

Ohje rengasrouheen käyttämisestä ja mitoittamisesta kaatopaikkarakenteissa

1.10.2012

Laatuinsinöörit Oy

Hannu Aurinko



Ohje rengasrouheen käyttämisestä
ja mitoittamisesta kaatopaikkarakenteissa

Tiivistelmä

Valtioneuvoston tekemän päätöksen mukaan käytettyjen renkaiden järjestelmällinen kierrätys aloitettiin Suomessa vuonna 1996. Taustalla on valtioneuvoston päätös, joka velvoittaa renkaan tuottajan huolehtimaan siitä, että käytöstä poistetut renkaat päätyvät hyötykäyttöön. Kierrätysvelvoitteen hoitamiseksi joukko rengasalan toimijoita perustivat syksyllä 1995 Suomen Rengaskierrätys Oy:n ja Kuusakoski Oy, joka operoi tänä päivänä kierrätystoimintaa viiden alueterminaalin ja 18 palvelupisteen sekä lukuisten keräyspisteiden avulla. Kierrätystoiminnan avulla renkaista yli 90 % kertyvästä massasta toimitetaan kokonaisina renkaina, paaleiksi sidottuna tai rengasrouheeksi leikattuna mm. tie- ja maanrakennustyömaille. Lisäksi hienojakoista rengasgranulaattia käytetään joustoa vaativien alustojen kuten keinonurmien, urheilu- ja leikkikenttien pintarakenteissa. Hyötykäyttökohteita on useita ja uusia etsitään aktiivisesti.

Tässä ohjeessa rengasrouheen ja granulaatin materiaaliominaisuuksia käsitellään lähinnä kaatopaikkojen sovellutuskohdeiden näkökulmasta. Kaatopaikalla rengasrouhetta voidaan käyttää pinta- ja pohjarakenteiden kuivatuskerroksissa, kaasunkeräyskerroksissa, välitäyttökerroksissa johtamaan kaasua ja suotovettä, kaasunkeräyskaivoina, suojauskerroksissa, ympäristäytöissä ja kaatopaikkatiestössä. Rengasrouhemateriaalin teknisiä ominaisuuksia voidaan soveltaa myös muihin käyttökohteisiin, koska rengasrouhe soveltuu hyvin korvaamaan karkearakeisia maa-ainesmateriaaleja erilaisissa käyttökohteissa. Tällaisia käyttökohteita ovat mm. penkereiden keventeissä, meluvalleissa, siltojen taustatäytöissä, luiskien vahvisteena ja ruotasuojauseristeenä.

Rengasrouheen tärkeimpiä teknisiä ominaisuuksia ovat hyvä veden- ja kaasunjohtavuus, kestävyys ja muodonmuutosten sietokyky, materiaalin pieni ominaispaino, pieni lämmönjohtokyky ja materiaalin lujuusparametrit vastaavat tyypillistä kiviainesmateriaalin lujuusparametreja. Lisäksi ohje antaa perusteet rengasrouhemateriaalin mitoittamiseen kaasunkeräys- kuivatus-, välitäyttö- ja suojarakenteeksi kaatopaikalle. Rengasrouheella pystytään korvaamaan kustannustehokkaasti ja turvallisesti kiviainesmateriaalia kaatopaikan eri rakenteissa. Rengasrouhemateriaali on helposti rakennettavaa normaalilla maarakennuskalustolla ja alhaisesta tilavuuspainosta johtuen rakentaminen ja kuljettaminen ovat kustannustehokkaita.

Rengasrouheen vaikutuksia ympäristöön, erityisesti pohjavesiin, on tutkittu laajasti eri puolilla maailmaa. Tehtyjen tutkimusten perusteella rengasrouhe ympäristön kannalta turvallinen vaihtoehto käytettäväksi eri sovellutuskohdeissa, koska siitä ei liukene haitta-aineita ympäristöön. Lisäksi tiedetään, että rengasrouhe pystyy sitomaan aktiivihiihi-suodattimen tavoin kaasu- ja nestemuodossa olevia haihtuvia orgaanisia yhdisteitä.

Avainsanat: Rengasrouhe, granulaatti, hydraulinen johtavuus, kaasunkeräys, muodonmuutos.

Abstract

After the Finnish government decision, organized used tires recycling to begin in Finland 1996. The government decision obligates tire producer take care that disused tires end up on utilization. In 1995, a group of tire industry operators was constituted Suomen Rengaskierrätys Ltd to organize recycling obligation and Kuusakoski Ltd recycles tires today by the dint of five regional terminals, 18 drop in centers and 2300 drop in points. By force of tire recycling, over 90 % of all used tires is forwarding etc. to road or earth construction sites as complete tires, bales of tire chips and shredded tire chips. In addition, fine grained tire granulated material is used in flexible demanding base structures as artificial grass areas, sports fields and playgrounds. There are lots of recycling targets and new subject of experiment is searching actively.

In this report is concerned with shredded tire chips and tire granulated material properties according to landfill a point of view. In landfills shredded tire chips can be used in drainage layer bottom and surface structures, gas collection layers, intermediate layers to conduct bio gas and leachate, gas collection wells, intermediate covers, landfill protective layers and landfill roads. Shredded tire chips fulfill the demands and recommendations of landfill structures as well as technical and environmental properties; it can be used instead of granular soils. Applications of this kind are light weight fill etc. in road embankments, noise barriers, in bridge back fills, slope stability support and as insulation material.

The most important technical properties of shredded tire chips are good water and gas permeability, durability and the ability to stand uneven settlements, low thermal conductivity and the strength parameters are similar comparing with typical soils. In addition this report gives bases for shredded tire chips materials to design gas collection layers, drainage layers, intermediate layers and protective layers in landfill. Shredded tire chips can replace cost efficiency and according to environment safely soil materials in landfill structures. Shredded tire chips can be easily to construct by normal earth construction machines and due to low unit weight saturated constructing and transporting is cost efficient.

Shredded tire chips impact on environment, especially to groundwater, has been examined widely in the world. According to examinations results, shredded tire chips in a safe choice due to environment in previously described applications, because it does not dissolve any harmful substances to environment. In addition shredded tire chips are known to leach organic contaminants like an activated carbon filter.

Keywords: Shredded tire chips, tire granulated, hydraulic conductivity, gas collection, deformation.

Sisältö

Tiivistelmä	3
Abstract	4
1. Johdanto	7
2. Kaatopaikkarakenteiden vaatimukset	8
3. Rengasrouheen materiaaliominaisuudet	10
3.1. Yleistä	10
3.2. Luokitusominaisuudet	10
3.1.1. Ominaispaine	10
3.1.2. Tilavuuspaine	10
3.1.3. Rakeisuus	11
3.1.4. Huokoisuus	12
3.3. Lujuusominaisuudet	13
3.4. Kokoonpuristuvuus ominaisuudet	14
3.4.1. Lyhyen ajan kokoonpuristuvuus	16
3.4.2. Pitkän ajan kokoonpuristuvuus	16
3.5. Hydrauliset ominaisuudet	16
3.5.1. Hydraulinen johtavuus	17
3.5.2. Kaasun johtavuus	19
3.5.3. Biologinen ja fysikaalinen tukkeutuminen	19
3.6. Lämmönjohtavuus	20
3.7. Rengasrouheen vaikutukset ympäristöön	20
3.7.1. Liukenevuus, pysyvyys ja pidättävyys	21
3.7.2. Veden adsorptio	21
3.7.3. Syttymisherkkyys	22
3.8. Rengasrouheen yhteensopivuus muihin kaatopaikkarakenteisiin	22
3.9. Rakennettavuus	23
3.10. Varastointi	24
4. Rengasrouheen soveltuvuus ja käyttökohteita kaatopaikoilla	26

4.1.	Tekninen soveltuvuus.....	26
4.2.	Ympäristökelpoisuus	26
4.3.	Käyttökohteita kaatopaikoilla	27
4.3.1.	Kaasunkeräyskerrokset	28
4.3.2.	Kuivatuskerrokset.....	28
4.3.3.	Välitäyttökerrokset.....	30
4.3.4.	Suojauskerrokset	31
5.	Rengasrouheen mitoitusperusteet	32
5.1.	Yleistä	32
5.2.	Kuivatusrakenteen mitoittaminen	32
5.2.1.	Esimerkki rengasrouherakenteen mitoittamisesta kuivatusrakenteeksi.....	34
5.3.	Kaasunkeräysrakenteen mitoittaminen	36
5.4.	Välitäyttörakenteen mitoittaminen	36
5.5.	Suodatin ja suojausrakenteen mitoittaminen.....	38
	Lähteet.....	39
	Liite 1 Kaatopaikkakelpoisuustestin tulokset	

1. Johdanto

Käytettyjen renkaiden järjestelmällinen kierrätys aloitettiin Suomessa vuonna 1996. Taustalla on valtioneuvoston päätös, joka velvoittaa renkaan tuottajan huolehtimaan siitä, että käytöstä poistetut renkaat päätyvät hyötykäyttöön. Lisäksi päätöksessä asetettiin velvoite, että vuoteen 2 000 mennessä 90 % käytöstä poistetuista renkaista on kierrätettävä - tämä tavoite on toteutunut. Kierrätysvelvoitteen hoitamiseksi joukko rengasalan toimijoita perustivat syksyllä 1995 Suomen Rengaskierrätys Oy:n ja Kuusakoski Oy operoi tänä päivänä kierrätystoimintaa.

Kierrätettävistä renkaista voidaan valmistaa erilaisia materiaaleja, joita voidaan soveltaa käytettäväksi mm. meluväliseinissä, routaeristeissä ja kaatopaikkojen rakenteissa. Pienempi rengasrouhe toimii mainiosti mm. ratsastuskenttien joustokerroksena ja urheilukenttien pintarakenteena. Renkaille ja rengasrouheelle kehitellään jatkuvasti uusia hyödyntämistapoja kuten räjäytysmatot, jotka toimivat myös metsäautoteiden väliaikaisena rakenteena tai rengaspaalien ja rengasrouheen käyttäminen rauta- ja maanteiden tärinäsuojauksessa.

Tässä ohjeessa käydään läpi rengasrouheen yleisiä ja teknisiä ominaisuuksia sekä niiden vaikutusta rengasrouheen käyttäytymiseen eritilanteissa ja olosuhteissa kaatopaikan sovellutuskohdeissa. Lisäksi ohje antaa perusteet rengasrouhemateriaalin mitoittamiseen kaasunkeräys- kuivatus-, välitäyttö- ja suojarakenteeksi kaatopaikalle.

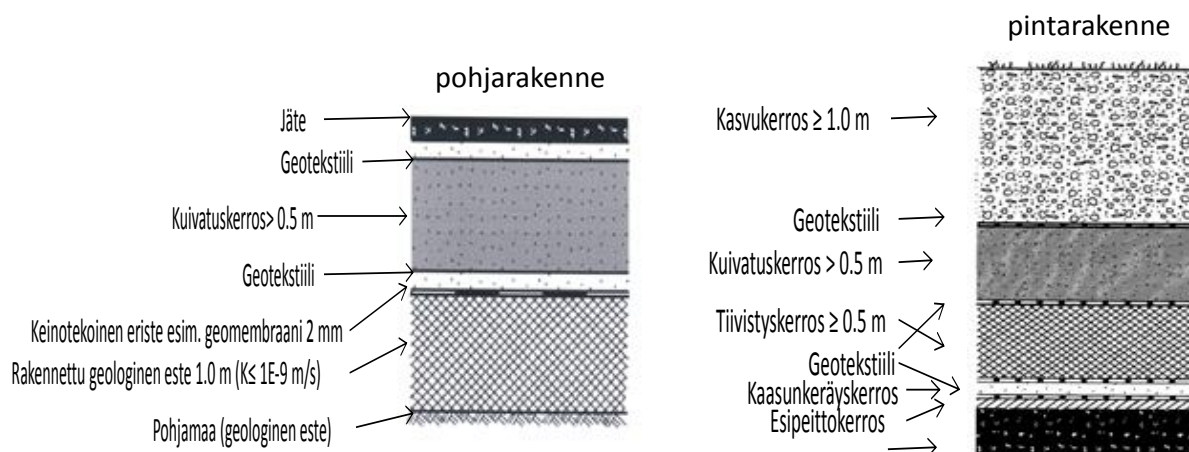
Rengasrouhe on kaasun- ja vedenjohtavuusominaisuuksiltaan kaikissa olosuhteissa maa-ainesmateriaalia parempaa, joten se soveltuu erinomaisesti kaasua kerääviin ja kuivatusrakenteisiin. Rengasrouheen kokoonpuristuvuus ja palautumisominaisuudet mahdollistavat sen käyttämisen syklisen kuormituksen tasaamiseen ja suurien muodonmuutoksien vastaanottajaksi esim. kaatopaikalla jätetäytön sisällä. Lujuusominaisuuksiltaan rengasrouheen ominaisuudet vastaavat kiviainesmateriaalien ominaisuuksia ja lämmöneristysominaisuuksiltaan rengasrouhe vastaa kevytsoran ominaisuuksia kuitenkin sillä poikkeuksella, ettei rengasrouhe kerää vettä sisäänsä. Lisäksi kirjallisuuden perusteella tiedetään, että rengasrouhe pystyy sitomaan, absorboimaan, aktiivihiihiinuolettimen tavoin kaasu- ja nestemuodossa olevia haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (Park ym. 1991).

Aikaisempien tutkimuksien perusteella rengasrouhe on ympäristön kannalta turvallinen vaihtoehto käytettäväksi eri sovellutuskohdeissa, koska siitä ei liukene haitta-aineita ympäristöön, jotka vaatisivat erillisiä ympäristön suojausrakenteita (Humphrey & Katz 2001). Materiaali on helposti rakennettavaa normaalilla maarakennuskalustolla ja alhaisesta tilavuuspainosta johtuen rakentaminen ja kuljettaminen ovat kustannustehokkaita. Rengasrouheella pystytään korvaamaan kustannustehokkaasti ja turvallisesti kiviainesmateriaalia kaatopaikan eri rakenteissa.

2. Kaatopaikkarakenteiden vaatimukset

Valtioneuvoston päätös kaatopaikoista (861/1997) sisältää pinta- ja pohjarakenteiden yleiset vaatimukset, jotka perustuvat EU:n neuvoston direktiiviin 1999/91. Rengasrouhe soveltuu käytettäväksi kaatopaikoilla kaasunkeräys-, kuivatus-, välitäyttö- ja suojakerroksina. Lisäksi granulaattia l. rengasraetta voidaan käyttää esim. geomembraanin suojakerroksena ja kuivatusrakenteena (kuva 1).

Kuivatuskerroksen tehtävänä on johtaa pintakerroksen läpi suotautuva sadevesi pois sekä vähentää tiivistyskerrokseen kohdistuvaa vesipainetta. Kerroksen vedenläpäisevyyden suositusarvo on yleensä suurempi kuin 1 E-3 m/s (kuva 1). Kaasunkeräyskerroksen tehtävänä on kerätä tehokkaasti jätetäytössä (kuva 1). Yhdyskuntajätteen kaatopaikasta muodostuva kaasu, joka sisältää tyypillisesti 55...65 % metaania (CH_4) ja 35...45 % hiilidioksidia (CO_2) (Ehrig 1991). Kaasunkeräyskerroksesta ja kaasunkeräyskaivoista biokaasu johdetaan kaasunkeräilyverkkoon ja jatkohyödynnettäväksi.



Kuva 1. Esimerkki kaatopaikan pohja- ja pintarakennekerroksista.

Taulukossa 1. on estetty vaatimukset ja suositukset kaasunkeräys- ja kuivatuskerroksille kerrospaksuuden, hydraulisen- ja kaasunjohtavuuden osalta. Välitäyttö- ja suojakerroksille ei ole määritetty vaatimuksia Valtioneuvoston päätöksessä kaatopaikoista (VNp 861/1997).

Taulukko 1. Kaatopaikan pinta- ja pohjarakenteiden hydraulisen tai kaasunjohtavuus- ja kerrospaksuus vaatimukset tai suositukset

Rakennekerros	Johtavuus [m/s]	Kerrospaksuus [m]
Kuivatuskerros pintarakenteessa	$\geq 1E-3$ *	≥ 0.5
Kuivatuskerros pohjarakenteessa	$\geq 1E-3$	≥ 0.5
Kaasunkeräyskerros pintarakenteessa	--- **	0.3*

Huom. * tarkoittaa suositusta. ** kaasunjohtavuudelle ei ole määritetty johtavuusvaatimusta.

Valtioneuvoston päätös kaatopaikoista (VNp 861/1997) asettaa vaatimukset pinta- ja pohjarakenteiden kuivatuskerroksien paksuudelle ja pohjarakenteen kuivatuskerroksen hydrauliselle johtavuudelle. Suositukset muille vaatimuksille perustuvat Kaatopaikan tiivisrakenteet oppaaseen, jossa dimensiot on mainittu (Leppänen 1998). Valtioneuvoston päätöksessä asetetuista vaatimuksista ja suosituksista voidaan poiketa lupaviranomaisen päätöksellä, mikäli esim. riskienarvioinnin avulla osoittamaan ettei siitä aiheudu haittaa.

Lupaviranomainen voi päätöksellään lieventää vaatimuksia:

- kaatopaikkavesien keräämisestä yhteen ja käsittelystä,
- kaatopaikan pohja- ja pintarakenteista tai
- kaatopaikkakaasun keräämisestä yhteen ja hyödyntämisestä tai käsittelystä,

Poikkeus voidaan tehdä, ”jos kaatopaikan pitäjä kaatopaikan terveys- ja ympäristövaikutusten kokonaisarvioinnin perusteella luotettavasti osoittaa, ettei kaatopaikasta ja jätteiden sijoittamisesta sille voi aiheutua pitkänkään ajan kuluessa jätelaissa tai ympäristönsuojelulaissa taikka niiden nojalla annetuissa säännöksissä tarkoitettua vaaraa tai haittaa terveydelle tai ympäristölle eikä ympäristönsuojelulain 7 §:ssä tarkoitetun maaperän pilaamiskiellon tai 8 §:ssä tarkoitetun pohjaveden pilaamiskiellon rikkomista. Kaatopaikalla käytettävän tekniikan sekä terveys- ja ympäristöhaitan torjuntamenetelmän on tällöinkin oltava 6 §:n 5 kohdassa säädetyn mukaisia.”

3. Rengasrouheen materiaaliominaisuudet

3.1. Yleistä

Tässä osiossa käsitellään rengasrouheen yleisiä ja teknisiä ominaisuuksia sekä niiden vaikutusta rengasrouheen käyttäytymiseen eritilanteissa ja olosuhteissa. Renkaat sisältävät luonnon kumia ja synteettistä kumia, jotka ovat öljyn ja kaasun johdannaisia. Lisäksi tuotantoprosessissa on käytetty polymeerejä, metallia ja lisäaineita parantamaan renkaan suorituskykyä.

Rengasrouhetta käytettäessä kaatopaikan sovellutuskohteisiin tulee suunnittelijan tietää kuinka nämä tekijät vaikuttavat lopulliseen käyttökohteeseen. Erilaiset yksityiset ja julkiset tahot ovat suorittaneet useita tutkimuksia rengasrouheen ominaisuuksista viime vuosikymmeninä mm. Yhdysvalloissa. Materiaaliominaisuudet on johdettu näistä tutkimuksista tähän mitoitusohjeeseen. Tärkeimmät rengasrouheen mitoittamiseen liittyvät materiaaliominaisuudet on esitetty seuraavissa kappaleissa.

3.2. Luokitusominaisuudet

3.1.1. Ominaispaino

Ominaispaino, ρ_s , on kiinteän rengasrouhepalan paino normaaliolosuhteissa. Rengasrouheen ominaispaino vaihtelee 1.02...1.27 tn/m³ välillä riippuen kuinka paljon rengaspala sisältää metallia (Ahmed 1993; Humphrey & Manion 1992; Humphrey ym. 1992). Rengasrouheen ominaispaino on hieman suurempi veden ominaispainoon verrattuna ja tästä johtuen veden aiheuttamaa nostetta ei tarvitse huomioida sijoitettaessa rengasrouhetta pysyvästi vesipinnan alapuolelle. Vastaavasti rengasrouhe on huomattavasti kevyempää kuin maa- ja kiviainesfraktiot.

Ominaispaino voidaan määrittää ASTM C 127 standardin mukaisesti ” *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*”. ASTM C 127 menetelmän avulla voidaan määrittää karkearakeisen materiaalin keskimääräinen tiheys (menetelmä ei huomioi partikkeleiden välistä huokoisuutta), suhteellisen tiheyden (ominaispaino) ja karkean aggregaatin/fraktion sorption (Humphrey 1996).

3.1.2. Tilavuuspaino

Tilavuuspaino on suure, joka ilmoittaa tutkittavan aineen painon suhde sen tilavuuteen, jolloin tilavuuspainoon vaikuttavat materiaalin ominaispaino, partikkelien raekoko/palakoko, tiiviys ja kuormitus. Tilavuuspainoa voidaan lisätä tiivistämällä rengasrouhetta esim. mekaanisesti kuormittamalla. Aikaisemmat tutkimukset osoittavat, että mekaanisesti tiivistämisellä saadaan aikaan vain vähäistä tilavuuspainon lisääntymistä, joka johtuu maksimikuivatilavuuspainon

saavuttamisesta varsin vähäisellä tiivistämistyöllä. Lisäksi vesipitoisuuden vaihtelulla on osoitettu olevan vain vähäinen merkitys rengasrouheen tiivistymiseen (Manion & Humphrey 1992).

Humphreyn (1997) mukaan tiivistämättömän rengasrouheen tilavuuspaino vaihtelee $2.3...4.8 \text{ kN/m}^3$ välillä ja tiivistetyn $5.9...8.2 \text{ kN/m}^3$ välillä. Tilavuuspainoon vaikuttavat rengastyypin välillä olevat erot onko siinä käytetty teräs- vai lasikuituvahvisteista rakennetta tai näiden sekoitusta. Teräsvahvisteiset renkaat ovat tilavuuspainoltaan suurempia verrattuna lasikuituvahvisteisiin tai yhdistelmä vahvisteisiin renkaisiin. Suomessa ei ole käytetty lasikuituvahvisteisiä renkaita, mutta käytettyjä renkaita voidaan tuoda maahan ulkomailta, jossa lasikuituvahvisteita on käytetty. Luonnon materiaalien tilavuuspaino vaihtelee saven 13.8 kN/m^3 soran 21.7 kN/m^3 välillä, joka on merkittävästi suurempi rengasrouheen tilavuuspainoon verrattuna (Mitchell 1993; Terzaghi & Peck 1967). Rengasrouheen tilavuuspaino voidaan määrittää ASTM D 4253 standardin mukaisesti, "*Standard Test Method for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table*" (ASTM, 2008).

3.1.3. Rakeisuus

Rengasrouhe pystytään valmistamaan 50...300 mm rakeisuusvälille käytettävän kohteen mitoitustarpeen mukaisesti. Rakeisuus on materiaalin nimelliskoko, joka vaihtelee yksittäisten partikkelien koon ja muodon osalta (kuva 2). Tämä johtuu renkaan leikkausprosessista, jolloin kokonainen rengas voi olla eri asennossa leikkaus hetkellä ja tästä johtuen materiaalin muoto vaihtelee. Rakeisuus vaikuttaa rengasrouheen tiivistyvyyteen, koska mitä pienempi raekoko sitä huokoisempi rakenne on ja helpompi tiivistää.

Renkaat voidaan valmistaa myös granulaatiksi i. rengasrakeeksi, jolloin materiaali voidaan seuloa 2...25 mm raekoon välille käyttökohteen vaatimaan fraktioon. Granulaatista poistetaan jalostusprosessin aikana teräs- tai lasikuituvahvisteet, jolloin se ei vahingoita muita materiaaleja, joihin granulaatti on kosketuksissa. Rengasrouheen ja granulaatin rakeisuus voidaan määrittää ASTM C 136 standardin mukaisesti, "*Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*" (ASTM, 2008).



Kuva 2. Rengasrouheen leikkausprosessi työmaaolosuhteissa.

3.1.4. Huokoisuus

Huokoisuus ilmoittaa ei-kiinteän aineen suhteen aineen kokonaismäärään. Huokosten määrä ilmoitetaan huokosluvun e tai huokoisuuden n [%] avulla. Huokoisuus vaihtelee rengasrouheessa materiaalin palakoon/rakeisuuden ja tiiviysasteen suhteessa. Löyhässä ja ison palakoon omaavassa rengasrouheessa on selvästi suurempi huokosten määrä verrattuna hyvin tiivistettyyn ja pienen palakoon rengasrouheeseen (Humphrey ym. 1993). Rengasrouheen huokoisuus on suorassa suhteessa sen vedenläpäisevyyteen ja keveyteen, koska suuremman huokoisuuden ja rakeisuuden/palakoon omaavalla rengasrouheella on suurempi vedenläpäisevyys pienempään raekokoon tai huokoisuuteen verrattuna. Tätä oletusta ei voida yleistää muihin materiaaleihin, koska esim. savella on suuri huokoisuus, mutta pieni vedenläpäisevyys. Huokosluku voidaan määrittää kaavan (1) avulla:

(1)

Missä; e on huokosluku, p_s on rengasrouheen ominaispaine, γ_w on veden tilavuuspaine ja γ_d rengasrouheen kuivatilavuuspaine. Tiivistämättömän rengasrouheen huokosluku vaihtelee tyypillisesti 1.5...2.5 ja tiivistetyn rengasrouheen 0.9...1.2 välillä. Huokoisuus ($n=e/(1+e)$) vaihtelee tiivistämättömällä rengasrouheella 60...70 % ja tiivistetyllä rengasrouheella 45...55 % välillä.

3.3. Lujuusominaisuudet

Rengasrouheen leikkauslujuus murtotilassa voidaan mallintaa Mohr-Coulombin -yhtälöstä normaalijännityksen, kitkakulman ja koheesion avulla kaavasta (2):

$$\tau_f = c + \sigma \tan \phi, \quad (2)$$

Missä; τ_f on leikkausvoima murtotilassa, c on koheesio, σ on normaalijännitys murtotilassa ja ϕ on kitkakulma. Rengasrouheen leikkauslujuutta on testattu laboratoriossa rasialeikkaukskokeella ja kirjallisuuden perusteella leikkauslujuusparametrien arvot ovat vaihdelleet kitkakulman osalta ϕ 20...40° asteen ja koheesion c 8...10 kN/m² välillä. Laboratoriokokeissa määritettyihin tuloksiin vaikuttivat mm. rengasrouheen palakoko/raekoko, tiiviysaste ja kyllästysaste. (Duffy 1995; Cosgrove 1995; Humphrey and Sandford 1993)

Lujuusparametrit ovat samaa tasoa Suomessa maarakentamisessa käytettävien luonnonmateriaalien kuten hiekan ja soran, joiden lujuusparametreista on esimerkkejä taulukossa 2. Rengasrouheen lujuusparametrit eivät yleensä vaikeuta luiskien kantavuus tai stabiliteettilaskentaa, koska se voidaan luiskata 1:3 kaltevuuteen, jolloin vakavuus on riittävä. Leikkauslujuus voidaan määrittää ASTM D 3080 standardin mukaisesti, "Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions" (ASTM, 2008).

Taulukko 2. Rengasrouheen, saven, hiekan ja soran leikkauslujuusparametrit

Materiaali	Rengasrouhe	Savi	Hiekka	Sora
Koheesio[kN/m ²]	20...40	2...20*		
Kitkakulma [°]	8...10	15...25	30...38	34...40

Huom. * Saven leikkauslujuusparametreina on käytetty tehokkaita leikkauslujuusarvoja. (Humphrey 1993; Terzaghi & Peck 1967)

3.4. Kokoonpuristuvuus ominaisuudet

Rengasrouheella on merkittävästi suurempi kyky muodonmuutoksiin verrattuna maa- ja kiviainesmateriaaleihin. Muodonmuutokset ovat hyvin pitkälti palautuvia ilmiöitä kuormituksen jälkeen. Rengasrouhe kokoonpuristuu suorassa suhteessa kuormituksen aiheuttamaan jännitystilaan. Kokoonpuristuman aiheuttaa rengasrouhepalojen puristuminen tiiviimmin toisiinsa nähden, jolloin huokostilavuus pienenee.

Kuormituksen poistamisen jälkeen rengasrouherakenne palautuu muodonmuutoksen jälkeen takaisin lähes samaan huokostilaan kuin ennen kuormitusta. Kokoonpuristuminen on maa-ainesmateriaaleihin nähden huomattavasti suurempaa 5...50 % kerrospaksuudesta ja sen vaikutus rakenteen toimivuuteen täytyy huomioida rakenteen mitoituksessa. Tyypillisesti kaatopaikan pintarakenteissa käytettävään rengasrouheeseen ei kohdistu merkittäviä kuormituksia, jolloin painumat ovat pienempiä. Kaatopaikan pohjarakenteen yläpuolisissa ja välitäyttörakenteissa kuormituksen aiheuttama painuma on huomattavasti suurempi ja sen vaikutus tulee huomioida rakenteiden suunnittelussa.

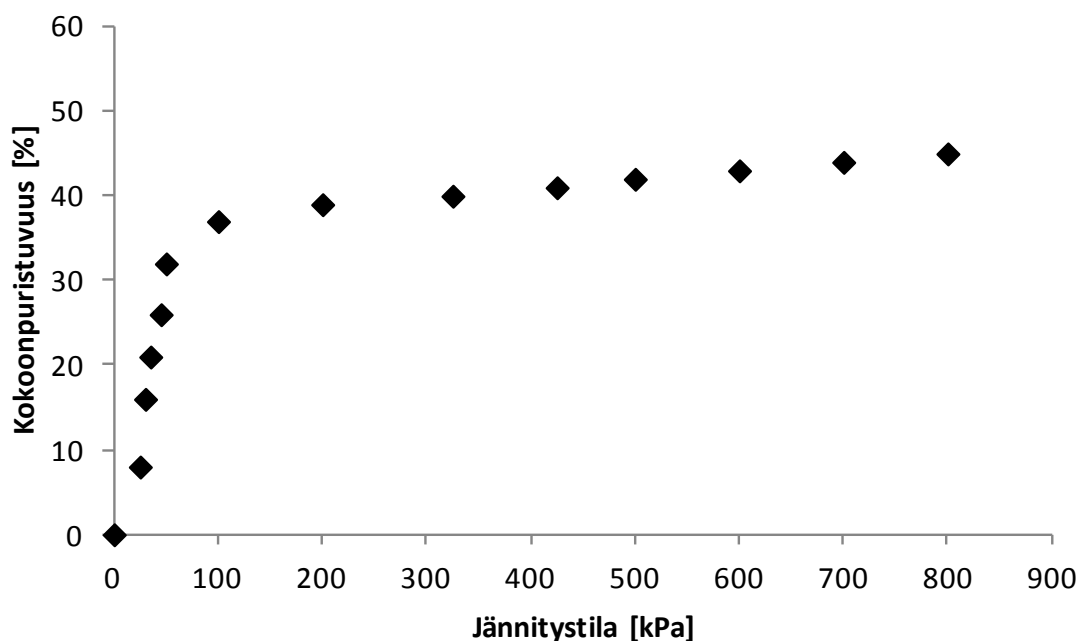
Taulukossa 3 on esitetty jätepenkereen ja maapenkereen kerrospaksuuden vaikutus konseptuaalisesti rengasrouheeseen kohdistuvaan kuormitusvaikutukseen. Kuvassa 3 on esitetty yksidimensioanaalisen kuormituksen aiheuttaman jännitystilan suhde rengasrouheen kokoonpuristuvuuteen.

Taulukko 3. jätepenkereen ja maapenkereen kerrospaksuuden vaikutus konseptuaalisesti rengasrouheeseen kohdistuvaan kuormitusvaikutukseen

Kuormitus [kPa]	Kuormitusta vastaavan jätepenkereen korkeus oletuksena ($\gamma = 10\text{kN/m}^3$) [m] *	Kuormitusta vastaavan maapenkereen korkeus oletuksena ($\gamma = 20\text{kN/m}^3$) [m] **
25	2.5	1.25
50	5.0	2.5
100	10	5
200	20	10
300	30	15
400	40	20
600	60	30

Huom. * Tiivistämättömän rengasrouheen tilavuuspaino vaihtelee $2.3...4.8\text{ kN/m}^3$ välillä ja tiivistetyn $5.9...8.2\text{ kN/m}^3$ välillä. **Maapenkereen tilavuuspainona on käytetty oletusmateriaalina soraa. (Humphrey 1993; Terzaghi & Peck 1967).

Kokoonpuristuminen vaihtelee epälineaarisesti kuormituksesta riippuen 5...50 % välillä (kuva 3). Kokoonpuristuvuus saavuttaa 40 % tason jo alle 100 kPa jännitystilan vaikutuksesta, joka vastaa kaatopaikkajätteenä muutettuna n. 10 metrin jätetäyttökerroksen paksuutta. Kaatopaikan pintarakenteessa kahden metrin paksuinen kasvukerros ($\gamma = 15 \text{ kN/m}^3$) aiheuttaa n. 25 % kokoonpuristumisen rengasrouhekerroksen kerrospaksuuteen nähden. Vastaavasti kaatopaikan pohjarakenteessa tai välitäyttökerroksessa rengasrouhe saavuttaa maksimi kokoonpuristuman n. 45 % kaikissa kuormitustilanteissa joissa jätetäytön paksuus on yli 5 metriä tai maakerroksen paksuus on yli 2.5 metriä (Ahmed 1993). Nämä kokoonpuristuvuuden tulokset perustuvat 50 mm*50 mm palakoon omaan rengasrouhemateriaalin tietoihin.



Kuva 3. Yksidimensioanaalisen kuormituksen aiheuttaman jännitystilan suhde rengasrouheen kokoonpuristuvuuteen (Manion & Humphrey 1992; Humphrey ym. 1993).

Rengasrouheen kokoonpuristuvuuteen kuormituksesta johtuvan jännitystilan lisäksi vaikuttavat palakoko/raekoko, kyllästysaste ja tiivistysaste. Granulaatissa painumat ovat pienempiä johtuen pienemmästä raekoosta verrattuna rengasrouheeseen (Humphrey ym. 1993). Molemmat materiaalit saavuttavat maksimikokoonpuristuvuuden varsin pienillä kuormituksilla. Kaatopaikan pintarakenteissa rengasrouhetta kuormittavan kerrospaksuuden aiheuttaman jännitystilan vaikutus tulee huomioida tapauskohtaisesti, koska kuormittavan materiaalin kerrospaksuus ja tilavuuspaino vaikuttavat huomattavasti rengasrouheen kokoonpuristuvuuteen. Kokoonpuristuvuus voidaan jakaa

lyhyen ajan ja pitkän ajan vaikutuksiin. Kokoonpuristuvuus voidaan määrittää ASTM D 698 standardin mukaisesti ” *Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort*” (ASTM 2008).

3.4.1. Lyhyen ajan kokoonpuristuvuus

Kuvan 3 mukaisesti, kokoonpuristuvuuden kasvu on kuormituksen kasvaessa 100 kPa tasolle hyvin suuri, mikä kertoo rengasrouhepartikkelien taipumisesta ja uudelleenjärjestymisestä kuormituksen vaikutuksesta. Kuvan 3 mukaan kokoonpuristuvuus saavuttaa maksimikokoonpuristuvuuden kuormituksen kasvaessa 800 kPa ja alkuvaiheessa tapahtunut rengasrouhepartikkelien uudelleen järjestyminen ei palaudu täysin alkutilanteeseen kuormitus poistettaessa. Taipumista tai elastisesta painumasta johtuvat muodonmuutokset ovat palautuvia myös syklisen kuormituksen vaikutuksesta. (Drescher ym. 1999; Bernal ym. 1996; Nickles, 1995)

3.4.2. Pitkän ajan kokoonpuristuvuus

Pitkän aikavälin tarkastelussa kuormitusvaikutus kohdistuu rengasrouheeseen virumana, joka kirjallisuuden perusteella muuttuu merkityksettömäksi kahden ensimmäisen vuoden jälkeen (Drescher ym. 1999). Pitkän aikavälin kokoonpuristuvuus tapahtuu 50 vuorokauden aikana 60 % - sesti oletuksella, että maksimikuormitus kohdistuu alusta alkaen rakenteeseen. Tällä perusteella kaatopaikkarakenteissa käytettävä rengasrouheen kokoonpuristuminen tapahtuu lyhyellä aikavälillä suhteessa rakenteen mitoitusikään ja rengasrouheen ominaisuudet eivät muutu pitkällä aikavälillä (Wartman ym. 2007).

3.5. Hydrauliset ominaisuudet

Keskeisimpiä ominaisuuksia, jotka vaikuttavat nesteen ja kaasunjohtavuuteen, ovat materiaalin partikkelien koko, materiaali matriisin huokoisuus ja koostumus, tiiviysaste, materiaali partikkelin muoto ja materiaali matriisin kyllästysaste (Mitchell 1993). Sharman ja Lewis’n (1994) mukaan partikkelien koko vaikuttaa hydrauliseen johtavuuteen, pienempi partikkelikoko muodostaa pienempiä avoimia huokosia, joka johtaa tyypillisesti pienempään hydrauliseen johtavuuteen. Lisäksi hienoaineksen määrällä, kuten siltillä tai savella, voi olla merkittävä vaikutus materiaalien hydrauliseen johtavuuteen, mikäli rengasrouheeseen on sekoitettu maa-ainesta (Sharma & Lewis 1994). Tästä johtuen maa-aineksen koostumuksella voi olla merkittävä vaikutus, mikäli se pääsee esim. materiaalikerrosten rajapinnoilla sekoittumaan rengasrouheen kanssa, sen hydrauliseen johtavuuteen (Sharma & Lewis 1994). Rengasrouheen hydraulinen johtavuus voidaan määrittää ASTM D 6270 standardin mukaisesti ”hydraulic conductivity of tire shred/soil mixtures should be measured with a constant head permeameter with a diameter several times greater than the maximum particle size” (ASTM 2008).

3.5.1. Hydraulinen johtavuus

Hydraulinen johtavuus on yhteydessä vedenpidätyskykyyn testattavan nesteen ja rengasrouheen ominaisuuksien kautta. Relevantteja tekijöitä, jotka ovat suhteessa keskenään ja vaikuttavat hydrauliseen johtavuuteen, ovat nesteen tiheys [ρ] ja viskositeetti [μ]. Vastaavasti rengasrouheen ominaisuuksista vaikuttavia tekijöitä ovat rakeisuus, partikkelien muoto, materiaalille ominainen turtoosinen tekijä, ominaispinta-ala ja huokoisuus (Othman & Seymour 2008; Bear & Palmer 1972). Hydraulisen johtavuuden ja vedenpidätyskyvyn välinen yhteys voidaan ilmaista kaavan 4 mukaan (Nutting 1930):

$$k = \frac{Kg\rho}{\mu} , \quad (3)$$

Missä; k on hydraulinen johtavuus, K on materiaalille ominainen vedenpidätyskyky, g on maanvetovoiman kiihtyvyys, ρ on nesteen tiheys ja μ on nesteen viskositeetti.

Kyllästysasteella ja huokoisuudella tai huokosluvulla on yhteys maa-aineksen osittain-kyllästyneen tilan hydrauliseen johtavuuteen riippuen kyllästysasteesta (Mitchell 1993). Osittain kyllästyneen tilan hydraulinen johtavuus on pienempi verrattuna täysin kyllästyneen tilan hydrauliseen johtavuuteen (Mitchell 1993). Tämä johtuu siitä, että huokostilan tulee ensin saavuttaa täysin kyllästynyt tila ennen kuin laminaarinen virtaus rakenteen läpi on mahdollinen. Kuitenkin materiaalin epähomogeenisuudesta johtuen laminaarinen virtaus on mahdollinen paikallisesti, jolloin rakenne ei ole kaikilta osin täysin kyllästyneessä tilassa.

Hydraulinen johtavuus ei ole riippuvainen hydraulisesta gradientista edellyttäen, että Darcy'n laki on voimassa (Mitchell 1993). Hydraulinen gradientti on tärkeässä merkityksessä, jos tarkastellaan haitta-aineen kulkeutumista esim. kaatopaikan pohjarakenteen yläpuolisessa kuivatusrakenteessa tai pintarakenteessa (Othman & Seymour 2008). Suotonopeus on suorassa suhteessa huokoisuuteen ja hydrauliseen gradienttiin, jolloin gradientin muutokset vaikuttavat myös virtaamaan rakenteen läpi. Suotonopeus on Darcy'n lain mukaan riippuvainen hydraulisesta johtavuudesta, huokoisuudesta ja hydraulisesta gradientista kaavan 4 mukaisesti:

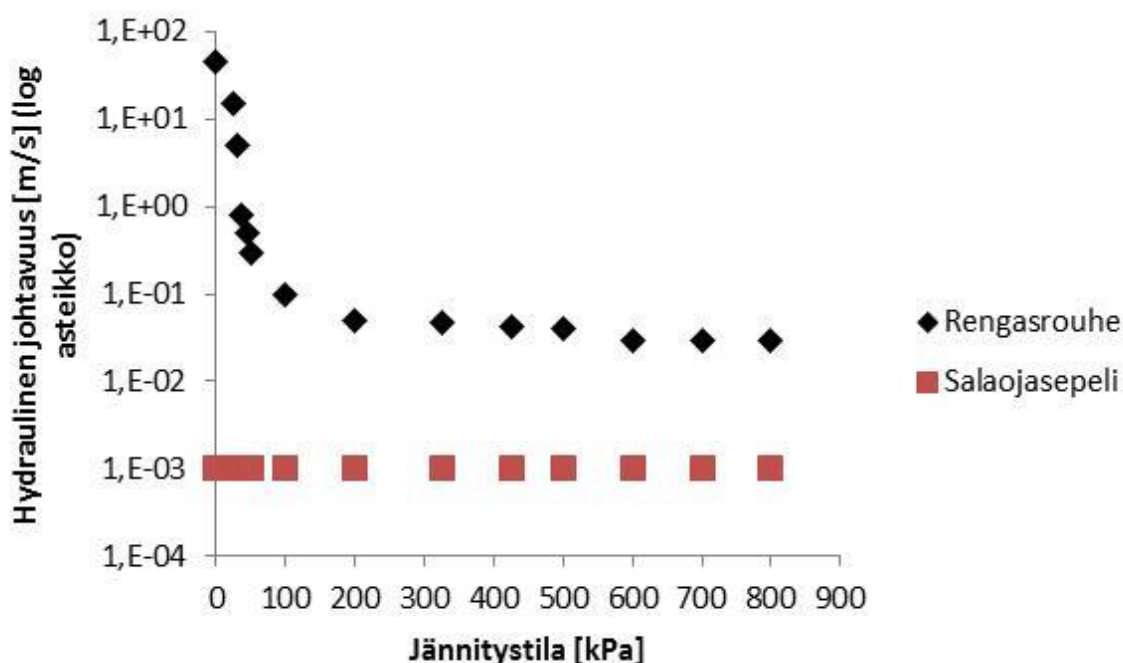
$$Q = k \times i \times a , \quad (4)$$

Missä; k on hydraulinen johtavuus, i on hydraulinen gradientti ja a on pinta-ala.

Mitchell'n (1993) mukaan luonnossa hydraulinen gradientti on harvoin suurempi kuin yksi, mutta esim. kaatopaikan pohjalla se voi olla huomattavasti suurempi riippuen jätteen koostumuksesta. Laboratoriossa tehtävissä kokeissa käytetään yleensä suurempia hydraulisia

gradientteja, jotka voivat olla 10...100 välillä, jolloin kokeita voidaan nopeuttaa ja se tuo laboratoriotestaukseen parempaa sovellettavuutta suunnitteluun tai työnohjaukseen (Sharma & Lewis 1994). Laboratoriossa hydraulinen johtavuus voidaan määrittää rengasrouheelle ASTM D 2434 standardin mukaan "Test Method for Permeability of Granular Soils Constant Head" (ASTM 2008).

Kirjallisuuden perusteella hydraulisen johtavuuden testausta on tehty erittäin paljon laboratoriossa ja kenttäkokein. Hydraulinen johtavuus vaihtelee eri tutkimuksien kesken johtuen materiaaliominaisuuksien, testausominaisuuksien ja – olosuhteiden variaatioista. Kuvassa 4 on esitetty täysin kyllästyneen tilan aiheuttama Darcy'n lain mukainen hydraulisen johtavuuden suhde rengasrouheen ja salaojasepelin jännitystilaan nähden.



Kuva 4. Yksidimensioanaalisen kuormituksen aiheuttaman jännitystilan suhde rengasrouheen ja salaojasepelin hydrauliseen johtavuuteen.

Hydraulisen johtavuuden vaikuttavat keskeisesti mm. rengasrouheen palakoko/raekoko, rakenteen tiiviysaste, hydraulinen gradientti ja kuormituksen aiheuttama jännitystila. Näistä tekijöistä johtuen kirjallisuuden perusteella hydraulinen johtavuus vaihtelee 0.6...24 m/s välillä, joka on huomattavasti suurempi verrattuna esim. maa- tai kiviaineksesta valmistettuun kuivatuskerrosrakenteeseen (Othman & Seymour 2008; Humphrey 1996; Donovan ym. 1996).

Taulukossa 4 on verrattu rengasrouheen vedenläpäisevyyttä muihin kaatopaikkarakenteissa käytettyihin materiaaleihin.

Taulukko 4. Rengasrouheen, saven, hiekan ja soran hydraulisen johtavuuden arvoja

Materiaali	Rengasrouhe*	Savi	Hiekka	Sora	VNp:n mukainen vaatimus
Hydraulinen johtavuus [m/s]	6E-1...24	1E-7...1E-10	1E-2...1E-6	1E-1...1E-3	$\geq 1E-3$

Huom. * Rengasrouheen hydraulinen johtavuus on yhtä hyvä tai parempi luonnon materiaaleihin verrattuna. (Humphrey 1993; Terzaghi & Peck 1967)

3.5.2. Kaasun johtavuus

Kaasun johtumista rengasrouhekerroksessa on tutkittu mm. Yhdysvalloissa laboratoriossa ja kenttäkokein suljettavilta kaatopaikoilta. Othmanin ja Seymourin (2008) mukaan kaasunjohtuminen rengasrouhekerroksessa on vastaava tai parempi vedenjohtumiseen verrattuna, jolloin tämän perusteella kaasunjohtumiseen voidaan soveltaa samoja johtavuusarvoja kuin hydraulisen johtavuuden määrittämisessä (Richardson ym. 2000; Thiel 1998). Lisäksi suuresta huokoisuudesta johtuen kaatopaikassa muodostuva biokaasu johtuu tehokkaammin rengasrouheessa maa-ainekseen kuten hiekkaan tai soraan verrattuna.

3.5.3. Biologinen ja fysikaalinen tukkeutuminen

Rengasrouhe on kaatopaikan pohjalla kuivatusrakenteessa ja välitäytötkerroksissa pääosin anaerobisessa tilassa, jolloin olosuhteet biologiselle kasvuympäristölle ovat varsin epäsuotuisat. Kaatopaikan pintarakenteissa olosuhteet poikkeavat pohjan tilasta lämpötilan vuorokausi ja vuoden aikavaihtelujen osalta, kyllästysasteen osalta, joka vaihtelee vuoden ajan suhteen sekä aerobinen tila vaihtelee. Toisaalta pintarakenteessa ei ole kaatopaikan suotoveden kaltaista ympäristöä biologiselle kasvualustalle, jolloin veden- ja kaasunjohtuminen ei muutu biologisesta tukkeutumisesta johtuen rakenteen elinkaaren aikana (Othman & Seymour 2008).

Fysikaalinen tukkeutuminen on mahdollista kaikissa kaatopaikassa käytetyissä rengasrouheen sovellutuskohteissa. Suotoveden vaikutuksesta hienojakoinen partikkeli kulkeutuu hyvin johtavaa kerrokseen ja saattaa aiheuttaa tukkeutumista kuivatus- ja kaasunkeräysrakenteeseen. Tukkeutumiseen vaikuttavat rengasrouheen ominaisuuksista rakeisuus, rakenteen paksuus, partikkelien muoto, ominaispinta-ala ja huokoisuus (Othman & Seymour 2008). Kaatopaikan

pintarakenteissa kasvukerroksen päälle muodostuva kasvuston juuret voivat tunkeutua rengasrouherakenteeseen, jolloin rakenne voi vaurioitua tai tukkeutua juuriston vaikutuksesta.

Rowe ja Mc Isaac (2005) ovat tutkineet ja verranneet rengasrouheen ja kiviaineksen tukkeutumisen eroja. Isojen kuormitusten vaikutuksesta aerobisessa tilassa rengasrouheen tukkeutuminen alentaa hydraulisen johtavuuden arvoa tasolle $1E-5 \dots 1E-6$ m/s. Tulos on samaa tasoa kuin tavallisella kiviaineksella kahden vuoden kestoisen testausjakson jälkeen. Tämän perusteella tukkeutumisesta johtuen rengasrouhetta ja kiviainesta verrattaessa rengasrouheen hydraulinen johtavuus säilyy samalla tasolla tai alenee hieman heikommaksi.

3.6. Lämmönjohtavuus

Rengasrouheen lämmönjohtavuus on huomattavasti, 2...3 kertaa, pienempi kuin tyypillisesti maa-ainesten lämmönjohtokykyyn verrattuna. Lämmönjohtokyky on riippuvainen mm. palakoosta/raekoosta ja tiiviysasteesta. Jäätynyt rengasrouhe johtaa paremmin lämpöä sulassa tilassa olevaan verrattuna ja mitä suurempi vesipitoisuus on sitä suurempi lämmönjohtavuus, koska veden lämmönjohtavuus on pienempi jäätynneen veden lämmönjohtavuuteen verrattuna (Humphrey ym. 1997). Taulukossa 5 on verrattu rengasrouheen ja maa-aineksien tyypillisiä lämmönjohtavuuskertoimia.

Taulukko 5. Rengasrouheen, saven, hiekan, soran ja kevytsoran lämmönjohtavuuden kertoimia

Materiaali	Rengasrouhe*	Savi	Hiekka	Sora	Kevytsora
Lämmönjohtavuus λ [W/Km]	0.14...0.24	1.25...1.7	1.25...2.5	0.5...2.5	0.15

Huom. * Rengasrouheen lämmönjohtavuus on riippuvainen mm. palakoosta/raekoosta. (Kubo 1997; Humphrey 1993; RIL Pohjarakennusohjeet 1988).

Pienen lämmönjohtavuuden ansiosta rengasrouhetta voidaan käyttää esim. kaatopaikkojen pohjarakenteiden routasuojaukseen ennen riittävän jätetäytökerroksen saavuttamista. Rengasrouhetta voidaan käyttää myös muihin suojausrakenteisiin.

3.7. Rengasrouheen vaikutukset ympäristöön

Rengasrouheen vaikutuksia ympäristöön, erityisesti pohjavesiin, on tutkittu laajasti eri puolilla maailmaa. Humphrey ja Swett (2006) ovat tehneet laajan kirjallisuustarkastelun rengasrouheen

ympäristövaikutuksista pohjavesiin. Rengasrouheesta on tehty myös kenttäkokeita, jossa rouhetta on asennettu pohjavesitason ylä- ja alapuolelle, jonka jälkeen on tarkkailtu eri metallien pitoisuuksien muutoksia pohjavedessä. Suomessa on tutkittu rengasrouheen vaikutusta pohjavesiin 1997...1999 koekohteesta moottoritie Vt7:ltä.

Molempien tutkimusten tulokset ovat samansuuntaisia, jossa mangaanin, raudan, sinkin ja kuparin pitoisuudet kohosivat seurantajakson aikana, joka johtuu metallien liukenemisesta renkaiden teräslangoista. Pitoisuuksien kasvu ei ollut merkittävää esim. taustapitoisuuksiin verrattuna ja pitoisuudet eivät ylittäneet ihmisen terveydelle haitallista tasoa missään vaiheessa. Humphreyn ja Swettin (2006) mukaan pitoisuuksien kasvu alenee ajan funktiona, koska teräslangoissa on vain rajallinen määrä metalleja ja tästä syystä pitkällä aikavälillä niiden merkitys on erittäin vähäinen tai merkityksetön ympäristön kannalta eikä rengasrouhetta käytettävissä kohteissa suositella otettavaksi käyttöön erillistä seurantaohjelmaa tämän vuoksi. Kaatopaikka rakenteissa pitoisuuksien kasvu suotoveteen nähden ei ole merkityksellinen (Humphrey & Katz 2001).

3.7.1. Liukenevuus, pysyvyys ja pidättävyys

Tutkimustulokset osoittavat, että rengasrouheesta liukenee osa renkaan teräslangoista. Lähinnä lyijy (Pb) ja Rauta (Fe) pitoisuudet ylittävät hyvälle talousvedelle määritetyt vaatimukset (Talousveden laatuvaatimus VNa 461/2000; Pohjavesidirektiivi 2006/118/EY). Rengasrouheen käyttäminen kaatopaikka rakenteissa ei aiheuta liukenevuuden osalta mitään lisä- tai poikkeaa toimenpidettä kaatopaikkojen vesien käsittelyyn tai vesien tarkkailuun. Suomessa tehtyjen tutkimusten perusteella rengasrouhe on turvallinen materiaali käytettäväksi kaatopaikkojen kuivatus-, kaasunkeräys-, salaojitus- ja välitäyttörakenteissa (Ettala 1998).

Kirjallisuuden perusteella tiedetään, että rengasrouhe pystyy sitomaan, absorboimaan, aktiivihiihluodattimen tavoin kaasu- ja nestemuodossa olevia haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (Park ym. 2003). Rengasrouhetta on käytetty maailmalla kaatopaikkojen pohjarakenteen yläpuolella hidastamaan haitallisten yhdisteiden kulkeutumista geologiseen esteeseen ja sen läpi. Parkin (2003) mukaan rengasrouheen palakoosta/rakeisuudesta riippuen sen absorptiokapasiteetti on 2.5...10 % aktiivihiihen absorptiokapasiteetista.

3.7.2. Veden adsorptio

Rengasrouheen veden adsorptiokyky perustuu rakenteen ominaispinta-alaan. Humphreyn (1997) mukaan rengasrouheen veden adsorptiokyky on 2...4 % kuivatilavuuspainosta. Alhainen veden adsorptiokyky vaikuttaa siihen, ettei rengasrouheen pintaan pidättäydy nestettä ja tästä syystä hydraulinen johtavuus on suuri.

3.7.3. Syttymisherkkyyys

Rengasrouheen varastointiin liittyy ongelma sisäisen lämmön muodostumisesta, joka johtuu teräslankojen hapettumisesta johtuen korroosion ja/tai eksotermisten reaktioiden vaikutuksesta, jolloin muodostuu lämpöä (Humphrey ym. 1996). Rengasrouheen leimahduspiste on 322 °C ja se tarvitsee ulkopuolisen ärsykkeen syttyäkseen palamaan (Othman & Seymour 2008). Suurissa rengasvarastokasoissa voi erityisten olosuhteiden vallitessa muodostua poikkeuksellisen suuri lämpötila varastoidun kasaan sisälle, jolloin jonkin ulkoisen tekijän vaikutuksesta rengasrouhe voi leimahtaa tuleen.

Kaatopaikan sisällä ei ole missään mittauksissa tai tutkimuksissa tavattu yli 100 °C asteen lämpötilaa ja lisäksi jätetäytön sisällä on pitkälti anaerobinen tila, jolloin palamiseen tarvittavaa happea ei tyypillisesti ole riittävästi käytettävissä palamisreaktioon. Kaatopaikan pinnassa, jossa on aerobisempi tila, lämpötila ei pääse nousemaan lähellekään jätetäytön sisäistä lämpötilaa, jolloin palaminen ei ole mahdollista. Tämän perusteella kaatopaikalla käytettävien kerrospaksuuksien osalta ei ole mitään vaaraa, että rengasrouhe pääsisi leimahtamaan tuleen (Othman & Seymour 2008).

3.8. Rengasrouheen yhteensopivuus muihin kaatopaikkarakenteisiin

Rengasrouhe sisältää teräslankoja, jotka tulee huomioida silloin, kun rengasrouhe on kosketuksissa muihin kaatopaikkarakenteisiin nähden. Kaatopaikan pohjarakenteessa on tyypillisesti keinotekoinen eriste, geomembraani kuten HDPE-kalvo tai tiivisasfaltti, joka täytyy säilyä vaurioitumattomana. Mikäli keinotekoinen eriste koostuu tiivisasfaltista, ei rengasrouhe pysty vaurioittamaan sen pintaa niin, että sillä olisi merkitystä materiaalin elinkaareen.

Geomembraanit ovat käytännössä katsoen läpäisemättömiä ja niissä esiintyvät vuodot johtuvat pääasiassa materiaalin pinnan reikiintymisestä joko asennus- tai käyttövaiheessa tai sen saumojen vuotamisesta. Tästä syystä lopullisen rakenteen vuotamiseen voidaan ratkaisevasti vaikuttaa geomembraanin asennuksessa huolellisuudella, hyvällä suunnittelulla ja työnaikaisella valvonnalla sekä noudattamalla tarkasti valmistajan ohjeita. Ohuet kalvorakenteet ovat herkkiä reikiintymään kuljetuksen, rakentamisen ja käytön aikana. Koska geomembraanit eivät kestä juurikaan mekaanista kuormitusta, on ehjänä pysymisen varmistamiseksi näissä vaiheissa siihen kohdistuvat rasitukset pyrittävä minimoimaan (Haxo Jr & Kamp 1990). HDPE-kalvo vaurioituu helposti pistemäisen kuormituksen vaikutuksesta ja materiaalivalmistajat suosittelevat, että kalvo suojataan aina suojahuovalla tai 25...35 cm vahvuisella suojakerroksella, joka voi olla esim. seulottua hiekkaa.

Kaatopaikan pintarakenteissa käytetään bentoniittimattoa. Bentoniittimatto koostuu yleensä kahdesta geotekstiilistä, joiden välissä on ohut, yleensä noin 3...8 mm paksuinen kerros bentoniittia. Usein toisella puolella on kudottu ja toisella neulasidottu geotekstiili, mutta on myös olemassa ratkaisuja, joissa bentoniittimattoon liitetään tehtaalla lujitekangas, joka parantaa maton

muodonmuutoskestävyyttä. Geotekstiilien yhteen liittämisessä käytetään tyypillisesti neulasidontaa, joka estää bentoniitin karkaamisen geotekstiilien välistä ja parantaa maton leikkauslujuutta. Geotekstiilit kestävät rajallisesti yksi- ja moniaksiaalista vetokuormitusta sekä pistemäistä mekaanista kuormitusta, jonka jälkeen geotekstiili repeää tai vaurioituu. Bentoniittimatto on vaurioherkkää käytettäessä rengasrouhetta suoraan bentoniittimaton kanssa kosketuksissa johtuen teräslankojen mekaanisesta kuormituksesta (Tammirinne ym. 2004).

3.9. Rakennettavuus

Rengasrouhetta voidaan käsitellä, kuljettaa ja tiivistää normaalilla maarakentamisessa käytettävällä kalustolla. Kumipyöräistä kalustoa käytettäessä on huomioitavaa, että teräslangat voivat vaurioittaa pyöriä, jolloin tela-alusteinen kalusto on soveltuvampaa käytettäväksi rakenteiden toteutuksessa. Tiivistystyö voidaan suorittaa riittävän painavalla mekaanisella jyräkalustolla, joka tiivistää vain alkutiivistyksen ja lopullinen kokoonpuristuma tapahtuu vasta yläpuolisen materiaalin aiheuttaman jännitystilän vaikutuksesta (kuva 5).



Kuva 5. Rengasrouhekerroksen rakentamista kaatopaikkatyömaalla.

Rengasrouheen rakennekerroksien pysyvyyttä voidaan lisätä asentamalla rakennekerroksen ylä- ja alapuolelle suodatinkangas estämään eri materiaalien sekoittumisen. Rengasrouhe pystytään asentamaan kaikkien kiviainespohjaisten materiaalien kanssa ilman suodatinkangasta tai suojahuopaa, mutta rakenteen elinkaaren aikana materiaalien pinnat tulevat sekoittumaan. Tämä nopeuttaa rakentamista ja laskee materiaali kustannuksia (kuva 6).



Kuva 6. Esimerkki kaatopaikan pintarakenteen toteutuksesta, jossa rengasrouheen pinnalle on asennettu suodatinkangas.

3.10. Varastointi

Rengasrouhe varastoidaan aumatyyppisiin varastokasoihin, jolloin varastokasan sisään ei pääse muodostumaan suuria lämpötiloja, joka voisi aiheuttaa syttymistilanteen teräslankojen hapettuessa varastokasan sisällä. Kuvassa 7 on rengasrouheen varastokasoja, jotka rakentuvat leikkurin kuljettimen korkuisiksi kasoiksi.



Kuva 7. Esimerkki rengasrouheen varastokasasta.

4. Rengasrouheen soveltuvuus ja käyttökohteita kaatopaikoilla

Rengasrouhe ja rengasgranulaatti, josta käytetään myös rengasrae nimitystä, on murskattu/leikattu vanhoista käytöstä poistetuista autonrenkaista. Rengasrouhe ja –granulaatti eroavat toisistaan materiaalien raekoon ja sisällönsuhteen. Rengasrouhe sisältää renkaan tukena olevat teräslangat ja runkovahvisteet, jotka on poistettu rengasgranulaatista. Lisäksi granulaatti on raekooltaan huomattavasti pienempää rengasrouheeseen verrattuna. Tyypillisiä rengasgranulaatin raekokoja ovat 2,5, 5, 8 ja 25 mm raekoot. Rengasrouheen palakoko on tyypillisesti 50...300 mm välillä, joka ilmoitetaan nimellispalakokona. Palakoko on keskimäärin ilmoitetun palakoon mukainen. Yksittäisen rouhepalan koko voi olla ilmoitettua palakokoa suurempi tai pienempi.

4.1. Tekninen soveltuvuus

Rengasrouhe soveltuu teknisiltä ominaisuuksiltaan moneen käyttökohteeseen korvaamaan normaalin maarakennustyössä käytettävän luonnonmateriaalin. Maa-ainesmateriaaleihin verrattuna rengasrouhe on huomattavasti kevyempi materiaali ($\gamma = 2.3...8.4 \text{ kN/m}^3$) tiiviysasteesta riippuen. Suuren huokostilavuuden ansiosta rengasrouhe pystyy suuriin muodonmuutoksiin ja pystyy palautumaan kuormituksen jälkeen lähes samaan huokostilavuuteen.

Rengasrouheen hydraulinen ja kaasunjohtavuus on kaikissa kuormitustilanteissa normaalia maa-ainesmateriaalia suurempi. Lisäksi rengasrouheen lämmönjohtokyky on maa-ainesmateriaaliin verrattuna huomattavasti pienempi, jolloin se soveltuu käytettäväksi esim. routasuojausmateriaalina. Materiaali pystyy myös adsorpoimaan rajallisesti orgaanisia aineita. Rengasrouhe kokoonpuristuu kuormituksen vaikutuksesta, joka tulee huomioida rakenteiden suunnittelussa. Toinen tekijä, joka tulee huomioida rengasrouheen läjittämisessä, on materiaalin palamis- ja syttymisherkkyys. Tämä ei tule kuitenkaan kysymykseen kaatopaikkarakenteissa käytettävien kerrospaksuuksien osalta ja jätetäytön sisäinen lämpötila ei riitä haittamaan syttymisvaaraa rengasrouheeseen. Parkin (2003) mukaan jätetäytössä vallitsee anaerobiset olosuhteet, jolloin hiilimonoksidin pitoisuus on suuri ja happipitoisuus on niin alhainen, ettei se riitä rengasrouheen syttymiseen. Lisäksi lämpötila oli neljän vuoden seurantajakson aikana $28^\circ \text{C}...61^\circ \text{C}$ välillä, joka on liian alhainen rengasrouheen leimahtamiseen, jonka leimahduspiste on 322°C .

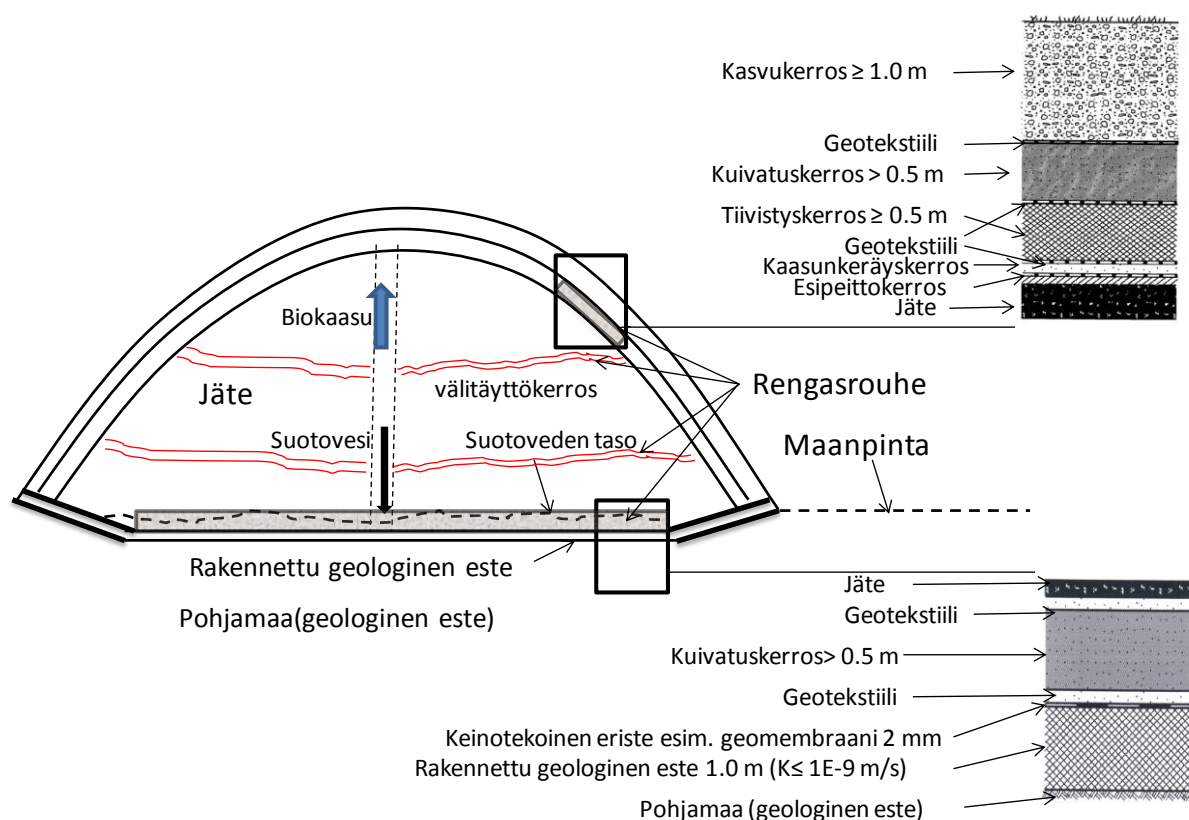
4.2. Ympäristökelpoisuus

Kaatopaikan käyttökohteissa rengasrouhe materiaali on kaikissa tämän ohjeen sovellutuskohteissa kaatopaikkavesien käsittelyprosessissa mukana, jolloin kaatopaikan eristerakenteet estävät haitallisten aineiden pääsyn ympäristöön. Rengasrouhetta ei rinnasteta saastuneisiin massoihin, mutta ohjeellisena raja-arvona voidaan käyttää Valtioneuvoston asetusta VNa 214/2007 *”Maaperän haitallisten aineiden pitoisuuksien kynnys- ja ohjearvon”*. Kirjallisuuden

perusteella tutkittujen aineiden liuenneet määrät ovat olleet hyvin vähäisiä, pitoisuudet ovat alentuneet ajan funktiona ja eivät ole ylittäneet talousveden laatuvaatimusten sallittuja pitoisuuksia (Park ym. 2003; Ettala 1998; Park ym. 1996). Rengasrouheesta on tehty kaatopaikkakelpoisuus määrittäminen, jonka tulokset osoittavat materiaalin soveltuvan käytettäväksi kaatopaikalle (liite 1). Näiden tekijöiden perusteella rengasrouhemateriaalia voidaan käyttää turvallisesti kaatopaikalla ja maarakentamisessa eri sovellutuskohteissa.

4.3.Käyttökohteita kaatopaikoilla

Rengasrouhemateriaalia voidaan hyödyntää ja soveltaa kaatopaikoilla monessa eri kohteessa (Kuva 8). Suomessa tyypillisimmin rengasrouhetta on käytetty kaatopaikkojen sulkemisessa kuivatuskerroksessa pintarakenteen yläosassa. Kirjallisuuden perusteella muualla maailmalla esim. Yhdysvalloissa rengasrouhetta hyödynnetään kaatopaikalla kaasunkeräyskerroksena, kaikissa kuivatusrakenteissa pohjarakenteen yläpuolella ja pintarakenteessa, välitäyttökerroksena, jolloin se toimii sekä kaasunkeräys että kuivatuskerroksena ja suodatin sekä suojauskerroksena.



Kuva 8. Konseptuaalinen tarkastelu kaatopaikan pinta- ja pohjarakenteiden rakennekerroksista. Kuvassa käytetyt rakennekerrosten dimensioidut perustuvat Valtioneuvoston päätökseen kaatopaikoista 861/1997.

4.3.1. Kaasunkeräyskerrokset

Yhdyskuntajätteen kaatopaikalle täytyy Valtioneuvoston päätöksen 861/1997 mukaisesti rakentaa biokaasun keräämiseksi rakennekerrokset, jonka kautta biokaasu voidaan johtaa hyödyntämiseen tai polttoon. Rengasrouheella on erittäin suuri hydraulinen ja kaasunjohtavuus ($k > 1E-2$ m/s) riippuen materiaalin palakoosta/raekoosta, kuormituksesta, kyllästys- ja tiivistysasteesta.

Kaasunkeräys tehostuu, mikäli jätetäytön pohjasta pintaan ulottuu kaasukaivo, joka on tehty rengasrouheesta ja välitäytötkerroksista johdetaan kaatopaikan aktiivivaiheen aikana biokaasua keräysjärjestelmään. Aktiivivaiheen kaasunkeräys lyhentää passiivivaiheen kaasun muodostumista jätetäytön sisällä, koska kaasua muodostava jäte hajoaa tehokkaasti jo jätteen läjityksen aikana ja se voidaan kerätä hallitusti kaasunkeräysjärjestelmään. Samalla hallitun kaasunkeräyksen ansiosta hajuhaittoja kaatopaikan ympäristöön voidaan vähentää.

Imukaivot/pystykaivot tehdään poraamalla jätteeseen reikä, johon sujutetaan 300...1000 mm halkaisijaltaan oleva asennusputki, joka täytetään rengasrouheella ja vedetään pois jätetäytöstä. Jätetäyttöön muodostuu kuvan 8 mukainen pystysuuntainen imukaivo, johon liittyvät vaakasuuntaiset kaasua keräävät välitäytötkerrokset. Yläpäähän asennetaan kaasutiivis liitos siirtoputkeen. Keskeinen tekijä kaivojen toiminnalle on kaasutiiviin rakenteen asentaminen kaivon yläosan ympärillä. Tiivistyksessä voidaan käyttää muovia kalvoa, joka levitetään kaivon yläosan ympärille tai kaivon ympärille asennetaan savi ja tuhkerakennus estämään kaasua johtumasta kaivon ohi ilmaan. Mikäli jätetäyttö painuu eri tahtiin kuin kaivo, niin muodonmuutokset eivät pääse vaurioittamaan kaivorakennetta sen hyvän muodonmuutoskyvyn takia.

Vaakasalojilla, jotka toimivat myös välitäytötkerroksina, saadaan enemmän imupinta-alaa kuin pystysalojilla eikä vaakasalojien rakentamiseen tarvita kallista erikoiskalustoa kuten pystykaivojen rakentamiseen (kuva 8). Salaojat voidaan rakentaa esim. kuljettamalla dumppereilla rengasrouhe jätetäytön päälle ja levittää rengasrouhekerros puskukoneella. Vaakasalojat pitää kuitenkin asentaa kaatopaikan sisäisen vedenpinnan yläpuolelle, muuten ne eivät johda kaasua vaikka rengasrouhe on vettä kevyempää ja siten eikä vaikuta salaojarakenteen toimivuuteen vedenpinnan alapuolella.

4.3.2. Kuivatuserrokset

Rengasrouheen hydraulinen johtavuus on vähintään samaa tasoa vaikka siihen kohdistuu 60 metrin vahvuisen jätetäytön kuormitus (oletuksena $\gamma \leq 10$ kN/m³). Kirjallisuuden perusteella kuivatusrakenteen kerrospaksuudet ovat olleet rakenteissa mitoituslaskelmiin perustuen ohuempia verrattuna esim. Valtioneuvoston päätökseen kaatopaikoista 861/1997.

Yhdysvalloissa seurattiin neljän vuoden ajan rengasrouherakenteen toimivuutta kuivatusrakenteena pohjarakenteen yläpuolella. Seurantajakson aikana kuivatuskerroksen hydraulinen johtavuus säilyi tasolla $k=1E-2$ m/s (Edil ym. 2004; Park ym. 2003). Tämän perusteella huomattavasti ohuemmalla kuivatuskerroksella päästäisiin vastaavaan lopputulokseen kuin Valtioneuvoston päätöksessä kaatopaikoista 861/1997on vaatimuksena (Ettala 1998).

Kuivatuskerroksen suunnittelussa tulee huomioida kaatopaikan pohjarakenteen keinotekoisien eristemateriaalin suojausvaatimukset, koska rengasrouhe sisältää teräslankoja ja runkovahvisteita, jotka voivat vaurioittaa esim. HDPE-kalvoa. Geomembraanin pinnalle voidaan asentaa suojahuopa suojaamaan geomembraania materiaalin valmistajan antamien ohjeiden mukaisesti tai käyttää rengasgranulaattia suojakerroksena ennen rengasrouhetta, jolloin geomembraanin pintaan ei kohdistu teräslankojen vaikutusta.

Suotoveden kerääminen tehostuu, mikäli jätetäytössä käytetään välitäyttökerroksena rengasrouhetta, koska maa-ainekseen verrattuna jätetäytön sisään ei muodostu vettä pidättäviä kerroksia vaan suotovesi pääsee kulkeutumaan välitäyttökerroksessa kuivatusjärjestelmään. Tehokas suotoveden kerääminen kaatopaikan aktiivivaiheen aikana nopeuttaa jätetäytön painumista ja lyhentää passiivivaiheen jälkihoidon tarvetta.

Rengasrouhetta voidaan käyttää kuivatusrakenteena kaatopaikan pintarakenteen kuivatuskerroksena ja pohjarakenteen kuivatuskerroksena (kuva 9). Lisäksi rengasrouhetta voidaan käyttää myös suotoveden kuivatusojissa. Kirjallisuuden perusteella kuivatuskerroksen hydrauliseen johtavuuteen vaikuttavat biofilmin muodostuminen tai tukkeutuminen ei ole kenttäkokeissa osoittanut poikkeavan normaalin maa-ainekseen verrattuna (Sengupta & Miller 2004; Sengupta & Miller 2000).



Kuva 9. Kuivatuskerros toteutettuna Rengasrouheella suljettavalla kaatopaikalla osana pintarakennetta.

4.3.3. Välitäyttökerrokset

Välitäyttökerroksella tarkoitetaan jätetäytön sisälle rakennettavaa rengasrouhekerrosta, jonka tarkoituksena on toimia kaasunkeräys- ja kuivatusjärjestelmänä (kuva 3). Lisäksi rengasrouhe stabiloi kaatopaikan jätetäytön painumien vaihtelua, joka johtuu jätteen epähomogeenisuudesta, koska rengasrouhe pystyy ottamaan huomattavan suuren kokoonpuristuman vastaan ja palautumaan samaan huokostilaan ennen kuormituksen vaikutusta.

Välitäyttökerros tehostaa kaatopaikan aktiivivaiheessa suotoveden kulkeutumista kuivatusrakenteeseen, kaasun keräämistä kaasunkeräysjärjestelmään ja biokaasun muodostumista jätetäytön sisällä, koska vettä, suotovettä ja kaasua pidättäviä maa-aineskerroksia ei ole jätetäytön sisällä. Tiivistetyn maa-aineksen esim. moreenin hydraulinen johtavuus ($1E-5 < k < 1E-8$ m/s) on huomattavasti alhaisempi tiivistetyn rengasrouhekerroksen hydrauliseen johtavuuteen verrattuna ($k > 1E-2$ m/s). Rengasrouheen tilavuuspaino ($\gamma = 2.3...8.4$ kN/m³) on pienempi jätteen tilavuuspainoon

($\gamma \leq 10 \text{ kN/m}^3$) verrattuna, jolloin rengasrouheesta ei kohdistu maa-aineksen ($\gamma \leq 20 \text{ kN/m}^3$) tavoin ylimääräistä kuormitusta jätetäytön sisään.

Jättemäärät ovat kierrätyksen ja jätteenpolttamisen vaikutuksesta laskemassa tulevaisuudessa, jolloin olemassa olevia jätekasoja voidaan jatkossa tarvita jätteenpolttolaitoksien raaka-aineeksi. Rengasrouhe käytettynä jätetäytön välikerroksena ei aseta jätetäytön hyödyntämiseksi esim. jätteenpolttolaitoksessa samanlaisia käytettävyyden rajoitteita ja puhdistustarpeita kuin maa-ainekset, joita ei voida polttaa jätteenpolttolaitoksessa.

4.3.4. Suojauskerrokset

Rengasrouhetta voidaan käyttää jätetäytössä väliaikaisena tai pysyvänä suojauskerroksena. Suojausrakenteissa täytyy huomioida suojattavan kerroksen vaatimukset, koska rengasrouhe on erittäin huokoinen materiaali, se ei pysty estämään ulkopuolisen veden suodautumista suojattavaan kerrokseen. Suojausvaikutuksen tehostamiseksi voidaan rengasrouheeseen sekoittaa maa-ainesta esim. suhteessa 50 %/50 %, jolloin suojausvaikutus tehostuu (Humphrey 2006).

5. Rengasrouheen mitoitusperusteet

5.1. Yleistä

Kaatopaikan rakenteiden vaatimukset on määritetty Valtioneuvoston päätöksessä kaatopaikoista 861/1997. Päätöksessä ei ole määritetty eri materiaalien ominaisuuksia huomioivia vaatimuksia vaan kaikille materiaaleille on samat vaatimukset, joista kaatopaikan lupaviranomainen voi päätöksellään lieventää seuraavia kohtia:

”Lupaviranomainen voi päätöksellään lieventää kohdassa 2–4 tarkoitettuja vaatimuksia

– kaatopaikkavesien keräämisestä yhteen ja käsittelystä,

– kaatopaikan pohja- ja pintarakenteista tai

– kaatopaikkakaasun keräämisestä yhteen ja hyödyntämisestä tai käsittelystä,”

”jos kaatopaikan pitäjä kaatopaikan terveys- ja ympäristövaikutusten kokonaisarvioinnin perusteella luotettavasti osoittaa, ettei kaatopaikasta ja jätteen sijoittamisesta sille voi aiheutua pitkänkään ajan kuluessa jätelaissa tai ympäristönsuojelulaissa taikka niiden nojalla annetuissa säännöksissä tarkoitettua vaaraa tai haittaa terveydelle tai ympäristölle eikä ympäristönsuojelulain 7 §:ssä tarkoitetun maaperän pilaamiskiellon tai 8 §:ssä tarkoitetun pohjaveden pilaamiskiellon rikkomista. Kaatopaikalla käytettävän tekniikan sekä terveys- ja ympäristöhaitan torjuntamenetelmän on tällöinkin oltava jätelain 6 §:n 5 kohdassa säädetyn mukaisia.” (VNp 861/1997).

5.2. Kuivatusrakenteen mitoittaminen

Rengasrouheen hydrauliseen johtavuuteen kuivatusrakenteissa vaikuttavat yläpuolisten kerrosten kuormitus, rakenteen tukkeutuminen ja rouhepalan koko. Kirjallisuuden perusteella hydraulisen johtavuuden tiedetään olosuhteista ja ulkopuolisista tekijöistä riippumatta olevan $1E-2 < k < 24$ m/s välillä, joka on suurempi kuin VNp:n mukainen vaatimus kuivatusrakenteelle $k \geq 1E-3$ m/s (Edil ym. 2004; Park ym. 2003; Humphrey 1997; Donovan ym. 1996). Tämän perusteella voidaan tarkastella ekvivalenttisesti kuivatusrakenteen hydraulista välityskykyä, koska samassa rakenteessa virtaama ja rakenteen kaltevuudet ovat samat. Hydraulinen välityskyky laskentaan kaavasta 5:

$$\Theta = k \cdot h \quad (5)$$

Missä Θ on hydraulinen välityskyky [m^2/s], k on hydraulinen johtavuus [m/s] ja h kuivatusrakenteen kerrospaksuus kuormitusvaikutuksen jälkeen. Taulukossa 6 on ekvivalenttiset kerrospaksuudet rengasrouheelle eri kuormitusvaikutukset huomioiden, jotka kuvaavat kaatopaikan pinta- ja pohjarakenteen. Ekvivalenttisisä laskennassa on vertailurakennekerrokseksi huomioitu VNp:n mukaisen 0.5 metrin kuivatusrakenne, jonka hydrauliseksi johtavuudeksi on määritetty VNp:n mukainen vaatimus ($k \geq 1\text{E-3 m/s}$).

Taulukko 6. Rengasrouheen ja VNp:n mukaisen kuivatusrakenteen ekvivalenttinen vertailu jätetäytön korkeuden vaikutus huomioiden hydrauliseen johtavuuteen ja kerrospaksuuden kokoonpuristuvuuteen

Jätetäytön korkeus [m]	2.5	10	20	40	VNp:n mukainen vaatimus*
Kuivatusrakenteen kerrospaksuus [m]	< 0.05	0.08	0.10	0.15	0.5
Hydraulinen johtavuus kuormituksen vaikutuksesta [m/s]	20	0.6	8E-1	1E-2	1E-3
Kokoonpuristuvuus kuormituksen vaikutuksesta [%]	38	48	49	49	0

Huom. * VNp:n mukaisessa rakenteessa on käytetty salaojasepeliä, jonka hydraulinen johtavuus on $k \geq 1\text{E-3 m/s}$.

Ekvivalenttisisä mitoituksessa ei ole huomioitu kuivatusrakenteen tukkeutumista, nesteen viskositeetin vaikutusta virtaamaan ja nesteen tiheyttä sekä rakennettavuuteen liittyvää kerrospaksuuden toleranssia. Nämä tekijät alentavat kuivatusrakenteen nesteen johtavuutta, jonka perusteella kuivatusrakenteen lopullisen kerrospaksuuden kuormitusvaikutuksen aiheuttaman kokoonpuristuman jälkeen tulisi kaikissa mitoituslanteissa olla vähintään 0.20 m paksuinen.

Kuivatusrakenteen mitoittaminen täytyy aina toteuttaa tapauskohtaisesti, koska mitoittukseen vaikuttavat mm. jätetäytön luiskan pituus ja kaltevuus, suotoveden tai sadeveden aiheuttama hydraulinen gradientti, kyllästysaste, oletus virtaama, rakenteen muodonmuutokset ja viruma sekä kemiallisten ja biologisten tekijöiden vaikutus. Kuivatusrakenteen mitoittamisesta jätetäytön pintarakenteeksi on esimerkki laskelma unit gradient methodilla kohdassa 5.2.1. Mitoittamiseen voidaan käyttää myös muita soveltuvia menetelmiä.

5.2.1. Esimerkki rengasrouherakenteen mitoittamisesta kuivatusrakenteeksi

Rengasrouherakenteen mitoitus on tehty unit gradient methodilla, jossa oletus gradientti voi olla 0.14 täysin kyllästyneessä tilanteessa, rakennekuormitus 20 kN/m^2 ja luiskankorkeus on 95 m sekä kaltevuuskulma 14° . Mitoitustilanne kuvaa tyypillistä kaatopaikan pintarakennetta.

Todellinen kuormitus on määritetty laskennallisesti, jossa materiaalina käytetään alueen ylijäämämaita ja vertailuarvona hiekan irtotiheyttä 1.4 tn/m^3 . Käytettävästä maakerroksesta aiheutuu maksimivaakakuormitus 13.7 kN/m^2 , josta luiskassa 14° kaltevuuskulmalla kohdistuu 13.3 kN/m^2 horisontaalinen kuormitus. Laskennallinen maksimivirtaama muodostuisi $7.64 \text{E-5 l/m}^2\text{s}$ ja rengasrouheen maksimivirtaama on määritetty oletus gradientin $i=0.3$ ja $i=0.1$ mukaan huomioiden pitkäaikavälin kuivatuskapasiteetti, jolloin laskentagradientti on $i=0.25$. Taulukkoon 7 on kirjattu salaojamaton mitoitus- ja todellisen tilanteen mukaiset laskenta-arvot sekä varmuuskertoimet.

Taulukko 7. Rengasrouherakenteen kuivatuskerroksen mitoituslaskelma mitoitus- ja todellisen tilanteen laskenta-arvot ja varmuuskertoimet

Ominaisuus, [yksikkö]	Mitoituslaskelma Q_A	Todellinen tilanne Q_E	Varmuuskerroin
Virtaama [$\text{l/m}^2\text{s}$]	2.38 E-1	1.28E-2	18.6
Tehokas jännitys [kPa]	20	13.3	1.5
Gradientti [-]	0.25	0.14	1.8
Mitoituksen kokonaisvarmuuskerroin	2.05	2	2.05
Mitoitetun rakenteen kerrospaksuus [m]	0.20	< 0.10	> 2

Kuivatuskapasiteetti on mitoitettu seuraavien kaavojen 6...9 mukaan:

$$Q_A > Q_E, \quad (6)$$

jossa, Q_A on tarvittava kuivatuskapasiteetti ja Q_E on kuivatusrakenteeseen virtaava vesimäärä

$$Q_A = Q_{\text{pitkäaikainen}} = Q_{i,d,\text{laboratorio}} / \eta_{\text{total}}, \quad (7)$$

Ohje rengasrouheen käyttämisestä
ja mitoittamisesta kaatopaikkarakenteissa

jossa, $Q_{i,d,laboratorio}$ riippuu hydraulisesta gradientista, kuivatusrakenteen paksuudesta ja kuormituksen mukaisesta jännitystilasta [kPa], n_{total} on kuivatusrakenteen tekijöistä muodostuva varmuuskerroin. Kuivatusrakenteen pitkäaikaispaksuus suhteessa virtaamaan on määritetty kaavojen 6...9 mukaisesti.

$$n_{total} = FS_{IN} * FS_{CR} * FS_{CC} * FS_{CB}, \quad (8)$$

jossa, FS_{IN} on rakenteen muodonmuutoksesta johtuva kerroin [$FS_{IN} = 1.0...1.5$]

FS_{CR} on rakenteen virumisesta johtuva kerroin [$FS_{CR} = 1.2...1.4$]

FS_{CC} on kemiallisten tekijöiden vaikutus virtaamaan [$FS_{CC} = 1.0...1.2$]

FS_{CB} on biologisten tekijöiden vaikutus virtaamaan [$FS_{CB} = 1.2...1.5$]

Mitoituksessa käytetyt kertoimet ovat kirjallisuuteen perustuvia varmuuskertoimia.

$$n_{total} = FS_{IN} * FS_{CR} * FS_{CC} * FS_{CB} = 1.5 * 1.0 * 1.05 * 1.3 = 2.05$$

$$Q_E = q_E * l * FS_{SY}, \quad (9)$$

jossa, q_E on maksimivirtaama [l/m^2s], l on luiskan pituus [m] ja laskelmassa on käytetty oletusta $q_E = 25mm/d$ (Tammirinne ym. 2004).

FS_{SY} on varmuuskerroin virtaamalle [$FS_{SY} = 1.0...2.0$], käytetty arvo 2.0

$$Q_E = 6.72E-5 \text{ l/m}^2s * 95 \text{ m} * 2.0 = 1.28E-2 \text{ l/m}^2s$$

$$Q_A = 2.38E-1 \text{ l/m}^2s > Q_E = 1.28E-2 \text{ l/m}^2s$$

Mitoituksen perusteella valittu rengasrouherakenteen kuivatuskapasiteetti on 18.6 kertaa suurempi kuin maksimikuivatus tarve mitoitusparametrien mukaan. Maksimikuivatuskapasiteetti perustuu keskimääräisenä sademääränä Ilmatieteenlaitoksen mukaan käytettyyn laskenta-arvoon 600 mm/vuosi, joka voi ylittyä yksittäisten vuosien osalta eri puolilla Suomea.

5.3. Kaasunkeräysrakenteen mitoittaminen

Yhdyskuntajätteen kaatopaikat muodostavat biokaasua, joka muodostuu fysikaalisten, kemiallisten ja mikrobiologisten prosessien muuntaessa ja hajottaessa jätteitä kaatopaikoilla (Ehrig 1991). Jätetäytössä tapahtuviin prosesseihin vaikuttavat muun muassa jätteen koostumus, kaatopaikan rakenteet ja hoitotoimenpiteet sekä mm. lämpötila, pH, kosteus ja happipitoisuus (Christensen ja Kjeldsen 1989).

Rengasrouheen kaasun johtavuuteen vaikuttavat yläpuolisten kerrosten kuormitus, rakenteen tukkeutuminen muiden rakennekerrosten vaikutuksesta ja rouhepalan koko. Kirjallisuuden perusteella hydraulisen johtavuuden tiedetään olosuhteista ja ulkopuolisista tekijöistä riippumatta olevan $1E-2 < k < 24$ m/s välillä, joka vastaa myös rengasrouheen kaasunjohtokykyä. (Edil ym. 2004; Park ym. 2003; Humphrey 1997; Donovan ym. 1996). Pintarakenteessa kaasunkeräyskerroksen kuormitusvaikutuksen aiheuttaman kokoonpuristuman jälkeen tulisi kaikissa mitoitustilanteissa olla vähintään 0.20 m paksuinen (taulukko 6).

Kaasunkeräysrakenteelle ei ole asetettu kerrospaksuus tai kaasunjohtavuusvaatimusta. Kaasunkeräyskerroksen suositeltava minimipaksuus on 0,3 m maa-aineksesta tehtynä. Vaakasalaojat voidaan mitoittaa kohdan 5.4 mukaisesti, jolloin rakenteen mitoituksessa huomioidaan tulevan jätetäytön aiheuttama kuormitusvaikutus vaakasalaojan lopulliseen rakennepaksuuteen.

5.4. Välitäyttörakenteen mitoittaminen

Välitäyttörakenteille ei ole asetettu erillisiä laatuvaatimuksia. Kaatopaikalle sijoitettaville materiaaleille on määritetty kaatopaikkakelpoisuus vaatimukset Valtioneuvoston asetuksessa 202/2006.

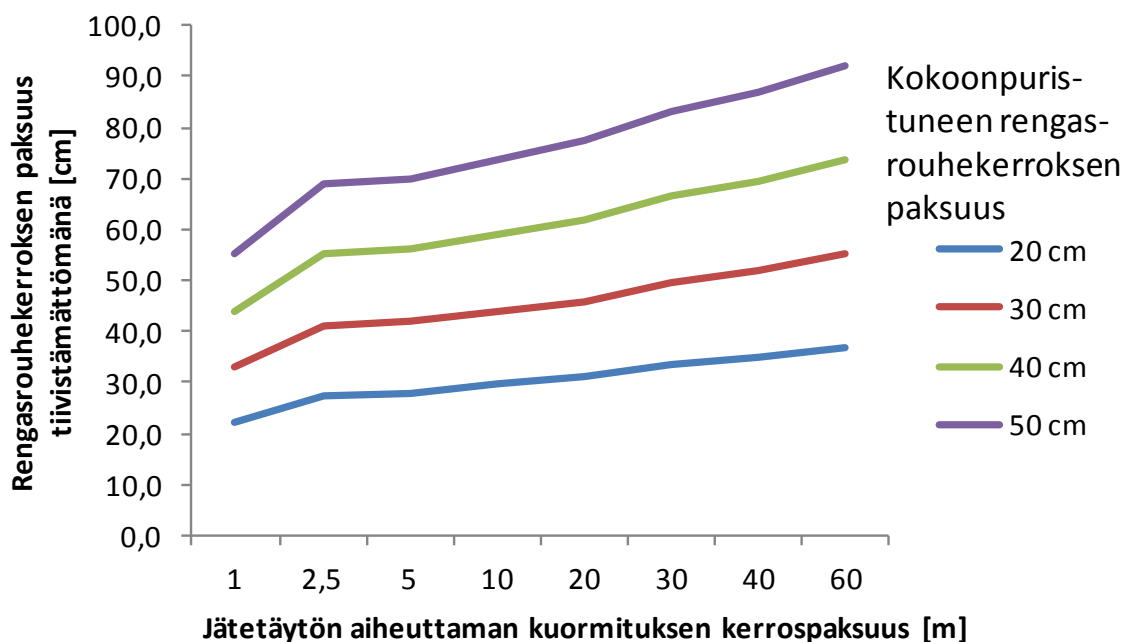
Rengasrouheesta tehtävän välitäyttökerroksen on tarkoituksena toimia suotovettä ja kaasua johtavana kerroksena. Kirjallisuuden perusteella Yhdysvalloissa on käytetty kaatopaikan pohjarakenteen yläpuolella n. 30 cm paksuista kuivatuskerrosta ja jätetäytön sisällä kerrospaksuudet ovat vaihdelleet 13...30 cm:n välillä kuormitusvaikutuksen aiheuttama kokoonpuristuma huomioiden. Taulukossa 8 ja kuvassa 10 on esitetty mitoitusperusteet yhdyskuntajätteen kaatopaikan välitäyttökerroksen paksuudelle jätetäytön kerrospaksuuden suhteen aiheuttama jännitystila huomioiden jätteen oletustilavuuspainolla $\gamma \leq 10$ kN/m³. Välitäyttökerroksen mitoituksessa on huomioitu jätetäytön epätasaisuuden vaikutus rakennekerroksen lopulliseen paksuuteen.

Taulukko 8. Mitoitusperusteet yhdyskuntajätteen kaatopaikan välitäyttökerroksen tiivistämättömälle kerrospaksuudelle jätetäytön kerrospaksuuden aiheuttaman kuormituksen suhteen

Kuormitus [kPa]	Kuormitusta vastaavan jätepenkereen korkeus oletuksena ($\gamma = 10\text{kN/m}^3$) [m] *	Suunniteltu rengasrouheen kerrospaksuus jätetäytön aiheuttaman kuormituksen jälkeen [cm]			
		20 cm	30 cm	40 cm	50 cm
		Rengasrouhe kerroksen paksuus tiivistämättömänä [cm] **			
10	1.0	22	33	44	55
25	2.5	27.5	41	55	69
50	5.0	28	42	56	70
100	10	29.5	44	59	73.5
200	20	31	46	62	77
300	30	33.5	50	67	83.5
400	40	35	52	69.5	87
600	60	37	55	73.5	92

Huom. * Tiivistämättömän rengasrouheen tilavuuspaino vaihtelee $2.3 \dots 4.8 \text{ kN/m}^3$ välillä ja tiivistetyn $5.9 \dots 8.2 \text{ kN/m}^3$ välillä. ** Lopullinen kerrospaksuus on 30 cm kuormitusvaikutuksen jälkeen.

Kuvassa 10 on määritetty kuinka paksu rakennettava rengasrouhekerroksen paksuus tulee olla tiivistämättömänä suhteessa jätetäytön kerrospaksuuteen. Käyrät kuvaavat kuormituksen vaikutuksesta kokoonpuristuneen rengasrouhekerroksen paksuuksia (kuva 10).



Kuva 10. Rengasrouhekerroksen mitoitusperusteet yhdyskuntajätteen kaatopaikan välitäytötkerroksen paksuudelle jätetäytön kerrospaksuuden aiheuttama jännitystila huomioiden jätteen oletustilavuuspainolla $\gamma \leq 10 \text{ kN/m}^3$.

5.5. Suodatin ja suojausrakenteen mitoittaminen

Suodatin ja suojausrakenteille ei ole esitetty erillisiä mitoitusvaatimuksia. Kerrospaksuus tulee valita vallitsevat olosuhteet, suojattava rakenne tai ympäristön asettamat vaatimukset huomioiden. Kaatopaikan pohjarakenteen routasuojauksena käytetään tyypillisesti tiivistämättömänä n. kahden metrin vahvuista maa-ainekerrosta esim. moreenia estämään tiivisrakenteen jäätyminen. Routaeristyksen tarvittava paksuus voidaan määrittää yhtälöstä (10):

$$d_e = m_r \cdot \lambda, \quad (10)$$

missä d_e on eristeen mitoituspaksuus (m), m_r on vaadittava routaeristeen lämmönvastus ($\text{m}^2\text{K/W}$) ja λ on mitoituslämmönjohtavuus (W/Km). 40 cm vahvuinen kuivarengasrouhe vastaa kahden metrin moreenikerroksen routaeristävyyttä. Mikäli rengasrouhekerros pääsee kastumaan ennen talvea, vaikuttaa vesipitoisuus olennaisesti rengasrouheen routaeristävytyteen, koska veden lämmönjohtavuus on n. 0.6 W/Km ja jäätymisen jälkeen lämmönjohtavuus kasvaa arvoon n. 2.2 W/Km (Saarelainen 2001).

Lähteet

- Ahmed, I. 1993. Laboratory Study on Properties of Rubber Soils, Report No. FHWA/IN/JHRP-93/4, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- ASTM 2008. Annual Book of ASTM Standards, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pennsylvania.
- Bear J.H.F. & Palmer, R.S.J. 1972. Hydraulics of groundwater. McGraw-Hill, New York.
- Bernal, A. 1996. Laboratory Study on the Use of Tire Shreds and Rubber-Sand in Backfills and Reinforced Soil Applications, Report No.: FHWA/IN/JHRP-96/12, School of Civil Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Christensen, T.H. & Kjeldsen, P. 1989. Basic Biochemical Processes in Landfills. Julk.: Christensen, T.H., Cossu, R. & Stegman, R. (toim.). Sanitary Landfilling: Processes, Technology and Environmental Impacts. Academic Press, London, UK. s. 29–50. ISBN 0-12-174255-5.
- Cosgrove, T.A. 1995. Interface Strength Between Tire Chips and Geomembrane for Use as a Drainage layer in a Landfill Cover, Proceedings of Geosynthetics'95, Industrial Fabrics Association, St. Paul, Minnesota, Vol. 3, 1995, pp. 1157-1168.
- Donovan, R., Dempsey, J. & Owen, S. 1996. Scrap Tire Utilization in Landfill Applications, Proceedings of Wastecon 1996, SWANA's 34th Annual International Solid Waste. Exposition, Portland, Oregon, September 1996, pp. 353-383.
- Drescher, A., Newcomb, D., & Heimdahl, T. 1999. Deformability of Shredded Tires, Minnesota Department of Transportation, January, pp. 145.
- Duffy, D.P. 1995. Using Tire Chips as a Leachate Drainage Layer, Waste Age, September 1995, pp. 113 - 122.
- Edil, T. B., Park, J. K. & Kim, J. Y., 2004. "Effectiveness of scrap tire chips as sorptive drainage material. J. Environ. Eng., 130, 824–831.
- Ehrig, H.J. 1991. Prediction of Gas Production from Laboratory Scale Tests. Julk.: Proceedings Sardinia-91. Third International landfill Symposium. 14–18 October, 1991, S. Margherita di Pula (Cagliari), Sardinia, Italy. S. 87–114.

Ettala, M., 1998. Rengasrouhe kaatopaikkarakenteissa. Espoo, pp.51.

Grimes, B.H., Steinbeck, S. & Amoozegar, A. 2003. Analysis of Tire Chips as a Substitute for Stone Aggregate in Nitrification Trenches of Onsite Septic Systems: Status and Notes on the Comparative Macrobiology of Tire Chips Versus Stone Aggregate Trenches, Small Flows Quarterly, Vol. 4, No. 4.

Haxo, Jr, H.E. & Kamp, L.C., 1990. Destructive testing of geomembrane seams: Shear and peel testing of seam strength. Geotextiles and Geomembranes, Volume 9, Issue 4-6, 1990. pp. 369-395.

Humphrey, D.N. 2006. Civil Engineering Applications of Tire Derived Aggregate, Course Notes, prepared for California Integrated Waste Management Board.

Humphrey, D.N., 1997. Civil Engineering Applications of Tire Shreds, A Short Course, prepared for the California Integrated Waste Management Board, 16 June 1997.

Humphrey, D.N., 1996. Engineering Properties and Water Quality Effects of Tire Chips for Landfill Construction", Proceedings of a Seminar on Landfill Design Using Tire Shreds, Texas Natural Resources Conservation Commission, Arlington, Texas, pp. 34 - 92.

Humphrey, D.N., Chen, L.H., & Eaton, R.A. 1997. Laboratory and field measurement of the thermal conductivity of tire chips for use as subgrade insulation, Preprint No. 971289, Transportation Research Board, Washington, D.C.

Humphrey, D.N. & Katz, L.E. 2001. Field Study of Water Quality Effects of Tire Shreds Placed Below the Water Table, Proceedings of the Conference on Beneficial Use of Recycled Materials in Transportation Applications, Air and Waste Management Association, Pittsburgh, Pennsylvania.

Humphrey, D.N. & Manion, W.P., 1992. Properties of Tire Chips for Lightweight Fill, Grouting, Soil Improvement and Geosynthetics, R.H. Borden, eds., ASCE, Vol. 2, pp. 1344-1355.

Humphrey, D.N., Sandford, T.C., Cribbs, M.M., Gharegrat, H., & Manion, W.P. ,1992. Tire Chips as Lightweight Backfill for Retaining Walls–Phase I, prepared for the New England Consortium, 137 pp.

Kubo, H., 1997. Experiment applying tire chips as frost insulation in concrete channels. Proc. Of the Inter. symposium "Ground Freezing 97", Luleå, Sweden. Rotterdam, A.A. Balkema. pp. 427-432.

Mitchell, J.K. 1993 Fundamentals of Soil Behavior. pp. 577.

Nickles, W.L., Jr. 1995. The Effect of Tire Shreds as Subgrade Fill on Paved Roads, M.S. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Maine, Orono, Maine.

Othman, M.A. & Seymour, J. 2008. Use of Tire Chips in the Final Cover System of a Superfund Site Landfill, Geotechnical Special Publication, Issue 177, 2008. pp. 304-311.

Park, J.K., Edil, T.B., Kim, J.Y., Huh, M., Lee, S.H., & Lee, J.J., 2003. Suitability of Shredded Tires as a Substitute for a Landfill Leachate Collection Medium, Waste Management and Research, Vol. 21.

Park, J.K., Sakti J.P. & Hoopes J.A., 1996. Transport of aqueous organic compounds in thermoplastic geomembranes. II: Mass flux estimates and practical implications. Journal of Environmental Engineering, ASCE 122(9), 807-813.

Pohjarakennusohjeet RIL 121, 1998, Helsinki. suomen Rakennusinsinöörien Liitto.

Pohjavesidirektiivi 2006/118/EY.

Richardson, G.N., Giroud, J.P., & Zhao, A. 2000. Design of Lateral Drainage Systems for Landfills, Tenax Corporation Design Manual, Tenax Corporation, Baltimore, Maryland.

Rowe, R.K. & Mc Isaac, M. 2005. Clogging of Tire Shred and Gravel Permeated with Landfill Leachate, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, pp. 682-693, Vol. 131, No. 6.

Saarelainen, S., 2001. Tierakenteen routamitoitus, VTT Rakennus- ja yhdyskuntateknikka, Espoo. pp. 45.

Sengupta, S. & Miller, H. 2004. An Evaluation of Recycled Tire Shreds as a Substitute for Gravel in Residential Soil Absorption Systems", Civil Engineering Practice, Journal of the Boston Society of Civil Engineers Section, Vol. 19, No. 1.

Sengupta, S. & Miller, H.J. 2000. Investigation of Tire Shreds for Use in Residential Subsurface Leaching Field Systems: A Field Scale Study, Technical Report #32, Chelsea Center for Recycling and Economic Development, Technical Research Program, University of Massachusetts – Lowell, Chelsea, Massachusetts.

- Sharma, H.D. & Lewis, S.P. 1994. Regulatory framework and waste characterization and soil-waste interaction. Waste Containment Systems, Waste Stabilization, and Landfills, Design and Evaluation.
- Suomen ympäristökeskus, 1998. Kaatopaikan tiivistysrakenteet / Minna Leppänen (toim.). Ympäristöopas; 36.
- Tammirinne, M., Juvankoski, M., Laaksonen, R. & Rathymayer, H. 2004. Kaatopaikan tiivistysrakenteiden ja –materiaalien tuotehyväksyntä. Menettelyopas vapaaehtoiselle tuotehyväksynnälle. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Espoo. 24 s. ISBN 952-5004-51-1.
- Terzaghi, K.T. & R. Peck, 1967. Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons, 2nd Edition.
- Thiel, R.S. 1998. Design methodology for a gas pressure relief layer below a geomembrane landfill cover to improve slope stability, Geosynthetics International, Vol. 5, No. 6, pp. 589-617.
- Valtioneuvoston asetus 461/2000, Talousveden laatuvaatimus.
- Valtioneuvoston asetus, VNa 214/2007. Maaperän haitallisten aineiden pitoisuuksien kynnys- ja ohjearvon.
- Wartman, J., Natale, M.F., & Strenk, P.M. 2007. Immediate and Time-Dependent Compression of Tire Derived Aggregate, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 133, No. 3.

Ohje rengasrouheen käyttämisestä
ja mitoittamisesta kaatopaikkarakenteissa

Liite 1. Rengasrouheen kaatopaikkakelpoisuustestin tulokset.