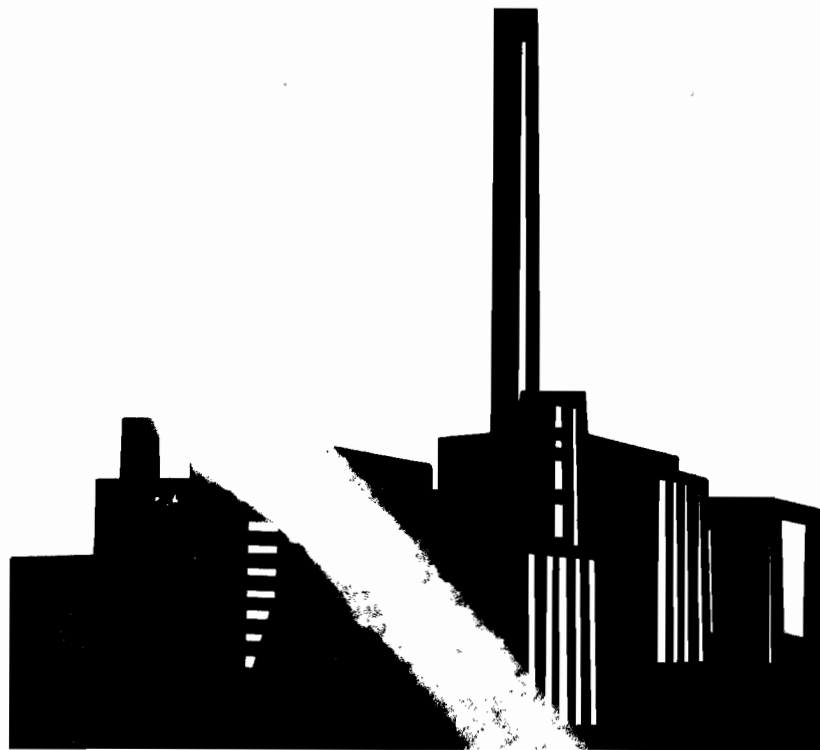




TUHKAPROJEKTI LOPPURAPORTTI

J. Havukainen, A. Hämäläinen, A. Latvala

**KIVIHIILITUHKIEN KÄYTTÖKOKEMUKSET
KUNNALLISTEKNIIKAN MAARAKENTEISSA**

Geoteknisen osaston tiedote 45

Jorma Havukainen, Alpo Hämäläinen, Ahti Latvala

**KIVIHIILITUHKIEN KÄYTTÖKOKEMUKSET
KUNNALLISTEKNIIKAN MAARAKENTEISSA**

Tuhkaprojektin loppuraportti

Geoteknisen osaston tiedote 45

TUHKAPROJEKTI 1979 - 1987

Valvova ryhmä

Usko Anttikoski (puh.joht.)	Kv/geo
Risto Alkio	VTT/tie
Osmo Arponen	HKE
Martti Eerola	VTT/tie
Pertti Eklund	Espoon kaup./geo
Jorma Havukainen (siht.)	Kv/geo
Juhani Hietanen	HKR/puo
Erkki Karjalainen	HKR/kao
Hannu Koponen	Sal
Hannu Kärki	Sal
Veikko Lahti	HKE
Leo Liusvaara	UUV
Olavi Louko	HKR/kao
Aimo Oksanen	HKR/kao
Matti Sallinen	HKR/kao
Heikki Somervuo	Ksv

Asiantuntijat

Pertti Nieminen	TTKK/r-os.
Liisa Sundberg	HKE

Projektiryhmä

Jorma Havukainen (puh.joht.)	Kv/geo
Alpo Hämäläinen	Kv/geo
Ahti Latvala	Kv/geo
Juha Siitonen	Kv/geo
Antti Sulamäki	Kv/geo
Yeasmine Blomqvist (siht.)	Kv/geo
Outi Karsimus (siht.)	Kv/geo
Ulla Smolander (siht.)	Kv/geo

Tuhkaprojekti kiittää kaikkia projektiin osallistuneita sekä kaikkia niitä, jotka ovat myötävaikuttaneet projektin onnistumiseen.

TIIVISTELMÄ

Kivihiilituhkien käyttökokemukset kunnallistekniikan maarakenteissa. Tuhkaprojektin loppuraportti. Julkaisija Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geotekninen osasto. Helsinki 1987. 84 s.

Tässä loppuraportissa selostetaan tuhkaprojektin tutkimustuloksia ja siinä täydennetään jo aikaisemmin aiheesta julkaistuja raportteja. Siinä keskitytään tuhkien käytön kannalta tärkeimpiin maarakennustekniikan, ympäristögeotekniikan ja massatalouden kysymyksiin.

Kaikkia kivihiilituhkatyyppejä voidaan käyttää maarakentamisessa korvaamaan luonnonkiviaineksia, lähinnä soraa ja hiekkaa. Tuhkatyypit luokitellaan lentotuhkaan, pohjatuhkaan ja pohjakuonaan. Kivihiilituhkasta tehdyillä rakenteilla on hyvät lujuusominaisuudet ja sen lämmöneristävyyys on merkittävästi parempi kuin luonnonkiviainesten. Lujittuvan lentotuhkan lujuus ja kantavuus paranevat rakenteen iän mukana, mikä nostaa sen arvoa vaativien maarakenteiden tekemisessä. Tuhkaa voidaan käsitellä tavannoista kalustoa käyttäen. Pohjatuhka ja pohjakuona ovat käsiteltävyydeltään samanlaisia kuin sora ja hiekka. Lentotuhkaa tiivistettäessä on erityisesti valvottava, että sen vesipitoisuus ja kerralla tiivistettävän kerroksen paksuus ovat riittävän pieniä. Tuhka syövyttää useimpia maahan yleisesti asennettavia metalleja, minkä vuoksi ne on yleensä korroosiosuojattava. Betonin syöpymistä ei tuhkarakenteissa ole tutkimuksen aikana havaittu. Muovi ei syövy tuhka- kassa. Tuhkarakenteet on suojattava säältä luonnonkiviaineskerrosta käyttäen. Kasveista jotkut viihtyvät tuhka- kassa ja jotkut eivät, minkä vuoksi tuhkan soveltuvuus on varmistettava ennen istutustöitä tai tuhkan käyttöä on istutettavilla alueilla vältettävä. Tuhkan raskasmetallipitoisuudet ovat huomattavasti pienempiä kuin esimerkiksi maanviljelyksessä käytettävän jätevesilietteen ja samaa suuruusluokkaa kuin Suomen maaperässä keskimäärin. Tuhkaa voidaan käyttää myös maanparannusaineena. Tuhkan käytöllä maarakennusmateriaalina saavutetaan Helsingissä merkittäviä säästöjä kiviaines- ja kuljetuskustannuksissa. Jokainen tuhkatonni, joka ohjataan maarakentamiseen, tuottaa Helsingille noin 46 mk/t säästön (60 mk/rakenne- m^3). Tuhkan kokonaistuotanto on Helsingissä noin 170 000 t/vuosi (130 000 rakenne- m^3 /vuosi). Noin puolet tuhka- kasta käytetään nykyään kaupungin maarakentamiseen ja loput (lentotuhka) myydään sementtiteollisuudelle. Vuotuinen kustannushyöty on nykyisellä käyttöasteella noin 4 Mmk/vuosi. Tuhkaprojektin kokonaiskustannukset olivat noin 1.5 Mmk (vuosina 1979...1983), jotka säästettiin jo tutkimusaikana kiviaines- ja kuljetuskustannuksissa.

SAMMANFATTNING

Erfarenheter av stenkolsaskornas användning vid kommunaltekniska jordkonstruktioner. Slutrapporten från Askprojektet. Publ. Helsingfors stads fastighetskontor, geotekniska avdelningen. Helsingfors 1987. 84 sid.

Denna slutrapport behandlar resultat av askprojektets forskningar och den uppfyller redan tidigare publicerade rapporter från saken. Främst behandlar den de frågor som är de viktigaste vid anläggningssteknik, miljögeoteknik och massekonomi.

Stenkolsaska kan användas vid anläggningsarbeten som ersättning för naturligt stenmaterial, främst grus och sand. Askan kan indelas i flygaska, bottenaska och bottenslagg. Konstruktioner av stenkolsaska har goda hållfasthetsegenskaper och askan har mycket bättre värmeisoleringsförmåga än de naturliga stenmaterialen. Hållfastheten och bärighetsegenskaperna hos flygaska av den typ som hårdnar förbättras med tiden, vilket ökar dess värde vid användning i krävande anläggningsarbeten. Askan kan hanteras med sedvanlig utrustning. Bottenaska och bottenslagg kan hanteras på samma sätt som grus och sand. Då man packar flygaska, bör man särskilt tillse att flygaskans vattenkvot och tjockleken av det lager som packas på en gång inte överstiger det tillåtna värdet. Korrosion kan förekomma i de flesta metaller, som i allmänhet används i jordkonstruktioner. Därför måste de skyddas mot korrosion. Korrosion av betongkonstruktioner har man inte märkt under forskningen. Aska förorsakar inte heller korrosion i plast. Konstruktioner av aska bör skyddas mot väder och erosion genom ett lager av naturligt stenmaterial. Några av växter trivs och andra trivs inte i aska. Därför måste lämpligheten av aska till växter alltid försäkras före planteringsarbeten eller användning av aska måste undvikas i planteringsplatser. Mängder av tungmetaller i aska är märkvärdigt mindre än de mängder som har den allmänt i jordbruk använda restvattens slutprodukt och något så när samma slags mängder som i Finland grundmark i medeltal. Aska kan användas också som jordförbättringsämne. När aska används i Helsingfors, gör man betydande inbesparingar i stenmaterial- och transportkostnaderna. Varje ton av aska som används vid anläggningsarbeten, producerar cirka 46 mk/t (60 mk/m³ i konstruktion) till Helsingfors stad. Stenkolskraftverken i Helsingfors producerar cirka 170 000 t/år (130 000 m³/år i konstruktion). Ungefär hälften av produktionen används nyförtiden vid stadens anläggningsarbeten och resten säljs till cementindustrin. Nyförtiden sparar Helsingfors årligen ungefär 4 Mmk/år. Konstnaderna av askprojektet var cirka 1.5 Mmk (under 1979...1983), som betalades tillbaka sedan under forskningen i formen av billigare stenmaterial och transportkostnader.

ABSTRACT

The Utilization Experiments in Earth Constructions of Public Works. The Final Report of the Ash Research Project. Published by the Geotechnical Department of Helsinki. Helsinki 1987. 84 pp.

The present report deals with the results of the Ash Research Project and the results of earlier published reports are completed. The contents especially deal with the main problems in connection with the utilization of coal ash. These are the geotechnical, environmental and economical aspects.

Coal ash can be used in the earth works as a substitute for natural aggregates, especially gravel and sand. Ashes can be classified by type as fly ash, dry bottom ash and dry bottom boiler slag. Structures made of coal ashes possess good strength properties, and they afford significantly better thermal insulation than natural aggregates. The strength and load bearing properties of the hardening type of fly ash improve with age, which enhances their value in the construction of demanding earth works. Ashes can be handled using conventional equipment. Dry bottom ash and dry bottom boiler slag are similar to gravel and sand from the standpoint of handling. In the compacting of fly ash, particular care should be taken that its moisture content and the thickness of each layer constructed at any one time remain sufficiently small. Ashes corrode most metals generally placed inside earth works, which means that, as the situation requires, these must be protected against corrosion. Corrosion of concrete put in ash structures has not been observed during the research project. Ashes do not corrode plastic. Ash structures should be protected against the weather and erosion by using a buffer layer of a natural aggregate. Some of plants thrive in ash and the other do not. Therefore the suitability of the ash with a plant should be checked before plants are placed in a coal ash or the use of ash should be avoided in that kind of areas. The concentration of injurious trace elements are significantly smaller than that of wastewater sludge utilized in farming and it is the same order than that of the Finnish soil in average. Ash can be also used for soil improvement. Significant savings in the form of lower costs of aggregate purchase and transportation can be gained by the utilization of ashes as construction material for earth works in Helsinki. Each ton of coal ash used in earth works saves money for the city of Helsinki about 46 mk/t (60 mk/m³ in structure). The present production of coal ashes in Helsinki is about 170 000 t/y (130 000 m³/y in structure). About 50 % of the ash is used in earth works and the rest is sold to cement industry. The present annual savings are about 4 Mmk/y. The costs of the Ash Research Project (in 1979...1983) were about 1.5 Mmk, and they were paid by the savings gained already during the research project being caused by lower costs of aggregate purchase and transportation.

ALKUSANAT

Geoteknisen osaston kiinteistölautakunnan kehotuksesta 1979 (13.3.1979/495 §) käynnistämä tuhkaprojekti päättyi varsinaisesti 31.12.1983, mutta tutkimustulosten jäsentelyä ja kokoamista on tehty vielä vuosina 1984...1987. Tutkimusta valvoi Helsingin kaupungin virastoista ja laitoksista, Espoon kaupungin teknisestä virastosta ja Valtion teknillisestä tutkimuskeskuksesta (VTT) koottu asiantuntijaryhmä, jonka puheenjohtajana toimi dipl.ins. Usko Anttikoski. Tutkimuksen suoritti dipl.ins. Jorma Havukaisen johdolla 4...5 henkilön työryhmä, johon kuului 3...4 diplomi-insinööriä tai insinööriä ja tutkimussihteerä.

Tutkimuksen lähtöaineistoksi koottu kirjallisuusselvitys julkaistiin 1.3.1979 geoteknisen osaston tiedotteena 13 nimellä "Voimalaitostuhkan ja polttolaitoskuonan hyötykäyttö rakentamisessa". Tuhkatutkimuksen ensimmäinen väliraportti julkaistiin 27.1.1981 geoteknisen osaston tiedotteena 18 nimellä "Kivihiilivoimalan tuhkan käyttö maarakenteissa" ja toinen väliraportti 1.7.1982 tiedotteena 23 nimellä "Kivihiilivoimalan tuhkien hyötykäyttöselvitys kunnallistekniikassa". Käytännön rakentamista palveleva ohje "Kivihiilituhkan käyttö maarakentamisessa. Tekniset ohjeet" julkaistiin 15.2.1983 suomen, ruotsin ja englanninkielisinä tiedotteina 31, 32 ja 33. Lisäksi on julkaistu 15.9.1983 tiedote 35 "Matkakerätömus kivihiilituhkien ympäristövaikutuskonferenssista". Muita tuhkaprojektin työn yhteydessä laadittuja sivutuotteiden hyötykäyttöselvityksiä ovat geoteknisen osaston tiedotteet 22, 24 ja 25.

Projektin kustannukset olivat yhteensä noin 1.5 Mmk, mistä palkkakustannuksia oli noin 1 Mmk. Valtion tukena saatiin palkkakustannuksista noin 20 %. Projektin aikana kaupunki saavutti tuhkan käytön ansiosta kiviaines- ja ajokustannuksissa vähintään 3 Mmk säästön ($100\,000\text{ m}^3\text{ rtr} \times 30\text{ mk/m}^3\text{ rtr}$), joten projekti maksoi itsensä jo tutkimusaikana.

Tämän loppuraportin ovat laatineet dipl.ins. Jorma Havukainen, ins. Alpo Hämäläinen ja dipl.ins. Ahti Latvala Helsingin kaupungin kiinteistöviraston geoteknisellä osastolla vuosina 1984...1987. Raportissa esitetään yhteenveto tuhkaprojektin kehittämistyön tuloksista. Erityisesti huomiota kiinnitetään tuhkan ympäristövaikutuksiin.

Voimalaitostuhkan hyötykäyttötutkimuksia jatketaan muunmuassa VTT:n geotekniikan laboratorion toimesta. Helsingin kaupunki ottaa osaa edelleen aktiivisesti tähän kehittämistoimintaan.

Helsingissä, joulukuun 11. päivänä 1987.


Usko Anttikoski
osastopäällikkö

SISÄLLYSLUETTELO

	Sivu
1. JOHDANTO	6
2. TUHKAN TUOTANTO JA TUHKATYYPIT	10
3. KEMIALLISET OMINAISUUDET	14
3.1 <u>Kemiallinen koostumus</u>	14
3.2 <u>Potsolaanisuus</u>	15
4. MAARAKENNUSTEKNISET OMINAISUUDET	16
4.1 <u>Raeominaisuudet</u>	16
4.2 <u>Tiivistymisominaisuudet</u>	19
4.3 <u>Vedenläpäisevyys, kapillaarisuus ja routivuus</u>	23
4.4 <u>Lämmöneristävyys</u>	24
4.5 <u>Puristuslujuus</u>	27
4.6 <u>Leikkauslujuus</u>	37
4.7 <u>Kokoonpuristuvuus</u>	45
4.8 <u>Kantavuus</u>	47
5. YMPÄRISTÖGEOTEKNISET OMINAISUUDET	52
5.1 <u>Pölyäminen ja liettyminen</u>	52
5.2 <u>Vaikutukset pinta- ja pohjavesiin</u>	53
5.3 <u>Radioaktiivisuus</u>	57
5.4 <u>Soveltuvuus kasvualustaksi</u>	58
5.5 <u>Soveltuvuus maanparannusaineeksi</u>	61
5.6 <u>Korroosiovaikutukset</u>	66
6. TUHKARAKENTEET	73
6.1 <u>Suunnittelun pääperiaatteet</u>	73
6.2 <u>Rakenteelliset tekijät</u>	75
6.3 <u>Käyttökohteet maarakentamisessa</u>	76
7. HELSINGISSÄ RAKENNETTUJA KOHTEITA	78
8. KIVIHIILITUHKAN MERKITYS HELSINGIN MASSATALOUDESSA	80
9. JOHTOPÄÄTÖKSET	83
KIRJALLISUUSLUETTELO	84

1. JOHDANTO

Perinteisesti maarakentamiseen käytettyjä kiviainek-
sia korvaavien materiaalien käyttöönoton tarve on
lisääntynyt kaikkialla teollistuneessa maailmassa
muun muassa seuraavista syistä:

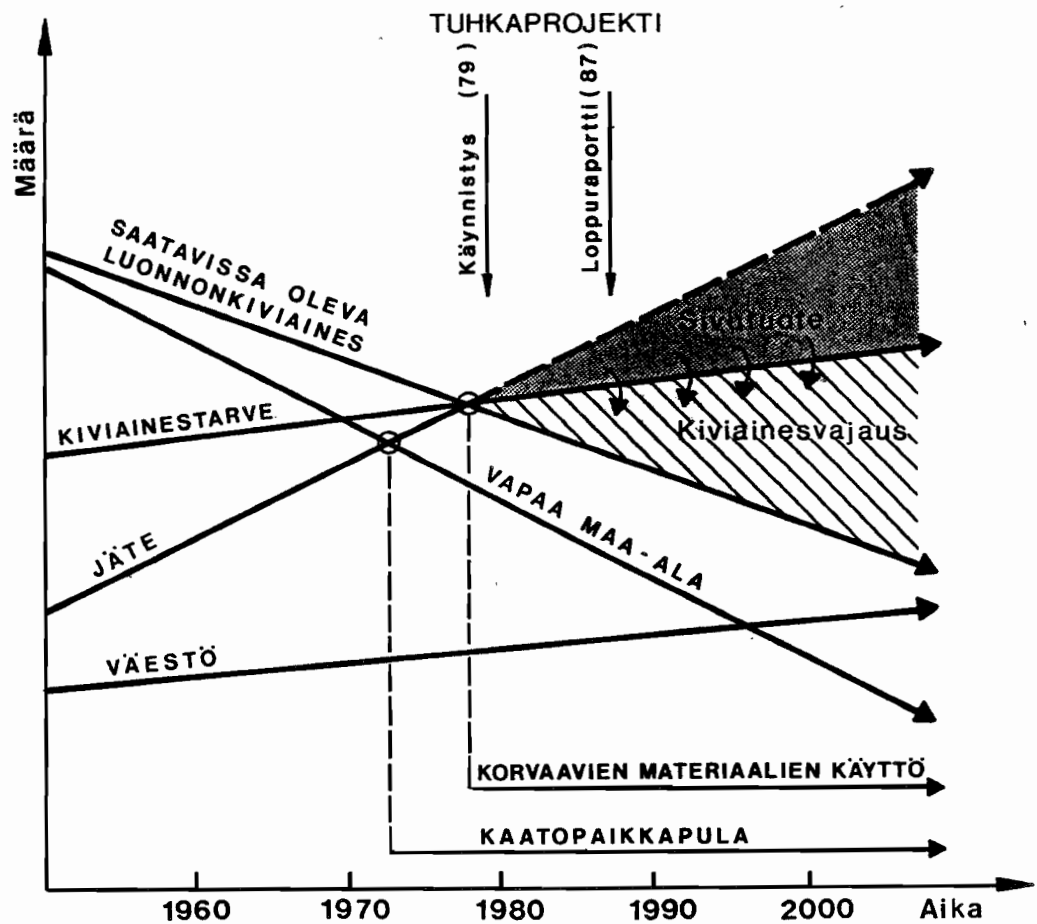
- väestönkasvun seurauksena rakentaminen ja tähän
tarvittavan kiviaineksen määrä lisääntyy
- luonnonvarojen ehtyessä saatavissa olevan luon-
nonkiviaineksen määrä vähenee
- kulutuksen yleisen kasvun seurauksena jätteiden
määrä lisääntyy
- vapaan maa-alan vähentyessä jätteiden sijoittami-
nen vaikeutuu
- kiviainestarpeen ylittäessä saatavissa olevan
luonnonkiviaineksen määrän syntyy kiviainesva-
jaus, joka on pyrittävä poistamaan korvaavilla
materiaaleilla
- osa jätteistä on sellaisenaan tai jatkojalostet-
tuna käyttökelpoista rakentamisen raaka-ainetta
eli ns. korvaavaa materiaalia. Tällöin "jätteen"
sijasta on puhuttava "sivutuotteesta", jonka
käyttöönotolla kiviainesvajausta voidaan ratkai-
sevasti vähentää.

Suomessa sivutuotteiden hyötykäyttöä ovat vauhditta-
neet vuoden 1982 alussa voimaan tulleen maa-aines-
lain asettamat rajoitukset, kiviainesesiintymien vä-
hentymisestä varsinkin etelä- ja länsirannikolla
johtuvat pitkät kuljetusmatkat sekä kaatopaikka- ja
täyttöaluetilan puute.

Maarakentamiseen soveltuvista materiaaleista on vii-
me vuosina tutkittu ja käytetty eniten rauta- ja te-
rästeollisuuden kuonia sekä kivihiilivoimalaitoksis-
sa syntyviä tuhkia. Helsingissä ja sen lähiympäris-
tössä on kivihiilituhkan käytöllä maarakentamisessa
merkittävä asema.

Kaatopaikka- ja täyttöaluepulaa alkoi Helsingissä
esiintyä 1970-luvun alkupuolella ja tilanne on vai-
keutunut vuosi vuodelta. Vielä 1970-luvun lopulle
saakka lähes koko Helsingin tuhkantuotanto (n. 150
000 t) ohjattiin kaatopaikoille ja täyttöalueille,
mikä maksoi kaupungille vuosittain nykyhintatasossa
1.5...2.0 Mmk. Samanaikaisesti alkoi lähialueilta
saatavissa olevan kiviaineksen määrä suhteessa sen
tarpeeseen vähentyä merkittävästi ja kuljetusmatkat
kasvoivat, jolloin vastaavasti soran ja hiekan hinta

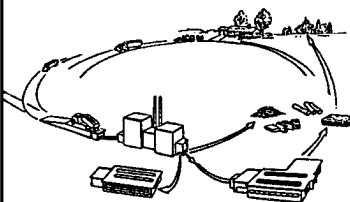
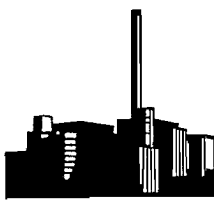
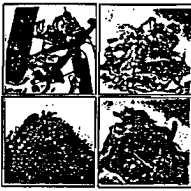
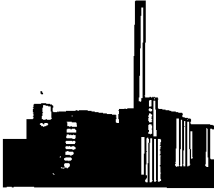
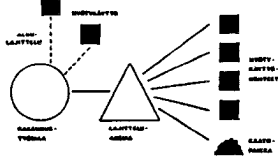
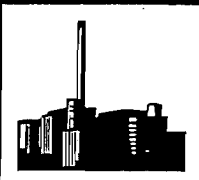
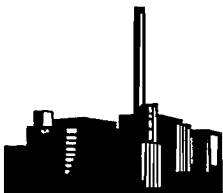
nousi. Tilanteen korjaamiseksi käynnistettiin vuonna 1979 kiinteistölautakunnan kehotuksesta (13.3.1979/§ 495) tuhkaprojekti, jonka tuli selvittää kivihiilituhkan hyötykäyttömahdollisuudet maarakentamisessa ja laatia tuhkan käyttöohjeet tuhkarakenteiden suunnittelua ja rakentamista varten. Helsingin kiviainestalous ongelmanakenttää selvitetään kuvassa 1.



Kuva 1. Kiviainestalouteen liittyvien tekijöiden kehityksen pääpiirteitä Helsingissä sekä tuhkaprojektin niveltymisen niiden kulkuun.

Tuhkaprojektin työn yhteydessä on laboratoriokokeiden lisäksi tehty runsaasti koerakenteita tuhkasta ja seurattu niiden käyttäytymistä rakentamisen jälkeen. Projektin toiminnan aikana on julkaistu aiheesta tai siihen läheisesti liittyvistä kysymyksistä yhteensä kahdeksan geoteknisen osaston tiedotetta. Esitelmiä on pidetty sekä kansainvälisissä konferensseissa että kotimaassa järjestyissä geoteknisen alan tilaisuuksissa yhteensä noin 20. Tämä loppuraportti on järjestyksessä yhdeksäs tuhkaprojektin tiedote (kuva 2).

Loppuraportissa esitetään tärkeimpiä jo aikaisemmissa tiedotteissa esitettyjä asioita ja pyritään lisäksi keskittymään seikkoihin, joista on saatu lisätietoa myöhemmässä vaiheessa. Tällaisia ovat lähinnä ympäristögeotekniikan piiriin kuuluvat korroosiokysymykset ja muut ympäristövaikutukset.

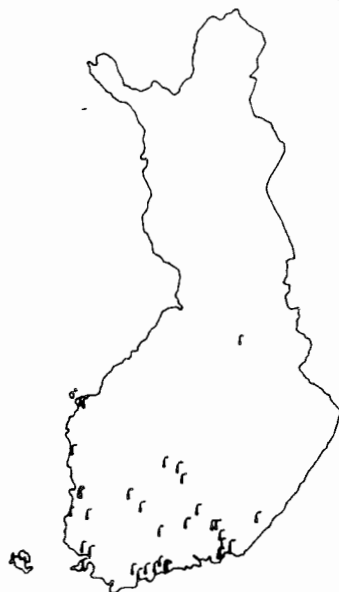
HELSINGIN KAUPUNGIN GEOTEKNILLINEN TOIMISTO  VOIMALAITOSTUHKAN JA POLTTOAITOSKUONAN HYÖTYKÄYTTÖ RAKENTAMISESSA Geoteknillisen toimiston tiedote 13 1.3.1979	Helsingin kaupungin kiinteistövirasto GEOTEKNINEN OSASTO  TUHKAPROJEKTI VÄLIRAPORTTI Jorma Havukainen KIVIHILVOIMALAN TUHKAN KÄYTTÖ MAARAKENTEISSA Geoteknisen osaston tiedote 16 27.1.1981	HELSINGIN KAUPUNGIN KIINTEISTÖVIRASTO GEOTEKNINEN OSASTO  Jorma Havukainen ESIMERKKEJÄ JÄTTEIDEN HYÖTYKÄYTTÖÄ RAAKA-AINEENA JA ENERGIALÄHTENÄ MATKAKERTOMUS TUHKAPROJEKTIN TUTUSTUMIS- KÄYNNISTÄ UPPSALAAN, NAANTALIIN JA TURKUUN Geoteknisen osaston tiedote 22 11.12.1981
Helsingin kaupungin kiinteistövirasto GEOTEKNINEN OSASTO  TUHKAPROJEKTI VÄLIRAPORTTI 2 Jorma Havukainen KIVIHILVOIMALAN TUHKIEN HYÖTY- KÄYTTÖSELVITYS KUNNALLISTEKNIKASSA Geoteknisen osaston tiedote 23 1.7.1982	Helsingin kaupungin kiinteistövirasto GEOTEKNINEN OSASTO  Ahti Latvala RAKENNUSJÄTTEEN ALUSTAVA HYÖTYKÄYTTÖSELVITYS Geoteknisen osaston tiedote 24 1.8.1982	Helsingin kaupungin kiinteistövirasto GEOTEKNINEN OSASTO  J. Havukainen, A. Hämäläinen, A. Suurmäki ALUSTAVA SELVITYS POLTTOAITOS- KUONAN HYÖTYKÄYTTÖMAHDOLLI- SUUKSISTA MAARAKENTAMISESSA Geoteknisen osaston tiedote 25 1.8.1982
Helsingin kaupungin kiinteistövirasto GEOTEKNINEN OSASTO  International Conference on Coal Fired Power Plants and the Aquatic Environment - Copenhagen 1982 Jorma Havukainen MATKAKERTOMUS KIVIHILITUHKIEN YMPÄRISTÖVAIKUTUSKONFERENSSISTA Geoteknisen osaston tiedote 35	Kivihilituhkan käyttö maarakentamisessa TEKNISET OHJEET  Helsingin kaupungin kiinteistövirasto GEOTEKNINEN OSASTO	Helsingin kaupungin kiinteistövirasto GEOTEKNINEN OSASTO  TUHKAPROJEKTI LOPPURAPORTTI J. Havukainen, A. Hämäläinen, A. Latvala KIVIHILVOIMALAN TUHKIEN KÄYTTÖ KUNNALLISTEKNISSÄ MAARAKENTEISSA Geoteknisen osaston tiedote 45

Kuva 2. Tuhkaprojektin tiedotteet vuosina 1979... 1987. (Tekniset ohjeet on julkaistu myös ruotsin- ja englanninkielisinä).

2.

TUHKAN TUOTANTO JA TUHKATYYPIT

Maamme kivihiilivoimalaitoksissa on poltettu 1980-luvun puolivälissä kivihiiltä vuosittain noin neljä miljoonaa tonnia. Poltetusta kivihiilestä syntyy keskimäärin 15 prosenttia tuhkaa, joten vuotuisen tuhkantuotanto on noin 600 000 tonnia. Suurin tuottaja on Imatran Voima Oy. Tämän vuosikymmenen energiapoliittiset ratkaisut määräävät, missä määrin uusia kivihiilivoimalaitoksia maahamme jatkossa rakennetaan.



A. Ahlström Oy	Kaustua
Enso-Gutzeit Oy	Hamina
Enso-Gutzeit Oy	Kotka
Espoon Sähkö Oy	Espoo
Etelä-Pohjanmaan Voima Oy	Vaasa
Helsingin kaupungin Energialaitos	Helsinki
Hänasaari	Helsinki
Helsingin kaupungin Energialaitos	Helsinki
Myllypuro	Helsinki
Helsingin kaupungin Energialaitos	Helsinki
Salmisaari	Helsinki
Imatran Voima Oy	Inkoo
Imatran Voima Oy	Naantali
Kajaani Oy	Kajaani
Kaukas Oy	Lappeenranta
Kemira Oy	Valkeakoski
Kotkan Höyryvoima Oy	Kotka
Kymi Kymmene Oy Kymen tehdas	Kuusankoski
Kymi Kymmene Oy Voikkaan tehdas	Kuusankoski
Lahden Energialaitos	Lahti
Lansirannikon Voima Oy	Pori
Metsäliiton Teollisuus Oy	Kirkniemi
Myllykoski Oy	Myllykoski
Nokia Oy	Nokia
Partek Oy	Parainen
Pohjojan Voima Oy	Kristinankaupunki
Rauma-Repola Oy	Rauma
Rosenlew Oy	Pori
G. A. Serlachius Oy	Marjatta
Suomen Sokeri Oy	Kirkkonummi
Tampella Oy	Heinola
Tampella Oy	Inkeröinen
Tervakoski Oy	Tervakoski
Turun kaupungin Sähkölaitos	Turku
Vantaan Sähkölaitos Oy	Vantaa
Yhtyneet Paperitehtaat Oy	Jamsankoski
Yhtyneet Paperitehtaat Oy	Kaipola

Kuva 3. Suomen merkittävimpien kivihiilivoimalaitosten sijainti /7/.

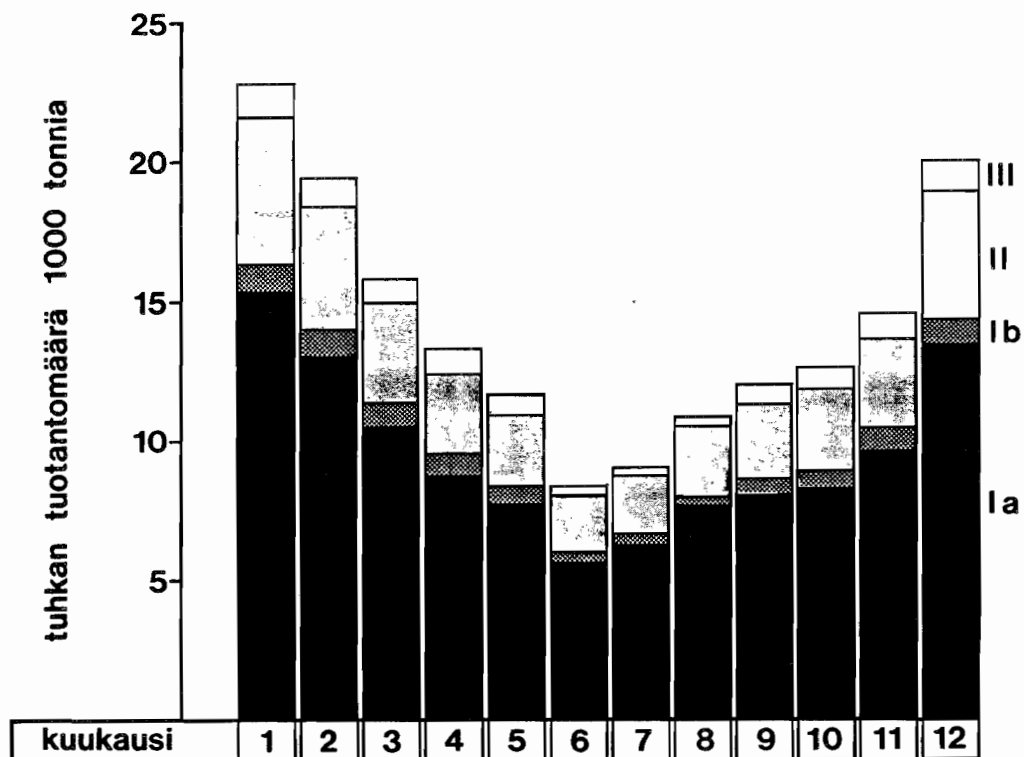
Helsingissä käynnistettiin syksyllä 1984 Salmisaaren uusi voimalaitos, samalla kun vanha voimalaitos lopetti toimintansa. Tämän vuosikymmenen loppupuoliskolla on kivihiilituhkan vuosituotannoksi pääkaupungissa arvioitu noin 170 000 tonnia.

Tuotetun tuhkan laatuun vaikuttavat ratkaisevasti polttolaitostyyppin ja polttotekniikan lisäksi muun muassa kivihiilen alkuperä. Helsingissä poltettavasta kivihiilestä tuodaan pääosa Puolasta.

Tässä raportissa, jossa käsitellään lähinnä Helsingissä syntyvän kivihiilituhkan ominaisuuksia, on tuhka jaettu seuraaviin päätyyppeihin:

- Ia Lujittuva lentotuhka, joka erotetaan savukaasuista nykyaikaisessa pölypolttolaitoksessa sähköisten ja mekaanisten erottimien avulla. Sitä tuottaa Hanasaaren A- ja B-voimalaitos sekä Salmisaaren uusi voimalaitos. Tämä tuhkatyyppi on hienojakoista ja vastaa rakeisuudeltaan silttiä. Ulkonäöltään se muistuttaa likimäärin portlandsementtiä. Lentotuhkan vuosituotanto v. 1987 on noin 110 000 t.
- Ib Lujittumaton lentotuhka, jota tuottaa murskeena kivihiiltä polttava Myllypuron voimalaitos. Tuhka sisältää runsaasti palamatonta hiiltä, jonka johdosta se on värisävyltään tummempaa kuin Ia. Rakeisuudeltaan se vastaa hienoa hiekkaa. Myllypuron lentotuhkaa syntyy vuosittain noin 10 000 t.
- II Pohjatuhka, joka otetaan talteen pölypolttolaitoksessa palotilan pohjalta. Se jäähdytetään vesialtaassa, mistä johtuen sen vesipitoisuus on suuri. Pohjatuhka vastaa rakeisuudeltaan keskikarkeaa tai karkeaa hiekkaa. Rakeet ovat särmikkäitä ja pinnaltaan huokoisia. Joukossa on myös pinnaltaan lasimaisia rakeita sekä jonkin verran lentotuhkahiukkasia. Tätä tuhkatyyppiä syntyy lähes 40 000 t vuosittain.
- III Pohjakuona, joka otetaan talteen palotilan pohjalta Myllypuron arinapolttolaitoksessa. Se jäähdytetään myös vesialtaassa, minkä vuoksi sen vesipitoisuus on suuri. Rakeisuudeltaan se vastaa hienoa tai keskikarkeaa soraa. Sen rakeet ovat särmikkäitä ja huokoisia. Joukossa on myös sileitä lasimaisia rakeita. Tämän tuhkatyyppin vuosituotanto on keskimäärin 10 000 t vuodessa.

Voimalaitosten käyttöaste on suurin kylmänä talvikautena (marras-huhtikuu), jonka tuhkamäärä edustaa noin 70 prosenttia koko vuosituotannosta. Kuvassa 4. nähdään tuhkantuotannon keskimääräinen vaihtelu kuukausittain.



Kuva 4. Kivihiilituhkan (tyypit Ia, Ib, II ja III) keskimääräinen tuotanto eri kuukausina Helsingissä.

Rikinpoistotuotteeksi kutsutaan yhdistettä, jota syntyy noin 30 000 t/v Salmisaaren voimalaitoksen rikinpoistolaitoksen käynnistyttyä vuoden 1987 lopulla. Salmisaarella käytettävää rikinpoistomenetelmää kutsutaan puolikuivaksi menetelmäksi. Siinä hiiltä poltettaessa vapautuviin kuiviin savukaasuihin ruiskutetaan kalkkilietettä pieninä pisaroina, jolloin kalkkilietteessä oleva vesi haihtuu ja savukaasuissa oleva SO_2 reagoi alkalisen absorptioaineen (kalkin) kanssa. Haihtumisen jälkeen tuloksena on lähes kuivaa jauhetta, joka erotetaan pölyneroitimmella. Jauhe on pääosin kipsiä (CaSO_3), mutta joukossa on myös lentotuhkaa sekä pieniä määriä muita kalsiumyhdisteitä.

Rikinpoistotuotteen hyötykäyttömahdollisuuksista on alkamassa useita erillisselvityksiä. Tässä raportissa ei käsitellä rikinpoistotuotteen ominaisuuksia tai hyötykäyttöön liittyviä kysymyksiä. Kuitenkin on ilmeistä, että tuotteella on käyttöä joko sellaisenaan tai esimerkiksi kivihiilituhkaan sekoitettuna

erityisesti sellaisissa maarakenteissa, joissa vaaditaan suurta lujuutta sekä mahdollisesti myös huonolaatuisten maamassojen stabiloinnissa. Ensimmäiset rikinpoistotuotteen sijoittamiskokeilut aiotaan suorittaa Vuosaaren lieteallasalueella ja Malminkartanon täyttömäen laajennusalueella. Kummassakin kohteessa rikinpoistotuote sekoitetaan lentotuhkaan likimain suhteessa 1:1. Hyötykäyttö tulee aluksi olemaan luonteeltaan varovaista ja pääasiana lieneekin tuotteen mielekäs sijoittaminen ja myöhemmässä vaiheessa ryhdytään etsimään arvokkaampia käyttötarkoituksia.

3. KEMIALLISET OMINAISUUDET

3.1 Kemiallinen koostumus

Helsingin voimalaitoksissa poltettava kivihiili on tyypiltään bituminiittia, joka sisältää 75...93 % hiiltä. Loppu on sivukiveä ja muita mineraaleja sekä maatumisasteeltaan vielä tunnistettavia kasvinjään-
nöksiä. Polttolämpötila (1500 ± 200 °C) ylittää hii-
len mukana olevien mineraalien sulamispisteen, jol-
loin niissä tapahtuu fysikaalisia ja kemiallisia
muutoksia. Tuhkapartikkelit koostuvat suurimmalta
osaltaan lasimaiseksi jäähtyneistä mineraaleista,
muun osan ollessa huokoista kiteistä ainesta. Tuhkan
ominaisuuksiin vaikuttaa kivihiilityypin ohella rat-
kaisevasti myös polttotekniikka ja tulipesän kunto.
Samankin laitoksen yhteydessä laatu saattaa vaihdel-
la suuresti.

Lento- ja pohjatuhkan sekä pohjakuonan kemialliset
koostumukset poikkeavat jo syntytapansa vuoksi jon-
kin verran toisistaan. Saman raaka-ainealkuperänsä
vuoksi ne kuitenkin ovat pääpiirteiltään samanlai-
set. Kaikissa on pääainesosina piidioksidi, alumi-
niumoksidi ja rautaoksidi. Pienempiä määriä niissä
on myös kalsiumoksidia, magnesiumoksidia, rikki-
trioksidia ym. yhdisteitä. Palamattoman hiilen osuus
Hanasaaren tuhalla vaihtelee 1 ja 12 % välillä, kun
taas Myllypuron lentotuhalla se saattaa nousta aina
30 % saakka. Taulukossa 1 esitetään Hanasaaren tuh-
kan kemiallisen koostumuksen arvoja.

Taulukko 1. Hanasaaren voimalaitosten (A- ja
B-laitos) kivihiilituhkan eräiden
kemiallisten ja fysikaalisten omi-
naisuuksien vaihtelurajoja (%)
vuosina 1978...1981.

Ominaisuus	Hanasaaren lentotuhka	Hanasaaren pohjatuhka
SiO ₂	41,9...50,2	32,5...35,9
Al ₂ O ₃	16,6...22,6	11,0...12,1
TiO ₂	0,8...1,3	0,6...0,8
Fe ₂ O ₃	10,0...13,6	6,8...8,5
CaO	6,7...9,4	3,5...5,2
MgO	4,3...5,9	2,1...3,1
Na ₂ O	0,8...1,1	0,4...0,6
K ₂ O	1,7...2,3	1,0...1,3
P ₂ O ₅	0,2...0,4	0,1
SO ₃	0,4...1,5	0,1...0,3
Kosteus	0,04...0,17	34,0...39,8
Hehkutushäviö	1,0...12,6	0,2...0,8
Vesiliukoiset suolat	1,6...3,4	0,16...0,45
Vesiliuoksen pH	12,0...12,6	9,5...10,0

3.2

Potsolaanisuus

Potsolaaninen materiaali määritellään hienojakoiseksi materiaaliksi, jonka eräät ainesosat reagoivat kemiallisesti kalkin kanssa veden läsnäollessa ja riittävässä lämpötilassa. Reaktion tuloksena muodostuu lujittavia veteen liukenemattomia sidoksia. Hyvä tiiviys ja sopiva vesipitoisuus ovat muita lujittumisen kannalta tärkeitä edellytyksiä. Hienojakoiset piidioksidi ja aluminiumoksidi ovat eräitä olennaisia ainesosia potsolaanisessa materiaalissa.

Potsolaanireaktioita on varsin hankala yksityiskohdaisesti selvittää. Kunkin tuhkatyyppin ominaisuudet vaihtelevat jossain määrin lähes päivittäin, mikä tekee niistä melko vaikeasti tutkittavan materiaalin nimenomaan silikaattikemian alueella. Lentotuhkassa oleva vapaa kalkki näyttelee pääosaa potsolaanisissa reaktioissa. Kun tuhkaan sekoitetaan vettä, tuhkan vapaa kalkki reagoi tämän kanssa muodostaen kalsiumhydroksidia, joka puolestaan muodostaa piidioksidin ja aluminiumoksidin kanssa lujittavia sidoksia.

Helsingissä syntyvästä kivihiilituhkasta on potsolaanista Hanasaaren voimalaitosten lentotuhka sekä Salmisaaren uuden voimalaitoksen lentotuhka (tyyppi Ia). Sen sijaan pohjatuhka, pohjakuona ja Myllypuron voimalaitoksen lentotuhka (tuhkatyyppi Ib) eivät ole potsolaanisia.

Potsolaanisuutta voidaan aktivoida lisäämällä lentotuhkaan esimerkiksi kalkkia, sementtiä tai kipsiä.

4.

MAARAKENNUSTEKNISET OMINAISUUDET

4.1

Raeominaisuudet

Kivihiilituhka koostuu pääasiassa lasimaiseksi sulaneesta sivukivestä sekä pienestä määrästä palamatta jäänyttä kivihiiltä. Rakeiden kemiallisen koostumuksen lisäksi geoteknisessä mielessä tärkeitä raeominaisuuksia ovat:

- raemuoto ja rakeiden pintastrukturi
- raekoko
- rakeiden kiintotiheys
- rakeiden lujuus

Raemuoto ja rakeiden pintastrukturi

Tuhkarakeiden muotoa ja pintastruktuuria on tarkasteltu silmämääräisesti ja mikroskoopin avulla. Lisävalaistusta on saatu alan kirjallisuudesta.

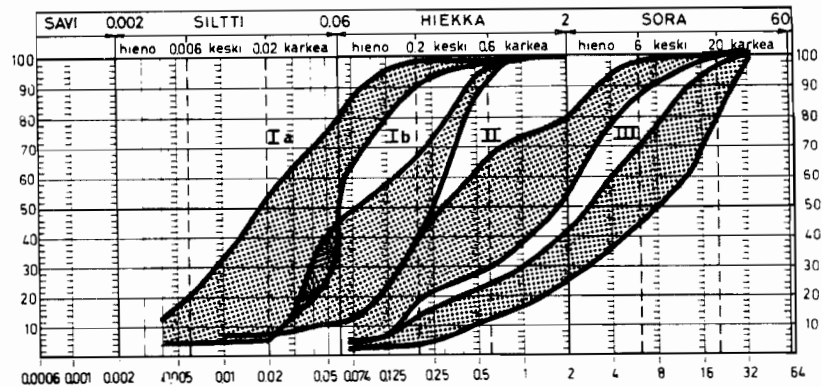
Lentotuhkarakeet ovat pääasiassa pieniä lasimaisia, onttoja palloja, jotka esiintyvät englanninkielisessä kirjallisuudessa nimellä "cenospheres". Pieni osa palloista on niin keveitä, että ne kelluvat veden pinnalla. Joukossa on myös kiinteitä lasipalloja sekä särmikkäitä mineraalirakeita. Palamattoman hiilen määrä vaihtelee lentotuhkalla 1 ja 12 painoprosentin välillä. Poikkeuksena on Myllypuron voimalaitoksen lentotuhka, joka saattaa sisältää jopa 30 % palamatta jäänyttä hiiltä.

Pohjatuuhka muodostuu suurimmaksi osaksi kuonautuneesta lentotuhkasta, jonka partikkelit ovat liittyneet suuressa kuumuudessa toisiinsa pohjatuuhkarakeiksi. Rakeet ovat särmikkäitä ja niillä on huokoinen pinta. Hienoaineksessa esiintyy lehtotuhkarakeiden kaltaisia hiukkasia. Joukossa on myös joitakin suurehkoja sorarakeen kokoisia pinnaltaan lasimaisia kuonakappaleita. Palamatta jääneen hiilen määrä on noin 1 %.

Pohjakuonarakeille on ominaista mustat, särmikkäät rakeet. Ne ovat keskimäärin suurempia kuin pohjatuuhkarakeet. Rakeet ovat kuonamaiseksi sulaneita ja niillä on lasimainen sileä pinta. Suurimmat rakeet ovat jonkin verran huokoisia.

Raekoostumus

Raekoostumus on määritetty Kyläsaaren tielaboratoriossa seulomalla ja areometrianalyysin avulla.



Kuva 5. Helsingin kivihiilituhtatyypin keskimääräiset rakeisuusalueet /3/.

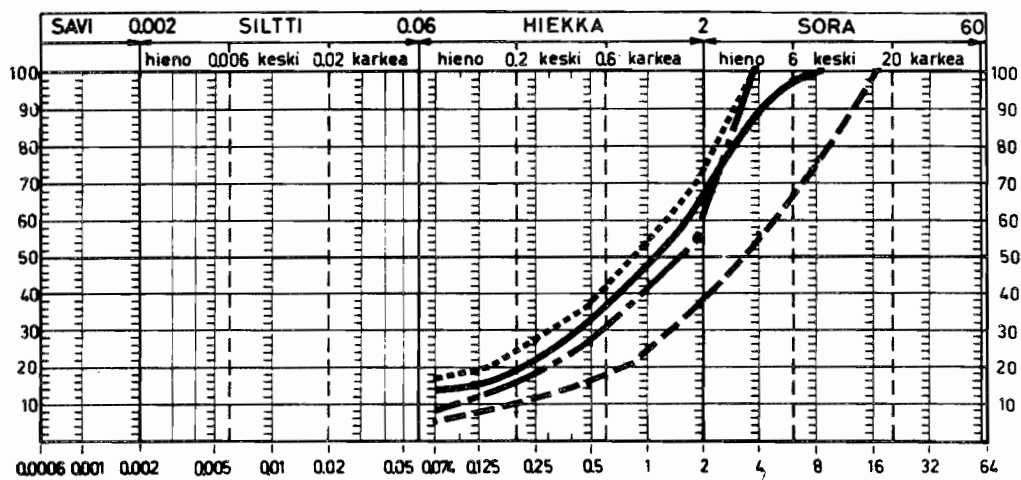
- | | |
|-----|---|
| Ia | Hanasaaren voimalaitoksen lentotuhta 1) |
| Ib | Myllypuron voimalaitoksen lentotuhta |
| II | Hanasaaren voimalaitoksen pohjatuhta |
| III | Myllypuron voimalaitoksen pohjakuona |

1) Salmisaaren uuden voimalaitoksen lentotuhtin rakeisuus on likimäärin sama tai jonkin verran hienompi.

Kuvassa 5 esitetyt rakeisuuskäyrät on lentotuhtin osalta määritetty tuoreista ja kuivista näytteistä. Käytännössä kuitenkin esimerkiksi potsolaanisen lentotuhtin varastointi kosteassa tilassa ja lämpimissä olosuhteissa muuttaa rakeisuutta karkeampaan suuntaan. Tämä johtuu siitä, että kemiallisia sidoksia syntyy varastoinnin aikana lentotuhtahiukkasten välille, jolloin muodostuu suurempia rakeita.

Toisaalta areometrikokeen luonteesta johtuen saattaa lentotuhtin rakeisuuskäyrässä olla epätarkkuutta. Lentotuhtirakeiden kiintotiheyden arvo $1,9...2,4 \text{ t/m}^3$ on vain keskimääräinen. Todellisuudessa pienten lasipallohiukkasten kiintotiheys on selvästi keskiarvoa suurempi, noin $2,6...2,7 \text{ t/m}^3$, kun taas suuret, huokoiset hiukkaset ovat keskiarvoa kevyempiä. Pienet hiukkaset laskeutuvat siten mittalasin pohjalle oletettua nopeammin osoittaen todellista suurempaa raekokoa. Suuret hiukkaset taas osoittavat todellista pienempää raekokoa. Mikäli lentotuhtin rakeisuuden luotettavampi määrittäminen on tarpeen, on käytettävä jotain tarkempaa menetelmää, esimerkiksi mikroskooppilaskentaa.

Pohjatuuhka- ja -kuonarakeet hienontuvat jonkin verran dynaamisen kuormituksen vaikutuksesta. Myllypuron pohjakuonanäytteestä määritettiin rakeisuus ennen parannettua proctor-koetta ja sen jälkeen. Kuvassa 6 esitetään rakeisuuden muuttuminen. Käytännön kuormitustilanteissa rakeiden murskaantumista ei kuitenkaan tapahtune näin suuressa määrin.



Kuva 6. Myllypuron pohjakuonan rakeisuuden muuttuminen proctor-kokeessa, joka on tehty alle 16 mm näytteelle /2/.

- näyte ennen proctor-koetta
- näyte proctor-kokeen jälkeen
- alle 4 mm fraktio ennen proctor-koetta
- alle 4 mm fraktio proctor-kokeen jälkeen

Kiintotiheys

Kivihiilituhkan kiintotiheyden arvo riippuu rakeiden mineraalikoostumuksesta ja rakenteesta. Kiintotiheydet on määritetty pyknometrimenetelmällä alipainetta käyttäen. Kuonarakeissa saattaa olla umpeenlasittuneita huokosia, joihin ei alipaineesta huolimatta kokeessa käytetty neste, trikloorietyleeni tai vesi, ole päässyt tunkeutumaan. Tällöin päädytään näennäiskiintotiheyksiin, joiden arvot ovat hiukan todellista pienempiä. Yleisesti ottaen kivihiilituhkan kiintotiheys on keskimäärin selvästi pienempi kuin tavanomaisten maa-ainesten. Helsingin kivihiilituhkalle on mitattu seuraavanlaiset kiintotiheyden vaihtelurajat:

- lentotuhka 1,9...2,4 t/m³
- pohjatuuhka 1,9...2,0 t/m³
- pohjakuona 1,8...2,1 t/m³

Rakeiden lujuus

Rakeiden lujuudella on merkitystä etenkin pohjatuhkasta ja -kuonasta rakennettaessa. Standardin mukaisia Los Angeles-lukuja sekä muoto- ja haurausarvoja ei ole tämän projektin yhteydessä määritetty. Kokeuksesta kuitenkin tiedetään, että suuren dynaamisen kuormituksen alaisena rakeet murskautuvat suhteellisen helposti. Tämä on otettava huomioon pohjatuhkasta- ja kuonasta rakennettaessa. Amerikkalaisten voimalaitosten pohjatuhkalla Los Angeles-luku vaihtelee 37 ja 40 välillä /4/.

4.2

Tiivistymisominaisuudet

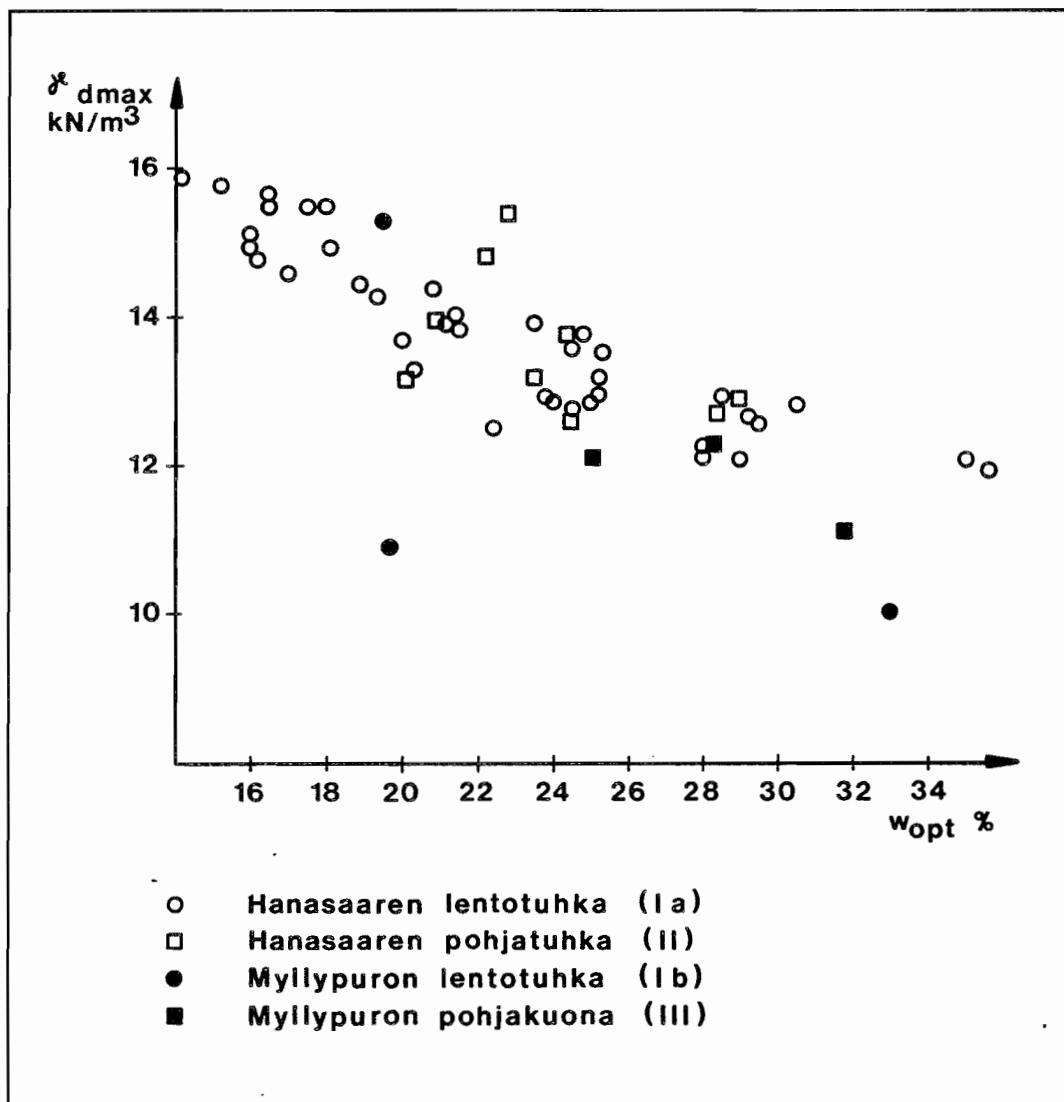
Kivihiilituhkasta rakennettaessa on sen tiivistymisominaisuuksien tuntemisella tärkeä merkitys. Käytettävän tuhkan tilavuuspainon, veden tarpeen, kerrolla tiivistettävän kerroksen paksuuden ja materiaalimenekin tunteminen on välttämätöntä rakennetta suunniteltaessa. Lisäksi on otettava huomioon kivihiilituhkan ominaisuuksien joskus suurikin vaihtelevuus samankin voimalaitoksen tuhkatuotteilla.

Kuivatilavuuspainon maksimiarvon ja optimivesipitoisuuden määrittämiseen on käytetty parannettua proctor-menetelmää ja kentällä suoritettavaan tiiviiden tarkkailuun mäntävesivolymetriä. Myös kombrimetriä ja proctor-neulaa on kokeiltu ja havaittu, etteivät ne ole kovinkaan käyttökelpoisia. Proctor-kokeita on tehty eniten lentotuhkalla johtuen toisaalta siitä, että sen laadunvaihtelu on kaikkein suurin sekä siitä, että sen tiivistämiseen liittyvät suurimmat ongelmat.

Maksimikuivatilavuuspaino ja optimivesipitoisuus

Kivihiilituhkan mineraalikoostumus vaikuttaa sen kiintoutumisen arvoihin ja sitä kautta myös kuivatilavuuspainoon. Toisaalta esimerkiksi lentotuhkalla suuri palamattoman hiilen määrän lisääntyminen pienentää kuivatilavuuspainoa ja suurentaa optimivesipitoisuutta.

Proctor-kokeessa saadussa tiivistymiskäyrässä on selvä huippu optimivesipitoisuuden kohdalla, jonka jälkeen käyrä laskee jyrkästi vesipitoisuuden kasvaessa. Tiivistymiskäyrässä esiintyy joskus myös kaksi huippukohtaa.



Kuva 7. Tuhkanäytteiden maksimikuivatilavuuspainon ja optimivesipitoisuuden arvoja.

Kuvasta 7 havaitaan, että mitä suurempi on optimivesipitoisuus, sitä pienempi on maksimikuivatilavuuspaino. Mukana on paitsi tuoreesta tuhkaista myös kentältä varastokasasta otetuista näytteistä tehdyt proctor-kokeet. Lentotuhkasta viimeksi mainituista kokeista tulokset sijoittuvat kuvassa lähinnä oikeaan laitaan, mikä johtuu siitä, että kosteassa ja lämpimässä tilassa oltuaan tuhkan ominaisuudet lähinnä rakeisuuden osalta ovat muuttuneet rakeiden välille syntyneiden kemiallisten sidosten vuoksi.

Taulukossa 2 esitetään eri tuhkatyyppeiden ja eräiden luonnonkiviainesten optimivesipitoisuuksien ja maksimikuivatilavuuspainojen vaihteluvälejä.

Taulukko 2. Kivihiilituhkan ja tavanomaisten maa-ainesten keskimääräisiä optimivesipitoisuuden ja maksimikuivatilavuuspainon arvoja.

Tuhkatyyppi	W_{opt} (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)
Lentotuhka Ia	14 - 28	12 - 16
Lentotuhka Ib	19 - 21	10 - 15
Pohjatuhka II	12 - 15	12 - 15
Pohjakuona III	21 - 26	11 - 14
Sora	5 - 10	20 - 22
Hiekka	5 - 15	17 - 22
Siltti	15 - 25	16 - 18

Tuhka on kevyempää kuin tavanomaiset maa-ainekset. Kuorma-auton lavalla työmaalle tuotaessa lentotuhka painaa keskimäärin 7...8 kN/m³itd ja pohjatuhka sekä pohjakuona 11...12 kN/m³itd. Yleensä tuhka on lujuutta ja kantavuutta vaativissa rakenteissa tiivistettävä 90...95 % tiiviYTEEN. Tilavuuspainon suunnitteluarvona voidaan tällöin lentotuhkalla Ia ja pohjatuhkalla II käyttää yleensä 16 kN/m³ sekä lentotuhkalla Ib ja pohjakuonalla III 15 kN/m³. Tilavuuspainojen erot tavanomaisiin maa-aineksiin verrattuina eivät normaalitöissä kuitenkaan ole ratkaisevia ja tuhalla saatava kevennysvaikutus on yleensä varsin rajallinen.

Lentotuhka puristuu tiivistettäessä kokoon nopeasti. Kokoonpuristuminen löyhästä tilasta tiiviiseen on lisäksi suuri tavanomaisiin maa-aineksiin verrattuna, noin 45 prosenttia. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että 300 mm löyhä lentotuhkakerros on tiivistämisen jälkeen noin 170 mm paksu. Tämä on huomionarvoinen seikka massankäytön suunnittelun kannalta lentotuhkasta rakennettaessa.

Laboratoriokokeiden yhteydessä on havaittu, että tiivistämisen jälkeen lentotuhkassa tapahtuu asteittaista laajenemista kimmoisesta palautumisesta johtuen. Laajenemisen suuruus on likimäärin 0,5...1,5 prosenttia. Tämä aiheuttaa lievää kuivatilavuuspainon pienenemistä, mikä merkitsee käytännössä vastaavasti noin 0,5...1,5 prosenttiyksikön alentumista tiiviysasteessa, jonka määrittäysperusteena on laboratorioissa tehty proctor-koe.

Pohjatuhka ja -kuona käyttäytyvät tiivistämisen yhteydessä suunnilleen samalla tavoin kuin vastaavan raekoon omaavat luonnon kiviainekset. Kentällä tiivistettäessä tapahtuu rakeiden murskaantumista oletettavasti vähemmän kuin proctor-kokeessa, mistä syystä vesivolymetrikokeet antavat keskimäärin hiukan laboratorioissa saavutettuja pienempiä tiiviysasteita.

Huokoisuus

Huokoisuudella tarkoitetaan maa- tai tuhkarakenteesta otetussa volymetrinäytteessä olevan veden ja ilman yhteenlasketun tilavuuden suhdetta näytteen kokonaistilavuuteen.

$$n = V_v / V$$

n = huokoisuus

V_v = veden ja ilman yhteenlaskettu tilavuus

V = näytteen tilavuus

Tiivistetyn kivihiilituhkakerroksen huokoisuuteen vaikuttaa rakeiden muoto ja rakenne, rakeisuus sekä kerroksen tiiviys.

Taulukko 3.

Kivihiilituhkan huokoisuuden arvoja tiiviysasteissa $D = 90 \%$ ja $D = 100 \%$. Vertailuna on esitetty myös vastaavat luonnonkiviainesten keskimääräiset arvot.

Tuhkatyyppi	Huokoisuus n (%)	
	$D = 90 \%$	$D = 100 \%$
Lentotuhka Ia	37...41	33...37
Lentotuhka Ib	42...52	38...47
Pohjatuhka II	28...41	25...37
Pohjakuona III	37...43	33...39
Sora	19...28	17...25
Hiekka	19...40	17...36
Siltti	36...43	32...39

4.3

Vedenläpäisevyys, kapillaarisuus ja routivuusVedenläpäisevyys

Tiivistetty lentotuhka on erittäin huonosti vettä läpäisevää. Lujittumattoman lentotuhkan vedenläpäisevyys on samaa luokkaa kuin keskikarkean siltin. Potsolaanisen lentotuhkan vedenläpäisevyys pienenee lisäksi ajan mukana tapahtuvan lujittumisen seurauksena. Tätä ominaisuutta voi käyttää hyväksi vettäpidättäviä rakenteita, esimerkiksi maapatojen tiivistyssydämiä tehtäessä.

Pohjatuhka ja -kuona läpäisevät vettä huomattavasti huonommin kuin vastaavan rakeisuuden omaavat luonnonkiviainekset hiekka ja sora. Tämä johtuu siitä, että huokoiset ja särmikkäät kuonarakeet hidastavat veden läpivirtaamista.

Taulukko 4.

Kivihiilituhkan ja siltin keskimääräisiä vedenläpäisevyyden arvoja.

Tuhkatyyppi	k (m/s)
Lentotuhka Ia	$10^{-7} - 10^{-9}$
Lentotuhka Ib	$10^{-6} - 10^{-7}$
Pohjatuhka II	$1-3 \times 10^{-6}$
Pohjakuona III	$10^{-5} - 10^{-6}$
Siltti	$10^{-5} - 10^{-9}$

Kapillaarisuus ja routivuus

Kapillaarisella nousukorkeudella h_c tarkoitetaan sitä nousukorkeutta, johon vesi kapillaarivoiman vaikutuksesta nousee rakenteen huokosissa vapaan vedenpinnan yläpuolelle. Luonnon kiviainesten eräänä routivuuskriteerinä pidetään kapillaarista nousukorkeutta. Routimattomilla materiaaleilla se on alle 1 m.

Tiivistetyn lentotuhkarakenteen kapillaarinen nousukorkeus $h_c > 2$ m. Pohjatuhkan ja -kuonan $h_c < 1$ m. Kapillaarisuuteen ja rakeisuuteen perustuvien kriteereiden mukaan lehtotuhka olisi routivaa. Lentotuhkan routimisominaisuuksiin vaikuttavat kuitenkin myös sen lujittumisominaisuudet ja huono vedenläpäisevyys sekä ilmeisesti luonnonkiviaineksista poikkeavat rakeiden ja huokosveden väliset kemialliset ja fysikaaliset vuorovaikutukset.

Sekä Tampereen teknillisessä korkeakoulussa tehtyjen routakokeiden että käytännön tuhkarakenteiden seurannan perusteella pohjatuhka ja pohjakuona eivät roudi. Myöskään huolellisesti tiivistetyn lentotuhkan ei ole todettu routivan. Kuitenkin huonosti tiivistetty lentotuhkarakenne voi menettää keväällä sulamisen jälkeen kantavuutensa, minkä vuoksi lentotuhkan huolellinen tiivistäminen on myös routimista silmällä pitäen välttämätöntä. Lisäksi tiivistäminen on tehtävä siten, että eri kerrosten väliin ei synny saumakohtia, joihin voisi muodostua routalinssejä.

Taulukko 5. Tiivistetyn kivihiilituhkan kapillaarisuuden keskimääräisiä arvoja. Vertailumateriaaleina ovat sora, hiekka ja siltti.

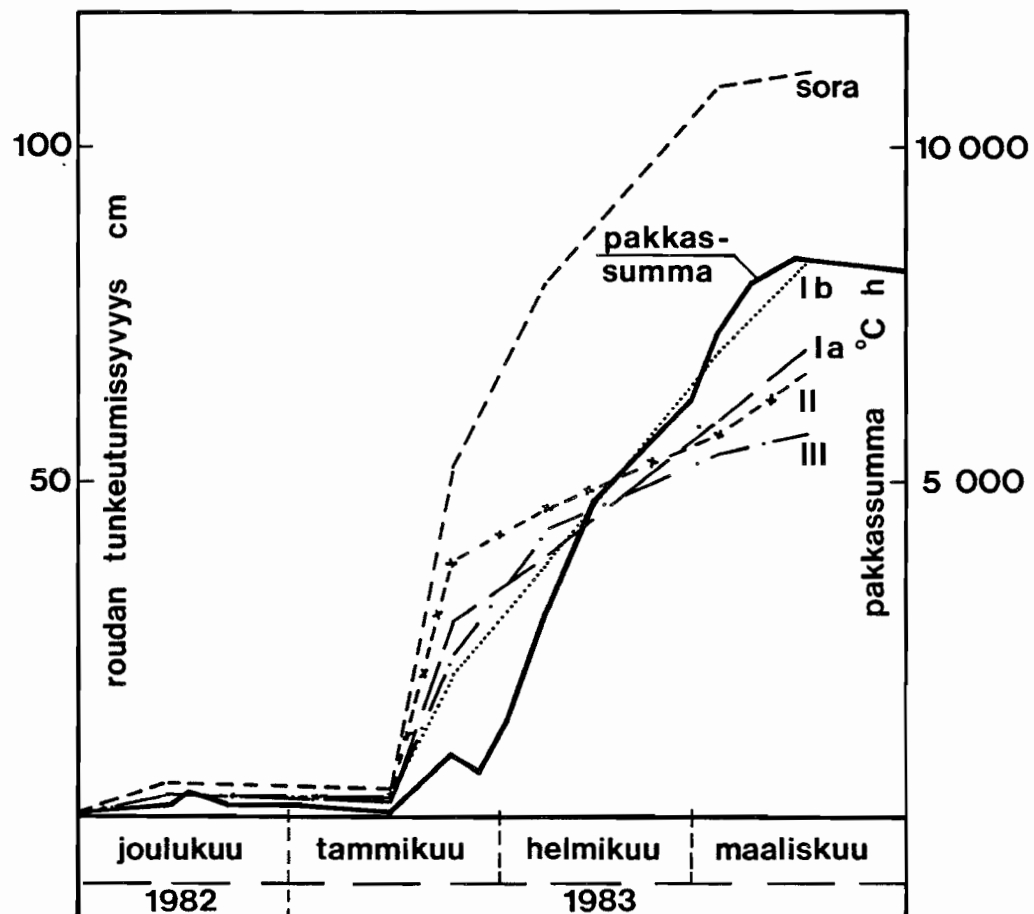
Tuhkatyyppi	Kapillaarisuus, h_c (m)
Lentotuhka Ia	2,0 - 3,5
Lentotuhka Ib	< 1,0
Pohjatuhka II	< 0,8
Pohjakuona III	< 0,7
Sora	< 0,05
Hiekka	0,04 - 3,5
Siltti	2,5 - 12,0

4.4 Lämmöneristävyys

Kivihiilituhkan lämmöneristyskyvyn selvittämiseksi on seurattu pakkaskauden aikana lämpötilamittauksin roudan tunkeutumisnopeutta ja syvyyttä rakenteissa, jotka on tehty eri tuhkatyypeistä ja luonnonkiviaineksista, lähinnä sorasta.

Tuhkaprojektin tutkimusryhmä on asentanut tuhkarakenteisiin lämpötilanmittausantureita 10 kohteessa eri puolilla Helsinkiä syksystä 1979 lähtien. Suuri osa antureista asennettiin syksyllä 1981. Talven 1981...1982 mittauksia ja tulosten tulkintaa vaikeutti suuresti erittäin runsas lumen tulo, koska kalustoa ei aina riittänyt koealueiden auraamiseen.

Syksyllä 1982 rakennettiin Viikin puhdistamon läheisyyteen yhtenäinen koekenttä, jossa ovat pienellä alueella edustettuina kaikki Helsingissä syntyvän kivihiilituhkan päätyypit sekä vertailumateriaalina jakavan kerroksen sora. Koekentän eräänä tavoitteena oli saada vertailukelpoista tietoa roudan tunkeutumisvyvyksistä samanarvoisissa olosuhteissa. Koekenttä saatiin hyvin pidetyksi lumesta vapaana, missä osaltaan auttoi vähäluminen talvi. Lämpötilanmittausantureita asennettiin kaksi kappaletta kutakin tutkittavaa materiaalia kohden ja ne ulottuivat 250 mm:n välein 1500 mm:n syvyyteen. Tiivistetty kerrospaksuus kentässä on 500 mm, jonka alla on sekalaisista, routivaa ja heikosti tiivistynyttä täyteä. Vuorokauden keskilämpötilatiedot on saatu Ilmatieteen laitokselta.



Kuva 8. Viikin koekentässä mitatut roudan tunkeutumisvyvydet ajan funktiona talvella 1982...1983. Kuvassa on esitetty myös vastaava pakkassummakäyrä, josta havaitaan, että talvi oli varsin leuto.

Kuvasta 8 nähdään, että kivihiilituhka hidastaa selvästi roudan tunkeutumismopeutta. Rakeisuudeltaan soraa vastaavalla pohjakuonalla näyttää olevan paras lämmöneristyskyky. Vesipitoisuus tuhalla oli varsin suuri, noin 25...30 %, tuhkatyypistä riippuen.

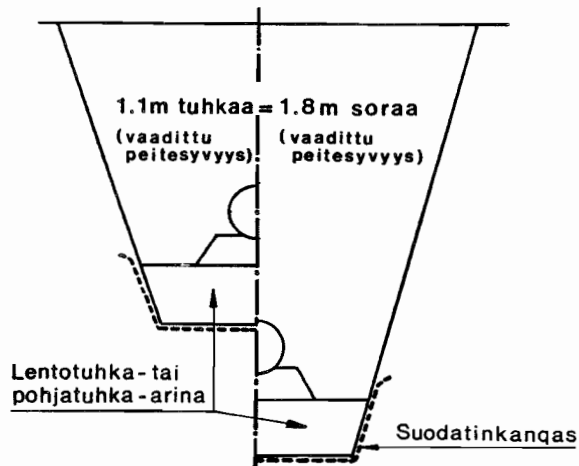
Taulukossa 6 esitetään roudan tunkeutumisvyvyys poikkeuksellisen kylmän talven pakkaskauden päättyessä keväällä 1985 (pakkassumma n. 23.000 h°C) samassa kohteessa. Lumipeitteen on annettu tiivistyä kentällä liikenteen alla.

Taulukko 6. Roudan maksimipaksuus Viikin koe-kentällä kevättalvella 1985.

Tuhkatyyppi	Roudan syvyys (m)
Lentotuhka Ia	0,75
Lentotuhka Ib	0,80
Pohjatuhka II	0,60
Pohjakuona III	0,45
Sora	1,30

Tehtyjen mittausten perusteella on laskettu eri tuhkatyyppien likimääräiset λ -arvot ja ne vaihtelevat 0,7 ja 1,1 W/°C m välillä. Vastaavat arvot soralla ja hiekalla ovat 2,0 ja 2,3 W/°C m välillä.

Roudan tunkeutumisvyvydellä on käytännön merkitystä arvioitaessa tuhkan käyttökelpoisuutta lämpöä eristävänä materiaalina esimerkiksi saveen verrattuna. Kuvassa 9 esitetään tuhkan lämmöneristävyyden hyödyntäminen putkijohtokaivannossa. Käytettäessä tuhkaa täyttömateriaalina riittää Helsinginseudulla putken peitesyvydeksi 1,1 m, kun taas luonnonmaa-aineksia käytettäessä vaaditaan 1,6...1,8 m peitesyvyys. Tuhkavaihtoehdossa säästetään kaivussyvydessä ja täyttömateriaalissa sekä vältetään kaivannon kalliilta tuennalta savikoilla. Täyttömateriaaliksi soveltuvat pohjatuhka ja pohjakuona paremmin kuin lentotuhka, jonka lujittuminen saattaa aiheuttaa kaivu vaikeuksia korjaustöiden yhteydessä.



Kuva 9. Kivihiilituhkan käytöllä putkijohtokaivannon täyttömateriaalina voidaan säästää merkittävästi.

4.5 Puristuslujuus

Pölypolttolaitoksissa syntyvä lehtotuhka ja poikkeaa tavanomaisista maa-aineksista ja muista tuhkatyypeistä lujittumisensa takia. Lentotuhkan lujittuminen avaa suuria mahdollisuuksia geotekniikan alueella. Tuhkaprojektin työryhmä on käyttänyt huomattavan osan laboratoriotyöajastaan lentotuhkan lujittumiseen vaikuttavien tekijöiden selvittämiseen pitäen etusijalla kuitenkin käytännön maarakentamisen tarpeita. Lentotuhkan lujittumisella on geoteknisessä mielessä merkitystä muun muassa seuraavilla osa-alueilla:

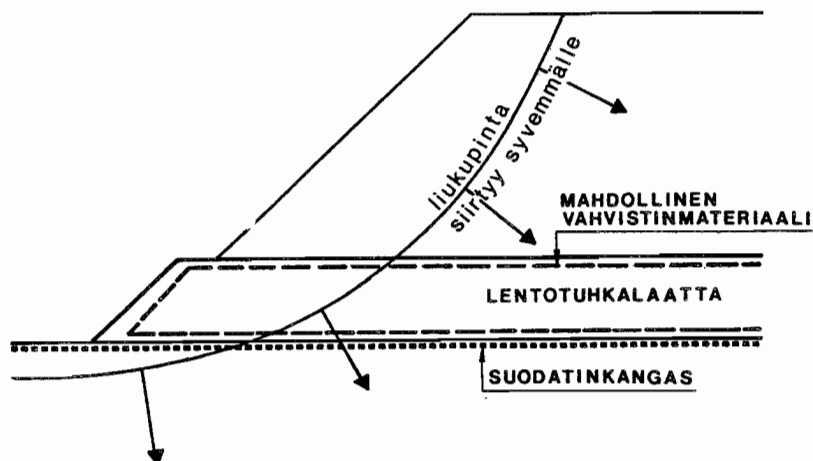
Lujittunut tiivis lentotuhkakerros

- 1 Tasaa painumia pehmeiköllä jakaessaan kuorimitukset pohjamaalle tasaisemmin kuin tavannomainen rakenne (kuva 10).
- 2 Muuttaa liukupintojen sijainnin syvemmälle lujempiin maakerroksiin parantaen varmuutta maapohjan murtumista vastaan (kuva 10).
- 3 Korvaa tavanomaisesti paksumman maarakenteen säilyttäen kuitenkin kantavuuden, jolloin saadaan aikaan kevyempi rakenne.
- 4 Vähentää maanpainetta (kuva 11).
- 5 Toimii vettä pidättävänä rakenteena.

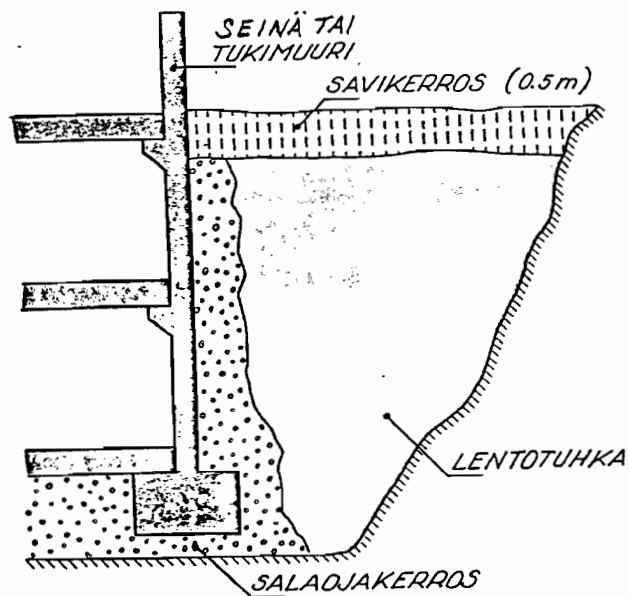
Muihin kiviaineksiin sekoitettuna lujittuva lentotuhka

- 6 Hienoaineksena parantaa tasarakeisten kiviainesten stabiliteettia mekaanisesti.
- 7 Sideaineena parantaa kiviainesten stabiliteettia kemiallisesti lujittaen.
- 8 Parantaa injektointimassojen ominaisuuksia, muunmuassa parantaa pumpattavuutta ja vähentää komponenttien erottumista.

Tuhkaprojektin työ on tähdännyt tällä alueella ensisijaisesti hyödyntämään lentotuhkan lujittumisominaisuuksia tapauksissa 1...5. Lentotuhkan tekninen ja taloudellinen merkitys kasvaa tässä valossa aivan toisiin mittoihin kuin pelkästään kiviaineksen korvaajana.



Kuva 10. Lujittunut lentotuhkalaatta (kuvassa lisäksi lujiteverkolla vahvistettu) tasaa savi-kolla maanvaraisen penkereen painumia sekä parantaa penkereen kokonaisvarmuutta pohja-maan murtumista vastaan.



Kuva 11. Lujittunut lentotuhka vähentää seinään tai tukimuuriin kohdistuvaa maanpainetta pitäessään itseään "koossa" ja soveltuu sen vuoksi hyvin taustatäyttömateriaaliksi.

Lujittuminen

Tuhka-alan kirjallisuudessa käsitellään lentotuhkan lujittumista ja siihen vaikuttavia syitä melko runsaasti. On todettu, että asia on varsin monimutkainen johtuen muunmuassa kemialliseen koostumukseen vaikuttavasta kivihiilen alkuperästä, polttoprosessin yksityiskohdista ja tuhkan käsittelytavasta.

Yleisesti tunnettua on, että lentotuhkassa oleva vapaa kalkki näyttelee pääosaa potsolaanisissa reaktioissa. Lisäksi kirjallisuudessa mainitaan, että lujittumiseen vaikuttaa ratkaisevasti kolmen pääoksidin, SiO_2 , Al_2O_3 ja Fe_2O_3 , yhteismäärä.

Mitä hienorakeisempaa materiaali on, sitä suurempi on välittömille kemiallisille reaktioille alttiina oleva pinta-ala (ns. ominaispinta-ala).

Lentotuhkan jäännöshiilipitoisuuden sanotaan vaikuttavan epäedullisesti lujittumisreaktioihin. Tuhkaprojektin tekemisissä lujustutkimuksissa ei ole havaittu mitään selvää yhteyttä lentotuhkan, jonka hehkutushäviö on pienempi kuin 10 painoprosenttia, lujuuden ja jäännöshiilipitoisuuden välillä. Tämä korostaa sitä tosiasiaa, että ei voida yhdistää ainoastaan jotakin yksittäistä tekijää lentotuhkan lujittumisominaisuuksiin.

Tiedetään myös, että runsaasti rikkiä sisältävässä tuhkassa voi sulfaateista ja kalkista veden kanssa reagoidessa syntyä kipsiä, jonka toiminta yhdessä aineksen mahdollisesti sisältämien kalsiumaluminaattiliuosten kanssa synnyttää ettringiittiä. Ettringiitin tilavuus on suurempi kuin reaktioiden lähtöaineiden yhteistilavuus, jolloin lujittunut rakenne rikkoutuu ja menettää lujuuttaan.

Lämpötila vaikuttaa lujittumistapahtumaan oleellisesti, koska monet kemialliset reaktiot ovat riippuvaisia lämpötilasta. Lämpötilan kohoaminen nopeuttaa myös lujittumisreaktioita. Tämän edellytyksenä on kuitenkin, että kosteuspitoisuus säilyy lujittumisen aikana sopivana.

Edellä mainituista seikoista havaitaan, että lentotuhkan lujittumistapahtumaan vaikuttavia tekijöitä on useita, eikä kaikkiin näihin kysymyksiin ole tuhkaprojektin yhteydessä pyritty löytämään vastausta. Kuitenkin lujuusominaisuuksia selvitettyä on kerätty aineistoa helposti kontrolloitavista tekijöistä. Näitä seikkoja on selostettu tarkemmin geoteknisen osaston tiedotteessa 23 /2/.

Puristuslujuuskokeet

Kokeet on tehty rakennusviraston katuosaston Kyläsaaren tielaboratoriossa. Menetelmänä on käytetty yksiakselistaa puristuskoetta. Koekappaleet ovat olleet lieriömuotoisia, korkeus $h = 70...90$ mm ja halkaisija 62 mm. Ne on tiivistetty pudotusvasaralaitteella, tiivistämisen energian ollessa sama kuin parannetussa proctor-menetelmässä; $2,65 \text{ J/cm}^3$. Vesipitoisuutena on käytetty $W_{opt} \pm 2 \%$. Saavutettu tiiviysaste on ollut $90...95 \%$ parannetun proctor-kokeen tiiviyydestä, mikä vastaa hyvin käytännön tilannetta.

Vertailumielessä on tehty pienempi määrä koekappaleita myös proctor-muotissa proctor-sullontaa käyttäen. Pienempien koekappaleiden käyttäminen oli kuitenkin perustellumpaa, koska koekappaleita käsiteltiin varsin suuri määrä (noin 2000 kpl) ja näin sekoitustyö oli helpompi ja materiaalimenekki pienempi. Toinen syy oli puristuslaitteena käytetyn katuosaston CBR-puristuslaitteen maksimipuristusvoima (50 kN). Proctor-koekappaletta pienempää poikkipinta-alaa käytettäessä pystyttiin melkein kaikki lujittuneetkin kappaleet ($P < 16 \text{ MN/m}^2$) puristamaan. Lujuudeltaan yli 16 MN/m^2 koekappaleet on puristettu Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen tie- ja liikennelaboratoriossa.

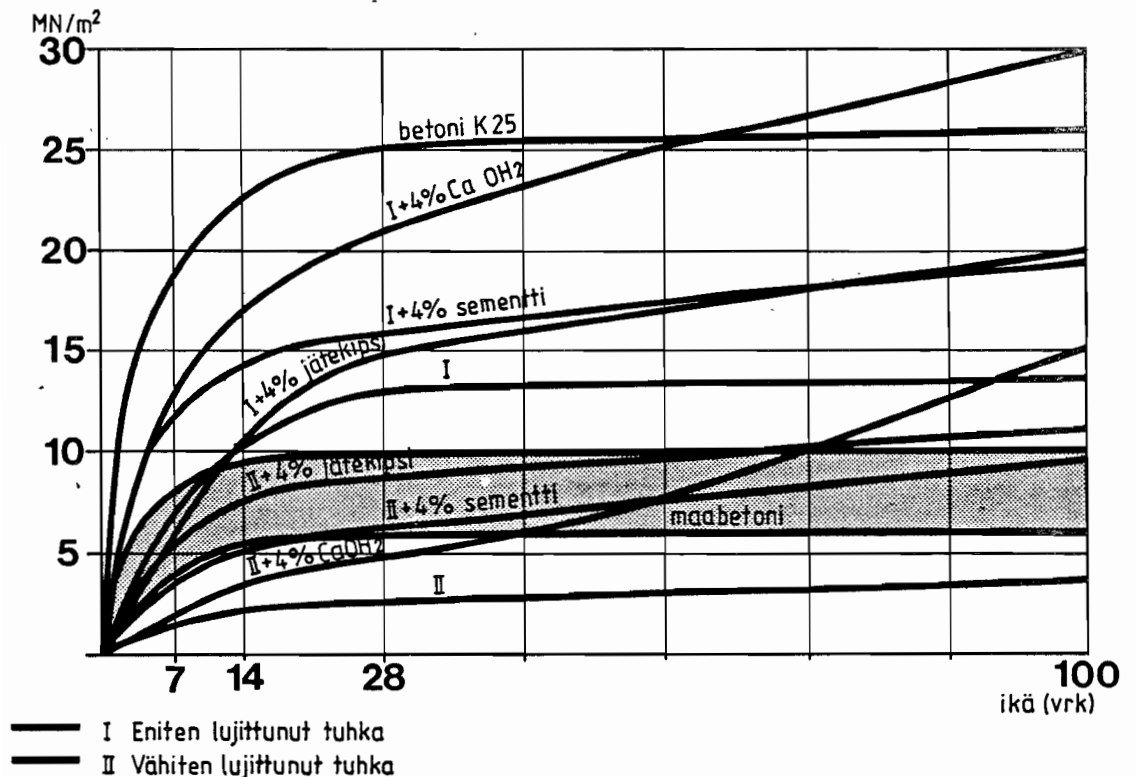
Koekappaleet säilytettiin muovikelmuun käärittynä huoneenlämpötilassa. Lujittumisreaktiolle välttämättömän kosteus säilyi hyvin muovikelmun ansiosta.

Puristuslujuuskokeiden alkuvaiheessa jokainen koe tehtiin kolmella kappaleella, joiden tulosten keskiarvoa käytettiin lopullisena tuloksena. Kun huomattiin, että hajonta on vakio-olosuhteiden ansiosta erittäin pieni, siirryttiin käyttämään ainoastaan kahta koekappaletta. Puristusikä ovat olleet 7, 14, 28, 90, 180 ja 360 vuorokautta. Pääpaino on ollut 14 ja 28 vuorokauden lujuuksilla.

Kokeilla pyrittiin selvittämään paitsi pelkän lentotuhkan lujittumisominaisuuksia myös eräiden sideaineiden vaikutusta lujittumista edistävänä tekijänä. Myös näiden sideaineiden erilaisia yhdistelmiä kokeiltiin. Sideaineina kokeiltiin rakennushienokalkkia, tavallista portland-sementtiä ja Kemiran Uudenkaupungin fosfaattitehtaan jätekipsiä. Pitoisuudet ovat olleet 2... 12 % tuhkan kuivapainosta. Myös alle 2 % pitoisuuksia on kokeiltu, mutta käytännössä näin pieniin pitoisuuksiin ei voida mennä, koska stabiloinnin onnistumisen epävarmuustekijöiden määrä lisääntyy suuresti.

HANASAAREN LENTOTUHKAN LUJITTUMINEN

20 Näyte-erän perusteella

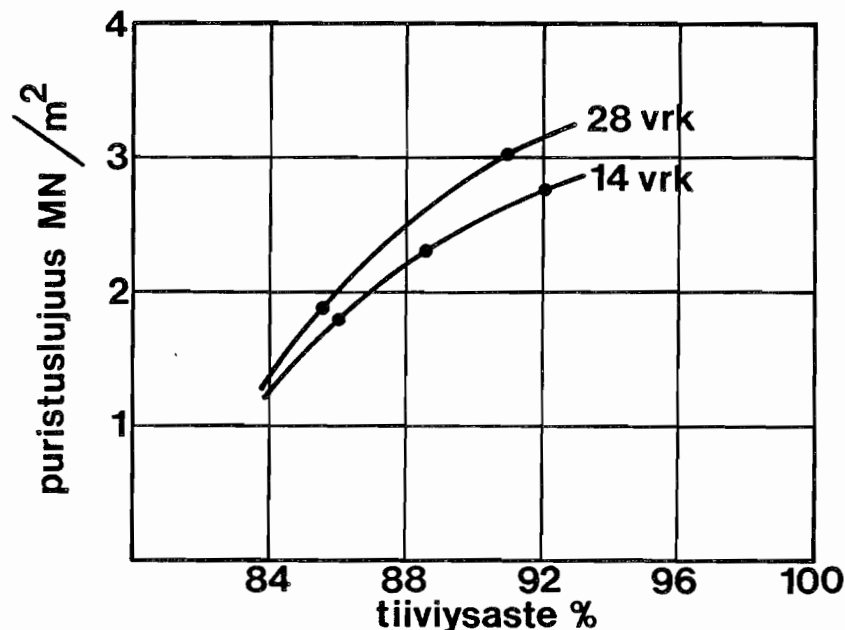


Kuva 12. Esimerkki huonosti ja erittäin hyvin lujittuvan lentotuhkanäytteen lujuudenkehityksestä ilman lisäsideaineita sekä sementin, kalkin ja jätekipsin kanssa (sideainepitoisuus 4 % tuhkan kuivapainosta).

Puristuslujuuskokeiden tuloksia selostetaan geoteknisen osaston tiedotteessa 23 /2/.

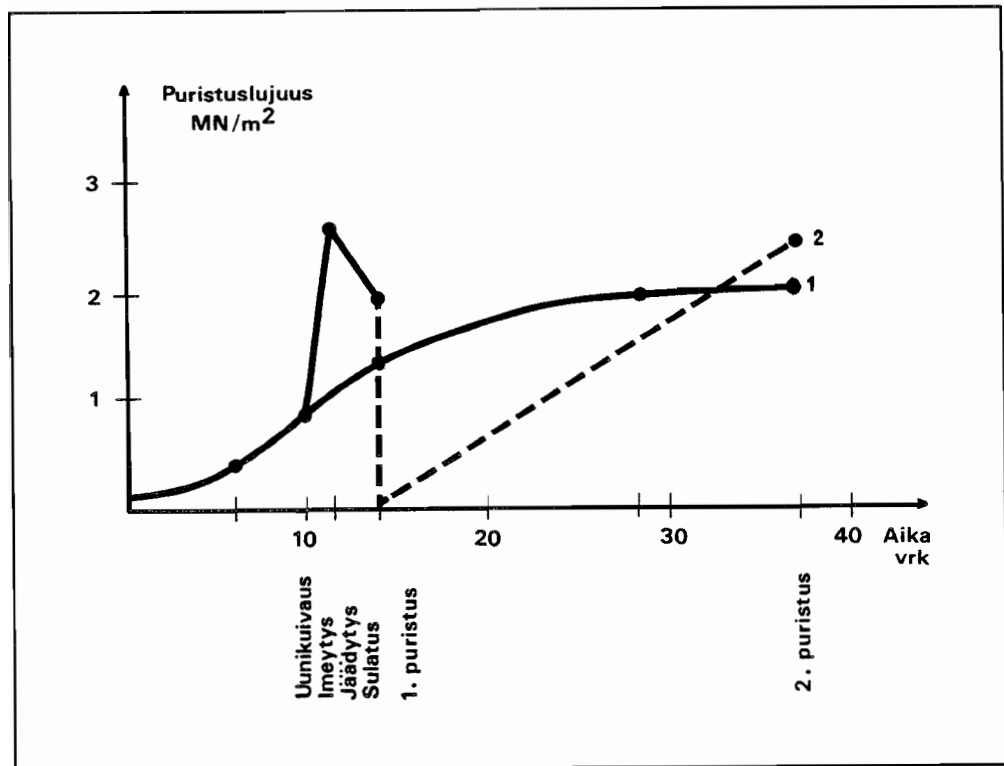
Lentotuhka lujittuu käytännön tilanteessa melko hitaasti. Toisaalta sen lujittumisominaisuudet vaihtelevat suuresti. Kokeiden yhteydessä on ollut lentotuhkanäytteitä, joilla ei ole juuri lainkaan potso-
laanisia ominaisuuksia. Rakentamistilanteessa usein-
kin on toivottavaa, että tietty lujuus saavutetaan mahdollisimman aikaisessa vaiheessa. Lujittumista nopeuttavien lisäsideaineiden käytölläkin on tietty optimaalinen yläraja, jonka ylittäminen ei ole taloudellisesti kannattavaa.

Tuhkan tiiviydellä on oleellinen vaikutus saatuihin lujuuksiin, kuva 13. Yleensä rakenteissa olisi pyrittävä vähintään 90 % tiiviysasteeseen.



Kuva 13. Hanasaaren lentotuhkan puristuslujuuskokeiden tuloksia eri tiiviystiloissa.

Lentotuhkan lujittuminen keskeytyy, jos lentotuhka-rakenne pääsee jäätymään. Jäätymis-sulamisvaiheen aikana tuhka menettää osan lujuudestaan. Lujuuden menetys on merkittävä silloin, jos tuhkan vesipitoisuus on optimivesipitoisuutta suurempi. Pitkän ajan kuluessa lujuus palautuu lähes ennalleen. Lentotuhka menettää lujuutensa myös, jos se esimerkiksi kuormituksen vaikutuksesta murtuu. Myös murtuman seurauksena menetetty lujuus palautuu ilmeisesti suurimmalta osaltaan ajan kuluessa, kuva 14 /2/.



Kuva 14. Hanasaaren A-laitoksen lentotuhkan lujuudenmenetys jäätyksen, sulamisen ja puristumurrin jälkeen sekä lujuuden palautumisen /2/.

1 = Näytteen normaali lujittuminen

2 = Näytteen lujittuminen murtuman jälkeen

Lentotuhka liettyy ja menettää kantavuutensa pitkäaikaisen sateen tai veteen joutumisen seurauksena. On kuitenkin havaittu tuhkan kestävän hajoamatta, jos puristuslujuus on ennen veteen joutumista ollut vähintään noin 1 MN/m². Laboratorio-olosuhteissa mainittu lujuus saavutetaan puolalaisen kivihiilen lentotuhkalla yleensä alle 10 vrk:n ikäisenä.

Yhteenvetona puristuslujuuskokeiden tuloksista voidaan todeta, että saman voimalaitoksen polttoprosessissa syntyvän lentotuhkan lujittumisominaisuudet voivat vaihdella erittäin paljon samaakin kivihiiliä käyttäessä. Hanasaaren voimalaitoksen 28 vuorokauden puristuslujuus on tutkituilla näytteillä vaihdellut 0,1 ja 8,9 MN/m² välillä. Puolalaisen kivihiilen lentotuhkan 28 vuorokauden lujuus on vaihdellut 1,1 ja 8,9 MN/m² välillä. Amerikkalaisen ja englantilaisen kivihiilen lentotuhkan lujuudet ovat keskimäärin selvästi alhaisemmat vaihdellen 0,1 ja 2,0 MN/m² välillä. Jälkimmäisiin puristuslujuustuloksiin vaikuttavat jonkin verran heikentävästi edellisiä alhaisempi koekappaleiden tiiviysaste.

Käytännön kannalta tärkein lujuudenkehitysaika on laboratorio-oloissa ≤ 7 vuorokautta, mikä vastaa lämpösummaa ≤ 126 vrk $^{\circ}\text{C}$, kun oletetaan, että lujittumista tapahtuu vain lämpötiloissa $\geq + 4$ $^{\circ}\text{C}$. Kenttäoloissa saavutetaan Helsingissä toukokuussa 7 vuorokauden laboratoriolujuus aikaisintaan 1,5...3 viikon, kesä-elokuussa 1...2,5 viikon ja syyskuussa 2...3 viikon kuluessa.

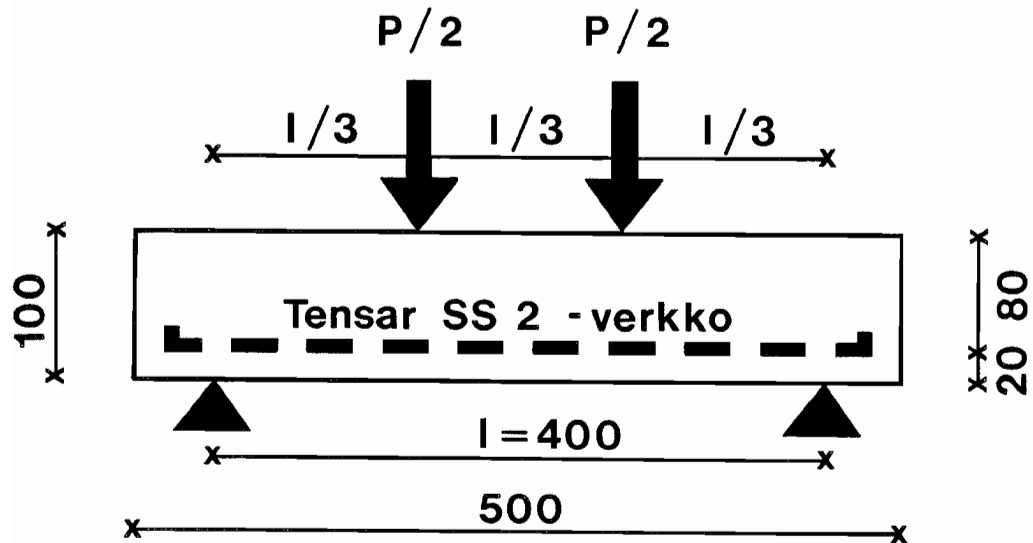
Tutkimuksissa huomattiin erityisesti, että jätkekip-sillä saadaan ilman sideainetta huonosti lujittuval-la tuhalla aikaan nopein lujuuden kasvu, kun taas kalkilla saavutetaan suurimpia loppulujuuksia. Sekä kalkki, sementti että jätkekipsi lisäävät selvästi lentotuhkan lujittumista.

Sideaineyhdistelmien käyttäminen ei liene hyvistä lujittumisominaisuuksista huolimatta tarkoituksenmu-kaista kenttäolosuhteissa. Sideainetta on syytä käyttää aina, kun lentotuhkarakenteelta vaaditaan suurta alkulujuutta.

Vetolujuus

Hyvän potsolaanisen lentotuhkan lujittumisominaisuu-det antavat mahdollisuuden suunnitella laattamaisia rakenteita. Nämä tulevat kysymykseen huonosti kanta-villa maapohjilla, esimerkiksi putkijohtojen tai tei-den perustuksissa. Lujittuneen lentotuhkan vetolu-juus ei kuitenkaan riitä vaativissa perustusraken-teissa, joten sitä on pyrittävä lisäämään (kuvat 9 ja 10). Nykyisin on saatavissa erittäin lujia muoviverkkoja, joiden käyttökelpoisuutta kokeiltiin rau-doitusmateriaalina tuhkapalkkikokein. Tuhkarakentei-siin muoviverkot soveltuvat teräsverkkoja paremmin syöpymättömyytensä vuoksi. Tärkeäksi valintakritee-riksi tulevat kuitenkin muodonmuutosominaisuudet.

Muoviverkon ja lujittuvan lentotuhkan yhteistoimin-nan selvillesaamiseksi tehtiin tuhkaprojektin toi-mesta lyhyt koesarja betoninkoestustekniikkaa sovel-taen. Betonin koestuksessa käytetään taivutus-veto-lujuuden määrittämiseen betonipalkkia, jonka mitat ovat 100 x 100 x 500 mm. Se koestetaan siten, että jänneväliksi tulee 400 mm ja taivutetaan kahdesta symmetrisestä kuormituspisteestä murtotilaan asti, kuva 15.



Kuva 15. Palkin kuormitus tilanne taivutus-vetoko-
keessa.

Tämän periaatteen mukaisesti valmistettiin Hanasaaren lentotuhkasta tuhkapalkkeja yhteensä 12 kappaletta, joista kahdeksassa käytettiin vetolujuuden parantamiseksi Tensar SS2-muoviverkkoa.

Tuhkapalkit valmistettiin teräsmuotissa, jossa oli irroitettavat reunalevyt. Lentotuhka tiivistettiin optimivesipitoisuudessa kolmena kerroksena siten, että tiivistyssaumat olivat koestustilanteessa vaakatasossa. Tiivistetyn kerroksen pinta karhennettiin ennen seuraavan kerroksen tekoa. Muoviverkot asennettiin alapinnasta ja reunoista kahden senttimetrin etäisyydelle. Verkot ankkuroitiin kiinni ylemmään kerrokseen. Lujuuden kehityksen varmistamiseksi kaikissa palkeissa käytettiin kalkkia 4 % kuivan lentotuhkan painosta laskettuna.

Mittatarkkuudeltaan palkit onnistuivat varsin hyvin, mittavirheen ollessa ± 1 mm. Sen sijaan tiivistäminen teräsmuotissa tuotti vaikeuksia. Tiiviysaste jäi suhteellisen alhaiseksi ollen 85 ± 2 % parantusta proctor-tiiviyydestä. Palkit koestettiin 14 ja 28 vuorokauden ikäisinä Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen betoni- ja silikaattitekniikan laboratoriossa. Tulokset näistä ilmenevät taulukossa 7.

Vertailulujuuksien saamiseksi samasta kalkki-tuhka-seoksesta määritettiin 14 ja 28 vuorokauden puristuslujuudet. Puristuslujuudet määritettiin lisäksi kolmessa erilaisessa tiiviysasteessa, jotta saataisiin palkkien tiiviyyttä vastaavat puristuslujuusarvot.

Suoritettu koe oli varsin suppea, mutta jo nämäkin tulokset osoittavat, että lujittuneen lentotuhkan vetolujuuden ja puristuslujuuden suhde (0,23...0,35) on samaa luokkaa tai vähän suurempi kuin betonilla (0,18...0,22). Muoviverkolla saavutettiin selvää vetolujuuden paranemista 14 vrk ikäisellä palkilla, mutta 28 vrk ikäisellä palkilla asia jäi epäselväksi. Koetulosten hajontaa aiheutti jonkin verran tiivysasteen vaihtelu sekä muoviverkkojen tartunnan osittainen epäonnistuminen.

Taulukko 7. Puristuslujuus- ja taivutusvetolujuuskokeiden tulokset koepalkeilla, jotka tehtiin Hanasaaren lentotuhkasta ja lisäsideaineena oli 4 % kalkkia. Lujitemateriaalina käytettiin taivutusvetokokeessa Tensar SS2-muoviverkkoa.

Hanas. lentotuhka + 4 % kalkkia	14 vrk MN/m ²	28 vrk MN/m ²
Puristuslujuus	1,7	2,0
Taivutusvetolujuus ilman muoviverkkoa	0,4	0,7
Taivutusvetolujuus muoviverkon kanssa	0,7	0,7

Eräs huomionarvoinen seikka ilmeni palkkien koestuksen yhteydessä. Pitkittäissuuntaisia murtohalkeamia syntyi poikkeuksetta ensin tiivistyssaumojen kohdalle ja kuormituksen kasvaessa tiivistetyt kerrokset irtaantuivat levymäisinä toisistaan. Näin tapahtuu siitä huolimatta, että edellisen tiivistetyn kerroksen pinta oli karhennettu ennen seuraavan kerroksen tekoa. Tästä voi tehdä johtopäätöksen, että laattamaisia taivutukselle alttiita rakenteita lentotuhkasta suunniteltaessa tiivistyssaumoihin on kiinnitettävä erityistä huomiota.

Lisäksi on todettava, että lentotuhkan ja käytetyn muoviverkon jännitysvenymäkäyttäytyminen poikkesi niin suuresti toisistaan, että niiden yhteistoiminta oli puutteellista. Ilmeisesti teräsverkko olisi paremmin toimiva raudoitusmateriaali, mikäli korroosioriskiä ei esiintyisi.

4.6

Leikkauslujuus

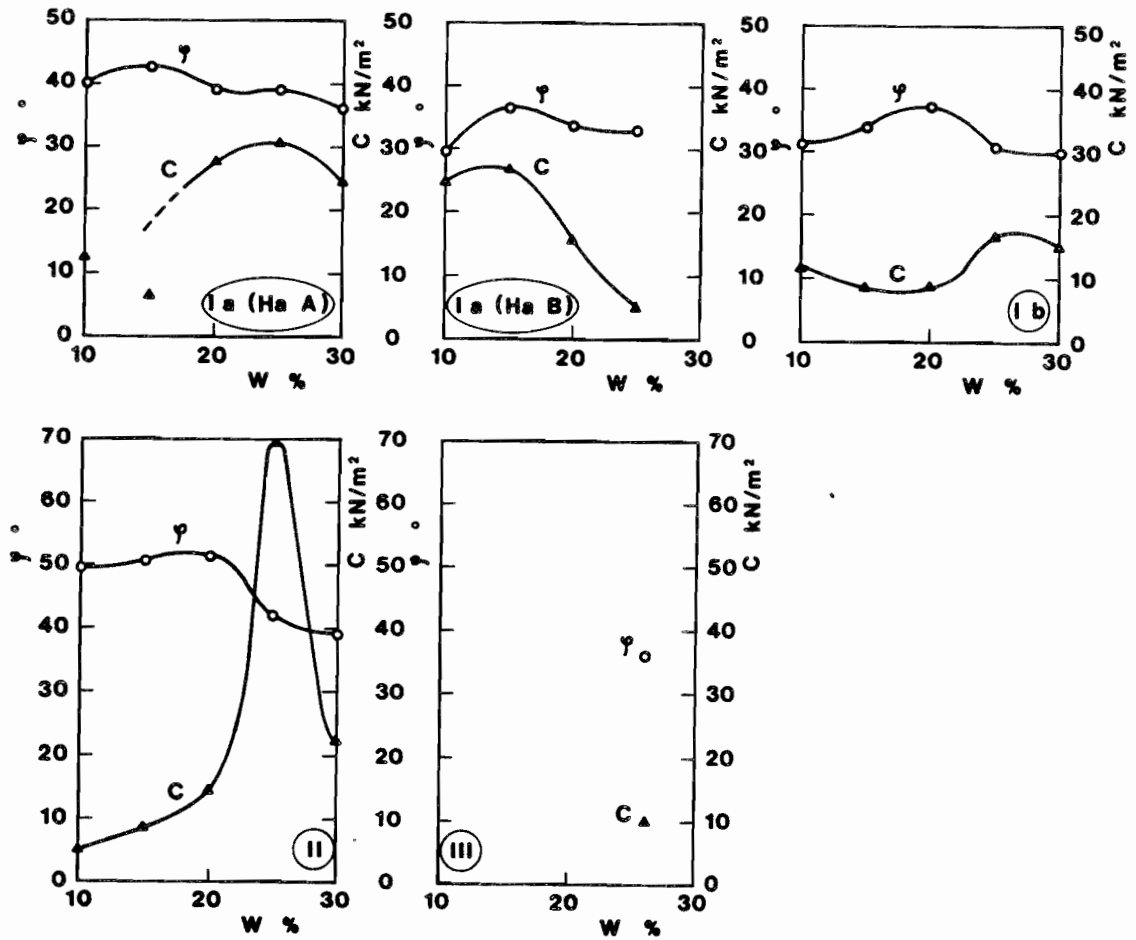
Kirjallisuudessa oletetaan lentotuhkan leikkauslujuuden muodostuvan välimalajien tavoin sekä kitkasta että koheesiosta. Useilla lentotuhkatyypeillä oletetaan myös olevan itsekovettamisominaisuuksia, mistä johtuen tietyissä kosteustiloissa tiivistetyn lentotuhkarakenteen leikkauslujuus kasvaa ajan kuluessa.

Pohjatuhkan ja pohjakuonan leikkauslujuuden oletetaan karkearakenteisten maalajien tavoin muodostavan pääasiassa kitkavoimista. Tuhkalla vesipitoisuus ja tiiviys vaikuttavat voimakkaasti leikkauslujuuteen.

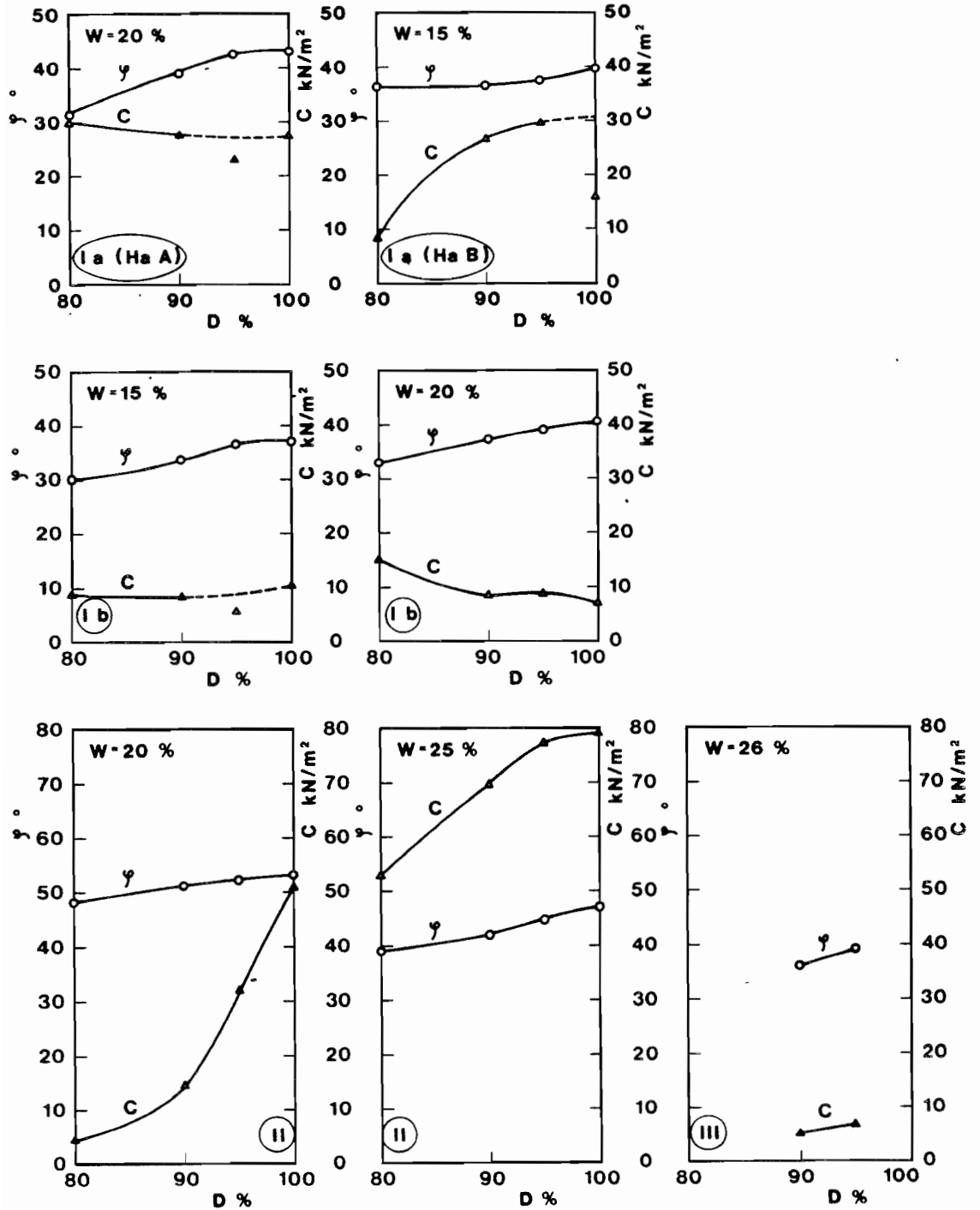
Puolalaisen kivihiilen tuhkan
lujuustutkimus

Helsingin voimalaitoksissa poltettavan puolalaisen kivihiilen tuhkan leikkauslujuuden selvittämiseksi tehtiin Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen geotekniikan laboratoriossa tutkimus, n:o GEO 1171, jossa tuhkan leikkauslujuusparametrit määritettiin useissa kosteus- ja tiiviystiloissa.

Lujuusparametrien määrittämismenetelmänä käytettiin suoraa leikkauskojetta, joka tehtiin rasialeikkauslaitteella. Rasialeikkauskoe valittiin, koska lujituneet lentotuhkanäytteet vaativat järeää leikkauskalustoa. Toisaalta koetulosten vertailukelpoisuuden takia kaikki kokeet tehtiin samalla koemenetelmällä. Kaikki tuhkatyypit konsolidoituvat nopeasti, joten riittävänä konsolidoitumisaikana pidettiin 15 minuuttia. Leikkausnopeutena käytettiin 0,1 mm/min. Koe vastasi siten lihinää cu-koetta. Kokeet tehtiin normaali-jännityksen 50, 100 ja 200 kN/m² arvoilla. Koetulokset esitetään kuvissa 16...18.



Kuva 16. Rasialeikkauskokeissa puolalaisen kivihiilen tuoreelle tuhkalle saadut ϕ :n ja c :n arvot eri vesipitoisuuksilla. Tiiviysaste $D = 90 \%$. Ia (Ha A), Ia (Ha B), Ib, II ja III ovat tuhkatyyppien tunnuksia.



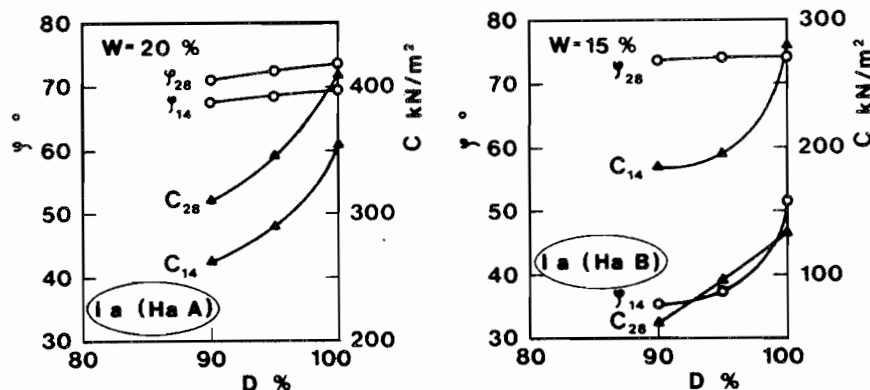
Kuva 17. Rasialeikkauskokeissa puolalaisen kivihiilen tuoreelle tuhkalle saadut ϕ :n ja c:n arvot eri tiiviystiloissa. Ia (Ha A), Ia (Ha B), Ib, II ja III ovat tuhkatyyppien tunnuksia.

Hanasaaren lentotuhkan (Ia) kitkakulman arvo vaihteli tuoreilla, lujittumattomilla näytteillä $\phi = 30...43^\circ$, kun tiiviysaste oli $D = 80...100\%$ ja vesipitoisuus $w = 10...30\%$. Vastaavasti koheesio vaihteli $c = 5...31 \text{ kN/m}^2$.

Myllypuron lentotuhkan (Ib) kitkakulma vaihteli $\phi = 30...40^\circ$ ja koheesio $c = 6...17 \text{ kN/m}^2$, kun tiiviysaste oli $D = 80...100\%$ ja vesipitoisuus $w = 10...30\%$.

Pohjatuhan (II) kitkakulma oli $\phi = 39...53^\circ$ ja koheesio $c = 5...79 \text{ kN/m}^2$, kun näytteiden tiiviysaste oli $D = 80...100\%$ ja vesipitoisuus $w = 10...30\%$. Erityisesti kiinnitti huomiota koheesiovoimakas kasvu lähestyttäessä optimivesipitoisuutta ja selvä koheesiovoimien pieneminen kun w_{opt} ylitettiin 5...10 prosenttiyksiköllä.

Myllypuron pohjakuonasta (III) tehtiin kokeet 90 % ja 95 % tiiviystiloissa, kun vesipitoisuus oli $w = 26\%$. Kitkakulman arvoksi saatiin $\phi = 36$ ja 39° sekä koheesioarvoiksi $c = 5$ ja 7 kN/m^2 .



Kuva 18. Rasialeikkauskokeissa puolalaisen kivihiilen lujittuneelle tuhkalle saadut ϕ :n ja c :n arvot eri tiiviystiloissa $w = w_{\text{opt}} \pm 2\%$. Ia (Ha A) ja Ia (Ha B) ovat tuhkatyyppien tunnuksia.

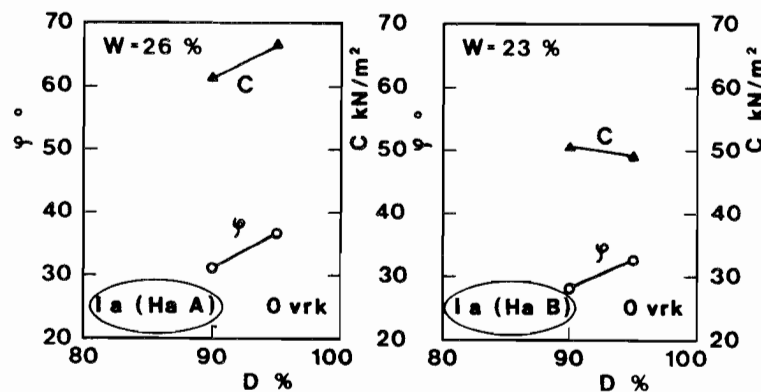
Lujittuneiden lentotuhkanäytteiden (Ia) vesipitoisuus oli näytepalleiden valmistusvaiheessa $w = w_{\text{opt}} \pm 2\%$. Ne säilytettiin huoneenlämmössä muovikelmuun tiiviisti käärittyinä lujittumiselle välttämättömän kosteuden säilyttämiseksi. 14 vuorokauden ikäisillä näytteillä oli kitkakulman arvo $\phi = 36...70^\circ$ ja koheesioarvo $c = 185...355 \text{ kN/m}^2$, kun tiiviysaste oli $D = 90...100\%$. Hanasaaren A-laitoksen lentotuhkan lujuusarvot olivat suurempia kuin B-laitoksen. 28 vuorokauden ikäisten näytteiden vastaavat parametrit olivat $\phi = 57...77^\circ$ ja $c = 64...490 \text{ kN/m}^2$.

Lentotuhkan huonoin kitkakulman arvo oli puristuslujuudeltaan B-laitoksen huonoimmalla tuhkanäytteellä ja paras B-laitoksen puristuslujuudeltaan parhaalla näytteellä. Minkään B-laitoksen näytteen koheesio ei yltänyt arvoon $c = 300 \text{ kN/m}^2$, jota tulosta ei puolestaan yksikään A-laitoksen tuhkanäyte alittanut. On mahdollista, että näissä B-laitoksen näytteissä ei lujittumista päässyt riittävästi tapahtumaan näytteen tiivistyspinnoissa ja murtuminen tapahtui jotakin tiivistyspintaa pitkin. Kyseessä olevaa haittaa pyrittiin eliminomaan karhentamalla tuhkan pinta ennen uuden kerroksen levittämistä ja tiivistämistä näytekappaletta valmistettaessa.

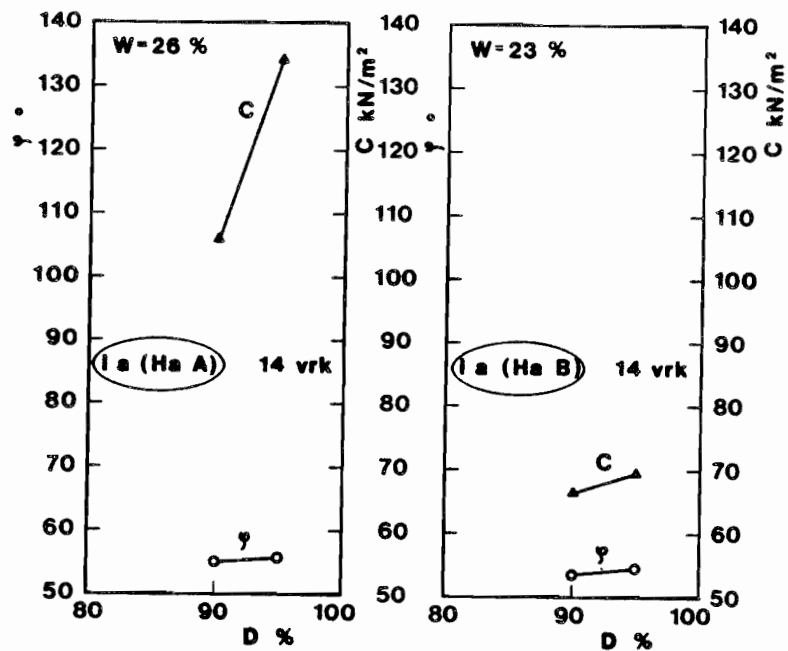
Englantilaisen ja amerikkalaisen kivihiilen tuhkan lujuustutkimus

Edellisen tutkimuksen lisäksi tehtiin Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen geotekniikan laboratoriossa täydentävä tutkimus, n:o GEO 1226, koska puolalainen kivihiili vaihtui välillä englantilaiseen ja amerikkalaiseen. Koetulokset esitetään kuvissa 19 ja 20.

Lujittumattoman lentotuhkan kitkakulma oli tutkimuksessa $\phi = 28...37^\circ$ ja koheesio $c = 49...67 \text{ kN/m}^2$. Kokeet tehtiin optimikosteudessa ($w = w_{\text{opt}} \pm 2 \%$) ja 90 sekä 95 % tiiviystiloissa. A-laitoksen tuhkalta saatiin paremmat lujuusparametrit kuin B-laitoksen tuhkalta.



Kuva 19. Rasialeikkauskokeissa amerikkalaisen tai englantilaisen kivihiilen tuoreelle tuhkalta saadut ϕ :n ja c :n arvot eri tiiviystiloissa. $w = w_{\text{opt}} \pm 2 \%$. $Ia (Ha A)$ ja $Ia (Ha B)$ ovat tuhkatyyppien tunnuksia.



Kuva 20. Rasialeikkauskokeissa amerikkalaisen tai englantilaisen lujittuneelle tuhkalle saadut ϕ :n ja c :n arvot eri tiiviystiloissa $w = w_{\text{opt}} \pm 2\%$. Ia (Ha A) ja Ia (Ha B) ovat tuhkatyyppien tunnuksia.

Lujittuneen lentotuhkan lujuuskokeet tehtiin 14 vrk:n ikäisinä. Kitkakulma oli $\phi = 54...56^\circ$ ja koheesio $c = 67...134 \text{ kN/m}^2$. B-laitoksen tuhkan koheesio arvot olivat huomattavasti A-laitoksen arvoja pienemmät.

Koetulosten arviointi

Tuhkan leikkauslujuuden tilastollisesti luotettava määrittäminen vaatisi huomattavasti laajempaa koesarjaa erilaisista tuhkatyypeistä ja eri tuhkaeristä. Tulokset sopivat kuitenkin keskenään hyvin yhteen ja ne antanevat suuntaa niille periaatteille, joiden puitteissa tuhkan lujuusominaisuuksia voidaan arvioida.

Koheesion merkitys on tehdyissä kokeissa vähäinen Myllypuron lentotuhkalla ja pohjakuonalla. Muilla tuhkatyypeillä koheesion merkitys vähenee silloin, kun vesipitoisuus laskee reilusti optimin alapuolelle. Tästä syystä Helsingin voimalaitosten tuottama kivihiilituhka voidaan yleensä luokitella ominaisuuksiltaan välimaalajien kaltaiseksi. Kivihiilituhkalle saadut alimmat lujuusparametrien arvot esitetään taulukossa 8. Vertailuna esitetään eräiden luonnonkiviainesten vastaavat keskimääräiset arvot.

Taulukko 8.

Tuoreen kivihiilituhkan alimmat lujuusparametrien arvot kun $w = w_{opt} \pm 2\%$ ja $D \geq 90\%$ ja eräiden luonnonkiviainesten keskimääräisiä lujuusparametrien ominaisarvoja.
p = puolalaisen kivihiilen tuhka,
am = amerikkalaisen tai englantilaisen kivihiilen tuhka.

Tuhkatyyppi	ϕ (°)	c (kN/m ²)
Ia (p)	36	23
Ia (am)	28	49
Ib (p)	34	-
II (p)	42	15
III (p)	36	-
Kiviainestyyppi	ϕ (°)	c (kN/m ²)
Louhe	45	-
Sora	36	-
Hiekka	34	-
Karkea siltti	30	-

Lentotuhkan Ia lujuus laskee selvästi heti murtuman jälkeen. Lentotuhkalla Ib ja pohjatuhkalla lujuuden alentuminen sen sijaan on vähäisempää ja pohjakuonan koetuloksista ei lujuuden laskua voitu havaita. Pohjakuonalla on myös lujuuden kasvu muodonmuutoksen kasvaessa selvästi muita tuhkatyypejä hitaampaa.

Helppojen rakennuskohteiden suunnittelussa sekä esisuunnitteluvaiheeseen ja luonnosvaiheeseen liittyvässä suunnittelussa voitaneen Helsingissä käyttää taulukossa 8 esitettyjä lujuusparametreja.

Vaativien ja erittäin vaativien kohteiden pohjarakennussuunnittelussa on käytettävän tuhkaerän ominaisuuksista varmistuttava erikseen. Tuhkaerän ominaisuuksien yksityiskohtainen tutkiminen on erityisen tärkeätä, jos on tarvetta käyttää korkeita lujuusarvoja.

Valmiskin tuhkarakenne imee itseensä kosteutta. Vesipitoisuuden kasvu on otettava huomioon käyttötilan lujuusominaisuuksiin vaikuttavana tekijänä sekä esim. tilavuuspainoa kasvattavana tekijänä.

Lujittuneen lentotuhkan leikkauslujuuden selittäminen on mutkikkaampaa kuin lujittumattoman tuhkan, eikä se ilmeisesti koostu pelkästään kitkasta ja koheesiosta. Ainakaan koheesion luonne ei ole sama kuin esimerkiksi savella, jossa rakeet ovat vesi-vaippojen ympäröiminä. Lujittavat silikaattikemian piiriin kuuluvat monimutkaiset sidokset muistuttavat sementin sitoutumista. Kuitenkin niilläkin leikkauslujuuden voidaan käytännössä olettaa koostuvan kitkasta ja koheesiosta samalla tavoin kuin kiviaineksilla yleensä.

Kitka ja koheesio lisääntyvät yleensä voimakkaasti lujittumisen edistyessä. Kokeissa saavutetut arvot ovat erittäin korkeat. Tällä on merkitystä suurta lujuutta vaativien maarakenteiden rakentamisessa. Kuitenkaan tutkimuksessa saatuja 14 ja 28 vuorokauden arvoja ei pidä ottaa sellaisenaan lähtökohdaksi käytännön suunnittelussa, koska laboratorio-olosuhteissa saavutetaan suurempia lujuuksia kuin kentällä, jossa vuodenaika ja muut sääolot hidastavat ja jopa ehkäisevät lujittumisprosessia.

Lujittuneen lentotuhkan murtuminen on hyvin nopeaa ja leikkauslujuus laskee heti jäännöslujuuden tasolle, jonka suuruus saattaa olla vain muutama prosentti huippulujuuden arvosta.

Lujittuneen lentotuhkan koetulosten yhteenveto esitetään taulukossa 9.

Taulukko 9.

Hanasaaren lujittuneen lentotuhkan leikkauslujuustulosten yhteenveto. $w = w_{opt} \pm 2 \%$. $D \geq 90 \%$. p = puolalaisen kivihiilen tuhka, am = amerikkalaisen tai englantilaisen kivihiilen tuhka.

Tuhkatyyppi	ikä (vrk)	ϕ (°)	c (kN/m ²)
Ia (Ha A, p)	14	67...70	265...355
Ia (Ha A, am)	14	55...56	106...134
Ia (Ha B, p)	14	36...51	185...279
Ia (Ha B, am)	14	54...55	67...70
Ia (Ha A, p)	28	64...74	312...490
Ia (Ha B, p)	28	57...77	64...288

Tuhkaerän lujittumisominaisuudet on tutkittava kutakin rakennuskohdetta varten erikseen, koska etenkin muissa kuin puolalaisessa kivihiilituhkassa on tuhkaeriä, joissa lentotuhkan lujuuden kehitys on erittäin heikkoa.

Yleensä kaikilla tuhkatyypeillä saavutetaan parhaat leikkauslujuuden arvot optimivesipitoisuudessa hyvin tiivistetyillä koekappaleilla. Poikkeuksen muodostaa vain Myllypuron voimalaitoksen lentotuhka, jolle on vaikea löytää sidonnaisuutta em. tekijöihin.

4.7

Kokoonpuristuvuus Ödometrikokeet

Kivihiilituhkalla tehtiin ödometrikoesarja, jossa maksimikuormituksena käytettiin 400 kN/m². Näytteet valmistettiin optimivesipitoisuudessa tiivistäen pudotusvsaralaitteen muotissa. Näytteiden tiiviysaste vaihteli 90 ja 95 % välillä. Kaikkien tuhkatyyppien kokoonpuristuminen tapahtui kokeissa nopeasti. Yli 75 % painumasta tapahtui jo ensimmäisten 15 sekunnin kuluessa.

Tiivistetyn lentotuhkan kokoonpuristuminen oli 400 kN/m² kuormituksella 0,6...2,4 %. Pohjatuhkan kokoonpuristuminen oli vastaavasti 2...3 % ja pohjakuonan 4...5 %. Jälkimmäisten suuremmat arvot selittyvät osaksi rakeiden hauraudesta ja huokoisuudesta. Vastaavan dynaamisen kuormituksen alaisena pohjatuhkan ja pohjakuonan kokoonpuristuminen on ilmeisesti edellä esitettyjä arvoja suurempi rakeiden osittaisesta rikkoutumisesta johtuen.

Taulukko 10.

Kivihiilituhkan kokoonpuristumat ödometrikokeessa erään koesarjan perusteella 200 kN/m² ja 400 kN/m² kuormituksilla. Vertailumateriaalina on käytetty eristyshiekkaa.

Tuhkatyyppi	Kokoonpuristuma (%) eri kuormituksilla	
	200 kN/m ²	400 kN/m ²
Lentotuhka Ia (0 vrk)	0,4 - 1,3	0,6 - 1,5
Lentotuhka Ia (14 vrk)	1,2 - 1,4	1,7 - 2,0
Lentotuhka Ia (28 vrk)	0,7 - 1,9	1,1 - 2,4
Pohjatuhka II	1,8	2,5
Pohjakuona III	2,8	4,5
Eristyshiekka	1,6	2,2

Taulukossa 10 esitettyjen tulosten perusteella lujuuttuneen lentotuhkan kokoonpuristuminen on keskimäärin suurempaa kuin vasta tiivistetyllä tuoreella lentotuhkalla. On ilmeistä, että lentotuhkarakenteessa tapahtuu lujuuttumisen aikana muutoksia, joiden jälkeen huokosvettä on alkuperäistä vähemmän ja tyhjää huokos tilaa enemmän kuin tuoreessa lentotuhkarakenteessa. Tällöin voi suurilla kuormituksilla myös kokoonpuristuma olla suurempi. Kuitenkin kaikilla lentotuhkanäytteillä todetut kokoonpuristumat ovat käytännön rakentamisen kannalta pieniä.

Pohjatuhkalla ja -kuonalla kokoonpuristuminen on lentotuhkaan verrattuna 1,5...2,5 -kertainen. Kokoonpuristuminen tapahtuu nopeasti kuormituksen liisäämisen jälkeen. Kokoonpuristuvuuteen voimakkaimmin vaikuttava tekijä on kitkamaalajien tapaan materiaalin tiiviys (huokoisuus).

4.8

KantavuusKantavuuteen vaikuttavia tekijöitä

Tuhkarakenteen kantavuuteen vaikuttavat muiden maa-rakenteiden tavoin rakenteen tiiviys, vesipitoisuus ja paksuus sekä pohjamaan kantavuus. Vaikka kaikilla kivihiilituhkatyypeillä on laboratoriokeiden perusteella hyvä leikkauslujuus (kohta 4.6), niiden käytännön kantavuutta (ns. tieteellinen kantavuus) heikentäviä tekijöitä on enemmän kuin esimerkiksi hiekalla ja soralla.

Lentotuhkarakenteen kantavuus pienenee selvästi vesipitoisuuden ylittäessä optimivesipitoisuuden muutamalla prosenttiyksiköllä. Myös tiiviin lentotuhkarakenteen kantavuus saattaa pienentyä, mikäli lentotuhka ei ole ehtinyt vielä lujittua. Sen sijaan hyvin tiivistetyn ja lujittuneen lentotuhkarakenteen kantavuuteen eivät vesipitoisuuden vaihtelut vaikuta, vaan kantavuus lisääntyy entisestään lujittumisen edistyessä.

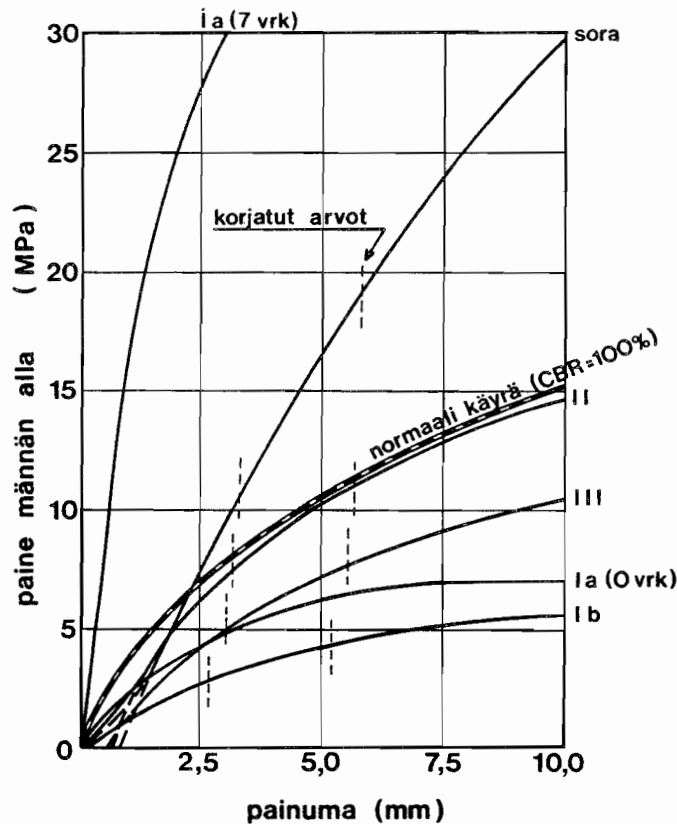
Karkeista tuhkatyypeistä (pohjatuhka ja pohjakuona) tehtyjen rakenteiden kantavuusarvot ovat luonnonkiviaineksista tehtyjen rakenteiden arvoja pienempiä, koska huokoiset rakeet murskaantuvat helposti esimerkiksi levykuormituskokeessa aiheuttaen rakenteessa suurempia muodonmuutoksia kuin sora- tai hiekkarakennetta kuormitettaessa.

Kantavuuskokeiden tulokset

Tuhkatyyppien kantavuuksia on mitattu levykantavuus-, pudotuspaino- ja CBR (California Bearing Ratio) -laitteella. Taulukossa 11 esitetään yhteenveto keskimääräisistä koetulosten arvoista sekä kuvassa 21 CBR-kokeiden tuloskäyrät.

Taulukko 11. Kivihiilituhkan keskimääräisiä tieteellisen kantavuuden arvoja levykantavuus-, pudotuspaino- ja CBR-kokeissa. Vertailumateriaalina on jakavan kerroksen sora. Lujittumisaika 7 vrk tarkoittaa lämpösummaa 112 vrk °C, mikä vastaa laboratorio-oloissa (NTP) 7 vrk:n aikaa. (Lujittumista tapahtuu pääasiassa vain yli +4 C:n lämpötiloissa).

Materiaali	Levyk.koe E_2 MN/m ²	CBR-luku %	Pudotusp.koe E_0 MN/m ²
Lentotuhka I a (tuore)	190 (0 vrk)	60 (0 vrk)	-
Lentotuhka I a (lujittunut)	400-500 (≥ 7 vrk)	410 (7 vrk)	540 (7 vrk)
Lentotuhka I b	30	40	50
Pohjatuhka II	120	105	200
Pohjakuona III	60	70	100
Jakava sora	190	180	460



Kuva 21. Kivihiilituhkan ja jakavan soran CBR-kokeiden tulokset.

Talonrakennustekniikassa sekä muussa rakentamisessa, jossa maarakenne tiivistetään pääasiassa staattista kuormitusta varten, kuvaa levykantavuuskokeen E_1 arvo paremmin maarakenteen kantavuutta (taulukko 12).

Taulukko 12. Hyvin tiivistetyn kivihiilituhkan ja jakavan soran levykantavuuskokeen E_1 -arvon vaihteluvälejä.

Materiaali	Levykuormituskoe E_1 , MN/m ²
Lentotuhka Ia (tuore)	50...70
Lentotuhka Ia (≥ 7 vrk)	>150
Lentotuhka Ib	15
Pohjatuhka II	30...50
Pohjakuona III	15...30
Jakava sora	50...90

Kantavuuskokeiden perusteella on tuhkatyypeille määritetty tuhkarakenteiden mitoittamista varten vastaavuuskertoimet. Vastaavuuskerroin on luku, joka ilmoittaa, kuinka monta millimetriä jotakin materiaalia tarvitaan, jotta saavutettaisiin sama kantavuus kuin murskatusta kiviaineksesta tehdyllä 1 mm paksulla kerroksella asfalttibetonia.

Taulukossa 13 esitetään saatujen kantavuustulosten perusteella arvioidut tuhkan vastaavuuskertoimien vaihtelurajat /7/. Samassa taulukossa esitettyjen muiden materiaalien arvot on otettu lähteestä /5/.

Taulukko 13. Tuhkan ja perinteisten maarakennusmateriaalien vastaavuuskertoimia /7/.

Materiaali	Vastavuuskerroin s
Asfalttibetoni +20°C	1.00
Asfalttibetoni +15°C	0.87
Maabetoni	1.25...1.75
Murske	2.00...2.50
Murskesora	2.25...2.75
Sora	2.50...3.00
Hiekka	3.00...4.00
Lentotuhka (Ia) ¹⁾	2.50...3.00
Lentotuhka (Ia) ²⁾	1.50...2.00
Lentotuhka (Ib)	5.00...8.00
Pohjatuhka (II)	2.75...3.25
Pohjakuona (III)	3.00...3.50

¹⁾ Lujittuminen vähäistä

²⁾ Lujittunut rakenne, josta poratun koeliriön (h/d 1,5) 1-akselinen perustuslujuus on 1.0...3.0 MPa tai normaaliolosuhteissa säilytetyn Proctor-koeliriön (parannettu Proctor) 14 vrk:n 1-akselinen puristuslujuus on 2.0...6.0 MPa.

Vaikka tarkoitukseensa tyypiltään sopivan tuhkan kantavuus olisikin riittävä, tuhkaa ei voida kuitenkaan käyttää rakenteen pintakerrokseen. vaan tuhkarakenne on aina suojattava luonnon maa-aineksella. Geoteknisessä mielessä ihanteellisin tuhkamateriaalien sijoittamisjärjestys maarakenteessa on sellainen, että huonommin kantavat tuhkalaadut tulisi sijoittaa syvälle ja paremmin kantavat lähelle pintaoisia. Tarvittaessa voidaan eri materiaaleista tehdyt rakennekerrokset erottaa sekoittumisen estämiseksi suodatinkankaalla.

Kuvassa 22 on esitetään esimerkki kivihiilituhkan käytöstä vaihtoehtoisena materiaalina tontin tie- ja pysäköintialueiden rakennekerroksissa /7/.

Asfalttipäällysteiset rakennekerrokset pohjamaaluokittain		Liikenneluokka			
		1		2	
Normaali- rakenne (= NR)	Tuhka- rakenne (= TR)	Jalkakäytävät, pyörä- tiet ja piha-alueet, joilla on vain kevyttä ajoneuvoliikennettä		Pysäköinti- ja piha- alueet, joilla on ke- vyttä ajoneuvoliiken- nettä ja vain vähän raskasta liikennettä	
NR	TR	NR	TR	NR	TR
 (A-B)	AB MS (A-B)	30...50 50 80...100	30...50 50 80...100 (Ei tuhkaa)	50 100 150	50 100 150 (Ei tuhkaa)
 (C)	AB MS Sr (C)	30...50 50 100 180...200	30...50 50 100 180...200	50 100 100 250	50 100 100 250
 (D)	AB MS Sr Hk (D)	30...50 50 100 100 280...300	30...50 50 200*) 280...300 (220...240)*)	50 100 100 100 350	50 100 200*) 350 (290)*)
 (E-F)	AB MS Sr Hk (E-F)	30...50 50 100 200 380...400	30...50 50 300*) 380...400 (290...310)*)	50 100 100 200 450	50 100 300*) 450 (360)*)

AB = Asfalttibetoni
MS = Murskesora
Sr = Sora
Hk = Hiekka
LT = Lentotuhka
PT = Pohjatuhka

*) Mikäli käytetään lentotuhkaa, jonka lujittu-
minen on varmistettu ennakkokokein tai
lujittumista on parannettu lisäsideaineella,
voidaan tuhkakerrosta ohentaa 30 %.

Pohjamaaluokka	Maalaji
(A - B)	Kallio tai sora
(C)	Hiekka
(D)	Kuivakuorisavi tai hiekkamoreeni
(E - F)	Siltti, silttimoreeni tai pehmeä savi

Kuva 22. Kivihiilituhkan käyttö tontin tie- ja pysä-
köintialueiden rakennekerroksissa sekä vas-
taavat normaalirakenteet /7/.

5. YMPÄRISTÖGEOTEKNISET OMINAISUUDET

5.1

Pölyäminen ja liettyminen

Kun suojaamaton lentotuhkarakenne on alttiina kuivattavalle säälle, kovalle tuulelle tai liikenteelle lyhyenkin ajan, pintakerros kuivuu ja alkaa pölytä. Pölyäminen rakennuspaikalla on epämiellyttävää ympäristölle, vahingollista hengityselimille ja lisäksi haitallista moottoroiduille työvälineille. Kuivien olosuhteiden aikana tai jos seuraavan kerroksen rakentaminen viivästyy, on välttämätöntä ryhtyä toimenpiteisiin pölyämisen estämiseksi.

Lentotuhkarakenteen pölyäminen on helposti hallittavissa. Päällimmäinen tiivistetty kerros voidaan pitää jatkuvasti kosteana kastelun avulla. Liikennettä voidaan tarvittaessa rajoittaa pölyämiselle alttiin kerroksen päällä. Luiskat voidaan väliaikaisesti peittää ohuella kerroksella multaa, kosteaa pohjatuhkaa tai muuta karkearakeista materiaalia, joka ei pölyä herkästi. Joissakin tapauksissa voi tulla kysymykseen myös pinnan stabiloiminen pienellä määrällä sementtiä tai pinnan käsittely bitumiemulsiolla. Edellä mainitut toimenpiteet soveltuvat myös välivarastokasojen pölyämisen estämiseen.

Lentotuhka liettyy ennen tiivistämistä tarttuen helposti kenkiin ja työvälineisiin, mikäli sen vesipitoisuus ylittää optimiarvon (lentotuhkaerästä riippuen $w_{opt} = 15...28 \%$ kuivapainosta). Tämän vuoksi lentotuhkasta ei voida rakentaa päiväkausia jatkuvalla sateella, vaan työ on keskeytettävä ja tuhka-kerroksen pinta on suojattava vedenpitävällä peitteellä. Myöskään valmiin lentotuhkarakenteen pintaa ei tulisi jättää useiksi päiviksi paljaaksi, vaan se olisi liettymisvaaran takia suojattava luonnonkiviaineskerroksella. Samassa määrin ei ongelmaa esiinny pohjatuhkalla ja pohjakuonalla.

5.2

Vaikutukset pinta- ja pohjavesiin

Lumen sulamisvesien ja kovien sateiden johdosta suojaamattomat lentotuhkaluiskat joutuvat alttiiksi virtaavan veden aiheuttamalle eroosiolle, joka voi aiheuttaa pintavesien likaantumista. Tämän vuoksi on suositeltavaa, että pinnat, joita ei ole peitetty päällysteellä tai vastaavalla, suojataan mahdollisimman varhaisessa vaiheessa pysyvillä toimenpiteillä. Kasvillisuus vastustaa tehokkaasti eroosiota. Kasvien juurtumista voidaan nopeuttaa peittämällä luiskat ohuella valmiiksi lannoitetulla ja kylvetyllä multakerroksella.

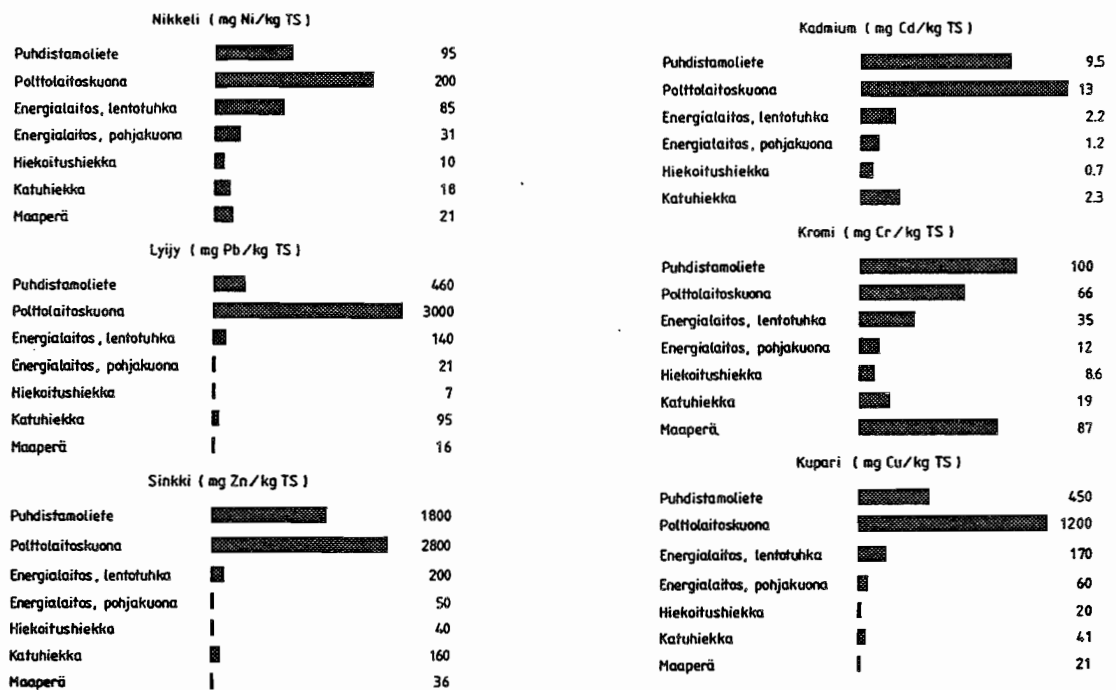
Tärkein pohjavesiä koskeva ongelma on raskasmetallien, kloridien ja sulfaattien mahdollinen uuttautuminen. Kemialliset ainesosat esiintyvät kivihiilituhkassa suunnilleen samansuuruisina määrinä kuin tavanomaisissa maa-aineksissa ja kivilajeissa. Poikkeuksena ovat hivenaineet, jotka ovat rikastuneet palamisprosessin aikana.

Tuhkassa olevat hivenaineet voivat olla yhdistyneinä alumosilikaattiseen sideaineeseen, jolloin ne ovat ympäristön kanssa kemiallisesti stabiileja sekä säänkestäviä, eivätkä tämän vuoksi uuttaudu helposti. Tämän vuoksi uutoksien hivenainepitoisuutta ei voida ennustaa pelkästään kivihiilituhkan kemiallisen koostumuksen perusteella. Hivenaineet voivat olla myös absorboituneina tuhkapartikkelien pintaan, jolloin ne uuttautuvat helpommin.

Helppoliukoisia suoloja ovat esimerkiksi kloridit ja sulfaatit. Suurina pitoisuuksina kivennäissuolat voivat vapauttaa maaperään kerääntyneitä vetyioneja. Tämän seurauksena olisi pohjaveden hapantuminen ja riski maaperän omien metallivarastojen vapautumisesta, mikä näkyisi kohonneina metallipitoisuuksina alueen pohjavesivarastoissa.

Tuhkauutoksen pH-arvolla voidaan kontrolloida tuhkan sisältämien alkuaineiden uuttautumiskykyä. Tuhkan korkeasta kalsium- ja magnesiumpitoisuudesta johtuen ovat uutokset alkalisia. Alkalisuus vähentää useiden hivenaineiden liikkuvuutta. Edellä mainittu puskuroiva ominaisuus vähenee kuitenkin ajan mittaan happaman sadeveden ja puskuroivien ainesten uuttautumisen johdosta. Raskasmetallit uuttautuvat helpoimmin pH:n ollessa alle 5.

Helsingin kaupungin vesi- ja viemärlaitoksen kemian laboratoriossa tehtiin vuoden 1983 aikana koesarja, jossa kartoitettiin eräiden metallien kokonaispitoisuudet sekä vastaavasti liukoisten metallien pitoisuudet muunmuassa jätevesilietteestä, polttolaitoskuonasta, energialaitoksen lentotuhkasta (Ia), pohjatuuhkasta (II) ja pohjakuonasta (III) sekä käyttämättömästä hiekoitushiekasta ja käytetystä katuhiekasta. Tuloksista voitiin todeta, että Helsingissä tuotetussa kivihiilituuhkassa näiden metallien pitoisuudet ovat samaa suuruusluokkaa kuin Suomen maaperässä keskimäärin (kuva 23). Kuvassa 24 esitetään samojen materiaalien helppoliukoisen, happoliukoisen ja niukkaliukoisen fraktion osuudet. Happoliukoiset metallit uuttuvat myös happamalla sadevedellä ja ovat siten helposti kasvien saatavissa ja voivat siirtyä esimerkiksi valumavesien mukana vesistöihin tai pohjaveteen. Happoliukoiset metallit ovat kemiallisia yhdisteitä, jotka eivät liukene välittömästi, mutta saattavat uuttua olosuhteiden muuttuessa tai pitkäaikaisessa huuhtelussa. Niukkaliukoiset metallit ovat joko orgaanisesti sitoutuneita tai niukkaliukoisia kemiallisia yhdisteitä, esim. oksideja.

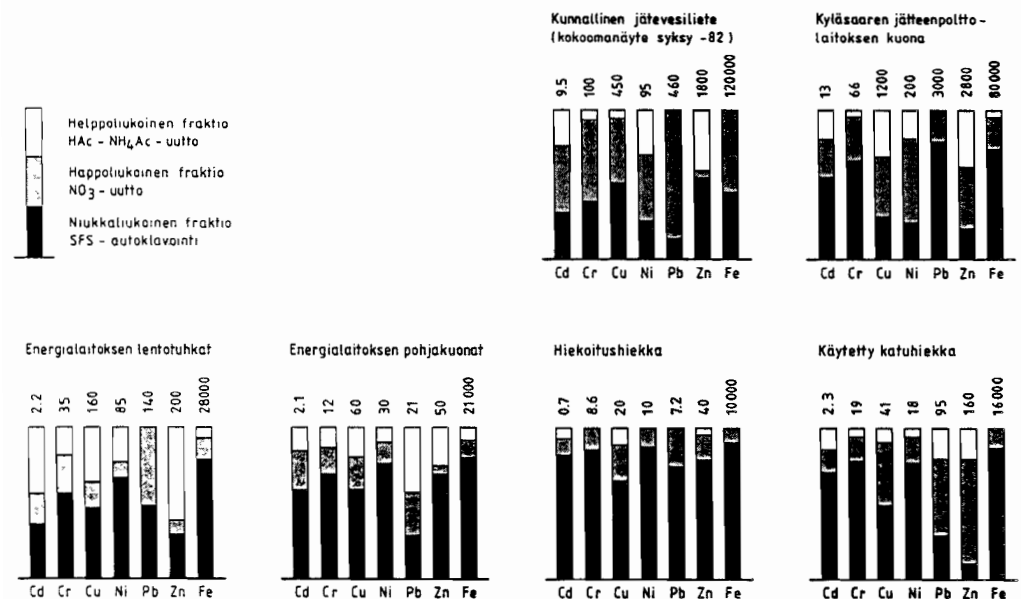


Kuva 23. Helsingin lentotuhkan (Hanasaaren B-voimalaitoksen ja Myllypuron voimalaitoksen lentotuhkan tulosten keskiarvo) ja pohjakuonan (Hanasaaren A- ja B-laitosten pohjatuuhkan sekä Myllypuron voimalaitoksen pohjakuonan tulosten keskiarvo) kokonaisraskasmetallipitoisuudet /8/. Vertailuna esitetään myös puhtaan hiekoitushiekan, käytetyn katuhiekan, jätevesilietteen ja Kyläsaaren lakkautetun polttolaitoksen kuonan vastaavat arvot.

Taulukossa 14 esitetään maanviljelyskäyttöön kelpaavan jätevesilietteen suurimmat sallitut raskasmetallipitoisuudet.

Taulukko 14. Maanviljelyskäyttöön kelpaavan jätevesilietteen suurimmat sallitut raskasmetallipitoisuudet (lääkinthallitus, yleiskirje n:o 1637/77).

Metalli	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
Jätevesilietteen sallittu maksimipitoisuus (mg/kg)	30	1000	3000	500	1200	5000



Kuva 24. Helsingin lentotuhkan (Hanasaaren B-laitoksen ja Myllypuron voimalaitoksen lentotuhkan tulosten keskiarvo) ja pohjakuonan (Hanasaaren A- ja B-laitosten pohjatuhan sekä Myllypuron voimalaitoksen pohjakuonan tulosten keskiarvo) helppoliukoisen, happoliukoisen ja niukkaliukoisen fraktion osuudet kokonaisraskasmetallipitoisuudesta /8/. Vertailuna esitetään myös jätevesilietteen ja Kyläsaaren jätteenpolttolaitoksen kuonan vastaavat arvot.

Kivihiilituhka luokitellaan ulkomaisissa tutkimuksissa yleensä ympäristölle haitattomaksi. On kuitenkin syytä tarkastella eräitä luonnollisia ympäristövaikutusten vähentämismekanismeja ja teknisiä toimenpiteitä, joita on käytettävissä haittojen minimoimiseksi.

Luonnon mekanismeja vaikutusten vähentämiseksi ovat:

- maa-aineksen puskurointikapasiteetti
- hivenaineiden hajaantuminen eräissä maalajeissa ja orgaanisissa aineksissa
- maa-aineksen pieni vedenläpäisevyys
- lentotuhkan potsolaaniset ominaisuudet.

Useimpien hivenmetallien liukenevuus vähenee, kun pH-arvo kasvaa. Savipitoisuus ja orgaanisten aineiden läsnäolo voi lisätä voimakkaasti hivenmetallien hajaantumista ja siten vähentää niiden vaikutusta. Lisäksi savi absorboi metalli-ioneja uutoksesta sekä hidastaa uutosvesien kulkua huonon vedenläpäisevyyden vuoksi. Kadmiumin, lyijyn ja nikkelin liikkuvuus on saven ja orgaanisten aineiden vaikutuksesta vähäistä näiden ja raskasmetallien yhtymistäipumuksen vuoksi. Potsolaanisilla lentotuhkilla itselujittuvat ominaisuudet pienentävät suotovesien läpäisykykyä ja ehkäisevät hivenmetallien liikkumista.

Luonnollisten vaikutusten vähentämismekanismien ohella voidaan hivenmetallien uuttautumista tuhkarakenteista valvoa eräillä rakennusteknisillä toimenpiteillä:

- Huolehditaan siitä, ettei lumen sulamisvesien ja rankkasateiden aiheuttamaa eroosiota pääse syntymään.
- Salaojituksella kerätään uutosvedet sadevesien keräysjärjestelmään.
- Tuhkarakenteet tiivistetään huolellisesti.
- Rakenteen pinnat muotoillaan siten, että sadevedet poistuvat mahdollisimman nopeasti rakenteen päältä.
- Suojaamaton tuhkarakenne päällystetään mahdollisimman aikaisessa vaiheessa.
- Suunnataan rakentaminen etupäässä savikkoalueille.
- Tarkkaillaan uutosvesien laatua.

5.3

Radioaktiivisuus

Kivihiilessä kuten kaikkialla maankuoressa, esiintyy pieniä määriä luonnon pitkäikäisiä radionuklideja, uraania ja toriumia, jotka synnyttävät osan niin kutsutusta taustasäteilystä. Ihmisen säteilyaltistuksen kannalta merkityksellinen on uraanin hajoamisarjaan kuuluva kaasumaisena esiintyvä radonisotoppi, ^{222}Rn , jonka hajoamistuotteet aiheuttavat terveydelle vaarallista säteilyä. Radonia syntyy radiumin (^{226}Ra) hajotessa, puoliintumisajan ollessa 3,8 vuorokautta.

Radonkaasun pitoisuus (esimerkiksi huoneilmassa) ilmoitetaan aktiivisuutena tilavuusyksikköä kohti. Aktiivisuus tarkoittaa hajoamisten lukumäärää aikayksikössä. SI-järjestelmässä aktiivisuus ilmoitetaan becquerel-yksiköissä (Bq). Jos kuutiometrissä ilmaa tapahtuu yksi radonhajoaminen sekunnissa, on radonpitoisuus 1 Bq/m^3 .

Vain pieni osa maankuoressa muodostuvasta radonista pääsee vapaaseen ilmaan. Radonin erittymisnopeus (ekshalaationopeus) materiaalista sen pinta-alayksikköä kohti on suoraan verrannollinen materiaalin radiumpitoisuuteen (Bq/kg), mutta verrannollisuuseroin on riippuvainen materiaalin sisäisistä ominaisuuksista kuten tiheydestä ja huokoisuudesta sekä materiaalin paksuudesta. Radonin erittymisnopeuden yksikkönä käytetään $\text{Bq/m}^2/\text{h}$.

Kun tarkastellaan kivihiilituhkan radioaktiivisuuden merkitystä, on tärkeätä suhteuttaa tulokset tavanno- maisten materiaalien luonnolliseen radioaktiivisuuteen, jolle ihminen on aina alttiina.

Viikin puhdistamon alueelle, jonka pintaosa koostuu moreenipitoisesta täytemaasta, rakennettiin syksyllä 1982 koekenttä, jonka materiaaleina olivat rinnakkain kaikki Helsingissä syntyvät kivihiilituhkatyy- pit ja karkea sora. Kentän pengerkorkeus oli keskimäärin 0,50 m. Säteilyturvallisuuslaitos mittasi marraskuussa 1982 koekentässä olevien materiaalien sekä vieressä olevan täytemaan radioaktiivisuuden. Tulokset esitetään taulukossa 15.

Taulukko 15.

Säteilyturvallisuuslaitoksen suorittaman radonekshalaatiomittauksen ja radionuklidianalyysin tulokset Helsingin Viikissä sijaitsevalta koekentältä.

Materiaali	Radonin ekshalaati- nopeus Bq/m ² /h		226Ra-pitoisuus Bq/kg
	piste 1	piste 2	
Ha 1t (Ia)	< 15	25	110,0
Ha pt (II)	< 15	< 15	113,0
My 1t (Ib)	< 15	< 15	122,1
My pk III	< 15	< 15	110,9
Sora	40	29	126,4
Täytemaa	97	15	42,5

Tuloksista havaitaan, että radonin erittymisnopeus kivihiilituhkasta on tässä vertailussa selvästi pienempi kuin soralla ja täytemaalla. Radiumpitoisuus on kaikilla samaa suuruusluokkaa lukuunottamatta täytemaata, jolla sen arvo on vähän alle puolet muiden materiaalien (myös soran) arvoista.

5.4

Soveltuvuus kasvualustaksi

Kivihiili on muodostunut kasvien aineksista, jotka ovat säilyneet täydelliseltä lahoamiselta suotuisassa ympäristössä ja myöhemmin muuttuneet erilaisten kemiallisten ja fysikaalisten tekijöiden vaikutuksesta. Kivihiilen mineraalikoostumus vastaa paljolti maata, missä kivihiiliesiintymän sijaintialueen kasvit ovat aikoinaan kasvaneet.

Kun kivihiili jauhetaan ja tämän jälkeen poltetaan voimalaitoksen uuneissa, tapahtuu siinä kemiallisia muutoksia. Eräät yleiset, kuten booria sisältävät yhdisteet, tulevat liukenevampaan muotoon. Toinen kivihiilituhkalle luonteenomainen piirre on liukenevien suolojen suhteellisen suuri määrä. Kivihiilituhka on alkalista. Tärkeä alkalisuuden lähde on hiilessä esiintyvä pieni määrä kalkkisälpää, josta tulee kalkkia, kun hiiltä poltetaan. Tämä ja magnesium nostavat kivihiilituhkan pH-arvon suuremmaksi kuin maalajien yleensä.

Kasvien kasvua yleensä haittaavia tekijöitä ovat suuri booripitoisuus, korkea alkalisuus ja liiallisten liukenevien suolojen mukanaolo tuhassa. Toisaalta alkalisuudesta johtuen kivihiilituhkalla on neutraloiva vaikutus liian happamien maiden käsittelyssä, mistä on etua kasveille.

Kivihiilituhka, kuten kasvumaa yleensä, voi edistää kasvua vain, kun kasveille oikeantyyppiset ravintoaineet ovat mukana oikeissa suhteissa. Tuhka ei sisällä riittävästi typpeä, ja se tarvitsee myös lisää fosfaattia. Näitä voidaan helposti lisätä käyttämällä lannoitteita, mutta typpi pitäisi olla mukana nitraatteina mieluummin kuin ammoniumsuoloina, jotka todennäköisesti menettävät typpensä, kun ne sekoitetaan alkaliseen tuhkaan. Kaliumia ja hivenaineita on yleensä riittävästi.

Kasvit voidaan karkeasti jaotella tuhkaa "sietäviin" ja "ei sietäviin". Palkokasveihin kuuluvat apilat ja rehumailanen ovat parhaiten kivihiilituhkaa sietäviä. Lisäksi ne pystyvät sitomaan ilmassa olevaa typpeä. Jotkut ruohot, erityisesti raiheinä, kasvavat hyvin kivihiilituhkassa. Viljelylajikkeista juurikas- ja kaalisukuun kuuluvat kasvavat parhaiten. Viljakasveista rukiin on todettu sietävän tuhkaolosuhteita. Useat kasvit eivät kuitenkaan siedä tuhka-kasvualustaa hyvin. Yleisimmistä viljelylajikkeista näitä ovat mm. kaura, ohra, herne, papu ja peruna.

Kasvien on todettu kasvavan yleensä paremmin vanhas-
sa, sään kuluttamassa tuhkassa kuin tuoreessa tuh-
kassa. Lisäksi voidaan todeta, että tuhkan vedenpi-
dätyskyky on tarpeeksi suuri riittävän kosteuden ta-
kaamiseksi useimmissa olosuhteissa. Tässä suhteessa
kivihiilituhka on parempi kuin useimmat maalajit.

Rakennusviraston puisto-osasto tarkkaili kesällä ja
syksyllä 1983 kohteita, joissa istutettavilla alu-
eilla oli käytetty kasvualustakerroksen alla tuhkaa.
Seurantakohteet ovat:

- 1) Laajasalon palloiluhallin istutusalueet
- 2) Itäkeskuksen ystävyyspuisto
- 3) Myllypurossa sijaitsevan omakotitalon seinän-
vierustat
- 4) Karpalotien istutuskaista

Seurannan perusteella ei ollut havaittavissa mitään,
mikä viittaisi siihen, että tuhka olisi vaikuttanut
haitallisesti kasvustoon. Tosin näissä kohteissa
tuhka ei ollut päällimmäisenä kerroksena eikä kasvu-
alustakerrokseen sekoitettuna, mutta kasveilla on
ollut juuriensa avulla suora tai välillinen yhteys
tuhkakerrokseen ravinteita maasta ottaessaan.

Taulukko 16.

Puut ja pensaat, joita voidaan kasvattaa lentotuhkapaikoilla engl. lähteen mukaan /1/.

Puut	Pensaat
Sietävät	
<i>Alnus glutinosa</i> (Tervaleppä)	<i>Artemesia abrotanum</i> (Aaprottimaruna)
<i>Gleditschia triacanthus</i> (Kolmioka)	<i>Atriplex Holimus</i> (eräs maltsalaji)
<i>Picea sitchensis</i> (Sitkan kuusi)	<i>Berberis thunbergii</i> (Japaninhappomarja)
<i>Populus alba</i> (Hopeapoppeli)	<i>Colutea arborescens</i> (eräs rakkopensaslaji)
<i>Populus nigra italica</i> (Pyramidipoppeli)	<i>Elaeagnus angustifolia</i> (Kaitakilseppensas)
<i>Salix</i> (Paju)	<i>Erica carnea</i> (Kanerva)
	<i>Ribes aureum</i> (Kultaherukka)
	<i>Tamarix gallica indica</i> (Tamariski)
Puolisietävät	
<i>Acer pseudoplatanus</i> (Vuorivaahtera)	<i>Berberis lineraifolia</i> (eräs happomarjalaji)
<i>Ailanthus glandulosa</i> (Jumaltenpuu)	<i>Ceanothus azureus</i> (eräs paatsamalaji)
<i>Betula verrucosa</i> (Rauduskoivu)	<i>Clematis vitalba</i> (Saksan metsäköynnös)
<i>Picea omorika</i> (Serbian kuusi)	<i>Hippophae rhamnoides</i> (Tyrni)
<i>Robinia pseudoacacia</i> (Valeakaasia)	<i>Hypericum calycinum</i> (eräs kuismalaji)
	<i>Ribes sanguineum</i> (Veriherukka)
	<i>Ulex europaeus</i> (Euroopan piikkiherne)
	<i>Hebe buxifolia</i> (Pensastädyke)

5.5

Soveltuvuus maanparannusaineeksi

Yleistä

Helsingin kaupungin vesi- ja viemärilaitoksen kemian laboratorio teki tuhkaprojektin toimeksiannosta merkittävän tutkimuksen Hanasaaren voimalaitoksen lento- ja pohjatuhkan käytöstä lannoitus- ja maanparannusaineena /10/. Tässä esitetään lyhennelmä tutkimuksen selostuksesta.

Kaupunki saa nykyisin sijoitetuksi suurimman osan jätevesilietteestään viljanviljelyyn lannoitteeksi ja maanparannusaineeksi. Maaperään joutuu lietteen ravinne- ja humusaineiden ohella myös haitallisia aineita, erityisesti raskasmetalleja. Myös käyttövedenpuhdistuksessa muodostuvaa alumiinipitoista vesilaitossakkaa johdetaan viemäriin Kyläsaaren puhdistamon viemäröintialueella.

Useiden raskasmetallien ja alumiinin mahdollisia haittavaikutuksia voidaan torjua nostamalla maan pH-astetta kalkin tms. neutraloivan aineen avulla. Vuosina 1983...1984 tehdyssä tutkimuksessa verrattiin Hanasaaren lentotuhkan, pohjatuhkan ja tavallisen maatalouskalkin vaikutuksia. Tutkimus tehtiin viljanviljelyn kenttäkokeena. Koekasvina oli kevätvehnä. Jätevesilietteitä (kolme lajia) ja e.m. neutralointiaineita levitettiin koealueelle kaistoittain toisiinsa nähden poikittain. Tällöin muodostui koeruudukko, jossa aineiden yhteisvaikutuksia voitiin tutkia. Ruutujen maanäytteistä analysoitiin tärkeimmät kasvutekijät ja haitta-aineet, ja ruuduilta saatu viljasato punnittiin. Jyvien sisältämistä raskasmetalleista analysoitiin kadmium, sinkki ja kupari.

Koejärjestely

Kokeeseen otettavat vesilaitos- ja jätevesilietetyypit levitettiin eri annoksina 6 m levyisiksi kaistoiksi pellolle. Kaistojen poikki levitettiin neutralointiainerivit, joiden leveys oli 10 m. Näin muodostettiin koeruutuja, joiden koko oli 6 x 10 m. Näihin kylvettiin kevätvehnä ilman lisälannoitusta. Ruuduista otettiin maaperänäytteet ja niiden happamuusastetta seurattiin kenttämittauksin. Muodostuva viljasato mitattiin ja sen mahdolliset haitta-ainepitoisuudet analysoitiin.

Neutralointiaineet:

Maatalouskalkki (kalkkikivijauhe), Mak
Hanasaaren B-voimalaitoksen lentotuhka, Let (Ia)
Hanasaaren B-voimalaitoksen pohjatuhka, Pot (II)

Neutralointiannokset:

Luvut: levitysmäärät tn/ha:

Mak 2 Mak 4

Let 25

Pot 25

Osa ruuduista jätettiin ilman neutralointiainekäsittelyä.

Lietteet:

- 1) Kyläsaaren jätevedenpuhdistamon mädätetty, linkokuivattu liete, jota oli varastoitu koekentän lähellä sijaitsevaan maapohjaiseen varastoaltaaseen marraskuussa 1982 ja joka ei sisältänyt Pitkälkosken alumiinipitoista vesilaitossakkaa (lyhennys Al₀).
- 2) Kyläsaaren jätevedenpuhdistamon mädätetty, linkokuivattu liete huhtikuulta 1983, jolloin Al-sakan syöttökokeilu oli ollut käynnissä n. 6 kk (lyhennys Al₁).
- 3) Kuten edellinen, mutta Al-sakan määrää oli lisätty keinotekoisesti sekoittamalla sitä lingottavan lietteen joukkoon. Tavoitteena oli nostaa Al-sakkapitoisuus tasolle, jolla se olisi, jos Pitkälkosken lisäksi myös Vanhankaupungin Al-sakka johdettaisiin Kyläsaareen (lyhennys Al₂).

Lieteannokset:

0, 35, 100 ja 160 tn/ha.

Koeruutujen määrä:

Erilaisia lietemäärien ja alumiiniväkevyyksien yhdistelmiä oli $3 \times 3 = 9$. Osa ruuduista toimi vertailuruutuina (0-kaistat). Kerranteita oli kolme. Lietekaistoja muodostui näin ollen yhteensä $10 \times 3 = 30$.

Edellisiin nähden poikittain levitettäviä neutralointiaineyhdistelmiä ja näiden vertailukaistoja oli kuusi. Näillä oli kaksi kerrannetta. Neutralointiainekaistoja oli näin ollen yhteensä $6 \times 2 = 12$.

Muodostuva koeruudukko sisälsi $30 \times 12 = 360$ koeruutua, joiden koko oli 6×10 m.

Analyysit ja mittaukset:

Maaperän tilan muutosta seurattiin maaperäanalyysillä, jonka teki Viljavuuspalvelu Oy. Siihen kuuluivat nk. perustutkimus (pH, johtoluku, liukoiset P ja K), Cd, Cr, Zn, Cu ja Fe.

Vesilaboratoriossa analysoitiin maaperän liukoiset Al, Ca, Mg ja K kahdella eri uuttomenetelmällä, sekä jyväsadon Cd, Cr, Zn ja Cu.

Lisäksi mitattiin maaperän alumiinipitoisuuden perustilaa (kokonais-alumiini) perusmaasta ja koekais-toilta, joissa oli Al₂-sakkaa sisältävää lietettä 160 tn/ha. Sato punnittiin ja sen kosteus määritettiin.

Vaikutus maaperän ominaisuuksiin

Taulukossa 17 esitetään yhteenveto kesällä 1983 otettujen maanäytteiden analyysitulosten tärkeimmistä havainnoista. Vastoin odotuksia kivihiilituhka ei nostanut maaperän pH-astetta. Tästä huolimatta lentotuhka alensi maan liukoisen alumiinin määrää saman verran kuin korkeampi annos maatalouskalkkia.

Taulukko 17. Yhteenveto maanäytteiden analyysituloksista /10/.

Maaperän ominaisuus ¹⁾	Neutralointiaineiden vaikutus ²⁾	Lietelajien ja -määrien vaikutus ³⁾
happamuusaste	MaK 2 ja MaK 4 nostivat 0,2...0,4 yksikköä LeT ja PoT: ei vaikutusta	ei vaikutusta
vaihtuva Ca	MaK 2 ja MaK 4 nostivat 10...120 % LeT ja PoT: ei vaikutusta	ei vaikutusta
fosfori	ei vaikutusta	sekä helppoliukoinen että kokonaisfosfori kohosivat
liukoinen alumiini	MaK 4 ja LeT alensivat muilla ei vaikutusta	vain n. 10 % lisäystä alumiinista esiintyi liukoisena
rauta	ei vaikutusta	ei vaikutusta
vaihtuva magnesium	LeT nosti 20...30 % muilla ei vaikutusta	ei selvää vaikutusta
vaihtuva kalium	ei vaikutusta	ei vaikutusta
boori	LeT nosti 50...80 % muilla ei vaikutusta	ei vaikutusta
kadmium	MaK 4 ja LeT alensivat 15...30 % PoT alensi 10 %	korkein lieteannos (160 tn/ha) nosti 13...33 % muut eivät
sinkki	MaK 2 nosti 10 % LeT alensi	lievä nostava vaik.
kupari	ei vaikutusta	ei vaikutusta

1) Viljavuuspalvelu Oy:n käyttämien nimitysten mukaisesti.

2) Lyhenteet: katso 5.5 kohta Koejärjestely.

3) Lietelajit ja -annokset: katso 5.5 kohta Koejärjestely

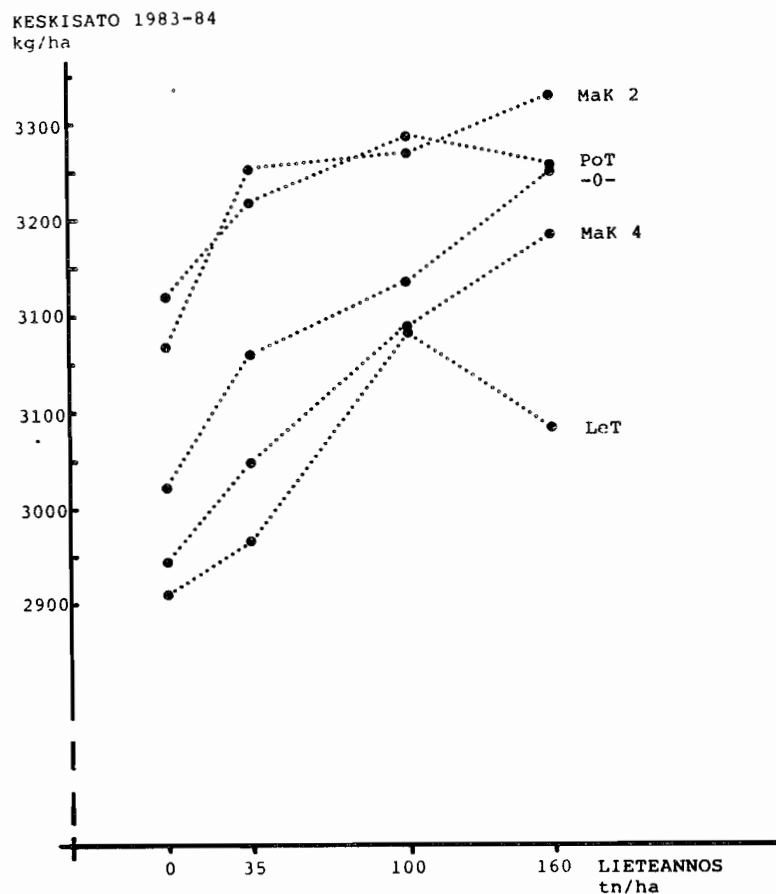
Lentotuhkan mukana maahan joutuu magnesiumia ja booria, jotka ovat arvokkaita kasvinravinteita. Molempien vaikutus tuli selvästi esiin kemiallisessa analyysissä. Pohjatuhkalla tai kalkilla ei ollut samaa vaikutusta.

Lietteiden mukana maaperään joutuu raskasmetalleja. Näistä useat ovat kasvulle välttämättömiä hivenaineita, mutta eräät taas ovat haitallisia. Lääkintöhallitus on yleiskirjeessään 1637/77 antanut ohjeet kadmiumin enimmäisannoksista jätevesilietteen käytön yhteydessä (taulukko 14).

Lentotuhkaa tai maatalouskalkkia käyttämällä (happoliukoisen) kadmiumin pitoisuus saatiin alenemaan jonkin verran. Sinkin ja kuparin pitoisuuksiin neutralointiaineilla ei ollut johdonmukaista vaikutusta.

Vaikutus sadon määrään

Voidaan todeta, että jätevesilietteet nostivat satoa odotetusti. Kahden vuoden yhteenlaskettu sadonlisäys vaihteli 12 ja 20 % välillä eri lietelajeja käytettäessä (kuva 25).



Kuva 25. Neutralointiaineiden ja jätevesilietteen vaikutus kevätvehnän satoon vuosina 1983...1984 /10/. (Lyhenteet: katso 5.5 kohta Koejärjestely).

Pohjatuhka (25 tn/ha) vaikutti sadon määrään samansuuntaisesti kuin alempi annos maatalouskalkkia (2 tn/ha). Molemmat nostivat satoa n. 5...6 %. Toisaalta korkeampi annos maatalouskalkkia (4 tn/ha) ja lentotuhka (25 tn/ha) vaikuttivat molemmat jonkin verran satoa alentavasti.

Kuten kuvasta 25 havaitaan, lento- ja pohjatuhkan vaikutusero pysyi lähes samansuuruisena eri lieteanostuksilla (6...11 %).

Vaikutus sadon laatuun

Maaperän neutraloinnin tiedetään vähentävän kadmiumin kulkeutumista kasveihin. Tässä kokeessa korkeampi annos maatalouskalkkia sekä lentotuhka alensivat kadmiumin pitoisuutta jyvissä sekä lietteellä lannoitetuilla että lannoittamattomilla vertailuruuduilla (taulukko 18). Pohjatuhkan vaikutus oli samansuuntainen, joskaan ei niin selvä. Kuparin ja sinkin pitoisuuksiin käsittelyillä ei ollut oleellista vaikutusta.

Taulukko 18.

Kuparin, sinkin ja kadmiumin pitoisuuksien muutokset kevätvehnän jyvissä. Vertailuruutujen pitoisuus = 100. Toinen sato on korjattu neutraloinnin jälkeen /10/.

Lietelaji/ neutr.aine ¹⁾	Ei lietettä			Lietettä 160 tn/ha		
	Cu	Zn	Cd	Cu	Zn	Cd
Al ₀ /O	100	100	100	93	110	148
MaK 2	110	115	150			
MaK 4	111	85	52			
LeT	106	110	69	95	111	89
PoT	85	89	89	86	106	143
Al ₁ /O	100	100	100	96	101	125
MaK 2	110	115	150	79	108	206
MaK 4	111	85	52	101	96	73
LeT	106	110	69	299	99	97
PoT	85	89	89	99	92	107

¹⁾ Lyhenteet: katso 5.5 kohta Koejärjestely.

Yhteenvedona voidaan todeta, että Hanasaaren pohjatuuskalla oli suotuia vaikutus kevätvehnän kasvuun. Suoritetun kokeen perusteella annos 25 tn/ha yhdessä jätevesilieteannoksen 100 m³/ha kanssa nostaa kahden vuoden kokonaissatoa 12 %. Samanaikaisesti pohjatuuka vaikutti edullisesti jyvien laatuun alentamalla niiden kadmiumpitoisuutta.

Tuhka saattaa lisätä kasveille käyttökelpoisen ammoniumtypen haihtumista ilmaan, jos niitä käytetään yhdessä jätevesilietteen kanssa. Tuhka ja liete tulisi tästä syystä levittää peltoon eri aikoina ja mullata peltoon mahdollisimman nopeasti levityksen jälkeen.

5.6

Korroosiovaikutukset

Korroosiotutkimukset

Kivihiilituuskasta rakennettaessa on sen muita rakennusmateriaaleja syövyttävien ominaisuuksien tunteminen tärkeää. Kivihiilituhka on verrattain uusi rakennusmateriaali, eikä sen korroosio-ominaisuuksista ole ulkomaisista tutkimuksista saatavissa suoraan meidän olosuhteisiimme soveltuvaa yksiselitteistä tietoa. Tämän vuoksi tuhkaprojektin yhteydessä käynnistettiin syksyllä 1979 korroosiotutkimus, jonka tarkoituksena oli selvittää Helsingissä syntyvän kivihiilituukan erilaisille materiaaleille aiheuttamaa korroosioriskiä. Salmisaaren voimalaitosalueelle tehtyyn tuhkakenttään, joka oli rakennettu Hanasaaren lentotuuskasta sekä pintaosaltaan Salmisaaren pohjakuonasta, sijoitettiin marraskuussa 1979 erilaisia materiaaleja (metalleja, betonia ja muoveja), jotka kaivettiin ylös niiden oltua tuhkakentän sisässä vuoden. Materiaalit tutkittiin Tampereen teknillisen korkeakoulun rakennusgeologian ja metallurgian laboratorioissa, joissa myös laboratorioolosuhteissa selvitettiin lentotuukan korroosio-ominaisuuksia /6/. Laboratoriotutkimuksissa käytettiin Hanasaaren B-laitoksen lentotuukaa sekä vertailumateriaalina hiekkamoreenia.

Myös tuhkaprojektin työryhmä teki painohäviömittauksiin perustuvan lyhyen korroosioselvityksen 1981... 1982. Tässä mielessä asennettiin erilaisia metallikappaleita ja teräsbetonikappaleita Helsingissä tuotetusta kivihiilituuskasta rakennettuihin kohteisiin sekä rakeisuudeltaan soraa vastaavaan täytemaahan. Koekappaleet olivat kohteissaan vuoden ajan syksystä 1981 syksyyn 1982.

Metallien korroosio

Kivihiilituhkan syövyttäviä ominaisuuksia kartoitettiin useilla menetelmillä. Korroosion kannalta merkityksellisiä ominaisuuksia ovat mm. ominaisvastus, redox-potentiaali, pH, kapillaarisuus sekä huokoisuus. Syövyttävien ominaisuuksien koetulokset perustuvat em. selvityksiin sekä laboratorio-olosuhteissa että kentällä.

Ominaisvastuksen kasvaessa korroosioalttius vähenee. Metallien syövyttävyyden suuntaa-antavaan arvioimiseen kosteassa maaperässä on lähteessä /9/ esitetty ohjeellisia arvoja, taulukko 19.

Taulukko 19. Maaperän metallin syövyttävyys maan eri ominaisvastuksen arvoilla /9/. Taulukon arvot pätevät pääasiassa teräkseen, sinkkiin ja alumiiniin.

Syövyttävyys	Ominaisvastus Ωm
alhainen	> 450
kohtalainen	150...450
korkea	50...150
hyvin korkea	< 50

Laboratoriomittauksissa tuoreen tiivistetyn lentotuhkan ominaisvastukseksi on saatu 15 Ωm . Yhden vuoden ja kahdeksan kuukauden kuluttua se oli noussut arvoon 70 Ωm . Molemmilla mittauskerroilla kosteus oli 17 %. Lisäksi kosteuden alentuessa ominaisvastus kasvoi edellisestä. Laboratoriokokeissa vertailumateriaalina olleen hiekkamoreenin ominaisvastus 1640 Ωm säilyi tutkimusaikana muuttumattomana vakio kosteudessa (19 %) ja -lämpötilassa (+18 °C).

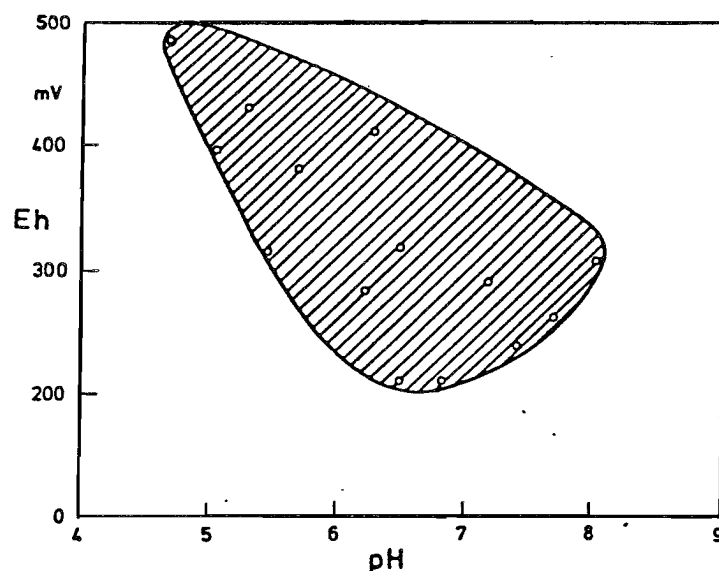
Ominaisvastuksen arvoja mitattiin ns. korroosiosondin avulla myös maastoon rakennetuista kohteista, joissa on käytetty kaikkia Helsingissä syntyviä kivihiilituhkatyyppejä. Luotaussyvyys vaihteli 0 ja 1,0 metrin välillä. Todettiin, että ominaisvastusarvot olivat pääosin alle 10 Ωm . Suurimmat ominaisvastuksen arvot mitattiin Hanasaaren pohjatuhkasta rakennetusta pallokentästä, missä ne olivat 20...65 Ωm .

Mittaustulosten perusteella Helsingissä syntyvä ki-vihiilituhka johtaa sähköä hyvin verrattuna tavalli-seen maaperään. Sähkökemiallisten korroosioparien syntymiselle metallien pinnalla näyttäisi tämän pe-rusteella olevan hyvät mahdollisuudet. Taulukon 20 perusteella arvioituna ki-vihiilituhkan syövyttävyys-aste, etenkin teräksen, sinkin ja alumiinin suh-teen, on hyvin korkea.

Redoxpotentiaolimittauksilla saadaan selville liuok-sen hapetus-pelkistyspotentiaali eli elektroniaktii-visuus. Sen suuruuteen vaikuttavat muunmuassa pH, lämpötila ja happipitoisuus. Ilman kanssa kosketuk-sissa olevan luonnonveden redoxpotentiaalin arvot vaihtelevat 350 ja 500 mV välillä pH-arvon ollessa yli 5. Maan redoxpotentiaalin ja anaerobisten sul-faatteja pelkistävien bakteerien aiheuttaman korroo-sion välille on esitetty taulukon 20 mukainen riip-puvuus. Aerobisten rautabakteerien toiminta-alue pH:n ja redoxpotentiaalin suhteen esitetään kuvassa 26.

Taulukko 20. Korroosion ja redoxpotentiaalin välinen riippuvuus /6/.

Redoxpotentiaali (Eh)	Anaerobisten bakteerien aiheuttama korroosio
< 100 mV	voimakas
100...200 "	kohtalainen
200...400 "	heikko
> 400 "	ei korroosiota



Kuva 26. Aerobisten rautabakteerien toiminta-alue pH:n ja redoxpotentiaalin suhteen Baas-Bec-kin ym. mukaan /6/.

Laboratorio-olosuhteissa määritetyt Hanasaaren lentotuhkan sekä vertailumateriaalina olleen hiekkamoreenin redoxpotentiaalit ja pH-arvot sekä niiden muutokset kokeen aikana esitetään taulukossa 21.

Taulukko 21. Hanasaaren lentotuhkan ja hiekkamoreenin redoxpotentiaalit ja pH-arvot /6/.

Materiaali	pH	Redoxpotentiaali mV
Lentotuhka, voimakkaasti uuttunut	8,4	+533
Lentotuhka, pintaosa	9,2	+549
Lentotuhka, uuttunut	8,8	+535
Moreeni, pintaosa	6,0	+446
Moreeni, pohja	6,6	+435
Lentotuhka, tuore	11,4	+488

Taulukossa 21 moreenin ja lentotuhkan redoxpotentiaaliarvot vastaavat luonnonveden arvoja. Vanhojen lentotuhkien redoxpotentiaaliarvot ovat hieman näitä arvoja korkeampia.

Taulukon 20 ja kuvan 26 sekä mitattujen pH-arvojen ja redoxpotentiaaliarvojen (taulukko 21) perusteella ei sulfaattibakteerien ja rautabakteerien elintointi ole lentotuhkassa mahdollista. Hiekkamoreenis- sa rautabakteereilla sen sijaan on edellytykset toimia. Muille kivihiilituhkatyypeille redoxpotentiaaliarvoja ei ole määritetty.

Kenttäkokeiden avulla saatiin käytännön tietoa Helsingissä syntyvän kivihiilituhkan korroosiovaikutuksista. Kosteusolosuhteet vaihtelivat tuhkatyypeistä ja vuodenajasta riippuen melkoisesti. Heikosti vettä läpäisevissä lentotuhkarakenteissa kosteus vaihteli 25 ja 50 % välillä painoprosentteina kuivapainosta. Sen sijaan karkeammassa pohjatuhka- ja pohjakuonarakenteissa kosteuspitoisuus vaihteli 10 ja 20 % välillä. Lämpötilat olivat rakenteissa pakkaskautena -1...+5 °C ja korkeimmillaan kesällä +15 °C.

Korroosiokokeissa olleita materiaaleja tutkittiin mittaamalla niiden painohäviöt sekä etsimällä silmämääräisesti merkkejä korroosiojäljistä.

Taulukossa 22 esitetään yhteenveto kenttäolosuhteissa saaduista kokemuksista kivihiilituhkan korroosiovaikutuksista.

Taulukko 22. Metallien syöpyminen kivihiilituhkassa.

Koe-kappale	Tuhka-tyyppi	Painohäviö vuodessa g/dm ²	Syöpymis- aste
Kupari	Ia	0,0	+
	II	0,0	+
	III	0,0	+
	sora	0,0	+
Alumiini	Ia	0,2	0
	II	0,1	0
	III	0,0	+
	sora	0,0	+
Lyijy	Ia	ei mitattu	0
	II	"	0
	III	"	0
	sora	"	+
Teräs	Ia	3,2	-
	II	2,4	-
	III	0,3	0
	sora	1,2	-
Harja- teräs	Ia	4,0	-
	II	3,6	-
	III	1,2	0
	sora	ei mitattu	-
Valu- rauta	Ia	3,3	-
	II	3,1	-
	III	0,0	+
	sora	ei mitattu	0
Kuuma- sinkitty teräs	Ia	0,8	0
	II	1,7	-
	III	1,2	-
	sora	0,0	+
Galva- noitu teräs	Ia	ei mitattu	-
	II	"	-
	III	"	-
	sora	"	0

Syöpymisaste: - = syöpyminen voimakasta
 0 = syöpyminen lievää tai kohtalaista
 + = syöpyminen vähäistä

Betonin korroosio

Betonin korroosio on kemiallista, ja sen edellytyksenä on kosteuden esiintyminen. Päähuomio betonin korroosiosta kiinnittyy kovettuneeseen sementtiin, sillä runkoaineena käytetyt kiviainekset ovat yleensä erittäin hyvin korroosiota kestäviä. Korroosio-
muodot voidaan jakaa liuottaviin ja paisuttaviin. Liuottavasti vaikuttavat hapot, väkevät emäkset, diffusoituvat suolat, öljyt ja rasvat. Väkevät emäkset syövyttävät sementin silikaatteja varsinkin lämpötilan kasvaessa. Paisumista aiheuttavat rikkiyhdisteet, ensisijassa sulfaatit. Ne muodostavat kalسيومaluminaatin kanssa uuden yhdisteen, joka paisuessaan rikkoo betonia. Helposti sulfiiteiksi hapetuvat sulfidit voivat johtaa vastaaviin tuloksiin.

Betoniteräksset ovat sementin emäksisestä luonteesta johtuen passiivisessa, korroosiolta suojaavassa tilassa. Betoniterästen passiivisen tilan voi poistaa sellainen vesi, johon on liuennut hiilidioksidia, happa ja kloorisuoloja. Teräksessä syntyy korroosio-
opareja, joiden toiminnan tuloksena muodostuu rautaksidia. Tämän tilavuus on suurempi kuin teräksen ja laajentumisesta aiheutuva paine rikkoo betonia ja lisää korroosiota.

Kivihiilituhkasta rakennetuissa kenttäkohteissa ei tuhkan kanssa kosketuksessa olevassa betonissa ole havaittu korroosiota. Kertaalleen VTT:n betoni- ja silikaattitekniikan laboratoriossa tutkittujen tuhkanäytteiden perusteella Myllypuron lentotuhkan voi katsoa olevan betoniaggressiivista sen suuren sulfaattipitoisuuden ja happamuuden johdosta. Myös Hannasaaren lentotuhka voi olosuhteissa, joissa vesipitoisuus pysyy korkeana, eikä veden vaihtumista tapahtu, olla jossain määrin betonille vaarallista.

Muovituotteiden korroosio

Kenttäkokeissa koekappaleina käytettiin PVC-muoviputkea sekä erilaisia muovipäälysteisiä kaapeleita. Muovien ei todettu syöpyvän kivihiililentotuhkassa. Kemialliselta kestävyydeltään muovit ovat erittäin hyviä.

Korroosioriskin huomioonottaminen

Yleisesti voidaan todeta, että kivihiilituhka syövyttää metalleja enemmän kuin luonnonkiviainekset. Kuumasinkitty teräs syöpyy vähemmän ja tasaisemmin kuin sähkösinkitty teräs. Terästen pinnoitteena voidaan käyttää myös epoksi- tai epoksipikipinnoitteita.

Kuparia voidaan hyvin käyttää ilman korroosiosuojausta kivihiilituhkassa. Lyijyssä ja alumiinissa on havaittu lievää pistesyöpymistä, minkä vuoksi niiden suojaamista korroosiota vastaan on syytä harkita.

Vaikka käytännössä betonin syöpymistä ei ole tuhkaussa havaittukaan, voi betonin sulfaattikorroosiovaara olla olemassa. On erityisesti kiinnitettävä huomiota betonin tiiviyyteen ja esimerkiksi salaojituksella huolehdittava siitä, ettei kosteuspitoisuus rakenteessa nouse liian suureksi. Voidaan käyttää myös sulfaatinkestävää portland-sementtiä tai vaikeissa tapauksissa sopivaa pintasuojauksia.

Mikäli korroosioriski on olemassa, on käytettävä materiaali korvattava mahdollisuuksien mukaan vähemmän syöpyvällä materiaalilla tai tuhkan käyttöä tulee tällaisessa kohteessa välttää.

6.

TUHKARAKENTEET

6.1

Suunnittelun pääperiaatteetYleisiä näkökohtia

Kaikkia tuhkatyyppejä voidaan käyttää maarakenteiden tekemiseen ja tuhka valitaan suunnitteluvaiheessa rakennetyypin, tulevien kuormitusten, pohjasuhteiden ja vesiolosuhteiden mukaan. Taulukossa 23 esitetään tuhkatyyppin valinnan pääperiaatteet.

Taulukko 23.

Tuhkatyyppin valinta maarakennetyypin, pohjasuhteiden ja vesiolosuhteiden mukaan /3/.

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

*) Lujittunut lentotuhka

***) Vain rakenteen alaosa avovedessä

Tuhkarakenteiden suunnitteluun ja rakentamiseen annetaan tarkemmat ohjeet lähteessä /3/. Seuraavassa esitetään keskeisimmät tuhkarakentamiseen liittyvät näkökohdat.

Saatavuus

Noin 70 % vuotuisesta kivihiilen poltosta tapahtuu talvella. Vastaava osuus tuhkastakin syntyy siten talvella (luku 1, kuva 2). Polttokatkoista ja kesällä syntyvän tuhkan vähäisyydestä johtuen tuhkan saatavuus työmaalle ei ainakaan vilkkaimpana raken nusaikana ole yleensä riittävä.

Tuhkarakenteiden suunnittelussa tulisi saatavuus ottaa huomioon esimerkiksi välivarastoinilla tai vaurautumalla muiden materiaalien käyttöön. Toisinaan tämä johtaa kahden vaihtoehtoisen suunnitelman laatimiseen, koska rakenteelliset ratkaisut ja perustamistavat voivat olla erilaisia. Esimerkiksi kaivantojen tukemistarve on tuhkarakenteilla ohuemmista rakennekerroksista johtuen usein vähäisempi.

Talvirakentaminen

Talvitäyttöjen rakentaminen on aina ongelmallista. Tuhkarakentaminen ei ole tästä poikkeus. Jäätynyttä tuhkaa ei saa käyttää kantavuutta edellyttävissä rakenteissa. Tuhkan on myös pysyttävä sulana tiivistämisen ajan. Näiden seikkojen johdosta talvirakentaminen vaatii erityisen huolellista valvontaa.

Lentotuhka on voimalaitokselta tuotaessa lämmintä. Sulana tiivistäminen on sen takia helpommin järjestettävissä. Tiivistämistä varten sopivaan vesipitoisuuteen pääsemiseksi vaadittava veden lisäämisen määrä on laskettava etukäteen, jotta välttyttäisiin liettymiseltä. Liettyminen talviolosuhteissa johtaa varmaan epäonnistumiseen. Sopiva vesipitoisuus on jonkin verran alle optimin.

Lentotuhkan lujittumisprosessi keskeytyy, kun lämpötila tuhkassa laskee 0...+4 °C alapuolelle. Jäätymisestä johtuen lujuus ei tällöin alene, vaan kriittisin tilanne on vasta keväällä sulamisen aikana, jolloin tuhka menettää jäätymislujuutensa ja osan jo tapahtuneesta lujittumisestaan. Voimakasta kuormitusta on talvirakentamisen jälkeisenä keväänä vältettävä. Erityisesti tämä on otettava huomioon, jos tuhkan vesipitoisuus on korkea. Lämpötilan noustessa lujittumisreaktio lähtee uudelleen käyntiin, mikäli tuhkan kosteus on sopiva.

Varastointi

Tuhkan saatavuuden varmistamiseksi kaikkina vuodenaikoina on tuhka voitava varastoida rakentamisen kannalta sopivaan paikkaan. Pohjatuhka ja pohjakuona ovat helppoja varastoitavia. Varastokasan pinta on kuitenkin tarpeen mukaan suojattava pölyämisen estämiseksi.

Lujittuva lentotuhka sen sijaan vaatii perusteellisemmän suojauksen sade- ja pölyämisvaaran eliminoinnin lisäksi. Alueen kuivatus tulisi järjestää siten, että tuhka ei pääse imemään vettä. Kosteana säilytettävä tuhka menettää säilytyksen aikana lujittumisominaisuuksiaan.

Tiivistäminen

Tuhka tiivistyy yleensä vastaavien maa-ainesten kaltaisesti. Pohjatuhka ja pohjakuona ovat tiivistämiskelpoisia laajalla vesipitoisuuden vaihteluvälillä. Vesipitoisuuden vaikutus on kuitenkin nähtävissä tiivistystuloksessa. Lentotuhkalla muodostaa optimivesipitoisuus käytännön kannalta melko selvän vesipitoisuuden ylärajan, jonka yläpuolella tiivistäminen ei enää ole mahdollista.

Kerralla tiivistettävän kerroksen enimmäispaksuus on lentotuhkalla noin 300 mm ja pohjatuhkalla sekä pohjakuonalla noin 400 mm. Tiivistämisen jälkeen kerrospaksuus on suuresta kokoonpuristuvuudesta johtuen vain noin 40...80 % tiivistämistä edeltävästä paksuudesta.

Tiivistyskalustona voidaan käyttää täryvalssiäyriä ja kumipyöräjäyriä. Myös tärylevyillä saavutetaan hyviä tuloksia. Kaksivalssiset pienet täryjyrät eivät kokemusten mukaan sovellu tukkien tiivistämiseen.

6.2**Rakenteelliset tekijät****Kuivatus**

Tuhkarakenne imee helposti saatavilla olevaa vettä itseensä. Vesi puolestaan lisää rakenteen painoa ja huonontaa kantavuusominaisuuksia. Lentotuhka liettyy liiallisen veden vaikutuksesta helposti ja menettää kantavuutensa kokonaan.

Lentotuhkarakenteen alle on tehtävä salaojituseros, jos veden nousu tuhkarakenteeseen on mahdollista. Pohjatuhka- ja pohjakuonarakenteilla on salaojituseros tarpeen, jos rakenteelta vaaditaan suurta kantavuutta. Salaojituserroksesta vesi johdetaan putkiston tai avo-ojituksen välityksellä pois.

Ylhäältä tuhkarakenteeseen tuleva vesi johdetaan pois sopivilla pintamateriaaleilla ja kallistuksilla.

Suojaus

Tuhka ei kestä hyvin sen pintaan suoraan kohdistuvaa mekaanista rasitusta. Liikkuvan kuorman alla tuhkan pinta pehmenee ja karkeampien tuhkatyyppien rakeet rikkoutuvat. Lisäksi paljaana oleva lentotuhkarakenteen pinta halkeilee kuivuessaan ja menettää lujuutta. Seurauksena pinnassa olevien pölyävien ainesosien määrä lisääntyy, jotka taas muodostavat sateella kenkiin ja pyöriin tarttuvan massan.

Tuhkarakenne voidaan suojata sora-, hiekka- tai muulla tarkoitukseen sopivalla materiaalilla. Suojaavan kerroksen paksuus voi rakenteesta riippuen olla 50 ja 500 mm välillä.

Lujuutta lisäävät rakenneratkaisut

Tuhkarakenteita suunnitellaan usein pehmeiköille, joilla on painumis- ja stabiliteettiongelmia. Tällöin tuhkarakenne olisi saatava toimimaan yhdessä maapohjan kanssa.

Vahvistinkankaat ja vahvistinverkot tarjoavat tähän erään ratkaisun. Vahvistinmateriaaleilla rakenne voidaan sitoa yhteen siten, että se kestää kriittisistä kohdastaan enemmän leikkaus- ja vetorasituksia. Samalla maapohjan vaarallisimmat "liukupinnat" pakotetaan kulkemaan syvemmältä tai pitemmän matkan maapohjassa. Yleensä näiden materiaalien tahokas hyväksikäyttö edellyttää melko suurien muodonmuutosten syntymistä.

Lentotuhkan lujuutta voidaan lisätä myös lisäsideaineilla. Esimerkiksi 2...6 % kalkin, sementin tai jätkepsin sekoittaminen lisää tuhkan lujuutta merkittävästi. Tuhkalle sopiva lisäsideaine tulisi testata ko. tuhkaerän kanssa etukäteen. Kun sopiva aine on löydetty, se voidaan sekoittaa tuhkaan sekoitusasemalla tai maastossa paikalla sekoituksena.

6.3**Käyttökohteet maarakentamisessa**
Katurakenteet

Pengertäytteeksi soveltuvat kaikki tuhkatyyppit. Eri-tyisesti on otettava pohjavesiolosuhteet huomioon.

Jakavan kerroksen alaosan ja tämän alapuolisten kerrosten materiaaleina voidaan käyttää kaikkia tuhkatyyppejä katuluokissa 2-6. Jakavan kerroksen yläosaan ja kantavan kerroksen alaosaan ei ole suositeltavaa käyttää muuta kuin lujittuvaa lentotuhkaa Ia katuluokissa 2-4. Sen sijaan katuluokissa 5 ja 6 voidaan näissäkin kerroksissa käyttää pohjatuhkaa II ja pohjakuonaa III.

Siirtymäkiiloihin soveltuvat lentotuhka Ia, pohjatuhka ja pohjakuona.

Kentät

Pengertäytteenä voidaan käyttää kaikkia tuhkatyypppejä. Pohjavesiolosuhteet on erityisesti otettava huomioon.

Tukikerroksessa voidaan käyttää muita tuhkatyypppejä, paitsi lentotuhkaa Ib.

Kantavan kerroksen materiaaleina voidaan käyttää lentotuhkaa Ia. Pohjatuhkaa ja pohjakuonaa voidaan käyttää kantavuusvaatimusten edellyttämässä rajoissa.

Putkijohtokaivannot

Putkien syöpymisvaara on selvitettävä.

Arinarakenteissa voidaan käyttää pohjatuhkaa ja pohjakuonaa sekä jos kuivatus on riittävä, myös lentotuhkaa Ia.

Suojatäyttönä voidaan käyttää pohjatuhkaa.

Lopputäyttö voidaan rakentaa pohjatuhkasta, pohjakuonasta ja lentotuhkasta Ib. Kantavuusvaatimukset on otettava huomioon.

Maisemointitäytöt

Maisematäytöissä voidaan käyttää kaikkia tuhkatyypppejä. Erityisesti on kuitenkin otettava huomioon tuhkan vaikutus kasveihin.

Rakennukset

Keveiden rakennusten perustusten alustäyttö voidaan rakentaa lentotuhkasta Ia, pohjatuhkasta ja pohjakuonasta. Kantavuusvaatimukset on otettava huomioon.

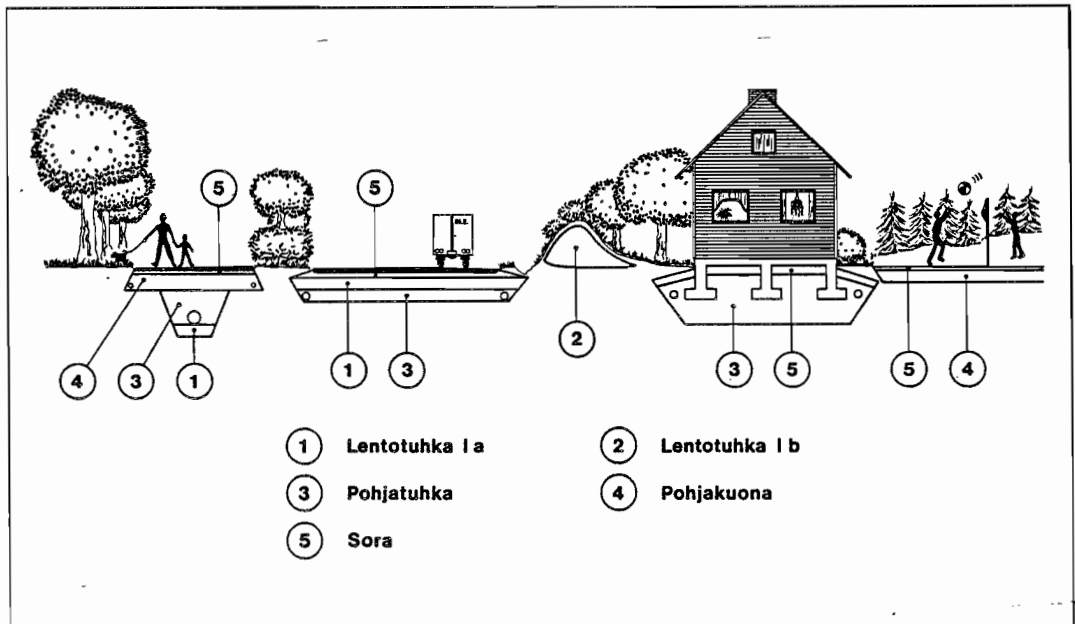
Alapohjan alustäyttöön sopivat lentotuhka Ia, pohjatuhka ja pohjakuona. Alapohjan salaojituskerros on tehtävä luonnonkiviaineksesta.

Muut kohteet

Taustatäytteenä sopivat kaikki tuhkatyyppit.

7. HELSINGISSÄ RAKENNETTUJA KOHTEITA

Helsingissä on rakennettu kivihiilituhkasta vuoteen 1987 mennessä yhteensä lähes 0,5 miljoonaa rakennem³ maarakenteita. Näistä noin 200 000 m³ rtr rakennettiin tuhkaprojektin koerakentamisena eri puolille kaupunkia. Kuvassa 27 on esitetty yleisimmät Helsingissä rakennetut tuhkarakennetyypit.



Kuva 27. Yleisimmät Helsingissä rakennetut tuhkarakennetyypit.

Helsingin kaupungin virastoista ja laitoksista suurimpia kiviainesten käyttäjiä ja siten myös mahdollisia tuhkanikäyttäjiä ovat rakennusvirasto, urheilu- ja ulkoiluvirasto, satamalaitos ja energialaitos. Taulukossa 25 on lueteltu eräitä pääosin vuosina 1979...1986 Helsingissä rakennettuja kohteita, joissa on käytetty kivihiilituhkaa (lentotuhkaa, pohjatuhkaa tai pohjakuonaa). Luettelo ei ole kattava, koska kaikki kohteet eivät ole tämän raportin tekijöiden tiedossa.

Taulukko 24.

Eräitä Helsingissä vuosina
1979...1986 rakennettuja kohteita,
joissa on käytetty kivihiilituhkaa.

Kohde	Rakennuttaja
Hanasaaren voimalaitosalueen tien rakennekerrokset	HKE
Myllypuron voimalaitoksen kytkinkenttä ¹⁾	HKE
Salmisaaren voimalaitoksen kivihiilivaraston pohja ¹⁾	HKE
Salmisaaren voimalaitoksen varastokenttä	HKE
Huopalahdentien alikäytävä	HKR/kao
Karpalotien massanvaihto ja rakennekerrokset	HKR/kao
Kyläsaaren puhdistamoalueen palloilukentät	HKR/HKV
Lyypekin aukion pysäköintialue, Itäkeskus	HKR/kao
Mertakatu, kylmämassa-aseman ajoluiska	HKR/kao
Putkijohtojen arinoita ja viemärikaivantojen täytteitä eri puolilla Helsinkiä	HKR/kao
Ruosilantie-Kartanonkaari, kevyenliikenteen tie	HKR/kao
Torpparinmäki, eräät PIKO-alueen kunnallistekniikan maarakenteet	HKR/kao
Torpparinmäen meluseinän perustus	HKR/kao
VT3:n ja Metsäläntien ramppi	HKR/kao
Kaarelantie, kompostointivarasto	HKR/puo
Paloheinä, maisemointitäyttö	HKR/puo
Paloheinä, lietevaraston pohja	HKR/puo
Sysimiehentie-Kytöniityntie, ulkoilutie	HKR/puo
Ala-Malmin ala-asteen koulun alustäyttö	HKR/tro
Hykkylän koulun piha-alue	HKR/tro
Tapanilan ala-asteen koulun alustäyttö ja piha-alueet	HKR/tro
Tuomarinkartanon työkeskuksen varastorak. alustäyttö	HKR/tro
Ystävyysmonumentin alustäyttö, Itäkeskus	HKR/tro
Viikin kompostointialueen maarakenteet	HKV
Mertakatu, työ- ja tarvikevarastokenttä	Kv/geo
Koivusaari, veneiden talvisäilytyspaikka	Sal
Suomenlinnan viemärikaivantojen vettäpid. padot	Suomenl.hoitok.
Maunula, ulkoilutie	Uuv
Maunula, kyykkäkenttä	Uuv
Metsäläntie, pysäköintialue	Uuv
Mustapuron ylittävän jalankulkusillan päätypenkereet	Uuv
Puotinharju	Uuv
Myllypuro, palloilukentät	Uuv
Myllypuro, pysäköintialue	Uuv
Myllypuro, ulkoilutiet	Uuv
Pakilantie-Kehä I, palloilukenttä	Uuv
Paloheinä, pysäköintialue	Uuv
Pohjois-Haagan palloilukenttä	Uuv
Tapanila, pysäköinti- ja palloilukentät	Uuv
Tattarisuo, kevyenliikenteen tie	Uuv
Tuomarinkartanon pysäköintialueet	Uuv
Tuomarinkartanon ratsastuskenttä	Uuv
Tuomarinkartanon vinttikoirarata	Uuv
Etelä-Vantaan ratsastuskenttä	yksit.
Myllypuro, pientalojen alustäytöt	yksit.
Laajasalon palloiluhallien ja -kenttien pohjat	yksit.

1) Rakennettu ennen vuotta 1979.

8.

KIVIHIILITUHKAN MERKITYS HELSINGIN MASSATALOUDESSA

Helsingin kaupungin maarakennustoiminnassa käytetään kiviaineksia vuosittain keskimäärin noin 600 000 rakenne- m^3 , joiden likimääräinen jakautuminen murskaamattomiin ja murskattuihin kiviaineksiin sekä louheeseen esitetään taulukossa 25. Lisäksi maarakentamiseen käytetään kivihiilituhkaa noin puolet koko 170 000 tonnin (noin 130 000 rakenne- m^3) tuhkan tuotannosta eli noin 60 000 rakenne- m^3 .

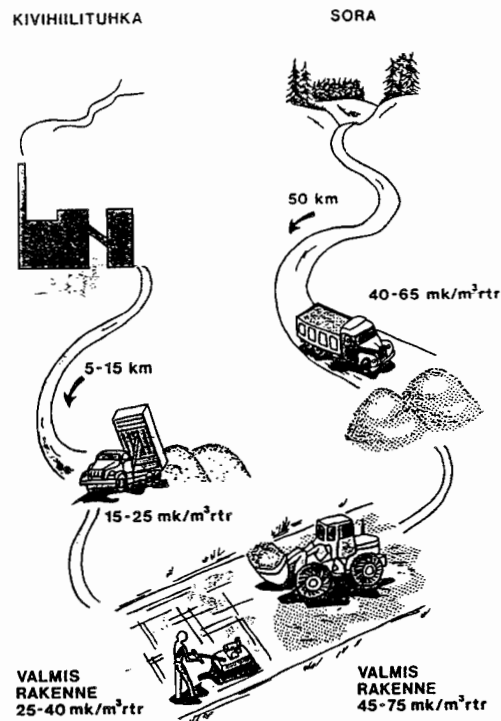
Taulukko 25. Helsingin kaupungin maarakennustoiminnassa vuosittain käytettävät kiviainesmäärät sekä maarakentamiseen käytettävän kivihiilituhkan määrä.

Maarakennusmateriaali	Käyttömäärä/v, r- m^3
Murskaamattomat kiviainekset	250 000
Murskatut kiviainekset	100 000
Louhe	250 000
Kiviainekset yhteensä	600 000
Kivihiilituhka	60 000
Maarakennusmateriaalit yht.	660 000

Taulukossa esitetyissä määrissä eivät ole mukana täyttöalueille ajettavat maamassat ja louheet. Määrät vaihtelevat vuosittain etenkin louheen osalta, mutta lukuja voidaan pitää kuitenkin riittävän tarkkoina tuhkan taloudellista merkitystä arvioitaessa.

Tuhkan käytöllä saavutettava kaupungin kokonaissatasataloudellinen säästö verrattuna tilanteeseen, jossa kaikki tuhka ajettaisiin täyttömäkiin tai kaatopaikalle koostuu seuraavista tekijöistä:

- säästö kuljetuskustannuksissa kaatopaikalle tai täyttömäkeen keskimäärin 20 mk/rakenne- m^3
- säästö täyttöaluetilan vapautumisena keskimäärin 10 mk/rakenne- m^3 tai kaatopaikkatilan vapautumisena keskimäärin 100 mk/rakenne- m^3 (vapautuvan tilan arvo koostuu mm. perustamis-, ylläpito- ja maisemointikustannuksista sekä maan arvosta)
- säästö korvattavan materiaalin ja tuhkan hintaerona; soraa ja hiekkaa korvattaessa keskimäärin 30 mk/rakenne- m^3 , kuva 28.



Kuva 28. Kivihiilituhkan edullisuus johtuu Helsingissä lyhyistä kuljetusmatkoista.

Helsingin kaupunki tuottaa kivihiilituhkaa yhteensä noin 170 000 tonnia (vuonna 1987), josta hyvälaatuista lujittuvaa lentotuhkaa (Ia) on noin 110 000 tonnia (rakenne-tilavuudeksi muutettuna noin 85 000 rakenne-m³), lujittumatonta lentotuhkaa (Ib) noin 10 000 tonnia (noin 8 000 rakenne-m³), pohjatuhkaa (II) noin 40 000 tonnia (noin 30 000 rakenne-m³) ja pohjakuonaa (III) noin 10 000 tonnia (noin 8 000 rakenne-m³).

Jokainen tuhkatonni, joka ohjataan hyötykäyttöön, tuottaa Helsingin kaupungille säästöä vähintään 23 mk/tuhka-t (30 mk/rakenne-m³) ja lisäsäästöä syntyy, mikäli kaupunki hyötyy vielä tuhkan käyttöarvosta. Lisäsäästö esimerkiksi soran- ja hiekan korvaajana on 23 mk/tuhka-t (30 mk/rakenne-m³). Jokainen kaupungin omaan maarakentamiseen ohjattu tuhkatonni tuo kaupungille kustannushyötyä yhteensä vähintään noin 46 mk/tuhka-t eli noin 60 mk/rakenne-m³, mikäli tuhka muutoin ajettaisiin täyttöalueelle. Mikäli tuhka vaihtoehtoisesti ajettaisiin muutoin kaatopaikalle, on vastaava säästö noin 115 mk/tuhka-t eli noin 150 mk/rakenne-m³.

Kun kustannushyödyksi lasketaan 60 mk/rakenne-m³, saadaan Helsingin kaupungin vuotuiseksi kokonaishyödyksi nykytilanteessa (kaupungin maarakentamiseen käytetään tuhkaa noin 60 000 rakenne-m³/vuosi) noin 3,6 milj. mk + hinta, jonka kaupunki saa lentotuhkan myyntituloina sementtiteollisuudelta.

Kivihiilituhkaa on ajettu 100 % hyötykäyttötavoitteesta huolimatta viime vuosina täyttöalueille noin 15...20 % kokonaistuotannosta eli noin 25 000...35 000 tonnia/vuosi. Tämä vastaa noin 20 000...27 000 rakenne-m³/vuosi.

Helsingin kaupungin käyttämiin kiviainesmääriin verrattaessa voidaan todeta, että kivihiilituhkan osuus on nykyisellä hyötykäyttöasteella noin 9 % kaupungin maanrakentamisen kiviaineskulutuksesta ja sillä korvataan noin 19 % kaupungin maanrakentamiseen tarvittavan soran ja hiekan yhteismäärästä. Mikäli myös täyttöalueille nykyisin menevä tuhka ohjataan kaupungin maarakentamiseen, on kivihiilituhkan osuus vastaavasti noin 13 % kaupungin maanrakentamisen kiviaineskulutuksesta ja noin 27 % kaupungin maanrakentamiseen tarvittavan soran ja hiekan yhteismäärästä. Mikäli koko tuhkan tuotanto ohjattaisiin maanrakentamiseen, olisi kivihiilituhkan osuus noin 26 % kaupungin maanrakentamisen kiviaineskulutuksesta ja noin 55 % kaupungin maanrakentamiseen tarvittavan soran ja hiekan yhteismäärästä.

9. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tuhkaprojekti on saatettu loppuun siinä muodossa, kuin se käynnistettiin ja sen aikana on saavutettu sille asetetut päättavoitteet. Kuitenkin on eräitä tekijöitä, jotka vaativat työpanosta jatkossakin joko virkatyönä tai erillisprojekteina yhdessä VTT:n, korkeakoulujen ja muiden tutkimuslaitosten kanssa sekä kaupungin eri virastojen ja laitosten välistä yhteistyötä. Tärkeimpiä niistä ovat:

- Täyttöalueille yhä ajettavan 25 000 rakenne-m³/v tuhkaosuuden (yhteiskustannusvaikutus noin 1,5 milj.mk) ohjaaminen hyötykäyttöön.
- Rikinpöistotuotteen hyötykäytön kehittäminen.
- Rakennettujen tuhkarakenteiden jatkuva seuranta, jotta niiden pitkäajan käyttäytymisestä saataisiin luotettavaa lisätietoa.
- Uusien tuhkanikäyttömahdollisuuksien selvitys esimerkiksi ylijäämämassojen stabiloinnissa, savialueiden syvästabiloinnissa sekä maabetonin kaltaisten kiviaines + sideaine-seosten valmistuksessa.

KIRJALLISUUSLUETTELO

- /1/ CEGB, PFA Utilization, Lontoo 1972, 104 s.
- /2/ Havukainen, J., Kivihiilivoimalan tuhkien hyötykäyttöselvitys kunnallistekniikassa. Tuhkaprojektin väliraportti 2. Helsingin kaupungin geoteknisen osaston tiedote 23, Helsinki 1987, 90 s.
- /3/ Havukainen, J., Kivihiilituhkan käyttö maarakentamisessa, tekniset ohjeet. Helsingin kaupungin geoteknisen osaston tiedote 31, Helsinki 1983, 36 s.
- /4/ International Conference on the use of by-products and waste in Civil Engineering, Paris 28...30 November 1978, Volume I, II ja III, Association Amicale des Ingenieurs Anciens Eleves de I'E.N.P.C., Pariisi 1978, 705 s.
- /5/ Kankare, E., Lampinen, A., Lehtipuu, E. ja Matilainen, E., Katujen vahvistamista ja perusparantamista koskevat ohjeet. Tiedonanto 52. VTT, tie- ja liikennelaboratorio, Espoo 1979, 49 s.
- /6/ Nieminen, P., Korroosiosta kivihiililentotuhkassa. Tampereen teknillisen korkeakoulun rakennusgeologian laboratorion tutkimusselostus, Tampere 1980, 20 s.
- /7/ Pohjarakenteet, RIL 166, Suomen rakennusinsinöörien liitto, Helsinki 1986, 597 s.
- /8/ Riiheläinen, T., Puhdistamolietteen, polttolaitoskuonan, voimalaitostuhkien ja hiekoitushiekan metallipitoisuuksista Helsingissä. Helsingin kaupungin vesi- ja viemärilaitoksen kemian laboratorion tutkimusselostus, Helsinki 1983, 7 s.
- /9/ Saraoja, E.K., Maa- ja kallioperän ominaisvastus Suomessa ja voimajohtojen vaikutus viestiavojohtoihin. Väitöskirja, TKK, Helsinki 1946, 126 s.
- /10/ Viitasalo, I., Naskali, L., Hanasaaren voimalan lento- ja pohjatuhkien käyttö lannoitus- ja maanparannusaineina viljanviljelyssä. Helsingin kaupungin vesi- ja viemärilaitoksen kemian laboratorion tutkimusselostus, Helsinki 1984, 3 s.

GEOTEKNISEN OSASTON TIEDOTTEET

1. Anttikoski, U., Geoteknilliset kartat ja niiden käyttäminen. 1973. 30,-
- *1) 2. Anttikoski, U., Kaupunkisuunnittelun geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu. 1973. 50,-
- *1) 3. Anttikoski, U., Kunnallistekniikan geoteknillinen tutkimus ja suunnittelu. 1974. 50,-
- *1) 4. Mäkinen, R., Täyttömäkien rakentaminen kaupunkialueella. 1974. 50,-
- *1) 5. Saarelma, M., Melusuojarakenteiden perustamistapaselvitys. 1974. 30,-
6. Saarelma, M., Kitkapaalujen kantavuus. 1976. 30,-
7. Petäjä, J., Putkijohtojen pohjarakenteiden mitoittaminen. 1977. 50,-
- *1) 8. Raudasmaa, P., Metrotunneleiden injektointi. 1977. 120,-
- *1) 9. Anttikoski, U., Kalliotunnelien käyttö varastointiin. 1977. 50,-
10. Tikkanen, H., Rakentamisen vaikutus pohjaveteen Helsingin keskustassa. 1978. 70,-
- *1) 11. Arkima, O., Kluuvien ruuhkeen jäädytys. 1978. 120,-
12. Raudasmaa, P., Puiset perustusrakenteet. 1979. 50,-
13. Havukainen, J., Voimalaitostuhkan ja polttolaitoskuonan hyötykäyttö rakentamisessa. 1979. 50,-
14. Vähäaho, I., Pehmeikölle perustettavan pientalon painumien laskeminen. 1979. 50,-
15. Raudasmaa, P., Pohjavesitarkkailu -80. 1980. 50,-
- *1) 16. Anttikoski, U., Katsaus tunnelien rakentamistekniikan nykytilaan Atlantan kansainvälisen tunneli-konferenssin kokemusten perusteella. 1979.
17. Roinisto, J., Matkakertomus tutustumismatkalta Tukholman yhteiskäyttötunneleihin. 1981. 50,-
- *1) 18. Havukainen, J., Kivihiilivoimalan tuhkan käyttö maarakenteissa. 1981. 50,-
19. Roinisto, J., Yhteiskäyttötunneleiden teknis-taloudellinen selvitys. 1981. 50,-
20. Vuola, P., Talonrakennuksen maarakenteet ja niiden laadunvalvonta. 1981. 50,-
21. Havukainen, J., Korhonen, O., Tonttialueiden maarakenteet. 1981. 30,-
22. Havukainen, J., Esimerkkejä jätteen hyötykäytöstä raaka-aineena ja energianlähteenä. 1981.
23. Havukainen, J., Kivihiilivoimalan tuhkien hyötykäyttöselvitys kunnallistekniikassa. 1982. 50,-
24. Latvala, A., Rakennusjätteen alustava hyötykäyttöselvitys. 1982. 30,-
25. Havukainen, J., Hämäläinen, A., Sulamäki, A., Alustava selvitys polttolaitoskuonan hyötykäyttö-mahdollisuuksista maarakentamisessa. 1982. 30,-
- *1) 26. Halkola, H., Kunnallistekniikan geotekniikkaan liittyvät koerakakentamiskohteet Torpparinmäessä. 1982.
27. Paavola, P., Kunnallistekniikoiden tunneleiden louhintakustannusselvitys. 1982. 50,-
- *1) 28. Vähäaho, I., Maarakennusta koskeva mallityöselitys. 1982. 70,-
29. Gulin, K., Rakentamisen vaikutus pohjaveden tasoon ja rakennusten painumiin Helsingin Puistolassa. 1982. 50,-
30. Halkola, H., Syvästabiloinnin laadun ja lujuuden valvontamenetelmät. 1982. 50,-
31. Havukainen, J., Kivihiilituhkan käyttö maarakentamisessa, tekniset ohjeet. 1983. 30,-
32. Havukainen, J., Användning av stenkolaska vid anläggningsarbeten, tekniska anvisningar. 1983. 30,-
33. Havukainen, J., The utilization of coal ash in earth works, technical guidelines. 1983. 30,-
34. Salmelainen, J., Helsingin kallioperän geologiasta ja kivilajien lujuusominaisuuksista porattavuuden kannalta. 1983. 50,-
35. Havukainen, J., Matkakertomus kivihiilituhkien ympäristövaikutuskonferenssista. 1983.
36. Hytti, P., Esi-injektoinnin suoritus ja sen huomioiminen urakka-asiakirjoissa. 1984. 60,-
37. Leinonen, J., Kalliomekaaniset mittaukset Hanasaaren syvävarastossa. 1984. 60,-
38. Pirinen, J., Kelluvan rantapenkereen rakentaminen. 1984. 60,-
39. Latvala, A., Geotekninen kustannustiedosto, Geo-kuti. 1984. 60,-
40. Korpela, J., Schüller, M., Jäykkien liitosjohtojen pohjarakenneselvitys (Jäli-selvitys). 1984. 80,-
41. Lahtinen, E.-R., Maanalaiset tilat ja yhdyskuntarakentaminen (MARASU-tutkimus, väliraportti). 1985. 30
42. Korpi, J., In Situ-kuormituskoe painumien määrittämiseksi. 1985. 60,-
43. Havukainen, J., Esirakentamisen kehittäminen. 1985. 60,-
44. Vähäaho, I., Jäädytysmenetelmän käyttö. 1987. 60,-
45. Havukainen, J., Hämäläinen, A., Latvala, A., Kivihiilituhkien käyttökokemukset kunnallistekniikan maarakenteissa. 1987. 60,-
46. Julkunen, A., Geofysiikan tutkimusmenetelmät kalliorakentamisessa. 1987. 60,-