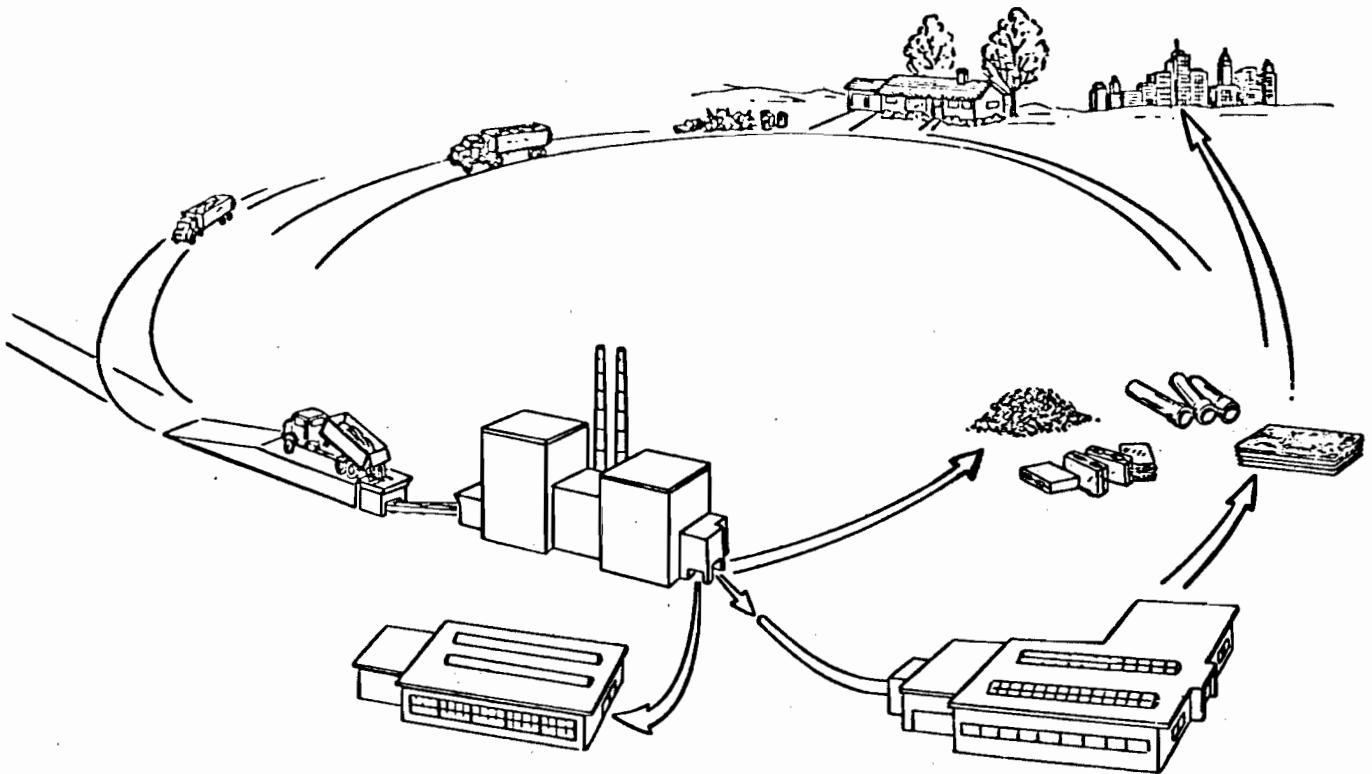


HELSINGIN KAUPUNGIN GEOTEKNILLINEN TOIMISTO



VOIMALAITOSTUHKAN JA POLTTOLAITOSKUONAN HYÖTYKÄYTTÖ RAKENTAMISESSA

Geoteknillisen toimiston
tiedote 13 1.3.1979

HELSINGIN KAUPUNGIN
KIINTEISTÖVIRASTO
GEOTEKNILLINEN TOIMISTO

MATKAKERTOMUS PARIISISSA 28.-30.11.1978 PIDETYSTÄ SIVUTUOTTEITA
JA JÄTTEITÄ RAKENNUSTEKNIIKASSA KÄSITTELEVÄSTÄ KOKOUKSESTA JA
KOKEMUSTEN SOVELTAMINEN HELSINGIN KAUPUNGIN TARPEISIIN

S I S Ä L L Y S L U E T T E L O :

	sivu
ESIPUHE	1
YLEISTÄ	1
KONFERENSSIN OHJELMA	2
KESKEISIÄ AIHEITA	3
EXURSIO ROUENIIN	6
KOKEMUSTEN SOVELTAMINEN HELSINGISSÄ	7
LIITE I TUHKAPROJEKTI: Tutkimussuunnitelma tuh- kan ja kuonan hyötykäytöstä rakentamisessa ...	10-14
LIITE II KONFERENSSIN KESKEISIÄ ARTIKKELEITA	15-83

MATKAKERTOMUS PARIISISSA PIDETYSTÄ SIVUTUOTTEITA JA JÄTTEITÄ
RAKENNUSTEKNIKKASSA KÄSITTELEVÄSTÄ KOKOUKSESTA 28.-30.11.1978
JA KOKEMUSTEN SOVELTAMINEN HELSINGIN KAUPUNGIN TARPEISIIN

ESIPUHE

Matkakertomuksessa selostetaan Pariisissa 28.-30.11.1978 pidettyä kansainvälistä kokousta, jossa käsiteltiin sivutuotteiden ja jätteen hyötykäyttöä rakentamisessa. Kokouksen aihepiiri oli erittäin laaja käsittäen yhdyskuntajätteen lisäksi myöskin teollisuuden ja kaivostoiminnan jätteet ja sivutuotteet. Matkakertomuksessa keskitytään kuitenkin vain niihin jätteisiin, joilla on merkitystä Helsingin kaupungin kannalta. Tällöin tarkastellaan erityisesti voimalaitosten tuhkia ja kuonia sekä polttolaitosten palamisjätteitä. Matkakertomuksen liitteenä on suomenkielelle käännetty eräitä tärkeiksi katsottuja artikkeleita. Käännöstyön on tehnyt DI Jorma Havukainen, joka on virastotyöntekijänä geoteknillisessä toimistossa. Matkan aikana Helsingin kaupungin edustajat neuvottelivat myöskin muiden suomalaisten kokouksen osanottajien kanssa hyötykäyttömahdollisuuksista Helsingissä. Matkan jälkeen on suunniteltu jätteen hyötykäyttöä rakentamisessa käsittelevän tutkimuksen käynnistämistä Helsingissä. Tämän ns. tuhkaprojektin suunnitelma on myöskin liitteenä.

YLEISTÄ

Pariisin kansainvälinen konferenssi "sivutuotteiden ja jätteen käyttäminen rakentamisessa" (International conference of the use of by-products and waste in civil engineering) 28.-30.11.1978 oli ensimmäinen kansainvälinen kokous, missä käsiteltiin samanaikaisesti kaikkia tuotteita, joilla saattaa olla hyötykäyttöä rakentamisessa. Kokouksen järjestäjinä toimivat seuraavat yhdeksän järjestöä:

the Permanent International Association of Road Congresses (PIARC)
the International Union of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures (RILEM)
the Agence Nationale pour l'Élimination et la Récupération des Déchets (ANDRED)
the American Society for Testing Materials (ASTM), Committee E-38 on Resource Recovery
the Roads and Transportation Association of Canada
the US Bureau of Mines
the US Department of Energy
the US Environmental Protection Agency
the US Federal Highway Administration.

Kokoukseen osallistui 300 henkilöä 30:stä eri maasta. Helsingin kaupungilta olivat mukana kiinteistöviraston virastopäällikkö Kalevi Korhonen, geoteknillisen toimiston päällikkö Usko Anttikoski ja rakennusviraston katurakennusosaston rakentamistoimiston päällikkö Matti Sallinen. Lisäksi oli henkilöitä Paraisten Kalkista, Kemirasta, VTT:n betonitekniikan laboratorion ja Tampereen teknillisestä korkeakoulusta. Kokouspaikkana oli moderni laaja konferenssikeskus Centre International de Paris, johon mahtuu samanaikaisesti noin 5000 henkilöä. Konferenssikeskuksen yhteydessä on 33-kerroksinen Concorde La Fayette hotelli, jossa on noin 2000 vuodepaikkaa. Konferenssikeskuksen vieressä on metroasema Porte Maillot.

Kolmen päivän aikana käsiteltiin esitelmissä ja keskusteluissa sivutuotteiden ja jätteiden käytömahdollisuuksia. Puheenvuorot olivat englanniksi tai ranskaksi simultaanisesti tulkittuina. Neljäntenä päivänä oli järjestetty työmaakäynti kahteen tiettyömaahan Pariisin lähellä.

KONFERENSSIN OHJELMA

Konferenssiin oli jätetty 80 kirjoitusta. Puolet kirjoituksista oli Ranskasta sekä muut Keski-Euroopasta, USA:sta ja Kanadasta. Pohjoismaista oli yhteensä vain kaksi kirjoitusta, joista toinen oli Tampereen teknillisen korkeakoulun FL Pertti Niemisen kirjoitus kipsin käyttämisestä maan stabilointiin.

Konferenssissa käsiteltiin erikseen kutakin sivutuotetta ja jäteainetta. Julkaistuista kirjoituksista esitettiin aluksi raportoin tekemä yhteenveto, minkä jälkeen kuulijoilla oli tilaisuus tehdä kysymyksiä ja esittää täydentäviä huomautuksia. Puheenjohtajat ja raportoin olivat Ranskasta ja muista Keski-Euroopan maista sekä USA:sta ja Kanadasta.

Tiistaina 28.11. käsiteltiin orgaaniset jätteet-lietteet, sulfaattijätteet sekä sekalaiset jätteet, kuten rakennus-, betoni- ja asfalttijätteet.

Keskiviikkona 29.11. käsiteltiin erilaiset kuonat, jolloin erityisesti tarkasteltiin masuunikuonia ja kipsejä. Puoli päivää käsiteltiin voimalaitosten lentotuhkia.

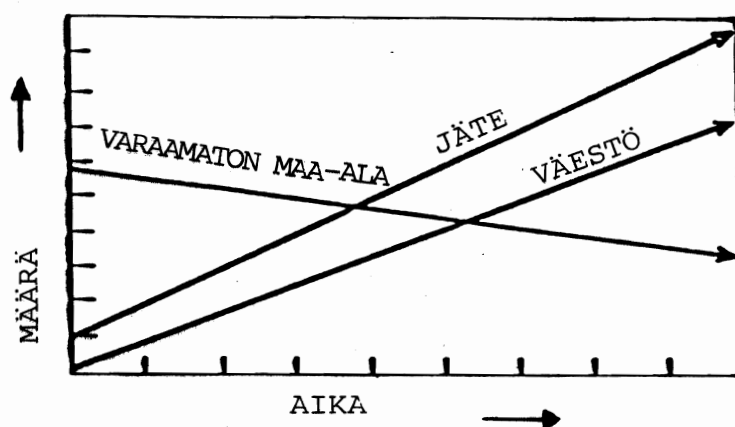
Torstaina 30.11. käsiteltiin polttolaitosten palamisjätteet sekä kaivosteollisuuden jätteet.

Järjestelyt sujuivat suuren konferenssikeskuksen antamien mahdollisuuksien mukaan rutiininomaisesti. Aihe ei ehkä erikoisemmin innostanut muita kuin asiantuntijoita.

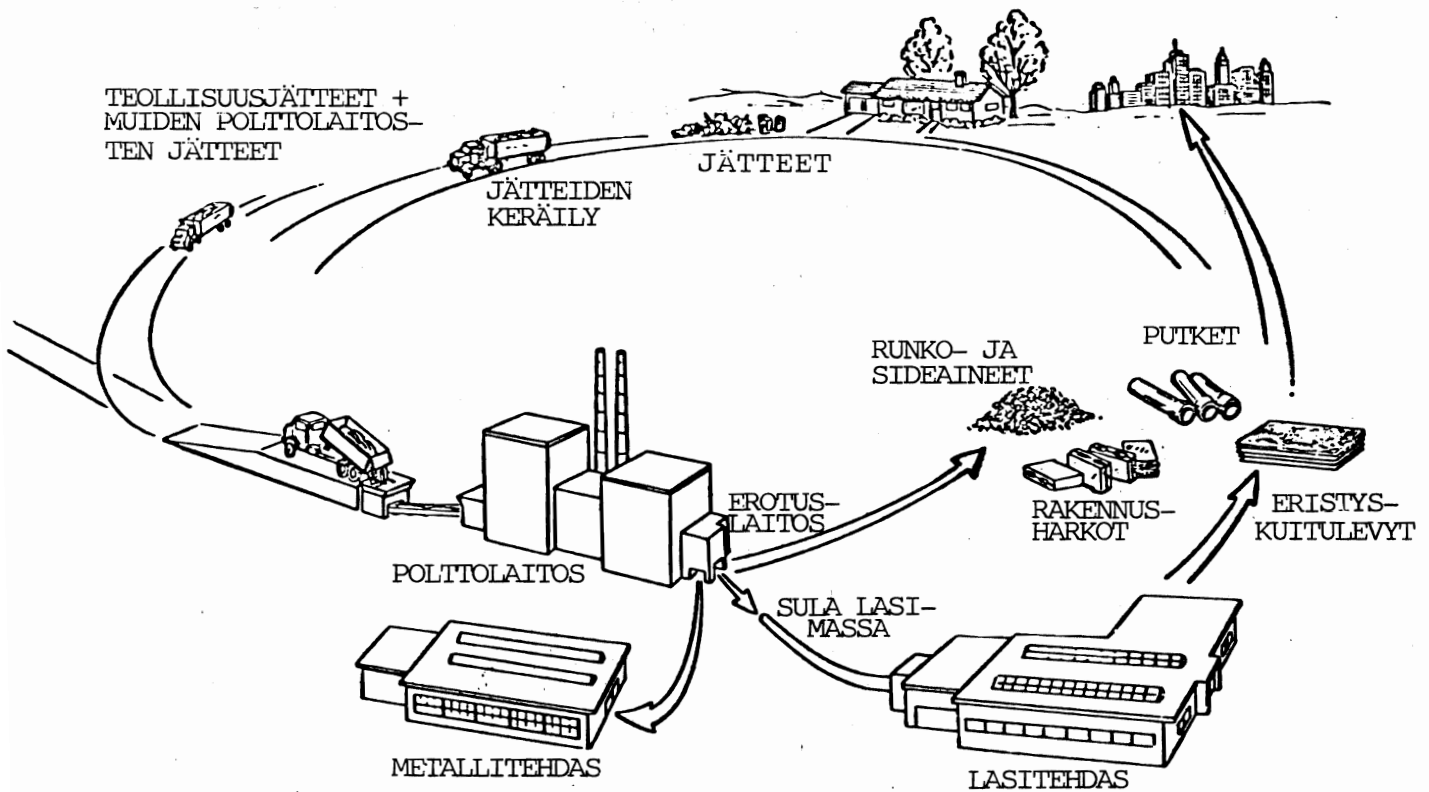
Konferenssin artikkeleista oli koottu kaksiosainen ennakkopainos ja se käsitti yhteensä 750 sivua. Kirjoituksista oli suunnilleen puolet ranskankielellä ja puolet englanninkielellä. Julkaisu- ja kolmas osa, jossa ovat yhteenvetoraportit sekä käytetyt puheenvuorot, lähetetään osanottajille keuhällä 1979. Saadun kirjallisen aineiston paksuus oli noin 6 cm.

KESKEISIÄ AIHEITA

Jätteiden ja sivutuotteiden määrä on jokaisessa maassa voimakkaasti nousemassa (kuva 1). Tämän takia jätteiden ja sivutuotteiden hyötykäyttöä rakentamisessa pyritään eri maissa lisäämään. Jätteiden kiertokulkua pyritään edistämään (kuva 2).



Kuva 1. Kasyavan jätemäärän suhde väestön lisääntymiseen ja varaamattoman maan vähentymiseen



Kuva 2. Yhdyskuntajätteen hyötykäytön suljettu kiertosysteemi

Energian hinnan nopea nousu sekä ympäristötekijöiden tiedostaminen ovat suuresti lisänneet jätteiden ja sivutuotteiden hyödyntämiseen liittyviä tutkimuksia. Korvaavien materiaalien käyttöä lisäävät myös jätteiden sijoittamiseen tarvittavan maa-alan puute, varastointiin liittyvät määräykset sekä tavanomaisten rakennusmateriaalien hinnan nousu. Nykyisin tunnettuja käytötapoja halutaan edistää ja toisaalta keksiä uusia. Tien ja kadun rakentaminen on yksi suurimmista käyttökohteista. Samoin myöskin rakennusaineteollisuus voi käyttää jätteitä monin tavoin.

Useimpia jätteitä ja sivutuotteita käytetään jo tällä hetkellä rakennustekniikassa ja monilla on myöskin potentiaalisia käyttömahdollisuuksia. Tämä käy ilmi amerikkalaisen W. Ormsbyn laatimasta yhteenvetotaulukosta (kuva 3), jossa on lueteltu eri jätteet sekä arvioitu niiden käyttöä tien rakentamisessa.

Jäte- ja sivutuotteet		Sideaine	Stabilointiaine	Filleri	Betoni	Runkoaine-asfalttibetonissa pintaranteissa	Runkoaine-asfalttibetonissa sitovassa kerroksessa	Runkoaine kantavassa ja jätekerroksessa	Perustustyö ja maapohjan parantamiseksi
<u>Kaivos- ja louhosjätteet</u>									
kaivos- ja louhintajätteet	a. hiilikaihosjäte		M	M	M	M		M	V
	b. louhosjäte							M	V
	c. kaihosjäte							M	V
	d. kivilouhosjäte				M	M	M	M	V
	e. öljyliuskejäte							M	V
	f. kaoliinihiekkä				V			V	V
	g. kalisuolalouhosjäte							M	M
malmijätteet	a. rautamalmi					V	V	V	V
	b. takoniittipohjainen rautamalmi					V	V	V	V
	c. fluorisälpä							M	M
	d. lyijysinkki			M				M	M
	e. kupari							M	V
	f. kulta							M	M
liejut	a. alumiinoksidi		M						
<u>Metallurgiset jätteet</u>									
rauta-pitoiset kuonat	a. masuunikuona					V	V	V	V
	- ilmajäähdystetty					V	V	V	V
	- granuloitu	V	V	V	V			M	
	- pelletoitu	V	V	V	V			M	
	- paisutettu				V				
	b. teräskuona	M	M			V	V	V	V
raudat-tomat kuonat	a. sinkki (lyijy, lyijy-sinkki)	M		V		M	M	M	M
	b. kupari	M					V	V	V
	c. nikkeli	M					V	V	V
	d. fosfaattijäte	M		V	V	V	V	V	M
	valimohiekka								M
	keraamiset jätteet					M	M	M	M
<u>Teollisuusjätteet</u>									
tuhka	a. lentotuhka	V	V	V	V	M	M	V	V
	b. pohjatuhka (kuona ja tuhka)					V	V	V	V
	c. sekalaiset								
	- tiilipöly			V					V
	- rikki	V							
	- ruoppaustuote				M	M	M	M	V
	- kattila- ja masuuni-klinkerit ja kuona					V	V	V	V
	- jätemuovi				M	M	M		M
	- kiisukuonat								V
<u>Yhdyskuntajätteet</u>									
polttolaitosjäte	a. tuhka		M	M					V
	b. klinkkeri					V	V	V	V
murskausjätteet	a. rakennuskivet					M	M	M	V
	b. asfalttipäällyste					V	V	V	V
	c. betonipäällyste				M	V	V	V	V
	lasi ja keramiikka		M				M	M	
	kumi					V	M		
<u>Maa- ja metsätalousjätteet</u>									
puu-jätteet	a. kuoret ja sahapöly								V
	b. ligniini		M						
	c. paperitehdasjäte		M						

V = vakiintunut käyttö (tienrakennukseen hyväksytty käyttö)

M = mahdollinen käyttö (tutkimusten mukaan on teknisiä käyttömahdollisuuksia)

Kuva 3. Vakiintuneet ja mahdolliset jätteiden ja sivutuotteiden käyttökohteet tienrakennuksessa

Keskeisiä tutkimuskohteita ovat viime vuosina olleet voimalaitostuhkan lisäksi teollisuusjätteet, kuten kipsit ja masuunikuonat sekä asutuskusten polttolaitosten palamisjätteet.

Lämpövoimaloissa kertyy savupiipun yläosan suodattimille runsaasti palamisjätettä, jota kutsutaan lentotuhkaksi. Uunin pohjalle putoaa palamisjätteistä noin 10-30 % ja tätä jätettä kutsutaan kuonaksi tai arinatuhkaksi. Lentotuhka on hienojakoista pölyävää ainesta, joka kostutettaessa käyttäytyy **kuten** hieno hiekka. Sillä on sitovia ominaisuuksia ja se lujittuu ajan kuluessa hitaasti kovettuvan sementin tavoin. Lentotuhkan käyttömahdollisuuksia on viime vuosina tutkittu erittäin paljon eri maissa. Myös Suomessa on VTT:ssä parhaillaan käynnissä lehtotuhkan ominaisuuksia selvittelevä tutkimus.

Polttolaitosten palamisjätteiden hyötykäyttö maa-rakennuksessa edellyttää huolellista polttoa. Polttojäte luokitellaan kolmeen luokkaan ja vain paras luokka kelpaa rakentamiseen sen jälkeen, kun siitä on poistettu ylisuuret rakeet > noin 100 mm ja rautaromu.

Konferenssin aiheista olivat Helsingin kaupungin kannalta lupaavimpia voimalaitostuhkaan ja polttojätteisiin liittyvät tutkimukset. Mielenkiintoisimpia tutkimusraportteja on matkakertomuksen liitteenä. Alkuperäiset tutkimusjulkaisut ovat saatavissa matkakertomuksen laatijoilta.

Konferenssin aikana oli Helsingin kaupungin edustajilla edullinen tilaisuus keskustella Helsingin voimalaitostuhkien hyötykäytöstä myös muiden suomalaisten osallistujien kanssa.

Konferenssin aiheiden ja käytyjen keskustelujen antamien virikkeiden perusteella laadittiin jälkeinpäin liitteenä oleva tutkimussuunnitelma sovellettuna Helsingin kaupungin tarpeisiin.

EXURSIO ROUENIIN

Konferenssin jälkeen perjantaina 1.12 oli tutustumismatka Rouenin koetietyömaalle. Matkalle osallistui noin 30 henkilöä ja matka tehtiin bussilla. Rouenissa selostettiin Ranskan tielaitoksen tielaboratorion toimintaa sekä laboratorion suorittamia kokeita jäteaineilla. Jätetutkimuksissa oli runsaasti henkilöstöä ja tutkimuskohteina olivat erityisesti kipsi ja lentotuhka. Laitoksen vieressä oli noin 1,5 km pituinen ja noin

15 m levyinen tieosa, jota käytiin paikalla katsomassa. Tien päällysrakenne oli tehty kipsistä ja siitä puuttui vielä varsinainen asfalttipäällyste. Tierakenne oli erittäin runsaasti instrumentoitu painuma-, maanpaine- ja lämpötilan mitauslaitteilla. Tien rakenne näytti erittäin lujalta. Lopullinen raportti tutkimuskohteesta valmistuu vasta noin puolen vuoden kuluttua. Tieosaa käytetään jo tutkimusaikana normaaliin liikenteeseen. Laboratorio tutkii myöskin maa-ainesten, lentotuhkan ja kipsin erilaisia sekoitussuhteita ja laatii myöhemmin ohjeet niiden käyttämisestä tien rakentamisessa.

Tutustumismatkaan piti myöskin kuulua moottoritie F 6 lähellä Monthleryä, mutta perjantai-iltapäivän liikenneuhkista johtuen ei tänne työmaalle voitu enää mennä.

KOKEMUSTEN SOVELTAMINEN HELSINGISSÄ

Konferenssin aikana sai hyvän yleiskuvan erilaisien jätteiden ja sivutuotteiden hyötykäytön mahdollisuuksista. Jätteiden ja sivutuotteiden määrät lisääntyvät jokaisessa maassa ja voimakas alan tutkimustoiminta ja kehitystoiminta on käynnissä eri maissa. Asennoituminen jäteaineisiin tulisi saada muuttumaan niin, että konferenssissa esitetty "jäterengas" (kuva 2) saataisiin sulkeutumaan.

Helsingin kaupungin kannalta mielenkiintoisimmat aineet olivat voimalaitostuhka ja polttolaitoskuona, joista annettiin runsaasti uutta tietoa. Liitteenä on eräitä mielenkiintoisimpia artikkeleita.

Nämä ongelmat ovat Helsingissä muita Suomen kaupunkeja suurempia, koska kivihiilikäyttöisistä voimaloista ja polttolaitoksesta syntyy suuria määriä tuhkaa ja kuonaa ja kaatopaikoista on pulaa.

Eräiden asiantuntijoiden mielestä voimalaitosten tuhka olisi jopa liian arvokasta käytettäväksi pengertäytteeksi, sillä se vastaa paremmin sementtiä kuin kiviainesta. Suuntaamalla voimalaitostuhkan käyttöä entistä enemmän senttiteollisuuden ja päällysteiden rakentamiseen saattaisi tuhkan hinta nousta jopa 50-100 markkaan/m³. Maarakennusaineita korvaavana sen hinta voi nousta enintään 20 mk:aan/m³. Voimalaitostuhkaa syntyy erityisesti talvella, jolloin tuhkan hyötykäyttö on toisaalta vähäisempää. Sementin valmistajat esittivät, että lentotuhkaa ostettaisiin Helsingin kaupungilta paljon enemmän, jos voimalaitosten yhtey-

dessä olisi 3000-5000 m³ suuruiset siilot tuhkan tilapäistä varastointia varten. Voimalaitostuhkaa ei kannattaisi ajaa kaatopaikoille tai täyttömäkiin kuten nyt tehdään Helsingissä, vaan mieluummin se tulisi sijoittaa erikseen siten, että sitä voidaan käyttää myöhemmin, kun hyötykäytön tekniikka on omaksuttu.

Jos tuhkan talteenottoa voimalaitosten piipun sähkösuodattimilta kehitetään siten, että sitä voidaan koota suodattimen eri kohdista, saadaan tuhka erotetuksi vielä tarkemmin eri raakoostumuksiksi. Eestissä on tätä asiaa selvitetty ja suomalaisen asiantuntijaryhmä on suunnitellut tutkimismatkaa ensi keväänä sinne tämän asian selvittämiseksi.

Kunnallistekniikan rakentamiseen soveltuvat tuhkat ja kuonat hyvin, koska niiden tilavuuspaino on pieni (1,2 - 1,8 t/m³), jolloin pehmeillä savi-alueilla ja varsinkin ranta-alueilla maanpinnan painuminen jää pienemmäksi kuin luonnon maa-aineksilla. Jätteiden aiheuttama korroosio putkille ja muille rakenteille ei myöskään vaikuta olevan vakava ongelma.

Helsingissä on tuhkien ja polttojätteiden määrä t/vuosi kehittynyt suunnilleen seuraavasti:
voimalaitosten pohjakuona polttolaitosten
lentotuhka kuona

v.1971	28 000	38 000	
v.1978	140 000	35 000	25 000
v.1985	180 000	20 000	50 000

Helsingin kaupunki käyttää rakennustoiminnassaan maa-aineksia vuodessa noin 1,5 milj. m³, joista Helsingin ulkopuolelta tulee n.1,1 milj. m³. Ylijäämämassoja, jotka eivät sovellu rakentamiseen, syntyy noin 0,8 milj. m³ vuodessa. Polttojätteiden ja tuhkien hyötykäytöllä voitaisiin vuonna 1985 korvata maa-aineksista noin 15 %, mutta jos näin ei menetellä, tarvitaan vaihtoehtoisesti lisää 25 % kaatopaikkoja.

Tuhkan ja polttojätteen hyötykäyttö on saatujen kokemusten perusteella järkevää. Helsingin kaupungilla tulisikin käynnistää kehitystyö, että näille jäteaineksille löytyisi käyttöä ainakin kaupungin omassa rakennustoiminnassa.

Konferenssin jälkeen geoteknisessä toimistossa laadittiin alustava suunnitelma ns. tuhkaprojektista, Projektista on käyty alustavia neuvotteluja

rakennusviraston katurakennusosaston ja energia-
laitoksen kanssa. Tutkimuksessa on pääpaino maas-
tossa tehtävällä koerakentamisella ja valmiiden
rakenteiden käyttöominaisuuksien selvittämisellä.
Tutkimus on jo käynnistynyt korroosioselvitysten
osalta. Sen sijaan varsinaisesta rakennusteknii-
lisestä tutkimuksesta ei ole vielä tehty päätöstä.

Matkakertomuksen laatijat toivovat, että koko
tuhkaprojekti voitaisiin käynnistää, jolloin Hel-
singin kaupunki pääsisi mukaan siihen tutkimus-
ja kehitystyöhön, johon muualla maailmassa ollaan
siirtämässä runsaasti voimavaroja.

Helsingissä maaliskuun 1 päivänä 1979

Uko Antikainen Keijo Kallio Matti

Liitteet:

Liite I: Tuhkaprojektin suunnitelma

Liite II: Konferenssin keskeisiä artikkeleita



UA/JH/em

Päivämäärä

Helsinki 15.2.1979

TUHKAPROJEKTI

TUTKIMUSSUUNNITELMA TUHKAN JA KUONAN HYÖTYKÄYTÖSTÄ RAKENTAMISESSA

1. JOHDANTO

Rakentamiseen tarvittavan luonnonmaan saanti vaikeutuu Helsingissä ja sen lähiympäristössä sopivien materiaaliesiintymien vähentyessä ja kuljetusmatkojen pidentyessä. Lähitulevaisuudessa joudataankin luonnonmateriaali ainakin osittain korvaamaan muilla tarkoitukseen sopivilla materiaaleilla. Toisaalta lisääntyvien teollisuus- ja yhdyskuntajättemäärien vuoksi kasvaa sopivien jätteen sijoittamiskohteiden tarve.

Helsingin kaupungin Hanasaaren ja Salmisaaren voimalaitosten jätetuhka soveltuu tämän hetken tietämyksen mukaan sekä sideaineeksi että runkoaineeksi ja sillä on tulevaisuudessa huomattava merkitys korvaavana rakennusmateriaalina. Tuhkasta suurin osa on ns. lentotuhkaa ja loppu ns. pohjatuhkaa. Tällä hetkellä tutkitaan lentotuhkan hyväksikäyttömahdollisuuksia miltei kaikissa teollisuusmaissa, joissa käytetään hiiltä polttoaineena. Eri maiden tutkimustuloksista saadaan viitteitä tuhkan ominaisuuksista ja käyttösovellutuksista yleensä. Esimerkiksi Iso-Britanniassa on käytetty lentotuhkaa täyttö- ja pengermateriaalina jo 1950-luvulta lähtien. Tuhkan laatu vaihtelee raaka-aineena käytetyn hiilen laadusta, polttolaitteistosta ja polttomenetelmästä riippuen. Sen vuoksi on kunkin voimalaitoksen tuhkan ominaisuudet ja soveltuvuus rakentamiseen selvitettävä erikseen. Hanasaarella ja Salmisaarella syntyy tuuhkaa vuosittain yhteensä noin 170 000 tonnia. Tämä määrä lisääntyy huomattavasti, kun Salmisaaren voimalan uusi laajennus käynnistyy.

Mikäli syntyvä lentotuhka käytetään pääasiassa katurakennuskohteissa, arvioidaan taloudellisen säästön olevan Helsingin kaupungille vähintään 1 milj.

mk/vuosi. Jos lentotuhkaa voidaan käyttää korvaamaan pääasiassa sementtiä on sen arvo vähintään 10 milj. mk/vuosi.

Helsingin kaupunki tuottaa Kyläsaaren polttolaitoksessa yhdyskuntajätteen polttamisessa syntyvää polttojätettä. Tätä syntyy tällä hetkellä noin 25 000 tonnia. Polttojätteen määrä lisääntyy merkittävästi, jos Kyläsaaren polttolaitosta laajennetaan. Polttojätteen hyötykäytöllä katu- ja puistorakentamisessa voidaan saavuttaa myös merkittäviä kustannussäästöjä.

2.

TUTKIMUKSEN SUORITUS

Sivutuotteiden ja jätteen hyväksikäytön selvittämiseksi olisi tarpeellista suorittaa Helsingin kaupungin toimesta tutkimus, jossa selvitetään voimalaitostuhkan ja polttojätteen soveltuvuutta kaupungin rakentamistarkoituksiin, kuten esim. katurakenteisiin, pengertäyksiin, kenttien rakenteisiin, kanavatäyttöihin, stabilointeihin ja kasvualustoiksi.

Tutkimuspaikaksi sopisi Helsingin kaupungin rakennusviraston katurakennusosaston vesi- ja tielaboratorio. Paikan käyttökelpoisuutta puolustaa jätteen polttolaitoksen ja Hanasaaren voimalaitoksen läheinen sijainti sekä laboratorion läheisyydessä olevan kentän käyttömahdollisuus rakentamiskokeisiin. Tutkimus voitaisiin aloittaa vuoden 1979 alkupuolella ja ensimmäinen vaihe päättyisi v. 1980. Siitä annettaisiin raportteja noin 2 kk välein. Ensimmäisen vaiheen raportti valmistuisi v. 1980 lopussa. Tutkimusta jatkettaisiin erikseen ohjelmoitavalla seurantavaiheella, ja loppuraportti valmistuisi v. 1981 loppuun mennessä.

Tutkimus jakautuisi laboratorio- ja kenttäkokeisiin. Nämä liittyisivät kiinteästi toisiinsa.

Laboratoriokokeissa tutkittaisiin sekä polttojätteen että lentotuhkan rakentamisen kannalta merkittävimmät geotekniset ominaisuudet sekä tehtäisiin kokeita lentotuhkan, polttojätteen ja muun runkoaineen seoksilla.

Kenttäkokeet tehtäisiin lentotuhkalla, polttojätteellä, pohjatuhkalla sekä niillä seoksilla, joilla saadaan laboratoriokokeissa paras lujuus. Kenttäkokein selvitetäisiin tiivistämistavan, kerrospaksuuden ja tiivistysmäärän vaikutusta kantavuusominaisuuksiin. Lujuuden kehitystä seurattaisiin myös kentällä valmiissa rakenteissa.

Tuhkatutkimuksessa huomioidaan VTT:ssä ja Imatran Voima Oy:n laboratorioissa parhaillaan käynnissä olevat selvitykset.

Lentotuhkan korroosiovaikutukset selvitetäisiin erillisellä tutkimuksella Tampereen Teknillisen korkeakoulun rakennustekniikan osastolla sekä mahdollisesti Helsingin kaupungin energialaitoksen laboratoriossa. Korroosiovaikutuksen selvittämiseksi lentotuhkan sekaan asennettaisiin erilaisia vesijohtoputkia, viemäriputkia, kaapeleita ja teräsbetonikappaleita.

Puisto-osaston ja katurakennusosaston vesilaboratorio suunnittelevat erikseen puhdistamon lietteestä ja tuhkasta tehtäville seoksille suoritettavan ns. kasvualustan tutkimuksen.

3.

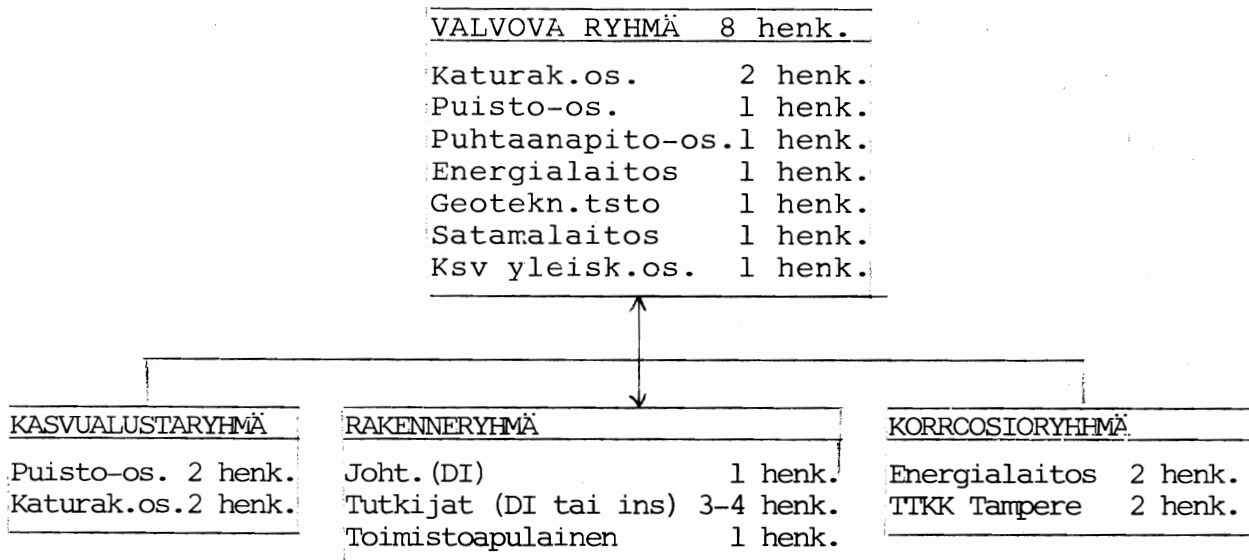
RAKENNERYHMÄN ORGANISAATIO JA RAHOITUS

Tuhkatutkimusta varten muodostettaisiin kolme ryhmää (kaavio), joiden työtä valvoisi Helsingin eri virastojen ja laitosten edustajat. Rakenneryhmää johtaisi DI Jorma Havukainen, joka on parhaillaan virastotyöntekijänä geoteknillisessä toimistossa ja joka on tehnyt ko. alalta diplomityönsä. Rakenneryhmän muut henkilöt pyritäisiin kokoamaan työvoimatoimiston virastotyöntekijöistä. Ainakin rakenneryhmän johtaja tulisi kiinnittää tutkimukseen koko projektin ajaksi. Rakenneryhmän työtä avustaisivat tielaboratorio ja geoteknillinen toimisto. Muut tutkimusryhmät muodostettaisiin kaupungin palveluksessa olevista henkilöistä.

Työskentelypaikaksi on suunniteltu vesi- ja tielaboratoriota Kyläsaarella.

Tutkimuksen rahoitukseen pyritään saamaan työvoimatoimisto henkilöstön palkkakustannusten osalta. Virastotyöntekijät olisivat katurakennusosaston palveluksessa. Geoteknillinen toimisto antaisi asiantuntija-apua ja energialaitos toimittaisi tarvittavat tutkimusmateriaalit.

TUHKAPROJEKTIN ORGANISAATIO



TYÖSKENTELYPAIKKA: Kyläsaaren vesi- ja tielaboratoriot ja viereinen täyttöalue
 Energialaitoksen laboratorio
 TTKK:n rakennustekn. os. Tampere

RAHOITUS:

TYÖVOIMATOIMISTO

HELSINGIN KAUPUNKI

- HKR Katurak.os.
- Energialaitos
- Geotekn.toimisto

Jorma Havukaisen laatima lyhyt kirjallisuusselvitys

LENTOTUHKAN KÄYTTÖSOVELLUTUKSISTA

1. JOHDANTO

Kivihiilituhkaa on joissakinteollisuusmaissa käytetty jo yli 20 vuotta rakennusmateriaalina. Kiinnostus kaikkien jätteiden ja sivutuotteiden hyötykäyttöä kohtaan on kasvanut voimakkaasti. Kaikkialla maailmassa uhrataan huomattavia summia alan tutkimukseen, koska tiedetään, että uhraukset voidaan saada monin verroin takaisin.

Tuhkaa käytettäessä voidaan materiaalikustannuksia säästää seuraavien keinoin:

1. Sora- ja hiekkakustannuksissa säästetään korvaamalla ainakin osa ko. materiaaleista lento- ja pohjatuhkalla.
2. Sementti- ja kalkkikustannuksissa säästetään korvaamalla osa sideaineista lentotuhkalla.
3. Lentotuhkaa voidaan käyttää sideaineseoksen osana stabiloitaessa jätemaita, jotka näin saadaan hyötykäyttöön.

Kivihiilituhkaa on käytetty ulkomailla muunmuassa taulukossa 1 esitettyihin tarkoituksiin.

Taulukko 1. Lentotuhkan käyttökohteita

<u>Runkoaineena</u>	<u>Sideaineena</u>
Penkereet x)	Betoni
Tierakenteet x)	Maan stabilointi
Maapadot	
Täytöt x)	
Tiilet	
Kasvualustat	

x) Käytetään myös pohjatuhkaa

Tuhkan ja muiden jäteaineiden - kuten polttolaitoksen kuona ja puh-

distamojäte - seoksia, sekä kutakin jäteainetta erikseen voidaan käyttää monissa kaupungin rakennuskohteissa. Esimerkkeinä mainittakoon kevyen liikenteen tiet, meluvallit, täyttömäet, pihat, pysäköintipaikat ja puistojen kasvualustat.

2. KIVIHIILITUHKAN OMINAISUUKSISTA

2.1 Kemiallinen koostumus

Seuraavassa taulukossa on esitetty muutamia kivihiilituhkien koostumuksia.

Taulukko 2. Lento- ja pohjatuhkan kemiallinen koostumus,

Yhdiste	Lentotuhka					Pohjatuhka
	Suomi		Helsinki	Iso-Britannia	USA	USA
	Puolal.	Neuvostol.	Hanasaari x)			
SiO ₂	48,2-49,8	60	47,6	48	40 - 50	20 - 60
Al ₂ O ₃	22 - 22,1	22	20,8	27	5 - 35	10 - 35
Fe ₂ O ₃	10,6	8	10,2	9	5 - 40	5 - 35
CaO	6,4- 6,8	0,5	6,4	3,3	1 - 15	1 - 20
TiO ₂				0,9		
MgO	4,0- 4,3	2,5	4,6	2,0	0,3 - 4	0,3 - 4
Na ₂ O	0,09-0,20		0,8	1,2	0,3 - 4	1 - 4
K ₂ O	0,12-0,17		2,0	3,8		1 - 4
SO ₃			0,6	0,6	0,1 - 4	0,1 - 12

x) Yksittäisen näytteen analyysi.

Helsingissä käytetään 90 % puolalaista ja 10 % neuvostoliittolaista hiiltä. Lentotuhka on alkaalinen materiaali ja sen pH vaihtelee välillä 10 - 13.

2.2 Geotekniset ominaisuudet

Raekoko

Savukaasuista mekaanisin tai sähköisin erottimin talteenotettava lentotuhka vastaa raekooltaan silttiä.

Arinan pohjalle jäävää ainesta kutsutaan joko pohjatuhkaksi tai pohjakuonaksi riippuen voimalaitoksen käyttämästä polttomenetelmästä. Rakeisuus vastaa hienon tai hiekkaisen soran rakeisuutta.

Ominaispaino

Lentotuhkarakeet ovat ominaispailholtaan $2 - 4 \text{ kN/m}^3$ kevyempää kuin luonnon kivennäismaa. Sen paino vaihtelee välillä $22 - 25 \text{ kN/m}^3$.

Pohjatuhkan ja -kuonan ominaispaino on $23 - 28 \text{ kN/m}^3$.

Vesipitoisuus ja plastisuus

Lentotuhkien ominaisuudet muuttuvat yleensä jo melko vähäisistä vesipitoisuuden muutoksista. Plastiset ominaisuudet voivat kuitenkin vaihdella eri voimalaitosten tuhkillä huomattavasti. Tuhka on yleensä pölyämätöntä, kun vesipitoisuus on yli 13 %. Helsingin kaupungin lentotuhkan optimivesipitoisuus on aikaisempien kokemusten mukaan 18 - 25 %.

Pohjatuhkan vesipitoisuudella ei ole materiaalin ominaisuuksille niin suurta merkitystä kuin lentotuhkalla.

Tilavuuspaino ja tiiveysominaisuudet

Maksimikuivatilavuuspaino vaihtelee Helsingin lehtotuhkillä välillä $12 - 15 \text{ kN/m}^3$. Märkänä vastaava arvo on $14 - 18 \text{ kN/m}^3$. Kenttäoloissa tiivistetyn lentotuhkan märkápaino vaihtelee välillä $13 - 16 \text{ kN/m}^3$.

Parhaaksi tiivistämisvälineeksi pengerrakenteissa on todettu joko täryttävä teräsvalssi- tai kumipyöräjäyrä, jonka paino voi olla jopa 10 tonnia. Sorkkajyrä repii lentotuhkakerroksen pinnan löyhdyttäen tätä.

Vedenläpäisevyys

Lentotuhkan vedenläpäisevyys vaihtelee yleensä välillä 10^{-4} - 10^{-8} m/s. Tiivistettynä ja kovettuneena tuhkan läpäisevyys on erittäin pieni tai olematon.

Pohjatuhkan vedenläpäisevyys on huomattavasti suurempi kuin lentotuhkan ja sen vedenläpäisevyyskerroin $k > 10^{-4}$ m/s.

Kapillaarisuus ja routivuus

Kapillaarinen nousukorkeus on lentotuhkalla yli 2 m. Kapillaarisuutensa (>1000 mm) ja rakeisuutensa perusteella lentotuhka on routiva materiaali. Kuitenkin lentotuhkan ja veden seos tulee kovettuessaan niin lujaksi, että jään muodostumisen yhteydessä ei merkittäviä tilavuuden muutoksia (routanousuja) pääse tapahtumaan. Lisäksi tiivistetyn ja lujittuneen lentotuhkan vedenläpäisykyky on niin pieni, että routimiselle välttämätön lisäveden saanti on mahdotonta.

Pohjatuhka ei karkean raekoostumuksensa vuoksi ole routivaa.

Kokoonpuristuvuus

Lentotuhkan pitkäaikainen kokoonpuristuminen on lujittumisen vuoksi vähäinen. Imatran Voima Oy:n tekemissä kokeissa on todettu, että kokoonpuristuminen on kompressiometrillä mitattaessa jo 4 sekunnin kuluttua yli puolet kuormitusportaan 1 vrk:n painumasta ja 49 sekunnin kuluttua noin 80 % kuormitusportaan kokonaispainumasta. Optimivesipitoisuudessa olevan sullotun näytteen kokoonpuristuma oli noin 3 % 800 kN/m^2 kuormituksella.

Iso-Britanniassa lentotuhkaa on käytetty sellaisissa paikoissa, joissa pienetkin painumat ovat haitallisia.

Pohjatuhkan painuminen on ilmeisesti vähäistä kuten hiekalla ja soralla.

Leikkauslujuus

Lentotuhkan lujuus koostuu kitkasta ja koheesiosta. Kitkakulma ϕ vaihtelee iästä ja tiiveydestä riippuen välillä 15 - 40°. Koheesio riippuu iästä, tiiveydestä ja vesipitoisuudesta. Täysin kuivana tai täysin vedellä kyllästettynä lentotuhkan koheesio $c = 0$, mutta sopivan kosteana se voi olla jopa 250 kN/m². Talvikaikana lujuuden kehitys on hidasta, mutta kiihtyy uudelleen ke-sällä. Pohjatuhkan lujuus koostuu pelkästään kitkasta. Kitkakul-ma ϕ on 38 - 50°.

2.3 Reaktiiviset ominaisuudet

Pozzolaanisuus

Lentotuhka on pozzolaaninen yhdiste, joka reagoi kosteana kal-siumhydroksidin kanssa tavallisissa lämpötiloissa muodostaen lu-jittavia sidoksia. Pozzolaanisuus riippuu etenkin piidioksidin (SiO₂) ja alumiinioksidin (Al₂O₃) yhteismäärästä. Kalsiumoksidin (CaO) ja veden läsnäolo saa aikaan lujittavia reaktioita.

Lentotuhkan pozzolaanisia ominaisuuksia käytetään hyväksi semen-tin ja kalkin korvaamisessa muunmuassa valmistettaessa betonia ja stabiloitaessa maata.

Pohjatuhka ei karkeampana materiaalina ole kemiallisesti niin aktiivinen kuin lentotuhka.

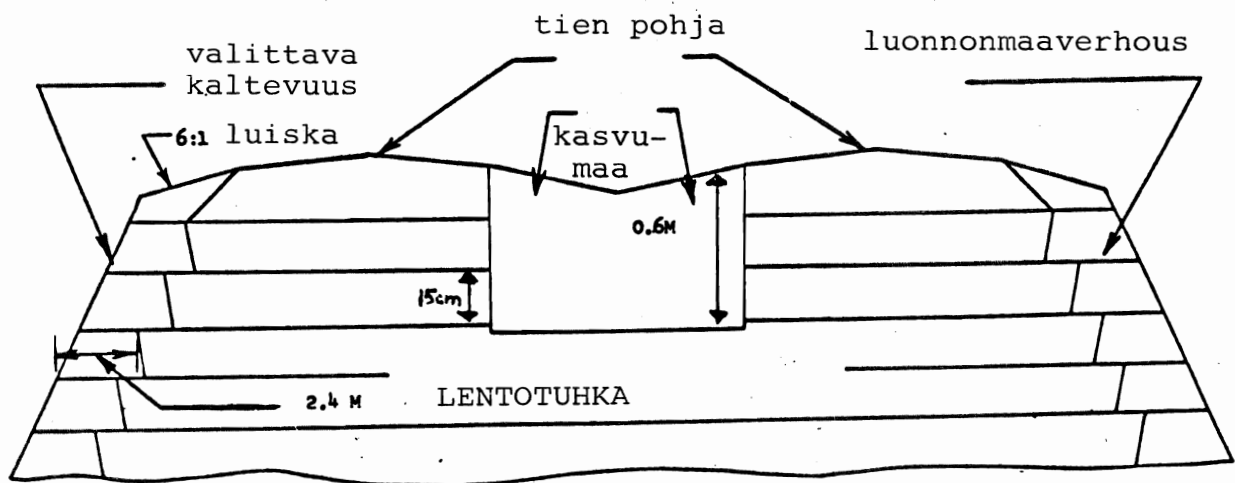
Korroosio-ominaisuudet

Lentotuhkalla ei tämänhetkisten tietojen mukaan ole korroosiota synnyttäviä ominaisuuksia. Lentotuhkaa käytetään muunmuassa beto-nin syöpymiskestävyyden parantamiseen.

Alkaalisena materiaalina lentotuhka muodostaa ainakin teräksen pinnalle suojakalvon, joka estää syövyttävien yhdisteiden pääsyn materiaaliin.

- Täyttö huokoisella kitkamaalla 0,6 m yli vedenpinnan.
- Kitkamaakerroksen päälle lentotuhkapenger, korkeus noin 1 m, paitsi kahden siltarampin kohdalla, joissa korkeus 8,5 m.
- Luiskat tehtiin luonnonmaasta.
- Tuhka levitettiin 15 - 35 % kosteudessa 15 cm paksuina kerroksina tiivistäen 85 % suhteelliseen tiiveyteen, tällöin proctor-neulan vastusarvo oli oltava vähintään 240 kN/m^2 .
- Keskelle pengertä tehtiin 0,6 m paksu kasvumaatäyte.

Kuvassa 1 nähdään tyypillinen penkereen poikkileikkaus.



Kuva 1. Tyypillinen lentotuhkasta rakennettu tiepengerpoikkileikkaus.

Tiivistykseen käytettiin 10 tonnin täryjyrää. Keskitiiveys oli 97,3 %.

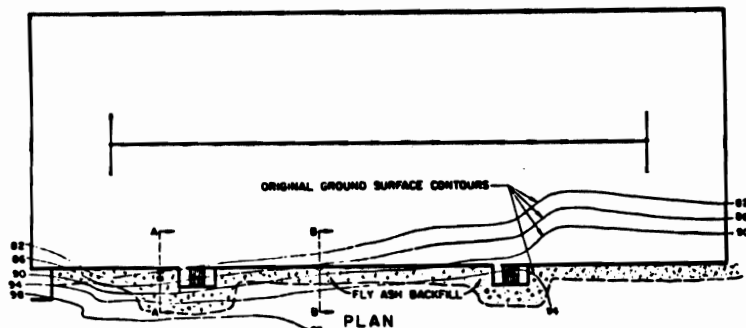
Havaintoja kenttätöistä

Tiivistystyö ei ollut vaikeaa sadesäälläkään ja tuhka käyttäytyi paremmin kuin luonnonkoheesiomaat vastaavissa oloissa. Rankkasateen päätyttyä ja penkereen kuivuttua vapaata kalkkia ilmestyi penkereen pinnalle. Vesi teki usean kymmenen sentin syvyisiä ojia suojaamattomiin luiskiin.

Jäätyminen ja sulaminen tapahtui hitaammin kuin lähistön luonnonmaissa. Pinnan sulamisen jälkeen tuhka muuttui epästabiilimaksi vesipitoisuuden lisääntyessä ja jäälinssien estäessä vedenvirtauksen alaspäin. Suhteellisen pienen kuiva-ainemäärän lisääminen paransi tiepenkereen työmaaliikennekuntoiseksi. Kuitenkin koko routaantuneen kerroksen sulamisen päätyttyä penkereen stabiliteetti palasi ennalleen 2 - 4 päivässä.

3.2 Lentotuhkatäyte jäykän kulmatukimuurin takana (lyhennelmä)
JOSHI, R.D., DUNCAN, D.M., DURBIN, W.L., Woodward-Clyde
Consultants, Kansas City, Mo, U.S.A.

Kansas City'ssä Missourissa käytettiin 1975-1976 lentotuhkaa 6,5 m korkean ja 70 m pitkän tukiseinän taustatäytteenä. Seinä ympäröi 3-kerroksista pysäköintitaloa, jonka mitat ovat 35 x 70 m, kuva 2 a. Tukimuuri on teräsbetoninen, ankkuroitu ja lepää kalkkikivi- ja liuskekerrosten päällä, kuva 2 b.



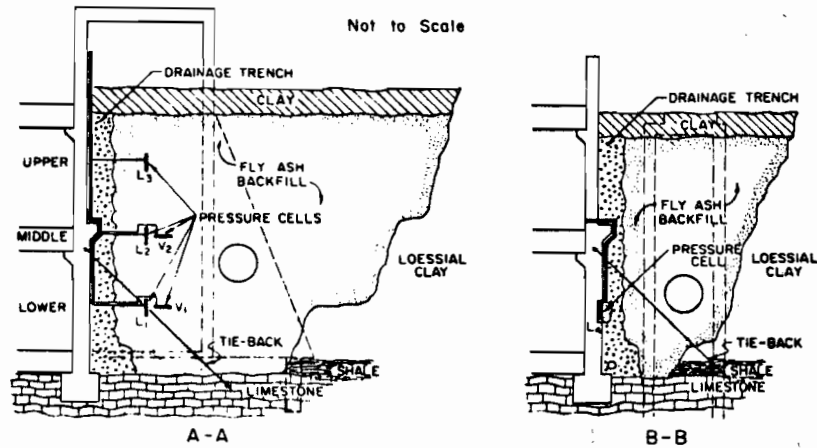
Kuva 2 a. Tukimuurin rakennussuunnitelma.

Täyttötöyö

Noin 3500 tonnia lentotuhkasta saatiin suoraan laitoksesta nimeltä Grand Avenue Power Plant of Kansas City Power and Light Company. Tuhkan ja tukimuurin väliin pantiin noin 60 cm paksu salaojakerros käyttäen raekooltaan 13 - 19 mm olevaa mursketta. Lentotuhka levitettiin 20 - 25 cm paksuina löyhinä kerroksina ja tiivistettiin 2 - 3 kertaa tärylevyllä. Vesipitoisuus oli keskimäärin 22 % ja märkäpaino tiivistettynä $14,5 \text{ kN/m}^3$.

Tiivistetyn lentotuhkan lujuus oli kuukauden kuluttua 1,0 - 2,3 MPa.

Lentotuhkatäytteen päälle ajettiin lopuksi savikerros.



Kuva 2 b. Tukimuurin poikkileikkaukset A-A ja B-B.

Maanpaine

Täyttötyön aikana valvottiin maanpaineen kehittymistä täytteessä. Useissa eri kohdissa tehtyjen mittausten mukaan paineet olivat yleensä alle teoreettisesti laskettujen arvojen. Sivupaineiden pienuus johtui itsekovettumisesta.

Kustannussäästöt

Lentotuhkan käytöllä säästettiin tukiseinän kokonaishinnassa noin 15 %. Suurimmat säästöt syntyivät siitä, että voitiin vähentää käytettävän betonin ja terästen määrää. KCPL myi lentotuhkan hintaan 1,50 dollaria/tonni (n. 6 mk/tonni), mikä on vähemmän kuin tavanomaisella materiaalilla oleva hinta.

Projektin kokonaiskustannukset olivat noin 13 miljoonaa dollaria (n. 50 milj. mk). Tukiseinän kustannukset olivat noin 20 % projektin kustannuksista. Lentotuhkan käytöllä arvioitiin saavutetun noin 39000 dollarin (n. 150 000 mk) säästö.

3.3 Lentotuhkatäyte öljysäiliön pohjana (lyhennelmä)
JOSHI, R.C., DUNCAN, D.M, DURBIN, W.L., Woodward-Clyde
Consultants, Kansas City, Mo., U.S.A.

KCPL rakensi 3,8 miljoonan litran öljysäiliön Missourin tulvasangolle Hawthornen voimalaitokselle. Pohjamaa koostui noin 6 metrin paksuisesta pehmeästä, erittäin plastisesta savikerroksesta, jonka alapuolella oli noin 18 metriä paksu löyhästä keskittiiviiseen vaihteleva hiekkakerros. Painumien minimoimiseksi pehmeät savet piti korvata sopivalla täytteellä.

Laboratoriokoetulosten perusteella varastossa oleva lentotuhka valittiin säiliön pohjan täytemateriaaliksi. Lentotuhkaa käytettiin myös tulvavesien estämiseksi tehdyn padon rakentamiseen noin 4000 tonnia. Pehmeät maat kaivettiin rakennttavan säiliön kohdalta pois ja lentotuhkaa ajettiin tilalle 20 - 25 cm paksuina kerroksina. Tiivistys suoritettiin ensin D-5 puskutraktorilla ja sen jälkeen täryvalssijyrällä ja 10 tonnin kumipyöräjyrällä.

Varastoidun lentotuhkan kosteuspiitoisuus vaihteli välillä 18 - 38 %. Suurikaan vesipitoisuuden vaihtelu ei aiheuttanut sanottavasti tiivistämisvaikeuksia ja 95 % tiiveys (ASTM D 698-70) voitiin saavuttaa.

Säiliö koekuormitettiin vedellä 1,1-kertaisesti verrattuna odotettavissa oleviin öljyn aiheuttamiin kuormiin. Painumamittauksia tehtiin neljässä pisteessä. Pienin painuma oli 1,3 cm ja suurin 2,5 cm.

Säiliö on ollut käytössä jo 3 vuotta, eikä haitallisia painumia ole esiintynyt.

3.4 Plastisen saven stabilointi (lyhennelmä)

JOSHI, R.C., DUNCAN, D.M., DURBIN, W.L., Woodward-Clyde Consultants, Kansas City, Mo., U.S.A.

Kansas City Power and Light Company'n teollisuusalueella sijaitseva tienpohja koostuu erittäin plastisesta savesta, jonka juoksuraja on 65 %, plastisuusluku 43 % ja CBR-luku 3,5 %. Kaupungin erikoismääräysten mukaan tiivistetyn pohjamaan plastisuusluku on oltava pienempi kuin 10 %. Päällysten piti olla asfalttia tai vastaavaa materiaalia, paksuudeltaan 30 cm ko. maalla. Laitos käytti lentotuhkaa pohjamaan ominaisuuksien parantamiseen, jolloin voitaisiin tehdä ohuempi päällyste.

Laboratoriotutkimukset

Kokeita tehtiin savelle, johon oli lisätty 5 % kalkkia, 15 ja 20 % Hawthornen tai 15 % La Cygnen lentotuhkaa. Tulokset osoittivat, että kalkki vähensi enemmän maan plastisuutta kuin lentotuhka. Lentotuhkan lisääminen muutti enemmän juoksurajaa kuin kieritysrajaa. Lisättäessä 20 % lentotuhkaa ei saavutettu merkittävästi parempia tuloksia kuin käytettäessä 15 % lentotuhkaa. Maa-tuhkaseoksen sitouduttua rauhassa 5 päivän ajan, plastisuusluku oli pienentynyt.

Tiivistyskoetulosten mukaan 5 %:n kalkkilisäys vähensi maksimikuivatilavuuspainoa ja lisäsi optimivesipitoisuutta. Hawthornen lentotuhkalla oli samanlainen vaikutus, tosin vähäisempi. Sen kalkkipitoisuus on noin 3 % ja ominaispaino 24 kN/m^3 . La Cygnen tuhkan käyttö nosti maan maksimikuivatilavuuspainoa. Sen suuri ominaispaino (29 kN/m^3) johtuu sen sisältämien kalsiumsulfaatin ja kalsiumkarbonaatin suuresta määrästä.

Lujuus- ja CBR-kokeiden tulosten perusteella voitiin sanoa, että kalkin ja lentotuhkan lisääminen paransi plastisen saven lujuusominaisuuksia.

Rakentaminen

La Cygnen lentotuhkan osoittautuessa vaikeaksi käsitellä, stabilointiin käytettiin Hawthornen lentotuhkaa, jonka pitoisuus oli 15 %. Tiessä käytettiin 23 cm paksua asfalttipäällystettä, jonka alla oli saman paksuinen stabiloitu savikerros, joka tehtiin kahdessa 12 cm:n kerroksessa.

Lentotuhka kuljetettiin sementtiautoilla ja levitettiin ennakolta muokatun pohjamaan päälle. Pölyäminen oli huomattavaa. Sekoitus suoritettiin koneellisesti. Sen aikana lisättiin vettä. Tiivistys tapahtui siten, että ensin tiivistettiin sorkkajyrällä, tasoitettiin, ja tiivistettiin taas. Lopuksi tiivistettävän pinnan yli ajettiin kertaalleen teräsvalssijyrällä. Tiiveys- ja vesipitoisuuskokeet tehtiin ydintiiveyskoemittarilla sekä konventionaalisella menetelmällä.

Tiivistetyn stabiloidun kerroksen annettiin sitoutua 1 viikon ennen päällystämistä. Rankkasateet päällystystyön yhteydessä eivät aiheuttaneet suuriakaan ongelmia. Mikäli stabilointia ei olisi suoritettu, pohjamaa olisi sateen vaikutuksesta tullut käyttökeltomaksi.

Kenttäkokeet ja -havainnot

Kentällä suoritettujen CBR-kokeiden arvot olivat suurempia kuin laboratoriokoe-arvot, ne suurenivat ajan kuluessa. Sen perusteella maa-lentotuhkaseosten lujuus kasvaa ajan myötä.

Tie on ollut kevyen kuorma-autoliikenteen alaisena yli 3 vuotta ja on osoittautunut erinomaiseksi.

Yhteenvedo KCPL:n lentotuhkan käyttösovellutuksista

Itsekovettuvia lentotuhkia käytettiin onnistuneesta tavanomaisten rakennusmateriaalien sijasta kolmessa eri kohteessa. Lentotuhkan käytöllä saavutettiin kustannussäästöjä. Rakenteet ovat edelleen hyvässä kunnossa.

Lentotuhkatäytteen todettiin synnyttävän suhteellisen pieniä maanpaineita.

Kenttäkokeiden mukaan lentotuhkaa voidaan menestyksellisesti tiivistää, vaikka kosteuspitoisuus vaihtelisi selvästi optimin molemmiin puolin.

Pozzolaanista lentotuhkaa voidaan käyttää plastisen saven plastisuusluvun pienentämiseen ja lujuusominaisuuksien parantamiseen.

- 3.5 Lentotuhkan soveltuvuus padonrakennusmateriaaliksi (lyhenelmä)
- LAMB, D.W., Acres American Inc., Buffalo, NY,
HERRMANN, E., Potomac Electric Power Company, Washington, D.C.
PIZZELA, J., Potomac Electric Power Company, Washington, D.C.

Johdanto

Maryland Public Service Commission määräsi, että The Potomac Electric Power Companyn (PEPCO) uuden 850 MW:n kivihiiltä polttavan, 1982 valmistuvan voimalaitoksen suunnitelmaan tuli sisällyttää 1,3 miljoonan kuutiometrin vesisäiliö kuivien aikojen varalle. Vuoden 1966 kuivuuden aikana läheinen Potomac-joki ei pystynyt turvaamaan kaupungin vedentarvetta moneen päivään.

Lentotuhkan nykyistä käyttöä rakentamisessa koskeva katsaus osoitti, että lentotuhkan käytöstä on riittävästi kokemusta, jotta materiaalia voitiin käyttää padon rakentamiseen. Lähistöllä sijaitseva, jo aikaisemmin rakennettu voimalaitos tuottaa 170 000 tonnia lentotuhkaa vuodessa.

Suunnitelmaan liittyviä keskeisiä asioita

Maapadon tärkeimmät vaatimukset vedenpinnan laskiessa altaassa nopeasti ovat:

- Vedenpuoleinen osa vettäläpäisevä, jotta materiaaliryöstymiä ei syntyisi.
- Vettä läpäisemätön sydän suotovirtauksen rajoittamiseksi.

- Suodatin- ja salaojakerrokset alavirranpuolelle sydäntä suoto-vesien johtamista ja hydraulisen murtuman estämistä varten.
- Alavirran puoleinen luiska riittävän painavasta materiaalista sydämen tukemiseksi.
- Riittävän hyvät perustukset.

Tultiin siihen tulokseen, että lentotuhkan käytöllä saavutettaisiin huomattavia säästöjä verrattuna luonnonmateriaaliin.

Laboratoriokokein määritettiin raekoko, tiivistymisominaisuudet, leikkauslujuus, konsolidaatio-ominaisuudet, vedenläpäisevyys- ja käsiteltävyysominaisuudet. Kenttäkokein selvitettiin samoja ominaisuuksia.

Todettiin, että lentotuhkaa on helppo käsitellä ja tiivistää. Sen vedenläpäisevyys- (10^{-4} cm/sek.) ja konsolidoitumisominaisuudet ovat sellaiset, ettei rakenteen huokosvedenpaine lisäännä.

Kuitenkin lentotuhka on eroosioherkkä materiaali, joka on suojattava suodatinkerroksella, jotta hienoaainesten poiskulkeutuminen estyisi.

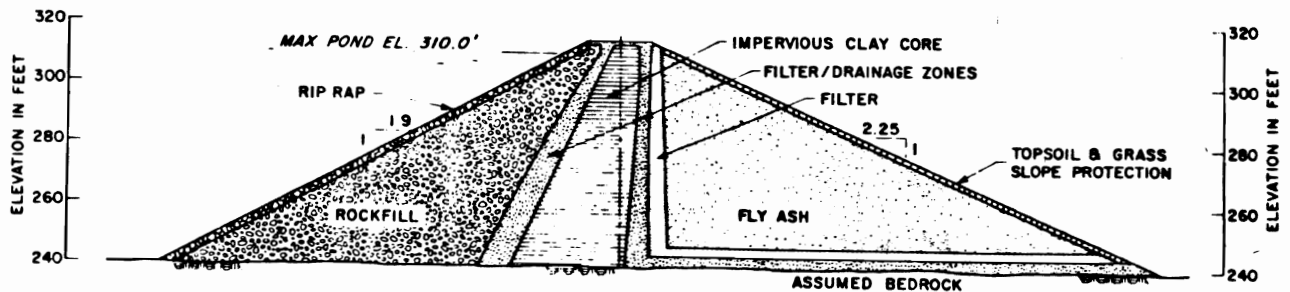
Kaikki rakenteet on tiivistettävä ainakin 70 % suhteelliseen tiiveyteen. Vedenläpäisevyyden marginaaliarvo patorakenteissa on 10^{-4} cm/sek. lukuunottamatta patoja, joihin on tehty erittäin paksu sydän.

Patopoikkileikkauksia

Projektissa suunniteltiin kaksi vaihtoehtoista poikkileikkausta, joissa yhtenä materiaalina on lentotuhka, kuvat 1 ja 2.

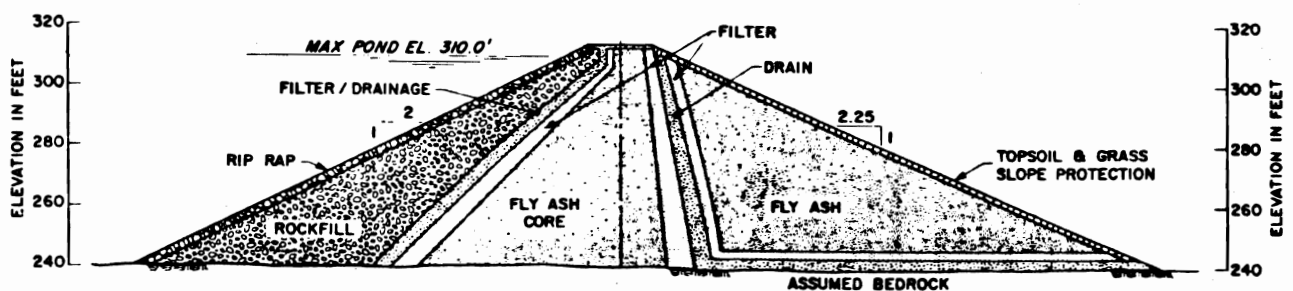
Ensimmäisessä leikkauksessa alavirran puoleinen osa on rakennettu lentotuhkasta, joka on suojattu suodatin- ja salaojakerroksilla. Näiden avulla pidetään lentotuhka kuivana ja estetään eroosion syntyminen. Vedenpuoleinen luiska on tehty murskeesta, joka takaa

stabiliteetin veden äkillisten laskujen yhteydessä. Tiivistetty lentotuhka ei ole riittävän läpäisevä materiaali tähän tarkoitukseen. Lentotuhkan osuus padon tilavuudesta on melkein 50 %.



Kuva 1. Lentotuhkapadon poikkileikkaus 1.

Toisessa suunnitelmassa lentotuhkaa käytetään vedenpitävän sydänosan ja alavirranpuoleisen luiskan rakentamiseen. Sisäisen eroosiovaaran poistamiseksi tarvitaan edelliseen verrattuna paksummat suodatin- ja salaojakerrokset. Kenttäkoetulosten perusteella tätä poikkileikkaustyyppiä voidaan käyttää vain tietyissä tapauksissa, sydämen läpi tapahtuvan suotovedenvirtauksen vuoksi. Sitä voidaan käyttää kohteissa, joissa suotovedenvirtauksella ei ole suurta merkitystä, kuten esimerkiksi tuhka-altaan patona.



Kuva 2. Lentotuhkapadon poikkileikkaus 2.

Kustannusten tarkastelu

Kuvien 1 ja 2 poikkileikkausten ja konventionaalisen savisydämelä varustetun murskepadon poikkileikkauksen yksityiskohtaisen kustannusarvion mukaan ovat lentotuhkasta rakennetut padot 5 - 10 % halvempia kuin konventionaalinen pato.

3.6 Lentotuhka kasvumaan ja ympäristön parantajana (lyhennelmä)
BARBER, G., Central Electricity Generating Board, London.

Vaikka yli puolet CEGB:n tuottamasta lentotuhkasta hyödynnetäänkin kaupallisesti, jää silti vielä 3,8 miljoonaa tonnia vuosittain käytettäväksi maanparannustarkoituksiin.

Arvioidaan, että noin 1200 hehtaaria Yhdistyneiden Kuningaskuntien maasta on parannettu lentotuhkalla ja vuosittainen alueen lii- säys on noin 80 hehtaaria.

Tutkimuksissa on todettu, että pääasiallisin maanparakennuksen kan- nalta epäedullinen aine on boori, jota tuoreessa lentotuhkassa on noin 20 kertaa enemmän kuin normaalimaassa.

Toinen kasvinviljelyn kannalta tärkeä tekijä on tuhkan sisältä- mien liukoisten suolojen suhteellisen suuri määrä ja näiden alkaa- linen luonne. Keskeinen alkaalisuuden lähde on kivihiilen sisäl- tämä kalkki. Lentotuhkan pH-luku voi olla yli 8,5, kun taas nor- maalimaalla vastaava arvo on 6,0 - 7,0.

Kasvit voidaan jakaa lentotuhkaa sietäviin ja sietämättömiin (tolerant, intolerant). Apilat olivat kaikkein sietokykyisimpiä. Jotkut ruohot, kuten pyörtänöluste soveltuvat myös viljelyyn erit- täin hyvin. Monet puut ja pensaat ovat myös hyvin tai keskinker- taisesti lentotuhkaa sietäviä.

Monet kasvit kasvavat paremmin sään vaikutuksille alttiina ollees- sa kuin tuoreessa lentotuhkassa.

Tuhkassa on yleensä kasvinviljelyn kannalta liian vähän typpeä ja fosfaatteja. Kaliumia ja muita tärkeitä alkuaineita on taval- lisesti riittävästi. Typen ja fosfaattien lisäämiseksi voidaan käyttää lannoitteita, mutta typen pitäisi olla nitraattien muo- dossa eikä ammoniumsuoloina, jotka menettävät helposti typen kun niitä sekoitetaan alkaaliseen tuhkaan.

Seuraavassa taulukossa on esitetty joitakin puita ja pensaita, joita voidaan kasvattaa lentotuhkassa.

Taulukko 3. Puita ja pensaita, jotka sietävät lentotuhkaa.

sietävät		keskinkertaisesti sietävät	
Puut	Pensaat	Puut	Pensaat
Leppä	Happomarja	Hopeakoivu	Happomarja
Norjan kuusi	(Berberis thun-	Servian kuusi	(Berberis line-
Poppeli	bergii)		raifolia)
Paju	Kanerva		Jotkut viini-
Raita	Jotkut viini-		marjat
	marjat		Piikkiherne

Lentotuhkan käytöllä on tärkeä merkitys maanparannusaineena varsinkin, kun siihen sekoitetaan jotakin toista kasveille suotuisaa jätettä.

ANDRIEUX, P., Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement
Nord-Picardie, France

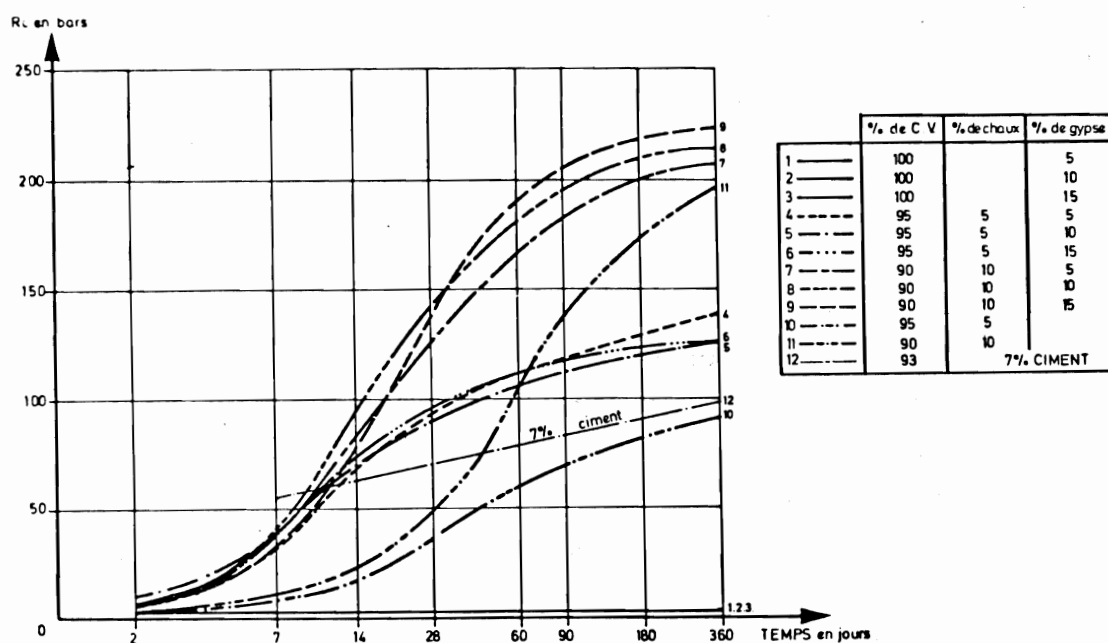
LENTOTUHKAN KÄYTTÖ TIENRAKENNUKSESSA (yhteenvedo)

Ranskassa käytettiin ensimmäisen kerran lentotuhkaa tienrakennuksessa vuonna 1959; sitä käytettiin hiekan ja soran rakeisuuden parantamiseen, koska näistä puuttui hienoaines. Myöhemmin sen osuutta on lisätty hiekan kanssa sekoitettuna, ja pozzolaanisten ominaisuuksiensa vuoksi sen käytöllä on voitu vähentää sementin osuutta rakentamisessa. Lentotuhkaa, johon on sekoitettu 7 % sementtiä, on käytetty perustusten pohjissa vuodesta 1963 lähtien. Tällainen tekninen kehityssuunta on erittäin kiinnostava, koska säästetään runkoainekustannuksia korvaamalla tavanomaiset materiaalit teollisuuden sivutuotteilla, joita on rajoittamattomasti saatavissa. Vuonna 1969 ryhdyttiin uutuutena käyttämään lentotuhkaa ja kalkkia yhdessä.

Nykyään käytetään lentotuhkaa alusrakenteissa pääasiassa seuraavina seoksina:

- lentotuhkaa (91 %) - kipsiä (5 %) - sammuttamatonta kalkkia (4 %).
Tällä seoksella saavutetaan vuodessa 150 barin (15 MPa) lujuus. Sekoitus tapahtuu sekoitusasemalla. Tiivistys suoritetaan kumipyöräajurilla. Ensimmäisten tulosten perusteella näyttää mahdolliselta, että kipsin osuutta voidaan lisätä 5:stä 20:een, jopa 30 %:iin;
- hiekkaa - lentotuhkaa - kalkkia tai sementtiä. Seos on käyttäytynyt erinomaisesti kaikenlaisten liikennemäärien alaisena, mukaanlukien moottoritiet. Lisätutkimuksia tarvitaan seoksen soveltuvuudesta päällysrakenteisiin;
- soratuhkaa, joka koostuu sorasta 0/20 mm (85 %), lentotuhkasta (13 %) ja sammuttamattomasta kalkista (2 %) käyt. vilkkaasti liikennöityjen teiden päällysrakenteisiin (moottoritiet). Tällä materiaalilla on hyvät mekaaniset ominaisuudet, sekoitus

tapahtuu asemalla; tiivistys suoritetaan ensin raskaalla täryjyrällä, sen jälkeen kumipyöräjyrällä.



Kuva 1. Puristuslujuuden kehitys ajan funktiona erilaisilla lentotuhka (C.V.) - kalkki (chaux) - kipsi (Gypse) - seoksilla (1-12). Lujuudet baareina, 1 bar = 0.1 MN/m².

BRADBURY, H.W., Hargreaves Industrial Service Ltd, Iso-Britannia
BOYES, R.G.H., Geotechnical Consultant, Alton, Iso-Britannia

LENTOTUHKA INJEKTOINNISSA

P.F.A. injektointisideaineena

Lentotuhkaa (Pfa = pulverized fuel ash) on injektoinnissa käytetty pääasiassa suurten onkaloiden, kuten käytöstä poistettujen viemäreiden ja kaivosten täyttämiseksi. Sellaisissa töissä sitä on käytetty ennen muuta hyvien pumppausominaisuuksiensa vuoksi. Nämä ominaisuudet johtuvat tuhkan sisältämästä suuresta pallomaisten rakeiden määrästä. Rakeet saavat aikaan "kuulalaakerivaikutuksen". Notkeutensa lisäksi rakeisuus on sopiva vähentämään erottumista ja parantamaan injektointimassan homogeenisuutta. Lentotuhka sisältää pääasiassa silttikokoa olevia rakeita, mutta siinä on myös hienompia savikokoa olevia (jopa 12 %) ja karkeampia keskikokoisia hiekkarakeita. Pfa:vesi-suhdetta 2:1 (tai hieman alle) on yleisesti käytetty Iso-Britanniassa. Tällöin on saatu aikaan juokseva injektointimassa. Tässä käsitellään lentotuhkaa korkealaatuksena materiaalina, johon on sekoitettu eri lisäaineita kuivana, ja seokseen on lisätty vesi juuri ennen injektointia.

Lentotuhkan soveltuvuus injektointiseokseen riippuu ennen muuta kemiallisesta ja mineraalikoostumuksesta.

Hieno, kuiva tuhka saadaan talteen voimalaitosten suodattimilla. Tuhkan laatu vaihtelee voimalaitostyyppin mukaan.

a) Jotkut voimalaitokset tuottavat hienompaa tuhkaa kuin toiset. Nykyaikaisista tasaisesti kuormitetuista voimalaitoksista tulee hienompaa tuhkaa kuin vanhemmista, jotka toimivat tehokkaammin huippuaikoina. Asemastaan johtuen jälkimmäisissä poltetaan usein antrasiittia.

b) Rakeiden hienous lisääntyy, mitä ylempää savupiipusta ne kerätään talteen (koska alempana sijaitsevat erottimet ovat keränneet jo karkeammat rakeet).

c) Antrasiitin hiilipitoisuus on yleensä korkea ja sen vuoksi suuret nykyaikaiset voimalaitokset (jotka eivät käytä paljoakaan antrasiittia) tuottavat hyvälaatuista, hienoa, vähän hiiltä sisältävää lentotuhkaa, jota on saatavissa kuivana.

d) Hienous riippuu tietysti poltettavan hiilen hienoudesta. Sähkön kulutus huippujen aikana saattaa jauhatuksessa olla eroja, mutta materiaali on Saatava tasalaatuiseksi seulomalla ja sekoittamalla, jotta sitä voitaisiin käyttää injektoinnissa.

e) Kuten hienous, myös lentotuhkan väri voi vaihdella käytetystä kivihiilestä riippuen. Tähän vaikuttaa hiilen sisältämän rautaksidin määrä. Värillä ei ole kuitenkaan merkitystä materiaalin ominaisuuksiin.

f) Lentotuhkan hienoudella ja reaktiivisuudella on yhteyttä. Yleensä mitä hienompaa aines on, sitä reaktiivisempaa se on. Pozzolaa-nisuus on toivottava ominaisuus, koska pozzolaaninen aines reagoi sementin hydratoitumisen yhteydessä vapautuneen kalkin kanssa ja muodostaa kestävä ja liukenemattoman materiaalia lujittavan yhdisteen. Kalkin reagoitokykyä voidaan käyttää hyödyksi tapauksissa, joissa vaaditaan erittäin suurta tunkeutumista, hidasta lujuuden kasvua ja vähäistä massan vuotamista ja erottamista. Kalkin on oltava hienorakeisempaa kuin lentotuhka ja sementti. Siten lisättäessä kalkkia lentotuhkan ja veden tai lentotuhkan, sementin ja veden seokseen, saadaan aikaan kollodisempi suspensio.

g) Materiaalin konsistenssilla on tärkeä merkitys, kun sitä käytetään injektointiaineena. Lentotuhkan konsistenssi riippuu pääasiassa sen rakeisuudesta ja hiilipitoisuudesta. Tyypillisellä Yhdistyneiden Kuningaskuntien (U.K.) tuottamalla lentotuhkalla on seuraavat konsistenssiparametrit:

Hiili (C)	: 2,1 % $\pm 1,2$
Ominaispinta-ala:	3960 cm ² /g ± 770

Raekoko ilmaistaan usein ominaispinta-alana ja samanlaatuisen lentotuhkan reaktiivisuus paranee yleensä ominaispinta-alan kasvaessa.

h) On tärkeätä muistaa, että injektointityön onnistumista on tarkkailtava tekemällä lujuuskokeita. Tämänlaatuisten injektointiaineiden päätarkoitus on vähentää vedenläpäisykykyä tai täyttää tunnelien ja kaivantojen seinämissä olevat halkeamat stabiililla materiaalilla. Injektointimassan ja maan yhteistoiminta, injektointiainerakeiden erottuminen, pitkän ajan kutistuminen ja seoksen yleinen lujuus ovat tärkeitä ja varteenotettavia tekijöitä injektointityössä.

Ainesosien erottuminen riippuu seuraavista tekijöistä:

- 1) Kiintoaineen ja nestemäisen aineen tilavuuksien suhteesta.
- 2) Partikkelien ja nesteen ominaispainosta.
- 3) Partikkelien ominaispinta-alasta ja
- 4) Lujuuden ja viskositeetin kehityksestä.

Nesteen ja rakeiden erottumista voidaan tutkia kokein. Kiintoainoksen laskeutuesssa pohjalle halkeamien yläosat jäävät täyteen pelkkää nestettä. Laskeutumisen määrää voidaan mitata kirkkaan nesteen syvyyden ja injektointimassan alkuperäisen syvyyden suhteella. Se ilmaistaan usein prosentteina ajan suhteen. Yksinkertaisessa sedimentaatiotestissä halkaisijaltaan 100 mm ja korkeudeltaan 100 mm oleva lieriö täytetään injektointimassalla. Kirkkaan nestepatsaan korkeus mitataan säännöllisin väliajoin. Suotautuminen lakkaa joko pisteessä, jossa huokoisuus on niin pieni, että stabiliteetti vallitsee tai jossa injektointimassa alkaa kovettua, geelimäisyys estää laskeutumisen. (Erään mielivaltaisen, mutta hyödylliseksi osoittautuneen määrittystavan mukaan erottuminen loppuun, kun injektointimassalla täytettyyn lasiastiaan pantu lasisauva pysyy pystysuorassa asennossa pelkästään massan tukemana).

i) Lentotuhka-vesiseoksella ja portlandsementti-vesiseoksella suoritettu koe osoitti, että erottuminen on vähäisempää lentotuh-

kan ja veden seoksella. Tämä on lentotuhkarakeiden pienemmän ominaispainon (1,9 - 2,3, sementillä noin 3,15) ja raekoon sekä pyöreämmän muodon ansiota. Käytettäessä lentotuhkaa sementin kanssa sekoitettuna, kuten yleensä onkin tapana, sedimentaation on todettu vähenevän, mikäli lentotuhkan osuus on ainakin 20 % seoksen kokonaispainosta.

j) Lentotuhka-sementti-seoksilla on pystytty poistamaan joitakin lähinnä sementtiseoksiin liittyviä haittoja. Mikäli injektointissa käytetään pelkkää sementtiä, ja mikäli massa pidetään notkeana injektointin helpottamiseksi, massa pyrkii erottumaan ja vuotamaan. Injektointimassa on altis kutistumiselle jähmettyttyään ja vaihteluja tiiveydessä, lujuudessa, vedenläpäisevyydessä sekä lujitemassan yleisessä konsistenssissa esiintyy, mikä aiheuttaa halkeamien esiintymisvaaraa tunneliholvissa. Jos käytetään alhaista vesisementtisuhdetta, lisääntyy vaara, että massa tukkii injektointilaitteiston ja että kovettuminen tapahtuu muutenkin liian nopeasti. Itse asiassa tiedossa on useita tapauksia, joissa tunnelirakentamisen yhteydessä, varsinkin kiireellisissä tilanteissa, injektointimassasäiliöitä ei ole pesty sekoitusten välillä. Edellämainittujen haittapuolten lisäksi käytettäessä alhaista vesisementtisuhdetta sementin hydratoituessa syntyvä lämpö nostaa osaltaan vallitsevaa lämpötilaa ja tekee työskentelyn epämukavaksi.

Hyvin harvat urakoitsijat tai neuvonantajat, jotka ovat tekemisissä tunnelirakentamisen kanssa, suosittelevat nykyään pelkkää sementin ja veden seosta ilman, että massaan lisättäisiin tiettyjä tämän ominaisuuksia parantavia lisäaineita. Nämä sekoitetaan usein rakennuspaikalla. Tällöin annostus on helposti liian suuri tai pieni. Työskentelyolot vaikeutuvat sekoitustyön viedessä tilaa.

Hilton on painottanut injektointiaineen ja maan vuorovaikutuksen tärkeyttä ja Cambefort on esittänyt aikaisemmin joitakin tähän liittyviä pääperiaatteita. Edellinen on esittänyt jähmettymisen ja kovettumisen aikana lentotuhkan ja sementin välillä val-

litsevaan vuorovaikutukseen liittyviä mainintoja. Lentotuhkan ja sementin samankaltaiseen rakeisuuteen perustuen hän esittää: "Sitoutumisen ja kovettumisen aikana lentotuhka laimentaa sementin, pidentää sementtihiukkasten keskinäistä välimatkaa ja vähentää niiden vuorovaikutusta. Sen vuoksi lujuudet ovat pienempiä kuin ilman lentotuhkaa. Lentotuhkalla on kuitenkin suuri pitoisuus aktiivista silikaattia (SiO_2 -pitoisuus vaihtelee välillä 45 - 51 % ja on keskimäärin 48 %), mikä saa aikaan pozzolaanisen reaktion sementinhydratoitumisen yhteydessä vapautuvan kalkin kanssa. Reaktiotuote - $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ - saavuttaa sementtimassan lujuuksiin verrattavia pitkän ajan lujuuksia - halvemmalla".

k) Lentotuhka-sementtiseosten ominaisuuksia

(1) Lentotuhkan rakenteesta ja rakeisuudesta johtuen tämä parantaa injektointiaineen työstettävyyttä ja virtausominaisuuksia. Halutun lujuuden saavuttamiseksi voidaan valita sopiva seos, yleisimpien seossuhteiden vaihdellessa välillä 1:1 - 1:10 (sementti: lentotuhka). Heikko täyte saadaan aikaan suhteella 1:20. Koska useimmat injektointimassat ruiskutetaan veden kyllästämään materiaaliin, on parasta, että lujuuskokeet tehdään näytekappaleilla, joita säilytetään vedessä. Vedellä kyllästymättömien näytekappaleiden käyttö voi antaa liian optimistisia tuloksia, koska hienojakoisissa maissa voi kehittyä suuria huokosveden imeytymispaineita. Säilytyslämpötilalla on myös varsin tärkeä merkitys injektointiaineille, jotka sisältävät lentotuhkan kaltaisia pozzolaanisia materiaaleja. Tämä on otettava huomioon kokeita tehtäessä.

(2) Kuivumiskutistumiskokeet, joissa sementtiä on korvattu lentotuhkalla aina 30 %:iin saakka, ovat osoittaneet, etteivät kutistumis- ja vuotamisominaisuudet muutu merkittävästi. Lentotuhka-sementin käytöllä on myös tiettyjä etuja hitaamman kovettumisen ja matalamman hydratoitumislämpönsä vuoksi. Itse asiassa sekoitettu lentotuhka estää suurien lämpötilojen syntymistä tehokkaammin kuin sementin määrän vastaava vähentyminen.

(3) Lisääntynyt notkeus ja parantunut pumpattavuus, mitkä saavutetaan lentotuhkan käytöllä, aiheuttavat helposti huonontumista

seoksen konsistenssissa paikalla sekoitettaessa. Hidas kovettumisaika aiheuttaa lisääntyvää massan suotautumista. Tämä melko määräävä vaikutus voidaan eliminoida lisäämällä veteen pieni annos bentoniittia tai muuta savea, jolloin lisätty aines toimii suspensiona ja voitelevana aineena. Käytettävän saveen tyyppi riippuu työkohteesta, kustannuksista ja saveen saatavuudesta. Sel- laista seosta käytettiin ensi kertaa muutamia vuosia sitten erään lontoolaisen tunnelityön yhteydessä. Tässä tapauksessa valittiin bentoniitti ja teknisiin ominaisuuksiin perustuen seuraavalla seoksella saavutettaisiin tarvittava kohesiivinen tila:

Lentotuhkaa 2,5 osaa, nopeasti kovettuvaa rautasementtiä 1 osa, bentoniittia 0,4 osaa, 0,6 osaa luonnon natriumia. On tultu siihen tulokseen, että olisi mahdollista poistaa ongelmat ja bentoniitin esi-hydrataation välttämättömyys tai erillisten savea ja sementtiseoksia varten tarkoitettujen pannujen tarve, mikäli käytettäisiin matalalämpöistä lentotuhkasementtiä, johon on sekoitettu ferrosementtiä ja bentoniitin korvaavaa keinotekoisia hectoriittia, jonka on kehittänyt Laporte Industries ja jota valmistetaan synteettisesti kauppanimellä Laponite. Hyvin voimakkaan geelilytymisominaisuutensa vuoksi sitä tarvittaisiin vain hiukan yli 0,5 kg/P.F.A./ferrosementti-tonni. Siihen sekoitettaisiin fosfaattia vesiseoksessa tapahtuvan dispersion edistämiseksi.

Laponiitin käyttö lisäsi esisekoituksen tarvetta, ja tämä oli injektointimassavälityksen alku. Nyt voitiin seoksia valmistaa halutun kokoisissa erissä. Suuri geelilytymisominaisuus mahdollisti injektointityön suorittamisen vetelällä massalla, joka kuitenkin sitoutuu nopeasti lujaksi kohesiiviseksi geeliksi.

Seos osoittautui käytännössä onnistuneeksi. Tunnelityön aikana otetut näytteet osoittavat, että seoksen ja maan välillä on kiinteä sidos. Huomattiin, että pitkin epäsäännöllistä sidosrajaa ja vieläpä ohuissa Lontoon saveen raoissakin massa oli tunkeutunut ainakin metrin. Vertailevat tutkimukset osoittivat, että käytetyllä seoksella (T61) sitoutumiskutistuminen oli 50 % vä-

häisempää kuin sementillä (O.P.C.) kummankin seoksen vesikiintoainnessuhteen ollessa 0,45.

Jotta kutistuminen saataisiin kokonaan pois ja melkein välitön kovettuminen saavutettaisiin (viskositeetti 145 cps vesikiintoainnessuhteella 0,4 Fannin viscometrillä mitattuna, 58 cps vesikiintoainnessuhteella 0,5, jolloin taataan 1 tunnin pumppautuvuus-aika), T61:een sekoitettiin kipsilaastia. Tämä kuvaa systeemin mukautumiskykyä, koska työ suoritettiin paikalla ja tehtävänä oli täyttää erään tunnelisortuman yhteydessä syntyneet raot.

Kaikenlaisia injektointimassoja on tällä tavoin mahdollista valmistaa, ja ne tehdään nykyään projektikohtaisesti useissa maissa.

Lentotuhka/sementti/kalkki injektointiseokset

Pienen kalkkimäärän lisäyksellä voidaan seosten ominaisuuksia entisestään parantaa. Seuraavassa on esitetty muutamia lentotuhka/sementti/kalkki-seoksia:

Sementti : lentotuhka : kalkki (paino-osina)

1	:	1	:	0,08
1	:	2	:	0,16
1	:	3	:	0,24
1	:	4	:	0,32
1	:	5	:	0,40 jne.

Suurempia (sementti-)suhteita käytettäessä ei saavuteta sen suurempaa hyötyä, koska seoksen laihuus vain parantaa tämän täyteominaisuuksia ja hinnatkin pysyvät alhaisempina.

Lentotuhka/sementti/savi injektointiseokset

Injektointimassojen vuotamis- ja erottumistaipumusta voidaan vähentää alkusitoutumisen ajaksi, noin 5 tunniksi, lisäämällä tiettyntyyppisiä savia, jotka vaikuttavat liettävästi ja saavat aikaan riittävän viskositeetin ja lisäävät lujuutta, jotta muiden partikkeleiden gravitaatiolaskeutuminen estyy. Natriumbentonitiin lisääminen vaikuttaa tällä tavoin käytettäessä sitä 2,5 - 6 %. Mitä enemmän natriumbentoniiattia lisätään, sitä pitemmäksi sitou-

tumisaika tulee, toisin sanoen bentoniitti toimii hidastimena. Kalkin lisääminen näyttää vähentävän seosten liettämisominaisuuksia, mikä johtuu lisääntyneestä kalsiumionien määrästä. Bentonitiin käyttäminen lisää viskositeettia. Tämä voidaan tarvittaessa kompensoida vähäisellä kalsiumlignosufonaatin lisäämisellä (noin 0,25 %).

Samoin vuotamista ja erottumista voidaan vähentää käyttämällä hienoksi jauhettua savipellettiä (pall clay). Merivedenkestäviä seoksia voidaan myös valmistaa käyttämällä k.o. ainesta noin 5 % seoksen määrästä.

Useimpia injektointiseoksia on saatavana esisekoitettuna.

Lentotuhka/hiekka injektointiseokset

Injektointiseokseen voidaan lisätä hiekkaa, vieläpä soraa, tiilanteissa, joissa raekoolla ei ole erityisen tärkeää merkitystä. Suurempi raekoko mahdollistaa tiiviimpien injektointimassojen käytön. Näillä on samanlaisia ominaisuuksia kuin hyvänlaatuisilla betoneilla. Lentotuhka on varsin käyttökelpoinen materiaali hiekkapitoisissa seoksissa, koska se voitelee ympäröiviä rakeita ja tekee tiiviitäkin massoja käytettäessä pumppaamisen mahdolliseksi.

References

1. PFA in Grouting. C.E.G.B. Oct. 1968
Reprinted June 1975
2. Gutts. W.
Nixon P.J.
Smith M.A.
Harrison W.H.
Russell A.D.
A Survey of the Location, Disposal & Prospective Uses of the Major Industrial By-products and Waste Material.
B.R.E. Current paper CP 19/74. Feb. 1974.
3. Sutherland H.B.
Finlay T.W.
Cramm I.A.
Engineering and Related Properties of Pulverized Fuel Ash.
J.Inst. Highway Engineers. June 1968.
4. Cambefort H.
The Principles and Application of Grouting.
Quarterly Journal Engineering Geology.
1977. Vol. 10. Pages 57 - 95.
5. Hilton I.C.
Classification of Grout in Methods of Treatment of Unstable Ground.
Ed: Bell F.G. Pub: Newnes-Butterworth,
London. 1975.

ANDERSON, D.A., The Pennsylvania State University, U.S.A.

POHJATUHKAN KÄYTTÖ TIENRAKENNUKSESSA

POHJATUHKAN TUOTANTO JA SEN TYYPIT

Yhdysvalloissa tuotetaan hiiltä polttavissa sähkövoimalaitoksissa kahdentyyppistä pohjatuhkaa. Märkä pohjatuhka eli märkäpohjakat-tilakuona juoksutetaan tulipesästä sulana ja annetaan valua vesisäiliöön. Tällöin kuona jäähtyy ja syntyy lasimaista särmikästä raekooltaan pääosin 0,5 - 5,0 mm olevaa materiaalia. Prosessissa syntyy myös karkeampia rakeita (≥ 50 mm), jotka ovat rakkulamaisempia kuin edelliset ja ne jähmettyvät tulipesässä.

Jos sulaan kuonaan joutuu kaasuja juoksutusvaiheessa, kuonasta tulee jäähtyessään jonkinverran rakkulamaista. Huokoisuus riippuu hiilen laadusta ja polttolaitteiston toiminnasta. Kalkin syöttäminen palavan hiilen fuusiolämpötilan alentamiseksi lisää huomattavasti huokoisuutta. USA:n länsiosien ruskohiilet (puupohjaiset kivihiilet) tuottavat huokoisempaa kuonaa kuin itäosien bitumi-pohjaiset kivihiilet. Kuonaa tuottavissa voimalaitoksissa 50 - 70 % tuhkasta on juuri kuonaa ja loput lentotuhkaa.

Kuivaa pohjatuhkaa syntyy, kun hienoksi jauhettua ($\leq 0,075$ mm) kivihiiltä syötetään palotilaan. Suurin osa tuhkasta (70-80 %) on pienirakeista ja se kerätään talteen lentotuhkana.

Pohjatuhkaosuus (20-30 %) kasautuu muodostaen hyvin suhteittuneen raekooltaan 0,074 - 50 mm olevan materiaalin. Kuivan pohjatuhkan sintrautumis-(=kiinteytymis)aste vaihtelee riippuen kivihiilen alkuperästä ja laitoksen toiminnasta. Heikosti sintrautunut pohjatuhka on heikkoa ja haurasta ja murenee helposti lentotuhkarakeiden kokoisiksi hiukkasiksi, mikä alentaa niiden käyttöarvoa. Hyvin sintrautunut pohjatuhka on karkeaa, sisältä huokoista, ulkopäin kuonamaista (lasimaista). Jonkinverran kuonautumista tapahtuu

myös tulipesässä. Syntyvät suuret kuonakappaleet murskataan käsittelyn helpottamiseksi.

Jotkut voimalaitokset on suunniteltu siten, että rikkikiisu poistetaan kivihiilestä, jotta sitä ei pääsisi tuhkan joukkoon, koska rikkikiisu syövyttää nopeasti asfalttipäällysteet tuhkaa käytettäessä. Rikkikiisun kaltaisia partikkeleita voi syntyä myös tulipesässä ja ne putoavat pohjatuhkan joukkoon. Kun niitä on runsaasti, ne ovat myös haitallisia, koska ne alentavat tuhkan käyttöarvoa.

KÄSITTELY JA SIJOITTAMINEN

Pohjatuhkaa ja pohjakuonaa pidetään yleisesti jätteinä ja tuhkan käsittelyjärjestelmät suunnitellaan parantamaan hävittämistä eikä runkoaineen laatua. Varastointi on välttämätöntä, koska jatkuvas- ta tuhkan tuotannosta huolimatta koko vuoden tuotanto saatetaan käyttää yhdessä tai kahdessa viikossa. Kuivavarastointi suori- taan käyttäen kuorma-autoja pohjatuhkan kuljetukseen; märkävaras- tointi hydraulisesti altaisiin. Allasvarastoinnissa voi tapahtua haitallista rakeiden erottumista. Tätä voidaan käyttää kuitenkin hyödyksi, mikäli halutaan poistaa tuhkasta ylisuuret rakeet. Erottumista voi tapahtua myös kuivavarastoinnissa, mikäli tuhka kipataan korkean läjän reunan yli. Joissakin laitoksissa pohja- ja lentotuhka yhdistetään varastoinnin tai poiskuljetuksen yhtey- dessä, jolloin syntyy materiaalia, joka on käytännöllisesti kat- soen kelpaamatonta asfalttirakenteisiin.

Pohjakuona (märkä pohjakattilakuona) on yleensä tasalaatuisempaa kuin pohjatuhka (kuiva pohjatuhka).

TUOTANTO JA HYÖTYKÄYTTÖ

Vuonna 1973 Yhdysvalloissa tuotettiin 14,7 miljoonaa tonnia poh- jatuhkaa ja -kuonaa. Määrästä on 10,9 miljoonaa tonnia pohjatuh- kaa ja 4,0 miljoonaa tonnia pohjakuonaa. Uudemmat laitokset ovat tyypiltään pohjatuhkaa tuottavia ja tuleva tuotanto tulee lisään-

tyvässä määrin olemaan pohjatuhkaa pohjakuonan sijasta. Pohjatuhkasta käytettiin hyväksi vain 17 prosenttia ja pohjakuonasta käytettiin 45 prosenttia. Edellisestä käytettiin 0,1 % ja jälkimmäisestä 1,2 % asfalttirakentamiseen.

Tyypillinen 1000 MW:n voimalaitos voi polttaa 3,3 miljoonaa tonnia kivihiiltä vuodessa. Tuhkapitoisuuden ollessa 13 % noin 400 000 tonnia tuhkaa tuotetaan joka vuosi. Sellainen voimalaitos olisi sopiva kuivapohjatyypisenä, jolloin se tuottaisi 80 000 tonnia pohjatuhkaa ja 320 000 tonnia lentotuhkaa.

Pohjakuonaa on laajasti käytetty hiekkaisena sorana, kulutuspin-
toina ja kattosorana. Tällöin suuri osa pohjakuonasta on kallista eikä ole kilpailukykyistä perinteisten tienrunkoaineiden kanssa.

Pohjatuhkaa käytetään betonirakennuselementtien rakentamiseen, kitkan lisäämiseen lumisilla ja jäisillä pinnoilla sekä runkoaineena sementti- ja kalkki-lentotuhkastabiloinnissa. Sen hinta - yhdestä muutamaan dollariin tonnilta - on yleensä vähemmän kuin luonnon runkoaineiden hinta.

POHJAKUONAN RAKENNUSTEKNISET OMINAISUUDET

Pohjakuonat ovat melko lajittuneita ja niiden raekoko on 0,5 - 5,0 mm. Ne ovat kovia, tavallisesti mustia, amorfisia ja sileäpintaisia muistuttaen paljon murskattua lasia. Useimmat pohjakuonat, elleivät ne ole rakkulamaisia, täyttävät perinteisille runkoaineille asetetut erikoisvaatimukset.

Tuettuna (confined) pohjakuonilla on suuri sisäinen kitkakulma, noin 40° , kuitenkin sivutuettomana ne eivät ole kovin stabiileja sileän pintansa vuoksi. Tehtäessä kokeita pohjakuonalla on oltava tarkka, jotta tutkittaisiin todella edustavaa näytettä, koska esimerkiksi Los Angeles-kulutuskokeen arvot ovat usein korkeammat karkeammille fraktioilla, jotka ovat yleensä enemmän rakkulamaisia.

KENTTÄKOKEMUKSIA POHJAKUONAA SISÄLTÄVISTÄ ASFALTTISEOKSISTA

Pohjatuhkaa markkinoitiin 1950-luvun lopulla kauppamerkillä "Black Beauty". Kampanjassa keskityttiin mainostamaan kuonan käyttöä liukumista vastustavana materiaalina hienojakoisissa seoksissa. Kitkavaikutuksen perusteltiin johtuvan kuonan terävyydestä ja kulmikkuudesta. Materiaalin soveltuvuudesta kitkaa lisääväksi runkoaineeksi on ollut sekalaisia mielipiteitä. Sillä on kuitenkin ollut merkitystä konventionaalisten asfalttirunkoaineiden korvaajana. Sitä on käytetty tiiviissä kuuma-asfalttiseoksissa, pintakäsittelyssä ja kylmäseoksissa.

Teksasissa on pohjakuonaa ja kalkkikivimursketta (20 - 50 %) yhdistetty ja saatu tiivis pintaseos. Tulokset ovat olleet erinomaisia keskinkertaisesti liikennöidyillä teillä (1). Kalkkikivimurske on tarpeellinen riittävän stabiliteetin aikaansaamiseksi.

Upotuskokeiden (24 tunnin liotus vedessä) tulokset osoittavat, että seoksella on hyvä kestävyys veden vaikutuksia vastaan.

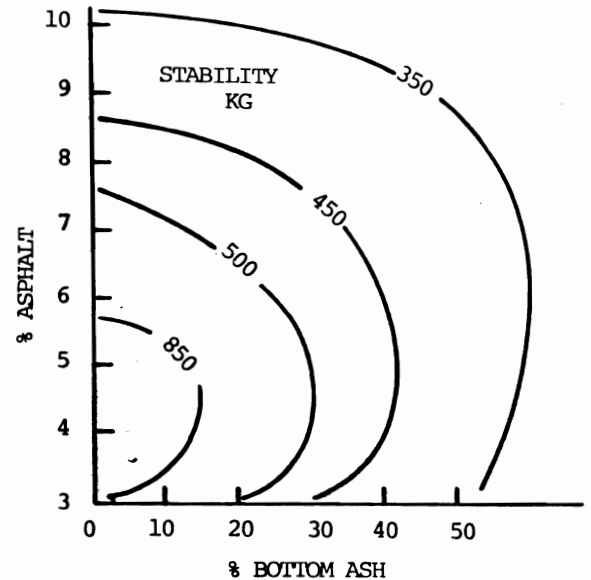
Pohjakuonaa on käytetty jatkuvasti hienorakeisessa kuumaseoksessa Länsi-Virginian pohjoisosassa täydentämään raekokoja, jotka puuttuvat paikallisesta jokihiekasta.

Seos sisältää 50 % kuonaa, 39 % jokihiekkaa, 3 % lentotuhkaa ja 8 % asfalttisementtiä. Joissakin tapauksissa nämä seokset kantivat raskaan kuorma-autoliikenteen (2).

Muita käyttökohteita on ollut sellaisilla alueilla kuin Tampan ja Floridan ympäristö, Kansas City, the Indiana Tollway ja Ohio. Pohjatuhkan käyttöä rajoittaa enemmän sen kallis hinta ja rajoitukset sen tuotannossa kuin sen rakennustekniset ominaisuudet. Kitkaominaisuutta on käsitelty myöhemmin.

POHJAKUONASEOSTEN SUUNNITTELU

Onnistuneet kenttäkokeet osoittavat, että pohjakuonaa voidaan käyttää sellaisenaan korvaamaan perinteisiä runkoaineita. Se on kovaa, kulutusta kestävä, vedenpitävää eikä pinta lohkeile helposti. Parhaat tulokset on saavutettu käytettäessä luonnon runkoainetta ja pohjakuonaa yhdessä. Pohjakuonan määrä on 40 - 50 % runkoaineen kokonaismäärästä. Pohjakuonaseoksilta, jotka eivät sisällä murskattua luonnon kiviainesta, puuttuu stabiliteetti, kuten kenttäkokeissa on varmistettu ja Shulerin ja Woodin tutkimustulokset osoittavat (3). Kuva 1.



Kuva 1. Pohjakuonan pitoisuuden vaikutus Marshall-lujuuteen.

Yhteenvetona todettakoon, että niin kauan kuin pohjakuonapitoisuus rajoitetaan noin

50 %:in kokonaismäärästä, kuonaa voidaan käyttää sellaisenaan korvaamaan luonnon runkoaineita. Määrää pitäisi epäilemättä lisätä, jos kuonan huokoisuus lisääntyy. Lisätutkimuksia tarvitaan, jotta voitaisiin määrittää huokoisuuden vaikutus seoksen stabiliteettiin ja käyttäytymiseen.

POHJATUHKAN RAKENNUSTEKNISET OMINAISUUDET

Pohjatuhkan fysikaaliset ominaisuudet vaihtelevat enemmän kuin pohjakuonan. Tämä on ymmärrettävää, koska pohjatuhka on suora palamistuote, kun taas pohjakuona on kiinteytynyt sulasta tilasta. Los Angeles-luvut vaihtelevat $\approx 30 - 50$. Useimmat tuhkat alittavat vaatimuksen 40.

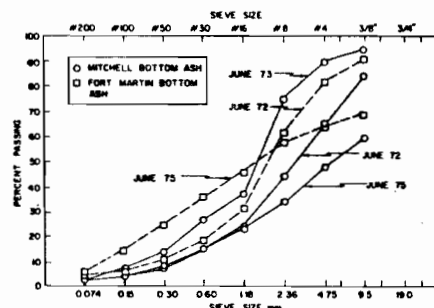
Vedenimukyky vaihtelee melkoisesti riippuen tuhkan huokoisuudesta ja pintarakenteesta.

Vaikka pohjatuhka on osoittautunut soveltuvansa erinomaisesti moniin tarkoituksiin, on tarkasteltava kahta vaaratekijää sen käytössä. Ensimmäinen on pohjatuhkan sisältämät suuret hauraat rakeet. Nämä popcornin kaltaiset partikkelit ovat löyhärakenteisia ja ovat muodostuneet lentotuhkarakeista. Ne voidaan helposti murskata sormilla. Los Angeles-koe ei riittävän tarkasti määritä näiden rakeiden kulutuskestävyyttä (4). Pohjatuhkaa, joka sisältää runsaasti hauraita rakeita, ei pitäisi käyttää asfalttirakentamiseen, mutta sitä voidaan paremminkin käyttää hyödyksi muulla tavoin, kuten elementtiteollisuudessa.

Toinen vaaratekijä koskee kiisurakeita. Toisin sanoen, raakaa palamatonta rikkikiisua sisältävää pohjatuhkaa ei pitäisi käyttää bitumiinisissa rakenteissa.

Edellä mainitut kaksi seikkaa eivät estä pohjatuhkan käyttämistä, mutta ne on otettu esille, jotta vältettäisiin tuota pientä pohjatuhkamäärää, jota ei pitäisi käyttää asfalttirakentamiseen.

Pohjatuhkan rakeisuuden vaihtelut kahdessa voimalaitoksessa on esitetty kuvassa 2. Rakeisuusvaihtelut eivät vaikuta kovin paljon kylmiin seoksiin, eivätkä kuvan 2 osoittamat vaihtelut estä käyttämästä pohjatuhkaa vähän liikkennöidyillä teillä.



Kuva 2. Kahden voimalaitoksen pohjatuhkan rakeisuuskäyriä.

Kuten joillakin luonnonmaillaakin, rakeiden uudelleen järjestymistä tapahtuu myöskin pohjatuhkalla käsittelyn, paikalletuonnin ja tiivistämisen aikana. Tällä ei ole kuitenkaan merkittäviä haittavaikutuksia. Tästä syystä sekoittava tiivistyskone on sopiva laboratoriokäytössä, koska sillä saadaan aikaan parhaiten kenttäolosuhteita vastaava tilanne.

POHJATUHKAA SISÄLTÄVÄT ASFALTTISEOKSET - KENTTÄHAVAINTOJA

Aivan viime aikoja lukuunottamatta on pohjatuhkaa käytetty asfalttiseoksissa vain vähän. Ensimmäisen kerran sitä käytettiin laajemmin 1972. Tällöin pohjatuhkaa käytettiin yksinomaisena runkoaineena kylmaseoksessa, jolla kestopäällystettiin Länsi-Virginiassa, Morgantown'issa sijaitsevan Fort Martin'in voimalaitoksen ympäristö. Siitä lähtien useita satoja tuhansia tonneja tätä kylmää emulsiota, jota nykyisin kutsutaan nimellä "ASHPHALT", on levitetty vähäliikenteisille maaseututeille Länsi-Virginiassa. Seoksen hinta on 50 - 100 prosenttia halvempi kuin konventionaalinen kuumaseos (2).

Tuhkapartikkelien rakenteesta johtuen stabiliteetti saavutetaan välittömästi jyräyksen jälkeen ja kuorma-autot voivat liikkua seoksen päällä heti.

Kenttätiiveydet olivat luokkaa $1760 - 1810 \text{ kg/m}^3$ ja huokosten määrä 10 - 21 % tilavuudesta. Huokoisuus on tyypillistä pohjatuhkaseoksille, eikä sillä ole haitallisia vaikutuksia.

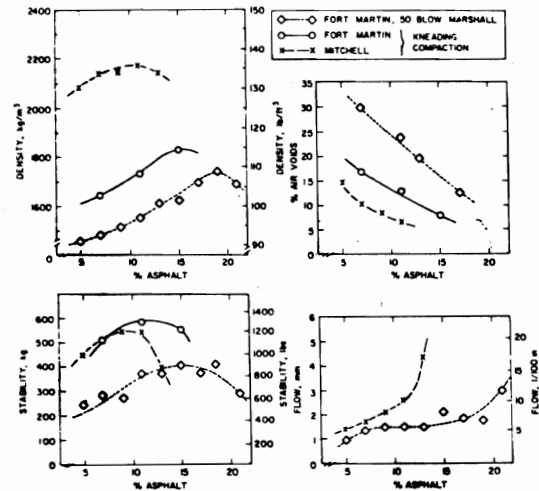
Päällysteen pinta vaatii rakeisuuden (# 60 tai # 80 mesh), joka poistaa liukkauden alhaisilla nopeuksilla ajettaessa vielä useiden vuosien kulutuksen jälkeenkin.

POHJATUHKASEOSTEN SUUNNITTELU

Pohjatuhkan ja pohjakuonan ominaisuudet eroavat merkittävästi toisistaan, mikä on otettava huomioon. Koska pohjatuhka on hyvin suhteistunut, sen käyttö sellaisenaan ilman sekoittamista muihin runkoaineisiin, on taloudellisesti kiinnostavaa. Tältä pohjalta lähti "ASHPHALT'in" kehittäminen.

Näillä seoksilla on hyvä stabiliteetti rakeiden karkean pinnan vuoksi. Ne ovat hyvin kestäviä veden vaikutuksia vastaan, eivät-kä osoita mitään merkkejä kuoriutumuksesta lasimaisesta luonteestaan huolimatta.

Pohjatuhkaseoksissa tarvitaan runsaasti asfalttia rakeiden pinnan karkeudesta johtuen. Jos suunnittelussa käytetään Marshall-kriteeriä, suunnittelu asfalttipitoisuus on liian suuri, 10 - 20 %:n luokkaa. Kenttäkokemuksen perusteella 8-9 % on sopiva. Tällöin saavutetaan taloudellisesti kilpailukelpoinen seos. Tyypillisiä seoskäyriä nähdään kuvassa 3 (lähteestä 4). Käyrät kuvaavat tiivistämisen vaikutusta seoksen ominaisuuksiin.



Kuva 3. Tyypillisiä pohjatuhkan ja asfaltin seoksen ominaisuuksia kuvaavia käyriä.

Vähentääkseen asfaltin tarvetta ja huokosia tiivistetyissä seoksissa jotkut tutkijat ovat tehneet pohjatuhkan ja luonnonmaan seoksia (3). Menetelmää voidaan käyttää tapauksissa, joissa suuri osa tuhkarakeista on hauraita. Kenttätietoja ei tästä kuitenkaan ole vielä saatavissa.

Rikkikiisun läsnäolo voidaan määrätä silmämääräisesti kuitenkin, jos on pienintäkin epäilystä asiasta, muutamalla märkäkuivakokeella voidaan ratkaista ongelma. Jos tuhka sisältää rikkikiisua, huomattavaa rikkoutumista ja stabiliteetin vähenemistä tapahtuu kokeiden jälkeen (upotus-ilmakuiva, 24 tunnin kierto).

Pohjatuhkaa sisältävillä seoksilla joko pelkkää tuhkaa käytettäessä tai sekoitettuna muihin runkoaineisiin voidaan saavuttaa tyydyttäviä tuloksia.

MUITA POHJATUHKAN KÄYTTÖMUOTOJA TIENRAKENNUKSESSA

Vaikka suurin osa tästä kirjoituksesta käsittelee pohjatuhkan käyttöä bitumiinisissa rakenteissa, on syytä lyhyesti mainita myös muita käyttömahdollisuuksia, kuten stabiloidut ja stabiloimattomat maakerrokset, kuivatussovellutukset ja käyttö kitkanlisäajana jää- ja lumiolosuhteissa (5).

Joillakin pohjatuhkilla on stabiloimattomana maakerrosmateriaalina käytettäessä taipumus menettää stabiliteettinsa, kun tiivistyskosteus on poistunut (5). Stabiloimattomalla pohjatuhkan ja lentotuhkan seoksella (60 - 70 % pohjatuhkaa, 40-30 % lentotuhkaa) saadaan aikaan tiiviitä kerroksia, kuitenkin niiden routimisalttius kasvaa raekoon pienentyessä.

Viime aikoina (1977,1978) John Amos-voimalaitoksen (Länsi-Virginia) pohjatuhkaa on stabiloitu Portland-sementillä ja käytetty pohjarakennekerroksena alueella nimeltä District 8, Länsi-Virginia Department of Highways. Suunnilleen 480 kilometriä päällystämätöntä maaseututietä on päällystetty 23 - 30 cm paksuisella kerroksella, joka sisältää 10 prosentin (paino-osina) sementtimäärällä stabiloitua pohjatuhkaa. Materiaali sekoitettiin asemasekoitusmenetelmällä ja tiivistettiin täryjyrällä. Tämän tienpohjan päällä on noin 4 cm paksu kuumasekoitettu asfalttibetoni. Säästökäsi on laskettu 14 000 dollaria/maili verrattuna tavanomaiseen kuumasekoitettuun asfalttipäällysteeseen. Sen lisäksi v. 1978, 120 cm penkereitä levitettiin kerrosrakenteen ollessa alhaalta ylöspäin: 15 cm stabiloimatonta pohjatuhkaa, 15 cm sementillä stabiloitua tuuhkaa ja 4 cm kuumana sekoitettua asfalttibetonia.

Pohjatuhkaa ja pohjakuonaa on stabiloitu menestyksekkäästi sekä Portland-sementillä että kalkki-lentotuhka-seoksilla (LFA). Pohjatuhkaa on käytetty melko runsaasti Chicagon alueella runkoaineena Pozz-o-pac (LFA) - seoksissa. Niin kauan kuin pohjatuhka ei sisällä rikkikiisua tai ylenmäärin hauraita partikkeleita sillä voidaan suoraan korvata konventionaalista runkoainetta LFA-seoksissa, joskus jopa saavuttaa parempia lujuuksia. LFA-seosten teknologiaa kehitetään edelleen.

POHJATUHKAN KÄYTTÖ LIUKUMISTA ESTÄVÄNÄ RUNKOAINEENA

Viime vuosina liukumisen estämisestä on tullut tärkeä turvallisuustekijä liikenteessä. Tutkimuksissa on määritetty runkoainevaatimukset riittävän kitkavaikutuksen saavuttamiseksi erilaisil-

la ajonopeuksilla (6). Mikrorakenteella (epätasaisuudet $< 0,5$ mm) on pääasiallinen merkitys käytettäessä pieniä nopeuksia, kun taas sekä mikro- että makrorakenteella (epätasaisuudet $> 0,5$ mm) on merkitystä suuria nopeuksia käytettäessä kitkavaikutuksen aikaansaamiseksi. Sen lisäksi runkoaineen on kestettävä kulutusta.

Pohjakuonalla on pieni mikrorakenne ja sen rakeiden särmikkyydestä riippuu kitkavaikutus alhaisia nopeuksia käytettäessä. Ellei tienpinta kulu tarpeeksi, jotta uusia särmiä paljastuisi, lasimaiset kuonapartikkelien pinnat tulevat yhdensuuntaisiksi päällysteen pinnan kanssa ja kitkavaikutus vähenee. Kuonan rakukulamaisuuden pitäisi parantaa mikrorakennetta, mutta tätä ei ole kokeiltu käytännössä.

Kun pohjatuhkassa on kuonamaisia partikkeleita, ne ovat yleensä rakkulamaisia ja sen tähden vaikuttavat mikrorakenteeseen. Ne ovat kulutusta kestäviä. Kuitenkin pääosa partikkeleista on hiekkajyvien kokoisia ja kulutuksen vaikutuksesta ne järjestyvät päällysteen pinnalle kuten santapaperissa. Tällaisella pinnalla on erinomainen mikrorakenne, mutta siltä puuttuu makrorakenne.

Kitkavaikutuksen parantamiseksi Yhdysvalloissa on suuntauksena tehdä huokoisia, vapaasti lajittuneita kitkakerroksia ja sekä pohjatuhka että -kuona ovat liian hienoa käytettäväksi näissä seoksissa. Sen vuoksi pohjatuhkalla näyttää olevan rajoitetut mahdollisuudet kitkamateriaalina käytettäessä. Poikkeuksen tekevät hienommat hiekkaseokset, joilla pohjatuhkaa käytettäessä on annettu hyvin korkeita British Pendulum-lukuja laboratorioissa (3).

Taulukko 1. Laboratoriokokeissa pohjatuhkaseoksille saadut British Pendulum-luvut.

Taulukon 1 tulokset on saatu seoksilla, joissa on käytetty 50 % pohjatuhkaa ja 50 % kalkkiahiekkaa.

Ash Source	Number of Passes		
	Initial	200,000	400,000
1	85	72	70
2	82	71	72
3	83	70	68
4	80	75	76

Näiden tulosten paikkansapitävyyden varmistamiseksi tarvitaan lisäselvitystä kenttäolosuhteissa. Myös kitkavaikutusta on tutkittava näillä seoksilla useilla nopeuksilla.

YHTEENVETO JA LOPPUPÄÄTELMÄT

Kaksi pohjatuhkatyyppiä, kuiva pohjatuhja ja -kuona ovat ominaisuuksiltaan erilaisia, mikä heijastuu niiden käytössä ja käytäytymisessä päällystemateriaaliseoksissa. Molempia tuhkatyyppiejä on käytetty menestyksellisesti tienrakennuksessa. Kuitenkin pohjatuhkan käyttö näyttää tulevaisuudessa lisääntyvän pohjakuonan kustannuksella. Pohjatuhkan käyttö on suurelta osin ollut kenttähenkilöstön innokkuuden tulosta sen etsiessä vaihtoehtoja, halvempaa materiaalia vähäliikenteisiin paikallisteihin. Perinteiset runkoainekauppiat eivät ole edistäneet pohjatuhkan käyttöä eikä ole olemassa mitään taloushallintoelintä, joka kannustaisi käyttämään näitä materiaaleja.

The Federal Highway Administration tukee nykyisin erästä tutkimusprojektia, jossa selvitetään pohjatuhkan käyttömahdollisuuksia asfalttiseoksissa. Vaikka tämän tutkimuksen tulokset eivät ole vielä kokonaisuudessaan selvillä, ne ovat kuitenkin samansuuntaisia kuin aikaisempien tutkijoiden saavuttamat tulokset. Pohjatuhkaseosten kulutuskestävyyttä ja rakenteen sitkeyttä on tutkittu. Nämä ominaisuudet puolsivat konventionaalisten runkoaineiden korvaamista pohjatuhkalla. Suositeltavaa myös on, että pohjatuhkalle määrätään tiukempi laadunvalvonta ja että valtion virastot muuttaisivat määräyksensä pohjatuhkalle soveltuviksi ja siten rohkaisisivat tämän käyttöä.

References

1. "Lignite Slag Pours the Way", Ind. and Engr. Chem., Vol. 51, No. 7, 1959.
2. Anderson, D.A., Usmen, M., and Moulton, "Power Plant Aggregates in Bituminous Construction", TRR No. 595, 1976.
3. Shuler, T.S., and Wood, L.E., "The Effects of Bottom Ash Upon Bituminous Sand Mixtures", Proceedings, AAPT, Vol. 46, 1977.
4. Usmen, M., Anderson, D.A., and Moulton, L.K., "Applicability of Conventional Test Methods and Material Specifications to Coal-Associated Waste Aggregates", presented at 57th Annual Meeting TRB, January, 1978 (to be published).
5. Moulton, L.K., Seals, R.K., and Anderson, D.A., "Utilization of Ash from Coal-Burning Power Plants in Highway Construction", HRR No. 430, 1973.
6. Dahir, S.H., Henry, J.J., Anderson, D.A. et.al., "Alternatives for Optimization of Aggregate and Pavement Projectives Related to Function and Wear Resistance" Draft Report, FHWA Contract No. DOT-FH-11-8814, Pennsylvania State Univ. March, 1977.

COLLINS, R.J., Valley Forge Laboratories, U.S.A.

ORMSBY, W.C., Federal Highway Administration, U.S.A.

POLTTOJÄTTEIDEN HYVÄSIKÄYTTÖ YHDYSVALLOISSA

JOHDANTO

Yhdysvalloissa syntyy vuosittain lähes 200 miljoonaa tonnia yhdyskuntajätettä. Suurin osa siitä käytetään täyttöön; noin 10 prosenttia poltetaan, mikä on yksi pääasiallisimpia jätteidenhävittämiskeinoja useissa suurkaupungeissa.

Yhdysvalloissa on tällä hetkellä toiminnassa noin 140 jätteiden polttolaitosta. Ne tuottavat vuosittain yhteensä 5 miljoonaa tonnia polttojätettä. (1). Jätteiden käsittelykustannuksista ja sopivien jätteidensijoituspaikkojen puutteesta johtuen yhdyskuntajätteiden käsittely on muodostumassa vakavaksi ongelmaksi.

On olemassa näyttöä sekä aikaisempien tutkimusten että käytännön kokemusten perusteella, että poltettuja yhdyskuntajätteitä voidaan käyttää useissa rakennustekniikan sovellutuksissa. Tässä esityksessä käsitellään materiaalin täyttötöissä lupaavalta näyttäviä sovellutuksia.

POLTTOJÄTETYYPIT

Polttojätteet voidaan jakaa palamisasteen mukaan kolmeen luokkaan. Palamisaste voidaan määritellä palaneen jätteen painon suhteena jätteen palavan osuuden painoon. Päätyypit ovat:

1. Hyvin palanut

Tämän tyyppin jätteet ovat korkean asteen arinakiihdyttimillä varustetuista jatkuvasyöttöisistä polttouuneista syntyvää jätettä. Niitä syntyy yleensä laitoksissa, joissa on kiertouunit ja vastasyöttö- tai keinuarinat. Ne ovat noin 10 tilavuusprosenttia ja 20 - 30 painoprocenttia syötetyn jätteen määrästä.

2. Keskinkertaisesti palanut

Suurin osa polttojätteistä kuuluu tähän luokkaan. Sitä syntyy liikkuvilla arinoilla varustetuissa jatkuvasyöttöuuneissa. Palamista on joko kiihdytetty vähän tai ei lainkaan. Polttojätteen osuus syötetystä määrästä on noin 20 tilavuusprosenttia ja 25 - 30 painoprosenttia.

3. Heikosti palanut

Tähän luokkaan kuuluvat jätteet ovat eräsyöttöuunien tai hyvin heikosti toimivien jatkuvasyöttöuunien sivutuotteita. Palamisajan vaihtelu vaikuttaa merkittävästi palamisasteeseen, minkä seurauksena syntyy huomattavia määriä palamatonta tai osittain palanutta materiaalia. Poltetun jätteen osuus syötetystä määrästä on 30 - 40 tilavuus- ja painoprosenttia.

POLTTOJÄTTEEN KOOSTUMUS

Valley Forge Laboratories'in Federal Highway Administration'ille (FHWA) tekemät tutkimukset ovat osoittaneet, että yhdyskuntajätteiden pääkomponentit ovat lasi, rautametalli, raudaton metalli, mineraalit ja tuhka sekä palava aines. (3).

Taulukossa 1 on koottu näiden komponenttien keskimääräiset prosenttiarvot ja verrataan arvoja U.S. Bureau of Minesin kehittämiin vastaaviin diagrammiarvoihin. (4). Vaikka polttojätteen koostumus vaihtelee polttolaitteista ja menetelmistä riippuen, OECD:n äskettäin julkaiseman raportin mukaan eri lähteistä ja maista peräisin olevat polttojätteet ovat peruskoostumukseltaan samankaltaisia (5).

Taulukko 1. Yhdyskuntajätteiden fysikaalinen koostumus painoprosentteina.

Component	Well Burned	Intermediately Burned	Poorly Burned	Average Composition	U.S. Bureau of Mines
Glass	39.9	51.5	45.7	48.0	44.0
Mineral Matter	39.5	17.5	13.1	21.0	17.6
Ferrous Metal	13.8	16.0	8.7	14.2	28.0
Non-Ferrous Metal	3.3	4.3	4.3	4.1	1.4
Combustible and Organic Matter	3.5	10.7	28.2	12.7	9.0
	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

POLTTOJÄTTEIDEN TEKNISET OMINAISUUDET

Polttojätteen raakoostumus on tärkeä rakennustekninen ominaisuus. Yleensä jätteet, joista on otettu ylisuuret rakeet (76.2 mm) pois, ovat rakeisuudeltaan sopivia useimpiin rakennustekniikan sovelluksiin.

Vesipitoisuus voi vaihdella välillä 15 - 60 prosenttia. Läjittäminen alentaa jätteen vesipitoisuutta ja parantaa sen koostumusta ja fysikaalisia ominaisuuksia. (6).

Polttojätteiden ominaispaino riippuu materiaalin palamisasteesta ja fysikaalisesta koostumuksesta. Kuivapainot vaihtelevat heikosti palaneen jätteen arvoista $640 - 200 \text{ kg/m}^3$ hyvin palaneen jätteen arvoihin $1280 - 1440 \text{ kg/m}^3$.

Ennen tiivistystä ja sen jälkeen suoritettut rakeisuusanalyysit osoittavat, että tiivistämisessä tapahtuu huomattavassa määrin rakeisuuden muuttumista. Veden imeytymisen ja kosteuden epätasaisen jakautumisen vuoksi on vaikea saada normaalia kosteus-tiiveys-käyrää. Sen tähden optimivesipitoisuuden arvoja ei pitäisi määrittää yksinomaan maksimikuivatilavuuspainoon perustuen ilman, että kokeen tekijällä olisi käytännön kokemuksen mukanaan tuoma arvostelukykyä (6).

POLTTOJÄTTEIDEN KÄYTTÖMAHDOLLISUUKSIA

Yhdysvalloissa on lukuisia esimerkkejä polttojätteiden käytöstä. Seuraavassa esitetään lupaavimpia sovellutuksia.

Täyttömateriaalina

Täyttömateriaalina käytettäessä sopivin keinoin tuotettua polttojätettä voidaan tiivistää hyvin. Floridassa sijaitseva Tampan kaupunki on käyttänyt kiertouuneilla varustetun polttolaitoksen jätettä maantietäyttöön ja pysäköintipaikkojen pohjarakenteisiin. On saavutettu tyydyttäviä tuloksia 0,3 metrin paksuilla kerroksin tiivistäen teräsvalssijyrällä. Pohjarakennekerroksissa käy-

tettäessä päällimmäinen tiivistetty jätokerros on sidottu pölyämisen ja pintaveden pääsyn estämiseksi. (7).

Toisen maailmansodan aikana Philadelfian kansainvälisen lentokentän läheisyydessä sijaitsevasta teollisuusvaltatiestä tehtiin osa polttojätteestä. Jätettä käytettiin pohjan ja penkereiden rakentamiseen. (8) Samoin New Yorkissa monet Brooklynin kadut on rakennettu tiivistetyn polttojätteen päälle toisen maailmansodan aikana ja sen jälkeen. (9)

Polttojätteestä on poistettava yli 8 cm kappaleet. Kokemus on osoittanut, että riittävä tiiveys saavutetaan tiheydeltään suurella, lujalla massalla.

Viemäritäytön peitemateriaalina

Villanovan yliopistoon kuuluvat Valley Torgen Laboratorioilla on tällä hetkellä meneillään kokeiluprojekti, jonka tarkoituksena on selvittää polttojätteen hyväksikäyttömahdollisuuksia maapeitteen asemasta eräässä linjaviemäritäyttöoperaatiossa.

Noin 50000 tonnia Philadelfiassa, Pennsylvaniassa olevista kahdesta polttouunista peräisin olevaa säiliössä ollutta ja seulotua jätettä on levitetty Montgomery Countyn lähellä sijaitsevan viemäritäytteen päälle. Sitä on käytetty sekä peite- että työmaatiemateriaalina.

Käsitelty jäte on täyttänyt kaikki sille asetetut vaatimukset. Se leviää ja tiivistyy helposti, on helppoa käsitellä, sillä ei ole vastenmielistä hajua, ei aheuta pölyongelmaa eikä vahingoita tiivistyslaitteita eikä kuljetuskalustoa. Jätteen on todettu olevan melko hyvä kuljetusteiden stabilointimateriaali. (10)

Stabiloidun tiepohjan koostumus

Kiertouuneissa tuotetulle, 2 - 10 % kalkkimäärällä stabiloidulle polttojätteelle on haettu patenttia nimellä "Chempac". (11) Seoksessa käytetyn jätteen raekoko on oltava alle 25 mm ja hiilipi-

toisuus ainakin 10 prosenttia. Seoksella saavutetaan yli 21 kp/cm²:n 28 vuorokauden lujuuksia, kun seos on tiivistetty ASTM D1557:n mukaisesti 95 % suhteelliseen tiiveyteen ja vesipitoisuuden ollessa optimi (18 - 23 %). CBR-arvot ovat olleet keskimäärin 80 ja on todettu jopa niin korkeita arvoja kuin 120. (12)

Kalkilla käsitelty polttojäte levitettiin lokakuussa 1974 osalle erästä pysäköintialuetta Chicagossa, Illinoisissa. Jäte saatiin erästä pienestä eräsyöttöuunista Chicagosta. Se seulottiin sitten, että kaikki rakeet olivat hienompia kuin 25 mm. Perusaines sisälsi 8 prosenttia kalkkiteollisuuden sivutuotteena syntyvää jätäkalsiumoksidia. Seos sekoitettiin erityisessä laitoksessa levitettiin ja tiivistettiin kerroksen paksuuden ollessa n. 150 mm. (13)

REFERENCES

- [1] Pindzola, D. and Collins, R.J. "Technology for Use of Incinerator Residue as Highway Material. Identification of Incinerator Practices and Residue Sources." U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-75-81, Washington, D.C., July, 1975.
- [2] Achinger, W.C. and Daniels, L.E. "An Evaluation of Seven Incinerators." In Proceedings, 1970 National Incinerator Conference, American Society of Mechanical Engineers, New York, N.Y., 1970, pp. 32-64.
- [3] Collins, R.J., et. al. "Technology For Use of Incinerator Residue as Highway Material." U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-77-151, September, 1977.
- [4] Kenahan, C.B.; Sullivan, P.M.; Ruppert, J.S.; and Spano, E.F. "Composition and Characteristics of Municipal Incinerator Residues." U.S. Bureau of Mines, Report of Investigations No. 7204, Washington, D.C., December, 1968.
- [5] "Use of Waste Materials and By-Products in Road Construction." Report Prepared by an OECD Road Research Group. Organization for Economic Cooperation and Development, Paris, France, September, 1977, 168 p.
- [6] Collins, R.J.; Miller, R.H.; and Ciesielski, S.K. "Guidelines for Use of Incinerator Residue as Highway Construction Material." U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-77-150, September, 1977.
- [7] Conatty, Norman, Sanitation Department, City of Tampa, Florida. Private Communication.
- [8] Cappelli, Dominick, Cappelli Brothers Trucking Company, Glen Mills, Pennsylvania, Private Communication.
- [9] Fenton, Richard, Assistant Commissioner, New York City Environmental Protection Administration, Private Communication.
- [10] Schuster, James J. and Collins, Robert J. "Demonstration of the Utilization of Incinerator Residue as Cover Material for a Lined Sanitary Landfill." Interim Progress Report, November, 1977.
- [11] Gnaedinger, John P., "Materials and Method for Pavement Construction." U.S. Patent No. 3,293,999. Washington, D.C., December 27, 1966.
- [12] Gnaedinger, John P., President, Soil Testing Services, Inc., Northbrook, Illinois. Private Communication.
- [13] Zimmerman, R. Eric and Gnaedinger, John P. "Lime Treatment of Incinerator Residue for Road Base Construction." Final Report, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, FHWA-RD-78-91, September, 1977.

SCHWAB, E.F., Federal Institute for Research and Testing, Itävalta
PREGL, O., University of Agriculture, Itävalta

POLTTOJÄTE TÄYTEMATERIAALINA

JOHDANTO

Yhdyskuntajätteen määrä lisääntyy jatkuvasti käytännöllisesti katsoen kaikissa suurissa kaupungeissa kaikkialla maailmassa. Polttamisesta on tullut pääasiallinen jätteen hävittämismenetelmä. Syntyvä energia käytetään enimmäkseen alueen lämmitykseen. Eräs suuri etu jätteen polttamisesta on jätteen tilavuuden huomattava pieneneminen. Wienissä kiinteän polttojätteen tilavuus on suunnilleen 12 % jätteen alkuperäisestä tilavuudesta. Tällä hetkellä noin 75 % Wienin yhdyskuntajätteistä poltetaan.

Polttojätteen sijoittaminen vaikeutuu kaatopaikka-alueiden vähen-tyessä. Useita tutkimuksia on sen vuoksi tehty polttojätteen kemiallisten ja fysikaalisten ominaisuuksien määrittämiseksi mahdollisia rakennustekniikan sovellutuksia varten (e.g. Balstrup, 1975, Schaden 1977, Sherwood, 1974, Hirt, 1973). Näiden tutkimusten tulokset ovat osoittaneet, että polttojätettä ei voida käyttää rakennusmateriaalina ilman esikäsittelyä.

Maarakennustekniikassa voidaan kuitenkin polttojätettä käyttää täyttömateriaalina hiekan ja soran korvikkeena, etenkin kaupunkialueilla, missä maa-aineksista on pulaa. (Hirt, 1973, Pindzola and Collins, 1975, Schwab and Pregl, 1978).

Tässä tutkimuksessa käsitellään pengermateriaalina käytetyn polttojätteen geoteknillisiä ominaisuuksia.

Tärkeimmät täytemateriaalille asetettavat vaatimukset ovat:

- hyvät tiivistysominaisuudet
- hyvät kuivatusominaisuudet
- lujuus staattista ja dynaamista kuormitusta vastaan
- vähäinen routivuus
- vähäinen saastevaikutus

Tämä tutkimus käsitti laboratorio- ja kenttäkokeet.

POLTTOJÄTTEEN GEOTEKNISET OMINAISUUDET

Laboratoriokokeiden tulokset on koottu alle.

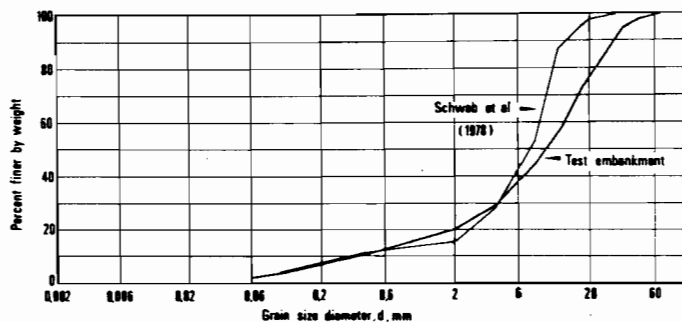
POLTTOJÄTTEEN YLEINEN KUVAUS

Polttojätteet sisältävät noin 75 % kuonaa ja lentotuhkaa, 20 % lasia ja keramiikkaa ja 5 % metalleja. Näitä kiinteitä jätteitä kutsutaan seuraavassa kuonaksi. Kuonarakeilla on terävät särmät ja karkea pinta. Palamattoman materiaalin määrä on pieni.

RAEKOOSTUMUS

Koepenkereestä tiivistämisen jälkeen otetun edustavan näytteen raekoostumis on esitetty kuvassa 1. Aikaisemmin tehtyjen analyysien tulokset näkyvät myös

kuvassa. Maksimiraekoot olivat 35 mm ja vastaavasti 70 mm. Raekooltaan yli 35 mm:n osuus on 3 - 7 %. Kentällä tavatut suurimmat rakeet olivat halkaisijaltaan 400 mm. Suuret möykyt murskattiin pengertä tiivistettäessä ja sen vuoksi laboratorionäytteitä voidaan pitää kenttäolo- ja vastaavina.



Kuva 1. Raekoostumus.

Kuona luokiteltiin keskinkertaisesti suhteistuneeksi ja vähän suhteistuneeksi hiekkaiseksi soraksi. Tämän tyyppin materiaaleilla on yleensä hyvät geotekniset ominaisuudet täyttömateriaaliksi (Wagner, 1957).

ROUTIVUUS

Casagranden routakriteerin (1931) mukaan kuona (polttojäte) ei ole routivaa.

OMINAISPAINO

Kuonan ominaispaino oli 2.70 g/cm^3 . Kun lasi ja metalli erotettiin kuonasta, ominaispaino oli noin 2.47 johtuen yksityisten rakeiden suuresta huokoisuudesta.

VEDENLÄPÄISEVYYS

Konventionaalisella vedenläpäisevyydestillä mitattiin vedenläpäisykertoimen arvoksi noin $3 \cdot 10^{-3} \text{ cm/s}$. Tämä arvo on liian alhainen verrattuna kenttäolosuhteisiin ja johtuu siitä, että hienoaaines kerääntyi huokoskivien päälle. Kokeessa, jossa hienoaaines-eroosio oli mahdollinen, läpäisevyysskerroin oli noin $3 \cdot 10^{-1} \text{ cm/s}$. Rakeisuuden määrittäminen osoitti, että eroosiossa oli näytteestä lähtenyt jopa 2 mm:n rakeita.

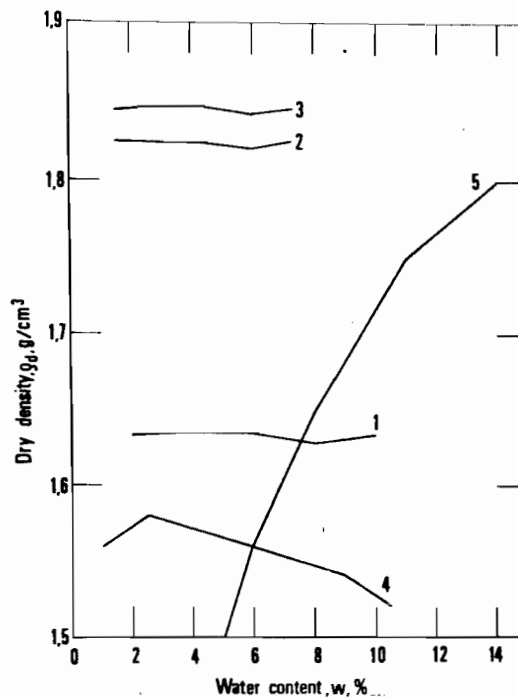
TIIVEYS

Laboratoriokokeiden mukaan kuonan minimikuivapaino oli keskimäärin 1.09 g/cm^3 . Kuona oli ilmakeivää. Irtotilavuuspaino vaihteli välillä $1.17 \text{ g/cm}^3 - 1.15 \text{ g/cm}^3$ vesipitoisuuden ollessa $0 - 8 \%$ määritettynä siten, että kuonaa kaadettiin 1 metrin korkeudelta sylinteriin ja näin saadun näytteen tilavuuspaino mitattiin. Lasi ja metallit erotettiin ennen näitä kokeita. Huomattavasti korkeampia arvoja saavutettiin näytteillä, joista ei ollut erotettu lasia eikä metalleja.

STANDARDI PROCTOR-KOKEET

Proctor-kokeiden tulokset on esitetty kuvassa 2. Kokeet tehtiin näytteillä, joiden maksimiraekoko oli 18 mm , käyrä 1. Todellisuudessa tätä suurempien rakeiden määrä oli 27% . Proctor-kokeiden tulokset on korjattu kahdella eri standardimenetelmällä ottaen huomioon suuret rakeet, käyrät 2 ja 3. Alkukokeet tehtiin näytteillä, joista lasi- ja metallipartikkelit oli erotettu kuonasta, käyrät 4 ja 5. Partikkelien rikkoutumisen vuoksi jokaista yksityistä koetta varten otettiin uusi näyte, käyrät 1 - 4. Kokeet

tehtiin myös käyttäen koko ajan samaa näytettä, käyrä 5. Käyrästä 3 voidaan nähdä, että kuonan tiivistymiskäyttäytyminen ei ole herkkä vesipitoisuuden muutoksille, kun kuhunkin kokeeseen käytetään uutta materiaalia. Kun käytetään samaa materiaalia, tiiveyden lisääntyminen johtuu hienojen partikkelien määrän kasvaessa murskautumisesta johtuen.



Kuva 2. Proctor-kokeiden tulokset

LEIKKAUSLUJUUS

Leikkauslujuus määritettiin tavanomaisilla kolmiaksaalikokeilla kuivilla näytteillä sekä löyhässä että tiiviissä tilassa. Kokeet tehtiin sellipaineilla 50 kPa, 100 kPa ja 130 kPa. Lujuusparametrit ja tangenttimodulit on koottu taulukkoon 1.

CBR-LUKU

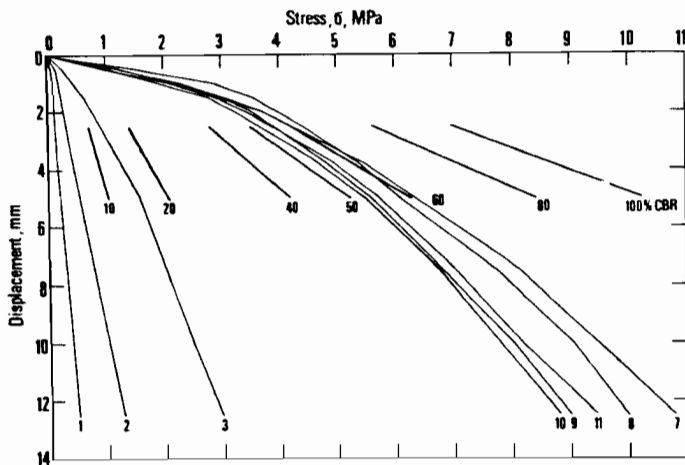
Standandikokeet tehtiin näytteillä, joiden maksimiraekoko oli 18 mm. Tyypilliset jännitys-muodonmuutoskäyrät on esitetty kuvassa 3 ja tulokset on koottu taulukkoon 2. Löyhät näytteet tiivistettiin pienellä tärytyksellä tai sopivasti käsin tiivistäen ja tiiviit näytteet tiivistettiin standardi-Proctor-sullonnalla. Voidaan havaita, että CBR-arvot kasvoivat huomattavasta kuiva-tilavuuspainon kasvaessa löyhillä näytteillä. Proctor-menetelmällä tiivistettäessä CBR-arvo pieneni hiukan vesipitoisuuden lisääntyessä tiiveyden pysyessä vakiona. CBR-arvot männän siirtymällä 5 mm olivat suurempia kuin 2,5 mm:n siirtymällä. Tiiviillä näytteillä CBR-arvot olivat korkeita ja vastaavat tiivisteynsoran arvoja.

Taulukko 1. Kolmiaksaalikokeiden tulokset

State	Confining pressure	Friction angle degree	cohesion intercept kPa	Tangent modulus kPa
loose	50			20
	100	33	13	28
	130			28
dense	50	peak 39	48	55
	100	residual 43	0	64
	130			100

Taulukko 2. CBR-kokeiden tulokset

Test	Dry density g/cm ³	Compaction	Water content %	CBR %
1	1,25	none	5,2	1,7 (2,5 mm) 3,0 (5,0 mm)
2	1,32	slight vibration	5,0	4,5 7,6
3	1,45	moderately by hand	4,5	13,1 15,1
4	1,24	none	9,9	1,8 1,7
5	1,32	slight vibration	9,9	5,0 7,8
6	1,39	moderately by hand	10,3	7,9 12,1
7	1,63	Standard Proctor	2,0	60,8 77,5
8	1,64	"	4,0	63,2 73,9
9	1,63	"	6,0	56,1 65,1
10	1,63	"	8,0	52,2 64,4
11	1,63	"	10,0	56,4 67,0



Kuva 3. CBR-kokeiden tulokset

Pindzolan ja Collingin (1975) sekä Hirtin (1975) julkaisemat polttojätteen CBR-arvot ovat samaa luokkaa kuin tässä tutkimuksessa saadut arvot (kuva 3 ja taulukko 2).

SAASTEVAIKUTUKSET

Laboratoriossa suoritettut liuotuskokeet (Schwab 1978) osoittavat, että kuonan saastuttamispotentiaali on hyväksyttävä niin kauan kuin kuona pysyy pohjavedenpinnan yläpuolella.

KENTTÄKOKEET

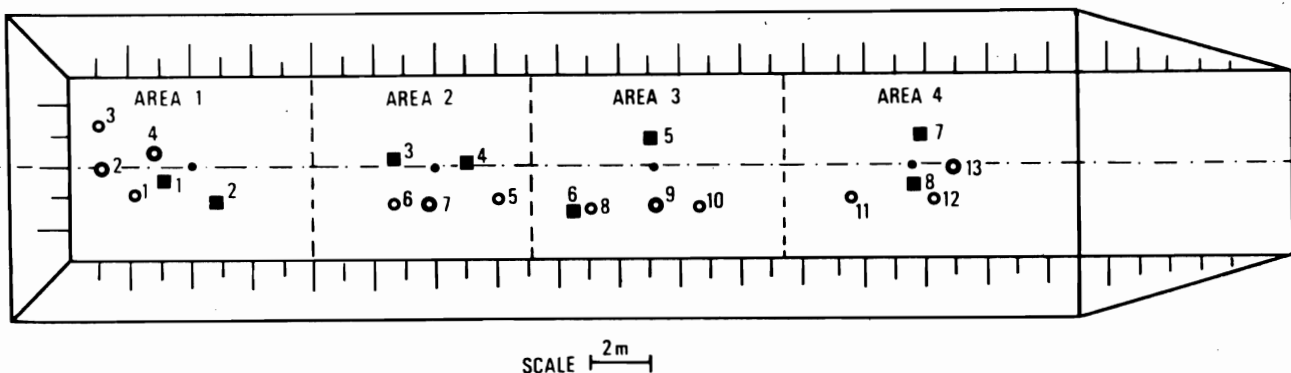
YLEISTÄ

Polttojätteestä rakennettiin koepenger, jotta voitaisiin saada käsitys kuonan todellisesta käyttäytymisestä. Kuona tuotiin kuorma-autoilla suoraan polttolaitoksesta. Suunnitelman mukaan penger rakennettaisiin käsittelemättömästä materiaalista 3 - 4 päivän aikana. Paikalle tuotaessa vesipitoisuus vaihteli välillä 4 - 10 %. Rankkasateet ja ukkosmyrskyt muuttivat rakennusaikana olosuhteita huomattavasti ja viivästyttivät työtä 10 päivää.

TIIVISTÄMINEN

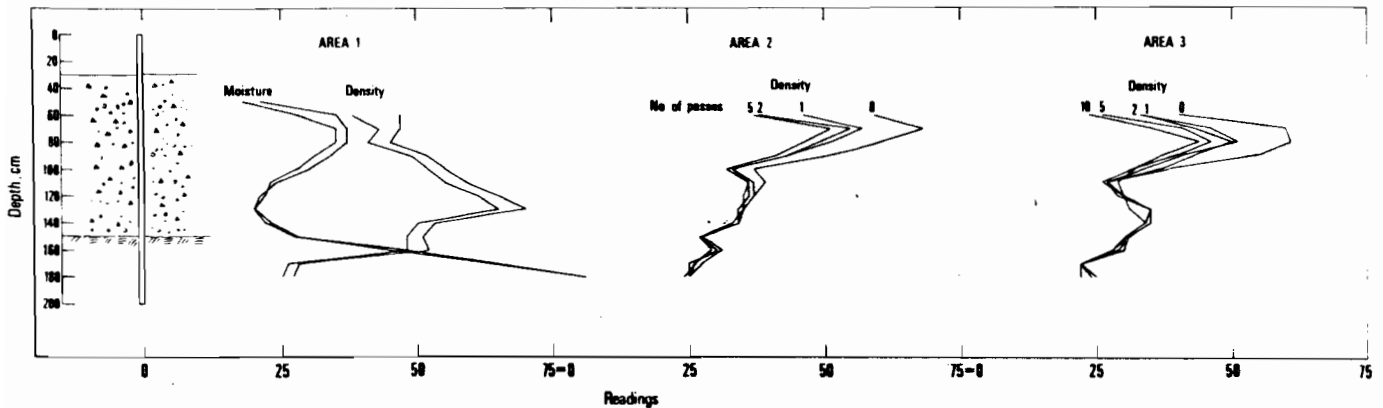
Kukin kerros tiivistettiin erikseen. Tiivistäminen suoritettiin katerpillarilla, jonka kokonaispaino oli 15 tonnia. Tiivistämisen ajaksi painoa lisättiin 4 tonnilla. Mutta kuitenkin aikaansaadut jännitykset olivat pienet, noin 70 kPa.

Penger jaettiin 4 alueeseen, kuva 4. Aluetta 1 ei tiivistetty. Pientä tiivistymistä kuonanajovaiheessa ei voitu kuitenkaan välttää. Alueet 2, 3 ja 4 tiivistettiin siten, että kutakin kerrosta tiivistettiin 5, 10 ja 15 kertaa. Kunkin alueen keskelle oli sijoitettu teräsputket ennen penkereen rakentamista, jotta voitaisiin mitata tiiveyden muutoksia tiivistämistyön aikana ydin-kosteus-tiiveysmittarilla. Tällä menetelmällä mitattiin keskimääräi-



Kuva 4. Koepenger suunnitelma, o levykuormituskokeet $\varnothing$ 30 cm,
 ● levykuormituskokeet $\varnothing$ 60 cm, ■ hiekkatiiveyskokeet,
 • tiiveysmittausputket

nen tiiveys halkaisijaltaan noin 40 cm:n alueelta. Mittauksia suoritettiin aina, kun 10 cm:n kerroslisäys oli syntynyt sekä ensimmäisen, toisen, viidennen ja kymmenennen tiivistyskerran jälkeen. Näiden mittausten tulokset lopullisessa pengerkorkeudessa (1,2 m) alueissa 1, 2 ja 3 on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Ydinmittarilla tehtyjen kosteus- ja tiiveysmittausten tulokset.

Alueen 4 putki vääntyi katerpillarin toimesta niin paljon, että anturia ei voinut viedä putkeen.

Alueen 1 putkessa tehtiin kaksi mittausta. Ensimmäinen mittaus tehtiin välittömästi sen jälkeen kun kuonakerros oli ajettu täytömaan päälle. Mittaus toistettiin seuraavana päivänä rankkasteiden jälkeen. Vesipitoisuus on suurin pohjamaassa. Se vähentyi nopeasti pohjamaan pinnassa ja jonkin verran myös ensimmäisessä kuonakerroksessa. Vesipitoisuus lisääntyi kerroksessa 2.

Mittaukset putkissa 2 ja 3 osoittavat selvästi, kuinka tiiveys lisääntyi tiivistyskertamäärän lisääntyessä.

HIEKKATIIVEYSKOKEET

Hiekkatiiveyskokeita tehtiin penkereen pinnasta noin 20 cm:n syvyyteen saakka. Koepaikat näkyvät kuvassa 4. Koetulokset on koottu taulukoon 3.

Taulukosta 3 voidaan nähdä, että suhteellinen tiiveys vaihteli välillä 78 - 92 % verrattaessa parannetun Proctor-kokeen maksimitiiveyteen. Tienrakennuksessa vaaditaan 95 % suhteellinen tiiveys kitkamaille (Itä-valta).

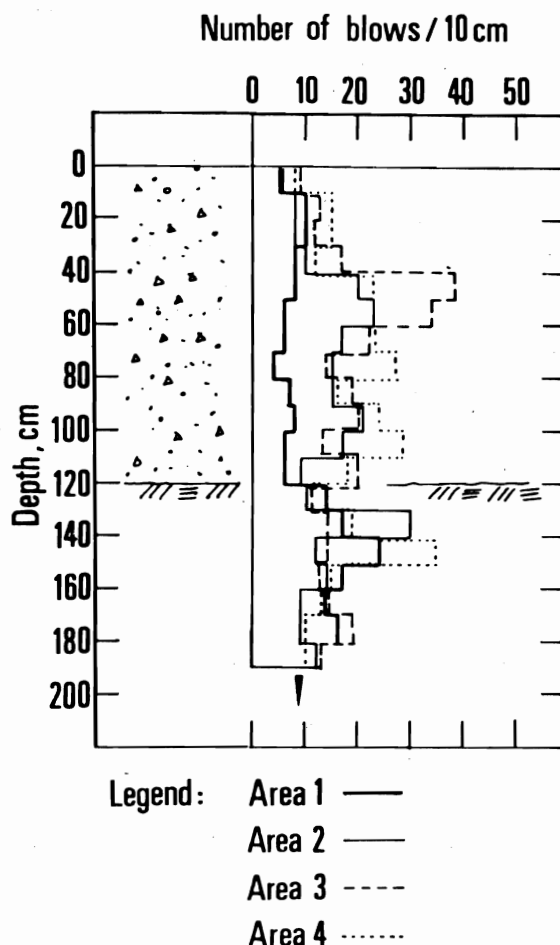
Taulukko 3. Hiekkatiiveyskokeiden tulokset.

Area test	Dry density	Mean	Density	Mean	Water content	D _{Pr} (%)
1 - 1	1.38	1,42	1.58	1,61	14.9	78
1 - 2	1.47		1.64		11.3	
2 - 3	1.60	1,55	1.69	1,65	6.0	85
2 - 4	1.50		1.61		7.2	
3 - 5	1.57	1.60	1.71	1.75	10.3	87
3 - 6	1.62		1.78		10.2	
4 - 7	1.66	1.68	1.83	1.84	9.8	92
4 - 8	1.70		1.85		8.8	

DYNAAMINEN KAIRAUS

Kokeet tehtiin saksalaisella kevytkairalla. Kärjen poikkileikkaus oli 5 cm². Kullakin alueella suoritettiin kolme kairausta. Tulokset on esitetty kuvassa 6.

Tulosten hajonta oli odotetusti suhteellisen suuri, johtuen kuonan epähomogeenisuudesta. Keskimäärin kairausvastus lisääntyi alueelta 1 alueelle 4. Kairausvastus ylimmässä 40 cm:n kerroksessa oli suunnilleen sama kaikissa kokeissa, mikä onkin yleistä lähellä pintaa vallitsevan vähäisen ylikuorman takia. Alueella 3 kairausvastus syvyysvälillä 40 - 60 cm on suuri todennäköisesti kovan kerroksen vuoksi.

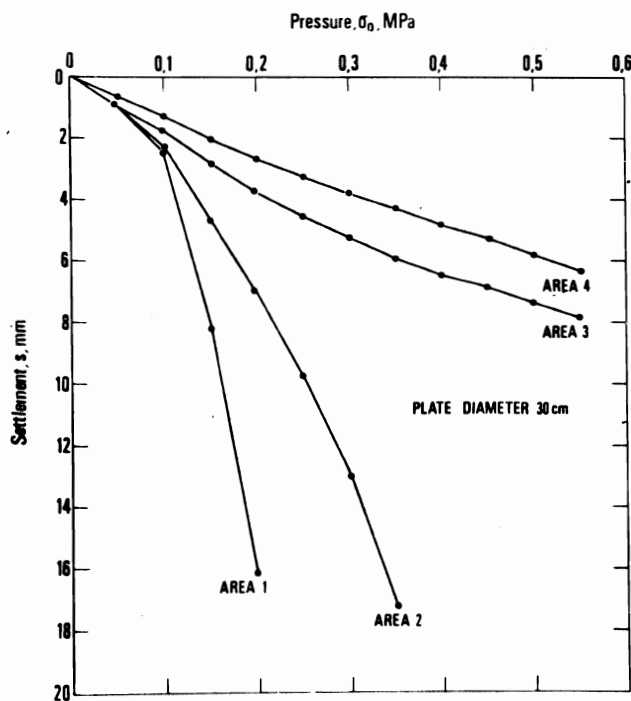


Kuva 6. Dynaamisen kairauksen tulokset. Kolmen tuloksen keskiarvot.

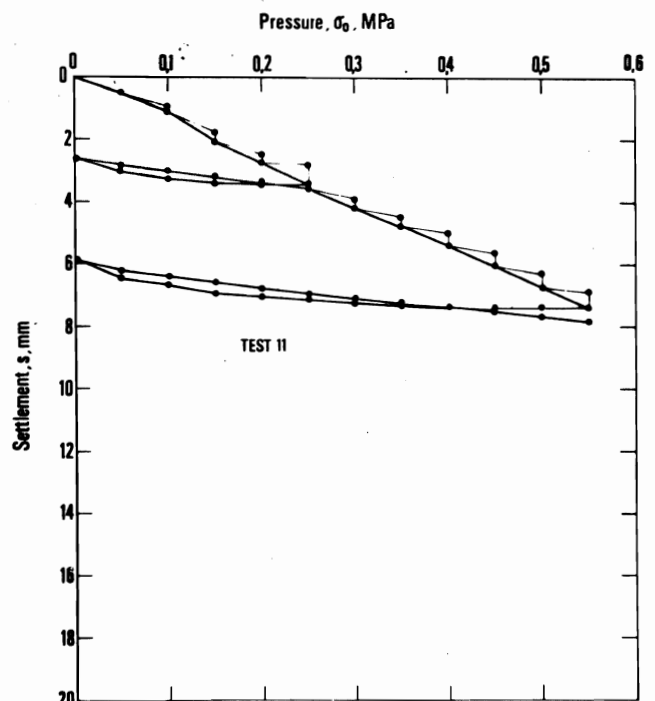
LEVYKUORMITUSKOKEET

Levykuormituskokeet tehtiin kuonan (polttojätteen) kantavuuden ja muodonmuutoskäyttäytymisen tutkimiseksi. Koelevyn halkaisija oli 30 cm ja 60 cm. Koepaikat näkyvät kuvasta 1. Levykuormituskokeiden tulokset on esitetty kuvassa 7. Kuvassa 7a on tulokset, jotka on saatu käyttäen halkaisijaltaan 30 cm levyä. Käyrät edustavat kahden kokeen keskiarvoja. Paine-painuma-käyrät alueilla 1 ja 2 osoittavat, että murtokuormitus saavutettiin. Murtuma esiintyi paikallisena leikkausmurtumana eikä yleisenä kuormituskapasiteetin ylityksenä. Murtokuorma oli molemmilla alueilla suunnilleen sama. Se vastaa likipitään 0.1 Mpa:n jännitystä, mikä on järkeenkäypä arvo. Käyttäen klassista kitkamaan kantavuuskaavaa voidaan kitkakulmaksi laskea 43° . Tätä arvoa voidaan hyvin verrata erittäin alhaisen ympäröivän paineen alaisena olevan kitkamaan kitkakulmaan. Alueilla 3 ja 4 saatiin melkein lineaarinen suhde paineen ja painuman välillä, mikä merkitsee, että jännitykset ovat materiaalin kimmoisella alueella.

Kuvassa 7 b on esitetty tyypillinen levykuormituskokeen tulos.



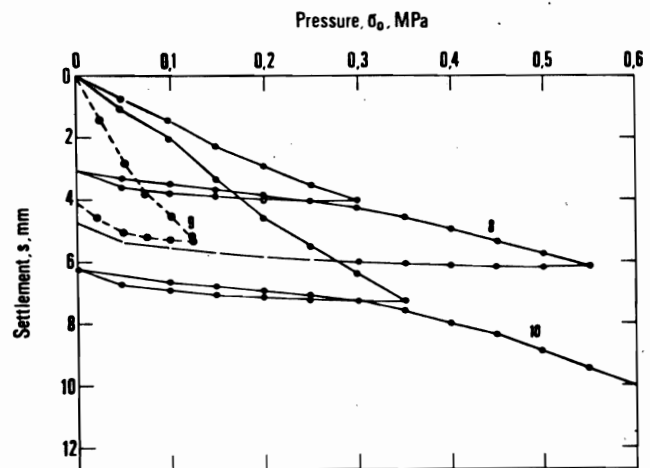
Kuva 7 a. Yhteenveto levykuormituskokeiden tuloksista.



Kuva 7 b. Levykuormituskokeiden antamia tyypillisiä tuloksia.

Painetta lisättiin 50 kPa:n portain, ja sama paine vallitsi aina siihen saakka, kunnes painuminen oli vähäisempää kuin 0.02 mm/min. Tässä kokeessa tehtiin kaksi kuormituskierrosta. Itävaltalaisen standardin mukaan muodonmuutosmoduli voidaan valua tuloksista kaavalla $E_v = 0.75 d \Delta b / \Delta s$, missä d on levyn halkaisija, Δb on jännityslisäys ja Δs on vastaava painuma. Kokeen 11 muodonmuutosmodulit ovat $E_{v1} = 16.7$ MPa, $E_{v2} = 59.2$ MPa ja $E_{v3} = 70.3$ MPa, missä E_{v1} on käyrän alkuosan moduli ja E_{v2} ja E_{v3} ovat ensimmäisen ja toisen uusintakuormituksen modulit. Modulia E_{v2} käytetään yleensä suunnittelukriteerinä tienrakennuksessa. Kokeessa 11 saatu arvo $E_{v2} = 59.2$ MPa vastaa hyvän tiepenger materiaalin arvoa. Suhde E_{v2}/E_{v1} on tiiveyden mitta. Kokeen 11 suhdeluku on 3.5, mikä merkitsee, että kuona oli huonosti tiivistetty. Tierakenteessa tämä suhdeluku ei saisi ylittää lukua 2.2.

Kuvassa 7 c on esitetty kokeiden 8, 9 ja 10 tulokset. Ne osoittavat suurta hajontaa, kuten on oletettavaa polttojätteen kaltaisella materiaalilla. Levyn halkaisija kokeessa 9 oli 60 cm. Kaikille kokeille tyypillistä on erot pienellä ja suurella levyllä saavutettujen tulosten välillä. Painumien suhde 2 samalla kuonalla on tyypillinen seuraus mittaerosta ja on odotettavissa kimmoisen puoliavaruuden teorian mukaisesti noudattavan ympärilevykaavaa $s_2 = s_1 d_2 / d_1$.



Kuva 7c. Alueella 3 tehtyjen levykuormituskokeiden tulokset.

YHTEENVETO

Tutkittu polttojäte luokiteltiin heikosti suhteistuneisiin hiekkasoriin. Hiekkasten sorien ominaisuudet ovat yleisesti erittäin hyvät. Kuonan leikkauslujuus oli suuri ja kuivatusominaisuudet hyvät. CBR-kokeet suoritettiin koekappaleille, jotka oli tiivistetty standardi-Proctor-sullonnalla. CBR-arvot olivat hyvät ja niitä voidaan hyvin verrata tiiviin soran CBR-arvoihin. Arvot pienenivät hiukan vesipitoisuuden lisääntyessä. Toisaalta Proctor-kokeissa saatujen tiiveystulosten mukaan vesipitoisuuden vaihtelu ei vaikuttanut tiiveyteen.

Koepenger jaettiin neljään alueeseen, jotka tiivistettiin katterpillarilla eri tiiveyksiin. Hiekkatiiveyskokeet suoritettiin koepenkereen pinnassa. Kenttätiiveys vaihteli välillä 78 - 92 % standardi-Proctor-tiiveydestä. Löyhästi tiivistetyn kuonan kantavuus määritettiin levykuormituskokeilla. Kantavuus oli luokkaa 0.1 MPa, mikä on järkeenkäypä arvo. Enemmän tiivistetyillä alueilla paine-painumasuhteet osoittautuivat levykuormituskokeissa lineaarisiksi. Näiden kokeiden perusteella saadut moduliarvot olivat tiepengermaalialle asetettujen vaatimusten mukaiset. Kuitenkin suhde E_{v2}/E_{v1} osoitti, että kuona oli huonosti tiivistetty.

Laboratorio ja kenttäkokeet osoittavat, että polttojätteitä voidaan käyttää ilman esikäsittelyä maanrakennustekniikassa, kuten tierakennusmaalina sekä tukimuurien taustatäytteenä. Suurten paineiden alaisena rakeiden hajoamisesta johtuen voi kuitenkin syntyä painumia. Pitkän ajan vaikutuksia sekä kuonan käyttäytymistä dynaamisen ja vaihtelevan kuormituksen alaisena ei ole vielä tutkittu. Sen vuoksi suositellaan, että kuonaa käytetään kuten keskilaatuinen hiekkasora. Edelleen mainittakoon, että kuonan saastuttamispotentiaali on vähäinen.

REFERENCES.

- BALSTRUP, I., 1975, I/s Vestforbraending Slaggfyld, Danish Geotechnical Institute, Technical Report, No.2, 33 p.
- CASAGRANDE, A. 1931, Discussion: A new theory of frost heaving, Proc. Highway Research Board, No.11, p. 168 - 172.
- FISCHER, F. 1977, Studie über das Homogenitverfahren, Forschungsbericht des BM f. Gesundheit und Umweltschutz, No. 1/77, p. 3 - 38.
- HIRT, R., 1973, Die Verwendung von Recycling-Materialien im Straßenbau, Straße und Verkehr, No.9, p. 512 - 517.
- PINDZOLA, D. and R.J.COLLINS, 1975, Technology for use of incinerator residue as highway material, Report No. FHWA-RD-7581, 78p.
- SCHADEN, K., Studie über den gegenwärtigen Stand der Forschung und der Praxis in der Verwertung von Aschen und Schlacken aus kalorischen Kraftwerken und Müllverbrennungsanlagen für Baumaterial, Forschungsbericht des BM f. Gesundheit und Umweltschutz, No. 1/77, p. 39 -120.
- SCHWAB, E.F., 1978, Laborversuche mit Müllschlacke vom Fernwärmewerk Spittelau, Bundesversuchs- und Forschungsanstalt Arsenal, Report, to be published.
- SCHWAB, E.F., and O.PREGL, 1978, Geotechnical properties of incinerator waste, Proc. Int. Conf. on Materials of Construction for Developing Countries, Bangkok, Thailand, accepted for publication.

LIITE II/7

TOUSSAINT, A.

Bundesanstalt für Strassenwesen, Saksan Liittotasavalta.

POLTTOJÄTTEEN KÄYTTÖ MAAN- JA TIENRAKENNUKSESSA

1. JOHDANTO

Verrattuna muihin jäte- ja sivutuotteisiin, joita Saksan Liittotasavallassa on käytetty useita vuosia, polttojäte on suhteellisen uusi rakennusmateriaali (1). Nykyään suunnilleen 25 % yhdyskuntajätteistä poltetaan noin 40 polttolaitoksessa. Tästä syntyy likimäärin 1,6 milj. tonnia vuodessa polttojätettä, josta noin 50 prosenttia käytetään tienrakennusprojekteihin.

2. YLEISTÄ POLTTOJÄTTEESTÄ JA SEN KÄSITTELYSTÄ

Kun jätteet on poltettu erikoislaitoksissa, alkuperäinen materiaali on pienentynyt tilavuudeltaan 10 - 30 prosenttiin alkuperäisestä polttolämpötilan vaihdellessa välillä 800 - 1000° C. Tuhka ja palamattomat aiheet jäädytetään heti vedessä. Tuhka voi sisältää vähän palamatta jäänyttä materiaalia. Tämä johtuu osaksi siitä, että polttamisessa ei ole käytetty riittävästi happea. Palamiskaasuista erotettu lentotuhka sekoitetaan yleensä kuonaan.

Se osa kuonasta, jota ei ole viety suoraan käyttökohteeseen, varastoidaan kuonakasoihin ja märkä materiaali jätetään kuivamaan. Reaktioherkät yhdistett, kuten CaO, voivat saada aikaan reaktiota kasoissa.

Polttolaitoksissa ylisuuret rautaromukappaleet, kuten metallikannisterit, vaijerit jne., erotetaan magneettierottimilla.

Karkea runkoaine eli yli 56 mm rakeet seulotaan pois. Valmiit raekokoseokset, kuten 0/45, 0/32 tai 0/22 mm, valmistetaan seulontalaitoksissa.

3. KOOSTUMUS JA OMINAISUUDET

3.1 Koostumus

Seuraavat tiedot on kerätty 19 polttouunissa poltetuista jätteistä:

Lasi ja keramiikka	30 - 70	painoprosenttia
Sintrautunut aines, hienotuhka	20 - 60	- " -
Metallit (=raudattomat)	1 - 3	- " -
Palava aines, kuten puu,		
paperi ja muovit	1 - 4	- " -

Vaihtelu materiaalikoostumuksessa aiheuttaa, että myös kemiallinen koostumus vaihtelee suuresti.

Yhdisteiden analyysitiedot nähdään taulukossa 1.

Taulukko 1. Polttojätteiden kemiallinen koostumus prosentteina

Pääkomponenttien lisäksi

polttojätteet sisältävät myös

pieniä määriä raskaita, osin myrkyllisiä metalleja. On analyttisesti todettu, että polttouuneista tuleva lentotuhka sisältää huomattavia määriä myrkyllisiä raskaita metalleja.

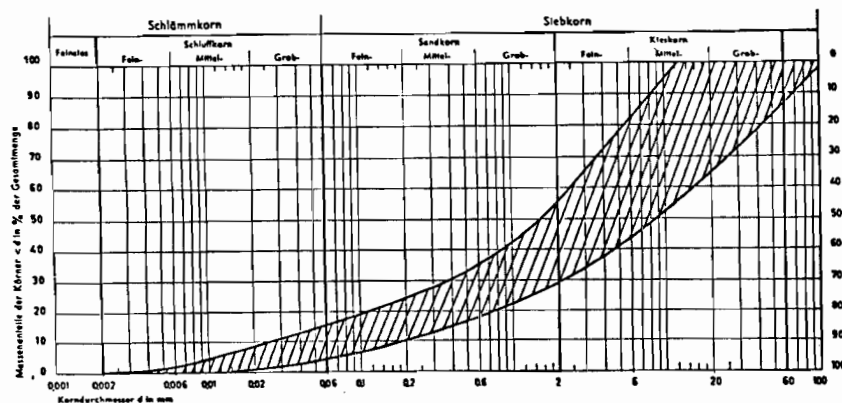
	According to Rasch (2)	OECD Report (3)
SiO ₂	32 - 56	42 - 58
Al ₂ O ₃	27 - 32	6 - 18
Fe ₂ O ₃	9 - 26	8 - 18
CaO	1 - 8	9 - 12
MgO	1 - 3	1 - 2
Na ₂ O	1 - 6	3 - 8
K ₂ O	-	1.1 - 1.6
Cl	-	0.14 - 0.38
SO ₃	1 - 9	0.7 - 6.4

Ajoittain sulfaatin määrä

saattaa olla korkeampi kuin

5000 mg/jätek. Sellaiset materiaalit on ryhmiteltävä maiksi, jotka ovat hyvin aggressiivisia betonia kohtaan (5). Yleensä korkean kalkkipitoisuuden vuoksi polttojätteiden PH-arvo vaihtelee alueella 8 - 11. Jätteet ovat sen vuoksi alkaalisia ja voivat neutraloida materiaalin sisältämät jäännöshapot. Siitä huolimatta täytyy korkean sulfaattimäärän vaikutukset erikseen arvioida, kun materiaalia käytetään betonirakenteissa. Suurin osa sulfaateista on vesiliukoista. Kuitenkaan useita vuosia läjitettynä olleella materiaalilla ei liukoinen sulfaatti ollut huuhtoutunut pois.

Karkeiden rakeiden poistamisen jälkeen polttojätteen rakeisuus on yleensä hyvä. Alle 0,02 mm rakeiden määrä on 0 - 8 %, alle 0,06 mm rakeiden 2 - 15 % ja yli 2 mm rakeiden 45 - 70 %. Kuvas-
sa 1 nähdään 19 polttouunin jätteiden rakeisuusalue. Karkeiden rakeiden poistamisen jälkeen lisäseulonta ei ole yleensä tarpeen.



Kuva 1. Polttojätteiden rakeisuusalue.

3.2 Ominaispaino ja tiivistämisolosuhteet

Jätteen heterogeenisuus ja koostumuksen vaihtelu aiheuttavat vaihtelua ominaispainossa, joka on $2,34 - 2,86 \text{ g/cm}^3$ ja karkeiden rakeiden poistamisen jälkeen $2,28 - 2,62 \text{ g/cm}^3$. Aineksen irtotilavuuspaino riippuu rakeiden muodosta ja on $0,76 - 1,20 \text{ kg/dm}^3$, mikä on suhteellisen alhainen verrattuna luonnonmaiden vastaaviin arvoihin.

Proctor-sullonnalla saavutetaan suhteellisen alhaisia kuivatilavuuspainoja huolimatta hyvästä raekoostumuksesta. Arvot vaihtelevat välillä $1,25 - 1,83 \text{ tonnia/m}^3$.

Taulukko 2. Polttojätteiden ominaisuudet.

Grain size range	mm	0 - 120
Specific density ρ_0	g/cm^3	2.34 - 2.86
Apparent specific gravity ρ_R	g/cm^3	2.28 - 2.62
Uncompacted bulk density ρ_s	g/cm^3	0.76 - 1.20
Proctor density ρ_{pr}	g/cm^3	1.25 - 1.83
Proctor moisture w_{pr}	M-%	10 - 22

3.3 Mekaaninen lujuus

Hauraan, lasimaisen, joskus raemuodoltaan oudon polttojätteen mekaaninen lujuus on melko pieni verrattuna tierakenteissa käytettävään luonnon runkoainekseen tai masuunikuonaan. Käytännössä on todettu jäterakeiden hajoavan hienommaksi. Polttojätterakroksen pinnalla hienoainespitoisuus lisääntyy osittain tiivistämisen vuoksi.

3.4 Roudan kesto

Riippuen silttipitoisuudesta polttojäte voidaan laskea kuuluvaksi routimattomaan, tai vähän tai keskirakenteisesti routivaan materiaalityhmään (8). Vertailevia routakokeita tehtiin. Niissä todettiin, että routanousua ei tapahtunut. Voidaan olettaa, että huokoinen tuhka estää täydellisen vedellä kyllästymisen ja jättää riittävästi tilaa jäälinssien muodostumiselle.

4. AIKAISEMMAT KOKEMUKSET

4.1 Pengertäytöt

Pelkästä polttojätteestä ei ole vielä rakennettu penkereitä Saksan Liittotasavallassa. Yleensä jätteen määrä on liian pieni suuriin maarakennuskohteisiin ellei sitä ole varastoitu etukäteen. Kuitenkin koetäyttöjen ja laboratoriotutkimustulosten perusteella voidaan polttojätettä pitää sopivana täyttömateriaalina.

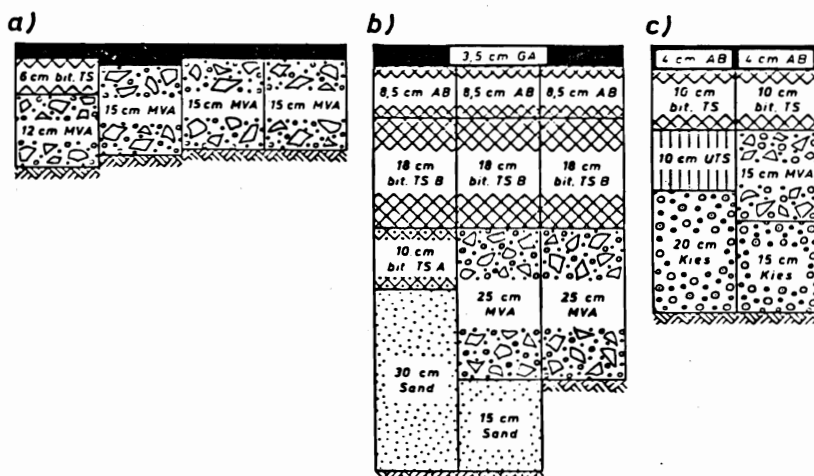
4.2 Sitomattomat rakennekerrokset

Polttolaitosjätteiden soveltuvuutta sitomattomiin rakennekerrokseen on tutkittu tekemällä sarja koepoikkileikkauksia. Osa niistä on suhteellisen uusia. Vanhin virallinen koeleikkaus on eräs yhdyskuntatie, jossa liikenne on vähäistä. Tie rakennettiin lähelle Hagenia, Kreis Wesenmündendeen vuonna 1973. Tässä kokeessa polttojätteestä ei käytetty ainoastaan raekokoa 0/30 sitomattomassa kerroksessa, vaan ensimmäistä kertaa myös raekokoa 0/5 mm

bitumipitoisessa kulutuskerroksessa. Näiden neljän koekentän (pituus 1,2 km) rakenne nähdään kuvassa 2 a.

Monenlaisia kokeita, mukaanlukien dynaamisia tutkimuksia, tehtiin eräässä koeleikkauksessa, jonka rakensi Hamburgin liittovaltio vuonna 1975. Tämän raskaaasti liikennöidyn kadunrakenne on esitetty kuvassa 2 b. Normaalin 10 cm:n bitumikerroksen asemasta käytettiin 25 cm:n polttojätekerrosta.

Seuraava koeleikkaus rakennettiin vuonna 1977. Se on kevyesti liikennöity huoltotie Leverkusenin asutusalueella. Standardimurskekerroksen (10 cm) asemasta käytettiin 15 cm:n polttojätekerrosta. Rakenne näkyy kuvassa 2 c.



Kuva 2. Polttojätteistä tehtyjen koetieleikkausten rakenne (MVA), a) Hagen, b) Hamburg, c) Leverkusen.

Tietyillä alueilla polttojätettä käytetään runsaammin rakennekerrokseen. Kevyesti liikennöityjen teiden, kenttien ja muiden vähäkäyttöisten teiden kestopäällysteen alle on pantu 10 - 15 cm:n kerros jätettä. Päällysteen ja polttojätteen väliin on ajettu yleensä 2- 5 cm luonnonhiekkaa.

Alustava kokemus jätekerroksista osoittaa, että nämä kestävät kevyen liikenteen aiheuttamia jännityksiä ja muodonmuutoksia sekä säätä melko hyvin. Levykuormituskokeet osoittivat, että kerrosten rakennusvaiheessa mitatut muodonmuutosmodulit olivat säily-

neet muuttumattomina. Sen vuoksi voitiin tehdä johtopäätös, että polttojätteen konsolidoituminen ei kiihdy painumisen edistyessä. Todettiin myös, että huomattavaa hienoaineksen lisääntymistä ei tapahtunut rakennekerroksessa - tämä tulos on saatu kuitenkin lyhytaikaisella kokeella. Alustavien maanpainemittausten perusteella paineet siirtyvät pohjakerrokseen Hampurin poikkileikkauksessa yhtä hyvin kuin konventionaalisessa rakenteessa. Kun polttojätekerrosta peittävä päällyste ≤ 8 cm, pinnassa on havaittu kämmenen kokoisia kohoumia. Niiden arvellaan johtuvan reaktioista, joihin ottavat osaa jätteen sisältämät metallit.

4.4 Sementillä sidotut kerrokset

Sementillä stabiloidun polttojätteen käyttäytymisestä on tehty kokeita ainoastaan BAST:n laboratorioissa.

Tämän vuoksi täysin palanutta polttojätettä, jonka rakeisuus oli 0/46 mm stabiloitiin voimakkaasti sulfaatteja kestäväällä sementillä (Hoz 350). Saavutettiin seuraavia puristuslujuuden arvoja:

6 prosenttia sementtiä:	5.4 N/mm ²	7 päivän kuluttua
	7.3 N/mm ²	28 " "
9 prosenttia sementtiä:	7.0 N/mm ²	7 päivän kuluttua
	8.0 N/mm ²	21 " "

Näillä puristuslujuuden arvot ovat niin suuria, että "Technischen Vorschriften und Richtlinien für die Ausfeuerung von Bodenverfestigungen und Bodenverbesserungen im Strassenbau (TVV 74)":n mukaan roudankestävä maa-sementtiseos saavutetaan.

Lujuusarvojen mukaan hydraulisesti stabiloituja polttojätekerroksia voidaan pitää laskelmissa ekvivalentteina vastaavalla tavalla käsiteltyjen luonnonmaakerrosten kanssa.

On kuitenkin harkittava tällaisen rakennusmenetelmän kannattavuutta. Ennen käytännön kokeiluja on lisäksi tutkittava polttojätteen - myös sementillä stabiloidun - pitkänajan käyttäytymistä.

4.5 Sitomattomat päällyskerrokset

Polttojätteen käyttö on laajimmin levinnyt vähäliikenteisten teiden, pihojen, pysäköintialueiden ja tehdasalueiden päällysteisiin. Varsinkin pehmeillä suoalueilla yksikerroksisia 8 - 20 cm paksuisia rakenteita on käytetty maatalous- ja metsänteissä ja on saatu ne ajokuntoisiksi myös epäsuotuisalla säällä.

Useimmissa tapauksissa käytettiin rakeisuuksia 0/15 ja 0/22 mm. Ulkonäkösyistä polttojäte on paikka paikoin peitetty ohuella murske- tai luonnonhiekkakerroksella. Ohuet kerrokset tiivistyvät riittävästi rakennuskoneiden painosta. Epäsäännöllisen muotoiset, karkeapintaiset rakeet kiinnittyvät tiivistettäessä hyvin toisiinsa ja tuloksena on hyvin sidottu kerros, mikäli liikenne pysyy kevyenä, suuria muodonmuutoksia eikä uria esiinny ja aines pysyy hyvin vettäläpäisevänä.

5. KÄYTTÖKOhteita

Yhteenvedon voidaan sanoa, että käytännön kokemus ja saatavissa olevat laboratoriokoe tiedot ovat riittäviä, jotta polttojätteen käyttöä voidaan suositella useissa sovellutuksissa. Saksan Liittotasavallassa ja muissa maissa polttojäte on osoitettu sopivaksi pengertäyttemateriaalina, perusrakenteissa ja päällysteissä. Heterogeenisen materiaalin laaduntarkkailu on kuitenkin oltava jatkuva. Maahan levitetyn polttojätteen tilavuuspainon määrittäminen on vaikeaa. Muodonmuutosmoduleja E_{v2} ja E_{v1} voidaan pitää arvosteluperusteena. E_{v2} on määritettävä koetiivistyksen keinoin. Polttojätteet painavat yleensä 10 - 35 prosenttia vähemmän kuin luonnonmaat, joilla on vastaava rakeisuus. Sen vuoksi jätettä voidaan suositella käytettäväksi runsaasti painuvilla alueilla, jossa vaaditaan niin kevyitä pengerrakenteita kuin mahdollista.

5.1 Käyttö pengertäyttemateriaalina

Täysin palaneita polttojätteitä voidaan käyttää tiepenkereisiin, meluvalleihin ja täyttömaaksi.

Polttojätteet, jotka ovat hyvin tai täysin palaneita, ovat vettä-läpäiseviä, kuivuvat nopeasti ja niitä voidaan helposti käsitellä kaikissa sääoloissa. Huokoisuutensa ja rakeiden karkean pinnan vuoksi polttojäte tiivistyy erittäin hyvin penkereissä. Suositeltavat minimitiiveysasteet (D_{pr}) ovat:

100 prosenttia penkereen yläosassa

97 prosenttia penkereen alaosassa.

Erikoisten rakenneominaisuuksien vuoksi tämän materiaalin huokoisuus voi 100 % suhteellisessa tiiveydessä olla 25 - 50 %. Riippuen kuormitusolosuhteista, konsolidaatio voi olla yli 1 prosentti penkereen korkeudesta. Luontaista on myös suhteellisen suuri kerroksen pinnan sivusiirtymä pyöräkuormien vaikuttaessa.

Tärytiivistimiä voidaan käyttää tiivistyksessä. Koetiivistyksen avulla nähdään optimitiivistystapa kussakin tapauksessa.

5.2 Käyttö sitomattomissa rakennekerroksissa

Täysin palaneita polttojätteitä voidaan hyvin käyttää pohjakerrokseen ilman sideainetta edellyttäen, että ko. tiellä vallitsee vähäinen liikenne ja jätteet on peitetty riittävällä määrällä si-dottuja kerroksia, joiden yhteisen paksuuden on oltava suurempi kuin 10 cm.

5.3 Käyttö vähäliikenteisten teiden ja alueiden päällysteissä

Polttojätteitä tullaan laajimmin käyttämään myös tulevaisuudessa kevyesti liikennöityjen pikkuteiden ja alueiden päällysteiksi. Tämä koskee maatalous- ja metsäteitä, aika ajoin käytettyjä syr-jäteitä, vähän käytössä olevia pysäköintipaikkoja sekä tehdas-pihoja. Kerrospaksuus voi vaihdella välillä 10 - 25 cm käytettä-essä yhtä kerrosta. Mikäli jätettä on levitettävä kaksi kerros-ta, alemman kerroksen pitäisi olla karkeampaa jäteainesta kuin ylempi.

6. TULEVIA TUTKIMUSKOhteITA

Kansallisen ja kansainvälisen polttojätteiden käyttöä koskevas-
ta runsaasta kokemuksen määrästä huolimatta lisätutkimusta tar-
vitaan, jotta jätteen kemiallisen koostumuksen heterogeenisyy-
destä johtuvat ongelmat voitaisiin ratkaista. Tutkimuksissa on
kiinnitettävä huomiota seuraaviin kysymyksiin:

1. Tutkimus ohuiden bitumilla sidottujen, sitomattoman polttojät-
teen päällä olevien pintakerrosten pullistelun selvittämiseksi
ja kokeita näiden muodostumien ehkäisemiseksi.
2. Tutkimus polttojätteiden, varsinkin poltettaessa syntyvän len-
totuhkan, myrkyllisten ja agressiivisten yhdisteiden ympäris-
tövaikutuksista.
3. Kokeet polttojätteiden soveltuvuudesta raskaasti liikennöityjen
teiden materiaaliksi.
4. Taloudellisen polttojätteiden stabilointimenetelmän kehittämi-
nen raskaasti liikennöityjen teiden rakentamiseksi.

References

- (1) Floß, R. und Toussaint, A. Abfallstoffe und in-
dustrielle Nebenprodukte im Erd- und Strassenbau.
Strasse und Autobahn 27 (1976).
- (2) Rasch, R. Muellschlackenverwertung. Chemische
Rundschau Nr. 22 (1977).
- (3) Organisation for Economic Co-operation and Devel-
opment (OECD). Use of waste materials and by-pro-
ducts in road construction. Report C12 (1977).
- (4) DIN 51719. Bestimmung des Aschegehaltes.
- (5) DIN 4030. Beurteilung betonangreifender Waesser,
Boeden und Gase.
- (6) DIN 18196. Erdbau, Bodenklassifikation fuer bau-
technische Zwecke und Methoden zum Erkennen von
Bodengruppen.
- (7) Merkblatt fuer die Pruefung von Mineralstoffen
im Strassenbau. Blatt 5.5, Schlagpruefung an
Splitt 8/12.
- (8) Zusaetzliche Technische Vorschriften und Richt-
linien fuer Erdarbeiten im Strassenbau ZTVE-StB
76.

