

FINNCAO OY

**METSÄTEOLLISUUDEN LENTOTUHKIEN
KÄYTTÖ TIE-, KATU- JA KENTTÄRAKEN-
TEISSA**

FINNCAO



**MAALISKUU
2005**

SUUNNITTELU- JA MITOITUSOHJE

SISÄLTÖ

ALKUSANAT	2
I LENTOTUHKIEN OMINAISUUDET	3
1. Johdanto	3
2. Lentotuhkan materiaaliominaisuudet	4
2.1 Fysikaaliset ominaisuudet	4
2.11 Vesipitoisuus	4
2.12 Hehkutushäviö	4
2.13 Rakeisuus	5
2.14 Tiivistettävyys ja tilavuuspaino	5
2.2 Hydrauliset ominaisuudet	6
2.3 Mekaaniset ominaisuudet	7
2.31 Lujuus	7
2.32 Kantavuus	8
2.4 Routivuus	8
2.5 Lämpötekniset ominaisuudet	8
2.6 Jäätymättömän veden määrä tuhkamateriaalissa	9
3. Ympäristökelpoisuus	9
II SUUNNITTELUOHJE	12
4. Lentotuhkarakenteen suunnittelu ja mitoitus	12
4.1 Suunnittelun ja mitoituksen perusteet	12
4.2 Routamitoitus	12
4.3 Kantavuusmitoitus	15
5. Kasavarastoitu lentotuhka sidottuna rakenteena	16
III LENTOTUHKARAKENTEIDEN RAKENTAMINEN	19
6. Rakentamisen työselitys	19
6.1 Ohjeen soveltaminen	19
6.2 Kasavarastoidun lentotuhkan varastointi, käsittely ja kuljetus	19
6.3 Kuivatus ja alusrakenteet	19
6.4 Päälysrakenne	19
6.41 Suodatinkerros	19
6.42 Rakentaminen	20
6.43 Kasavarastoidun lentotuhkan laatuvaatimukset	20
7. Kirjallisuus	21
LIITTEET	23

ALKUSANAT

Suomen metsäteollisuuden energiantuotannossa muodostuu vuosittain noin 350 000 tonnia maa- ja ympäristörakentamisessa hyödyntämiskelpoisia tuhkakajeita. Suurin osa tuhkasta on lentotuhkaa, joka on suhteellisen hienorakeista ja kuivana pölyävää materiaalia. Lentotuhkien materiaaliominaisuuksia ja hyötykäyttötapoja on tutkittu useissa yhteyksissä määrätietoisesti jo 1970-luvulta alkaen. Tuhkien käyttö erilaisissa sovelluksissa on lisääntynyt tutkimus- ja kehittämistyön seurauksena ja esimerkiksi massa- ja paperiteollisuuden tuhkien hyötykäyttöaste v. 2003 oli 48,7 %. Uusia hyötykäyttötapoja tutkitaan kuitenkin edelleen aktiivisesti.

Tällä hetkellä (v. 2005) on valmisteltavana valtioneuvoston asetus eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa /8/. Metsäteollisuuden energiantuotannossa muodostuvat lentotuhkat kuuluvat ehdotuksessa määriteltyihin jätteisiin. Asetuksen voimaantulon jälkeen sen piiriin kuuluvien jätteiden hyötykäyttö voitaisiin toteuttaa raskaan ympäristölupamenettelyn sijaan ilmoitusmenettelyllä. Asetuksen mukaisina hyötykäyttökohteina olisivat

- ajoväylät ja niiden liitännäisalueet, pois lukien yksityiset tiet ja meluesteet
- pysäköintialueet, ratapihat sekä urheilukentät ja teollisuusalueilla sijaitsevat varastokentät

Tätä ohjetta voidaan käyttää apuna suunniteltaessa lentotuhkarakenteita sekä asetusluonnoksen mukaisiin että sen ulkopuolelle jääviin kohteisiin.

Kasavarastoitu lentotuhka on routimatonta materiaalia. Se sisältää vain vähäisiä määriä ympäristölle haitallisia aineita, joiden liukoisuus on todettu pieneksi. Lentotuhkan potentiaalisia käyttökohteita ovat tie, katu- ja kenttärakenteiden rakennekerrokset sekä erilaiset täyttökerrokset, joissa materiaalilta edellytetään routimattomuutta.

Tämän ohjeen piiriin kuuluvat Suomen metsäteollisuuden energiantuotannossa muodostuvat kasavarastoidut lentotuhkat. Ohjeen on kirjoittanut DI Eero Huttunen. Tämä ohje on osa ”Metsäteollisuuden tuhkien hyötykäyttö” -hanketta. Ohjeen kirjoittamista on ohjannut ja valvonut ryhmä, johon kuuluvat:

Jaakko Soikkeli	Finncao Oy
Ari-Pekka Heikkilä	Finncao Oy
Kauko Kujala	Oulun yliopisto
Jukka Palko	Envitop Oy.

I LENTOTUHKIEN OMINAISUUDET

1. Johdanto

Suomessa muodostuu metsäteollisuudessa voimalaitostuhkaa vuosittain lähes 350 000 tonnia. Tuhka muodostuu poltettaessa turvetta, puuta, puun kuorta, öljyä ja kivihiiltä. Joissain tapauksissa varsinaisen polttoaineen seassa käytetään puunjalostuksen prosesseissa muodostuvia sivutuotteita, kuten esimerkiksi jätevesilietteitä. Polttoaineen koostumus, palamisprosessi sekä tuhkan keräysjärjestelmät määräävät muodostuvan tuhkan ominaisuudet. Astinvaraisin havainnoin selvimmin erottuvat karkearakeiset *arina-* ja *pohjatuhkat* hienorakeisimmista ja kuivana voimakkaasti pölyävistä *lentotuhkista*.

Tällä hetkellä (2005) suuri osa tuhkasta sijoitetaan kaatopaikoille tai tuhkien läjitysalueille. Tämä toiminta aiheuttaa mm. kuljetuksesta, läjityksestä sekä sijoitusalueiden ylläpidosta muodostuvia kustannuksia, joiden määrä tulevaisuudessa kasvaa ympäristölainsäädännön kiristymisen seurauksena. Tuhkan sijoittaminen vaatii myös runsaasti tilaa ja estää tuhkan sijoituspaikkojen maankäytön muihin vaihtoehtoihin tarkoituksiin.

Suurin hyötykäyttöpotentiaali tuhkalle muodostuu sen käytöstä luonnon kiviainesta korvaavana materiaalina. Erityisesti maarakentamisessa ja rakennusaineteollisuudessa tarvitaan runsaasti kiviaineksia, joita voidaan korvata tuhkalla. Jo pelkästään maarakentamisessa käytetään maassamme vuosittain noin 80 miljoonaa tonnia luonnon kiviaineksia. Lentotuhkan kiviainesfillerin tapaisen raekokojakauman vuoksi sitä voidaan käyttää mm. asfaltin ja betonin täytejauheena tai sideaineena. Samasta syystä arina- ja pohjatuhkia voidaan käyttää hiekkojen ja soramateriaalien tapaan. Tuhkien toiminta hydraulisina sideaineina laajentaa niiden hyötykäyttömahdollisuuksia myös sidottuihin rakenteisiin ja materiaaleihin. Lisäpotentiaalia muodostavat tuhkien käyttö lannoitteina sekä likaantuneen veden käsittelymateriaalina eri muodoissa. Valmisteilla oleva valtioneuvoston asetus tekee eräiden muiden teollisuuden sivutuotteiden ja uusiomateriaalien ohella myös tuhkien hyötykäytön mahdolliseksi tie-, katu- ja kenttärakenteissa ilman ympäristölupamenettelyä.

Hyötykäytön edellytyksinä ovat voimalaitostuhkien sovelluskohtaisen ympäristökelpoisuuden varmistaminen ja tuhkarakenteiden elinkaareen perustuva teknistaloudellinen kilpailukyky vaihtoehtoratkaisuihin verrattuna. Näiden seikkojen vuoksi sivutuotteiden turvallinen käyttö edellyttää materiaalien teknisten ominaisuuksien ja ympäristökelpoisuuden tuntemista pitkäaikaisissa käyttöolosuhteissa. Sivutuotteiden käyttöönottoa edeltääkin usein monivuotinen tutkimus- ja tuotekehitysvaihe, jossa selvitetään tuotteen materiaaliominaisuudet laboratorio-olosuhteissa ja käyttäytyminen maarakenteissa koerakentamisen ja pitkäaikaisen seurannan avulla.

Kasavarastoinnin aikana lentotuhkissa tapahtuu hienoainepartikkelien yhteenliittymistä, jonka seurauksena materiaalin rakeisuus muuttuu karkeammaksi. Tämä muutos parantaa lentotuhkan routa- ja kuormituskestävyysominaisuuksia. Maa- ja ympäristörakentamisessa kasavarastoidun lentotuhkan etuina ovat erityisesti routimattomuus, luonnonmaamate-

riaaleja tehokkaampi roudan syvyyden rajoittaminen sekä keveys. Kantavuudeltaan kasavarastoitu lentotuhka voidaan rinnastaa suodatinkerroksen hiekkaan, lisäksi se yleensä täyttää tie-, katu- ja kenttärakenteiden suodatinkerroksille asetetut vaatimukset. Kasavarastoitu lentotuhka sisältää vain vähäisiä määriä ympäristölle haitallisia aineita ja yhdisteitä, joiden liukoisuus on todettu pieneksi.

Kasavarastoitua lentotuhkaa voidaan käyttää mm. ajoväylien ja niiden liitännäisalueiden, pysäköintialueiden, ratapihojen sekä urheilu- ja varastointikenttien rakennekerroksiin. Lisäksi käyttökohteiksi soveltuvat erilaiset täyttökerrokset. Lentotuhkaa voidaan käyttää maa- ja ympäristörakentamisessa joko sellaisenaan, sideaineena tai runkoaineena yhdessä sitovien materiaalien kanssa. Tässä ohjeessa esitetään tekniset suunnitteluparametrit sekä ja routa- ja kantavuusmitoituksen perusteet kasavarastoidun lentotuhkan käytölle maa- ja ympäristörakentamisessa.

2. Lentotuhkan materiaaliominaisuudet

Tämän ohjeen piiriin kuuluvat Suomen metsäteollisuuden energiantuotannossa muodostuvat kasavarastoidut lentotuhkat. Kasavarastoidulla lentotuhkalla tarkoitetaan tässä ohjeessa tuhkaa, joka on kostutettu ennen läjittämistä ja on ollut varastoituna vähintään 1 kk ajan yli + 5°C lämpötilassa.

Esitettävät materiaaliominaisuudet on määritetty maarakentamisessa yleisesti käytettyjen ohjeiden ja normien mukaisesti /3/. Materiaalia koskevat yksityiskohtaiset tutkimusraportit ja selvitykset on tehty tutkimushankkeessa ”Metsäteollisuuden tuhkien toiminnalliset ominaisuudet” /9,10/.

2.1 Fysikaaliset ominaisuudet

2.11 Vesipitoisuus

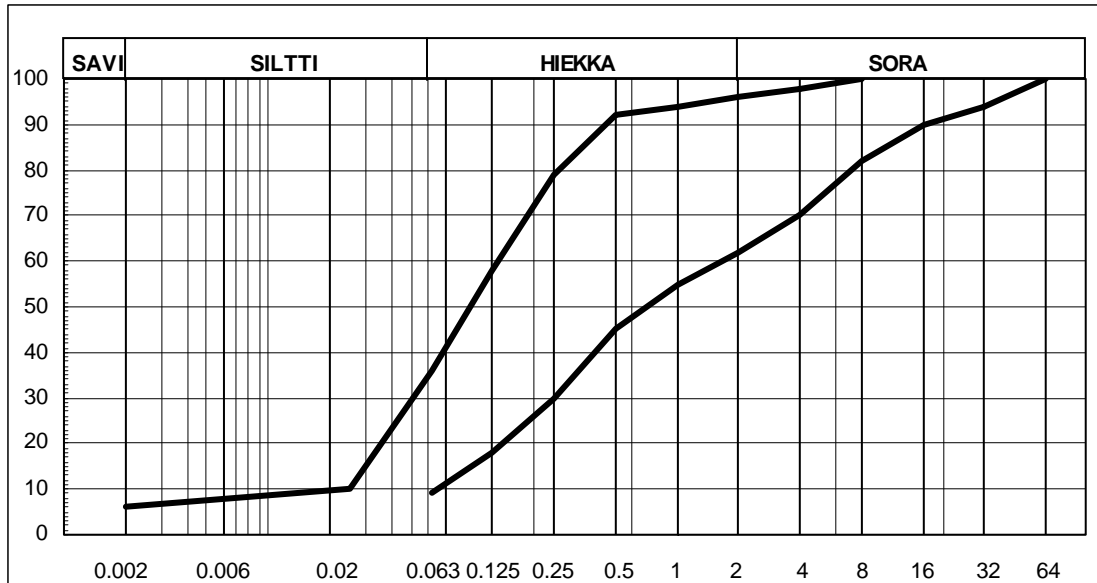
Lentotuhka on siilossa polton jälkeen kuivaa ($w = 0$ %). Siilosta purettaessa se useimmiten kostutetaan ennen kuljetusta varastointialueelle. Varastointikasassa olevan lentotuhkan geotekninen vesipitoisuus (materiaalin sisältämän veden massa jaettuna kuivan näytteen massalla prosentteina ilmaistuna) on pitkän varastoinnin jälkeen tyypillisesti 40-60 %.

2.12 Hehkutushäviö

Kasavarastoidun lentotuhkan hehkutushäviö on tavallisesti 6-11 %. Hehkutushäviö ei aina kuvaa palamattoman aineksen määrää, sillä kasavarastoinnissa syntyneiden reaktiotuotteiden muuttuminen lämpötilavälillä 105-800 °C suurentaa hehkutushäviötä.

2.13 Rakeisuus

Kasavarastoidun lentotuhkan rakeisuus vaihtelee geoteknisen maalajiluokituksen mukaan silttisestä hiekasta (siHk) soraiseen hiekkaan (srHk), (kuva 1). Hienoaineksen määrä on 9-34 %. Keskimääräinen raekoko d_{50} on 0,30 mm. Lentotuhkan väri vaihtelee vaalean ruskeasta harmaaseen ja joissain tapauksissa mustaan. Kaikissa tuhkissa esiintyy tikku-maisia, levymäisiä ja pallomaisia raemuotoja, joiden määräsuhteet vaihtelevat polttoai-neesta ja palamisprosessista riippuen.



Kuva 1. Kasavarastoidun lentotuhkan raekokojakauman vaihteluväli.

2.14 Tiivistettävyys ja tilavuuspaino

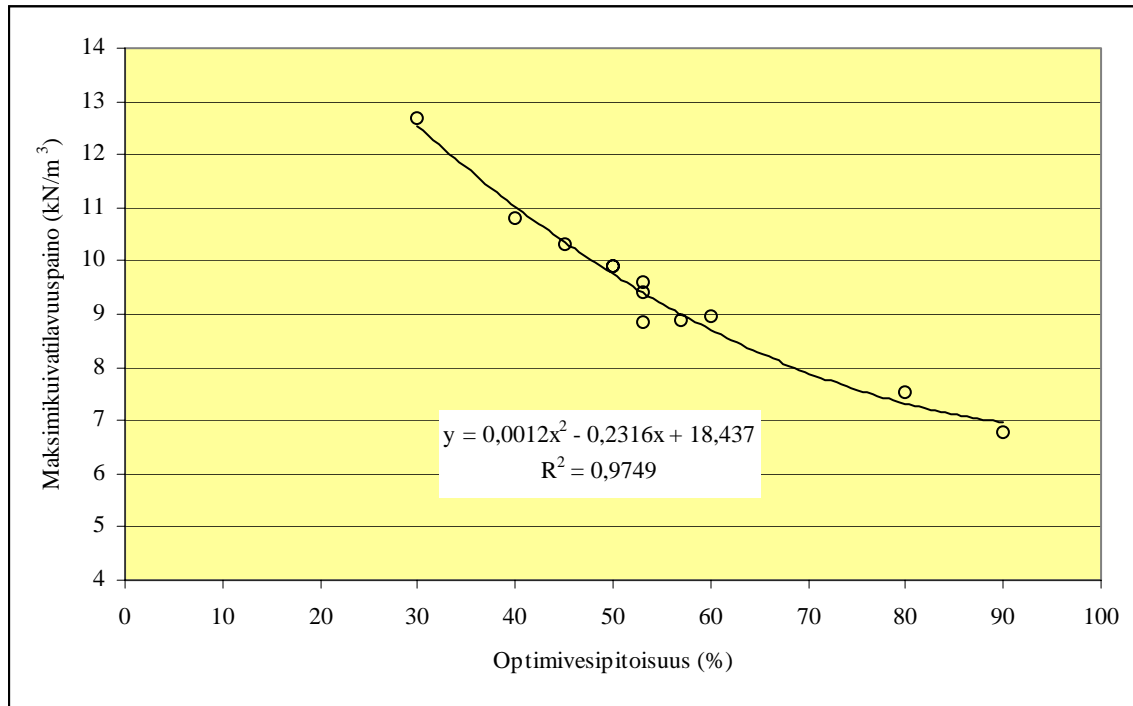
ICT- kiertotiivistyslaitteella saavutettava maksimikuivatilavuuspaino γ_{dmax} on 8,00-12,00 kN/m^3 kuvan 2 mukaisesti optimivesipitoisuuden ollessa vastaavasti 45-60 %. Kuvan 2 esittämä käyrä on muodoltaan 2. asteen polynomifunktio:

$$\gamma_{dmax}=0,0012w_{opt}^2-0,2316w_{opt}+18,437 \quad (1)$$

missä γ_{dmax} on ICT-kiertotiivistyslaitteella saavutettava maksimikuivatilavuus-
paino (kN/m^3)
 w_{opt} optimivesipitoisuus (%)

Kasavarastoidun lentotuhkan geotekninen vesipitoisuus (materiaalin sisältämän veden massa jaettuna kuivan näytteen massalla prosentteina ilmaistuna) w on tavallisesti 40-60 % tuhkan laadusta sekä varastointitavasta ja -ajasta riippuen. Mikäli rakentamisessa käytettävän lentotuhkan vesipitoisuus on pieni (noin 40 % tai sen alle), ja tiivistyksen jälkeen mitattu kuivatilavuuspaino on huomattavasti pienempi kuin kuvasta 2 saatava arvo, on kyseisen lentotuhkan optimivesipitoisuus todennäköisesti suurempi kuin tiivistysvaiheen

vesipitoisuus. Tällöin tiiviysastetta voidaan kasvattaa kastelemalla tuhka ennen tiivistyön suorittamista.



Kuva 2. Kasavarastoidun lentotuhkan maksimikuivatilavuuspainon ja optimivesipitoisuuden välinen vuorosuhde ICT-kiertotiivistyksessä.

Kasavarastoidun lentotuhkan kiintotiheys on 2,3-3,2 t/m³, ja se määräytyy ensisijaisesti polttoaineen koostumuksen perusteella. Lentotuhkan kuivatilavuuspaino on kuitenkin jonkin verran pienempi kuin vastaavan raekokojakauman omaavan luonnonmaamateriaalin. Lentotuhkan huokoisuus on siten suurempi kuin luonnonmaa-aineksilla. Kuorma-auton lavalla työmaalle kuljettaessa kasavarastoitu lentotuhka painaa keskimäärin 8,00-11,00 kN/m³itd.

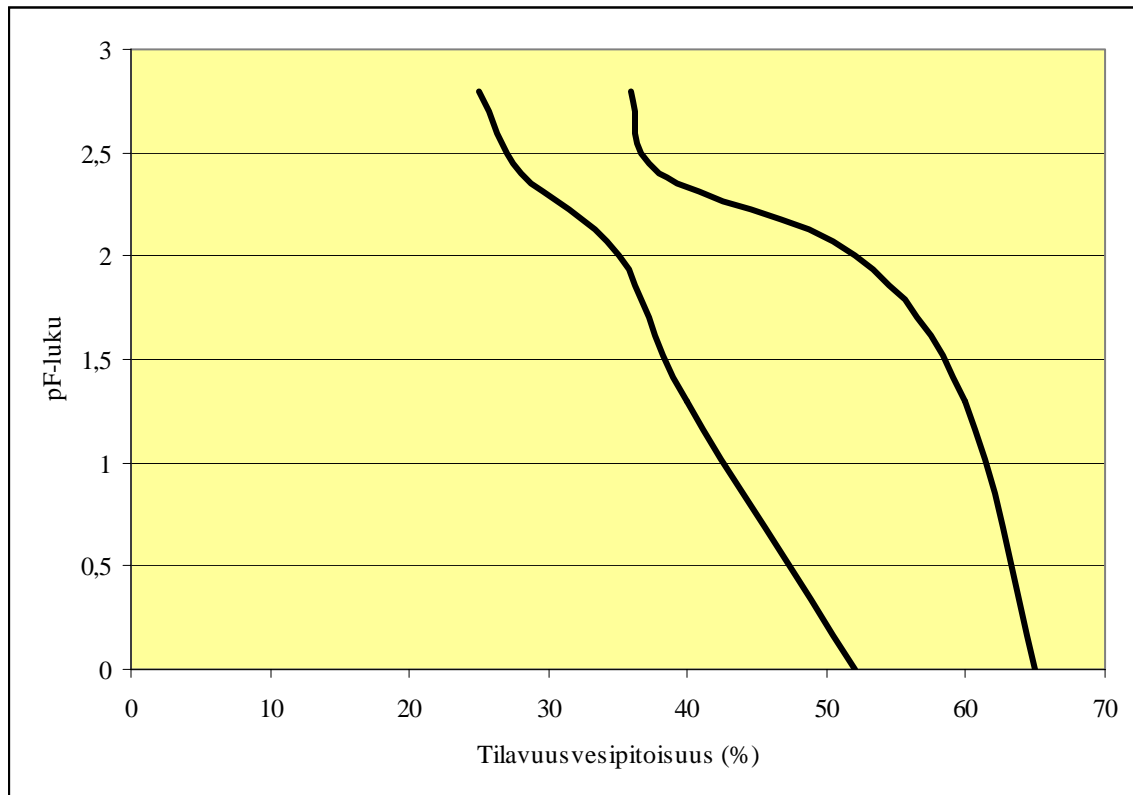
2.2 Hydrauliset ominaisuudet

Kasavarastoidun lentotuhkan kyllästyneen tilan vedenläpäisevyydet 95 %:n tiivisyasteessa ovat 0,1-1,0·10⁻⁶ m/s. Kapillaarisuudet ovat 20-60 cm. Vedenläpäisevyydet ja kapillaarisuudet vastaavat rakeisuudeltaan samanlaisen luonnonmaamateriaalien arvoja (taulukko 1).

Taulukko 1. Kasavarastoidun lentotuhkan kapillaarisuus ja vedenläpäisevyys.

KAPILLAARINEN NOUSUKORKEUS	KUIVATILAVUUSPAINO	TIIVIYSASTE	VEDENLÄPÄISEVYYS
h [m]	γ_d [kN/m ³]	D [%]	k [m/s]
0.2-0.6	6.46-12.00	95-100	0.1-1.0·10 ⁻⁶

Lentotuhkan kykyä sitoa vettä voidaan arvioida vedenpidätyskäyrän eli pF-käyrän avulla. Täysin vedellä kyllästyneessä tilassa lentotuhkan huokoisuus ja tilavuusvesipitoisuus on 50-65 %. Esimerkiksi pF-luvun arvolla 2, joka vastaa tasapainotilannetta 1 m pohjaveden pinnan yläpuolella, lentotuhkan tilavuusvesipitoisuus on $w_{vol} = 36-50$ %. Merkittävä vesi-pitoisuuden pieneneminen tapahtuu pF- lukujen 2,0 ja 2,5 välillä ja pF-luvun 2,5 arvolla lentotuhkien tilavuusvesipitoisuus on 27-38 % (kuva 3).



Kuva 3. Kasavarastoidun lentotuhkan vedenpidätyskäyrän vaihteluväli määritettynä painelevylaitteistolla.

2.3 Mekaaniset ominaisuudet

2.31 Lujuus

Kasavarastoidut lentotuhkat ovat välimaalajeja, joiden leikkauslujuus muodostuu koheesiosta ja kitkasta. Tiiviysasteen ollessa 90-95 % kitkakulma on 30-45° ja koheesio 40-60 kPa (taulukko 4).

Joillakin kasavarastoiduilla tuhkillä tapahtuu tiivistämisen jälkeen lujittumista, jonka suuruus vaihtelee tuhkan laadusta sekä varastointiolosuhteista ja -ajasta riippuen. Tiivistyksen jälkeen määritetty 28 vrk:n 1-akiaalinen puristuslujuus on kuitenkin kaikilla kasavarastoiduilla tuhkillä suurempi kuin 200 kPa. Voimakkaasti lujittuvilla tuhkillä vastaava arvo on 1 MPa:n suuruusluokkaa.

Taulukko 2. Kasavarastoidun lentotuhkan lujuusparametrit määritettynä kolmiakselialikokeella

TIIVIYSASTE	LUJUUSPARAMETRIT	
D [%]	Kitkakulma ϕ [ast.]	Koheesio c [kPa]
90-95	30-45	40-60

2.32 Kantavuus

Kasavarastoidun lentotuhkan kantavuuteen vaikuttavat tiiviysaste, vesipitoisuus ja tuhkan lujittuminen. Kantavuutta voidaan arvioida mm. CBR -arvolla, joka ilmaisee prosentteina paineen, joka aiheuttaa tutkittavassa materiaalissa yhtä suuren painuman kuin vertailumateriaalina käytetyssä kalkkikivimurskeessa. CBR -arvon kasvaessa materiaalin kantavuus kasvaa. Kasavarastoidun lentotuhkan CBR -arvo on vähintään 15 % kun tiiviysaste suurempi kuin 90 %. Voimakkaasti lujittuvilla materiaaleilla CBR - arvo on jopa 40-50 %. CBR -arvojen avulla voidaan arvioida myös materiaalien kimmomoduuleja *liitteen 1* mukaisesti.

Kantavuusmitoituksessa lentotuhkan kevätkantavuutta kuvaavan muodonmuutosmoduulin arvona voidaan käyttää $E_2 = 45 \text{ MN/m}^2$. Tiiviysasteen tulee tällöin olla suurempi kuin 90 %.

2.4 Routivuus

Kasavarastoitu lentotuhka on tehtyjen tutkimusten perusteella routimaton materiaali, sillä routanousukokeella määritetty routivuuskerroin $SP = 0 \text{ mm}^2/\text{Kh}$ (*taulukko 3*). Materiaali luokitellaan routimattomaksi kun routimiskerroin on pienempi kuin $0.5 \text{ mm}^2/\text{Kh}$ /4/.

Taulukko 3. Lentotuhkan routivuus routanousukokeen avulla määritettynä.

ROUTIMISKERROIN SP [mm ² /Kh]	ROUTIVUUSLUOKITUS
0	Routimaton

Kasavarastoitu lentotuhka on myös kapillaarisuuden perusteella määritettynä routimaton materiaali. Jos lentotuhkan rakeisuus poikkeaa *kuvasa 1* esitetystä, on routimattomuus tarvittaessa varmistettava erikseen.

2.5 Lämpötekniset ominaisuudet

Kasavarastoidun lentotuhkan lämmönjohtavuus sulana on 0.33-0.53 W/Km ja jäätyneenä 0.6-0.8 W/Km (*taulukko 4*).

Taulukko 4. Kasavarastoitujen lentotuhkien lämmönjohtavuuksien vaihteluvälit sulassa ja jäätyneessä tilassa.

VESIPITOISUUS	TIIVIYSASTE	Lämmönjohtavuus	
		λ [W/Km] sula (+ 22 °C)	λ [W/Km] jäätynyt (-15 °C)
w [%]	D [%]	0,33-0,53	0,60-0,80
30-52 %	80-90 %		

Luonnonmateriaaleista siltin lämmönjohtavuus on sulana noin 1.0-1.7 W/Km ja jäätyneenä noin 1.7-2.8 W/Km sekä hiekalla vastaavasti 1.1-2.2 W/Km ja 0.8-1.8 W/Km. Lentotuhkalla on luonnonmaamateriaaleja pienempi lämmönjohtavuus, mikä johtuu suurelta osin lentotuhkan suuremmasta huokostilasta ja poikkeavasta huokosrakenteesta.

2.51 Jäätymättömän veden määrä tuhkamateriaaleissa

Pakkaslämpötiloissa sulana pysyvän huokosveden osuus on tuhkamateriaaleissa suurempi kuin luonnonmaamateriaaleissa. Tämä seikka tulee ottaa routamitoituksessa huomioon, sillä sulana pysyvän veden määrä vaikuttaa maaperän routaantumisen roudan syvyyttä lisäävästi ja roudan sulamista nopeuttavasti. Tämä johtuu siitä, että tuhkamateriaalin olomuodonmuutoksessa vedestä jääksi vapautuu lämpöä laajemmalla lämpötilavälillä kuin tavanomaisilla maamateriaaleilla.

Käytännön routamitoituksessa voidaan käyttää kaavan 2 mukaista sovitefunktiota, joka kuvaa riittävän hyvin kaikkia tuhkamateriaaleja maarakenteissa vallitsevalla lämpötila-alueella /11/. Tällaisen sovitefunktion käyttö on mahdollista mm. GEO-SLOPE-TEMP/W 2004 ohjelmistossa.

$$w_{\text{unfrozen}} = w \cdot e^{-\left(\frac{T}{4,7}\right)^{1,5}} \quad (2)$$

missä w_{unfrozen} on jäätymättömän veden määrä lämpötilassa T
 w vesipitoisuus ($T > 0$ °C)
 T lämpötila.

3. Ympäristökelpoisuus

Suomessa maaperään sijoitettavien materiaalien ympäristökelpoisuuden arviointiin ei ole toistaiseksi virallista menettelytapaa /1/. Tällä hetkellä (kevät 2005) lentotuhkien käyttö edellyttää tapauskohtaista lupamenettelyä. Valmisteltavana olevassa ehdotuksessa valtioneuvoston asetukseksi /8/ on esitetty puu- ja turveperäisen aineksen poltossa muodostuville tuhille haitallisten aineiden pitoisuuksien ja liukoisuuksien raja-arvot. Asetuksen soveltamisalaan kuuluvien jätteiden haitallisten aineiden pitoisuus tai liukoisuus ei saa

ylittää annettuja raja-arvoja. Ehdotuksessa /8/ esitetyt raja-arvot voivat ennen asetuksen voimaantuloa vielä muuttua.

Lentotuhkan haitallisten aineiden pitoisuuksiin ja liukoisuuksiin vaikuttaa ensisijaisesti polttoaineen koostumus. Sen vuoksi on osoittautunut tarkoituksenmukaiseksi luokitella metsäteollisuuden tuhkat käytetyn polttoaineen koostumuksen perusteella 3 hyötykäyttöluokkaan /9/:

RYHMÄ A: Tuhkasta yli 50 % muodostunut lietteestä

RYHMÄ B: Tuhkasta yli 50 % muodostunut puuaineksesta

RYHMÄ C: Tuhkasta yli 50 % muodostunut turpeesta.

Em. luokittelu johtaa joissakin tapauksissa siihen, että tietyissä kattiloissa muodostuvan tuhkan hyötykäyttöluokka voi vaihdella, jos polttoaineen koostumus vaihtelee. Ryhmien A ja C tuhkien pitoisuudet eivät yleensä ylitä asetettuja raja-arvoja. Ryhmän B tuhkillä erityisesti bariumin ja sinkin pitoisuudet voivat ylittää raja-arvon (taulukko 5).

Taulukko 5. Metsäteollisuudessa muodostuvien lentotuhkien haitta-aineiden pitoisuuden keskiarvot ja vaihteluvälit sekä ehdotuksessa Vna:n asetukseksi /8/ esitetyt vastaavat raja-arvot.

Hyötykäyttöluokka	As (mg/kg)	B (mg/kg)	Ba (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Mo (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Sb (mg/kg)	Se (mg/kg)	Zn (mg/kg)
A	24 6,7...34	143 65...203	975 442...1350	5,7 0,5...17	304 66...631	11 3,7...19	182 21...440	1,0 0,02...2,6	3,0 0,5...5,1	932 217...1700
B	20 1,2...51	296 144...485	2283 953...3410	12 4,3...24	186 44...769	17 2,3...99	110 33...509	0,9 0,04...6,1	3,5 1,1...6,9	2722 998...7630
C	34 17...92	137 27...215	1379 661...1700	8 0,6...15	143 117...204	16 9,9...36	81 21...185	0,14 0,05...0,33	8,4 4,7...13	1211 177...2030
Raja-arvo	50	320	2000	14	650	40	230	40	20	2600

*A: Tuhkasta yli 50 % muodostunut lietteestä

B: Tuhkasta yli 50 % muodostunut puuaineksesta

C: Tuhkasta yli 50 % muodostunut turpeesta.

Tuhkien haitallisten aineiden liukoisuudet vaihtelevat hyötykäyttöluokittain. Erityisesti sulfaatin liukoisuudet voivat tapauskohtaisesti ylittää peitetulle ja päällystetylle rakenteelle asetettuja raja-arvoja. Lisäksi hyötykäyttöluokassa A on havaittu molybdeenin, sinkin ja sulfaatin liukoisuuksien tapauskohtaisesti ylittävän raja-arvoja. Vastaavasti hyötykäyttöluokassa B kadmiumin, antimoinin, seleenin, sinkin ja sulfaatin sekä hyötykäyttöluokassa C molybdeenin, seleenin ja sulfaatin liukoisuudet voivat ylittää asetettuja raja-arvoja (taulukko 6).

Taulukko 6. Metsäteollisuudessa muodostuvien lentotuhkien haitta-aineiden liukoisuuk-sien vaihteluvälit sekä ehdotuksessa Vna:n asetukseksi /8/ esitetyt vastaavat raja-arvot.

Hyötykäyttöluokka	As (mg/kg)	Ba (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Mo (mg/kg)	Sb (mg/kg)	Se (mg/kg)	Zn (mg/kg)	SO ₄ (mg/kg)
A	<0.002	3,0-61	0,002-0,009	1,1-4,9	<0,001-0,003	0,09-0,2	0,07-3	259-9241
B	<0.01	2,0-3,0	0,01-0,03	1,7	0,6-0,7	0,11-0,91	2,9-6,2	20000-25100
C	<0.02	1,9-3,0	0,004-0,009	2,5-5,5	<0,01-0,04	0,14-0,4	0,2-0,6	15300-45800
Raja-arvo Peitetty rakenne	0,2	100	0,02	2,5	0,12	0,3	1,5	3000
Raja-arvo Päällystetty rakenne	0,85	280	0,02	4,0	0,40	0,5	2,7	15000

*A: Tuhkasta yli 50 % muodostunut lietteestä

B: Tuhkasta yli 50 % muodostunut puuaineksesta

C: Tuhkasta yli 50 % muodostunut turpeesta.

Lentotuhkille asetettujen ympäristökelpoisuusvaatimusten täytyminen pitää todeta ennen rakentamistyön aloittamista ja sen aikana tämän ohjeen kohdassa 6.43 esitetyn mukaisesti.

II SUUNNITTELUOHJE

4. Lentotuhkarakenteen suunnittelu ja mitoitus

4.1 Suunnittelun ja mitoituksen perusteet

Maarakenteiden suunnittelussa voidaan lentotuhkalle käyttää tämän ohjeen mukaisia materiaaliparametreja. Tie-, katu ja kenttärakenteissa noudatetaan näille rakenteille tarkoitettuja yleisiä suunnittelu- ja mitoitusperusteita. Seuraavassa esitetään esimerkein lentotuhkarakenteen routa- ja kuormitusmitoituksen perusteet, kun lentotuhkaa käytetään *suodatinkerroksen* materiaalina. *Lentotuhkaa voidaan käyttää myös muissa rakennekerroksissa, jolloin rakenteen routa- ja kantavuusmitoitus tulee suorittaa normaalikäytäntöjen mukaisesti käyttäen tässä ohjeessa esitettyjä lentotuhkan materiaaliominaisuuksia.*

Rakenteen routakäyttäytyminen ilmenee routanousuna ja/tai sulamisvaiheen kantavuuden alenemisena. Suodatinkerroksen paksuutta muuttamalla rajoitetaan roudan tunkeutumista routivaan pohjamaahan ja siten routimisen haitallisia vaikutuksia. Kantavuusmitoitus voidaan suorittaa esim. perinteisellä Odemarkin menetelmällä tai vaihtoehtoisesti analyttisellä kantavuusmitoituksella (mm. APAS).

Suodatinkerroksen tehtävänä on veden kapillaarisen nousun katkaiseminen ja rakenteesta tulevan veden poisjohtaminen sekä rakennekerrosten ja pohjamaan erottaminen toisistaan. Kasavarastoitu lentotuhka täyttää yleensä Tielaitoksen laadunvalvontaohjeissa /7/ esitetyt suodatinkerroksen rakeisuusvaatimukset (vrt. *kuva 1*). Kasavarastoitu lentotuhka täyttää myös suodatinkerrokselle asetun kapillaarisuus- ja routimattomuuskriteerin.

Suodatinkerroksen toimivuuden säilyttämiseksi materiaalin tulee täyttää myös seuraavat rakeisuusvaatimukset /7/.

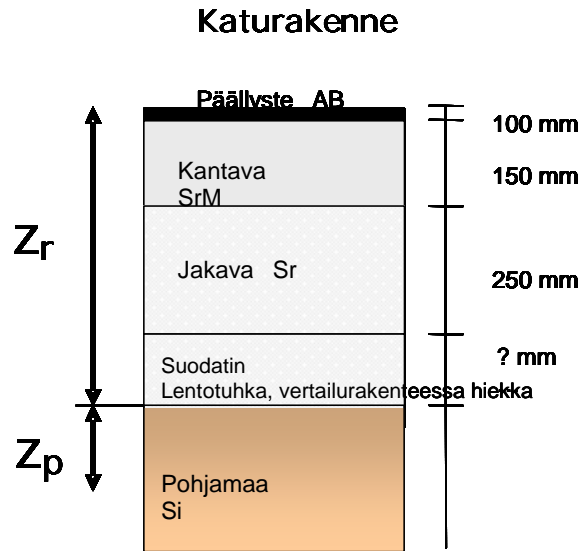
-suodatinkerroksen materiaalin d_{20} / alusrakenteen $d_{20} = 8 - 40$
 -jakavan kerroksen materiaalin d_{20} / suodatinkerroksen $d_{20} = 8 - 40$
 d_{20} on materiaalin läpäisyprosenttia 20 vastaava raekoko.

4.2 Routamitoitus

Routamitoitus voidaan tehdä laskemalla rakenteen routanousu tai vaihtoehtoisesti laskeamalla roudan eteneminen pohjamaahan. Routamitoituksen lähtökohtana on mitoituspaikkakuntaa koskevan pakkasmäärän valinta. Mitoituspakkasmääränä käytetään yleensä tilastollisesti kerran 5 (F_5) vuodessa tai kerran 10 (F_{10}) vuodessa toistuvaa pakkasmäärää (*liite 2*). Routanousu voidaan laskea pohjamaan routimiskertoimen (segregaatiopotentiaalilin) ja routivan kerroksen lämpötilagradientin avulla.

Tarkastellaan esimerkkinä kuvan 4 mukaista rakennetta, jossa suodatinkerroksen materiaalina on kasavarastoitu lentotuhka. Vertailurakenteessa suodatinkerroksen materiaalina on hiekka, jonka yläpuolella sijaitsevat rakennekerrokset ovat samanlaiset kuin tarkastel-

tavassa lentotuhkarakenteessa. Kohteessa pakkaskauden kesto on 5 kk ja pohjaveden oletetaan olevan 2 m syvyydessä. Mitoituspakkasmäärä on 30 000 Kh. Pohjamaan on routivaa silttiä, jonka routivuuskerroin on $8,0 \text{ mm}^2/\text{Kh}$ (erittäin routiva).



Kuva 4. Routamitoitusesimerkissä käytetty katurakenne. Z_r on päällysrakenteen paksuus ja Z_p roudan tunkeuma pohjamaahan.

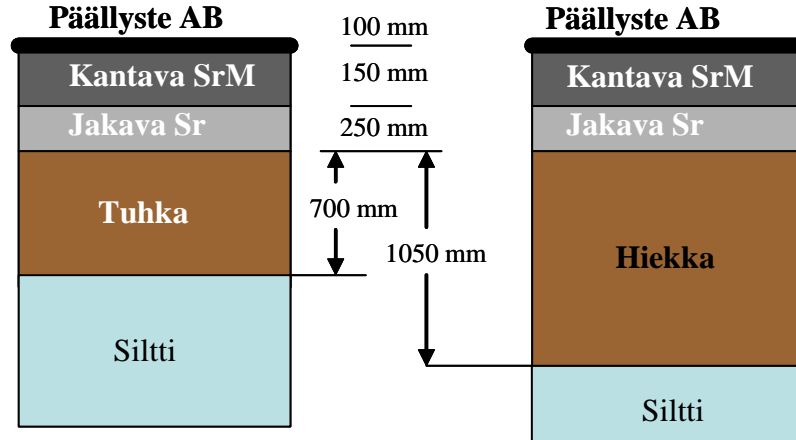
Rakennekerrosten materiaaliominaisuuksina käytetään taulukossa 7 esitettyjä arvoja.

Taulukko 7. Routamitoitusesimerkissä käytetyt päällys- ja alusrakenteen materiaaliparametrit.

Materiaali	VESIPITOISUUS	KUIVATILAVUUSPAINO	LÄMMÖNJOHTAVUUS	LÄMMÖNJOHTAVUUS	ROUTIMISKERROIN
	w [%]	γ_d [kN/m^3]	λ_{sula} [W/mK]	$\lambda_{\text{jäätynyt}}$ [W/mK]	SP [mm^2/Kh]
Asfalttibetoni AB	0.5	20.0	1.5	1.5	0
Soramurske SrM	2.0	20.0	2.0	2.0	0
Sora Sr	3.0	19.5	2.0	2.0	0
Lentotuhka	45.0	10.2	0.5	0.7	0
Hiekka (vertailurakenne)	8	16.7	1.2	1.3	0
Pohjamaa (Si)	30	14.5	1.3	2.3	8.0

Mitoitetaan edellä kuvattu päällysrakenne siten, että rakenteen sallittu routanousu on 50 mm. Roudan syvyys ja routanousu lasketaan taulukon 7 mukaisilla materiaaliparametreilla. Routamitoitus suoritetaan numeerisella lämmönsiirtymisen laskentamallilla, jossa routanousu lasketaan maapohjan routivuuskertoimen avulla. Laskentamallissa otetaan huomioon sekä hiekan että tuhkan huokosveden jäätyminen eri lämpötiloissa.

Esimerkin mukaisessa rakenteessa 700 mm tuhkerakroksen paksuudella saavutetaan samansuuruinen routanousu (50 mm) kuin 1050 mm paksuisella hiekkakerroksella (kuva 5). Roudan syvyys tuhkarakenteessa on 1,45 m ja hiekkarakenteessa 1,83 m (taulukko 8).



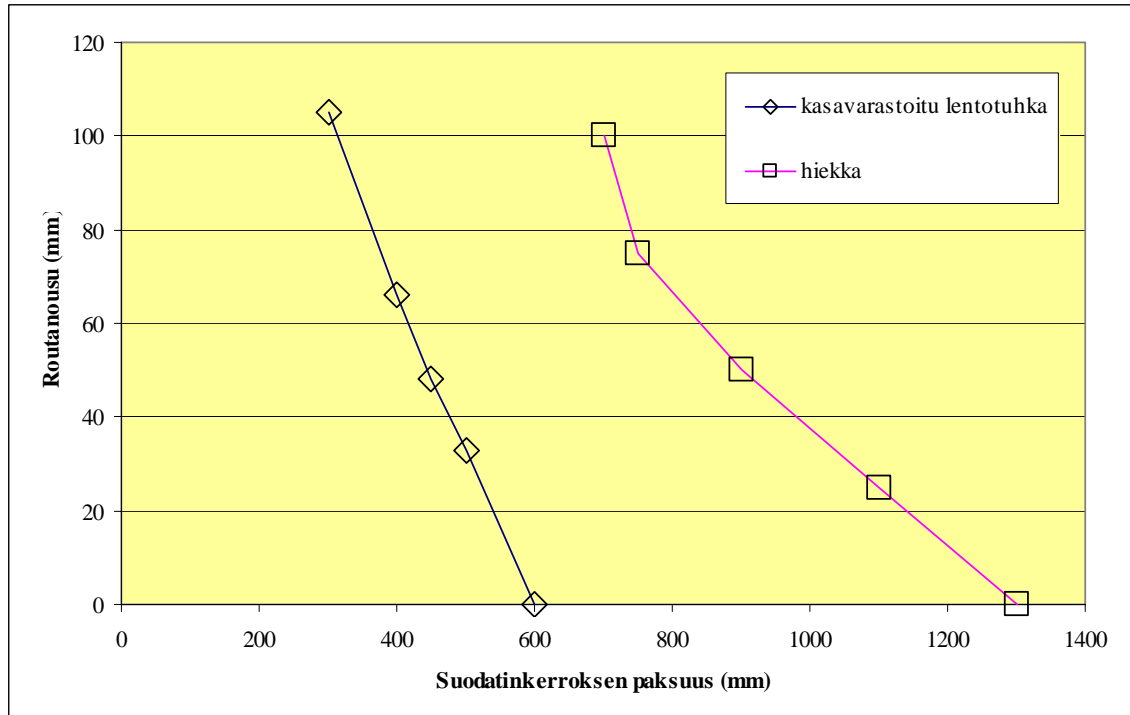
Kuva 5. Routamitoitetun katurakenteen kerrospaksuudet, kun suodatinkerroksen materiaalina on tuhka ja vertailurakenteessa hiekka. Rakenteet on mitoitettu 50 mm sallitulle routanousulle.

Taulukko 8. Routamitoitetun katurakenteen kerrospaksuudet ja roudan syvyys. Sallittu routanousu on 50 mm.

	<i>Tuhkarakenne</i>	<i>Vertailurakenne</i>
Päällysrakenteen paksuus (mm)	1200	1550
Suodatinkerroksen paksuus (mm)	700	1050
Roudan syvyys (m)	1,45	1,83
Routanousu (mm)	50	50

Edellä kuvattu rakenne on mitoitettu esimerkin mukaisella päällysrakenteen paksuuksilla, jossa ainoastaan suodatinkerroksen paksuutta muuttamalla on rajoitettu maksimi routanousu 50 mm:een. Pohjamaa mitoitusesimerkissä on voimakkaasti routivaa silttiä, jonka routivuuskerroin on $8,0 \text{ mm}^2/\text{Kh}$. Poikettaessa esimerkkirakenteen mitoista ja olosuhteista, mitoitukset tulee suorittaa kohdekohtaisilla todellisilla rakennekerrospaksuuksilla valitsemissa pohja- ja ilmasto-olosuhteissa.

Suodatinkerroksessa käytettynä kasavarastoitu lentotuhka rajoittaa roudan syvyyttä tehokkaammin kuin luonnonhiekkä. Tämän ominaisuuden vaikutuksia erään katurakenteen routanousuun on esitetty kuvassa 6.



Kuva 5. *Esimerkki erään katurakenteen suodatinkerroksen paksuuden vaikutuksesta rakenteen routanousuun, kun suodatinkerroksen materiaaleina ovat luonnonhiekkä ja kasavarastoitu lentotuhka. Kuvaa ei saa käyttää routamitoituksessa, vaan mitoitukset tulee suorittaa kohdekohtaisesti valituilla rakennekerrospaksuuksilla ja kohteen mukaisissa pohja- ja ilmasto-olosuhteissa.*

4.3 Kantavuusmitoitus

Päällysrakenteen kantavuusmitoitus voidaan suorittaa Odemarkin mitoitukskaavan (3) avulla. Kantavuuden mitoittaminen Odemarkin menetelmällä edellyttää, että tunnetaan sekä pohjamaan että rakennekerrosten E-moduulit. Kantavuuskaavan avulla voidaan laskea kerroksen päältä saavutettava kantavuus (E_Y -arvo), kun tunnetaan kerrospaksuus h , kerros materiaalin E -moduuli ja kerroksen alla olevan kerroksen kantavuus (E_A -arvo). Vastaavasti voidaan laskea kuinka paljon rakenteen kantavuus lisääntyy, kun rakenteen paksuutta lisätään. Kantavuustarkastelu voidaan suorittaa myös päällysrakenteen jännitys- ja siirtymätilatarkastelujen avulla analyttisellä mitoituksmenettelyllä (mm. APAS).

$$E_Y = \frac{E_A}{\left(1 - \frac{I}{\sqrt{1 + 0,8I \cdot \left(\frac{h}{0,15m}\right)^2}}\right) \cdot \frac{E_A}{E} + \frac{I}{\sqrt{1 + 0,8I \cdot \left(\frac{h}{0,15m}\right)^2} \cdot \left(\frac{E}{E_A}\right)^{2/3}}} \quad (3)$$

missä E_Y on mitoitettavan kerroksen päältä saavutettava kantavuus [MPa]
 E_A mitoitettavan kerroksen alta saavutettava kantavuus [MPa]
 h mitoitettavan kerroksen paksuus [m]
 E mitoitettavassa kerroksessa käytettävän materiaalin E-moduuli [MPa]

Alusrakenteen kantavuusluokituksena käytetään Tielaitoksen suunnitteluohjeiden mukaista alusrakenteen kantavuusluokitusta (TVH 1985). Alusrakenteen kantavuusluokka arvioidaan normaalitapauksessa pohjamaan maalajin perusteella. Kantavuusmitoituksessa lentotuhkan kevätkantavuutta kuvaavana E-moduulina voidaan käyttää 45 MPa. Tällöin rakentamisvaiheessa lentotuhka on tiivistettävä vähintään 90 % tiiviyteen.

Tarkastellaan esimerkinä kuvan 5 mukaista rakennetta. Lasketaan sen kantavuus lentotuhkakerroksen paksuuden ollessa 450 mm. Laskennassa käytetään taulukon 9 mukaisia kerrospaksuuksia ja kantavuusmoduuleja (kevätkantavuusarvoja).

Taulukko 9. Esimerkissä tarkasteltavan lentotuhkarakenteen materiaalitiedot ja kantavuus lentotuhkakerroksen paksuuden ollessa 450 mm

Rakennekerros	Materiaali	Kerrospaksuus h (m)	Kerroksen E- moduuli (MPa)	Kantavuus E_Y kerroksen päältä (MPa)
Päällyste	AB	0,10	2500	224
Kantava kerros	SrM	0,15	350	120
Jakava kerros	Sr	0,25	220	73
Suodatinkerros	Lentotuhka	0,45	45	27
Pohjamaa	Si		10	

Kantavuuskaavan 3 avulla laskettuna esimerkkirakenteen kantavuudeksi saadaan 224 MN/m², jolloin kantavuus on riittävä katuluokkaan 5 (pientaloalueen asuntokatu, huolto liikenteen väylät ja henkilöautojen pysäköintialueet) /5/. Lentotuhkakerroksen paksuus on tällöin 450 mm. Rakennekerrosten ominaisuudet ja kerrospaksuudet ovat taulukon 9 mukaiset.

Tarkastellaan vielä esimerkinä kevyen liikenteen väylää, jonka rakennekerrosten ominaisuudet on esitetty taulukossa 10. Mitoitetaan suodatinkerroksen toimivan tuhkakerroksen paksuus siten, että KT 97 mukainen kantavuusvaatimus 175 MPa päällysteen päältä toteutuu

Taulukko 10. Esimerkissä tarkasteltavan kevytväylärakenteen materiaalitiedot.

Rakennekerros	Materiaali	Kerros-paksuus h (m)	Kerroksen E- moduuli (MPa)	Kantavuusvaatimus E_Y kerroksen päältä (MPa)
Päällyste	AB	0,05	2500	175
Kantava kerros	SrM	0,15	350	
Jakava kerros	Sr	0,25	220	
Suodatinkerros	Lentotuhka	?	45	
Pohjamaa	Routiva HkMr Kantavuusluokka E		20	

Kun lasketaan rakenteen kantavuus päällysteen päältä kaavan 3 mukaisesti, huomataan, että lentotuhkakerroksen paksuuden ollessa 0,6 m asetettu kantavuusvaatimus 175 MPa täyttyy. Taulukon 10 mukaisilla arvoilla rakenteen kantavuudeksi tulee silloin 175,86 MPa.

5. Kasavarastoitu lentotuhka sidottuna rakenteena

Tässä ohjeessa lähtökohtana on ollut kasavarastoidun lentotuhkan hyötykäyttö sitomattomana rakenteena. Sen vuoksi sidotuille rakenteille tarkoitettuja suunnittelu- ja mitoitusrvoja ei tässä esitetä. Erityisesti kuivana säilytetyn lentotuhkan hyvien lujittumisominaisuuksien vuoksi käyttö sidotuissa rakenteissa on kuitenkin syytä ottaa esille yleispiirteisesti.

Lentotuhkia voidaan käyttää sidotuissa rakenteissa runkoaineena, runkoaineen rakeisuutta korjaavana materiaalina ja sideaineina. Käytettäessä lentotuhkaa em. tavoin sidotuissa rakenteissa, pitää materiaalin lujuusominaisuudet ja pakkasenkestävyys määrittää tapauskohtaisesti suhteessa asetettuihin vaatimuksiin. Painuvilla pohjamailla stabiloidun rakenteen muodonmuutoskestävyyden tulee olla riittävä. Raskaasti kuormitetuilla väylillä puristuslujuus- ja kantavuusvaatimukset muodostuvat vastaavasti tärkeämmiksi.

Stabiloitavan runkoaineen suhteutusta varten määritetään lentotuhkan rakeisuuskäyrä. Sen jälkeen määritetään runkoaineen osa-aineiksi valittujen materiaalien osuudet siten, että runkoaineen rakeisuuskäyrä täyttää sille asetetut vaatimukset. Lentotuhkien käyttö osana runkoainesta yleensä kasvattaa stabiloidun materiaalin lujuutta.

Lentotuhkia voidaan käyttää sidotuissa rakenteissa myös sideaineena, esimerkiksi murskeen stabiloinnissa. Suurin lujittuminen saavutetaan tuoreilla tai kuivina varastoiduilla tuhkillä, mutta useilla kasavarastoiduillakin tuhkillä on todettu merkittävä lujittumispotentiaali.

Lentotuhkaa voidaan lujittaa sementillä sekä sitoutuvilla sivutuotteilla. Lujittuneen lentotuhkan puristuslujuus riippuu pääosin käytetystä sideaineesta ja sen määrästä, ja se voi teknistaloudellisilla sideaineratkaisuilla olla esimerkiksi 2-15 MPa. Sidottu lentotuhka kestää myös hyvin jäätymis-sulamisrasitusta.

III LENTOTUHKARAKENTEIDEN RAKENTAMINEN

6 . Rakentamisen työselitys

6.1 Ohjeen soveltaminen

Tätä työselitystä sovelletaan käytettäessä kasavarastoitua lentotuhkaa tie-, katu- ja kenttä-rakenteiden suodatinkerroksessa. Kasavarastoidulla lentotuhkalla tarkoitetaan tässä ohjeessa tuhkaa, joka on kostutettu ennen läjittämistä ja on ollut varastoituna vähintään 1 kk ajan yli + 5°C lämpötilassa. Rakentamisessa noudatetaan kohdekohtaisesti tierakennustöiden yleisiä laatuvaatimuksia ja työselityksiä /10/ tai kunnallisteknisten töiden yleistä työselitystä /6/.

6.2 Kasavarastoidun lentotuhkan varastointi, käsittely ja kuljetus

Kasavarastoitu lentotuhka voidaan varastoida suojaamatta kuten rakeisuudeltaan vastaava maamateriaali. Talvirakentamisessa tulee huolehtia, että lentotuhka ei pääse jäätymään eikä jäätynyttä lentotuhkaa käytetä rakentamiseen. Kesällä ja kuivalla säällä pitkäaikaisesti varastoituna varastokasa tulee tarvittaessa kastella pölyämisen estämiseksi. Varastoinnissa on huolehdittava, että sadevesi ei pääse kertymään materiaaliin. Varastointi ei vaadi erityisiä toimia tai seurantaa.

6.3 Kuivatus ja alusrakenteet

Kuivatuksessa noudatetaan kohdekohtaisesti tierakennustöiden yleisiä laatuvaatimuksia ja työselityksiä /10/ tai kunnallisteknisten töiden yleistä työselitystä /6/. Rakentamisvaiheessa on varmistettava, että tien alusrakenteisiin tai rakennekerroksiin ei jää vettä kerääviä painanteita eikä esteitä, jotka saattavat estää veden poistumisen lentotuhkakerroksesta.

Alusrakenteet, kuten leikkaus- ja pengertyöt sekä alustan muotoilu tehdään noudattaen yleisiä laatuvaatimuksia ja työselityksiä.

6.4 Päällysrakenne

6.41 Suodatinkerros

Suodatinkerros rakennetaan soveltaen tierakennustöiden /10/ tai kunnallisteknisten töiden yleisiä laatuvaatimuksia ja työselityksiä /6/. Heikosti kantaville pohjamaille kuten savi- ja silttipohjille rakennettaessa suositellaan käytettäväksi suodatinkerroksen ja pohjamaan välissä suodatinkangasta. Suodatinkangas asennetaan ohjeiden mukaisesti.

6.42 Rakentaminen

Lentotuhkakerros rakennetaan tasatulle alustalle päätypenkereinä tai puoli tietä kerrallaan rakennettaessa sivulta kipaten. Suodatinkerros tehdään joko yhtenä tai useampana kerroksena paksuudesta ja tiivistyskalustosta riippuen. Kerros voidaan tiivistää erillisenä tai vasta jakavan kerroksen rakentamisen yhteydessä. Levitystyö voidaan suorittaa pyöräkuormaajalla tai pyörä-/telapuskukoneella. Lentotuhka levitetään enintään 0,4-0,5 m paksuna kerroksena. Tiivistäminen suoritetaan levityksen ja tasauksen jälkeen tavanomaisella maarakennuskalustolla. Tiivistämiskertojen lukumäärä täryjyrällä tiivistettäessä on 4-6 jyräyskertaa. Tiivistämistyö voidaan suorittaa myös talvella, mikäli suodatinkerrokselle asetetut laatuvaatimukset täyttyvät.

Suodatinkerroksen tiiviysasteen tulee olla keskimäärin 95 %. Pienin sallittu yksittäinen tiiviysaste on 92 %. Suodatinkerroksen rakeisuus ja tiiviysaste tulee määrittää vähintään kerran jokaista alkavaa 1000 m³:n itd aineserää kohti. Suodatinkerroksen sallitut poikkeamat tierakennuskohteissa ovat taulukossa 12 esitettyjen lukuarvojen mukaiset.

Yhden rakenneteoreettisen (m³rtr) kuutiometrin tekemiseen tarvitaan noin 1,4 m³ itd kasvavaraa lentotuhkaa.

Mikäli työkoneiden liikkuminen lentotuhkan päällä vaikeutuu esimerkiksi äkillisen rankkasateen johdosta, voidaan kastuneen kerroksen päälle levittää kuivempaa lentotuhkaa, joka kuivattaa alapuolella olevaa materiaalia ja parantaa kerroksen kantavuutta rakentamisvaiheessa.

Taulukko 10. Suodatinkerroksen sallitut poikkeamat /10/.

SALLITUT POIKKEAMAT	
TASOSIJAINTI	
* Tasosijainnin poikkeama	± 150 mm
* Tasosijainnin poikkeaman muutos	150 mm/20 mm
TASO	
* Yksittäinen poikkeama kohtisuoraan pintaa vastaan	± 40 mm
* Yksittäisen poikkeaman muutos	50 mm/20 m
* Tason keskiarvon poikkeama kohtisuoraan pintaa vastaan	± 20 mm
MITAT	
* Yläpinnan leveys	± 100 mm
* Yläpinnan leveyden keskiarvo	± 50 mm
KALTEVUUS	
	± 1,5 % yksikköä
KERROSPAKSUUDEN KESKIVARVO	
	- 5 mm

6.43 Kasavarastoidun lentotuhkan laatuvaatimukset

Kasavarastoidun lentotuhkan ympäristökelpoisuus on tutkittava ennen rakentamistyön aloittamista sekä rakentamisen aikana kutakin 5 000 t massaerää kohti. Haitallisten aineiden pitoisuudet ja liukoisuudet eivät saa ylittää asetettuja raja-arvoja /8/.

Työkohteessa lentotuhkaa vastaanotettaessa on todettava, että materiaali on laatuvaatimukset täyttävää. Kerroksen rakentamisen yhteydessä varmistetaan, että tässä työselityksessä tarkoitettu laatu saavutetaan.

7. Kirjallisuus

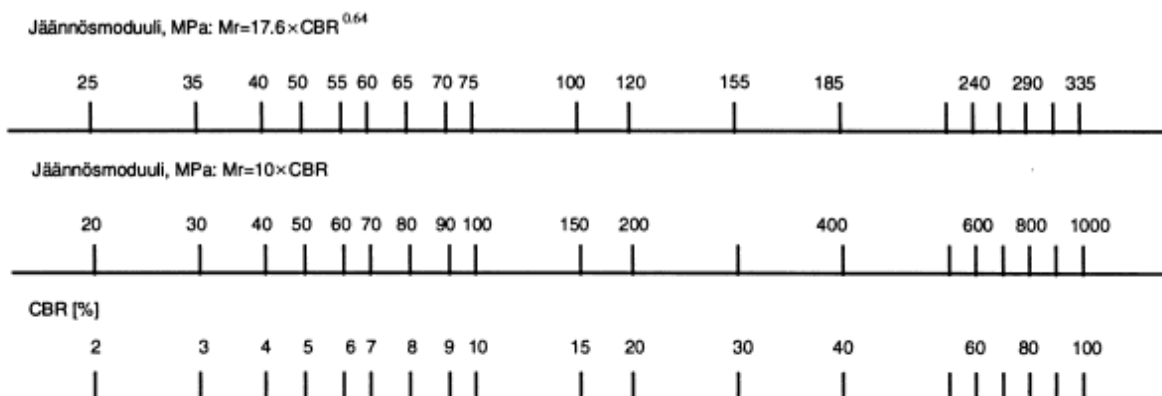
1. Assmuth, T. 1997. Selvitys ja ehdotuksia ympäristövaarallisten aineiden pitoisuuksien ohjearvoista maaperässä –tiedolliset perusteet, määrittelyperusteet, soveltaminen, kehittäminen. Suomen ympäristökeskuksen moniste 92. Helsinki 1997.
2. Ehrola, E. Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Rakennustieto Oy. Helsinki 1996. ISBN 951-682-338-6
3. Geotekniset laboratorio-ohjeet, GLO –85, 1. Luokituskokeet. Suomen geoteknillinen yhdistys. Rakentajain Kustannus Oy. Helsinki 1985
4. ISSMFE 1989. Technical Committee on Frost, TC 8. Work report 1985-1989. VTT Symposium 94, Frost in geotechnical engineering. Volume 1. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Espoo 1994.
5. Kunnallisteknisten töiden yleinen työselitys 97, KT97. Suomen kuntaliitto. Helsinki 1997. ISBN 951-598-462-9
6. Saastuneet maa-alueet ja niiden käsittely Suomessa. Saastuneiden maa-alueiden selvitys- ja kunnostusprojekti; loppuraportti. Muistio 5. Ympäristöministeriö, ympärisönsuojeluosasto. Helsinki 1994. ISBN 951-47-4823-9.
7. Tielaitos 1994. Penger- ja kerrosrakenteet. Tierakenteiden yleiset laatuvaatimukset. Helsinki 1994. 62 s. ISBN 1951-47-8747-1, Tiel 2212460-94.
8. Ehdotus valtioneuvoston asetukseksi eräiden jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa. Muistio 25.6.2002. Ympäristöministeriö.
9. Kortelainen, Heli. Metsäteollisuuden tuhkien hyötykäyttöluokittelu. Diplomityö. Oulun yliopisto, prosessi- ja ympäristötekniikan osasto, 2004.
10. Kuha, Jaakko. Metsäteollisuuden tuhkien geotekniset ominaisuudet. Diplomityö. Oulun yliopisto, prosessi- ja ympäristötekniikan osasto, 2004.

11. Jäätymättömän veden määrä tuhkamateriaaleissa. Kauko Kujala 1.10.2004
12. Katujen ja pihojen routasuojaus EPS-routaeristeillä, Seppo Saarelainen ja Harri Kivikoski, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, 2003

LIITTEET

Liite 1

Sitomattoman rakennekerroksen kimmomoduulien arviointi maalajiluokituksen ja CBR - arvojen perusteella /Ehrola 1997/



Kantavan kerroksen, suodatinkerroksen ja alusrakenteen yleinen luokittelu

Erittäin huono alusrakenne	Huono alusrakenne	Tyydyttävä alusrakenne	Keskinkertainen alusrakenne	Hyvä alusrakenne	Keskinkertainen suodatinkerros	Hyvä suodatinkerros	Keskinkertainen kantava kerros	Hyvä kantava kerros	Erittäin hyvä kantava kerros
Unified soil classification									
	OH	CH					GM-u	GM-d	GW
	MH	OL					GC		
			CL				SW		
			ML				SM-d		
				SC					
				SM-u			GP		
				SP					
d) $W_L \leq 25$ ja $I_p \leq 5$ (W_L ja I_p määritetään seulan 0.425 mm läpäisseellä materiaalilla)									
u) muulloin									

Routamitoituksessa käytettävät pakkasmäärät /12/.

