminen
- rakenteen sortumista edeltävä tila, jota käsitellään murtorajatilana
- rakenteen tai muun oleellisen toimivuusvaatimuksen alittaminen (esim. vaipan tai sen osan lämmöneristävyys, vesieristeen vedeneristävyys jne).

Rajatilan alittumista kutsutaan vaurioitumiseksi. Vaurioitunut rakenne on ylittänyt käyttöikärajan kyseisen ominaisuuden ja rajatilan suhteen.

Rakenteen toimivuuden luotettavuus suunnitteluiän eli tavoitekäyttöiän aikana turvataan käyttöiän osavarmuuskertoimen avulla.

Käyttöiän keskiarvoa approksimoidaan käyttöikämallilla (turmeltumisen vaikutuksen huomioivalla mallilla). Käyttöiän keskiarvon $\mu(t_L)$ tulee olla vähintään laskentakäyttöiän suuruinen (t_d ; d = design) eli

$$\mu(t_L) \geq t_d$$

$$t_d = \gamma_t * t_g$$

missä

$\mu(t_L)$ on käyttöiän keskiarvo
 t_d laskentakäyttöikä ja
 γ_t käyttöiän varmuuskerroin.

Käyttöiän varmuusluku normaalijakautumamenetelmällä

Viitteen /67/ mukaan, kun oletetaan, että turmeltuminen on normaalisti jakautunut keskiarvon ympärille ja turmeltumisen keskiarvokäyrä noudattaa jotakin referenssikäyrän muotoa (referenssikäyrien muoto on esitetty jäljempänä kuvassa 5.33)

$$\mu(D)=a*t^n$$

missä

$\mu(D)$ on turmeltumisen keskiarvo (D sanasta deterioration)

a vakiokerroin

t aika

n eksponentti (esimerkiksi n=1, lineaarinen turmeltuminen; 0.5 hidastuva turmeltuminen tai 2 kiihtyvä turmeltuminen)

ja että turmeltumisen hajonta on suoraan verrannollinen turmeltumisen keskiarvoon (variaatiokerroin v_D on vakio), voidaan käyttöiän varmuusluvulle johtaa yhtälö

$$\gamma_t = (\beta v_D + 1)^{1/n}$$

missä

β on varmuusindeksi

v_D turmeltumisen variaatiokerroin

Käyttöiän varmuusluku riippuu suurimmasta sallitusta vauriotodennäköisyydestä ajanhetkellä t_g (suunniteltu käyttöikä), turmeltumisen variaatiokertoimesta ja referenssikäyrän muodosta, mutta ei suoraan käyttöiästä.

Em. kaavalla saadaan taulukoissa 5.11 - 5.13 esitetyt arvot.

Taulukko 5.11. Käyttöiän varmuusluvut turmeltumisen ollessa suoraan verrannollinen aikaan ($n=1$) /67/. Taulukkoon lisätty β :n arvoa 3.8 ja v_D :n arvoja 0.2 ja 0.4 vastaavat arvot.

Vaurio- todennäköisyys	β	γ_t v_D					
		0.2	0.4	0.6	0.9	1.2	1.5
0.0072 %	3.80	1.76	2.52	3.28	4.42	5.56	6.70
5 %	1.64	1.33	1.66	1.98	2.48	2.97	3.46
10 %	1.28	1.26	1.51	1.77	2.15	2.54	2.92
20 %	0.84	1.17	1.34	1.50	1.76	2.01	2.26
50 %	0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Taulukko 5.12. Käyttöiän varmuusluvut turmeltumisen ollessa verrannollinen ajan ne-
liöjuureen ($n=0.5$) /67/. Taulukkoon lisätty β :n arvoa 3.8 ja v_D :n arvoja 0.2 ja 0.4 vas-
taavat arvot.

Vaurio- todennäköisyys	β	γt v_D					
		0.2	0.4	0.6	0.9	1.2	1.5
0.0072 %	3.80	3.10	6.35	10.76	19.54	30.91	44.89
5 %	1.64	1.76	2.74	3.94	6.13	8.81	11.97
10 %	1.28	1.58	2.29	3.13	4.63	6.43	8.53
20 %	0.84	1.36	1.78	2.26	3.08	4.03	5.11
50 %	0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

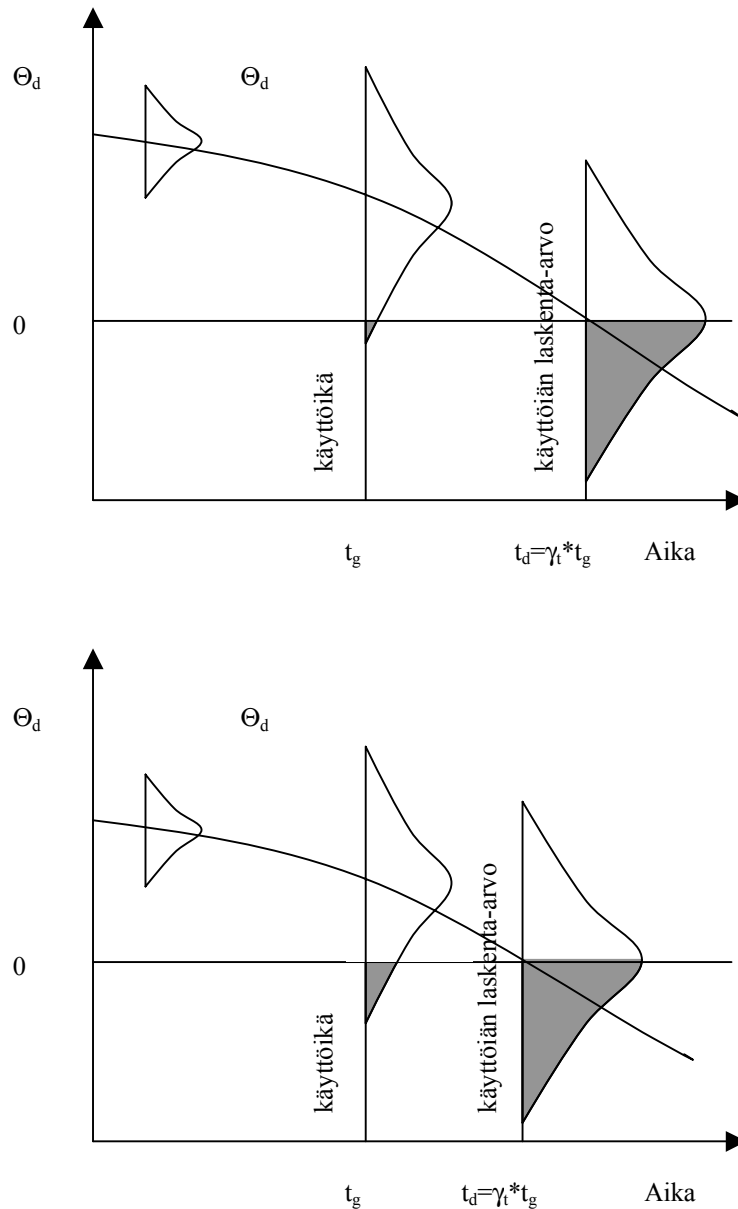
Taulukko 5.13. Käyttöiän varmuusluvut turmeltumisen ollessa verrannollinen ajan toi-
seen potenssiin ($n=2$) /67/. Taulukkoon lisätty β :n arvoa 3.8 ja v_D :n arvoja 0.2 ja 0.4
vastaavat arvot.

Vaurio- todennäköisyys	β	γt v_D					
		0.2	0.4	0.6	0.9	1.2	1.5
0.0072 %	3.80	1.33	1.59	1.81	2.10	2.36	2.59
5 %	1.64	1.15	1.29	1.41	1.57	1.72	1.86
10 %	1.28	1.12	1.23	1.33	1.47	1.59	1.71
20 %	0.84	1.08	1.16	1.23	1.33	1.42	1.50
50 %	0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Jos käytettävissä on käyttöiän log-normaalinen jakautumatieta, voidaan käyttöiälle las-
kea varmuusluvut tähän ja käyttöiän variaatiokertoimeen pohjautuvina /67/.

Rakenteellinen käyttöikämitoitus muistuttaa tavanomaista rakennesuunnittelua. Käyttö-
ikämitoituksessa rakenteen kantavuus (ja muu toimivuus) oletetaan kuitenkin ajasta
riippuvaksi suureeksi, koska materiaaleissa voi tapahtua turmeltumista. Myös kuorma
voi olla ajasta riippuva. Tavanomaisessa rakenteiden kantavuusmitoituksessa käytetään
kuormalla ja kapasiteetilla osavarmuuskertoimia. Kun mitoituksessa sovelletaan suun-
nitteluarvoja, vauriolla ei tarkoiteta rakenteellista vaurioitumista vaan vaadittavan var-
muustason alittumista. Varmuuskertoimista johtuen kuormituksen suunnitteluarvon
ylittäessä kantavuuden suunnitteluarvon rakenne on vielä kaukana sortumistilasta.

Kuvassa 5.30 on esitetty kantavuuden ja kuormituksen suunnitteluarvoilla lasketun var-
muusmarginaalin pieneneminen ajan funktiona materiaaleissa tapahtuvan turmeltumi-
sen johdosta. Ajanhetkellä 0 varmuusmarginaalin pitää olla niin paljon vaadittua suu-
rempi, että se vielä käyttöiän t_g jälkeenkin täyttää varmuustasovaatimuksen.



Kuva 5.30. Kantavuuden ja kuormituksen suunnitteluarvoilla lasketun varmuusmarginaalin pienentyminen iän funktiona ja käyttöiän osavarmuuskertoimen merkitys. Alitustodennäköisyyden alueet tummennettu /67/. Ylempässä kuvassa sallittu alitustodennäköisyys käyttöiän päättyessä on pienempi kuin alemmassa kuvassa.

Jos rakenne suunnitellaan siten, että käyttöiän laskenta-arvo t_d on sama kuin tavoitekäyttöikä t_g ja sitä sovelletaan kestävyysmalleihin, jotka kuvaavat keskimääräistä ikäkäyttäytymistä, noin 50 % rakenteista alittaa varmuustasovaatimuksen tavoitekäyttöiässä t_g . Jotta varmuustason alitustodennäköisyys olisi pienempi tavoitekäyttöiässä t_g , käyttöiän laskenta-arvon t_d on oltava tavoitekäyttöikää pidempi. Tavoitekäyttöiän ja laskentaikäerö erotus määritetään rakennesuunnittelussa osavarmuusluvulla γ_t /67/. Kuvassa 5.30 tarkastellaan ainoastaan materiaalien turmeltumisesta aiheutuvaa varmuusmarginaalin pienentymistä ja siitä aiheutuvaa lisähajontaa.

Rakenteellista kokonaisvarmuutta tarkasteltaessa tarkastelut on tehtävä kantavuuden ja kuormien ominaisarvoilla, joilla rakenteellisen varmuuden vaatimukset on asetettu ja turmeltumista johtuva lisähajonta on yhdistettävä muuhun materiaalien ominaisuuksien ja kuormien vaihtelusta johtuvaan varmuusmarginaalin hajontaan.

Esimerkki käyttöikä tarkastelun soveltamisesta tiivisterakenteisiin

Tiivisterakenteiden läpäisevät vesimäärät lasketaan yleensä käyttötilassa. Sen paremmin materiaaliominaisuuksille kuin esitetyille raja-arvoillekaan ei ole esitetty osavarmuuskertoimia (käyttötilan osavarmuuskertoimet ovat yleensä 1). Esimerkiksi Ruotsissa käytetty läpäisevälle vesimäärälle sallittu arvo 50 mm/v/m^2 (luku 2.1) vaikuttaa arvolta, jota läpäisevä vesimäärä ei keskimäärin saa ylittää. Rakenne on siis mitoitettava siten, että tätä arvoa ei keskimäärin ylitetä (luottamusväli 50 % ajanhetkellä $t=0$ eikä turmeltumista huomioida). Jonakin vuonna läpäisevä vesimäärä voi olla suurempi ja jonain vuonna pienempi, mutta keskimäärin 50 mm/v/m^2 tai toisin sanoen 50 % vesimäärästä on tätä rajaa suurempia ja 50 % pienempiä. Jos tarkastellaan rakennetta, jonka paksuus on 1 m ja jonka päällä on 50 cm vedenpaine ($i=1.5$), kerrokselta vaadittava vedenläpäisevyyden arvo on

$$k = q / (i * t) = 0.05 / (1.5 * 86400 * 365) = 1.06 * 10^{-9} \text{ m/s.}$$

Vedenläpäisevyyden sisältämää hajontaa ei siis huomioida millään lailla. Käytännössä voitaneen kuitenkin olettaa, että mitoituksessa saatavalla arvolla tarkoitetaan tiivistekerroksen materiaalin ominaisvedenläpäisevyyttä eli arvoa, joka materiaalin vedenläpäisevyysskojeissa saatujen tulosten perusteella ylittyy ainoastaan (esimerkiksi rakennepuolella yleisesti käytetyllä) 5 %:n todennäköisyydellä. Käytettävän materiaalin keskimääräinen vedenläpäisevyys on siis tätä arvoa pienempi. Maamateriaaleilla 5 %:n suuruinen alitusvaatimus saattaa olla liian tiukka, ottaen erityisesti huomioon tiivistemateriaaleilla suoritettavien vedenläpäisevyysskojeiden vähäisen lukumäärän. Geotekniikassa puhutaankin ominaisarvoa yleisemmin "varovaisesti valitusta keskiarvosta". Rakennepuolella keskijajonta määritetään yleensä käyttäen testauksessa vähintään kuutta näytettä.

Tiivistysrakenteiden käyttöikämitoitusta ajatellen edellä esitetty tarkoittaisi sitä, että käyttöikä määräytyisi ainoastaan käyttöiän varmuuskertoimen pohjalta suoritettavan mitoituksen perusteella.

Oletetaan seuraavaksi, että kerros rakennetaan materiaalista, jonka vedenläpäisevyyden ominaisarvo on $7.25 * 10^{-10} \text{ m/s}$. Tämä läpäisee vettä 34.3 mm/v/m^2 . Oletetaan lisäksi, että materiaali turmeltuu siten (ottamatta vielä kantaa siihen mistä turmeltuminen mahdollisesti aiheutuu), että sen vedenläpäisevyys kasvaa kaksinkertaiseksi sadassa vuodessa ja että turmeltumisen variaatiokerroin on 0.2. Keskimääräinen vuosittainen läpäisevä vesimäärä on siten

$$q = k \cdot i \cdot 365 \cdot 86400 (1 + 0.01 \cdot t)$$

missä

q on läpäisevä vesimäärä [m^3/v]

t aika vuosina ja t:n kerroin esittää turmeltumisen vaikutuksen vedenläpäisevyyden kasvuun

Laskemalla saadaan, että 100 vuoden kohdalla läpäisevä vesimäärä on 68.5 mm/v/m^2 .

Em. kaavalla voidaan laskea, että arvo 50 mm/v saavutetaan ajassa 45.8 vuotta. Olettaen turmeltuminen normaalijakautuneeksi ja lineaarisesti ajasta riippuvaksi ja sallittavaksi alitustodennäköisyydeksi tavoitekäyttöiässä 5 %, saadaan käyttöiän varmuuskertoimeksi $\gamma_t = 1.33$ (esim. edellä olevasta taulukosta 5.11). Käyttöikä olisi siis tämän perusteella $45.8 \text{ v} / 1.33 = 34.4 \text{ v}$. Jos vaadittu käyttöikä on esim. 50 vuotta, tulee rakennetta paksumtaa tai sen vedenläpäisevyyttä pienentää. Kun valitaan vedenläpäisevyydeksi esim. $6.3 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}$, saadaan läpäiseväksi vesimääräksi alussa ($t=0$) $q = 6.3 \cdot 10^{-10} \cdot 1.5 \cdot 365 \cdot 86400 = 29.8 \text{ mm/v/m}^2$. Raja-arvo 50 mm/v/m^2 saavutetaan ajassa 67.6 vuotta ja soveltamalla käyttöiän varmuuskerrointa, käyttöikä on 50.8 v. Alkuperäiseen vaatimukseen nähden materiaalilta vaaditaan siis n. 1.67 kertaa pienempi vedenläpäisevyys kuin alkutilassa. Tiivistekerroksen läpäisevää vesimäärää ajan funktiona on havainnollistettu kuvassa 5.31. Jos puolestaan Ruotsin vaatimusta tulkitaan siten, ettei raja-arvoa 50 mm/v/m^2 tavoitekäyttöiässä keskimäärin saada ylittää turmeltuvalla materiaalilla $\gamma_t = 1$ ja käyttöikä 67.6 v. Mikäli käyttöiän päättyessä sallitaan hyvin pieni vauriotodennäköisyys ($7.2 \cdot 10^{-5}$, mikä vastaa 0.0072 % alitustodennäköisyyttä), $\gamma_t = 1.76$ ja käyttöikä 37.8 v.

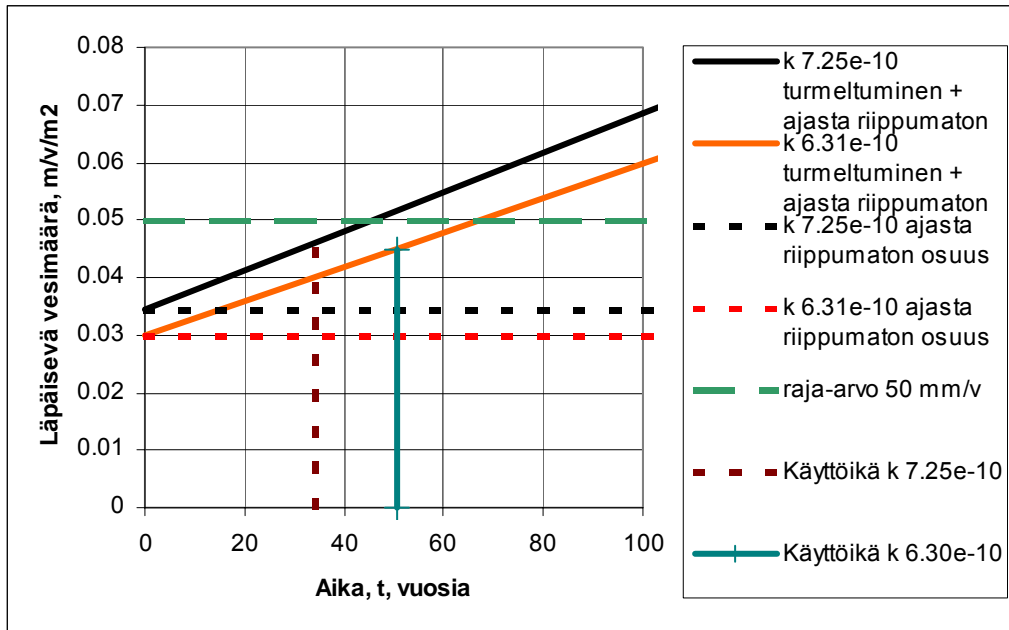
On huomattava, että edellä kuvatussa menettelyssä on huomioitu ainoastaan turmeltumisesta aiheutuva hajonta. Mikäli vedenläpäisevyyden hajonta (tiivistekerroksen epähomogeenisuus) huomioitaisiin, käyttöikä olisi lyhyempi (tosin olettamalla käytettävä vedenläpäisevyyden arvo ominaisarvoksi, osa keskimääräisen vedenläpäisevyyden hajonnasta on mukana).

Vedenläpäisevyyteen liittyvä lisähajonta voidaan huomioida siten, että tarkistetaan vedenläpäisevyyden hajonnan ja turmeltumiseen liittyvän hajonnan yhteisvaikutus mitoitussajankohtana.

Edellä esitetyt alitustodennäköisyydet ja variaatiokertoimet koskevat talonrakennuksen kantavia rakenteita. Infrarakenteita tarkasteltaessa voidaan olettaa variaatiokertoimien olevan jonkin verran suurempia kuin kantavissa rakenteissa. Toisaalta infrarakenteiden vaurioituessa mahdolliset seurannaisvaikutukset (etenkin hengenvaaraa aiheuttavat rakenteiden sortumat) eivät useinkaan ole yhtä äkillisiä ja pahoja kuin kantavien rakenteiden tapauksessa, mikä puoltaisi suuremman alitustodennäköisyyden sallimista. Toisaalta

tulee ottaa huomioon se, että esimerkiksi kaatopaikkojen pohjarakenteet ovat vaikeasti jälkeinpäin korjattavissa ja ympäristövauriot vaikeita korjata.

Vaikka tässä käytettyä raja-arvoa on pidetty niin sanottuna sallittuna läpäisevänä vesimääränä, tulisi ainakin vesitaselaskelmiin perustuvassa mitoituksessa huomioida jo nolatilanteessa ilman turmeltumistakin se, että vesitaselaskelmissa saatu vesimäärä voi poiketa todellisesta vesimäärästä kertoimella 2 /52/.

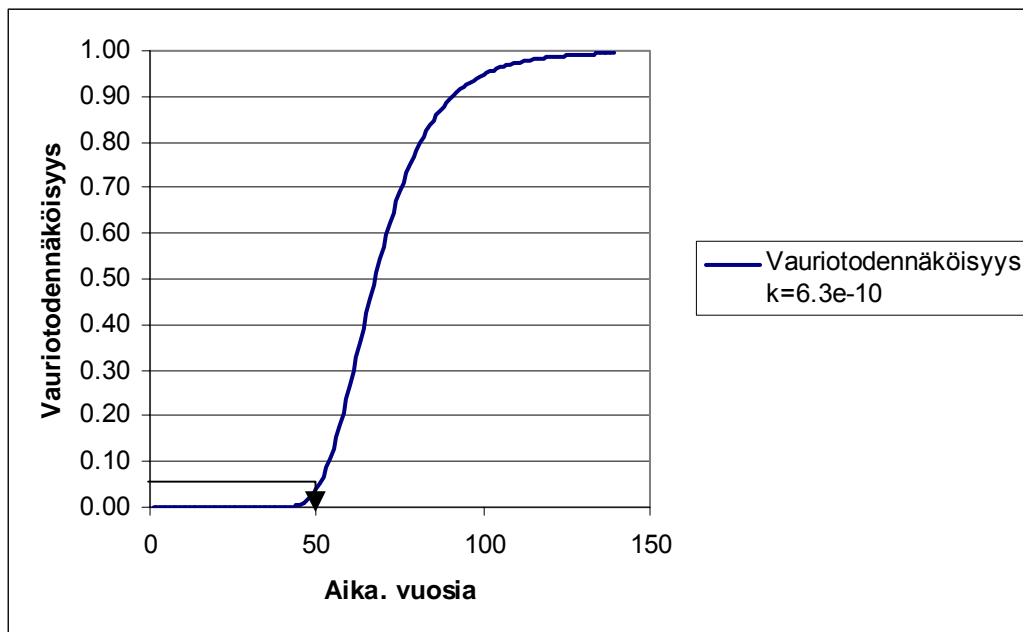


Kuva 5.31. Tiivistekerroksen käyttöiän määrittäminen, kun ainoastaan turmeltumisesta aiheutuva lisähajonta on otettu huomioon.

Edellisen varmuuslukuun pohjautuvan tarkastelun kanssa samaan tulokseen päästään myös laskemalla vauriotodennäköisyydelle 0,1 -normaalijakautuman testisuure $\beta(t)$.

$$\beta(t) = (\mu[R,t] - \mu[S,t]) / (\sigma^2[R,t] + \sigma^2[S,t])^{0.5}$$

Vastetta R vastaa tässä läpäisevälle vesimäärälle asetettu raja-arvo 50 mm/v/m², josta vähennetään ajasta riippumattoman tiivistekerroksen läpäisevä vesimäärä. Raja-arvo on siis vakio eikä sillä ole hajontaa. Rasiitusta S vastaa ajan mukana turmeltumisen myötä kasvava vesimäärä joka siis tässä on $q = 365 \cdot 86400 \cdot k \cdot i \cdot 0.01 \cdot t$ m/v/m² (aika t vuosis-
sa). 5 % vauriotodennäköisyyttä vastaa tässäkin ajankohta 50.8 v (kuva 5.32).



Kuva 5.32. Vauriotodennäköisyysjakautuma.

Edellä on käytetty ajan suhteen tapahtuvalle turmeltumiselle eli vedenläpäisevyyden kasvulle 100 vuodessa kerrointa 2 ja turmeltumisen vaikutus on arvioitu lineaariseksi. Materiaalin vedenläpäisevyys voi heikentyä useiden tekijöiden, kuten esimerkiksi maapohjan painuman (tai pintarakenteen tiivistekerroksen jätetäytön painuman) johdosta tai suotoveden sisältämien kemikaalien johdosta. Todellisuudessa vaikutukset eivät ole lineaarisia. Ajassa kehittyvän painuman (muodonmuutoksen) vaikutus vedenläpäisevyyteen on arvioitavissa, kun maapohjan painumaparametrit, kuormitus sekä materiaalin vedenläpäisevyys eri painumaa vastaavassa muodonmuutostilassa tunnetaan. Vastavasti kemikaalien vaikutus tiivisterakenteen vedenläpäisevyyteen ajassa voidaan arvioida, mikäli tunnetaan kemikaalin vaikutus materiaalin vedenläpäisevyyteen sinällään ja arvioidaan sen vaikutussyvyys eri ajankohtina laskennallisesti.

Tiivistemateriaalien osalta ei kuitenkaan ole yleensä tiedossa muodonmuutoksen tai kemikaalien vaikutusta vedenläpäisevyyteen. Suuruusluokaltaan kaksin-kolminkertaisia vedenläpäisevyyksiä on esitetty Trisoplastille viitteessä /6/ kaksiakselisen venymän ja eräiden nesteiden läpäisevyyden suhteen. Materiaalin vedenläpäisevyyteen voi luonnollisesti vaikuttaa vielä muitakin tekijöitä, kuten materiaalin kuivuminen, orgaanisen aineen hajoaminen tai materiaalin tiivistyminen, minkä johdosta vedenläpäisevyys ei kuitenkaan kasva, vaan pienenee.

Kokonaisia rakenteita (koko kaatopaikka) ajatellen tässä esimerkkinä käytettyyn vedenläpäisevyyden suhteen esitettyyn toimintavaatimukseen vaikuttaa yhden tiivistekerroksen (vaikkapa pohjatiivisteen) käyttäytymisen ohella monta muutakin tekijää. Näitä ovat esimerkiksi pintarakenteen toiminta (läpäisevyyden kasvu esim. jätetäytön painumisesta

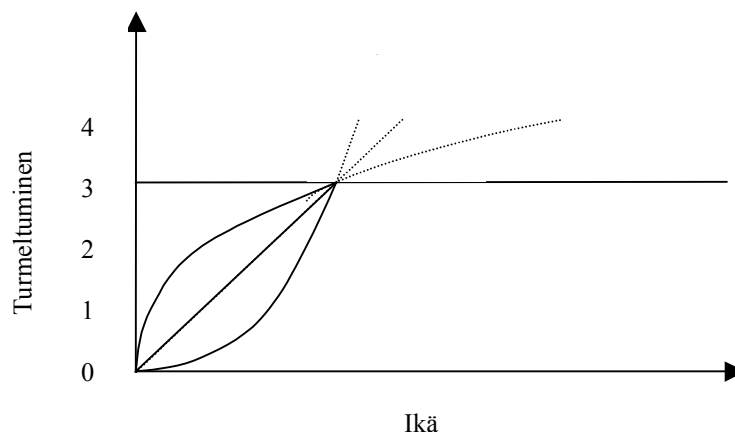
aiheutuvan eristeen löyhtymisen ja halkeilun johdosta), kuivatuskerroksen toiminta (kuivatuskerroksen vedenläpäisevyyden aleneminen rapautumisen, tukkeutumisen ja muiden vedenjohtavuutta heikentävien tekijöiden johdosta) ja mahdollisesti geomembraanissa tapahtuva turmeltuminen.

Jos vedenläpäisevyydelle esitetty raja-arvo (litraa/v/m² alla olevaan maapohjaan) on asetettu koko kaatopaikkarakenteelle, voidaan menetellä esimerkiksi siten, että lasketaan kaatopaikan pohjaeristeen läpi kulkeutuva vesimäärä esim. HELP –ohjelmalla 5 tai 10 vuoden ajanjaksoissa (työmäärän pitämiseksi kohtuullisena; itse laskennassa on syytä käyttää 30...100 vuoden jaksoja ilmastollisista tekijöistä aiheutuvan vaihtelun tasaamiseksi). Näissä ajanjaksoissa arvioidaan eri rasiustekijöiden vaikutukset eri rakennekerrosten materiaaleihin (lähinnä tiivistekerrosten ja salaojituserrosten vedenläpäisevyyteen). Ainakaan toistaiseksi HELP-ohjelmassa ei ole mahdollista antaa materiaaliominaisuuksia ajasta riippuvina. Mikäli kaikki vaikutukset eivät kohdistu koko kaatopaikan alaan (esim. pinta- ja / tai pohjatiivisteen painuma) ja sen merkitys on oleellinen, on laskelmat suoritettava osissa ja laskettava lopullinen läpäisevä vesimäärä koko kaatopaikan pinta-alalle (eli jos esim. painumasta kärsivän alueen osuus on 1 ja se läpäisee 70 mm/v, ja ala jossa painumat eivät vaikuta haitallisesti on 5 yksikköä ja läpäisy 10 mm/v, läpäisevä vesimäärä on keskimäärin 20 mm/v). Toimivuusvaatimuksen ylitykseen kuluva aika on määritettävissä näiden eri ajanjaksojen muodostamien vuosittaisten läpäisevien vesimäärien muodostaman käyrän avulla.

Kaatopaikkarakenteissa olevien eri materiaalien turmeltumista on käsitelty erikseen jällempämä luvussa 5.3 "Materiaalien turmeltuminen".

Markovin ketjun hyödyntäminen käyttöikä tarkasteluissa

Markovin ketjumenetelmässä rakenteiden kunto esitetään diskreetteinä kuntotiloina. Kuntotilat ilmaisevat, miten rakenne on jakautunut esimerkiksi kuntotiloihin 0, 1, 2, 3 ja 4. Tiloja voi olla useampia, mutta laskennat monimutkaistuvat nopeasti kuntotilojen lisääntyessä. Rakenteen turmeltuminen lisääntyy ja toiminta heikkenee asteittain kuntotilaluokan (eli turmeltumislukon) kasvaessa. Tila 0 edustaa parasta tilaa ja tila 4 huonointa tilaa. Tila 3 määrittelee rajatilan eli toiminnallisen vaatimuksen. Käyttöikä on tämän tilan saavuttamiseen tarvittava ikä. Tila 4 on kokoava turmeltumislukko, johon kaikki rakenteet lopulta päätyvät (kuva 5.33). Menetelmän etuja ovat mm. se, ettei käyttöiän jakautuman tarvitse olettaa olevan jotain ennalta määrättyä tyyppiä ja ettei käyttöiän hajonnalle tarvitse tehdä oletuksia /67/.



Kuva 5.33. Referenssikäyrien tyypit. Vasemmalta ylhäältä neliöjuuri, lineaarinen ja toinen potenssi. /67/.

Tietyissä iässä kussakin tilassa olevien rakenteiden määrä (m^2 , jm, jne.) esitetään kuntojakautumana. Kuntotiloissa tapahtuvat muutokset määritetään tilastollisina siirtymätodennäköisyyksinä, jotka esitetään ns. siirtymämatriisissa. Siirtymätodennäköisyydet tarkoittavat todennäköisyyttä, että rakenne siirtyy tietystä kuntotilasta seuraavaan kuntotilaan yhden vuoden aikana. Seuraavan vuoden kuntotila voidaan ennustaa kertomalla aloitusikä (0 vuotta) vastaava rakenteiden kuntojakautuma siirtymämatriisilla. Kertomista jatketaan niin monen vuoden osalta, kun kuntotilaa halutaan tarkastella. Siirtymätodennäköisyysmatriisiin oletetaan pysyvän muuttumattomana koko turmeltumisprosessin ajan (turmeltuminen kuitenkin etenee vaikka siirtymätodennäköisyysmatriisi pysyy samana). Kun kuntotilalle muodostetaan referenssikäyrä, voidaan myös siirtymätodennäköisyysmatriisi muodostaa. Menetelmällä saadaan lisäksi kaikki tilastollinen informaatio turmeltumisprosessin etenemisestä. Käyttöiän jakautumakäyrää määritettäessä lasketaan luokkien 3 ja 4 osuudet yhteen. Yksityiskohtaisemmin Markovin ketjumenetelmää on käsitelty mm. viitteessä /67/.

Jos edellä läpikäydylle esimerkille luodaan siirtymämatriisi lineaarista referenssikäyrää käyttäen siten, että turmeltumisaste 3 saavutetaan ajankohtana 67.8 v (rajatilan ylitys) ja suoritetaan referenssikäyrän sovitus minimoiden referenssikäyrän ja Markovin ketjumenetelmällä lasketun keskiarvokäyrän vuosittaisten poikkeamien summa tilojen 0 ja 3 välillä, saadaan siirtymätodennäköisyysmatriisille taulukossa 5.14 esitetyt arvot. Siirtymätodennäköisyysmatriisista nähdään, että vuosittain kuntotilassa 0 säilyy 95.54 % ja kuntotilaan 1 siirtyy 4.46 %; vastaavasti kuntotilasta 1 kuntotilaan 2 siirtyy 4.46 % jne.

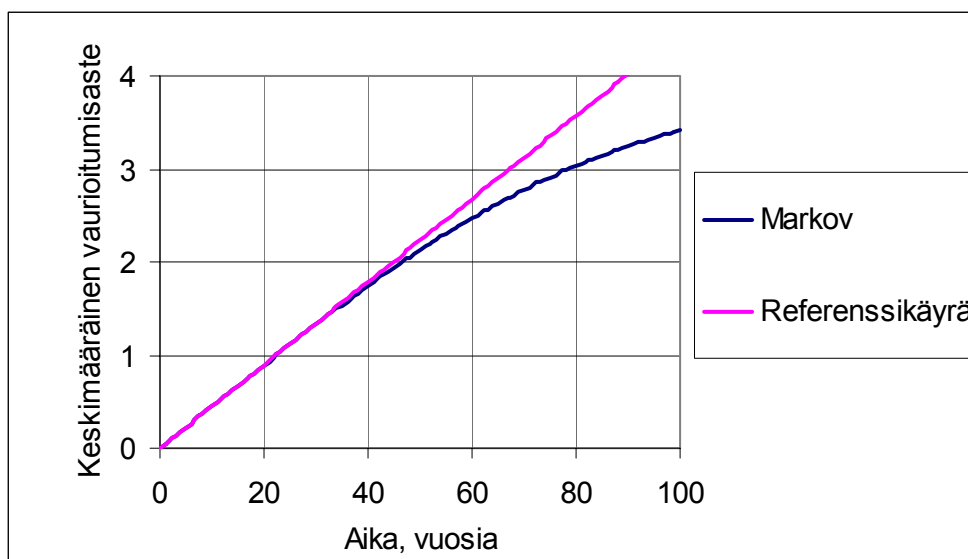
Referenssikäyrä ja Markovin ketjumenetelmällä saatu käyrä on esitetty kuvassa 5.34. Kuvassa 5.35 on esitetty eri kuntotilojen kumulatiiviset jakautumat. Kuvasta voidaan havaita, että 5 % alitustodennäköisyydellä käyttöikä on n. 19 vuotta. Vaurioitumisaste 3 saavutetaan 79 vuoden iässä, joten käyttöiän varmuuskerroin on n. 4.16. Tämä on yli

kolminkertainen normaalijakautumaan perustuvalla menettelyllä saatuun varmuusker-
toimeen nähden (kun variaatiokerroin oli oletettu hyvin pieneksi).

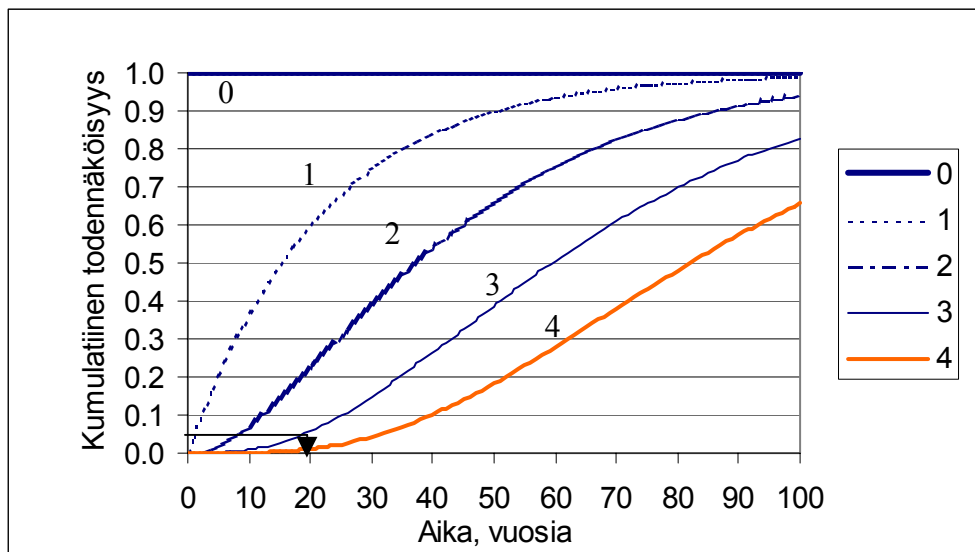
Markovin ketjumenetelmän etuna on mm. se, että siirtymämatriisin luomisessa voidaan
käyttää hyväksi kohteessa suoritettaviin mittauksiin perustuvaa tietoa. Tällöin esimer-
kiksi seuraamalla kaatopaikan peittorakenteen painumaa (ja siitä aiheutuvia muodon-
muutoksia, jotka määräävät tiivisteiden vedenläpäisevyyden), on mahdollista arvioida mi-
neraalitiivisteiden käyttöikä (automatoituja mittausmenettelyitä tulossa). Kuntotila-
muuttuja mahdollistaa myös useampien turmelevien tekijöiden samanaikaisen tarkaste-
lun. Tällöin on huomattava, että luokkia muodostuu l^n kappaletta, jossa l on kuntotilojen
lukumäärä ja n turmelevien tekijöiden määrä (esim. $l=5$, $n=3$; tiloja $5^3=125$).

Taulukko 5.14. Markovin ketjumenetelmän siirtymätodennäköisyysmatriisi.

Kuntotila	0	1	2	3	4
0	0.9554	0.0446	0	0	0
1	0	0.9554	0.0446	0	0
2	0	0	0.9554	0.0446	0
3	0	0	0	0.9554	0.0446
4	0	0	0	0	1



Kuva 5.34. Referenssikäyrä ja Markovin ketjumenetelmän mukainen käyrä.



Kuva 5.35. Kuntotilojen kumulatiiviset todennäköisyydet. 5 %:n vaurioitumistodennäköisyys merkitty kuvaan nuolella.

5.3 Materiaalien turmeltuminen

Turmeltumismallit kuvaavat materiaalin käyttäytymistä tietyn turmelevan tekijän vaikutuksesta ajan funktiona. Jotta olisi mahdollista arvioida turmeltumisen vaikutusta rakenteen käyttäytymiseen, on siis tunnettava vähintään turmelevan tekijän vaikutuksen suuruus sekä sen tapahtumiseen vaadittava aika. Selkeitä turmeltumismalleja, joita voitaisiin suoraan käyttää tiivisterakenteiden käyttöiän määrittämisessä, ei juurikaan ole olemassa. Tässä kappaleessa on esitetty eräitä mahdollisuuksia arvioida muutamien tekijöiden vaikutusta tiivisterakenteen ajanfunktiona tapahtuvaan turmeltumiseen. Lisäksi on esitetty kunkin turmeltumistekijän yhteydessä LandSim -ohjelmassa esitetyt mahdollisuudet tiettyjen turmeltumistekijöiden huomioimiseksi.

Oleellimmat kaatopaikan käyttöikä lyhentävät ja päästöjä lisäävät tekijät ovat

- mineraaliaineksisen tiivistekerroksen läpäisevyyden kasvu routimisesta, suotovedestä / kemikaaleista tai kuivumisesta johtuen,
- mineraaliaineksisen tiivisteiden vedenläpäisevyyden kasvu muodonmuutoksista johtuen (lähinnä pintarakenteessa jätettyjen painumista johtuen) ja
- salaojituserroksen läpäisevyyden heikentyminen (biologinen, kemiallinen ja mekaaninen tukkeutuminen).

Kaatopaikoissa käytettävien geosynteettisten tuotteiden (lähinnä geomembraanit ja geotekstiilit, mutta myös esim. salaojaputket) osalta kaatopaikan käyttöikää lyhentävät geomembraanin puhkaistuminen, mekaanisten ominaisuuksien heikentyminen ja mineraaliaineksiin nähden geosynteettisten tuotteiden oma, rajallinen kestoikä.

Mineraalisen aineksen vedenläpäisevyyden muuttuminen

Mineraaliaineksisten tiivisteiden osalta joidenkin rasiusten vaikutukset saattavat olla suuria ja nopeita, kuten esimerkiksi mineraaliaineksen jäätymisestä ja sulamisesta aiheutuva vedenläpäisevyyden kasvu. Materiaalin vedenläpäisevyys voi kasvaa jo yhden jäätymis-sulamissyklin aikana moninkertaiseksi, ja suhteellisen paksuuden eristekerros, mikäli se on alttiina jäätymiselle, saattaa yhden talven aikana läpikäydä useita jäätymis-sulamis-syklejä. Jäätymisestä ja sulamisesta aiheutuva tiivisterakenteen turmeltuminen pyritäänkin estämään kokonaan, joko estämällä jäätyminen tai valitsemalla jäätymistä kestävä materiaali. Periaatteessa osittain jäätyminen ja sulamisen vaikutuksesta turmeltuneen eristekerroksen vedenläpäisevyys voidaan määrittää turmeltuneen osakerroksen ja turmeltumattoman osakerroksen vedenläpäisevyyksien avulla, jos rakenne on jo pääsyt vaurioitumaan, mutta käytännössä riskin ennakoimiseksi, läpäisevyyden arviointi ennakkoon esimerkiksi yhden talven vaikutusten jälkeen, on hankalaa.

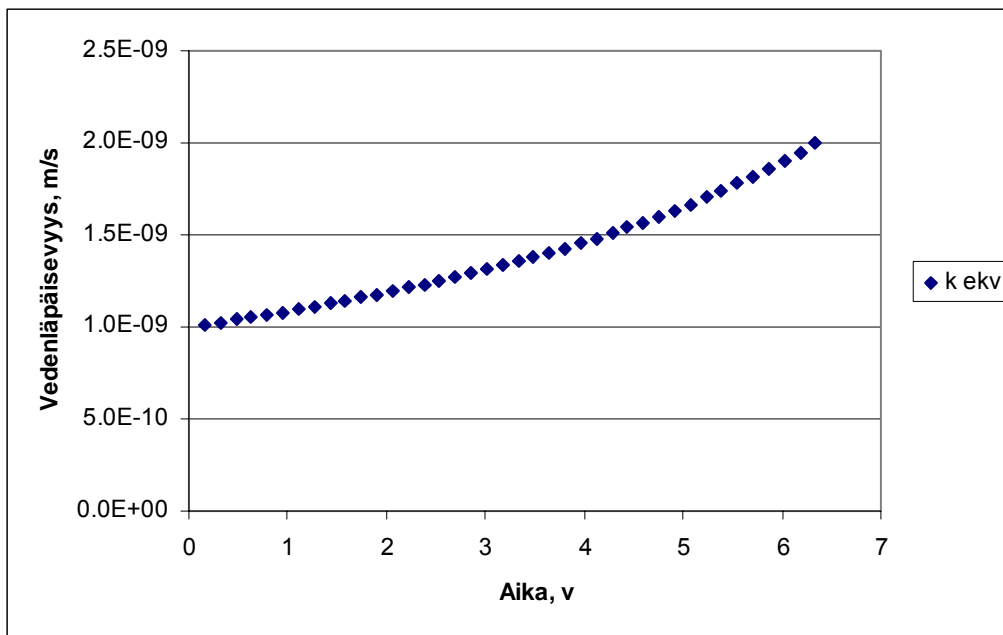
Sen sijaan suotoveden tai kemikaalien vaikutus mineraalisen tiivisterroksen vedenläpäisevyyteen vaikuttaa yleensä hitaasti. Suotoveden tai kemikaalin aikavaikutusta kerroksen läpäisevyyteen voidaan arvioida nesteiden tunkeutumisenopeuteen (haitta-aineen kulkeutumien virtauksen mukana tai diffuusiolla) perustuen. Jos tunnetaan suotoveden vaikutus materiaalin vedenläpäisevyyteen, voidaan koko kerrokselle laskea ekvivalentti vedenläpäisevyys ajanfunktiona nesteiden virtausnopeuteen pohjautuen

$$h_{\text{kok}}/k_{\text{eq}} = h_{\text{suotovesi}}/k_{\text{suotovesi}} + h_{\text{vesi}}/k_{\text{vesi}}$$

missä

h_{kok}	on	eristekerroksen kokonaispaksuus
k_{eq}		eristekerroksen ekvivalentti läpäisevyys
$h_{\text{suotovesi}}$		suotoveden vaikutussyvyys tietyllä ajanhetkellä
$k_{\text{suotovesi}}$		materiaalin vedenläpäisevyys suotovedellä
h_{vesi}		se eristekerroksen paksuus, johon suotovesi ei ole vielä vaikuttanut ($h_{\text{kok}} - h_{\text{suotovesi}}$)
k_{vesi}		materiaalin vedenläpäisevyys puhtaalla vedellä.

Kuvassa 5.36 on esitetty yhden metrin paksuisen savikerroksen ekvivalentin vedenläpäisevyyden kasvu edellä esitetyllä kaavalla laskettuna ($i=2$; $n=0.4$), kun vedenläpäisevyyden on oletettu suotoveden vaikutuksesta lisääntyvän kaksinkertaiseksi.



Kuva 5.36. Tiivistekerroksen ekvivalentin vedenläpäisevyyden muuttuminen, kun läpäisevyys muuttuu suotoveden tunkeutumissyvyyden ($v=k*i/n$) mukana kaksinkertaiseksi.

Samaan vaikutusaikaan (ajankohta, jolloin läpäisevyys on kaksinkertaistunut) päästään myös, jos lasketaan alkuperäisen läpäisevyyden perusteella se aika, jolloin koko huokostilavuuden suuruinen suotovesimäärä on kulkeutunut tiivistekerroksen läpi. Kuten aikaisemmin diffuusioreunaehto- ja yhteydessä havaittiin ja kuten myös kemikaaleilla tehdyt laboratoriotestit osoittavat, kemikaalin tai haitta-aineen kokonaisvaikutus vedenläpäisevyyden lisääntymiseen ei kuitenkaan välttämättä tapahdu kokonaan ensimmäisen huokostilavuuden suuruisen vesimäärän virtauksen aikana, vaan vedenläpäisevyydessä saattaa esiintyä kasvua 3...5 huokostilavuuden suuruiseen läpäisevään vesimäärään asti, maahuokosissa olevan veden suojatessa alkuvaiheessa maamateriaalia suotoveden / kemikaalin haitallisilta (kutistumista) aiheuttavilta vaikutuksilta. Tämän takia on tärkeää suorittaa vedenläpäisevyysskojeet riittävän pitkäaikaisina, jotta huokosvesi ehtii vaihtua ja suotoveden / kemikaalien vaikutus ehtii varmasti tapahtua.

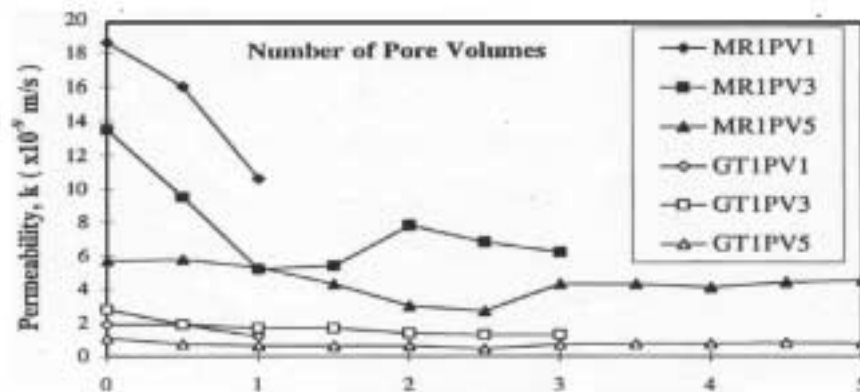
Pelkän 1 metrin paksuisen mineraalitiivisteen vedenläpäisevyyden muuttuminen saattaa siis pahimmillaan kestää ainoastaan 6...12 vuotta, jos vedenläpäisevyyden muutos tapahtuu yhden huokosveden tilavuuden läpivirtauksen aikana. Jälkimmäistä arvoa lasettaessa gradientin on oletettu lähentyvän arvoa 1, mikä kaatopaikan alkuvaiheessa salojien vielä toimiessa hyvin saattaa olla mahdollistakin. Parhaimmillaan muuttumiseen saattaa vastaavasti kulua 30...60 vuotta, jos muutokset toteutuvat vasta esimerkiksi 5 huokostilavuuden läpivirtauksen jälkeen.

Geomembraanin sisältävällä rakenteella sen alla olevan mineraaliaineen läpäisevyyden muuttumisaika on vaikeammin arvioitavissa. Edellä esitetyillä arvoilla, kun huokos-

mioidaan ainoastaan reikien läpi tapahtuva virtaaminen, yhden huokostilavuuden suuruisen vesimäärän läpivirtaus esimerkiksi taulukon 5.9 yhden metrin paksuisella yhdistelmärakenteella (4080 l/ha/a) kestää lähes 1000 vuotta, kun vesimäärä jaetaan tasaisesti koko mineraalitiivisteelle. Jos sen sijaan reikien kohdalla huomioidaan läpäisevyyden muuttuminen nopeasti kaksinkertaiseksi, läpäisevän vesimäärän kasvamisen johdosta vastaava aika alentuu n. 600 vuoteen. Jos vielä on mahdollista, että geomembraanin läpi diffuusiolla kulkeutuvat aineet aiheuttavat vedenläpäisevyyden kasvua, aika lyhenee edelleen. Tällöin vedenläpäisevyyden muuttumiseen kuluvan ajan arvioimiseksi on tunnettava myös läpäisevyyttä lisäävän kemikaalin konsentraation vaikutus läpäisevyyden kasvuun. Tämä tarkoittaa sitä, että vedenläpäisevyyskokeita olisi tehtävä suotovedelläkin.

Jos suotoveden (tai muun nesteen, jonka läpäisevyyttä halutaan tutkia) vaikutus mineraaliseen tiivistemateriaaliin tapahtuu jo ensimmäisen huokostilavuuden suuruisen nestemäärän kulkiessa materiaalin läpi, on järkevintä soveltaa suoraan jo mitoituksessa muuttunutta, korkeampaa vedenläpäisevyyden arvoa. Tämä siitä syystä, että tunkeutumissyvyyden mukaan laskettu aika on suhteellisen lyhyt kaatopaikalta edellytettävään käyttöikään nähden, kuten edellä olevasta kuvasta 5.36 voidaan havaita. Jos vaikutukset tapahtuvat vasta useamman huokostilavuuden virtauksen tapahduttua ja mineraaliaines on vielä suojassa geomembraanin alla, saattaa olla perusteltua huomioida suotoveden / kemikaalin vaikutus ajan funktiona vedenläpäisevyyttä kasvattavana käyttöikä arvioitaessa. Aikajänne on kuitenkin syytä pitää kohtuullisena, esim. 100...200 vuoden mittaisena.

Suotoveden tai kemikaalien vaikutuksesta mahdollisesti tapahtuvaa mineraaliaineksen vedenläpäisevyyden pienentymistä ei voida todennäköisesti hyväksyä missään tapauksessa perusteena käyttää pienempää arvoa suunnitteluarvona. Suotoveden läpäisevyyttä pienentävää vaikutusta ei voida taata eri kaatopaikoissa eikä myöskään sen pysyvyydestä ole varmuutta. Suotoveden vaikutusta läpäisevyyttä alentavana tekijänä voidaan jopa pitää osoituksena mineraaliaineksen ja suotoveden keskinäisestä reagoinnista ja mikäli on olemassa vaihtoehtoisia materiaaleja, joiden läpäisevyys ei reagoi juurikaan suotoveteen, näiden käyttöä parhaana vaihtoehtona /89/. Kahden eri materiaalin vedenläpäisevyyden käyttäytyminen saman suotoveden vaikutuksesta on esitetty kuvassa 5.37.



PV

Kuva 5.37. Rapautuneen savikiven (MR1) ja moreenin (GT1) läpäisevyyden muuttuminen suotoveden vaikutuksesta näytteen läpi virtaavan huokosvesitulavuuden (PV) funktiona /89/.

Kemikaalit vaikuttavat lähinnä kahdella tavalla mineraalisen materiaalin vedenläpäisevyyden kasvuun. Kemikaali voi aiheuttaa makrorakoja maapartikkeliryhmien kutistuksessa tai se voi lisätä huokoisuutta tasaisesti koko materiaalissa /4/. Kemikaalien vaikutusten laskennallinen arviointi maamateriaalin vedenläpäisevyyteen on kuitenkin vielä kehitysvaiheessa, eikä kumpaankaan mahdollisuuteen perustuvia luotettavia tuntuja malleja ole käytettävissä. Kemikaalien suurempaa läpäisevyyttä ei voida myöskään selittää pelkästään nesteiden tiheyksissä ja viskositeeteissa olevien erojen perusteella laskemalla k-arvoa esim. Kozeney-Carman yhtälöllä, sillä useimmissa tapauksissa näiden pohjalta saatavat erot ovat pieniä verrattuna mitattuihin eroihin nähden /4/.

Kozeney-Carman yhtälö huomioi monia maamateriaalin vedenläpäisevyyteen vaikuttavia tekijöitä:

$$k = (\gamma/\eta) * (1/k_0 * T^2 * S_0^2) * (e^3 / (1+e))$$

missä

γ on nesteen tiheys

η nesteen viskositeetti

k_0 muotokerroin

T tortuositeetti

S ominaispinta-ala

e huokosluku

Tällä yhtälöllä tai siitä johdetuilla sovituskäytännöillä voidaan kuitenkin arvioida huokoisuudessa tapahtuvien muutosten vaikutusta materiaalin vedenläpäisevyyteen. Huokoisuuden muuttumista voi aiheuttaa esimerkiksi tiivistämateriaalissa olevan orgaanisen

aineen hajoaminen tai salaojituserroksen materiaalin tukkeutuminen. Muiden yhtälön termien pysyessä muuttumattomina aiheuttaa 5 %-yksikön huokoisuuden (esim. arvosta $n=0.40$ arvoon 0.45) muutos vedenläpäisevyyden kasvun n. 1.7-kertaiseksi. Suoranaisesti vedenläpäisevyyttä laskettaessa em. yhtälöön perustuvilla sovitusfunktiolla päästään parhaimmillaan 1/3...3 -kertaiseen arvoon todelliseen, mitattuun vedenläpäisevyyteen nähden /10/.

Bentoniittia sisältävien materiaalien käyttäytyminen riippuu suuresti käytetystä bentoniitista (natrium- tai kalsiumbentoniitti). Suotovesi voi aiheuttaa bentoniittiivisteissä huomattavaa kemiallisia ja fysikaalisia muutoksia. Vedenläpäisevyydessä tapahtuvien muutosten on todettu johtuvan Na, K, Mg, Fe ja Al huuhtoutumisesta mineraaliaineksesta, kationinvaihdon aiheuttamista kutistumisesta / paisumisesta ja mahdollisesti saven mikrobiologisesta hajoamisesta. Kun lisätään bentoniitin määrää muutamalla prosentilla yli vedenläpäisevyyden edellyttämän määrän, voidaan em. prosessien vaikutusta pienentää ja kestoikää lisätä. Kestoikää lisää myös se, että bentoniitti(seos) hydratoituu (kyllästyy) puhtaalla vedellä eikä suotovedellä. Suotovedellä bentoniittiseosten vedenläpäisevyydet ovat suurempia kuin puhtaalla vedellä, mutta natriumbentoniitti käyttäytyy tässäkin suhteessa kalsiumbentoniittia paremmin. Natriumbentoniitin vedenimukyky on luokkaa 600...1000 %, kalsiumbentoniitin vedenimukykyyn ollessa luokkaa 100 %. Tällä on merkitystä myös tiivistemateriaalin itsekorjautumiseen ja painuman sietokykyyn kaatopaikan painumisen johdosta /31/.

Laboratoriokokeiden mukaan bentoniittiseoksissa ei tapahdu pitkäaikaisia vedenläpäisevyyteen vaikuttavia muutoksia, jos läpäisevän neste ionikonsentraatio on pieni. Suuri kalsiumionikonsentraatio kuitenkin johtaa huomattavaan läpäisevyyden kasvuun suurilla hydraulisen gradientin arvoilla. Kirjallisuuden pohjalta kaatopaikkojen pohjarakenteissa käytettävän bentoniitin osalta kaivattaisiin lisää tietoa /31/.

Tiivistemateriaalin routimisen, suotoveden ja kemikaalien sekä kuivumisen vaikutuksia on tarkasteltu materiaaliakohtaisesti laajemmin "Mineraalisten pohjavedensuojausrakenteiden pitkäaikaistoimivuus" -raportissa viitteessä /90/.

LandSim -ohjelmassa mineraalisen eristemateriaalin heikentymistä (vedenläpäisevyyden kasvua) ei voida huomioida ajan funktiona. Ohjelman manuaalissa suotoveden vaikutuksen ja mineraaliainestiivisteiden epähomogeenisuuksien huomioimiseksi on esitetty käytettäväksi materiaalin vedenläpäisevyydellä logaritmista jakautumaa ja kertaluokkaa tavoitteena olevaa suurempaa vedenläpäisevyyttä ja samalla pienempää arvoa, kuin mitä geometrisenä keskiarvona on saatu. Eli käytännössä laskettaessa vedenläpäisevyyden arvolla $1 \cdot 10^{-9}$ m/s, tavoiteltava vedenläpäisevyyden arvo tulisi olla $1 \cdot 10^{-10}$ m/s. Arvon valinnassa voidaan luonnollisesti huomioida suoritettujen kokeiden määrä arvoa pienentävänä tai suurentavana tekijänä /19/.

Painuma

Painumasta aiheutuvien tiivistekerroksen vedenläpäisevyysmuutosten huomiointi edellyttää, että tunnetaan materiaalin vedenläpäisevyyden muuttuminen muodonmuutoksen suhteen. Pohjaeristeiden osalta mahdolliset maapohjan ja itse mineraalisen tiivistekerroksen painumat ovat yleensä pieniä (kun kaatopaikkaa ei perusteta painuvalle pohjalle) ja ne voidaan arvioida geotekniikassa yleisesti käytettävillä menetelmillä, kun jätetäytöstä ja lopulta peittorakenteesta aiheutuva kuormitus arvioidaan.

Sen sijaan peittorakenteeseen kohdistuvan painumarasituksen arviointi on hankalaa jätteen epähomogeenisuuden takia. Painumat voivat kuitenkin olla niin suuria, että ne vaarantavat peittorakenteen pitkäaikaisen tiiviyyden. Jätetäytön painuman suuruusluokan on esitetty voivan olla 30...50 % jätetäytön paksuudesta /31/.

Jätetäytön painuman voidaan ajatella koostuvan kolmesta painumalajista: välittömästä painumasta (heti kuorman lisäämisen jälkeen tapahtuva painuma), primäärisestä painumasta (vastaa likimäärin maamateriaalien konsolidaatiopainumaa) ja pitkäaikaisesta eli biokemiallisen hajoamisen aiheuttamasta painumasta. Hajoamisesta aiheutuva pitkäaikainen painuma alkaa vasta tietyn aikaviiveen jälkeen, kun hajoamistoiminta on päässyt kaatopaikassa käyntiin. Kuten geotekniikassakin, painumalajien tarkka erottaminen toisistaan on hankalaa /30/.

Jätetäytön painumien arvioitiin on kehitetty useita maamekaniikkaan ja / tai empiirisiin havaintoihin perustuvia painumamalleja. Jotkut malleista huomioivat välittömän painuman erikseen ja joissakin malleissa painumaa aletaan laskea vasta peittorakenteesta aiheutuvan välittömän painuman tapahtumisen jälkeen. Painumamalleille esitetyt parametrit voivat olla heikosti sovellettavissa yksittäiseen tapaukseen ja painuman suuruus riippuu joka tapauksessa merkittävästi parametrien valinnasta. Eri painumalajien painumamalleja on esitetty mm. viitteessä /30/.

Janbun pitkäaikaisen painuman mallilla

$$w = H/r_s * \ln(t/t_0)$$

missä

w on painuma

H jätetäytön kerrospaksuus

r_s painumaparametri (creep resistance)

t aika kuukausissa

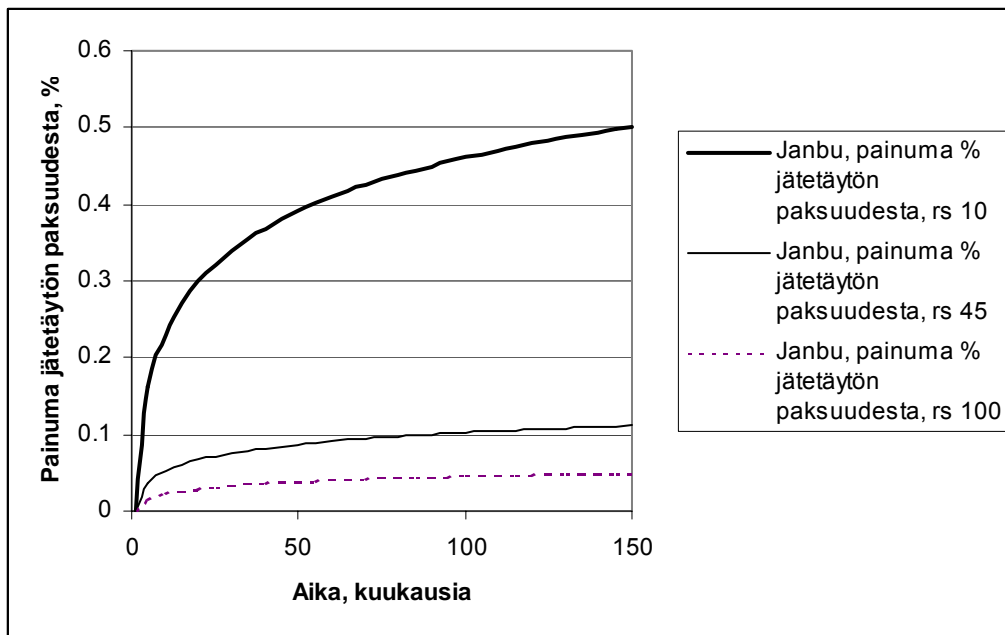
t₀ aloitusaika

saadut jätetäytön paksuuteen suhteutetut painumat on esitetty painumaparametrin funktiona kuvassa 5.38. Kuvasta voidaan havaita, että 10 m jätepenkereen painumat vaihtelevat 0.5 m:stä 5 m:iin parametrissa r_s riippuen jo lyhyellä aikavälillä.

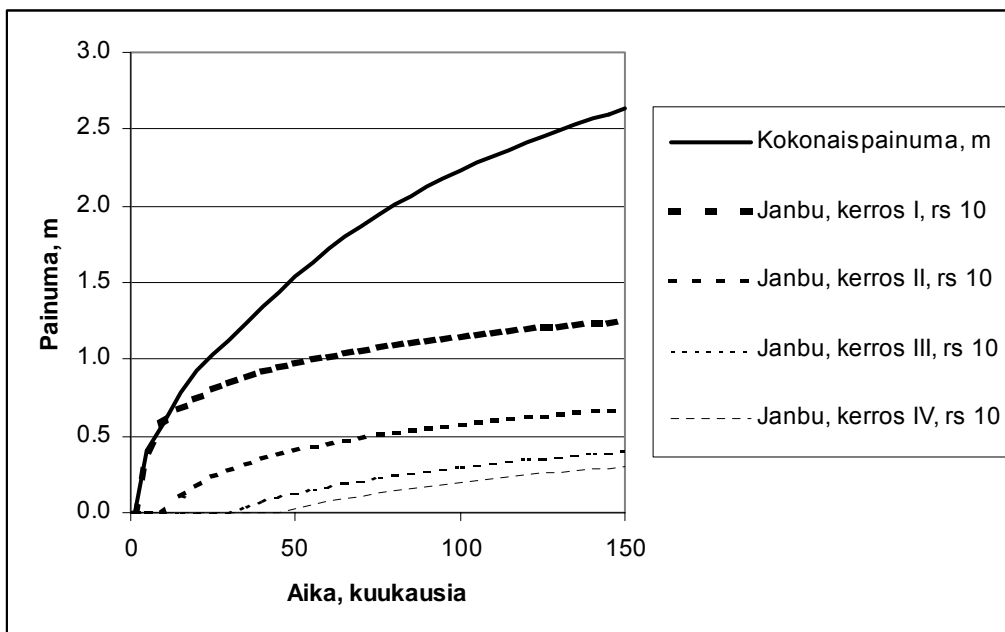
Järkevään tulokseen pääsemiseksi ko. parametri on siis valittava kohteesta esim. mitaamalla saatujen tietojen pohjalta. Uusien kaatopaikkojen osalta suositeltavinta olisi mitata kerrosten painumaa, valita käytettävä painumanlaskentamenetelmä parhaimman sovituksen antamalla mallilla ja laskea lopulta koko kaatopaikan painuma osakerrosten painumien summana. Näin menetellen, esimerkiksi Janbun mallia soveltamalla, voidaan huomioida myös mahdollisen vaiheittaisen rakentamisen vaikutukset ja myös jätteen ominaisuuksissa mahdollisesti kerroksittain tapahtuvat muutokset sekä arvioida lopullisen rakenteen painumaa soveltuvimman peittorakenteen ja peittoajankohdan valitsemiseksi (kuva 5.39).

Tämäkään tarkastelu ei anna suoraan vastausta jätteen epähomogeenisuuksista aiheutuvien peittorakenteen muodonmuutosten suuruuteen. Epätasaiset painumat ovat jätetäytönkin painuman ollessa kyseessä suhteessa kokonaispainuman suuruuteen ja epätasaiten, muodonmuutosta aiheuttavien painumien vaara on olemassa ainakin niin kauan kuin jätetäytössä tapahtuu merkittävää painumaa.

Vanhojen käytöstä poistettujen ja peitettävien kaatopaikkojen jätteen ja peittorakenteen painon aiheuttaman painuman arvioiminen lienee luotettavimmin tehtävissä koepiitorakenteita rakentamalla ja seuraamalla painumia. Tässäkin havaintoja voidaan sovittaa ajasta riippuviin painumamalleihin. Luonnollisesti käsitys jätetäytön epähomogeenisuuksien vaikutuksista, jotka juuri aiheuttavat tiivisterakenteelle haitallisimmat painumaerot, jää pienimittakaavaisessa koerakenteessa aina jonkin verran puutteelliseksi, mutta sen perusteella painumat voidaan arvioida kuitenkin paremmin kuin esim. laboratoriomittakaavassa tehtävien painumakokeiden perusteella. Osaltaan ratkaisuna peittorakenteen kestävyysongelmaan olisi väliaikaisten peittorakenteiden käyttö. Väliaikainen peittorakenne toimisi paitsi jätetäyttöä kokoonpuristavana elementtinä, tarjoaisi myös toiminnaltaan seurattuna tarvittavaa tietoa lopullisen peittorakenteen rakentamista varten. Jätetäytön mahdollisesta suurista painumista ja painumaeroista johtuen on jokapaikksessa kyseenalaistettava yhdellä kertaa rakennettavan peittorakenteen pitkäaikais-toiminta ilman rakenteeseen tehtäviä korjaustoimenpiteitä.



Kuva 5.38. Janbun mallin mukainen jätetäytön painuman riippuvuus laskennassa käytetystä parametrilla $r_s/30$.



Kuva 5.39. Jätetäytön painuman kerroksittainen arviointi. Kerrosten painumahavaintojen perustella valitaan kerroksen aika-painumaa kuvaava malli (tässä Janbun malli) ja sen parametrit. Kokonaispainuma lasketaan kerroksittaisten painumien summana.

LandSim -ohjelmassa mineraaliaineksesta koostuvan kaatopaikan peittorakenteen läpäisevyyden kasvua esim. painumista aiheutuvien muodonmuutosten osalta ei ole katsottu tarpeelliseksi mallintaa. Tämän taustalla on ajatus siitä, että painumat ja niistä aiheutuvat vauriot korjataan alkuperäiseen kuntoon kaatopaikan jälkihoitoaikana.

Salaojituskerroksen tukkeutuminen

Viitteessä /68/ on esitetty yksinkertaistettu menettely salaojitusjärjestelmän tukkeutumisen ja eliniän (toimintaiän) arvioimiseksi. Kuiva-aineena mitattuna salaojitusjärjestelmän tukkivasta aineesta 40...50 % on kalsiumkarbonaattia (CaCO_3) sekä Saksassa että Kanadassa. Menettely pohjautuu salaojitusjärjestelmään kulkeutuvaan vesimäärään ja suotoveden kalsiumpitoisuuteen ja oletukseen, että kaikki kalsium muodostaa salaojituskerrosta tukkivaa sakkaa. Meillä Suomessa rautasakkautumien on todettu olevan yleensä suurin rakennusten ja peltojen salaojien tukkeutumista aiheuttava riskitekijä.

Sakan täyttämän tietyn huokososuuden täyttämiseen tarvittava aika voidaan laskea eri oletustapauksilla:

1. Sakka jakautuu tasaisesti salaojituskerrokseen kalsiumkonsentraation ollessa vakio

$$T = v_f * B * \rho_c * f_{Ca} / (q_0 * c_{L1})$$

missä

T on tukkeutumiseen tarvittava aika, vuosia

v_f sakan täyttämä tilavuus, m^3

B^* salaojituskerroksen paksuus pystysuunnassa (yleensä 0.5 m)

ρ_c sakkamateriaalin tilavuuspaino (mitattu eräässä tapauksessa 1.5 g/cm^3 , /68/)

f_{Ca} kalsiumin osuus tukkivasta materiaalista (mitattu eräässä tapauksessa 26 %, /68/)

q_0^* kuivatuskerrokseen tuleva pystysuunnassa tuleva vesimäärä (m^3/m^2)

c_{L1} kalsiumin pitoisuus suotovedessä (vakio tässä oletuksessa) (mg/l)

2. Sakka jakautuu tasaisesti salaojituskerrokseen kalsiumkonsentraation alentuessa ajan myötä

$$T = v_f * B * \rho_c * f_{Ca} / (q_0 * c_{L2}) - (c_{L1} - c_{L2}) / (2 * c_{L2}) * (T_1 + T_2)$$

c_{L1} kalsiumpitoisuus alussa ajanjakson T_1 ajan

c_{L2} kalsiumpitoisuus ajanjakson T_2 jälkeen (eli pitoisuus alenee lineaarisesti ajan T_1 ja T_2 välillä)

3. Sakka kerääntyy salaojaputken ympärille tietylle alalle kalsiumkonsentraation ollessa vakio

$$T = (v_f * B * L/3 + 2 * v_f * B * a/3) * (\rho_c * f_{Ca}) / (q_0 * c_{L1} * L)$$

L on etäisyys salaojasta pohjan taitepisteeseen (= matka jolta vedet valuvat salojaan; yleensä salojien väli / 2)

a sakan täyttämän osuuden (v_f) matka salaojaputkesta mitattuna (loppuosalla L -a sakan täyttämä osuus laskee nolnaan).

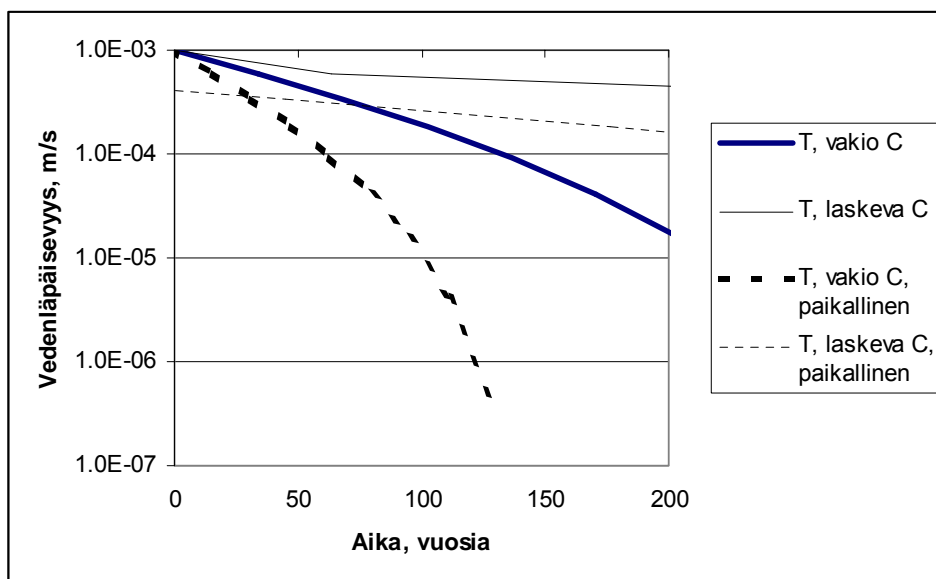
4. Sakka kerääntyy salaojaputken ympärille tietylle alalle kalsiumkonsentraation alentuessa ajan myötä

$$T = (v_f * B * L/3 + 2 * v_f * B * a/3) * (\rho_c * f_{Ca}) / (q_0 * c_{Li} * L).$$

Esitetty malli ei huomioi raekoon vaikutusta tukkeutumiseen, minkä johdosta mallin mukaan samanlaisen huokostilan omaavat materiaalit tukkeutuvat samalla lailla. Todellisuudessa raekoolla on luonnollisesti vaikutusta tukkeutumiseen. Mallia tulee käyttää varoen, jos materiaalissa on rakeisuudeltaan alle 25 mm jakeita.

Puutteineenkin edellä esitetty menettelytapa kuitenkin tarjoaa mahdollisuuden arvioida salaojituskerroksen tukkeutumisen vaikutusta. Yhdessä tapauksessa ko. mallilla on pystytty selittämään jo 10 vuodessa tapahtunut salaojituskerroksen tukkeutuminen, mikä johdosta veden korkeus suuressa kaatopaikassa (salaojaputkien väli 200 m) nousi 20 m:iin tiivistekerroksesta /68/.

Kuvassa 5.40 on esitetty salaojituskerroksen materiaalin vedenläpäisevyyden (alkuperäinen läpäisevyys $1 * 10^{-3}$ m/s) muuttuminen Kozeney-Carman yhtälöllä laskettuna ajan funktiona eri tukkeutumisen oletustapauksissa, viitteessä /68/ esitettyihin parametreihin pohjautuen, jotka puolestaan on esitetty taulukossa 4.15. Käytetyillä oletuksilla salaojituskerroksen läpäisevyys putoaa (vakio kalsiumkonsentraatio) kymmenesosaan 60...130 vuodessa ja kahdella dekadilla noin 100...220 vuodessa.



Kuva 5.40. Salaojituskerroksen vedenläpäisevyyden muuttuminen eri oletuksia käyttäen.

Taulukko 5.15. Salaojituskerroksen tukkeutumisen laskennassa käytetyt parametrit.

Materiaalin raekoko	50	mm
C alku	1650	mg/l
T ₁	10	vuotta
C loppu	200	mg/l
T ₂	50	vuotta
L	25	m
a	5	m
f _{Ca}	0.3	
ρ _{Ca}	1500	kg/m ³
B	0.5	m
q ₀	0.2	m ³ /v

LandSim -ohjelman manuaalissa salaojituskerroksen tukkeutuminen on esitetty otettavaksi huomioon käyttämällä salaojituskerroksella 2...4 kertaluokkaa pienempää vedenläpäisevyyttä eli arvoa $1 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-5}$ m/s, kuin alkuperäisellä paikoilleen asetetulla salaojituskerroksella (manuaalissa esitetty tavoite Englannissa $\sim 1 \cdot 10^{-2}$ ja läpäisevyys käytännössä on $\sim 1 \cdot 10^{-1}$ m/s). Salaojien tukkeutumistodennäköisyydeksi, joka ohjelmassa on myös mahdollista huomioida, kaatopaikan sulkemisvaiheessa on LandSim -ohjelman manuaalissa esitetty asiantuntija-arvioon perustuvaa arvoa 0.2. Yli 30 vuotta mallinnettaessa tukkeutumistodennäköisyys saattaa olla 0.5, eli jo joka toinen salaoja on tukkeutunut.

Geosynteettisten tuotteiden käyttöikä

Geomembraani toimii nykyisissä kaatopaikoissa oleellisena tiivistävänä elementtinä. Geomembraanin käyttöikään vaikuttavat useat tekijät. Näitä ovat mm.

- geomembraanin materiaali,
- geomembraanissa käytetyt vanhentumista ja heikkenemistä hidastavat lisäaineet
- geomembraaniin kohdistuvat erityyppiset rasitukset.

Jo aikaisemmin (luvussa 2.2) on käsitelty mm. harmonisoitujen tuotestandardien vaatimuksia, joilla pyritään osaltaan varmistamaan tuotteen soveltuvuus käyttötarkoitukseensa.

Tässä yhteydessä käsitellään tarkemmin ensisijaisesti geomembraanien suojausta puhkaisua vastaan ja geomembraanin käyttöikään liittyviä tekijöitä. HDPE on tunnetuin ja käytetyin kaatopaikkakalvojen valmistusmateriaali lähinnä hyvän kemiallisen kestäväyhtensä johdosta. HDPE:tä käytetään usein myös salaojitusjärjestelmien putkimateriaalina. Tämän johdosta HDPE:stä on myös runsaasti tutkimustuloksia.

Geomembraaneita valmistetaan muistakin polymeereistä kuin polyeteenistä ja seuraavassa esitetyt periaatteet "pätevät" myös muista materiaaleista valmistetuilla geomembraaneilla, vaikkeivät tulokset olekaan välttämättä suoraan sovellettavissa. Muista polymeereistä valmistetut geomembraanit saattavat tapauskohtaisesti soveltua HDPE:tä paremminkin tiettyjen ominaisuuksiensa, esim. muodonmuutosominaisuuksiensa puolesta, kaatopaikkarakenteissa käytettäviksi. Esimerkiksi alhaisempitiheykset polyeteenit (kuten LDPE) omaavat myös HDPE:tä paremmat venymisominaisuudet.

Geomembraanin puhkaistuminen

Geomembraanien puhkaistumisen estämiseksi käytetään geomembraanin päällä paksua suojageotekstiiliä sen yläpuolella olevaa maa-ainesta (salaojakerros) vastaan. Suojageotekstiilin valinnassa käytetään Yhdysvalloissa ja Euroopassa erityyppistä lähestymistapaa. Yhdysvalloissa suojageotekstiilin valinta perustuu ajatukseen estää geomembraanissa yli myötörajan tapahtuvat venymät. Euroopassa ajatuksena on sen sijaan rajoittaa geomembraanissa esiintyvät paikalliset venymät alle 0.25 % tason. Lähestymistapojen erilaisuudesta johtuen Yhdysvalloissa käytetään Eurooppaan verrattuna ohuita suojageotekstiileitä (250...600 g/m², raakoosta riippuen /7/). Eurooppalaisen ajattelun pohjalta suojageotekstiilien paksuudet ovat nykyisin yli 2000 g/m² (Saksassa jopa 3000 g/m², vaikka vain pyörityneet rakeet sallitaan /7/). Geomembraanin aiheutuva paikallinen venymä voidaan määrittää kokeellisesti (esim. Saksassa käytössä, BAM) /8/.

Esim. internetissä esitetyt käytössä olevat suojageotekstiilien mitoitusohjelmat perustuvat usein Yhdysvalloissa käytössä olevaan ajattelutapaan. Tähän ajattelutapaan kuuluu myös varmuuskertoimen käyttö. Varmuuskerroin on tapauskohtainen, mutta sen tulee olla suurempi kuin 2.5 /7/. Lähinnä lähestymistapojen erilaisuudesta johtuen Yhdysvalloissa käytössä olevalla varmuuskertoimella mitattuna eurooppalainen lähestymistapa saattaa johtaa jopa yli 6-kertaiseen varmuuteen jo varmuuskerrointa käyttäen laskettuun geotekstiilin paksuuteen Yhdysvalloissa käytettyyn tapaan nähden. Yhdysvaltalaisessa ajattelutavassa varmuuskerroin on kuitenkin paikka- / tapauskohtainen (site-specific).

Kokeellisessa suojauskerroksen tehokkuuden määrittämisessä keinotekoisien pohjamaan päällä olevaa geomembraania rasitetaan 1.5 -kertaisella kaatopaikan täytteestä aiheutuvalla kuormalla 40 °C:n lämpötilassa 1000 h. Salaojituserroksen materiaalista geomembraaniin aiheutuvat venymät mitataan geomembraanin alle sijoitetusta taipuisasta metallilevystä tai yksinkertaistetussa testissä geomembraanin pinta arvioidaan silmämääräisesti näytteen ilmastoinnin jälkeen /32/.

Etenkin uusien tyyppihyväksyttävien (mineraaliainestiiiviste)materiaalien osalta, jos ne poikkeavat tyypiltään aikaisemmin pohjarakenteessa käytettävistä materiaaleista, tulisi tarvittava geomembraanin suojageotekstiilin (ja / tai suojauskerroksen) arviointi suorittaa kokeellisesti käyttäen pohjamaana kyseessä olevaa materiaalia.

Suojageotekstiilin kestävyys vaikuttaa luonnollisesti myös kemialliset rasitukset ja mikro-organismien sekä kasvien juurien ja eläinten, lähinnä jyrsijöiden kestävyys, jotka Saksassa käytössä olevan geomembraanien sertifiointijärjestelmän /32/ mukaan on määritettävä.

Geomembraanien käyttöikä

Kirjallisuudessa geomembraanien kestoikälle on esitetty hyvinkin eri suuruisia arvioita olosuhteista riippuen. Seuraavat kirjallisuudessa esitetyt näkemykset geomembraanien kestoikästä on kirjattu mm. viitteeseen /31/:

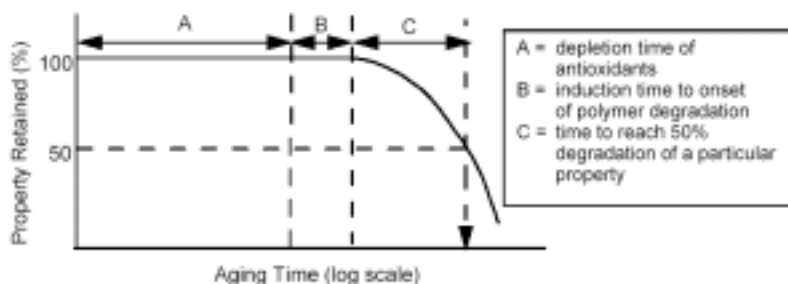
- laboratoriokokeisiin perustuen HDPE voi kestää 1000 vuotta, jos geomembraani ei altistu ultravioletisäteilylle
- 250...900 vuotta tuotteista ja olosuhteista riippuen
- 20°C lämpötilassa hapetta ollessa tarjolla yli 300 vuotta geomembraanityypistä riippuen - liitosten läheisissä saumoissa, nurkissa ja luiskien alaosissa kestoikä saattaa kuitenkin olla vain kolmasosa tästä
- HDPE -kalvo kestää 50...100 vuotta "pahimmissa olosuhteissa" (suotoveden ja hapen vaikutuksen alla 40°C lämpötilassa).

Seuraavassa on käsitelty HDPE:stä valmistettujen geomembraanien kestoikää melko laajaan laboratoriotutkimukseen perustuen (/7/, /45/).

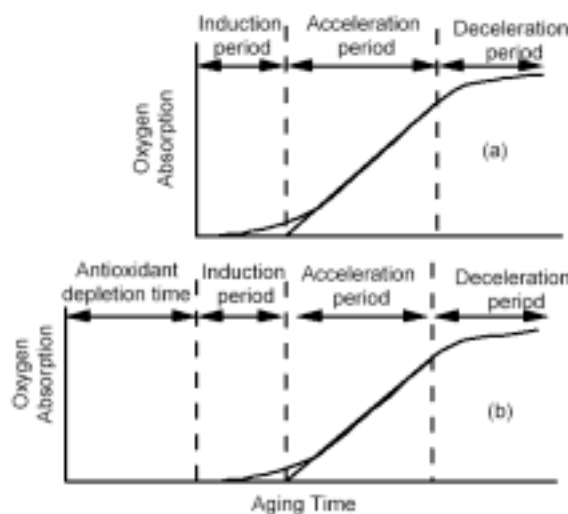
HDPE:stä valmistetuissa geomembraaneissa on n. 97 % polyeteeniä, hiilimustaa n. 2 % ja antioksidantteja n. 1 %. Geomembraanin pitkäaikainen vanheneminen tapahtuu kolmessa eri vaiheessa, jotka ovat (kuva 5.41):

- antioksidanttien loppuunkuluminen
- induktioaika ja
- ominaisuuksien heikentymisaika (venymä, jäykkyys, lujuus jne. - tässä aika vastaa ominaisuuden alentumista 50 %:n tasolle) /7/.

Kuvan 5.41 vanhentumisvaiheet ovat tyypillisiä myös LDPE:stä ja taipuisasta PP:stä valmistetuille geomembraaneille. Kuvassa 5.42 on esitetty antioksidantteja sisältämättömän ja sisältävän materiaalin käyttäytymisen erot.



Kuva 5.41. HDPE-geomembraanin kemiallisen ikääntymisen vaiheet /45/.



Kuva 5.42. Antioksidantteja sisältämättömän (a) ja sisältävän materiaalin (b) käyttäytymisen vaiheet /45/.

Antioksidantit ovat tärkeitä vanhentumisprosessissa, koska ne reagoivat polymeeriin tunkeutuvan hapen kanssa ja siten estävät hapettumista. Kun ne kuluvat loppuun A vaiheen lopussa, alkaa induktioaika. Induktioaika edustaa mitattavissa olevaa oksidaation aiheuttamaa polymeeriketjujen katkeamista. Oksidaatioprosessi jatkuu vaiheessa C siten, että mekaaniset ominaisuudet alkavat muuttua. Tämä näkyy tyypillisimmin murto- ja venymäarvoissa. Tämä tarkoittaa materiaalin muuttumista joustavasta hauraaksi ja juuri haurastuminen ilmentää heikentymisprosessia. Käyttäytyminen on hyvin voimakkaasti lämpötilasta riippuva. Polymeeriteknologiassa 50 % muutosta ominaisuuksissa pidetään huomattavana ja sen on esitetty tässä suhteessa tarkoittavan materiaalin käyttöiän loppumisesta /7/.

Viitteissä /7/ ja /45/ on esitetty käynnissä olevassa pitkäaikaisessa tutkimuksessa geomembraaneilla saatuja tuloksia. Näytteitä on inkuboitu joko kokonaan vedessä ilman kuormitusta tai toiselta puolelta vedessä toiselta puolelta ilmassa paineen (260 kPa) alaisina 85, 75, 65 ja 55°C lämpötiloissa aina 30 kuukauteen saakka. Tämän jälkeen näyt-

teistä on määritetty OIT (Oxidation Inductive Time) kahdella eri ASTM-standardin mukaisella menetelmällä. OIT-aika riippuu käytetyn antioksidantin määrästä ja tyypistä. Arrheniuksen kemiallisten reaktioiden nopeuden ja lämpötilan vaikutuksen yhdistävällä menettelyllä mittaustuloksista voidaan määrittää ko. vaiheen (vaihe A) kesto aika tietyssä lämpötilassa, joksi em. viitteissä on valittu kolmessa Yhdysvaltain osavaltiossa kerättyyn dataan pohjautuen geomembraanin tyypillinen lämpötila 20°C. Vaiheen A kestoksi on näin saatu 192...196 vuotta.

Vaiheen B kesto arvioitaessa on käytetty hyväksi vanhoista, antioksidanteja sisältämättömistä (n. 25 vuotta vanhoja kaatopaikoista kerättyjä maitotölkkejä yms.) näytteistä kerättyä tietoa. Tämän tiedon pohjalta vaiheen B kestoksi on arvioitu n. 20 vuotta.

Kolmannen vaiheen kestoajan määrittämisessä ei em. tutkimuksen laboratorioskokeissa käytetty aika ollut riittävä heikentymisen esiinsaamiseksi, joten sen arvioinnissa on käytetty polyeteeniputkista olemassa olevaa dataa. Lämpötiloissa 70...105°C suoritettujen putkikokeiden tulosten perusteella kolmannen vaiheen kestoksi em. Arrheniuksen menetelmää käyttäen on ekstrapoloitu 746 vuotta /7/.

Kolmen heikentymisvaiheen kestoajat yhteen laskien on siten saatu tietyn reseptin omaavalle 1.5 mm:n paksuiselle kuormitetulle HDPE -kalvolle tilanteessa, jossa se on toiselta puolelta vesikontaktissa ja toiselta puolelta ilmakontaktissa, 20°C lämpötilassa kestoiksi lähes tuhat vuotta /7/. Vastaavasti 30°C lämpötilaan laskettuna kesto aika lyhenee viitteen /7/ tiedoilla laskettuna n. 370 vuoteen, joten lämpötilalla on erittäin suuri vaikutus kestoikään. Viimeisten Yhdysvaltalaisten tutkimustietojen mukaan lämpötila uudehkojen kaatopaikkojen tiivistysrakenteissa on luokkaa 20...30°C, mutta vuotuinen kasvu edelleen 2...3°C luokkaa /104/.

Molemmilta puoliltaan vesikontaktissa ilman kuormitusta olevilla näytteillä vaiheen A kesto oli lyhyempi 41...44 vuotta / 25°C, kun sen pituus toispuolisessa vesikontaktissa kuormituksen alla oli 126...128 vuotta / 25°C /7/.

Em. kokeet eivät ole sisältäneet suotovesirasitusta. Vahvat suotovedet voivat suurentaa antioksidanttien loppuun kulumisen nopeutta. Tulosten perusteella on arvioitu HDPE-geomembraanien kestävän hyvinkin monissa ympäristösäädöksissä esitetyn yli 30 vuoden jälkihoitoajan kestoikävaatimuksen ilman mitattavissa olevaa mekaanisten ominaisuuksien heikentymistä. Useiden satojen vuosienkin käyttöä saavuttaminen on mahdollista /7/.

Edellä esitetystä on havaittavissa, että geomembraanin koostumuksen ohella kestoikään vaikuttavat etenkin lämpötila, suotovesi / kemikaalit ja geomembraanin kuormitus ja altistumistapa (yksi-/kaksipuolinen rasitus). Kaikkien rasitusten yhteisvaikutusta ei vielä kunnolla tunneta.

Edellä on käsitelty geomembraanin käyttöikää vain oksidaation avulla. Kestoikään vaikuttaa kuitenkin myös muita tekijöitä, eikä asianmukaisen suunnittelun osuuttakaan saa unohtaa. Harmonisoiduissa sovellusstandardissa prEN 13493 esitetyn oksidaatiovastuksen määrittämisproseduurin tarkoituksena on seuloa materiaalit vähintään 25 vuoden kestoikää silmälläpitäen. Kestoikää ei koetuloksen perusteella sellaisenaan voida kuitenkaan arvioida. Kestävyyden osoittamiseen kuuluu harmonisoiduissa standardeissa myös mahdollisesti ilmastokestävyys, mikro-organismien kestävyys, ympäristön aiheuttaman jännityssäröilyn kestävyys-, liukenemiskestävyys- ja kemiallisten aineiden kestävyyskokeet sekä kuivumis-kastumis-, jäätyminen-sulamis- ja juurientunkeutumiskestävyyskokeet. Näiden osalta vaatimuksena on, että (yleensä) tuotteen veto-ominaisuudet säilyttävät vähintään 75 % (tai muutos pienempi kuin ± 25 %) tason kokeen jälkeen. Saksassa yleisessä käytössä olevan kaatopaikkojen geomembraanien sertifiointimenettelyn /11/ ohjeissa vaaditaan geomembraanilta pitkäaikaiskestävyyskokeessa yhdistetyillä rasituksilla (putkinäytteet) koetuloksista ekstrapoloitua yli 50 vuoden kestoikää (kuormitus 4 N/mm^2 ja ekstrapolointilämpötila 40°C) tai sitä vastaavien ominaisuuksien osoittamista jännityssäröilyn- ja oksidaatiovastuksen määrittämissä kokeissa. Kaikkiaan hyväksymisohjelma on hyvin laaja ja se sisältää selvät numeroarvoiset vaatimukset. Vaatimusten suhteen on huomattava, että geomembraanilta vaadittava minimipaksuus on 2.5 mm.

LandSim -ohjelmassa geomembraanin käyttöiän vaikutus käsitellään geomembraanissa olevien vikojen määränä. Manuaalissa on esitetty eri lähteisiin pohjautuvien pienempien ja suurempien reikien sekä repeämien ja muiden vikojen esiintymistiheyksiä. Näiden määrää voidaan merkittävästi vähentää laadunvalvonnalla, reikien osalta jopa kolmas-kymmenesosaan ja repeämien osalta viidesosaan. Salaojituserroksen asennuksen jälkeenkin suoritettujen vuotokohtien paikannuksen ja korjauksen jälkeen vikojen maksimimääräksi on esitetty vielä 13 pienempää ja 3 suurempaa reikää ja 1 repeämä (kuhunkin pinta-alaan liittyvät määritelmät on esitetty käyttöikää käsittelevässä luvussa 5.2.4). Tarkoituksena ei niinkään ole tarkastella geomembraania heti asennuksen tai laadunvalvonnan jälkeen, vaan koko kaatopaikan käyttöiän aikana. Ohjelma huomioi reikien määrän kehityksen (=kasvun; tarvittaessa nolasta alkaen) sen ajan kuluessa, jolloin geomembraanin heikentyminen ei vielä ole alkanut (oletusasetus 150 vuotta). Tämän ajan jälkeen käyttöikä vaikuttavana tekijänä (geomembraanin heikentymisenä ajanmyötä) käyttäjä määrittää sen ajanjakson pituuden, jolloin geomembraanissa olevien vikojen määrä kaksinkertaistuu. Manuaalissa ja ohjelmassa esitetyt vikajakautumat koskevat ainoastaan HDPE-materiaalia.

Pintarakenteessa mahdollisesti käytettävälle geomembraanille (LLDPE, Linear Low Density Polyethylene, peittorakenteiden standardimateriaali Englannissa) geomembraanin heikentymisen alkamisajankohta on ohjelman perusasetuksissa 250 vuotta ja hajomisajan kohta 1000 vuotta. Tällä aikavälillä peitterakenteen läpäisevä vesimäärä interpoloidaan (LandSim-mallissa) peitterakenteen suunnitellun läpäisyn ja peitteen pintaan

imeytyvän vesimäärän välillä. Periaatteessa tällä menettelyllä voidaan tarvittaessa kuvata myös mineraalisen tiivisterakenteen vedenläpäisevyyden heikentymistä ajan myötä, jos painumasta aiheutuvien muodonmuutosten vaikutus vedenläpäisevyyden arvioidaan. Ohjelmassa annetaan vain geomembraanin sisältävän peittorakenteen laskennallinen vedenläpäisevyys geomembraanin heikentymisen alkuun asti (vain mineraalieristeen painumisesta aiheutuvia vaurioita kuvattaessa "geomembraanin" heikentymisaika alkaa tällöin esim. $t=0$ v) ja lopussa ("geomembraanin hajoamisajankohta", painumavaikutusten päättymisaika esim. 50 v).

Geotekstiilien ja muoviputkien käyttöikä

Geomembraanien suojana käytettävien geotekstiilien pitkäaikaiskestävyydestä on olemassa suhteellisen vähän tietoa. Samantapaisia käyttöiän määrittämiseen tähtäviä tutkimuksia kuin geomembraaneillakin on kuitenkin meneillään /7/. Jo nykyisellään tiedetään etenkin ultraviolettivalon heikentävän geotekstiilejä nopeasti. Geotekstiili on syytä peittää nopeasti (2...4 viikon kuluessa; 150 mm maakerros riittää) /7/.

Ennenkuin geotekstiilien tarkemmasta käyttöiästä pitkäaikaisissa infrarakenteissa on saatu lisätietoa, on suositeltavaa noudattaa "eurooppalaista" konservatiivista lähestymistapaa. Tässä menettelyssä geotekstiilin suojaustehokkuutta on vielä todennäköisesti jäljellä odotettua suuremmisakin lämpötiloissa ja suotovesirasituksessa. Viitteessä /31/ esitetyn tutkimustiedon mukaan HDPE:stä tai polypropyleenista valmistettujen 1200 g/m² painavien kuitukankaiden suojaustehokkuus laskee kolmasosaan 1000 h aikana 40°C lämpötilassa paikallisen venymän suhteen mitattuna ja kuormitettuna 16/32 mm salaojituskerros materiaalilla 562 kPa kuormalla. Suhteellisen ohuiden geotekstiilien (200...1000 g/m²; 8 erityyppistä polyesteristä ja polypropyleenista valmistettua non woven -geotekstiiliä) veto-ominaisuudet suotovesirasituksessa (suotovesi korealaisista "märkäkaatopaikoista") heikentyivät puolestaan keskimäärin luokkaa 25 % (180 vrk, 25...50°C) lähes kaikilla näytteillä, suurimpien heikennysten ollessa 70%:n luokkaa alhaisissakin lämpötiloissa. Joillakin näytteillä ominaisuuksia ei pystytty enää mittaamaan 50...80°C lämpötilassa /38/.

Kaatopaikoissa käytetään usein salaojaputkina HDPE:stä valmistettuja putkia, joten tällaisten putkien kestoikää pitäisi periaatteessa olla mahdollista arvioida vastaavasta materiaalista valmistettujen geomembraanien kestoian avulla. Putkien kestoikää silmälläpitäen rasitukset voivat kuitenkin olla suuremmat ja johtaa putkien muodonmuutoksiin. Tämän johdosta lyhytaikaisen kestävyuden ohella putkien pitkäaikaismitoitus on syytä tarkistaa. Putken jäykkyys pitkäaikaistilanteessa saattaa olla 1/10...1/5 lyhytaikaisen tilanteen jäykkyyydestä. Aihetta on käsitelty mm. viitteissä /7/ ja /46/.

Yhteenveto kaatopaikoissa käytettävien materiaalien turmeltumisen huomioimisesta

Yhteenvetona kaatopaikkarakenteiden käyttöikään vaikuttavista tekijöistä voidaan todeta, että olemassa olevan tiedon mukaan nykyisillä kaatopaikassa käytävillä materiaaleilla sinällään on mahdollista saavuttaa hyvinkin pitkä käyttöikä. Kaikkia käyttöikään vaikuttavia tekijöitä ei kuitenkaan ole vielä riittävästi selvitetty ja nimenomaan paikka-kohtaiset tekijät, kuten esimerkiksi kaatopaikassa vaikuttava suotoveden koostumus ja lämpötila, joita ei aina voida tarkasti ennakoida, saattavat vaikuttaa kestoikään suuresti. Kestoikään liittyvistä epävarmuustekijöistä huolimatta yhdistelmärakenteiden käyttö kaatopaikoissa on nykyisin parasta käytettävissä olevaa tekniikkaa sekä lyhyellä että pitkällä aikavälillä.

Edellä esitetyillä menettelyillä käyttöiän määrittämistä toimivuusvaatimusten suhteen voidaan lähestyä kahdella toisistaan hieman poikkeavalla tavalla.

Ensimmäisessä vaihtoehdossa (kun tarkastellaan kaatopaikasta pohjaeristeen läpi ympäristöön vapautuvia vesimääriä vesitasemalleilla) huomioidaan parhaan mahdollisen arvion mukaan eri ajankohtina kaatopaikan eri osien käyttäytyminen rasitukset huomioituna (pinta- ja pohjarakenteen vedenläpäisevyys, salaojituskerroksen vedenläpäisevyys, salaojien toimivuus ja geomembraanien reiät) ja lasketaan läpäisevä vesimäärä aikaväleittäin. Yksinkertaisilla taulukkolaskentamenettelyillä voidaan tällöin tarkastella em. menettelyllä saadun vedenpainekorkeuden avulla esim. kaatopaikan pohjan yhdistelmärakenteen läpi kulkeutuvan haitta-aineen vuota vakio-tilanteessa eri mineraaliaineksen läpäisevyyksiä ja reikätiheyksiä käytettäessä.

Toisessa tapauksessa (LandSim -ohjelmalla; lähinnä kulkeutumista tarkasteltaessa) huomioidaan pohjatiivisteessä suotoveden johdosta mahdollisesti tapahtuvat muutokset jo alkuperäisen vedenläpäisevyyden vaihtelualuetta valittaessa sekä huomioidaan geomembraanissa ajanmyötä tapahtuva heikentyminen ja luotetaan kaatopaikkaa hoidettavan tietyn aikaa tiettyjen tekijöiden (pintaeristeen läpäisevyys, salaojituksen toiminta) hallinnassa pitämiseksi. Kaatopaikan hydraulisia ominaisuuksia LandSim -ohjelmalla arvioitaessa huomioidaan salaojituskerroksen materiaalin vaihtelun alueen valinnassa tukkeutumisen mahdollisuus ja salaojien rikkoontumisriski. LandSim -ohjelmaakin käytettäessä voidaan hyödyntää edellä esitettyjä analyttisiä periaatteita parametrien vaihtelun alueita määritettäessä.

5.4 LandSim -ohjelman esimerkkilaskennat

Tarkastelutapaukset

Seuraavassa on kuvattu LandSim-ohjelmaa ja sen tulostuksia esimerkkien avulla. Esimerkeissä on suoritettu kaikkiaan 5 erillistä laskelmaa pohjasuhteiltaan oletetulle kaatopaikalle. Tarkasteluissa on keskitytty ainoastaan kulkeutumistarkasteluihin, vaikka LandSim -ohjelmalla voidaan tarkastella myös salaojituksen toimivuutta.

Lähtökohdat:

- Kaatopaikan pinta-alaksi on oletettu 1 hehtaari.
- Esimerkkikaatopaikkaa täytetään 20 vuotta ja sen jälkeen siihen tehdään pintarakente.
- Ennen pintarakenteen tekoa puolet sadannasta, keskimäärin 350 mm/v/m^2 (minimissään 250 mm/v/m^2 ja maksimissaan 450 mm/v/m^2) suotautuu jätetäyttöön.
- Ainoastaan mineraaliainekeksen tiivisteeseen sisältyvän (ei siis sisällä geomembraania) pintarakenteen teon jälkeen sen läpi suotautuu keskimäärin 63 mm/v/m^2 (minimissään 35 mm/v/m^2 ja maksimissaan 126 mm/v/m^2).
- Keskimääräinen pintarakenteen läpi suotautuva vesimäärä on 9 % sadannasta, minimivesimäärä 5 % ja maksimivesimäärä kaksinkertainen keskimääräiseen suotautuvaan vesimäärään nähden.
- Keskimääräinen suotautuva vesimäärä on valittu normaalin (ilman geomembraania olevan) mineraalisen pohjatiivisteeseen läpäisevän vesimäärän suuruiseksi. Tämä vastaa myös pintatiivisteeseen läpäisevää vesimäärää jos $k = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ ja tiivisteeseen pakkaus on 0.5 m ja $h_w = 0.5 \text{ m}$.
- Peittorakenteen vedenläpäisevyyden arvo ja yläraja on valittu suurehkoksi, koska LandSim -ohjelmassa voidaan mallintaa mineraalisen pintaeristeen mahdollista ajan myötä tapahtuvaa kasvua, kuten ei myöskään mineraalisen pohjaeristeen vedenläpäisevyyden kasvua.

Muihin laskennassa käytettäviin parametreihin liittyvä hajonta (mahdolliset vaihteluvälit) on esitetty jäljempänä laskelmiin liittyvien lähtötietojen yhteydessä.

- Jätetäytön paksuudeksi on oletettu 15 m.
- Kaatopaikan pohjassa olevaa salaojituskerrosta ei ole tarpeen kuvata tarkasteluissa, joissa suotovedenpinnan korkeus annetaan, kuten tässä tapauksessa. Suotovedenpinnan todennäköisimpänä korkeutena on käytetty 1 m.

- Pohjarakenne koostuu geomembraanista ja sen alla olevasta mineraaliaineksista tiivistekerroksesta.
- Geomembraaniin oletettujen vikojen esiintymistiheys on esitetty jäljempänä laskelmiin liittyvien lähtötietojen yhteydessä.
- Geomembraanissa esiintyvien vikojen oletetaan pinta-alaltaan kaksinkertaistuvan 100 vuoden aikana sen jälkeen, kun geomembraanissa alkaa tapahtua heikentymistä 100 vuoden kuluttua kaatopaikan täytön aloittamisesta.
- Ohjelma ei tarvitse lähtötietona geomembraanin paksuutta, eikä sitä voida myöskään antaa.
- Mineraaliaineksisen tiivisteiden keskimääräinen vedenläpäisevyys on $1 \cdot 10^{-9}$ m/s.
- LandSim -ohjelmassa ei ole mahdollista huomioida mineraaliaineksessa ajanmyötä tapahtuvaa turmeltumista.
- Pohjarakenteen alla on ainoastaan ohut, osittain kyllästynyt maakerros (0.5 m, $k=1 \cdot 10^{-4}$ m/s) ja sen alla kyllästynyt ohut maakerros (0.5 m, $k=1 \cdot 10^{-4}$ m/s) ennen vettäjohtavaa akviferikerrosta (paksuus n. 2 m, $k=1 \cdot 10^{-4}$ m/s, $i=0.01$).
- Tarkastelupiste (luvanmukaisuuden tarkistus) sijaitsee 500...600 metrin päässä kaatopaikasta.

Kaikissa esimerkin tarkastelutapauksissa on oletettu suotovedenpinnan korkeuden pohjatiivisteiden päällä olevan 1.0 m. Lyhyellä aikavälillä, salaojien toimiessa, tämä on todennäköisesti ankara oletus. Pidemmällä aikavälillä, salaojien tukkeutuessa ja rikkoontuessa suotovedenpinnasta tehty oletus voi olla pahastikin aliarvioiva. Pitkällä aikavälillä suotoveden pitoisuudet voivat kuitenkin alentua, mikä vähentää haitta-aineen pitoisuutta pohjavedessä.

Esimerkin tarkastelutapauksissa haitta-aineena on käytetty ainoastaan kloridia sen suuresta diffuusionopeudesta ja pidättymättömyydestä johtuen. Myös LandSim -ohjelman manuaalissa on esitetty käyttäväksi kloridia aineena, joka ilmaisee milloin ensimmäiset vaikutukset kaatopaikasta voivat olla havaittavissa ympäristössä. Kloridille on esitetty talousveden laatusuosituksena 250 mg/l (Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista, 19.5.2000, Laatusuositukset, tavoitteelliset enimmäisarvot). Saman suosituksen mukaan vesijohtomateriaalien syöpymisen ehkäisemiseksi kloridipitoisuuden tulisi olla alle 25 mg/l.

LandSim -ohjelman manuaalissa esitetään haitta-aineiden pitoisuuksilla käytettäväksi yleensä logaritmista kolmiojakautumaa. Tavallista kolmiojakautumaa voidaan kuitenkin käyttää, jos jakautuma tunnetaan hyvin. Näissä tarkasteluissa kloridilla on käytetty kolmionmallista jakautumaa.

- Tarkastelutapauksissa suotoveden sisältämää kloridimäärää on vaihdeltu.
- Kaatopaikan pohjarakennetta on tarkasteltu joko ilman geomembraania tai yleisimmin geomembraanin kanssa.
- Lähinnä käyttöikään liittyvien tarkastelujen yhtenä muuttuja on käytetty kaatopaikan jälkihoitoaikaa, jolla on erittäin suuri vaikutus saataviin tuloksiin. Jälkihoitoaika tarkoittaa tässä sitä aikaa, jona salaojitusjärjestelmästä tulevat vedet johdetaan käsiteltäväksi ja jona aikana salaojitusjärjestelmä toimii.
- Kun salaojitusjärjestelmä ei enää toimi - eli jälkihoitoaika on loppunut - suotoveden pinta alkaa kaatopaikassa nousta. Suotoveden pinnan korkeudelle voidaan antaa maksimikorkeus. Tässä maksimikorkeutena on käytetty jätetätön korkeutta. Tämän maksimikorkeuden saavuttamisen jälkeen suotovesi alkaa valua ympäristöön.
- Jälkihoitoajan päättymisajankohtana (salaojituksen toimivuusajalla) on tässä käytetty kolmea arvoa: 1000 vuotta, 50 vuotta ja 100 vuotta. Arvoa 1000 vuotta ei niinkään ole käytetty "varmana" jälkihoitoajan päättymisaikana, vaan pikemminkin antamaan käsityksen haitta-aineiden kulkeutumisesta vakio-olosuhteissa. Sen sijaan 100 vuotta saattaa jälkihoitoajan päättymisajankohtana nykyisellään olla realistinen salaojienkin toimivuuden kannalta ja 50 vuoden jälkihoitoajan päättymisajankohta puolestaan kuvanee jo jonkinasteista skenaariota: esimerkiksi salaojitus joko lakkaa toimimasta tukkeutumisen putkien rikkoutumisen tms. muun sellaisen johdosta tai kaatopaikka joutuu muista syistä todella oman onnensa nojaan 30 vuoden kuluttua kaatopaikan sulkemisesta.

Tarkastelutapaukset ovat seuraavat:

1. Kloridin pitoisuus vaihtelee välillä 4.8 mg/l...1800 mg/l (kolmiojakautuma), todennäköisimmän arvon ollessa 220 mg/l (arvot /100/ ja /55/), kaatopaikan pohjarakenteen tiivistävänä rakenneosana on ainoastaan mineraaliainestiiviste.
2. Kloridin pitoisuus vaihtelee välillä 4.8 mg/l...1800 mg/l, todennäköisimmän arvon ollessa 631 mg/l (arvot /100/, painotettu suurien kaatopaikkojen pitoisuuksia), kaatopaikan pohjarakenteen tiivistävänä rakenneosana on tässäkin ainoastaan mineraaliainestiiviste.
3. Kloridin pitoisuus kuten esimerkkitapauksessa 2, kaatopaikan pohjarakenteessa on tiivistävänä elementtinä mineraaliainestisen tiivisteiden ohella myös geomembraani. Geomembraanissa on lähtötilanteessa pieniä reikiä 5 kpl (pinta-ala 0.1...5 mm²), suurempia reikiä 5 kappaletta (pinta-ala 5...100 mm²) ja 0 kappaletta repeämiä (pinta-ala 100...10 000 mm²). Reikien lukumäärät pysyvät samoina 100 vuoteen asti, repeäminen määrä kasvaa sen sijaan 10:een 100 vuoden aikana. Tämän jälkeen geomembraanin vikojen määrä (pinta-ala) kaksinkertaistuu aina 100 vuodessa.

4. Kloridin pitoisuus ja muut arvot kuten esimerkkitapauksessa 3, eristeessä mukana myös geomembraani. Kaatopaikan jälkihoitoaika päättyy ajankohtana 50 vuotta (=täyttöaika 20 v + jälkihoitoaika 30 v).
5. Kloridin pitoisuus ja muut arvot kuten esimerkkitapauksissa 3 ja 4, eristeessä mukana myös geomembraani. Kaatopaikan jälkihoitoaika päättyy ajankohtana 100 vuotta (=täyttöaika 20 v + jälkihoitoaika 80 v).

Tarkastelutapauksissa 1...3 suotoveden pinta pysyy siis vakiotasolla käytännöllisesti katsottuna jatkuvasti (vakiotaso 1000 vuoteen asti; tuloksia tarkastellaan yleensä huomattavasti lyhyemmällä ajanjaksolla). Tarkastelutapauksissa 4 ja 5 kaatopaikan täyttö- ja jälkihoitoaika on joko yhteensä 50 vuotta tai 100 vuotta (suotoveden pinnan taso pysyy keskimäärin tasolla 1 metri tämän ajan ja alkaa sen jälkeen nousta pintarakenteen läpi suotautuvan veden johdosta). LandSim -ohjelma laskee tulokset automaattisesti aina 20 000 vuoteen saakka.

Tarkastelutapauksen 3 lähtöarvot

LandSim -ohjelman laskentaesimerkin tarkastelutapauksen 3 oleelliset lähtötiedot (lähtötiedot riippuvat osittain käytetystä mallinnustavasta) on esitetty alla. Lähtötietoja on tarpeenmukaan myös selitetty. Oleelliset osat ovat

- Laskennan asetukset - Calculation Settings
- Haitta-aineen taustapitoisuudet - Background Concentration of Contaminants
- Kaatopaikan eri ikäiset / eri paikoissa olevat vaiheet - Phase
- Peittorakenteen suotautumiseen liittyvät tiedot - Infiltration Information
- Kaatopaikan laskentasolut - Cell dimensions
- Haitta-aineen lähtöpitoisuudet - Source concentrations of contaminants
- Kuivatuskerroksen tiedot - Drainage Information
- Eristerakenteen tiedot - Barrier Information
- Osittainkyllästyneen ja kyllästyneen kerroksen tiedot sekä akviferin tiedot - Pathway parameters

Lähtöarvoissa jakautumatyyppi ja sen arvot esitetään seuraavasti: JAKAUTUMATYYPPI (pienin arvo, todennäköisin arvo, maksimiarvo).

Calculation Settings

- Number of iterations: 1001 (1001 laskentaa lähtöarvoja varioiden; 1 % ja 99 % todennäköisyyksien laskennan edellytys)
- Results calculated using sampled PDFs (PDF = Probability Density Function)
- Full Calculation (suoritetaan sekä hydrauliset laskennat että kulkeutumistarkastelut)

Clay Liner:

- Unsaturated pathway:
- Saturated Vertical Pathway:
- Aquifer Pathway:
- Unretarded values used for simulation - pidättymistä ei huomioida
- No Biodegration - biohajoamista ei huomioida

Timeslices at: 3, 10, 30, 100 (valitut numerotulostusten ajankohdat, vuosia)

Background Concentration of Contaminants

- ei huomioida taustapitoisuuksia pohjavedessä

Phase: Phase 1 (mahdollista tarkastella useampia kaatopaikan osia samassa tarkastelussa – tässä vain yksi)

Infiltration Information

- Cap desing infiltration (mm/year): TRIANGULAR(35, 63,126) – oletetaan että peittorakenteen läpäisee pienimmillään n. 5 % sadannasta eli 35 mm, keskimäärin 63 mm ja suurimmillaan 126 mm – lähtöarvoissa pyritty osaltaan huomioimaan pitkä tarkasteluaika, koska peittorakenteen läpäisevyyden kasvua eli turmeltumista ajan mittaan ei voida huomioida
- Infiltration to waste (mm/year): TRIANGULAR(250,350,450) – peittämätön jäte kaatopaikan täyttöaikana – oletetaan, että noin puolet sadannasta imeytyy täyttöön
- End of filling (years from start of disposal): 20 – peittorakenne rakennetaan 20 vuoden täyttöajan jälkeen
- Duration of management controll (years from the start of disposal): 1000 (tässä laskennassa; laskettu myös 50 ja 100 vuodella)

Cell dimensions

- Cell width (m): 50 (1 hehtaarin kaatopaikka koostuu neljästä sellistä á 50 x 50 m²)
- Cell legth (m): 50
- Cell top area (ha): 0.251
- Cell base area (ha): 0.25
- Number of cells; 4
- Total base area (ha): 1
- Total top area (ha): 1.004
- Head of Leachate surface water breakout occurs (m): SINGLE(15) (oletetaan, että suotoveden korkeus voi nousta 15 korkeuteen (koko jätetäytön korkeus), ennenkuin vettä virtaa ulos pintarakenteen kautta
- Waste porosity (fraction): SINGLE(0.671)
- Final waste thichness (m): SINGLE(15)
- Field capacity (fraction): SINGLE(0.292)
- Waste density (kg/l): SINGLE(1.5)

Source concentrations of contaminants

- All units in milligrams per litre
- Infinite source term (jätteen heikentymistä ei huomioida, koska käyttöikä voi olla lyhytkin)
- Chloride: TRIANGULAR(4.8,631,1800)

Drainage Information

- Fixed head (suotovedenkorkeuden oletetaan vaihtelevan jäljempänä annetulla tasolla täyttö- ja jälkihoitoajan, joka tässä on 1000 vuotta, tämän jälkeen suotovedenpinnan korkeus nousee peittorakenteesta sisään tulevan veden määräämässä tahdissa koko jätetäytön korkeuteen, eli että salaojitus ei toimi enää lainkaan)
- Head on EBS is given as (m): TRIANGULAR(0.1,1,1.5) - veden korkeus eristerakenteen päällä

Barrier Information

- There is a composite barrier
- Liner installed under CQA (ellei geomembraanin asennuksen laadunvalvontaa, vikojen määrä huomattavasti suurempi, reikien osalta 30-kertainen)
- Design thickness of clay (m): TRIANGULAR(0.975,1,1.025)
- Pathway moisture content (fraction): SINGLE(0.427)
- Onset of FML degradation (years since filling commenced): 80 (geomembraanin haajoamisen oletetaan alkavan)
- Pathway longitudinal dispersivity (m): SINGLE(0.1)
- Time for area of defects to double (years): 100 (geomembraanin vikojen määrä kaksinkertaistuu 100 vuodessa, mm. maan liikkeistä aiheutuvien repeämisten johdosta)
- Membrane defects (number per hectare):
- Pin holes: Minimum 5, Maximum 5
- Holes: Minimum 5, Maximum 5
- Tears: Minimum 0, Most Likely 1, Maximum 10
- Most likely value for the PDFs representing the density of pinholes and holes will move from the minimum value selected above the maximum value selected over the time period before FML degradation commences (tässä käytetyillä arvoilla oletetaan, että geomembraanissa on jo heti asennuksen jälkeen ns. konservatiivinen määrä reikiä ja että geomembraanin läpäisevyys kasvaa vain repeämien lisääntymisen johdosta ensimmäisen 100 vuoden aikana)

Hydraulic conductivity of liner (m/s): TRIANGULAR(6.7e-10,1e-9,1.5e-9) – vedenjohtavuus voi olla $\approx \pm 1.5$ -kertainen vaadittavaan arvoon nähden, kuvaa vedenläpäisevyyden vaihtelua, mineraaliainestiiivisten turmeltumista ajassa ei voida huomioida

Pathway parametres

- Modelled as un saturated pathway
- Pathway length (m): SINGLE(0.5) – vain lyhyt matka osittain kyllästyneessä kerroksessa
- Flow Model: porous medium
- Pathway moisture content (fraction): SINGLE(0.3)
- Pathway Density (kg/l): UNDEFINED
- Pathway hydraulic conductivity values (m/s): SINGLE(0.0001)
- Pathway longitudinal dispersivity (m): SINGLE(0.05)

No retardion values used in this simulation.

Aquifer Pathway Dimensions for Phase

- Pathway length (m): UNIFORM(500,600)
- Pathway width (m): UNIFORM(100,140)

Pathway parameters

- Modelled as vertical pathway.
- Pathway lenght (m): SINGLE(0.5)
- Pathway porosity (fraction): SINGLE(0.3)
- Pathway dispersivity (m): SINGLE(0.05)

Pathway parameters

- Modelled as aquifer pathway.
- Mixing zone (m): TRIANGULAR(1.9,2,2.1)
- Pathway porosity (fraction): TRIANGULAR(0.35,0.4,0.45)
- Pathway regional gradient (-): TRIANGULAR(0.005,0.01,0.015)
- Pathway hydraulic conductivity (m/s): TRIANGULAR(1e-5, 0.0001, 0.001)
- Pathway longitudinal dispersivity (m): TRIANGULAR(40,50,60)
- Pathway transverse dispersivity (m): TRIANGULAR(0.9,1,1.1)

No retardion values used in this simulation.

Tarkastelutapausten 1...3 tulokset

Tässä yhteydessä on esitetty tarkastelutapausten 1...3 tuloksia. Aluksi on vertailtu tarkastelutapauksia 1 ja 2 keskenään (ei geomembraania, kloridipitoisuus vaihtelee) sekä tapauksia 2 ja 3 (pelkkä mineraaliaineseriste tai geomembraani ja mineraaliaines eriste). Jälkihoitoajan pituuteen liittyvien tarkastelujen tulokset on esitetty hieman jäljempänä. Lopuksi on esitetty esimerkkilaskennasta 3 saatu numeerinen tulostus.

Kuvissa 5.43...5.46 on esitetty kloridin pitoisuudet mineraalisen tiivistyskerroksen alapinnassa, osittain kyllästyneen kerroksen alapinnassa, kyllästyneen kerroksen alapinnas-

sa ja luvanmukaisuuden tarkastelupisteessä (etäisyys 500...600 m) ajan funktiona eri todennäköisyytasoilla tarkastelutapauksessa 1 (ei geomembraania, kloridipitoisuuden keskiarvo 220 mg/l). Jos kloridipitoisuuden sallittuna arvona pidetään 250 mg/l, se saavutetaan tässä tapauksessa tiivistekerroksen alapinnassa n. 5 vuoden kuluttua, osittain kyllästyneen kerroksen alapinnassa n. 10 vuoden kuluttua ja kyllästyneen kerroksen alapinnassa n. 12.5 vuoden kuluttua, kun kriteerinä käytetään 95 %:n todennäköisyyden käyrää (95 % pitoisuuksista on käyrän arvoa pienempiä). Luvanmukaisuuden tarkastelupisteessä ei raja-arvo 250 mg/l ylitetä. Jos tässä pisteessä kriteerinä käytetään vertailun vuoksi arvoa 25 mg/l, se saavutetaan n. 21 vuoden kuluttua.

Kuvissa 5.47...5.50 on esitetty puolestaan kloridin pitoisuudet vastaavissa tarkastelupisteissä, mutta nyt laskettuna keskiarvoilla (LandSim -ohjelmassa on mahdollista laskea keskiarvoilla "expected values" ilman vaihtelun huomioimista; vedenläpäisevyys on siis $k=1 \cdot 10^{-9}$ m/s, vedenpaine korkeus $h_w = 1$ m, tiivistekerroksen paksuus = 1 m jne.) tapauksessa, jossa kloridipitoisuus on 631 mg/l (tarkastelutapaus 2). Jos kloridipitoisuuden sallittuna arvona pidetään edelleen arvoa 250 mg/l, se saavutetaan tässä tapauksessa tiivistekerroksen alapinnassa n. 6.5 vuoden kuluttua, osittain kyllästyneen kerroksen alapinnassa n. 13 vuoden kuluttua ja kyllästyneen kerroksen alapinnassa n. 16 vuoden kuluttua. Luvanmukaisuuden tarkastelupisteessä ei raja-arvo 250 mg/l nytäkään ylitetä. Jos tässä pisteessä kriteerinä käytetään arvoa 25 mg/l, se saavutetaan n. 25 vuoden kuluttua.

Lähes kolminkertaisella kloridipitoisuuden lähtöarvolla vastaavien pitoisuuksien saavuttamiseen kuluu siis jopa jonkin verran pidempi aika, kun eri tekijöihin liittyviä vaihtelumahdollisuuksia (epävarmuuksia) ei ole otettu huomioon.

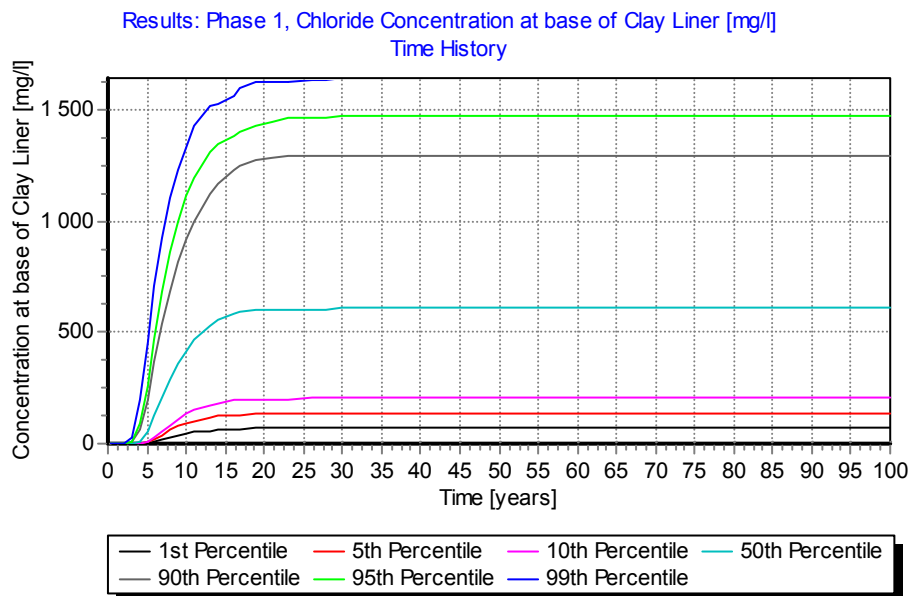
Lopuksi on vielä vertailtu tapausta ilman geomembraania (tarkastelutapaus 2) ja geomembraanin kanssa (tarkastelutapaus 3). Kloridipitoisuuksia ei ole tässä yhteydessä esitetty enää mineraaliainestiivisteiden alapinnassa. Ne ovat kutakuinkin samat kuin ilman geomembraania olevassa tapauksessa. Vasta reikien läpi siirtyvästä pienemmästä aineäärästä johtuen konsentraatio pohjavedessä on merkittävästi pienempi kuin tapauksessa, jossa geomembraania ei ole. Kuvissa 5.51 ja 5.52 on esitetty luvanmukaisuuden tarkastuspisteen kloridikonsentraatio tarkastelutapauksessa 2 ja tarkastelutapauksessa 3. Kloridipitoisuuden arvo 25 mg/l saavutetaan ilman geomembraania olevassa tapauksessa n. 21 vuodessa, sen sijaan tapauksessa, jossa geomembraani on mukana luvanmukaisuuden tarkastuspisteessä kloridipitoisuus on vielä alle 10 mg/l 100 vuodenkin kuluttua.

Näissä tarkasteluissa kaatopaikan jälkihoidon on oletettu olevan kunnossa ainakin yli 100 vuotta. 100 vuotta on näissä tarkasteluissa myös se aikaraja, jonka jälkeen geomembraaneissa olevien heikkouskohtien vaikutukset geomembraaniin vanhentumisen johdosta (reikäkoon kaksinkertaistumisen johdosta) vasta lähtevät kasvuun, joten tarkastelut eivät sisällä varsinaisia ajan myötä tapahtuvan turmeltumisen vaikutuksia.

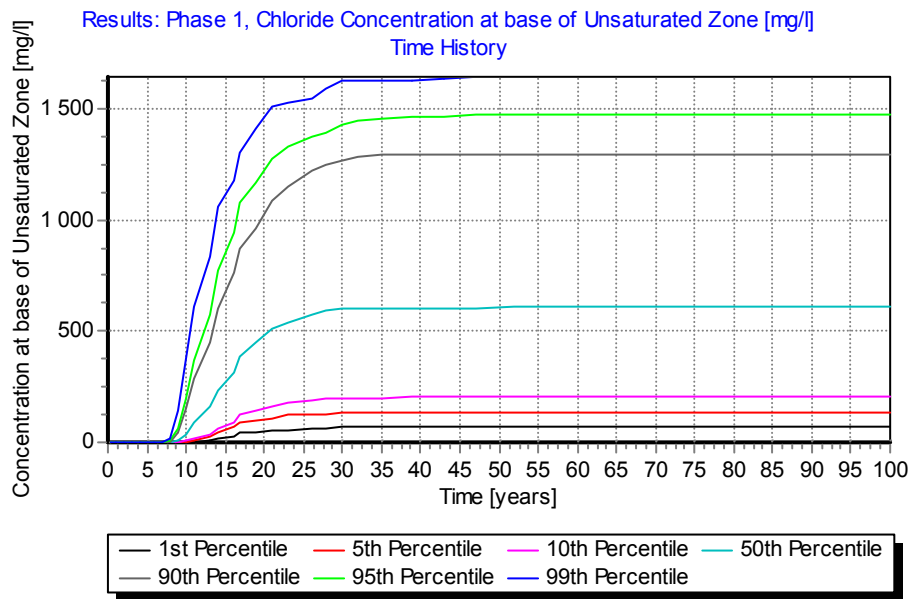
Yhteenvetona on taulukossa 5.16 esitetty eri raja-arvojen saavuttamiseen eri tarkastelutapauksissa vaadittavat ajat. Myös tarkastelutapauksesta 2 on esitetty 95 % todennäköisyyttä vastaavat arvot, jotka ovat samaa suuruusluokkaa kuin pienemmällä kloridipitoisuudella saavutetut ajat.

Taulukko 5.16. Kloridipitoisuuksien 250 mg/l ja (25 mg/l) saavuttamiseen kuluva aika eri tarkastelutapauksissa.

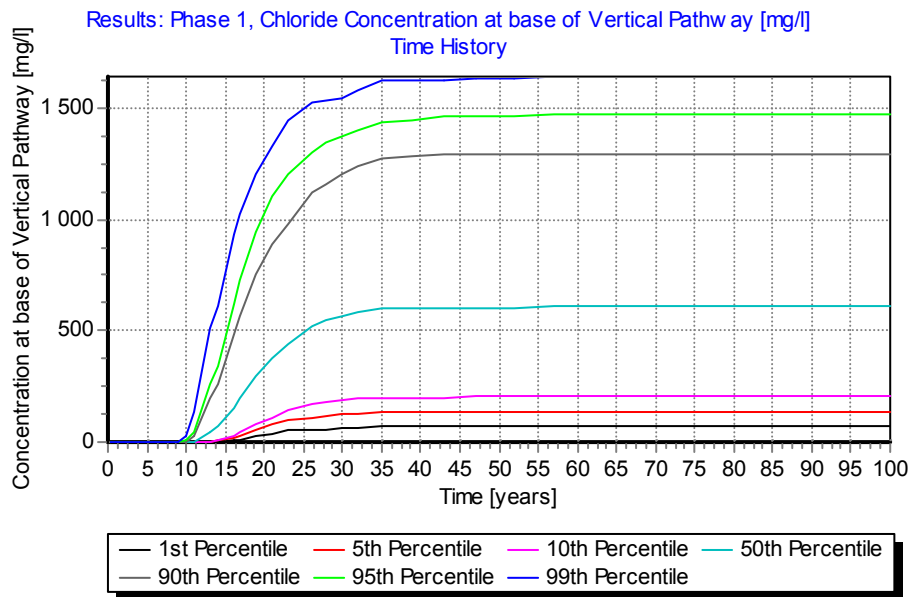
Tarkastelupiste	Tapaus 1 ei GM Cl 220 mg/l vaihtelut mukana	Tapaus 2 ei GM Cl 631 mg/l keskiarvo- laskenta	Tapaus 2 ei GM Cl 631 mg/l vaihtelut mukana	Tapaus 3 GM mukana Cl 631 mg/l vaihtelut mukana
Kloridipitoisuuksien 250 mg/l ja (25 mg/l) saavuttamiseen kuluva				
Mineraalisen tiiviste- teen alapinta	5 v	6.5 v	5 v	5 v
Osittain kyllästyn- neen kerroksen alapinta	10 v	13 v	10 v	10 v
Kyllästyneen ker- roksen alapinta	13 v	16 v	13 v	13 v
Luvanmukai- suuden tarkastelu- piste	(21 v, 25 mg/l)	(25 v, 25 mg/l)	(21 v, 25 mg/l)	vakiotaso 5.5 mg/l saavu- tetaan 50 vuo- dessa



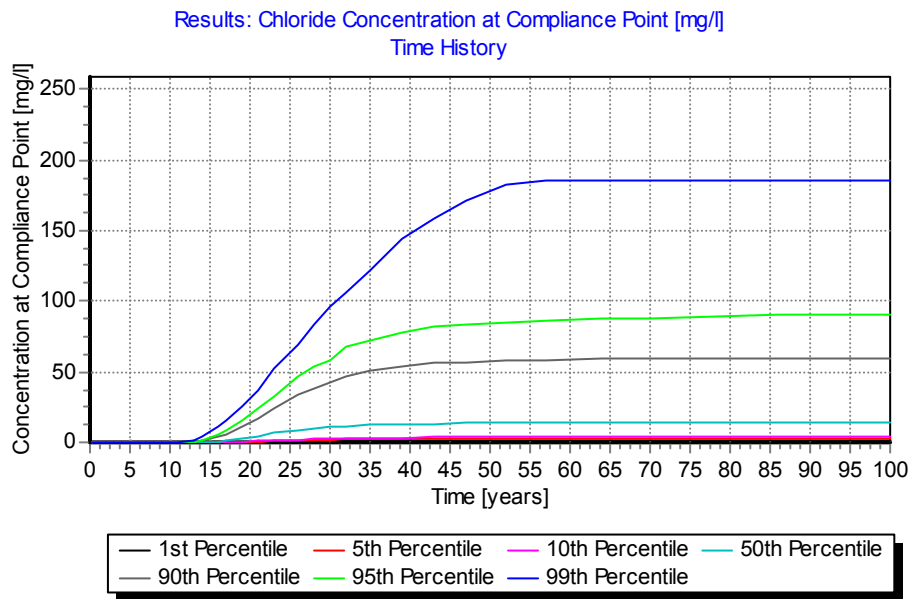
Kuva 5.43. Kloridikonsentraatio mineraaliaineeksisen eristeen alapinnassa (ei geomembraania, lähtöpitoisuuden keskiarvo 220 mg/l).



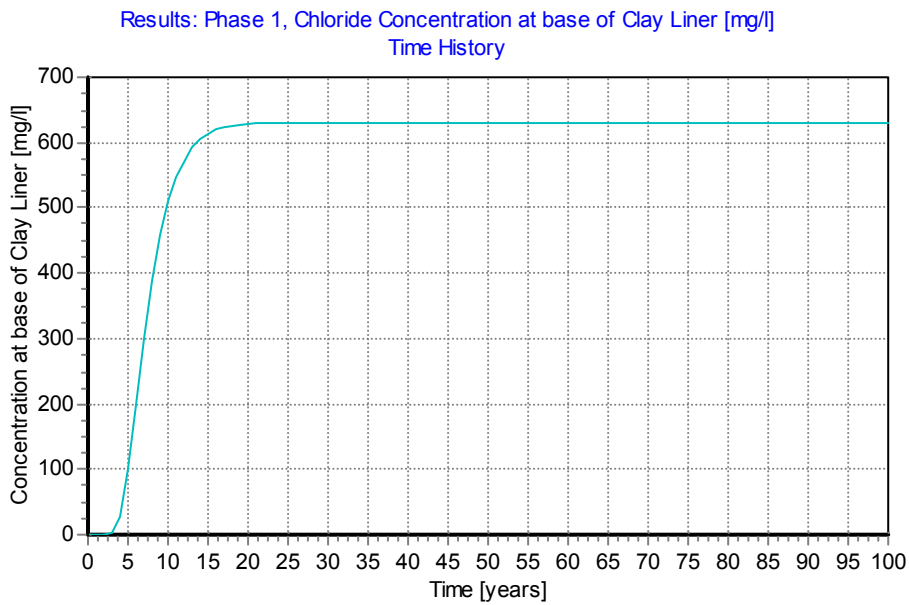
Kuva 5.44. Kloridikonsentraatio osittainkyllästyneen kerroksen alapinnassa (ei geomembraania, lähtöpitoisuuden keskiarvo 220 mg/l).



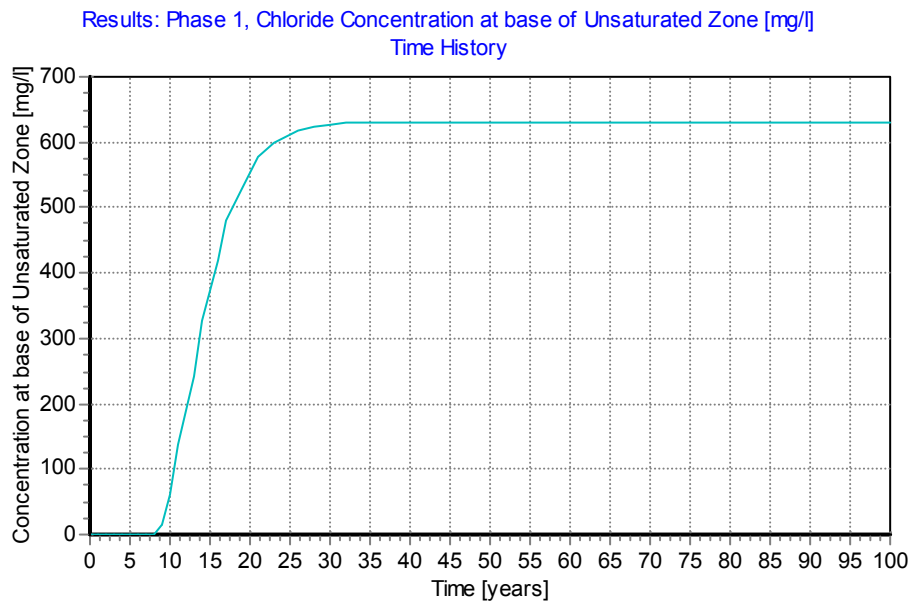
Kuva 5.45. Kloridikonsentraatio kyllästyneen kerroksen alapinnassa (ei geomembraania, lähtöpitoisuuden keskiarvo 220 mg/l).



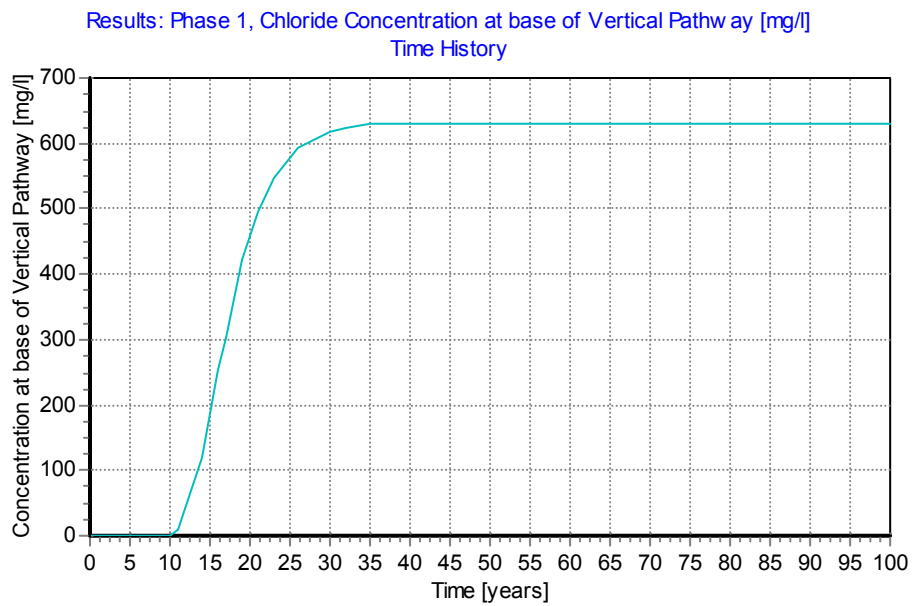
Kuva 5.46. Kloridikonsentraatio luvanmukaisuuden tarkastelupisteessä (ei geomembraania, lähtöpitoisuuden keskiarvo 220 mg/l).



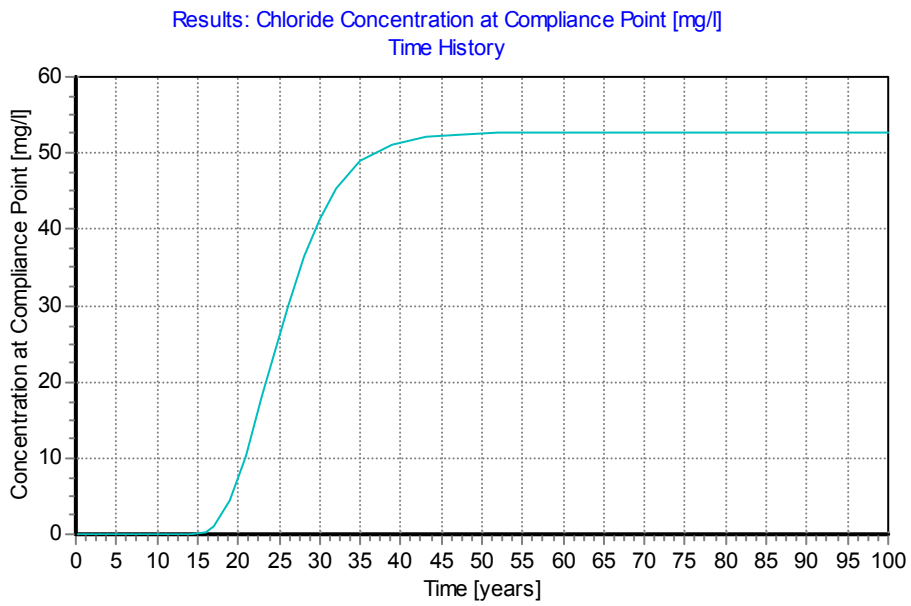
Kuva 5.47. Lähtötietojen keskiarvoilla laskettu kloridikonsentraatio mineraaliaineksisen eristeen alapinnassa (ei geomembraania, lähtöpitoisuuden keskiarvo 631 mg/l).



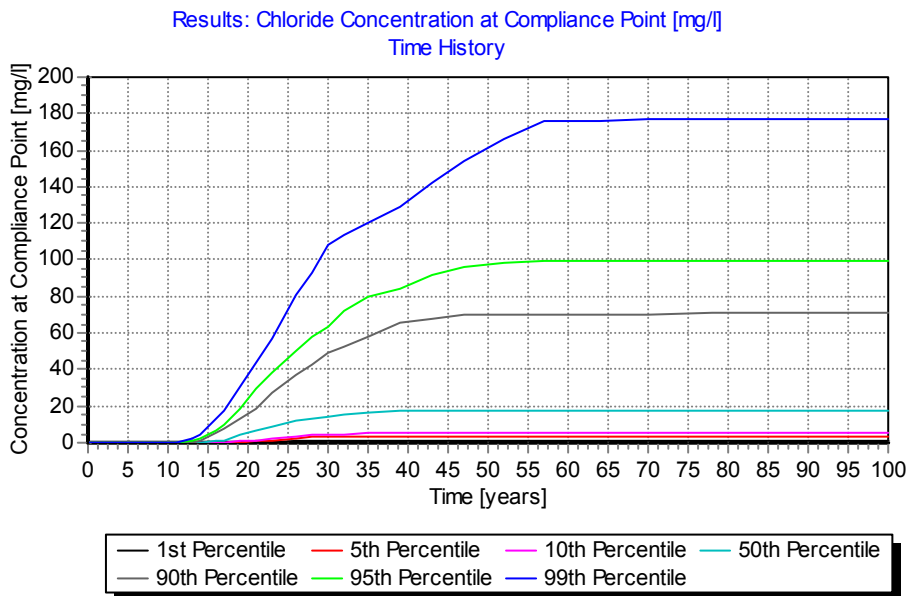
Kuva 5.48. Lähtötietojen keskiarvoilla laskettu kloridikonsentraatio osittainkyllästyneen kerroksen alapinnassa (ei geomembraania, lähtöpitoisuuden keskiarvo 631 mg/l).



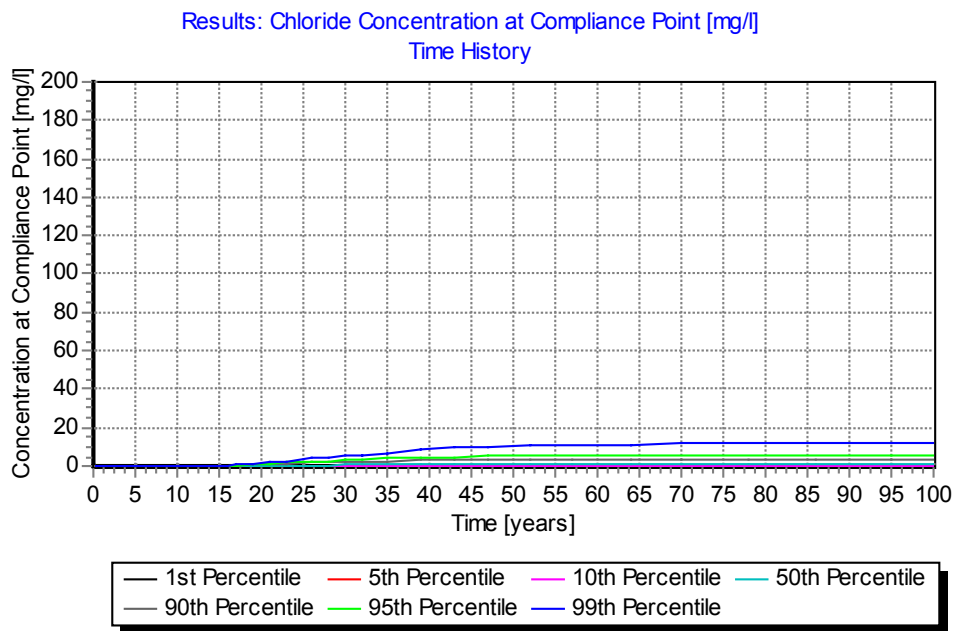
Kuva 5.49. Lähtötietojen keskiarvoilla laskettu kloridikonsentraatio kyllästyneen kerroksen alapinnassa (ei geomembraania, lähtöpitoisuuden keskiarvo 631 mg/l).



Kuva 5.50. Lähtötietojen keskiarvoilla laskettu kloridikonsentraatio luvanmukaisuuden tarkastelupisteessä (ei geomembraania, lähtöpitoisuuden keskiarvo 631 mg/l).



Kuva 5.51. Kloridikonsentraatio luvanmukaisuuden tarkastelupisteessä (ei geomembraania, lähtöpitoisuuden keskiarvo 631 mg/l).



Kuva 5.52. Kloridikonsentraatio luvanmukaisuuden tarkastelupisteessä (geomembraani mukana, lähtöpitoisuuden keskiarvo 631 mg/l).

Esimerkkilaskennan 3 numeerinen tulostus

LandSim ohjelma antaa tulostuksen edellä esitettyjen graafisten tulosteiden ohella myös numeerisessa muodossa valittuna tarkasteluajankohtina. Tärkeimmät tulosteet ovat:

- haitta-aineen konsentraatio pohjavedessä - Concentration of Chloride in groundwater [mg/l]
- haitta-aineen huippupitoisuuden saavuttamiseen luvanmukaisuuden tarkastelupisteessä kuluva aika - Approx. time to Peak Conc. Chloride at Offsite Compliance Point [years]
- lähtöaineen konsentraatio - Source Concentration of Chloride [mg/l]
- konsentraatio mineraaliainestiiivisten alapinnassa - Concentration of Chloride at base of Clay Liner [mg/l]
- konsentraatio osittainkyllästyneen kerroksen alapinnassa - Concentration of Chloride at base of Unsaturated Zone [mg/l]
- haitta-aineen huippupitoisuuden saavuttamiseen osittainkyllästyneen kerroksen alapinnassa kuluva aika - Approx. time to Peak Conc. Chloride at Base of Unsaturated Zone [years]
- konsentraation kyllästyneen kerroksen alapinnassa - Concentration of Chloride at base of Vertical Pathway [mg/l]
- konsentraatio kunkin kaatopaikkavaiheen tarkastelupisteessä - Concentration of Chloride at base of Phase Monitor Well [mg/l]

- haitta-aineen huippupitoisuuden saavuttamiseen kunkin kaatopaikkavaiheen tarkastelupisteessä kuluva aika - Approx. time to Peak Conc. Chloride at Phase Monitor Well [years]
- puhdistuslaitokselle virtaava vesimäärä - Flow to Leachate Treatment Plant [l/day]
- tiivisterakenteen pinnalla vaikuttava vedenpaine korkeus - Head on EBS [m]
- pintarakenteen läpi ulos valuva vesimäärä - Surface Breakout [l/day]
- pohjaeristerakenteen läpi suotautuva vesimäärä - Leakage through EBS [l/day]
- akviferissa virtaava vesimäärä - Aquifer Flow [m³/year].

Tässä on esitetty mallina ainoastaan ajankohta 100 vuotta tarkastelutapauksesta 3.

Tulokset valittuina ajankohtina:

Concentration of Chloride in groundwater [mg/l]

At 100 years

- 01 % of values less than 0.0246
- 05 % of values less than 0.0673
- 10 % of values less than 0.122
- 50 % of values less than 0.681
- 90 % of values less than 3.25
- 95 % of values less than 5.41
- 99 % of values less than 11.7

Minimum 0.00534 Maximum 26.9

Mean 1.42 Std. Dev. 2.39 Variance 5.74

Approx. time to Peak Conc. Chloride at Offsite Compliance Point [years] – luvanmukaisuuden tarkastelupiste 500...600 metrin päässä kaatopaikasta

- 01 % of values less than 3046
- 05 % of values less than 3046
- 10 % of values less than 3046
- 50 % of values less than 3363
- 90 % of values less than 12189
- 95 % of values less than 13458
- 99 % of values less than 18114

Minimum 3046 Maximum 20000

Mean 4844 Std. Dev. 3561 Variance 1.28e+7

Source Concentration of Chloride [mg/l]

At 100 years

- 01 % of values less than 97.2
- 05 % of values less than 231
- 10 % of values less than 333

- 50 % of values less than 776
- 90 % of values less than 1328
- 95 % of values less than 1432
- 99 % of values less than 1660

Minimum 13.0 Maximum 1782
Mean 807 Std. Dev. 368 Variance 135874

Concentration of Chloride at base of Clay Liner [mg/l]

At 100 years

- 01 % of values less than 96
- 05 % of values less than 229
- 10 % of values less than 331
- 50 % of values less than 772
- 90 % of values less than 1320
- 95 % of values less than 1423
- 99 % of values less than 1652

Minimum 13.0 Maximum 1772
Mean 803 Std. Dev. 366 Variance 134502

Concentration of Chloride at base of Unsaturated Zone [mg/l]

At 100 years

- 01 % of values less than 97.2
- 05 % of values less than 231
- 10 % of values less than 333
- 50 % of values less than 776
- 90 % of values less than 1328
- 95 % of values less than 1432
- 99 % of values less than 1660

Minimum 13.0 Maximum 1782
Mean 807 Std. Dev. 368 Variance 135873

Approx. time to Peak Conc. Chloride at Base of Unsaturated Zone [years]

- 01 % of values less than 105
- 05 % of values less than 1523
- 10 % of values less than 1681
- 50 % of values less than 1681
- 90 % of values less than 2759
- 95 % of values less than 3714
- 99 % of values less than 13458

Minimum 100 Maximum 20000
Mean 2361 Std. Dev. 2053 Variance 4.2e+6

Concentration of Chloride at base of Vertical Pathway [mg/l]

At 100 years

- 01 % of values less than 97.2
- 05 % of values less than 231
- 10 % of values less than 333
- 50 % of values less than 776
- 90 % of values less than 1328
- 95 % of values less than 1432
- 99 % of values less than 1660

Minimum 13.0 Maximum 1782

Mean 807 Std. Dev. 368 Variance 135689

Concentration of Chloride at base of Phase Monitor Well [mg/l] – 5 metrin päässä kaato-
paikasta

- 01 % of values less than 0.0246
- 05 % of values less than 0.0673
- 10 % of values less than 0.122
- 50 % of values less than 0.681
- 90 % of values less than 3.25
- 95 % of values less than 5.41
- 99 % of values less than 11.7

Minimum 0.00534 Maximum 26.9

Mean 1.42 Std. Dev. 2.39 Variance 5.74

Approx. time to Peak Conc. Chloride at Phase Monitor Well [years]

- 01 % of values less than 3046
- 05 % of values less than 3046
- 10 % of values less than 3046
- 50 % of values less than 3363
- 90 % of values less than 11039
- 95 % of values less than 13458
- 99 % of values less than 18114

Minimum 2499 Maximum 20000

Mean 4803 Std. Dev. 3509 Variance 1.2e+7

Flow to Leachate Treatment Plant [l/day] – salaojituksen toiminta lakkasi tässä lasken-
nassa 100 vuoden kohdalla

At 100 years

- 01 % of values less than 1013
- 05 % of values less than 1188
- 10 % of values less than 1348
- 50 % of values less than 1913

– 90 % of values less than 2735
– 95 % of values less than 2930
– 99 % of values less than 3222
Minimum 798 Maximum 3337
Mean 1993 Std. Dev. 518 Variance 268787

Head on EBS [m]

At 100 years

– 01 % of values less than 0.234
– 05 % of values less than 0.353
– 10 % of values less than 0.454
– 50 % of values less than 0.884
– 90 % of values less than 1.22
– 95 % of values less than 1.31
– 99 % of values less than 1.39
Minimum 0.118 Maximum 1.47
Mean 0.861 Std. Dev. 0.282 Variance 0.080

Surface Breakout [l/day] –

At 100 years

– 01 % of values less than 0
– 05 % of values less than 0
– 10 % of values less than 0
– 50 % of values less than 0
– 90 % of values less than 0
– 95 % of values less than 0
– 99 % of values less than 0
Minimum 0 Maximum 0
Mean 0 Std. Dev. 0 Variance 0

Leakage through EBS [l/day]

At 100 years

– 01 % of values less than 6.28
– 05 % of values less than 11.3
– 10 % of values less than 15.8
– 50 % of values less than 64.0
– 90 % of values less than 141
– 95 % of values less than 164
– 99 % of values less than 216
Minimum 2.41 Maximum 249
Mean 72.4 Std. Dev. 49.0 Variance 2401

Aquifer Flow [m³/year]

At 100 years

- 01 % of values less than 2756
- 05 % of values less than 5149
- 10 % of values less than 7230
- 50 % of values less than 24446
- 90 % of values less than 52187
- 95 % of values less than 60943
- 99 % of values less than 78495

Minimum 0

Maximum 104272

Mean 27576

Std. Dev. 189026 Variance 3.24e+8

Käyttöikä tarkastelut LandSim -ohjelmaa käyttäen

LandSim -ohjelmaa voidaan käyttää periaatteessa myös kaatopaikan käyttöiän määrittämisessä. Käyttöiän määrittämiseksi on kuitenkin tehtävä runsaasti oletuksia ja valintoja. Osa lähtötiedoista on mahdollista arvioida melko tarkasti etukäteenkin, osa sisältää arvioinnin jälkeenkin todennäköisesti huomattavaakin epävarmuutta. Lisäksi on huomattava, ettei ohjelmassa ole mahdollisuutta huomioida suoraan mineraaliaineksesta tehtyjen tiivistekerrosten heikkenemistä ajan myötä. Osa näihin oletuksiin liittyvästä epävarmuudesta on luonnollisesti mahdollista ottaa huomioon jo suoraan esimerkiksi läpäisevyyden vaihtelurajoja annettaessa.

Käyttöiän kannalta tarkasteltuna tärkeimpiä kannanottoja (LandSim -ohjelmassa) vaativia kohtia ovat:

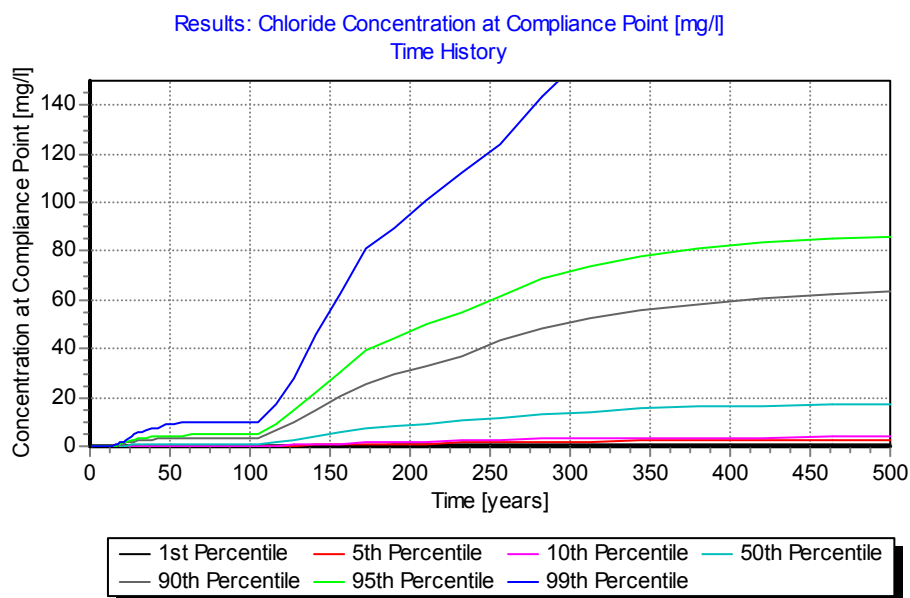
- kaatopaikan täyttöaika eli pinta-rakenteen rakentamisajankohta (täyttöajan loppuun saakka kaatopaikassa ei ole vielä lopullista pintarakennetta, ainakaan koko alueella)
- seuranta-ajan ja jätevesien käsittelyajan pituus (tämän ajan suotovedenpinnan tason oletetaan kulkeutumistarkasteluissa pysyvän vakiona (vaihtelualueellaan))
- pintarakenteen läpäisevä vesimäärä (asettaa maksimiarvon myös pohjarakenteen pitkällä aikavälillä läpäisevälle vesimäärälle; suotovedenkorkeus lähtee kasvuun pinta-rakenteen läpäisyn määräämässä tahdissa seuranta- ja jätevesien käsittelyajan päätyttyä ja saavuttaa lopulta halutun maksimitason - tässä jätetäytön korkeus - voidaan antaa myös taso josta vesi alkaa purkautua ulos)
- jos pintarakenteessa on käytetty geomembraania, geomembraanin vaurioitumisen alkaminen ja geomembraanien tuhoutuminen
- geomembraanin vikojen suuruudet ja lukumäärät
- geomembraanin heikentymisen alkamisen ajankohdan valinta (tässä käytetty 100 vuotta asentamisesta; LandSim -ohjelman oletusvalinta on 150 vuotta) ja vanhentu-

misen vaikutus geomembraanin vikojen esiintymiseen heikentymisen alkamisen jälkeen (vikojen kaksinkertaistumisaika, tässä käytetty aika 100 v).

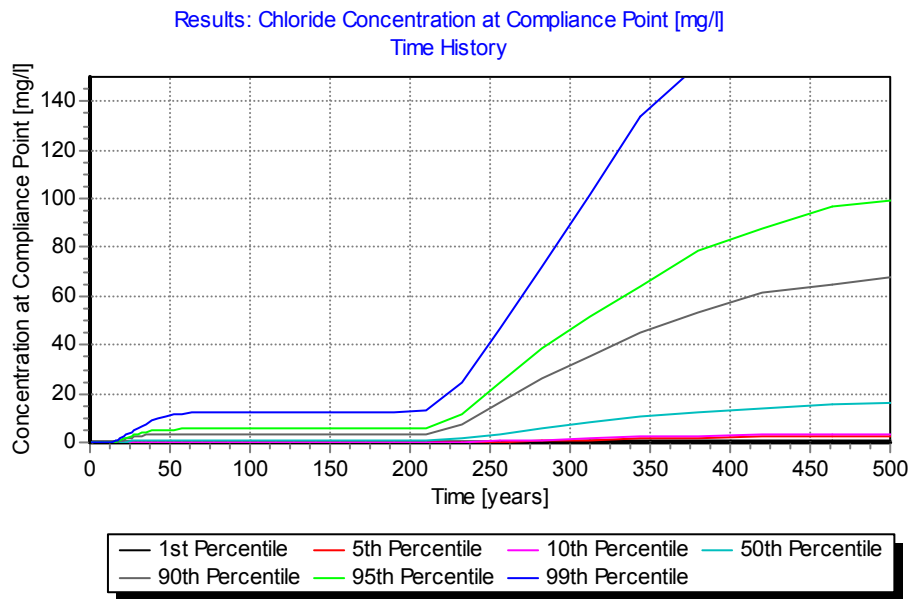
Molemmissa jalempänä esitetyissä tarkasteluissa kaikki muut arvot on pidetty vakioina, mutta aikaa kaatopaikan rakentamisesta jälkihoitoajan loppuun on vaihdeltu. Tarkastelussa 4 tämä kokonaisaika on ollut 50 vuotta ja tarkastelussa 5 puolestaan 100 vuotta.

Kuvissa 5.53 ja 5.54 on esitetty kloridin konsentraatiot luvanmukaisuuden tarkastuspisteessä. Kuvista voidaan havaita, että pidemmällä jälkihoitoajalla 25 mg/l pitoisuuden saavuttamiseen kuluu 110 vuotta kauemmin kuin lyhyemmällä jälkihoitoajalla.

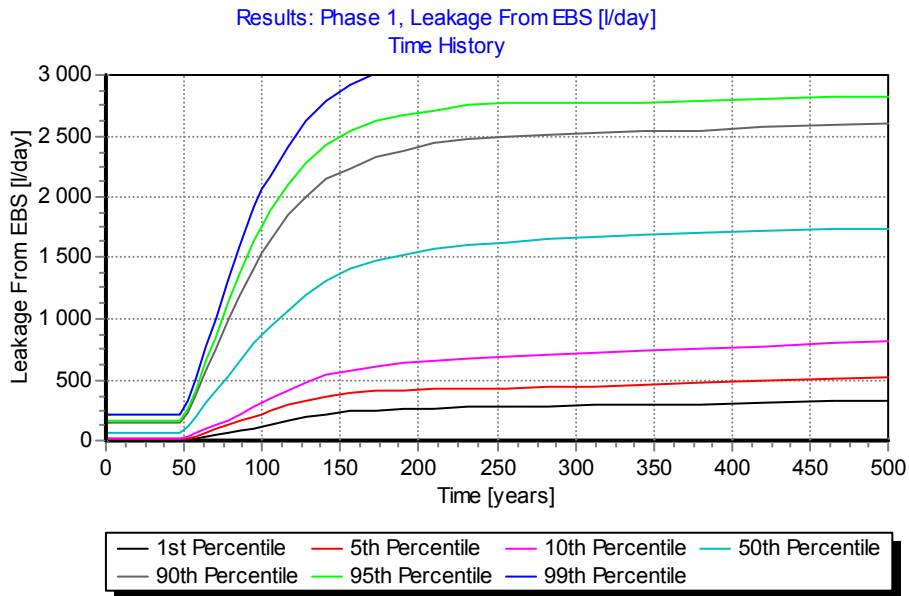
Kaatopaikasta ympäristöön pohjaeristeen läpi suotautuva vesimäärä on esitetty kuvissa 5.55 ja 5.56. Näistä voidaan puolestaan havaita, että pelkkää mineraaliainestiivistettä vastaava vesimäärä alkaa suotautua kaatopaikasta jo 99 (täyttöajan jälkeinen jälkihoitoaika 30 vuotta) ja 150 (täyttöajan jälkeinen jälkihoitoaika 100 vuotta) vuoden kuluttua kaatopaikan perustamisesta (täytön aloittamisesta). Tässä vaiheessa geomembraanissa olevien vikojen määrä ei vielä ole merkittävästi ehtinyt kasvaa, vaan suotautuvan veden määrä johtuu pääosin kaatopaikassa tapahtuvasta suotoveden pinnan tason noususta. Suotoveden pinnan tasot on esitetty kuvissa 5.57 ja 5.58.



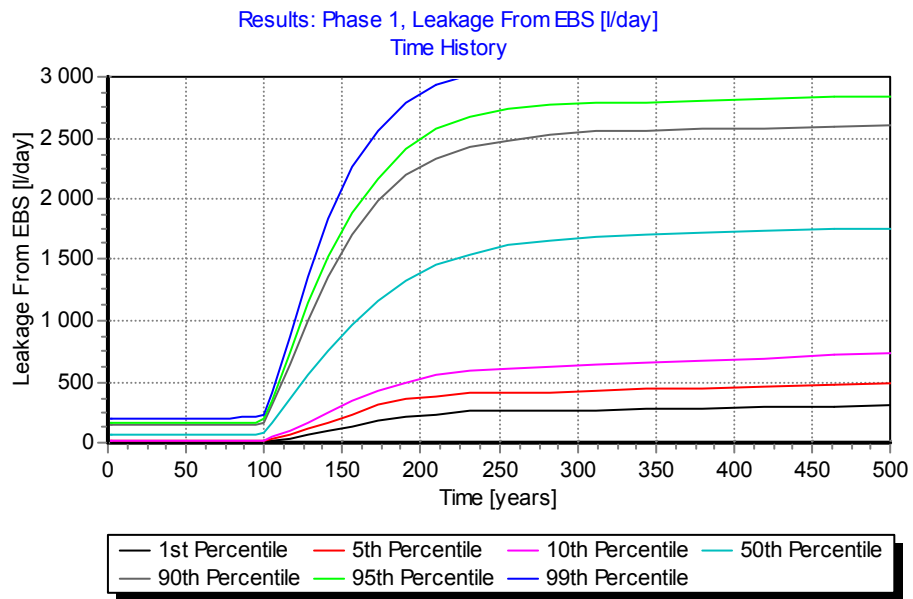
Kuva 5.53. Kloridipitoisuus luvanmukaisuuden tarkastuspisteessä, kun kaatopaikan täyttö- ja jälkihoitoaika on yhteensä 50 vuotta.



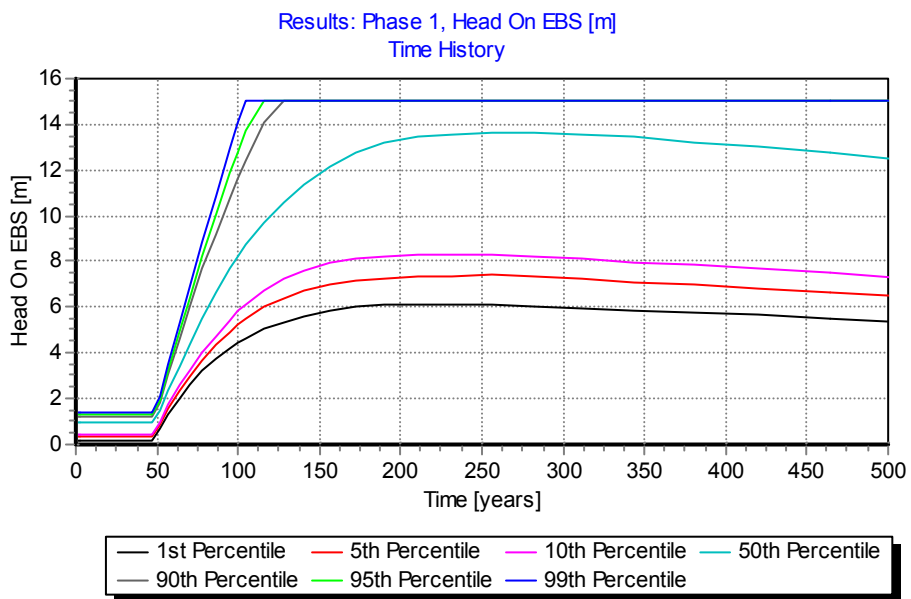
Kuva 5.54. Kloridipitoisuus luvanmukaisuuden tarkastuspisteessä, kun kaatopaikan täyttö- ja jälkihoitoaika on yhteensä 100 vuotta.



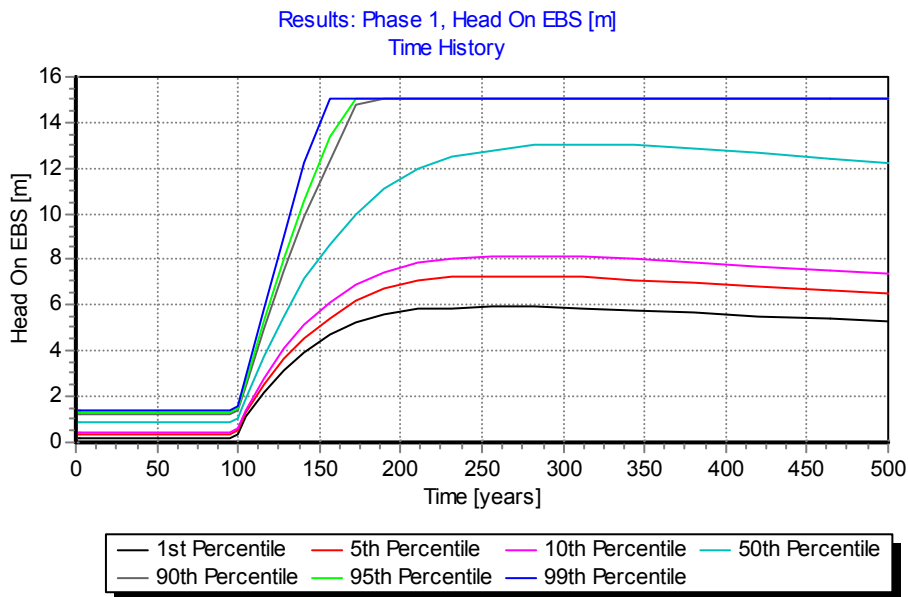
Kuva 5.55. Pohjaeristeen läpi suotautuva vesimäärä, kun kaatopaikan täyttö- ja jälkihoitoaika on yhteensä 50 vuotta.



Kuva 5.56. Pohjaeristeen läpi suotautuva vesimäärä, kun kaatopaikan täyttö- ja jälkihoitoaika on yhteensä 100 vuotta.



Kuva 5.57. Pohjaeristeen päällä vaikuttava vedenpaine korkeus, kun kaatopaikan täyttö- ja jälkihoitoaika on yhteensä 50 vuotta.



Kuva 5.58. Pohjaeristeen päällä vaikuttava vedenpaine korkeus, kun kaatopaikan täyttö- ja jälkihoitoaika on yhteensä 100 vuotta.

Taulukkoon 5.17 on koottu eri pituisten jälkihoito- ja kunnossapitoaikojen vaikutusta käsittelevien tarkasteluiden tulokset. Tuloksissa on huomattava, ettei mineraaliainestieväesteen mahdollisen turmeltumisen vaikutuksia ole otettu tässä huomioon, ellei vaikutusten voida katsoa sisältyvän vedenläpäisevyydelle annettuihin vaihtelurajoihin. Esimerkeistä voidaan havaita, että lopullisen kaatopaikan käyttöiän määrittäminen on hyvin vahvasti valittavasta kaatopaikan hoitoajasta ja luonnollisesti myös kriteeristä (vesimäärä vai pitoisuus; pitoisuuden raja-arvo esim. 25 vai 250 mg/l) riippuvainen. Kyseisissä valituissa pohjasuhteissa laatusuosituksena esitettyä rajaa 250 mg/l ei saavuteta missään tapauksista. Sen sijaan vesijohtomateriaalien syöpyemisen ehkäisemiseksi esitetty kloridipitoisuuden raja-arvo 25 mg/l voidaan ylittää 150...250 vuoden kuluessa ja pelkästään mineraalieristeen mukaan laskettu läpäisevän vesimäärän raja-arvo 63 mm/v/m^2 ($63 \text{ mm/v/m}^2 \wedge 1728 \text{ l/vrk/ha}$; Ruotsin raja-arvo 50 mm/v/m^2) 100...150 vuoden kuluttua. Jos kaatopaikassa vaikuttava suotovedenkorkeus voidaan hallita pitkälläkin ajanjaksolla, pysyvät myös ympäristöön suotautuvat vesimäärät kohtuullisina.

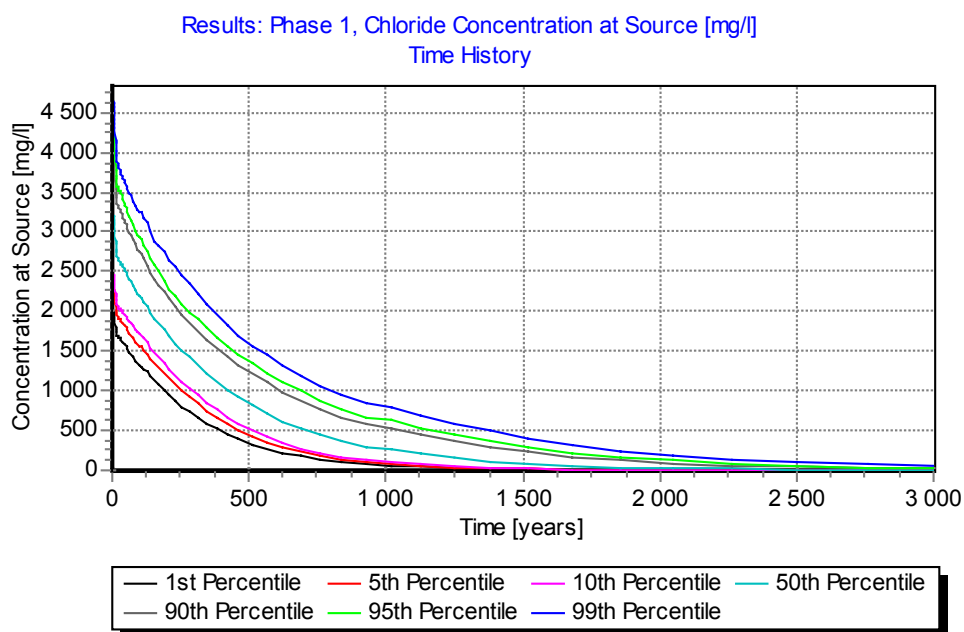
Taulukko 5.17. Pelkän mineraaliainestiivisteiden läpäisevän vesimäärän (1728 l/ha/vrk) saavuttamiseen kuluva aika ja eri kloridipitoisuuksien 250 mg/l ja (25 mg/l) saavuttamiseen kuluva aika luvanmukaisuuden tarkastelupisteessä 95 % todennäköisyyskäyrien perusteella (lähtöpitoisuus oletettu vakioksi).

Tarkastelupiste	Tapaus 3 GM mukana - hoitoaika "ääretön" 1000 v	Tapaus 4 GM mukana - täyttö+jälki- hoitoaika 50 v	Tapaus 5 GM mukana - täyttö+jälki- hoitoaika 100 v
	läpäisevän vesimäärän ja saavuttamiseen kuluva aika		
Pelkän mineraalisen tiivisteiden läpäisyä 1728 l/ha/vrk vast. aika	~ 1000 v (< 280 l/vrk -> 900 v)	99 v	150 v
Pitoisuus 25 mg/l	pitoisuus 5.5 mg/l saavutetaan 50 vuodessa pit. 10 mg/l 2000 v	146 v	256 v
Pitoisuus 250 mg/l	pit. 120...130 mg/l 2700...6000 v	95 mg/l ~1000 v 115 mg/l ~ 6000 v	105 mg/l ~ 600 v 130 mg/l ~ 6000 v

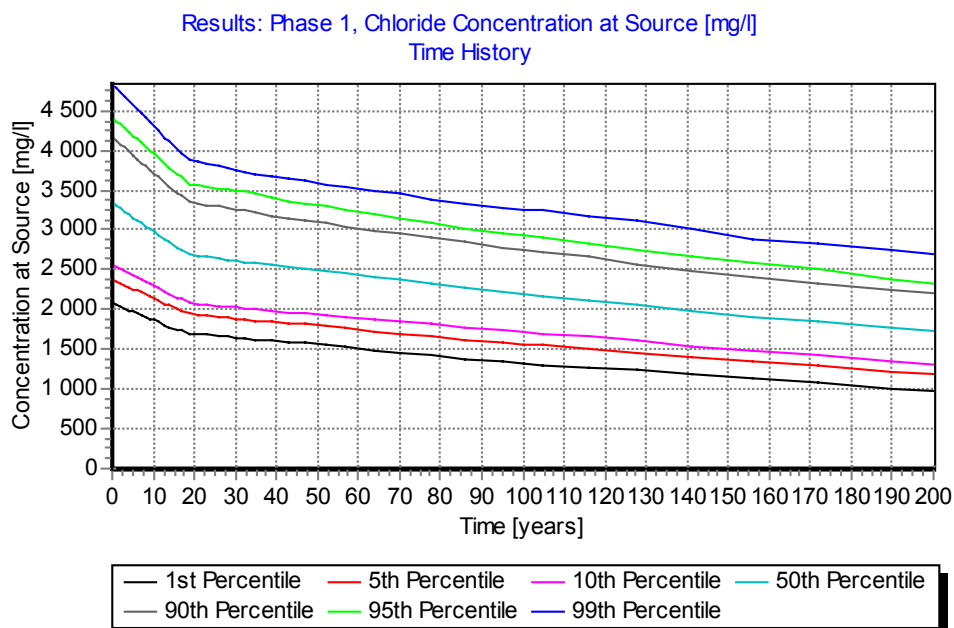
Edellä olevissa tarkasteluissa ei ole huomioitu lainkaan haitta-aineen lähtöpitoisuudessa tapahtuvaa heikkemistä. Lyhyttä aikaväliä tarkasteltaessa heikkenemisellä ei välttämättä ole suurta vaikutusta, sen sijaan pitkällä aikavälillä vaikutus saattaa olla hyvinkin merkittävä.

Heikkenemisen vaikutusta on havainnollistettu kuvissa 5.59...5.61. Laskenta on suoritettu kuten edellä tarkastelutapauksessa 3, mutta lähtötiedot kloridin osalta on valittu käyttämällä LandSim -ohjelman optioita "Use UK Default Leachate Inventory and Concentrations", jossa pitoisuudella on kolmiomallinen jakautuma ja "Use Declining Source Term" eli Englannissa käytettävät oletusarvot (jos ei muuta tietoa - pitoisuudet yleensä selvitetty tarkemmin) ja ajanmittaan vähenevää haitta-aineen pitoisuutta. On huomattava, että oletusarvoissa kloridipitoisuus on huomattavasti suurempi kuin mitä edellä Suomen arvoja käytettäessä oli, eli kloridipitoisuus on 36.6...2270...7760 mg/l.

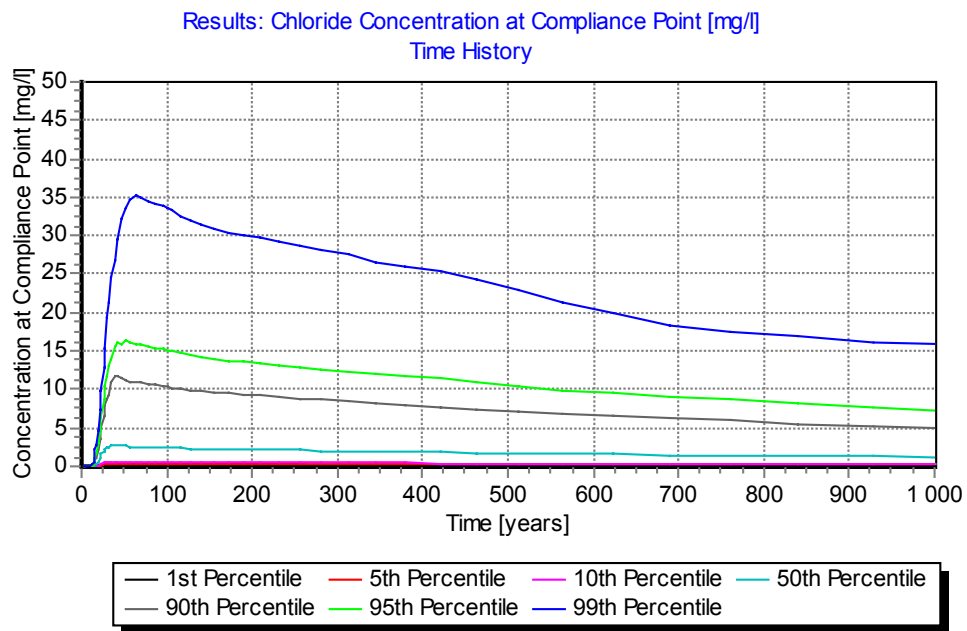
Tuloksista voidaan havaita, että käytännössä haitta-aineen pitoisuus kaatopaikassa vähenee puoleen n. 200 vuodessa ja lähenee nollaa n. 3000 vuodessa (kuvat 5.59 ja 5.60; sama informaatio eri mittakaavoissa). Haitta-aineen pitoisuus luvanmukaisuuden tarkastelupisteessä pysyy kuitenkin suhteellisen korkealla ja lähes vakiotasolla ensimmäisten satojen vuosien aikana (kuva 5.61).



Kuva 5.59. Haitta-aineen pitoisuus kaatopaikassa 3000 vuoden aikana, kun lähtöpitoisuuden vähentyminen on huomioitu.



Kuva 5.60. Haitta-aineen pitoisuus kaatopaikassa 200 vuoden aikana, kun lähtöpitoisuuden vähentyminen on huomioitu.



Kuva 5.61. Haitta-aineen pitoisuus luvanmukaisuuden tarkastelupisteessä, kun lähtöpitoisuuden vähentyminen on huomioitu.

6. Toteutuneen rakenteen käyttöiän mittaaminen

6.1 Suojausrakenteiden toimivuuden mittaaminen

(Teksti perustuu huomattavilta osiltaan Kaatis-esiselvityksen /79/ liitteeseen 5 "Ympäristönsuojelujärjestelmien toimivuus ja epävarmuudet")

6.1.1 Lähtökohdat

Kaatopaikan suojausrakenteiden toimivuuden mittaaminen voidaan toteuttaa ja pitäisi-kin toteuttaa osana ympäristönsuojelujärjestelmien toimivuuden varmistamista. Ympäristönsuojelujärjestelmien sisältö määräytyy kaatopaikkoja koskevien määräysten ja sää-
dösten sekä kaatopaikkalupaan kuuluvien kaatopaikkasuunnitelmien sisällöstä.

Kaatopaikkadirektiivin /60/ mukaan kaatopaikkaa koskevan lupahakemuksen tulee sisältää mm. seuraavat tiedot:

- sijoitettavien jätetyyppien kuvaus ja jätteen kokonaismäärä
- kaatopaikan suunniteltu kapasiteetti
- kaatopaikan kuvaus, mukaan lukien sen hydrogeologiset ja geologiset ominaisuudet
- ehdotetut menetelmät pilaantumisen ehkäisemiseksi ja torjumiseksi
- ehdotettu toiminta-, seuranta- ja valvontasuunnitelma
- ehdotettu suunnitelma käytöstäpoistamista ja jälkihoitoa koskeviksi menettelyta-
voiksi.

Lupaehtona mainitaan mm., että kaatopaikkaa hoidetaan siten, että onnettomuuksien eh-
käisemiseksi ja niiden vaikutusten rajoittamiseksi tarvittavat toimenpiteet toteutetaan.

Luvan tulee sisältää mm. seuraavat asiat:

- kaatopaikkaluokka
- luettelo niistä määritellyistä jätetyypeistä ja jätteiden kokonaismäärästä, joille on myönnetty lupa kaatopaikalle sijoittamista varten
- kaatopaikan perustamista, kaatopaikan toimintaa sekä seuranta- ja valvontamenet-
telyjä koskevat vaatimukset, mukaan lukien varotoimia koskevat suunnitelmat sekä käytöstäpoistamista ja jälkihoitoa koskevat väliaikaiset vaatimukset
- luvan hakijan velvollisuus tehdä vähintään kerran vuodessa toimivaltaiselle viran-
omaiselle ilmoitus vastaanotetun jätteen laadusta ja määrästä sekä lupahakemukses-
sa ja lupaehtoissa sekä direktiivissä säädetyin seurantaohjelman tuloksista.

Kaatopaikan toimintavaiheen valvonnasta ja tarkkailusta direktiivissä /60/ todetaan mm.

- Kaatopaikan pitäjän on toteutettava toimintavaiheen aikana valvonta- ja tarkkailuohjelma.
- Kaatopaikan pitäjän on ilmoitettava toimivaltaiselle viranomaiselle kaikista valvonnan ja tarkkailun yhteydessä esille tulleista huomattavista haitallisista ympäristövaikutuksista ja hänen on noudatettava toimivaltaisen viranomaisen päätöstä toteutettavien korjaavien toimenpiteiden luonteesta ja ajoituksesta. Näiden toimenpiteiden toteuttamiskustannuksista vastaa kaatopaikan pitäjä. Toimivaltaisen viranomaisen vahvistamin säännöllisin väliajoin, mutta kuitenkin vähintään kerran vuodessa, kaatopaikan pitäjän on kerättyjen tietojen perusteella tehtävä toimivaltaisille viranomaisille ilmoitus tarkkailun tuloksista lupaehtojen noudattamisen osoittamiseksi ja jätteen käyttäytymisestä kaatopaikalla saatavan tiedon lisäämiseksi.

Kaatopaikan käytöstäpoistamis- ja jälkihoitomenettelystä direktiivissä /60/ todetaan mm:

- Sen jälkeen kun kaatopaikka on lopullisesti poistettu käytöstä, kaatopaikan pitäjä on vastuussa kaatopaikan kunnossapidosta, tarkkailusta ja valvonnasta jälkihoitovaiheen aikana niin kauan kun toimivaltainen viranomainen sitä vaatii, ottaen huomioon ajan, jonka kaatopaikka voi aiheuttaa vaaraa.
- Kaatopaikan pitäjän on ilmoitettava toimivaltaiselle viranomaiselle kaikista valvontamenettelyjen yhteydessä esiin tulleista huomattavista haitallisista ympäristövaikutuksista ja hänen on noudatettava toimivaltaisen viranomaisen tekemää päätöstä toteutettavien korjaavien toimenpiteiden luonteesta ja ajoituksesta.
- Niin kauan kuin toimivaltainen viranomainen katsoo, että kaatopaikka todennäköisesti aiheuttaa vaaraa ympäristölle, kaatopaikan pitäjä on velvollinen tarkkailemaan ja tutkimaan kaatopaikkakaasujen ja alueen suotovesien koostumusta sekä lähialueen pohjavesikerrosta, sanotun kuitenkin rajoittamatta jätteen haltijan vastuuta koskevan yhteisön tai kansallisen lainsäädännön soveltamista.

Kun tarkastellaan kaatopaikan ympäristönsuojelujärjestelmiä, tulee tarkastelussa ottaa huomioon, onko kaatopaikka

- vanha (ainakin pohjaeristysrakenteet puuttuvat, pintaeritys rakennettu tai ei, jätteen koostumus "lähes tuntematon", jne.),
- nykyinen (pohjaeristysrakenteet rakennettu, jätteen laatu jollain tarkkuudella tunnettu, jne.) tai
- uusi (voimassa olevien kaatopaikkamääräysten mukainen, esikäsitelty jäte, jne.)

6.1.2 Ympäristönsuojelujärjestelmien toimivuuden mittaamiselle asetetut tavoitteet

VNp:n (sen liitteen 3) /92/ mukaan kaatopaikan pitäjän lupaviranomaiselle vuosittain toimittamasta raportista on käytävä ilmi "selvitys poikkeuksellisista tapahtumista ja poikkeamisista hyväksytyistä suunnitelmista". Nämä päätökset sisältyvät EU-direktiiviin /60/, joten tavoitteet ovat EU-jäsenmaiden osalta yhteneväisiä.

Valtioneuvoston päätöksen /92/, liitteen 3 mukaan kaatopaikan valvonnalla ja tarkkailulla on selvitettävä, että

- jäte on hyväksytty sijoitettavaksi kyseiselle kaatopaikkaluokalle vahvistettujen arviointiperusteiden mukaisesti,
- kaatopaikan sisäiset prosessit etenevät tarkoitetulla tavalla,
- ympäristönsuojelujärjestelmät toimivat täysin aiotulla tavalla ja
- kaatopaikan lupaehdot täytetään.

Jotta VNp:n mukainen valvonta, tarkkailu ja raportointi voidaan hoitaa asianmukaisesti, tulisi kaatopaikan suunnittelussa, rakentamisessa sekä käytön ja jälkihoidon aikana tehdä myöhemmin seuraavassa luvussa lueteltuja toimenpiteitä ja olla käytettävissä luetellut tiedot (joko kaikki tai erikseen määrätyt asiat). Ympäristönsuojelujärjestelmien toimivuuden seurantaan ja epävarmuuksien tunnistamiseen kohdistuvien mittausten suorittamisen lähtöedellytyksenä on, että tiedetään mitä mitataan ja miksi mitataan sekä mihin mittaustuloksia verrataan. Valvontaa ja tarkkailua on jatkettava lupaehdoissa määritellyn ajan myös kaatopaikan käytöstäpoiston jälkeen.

Ympäristönsuojelujärjestelmien toimivuuden seuranta ja epävarmuuksien tunnistaminen edellyttää sekä kaatopaikan suunnittelulta ja rakentamiselta tiettyjä toimenpiteitä.

Kaatopaikan suunnitteluun pitäisi kuulua

- kaatopaikan (jätepenkereen) toiminnan mallintaminen (jotta seuranta olisi mielekästä, pitää olla "toimivuusmalli", johon tuloksia verrataan ja jonka perusteella tilaa arvioidaan)
- kaatopaikan mahdollisten haittojen (päästöjen) leviämisen nusteet (ilma, maaperä, pohjavesi)
- riskitarkastelut (jos jotain on sattumassa / tapahtumassa, miten sen vaikuttavuutta arvioidaan)

Kaatopaikan lupahakemuksessa ja suunnitelmissa / työselityksissä tai muissa rakentamista koskevissa asiakirjoissa pitäisi määritellä myös ne asiat, mitä pitää työnaikana tehdä kaatopaikan (jätepenkereen) seurannan / hallinnan mahdollistamiseksi. Tällaisia ovat mm.

- työnaikaiset laadunvalvontamittaukset
- mittauslaitteiden asennus.

6.1.3 Kaatopaikkojen ympäristönsuojelujärjestelmien toimivuuden toteaminen

Kaatopaikan ympäristönsuojelujärjestelmien toimivuuden toteaminen palvelee raportointivelvoitteiden ohella (ja ensisijaisesti) myös kaatopaikan jokapäiväistä käyttöä ja hoitoa. Ympäristönsuojelujärjestelmien toimivuuden toteamiseksi tehdyillä mittauksilla ja mittausten perusteella tehdyillä johtopäätöksillä voidaan (ja tulisikin) mm. ohjata kaatopaikan käyttöä. Vielä kaatopaikan sulkemisen jälkeenkin on pystyttävä seuranta-mittauksilla ym. toimenpiteillä osoittamaan, että kaatopaikka (ja sen eristysrakenteet) toimii lupaehtojen mukaisesti. Useimmat seuraavissa luvuissa esitetyt mittaukset muodostavat kokonaisuuden ja täydentävät toisiaan.

Jätepenkereen laatu ja mekaaninen käyttäytyminen

Jäljempänä luetelluilla mittauksilla saadaan tietoa joko suoraan tai välillisesti mm. seuraavista kaatopaikan toimivuuteen (lupaan) liittyvistä asioista:

- kaatopaikan suunniteltu / jäljellä oleva kapasiteetti
- kaatopaikalle tuotujen jätteiden kokonaismäärä
- kaatopaikan (lopullisen) peittämisen oikea ajoittaminen
- kaatopaikan turvallisuuden hallinta (kaatopaikkasortumat)
- kaatopaikkaprosessien eteneminen ja kaasuntuotanto.

Suoritettavat mittaukset

- jätemassan laatu ja "geotekniset" ominaisuudet mm. jätepenkereen painumien enustamiseksi ja stabiliteetin varmistamiseksi (geotekniset suunnitteluparametrit: mm. lujuus, muodonmuutosominaisuudet, tiheys, vesipitoisuus, jne.) tulisi olla tiedossa (ainakin arvioituna) jo kaatopaikan suunnitteluvaiheessa ja työaikana voidaan tarvittaessa tarkistaa, pitävätkö arviot paikkansa)
- kaatopaikkapenkereen painuminen / kokoonpuristuminen, luiskien pysyminen / stabiliteetti (kaatopaikan topografia)
- vedenpinta (painetaso pohjaeristeelle) jätepenkereessä

Eristysrakenteiden toimivuus

Tässä kohdassa esitetyillä toimenpiteillä saadaan tietoa mm. seuraavien ympäristön pilaantumisen ehkäisemiseksi ja torjumiseksi rakennettujen järjestelmien toimivuudesta

- pohjaeristysrakenteet (tiivistyskerrokset, kuivatusrakenteet, salaojat)
- pintaeristysrakenteet (tiivistyskerrokset, kuivatusrakenteet, kaasunkeräyskerrokset)
- kaatopaikkaprosessien eteneminen ja ohjaus
- kaatopaikkakaasujen syntyminen ja keräys.

Suoritettavat mittaukset

- suotovesimäärät (kerroskohtaisesti)
- tiivistyskerrosten vuotojen paikallistaminen
- kosteus jätepenkereen sisällä
- lämpötila jätepenkereen sisällä
- pH jätepenkereen sisällä.

Päästöt

Tässä kohdassa esitetyillä toimenpiteillä saadaan valumavesiä, suotovesipäästöjä (maaperään ja pohjaveteen kohdistuvat päästöt) ja kaatopaikalla syntyviä kaasuja (ilmakehään kohdistuvat päästöt) koskevia tietoja mm. kaatopaikan ympäristökuormituksen arviointia varten. Toimenpiteillä tulisi myös pystyä arvioimaan lopetetun kaatopaikan seurantavelvoitteen kestoa (jälkihoitoaikaa).

Suoritettavat mittaukset

- pohjaveden laatu
- valumavesi: määrä ja laatu
- suotovesi: määrä ja laatu
- kaasupäästöt: määrä ja laatu
- ilmastotiedot

Säätila, ilmastotiedot

VNp:n mukaisesti ja ympäristönsuojelujärjestelmien tulosten tukinnan ja arvioinnin tarpeisiin edellytetään koottavan seuraavat sää tiedot

- lämpötila
- sademäärä
- tuuli
- haihtuminen
- ilman kosteus
- ilmanpaine

Sää- ja ilmastotietoja tarvitaan myös kaatopaikan käytön aikaisen toiminnan hallintaan ja ohjaamiseen.

Tilanne mittausjärjestelmien markkinoilla

Maailmalla on tarjolla ja käytössäkin hyvin runsaasti monentasoisia jätepenkereen ja kaatopaikan ympäristön tilan mittaukseen käytettäviä mittalaitteita. Ehkä runsaimmin (esim. internetissä hakusanoilla landfill, monitoring) referoituja ovat kaatopaikkakaasuihin liittyvät seurantamittaukset. Myös jätepenkereen lämpötilan ja vesipinnan mit-

taukseen löytyy runsaasti mittalaitteita. Perinteisissä geoteknisissä mittauksissa (esim. jätteenkieren painumat ja deformaatiot) käytettävät mittausmenetelmät ovat osin sovellutuskelpoisia myös kaatopaikalle.

Kaatopaikoille asennettujen erilaisten mittausjärjestelmistä, niiden tarkoituksenmukaisuudesta ja luotettavuudesta on niukasti yleistettävissä olevaa raportoitua tietoa. Sen sijaan case-tapauksia on esitelty lukumääräisesti useita esim. "The International Landfill and Waste Management Symposia"-julkaisuissa eri vuosilta (ns. Sardinian konferenssit).

Suomessa kaatopaikkapenkereen sisäisten prosessien seuranta- ja mittausmenetelmiä ja järjestelmiä on aivan viime vuosina kehitetty ja testattu mm. Jyväskylän yliopistossa meneillään olevassa STREAMS-projektissa "Kaatopaikan prosessien ohjaus". Hankkeen tavoite on kehittää teknologiaa, joilla ohjataan kaatopaikan prosesseja haitallisten ympäristö- ja terveysvaikutusten minimoimiseksi, jätetäytön kapasiteetin lisäämiseksi sekä kaatopaikan jälkihoitovaiheen lyhentämiseksi. Kohdealueina ovat lähitulevaisuudessa suljettavat kaatopaikat, joilla on runsaasti biohajoavaa ainesta sekä uudet kaatopaikat, joille tullaan sijoittamaan esikäsiteltyä jätettä. Hankkeessa tehdään koetoimintaa käytännön kaatopaikkakohteissa, koalueilla sekä laboratoriomittakaavassa.

Vuotojen ja vuotovesien havainnointi

Eristysrakenteiden tehtävänä on pitää jätetäytössä muodostuva suotovesi mahdollisimman hyvin erossa pohjavedestä tai ainakin pienentää pohjaveteen pääsevien aineiden määrää määritellyyn "haitattomuuden" rajaan saakka. Eristysrakenteen toimivuuden varmistaminen pitkällä aikavälillä edellyttää siten mahdollisten päästöjen havaitsemista pohjatiivisterakenteen alla tai muodostuneiden vuotokohtien paikallistamista mielellään heti niiden ilmaannuttua. Esim. Yhdysvalloissa vaaditaan kaatopaikoissa vuotovesien havaintojärjestelmä yhdistelmä rakenteen alimmaisena kalvon päälle /3/. Vuotovesijärjestelmästä tuleva vesi johdetaan tarkkailukaivoon ja sen määrä mitataan. Alemman kalvon päältä kerättävät haitta-aineetkaan eivät kuitenkaan osoita alemman kalvon toimivuutta.

Lisäksi kaatopaikkoihin on USA:ssa asennettava pohjaveden tarkkailujärjestelmä. Pohjavesiputkia on asennettava pohjaveden virtaussuuntaan nähden sekä kaatopaikan alapuolelle että yläpuolelle. Putkien määrä ja asennussyvyys riippuu geologisista ja hydrologista tekijöistä, mutta putkista on pystyttävä ottamaan pohjavesinäytteet ylimmästä pohjavesiesiintymästä. Analysoimalla vesinäytteet voidaan vuotokohtat yleensä havaita. Harvakseltaan sijoitettavat putket eivät välttämättä osoita vuotoa ja jos osoittavat, vuotoa on jo tapahtunut kaatopaikan mittasuhteista ja tarkastelupisteen sijainnista johtuen jo mahdollisesti pitkänkin aikaa. Kaliforniassa vaaditaan lisäksi pohjaveden yläpuolisesta osittain kyllästyneestä kerroksesta joko lysimetrein tai näytteenotoin tehtävää vuototarkkailua.

Yksi varsin lupaavalta tuntuvista ja tulevaisuudessa yleistyvistä seurantamenetelmistä tulee olemaan "älykäs geomembraani". Siinä geomembraaniin asennetaan jo valmistusvaiheessa kuituoptiikkaa. Menetelmästä käytetään nimeä GMMS (Geosynthetic Membrane Monitoring System). Tietyin välein geomembraanissa olevalla kuituoptiikalla voidaan tietokoneen avulla havainnoida mm. pintarakenteessa olevasta kalvosta painumia, kosteuspitoisuuksia, nesteen pinnan tasoa, havaita repeytymiä kalvossa ja määrittää luiskan vakavuutta. Menetelmää on kehitetty niin, että se lisää geomembraanin hintaa ainoastaan parillakymmenellä prosentilla /72/. Menetelmä vaikuttaa tehokkaalta, koska sillä voidaan periaatteessa havaita mahdolliset vauriot esim. pintarakenteessa. Erittäin mielenkiintoiseksi menetelmän tekee se, että sillä kerättävää aineistoa pintarakenteen käyttäytymisestä voitaisiin periaatteessa käyttää esimerkiksi Markovin ketjulla tapahtuvaan käyttöiän määrittämiseen /5.2.4/. Näin rakenteen valvonta ja käyttöiän ennakointi voitaisiin yhdistää suhteellisen helposti.

Vastaavan tyyppisiä (sähköisiä) geofysiikkaan perustuvia vuotokohtien ja vuotomäärien arviointimenetelmiä on jo käytössä /3/. Viitteissä /85/ ja /86/ on kuvattu ELDST (Electronic Leak Detection System) -järjestelmää. Tässä menetelmässä seurattavan tiivistyränteen alle asennetaan verkkotyypistä anturit, joista tietokoneavusteisesti suoritetaan vastusmittaus ja tulosten tulkinta. Lähinnä teollisuuden allas-sovellutuksissa käytetylle järjestelmälle esitetty tarkkuus vuodon havainnoinnin suuruuden ja sijainnin suhteen vaikuttaa kaatopaikkarakenteita ajatellen heikohkolta, mutta anturien sijoittelulla riittävät tarkkuusvaatimukset ovat todennäköisesti saavutettavissa. Ensimmäinen järjestelmä on otettu käyttöön jo 1987 ja sen kerrotaan toimivan edelleen. Järjestelmiä on asennettu kaatopaikkoihinkin ja niitä voidaan käyttää paitsi vuodon havaitsemiseen, myös geomembraanin ehjyyden toteamiseen ennen kaatopaikan täyttövaihetta (laadunvalvonta) /3/.

Muita mahdollisia seurantamenetelmiä ovat mm. diffuusioletku (kaasuuntuvien aineiden vuotokohtien paikallistamiseen) sekä erilaiset sähkökemialliset havaintokaapelit. Kaapeleita on yleensä käytetty varastotankkien tai putkilinjojen vuotojen havaitsemiseen. Useimmat näistä menetelmistä mittaavat tiettyjä hiilivetyjä, jotka aiheuttavat fysikaalisia tai kemiallisia muutoksia kaapelissa. Kaapelit mittaavat yleensä lika-aineita suhteellisen "kapealla alueella", jolloin on varmistettava kaapelin sopivuus kyseiseen käyttötarkoitukseen. Erityisiä suotovettä havainnoivia kaapeleita ei ole /3/.

Erilaiseen anturitekniikkaan perustuvia mittausmenettelyitä on myös olemassa, mm. taajuusalueella toimivat maan dielektrisyttä mittaavat kosteusmuutosten (dielektrisyysmuuttumisen) tunnistamiseen tarkoitetut anturit /3/. Anturitekniikoiden heikkoutena on luonnollisesti mittausten pistemäisyys, anturien asennustarve ennen eristekerroksen tekoa ja näistä aiheutuvat suuret kustannukset sekä epävarmuus anturien pitkäaikaiskestävyydestä.

Painumien tarkkailu

Kaatopaikan sulkemisen ja pintaeristysrakenteiden rakentamisen jälkeen on seurattava sekä kaatopaikan kokonaispainumia että painumaeroja. Merkittävimmät painumat voivat aiheutua jätepenkereen kokoonpuristumisesta eli jätteen tiivistymisestä, joka voi olla hyvinkin epätasaista. Painumaerot ovat erityisen haitallisia pintaeristysrakenteiden pitkäaikaistoiminnalle, koska useat mineraaliainestiivisteet sietävät vain noin 0.5 % suuruisia venymiä. Tiivistekerrosten painumat saattavat johtaa siihen, että niiden päällä olevien kuivatuskerrosten toiminta häiriintyy (kallistukset muuttuvat).

Painumien havainnointi ja seuranta voi perustua esim. ilmakuviin tai tavanomaisiin painumanmäärittämismenetelmiin, kuten vaaitukseen tai nykyisin GPS-satelliittipaikannukseen perustuvina. Ilmakuvien erottelukyky painumaerojen osalta ei välttämättä ole kovin hyvä, mutta kuvien tulkinta esim. kasvillisuuden perusteella saattaa antaa viitteitä vaurioista.

Painumaseurannan yleisenä haittana on, etteivät mittaamallaan havaitut painumaerot selvitä sitä, mistä painuma aiheutuu. Haluttaessa selvittää erityisesti esim. pintarakenteen painumia, on käytettävä painumalevyjä tai esim. maatulkausta pintarakenteen muodonmuutosten selvittämiseksi.

Painumien osalta käyttökelpoisimman seurantamenettelyn saattaisi pintarakenteen osalta muodostaa säännöllisin väliajoin tietyllä ruutuverkolla suoritettu pintavaaitus, jota täydennetään kriittisimpien kohtien tai linjojen painumalevymittauksilla (mitataan itse tiivisteiden painumaa ja kuivatuskerroksen painumaa; luiskissa myös koordinaatit siirtymättömyyden varmistamiseksi) sekä kohteessa tietyin väliajoin suoritettavilla (patojen turvatarkastusta vastaavilla) silmä määrällisillä tarkasteluilla. Mahdollisten vikojen havaitsemisen jälkeen vikojen tarkempi paikantaminen on mahdollista esimerkiksi maatulkaalla.

6.2 Eristysrakenteiden laadunvalvonta ja -varmistus

Kaatopaikan rakenteita säätelee Valtioneuvoston päätös kaatopaikoista 861/97 ja sen muutos 1049/1999 /92/. Kaatopaikkarakenteiden laadunvalvontaa koskevia ohjeita on annettu myös Suomen ympäristökeskuksen ympäristöoppaissa Nro 36 ”Kaatopaikan tiivistysrakenteet” ja Nro 89 ”Kaatopaikkojen lopettamisopas”. Kaatopaikan suojausrakennetta koskevia määräyksiä annetaan myös ko. kohteen ympäristöluvassa. Tuotehyväksytyä rakennetta "säätelee" tuotehyväksyntäasiakirja.

Tätä raporttia laadittaessa (kevät 2004) on viimeisteltävänä Tiivistysrakenteiden laadunvalvonta-ohje /47/, jossa annetaan varsin yksityiskohtaisia ohjeita kaatopaikkojen

tiivistysrakenteiden laadunvalvonnasta. Ohje on laadittu ohjaamaan ja yhtenäistämään tiivistysrakenteiden laadunvalvontaa. Tekstissä keskitytään erityisesti riippumattoman laadunvalvonnan sisältöön ja sille asetettaviin vaatimuksiin ja ohjeessa on pyritty kuvaamaan hyvä laadunvalvontakäytäntö. Ohjeessa on malliasiakirjoja sekä taulukko eri vaiheissa tehtävistä laadunvalvontamittauksista. Tässä luvussa esitetyt asiat ovat pääosin poimintoja tuosta ohjeluonnoksesta ja ohjeiden eräisiin kohtiin on lisätty mainintoja, joissa esitetään, miten tuotehyväksytyyn tuotteen / rakenteen käyttö voitaisiin ottaa huomioon.

Kaatopaikan tiivistysrakenteiden ja -materiaalien tuotehyväksyntämenettely lähtee siitä, että tuotehyväksytyyn rakenteen laadunvalvonta tapahtuu normaaleja laadunvalvontamenettelyitä noudattaen. Mahdolliset poikkeamat esitetään tuotehyväksyntäasiakirjassa tai yksilöidymminkin rakennussuunnitelmassa. Tuotehyväksyntämenettelyn (tämän raportin luku 1) mukaan hyväksyntäpäätökseen liitetään menettelytapa, jota noudatetaan hyväksytyyn materiaalin tai rakenteen seurantatiedon ja käyttökokemusten kokoamiseksi ja toimittamiseksi asiantuntijaryhmälle. Myös tuotehyväksytyjen eristysrakenteiden rakentamisen aikainen seurantatieto rakennuskohteista kootaan ja raportoidaan kohteessa tehtävän riippumattoman laadunvalvonnan yhteydessä.

Rakennusprojektin toimintaketjussa riippumattoman laadunvalvojan osuus alkaa joskus jo lupapäätöksen saannin jälkeen tai yleisemmin riippumaton laadunvalvoja valitaan urakkakyselyvaiheessa. Riippumaton laadunvalvonta päättyy riippumattoman laadunvalvonnan loppuraportin luovuttamiseen rakennuttajalle rakennustyön valmistuttua. Tarpeen mukaan tarvittavien jälkikorjaustoimien toteuttamisen valvonta voidaan sisällyttää riippumattoman laadunvalvojan tehtäviin. Hyvän käytännön mukaisesti korjaustoimenpiteet tehdään työn edetessä jo ennen riippumattoman laadunvalvonnan loppuraportin valmistumista.

Laatuvaatimusten määrittäminen ja esittäminen

Materiaalivalinnan lähtökohtana on, että suunnitelmissa (työselitysteksti ja suunnitelmapiiirustukset) esitetään materiaali- ja laatuvaatimukset kullekin rakenneosalle. Tuotehyväksynnän yhteydessä esitetty yleinen työselitys on aina "päivitettävä" vastaamaan rakennettavaa kohdetta. Jos tiivistysrakenteena käytetään tuotehyväksynnän saanutta rakennetta, niin rakenne on toteutettava tuotehyväksyntäasiakirjan mukaisena. Mikäli urakoitsija muuttaa jotain materiaalia tai rakenneosaa, saattaa seurauksena olla, että kyseessä ei ole enää tuotehyväksytty rakenne.

Tuotehyväksyttyäkin rakennetta käytettäessä rakenteen ja materiaalien laatuvaatimukset tulee aina tarkistaa tapauskohtaisesti ottaen huomioon käytettävät materiaalit ja paikalliset olosuhteet, erityisesti pohjamaan laatu ja jätteen sekä suotoveden (jätteen laadun perustella arvioitu) koostumus.

Rakennuskohteen suunnitelmapiirustuksiin ja työselitykseen lisätään / sisällytetään myöskin suojausrakenteiden rakennustyön aikana samoin kuin kaatopaikkapenkereen teon (kaatopaikan täytön) aikana tuotehyväksyntäpäätöksessä mahdollisesti mainittujen seurantamittauslaitteiden paikat ja asennusohjeet. Samoin mittausten tekemisen aikataulu ainakin kaatopaikan aktiivivaiheen ajalta esitetään työselityksessä, elleivät ne jo sisälly ympäristöluvan edellyttämään "lakisääteiseen" tarkkailuun. Jälkihoitovaiheen aikaisten seurantamittausten suorittamisesta määrätään kaatopaikan ympäristöluvassa. (vrt. Valtioneuvoston päätös kaatopaikoista 861/97 ja sen muutos 1049/1999: liite III Valvonta ja tarkkailu toiminta ja jälkihoitovaiheessa)

Suunnitelma-asiakirjoissa esitetään myös alustava laadunvalvontasuunnitelma, jossa esitetään, mitä parametrejä seurataan eri rakennusosissa, millä menetelmillä ja miten tiheästi ennakkokoevaiheessa, koekenttävaiheessa ja rakentamisen aikana. Laadunvalvontasuunnitelmaa laadittaessa on otettava huomioon tuotehyväksytyt rakenteen käytön raportoinnin edellyttämät raportoittavat asiat ja mahdolliset lisäkokeet.

Materiaaleista tehdään tarvittaessa ennakkokokeita, joiden perusteella arvioidaan käytettävissä olevien materiaalin soveltuvuutta. Ennakkokokeista on esitettävä rakennuttajalle ja riippumattomalle laadunvalvojalle sekä ympäristöviranomaiselle kaikki tulokset valitun materiaalin osalta. Seosaineet ja -määrät on mainittava. Urakoitsija esittää kaikki laadunvalvontatulokset työmaapöytäkirjoissa tai laadunvalvonta-asiakirjoissa.

Koekenttävaiheessa varmistetaan lopullisesti, että urakoitsijan esittämät materiaalit ja työtavat soveltuvat kohteeseen, ja että ne tuotehyväksytyä rakennetta käytettäessä ovat tuotehyväksynnän mukaisia.

Tiivistysrakenteiden laadunvalvonta

Laadunvalvonta jakaantuu

- materiaalin valmistuksen laadunvalvontaan ja
- rakennusaikaiseen laadunvalvontaan.

Työmaalla sekoitettavista tuotteista on tehtävä rakentamisen aikana huomattavasti enemmän laadunvalvontamittauksia kuin teollisesti valmistetusta tuotteesta, jonka valmistusvaiheen laadunvalvonta tehdään / on tehty jo tuotantolaitoksessa.

Rakennustyön valmistelu

Urakoitsija toimittaa ennen rakennustyön aloitusta tuotetiedot ja tuotannon laadunvalvontatiedot urakoitsijan materiaaleista, kuten geosynteettisistä tuotteista, putkista ja kiiviaineista. Riippumaton laadunvalvoja tarkistaa, että tuotteet ovat työselityksen vaatimusten mukaisia ja täyttävät asetetut vaatimukset tuotannaikaisen laadunvalvonnan

ja ominaisuuksien osalta. Mikäli materiaaleista ei ole tehty työselityksessä edellytetyjä määrittelyksiä tai käytetyt menetelmät ovat olleet työselityksessä esitetyistä poikkeavia, tehdään tarvittaessa täydentäviä määrittelyksiä. Keskeisiä parametrejä voidaan muutenkin tarkistaa teettämällä kokeita, mikäli niin on työselityksessä edellytetty tai se katsotaan muuten tarpeelliseksi. Urakoitsijan esittämä tuote hylätään, mikäli se ei täytä asetettuja vaatimuksia tai urakoitsija ei pysty esittämään vaadittuja laatuasiakirjoja ennen työn aloitusta.

Rakennustyönaikainen laadunvarmistus

Rakennustyön aikainen laadunvarmistus koostuu seuraavista tehtävistä:

- käytettävien materiaalien käyttöön liittyvät kokeet
- vaatimusten täyttymisen osoittamiseen liittyvät kokeet
- työn valvonta
- materiaaliominaisuuksien valvonta
- muiden laatuun vaikuttavien seikkojen valvonta (materiaalien ja tarvikkeiden varastointi, työmaan siisteys, työsuojelutoimenpiteet, yms.).

Asiantuntijavalvontaa olisi pyrittävä kohdentamaan kriittisiin työvaiheisiin niin paikallaoloa kuin kokeiden määrääkin lisäämällä.

Laboratoriomäärittelysten laadusta voidaan varmistua käyttämällä laboratoriota, joilla on käytössä toimiva laatujärjestelmä, standardinmukaiset laitteistot ja mittausmenetelmät sekä pätevä henkilökunta.

Laboratoriokokeiden lisäksi riippumaton laadunvalvoja voi tehdä laadunvalvontasuunnitelmassa esitettyjä kenttäkokeita pistokoelunonteisesti. Sekä laboratorio- että kenttäkokeiden määrät esitetään ennen rakentamisen käynnistymistä laaditussa riippumattoman laadunvalvonnan toteutussuunnitelmassa. Kokeet tehdään laadunvalvontasuunnitelmasa esitettyjen koetapojen mukaisesti.

Kaikista havaituista laatuvaatimusten alituksista tai työmaalla havaituista virheellisistä työtavoista yms. ilmoitetaan välittömästi sekä rakennuttajan edustajalle että urakoitsijan edustajalle. Tarvittaessa laaditaan poikkeamaraportti, mikäli työ ei etene suunnitelmien mukaisesti. Kaikki laadunvalvontatyöhön liittyvät toimenpiteet (esim. työmaakäynnit, suunnitelmien tarkistaminen) kirjataan ylös ja liitetään loppuraporttiin soveltuvin osin.

Hyväksymiskriteerit ja toimenpiderajat

Hyväksymiskriteerit ja toimenpiderajat on esitettävä etukäteen suunnitelmissa ja urakasopimuksessa yksiselitteisesti. Tuotehyväksytylle rakenteelle vastaavat tiedot pitäisi sisällyttää tuotteen "selostukseen". Asetettuja laatuvaatimuksia ei saa alittaa. Tuotehy-

väksytyä rakennetta käytettäessä tehdyn tiivistysrakenteen on oltava tuotehyväksynnän mukainen. Tarvittaessa laatuvaatimukset alittava rakenteen osa tai materiaali on poistettava ja korvattava uudella, mikäli muilla toimenpiteillä ei päästä vaadittavaan laatu-tasoon. Mikäli kriteerit on asetettu yksiselitteisesti, todettavien laatuvaatimusten alittu-misten aiheuttamat toimenpiteet voidaan tällöin määritellä yhteisesti tiedossa olevien sääntöjen mukaisesti ilman harkinnanvaraisuudesta aiheutuvaa epävarmuutta.

Loppuraportti

Riippumattoman laadunvalvonnan loppuraportti on tarkoitettu paitsi rakennuttajalle myös viranomaiskäsittelyä varten. Siinä esitetään tiivistetyssä muodossa laadunvalvonnan toteutuksen pääpiirteet ja olennaisimmat tulokset johtopäätöksineen suunnitellun laatu-tason toteutumisesta. Lisäksi esitetään riippumattoman laadunvalvojan käsitys, on-ko rakenne toteutettu suunnitelmien ja ympäristöluvan ehtojen mukaisesti. Yksityis-kohtaisemmat tulosten esittelyt ja kuvaukset voidaan tarvittaessa esittää raportin liitteis-sä. Loppuraportti toimitetaan työn rakennuttajalle ja rakennuttajan esittämän jakelulistan mukaan projektin muille osapuolille.

Riippumattoman laadunvalvonnan loppuraportti voidaan laatia saman sisällysluettelon perusteella kuin urakoitsijan laadunvalvontaraportti. Raportin laajuus riippuu urakoitsi-jan laadunvalvontaraportin sisällöstä ja riippumattoman laadunvalvojan työn sisällöstä.

Loppuraporttiin tulisi liittää tiivistelmä tehtyjen rakenteiden hyväksyttävyydestä. Tuote-hyväksyntämenettelyn hyväksyntäpäätöksen edellyttämä seurantatieto rakennuskoh-teesta voidaan sisällyttää tähän raportinosaan tai sen jatkoksi. Tämä seurantatieto toi-mitetaan suoraan tuotehyväksyntäryhmälle (sen tekniselle sihteerille). Sisällytettävistä erityisistä asioista esitetään luettelo ko. rakenteen tuotehyväksyntäpäätöksessä.

7. Näkökohtia kaatopaikan suojausrakenteiden suunnittelusta ja mitoituksesta

7.1 Kaatopaikalle sijoitettavan jätteen laadun muuttuminen tulevaisuudessa

Suomen yhdyskuntajätehuolto on perustunut kaatopaikkakäsittelyyn, jolloin jäte loppusijoitetaan kaatopaikoille esikäsittelemättömänä. Biohajoavan jätteen osuus loppusijoitettavasta jätteestä on pysynyt korkeana, vaikka syntypaikkalajitteluun pohjautuvaa hyödyntämistä on kehitetty.

Viime vuosien aikana on tullut voimaan useita säädöksiä, jotka tulevat vaikuttamaan sekä loppusijoitettavan jätteen koostumukseen että samalla myös kaatopaikkojen tekniseen toteutukseen. Seuraavassa on käsitelty voimassa ja valmisteilla olevia tavoitteita ja säädöksiä, jotka vaikuttavat jo lähivuosina jätteiden loppusijoitukseen. Tärkeimmät tällaiset säädökset ovat

- Valtioneuvoston päätös kaatopaikoista (VNp 861/1997, muutos 1049/1999) /92/.
- EY:n direktiivi kaatopaikoista (1999/31/EC) (otettu huomioon VNp 861/1997 ja sen muutoksessa 1049/1999 /60/ ja /9/
- Tarkistettu valtakunnallinen jättesuunnitelma vuoteen 2005 /18/
- EU neuvoston päätös: Perusteet ja menettelyt jätteen hyväksymisestä kaatopaikoille (2003/33/EY) /62/

VNp kaatopaikoista 861/1997

Valtioneuvoston päätöksessä kaatopaikoista (861/1997) edellytetään, että jätteet esikäsitellään ennen niiden sijoittamista kaatopaikalle. Päätöksen mukaan vuoden 2004 jälkeen kaatopaikoille saa sijoittaa vain sellaista yhdyskuntajätettä, josta suurin osa biohajoavasta jätteestä on kerätty hyödyntämistä varten erilleen muusta jätteestä. Päätös myös edellyttää, että kaikki loppusijoitettava jäte on esikäsiteltävä. Esikäsitellyllä tarkoitetaan lajittelu mukaan lukien fysikaalisia, kemiallisia, biologisia tai termisiä menetelmiä, joiden avulla muutetaan jätteen ominaisuuksia sen määrän tai haitallisuuden vähentämiseksi taikka sen käsittelyn helpottamiseksi tai hyödyntämisen tehostamiseksi. Lisäksi päätöksessä esitetään mm. kaatopaikan pohjan tiiveyttä, suotovesien ja kaasujen keräystä ja käsittelyä sekä kaatopaikkaprosessin ohjausta koskevat vaatimukset.

Kaatopaikkadirektiivi 1999/31/EC

Kaatopaikkadirektiivin vaatimukset on pääosiltaan otettu osaksi kansallista lainsäädäntöä valtioneuvoston päätöksellä kaatopaikoista (VNp 861/97, muutos 1049/99). Kuiten-

kaan mukaan ei ole otettu direktiivin sitä vaatimusta, jonka mukaan loppusijoitettavan biohajoavan yhdyskuntajätteen määrän tulee vähentyä vuonna 1995 tuotetusta biohajoavan jätteen määrästä seuraavasti /79/:

- 75 %:iin vuoteen 2006 mennessä
- 50 %:iin vuoteen 2009 mennessä
- 35 %:iin vuoteen 2016 mennessä.

Kaatopaikkadirektiivin vaatimuksista huolimatta suuri osa loppusijoitettavasta jätteestä olisi vielä vuoden 2016 jälkeenkin biohajoavaa jätettä. Vuonna 2016 loppusijoitettavasta jätteestä neljäsosa on biohajoavaa /79/. Käytännössä biohajoavan jätteen osuus on selvästi suurempi kuin neljännes, sillä myös ei-biohajoavaa jätettä hyödynnetään.

Tarkistetussa valtakunnallisessa jätesuunnitelmassa vuoteen 2005 on esitetty useiden kaatopaikkäsittelyyn vaikuttavien ohjauskeinojen käyttöönottoa tulevaisuudessa. Tällaisia ovat esim.:

- vuoden 2010 alusta alkaen saa kaatopaikalle sijoittaa vain sellaista yhdyskuntajätettä, jonka orgaanisesta ja biohajoavasta osasta on poistettu vähintään 80 %
- verotuki jätepolttoaineilla ja jätteestä valmistetulla biokaasulla tuotetulle sähkölle.

EU neuvoston päätös 2003/33: Perusteet ja menettelyt jätteen hyväksymisestä kaatopaikoille

EU-maille yhteiset "Perusteet ja menettelyt jätteen hyväksymisestä kaatopaikoille" on hyväksytty EU:n neuvostossa joulukuussa 2002 (Neuvoston päätös 2003/33/EY, 19.12.2002). Annettuja kriteerejä on sovellettava EU-maissa viimeistään vuonna 2005. Taulukossa 7.1 on esitetty tiivistelmä eri kaatopaikkaluokista ja alaluokista. Direktiiviliitteen kelpoisuuskaatopaikoille on esitetty seuraaville jätteille /100/:

Pysyvän jätteen kaatopaikalle sijoitettava jäte

Pysyvällä jätteellä tarkoitetaan jätettä, joka ei liukene, pala, hajoa biologisesti tai reagoi muiden aineiden kanssa aiheuttaen vaaraa terveydelle tai ympäristölle ja jossa ei pitkään ajan kuluessa tapahdu olennaisia muita fysikaalisia, kemiallisia tai biologisia muutoksia ja jonka sisältämien haitallisten aineiden kokonaishuuhtoutuminen ja -pitoisuus samoin kuin kaatopaikkaveden myrkyllisyys ympäristölle ovat merkityksettömiä eikä siitä ennen kaikkea aiheudu vaaraa pinta- tai pohjaveden laadulle. Pysyvän jätteen ominaisuuksien tulisi olla ns. luonnonmateriaalien kaltaisia.

Tavanomaisen epäorgaanisen jätteen kaatopaikalle sijoitettava jäte

Jäte, jota ei luokitella ongelmajätteeksi eikä pysyväksi jätteeksi, on tavanomaista jätettä. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, että tavanomaiseksi jätteeksi luokiteltu jäte olisi aina kaa-

topaikkakelpoista sijoitettavaksi tavanomaisen jätteen kaatopaikalle. Direktiiviliitteen mukaan jäte on yleensä aina testattava kaatopaikkakelpoisuuden arvioimiseksi. Poikkeuksena ovat ainoastaan tavanomaiseksi jätteeksi luokiteltu yhdyskuntajäte, asbestijäte ja muutamat liitteessä pysyviksi jätteeksi määritellyt puhtaat jätevirrat. Jätteiden kelpoisuusvaatimukset koskevat lähinnä liukoisuusominaisuuksia ja pysyvän jätteen ja ongelmajätteen osalta myös joidenkin aineiden kokonaissisältöä. Kaatopaikkadirektiivin liitteessä on lisäksi esitetty mahdollisuus tapauskohtaisen riskinarvioinnin kautta hyväksyä joillekin jäteominaisuuksille korotettu raja-arvo.

Ehdotuksessa tavanomaisen jätteen kaatopaikat on jaettu neljään alaluokkaan kaatopaikalle sijoitettavan jätteen laadun perusteella. Näistä yksi (alaluokka B1b, taulukko 1) on tarkoitettu epäorgaaniselle jätteelle, jossa orgaanisen tai biohajoavan aineksen osuus on pieni. Muille kaatopaikkaluokille hyväksyttävillä jätteillä annettavat kelpoisuusvaatimukset määritetään kansallisesti.

Ongelmajätteen kaatopaikalle sijoitettava jäte

Ongelmajätteellä tarkoitetaan jätettä, joka kemiallisen tai muun ominaisuutensa takia voi aiheuttaa erityistä vaaraa tai haittaa terveydelle tai ympäristölle. Jäteasetuksessa (1390/1993, muutos 1128/2001) on esitetty vaaralliset ominaisuudet ja pitoisuusrajat, joiden perusteella luokittelu tulee suorittaa. Ympäristöministeriön päätöksessä yleisempien jätteiden ja ongelmajätteiden luettelossa (1129/2001) on merkitty ongelmajätteeksi yleensä luokiteltavat jätteet. Ongelmajätteen luokituksen tekee aina jätehuoltoviranomainen. Ongelmajätteet voidaan myös käsitellä (esim. kiinteyttää) siten, että niiden sijoitus tavanomaisen jätteen kaatopaikalle on mahdollista. Kaikki ongelmajätteet eivät välttämättä kuitenkaan ole kaatopaikkakelpoisia ongelmajätteen kaatopaikalle. Kaatopaikkakelpoisuus on aina arvioitava kaatopaikkatesteillä.

Käsitelty ongelmajäte

Käsitelty ongelmajäte sijoitetaan tavanomaisen jätteen kaatopaikalle (B1b), johon sijoitetaan vain epäorgaanista ja jätettä.

Taulukko 7.1. Tiivistelmä kaatopaikkaluokista ja esimerkkejä alaluokista (EY päätös 2003/33)/100/

Kaatopaikkaluokka	Tärkeimmät alaluokat (maanalaiset varastot, tietyn yksittäisen jätteen sekä kiinteitetyn, monoliittisen jätteen kaatopaikat ovat mahdollisia kaikissa kaatopaikkaluokissa)	Koodi	Kelpoisuusperusteet
Pysyvän jätteen kaatopaikka	Kaatopaikat, joihin voidaan sijoittaa pysyvää jätettä	A	Huuhtoutumista ja orgaanisen aineksen osuutta koskevat perusteet asetettu EU:n tasolla Epäorgaanisten ainesta koskevat perusteet voidaan asettaa jäsenvaltioiden tasolla.
Tavanomaisen jätteen kaatopaikka	Epäorgaanisen tavanomaisen jätteen kaatopaikat. Jätteen orgaanisen / biohajoavan aineksen osuus on alhainen, eikä jäte täytä ehdotuksessa annettuja perusteita epäorgaaniselle tavanomaiselle jätteelle, joka voidaan sijoittaa alaluokan B1b kaatopaikalle.	B1a	Huuhtoutumista ja kokonaissisältöä koskevia perusteita ei ole asetettu EU:n tasolla.
	Epäorgaanisen tavanomaisen jätteen kaatopaikat. Jätteen orgaanisen / biohajoavan aineksen osuus on alhainen	B1b	Huuhtoutumista ja orgaanisen aineksen osuutta sekä muita ominaisuuksia koskevat perusteet on asetettu EU:n tasolla; perusteet ovat yhteisiä rakeiselle tavanomaiselle jätteelle sekä pysyvälle, reagoimattomalle vaaralliselle jätteelle. Viimeksi mainittua varten on asetettava vakautta koskevia lisäperusteita jäsenvaltioiden tasolla. Stabiloitua ja kiinteitettyä jätettä koskevat perusteet on asetettava jäsenvaltioiden tasolla.
	Tavanomaisen orgaanisen jätteen kaatopaikka	B2	Huuhtoutumista ja kokonaissisältöä koskevia perusteita ei ole asetettu EU:n tasolla.
	Sekalaisen tavanomaisen jätteen kaatopaikat. Jätteessä on runsaasti sekä orgaanista / biohajoavaa ainesta että epäorgaanista ainesta	B3	Huuhtoutumista ja kokonaissisältöä koskevia perusteita ei ole asetettu EU:n tasolla.
Ongelmajätteen kaatopaikka	Ongelmajätteen maanpäällinen kaatopaikka	C	Rakeisen vaarallisen jätteen huuhtoutumista sekä tietyn aineksen kokonaissisältöä koskevat perusteet on asetettu EU:n tasolla Stabiloidun ja kiinteitetyn jätteen perusteet on asetettava jäsenvaltioiden tasolla. Pilaavia aineita koskevat lisäperusteet voidaan asettaa jäsenvaltioiden tasolla.
	Maanalainen varasto	DHAZ	EU:n tasolla asetetut erityistavoitteet luetellaan ehdotuksen liitteessä A.

Esikäsittelyn vaikutukset loppusijoitukseen

Vanhoille jo suljetuille pienehköille kaatopaikoille on sijoitettu lähinnä sekajätettä, jossa biohajoavan jätteen määrä voi olla huomattava. Kasvihuonekaasupäästöt eivät edellytä

kaasun talteenottoa. Suljetuille tai lähivuosina (vuoteen 2007 mennessä) suljettaville kaatopaikoille on sijoitettu sekajätettä ja jätettä, josta erilliskerätty biojäte on poistettu. Biohajoavan jätteen määrä voi kuitenkin olla huomattava. Kaatopaikkajätteen koostumus ja mahdollinen kaatopaikkakaasun talteenotto on otettava huomioon pintaeristyksiä suunniteltaessa ja rakennettaessa.

Uusille tällä hetkellä käytössä oleville ja lähimmän vuosikymmenen aikana suljettaville tai ainakin osittain suljettaville kaatopaikoille (kaatopaikan eri osille) sijoitetaan tällä hetkellä erilliskerättyä kuivajätettä, josta osa polttokelpoisesta jakeesta on poistettu. Jatkossa näille kaatopaikoille sijoitetaan mahdollisesti mekaanis-biologisesti esikäsittelyä kuivajätettä, tuhkaa ja/tai likaantuneita maita. Kaatopaikkajätteen koostumus ja mahdollinen kaatopaikkakaasun talteenotto on otettava huomioon pintaeristyksiä suunniteltaessa ja rakennettaessa.

Jätealan sääntelyn ja kehityksen perusteella voidaan päätellä, että tulevaisuuden kaatopaikat toimivat lähinnä epäorgaanisen jätteen loppusijoituspaikkoina (tuhkat ja kuonat, epäorgaaninen jäte, esikäsittely biohajoava jäte). Tarkkaa ajankohtaa tämän ennusteen toteutumiseksi on vaikea sanoa, mutta kyse lienee lähitulevaisuudesta. Tähän voidaan päästä jo nykyisillä kaatopaikkadirektiivin ja valtioneuvoston kaatopaikkapäätöksen lajittelu- ja esikäsittelyvaatimuksilla, jos esikäsittelyä tulkitaan tiukasti.

Jätteen esikäsittelyvaatimus merkitsee mitä ilmeisimmin, että biohajoavaa jätettä ei saa loppusijoittaa tulevaisuuden kaatopaikoille EU:n jäsenmaissa. Tulevaisuuden kaatopaikoille sijoitetaan siten lähinnä jätteen käsittelyn eri rejektejä, jotka mahdollisesti myös läjitetään omille alueilleen. Esimerkiksi geotekniset näkökohdat (rejektien geotekniset ja maarakennusominaisuudet) voivat kuitenkin tukea myös joidenkin rejektien yhteisläjitystä.

Nykyiset jätteiden hyödyntämistavoitteet ja kaatopaikkadirektiivin vaatimukset biohajoavan jätteen loppusijoituksen vähentämiseksi eivät suoraan merkitse biohajoavan jätteen kaatopaikkakäsittelyn loppumista. Loppusijoitettavan jätteen määrä vähenee kyllä selvästi, mutta merkittävä osuus tästä jätteestä on edelleen biohajoavaa. Siirtymävaiheessa loppusijoitettava jäte sisältää esikäsittelystä huolimatta edelleen vaihtelevan osuuden orgaanista biohajoavaa jätettä, mikä on otettava huomioon mm. kaatopaikan prosessien ohjauksessa ja eristysrakenteita suunniteltaessa.

Biologisesti stabiloidun ja nykyistä homogeenisemmaksi käsitellyn jätteen osuus kaatopaikoilla tulee kasvamaan. Muutos tapahtuu kuitenkin vähitellen, joten kaatopaikoille tullaan lähimmän vuosikymmenen aikana sijoittamaan monenlaatuista esikäsittelyä jätettä sekä mahdollisesti myös esikäsittelyä ja esikäsittelymättömän tai rajoitetusti esikäsittellyn jätteen seoksia. Eristysrakenteet tulee suunnitella tapauskohtaisesti kaatopaikalle

sijoitetun jätteen ja kaatopaikan toiminnan (suunniteltujen kaatopaikkaprosessien) perusteella.

Näillä lähtöoletuksilla esikäsittelyllä voidaan arvioida olevan mm. seuraavia kaatopaikkaan kohdistuvia vaikutuksia (Jätteiden loppusijoituksen tutkimustarpeet Suomessa 2002. Loppuraportti 1.2.2002. STREAMS ohjelma /79/):

Jätteen tiivistystarve ja käyttäytyminen kaatopaikalla

Sijoitettava materiaali on nykyistä tiheämpää ja tasalaatuisempaa. Tämä vaikuttaa jätepenkereeseen soveltuvaan tiivistystekniikkaan. Nykyisen tyyppisen raskaan tiivistyskalluston käyttö ei välttämättä ole tarpeen ja sen on todettu olevan hankalaa erityisesti jätteen kastuessa. Tiivistystarpeeseen ja -tekniikan valintaan vaikuttaa myös se, miten kaatopaikan halutaan jatkossa toimivan. Painumat vähenevät tai ovat helpommin hallittavissa, mutta tasalaatuisuus voi lisätä stabiliteettiongelmia kaatopaikalla ja kaatopaikkapenkereen luiskissa. Nämä seikat on otettava huomioon pintaeristystä suunniteltaessa ja rakennettaessa.

Tiiviin jättemateriaalin vedenjohtavuus ja kaasunläpäisevyys ovat pieniä. Tiivistetty materiaali voi vedenjohtavuudeltaan olla lähes kaatopaikkarakenteita vastaavaa. Kun esikäsitelty materiaali todennäköisesti on nykyistä kuivempaa ja vähemmän hajoavaa ainesta sisältävää, hajoamis- ja liukenemisprosessit hidastuvat, erityisesti, jos rakenne peitetään tiiviisti eikä vettä lisätä. Jätepenkereen kastelu saattaa olla tarpeen / järkevää kaatopaikkaprosessien nopeuttamiseksi. Kastelutarve ja -määrä voivat olla pintaeristyskerroksen tiivistyskerroksen mitoitusta ohjaavia tekijöitä.

Keski-Euroopassa keskustellaan ns. kestävästä kaatopaikasta. Tällöin tavoitteena on, että kaatopaikalla päästään mahdollisimman nopeasti stabiiliin, mahdollisimman vähän hoitoa ja valvontaa vaativaan tilaan. EU-direktiivien mukainen lähestymistapa on suljettu kaatopaikka, jossa jäte tiivistetään mahdollisimman hyvin ja veden pääsy jätteeseen estetään. Tällöin prosessit pysähtyvät tai hidastuvat. Tällainen kaatopaikka kuitenkin vaatii erittäin pitkää valvontaa (satoja vuosia). Pintaeristyskerroksen tiivistyskerroksen pitkäikäisyysvaatimus korostuu.

Mm. Hollannissa ja Tanskassa on esitetty vaihtoehtona kaatopaikkaprosessien ohjausta siten, että liukenevat aineet ja kaasut saadaan pois mahdollisimman nopeasti. Lopputavoitteena on stabiili tila hallittavissa ja ennustettavissa olevana aikana (noin 30 - 50 vuodessa). Pintaeristyskerroksen tiivistyskerroksen vedenläpäisevyysvaatimus ohjaa sen mitoitusta. Kaatopaikkoja pyritään myös stabiloimaan mm. sekoittamalla eri tyyppisiä jätteitä siten, että lopputulos on mahdollisimman neutraali.

Kaasut ja suotovedet

Orgaanisen aineksen vähentyessä kaatopaikan kaasuntuotto vähenee ja tämän seurauksena kaasun hyötykäyttö ei ole teknis-taloudellisesti järkevää. Kaasun keräyksen sijasta voidaan pyrkiä hapettamaan kaasut biologisesti pintakerroksessa. Tällöin pintaeristykseenkin tiivistyskerroksenkin suunnittelussa saattaa olla tarpeen ottaa huomioon hapettamistavoite.

Suotovesien määrä sekä suotovesiin liukenevan orgaanisen aineksen ja typen määrä vähenevät. Suotovesien koostumus ei välttämättä kuitenkaan kovin paljon muutu, koska haitta-aineet konsentroituvat pienempään vesimäärään. Kaatopaikan käyttötapa (veden kierrätys, peittäminen) vaikuttaa suotovesien määrään. Suotovesien mikrohaitta-ainekoostumus voi muuttua tai suotovesissä voi olla haitta-aineita, joihin nykyisin ei kiinnitetä riittävästi huomiota. Suotovesien kierrätyksen tapauksessa eristysrakenteiden materiaaleilta edellytetään hyvää kemiallista kestävyyttä suotovesien koostumuksen suhteen.

Muut jätetyypit

Polton tai kaasutuksen yleistymisen lisää poltto- ja kaasutustuhkien ja lietteiden sijoitustarvetta. Jätteenpolton tuhkat ovat aiheuttaneet Saksassa kuumenemis- ja vetryrähdysongelmia. Mahdolliset tavallista korkeammat lämpötilat pitää ottaa huomioon eristysrakenteiden suunnittelussa ja materiaalivalinnoissa.

Esikäsittelyä vaaditaan myös teollisuus- ja ongelmajätteille. Joidenkin ongelmajätetyyppien sijoittaminen esikäsiteltyinä omiin osastoihinsa tavanomaisen jätteen kaatopaikoilla saattaa olla mahdollista ja näiden jätteiden sijoittaminen tavanomaisen jätteen kaatopaikoille voi lisääntyä.

Esikäsittelyn vaikutus suojausrakenteiden rakennevaatimukseen

Esikäsitellyllä voi olla vaikutusta eristysrakenteiden toimivuusvaatimukseen ja sitä kautta mitoittamiseen, mikäli esikäsitellyllä voidaan merkittävästi homogenisoida jätettä ja vähentää jätetäytössä tapahtuvaa biohajoamista. Biohajoavan jätteen osuuden vähentyessä tai sen jakautuessa entistä homogeenisemmin täyttöön, jätetäytön epätasaiset painumat vähenevät, mikä helpottaa pintarakenteiden suunnittelua (parantaa niiden toimintaedellytyksiä pitkälläkin aikavälillä).

Pohjarakenteiden osalta voi merkitystä olla esikäsittelyn mahdollistamalla jälkihoitoajan rajoittamisella, jolloin pohjarakenteen toiminnalliselle mitoitukselle olisi nykyistä parempia edellytyksiä. Jätteen laadun muuttuessa ja sen homogenisoituessa on entistä jär-

kevämpää / tarkoituksenmukaisempaa suunnitella suojausrakenteet "tarkasti" kaatopaikakokohtaisesti.

7.2 Pohjavedensuojausrakenteiden toimivuusvaatimusten ja mitoituskriteerien asettaminen

Tässä luvussa on esitetty osittain rinnan nykyisiä direktiivin (suomalaisia) vaatimuksia ja ulkomaisesta kirjallisuudesta poimittuja ulkomaisia käytäntöjä (esitetty laajemmin luvussa 2.1). Esitetyt ajatukset ja mielipiteet ovat tämän raportin laatijoiden omia mielipiteitä ja näkemyksiä.

Kaatopaikan ympäristövaikutusten hallinta

Kaatopaikka on nykyisten ohjeiden mukaan sijoitettava, suunniteltava ja rakennettava siten, että se täyttää asetetut vaatimukset etenkin pintaveden, pohjaveden, maaperän ja ilman saastumisen ehkäisemiseksi tai vähentämiseksi niin pitkälle kuin mahdollista. Mitään yleisiä aikarajoja ei ole esitetty sille, miten pitkään kaatopaikasta pitää huolehtia. Kaatopaikkalupa myönnetään nykyisin 30 vuodeksi, jonka jälkeen asia harkitaan lupaviranomaisten taholta uudelleen ja päätetään jatkotoimenpiteistä. Eristysrakenteiden käyttöikämitoituksen lähtökohdaksi tarvittaisiin joitakin ohjeellisia käyttöikärajoja, joko yleisiä tai kohdekohtaisia kaatopaikkaluvassa annettuja.

Kaatopaikan ympäristövaikutusten ohjaamiseksi suunnittelussa voitaisiin ajatella, että joko yleisesti tai kohdekohtaisesti kaatopaikan ympäristöluvassa esitettäisiin kaatopaikalle yksityiskohtaiset "ympäristökriteerit". Kriteerit voisivat olla esim. seuraavanlaiset: (mukaellen: Landfill Directive. Regulatory Guidance Note 3.0 June 2002. Interpretation of the Engineering Requirements of Annex I of the Landfill Directive (1999/31/EC) /49/)

- Kaatopaikasta ei saa päästä pohjaveteen ollenkaan Listan I aineita ja Listan II aineet eivät saa aiheuttaa pohjaveden haitallista likaantumista (aineluettelot olisi sopeutettava Suomen olosuhteisiin).
- Lista II:n aineille sovellettavat raja-arvot esitetään kaatopaikan ympäristöluvassa. Tarkastelupiste Lista II:n haitta-aineille määritellään ympäristöluvassa. Tarkastelupiste Lista II:n haitta-aineille voi olla pohjavedenhavaintoputki hydraulisen gradientin suunnassa tai jokin muu riittävän herkkä vastaanotin / ilmaisin. Paikka määräytyy kaatopaikan geologisen / hydrogeologisen rakenteen (olosuhteiden) perusteella.

- Lista I:n haitta-aineille tarkastelupiste on aina kaatopaikan alla olevan vedellä kylästyneen kerroksen yläpinta (yleensä pohjavedenpinta tai alimman tiivistyskerroksen alapinta).

Lista I /Directive 76/464/EEC Annex List I and II families and group of substances / ote alkuperäisestä

List I of families and groups of substances

List I contains certain individual substances which belong to the following families and groups of substances, selected mainly on the basis of their toxicity, persistence and bioaccumulation, with the exception of those which are biologically harmless or which are rapidly converted into substances which are biologically harmless:

Lista II /Directive 76/464/EEC Annex List I and II families and group of substances / ote alkuperäisestä

List II of families and groups of substances

List II contains:

- substances belonging to the families and groups of substances in List I for which the limit values referred to in Article 6 of the Directive have not been determined,
- certain individual substances and categories of substances belonging to the families and groups of substances listed below,

and which have a deleterious effect on the aquatic environment, which can, however, be confined to a given area and which depend on the characteristics and location of the water into which they are discharged.

Lisäksi voitaisiin ajatella, että myös kaatopaikkakaasuille annettaisiin jotkin raja-arvot (esim. pitoisuus pintakerroksen yläpinnassa)

Eristysrakenteiden suunnittelussa ja mitoituksessa tulisi aina tarkastella kaatopaikkaa ja käytettävien eristemateriaalien pitkäaikaiskestävyyttä rakenteissa kokonaisuutena (pinta- ja pohjarakenteet sekä jätepengeri) suotovesien virtauksen, haitta-aineiden diffuusion ja tarvittaessa haitta-aineiden adsorption kannalta kaatopaikan koko toiminnan (aktiivivaihe ja passiivivaihe) aikana (mallintaminen mahdollista esim. HELP ja LandSim-ohjelmilla, käyttöikämitoitus).

Geologinen este

Kaatopaikan maaperälle (kivennäismaa tai kallio) asetetaan seuraavat vaatimukset /60/

- kaatopaikan maaperän on oltava kantava ja kaatopaikan maaperän on täytettävä sellaiset veden kyllästämisen maan vedenläpäisevyys- (K) ja paksuusvaatimukset, että niiden yhdistetty vaikutus vastaa seuraavilla kaatopaikoilla vähintään seuraavia vaatimuksia:
- ongelmajätteen kaatopaikka: $K \leq 1.0 \times 10^{-9}$ m/s; paksuus ≥ 5 m
- tavanomaisen jätteen kaatopaikka: $K \leq 1.0 \times 10^{-9}$ m/s; paksuus ≥ 1 m
- pysyvän jätteen kaatopaikka: $K \leq 1.0 \times 10^{-7}$ m/s; paksuus ≥ 1 m

Jos kaatopaikan maaperän tiiveys ei luonnostaan vastaa edellä tarkoitettuja vaatimuksia, on sitä parannettava rakennetulla tiivistyskerroksella vastaavan suojatason saavuttamiseksi. Rakennetun tiivistyskerroksen paksuuden on oltava tavanomaisen jätteen ja pysyvän jätteen kaatopaikoilla vähintään 0.5 m ja ongelmajätteen kaatopaikalla vähintään 1.0 m /60/.

Voidaanko em. määräyksiä tulkita siten, että jos esim. rikkonaisen kallion päällä tai so-rakerroksen päällä on tavanomaisen jätteen kaatopaikan alla vähintään yksi metri mine-raalimaata (luonnonmaata tai rakennettu tiivistyskerros), jonka vedenläpäisevyys $K \leq 1.0 \times 10^{-9}$ m/s, niin kaatopaikka voidaan rakentaa tällaiselle pohjalle ?

Viitteen / 49/ mukaan geologinen este on geologinen muodostuma keinotekoisien tiivisteen alapinnan ja tarkastelupisteen (compliance point) välissä, jossa GWD:n (Ground Water Directive /82/) määräykset tulee toteutua.

Geologisen esteen tulee antaa riittävä "attenuaatio" estämään pohjaveden ja maapohjan pilaantumisen riski. Suunnitelmissa ehdotetun geologisen esteen toimivuuden arvioimiseksi ja toteutukseksi GWD:n ja LFD:n (Land Fill Directive) mukaisesti tulee suorittaa riskitarkastelu ottaen huomioon Lista I:n ja Lista II:n tapaukset. Tarkastelun tulee sisältää myös pysyvyydestä tarkastelut ja kaatopaikkakaasujen hallinta. (Ohje: Guidance on Hydrogeological Risk Assessment for Landfills and Derivation of Groundwater Trigger Levels. Environmental Agency 2002 /34/)

Geologisen esteen toimivuuden tarkastelun tulee pitää sisällään kaatopaikan käyttöaika (aktiivivaihe) ja sulkemisen jälkeinen aika (passiivivaihe). Tarkastelussa tulee ottaa huomioon tulevaisuudessa (mahdollisesti) tapahtuvat aktiivisten suojaus- ja valvontatoimenpiteiden (keinotekoinen tiiviste ja salaojitusjärjestelmä, käyttö- ja hallintatoimenpiteet) pettäminen tai vaurioituminen sekä pettämisen tai vaurioitumisen aiheuttamat haitta-aineiden konsentraatiot kaatopaikalla.

Jos geologinen este ei sellaisenaan tarjoa riittävää suojaa, sitä voidaan täydentää keino-tekoisesti. Keinotekoisien geologisen esteen tulee edellä mainitun viitteen /LFD/ mukaan olla vähintään 0,5 m paksu (reasonable minimum). Paksuus määräytyy rakentamisen hyvän lopputuloksen varmistamisesta ja geologista eristettä täydentävän geosynteettisen tiivisterakenteen hyvän alustan varmistamisesta. "Puhtaan" geologisen esteen tulee olla luonnontilainen ja luonnostaan huonosti vettä läpäisevää eikä sitä kerrosta saa keinotekoisesti parantaa.

Suomessa kaatopaikat rakennetaan hyvin yleisesti kallion varaan, siten, että kallio louhitaan ja rikotun kallion päälle pannaan ensin mursketta, sitten "kiilauskerros" = alusta tiivistyskerrokselle ja sitten itse tiivistyskerros. Tällaiseen osittaiseen kalliokaivantoon tehty kaatopaikka on kaatopaikan alla ja ympäristössä ilmenevien haitta-ainepitoisuuksien tarkastelua ajatellen erittäin vaikeasti käsiteltävä ja mallinnettava ratkaisu. Jos tiivisterakenne vuotaa, niin haitta-aineet pääsevät esteettä kallionpintaan ja siitä edelleen hallitsematta leviämään kallioperässä, kallion raoissa ja ruhjeissa. Maakerroksessa voidaan haitta-aineiden leviämistä mallintaa ja myös tarvittaessa seurata havainnoin, koska virtaussuunnat on yleensä tiedossa. Ympäristöoppaan 36 mukaan "Alusrakenteena toimivan maapohjan (siis myös kallion, tekijöiden lisäys) soveltuvuus kaatopaikkapohjaksi kantavuutensa ja vedenläpäisevyytensä puolesta selvitetään sijoituspaikkasuunnittelun yhteydessä". Tunnetusti kalliolla massana on hyvin pieni vedenläpäisevyys, mutta kallion raot ja ruhjeet voivat johtaa vetää runsaastikin.

Lisävarmuuden aikaansaamiseksi ja suotovesien paremmaksi hallitsemiseksi louhitun ja puhdistetun kallion kuopat ja kohoumat pitäisi tasata kantavalla tasauskerroksella (paksuus keskimäärin esim. 1,0 m) ja tasauskerroksen vedenläpäisevyyden tulisi olla riittävän pieni (esim. $k < 10^{-7}$ m/s, sovellettu joissain tapauksissa). Tämän tasauskerroksen (alusrakenteen) päälle rakennetaan pohjaeristys. Tällaista varmistusta tulisi käyttää myös muunlaisilla pohjilla silloin, kun pohjan vedenläpäisevyys on vaikeasti tutkittavissa ja hallittavissa.

Pohjarakenne (pohjaeristys)

EY-direktiivin /asiakirjavihko /60/ mukaan kaatopaikan perustuksen ja sivujen tulee koostua mineraalikerroksesta (*mineral layer*), joka täyttää läpäisevyys- ja paksuusvaatimukset siten, että se vastaa maaperän, pohjaveden ja pintaveden suojelun kannalta (*sufficient attenuation capacity to prevent the potential risk*) yhteisvaikutuksiltaan (*equivalent to the one resulting*) vähintään tiettyjä (annettuja) vedenläpäisevyysarvovaatimuksia. Jos geologinen este (*geological barrier*) ei luonnostaan vastaa näitä vaatimuksia, sitä voidaan täydentää rakentamalla ja vahvistaa (*artificially and reinforced*) muilla vastaavan suojan antavilla keinoilla. Rakennetun geologisen esteen (*an artificially established geological barrier / geological barrier established by artificial means*) on oltava vähintään 0,5 m paksu.

Valtioneuvoston päätöksessä /92/ liitessä 1 on kaatopaikan maaperälle (kivennäismaa tai kallio) asetettu vaatimukset, joiden mukaan kaatopaikan maaperän on oltava kantava ja kaatopaikan maaperän on täytettävä sellaiset veden kyllästämisen maan vedenläpäisevyys- (K) ja paksuusvaatimukset, että niiden yhdistetty vaikutus vastaa erilaisille kaatopaikoilla annettuja vedenläpäisevyys- ja paksuusvaatimuksia. Jos kaatopaikan maaperän tiiveys (tässä ei mainita kalliopohjaa) ei luonnostaan vastaa edellä tarkoitettuja vaatimuksia, on sitä parannettava rakennetulla tiivistyskerroksella (= täydentävä kerros) vastaavan suojatason saavuttamiseksi. Rakennetun tiivistyskerroksen paksuuden on oltava tavanomaisen jätteen ja pysyvän jätteen kaatopaikoilla vähintään 0.5 m ja ongelmajätteen kaatopaikalla vähintään 1.0 m.

VNp 861/97:n mukaan kaatopaikan pohjarakenteen tulee olla kemiallisesti ja fysikaalisesti riittävän kestävä. Vaatimus koskee pohjarakenteen kaikkia rakenneosia. Rakenteiden toimivuuden tulee täyttää asetetut vaatimukset suunnitellun ajan (suunnittelu- / käyttöikä), johon kuuluu myös kaatopaikan jälkihoitoaika. Tuotehyväksyntä annetaan vain sellaiselle tuotteelle / rakenteelle, joka täyttää viranomaisten taholta asetetut minimivaatimukset erilaisissa rasiutiloissa koko suunnittelujakson ajan.

VNp 861/97:stä ei selviä yksikäsitteisesti, miten vastaavuus (vastaavan suojatason saavuttaminen) todetaan tai em. ympäristöselvitys tai kokonaisarvio tehdään tai mitä sen pitäisi sisältää. Jos tarkastellaan rakennevaihtoehtoja vedenläpäisevyyden kannalta (vastaava rakenne), niin tavanomaisen jätteen kaatopaikalla voitaisiin ajatella käytettävän pienempääkin rakennetun tiivistyskerroksen paksuutta, jolloin rakenne on kuitenkin aina mitoitettava. Paksuuden on oltava aina sellainen, että kerros voidaan luotettavasti rakentaa tiiviiksi ja homogeeniseksi. Kerroksen pitkäikäisyys ja toiminnalliset ominaisuudet on oltava luotettavasti osoitettu. Tiivistysrakenteen kokonaispaksuus 0,5 m voisi siis koostua varsinaisesta tiivistyskerroksesta ja sen alla olevasta kantavasta mineraali- maakerroksesta. Näiden tulee yhdessä antaa direktiivin määrittelemä suojavaikutus. Rakenteen toiminta on tarkistettava myös diffuusiolla tapahtuvan haitta-aineiden läpäisyn suhteen. Tiivistyskerroksen alla olevan kerroksen tulee aina muodostaa hyvin kantava alusta tiivistyskerrokselle.

Pohjarakenteen tiivistekerroksen vedenläpäisevyysmitoituksen täsmentämiseksi voitaisiin ajatella sovellettavan esim. Ruotsissa käytössä olevaa tapaa. Tiivistekerroksen läpi menevä vesimäärä ei saisi olla kaatopaikan toiminnan aikana suurempi kuin $Q =$ (määritellään kaatopaikan ympäristöluvassa tai yleisesti viranomaisten taholta) $l/v /m^2$ (keskimääräinen vuosittainen vesimäärä koko käyttöikänsä aikana).

Tällöinkin haitta-aineiden diffuusio tiivistekerroksen läpi ja niiden pidättäytyminen tiivistekerrokseen olisi osoitettava kokeellisesti ja laskelmin. Laskelmien tiivistemateriaalia koskevat lähtötiedot on tutkittava tai ne on muulla tavalla osoitettava tapauskohtaisesti luotettaviksi.

Jos tiivistekerroksena aiotaan tällaista mitoituskriteeriä sovellettaessa käyttää luonnon-savikerrostumaa, on otettava huomioon se, että kaatopaikka ei saa painua siten, että painumat vaikuttavat haitallisesti eristysrakenteiden eri kerrosten pitkäaikaiskestävyyteen ja esim. kuivatuskerrosten kaltevuuksien muuttumiseen niiden toimivuutta heikentäen.

Kaatopaikan pohjarakenteen suunnittelun pitää perustua seuraaviin periaatteisiin, mm. /53/

- tiivistekerros on suojausrakenteen pääkomponentti keskipitkää ja pitkää (> 50 v, väh. 100 v) toiminta-aikaa ajatellen
- tiivistekerroksen vaatimukset ja ominaisuudet ovat
 - pieni vedenläpäisevyys lopullisessa rakenteessa
 - pitkäaikainen yhteensopivuus saastuttavien kemikaalien suhteen
 - korkea adsorptiokapasiteetti
 - pieni diffuusio
 - korkea adsorptiokapasiteetti
 - turmeltumismekanismit eivät heikennä tiivistemateriaalin ominaisuuksia suunnitellun käyttöiän aikana
- yhdistelmä rakenteella on tärkeitä etuja sekä lyhyellä että pitkällä tähtäyksellä
 - pieni vedenläpäisevyys mahdollisia keinotekoisien eristeen ja/tai tiivistekerroksen paikallisia vaurioitakin silmälläpitäen
 - veden johtuminen salaojitusjärjestelmään tehostuu (jolloin suotovesien kerääntyminen tiivisteeseen päälle (hydraulinen painekorkeus) minimoituu)
- suotovesien keräysjärjestelmän (salaojituskerros ja putkisto) tehokkuudella on suuri vaikutus tiivisteeseen päälle kertyvän suotoveden ehkäisemisessä
- rakenneyksityiskohdat (läpiviennit, liitynnät, saumakohdat yms.) näyttävät ratkaisevaa osaa suojausrakenteen tehokkuudessa.

Pintarakenne (pintaeristys)

Pintaeristyksen tehtävänä on estää kaatopaikan passiivin vaiheen aikana / käytöstä poistamisen jälkeen sade- ja pintavaluntavesien imeytyminen jätepenkereeseen ja siitä seuraava likaantuneen suotoveden muodostuminen ja haitta-aineiden kulkeutuminen ympäristöön. Pintaeristyksen tärkeä tehtävä on pitää pintavedet erillään kaatopaikkavesistä. Tiiviin pintaeristyksen avulla tehostetaan kaasun talteenottoa ja vähennetään kaatopaikkojen ympäristöhaittoja. Pintarakenteelle voidaan asettaa kaatopaikkakaasujen metaania hapettava toimivuusvaatimus.

Kaatopaikan pintarakenteen tulee olla kemiallisesti ja fysikaalisesti (muodonmuutoskyky, halkeilemattomuus, vesitiiveyden säilyminen) riittävän kestävä. Vaatimus koskee pintarakenteen kaikkia rakenneosia. Rakenteen toimivuuden tulee täyttää asetetut vaatimukset suunnitellun ajan (suunnittelu- / käyttöikä), johon kuuluu myös kaatopaikan jälkihoitoaika (passiivivaihe).

Keski-Euroopassa käytetään jokseenkin yleisesti kaatopaikan vaiheittaista peittämistä. Vaiheittaisessa rakentamisessa kaatopaikan lopettamisen jälkeen ensimmäisessä vaiheessa rakennetaan jätteenkoreen päälle väliaikainen pintarakenne, jonka vaatimukset ovat eräiltä osin (esim. muodonmuutoskestävyys) "astetta" lievempiä, kuin lopullisen pintarakenteen vaatimukset. Samalla kerätään suotovedet talteen ja annetaan kaatopaikan toimia aktiivisena bioreaktorina.

Kun peittämissrakenteiden toimivuutta vaarantavaa jätteiden hajoamista ja painumista ei enää tapahdu (edellyttää painumien mittaamista), rakennetaan lopullinen pintarakenne siitä lähtökohdasta, että pohjarakenteen pidättämiskyvyn otaksutaan jo heikentyneen.

Vaiheittainen rakentaminen soveltuisi lähinnä uudempiin kaatopaikkoihin, jotka on varustettu nykyaikaisilla VnP:n mukaisilla pohjarakenteilla ja joissa suotovesien hallinta on mahdollista. Vanhoilla kaatopaikoilla tulisi käyttää aina tiivistysrakenteita, joiden plastisuus ja muodonmuutoskyky sallivat suuria painumia.

Pintarakenteiden suunnittelun ja mitoituksen konkretisoimiseksi voitaisiin ajatella, että kaatopaikkaluvassa esitettäisiin pintaeristyksen suunnittelu- ja mitoitusavoitteet (vedenläpäisy, kaasunläpäisy) mukaan lukien eristyksen rakentamisaikataulu (esim. vaiheittainen rakentaminen) ja käyttöikä.

Ympäristöoppaan 89 /40/ mukaan tiivistekerroksen vedenläpäisevyysvaatimus määräytyy rakenteen tehokkuuden mukaisesti. Mikäli veden kerääntyminen kaatopaikkaan halutaan estää eikä pohjassa ole toimivaa kuivatuskerrosta, on pintarakenteen vedenläpäisevyyden oltava pienempi tai enintään yhtäsuuri kuin pohjarakenteen vedenläpäisevyys (käytännössä siis $k < 1 \times 10^{-9}$ m/s). Toinen tapa määrittää pintarakenteen vedenläpäisevyysvaatimus on määrittää (ilmoittaa) kaatopaikkapenkereeseen sen biologisen prosessin optimaaliseksi tapahtumiseksi päästettävän veden määrä ja mitoittaa rakenne ko. vaatimusta vastaavaksi.

Pintaeristyksen tiivistyskerroksen läpäisevyysmitoitusta varten voitaisiin ajatella, että käytettäisiin samaa mitoitusperusteen määrittelyä kuin pohjaeristeen tiivistyskerroksen läpäisevyysmitoituksessakin. Ts. määriteltäisiin pintaeristyksen läpi menevä vesimäärä, joka ei saisi olla kaatopaikan toiminnan aikana suurempi kuin $Q_v =$ (määritellään kaatopaikan ympäristöluvassa tai yleisesti viranomaisten taholta) $l/v /m^2$ (keskimääräinen vuosittainen vesimäärä käyttöänsä aikana, Jos kaasunläpäisy on pintaeristyksen oleellinen tekijä, niin sillekin pitäisi antaa mitoitusarvo (kaasunläpäisy $Q_k =$ (määritellään kaatopaikan ympäristöluvassa tai yleisesti viranomaisten taholta) $l/v /m^2$.

Tällä hetkellä (kevät 2004) keskustellaan laajasti erilaisten INFRA-rakenteiden uusista hankintamenettelytavoista ja erilaisista urakkamuodoista. Kaatopaikan pintaeristyksen kohdalla olisi harkinnanarvoinen ja kehittelyä kaipaava menettely se, että pintaeristyk-

selle asetettaisiin em. läpimenevä vesimäärä-mitointiperuste tai kääntäen pintatiivisteiden veden alapäin kulkeutumisen estämistä koskeva vaatimus /14/. Tämä voitaisiin konkretisoida esim. siten, että pintaeristysrakenteen kuivatuskerroksesta pitää saada ulos "puhdasta vettä" tietty määrä (osa sadevedestä haihtuu ja poistuu pintavaluntana ennen kuivatuskerrosta). Urakoitsija sitoutuisi rakentamaan toimivuudeltaan tällaisen rakenteen ja kuivatuskerroksesta tulevaa vesimäärää mitattaisiin jatkuvasti, varautuen hyvin pitkääikaisiin mittauksiin.

Materiaalien tutkiminen ja materiaalivaatimukset

Ympäristöoppaassa 36 "Kaatopaikan tiivistysrakenteet" on lueteltu suuri joukko tiivistämateriaalien ominaisuuksia, joita suositellaan tutkittavaksi tai muuten selvitettäväksi (joitain esitetty myös tämän raportin luvussa 3.3). Joillekin ominaisuuksille on annettu numeroarvo-kriteerejäkin, jolloin materiaalien käyttökelpoisuuden arviointi on jokseenkin yksikäsitteisesti mahdollista. Olisi ensiarvoisen tärkeää, että asiantuntijoiden tutkitavat ominaisuudet käytäisiin läpi ja jaoteltaisiin perustellen esim. seuraavasti:

- aina kaikista materiaaleista tutkittaviin, joille esitetään hyväksymiskriteeri ja joista testin tuloksena esitetään numeroarvo
- materiaali -/ tapauskohtaisesti tutkittaviin, joille esitetään hyväksymiskriteeri ja joista testin tuloksena esitetään numeroarvo
- materiaali -/ tapauskohtaisesti tutkittaviin, joista saadaan tuloksena numeroarvo, mutta kriteeriä hyväksyttävyydelle ei voida esittää (numeroarvoa käytetään materiaalin käyttökelpoisuuden laadullisessa arvioinnissa).

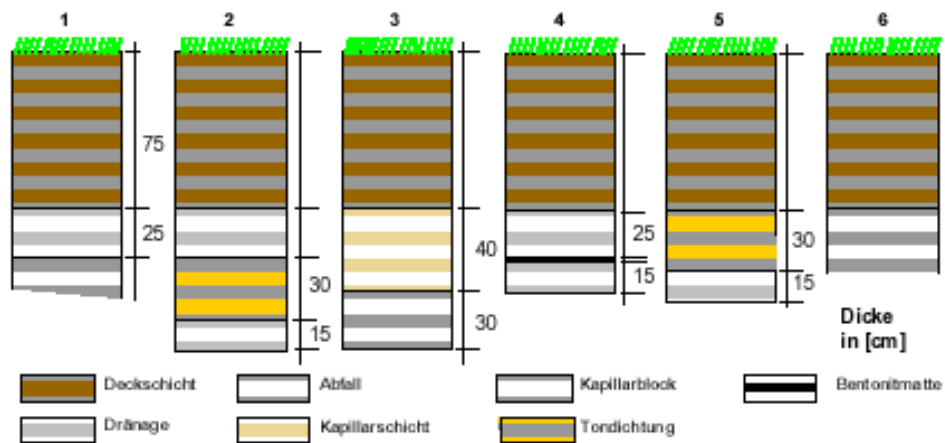
Tässä tutkimusprojektissa tällaista tarkastelua ei ole tehty, koska se ei ole kuulunutkaan projektin tehtäviin.

7.3 Tiivistysrakenteiden turmeltuminen ja taloudellisuus - BLACE

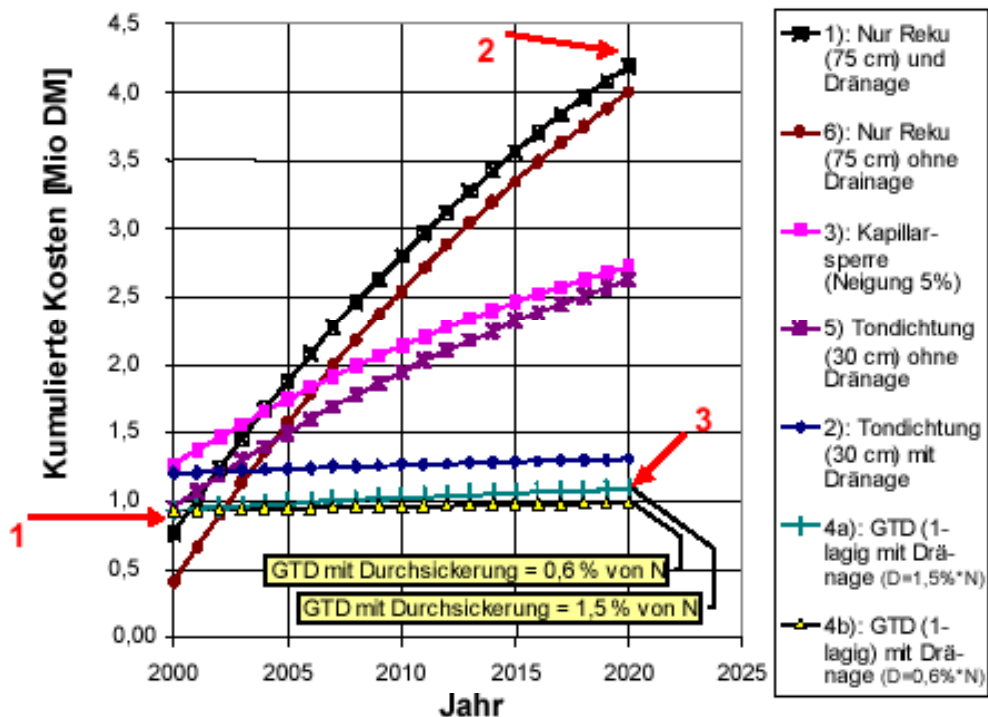
Tässä projektissa ei ole käsitelty eristysrakenteiden taloudellisuutta. Kuitenkin taloudellisuus, sekä investointikustannukset että "käyttökustannukset" aina kaatopaikan hoitoajan loppuun saakka tulisi ottaa huomioon myös kaatopaikkojen eristysten valinnassa. Jätelain /103 / mukaan "jätehuollossa on käytettävä parasta taloudellisesti käyttökelpoista tekniikkaa ja mahdollisimman hyvää terveys- ja ympäristöhaitan torjuntamenetelmää". Tämä yleistoteamus tulisi pitää mielessä myös eristysrakenteiden suunnittelussa ja valinnassa. Seuraavassa on esitetty hyvin pääpiirteittäin ja vain esimerkkinä eräs saksalainen menettely pintaeristysrakenteiden kokonaiskustannusten määrittämiseksi ja erilaisten eristysratkaisujen kustannusvertailujen tekemiseksi. Käytettävissä olleesta viitteestä eivät menettelyn yksityiskohdat selviä yksikäsitteisesti, mutta se antaa kuitenkin käsityksen menettelyn pääpiirteittäisestä sisällöstä. Menettelyssä on mukana myös

tiivisterakenteen käyttöiän mukana tapahtuva turmeltumisen kehittyminen (vedenläpäisevyyden osalta). Esimerkillä ei haluta ottaa kantaa erilaisten rakenteiden taloudellisuuteen Suomen olosuhteissa.

Saksassa on kehitetty tietokoneohjelma /75/, jolla voidaan vertailla erilaisten pintaeristysrakenteiden taloudellisuutta. Menettelyyn sisältyy myös maaperään tapahtuvien päästöjen tarkastelu koko kaatopaikan käyttöikä. Yksi esimerkki ohjelman tulostuksesta on kuvassa 7.2 /74./. Kuvasta 7.2 käy ilmi, että pelkkä 75 cm kasvu/pintakerros (rakenne 1) antaa pienimmät rakennuskustannukset (nuoli 1), mutta runsaiden suotovesien puhdistuskustannukset nostavat ratkaisun kokonaiskustannukset 20 vuodessa hyvin suuriksi (nuoli 2). Edullisin ratkaisu tässä yksittäisessä esimerkissä on bentoniittimattoeristys (rakenne 4a; nuoli 3) /74./.

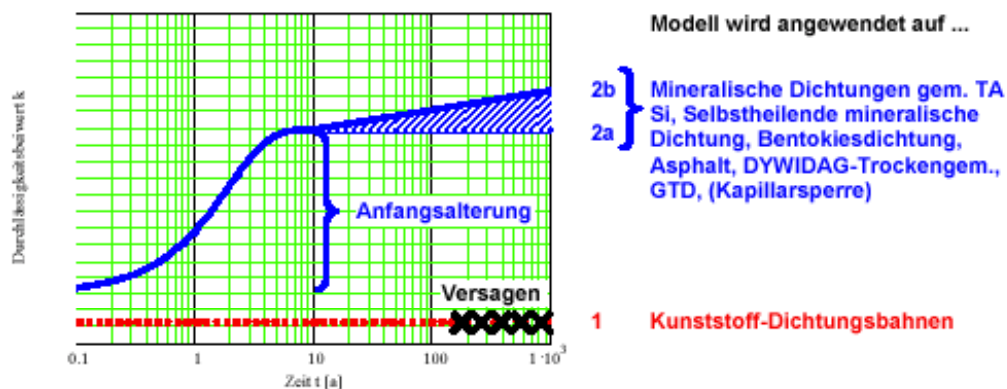


Kuva 7.1. Kuvassa 7.2 esitettyjä kustannuskäyriä vastaavat rakenteet.



Kuva 7.2. Kaatopaikan pintaeristysten rakennuskustannukset ja vuoteen 2000 diskontatut suotovesien puhdistuskustannukset 20 vuoden ajalta erilaisilla pinteristysrakenteilla.

Viitteessä / 73/ on esitetty menettelytapa, jota voidaan käyttää arvioitaessa pintatiivistysrakenteiden vedenläpäisevyyden muuttumista ajan mukana. Menettelyn lähtökohtana on, että tiivistysrakenteen vedenläpäisevyydestä on käytettävissä mittaushavainnot kaatopaikan alkuvuosilta. Menettelyprosessia on hyvin ylimalkaisesti kuvattu kuvissa 7.3-7.6 ja taulukoissa 7.1-7.2.



Kuva 7.3. Kaksi mahdollista toisistaan poikkeavaa tiivistyskerroksen vanhenemismallia (vedenläpäisevyyden muuttumista ajan mukana), Anfangsalterung = 10 vuodessa tapahtuva vanheneminen, Versagen = hajota).

Havainnoista ekstrapoloitu vedenläpäisevyys saadaan kaavalla

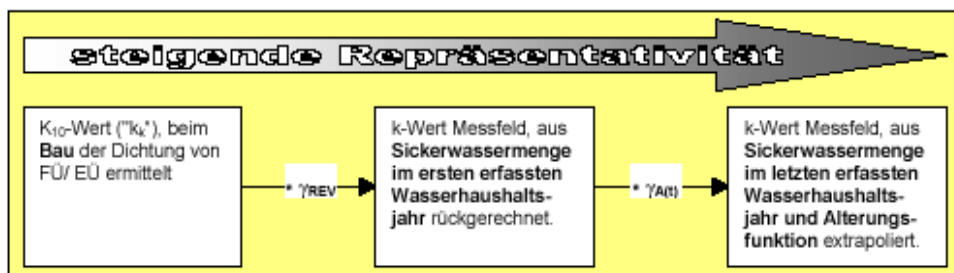
$$k_{(t=10a)} = k_i / [\tanh (n_a/2,5)] \quad (1)$$

jossa

k_i = viimeisimmästä mittauksesta saatu vedenläpäisevyys

n_a = havaintovuosien lukumäärä

Jotta saataisiin "edustava" vedenläpäisevyys (kuva 7.3) 10 vuoden kuluttua, pitää havainnoista laskettu arvo korjata vielä kertoimilla γ_{REV} ja $\gamma_{A(t)}$ (kuva 7.4).

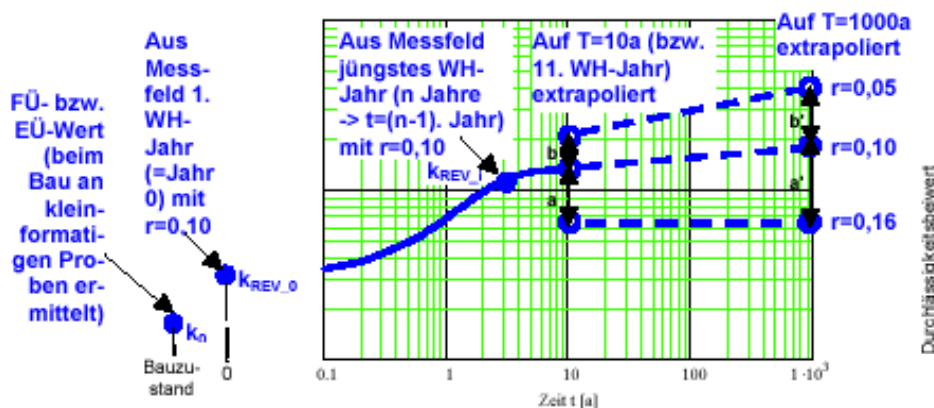


Kuva 7.4. Lyhytaikaisilla mittauksilla saadun vedenläpäisevyyden muuttaminen pitkäaikaiseksi vedenläpäisevyydeksi, "periaatemalli".

K_{10} on rakennusvaiheessa mitattu / havaittu arvo

γ_{REV} kerroin, joka "muuttaa" pienimittakaavaisen vedenläpäisevyyskokeen tuloksen vastaamaan esim. lysimetrikokeesta saatua vedenläpäisevyysarvoa

$\gamma_{A(t)}$ kerroin, jolla ekstrapoloidaan mittauksilla saatu vedenläpäisevyyden arvo vastaamaan 10 vuoden kuluttua rakentamisesta vallitsevaa vedenläpäisevyysarvoa



Kuva 7.5. Periaatekuva pintatiivistyskerroksen edustavan pitkäaikaisen vedenläpäisevyyden (hajontoineen) määrittämisestä (ekstrapoloinnista) kaatopaikan rakennusaikana (k_0 Bauzustand) ja sen jälkeen ($k_{REV..0}$, $k_{REV..i}$) tehtyjen havaintojen perusteella. $k_{r=0,05} = k_{max}$, $k_{r=0,10} = k_{keskim}$, $k_{r=0,16} = k_{min}$, a ja b kts. kaava.

Vedenläpäisevyyden maksimiarvoa, keskimääräistä arvoa ja minimiarvoa laskettaessa oletetaan läpäisevän vesimäärän läpäisevän rakenteen 0.05, 0.1 ja 0.16 -kertaisessa ajassa havaintoaikaan nähden ($k_{r=0,05} = k_{\max}$, $k_{r=0,10} = k_{\text{keskim}}$, $k_{r=0,16} = k_{\min}$) ja vedenpaine korkeudeksi oletetaan 6...10 mm. Tällöin esimerkiksi kaksikertaisella bentoniittimatolla $i = 1.5$.

Taulukko 7.2. Mittaushavaintoihin perustuvat kertoimet γ_{REV} ja $\gamma_{A(t)}$ (kts. kuva 7.5).

Zeile Nr.	Untersuchtes Dichtungselement	k-Wert bei Bau der Dichtung (t=0) [m/s]	k-Wert bei Bau der Dichtung (t=0) [m/s]	Übertragungsfaktor γ_{REV}	Auf T=10a extrapoliertes Alterungsfaktor $\gamma_{A(t=10)}$
1	KDB (TA Si-Komb.)	ermittelt	1,0E-17	21139861	0,6
2	----- "-----	festgelegt	1,0E-14	1,0	1,0
3	MD (TA Si-Komb.)	festgelegt	5,0E-9	10	1,0
4	MD mit Drän	ermittelt	2,1E-10	25	7,8
5	MD ohne Drän	ermittelt	3,4E-11	1252	2,3
6	SMD	ermittelt	2,6E-10	<1	
7	----- "-----	festgelegt		1,3	1,3
8	Bentokies	ermittelt	5,0E-11	0,0026	1,3
9	----- "-----	festgelegt		1,3	
10	DYWIDAG-Trockengemisch	festgelegt	5,0E-11	1,3	1,3
11	GTD	ermittelt	4,2E-11	28	2,7
12	Asphalt	festgelegt	1,0E-13	1,3	1,3
13	KS	ermittelt	--		1,1
14	----- "-----	festgelegt		5	

KDB on yhdistelmätiiviste (TA Si), mineraalimaatiiviste ja geomembraani

MD mineraalimaatiiviste (TA Si), ilman geomembraania

MD "perinteinen" mineraalimaatiiviste, kuivatuskerros

MD "perinteinen" mineraalimaatiiviste, ei kuivatuskerrosta

SMD "itsekorjautuva" mineraalimateriaaliiviste

Bentokies hiekkabentoniitti

DYVIDAG "kuivasekoite", mineraalimateriaalipohjainen

GTD bentoniittimatto (2 kerroksinen)

Asphalt asfalttiiviste

KS kapillaarikatkaisukerros, jonka alla geomembraani

ermittelt = mitattu

festgelegt = ennalta asetettu

Taulukko 7.3. Kaavan (2) kertoimien f_i merkitys

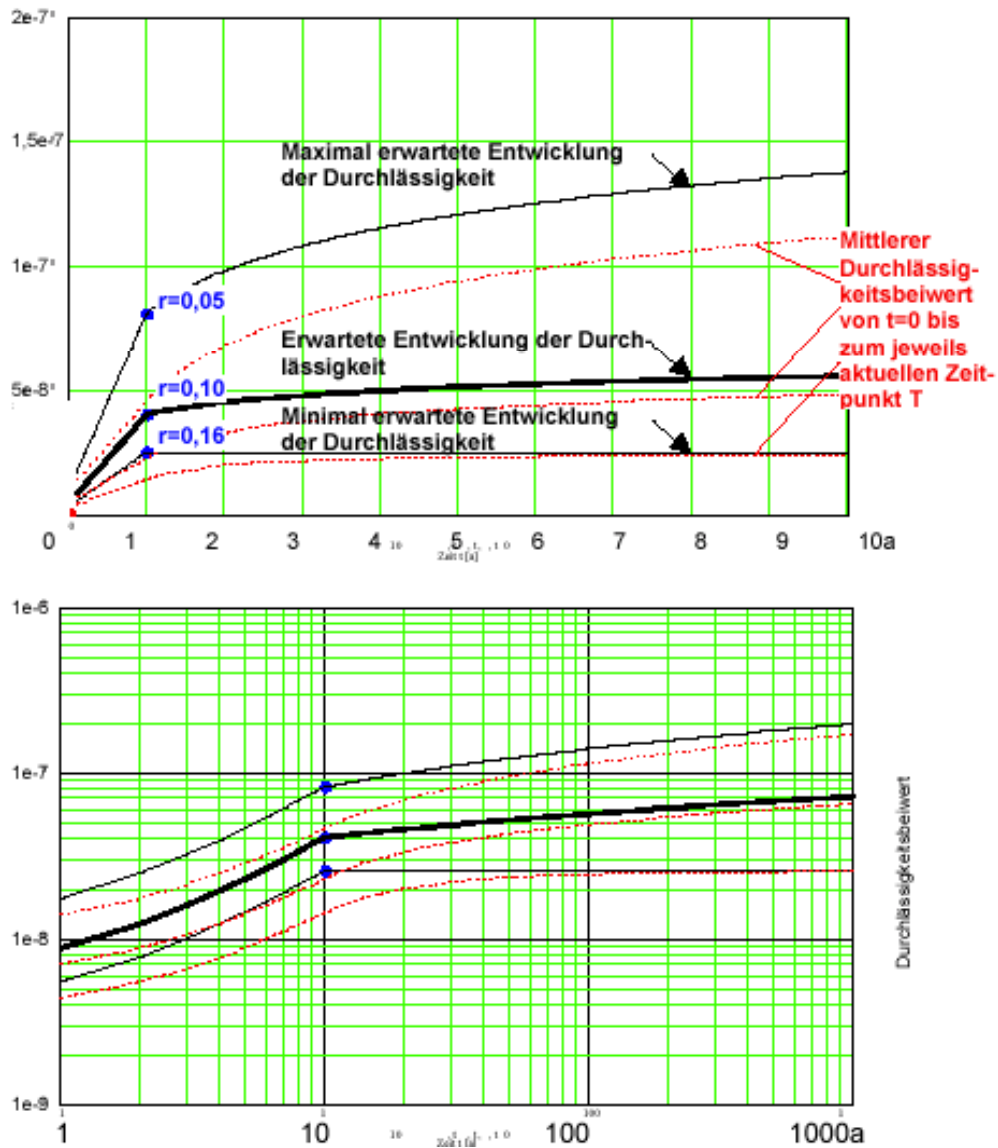
Abkürzung	Definition des Faktors	Bemerkung								
f_T	$\gamma_{A(t-10)} * \log(T/10)$ {für $T \geq 10a$ }	Wirkt <u>erhöhend</u> und soll die weitere Alterung und die Vorhersageunsicherheit bei Prognosezeiträumen $T > 10a$ abdecken. Es geht die Prognosedauer T und die Alterungsgeschwindigkeit bzw. der Alterungsfaktor $\gamma_{A(t-10)}$ in den Faktor mit ein. Für $\gamma_{A(t-10)} = 1$ ergeben sich z.B. folgende Wertepaare (T; f_T): <table border="1" data-bbox="667 622 1241 741"> <tr> <td>T</td> <td>10</td> <td>100</td> <td>1000</td> </tr> <tr> <td>f_T</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>2</td> </tr> </table> Für $T=1000a$ und $\gamma_{A(t-10)} = 6$ ergibt sich z.B. ein f_T von 12. Für $T=10$ ergibt sich in jedem Fall ein $f_T=0$	T	10	100	1000	f_T	0	1	2
T	10	100	1000							
f_T	0	1	2							
f_{nm}	$1 / \sqrt{n_m}$	Wirkt um so <u>abmindernder</u> auf die Streuung je mehr Messfelder je System vorliegen								
f_{na}	$1 / \sqrt{\sum n_a}$	Wirkt um so <u>abmindernder</u> auf die Streuung je mehr Messjahre für das System (insgesamt über alle Messfelder) gesammelt worden sind								
f_{REV}	(vorerst =1)	Berücksichtigt die Größe der Messfelder								
f_{σ}	(vorerst =1)	Berücksichtigt die Streuung der Ergebnisse								

Kaavan (2) (kts kuva 7.2)

$$a'/a = b'/b = 1 + \pi (f_i) \quad (2)$$

$$\pi (f_i) = f_T * f_{nm} * f_{na} * f_{REV} * f_{\sigma}$$

kertoimet f_i taulukosta 7.3 (n mittauskenttien / mittausvuosien lukumäärä)



Kuva 7.6. Mallilla määritetty kaatopaikan pintaeristyksen mineraalitiivisten vedenläpäisevyyden k muuttuminen pitkän ajan kuluessa.

Lähdeluettelo

- 1 <http://www.agruamerica.com> Technical data - HDPE smooth liner
- 2 Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Abfallgesetz. 1991
- 3 Argus Landfill Monitoring: Saatavissa <http://www.argusenv.demon.co.uk/>
- 4 Anandarajah, A., Mechanism Controlling Permeability Change in Clays due to Changes in Pore Fluid. *J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. February 2003. pp. 163...172.
- 5 Giroud, J.P., Bonaparte, R., Leakage through Liners Constructed with Geomembranes - Part II. Geomembrane Liners. *Geotextiles and Geomembranes Vol 8 No 2* (1989). p. 71-111.
- 6 Boels, D. Comparing performance of trisoplast with different mineral liner materials. *Proceedings Sardinia 2001. Eighth International Waste Management and Landfill Symposium*. S. Margaritha di Pula, Cagliari, Italy. 1-5 October 2001. pp. 45-54.
- 7 Bonaparte, P.E. et al., Assessment and recommendations for improving the performance of waste containment systems. EPA/600/R-02/099, December 2002. Saatavissa: <http://www.epa.gov/>
- 8 Bouazza, A. et al. Geosynthetics in waste containment facilities: recent advances. *Geosynthetic 7th ICG, Nice 2002*, Eds Delmas, Ph., Gourc, J. P. & Girard, H., Swets & Zeitlinger, 2002, pp. 445...507.
- 9 Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste. Document 399L0031.
- 10 Chapuis, R. P., On the use of the Kozeny-carman equation to predict the hydraulic conductivity of soils. *Can. Geotech. J.* 40:2003. pp. 616...628.
- 11 Certification Guidelines for the Plastic Geomembranes Used to Line Landfills and Contaminated Land. Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM). Ed. by. W.W. Müller, Published by Laboratory IV.32, Landfill Engineering. English Translation of the second Revised Edition 09/99. Saatavissa: <http://www.geosynthetica.net/>

- 12 Duinger, V. Das Modell BOWAHALD-2D zur zweidimensionalen Simulation des Wasserhaushaltes von wassergesättigten Bergehalden und Deponien unter Berücksichtigung von Abdeckschichten. Inst. f. Geologie, TU Bergakademie Freibrg. 1997.
- 13 Environment Protection Authority. Development of technical parameters for long-term containment facility performance requirements. Stage one: Preliminary review & research.. Report. Meinhardt. 27 March 2003.
- 14 Ettala, M., Sormunen, K., Englund, M., Hyvönen, P., Laurila, T., Karhu, K. ja Rintala, J. Instrumentation of a landfill. 9th Waste and Landfill Symposium. Sardinia 6.-10. October 2003.
- 15 prEN 13493:2002. Geosynthetic Barriers - Characteristics required for use in the construction of solid waste storage and disposal sites, and storages for hazardous solid materials (Final Draft - August 2002).
- 16 http://www.tu-harburg.de/wwv/skripte/Groundwater_engineering
- 17 Ettala, M., Rossi, E., Kaatopaikan pohjalla vallitsevat olosuhteet, tutkimusraportti 11.12.1996
- 18 Ehdotus tarkistetuksi valtakunnalliseksi jätesuunnitelmaksi vuoteen 2005 perusteluineen. Ympäristöministeriön työryhmä 2001.
- 19 Environment Agency, LandSim 2 Groundwater risk assessment tool for landfill design, <http://www.landsim.co.uk/landsim.pdf/>
- 20 Framework for evaluating use of recycled materials in the highway environment. Publication NO FHWA-RD-00-140. 2000.
- 21 Förordning (SFS 2001:512) on deponering av avfall. Miljödepartementet 2001.
- 22 Functionele levensduur van minerale afdichtingsmaterialen en kunststoffen in vloeidichte eindafwerking van stortplaatsen. H.A. van der Sloot. Second Opinion. ECN-C-02-068. October 2002.
- 23 Geotekniset laboratorio-ohjeet. Luokituskokeet. Suomen geoteknillinen yhdistys r.y ja Rakentajain kustannus Oy. 1985.
- 24 <http://www.geofabrics.com> HP & HPS non-woven needlepunched geotextiles - Mar 04 to Mar 05

- 25 Guidance on the Monitoring of Landfill Leachate, Groundwater and Surface Water. Environmental Agency. 2002.
- 26 Goldman, L. 1988. Design, Construction, and Evaluation of Clay Liners for Waste Management Facilities. EPA
- 27 Giroud, J.P., Bonaparte, R., Leakage through Liners Constructed with Geomembranes - Part I. Geomebrane Liners. Geotextiles and Geomembranes Vol 8 No 1 (1989). p. 27-67.
- 28 Berger, Kl., Validierung und Anpassung des HELP-Modells für deutsche Verhältnisse, Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg. <http://www.geowiss.uni-hamburg.de>
- 29 Henkilökohtainen tiedonanto 9.9.2003, Jukka Takala, Golder Associations.
- 30 Gourc, J. P. et al., Proposal of a waste settlement survey methodology. In: Proceedings of 3rd International Congress on Environmental geotechnics, Lisbon, Portugal, 1998, Artikkelit konferenssin CD-levyllä.
- 31 Glark, R. G. Longterm behavior and risk assessment of containment systems. In: Proceedings of 3rd International Congress on Environmental geotechnics, Lisbon, Portugal, 1998, Artikkelit konferenssin CD-levyllä.
- 32 Guidelines for the Certification of Geomembranes as a Component of Composite Liners for Municipal and Hazardous Waste Landfills and for Lining Contaminated Land. Federal Intitute for Materials Research and Testing (BAM). February 1994. Englanninkielinen versio saatavissa: <http://www.deponie-stief.de>
- 33 Hämäläinen, Jyrki. Bentoniittimatto kaatopaikan pintatiivisteinä lupaviranomaisen kannalta. SYKE Kaatopaikkaseminaari 23-24.3.2004
- 34 Hydrogeological Risk Assessment for Landfills and Derivation of Groundwater Control and Trigger Levels. (Draft v1.12)Environmental Agency 2002.
- 35 Intercode Comparisons for Simulating Water Balance in an Engineeried Cover. <http://www.beg.utexas.edu/environqlty/vadose>
- 36 Juvankoski, M., Laaksonen, R., Onninen, H., Osittain kyllästyneen tilan huomiointaminen mineraalisten pintaeristys-rakenteiden mitoituksessa. Tekes, Ympäristögeotekniikkaohjelma ja VTT Yhdyskuntatekniikka, Väylät ja ympäristö, Tutkimusraportti 576, Espoo 2000.

- 37 Jagloo, K., Groundwater risk analysis in the vicinity of a landfill, A case study in Mauritius. Master Thesis. Environmental Engineering and Sustainable Infrastructure Course, Department of Land and Water Resources Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2002. 68 p.
- 38 Jeon, H.Y. et al, Chemical Resistance and Weatherability of Nonwoven Geotextiles in Leachate Solutions. Proc. of Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, 6-10 October 2003, Sardinia, Italy.
- 39 Kaatopaikan tiivistysrakenteiden - ja materiaalien tuotehyväksyntä. Menettelyta-
paapas vapaaehtoiselle tuotehyväksynnälle. VTT ja SYKE 2004 (julkaistaan
2004).
- 40 Kaatopaikan tiivistysrakenteet. Ympäristöopas Nro 36. Suomen ympäristökeskus
1998.
- 41 Kaatopaikkojen lopettamisopas. Ympäristöopas Nro 89. Suomen ympäristökeskus
2001.
- 42 Klaus-Peter Fehlau & Ulrike Nienhaus. Die Entwicklung der bautechnischen
Sicherungen von Deponien. Mitt.Ing.-u. Hydrogeol. 79. Aachen 2001.
- 43 Kurki, T., Toimintavaatimukset teiden ja katujen kunnossapitourakoissa. Esitel-
mä. Kesätiepäivät (STY), Kunnosta on kysymys -seminaari 4.-5.6.2003.
- 44 Katsumi, T., et al., Performance-based design of landfill liners. Engineering Geo-
logy 60(2001) pp.139-148.
- 45 Korner, R. M., Hsuan, G., Appendix B. Antioksidant Depletion time in high den-
sity polyethyle geomembranes. Saatavissa: <http://www.epa.gov/>
- 46 Kempfert, H.-G. et al. Numerical and experimental investigations on the beha-
viour of leachate collection pipes in waste disposal engineering. In: Proceedings of
3rd International Congress on Environmental geotechnics, Lisbon, Portugal, 1998,
Artikkelit konferenssin CD-levyllä.
- 47 Leppänen, M., Vahanne, P. & Ahonen, J. 2004. Tiivistysrakenteiden laadunval-
vonta. SCC Viatek Oy, VTT Prosessit. Luonnos.
- 48 Landfill Regulations (England and Wales) 2002. Draft Statutory Instrument 2002
No.

- 49 Landfill Directive. Regulatory Guidance Note 6.0 (Version 3.0 June 2002). Interpretation of the Engineering Requirements of Annex I of the Landfill Directive (1999/31/EC) Environment Agency 2002
- 50 LaGatta, M. D. et al, Geosynthetic Clay Liners Subjected to Differential Settlement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, May 1997, Vol. 123, No 5. p. 402-410.
- 51 Leakage rate Trough Composite Liner Calculatos, <http://landfilldesign.com>
- 52 Landfill manuals. Landfill Site Design. Environmental Protection Agency Ireland. 138 s. Saatavissa: <http://www.epa.ie/>
- 53 Manassero, M., Parker, R., Pasqualini, E., Szabò, I., Almeida, M.S.S., Bouazza, A., Daniel, D.E. and Rowe, R.K., 1998. Controlled landfill design (Geotechnical aspects). *Environmental Geotechnics*, Proc. 3rd International Congress on Environmental Geotechnics, Lisboa, Portugal
- 54 Materialien zur Altlastenbehandlung Nr 6/98. Oberflächensicherung von Altablagern und Deponien. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- 55 Mömossen Jätehuolto Oy, Sipoon kunta, Mömossenin jätteenkäsittely-alueen pinta- ja pohjavesien velvoitetarkkailu. Yhteenveto vuodelta 1999. Suunnittelukeskus 26.4.2000.
- 56 Mouser Version 1 Users Manual.
Saatavissa: <http://www.groundwater.buffalo.edu/>
- 57 Manassero, M. Controlled Landfill Design. In: *Environmental Geotechnics. Report of the ISSMFE Technical Committee TC 5 on Environmental Geotechnics*. Edited by the Technical Committee TC 5 "Environmental Geotechnics", ISSMFE International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering. Ruhr-Universität Bochum, Bochum September 1997. pp. 77-122.
- 58 NordGeoSpec 2002. A Nordic system for specification and control of geotextiles in roads and other trafficked areas. SINTEF & VTT.
- 59 Neuvoston direktiivi 89/106/ETY 21.12.1988 "rakennusalan tuotteita koskevan jäsenvaltioiden lainsäädännön lähentämisestä"
- 60 Neuvoston direktiivi 1999/31/EY, annettu 26.4.1999, kaatopaikoista. Asiakirja 399L0031.

- 61 Pelkonen M. 2002. Kaatopaikkavesien käsittely. Julkaisussa: Tanskanen, J.-H. ja Ettala, M. Jätteen loppusijoituksen tutkimustarpeet Suomessa 2002. Liite 8, Tekesin STREAMS-teknologiaohjelmaan kuuluvan KAATIS-hankkeen jatkoselvitys (18.1.2002) CD-Rom. Suomen ympäristökeskus.
- 62 Perusteet ja menettelyt jätteen hyväksymisestä kaatopaikoille. Neuvoston päätös 2003/33/EY, 19.12.2002.
- 63 Slenders, H., Goes, R., Canter Cremers, I., Kok, B. & Ruardi P. Dutch guideline for hydrogeological isolation.
- 64 Den Ouden, J. and Backhuijs, F. Dutch guidelines for bottom isolation and site specific alternatives. Proc. Sardinia 99, Seventh Int. Waste Management and Landfill Symposium. 1999
- 65 @RISK -manuaali, Guide to Using @risk, Risk Analysis and Simulations Add-In for Microsoft Excel, Version 4, Palisade Corporation, USA, november 2000. lisätietoja: <http://www.palisade.com>
- 66 Rakenteiden elinkaaritekniikka. RIL 216-2001. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry. Helsinki 2001. 301 s.
- 67 Rakennusmateriaalien ja rakenteiden käyttöikä. RIL 182-1995. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto ry. Helsinki 1995. 119 s.
- 68 Rowe, R.K., Fleming, I.R., Estimating the time for clogging of leachate collection systems. Proceedings of 3rd International Congress on Environmental geotechnics, Lisbon, Portugal, 1998, pp. 23-38.
- 69 Schicketanz, R. Was ist beim Einbau von Kuststoffdichtungsbahnen als Oberflächenabdichtung bei unterschiedlichen Aufbausystemen zu beachten. 2001
- 70 SFS-EN 13249 Geotextiles and geotextile-related products. Characteristics required for use in the construction of roads and other trafficked areas (excluding railways and asphalt inclusion)
- 71 SFS-EN 13249 Geotekstiilit ja vastaavat tuotteet. Toiminnalliset vaatimukset teiden ja muiden liikennöityjen alueiden rakentamisessa/ (lukuun ottamatta rautateitä ja asfaltilla sidottuja kerroksia)
- 72 <http://www.sandia.gov/Subsurface/factshts/ert/gmms.pdf>

- 73 Schmid, J. Wirtschaftlichkeit von Oberflächenabdichtungen: Das optimale System für den konkreten Standorten finden. BayFORREST. Kostengünstige und qualitative Abdeckung von Deponien. 2002.
- 74 Schmid, J., Schulz, H. Wirtschaftlichkeit von Oberflächenabdichtungen. Vorträge zum 8. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium am 15. März 2001. Mitteilungen Technische Universität Darmstadt. Heft Nr. 55. 2001. 195-213
- 75 Schmid, J., Schulz, H. BLACE - ein Hilfsmittel zur technisch - ökonomischen Bewertung von Oberflächenabdichtungen. Bayerische Abfall- und Deponietage 17-17.5.2001 am Bayerischen Landesamt für Umweltschutz unter Beteiligung des Vereins "KUMAS Augsburg". Referat 12.
- 76 Shackelford, C.D., Rowe, R.K. Contaminant transport modeling. In: Environmental Geotechnics. Report of the ISSMFE Technical Committee TC 5 on Environmental Geotechnics. Edited by the Technical Committee TC 5 "Environmental Geotechnics", ISSMFE International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering. Ruhr-Universität Bochum, Bochum September 1997. pp. 5-22.
- 77 Schroeder, P. R. et al. The hydrologic evaluation of landfill performance (HELP) model, Engineering Documentation for version 3, Risk reduction engineering laboratory office of research and development, U.S: Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio. 1994, 84 p. + app.
- 78 Saavalainen, J., Salaojittajan käsikirja. Osa 1 A. Suomen olosuhteet kuivatusta silmälläpitäen, Salaojituksen kannatusyhdistys, Helsinki 1981, 116 s.
- 79 Tanskanen, J-H., Ettala, M. Jätteiden loppusijoituksen tutkimustarpeet Suomessa 2002. Loppuraportti 1.2.2002. STREAMS ohjelma
- 80 Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen von 14. Mai 1993.
- 81 Tekesin STREAMS-teknologiaohjelman KAATIS-hankkeen matkaraportti. Saksa ja Hollanti 18-22.11.2001. TEKES, CD-levy.
- 82 The EC Groundwater Directive (80/68/EEC) and the Waste Management Licensing Regulations 1994. Internal Guidance on the Interpretation and Application of Regulation 15 of the Waste Management Licensing Regulations 1994 (The Protection of Groundwater Resources). Environmental Agency 1999.

- 83 Tienrakennustöiden yleiset laatuvaatimukset ja työselitykset: Penger- ja kerrosrakenteet, kohta 4450 Suodatinkankaat (TIEH 2200017-v-03).
- 84 <http://water.usgs.gov/pubs/twri/twri3-b7/html/pdf.html>
- 85 <http://www.terraplus.com/papers/g2%20Imaging.htm>
- 86 <http://www.terraplus.com/papers/henderson.htm>
- 87 Tätskikt i mark. Vägledning för beställare, projektörer och entreprenörer. Svenska Geotekniska Föreningen, SGF Rapport 1:99. Lindköping 1999. 83 s.
- 88 Tilastoja Suomen Ilmastosta 1961-1990. Liite Suomen meteorologiseen vuosikirjaan. Nide 90, Osa 1 - 1990 Ilmatieteen laitos 1991, Helsinki 1991.
- 89 Tan, B-K. et al. Assessing the Suitability of Clay Soils For Landfill Liner Via Leaching Column Test, Proc. of Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, 6-10 October 2003, Sardinia, Italy.
- 90 Tammirinne, M., Juvankoski, M., Leppänen, M., Kaartokallio, A., Ruohonen, K., Virtanen, P., Mineraalisten pohjavedensuojusrakenteiden pitkäaikaistoimivuus, VTT Yhdyskuntatekniikka, Tutkimusraportti 510, Espoo 21.12.1999.
- 91 User guidelines for waste and by-product materials in pavement construction (EVALUATION GUIDANCE. General Framework) Publication NO FHWA-RD-97-148. 1998
- 92 Valtioneuvoston päätös kaatopaikoista (861/97) ja sen muutos (1049/1999)
- 93 von Maubeuge, K. P., & Dixon, J. H., Geomembrane Protection Layers for Landfills. A Summary of German Experience. Wastemann, Birmingham 25...27.2.1992
- 94 Vainio, K. 2002. Turun kaupungin Topinojan kaatopaikan tarkkailututkimus vuonna 2001, Vuosiyhteenveto. Tutkimusseloste 194. Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy. Turku. 24 s. + liitteet.
- 95 Vainio, K. 2001. Turun kaupungin Topinojan kaatopaikan tarkkailututkimus vuonna 2000, Vuosiyhteenveto. Tutkimusseloste 170. Lounais-Suomen vesi- ja ympäristötutkimus Oy. Turku. 22 s. + liitteet.

- 96 Vesihydro Oy. 2001. Ämmässuon kaatopaikan viemäriin pumpattavien vesien, vesistövesien ja pohjavesien tarkkailu v. 2000. Laajempi yhteenveto 27.2.2001. 22 s. + liitteet
- 97 Vesihydro Oy. 2000. Ämmässuon kaatopaikan viemäriin pumpattavien vesien, vesistövesien ja pohjavesien tarkkailu v. 1999. Suppeampi yhteenveto 8.2.2000. 19 s. + liitteet.
- 98 Vesihydro Oy. 2002. Ämmässuon kaatopaikan viemäriin pumpattavien vesien, vesistövesien ja pohjavesien tarkkailu v. 2001. Suppeampi yhteenveto 12.2.2002. 19 s. + liitteet.
- 99 Fitzsimmons, J. H., Stark T. D., Theoretical effect of bentonite migration on contaminant transport through GCLs. Geosynthetic 7th ICG, Nice 2002, Eds Delmas, Ph., Gourc, J. P. & Girard, H., Swets & Zeitlinger, 2002, pp. 757...760.
- 100 Wahlström, M., Laine-Ylijoki, J., Eskola, P., Vahanne, P., Mäkelä, E., Vikman, M., Venelampi, O., Hämäläinen, J., Frilander, R. 2004. Kaatopaikkojen tiivistysrakennemateriaaleina käytettävien teollisuuden sivutuotteiden ympäristökelpoisuus. VTT Tiedotteita (painossa)
- 101 Kovács, B. et al. The complex equivalency of liner systems applied for waste disposal, <http://www.gama-geo.hu/kb/cikk/prag2000.pdf>
- 102 Wi 00189070 Geotextiles and geotextile related products - On site quality control.
- 103 Ympäristöministeriö. Jätelaki V:1.1.1994 A:3.12.1993, SK 1072/1993.
- 104 Yesiller, N., Hanson, J. L., Analysis of Temperatures at a Municipal Solid Waste Landfill, Proc. of Ninth International Waste Management and Landfill Symposium, 6-10 October 2003, Sardinia, Italy.
- 105 Zeh, R. M., Witt, K. J., Water Balance Models and Programs - Comparisons and Calculation Results, <http://www.uni-weimar.de>
- 106 Zeh, R. M. et al. An Approach to the Assessment of Cover Lining Systems, <http://www.uni-weimar.de>
- 107 ÖNORM S 2076-2. 1.4.2001. Deponien. Geotextile Schutzlagen. Anforderungen und Prüfbestimmungen. Österreichisches Normungsinstitut.

