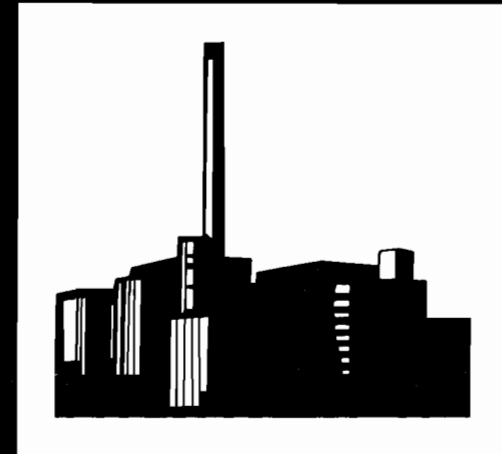


# Kivihiilituhkan käyttö maarakentamisessa

TEKNISET OHJEET



Helsingin kaupungin kiinteistövirasto  
GEOTEKNINEN OSASTO

# KIVIHIILITUHKAN KÄYTTÖ MAARAKEN- TAMISESSA

Tekniset ohjeet

Helsingin kaupungin  
kiinteistövirasto  
**GEOTEKNINEN OSASTO**

Tiedote 31      15.2.1983

## TIIVISTELMÄ

Kivihiilituhkan käyttö maarakentamisessa. Tekniset ohjeet. Julk. Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geotekninen osasto. Helsinki 1983. 36 s.

Kivihiilituhkia voidaan käyttää maarakentamisessa korvaamaan murskaamattomia luonnonkiviaineita. Ne voidaan jakaa tyypiltään lentotuhkaan, pohjatuhkaan ja pohjakuonaan. Tuhkien käyttöedellytysten parantamiseksi annetaan suunnittelu-, rakentamis- ja valvontaohjeet, joiden tiedot perustuvat Helsingin kaupungin kivihiilivoimalaitosten tuhkilla tehtyjen tutkimusten ja koerakentamisen tuloksiin. Kivihiilituhkista tehdyillä rakenteilla on hyvät lujuusominaisuudet, ja ne ovat kevyempiä ja lämmöneristävyydeltään parempia kuin luonnonkiviainekset. Tyypiltään lujittuvan lentotuhkan lujuus ja kantavuusominaisuudet paranevat iän mukana, mikä nostaa niiden arvoa vaativien maarakenteiden tekemisessä. Tuhkia voidaan käsitellä tavanomaista kalustoa käyttäen. Pohjatuhka ja pohjakuona ovat käsiteltävyydeltään samanlaisia kuin sora ja hiekka. Lentotuhkaa tiivistettäessä on erityisesti valvottava, että sen vesipitoisuus ja kerralla rakennettavan kerroksen paksuus pysyvät riittävän pieninä. Tuhkat imevät käyttötilassa itseensä vettä, mutta ne eivät huolellisesti tiivistettynä roudi. Ne syövyttävät useimpia maarakenteiden sisään yleisesti asennettavia metalleja, joten nämä on tarvittaessa suojattava korroosiota vastaan. Betonin syöpyminen on olematonta tai vähäistä, joten niitä ei yleensä tarvitse suojata korroosiota vastaan. Tuhkat eivät syövytä muoveja. Tuhkarakenteet on suojattava säätä ja eroosiota vastaan luonnonkiviaineskerrosta käyttäen. Kasveja ei tulisi istuttaa kivihiilituhkaan, mikäli ei ole näyttöä, että kyseessä olevat kasvit viihtyvät tuhassa. Tuhkien käytöllä maarakennusmateriaalina voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä alueilla, joiden läheisyydessä kivihiilivoimalaitoksia sijaitsee. Ohjeissa esitetään suunnittelun ja rakentamisen kannalta keskeisiä mitoituspparametrien arvoja sekä työtekniikkaan ja valvontaan liittyviä seikkoja.

## ALKUSANAT

Maamme kivihiilivoimalaitoksissa syntyy vuosittain 500 000...600 000 t tuhkaa, mikä vastaa 1 m kerrokseksi levitettynä ja tiivistettynä alaltaan 40...50 ha pengertä. Tuhkien hyötykäyttöä on viime vuosina ryhdytty tehostamaan pääasiassa tien- ja maarakennustöissä sekä sementti- ja betoniteollisuudessa. Myös useissa muissa teollisuusmaissa tuhkia hyödynnetään rakentamisessa. Muun muassa Isossa Britanniassa ja Ranskassa niitä on käytetty jo yli 20 vuoden ajan. Suomessa käyttöä on rajoittanut osaltaan suunnittelu- ja rakentamishojjeiden puuttuminen.

Nämä tuhkarakentamista palvelevat ohjeet on laadittu Helsingin kaupungin tuhkaprojektin toiminnan aikana 1979...82 saatujen tutkimustulosten ja rakentamiskokemusten pohjalta. Ohjeet on tarkoitettu maarakenteiden suunnittelijan, rakentajan ja valvojan käytännön oppaaksi ja ne käsittelevät tuhkien käyttöä sellaisenaan sekoittamatta niitä muihin tuhkatyyppeihin tai kiviaineksiin.

Ohjeet on laadittu vuoden 1982 aikana. Työtä on valvonut tuhkaprojektin asiantuntijaryhmä, johon ovat kuuluneet puheenjohtajana toiminut Usko Anttikoski Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknisestä osastosta, muina jäseninä Osmo Arponen Helsingin kaupungin energialaitoksesta, Olavi Louko, Matti Sallinen, Aimo Oksanen, Erkki Karjalainen ja Yrjö Lundström Helsingin kaupungin rakennusviraston katurakennusosastosta, Juhani Hietanen Helsingin kaupungin rakennusviraston puisto-osastosta, Leo Liusvaara Helsingin kaupungin urheilu- ja ulkoiluvirastosta, Hannu Kärki Helsingin kaupungin satamalaitoksesta, Heikki Somervuo Helsingin kaupungin kaupunkisuunnitteluvirastosta, Martti Eerola ja Risto Alkio Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen tie- ja liikennelaboratoriosta sekä Pertti Eklund Espoon kaupungin teknisen viraston geoteknisestä osastosta. Ohjeet on laatinut työryhmä, jota on johtanut Jorma Havukainen Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknisestä osastosta. Työryhmän muina jäseninä ovat olleet Alpo Hämäläinen, Ahti Latvala ja Antti Sulamäki sekä työryhmän sihteerinä toiminut Yeasmine Blomqvist. Piirtämistyön ovat tehneet Yeasmine Blomqvist ja Bosse Österberg.

# SISÄLLYSLUETTELO

sivu

|   |                                                      |    |
|---|------------------------------------------------------|----|
| • | TIIVISTELMÄ                                          |    |
| • | ALKUSANAT                                            |    |
|   | 1. OHJEIDEN TARKOITUS JA SOVELTAMINEN .....          | 9  |
|   | 2. KIVIHIILITUHKAT .....                             | 10 |
|   | Tuhkien tuotanto ja merkitys maarakentamisessa ..... | 10 |
|   | Tuhkatyypit ja niiden tunnistaminen .....            | 10 |
|   | 3. SUUNNITTELU .....                                 | 13 |
|   | Suunnittelun lähtökohdat .....                       | 13 |
|   | Mitoittamisen periaatteet .....                      | 19 |
|   | Työohjeen laatiminen .....                           | 25 |
|   | Seurannan suunnittelu .....                          | 25 |
| • | 4. RAKENTAMINEN .....                                | 26 |
|   | Työsuunnittelu .....                                 | 26 |
|   | Levittäminen ja tiivistäminen .....                  | 29 |
| • | 5. VALVONTA .....                                    | 34 |
|   | Työmenetelmien valvonta .....                        | 34 |
|   | Rakentamisen aikaiset valvontamittaukset .....       | 34 |
|   | Käytönaikainen seuranta .....                        | 35 |
|   | AIHETTA KÄSITTELEVÄÄ KIRJALLISUUTTA .....            | 36 |

# 1. OHJEIDEN TARKOITUS JA SOVELTAMINEN

Ohjeet on laadittu antamaan suunnittelijalle, rakentajalle ja valvojalle perustiedot kivihiilituhkien ominaisuuksista ja niiden tarkoituksenmukaisesta käytämisestä maarakenteiden tekemisessä. Niissä käsitellään erikseen kutakin kivihiilivoimaloiden tuhkien päätyyppiä niiltä osin kuin on tarpeellista. Koska samankin tuhkatyyppin ominaisuudet voivat vaihdella melko paljon, ohjeissa annetut suunnitteluarvot ovat Helsingin kivihiilituhkille määritettyjen keskimääräisten arvojen varmallalla puolella olevia ominaisarvoja ja soveltuvat käytettäväksi vastaaville tuhkatyypeille myös muualla. Epäselvissä tapauksissa, ja silloin, kun vaaditaan tietyn tuhkatyyppin ominaisuuksien tarkempaa tuntemista, on tehtävä erillinen selvitys.

Ohjeet soveltuvat kaikkien sellaisten maarakenteiden suunnittelemiseen ja tekemiseen, joissa käytetään yleensä murskaamattomia luonnonkiviaineksia. Poikkeuksena ovat eräät ympäristön huomioonottamiseen ja lentotuhkan veteen levittämiseen liittyvät rajoitukset. Varsinaisessa tuhkarakenteiden geoteknisessä suunnittelussa sovelletaan voimassa olevia ohjeita ja oppaita. Tuhkarakenteiden suunnittelemisen yhteydessä on yleensä syytä tehdä vaihtoehtoinen, tavanomaisten kiviainesten käyttöön perustuva suunnitelma siltä varalta, että tuhkien saatavuudessa esiintyy rakentamisen käynnistyessä tai sen aikana häiriöitä.

Ohjeissa ei esitetä suunnitelmapiirustuksissa käytettäviä tuhkatyyppien piirustusmerkintöjä. Koska eri tuhkatyypit poikkeavat ominaisuuksiltaan toisistaan, ne on kuitenkin merkittävä selvästi sekaannusten välttämiseksi. Suositeltava tapa on kirjoittaa tuhkatyyppin nimi kyseessä olevan tuhkarakenteen kohdalle piirustukseen.

Kivihiilituhkien käyttö on vielä uutta, ja on tärkeää saada lisää tietoa ja kokemusta, joka palvelee tuhkarakentamisen kehittämistä. Tämän vuoksi suunnitelmaan tulisi liittää myös jatkoseurantasuunnitelma, mikäli rakenne, pohja- tai muut olosuhteet ovat sellaiset, että seurannan avulla saatavalla tiedolla on käytännön merkitystä. Ohjeiden loppuun on koottu eräitä keskeisiä aihetta käsitteleviä julkaisuja, joista saa tarvittaessa lisätietoja kivihiilituhkista ja niiden käytämisestä maarakenteiden tekemisessä. Tietoja antaa myös Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geotekninen osasto.

## 2. KIVIHIILITUHKAT

### Tuhkien tuotanto ja merkitys maarakentamisessa

Kivihiilen palamistuotteena syntyy tuhkaa noin 15 % kivihiilen alkuperäisestä painosta. Suomen kivihiilivoimalaitoksissa tuotetaan tuhkia vuosittain yhteensä 500 000...600 000 t (v. 1982). Lähivuosina rakennetaan maahamme uusia kivihiilikäyttöisiä voimalaitoksia ja eräiden arvioiden mukaan tuhkien tuotanto kaksinkertaistuu vuoteen 2000 mennessä.

Kivihiilituhkia voidaan käyttää maarakentamiseen hiekan ja soran korvaajana. Maassamme syntyvällä tuhkamäärällä voitaisiin korvata vuosittain noin 700 000 t murskaamattomia kiviaineksia. Kivihiilituhkilla on tyypistä riippuen kansantaloudellista merkitystä myös muilla rakennusaineteknologian aloilla, esimerkiksi sementti- ja betonteollisuudessa sekä teiden ja katujen päällystemassojen valmistamisessa. Sen vuoksi vain osa tuhkien tuotannosta ohjattaneen lähitulevaisuudessa maarakentamiseen.

Tuhkien merkitys kiviainesten korvaajana on suurin alueilla, missä

- soran ja hiekan kuljetusmatkat ovat pitkiä
- kivihiilivoimaloita sijaitsee rakentamisalueen läheisyydessä
- tuhkien sijoittamispaikoista on pula tai vanha sijoittamistapa esimerkiksi kaatopaikoille tai täyttöalueille aiheuttaa huomattavia kustannuksia
- kiviainesten tarve on suuri.

### Tuhkatyypit ja niiden tunnistaminen

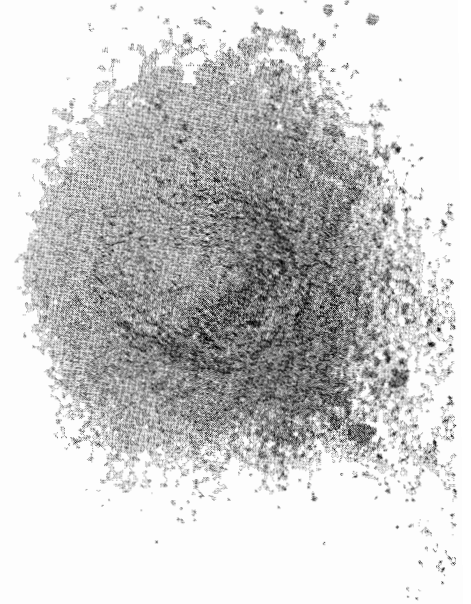
Tuhkan laatuun ja tyyppiin vaikuttavat muun muassa kivihiilen koostumus ja karkeus, voimalaitoksen polttolaitteiston tyyppi ja polttolämpötila. Kivihiilituhkat voidaan jaotella kolmeen päätyyppiin:

- I Lentotuhka, joka erotetaan ja otetaan talteen savukaasuista
- II Pohjatuhka, joka jää palotilan pohjalle hienoksi jauhettua hiiltä polttavassa pölypolttolaitoksessa
- III Pohjakuona, joka jää palotilan pohjalle murskeena hiiltä polttavassa arinapolttolaitoksessa.

On olemassa myös muita tuhkien jaottelutapoja, joten muualta saatavaa tietoa käytettäessä on aina varmistuttava, mistä tuhkatyypistä on kyse. Parhaiten tuhkat voidaan erottaa toisistaan raekokonsa perusteella. Seuraavassa esitetään eräitä tärkeimpiä niiden tunnistamista helpottavia tekijöitä.

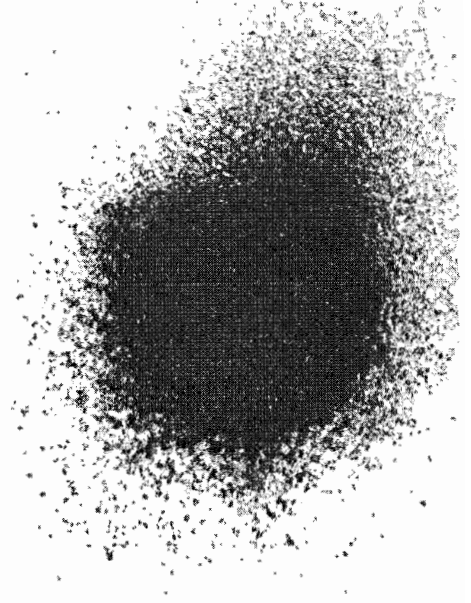
Kuva 1. Lentotuhka Ia

Nykyaikaisissa voimalaitoksissa kivihiili poltetaan hienoksi jauhettuna ja niissä syntyy lentotuhkaa 70...90% tuhkan kokonaispainosta. Sen väri voi vaihdella vaalean harmaasta ruskean tai mustan harmaaseen. Rakeisuudeltaan se vastaa silttiä. Kuivana se pölyää ja muistuttaa ulkonäöltään portlandsementtiä. Kosteana se voi alkalisuudeltaan johtuen tuntua liukkaalta. Tällainen pölypolttolaitosten lentotuhka (Ia) lujittuu yleensä, kun se tiivistetään sopivaa vesipitoisuutta käyttäen.



Kuva 2. Lentotuhka Ib

Murskeena hiiltä polttavien laitosten lentotuhka (Ib) on karkeampaa kuin edellinen ja väriltään useimmiten mustaa. Sitä syntyy yleensä alle puolet laitoksen tuhkan kokonaispainosta. Tämä lentotuhkatyyppi ei lujitu, vaan käyttäytyy suunnilleen samoin kuin rakeisuudeltaan sitä vastaava hieno hiekka.

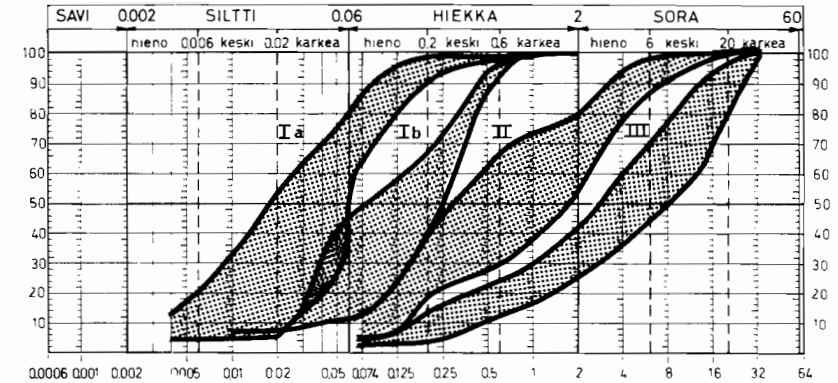


Kuva 3. Pohjatuhka II

Pölypolttolaitoksissa palotilan pohjalta talteenotettavan pohjatuhkan osuus laitoksen tuhkan kokonaispainosta on 10...30%. Pohjatuhkan väri voi vaihdella vaalean harmaasta ruskean tai mustan harmaaseen. Se jäähdytetään vesialtaassa, mistä johtuen se näyttää suuren vesipitoisuutensa vuoksi tummemmalta kuin saman laitoksen lentotuhka rakennuspaikalle tuotaessa. Pohjatuhka vastaa rakeisuudeltaan keskikarkeaa tai karkeaa hiekkaa eikä lujitu. Rakeet ovat särmikkäitä ja niillä on huokoinen pinta. Joukossa on myös kuonautuneita, pinnaltaan lasimaisia rakeita. Hie-noaineuksessa esiintyy myös jonkin verran lentotuhkahiukkasia.

Kuva 4. Pohjakuona III

Arinapolttolaitoksissa palotilan pohjalle jäävän pohjakuonan osuus on yleensä yli puolet laitoksen tuhkan kokonaispainosta. Se on väriltään tumman ruskeaa tai mustanharmaata. Pohjakuonakin jäähdytetään vesialtaassa, minkä vuoksi sen vesipitoisuus on suuri rakennuspaikalle tuotaessa. Se vastaa rakeisuudeltaan hienoa tai keskikarkeaa soraa ja käyttäytyy suunnilleen samalla tavoin kuin vastaava kiviaines. Jotkut rakeista ovat särmikkäitä, jotkut sileitä. Niiden pinta on joko huokoinen tai lasimainen. Paras tuntomerkki pohjatuhkaan (II) verrattaessa on pohjakuonan edellistä suurempi keskimääräinen rakeko.



Kuva 5. Helsingin voimalaitostuhkien rakeisuusalueet

- I a Hanasaaren voimalaitoksen lentotuhka
- I b Myllypuron voimalaitoksen lentotuhka
- II Hanasaaren voimalaitoksen pohjatuhka
- III Salmisaaren ja Myllypuron voimalaitoksen pohjakuona.

### 3. SUUNNITTELU

#### Suunnittelun lähtökohdat

##### Pohjaolosuhteet ja pohjaveden korkeus

Tuhkarakenteen suunnittelun kulku etenee samojen periaatteiden mukaisesti kuin maarakenteen suunnittelu yleensä. On varmistuttava, että rakenteiden muodonmuutokset pysyvät riittävän pieninä ja että niiden varmuus murtumista vastaan on riittävän suuri sekä rakentamisen että käytön aikana. Suunnittelun lähtötietoina selvitetään pohjaolosuhteet ja rakentamiseen vaikuttavat maasto- ja ympäristötekijät.

Pohjatutkimustulosten perusteella selvii, onko tuhkarakenteen tekeminen kyseiselle paikalle tarkoituksenmukaista. Kantavalla pohjamaalla tuhkien käytöllä ei yleensä saavuteta parasta mahdollista hyötyä, vaan niitä pitäisi pyrkiä käyttämään pehmeikköalueilla, joissa niiden keveyden ansiosta saataisiin pohjamaan painuminen vähäisemmäksi kuin tavanomaisia kiviaineita käyttäen.

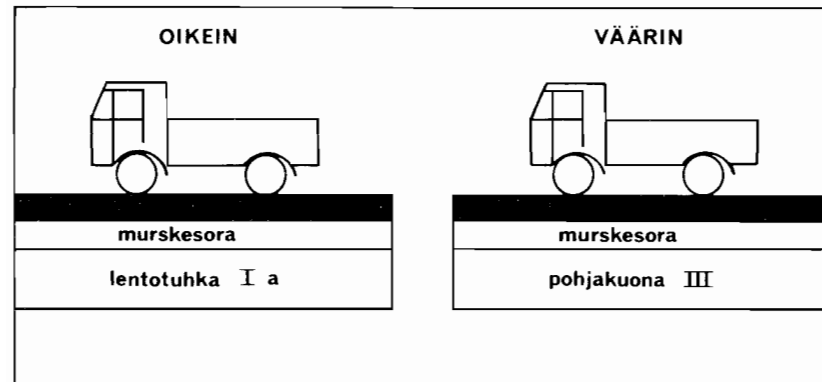


Pohjavedenpinnan korkeustietojen perusteella voidaan arvioida pohjamaan ja tuhkarakenteen tehokkaat tilavuuspainot, joita käytetään painuma- ja vakavuuslaskelmissa. Pohjavedenpinnan sijainti ratkaisee yleensä myös tuhkien soveltuvuuden ympäristön kannalta. Mikäli on odotettavissa tuhkaista veteen liukenevien aineiden haittavaikutuksia kasveille tai pohjavesille, on tuhkan käytön rajoitukset harkittava tapauskohtaisesti. Lisäksi on otettava huomioon, että lentotuhka voi menettää kantavuutensa, jos se joutuu lujittumattomana suoraan kosketukseen pohjaveden kanssa. Tämän vuoksi on lentotuhkakerroksen alle tarvittaessa rakennettava eristyskerros karkeasta materiaalista.

### Tuhkatyyppien valinta

Tuhkarakenteen tyyppi ja sen yläpuoliset rakenteet sekä niille tulevien kuormitusten suuruus ja laatu vaikuttavat käytettävän tuhkatyyppien valintaan. Tavanomaisiin maarakenteisiin voidaan käyttää kaikkia tuhkatyyppisiä, lukuunottamatta tyyppiä Ib lentotuhkaa, jonka käyttö tulee rajoittaa lähinnä täyttötöihin. Tyyppien II ja III tuhkat eivät sovellu rakenteisiin, joissa ne joutuisivat suurten dynaamisten kuormitusten alaisiksi, mikäli rakenteelle ei sallita rakeiden hienontumisesta johtuvaa kokoonpuristumista.

Suurta kantavuutta vaativiin kohteisiin ja paikkoihin, joissa rakenteelle sallitaan vain erittäin pieniä painumia, soveltuu lentotuhkatyyppi Ia. Tämä kestää parhaiten myös suuria dynaamisia kuormituksia, kuva 6. Lentotuhkan Ia lujittuminen ei ole kuitenkaan kaikissa tapauksissa suotava ominaisuus, mikä on otettava suunnitteluvaiheessa huomioon, kuva 7. Taulukko 1 auttaa suunnittelijaa valitsemaan maarakenteeseen sopivan tuhkatyyppien.



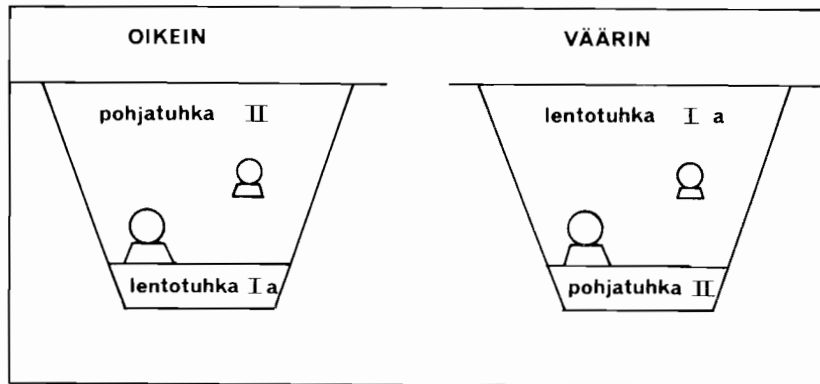
Kuva 6. Suurten dynaamisten kuormitusten alaisissa rakenteissa, esimerkiksi raskaasti liikennöityjen katujen päällysrakenteissa, soveltuu parhaiten käytettäväksi lujittuva lentotuhka (Ia). Muiden tuhkien rakeet murskautuvat, minkä seurauksena rakenteen pintaan voi syntyä haitallisia painumia.

Taulukko 1. Tuhkatyyppien valinta rakenteen tyyppiin ja vaatimustason mukaan.

|                                                                      | Lentotuhka Ia | Lentotuhka Ib | Pohjatuhka II | Pohjakuona III | Sora/Hiekka |
|----------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|-------------|
| 2 Soveltuu hyvin<br>1 Soveltuu joissakin tapauksissa<br>0 Ei sovellu |               |               |               |                |             |
| <b>MAARAKENNETYYPPI</b>                                              |               |               |               |                |             |
| Tiet, kadut, pysäköintialueet                                        |               |               |               |                |             |
| — pengertäyte                                                        | 2             | 2             | 2             | 2              | 2           |
| — tukikerros                                                         | 2             | 1             | 1             | 1              | 2           |
| — kantava kerros                                                     | 1             | 0             | 1             | 1              | 1           |
| <b>Kevyet rakennukset</b>                                            |               |               |               |                |             |
| — perustusten alainen täyte                                          | 2             | 1             | 2             | 2              | 2           |
| — taustatäyte                                                        | 2             | 2             | 2             | 2              | 2           |
| <b>Urheilukentät, piha-alueet</b>                                    |               |               |               |                |             |
| — täyte                                                              | 2             | 2             | 2             | 2              | 2           |
| — tukikerros                                                         | 2             | 1             | 2             | 2              | 2           |
| — kantava kerros                                                     | 2             | 0             | 1             | 1              | 2           |
| <b>Putkijohdot</b>                                                   |               |               |               |                |             |
| — perustusrakenteet                                                  | 2             | 1             | 2             | 2              | 2           |
| — kaivannon täytteet                                                 | 0             | 1             | 2             | 2              | 2           |
| <b>Erityisrakenteet</b>                                              |               |               |               |                |             |
| — laattamaiset rakenteet                                             | 1             | 0             | 0             | 0              | 0           |
| — vettä pidättävät rakenteet                                         | 1             | 0             | 0             | 0              | 0           |
| — suurta lujuutta vaativat maarakenteet                              | 2             | 0             | 0             | 0              | 0           |
| <b>POHJASUHTEET</b>                                                  |               |               |               |                |             |
| Pehmeikko                                                            |               |               |               |                |             |
| — painumien vahentaja                                                | 1             | 1             | 1             | 1              | 0           |
| — kantokyvyn parantaja                                               | 2             | 1             | 2             | 2              | 2           |
| Routiva pohjamaa                                                     |               |               |               |                |             |
| — routasuojauksen parantaja                                          | 1             | 1             | 1             | 1              | 0           |
| <b>VESIOLOSUHTEET</b>                                                |               |               |               |                |             |
| Pohjavesi                                                            |               |               |               |                |             |
| — rakenne pohjavedenpinnan alapuolella                               | 1*)           | 0             | 1             | 1              | 2           |
| Avovesi                                                              |               |               |               |                |             |
| — rakenne avovedessä valtiakaisesti                                  | 1*)           | 0             | 1**)          | 1**)           | 1           |
| — rakenne avovedessä pysyvästi                                       | 0             | 0             | 0             | 0              | 0           |

\*) Lujittunut lentotuhka

\*\*\*) Vain rakenteen alaosa avovedessä



Kuva 7. Putkijohtokaivannon täytemateriaalina ei suositella käytettäväksi lujuuttuvaa lentotuhkaa (Ia), koska se vaikeuttaa myöhemmässä vaiheessa putkijohtojen esiin kaivamista mahdollisten korjaustöiden yhteydessä. Sen sijaan kaikki tuhkatyypit soveltuvat arinarakenteen tekemiseen, lentotuhka kuitenkin vain silloin, kun arina voidaan rakentaa pohjaveden yläpuolelle, jolloin se ei pääse pehmenemään veden vaikutuksesta.

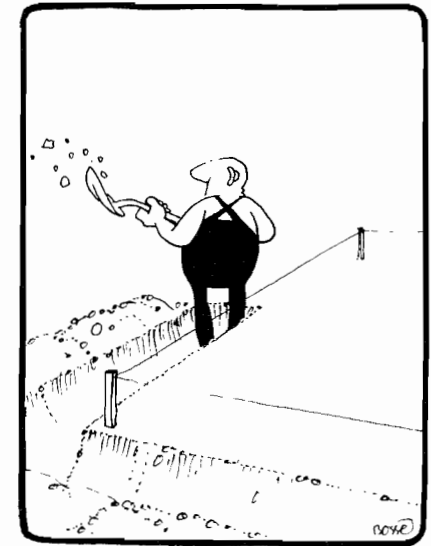
### Rakentamisen vuodenaika

Tuhkan käyttöä harkittaessa on otettava huomioon rakentamisen ajan-kohta, tarvittava tuhkamäärä sekä voimalaitoksen käyttöaste kyseessä olevana aikana. Yleensä kivihiilivoimala tuottaa tuhkaa huhtikuun ja syyskuun välisenä aikana vain noin 30 % koko vuoden tuotannosta, koska energian tuotanto keskittyy talvikauteen. Tuhkan saatavuuden turvaamiseksi suunnittelijan on hyvissä ajoin yhdessä työnsuunnittelijan kanssa sovittava tuhkan tilaamisesta tai ennakkovarastoinnista työmaa-alueelle. Tuhkista voidaan rakentaa kaikkina vuodenaikoina. Suunnitteluvaiheessa on kuitenkin jo syytä kiinnittää huomiota vuodenaajoista johtuviin säätekijöihin. Työselityksestä ilmenevä rakentamisjärjestys on laadittava siten, että runsaiden sateiden vaikutuksesta ei pääse tapahtumaan rakenteelle vahingollista tai ympäristöä likaavaa liettymistä.

### Kuivatus

Tuhkarakenteen kuivatus suunnitellaan samojen periaatteiden mukaan kuin tavalliselle maarakenteelle. Tuhkan alla olevan pohjamaan tai muun rakennekerroksen pinta on tehtävä riittävän sivukaltevaksi, jotta suotovedet pääsevät virtaamaan kuivatusjärjestelmään. Koska lentotuhkan vedenläpäisevyys on pieni, on siitä tehdyn rakenteen pinnalle tulevien vesien poisjohtaminen järjestettävä rakentamalla pinta riittävän sivukaltevaksi. Näin vähennetään veden imeytymistä lentotuhkarakenteeseen ja vähennetään sen pehmenemisvaaraa.

Kuva 8. Tuhkarakenteeseen joutuvien ylimääräisten vesien kuivattamisella on tärkeä merkitys sekä rakenteen toimivuuden että ympäristön kannalta. Kun vedet kerätään salaojituksen avulla viemäriverkostoon, ne voidaan parhaiten ohjata sopivaan purkupaikkaan kuormittamasta rakentamisalueen pohjavesiä tuhkarakenteista mahdollisesti suotautuvilla ympäristölle haitallisilla aineilla. Kuivatus voidaan hoitaa myös avo-ojitusta käyttäen, mikäli se todetaan riittäväksi ja pohjamaa on huonosti vettäläpäisevä, jolloin suotautuminen pohjavesiin on vähäistä.



### Korroosiosuojaus

Rakennusmateriaalien syöpyminen maaperässä ja maarakenteissa aiheuttaa rakenteille suurta haittaa ja siihen on kiinnitettävä erityistä huomiota. Yleisimmin korroosiolle alttiita materiaaleja ovat metallit ja betonit sekä muovit. Tuhkien syövyttävistä vaikutuksista on maailmassa tietoa melko vähän. Ilmiöön vaikuttavia tekijöitä on paljon ja siten myös aineiden syövyttävyyden vaihdella suuresti.

Metallien korroosio on luonteeltaan sähkökemiallista ja syöpyminen on usein pistemäistä. Yleensä metallirakenteet joudutaan suojaamaan korroosiolta tavanomaisia maarakennusmateriaaleja käytettäessä. Maan tai tuhkan, veden, ilman ja metallin muodostamassa systeemissä syövyttävyyteen vaikuttavat muun muassa maa- tai tuhkarakenteen sähkönjohtokyky, vesipitoisuus, pH-arvo, huokoisuus ja suolapitoisuus. Yksittäistä tekijää tutkimalla ei voida kuitenkaan varmistua korroosionopeudesta ja sen suuruudesta. Paras keino on varmistua asiasta käytännön kokein.

Helsingissä suoritettut käytännön kokeet ja muualta maailmasta saadut tiedot tuhkien metalleja syövyttävistä vaikutuksista osoittavat, että yleisesti käytetyt metallit, kuten hiiliteräs, valurauta ja alumiini voivat syöpyä kivihiilituhkissa melko voimakkaasti. Ennen tuhkarakenteeseen sijoittamista ne on syytä suojata korroosiota vastaan. Galvanoitu ja kuumasinkitty teräs syöpyvät myös jonkin verran tuhkissa. Sen sijaan kuparin ja lyijyn syöpyminen on tämänhetkisten kokemusten mukaan vähäistä.

Betonien korroosio on luonteeltaan kemiallista ja tyypiltään joko liuottavaa tai paisuttavaa. Liuottavia aineita voivat olla muun muassa happamat ja pehmeät vedet, diffusoituvat suolat, öljyt ja rasvat. Betoneja paisuttavia aineita ovat rikkiyhdisteet, muun muassa sulfaatit. Betonirakenteiden ei ole todettu käytännössä syöpyvän tuhkissa.

Muovit kestävät yleensä hyvin maarakenteissa. Samoin on todettu niiden hyvä kestävyys syöpymistä vastaan myös tuhkissa, joten niitä ei tarvitse suojata korroosiolta.

Tuhkien korroosiovaikutukset ovat laajan selvitystyön alaisena ja lähivuosina saadaan lisää tietoa asiasta. Aina sellaisissa tapauksissa, joissa materiaalin syöpymistä pelätään, on suoritettava korroosiosuojaus tai vältettävä kyseisen materiaalin sijoittamista tuhkaan.

#### Kasvillisuuden huomioonottaminen

Alkuainekoostumukseltaan tuhkat sisältävät muun muassa kasvien tarvitsemia ravinteita. Kuitenkin niissä esiintyy myös joitakin haittaavia tekijöitä. Kivihiilen palamisen yhteydessä siinä oleva boori muuttuu alkupe-  
räistä vesiliukoisemmaksi, jolloin tuhassa kasvavan kasvin saama run-  
sas boorin määrä on joillekin kasveille haitallinen. Myös tuhkan suuri al-  
kalisuus, pH-arvo 9...12, voi olla epäedullinen tekijä. Lisäksi haittana on  
yleensä typen ja fosfaatin puute. Suunnittelussa on huolehdittava, että  
kasvien juuret eivät joudu suoraan kosketukseen kivihiilituhkan kanssa,  
mikäli ei ole näyttöä, että kyseessä olevat kasvit viihtyvät tuhassa.

#### Kuitukankaan käyttö

Kuva 9. Rakeisuudeltaan eri-  
laisten tuhkien ja kiviainesten  
sekoittuminen voidaan estää  
asentamalla niiden väliin kuitu-  
kangas, jolloin perinteisesti  
käytetty eristys- ja suodatinker-  
ros voidaan jättää pois. Kangas  
päästää suotovedet läpi, jolloin  
pohjamaahan tai rakenteeseen  
ei pääse syntymään haitallisia  
huokosveden ylipaineita. Ra-  
kenteen kokonaispaksuutta ei  
kuitukankaan käyttämisestä  
huolimatta aina voida pienentää  
muun muassa riittävän routa-  
suojauksen tai vaadittujen kor-  
keustasojen vuoksi. Kankaan  
käyttö on toisinaan perusteltua  
myös työteknisessä mielessä,  
koska se vähentää heikosti  
kantavan pohjamaan häiriinty-  
mistä, vaikka ei varsinaisesti  
kantavuutta lisääkään.



## Mitoittamisen periaatteet

#### Tilavuuspaino ja vesipitoisuus

Tuhkarakenteiden ja niiden alaisen pohjamaan vakavuutta ja painumia ar-  
vioitaessa on pohjamaan ominaisuuksien lisäksi oltava selvillä tuhkien  
suunnitteluarvot. Yksi tuhkien etuja tavanomaisesti käytettyihin kiviainek-  
siin verrattuna on sen keveys. Kivihiilituhkien maksimikuivatilavuuspaino  
 $\gamma_{dmax} = 10...15,5 \text{ kN/m}^3$ . Niiden vesipitoisuudesta ja tiiviysasteesta ra-  
kenteessa riippuu niiden todellinen tilavuuspaino.

Lentotuhkat (Ia ja Ib) kuljetetaan työmaalle pölyämisen estämiseksi hie-  
man kostutettuna,  $w \geq 10 \%$  kuivapainosta. Niihin on lisättävä rakenta-  
mispaikalla vettä optimipitoisuuden  $w_{opt} \approx 20 \pm 5 \%$ , saavuttamiseksi.  
Lisäksi valmis tuhkarakenne imee lisää saatavilla olevaa vettä, jolloin w  
voi kohota jopa 35 %:iin, mikä nostaa sen painoa käyttötilassa.

Pohjatuhka (II) ja pohjakuona (III) kuljetetaan työmaalle märkänä eikä nii-  
hin tarvitse lisätä paikalla vettä. Niidenkin vesipitoisuus voi käyttötilassa  
olla jopa 35 %. Käytettäessä tuhkatyyppejä II ja III pohjaveden alapuolella  
niiden painosta on vähennettävä  $10 \text{ kN/m}^3$ , jolloin saadaan tehokas tila-  
vuuspaino  $\gamma'$ .

Taulukko 2. Kivihiilituhkien keskimääräisiä tilavuuspainon ja optimivesipitoi-  
suuden ominaisarvoja sekä vaadittavat tiiviysasteet määritettynä parannetun  
proctor-kokeen maksimitiiviyydestä. Lentotuhkan Ia vaadittu tiiviysaste on  
95 % vain erittäin vaativissa rakenteissa.

| Tuhkatyyppi | $\gamma_{dmax}$<br>( $\text{kN/m}^3$ ) | $w_{opt}$<br>(%) | $\gamma_n$ suunnittelu-<br>arvo<br>( $\text{kN/m}^3$ ) | Vaadittava<br>tiiviysaste<br>D (%) |
|-------------|----------------------------------------|------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Ia          | 13.5                                   | 20               | 16                                                     | 90, 95                             |
| Ib          | 12.5                                   | 20               | 15                                                     | 92                                 |
| II          | 13.5                                   | 22               | 16                                                     | 92                                 |
| III         | 13.0                                   | 24               | 15                                                     | 92                                 |

**Vedenläpäisevyys**

Tuhkarakenteen vedenläpäisevyys riippuu tuhkatyypistä. Tiivistetyn lentotuhkan la vedenläpäisevyys on lujittumattomana samaa luokkaa kuin keskikarkean siltin, jonka vedenläpäisevyyskerroin  $k \approx 10^{-7}$  m/s ja se on siis huomasti vettä läpäisevä. Lujittuneena vedenläpäisevyys on vielä pienempi ja vastaa hienon siltin tai silttisen saven vedenläpäisevyyttä, jonka  $k \approx 10^{-9}$  m/s. Tyypin la lentotuhkaa voidaan käyttää huolellisesti tiivistettynä vettäpidättävien rakenteiden tekemiseen, kunhan varmistetaan siitä, että rakentaminen voidaan suorittaa kuivissa oloissa. Muilla tuhkatyypeillä on suurempi vedenläpäisevyys. Taulukossa 3 esitetään tuhkien likimääräiset k-arvot.

*Taulukko 3. Kivihiilituhkien likimääräiset vedenläpäisevyysskertoimet tiivistetyssä rakenteessa.*

| Tuhkatyyppi | Vedenläpäisevyyskerroin k (m/s) |
|-------------|---------------------------------|
| Ia          | $10^{-7} \dots 10^{-9}$         |
| Ib          | $10^{-6} \dots 10^{-7}$         |
| II          | $10^{-6}$                       |
| III         | $10^{-5} \dots 10^{-6}$         |

**Kokoonpuristuvuus**

Tiivistetty tuhkarakenne puristuu kuormitettaessa kokoon hyvin nopeasti kuten kitkamaat, eikä käyttötilan aikaista kokoonpuristumista tavallisesti tarvitse ottaa huomioon. Kuitenkaan tuhkatyyppejä II ja III ei saa käyttää rakenteissa, jossa ne joutuvat suurten dynaamisten kuormitusten alaiseksi, esimerkiksi lähellä raskaasti liikennöidyn kadun pintaa, koska niissä voi tapahtua haitallista kokoonpuristumista, taulukko 1 ja kuva 6.

**Lujuus**

Vakavuus-, kantavuus- ja maanpaineelaskelmien tekemiseksi on käytettävän kiviaineksen lujuusominaisuuksien tunteminen välttämätöntä. Geoteknisessä mielessä tärkein lujuusarvo on leikkauslujuus, joka riippuu kiviaineksen tiiviydestä, raekoostumuksesta, raemuodosta, vesipitoisuudesta ja kuormitusnopeudesta. Sen oletetaan koostuvan kahdesta komponentista:

1 sisäisestä kitkasta, joka aiheutuu kiviainesrakeiden hankauksesta toisiaan vastaan

2 koheesiosta, joka aiheutuu kiviainesrakeiden välisistä kiinnevoimista.

Leikkauslujuuden (**s**) oletetaan yleensä kasvavan kokonaisnormaalijännityksen (**σ**) kasvaessa seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$s = c + \sigma \tan \varnothing$$

jossa lujuusparametrit ovat

**c** = näennäinen koheesio

**∅** = näennäinen kitkakulma.

Karkearakeisten kiviainesten leikkauslujuus muodostuu pääasiassa kitkasta ja hienorakeisten kiviainesten pääasiassa koheesiosta. Kivihiilituhkan leikkauslujuus koostuu sekä kitkasta että koheesiosta.

*Taulukko 4. Kivihiilituhkien ja eräiden luonnonkiviainesten keskimääräisiä lujuusparametrien ominaisarvoja.*

| Tuhkatyyppi     | ∅ (°) | c (kN/m²) |
|-----------------|-------|-----------|
| Ia              | 32    | 34        |
| Ib              | 34    | —         |
| II              | 42    | 30        |
| III             | 34    | —         |
| Kiviainestyyppi | ∅ (°) | c (kN/m²) |
| Louhe           | 45    | —         |
| Sora            | 36    | —         |
| Hiekka          | 34    | —         |
| Karkea siltti   | 30    | —         |

Lentotuhkasta la tehty rakenne lujittuu ajan kuluessa yli 0°C olevissa lämpötiloissa, jolloin lujuusparametrien arvot kohoavat. Tarvittaessa voidaan lujittuminen varmistaa sekoittamalla tuhkan joukkoon esimerkiksi kalkkia tai sementtiä 2...6 % tuhkan painosta. Leikkauslujuuden paranemista ei kuitenkaan aina voida käytännössä ottaa huomioon, vaan suunnitelma on tehtävä taulukossa 2 esitettyjä lujittumattoman tuhkan parametrejä käyttäen.

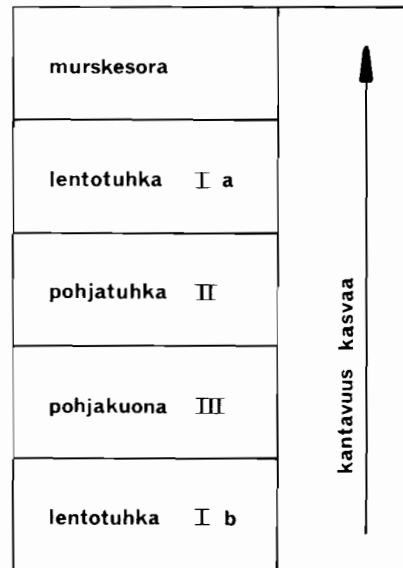
Mikäli tuhkien lujittumisominaisuutta aiotaan hyödyntää, on syytä harkita asiaa tapauskohtaisesti yhdessä asiantuntijan kanssa. Tämä tulee kyseeseen muun muassa, kun lentotuhkaa la hyödynnetään seuraavissa tapauksissa:

- 1 Tasataan painumia pehmeiköllä.
- 2 Parannetaan varmuutta maapohjan murtumista vastaan muuttamalla liukupintojen sijainti syvälle lujiin maakerroksiin.
- 3 Pyritään ohuihin rakennekerroksiin.
- 4 Vähennetään maanpainetta.
- 5 Käytetään lentotuhkaa vettäpidättävän rakenteen tekemiseen.

Lentotuhkan lujittumisastetta voidaan käytännössä arvioida paremmin puristuslujuuden kuin tätä vaikeammin määritettävien leikkauslujuusparametrien avulla. Tietekniikassa käytetään maabetonin laadunvalvonnassa lieriönmuotoisia koekappaleita, mikä soveltuu hyvin myös lentotuhkan lujittumisen tarkkailuun. Laboratoriossa lentotuhkalieriöiden puristuslujuus on yleensä 28 vrk ikäisenä 0,5...5 MN/m<sup>2</sup>. Käytännön rakenteista otettujen näytteiden pitkän ajan lujuudet ovat ilman lisäsideaineen käyttöä useimmiten alle 2,5 MN/m<sup>2</sup>.

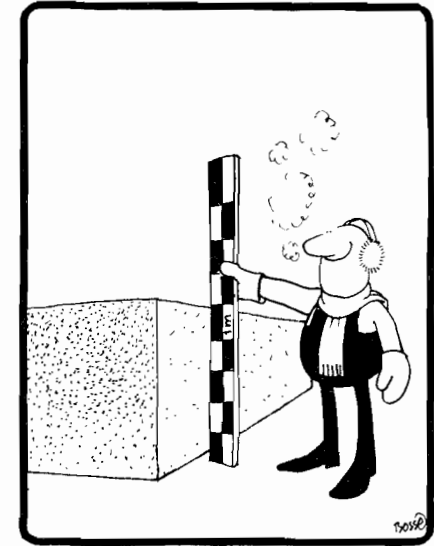
#### Kantavuus

Kuva 10. Tuhkarakenteen kantavuuteen vaikuttaa muiden maarakenteiden tavoin rakenteen tiiviys, vesipitoisuus ja paksuus sekä pohjamaan kantavuus. Hyvin tiivistetyn, vasta rakennetun lentotuhkakerroksen la kantavuus on samaa luokkaa kuin hyvin suhteistuneen luonnonsoran. Lujittumisen vaikutuksesta sen kantavuus vielä kasvaa ajan kuluessa. Sen sijaan muiden tuhkatyyppien kantavuus ei ole aivan yhtä hyvä, mikäli kriteerinä pidetään tietyn kuormituksen aiheuttamaa painumaa esimerkiksi levykuormituskokeessa. Kuitenkin niistä tehdyillä rakenteilla on hyvät leikkauslujuusominaisuudet ja siten hyvä kantokyky. Kuvassa esitettävä järjestys ("paremmuusjärjestys") on tuhkatyyppien ihanteellinen sijoittamisjärjestys rakenteessa.



#### Routa ja lämmöneristävyyys

Kuva 11. Kivihiilituhkasta tehty huolellisesti tiivistetty rakenne ei roudi. Kuitenkin lentotuhkasta la tehdyn rakenteen tiivistämisen yhteydessä muodostuneissa saumakohtissa voi routimiselle suotuisissa oloissa käynnistyä jääkerroksen muodostumisprosessi. Tämän välttämiseksi on ennen uuden kerroksen levittämistä tiivistetyn kerroksen pinta karhennettava, jotta saumoja ei pääse syntymään. Roudan tunkeutumisvyöhyke on kivihiilituhkissa pienempi kuin sorassa ja hiekassa. Routivalle pohjamaalle rakennettaessa voidaan tuhkia käytettäessä kerrospaksuutta pienentää 40 % vastaavan sora-kerroksen paksuudesta pohjamaan pitämiseksi routimattomana (esimerkiksi 1,0 m tuhkaa vastaa 1,6 m soraa).



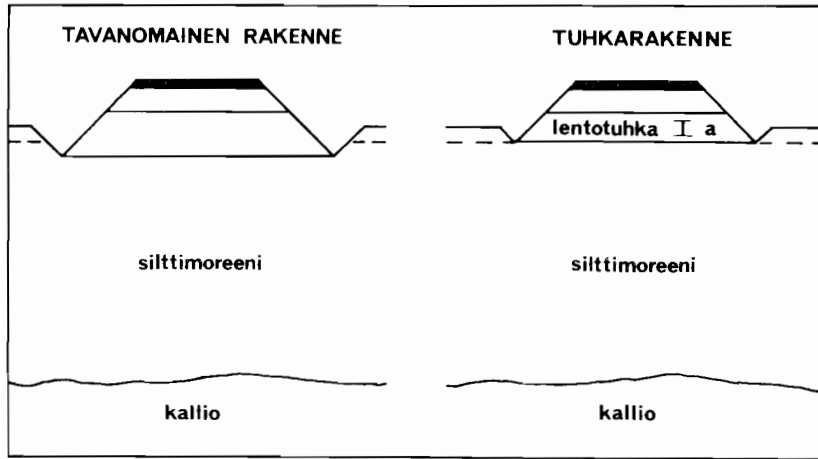
#### Kustannusten laskeminen

Teknisesti parhaan maarakennevaihtoehdon löytämiseksi suorittamansa vertailun lisäksi suunnittelijan on tehtävä vaihtoehtojen kesken myös kustannusvertailu, jonka perusteella lopullisesti määrätään toteutettava vaihtoehto. Luonnonkiviainesten ja tuhkien käyttöön perustuvien rakennevaihtoehtojen kustannuksia tarkasteltaessa voidaan tarkastelun kohteeksi ottaa seuraavat vertailukustannuksiin oleellisesti vaikuttavat tekijät:

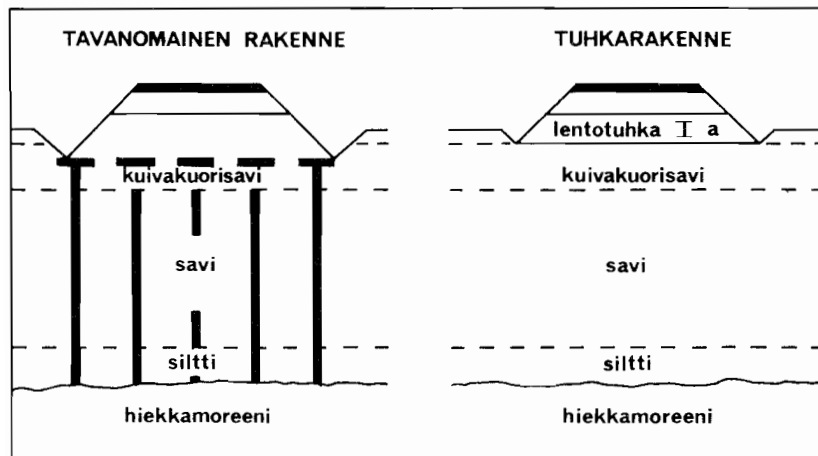
**RAKENTEEN HINTA = MATERIAALIN HINTA + KULJETUSKUSTANNUKSET + LEVITTÄMIS- JA TIIVISTÄMISKUSTANNUKSET**

Kun luonnonkiviainesten ja tuhkien hintoja vertaillaan, on otettava huomioon niiden tilavuuspaino, vesipitoisuus, kokoonpuristuvuus tiivistettäessä sekä kerralla tiivistettävän kerroksen paksuus. Kustannukset on syytä ilmoittaa muodossa mk/m<sup>3</sup>rtr (rtr = rakenneteoreettinen), jolloin niitä on helppo käyttää apuna myös muiden vastaavanlaisten rakenteiden kustannusvertailussa.

Mikäli tuhkien käytöllä voidaan saavuttaa suorien kustannussäästöjen lisäksi myös välillisiä säästöjä on ne otettava vertailussa huomioon. Jos esimerkiksi tuhkien keveyden ansiosta voidaan käyttää halvempaa perustamistapaa kuin luonnonkiviaineksia käytettäessä, saattaa saavutettava kustannussäästö olla merkittävä.



Kuva 12. Kustannusten säästäminen tuhkarakennetta käytettäessä, kun käytettävä materiaali ei vaikuta perustamistapaan. Säästöjä voidaan saavuttaa sorarakenteeseen verrattuna tuhkan halvemman hinnan, ohuempien rakennekerrosten ja vähentyneen kaivun ansiosta.



Kuva 13. Kustannusten säästäminen tuhkarakennetta käytettäessä, kun käytettävä materiaali vaikuttaa perustamistapaan. Säästöjä voidaan saavuttaa sorarakenteeseen verrattuna halvemman perustamistavan ja tuhkan halvemman hinnan ansiosta.

## Työohjeen laatiminen

Suunnitelmaan on liitettävä yksiselitteinen, helposti ymmärrettävä työohje työmaata varten. Sen tulee sisältää tarpeen mukaan ainakin seuraavat kohdat:

- 1 Kaivu
  - kaivuvaiheet
  - luiskakaltevuus tai tuentatapa
  - kaivumassojen sijoittaminen
- 2 Pohjamaan käsittely
  - pohjamaan pinnan muotoilu ja tiivistäminen
  - pohjamaan stabilointitarve
- 3 Kuivatus
  - työnaikainen kuivatus
  - käytönaikainen kuivatus
  - eristyskerroksen tarve
- 4 Muiden rakenteiden korroosiosuojaustarve
- 5 Levittäminen ja tiivistäminen
  - kerrospaksuus
  - tiivistyskalusto ja tiivistämistapa
  - veden käyttö
  - kuitukankaan käyttö
- 6 Kasvillisuuden huomioonottaminen
- 7 Tuhkarakenteen suojaus
  - työnaikainen suojaus
  - käytönaikainen suojaus
- 8 Yhteyshenkilöt suunnittelijan ja tuhkien toimittajan taholta.

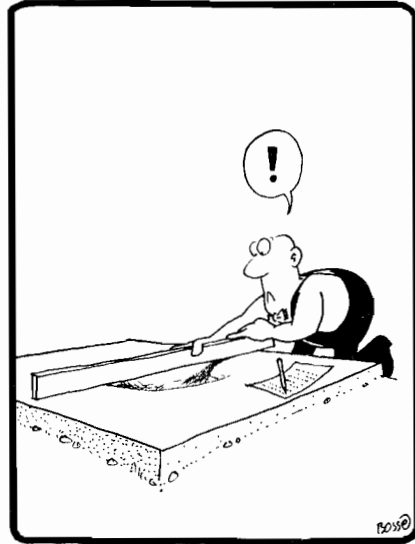
## Seurannan suunnittelu

Mikäli toteutettava projekti on luonteeltaan sellainen, että sen käytön aikana valvontamittauksilla on saatavissa uutta tietoa kivihiilituhkien käyttäytymisestä, on suunnitelmaan liitettävä jatko-seurantasuunnitelma. Tärkeitä seurattavia seikkoja ovat muun muassa:

- pohjamaan ja rakenteen painuminen
- routanousut
- roudan tunkeutumissyvyys
- kantavuus
- lentotuhkan lajuuden kehitys
- vaikutukset pohjavesiin ja kasveihin
- korroosiovaikutukset
- sään vaikutukset.

Kuva 14. Huolellisesti suunniteltu tuhkarakenteen käytönäkainen seuranta on tärkeää rakentamiskokemusten kartuttamiseksi. Seurantasuunnitelman tulee sisältää seuraavat asiat:

- seurannan tarkoitus
- käytettävät mittausmenetelmät
- mittauksen suorittajat
- kustannukset ja rahoitus
- aikataulu
- raportointi.



## 4. RAKENTAMINEN

### Työnsuunnittelu

#### Tuhkien saatavuus ja työmaiden ennakointi

Tuhkien edullisuus soraan ja hiekkaan verrattuna riippuu ensisijassa kuljetusmatkojen pituudesta. Toinen huomioonotettava seikka on niiden saatavuus juuri silloin, kun niitä tarvitaan. Koska tuhkia syntyy rakentamisen kannalta melko hitaasti, on kiinnitettävä erityistä huomiota tuhkien jakelujärjestelmään ja tuhkan käytölle sopivien työmaiden ennakoimiseen. Tähän liittyy oleellisesti myös tuhkien välivarastointi- ja talvirakentamiskysymys.

Tuhkia syntyy talvikaudella noin 2/3 koko voimalaitoksen vuosituotannosta, kun taas kesäkuukausina, jolloin rakentaminen on vilkasta, tuhkan tuotanto on vähäistä. Rakentaminen on tämän vuoksi järkevää keskittää kesäaikaan kutakin saatavissa olevaa tuhkatyyppiä kohden vain yhteen tai kahteen kohteeseen kerrallaan. Talvella taas runsaamman tuotannon aikana voidaan osa tuhista kuljettaa mahdollisuuksien mukaan hyvissä ajoin ennakolta määrättyihin, tulevien rakentamispaikkojen läheisyydessä oleviin varastokasoihin. Muu tuhkan tuotanto tulisi suunnata talvirakentamiskohteisiin.

### Valmistelevat työt

Ennen rakentamiseen ryhtymistä tehdään tavanmukaiset valmistelevat työt, kuten raivaukset ja humusmaan poisto. Koska tuhkan saatavuuden parantamiseksi sen kuljettamisen on oltava jatkuvaa, työmaa-alueelta on varattava sopiva tuhkan välivarastointipaikka siitäkin huolimatta, että koko tuhkamäärää ei ajeta etukäteen varastoon. On yleistä, että tuhkia ajetaan työmaalle myös yöaikaan, jolloin tuhka on tyhjennettävä kuljetusautosta välivarastointipaikkaan odottamaan seuraavana päivänä tapahtuvaa levittämistä rakenteeseen.

Lentotuhkan kastelumahdollisuus työmaalla on etukäteen varmistettava. Kasteluletkun päähän on varattava sumuttava suutin, jonka avulla vesi saadaan tasaisemmin sekoittumaan lehtotuhkaan. Kuitukankaan käyttöön on varauduttava, vaikka suunnitelma ei sitä edellyttäisikään. Kankaan käytöllä voidaan helpottaa työskentelyä muun muassa pehmeikkö-alueilla. Suunnitelman edellyttämät koneet ja laitteet on järjestettävä työmaalle rakentamisen alkamispäivään mennessä. Mikäli on kyseessä talvirakentaminen, on seisokkien vuoksi varauduttava lämpöeristämään tuhka väliaikaisesti.

### Tuhkien menekki

Tuhkia tilatessaan on työnsuunnittelijan kiinnitettävä huomiota tuhkien menekkiin. Mikäli toimituksissa käytetään yksikkönä tonnia, on huomattava, että tuhkatonnista voidaan tehdä enemmän rakennetta kuin sora- tai hiekkatonnista. Jos taas käytetään irtokuutiometrejä, on tilanne päinvastoin.

*Taulukko 5. Kivihiilituhkien sekä soran ja hiekan menekki rakennekuutiometriä kohti (m³rtr), kun irtaaineksen määrä ilmoitetaan joko tonneina (t) tai irtokuutiometreinä (m³itd).*

| Materiaali  | t/m³rtr | m³itd/m³rtr |
|-------------|---------|-------------|
| Ia          | 1.4     | 2.0         |
| Ib          | 1.2     | 2.0         |
| II          | 1.7     | 1.4         |
| III         | 1.6     | 1.4         |
| Sora/hiekka | 2.0     | 1.3         |

### Kuljetus ja välivarastointi

Kaikki tuhkatyypit voidaan kuljettaa kosteana voimalaitokselta työmaalle avolavaisella kuorma-autolla. Koska tyypit II ja III jäädytetään vesialtaassa, ne ovat jo valmiiksi kosteita,  $w \approx 40\%$ . Sen sijaan tyypit Ia ja Ib ovat kuivia ja ne joudutaan kostuttamaan voimalaitokselta lähtiessä. Kun vesipitoisuus  $w \geq 10\%$ , ei pölyämistä tapahdu kuljettamisen aikana.

Jotta tuhkien saatavuutta voidaan kesäkuukausina parantaa, on talvituo-  
tanta pystyttävä varastoimaan. Jotta tuhkat voisivat säilyttää kilpailuky-  
kynsä soraan ja hiekkaan verrattuna, varastointitavan on oltava halpa ja  
joustava. Käyttökelpoinen menetelmä on tuhkien varastointi kasaan työ-  
maiden läheisyyteen. Se ei lisää kalliin siirtokuljetuksen osuutta kuin sen  
verran, minkä tuhkien sijoittelu rakentamispaikalla vaatii. Tuhkatyypin II  
ja III varastoiminen kasaan ei vaadi mitään erityisiä toimenpiteitä, kunhan  
talvella rakennettaessa huolehditaan, että kasan jäätyneitä pinta-ainek-  
sia ei käytetä rakenteisiin.

Tuhkatyypin Ia ja Ib varastoisessa on kiinnitettävä huomiota siihen,  
etteivät ne pääse kastumaan lisää kasassa ollessaan. Ne voidaan kuiten-  
kin kuljettaa varastokasaan samalla tavoin kostutettuna ( $w \geq 10\%$ ) kuin  
suoraan rakentamispaikalle kuljettaessakin. Pohjan kautta tulevan ka-  
pillaariveden ja sateiden aiheuttaman veden pääsy on estettävä. Parhai-  
ten tämä voidaan tehdä levittämällä kasan alle muovikelmu ja päälle jokin  
ruiskuttava kate, esimerkiksi bitumiöljy. Näin saadaan poistetuksi myös  
lentotuhkan pölyämisongelma.

Mikäli lentotuhkaa Ia käytettäessä edellytetään, että lujittumisominaisuu-  
det ehdottomasti säilyvät, se on varastoitava kuivana tai kuljetettava suo-  
raan voimalaitoksen siilosta rakentamispaikalle.

### Kaluston valinta

Mikäli suunnitelmassa on ilmoitettu käytettävä kalusto, työsuunnittelija  
huolehtii siitä, että työmaalle hankittavat koneet ovat vaaditun tyyppisiä.  
Muussa tapauksessa voidaan käyttää samaa kalustoa kuin sorasta ja  
hieasta rakennettaessa.

Levityskoneeksi sopii parhaiten telapuskutraktori tai kauhakuormaaja. Ne  
esitiivistävät tuhkakerroksen levitystyön yhteydessä, mikä helpottaa var-  
sinaista tiivistämistä. Tiivistyskoneen valinta riippuu pohjamaan laadusta  
ja rakenteen pinta-alasta. Kantavalle pohjamaalle soveltuu laajoissa koh-  
teissa traktorivetoinen 30...80 kN täryvalssiyrä tai 120...150 kN kumipyö-  
räjyry. Pehmeällä pohjamaalla on käytettävä kevyitä jyriä ja vetokoneena  
mieluiten telapuskutraktoria. Pienehköissä ja ahtaissa kohteissa on 1...4  
kN tärylevy sopiva.

### Levittäminen ja tiivistäminen

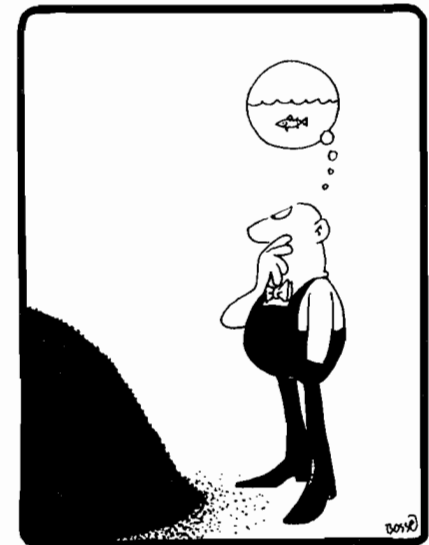
#### Veden käyttö ja veteen rakentaminen

Tuhkatyypit Ia ja Ib toimitetaan yleensä voimalaitokselta kostutettuna noin  
10 % vesipitoisuuteen. Paikalle tuodun tuhkan vesipitoisuutta on valvottava  
ja puuttuva vesimäärä on lisättävä levittämisen jälkeen tasaisesti koko ra-  
kenteen alalle. Tavoitevesipitoisuus  $w = 15\text{...}20\%$ . Vaihteluvälin ylärajaa ei  
saa kastelutoimenpitein ylittää kuin siinä tapauksessa, että laboratorioko-  
kein on käytettävällä lentotuhkatyypillä todettu olevan suurempi optimivesi-  
pitoisuus kuin  $w_{opt} = 22\%$ . Kuvassa 16 esitetään käytännön esimerkki  
lentotuhkan oikean vesipitoisuuden laskemisesta.

Alhaisia vesipitoisuuksia on käytettävä siksi, että kesällä ja syksyllä tuhkan  
vesipitoisuus saattaa rankkasateen sattuessa nousta hetkessä muutamal-  
la prosenttiyksiköllä, jolloin tuhkatyypit Ia ja Ib voivat menettää kantavuu-  
tensa ja tällöin työ joudutaan keskeyttämään. Lentotuhkista (Ia ja Ib) ei voi-  
da rakentaa veteen, sillä ne liettyvät tällöin täysin.

Talvella liika veden käyttö aiheuttaa suuremman jäätymisriskin sekä vaa-  
ran, että tuhkarakenne keväällä sulaessaan menettää stabiliteettinsa. Pak-  
kassäällä levittäminen, kastelu ja tiivistäminen on tehtävä välittömästi tuh-  
kan paikalletuonnin jälkeen, jolloin se on vielä lämmintä.

Kuva 15. Lentotuhkakerroksen  
tiivistämistyön onnistumisen  
edellytyksenä on ennen muuta  
tuhkan oikea vesipitoisuus. Mie-  
luiten tulisi käyttää vesipitoisuut-  
ta, joka on hiukan alle optimin,  
jotta vältettäisiin yllättävästä sa-  
teesta johtuva lentotuhkan liet-  
tyminen. Pohjatuhkan (II) ja poh-  
jakuonan (III) vesipitoisuutta ei  
tarvitse yleensä tarkkailla tiivis-  
tettäessä, koska ne ovat useim-  
miten riittävän märkiä paikalle  
tuotaessa.





**Esimerkki**

Rakentamispaikalle on kuljetettu lentotuhkakasa, josta otettujen näytteiden keskimääräiseksi vesipitoisuudeksi ( $w$ ) mitataan 10 % tuhkan kuivapainosta. Tuhkaa tuottavan voimalaitoksen polttamasta kivihiilestä syntyvän lentotuhkan maksimikuivatilavuuspainon ( $\gamma_{dmax}$ ) tiedetään olevan 13...15 kN/m<sup>3</sup> ja optimivesipitoisuuden ( $w_{opt}$ ) 16...20 %. Kuinka paljon vettä on lisättävä 1 m<sup>2</sup> ja tiivistettävää kerrosta kohden, kun kerroksen paksuus ( $h$ ) on 0,15 m ja vaadittu tiiviysaste ( $D$ ) on 90 % maksimitiiviudesta?

**Laskeminen**

Tarvittava vesimäärä (l/m<sup>2</sup>) =

$$\frac{1}{100} \times (w_{opt} - w) \times D \times \gamma_{dmax} \times h$$

$w = 10 \%$

$w_{opt} = 16...20 \%$

$\gamma_{dmax} = 13...15 \text{ kN/m}^3$

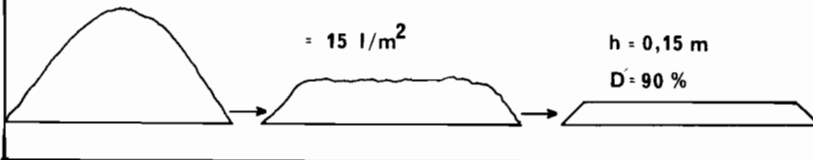
Vesimäärä

$$\frac{1}{100} \cdot (18-10) \cdot 90 \cdot 14 \cdot 0,15 \text{ l/m}^2$$

$$= 15 \text{ l/m}^2$$

$h = 0,15 \text{ m}$

$D = 90 \%$

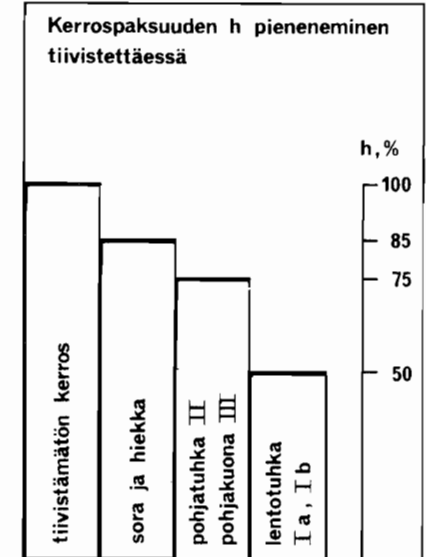


Kuva 16. Tarvittavan lisäveden määrän laskeminen lentotuhkan tiivistämistä varten.

Pohjatuhan (II) ja pohjakuonan (III) vesipitoisuudet ovat paikalle tuotaessa yleensä reilusti yli optimin. Tämä ei aiheuta kuitenkaan haittaa levittämisen ja tiivistämiselle, vaan liika vesi poistuu ympäristöön. Mikäli haitallisia ympäristövaikutuksia ei ole pelättävissä, tuhkatyypeistä II ja III voidaan rakentaa myös pohjamaalle, jonka päällä on vettä, mutta veden syvyys ei saa olla rakentamisen aikana suurempi kuin 0,1...0,2 m. Tällöin saatetaan ensimmäinen kerros joutua tekemään paksummaksi kuin 300 mm. Seuraava kerros on tehtävä siinä tapauksessa ohuena, 100...200 mm, jotta riittävä tiivistysvaikutus saavutetaan. Kun veteen rakennetaan, on kuitenkin ehdottomasti huolehdittava työnaikaisesta kuivatuksesta. Vesi ei saa päästä jäätyämään rakentamisen aikana.

**Tiivistettävän kerroksen paksuus ja tiivistämiskertojen määrä**

Kuva 17. Kivihiilituhkat puristuvat tiivistettäessä enemmän kokoon kuin sora ja hiekka. Tämä on otettava huomioon materiaalin menekkiä laskettaessa. Lentotuhkat (Ia ja Ib) levitetään enintään 300 mm paksuna kerroksena kerrallaan. Tiivistetyn kerroksen paksuus on vain 0,4...0,6 kertaa alkuperäinen paksuus, joten kerroksen paksuus on tiivistettynä enintään noin 200 mm. Tuhkaa Ia käytettäessä on vasta tiivistetyn kerroksen pinta karhennettava ennen seuraavan kerroksen levittämistä. Pohjatuikka (II) ja pohjakuona (III) levitetään enintään 400 mm paksuna kerroksena kerrallaan. Tiivistetyn kerroksen paksuus on noin 0,7...0,8 kertaa alkuperäinen paksuus, joten kerroksen paksuus on tiivistettynä enintään noin 300 mm. Tiivistämiskertojen määrä on kaikilla tuhkillä kerrosta kohti vähintään kuusi.

**Lisäsideaineen käyttö**

Suurta lujuutta vaativissa kohteissa lentotuhkatyypin Ia lujuutta voidaan parantaa sekoittamalla siihen eräitä lisäsideaineita, muun muassa kalkkia tai sementtiä. Sekoittaminen voidaan suorittaa paikalla tai asemasekoitusmenetelmää käyttäen. Jälkimmäistä käyttäen saavutetaan homogeenisempi massa ja parempi laatu. Yleensä kuitenkin huolellisesti suoritettu paikallasekoitus takaa vaaditun laatutason. Sementti tai kalkki annostellaan tasan välein ruudutetulle alueelle löyhän lentotuhkakerroksen päälle suunnittelijan tai muun asiantuntijan antaman ohjeen mukainen määrä. Sen jälkeen lisäaine ja hieman kostea tuhka sekoitetaan sopivalla laitteella keskenään. Kun sekoittuminen todetaan riittäväksi, tuhkakerrokseen lisätään vettä puuttuva määrä ja se tiivistetään.

### Suojaaminen sään vaikutuksilta

Mikäli rankkasade pääsee yllättämään kesken rakentamisen, kestää huolellisesti tiivistetty lentotuhkakerros muutamia tunteja liettymättä aivan pintakerrosta lukuunottamatta. Sateen loputtua myös pinta saavuttaa jälleen stabiilitteettinsä noin puolen vuorokauden kuluttua. Jos sade jatkuu yli vuorokauden, voi hyvinkin tiivistetty lentotuhkarakenne pehmentyä, jolloin se vaatii kantavuuden palautumiseksi 2...4 vuorokauden kuivan ajanjakson. Sateen aiheuttamilta vahingoilta vältytään, kun lentotuhkan pinta suojataan sateelta.

Lentotuhkakerros on sään haittavaikutusten minimoimiseksi levitettävä ja tiivistettävä aina, mikäli mahdollista, heti paikalle tuonnin jälkeen. Valmiin lentotuhkarakenteen pinta on tehtävä sivukaltevaksi, jotta sade- ja sulamisvedet pääsevät virtaamaan pois. Lisäksi valmis pinta on peitettävä sopivalla kiviaineskerroksella, esimerkiksi murskesoralla tai hienomurskeella, kuva 19. Tämä toimii muun muassa kulutuskerroksena, työstökelpoisena tsaussmassana ja kosteutta säilyttävänä kerroksena. Penkereiden luiskat ovat erityisen alttiita eroosiolle. Ne on suojattava esimerkiksi murskekerroksella tai verhousistutuksella. Märkä lentotuhka voi kulkeutua työmaalta kenkien mukana ja liata ympäristöä. Tämä on myös estettävä käyttämällä lentotuhkan peitemateriaalina sopivaa luonnonkiviainesta.

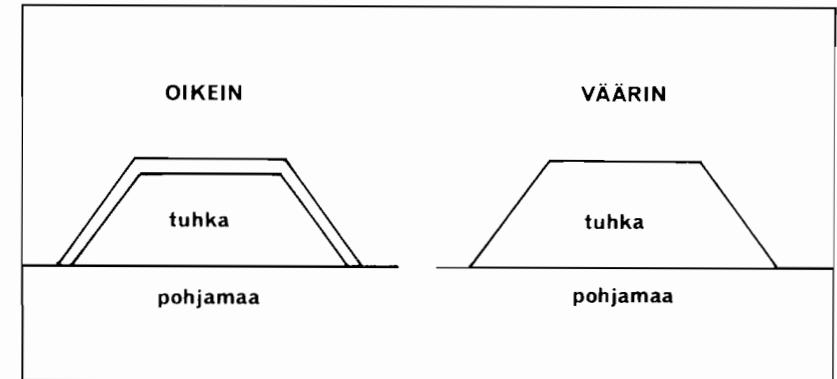


Kuva 18. Lentotuhkasta ei voida rakentaa rankkasateella, vaan työ on keskeytettävä ja tuhka-kerroksen pinta on suojattava vedenpitävällä peitteellä. Myöskään valmiin lentotuhkarakenteen pintaa ei saa jättää useiksi päiviä paljaksi, vaan se on suojattava luonnonkiviaineskerroksella.

Tuuli ja auringonpaiste kuivattavat nopeasti kosteankin tuhkan pinnan. Lentotuhka (Ia ja Ib) pölyää kuivuttuaan tuulella niin paljon, että se aiheuttaa haittaa ympäristölleen. Tiivistetynkin lentotuhkan pinta voi pölytä haitallisesti. Tämän vuoksi lentotuhkaa ei pidä jättää koskaan useiksi päiviä suojaamatta. Suojaaminen suoritetaan luonnonkiviaineskerrosta käyttäen. Asia voidaan hoitaa myös väliaikaisesti kastelemalla tai sopivaa peitettä käyttämällä.

Pohjatuhka (II) ja pohjakuona (III) eivät kärsi rankkasateen vaikutuksista ja ne voidaan jättää rakentamisen aikana tavallisesti suojaamatta. Ne eivät myöskään pölyä kuivana niin paljon kuin lentotuhkat. Kuitenkin lähellä asutusta nekin voivat aiheuttaa ympäristölle suojaamattomina haittaa, mikä on estettävä. Niistä tehdyt rakenteet on suojattava pysyvästi lentotuhkarakenteiden tavoin kiviaineskerroksella.

Talvirakentamisen yhteydessä on tuhkan pinta tarvittaessa suojattava lämmöneristeellä. Jäätäneitä tuhkia ei saa käyttää rakentamiseen.



Kuva 19. Tuhkarakenteen pinta on aina suojattava sään vaikutuksia ja kulutusta vastaan kiviaineskerrosta käyttäen.

## 5. VALVONTA

### Työmenetelmien valvonta

Tuhkarakenteiden tekemistä valvovan vastaavan työnjohtajan on pätevyysvaatimuksistaan säädettyjen ja määrättyjen erillisten velvoitteiden lisäksi oltava perehtynyt tehtävänsä edellyttämällä tavalla kivihiilituhkien ominaisuuksiin sekä tavanomaisten maarakennustöiden valvontaan. Hänen on noudatettava näitä ohjeita sekä suunnittelusta vastaavien henkilöiden antamia ohjeita.

Tuhkarakenteen suunnittelijan on valvottava, että suunnitelman edellyttämät tehtävät suoritetaan asianmukaisesti ja siinä määrättyjä menetelmiä noudattaen. Rakennustyön laadun ja kelpoisuuden tarkkailemiseksi on työn aikana pidettävä riittävän tarkkaa pöytäkirjaa, josta ilmenevät mitaus- ja havaintotulokset, mikäli työn tulosta ei voida todeta muulla tavoin.

### Rakentamisen aikaiset valvontamittaukset

#### *Tiiviyden ja kantavuuden tarkkailu*

Tuhkarakenteen tiivistämistyön valvontaperusteena käytetään joko rakenteelle asetettua tiiviydsastevaatimusta tai huolellisesti suoritettavaa menetelmätarkkailua. Tiiviydsaste voidaan määrittää tekemällä rakenteesta vesivolymetrikokeita riittäväksi harkittu määrä, kuitenkin pienissäkin kohteissa vähintään kolme kustakin kerroksesta. Tuloksena saatuja näytteiden kuivatilavuuspainojen arvoja verrataan vastaavalle tuhkalle laboratoriossa määritettyyn maksimikuivatilavuuspainon arvoon. Vaaditut tiiviydsasteet kullekin tuhkatyypille esitetään taulukossa 2. Menetelmä vaatii kuitenkin runsaasti työtä tuhkien suurten tilavuuspainovaihtelujen vuoksi. Käytännöllisempi tapa on valvoa kerrospaksuutta, vesipitoisuutta ja tiivistämiskertojen lukumäärää. Nämä määritetään työn alkaessa pienellä alueella tehdyn koetiivistämisen yhteydessä tehtyjen proctor- ja vesivolymetrikokeiden tulosten perusteella. Tuhkien keskimääräisiä maksimikuivatilavuuspainon ja optimivesipitoisuuden arvoja esitetään taulukossa 2. Lentotuhilla on tiiviydentarkkailussa keskeisessä asemassa vesipitoisuuden seuranta, kuva 16. Karbidometri on todettu luotettavaksi ja nopeaksi lentotuhkan vesipitoisuutta määritettäessä.

Rakenteiden kantavuutta mitataan esimerkiksi levykuormituslaitetta käyttäen. Kantavuusvaatimukset ovat voimassa olevien ohjeiden mukaiset, lukuunottamatta tapausta, jossa määrävänä on leikkauslujuus eikä pelkästään tietyn kuormituksen aiheuttama painuma.

*Kuva 20. Tuhkarakenteiden tiivistämistä valvotaan joko ennakkokokeiden tuloksiin perustuvana kerrospaksuuden, vesipitoisuuden ja tiivistämiskertojen lukumäärän valvontana tai vaadittavan tiiviydsasteen saavuttamiseen perustuen.*



#### *Työnaikainen lujittumisen tarkkailu*

Käytettäessä lentotuhkaa (la) erittäin vaativien rakenteiden tekemiseen sen lujittumista on seurattava ottamalla rakennuspaikalle tuoduista lentotuhkakuormista näytteitä. Niistä optimivesipitoisuudessa sulotut lieriönmuotoiset koekappaleet puristetaan suunnittelijan tai muun asiantuntijan määräämän ajan kuluttua. Koekappaleiden säilytys tapahtuu kosteuden säilyttämiseksi tiiviiseen muovikeltuun käärittynä huoneen lämpötilassa. Säilytysaikaa voidaan lyhentää, kun kappaleita pidetään erikseen sovitussa huoneen lämpötilaa korkeammassa lämpötilassa.

Koejärjestelyn tarkempi suunnittelu ja valvonta sekä koetulosten tulkitseminen kuuluvat asiantuntijalle. Mikäli todetaan, että lentotuhka ei lujitu riittävästi, lujittumista aktivoidaan lisäämällä rakenteessa käytettävään tuhkaan sementtiä tai kalkkia asiantuntijan ilmoittama määrä, yleensä vähintään 4 prosenttia kuivan tuhkan painosta (kts. levittäminen ja tiivistäminen).

### Käytönaikainen seuranta

Kun tuhkarakenteen tai siihen liittyvien rakenteiden käyttäytymisestä halutaan lisätietoa korjaustarpeen ennakoimiseksi tai yleisen tietouden lisäämiseksi on rakennetta seurattava tekemällä pitkäaikaisia, yleensä vuosia kestäviä valvontamittauksia. Seuranta suoritetaan suunnittelijan laatiman ohjeen mukaan.

## AIHETTA KÄSITTELEVÄÄ KIRJALLISUUTTA

- 1 *Barber, E. G., Jones, G.T., Knight, P. G. K., Miles, M. H.*, PFA Utilization, CEGB, London 1972, 104 s.
- 2 *Eerola, M., Alkio, R.*, Voimalaitostuhkat ja niiden hyväksikäyttö, osa 7, VTT:n Tie- ja liikennelaboratorio, Tiedonanto 54, Espoo 1980, 67 s.
- 3 *Havukainen, J.*, Kivihiilivoimalan tuhkien hyötykäyttöselvitys kunnallisteekniikassa, Helsingin kaupungin geoteknisen osaston tiedote 23, Helsinki 1982, 90 s.
- 4 *Höboda, P.*, Användning av koleldningens restprodukter vid vägbyggnad, Statens Väg- och trafikinstitut (VTI), Meddelande 285, Linköping 1982, 358 s.
- 5 *Keppo, M., Ylinen, P.*, Suomessa muodostuvat tuhkamäärät ja niiden laatu. Voimalaitostuhkat ja niiden hyväksikäyttö, osa 1, VTT:n Betoni- ja silikaattiteekniikan laboratorio, Tiedonanto 61, Espoo 1980, 63 s.
- 6 *Meyers, J. F., Pichumani, R., Kapples, B. S.*, Fly Ash as a Construction Material for Highways, A Manual, Pennsylvania 1976, 177 s.
- 7 *OECD Road Research Group*, Use of waste materials and by-products in road construction, Paris 1977, 168 s.
- 8 *Torrey, S.*, (toim.) Coal Ash Utilization. Fly Ash, Bottom Ash and Slag, Pollution Technology Review No 48, NDC, New Jersey 1978, 370 s.