



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

JÄTEBUNKKERIN RAKENNESUUNNITTELUN LÄHTÖTIEDOT JA ERITYISKYSYMYKSET

Konsta Pennanen

RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIikka

Diplomityö

Joulukuu 2022

TIIVISTELMÄ

Jätebunkkerin rakennesuunnittelun lähtötiedot ja erityiskysymykset

Konsta Pennanen

Oulun yliopisto, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2022, 115 sivua

Työn ohjaaja yliopistolla: Professori Antti Niemi

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tarkentaa jätteenpolttolaitoksien jätebunkkereiden rakennesuunnittelun lähtötietoja ja selvittää niiden taustalla olevaa teoriaa. Lähtötietojen konservatiiviset arviot eivät mahdollista rakenteiden optimointia. Tarvittavia jätteen ominaisuuksia on suomen- ja englanninkielisessä kirjallisuudessa käsitelty vain perinteisen kaatopaikkaläjityksen kontekstissa, joten työ on aihepiirin ensimmäinen. Arvioiden mukaan Euroopan nykyinen jätteenpolttolaitoskapasiteetti mahdollistaa noin 330 uuden jätevoimalaitoksen rakentamisen, joten aihe on ajankohtainen.

Työssä käsitellään siloja koskevan standardin teoriapohjaa ja sen mukaisten painelaskujen soveltuvuutta jätebunkkerin suunnitteluun. Tämän jälkeen selvitetään jätteen mekaanisia ominaisuuksia ja niiden määrittämisen problematiikka. Toisessa osiossa selvitetään jätteen kompostoitumisen tuottamaa lämpöä, jätteen lämmönjohtavuutta ja ominaislämpökapasiteettia sekä näiden määrittämiseen liittyviä ongelmia. Kolmanneksi käsitellään jätteen aiheuttaman kemiallisen rasituksen määrää ja arvioinnin vaikeutta sekä rasituksen vaikutusta bunkkerin betonirakenteisiin. Työ rajautuu näiden lähtötietojen määrittämiseen eurooppalaisten standardien puitteissa.

Lähtötietojen tarkennuksen ei katsottu olevan mahdollista pelkän aiemman tutkimuksen pohjalta, vaan myös käytännön mittauksia jätteen mekaanisista ja lämpöteknisistä ominaisuuksista sekä kemiallisen rasituksen aggressiivisuudesta tulee rakenteiden optimoinnin mahdollistamiseksi suorittaa. Työn tulokseksi muodostui kattava selvitys eri aiheiden ongelmakentistä, teoriasta, tutkimuksen tilasta ja jatkotutkimustarpeista.

Asiasanat: jätebunkkeri, jätesiilo, jätekuorma, jätteenpolttolaitos

ABSTRACT

Initial Data and Special Questions for Structural Design of Waste Bunker

Konsta Pennanen

University of Oulu, Degree Programme of Civil Engineering

Master's thesis 2022, 115 pages

Supervisor at the university: Professor Antti Niemi

The goal of this thesis was to define initial data for structural design of waste bunkers in waste incineration plants more accurately and to clarify the underlying theory. Mere conservative estimates of initial data don't enable structural optimizing. In Finnish and English literature, the needed properties of waste are only discussed in a traditional landfilling context, hence this work is a first on the subject. According to estimates, Europe's current waste incineration power plant capacity allows about 330 new waste power plants to be build, so the topic is timely.

The thesis first discusses a theory base of standard of silos and a suitability of waste load calculations for waste bunker design made according to it. After this, waste's mechanical properties and problematics of defining them are discussed. Secondly discussed are waste's heat generation due to composting, thermal conductivity, specific heat capacity and issues to define them. Thirdly, amount of chemical load from waste and difficulties to estimate it, are discussed with their effect on bunker's concrete structures. The study is limited to a definition of above-mentioned initial data in a frame of European standards.

More accurate definition of initial data was not seen possible when it's only based on prior research. Hence, measurements in practice are needed from waste's mechanical properties, thermal properties and chemical aggressivity to enable structural optimization. Outcome of the thesis formed to be an extensive study about issues, theories, state of research and about further needs of research on the subject.

Keywords: waste bunker, waste silo, waste load, waste to energy, waste incineration plant, municipal solid waste

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	8
ABSTRACT	9
SISÄLLYSLUETTELO.....	10
MERKINNÄT JA LYHENTEET.....	12
1 JOHDANTO.....	17
2 JÄTTEEN AIHEUTTAMAT PAINEKUORMAT	23
2.1 Siilostandardin mukaiset painekuormat seinille	28
2.2 Siilostandardin mukaiset painekuormat bunkkerin pohjalla	36
2.3 Täytön ja tyhjennyksen aikaiset tilanteet	38
2.4 Siilokuormien yhdistelyt ja osavarmuusluvut.....	41
2.5 Siilostandardin soveltuvuus jätebunkkerin paineiden laskentaan	43
2.6 Jätteen mekaaniset ominaisuudet	44
2.6.1 Leikkauslujuuden määrittäminen	44
2.6.2 Jätteen koostumus	49
2.6.3 Kitkakulma	52
2.6.4 Koheesio	54
2.6.5 Kosteuspitoisuus	56
2.6.6 Kokoonpuristuvuus	59
2.6.7 Poimintoja tutkimuksista	63
2.7 Johtopäätökset jätteen aiheuttamien painekuormien määrittämisestä.....	68
3 JÄTTEEN AIHEUTTAMAT LÄMPÖTILAKUORMAT	70
3.1 Lämmöntuotto.....	71
3.1.1 Lämpöarvon määrittäminen kalorimetri tuloksista	75
3.1.2 Lämmöntuoton voimakkuuteen vaikuttavia tekijöitä.....	77
3.2 Lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti.....	80
3.3 Lämpötilojen huomiointi standardien mukaisesti	83
3.4 Pakkovoimien huomiointi laskentamallissa	84
3.5 Johtopäätökset lämpökuormien määrittämisestä	85
4 JÄTTEEN AIHEUTTAMAT KEMIAALLISET RASITUKSET	87
4.1 Kemiaalliset rasitukset jätebunkkerissa	94
4.2 Kemiaallisen rasitusluokan vaikutus jätebunkkerin betonirakenteeseen	99
4.3 Vesitiiveys vaatimuksen vaikutus halkeamarajaan.....	103
4.4 Kristallisoivien lisäaineiden käyttö	104

4.5 Johtopäätökset jätteen aiheuttamista kemiallisista rasituksista	106
5 YHTEENVETO.....	108
LÄHDELUETTELO.....	111

MERKINNÄT JA LYHENTEET

CHS	kalsiumsilikaattihydraatti
EQU	rakenteen staattisen tasapainon rajatila (equilibrium)
JLY	Jätelaitosyhdistys ry
KIVO	Suomen Kiertovoima ry
OCR	ylikonsolidoitumissuhde
STR	rakenteen sisäinen vaurioituminen tai liian suuri siirtymätila, kun materiaalin lujuus on määräävä (strength)
TUKES	Turvallisuus ja kemikaalivirasto
VTT	Valtion teknillinen tutkimuskeskus
Ca^{2+}	kalsiumioni
$CaCO_3$	kalsiumkarbonaatti
Cl^-	kloridianioni
CO_2	hiilidioksidi
CO_3^{2-}	karbonaattianioni
Mg^{2+}	magnesiumkationi
NH_4^+	ammoniumioni
SO_4^{2-}	sulfaattianioni
<i>A</i>	siilon vaakapoikkileikkauksen pinta-ala
<i>A</i>	pystylohkon rajaaman vaakapoikkileikkauksen pinta-ala
<i>ASH</i>	tuhkan massaosuus
<i>C</i>	hiili
<i>C</i>	hiilen massaosuus
C_b	pohjaan vaikuttavan kuorman suurennuskerroin
C_C	kokoonpuristuvuusindeksi (compression index)
$C_{C/N}$	hiilen määrän suhde typen määrään
C_{pf}	täytössä syntyvän paikallisen painekuorman suurennuskerroin
C_{O_2}	happipitoisuus tilavuussuhteena
C_{op}	kiintoaineesta syntyvän paikallisen painekuorman suurennuskerroin
C_R	kokoonpuristuvuussuhde (compression ratio)
C_{water}	vesipitoisuus suhteena kokonaismassaan

D	halkaisija
D	yksiulotteinen rajoitettu puristuvuusmoduuli (constrained modulus)
E	epäkeskisyyden suhde siilon säteeseen
F	kaatopaikan vuotuinen täyttökorkeus
FC	hiilen massaosuus
H	vety
H	lämmöntuotto
H	vedyn massaosuus
I	muunnettu edustava reagoimattomien aineiden määrä
K	sivupainekertoimen ominaisarvo
K	vaakapainekerroin
K_m	sivupainekertoimen keskiarvo
K_0	lepopainekerroin
M_s	kuivatetun kiintoaineen massa
M_w	haihtuneen veden massa
N	typen massaosuus
O	happi
O	hapen massaosuus
Q	lämpöarvo
S	rikin massaosuus
T	lämpötila tarkasteluhetkellä
T	epälineaarinen lämpötilajakauma
T_{max}	enimmäislämpötila
T_{min}	vähimmäislämpötila
T_{opt}	optimaalinen lämpötila
ΔT_{eq}	ekvivalentti lineaarinen lämpötilagradientti
U	vaakapoikkileikkauksen piiri
U	pystylohkon vaakapoikkileikkauksen sisäpuolinen piiri
V_T	kokonaistilavuus
VM	reaktioherkän materiaalin massaosuus
WC_{dry}	kosteuspitoisuus osuutena kuivasta kiintoaineesta
WC_{wet}	kosteuspitoisuus osuutena kokonaismassasta
Y_j	syvyydestä riippuva Janssenin painefunktio
Y_R	matalan siilon eri syvyyksillä vaikuttavasta paineesta riippuva funktio

a_F	orgaanisen jakeen ruuan massaprosentti
a_G	orgaanisen jakeen viherjätteen massaprosentti
a_I	orgaanisen jakeen reagoimattomien aineiden massaprosentti
a_K	sivupainekertoimen muuntokerroin
a_P	orgaanisen jakeen paperin ja pahvin massaprosentti
a_T	orgaanisen jakeen tekstiileiden massaprosentti
a_μ	seinäkitkakertoimen muuntokerroin
c	koheesio
c_i	aineen ominaislämpökapasiteetti
c_1	muunnettu edustava hiilihydraattiselluloosan määrä
c_2	muunnettu edustava korkea asteisen hiilihydraatin määrä
de	huokossuhteen muutos
dm	alkion massa
dp_v	pystypaineen muutos
dz	alkion korkeus
$d\varepsilon$	suhteellisen puristuman muutos
d_c	siilon poikkileikkauksen sisäpuolinen ominaismitta
e_f	yläpinnan kasan suurin epäkeskisyys täyttöprosessin aikana
f	muunnettu edustava rasvan määrä
f	alkuaineanalyysin lisäkerroin
$f(i)$	tekijän i lämmöntuoton vaikutuskerroin
f_{im}	kiintoaineen kitkakertoimen ominaisarvo kasvavalla kuormalla
f_r	kiintoaineen kartiokasan luonnollinen kaltevuuskulma
g	putoamiskiihtyvyyys
h	poikkileikkauksen korkeus
h_c	siilon pystylohkon korkeus taitekohdasta täytön ekvivalenssipinnan tasalle
h_{tp}	kiintoaineen yläpinnan kasan kokonaiskorkeus
h_0	yläpinnan kasan alareunan ja täytön ekvivalenssipinnan välinen korkeus
n	eksponentti suppilon paineen riippuvuutta ilmaisevassa kaavassa
p	muunnettu edustava proteiinin määrä
p_a	normaali ilmanpaine
p_h	kiintoaineen aiheuttama vaakapaine
p_{hf}	vaakapaine täytön jälkeen

p_{ho}	kiintoaineen aiheuttama asymptoottinen vaakapaine suurella syvyydellä
p_{pf}	osapinnalle vaikuttava paine täytön jälkeen
$p_{pf,nc}$	ei-pyöreään siiloon vaikuttava tasainen paine, joka edustaa paikallisen painekuorman vaikutuksia täytön jälkeen
p_v	pystypaine
p_{vb}	pystypaine määritettynä pohjan tasolla matalassa siilossa
p_{vf}	pystyjännitys kiintoaineessa täytön jälkeen
p_{vho}	pystypaine määritettynä yläpinnan kasan alareunassa
p_{vft}	pystyjännitys kiintoaineessa taitekohdassa täytön jälkeen
p_{vsq}	matalan tai keskihoikan siilon tasaiseen pohjaan vaikuttava pystypaine
p_{vtp}	yläkasan alareunan korkeudella vaikuttava geostaattinen pystypaine
$p_{v.0}$	pystypaine alussa
p_w	pystyvaippaan vaikuttava kitkakuorma
p_{wf}	vaipan kitkakuorma täytön jälkeen
Δp_{sq}	matalien siilojen kahdessa mitoitusmenetelmässä käytettävien pystypaineiden erotus
s	paikallisen painekuorman vaikutusalueen mitta
s	likimääräisanalyysin lisäkerroin
z	korkeus täytön yläpinnasta tarkasteltavaan alkioon
z	etäisyys neutraaliakselilta
z	kiintoaineen täytön ekvivalenssipinnan alapuolinen syvyys siilon ollessa täynnä
z_s	syvyys kiintoaineen ja seinän välisestä ylimmästä kosketuskohdasta
z_v	matalissa siiloissa pystyjännityksen määrittämiseen käytettävä syvyyskoordinaatti
z_0	Janssenin ominaissyvyys
α	murtopinnan kaltevuus
α	betonin lämpölaajenemiskerroin
β	maan pinnan kaltevuus
γ	kiintoaineen tilavuuspainon ominaisarvon yläraja τ leikkausmurtolujuus
γ_a	kuorman osavarmuusluku onnettomuusrajatilassa Robot -ohjelmassa

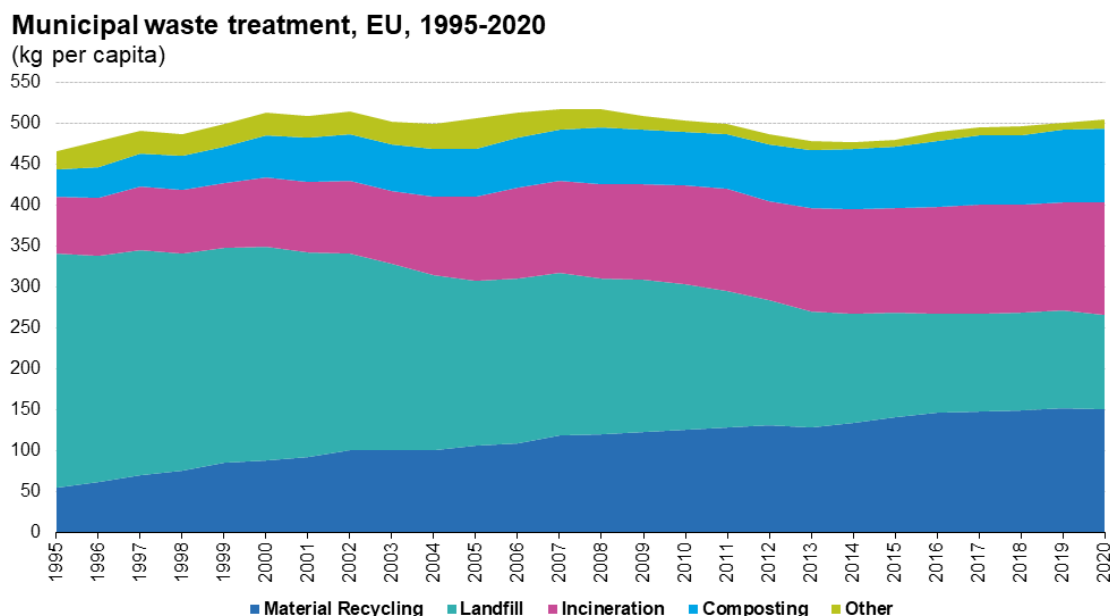
γ_F	kuormien osavarmuusluku, jossa otetaan huomioon myös mallin epävarmuudet ja mittojen vaihtelut
γ_s	kuorman osavarmuusluku käyttörajatilassa <i>Robot</i> -ohjelmassa
ε_i	aineen tilavuusosuus
λ_C	ilmasto- ja operaatio-olosuhteiden kerroin
λ_i	aineen lämmönjohtavuus
μ	kitkakerroin
μ	pystyvaipan seinäkitkan kitkakulman ominaisarvo
ν	Poissonin luku
ξ_1	epäedullisen pysyvän kuorman pienennyskerroin
ρ_b	materiaalin irtotiheys
ρ_{dry}	kuiva irtotiheys
ρ_i	aineen tilavuuspaino
ρ_{wet}	märkä irtotiheys
σ	leikkauspinnan normaalijännitys
σ_v	pystypaine
σ_w	seinäpinnan normaalijännitys
σ_1	pystypaine
σ_3	vaakapaine
σ_1	pystyjännitys
σ_2	vaakajännitys
τ_w	leikkausjännitys seinäpinnalla
φ	materiaalin luonnollinen kitkakulma
φ'	materiaalin luonnollinen tehokas kitkakulma
φ_w	seinän ja materiaalin välinen kitkakulma
φ_{pv}	jännitysriippuvainen kitkakulma
φ_0	kitkakulma normaalissa ilmanpaineessa
$\Delta\varphi$	kitkakulman muutos logaritmisyklisen pystypaineen muutoksesta
$\Psi_{0,0}$	muuttuvan kuorman yhdistelykerroin
$\Psi_{0,1}$	pääasiallisen muuttuvan kuorman yhdistelykerroin
$\Psi_{1,0}$	muuttuvan kuorman tavallisen arvon yhdistelykerroin
$\Psi_{2,0}$	muuttuvan kuorman pitkäaikaisarvon yhdistelykerroin

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on varmentaa jätevoimalaitoksien jätebunkkereiden rakennesuunnittelussa käytettyjen lähtötietojen oikeellisuus ja tarkentaa niitä mahdollisuuksien mukaan aiempaan tutkimukseen perustuen. Varmennettujen ja tarkentuneiden lähtötietojen tavoitteena on toimia pohjana jätebunkkerin rakennetekniselle optimoinnille, joka ei nykyisillä konservatiivisilla arvioilla ole juuri ollut mahdollista. Aiheesta oletetaan löytyvän riittävästi tutkimusta, sillä samoja tietoja tarvitaan myös perinteisemmässä jätteen kaatopaikkaläjityksen suunnittelussa. Pääasiallisena kuormituksena jätebunkkerissa toimii siellä varastoitava jäte. Jätteen aiheuttaman paineen laskenta on riippuvainen jätteen ominaisuuksista, kuten tiheydestä ja kitkakulmasta. Näitä on tyydytty arvioimaan konservatiivisesti ja paineiden laskentaan on sovellettu maamekaniikkaa sekä soveltuvin osin siilostandardin ohjeistuksia. Tarkempaa yhtenäistä tutkimukseen perustuvaa menetelmää ominaisuuksien määrittämiseksi ja paineiden laskemiseksi ei kuitenkaan ole ollut käytössä. Toinen merkittävä kuormitus bunkkerin mitoituksen kannalta on lämpötilagradientin suuruus bunkkerirakenteiden yli. Varastoidussa jätteessä kehittyvä merkittävä määrä lämpöä jätteen biologisen hajoamisen johdosta. Lämmöntuottoon vaikuttaa eniten biojätteen osuus kokonaisuudesta. Suurimpia mahdollisia lämpötiloja on pyritty arvioimaan suunnittelun pohjaksi, mutta tarkempia perusteluja ei juuri ole esitetty. Kolmas jätteen aiheuttama rasitus on kemiallinen. Bunkkereissa on käytetty tiukkaa kemiallista rasisluokkaa betonille, joka on johtanut hyvin pieniin sallittuihin halkeama leveyksiin. Tätä on kompensoitu käyttämällä betonissa halkeamia korjaavia kristallisoivia lisäaineita. Jätteen aiheuttamien kemiallisten rasisuoksien todellisesta aggressiivisuudesta ei kuitenkaan ole ollut kuin konservatiivisia arvioita. Opinnäytetyössä rajaudutaan keskittymään rakennesuunnittelun lähtötietojen tarkentamiseen. Työssä ei käsitellä työmaatekniikkaa ja betoniteknologia rajataan vain välttämättömään kemiallisten rasisuoksien käsittelyn yhteydessä tarvittavaan tietoon. Työssä käsitellään vain Euroopan alueella voimassa olevia aiheeseen liittyviä säännöksiä ja ohjeita.

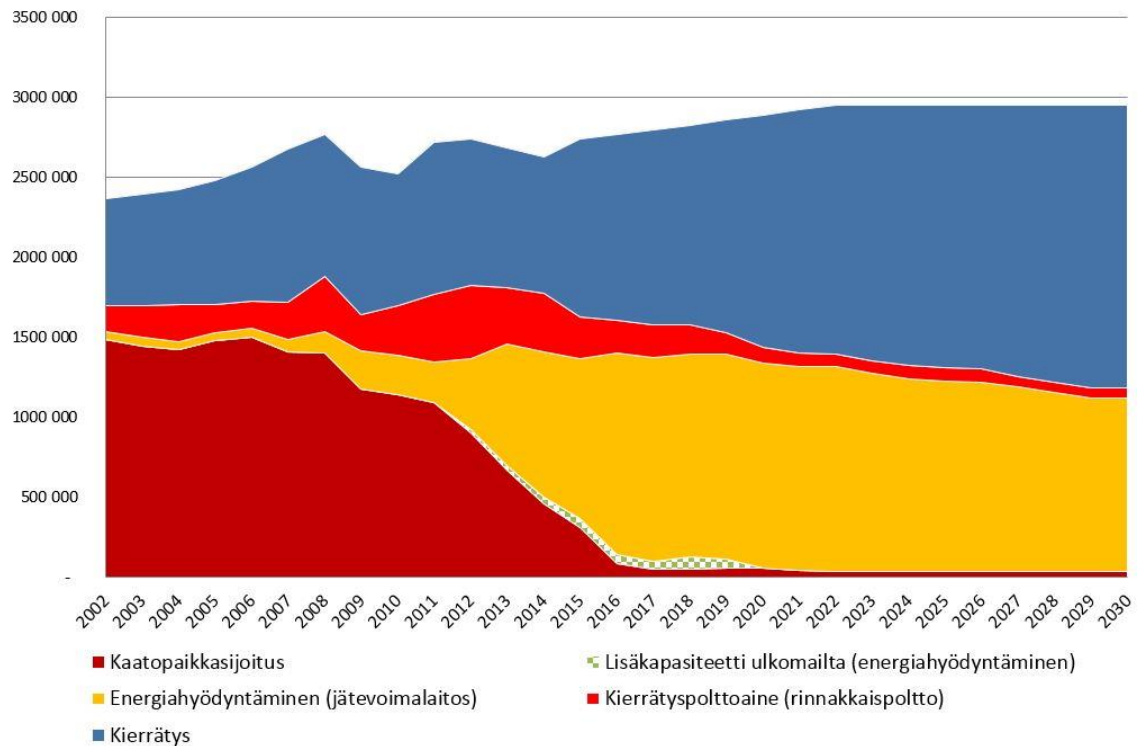
Jätteen kaatopaikkaläjityksen määrä on Euroopan Unionin alueella pudonnut vuoden 1995 ja 2020 välillä 61 %:sta 23 %:iin. Tämä selittyy monilla vaihteittain kiristyneillä ympäristönsuojeluun ja kierrätykseen liittyvillä lainsäädännöillä. Jätteenpolttolaitoksien osuus käsittelystä on vastaavasti noussut 105 %. (Eurostat, 2021) Seuraava kuva 1

havainnollistaa kotitalousjätteen käsittelyn kehitystä Euroopassa vuodesta 1995 vuoteen 2020.



Kuva 1. Kotitalousjätteen käsittelyn kehitys Euroopassa vuodesta 1995 vuoteen 2020 (Eurostat, 2021).

Suomessa jätteenpoltto on niin ikään yleistynyt vaiheittain. Suurimpia käännekohtia ovat ensimmäisten modernien jätteenpolttolaitosten rakentamisen aloittaminen Kotkaan ja Riihimäelle vuonna 2006 sekä vuonna 2016 voimaan tullut orgaanisen jätteen kaatopaikkasijoittamisen rajoitus, joka on vauhdittanut voimalaitosinvestointeja (Nygård, 2018). Seuraava kuva 2 havainnollistaa Suomen yhdyskuntajätteiden käsittelyn kehitystä vuodesta 2002 vuoteen 2016 sekä Suomen Kiertovoima ry:n ennustetta vuodesta 2017 eteenpäin. Kuvan 2 tilastosta voi havaita jätevoimalaitoskapasiteetin rakentamisen alun vuoden 2006 jälkeen, vuoden 2016 kaatopaikkasijoituksen rajoittamisen sekä jätteen kokonaismäärän jatkuvan kasvun.



Kuva 2. Suomen yhdyskuntajätteiden käsittelyn kehitys [tn/v] (KIVO, 2022).

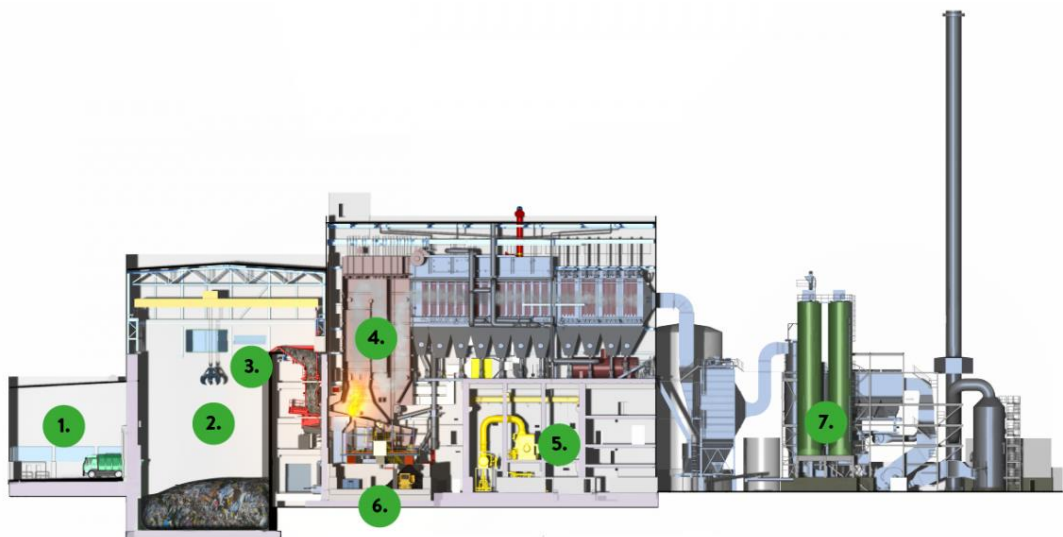
Seuraavaan kuvaan 3 on merkitty Suomessa tällä hetkellä toiminnassa olevat jätteenpolttolaitokset. Näiden lisäksi toimii monia pienempiä rinnakkaispolttolaitoksia, joissa poltetaan hyvälaatuisia kierrätyspolttoainetta ja tasalaatuisia teollisuusjätteitä (Pöyry Management Consulting Oy, 2015). Vuonna 2016 Euroopassa oli 512 jätteenpolttolaitosta ja arvioiden mukaan lisäkapasiteettia olisi mahdollista rakentaa noin 330 voimalaitoksen verran. Suomen markkinoille arvioidaan mahtuvan vielä 4 uutta jätteenpolttolaitosta. (Scarlat, et al., 2019).

Kuva 4 havainnollistaa jätteenpolttolaitoksen prosessin pääosat, joita ovat: 1. Vastaanottohalli, 2. Jätebunkkeri, 3. Kahmarihalli, 4. Kattilahalli, 5. Höyryturbiini generaattori, 6. Pohjatuhkavarasto ja 7. Savukaasunpuhdistus.

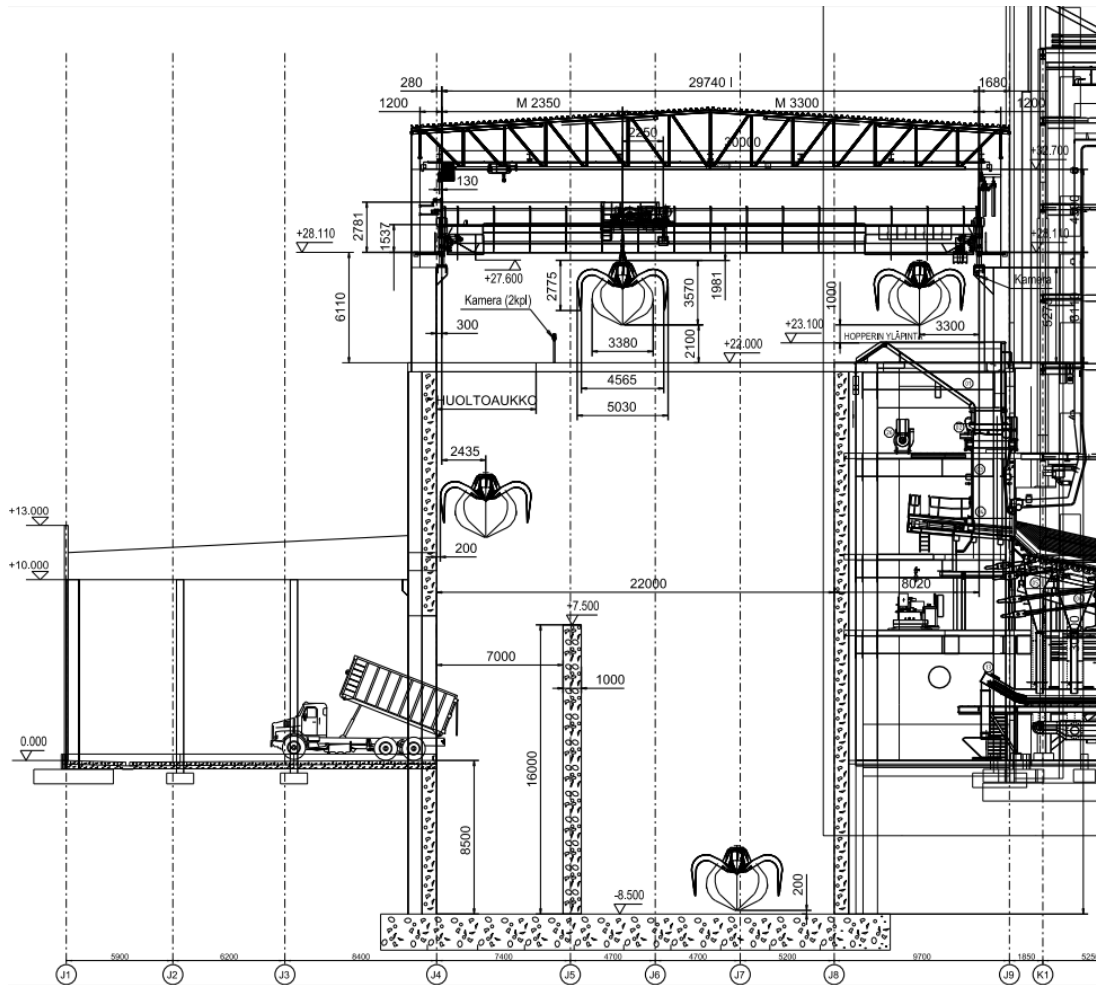
Kuva 5 on esimerkki tyypillisestä jätebunkkerin leikkauksesta. Jätebunkkerin rakennuskokonaisuuteen kuuluvat sen etualalla oleva vastaanottohalli, yläpuolella oleva kahmarihalli ja oikealla oleva kattilan syöttösuppilo-osasto. Kuvassa 5 olevista mitoista voi hahmottaa bunkkerin suuruuden. Kuvat 6 ja 7 havainnollistavat bunkkeriin kasattuja jätevuoria sekä jättemateriaalin monimuotoista ja kompleksista luonnetta.



Kuva 3. Suomen jätteenpolttolaitokset (Pennanen, 2022).



Kuva 4. Jätteenpolttolaitoksen prosessin pääosat (Mustankorkea Oy, ei pvm).



Kuva 5. Tyypillisen jätebunkkerin poikkileikkaus (Pennanen, 2022).



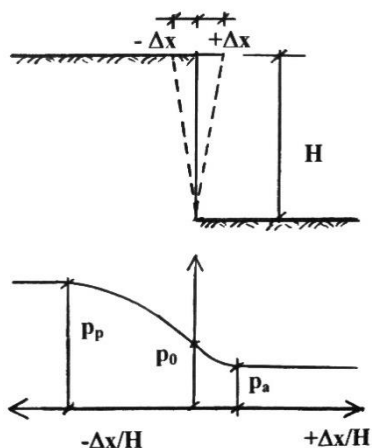
Kuva 6. Havainne Riikinvoiman bunkkeriin kasatusta jätevuoresta ja materiaalin kompleksisesta luonteesta (Manninen, 2018).



Kuva 7. Havainne Vantaan Energian bunkkeriin kasatusta jätevuoresta ja materiaalin kompleksisesta luonteesta (Kierikka, 2014).

2 JÄTTEEN AIHEUTTAMAT PAINEKUORMAT

Jätebunkkerin seinille tulevien paineiden määrittäminen pohjautuu osittain maamekaniikan periaatteisiin. Bunkkerin seinäpaineet ovat siten jossain määrin analogiset geotekniikasta tutun tukimuurin paineiden laskennan kanssa. Maamekaniikassa vaakapaine on kuvan 8 mukaisesti riippuvainen tukiseinän liikkeestä.

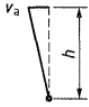
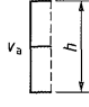
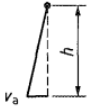
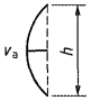


Kuva 8. Siirtymän vaikutus paineeseen (Jääskeläinen, 2011).

Jos seinää työnnettäisiin esimerkiksi ankkureilla maahan päin syntyisi niin sanottu passiivipaine sillä maa vastustaa tätä muodonmuutosta. Jos taas seinä pääsee joustamaan massasta pois päin, aktivoituu maan lujuusominaisuudet vastustamaan liikettä ja seinään kohdistuva paine pienenee. Tätä painetta kutsutaan aktiivipaineeksi. Lähes liikkumattomien pysyvien rakenteiden osalta vastaavaa painetta kutsutaan lepopaineeksi. Suurin paineista on passiivipaine ja pienin aktiivipaine. (Jääskeläinen, 2011) Jätebunkkerin seinät ovat lähes liikkumattomia, joten tilanteessa vaikuttaa **lepopaine**. Aktiivipaineen mobilisoitumiseen riittävää muodonmuutosta kitkamaan tapauksessa on havainnollistettu seuraavassa taulukossa 1. Taulukko on Eurokoodi 7:n taulukko C.1, jonka mukaan esimerkiksi 20 m korkea bunkkerin seinä vaatisi 80 mm vaakasiirtymän aktiivipaineen aktivoitumiseksi, joka ei ole mahdollinen.

Taulukko 1. Siirtymä aktiivipaineen muodostumiseksi (SFS-EN 1997-1, 2005).

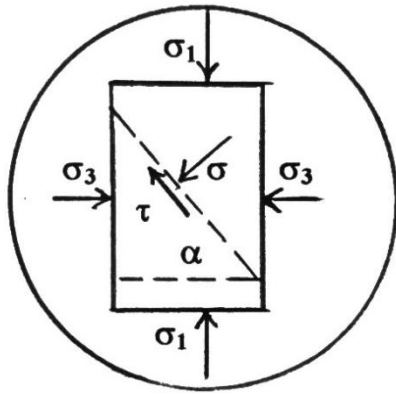
Taulukko C.1 Suhteet v_a/h

Seinän liikkeen tyyppi	v_a/h löyhä maa %	v_a/h tiivis maa %
a) 	0,4...0,5	0,1...0,2
b) 	0,2	0,05...0,1
c) 	0,8...1,0	0,2...0,5
d) 	0,4...0,5	0,1...0,2

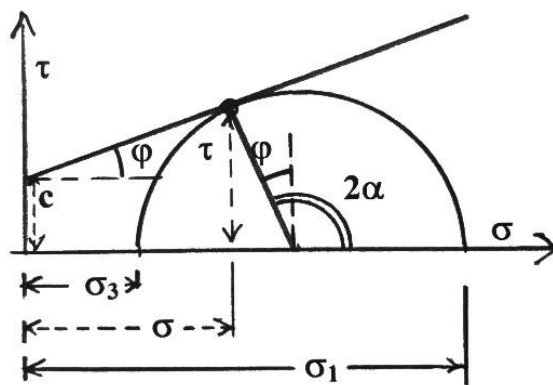
missä:
 v_a on aktiivisen maanpaineen mobilisoiva seinän liike
 h on seinän korkeus

Maamekaniikassa keskeisimpään asemaan nousee leikkauslujuus, sillä maahan syntyy vyöhykkeitä tai pintoja, joita pitkin maa pyrkii murtohetkellä leikkautumaan. Leikkauslujuus muodostuu partikkeleiden välisestä koheesiosta ja kitkasta, sillä partikkelit eivät ole samalla tavalla sidoksissa toisiinsa kuten esimerkiksi metalleissa on. (Jääskeläinen, 2011) Jätteessä esiintyy näiden lisäksi myös vetolujuutta pitkien kuitumaisten partikkeleiden vaikutuksesta. Tätä vetolujuutta on jätteen materiaalimalleissa huomioitu esimerkiksi lisäämällä koheesiota. (Langer, 2005)

Yleisimmin leikkautuvan murtopinnan kestävyyttä kuvataan **Mohr-Coulomb** murtokriteerillä, jossa materiaali-alkion murto tapahtuu leikkauslujuuden ylittyessä, sen ollessa riippuvainen alkion normaalijännityksistä eli pysty- ja vaakapaineiden suhteista. Kuva 9 havainnollistaa Coulombin kitkahypoteesin mukaista murtoviivaa ja kuva 10 tilannetta Mohrin jännitysympyrälle piirrettynä.



Kuva 9. Alkion jännitykset ja murtoviiva (Jääskeläinen, 2011).



kk

Kuva 10. Mohrin geometrinen esitys (Jääskeläinen, 2011).

Leikkauspinnan **leikkausmurtolujuuden** [N/m^2] muodostuminen on siten

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi, \quad (1)$$

jossa c on koheesio [N/m^2],
 σ on leikkauspinnan normaalijännitys [N/m^2],
 φ on materiaalin luonnollinen kitkakulma [$^\circ$].

Kuvan 10 Mohrin ympyrän geometriasta nähdään, että jos vaakapaine pienenee tai pystypaine kasvaa niin, että Mohrin ympyrä koskettaa murtosuoraa tulee materiaali-alkio murtotilaan. Murtosuoran perusteella on leikkauspinnan normaalijännityksen ja leikkausmurtolujuuden välillä murtotilasuhde ja alkion murtoviivan kaltevuus α määräytyy normaalijännityksien perusteella. Murtopinnan kaltevuudella ja kitkakulmalla on Mohrin ympyrän mukainen geometrinen yhteys. Murtopinnan kaltevuus [$^\circ$]

$$\alpha = 45^\circ + \varphi/2 \quad (2)$$

ja vaakapaine [N/m²]

$$\sigma_3 = \sigma_1 \cdot \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) - 2c \cdot \tan \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right), \quad (3)$$

jossa σ_1 on pystypaine [N/m²].

Kaava (3) on maan aktiivipaineelle sovellettuna, jossa miinuksen jälkeinen osa kuvaa koheesion vaikutusta. Passiivipaineen tapauksessa vaakapaine [N/m²]

$$\sigma_3 = \sigma_1 \cdot \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right) + 2c \cdot \tan \left(45^\circ + \frac{\varphi}{2} \right). \quad (4)$$

Kaava on sama, mutta kulmat ja koheesio vähentämisen sijaan lisätään. Passiivipaine on näin ollen lepo- ja aktiivipainetta suurempi. (Jääskeläinen, 2011) Kuvasta 10 ja kaavoista (3) ja (4) nähdään myös, että koheesio ei ole riippuvainen normaalijännityksestä ja toimii vaikka normaalijännitys olisi nolla. Tämä osaltaan selittää miksi jätekasoilla näkee tilanteita, joissa pystysuorat seinämät pysyvät stabiileina pitkiäkin aikoja (Ramaiah, et al., 2017).

Kaavat (3) ja (4) perustuvat **Rankinen** maanpaineteoriaan, jolla voidaan tarkastella maan oman massan synnyttämiä jännityksiä maamassan sisällä. Rankinen alkuperäinen teoria ei sinänsä käsittele tukiseinämiä vasten syntyviä voimia. Tätä havainnollistaa, että jännitysalkion reunoilta puuttuu lujuusopista tutut leikkauskomponentit. Tukiseinämiä vasten syntyvät voimat voidaan kuitenkin selvittää teoriolla saatujen maanpainneiden avulla. Tukiseinämiin kohdistuvia voimia voidaan arvioida myös Coulombin maanpaineteorialla, joka huomioi myös seinän ja maan välisen kitkan. Coulombin maanpaineteoria tarkastelee maanpaineen aiheuttaman murtuman tasoliukupintoja. Näiden teorioiden mukaiset aktiivi- ja passiivipaineet perustuvat plastisuusteoriaan, jossa maa on liukupinnaltaan murtotilassa. Jätebunkkerissa vallitseva lepopaineen määrittäminen perustuu näistä poiketen kimmoteoriaan ja empiiristen kokeiden mukaisiin menetelmiin, sillä lepopaine vaatii massan liikkumattomuutta. (Portaankorva, 2019)

Geoteknisen Eurokoodi 7:n luvussa 9 esitetään menetelmä lepopaineen laskentaan, kun kyseessä on maata, kalliota tai täyttöä tukeva rakenne. Eurokoodin kaava

lepopainekertoimelle perustuu **Jakyn** vuonna 1944 johtamaan funktioon hiekkakasan käyttäytymisestä (Portaankorva, 2019). Kertoimella kuvataan vaakapaineen suhdetta pystypaineeseen, joten kertomalla pystypaine kyseisellä kertoimella saadaan tulokseksi vaakapaine. Jakyn kaava kuvaa tätä suhdetta analyyttisesti ja osittain empiirisesti kitkakulman avulla. Kaavan johtamista on avattu esimerkiksi lähteessä Pipatpongsa & Vardhanabhuti (2009). Jakyn alkuperäinen julkaisu ei ole kovin tunnettu johtuen heikoista julkaisu menettelyistä aikansa Unkarissa (Pipatpongsa & Vardhanabhuti, 2009). Eurokoodissa 7 kaava maanpaineen lepopainekertoimelle [-] on muotoa

$$K_0 = (1 - \sin\varphi') \cdot \sqrt{OCR} \cdot (1 + \sin\beta), \quad (5)$$

jossa φ' on materiaalin luonnollinen tehokas kitkakulma [°],
 OCR on ylikonsolidoitumissuhde (over consolidation ratio),
 β on maan pinnan kaltevuus [°].

Ylikonsolidoitumissuhde on maa-aineksen kokeman suurimman jännityksen suhde nykyiseen tilaan tarkasteltavalla ajanjaksolla. Maa-aineksen, jota ei ole aikaisemmin kuormitettu, ylikonsolidoitumissuhde on 1. Käytännössä tukimuurien kannalta OCR-termi on lähes aina 1 (Lehikoinen, 2015).

Lujuusopillisesti lepopaine on se kosketuspaine, jolla maa-aineksen hiukkasten keskinäinen asema pysyy muuttumattomana. Teoriassa tällainen tilanne kehittyy ajan myötä siirtymättömiin rakenteisiin. Kimmoteoriaan perustuva maan vaakasuuntaisen lepopaineen kaava on johdettu yleistetystä Hooken laista. Maan vaakasuuntainen lepopaine [N/m²] pystysuoraa seinää vasten Hooken lain mukaisesti on

$$\sigma_3 = \sigma_1 \cdot \frac{\nu}{1-\nu}, \quad (6)$$

jossa ν on Poissonin luku.

Yleensä Poissonin lukua maa-aineksille ei kuitenkaan tunneta riittävän tarkasti. (RIL 166, 1986)

U on vaakapoikkileikkauksen piiri [m],

z on korkeus täytön yläpinnasta tarkasteltavaan alkioon [m].

Merkitsemällä

$$\sigma_v(z) - \sigma_v(z + dz) = d\sigma_v(z) \quad (8)$$

ja
$$\tau_w(z) = K \cdot \tan \varphi_w \cdot \sigma_v(z), \quad (9)$$

jossa K on vaakapainekerroin [-],

φ_w on seinän ja materiaalin välinen kitkakulma [°],

saadaan johdettua alkion differentiaaliyhtälö

$$\frac{d\sigma_v(z)}{dz} + \sigma_v(z) \cdot K \cdot \frac{U}{A} \cdot \tan \varphi_w = g \cdot \rho_b(z). \quad (10)$$

Kun differentiaaliyhtälön reunaehdoksi asetetaan, että pystyjännitys $\sigma_v(z)$ on nolla, kun z on nolla, niin pystyjännityksen ratkaisuksi saadaan

$$\sigma_v(z) = \frac{g \cdot \rho_b(z) \cdot A}{K \cdot \tan \varphi_w \cdot U} \cdot \left(1 - e^{-\frac{K \cdot \tan \varphi_w \cdot U \cdot z}{A}}\right). \quad (11)$$

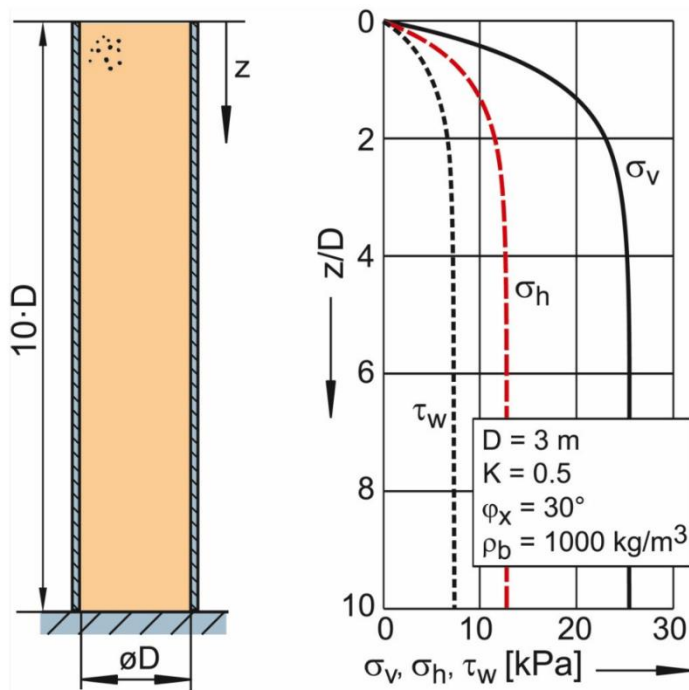
Jos kyseessä on pyöreä siilo, korvataan hydraulinen säde eli pinta-alan ja piirin suhde A/U arvolla $D/4$, jossa D on halkaisija. Kun pystyjännitys tiedetään, saadaan vaakajännitys ratkaistua kertomalla pystyjännitys vaakapainekertoimella K ja seinäpinnan leikkausjännitys saadaan sijoittamalla pystyjännityksen ja vaakapainekertoimen arvot kaavaan (9). Kaavasta (11) huomataan, että jos siilon syvyyden z annetaan lähestyä ääretöntä jää negatiivisen eksponentin takia jäljelle vain kaavan etuosa. Tämä edustaa suurinta pystyjännitystä, joka monesti siiloissa saavutetaan jo syvyydellä kahdesta kolmeen kertaan siilon halkaisija. Siilostandardissa seinille kohdistuvat paineet lasketaan siilon pohjalla vaikuttavalla suurimmalla pystyjännityksellä. Tämä asymptoottinen likiarvo perustuu oletukseen, että kun pystypaine on tarpeeksi suuri, on seinän leikkausjännityksen ottama voima yhtä suuri alkion painovoiman kanssa, sillä vaakapaine on verrannollinen pystypaineeseen ja seinän leikkausjännitys taas vaakapaineeseen. Eli

$$\tau_w(z) \cdot U \cdot dz = g \cdot \rho_b \cdot A \cdot dz \quad (12)$$

ja korvaamalla seinän leikkausjännitys kaavalla (9)

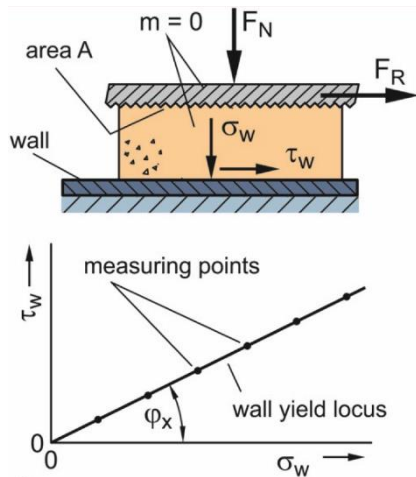
$$K \cdot \tan \varphi_w \cdot \sigma_v(z) \cdot U = g \cdot \rho_b \cdot A. \quad (13)$$

Ratkaisemalla tästä pystyjännitys nähdään, että tulos on sama kaavan (11) kanssa, kun korkeus z on ääretön. Kuva 12 havainnollistaa Janssenin tuloksella saatuja paineita siilon korkeuden suhteen.



Kuva 12. Paineiden asymptoottinen lähestyminen ääriarvojaan korkeuden funktiona (Schulze, 2019).

Kolmen paineen kuvaajat ovat saman muotoisia, sillä ne ovat suhteellisesti keskinäisriippuvaisia. Mitä suurempi seinän ja materiaalin välinen kitkakulma on, sitä nopeammin paineiden ääriarvot saavutetaan. Myöskin mitä suurempi seinäkitkakulma on sitä suuremman osan painosta siilon seinät kantavat. Seinän ja materiaalin välinen kitkakulma ja kitkakerroin saadaan seuraavan kuvan 13 mukaisesta leikkauskokeesta.



Kuva 13. Leikkauskokeen periaate kitkakulman määrittämiseksi (Schulze, 2019).

Materiaalista riippuen voi kuvaaja leikkausjännityksen suhteesta pinnan normaalijännitykseen olla myös epälineaarinen eli kitkakulma voi olla normaalijännityksen funktio. Arvojen välinen riippuvuus

$$\tan \varphi_w = \frac{\tau_w}{\sigma_w} = \mu, \quad (14)$$

jossa μ on kitkakerroin [-],

σ_w on pinnan normaalijännitys [N/m^2].

Janssenin teoriassa oletetaan, että pystyjännitys on sama koko poikkileikkauksessa, vaakajännitys ja seinän leikkausjännitys ovat keskiarvoja kaikilla syvyyksillä ja kehän kohdilla, vaakapaine kerroin on sama kaikilla korkeuksilla eli kaikilla pystypaineen arvoilla, seinäkitkan oletetaan olevan täysin kehittynyt eli suurimpaan arvoon tarvittava siirtymä on tapahtunut ja että kiintoaineen tiheys on vakio. (Sadowski, 2010)

Eurokoodissa siilot luokitellaan niiden hoikkuuden eli kuvan 14 mukaisen korkeuden h_c ja sisäpuolisen ominaisleveyden d_c suhteen perusteella kolmeen ryhmään, hoikat, keskihoikat ja matalat, sekä erittäin matalat siilot. Kun

$$h_c / d_c \geq 2$$

hoikka siilo, Janssenin teoria.

$$1 < h_c / d_c < 2$$

keskihoikka siilo, muokattu Reimbertin teoria,

$$0,4 < h_c / d_c \leq 1$$

matala siilo, muokattu Reimbertin teoria,

$$h_c / d_c \leq 0,4$$

erittäin matala siilo, maanpaineteoria.

$$z_0 = \frac{1}{K \cdot \mu} \cdot \frac{A}{U}, \quad (19)$$

$$Y_j(z) = 1 - e^{-z/z_0}, \quad (20)$$

joissa γ on tilavuuspainon ominaisarvo [kg/m^3],
 μ on seinäkitkakertoimen ominaisarvo [-],
 K on sivupainekertoimen ominaisarvo [-],
 z on aineen täytön ekvivalenssipinnan alapuolinen syvyys [m],
 A on vaakapoikkileikkauksen ala [m^2],
 U on vaakapoikkileikkauksen piiri [m].

Keskihoikille ja **matalille** silloille suuremman symmetrisen kasauksen huomioivat muokatut Janssenin kaavat tunnetaan **Reimbertin** teoriana vuodelta 1976. Janssenin hoikkien sillojen teoriassa oletetaan, että vaakapainekerroin K pysyy samana, kun taas Reimbertin teoriassa sen oletetaan pienenevän syvyyden z kasvaessa (Moore, et al., 2006). Eurokoodi esittää Reimbertin kaavat seuraavassa muodossa. Vaakapaine, kitkakuorma ja pystypaine [N/m^2]

$$p_{hf} = p_{ho} \cdot Y_R, \quad (21)$$

$$p_{wf} = \mu \cdot p_{hf}, \quad (22)$$

$$p_{vf} = \gamma \cdot z_V \quad (23)$$

ja näissä keskihoikan ja matalien sillojen eri syvyyksillä vaikuttava paineesta riippuva funktio [-], tämän eksponentti [-], pystyjännityksen määrittämiseen käytettävä syvyyskoordinaatti [m] ja kuvan 8 mukainen kasauksen painopisteen ja seinän ylimmän kosketuskohdan korkeus symmetrisesti täytetyille suorakaidesilloille [m]

$$Y_R = 1 - \left(\frac{z-h_0}{z_0-h_0} + 1 \right)^n, \quad (24)$$

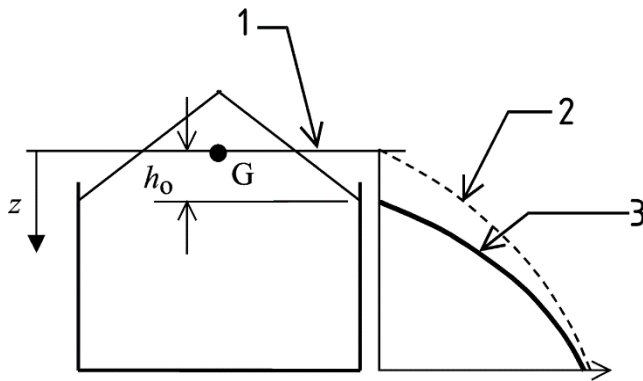
$$n = -(1 + \tan f_r) \cdot \left(1 - \frac{h_0}{z_0} \right), \quad (25)$$

$$z_V = h_0 - \frac{1}{n+1} \cdot \left(z_0 - h_0 - \frac{(z+z_0-2 \cdot h_0)^{n+1}}{(z_0-h_0)^n} \right), \quad (26)$$

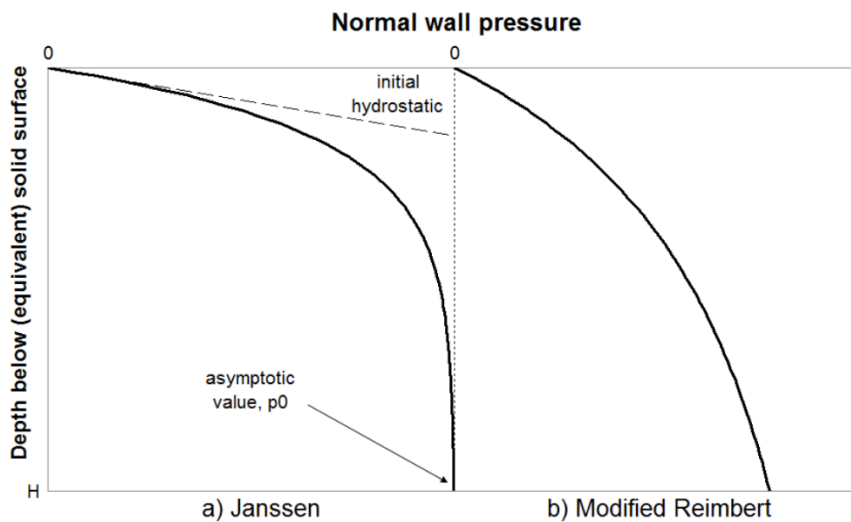
$$h_0 = \frac{d_c}{4} \cdot \tan f_r, \quad (27)$$

joissa f_r on kiintoaineen kartiokasan luonnollinen kaltevuuskulma [°].

Kuvat 15 ja 16 havainnollistaa painejakautumien eroa eri siilo hoikkuuksilla. Matalan siilon paineet alkavat seinän ja materiaalin kosketuskohdasta ja ovat pienempiä kuin jos ne laskettaisiin hoikan siilon menettelyllä.



Kuva 15. Täytön ekvivalenssi pinta kohdassa 1, hoikan siilon sääntö kohdassa 2 ja matalan siilon paineiden muodostuminen kohdassa 3 (SFS-EN 1991-4, 2006).



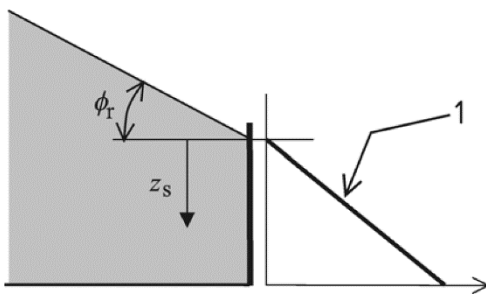
Kuva 16. Hoikan siilon Janssen painejakauma ja keskihoikan tai matalan siilon muokattu Reimbert painejakauma (Sadowski, 2010).

Erittäin matalille siiloille eurokoodi esittää vaakapaineen [N/m²] muodossa

$$p_h = \gamma \cdot K \cdot (1 + \sin f_r) \cdot z_s, \quad (28)$$

jossa z_s on kuvan 10 mukainen kiintoaineen ja seinän välisen ylimmän kosketuskohdan ja sen alapuolisen vaakapaineen määrittämyskohdan välinen korkeusero [m].

Kaava (28) on periaatteeltaan sama geoteknisen Eurokoodi 7:n lepopaine kertoimen kaavan (5) kanssa. Tilavuuspaino γ ja korkeus z_s muodostavat pystypaineen, jota kerrotaan kasan pinnan muodolla ja kaavan (30) sivupaine kertoimella, kuten myös kaavassa (5) tehdään. Kasan luonnollinen kaltevuus f_r on esitetty kuvassa 17 symbolilla ϕ_r .



Kuva 17. Erittäin matalan siilon painejakauma (SFS-EN 1991-4, 2006).

Erittäin matalan siilon seinän kitkakuorma [N/m^2] saadaan kertomalla vaakapaine seinän kitkakertoimella

$$p_w = p_h \cdot \mu. \quad (29)$$

Siilostandardissa siilot jaotellaan myös kolmeen **kuormaluokkaan** niiden kapasiteetin perusteella. Jätebunkkerit ovat suuren kokonsa vuoksi kuormaluokassa 3, jonka takia niitä suunniteltaessa sivupainekertoimen vaaditaan perustuvan koetuloksiin. Tässä työssä käsitellään vain kuormaluokan 3 siilorakenteita. Standardissa esitetään koemenetelmä, jossa mitataan suoraan vaakajännityksen suhdetta pystyjännitykseen. Tällöin sivupaine kerroin

$$K = 1,1 \cdot \frac{\sigma_2}{\sigma_1}, \quad (30)$$

jossa σ_2 on vaakajännitys [N/m^2],

σ_1 on pystyjännitys [N/m^2].

Suurennuskerroin 1,1 kuvaa koetilanteen lähes kitkattoman seinän ja todellisen seinäkitkan vallitessa saatavan sivupaine kertoimen eroa. Kertoimella siis korotetaan vaakajännitystä ja kitkakuormaa, mutta huomattavaa on myös, että se pienentää pystyjännityksiä. Sivupaine kerroin sallitaan myös johtaa mitatusta kitkakulmasta. Tällöin sivupaine kertoimen keskiarvo määritetään Jakyn teoriaan perustuen, kuten myös geoteknisen Eurokoodi 7:n kaavassa (5) tehtiin. Sivupaine kerroin kitkakulman avulla

$$K_m = 1.1 \cdot (1 - \sin f_{im}), \quad (31)$$

jossa f_{im} on kiintoaineen kitkakulman keskiarvo kasvavalla kuormalla [°].

Suurennuskerroin 1,1 kuvaa samaa kuin kaavassa (30).

2.2 Siilostandardin mukaiset painekuormat bunkkerin pohjalla

Hoikkien siilojen tasaisiin pohjiin vaikuttava pystypaine oletetaan tasan jakaantuneeksi. Siilostandardin mukaan keskimääräinen pystypaine [N/m²] seinän ja pohjan taitekohdassa

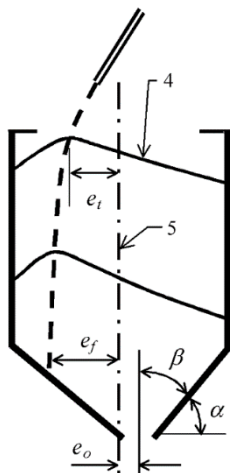
$$p_{vft} = C_b \cdot p_{vf}, \quad (32)$$

jossa C_b on pohjan kuormituksen suurennuskerroin.

Pohjan kuormituksen suurennuskertoimella huomioidaan hoikan siilon pohjaan syntyvät dynaamiset vaikutukset. Dynaamisia vaikutuksia, joissa materiaali eri tavoin lukkiutuu tai holvaantuu siiloon ja tämän seurauksena äkillisesti putoaa, voi syntyä, jos materiaali on mekaanisesti lukkiutuvaa, kuten esimerkiksi sementtiklinkkeri tai jos materiaalilla on huomattavasti koheesiota. Standardin mukaan suurennuskerroin huomioidaan koheesion takia, jos koheesion suhde pystypaineen vertailujännitykseen on yli 4 %. Pystypaineen vertailujännityksenä käytetään todellista arviota siilon pohjalla olevasta pystyjännityksestä tai arvoa 100 kPa. Lisäksi standardissa esitetään kaava pystypaineelle, jossa huomioidaan pohjan muoto, kaltevuus ja eri painesuhteita. Pohjan ollessa tasainen jää kaavasta kuitenkin jäljelle vain jo kaavassa (32) esitetty.

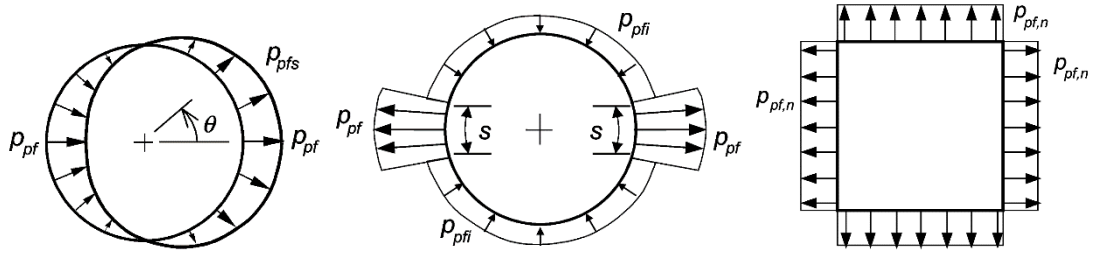
2.3 Täytön ja tyhjennyksen aikaiset tilanteet

Edellisissä luvuissa esitetyt paineet edustavat symmetrisesti täynnä olevaa siiloa. Epäkeskinen täyttö aiheuttaa siiloon epäsymmetrisen painejakauman kokonaisuudessaan. Lisäksi materiaalille syntyy erilaisia pakkautumistiheyksiä, joista myös aiheutuu paineiden epäsymmetriaa. Tyhjennyksen aikana voi erilaisten virtaustilanteiden takia syntyä tilapäisiä paineen lisäyksiä. Päältä tyhjennettävässä jätebunkkerissa kyseisiä virtauksia ei kuitenkaan esiinny, joten siilostandardissa annetut tyhjennyksen aikaiset tilanteet jätetään huomiotta. Niin sanottuja pieniä alle 25 % halkaisijasta olevia epäkeskisyyksiä, kuvataan noin samansuuruisen vaikutuksen antavilla **paikallisilla painekuormien** lisäyksillä. Paikalliset painekuormat lisätään symmetrisiin täyttökuormiin ja huomioidaan niiden kanssa samassa kuormitustapauksessa. Seuraavassa kuvassa 19 havainnollistetaan epäkeskistä kuormitusta.



Kuva 19. Täyden siilon kasan epäkeskisyyden e_t , täytön aikainen suurin epäkeskisyyden e_f ja tyhjennysaukon epäkeskisyyden e_o (SFS-EN 1991-4, 2006).

Epäsymmetrinen täyttö työntää siiloa vinoon, jonka takia siilon vaakapoikkileikkaus pyrkii menemään soikeaksi ja seinän pystypaineet kasvavat korkeamman täytön reunalla. Eri vaakapoikkileikkaukset käyttäytyvät eri tavoin. Siilostandardissa annetaan kolme tapausta; paksuseinäiset pyöreät, ohutseinäiset pyöreät ja ei-pyöreät silot. Ohutseinäisillä viitataan yleisesti metallisiiloihin ja paksuseinäisillä betonisiiloihin. Näiden tapauksien pienen epäkeskisen täytön vaikutusta pyritään kuvaamaan seuraavan kuvan 20 mukaisilla paikallisilla painekuormilla.



Kuva 20. Epäsymmetrisen täytön vaikutusta kuvaavat paikalliset painekuormat ohutseinäisille pyöreille, paksuseinäisille pyöreille ja ei-pyöreille siiloille (SFS-EN 1991-4, 2006).

Hoikkien siilojen **täytössä** syntyvälle paikalliselle paineelle lasketaan ensin viitearvo [N/m²]

$$p_{pf} = C_{pf} \cdot p_{hf}, \quad (36)$$

jossa täytössä syntyvän paikallisen painekuorman suurennuskerroin

$$C_{pf} = 0,21 \cdot C_{op} \cdot (1 + 2 \cdot E^2) \cdot (1 - e^{-1,5 \cdot [(h_c/d_c)^{-1}]} \geq 0 \quad (37)$$

ja tässä **epäkeskisyyden** suhde siilon säteeseen

$$E = 2 \cdot e_f / d_c. \quad (38)$$

Näissä p_{hf} on kaavan (15) mukainen vaakapaine, paikallisen painekuorman vaikutus korkeudella,

e_f on kuvan 19 mukainen kasan suurin epäkeskisyys,

C_{op} on materiaalin mukainen kerroin.

Materiaalin mukainen kerroin on empiirinen ja saadaan täysmittakaavan kokeista. Pienimillään se on kiviaineksella 0,4 ja suurimmillaan rehuseoksella 1,0. Kun kerrointa ei tunneta, voidaan sitä arvioida seinäkitka- ja sivupainekertoimen muuntokerroimien avulla

$$C_{op} = 3,5 \cdot a_{\mu} + 2,5 \cdot a_K - 6,2, \quad (39)$$

jossa a_{μ} on seinäkitkakertoimen muuntokerroin,

a_K on sivupainekertoimen muuntokerroin.

Jätteen osalta on varmintä käyttää arvoa 1, sillä koetuloksia ei ole saatavilla. Jätebunkkerin **ei-pyöreän hoikan** siilon tapaukseen saadaan **epäkeskisyyden** paikallinen paineen lisäys [N/m^2] viitearvoa muokkaamalla

$$p_{pf,nc} = 0,36 \cdot p_{pf}. \quad (40)$$

Paikallisen painelisäyksen vaikutusvyöhykkeen korkeus [m]

$$s = \pi \cdot d_c / 16. \quad (41)$$

Kun paikallinen painelisäyksen vyöhyke asetetaan vaikuttamaan siilon **korkeuden keskelle** pitäisi sen vaikutus seinän taivutusmomenteihin ja leikkausjännitykseen olla likimain yhtä suuri kuin todellisen pienen epäkeskisen täytön vaikutus. Standardissa kuitenkin kerrotaan, että vyöhykettä tulisi käyttää kaikilla korkeuksilla niin, että suurin vaikutus kaikkiin kohtiin löytyy. Toisaalta kuormaluokan 2 pyöreiden betonisiilojen tapauksessa sallitaan katsoa, paljonko paikallinen painekuorma lisää jännityksiä, kun se asetetaan siilon korkeuden keskelle ja tämän jälkeen kaikkia muita jännityksiä yksinkertaisesti skaalataan tässä suhteessa. Suunnittelijan on siis arvioitava, kuinka monta kuormitustapausta eri korkeudella vaikuttavalla paikallisella painekuormalla on syytä tehdä ja kuinka suuri vaikutus kuormituksella on rakenteen jännityksiin kaikissa muissa kohdissa. Paikallisen painekuorman aiheuttamaa lisäystä seinän kitkakuormaan ei tarvitse huomoida.

Matalalle siilolle **täytön** pienestä alle 25 % halkaisijasta olevasta epäkeskisyydestä syntyviä paikallisia painekuormia ei tarvitse ottaa huomioon ja **keskihoikalle** siilolle se lasketaan aivan kuten edellä hoikille siiloille. Kuitenkin, kun **keskihoikan tai matalan** siilon täyttöpäkeskisyydet ylittävät 25 % halkaisijasta, tulee käyttää erillistä **suurten täyttöpäkeskisyyksien menetelmää** ja tälle erillistä kuormitustapausta. Tämä menetelmä on kuitenkin esitetty **vain pyöreille** siiloille. **Erittäin matalien** siilojen osalta ei esitetä paineen lisäyksiä epäkeskisen täytön tilanteessa ja **hoikille** siiloille ei esitetä vastaavaa menetelmää suurten täyttöpäkeskisyyksien huomioimiseksi, kuten keskihoikkien ja matalien siilojen osalta. Suurten täyttöpäkeskisyyksien menetelmän pääideana on lisätä kasan puoleisen seinän pystyvoimaa, joka aiheutuu koko siiloa taivuttavasta epäkeskisyydestä kun vastakkaisen seinän vaakapaine puuttuu. Kaikissa tapauksissa lopulta vaaditaan huomioimaan **suuret täyttöpäkeskisyydet**, vaikka mitään menetelmää ei-pyöreille siiloille ei ole esitetty. Kaatava vaikutus saataneen muodostamalla

eri kuormitustapaukset täyttöpaineilla niin, että vuorotellen yhden seinän vastakkainen vaakapaine puuttuu. Tällöin Janssenin mukainen seinän vaakapaine ei periaatteessa pääsisi muodostumaan, mutta tarkempaa menetelmää ei ole tarjolla. Kasan puoleisen seinän pystypaineen kasvun suuruden arviointiin ei esitetä keinoja. Epäselväksi jää, onko tuo kasvu merkittävä vain pyöreillä siiloilla, sillä niissä pystypaine pyöreän geometrian takia keskittyy lyhyemmälle matkalle. Huomattavaa on myös, että epäkeskisyyden vaikutusta pohjan pystypaineeseen ei vaadita huomioimaan. Pohjan pystypaineen pientyminen toisella reunalla kuitenkin edesauttaa siiloa kaatavaa vaikutusta. Suunnittelussa tulisikin arvioida millä matkalla vakauttava pystypaine vaikuttaa.

2.4 Siilokuormien yhdistelyt ja osavarmuusluvut

Siilostandardin liitteessä A kerrotaan kuinka mitoitustilanteet ja kuormayhdistelmät tulee siilorakenteille muodostaa. Liite on ennemminkin osa suunnitteluperusteet standardia EN 1990, mutta sitä ei ole vielä äänestyksen puutumisen takia siirretty osaksi kyseistä standardia. Suunnitteluperusteet standardin yleinen menettely mitoitustilanteiden ja kuormitusyhdistelmien muodostamiseksi on periaatteessa suoraan sovellettavissa siilorakenteisiin. Siilostandardin liitteen A taulukoissa esitetään mitkä mitoitustilanteet, kuormitusyhdistelyt ja muuttuvien kuormien yhdistelykertoimet tulee huomioida. Siilostandardin Suomen kansallisessa liitteessä kuitenkin kerrotaan, ettei noiden taulukoiden yhdistelykertomia tule käyttää. Kuitenkin taulukoiden mukaiset kuormitustilanteet tulee huomioida. Siilokuormat eli täyttökuormat luokitellaan muuttuviksi kuormiksi. Suomen kansallinen liite antaa siilokuorman osavarmuusluvuksi γ_F 1,5, ominaisyhdistelyn yhdistelykertoimiksi $\Psi_{0,0}$ 1,0, tavallisen yhdistelyn yhdistelykertoimeksi $\Psi_{1,0}$ 0,9 ja pitkäaikaisyhdistelyn yhdistelykertoimeksi $\Psi_{2,0}$ 0,8. Yhdistelykertoimen ensimmäinen alaindeksi viittaa mitoitustilanteeseen, kuten normaali, tavallinen tai pitkäaikainen. Toinen alaindeksi kertoo samanaikaisen muuttuvan kuorman järjestysnumeron. Siilostandardin liitteen A mukaan määräävä muuttuva kuorma ja pysyvät kuormat tulee aina huomioida täyden arvonsa suuruisina. Liitteen A taulukoista huomataan, että siilon täyttökuormat ovat aina järjestykseltään kuormitusyhdistelyn määräävän muuttuvan kuorman jälkeisiä niin sanottuja ensimmäisiä pääasiallisia muuttuvia kuormia. Liitteen mukaan pääasiallisen muuttuvan kuorman yhdistelykerroin $\Psi_{0,1}$ on 1,0. Suunnitteluperusteet standardin yhdistelyiden mukaisesti määräävää muuttuva kuorma on aina täysi ja muita samanaikaisia kuormia voidaan pienentää

yhdistelykertoimilla. Koska siilokuorman yhdistelykertoimet $\Psi_{0,0}$ ja $\Psi_{0,1}$ ovat molemmat ykkösiä ja taulukoissa esitettyjä yhdistelykertomia ei tule huomioida, saadaan siilostandardin liitteen A taulukoiden mukaiset yhdistelyt ja mitoitusilanteet huomioitua lähes suoraan suunnitteluperusteet standardin SFS-EN 1990 mukaan muodostetuilla yhdistelyillä.

Lisäksi kun yhdistely sisältää siilokuormia on **epäedullisen pysyvän kuorman pienennyskerroin** ξ_1 siilostandardin mukaan 0,9. Suunnitteluperusteet standardissa kerroin esiintyy kaavassa (6.10b) ja taulukossa A1.2(B) eli yhdistelyissä, joilla tarkastellaan rakenteen lujuutta. Taulukon A.1.2(B) mukaan kertoimen arvo on siilostandardista poiketen 0,85. Suunnitteluperusteet standardin Suomen kansallisessa liitteessä ja myös kun käytetään suunnitteluperusteet standardin taulukossa A1.2(A) mainittua menetelmää, jossa staattisen tasapainon (EQU) tarkastelu ja rakenneosien kestävyyksien (STR) tarkastelu sisällytetään samoihin yhdistelyihin, esitetään kertoimen vaikutus $0,85 \cdot 1,35 = 1,15$ suoraan kertoimella 1,15. Siilokuormat huomioiden arvoksi kuitenkin saadaan $0,9 \cdot 1,35 = 1,22$. Tämä tarkoittaa, että siilorakenteita mitoittaessa epäedullisen pysyvän kuorman osuus tulee huomioida suurempana. Kyseenalaiseksi jää, onko kyse pyöristysvirheestä vai onko suuremman omanpainon huomiointi todella tarpeen. (SFS-EN 1990, 2006; SFS-EN 1991-4, 2006)

Rakenneanalyysi ohjelmista ei yleensä löydy valmiiksi yhdistelykertoimia siilokuormille, joten ne on syötettävä manuaalisesti. Seuraavassa taulukossa 2 esitetään, kuinka siilokuormalle luodaan oma kuormatyyppi Autodesk Robot Structural Analysis ohjelmaan.

Taulukko 2. Siilokuormien kuormatyyppin kertoimet rivillä 19 ja kasvatetut epäedullisen pysyvän kuorman pienennyskertoimet rivien 1 ja 2 toiseksi viimeisissä sarakkeissa.

	Nature	Subnature	γ_{max}	γ_{min}	γ_s	γ_a	$\Psi_{0,1}$	$\Psi_{0,2}$	$\Psi_{0,3}$	$\Psi_{0,n}$	Ψ_1	$\Psi_{2,1}$	$\Psi_{2,n}$	Ψ_K	ξ_l	ξ_z
1	Dead	STRC	1.35	0.9	1	1									0.9	1
2	Dead	NSTR	1.35	0.9	1	1									0.9	1
3	Live	Luokka A	1.5		1		0.7				0.5	0.3				
4	Live	Luokka B	1.5		1		0.7				0.5	0.3				
5	Live	Luokka C	1.5		1		0.7				0.7	0.3				
6	Live	Luokka D	1.5		1		0.7				0.7	0.6				
7	Live	Luokka E	1.5		1		1				0.9	0.8				
8	Live	Luokka F	1.5		1		0.7				0.7	0.6				
9	Live	Luokka G	1.5		1		0.7				0.5	0.3				
10	Live	Luokka H	1.5		1											
11	Wind		1.5		1		0.6				0.2					
12	Snow		1.35		1		0.7				0.4	0.2				
13	Snow	Lumikuorma sk<	1.5		1		0.7				0.4	0.2				
14	Snow	Lumikuorma sk>	1.5		1		0.7				0.5	0.2				
15	Snow	Jääkuorma	1.5		1		0.7				0.3					
16	Temperature		1.5		1		0.6				0.5					
17	Accidental					1										
18	Seismic					1										
19	Live	Siilo	1.5		1		1				0.9	0.8				
20																

Robotin taulukossa ei ole saraketta määrävän muuttuvan kuorman yhdistelykertoimelle $\Psi_{0,0}$, sillä määrävä muuttuva kuorma on lähtökohtaisesti täyden arvonsa suuruinen. Robotin merkintä kuorman osavarmuusluvulle γ_s tarkoittaa käyttörajatilaa ja γ_a onnettomuusrajatilaa.

2.5 Siilostandardin soveltuvuus jätebunkkerin paineiden laskentaan

Siilostandardi ja -teoria perustuvat niin sanotun kiintoaineen käyttäytymiseen. Kiintoaine on rakeista vapaasti virtaavaa materiaalia, jossa on paljon erillisiä ja toisistaan riippumattomia partikkeleita (SFS-EN 1991-4, 2006). Näin ollen kiintoaine ei voi omata vetolujuutta eikä suurta koheesiota. Suuri kokoonpuristuvuus ja leikkauslujuuden muodonmuutosriippuvuus voi myös häiritä teorian oletuksien toteutumista (Schulze, 2019). Määritelmästä poiketen jätteellä on vetolujuutta ja koheesiota sekä se on hyvin kokoonpuristuvaa. Näin ollen siiloteoriassa tehdyt oletukset seinän ja materiaalin välille syntyvistä voimista eivät välttämättä vastaa kovin hyvin todellisuutta. Jotta materiaali voisi holvaantua seinien väliin tulisi sen olla suhteellisen kokoon puristumatonta ja leikkauslujuuden tulisi aktivoitua ilman suuria muodonmuutoksia. Jätteen joustaessa vaakasuunnassa, tulisi pakkaantumisen olla hyvin tiivis, jotta vaakavoimat välittyvät bunkkerin seinille. Toisekseen standardin mukaisissa laskelmissa käytetään vain suurinta pohjalla vaikuttavaa tilavuuspainoa. Hyvin kokoonpuristuvan jätteen tilavuuspaino muuttuu huomattavasti eri korkeuksilla, joten standardin oletus johtaa konservatiiviseen

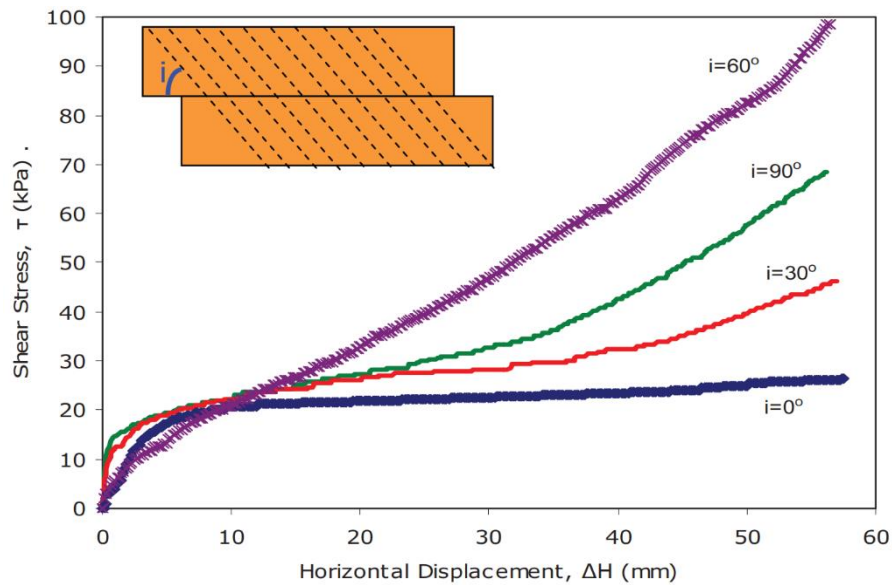
tulokseen. Myös jätteen sivupainekerroin, koheesio ja vetolujuus ovat pystypaineen funktioita, mutta standardissa käytetään pohjalla vaikuttavaa suurinta arvoa.

2.6 Jätteen mekaaniset ominaisuudet

Jotta siilostandardia, geomekaniikkaa tai muita materiaalimalleja voidaan soveltaa paineiden laskentaan ja rakenneanalyysiin, tulee jätteen mekaaniset ominaisuudet ensin määrittellä riittävällä tarkkuudella. Tässä luvussa keskitytään selvittämään jätteen mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä, ominaisuuksien erilaisia määrittystapoja, määrittelyyn liittyviä ongelmia, materiaalin kompleksista luonnetta ja sen aiheuttamaa problematiikkaa sekä alan tutkimuksen tilaa.

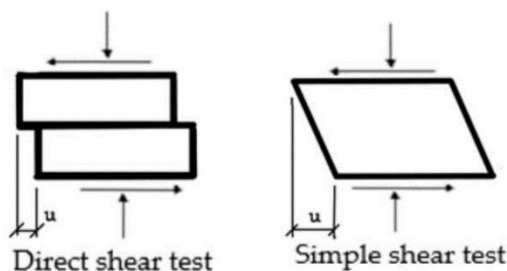
2.6.1 Leikkauslujuuden määrittely

Jätteen mekaanisten ominaisuuksien määrittely pohjautuu geoteknisiin testausmenetelmiin. Yleisimmin käytetty testi jätteen leikkauslujuuden määrittelyyn on niin sanottu suoraleikkaustesti eli rasialeikkauskoe (**direct shear test**). Direct shear – testissä leikkauslujuus on leikkaava vaakavoima jaettuna testikappaleen vaakapinta-alalla ja suhteellinen muodonmuutos on vaakasiirtymä jaettuna testikappaleen halkaisijalla. Tässä menetelmässä leikkauspinta muodostuu aina vaakatasoon, jonka suuntaisesti myös vetolujuutta muodostavat kuituiset materiaalit luontaisesti asettuvat. Niin sanottu **kuitukoheesio** on korkeimmillaan, kun leikkauspinnan ja kuitujen orientaation välinen kulma on 60 astetta. (Pulat & Yukselen-Aksoy, 2017) Todellisessa tilanteessa leikkaus- eli liukupinta ei ole vaakasuorassa, joten testin tulokset ovat varmallalla puolella. Seuraava kuva 21 havainnollistaa kuituorientaation vaikutusta leikkauslujuuteen.



Kuva 21. Kuituisten materiaalien orientaation vaikutus leikkauslujuuteen (Zekkos, 2008).

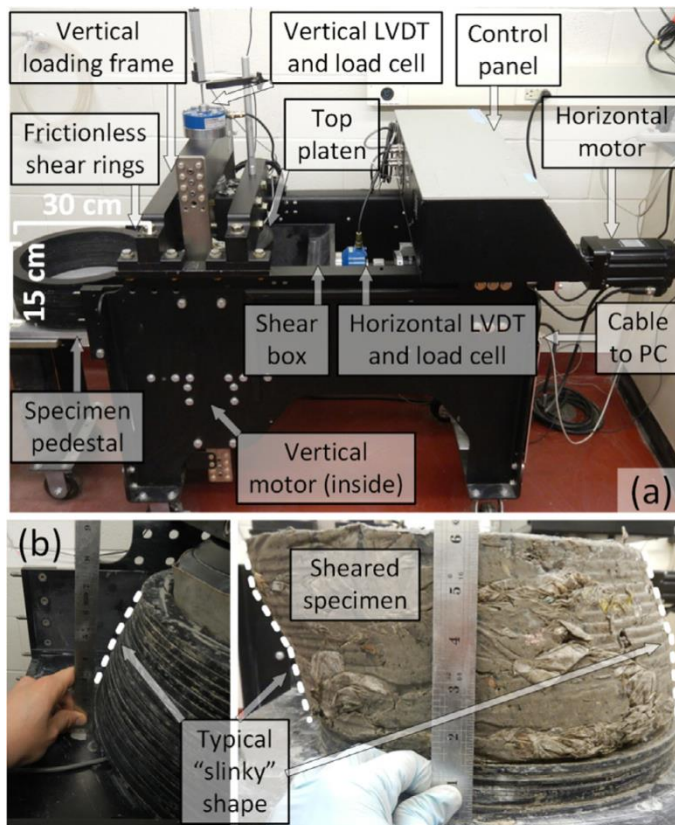
Toinen yleinen leikkaustesti on niin sanottu yksinkertainen leikkauskoe (**simple shear test**). Tässä testissä muodonmuutos tapahtuu tasaisesti koko testi kappaleessa muodostamatta yhtä leikkauspintaa kuten rasialeikkauskokeessa. Tämän etuna on, että materiaalin sisäinen muodonmuutos ja murtuminen tapahtuu sen heikoimmasta kohdasta, jonka ajatellaan tuottavan todennukaisempia tuloksia. Testilaitteen pystyseinät muodostetaan yleensä pinolla metallirenkaita, jotka pääsevät liukumaan toistensa suhteen vaakatasossa. Simple shear – testissä leikkauslujuus on vaakakuorma jaettuna testikappaleen vaaka-poikkileikkausalalla ja suhteellinen muodonmuutos on vaakasiirtymä jaettuna testikappaleen korkeudella. (Zekkos & Fei, 2017) Testilaitteisto on rasialeikkauskoetta monimutkaisempi, eikä sitä ole yleensä skaalattu suurempaan kokoon, vaan tutkimuksissa on käytetty hyvin ikääntynyttä tai muutoin pienemmäksi silputtua jätettä. Seuraavassa kuvassa 22 esitetään näiden kahden testin periaate, kuvassa 23 on jätteen rasialeikkauskoe yksinkertaisimmillaan ja kuvassa 24 on ”simple shear” -testilaitte.



Kuva 22. Suoran ja yksinkertaisen leikkauskokeen periaate (Wang, et al., 2022).



Kuva 23. Jätteen niin sanottu large-scale in-situ rasialeikkauskoe yksinkertaisimmillaan (Keramati, et al., 2020).



Kuva 24. Jätteen ”simple shear” - leikkauslujuustesti (Zekkos & Fei, 2017).

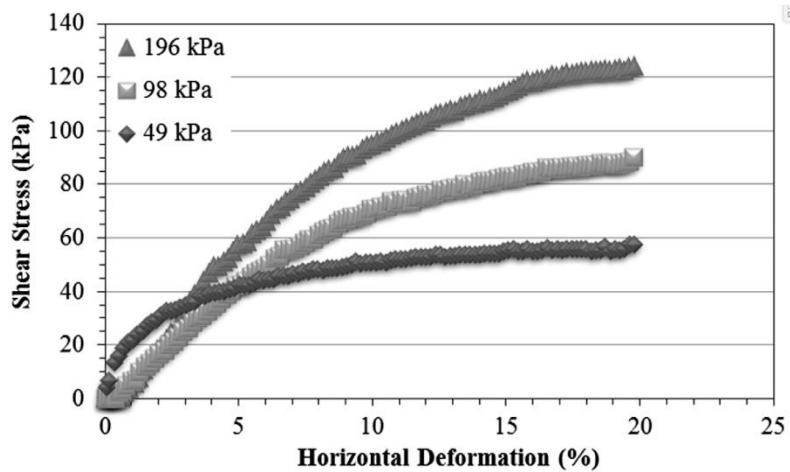
Kolmas käytetty testimenetelmä on kolmiaksaalikoe (**triaxial test**), jossa näyte puristetaan leikkausmurtoon vedellä paineistetun, niin sanotun sellin sisällä. Sellissä oleva paine toimii vaakapaineena ja murtava pystypaine tuodaan kappaleeseen tangon välityksellä. Sellissä leikkausilmiöt tapahtuvat kolmiaksaalisessa tilassa, joten sen

ajatellaan kuvaavan todellisuutta parhaiten. Myös kolmiakσιαalikokeen soveltamista jätteen testaukseen rajoittaa olemassa olevien laitteiden koko.

Kuten mainittu, jätteen mekaanisten ominaisuuksien testauksen perusongelma on, että olemassa oleva testilaitteisto on maa-aineksille, joiden partikkelikoko on jätettä paljon pienempi. Esimerkiksi standardin ASTM D3080-11 mukaan leikkausrasian halkaisijan tulee olla vähintään 10 kertaa suurimman partikkelin koko, standardin SFS-EN 1991-4 mukaan vähintään 20 kertaa suurimman partikkelin koko ja vähintään 40 kertaa keskimääräinen partikkelin koko. Leikkausrasian kokoa rajoitetaan, jotta seinät eivät vaikuttaisi partikkeleiden uudelleen järjestäytymiseen ja että materiaali ei pääsisi holvaantumaan (SFS-EN 1991-4, 2006; Beaven, 2000). Standardien rajoitusten perusteella, esimerkiksi 16 mm murskeelle riittää 320 mm rasia, kun taas 30 cm leveille jättepusseille rasian tulisi olla 6 m leveä. Monissa tutkimuksissa onkin päädytty silppuamaan jäte pienemmäksi, jottei isompia testilaitteita tarvitsisi rakentaa. Monesti testattava jäte on myös muodostettu synteettisesti eli tuoreista haisemattomista materiaaleista. Synteettisesti muodostetulla jätteellä pystytään simuloimaan erilaisia jättejakaumia ja eri materiaalijakeiden vaikutuksia tuloksiin. Kun testattava materiaali ei ole alkuperäistä ja sen raekokoa on pienennetty, on tuloksien soveltaminen kyseenalaista. Kaatopaikkaläjitykseen liittyvissä tutkimuksissa silputtu jäte on lähempänä totuutta kuin tuoreen jätteen kohdalla, sillä keskimääräinen partikkelikoko pienenee mätänemisen edetessä. On kuitenkin selvää, että kuituisten vahvistavien materiaalien silppuaminen pienentää leikkauskestävyyttä. Jotta eritutkimuksissa saadut tulokset olisivat vertailukelpoisia tulisi jätteen testausmenetelmät standardisoida. (Hossain, et al., 2009; Langer, 2005; Pulat & Yukselen-Aksoy, 2017)

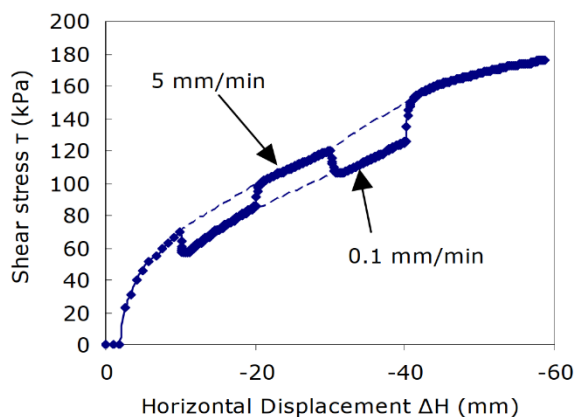
Jätteen leikkauslujuus on **muodonmuutoksen** funktio, joten toinen tärkeä tekijä lujuutta määritettäessä on muodonmuutoksen taso, jolla niin kutsuttua mobilisoitunutta leikkauslujuutta arvioidaan. Kaikissa tutkimuksissa ei havaita selvää jännityshuippua, josta kestävyys määrittää, vaan leikkausjännitys jatkaa kasvuaan muodonmuutoksen kasvaessa. Esimerkiksi siilostandardissa SFS-EN 1991-4 vaaditaan 6 % muodonmuutosta, kun taas jätetutkimuksissa puhutaan 20 % muodonmuutoksista (Pulat & Yukselen-Aksoy, 2017). Kaatopaikoilla käytetään jätekerroksien välissä yleensä maakerroksia, joiden särkymisen estämisellä perustellaan pienempiä muodonmuutostasoja. Jätebunkkerissa materiaalin voisi ajatella rajoituksetta saavuttavan leikkauslujuuden vaatiman muodonmuutos tason. Muodonmuutoksen taso on myös

määritettävissä kokoonpuristumisen suuruuden mukaisesti. Kuitukoheesion on myös havaittu alkavan vaikuttamaan vasta suurilla noin 20 % muodonmuutoksilla (Langer, 2005). Seuraava kuva 25 havainnollistaa leikkausjännityksen kehittymistä muodonmuutoksen kasvaessa.



Kuva 25. Muodonmuutoksen vaikutus mobilisoituvaan leikkausjännitykseen (Pulat & Yukselen-Aksoy, 2017).

Tuloksiin vaikuttaa myös testissä käytetty **leikkausnopeus**, kuten seuraavassa kuvassa 26 havainnollistetaan. Mitä nopeammin leikkaus tapahtuu, sitä suurempia kestävyyyksiä saadaan. Nopeuden vaikutus on suurempi jätteelle, jossa on vain vähän < 20 mm hienoaineksia. (Zekkos & Bray, 2007)



Kuva 26. Esimerkki leikkaustestin nopeuden vaikutuksesta leikkauslujuuteen (Zekkos & Bray, 2007).

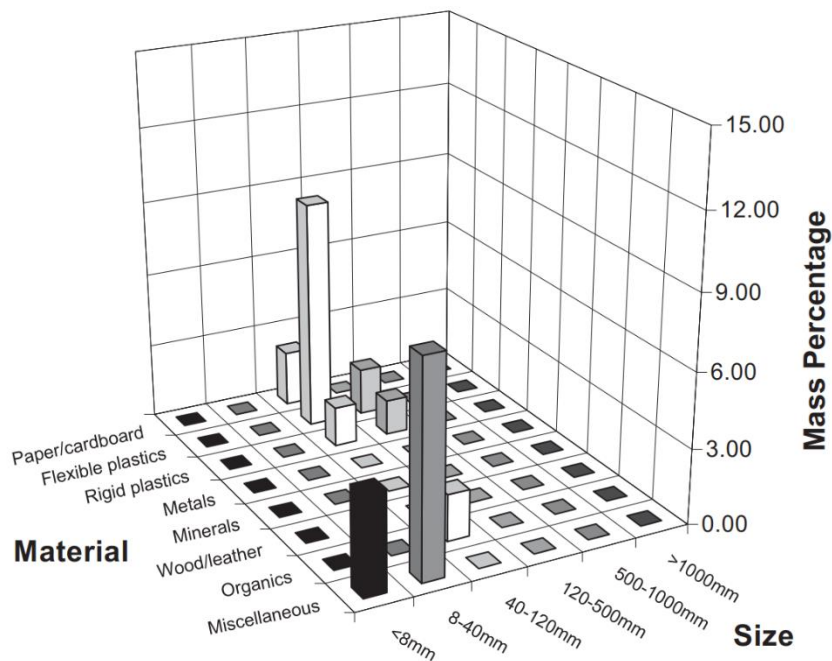
2.6.2 Jätteen koostumus

Jotta tutkimuksista kertynyttä empiiristä testidataa voidaan hyödyntää arvioitaessa jätteen mekaanisia ominaisuuksia, tulee testatun jätteen koostumus tuntea ja raportoida tarkasti. Jätteen koostumuksen luokittelun keskeisin ongelma on, ettei yhtenäistä ja standardisoitua menetelmää ole käytössä. Tämä on tuottanut vaikeuksia luoda empiirisestä datasta johtopäätöksiä tai edes vertailua eri tutkimuksien välillä. Yleensä eri alueiden jätteen koostumuksesta on saatavilla tutkittua tietoa, mutta koska tutkimuksien päämääränä ei ole ollut jätteen mekaanisten ominaisuuksien selvittäminen, eivät niissä raportoidut tiedot ja jakeisiin luokittelut onnistu kuvaamaan mekaanisiin ominaisuuksiin keskeisesti vaikuttavia tekijöitä. Jätettä ei pysty luokittelemaan kuten maa-aineksia, sillä sen partikkelit ovat kokoonpuristuvia, venyviä, maatuovia, aika ja kosteusriippuvaisia, sekä vetolujuutta omaavia. Luokittelun tulee tunnistaa ominaisuudet, jotka vaikuttavat keskeisiin mekaanisiin parametreihin kuten kokoonpuristuvuuteen ja leikkauslujuuteen. On myös huomioitava, että nämä parametrit ovat tiheys, jännitystaso ja orientaatio riippuvaisia. (Zekkos, 2008) Ei ole myöskään juuri mahdollista eristää yhtä ominaisuuksiin vaikuttavaa tekijää vaikuttamatta samalla muihin ominaisuuksiin, joten yhden tekijän vaikutuksien yksiselitteinen tutkiminen on vaikeaa (Langer, 2005).

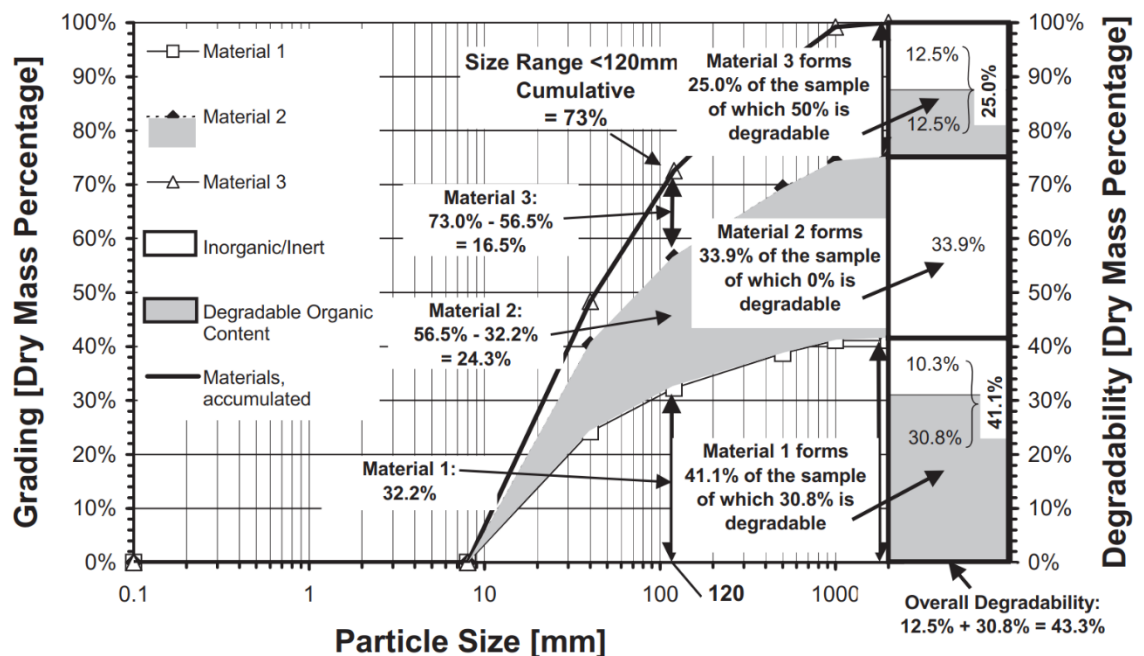
Alan kirjallisuudesta löytyy monia ehdotuksia **luokittelujärjestelmästä**. Tähän työhön löydetty tuorein versio on Zekkosin (2008) julkaisussa esitelty, joka suurimmalta osaltaan pohjautuu Langerin (2005) työhön. Koostumuksen kuvailuun ja jakeisiin luokitteluun tarvittavat keskeisimmät tiedot ovat:

- materiaalityypit; paperi ja pahvi, venyvä muovi, venymätön muovi, kumi, metalli, mineraali, lasi, puu, nahka, tekstiili ja muut määrittelemättömät
- muut määrittelemättömät materiaalit tulee olla < 20 mm
- materiaalien ryhmittely kolmeen muotoon perustuvaan alaluokkaan: kokoonpuristuvat, puristumattomat ja vahvistavat, sekä puristuvuuden ryhmittely kahteen alaluokkaan: korkea puristuvuus ja pieni puristuvuus
- raekokojakauman määrittely materiaalityypittain: < 20 mm, 20 – 40 mm, 40 – 120 mm, 120 – 500 mm, 500 – 1000 mm ja > 1000 mm
- biologisen hajoamispotentiaalnin arviointi
- arvio luokittelun aikariippuvuuden huomioon ottamisen tarpeellisuudesta ja arvio jännitystilan sekä maatumisasteen muutoksista jätteen eri komponentteihin

Huolellisesti tehdyn koostumusluokittelun tulokset voidaan esittää havainnollisesti, kuten seuraavien kuvien 27 ja 28 esimerkeissä. Kuvan 28 raekokojakauman esitystavasta ilmenee myös kolmen eri materiaaliryhmän biologisen hajoamisen potentiaali.

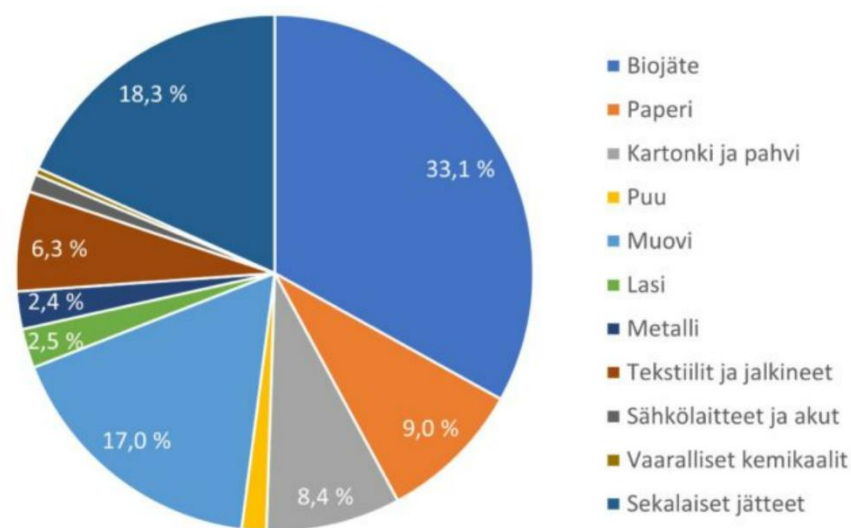


Kuva 27. Esimerkki jätteen kokoonpuristuvien partikkeleiden massaosuuksista (Zekkos, 2008).



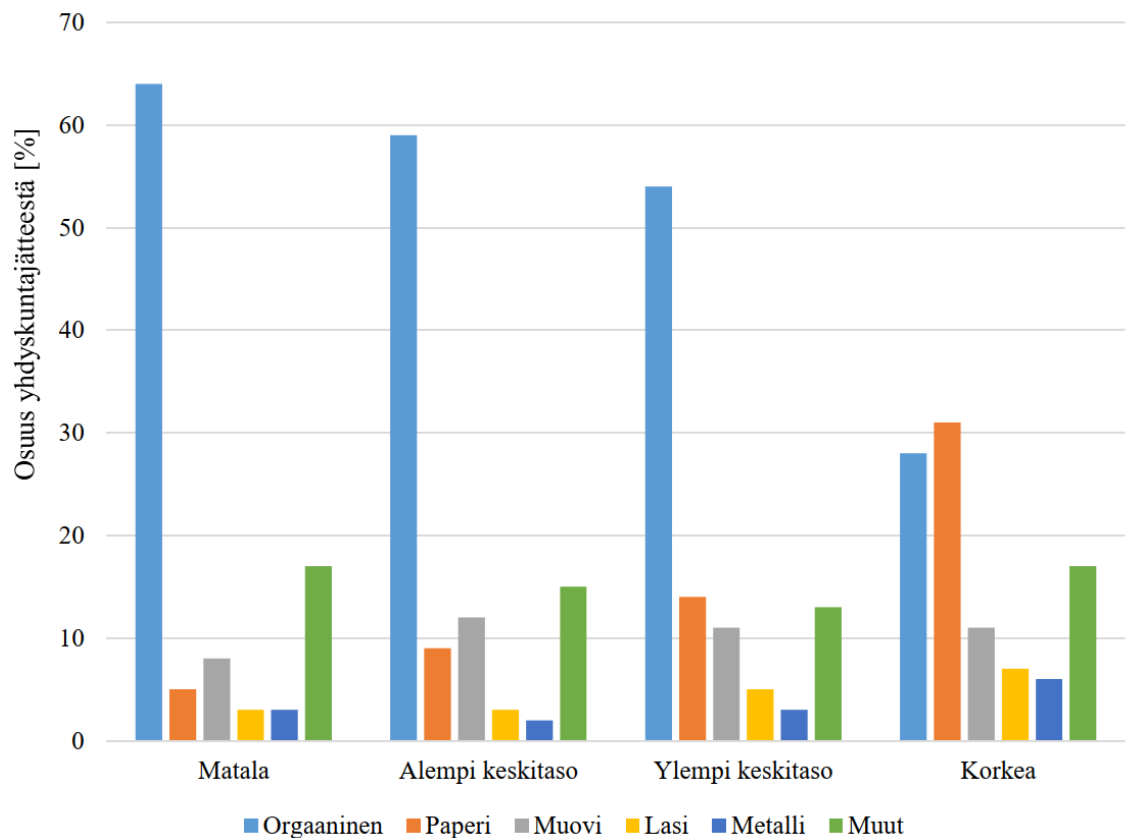
Kuva 28. Esimerkki raekokojakauman esitystavasta (Zekkos, 2008).

On myös hyvä muistaa, että jätteen koostumus on jatkuvassa muutoksessa materiaalien kierrätysasteen parantuessa ja pakkausmateriaalien muuttuessa. Kierrätysasteen parantuminen vähentää biojätteen määrää, jonka voi yleensä olettaa pienentävän bunkkeriin kohdistuvia paineita. Suomessa **lajittelututkimuksia** tekee lähinnä kunnalliset jätealan yritykset. Pohjana tutkimuksille toimii Suomen Kiertovoima ry:n (KIVO) entiseltä nimeltään Jätelaitosyhdistys ry:n (JLY) julkaisema opas sekajätteen koostumustutkimuksiin. Oppaan mukaiset tutkimukset eivät kuitenkaan tähtää mekaanisten ominaisuuksien määrittelyyn. Seuraavassa kuvassa 29 on eri jakeiden keskimääräiset massaosuudet Suomessa.



Kuva 29. Kotitalouksien sekajätteen materiaali-jakeiden massaosuudet Suomessa (KIVO, 2020).

Kansainvälisesti yhdyskuntajätteen määrä ja koostumus korreloi keskimääräisen **tulotason** kanssa. Maailmanlaajuisesti yhdyskuntajätteessä on yli puolet orgaanista jätettä eli ruoka-, puutarha-, puu- ja prosessijätettä. Paperin, kartongin ja pahvin osuus on sitä suurempi mitä korkeampi keskimääräinen tulotaso on, ja korkean tulotason maissa niiden osuus jätteestä on merkittävä, noin 28 % (Roininen, 2018; Hoornweg & Bhada-Tata, 2012). Seuraava kuva 30 havainnollistaa tulotason vaikutusta jätteen koostumukseen.



Kuva 30. Yhdyskuntajätteen koostumus maan keskimääräisen tulotason mukaan (Roininen, 2018; Hoornweg & Bhada-Tata, 2012).

2.6.3 Kitkakulma

Todellisuudessa kaavan (1) mukainen lineaarinen Mohr-Coulomb lujuuskriteeri ei aina täysin vastaa koetuloksia, vaan leikkauslujuuden riippuvuus pystypaineesta tai suhteellisesta muodonmuutoksesta on epälineaarinen. Epälineaarisia lujuuskriteereitä on kehitetty monia. Esimerkiksi Zekkos (2010) esitti leikkauslujuuden epälineaarisen määrittämisen, joka huomioi kitkakulman riippuvuuden pystyjännityksestä. Tämä leikkauslujuuden kaava on kuin kaavassa (1) aiemmin esitetty, mutta kitkakulma [°] on jännitysriippuvainen

$$\varphi_{p_v} = \varphi_0 - \Delta\varphi \cdot \log \frac{p_v}{p_a}, \quad (42)$$

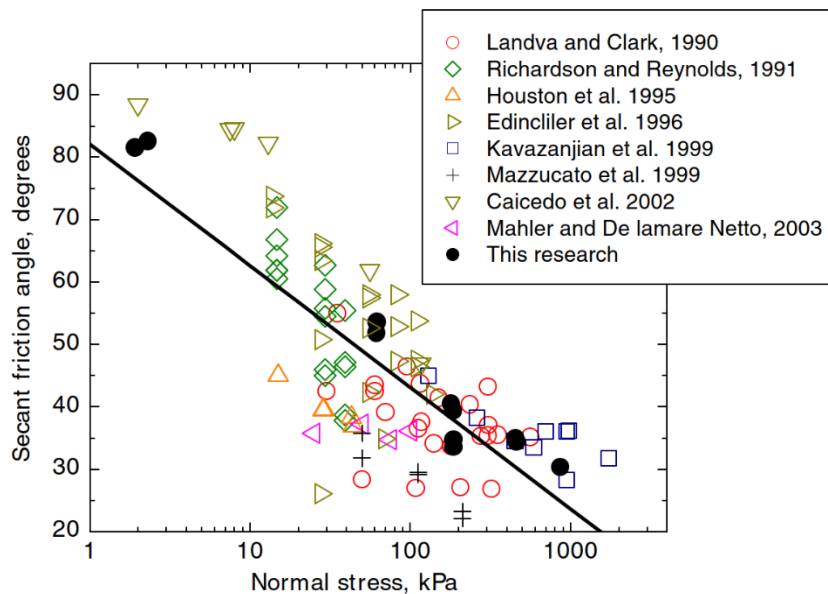
jossa

φ_0 on kitkakulma normaalissa ilmanpaineessa [°],

$\Delta\varphi$ on kitkakulman muutos logaritmisyklisen pystypaineen muutoksesta [°],

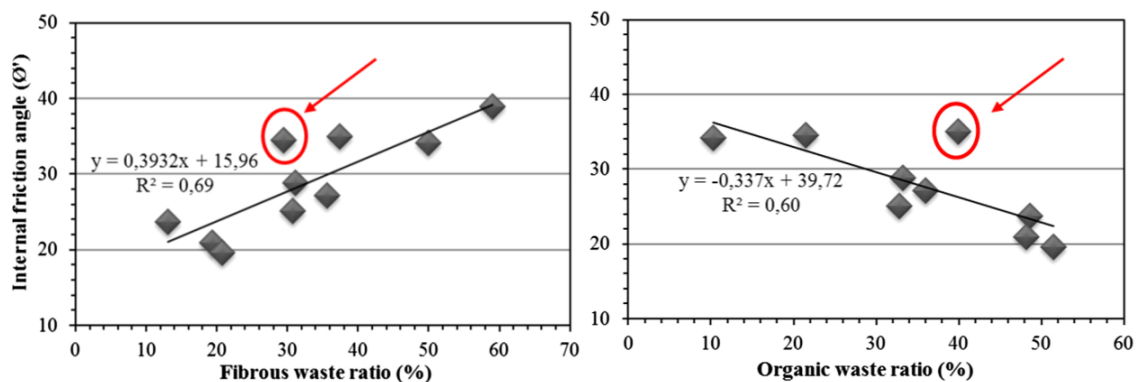
p_a on normaali ilmanpaine 101,3 kPa.

Myös koheesio on jännitustasosta riippuvainen, mutta tätä Zekkosin muokattu Mohr-Coulomb kriteeri ei huomioi. Koheesioin huomioivia malleja on esimerkiksi Bakerin vuonna 2004 esittämä eksponentiaalinen kriteeri (Lu, et al., 2014). Seuraava kuva 31 havainnollistaa kitkakulman riippuvuutta pystyjännityksestä. Pystyjännityksen kasvaessa leikkauslujuus suurenee ja sekantti kitkakulma pienenee.



Kuva 31. Pystypaineen vaikutus kitkakulmaan (Zekkos, et al., 2010).

Kitkakulmaan vaikuttaa myös muut tekijät, kuten esimerkiksi kuituisten materiaalien ja orgaanisten materiaalien osuudet. Yleensä kuituiset materiaalit nostavat ja orgaaniset aineet laskevat kitkakulmaa. Tätä havainnollistaa seuraava kuva 32.

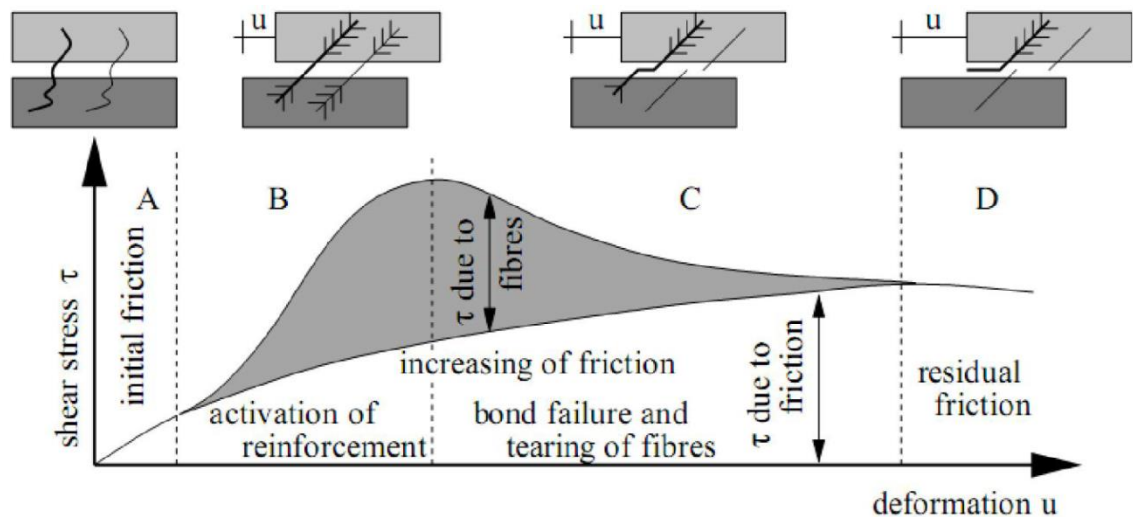


Kuva 32. Kuituisten ja orgaanisten materiaalien vaikutus kitkakulmaan (Pulat & Yukselen-Aksoy, 2017).

2.6.4 Koheesio

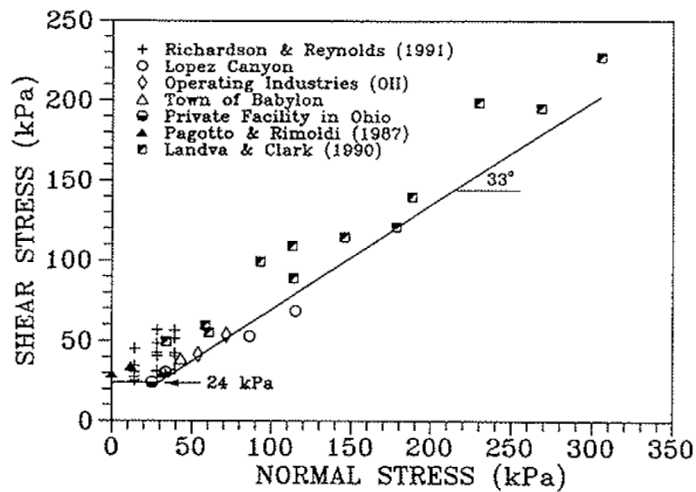
Koheesion voidaan ajatella jakautuvan normaaliin koheesioon ja niin sanottuun **kuitukoheesioon**. Normaali koheesio muodostuu partikkelien välissä olevan veden pintajännityksestä, sähköstaattisista voimista ja dispersiovoimista (Langer, 2005; Kölsch, 1995). Tämän koheesion ajatellaan olevan jännitystasosta riippumaton ja ilmenee kuvan 10 Mohrin ympyrän alussa jännityksien ollessa nolla. Kuitukoheesio puolestaan muodostuu kuitumaisten materiaalien vetolujuudesta ja se aktivoituu muodonmuutoksen kasvaessa. Kuitukoheesio on kitkavoimien tapaan jännitystasosta riippuvainen, sillä suurempi puristusaine parantaa kuitujen tartuntaa.

Seuraava kuva 33 havainnollistaa saksalaisen Kölschin (1996) tohtori tutkielmassa esitettyjä leikkauslujuuden muodostumisvaiheita. Leikkauksen alussa kohdassa A kuituiset materiaalit ovat löysällä ja vain normaali koheesio ja kitkavoimat vaikuttavat. Vaiheessa B kuituisten materiaalien vetolujuus aktivoituu, joka nostaa leikkauslujuutta. Vaiheessa C normaali koheesio ja kitkavoimat saavuttavat ääriarvonsa, sekä kuituisten materiaalien vetolujuus alkaa pienenemään. Kuituiset materiaalit joko katkeavat tai vetäytyvät ulos muusta massasta. Vaiheessa D vain materiaalien välinen kitka on jäänyt jäljelle.



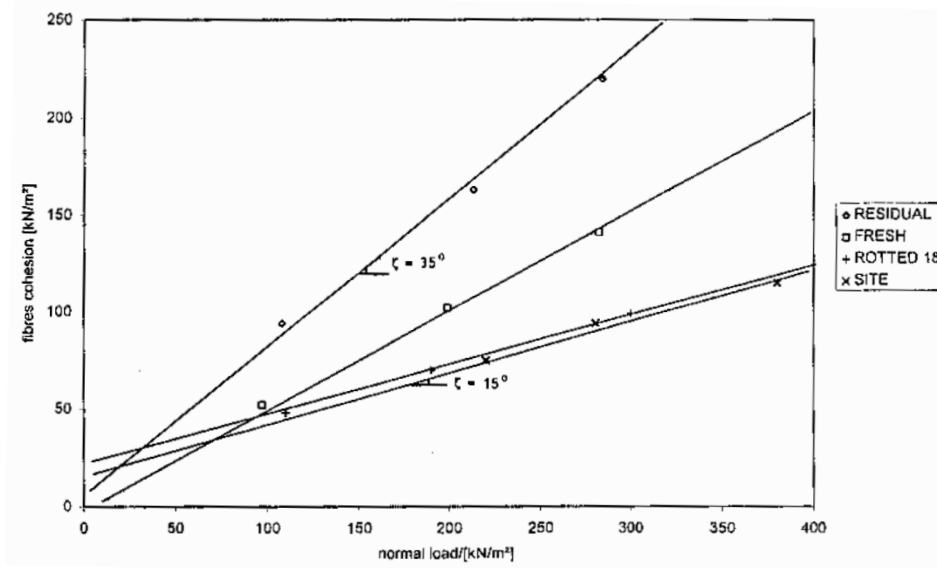
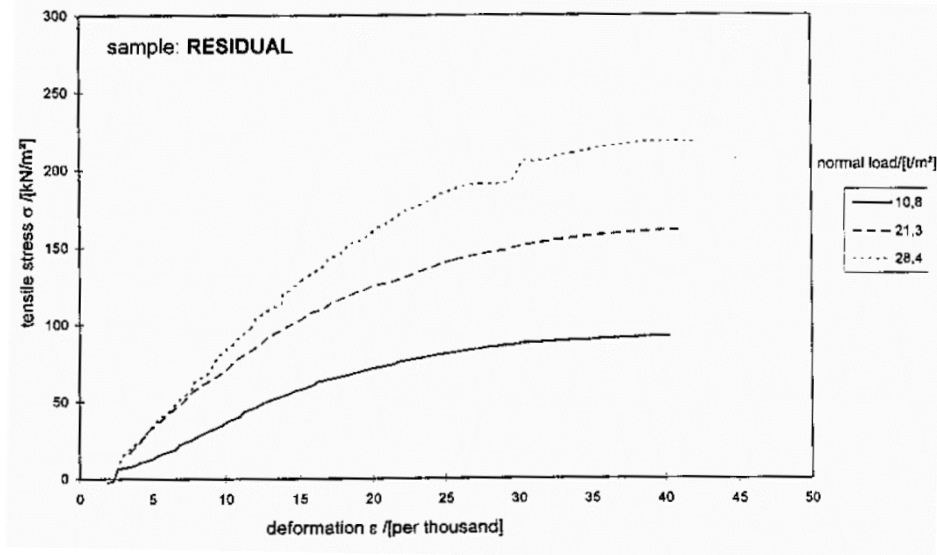
Kuva 33. Leikkauslujuuden muodostumisen eri vaiheet (Shariatmadari, et al., 2011).

Leikkauskoe tuloksista voi tulkita kohdan, jossa pystypaineen pienentäminen ei enää pienennä leikkauslujuutta. Tämä lujuus tulkitaan Mohr-Coulomb murtokriteerin mukaiseksi normaaliksi koheesioksi, kuten seuraava kuva 34 havainnollistaa. Monesti leikkaustestiä ei kuitenkaan ole suoritettu täysin nolla paineella.



Kuva 34. Bi-lineaarinen Mohr-Coulomb materiaalimalli (Kavazanjian, et al., 1995).

Kölsch tutki kuitukoheesion suuruutta eli jätteen vetolujuutta tohtori tutkielmassaan. Hän myös esitti, kuinka vetolujuudesta saadaan laskettua leikkauslujuus (Langer, 2005; Kölsch, 1995). Kuitukoheesio kuitenkin sisältyy ja piiloutuu leikkaustesteissä leikkauslujuuteen, eikä sen suuruutta ole käytännössä juuri tarvetta eritellä, kun käytetään maamekaniikan mukaisia materiaalimalleja. Seuraava kuva 35 havainnollistaa kuitukoheesion riippuvuutta muodonmuutoksesta ja puristusjännityksestä.



Kuva 35. Vetolujuuden eli kuitukoheesion riippuvuus muodonmuutoksesta ja puristusjännityksestä (Kölsch, 1995).

2.6.5 Kosteuspitoisuus

Kosteuspitoisuus mitataan Euroopassa standardin SFS-EN 15934 mukaan punnitsemalla näyte ennen ja jälkeen 16 tunnin uunikuivatuksen 105 °C:ssa. Haihtunut massaosuus on näytteessä olleen veden massa. Kosteuspitoisuus vaikuttaa eniten jätteen tilavuuspainoon.

Tilavuuspaino voidaan määrittää alkuperäisenä märkänä irtotiheytenä (wet bulk density) [kg/m³]

$$\rho_{wet} = \frac{M_s + M_w}{V_T}, \quad (43)$$

jossa M_s on kuivatetun kiintoaineen massa [kg],
 M_w on haihtuneen veden massa [kg],
 V_T on tilavuus [m³]

tai kuivatiheytenä [kg/m³]

$$\rho_{dry} = \frac{M_s}{V_T}. \quad (44)$$

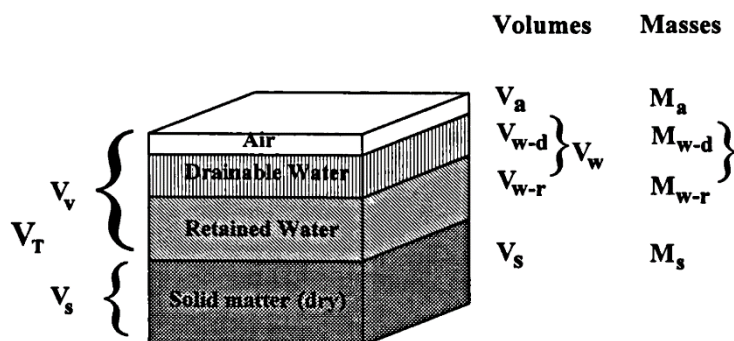
Itse kosteuspitoisuus voidaan määrittää osuutena kuivasta kiintoaineesta

$$WC_{dry} = \frac{M_w}{M_s}. \quad (45)$$

tai osuutena kokonaismassasta

$$WC_{wet} = \frac{M_w}{M_s + M_w}. \quad (46)$$

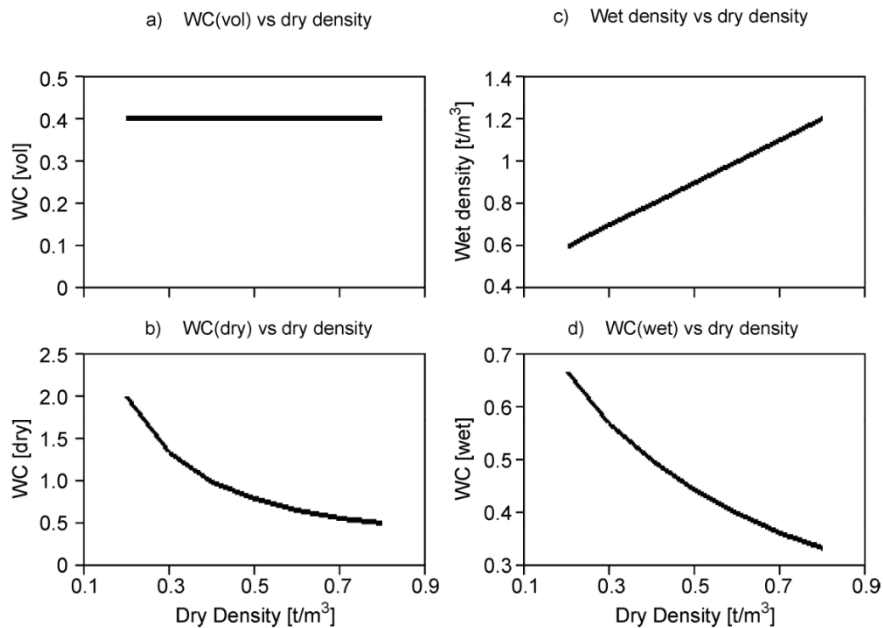
(Beaven, 2000) Seuraava kuva 36 havainnollistaa tilavuuden jakoa eri osuuksiin.



Kuva 36. Jako kuivaan kiintoaineeseen, kiintoaineeseen sitoutuneeseen kosteuteen, vapaaseen huokosveteen ja ilmaan (Beaven, 2000).

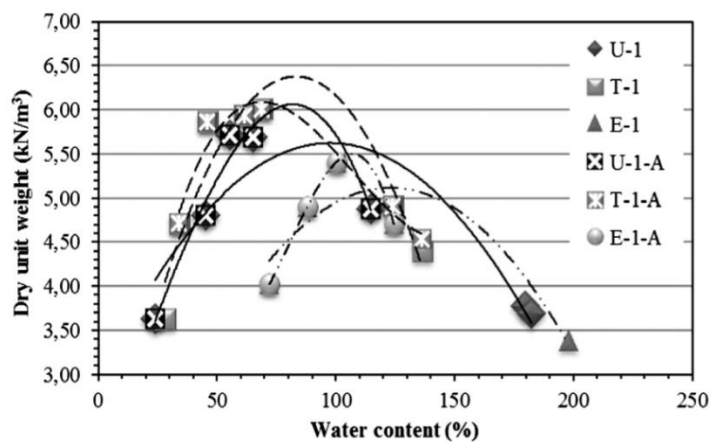
Tiheyttä ja kosteuspitoisuutta voi tarkastella massan sijaan myös tilavuuden ja huokoisuuden avulla, tästä on kuitenkin hyötyä lähinnä vain hydrologisia tarkasteluja tehtäessä. Seuraava kuva 37 havainnollistaa kuivan kiintoainemassan määrän muutoksen vaikutusta kosteuteen. Kuvan kohdassa A kosteuspitoisuus tilavuuden suhteen pysyy vakiona jätteen kuivatiheyden muuttuessa, koska se määritetään kokonaistilavuuden suhteen. Kohdassa B kuiva kosteusprosentti on suhteessa kuivan kiintoaineen massaan, joten se muuttuu kuivan kiintoaineen määrän muuttuessa. Kohdassa C märkätiheys kasvaa lineaarisesti, kun kuivatiheys kasvaa, kuten kaavoista 45 ja 46 on nähtävissä.

Kohdan D märkä kosteusprosentti muodostaa käyrän sekä kuivatiheyden ja märkätiheyden suhteen.



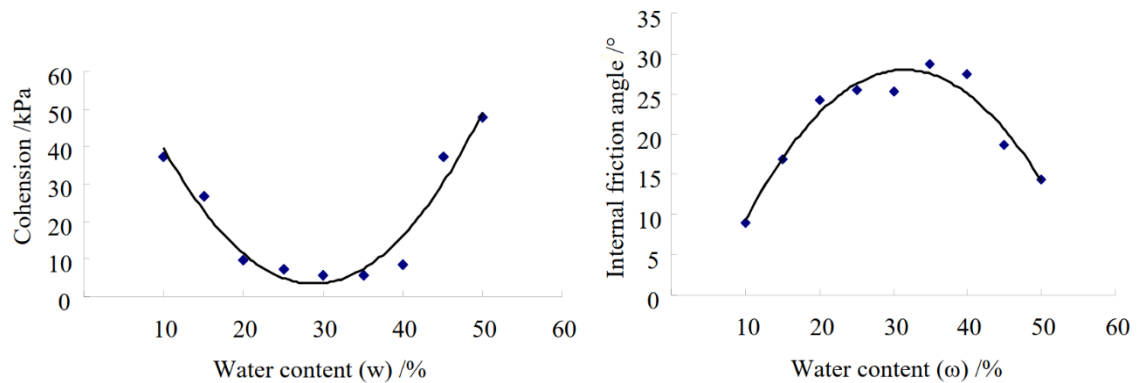
Kuva 37. Kohta a) kosteustilavuus b) kuiva kosteusprosentti c) märkätiheys d) märkä kosteusprosentti jätteen kuivatiheyden muuttuessa (Beaven, 2000).

Kosteuspitoisuuden kasvu heikentää kuitukoheesiota tuottavia papereita ja pahveja, tekee muoveista liukkaampia ja nostaa tilavuuspainoa. Suomessa sekajätteen kosteuden massa kokonaismassan suhteen vaihtelee 25 ja 45 % välillä (Huttunen, 2019). Seuraava kuva 38 havainnollistaa niin sanotun kuivan kosteusprosentin vaikutusta kuivatiheyteen. Kuiva kosteuspitoisuus voi olla yli 100 %, sillä veden massa voi ylittää kuivan kiintoaineen massan. Jos veden massa on suurempi kuin kiintoaineiden massa ja jos veden osuus pienentää kiintoaineen osuutta, käy jätteen kuivatiheys laskemaan.



Kuva 38. Kosteuspitoisuuden vaikutus tilavuuspainoon (Pulat & Yukselen-Aksoy, 2017).

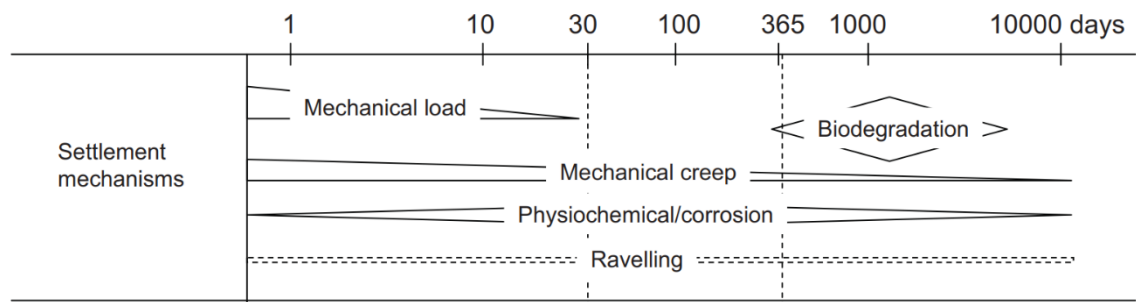
Kosteuspitoisuudella on myös merkittävä vaikutus jätteen **lujuusparametreihin**, kuten seuraavassa kuvassa 39 havainnollistetaan.



Kuva 39. Esimerkki kosteuspitoisuuden vaikutuksesta koheesioon ja kitkakulmaan (Bingjian, et al., 2013).

2.6.6 Kokoonpuristuvuus

Jäte on hyvin kokoonpuristuvaa, joten sen tilavuuspaino on riippuvainen siihen kohdistuvasta pystypaineesta. Kaatopaikkaläjityksessä kokonaispainumat ovat 25 %:sta 75 %:iin alkuperäisestä korkeudesta. Jätteen painumaan, kuten sen muihinkin ominaisuuksiin, vaikuttaa sen koostumuksesta riippuen moni tekijä. Kokoon puristumaa pienentää suuri hienoaineksen < 20 mm osuus, sekä suuri alkutiheys ja toisaalta puristumaa kasvattaa suuri paperin ja muovin määrä. (Zekkos, 2017) Jätteen jäykkyys on myös lämpötila riippuvaista ja lämpötilan nousu voi ainakin kaksinkertaistaa kokoonpuristuman (Portelinha, et al., 2020). Painuma voidaan jaotella eri mekanismeihin ja kuvata niiden vaikutus aikajanelle, kuten seuraavassa kuvassa 40 esitetään. Yleisesti nämä ovat alkupainuma, mekaaninen viruma ja biologisesta hajoamisesta aiheutuva painuma. Pystykuormasta aiheutuvan alkupainuman katsotaan yleisesti päättyvän noin kuukaudessa ja mädäntymiseen liittyvän painuman katsotaan nousevan määrääväksi noin vuoden kuluessa. (Zekkos, 2008) Jätebunkkerissa vaikuttaa lähinnä vain mekaanista kuormasta riippuvaista alkupainumaa, joten aikariippuvaiset biologiseen hajoamiseen ja virumisen kaltaisiin ilmiöihin liittyvät vaikutukset jätetään tässä yhteydessä huomiotta.



Kuva 40. Painumaan vaikuttavien tekijöiden aikajana (Zekkos, 2008).

Kirjallisuudessa jätteen kokoonpuristuvuutta eli **jäykkyyttä** mekaanisen alkupainuman aikana kuvataan erilaisilla yksiulotteisilla kimmokertoimilla, toisin sanottuna kokoonpuristuvuusmoduuleilla. Vanhin näistä on niin sanottu kokoonpuristuvuus indeksi C_C (compression index), joka kuvaa kulmakerrointa huokossuhteen ja logaritmisen pystyjännityksen välillä. Kokoonpuristuvuusindeksi [-]

$$C_C = \frac{de}{\log\left(\frac{p_{v.0} + dp_v}{p_{v.0}}\right)}, \quad (47)$$

jossa de on huokossuhteen muutos,
 $p_{v.0}$ on pystypaine alussa,
 dp_v on pystypaineen muutos.

Kokoonpuristuvuusindeksiä ei kuitenkaan käytetä, sillä jätteen huokossuhteen määrittäminen on vaikeampaa kuin maa-aineksille. Jättemassan huokossuhde on vaikea määrittää, sillä jätteen sisäiset partikkelit eivät ole kokoon puristumattomia. Tämä voidaan välttää käyttämällä niin sanottua kokoonpuristuvuussuhdetta (compression ratio) [-]

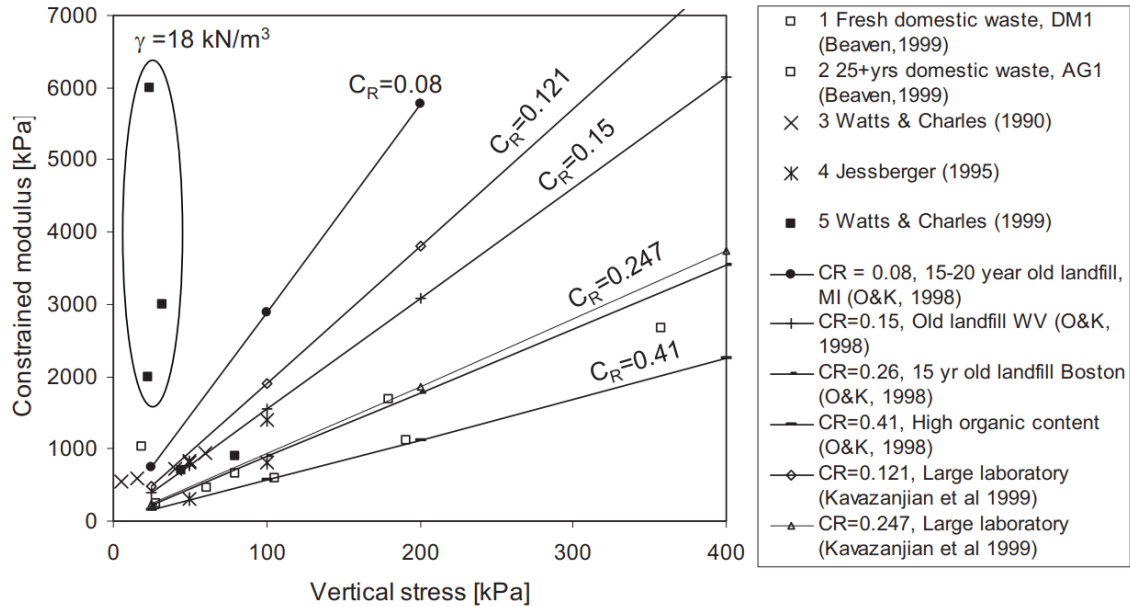
$$C_R = \frac{d\varepsilon}{\log\left(\frac{p_{v.0} + dp_v}{p_{v.0}}\right)}, \quad (48)$$

jossa $d\varepsilon$ on suhteellisen puristuman muutos.

Kokoonpuristuvuussuhde kuvaa indeksin tapaan kulmakerrointa suhteellisen puristuman muutoksen ja logaritmisen pystyjännityksen välillä. Kolmas tapa kuvata jätteen jäykkyyttä on niin sanottu yksiulotteinen rajoitettu puristuvuusmoduuli (constrained modulus) [N/m²]

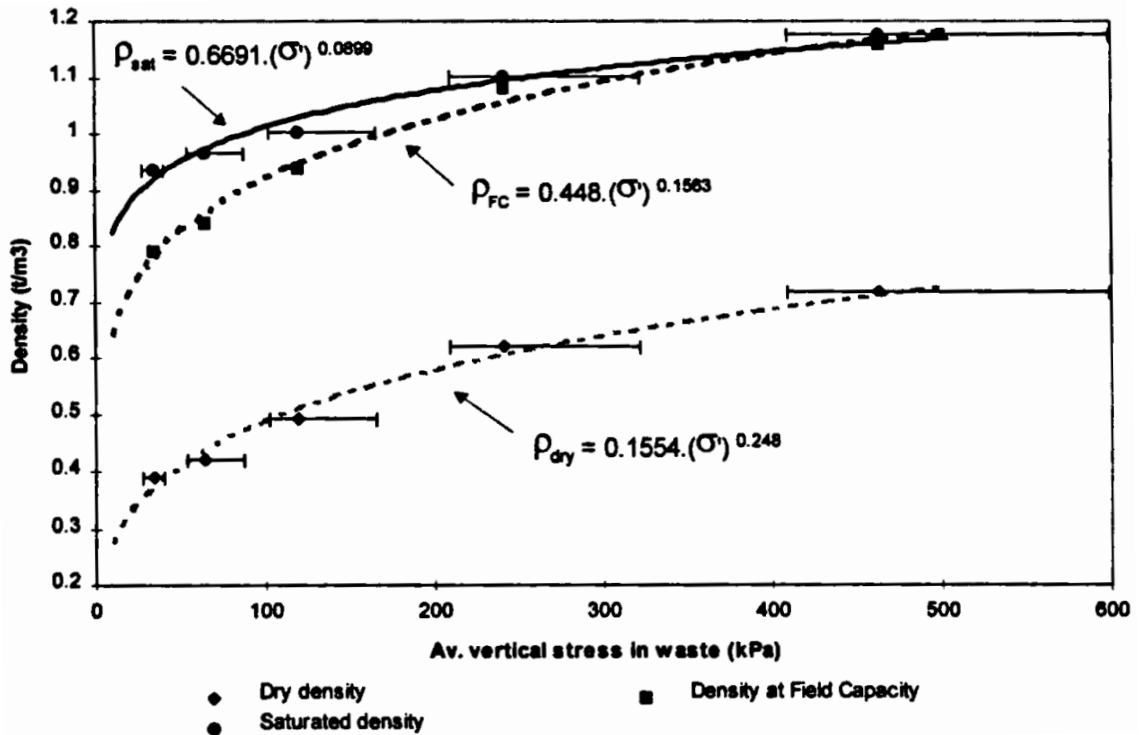
$$D = \frac{dp_v}{d\varepsilon}. \quad (49)$$

Moduulien määrittäminen helpottaa lähinnä eri tutkimuksissa käytettyjen jätteiden puristuvuuden vertailua, kuten seuraavassa kuvassa 41 on tehty.



Kuva 41. Jätteen puristusjäykkyyksiä puristusmoduulin avulla esitettynä (Zekkos, 2008).

Jätteen **tiheys** eri täyttösyvyyksillä eli pystykuormalla on käytännössä määritettävä koetuloksien perusteella. Esimerkiksi Beaven (2000) on tutkimuksessaan muodostanut käyränsovituksella jätteen tiheyttä pystypaineen avulla kuvaavat funktiot, kuten seuraavassa kuvassa 42 havainnollistetaan. Kuvassa kuivatiheys edustaa jätettä ennen kastumista, tiheys kenttäkapasiteetissa edustaa kosteuspitoisuutta sateelle alttiilla kaatopaikalla ja kolmas käyrä edustaa täysin vedellä kyllästettyä näytettä.



Kuva 42. Esimerkki jätteen tiheyden ja pystyjännityksen välisestä suhteesta, sekä käyrän sovittamisesta koetuloksiin (Beaven, 2000).

Jätteen omapainosta aiheutuva tiivistyminen ja tilavuuspainon nousu saadaan johdettua differentiaalisen alkion tasapainosta.

$$dp_v = dm \cdot g = \gamma(p_v) \cdot dz \cdot g, \quad (50)$$

jossa dm on alkion massan [kg/m³],
 g on putoamiskiikkyvyys [m/s²],
 $\gamma(p_v)$ on jätteen tilavuuspaino [kg/m³] pystypaineen funktiona,
 dz on alkion korkeus [m].

Integroimalla vasen puoli pystypaineen ja oikea puoli täyttösyvyyden z suhteen

$$\int_0^{p_v} \frac{1}{g \cdot \gamma(p_v)} dp_v = \int_0^z dz = z, \quad (51)$$

nähdään yhteys tilavuuspainon ja täyttösyvyyden välillä. Sijoittamalla tähän, esimerkiksi edellisen kuvan 42, kuivan jätteen käyränsovituksesta saatu tilavuuspainon yhtälö ja suorittamalla integrointi saadaan

$$z = \int_0^{p_v} \frac{1}{g \cdot 0.1554 \cdot p_v^{0.248}} dp_v = \frac{8.5572 \cdot p_v^{0.752}}{g} \quad (52)$$

ja tästä $p_v = (0.1169 \cdot g \cdot z)^{1.3298}$. (53)

Kaava (53) antaa nyt **pystypaineen** kaikilla korkeuksilla. Sijoittamalla pystypaineet tilavuuspainon yhtälöön saadaan piirrettyä tiheys kaikilla täyttösvyyyksillä. (Beaven, 2000) Pystypaineen kehitykseen vaikuttaa alku- eli irtotiheys. Savolaisen sekajätteen keskimääräinen tilavuuspaino jäteastioissa ennen kuljetusta on noin 94 kg/m³ (Haikonen, 2021). Polttolaitoksille jäte saapuu kauempaa siirtokuormilla ja lähempää jäteautoilla. Laitokselle siirtokuormilla saapuessaan on jäte jo tiivistynyt ja sen keskimääräinen tilavuuspaino on noin 285 kg/m³ (Lahtonen, 2018).

2.6.7 Poimintoja tutkimuksista

Lähtökohtaisesti jätteenlaatu on alue- ja laitoskohtainen ja sitä myötä sen mekaaniset ominaisuudet olisi selvitettävä tapauskohtaisesti. Opinnäytetyöhön ei löytynyt tutkimuksia jätteen ominaisuuksista jätebunkkerin suunnittelun näkökulmasta. Moderneja jätteenpolttolaitoksia on rakennettu noin kahden vuosikymmenen ajan, joten alan kirjallisuuden keskittyminen pelkkään kaatopaikkatekniikkaan yllättää. Haku tosin rajoittui suomen ja englannin kielelle. Tähän kappaleeseen on poimittu muutamia tutkimuksia, joiden mukaan suomalaisen sekajätteen ominaisuuksia voi pyrkiä arvioimaan sekä tutkimuksia, jotka muutoin valottavat alan kehitystä.

Turkkilaisessa tutkimuksessa vuodelta 2017 tutkittiin kotitalousjätteen leikkausjännitys käyttäytymiseen vaikuttavia tekijöitä. Tutkimuksessa käytettiin kolmea keskiarvoistettua jätteen koostumusta, joilla pyrittiin kuvamaan tyypillistä turkkilaista (T-1), eurooppalaista (E-1) ja USA: laista (U-1) kotitalousjätettä. Testimateriaalit muodostettiin synteettisesti tilastoitujen jae jakautumien perusteella eli jäte koostettiin puhtaista materiaaleista kaatopaikalta otettujen todellisten näytteiden sijaan. Koostumukset on esitetty seuraavassa taulukossa 3. Leikkauskokeet tehtiin suoranleikkauksen koemenetelmällä, jonka koko oli 30·30·15 cm. Suurin partikkelikoko oli 25,4 mm ja leikkausjännityksen arvot määritettiin 20 % muodonmuutostasolla.

Taulukko 3. Euroopan, Turkin ja USA:n jätteen keskiarvoiset koostumukset (Pulat & Yukselen-Aksoy, 2017).

Composition ratios of the synthetic MSWs for U-1, E-1 and T-1.

Material	Sieve aperture (mm)	Synthetic MSW components		
		Weight %		
		E-1	T-1	U-1
<i>Organic</i>				
Kitchen waste	4.75	17.5	22.5	16
Wood shavings	2.00	6	4	7
Cardboard pieces ^a	12.50	7	3	6
Garden waste	4.75	17.5	22.5	16
Textile ^a	25.40	3	5	5
Plastic particles ^a	4.75	8	10	12
<i>Inorganic</i>				
Metal dust-chips	6.30	5	2	9
Ash	0.425	0	15	0
Granular glass	2.00	6	4	7
Soil	0.425	2	0	0

Seuraavassa taulukossa 4 esitetään, minkä materiaalin määrän vaikutusta milläkin muokatulla koostumuksella on tutkittu.

Taulukko 4. Muokattujen koostumusten ominaisuudet (Pulat & Yukselen-Aksoy, 2017).

The properties of the modified compositions.

Composition	Sample property
E-1-1	Paper-cardboard was reduced from 35% to 10%
E-1-2	Organic waste was reduced from 35% to 10%
T-1-1	Ash waste (15%) was removed
T-1-2	Organic waste was reduced from 45% to 20%
U-1-1	Plastic waste (12%) was removed
U-1-2	Metal waste (9%) was removed

Seuraavassa taulukossa 5 esitetään kaikkien testien tulokset. Kirjaimella A viitataan ikäännytettyyn materiaaliin. Taulukoon 6 on koottu kunkin muutoksen vaikutus jätteen kitkakulmaan ja koheesioon. (Pulat & Yukselen-Aksoy, 2017)

Taulukko 5. Leikkauslujuus parametrien tulokset (Pulat & Yukselen-Aksoy, 2017).

Effective shear strength parameters of MSW samples.

No	Sample	Shear strength parameters	
		ϕ' (°)	c' (kPa)
1	E-1	27.1	40.3
2	E-1-A	29.4	36.4
3	E-1-1	23.7	40.5
4	E-1-2	34.2	43.3
5	T-1	20.9	49.6
6	T-1-A	34.6	32.8
7	T-1-1	19.6	41.2
8	T-1-2	34.5	33.3
9	U-1	25.1	32.6
10	U-1-A	36.8	32.0
11	U-1-1	35.0	35.0
12	U-1-2	28.8	37.0

Taulukko 6. Muutoksien vaikutukset leikkausparametreihin.

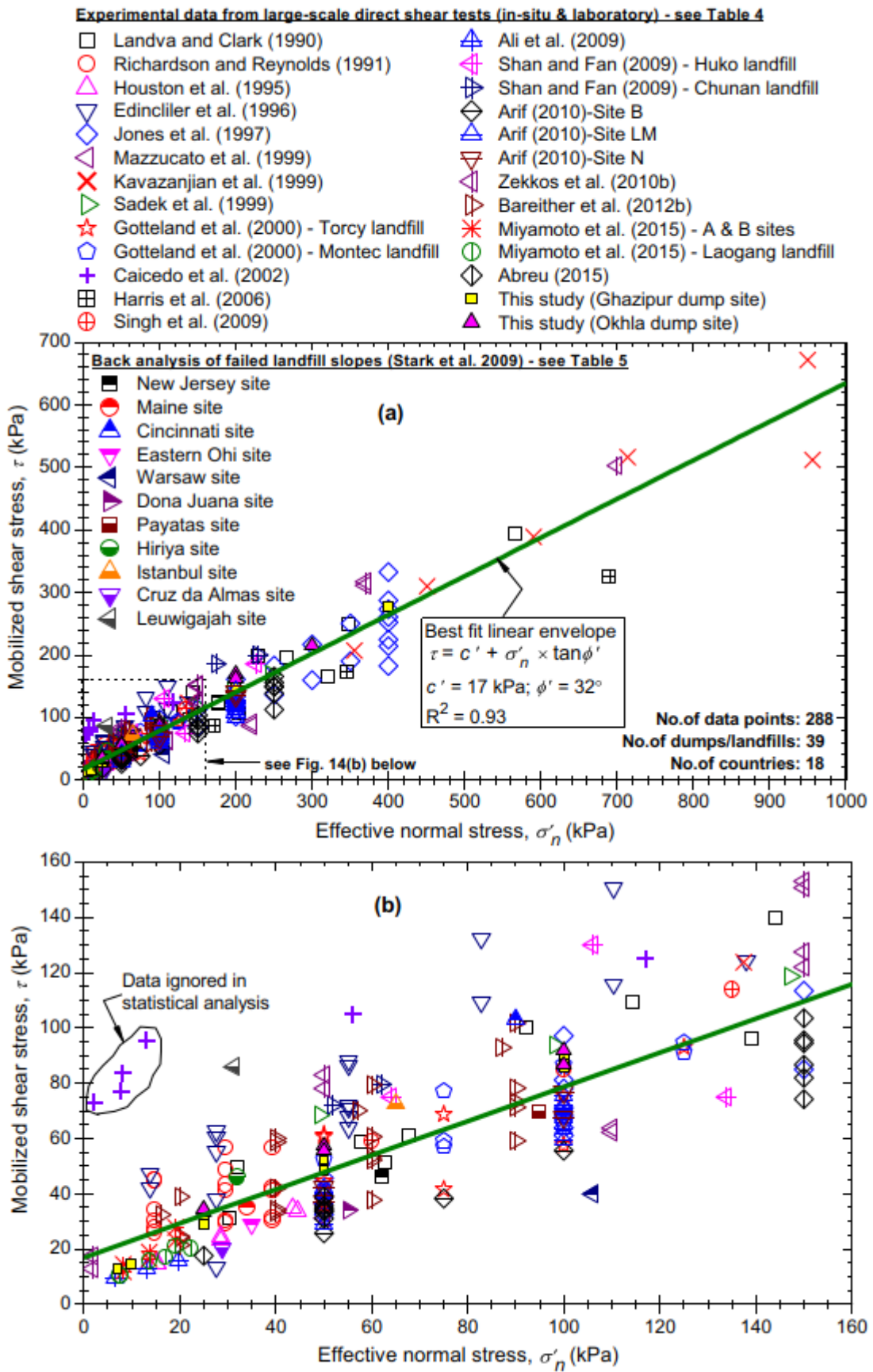
	Määrän muutos %	Kitkakulma deg	Koheesio kPa
Eurooppa			
Paperit ja pahvit	-25	-3,4	0
Orgaaniset	-25	+7,1	+3
Ikääntyminen + 1 v		+2,3	-3,9
Turkki			
Tuhkat kokonaan pois	-15	-1,3	-8,4
Orgaaniset	-25	+13,6	-16,3
Ikääntyminen + 1 v		+13,7	-16,8
USA			
Muovit kokonaan pois	-12	+9,9	+2,5
Metallit kokonaan pois	-9	+3,7	+4,4
Ikääntyminen + 1 v		+11,7	-0,6

Tuloksien mukaan paperien ja pahvien poistaminen ei muuttanut koheesiota, vaikka niiden yleisesti katsotaan tuottavan niin sanottua kuitukoheesiota vetolujuuden ansiosta. Vetolujuuteen vaikuttaa kosteus ja tässä tutkimuksessa näytteet olivat kasteltuja. Paperin ja pahvin poistaminen myös odotetusti pienensi kitkakulmaa. Orgaanisen aineen vähentäminen odotetusti nosti kitkakulmaa. Toisessa näytteistä orgaanisen aineen vähentäminen odotetusti laski koheesiota, kun sitten toisessa, se nousi hieman. Nouseminen voi liittyä parantuneeseen kuitukoheesioon tai muutoin mittaus epätarkkuuteen. Liukkaiden muovien poistaminen nosti kitkakulmaa. Toisaalta, jos jäte olisi kuivempaa, voisi muovien vaikutus olla päinvastainen. Hienoaineiden eli tuhkien poistaminen madalsi koheesiota. Vuoden ikääntyminen nosti kitkakulmaa ja vaikutus oli

sitä suurempi, mitä enemmän mukana oli orgaanisia aineita. Toisaalta ikääntyminen voi huomattavasti laskea kuitukoheesiota, kun esimerkiksi pahvien vetolujuus häviää. Puolestaan joissain tutkimuksissa ikääntyminen on nostanut kitkakulmaa ja laskenut koheesiota (Shariatmadari, et al., 2014).

Turkkilaisen tutkimuksen tuloksista voi karkeasti arvioida, että **suomalaisella** sekajätteellä, jossa orgaanisten aineiden määrä on noin 30 % käytettyä eurooppalaista keskiarvoa matalampi, olisi kitkakulma noin 35 astetta ja koheesio noin 40 kPa. Jos huomioidaan paperien ja pahvien 10 % suurempi määrä Suomessa, voidaan kitkakulmaa nostaa vielä noin asteen verran.

Vuonna 2016 Intiassa tehdyssä tutkimuksessa pyrittiin muodostamaan empiiriset kategoriset funktiot kotitalousjätteen leikkauslujuudesta. Kategoriat pyrittiin jakamaan jätteen iän, eri jakeiden määrän ja mittaustekniikan perusteella. Tutkimuksessa käytiin läpi 277 jätteelle tehtyä leikkauslujuustestiä 18 eri maasta. Seuraavassa kuvassa 43 esitetään kerättyjen tutkimusten leikkauslujuustulokset. Kaiken datan keskimääräinen kitkakulma oli 32 astetta. Koheesioksi ilman pystypainetta saatiin 17 kPa. Tämän arvellaan osaltaan selittävän miksi kaatopaikoilla nähdään jopa 5 metrisiä tukemattomia ja kuukausia tai jopa vuosia stabiileina pysyviä pystyseinämiä.



Kuva 43. Vanhoista tutkimuksista koottua leikkauslujuus dataa (Ramaiah, et al., 2017).

Empiiristen kategoristen funktioiden muodostamisen ongelmaksi nousi, että tutkimusartikkeleissa ei ole tarpeeksi tarkkoja tietoja vaikuttavista tekijöistä, kuten esimerkiksi jätteen iästä ja koostumuksesta. Näin ollen kontekstuaalisia kategorioita leikkauslujuuden arvioimiseksi ei kyseissä tutkimuksissa pystytty muodostamaan. Tämän myös ajateltiin olevan syynä, miksi aikaisemmissa tutkimuksissa on raportoitu kaikki tulosdata sen sijaan, että olisi pyritty muodostamaan funktiota, joilla arvioida eri kategorioiden leikkauslujuuksia eri muuttujien suhteen. (Ramaiah, et al., 2017)

Iranilaisessa tutkimuksessa vuodelta 2018 mallinnettiin jätteen koostumuksen vaikutusta sen mekaanisiin ominaisuuksiin matemaattisilla neuroverkoilla. Neuroverkolle opetetaan halutut syy-seuraussuhteet malliaineistosta, kuten tässä tapauksessa jätteen koostumuksesta ja sitä vastaavista lujuusparametreistä. Tämän jälkeen neuroverkolla voidaan tuottaa jätteen leikkauslujuusparametrit sen koostumustiedon perusteella, tekemättä käytännön testejä parametrien selvittämiseksi. Tutkimuksen havaintona oli, että neuroverkkojen hyödyntäminen on yksi keino vähentää testaustarvetta ja arvioida lujuusominaisuudet suoraan koostumuksesta. Jotta neuroverkko toimii, tarvitsee se laajan oppimisaineiston, jota ei ilman kattavia ja tarkasti raportoituja käytännöntestejä ole olemassa. (Falamaki & Shahin, 2018)

2.7 Johtopäätökset jätteen aiheuttamien painekuormien määrittämisestä

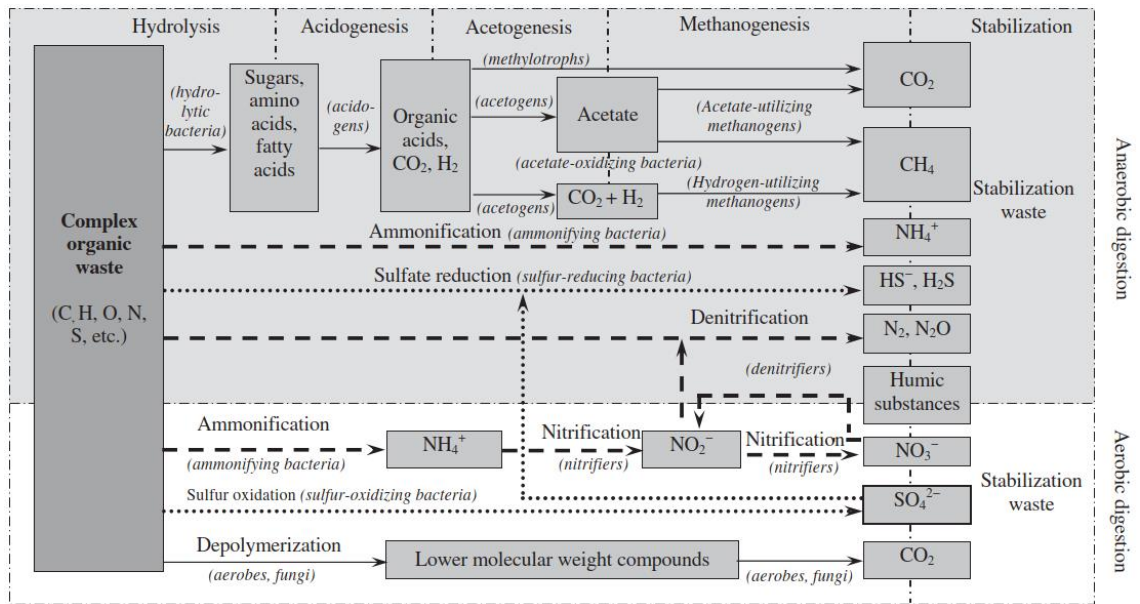
Jätteen ominaisuuksien monimuotoisuuden ja alueellisen vaihtelun vuoksi ei pelkkään kirjallisuuskatsaukseen perustuen voi tehdä luotettavia mekaanisten ominaisuuksien määrittelyitä. Alan tutkimus keskittyy jätteeseen yksinomaan kaatopaikkatekniikan näkökulmasta. Tällöin tutkimuksien lähtökohdat ja tavoitteet eivät vastaa tilannetta jätebunkkereissa. Kaatopaikka kontekstissa ei esimerkiksi juuri ole tarvetta käsitellä tuoreen sateelta suojatun jätteen ominaisuuksia. Ainakin jätteen leikkauslujuus, vetolujuus, kokoonpuristuvuus, kitkakulma, koheesio ja tilavuuspaino tulisi määrittää kokeellisesti. Jätteen ominaisuudet poikkeavat maa-aineksista ja niin sanotuista kiintoaineista ainakin vetolujuuden osalta sekä parametrien voimakkaan ulkoisten tekijöiden riippuvuuden osalta. Käytettävän materiaalimallin tulisi pystyä huomioimaan nämä riippuvuudet. Kokeita varten tulisi rakentaa jätteen partikkelikokoon nähden tarpeeksi suuret testilaitteet. Kokeissa tulisi huomioida ainakin koostumuksen ja kosteuspitoisuuden vaihteluväli, jotta ominaisuuksien ääriarvot löytyvät. Jätteen testausmenetelmät ja koostumustutkimuksien suoritustapa tulisi standardisoida. Suomen

Kiertovoima ry:n Opas Sekajätteen Koostumustutkimuksiin tulisi päivittää siten, että myös jätteen mekaanisiin ja lämpötekniisiin ominaisuuksiin vaikuttavista tekijöistä kerätään tarkempaa tietoa. Mekaanisten ominaisuuksien tutkimisen jälkeen tulisi bunkkerin paineet mallintaa esimerkiksi Bentley:n Plaxis ohjelmaa hyödyntäen. Numeerisen analyysiin tuloksia tulisi verrata Siilostandardin mukaisiin laskelmiin sen soveltuvuuden määrittämiseksi. Myös geoteknisillä maanpaineen laskentamenetelmillä saatavia paineita tulisi verrata. Kun ominaisuudet eivät perustu paikallisiin kokeellisiin tuloksiin ovat lähtöarvot aina konservatiivisia. Tuoreen ja kuivan jätteen luonnollinen kitkakulma on todennäköisesti nykyisiä konservatiivisia arvioita paljon suurempi. Kuten kuvasta 6 nähdään, asettuu jätekasa miltei pystysuoraksi seinämäksi. Jätteen aiheuttamat paineet ovat bunkkerin määräävimmit kuormat, joten lähtötietojen tarkennus näkyisi suoraan kustannuksissa. Yksi jätebunkkeri on noin 5 miljoonan euron investointi, joten hyöty tarkemmasta tutkimuksesta on ilmeinen.

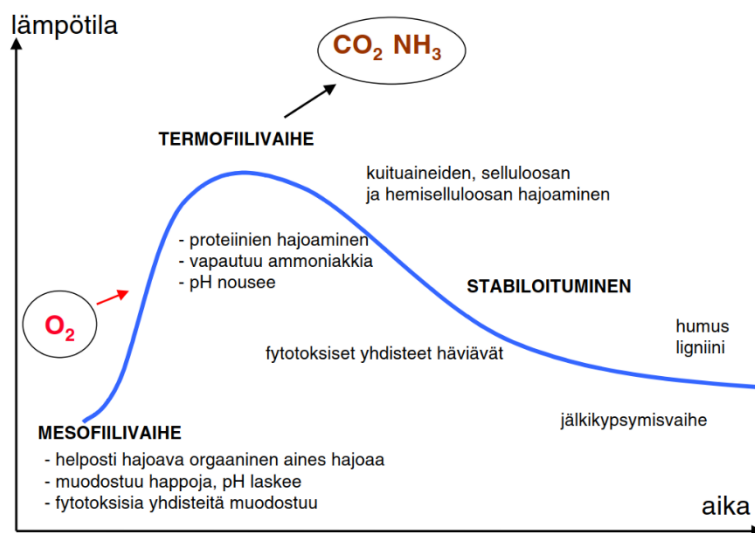
3 JÄTTEEN AIHEUTTAMAT LÄMPÖTILAKUORMAT

Jätteen orgaanisen osuuden lämmöntuotto on moninaisten biologisten ja kemiallisten lämpöä vapauttavien eli eksotermisten hajoamisreaktioiden summa. Hajoaminen voi tapahtua joko hapen läsnä ollessa aerobisissa olosuhteissa tai hapettomassa tilassa anaerobisissa olosuhteissa. Hapellisissa olosuhteissa hajoaminen on nopeaa ja voimakkaasti lämpöä tuottavaa. Aerobinen hajoaminen tunnetaan paremmin kompostointina. Kompostoinnissa mikrobit hajottavat orgaanisen aineen pääasiassa humukseksi, vedeksi, hiilidioksidiksi, ammoniakiksi ja lämmöksi (Sang, et al., 2012). Anaerobisissa eli hapettomissa olosuhteissa hajoaminen tapahtuu eri prosessien kautta kuin aerobisissa olosuhteissa. Mädätyksenä tunnettu anaerobinen hajoaminen vapauttaa vähemmän lämpöä, sillä se toimii ilman ulkoista elektronin vastaanottajaa, kuten happea, nitraattia tai sulfaattia. Tämän ansiosta hajoamistuotteet säilyttävät hajoavan aineksen hapettumistilan, jolloin energia säilyy hajoamistuotteissa, eikä vapaudu lämpönä. Anaerobisen hajoamisketjun päätteeksi saadaan tuotettua energiatiheää biokaasua.

Kaatopaikoilla jäte tiivistyy uuden jätteen alle ja hajoaminen kuluttaa saatavilla olevan hapen, joten prosessi siirtyy melko nopeasti anaerobiseen tilaan. Alan tutkimus keskittyy pääosin tämän kaatopaikkojen luonteen ja bioreaktoreissa tuotettavan biokaasun takia anaerobisiin hajoamisketjuihin. Jossain tapauksissa käsitellään kaatopaikkajätteen aerobista hajoamisketjua. Näissä tapauksissa tavoitteena on yleensä vähentää kaatopaikan metaani päästöjä johtamalla happea jätekasaan ja siirtämällä kaatopaikka aerobiseen hajoamistilaan. Jätebunkkerissa jäte on tuoretta ja sitä sekoitetaan jatkuvasti polttoaineen tasalaatuisuuden takia. Bunkkerissa jätteen lämmöntuotto tapahtuu siis pääosin **aerobisessa** tilassa, johon sekajätettä käsittelevässä alan kirjallisuudessa harvoin keskitytään. Orgaanisen aineen hajoamisketjuja voidaan havainnollistaa monenlaisilla kaavioilla, joista kuva 44 on eräs esimerkki. Kuva 45 havainnollistaa kompostoinnin vaiheita.



Kuva 44. Anaerobisen ja aerobisen hajoamisketjun prosessikaavio (Sang, et al., 2012).



Kuva 45. Kompostointiprosessin eri vaiheet (Itävaara, et al., 2006).

3.1 Lämmöntuotto

Kaatopaikkatutkimuksissa jätteen lämmöntuottoa on mallinnettu joko empiiriseen mittausdataan sovittamalla tai biologisen hajoamisen kemiallisista reaktioista arvioimalla. Esimerkiksi Yhdysvaltalaisilla kaatopaikoilla on mitattu jätteen lämpötilan kehitystä, jonka avulla on muodostettu tähän empiiriseen dataan sovitettu lämmöntuoton yhtälö [W/m³]

$$H(t) = A \cdot \left(\frac{B \cdot t}{B^2 + 2 \cdot B \cdot t + t^2} \right) \cdot e^{-\sqrt{\frac{t}{D}}}, \quad (54)$$

jossa $A = -7,92 + 0,12 \cdot \lambda_C,$ (55)

$$B = -2027 + 20,47 \cdot \lambda_C - 0,015 \cdot \lambda_C^2, \quad (56)$$

$$D = 55,5 + 2,79 \cdot F \quad (57)$$

ja näissä t on aika [vrk],

A on lämmöntuoton ääriarvokerroin [W/m^3],

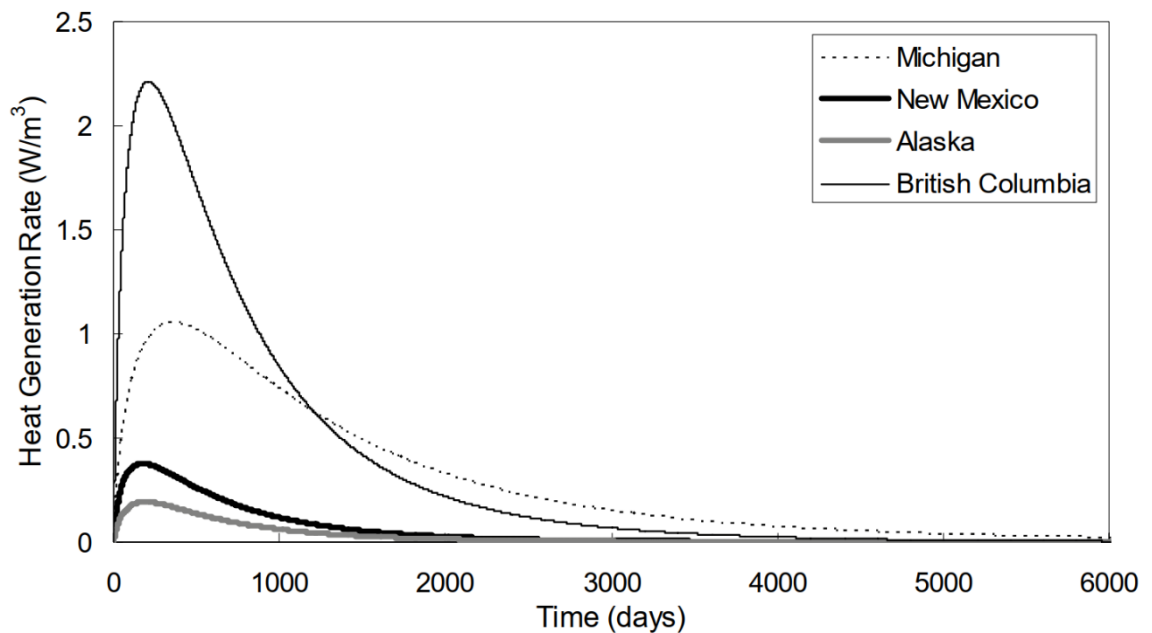
B on muotokerroin [vrk],

D on lämmöntuoton laskemisen nopeuskerroin [vrk],

λ_C on ilmasto- ja operaatio-olosuhteiden kerroin [$^\circ\text{C m}^4/\text{kg v}$],

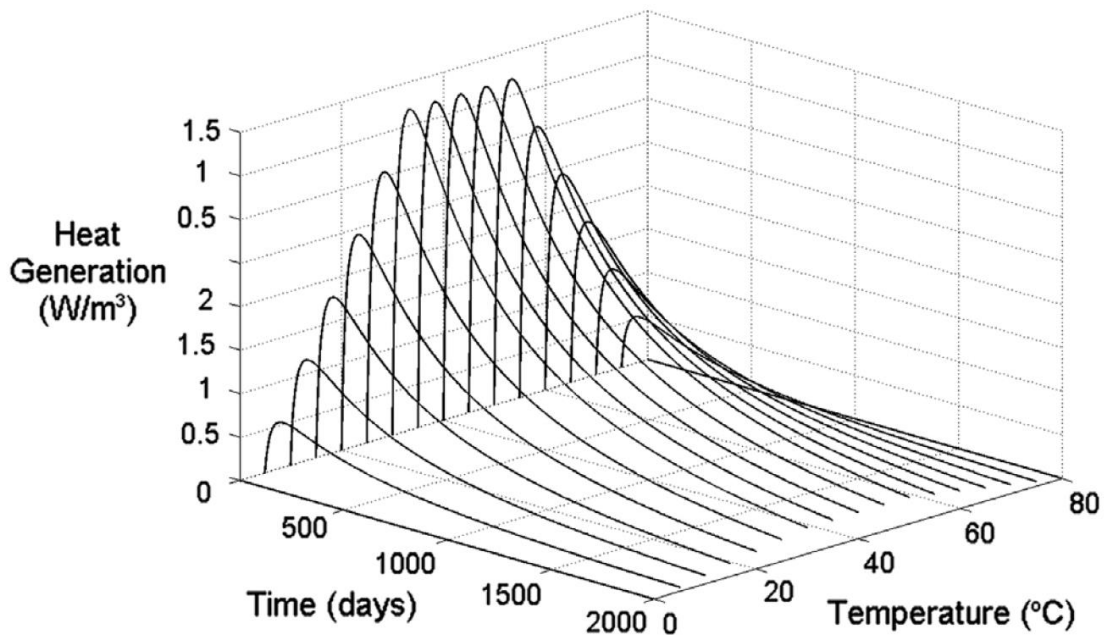
F on kaatopaikan vuotuinen täyttökorkeus [m/v].

Ilmasto- ja operaatio-olosuhteiden kerroin λ_C on kaatopaikan sijainnin mukaisen vuotuisen ulkolämpötilan keskiarvon [$^\circ\text{C}$] ja vuotuisen sademäärän [m/v] tulo, jaettuna jätteen keskimääräisellä tilavuuspainolla [kg/m^3]. (Hanson & Yesiller, 2008) Yhtälöllä (54) muodostettuja lämmöntuoton aikakehityksiä on havainnollistettu neljälle eri kaatopaikalle seuraavassa kuvassa 46.



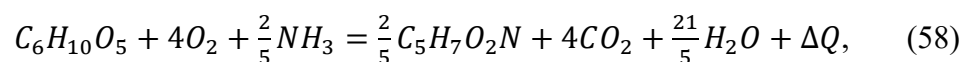
Kuva 46. Jätteen lämmöntuoton kehitys ajan funktiona kaatopaikka olosuhteissa (Hanson & Yesiller, 2008).

Biologinen hajoaminen ja sitä kautta myös jätteen lämmöntuotto on lämpötilasta ja kosteuspitoisuudesta riippuvainen. Seuraava kuva 47 havainnollistaa kaavan (54) mukaista lämmöntuottoa skaalattuna lämpötilan vaikutuksella.

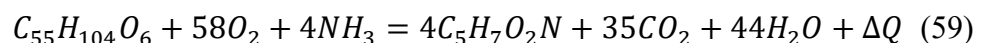


Kuva 47. Esimerkki lämpötilan vaikutuksesta jätteen lämmöntuottoon (Hanson, et al., 2013).

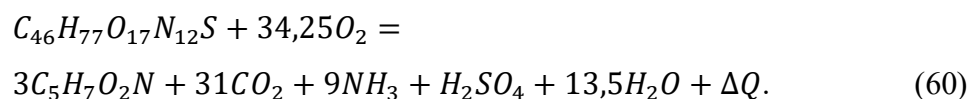
Toinen tapa arvioida jätteen lämmöntuottoa on kemiallisista reaktioista vapautuvan lämmön laskeminen. Jätteen sisältämien orgaanisten aineiden aerobinen hajoaminen voidaan kuvata muutamilla lämmöntuottoon keskeisimmin vaikuttavien aineiden hajoamisreaktioilla. Näitä aineita ovat: nopeasti hajoava selluloosa, hitaasti hajoava selluloosa, sokeri, rasva, proteiini, ammoniakki ja mikro-organismit, kuten aerobiset ja nitriittiset bakteerit. Aineiden hajoaminen voidaan kuvata stoikiometrisillä reaktioyhtälöillä. Nopeasti ja hitaasti hajoava selluloosa sekä sokerin hapettuminen



rasvan hapettuminen



ja proteiinin hapettuminen



Nopeasti ja hitaasti hajoava selluloosa sekä sokerin hapettuminen vapauttaa 2575,8 kJ/mol lämpöä, rasvan hapettuminen vapauttaa 30,616 kJ/mol ja proteiinin hapettuminen 20,699 kJ/mol. Nitriittisten bakteereiden reaktioista syntyvä lämpö on hyvin pientä muihin reaktioihin verrattuna, joten ne on jätetty huomiotta. (Xiao, et al., 2021)

Jotta stoikiometrisien yhtälöiden mukaisia lämmöntuotto arvoja voitaisiin käyttää, tulee jätteen orgaaniset jakeet ensin muuntaa yhtälöissä käytetyiksi edustaviksi aineiksi. Kun orgaaninen osuus jaotellaan massaprosentteina ruuaksi a_F , viherjätteeksi a_G , paperiksi a_P , tekstiileiksi a_T ja muiksi reagoimattomiksi osiksi a_I , voidaan nämä jakeet muuntaa hiilihydraattiselluloosaksi c_1 $(CH_2O)_6$, korkea asteiseksi hiilihydraatiksi c_2 $(CH_2O)_{12}$, proteiiniksi p $C_{46}H_{77}O_{17}N_{12}S$, rasvaksi f $C_{55}H_{104}O_6$ ja reagoimattomiksi aineiksi I , seuraavien kaavojen avulla. (White, 2008)

$$c_1 = 0,31 \cdot a_F + 0,67 \cdot a_G + 0,83 \cdot a_P + 0,45 \cdot a_T, \quad (61)$$

$$c_2 = 0,40 \cdot a_F + 0,08 \cdot a_P + 0,45 \cdot a_T, \quad (62)$$

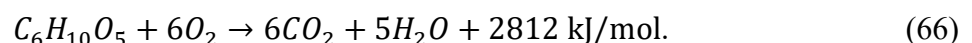
$$p = 0,18 \cdot a_F + 0,33 \cdot a_G, \quad (63)$$

$$f = 0,11 \cdot a_F, \quad (64)$$

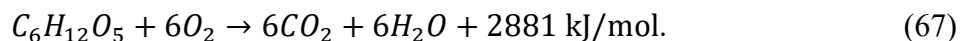
$$I = 0,09 \cdot a_P + 0,10 \cdot a_T + a_I. \quad (65)$$

Yhtälöiden kertoimet kuvaavat ruuan, viherjätteen, paperin ja tekstiilin koostumusta yllä olevien kaavojen mukaisten aineiden massaprosentteina. Esimerkiksi ruokajäte sisältää 18 % lämmöntuottoa edustavaa proteiinia ja 11 % lämmöntuottoa edustavaa rasvaa. Nämä muuntokaavat ovat kuitenkin anaerobiselle hajoamisprosessille sovitettuja, eivätkä siten sovellu suoraan edellä esitettyjen aerobisten hajoamisenketjujen lämmöntuoton laskentaan. Ainakin selluloosalle on käytetty eri molekyyliarakennetta, joka näin ollen hajotessaan vapauttaa eri määrän lämpöenergiaa.

Koska orgaaninen jäte sisältää määrältään eniten selluloosaa ja sen hajoaminen on lämmöntuotoltaan voimakkainta, on monissa tutkimuksissa sovellettu pelkästään sen hajoamisketjua kuvaamaan kaikkia lämpöä tuottavia reaktioita. Selluloosan $C_6H_{10}O_5$ aerobinen hajoaminen (Hulc, 2021)



Selluloosan moolimassa on 162,1406 g/mol, joten kilogramman täydellinen hajoaminen tuottaa lämpöenergiaa noin 17,3 MJ/kg (Hao, 2020). Myös pelkän glukoosin $C_6H_{12}O_5$ hajoamista on käytetty edustamaan hajoamisketjun lämmöntuottoa, sillä se on yhteyttämisen ja eliöiden energiantuoton keskiössä



Glukoosin moolimassa on 180,156 g/mol, joten kilogramman täydellinen hajoaminen tuottaa lämpöenergiaa noin 16 MJ/kg. (Sokolovs, et al., 2015) Kuituisen selluloosan määrän selvittäminen orgaanisesta jätteestä onnistuu erilaisilla kemialliseen liuottamiseen perustuvilla testeillä (Ivanova, et al., 2008). Vanhoja hyödynnettävissä olevia testituloksia eri aineiden selluloosa pitoisuuksista löytyy monista lähteistä (White, 2008).

3.1.1 Lämpöarvon määrittäminen kalorimetri tuloksista

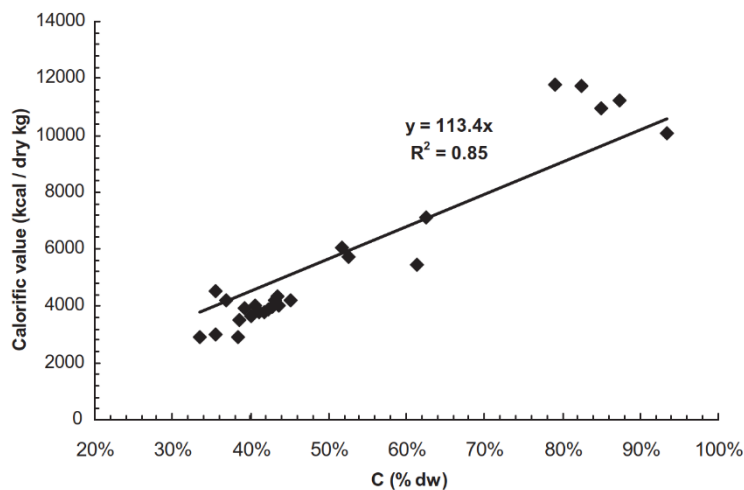
Aineen hajoamisen lämmöntuotto pystytään mittaamaan kalorimetrillä. Yleisin testausmenetelmä on standardin SFS-EN ISO 1716:n mukainen, niin sanottu pommikalorimetritesti. Testissä koekappale poltetaan terässylinterissä puhtaan hapen, vakiotilavuuden ja -paineen alaisena niin, että täydellinen palaminen varmistuu. Palon tuottama lämpö siirtyy sylinteristä sitä ympäröivään veteen, jonka lämpötilan muutoksesta saadaan laskettua koekappaleen luovuttama lämpömäärä eli lämpöarvo [MJ/kg]. Pommikalorimetri antaa niin sanotun korkean lämpöarvon. Silloin koekappaleessa oleva kosteus ensin höyrystyy ja sitten tiivistyy testisylinterin seinille, vapauttaen veden faasimuutoksessa sitoutuneen energian. Jos käytännön sovelluksessa vesihöyry pääsee poistumaan materiaalista, veden faasimuutoksessa sitoutuneen energian pois lämpenevästä systeemistä, tulee käyttää niin sanottua alempaa lämpöarvoa. Tämä saadaan vähentämällä korkeasta lämpöarvosta vesihöyryn viemä osuus.

Kalorimetritestien tuloksiin pohjautuen on kehitetty erilaisia empiirisiä sovituksia, joiden avulla lämpöarvoa voi pyrkiä arvioimaan. Empiirisiä sovituksia käytetään, sillä käytännön kalorimetrituloksia ei aina juuri kyseisestä ainekoostumuksesta ole saatavilla. Kolme yleisintä sovitusmenetelmää perustuvat alkuaineanalyysiin (ultimate/element analysis), likimääräisanalyysiin (proximate analysis) tai kemiallisen koostumuksen analyysiin (chemical composition analysis). Alkuaineanalyysiin perustuvassa

lämpöarvon arvioinnissa tutkittavan aineen alkuainekoostumus pyritään sovittamaan sitä vastaavaksi lämpöarvoksi. **Alkuaineanalyysiin** perustuva lämpöarvo [MJ/kg]

$$Q = aC + bO + cH + dN + eS + f, \quad (68)$$

jossa a, b, c, d ja e ovat lämpöarvokertoimia [MJ/kg], C, O, H, N ja S ovat hiilen, hapen, vedyn, typen ja rikin massaosuudet [%] ja f on alkuaineanalyysin lisäkerroin. (Fan, et al., 2021) Lämpöarvokertoimet saadaan arvioitua esimerkiksi lineaarisen **regressioanalyysin** avulla. Regressioanalyysissä lasketaan eri tekijöiden vaikuttavuutta tutkittavaan suureeseen. Seuraava kuva 48 havainnollistaa regressioanalyysistä saadun lineaarisen korrelaation hiilen määrän ja lämpöarvon välillä. Kuvan pisteet ovat jätteen orgaanisen jakeen eri komponenttien kalorimetritestistä saatuja lämpöarvoja ja näiden komponenttien alkuaineanalyysistä saatuja hiilen prosenttimääriä. Viiva kuvaa regressioanalyysistä saatua lineaarista sovitusta ja sen kulmakerroin hiilen lämpöarvokerrointa. (Komilis, et al., 2012)



Kuva 48. Hiilen vaikutus jätteen orgaanisen jakeen lämpöarvoon (Komilis, et al., 2012).

Likimääräisanalyysistä puolestaan saadaan reaktioherkän materiaalin, kiinteän hiilen ja tuhkan massaosuudet. Näiden aineiden vaikutus sovitetaan testituloksiin ja muodostetaan korrelaatio samalla tavoin, regressioanalyysillä. Likimääräisanalyysiin perustuva lämpöarvo [MJ/kg]

$$Q = pFC + qVM + rASH + s, \quad (69)$$

jossa p, q ja r ovat lämpöarvokertoimia [MJ/kg], FC, VM ja ASH ovat kiinteän hiilen, reaktioherkän materiaalin ja tuhkan massaosuudet [%] ja s on likimääräisanalyysin

lisäkerroin. Likimääräisanalyysi on alkuaineanalyysiä yksinkertaisempi ja halvempi, joten sitä on käytetty monissa tutkimuksissa. Se ei kuitenkaan ole yhtä tarkka kuin alkuaineanalyysi. Kolmannessa kemialliseen koostumukseen perustuvassa menetelmässä skaalataan valittujen edustavien kemiallisten yhdisteiden vaikuttavuutta samalla tavoin lämpöarvokertoimilla. (Fan, et al., 2021) Empiiristen sovitusten ongelmana kuitenkin on, että eri tutkimuksissa tehdyt sovitukset poikkeavat toisistaan merkittävästi. Epätarkkuuteen vaikuttaa ainakin rajoitettu määrä kalorimetri tuloksia, sekä erilaiset analysointi ja sovitus menetelmät (Sheng & Azevedo, 2005). Lisäksi kemiallisten yhdisteiden muodostuminen on energiaa vapauttava reaktio, joten alkuaineiden ja niistä muodostuvien yhdisteiden sisältämä energia on erisuuri (Huang & Lo, 2020).

3.1.2 Lämmöntuoton voimakkuuteen vaikuttavia tekijöitä

Kalorimetrinen lämpöarvo kuvaa täydellisen hajoamisen lämpöpotentiaalia. Todellisuudessa lämmöntuotto on tätä vähäisempää. Kalorimetristä lämpöarvoa muokataan eri tekijöiden **vaikutuskertoimilla**, joista keskeisimpiä ovat lämpötila, kosteuspitoisuus, hapen saatavuus ja hiili-typpisuhde. **Lämpötilan** vaikutuskerroin [-]

$$f(T) = \frac{(T-T_{max})(T-T_{min})^2}{(T_{opt}-T_{min})[(T_{opt}-T_{min})(T-T_{opt})-(T_{opt}-T_{max})(T_{opt}+T_{min}-2T)]} \quad (70)$$

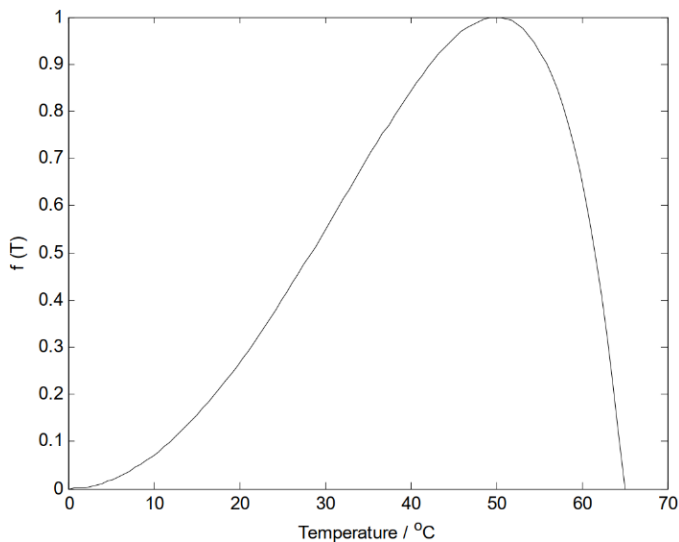
jossa T on lämpötila tarkasteluhetkellä [°C],

T_{min} on vähimmäislämpötila [°C],

T_{max} on enimmäislämpötila [°C],

T_{opt} on optimaalinen lämpötila [°C].

Vähimmäislämpötila ja enimmäislämpötila kuvaavat lämpötilan ääriarvoja, joiden jälkeen aerobinen hajoaminen pysähtyy, nämä ovat 0 °C ja 65 °C. Optimaalinen lämpötila kuvaa lämpötilaa, jossa aerobinen hajoaminen on voimakkaimmillaan ja se on 50 °C. (Xiao, et al., 2021) Seuraava kuva 49 havainnollistaa kaavan (70) mukaista lämpötilan vaikutusta hajoamisnopeuteen.



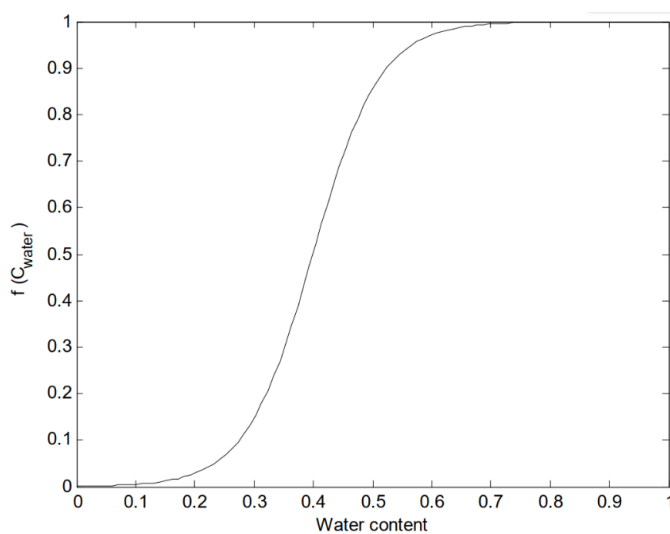
Kuva 49. Lämpötilan vaikutus aerobisen hajoamisen lämmöntuottoon (Xiao, et al., 2021).

Kosteuspitoisuuden vaikutuskerroin [-]

$$f(C_{water}) = \frac{1}{e^{(-17,684 \cdot C_{water} + 7,0622)} + 1} \quad (71)$$

jossa C_{water} on vesipitoisuus suhteena kokonaismassaan [%].

Pieni vesipitoisuus vaikeuttaa mikro-organismien kykyä hajottaa ravinteita ja suuri vesipitoisuus voi vähentää hapen saatavuutta. (Xiao, et al., 2021) Seuraava kuva 50 havainnollistaa kaavan (71) mukaista kosteuspitoisuuden vaikutusta hajoamisnopeuteen.



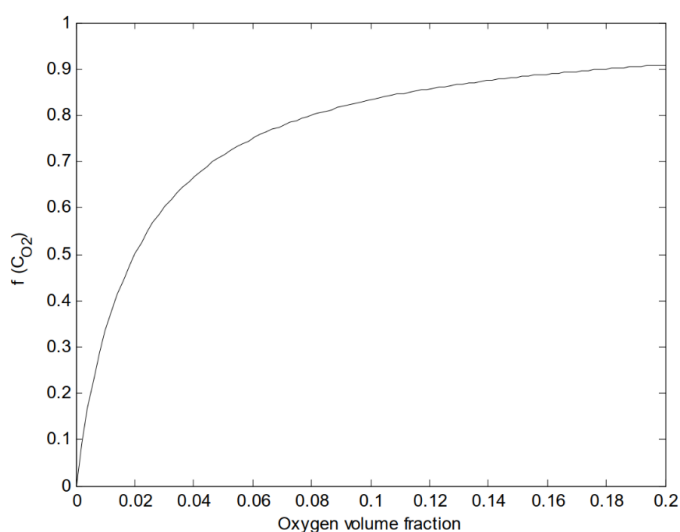
Kuva 50. Kosteuspitoisuuden vaikutus aerobisen hajoamisen lämmöntuottoon (Xiao, et al., 2021).

Happipitoisuuden vaikutuskerroin [-]

$$f(C_{O_2}) = \frac{C_{O_2}}{C_{O_2} + 2\%}, \quad (72)$$

jossa C_{O_2} on happipitoisuus tilavuussuhteena [%].

Happipitoisuuden tilavuussuhde on jätteen kokonaistilavuuden happiosuus. (Xiao, et al., 2021) Ilman happipitoisuus on noin 21 %. Jos jätekuutiossa on esimerkiksi 15 % huokosilmaa kokonaistilavuudesta on happea siitä noin 3,15 %. Seuraava kuva 51 havainnollistaa kaavan (72) mukaista happipitoisuuden vaikutusta hajoamisnopeuteen.



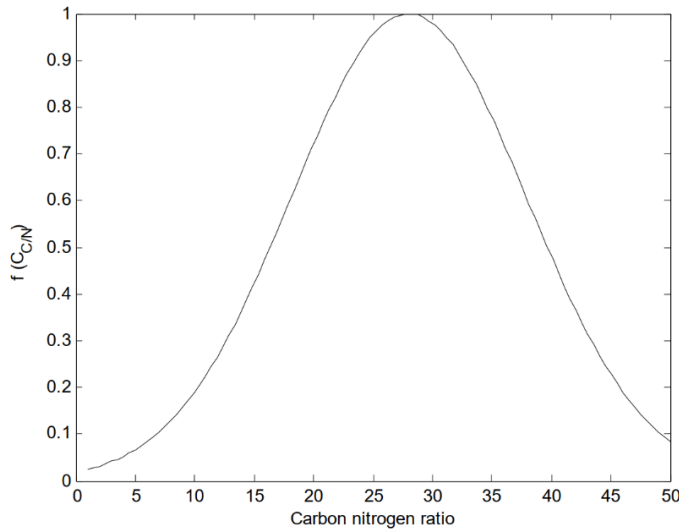
Kuva 51. Happipitoisuuden vaikutus aerobisen hajoamisen lämmöntuottoon (Xiao, et al., 2021).

Hiili-typisuhteen vaikutuskerroin [-]

$$f(C_{C/N}) = e^{-((C_{C/N} - 28)/14)^2}, \quad (73)$$

jossa $C_{C/N}$ on hiilen määrän suhde typen määrään [%].

Mitä korkeampi suhde on sitä enemmän mikro-organismit hajottavat orgaanista ainetta, mutta jos suhde kasvaa liikaa eli typen määrä on liian matala, käy hajoamisprosessi hidastumaan. (Xiao, et al., 2021) Seuraava kuva 52 havainnollistaa kaavan (73) mukaista hiili-typisuhteen vaikutusta aerobisen hajoamisen lämmöntuottoon.



Kuva 52. Hiili-typin suhteen vaikutus aerobisen hajoamisen lämmöntuottoon (Xiao, et al., 2021).

Todellisia olosuhteita vastaava lämpöarvo saadaan siis kalorimetristä lämpöarvoa skaalaamalla, ainakin kaikilla edellä mainituilla vaikuttavilla tekijöillä. Aerobinen lämmöntuotto vaihtelee noin 2,5 ja 12 W/m³ välillä (Hanson & Yesiller, 2008). Pelkän kirjallisuuskatsauksen avulla, ilman käytännön mittauksia, on sovellettavissa olevaa arviota kuitenkin hankala tehdä.

3.2 Lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti

Jätteen lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti muodostuvat yhdessä kiintoaineen, nesteen ja kaasun ominaisuuksista. Kun yksittäisten materiaalien osuudet ja ominaisuudet tunnetaan, voidaan kokonaislämmönjohtavuus arvioida summaamalla eri aineiden osuudet yhteen. Jätteen **lämmönjohtavuus** [W/(m·K)]

$$\lambda = \lambda_s \varepsilon_s + \lambda_l \varepsilon_l + \lambda_g \varepsilon_g, \quad (74)$$

jossa λ_i on kiintoaineen, nesteen ja kaasun lämmönjohtavuudet [W/(m·K)],
 ε_i on kiintoaineen, nesteen ja kaasun tilavuusosuudet [%].

Samaan tapaan voidaan arvioida **ominaislämpökapasiteetti** [J/(K·kg)]

$$c = \frac{c_s \varepsilon_s \rho_s + c_l \varepsilon_l \rho_l + c_g \varepsilon_g \rho_g}{\varepsilon_s \rho_s + \varepsilon_l \rho_l + \varepsilon_g \rho_g}, \quad (75)$$

jossa c_i on kiintoaineen, nesteen ja kaasun ominaislämpökapasiteetit [$J/(K \cdot kg)$],
 ε_i on kiintoaineen, nesteen ja kaasun tilavuusosuudet [%],
 ρ_i on kiintoaineen, nesteen ja kaasun tilavuuspainot [kg/m^3].

Kaavat (74) ja (75) kuvaavat tilannetta, jossa kiintoaine, neste ja kaasu ovat rinnakkain lämpövirran suuntaan nähden. Tulokset ovat likimääräisiä sillä todellisuudessa osuudet ovat sekoittuneena toisiinsa. (Faitli, et al., 2015)

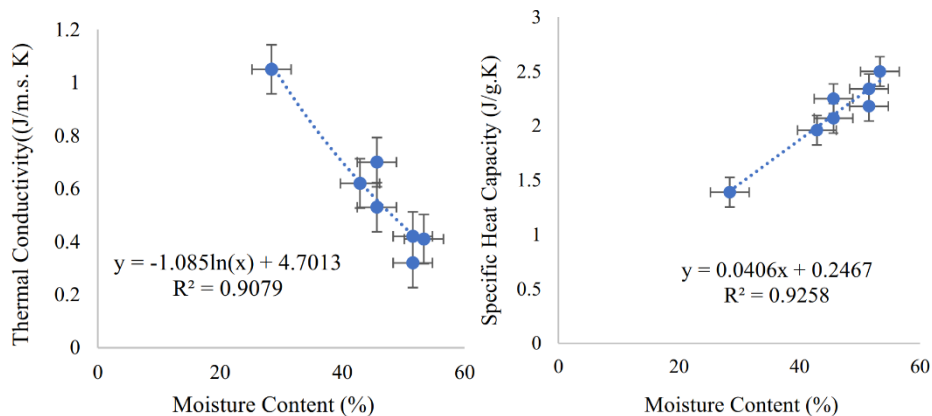
Kiintoaineosuuden lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti voidaan koota eri materiaalien **painotettuna keskiarvona**. Eri materiaalijakeiden lämmönjohtavuuksien määrittäminen on likimääräistä arviointia kirjallisuudesta löytyviin arvoihin perustuen. Esimerkiksi seuraavan taulukon (7) mukaisilla oletuksilla ja suomen sekajätteen jaejakaumalla, saadaan kuivan kiintoaineen keskimääräiseksi lämmönjohtavuudeksi noin $3,5 W/(m \cdot K)$ ja ominaislämpökapasiteetiksi noin $2000 J/(kg \cdot K)$. Jos jätteen märkätiheys on $700 kg/m^3$, vedenmassan oletetaan olevan 40 % kokonaismassasta ja huokosilmaa oletetaan olevan 15 %, niin kiintoaineen, veden ja ilman rinnakkain yhdistetyksi lämmönjohtavuudeksi saadaan noin $2 W/(m \cdot K)$ ja ominaislämpökapasiteetiksi noin $2900 J/(kg \cdot K)$. Arvot ovat suuri piirteisiä, eikä niitä tule soveltaa käytännössä.

Taulukko 7. Arvioita sekajätteen materiaalijakeiden ominaisuuksista.

	%	λ W/mK	c J/kgK	kg/m ³	
Biojäte	32,3		0,15	2720	700
Paperi	8,8		0,05	1340	1100
Kartonki ja pahvi	8,2		0,21	1340	1100
Puu	1,5		0,15	2300	550
Muovi	16,6		0,25	1670	1150
Lasi	2,4		1	840	2700
Metalli	2,3		100	480	4000
Tekstiilit ja jalkineet	6,1		0,06	1290	250
Sähkölaitteet ja akut	1,1		5	1000	500
Vaaralliset kemikaalit	0,4		5	1000	500
Sekalaiset	20,3		5	1000	500
Yht. keskiarvo	100		3,5	1746,0	893,3
Vesi			0,6	4181	1000
Ilma			0,025	1012	1

Selkeimmin lämmönjohtavuuteen ja ominaislämpökapasiteettiin vaikuttaa kostean biojätteen määrä. Koska veden lämmönjohtavuus on pienempi kuin keskiarvoistetun

kiintoaineen, on jäte sitä eristävämpää, mitä suurempi biojätteen osuus on. Toisaalta kostean ja painavan biojätteen määrä kasvattaa tilavuuspainoa, joka taas nostaa lämmönjohtavuutta. Veden ominaislämpökapasiteetti on myös suurempi kuin keskiarvoistetun kiintoaineen, joten mitä enemmän kostea biojätettä on, sitä enemmän jätemassa kykenee varaamaan itseensä lämpöä. (Manjunatha, et al., 2020) Seuraava kuva 53 havainnollistaa kosteuspitoisuuden vaikutusta.



Kuva 53. Esimerkki kosteuspitoisuuden vaikutuksesta lämmönjohtavuuteen ja ominaislämpökapasiteettiin (Manjunatha, et al., 2020).

Lämmönjohtavuuden ja ominaislämpökapasiteetin mittaamiseen on olemassa monia koemenetelmiä. Kuten lämmönjohtavuuden määritelmän, myös sen mittauksen peruseriaatteena on määrittää materiaalin läpi siirtyvän lämpötehon määrä lämpötilagradienttia kohti. Yleisimmällä **lämpövirtalevyllä** koekappaleen pintoihin muodostetaan erilämpötilat. Mittaamalla levyjen lämmitykseen tarvittavaa tehoa ja lämpögradientin suuruutta, saadaan materiaalin lämmönjohtavuus. (Vinha, et al., 2005) Myös ominaislämpökapasiteetin mittaaminen on määritelmänsä mukainen. Mittauksissa tarkkaillaan lämpöenergiaa, joka tarvitaan näytteen lämpötilan nostamiseen sen massaa kohti. Tämä onnistuu lämpövirtalevyllä ja kalorimetreillä. Kuten mekaanisten ominaisuuksien osalta, niin myös lämpöteknisten ominaisuuksien testauksen ongelmana on osaltaan jätemassaa hyvin edustavan näytteen mahtuminen nykyisiin testilaitteisiin. Lisäksi ominaisuudet ovat lämpötilasta ja kosteuden liikkeistä riippuvaisia. Tarkempaan mallinnukseen pyrittäessä myös kosteuden siirtymiseen liittyviä ominaisuuksia pitäisi pyrkiä määrittämään.

3.3 Lämpötilojen huomiointi standardien mukaisesti

Eurokoodi SFS-EN 1991-1-5 antaa ohjeistusta rakenteen ulko- ja sisäpintojen lämpötilojen määrittämiseen. Standardin ja sen Suomen kansallisen liitteen mukaan, esimerkiksi Vantaalle rakennettaessa, saadaan seuraavan taulukon 8 mukaiset sisä- ja ulkolämpötilat, sekä taivutusta aiheuttavat lineaariset lämpötilagradientit rakenteen yli.

Taulukko 8. Lämpötilagradienttien muodostuminen eurokoodin mukaan.

Sisälämpötila	
Kesä	25 °C
Talvi	23 °C
Ulkolämpötila, Vantaa	
Kesä	34 °C
Talvi	-38 °C
Auringonsäteilyn vaikutus, tumma etelä seinä	
T ₅	30 °C
Maanalainen lämpötila	
Kesä, yli 1m	4 °C
Talvi, yli 1m	-4 °C
Lineaarinen lämpötilagradientti rakenteen yli ilmassa	
Kesä	39 °C
Talvi	61 °C
Lineaarinen lämpötilagradientti rakenteen yli maassa	
Kesä, yli 1m	21 °C
Talvi, yli 1m	27 °C

Eurokoodi antaa konservatiivisen arvion gradientin suuruudesta ja määrittää sen suoraan pintojen välisestä lämpötilaerosta. Todellisuudessa kyse ei ole stationäärisestä ajasta riippumattomasta tilasta, jolloin lämpötilat rakenteen yli ovat kerenneet tasoittumaan lineaarisiksi. Jos lämpötilan vaihtelut ovat nopeita, ei rakenne kerkeä muuttamaan lämpötilaansa kuin sen pintaosilta. Tällöin rakenteen sisäinen lämpötilajakauma on epälineaarinen. Epälineaarista jakaumaa ei ole käytännöllistä mallintaa, joten se korvataan ekvivalentilla lineaarisella lämpögradientillä. Tämä perustuu momenttitasapainoon siten, että ekvivalentti lineaarinen ja epälineaarinen lämpöjakauma tuottaa yhtä suuret momentit

$$\int_{-h/2}^{h/2} \alpha(\Delta T_{eq} z) z dz = \int_{-h/2}^{h/2} \alpha T(z) z dz, \quad (76)$$

jossa α on betonin lämpölaajenemiskerroin [-],
 ΔT_{eq} on ekvivalentti lineaarinen lämpötilagradientti [°C/m],
 z on etäisyys neutraaliakselilta [m],

$T(z)$ on epälineaarinen lämpötilajakauma [$^{\circ}\text{C}$],

h on poikkileikkauksen korkeus [m].

(Gao, et al., 2017) Esimerkiksi 800 mm paksu betonirakenne, jonka sisäpuoli kuumennetaan $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ asteeseen ja ulkopuoli on $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ asteen ulkolämpötilassa, saavuttaa lämpögradientin ääriarvon noin viikon kuluessa. Rakenteen ekvivalentti lineaarinen lämpögradientti on tällöin noin 90 % suorasta pintojen välisestä lämpötila-erosta. Epälineaarisuuden vaikutus on sitä suurempi, mitä ohuempi rakenne on ja mitä suurempia lämpötilaerot ovat. Toisaalta, jos rakenne on esimerkiksi maata tai eristettä vasten, jaksaa se lämmetä myös vasta puolelta, pienentäen gradienttia ajan myötä. Eurokoodi olettaa myös auringonsäteilyn voimakkuuden stationäärisellä säteilyteholla, joka edustaa suurinta kesän säteilytehoa. Todellisuudessa säteilyteho muuttuu päivän mittaan ja suurin teho kestää vain muutaman tunnin. (Leminen, 2014)

3.4 Pakkovoimien huomiointi laskentamallissa

Sisäpuolisen lämmön noustessa upotettu bunkkeri on maanpinnan alapuoliselta osaltaan puristettuna ympäröivää maata vasten ja lämmön laskiessa vedettynä ympärystätön kitkavoimien johdosta. Maanpäällinen bunkkeri on lämmön noustessa puristettuna ja lämmön laskiessa vedettynä, lähinnä pohjalaatastaan. Bunkkeria ympäröivä maa vastustaa bunkkerin liikkeitä ja se tulisi mallintaa rakenneanalyysiä tehdessä kitkavoimin tai jousivaimennin systeemein. (Wu, et al., 2019)

Tavanomaisissa rakenteissa, joissa ei esiinny merkittäviä pakkovoimia, käytetään suoraviivaisesti kimmoteorian mukaisia materiaaliominaisuuksia ja halkeilemattoman poikkileikkauksen ominaisuuksia. Jätebunkkerin rakenteissa esiintyy merkittäviä pakkovoimia, lämpökuormasta ja kutistumisesta johtuen. Niiden huomiointi kimmoteorian mukaisilla jäykkyysominaisuuksilla johtaa tarvittavaa suurempiin raudoitusmääriin. Todellisuudessa teräsbetonirakenteen taivutusjäykkyys muuttuu kuormituksen funktiona. Kuormituksen aiheuttama halkeilu pienentää jäyhyysmomenttia siten, että poikkileikkauksen pinta-ala pienenee vedetyltä reunalta halkeaman syvyyden verran. Lisäksi ajan myötä tapahtuva betonin viruma kasvattaa muodonmuutoksia. Tämä pienentää betonin kimmomoduulia ja sitä myötä taivutusjäykkyyttä. Kun laskennassa käytetään halkeilleen betonin tehollista taivutusjäykkyyttä, on rakenne löysempi.

Löysemässä rakenteessa rasitukset jakautuvat tasaisemmin johtaen pienempiin halkeamaleveyksiin ja rauditusmääriin. Tehollisen jäykkyyden tai betonin epälineaarisen materiaalimallin huomioivan laskentamallin muodostaminen on tämän opinnäytetyön rajauksen ulkopuolella ja siitä voi lukea esimerkiksi Lemisen diplomityöstä. Betonin epälineaarisen jäykkyyden huomiointi eri ohjelmistoissa ei ole yksiselitteistä. Esimerkiksi Autodesk Robot ohjelmassa ominaisuutta ei suoranaisesti ole käytettävissä, kun taas Dlubal RFEM ohjelma mahdollistaa tämän lisämoduulin avulla.

3.5 Johtopäätökset lämpökuormien määrittämisestä

Jätteen ominaisuuksien monimuotoisuuden ja alueellisen vaihtelun vuoksi ei pelkkään kirjallisuuskatsaukseen perustuen voi tehdä luotettavia lähtötietojen määrittelyitä. Biojäteosuuden kompostoitumisesta syntyvä lämpö tulisi tutkia kattavilla kalorimetritesteillä eri vaikuttavat tekijät huomioiden. Samoin lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti pitäisi saada mitattua. Jotta tulokset olisivat edustavia, täytyisi mittalaitteisiin mahtua jätettä mahdollisimman hyvin edustava täysikokoinen näyte. Jotta testien todenmukaisuus voitaisiin varmentaa, tulisi olemassa olevissa bunkkereissa muodostuvia lämpötiloja seurata vähintään vuoden ympäri. Pohjoisissa olosuhteissa talvella poltettavaksi saapuva jäte on kerennyt viilentyä ulkona olevissa jäteastioissa. Kuten kuvasta 49 nähdään, biologinen hajoaminen hidastuu voimakkaasti lämpötilan alentuessa. Saapuvan jätteen lämpötilaa tulisi seurata tämän määrittämiseksi. On hyvin todennäköistä, että niin sanotuksi kylmäksi rakennukseksi suunnitellussa bunkkerissa jätteen biologinen hajoaminen ei käynnisty tai on hyvin hidasta talviolosuhteiden vallitessa. Hajoaminen tarvitsee myös kosteutta, jonka määrä on etenkin talvisin rajallinen. Nämä seikat huomioiden on talvisen lämpötilagradientin suuruus todennäköisesti huomattavasti nykyisiä konservatiivisia oletuksia pienempi. Bunkkerin lämpötekninen mallinnus ja analysointi suurimpien gradienttien määrittelemiseksi onnistuu, kunhan jätteen lämpötekniset ominaisuudet on ensin käytännössä tutkittu. Bunkkeri on kylmä rakennus ja kattilassa käytettävä ilma virtaa sen läpi, joten Eurokoodin mukaiset sisälämpötilat eivät ole sovellettavissa. Lämpötilagradientin pienentämiseksi bunkkeri olisi mahdollista eristää, mutta tämän kannattavuutta ei voi arvioida ilman lämpöteknistä mallinnusta. Analyysin tuloksia tulee verrata käytännössä mitattuihin, niiden jatko sovellettavuuden varmistamiseksi. Bunkkerissa olevan jätteen kierron arvioidaan olevan noin 4 vuorokautta, mutta jos uutta jätettä saapuu samalla

syklillä, voi bunkkeri ja lämmöntuotto pysyä täydellä volyymilla pidemmänkin aikaa. Laitoksilla tulisi seurata myös bunkkerin täyttöastetta lämmöntuoton voimakkuuden määrittämiseksi.

4 JÄTTEEN AIHEUTTAMAT KEMIALLISET RASITUKSET

Tämänhetkinen eurooppalaiseen standardeihin perustuva betonirakenteiden säilyvyys suunnittelu kemiallisia rasituksia vastaan antaa ohjeistusta vain tavanomaisten perustusrakenteiden suunnitteluun. Betonin määrittelyä koskeva standardi SFS-EN 206, perustelee kemiallisten rasitusluokkien määräytymistä vain luonnon maaperän ja pohjaveden aiheuttamissa olosuhteissa. Seuraava taulukko 9 on Betoniyhdistyksen versio SFS-EN 206:n aggressiivisuus luokitukseen johtavista kemikaali pitoisuuksista.

Taulukko 9. Luonnon maaperän ja pohjaveden aiheuttaman kemiallisen rasituksen rasitusluokkien raja-arvot (Suomen Betoniyhdistys ry, 2016).

Kemiallinen ominaisuus	Koemenetelmä	XA1	XA2	XA3
Pohjavesi				
SO ₄ ²⁻ mg/l	SFS-EN 196-2	≥ 200 ja ≤ 600	> 600 ja ≤ 3000	> 3000 ja ≤ 6000
pH	ISO 4316	≤ 6,5 ja ≥ 5,5	< 5,5 ja ≥ 4,5	< 4,5 ja ≥ 4,0
CO ₂ mg/l aggressiivinen	SFS-EN 13577	≥ 15 ja ≤ 40	> 40 ja ≤ 100	> 100 kyllästymiseen asti
NH ₄ ⁺ mg/l	ISO 7150-1	≥ 15 ja ≤ 30	> 30 ja ≤ 60	> 60 ja ≤ 100
Mg ²⁺ mg/l	EN ISO 7980	≥ 300 ja ≤ 1000	> 1000 ja ≤ 3000	> 3000 kyllästymiseen asti
Maaperä				
SO ₄ ²⁻ mg/kg ^(a) kokonaismäärä	SFS-EN 196-2 ^(b)	≥ 2000 ja ≤ 3000 ^(c)	> 3000 ^(c) ja ≤ 12000	>12000 ja ≤ 24000
Happamuus Baumann Gullyn mukaisesti ml/kg	prEN 16502	> 200	Ei esiinny käytännössä	

^{a)} Savimaat, joiden läpäisevyys on pienempi kuin 10⁻⁵ m/s, voidaan luokitella alempaan luokkaan.

^{b)} Testausmenetelmän periaate on uuttaa SO₄²⁻ suolahapolla. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää vesiuuttoa, jos betonin käyttöpaikalla on siitä kokemusta.

^{c)} Raja-arvo 3000 mg/kg lasketaan arvoon 2000 mg/kg, jos betonin toistuva kuivuminen ja kastuminen tai kapillaarinen kastuminen voivat aiheuttaa betoniin sulfaatti-ionien kasaantumisriskin.

Esimerkiksi eurooppalaisten standardien brittiläiset edeltäjät CP110-1973 ja BS8110-1985 painottivat, että sulfaatit, hapot ja kloridit voivat heikentää betonirakenteita ja, että altistuksen määrää niille tulee rajoittaa tai betonimassa tulee suunnitella niitä kestäviksi.

Nykyisiin betonia käsitteleviin eurooppalaisiin standardeihin EN 206 ja EN 1992 lisättiin sulfaattianionin SO_4^{2-} , happojen pH ja kloridianionin Cl^- lisäksi kolme muuta betonille aggressiivista ainetta, joita ovat hiilidioksidi CO_2 , ammoniumioni NH_4^+ ja magnesiumkationi Mg^{2+} . (Okovido, 2015) Näin ollen kemiallisten rasitusluokkien pohjana toimivat, vain neljä kemikaalia, happamuus, sekä kloridit omassa rasitusluokassaan. Jos betoniin kohdistuu jokin muu kuin taulukossa 9 esitetty betonille aggressiivinen kemiallinen aine, todetaan SFS-EN 206:ssa, että voi olla tarpeen suorittaa erityisselvitys. Teollisuusrakentamisen sektori, jossa näitä muitakin kemikaaleja esiintyy, jää omien erityisselvityksiensä varaan. Alankomaiden standardin EN 206 kansallisessa liitteessä on suunnittelijoiden avuksi listattu muitakin yleisimpiä betonille aggressiivisia kemikaaleja, kuvattu niiden aggressiivisuutta betonille viidellä eri luokalla ja kerrottu kunkin kemikaalin betonia vaurioittava mekanismi (Suomen Betoniyhdistys ry, 2016). Kyseinen lista on esitetty seuraavassa taulukossa 10.

Taulukko 10. Kemikaalien aggressiivisuus betonille Alankomaiden kansallisesta liitteestä standardille EN 206 (Petrow, et al., 2017).

Aggressiivisuusluokat:

1 = vaaraton

2 = lievästi aggressiivinen

3 = kohtalaisen aggressiivinen

4 = voimakkaasti aggressiivinen

5 = erittäin voimakkaasti aggressiivinen

Aggressiivisuuteen vaikuttaa aineen kemiallisen koostumuksen lisäksi mm. aineen pitoisuus, liuoksen pH sekä lämpötila.

KEMIKAALIEN AGGRESSIIVISUUS BETONILLE		
Aine	Reaktiotapa	Aggressiivisuus- luokka
HAPOT:		
<i>Etikkahappo</i>	liuottaa	3 – 4
<i>Boorihappo</i>	liuottaa	2
<i>Fenoli</i>	liuottaa/ioninvaihto	2 – 3
Sitruunahappo	liuottaa	4
Fosforihappo	liuottaa	4
Humushappo	liuottaa	4
<i>Maitohappo</i>	liuottaa	3
<i>Muurahaishappo</i>	liuottaa	3
<i>Oksaalihappo</i>	liuottaa	1
Typpihappo	liuottaa	5
<i>Parkkihappo</i>	liuottaa	1 – 2
Fluorivetyhappo	liuottaa	5
<i>Viinihappo</i>	liuottaa	1
Suolahappo	liuottaa / teräskorroosio	5
<i>Rikkivety</i>	liuottaa	2
Rikkihappo	liuottaa / paisuttaa	5
SUOLAT:		
<i>Ammoniumkarbonaatti</i>	ioninvaihto	2

<i>Formiaatti</i>		1
<i>Kaliumkarbonaatti</i>	paisuttaa	2
<i>Natriumkarbonaatti</i>	paisuttaa	2
<i>Alumiinikloridi</i>	ioninvaihto / teräskorroosio	3
<i>Ammoniumkloridi</i>	ioninvaihto / teräskorroosio	3
<i>Kalsiumkloridi</i>	teräskorroosio	1
<i>Kaliumkloridi</i>	teräskorroosio / paisuttaa	1
<i>Kuparikloridi</i>	teräskorroosio	1
<i>Elohopeakloridi</i>	teräskorroosio	1
<i>Magnesiumkloridi</i>	ioninvaihto / teräskorroosio	3
<i>Natriumkloridi</i>	teräskorroosio / paisuttaa	2
<i>Rautakloridi</i>	teräskorroosio	2
<hr/>		
<i>Sinkkikloridi</i>	teräskorroosio	2
Ammoniumfluoridi	ioninvaihto	4
<i>Ammoniumhydroksidi</i>		1
<i>Kalsiumhydroksidi</i>		1
<i>Kaliumhydroksidi</i>	paisuttaa	2
<i>Natriumhydroksidi</i>	paisuttaa	2
Ammoniumnitraatti	ioninvaihto	5
<i>Kalsiumnitraatti</i>		1
<i>Kaliumnitraatti</i>	ioninvaihto / paisuttaa	3
<i>Natriumnitraatti</i>	ioninvaihto / paisuttaa	3
Alumiinisulfaatti	paisuttaa	4
Ammoniumsulfaatti	ioninvaihto / paisuttaa	5
Kalsiumsulfaatti	paisuttaa	4
Kaliumsulfaatti	paisuttaa	4
Kuparisulfaatti	paisuttaa	4
Mangaanisulfaatti	paisuttaa	4
Magnesiumsulfaatti	ioninvaihto / paisuttaa	5
Natriumsulfaatti	paisuttaa	4
Nikkelisulfaatti	paisuttaa	4
Rautasulfaatti	paisuttaa	4
Sinkkisulfaatti	paisuttaa	4
MAAÖLJYTISLEET:		
<i>Bensiini</i>		1
<i>Kerosiini</i>		1
<i>Naftaleeni</i>		1
<i>Paloöljy</i>		1
<i>Kevyt öljy</i>		1
<i>Raskas öljy</i>		1
<i>Dieselöljy</i>		1
KIVIHILITISLEET:		
<i>Antraseeni</i>		1
<i>Benzeeni</i>		1
<i>Kumeeni</i>		1
<i>Kreosootti</i>		1
<i>Parafiini</i>		1
<i>Terva</i>		1
<i>Tolueneeni</i>		1
<i>Ksyleeni</i>		1
KASVIÖLJYT:		
<i>Manteliöljy</i>	ioninvaihto	3
<i>Kiinanpuuöljy</i>	ioninvaihto	3
<i>Puuvillasiemenöljy</i>	ioninvaihto	3
<i>Kookosöljy</i>	ioninvaihto	3
<i>Pellavasiemenöljy</i>	ioninvaihto	3

<i>Unikonsiemenöljy</i>	ioninvaihto	3
<i>Maapähkinäöljy</i>	ioninvaihto	3
<i>Turnipsiöljy</i>	ioninvaihto	3
<i>Risiiniöljy</i>	ioninvaihto	3
<i>Soijapapuöljy</i>	ioninvaihto	3
<i>Mäntyöljytärpätti</i>	ioninvaihto	3
<i>Saksanpähkinäöljy</i>	ioninvaihto	3
ELÄINPERÄISET RASVAT:		
<i>Hirvensarvenöljy</i>	liuottaa	2
<i>Sian ihra</i>	liuottaa	2
<i>Kalaöljy</i>	liuottaa	2
<i>Teurasjätteet</i>	liuottaa	3
SEKALAISET:		
<i>Alkoholi</i>		1
<i>Asetoni</i>		1
<i>Ammoniakki</i>		1
<i>Olut</i>	liuottaa	2
<i>Valkaisuaine, natriumhypokloriitti</i>	teräskorroosio	2
<i>Booraksi</i>		1
<i>Lipeäkivi</i>		1
<i>Siideri, omenaviini</i>	liuottaa	4
<i>Eetteri</i>		1
<i>Eteeriset öljyt</i>		1
<i>Fenoli</i>	ioninvaihto	3
<i>Formaldehydi</i>	ioninvaihto	3
<i>Rypälesokeri</i>	ioninvaihto	3
<i>Glyseriini</i>	ioninvaihto	1
<i>Hunaja</i>		1
<i>Puuhioke</i>		1
<i>Kaliumpermangnaatti</i>		1
<i>Kalkki</i>		1
<i>Hiiidioksidi</i>		1
<i>Säilörehu</i>	liuottaa	5
<i>Lyijy</i>		1
<i>Aurinkovoide</i>		1
<i>Melassi</i>	ioninvaihto	3
<i>Maito</i>		1
<i>Lanta</i>	liuottaa / ioninvaihto	4
<i>Sokeri, kuiva</i>		1
<i>Sokeriliuos</i>	ioninvaihto	3
<i>Tolueeni</i>		1
<i>Trikloorietyleeni</i>		1
<i>Urea</i>		1
<i>Virtsa</i>	liuottaa / ioninvaihto	3
<i>Vaseliini</i>		1
<i>Hedelmämehu</i>	liuottaa	4
<i>Vesilasi</i>		1
<i>Veri</i>	liuottaa	3
<i>Viini</i>		1
<i>Pehmeä vesi (kokonaiskovuus < 0,55 mmol/l)</i>	liuottaa	3
<i>Saippua</i>		1
<i>Rikki</i>		1

Alankomaiden kansallisen liitteen listassa esitetyt aggressiivisuus luokat eivät vastaa kemiallisia rasitusluokkia. Tulkintaan rasitusluokasta vaikuttaa kemikaalien itsensä lisäksi se, kuinka betonipinta niille altistuu kuten, mikä on kemikaalin pitoisuus, kuinka toistuvaa altistus on ja, mitkä ovat muut ympäröivät olosuhteet, kuten lämpötila, ilman kosteus tai ilman vaihtuvuus eli tuuletuksen taso.

Myös standardista SFS-EN 14879-3 *Orgaaniset pinnoitteet ja vuoraukset teollisuuslaitteiden ja tuotantolaitosten suojaamiseen syövyttävien väliaineiden aiheuttamalta korroosiolta. Osa 3: Betoniset pinnoitteet* löytyy listausta betonia syövyttävistä kemikaaleista, joiden altistus yleensä vaatii betonin pinnoittamista. Listaus on esitetty seuraavassa taulukossa 11. Lisäksi standardissa luokitellaan kemikaalisen nesteen kuormituksen tyyppi ja toistuvuus seitsemään eri luokkaan. Näillä jaotteluilla standardi pyrkii ohjaamaan oikeanlaisen pintasuojauksen valintaan. Myös jos taulukossa 9 esitetyt XA3 luokan kemikaalipitoisuuksien ylärajat ylittyvät, ei betoni itsessään kestä, johtaen yleensä pinnoittamiseen.

Taulukko 11. Yleisesti käytettyjä betonin pinnoitusta vaativia kemikaaleja ja niiden luokittelua (SFS-EN 14879-3, 2007).

Kemikaalin tyyppi	Esimerkkejä	
I. Epäorgaaniset kemikaalit		
Epäorgaaniset ei-hapettavat hapot	HCl H ₂ SO ₄ H ₃ PO ₄	Suolahappo Rikkihappo, enintään 70 % Fosforihappo
Epäorgaaniset hapettavat hapot	HNO ₃ H ₂ SO ₄ CrO ₃ , H ₂ CrO ₄ HClO ₃	Typpihappo Rikkihappo, yli 70 % Kromihappo Kloorihappo
Epäorgaaniset piidioksidia (SiO ₂) liuottavat hapot	HF H ₂ SiF ₆ HBF ₄	Fluorivetyhappo Heksafluoripiihappo (sisältää fluorivetyhappoa) Fluoriboorihappo (sisältää fluorivetyhappoa)
Suolat	NaCl FeSO ₄ Na ₂ CO ₃	Natriumkloridi Rauta(II)sulfaatti Natriumkarbonaatti
Emäkset	NaOH KOH CaO, Ca(OH) ₂ NH ₄ OH	Natriumhydroksidi Kaliumhydroksidi Kalsiumoksidi, Kalsiumhydroksidi Ammoniakkiliuos (ammoniumhydroksidiliuos)
Hapettavat emäkset	NaOCl	Natriumhypokloriitti
II. Orgaaniset kemikaalit		
Orgaaniset hapot	HCOOH CH ₃ COOH CH ₂ ClCOOH (COOH) ₂	Muurahaishappo Etikkahappo Kloorietikkahappo Oksaalihappo

	CH ₃ CHOHCOOH	Maitohappo
Alifaattiset hiilivedyt	C ₆ H ₁₄	Heksaani
	C ₈ H ₁₈	Oktaani
Aromaattiset hiilivedyt	C ₆ H ₆	Bentseeni
	C ₆ H ₅ CH ₃	Tolueeni
	C ₆ H ₄ (CH ₃) ₂	Ksyleeni
Alkoholit	CH ₃ OH	Metanoli
	C ₂ H ₅ OH	Etanoli
	C ₄ H ₉ OH	Butanoli
	CH ₂ OHCH ₂ OH	Etaanidioli
Aldehydit, ketonit, esterit	CH ₂ O	Formaldehydi
	CH ₃ COCH ₃	Asetoni
	C ₂ H ₅ COCH ₃	Metyylietyyliketoni (2-butanoni)
	CH ₃ COOC ₂ H ₅	Etyyliasetatti
Alifaattiset halogenoidut hiilivedyt	CH ₂ Cl ₂	Dikloorimetaani
	C ₂ HCl ₃	Trikloorietyleni
	C ₂ Cl ₃ F ₃	Triklooritrifluorietaani
Aromaattiset halogenoidut hiilivedyt	C ₆ H ₅ Cl	Klooribentseeni
	ClC ₆ H ₄ CF ₃	Klooritrifluorimetylibentseeni
Alifaattiset amiinit ja pyridiini	CH ₃ NH ₂	Metyyliamiini
	(C ₂ H ₅) ₃ N	Trietyyliamiini
	NH ₂ C ₂ H ₄ NH ₂	Etyleenidiamiini
Aromaattiset amiinit	C ₆ H ₅ NH ₂	Aniliini
	C ₅ H ₅ N	Pyridiini
Fenolit	C ₆ H ₅ OH	Fenoli
	CH ₃ C ₆ H ₄ OH	Kresoli
Rasvat, öljyt		Kasvi- ja eläinrasvat ja -öljyt

Turvallisuus ja kemikaaliviraston (TUKES) oppaassa vaarallisten kemikaalien varastoinnista on puolestaan annettu opastusta happojen ja emäksien aggressiivisuudesta betonia kohtaan. Opastus on esitetty seuraavassa taulukossa 12 ja se perustuu Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) tiedonantoon 74 vuodelta 1980.

Taulukko 12. Happojen ja emästen aggressiivisuus ja vaikutus betoniin (Turvallisuus ja kemikaalivirasto, 2015).

<u>Yhdiste</u>		<u>Vaikutus betoniin</u>
ammoniumhydroksidi		ei haitallista vaikutusta
arsenihappo		"
bariumhydroksidi		ei haitallista vaikutusta
boorihappo		vaikutus mitätön
etikkahappo	10 %	rapauttaa hitaasti
	30 %	"
jääetikka	kons.	"
fluorivetyhappo	10 %	syövyttää nopeasti, myös teräksiä
	30 %	"
	40 %	"
	75 %	"
fosforihappo	10 %	rapauttaa hitaasti
	85 %	"
happamat vedet (pH ≤ 6,5)		rapauttaa hitaasti, teräkset voivat syöpyä

hiilihappo		rapauttaa hitaasti, teräskorroosio
humushapot		syövyttävät ja rapauttavat hitaasti
kaliumhydroksidi	5 %	ei haitallista vaikutusta
	25 %	syövyttää
	95 %	syövyttää
kalsiumhydroksidi		ei haitallista vaikutusta
kloorivetyhappo	10 %	syövyttää nopeasti myös teräkset
(suolahappo)	30 %	"
	37 %	"
kromihappo	5 %	teräkset voivat syöpyä
	10 %	"
	50 %	"
	60 %	"
maitohappo	5 %	syövyttää hitaasti
	25 %	syövyttää
muurahaishappo	10 %	syövyttää hitaasti
	30 %	"
	90 %	"
natriumhydroksidi	1 %	ei haitallista vaikutusta
	10 %	"
	20 %	syövyttää
	25 %	"
	40 %	"
oksaalihappo		ei haitallista vaikutusta, suojaa säiliöitä
		heikkoja happoja ja suolavettä vastaan
perkloorihappo	10 %	syövyttää
puuvillasiemenöljy		rapauttaa etenkin ilman läsnäollessa
pyriitti eli rikkikiisu		ks. rautasulfidi ja CuS
rikkidioksidi		muodostaa rikkihapoketta
rikkihappo	10 %	tuhoaa nopeasti
	30 %	"
	50 %	"
	60 %	"
	70 %	"
	80 %	"
	93 %	syövyttää
	kons.	"
	savuava	"
rikkihapoke		syövyttää nopeasti
rikkivety		vaaraton, mutta kosteassa
		hapettavassa ympäristössä
		muuttuu rikkihapoksi ja
		syövyttää hitaasti
typpihappo	2 %	syövyttää nopeasti
	5 %	"
	10 %	"
	20 %	"
	30 %	"
	40 %	"

Kuten edeltävistä listoista huomataan, on betonille eritavoin aggressiivisia kemikaaleja paljon ja siksi niitä yleensä pyritään ryhmittelemään kategorioihin, jottei jokaista kemikaalia tarvitsisi käsitellä erikseen. Samankaltaisia kemikaaleja kategorisoidaan niin sanottuihin vauriotekijöihin ja samankaltaisia kemikaalien aiheuttamia vaurioita

kategorisoidaan niin sanottuihin vauriomekanismeihin. Esimerkiksi seuraavien taulukoiden 13 ja 14 mukaisesti. Kategorisointi helpottaa kemiallisten vauriotekijöiden ja -mekanismien käsittelyä. Tässä työssä ei kuitenkaan käsitellä sen tarkemmin betonitekniikkaa ja yleisimpiä kemiallisia vaurioita, sillä niistä löytyy suhteellisen hyvin tietoa alan kirjallisuudesta, kuten esimerkiksi Betoniyhdistyksen julkaisuista.

Taulukko 13. Betonille aggressiivisten kemikaalien kategorisointia vauriotekijöihin, kategorian kemikaalien aiheuttamiin vauriomekanismeihin, sekä näiden käytännön vaikutuksia betonirakenteeseen (Suomen Betoniyhdistys ry, 2018).

Kemialliset vauriotekijät	Mekanismi	Vaikutus
Pehmeä vesi	liukeneminen	betonin rapautuminen
Happo	liukeneminen	betonin rapautuminen
Happo	neutraloituminen	teräskorroosion aktivoituminen
Happamat kaasut: hiilidioksidi, rikki- ja typpioksidit	neutraloituminen karbonatisoituminen	teräskorroosion aktivoituminen mikrorakenteen epäedullinen muuttuminen
Kloridit	passiivikalvon rikkoutuminen	teräskorroosion aktivoituminen
Aktiivitilassa olevat terästangot + happi + vesi	korroosio	terästankojen paisuminen, pinta-alan ja tartunnan menetys
Jännitys, kloridit	jännityskorroosio (vetyhaurastuminen)	jänneraudoitteiden katkeaminen
Sulfaatit, merivesi, maaperä	kiteytymispaine kemialliset muutokset	betonin paisuminen betonin rapautuminen
Alkalit, silikaattikiviaines	alkali-piihapporeaktio alkali-silikaattireaktio	betonin paisuminen betonin rapautuminen
Alkalit, karbonaattikiviaines	karbonaattireaktio	betonin paisuminen betonin rapautuminen

Taulukko 14. Kemikaaliryhmien ja yhdisteiden tyypillisiä vaurioittamismekanismeja (Kettunen, 2018).

Kemiallinen yhdiste	Tyypillisiä vauriomekanismeja
Alkali-kiviainesreaktio	paisuttaa
Ettringiitti	paisuttaa
Hapot	liukeneminen, ioninvaihto, biologinen korroosio
Kasvisöljyt	ioninvaihto
Kloridit	betoniterästen korroosio
Sulfaatit	paisuttaa
Hiilidioksidi	karbonatisoituminen

4.1 Kemialliset rasitukset jätebunkkerissa

Jätebunkkerissa jätteen aiheuttamien kemiallisten rasitusluokkien määrittäminen tulisi pohjautua tietoon jätteen kemiallisen koostumuksen aggressiivisuudesta betonin

säilyvyyttä kohtaan. Kotitalousjätteen kemikaalista koostumusta on lähinnä tutkittu kaatopaikkojen suotovesistä mittaamalla. Näissä tutkimuksissa ollaan yleensä kiinnostuneita suotoveden sisältämistä aineista ja kemikaaleista, jotka ovat ympäristölle haitallisia. Kaikki jätteessä olevat betonille aggressiiviset kemikaalit eivät ole ympäristölle haitallisia, joten niiden määrän arviointiin ei ole olemassa kattavaa tietokantaa. Seuraava taulukko 15 havainnollistaa kaatopaikkojen suotovesistä mitattuja ympäristönsuojelun kannalta tyypillisiä haitta-aineita ja niiden pitoisuuksia. Arvot ovat Riikinnevan kaatopaikan vesien tarkkailun vuosiyhteenvedosta 2019 ja pitoisuudet ovat vuosikeskiarvoja (Virta, 2022).

Taulukko 15. Riikinnevan kaatopaikan suotovesien koostumuksia (Virta, 2022).

	P1 tasausallas (jäteveden- puhdistamolle pumpattavat)	P7 Ongelmajätteen suotovesi	P9 Loppusijoitusalue suotovesi (suljettu)	P15 Loppusijoitusalue suotovesi (aktiivinen)
pH	-	-	7	8
sähkönjohtavuus, mS/m	463	2300	-	-
Kiintoaine, mg/l	37	15	131	40
COD, mg/l	195	380	275	568
BOD7, mg/l	23	2	22	30
Kok. N, mg/l	54	7	115	268
NH4-N, mg/l	42	2	102	157
Cl ⁻ , mg/l	1040	9600	135	468
SO4 ⁻² , mg/l	318	1350	47	758
Kok. P, mg/l	0,5	0,1	1,1	2,6
Fe, mg/l	1,8	0,8	64	4,1
Sinkki, ug/l	330	1055	-	-
Kupari, ug/l	50	120	-	-
Kromi, ug/l	16	51	-	-
Nikkeli, ug/l	77	218	-	-
Lyijy, ug/l	22	525	-	-
Arseeni, ug/l	6	5	-	-
Kadmium, ug/l	2	16	-	-
Elohopea, ug/l	1	0	-	-

Kaatopaikkojen suotovesien lisäksi kemiallisen rasituksen suuruuden suuntaa voi harkiten hakea viemäriveresien koostumuksesta. Samoin kuin kaatopaikan suotovesistä, niin myös viemäriveresistä on yleensä tutkittu vain jätevedenpuhdistuksen ja ympäristönsuojelun kannalta haitallisia fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia. Seuraavassa taulukossa 16 on tyypillisiä yhdyskuntajäteveden fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia ja taulukossa 17 on suurimpien kuntien viemäriverkostoon johdettavien jätevesien haitallisten aineiden tyypillisesti sallitut raja-arvot.

Taulukko 16. Tyypillisiä yhdyskuntajäteveden fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia (Suomen Betoniyhdistys ry, 2016).

Ominaisuus	Pitoisuus (mg/l, paitsi pH)
BOD ₅ (biologinen hapenkulutus)	125 - 175
SS (kiintoaine)	150 - 200
VS (hehketushäviö)	120 - 150
TS (kuiva-aine)	350 - 600
P (fosfori)	6 - 8
N (kokonaistyyppi)	25 - 40
NH ₄ (ammoniumtyyppi)	15 - 25
K	10 - 15
Cl	25 - 75
COD (kemiallinen hapenkulutus)	300 - 450
pH	6 - 8

Taulukko 17. Viemäriverkkoon laskettavan veden haitta-aineiden suurimmat sallitut pitoisuudet (Petrow, et al., 2017).

Viemäriverkolle haitallisten aineiden raja-arvoja

Alkuaineet	Mg/l	Kemialliset yhdisteet	mg/l
Arseeni (As)	0,1	Sulfidi	5,0
Elohopea (Hg)	0,01	Ammoniakki, ammonium	40
Hopea (Ag)	0,1...0,2	Sulfaatti, tiosulfaatin ja sulfiitin summa-arvo	400
Kadmium (Cd)	0,01	Magnesium	300
Kokonaiskromi (Cr)	0,5...1,0	Rasva	150
Kromi (VI) (Cr ⁶⁺)	0,1	Kokonaishiilivetytitoisuus (C ₁₀ - C ₄₀), max.	100
Kupari (Cu)	2,0	Kloorivapaat VOC yhdisteet (esim. tolueni ksyleeni), max.	3
Lyijy (Pb)	0,5	Muu ominaisuus	
Nikkeli (Ni)	0,5	pH min	6,0
Sinkki (Zn)	3,0	pH max.	11,0
Kokonaissyaniidi (CN)	0,5	Lämpötila T _{max} °C	40
Tina (Sn)	2,0		
Seleeni (Se)	1,0		

Ainoa tähän työhön löydetty artikkeli tutkimuksesta, joka lähtökohtaisesti käsittelee kotitalousjätteen kemiallisten rasituksen vaikutusta betonin kestävyys, on Nigeriassa vuonna 2015 tehty. Tutkimuksessa pyrittiin selvittämään, onko kaatopaikkojen tiivistysrakenteita kannattavaa tehdä betonirakenteisena, betonin kemiallisen kestävyden ja tiiveyden näkökulmasta, kun betoni altistuu kaatopaikalla sekajätteen suotovesiin liuenneille kemikaaleille. Tutkimuksessa analysoitiin jäteastioista kerätyn jätenäytteen kemiallista koostumusta sekä poimittiin kirjallisuudesta löytyneitä lähteitä. Seuraava taulukko 18 esittää yhden Nigerianlaisen kaatopaikan suotoveden ja laboratoriossa jätteen läpi suodetun veden kemiallisen koostumuksen, eurooppalaisissa standardeissa käsitellyille kemikaaleille. Samalla tapaa taulukossa 19 on koottuna Nigerianlaisien ja taulukossa 20 muutaman maailmalta poimitun kaatopaikan

suotovesitutkimuksista kootut eurooppalaisien standardien käsittelemien kemikaalien pitoisuudet.

Taulukko 18. Kaatopaikan ja laboratoriossa suodetun veden kemiallinen koostumus (Okovido, 2015).

Chemical parameter	Municipal landfill effluent	Model solid waste effluent	
		Day-1	Day-5
SO ₄ ²⁻ mg/l	10	2.463	2.16
pH	4.5 to 10.5	6.42	6.50
CO ₂ mg/l aggressive	NA	NA	NA
NH ₄ ⁺ mg/l	500	NA	NA
Mg ²⁺ mg/l	230	<0.005	<0.005
Cl ⁻ mg/l	1000 - 5000	220	102

Taulukko 19. Nigerialaisten kaatopaikkojen suotovesien betonille aggressiivisten kemikaalien pitoisuuksia (Okovido, 2015).

Study / Location	landfills	Acidity (pH units)	Chemical concentrations (mg/l)			
			SO ₄ ²⁻	NH ₄ ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻
Olorunfemi et al, 2011 [Benin]	3	4.70	138.00		1.47	789.1
	5	7.876	63.14			183.6
Osazuwa & Abdullahi 2008 [Kaduna]	1	6.63	251.08			
Aderemi et al 2011 [Lagos]	1	8.10	1.21	1.21	1.21	
Egharevba et al, 2013 [Benin]	10	6.82	1.09	3.88		43.3
Kola-Olusanya A., 2012 [Lagos]	3	5.50	175.00			1992.0
Aiyesanmi & Imoisi , 2011 [Benin]	3	7.06	0.03	0.94	38.23	1267.2
Aderemi et al 2012 [Lagos]	1		1.21	4.50		
Olaniyan et al, 2009 [Kaduna]	1	8.80	268.10		13.00	2241.0
Eni and Digha , 2014 [Calabar]	1	6.60				4.7
Alimba et al 2009 [lagos]	2	7.11	70	80		770
minimum	1	4.70	0.03	0.94	1.21	4.7
median	1	6.63	63.14	3.88	13.00	1267.2
mean	3	6.23	96.88	18.11	93.38	429.72
maximum	10	9.00	268.10	80.00	413.0	2241.0

Taulukko 20. Kaatopaikkojen suotoveden koostumuksia maailmalta (Okovido, 2015).

Table-6: Leachate components concentrations obtained from studies involving developed landfills						
study/investigation	Acidity (pH units)	Chemical substance concentrations (mg/l)				
		SO ₄ ²⁻	NH ₄ ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	
Reinhart & Grosh 1998, [USA]	4.5-9.0		2-3000		30-5000	
Ngo, guo and xing w [Australia]	5.3-8.9	1.4-295		0.7-740	40-19800	
Saltworks Technologies Inc. 2014 [USA]	7.4	1172.0	45.8	240	5844	
Yusmartini et al, 2013, [Indonesia]	6.9-7.5	0-199	11.3-65.0		160-175	
Bhalla et al, 2012, [India]	6.5-9.5	48.7-65.1			1448-1836	
Baig S. et al [France]	8.2-8.3		300-690			
UNEP 2005 [Developing countries]	4.5-9.0	20-1750	30-3000	40-1150	100-5000	
Kjeldsen et al 2002 [Europe and USA]	4.5-9.0	8-7750	50-2200	30-15000	150-4500	
El Fadel <i>et al.</i> , 2001	0-5years	3.0-6.0	500-2000	500-1500	500-1500	1000-3000
	5-10years	6.0-7.0	200-1000	300-500	500-1000	500-2000
	10-20years	7.0-7.5	50-200	50-200	100-500	100-500
	>20years	7.5-9.0	0-50	<30	<100	<100
Pillai et al, 2014, [India]	6.8	20.6		393.2	960.0	
Lee & Jones-Lee, 1994 [[USA]	5.0-7.5	10-1000	100-400	30-500	100-2000	
overall range	3.0-9.0	0-7750	1.1-3000	0.70-15000	30-19800	

Vertaamalla pitoisuuksia standardin SFS-EN 206:n taulukossa 9 annettuihin arvoihin maaperälle ja pohjavedelle, saadaan taulukon 15 Riikinnevan suotovesien mukaan betonin rasisluokaksi XA2. Taulukon 16 viemäriveresien tyypillisten arvojen mukaan rasisluokka XA1 saadaan sekä happamuuden, että ammonium rasisuksen takia. Kun yhtä useampi kemikaalisesti aggressiivinen aine vaikuttaa samanaikaisesti, määrää niistä aggressiivisempi rasisluokan, mutta jos kahden kemikaalin konsentraatio on samassa rasisluokassa, on niiden yhteisvaikutus suurempi ja näin ollen luokkaa tulee nostaa yhdellä (SFS-EN 206, 2014). Täten viemäriveresien tyypillisten arvojen mukaan, tulee kemiallisesti rasisluokaksi valita XA2. Taulukon 17 viemäriinverkkoon laskettavan veden raja-arvojen mukaan rasisluokaksi saadaan myös XA2. Seuraavassa taulukossa 21 on nigerialaisessa tutkimuksessa koottujen suotovesitietojen mukaiset kemikaalien ääriarvot, joiden mukaan betonin rasisluokka nousisi ainakin ammoniumin takia luokkaan XA3 ”extreme”. Suotovesiliuoksen väkevyys on tosin riippuvainen vesimäärästä johon kemikaalit ovat liuenneina. Avonaisilla kaatopaikoilla suotoveden väkevyys vaihtelee eri vuodenaikojen sademäärien mukaisesti. Betonin turmeltumisen voi kuitenkin ajatella seuraavan keskiarvojen mukaista rasisusta.

Taulukko 21. Kaatopaikka suotovesien kemikaalipitoisuuksien ääriarvoja (Okovido, 2015).

Table-7: Adverse chemical conditions and exposure environments				
Chemical parameter	Chemical condition/concentration		Classification of aggressiveness	
	Maximum measured	Range for developing countries (UNEP 2005)	Local	Global
Sulphate (SO ₄ ²⁻) mg/l	268	20-1750	Slight	Moderate
Acidity (pH)	4.5	4.5-9.0	Moderate	Moderate
CO ₂ mg/l aggressive	NA	NA	NA	NA
Ammonia (NH ₄ ⁺) mg/l	500	30-3000	Extreme	Extreme
Magnesium (Mg ²⁺) mg/l	413	40-1150	Slight	Moderate
Chloride (Cl) mg/l	5000	100-5000	Extreme	Extreme

4.2 Kemiallisen rasitusluokan vaikutus jätebunkkerin betonirakenteeseen

Lähtökohtaisesti mahdollisimman tiivis, rajoitetusti halkeillut ja hallitulla kutistumalla oleva betonirakenne on kestävä ympäristön rasituksia kohtaan, sillä haitallisten aineiden tunkeutuminen betoniin vaikeutuu. Seuraava taulukko 22 esittää rasitusluokkien vaikutuksen käytettävään **sementtilaatuun** ja **seosaineisiin**. Ainakin luokissa XA2 ja XA3, kun luokan määrä sulfaattirasitus, tulee käyttää joko sulfaatinkestävää sementtiä CEM 1-SR3 tai sideaineen on sisällettävä vähintään 70 % masuunikuonaa (SFS 7022, 2019). Suunniteltaessa betonimassaa kemikaalisia rasituksia vastaan ei siis riitä pelkän rasitusluokan määrittäminen, vaan tulee olla tieto vaikuttavista kemikaaleista. Masuunikuonan ja lentotuhkan käyttö kiihdyttää karbonatisoitumista ja kloridikorroosiota, mutta toisaalta ne myös tekevät betonista tiiviimpää hidastaen vaikutuksia. Masuunikuonan käyttö myös pienentää hydratoitumislämpöä, mutta toisaalta taas kasvattaa kutistumaa ja virumaa. (Kettunen, 2018)

Taulukko 22. Rasitusluokkien vaikutus sallittuihin sementtityyppeihin ja vaadittaviin seosaineisiin (SFS 7022, 2019).

	Rasitusluokat																	
	Ei korroosion tai rasituksen vaaraa	Karbonatisoitumisen aiheuttama korrosio				Kloridien aiheuttama korrosio						Jääditys-sulatusrasitus				Aggressiivinen kemiallinen rasitus		
						Merivesi			Kloridit muusta kuin merivedestä									
		X0	XC 2	XC 3	XC 4	XS1	XS 2	XS 3	XD 1	XD 2	XD 3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3
Sallitut sementtityypit	Ei säilyvyyden aiheuttamia rajoituksia Kaikki standardin SFS-EN 197-1 mukaiset sementit ovat sallittuja	I	I	I	II)	II)	II)	II)	II)	II)	I	I	I	I	I	2) 3)	2) 3)	
Seosainekertoimet																		
Silika	w/c ≤ 0,45	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	
	w/c > 0,45	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Lentotuhka ³⁾	1,00	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	
Masuunikuona	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	

Esimerkkejä sallituista seosaineiden enimmäislisäyksistä %-osuuksina sementin CEM I -painosta ⁶⁾																		
Seosaine	Ei korroosion tai rasituksen vaaraa	Karbonatisoitumisen aiheuttama korrosio				Kloridien aiheuttama korrosio						Jääditys-sulatusrasitus				Aggressiivinen kemiallinen rasitus		
						Merivesi			Kloridit muusta kuin merivedestä									
		X0	XC 1	XC 2	XC 3	XC 4	XS1	XS 2	XS 3	XD 1	XD 2	XD 3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2
Silika	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	2) 3)	2) 3)
Lentotuhka	100	100	45	45	45	45	45	30	45	45	30	45	30	45	30	45	2) 3)	2) 3)
Masuunikuona	1 900	1 900	375	375	375	375	375	375	375	375	375	375	100	375	100	375	2) 3)	2) 3)

1) Käytettäessä sementtiä CEM I suositellaan rasituksen ankaruuden mukaisesti erikseen määriteltäviä säilyvyyttä parantavia lisätoimenpiteitä. Tällaisia lisätoimenpiteitä ovat esimerkiksi betonin kloridinkestävyttä parantavien seosaineiden käyttö ja betonipeitteen paksuuden kasvattaminen.

2) Sulfaattipitoisessa ympäristössä käytetään joko SFS-EN 197-1 mukaista sulfaatinkestävää sementtiä (CEM I-SR3 tai CEM I-SR0) tai sideainetta, joka sisältää masuunikuonaa vähintään 70 % sideaineen kokonaismäärästä.

3) Suunnittelija valitsee käytettävän sideaineen vallitsevan kemiallisen rasituksen mukaan.

4) Kalkkikivijauheen osuus enintään 20 %.

5) Lentotuhkan aktiivisuuskertoimen arvo on 0 siltä osin, kun tuhkan ja sementin paino-osuuksien suhde ylittää arvon 0,33 rasitusluokissa X0, XC 1, XF1 ja XF3 lukuun ottamatta. Käytettäessä lujusluokan 32,5 sementtiä lentotuhkan aktiivisuuskertoimen arvo on 0,20 rasitusluokissa XC2, XC3, XC4, XF2, XF4, XS-, XD- ja XA-luokissa siltä osin, kun tuhkan ja sementin paino-osuuksien suhde alittaa arvon 0,33, tämän ylittävältä osalta aktiivisuuskertoimen arvo on 0.

6) Kaikki sallittujen sementtien ja sallittujen seosaineiden yhdistelmät ovat sallittuja, kunhan seoksen koostumus täyttää sallittujen sementtien koostumukselle standardissa SFS-EN 197-1 asetetut vaatimukset.

Seuraavan taulukon 23 mukaisesti on rasitusluokilla suora vaikutus tarvittavaan **vesi-sementtisuhteeseen, lujusluokkaan sekä sementti- ja ilmamäärään** (SFS 7022, 2019).

Taulukko 23. Rasitusluokkien vaikutus vesi-sementtisuhteeseen, lujusluokkaan sekä sementti- ja ilmamäärään (SFS 7022, 2019).

	Rasitusluokat																	
	Ei korroosion tai rasituksen vaaraa	Karbonatisoitumisen aiheuttama korrosio				Kloridien aiheuttama korrosio						Jääditys-sulatusrasitus ^{1) 2)}				Aggressiivinen kemiallinen rasitus		
						Merivesi			Kloridit muusta kuin merivedestä									
		X0	XC 1	XC 2	XC 3	XC 4	XS1	XS 2	XS 3	XD 1	XD 2	XD 3	XF 1 ³⁾	XF 2	XF 3 ³⁾	XF 4	XA 1	XA 2
w/c enintään		0,90	0,80	0,60	0,60	0,50	0,45	0,45	0,55	0,55	0,45	0,60	0,50	0,50	0,45	0,50	0,45	0,40
Vähimmäislujuusluokka	C12/15	C20/25	C20/25	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C35/45	C40/50
Vähimmäis-sementtimäärä (kg/m ³)		160	160	250	250	300	320	320	300	300	320	270	330	300	360	300	320	330
Ilmamäärä ⁵⁾ (%)												4,0 ⁴⁾	5,0 ⁴⁾	4,0 ⁴⁾	5,0 ⁴⁾			

1) Lisäksi pakkaskestävyyden vaatimukset [liitteen A taulukon A.1-F](#) mukaan.

2) Rasitusluokissa XF2 ja XF4 edellytykset betonin vesi-sementtisuhteen, ilmamäärän ja sementtimäärän vaatimukset ovat sementtilaaduille CEM I, CEM II/A-D, CEM II/A-LL, CEM II/A-M ja CEM II/B-M [taulukossa 2-F](#) esitetyn rajoituksen.

3) Betonin vesi-sementtisuhteen ja ilmamäärän yhdistelmä voidaan määrittää vaihtoehtoisesti F-lukemennetyllä (Liite A). Tällöin tämän taulukon sarakkeissa XF1 ja XF3 esitettyjen vesi-sementtisuhte- tai ilmamäärävaatimusten ei tarvitse täyttää, mutta betonin F-lukuvaatimukseen tulee täyttää 50 vuoden suunnitellulla käyttöiällä F-lukuvaatimus rasitusluokassa XF1 on 1,0 ja rasitusluokassa XF3 1,5.

F-luvun arvoja vesi-sementtisuhteen, ilmamäärän ja kivaineksen ylämäärärajana on esitetty [taulukossa D.1-F](#).

4) Ilmamäärävaatimus koskee betonia, jossa kivaineksen ylämääräraja on vähintään 16 mm. Ylämäärärajalla on 12 mm ilmamäärävaatimusta nostetaan 0,5 % yksikköä ja ylämäärärajalla on 8 mm 1,0 % yksikköä.

5) Yli 7 % tavoitellun määrän ei ole suositeltavaa.

Seuraava taulukko 24 esittää Suomen kansallisen näkemyksen rasitusluokkien vaikutuksesta tarvittavaan **betonipeitepaksuuteen**. Betonipeitteen vähimmäisarvoa voi pienentää 5 mm, jos betonin lieriölujuus on vähintään 10 MPa suurempi kuin säilyvyyden kannalta vaadittava lieriölujuus. Kuten taulukosta 24 huomataan, ei kemiallisen rasituksen suhteen ole annettu vaatimuksia, vaan peitepaksuus määräytyy muiden rasitusluokkien perusteella. SFS-EN 1992-1-1 toteaaakin, että pakkasrasituksen tai kemiallisen rasituksen tapauksessa tulee huomio kiinnittää betonin koostumukseen.

Taulukko 24. Rasitusluokkien perusteella tarvittavat betonipeitepaksuudet (Ympäristöministeriö, 2019).

Betonipeitteen vähimmäisarvovaatimus $c_{min,dur}$ (mm) eri ympäristöolosuhteissa							
Kriteeri	Rasitusluokka standardin SFS-EN 1992-1-1 taulukon 4.1 mukaan						
	X0	XC1	XC2	XC3, XC4	XD1, XS1	XD2, XS2	XD3, XS3
Betoniteräs	10	10	20	25	30	35	40
Jänneteräs	10	20	30	35	40	45	50
100 vuoden suunniteltu käyttöikä	+0	+0	+5	+5	+5	+5	+5

SFS-EN 1992-1-1:ssä rakenteita voi myös jaotella niin sanottuihin **vaatimusluokkiin**. Yleisesti ottaen vaatimusluokka määräytyy rakenteen tärkeyden mukaan ja luokkaa joko nostetaan tai lasketaan, esimerkiksi suunnittelukäyttöään, lujuusluokan, vaakarakenteen ja laadunvarmistuksen perusteella. Seuraava taulukko 25 esittää vaatimusluokan ja rasitusluokkien vaikutusta tarvittavaan betonipeitteeseen. Kansallisen liitteen taulukko 24 on määräävä, mutta huomattavaa on, että esimerkiksi XD3/XS3 rasitusluokille, 50 vuoden käyttöikää vastaavalla vaatimusluokalla S4, saadaan 45 mm peitepaksuus, kun kansallisen liitteen mukaan pienempi 40 mm paksuus on riittävä.

Taulukko 25. Vaatimusluokan ja rasitusluokkien mukainen betonipeitepaksuus (SFS-EN 1992-1-1, 2015).

Ympäristöolosuhteista johtuva betonipeitteen vähimmäisarvovaatimus $c_{min,dur}$ (mm)							
Vaatimusluokka	Taulukon 4.1 mukainen rasitusluokka						
	X0	XC1	XC2 / XC3	XC4	XD1 / XS1	XD2 / XS2	XD3 / XS3
S1	10	10	10	15	20	25	30
S2	10	10	15	20	25	30	35
S3	10	10	20	25	30	35	40
S4	10	15	25	30	35	40	45
S5	15	20	30	35	40	45	50
S6	20	25	35	40	45	50	55

Seuraava taulukko 26 esittää Suomen kansallisen näkemyksen rasisitusluokkien vaikutuksesta sallittavaan **halkeamaleveyteen** ja taulukko 27 kansallisen näkemyksen sallittavista halkeamaleveyksistä siltarakenteissa. Kuten jälleen huomataan, ei kemiallisen rasisitusluokan vaikutukselle anneta ohjeistusta, vaan suunnittelijan tulisi selvittää tarvittavat rajoitukset kemikaalikohtaisesti.

Taulukko 26. Rasisitusluokkien vaikutus halkeamaleveyden rajoittamiseen (Ympäristöministeriö, 2019).

Rasisitusluokka	Teräsbetonirakenteet ja tartunnattomat ankkurijännerakenteet	Tartuntajännerakenteet ja injektoidut ankkurijännerakenteet	
	Pitkäaikainen kuormayhdistelmä	Tavallinen kuormayhdistelmä	Pitkäaikainen kuormayhdistelmä
X0, XC1	0,40	0,20	ei vaatimuksia
XC2, XC3, XC4, XD1, XS1	0,30	0,20	Vetojännityksetön tila
XD2, XD3, XS2, XS3	0,20	Vetojännityksetön tila	ei vaatimuksia

Taulukko 27. Siltasuunnittelussa sallitut halkeamaleveydet (Liikenne- ja viestintäministeriö, 2010).

Rasisitusluokka ^a	Raudoitettujen ja tartunnattomien jänteillä jännitetyt rakenneosat
	Pitkäaikaisyhdistelmä
X0, XC1	0,3 ^c
XD1 ^d , XC2, XC3, XC4, XS1 ^d	0,2 (tai 0.15. Arvo päätetään vertailulaskelmien perusteella)
XD2, XD3, XS2, XS3 ^d	0,1

Standardissa ISO 15686-1 ja By65 kirjassa esitetyllä **laskennallisella käyttöikäsuunnittelulla** voidaan joissain tapauksissa saada huokeampia vaatimuksia betonirakenteelle kuin taulukkomitoituksilla. Esimerkiksi kun betonipeitepaksuus on kulumisen takia asetettu 50 mm voi muita vaatimuksia pystyä pienentämään laskennallisesti tämän paksuuden peitteen takia. Toisaalta, jos rakenne kuluu, ei betonipeitepaksuus säily 50 mm:ssä, eikä muiden tekijöiden huojentaminen näin ollen ole tarkoituksen mukaista.

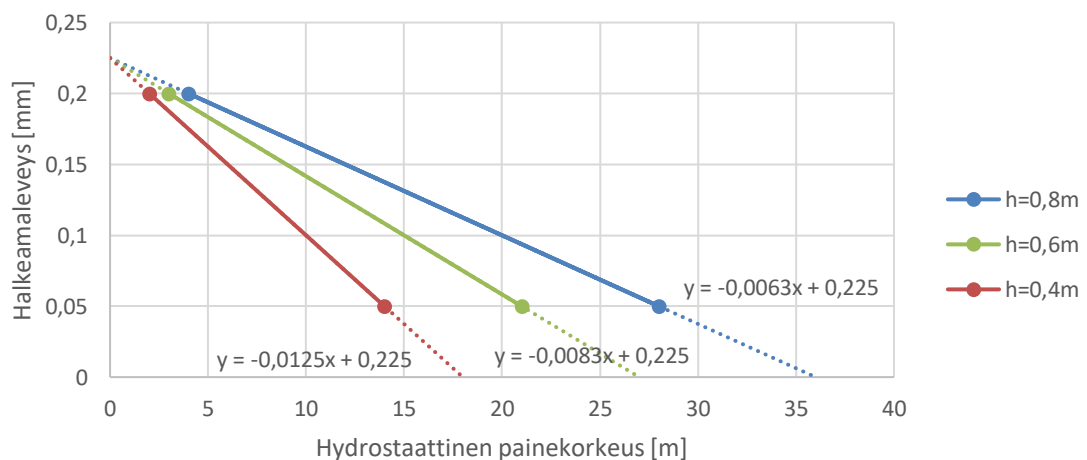
4.3 Vesitiiveys vaatimuksen vaikutus halkeamarajaan

Jätebunkkerit tulee usein myös olla vesitiiviitä. Maanpäällisen bunkkerin tapauksessa likaveden ulosvaluminen halutaan estää ja maahan upotetun bunkkerin tapauksessa pohjaveden sisään pursuaminen halutaan välttää. Betonirakenteiden tiiveysvaatimukset ja tiiveysluokitukset esitetään standardissa SFS-EN 1992-3. **Tiiveysluokitus** on seuraavan taulukon 28 mukainen.

Taulukko 28. Vedenpaineen alaisten betonirakenteiden tiiveysluokitus (SFS-EN 1992-3, 2006).

Tiiveysluokka	Vuotoa koskevat vaatimukset
0	Tietty vuodon määrä hyväksyttävä tai nesteiden vuodolla ei ole merkitystä.
1	Vuoto rajoitettava pieneen määrään. Tietty pinnan tahriutumisen tai kosteat laikut hyväksyttäviä.
2	Vuoto minimaalista. Tahriutumisen ei saa heikentää ulkonäköä.
3	Vuotoa ei sallita ollenkaan.

Jätebunkkerin vedenpaineelliset osat kuuluvat vähintään tiiveysluokkaan 2. Luokka 3 vaatisi rakenteen jännittämistä ja luokka 1 ei ole riittävä, sillä siinä läpihalkeamat ovat sallittuja. Tiiveysluokissa 2 ja 3 poikkileikkauksen puristusvyöhykkeen korkeudelle esitetään vähimmäisvaatimus kuormien pitkäaikaisyhdistelmillä, jottei läpihalkeamia syntyisi. Myös halkeamaleveyttä poikkileikkauksen vedetyllä puolella rajataan hydrostaattisen painekorkeuden mukaan, kuten seuraavassa kuvaajassa 54 muutamille rakennepaksuuksille h on lineaarisesti interpoloitu esitetty. Kuvaajan mukaiset halkeamaleveydet voidaan olettaa tiivistyvän itsestään suhteellisen lyhyessä ajassa. (SFS-EN 1992-3, 2006).



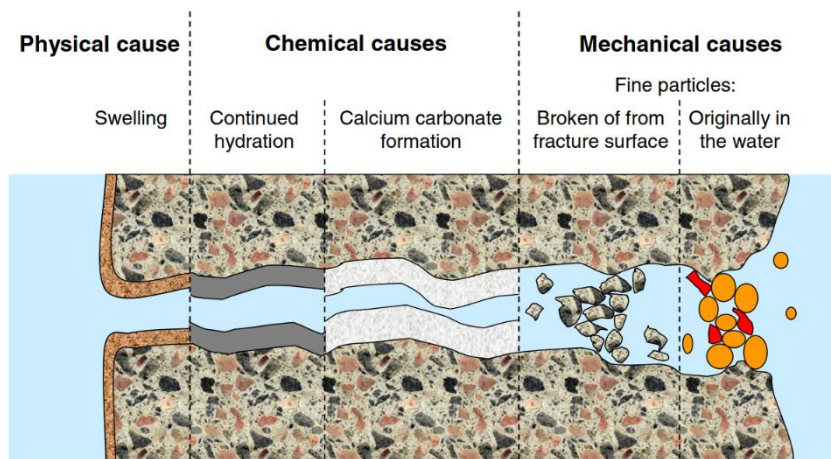
Kuva 54. Hydrostaattisen painekorkeuden ja rakennepaksuuden vaikutus halkeamaleveyteen.

4.4 Kristallisoivien lisäaineiden käyttö

Tavallisella betonilla on luontainen kyky tiivistää pieniä halkeamia ja näin ollen parantaa kestävyyttä vedenpainetta ja haitallisten aineiden tunkeutumista vastaan. Tärkein mekanismi halkeilunkorjauksessa on tilavuudeltaan suuremman kalsiumkarbonaatin CaCO_3 muodostuminen betonissa olevan kalsiumionin Ca^{2+} ja veden, hiilidioksidin sekä hiilihapon reaktioissa syntyvän karbonaattianionin CO_3^{2-} kanssa. Kalsiumkarbonaatin muodostumisen reaktioyhtälö

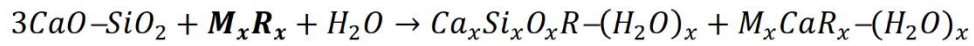


(Itriago Rodríguez, 2021) Seuraava kuva 55 havainnollistaa betonin luontaiseen itsestiivistymiseen vaikuttavia tekijöitä.



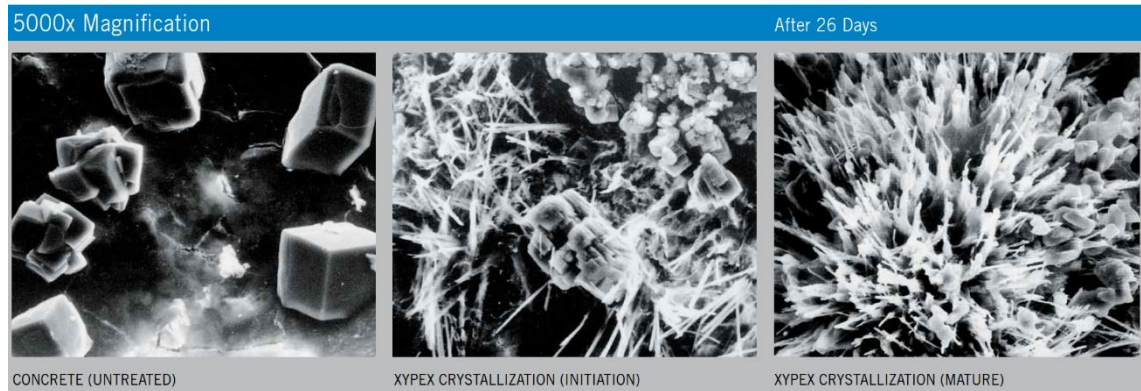
Kuva 55. Tavallisen betonin halkeamia itsekorjaavaan vaikutukseen osallistuvia tekijöitä (de Rooij, et al., 2013).

Niin sanotuilla kristallisoivilla lisäaineilla (crystalline admixtures) itsestiivistymistä pyritään varmistamaan ja vaikutusta parantamaan. Näiden tuotteiden koostumukset ovat niiden valmistajien toimesta salassa pidettyjä ja näin ollen tarkkoja tuotekohtaisia toimintaperiaatteita ei juuri tunneta. Yleisesti ottaen tiivistymisreaktion promoottorina toimiva kristallisoiva lisäaine reagoi veden läsnä ollessa betonissa olevan trikalsiumsilikaatin tai portlandiittin kanssa tihentäen kalsiumsilikaattihydraattia (CHS) (Flores, 2018; ACI 212.3R-16, 2016). American Concrete Institution:in raportin mukaan prosessi on yleisesti ottaen seuraavan kuvan 56 mukainen ja kiderakenteen muodostuminen mikroskoopin läpi on kuvassa 57 esitetyn näköinen.



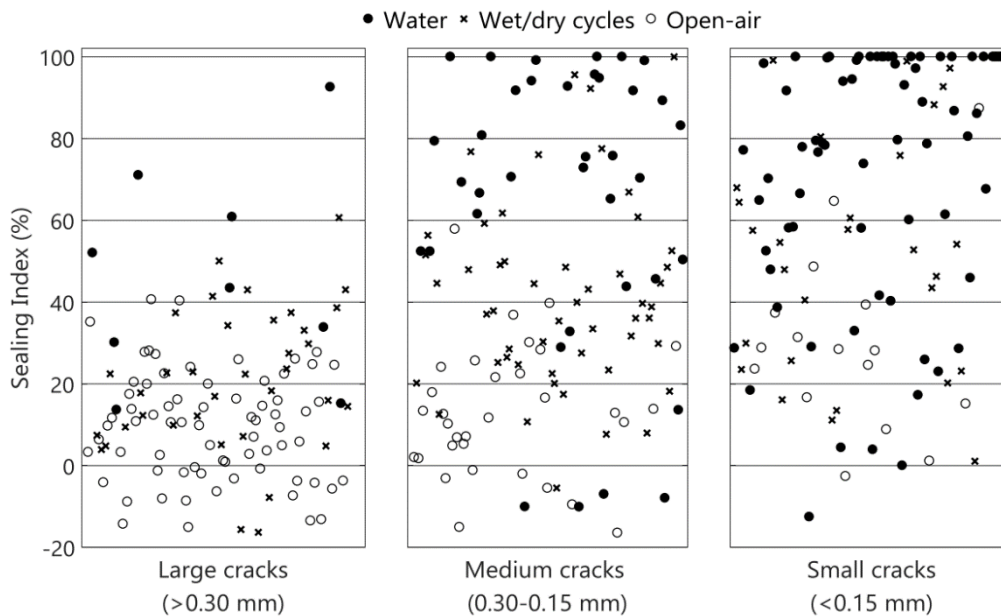
Tricalcium silicate + crystalline promoter + water → modified CSH + pore-blocking precipitate

Kuva 56. Kristallisoivien lisäaineiden yleismuotoinen reaktioyhtälö (Flores, 2018).



Kuva 57. Lisäaineettoman betonin kalsiumhydroksidi kiteitä, kristallisoitumisen alkuvaihe ja kristallisoitunut betoni 26 vrk. iässä (Xypex Chemical Corporation, 2022).

Betoni harvoin tai edes koskaan altistuu kemikaalirasitukselle kuivien ja kiinteiden aineiden vaikutuksesta. Jotta merkittävä kemikaalihyökkäys voi tapahtua on kemikaalien oltava veteen liuenneena ja liuoksen konsentraatio tulee olla tarpeeksi aggressiivinen. Toisin sanoen kemikaalit pääsevät imeytymään betoniin vain veden kanssa. Kristallisoivien lisäaineiden kemikaalihyökkäystä vastustava vaikutus perustuu suurimmalta osaltaan tiiviimmän betonin aikaansaamiseen. Samalla tavoin toimii myös parantunut vastustuskyky karbonatisoitumista sekä kloridi- ja pakkasrasitusta kohtaan. (Arsenault, 2021) Esimerkiksi Suomen markkinoilta löytyvät Xypex, Mapei, Velosit, Betocrete, CWS, Penetron ja Vandex lupaavat halkeamien ja huokosten tiivistymisen 0,4 mm asti. Lisäaineettomalla betonilla itsetiivistymistä voi tulkita tapahtuvan noin 0,15 mm asti. Itsetiivistymisen tehokkuuteen vaikuttaa ainakin veden saanti, sen virtausnopeus, hydraulinen painekorkeus, rakenteen ja halkeaman liike, halkeaman syvyys, sekä betonin ikä ja koostumus (de Rooij, et al., 2013). Seuraava kuva 58 havainnollistaa kristallisoivalla lisäaineella olevan betonin halkeamien tiivistymistä kuva-analyysin avulla erilaisissa kosteusolosuhteissa. Pelkkä ilmankosteus ei saa lisäainetta toimimaan, vaan tulokset ovat sitä parempia, mitä enemmän vettä on saatavilla.



Kuva 58. Halkeaman tiivistymisaste eri kokoisille halkeamille ja eri kosteus olosuhteissa (Ferrara, et al., 2018).

Kristallisoivien lisäaineiden käyttö ja tutkimus betoniteknologiassa on alkanut lisääntyä vasta hiljattain, joten aiheesta ei löydy juuri mitään kotimaista kirjallisuutta. Ainoana mainittakoon Kähkösen (2019) kandidaatintutkielma: *Betonin vedenpaineeneristys kristallisoivilla lisäaineilla*. Tämän takia ei juuri ole tietoa, pystyisikö kristallisoivien lisäaineiden nojalla tinkimään betonin muista ainesosista tai betonirakenteen ominaisuuksista. Kristallisoiville lisäaineille ei myöskään löydy omaa kategoriaa betonin lisäaineiden määritelmiä ja vaatimuksenmukaisuuden osoittamista käsittelevästä standardista SFS-EN 934-2. Näin ollen, käytössä ei ole yhtenäisiä menetelmiä eri ominaisuuksien suorituskyvyn määrittelyyn ja varmentamiseen. Lisäaineen lupaavat ominaisuudet luulisivat kiinnostavan betonitehtaita, jotka voisivat tuotteistaa itsekorjaavan valmisbetonin omaan tarjontaansa. Jätebunkkerin suunnittelussa voidaan ainakin halkeamarajaa nostaa, halkeamia korjaavan vaikutuksen nojalla, Suomen kansallisen liitteen vaatimasta 0,2 mm rajasta noin 0,3 mm:iin. Tällä saavutetaan jo merkittäviä säästöjä raudoituksen määrässä.

4.5 Johtopäätökset jätteen aiheuttamista kemiallisista rasituksista

Jätebunkkerin betonitekninen suunnittelu on laaja ja haastava kokonaisuus. Betoniin käytönaikana kohdistuvat rasitukset ovat keskeisessä asemassa käytettävää betonia suunniteltaessa. Kemiallisten rasitusten huomioimiseen annetaan nykyisissä

eurooppalaisissa standardeissa niukasti ohjeistusta. Tämä selittyy kemikaalien laajalla kirjolla, joiden vaikutusten määrittäminen eri käyttöolosuhteissa ei välttämättä ole yksiselitteisesti standardisoitavissa. Kaatopaikoilla on harvoin merkittäviä betonirakenteita, joiden kemiallisten rasituksien tutkiminen ja optimointi olisi tärkeää. Tietoa jätteen sisältämistä betonille aggressiivisista kemikaaleista on siten niukasti. Paikallisesta jätteestä veteen liukenevat aggressiiviset kemikaalit tulisi selvittää Okovidon (2015) tutkimuksen tapaan, laboratoriossa liuottamalla. Jotta liuoksen todellinen aggressiivisuus jätebunkkerissa voitaisiin määrittää, tulisi myös bunkkereiden pohjilta kerätä suotovesinäytteitä. Rasituksen jatkuvuuden määrittämiseksi tulisi bunkkereiden pohjien lammikoitumista ja seinien kosteustilannetta seurata systemaattisesti. Tuloksien varmentamiseksi tulisi kerätä olemassa olevien bunkkereiden betonikoostumuksen tiedot ja porata näytteitä betonin laboratoriotutkimuksia varten. Laboratoriotutkimuksilla voitaisiin määrittää betonin todellinen tila ja kemiallisten rasituksien aiheuttamat todelliset vauriot. Kristallisoivien lisäaineiden ominaisuudet ovat lupaavia mutta, jotta niiden todellinen suorituskyky olisi määritettävissä, tulisi tuotevalmistajien julkaista tutkimustuloksiaan avoimemmin, sekä saattaa aineet standardien piiriin. Valmisbetonitehtaiden intressissä olettaisi olevan kristallisoivien lisäaineiden lisäys betoniperheisiinsä. Tämä tuottaisi lisätietoa aineiden suorituskyvystä ja toimivuudesta muiden betonin osa-aineiden kanssa.

5 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tarkentaa jätebunkkereiden rakennesuunnittelun lähtötietoja, jotta jatkossa bunkkerit voitaisiin suunnitella taloudellisemmin. Nykyiset lähtötiedot ja suunnittelumenetelmät perustuvat konservatiivisiin arvioihin, eikä niiden perusteella rakennetekninen optimointi ole mahdollista. Kansainvälisesti siirtymä jätteen kaatopaikkasijoituksesta kierrätykseen ja energia hyödyntämiseen on vasta alkamassa, joten jätevoimalaitoksia tullaan jatkossa rakentamaan runsaasti.

Tällä hetkellä jätteen aiheuttamien paineiden laskentaan on sovellettu siilostandardia. Standardin teoria pohjautuu niin kutsutun kiintoaineen käyttäytymiseen, eikä se siten onnistu täysin kuvamaan jätteen käyttäytymistä ja sen aiheuttamia paineita. Kiintoaineesta poiketen, jäte omaa vetolujuutta, koheesiota ja on hyvin kokoonpuristuvaa. Jätteen mekaanisten ominaisuuksien määrittäminen on perinteisempiä maa-aineksia ja kiintoaineksia hankalampaa, sillä jäte koostuu monenlaisista eri tavoin käyttäytyvistä materiaaleista. Jätteen ominaisuudet ovat myös vahvasti olosuhteista, kuten kosteuspitoisuudesta ja lämpötilasta riippuvaisia. Jätteen koostumus vaihtelee myös paikallisesti ja ajallisesti, joten ominaisuuksien päättely muualla tehdyistä vanhoista tutkimuksista on hankalaa. Mekaanisten ominaisuuksien määrittelyissä on käytetty geotekniikan mittaamenetelmiä. Tutkimuksien ongelma on, että jätteen partikkeli koot ovat maa-ainesta paljon suurempia, joten todellisuutta vastaavien tuloksien aikaan saamiseksi, tulisi ensin rakentaa jätteen mittakaavaa vastaavat testilaitteistot. Jätteen testausmenetelmät eivät ole standardisoituja, joka hankaloittaa tutkimustulosten vertailua. Jätteen lajittelututkimuksissa määriteltävä koostumus eli materiaalijakeisiin luokittelu ei myöskään ole standardisoitu ja poikkeaa tutkimuksien välillä. Tämä osaltaan vaikeuttaa tulkintaa. Jotta luotettaviin johtopäätöksiin pääsisi, pitäisi paikallisen jätteen ominaisuudet tutkia kokeellisesti. Kun mekaaniset ominaisuudet on ensin testattu, voi siilostandardin ja numeerisen laskennan avulla tutkia paineiden kehittymisen todellista luonnetta.

Jätteen kompostoitumisesta aiheutuvaa lämmöntuottoa voi arvioida kemiallisista reaktioetjuista stoikiometrisillä yhtälöillä. Vaikuttavia aineita ja tapahtuvia reaktioita on monia, joten yleensä lämmöntuottoa kuvataan vain muutamien eniten lämpöä tuottavien aineiden hajoamisella. Näiden kuvaavien aineiden määrän selvitys onnistuu kemiallisesti

liuottamalla. Tähän tietoon perustuen on myös muodostettu kaavoja, joilla jätteen koostumuksen voi pyrkiä muuntamaan näiksi lämmöntuottoa edustaviksi aineiksi. Tätä tarkempi menetelmä on mitata biojäteosuuden lämpöarvo kalorimetrillä. Kalorimetri testilaitteet ovat verrattain pieniä, joten koko biojätettä kuvaavan näytteen aikaan saaminen voi olla hankalaa. Kalorimetritestien tuloksiin on tehty empiirisiä sovituksia, joilla lämpöarvoa voi pyrkiä arvioimaan. Tämä voi perustua esimerkiksi biojätteen alkuainekoostumukseen, kunhan se on ensin kemiallisesti analysoitu. Kalorimetritestistä saatava lämpöarvo kuvaa täydellisen hajoamisen tuottamaa lämpöä, jota tulee muokata eri olosuhdetekijöiden vaikutuksilla. Jätteen lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti ovat myös mitattavissa kalorimetreillä ja esimerkiksi lämpövirtalevylaitteella. Kun jätettä ei ole kokeellisesti testattu, voi sen lämmönjohtavuuden ja ominaislämpökapasiteetin koota eri osa-aineiden ominaisuuksista painotettuna keskiarvona. Jätteen lämpötekniisiin ominaisuuksiin vaikuttaa voimakkaimmin kosteus ja tilavuuspaino, joiden vaikutus tulisi myös pyrkiä arvioimaan testejä tehdessä. Vanhoista tutkimuksista voi pyrkiä koostamaan jätteen lämpöominaisuuksia, mutta luotettavien lähtötietojen aikaan saaminen vaatii käytännön mittauksia. Paikalliset olosuhteet bunkkerissa vaikuttavat lämmöntuottoon suuresti. Esimerkiksi pohjoisissa olosuhteissa voi saapuva jäte olla jäässä, jolloin kompostoituminen ei käynnisty lainkaan. Lämpötiloja tulisikin seurata suoraan toiminnassa olevista bunkkereista. Lämpötilagradientin aiheuttaman pakkovoiman tarkempi huomiointi johtaa betonin epälineaarisen jäykkyyden käyttöön laskentamallissa. Tämä ei ole arkipäiväistä ja vaatii suunnittelijalta laskentaosaamista ja ymmärrystä käytettävien ohjelmistojen rajoituksista.

Betonin kemiallisen rasisluokan määrittämiseen annetaan eurooppalaisissa standardeissa ohjeistusta vain pohjaveden ja maaperän sisältämien kemiallisesti aggressiivisten aineiden osalta. Tämä jättää teollisuussektorin suunnittelijat omien erityisselvityksien ja osaamisen varaan. Yleisimpien aggressiivisten aineiden vaikutuksista betoniin löytyy tietoa kirjallisuudesta ja arvio tarvittavasta betonin koostumuksesta voi pohjautua siihen. Kaatopaikoilla on harvoin merkittäviä betonirakenteita, joten jätteestä liukenevia betonille aggressiivisiä kemikaaleja on tutkittu vähäisesti. Aggressiivisuuden suuruutta voi hakea esimerkiksi jäteveden pitoisuuksista, mutta todelliset olosuhteet bunkkerissa tulisi arvioida paikallista jätteen suotovettä analysoimalla ja käytössä olevien bunkkereiden betonia tutkimalla. Kemiallinen rasisluokka on betonin koostumusta suunniteltaessa määräävä, joten tarkemmat

lähtötiedot vaikuttavat suoraan kustannuksiin. Konservatiiviset rasitusluokat ja vesitiiveysvaatimukset johtavat pieniin halkeamarajoihin. Bunkkereiden betonissa on käytetty halkeamia korjaavia kristallisoivia lisäaineita. Niiden koostumukset ovat valmistajan toimesta salassa pidettyjä, eikä kotimaista kirjallisuutta aiheesta juuri ole. Kristallisoivien lisäaineiden nojalla halkeamarajaa on hieman nostettu, mutta jotta todellinen suorituskyky selkeytyisi, tulisi tutkimusmateriaalin olla avoimemmin esillä ja aihepiirin rakennusosalalla laajemmin käsitelty.

Opinnäytteestä muodostui ensimmäinen aihepiiriä käsittelevä selvitystyö. Työtä aloittaessa tiedettiin, että aihepiiri on haastava, sillä jätebunkkerin rakennesuunnittelun erityiskysymyksiä ei ole aiemmin käsitelty kirjallisuudessa. Jätteeseen liittyvien lähtötietojen määrittäminen johtaa aiheisiin, jotka eivät ole rakennesuunnittelijalle tavanomaisia. Edellä mainittuun ja oikeassa kontekstissa olevan tutkimuksen puuttumiseen nähden on lopputulos kattava. Jätteen aiheuttamien paineiden, lämpötilojen ja kemiallisten rasituksien tarkka määrittäminen aiempaan tutkimukseen pohjautuen ei juuri ole mahdollista. Tarkempien lähtötietojen aikaansaaminen vaatii käytännön tutkimuksia ja jokaiseen aihepiiriin erikseen syventymistä. Opinnäytetyön tuloksena eri aiheiden ongelmakentät ja jatkotutkimus tarpeet saatiin selvitettyä.

LÄHDELUETTELO

ACI 212.3R-16, 2016. Report on Chemical Admixtures for Concrete, Farmington Hills: American Concrete Institute ACI, 80 s.

Arsenault, P. J., 2021. Continuing Education Center Architecture + Construction, Improving Concrete Durability with Crystalline Technology [verkkosivu]. Detroit: BNP Media. Saatavissa: <https://continuingeducation.bnppmedia.com/courses/xypex-chemical-corporation/improving-concrete-durability-with-crystalline-technology/1/> [viitattu 22.09.2022].

ASTM D3080-11, 2012. Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. Philadelphia: American Society for Testing and Materials ASTM, 10 s.

Beaven, R. P., 2000. The hydrogeological and geotechnical properties of household waste in relation to sustainable landfilling [verkkodokumentti]. Väitöskirja. Lontoo: University of London. Saatavissa: <https://core.ac.uk/download/pdf/30695817.pdf> [viitattu 01.05.2022]. 387 s.

Bingjian, Z. et al., 2013. Effect of Water Content on the Shear Strength Parameters of Municipal Solid Waste. Electronic Journal of Geotechnical Engineering EJGE, 18, s. 1181-1188.

Bray, J. et al., 2009. Shear Strength of Municipal Solid Waste. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 135, s. 709-722.

de Rooij, M., Van Tittelboom, K., De Belie, N. & Schlangen, E., 2013. State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials. Painos 11. New York: Springer, 279 s. ISBN 978-94-007-6623-5

Eurostat, 2021. Eurostat Statistics Explained [verkkodokumentti]. Luxemburg: Eurostat. Saatavissa: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/10360.pdf> [viitattu 01.05.2022].

Faitli, J., Magyar, T., Erdelyi, A. & Muranyi, A., 2015. Characterization of thermal properties of municipal solid waste landfills. *Waste Management*, 36, s. 213-221.

Falamaki, A. & Shahin, S., 2018. Determination of Shear Strength Parameters of Municipal Solid Waste from Its Physical Properties, 43, s.193-201.

Fan, S. et al., 2021. Heat potential, generation, recovery and utilization from composting: A review. *Resources, Conservation & Recycling*, 175(105850)

Ferrara, L., Cuenca, E., Tejedor, A. & Gastaldo Brac, E., 2018. Performance of concrete with and without crystalline admixtures under repeated cracking/healing cycles. *MATEC Web of Conferences*, 199(02016)

Flores, M. R., 2018. Self-Healing Concrete: Efficiency Evaluation and Enhancement with Crystalline Admixtures [verkkodokumentti]. Väitöskirja. Valencia: Polytechnical University of Valencia. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/10251/100082> [viitattu 01.05.2022]. 239 s.

Gao, X., Wei, Y. & Huang, W., 2017. Strain-based equivalent temperature gradient in concrete pavement and comparison with other quantification methods. *Road Materials and Pavement Design*, 18(6)

Haikonen, M., 2021. Sekajätteen lajittelututkimus ja jäteastioiden täyttöastetutkimus Ylä-Savon Jätehuolto Oy:n toimialueella [verkkodokumentti]. Opinnäytetyö. Kuopio: Savonia-Ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2021053112667> [viitattu 01.05.2022]. 53 s.

Hanson, J. & Yesiller, N., 2008. Analytical and Numerical Methodology for Modeling Temperatures in Landfills. *Proceedings of Selected Sessions of GeoCongress 08: Geotechnics of Waste Management and Remediation*, 177, s.24-31.

Hanson, J. et al., 2013. Development of numerical model for predicting heat generation and temperatures in MSW landfills. *Waste Management*, 33(10), s. 1993-2000.

Hao, Z., 2020. Understanding and Predicting Temperatures in Municipal Solid Waste Landfills [verkkodokumentti]. Väitöskirja. Raleigh: North Carolina State University. Saatavissa: <http://www.lib.ncsu.edu/resolver/1840.20/37218> [viitattu 01.05.2022]. 143 s.

Hoornweg, D. & Bhada-Tata, P., 2012. What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management [verkkodokumentti]. Washington: World Bank. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/10986/17388> [viitattu 01.05.2022]. 116 s.

Hossain, M. S., Gabr, M. A. & Asce, F., 2009. The effect of shredding and test apparatus size on compressibility and strength parameters of degraded municipal solid waste. *Waste Management*, 29(9), s. 2417-2424.

Huang, Y.-F. & Lo, S.-L., 2020. Predictin heating value of lignocellulosic biomass based on elemental analysis. *Energy*, 191(116501).

Hulc, B. G., 2021. Derivation of First-Order Decay Heat Generation Function and Prediction of Thermal Energy Potential for Municipal Solid Waste Landfill [verkkodokumentti]. Diplomityö. Saskatoon: University of Saskatchewan. Saatavissa: <https://hdl.handle.net/10388/13646> [viitattu 01.05.2022] 144 s.

Huttunen, M., 2019. Kausivaihteluiden vaikutus kierrätyspolttoaineen (yhdyskuntajäte) käytettävyyteen energiantuotannossa [verkkodokumentti]. Opinnäytetyö. Kuopio: Savonia-Ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2019100419542> [viitattu 01.05.2022]. 57 s.

ISO 15686-1, 2011. Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 1: General principles and framework. Geneva: International Standardization Organization ISO, 21 s.

Itriago Rodríguez, R. N., 2021. Study of the performance of waterproofing additives capable of promoting the Self-Healing in Concrete [verkkodokumentti]. Diplomityö. Torino: Politecnico Di Torino. Saatavissa: <http://webthesis.biblio.polito.it/id/eprint/19456> [viitattu 01.05.2022]. 131 s.

Itävaara, M. et al., 2006. Kompostoinnin kypsyystestit. Menetelmäohjeet. [verkkodokumentti]. Tiedote. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus VTT.

Saatavissa: <https://publications.vtt.fi/pdf/tiedotteet/2006/T2351.pdf> [viitattu 01.05.2022]. 43 s.

Ivanova, L., Richards, D. & Smallman, D., 2008. Assessment of The Anaerobic Biodegradation Potential of MSW. Waste and Resource Management, 161(WR4), s. 167-180.

Jääskeläinen, R., 2011. Geotekniikan perusteet. Painos 4. Tampere: Tammertekniikka / Amk-Kustannus Oy, 387 s. ISBN 978-952-5491-68-5

Kavazanjian, E., Matasovic, N., Bonaparte, R. & Schmertmann, G., 1995. Evaluation of MSW Properties for Seismic Analysis. Geoenvironment 2000, 2(46), s. 1126-1141.

Keramati, M., Shahedifar, M., Aminfar, . M. & Alagipuor, H., 2020. Evaluation the Shear Strength Behavior of Aged MSW Using Large Scale In-Situ Direct Shear Test, A Case of Tabriz Landfill. International Journal of Civil Engineering, 18(2), s. 717-733.

Kettunen, T., 2018. Betonin kemikaalikestävyys ja suojaaminen kemikaaleilta teollisuusrakentamisessa [verkkodokumentti]. Diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tyy-201805221778> [viitattu 01.05.2022] 123 s.

Kierikka, K., 2014. Pian jäte palaa Leppävirralla - laitoksen toimittaa Andritz. Talouselämä [verkkodokumentti], 16.10.2014. Saatavissa: <https://www.talouselama.fi/uutiset/pian-jate-palaa-leppavirralla-laitoksen-toimittaa-andritz/4ca3c6ee-0ad0-3622-9b0d-60a80ace79e1> [viitattu 31.10.2022].

KIVO, 2020. Suomen kiertovoima, Koostumustietopankki [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen Kiertovoima ry. Saatavissa: <https://kivo.fi/yymmarramme/koostumustietopankki/> [viitattu 07.06.2022].

KIVO, 2022. Suomen kiertovoima, Yhdyskuntajätehuolto lukujen valossa [verkkodokumentti]. Helsinki: Suomen Kiertovoima ry. Saatavissa: <https://kivo.fi/yymmarramme/yhdyskuntajatehuolto-lukujen-valossa/> [viitattu 30.10.2022].

Komilis, D., Evangelou, A., Giannakis, G. & Lymperis, C., 2012. Revisiting the Elemental Composition and The Calorific Value of The Organic Fraction of Municipal Solid Wastes. *Waste Management*, 32(3), s. 327-381.

Kähkönen, M., 2019. Betonin vedenpaineeneristys kristallisoivilla lisäaineilla [verkkodokumentti]. Kandidaatintutkielma. Tampere: Tampereen yliopisto. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-201906232173> [viitattu 01.05.2022] 33 s.

Kölsch, F., 1995. Material Values for Some Mechanical Properties of Domestic Waste [verkkodokumentti]. Braunschweig: Dr. Kölsch GmbH. Saatavissa: <http://www.dr-koelsch.de/html/resources.html> [viitattu 01.05.2022]. 20 s.

Lahtonen, A., 2018. Riikinvoiman ekovoimalaitoksen polttoaineen laadunhallinta [verkkodokumentti]. Opinnäytetyö. Kuopio: Savonia-Ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2018060612910> [viitattu 01.05.2022]. 30 s.

Langer, U., 2005. Shear and Compression Behaviour of Undegraded Municipal Solid Waste [verkkodokumentti]. Väitöskirja. Loughborough: Loughborough University. Saatavissa: <https://hdl.handle.net/2134/3203> [viitattu 01.05.2022]. 317 s.

Lehikoinen, N., 2015. Teräsbetonisen kulmatukimuurin mitoitus eurokoodein [verkkodokumentti]. Opinnäytetyö. Helsinki: Metropolia Ammattikorkeakoulu. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201503052776> [viitattu 01.05.2022]. 65 s.

Leminen, A., 2015. Lämpökuormien ja betonin kutistumisen aiheuttamien rasiusten laskenta FEM-ohjelmilla ja niiden vaikutus betonisen allasrakenteen mitoitukseen [verkkodokumentti]. Diplomityö. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201501291010> [viitattu 01.05.2022]. 152 s.

Liikenne- ja viestintäministeriö, 2010. Kansallinen liite (LVM) standardiin: SFS-EN 1992-2 Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 2: Sillat [verkkodokumentti]. Ohje. Helsinki: Liikenne- ja viestintäministeriö. Saatavissa: <https://ava.vaylapiivi.fi/ava/Julkaisut/Liikennevirasto/eurokoodit/> [viitattu 01.05.2022]. 15 s.

Lu, X., Lai, H. & Huang, M., 2014. Nonlinear strength criterion for municipal solid waste. *Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics*, 279-284.

Manjunatha, G. et al., 2020. Specific heat and thermal conductivity of municipal solid waste and its effect on landfill fires. *Waste Management*, 116, s. 120-130.

Manninen, K., 2018. Riikinvoima varoittaa jätevoimalaitosten päästökaupasta. *Savon Sanomat* [verkkodokumentti], 14.08.2018. Saatavissa: <https://www.savonsanomat.fi/paikalliset/2943039> [viitattu 31.10.2022].

Mehdizadeh, M., Shariatmadari, N. & Karimpour-Fard, M., 2020. Probabilistic slope stability analysis in Kahrizak landfill: effect of spatial variation of MSW's geotechnical properties. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79, s. 2679-2695.

Moore, I., Abdel-Fattah, M. & Abdel-Fattah, T., 2006. A numerical investigation into the behavior of ground-supported concrete silos filled with saturated solids. *International Journal of Solids and Structures*, 43(13), s. 3723-3738.

Mustankorkea Oy, 2022. Mustankorkea, Jätteenpoltto [verkkosivu]. Jyväskylä: Mustankorkea Oy. Saatavissa: <https://mustankorkea.fi/neuvonta/jatteiden-kasittely-lajitteluohteet/jatteenkasittelyprosessit/jatteenpoltto/> [viitattu 31.10.2022].

Nygård, H., 2018. Lannanjälöstamisestä kiertotalouteen: Katsaus Suomen jätehuollon pitkän ajan kehitykseen. *Tekniikan Waiheita*, 36(2), s. 25-40.

Okovido, J. O., 2015. Durability Considerations for Concrete Containment Liners Use in Engineered Landfills. *Journal of Civil and Environmental Systems Engineering*, 13(1), s. 121-141

Petrow, S., Heikkinen, M., Forsman, J. & Pirinen, M., 2017. Betoniset viemäri- ja hulevesijärjestelmät -suunnittelu ja toteutus. Helsinki: Betoniteollisuus ry, 158 s. ISBN 978-952-5351-21-7

Pipatpongsa, T. & Vardhanabhuti, B., 2009. Analysis of coefficient of lateral earth pressure in wedge-shaped granular mound based on Jaky's (1994) hypothesis. *Proceedings of the 14th National Conference in Civil Engineering*, s. 147-152

Portaankorva, S., 2019. Maanpaineen laskeminen eri teorioilla [verkkodokumentti]. Kandidaatintutkielma. Tampere: Tampereen Yliopisto. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-201911246225> [viitattu 01.05.2022] 34 s.

Portelinha, F., Correia, N. & Daciolo, L., 2020. Impact of temperature on immediate and secondary compression of MSW with high and low food contents. *Waste Management*, 118, s. 258-269.

Pulat, H. & Yukselen-Aksoy, Y., 2017. Factors affecting the shear strength behavior of municipal solid wastes, 69, s. 215-224.

Pöyry Management Consulting Oy, 2015. Jätteiden energiahyödyntäminen Suomessa [verkkodokumentti]. Helsinki: Energiateollisuus ry. Saatavissa: https://energia.fi/uutishuone/materiaalipankki/jatteiden_energiahyodyntaminen_suomessa_poyry_2015.html [viitattu 30.10.2022]. 39 s.

Ramaiah, B., Ramana, G. & Datta, M., 2017. Mechanical characterization of municipal solid waste from two waste dumps at Delhi, India. *Waste Management*, 68, s. 275-291.

RIL 166, 1986. Pohjarakenteet. Helsinki: Suomen rakennusinsinöörien liitto, 597 s. ISBN 951-758-108-4

Roininen, M., 2018. Mekaanisen jätteenkäsittelyprosessin rejektien jatkojalostusmahdollisuudet vesierotustekniikalla [verkkodokumentti]. Diplomityö. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2018042719225> [viitattu 01.05.2022] 105 s.

Sadowski, A. J., 2010. Modelling of failures in thin-walled metal silos under eccentric discharge [verkkodokumentti]. Väitöskirja. Edingburgh: University of Edinburgh. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/1842/8760> [viitattu 01.05.2022]. 412 s.

Sang, N. N., Soda, S., Ishigaki, T. & Ike, M., 2012. Microorganisms in landfill bioreactors for accelerated stabilization of solid wastes. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 114(3), s. 243-250.

Scarlat, N., Fahl, F. & Dallemard, J.-F., 2019. Status and Opportunities for Energy Recovery from Municipal Solid Waste in Europe. *Waste and Biomass Valorization*, 10, s. 2425-2444.

Schulze, D., 2019. Stresses in Silos Part 1: Bulk Solid Properties – Stresses in The Vertical Section. *Bulk Solids Handling* [verkkodokumentti], 37(2). Saatavissa: <https://news.bulk-online.com/bulk-solids-handling-archive/stresses-in-silos-part-1-bulk-solid-properties-stresses-in-the-vertical-section.html> [viitattu 02.06.2022].

SFS 7022, 2019. Betoni. Standardin SFS-EN 206 käyttö Suomessa. Painos 3. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS, 36 s.

SFS-EN 14879-3, 2007. Orgaaniset pinnoitteet ja vuoraukset teollisuuslaitteiden ja tuotantolaitosten suojaamiseen syövyttävien väliaineiden aiheuttamalta korroosiolta. Osa 3: Betoniosien pinnoitteet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, 111 s.

SFS-EN 15934, 2012. Sludge, treated biowaste, soil and waste - Calculation of dry matter fraction after determination of dry residue or water content. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, 21 s.

SFS-EN 1990, 2006. Eurokoodi: Rakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, 186 s.

SFS-EN 1991-1-5, 2004. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-5: Yleiset kuormat. Lämpötilakuormat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, 70 s.

SFS-EN 1991-4, 2006. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 4: Siilojen ja säiliöiden kuormat. Painos 2. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, 203 s.

SFS-EN 1992-1-1, 2015. Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Painos 2. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, 220 s.

SFS-EN 1992-3, 2006. Eurokoodi 2. Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 3: Nestesäiliöt ja siilot. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS, 24 s.

SFS-EN 1997-1, 2014. Eurokoodi 7: Geotekninen suunnittelu. Osa 1: Yleiset säännöt. Painos 3. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, 163 s.

SFS-EN 206, 2014. Betoni. Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimustenmukaisuus. Painos 3. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, 93 s.

SFS-EN 934-2, 2013. Betonin, laastin ja injektointilaastin lisäaineet. Osa 2: Betonin lisäaineet. Määritelmät, vaatimukset, vaatimustenmukaisuus ja merkintä. Painos 5. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS, 23 s.

SFS-EN ISO 1716, 2018. Reaction to fire tests for products - Determination of the gross heat of combustion (calorific value) (ISO 1716:2018). Painos 3. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, 36 s.

Shariatmadari, N., Karimpour-Fard, M., Keramati, M. & Naebi, A., 2011. Fiber Content Impact on the Shear Strength of MSW Materials in Direct Shear Tests. *International Waste Management and Landfill Symposium*, 13.

Shariatmadari, N., Razaghian, F. & Razaghian, F., 2014. Effects of aging on shear strength behavior of municipal solid waste. *International Journal of Civil Engineering, Geotechnique*, 12(3), s. 414-425.

Sheng, C. & Azevedo, J., 2005. Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. *Biomass and Bioenergy*, 28(5), s. 499-507.

Sokolovs, A. et al., 2015. Heat Recovery Technologies from Aerobic Bio-degradation: from Theoretical Finding to Modelling Results. *Procedia Computer Science*, 77, s. 141-150.

Suomen Betoniyhdistys ry, 2016. By68 Betonin valinta ja käyttöikäsuunnittelu - opas suunnittelijoille 2016. Helsinki: BY-Koulutus Oy, 95 s. ISBN 978-952-68619-1-3

Suomen Betoniyhdistys ry, 2018. By201 Betonitekniikan oppikirja 2018. Helsinki: BY-Koulutus Oy, 568 s. ISBN 978-952-68619-4-4

Suomen Betoniyhdistys ry, 2021. By65 Betoninormit 2021. Helsinki: BY-Koulutus Oy, 157 s. ISBN 978-952-7314-09-8

Turvallisuus ja kemikaalivirasto, 2015. Vaarallisten kemikaalien varastointi [verkkodokumentti]. Opas. Helsinki: Turvallisuus ja kemikaalivirasto TUKES. Saatavissa: https://tukes.fi/documents/10197/8647605/Vaarallisten_kemikaalien_varastointi.pdf [viitattu 01.05.2022]. 73 s. ISBN 978-952-5649-70-3

Vinha, J. et al., 2005. Rakennusmateriaalien rakennusfysikaaliset ominaisuudet lämpötilan ja suhteellisen kosteuden funktiona [verkkodokumentti]. Tutkimusraportti. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-2011041510640> [viitattu 01.05.2022] 321 s.

Virta, T., 2022. Kaatopaikkavesien ravinteiden talteenotto ja kierrätys [verkkodokumentti]. Kandidaatintutkielma. Lappeenranta: Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT. Saatavissa: <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2022050633326> [viitattu 01.05.2022]. 44 s.

Wang, R., Ong, D., Peerun, M. & Jeng, D.-S., 2022. Influence of Surface Roughness and Particle Characteristics on Soil-Structure Interactions: A state of the art review. *Geosciences*, 12(145).

White, J. K., 2008. The application of LDAT to the HPM2 challenge. *Waste and Resource Management*, 161(4), s. 137-146.

Wu, Q., Dong, Y. & Rao, J., 2019. Temperature stress of waste bunker in municipal solid waste incineration power generation plant. *Vibroengineering PROCEDIA*, 28, s. 165-170.

Xiao, D., Chen, Y., Xu, W. & Zhan, L., 2021. An Aerobic Degradation Model for Landfilled Municipal Solid Waste. *MDPI Applied Sciences*, 11(16), 7557.

Xypex Chemical Corporation, 2022. The Xypex Catalogue, Concrete Waterproofing by Crystallization [verkkodokumentti]. Richmond: Xypex Chemical Corporation. Saatavissa: <https://www.xypex.com/library/literature> [viitattu 22.09.2022]. 291 s.

Ympäristöministeriö, 2019. Eurokoodien SFS-EN 1991 kansalliset liitteet [verkkodokumentti]. Ohje. Helsinki: Ympäristöministeriö. Saatavissa: <https://www.eurocodes.fi/ymn-kansalliset-liitteet/> [viitattu 01.05.2022]. 51 s.

Zekkos, D., 2008. Geotechnical Characterization, Field Measurement and Laboratory Testing of Municipal Solid Waste, Virginia: American Society of Civil Engineers ASCE, 248 s. ISBN 978-0-7844-1146-9

Zekkos, D., 2017. Response of municipal solid waste to mechanical compression. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 143(3)

Zekkos, D. et al., 2010. Large-scale direct shear testing of municipal solid waste. *Waste Management*, 30(8-9), s. 1544-1555.

Zekkos, D. & Bray, J., 2007. Compositional and loading rate effects on the shear strength of municipal solid waste. *International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, 4(1525).

Zekkos, D. & Fei, X., 2017. Constant load and constant volume response of municipal solid waste in simple shear, 63, s. 380-392.